

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Белгородский государственный национальный исследовательский  
университет»

# **ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ**

**РОССИЙСКИЕ И СОВЕТСКИЕ УЧЕНЫЕ,  
ИЗМЕНИВШИЕ МИРОВУЮ НАУКУ**

Сборник материалов



Белгород 2020

УДК 001.38  
ББК 72.6 (0)  
Л 28

Л 28        Лауреаты нобелевской премии. Российские и советские учёные, изменившие мировую науку : сборник материалов / сост.: В.А. Монастырева, Н.А. Воронкова ; под общ. ред. О.Н. Полухина. – Белгород : ИД «БелГУ» НИУ «Бел-ГУ», 2020. – 480 с.

ISBN 978-5-9571-2887-8

Издание сборника связано с открытием аудитории Нобелевских лауреатов на выставке Научных достижений НИУ «БелГУ».

В сборник включены материалы о 16 российских и советских нобелевских лауреатах в номинациях «Физика», «Физиология и медицина», «Химия», «Экономика».

В каждой номинации представлены биографии (автобиографии) лауреатов, выступления на торжественном обеде и их нобелевские лекции.

Сборник представляет интерес для широкого круга читателей, а также преподавателей, студентов и аспирантов высших учебных заведений.

УДК 001.38  
ББК 72.6 (0)

ISBN 978-5-9571-2887-8

© The Nobel Foundation, 2020  
© РАН, «Успехи физических наук», 2020  
© НИУ «БелГУ», 2020

## ВСТУПИТЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Несмотря на большие изменения в жизни науки, одна вещь осталась неизменной - это Нобелевская премия: другой такой премии, пользующейся подобным международным авторитетом, не существует.

*Петр Капица, академик РАН,  
лауреат Нобелевской премии*

Нобелевская премия имеет статус самой престижной награды в мире и присуждается за выдающиеся научные исследования, революционные изобретения или крупный вклад в науку, культуру и развитие общества. Нобелевская премия служит не только для чествования ученых, но и для привлечения внимания мировой общественности к важным открытиям, коренным образом изменяющим практику и направление дальнейших исследований.

Премия названа в честь её учредителя Альфреда Нобеля (Альфреда Бернхарда Нобеля, 1833–1896).

Альфред Нобель был неутомимым шведским изобретателем, промышленным магнатом мирового масштаба, лингвистом, философом и гуманистом. А. Нобель вошел в историю как изобретатель динамита, сыгравшего важную роль в мировом промышленном развитии. Все свое состояние он завещал потратить на премии ученым и литераторам, внесшим крупнейший вклад в прогресс человечества, общественным деятелям, способствовавшим укреплению мира между народами.

Нобелевские премии присуждались 597 раз. Среди награжденных 23 лауреата – наши соотечественники – ученые, писатели и миротворцы.

Подготовка сборника «Лауреаты нобелевской премии» связана с открытием аудитории Нобелевских лауреатов на выставке «Научных достижений НИУ «БелГУ»». Идея его издания была поддержана губернатором Белгородской области Е.С. Савченко.

В сборник включены материалы о российских и советских нобелевских лауреатах в номинациях «Физика», «Физиология и медицина», «Химия», «Экономика».

В каждой номинации материалы излагаются в следующем порядке: биография (автобиография) лауреата, речь на торжественном обеде (если

произносилась), нобелевская лекция лауреата, если она была прочитана или впоследствии представлена Нобелевскому фонду.

Раздел «Физика» с большим числом лауреатов построен в хронологии – по годам присуждения Нобелевской премии (от 1958 по 2010 гг.).

Представленные материалы заимствованы из первого издания на русском языке лекций нобелевских лауреатов, опубликованных к столетию учреждения Нобелевской премии: Нобелевская премия. Серии: Физика. Физиология и медицина. Химия (Москва, 2006); Лауреаты Нобелевской премии по экономике (Санкт-Петербург, 2007); с сайта: Нобелевская премия. Нобелевские лауреаты (<http://nobeliat.ru/>), а также из журнала: Успехи физических наук (2004. Т. 174, № 11, 12).

Сборник представляет интерес для широкого круга читателей. «Чтение этих лекций, – как отмечал лауреат Нобелевской премии Жорес Алферов, – бесконечно полезно и ученым, и студентам, потому что в них сконцентрированы исследования многих лет и видна философия науки».

**О.Н. Полухин,**  
*профессор, доктор политических наук,  
ректор Белгородского государственного национального  
исследовательского университета*



# **ФИЗИКА**



*Игорь Евгеньевич Тамм*

*(1895–1971)*

## БИОГРАФИЯ<sup>1</sup>

Игорь Евгеньевич Тамм (1895–1971) родился 8 июля во Владивостоке в семье Евгения Тамма, инженера, и Ольги Тамм, урожденной Давыдовой. В 1918 г. Игорь закончил физический факультет Московского государственного университета, после чего сразу же начал свою академическую карьеру в системе высшего образования. Он последовательно занимал должности ассистента, инструктора, лектора и профессора и преподавал в Крымском и в Московском государственных университетах, в Политехническом и в Инженерно-физическом институтах, а также в Коммунистическом университете им. Я.М. Свердлова. И.Е. Тамму были присуждены степень доктора физико-математических наук и академическое звание профессора. С 1934 г. он возглавлял теоретическое отделение Физического института имени П.Н. Лебедева Академии наук СССР.

Решающее влияние на научную деятельность Тамма оказал профессор Л. Мандельштам, под руководством которого он проработал несколько лет и с которым он тесно сотрудничал с момента их встречи в 1920 г. и до смерти профессора Л. Мандельштама в 1944 г.

И.Е. Тамм был выдающимся физиком-теоретиком. Его ранние исследования были посвящены кристаллооптике и квантовой теории рассеяния света в твердых телах. Затем он переключился на исследования в области теории относительности и квантовой механики. В частности, им был разработан метод интерпретации взаимодействия ядерных частиц. И.Е. Тамм в сотрудничестве с И.М. Франком разработал теоретическое объяснение эффекта Черенкова – излучения света при движении заряженных частиц в среде со скоростью, превышающей скорость света в данной среде, а также теорию ливней частиц в космических лучах. Кроме того, И.Е. Тамм участвовал в разработке методов контроля термоядерных реакций. Плодом его оригинальных исследований стали два важных труда: «Релятивистское взаимодействие элементарных частиц» (1935) и «О магнитном моменте нейтрона» (1938).

---

<sup>1</sup> Игорь Евгеньевич Тамм (1895–1971). Биография / пер. с англ. А. Капранова // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 4 : 1951–1959. – С. 507–508. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

В 1933 г. И.Е. Тамм был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР, а в 1953 г. его избрали академиком АН СССР. Он был удостоен звания Героя Социалистического Труда, а в 1946 г. ему была присуждена Государственная премия СССР (совместно с С.И. Вавиловым, И.М. Франком и П.А. Черенковым). Он также был избран членом Польской академии наук, Американской академии наук и искусств и Шведского физического общества.

Игорь Евгеньевич Тамм женился в 1917 г. на Наталии Шуйской. У них родилось двое детей – сын и дочь. И.Е. Тамм скончался в Москве 12 апреля 1971 г. в возрасте 75 лет.

*Перевод с англ. А. Капранова*

## Речь на торжественном обеде<sup>2</sup>

10 декабря 1958 г.

Eders Majestater, Eders Kungliga Högheter, Excellenser, Mina Damer och Herrar!

A mina och mina kollegers Cerenkov och Frank vagnar onskar jag uttrycka var djupt kanda tacksamhet for den stora ara, som vederfarits oss<sup>3</sup>.

Несмотря на то что наши чувства безмерного личного счастья смешаны с чувством глубочайшего смирения при воспоминании о тех великих людях, которым присуждались премии в предыдущие годы, мы очень рады принимать некое скромное участие в великом деле международного научного сотрудничества, сотрудничества не только в рамках какой-либо одной научной дисциплины, но науки в целом.

Специализация в науке, которая в некоторой степени, безусловно, обязательна, пожалуй, достигла своего максимума в начале этого столетия, когда присуждались первые Нобелевские премии. Но в последующие годы становилось все более и более очевидным то, что многие из важнейших научных проблем можно решить только совместными усилиями различных наук.

Поэтому вовсе не случайно, что когда физик читает списки лауреатов Нобелевских премий по химии, он находит там имена многих ученых, которых считал вне всяких сомнений физиками, к примеру, Жолио-Кюри, Дебая, МакМиллана. Наверное, присуждение премий по физике тоже иногда может вызвать схожие ощущения у химика.

Тем не менее, разграничение между физикой и биологией в настоящее время достаточно острое. Но количество недавних впечатляющих достижений в биологии дает основания верить, что мы, вероятно, находимся в преддверии эпохи великих биологических открытий. Я рискну выразить мнение,

---

<sup>2</sup> Тамм И.Е. Речь на Нобелевском банкете, Стокгольм, 10 декабря 1958 г. / И.Е. Тамм ; пер. с англ. А. Ободовой // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 4 : 1951–1959. – С. 509–510. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

<sup>3</sup> Ваше Величество, Ваше Превосходительство, дамы и господа! От своего имени и от имени моих коллег, Черенкова и Франка, я хотел бы передать глубочайшую благодарность за высокую честь, которой мы были удостоены. – Перевод со швед. К. Финнсен.

что для достижения фундаментальных успехов в биологии необходимо будет тесное сотрудничество представителей всех трех наук, в области которых присуждаются Нобелевские премии.

Но есть еще один важный аспект того, что Фонд Нобеля собирает вместе представителей различных наук и различных национальностей. Дух дружеского международного сотрудничества ученых, развитию которого этот фонд так замечательно содействует, может оказаться в некоторой степени полезным в нашем стремлении к самой важной из всех целей современности – к мирному сотрудничеству всех народов мира.

*Игорь Тамм*

**ОБЩИЕ СВОЙСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ,  
ИСПУСКАЕМОГО СИСТЕМАМИ, ДВИЖУЩИМИСЯ  
СО СВЕРХСВЕТОВЫМИ СКОРОСТЯМИ, И НЕКОТОРЫЕ  
ПРИЛОЖЕНИЯ К ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ<sup>4</sup>**

*Нобелевская лекция, 11 декабря 1958 г.*

Механизм излучения света системой, движущейся со сверхсветовой скоростью, весьма прост и одинаков для излучения при соответствующих условиях всех видов волн – электромагнитных, звуковых, волн на поверхности воды и т.д.

Рассмотрим какую-либо систему, которая в принципе может испускать интересующее нас излучение, например электрически заряженную частицу, излучающую свет, или такой источник звука, как снаряд или самолет. До тех пор, пока скорость этой системы как целого меньше, чем скорость распространения соответствующих волн в окружающей среде, излучение может быть вызвано только колебательным движением системы как целого или какой-либо ее части, например периодическим движением электрона в атоме или вращением пропеллера в самолете. Частота испускаемого излучения, очевидно, определяется частотой возбуждающего периодического движения. Точнее говоря, для возможности излучения периодичность движения не является обязательной; существенно лишь, чтобы движение было неравномерным<sup>5</sup> (скорость его должна изменяться во времени).

Однако когда скорость системы становится больше, чем скорость рассматриваемых волн, возникает совершенно новый механизм излучения, благодаря которому начинает излучать даже система, движущаяся с по-

---

<sup>4</sup> Тамм, И.Е. Общие свойства излучения, испускаемого системами, движущимися со сверхсветовыми скоростями, и некоторые приложения к физике плазмы : нобелевская лекция, Стокгольм, 11 декабря 1958 г. / И.Е. Тамм // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 4 : 1951–1959. – С. 487–505. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

<sup>5</sup> Об исключении из этого правила, так называемом переходном излучении, см. работу В.Л. Гинзбурга и И.М. Франка (1945 г.) [1].

стоянной скоростью. Обозначим через  $c'(\omega)$  скорость распространения волн частоты  $\omega$  в окружающей систему среде. Тогда, как правило, излучение системы, движущейся в среде с постоянной скоростью  $v$ , содержит в себе все частоты, удовлетворяющие основному условию:

$$v > c'(\omega). \quad (1)$$

Это излучение отличается резко выраженной направленностью – волны данной частоты  $\omega$  испускаются только под углом  $\vartheta$  относительно направления движения системы, который определяется соотношением

$$\cos \vartheta = \frac{c'(\omega)}{v}. \quad (2)$$

Доказательство фундаментальных соотношений (1) и (2) основано на том, что при всех скоростях, больших и малых, поле равномерно движущейся системы должно быть стационарным относительно этой системы. Если система излучает, это означает, что в ней присутствует поле по крайней мере одной свободной волны (свободная волна частоты  $\omega$  по определению распространяется в среде с характерной фазовой скоростью  $c'(\omega)$  на сколь угодно большое расстояние от источника).

Пусть  $O$  и  $O'$  (рис. 1) – положения равномерно движущейся системы в два последовательных момента времени  $t = 0$  и  $t = \tau$ . Фаза волны, испускаемой системой, должна быть стационарной относительно этой системы. Это означает, что если  $AO$  изображает фронт волны<sup>6</sup>, который в момент времени  $t = 0$  проходит через систему  $O$ , то этот фронт, распространяясь в среде со скоростью  $c'(\omega)$ , будет постоянно сопровождать систему, и, в частности, в момент времени  $t = \tau$  будет занимать такое положение  $A'O'$ , при котором он проходит через  $O'$ . В этом случае направление распространения свободной волны  $\mathbf{n}$  перпендикулярно к фронту волны, поэтому треугольник  $OCO'$  прямоугольный, откуда легко получается фундаментальное соотношение (2).

Так как значение косинуса всегда меньше единицы, то условие (1) непосредственно вытекает из соотношения (2).

---

<sup>6</sup> Фронт волны, благодаря цилиндрической симметрии задачи, представляет собой конус;  $AOB$  представляет собой сечение такого конуса плоскостью чертежа.



Все указанные общие свойства рассматриваемого излучения уже давно были известны в аэродинамике. Ударные волны, излучаемые при сверхзвуковых скоростях, называются волнами Маха; излучение этих волн начинается тогда, когда скорость снаряда или самолета начинает превышать скорость звука в воздухе. Излучение волн означает потерю энергии движущимся телом, и эти потери оказываются столь значительными, что обуславливают основную долю сопротивления движению самолета, обладающего сверхзвуковой скоростью. Вот почему для преодоления звукового барьера, т.е. для достижения сверхзвуковых скоростей в авиации, необходимо весьма значительное увеличение мощности моторов.

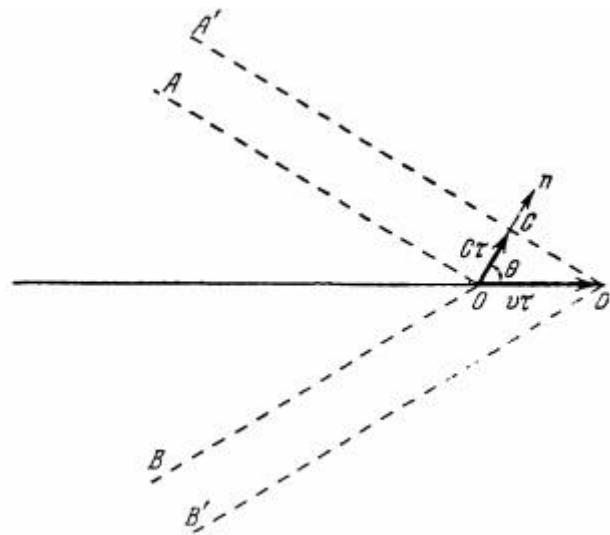


Рис. 1

Мы воспринимаем излучение волн Маха летящим снарядом в виде хорошо известного свиста или воя, возникающего при его движении. Именно поэтому, выяснив совершенно аналогичный механизм излучения Вавилова–Черенкова, т.е. излучения света при движении быстрых электронов, мы стали называть это явление «поющими электронами».

Здесь я должен пояснить, что мы в Советском Союзе называем это излучение «излучением Вавилова–Черенкова», а не просто «черенковским излучением», чтобы подчеркнуть определяющую роль покойного С.И. Вавилова в открытии этого излучения.

Вы видите, что механизм этого излучения чрезвычайно прост. Само это явление могло быть легко предсказано на основе классической элек-

тродинамики за много десятилетий до того, как оно было фактически обнаружено. Почему же это открытие столь запоздало? Мне кажется, что мы имеем здесь дело с поучительным примером достаточно обычной в развитии науки ситуации, когда научный прогресс тормозится некритическим применением правильных физических принципов к явлениям, выходящим за пределы применимости этих принципов.

В течение многих десятков лет всех молодых физиков учили, что свет (и электромагнитные волны вообще) могут излучаться только при неравномерном движении электрических зарядов. При доказательстве этой теоремы, явно или неявно, используется тот факт, что теория относительности не допускает движений со сверхсветовой скоростью; согласно этой теории никакое материальное тело не в состоянии даже достичь скорости света. На протяжении долгого времени эта теорема считалась справедливой без всяких оговорок.

Более того, когда И.М. Франк и я уже разработали математически правильную теорию излучения Вавилова–Черенкова, мы все еще пытались разными способами, которые для нас самих сегодня уже непостижимы, примирить наши результаты с утверждением, что для излучения необходимо ускорение. И лишь на следующий день после первого нашего доклада об этой теории на коллоквиуме Физического института мы внезапно узрели простую истину: предельной скоростью для материальных тел является скорость света в *вакууме* (обозначаемая нами через  $c$ ), тогда как заряд, движущийся в *среде* с постоянной скоростью  $v$ , начинает излучать при условии  $v > c'(\omega)$ , причем значение  $c'(\omega)$  определяется свойствами среды. Если  $c'(\omega) < c$ , то это условие вполне может быть выполнено без нарушения требований теории относительности ( $c' < v < c$ ).

Когда мы впервые обсуждали нашу теорию с академиком А.Ф. Иоффе, он указал нам на работу А. Зоммерфельда, опубликованную в 1904 г., в которой рассматривалось поле электрона, движущегося с постоянной скоростью, большей чем скорость света, и была вычислена сила сопротивления такому движению, вызванная испускаемым электроном излучением. Однако Зоммерфельд рассматривал движение электрона только в вакууме. Годом позже возникла теория относительности; дви-

жение, рассмотренное Зоммерфельдом, оказалось согласно этой теории невозможным, работа Зоммерфельда была совершенно забыта и впервые за много лет после ее опубликования она была процитирована в нашей работе 1937 г.

Давайте теперь вернемся к общим свойствам излучения, испускаемого при сверхсветовых скоростях. В дополнение к уже указанным свойствам новые и весьма характерные особенности этого излучения были выявлены в работах И.М. Франка (1943) и В.Л. Гинзбурга и И.М. Франка (1947).

Предположим, что система  $A$ , движущаяся с постоянной скоростью  $u$ , излучает некоторую порцию энергии  $\varepsilon$  в направлении, определяемом единичным вектором  $\mathbf{n}$ . Закон сохранения энергии выражается уравнением

$$\varepsilon + \Delta T + \Delta U = 0, \quad (3)$$

где  $\Delta T$  и  $\Delta U$  обозначают соответственно обусловленное излучением приращение кинетической энергии  $T$  поступательного движения системы  $A$  и приращение энергии  $U$  ее внутренних степеней свободы. С другой стороны, если излученная энергия  $\varepsilon$  распространяется в среде со скоростью  $c'$  в определенном направлении  $\mathbf{n}$ , то она обладает импульсом  $\varepsilon/c'$ , направленным по  $\mathbf{n}$ <sup>7</sup>. Следовательно, закон сохранения импульса приводит к векторному уравнению

$$\frac{\varepsilon}{c'} \mathbf{n} + \Delta \mathbf{p} = 0, \quad (4)$$

где  $\mathbf{p}$  – импульс системы  $A$ . Если изменение импульса  $\Delta \mathbf{p}$  мало по сравнению с самим импульсом  $\mathbf{p}$ , то тогда, согласно общему правилу,

$$\mathbf{v} \Delta \mathbf{p} = \Delta T. \quad (5)$$

<sup>7</sup> Для электромагнитного излучения было непосредственно показано как путем квантово-механического рассмотрения (В.Л. Гинзбург, 1940 г.), так впоследствии и на основе классической электродинамики (Маркс и Джорджи, 1955 г. [6]), что величина  $\varepsilon/c'$  (где  $c$  – фазовая скорость) действительно равна полному излученному импульсу, включающему в себя как импульс собственно излучения, так и импульс, приобретаемый средой.

Комбинируя эти три простые и весьма общие соотношения, получим, что

$$\Delta U = -\varepsilon \left( 1 - \frac{v \cos \vartheta}{c'} \right), \quad (6)$$

где  $\vartheta$  – угол между направлениями  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{n}$ .

Если система  $A$  не имеет внутренних степеней свободы (это, например, имеет место для точечного заряда), то  $\Delta U = 0$  и уравнение (6) сводится к уже рассмотренному соотношению (2). Тем самым мы еще раз получили это фундаментальное соотношение, однако путем совершенно иных рассуждений. С другой стороны, если система обладает внутренними степенями свободы (скажем, колебательными) и если ее скорость мала ( $v \ll c'$ ), то тогда, как обычно, ее внутренняя энергия  $U$  уменьшается на величину, равную величине  $\varepsilon$  излученной энергии.

Однако при сверхсветовых скоростях ( $v > c'$ ) величина, стоящая в скобках выражения (6), может стать отрицательной, и излучение энергии системой может сопровождаться *положительным* приращением ( $\Delta U > 0$ ) ее внутренней энергии  $U$ . Так, например, атом, находившийся первоначально в невозбужденном состоянии, испускает свет и в то же самое время переходит в возбужденное состояние! В подобных случаях как энергия излучения, так и энергия возбуждения, очевидно, заимствуются из кинетической энергии поступательного движения  $T$ , так что самовозбуждение системы сопровождается соответствующим замедлением движения системы как целого.

Соотношение (6), полученное при обсуждении оптических проблем, но имеющее совершенно общий характер, может быть применимо в аэродинамике (подобно тому как соотношения (1) и (2), полученные в сверхзвуковой аэродинамике, оказались полезными в оптике).

Конечно, строгий расчет сверхзвукового движения автоматически учитывает все, в том числе и возможное самовозбуждение некоторых видов колебаний в сверхзвуковом самолете. Однако такой строгий расчет неизбежно чрезвычайно сложен, а соотношение (6) может оказаться полезным тем, что оно дает представление о сущности механизма некоторых из тех явлений, которые становятся возможными при сверхзвуковых ско-

ростях. С другой стороны, соотношение (6) учитывает только затухание колебаний, связанное с излучением, тогда как в случае механических колебаний частей аэроплана этот вид затухания пренебрежимо мал по сравнению с затуханием, вызванным внутренним трением вибрирующих материалов. Имеются и другие отличия акустического излучения от оптического. Короче говоря, вопрос о значении упомянутых явлений в решении сложнейшей проблемы сверхзвукового полета следует считать открытым.

Теперь я хочу рассмотреть в качестве примера приложение общей теории к одной определенной области явлений, а именно к физике плазмы.

Сначала сделаю несколько замечаний относительно механизма энергетических потерь, испытываемых быстрыми заряженными частицами при прохождении через вещество. Излучение Вавилова–Черенкова составляет только часть (и обычно весьма незначительную) этих потерь, которые в основном обусловлены ионизацией и возбуждением атомов среды, через которую проходят частицы. Однако математическая трактовка, использованная И.М. Франком и мною при подсчете потерь на излучение, оказалась удобной и для рассмотрения проблемы в целом; она была в 1940 г. применена Э. Ферми [7] к подсчету полных энергетических потерь движущейся заряженной частицы. Исключение составляют только потери, связанные с лобовыми соударениями частиц с атомами среды, которые должны подсчитываться отдельно. Главное отличие работы Ферми от нашей работы состоит в том, что мы считали среду, в которой движется частица, прозрачной, тогда как Ферми не только учитывал поляризацию среды, вызываемую электрическим полем частицы, подобно тому как это делали мы, но принимал также во внимание поглощение электромагнитных волн в среде. Ферми показал, что обусловленное поляризацией среды экранирование поля частицы, которое не учитывалось в предшествующих работах по этому вопросу, существенно уменьшает потери энергии очень быстрых частиц.

Мы не можем здесь дать обзор многочисленных работ по этому вопросу, в которых теория Ферми получила дальнейшее развитие. Но для того чтобы получить некоторое представление о механизме явления, мы рассмотрим более подробно процессы, происходящие в плазме (т.е. в высокой

степени ионизованном газе), которая в интересующих нас отношениях является простейшей из всех сред. У меня нет собственных работ по этому вопросу, так что я буду излагать работы других авторов, давая ссылки лишь на работы последнего времени и не ссылаясь явно на работы, ставшие классическими, как, например, работы Н. Бора.

Потери энергии заряженных частиц, проходящих через плазму, могут быть разделены на две части. Представим себе цилиндр, ось которого совпадает с траекторией частицы, а радиус равен дебаевскому радиусу  $D$ :

$$D = \sqrt{\frac{kT}{4\pi N e^2}}.$$

Взаимодействие пролетающей частицы с частицами плазмы, находящимися внутри этого цилиндра, должно рассматриваться микроскопически; возникающие при этом потери энергии обусловлены так называемыми близкими соударениями. Взаимодействие же быстрой частицы с плазмой, расположенной вне цилиндра, может рассматриваться макроскопически; результирующие потери энергии называются когерентными. В обычных условиях оба вида потерь играют примерно одинаковую роль; но в очень горячей и разреженной плазме, имеющей столь важное значение в термоядерных исследованиях, сечение прямого кулоновского взаимодействия заряженных частиц оказывается малым и когерентные потери становятся преобладающими.

Так как показатель преломления плазмы  $n$  для всех частот меньше единицы, скорость света в плазме  $c' = c/n$  всегда больше скорости света в вакууме  $c$ . Поэтому может показаться, что эффект Вавилова–Черенкова вообще не может иметь места в плазме. Однако это не так. Во-первых, только скорость поперечных электромагнитных волн в плазме  $c'(\omega)$  превосходит скорость  $c$  при всех частотах, но для скорости плазменных волн в собственном смысле этого слова это не имеет места. Плазменными волнами называются продольные волны, в которых разноименно заряженные частицы плазмы совершают колебания в противоположных направлениях; возникающее при этом электрическое поле играет роль квазиупругой силы. Во-вторых, в магнитной плазме, т.е. в плазме, помещенной во внешнее магнитное поле, волны обоого вида, световые и плазменные, оказываются

взаимосвязанными, так что между поперечными и продольными волнами невозможно провести четкое различие. В результате показатель преломления света делается зависимым от направления его распространения и поляризации и в некоторой области значений этих параметров становится большим единицы, так что эффект Вавилова–Черенкова становится возможным.

Рассмотрим сначала когерентные потери энергии заряженной частицы, движущейся в плазме без внешнего магнитного поля. Почти все когерентные потери обусловлены возбуждением продольных плазменных волн; механизм этого возбуждения вполне эквивалентен механизму излучения света в эффекте Вавилова–Черенкова.

Фазовая скорость плазменных волн равна

$$c' = \sqrt{3v_T^2 + \frac{\omega_0^2}{k^2}},$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновой вектор,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi N e^2}{m}}$  – так называемая плазменная частота и  $v_T$  – средняя тепловая скорость плазменных электронов. Пока скорость  $v$  рассматриваемых частиц меньше, чем  $\sqrt{3}v_T$ , необходимое условие излучения плазменных волн  $v > c'$  не может быть выполнено; при этих скоростях практически все потери энергии, испытываемые частицей, происходят за счет близких соударений. Но когда скорость частицы  $v$  превышает  $\sqrt{3}v_T$ , тогда в некоторой области длин волн  $\lambda = \frac{2\pi}{k}$  условие  $v > c'$  выполняется и возникают когерентные потери<sup>8</sup>.

Разрешите мне теперь сделать небольшое отступление и переключить ваше внимание от плазмы к твердому телу. При достаточно высоких частотах валентные электроны в металлах могут рассматриваться как свободные, и, следовательно, можно считать, что они вместе с металлическими ионами образуют своего рода плазму. Плазменная частота  $\omega_0$  пропор-

<sup>8</sup> То обстоятельство, что короткие плазменные волны очень сильно поглощаются самой плазмой, не оказывает влияния на явление, поскольку условие излучения  $c'(\omega) < v$  удовлетворяется лишь для достаточно длинных плазменных волн ( $\lambda > D$ ), коэффициент затухания которых достаточно мал по сравнению с их частотой.

циональна квадратному корню из плотности плазменных электронов. Так как плотность электронов в металлах значительно больше, чем в обычной плазме, то частота плазменных волн в металлах значительно выше, чем в обычной плазме, и по порядку величины соответствует  $h\omega \sim 10$  эВ.

По аналогии с движением заряженных частиц в обычной плазме мы можем ожидать, что при прохождении быстрых электронов через металлическую пленку должны возникать наряду со всеми остальными видами потерь энергии также и потери, связанные с возбуждением плазменных волн только что описанным механизмом. Это и имеет место в действительности. Хорошо известно, что быстрые электроны, проходящие через тонкую металлическую пленку, часто испытывают в ней большие дискретные потери энергии, порядка 10 эВ. Я отошлю вас за подробностями к статье Д. Пайнса (1956 г.) [8], в которой показано, что элементарная теория возбуждения плазмы в металле быстрыми заряженными частицами, весьма аналогичная упомянутой выше теории возбуждения обычной плазмы, настолько хорошо согласуется с опытными фактами, относящимися к дискретным энергетическим потерям в металлах, что, по словам автора, «скорее возникает вопрос, почему наблюдается столь хорошее согласие, чем требуется объяснение некоторых несоответствий».

Возвращаясь к обычной плазме, я хотел бы отметить, что поглощение плазменных волн в самой плазме обусловлено своего рода обратным эффектом Вавилова–Черенкова.

Обычно необходимым условием заметного поглощения волн является наличие резонанса между частотой волны и одной из собственных частот поглощающей системы, например атома. Так, например, свободный электрон, который в отличие от связанного электрона не обладает собственной частотой, совершает в поле волны периодические колебания, попеременно приобретая и вновь теряя кинетическую энергию, что не может привести к заметному поглощению энергии волны.

Однако существует еще и другой, не резонансный механизм поглощения волн. В том случае, если скорость  $v$  свободного электрона больше, чем скорость волны ( $v > c'$ ), проекция скорости электрона на направление распространения волны  $v \cos \vartheta$  может стать равной скорости волны:



$$v \cos \vartheta = c'. \quad (7)$$

В этом случае электрон как бы едет верхом на гребне волны, поэтому направление действующей на него силы не изменяется с течением времени. Значит, электрон непрерывно поглощает энергию волны до тех пор, пока его скорость не возрастет настолько, что он выпадет из фазы с волной.

Таким образом, мы рассмотрим механизм поглощения плазменных волн<sup>9</sup>; условие (7), отбирающее те электроны плазмы, которые участвуют в процессе поглощения, совпадает с фундаментальным соотношением (2) для излучения<sup>10</sup>.

Коэффициент затухания плазмы  $\gamma$  впервые был вычислен в 1946 г. Л. Ландау. Изменив обозначения, принятые Ландау, можно представить экспоненциальный член полученной им формулы в следующем виде:

$$\gamma \sim \exp\left(-\frac{mu^2}{2kT}\right),$$

где  $u = \frac{\omega_0}{k}$ . В области применимости формулы Ландау отношение  $\omega_0/k$  равно скорости рассматриваемой волны  $c'$ . Следовательно, согласно (8) затухание плазменной волны пропорционально плотности плазменных электронов, обладающих по закону Максвелла скоростью  $u$ , равной скорости волны. Таким образом, формула (8) полностью соответствует только что рассмотренному механизму поглощения.

В недавно появившейся работе, касающейся механизма спорадического солнечного радиоизлучения, В.Л. Гинзбург и В.В. Железняков (1958 г.) [10] применили и развили изложенную выше теорию к новой и очень интересной области физики, начало которой было заложено здесь, в Швеции, профессором Альфвенем. Они, в частности, показали, что хорошо из-

<sup>9</sup> В принципе, этот механизм поглощения был указан уже в 1949 г. Бомом и Гроссом [11]. Работа этих авторов тесно связана с более ранней работой А. Власова. Детальное и очень поучительное математическое рассмотрение вопроса было приведено Р. Сагдеевым и В. Шафрановым на Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии в сентябре 1958 г.

<sup>10</sup> Излучение имеет место, если скоростью  $v$  обладает, скажем, один электрон или сгусток таких электронов, причем размеры этого сгустка малы по сравнению с длиной испускаемого излучения. Если, однако, электроны данной скорости  $v$  равномерно распределены в пространстве, то они не излучают, так как их волновые поля взаимно компенсируются в результате интерференции. Однако они могут поглощать энергию.

вестная неустойчивость пучка заряженных частиц, проходящих через плазму, с квантово-теоретической точки зрения обязана отрицательному поглощению плазменных волн проходящим пучком частиц (индуцированное излучение волн частицами пучка преобладает над истинным поглощением).

Прежде чем закончить свое выступление, я хотел бы упомянуть одну проблему, которая имеет довольно существенное значение для увлекательной и повсеместно усиленно разрабатываемой задачи регулирования термоядерных реакций и использования их в мирных целях; это проблема нагрева плазмы. Первые стадии нагрева легко осуществляются путем возбуждения в плазме электрического тока. Однако сечение кулоновского соударения заряженных частиц убывает обратно пропорционально четвертой степени их относительной скорости; поэтому в горячей и очень разреженной плазме эти столкновения становятся пренебрежимо редкими. Очевидно, нагревание током становится в этих условиях практически непригодным: лишь очень малая часть энергии упорядоченного движения плазменных электронов, вызванного приложенным к плазме внешним полем, переходит при этих условиях в джоулево тепло.

В настоящее время обсуждаются многочисленные предложения, касающиеся возможных способов дальнейшего нагрева плазмы, в частности, так называемое магнитное накачивание (*magnetic pumping*). Я отмечу здесь лишь два метода, тесно связанных с проблемами, которым посвящен мой доклад.

Во-первых, нагревание плазмы с помощью пучка быстрых заряженных частиц, инжектированных в плазму извне, в принципе возможно даже в том случае, если плазма сильно разогрета и очень разрежена. Хотя в такой плазме энергетические потери быстрых частиц, связанные с близкими соударениями, становятся пренебрежимо малыми, когерентные потери энергии, о которых речь шла выше, не зависят от сечения соударений и становятся преобладающими.

В связи с этим необходимо подчеркнуть два обстоятельства. Во-первых, в принципе нагревание может быть осуществлено пучком быстрых заряженных частиц, движущихся не в самой плазме, а вне ее, парал-

тельно ее граничной поверхности. В этом случае, как мы видели, когерентные потери энергии связаны с возбуждением быстрыми частицами плазменных волн. Те волны, длина которых велика по сравнению с расстоянием от пучка до границы плазмы, будут возбуждаться внешним пучком так же, как пучком, проходящим внутри плазмы. Это впервые отметил Л.И. Мандельштам в связи с обычным излучением Вавилова–Черенкова. Впоследствии В.Л. Гинзбург (1947 г.) [12] предложил метод генерации микрорадиоволн с помощью быстрых частиц, движущихся вдоль поверхности диэлектрика или в полости, проходящей через диэлектрик, обладающей надлежащими характеристиками.

Вторым обстоятельством, связанным с рассматриваемой проблемой, является то, что если пучок состоит из последовательности отдельных сгустков заряженных частиц, то все частицы каждого отдельного сгустка будут когерентно генерировать плазменные волны, длина которых велика по сравнению с размерами сгустков. Следовательно, интенсивность этих волн будет пропорциональна не числу частиц в сгустке, а квадрату этого числа. Очевидно, что это обстоятельство позволяет весьма значительно усилить разогревающее действие пучка.

Рассмотрим теперь другой возможный метод нагрева плазмы. В 1958 г. Морозов [13] рассчитал возбуждение так называемых магнитоакустических волн в магнитной плазме (напомню, что так называют плазму, на которую наложено внешнее магнитное поле), обусловленное круговым электрическим током, движущимся с достаточной скоростью в направлении, перпендикулярном к плоскости тока. Круговой ток может перемещаться внутри плазмы – можно себе представить плазменное кольцо, несущее ток, которое инжектируется извне внутрь той плазмы, которую хотят нагреть. Однако интересующий нас круговой ток может перемещаться и вне плазмы, вдоль поверхности сосуда, содержащего плазму; такой внешний ток вполне аналогичен внешнему пучку частиц, о котором я уже упоминал.

Генерация волн движущимся током является частным случаем излучения Вавилова–Черенкова. Морозов показал, что при определенных условиях поглощение плазмой магнитоакустических волн, генерируемых

указанным способом, в принципе может привести к очень сильному разогреванию плазмы. Разумеется, скорость перемещения тока должна превышать скорость распространения генерируемых волн. Одной из причин большой эффективности нагревания плазмы током является когерентность волн, испускаемых отдельными его элементами. В этом отношении имеется определенная аналогия между током и сгустками заряженных частиц, и мощность излучения тока пропорциональна квадрату силы тока.

Имеется еще другая возможность использования излучения Вавилова–Черенкова, создаваемого током. Хорошо известно, что токи, возбуждаемые в плазме, обычно концентрируются благодаря пинч-эффекту в тонкий шнур, отличающийся чрезвычайной неустойчивостью. Поэтому в практических приложениях обеспечение стабильности плазменного шнура часто имеет решающее значение. Если стенки сосуда, содержащего плазму, изготовлены из проводника, то при приближении плазменного тока к стенке в ней будут индуцироваться токи Фуко, что приведет к отталкиванию тока обратно от стенки. Методы стабилизации тока, основанные на этом явлении, были независимо предложены учеными в различных странах и были применены в многочисленных термоядерных экспериментах, однако оказались не очень удовлетворительными. Морозов и Соловьев (1958 г.) [14] предложили изготавливать стенки сосудов, содержащих плазму, не из проводящих материалов, а из материалов, в которых скорость распространения электромагнитных волн, в соответствующем диапазоне частот, была бы возможно малой.

Если ток, текущий в плазме параллельно поверхности такой стенки, смещается по направлению к этой поверхности со скоростью, превышающей скорость распространения волн определенной частоты в материале стенки, то этот ток должен излучать волны этой частоты внутрь стенки. Сила отдачи, действующая на излучающий ток, приведет к отталкиванию тока от стенки и тем самым к стабилизации тока.

Я хочу подчеркнуть, что у меня нет какого-либо определенного мнения о возможных преимуществах или недостатках упомянутых методов нагревания и стабилизации плазмы, а также о возможностях их технического осуществления. Эти методы были выбраны мною лишь в качестве

иллюстрации применения той общей теории, которую я изложил в начале доклада.

Те приложения теории, о которых я смог здесь упомянуть, по необходимости относились к весьма ограниченной области физики. Я могу лишь надеяться на то, что мне удалось показать возможности применения этой теории к новым и интересным физическим проблемам и что работа в этом направлении может оказаться полезной для решения этих проблем или по крайней мере для лучшего понимания общего физического механизма явлений, играющих роль в этих проблемах.

### Список литературы

1. В.Л. Гинзбург, И.М. Франк, (1945) *J. Phys. USSR* 9, 353.
2. A. Sommerfeld, (1940) *Gotting. Nachricht.* 99, 363.
3. И.Е. Тамм, И.М. Франк, (1957) *ДАН СССР* 14, 109.
4. I.M. Frank, (1943) *J. Phys. USSR* 7, 49.
5. В.Л. Гинзбург, И.М. Франк, (1947) *ДАН СССР* 56, 583.
6. В.Л. Гинзбург и И.М. Франк (1946) *ЖЭТФ* 16, 25.
7. E. Fermi, (1940) *Phys. Rev.* 57, 485.
8. D. Pines, (1956) *Rev. Mod. Phys.* 28, 184.
9. Л.Д. Ландау, (1946) *ЖЭТФ* 16, 574.
10. В.Л. Гинзбург, В. В. Железняков, (1958) *Астрон. журн.* 35, 694.
11. D. Bohm, E.P. Gross, (1949) *Phys. Rev.* 75, 1864.
12. В.Л. Гинзбург, (1947) *ДАН СССР* 56, 145.
13. А. Морозов, *Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций*, т. IV, стр. 331, Изд. АН СССР, М., 1958.
14. А. Морозов и Л. Соловьев, *ibid*, стр. 391.
15. И.Е. Тамм, (1939) *J. Phys. USSR* 1, 139.
16. G. Marx and G. Gyorgyi, (1955) *Ann. der Phys.* 16, 241.



*Илья Михайлович Франк*

*(1908–1990)*

## БИОГРАФИЯ<sup>11</sup>

Илья Михайлович Франк (1908–1990) родился в Санкт-Петербурге 23 октября. Он был младшим сыном Михаила Людвиговича Франка, профессора математики, и его жены, Елизаветы Михайловны Франк (Грациановой), доктора физики. В 1930 г. Илья Франк закончил МГУ, где проходил обучение под руководством Сергея Ивановича Вавилова. В 1931 г. Илья Франк получил должность старшего научного сотрудника в лаборатории профессора А.Н. Теренина в Ленинградском государственном оптическом институте. В 1934 г. он переезжает в Москву, где становится научным сотрудником, а вскоре и старшим научным сотрудником Физического института имени П.Н. Лебедева Академии наук СССР. С 1941 г. Франк занимал должность заведующего основанной им в этом институте лаборатории атомного ядра. Будучи с 1940 г. профессором Московского государственного университета, Франк с 1946 по 1956 г. возглавлял лабораторию радиоактивного излучения в Научно-исследовательском институте ядерной физики при МГУ. С 1957 г. он также являлся директором лаборатории нейтронной физики в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне.

Первые исследования И.М. Франка были посвящены изучению фотолюминесценции и фотохимических процессов. С 1934 г. он начал работать над проблемами ядерной физики в лаборатории профессора Д.В. Скобельцына. Им выполнены экспериментальные исследования электрон-позитронных пар, возникающих при столкновениях гамма-квантов с атомами, а также других задач, связанных с измерением и применением гамма-излучения. Его дальнейшие работы были посвящены физике нейтронов, взаимодействию легких ядер и расщеплению ядер нейтронами и мезонами. Кроме того, объектом его теоретических исследований был эффект Вавилова–Черенкова и связанные с ним проблемы.

---

<sup>11</sup> Илья Михайлович Франк (1908–1990). Биография / пер. с англ. А. Капранова // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 4 : 1951–1959. – С. 484–485. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

В 1935 г. И.М. Франк стал доктором физико-математических наук, в 1944 г. – профессором, а в 1946 г. – членом-корреспондентом Академии наук. В 1968 г. он становится академиком АН СССР.

В 1937 г. Илья Франк женился на Элле Абрамовне Бейлихис, видном историке. Их единственный ребенок, Александр, стал специалистом по нейтронной физике.

Илья Михайлович Франк скончался в возрасте 81 года 22 июня 1990 г.



*Илья Франк*

## **ОПТИКА ИСТОЧНИКОВ СВЕТА, ДВИЖУЩИХСЯ В ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ СРЕДАХ<sup>12</sup>**

*Нобелевская лекция, 11 декабря 1958 г.*

### **Особенности излучения в среде**

На протяжении ряда лет эффект Вавилова–Черенкова представлялся только своеобразным и притом трудно наблюдаемым оптическим явлением. Свечение возбуждалось радиоактивными препаратами и наблюдалось визуально [1]. Слабость свечения, казалось бы, исключала всякую возможность применений этого явления в физике, а тем более в технике.

С момента появления теории эффекта Вавилова–Черенкова [2] это явление можно было рассматривать как пример оптики сверхсветовых скоростей [8]. Это был единственный пример такого рода и притом, казалось бы, обособленный от всех известных физических явлений. Было очевидно, что в принципе возможны и другие проявления оптики сверхсветовых скоростей, однако их наблюдение представлялось крайне сложным. Так, уже первые расчеты показали, что если излучение Вавилова–Черенкова создается не электрическим зарядом, а, например, магнитным моментом электрона, то оно должно быть настолько слабым, что лежит за пределами возможностей экспериментального обнаружения [3]. Было также очевидно, что трудно создать условия для наблюдения атома, летящего со сверхсветовой скоростью [4].

Теоретическое рассмотрение всех этих вопросов в течение ряда лет представляло интерес в основном лишь с принципиальной точки зрения.

Развитие ядерной физики и усовершенствование экспериментальной техники привели в последние годы к тому, что эффект Вавилова–Черенкова нашел многочисленные применения в физике частиц высоких энергий. Выяснилась также связь этого явления со многими другими про-

---

<sup>12</sup> Франк, И.М. Оптика источников света, движущихся в преломляющих средах : нобелевская лекция, Стокгольм, 11 декабря 1958 г. / И.М. Франк // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 4 : 1951–1959. – С. 447–483. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

блемами, например с физикой плазмы, астрофизикой, проблемой генерации радиоволн, проблемой ускорения частиц и т.д. В связи с этим более широкий подход к трактовке явлений, связанных с эффектом Вавилова–Черенкова, становится сейчас не только законным, но и, по существу, необходимым.

Естественно поставить вопрос об особенностях излучения, которое может создаваться не только электрическим зарядом, но и любым источником света, движущимся в преломляющей среде [5]. Такая общая постановка вопроса, охватывающая, в частности, и эффект Вавилова–Черенкова, теперь представляется интересной не только с принципиальной точки зрения. Можно надеяться, что уже в ближайшем будущем некоторые из этого круга явлений станут предметом экспериментального изучения.

С момента открытия эффекта Вавилова–Черенкова наши представления о механизме взаимодействия быстро движущейся частицы со средой претерпели значительные изменения. Ранее казалось очевидным, что излучение, возникающее при электромагнитном взаимодействии частиц высокой энергии со средой, – это всегда один из видов тормозного излучения. Основную энергию в таком излучении несут фотоны большой энергии. Для испускания и распространения таких фотонов оптические свойства среды несущественны. Считалось также, что процессы ионизации и возбуждения быстрыми частицами можно рассматривать как сумму независимых взаимодействий этих частиц с отдельными атомами и молекулами. Отсюда следовал вывод, что и вообще для взаимодействия частиц высокой энергии с веществом несущественны его макроскопические свойства.

Открытие и объяснение эффекта Вавилова–Черенкова, а затем связь этого явления с ионизационными потерями, обнаруженная Ферми [6], заставили пересмотреть эту точку зрения. Стало очевидно, что для процессов излучения света быстро движущимися частицами макроскопические свойства среды имеют существенное значение.

Весьма важной величиной, от которой зависит излучение, является отношение скорости излучателя к скорости света. В вакууме скорость све-

та постоянна и всегда больше скорости излучателя. Она входит в формулы, определяющие излучение, как универсальная константа. Поэтому в вакууме излучение определяется только природой излучателя и законом его движения. Иначе обстоит дело в преломляющей среде. Фазовая и групповая скорости света здесь иные, чем в вакууме. Они зависят от свойств среды и частоты света. В оптически анизотропных средах они являются при этом функцией направления распространения волн и их поляризации.

В средах ограниченных размеров играет роль также изменение скорости света при переходе через границу сред. Таким образом, в преломляющей среде отношение скорости излучателя к скорости распространения волн существенно зависит от скорости света в среде и ее изменений. В отличие от вакуума, это отношение может быть, в частности, и больше единицы. В результате от особенностей распространения света в среде зависят не только свойства излучения, а иногда даже сам факт его возникновения. Эффект Вавилова–Черенкова – пример такого явления.

Излучение в среде, естественно, сильно зависит и от природы излучателя. Теория позволяет предсказать свойства излучения Вавилова–Черенкова не только для движущегося электрического заряда, но и для других случаев. Так, например, аналогично электрическому заряду, излучение Вавилова–Черенкова должно было бы создавать и магнитный заряд, если бы оказалось, что он существует [7]. Но если вопрос об излучении магнитного заряда и сейчас следует рассматривать лишь как теоретически возможный, то излучение Вавилова–Черенкова для магнитных и электрических диполей и мультиполей теперь является вполне реальным.

Фактически, рассмотрение излучения движущейся системы частиц может оказаться необходимым при решении многочисленных задач, связанных с процессами в плазме и с проблемами ускорения частиц. Очевидно, что система частиц может быть, в частности, квазинейтральной, но иметь электрический и, особенно, магнитный момент, обусловленный движущимися кольцевыми токами.

Система частиц может не только двигаться как целое, но может также иметь собственные частоты колебаний. Тем более это относится к таким системам, как движущийся атом, ион или атомное ядро. Собственную

частоту следует приписать и движущемуся в магнитном поле электрону (ларморова частота обращения вокруг линий поля). Поэтому, кроме обобщений теории эффекта Вавилова–Черенкова, необходимо и рассмотрение общего случая излучения систем, обладающих собственными частотами колебаний [5].

Такое общее рассмотрение включает в себя и эффект Вавилова–Черенкова. Он соответствует предельному случаю собственной частоты, равной нулю.

Тот факт, что теория излучения заряда при сверхсветовой скорости за последние двадцать лет не претерпела какого-либо пересмотра, вовсе не свидетельствует о завершении этой теории. Рассмотрим следующий пример. Л.И. Мандельштам впервые указал, что для излучения заряда при сверхсветовой скорости нет необходимости, чтобы он двигался в сплошной среде<sup>13</sup>. Излучение остается таким же, если заряд движется по оси полого цилиндрического канала внутри этой среды. Необходимо только, чтобы диаметр канала был мал по сравнению с длиной волны излучаемого света. Практически это очень существенно, так как можно получать излучение в условиях, когда излучатель не испытывает непосредственных соударений с атомами среды, которые могут его деформировать или разрушить. Казалось, что это применимо и к излучению диполя в среде.

Однако, как показали в последнее время В.Л. Гинзбург с сотрудниками, этот вопрос вовсе не так прост, как казалось ранее [10]. Свойства среды, непосредственно прилегающей к диполю, могут быть существенны, и поэтому нельзя пренебрегать наличием канала при любом, даже сколь угодно малом, его диаметре. Этот важный факт заставил критически проанализировать ранее полученные данные. Так, для излучения магнитного диполя двумя различными методами были получены противоречащие друг другу результаты [4; 7]. Теперь можно думать, что дело здесь не в ошибочности одного из использованных методов, а в том, что они по-разному учитывают влияние среды, прилегающей к движущемуся диполю. Возможно, что оба результата правильны, но относятся к различным фи-

---

<sup>13</sup> См. статью В.Л. Гинзбурга и И.М. Франка [9].

зическим случаям. Этот вопрос, однако, требует дополнительного рассмотрения.

Затронутый в этой лекции круг явлений, несмотря на их многообразие, охватывает лишь простейший случай излучения в среде, а именно излучение, при котором поступательное движение системы можно рассматривать как равномерное и прямолинейное.

### **Переходное излучение**

Типичным примером излучения в среде при равномерном движении электрического заряда является так называемое переходное излучение. Утверждение, что при прямолинейном и равномерном движении электрического заряда со скоростью, меньшей фазовой скорости света, не происходит излучения, правильно только при условии, что скорость света вдоль пути частицы должна оставаться неизменной. Если, например, равномерно движущаяся заряженная частица пересекает границу двух сред с разными показателями преломления, то возникает переходное излучение. Излучение появляется потому, что скачок, который испытывает величина фазовой скорости света на границе двух сред, в некоторой степени равносителен скачку в величине скорости частицы. Аналогия с торможением становится полной в предельном случае, когда частица движется из вакуума в металл, в котором свет поглощается на длине, малой по сравнению с длиной волны света. Интенсивность переходного излучения в этом случае максимальная. При этом в оптической области спектра, в которой только и имеет место переходное излучение, оно тождественно с тем излучением, которое создали бы электрический заряд и движущийся навстречу ему заряд противоположного знака (его электрическое изображение в металле), мгновенно останавливающиеся в точке встречи.

Интенсивность переходного излучения при малых скоростях пропорциональна кинетической энергии частицы, а в релятивистской области скоростей возрастает как логарифм полной энергии. Подобно тормозному излучению, оно становится в этом случае резко направленным. Высказывались предположения, что переходное излучение может быть полезно для определения энергии ультрарелятивистских частиц. Это существенно, по-

скольку для ультрарелятивистских частиц эффект Вавилова–Черенкова использовать для этой цели очень трудно. Как известно, угол, под которым направлено излучение Вавилова–Черенкова, и его интенсивность достигают в этом случае практически постоянного значения.

Интенсивность переходного излучения очень мала, что затрудняет его практическое использование. Вероятность испускания фотона составляет величину порядка постоянной тонкой структуры, т.е. порядка одной сотой. Если не удастся суммировать переходное излучение от многих пластинок, то наблюдение отдельной частицы по переходному излучению может проводиться лишь с очень малой эффективностью. В связи с этим отметим особенности переходного излучения для ультрарелятивистской скорости. В отличие от частиц с небольшой скоростью переходное излучение при попадании такой частицы из вакуума в прозрачный диэлектрик почти такое же, как при падении на металл. Это легко понять, проведя аналогию с тормозным излучением. Действительно, изменение скорости света эквивалентно небольшому изменению скорости частицы. Однако даже небольшое изменение скорости ультрарелятивистской частицы означает большое изменение ее энергии, т.е. сильное торможение частицы. Эта особенность, возможно, позволит суммировать переходное излучение от поверхностей многих параллельно расположенных в вакууме прозрачных пластинок.

Вторая особенность состоит в том, что в вакууме при ультрарелятивистских скоростях равновесное поле, увлекаемое частицей, формируется на значительном пути. Поэтому для того чтобы интенсивность излучения не оказалась сниженной, вакуумные прослойки между пластинками не должны быть меньше некоторой заданной величины. Для излучения видимого света протоном с энергией  $10^{11}$  эВ это минимальное расстояние порядка 1 мм, что вполне осуществимо; но для протона с энергией  $10^{14}$  эВ оно возрастает до размеров порядка километра.

Я остановился на вопросе о переходном излучении, чтобы отметить своеобразие оптических явлений для источников излучения, движущихся в преломляющих средах, связанное с особенностями распространения света в веществе.

Следует отметить, что хотя теория переходного излучения была развита Гинзбургом и автором этой статьи [11] свыше десяти лет назад и после того рассматривалась в ряде работ<sup>14</sup>, оно экспериментально не изучено. Положение здесь почти такое же, как с излучением Вавилова–Черенкова до появления работ этих авторов. Несомненно, что переходное излучение также неоднократно наблюдалось, и притом разными физиками, так как свечение поверхностей электродов под действием бомбардирующих частиц хорошо известно. Однако и сейчас не выяснен вклад, который вносят в это свечение люминесценция, тормозное излучение и переходное излучение. Наиболее надежные данные о переходном излучении получены недавно А.Е. Чудаковым (не опубликовано). Он наблюдал методом совпадений фотоны, испускаемые с поверхности металлической фольги при падении на нее быстрых электронов от радиофосфора. Найденная интенсивность излучения оказалась совпадающей с расчетной для переходного излучения по крайней мере по порядку величины<sup>15</sup>.

Необходимо также отметить, что практически всегда при наблюдении радиации Вавилова–Черенкова в силу ограниченности толщины радиатора в это излучение как составная и неотделимая часть входит и переходное излучение. Как показал В.Е. Пафомов, при очень малых толщинах радиатора это обстоятельство следует учитывать [16].

### **Спектр излучения и квантовая интерпретация явления**

Излучение заряженной частицы, равномерно движущейся со сверхсветовой скоростью, может быть, как известно, полностью описано методами классической электродинамики. Квантовая теория этого явления была впервые развита Гинзбургом [3], а затем рядом других авторов<sup>16</sup>. Гинзбург показал, что классическая формула, определяющая косинус угла, под которым происходит излучение, правильна с точностью до очень ма-

---

<sup>14</sup> См., например, работы [12] и литературу, приведенную в них.

<sup>15</sup> В книге Джелли «Излучение Черенкова и его применение» [18], с которой я имел возможность ознакомиться уже после написания этой лекции, содержится указание, что ее автор вместе с Эллиотом и Гольдсмитом наблюдали в 1958 г. излучение от протонов с энергией 1,5 МэВ, бомбардирующих алюминиевую мишень с полированной поверхностью. На основании данных об интенсивности и поляризации авторы считают это свечение переходным излучением.

<sup>16</sup> См., например, обзор [8].

лой поправки, равной по порядку величины отношению энергии излучаемого фотона к полной энергии движущегося излучателя (даже для электрона это отношение меньше, чем  $10^{-5}$ ). Если отбросить эту малую квантовую поправку, содержащуюся в точной формуле, то получим как классическим, так и квантовым методом тождественные соотношения, связывающие частоту излучаемого света с направлением его излучения. Напишем их в квантовой форме сразу для системы, обладающей собственной частотой  $\omega_0$  [14; 5] ( $\omega_0$  – частота измерения в лабораторной системе координат, т.е.  $\omega_0 = \omega'_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ ). При этом нет необходимости полагать, что  $\omega_0$  является единственной собственной частотой, которой обладает система. Можно считать ее одной из компонент сложного спектра частот и допустимо рассматривать излучение, с ней связанное.

Если импульс фотона, который в среде следует принять равным  $n\hbar\omega/c$ , очень мал по сравнению с импульсом излучателя, то закон сохранения импульса при излучении можно написать так:

$$\frac{n\hbar\omega}{c} \cos \theta = \frac{\Delta E}{v}. \quad (1)$$

Здесь  $\Delta E$  – изменение кинетической энергии излучателя, а  $v$  – его скорость. Их отношение дает величину изменения импульса системы.

Изменение кинетической энергии определяется, очевидно, энергией излученного фотона  $\hbar\omega$  и изменением внутренней энергии системы  $\hbar\omega_0$ :

$$\Delta E = \hbar\omega \pm \hbar\omega_0 \quad (2)$$

Величину  $\hbar\omega_0$  следует взять со знаком минус, если при излучении фотона система переходит из энергетически более высокого состояния в более низкое, т.е. энергия излученного фотона хотя бы частично покрывается за счет энергии возбуждения. Знак плюс должен быть взят, если при излучении происходит возбуждение системы, т.е. кинетическая энергия затрачивается и на излучение, и на возбуждение.

Соединяя уравнения (1) и (2), мы получаем

$$\frac{n\omega}{c} \cos \theta = \frac{\omega \pm \omega_0}{v}. \quad (3)$$



При этом множитель  $\hbar$ , сократился, так что уравнение (3) теперь не содержит ничего специфически квантового. Тот же результат получается и из классического волнового рассмотрения.

Уравнение (3) следует рассматривать для трех различных случаев.

1. Предположим, что

$$\frac{n\omega}{c} \cos \theta = 1 \quad (4)$$

Тогда уравнение (3) удовлетворяется лишь при условии  $\omega_0 = 0$ . Это как раз случай излучения Вавилова–Черенкова, а выражение (4) – хорошо известная формула, определяющая направление испускания света для этого излучения. Собственная частота  $\omega_0 = 0$ , необходимая для выполнения уравнения (4), означает, что движущаяся система такова, что содержит в себе источник постоянного во времени электромагнитного поля (электрический заряд, постоянный дипольный момент и т.д.). Следовательно, для того чтобы излучение Вавилова–Черенкова имело место, необходимо, чтобы такая постоянная компонента поля была отлична от нуля. При этом уравнение (4) дает связь между углом  $\theta$  и излучаемой частотой, поскольку показатель преломления  $n(\omega)$  есть функция частоты.

2. Если в уравнении (4) слева стоит величина, меньшая единицы, тогда (3) может быть удовлетворено только в случае знака минус при  $\omega_0$ , т.е.

$$\frac{n\omega}{c} \cos \theta = \frac{\omega - \omega_0}{v}, \quad \frac{n\omega}{c} \cos \theta < 1. \quad (5)$$

Это не что иное, как условие Доплера для источника света, движущегося в среде. Оно было получено еще Лоренцем при рассмотрении оптики движущихся сред. Уравнение (5) может быть, очевидно, записано в следующем обычном виде:

$$\omega = \frac{\omega_0}{1 - \frac{nv}{c} \cos \theta}. \quad (5a)$$

Оно определяет частоту в случае, когда составляющая скорость вдоль луча  $v \cos \theta$  меньше фазовой скорости света  $c/n$  для частоты  $\omega$ .

Уравнения (5) или (5a) отличаются от обычного условия Доплера для источника света, движущегося в вакууме, лишь тем, что скорость света в пустоте заменена в нем на фазовую скорость  $c/n$ . Если  $v$  мало по сравне-

нию с фазовой скоростью света, а в области частот, близких к  $\omega_0$ , дисперсия света невелика, то это не приводит к чему-либо принципиально новому. Меняется только абсолютная величина доплеровского смещения. Оно получается таким, как было бы в вакууме для скорости, равной  $nv$ , т.е. в  $n$  раз большей. Если дисперсия света в среде велика, возникают существенные особенности. Нельзя пренебрегать наличием дисперсии и при скоростях движения, сравнимых с фазовой скоростью света. Действительно, при  $n = \text{const}$  и для угла  $\theta = 0$  величина  $(nv/c)\cos\theta$  при увеличении  $v$  приближалась бы к единице, а  $\omega$ , как видно из (5а), стремилась бы к бесконечности. При еще больших скоростях знак неравенства в (5) не выполнялся бы и, следовательно, уравнение (5) не имело бы решений. В действительности, если частота возрастает, то при достаточно больших  $\omega$  показатель преломления любой среды становится практически равным единице. Следовательно, доплеровская частота в этом случае получается такой же, как в вакууме, т.е. заведомо конечной. Иными словами, при любой скорости  $v$  и любом  $\theta$  уравнение (5) обязательно имеет решение. Более того, как будет видно из дальнейшего, этих решений может быть не одно, а несколько [4; 5] (сложный эффект Доплера).

3. Третий случай имеет место, когда в левой части уравнения (4) стоит величина, большая единицы. Тогда в (3) обязательно должен быть знак плюс перед  $\omega_0$ , таким образом,

$$\frac{n\omega}{c} \cos \theta = \frac{\omega + \omega_0}{v}, \quad \frac{n\omega}{c} \cos \theta > 1. \quad (6)$$

Это обобщение формулы Доплера на случай, когда скорость излучателя превышает фазовую скорость света для излучаемой частоты [4, 14]<sup>17</sup>. Оно определяет «сверхсветовые» доплеровские частоты. Подобно эффекту Вавилова–Черенкова, сверхсветовые доплеровские частоты появляются при скорости выше некоторой пороговой. Они излучаются наряду с обычными, только при достаточно больших скоростях и в некотором интервале острых углов  $\theta$ .

<sup>17</sup> Очевидно, что уравнение (6) может быть записано в форме, аналогичной (5а). Различие состоит лишь в том, что в знаменателе правой части (5а) должен быть изменен знак на обратный.

Проведенный нами квантовый анализ показывает, что знак плюс при  $\omega_0$  в (2) и соответственно в (6) означает возбуждение системы. Таким образом, излучение сверхсветовых фотонов происходит не при переходе из верхнего, т.е. возбужденного, состояния в нижнее, как в обычном случае, а наоборот, – из нижнего в верхнее, причем энергия заимствуется из кинетической энергии поступательного движения системы [14]. Такое излучение, сопровождаемое возбуждением системы, должно происходить спонтанно, если система находится в нижнем энергетическом состоянии. Это так же возможно как спонтанный переход системы из верхнего энергетического состояния в нижнее с испусканием фотонов с частотой, удовлетворяющей (5). В самом деле, в обоих случаях переход происходит между теми же энергетическими состояниями и вопрос о том, какой из них происходит спонтанно, целиком определяется начальным состоянием и требованиями законов сохранения. При этом уравнения (5) и (6) в равной мере являются их следствиями.

Эффект Доплера в преломляющей среде может быть рассмотрен и в рамках классической физики. С точки зрения классической физики, эти результаты интерпретируются так. Колебания с собственной частотой  $\omega_0$  вызывают появление излучения с частотами, зависящими от направления распространения. Оно образует спектр доплеровских частот, который может быть двух типов. Всегда имеется излучение с частотами, удовлетворяющими (5), реакция которого на излучатель вызывает его затухание. При некоторых условиях дополнительно к первому появляется второй спектр с частотами, удовлетворяющими (6). Излучение на этих частотах стремится вызвать раскачку колебаний. Если затухание превалирует над раскачкой, то в системе, для которой уравнения классики правильны, колебания сами собой не возникнут, а если они имелись вначале, то будут затухать.

В квантовой системе положение принципиально иное. Процессы излучения квантов для спектров обоих типов следует рассматривать раздельно. Поэтому, если возможен процесс, соответствующий уравнению (6), то он обязательно будет иметь место, т.е. система будет возбуждаться за счет своей кинетической энергии, излучая свет, а затем обычным обра-

зом переходить в нижнее состояние. В принципе, возможен и двухфотонный механизм, когда фотоны обоих типов излучаются одновременно.

Таким образом, так же, как в эффекте Вавилова–Черенкова, система, обладающая собственной частотой колебаний, при сверхсветовой скорости будет затрачивать свою кинетическую энергию на излучение [14; 15].

Это можно сформулировать следующим образом: известно, что движение со скоростью, большей скорости света, в пустоте невозможно. Оно становится возможным в среде, но природа не полностью снимает свой запрет. Любая система, способная взаимодействовать с излучением, будет при сверхсветовой скорости тормозиться, излучая свет.

### О порогах излучения

Из проведенного выше анализа очевидно, что спектр излучения определяется скоростью движения системы  $v$ , ее собственной частотой  $\omega_0$  и величиной фазовой скорости света  $c/n(\omega)$  в среде, в которой происходит излучение. Как эффект Вавилова–Черенкова, так и сверхсветовой эффект Доплера возможны, как видно из (4) и (6), если  $vn(\omega)/c > 1$ . Это очевидное условие для порога их возникновения означает, что скорость движения должна превышать фазовую скорость света.

Это утверждение, правильное для изотропной среды, определяет порог излучения света данной частоты  $\omega$ , для которой показатель преломления равен  $n(\omega)$ . Так как показатель преломления зависит от частоты, то для другого  $\omega$  порог будет иной. Отсюда законна и другая постановка вопроса: при каком условии вообще становятся возможными эффект Вавилова–Черенкова и сверхсветовой эффект Доплера в данной среде?<sup>18</sup>

При излучении в среде имеется и еще одна особенность, которая также появляется при определенных пороговых условиях. Она состоит в следующем. Уравнение (3) и его следствия (4), (5), (6) не являются линейными относительно  $\omega$ . Действительно, они содержат показатель прелом-

---

<sup>18</sup> Для излучения Вавилова–Черенкова в изотропной среде этот вопрос о пороге элементарен, так как порог определяется просто максимальным значением, которое принимает показатель преломления в данной среде. Отметим существенное для дальнейшего обстоятельство, а именно, что для частоты, соответствующей  $n_{\text{макс}}$ , фазовая и групповая скорости одинаковы [см. уравнение (10), причем для  $n_{\text{макс}}$ , очевидно,  $\frac{dn}{d\omega} = 0$ ]. Таким образом, равенство пороговой скорости движения величине фазовой скорости означает ее равенство и величине групповой скорости света.

ления  $n(\omega)$ , который есть функция излучаемой частоты. В результате для данных  $\theta$ ,  $v$  и  $\omega_0$  в некоторых случаях возможно не одно, а несколько значений  $\omega$ , удовлетворяющих (3). Это значит, что в данном направлении может излучаться одновременно несколько компонент различной частоты. Появление таких дополнительных частот, т.е. так называемых сложных эффектов излучения, возможно только при определенных условиях. Они могут возникать не только в сверхсветовом эффекте Доплера и в излучении Вавилова–Черенкова, но и при обычном эффекте Доплера, подчиняющемся уравнению (5).

Л.И. Мандельштам был первым, кто обратил внимание на тот факт, что условие возникновения сложного эффекта Доплера [4] связано с величиной групповой скорости света. Как выяснилось, это утверждение имеет общий характер [5].

Если рассматривать излучение в направлении движения, то во всех перечисленных случаях условием порога возникновения излучения или его новых компонент является равенство скорости излучателя групповой скорости света для частоты, которая может излучаться [т.е. удовлетворяет условию (3)]. Эта пороговая частота должна, очевидно, удовлетворять уравнениям (4), (5) или (6), в зависимости от того, какой из видов излучения рассматривается.

Известно, что в преломляющей среде перенос энергии излучения происходит не с фазовой, а как раз с групповой скоростью. Не удивительно, что групповая скорость света существенна для процессов излучения в среде.

Тот факт, что порог излучения связан именно с групповой скоростью света, можно пояснить с помощью простых качественных соображений. Допустим, что условия возникновения излучения выполнены. Излучение возникает и забирает энергию от излучателя. Предположим теперь, что скорость движения меняется, приближаясь к пороговой. При достижении порога излучение должно исчезнуть, т.е. захват энергии излучением прекратится. При равенстве скорости движения групповой скорости света это действительно будет иметь место, так как будет происходить просто перенос энергии вместе с излучателем.

Условие возникновения сложных эффектов легко определить с помощью рассмотрения графика рис. 1. Кривая на рис. 1 представляет зависимость величины волнового вектора  $k(\omega) = \omega n(\omega)/c$  от частоты для какой-то определенной среды. Кроме кривой  $k(\omega)$  на рис. 1 показаны три прямые, уравнения которых имеют вид:

$$a_0 = \frac{\omega}{v \cos \theta}, \quad (7)$$

$$a_1 = \frac{\omega - \omega_0}{v \cos \theta}, \quad (8)$$

$$a_2 = \frac{\omega + \omega_0}{v \cos \theta}. \quad (9)$$

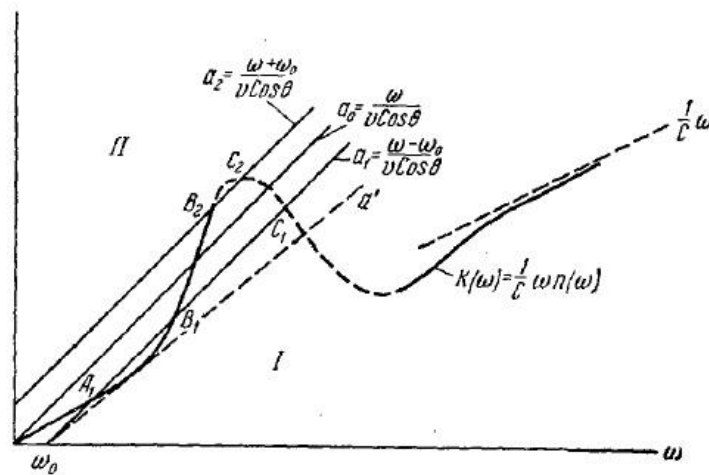


Рис. 1

Очевидно, что точки пересечения этих прямых с кривой  $k(\omega)$  определяют частоты, удовлетворяющие соответственно уравнениям (4), (5) и (6).

Тангенс угла наклона прямых  $a_0, a_1, a_2$  к оси  $\omega$  равен, очевидно,  $1/v \cos \theta$ . Мы будем предполагать в соответствии с рис. 1, что  $\cos \theta > 0$ , т.е.  $\theta \leq \pi/2$ .

Характер пересечения прямых  $a$  с кривой  $k(\omega)$  может быть различен. Если двигаться вдоль прямой в направлении увеличения  $\omega$ , то в точке пересечения прямая может переходить из области, лежащей под кривой (область I), в область, лежащую над кривой (область II). Это будет иметь место, если наклон касательной к кривой  $k(\omega)$ , т.е.  $dk/d\omega$ , меньше, чем  $\gamma = 1/v \cos \theta$  (см., например, точку  $A_1$  на прямой  $a_1$ ). Наоборот, если

$dk/d\omega > 1/(v\cos\theta)$ , то в точке пересечения происходит переход из области *II* в область *I*. Наконец,  $dk/d\omega = 1/(v\cos\theta)$  имеет место в точке касания.

Можно легко доказать, что наклон касательной к кривой  $k(\omega)$  равен обратной величине групповой скорости света. Действительно, величина групповой скорости  $W$ , как известно, подчиняется соотношению

$$\frac{1}{W} = \frac{dk}{d\omega} = \frac{1}{c} \frac{d}{d\omega} (\omega n) = \frac{1}{c} \left( n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right). \quad (10)$$

Таким образом, групповая скорость света для частот, которые могут излучаться, связана со скоростью движения  $v$  и  $\cos\theta$  соотношениями<sup>19</sup>

$$\frac{v \cos \theta}{W(\omega)} < 1 \text{ переход из } I \text{ в } II \quad (11)$$

$$\frac{v \cos \theta}{W(\omega)} > 1 \text{ переход из } II \text{ в } I \quad (12)$$

$$\frac{v \cos \theta}{W(\omega)} < 1 \text{ касание.} \quad (13)$$

При достаточно больших  $\omega$  величина  $W$  становится равной  $c$ . В самом деле, показатель преломления стремится к единице, и, значит, кривая  $k(\omega) = \omega n/c$  приближается к прямой с угловым коэффициентом  $1/c$ . Прямые  $a$  поднимаются более круто, поскольку  $v < c$  и, значит,

$$\frac{1}{v \cos \theta} > \frac{1}{c}.$$

Следовательно, все три прямые  $a$  при больших  $\omega$  лежат в области *II*.

Отсюда вытекает ряд следствий. Прежде всего очевидно, что прямая  $a$  обязательно пересекает кривую  $k(\omega)$ , т.е. уравнение (5), как уже отмечалось, всегда должно иметь решение. В самом деле, прямая  $a_1$  проходит через точку  $\omega = \omega_0$ , лежащую на оси абсцисс, и, значит, прямая где-то должна перейти из области *I* в область *II*. Более того, это означает, что в любом

<sup>19</sup> Величина, определяемая соотношением (10), имеет смысл групповой скорости света только при отсутствии сильного поглощения, т.е. в тех частях спектра, для которых среда прозрачна. Часть кривой  $k(\omega)$ , соответствующая области аномальной дисперсии, в которой поглощение заведомо имеется, показана на рис. 9 пунктиром. Особенности излучения для частот, попадающих в эту область, требуют специального рассмотрения.

случае излучается частота, для которой выполняется неравенство (11), соответствующее переходу из области  $I$  в  $II$ .

Прямые  $a_0$  и  $a_2$ , как и следовало ожидать, не всегда пересекаются с кривой  $k(\omega)$ . Для этого необходимо, чтобы их наклон к оси абсцисс был достаточно мал. Это значит, что скорость должна быть велика, а угол  $\theta$  не должен быть большим.

При больших  $\omega$  обе эти прямые также оказываются в области  $II$ . Отсюда следует, что если пересечения имеются, то, по крайней мере, последнее из них, определяющее наибольшую из излучаемых частот, соответствует переходу из области  $I$  в область  $II$ . Таким образом, вновь получаем, что в излучении имеется частота, для которой выполняется неравенство (11). Для излучения вперед, т.е.  $\theta = 0$ , это означает, что имеется компонента, для которой  $v < W$ , и, следовательно, по крайней мере для части излучения, энергия распространяется со скоростью большей, чем скорость источника света [5].

Из сказанного следует также, что если имеется частота, удовлетворяющая условию (12) (например, соответствующая точке  $B_1$  на прямой  $a_1$ ), то состав излучения обязательно сложный, так как должна быть частота или частоты, удовлетворяющие условию (11). (В общем случае число возможных пересечений для прямой  $a_1$  всегда нечетное, а для прямой  $a_2$  — всегда четное).

Границей появления излучения или новых компонент излучения является, очевидно, случай, когда соответствующая прямая  $a$  начинает касаться кривой  $k(\omega)$ . Это означает выполнение равенства (13). При  $\theta=0$  мы получаем, согласно вышесказанному, для пороговой частоты  $\nu = W$ .

Штриховая линия  $a'$  на рис. 1 соответствует порогу возникновения сложного состава излучения для обычного эффекта Доплера. Из рис. 1 видно, что частота начинает расщепляться при увеличении наклона прямой  $a_1$  по сравнению с пунктирной. Это значит, что сложный эффект Доплера возникает в данном случае не при увеличении скорости по сравнению с пороговой, а наоборот, при уменьшении ее или при увеличении угла (напомним, что тангенс наклона прямой  $a_1$  равен  $1/(v \cos \theta)$ ). Это объясняется тем, что здесь сложный эффект Доплера имеет место только в неко-



тором интервале скоростей или углов и штриховая прямая соответствует не нижнему, а верхнему порогу этого эффекта.

Все изложенное выше относится к случаю, когда угол  $\theta$  острый, т.е. что произведение  $v \cos \theta$  положительно. Можно обобщить сказанное о сложном эффекте Доплера и на случай тупых углов  $\theta$ , однако при этом придется ввести в рассмотрение отрицательную групповую скорость. Оказывается, что порог для возникновения сложного эффекта Доплера и при  $\theta > \pi/2$  определяется уравнением (13). Величина  $\cos \theta$  в этом случае отрицательна, поэтому равенство (13) может быть выполнено только при  $W$ , меньшем нуля. Смысл отрицательной групповой скорости применительно к эффекту Вавилова–Черенкова впервые был рассмотрен Пафомовым [10; 12б], который показал, что в анизотропных средах этот случай реален<sup>20</sup>. Он очень интересен. Мы привыкли к тому, что излучение Вавилова–Черенкова направлено вперед под острым углом. Однако это правильно только, если групповая скорость положительна. Если она отрицательна, то картина совершенно иная.

На рис. 2, а схематически представлен обычный случай излучения Вавилова–Черенкова. Фазовая скорость для излучаемого света  $u=c/n$  образует при этом острый угол  $\theta$  с направлением скорости  $v$ . Уравнения электродинамики допускают также и решение, схематически представленное на рис. 2, б. Направление фазовой скорости, т.е. направление распространения волн и в этом случае образует тот же острый угол  $\theta$  с вектором скорости. Однако волны идут не от излучателя, а к нему. Первый случай интерпретируют как излучение волн, а второй как их поглощение. Если нет источника энергии, питающего волны, идущие к излучателю, то случай рис. 2, б не осуществляется и решение, соответствующее ему, отбрасывают. Однако это правильно только в случае, если групповая скорость положительна, т.е. ее направление совпадает с направлением фазовой скорости (см. вектор  $W$  на рис. 2, а и 2, б). Направление потока энергии совпадает при этом с направлением фазовой скорости и, следовательно, рис. 2, а действительно соответствует излучению волн, а рис. 2, б – их поглощению. В

<sup>20</sup> Это связано с тем, что в анизотропной среде направление групповой скорости не совпадает с направлением фазовой скорости. Этот вопрос рассмотрен в следующем разделе лекции.

среде с отрицательной групповой скоростью вектор  $\mathbf{W}$  направлен навстречу вектору  $\mathbf{u}$  (среда считается оптически изотропной, и, следовательно, векторы  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{W}$  могут быть только параллельны или антипараллельны). Поэтому при  $\mathbf{W} < 0$  рис. 2, в соответствует излучению энергии, а рис. 2, г — ее поглощению. Таким образом, если групповая скорость отрицательна, то направление потока энергии излучения Вавилова–Черенкова образует тупой угол  $\theta_1 = \pi - \theta$  с направлением скорости, а движение волн направлено не от частицы, а наоборот, к ней<sup>21</sup>. Нетрудно провести аналогичное рассмотрение и для излучателя с собственной частотой  $\omega_0$ , движущегося в среде с отрицательной групповой скоростью [5; 12б].

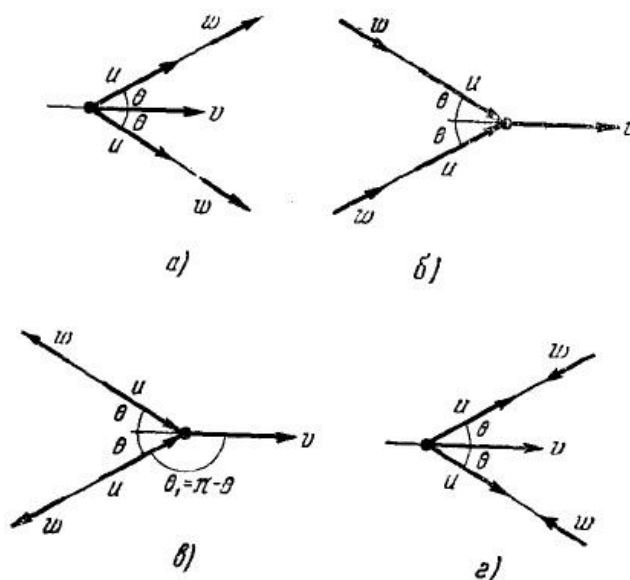


Рис. 2

Таким образом, ряд существенных особенностей излучения в преломляющей среде действительно связан не только с величиной фазовой скорости света, но также и с групповой скоростью света. Можно ожидать, что роль групповой скорости света проявится особенно отчетливо в анизотропных средах, в которых направления  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{W}$  образуют между собой некоторый угол.

<sup>21</sup> Анализ, проведенный с помощью рис. 10, во многом аналогичен рассмотренному в лекциях Л.И. Мандельштама примеру преломления света средой с отрицательной групповой скоростью (Л.И. Мандельштам. Собрание сочинений. Т. 5. С. 463).

## Излучение в оптически анизотропных средах

Излучение источника света, движущегося в кристалле, должно иметь ряд особенностей по сравнению с излучением в изотропных средах. Интерес к этому кругу вопросов в последнее время усилился в связи с изучением процессов в плазме<sup>22</sup>. В отношении распространения волн плазма, помещенная в магнитное поле, аналогична одноосному гиротропному кристаллу.

Эффект Вавилова–Черенкова в кристаллах впервые был теоретически рассмотрен В.Л. Гинзбургом [13], а затем другими авторами (см., например, обзор [8]). Экспериментально, однако, он не изучен и до сих пор.

Уравнение, определяющее излучаемую частоту  $\omega$ , остается таким же, как и в изотропной среде, т.е.  $\omega$  определяется из уравнения (4). Однако величина показателя преломления  $n$  в случае анизотропной среды зависит не только от частоты света, но также от угла  $\theta$  и поляризации света. В результате для излучения Вавилова–Черенкова конус нормалей к волновым поверхностям не круговой, как в изотропной среде, а может иметь весьма причудливую форму. При этом направление скорости вовсе не совпадает с осью конуса, а в некоторых случаях может даже лежать вне его [16].

Вторая особенность связана с поляризацией света. Излучение Вавилова–Черенкова всегда поляризовано. Как правило, на поляризацию света в этом явлении не обращают внимания, так как в современных практических приложениях этого излучения она пока не используется. Однако с точки зрения механизма явления поляризация весьма существенна. Отметим, например, что излучение магнитного заряда, если бы он существовал, можно было бы сразу отличить от излучения электрического заряда, так как в этом случае магнитный и электрический векторы менялись бы местами. Вопрос о поляризации света имеет также значение и для вполне реального, хотя еще не изученного на опыте, случая излучения диполей и мультиполей.

Роль поляризации проявляется особенно отчетливо в анизотропной среде. Прежде всего в такой среде, где в зависимости от поляризации излу-

---

<sup>22</sup> Некоторые из вопросов, связанных с плазмой, рассмотрены в нобелевской лекции И.Е. Тамма.

чаемого света может получиться не один, а два конуса волновых нормалей, соответствующих в одноосном кристалле так называемым обыкновенным и необыкновенным лучам. Более того, распределение интенсивности излучения является сложной функцией углов и связано с поляризацией света. Для наличия излучения недостаточно выполнения условия (4), так как интенсивность волн данной поляризации может оказаться равной нулю. Так, например, если частица движется в направлении оси одноосного кристалла, то в излучении должен исчезнуть конус обыкновенных лучей [8].

Третья особенность связана с тем, что в анизотропной среде направление луча, т.е. направление узкого пучка света, вообще говоря, не совпадает с нормалью к волновой поверхности. В кристалле существуют такие направления лучей, для которых нормаль к волновой поверхности образует с лучом некоторый угол  $\alpha$  (рис. 3).

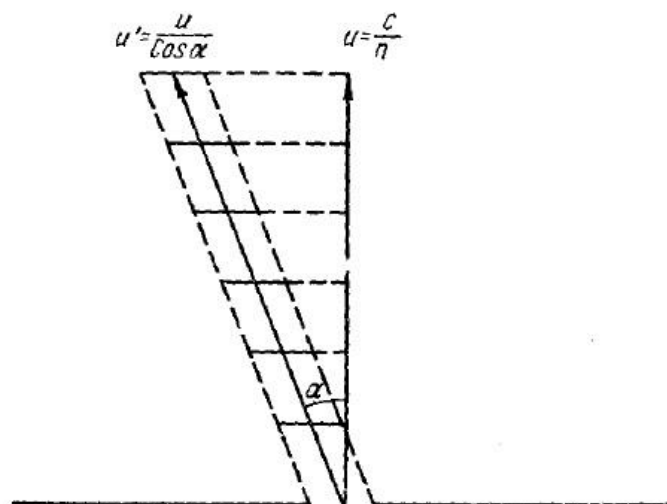


Рис. 3

Скорость, с которой распространяется фаза волны в направлении луча, как видно из рис. 3, в  $1/\cos \alpha$  раз больше, чем фазовая скорость, т.е.  $u' = u/\cos \alpha = c/(n \cos \alpha)$ . Мы будем называть  $u'$  скоростью волн вдоль луча. Ее не следует путать с групповой скоростью света, т.е. со скоростью переноса световой энергии, которая также, разумеется, направлена по лучу. Групповая скорость равняется скорости  $u'$  только при условии, что дисперсия света в среде отсутствует. В самом деле, при этом скорость волн вдоль луча не зависит от частоты, и, значит, группа волн движется с той же скоростью  $u'$ .

Скорость волн вдоль луча  $u'$  существенна для излучения в анизотропных средах. Рассмотрим в связи с этим вопрос о пороговой скорости для возникновения эффекта Вавилова–Черенкова. Утверждение, что излучение Вавилова–Черенкова для света частоты  $\omega$  возникает при скорости, большей фазовой скорости света для этой частоты, по существу предполагает, что среда изотропна. Если считать его применимым к анизотропным средам, а это, как мы увидим, допустимо не всегда, то во всяком случае необходимо указать, с каким направлением фазовой скорости следует сравнить скорость движения.

Уравнение (4), т.е.  $(vn/c) \cos\theta = 1$ , правильно и для анизотропных сред, причем в этом случае  $c/n = u$  есть фазовая скорость для данного направления волновой нормали, образующей с вектором  $\mathbf{v}$  угол  $\theta$ . Как известно, в изотропной среде при приближении скорости к пороговой угол  $\theta$  уменьшается до нуля, т.е. конус волновых нормалей сжимается к линии направления  $\mathbf{v}$ . В кристалле конус волновых нормалей в этом случае также сжимается к некоторой оси, однако, как правило, не совпадающей с  $v$ . Если этой осью является направление скорости, то пороговое  $\theta = 0$ , и тогда из уравнения (4) получим, что  $v = c/n$ , где  $c/n$  берется для направления  $\mathbf{u} = c/\mathbf{n}$ , совпадающего с  $\mathbf{v}$ . Таким образом,  $\mathbf{v} = \mathbf{u}$ . Это соотношение для граничной скорости действительно оказывается правильным в обычно рассматриваемых случаях движения источника в одноосном кристалле параллельно или перпендикулярно к оптической оси. Однако не было обращено внимание на то, что оно применимо не всегда.

Можно показать, что общее условие для появления излучения Вавилова–Черенкова частоты  $\omega$  следует формулировать так: пороговая скорость источника света должна равняться скорости волн вдоль луча, направленного по движению, т.е. пороговая скорость  $\mathbf{v} = \mathbf{u}'$ . У порога появления излучения направление луча совпадает с вектором скорости  $\mathbf{v}$ , а нормаль к волне образует с  $\mathbf{v}$  угол  $\alpha$ . Таким образом, в общем случае пороговая величина  $\theta = \alpha$ .

В частном случае, когда в анизотропной среде направление луча совпадает с волновой нормалью, т.е.  $\alpha = 0$ , тогда  $u' = u$ , и для граничной скорости имеем  $\mathbf{v} = \mathbf{u}$ . Наконец, в изотропной среде, где фазовая скорость

света  $u$  одинакова для всех направлений, можно от векторов перейти к скалярным величинам  $v$ , значит,  $v = u$ . Таким образом, общеизвестное утверждение, что пороговой скоростью является скорость, равная фазовой скорости света, имеет ограниченную область применения. Оно является частным случаем более общего условия.

Сказанное поясним, используя принцип Гюйгенса для построения волновой поверхности излучения. Таким построением и сейчас обычно пользуются при элементарном описании эффекта Вавилова–Черенкова, а в свое время оно послужило одной из руководящих идей для создания его теории. Нетрудно обобщить такое построение на случай анизотропной среды.

В кристаллооптике часто пользуются принципом Гюйгенса, чтобы пояснить особенности поведения так называемого необыкновенного луча при преломлении света. Волновую поверхность по принципу Гюйгенса находят как огибающую волн, испущенных из отдельных точек. Однако, если в изотропной среде вокруг каждой точки строится сфера радиуса  $r = (c/n)t$ , где  $t$  – время перемещения волн, то в кристалле следует поступать иначе. Существенным является расстояние, на которое волна переместится из данной точки в данном направлении луча. Это расстояние равно скорости волн вдоль луча, умноженной на время  $t$ , т.е.  $u't$ . Поэтому неизвестной характеристикой является огибающая так называемых поверхностей лучей, построенных вокруг каждого источника волн и определяемых уравнением  $\mathbf{r} = \mathbf{u}'t$ .

Применим принцип Гюйгенса для случая излучения Вавилова–Черенкова в одноосном кристалле. Скорости обыкновенного и необыкновенного лучей здесь не одинаковы и поэтому, вообще говоря, получаются два конуса волн, которые показаны на рис. 4 и 5. Все точки траектории частицы мы должны считать источником волн. При этом фаза волн задается моментом прохождения частицы через данную точку. Допустим, что излучатель в момент  $t = -t_3$  находился в точке  $A_3$ , в момент  $t = -t_2$  – в  $A_2$ , при  $t = -t_1$  – в  $A_1$  и, наконец, в момент наблюдения  $t = 0$  в точке  $A_0$ .

Для обыкновенных лучей скорость волн вдоль луча, так же как в изотропной среде, равна фазовой скорости света  $c/n$  и не зависит от

направления. Поверхности лучей – просто сферы, радиус которых для точек  $A_3$ ,  $A_2$ ,  $A_1$  и  $A_0$  равен соответственно  $(c/n)t_3$ ,  $(c/n)t_2$ ,  $(c/n)t_1$  и 0 (рис. 4). Огибающая этих сфер – это, очевидно, конус кругового сечения с вершиной в  $A_0$ <sup>23</sup>. Образующие его, лежащие в плоскости чертежа, –  $A_0B$  и  $A_0B'$ .

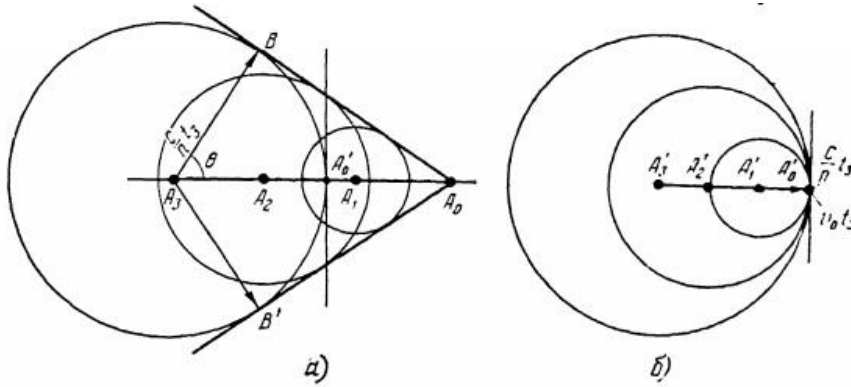


Рис. 4

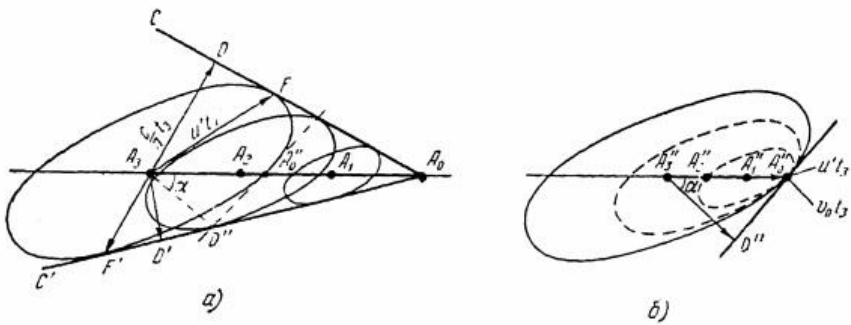


Рис. 5

Направления лучей по принципу Гюйгенса определяют радиусы-векторы, проведенные из какого-либо центра волн в точки касания с огибающей поверхностью. На рис. 4 это, например,  $A_3B$  или  $A_3B'$ , совпадающие для обыкновенных лучей с образующими конуса волновых нормалей. Таким образом, для обыкновенных лучей конус излучения Вавилова–Черенкова получается так же, как в изотропной среде. Существенное различие от изотропной среды связано с поляризацией света и зависящим от

<sup>23</sup> Строго говоря, при таком рассмотрении предполагается, что происходит суперпозиция монохроматических волн. Каждую точку траектории следует поэтому считать источником таких волн, испускаемых бесконечно долго. В действительности лишь сложение волн различной частоты создает световой импульс, возникающий в момент прохождения частицы через данную точку. Поэтому существует, конечно, не одна, а неограниченно много волновых поверхностей для волн данной частоты. Та, которая обычно строится, выделена лишь тем, что она проходит через точку мгновенного положения частицы (будем называть ее волновым конусом).

нее распределением интенсивности. При таком построении это не учитывается.

Из рис. 4 нетрудно определить величину пороговой скорости. При уменьшении скорости расстояния между точками  $A$  уменьшаются. Пороговым является случай, когда точка  $A_0$  займет положение  $A'_0$  на поверхности сферы (этот случай представлен отдельно на рис. 4, *a*.) При меньших скоростях сферы будут полностью лежать одна внутри другой и не будут иметь общей огибающей. В пороговом случае они имеют только общую точку касания  $A'_0$ . При этом, очевидно,  $(c/n)t_3 = v_0 t_3$ , т.е.  $v_0 = c/n$ . Конус волновых нормалей сжимается к направлению скорости  $\mathbf{v}$ , а волновой конус превращается в плоскость, перпендикулярную к оси движения в точке  $A'_0$  (см. рис. 4, *a*).

Аналогичным образом может быть использован принцип Гюйгенса и для получения волнового конуса необыкновенных лучей (см. рис. 5). Различие состоит в том, что вокруг точек  $A_3$ ,  $A_2$  и  $A_1$  вместо сфер строятся поверхности лучей  $\mathbf{u}'t_3$ ,  $\mathbf{u}'t_2$  и  $\mathbf{u}'t_1$ . Конус с вершиной в  $A_0$ , огибающий эти поверхности, в случае, представленном на рис. 5, не является круговым. В плоскости чертежа лежат образующие этого волнового конуса  $A_0C$  и  $A_0C'$ . Перпендикуляры, опущенные на них, например  $A_3D$  и  $A_3D'$ , определяют волновые нормали, а их длина пропорциональна фазовым скоростям. Векторы, проведенные из  $A_3$  в точки касания  $A_3F$  и  $A_3F'$ , дают соответствующие им направления лучей, которые, как видно из рис. 5, не совпадают с волновыми нормальями. Из рисунка видно также, что направление необыкновенного луча для излучения Вавилова–Черенкова в кристалле может даже составлять тупой угол с направлением скорости (направление  $A_3F'$  на рис. 5).

Нетрудно определить величину пороговой скорости для появления в излучении Вавилова–Черенкова необыкновенных лучей, которая, вообще говоря, отлична от пороговой скорости для обыкновенных лучей. Пороговый случай будет иметь место, когда скорость уменьшится настолько, что точка  $A_0$  совместится с точкой  $A''_0$ . При этом все поверхности лучей лежат одна внутри другой и имеют общую точку касания  $A''_0$ . Из рис. 5 или 5, *a*, на котором изображен пороговый случай, видно, что пороговое  $\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 = \mathbf{u}'$ .



Волновой конус превращается при этом в плоскость  $A_0''D''$ , а волновая нормаль образует с направлением  $v$  угол  $\alpha$ . Если проследить, что происходит с конусом волновых нормалей (на рис. 5 его образующие –  $A_3D$  и  $A_3D'$ ) при уменьшении скорости, т.е. при приближении точки  $A_0$  к  $A_0''$ , то нетрудно убедиться, что он сжимается не к направлению  $v$ , а к направлению  $A_3D''$ . Таким образом, в пороговом случае в уравнении (4) надо полагать не  $\theta = 0$ , а  $\theta = \alpha$ . Тогда уравнение (4) дает  $(vn/c) \cos \alpha = 1$ , т.е. действительно

$$v = \frac{c}{n \cos \alpha} = u'.$$

Напомним, что с помощью рис. 4 и 5 мы определили порог появления света некоторой данной частоты  $\omega$ . Скорость, при которой вообще появляется излучение, определяется минимальной в данной среде величиной скорости волн  $u' = u'_{\text{мин}}$  вдоль луча, направленного по движению. Для частоты  $\omega'$ , для которой  $u' = u'_{\text{мин}}$ , скорость волн вдоль луча не зависит от частоты и, значит, равна групповой скорости. Таким образом, снова приходим к выводу, что порог связан с групповой скоростью.

Рассмотрение излучения системы, обладающей собственной частотой колебаний  $\omega_0$ , также может быть распространено на случай оптически анизотропной среды. Здесь проявляются те же особенности, о которых говорилось в связи с излучением Вавилова–Черенкова. Связь между  $\omega$ ,  $\theta$ ,  $v$  и  $\omega_0$  по-прежнему определяется уравнениями (5) и (6), как и в изотропной среде, но под величиной  $n$  надо понимать его значение для направления волновой нормали под углом  $\theta$  к скорости.

Зависимость  $n$  от направления приводит к тому, что связь между  $\theta$  и частотой излучения  $\omega$  при заданных собственной частоте  $\omega_0$  и скорости  $v$  не является элементарной. Для нахождения  $\theta$  можно воспользоваться графическим методом, предложенным В.Е. Пафомовым [16] при рассмотрении эффекта Вавилова–Черенкова в кристаллах, обобщив его на случай произвольного  $\omega_0$ . На рис. 6 представлено сечение поверхности волновых векторов  $\mathbf{k}(\omega) = \omega \mathbf{n}/c$  для данного  $\omega$  в случае необыкновенных лучей в одноосном кристалле. Эта поверхность, дающая зависимость векторов  $\mathbf{k}$  от направления (они ориентированы по нормали к волне), отличается от поверхности показателей преломления только постоянным множителем  $\omega/c$

(величину  $\omega$  считаем заданной). Таким образом, для одноосного кристалла эта поверхность есть эллипсоид вращения. Допустим, что ось  $\mathbf{v}$  есть направление движения излучателя. Отложим на оси  $\mathbf{v}$  отрезок  $OA$  длины  $b$ , равной  $b_0$ ,  $b_1$  или  $b_2$  в зависимости от того, рассматривается ли эффект Вавилова–Черенкова, обычный эффект Доплера или сверхсветовой эффект Доплера. При этом

$$b_0 = \frac{\omega}{v}, \quad (14)$$

$$b_1 = \frac{\omega - \omega_0}{v}, \quad (15)$$

$$b_2 = \frac{\omega + \omega_0}{v}. \quad (16)$$

В точке  $A$ , являющейся концом отрезка  $b$ , построим плоскость  $a$ , перпендикулярную к оси  $\mathbf{v}$ . Кривую пересечения этой плоскости с поверхностью  $k(\omega)$  будем рассматривать как сечение некоторого конуса с вершиной в  $O$ . В плоскости рис. 6 лежат образующие этого конуса  $OC$  и  $OC'$ . Этот конус определяет величину и направление векторов  $\mathbf{k}$  для света частоты  $\omega$ , возникающего в рассматриваемом случае, т.е. для данного вида излучения при заданных  $\omega_0$  и  $v$ .

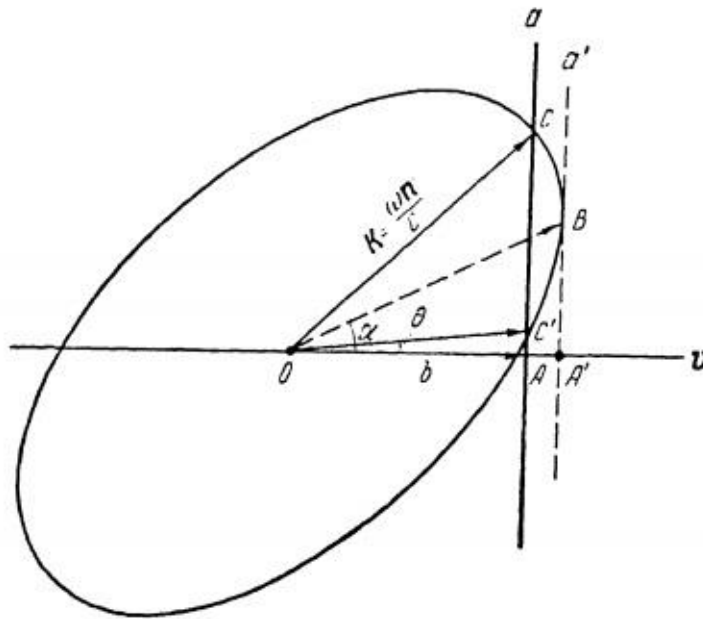


Рис. 6

В самом деле, из рис. 6 видно, что  $OA$  есть проекция вектора  $OC$  или  $OC'$ , т.е. вектора  $k = \omega n(\omega, \theta) / c$ ; таким образом,

$$\frac{\omega n(\omega, \theta)}{c} \cos \theta = b. \quad (17)$$

Подставляя вместо  $b$  его значения из (14), (15) или (16), получаем тождественно уравнения (4), (5) или (6).

Из рис. 6 видно, что конус волновых нормалей действительно может быть не только асимметричным, но даже, как об этом уже упоминалось, ось  $v$  может лежать вне конуса.

Плоскость  $a$  не всегда пересекается с поверхностью  $k(\omega)$ . Это соответствует тому очевидному факту, что не всякая частота излучается при данных  $v$  и  $\omega_0$ . Если  $b = b' = OA'$  (см. рис. 6), то плоскость касается поверхности, и, следовательно,  $b' = OA'$  является граничной для появления в спектре данной частоты  $\omega$ . Вектор  $\mathbf{k}$ , т.е. нормаль к волне, совпадает при этом с  $OB$ . Нетрудно показать, что она образует угол  $\alpha$  с направлением скорости, причем направление луча совпадает с направлением движения. Если положить в соответствии с этим в уравнении (3) угол  $\theta = \alpha$ , то для скорости  $v_0$ , необходимой для появления частоты  $\omega$ , получим общее условие

$$\frac{\omega}{u'} = \frac{\omega \pm \omega_0}{v_0}, \quad (18)$$

где  $u'$  – скорость волн вдоль оси  $\mathbf{v}$  (положительная или отрицательная, т.е. направленная по  $\mathbf{v}$  или против нее). В частном случае излучения Вавилова–Черенкова  $\omega_0 = 0$ .

Излучение системы, имеющей собственную частоту колебаний и движущейся в оптически-анизотропной среде, впервые было рассмотрено в работе К.А. Барсукова и А.А. Коломенского [17]. Они обнаружили ряд особенностей излучения, связанных с наличием обыкновенных и необыкновенных лучей и существенной ролью поляризации волн.

Примечательно, что именно этот, казалось бы более сложный, случай, по-видимому, уже сейчас интересен с экспериментальной точки зрения. Барсуковым и Коломенским специально рассмотрен вопрос об излучении радиоволн в ионосфере, которая под действием магнитного поля Земли ведет себя как оптически-анизотропная среда. Существенно, что в

некоторой области частот эта среда обладает сильной дисперсией и в ней возможен сложный эффект Доплера. Коломенский и Барсуков пришли к выводу, что сложный эффект Доплера возможен для радиоволн определенной частоты, испускаемых искусственным спутником Земли, движущимся в ионосфере. Они определили, что доплеровское смещение может составлять от десяти до ста герц и сопровождаться в этом случае расщеплением излучаемой частоты

на компоненты, отстоящие друг от друга на несколько сотых герца. По-видимому, при хорошо стабилизированной частоте передатчика такое расщепление может быть обнаружено.

\*\*\*

Я стремился показать в своей лекции, что имеется широкий круг вопросов, связанных с излучением источников света, движущихся в преломляющих средах. Излучение электрического заряда, движущегося со сверхсветовой скоростью в изотропной среде, т.е. экспериментально изученный случай эффекта Вавилова–Черенкова, по существу, является лишь частным, хотя и очень интересным примером этой области явлений.

### Список литературы

1. П.А. Черенков, ДАН 2, 451 (1934); С.И. Вавилов, ДАН 2, 457 (1934); П.А. Черенков, Труды Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР 2, № 4 (1944).
2. И.Е. Тамм и И. М. Франк, ДАН 14, 107 (1937).
3. В.Л. Гинзбург, ЖЭТФ 10, 589 (1940); *J. Phys.* 2, 441 (1940).
4. И.М. Франк, Известия АН СССР, сер. физ., 6, 3 (1942); *J. Phys.* 7, 49 (1943).
5. И.М. Франк, ЖЭТФ 36, 823 (1959), Объединенный институт ядерных исследований Р-237 (1958).
6. E. Fermi, *Phys. Rev.* 57, 485 (1940).
7. И.М. Франк, Сборник «Памяти С. И. Вавилова», Изд. АН СССР, М., 1952.
8. Б.М. Болотовский, УФН 62, 201 (1957).
9. В.Л. Гинзбург и И. М. Франк, ДАН 56, 699 (1947).
10. В.Л. Гинзбург, В. Я. Эйдман, ЖЭТФ 35, 1509 (1958); Л. С. Богданкевич, ЖТФ 29, 1086 (1959).

11. В.Л. Гинзбург и И. М. Франк, ЖЭТФ 16, 15 (1946).
12. а) Г.М. Гарибян, ЖЭТФ 33, 1403 (1957); б) В.Е. Пафомов, ЖЭТФ 36, 1855 (1959).
13. В.Л. Гинзбург, ЖЭТФ 10, 608 (1940); J. Phys. 3, 101 (1940).
14. В.Л. Гинзбург и И.М. Франк, ДАН 56, 583 (1947).
15. И.М. Франк, УФН 30, 149 (1946).
16. В.Е. Пафомов, Диссертация, ФИАН, М., 1957; ЖЭТФ 32, 366 (1957); 37 № 6 (1959).
17. К.А. Барсуков и А. А. Коломенский, ЖТФ 29, 954(1959).
18. J.V. Jelley, Cerenkov Radiation and its Applications, Pergamon Press, London, 1958.



*Павел Алексеевич Черенков*

*(1904–1990)*

## БИОГРАФИЯ<sup>24</sup>

Павел Алексеевич Черенков (1904–1990) родился в Новой Чигле в Воронежской области 28 июля. Его родители, Алексей и Мария Черенковы, были крестьянами. В 1928 г. Павел Черенков закончил физико-математический факультет Воронежского государственного университета. В 1930 г. он получил должность старшего научного сотрудника Физического института им. П.Н. Лебедева Академии наук СССР. Вскоре П.А. Черенков стал руководителем отдела, а в 1940 г. ему была присуждена степень доктора физико-математических наук. В 1953 г. ему было присвоено академическое звание профессора экспериментальной физики. С 1959 г. П.А. Черенков возглавлял лабораторию фотомезонных процессов в Физическом институте им. Лебедева. В течение 14 лет он также занимался преподаванием в различных учреждениях системы высшего образования.

В 1934 г., когда он работал под руководством С.И. Вавилова, Черенков обнаружил явление излучения голубого света водой, облучаемой радиоактивным излучением радия. Названное в его честь «эффектом Черенкова», это явление возникает при движении в какой-либо среде заряженных элементарных частиц со скоростью, превышающей скорость света в данной среде. Данный эффект позднее оказался очень важен для проведения экспериментальных исследований в ядерной физике и при изучении космических лучей. Детекторы Черенкова стали стандартным элементом оборудования для исследования атома. Они используются для регистрации и наблюдения релятивистских заряженных частиц и измерения их скорости. Одно из подобных устройств было установлено на «Спутнике 3» – третьем искусственном спутнике Земли. Черенков также принимал участие в проектировании и постройке ускорителей электронов и в исследовании фотоядерных и фотомезонных реакций.

---

<sup>24</sup> Павел Алексеевич Черенков (1904–1990). Биография / пер. с англ. А. Капанова // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 4 : 1951–1959. – С. 444–445. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

П.А. Черенкову дважды присуждалась Государственная премия СССР – в 1946 г. (совместно с С.И. Вавиловым, И.М. Франком и И.Е. Таммом) и в 1951 г.

В 1930 г. П.А. Черенков женился на Марии Путинцевой, дочери профессора русской литературы А.М. Путинцева. У них родилось двое детей – сын Алексей и дочь Елена.

Павел Алексеевич Черенков скончался в возрасте 85 лет 6 января 1990 г.



*Павел Черенков*

## **ИЗЛУЧЕНИЕ ЧАСТИЦ СВЕРХСВЕТОВОЙ СКОРОСТИ И НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭТОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ<sup>25</sup>**

*Нобелевская лекция, 11 декабря 1958 г.*

Замечательные свойства излучения, возникающего при движении в веществе быстрых заряженных частиц, известны и изучаются уже на протяжении 25 лет. Еще в 1934 г. С.И. Вавиловым и мной были опубликованы два сообщения [1; 2], в которых было указано, что  $\gamma$ -лучи радия, наряду с люминесценцией растворов, вызывают также и слабое видимое свечение самих растворителей.

В этих сообщениях были описаны универсальность этого свечения, его необычные свойства и сделан вывод о том, что на основании имеющихся у него свойств обнаруженное свечение не может быть люминесценцией.

Дальнейшими экспериментами было установлено, что это свечение производится не  $\gamma$ -лучами непосредственно, а быстрыми электронами, образуемыми при комптоновском рассеянии  $\gamma$ -лучей. Попытки получить свечение с такими же свойствами под действием лучей Рентгена ( $h\nu_{max} = 30$  кэВ) были безрезультатными.

Начнем с того, что наличие подобного свечения растворителей не могло представлять специального интереса, поскольку свечение не только твердых тел, но и жидкостей, и притом под действием самых разнообразных причин, представляет явление весьма распространенное. Кроме хорошо известных «классических» примеров люминесценции, можно указать, например, на слабое свечение практически весьма «чистых» жидкостей, наблюдаемое при облучении их ультрафиолетовым светом [3]; многие жидкости светятся под действием рентгеновских лучей [4]; установле-

---

<sup>25</sup> Черенков, П.А. Излучение частиц сверхсветовой скорости и некоторые возможности применения этого излучения в экспериментальной физике : нобелевская лекция, Стокгольм, 11 декабря 1958 г. / П.А. Черенков // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 4 : 1951–1959. – С. 425–443. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

но свечение жидкостей даже под действием ультразвуковых волн [5]. Еще со времен первых работ Пьера и Марии Кюри известны многочисленные факты свечения как жидкостей, так и твердых тел под действием радиоактивных излучений [6].

Как правило, свечения подобного рода являются обычной люминесценцией и, в случае так называемых «чистых» жидкостей, обусловлены присутствием в них ничтожных количеств посторонних примесей, способных люминесцировать. Поэтому было естественно предположить, что и то свечение, которое вызывается  $\gamma$ -лучами, также относится к одному из видов люминесценции. Так полагали Пьер и Мария Кюри, которые, несомненно, одни из первых наблюдали это свечение, правда, в условиях, когда оно было довольно сильно завуалировано обычной люминесценцией. Позднее и другие наблюдатели придерживались этой же точки зрения. В их числе был и Малле [7], который, помимо наблюдения самого факта свечения, сфотографировал и его спектр.

Однако более детальное количественное изучение этого свечения обнаружило ряд таких замечательных его свойств, которые с несомненностью указывали, что в данном случае имеет место не тривиальная люминесценция, а явление совершенно новой природы, представляющее первостепенный интерес как по своему научно-принципиальному значению, так и по разнообразным возможностям его практического использования.

Между тем было бы ошибкой считать, что причиной того, что столь характерное явление не было обнаружено гораздо раньше, является случайный «недосмотр». Необычную природу найденного явления можно было установить только в результате количественных измерений наиболее важных характеристик излучения, выявления их зависимости от определенных условий, меняемых в процессе опыта.

В настоящее время, когда в распоряжении экспериментаторов имеются мощные источники быстрых заряженных частиц и весьма чувствительные средства регистрации, подобные измерения не представляют собой сложности. Но несколько десятилетий назад возможности, которыми располагали физики, были не столь благоприятны. Тогда в качестве источника заряженных частиц могли быть использованы только естествен-

ные радиоактивные препараты, интенсивность которых была довольно низкой. Поэтому и яркость свечения жидкостей<sup>26</sup> получаемая с их помощью, была настолько слабой, что заметить свечение оказывалось возможным только после некоторого пребывания наблюдателя в полной темноте. Очевидно, что в этих условиях не ставился вопрос об использовании для количественных измерений обычных методов фотометрии<sup>27</sup>. Для проведения измерений такого рода требовался новый, гораздо более чувствительный метод.

В Физическом институте Академии наук СССР, где это явление было открыто, использовался метод визуальной фотометрии по порогу зрения, разработанный незадолго перед тем Е.М. Брумбергом и С.И. Вавиловым для количественных измерений квантовых флуктуаций света [8]. В этом методе в качестве прибора для регистрации света использовался глаз человека<sup>28</sup>. В связи с тем, что светочувствительность глаза, адаптированного к темноте, по крайней мере в десятки тысяч раз превышает его чувствительность при дневном зрении, этот метод по своей высокой чувствительности намного превосходил другие методы. Несмотря на свою субъективность и сравнительно большие ошибки измерений, в то время этот метод был единственным методом, пригодным для количественных измерений тех чрезвычайно слабых интенсивностей свечения, с которыми приходилось иметь дело. Важно отметить, что именно переход к количественным измерениям позволил впервые выявить необычные свойства рассматриваемого излучения и таким образом установить его особое происхождение. Выше уже отмечалось, что первой, наиболее вероятной гипотезой относительно природы свечения является предположение о люминесценции. Правильность такого предположения могла быть установлена

---

<sup>26</sup> Изучение рассматриваемого эффекта проводилось главным образом на жидкостях, так как жидкости легче очищаются от люминесцирующих примесей. При работе с ними проще менять такие параметры, как вязкость, коэффициент преломления, плотность и т.д. Кроме того, в этом случае значительно упрощаются опыты по «тушению» люминесценции.

<sup>27</sup> Напомним, что фотоумножители тогда еще не были разработаны.

<sup>28</sup> В основе «метода гашения», теперь уже представляющего исторический интерес, лежат следующие свойства сумеречного зрения человека:

а) наличие зрительного порога;

б) постоянство значения пороговой энергии для одного и того же наблюдателя (при стандартных условиях).

только путем экспериментального выяснения наличия (или отсутствия) у рассматриваемого свечения признаков, свойственных люминесценции. Существует, однако, большое многообразие свечений люминесценции, отличающихся способом возбуждения, длительностью высвечивания, характером спектра, свойствами люминесцирующих веществ и др. признаками. Очевидно, что в данном случае важным является установление наличия или отсутствия не вообще признаков люминесценции, а общих признаков, являющихся для люминесценции необходимыми.

Одним из таких признаков люминесценции, как это отметил С.И. Вавилов, является конечная длительность ( $\tau > 10^{-10}$  с) возбужденных состояний. Это свойство люминесценции позволяет воздействовать на ход процесса высвечивания. Можно, например, значительно ослабить яркость или, как принято говорить, «потушить» люминесценцию либо нагреванием люминесцирующего раствора, либо растворением в нем веществ, способных тушить люминесценцию. В обоих случаях ослабление люминесценции происходит вследствие передачи энергии от возбужденных частиц невозбужденным с дальнейшим переходом ее в тепловую.

Таким же образом можно изменять поляризацию люминесценции, меняя подвижность частиц, например, путем нагревания. Соответствующие опыты показывали, однако, что свечение жидкостей не меняет своей яркости ни при нагревании, ни при растворении в них таких активных тушителей флюоресценции, как йодистый калий, азотнокислое серебро и др. При этом было показано, что обнаруженная у этого свечения заметная поляризация также не меняется. Существенно отметить, что опыты с тушением заведомо флюоресцирующих растворов (например, раствор эскулина в воде), проводившиеся параллельно и в тех же условиях, во всех случаях обнаруживали заметный эффект тушения.

Эти результаты доказывали, что процесс высвечивания практически безынерционен и, таким образом, исключали гипотезу люминесценции. Этот вывод находил подтверждение также и в необычном характере поляризации этого свечения. Преимущественное направление вектора электрических колебаний оказалось не перпендикулярным к возбуждающему

пучку лучей, как это должно было бы быть для поляризованной флюоресценции, а параллельным ему.

Совокупность результатов, полученных уже на первом этапе исследования, позволила установить, что свечение, создаваемое в жидкостях  $\gamma$ -лучами, не является тривиальным. Однако эти данные оказались недостаточными для создания на их основе правильной теории явления. Решение вопроса пришло несколько позднее, после того как в 1936 г. было открыто новое, наиболее замечательное свойство излучения – его направленность [9; 10].

Оказалось, что свечение обладает резко выраженной пространственной асимметрией. Оно испускается только вперед в направлении, образующем некоторый угол с направлением возбуждающего пучка  $\gamma$ -лучей. Установление этого фундаментального свойства излучения оказалось решающим для выяснения его истинной физической природы и создания теории явления. Созданием этой теории мы обязаны И.М. Франку и И.Е. Тамму [11].

В этой теории рассматриваемое свечение интерпретируется как излучение электронов, равномерно движущихся в веществе со скоростью, превышающей фазовую скорость света в этой среде. Интересно отметить, что на возможность излучения частицы, движущейся со сверхсветовой скоростью, обратил внимание еще в 1901 г. лорд Кельвин [12]. Несколько позднее, в 1904–1905 гг., накануне появления теории относительности, Зоммерфельд теоретически рассмотрел гипотетический случай движения электрона в вакууме со сверхсветовой скоростью [13]. Однако появление теории относительности, согласно которой материальные тела не могут двигаться со скоростью, равной или большей скорости света, сделало выводы Зоммерфельда мало актуальными. Вероятно, это обстоятельство в известной мере послужило причиной того, что задача о движении заряженных частиц в веществе со сверхсветовой скоростью вообще не рассматривалась, как противоречащая теории относительности. Между тем именно при движении в веществе возможны скорости, превышающие скорость света, без какого-либо противоречия теории относительности. Это связано с тем, что в веществе скорость распространения световых

волн отличается от скорости света  $c$  в вакууме в  $n$  раз, где  $n$  – показатель преломления среды, в которой происходит движение. Так как для видимого света  $n > 1$ , то, следовательно, скорость распространения световых волн в веществе, равная  $c/n$ , будет меньше скорости света  $c$  в вакууме.

С другой стороны, давно уже известно, что скорость  $\beta$ -частиц, испускаемых радиоактивными веществами, может быть весьма близка к  $c$ . Для этих частиц скорость их движения в веществе может быть больше скорости света  $c/n$  в этом веществе, оставаясь в то же время меньше  $c$ , в полном соответствии с требованиями теории относительности. Поэтому движение частиц со сверхсветовой скоростью не только принципиально возможно, но может быть получено экспериментально.

Если предположить, что скорость электрона, движущегося в среде, больше скорости света, можно на основе простых качественных экспериментов получить условие возникновения излучения и установить некоторые весьма важные его свойства. Действительно, пусть электрон равномерно движется в среде в направлении оси  $z$  со скоростью  $v > c/n$ . В каждой точке, через которую проходит электрон, им будет вызвано электромагнитное возмущение, распространяющееся из этих точек как запаздывающая волна. Рассматривая компоненты определенной частоты  $\omega$  для волн, выходящих из различных точек траектории электрона в некотором направлении  $\theta$  (рис. 1), можно легко убедиться, что во всех направлениях, кроме направления, для которого

$$vt \cos \theta = \frac{c}{n} t,$$

или

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}, \quad (1)$$

волны погасятся вследствие интерференции. В направлении же, удовлетворяющем условию (1) волны придут к наблюдателю с оптической разностью хода, равной нулю, и, следовательно, в этом направлении будет происходить излучение. В акустике аналог этого излучения существует в виде так называемой баллистической волны, образуемой летящим со сверхзвуковой скоростью снарядом или самолетом (волны Маха). Анало-

гом поверхностной волны является хорошо знакомая всем носовая волна корабля.

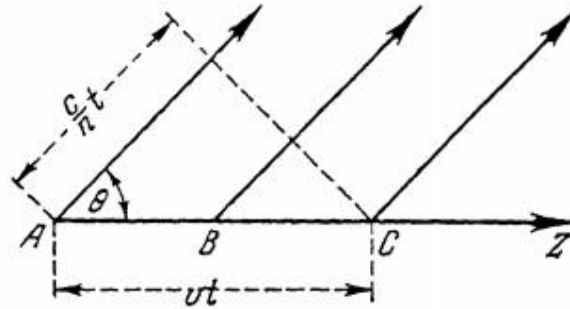


Рис. 1. Механизм излучения

Из равенства (1), которое представляет один из важнейших результатов теории Тамма и Франка, следует, что излучение возможно только при условии  $\beta n > 1$ , т.е. если скорость частицы  $v$  больше скорости света  $c/n$ . При  $\beta n < 1$ , или  $\beta < 1/n$ , излучения не происходит. Таким образом, равенство  $\beta n = 1$  определяет энергетический порог излучения. Значение  $E$  этого порога зависит от коэффициента преломления  $n$ . Так как для определения этого порога требуется не энергия непосредственно, а скорость частицы  $\beta$ , то очевидно, что  $E$  зависит от массы частицы.

Для иллюстрации сказанного в нижеследующей таблице приводятся значения пороговой энергии  $E$  для электронов,  $\pi$ -мезонов и протонов при трех значениях  $n$ .

Вид частиц	Значения пороговой энергии в МэВ		
	$n = 1,3$	$n = 1,5$	$n = 2$
	$(\beta = 0,769)$	$(\beta = 0,667)$	$(\beta = 0,5)$
Электроны	0,29	0,2	0,078
$\pi$ -мезоны	79	47	21,5
Протоны	520	320	143

Теоретическая зависимость между величинами  $\theta$ ,  $\beta$  и  $n$ , выражаемая соотношением (1), была проверена экспериментально. Полученные результаты полностью согласовывались с выводами теории. Схема соответствующего опыта по определению этой зависимости изображена на рис. 2. Пучок  $\gamma$ -лучей падает на тонкостенный сосуд  $A$  с жидкостью (рис. 2). Возникающее в этой жидкости излучение по выходе из сосуда падает на ко-

ническое зеркало и, отражаясь от него, попадает на объектив фотоаппарата. Люминесценция, не обладающая свойствами асимметрии, дает изображение, имеющее форму замкнутого кольца. С другой стороны, излучение частиц сверхсветовой скорости дает изображение не в виде сплошного кольца, а в виде двух пятен, угол между которыми равен  $2\theta$ .

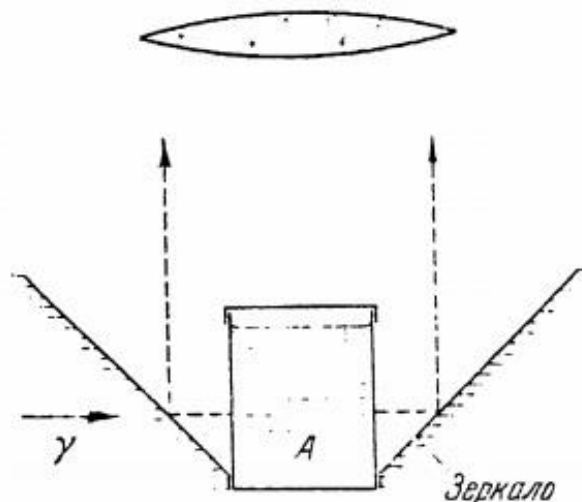


Рис. 2. Схема опыта для определения углового распределения интенсивности излучения

На рис. 3 приводятся образцы таких фотографий для двух чистых жидкостей (вода и этилциннамат). Там же для сравнения приведена фотография флюоресценции раствора эскулина в воде.

Найденные из измерений по таким фотографиям угловые распределения интенсивности излучения (для четырех жидкостей) приведены на рис. 4. Для каждой из жидкостей получены две кривые, соответствующие возбуждению свечения  $\gamma$ -лучами ThC" (верхние кривые) и  $\gamma$ -лучами Ra (нижние).

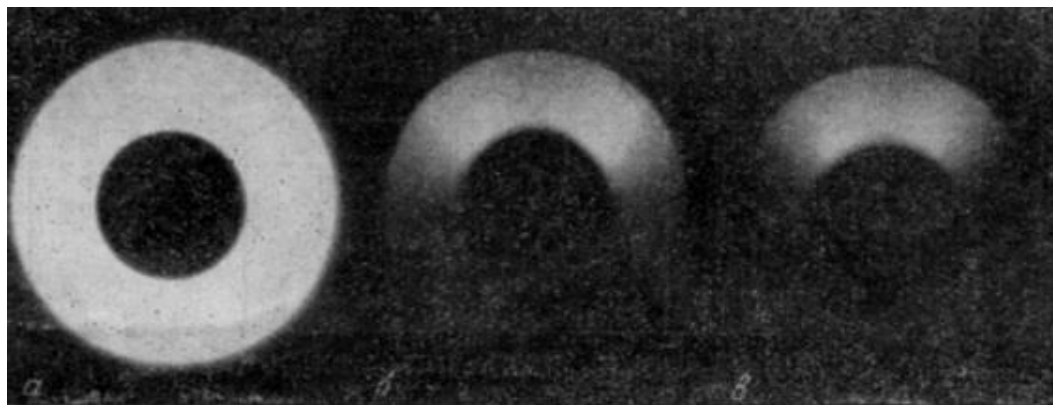


Рис. 3. Фотографии углового распределения интенсивности излучения:  
 а) обычная люминесценция (раствор эскулина в воде);  
 б) свечение этилциннамата ( $n = 1,5804$ ); в) свечение воды ( $n = 1,3371$ )



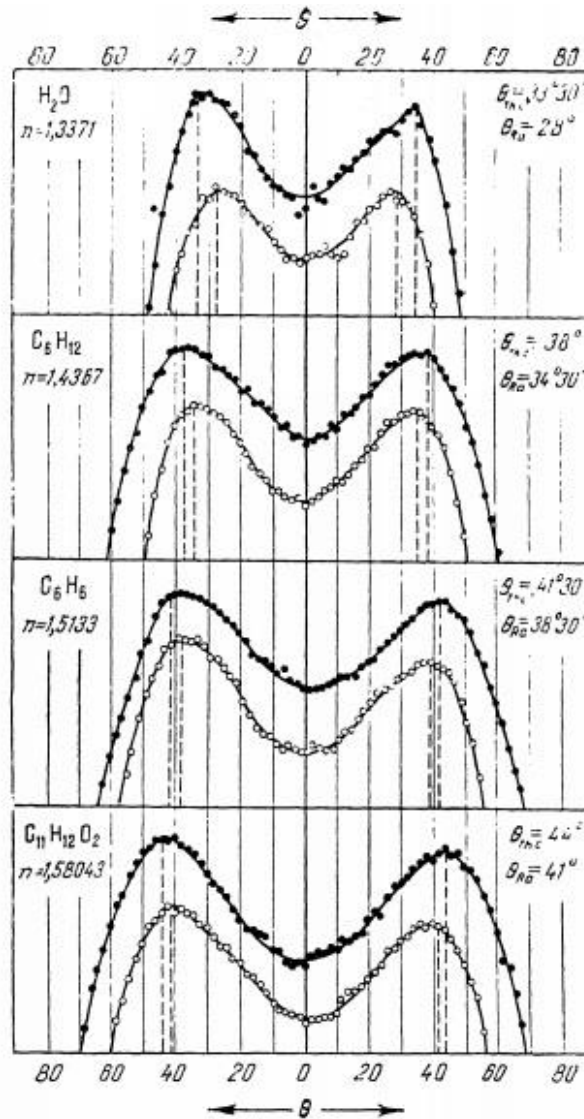


Рис. 4. Угловые распределения интенсивности излучения для жидкостей с разными  $n$ , полученные по фотографиям рис. 3. Кривые с черными точками (верхние) соответствуют возбуждению свечения комптоновскими электронами от  $\gamma$ -лучей ThC". Для них  $\beta_{\text{эфф}} = 0,896$  (по формуле (1)). Нижние кривые – возбуждение свечения комптоновскими электронами от  $\gamma$ -лучей Ra. В этом случае  $\beta_{\text{эфф}} = 0,847$

По кривым рис. 4 легко определяется угол  $\theta$ . Значения этого угла возрастают с увеличением показателя преломления  $n$  именно так, как это требуется по теории. Для одной и той же жидкости значения  $\theta$ , полученные в опытах с  $\gamma$ -лучами ThC", больше значений  $\theta$ , полученных в опытах с  $\gamma$ -лучами Ra. Это различие в измеренных значениях  $\theta_{\text{ThC"}}$  и  $\theta_{\text{Ra}}$  позволяет использовать соотношение (1) для определения «эффективной» скорости ( $\beta_{\text{эфф}}$ ) комптоновских электронов, вызывающих излучение. Эти скорости оказались соответственно равными 0,896 и 0,847. Этот результат вполне согласуется с более высокой энергией  $\gamma$ -излучения ThC".

Если рассматривать картину не в плоскости, а в пространстве, то излучение должно распространяться по поверхности конуса, осью которого является траектория заряженной частицы, а образующая составляет с этой осью угол  $\theta$ .

Помещая фотопластинку перпендикулярно к пучку быстрых частиц (рис. 5), мы получим, кроме изображения следа пучка, и фотографию излучения в форме кольца. Эта фотография изображена на рис. 6. Она получена с помощью тонкого пучка протонов на ускорителе Объединенного института ядерных исследований в городе Дубна.

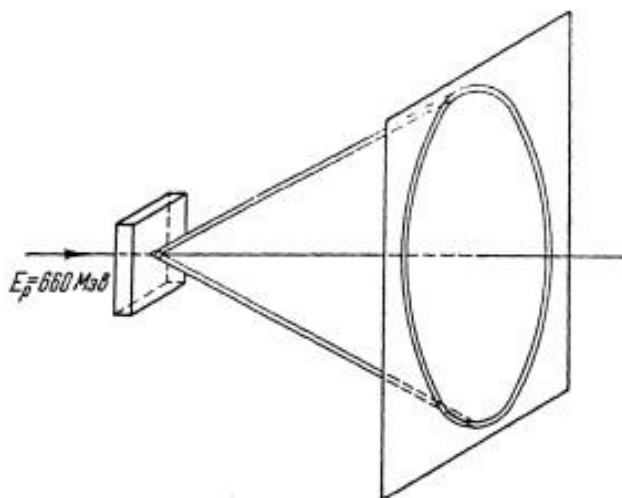


Рис. 5. Схема эксперимента для получения фотографии сечения конуса излучения плоскостью фотопластинки

До сих пор мы вели рассмотрение, предполагая некоторую определенную частоту  $\omega$ . На самом же деле спектр излучения непрерывный. Поскольку среда обладает дисперсией, т.е. показатель преломления  $n$  зависит от частоты, это означает, что свет разных длин волн будет распространяться под углами  $\theta$ , несколько отличающимися друг от друга, даже если скорость частиц  $\beta$  остается строго постоянной. Излучение оказывается как бы спектрально разложенным. Поверхность конуса излучения будет, таким образом, иметь некоторую толщину, причем для среды с нормальным ходом дисперсии с внутренней ее части будет расположен красный участок спектра, а с наружной – фиолетовый. Что это действительно так, видно на фотографии части кольца, показанного на рис. 6<sup>29</sup>.

<sup>29</sup> Фотография сделана с цветного снимка, полученного в объединенном институте ядерных исследований.

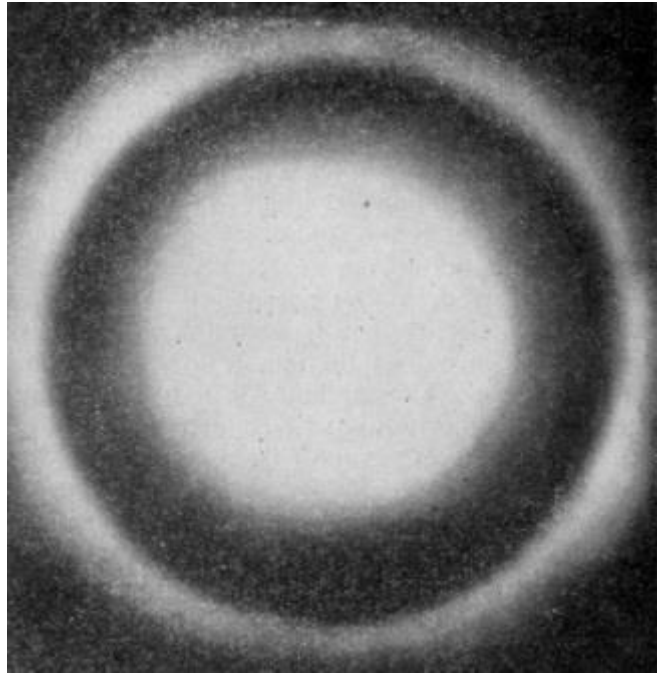


Рис. 6. Фотография сечения конуса излучения, полученная в опыте, схема которого приведена на рис. 5. Центральное пятно образовано пучком протонов

Таким образом, механизм излучения, предложенный Таммом и Франком, уже при качественном рассмотрении делает понятными такие наиболее характерные его свойства, как направленность, малую длительность высвечивания, наличие порога, универсальность. Строгая количественная теория дает, кроме того, выражение для энергии  $W$ , которую электрон теряет во время излучения. Это выражение имеет вид

$$W = \frac{e^2 l}{c^2} \int_{\beta n > 1} \omega I - \frac{I}{\beta^2 n^2} d\omega, \quad (2)$$

где  $l$  – длина пути электрона.

Из этого выражения следует также, что энергия в спектре излучения пропорциональна  $1 / \lambda^3$ , т.е. быстро возрастает в сторону коротких длин волн. Однако в рентгеновской области излучение должно отсутствовать, так как в этой области  $n < 1$ .

Наконец, из теории следует, что свечение поляризовано именно так, как это было установлено еще в первых экспериментах: вектор электрических колебаний лежит в плоскости, проходящей через лучи направления движения частиц.

Все это показывает, что рассмотренная теория с исчерпывающей полнотой описывает все известные до сих пор свойства нового излучения. Создание ее завершило большой цикл исследований, относящихся к открытию, всестороннему экспериментальному изучению и разработке теоретических основ явления, положивших начало новому направлению в физике – оптике излучателей, движущихся со сверхсветовой скоростью.

Новое излучение, конечно, представляло огромный интерес, но в связи с отсутствием достаточно чувствительных и удобных средств регистрации этот интерес носил лишь принципиальный характер. Содержащиеся в нем большие потенциальные возможности практического использования, в частности в экспериментальной физике, оставались нереализованными.

Однако за последние годы, в связи с разработкой и созданием фотоумножителей, излучение быстрых заряженных частиц приобрело важное прикладное значение, особенно в области исследований по физике частиц высоких энергий.

Несмотря на то что интенсивность вспышки излучения, создаваемой одной отдельной частицей, ничтожно мала, она теперь доступна измерению. Из формулы (2) следует, что при  $\beta \cong 1$  число приходящихся на видимый участок спектра фотонов, испускаемых заряженной частицей, движущейся в среде с  $n \cong 1,5$ , достигает 200–300 фотонов/см. При правильном выборе формы и расположения радиатора (т.е. среды, в которой движется и создает излучение заряженная частица) значительная доля этого света может быть направлена на фотокатод умножителя. В результате многократного усиления на аноде фотоумножителя появляется импульс тока, в миллионы раз превышающий начальный ток. Этот импульс может быть отмечен соответствующей радиотехнической схемой, и частица будет зарегистрирована. Такое устройство и есть счетчик, в котором для регистрации частиц используется ими же непосредственно создаваемое излучение.

Счетчик этого типа весьма напоминает так называемый сцинтилляционный счетчик, в котором для регистрации заряженных частиц, осуществляемой также с помощью фотоумножителя, используется люминесценция,

возникающая при поглощении энергии частиц в сцинтилляторе. Однако по сравнению с ним он обладает рядом существенных преимуществ:

1. Малая длительность времени высвечивания позволяет создать счетчики с очень высокой разрешающей способностью.

2. Наличие порога излучения делает счетчики этого типа нечувствительными к мягкому «допороговому» излучению. Это свойство счетчиков особенно ценно при использовании их в условиях, когда имеется значительный фон от мягкого  $\gamma$ -излучения.

3. Вследствие асимметрии излучения этими счетчиками возможна регистрация только тех частиц, которые движутся в радиаторе по направлению к катоду фотоумножителя. Частицы, движущиеся в обратном направлении, счетчиком не регистрируются. Иными словами, счетчик рассматриваемого типа обладает свойством направленности действия. Эта особенность счетчика была использована Винклером для определения альбедо космических лучей в верхних слоях атмосферы [14].

В настоящее время в работах Джелли [15], Маршалла [16] и других авторов описано большое число оригинальных конструкций счетчиков указанного типа. Методическая ценность излучения быстрых частиц заключается не только в его применениях как детектора частиц. Использование своеобразных свойств этого излучения (часто в комбинации с другими методами) в ряде случаев существенно расширяет возможности физического эксперимента.

Известно, например, что определение одного из важнейших параметров частицы – ее массы – может быть выполнено по измерению ее импульса и скорости. Обычно экспериментальные трудности встречаются при измерении скорости. Очевидно, что в некотором диапазоне скоростей частицы, когда  $\beta$  (удовлетворяющее условию  $\beta n > 1$ ) еще достаточно отличается от единицы, скорость частицы может быть легко найдена из соотношения (1) по измеренному значению  $\theta$  и известному показателю преломления  $n$ .

Если известен тип частиц, то измерение скорости позволяет сразу определить и их энергию. Особенно хорошие результаты этот метод дает при определении энергии протонов на ускорителях в области энергий порядка нескольких сотен МэВ (см. таблицу), где погрешность измерения энергии доведена до 0,25%.

Выше было уже отмечено, что наличие у излучения энергетического порога делает счетчик нечувствительным к частицам малых энергий. Подбирая радиатор с подходящим значением  $n$ , можно менять энергию порога  $E$ .

Очевидно, что два счетчика с заранее выбранными различными значениями пороговой энергии  $E_1$  и  $E_2$ , включенные в надлежащей последовательности по схеме антисовпадений, будут регистрировать только те частицы, скорость которых лежит в пределах, определяемых порогами  $E_1$  и  $E_2$ . Подобный прием был с успехом применен Сегре и его сотрудниками в их замечательной работе, приведшей к открытию антипротона.

Другое интересное использование свойств излучения нашло место в изучении широких потоков космических лучей. При изучении этих потоков установками с обычными счетчиками на некоторой высоте регистрируются только частицы, являющиеся далекими «потомками» первичной частицы. Все другие частицы, образовавшиеся в предшествующих стадиях развития потока и успевшие уже исчезнуть, этими установками не регистрируются. Так как частицы ливня обладают громадными энергиями, они способны создавать в воздухе излучение рассматриваемого типа, идущее практически в том же направлении. При благоприятных условиях это излучение доходит до поверхности Земли и может быть зарегистрировано фотоумножителем. Этот метод дает более полную картину потока и позволяет получить ценные сведения о процессе его развития.

Для космологии важное значение имеет выяснение вопроса о содержании в составе первичного космического излучения вне атмосферы Земли ядер, более тяжелых, чем ядра водорода. Такие исследования проводятся сейчас на спутниках. Они основаны на том, что интенсивность излучения частиц сверхсветовой скорости пропорциональна квадрату заряда частицы. Поэтому регистрируемые счетчиком импульсы от частиц разного заряда должны отличаться по амплитудам. Анализ амплитудного распределения позволит получить данные о распределении тяжелых частиц в космическом излучении в зависимости от их порядкового номера.

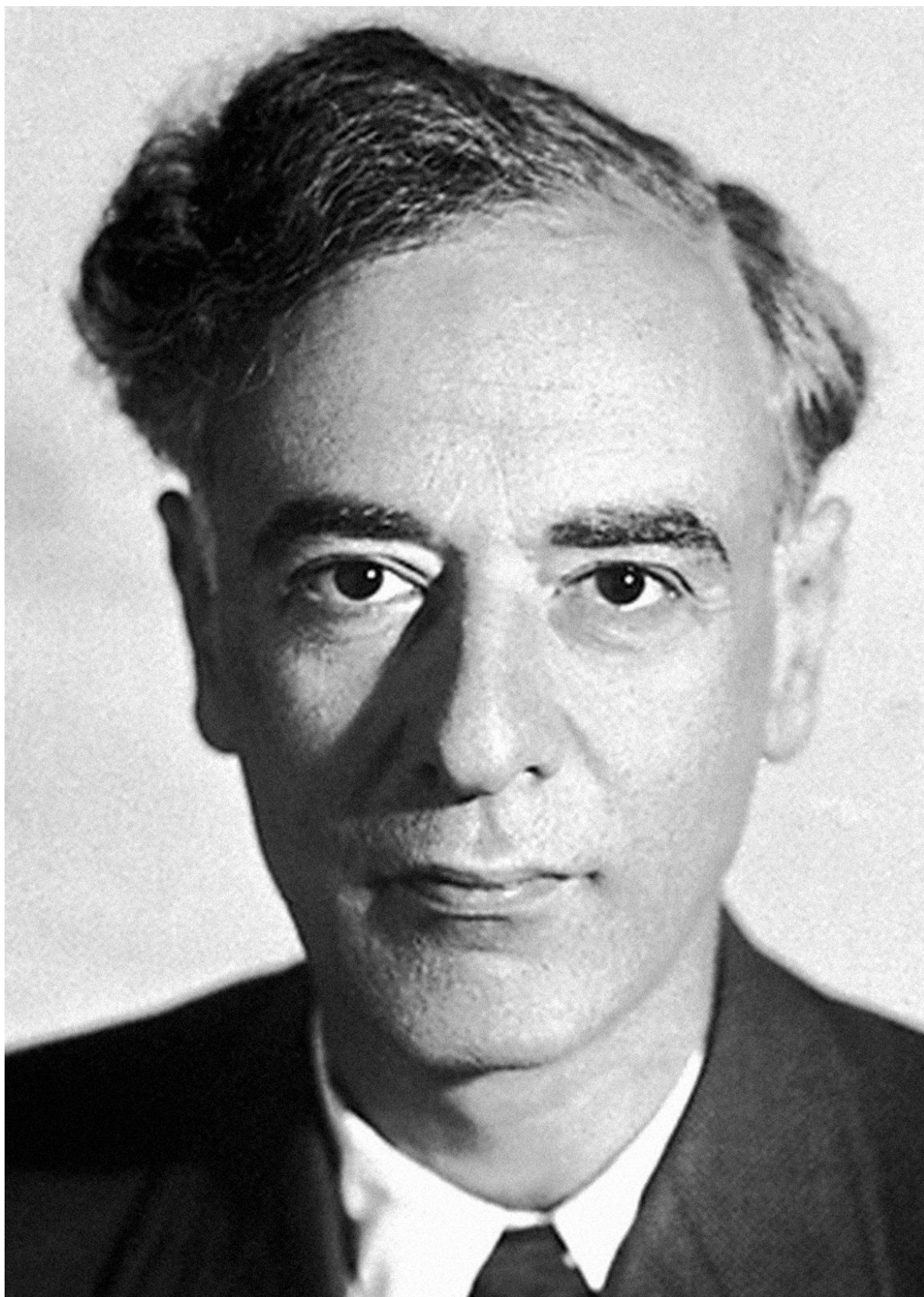
Последнее, на чем я хотел бы остановиться, – это использование излучения быстрой частицы для определения ее энергии, когда эта энергия весьма велика. В этом случае измерение энергии частицы по отклонению в

магнитном поле становится невозможным. Можно, однако, попытаться определить ее, измерив полную энергию, которую частица затрачивает на излучение рассмотренного нами типа. Для этой цели необходимо использование очень прозрачных, чувствительных радиаторов, достаточно плотных для полного развития потока частиц. Наиболее подходящим для указанной цели радиатором оказывается вода. В Физическом институте Академии наук СССР сооружается установка для измерения энергии космических частиц этим методом.

Все эти примеры показывают важность экспериментального исследования излучения частиц сверхсветовой скорости. Однако этим далеко не исчерпываются все возможности практического использования этого излучения. Можно не сомневаться в том, что область его применений будет и в дальнейшем быстро расширяться.

### Список литературы

1. П.А. Черенков, ДАН 2, 451 (1934).
2. С.И. Вавилов, ДАН 2, 457 (1934).
3. S.I. Wawilow, L. A. Tumermann, Zs. f. Phys. 54, 270 (1929).
4. Z.S. Newcomer, Journ. Amer. Chem. Soc. 42, 1997 (1920).
5. Z. Frenzel, Z. Schultes, Zs. f. Phys. Chem. (B) 27, 421 (1934).
6. Curie Eve, Madame Curie, London (1941).
7. M.L. Mallet, C. R. 183, 274 (1926); 187, 222 (1928); 188, 445 (1929).
8. Е.М. Брумберг и С. И. Вавилов, Изв. АН ОМОН, сер. VII, 919 (1933).
9. П.А. Черенков, ДАН 3 (XII), 413 (1936).
10. П.А. Черенков, ДАН 19, 99 (1937).
11. И.Е. Тамм и И.М. Франк, ДАН 14, 107 (1937).
12. Lord Kelvin, Nineteenth Century, Clouds over Dynamical Theory of Heat and Light, Phil. Mag., July, 1901.
13. Sommerfeld, Getting. Nachricht. 99, 363 (1904); 201 (1905).
14. Winckler U., Phys. Rev. 85, 1054 (1952).
15. J.V. Jelley, Cerenkov Radiation and its Applications, Pergamon Press, London, 1958.
16. R.L. Marshall, Phys. Rev. 84, 181 (1951).



*Лев Давидович Ландау*

*(1908–1968)*



## БИОГРАФИЯ<sup>30</sup>

Лев Давидович Ландау (1908–1968) родился 22 января в Баку в семье инженера и врача.

В возрасте 19 лет, после окончания физического факультета Ленинградского университета, он приступил к работе в Ленинградском физико-техническом институте. В 1929–1931 гг. Ландау находился за границей. Будучи стипендиатом Фонда Рокфеллера, он работал в Германии, Швейцарии, Англии и в Дании под руководством Нильса Бора.

В 1932–1937 гг. руководил Теоретическим отделом Украинского физико-технического института в Харькове, а после 1937 г. Теоретическим отделом Института физических проблем Академии наук СССР в Москве. Кроме того, Ландау преподавал теоретическую физику, являясь профессором Харьковского и Московского университетов.

Ландау занимался всеми областями теоретической физики, начиная с гидродинамики и заканчивая квантовой теорией поля. Значительная часть его работ посвящена физике конденсированного состояния. Это направление физики зародилось в 1936 г. с формулировкой общей термодинамической теории фазовых переходов второго рода. После открытия в 1938 г. П.Л. Капицей сверхтекучести жидкого гелия Ландау начал активную работу по объяснению этого явления, что привело к разработке полной теории «квантовой жидкости» при низких температурах. В 1941–1947 гг. он работал над теорией квантовой Бозе-жидкости, каковой является сверхтекучий жидкий гелий (самый распространенный изотоп  $^4\text{He}$ ). А в 1956–1958 гг. он сформулировал теорию квантовой Ферми-жидкости, примером которой служит другой изотоп жидкого гелия  $^3\text{He}$ .

В 1946 г. Ландау был избран в Академию наук СССР. Несколько раз ему присуждалась Государственная премия СССР, а в 1962 г. он, совместно с Е. М. Лифшицем, был награжден Ленинской премией за многотомный «Курс теоретической физики».

---

<sup>30</sup> Лев Давидович Ландау (1908–1968). Биография / пер. с англ. А. Колобова // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 5 : 1960–1967. – С. 128–129. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

Ландау был членом Лондонского Королевского общества, Датской и Нидерландской Королевских академий наук, иностранным членом Национальной академии наук США, почетным членом Американской академии наук и искусств, Лондонского физического общества, и Французского физического общества. В 1961 г. он получил медаль Макса Планка и премию имени Фрица Лондона.

**Вступительная речь члена Шведской Королевской академии наук  
профессора И. Валлера<sup>31</sup>**

*10 декабря 1962 г.*

Ваше Величество, Ваши Королевские Высочества, дамы и господа!

Профессор Московского университета Лев Давидович Ландау, награжденный в этом году Нобелевской премией по физике, родился в 1908 г. в Баку. Его блестящие способности к математике проявились в очень раннем возрасте, и уже в 14 лет он поступил в Ленинградский университет. После его окончания Ландау провел полтора года за границей, в частности в Копенгагене у всемирно известного физика-атомщика Нильса Бора. Во время стажировки он произвел очень сильное впечатление благодаря своему блестящему интеллекту и прямоте.

В 1930 г. Ландау опубликовал работу, принесшую ему мировую славу, в которой методами квантовой механики исследовалось поведение свободных электронов в магнитном поле. Эта работа стала ключом к пониманию свойств металлов. После возвращения домой Ландау вместе со своими учениками начал работу над новыми плодотворными идеями и получил целый ряд важных результатов, касающихся структуры магнитных веществ и сверхпроводников, и развил основополагающие теории фазовых переходов и термодинамических флуктуаций.

Потрясающая способность Ландау видеть сущность проблемы и его уникальная физическая интуиция полностью проявились в исследованиях жидкого гелия, которые он начал в 1937 г. после перехода в Московский институт физических проблем. В это время директор этого института, известный физик Капица, проводил интересные эксперименты с жидким гелием. Природный газообразный гелий становится жидкостью при понижении температуры приблизительно до четырех градусов выше абсолютного нуля. Дальнейшие исследования показали, что при последующем понижении температуры приблизительно до двух градусов эта жидкость пе-

---

<sup>31</sup> Валлер, И. Вступительная речь члена Шведской Королевской академии наук, Стокгольм, 10 декабря 1962 г. / И. Валлер ; пер. с англ. А. Колобова // Нобелевская премия. Физика. : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 5 : 1960–1967. – С. 123–126. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

переходит в новое состояние, обладающее весьма странными свойствами. Капица назвал его сверхтекучим, так как в этом состоянии жидкий гелий мог легко протекать через узкие капилляры и щели, которые практически полностью останавливали протекание всех остальных жидкостей.

Оригинальность метода, примененного Ландау для объяснения этого явления, заключалась в том, что он рассмотрел квантованные состояния движения жидкости в целом, а не ее отдельных атомов, как это делали до него. Сначала Ландау рассмотрел основное состояние жидкости при нулевой температуре. Он описал возбужденные состояния жидкости с помощью движения неких фиктивных частиц, названных квазичастицами. Ландау сопоставил экспериментальные данные со своими расчетами, и таким образом установил механические свойства квазичастиц. Эти данные, позволившие вычислить свойства сверхтекучей жидкости, были позже напрямую подтверждены экспериментами по рассеиванию нейтронов в жидком гелии. Впервые эти исследования были проведены в 1957 г. компанией «Atomic Energy Ltd.» в Стокгольме. В дальнейшем Ландау установил, что в жидком гелии, кроме обычных звуковых волн, существуют волны «второго звука». Этим он побудил русских ученых подтвердить существование этого явления экспериментально.

В природе гелий представлен изотопом с атомным весом 4, за исключением одной миллионной доли, которую составляет изотоп с атомным весом 3. Жидкая фаза легкого изотопа изучалась приблизительно с 1950 г. Свойства этого типа жидкого гелия довольно сильно отличались от жидкой фазы тяжелого изотопа, так как существенно отличались и ядра гелия с массами 3 и 4. Убедительная теория, описывающая поведение жидкого гелия, состоящего из легкого изотопа, впервые была предложена Ландау в 1956–1958 гг. и во многом походила на теорию, описывающую тяжелый изотоп, упомянутую выше. Новая теория играла существенную роль при еще более низких температурах, менее одной десятой Кельвина. Однако этот температурный диапазон является и наиболее интересным. Поскольку измерения при таких низких температурах крайне сложны, до последнего времени эта теория не была проверена экспериментально. Результаты экспериментов, по мере улучшения точности измерительной

техники, оказывались все более и более близкими к теоретическим предсказаниям. Ландау также предсказал существование нового типа волн в жидкости этого типа и назвал его нулевым звуком. Своим открытием он инициировал попытки экспериментаторов обнаружить нулевой звук.

Вся значимость исследований Ландау становится очевидной, когда понимаешь, что одна из важнейших целей физики – это описание всех свойств жидкости в той же мере, как это уже сделано для кристаллов и разреженного газа. В своих попытках решить эту задачу ученые столкнулись с непреодолимыми препятствиями. Важное исключение представляет разработанная Ландау теория жидкого гелия, которая, таким образом, является достижением огромной важности.

Кроме своих исследований конденсированного состояния, то есть исследований твердого тела и жидкостей, за которые он сегодня награждается Нобелевской премией, Ландау также внес величайший вклад и в другие области физики, в особенности в квантовую теорию поля и теорию элементарных частиц. Своими оригинальными идеями и мастерскими исследованиями он оказал существенное влияние на эволюцию атомной физики нашего времени.

К сожалению, профессор Ландау еще не до конца оправился после серьезной аварии, в которую он попал в начале этого года, и поэтому не смог приехать на церемонию награждения Нобелевской премией. Она будет вручена ему сегодня послом Швеции в Москве. От имени Шведской академии наук я выражаю надежду, что профессор Ландау вскоре полностью поправится.

**Речь посла СССР Н. Белохвостикова на торжественном обеде<sup>32</sup>**

*10 декабря 1962 г.*

*Так как лауреат не мог присутствовать на торжественном обеде в Стокгольме, речь была произнесена послом Советского Союза Н. Белохвостиковым.*

Ваши Величества, Ваши Королевские Высочества, Ваши Превосходительства, дамы и господа!

Большая честь для меня выразить от имени профессора и академика Льва Давидовича Ландау, который, к несчастью, по состоянию здоровья не может присутствовать на этом торжестве, его глубокую признательность Шведской Королевской академии наук за ту великую дань уважения к его трудам, какой стало присуждение ему Нобелевской премии по физике за 1962 год.

Тем самым Лев Ландау, блестящий физик и создатель теории твердого тела, заслуженно причислен к плеяде русских лауреатов Нобелевской премии в области научных исследований, среди которых мы находим имена таких его предшественников, как Илья Мечников, Иван Павлов, Николай Семенов, Павел Черенков, Игорь Тамм и Илья Франк.

Господин Ландау просил меня сказать, что он рассматривает свою Нобелевскую премию как признание не только его собственных трудов, но и заслуг тех советских исследователей, которые работали вместе с ним, дань уважения, в равной степени имеющую отношение к достижениям советской науки в целом.

---

<sup>32</sup> Белохвостиков, Н. Речь посла СССР на торжественном обеде, Стокгольм, 10 декабря 1962 г. / Н. Белохвостиков ; пер. с фр. А. Райской // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 5 : 1960–1967. – С. 130–131. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

Позвольте мне, дамы и господа, выразить уверенность в том, что присуждение Нобелевской премии господину Льву Давидовичу Ландау будет способствовать дальнейшему развитию тесного научного сотрудничества, которое связывает советских исследователей и их коллег в Швеции и других странах.



*Николай Геннадьевич Басов*

*(1922–2001)*



## БИОГРАФИЯ<sup>33</sup>

Николай Геннадьевич Басов (1922–2001) родился 14 декабря в маленьком городке Усмань около Воронежа в семье Геннадия Федоровича Басова и Зинаиды Андреевны Молчановой. Его отец был профессором Воронежского лесного института и всю свою жизнь исследовал влияние лесопосадок на подземные воды и дренаж.

В 1941 г. после окончания школы в Воронеже Басова призвали на службу в армию и направили в Военно-медицинскую академию им. Куйбышева. В 1943 г. он закончил академию, получив специальность помощника врача. Его направили в советскую армию, на 1-й Украинский фронт. В декабре 1945 г. он был демобилизован и поступил в Московский инженерно-физический институт, где изучал теоретическую и экспериментальную физику.

С 1950 по 1953 г. Басов был аспирантом Московского инженерно-физического института. В это же время он работал над диссертацией в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР под руководством профессоров М.А. Леонтовича и А.М. Прохорова.

В 1950 г. Басов стал сотрудником Физического института им. П.Н. Лебедева, где впоследствии был заместителем директора и руководителем лаборатории квантовой радиофизики. Он также являлся профессором кафедры физики твердого тела в Московском инженернофизическом институте.

В 1952 г. Басов начал заниматься квантовой радиофизикой. Он сделал много попыток (вначале теоретических, а затем экспериментальных) в проектировании и постройке излучателя (вместе с А.М. Прохоровым).

В 1956 г. Басов защитил докторскую диссертацию, посвященную «молекулярному излучателю», в которой объединил теоретические и экспериментальные работы по созданию излучателя, использующего в качестве активной среды аммиак.

---

<sup>33</sup> Николай Геннадьевич Басов (1922–2001). Биография / пер. с англ. А. Колобова // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 5 : 1960–1967. – С. 303–308. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

В 1955 г. Басов организовал группу для исследования частотной устойчивости молекулярных излучателей. Вместе со своими учениками и сотрудниками Н. Ораевским, В.В. Никитиным, Г.М. Страховским, С. Зуевым и другими, Басов изучал зависимость частоты излучателя, соответствующей различным спектральным линиям аммиака, от различных параметров. Он предложил метод увеличения стабильности частоты посредством замедления молекулярного движения и сам метод такого замедления, исследовал работу излучателей, использующих вместо аммиака резонаторы, осуществил стабилизацию фазы клистронной частоты с помощью молекулярных излучателей, изучил переходные процессы в молекулярных осцилляторах и создал излучатель, использующий дейтериевый аммиак. Результатом этих исследований стало создание в 1962 г. излучателей со стабильностью частоты  $10^{-11}$ .

В 1957 г. Басов начал работать над проектированием квантовых излучателей оптического диапазона. Группа теоретиков и экспериментаторов изучала возможность создания квантовых излучателей на основе полупроводников, а после предложения А. Явана – возможность их реализации в газовой среде. В 1958 г., совместно с Б.М. Вулом и Ю.М. Поповым, он исследовал возможность создания в полупроводниках состояния с отрицательной температурой и предложил использовать для этих целей импульс пробоя. В 1961 г., совместно с О.Н. Крохиным и Ю.М. Поповым, Басов предложил три разных метода для получения состояния с отрицательной температурой в полупроводниках с учетом прямых и обратных переходов (оптическое возбуждение, использование пучка быстрых электронов и введение переносчиков путем вырождения  $p$ - $n$  перехода).

Результатом его совместных с Б.М. Вулом и другими сотрудниками усилий стала разработка в начале 1963 г. полупроводникового лазера на кристаллах арсенида галлия.

В 1964 г. в сотрудничестве с О.В. Богданкевичем и А.Н. Девятковым были созданы полупроводниковые лазеры с электронным возбуждением; немногим позже, совместно с А.З. Грязюком и В.А. Катулиным, были сделаны лазеры с оптическим возбуждением. В 1964 г. за эти достижения

группу ученых Физического института им. П.Н. Лебедева наградили Ленинской премией.

Начиная с 1961 г. Басов (вместе с В.С. Зуевым, П.Г. Крюковым, В.С. Летоховым и др.) проводил теоретическую и экспериментальную разработку мощных лазеров. Именно тогда были найдены возможности разработки мощных короткоимпульсных лазеров. Он изучил природу появления таких импульсов в квантовых излучателях и их прохождение через квантовые усилители. В 1968 г. Басов, совместно с П.Г. Крюковым, Ю.В. Сенатским и др., разработал высокомогущный одноимпульсный лазер на стекле с неодимом с энергией 30 Дж и длительностью импульса  $2 \times 10^{-11}$  с, а в 1971 г., совместно с Г.В. Склизковым и др., – многоканальный лазер с энергией  $10^3$  Дж, выделяемой за  $10^{-9}$  с.

В 1962 г. Н.Г. Басов и О.Н. Крохин изучали возможность использования лазерного излучения для получения термоядерной плазмы. В 1968 г. Басов и его коллеги (П.Г. Крюков, Ю.В. Сенатский, С.Д. Захаров) сумели зарегистрировать первое испускание нейтронов в созданной лазером дейтериевой плазме. Также, совместно с О.Н. Крохиным, С.Л. Мандельштамом, Г.В. Склизковым, были определены спектры многозарядных ионов CaXVI, FeXXIII, KXIX и других. Совместно с В.С. Летоховым была разработана теория образования пикосекундного импульса. В том же году Басов и А.Н. Ораевский предложили метод теплового лазерного возбуждения. Дальнейшие теоретические исследования этого метода, проведенные Басовым, А.Н. Ораевским и В.А. Щегловым, ускорили разработку так называемых газодинамических лазеров.

В 1963 г. Басов и его коллеги (В.В. Никитин, Ю.М. Попов, В.Н. Морозов) начали работать в области оптоэлектроники. В 1967 г. они создали несколько быстродействующих логических элементов на базе диодных лазеров. Впоследствии они занимались разработкой логической структуры многоканальной оптоэлектронной системы, производящей  $10^{10}$  операций в секунду для обработки оптических данных.

В 1966 г. Басов, В.А. Данилевич и Ю.М. Попов начали исследования излучения конденсированных инертных газов под действием мощного

электронного пучка. Они первыми получили в 1970 г. лазерное излучение в ультрафиолетовом диапазоне.

В 1968 г. Басов (в сотрудничестве с О.В. Богданкевичем и А.С. Насибовым) предложил идею создания лазерной проекции изображения для телевидения. В то же время Басов (вместе с В.В. Никитиным) начал изучение стандартов частот в оптическом диапазоне (с помощью газовых лазеров). В 1970 г. им удалось создать газовый лазер, стабилизированный в линии поглощения метана, со стабильностью частоты  $10^{-11}$ .

В 1968 г. Басов (совместно с Е.М. Беленовым и В.В. Никитиным) предположил, что для получения стандарта частоты со стабильностью  $10^{-12}$ – $10^{-13}$  нужно использовать кольцевой лазер с нелинейной ячейкой поглощения.

Басов также внес большой вклад в область химических лазеров. В 1970 г. под его руководством был создан оригинальный химический лазер, работающий на смеси дейтерия, F и CO при атмосферном давлении. В том же году Басов (в сотрудничестве с Е.М. Беленовым, В.А. Данилевич и А.Ф. Сучковым) предложил и экспериментально разработал элион (электрическое прокачивание ионизованных сжатых газов) – метод возбуждения газового лазера. Используя этот метод для смеси CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>, сжатой до 25 атм, они получили огромное увеличение объемной мощности газового лазера по сравнению с обычным лазером на CO<sub>2</sub> при низком давлении.

В конце 1970 г. Басов (вместе с Е.П. Маркиным, А.Н. Ораевским, А.В. Панкратовым) представил экспериментальные доказательства ускорения протекания химических реакций под действием инфракрасного лазерного излучения.

В 1959 г. Басов вместе с А.М. Прохоровым был награжден Ленинской премией за исследования, приведшие к созданию молекулярных излучателей и квантовых парамагнитных усилителей. В 1962 г. Басов стал членом-корреспондентом Академии наук СССР; с 1966 г. – действительным членом Академии; в 1967 г. – членом Президиума Академии наук СССР и иностранным членом Германской академии наук в Берлине; в 1971 г. – иностранным членом Германской академии естествоиспытателей «Леопольдина».

Басов был главным редактором советских научных журналов *Природа* и *Квантовая электроника*, также членом редакционной коллегии *Il Nuovo Cimento*.

В 1970 г. Басову было присвоено звание Героя Социалистического Труда. Он был членом Советского комитета защиты мира и членом Всемирного совета мира.

Николай Басов женился в 1950 г. Его жена, Ксения Тихоновна Басова, тоже физик, работает на кафедре общей физики Московского инженерно-физического института. У них двое сыновей: Геннадий и Дмитрий.

Н. Г. Басов скончался 1 июля 2001 г.

## Речь на торжественном обеде <sup>34</sup>

*10 декабря 1964 г.*

Ваши Величества, Ваши Королевские Высочества, дамы и господа!

Мы счастливы – я говорю не только от своего имени, но и от имени моего коллеги Прохорова, – мы поистине счастливы, потому что нам оказана честь присутствовать на этом торжественном банкете в качестве лауреатов Нобелевской премии. В нашей стране, как и во всем мире, престиж Нобелевских премий необычайно высок, что, впрочем, вполне понятно. История Нобелевских премий – это история науки и научных открытий.

Наука не знает границ, открытия совершаются как в малых, так и в больших странах, и эти открытия принадлежат и служат всему человечеству. Это находит свое отражение и в списке нобелевских лауреатов. Премия по физике в этом году была присуждена ученым из двух стран – Советского Союза и Соединенных Штатов.

Мы с благодарностью отмечаем, что наши труды были высоко оценены, и видим в этом международное признание успехов советской науки. Благодарю вас за внимание, которого я был удостоен, благодарю за ваше гостеприимство.

*Перевод с фр. А. Райской.*

---

<sup>34</sup> Басов, Н.Г. Речь на Нобелевском банкете, Стокгольм, 10 декабря 1964 г. / Н.Г. Басов ; пер. с фр. А. Райской // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 5 : 1960–1967. – С. 309. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

**Николай Басов**

## **ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ КВАНТОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ<sup>35</sup>**

*Нобелевская лекция, 11 декабря 1964 г.*

В современной физике, как это, возможно, было и раньше, существует два различных течения. Одна группа физиков видит свою задачу в познании новых закономерностей и в разрешении существующих противоречий. Целью своей работы они считают создание теории, в частности разработку математического аппарата современной физики. В качестве отходов производства появляются новые принципы построения приборов и физические приборы. Другая группа физиков, наоборот, стремится создать приборы на основе новых физических принципов, преодолевая на своем пути неизбежно встречающиеся трудности и противоречия. Различные гипотезы и теории эта группа считает отходами производства.

Обе группы имеют выдающиеся достижения. Одна группа создает питательную среду для другой, и они не могут жить друг без друга, хотя их отношения друг к другу часто довольно критичны. Первая группа называет вторую «изобретателями», вторая обвиняет первую в абстрактности, а иногда и бесцельности.

С первого взгляда может показаться, что речь идет о теоретиках и экспериментаторах. Но это не так: и первая и вторая группы включают в себя обе эти разновидности физиков. В настоящее время разделение на эти две группы стало настолько явным, что целые направления в науке можно отнести к первой или второй группе, хотя имеются разделы физики, где обе группы работают сообща.

К первой группе физиков относится большинство исследователей в таких областях, как квантовая теория поля, теория элементарных частиц, многие разделы ядерной физики, гравитации, космогонии, физики твердого тела. Ярким примером второй группы являются физики, занятые разра-

---

<sup>35</sup> Басов, Н. Полупроводниковые квантовые генераторы : нобелевская лекция, Стокгольм, 11 декабря 1964 г. / Н. Басов // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 5 : 1960–1967. – С. 279–302. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

боткой вопросов термоядерного синтеза, квантовой и полупроводниковой электроники.

Несмотря на то что вторая группа физиков стремится в конечном счете создать физический прибор, их работа характеризуется предварительным теоретическим анализом. Так, в квантовой электронике были теоретически предсказаны возможности создания квантовых генераторов вообще, показана высокая монохроматичность и стабильность частоты излучения, предсказана высокая чувствительность квантовых усилителей, исследована возможность создания лазеров различных типов. Настоящий доклад посвящен наиболее молодой ветви квантовой электроники – полупроводниковым квантовым генераторам, которые появились на свет всего около двух лет назад, хотя их созданию предшествовал теоретический анализ, начатый еще в 1957 г. [1].

Но прежде чем переходить к анализу работы полупроводниковых генераторов, нам хотелось бы сделать несколько замечаний о «теоретических отходах» квантовой электроники. Их очень много, и мы остановимся лишь на трех.

Создание высокостабильных квантовых генераторов и переход на атомные эталоны времени поставило на повестку дня решение вопроса о свойствах атомного времени. Дике в докладе на первой конференции по квантовой электронике [2] указал на возможность экспериментальной проверки гипотезы об изменении мировых констант со временем на основе изучения изменения частот различных квантовых стандартов со временем. Возникает вопрос о предельной точности атомных и молекулярных часов, обусловленный квантовой природой излучения, особенно о точности измерения коротких промежутков времени.

Квантовая электроника положила начало интенсивным исследованиям нового «сверхнеравновесного состояния материи» – состояния с отрицательной температурой, которое в своей крайней точке отрицательного нуля по своим свойствам близко к состоянию абсолютной упорядоченности, свойственной состояниям абсолютного нуля температур. Именно это свойство высокой упорядоченности системы с отрицательной температурой и дает возможность создавать высококогерентное излучение кванто-



вых генераторов и получать высокочувствительные квантовые усилители, выделять запасенную в состоянии с отрицательной температурой энергию за очень короткие промежутки времени, сравнимые с периодом колебаний. Квантовая электроника дала примеры систем, в которых получается излучение с очень малым значением энтропии. Например, распыленное по очень большому числу степеней свободы низкотемпературное спонтанное излучение ламп с помощью систем с отрицательной температурой (квантовых генераторов) превращается в высококогерентное излучение лазера, температура которого уже сейчас достигает значений в  $10^{20}$ – $10^{25}$  градусов.

Видимо, закономерности, которые были обнаружены квантовой электроникой при исследовании излучения, могут быть обобщены и на другие формы движений. Возможность получения высокоупорядоченного движения с помощью систем с обратной связью может представлять интерес для химических и биологических исследований, космогонии. Возникает вопрос: используется ли мазерный принцип в природе?

Нам кажется, что перечисленные вопросы нуждаются во вмешательстве физиков первой группы, так как они далеко выходят за рамки теории колебаний, теории излучения и обычной оптики, составляющих основу современной квантовой электроники.

### **I. Условия получения отрицательной температуры в полупроводниках**

Работы по полупроводниковым квантовым генераторам явились непосредственным продолжением исследований по молекулярным генераторам и парамагнитным усилителям. Следует отметить, что к моменту начала работ по полупроводниковым квантовым генераторам, благодаря исследованиям, связанным с полупроводниковой электроникой, были выяснены основные физические характеристики полупроводников, необходимые для разработки лазеров: оптические и электрические свойства, структура энергетических зон, времена релаксации и т.д. Были получены разнообразные чистые легированные полупроводниковые материалы, создана методика измерения их различных свойств, разработана технология

изготовления *p-n*-переходов, контактов т.д. Все это значительно упростило проведение исследований по полупроводниковым лазерам.

Полупроводниковые материалы привлекли к себе внимание возможностью реализации генераторов от далекой инфракрасной области до оптического или даже ультрафиолетового диапазона, разнообразием методов возбуждения неравновесных состояний, большим коэффициентом поглощения (усиления). Как показали последующие исследования, полупроводниковые квантовые генераторы могут обладать большим коэффициентом полезного действия, в ряде случаев приближающимся к 100%.

В отличие от изолированного атома, в полупроводниках имеются не отдельные уровни, а группы непрерывно расположенных энергетических уровней – зоны. Верхняя группа уровней – зона проводимости, и более низкая группа занятых уровней – валентная зона разделены полосой запрещенных энергий (рис. 1).

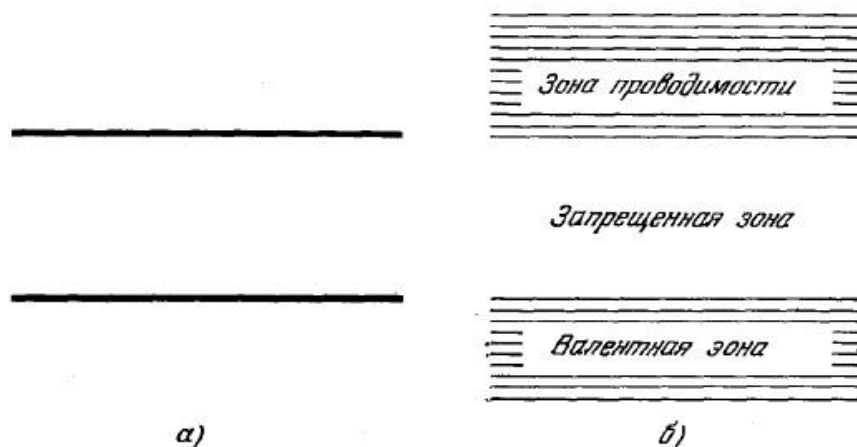


Рис. 1. Диаграмма энергетических уровней: *а* – для атома с двумя энергетическими уровнями; *б* – для полупроводника

Распределение электронов по энергетическим уровням описывается функцией Ферми: каждый уровень занят двумя электронами, электроны располагаются в полосе энергий порядка энергии теплового движения  $kT$ ; вероятность найти электрон за интервалом  $kT$  быстро падает с ростом энергии. Если энергия теплового движения  $kT$  значительно меньше разности энергий между зоной проводимости и валентной зоной, практически все электроны находятся в валентной зоне, заполняя ее уровни, а все уровни зоны проводимости свободны (рис. 2, *а*). В таком состоянии полупроводник не может проводить электрический ток и является изолятором, так как

электрическое поле, приложенное к полупроводнику, не в состоянии изменить движение электронов валентной зоны (все уровни энергии заняты).

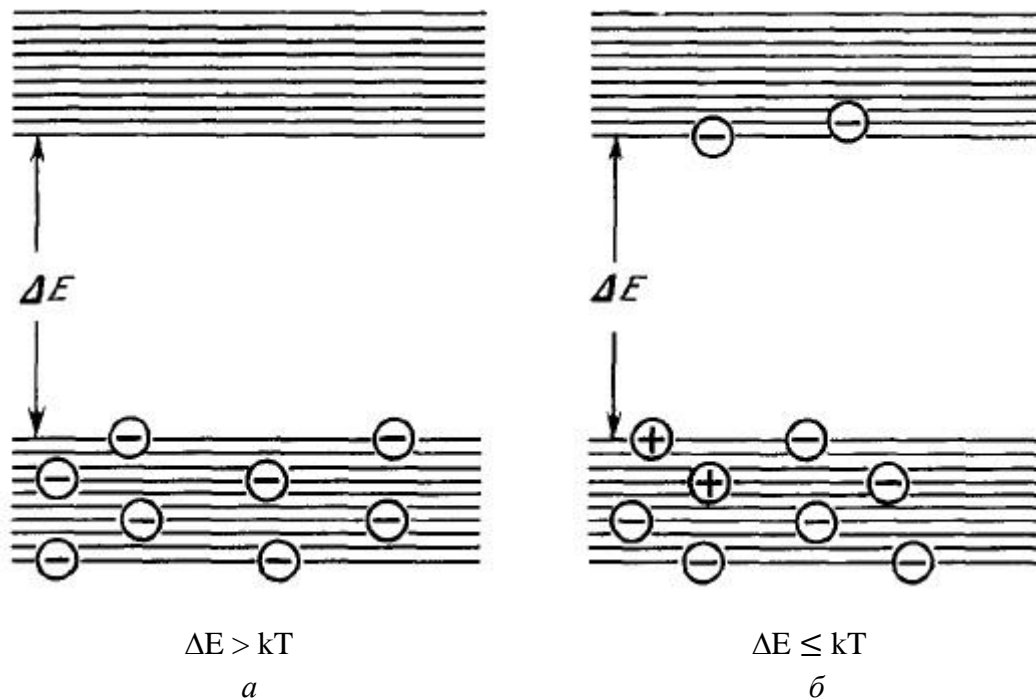


Рис. 2. Распределение электронов на энергетических уровнях

Если энергия теплового движения достаточна для того, чтобы перебросить электроны через запрещенную зону в зону проводимости, часть электронов переходит в зону проводимости. Такая система может проводить электрический ток. Он может течь как за счет изменения энергии электронов под действием внешнего поля, так и за счет изменения энергии электронов в валентной зоне. Картина тока в валентной зоне оказывается такой, как если бы свободные от электронов места (дырки) передвигались в противоположном направлении. Вакантное место («дырка») полностью эквивалентно положительно заряженной частице (рис. 2, б).

При взаимодействии со светом, так же как и для изолированного атома, в полупроводнике могут происходить три процесса:

1. Квант света может быть поглощен полупроводником; при этом образуется пара электрон–дырка, причем разность энергий между электроном и дыркой равна энергии кванта. Этот процесс связан с уменьшением энергии электромагнитного поля и носит название резонансного поглощения (рис. 3, а).

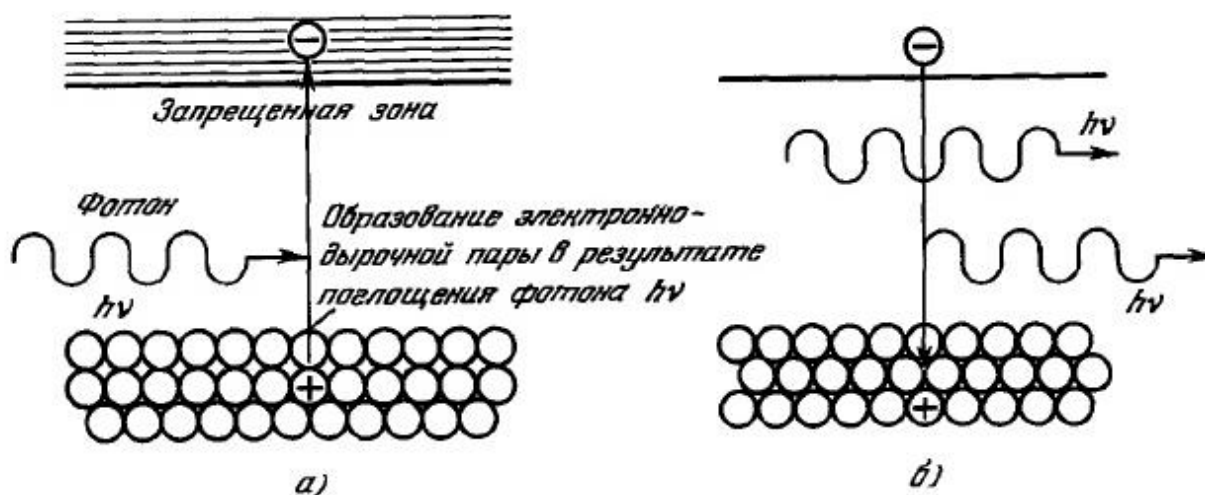


Рис. 3. Процессы взаимодействия со светом: *а* – резонансное поглощение; *б* – вынужденное излучение

2. Под действием кванта электрон может перейти из зоны проводимости в валентную зону на свободное место – дырку. При этом будет излучен квант света, тождественный по частоте, направлению распространения и поляризации с квантом, вызвавшим излучение. Этот процесс связан с увеличением энергии поля и носит название индуцированного излучения (рис. 3, *б*). Напомним, что индуцированное излучение было открыто А. Эйнштейном в 1917 г. при исследовании термодинамического равновесия между полем излучения и атомами.

3. Кроме резонансного поглощения и индуцированного излучения может иметь место третий процесс – спонтанное излучение. Электрон может самопроизвольно перейти на вакантное место – дырку (рекомбинировать с дыркой), испустив квант света.

Так как вероятности индуцированного излучения резонансного поглощения точно равны друг другу, полупроводник в равновесном состоянии при любой температуре в основном может лишь поглощать кванты света, так как вероятность нахождения электронов на уровнях уменьшается с ростом энергии.

Для того чтобы заставить полупроводник усиливать электромагнитное излучение, нужно нарушить равновесное распределение электронов по уровням и искусственно создать такое распределение, когда на более высоких уровнях энергии вероятность нахождения электронов больше, чем на более низких уровнях [1; 3]. Нарушить распределение внутри зоны

очень трудно вследствие сильного взаимодействия между электронами и решеткой полупроводника: оно восстанавливается за время  $10^{-10}$ – $10^{-12}$  с.

Значительно проще нарушить равновесие между зонами, так как время жизни электронов и дырок в зонах значительно больше. Оно зависит от природы полупроводника и лежит в пределах  $10^{-3}$ – $10^{-9}$  с.

Вследствие того что электроны и дырки движутся в полупроводниках, кроме закона сохранения энергии при излучении должен выполняться закон сохранения импульса. Так как импульс кванта весьма мал, приближенно закон сохранения импульса сводится к тому, что электрон и дырка при излучении (или поглощении) кванта света должны иметь одну и ту же скорость. На рис. 4 схематически изображена зависимость энергии от импульса. Существует два типа полупроводников. Для одних минимум энергии электронов в зоне проводимости точно равен максимуму энергии дырок в валентной зоне (рис. 4, а). В таких полупроводниках могут иметь место так называемые прямые переходы. Электрон, имеющий минимальную энергию, может рекомбинировать с дыркой, имеющей максимальную энергию. Для других полупроводников минимум энергии в зоне проводимости не совпадает с максимумом энергий в валентной зоне (рис. 4, б). В этом случае процесс излучения или поглощения кванта света должен сопровождаться изменением колебательного состояния решетки кристалла, излучением или поглощением фонона, который должен компенсировать изменение импульса. Такие процессы получили название непрямых переходов.

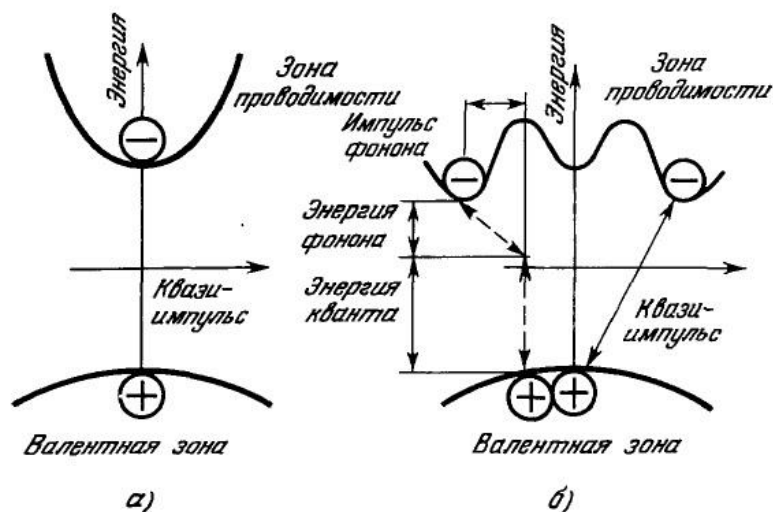


Рис. 4. Диаграмма зависимости энергии электронов и дырок от квазиимпульса:  
а – прямые переходы; б – непрямые переходы

Вероятность непрямых переходов обычно меньше вероятности прямых переходов.

Для того чтобы заставить полупроводник усиливать падающее излучение при междузонных переходах, нужно следующее.

#### **а. В случае прямых переходов**

Необходимо заполнить более половины уровней в энергетической полосе порядка  $kT$  вблизи края зон электронами и дырками. Такие состояния как для атомов, так и для молекул получили название состояний с инверсной населенностью или состояний с отрицательной температурой. Температура минус нуль градусов соответствует такому распределению электронов, когда все уровни в полосе  $kT$  зоны проводимости заняты электронами, а в валентной зоне дырками. В таком состоянии (в противоположность состоянию положительного нуля) полупроводник может только излучать (индуцировано и спонтанно) кванты света, но не может поглощать излучение.

Состояние полупроводника, когда большинство уровней в некоторой полосе энергии занято электронами или дырками, получило название вырожденного состояния.

Итак, для создания отрицательной температуры необходимо иметь вырождение в полупроводнике по электронам и дыркам. При заданном количестве электронов и дырок всегда можно создать вырождение, уменьшая температуру полупроводника, так как при уменьшении температуры уменьшается ширина полосы энергии, занятая электронами. При температуре жидкого азота для вырождения нужно иметь концентрацию электронов [3]  $10^{17}$ – $10^{18}$  см<sup>-3</sup>.

#### **б. В случае непрямых переходов**

Для создания отрицательной температуры не требуется вырождения. Это связано с тем, что при непрямых переходах вероятность индуцированного излучения кванта может не равняться вероятности резонансного поглощения.

Рассмотрим, например, не прямой переход, при котором одновременно испускается квант и фонон. Обратным такому процессу будет процесс одновременного поглощения кванта и фонона.

Вероятность поглощения пропорциональна числу фононов в решетке кристалла. Число фононов уменьшается с понижением температуры: при низкой температуре фононы отсутствуют. Снижая температуру образца, можно сделать вероятность излучения много больше вероятности поглощения. Поэтому для не прямых переходов отрицательная температура может быть получена при значительно более низкой концентрации электронов и дырок [4].

Следует отметить, что поглощение и излучение квантов при переходах внутри зоны также происходят за счет не прямых переходов. При создании отрицательной температуры между зонами внутризонное распределение электронов (и дырок) соответствует положительной температуре и приводит к поглощению излучения.

В случае прямых переходов, когда вероятность междузонных переходов много больше внутризонных переходов, можно пренебречь внутризонными переходами, т.е. можно утверждать, что состояния с отрицательной температурой будут усиливать излучение.

В случае не прямых переходов для усиления недостаточно иметь отрицательную температуру, нужно, чтобы вероятность междузонных переходов была больше, чем внутризонных переходов.

Необходимость выполнения этого условия затрудняет использование не прямых переходов. По оценкам Думке [5], оно не может быть выполнено для германия, но может выполняться для других полупроводников [6].

В ряде случаев в полупроводниках электрон и дырка образуют связанное состояние, подобное атому, – экситон. Экситоны могут рекомбинировать, давая излучение. Экситоны также могут быть использованы для создания квантовых генераторов, но мы не будем на этом останавливаться.

Мы рассмотрели условия возникновения отрицательной температуры в полупроводниках с идеальной решеткой. В неидеальном кристалле возникают дополнительные уровни энергии, связанные с наличием различных нарушений в кристаллической решетке (примеси, вакансии, дислокации и

т.д.). Как правило, эти состояния локализируются вблизи соответствующего центра (например, примесного атома), чем они и отличаются от состояний в разрешенных зонах, принадлежащих всему кристаллу в целом.

В идеальном кристалле число электронов в зоне проводимости точно равно числу дырок в валентной зоне. Однако в реальном кристалле число носителей тока, электронов и дырок определяется в основном наличием примесей.

Существует два сорта примесей: одни имеют уровни энергии, расположенные вблизи зоны проводимости, и, ионизируясь, создают избыточные электроны. Они получили название донорных примесей. Другие, имея уровни вблизи валентной зоны, способны захватывать электроны из валентной зоны, создавая в ней избыточное количество дырок. Эти примеси получили название акцепторов (рис. 5).

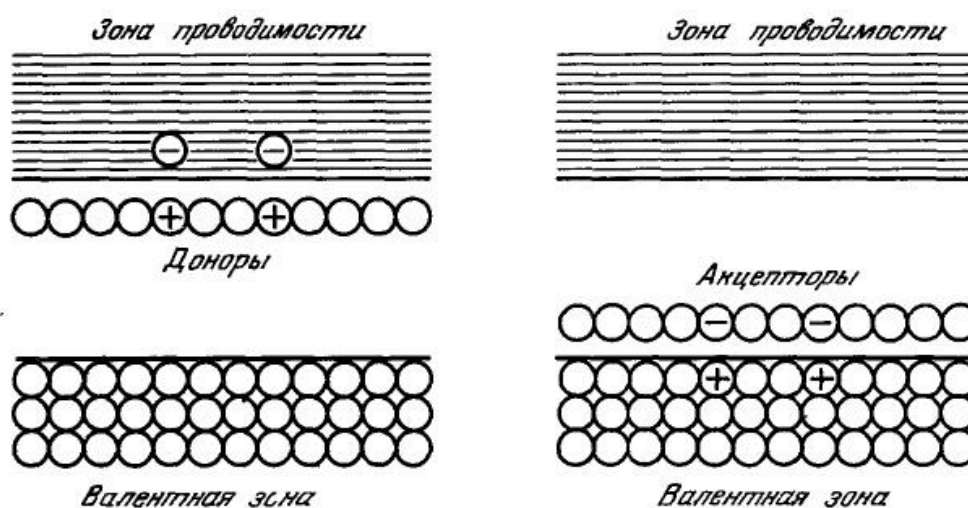


Рис. 5. Донорные и акцепторные уровни

Следует отметить, что полупроводник, в котором имеется одинаковое количество донорных и акцепторных примесей, ведет себя как чистый полупроводник, так как дырки, образованные акцепторами, рекомбинируют с электронами, образованными дырками.

В ряде случаев переходы электронов между зонами и примесными атомами или между уровнями примесных атомов тоже могут сопровождаться излучением. Такие переходы также могут быть использованы для получения отрицательной температуры, однако мы не будем останавливаться и на этом вопросе.



## II. Метод получения состояний с отрицательной температурой в полупроводнике

### а. Метод оптической накачки

В случае полупроводников можно воспользоваться «трехуровневой» схемой [7], с успехом применяемой для парамагнитных квантовых усилителей [8] и оптических генераторов на люминесцентных кристаллах и стеклах [9] (рис. 6).

Так как время релаксации электронов и дырок по уровням зон [10] много меньше времени жизни электронов и дырок в соответствующих зонах, инверсная населенность может быть получена с помощью света.

Полупроводники обладают очень большим коэффициентом поглощения, сильно увеличивающимся при увеличении частоты излучения. Поэтому для получения инверсной населенности в образцах сравнительно большой толщины целесообразно использовать монохроматическое излучение с частотой, близкой к частоте междузонных переходов [11]. В случае, когда частота возбуждающего излучения больше ширины запрещенной зоны, состояние с отрицательной температурой образуется в узкой полосе вблизи границы образца глубиной в несколько микрон (порядка длины диффузии электронов).

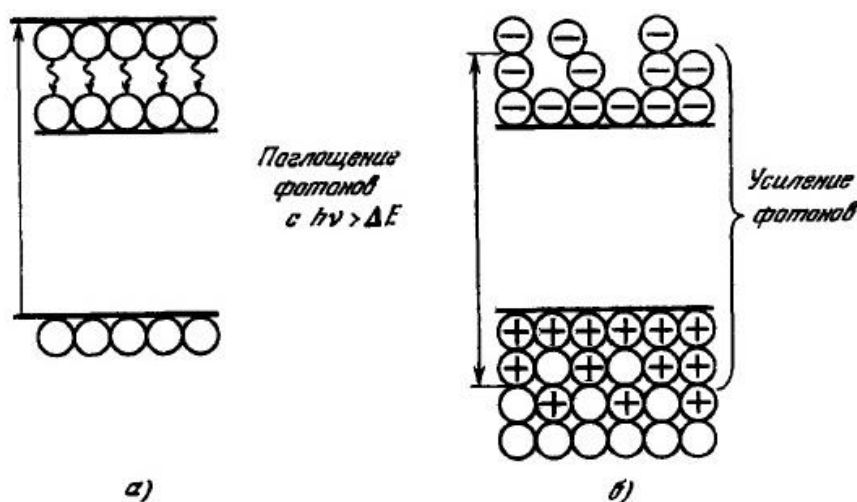


Рис. 6. Схемы оптической накачки: *а* – трехуровневая диаграмма для атомов; *б* – для полупроводников

В качестве источника излучения можно использовать свет лазеров других типов: газовых лазеров, лазеров на люминесцентных кристаллах, лазеров на *p-n*-переходах [11].

### **б. Возбуждение полупроводников пучком быстрых электронов**

Если направить пучок быстрых электронов на поверхность полупроводника, то электроны легко проникают в глубь полупроводника. На своем пути, сталкиваясь с атомами кристалла, быстрые электроны образуют электронно-дырочные пары. Расчеты и опыты [12; 13] показывают, что для образования одной электронно-дырочной пары тратится энергия, примерно в три раза большая, чем минимальная разность энергий между зонами. Образовавшиеся электроны и дырки, отдавая избыточную энергию атомам решетки, собираются на уровнях вблизи краев соответствующих зон. При этом может образоваться состояние с отрицательной температурой [14; 15]. Чем больше энергия электронов, тем больше их глубина проникновения. Однако существует некоторая пороговая энергия, начиная с которой электроны будут создавать дефекты в кристалле – разрушать кристаллическую решетку. Пороговая энергия зависит от энергии связи атомов в кристаллах и составляет обычно несколько сотен кэВ. Опыты показали, что электроны с энергией 200–500 кэВ еще не сильно портят решетку.

Плотность тока быстрых электронов, при которой образуется отрицательная температура, сильно зависит от времени жизни электронов и дырок. Для полупроводников с временем жизни  $\sim 10^{-8}$  с при температурах жидкого азота пороговая плотность тока имеет порядок  $1 \text{ А/см}^2$ . Так как выделяемую в полупроводнике энергию при таких больших токах трудно отвести, обычно используется импульсный метод возбуждения с малой скважностью импульса.

### **в. Инжекция электронов и дырок через *p-n*-переход**

Как было отмечено выше, специфической особенностью полупроводников является то, что его энергетические уровни могут заполняться электронами или дырками за счет введения в кристалл специально подобранных атомов примесей. Однако одновременное введение донорных и акцепторных примесей не приводит к возникновению состояний с отрица-

тельной температурой. Поэтому для получения инверсной населенности поступают следующим образом. Берут два «куска» полупроводника, в один из них вводятся донорные примеси, в другой – акцепторные. Если такие полупроводники соединить, то образуется  $p$ - $n$ -переход: на границе раздела полупроводников возникает скачок потенциала, препятствующий проникновению электронов в кристалл, в котором имеются дырки, а дырок – в кристалл, в котором имеются электроны (рис. 7, а). Как было отмечено выше, для получения инверсной населенности необходима большая концентрация электронов и дырок (должно быть занято больше половины уровней в некоторой полосе энергий), т.е. полупроводник должен содержать большое количество примесей.

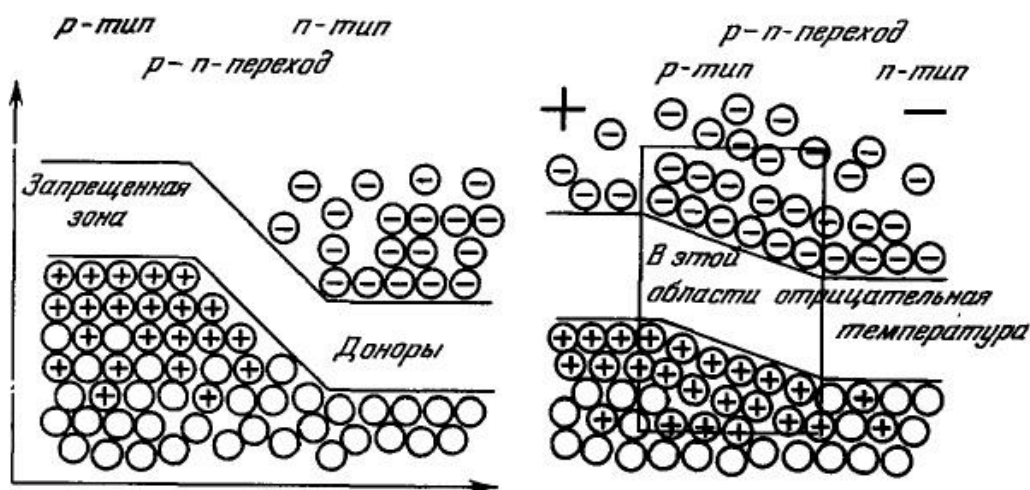


Рис. 7. а – переход в равновесии; б – переход во внешнем электрическом поле

Если к  $p$ - $n$ -переходу приложить внешнее напряжение, снимающее скачок потенциала между двумя частями полупроводника, то равновесное распределение электронов нарушится и через полупроводник пойдет ток. При этом электроны как бы вливаются в область, где много дырок, а дырки – в область, где много электронов, и в узкой зоне вблизи  $p$ - $n$ -перехода на расстоянии в несколько микрон возникает инверсная населенность.

Получается слой полупроводника, способный усиливать электромагнитные колебания за счет вынужденного излучения квантов при переходе электронов из зоны проводимости в валентную зону [16] (рис. 7, б).

При создании полупроводниковых приборов было разработано много методов получения  $p$ - $n$ -переходов.

В настоящее время для создания лазеров удалось использовать два метода изготовления  $p$ - $n$ -переходов: диффузионный метод [17; 18] и метод легирования различными примесями при росте кристаллов [19].

### III. Полупроводниковые квантовые генераторы

Для осуществления генерации на основе систем с отрицательной температурой необходимо в такую систему ввести обратную связь. Обратная связь осуществляется с помощью резонаторов. Простейшим типом резонаторов в оптическом диапазоне является резонатор с плоскопараллельными зеркалами [20; 21]. Отражаясь от зеркал, кванты света будут многократно проходить через усиливающую среду. Если квант света, прежде чем он будет поглощен зеркалами или внутри образца, успеет вызвать индуцированное излучение более одного кванта (т.е. если в системе будет выполнено условие самовозбуждения генератора), то такая система будет работать как генератор (рис. 8, *a*). Если поддерживать в образце с помощью внешнего источника энергии некоторую отрицательную температуру, то число квантов в резонаторе будет нарастать до тех пор, пока число возбуждаемых в единицу времени электронов не станет равным числу излучаемых квантов.

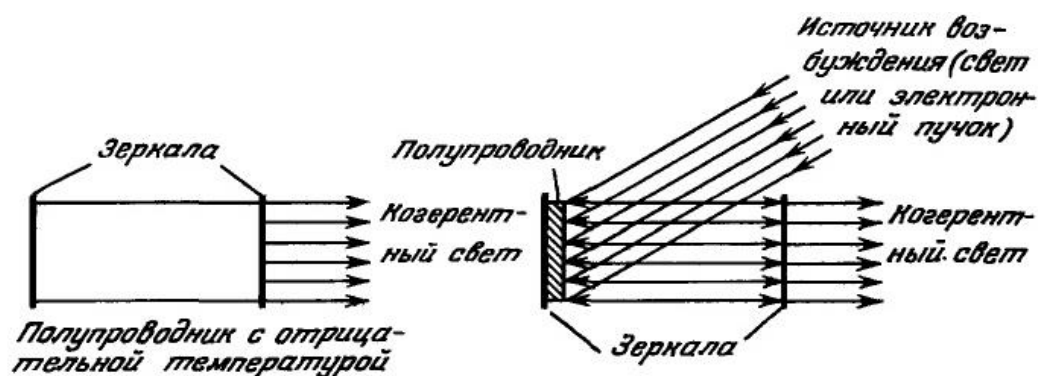


Рис. 8. Диаграммы полупроводниковых лазеров: *a* – обычные лазеры; *б* – с излучающими зеркалами

Следует особо подчеркнуть, что, когда квантовая система с обратной связью работает как генератор, ее излучение имеет строго определенное значение частоты.

Это свойство отличает излучение генератора от всех других источников света: ламп накаливания, люминесцентных ламп и от источников света с очень узкими спектральными линиями атомов и молекул.

Монохроматичность излучения квантового генератора является следствием свойств индуцированного излучения: частота кванта при индуцированном излучении равна частоте кванта, вызвавшего излучение. Исходная ширина линий в полупроводниках обычно составляет несколько сотен ангстрем. В настоящее время показано, что ширина линии в генераторах, использующих *p-n*-переход в арсениде галлия, меньше 0,0017 Å [22; 24]. Конечное значение ширины генерируемой линии связано со спонтанным излучением.

Наряду с изменением спектрального состава излучения в режиме генерации возникает пространственная направленность излучения. Она также связана с природой индуцированного излучения; при индуцированном излучении квант света имеет то же направление распространения, что и вызвавший его квант.

Обычно в полупроводниковых квантовых генераторах резонатором служит сам образец, так как полупроводниковые кристаллы имеют большую диэлектрическую постоянную и отполированная граница раздела воздух–диэлектрик способна отражать около 30% излучения.

Впервые полупроводниковые генераторы были осуществлены на *p-n*-переходе в кристаллах GaAs [17; 18], несколько позже при возбуждении электронным пучком [15] и в последнее время с оптическим возбуждением [23]. В таблице указаны различные полупроводниковые материалы, на которых удалось осуществить генерацию, и указаны методы возбуждения.

С помощью полупроводников уже удалось перекрыть большой диапазон частот от 0,5 до 8,5 мкм. В ряде случаев удается непрерывно перекрыть большой диапазон частот, так как изменение концентрации компонент в тройных полупроводниковых соединениях приводит к изменению расстояния между зонами, т.е. позволяет менять непрерывно частоту излучения. Например, изменения состава в системе InAs–InP приводит к изменению частоты от 0,9 до 3,2 мкм [25].

В настоящее время наибольшее развитие получили квантовые генераторы на  $p$ - $n$ -переходах в GaAs. Были получены импульсный и непрерывный режимы со средней мощностью в несколько ватт и пиковой мощностью до 100 Вт при КПД около 30% [24].

Наиболее интересной особенностью полупроводниковых квантовых генераторов является высокий коэффициент полезного действия. Так как для генераторов на  $p$ - $n$ -переходах имеет место прямое преобразование энергии электрического тока в когерентное излучение, коэффициент полезного действия может приближаться к единице. Уже сейчас удается делать диоды, имеющие КПД 70–80% [26].

### Полупроводниковые квантовые генераторы

Полупроводниковый материал	Длина волны излучения, мк	Метод возбуждения	Литература
CdS	0,5	Пучок быстрых электронов	[15]
CdTe	0,8	» » »	[30]
GaAs	0,85	Пучок быстрых электронов,	[29]
		$p$ - $n$ -переход	[17, 18]
		оптическая накачка	[23]
InP	0,9	$p$ - $n$ -переход,	[31]
GaSb	1,6	$p$ - $n$ -переход,	[32]
		пучок быстрых электронов	[33]
InAs	3,2	$p$ - $n$ -переход,	[34]
		Пучок быстрых электронов	[6]
InSb	5,3	$p$ - $n$ -переход,	[36]
		Пучок быстрых электронов	[35]
PbTe	6,5	$p$ - $n$ -переход	[24]
PbSe	8,5	$p$ - $n$ -переход	[24]
GaAs–GaP	0,65–0,9	$p$ - $n$ -переход	[37]
InAs–InP	0,9–3,2	$p$ - $n$ -переход	[25]
GaAs–InAs	0,85–3,2	$p$ - $n$ -переход	[38]

Очень высоким коэффициентом полезного действия должны обладать и квантовые генераторы с монохроматической оптической накачкой, так как частота накачки может быть близка к частоте излучения [11].

Коэффициент полезного действия лазеров с электронным возбуждением не может быть выше 30% [12], так как две трети энергии тратится на нагрев решетки при образовании электронно-дырочной пары.

Однако такие генераторы могут обладать значительной мощностью. Этот вид возбуждения, по-видимому, позволит создать источники когерентного излучения, работающие вплоть до далекой ультрафиолетовой области.

Другой особенностью полупроводников является высокий коэффициент усиления, достигающий нескольких тысяч обратных сантиметров, что позволяет создавать квантовые генераторы с размерами, исчисляемыми микронами, т.е. с размерами резонатора, близкими к длине волны излучения. Такие резонаторы должны обладать очень малым временем установления, порядка  $10^{-12}$ – $10^{-13}$  с, что открывает возможности для сверхвысокочастотного управления колебаниями полупроводниковых генераторов, для создания на основе лазеров сверхбыстродействующих схем, например элементов для сверхбыстродействующих электронно-счетных машин. На основе полупроводниковых веществ могут быть созданы генераторы с модулированной добротностью, дающие очень короткие импульсы света.

Малые размеры полупроводниковых лазеров открывают возможности для создания квантовых усилителей, обладающих предельно высокой чувствительностью, так как чувствительность увеличивается с уменьшением числа типов колебаний, которые могут возбуждаться в резонаторе. Созданы первые усилители света с коэффициентом усиления около 2000 [28].

Высокий коэффициент усиления в полупроводниковых генераторах позволяет создать для них новый тип резонатора – резонатор с излучающими зеркалами (рис. 8, б) [27].

Серебряное зеркало покрывается тонкой полупроводниковой пленкой, которая затем покрывается просветляющей пленкой. Если в полупроводниковой пленке создать состояние с отрицательной температурой, которое сможет компенсировать потери зеркала, такое зеркало может быть основой для создания квантового генератора. Как и в случае газового генератора, здесь можно ожидать очень высокую монохроматичность и пространственную когерентность излучения. Значительным преимуществом такой системы является также сравнительная легкость отвода тепла от

тонкой полупроводниковой пленки, что позволяет надеяться на получение значительной мощности.

Для получения отрицательной температуры в полупроводниковой пленке можно воспользоваться электронным возбуждением или оптической накачкой. Применение для оптической накачки полупроводниковых лазеров на  $p$ - $n$ -переходах позволит получить большой коэффициент полезного действия системы в целом.

Вопрос о предельных мощностях, которые могут быть получены с помощью полупроводниковых генераторов, в настоящее время еще недостаточно ясен. Однако применение излучающих зеркал достаточно большой площади, по-видимому, дает возможность использовать значительное количество полупроводникового вещества. Предельное значение сечения зеркал определяется точностью их изготовления, однородностью полупроводникового слоя и т.д. Различные нарушения оптической однородности будут приводить к возникновению высших типов колебаний.

Среди недостатков полупроводниковых квантовых генераторов следует отметить сравнительно малую мощность, большую пространственную расходимость и недостаточно высокую монохроматичность.

Однако, отмечая эти недостатки, следует иметь в виду, что полупроводниковая квантовая электроника делает еще только первые шаги. И сейчас уже видны пути устранения указанных недостатков, а также направления дальнейшего развития полупроводниковой квантовой электроники и расширения сферы применения полупроводниковых лазеров. Все это позволяет надеяться, что полупроводниковая квантовая электроника будет и дальше играть фундаментальную роль в развитии лазеров.

### Список литературы

1. Н.Г. Басов, Б. М. Вул, Ю. М. Попов, ЖЭТФ 37, 585 (1959).
2. R.H. Dicke, in Quantum Electronics, Columbia University Press., New York, 1960, p. 572.
3. Н.Г. Басов, О. Н. Крохин, Ю. М. Попов, УФН 72, 161 (1960).
4. Н.Г. Басов, О. Н. Крохин, Ю. М. Попов, ЖЭТФ 39, 100 (1960).
5. W.P. Dumke, Phys. Rev. 127, 1559 (1962).
6. C. Benoita la Guillaume, J. M. Debever, Symp. Radiative Recombination in Semiconductor, Paris, 1964.



7. Н.Г. Басов, А. М. Прохоров, ЖЭТФ 28, 249 (1955).
8. N. Bloembergen, Phys. Rev. 104, 324 (1956).
9. Т.Н. Матман, Nature 187, 493 (1960).
10. О.Н. Крохин, Ю.М. Попов, ЖЭТФ 38, 1589 (1960).
11. Н.Г. Басов, О.Н. Крохин, ЖЭТФ 46, 1508 (1964).
12. Ю.М. Попов, Труды ФИАН 23, 67 (1963).
13. В.С. Вавилов, УФН 75, 263 (1961).
14. N.G. Basov, O.N. Krokhin, and Yu. M. Popov, in Adv. Quant. Electr., New York, 1961, p. 496.
15. Н.Г. Басов, О.В. Богданкевич, А. Девятков, ДАН СССР 55, 783 (1964).
16. Н.Г. Басов, О.Н. Крохин, Ю. М. Попов, ЖЭТФ 40, 1879 (1961).
17. В.Н. Hall, G.E. Benner, J. D. Kingsley, T. J. Soltus, R. Carlos, Phys. Rev. Letts. 9, 366 (1962).
18. M.I. Natham, W. P. Dumke, G. Bums, F. H. Dill, G. J. Lasher, Appl. Phys. Letts. 1, 62 (1962).
19. М. Bernar, частное сообщение.
20. А.М. Прохоров, ЖЭТФ 34, 1658 (1959).
21. L. Schawlow, C. H. Townes, Phys. Rev. 112, 1940 (1958).
22. J.A. Armstrong, A. W. Smith, Appl. Phys. Letts. 4, 196 (1964).
23. Н.Г. Басов, А. З. Грасюк, В. Катулин, ДАН СССР 165, № 6 (1965).
24. C. Hilsum, Lasers and Their Applications, London 1964.
25. F.B. Alexander, Appl. Phys. Letts. 4, 1 (1964).
26. M.I. Nathan, PI EEE 52, 770 (1964).
27. N.G. Basov, and O. V. Bogdankevich, Symp. of Radiative Recombination in Semiconductor, Paris, July 23, 1964.
28. J.W. Crowe, R. W. Graig, Appl. Phys. Letts. 4, 57 (1964).
29. C.E. Hurwitz, R. J. Kayes, Appl. Phys. Letts. 5, 139 (1964).
30. В.С. Вавилов, Э.Л. Нолле, В. Д. Егоров, ФТТ 7, № 3 (1965)
31. G. Burns, R.S. Lewitt, M. I. Nathan, K. Weiser, PI EEE 51, 1143 (1963).
32. T. Deutsch et al., Phys. Stat. Solids 3, 1001 (1963).
33. C. Benoitata Guillaume, J. M. Debever, Preprint, Compt. rend. (1964).
34. Melngilis, Appl. Phys. Letts. 2, 176 (1963).
35. C. Benoitata Guillaume, J. M. Debever, Sci. St. Com. 2, 145 (1964).
36. R.J. Phelan, A.R. Calawn, R.H. Redikes, R.J. Keyes, B. Lax, Appl. Phys. Letts. 3, 143 (1963).
37. N. Holonyak, Jr., and S. F. Bevaqua, Appl. Phys. Letts. 1, 82 (1962).
38. T.M. Quist, R.H. Rediker, R.T. Keyes and W.E. Dray, Bull. Amer. Phys. Soc., 88 (January 1963).



*Александр Михайлович Прохоров*

*(1916–2002)*

## БИОГРАФИЯ<sup>36</sup>

Александр Михайлович Прохоров (1916–2002) родился 11 июля в Австралии. После Великой Октябрьской революции он вместе с родителями вернулся в Советский Союз.

В 1934 г. Александр Прохоров поступил на физический факультет Ленинградского государственного университета. Среди его преподавателей были профессора В.А. Фок (квантовая механика, теория относительности), С.Е. Фриш (общая физика, спектроскопия) и Е.К. Гросс (молекулярная физика). В 1939 г., после окончания университета, он поступил в аспирантуру Физического института им. П.Н. Лебедева в Москве, в лабораторию колебаний, возглавляемую академиком Н.Д. Папалекси. Там он начал изучать проблемы распространения радиоволн. В июне 1941 г. его призвали в Красную Армию. Он принимал участие во Второй мировой войне, был дважды ранен. После второго ранения, в 1944 г., он был демобилизован и вернулся в лабораторию колебаний Физического института им. П.Н. Лебедева. Там он начал исследовать нелинейные колебания под руководством профессора С.М. Рытова.

В 1946 г. он защитил кандидатскую диссертацию по теме «Теория частотной стабилизации лампового генератора в теории малого параметра». Начиная с 1947 г., по совету академика В.И. Векслера, Прохоров занимался исследованиями когерентного излучения электронов в синхротроне в сантиметровом диапазоне длин волн. В результате этих исследований он написал и защитил докторскую диссертацию по теме «Когерентное излучение электронов в синхротронном ускорителе».

После смерти в 1946 г. академика Н.Д. Папалекси лабораторию колебаний возглавил академик М.А. Леонтович. С 1950 г., работая в должности заместителя директора лаборатории, Прохоров начал широкие исследования проблем радиоспектроскопии, а несколько позже квантовой электроники. Он организовал группу из молодых ученых для исследования в этих областях физики.

---

<sup>36</sup> Александр Михайлович Прохоров (1916–2002). Биография / пер. с англ. А. Колобова // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 5 : 1960–1967. – С. 321–324. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

В 1954 г., после перехода академика М.А. Леонтовича в Институт атомной энергии, Прохоров стал директором лаборатории колебаний. В 1959 г. из одного из отделов лаборатории колебаний Прохоров создал лабораторию радиоастрономии (под руководством профессора В.В. Виткевича), а в 1962 г. – лабораторию квантовой радиофизики (под руководством профессора Н.Г. Басова).

Директор Физического института им. П.Н. Лебедева академик Д.В. Скобельцын и академик М.А. Леонтович внесли огромный вклад в развитие радиоспектроскопии и квантовой электроники. Идея молекулярного генератора возникла в результате работ Басова и Прохорова в области микроволновой спектроскопии. Они разработали теоретическое обоснование для создания молекулярного генератора, а также создали молекулярный генератор, работающий на аммиаке. В 1955 г. Басов и Прохоров предложили метод для создания отрицательного поглощения, названный методом накачки.

С 1950 г. по 1955 г. Прохоров со своими коллегами с помощью методов микроволновой спектроскопии исследовал различные типы молекулярных решеток. В 1955 г. он занялся изучением электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Прохоров провел цикл исследований ЭПР-спектров и времен релаксации различных кристаллов, в частности исследование спектра ионов элементов группы железа в решетке  $Al_2O_3$ . В 1955 г. Прохоров, совместно с А.А. Маненковым, исследовал ЭПР-спектр рубина, что позволило использовать его для создания лазера в 1957 г. Они спроектировали и построили мазеры на основе различных материалов, кроме того, были исследованы характеристики этих мазеров. Эта работа выполнялась совместно с лабораторией радиоспектроскопии Института ядерной физики Московского государственного университета, которую Прохоров организовал в 1957 г. Один из мазеров с длиной волны 21 см использовался для наблюдений на радиоастрономической станции в Пущино.

ЭПР-метод применялся также для изучения свободных радикалов. Например, с помощью этого метода был обнаружен переход свободного

радикала DPPH из парамагнитного в антиферромагнитное состояние при температуре 0,3 К.

В 1958 г. Прохоров предложил идею лазера, генерирующего субмиллиметровые волны. Для этого он разработал новый резонатор, состоящий из двух зеркал, названный позднее «открытым резонатором». Фактически это был интерферометр Фабри–Перо. Резонаторы этого типа широко применяются при создании лазеров.

В настоящее время Прохоров занимается разработкой твердотельных лазеров и их использованием в физических исследованиях, в частности при исследовании многофотонных процессов. В 1963 г. он вместе с А.С. Селиваненко предложил идею лазера, использующего два квантовых перехода.

Александр Прохоров был профессором Московского государственного университета и вице-президентом URSI.

С 1941 г. женат на Г.А. Шелепиной, географе по специальности. У них один сын.

А.М. Прохоров скончался 8 января 2002 г.

## КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА<sup>37</sup>

*Нобелевская лекция, 11 декабря 1964 г.*

Можно считать, что квантовая электроника начала свое существование с конца 1954 – начала 1955 гг. Именно в этот период были созданы теоретические основы квантовой электроники, а также спроектирован и сконструирован первый прибор – молекулярный генератор. Фундамент всей квантовой электроники – явление индуцированного, или вынужденного, излучения, предсказанного А. Эйнштейном в 1917 г. Как мы отметили, квантовая электроника появилась значительно позже.

Возникает вопрос: что препятствовало созданию квантовых приборов значительно раньше, например в период 1930–1940 гг.? Для того чтобы выяснить это, кратко напомним те принципы, на которых основывается квантовая электроника. Как было уже упомянуто, явление индуцированного излучения было предсказано Эйнштейном. Известно, что атом, находящийся в возбужденном состоянии, может отдать свою энергию в виде излучения (кванта) двумя путями. Первый путь – это спонтанное излучение, когда атом самопроизвольно излучает энергию. До создания квантовой механики явление спонтанного излучения описывалось классически, а именно: атом рассматривался как осциллятор с трением (лучистым), амплитуда которого убывала со временем. Все обычные источники света (лампы накаливания, газоразрядные лампы и т.д.) дают свет благодаря спонтанному излучению. Это означает, что явление спонтанного излучения уже давно было хорошо знакомо ученым, работающим в области оптической спектроскопии.

Второй путь, по которому атом может отдать свою энергию, – это вынужденное излучение. Это явление было рассмотрено Эйнштейном для того, чтобы описать термодинамическое равновесие между полем и атомами. Явление вынужденного излучения атома заключается в том, что

---

<sup>37</sup> Прохоров, А.М. Квантовая электроника : нобелевская лекция, Стокгольм, 11 декабря 1964 г. / А.М. Прохоров // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 5 : 1960–1967. – С. 311–320. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

возбужденный атом излучает, когда он взаимодействует с внешним квантом поля. Тогда получаются два кванта: один внешний, а другой – испущенный самим атомом. Эти два кванта неразличимы, их частота и направление совпадают. Это очень важное свойство вынужденного излучения, на которое, видимо, впервые было указано Дираком в 1927 г., и позволило создать квантовые приборы.

Для того чтобы наблюдать вынужденное излучение, нужно, во-первых, иметь возбужденные атомы, а во-вторых, необходимо, чтобы вероятность индуцированного излучения была больше вероятности спонтанного излучения. Если атомы находятся в тепловом равновесии, оптические уровни не заселены и при возбуждении атомов в обычных условиях они переходят на нижний уровень благодаря спонтанному излучению. Вероятность вынужденного излучения при обычных плотностях энергии света мала. Поэтому его не нужно было учитывать при спектроскопических исследованиях, и некоторые, вероятно, рассматривали это явление как некий искусственный прием теоретика, нужный только для построения теории.

Совершенно ясно, что, если все атомы системы находятся в возбужденном состоянии, такая система будет усиливать излучение. Нет сомнения в том, что некоторые ученые понимали это еще до 1940 г., однако никто не указал на возможность создания генераторов света. Это может показаться удивительным, потому что уже до 1940 г. оптические квантовые генераторы в принципе могли быть созданы. Однако нужны были определенные предпосылки. Они появились после окончания Второй мировой войны, когда начала бурно развиваться радиоспектроскопия. Именно ученые, работавшие в области радиоспектроскопии, заложили основы квантовой электроники [1; 2]. Чем это объяснить? Здесь имелся ряд благоприятных обстоятельств, которых не было у ученых, работавших в области оптической спектроскопии.

Прежде всего, ввиду того, что для систем, находящихся в тепловом равновесии, возбужденные уровни имели большую заселенность в радиодиапазоне, нужно было принимать во внимание индуцированное излучение. Действительно, если число частиц на нижнем уровне равно  $n_1$ , а на возбужденном –  $n_2$ , то коэффициент поглощения можно записать в виде:

$$\alpha = \frac{1}{\nu} h\nu(n_1 B_{12} - n_2 B_{21}), \quad (1)$$

где величина  $B_{12}$  характеризует вероятность поглощения, а  $B_{21}$  характеризует вероятность индуцированного испускания. Если уровни не вырождены, то  $B_{12} = B_{21}$  и тогда выражение (1) запишется в виде

$$\alpha = \frac{1}{\nu} h\nu(n_1 - n_2)B_{12}. \quad (2)$$

Для оптического диапазона в обычных условиях при тепловом равновесии  $n_2$  с большой точностью можно положить равным нулю, и тогда коэффициент поглощения

$$\alpha = \frac{1}{\nu} h\nu n_1 B_{12}. \quad (3)$$

Следовательно, для оптического диапазона коэффициент поглощения зависит только от населенности нижнего уровня.

Для радиодиапазона, как правило,  $h\nu \ll kT$ . В этом случае

$$n_2 = n_1 e^{-\frac{h\nu}{kT}} \approx n_1 \left(1 - \frac{h\nu}{kT}\right).$$

Тогда величина  $\alpha$  будет равна

$$\alpha = \frac{1}{\nu} h\nu n_1 B_{12} \frac{h\nu}{kT}. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что из-за индуцированного излучения величина коэффициента поглощения становится в  $kT/h\nu$  раз меньше, чем это было бы без его учета. Следовательно, всем работающим в области радиоспектроскопии необходимо учитывать индуцированное излучение. Более того, чтобы увеличить коэффициент поглощения, приходилось понижать температуру, чтобы уменьшить населенность верхнего уровня и тем самым уменьшить влияние вынужденного излучения. Из формулы (2) следует, что для систем, не находящихся в тепловом равновесии, но удовлетворяющих условию  $n_2 > n_1$ , величина коэффициента поглощения становится отрицательной, т.е. такая система может усиливать излучение. Именно для радиодиапазона такие системы, по существу, давно были известны физикам.

Если пропустить молекулярные (атомные) пучки через неоднородное магнитное или электрическое поле, то мы можем отделить молекулы, находящиеся в определенном энергетическом состоянии. В частности, можно



получать пучки молекул, находящихся только в верхнем состоянии. С другой стороны, физики, работавшие в области микроволновой радиоспектроскопии, стали думать о применении молекулярных пучков для увеличения разрешающей силы радиоспектроскопов. Для увеличения интенсивности спектральных линий в пучках нужно было иметь молекулы либо в нижнем, либо в верхнем состоянии, т.е. разделить их неоднородным электрическим или магнитным полем. Если молекулы после сортировки будут находиться в верхнем состоянии, то такая система будет усиливать.

Из радиотехники хорошо известно, что всякая система, способная усиливать колебания, может их генерировать. Для этого нужна обратная связь. Теория обычных генераторов радиодиапазона хорошо разработана. Для описания таких генераторов вводится понятие отрицательного сопротивления или проводимости, т.е. вводится элемент, имеющий отрицательные потери. В случае квантового генератора таким «элементом» является среда с отрицательным коэффициентом поглощения. Поэтому условие самовозбуждения квантового генератора должно записываться аналогично условию для обычного «классического» генератора. По аналогии с обычными генераторами в радиодиапазоне волн следует ожидать, что и для квантового генератора колебания будут близки к гармоническим.

Наконец, важным элементом квантового генератора, как и всякого другого генератора синусоидальных колебаний, является резонаторная система. Однако для радиодиапазона резонаторные системы были хорошо разработаны, и для мазеров были использованы резонаторы, применяющиеся в радиодиапазоне. Таким образом, очень важный элемент – объемный резонатор – также был хорошо известен работающим в области радиоспектроскопии.

Следовательно, для лиц, работавших в области радиоспектроскопии, уже были «готовы» отдельные элементы мазеров и требовалось только их синтезировать, чтобы получить мазер. Первые две статьи [1; 2] (одна из которых была опубликована в СССР, а другая в США) появились независимо, и обе они были непосредственно связаны с созданием радиоспектроскопов высокой разрешающей силы с использованием молекулярных пучков. Как легко можно видеть, этот результат явился вполне закономерным.

Эти работы явились началом развития квантовой электроники; ее первые успехи стимулировали дальнейшее ее продвижение. Уже в 1955 г. был предложен новый метод – метод накачки для получения отрицательного поглощения [3]. Этот метод получил дальнейшее развитие и применение для создания квантовых приборов новых типов. В частности, метод накачки был развит и применен для создания квантовых усилителей в радиодиапазоне на основе явления электронного парамагнитного резонанса [4; 5].

Казалось бы, что после создания мазеров в радиодиапазоне вскоре будут созданы квантовые генераторы и в оптическом диапазоне. Однако этого не случилось. Они были созданы только через пять-шесть лет. Чем это объясняется? Здесь были две трудности. Первая трудность заключалась в том, что тогда не были предложены резонаторы для оптического диапазона волн, и вторая – не были предложены конкретные системы и методы получения инверсной населенности в оптическом диапазоне волн.

Остановимся прежде на вопросе о резонаторах. Известно, что радиотехника начала свое развитие с освоения длинных волн, где использовались резонаторы в виде катушек самоиндукции и сосредоточенных емкостей. В этом случае размеры резонаторов были много меньше длины волны. При продвижении в сторону коротких волн стали применяться объемные резонаторы, т.е. замкнутые полости. Размеры этих резонаторов сравнимы с длиной волны. Ясно, что с помощью таких резонаторов нельзя продвинуться в область очень коротких волн, в частности в область оптического диапазона.

В 1958 г. был предложен так называемый открытый тип резонаторов для создания квантовых генераторов в области коротких волн [6]. Более подробный анализ таких резонаторов для оптических квантовых генераторов дан в работе [7]. По существу, это есть эталон Фабри–Перо, однако «радиотехнический» подход позволил предложить эту систему в качестве резонаторов. Впоследствии наряду с плоскими зеркалами стали использоваться также сферические зеркала. В настоящее время открытые резонаторы широко используются для лазеров. Размеры таких резонаторов много больше длины волны. Были также предложены системы для получения отрицательного поглощения в субмиллиметровом (далеком инфракрасном) диапазоне

волн [6], в инфракрасном и оптическом диапазонах волн [7–10]. Эти работы стимулировали дальнейшее продвижение в области более коротких волн и, в частности, оптического диапазона. Однако только в 1960 г. был создан первый оптический квантовый генератор [11]. В качестве активного материала использовался рубин, накачиваемый лампой-вспышкой.

После освоения оптического диапазона стали думать об освоении рентгеновского диапазона. Здесь возникают те же трудности, что были и для оптического диапазона волн. Нужно было предложить новые типы резонаторов, а также найти системы, с помощью которых можно получить отрицательное поглощение. Как известно, рентгеновские квантовые генераторы пока не созданы. Мы тоже пытались подойти к этой задаче, но здесь встретились большие трудности. Действительно, в рентгеновской области время жизни на возбужденных уровнях мало, и можно считать, что ширина линии определяется только временем жизни. Тогда коэффициент поглощения может быть записан в очень простом виде:

$$\alpha = \frac{\lambda^2}{4\pi} (n_1 - n_2), \quad (5)$$

где  $\lambda$  – длина волны, а  $n_1$  и  $n_2$  – плотность числа частиц на нижнем и верхнем уровнях соответственно. Из этой формулы видно, что коэффициент поглощения быстро падает с уменьшением длины волны. Это крайне неприятное обстоятельство. Действительно, для работы генератора величина  $\alpha$  должна быть порядка одного обратного сантиметра. Если  $\lambda = 1 \text{ \AA}$ , то плотность числа частиц на верхнем уровне должна быть не менее  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Время жизни на верхнем уровне  $10^{-16} \text{ с}$ . Следовательно, мы должны забрасывать за одну секунду  $10^{33}$  частиц/см<sup>3</sup>. Для такой задачи имеются значительные экспериментальные трудности. Однако и без создания квантовых генераторов в рентгеновской области успехи квантовой электроники огромны.

Уже в настоящее время диапазон, в котором работают лазеры и мазеры, крайне большой. Если недавно далекий инфракрасный диапазон не был освоен, то сейчас исследования в этом диапазоне ведутся с большим успехом. Практически с помощью мазеров и лазеров можно получать излучение от самых низких радиочастот до ультрафиолета. Работа всех квантовых ге-

нераторов основана на том, что в средах с отрицательным поглощением из-за большой плотности поля вероятность индуцированного излучения доминирует над спонтанным или безызлучательным переходом. Более того, в настоящее время, например, можно получать от рубинового генератора такие плотности энергии, при которых вероятность многоквантовых процессов становится сравнимой или превосходит вероятность одноквантовых процессов. Это новый качественный скачок, который приводит к различного рода интересным следствиям. Прежде всего можно оценить ту предельную мощность, которую может дать рубиновый лазер с одного квадратного сантиметра. Эта мощность равна  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> [12]. При этой мощности вероятность одновременного поглощения трех квантов красного света с перебросом электрона в зону проводимости настолько велика, что прекращается дальнейший рост поля. Для трехквантовых процессов потери растут пропорционально кубу плотности энергии, т.е. зависимость от поля очень сильная.

Большие электрические поля, которые имеются в лазерном луче, могут произвести ионизацию и диссоциацию молекул, а также пробой в твердом теле. Многоквантовые процессы не всегда приносят вред (например, ограничивая предельную мощность, даваемую лазером); они могут открывать совершенно новые возможности для дальнейшего развития квантовой электроники. Это интересное и принципиально новое направление связано с созданием квантовых генераторов с использованием двухквантовых переходов. На возможность создания таких генераторов было указано в 1963 г. в СССР [13] и независимо в США [14; 15]. Идея такого генератора заключается в том, что если имеется инверсная заселенность между двумя уровнями с разностью энергий  $h\nu$ , то возможна генерация на двух частотах  $\nu_1$  и  $\nu_2$  таким образом, что

$$\nu_1 + \nu_2 = \nu. \quad (6)$$

В частности, частоты  $\nu_1$  и  $\nu_2$  могут совпадать, но, вообще говоря, они могут быть любыми, лишь бы выполнялось соотношение (6).

Работа такого генератора, как было уже сказано, связана с двухквантовыми переходами, вероятность которых достаточно велика, если плотность поля значительна. Для самовозбуждения такого генератора нужно создать с помощью другого генератора достаточно большую начальную плот-

ность энергии на частоте  $\nu_1$  или  $\nu_2$ , и только после самовозбуждения такого генератора внешнее поле можно убрать. И здесь мы можем найти аналогию с обычными ламповыми генераторами радиодиапазона, которые при определенных условиях могут самовозбуждаться, если на них сначала воздействовать внешней силой определенной величины.

Такой генератор имеет две особенности: он обеспечивает более быстрый рост плотности поля, чем в обычном лазере, и дает возможность получать любую частоту при сохранении соотношения (6).

Создание генератора, работающего на любой заданной частоте излучения, еще больше расширит область применения лазеров.

Очевидно, что, если мы создадим лазер с широкой спектральной полосой излучения, мы, бесспорно, сможем влиять на молекулы таким образом, чтобы возбуждать в них определенные связи и управлять химическими реакциями.

Это непростая проблема, но она чрезвычайно интересна, и, возможно, ее решение сделает революцию в ряде отраслей химической индустрии.

### Список литературы

1. Н.Г. Басов, А.М. Прохоров. ЖЭТФ 27, 431 (1954).
2. J.B. Gordon, H.J. Zeiger, C. H. Townes, Phys. Rev. 95, 282 (1954).
3. Н.Г. Басов, А.М. Прохоров. ЖЭТФ 28, 249 (1955).
4. N. Bloembergen, Phys. Rev. 104, 324 (1956).
5. H.E.D. Scovil, G. Feher, H. Seidel, Phys. Rev. 105, 762 (1957).
6. А.М. Прохоров. ЖЭТФ 34, 1658 (1958).
- A. L. Shawlow, C.H. Townes, Phys. Rev. 112, 1940 (1958).
7. Н.Г. Басов, Б.М. Вул, Ю. М. Попов. ЖЭТФ 37, 587 (1959).
- A. Javan, Phys. Rev. Letts. 3, 87 (1959).
8. Ф.А. Бутаева, В.А. Фабрикант. О среде с отрицательным коэффициентом поглощения, в сб. памяти Г.С. Ландсберга «Исследования по экспериментальной и теоретической физике». М., Изд-во АН СССР\* 1959, с. 62.
9. Т.Н. Матман, Brit. Comm, and Electr. 1, 674 (1960).
10. Ф.В. Бункин, А.М. Прохоров. ЖЭТФ, № 4 (1965).
11. А.М. Прохоров, А.С. Селиваненко. Авторское свидетельство от 24 декабря 1963 г. № 872303.
12. P.P. Sorokin, N. Braslau, IBM Journ. 8, 177 (1964).
13. R.L. Garwin, IBM Journ. 8, 338 (1964).



***Петр Леонидович Капица***  
*(1894–1984)*

## БИОГРАФИЯ<sup>38</sup>

Петр Леонидович Капица (1894–1984) родился 9 июля в Кронштадте, неподалеку от Санкт-Петербурга, в семье Леонида Петровича Капицы, генерал-лейтенанта инженерного корпуса, и Ольги Иеронимовны Капицы, урожденной Стебницкой, педагога и исследовательницы фольклора.

Научная карьера Петра Капицы началась во время обучения на факультете инженеров-электриков Петроградского политехнического института, возглавляемого А.Ф. Иоффе. Закончив его в 1918 г., Капица три года продолжал работать в этом же институте. Здесь, совместно с Н.Н. Семеновым, он разработал метод измерения магнитного момента атомов, взаимодействующих с неоднородным магнитным полем, который позднее активно использовался в знаменитых экспериментах Штерна–Герлаха.

По предложению А.Ф. Иоффе Капица стал сотрудником Кавендишской лаборатории в Кембридже, где работал под руководством Резерфорда. В 1923 г. им была выполнена первая серия экспериментов, в которых камера Вильсона помещалась в сильное магнитное поле и использовалась для наблюдения искривленных им треков альфа-частиц. В 1924 г. Капицей были разработаны методы получения сверхсильных магнитных полей, что позволило создать магнитное поле напряженностью до 320 кГс в объеме 2 см<sup>3</sup>. В 1928 г. им была открыта линейная зависимость сопротивления металлов от напряженности поля в сверхсильных магнитных полях.

В последний год своего пребывания в Кавендишской лаборатории Капица начал исследования в области физики низких температур. Он начал с критического анализа существовавших в то время методов получения низких температур и разработал новую оригинальную установку для адиабатического ожижения гелия (1934).

С 1923 по 1926 г. Капица получал стипендию Кларка Максвелла для обучения в Кембриджском университете.

---

<sup>38</sup> Петр Леонидович Капица (1894–1984). Биография / пер. с англ. А. Капанова // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 7 : 1975–1978. – С. 372–379. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

С 1924 по 1932 г. он занимал должность заместителя директора Кавендишской лаборатории по магнитным исследованиям. С 1930 по 1934 г. Капица совмещал должности Месселевского профессора-исследователя и директора Лаборатории Монда Лондонского Королевского общества. Совместно с Р.Г. Фаулером он стал основателем и редактором Международной серии монографий по физике (*International Series of Monographs on Physics*, Oxford, Clarendon Press).

В 1934 г. Петр Капица возвратился в Москву, где им был основан Институт физических проблем, в котором он продолжил свои исследования сильных магнитных полей, физики низких температур и криогенной техники.

В 1939 г. им был разработан новый метод для сжижения воздуха в цикле низкого давления на основе специальной высокоэффективной расширительной турбины. В области физики низких температур Капица начал серию экспериментов, направленных на изучение свойств жидкого гелия, которые в 1937 г. привели к открытию явления сверхтекучести жидкого гелия. Кроме того, им была опубликована серия статей, посвященных исследованию этого нового состояния конденсированного вещества.

Во время Второй мировой войны Петр Капица участвовал в прикладных исследованиях, направленных на производство и использование жидкого кислорода, производимого с помощью разработанных им расширительных турбин низкого давления. Он также организовал и возглавил Главное управление кислородной промышленности при Совнарком СССР.

В конце сороковых годов Капица начал исследования совершенно нового спектра физических проблем. Он изобрел новые типы микроволновых генераторов высокой мощности – планотрон и ниготрон (1950–1955), а также открыл новый тип непрерывного разряда в высокотемпературной плазме с температурой электронов свыше миллиона градусов Кельвина.

Петр Капица занимал должность директора Института физических проблем. С 1957 г. он член президиума Академии наук СССР. Он также был одним из основателей Московского физико-технического института



(МФТИ), где был главой кафедры низких температур и криогенной техники при МФТИ и председателем Координационного совета. Петр Капица был главным редактором «Журнала экспериментальной и теоретической физики» (ЖЭТФ), а также членом Советского национального комитета Пагуошского движения ученых за мир и разоружение.

В 1927 г. Петр Леонидович Капица женился на Анне Алексеевне Крыловой, дочери знаменитого кораблестроителя, академика А.Н. Крылова. В их семье родились двое сыновей, Сергей и Андрей.



Награждение П. Капицы. *Справа* – Король Швеции Карл XVI Густав

### **Почетные степени**

Доктор физико-математических наук Академии наук СССР (1928).

Доктор наук Алжирского университета (1944).

Доктор наук, Сорбонна (1945).

Доктор философии университета Осло (1946).

Доктор наук Ягеллонского университета (1964).

Доктор наук Дрезденского технического университета (1964).

Доктор наук университета Чарльза (1965).

Доктор наук Колумбийского университета (1969).

Доктор наук Вроцлавского технического университета (1972).

Доктор наук Делийского университета (1972).

Доктор наук, Лозанна (1973).

Доктор философии университета Турку (1977).

### **Почетное членство**

Член Академии наук СССР (1939) (член-корреспондент с 1929 г.).

Член Лондонского Королевского общества (1929).

Член Французского физического общества (1931).

Член Английского института физики (1934).

Член Международной академии астронавтики (1964).

Почетный член Московского общества натуралистов (1935).

Почетный член Английского института металлов (1943).

Почетный член Института Франклина (1944).

Почетный член Тринити-колледжа, Кембридж, Англия (1925).

Почетный член Нью-Йоркской академии наук (1946).

Почетный член Академии наук Индии (1947).

Почетный член Ирландской Королевской академии наук (1948).

Почетный член Индийского национального института наук (1957).

Почетный член Немецкой академии естествоиспытателей «Леопольдина» (1958).

Почетный член Международной академии истории науки (1971).

Почетный член Института фундаментальных исследований Тата, Бомбей, Индия (1977).

Иностраный член Датской Королевской академии наук и литературы (1946).

Иностраный член Национальной академии наук США (1946).

Иностраный член Индийской национальной академии наук (1956).

Иностраный член Польской академии наук (1962).

Иностраный член Шведской Королевской академии наук (1966).

Иностранный член Американской академии искусств и наук (1968).  
Иностранный член Голландской Королевской академии наук (1969).  
Иностранный член Сербской академии наук и искусств (1971).  
Иностранный член Финской академии наук и искусств (1974).  
Почетный член Черчилль-колледж, Кембридж, Англия (1974).

### **Награды**

Медаль Льежского университета (1934).  
Медаль имени Фарадея Института инженеров-электриков (1942).  
Медаль имени Франклина Института Франклина (1944).  
Золотая медаль имени сэра Девапрасада Сарбадхикари Калькуттского университета (1955).  
Золотая медаль имени Котениуса Немецкой академии естествоиспытателей «Леопольдина» (1959).  
Серебряная медаль имени Фредерика Жолио-Кюри Всемирного комитета мира (1959).  
Золотая медаль имени Ломоносова Академии наук СССР (1959).  
Большая золотая медаль ВДНХ, СССР (1962).  
Медаль «За заслуги перед наукой и перед человечеством» Чехословацкой академии наук (1964).  
Международная медаль имени Нильса Бора Датского инженерного общества (1964).  
Медаль имени Резерфорда Института физики и Английского физического общества (1966).  
Золотая медаль имени Камерлинг-Оннеса Голландского криотехнического общества (1968).  
Мемориальная медаль имени Коперника Польской академии наук (1974).  
Государственная премия СССР (1941 и 1943).  
Мемориальная премия имени Саймона Института физики и Английского физического общества (1973).  
Мемориальная лекция имени Резерфорда Лондонского Королевского общества (1976).

Мемориальная лекция имени Бернала Лондонского Королевского общества (1976).

Кавалер ордена Ленина (1943, 1944, 1945, 1964, 1971 и 1974).

Дважды Герой Социалистического Труда (1945 и 1974).

Кавалер ордена Трудового Красного Знамени (1954).

Кавалер ордена Югославского Знамени с лентой (1967).

### **Публикации**

Collected Papers of P. L. Kapitza (в 3 томах). – Oxford: Pergamon Press, 1964–1967.

High Power Microwave Electronics. – Pergamon Press, 1964.

Эксперимент: Теория и Практика. – М.: Наука, 1977.

Le livre du probleme de physique. – P.: CEDIC, 1977.

Профессор Капица скончался 8 апреля 1984 г.

## **Речь на торжественном обеде<sup>39</sup>**

*10 декабря 1978 г.*

Ваши Величества, Ваши Королевские Высочества, дамы и господа!

Моя первая серьезная научная публикация появилась в 1913 г., с тех пор прошло 65 лет. Я наблюдал великие перемены, произошедшие в научной деятельности.

В дни моей юности научная работа была сосредоточена в университетах и в основном осуществлялась профессорами. Материальные средства были очень скромными. Потратить несколько сотен рублей на аппаратуру считалось великим событием.

К середине нашего столетия произошла так называемая научно-техническая революция. Социальный статус ученых и их работы изменился. Наука стала производительной силой. Были организованы специальные научно-исследовательские институты, которые располагали громадными материальными возможностями.

В наши дни на научную аппаратуру, возможно, тратятся сотни миллионов долларов.

Несмотря на эти огромные перемены в научной деятельности, одна вещь все-таки остается неизменной – Нобелевская премия. Ее значение как величайшей научной награды международного масштаба признано повсеместно. Это следует рассматривать как уникальное достижение шведского народа, так как присуждение награды требует великой мудрости.

Стоит отметить, что не существует другой награды, обладающей таким же международным авторитетом.

Я покорно прошу Ваше Величество передать Королевской академии наук от имени моих коллег профессоров Пензиаса и Вильсона и от меня лично нашу искреннюю признательность за великую честь, дарованную нам.

---

<sup>39</sup> Капица, П.Л. Речь на Нобелевском банкете, Стокгольм, 10 декабря 1978 г. / П.Л. Капица ; пер. с англ. Г. Волковой // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 7 : 1975–1978. – С. 380–381. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

## ПЛАЗМА И УПРАВЛЯЕМАЯ ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ<sup>40</sup>

*Нобелевская лекция, 8 декабря 1978 г.*

Выбор темы для Нобелевской лекции представляет для меня некоторую трудность. Обычно эта лекция связана с работами, за которые присуждена премия. В моем случае эта премия связана с моими исследованиями в области низких температур, вблизи температур ожижения гелия, т.е. несколько градусов выше абсолютного нуля. По воле судеб случилось так, что от этих работ я отошел уже более тридцати лет назад, и, хотя в руководимом мною институте продолжают заниматься низкими температурами, я сам занялся изучением явлений, происходящих в плазме при тех исключительно высоких температурах, которые необходимы для осуществления термоядерной реакции. Эти работы привели нас к интересным результатам, открывающим новые перспективы, и я думаю, что лекция на эту тему представляет больший интерес, чем уже забытые мною работы в области низких температур. К тому же, как говорят французы, *les extremes se touchent* (крайности сходятся).

Хорошо известно, что в данное время управляемая термоядерная реакция представляет большой практический интерес, так как этот процесс мог бы наиболее эффективно решить проблему надвигающегося глобального энергетического кризиса, связанного с истощением запасов сырья, используемого теперь как источник энергии.

Работы по управляемому термоядерному синтезу широко ведутся в ряде стран, и они связаны с научным изучением процессов, происходящих в высокотемпературной плазме. Сама возможность существования термоядерного синтеза не вызывает сомнения, поскольку он происходит при взрывах термоядерной бомбы. Процесс ядерного синтеза теоретически хорошо изучен, и расчеты надежны; они хорошо согласуются с эксперимен-

---

<sup>40</sup> Капица, П.Л. Плазма и управляемая термоядерная реакция : нобелевская лекция, Стокгольм, 8 декабря 1978 г. / П.Л. Капица // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 7 : 1975–1978. – С. 347–371. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

том. Но, несмотря на большие усилия и затраченные средства, до сих пор не удается осуществить процесс ядерного синтеза так, чтобы он мог служить полезным источником энергии. Несомненно, это вызывает некоторое недоумение.

Уже в продолжение нескольких десятков лет плазменные процессы, при которых происходит термоядерный синтез, изучаются как теоретически, так и экспериментально, и сейчас достаточно глубоко поняты. Поэтому сейчас, казалось бы, можно было бы выявить все основные причины, мешающие осуществлению управляемой термоядерной реакции. В данном сообщении я как раз и постараюсь выяснить, что, с моей точки зрения, мешает ее осуществлению и насколько вероятно, что удастся преодолеть эти препятствия. Я также постараюсь объяснить, откуда возникают противоречия между взглядами ученых на практическую осуществимость получения полезной термоядерной энергии.

Но предварительно я хочу охарактеризовать практическую значимость получения полезной энергии от ядерных процессов.

Реальность надвигающегося глобального кризиса в энергоснабжении связана с неизбежным истощением запасов сырья: газа, нефти, угля, и это сейчас всеми признано. Также известно, что так называемый валовой национальный продукт, который определяет благосостояние людей, пропорционален энергетическому оснащению страны. Истощение энергетических ресурсов, несомненно, вызовет общее обеднение.

Сейчас обсуждаются два выхода из надвигающегося кризиса. Первый, наиболее привлекательный, – более широкое использование неистощающихся источников энергии: гидроэнергии, энергии ветра, геотермальной энергии, солнечной энергии и др. Второй путь – использование ядерной энергии, о существовании которой человек узнал менее ста лет назад. Уже сейчас энергия, получаемая в реакторах в процессе распада ядер тяжелых элементов, оказывается более дешевой, чем получаемая от ряда неистощаемых источников энергии.

Как известно, основным горючим сырьем в ядерных реакторах является уран. Если использовать его так, как он используется сейчас, урана хватит только лет на сто. При более полном его использовании в бридерах

этот срок удлинится раз в 50, т.е. запасов урана хватит на несколько тысяч лет. Кроме того, многие считают, что уран, растворенный в морской воде, тоже можно эффективно использовать для получения дешевой энергии. Таким образом, казалось бы, что процессы, уже осуществленные в современных атомных электростанциях, могут предотвратить надвигающийся энергетический кризис. Но существуют весьма веские доводы против использования урана как энергетического сырья. В основном они связаны с вопросами обеспечения безопасности.

Во-первых, использование урана связано с накоплением долгоживущих радиоактивных шлаков и с необходимостью безопасного захоронения все нарастающих количеств этих шлаков. Эти проблемы пока еще надежно не решены.

Во-вторых, в крупной энергетической атомной станции сосредоточено такое большое количество радиоактивного вещества, что, если оно, в случае аварии, прорвется на свободу, может произойти катастрофа, по масштабам сравнимая с той, что произошла при взрыве атомной бомбы над Хиросимой.

Я думаю, что с этими двумя опасностями современная техника может справиться. Но существует еще третья опасность, гораздо более серьезная. Она заключается в том, что строительство большого количества атомных электростанций приведет к тому, что суммарное количество радиоактивного вещества во всех реакторах достигнет такой величины, что невозможно станет осуществлять контроль над его правильным использованием. В конечном итоге это приведет к тому, что не только небольшим странам, но достаточно богатому человеку или промышленному предприятию откроется возможность сделать свою атомную бомбу. Секрета, как она делается, больше не существует, а необходимого для этого плутония, особенно при предстоящем широком использовании бридеров, будет вполне достаточно. Недавно в Индии уже была таким путем осуществлена и взорвана небольшая атомная бомба. В современной системе международных организаций нет такой авторитетной организации, которая могла бы достаточно надежно контролировать мирное использование урана как энергетического сырья, и неясно, как такая организация может быть создана.



Это – основная причина, которая делает крайне желательным получение энергии третьим путем, а именно путем термоядерного синтеза. Как известно, этот процесс не только не будет создавать значительного количества радиоактивных шлаков и опасного накопления радиоактивного вещества, но, главное, не открывает никаких возможностей осуществления взрывной термоядерной реакции. Поэтому решение проблемы управляемого термоядерного синтеза для физиков надо рассматривать как «проблему № 1».

Условия, при которых происходит термоядерная реакция для получения полезной энергии, хорошо известны и надежно изучены. Таких реакций две. Их называют  $D + D$ - и  $D + T$ -реакциями. Первая из них происходит при столкновениях ядер дейтерия, вторая – при столкновении ядра дейтерия с ядром трития. В обоих случаях происходит выделение быстрых нейтронов, энергия которых может быть полезно использована. Поскольку дейтерий всегда в небольшом количестве присутствует в воде и его трудно извлекать, то его как горючего вполне достаточно. Свободный тритий в природе практически отсутствует, его нужно получать, как обычно это и делается, при взаимодействии нейтронов с ядром лития.

Термоядерная реакция происходит в высокотемпературной плазме. Чтобы полученная от нейтронов энергия могла быть полезно использована, она должна быть больше той энергии, которая затрачивается для поддержания температуры плазмы. Обычно это приводит к тому, что энергия, полученная от нейтронов, должна быть значительно больше тормозного излучения электронного газа плазмы. Расчеты показывают, что для получения полезной энергии  $D + D$ -реакция должна происходить при температуре ионов плазмы, которая раз в 10 выше, чем для реакции  $D + T$ . Однако реакция  $D + T$ , хотя и осуществляется при более низкой температуре, но имеет весьма крупный недостаток: при этом происходит сгорание лития, количество которого в природе ограничено. К тому же оказывается, что участие в реакции лития значительно осложняет конструкцию реактора. Расчеты показывают, что для получения полезной энергии температура ионов в плазме для  $D + D$ -реакции должна лежать в области выше  $10^9$  К и соответственно для  $D + T$ -реакции – в области выше  $10^8$  К.

Таким образом, для получения энергии в масштабах, нужных для практики, техническая задача осуществления управляемой термоядерной реакции сводится к получению плазмы при температуре ионов, близкой к  $10^8$  К, и плотности плазмы в пределах  $10^{13}$ – $10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Очевидно, что удержание плазмы при таких условиях обычным способом в каких-либо сосудах нельзя осуществить, так как нет материала, который может выдержать необходимые высокие температуры.

Предложено несколько способов решить проблему удержания плазмы и ее теплоизоляции.

Наиболее остроумным и многообещающим способом был так называемый «Токамак», предложенный в СССР, который разрабатывается уже более десятилетия [1, с. 15]. Принцип, на основе которого он работает, виден на схеме его конструкции, изображенной на рис. 1. Плазму удерживает магнитное поле, которое создается тороидальным соленоидом. Плазма имеет форму тора с радиусом  $R$  и сечением радиуса  $a$  и заключена внутри соленоида, в котором создается магнитное поле. Плазма находится под давлением в несколько атмосфер. При расширении в магнитном поле в ней возникают токи, которые задерживают это расширение. В итоге получается, что плазма окружена вакуумной изоляцией. Это необходимо для поддержания ее при высоких температурах, при которых происходит термоядерная реакция. Очевидно, что такой способ удержания плазмы будет ограничен временем. Расчеты показывают, что благодаря малой теплоемкости плазмы энергия, идущая на ее первоначальный нагрев, даже если плазма существует доли секунды, будет мала по сравнению с получаемой термоядерной энергией. Поэтому такой реактор может эффективно работать в импульсном режиме. Запускается «Токамак», как это видно на рис. 1, как бетатрон: разрядом конденсаторов через обмотку окружающего ярма трансформатора. Осуществление на практике удержания плазмы таким способом оказалось все же непростой задачей. Во-первых, существуют трудности стабилизации в магнитном поле формы плазменного кольца, когда растет радиус  $a$  сечения кольца, но главное, растет радиус  $R$  самого тороида, и при этом кольцо становится неустойчивым и теряет свою правильную форму. Эти трудности удалось преодолеть путем выбора отно-

шения  $R$  к  $a$  и распределения магнитных полей, хотя при этом время существования плазменного шнура обычно ограничивается долями секунды. Считается, что с увеличением масштабов «Токамака» это время будет расти как квадрат размера установки.

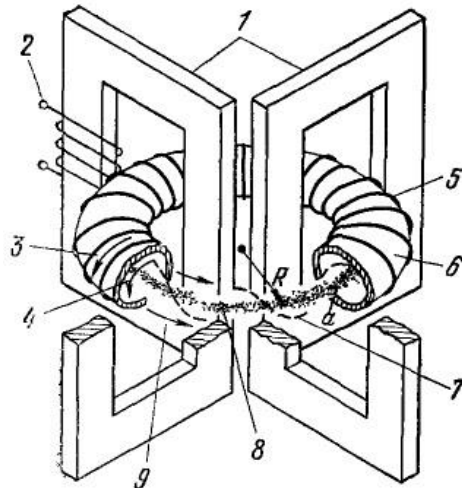


Рис. 1. Основные элементы конструкции «Токамака»: 1 – ядро трансформатора; 2 – первичная обмотка трансформатора; 3 – ток, создающий продольное магнитное поле; 4 – магнитное поле плазменного витка; 5 – катушка продольного магнитного поля; 6 – металлическая проводящая стенка; 7 – результирующее поле; 8 – ток в плазме; 9 – продольное поле

Но основная трудность появляется от причины, которую вначале недостаточно оценили. Она заключается в следующем: для получения термоядерной реакции нужен нагрев самих ионов дейтерия или трития, и главная трудность в передаче им тепла связана с тем, что нагрев плазмы производится воздействием на нее электрического поля; при этом практически всю энергию воспринимают электроны, которые благодаря их малой массе при соударении с ионами плохо передают им энергию. Кроме того, чем выше температура электронов, тем менее эффективен процесс теплопередачи. В «Токамаке» нагрев плазмы происходит электронным током. Таким образом, вся энергия, идущая на нагрев плазмы, сосредоточивается в электронах и потом уже передается ионам путем соударения. Оказывается, что для того, чтобы нагреть таким путем ионы до необходимой температуры, требуется время  $\Delta t$ , значительно большее, чем время, в продолжение которого может происходить нагрев плазмы электрическим

током. Расчеты, которые обычно делаются, очень сложны, так как их стремятся делать точно, и потому они оказываются мало наглядными. Но можно просто подсчитать нижний предел промежутка времени, при котором нагрев ионов еще может быть осуществлен. Он делается следующим простым выражением [2, формула (14)]:

$$\Delta t > -2,5 \cdot 10^2 \frac{f T_e^{3/2}}{\Lambda n} \ln \left( 1 - \frac{T_i}{T_e} \right).$$

Расчет ведется при условии, что во время нагрева плотность плазмы  $n$  равна

$$n = \frac{7,3 \cdot 10^{21} p}{T_e}$$

и остается постоянной, так же как давление  $p$ , выраженное в атмосферах, и температура электронов  $T_e$ .

Коэффициент  $f$  равен отношению массы иона к массе протона,  $\Lambda$  – известный логарифмический множитель [2, формула (4)],  $T_i$  – температура ионов. Согласно этому выражению для современного проекта «Токамака», работающего на реакции  $D + T$  с плазмой при температуре ионов  $T_i = 5 \cdot 10^8$  К и при плотности  $n = 3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> (при этом начальный нагрев электронов  $T_e = 10^9$  К), промежуток времени  $\Delta t$ , необходимый, чтобы начался ядерный процесс в плазме, должен быть больше чем 22 с, т.е. по крайней мере на два порядка длиннее, чем имеет место в современной установке токамак. Увеличить время удержания плазмы можно только увеличением самой установки, и, по-видимому, это время растет пропорционально квадрату размеров установки. Из приведенной формулы получаем, что для реакции  $D + D$  время нагрева увеличивается еще на два порядка, и тогда  $\Delta t > 2 \times 10^3$  с.

Трудности со временем нагрева ионов плазмы теперь полностью осознаны, но не видно, как можно сократить это время и как может работать «Токамак», если до нагрева ионов плазмы вся бетатронная энергия от разряда конденсаторов будет излучаться электронами. Поэтому теперешний проект «Токамака» предусматривает дополнительный подвод энер-

гии, которая превосходит энергию от бетатронного процесса, служащую только для начального зажигания.

Подвод дополнительной энергии к ионам плазмы должен осуществляться более эффективным образом, чем процессом кулоновских столкновений электронов и ионов. Для этого существуют два возможных процесса. Первый [1, с. 20], уже осуществленный, заключается в том, что в плазменное кольцо вводят атомы дейтерия или трития, предварительно ускоренные до температуры, необходимой для поддержания термоядерного процесса. Второй процесс нагрева ионов основан на том, что в плазменном кольце циркулярным током можно возбуждать радиальные магнитоакустические колебания, или, как обычно их называют, альвеновские волны. Известно [3, с. 1417], что диссипируемая ими энергия идет в значительной мере на нагрев ионов и подводимая мощность может быть достаточно велика, чтобы быстро нагреть ионы и поддерживать их температуру достаточное время. Таким образом, проблема нагрева ионов может быть решена, хотя механизм работы токамаков будет отличаться от первоначально задуманного. При этом конструкция «Токамаков» становится значительно сложнее и эффективность уменьшается.

Поскольку практически во всех ядерных реакторах генерируемая мощность пропорциональна объему активной зоны и потери увеличиваются только с увеличением ее поверхности, то эффективность ядерных реакторов растет с ростом их размеров. Поэтому у реактора существует критический размер, начиная с которого он может генерировать полезную энергию. Величина этого критического размера и определяет осуществимость реактора на практике. Этот критический размер определяют в основном не ученые, а инженеры-конструкторы, так как он тесно связан с конструктивным оформлением всей установки в целом и с выбором технологических процессов при ее производстве. Успех этой работы в значительной степени определяется талантом и изобретательностью инженеров-конструкторов. Поэтому определить критический размер «Токамака» можно только основываясь на тех конструкторских решениях, которые сейчас предлагаются. Я думаю, что существующие решения приводят к критическим размерам токамаков, которые делают их сейчас нереальными.

ми. Но, конечно, жизнь показывает, что изобретательские способности людей не имеют предела, и поэтому нельзя утверждать, что критические размеры «Токамака» не могут со временем стать осуществимыми.

Следует отметить, что, хотя главной принципиальной трудностью управляемого термоядерного процесса в токамаках является проблема нагрева ионов дейтерия и трития, кроме того, существуют еще трудности другого характера, которые пока не имеют четкого решения. Например, оказалось, что в «Токамаке» в плазму втягиваются, выделяясь из стенок контейнера, загрязнения, которые резко уменьшают интенсивность реакции. Кроме того, из плазмы вылетают нейтральные атомы и, ударяясь о стенки контейнеров, их разрушают. Оказалось, что отбор полезной энергии от нейтронов значительно усложняет конструкцию «Токамака». Хотя все эти факторы и можно преодолеть, но они усложняют конструкцию «Токамака» и увеличивают его критические размеры. Удастся ли со временем довести критические размеры «Токамака» до осуществимой величины? Если это и удастся, то точно определить, когда, – конечно, нельзя. Поэтому сейчас можно только констатировать, что нет принципиальной теоретической причины, почему управляемый термоядерный синтез осуществим, но с выходом полезной энергии в практических масштабах это пока неосуществимо.

Из других методов осуществления управляемого термоядерного синтеза серьезному рассмотрению подлежит тоже импульсный метод, но без использования магнитного удержания плазмы [1, с. 33]. Идея метода заключается в том, что происходит импульсный нагрев  $D + T$ -сгустка примерно миллиметрового диаметра в очень короткий промежуток времени, за который сгусток не успевает разлететься. При этом возникает очень высокое давление, которое обеспечивает интенсивный теплообмен между ионами и электронами. Считается, что таким путем термоядерная реакция  $D + T$  в сгустке может быть практически полностью завершена. Для этого необходимо хорошо сфокусированное мощное лазерное излучение, которое должно нагревать сгусток одновременно и со всех сторон за время порядка наносекунды. Это сложный процесс, но он может быть просчитан современным компьютером, и, если действительно плазменный сгусток

осветить со всех сторон хорошо сфокусированным лазерным излучением, это может дать избыток полезной термоядерной энергии. Но при реальной разработке такого устройства не видно, как можно решить возникающие технические и конструкторские трудности, например, как осуществить всестороннее и одновременное облучение, а также как полезно использовать полученную энергию нейтронов.

Тут также можно только констатировать правильность теоретического обоснования, но реального конструкторского решения его осуществления пока, с имеющимися техническими возможностями, не видно. Но, конечно, полностью отрицать возможность решения таким путем этой проблемы нельзя, хотя осуществление рассмотренной лазерной установки мне рисуется менее вероятным, чем импульсных установок с магнитным удержанием плазмы.

Наконец, третий тип термоядерного реактора основан на непрерывном нагреве плазмы и пока разрабатывается только в нашем институте. Эти работы были описаны девять лет назад [4], и с тех пор этот тип реакции более подробно изучался, и выявились те основные трудности, которые лежат на пути решения этим путем термоядерной проблемы. Я расскажу в общих чертах, какие имеются тут проблемы, требующие научного решения.

В отличие от «Токамака» и лазерного метода получения горячей плазмы для осуществления термоядерного процесса, наш метод не был специально изобретен; мы случайно нашли явление, при котором получалась горячая плазма. Нами разрабатывался мощный высокочастотный генератор непрерывного действия. В результате был осуществлен прибор, генерирующий высокую частоту при длине волны 20 см с высоким к.п.д. и мощностью в несколько сот киловатт. Принцип, на котором он работает, теперь описан [5], и также полностью описана [6] его конструкция и дана его рабочая характеристика. Этот генератор был нами назван «Ниготрон». В процессе разработки этого генератора, начиная с 1950 г., при испытании одной из его моделей мы пропускали его излучение через кварцевый шар, наполненный гелием при давлении 10 мм рт. ст. При этом в нем вспыхну-

ло свечение, которое имело четкие границы. Все явление наблюдалось несколько секунд, так как в одном месте шар проплавился.

Эти наблюдения привели к мысли, что шаровая молния – тоже явление, создаваемое высокочастотными колебаниями, возникающими в грозовых облаках после обычной молнии. Таким образом подводилась энергия, необходимая для поддержания продолжительного свечения шаровой молнии. Эта гипотеза была опубликована [7] в 1955 г. Через несколько лет у нас появилась возможность возобновить эти опыты. В марте 1958 г. уже в шаровом резонаторе, наполненном гелием при атмосферном давлении, в резонансном режиме при интенсивных непрерывных колебаниях типа  $H_{01}$  возникал свободно парящий газовый разряд овальной формы. Этот разряд образовывался в области максимума электрического поля и медленно двигался по кругу, совпадающему с силовой линией.

Мы стали изучать более подробно такой тип разрядов, исходя из того, что плазма в этих разрядах непосредственно не соприкасалась со стенками резонатора, и мы предположили, что при этом плазма могла бы иметь высокую температуру. В продолжение нескольких лет мы изучали это интересное явление в различных газах при давлениях, достигавших десятков атмосфер, и при различных мощностях, достигавших десятков киловатт, и, конечно, также изучалось влияние на разряд магнитного поля, достигавшего в наших опытах 25 кЭ. Эти исследования подробно описаны [4]. Схема установки, которая нами применялась, изображена на рис. 2.

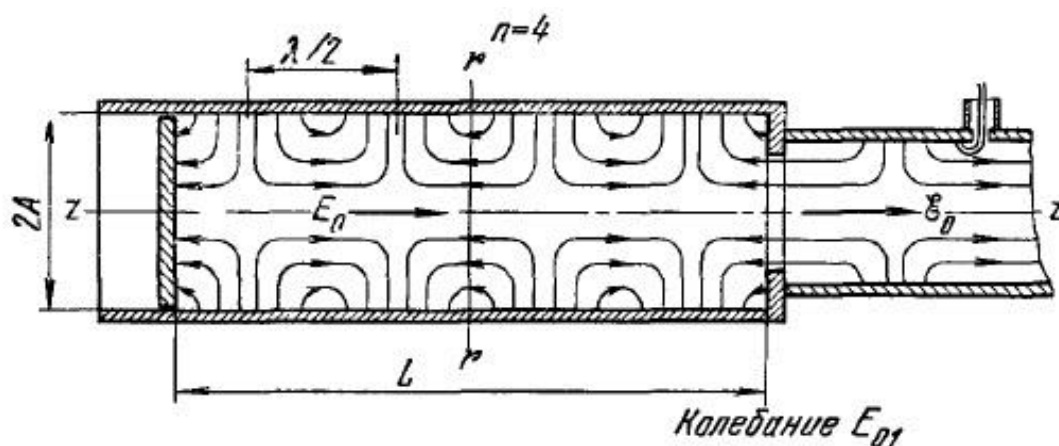


Рис. 2. Схема структуры ВЧ поля со шнуровым разрядом в резонаторе с колебаниями  $E_{01}$



Плазменный разряд имеет форму шнура около 10 см длиной, равной полудлине волны ВЧ колебаний. Интенсивные ВЧ колебания вида  $E_{01}$  генерировались в цилиндрическом резонаторе. Шнуровой разряд находился в одном из максимумов электрического поля  $E_{01}$ . Его устойчивость по продольной оси создавалась электрическим полем ВЧ колебаний. В радиальном направлении устойчивость плазменного шнура обеспечивалась вращением газа.

Наибольший интерес представляет изучение плазменного разряда в водороде или в дейтерии. При малых мощностях разряд не имел четко очерченных границ, и его свечение было диффузного характера. При увеличении подводимой ВЧ мощности свечение становилось ярче, увеличивался диаметр разряда и внутри появлялось четко очерченное ядро шнуровой формы, сечение которого росло с подводимой мощностью. В первоначальных опытах мощность, подаваемая в разряд, доходила до 15 кВт, а давление мы доводили до 25 атм. При этом чем выше было давление, тем устойчивее был разряд и тем лучше очерчивались формы ядра. Фотография такого разряда дана на рис. 3. Изучая проводимость плазмы, а также с помощью активной и пассивной спектральной диагностики можно было надежно установить, что центральная часть разряда имеет очень высокую температуру электронов – выше миллиона градусов. Таким образом, на границе плазменного шнура, на расстоянии нескольких миллиметров имелся скачок температуры более миллиона градусов. Это значило, что плазма на поверхности имела слой с высокой теплоизоляцией.

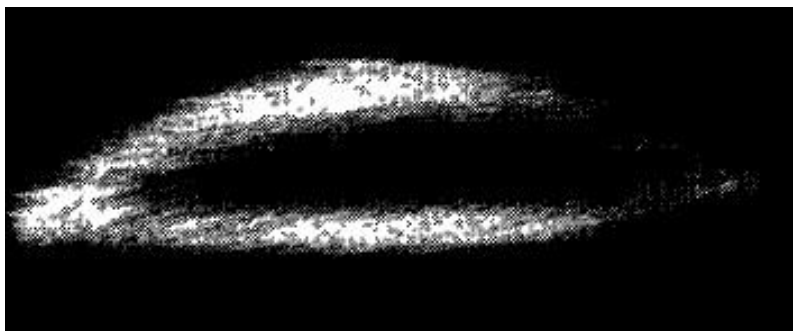


Рис. 3. Фотография шнурового разряда в дейтерии с примесью 5% аргона при большой мощности  $P_s = 14,7$  кВт и повышенном давлении  $p = 3,32$  атм (1969 г.)  
Длина разряда  $\sim 10$  см. Левый край разряда затемнен окном. Колебания типа  $E_{01}$

Возможность существования такого большого скачка температуры вначале вызывала сомнения, поэтому были испробованы всевозможные методы диагностики плазмы, но все они неизменно приводили к той же высокой температуре – выше миллиона градусов. Но в дальнейшем выяснилось, что физическая природа существования такого скачка температуры вполне объяснима. Нетрудно показать, что если бы при наблюдаемых высоких температурах ударявшиеся о границу шнура электроны свободно диффундировали в окружающий газ, то они уносили бы с собой мощность в сотни киловатт. Отсутствие такого мощного теплового потока может быть объяснено тем, что на границе горячей плазмы существует двойной электрический слой, от которого без существенных потерь электроны отражаются. Существование аналогичного явления давно известно. Оно имеет место в случаях, когда горячая плазма ограничена стенками из диэлектрика, например стеклом или фарфором.

Известно, что при таких условиях, даже если плазма находится под значительным давлением, электроны могут иметь температуру в десятки тысяч градусов и при этом не нагревать значительно стенки сосуда. Это явление уже давно объяснено существованием на поверхности диэлектрика двойного электрического слоя. Механизм возникновения двойного слоя прост. Он заключается в том, что при ударе о поверхность электроны, благодаря их большой подвижности, глубже проникают в диэлектрик, чем менее подвижные ионы. Объемный заряд электрона в диэлектрике находится на большей глубине, чем объемный заряд иона, и создает электрическое поле двойного слоя, направленное так, что от него упруго отражается горячий электрон. Такая плохая электронная теплопроводность на границе плазмы теперь широко используется в газосветящихся источниках. Описанный метод плазменной теплоизоляции был впервые предложен Ленгмюром. Мы считаем, что при достаточно высоком давлении аналогичный механизм теплоизоляции может иметь место в нашей горячей плазме. Существование двойного слоя в плазме на границе шнурового разряда нам теперь удастся наблюдать экспериментально как резкий скачок плотности плазмы. Описанный механизм температурного скачка, очевидно, может иметь место, только если температура

ионов значительно ниже температуры электронов и мало отличается от той, при которой в плазме возникает заметная ионизация, но это условие для существования двойного слоя необходимо только на границах шнура. В центральной части шнура температура ионов может быть сколь угодно высока. Как мы увидим из дальнейшего, разница между температурой ионов внутри шнура и на поверхности определяется величиной теплового потока и теплопроводности ионного газа. Обычно теплопроводность плазмы велика, но в сильном магнитном поле поперечная теплопроводность может стать весьма малой. Поэтому можно ожидать, что в сильных магнитных полях температура ионов внутри шнура будет мало отличаться от температуры электронов и может быть сделана достаточно высокой, чтобы осуществить в плазме из дейтерия или трития термоядерную реакцию. На этом основании можно пытаться осуществить проект термоядерного реактора для получения полезной энергии, что и было нами сделано [8]. Схема реактора дана на рис. 4. Шнуровой разряд 1 находится в контейнере – резонаторе 2. Давление дейтерия в контейнере 30 атм, магнитное поле, созданное обычным соленоидом, 10 кЭ. На чертеже показана схема, по которой полезно используется энергия нейтронов. Нагретый нейтронами газ поступает в газовую турбину 5, где адиабатически расширяется, и потом в турбокомпрессоре 6 изотермически опять сжимается. Полученная избыточная мощность поступает в генератор 8. Нагрев шнурового разряда производится высокочастотным полем так же, как в цилиндрических резонаторах, изображенных на рис. 2. Разница только в том, что в реакторе шнуровой разряд окружен еще катушкой 10, которая служит для возбуждения в разряде магнитоакустических колебаний; это делается для того, чтобы повышать в плазме ионную температуру [4, с. 1856]. Эта схема и ее расчеты были опубликованы еще в 1970 г. [8]. Это было сделано для того, чтобы выявить реальную картину, которую может принять термоядерный реактор, работающий с нашим плазменным шнуром.

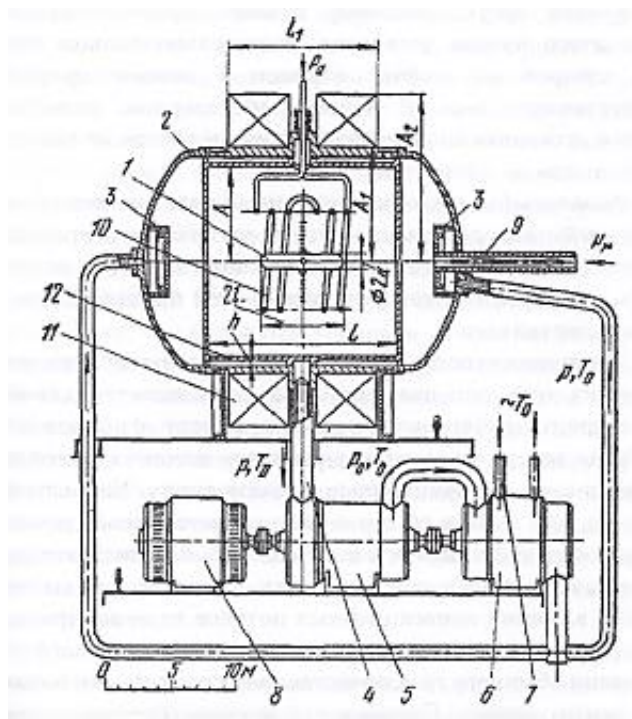


Рис. 4. Чертеж конструкции термоядерного реактора, работающего в режиме замкнутого цикла: 1 – шнуровой разряд; 2 – цилиндрический контейнер реактора; 3 – наклонные сопла; 4 – труба, соединяющая контейнер реактора с газовой турбиной; 5 – газовая турбина; 6 – изотермический компрессор; 7 – охлаждающая вода; 8 – генератор; 9 – коаксиальный волновод; 10 – катушка переменного магнитного поля; 11 – соленоид; 12 – медный кожух резонатора.  $L$  – длина резонатора,  $L_1$  – длина соленоида,  $P_a$  – мощность магнитоакустических колебаний,  $P_c$  – высокочастотная мощность,  $A$  – радиус резонатора,  $A_1$  – внутренний радиус обмотки,  $A_2$  – наружный радиус обмотки,  $2l$  – длина шнурового разряда,  $2a$  – диаметр шнурового разряда,  $h$  – расстояние между стенкой контейнера и резонатором

За прошедшее время мы значительно продвинулись в понимании происходящих в плазме процессов. В основном за это время был улучшен метод микроволновой диагностики, и в плазме стало возможным мерить с точностью до 5% распределение плотности по радиусу шнура и ее зависимость от магнитного поля, от давления и от подводимой мощности. Выяснены условия, необходимые для продольной стабилизации шнура. Все это дало возможность увеличить в несколько раз подводимую к шнуру мощность и поднять температуру электронов до 50 млн. кельвинов.

Таким образом, если бы удалось обеспечить температурное равновесие между ионным газом и электронным, то даже без дополнительного нагрева плазмы магнитоакустическими колебаниями можно было бы осу-

ществить  $D + T$ -реакцию. При этом конструкция термоядерного реактора становится проще и габариты ее уменьшаются. Это приводит к тому, что такой термоядерный реактор не только просто осуществляем, но и получаемую от нейтронов энергию можно легко превращать в механическую. Таким образом, отпадают те основные трудности, которые стоят на пути осуществления импульсных методов ядерного синтеза.

Но все же на нашем пути лежит еще нерешенная трудность, к которой следует отнестись очень серьезно, потому что она может сделать проблему вообще неразрешимой. Эта трудность заключается в следующем. Сейчас мы умеем в нашем устройстве в высокочастотном поле создавать плазменный шнур при давлении в несколько десятков атмосфер и поддерживать в нем непрерывную температуру электронов не меньше 50 млн. градусов и, по-видимому, с увеличением масштабов, значительно более высокую. Размер сечения нашего шнура ограничен только той мощностью, которую к нему подвели. Таким образом, мы располагаем электронным газом при рекордно высокой температуре, более высокой, чем температура электронного газа на Солнце. Вся задача теперь заключается в том, чтобы суметь нагреть до этой температуры ионы. Хотя ионный газ и находится в смеси с электронным, но, оказывается, выровнять их температуру не просто. Процесс выравнивания температур происходит в две стадии.

Первая – это передача тепла от электронов к ионам. Она просто заключается в энергетическом обмене, происходящем при столкновениях ионов с электронами. При этом очевидно, что количество передаваемого тепла пропорционально объему плазменного шнура. Вторая стадия заключается в отводе этого тепла от ионов, передаче тепла от ионного газа в окружающую шнур среду. Этот отвод пропорционален поверхности плазменного шнура. Таким образом, при заданной теплопроводности ионного газа температура ионов будет расти с увеличением радиуса шнура. Это приводит к тому, что при определенной теплопроводности ионного газа будет существовать критическое сечение плазменного шнура, при котором температура ионов достигнет значений, близких к температуре электронов, и станет происходить либо реакция  $D + D$ , либо реакция  $D + T$ . Если известна теплопроводность плазмы, то расчет

критического размера шнура не представляет трудности. Если, например, провести этот расчет для обычной ионной плазмы в отсутствие магнитного поля, в которой теплопроводность определяется длиной свободного пробега иона, то окажется, что шнур будет иметь неосуществимо большое сечение, с диаметром во много километров. Уменьшить это сечение можно, уменьшая теплопроводность ионного газа, что может быть достигнуто помещением шнура в магнитное поле так, как это сделано в реакторе на рис. 4. Теплопроводность ионного газа в магнитном поле становится значительно меньше, так как она теперь определяется не длиной свободного пробега иона, но диаметром его ларморовской орбиты, которая обратно пропорциональна величине магнитного поля. Вычисление теплопроводности ионного газа в магнитном поле не представляет труда, и она достоверно известна.

Оказывается, что критическое сечение диаметра шнура обратно пропорционально величине магнитного поля, и при поле в несколько десятков килоэрстед критический диаметр шнура равен всего 5–10 см.

Получить такую величину вполне осуществимо. Но для этого нужна установка значительно больше той, на которой мы сейчас изучаем в плазме природу электронного газа. В наших лабораторных условиях такая установка вполне осуществима и теперь находится в процессе изготовления.

Казалось бы, что описанный нами реактор непрерывного действия дает возможность осуществить простым способом не только реакцию  $D + T$ , но и  $D + D$ , но все же есть один фактор, который может этот процесс сделать неосуществимым.

Теплопроводность ионного газа мы вычисляем исходя из того, что она полностью определяется длиной свободного пробега иона, равной диаметру ларморовской орбиты, но при этом мы не учитываем влияния на теплопроводность конвекционных потоков тепла. Хорошо известно, что даже в обычном газе конвекционные потоки переносят тепла значительно больше, чем переносится при молекулярных столкновениях. Известно, что вычисление влияния конвекционных потоков на теплопроводность даже в случае беспорядочного турбулентного состояния обычного газа представляет практически неразрешимую задачу. Поэтому тут

обычно поступают так: находят методом размерностей теплоотдачу для близкой по характеру конвекции и обобщают ее для конкретного случая, при этом уже эмпирически определяя необходимый коэффициент. В случае плазмы процесс зависит от значительно большего числа параметров, и такой способ определения конвекционной теплопроводности становится еще более сложным, чем для обычного газа. Все же теоретически можно выявить, какие факторы больше всего влияют на интенсивность конвекции. Очевидно, что для того, чтобы поддержать конвекцию, необходимо затрачивать энергию. В газе эта энергия обычно берется из кинетической энергии при его течении за счет увеличения бернуллевского перепада давления.

В покоящемся плазменном шнуре такой механизм создания конвекции отсутствует. Но в ионизированной плазме может существовать другой источник энергии, который может создавать конвекцию. Он связан с возможностью возникновения градиентов температуры. Это может вызвать появление в газовой среде внутренних напряжений, что приводит к возникновению конвекции.

Это явление впервые было изучено Максвеллом [9]. Он показал, что в газе при тепловом потоке могут возникать внутренние напряжения, которые пропорциональны квадрату вязкости и производным градиента температуры. В обычных условиях в газе они столь малы, что до сих пор их экспериментально не удается обнаружить. Дело в том, что вязкость пропорциональна длине свободного пробега, которая в обычных газах при нормальном давлении очень мала, близка к  $10^{-5}$  см, и поэтому внутреннее напряжение при небольших градиентах температуры тоже мало.

В плазме длина свободного пробега как электронов, так и ионов достигает сантиметров и градиент температуры велик. Поэтому внутреннее напряжение, согласно формуле Максвелла, порядков на 10 больше, чем в газе, и может создавать в плазме конвекционные потоки и турбулентность. Присутствие магнитного поля, конечно, может влиять на характер этого явления, а участие в конвекции еще и электрического поля делает теоретический подход даже для самой грубой оценки мощ-

ности конвекции совсем ненадежным. Поэтому здесь есть только один путь – экспериментальное изучение этих процессов, что мы сейчас и делаем.

Несомненно, конвекционная теплопроводность будет уменьшать эффективность нагрева ионов и приведет к тому, что для получения термоядерного синтеза критическое сечение шнура будет увеличиваться и соответственно будут расти размеры реактора для полезного получения энергии. Если они станут недоступно большими, то, конечно, возникнет вопрос о способах борьбы с влиянием конвекционной теплопроводности. Это можно сделать, создав на границе плазменного шнура слой с отсутствием турбулентности, как это имеет место в газе, где возникает так называемый прандтлевский слой. Такая возможность может быть теоретически обоснована [4, с. 1853].

Таким образом, мы приходим к тому, что импульсный метод, применяемый в «Токамаке», сейчас поддается полному теоретическому расчету, но постройка термоядерного реактора, основанного на этом методе, приводит к очень большой и сложной конструкции. В противоположность этому наш термоядерный реактор имеет простую конструкцию. Но ее практическое осуществление и размеры зависят от конвекционных теплообменных процессов, которые не поддаются теоретической количественной оценке.

Основная привлекательность научной работы как раз в том, что она приводит к проблемам, решение которых нельзя предвидеть, поэтому решение проблемы управляемой термоядерной реакции для ученого особенно привлекательно.

### **Список литературы**

1. *Ribe F.L.* Fusion reactor systems. – Rev. Mod. Phys., 1975, v. 47, P-7.
2. *Каница П.Л.* Полезное получение энергии от термоядерных реакторов. – Письма в ЖЭТФ, 1975, т. 22, с. 20.
3. *Каница П.Л., Путаевский Л.П.* Нагрев плазмы магнитоакустическими колебаниями. – ЖЭТФ, 1974, т. 67, с. 1410.



4. *Катица П.Л.* – ЖЭТФ, 1969, т. 57, с. 1801.
5. *Катица П.Л.* Электроника больших мощностей. – М.: Наука, 1962.
6. *Катица П.Л., Филимонов С.И., Катица С. 77.* – В кн.: Электроника больших мощностей. № 6. – М.: Наука, 1969.
7. *Катица П.Л.* – ДАН СССР, 1955, т. 101, с. 254.
8. *Катица П.Л.* – ЖЭТФ, 1970, т. 58, с. 377.
9. *Maxwell J.C.* – Phil. Trans. Roy. Soc., 1879, v. 170, p. 231.



*Жорес Иванович Алферов*

*(1930–2019)*

## АВТОБИОГРАФИЯ<sup>41</sup>

Жизнь проносится удивительно быстро. Кажется, совсем недавно я отмечал юбилеи видных физиков, своих учителей, казавшихся мне весьма пожилыми людьми, а сегодня уже я сам недавно отметил свое семидесятилетие.

Мои родители, Иван Карпович и Анна Владимировна, родились и выросли в Белоруссии. Отец восемнадцатилетним юношей в 1912 г. приехал в Санкт-Петербург и работал грузчиком в порту, разнорабочим на конвертной фабрике и наконец начал настоящую рабочую карьеру на заводе «Лесснер» (впоследствии завод им. Карла Маркса).

В первую мировую войну он – храбрый гусар, унтер-офицер лейб-гвардии, Георгиевский кавалер. В сентябре 1917 г. отец вступил в партию большевиков и сохранил преданность идеям социализма и коммунизма до конца жизни.

В детстве с замиранием сердца старший брат и я слушали его рассказы о гражданской войне и его военной карьере. Мы узнали, как вчерашний унтер-офицер стал командиром кавалерийского полка Красной армии. Отец также рассказывал нам о своих встречах с революционными лидерами: В.И. Лениным, Л.Д. Троцким, Б.Е. Думенко, «товарищем Андреем» (А. Сольцем), в квартире которого в «Доме на набережной» мы всегда останавливались, приезжая в Москву. После окончания отцом Промакадемии в 1935 г. судьба бросала нас по всей стране: Сталинград, Новосибирск, Барнаул, Сясьстрой под Ленинградом, Туринск Свердловской области, где мы прожили военные годы, и наконец лежащий в руинах после войны Минск. Папа был назначен директором завода, комбината, позже начальником треста. Мама возглавляла Совет женобществениц, работала в библиотеке и всегда была для нас самым мудрым воспитателем и самым близким другом. То, что мы с братом были «директорскими детьми», означало прежде всего, что нужно быть примером в школе и в общественной жизни.

---

<sup>41</sup> Алферов, Ж.И. Автобиография / Ж.И. Алферов ; пер. с англ. Е. Литвиновича // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 13 : 1999–2000. – С. 178–191. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

Мне было легко учиться, и у меня всегда был надежный защитник – старший брат Маркс, сделавший мое существование безоблачным как в школе, так и на улице. Он закончил школу в Сясьстрое 21 июня 1941 г. (на следующий день началось вторжение фашистов), и несколько дней спустя мы уехали на Урал, в город Туринск, куда папа был незадолго до этого назначен директором только что построенного завода пороховой целлюлозы (Завода № 3, как он именовался тогда). Старший брат, ему было тогда 17 лет, поступил в Уральский индустриальный институт на энергетический факультет. Юноша считал, что будущее за энергетикой. Но проучился он недолго, поскольку решил, что его долг – идти на фронт защищать Родину от фашистов.

Он прошел Сталинград, Харьков, Курскую дугу. Оправившись от тяжелого ранения в голову, попал снова на фронт. Это был «второй Сталинград», как называли тогда Корсунь-Шевченковское сражение, где и погиб в бою в свои 20 лет гвардии младший лейтенант Маркс Иванович Алфёров, мой старший брат, навсегда оставшийся для меня двадцатилетним.

В октябре 1943 г. Маркс провел с нами в Свердловске три дня, когда после госпиталя снова ехал на фронт. Часто, оглядываясь назад, я вспоминаю эти три дня, его фронтовые рассказы, его страстную юношескую веру в силу науки и инженерной мысли.

В послевоенном разрушенном Минске я учился в единственной в то время русской мужской средней школе № 42, где был замечательный учитель физики – Яков Борисович Мельцерзон. Он читал нам лекции по физике, на которых мы, вообще довольно «хулиганистый» класс, никогда не шалили и слушали его внимательно, потому что Яков Борисович, влюбленный в физику, умел передать это отношение к своему предмету нам. Пораженный его рассказом о работе катодного осциллографа и принципах радиолокации, я по его совету после окончания школы поехал учиться в Ленинград, в Электротехнический институт им. В.И. Ульянова-Ленина (сокращенно ЛЭТИ).

Здесь, в институте, внесшем значительный вклад в развитие отечественной электроники и радиотехники и в образование в этих областях, мне очень повезло с моим первым научным руководителем. Теоретические

дисциплины давались мне очень легко, и поэтому меня привлекала «работа руками». На третьем курсе я пошел работать в Вакуумную лабораторию. Там я начал экспериментальную работу под руководством Наталии Николаевны Созиной, которая исследовала полупроводниковые фотодетекторы. Так в 1950 г., полвека тому назад, полупроводники стали главным делом моей жизни. Написанная во время блокады Ленинграда книга Ф.Ф. Волькенштейна «*Электропроводность полупроводников*» стала моим учебником по физике полупроводников. Моя дипломная работа была посвящена получению пленок и исследованию фотопроводимости теллурида висмута.

В декабре 1952 г. я окончил институт, и мой руководитель Наталия Николаевна очень хотела, чтобы я остался на кафедре в ЛЭТИ для совместной работы. Но я мечтал о работе в Физтехе, институте Абрама Федоровича Иоффе, монография которого «*Основные представления современной физики*» стала для меня настольной книгой. К счастью, в ЛЭТИ на наш факультет пришли три заявки из Института Иоффе, и одна из них досталась мне. Радости моей не было границ. И я думаю, что моя счастливая жизнь в науке была предопределена этим удачным распределением.

В письме родителям, жившим тогда в Минске, я писал о выпавшем мне огромном счастье работать в Институте Иоффе. Я тогда еще не знал, что академик Иоффе был освобожден от обязанностей директора и ушел из созданного им института, где он проработал директором более 30.

Я вспоминаю свой первый день в Физико-техническом институте, 30 января 1953 г., представление моему новому научному руководителю, Владимиру Максимовичу Тучкевичу, в то время заведующему сектором. Наш небольшой коллектив решал очень важную задачу: создание первых отечественных германиевых диодов и триодов (транзисторов) с *p-n*-переходами.

Физтех в 1953 г. был по нынешним временам небольшим институтом, я получил пропуск № 429, и это означало, что в тот момент численность всех сотрудников Института не превышала эту величину. Большинство знаменитых физтеховцев уехало в Москву к И.В. Курчатову и в другие вновь создаваемые «атомные» центры. Полупроводниковая «элита»

ушла вместе с А.Ф. Иоффе в недавно организованную Лабораторию полупроводников при Президиуме АН СССР. В Физтехе из старшего поколения «полупроводниковцев» остались Д.Н. Наследов, Б.Т. Коломиец и В.М. Тучкевич.

Новый директор Физтеха после А.Ф. Иоффе, академик А.П. Комар, далеко не лучшим образом вел себя по отношению к своему предшественнику, но в возрождении и развитии института избрал вполне разумную стратегию. Основное внимание дирекция уделяла поддержке работ по созданию качественно новой полупроводниковой электроники, космических исследований (газодинамика больших скоростей и высокотемпературные покрытия), разработке методов разделения легких изотопов для водородного оружия под руководством Б.П. Константинова.

Развивались и фундаментальные исследования как теоретического, так и экспериментального характера: именно в это время был экспериментально открыт экситон (Е.Ф. Гросс), созданы основы кинетической теории прочности (С.Н. Журков), начаты пионерские работы по физике атомных столкновений (В.М. Дукельский, Н.В. Федоренко).

Дирекция (А.П. Комар и Д.Н. Наследов) прекрасно понимала важность привлечения молодежи в науку, и каждый приходящий на работу в ЛФТИ молодой специалист проходил обязательное собеседование в дирекции. Именно таким образом были приняты на работу в Физтех многие известные российские ученые, среди которых были нынешние члены Академии наук Б.П. Захарченя, А.А. Каплянский, Е.П. Мазец, В.В. Афросимов и другие.

Как одно из самых ярких событий в жизни, я вспоминаю свое первое участие в полупроводниковом семинаре в Физтехе в феврале 1953 г. Это был блестящий доклад Е.Ф. Гросса об открытии экситона. Ощущение, которое я испытал тогда, трудно с чем-либо сравнить. Я был потрясен докладом о рождении открытия в той области науки, в которой я делал свои первые шаги.

Однако главным делом была ежедневная работа в лаборатории. Как реликвию я храню лабораторный журнал того времени с моими записями о создании первого советского транзистора с  $p-n$ -переходом от 5 марта

1953 г. Я и сейчас, вспоминая те дни, горжусь тем, что мы сделали. Мы – это группа очень молодых людей, которая под руководством В.М. Тучкевича преуспела в разработке основ технологии и метрики транзисторной электроники. Вот имена исследователей, которые работали в нашей небольшой лаборатории: А.А. Лебедев, выпускник Ленинградского государственного университета – выращивание и легирование совершенных монокристаллов германия, Ж.И. Алфёров – получение транзисторов с параметрами на уровне лучших мировых образцов, А.И. Уваров и С.М. Рыбкин – создание прецизионной метрики монокристаллов германия и транзисторов, Н.С. Яковчук, выпускник радиотехнического факультета ЛЭТИ – разработка схем на транзисторах.

Уже в мае 1953 г. первые советские транзисторные приемники демонстрировались «высокому начальству». В этой работе, которой мы отдавались со всей страстью молодости и сознанием высочайшей ответственности перед страной, очень быстро и эффективно шло мое формирование как ученого. Я начал понимать значение технологии не только для создания новых электронных приборов, но также и для фундаментальных исследований; роль и значение «мелких», на первый взгляд, деталей в эксперименте. И именно с тех времен я предпочитаю анализировать эксперимент, исходя из «простых» общих законов прежде, чем выдвигать высоконаучные объяснения.

В последующие годы наш небольшой коллектив заметно расширился, и в очень короткое время уже в лаборатории В.М. Тучкевича были созданы первые советские германиевые силовые выпрямители – германиевые фотодиоды и кремниевые солнечные батареи; было также исследовано поведение примесей в германии и кремнии.

В мае 1958 г. Анатолий Петрович Александров (впоследствии Президент АН СССР) обратился к нам с просьбой выполнить работу по созданию специального полупроводникового устройства для первой советской атомной подводной лодки. Для решения этой задачи нужно было разработать принципиально новую технологию и конструкцию германиевых вентилях, что и было сделано в рекордно короткие сроки. В октябре устройства уже стояли на лодке. Помню, как мне, младшему научному сотрудни-

ку, звонил первый заместитель Председателя Правительства СССР Дмитрий Федорович Устинов и просил ускорить на две недели создание устройств. Пришлось поселиться на два месяца прямо в лаборатории, но задание, конечно, было выполнено. Для меня и сегодня полученный в 1959 г. мой первый орден за эту работу – одна из самых ценных наград.

В 1961 г. я защитил кандидатскую диссертацию, посвященную в основном разработке и исследованию мощных германиевых и частично кремниевых выпрямителей. На основе этих работ возникла отечественная силовая полупроводниковая электроника. С научной, чисто физической точки зрения для меня был очень важным полученный мной вывод, что в  $p-i-n$ -,  $p-n-n^+$  - полупроводниковых гомоструктурах при рабочих плотностях тока (для большинства полупроводниковых приборов), ток в пропускном направлении определяется рекомбинацией в сильно легированных  $p$ - и  $n(n^+)$ -областях структур, тогда как вклад рекомбинации в средней  $i(n)$ -области гомоструктуры не является определяющим. Поэтому при появлении первой работы по полупроводниковым лазерам для меня было естественным рассмотрение преимуществ использования в лазерах двойной гетероструктуры типа  $p-i-n$ ,  $p-n-n^+$ ,  $n-p-p^+$ ). Эта идея была нами сформулирована сразу же после появления первой работы Р. Холла с сотрудниками, описывающей полупроводниковый лазер на основе гомо- $p-n$ -структуры в арсениде галлия.

Реализация главных преимуществ гетероструктур оказалась возможной только после получения гетероструктур  $Al_xGa_{1-x}As$ . В этой работе мы всего лишь на один месяц опередили американских исследователей из ИВМ.

Если в начале наших исследований гетероструктур мне не раз приходилось убеждать моих молодых коллег, что мы далеко не единственные в мире, кто считает, что полупроводниковые физика и электроника будут развиваться на основе ГЕТЕРО-, а не ГОМО-структур, то с 1968 г. реально началось очень жесткое соревнование, прежде всего с тремя лабораториями крупнейших американских фирм: Bell Telephone, ИВМ и RCA.

В 1967 г. во время короткой научной командировки в Англию я посетил лаборатории STL в Харлоу, которые были великолепно оборудованы по тем временам и в которых имелась прекрасная экспериментальная



база, но с английскими коллегами можно было обсуждать лишь теоретические аспекты физики гетероструктур, поскольку они тогда считали экспериментальные исследования неперспективными. Поэтому я потратил некоторое время на лондонские достопримечательности, в том числе и магазины. Я купил свадебные подарки моей невесте, Тамаре Дарской. Сразу по возвращении из Англии мы отпраздновали свадьбу в роскошном ресторане «Крыша» в гостинице «Европейская».

Тамара, дочь замечательного актера Георгия Дарского из Воронежского театра музыкальной комедии, работала в то время под Москвой, в космической фирме академика В.П. Глушко. Она удивительным образом сочетала несравненную красоту с глубоким умом и душевностью по отношению к своим друзьям. Это было время моих еженедельных полетов в Москву. Я мог себе это позволить, будучи старшим научным сотрудником Физтеха – билет на летавший ежечасно ТУ-104 стоил 11 рублей (около 15 долларов). Тем не менее, после полугода таких «челночных» полетов мы решили, что все-таки лучше Тамаре переехать в Ленинград.

В 1968–1969 гг. были практически реализованы все основные идеи управления электронными и световыми потоками в классических гетероструктурах на основе системы арсенид галлия–арсенид алюминия. Мы получили принципиально важные фундаментальные результаты, такие как односторонняя эффективная инжекция, эффект «сверхинжекции», диагональное туннелирование, электронное и оптическое ограничения в двойной гетероструктуре, ставшей вскоре основным элементом исследований низкоразмерного электронного газа в полупроводниках; нам удалось реализовать основные преимущества использования гетероструктур в полупроводниковых приборах: лазерах, светодиодах, солнечных батареях, диодах и транзисторах. Самым значительным было, конечно, создание низкопороговых, работающих при комнатной температуре лазеров на двойной гетероструктуре (ДГС), предложенной нами еще в 1963 г. Подход, который предложили М.Б. Паниш (M.B. Panish) и И. Хаяши (I. Hayashi) из Bell Telephone, а также Г. Крессель (H. Kressel) из RCA, отличался от нашего в том отношении, что он был основан на использовании в лазерах одиночной гетероструктуры p-AlGaAs-p-GaAs, и это накладыва-

ло определенные ограничения. Очевидно, они не верили в возможность получения эффективной инжекции в гетеропереходах, хотя потенциальные преимущества ДГС были им известны.

В августе 1969 г., во время моей первой поездки в США на Международную конференцию по люминесценции в Ньюарке, штат Делавэр, мой доклад, в котором приводились параметры низкопороговых, работающих при комнатной температуре лазеров на основе AlGaAs-ДГС, произвел на американских коллег впечатление разорвавшейся бомбы. Профессор Я. Панков (Ya. Pankov) из RCA, незадолго до доклада сообщивший мне, что, к сожалению, для моего визита в их лабораторию у них нет разрешения, сразу после доклада сообщил, что оно получено, и компания ждет меня после конференции. Я не отказал себе в удовольствии ответить, что теперь у меня нет времени, поскольку IBM и Bell Telephone пригласили меня посетить их лаборатории еще до моего доклада, и у меня уже все распланировано.

Мой доклад на семинаре в Bell, осмотр лабораторий и дискуссии с американскими коллегами довольно четко показали мне наши достоинства и недочеты. Думаю, что наступившее вскоре соперничество за достижение первыми непрерывного режима работы лазеров при комнатной температуре было редким для того времени примером открытого соревнования лабораторий из двух антагонистических великих держав. Мы выиграли это соревнование, опередив на месяц группу М. Паниша из Bell Telephone. Значение получения «непрерыва» было прежде всего связано с тем, что в это же время было создано оптическое волокно с малыми потерями, и создание наших ДГС-лазеров привело к рождению и бурному развитию волоконно-оптических систем связи.

В течение зимы 1970–1971 гг. и весны 1971 г. я провел шесть месяцев в США, работая в лаборатории полупроводниковых приборов Иллинойского университета совместно с проф. Ником Холоньяком (Nick Holonyak). Мы впервые познакомились в 1967 г., когда он посетил мою лабораторию в Физтехе. Ник Холоньяк, который является одним из основателей полупроводниковой оптоэлектроники и изобретателем первых полупроводниковых лазеров видимого диапазона и светодиодов, стал моим

близким другом. Вот уже 33 года мы обсуждаем все проблемы физики полупроводников и электроники, а также жизненные аспекты; наши контакты (визиты, письма, семинары, телефонные разговоры) сыграли очень важную роль в нашей работе и жизни.

В 1971 г. за работы по ДГС-лазерам мне была присуждена Золотая медаль Франклиновского института в США – моя первая международная награда, которая поэтому имеет для меня особую ценность. Франклиновский институт присуждал медали и другим советским ученым: в 1944 г. академику П.Л. Капице, в 1974 г. академику Н.Н. Боголюбову и в 1981 г. академику А.Д. Сахарову. Быть в такой компании – большая честь!

Система изопериодичных гетероструктур  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , которая поначалу казалась счастливым исключением, получила неограниченное развитие на основе многокомпонентных твердых растворов, сперва теоретическое, а затем экспериментальное (самый яркий пример –  $\text{InGaAsP}$ ).

Солнечные батареи на основе гетероструктур были созданы нами еще в 1970 г. И когда американцы публиковали свои первые работы, наши батареи уже летали на спутниках, и было развернуто их промышленное производство. Многолетняя эксплуатация наших батарей на орбитальной станции «Мир» блестяще доказала их преимущества в космосе. И хотя прогнозы резкого снижения стоимости электроэнергии, получаемой от полупроводниковых солнечных батарей, пока не оправдались, в космосе самым эффективным источником энергии, безусловно, являются солнечные батареи на гетероструктурах на основе соединений  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ .

Присуждение в 1972 г. Ленинской премии (высшей научной награды в СССР) мне и моим ученикам-коллегам было для нас большой радостью, омраченной только тем, что в силу не зависящих от нас, сугубо формальных и малопонятных причин из списка представленных к награде выпали Р.Ф. Казаринов и Е.Л. Портной.

В день присуждения премии я был в Москве и позвонил домой, в Ленинград, чтобы сообщить об этом радостном событии, но телефон не отвечал. Я позвонил родителям (с 1963 г. они жили уже в Ленинграде) и, радостно сообщив отцу, что его сын – лауреат Ленинской премии, услышал в ответ: «Что твоя Ленинская премия! У нас сегодня внук родился!».

1972 год был счастливым для меня: в дополнение к престижной премии я был избран осенью в Академию наук, но самой большой радостью было, конечно, рождение Вани Алфёрова.

Исследования сверхрешеток и квантовых ям, бурно развивавшиеся на Западе, а затем и у нас, в короткое время привели к рождению новой области квантовой физики твердого тела – физики низкоразмерных электронных систем. Апогеем этих работ в настоящее время являются исследования нуль-мерных структур – «квантовых точек». Отрадно, что Институт Иоффе и сегодня – в столь трудное для российской науки время – остается мировым лидером в этой области. И работы уже второго и третьего поколений моих учеников – П.С. Копьева, Н.Н. Леденцова, В.М. Устинова, С.В. Иванова – получили широкое признание. Н.Н. Леденцов стал самым молодым членом-корреспондентом Российской академии наук.

В 1987 г. я был избран директором ФТИ, в 1989 г. – председателем президиума Ленинградского научного центра АН СССР, а в апреле 1990 г. – вице-президентом Академии наук СССР. Впоследствии на эти посты я был переизбран уже в Российской академии наук.

В первые годы моего президентства и директорства нам удалось значительно расширить возможности проведения исследований в нашей уникальной (для всего мира) Академии наук и развить систему эффективного сотрудничества с вузами и школой. Так, в те годы при Физтехе была открыта Физико-техническая школа и был продолжен процесс создания на базе Института специализированных учебных кафедр: первая кафедра такого рода – кафедра оптоэлектроники – была создана в Электротехническом университете (бывший ЛЭТИ) еще в 1973 г. На основе уже существующей и вновь организованных базовых кафедр в Политехническом институте в 1988 г. был создан Физико-технический факультет.

Создание Научно-образовательного центра при Физтехе, объединяющего школьников, студентов и ученых в одном прекрасном здании, которое можно с полным правом назвать «Дворцом знаний», внесло значительный вклад в развитие вышеупомянутой системы образования. Все-таки главным в эти годы было сохранение нашей Академии наук как высшей – и уникальной! – научной и образовательной структуры России. Ее

хотели уничтожить в 20-е годы как «наследие царского режима». Ее хотели уничтожить в 90-е годы как «наследие тоталитарного советского режима». Для ее сохранения я согласился пойти депутатом в Государственную Думу в 1995 г. Президент РАН академик Ю.С. Осипов, ее вице-президенты, академики и члены-корреспонденты, доктора и кандидаты наук, старшие и младшие научные сотрудники, лаборанты и механики – все заняли твердую позицию в этой трудной ситуации. Ради сохранения Академии наук мы шли иногда на компромиссы с властью, но никогда – со своей совестью.

Все, что создало человечество, оно создало благодаря Науке. И если уж суждено нашей стране быть великой державой, то она ею будет не благодаря ядерному оружию, не благодаря вере в Бога или в президента, или в западные инвестиции, а благодаря труду ее народа, вере в знание, в науку, благодаря сохранению и развитию научного потенциала и образования.

Десятилетним мальчиком я прочитал замечательную книгу В.А. Каверина *«Два капитана»*. И всю последующую жизнь я следую принципу ее главного героя, Сани Григорьева: «Бороться и искать, найти и не сдаваться!».

Очень важно при этом понимать, за что ты борешься.

## **Речь на торжественном обеде<sup>42</sup>**

*10 декабря 2000 г.*

Ваши Величества, Ваши Королевские Высочества, дамы и господа!

Прежде всего, позвольте мне от имени моих коллег профессора Херберта Кремера, доктора Джека Килби и от себя лично выразить нашу глубочайшую признательность Королевской академии наук Швеции за присуждение нам самой престижной премии в истории – Нобелевской премии.

Нобелевская премия-2000 на рубеже столетий имеет особое значение. Двадцатое столетие было не только столетием войн и социальных взрывов, оно было столетием Физики и, прежде всего, квантовой физики. Положительный прогресс человеческого вида (к сожалению, не только положительный) был связан с открытиями и разработками в этой области наук.

Как уже было отмечено великим физиком Джоном Бардиным, единственным дважды награжденным Нобелевской премией в области физики: «То, что наука не признает национальных границ – старая истина для ученых, но, возможно, не так хорошо понятная для общества в целом».

Открытие сразу после Второй мировой войны транзистора и принципов лазера-мазера стало источником информационной технологии двадцатого столетия. Изобретение интегральных микросхем и создание нового вида материалов – искусственных кристаллов – полупроводниковых гетероструктур – привело к современному уровню информационных и коммуникационных технологий. Важные последствия этого технологического прорыва стали причиной пересмотра социальной структуры общества – того, что мы называем теперь постиндустриальным и информационным обществом.

Как всегда, мы, конечно, получаем от научных и технологических открытий не только позитивные, но негативные результаты. Электронные масс-медиа – сильное и могущественное оружие, к сожалению, иногда оказывается в руках бесчестных и безответственных людей.

Следует напомнить слова великого мыслителя Фрэнсиса Бэкона «Знание – сила». Но что также очень важно, что

---

<sup>42</sup> Алферов, Ж.И. Речь на Нобелевском банкете, Стокгольм, 10 декабря 2000 г. / Ж.И. Алферов ; пер. с англ. Е. Литвиновича // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 13 : 1999–2000. – С. 192–194. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

Сила должна основываться на знании.

В то время, когда мы начинали наше исследование по разработке лазера с двойной гетероструктурой,

Наша цель была и велика и ярка:

Нет более тьмы! Да будет свет

Для того, чтобы выпустить на волю вечный свет

Мы работали дни и ночи напролет.

А когда мы не могли больше ни работать, ни думать,

Мы пили русскую водку.

И мы должны были обнаружить спустя годы,

Что припасла для нас Природа.

Пришли молодые, появились новые результаты,

И работы моих студентов посылают в «Физическое обозрение»,

Поэтому наша жизнь не окончится никогда.

*Our purpose was both great and bright*

*No more the dark! Let there be light*

*So, to release eternal light*

*We did the work all day and night*

*And when could neither work nor think*

*We had the Russian vodka drink*

*And we must find, as years pass*

*What Nature has in store for us*

*Young Folk have come, results are new*

*And to Physical Review*

*My students' work is to be sent*

*So our life will never end.*

## ДВОЙНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ: КОНЦЕПЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ В ФИЗИКЕ, ЭЛЕКТРОНИКЕ И ТЕХНОЛОГИИ<sup>43</sup>

*Нобелевская лекция. Стокгольм, 10 декабря 2000 г.*

### 1. Введение

Сегодня невозможно представить себе современную физику твердого тела без полупроводниковых гетероструктур. Полупроводниковые гетероструктуры, и в особенности двойные гетероструктуры, включая квантовые ямы, проволоки и точки, являются сегодня предметом исследования 2/3 исследовательских групп, работающих в области физики полупроводников.

Если возможность управления типом проводимости полупроводника с помощью легирования различными примесями и идея инжекции неравновесных носителей заряда были теми семенами, из которых выросла полупроводниковая электроника, то гетероструктуры позволили решить значительно более общую проблему управления фундаментальными параметрами в полупроводниковых кристаллах и приборах, такими как ширина запрещенной зоны, эффективные массы носителей заряда их подвижности, показатель преломления, электронный энергетический спектр и т.д.

Развитие физики и технологии полупроводниковых гетероструктур привело к удивительным изменениям в нашей повседневной жизни. Электроника на гетероструктурах широко используется во многих областях человеческой деятельности. Едва ли можно представить нашу жизнь без телекоммуникационных систем, основанных на лазерах с двойной гетероструктурой (ДГС), без гетероструктурных светодиодов и биполярных транзисторов, без мал шумящих транзисторов с высокой подвижностью электронов (ВПЭТ) для высокочастотных применений, включая, напри-

---

<sup>43</sup> Алферов, Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии : нобелевская лекция, Стокгольм, 10 декабря 2000 г. / Ж.И. Алферов ; пер. с англ. Б.В. Егоров // Нобелевская премия. Физика : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 13 : 1999–2000. – С. 123–177. – (Нобелевские лекции – 100 лет).



мер, системы спутникового телевидения. ДГС-лазеры присутствуют сейчас практически в каждом доме в проигрывателях для лазерных дисков. Солнечные элементы на гетероструктурах широко используются как в космосе, так и на земле.

Наш интерес к полупроводниковым гетероструктурам не был случайным. Систематические исследования полупроводников были начаты еще в 30-е годы в Физико-техническом институте под прямым руководством его основателя – Абрама Федоровича Иоффе. В 1932 г. В.П. Жузе и Б.В. Курчатов исследовали собственную и примесную проводимость полупроводников, и в том же году А.Ф. Иоффе и Я.И. Френкель создали теорию выпрямления тока на контакте металл-полупроводник, основанную на явлении туннелирования [1]. В 1931 и 1936 гг. Я.И. Френкель опубликовал свои знаменитые работы, в которых он предсказал экситоны в полупроводниках, ввел само это название и разработал теорию экситонов, а Е.Ф. Гросс экспериментально открыл экситоны в 1951 г. [2]. Первая диффузионная теория выпрямляющего p-n-гетероперехода, которая стала основой теории n-p-перехода В. Шокли, была опубликована Б.И. Давыдовым в 1939 г. [3]. По инициативе А.Ф. Иоффе с конца 40-х годов в Физико-техническом институте были начаты исследования по интерметаллическим соединениям. Теоретическое предсказание и экспериментальное открытие полупроводниковых свойств соединений  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  были сделаны независимо Г. Велькером и, на примере InSb, Н.А. Горюновой и А.Р. Регелем в Физико-техническом институте [4]. Мы почерпнули очень много из того высокого теоретического, технологического и экспериментального уровня исследований, который существовал в ФТИ в то время.

### **Классические гетероструктуры**

Идея использования гетеропереходов в полупроводниковой электронике была выдвинута на заре развития электроники. Уже в первом патенте, связанном с транзисторами на p-n-переходах, В. Шокли [5] предложил использовать широкозонный эмиттер, чтобы получить одностороннюю инжекцию. В нашем институте А.И. Губанов впервые теоретически проанализировал вольтамперные характеристики изотипных и анизотипных

гетеропереходов [6], однако важные теоретические изыскания на этой ранней стадии исследования гетероструктур были сделаны Г. Крёмером, который ввел понятие квазиэлектрических и квазимагнитных полей в плавном гетеропереходе и предположил, что гетеропереходы могут иметь чрезвычайно высокую эффективность инжекции по сравнению с гомопереходами [7]. Тогда же были выдвинуты различные предложения по использованию гетероструктур в полупроводниковых солнечных элементах.

Предложение полупроводниковых лазеров на  $p-n$ -переходах [8], экспериментальное наблюдение эффективной излучательной рекомбинации в  $p-n$ -структуре на основе GaAs с возможностью стимулированного излучения [9] и создание лазеров и светоизлучающих диодов (СИД) на  $p-n$ -переходах [10] были теми зернами, из которых начала расти полупроводниковая оптоэлектроника. Однако лазеры были неэффективными из-за высоких оптических и электрических потерь. Пороговые токи были очень высоки, и для получения генерации требовались низкие температуры. Эффективность СИД была также очень низкой вследствие высоких внутренних потерь.

Важный шаг был сделан сразу же после создания лазеров на  $p-n$ -переходах, когда концепция лазера на двойной гетероструктуре была независимо сформулирована нами и Г. Крёмером [11]. В своей статье Г. Крёмер предложил использовать двойные гетероструктуры для пространственного ограничения носителей в активной области. Он предположил, что «с помощью пары гетеропереходных инжекторов лазерная генерация может быть осуществлена во многих непрямозонных полупроводниках и улучшена в прямозонных».

В нашем патенте мы также отметили возможность достижения высокой плотности инжектированных носителей и инверсной заселенности с помощью «двойной» инжекции. Мы особо указали на то, что лазеры на гомопереходах «не обеспечивают непрерывного режима генерации при высоких температурах» и, как дополнительное преимущество ДГС-лазеров, мы рассмотрели возможность «увеличения излучающей поверхности и использования новых материалов для получения излучения в различных областях спектра».

Первоначально теория развивалась существенно быстрее, чем экспериментальная реализация. В 1966 г. мы предсказали [12], что плотность инжектированных носителей могла бы на несколько порядков превосходить плотность носителей в широкозонном эмиттере (эффект «суперинжекции»). В том же году в статье [13], посланной в новый советский журнал *Физика и техника полупроводников*, я обобщил наше понимание основных преимуществ ДГС для различных приборов, особенно для лазеров и высокомоощных выпрямителей: «Области рекомбинации, светового излучения и инверсии заселенности совпадают и сосредоточены в среднем слое. Благодаря потенциальным барьерам на границе полупроводников с различной шириной запрещенной зоны, даже при больших смещениях в пропускном направлении целиком отсутствует сквозное токопрохождение электронов и дырок, и рекомбинация в эмиттерах равна нулю (в отличие от гомоструктур  $p-i-n$ ,  $p-n-n^+$ ,  $n-p-p^+$ , где она играет доминирующую роль)... Вследствие заметной разницы в диэлектрических постоянных свет полностью локализован в среднем слое, играющем роль высококачественного волновода, и, таким образом, световые потери в пассивных областях (эмиттерах) отсутствуют».

Вот самые важные особенности полупроводниковых гетероструктур, которые мы выделили в то время: 1) суперинжекция носителей, 2) оптическое ограничение и 3) электронное ограничение.

Реализация эффекта «широкозонного окна» была очень важна для фотоприемников, солнечных батарей и светодиодов. Это позволило значительно расширить и точно контролировать спектральную область солнечных элементов и фотодетекторов и радикально улучшить эффективность светодиодов. Основные физические явления в двойных и одиночных классических гетероструктурах показаны на рис. 1. Теперь осталось только найти гетероструктуру, где эти явления могли бы быть реализованы.

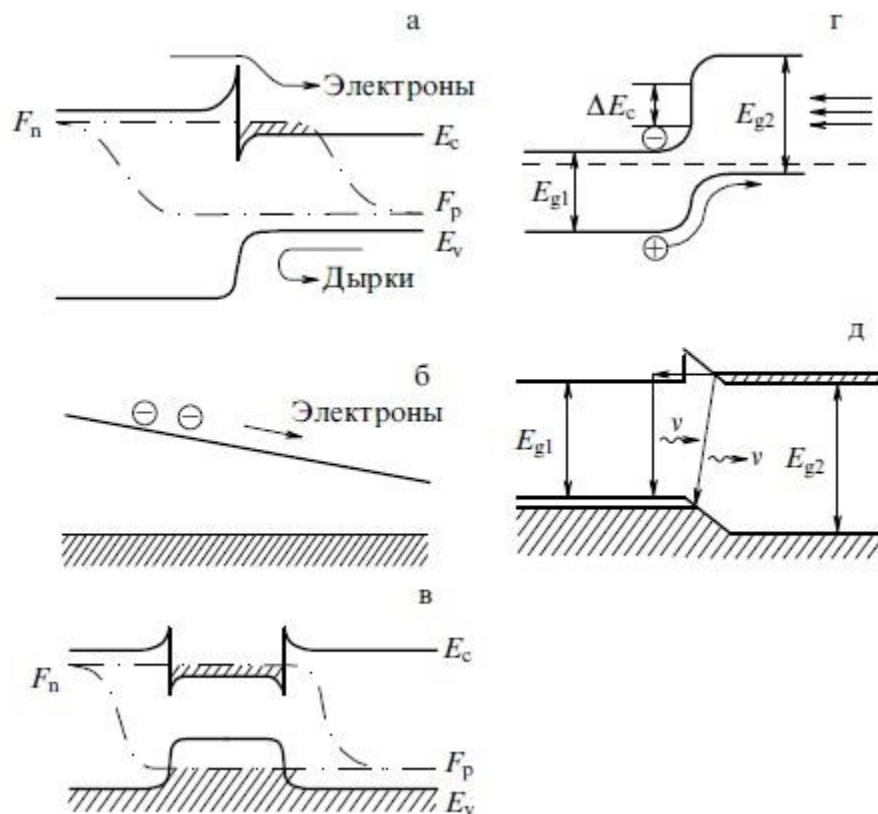


Рис. 1. Основные физические явления в классических гетероструктурах: (а) односторонняя инжекция и суперинжекция; (б) диффузия во встроенном квазиэлектрическом поле; (в) электронное и оптическое ограничение; (г) эффект широкозонного окна; (д) диагональное туннелирование через гетерограницу

В то время существовал общий скептицизм относительно возможности создания «идеального» гетероперехода с бездефектной границей и, тем более, с теоретически предсказываемыми инжекционными свойствами. Даже пионерские работы Р.Л. Андерсона [14] по исследованию первого эпитаксиального монокристаллического гетероперехода с совпадающими постоянными кристаллической решетки Ge-GaAs не давали доказательств инжекции неравновесных носителей в гетероструктурах. Фактическая реализация эффективных широкозонных эмиттеров считалась попросту невозможной, и патент лазера на ДГС многими рассматривался как «бумажный патент».

Главным образом из-за этого общего скептицизма существовало лишь несколько групп, пытавшихся найти «идеальную пару», что являлось, конечно, трудной задачей. Требовалось выполнение многих условий совместности тепловых, электрических, кристаллохимических свойств контактирующих материалов, а также их кристаллической и зонной структур.

Удачная комбинация ряда свойств, т.е. малые эффективные массы и большая ширина запрещенной зоны, эффективная излучательная рекомбинация и резкий край оптического поглощения вследствие «прямой» зонной структуры, высокая подвижность электронов в абсолютном минимуме зоны проводимости и ее сильное уменьшение в ближайшем минимуме в точке (100) уже в то время обеспечивала для GaAs достойное место в физике полупроводников и электронике. Так как максимальный эффект может быть получен при использовании гетероперехода между полупроводником, выступающим в качестве активной области прибора, и более широкозонным материалом, наиболее перспективными системами, рассматривавшимися в то время, были GaP-GaAs и AlAs-GaAs. Для «совместимости» материалы пары должны удовлетворять первому – и самому важному – условию: иметь наиболее близкие значения постоянных решетки. Поэтому гетеропереходы в системе AlAs-GaAs были предпочтительнее. Однако для того чтобы начать работы по получению и исследованию свойств этих гетеропереходов, требовалось преодолеть определенный психологический барьер. К тому времени AlAs был уже давно получен [15], но многие свойства этого соединения оставались неисследованными, так как было известно, что AlAs химически нестабилен и разлагается во влажной атмосфере. Возможность получения устойчивого и приспособленного для практических приложений гетероперехода в этой системе казалась малоперспективной.

Первоначально наши попытки создать ДГС были связаны с решеточно-несогласованной системой GaAsP. Мы успешно изготовили первые лазеры на основе ДГС в этой системе методом газофазной эпитаксии (ГФЭ). Однако из-за несоответствия параметров решетки лазерная генерация, как и в лазерах на гомопереходах, могла осуществляться только при температуре жидкого азота [16]. Любопытно отметить, однако, что это был первый практический результат для решеточно-несогласованной и даже частично релаксировавшей структуры.

Опыт, который мы получили при изучении системы GaAsP, был очень важен для понимания как многих специфических физических свойств гетеропереходов, так и основ гетероэпитаксии. Разработка метода

многокамерной ГФЭ для системы GaAsP позволила нам в 1970 г. создать структуры со сверхрешетками с периодом 200 Å и продемонстрировать расщепление зоны проводимости на минизоны [17].

Однако к концу 1966 г. из общих соображений мы пришли к выводу, что даже небольшое несоответствие параметров решеток в гетероструктурах GaP<sub>0,15</sub>As<sub>0,85</sub>–GaAs не позволяет реализовать потенциальные преимущества ДГС. В то время сотрудник моей группы Д.Н. Третьяков сообщил мне, что с мелкими кристаллами твердых растворов Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As различных составов, полученными два года назад путем охлаждения из расплава и положенными А.С. Борщевским в ящик стола, ничего за это время не случилось. Тотчас же стало ясно, что твердые растворы Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As являются химически устойчивыми и подходящими для изготовления долгоживущих гетероструктур и приборов. Изучение фазовых диаграмм и кинетики роста в этой системе, а также разработка модифицированного метода жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), пригодного для роста гетероструктур, вскоре привели к созданию первой решеточно-согласованной AlGaAs-гетероструктуры. Когда мы опубликовали первую работу на эту тему, мы были счастливы считать себя первыми, кто обнаружил уникальную, фактически идеальную, решеточно-согласованную систему для GaAs, но, как это часто случается, одновременно и независимо такие же результаты были получены Х. Руппрехтом и Дж. Вудолом в Исследовательском центре Т. Уотсона корпорации IBM [18].

Дальнейший прогресс в области полупроводниковых гетероструктур был стремительным. Прежде всего, мы экспериментально подтвердили уникальные инжекционные свойства широкозонных эмиттеров и эффект суперинжекции [19], продемонстрировали стимулированное излучение в ДГС AlGaAs [20], установили зонную диаграмму гетероперехода Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As-GaAs, тщательно изучили люминесцентные свойства и диффузию носителей в плавном гетеропереходе, а также чрезвычайно интересные особенности протекания тока через гетеропереход, например, диагональные туннельно-рекомбинационные переходы непосредственно между дырками из узкозонной и электронами из широкозонной составляющих гетероперехода [21].

В это же время мы создали большую часть наиболее важных приборов, в которых были реализованы основные преимущества гетероструктур:

- низкопороговые ДГС-лазеры, работающие при комнатной температуре [22] (рис. 2, 3);
- высокоэффективные светодиоды на одиночной гетероструктуре (ОГС) и на ДГС [23];
- солнечные элементы на гетероструктурах [24];
- биполярные транзисторы на гетероструктурах [25];
- тиристорные р–n–р–n-переключатели на гетероструктурах [26].

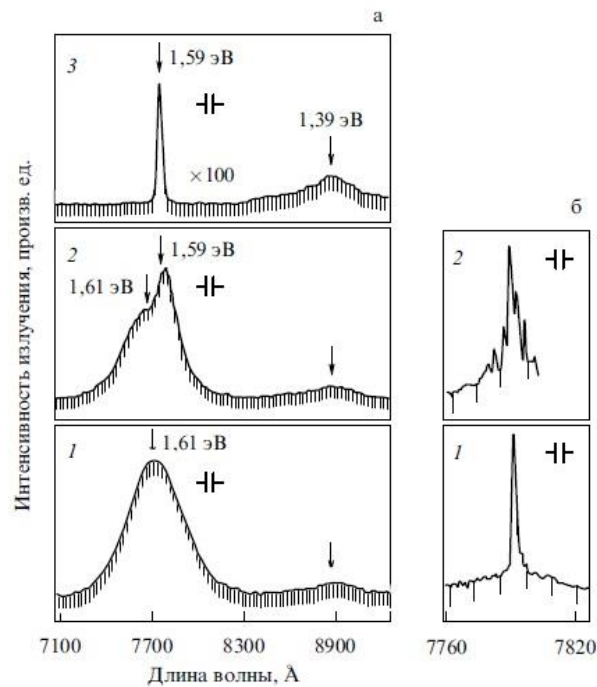


Рис. 2. Спектр генерации первого низкопорогового лазера на ДГС  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , работающего при комнатной температуре (300 К),  $J_{\text{th}} = 4300 \text{ А см}^{-2}$ .

Ток возрастает: (а) от 0,7 А (1) до 8,3 А (2) и затем до 13,6 А (3);

(б) от 13,6 А (1) до 18 А (2);  $s = 2,2 \times 10^{-3} \text{ см}^2$

Одним из первых опытов успешного применения гетероструктур в промышленном производстве в нашей стране стало использование солнечных батарей на гетероструктурах в космических исследованиях. Мы передали нашу технологию в НПО «Квант», и уже с 1974 г. солнечные элементы на основе GaAlAs устанавливались на многих отечественных

спутниках. Наша космическая станция «Мир» (рис. 4) использовала эти элементы в течение 15 лет.

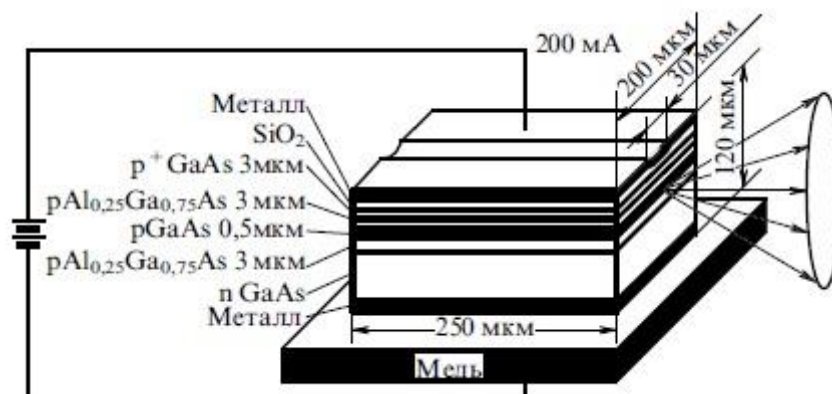


Рис. 3. Схематическое изображение структуры первого инжекционного ДГС-лазера, работающего в непрерывном режиме при комнатной температуре

Большой частью эти результаты были воспроизведены в других лабораториях в течение 1–2 лет, а в некоторых случаях даже позже. Но в 1970 г. международная конкуренция стала очень сильной. Позже один из наших основных конкурентов, И. Хаяши, который работал вместе с М. Панишем в лаборатории корпорации Bell Telephone в Мюррей-Хилл, писал [27]: «В сентябре 1969 г. Жорес Алфёров из Института Иоффе в Ленинграде посетил нашу лабораторию. Мы узнали, что он уже получил  $J_{th}(300\text{ K}) = 4,3\text{ кА см}^{-2}$  на ДГС. До этого мы не понимали, что конкуренция настолько острая, и удвоили наши усилия... О непрерывном режиме лазерной генерации при комнатной температуре было сообщено в мае 1970 г...». В нашей статье, посланной в печать в мае 1970 [28], непрерывный режим лазерной генерации был реализован в лазерах с полосковой геометрией, для создания которых была использована фотолитография; лазеры были установлены на медных теплоотводах, покрытых серебром (см. рис. 3). Самая низкая плотность порогового тока  $J_{th}$  при 300 К составляла  $940\text{ А см}^{-2}$  для широких лазеров и  $2,7\text{ кА см}^{-2}$  для полосковых лазеров. Независимо о непрерывном режиме лазерной генерации в ДГС-лазерах сообщили Ицую Хаяши и Мортон Паниш [29] (для широких лазеров с алмазным теплоотводом) в статье, направленной в печать всего лишь на месяц позже, чем наша работа. Реализация режима непрерывной лазерной



генерации при комнатной температуре вызвала взрыв интереса к физике и технологии полупроводниковых гетероструктур. Если в 1969 г. AlGaAs-гетероструктуры изучались только в нескольких лабораториях, в основном в СССР (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также «Полюс» и «Квант» – НПО, где мы внедряли наши технологии) и в США (Bell Telephone, D. Sarnoff RCA Research Center, T. Watson IBM Research Center), то в начале 1971 г. многие университеты, промышленные лаборатории в США, СССР, Великобритании, Японии, а также в Бразилии и Польше начали исследования III–V-гетероструктур и приборов на их основе.



Рис. 4. Космическая станция «Мир» с солнечными батареями на гетероструктурах

На этой ранней стадии развития физики и технологии гетероструктур нам стало ясно, что для расширения спектральной области необходимо искать новые решеточно-согласованные гетероструктуры. Первый важный шаг был осуществлен в нашей лаборатории в 1970 г., когда в работе [30] мы сообщили, что возможно получение различных решеточно-согласованных гетеропереходов с использованием четверных твердых растворов  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ , позволяющих независимо менять постоянную решетки и ширину запрещенной зоны. Позже к тем же выводам пришел Г.А. Антипас с сотрудниками [31].

В качестве примера реализации этой идеи мы использовали различные составы InGaAsP, и скоро этот материал стал одним из наиболее важных для практического применения, например, в фотокатодах [32] и, осо-

бенно, в лазерах ИК диапазона для волоконно-оптической связи [33] и видимого диапазона [34].

В начале 1970-х гг. была составлена «карта мира» идеальных решеточно-согласованных гетероструктур (рис. 5). Менее чем 10 лет спустя эта «карта мира» кардинально изменилась (рис. 6). В настоящее время следует добавить еще и III-нитриды.

Основные идеи полупроводникового лазера с распределенной обратной связью (РОС) были сформулированы нами в авторском свидетельстве в 1971 г. [35]. В том же самом году Х. Когельник и К.В. Шэнк рассмотрели возможность замены в лазерах на красителях резонатора Фабри–Перо или подобных ему на периодические объемные неоднородности [36]. Необходимо отметить, что их подход неприменим к полупроводниковым лазерам, и все исследователи полупроводниковых лазеров с РОС или с распределенными брэгговскими зеркалами (РБЗ) используют идеи, сформулированные в [35]:

1. Дифракционная решетка создается не в объеме, а на поверхности волноводного слоя.

2. Взаимодействие волноводных мод с поверхностной дифракционной решеткой приводит не только к распределенной обратной связи, но и дает на выходе хорошо сколлимированное излучение.

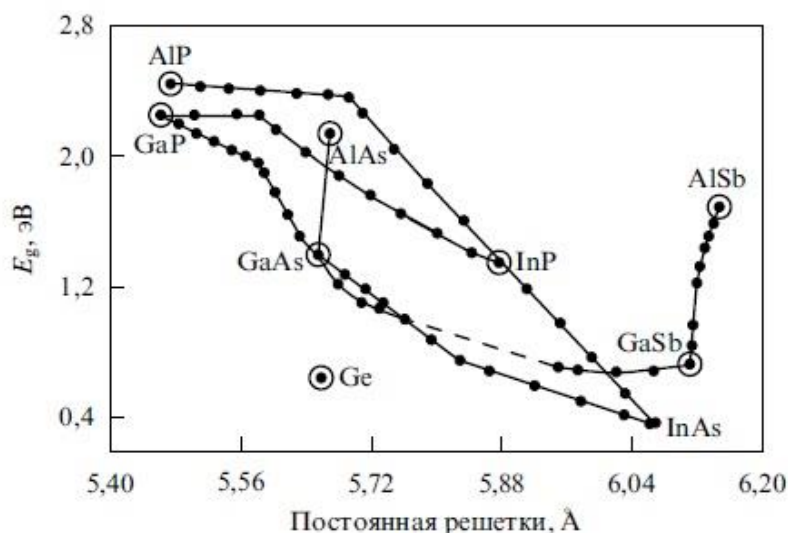


Рис. 5. Ширина запрещенной зоны  $E_g$  в зависимости от постоянной решетки для полупроводников  $A^{III}B^V$ . Решеточно-согласованные гетеропереходы: Ge-GaAs – 1959 г. (R.L. Anderson), AlGaAs – 1967 г. (Ж.И. Алфёров и др., J.M. Woodall & H.S. Rupprecht). Четверные ГС (InGaAsP и AlGaAsSb): предложены в 1970 г. (Ж.И. Алфёров и др., первый эксперимент – 1972 г. (G.A. Antipas et al.)

Подробный теоретический анализ работы полупроводникового лазера с поверхностной дифракционной решеткой был выполнен в 1972 г. [37]. В этой работе авторами был установлен способ получения одномодовой генерации. Первые полупроводниковые лазеры с поверхностной дифракционной решеткой и распределенной обратной связью были получены практически одновременно в Физико-техническом институте [38], в Калифорнийском технологическом институте [39] и в Лаборатории корпорации Хехо в Пало-Альто [40].

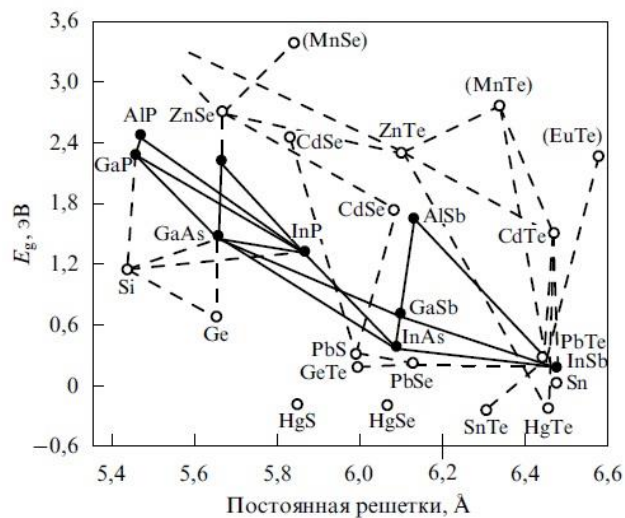


Рис. 6. Ширина запрещенной зоны  $E_g$  в зависимости от параметра решетки для полупроводников IV группы, соединений III–V и II(IV)–VI. В скобках указаны магнитные материалы. Линии, соединяющие полупроводники, обозначают гетероструктуры, которые уже исследованы. Сплошными линиями указаны соединения  $A^{III}B^V$ , штриховыми – все остальные

В начале 80-х годов Г. Крёмер и Г. Гриффитс опубликовали работу [41], стимулировавшую повышенный интерес к гетероструктурам со ступенчатой структурой зон (гетеропереходы II рода). Пространственное разделение электронов и дырок на таких гетерограницах позволяет в широких пределах управлять их оптическими свойствами [21в, 42]. Ступенчатая структура зон дает возможность получить оптическое излучение с энергией фотона, много меньшей ширины запрещенной зоны каждого из полупроводников, формирующих гетеропереход. Реализация инжекционного лазера на основе гетеропереходов II рода в системе GaInAsSb-GaSb [42] открыла хорошие перспективы для создания эффективных когерентных источников света в инфракрасном оптическом диапазоне. Излучение в

структурах такого типа возникает за счет рекомбинации электронов и дырок, локализованных в самосогласованных потенциальных ямах, расположенных по разные стороны от гетерограницы. Таким образом, гетероструктуры II рода открывают новые возможности как для фундаментальных исследований, так и для приборных применений, реализация которых на гетероструктурах I рода в системе соединений  $A^{III}B^V$  невозможна. Однако практическое использование гетероструктур II рода до сих пор ограничивается недостаточным пониманием их фундаментальных свойств и ограниченным числом экспериментально исследованных систем.

В заключение этого краткого обзора развития классических гетероструктур представляется весьма удобным классифицировать наиболее важные результаты следующим способом:

### **Классические гетероструктуры**

#### *I. Фундаментальные физические явления (см. рис. 1)*

- Односторонняя инжекция.
- Сверхинжекция.
- Диффузия во встроенном квазиэлектрическом поле.
- Электронное ограничение.
- Оптическое ограничение.
- Эффект широкозонного окна.
- Диагональное туннелирование через гетерограницу.

#### *II. Важные применения в электронике*

• Полупроводниковые лазеры – низкопороговые и работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре, РОС- и РБЗ-лазеры, вертикальные поверхностно-излучающие лазеры, ИК лазеры на гетероструктурах II рода.

- Высокоэффективные светоизлучающие диоды (СИД).
- Солнечные батареи и фотодетекторы, основанные на эффекте широкозонного окна.
- Полупроводниковая интегральная оптика на основе полупроводниковых РОС- и РБЗ-лазеров.
- Биполярные транзисторы с широкозонным эмиттером.
- Транзисторы, тиристоры, динисторы с передачей светового сигнала.

- Мощные диоды и тиристоры.
- Преобразователи света из ИК в видимый диапазон.
- Эффективные холодные катоды.

### *III. Важные технологические особенности*

- Принципиальная необходимость структур с хорошим согласованием параметров решетки.
- Многокомпонентные твердые растворы используются для согласования параметров решеток.
- Принципиальная необходимость эпитаксиальных технологий выращивания.

В заключение этого краткого обзора раннего развития классических гетероструктур можно сказать, что создание «идеального» гетероперехода и введение концепции гетероструктуры в физику и технологию полупроводников привело к открытию новых физических эффектов, кардинальному улучшению характеристик фактически всех известных полупроводниковых приборов и созданию новых типов таких приборов.

## **2. Гетероструктуры с квантовыми ямами и сверхрешетками**

Благодаря наличию электронного ограничения в двойных гетероструктурах лазеры на их основе по существу стали прямыми предшественниками структур с квантовыми ямами, в которых средний узкозонный слой имеет толщину порядка нескольких сотен ангстрем, что приводит к расщеплению электронных уровней вследствие эффектов размерного квантования. Однако лишь с развитием новых методов выращивания гетероструктур стала возможной реализация высококачественных двойных гетероструктур со сверхтонкими слоями. В 70-е годы были разработаны два основных современных метода эпитаксиального роста с прецизионным контролем толщины, планарности, состава и т.д. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) превратился сегодня в одну из важнейших технологий выращивания гетероструктур на основе соединений  $A^{III}B^V$ , прежде всего, благодаря пионерской работе А. Чо [43]. Основные идеи метода газофазной эпитаксии из паров металлоорганических соединений (МОС ГФЭ) были изложены в ранней работе Г. Манасевита [44].

Этот метод нашел широкое применение для выращивания III-V-гетероструктур, в особенности после сообщения Р. Дюпюи и П. Дапкуса о получении с его помощью инжекционного ДГС-лазера в системе AlGaAs, работающего при комнатной температуре [45].

Четкое проявление эффекта размерного квантования в оптических спектрах полупроводниковой гетероструктуры GaAs – AlGaAs со сверхтонким слоем GaAs (квантовой ямой) было продемонстрировано Р. Динглом и др. в 1974 г. [46]. Авторы наблюдали характерную ступенчатую структуру в спектрах поглощения и систематический сдвиг характеристических энергий при уменьшении толщины квантовой ямы (КЯ).

Экспериментальное изучение сверхрешеток началось в 1970 г. с работы Л. Есаки и Р. Тсу [47], где авторы рассмотрели электронный транспорт в сверхрешетке, т.е. в структуре с дополнительным периодическим потенциалом, который создается с помощью легирования или изменения состава полупроводниковых материалов и период которого больше, но сравним с постоянной решетки кристалла. В этом, как его назвал Лео Есаки, «кристалле, созданном человеком» (man-made crystal), происходит расщепление параболической зоны на мини-зоны, разделенные малыми запрещенными щелями, а зона Бриллюэна определяется периодом сверхрешетки. Аналогичные идеи были сформулированы Л.В. Келдышем еще в 1962 г. [48] при рассмотрении периодического потенциала, создаваемого на поверхности полупроводника интенсивной ультразвуковой волной. В начале 70-х годов в Физико-техническом институте Р. Казаринов и Р. Сурис теоретически рассмотрели прохождение тока в структурах со сверхрешетками [49]. Было показано, что протекание тока определяется туннелированием через потенциальные барьеры, разделяющие ямы. Авторами также были предсказаны очень важные физические явления: туннелирование носителей под действием электрического поля, когда основное состояние одной ямы совпадает с возбужденным состоянием следующей ямы, и стимулированное излучение, возникающее при туннелировании оптически возбужденных носителей из основного состояния одной ямы в возбужденное состояние соседней, расположенное ниже по энергии за счет действия приложенного электрического поля. Практически в то же

время Л. Есаки и Р. Тсу независимо рассмотрели эффекты резонансного туннелирования в структурах со сверхрешетками [50].

Пионерские экспериментальные исследования структур со сверхрешетками были выполнены Л. Есаки и В.Р. Тсу на сверхрешетках в системе  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}\text{-GaAs}$ , полученных методом ГФЭ. В нашей лаборатории к тому времени мы разработали первую многокамерную установку и, как было упомянуто ранее, изготовили структуры со сверхрешетками  $\text{GaP}_{0,3}\text{As}_{0,7}\text{-GaAs}$  с толщиной каждого из слоев 100 Å и общим количеством слоев, равным 200 [17]. Наблюдаемые особенности вольтамперных характеристик, их температурные зависимости и эффект фотопроводимости были объяснены расщеплением зоны проводимости за счет действия одномерного периодического потенциала сверхрешетки. Эти первые сверхрешетки являлись в то же время и первыми сверхрешетками с напряженными слоями. Э. Блэкли (E. Blakeslee) и Дж. Мэттьюз (J. Matthews), работавшие с Л. Есаки и Р. Тсу в IBM, в середине 1970-х годов достигли заметных успехов в выращивании напряженных сверхрешеток с очень низкой концентрацией дефектов. Но только намного позднее, после теоретической работы Г. Осборна [51] из Sandia Lab и выращивания первой высококачественной напряженной сверхрешетки  $\text{GaAs-In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$  М. Людовицем из Varian Associates, Н. Холоньяку из Иллинойского университета удалось создать на основе этих структур лазер, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре [52]. Стало понятно, что в сверхрешетках с напряженными слоями напряжение решетки является дополнительной степенью свободы и, варьируя толщины и составы слоев, можно изменять непрерывно и независимо друг от друга такие фундаментальные параметры, как ширина запрещенной зоны, постоянная решетки и т.д.

В начале 1970-х годов Л. Есаки и др. применили технологию МЛЭ к системе  $\text{AlGaAs}$  [53], а в марте 1974 г. они представили работу по резонансному туннелированию [54]. Это была первая экспериментальная демонстрация новых физических свойств гетероструктур с квантовыми ямами. Были измерены зависимости туннельного тока и проводимости от приложенного напряжения в гетероструктуре  $\text{GaAs-GaAlAs}$  с двойными барьерами и обнаружены максимумы тока, связанные с резонансным тун-

нелированием. Позже, в том же году Л. Есаки и Л.Л. Чанг наблюдали эффект резонансного туннелирования в сверхрешетке [55]. Усиленное внимание к резонансному туннелированию, очевидно, было также связано с потенциальными возможностями применения этого эффекта в быстродействующей электронике. В конце 80-х годов для двойного резонансного туннельного диода удалось достичь пикосекундного диапазона времени переключения; в резонансно-туннельных диодах на GaAs были получены осцилляции на частоте 420 ГГц при комнатной температуре.

Утверждение о переходе к двумерному движению электронов в полевых транзисторах было высказано уже достаточно давно [56] и для электронов, захваченных в инверсном слое, впервые проверено А.Б. Фаулером и др. в 1966 г. [57] в экспериментах по магнито-проводимости. Спектральные эффекты, обусловленные пространственным квантованием, наблюдались в тонких пленках висмута В.Н. Луцким и Л.А. Куликом в 1968 г. [58].

Пионерская работа по модулированно-легированным сверхрешеткам [59], в которой было продемонстрировано увеличение подвижности по сравнению с объемными кристаллами, стимулировала развитие исследований по использованию двумерного электронного газа с высокой подвижностью для микроволнового усиления. Во Франции и Японии практически одновременно на основе одиночной модулированно-легированной гетероструктуры n-AlGaAs-n-GaAs были созданы новые типы транзисторов, получившие во Франции название TEGFET (полевые транзисторы с двумерным электронным газом) [60], а в Японии – НЕМТ (транзисторы с высокой подвижностью электронов, ВПЭТ) [61].

Впервые лазерная генерация на квантовых ямах была получена Дж.П. ван дер Зилом и др. [62], но параметры генерации значительно уступали средним ДГС-лазерам. Лишь в 1978 г. Р. Дюпюи и П. Дапкус в сотрудничестве с Н. Холоньяком впервые сообщили о создании лазера на квантовой яме с параметрами, сравнимыми с параметрами стандартных ДГС-лазеров [63]. В этой работе впервые прозвучало название «квантовая яма». Реальное преимущество лазеров на квантовых ямах было продемонстрировано намного позже В.Т. Цангом из Bell Telephone Lab. За счет значительного улучшения технологии МЛЭ и создания оптимизированной



структуры (раздельно ограниченная ДГС с плавным изменением показателя преломления волноводной области: РО ПИПП ДГС) ему удалось добиться снижения пороговой плотности тока до  $160 \text{ А см}^{-2}$  [64].

В Физико-техническом институте развитие методов МЛЭ и МОС ГФЭ выращивания гетероструктур  $A^{III}B^V$  было начато только в конце 1970-х годов. Прежде всего, мы стимулировали разработку и конструирование первой советской установки молекулярно-лучевой эпитаксии в нашей электронной промышленности. В течение нескольких лет были разработаны три поколения машин для МЛЭ, и последние, носившие название «Цна» (красивая река недалеко от Рязани – города, где находится Научно-исследовательский технологический институт электронной промышленности – НИТИ; в НИТИ и была выполнена разработка установок для МЛЭ), оказались достаточно хорошими для реализации научных программ. Параллельно, чуть позже, мы начали разрабатывать системы МЛЭ в Научно-технологическом объединении Академии наук в Ленинграде. В середине 1980-х годов несколько систем этой версии были установлены в ФТИ. Оба типа систем МЛЭ все еще работают в ФТИ и других лабораториях страны.

Системы МОС ГФЭ были разработаны непосредственно в нашем институте, а позже, в 1980-е годы, шведская компания Eriqir специально для нас сконструировала, при нашем активном участии, несколько систем для нашего института, которые до сих пор используются в научных исследованиях.

Большой интерес к изучению низкоразмерных структур и отсутствие оборудования для технологий МЛЭ и МОС ГФЭ стимулировали наши исследования по развитию метода ЖФЭ, пригодного для выращивания гетероструктур с квантовыми ямами. Однако до конца 1970-х годов казалось, что методом ЖФЭ невозможно вырастить гетероструктуры  $A^{III}B^V$  с толщиной активной области менее  $500 \text{ \AA}$  из-за существования вблизи гетеропереходов протяженных переходных областей переменного химического состава.

Ситуация изменилась благодаря работе Н. Холоньяка и др. [65], предложивших для выращивания сверхрешеток на основе соединений

InGaAsP использовать систему ЖФЭ с вращающимися «лодочками». В нашей лаборатории мы разработали модифицированный метод ЖФЭ с обычным последовательным перемещением подложки в стандартной горизонтальной геометрии «лодочки» для InGaAsP-гетероструктур [66] и метод низкотемпературной ЖФЭ для AlGaAs-гетероструктур [67]. Эти методы позволили нам выращивать гетероструктуры с квантовыми ямами превосходного качества, практически любого вида, с толщиной активной области до 20 Å и с размером переходных областей, сравнимым с постоянной кристаллической решетки. Важное практическое значение имело получение методом ЖФЭ рекордных значений пороговых плотностей тока в лазерах с отдельным ограничением и одиночной квантовой ямой на основе гетероструктур InGaAsP-InP ( $\lambda = 1,3$  и  $1,55$  мкм) и InGaAsP-GaAs ( $\lambda = 0,65$ – $0,9$  мкм) [68]. Для мощных лазеров InGaAsP-GaAs ( $\lambda = 0,8$  мкм), выполненных в полосковой геометрии, были достигнуты в непрерывном режиме эффективность 66% и мощность излучения 5 Вт при ширине полоски 100 мкм [69]. В этих лазерах впервые было реализовано эффективное охлаждение мощного полупроводникового прибора за счет рекомбинационного излучения, как было предсказано ранее в [13]. Другой важной особенностью InGaAsP-гетероструктур явилась их довольно большая устойчивость к развитию дислокаций и дефектов (рис. 7) [70]. Данные исследования положили начало широкому применению гетероструктур, не содержащих алюминия.

Наиболее сложная лазерная структура с квантовыми ямами, которая соединила в себе одиночную квантовую яму (КЯ) и короткопериодные сверхрешетки (КПСР), использовавшиеся для создания РО ПИПП ДГС (наиболее предпочтительной для получения наименьших значений порогового тока  $J_{th}$ ), была выращена в нашей лаборатории в 1988 г. [71] (рис. 8). Используя КПСР, удалось не только достичь желаемого профиля показателя преломления в волноводной области и создать барьер движению дислокаций в активную область, но также получить возможность выращивать различные части структуры при существенно различных температурах. Таким образом, были достигнуты одновременно как превосходная морфология поверхности, так и высокая внутренняя квантовая эффек-

тивность на планарной поверхности GaAs (100). Самое низкое значение пороговой плотности тока  $J_{th} = 52 \text{ А см}^{-2}$  и, после некоторой оптимизации,  $J_{th} = 40 \text{ А см}^{-2}$  в течение долгого времени являлось мировым рекордом для полупроводниковых инжекционных лазеров и служило хорошей демонстрацией эффективного применения квантовых ям и сверхрешеток в электронных приборах.

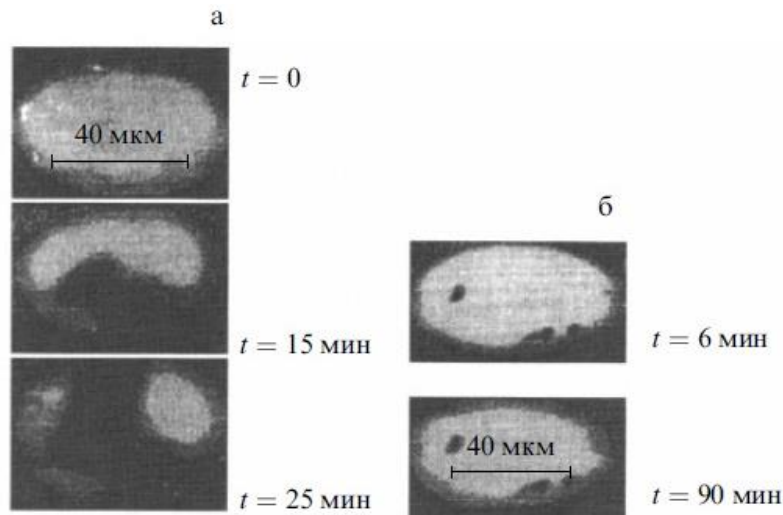


Рис. 7. Временная эволюция картин люминесценции из активной области двойной гетероструктуры при высоком уровне фотовозбуждения: (а) AlGaAs–GaAs, (б) InGaAsP–GaAs. Диаметр пятна возбуждения  $\text{Kr}^+$ -лазера – 40 мкм. Уровни возбуждения: (а)  $10^4 \text{ Вт см}^{-2}$ ; (б)  $10^5 \text{ Вт см}^{-2}$

Идея стимулированного излучения в сверхрешетках, выдвинутая Р. Казариновым и Р. Сурисом [49], была реализована почти на четверть столетия позже Федерико Капассо [72]. Предложенная ранее структура была существенно оптимизирована, и каскадный лазер, разработанный Ф. Капассо, вызвал к жизни новое поколение униполярных лазеров, работающих в среднем ИК диапазоне.

История развития полупроводниковых лазеров – это, с определенной точки зрения, история борьбы за снижение их порогового тока, что наглядно проиллюстрировано на рис. 9. Наиболее значительные изменения в данной области произошли только после внедрения концепции ДГС-лазеров. Использование КПСР КЯ фактически привело к достижению теоретического предела для этого – одного из наиболее важных – параметра. Дальнейшие возможности, связанные с применением новых структур с

квантовыми проволоками (КП) и квантовыми точками (КТ), будут обсуждаться в следующем разделе.

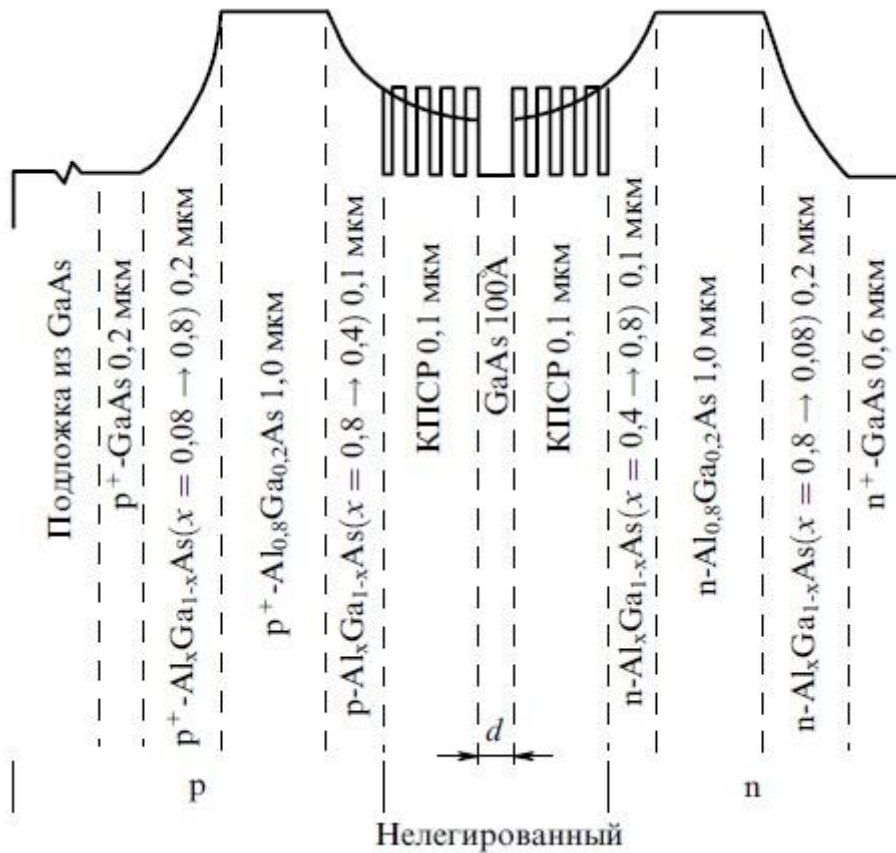


Рис. 8. Выращенная методом МЛЭ структура РО ДГС-лазера с квантовой ямой, ограниченной короткопериодной сверхрешеткой

Возможно, венцом исследований квантовых ям было открытие квантового эффекта Холла [73]. Это открытие и всестороннее его изучение в AlGaAs–GaAs-гетероструктурах, приведшее вскоре к открытию дробного квантового эффекта Холла [74], оказало принципиальное влияние на всю физику твердого тела. Обнаружение данного эффекта, имеющего отношение только к фундаментальным величинам и не зависящего от особенностей зонной структуры, подвижности и плотности носителей заряда в полупроводнике, показало, что гетероструктуры могут использоваться и для моделирования некоторых фундаментальных физических явлений. В последнее время большая часть исследований в этой области направлена на объяснение механизма конденсации электронов и на поиск вигнеровской кристаллизации.

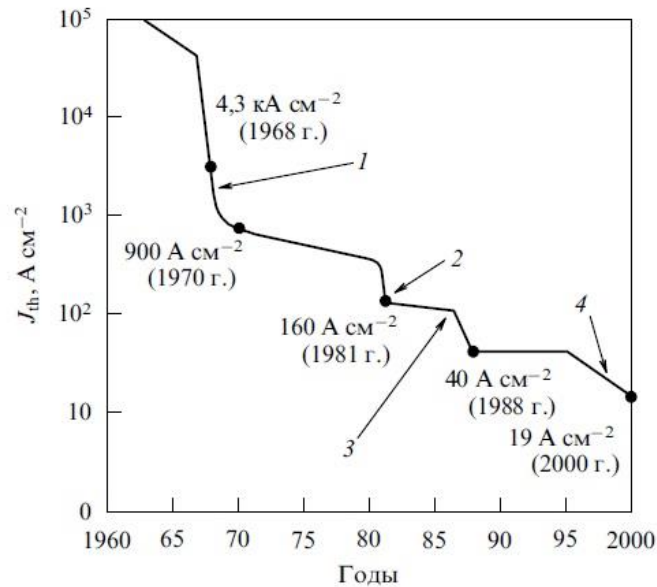


Рис. 9. Эволюция порогового тока полупроводниковых лазеров.

Цифрами обозначены резкие снижения порогового тока, обусловленные применением: 1 – двойных гетероструктур; 2 – гетероструктур с КЯ; 3 – гетероструктур с КЯ, ограниченной КПСР; 4 – гетероструктур с КТ

Обобщим кратко основные положения данного раздела аналогично тому, как это было сделано в предыдущем разделе, посвященном классическим гетероструктурам.

## Гетероструктуры с квантовыми ямами и сверхрешетками

### 1. Фундаментальные физические явления

- Двумерный (2D) электронный газ.
- Ступенчатый вид функции плотности состояний.
- Квантовый эффект Холла.
- Дробный квантовый эффект Холла.
- Существование экситонов при комнатной температуре.
- Резонансное туннелирование в структурах с двойным барьером и сверхрешетках.
  - Энергетический спектр носителей в сверхрешетках определяется выбором потенциала и упругих напряжений.
  - Стимулированное излучение при резонансном туннелировании в сверхрешетках.
  - Псевдоморфный рост напряженных структур.

## *II. Важные следствия для применений*

- Более короткие длины волн излучения, меньшие значения порогового тока, большее дифференциальное усиление и более слабая температурная зависимость порогового тока в полупроводниковых лазерах.
- Инфракрасные квантовые каскадные лазеры.
- Лазер с квантовой ямой, ограниченной короткопериодной сверхрешеткой (КПСР КЯ).
- Оптимизация электронного и оптического ограничения и характеристик волновода в полупроводниковых лазерах.
- Транзисторы с двумерным электронным газом (ВПЭТ).
- Резонансно-туннельные диоды.
- Высокоточные стандарты сопротивлений.
- Приборы на основе эффекта электропоглощения и электрооптические модуляторы.
- Инфракрасные фотодетекторы на основе эффекта поглощения между уровнями размерного квантования.

## *III. Важные технологические особенности*

- Нет необходимости в согласовании параметров решеток.
- Принципиально необходимо использование технологий с низкими скоростями роста (МЛЭ, МОС ГФЭ).
- Метод субмонослойного выращивания.
- Подавление распространения дислокаций несоответствия в процессе эпитаксиального роста.
- Резкое увеличение разнообразия материалов-компонентов гетероструктур.

### **3. Гетероструктуры с квантовыми проволоками и квантовыми точками**

Принципиальное преимущество применения квантово-размерных гетероструктур для лазеров является следствием существенного возрастания плотности состояний при уменьшении размерности электронного газа (рис. 10).

В 1980-е годы прогресс в физике двумерных гетероструктур с квантовыми ямами и их прикладных применениях привлек многих ученых к исследованию систем, обладающих еще меньшей размерностью, – квантовых проволок и квантовых точек. В отличие от квантовых ям, где носители ограничены в направлении, перпендикулярном к слоям, и могут свободно двигаться в плоскости слоя, в квантовых проволоках носители заряда ограничены в двух направлениях и свободно перемещаются только вдоль оси проволоки. В квантовых точках – «искусственных атомах», носители заряда ограничены уже во всех трех направлениях и обладают полностью дискретным энергетическим спектром (рис. 11).

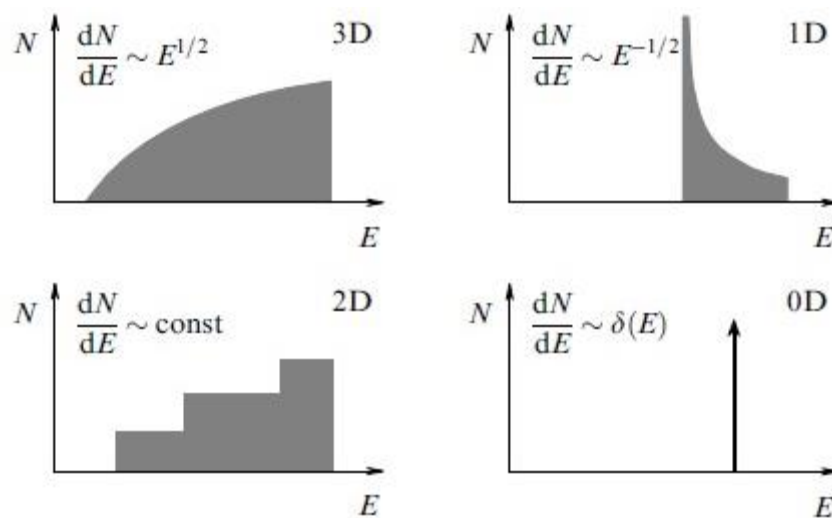


Рис. 10. Плотность состояний  $N(E)$  для носителей заряда в структурах с различной размерностью

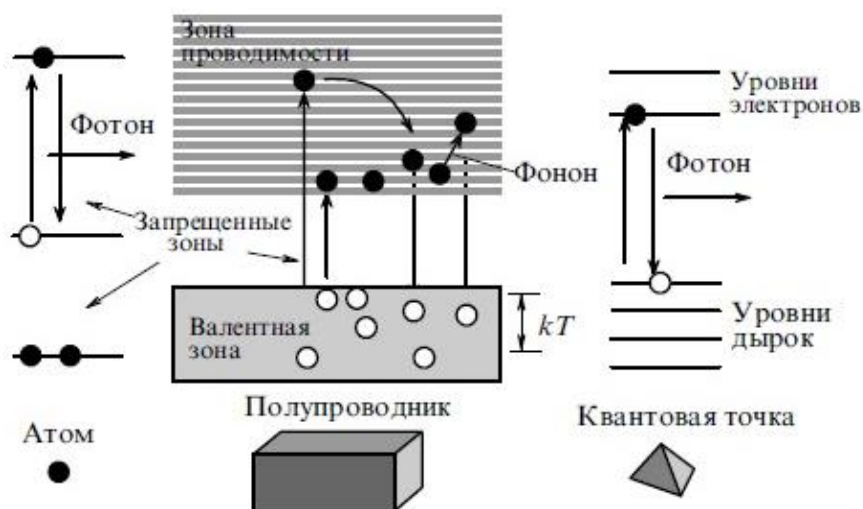


Рис. 11. Схема энергетических уровней для случая одиночного атома (слева), объемного кристалла (в центре) и квантовой точки (справа)

Экспериментальная работа по изготовлению и исследованию структур с квантовыми проволоками (КП) и квантовыми точками (КТ) была начата более 15 лет назад. В 1982 г. Я. Аракава и Х. Сакаки [75] теоретически рассмотрели некоторые эффекты в лазерах на гетероструктурах с размерным квантованием в одном, двух и трех направлениях. Они писали: «Самое важное, что пороговый ток такого лазера, как оказалось, является гораздо менее чувствительным, чем для традиционного лазера, что отражает уменьшение размерности электронного газа». Авторы провели эксперименты на лазерах с КЯ, помещенных в сильные магнитные поля, направленные перпендикулярно плоскости КЯ, и продемонстрировали, что характеристическая температура ( $T_0$ ), описывающая экспоненциальный рост порогового тока от температуры, возрастает в магнитном поле с 144 до 313 °С. Они отметили возможность ослабления температурной зависимости плотности порогового тока для лазеров на КП и полную температурную стабильность лазеров на КТ (рис. 12). К настоящему времени в данной области уже имеется значительное число как теоретических, так и экспериментальных работ.

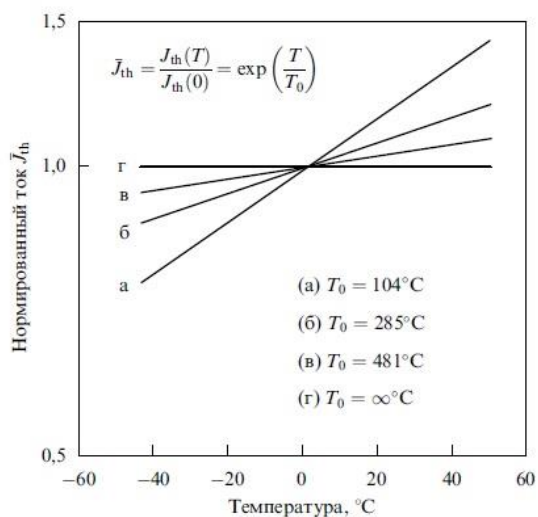


Рис. 12. Нормированные температурные зависимости порогового тока  $J_{th}$  для различных ДГС-лазеров: (а) объемных; (б) с квантовыми ямами; (в) с квантовыми проволоками, (г) с квантовыми точками

Первые полупроводниковые точки — микрокристаллы соединений  $A^{II}B^{VI}$ , сформированные в стеклянной матрице, были предложены и реализованы А.И. Екимовым и А.А. Онущенко [76]. Однако, поскольку полу-



проводниковые квантовые точки были внедрены в изолирующую стеклянную матрицу и качество гетерограницы между стеклом и полупроводниковой точкой было невысоким, это создавало определенные ограничения как для фундаментальных исследований, так и для приборных применений. Намного более интересные возможности появились с созданием трехмерных КТ, когерентных с окружающей их полупроводниковой матрицей [77].

Для изготовления этих структур было предложено несколько методов. Непрямые методы, например, изготовление КТ путем их поперечного вытравливания из структур с КЯ, часто страдают недостаточным разрешением и могут вызывать повреждение гетерограниц в процессе травления. Более перспективным способом является применение прямых методов изготовления, таких как рост в V-образных канавках и на гофрированных («корругированных») поверхностях, приводящих к образованию КП и КТ. Лаборатории Физико-технического института и Берлинского технического университета – в последнее время мы проводили эти исследования в тесном сотрудничестве – значительно продвинулись именно в последнем направлении.

Наконец, мы пришли к выводу, что наиболее многообещающим методом формирования упорядоченных массивов КП и КТ является метод, использующий явление самоорганизации на кристаллических поверхностях. Релаксация напряжений на краях ступеней или граней может приводить к формированию упорядоченных массивов КП и КТ в случаях роста как согласованных, так и рассогласованных по параметру решетки материалов.

Первые очень однородные массивы трехмерных квантовых точек, имеющих также поперечное упорядочение, были получены в системе InAs–GaAs с помощью методов МЛЭ и МОС ГФЭ [78; 79].

Движущей силой, вызывающей образование массива однородных напряженных островков на кристаллической поверхности, является релаксация упругих напряжений на краях граней и взаимодействие островков посредством напряжений, создаваемых ими в подложке [80].

В решеточно-согласованных гетероэпитаксиальных системах режим роста определяется исключительно соотношением между энергиями двух поверхностей и энергией границы раздела. Если сумма поверхностной энергии эпитаксиального слоя ( $\gamma_2$ ) и энергии поверхности раздела ( $\gamma_{12}$ ) меньше, чем поверхностная энергия подложки ( $\gamma_1$ ),  $\gamma_2 + \gamma_{12} < \gamma_1$ , т.е. если материал 2, который будет осаждаться, смачивает подложку, тогда мы имеем режим роста Франка-ван дер Мерве. Изменение значения величины  $\gamma_2 + \gamma_{12}$  может привести к переходу из режима Франка-ван дер Мерве к режиму Вольмера–Вебера, когда трехмерные островки образуются непосредственно на поверхности подложки.

В гетероэпитаксиальной системе с несоответствием решеток между материалом, который осаждается, и подложкой рост первоначально может происходить в послойном режиме.

Однако более толстый слой обладает большей упругой энергией, которая имеет тенденцию к уменьшению посредством образования изолированных островков. В этих островках упругие напряжения уменьшаются и, соответственно, понижается и упругая энергия. Это приводит к режиму роста по Странски–Крастанову (рис. 13). Характерный размер островков определяется минимумом энергии массива трехмерных однородно напряженных островков на единицу поверхности в зависимости от размера островка (рис. 14) [80]. Взаимодействие между островками через упруго напряженную подложку будет приводить к поперечному упорядочению островков в квадратную решетку.

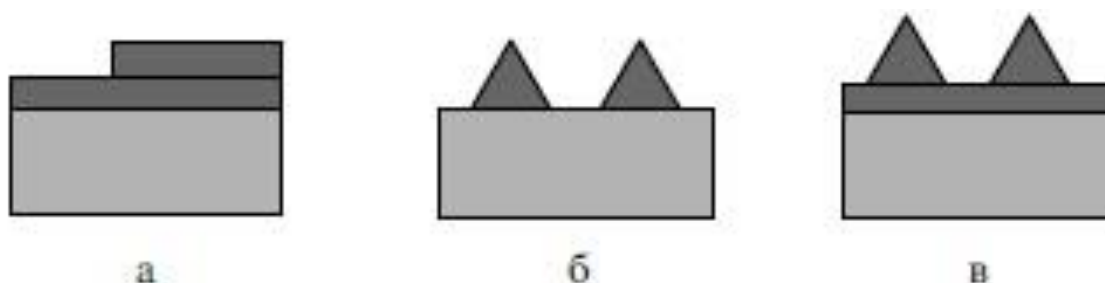


Рис. 13. Режимы роста: по Франку–ван дер Мерве (а), Вольмеру–Веберу (б), Странски–Крастанову (в)

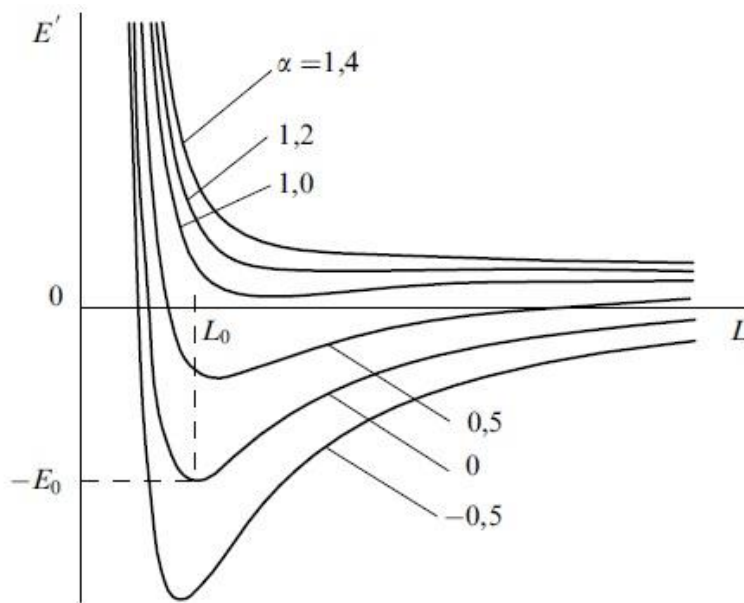


Рис. 14. Энергия разбросанного массива трехмерных напряженных островков на единицу поверхности как функция размера островка. Параметр  $\alpha$  – отношение изменения поверхностной энергии при образовании островков к вкладу краев островков в упругую энергию релаксации. При  $\alpha > 1$  система термодинамически стремится к сращиванию островков. При  $\alpha < 1$  существует оптимальный размер островка, и система островков стабильна по отношению к слиянию островков

Эксперименты показывают в большинстве случаев довольно узкое распределение островков по размерам, и, более того, при некоторых условиях когерентные островки InAs образуют квазипериодическую квадратную решетку (рис. 15). Форма КТ может значительно изменяться в процессе зарастивания или постростового отжига, а также при использовании сложных ростовых манипуляций. Короткопериодное попеременное нанесение различных напряженных материалов ведет к расщеплению квантовых точек и формированию сверхрешеток, образуемых плоскостями вертикально связанных КТ (рис. 15) [81]. В работе [78] было обнаружено, что энергия излучения из основного состояния КТ совпадает с краем поглощения и энергией лазерной генерации. Наблюдение сверхузких ( $< 0,15$  мэВ) линий люминесценции из одиночных квантовых точек [78], которые не уширяются с увеличением температуры, является доказательством формирования электронных КТ (рис. 16).

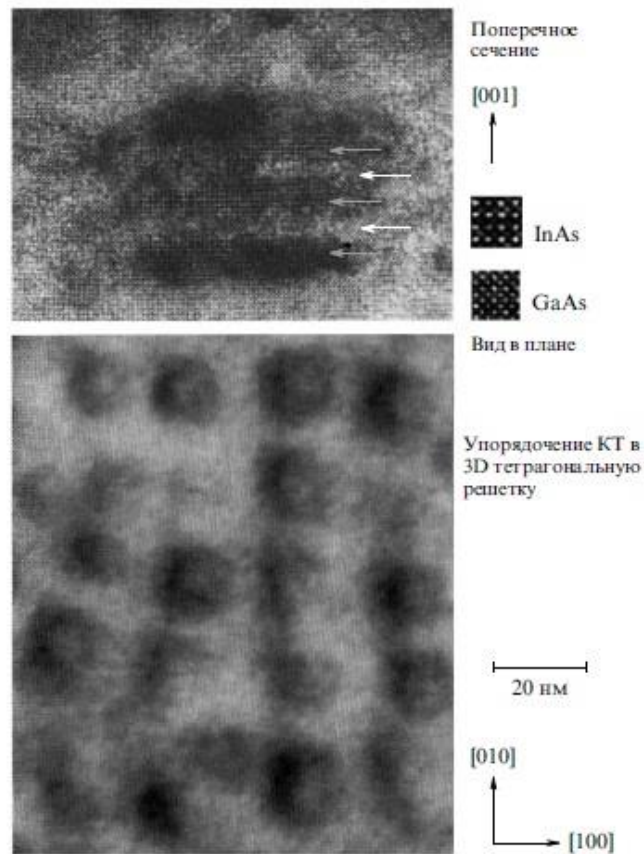


Рис. 15. Вертикальное и поперечное упорядочение связанных квантовых точек в системе InAs–GaAs

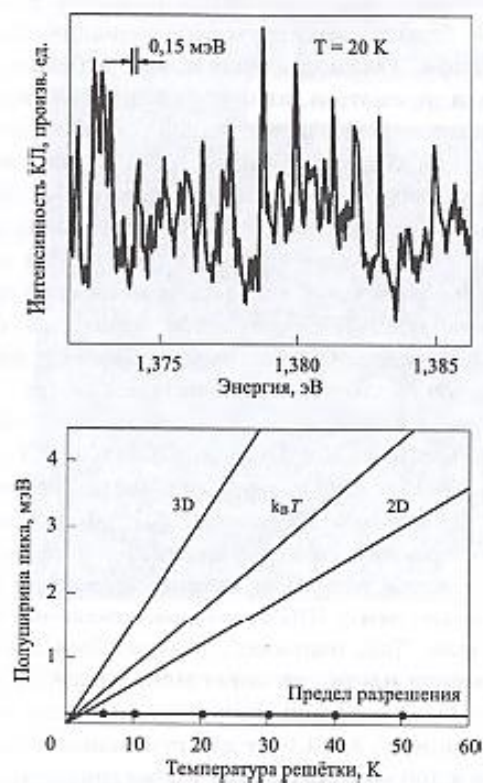


Рис. 16. (а) Спектр катодолуминесценции (КЛ) высокого разрешения для структур InAs–GaAs с КТ. (б) Температурная зависимость полуширины пика (full width at half maximum) в спектре катодолуминесценции одиночной КТ

Лазеры на квантовых точках, как ожидается, будут иметь более высокие характеристики по сравнению со стандартными лазерами на КЯ. Считается, что в них одновременно проявятся такие уникальные свойства, как высокое дифференциальное усиление, сверхнизкое значение пороговой плотности тока и высокая температурная стабильность пороговой плотности тока.

В дополнение к этому упорядоченные массивы КТ, сформированные в области оптического волновода, могут привести к появлению распределенной обратной связи с (или) к стабилизации одномодового лазерного излучения. *In situ* захороненные в полупроводнике структуры с КТ пространственно локализуют носители и предотвращают их безызлучательную рекомбинацию на зеркалах резонатора. Таким способом можно избежать перегрева зеркал резонатора, являющегося одной из наиболее серьезных проблем высокомоощных и высокоэффективных AlGaAs–GaAs- и AlGaAs- InGaAs-лазеров.

С момента первой реализации лазеров на КТ [82] стало сразу ясно, что однородность КТ по размеру вполне достаточна для обеспечения хорошей работы лазера. Но даже в то время было понятно, что основное препятствие для работы КТГС-лазера при комнатной и высокой температурах связано с термически индуцированным выбросом носителей из квантовых точек. Чтобы улучшить работу лазера, были разработаны различные методы: (1) увеличение объемной плотности КТ за счет увеличения количества слоев, содержащих массивы КТ (рис. 17); (2) вставка КТ в слой КЯ; (3) использование более широкозонного полупроводника для матрицы.

В результате мы получили многие параметры КТГС-лазеров лучше, чем у КЯГС-лазеров, сделанных на том же материале. Так, например, недавно был достигнут мировой рекорд плотности порогового тока в  $19 \text{ А см}^{-2}$  [83]. Далее, были получены выходная мощность в непрерывном режиме до 3,5–4,0 Вт для полосковой геометрии с шириной в 100 мкм, квантовая эффективность, равная 95%, и КПД около 50% [84].

Значительные усилия были также предприняты в теоретическом изучении лазеров на КТ с реалистичными параметрами. При 10-

процентном разбросе размеров КТ и других практических параметрах структуры теория [85] предсказывает типичную плотность порогового тока, равную  $5 \text{ А см}^{-2}$  при комнатной температуре. Экспериментально наблюдались уже значения  $10 \text{ А см}^{-2}$  при  $77 \text{ К}$  [86] и  $5 \text{ А см}^{-2}$  при  $4 \text{ К}$  [87].

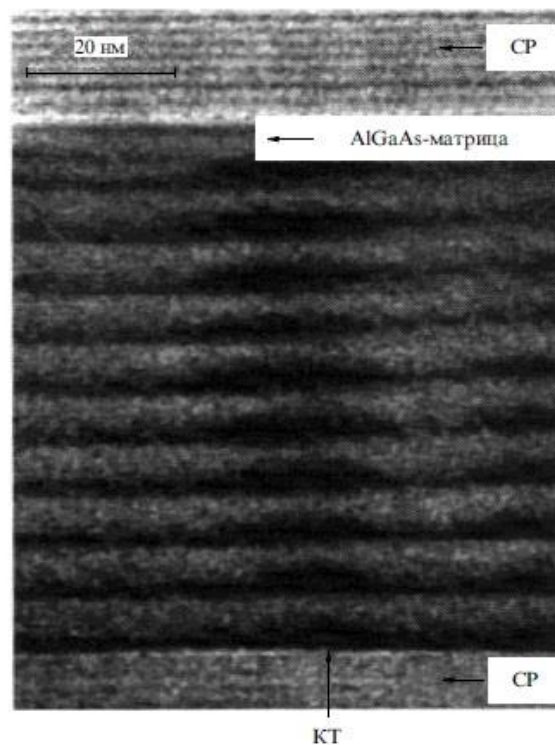


Рис. 17. ПЭМ изображение активной области мощного лазера на гетероструктуре с КТ

С точки зрения применения КТ в усовершенствованных приборах оказывается, что введение КТ в поверхностно излучающие лазеры с вертикальным резонатором (ВРПИЛ) очень существенно. Уже созданы подобные лазеры с параметрами, соответствующими лучшим значениям для приборов на КЯ с той же геометрией (рис. 18) [88]. Недавно многообещающие результаты были получены для лазера такого типа на подложке из GaAs, излучающего на длине волны  $1,3 \text{ мкм}$ , для использования в волоконно-оптических системах связи (рис. 19) [89].

В трехмерном островке, образованном за счет рассогласования параметров решеток островка и подложки, напряжения могут релаксировать упруго, без образования дислокаций. Таким образом, достаточно большой объем узкозонного материала может быть реализован в качестве когерентно-напряженных КТ. Это дает возможность охватить спектральный диапа-

зон 1,3–1,5 мкм, используя GaAs-подложку, и разработать мультиплексные системы на основе приборов КТ ВРПИЛ в будущем.

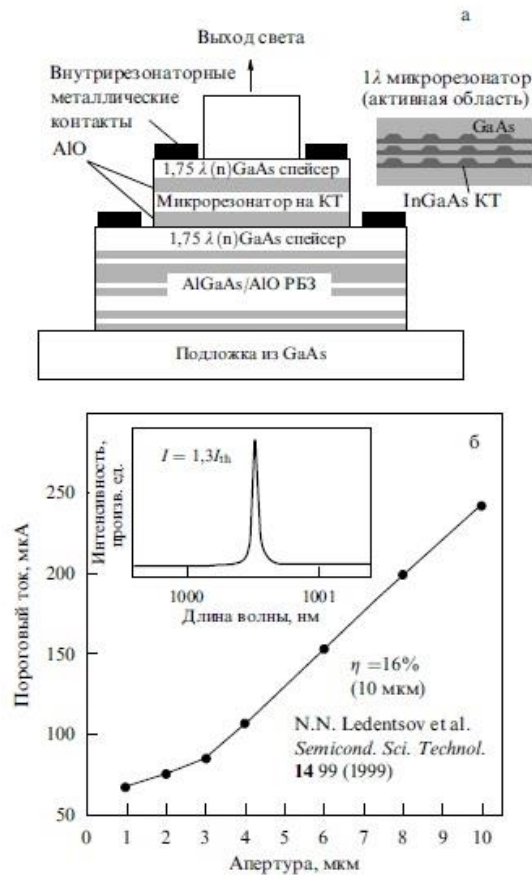


Рис. 18. (а) Схематическое изображение прибора КТ ВРПИЛ. Основные преимущества КТ: 1) отсутствие интерфейсной рекомбинации на апертуре; 2) уменьшение бокового растекания носителей из области апертуры. Возможность создания лазера на одиночной КТ с ультранизким пороговым током, (б) Зависимость порогового тока от размера апертуры: 1) низкие пороговые плотности тока ( $170 \text{ А см}^{-2}$  при 300 К); 2) низкие пороговые плотности тока при ультрамалых размерах апертуры; 3) спектральный диапазон 1,3 мкм на GaAs подложке

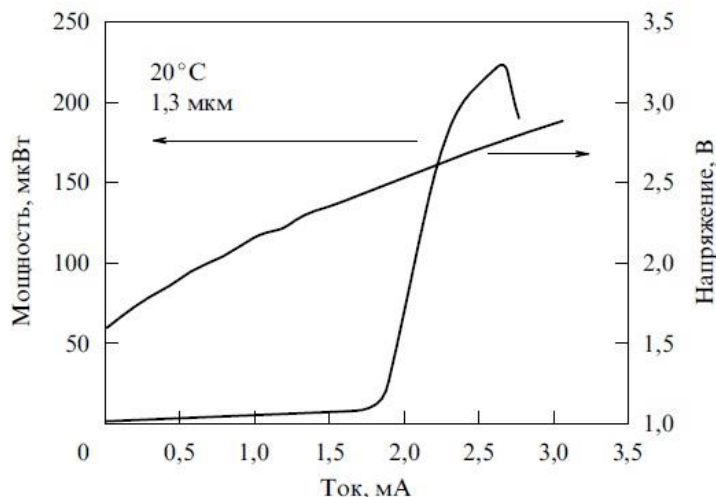


Рис. 19. КТ ВРПИЛ на GaAs, излучающий на длине волны 1,3 мкм

Очень важно подчеркнуть, что мы всегда использовали концепцию ДГС для КП и КТ, поскольку в обоих случаях мы имеем узкозонный материал в широкозонной матрице.

Подведем итог данного раздела таким же образом, как это было сделано для других разделов.

### **Гетероструктуры с квантовыми проволоками и точками**

#### *I. Фундаментальные физические явления*

- Одномерный (1D) электронный газ (проволоки).
- Функция плотности состояний с острыми максимумами (проволоки).
- Нуль-мерный (0D) электронный газ (точки).
- Функция плотности состояний типа дельта-функции (точки).
- Увеличение энергии связи экситонов.

#### *II. Важные следствия для применений в электронике*

- Уменьшенное значение порогового тока лазера и увеличенное дифференциальное усиление.
- Уменьшенная температурная зависимость порогового тока (проволоки).
- Температурная стабильность порогового тока (точки).
- Дискретный спектр усиления и возможность получения рабочих характеристик, подобных характеристикам твердотельных или газовых лазеров (точки).

• Более высокий коэффициент модуляции в электро-оптических модуляторах.

- Возможность создания «одноэлектронных» устройств.
- Новые возможности для разработки полевых транзисторов.

#### *III. Важные технологические особенности*

- Применение для роста эффектов самоорганизации.
- Эпитаксиальный рост в V-канавках (проволоки).
- Литография высокого разрешения и травление структур с квантовыми ямами.



#### 4. Тенденции развития

Недавно были получены впечатляющие результаты для коротковолновых источников излучения на основе II–VI-селенидов и III–V-нитридов. Использование гетероструктурных концепций и методов роста, разработанных для КЯ и СР на  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ , в большой степени определило успех этих исследований. Естественная и наиболее предсказуемая тенденция – применение гетероструктурных концепций и технологических методов к новым материалам. Разработанные недавно различные гетероструктуры на основе полупроводниковых соединений III–V, II–VI и IV–VI являются хорошими примерами.

С более общей и глубокой точки зрения, гетероструктуры (и это относится ко всем гетероструктурам: классическим, КЯ и СР, КП и КТ) представляют собой способ создания новых типов материалов – гетерополупроводников. Еще раз повторим слова Лео Есаки: вместо «Богом созданных кристаллов» мы сами создаем «кристаллы, сделанные человеком».

Классические гетероструктуры, квантовые ямы и сверхрешетки уже сейчас весьма совершенны, и мы используем многие из их уникальных свойств. Структуры же с квантовыми проволоками и точками пока еще очень молоды, и на этом пути нас ожидают захватывающие открытия и новые неожиданные применения. Уже сейчас можно сказать, что упорядоченные равновесные массивы квантовых точек будут использоваться во многих устройствах: лазерах, оптических модуляторах, детекторах и эмиттерах, работающих в дальней ИК-области, и т.д. Использование резонансного туннелирования через атомы полупроводника, внедренные в более широкозонные слои, возможно, приведет к значительному улучшению характеристик приборов. В общем, структуры с КТ будут развиваться как «вширь», так и «вглубь».

«Вширь» подразумевает системы из новых материалов, которые охватят новые диапазоны энергетического спектра. Проблемы, связанные со сроком службы зеленых и синих полупроводниковых лазеров, и даже более общие проблемы создания структур без дефектов на основе широ-

козонных полупроводников II–VI и III–V (нитридов), весьма вероятно, будут решены при использовании структур квантовых точек в этих системах.

«Вглубь» подразумевает понимание того, что степень упорядочения зависит от очень сложных условий роста, свойств материалов, конкретных значений поверхностной свободной энергии. Путь к резонансно-туннельным и одноэлектронным приборам и устройствам – глубокое и тщательное исследование и оценка этих параметров с целью достижения максимально возможной степени упорядочения. В целом, необходимо найти более сильные механизмы самоорганизации для создания упорядоченных массивов КТ.

В начале 1980-х я был приглашен прочитать лекцию о гетероструктурах и их применении в Amoco Photonic Center близ Чикаго, США.

Резюме моей лекции было следующим:

1. Гетероструктуры – новый тип полупроводниковых материалов; дорогой, сложный химически и технологически, но наиболее эффективный.

2. Современная электроника основана на использовании гетероструктур:

- ДГС-лазер – основной прибор современной оптоэлектроники;
- гетероструктурный фотодиод – самый эффективный и быстродействующий фотодиод;
- оптоэлектронные интегральные схемы: только с их помощью можно решить проблему высокой информационной плотности оптических систем связи.

3. Быстродействующая микроэлектроника будет создаваться, главным образом, на основе гетероструктур.

4. Высокотемпературная быстродействующая силовая электроника – новая обширная область применения гетероструктур.

5. Гетероструктуры в преобразовании солнечной энергии: самые дорогие солнечные элементы и самый дешевый производитель электрической энергии.

6. В XXI веке гетероструктуры оставят гомопереходам в электронике только 1%.

И даже через 20 лет я не хочу менять здесь ни одного слова.

Едва ли возможно отразить в статье все основные направления современной физики и технологии полупроводниковых гетероструктур. Их намного больше, чем было упомянуто. Многие ученые внесли свой вклад в этот впечатляющий прогресс, который не только в значительной степени определяет будущее развитие физики конденсированного состояния, полупроводниковых лазеров и коммуникационных технологий, но в каком-то смысле также и будущее человеческого общества. Я хотел бы также особо подчеркнуть роль ученых предыдущих поколений, тех, кто подготовил наш путь. Я счастлив, что имел возможность работать в этой области с самого начала. Я счастлив, что могу продолжать эту работу и сейчас.

### Список литературы

1. *В.П. Жузе, Б.В. Курчатов* «К вопросу об электропроводимости закиси меди» ЖЭТФ 2 (5/6) 309 (1932); *V.P. Zhuze, B.V. Kurchatov* «Zur elektrischen Leitfähigkeit von Kupferoxydul» Phys. Z. Sowjetunion 2 (6) 453 (1932); *Ya. I. Frenkel, A. Ioffe* «On the electrical and photoelectric properties of contacts between a metal and semiconductor» Phys. Z. Sowjetunion 1 (1) 60 (1932).

2. *J. Frenkel* «On the transformation of light into heat in solids I, II» Phys. Rev. 37 17, 1276 (1931); *Я.И. Френкель* «О поглощении света и прилипании электронов и положительных дырок в кристаллических диэлектриках» ЖЭТФ 6 647 (1936); *Е.Ф. Гросс, Н.А. Карпыев* «Поглощение света кристаллом закиси меди в инфракрасной и видимой части спектра» ДАН СССР 84 261 (1952); «Оптический спектр экситона» ДАН СССР 84 471 (1952).

3. *Б.И. Давыдов* «О контактном сопротивлении полупроводников» ЖЭТФ 9 451 (1939).

4. *H. Welker* «Uber neue halbleitende Verbindungen I, II» Z. Naturforsch. A 7 744 (1952); Z. Naturforsch. A 8 248 (1953); *Н. А. Горюнова* «Серое олово», Дисс. ... канд. хим. наук (Л.: ЛГУ, Физико-технический институт, 1951); *А.И. Блум, Н.П. Мокровский, А.Р. Регель* «Изучение электропроводимости полупроводников и интерметаллических соединений в твердом и жидком состояниях», Труды VII конференции по свойствам полупроводников, Киев, 1950, Изв. АН СССР. Сер. физ. XVI (2) 139 (1952).

5. *Shockley W.* «Circuit Element Utilizing Semiconductive Material», US Patent 2,569,347 (September 25, 1951).

6. А.И. Губанов «Теория контакта двух полупроводников с различным типом проводимости» *ЖТФ* 20 1287 (1950); «Теория контакта двух полупроводников с проводимостью одного типа» *ЖТФ* 21.304 (1951).

7. Н. Kroemer «Theory of a wide-gap emitter for transistors» *Proc. IRE* 45 1535 (1957); «Quasi-electric and quasi-magnetic fields in non-uniform semiconductors» *RCA Rev.* 18 332 (1957).

8. Н.Г. Басов, О.Н. Крохин, Ю.М. Попов «Возможности использования непрямых переходов для получения отрицательной температуры в полупроводниках» *ЖЭТФ* 39 1486 (1961) [*Sov. Phys. JETP* 12 1033 (1961)].

9. Д.Я. Наследов, А.А. Рогачев, СМ. Рыбкин, Б.В. Царенков «Рекомбинационное излучение арсенида галлия» *ФТТ* 4 1062 (1962) [*Sov. Phys. Solid State* 4 782 (1962)].

10. R.N. Hall, G.E. Fenner, J.D. Kingsley, T.J. Soltys, R.O. Carlson «Coherent light emission from GaAs junctions» *Phys. Rev. Lett.* 9 366 (1962); M.I. Nathan, W.P. Dumke, G. Burns, F. H. Dills (Jr), G. Lasher «Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions» *Appl. Phys. Lett.* 1 62 (1962); N. Holonyak (Jr), S.F. Bevacqua «Coherent (visible) light emission from GaAs- $iP_j$  junctions» *Appl. Phys. Lett.* 1 82 (1962).

11. Ж.И. Алферов, Р.Ф. Казаринов «Полупроводниковый лазер с электрической накачкой», Авт. свид. № 181737, Заявка № 950840/26-25, Заявлено 30.03.1963; Бюлл. изобрет. (14) 147 (1975); Н. Kroemer «A proposed class of heterojunction injection lasers» *Proc. IEEE* 51 1782 (1963).

12. Ж.И. Алферов, В.Б. Халфин, Р.Ф. Казаринов «Об одной особенности инжекции в гетеропереходах» *ФТТ* 8 3102 (1966) [*Sov. Phys. Solid State* 8 2480 (1967)].

13. Ж.И. Алферов «О возможности создания выпрямителя на сверхвысокие плотности тока на основе p-i-n (p-n-n), (n-p-p)-структуры с гетеропереходами» *ФТП* 1 436 (1967) [*Sov. Phys. Semicond.* 1 358 (1967)].

14. R.L. Anderson «Germanium-gallium arsenide heterojunctions» *IBM J.Res. Dev.* 4 283 (1960); «Experiments on Ge-GaAs heterojunctions» *Solid State Electron.* 5 341 (1962).

15. G. Natta, L. Passerini *Gazz. Chim. Ital.* 58 458 (1928); V.M. Goldschmidt «Crystal structure and chemical constitution» *Trans. Faraday Soc.* 25 253 (1929).

16. Ж.И. Алферов, Д.З. Гарбузов, В.С. Григорьева, Ю.В. Жилев, Л.В. Крадинова, В.И. Корольков, Е.П. Морозов, О.А. Нинуа, Е.Л. Портной, В.Д. Прочухан, М.К. Трукан «Инжекционная люминесценция эпитаксиальных гетеропереходов в системе GaP-GaAs» *ФТТ* 9 279 (1967) [*Sov. Phys. Solid State* 9 208 (1967)].

17. Ж.И. Алферов, Ю.В. Жилиев, Ю.В. Шмарцев «Расщепление зоны проводимости в «сверхрешетке» на основе  $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ » 5 196 (1971) [Sov. Phys. Semicond. 5 174 (1971)].

18. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.И. Корольков, Д.Н. Третьяков, В.М. Тучкевич «Высоковольтные p-n-переходы в кристаллах  $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ » ФТП 1 1579 (1967) [Sov. Phys. Semicond. 1 1313 (1968)]; H. S. Rupprecht, J. M. Woodall, G. D. Pettit «Efficient visible electroluminescence at 300 K from  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  p-n junctions grown by liquid-phase epitaxy» Appl. Phys. Lett. 11 81 (1967).

19. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.И. Корольков, Е.Л. Портной, Д.Н. Третьяков «Инжекционные свойства гетеропереходов n- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -p-GaAs» ФТП 2 1016 (1968) [Sov. Phys. Semicond. 2 843 (1969)].

20. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.И. Корольков, Е.Л. Портной, Д.Н. Третьяков «Когерентное излучение в эпитаксиальных структурах с гетеропереходами в системе AlAs-GaAs» ФТП 2 1545 (1968) [Sou. Phys. Semicond. 2 1289 (1969)].

21. (a) Ж.И. Алферов, В. М. Андреев, В. И. Корольков, Е. Л. Портной, Д.Н. Третьяков «Рекомбинационное излучение в эпитаксиальных структурах в системе AlAs-GaAs», в кн. Труды 9-й Международной конф. по физ. полупровод, Москва, 23-29 июля 1968 г. Т. 1 (Л.: Наука, 1969) с. 534; (b) Zh. I. Alferov «Electroluminescence of heavily-doped heterojunctions p- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -nGaAs» in Proc. of the Intern. Conf. on Luminescence, Newark, Delaware, USA, August 25-29, 1969 (Ed. F. Williams) (Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1970); J. Lumin. 1 869 (1970); (c) Ж.И. Алферов, Д.З. Гарбузов, Е.П. Морозов, Е.Л. Портной «Диагональное туннелирование и поляризация излучения в гетеропереходах  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs и p-n-переходах в GaAs» ФТП 3 1054 (1969) [Sov. Phys. Semicond. 3 885 (1970)]; (d) Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В. И. Корольков, Е.Л. Портной, А.А. Яковенко «Рекомбинационное излучение в твердых растворах  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с переменной шириной запрещенной зоны» ФТП 3 541 (1969) [Sov. Phys. Semicond. 3 460 (1970)].

22. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, Е.Л. Портной, М.К. Трукан «Инжекционные лазеры на основе гетеропереходов в системе AlAs-GaAs с низким порогом генерации при комнатной температуре» ФТП 3 1328 (1969) [Sov. Phys. Semicond. 3 1107 (1970)].

23. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.И. Корольков, Е.Л. Портной, А.А. Яковенко «Источники спонтанного излучения на основе структур с гетеропереходами в системе AlAs-GaAs» ФТП 3 930 (1969) [Sov. Phys. Semicond. 3 785 (1970)].

24. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, Каган М.Б., Протасов И.И., В.Г. Трофим «Солнечные преобразователи на основе гетеропереходов  $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-n-GaAs}$ » ФТП 4 2378 (1970) [Sov. Phys. Semicond. 4 2047 (1971)].

25. Ж.И. Алферов, Ф.А. Ахмедов, В.И. Корольков, В.Г. Никитин «Фототранзистор на основе гетеропереходов в системе  $\text{GaAs-AlAs}$ » ФТП 7 1159 (1973) [Sov. Phys. Semicond. 7 780 (1973)].

26. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.И. Корольков, В.Г. Никитин, А.А. Яковенко «р-п-р-п-структуры на основе  $\text{GaAs}$  и твердых растворов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ » ФТП 4 578 (1970) [Sov. Phys. Semicond. 4 481 (1971)].

27. I. Hayashi «Heterostructure lasers» IEEE Trans. Electron Dev. ED-31 1630 (1984).

28. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, Д.З. Гарбузов, Ю.В. Жиляев, Е.П. Морозов, Е.Л. Портной, В.Г. Трофим «Исследование влияния параметров гетероструктуры в системе  $\text{AlAs-GaAs}$  на пороговый ток лазеров и получение непрерывного режима генерации при комнатной температуре» ФТП 4 1826 (1970) [Sov. Phys. Semicond. 4 1573 (1971)].

29. I. Hayashi, M.B. Panish, P.W. Foy, S. Sumski «Junction lasers which operate continuously at room temperature» Appl. Phys. Lett. 17 109 (1970).

30. Zh. I. Alferov, V.M. Andreev, S.G. Konnikov, V.G. Nikitin, D.N. Tretyakov «Heterojunctions on the base of  $AmBv$  semiconducting compounds and of their solid solution» in Proc. of the Intern. Conf. on Physics Chemistry of Semiconductor Heterojunctions and Layer Structures, Budapest October, 1970 Vol. 1 (Eds G. Szigeti et al.) (Budapest: Akademiai Kiado, 1971) p. 93.

31. G.A. Antipas, R.L. Moon, L.W. James, J. Edgumbe, R.L. Bell in Gallium Arsenide and Related Compounds, 1972 (Institute of Physics Conf. Series, Vol. 17) (London: Institute of Physics, 1973) p. 48.

32. L. James, G. Antipas, R. Moon, J. Edgumbe, R.L. Bell «Photoemission from cesium-oxide-activated  $\text{InGaAsP}$ » Appl. Phys. Lett. 22 270 (1973).

33. А.П. Богатов, Л.М. Долгинов, Л.В. Дружинина, П.Г. Елисеев, Л.Н. Свердлов, Е.Г. Шевченко «Гетеролазеры на основе твердых растворов  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  и  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}_y\text{As}_{1-y}$ » Квант, электрон. 1 2294 (1974) [Sov. J. Quantum Electron. 1 1281 (1974)]; J.J. Hsieh «Room-temperature operation of  $\text{GaInAsP/InP}$  doubleheterostructure diode lasers emitting at 1.1  $\mu\text{m}$ » Appl. Phys. Lett. 28 283 (1976).

34. Ж.И. Алферов, И.Н. Арсентьев, Д.З. Гарбузов, С.Г. Конников, В.Д. Румянцев «Генерация когерентного излучения в гетероструктурах  $n\text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P} - p\text{Ga}_{x-0,55}\text{In}_{1-x}\text{As}_{y-0,10}\text{P}_{1-y} - n\text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$ » Письма в ЖТФ 1 305 (1975) [Sov. Tech. Phys. Lett. 1 147 (1975)]; Ж.И. Алферов, И.Н. Арсентьев, Д.З. Гарбузов,

*В.Д. Румянцев* «Красные инжекционные гетеролазеры в системе Ga-In-As-P» Письма в ЖТФ 1 406 (1975) [Sov. Tech. Phys. Lett. 1 191 (1975)]; *W.R. Hitchens, N. Holonyak (Jr), P.D. Wright, J.J. Coleman* «Low-threshold LPE  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-z}\text{As}_z/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-z}\text{As}_z/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-z}\text{As}_z$  yellow double-heterojunction laser diodes ( $J < 104 \text{ A/cm}^2$ ,  $I = 5850 \text{ A}$ ,  $77 \text{ K}$ )» Appl. Phys. Lett. 27 245 (1975).

35. *Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, Р.Ф. Казаринов, Е.Л. Портной, Р.А. Суриц* «Полупроводниковый оптический квантовый генератор», Авт. свид. № 392875 (СССР) МКИ H01 S 3/19, Заявка №1677436/26-25, Заявлено 19.07.1971; Бюлл. изобрет. (1) 259 (1977).

36. *H. Kogelnik, C.V. Shank* «Stimulated emission in a periodic structure» Appl. Phys. Lett. 18 152 (1971).

37. *Р.Ф. Казаринов, Р.А. Суриц* «Инжекционный гетеролазер с дифракционной решеткой на контактной поверхности» ФТП 6 1359 (1972) [Sov. Phys. Semicond. 6 1184 (1973)].

38. *Ж.И. Алферов, С.А. Гуревич, Р.Ф. Казаринов, М.Н. Мизеров, Е.Л. Портной, Р.П. Сейсян, Р.А. Суриц* «ПКГ со сверхмалой расходимостью излучения» ФТП 8 832 (1974) [Sou. Phys. Semicond. 8 541 (1974)]; *Ж.И. Алферов, С.А. Гуревич, Н.В. Клепикова, В.И. Кучинский, М.Н. Мизеров, Е.Л. Портной* «Полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью во втором порядке» Письма в ЖТФ 1 645 (1975) [Sov. Tech. Phys. Lett. 1 286 (1975)].

39. *M. Nakamura, A. Yariv, H.W. Yen, S. Somekh, H.L. Garvin* «Optically pumped GaAs surface laser with corrugation feedback» Appl. Phys. Lett. 22 315 (1973).

40. *D.R. Scifres, R.D. Burnham, W. Streifer* «Distributed-feedback single heterojunction GaAs diode laser» Appl. Phys. Lett. 25 203 (1974).

41. *H. Kroemer, G. Griffiths* «Staggered-lineup heterojunctions as sources of tunable bellow-gap radiation: Operating principle and semiconductor selection» IEEE Electron Dev. Lett. EDL-4 1, 20 (1983).

42. *А.Н. Баранов, Б.Е. Джурганов, А.М. Именков, А.А. Рогачев, Ю.М. Шерняков, Ю.П. Яковлев* «Генерация когерентного излучения в квантово-размерной структуре на одном гетеропереходе» ФТП 20 2217 (1986) [Sov. Phys. Semicond. 20 1385 (1986)].

43. *A.Y. Cho* «Film deposition by molecular-beam techniques» J. Vac. Sci. Technol. 8 (5) S31 (1971); «Growth of periodic structures by the molecular-beam method» Appl. Phys. Lett. 19 467 (1971).

44. *H.M. Manasevit* «Single crystal GaAs on insulating substrates» Appl. Phys. Lett. 12 156 (1968).

45. R. D. Dupuis, P. D. Dapkus «Room-temperature operation of Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As/GaAs double-heterostructure lasers grown by metal-organic chemical vapor deposition» *Appl. Phys. Lett.* 31 466 (1977).
46. R. Dingle, W. Wiegmann, C. H. Henry «Quantum states of confined carriers in very thin Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As - GaAs - Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures» *Phys. Rev. Lett.* 33 827 (1974).
47. L. Esaki, R. Tsu «Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors» *IBM J. Res. Dev.* 14 61 (1970).
48. Л.В. Келдыш «О влиянии ультразвука на электронный спектр кристалла» *ФТТ* 4 2265 (1962) [*Sov. Phys. Solid State* 4 1658 (1963)].
49. Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис «О возможности усиления, электромагнитных волн в полупроводнике со сверхрешетками» *ФТП* 5 797 (1971) [*Sov. Phys. Semicond.* 5 707 (1971)7]; «К теории электрических и электромагнитных свойств полупроводников со сверхрешетками» *ФТП* 6 148 (1972) [*Sov. Phys. Semicond.* 6 120 (1972)7]; «К теории электрических свойств полупроводников со сверхрешеткой» *ФТП* 7 488 (1973) [*Sov. Phys. Semicond.* 7 347 (1973)].
50. R. Tsu, L. Esaki «Tunneling in a finite superlattice» *Appl. Phys. Lett.* 22 562 (1973).
51. G.C. Osbourn «Strained-layer superlattices from lattice mismatched materials» *J. Appl. Phys.* 53 1586 (1982).
52. M. Ludowise, W.T. Dietze, C.R. Lewis, M.D. Camras, N. Holonyak (Jr), B.K. Fuller, M.A. Nixon «Continuous 300 K laser operation of strained super lattices» *Appl. Phys. Lett.* 42 487 (1983).
53. L.L. Chang, L. Esaki, W.E. Howard, R. Ludeke «The growth of a GaAs-GaAlAs superlattice» *J. Vac. Sci. Technol.* 10 11 (1973).
54. L.L. Chang, L. Esaki, R. Tsu «Resonant tunneling in semiconductor double barriers» *Appl. Phys. Lett.* 24 593 (1974).
55. L. Esaki, L.L. Chang «New transport phenomenon in a semiconductor 'superlattice'» *Phys. Rev. Lett.* 33 495 (1974).
56. J.R. Schrieffer in *Semiconductor Surface Physics* (Ed. R.H. Kingston) (Philadelphia, PA: Univ. of Pennsylvania Press, 1957) p. 68.
57. A.B. Fowler, F.F. Fang, W.E. Howard, P.J. Stiles «Magneto-oscillatory conductance in silicon surfaces» *Phys. Rev. Lett.* 16 901 (1966).
58. V.N. Lutskii «Quantum-size effect – present state and perspective on experimental investigations» *Phys. Status Solidi A* 1 199 (1970).



59. R. Dingle, H.L. Stormer, A.C. Gossard, W. Wiegmann «Electron mobilities in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices» *Appl. Phys. Lett.* 33 665 (1978).

60. D. Delagebeaudeuf, P. Delescluse, P. Etienne, M. Laviro, J. Chap-lart, N.T. Link «Two-dimensional electron gas MESFET structure» *Electron. Lett.* 16 667 (1980).

61. T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, K. Nanbu «A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterojunctions» *Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 2* 19 L225 (1980).

62. J.P. van der Ziel, R. Dingle, R. C. Miller, W. Wiegmann, W.A. Nordland (Jr) «Laser oscillation from quantum states in very thin GaAs - Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As multilayer structures» *Appl. Phys. Lett.* 26 463 (1975).

63. R.D. Dupuis, P.D. Dapkus, N. Holonyak (Jr), E.A. Rezek, R.Chin «Room-temperature laser operation of quantum-well Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As-GaAs laser diodes grown by metalorganic chemical vapor deposition» *Appl. Phys. Lett.* 32 295 (1978).

64. W.T. Tsang «Extremely low threshold (AlGa)As graded-index waveguide separate-confinement heterostructure lasers grown by molecular beam epitaxy» *Appl. Phys. Lett.* 40 217 (1982).

65. E.A. Rezek, H. Shichijo, B.A. Vojak, N. Holonyak (Jr) «Confined-carrier luminescence of a thin In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>P<sub>1-z</sub>As<sub>z</sub> well ( $x \sim 0.13$ ,  $z \sim 0.29$ ,  $\sim 400 \text{ \AA}$ ) in an InP p-n junction» *Appl. Phys. Lett.* 31 534 (1977).

66. Ж.И. Алферов, Д.З. Гарбузов, И.Н. Арсентьев, Б.Я. Вер, Л.С. Вавилова, В.В. Красовский, А.В. Чудинов «Оже-профили состава и люминесцентные исследования жидкофазных InGaAsP-гетероструктур с активными областями (1,5–5) × 10<sup>-6</sup> см» *ФТП* 19 1108 (1985) [*Sov. Phys. Semicond.* 19 679 (1985)].

67. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, А.А. Воднев, С.Г. Конников, В.Р. Ларионов, К.Ю. Погребницкий, В.Д. Румянцев, В.П. Хвостиков «AlGaAs-гетероструктуры с квантово-размерными слоями, полученные низкотемпературной жидкофазной эпитаксией» *Письма в ЖТФ* 12 1089 (1986) [*Sov. Tech. Phys. Lett.* 12 450 (1986)].

68. Ж.И. Алферов, Д.З. Гарбузов, К.Ю. Кижжаев, А.Б. Нивин, С.А. Никишин, А.В. Овчинников, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, А.В. Чудинов «Низкопороговые InGaAsP/InP лазеры раздельного ограничения с  $\lambda = 1,3 \text{ мкм}$  и  $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$  ( $j_{\text{пор}} = 600 - 700 \text{ А/см}^2$ )» *Письма в ЖТФ* 12 210 (1986) [*Sov. Tech. Phys. Lett.* 12 87 (1986)]; Ж.И. Алферов, Н.Ю. Антонишкис, И.Н. Арсентьев, Д.З. Гарбузов, А.В. Тикунов, В.Б. Халфин «Низкопороговые квантово-размерные InGaAsP/GaAs РО ДГ лазеры, изготовленные методом жидкостной эпитаксии ( $\lambda = 0,86 \text{ мкм}$ ,  $I_{\text{п}} = 90 \text{ А/см}^2$ ,  $L = \infty$ ;  $I_{\text{п}} = 165 \text{ А/см}^2$ ,  $L = 1150 \text{ мкм}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ )» *ФТП* 21 1501 (1987) [*Sov. Phys. Semicond.* 21 914 (1987)].

69. Ж.И. Алферов, Н.Ю. Антонишкис, В.И. Кольшикин, Т.А. Налет, Н.А. Стругов, А.В. Тикунов «Квантово-размерные InGaAsP/GaAs ( $\lambda = 0,86 - 0,78$  мкм) лазеры раздельного ограничения ( $I_{\text{п}} = 100$  А/см<sup>2</sup>, к.п.д. = 59%)» ФТП 22 1031 (1988) [Sov. Phys. Semicond. 22 650 (1988)]; Garbuzov D.Z. et al., Technical Digest CLEO, paper THU44 (1988) p. 396.

70. Garbuzov D.Z. 12th IEEE Intern. Semiconductor Laser Conf., Davos, Switzerland, Sept. 1990, Conf. Digest, paper L-33 (1990) p. 238.

71. Ж.И. Алферов, А.М. Васильев, С.В. Иванов, П.С. Копьев, Н.Н. Леденцов, М.Э. Луценко, Б.Я. Мельцер, В.М. Устинов «Снижение пороговой плотности тока в GaAs - AlGaAs ДГС РО квантово-размерных лазерах ( $J_{\text{п}} = 52$  А/см<sup>2</sup>,  $T = 300$  К) при ограничении квантовой ямы короткопериодной сверхрешеткой с переменным шагом» Письма в ЖТФ 14 1803 (1988) [Sov. Tech. Phys. Lett. 14 782 (1988)].

72. J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, A.Y. Cho «Quantum cascade laser» Science 264 553 (1994).

73. V.K. Klitzing, G. Dorda, M. Pepper «New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance» Phys. Rev. Lett. 45 494 (1980).

74. D.C. Tsui, H.L. Stormer, A.C. Gossard «Two-dimensional magneto-transport in the extreme quantum limit» Phys. Rev. Lett. 48 1559 (1982).

75. Y. Arakawa, H. Sakaki «Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current» Appl. Phys. Lett. 40 939 (1982).

76. А.И. Екимов, А.А. Онущенко «Квантовый размерный эффект в трехмерных микрокристаллах полупроводников» Письма в ЖЭТФ 34 363 (1981) [JETP Lett. 34 345 (1981)].

77. L. Goldstein, F. Glas, J.Y. Marzin, M.N. Charasse, G. Le Roux «Growth by molecular beam epitaxy and characterization of InAs/GaAs strained-layer superlattices» Appl. Phys. Lett. 47 1099 (1985).

78. N.N. Ledentsov, M. Grundmann, N. Kirstaedter, J. Christen, R. Heitz, J. Bohrer, F. Heinrichsdorff, D. Bimberg, S. S. Ruvimov, P. Werner, U. Richter, U. Gosele, J. Heydenreich, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh. I. Alferov «Luminescence and structural properties of (In, Ga)As-GaAs quantum dots» in Proc. of the 22nd Intern. Conf. on the Physics of Semiconductors, Vancouver, Canada, Aug. 15-19, 1994 Vol. 3 (Ed. D J Lockwood) (Singapore: World Scientific Publ. Co., 1995) p. 1855

79. Ж.И. Алферов, Н.Ю. Гордеев, С.В. Зайцев, П.С. Копьев, И.В. Кочиев, В.В. Комин, И.Л. Крестников, Н.Н. Леденцов, А.В. Лунев, М.В. Максимов, С.С. Рувимов, А.В. Сахаров, А.Ф. Цацульников, Ю.М. Шерняков, Д. Бимберг «Низкопороговый инжекционный гетеролазер на квантовых точках, полученный методом га-

зофазной эпитаксии из металлоорганических соединений» ФТП 30 357 (1996) [Semicond. 30 197 (1996)].

80. V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg «Spontaneous ordering of arrays of coherent strained islands» Phys. Rev. Lett. 75 2968 (1995).

81. Ж.И. Алферов, Н.А. Берт, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, А.О. Косоогов, И.Л. Крестников, Н.Н. Леденцов, А.В. Лунев, М.В. Максимов, А.В. Сахаров, В.М. Устинов, А.Ф. Цацульников, Ю.М. Шерняков, Д. Бимберг «Инжекционный гетеролазер на основе массивов вертикально связанных квантовых точек InAs в матрице GaAs» ФТП 30 351 (1996) [Semicond. 30 194 (1996)].

82. N. Kirstaedter, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V.M. Ustinov, S.S. Ruvimov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, U.Richter, P. Werner, U. Gosele, J. Heydenreich «Low threshold, large To injection laser emission from (InGa)As quantum dots» Electron. Lett. 30 1416 (1994).

83. G. Park, O.B. Shchekin, D.L. Huffaker, D.G. Deppe « Low-threshold oxide-confined 1.3  $\mu\text{m}$  quantum-dot laser » IEEE Photon. Technol. Lett. 12 230 (2000).

84. A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin, N.A. Maleev, V.M. Ustinov, D.A. Lifshits, I.S. Tarasov, D.A. Bedarev, M. V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, I.P. Soshnikov, P.S. Kop'ev, Zh. I. Alferov, N. N. Ledentsov, D. Bimberg «3.9 W CW power from sub-monolayer quantum dot diode laser» Electron. Lett. 35 1845 (1999).

85. L.V. Asryan., R.A. Suris «Inhomogeneous line broadening and the threshold current density of a semiconductor quantum dot laser» Semicond. Sci. Tehnol. 11 554 (1996).

86. A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.R. Kovsh, F. TsatsuVnikov, N.N. Ledentsov, S.V.Zaitsev, Yu. Gordeev, P.S. Kop'ev, Zh. I. Alferov «Negative characteristic temperature of InGaAs quantum dot injection laser» Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 1 36 4216 (1997).

87. D.G. Park, O.B. Shchekin, S. Csutak, D.L. Huffaker, Deppe«Room-temperature continuous-wave operation of a single-layered 1.3  $\mu\text{m}$  quantum dot laser» Appl. Phys. Lett. 75 3267 (1999).

88. J.A. Lott, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg «Vertical cavity lasers based on vertically coupled quantum dots» Electron. Lett. 33 1150 (1997).

89. J.A. Lott, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, N.A. Maleev, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, M.V. Maximov, B.V. Volovik, Zh.I. Alferov, D. Bimberg «InAs-InGaAs quantum dot VCSELs on GaAs substrates emitting at 1.3  $\mu\text{m}$ » Electron. Lett. 36 1384 (2000).



*Алексей Алексеевич Абрикосов*

*(1928–2017)*

## БИОГРАФИЯ<sup>44</sup>

Алексей Абрикосов (1928–2017) родился 25 июня 1928 г. в Москве, в семье Фанни Давыдовны Вульф и Алексея Ивановича Абрикосова – профессора патологоанатомии, руководившего бальзамированием тела Ленина. Но будущий Нобелевский лауреат, который в советское время возглавлял Институт физики высоких давлений, в начале перестройки уехал в США и с тех пор ни разу в Россию не приезжал. Он работал в Аргоннской национальной лаборатории близ Чикаго и являл собой, по словам одного из видных руководителей российской науки, одного из самых обидных и невосполнимых примеров утечки умов из России.

По окончании школы, в 1943 г. Абрикосов начинает изучать энерготехнику, но в 45-м увлекается физикой. После получения диплома он пишет под руководством Льва Ландау кандидатскую диссертацию в институте физических проблем в Москве и защищает её в 1951 г. После этого он остался в институте и защитил в 1955 г. докторскую работу по теме квантовой электродинамики высоких энергий.

В 1965 г. Алексей Абрикосов возглавляет факультет теоретической физики сплошных сред в новооснованном институте теоретической физики. В 1975 г. Абрикосов становится почётным доктором в Университете Лозанны, а в 1991 г. принимает приглашение Аргоннской национальной лаборатории в штате Иллинойс и переселяется в США. С 1999 г. – гражданин США. Абрикосов – член различных знаменитых научных учреждений, например, Национальной академии наук США, Российской Академии наук, Королевского научного общества и Американской Академии наук и искусств. Помимо научной деятельности он также много преподавал: сначала в МГУ – до 1969 г., с 1970 по 1972 гг. – в Горьковском университете, с 1976 по 1991 гг. заведовал кафедрой теоретической физики в МФТИ. В США он преподавал в университете Иллинойса (Чикаго) и в университете штата Юта.

Абрикосов был женат на Светлане Буньковой, 1977 г. рождения, имеет двух сыновей и дочь.

---

<sup>44</sup> Алексей Абрикосов (1928–2017). Биография [Электронный ресурс] // Нобелевская премия. Нобелевские лауреаты : [сайт]. – Москва, 2010–2019. – Режим доступа: <http://nobeliat.ru/laureat.php?id=647>.

За жизнью в России, работами своих коллег Алексей Абрикосов старался следить. По его мнению, человек, занимающийся наукой, должен зарабатывать достаточно, чтобы чувствовать себя комфортно. Сам он, по его словам, зарабатывал хорошо, но должен был думать о будущем. Абрикосов приехал в Америку «без копейки в кармане». Было ему тогда 62 года – возраст, когда многие в Америке уже уходят на пенсию, предварительно накопив достаточно денег. Российскому же ученому, несмотря на громкие звания, которые были присвоены ему на родине, всё пришлось начинать с нуля.

В этом плане денежное выражение полученной Нобелевской премии очень полезно. «Уйдя на пенсию, а точнее – в отставку, – поправляется Абрикосов, – я уже не буду нищим».

Возвращаясь к теме утечки мозгов из России, отметим: в редких интервью ученый всегда откровенен и предельно недипломатичен. На вопрос Дмитрия Серкова («Итоги. RU», 14 октября 2003 г.), что заставило Абрикосова уехать в 1991 г. из России, Алексей Алексеевич ответил: «Дело в том, что я всегда читал газеты между строк и на тот момент реально осознал, что фундаментальная наука в России медленно умирает, уже через год-другой она может полностью лишиться финансирования. К тому же я понял: все идет к тому, что в стране может произойти государственный переворот. Перспектива остаться за железным занавесом на тот момент меня совсем не прельщала. Мне хватило с избытком тех 18 лет, в течение которых я как секретный физик оставался невыездным. Теперь с американским паспортом я путешествую по всему миру – и отдыхаю, и общаюсь с коллегами».

Журналист был настойчив и попытался выяснить мнение Нобелевского лауреата о развитии физики в России, на что Абрикосов удивился: «А разве она развивается? Все более или менее значимые физики работают ныне за пределами России в самых разных странах. Я никогда не был сторонником термина «русская физика», но, тем не менее, многие выдающиеся работы подписаны русскими фамилиями».

На вопрос Серкова, считает ли себя Абрикосов учеником Ландау, ученый ответил коротко: «Несомненно. Мой учитель – только он».

Кстати, Кора Дробанцева-Ландау в своей книге «Академик Ландау. Как мы жили» (ЗАХАРОВ-АСТ, Москва, 1999) вспоминает: «Как-то на очередной звонок открыла дверь я. Поднявшись к Дау, сказала: «Даунька, там к тебе пришел симпатичный мальчик-школьник». Этот школьник недолго просидел в библиотеке, а когда он ушел, сияющий Дау мне сказал: «Коруша, это не школьник, а студент первого курса, он на редкость талантлив, я из него сделаю настоящего теоретика». Это был Алеша Абрикосов».

Умер Алексей Абрикосов 29 марта 2017 г. в американском городе Пало-Альто, спустя год после обширного инфаркта.

## СВЕРХПРОВОДНИКИ ВТОРОГО РОДА И ВИХРЕВАЯ РЕШЕТКА<sup>45</sup>

*Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2003 г.*

В 1950 г. Виталий Гинзбург и Лев Ландау опубликовали свою знаменитую работу по теории сверхпроводимости [1]. В ней использовался подход на основе общей теории фазовых переходов второго рода, предложенной Ландау в 1937 г. [2]. В этой теории Ландау ввел важную переменную, так называемый «параметр порядка», который имеет конечную величину ниже температуры фазового перехода и равен нулю при более высоких температурах. Различные фазовые переходы описываются разными параметрами порядка. Если для ферромагнитного перехода совершенно естественен выбор спонтанной намагниченности в качестве параметра порядка, то для сверхпроводящего перехода правильный выбор параметра порядка далеко не очевиден. Гениальность идеи Гинзбурга и Ландау состояла в использовании волновой функции в качестве параметра порядка для сверхпроводящего перехода. В то время никто не догадывался о существовании куперовских пар, о том, что эти пары образуют бозе-конденсат, в котором поведение частиц становится когерентным и описывается единой для всех частиц волновой функцией. Эта гипотеза легла в основу новой теории сверхпроводимости, которая смогла разрешить основное противоречие старой теории Фрица и Гейнца Лондонов [3], связанное с невозможностью получить положительную поверхностную энергию. Кроме того, она позволила сделать много полезных предсказаний. Например, относительно критического магнитного поля тонких пленок, критического тока тонких проволок и т.д.

Все эти предсказания требовали экспериментального подтверждения, и мой друг Николай Заварицкий, с которым еще раньше мы вместе

---

<sup>45</sup> Абрикосов, А.А. Сверхпроводники второго рода и вихревая решетка : нобелевская лекция, Стокгольм, 8 декабря 2003 г. / А.А. Абрикосов ; пер. с англ. А.И. Буздина // Нобелевские премии по физике. 1904–2004 : в 2 т. / А.М. Финкельштейн, А.Д. Ноздрачев, Е.Л. Поляков [и др.]. – Санкт-Петербург, 2005. – Т. 2 : 1965–2004. – С. 683–694.



учились в университете, начал измерять критические поля тонких сверхпроводящих пленок. Теория прекрасно согласовывалась с экспериментом, включая изменение характера перехода: переход в сверхпроводящее состояние был переходом первого рода при больших толщинах пленки второго рода при малых толщинах. Все, казалось, было прекрасно, но шеф Заварицкого, Александр Шальников, был, тем не менее, неудовлетворен. Он заявил, что пленки, используемые Заварицким, плохие, поскольку они приготовлены при комнатной температуре. Атомы металла, напыляемые на стеклянную подложку, стремятся собраться вместе и, по сути дела, пленка состоит из маленьких металлических капелек. Чтобы избежать этого, Шальников посоветовал поддерживать стеклянную подложку при гелиевой температуре как во время напыления, так и до самого окончания экспериментов. В результате каждый атом, попадающий на поверхность, будет как бы приклеен к своему месту и пленка получится однородной.

Заварицкий последовал этому совету, и полученные результаты оказались удивительными: зависимость критического поля от толщины или температуры (теория оперирует отношением толщины пленки к глубине проникновения, которая зависит от температуры) не совпадали с предсказаниями теории Гинзбурга-Ландау (ГЛ). Обсуждая эти результаты с Заварицким, мы не могли поверить, что теория может быть неверна: она была столь красива и так хорошо описывала предыдущие результаты! Поэтому мы старались найти решение этой загадки в рамках теории ГЛ, и мы его нашли. Если выразить все входящие в теорию величины в соответствующих единицах, то окажется, что уравнения содержат лишь одну безразмерную «материальную» константу  $\kappa$ , которая была позже названа параметром Гинзбурга-Ландау. Величина параметра ГЛ  $\kappa$  могла быть определена из поверхностной энергии границы между нормальной и сверхпроводящей фазами. Эта же энергия в свою очередь связана с периодом структуры промежуточного состояния. Соответствующие данные для обычных сверхпроводников приводили к очень малым значениям  $\kappa$ , и поэтому расчеты в статье Гинзбурга-Ландау были выполнены именно в этом пределе. Было также установлено, что с увеличением параметра  $\kappa$  поверхностная энергия границы между нормальной и сверхпроводящей фазами может

стать отрицательной, и, поскольку это противоречило бы существованию промежуточного состояния, такой случай не рассматривался.

Я же решил посмотреть, что все-таки происходит, если  $\kappa > 1/\sqrt{2}$  и поверхностная энергия отрицательна. Оказалось, что переход в сверхпроводящее состояние становится переходом второго рода при любой толщине пленки. Теория полностью соответствовала экспериментальным данным Заварицкого, что привело нас к заключению о существовании специального типа сверхпроводников с  $\kappa > 1/\sqrt{2}$  и отрицательной поверхностной энергией, которые мы назвали «сверхпроводниками второй группы». Теперь они называются сверхпроводниками 2-го рода. В 1952 г. я опубликовал мои выводы в журнале «Доклады академии наук СССР» [4], издаваемом на русском языке, и это было в первый раз, когда было введено понятие о сверхпроводниках 2-го рода. Поскольку этот журнал так никогда и не был переведен на английский язык, то авторство сверхпроводимости второго рода осталось неизвестным и часто можно прочесть, что просто «существуют два типа сверхпроводников...». В России идея о сверхпроводниках 2-го рода не вызвала особых возражений, хотя такие материалы и считались экзотическими. В этой связи интересно отметить, что практически все новые сверхпроводящие соединения, открытые с начала 60-х годов до настоящего времени, являются сверхпроводниками второго рода. В этот список входят органические сверхпроводники, соединения со структурой A-15, фазы Шевреля, соединения с тяжелыми фермионами, фуллерены и высокотемпературные сверхпроводники. Можно сказать, что теперь экзотическими являются сверхпроводники первого рода.

После работы по пленкам я задался вопросом о магнитных свойствах трехмерных сверхпроводников второго рода. Было ясно, что переход в нормальное состояние в магнитном поле должен происходить вторым родом, а сама точка перехода определяется из условия существования стационарного сверхпроводящего зародыша. Эти поля образования бесконечно малого зародыша сверхпроводящей фазы были найдены в статье ГЛ. Наивысшее значение такого поля соответствует для сверхпроводника второго рода так называемому верхнему критическому полю  $H_{c2}$ :

$$H_{c2} = H_{cm} \kappa \sqrt{2}, \quad (1)$$

где характерное магнитное поле  $H_{cm}$  определено как критическое поле перехода первого рода в цилиндрическом образце сверхпроводника 1-го рода ( $\kappa < 1 / \sqrt{2}$ ), находящемся в параллельном магнитном поле. Можно было предположить, что при более низких полях параметр порядка будет представлять собой линейную комбинацию таких зародышей с центрами в различных точках. В силу однородности пространства решение должно было быть также периодичным. Принимая также во внимание необходимость перенормировки векторного потенциала, в результате мы получили следующее общее выражение для параметра порядка:

$$\psi = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp \left[ ikny - \frac{1}{2} \kappa^2 \left( x - \frac{kn}{\kappa^2} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Здесь и далее координаты измеряются в единицах глубины проникновения поля  $\lambda$ , а  $k$  измеряется в единицах  $1/\lambda$ . Свободная энергия имеет вид:

$$\frac{\Omega_s - \Omega_n^{(0)}}{H_{cm}^2 / 4\pi} = B^2 - \frac{\kappa - B}{1 + (2\kappa^2 - 1)\beta_A}, \quad (3)$$

где  $\Omega_n^{(0)}$  – свободная энергия нормального металла в отсутствии магнитного поля,  $B$  – магнитная индукция (усредненное магнитное поле), выраженная в единицах  $H_{cm} \sqrt{2}$ , и

$$\beta_A = \frac{|\psi|^4}{(|\psi|^2)^2}. \quad (4)$$

Эта безразмерная константа зависит лишь от геометрии структуры, т.е. от относительной величины коэффициентов  $C_n$  в выражении 2.

Как следует из выражения для свободной энергии (3), выбор структуры определяется условием минимальности  $\beta_A$ . Можно показать, что это минимальное значение  $\beta_A = 1,16$ , и оно отвечает следующему выбору коэффициентов  $C_n$ :  $C_{n+4} = C_n$ ,  $C_0 = C_1 = -C_2 = -C_3$ , а также  $k = \kappa(\pi\sqrt{3})^{1/2}$ . Такая функция (2) соответствует треугольной решетке. Для квадратной решетки параметр  $\beta_A$  чуть больше 1,18, и все коэффициенты одинаковы:

$C_n = C$ , а  $k = \kappa(2\pi)^{1/2}$ . В этом последнем случае наиболее просто проиллюстрировать свойства решения. Оно может быть выражено через тета-функцию, а именно:

$$\psi = C \exp\left(-\frac{1}{2}\kappa^2 x^2\right) \vartheta_3\left[1; (2\pi)^{\frac{1}{2}}\kappa i(x + iy)\right]. \quad (5)$$

Используя свойства тета-функции, можно показать, что при операции поворота координатной системы на угол  $\pi / 2$  функция  $\Psi$  просто умножается на фазовый множитель  $\exp(i\kappa^2 xy)$ . Таким образом,  $|\Psi|^2$  обладает симметрией квадратной решетки.

Функция  $\Psi$  обращается в нуль в точках  $x = (\sqrt{2}\pi / \kappa)(m + 1/2)$ ,  $y = (\sqrt{2}\pi / \kappa)(n + 1/2)$ , где  $m$  и  $n$  – целые числа. Вблизи этих точек в полярных координатах:

$$\Psi = |\Psi| \exp(i\chi) \propto x + iy = \rho \exp(i\varphi). \quad (6)$$

Фаза  $\chi = \varphi$ , и таким образом, она меняется на  $2\pi$  при обходе по контуру вокруг нуля функции  $\Psi$ . Аналогичная ситуация реализуется и в случае треугольной решетки. Встает естественный вопрос: каким образом возникают решения с такими нулями? Мы просто рассматривали линейную комбинацию простых решений, центрированных в разных точках, а нули, фаза вокруг которых меняется на  $2\pi$ , возникли как бы сами по себе. Для того чтобы понять причину их появления, необходимо принять во внимание тот факт, что в уравнение ГЛ магнитное поле входит в виде вектор-потенциала. Если в среднем магнитное поле постоянно, то векторный потенциал должен расти с координатой. Поскольку систематический рост модуля параметра порядка невозможен, то увеличение векторного потенциала должно компенсироваться чем-то иным. Это возможно осуществить с помощью подходящего выбора фазы параметра порядка.

Принимая во внимание фазу параметра порядка, т.е. представляя его в виде  $\Psi = |\Psi| \exp(i\chi)$ , можно показать, что  $\chi$  входит в уравнение ГЛ в виде следующей комбинации с вектор-потенциалом:

$$\mathbf{A} - \frac{\hbar c}{2e} \nabla \chi. \quad (7)$$

Рассмотрим поведение комплексного параметра порядка в координатной плоскости (рис. 1). Для однозначного определения фазы необходимо провести разрезы, параллельные оси  $y$ , через нули параметра порядка.

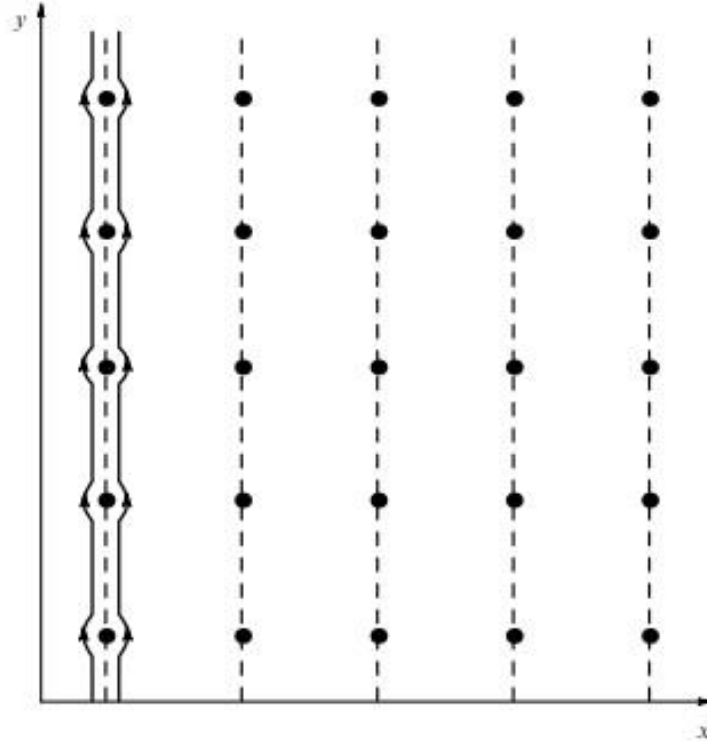


Рис. 1. Точки соответствуют нулям параметра порядка (квадратная решетка). Штриховыми линиями показаны разрезы, необходимые для однозначного определения фазы. Градиент фазы испытывает скачок на каждом разрезе

Если идти слева от разреза, то фаза будет меняться по закону:

$$\chi_{left}(y) = \chi_{reg} - \pi \frac{y}{a},$$

где первый член – это регулярная часть, а наличие второго члена связано с быстрым изменением фазы вблизи нуля  $\Psi$ ;  $a$  – период структуры. Если же идти справа от разреза, то

$$\chi_{right}(y) = \chi_{reg} + \pi \frac{y}{a}.$$

Из этих двух выражений можно заключить, что градиент фазы на каждом разрезе испытывает скачок:

$$\Delta \frac{\partial \chi}{\partial y} = \frac{2\pi}{a}. \quad (8)$$

Если магнитное поле направлено вдоль оси  $z$  и мы выбрали векторный потенциал  $A_y = H x$ , то в соответствии с формулой (7), компенсация его роста достигается при  $Ha = \pi\hbar c / (ea)$ , т.е.

$$a = \sqrt{\frac{\pi\hbar c}{eH}}, \quad (9)$$

откуда следует, что

$$Ha^2 = \frac{\pi\hbar c}{e} = \Phi_0.$$

Из этих двух формул можно сделать два вывода: а) период структуры растет с уменьшением магнитного поля, б) поток магнитного поля через элементарную ячейку является универсальной константой, называемой «квантом магнитного потока». Этот квант потока был впервые введен Ф. Лондоном и его величина  $2,05 \times 10^{-7} \text{ Э} \cdot \text{см}^2$ .

Рост периода с уменьшением поля происходит не только вблизи  $H_{c2}$ , но и при любом поле. В самом деле, ход рассуждений, приводящих к ситуации, представленной на рис. 1, и соответствующие выводы остаются всегда в силе. Единственная модификация состоит в том, что векторный потенциал больше не является линейной функцией координаты и необходимо переформулировать условие компенсации. Это приводит к замене магнитного поля на его среднее значение:

$$B = \frac{1}{a^2} \int_0^a \int_0^a H dx dy. \quad (10)$$

Таким образом, мы приходим к предыдущему результату, но с заменой  $H$  на  $B$ .

Отсюда можно заключить, что даже вдали от  $H_{c2}$  период структуры будет расти с уменьшением поля, и его критическое значение  $H_{c1}$  отвечающее  $B = 0$  (или  $a = \infty$ ), разделяет чисто сверхпроводящую фазу и фазу с частичным проникновением магнитного поля. Эту фазу я назвал «смешанным состоянием». Нижнее критическое поле

$$H_{c1} = \frac{H_{cm}}{\kappa\sqrt{2}} (\ln\kappa + 0,5). \quad (11)$$

Как следует из формулы (1), с ростом  $\kappa$  верхнее критическое поле  $H_{c2}$  увеличивается, и одновременно с этим уменьшается нижнее критическое поле  $H_{c1}$ .

Расстояние между нулями  $\Psi$  становится бесконечным при  $H_{c1}$ , а в его окрестности оно велико, что позволяет рассмотреть отдельно такую точку. В соответствии с теорией ГЛ ток в сверхпроводнике может быть записан в виде:

$$\mathbf{j} = \frac{\hbar e}{m} |\Psi|^2 \left( \nabla \chi - \frac{2e}{\hbar c} \mathbf{A} \right). \quad (12)$$

Вблизи  $\Psi = 0$  фаза  $\chi = \varphi$ , и  $\nabla \chi$  имеет лишь  $\varphi$ -компоненту:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \chi}{\partial \varphi} = \frac{1}{\rho}. \quad (13)$$

Таким образом, первый член намного больше второго члена в правой части (12), и ток формирует вихрь. В общем случае эти вихри образуют решетку. Линии тока в поле, близком к  $H_{c2}$ , представлены на рис. 2.

Очень похожая структура возникает и в треугольной решетке, которая в изотропной модели обладает чуть меньшей энергией. Из-за того что разность энергий очень мала, в реальных соединениях кристаллическая симметрия может сделать квадратную решетку более выгодной. Отметим, что смешанное состояние иногда еще называют «*фазой вихревой решетки*».

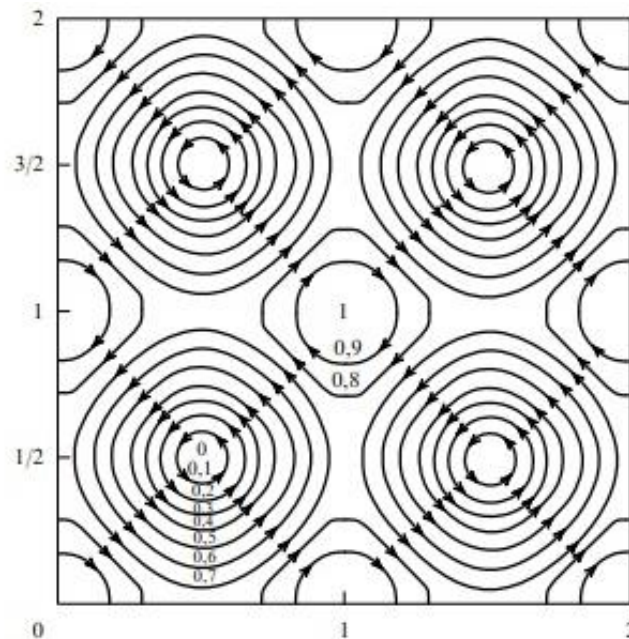


Рис. 2. Линии тока для квадратной решетки, совпадающие с линиями постоянного модуля параметра порядка  $|\Psi|$

В микроскопической теории Бардина-Купера-Шриффера (БКШ), а также в теории ГЛ (которая, как было показано Горьковым [6], представляет собой предельный случай теории БКШ при  $T \rightarrow T_c$ ) имеются две характерные длины: меньшая – «длина когерентности»  $\xi$ , или размер куперовской пары, и большая – «глубина проникновения»  $\lambda$ .

Параметр ГЛ  $\kappa$  – это, по сути дела, их отношение. Для чистого сверхпроводника при  $T \rightarrow T_c$

$$\kappa = 0,96 \frac{\lambda_L}{\xi_0},$$

где  $\lambda_L = (mc^2/4\pi ne^2)^{1/2}$  – лондоновская глубина проникновения ( $n$  – электронная плотность), а  $\xi_0 = 0,18 (\hbar v / T_c)$  – длина когерентности при  $T = 0$  ( $v$  – скорость электронов). В случае  $\kappa \gg 1$  выполняется неравенство  $\lambda \gg \xi$  (сверхпроводник предельно второго рода или же лондоновского типа) и каждый вихрь состоит из «сердцевинки» размером  $\xi$ , внутри которого резко меняется параметр порядка, и внешней области размером  $\lambda$ , где магнитное поле затухает до нуля. Вблизи центра вихря параметр порядка, в соответствии с выражением (6), линейно растет с увеличением расстояния. Обращение в нуль  $\Psi$  в центре связано с тем, что это единственная возможность сохранить однозначность  $\Psi$  в самой этой точке. На расстояниях порядка  $\xi$  параметр порядка достигает своего равновесного значения в отсутствии магнитного поля. Поведение параметра порядка и распределение магнитного поля в вихре представлено на рис. 3.

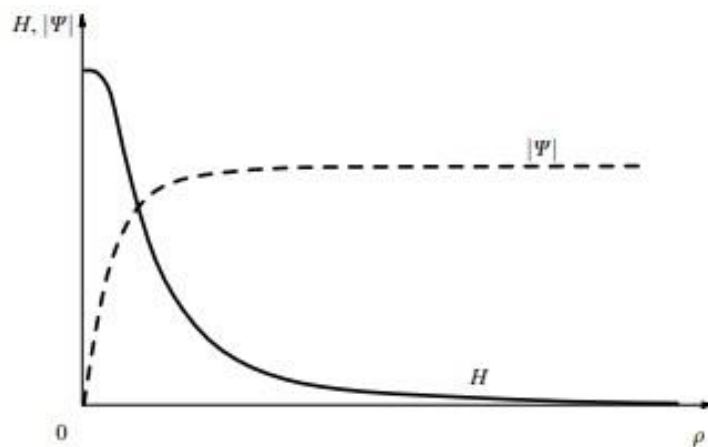


Рис. 3. Распределение магнитного поля  $H$  (сплошная линия) и  $|\Psi|$  в вихре



Теория также позволила найти макроскопические характеристики, в частности, зависимость намагниченности от внешнего магнитного поля. Последняя представлена на рис. 4 для различных значений параметра  $\kappa$ .

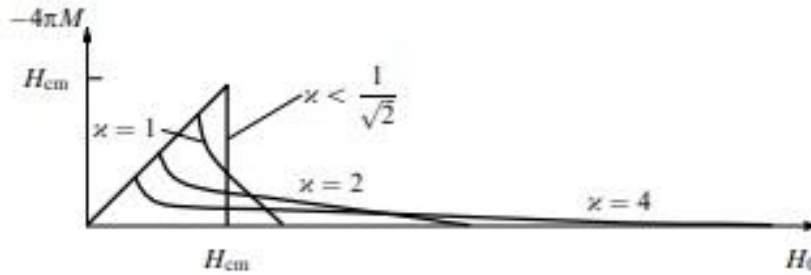


Рис. 4. Зависимость намагниченности от магнитного поля для различных значений параметра  $\kappa$

При  $\kappa \ll 1/\sqrt{2}$  кривая представляет собой «треугольник», что соответствует идеальному диамагнетизму в полях ниже  $H_{cm}$  и отсутствию намагниченности в нормальной фазе. При больших значениях  $\kappa$  возникает вихревая фаза, причем с увеличением  $\kappa$  ее нижняя граница уменьшается, а верхняя, наоборот, растет. Выражение для намагниченности в пределе, когда приложенное поле близко к верхнему критическому полю, имеет вид:

$$-4\pi M = \frac{H_{c2} - H_0}{(2\kappa^2 - 1)\beta_A}. \quad (14)$$

Я сравнил теоретические предсказания относительно кривых намагничивания с экспериментальными данными для сплава Рb-Тl, полученными Львом Шубниковым и его сотрудниками в 1937 г. [7]. Согласие оказалось очень хорошим.

Здесь я хотел бы описать состояние дел с экспериментом. Первые измерения намагниченности сверхпроводящих сплавов были выполнены де Гаазом и Казимир–Ионкер в 1935 г. [8], и они наблюдали плавный переход из сверхпроводящего в нормальное состояние с двумя критическими полями. Они объясняли свои результаты неоднородностями образцов. Шубников, который раньше работал с де Гаазом, решил приготовить образцы лучшего качества. Для этого его группа отжигала сплавы в течение длительного времени при температуре, близкой к температуре плавления. Последующий анализ рентгеновского рассеяния при комнатной температуре не обнаружил никаких следов неоднородностей. Авторы не могли

найти никакого объяснения наблюдаемому плавному переходу, и поэтому они написали в своей работе, что выпадение другой фазы должно происходить при более низкой температуре. К сожалению, Л.В. Шубников в том же 1937 г. был обвинен в организации «антисоветской забастовки», арестован и казнен органами КГБ. Я уверен, что если бы только у него было больше времени, Шубников смог бы открыть возникновение новой фазы и существование специального типа сверхпроводников. Я хотел бы отдать здесь дань уважения Шубникову, чьи результаты послужили мне источником вдохновения. Я никогда его не встречал, но слышал о нем от Ландау, который был его близким другом.

Результаты по существованию вихревой решетки я получил в 1953 г., но их публикация была отложена из-за несогласия Ландау с самой идеей моей работы. Лишь после того как Р. Фейнман опубликовал свою статью по вихрям в сверхтекучем гелии [9], и Ландау принял идею вихрей и согласился с моим выводом, я опубликовал свою статью в 1957 г. [10]. В то время, несмотря на наличие английского перевода, она не привлекла к себе внимания. Интерес к моей работе возник лишь в начале шестидесятых годов, после открытия сплавов и соединений с высокими критическими магнитными полями. Но и тогда экспериментаторы не верили в возможность существования вихревой решетки, несоизмеримой с кристаллической решеткой. Все сомнения отпали только после того, как вихревая решетка была наблюдаема экспериментально, вначале с помощью рассеяния нейтронов [11], а затем методом декорации [12] (рис. 5). Теперь существует много различных методик получения изображений вихревой решетки. Кроме уже упомянутых мною выше, это электронная голография, сканирующая туннельная микроскопия (рис. 6) и магнитооптика.

Впоследствии я сделал еще лишь одну работу по вихрям, а именно рассчитал нижнее критическое поле в тонкой пленке и структуру вихревой решетки вблизи этого поля.

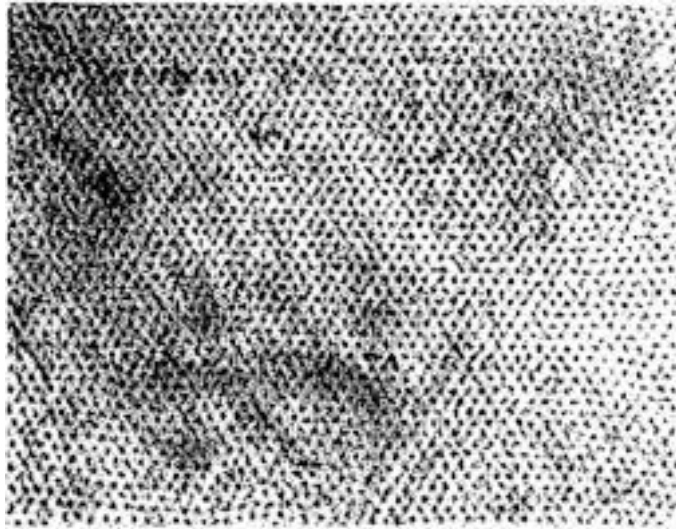


Рис. 5. Первое изображение вихревой решетки, полученное Эссманном и Траубле (1967 г.) методом декорации [12]

Хотя впоследствии я работал во многих разных направлениях теоретической физики, но сверхпроводимость оставалась моей любимой областью. В начале шестидесятых мы сделали несколько совместных работ с Львом Горьковым. Они основывались на представлении теории БКШ с помощью формализма гриновских функций, что позволило обобщить микроскопическую теорию на пространственно неоднородные случаи. Мы изучили поведение сверхпроводников в высокочастотном поле (совместно с И.М. Халатниковым) [14], исследовали роль магнитных примесей [15], что позволило нам открыть так называемую «бесщелевую» сверхпроводимость. Введя спин-орбитальное рассеяние, мы также решили загадку конечной величины сдвига Найта при низкой температуре [16].

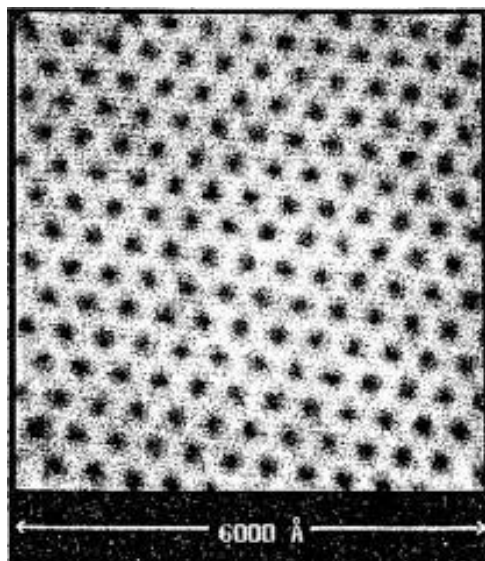


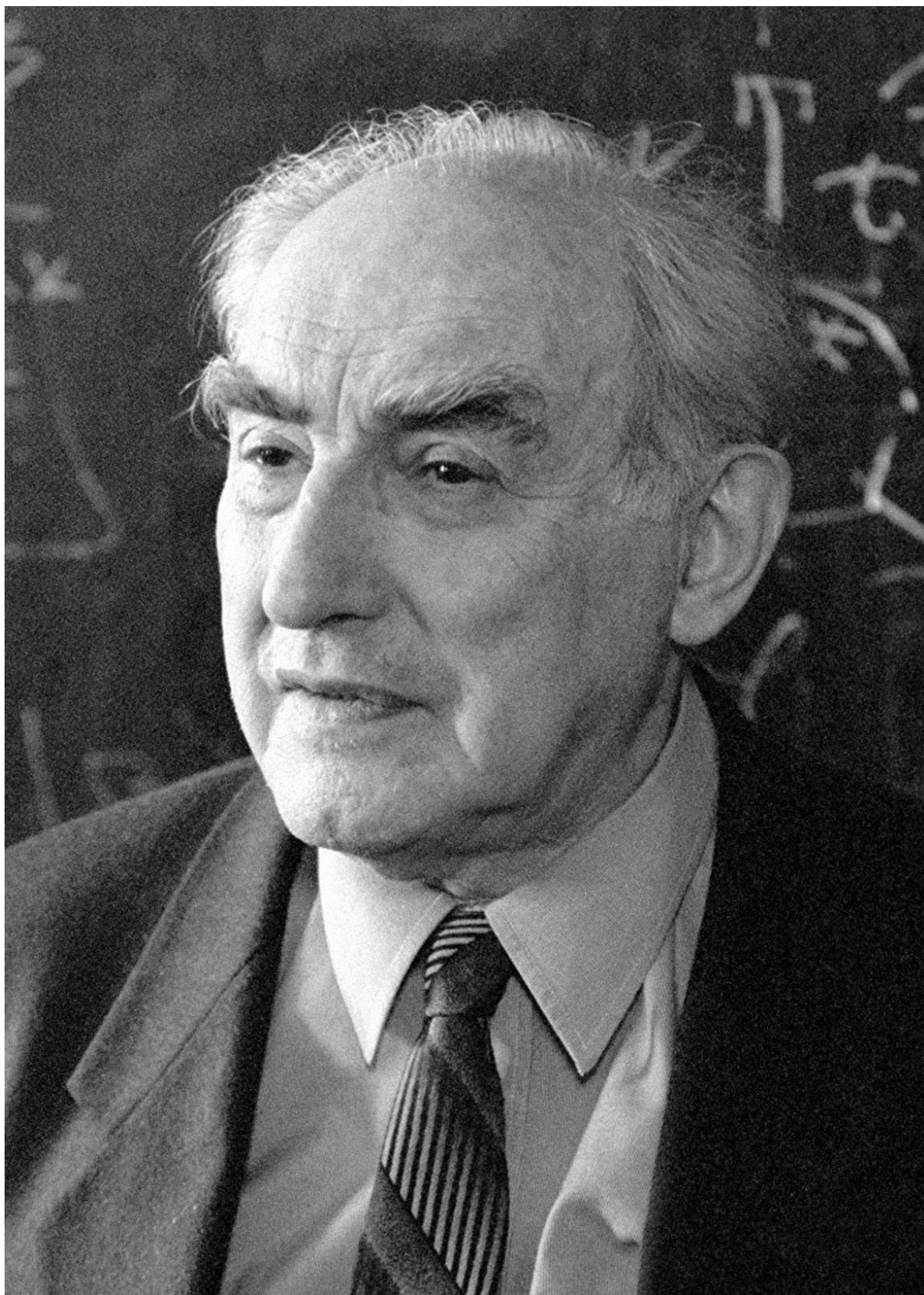
Рис. 6. Вихри в  $\text{NbSe}_2$ , наблюдаемые методом сканирующей туннельной микроскопии

После открытия Мюллером и Беднорцем [17] высокотемпературной сверхпроводимости в слоистых оксидах меди я заинтересовался свойствами этих соединений. Сейчас предложено много различных теорий для их описания, и практически все они основаны на тех или иных экзотических механизмах сверхпроводимости. В основу моего подхода я положил теорию БКШ, принимающую во внимание специфику электронного спектра этих соединений, а именно квазидвумерность и наличие так называемой «протяженной аномалии типа седловой точки» или «плоских участков» электронного спектра [18]. Другая идея связана с резонансным электронным туннелированием между слоями  $C_{11}O_2$  [19], которые ответственны за проводимость и сверхпроводимость. На базе этого подхода я смог объяснить большинство экспериментальных данных по слоистым купратам, не используя деления на «хорошие» данные, которые упоминаются при каждой возможности, и «плохие», о которых лучше забыть. В результате я могу утверждать, что так называемой «загадки» высокотемпературной сверхпроводимости не существует.

### Список литературы

1. Гинзбург В.Л., Ландау Л.Д., ЖЭТФ 20, 1064 (1950).
2. Landau L.D., Phys. Z. Sowjetunion 11, 26, 129 (1937).
3. London F., London H., Proc. R. Soc. London Ser. A149, 71 (1935).
4. Абрикосов А.А., ДАН СССР 86, 489 (1952).
5. London F., Super fluids. Vol. 1 (New York: Wiley, 1950).
6. Горьков Л.П., ЖЭТФ 36, 1918; 37, 1407 (1959) [Sov. Phys. JETP 9, 1364 (1959); 10, 998 (1960)].
7. Шубников Л.В. и др. ЖЭТФ 7, 22 (1937).
8. Kasimir-Jonker J.M., De Haas W.J., Physica 2, 943 (1935).
9. Feynman R.P., in Progress in Low Temperature Physics, Vol. 1 (Ed. D.F. Brewer) (Amsterdam: North-Holland, 1955) Ch. 11.
10. Абрикосов А.А., ЖЭТФ 32, 1442 (1957) [Sov. Phys. JETP 5, 1174 (1957)].
11. Cribier D., Jacrot B., Rao L.M., Farnoux B., Phys. Lett. 9, 106 (1964).
12. Essmann U., Trauble H., Phys. Lett. A24, 526 (1967).
13. Абрикосов А.А., ЖЭТФ 46, 1464 (1964) [Sov. Phys. JETP 19, 988 (1964)].

14. Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Халатников И.М., ЖЭТФ 35, 265 (1958); 37, 187 (1959) [Sov. Phys. JETP 81, 82 (1958); 10, 132 (1959)].
15. Абрикосов А.А., Горьков Л.П., ЖЭТФ 39, 1781 (1960) [Sov. Phys. JETP 12, 1243 (1961)].
16. Абрикосов А.А., Горьков Л.П., ЖЭТФ 42, 1088 (1962) [Sov. Phys. JETP 15, 752 (1962)].
17. Bednorz J.G., Mueller K.A., Z. Phys. B64, 189 (1986).
18. Abrikosov A.A., Physica C 341-348 97 (2000).
19. Abrikosov A.A., Physica C 317-318 154 (1999).



***Виталий Лазаревич Гинзбург***

*(1916–2009)*

## БИОГРАФИЯ<sup>46</sup>

Виталий Лазаревич Гинзбург (1916–2009) родился 4 октября 1916 г. в Москве. В 1938 г. окончил Московский университет. С 1940 г. работал в Физическом институте АН СССР (группа академика И. Тамма), одновременно с 1945 г. – профессор Горьковского университета. В 1953 г. – член-корреспондент, с 1966 г. – академик АН СССР.

Основные труды по теории распространения волн в ионосфере, радиоастрономии, оптике, ядерной физике. В 1940 г. разработал квантовую теорию излучения Черенкова–Вавилова.

Испытал влияние Л. Мандельштама, И. Тамма и Л. Ландау, с которым дружил и совместно разработал феноменологическую теорию сверхпроводимости. Гинзбург – лауреат нескольких премий, в том числе Ленинской (1966). Он избран членом Лондонского королевского общества, Национальной академии наук США, Европейской академии, Международной академии астронавтики, Академии наук и искусств США, академий наук Дании, Индии и других стран.

Среди научных наград Гинзбурга – большая золотая медаль имени М.В. Ломоносова, золотая медаль имени С.И. Вавилова, премии Российской академии наук – имени Л. Мандельштама и имени М. Ломоносова, премия имени Дж. Бардина и премия Вольфа, золотая медаль Лондонского королевского астрономического общества.

В 2003 г. Гинзбург вместе с А. Абрикосовым и Э. Леггетом получил Нобелевскую премию по физике за развитие теории сверхпроводимости и сверхтекучести.

Скончался в Москве вечером 8 ноября 2009 г. после длительной болезни от сердечной недостаточности. Виталия Гинзбурга похоронили 11 ноября 2009 г. на Новодевичьем кладбище в Москве.

---

<sup>46</sup> Виталий Гинзбург (1916–2009). Биография [Электронный ресурс] // Нобелевская премия. Нобелевские лауреаты : [сайт]. – Москва, 2010–2019. – Режим доступа: <http://www.nobeliat.ru/laureat.php?id=648>.

**О СВЕРХПРОВОДИМОСТИ И СВЕРХТЕКУЧЕСТИ  
(ЧТО МНЕ УДАЛОСЬ СДЕЛАТЬ, А ЧТО НЕ УДАЛОСЬ),  
А ТАКЖЕ О «ФИЗИЧЕСКОМ МИНИМУМЕ»  
НА НАЧАЛО XXI ВЕКА<sup>47</sup>**

*Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2003 г.*

**1. Введение**

Прежде всего хочу выразить искреннюю благодарность Шведской академии наук и ее Нобелевскому комитету по физике за присуждение мне Нобелевской премии по физике за 2003 г. Я хорошо представляю себе, сколь трудна задача выбрать не более чем троих лауреатов из значительно большего числа кандидатов. Тем ценнее получение этой премии. У меня лично имеются к тому же два дополнительных обстоятельства, побуждающих ценить присуждение премии.

Во-первых, мне уже 87 лет, посмертно Нобелевскую премию не дают, да мне как атеисту не так уж и существенно признание после смерти.

Во-вторых, Нобелевские премии по физике получали соответственно в 1958 и 1962 гг. Игорь Евгеньевич Тамм и Лев Давидович Ландау. Когда речь идет не о средней школе – понятие учителя довольно условно и часто применяется по формальным признакам, например, так называют руководителя при подготовке диссертации. Но я думаю, что непосредственными учителями в науке уместно называть только тех, кто оказал на тебя наибольшее влияние, с кого ты брал пример. И вот именно такими людьми были для меня И.Е. Тамм и Л.Д. Ландау. Поэтому мне как-то особенно приятно, что я в известном смысле оправдал их хорошее отношение. Дело, конечно, не в премии самой по себе, а в том, что ее получение вслед за ними свидетельствует о следовании по их пути.

---

<sup>47</sup> Гинзбург, В.Л. О сверхпроводимости и сверхтекучести (что мне удалось сделать, а что не удалось), а также о «физическом минимуме» на начало XXI века : нобелевская лекция, Стокгольм, 8 декабря 2003 г. / В.Л. Гинзбург // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, № 11. – С. 1240–1255.



Теперь о Нобелевской лекции. В этой лекции полагается, не знаю уж, по правилам или в силу естественной традиции, рассказывать о той работе, за которую получена премия. Но мне известно, по крайней мере, одно исключение. П.Л. Капица получил в 1978 г. премию за «изобретения и открытия в области физики низких температур». Но лекцию П.Л. Капица прочел под названием «Плазма и контролируемая термоядерная реакция». Он мотивировал свой выбор темы тем, что в области физики низких температур работал за много лет до получения премии и ему представляется более интересным рассказать о том, чем он занимается сейчас. Поэтому П.Л. Капица и рассказал о своих попытках построить термоядерный реактор с использованием высокочастотных электромагнитных полей. Кстати сказать, успеха на этом пути достичь не удалось, что в данном контексте не имеет значения.

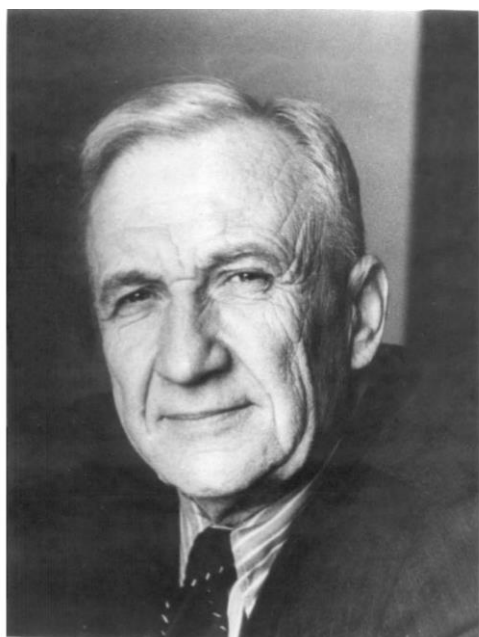
Я своих «пионерских работ в области сверхпроводимости и сверхтекучести», за которые получил премию, не забыл, но не хотел бы подробно останавливаться на них. Дело в том, что в 1997 г. мне захотелось подвести известный итог своей деятельности в соответствующей области, и я написал статью «Сверхпроводимость и сверхтекучесть (что удалось и чего не удалось сделать)» [1; 2]. В этой статье подробно изложена, в частности, история создания нашей совместной с Л.Д. Ландау квазифеноменологической теории сверхпроводимости [3]. В подобной ситуации было бы излишним и, главное, скучным все это повторять. Кроме того, теория сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау, которую я называю  $\Psi$ -теорией сверхпроводимости, используется в работе А.А. Абрикосова [4] и он, вероятно, на ней остановится в своей Нобелевской лекции. Я уже не говорю о том, что  $\Psi$ -теория сверхпроводимости освещена во многих книгах (см., например, [5; 6]). Вместе с тем имеется ряд вопросов из области сверхпроводимости и сверхтекучести, которыми я занимался, но которые остаются недостаточно исследованными. Вот я и решил в настоящей лекции подробнее коснуться двух таких важнейших проблем.

Речь идет о термоэлектрических эффектах в сверхпроводящем состоянии и о  $\Psi$ -теории сверхтекучести. Правда, перед тем как остановиться на этих вопросах, я все же кратко освещу всю историю своей деятельности

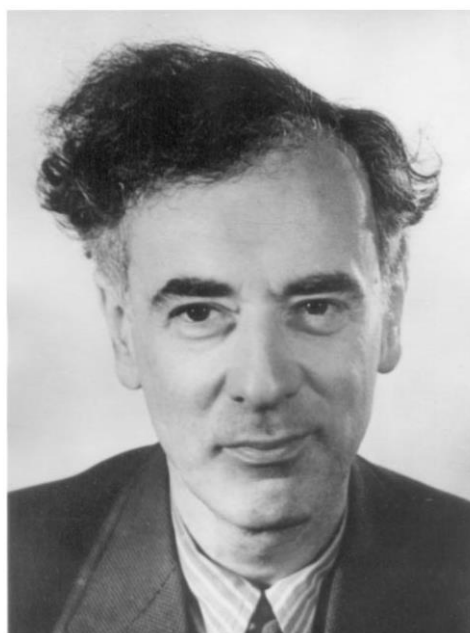
в области сверхпроводимости. В конце же лекции позволю себе коснуться некоторой образовательной программы для физиков (вопроса о «физическом минимуме»), которой интересуюсь уже больше тридцати лет.

## **2. Краткая история моей деятельности в области сверхпроводимости до создания высокотемпературных сверхпроводников**

Л.Д. Ландау ровно год просидел в тюрьме и был освобожден 28 апреля 1939 г. в основном благодаря усилиям П.Л. Капицы, взявшего его «под личное поручительство»<sup>48</sup>. В таком состоянии Ландау пребывал вплоть до своей безвременной смерти в 1968 г. «Дело» же Ландау было официально прекращено «за отсутствием состава преступления» лишь в 1990 г. (!). Тюрьма сильно повлияла на Ландау, но, к счастью, не лишила его выдающихся способностей как физика. Поэтому он «оправдал доверие», как тогда говорили, тех, кто выпустил его на поруки вместо того, чтобы расстрелять или сгноить в тюрьме (Ландау лично мне говорил, что уже был близок к смерти), и построил свою теорию сверхтекучести [7]. Я присутствовал на его докладе на эту тему в 1940 г. или, быть может, уже в 1941 г. (работа [7] поступила в редакцию 15 мая 1941 г.). В конце этой работы рассматривается также сверхпроводимость, трактуемая как сверхтекучесть электронной жидкости в металлах.



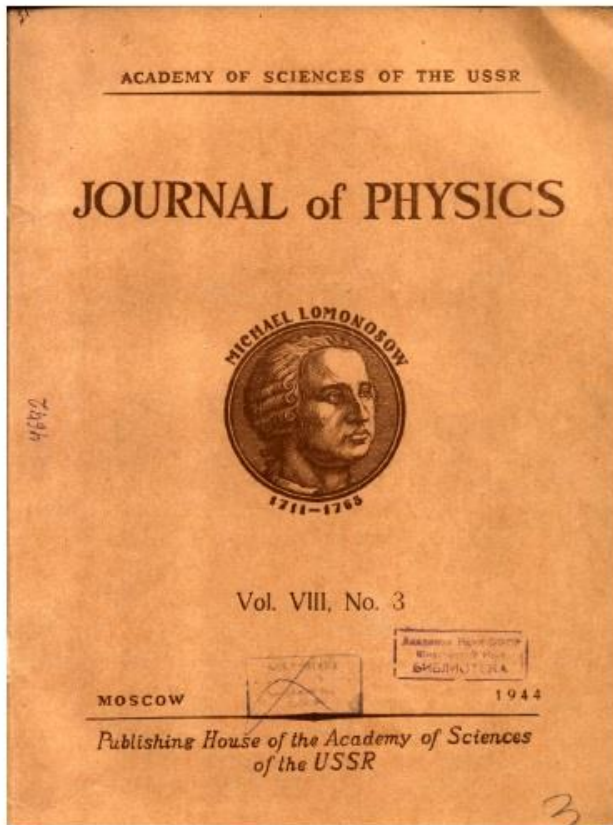
Е.И. Тамм



Л.Д. Ландау

---

<sup>48</sup> Подробнее об этом см., например, статью 10 в книге [2].



## ON THE THERMOELECTRIC PHENOMENA IN SUPERCONDUCTORS

By V. L. GINSBURG,

Leningrad Physical Institute, Academy of Sciences of the USSR.

(Received November 22, 1943)

Thermoelectric properties of superconductors are discussed. A normal current  $I^n$  should appear in superconductors having temperature gradients; in isotropic superconductors this current is compensated by a superconducting current  $I^s$  and therefore cannot be observed. In anisotropic crystals, on the contrary, the density of the resulting current  $I = I^n + I^s$  does not vanish and, generally speaking, their magnetic field should vanish and to detect the thermal current.

The thermoelectric properties of superconductors have been repeatedly studied. A short review of the experimental data and a bibliography can be found in a book by Bertone, Smith and Wilhelm<sup>(1)</sup>. It emerges from the experimental data that thermoelectric phenomena in superconductors disappear completely inasmuch as the Peltier effect is not observed when a superconducting current passes through the junction of two superconductors, just as no thermal current is observed when one of the junction in a superconducting current is heated. However this conclusion would be somewhat hasty. An analysis of the thermoelectric properties of superconductors can be carried out on the basis of modern conceptions of superconductivity recently reviewed by the author<sup>(2)</sup>. We then arrive at the conclusion that under special conditions some specific thermoelectric phenomena should be observed in superconductors.

1. In homogeneous, isotropic superconductors without a temperature gradient the current densities of the superconducting current  $I^s$  and normal current  $I^n$  (which can exist in the superconductor) are defined by the following equations (3):

$$\text{rot } \Delta \vec{I}^s = -\frac{1}{c} \vec{H}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{I}^s}{\partial t} = \vec{E}, \quad (2)$$

$$I^n = \sigma \vec{E}. \quad (3)$$

where  $\Delta$  is a coefficient depending on the temperature  $T$ .

It is our aim to generalize equations (1)–(3) for the case when a temperature gradient and gradient of the thermodynamic potential  $\Phi$  exist. In non-superconducting metals  $I^n \neq 0$  and the total current equals the normal component and is defined by (3). For non-vanishing  $\nabla T$  and  $\nabla \Phi$  it is well known\* that equation (3) must be substituted by the following:

$$I^n = \sigma \left( \vec{E} - \nabla \frac{\Phi}{Q} \right) + \Delta \nabla T, \quad (4)$$

where  $Q$  is a certain charge and  $\sigma$  is a coefficient depending on  $T$ . Usually  $\Delta$  is written instead of  $\nabla(\Phi/Q)$ , where  $\mu$  is the chemical potential and  $e = -$  the electron charge, but this is a insignificant point as  $Q$ ,  $\sigma$  and  $\Phi$  are all unknown. In a state of thermodynamic equilibrium  $\vec{E} = -\nabla(\Phi/Q) = 0$ ; at the junction of the two superconductors  $\nabla(\Phi/Q) \neq 0$  and therefore  $\vec{E} \neq 0$ . It will be clear that in a state of equilibrium the superconducting current cannot exist independently, and it therefore follows that for non-vanishing  $\nabla \Phi$  equation (2) must be substituted by the following:

$$\frac{\partial \vec{I}^s}{\partial t} = \vec{E} - \nabla \frac{\Phi}{Q}. \quad (5)$$

\* The phenomenological theory of thermoelectric phenomena in ordinary metals can be found in Ginzburg's book<sup>(3)</sup>.

- 122 -

На меня эта работа произвела, конечно, впечатление, но я тогда был увлечен исследованием совсем другого круга вопросов, а именно теорией частиц с высшими спинами. Поэтому сразу же низкими температурами не занялся, а вскоре наша жизнь существенно изменилась с наступлением войны (она для СССР, как известно, началась 22 июня 1941 г.). Физический институт Академии наук СССР, где я работал и работаю до сих пор, был эвакуирован из Москвы в г. Казань, было немало трудностей, о чем пишу в автобиографии. Так или иначе, только в 1943 г. я попытался в духе теории сверхтекучести Ландау [7] сделать нечто подобное в применении к сверхпроводимости<sup>49</sup>. Эта работа [9] сейчас не представляет ценности, но, думаю, что кое-что интересное в ней было, ибо Бардин в своем известном обзоре [10] останавливается на ней довольно подробно. Но я и тогда понимал, что не направил ее в журнал на английском языке, как мы тогда обычно поступали (этот журнал – *Journal of Physics USSR* – был ликвидирован в 1947 г. в период «холодной войны»). Следующая моя работа была

<sup>49</sup> Правда, еще несколько раньше я на основе теории Ландау [7] рассмотрел вопрос о рассеянии света в гелии II [8].

посвящена термоэлектрическим явлениям в сверхпроводящем состоянии [11], и ее судьба мне кажется необычной и странной. Дело в том, что прошло уже 60 лет, а некоторые предсказания, сделанные в этой работе, до сих пор не проверены и, вообще, термоэлектрические явления в сверхпроводящем состоянии остаются совершенно недостаточно исследованными. Сам я в последующие годы не раз возвращался к этой проблематике, но какого-то заметного успеха не достиг. Призывы же, обращенные к другим физикам, слабо действуют, вопрос оказался немодным. Вот я и хочу воспользоваться последней для меня возможностью и привлечь к нему внимание. Этому будет посвящен раздел 4.

Однако вопрос о термоэлектрических эффектах в сверхпроводниках, хотя и интересен, но все же это частная проблема, возникающая, очевидно, лишь при наличии градиента температуры. В то же время тогда отсутствовала достаточно совершенная теория сверхпроводимости даже в условиях термодинамического равновесия. Дело в том, что известная теория Лондонов, предложенная в 1935 г. [12] (о ней еще пойдет речь в разделе 4 лекции), многое дала, и в определенных условиях широко используется и сейчас [5; 6; 13], но она совершенно недостаточна. Последнее было в значительной мере выяснено в моей следующей работе, выполненной еще в 1944 г. [14]. Именно, теория Лондонов неприменима в сильном магнитном поле (поле в теории сверхпроводимости называется сильным, если оно порядка критического магнитного поля  $H_c$ ; речь идет о сверхпроводниках 1-го рода). Далее из теории Лондонов следует, что поверхностная энергия  $\sigma_{ns}$  на границе нормальной и сверхпроводящей фаз оказывается отрицательной, и для достижения положительности  $\sigma_{ns}$  приходится без всяких оснований вводить какую-то дополнительную и при этом большую поверхностную энергию неэлектромагнитного происхождения. Таким образом, стало очевидно, что теорию Лондонов необходимо обобщить. Эта задача и была решена в 1950 г. в  $\Psi$ -теории сверхпроводимости [3]<sup>50</sup>. Возникает вопрос и мне его не раз задавали: «Почему понадобилось 5 лет после

---

<sup>50</sup> Как уже упоминалось, эту теорию обычно называют теорией Гинзбурга-Ландау. Я же пользуюсь термином  $\Psi$ -теория сверхпроводимости потому, что, как мне кажется, по крайней мере, в русском языке использование своей фамилии звучит несколько претенциозно. Кроме того, в применении к сверхтекучести аналогичная теория развивалась мной совместно не с Ландау, а с Л.П. Питаевским и А.А. Собяниным.

работы [14], в которой была осознана необходимость обобщить теорию Лондонов, для создания  $\Psi$ -теории?» Разумеется, в отношении других физиков я на этот вопрос ответить не могу. Что же касается меня самого, то я в какой-то мере продвигался к цели, как это описано в статье [1]. Но, думаю, главная причина медленности этого процесса все же та, что я не сконцентрировал внимание на теории сверхпроводимости. Великое счастье физиков-теоретиков заключается в том, что они могут почти одновременно работать в нескольких направлениях и, вообще, быстро переходить от темы к теме. Конкретно, в период после 1944 г. и до 1950 г. помимо сверхпроводимости и сверхтекучести, я занимался распространением радиоволн в ионосфере (плазме), радиоизлучением Солнца, рассеянием света в жидкости, теорией переходного излучения (мы обратили внимание на существование этого эффекта совместно с И.М. Франком), релятивистской теорией частиц с высшими спинами (частично совместно с И.Е. Таммом), излучением в ондуляторах, теорией ферроэлектриков (сегнетоэлектриков), да и еще кое-чем. Особо отмечу, что ферроэлектрические явления (с применением, в основном, к  $\text{BaTiO}_3$ ) рассматривались [15] на основе теории фазовых переходов Ландау, и это направление в дальнейшем развивалось (см. статью 5 в сборнике [2])<sup>51</sup>.

$\Psi$ -теория сверхпроводимости [3] как раз и представляет из себя применение, если угодно, теории фазовых переходов Ландау к сверхпроводимости. При этом роль параметра порядка играет некоторая скалярная комплексная функция  $\Psi$ . В силу сказанного ранее, ограничусь здесь тем, что приведу используемые уравнения для  $\Psi$  и векторного потенциала электромагнитного поля  $\mathbf{A}$  (как известно,  $\text{rot } \mathbf{A} = \mathbf{H}$ , где  $\mathbf{H}$  – напряженность магнитного поля, не отличающаяся здесь от магнитной индукции  $\mathbf{B}$ ; кроме того, используется калибровка  $\text{div } \mathbf{A} = 0$ ):

$$\frac{1}{2m^*} \left( -i\hbar\nabla - \frac{e^*}{c} \mathbf{A} \right)^2 \psi + \alpha\psi + \beta|\psi|^2\psi = 0, \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{A} = -\frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_c,$$

$$\mathbf{j}_c = -\frac{ie^*\hbar}{2m^*} (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*) - \frac{(e^*)^2}{mc} |\psi|^2 \mathbf{A}. \quad (2)$$

<sup>51</sup> Подробнее о перечисленных и других моих работах см. в статье «A Scientific Autobiography – an Attempt» («Опыт научной автобиографии»), имеющейся в книге [16].

Рассматривается равновесное или, во всяком случае, стационарное состояние и здесь считается, что плотность нормального тока в сверхпроводнике  $\mathbf{j}_n = 0$  (полная плотность тока  $\mathbf{j} = \mathbf{j}_s + \mathbf{j}_n$ , где  $\mathbf{j}_s$  – плотность сверхпроводящего тока). Кроме того, на границе сверхпроводника с вакуумом используется граничное условие

$$\mathbf{n} \left( -i\hbar\nabla - \frac{e^*}{c} \mathbf{A} \right) \psi = 0, \quad (3)$$

где  $\mathbf{n}$  – нормаль к границе.

Вблизи критической температуры  $T_c$ , при которой происходит в равновесном случае переход из нормальной фазы в сверхпроводящую, в  $\Psi$ -теории можно (и даже нужно) положить

$$\alpha = \alpha'_c (T - T_c), \beta = \beta(T_c) \equiv \beta_c > 0, \alpha'_c > 0 \quad (4)$$

и поведение сверхпроводника определяется параметрами

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{m^* c^2 \beta_c}{4\pi (e^*)^2 |\alpha|}}, \kappa = \frac{m^* c}{e^* \hbar} \sqrt{\frac{\beta_c}{2\pi}} = \frac{\sqrt{2} e^*}{\hbar c} H_{cm} \delta_0^2. \quad (5)$$

Здесь  $\delta_0$  – глубина проникновения в сверхпроводник слабого магнитного поля  $H \ll H_{cm}$  и  $H_{cm}$  – критическое магнитное поля для массивных образцов (ранее упоминалось критическое поле  $H_c$ , которое, например, для пленок больше  $H_{cm}$ ).

Поскольку  $\Psi$ -теория феноменологическая, значения массы  $m^*$  и заряда  $e^*$  заранее неизвестны. При этом, поскольку  $\Psi$  не является наблюдаемой величиной (ими являются, в частности, величины  $\delta_0$  и  $H_{cm}$ ), массу  $m^*$  можно выбирать произвольно – в измеряемые (наблюдаемые) значения она не входит. Вопрос же о выборе значения для  $e^*$  весьма интересен и любопытен. Мне с самого начала казалось, что  $e^*$  – это некоторый эффективный заряд, который может быть отличен от заряда электрона или, как иногда говорят, свободного электрона  $e$ . Однако Ландау не видел оснований для отличия  $e^*$  от  $e$ , и в нашей работе [3] в виде некоторого компромисса так и написано, что заряд  $e^*$  «нет оснований считать отличным от заряда электрона». Я оставался при своем мнении, и увидел способ решения вопроса путем сравнения теории с опытом. Конкретно, заряд  $e^*$  входит в выражение (5) для  $\kappa$ , где  $\delta_0$  и  $H_{cm}$  измеряются на опыте; вместе с тем  $\kappa$

входит в выражение для поверхностной энергии  $\sigma_{\text{ns}}$ , для глубины проникновения в сильном поле (поле  $H \geq H_{\text{cm}}$ ) и для предельных полей переохлаждения и перегрева сверхпроводящих образцов. На таком пути из сравнения теории с опытом я пришел к выводу [17], что  $e^* = (2-3)e$ . При обсуждении этого результата с Ландау, он привел возражение, которым, очевидно, руководствовался и ранее, хотя и не высказывал его. Именно, если считать заряд  $e^*$  эффективной величиной подобно, скажем, эффективной массе  $m_{\text{eff}}$  в теории металлов или полупроводников, то эффективный заряд  $e^*$  может и, вообще говоря, будет зависеть от координат в силу зависимости параметров, характеризующих проводник, от температуры, давления и состава, которые в свою очередь могут зависеть от координат  $\mathbf{r}$ . Если же  $e^*(\mathbf{r})$ , то теряется калибровочная (градиентная) инвариантность уравнений  $\Psi$ -теории (1), (2). Я не нашел возражений против этого замечания, и в статье [17] изложил ситуацию (сообщив, конечно, с его разрешения, мнение Ландау). Ларчик же просто открывался. После создания в 1957 г. теории Бардина, Купера и Шриффера (БКШ) [18] стало ясно, что в сверхпроводниках происходит «спаривание» электронов с противоположными импульсами и спинами (имею в виду простейший случай). Образующиеся «пары», иногда называемые куперовскими парами, обладают нулевым спином и являются бозе-частицами или, точнее, квазичастицами. Бозе-эйнштейновская конденсация этих пар и приводит к появлению сверхпроводимости. Кстати сказать, еще в 1952 г. я отметил [19], что заряженный бозе-газ будет вести себя как сверхпроводник, но до идеи спаривания не догадался. Между прочим, она высказывалась [20; 21] еще до Купера [22]. Из теории БКШ сразу, по-видимому, ясно, что роль заряда  $e^*$  в теории сверхпроводимости должен играть заряд пары, т.е.  $2e$ . Этот факт и был доказан Горьковым [22], получившим из теории БКШ уравнения  $\Psi$ -теории. Таким образом, Ландау оказался прав в том отношении, что заряд  $e^*$  должен быть универсальным, и я оказался прав в том, что он не равен  $e$ . Но вот сколь простая, казалось бы, мысль, что оба требования совместимы и  $e^* = 2e$ , никому не пришла в голову. Задним числом можно стыдиться такой слепоты, но это далеко не редкий случай в науке, и я не столько стыжусь этой слепоты, сколько досадно мне, что она имела место.

В нашей работе [3] было получено много результатов. Была вычислена при малых значениях параметра  $\kappa$  поверхностная энергия  $\sigma_{\text{ns}}$  и указано, что она уменьшается с ростом  $\kappa$ , причем обращается в нуль при  $\kappa = \kappa_c = 1/\sqrt{2}$ . Опираясь на имевшиеся экспериментальные данные, мы полагали, что для чистых сверхпроводников  $\kappa < \kappa_c$ , и это, в общем, правильно. Так или иначе, мы подробнее рассматривали только сверхпроводники с  $\kappa < \kappa_c$ , которые называются сейчас сверхпроводниками I рода. Я сам в дальнейшем тоже ограничивался исследованием сверхпроводников I рода (известным исключением является работа [24]). В 1950 г., да и ранее, было известно, что сверхпроводящие сплавы ведут себя обычно существенно не так, как чистые сверхпроводники. Особенно четкие результаты в отношении сплавов были получены в середине 30-х годов Л.В. Шубниковым<sup>52</sup> и его сотрудниками в Харькове (ссылки и результаты см. в [25], затронут этот материал и в [26], а подробнее в [27]). В [27] используется даже термин «шубниковская фаза» для исследовавшихся Шубниковым сплавов. Однако понимания ситуации не было, и мы с Ландау, как и многие другие, считали, что сплавы – «дело грязное», и не интересовались ими, ограничившись материалами с  $\kappa < \kappa_c$ , для которых  $\sigma_{\text{ns}} > 0$ , т.е. сверхпроводниками I рода. Правда, как указывается в статье А. Абрикосова [4] и в [5], Ландау высказал предположение, что в сплавах как раз  $\kappa > 1/\sqrt{2}$ , т.е. по современным представлениям они являются сверхпроводниками II рода.

Большая часть работы [3] была посвящена решению различных задач на основе уравнений  $\Psi$ -теории. Помимо уже упомянутого вопроса об энергии  $\sigma_{\text{ns}}$ , рассматривалось преимущественно поведение сверхпроводящих пластин и пленок во внешнем магнитном поле, а в некоторых случаях и при наличии тока, причем теория сравнивалась с опытом. В дальнейшем Ландау подобными расчетами и, вообще, развитием  $\Psi$ -теории не интересовался. Мои собственные усилия в этом направлении освещены в [1]. Ограничусь здесь упоминанием о довольно очевидном, но важном обобщении  $\Psi$ -теории [3], в которой сверхпроводники считались изотропными, на анизотропный случай [28]. Далее, исследовались перегрев и переохлаждение сверхпроводников в магнитном поле [29], квантование магнитного

---

<sup>52</sup> В 1937 г., в разгар сталинского террора, Л.В. Шубников был арестован и расстрелян.



потока в случае сверхпроводящего цилиндра с любой толщиной стенок [30] и проводилось сравнение  $\Psi$ -теории с опытом уже после создания теории БКШ [31]. Особо упомяну работу [32], развивавшуюся в [33], мало связанную с  $\Psi$ -теорией и касающуюся ферромагнитных сверхпроводников. Такие сверхпроводники в то время еще обнаружены не были, и в [32] предлагается объяснение этому факту, связанное с учетом магнитной энергии. В дальнейшем (после создания теории БКШ) стало ясно, что в ферромагнетиках появление сверхпроводимости затруднено также в силу спинового взаимодействия. Я этой проблемой не занимался, но хочу обратить внимание на следующее. В статье [32] были приведены определенные соображения, позволяющие изменять роль магнитного фактора (использование тонких пленок и материалов со сравнительно большой коэрцитивной силой). Не думаю, чтобы кто-либо обратил внимание на эти возможности, старые работы редко читают. Конечно, я не уверен в том, что на современном этапе в статьях [32; 33] можно найти нечто представляющее интерес, и хотел бы лишь одного, – чтобы эти работы посмотрели.

В далеком 1943 г. я занялся изучением сверхпроводимости потому, что это явление представлялось тогда самым таинственным в физике конденсированного состояния вещества. Но после создания  $\Psi$ -теории, и особенно теории БКШ, картина в отношении известных тогда материалов стала, в общем, ясна. Поэтому я потерял к сверхпроводимости особый интерес, хотя эпизодически кое-что и делал в этой области (см., например, [30; 34]). Интерес у меня возродился в 1964 г. в связи с постановкой вопроса о возможности существования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). У первого обнаруженного в 1911 г. сверхпроводника – ртути  $T_c = 4,15$  К, в то время как температура кипения  $^4\text{He}$  при атмосферном давлении  $T_{b,^4\text{He}} = 4,2$  К. Кстати сказать, жидкий гелий с 1908 по 1923 гг. целых 15 лет получали только в Лейдене, и масштаб работ в области физики низких температур, по сегодняшним меркам, был очень мал. Достаточно сообщить, в качестве примера, что в библиографическом указателе, помещенном в конце монографии [26], приведено около 450 ссылок на работы по сверхпроводимости (или, иногда, близким вопросам) за период с 1911 по 1944 гг.; из них на 1911–1925 гг. приходится только 35 ссылок.

Между тем после 1986–1987 гг., когда была открыта ВТСП, за 10 последующих лет было опубликовано около 50000 статей, т.е. примерно по 15 статей в день (!).

Несомненно, сразу же после открытия и первых исследований сверхпроводимости встал вопрос о том, почему это явление наблюдается лишь при низких температурах или, как говорят, гелиевых температурах. Но, естественно, дать ответ было невозможно до того, как была понята природа сверхпроводимости, т.е. до создания в 1957 г. теории БКШ [18]. В этой теории было получено такое выражение для критической температуры:

$$T_c = \theta \exp\left(-\frac{1}{\lambda_{\text{eff}}}\right), \quad (6)$$

где  $k_B\theta$  – область энергий вблизи энергии Ферми  $E_F = k_B\theta_F$ , в которой электроны проводимости (точнее, соответствующие квазичастицы) притягиваются, что и обуславливает образование пар и неустойчивость нормального состояния; далее, в простейшем случае,  $\lambda_{\text{eff}} = \lambda = N(0) V$ , где  $N(0)$  – плотность электронных уровней вблизи поверхности Ферми в нормальном состоянии и  $V$  – некоторый средний матричный элемент энергии взаимодействия между электронами, отвечающего притяжению. В теории БКШ, в ее первоначальной форме, «константа связи»  $\lambda_{\text{eff}}$  и, конкретно,  $\lambda$  считается малой («слабая связь»), т.е.

$$\lambda \ll 1. \quad (7)$$

Что касается температуры  $\theta$ , то в теории БКШ считалось, что

$$\theta \sim \theta_D, \quad (8)$$

где  $\theta_D$  – дебаевская температура металла, ибо притяжение между электронами считалось обусловленным электронно-фононным взаимодействием (как известно, максимальная энергия фононов в твердом теле порядка  $k_B\theta_D$ ). В типичных случаях  $\theta_D \lesssim 500$  К и  $\lambda \lesssim 1/3$ , откуда, согласно (6),  $T_c \lesssim 500 \exp(-3) = 25$  К или вообще

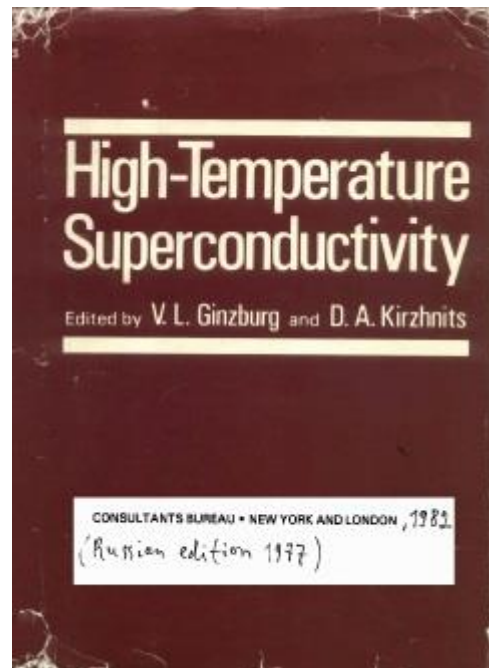
$$T_c \lesssim 30 - 40 \text{ К}. \quad (9)$$

Здесь не место все это уточнять. Но, как мне кажется, сказанного достаточно для того, чтобы понять, почему для типичных металлов условие

(9) выполняется и даже с запасом. Так, все усилия обнаружить или создать сверхпроводник по возможности с более высокой критической температурой до открытия ВТСП в 1986-1987 гг. привели к созданию в 1973 г. только соединения  $\text{Nb}_3\text{Ge}$  с  $T_c = 23 - 24$  К (здесь и ниже я, разумеется, не стремлюсь к тому, чтобы приводить точные значения различных параметров; они зависят от чистоты, обработки образцов и т.д.).

### 3. О высокотемпературных и комнатнотемпературных сверхпроводниках (ВТСП и КТСП)

После создания теории БКШ можно было подумать и о возможностях радикального повышения критической температуры. Возможно, я чего-либо не знаю, но, насколько мне известно, этот вопрос четко и конструктивно был впервые поставлен Литтлом в 1964 г. [35]. Вынужденный из-за недостатка места излагать дальнейшую часть этого раздела весьма схематически, могу сказать, что Литтл предложил рассмотреть возможность замены фононного механизма притяжения между электронами проводимости на подобное притяжение за счет взаимодействия со связанными электронами, имеющимися в той же системе. Я называю такой механизм экситонным или электрон-экситонным, ибо на наглядном уровне речь идет о замене фононов экситонами – возбуждениями в системе связанных электронов. Правда, такой термин используется в литературе не всегда. При этом Литтл использовал квазиодномерную модель, в которой некоторая проводящая нить («spine») была окружена боковыми «поляризаторами», скажем, органическими молекулами. Поскольку для электронных экситонов или, иначе говоря, для возбужденных состояний связанных электронов, характерная температура  $\theta_{\text{ex}} = E_{\text{ex}}/k_B \leq \theta_F \sim 10^4 - 10^5$  К и, во всяком случае, вполне реальны значения  $\theta_{\text{ex}} \sim 10^4$  К, очевидно, что заменяя в (6)  $\theta \sim \theta_D$  на  $\theta \sim \theta_{\text{ex}}$ , мы получаем значения  $T_c \lesssim 10^3$  К (если,



скажем,  $\lambda \sim 1/3$ ). Разумеется, пока что это только слова, ибо, как реализовать модель Литтла неясно, и это не сделано и до сих пор. К тому же, как выяснилось, в квазиодномерных системах флуктуации так велики, что переход в сверхпроводящее состояние, вероятно, не может иметь места. Однако, ознакомившись с работой [35], я сразу же предложил [36] квазидвумерную модель, в которой плоский проводник соприкасается с диэлектриком, скажем, с диэлектрической пленкой. Развитие этого варианта – чередование тонких проводящих слоев с диэлектрическими слоями, мы называли «сэндвичем». Переход от квазиодномерной модели к квазидвумерной был не случаен, ибо непосредственно перед работой [36] мы с Д.А. Киржницем<sup>53</sup> рассмотрели [37] вне всякой связи с проблемой ВТСП, задачу о двумерной (поверхностной) сверхпроводимости. Кстати сказать, этот вопрос до сих пор достаточно интересен и сам по себе, но за недостатком места не могу здесь на нем останавливаться, ограничившись ссылками [37; 38].

Квазидвумерные системы обладают уже тем преимуществом по сравнению с квазиодномерными, что в них значительно меньше флуктуации, разрушающие сверхпроводимость. Развитием квазидвумерного варианта [36; 39] мы и занялись. Точнее, в ФИАНе (Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР) группа теоретиков занялась проблемой ВТСП в широком плане, обсуждая все известные нам вопросы и возможности. Плоды этой деятельности были отражены в монографии [40], опубликованной даже в английском переводе в 1982 г., т.е. за 4–5 лет до экспериментального создания ВТСП [41; 42] в 1986-1987 годы. Если не касаться рассмотрения различных моделей и возможностей, то наиболее важным количественным результатом нашей работы, принадлежавшим в основном Д.А. Киржницу, является условие устойчивости кристалла. Дело в том, что основным возражением против возможности создать ВТСП было опасение, что при значении параметров металла, необходимых для получения

---

<sup>53</sup> К сожалению, выдающийся физик-теоретик Д.А. Киржниц безвременно скончался в 1998 г.

ВТСП, т.е. материала с  $T_c > T_{b,N_2} = 77,4 \text{ K}$ <sup>54</sup>, кристаллическая решетка будет неустойчива. Если сформулировать вопрос в терминах продольной диэлектрической проницаемости вещества  $\varepsilon(\omega, \mathbf{q})$ , где  $\omega$  – частота и  $\mathbf{q}$  – волновой вектор (ограничиваемся здесь изотропным телом), то для образования электронных пар, если рассуждать грубо, нужно, чтобы межэлектронное взаимодействие  $V = e^2/\varepsilon(0, q)r$  было отрицательным, т.е. отвечало притяжению. Но это соответствует требованию  $\varepsilon(0, q) < 0$ ; между тем, по некоторым соображениям, считалось, что для устойчивости решетки необходимо требование

$$\varepsilon(0, q) > 0. \quad (10)$$

Правда, при более подробном рассмотрении (см. [1; 40]) выяснилось, что сверхпроводимость возможна и при условии (10), но значения  $T_c$  оказывались небольшими, даже ниже оценки (9). В [40] и указанных там наших статьях было выяснено, что правильное условие устойчивости при  $q \neq 0$  имеет вид

$$\frac{1}{\varepsilon(0, q)} \leq 1, \quad (11)$$

т.е. соблюдается, если имеет место одно из двух неравенств

$$\varepsilon(0, q) > 1, \quad \varepsilon(0, q) < 0. \quad (12)$$

Другими словами, с точки зрения устойчивости, любые отрицательные значения  $\varepsilon(0, q)$  допустимы и нет ограничений на  $T_c$ . Точнее, мы и до сих пор не знаем о таких ограничениях. В результате нашей работы был сделан такой вывод, содержащийся в написанной мной главе 1 книги [40]:

*«Из общих теоретических соображений мы в настоящее время считаем разумной оценку  $T_c \lesssim 300 \text{ K}$ , причем, конечно, речь идет о материалах и системах, находящихся в более или менее нормальных условиях (равновесные или квазиравновесные металлические системы при отсутствии давления или под сравнительно небольшими давлениями и т.п.). При этом, если не говорить о металлическом водороде и, быть может, орга-*

<sup>54</sup> Не знаю, существует ли общепринятое определение, какой сверхпроводник считать высокотемпературным. По моему мнению, разумно считать, что ВТСП имеет место, если  $T_c > 77,4 \text{ K}$ , т.е. выше температуры кипения азота при атмосферном давлении.

нических металлах, а также полуметаллах, находящихся вблизи области электронных фазовых переходов, то предполагается использовать экситонный механизм притяжения между электронами проводимости.

В этом плане наиболее перспективными с точки зрения возможности повышения  $T_c$  представляются, по-видимому, слоистые соединения и сэндвичи диэлектрик – металл-диэлектрик. Однако состояние теории, не говоря уже об эксперименте, далеко еще не такое, чтобы можно было считать закрытыми и другие возможные направления, в частности, использование нитевидных соединений. Более того, при современном состоянии проблемы высокотемпературной сверхпроводимости наиболее правильным и плодотворным является непредвзятый подход, попытки продвинуться вперед в самых различных направлениях.

Исследования проблемы высокотемпературной сверхпроводимости вступают во второе десятилетие своей истории (если говорить о сознательном поиске веществ с  $T_c \gtrsim 90$  К при использовании экситонного и других механизмов). Одновременно, как можно полагать, начинается новый этап этих исследований, характеризующийся не только большим размахом и разнообразием, но и значительно лучшим пониманием возникающих задач. Никакой гарантии, что прилагаемые усилия приведут к существенному успеху, все еще нет, но ряд новых сверхпроводящих веществ уже создан и исследуется. Поэтому в любом случае трудно сомневаться в том, что дальнейшее исследование проблемы высокотемпературной сверхпроводимости принесет много интересного для физики и техники, даже если и не будут созданы материалы, остающиеся сверхпроводящими при азотных температурах (или, тем более, при комнатных температурах). Впрочем, как подчеркивалось, и подобная конечная цель ни в какой мере не кажется нам дискредитированной. Ближайшее десятилетие, как можно думать, явится решающим для проблемы высокотемпературной сверхпроводимости».

Это было написано в 1976 г. Но время шло, а довольно многочисленные попытки создать ВТСП надежным и воспроизводимым образом к успеху не приводили. В результате после некоторой вспышки активности наступило затишье, что дало мне основание в популярной статье [43],

опубликованной в 1984 г., охарактеризовать сложившуюся ситуацию следующим образом:

*«Как-то получилось, что исследования в области высокотемпературной сверхпроводимости оказались немодными (слово «мода» здесь с полным основанием употребляется без кавычек, ибо в научной деятельности и научной среде именно мода играет иногда большую роль). Трудно чего-либо добиться уговорами. Обычно лишь какой-то явный успех (или сообщение в печати, пусть и неточное, о таком успехе) может совершенно, и притом быстро, изменить ситуацию. Почувствовав «запах жареного», вчерашние скептики или даже хулители способны превратиться в рьяных сторонников нового направления. Но это другая тема – скорее из области психологии и социологии научной и технической деятельности.*

*Короче говоря, поиски высокотемпературной сверхпроводимости, особенно при существующих неясностях в области теории, вполне могут привести к неожиданным результатам, к открытиям».*

Не ожидал я, конечно, что всего через два года это «предсказание» сбудется [41; 42]. Оно сбылось не только в том отношении, что были получены ВТСП с  $T_c > T_{b,N_2} = 77,4$  К, но и, так сказать, в социальном плане: как упоминалось, начался настоящий «бум», возник «ВТСП-психоз». Одним из проявлений бума и психоза стало почти полное забвение всего того, что делалось до 1986 г., как будто проблема ВТСП не начала обсуждаться на 22 года раньше [35; 36]. На этой теме я уже останавливался выше и в статьях [44; 45] и не хотел бы здесь к ней возвращаться. Замечу лишь, что уважаемый мной Дж. Бардин относился к проблеме ВТСП с пониманием как до 1986 г., так и после этого (см. [46]); эта статья помещена и в книге [16]).

Сказанное не означает, конечно, что я или наша группа претендуют на очень важный реальный вклад в создание ВТСП. Думаю, вместе с тем, что работы Литтла и наши сыграли существенную роль в постановке проблемы, привлечении к ней внимания. Решение же задачи было достигнуто в значительной мере случайно. Предложение использовать слоистые соединения было разумным и перспективным, но ни я, ни, насколько знаю, кто-либо другой не предложил ведь выбрать именно купраты. Другие же

исследованные слоистые соединения не принадлежат к числу ВТСП. В известной мере случайный характер открытия ВТСП иллюстрируется таким фактом. Еще в 1979 г. в одном из институтов в Москве была создана и даже исследована [47] керамика  $\text{La}_{1,8}\text{Sr}_{0,2}\text{CuO}_4$ , близкая к исследованной Бед-норцем и Мюллером [41] и для которой  $T_c \approx 36$  К [48]. Однако авторы [47] измеряли сопротивление своих образцов при температуре не ниже температуры жидкого азота и поэтому не обнаружили их сверхпроводимости. Из сказанного нужно, конечно, сделать тривиальный вывод о том, что все вновь созданные материалы нужно «пробовать» на сверхпроводимость. Довольно очевиден и другой вывод, а именно, что и в наши дни все еще можно без гигантских установок и работы большого коллектива сделать важное открытие и получить за него Нобелевскую премию в следующем же году. Это должно вдохновлять, особенно молодежь.

Современное состояние теории твердого тела не позволяет вычислить значение  $T_c$ , как и других параметров сверхпроводников, разве что для еще не созданного металлического водорода. Более того, до сих пор и уже более 15 лет остается невыясненным механизм сверхпроводимости в купратах. Должен заметить, что хотя я при исследовании ВТСП делал, так сказать, ставку на экситонный механизм, вопрос о роли этого механизма в известных ВТСП еще совершенно неясен. При этом в ВТСП (в купратах) с  $T_c < 170$  К (максимальное известное значение  $T_c \approx 165$  К достигнуто еще в 1994 г. в купрате  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$  под высоким давлением), насколько понимаю, главенствующим может оказаться электрон-фононный механизм образования пар. Эта возможность была в прошлом недооценена (в частности, мной), поскольку ориентировались на оценку (9). Но она справедлива лишь при слабой связи (7). Если же связь сильная (т.е.  $\lambda_{\text{eff}} \gtrsim 1$ ), то формула (6), конечно, неприменима, но уже из нее ясно, что  $T_c$  растет с ростом  $\lambda_{\text{eff}}$ . Обобщение теории БКШ [18] на случай сильной связи [49] позволяет исследовать соответствующие возможности. Из их анализа (см. в особенности [50] и указанную там и в [1] литературу) следует, что в силу высоких значений  $\theta_D$  и  $\lambda_{\text{eff}}$  в купратах электрон-фононный механизм вполне может обеспечить сверхпроводимость с  $T_c \lesssim 200$  К. Другое дело, что в условиях так называемого  $d$ -спаривания и, возможно, других осо-



бенностей сверхпроводимости в купратах, одного электрон-фононного взаимодействия, по-видимому, недостаточно. Однако роль других возможностей (спиновые взаимодействия, экситонное взаимодействие) неясна. Здесь, конечно, не место обсуждать эту важную и актуальную проблему. Я хочу лишь, с одной стороны, подчеркнуть, что долго наблюдавшееся пренебрежение ролью электрон-фононного взаимодействия в купратах всегда казалось мне и представляется сейчас совершенно необоснованным (см. [51]). С другой стороны, возможность на основе электрон-фононного взаимодействия достичь значений  $T_c \sim 300$  К, а это уже комнатотемпературная сверхпроводимость КТСП (RTSC), представляется очень маловероятной, как и при использовании спинового механизма. В то же время, насколько известно, экситонный механизм не встречает принципиальных возражений и при  $T_c \sim 300$  К. Поэтому я надеюсь именно на этот механизм для достижения КТСП. Но все это, разумеется, не более чем интуитивные суждения.

Для меня создание ВТСП в течение 22 лет было мечтой, причем никакой гарантии, что цель достижима вообще и в обозримое время, в частности, не было. Сейчас получение КТСП, с моей точки зрения, занимает такое же место.

#### 4. Термоэлектрические явления в сверхпроводящем состоянии

Термоэлектрические явления и, конкретно, термоток или термоэдс в неравномерно нагретой цепи из двух сверхпроводников, насколько мне известно, впервые пытался наблюдать Мейснер [52] в 1927 г. Он пришел к выводу, что в сверхпроводниках термоэлектрический эффект полностью отсутствует. В 1943 г., когда я заинтересовался этим вопросом, именно такое мнение было общепринятым (см., например, [53] и особенно первое и последующие издания книги [25]). Впрочем, с подобным утверждением я встречался и в последующие годы. Между тем такое заключение ошибочно, что и было указано в моей работе [11], опубликованной еще в 1944 г.

Дело в том, что в сверхпроводящем состоянии помимо сверхпроводящего тока с плотностью  $\mathbf{j}_s$  может протекать и нормальный ток с плотностью  $\mathbf{j}_n$ . Этот нормальный ток переносится «нормальными электронами»,

т.е. квазичастицами электронного или дырочного типа, присутствующими в металле как в нормальном, так и в сверхпроводящем состоянии. В сверхпроводящем состоянии концентрация таких нормальных квазичастиц сильно зависит от температуры и, вообще говоря, стремится к нулю при  $T \rightarrow 0$ . Подобные представления, иногда именуемые двухжидкостной моделью, восходят к работе [54]. В изотропном несверхпроводнике или, точнее, в изотропном металле, находящемся в нормальном состоянии, может протекать лишь ток с плотностью

$$\mathbf{j} = \sigma \left( \mathbf{E} - \frac{\nabla\mu}{e} \right) + b\nabla T, \quad (13)$$

где  $\mu$  – химический потенциал электронов и  $\mathbf{E}$  – напряженность электрического поля. В сверхпроводящем же состоянии для нормального тока имеем (подробнее см. [55])

$$\mathbf{j}_n = \sigma_n \left( \mathbf{E} - \frac{\nabla\mu}{e} \right) + b_n \nabla T. \quad (14)$$

В то же время, для плотности сверхпроводящего тока  $\mathbf{j}_s$  в приближении теории Лондонов [12], которым здесь ограничимся (разумеется, именно такое приближение использовалось в [11])

$$\text{rot} (\Lambda \mathbf{j}_s) = -\frac{1}{c} \mathbf{H}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial (\Lambda \mathbf{j}_s)}{\partial t} = \mathbf{E} - \frac{\nabla\mu}{e}, \quad (16)$$

где  $\Lambda = m/(e^2 n_s)$  – некоторая постоянная, причем  $n_s$  – концентрация «сверхпроводящих электронов» (так что  $\mathbf{j}_s = en_s \mathbf{v}_s$ , где  $\mathbf{v}_s$  – скорость); в этой схеме глубина проникновения поля

$$\delta_L = \sqrt{\frac{\Lambda c^2}{4\pi}} = \sqrt{\frac{mc^2}{4\pi e^2 n_s}}.$$

Нужно отметить, что здесь я все несколько упрощаю, ибо на самом деле нужно было бы ввести в (14) и (16) различные химические потенциалы  $\mu_n$  и  $\mu_s$  соответственно для нормальных и сверхпроводящих электронов. Кроме того, в (16) в правой части фигурирует еще некоторый член (вооб-

ще говоря, небольшой), пропорциональный  $\nabla j_s^2$  (см. [55]). Если сверхпроводник неоднороден, то параметр  $\Lambda$  зависит от координат.

Как ясно из (16), в стационарном случае в сверхпроводнике

$$\mathbf{E} - \frac{\nabla\mu}{e} = 0 \quad (17)$$

и в силу (14),

$$\mathbf{j}_n = b_n(T)\nabla T. \quad (18)$$

Таким образом, термоток в сверхпроводящем состоянии отнюдь не исчезает. Этот ток, однако, в простейшем случае непосредственно не наблюдается, ибо компенсируется сверхпроводящим током  $\mathbf{j}_s$ . Так, рассмотрим однородный стержень из сверхпроводника, один конец которого находится при температуре  $T_2$ , а другой при температуре  $T_1 < T_2$  (рис. 1). Тогда в нормальном состоянии (т.е., если  $T_1 > T_c$ ), в силу отсутствия замкнутой цепи, из (13) имеем (рис. 1, а)

$$\mathbf{j} = 0, \quad \mathbf{E} - \frac{\nabla\mu}{e} = -\frac{b}{\sigma}\nabla T. \quad (19)$$

В сверхпроводящем же состоянии (при  $T_2 < T_c$ )

$$\begin{aligned} \mathbf{j} = \mathbf{j}_s + \mathbf{j}_n = 0, \quad \mathbf{j}_s = -\mathbf{j}_n = -b_n\nabla T, \\ \mathbf{H} = 0, \quad \mathbf{E} - \frac{\nabla\mu}{e} = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Правда, вблизи концов стержня, где  $\mathbf{j}_s$  превращается в  $\mathbf{j}_n$  или наоборот, появляются некомпенсированные заряды (charge imbalance effect), и поэтому поле  $\mathbf{E}$  не равно  $\nabla\mu/e$ ; здесь и ниже от этого момента отвлекаюсь.

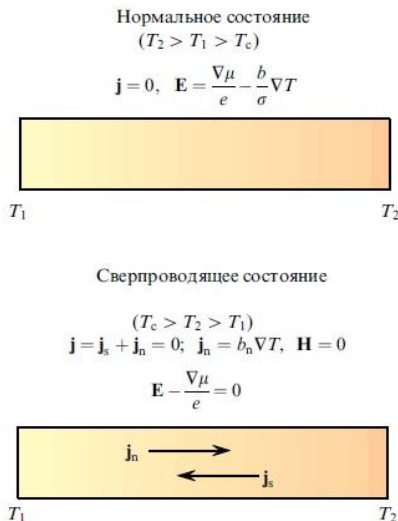


Рис. 1

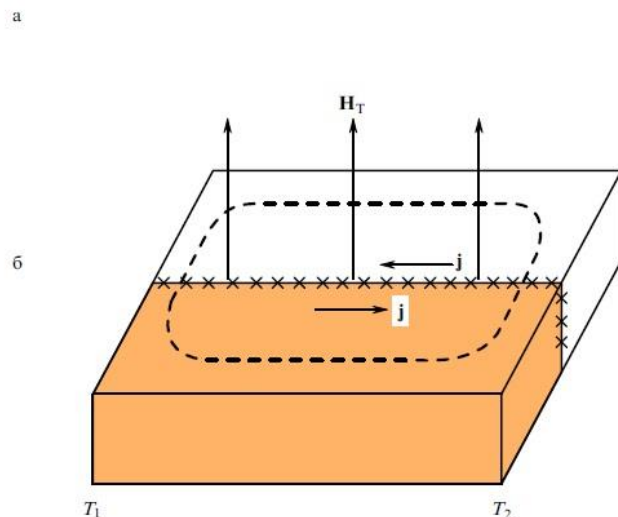


Рис. 2

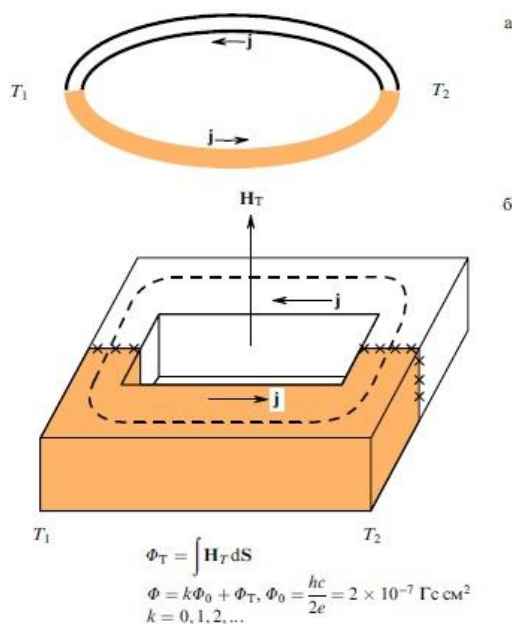


Рис. 3

Сейчас важно подчеркнуть, что в однородном случае в сверхпроводящем состоянии (рис. 1, б) термоток  $\mathbf{j}_n$  существует, но поле  $H = 0$ . Если сверхпроводник неоднороден или анизотропен, то токи  $\mathbf{j}_s$  и  $\mathbf{j}_n$ , вообще говоря, полностью не компенсируются, и появляется наблюдаемое термоэлектрическое магнитное поле, что и было отмечено в [11]. В то далекое время (60 лет назад!), как уже отмечалось, случай сплавов считался «грязным», и было даже неясным, можно ли использовать для сплавов уравнения Лондонов. Поэтому я ограничился кратким рассмотрением биметаллической пластины (скажем, сваренных или спаянных друг с другом двух различных сверхпроводников; этот спай и является сплавом) при наличии градиента температуры (см. также § 16 в [26] и [55]). В этом случае в силу зависимости параметра  $\Lambda$  от координат (очевидно, параметр  $\Lambda$  для разных металлов различен) вдоль линии спая появляется некомпенсированный ток  $\mathbf{j}$  и, следовательно, магнитное поле  $\mathbf{H}$ , перпендикулярное пластине и линии спая (рис. 2). Подробнее же в [11] и [26] был рассмотрен случай анизотропного сверхпроводника. Для этой цели уравнения Лондонов были довольно тривиальным образом обобщены путем замены скаляра  $\Lambda$  на тензор  $\Lambda_{ik}$  (для изотропных и кубических металлов  $\Lambda_{ik} = \Lambda \delta_{ik}$ ). Если в некубическом сверхпроводящем кристалле в виде пластины градиент температуры  $\nabla T$  не направлен по оси симметрии, то возникает обтекаю-

щий пластину ток  $\mathbf{j}$ , и поперек пластины появится магнитное поле  $\mathbf{H}_T$ , пропорциональное  $(\nabla T)^2$ . Это поле современными методами, в принципе, не трудно наблюдать. Казалось бы, интересный эффект и к тому же позволяющий измерить термоэлектрический коэффициент  $b_n(T)$  или, точнее, компоненты обобщающего его тензора  $b_{n,ik}(T)$ . Более тридцати лет назад мне удалось убедить В. Фербенка (W. Fairbank) поставить соответствующий эксперимент, и его результаты остаются до сих пор единственными известными мне на эту тему [56]. К сожалению, эта работа ясности не внесла [55; 57]. Меня просто поражает, что и после получения резко анизотропных ВТСП никто не заинтересовался этим вопросом. Видимо, такая сила моды и в науке.

Правда, известный интерес возник в отношении как раз изотропных сверхпроводников и, по сути дела, в применении к более или менее обычной термоэлектрической цепи (рис. 3, а). Ведь эта цепь эквивалентна «цепи» рис. 3, б. Для нее легко показать [58; 59] (вывод имеется и в [55]), что поток магнитного поля  $\Phi = \int \mathbf{H} d\mathbf{S}$  через отверстие равен

$$\Phi = k\Phi_0 + \Phi_T, \quad \Phi_T = \frac{4\pi}{c} \int_{T_1}^{T_2} (b_{n,II}\delta_{II}^2 - b_{n,I}\delta_I^2) dT,$$

$$\Phi_0 = \frac{hc}{2e} = 2 \times 10^{-7} \text{ Гс см}^2, \quad k = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (21)$$

Здесь индексы I и II относятся к сверхпроводящим металлам I и II,  $\delta_I$  и  $\delta_{II}$  – глубины проникновения поля в эти металлы,  $b_{n,I}$  и  $b_{n,II}$  – соответствующие коэффициенты  $b_n(T)$  в формуле (18) и  $\Phi_0$  – так называемый квант потока. По сути дела, конфигурация рис. 3, б эквивалентна биметаллической пластине рис. 2 с  $k = 0$ , т.е. без отверстия. К сожалению, я в свое время (т.е. в [11; 26]) этого не понял.

Если для простоты считать, что  $(b_n\delta^2)_{II} \gg (b_n\delta^2)_I$  и  $\delta_{II}^2 = \delta_{II}^2(0) \left(1 - T/T_{c,II}\right)^{-1}$ , то из (21) имеем ( $T_{c,II} = T_c$ ):

$$\Phi_T = \frac{4\pi}{c} b_{n,II}(T_c) \delta_{II}^2(0) T_c \ln \left( \frac{T_c - T_1}{T_c - T_2} \right). \quad (22)$$

Подставив сюда известные значения  $b_n(T_c)$  и  $\delta(0)$  при  $\ln(T_c - T_1)/(T_c - T_2) \sim 1$ , приходим к оценке  $\Phi_T \sim 10^{-2}\Phi_0$ . Такой поток легко

измеряется, что и было сделано в ряде работ (см. [1; 55] и указанную там литературу). Оказалось, однако, что в некоторой более сложной конфигурации сверхпроводящей цепи наблюдаемый поток  $\Phi$  оказался на порядки выше, чем согласно (21), (22), и обладает другой зависимостью от температуры [60]. Причина такого результата не выяснена, на этот счет имеются различные предположения [61; 62]; см. также другие указанные в [1] ссылки.

Нужно также отметить, что выражение (21) и вытекающая из него формула (22) получается в предположении о равенстве  $\mathbf{j} = \mathbf{j}_s + \mathbf{j}_n = 0$  во всей толще контура (ток идет лишь вблизи поверхности). Между тем при приближении к  $T_c$  глубина проникновения поля  $\delta$  возрастает, и при  $T \rightarrow T_c$  глубина  $\delta \rightarrow \infty$ , а плотность тока  $\mathbf{j}_n$  стремится к плотности термотока в нормальном состоянии, т.е. при  $T > T_c$ . В таких условиях необходим более подробный анализ, учитывающий роль появления уже упомянутых зарядов и электрического поля (charge imbalance эффект). Весь этот интересный вопрос не исследован (подробнее см. [1]).

Но сказанное еще не все. Даже в простейшем случае однородного сверхпроводника наличие градиента температуры (рис. 1, б) сказывается на теплопроводности, ибо в силу того, что  $\mathbf{j}_n \neq 0$  должен иметь место, и дополнительный (конвективный) поток тепла  $\mathbf{q}_c = -\kappa_c \nabla T$ , аналогичный имеющему место в сверхтекучей жидкости. Это было отмечено уже в [11] и, собственно, явилось исходной идеей в этой работе.

Полный поток тепла в сверхпроводящем состоянии  $\mathbf{q} = -\kappa \nabla T$ ,  $\kappa = \kappa_{ph} + \kappa_e + \kappa_c$ , где  $\kappa_{ph}$  — коэффициент теплопроводности, связанный с решеткой (фононами),  $\kappa_e$  — электронный вклад при отсутствии конвекции (циркуляции), т.е. при условии  $\mathbf{j}_n = 0$  и, как уже отмечено,  $\kappa_c$  — вклад циркуляции. Как известно, в нормальном состоянии коэффициент теплопроводности по определению измеряется при  $\mathbf{j} = 0$ , и можно сказать, что  $\kappa_c = 0$  (см. <sup>55</sup>). В оценке коэффициента  $\kappa_c$  как я, так и другие путались, и здесь ограничусь ссылкой на статью [1] и замечанием, что в обычных (не высокотемпературных) сверхпроводниках, по-видимому,  $\kappa_c \ll \kappa_e$ . В высо-

<sup>55</sup> Другое дело, что, например, в полупроводнике при наличии одновременно как электронной, так и дырочной проводимости, и при условии  $\mathbf{j} = 0$  могут одновременно течь токи электронов  $\mathbf{j}_e$  и дырок  $\mathbf{j}_h = -\mathbf{j}_e$ ; от подобных возможностей здесь отвлекаемся.

котемпературных же сверхпроводниках роль  $\kappa_c$  мне не ясна. Главное же, неясно, как выделить  $\kappa_c$ , даже если удастся отдельно определить  $\kappa_{ph}$  и  $\kappa_{e,tot} = \kappa_e + \kappa_c$  (непосредственно измеряется полный коэффициент теплопроводности  $\kappa$ ; об отделении  $\kappa_{ph}$  от  $\kappa_{e,tot}$  см. в [1]).

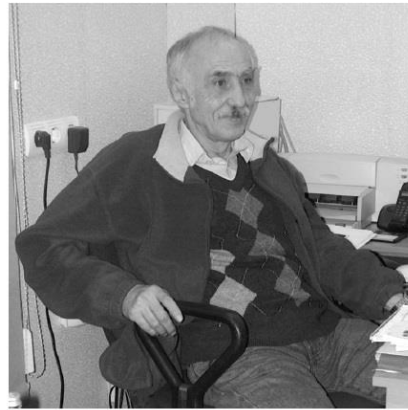
Подробнее останавливаться здесь на термоэлектрических явлениях в сверхпроводящем состоянии нет возможности. Моя цель – обратить внимание на этот круг вопросов, который начал изучаться еще в 1927 г. (см. [52], а также [25]) и мной в 1944 г. [11], но до сих пор остается во многом совершенно неясным. И это несмотря на огромное число работ, посвященных сверхпроводимости.



Г.Ф. Жарков



Д.А. Киржиц



Е.Г. Максимов

## 5. Работы в области сверхтекучести. Ψ-теория сверхтекучести

Сверхпроводимость – это, если угодно, сверхтекучесть заряженной жидкости или, эквивалентно, сверхтекучесть – это сверхпроводимость незаряженной жидкости. Поэтому, естественно, исследования обоих этих явлений всегда проводились во взаимосвязи. Моя первая работа в этой области [8], посвященная рассеянию света в гелии II, уже упоминалась в разделе 2. Кстати сказать, к этому вопросу следовало бы вернуться в свете современного понимания флуктуаций вблизи  $\lambda$ -точки. Ряд других работ освещен в [1], здесь же остановлюсь лишь на Ψ-теории сверхтекучести, правда, с одним исключением. Именно, хочу упомянуть также о совмест-

ном с А.А. Собяниным <sup>56</sup> и, частично, Г.Ф. Жарковым [63; 64] предложении и затем исследовании возможности наблюдать термомеханический циркуляционный эффект в сверхтекучей жидкости.

В заполненном сверхтекучей жидкостью (конкретно, речь шла о гелии II) кольцеобразном сосуде с двумя различными «слабыми звеньями» (например, узкими капиллярами) при наличии градиента температуры должна возникнуть циркуляция – сверхтекучее течение, охватывающее весь сосуд (рис. 4). Кстати, к заключению о существовании такого эффекта [63] мы пришли на основе аналогии с термоэлектрическим эффектом в сверхпроводящей цепи. Вывод же о существовании термотока в сверхпроводящей цепи я в свое время сделал [11] на основе аналогии с поведением гелия II при наличии градиента температуры. Указанный термоциркуляционный эффект в гелии II наблюдался [65] и обсуждался [64], причем были отмечены интересные, по моему мнению, возможности дальнейших исследований [64]. Однако, насколько знаю, за прошедшие 20 лет никто этим вопросом так и не заинтересовался.

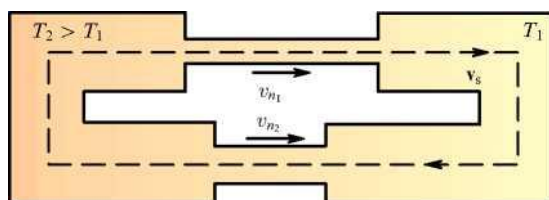


Рис. 4

После создания  $\Psi$ -теории сверхпроводимости [3] перенос чего-то аналогичного на случай сверхтекучести представлялся довольно очевидным. Вместе с тем меня еще ранее (см., например, [9]) беспокоил вопрос о поведении гелия II вблизи  $\lambda$ -точки, и был непонятен вопрос о граничном условии для скорости сверхтекучей компоненты  $\mathbf{v}_s$ . Кстати, Л.Д. Ландау, создателя теории фазовых переходов и сверхтекучести, этот круг вопросов почему-то, насколько знаю, никогда не интересовал. В теории сверхтекучести Ландау [7] скорость  $\mathbf{v}_s$  вдоль стенки (в отличие от скорости нормальной компоненты  $\mathbf{v}_n$ ) в нуль на стенке не обращается, имеется какой-то

<sup>56</sup> Талантливый физик-теоретик и общественный деятель Александр Собянин безвременно скончался в 1997 г. в возрасте 54 лет.



разрыв. Но при этом, как мне казалось, с таким разрывом должна была бы быть связана некоторая поверхностная энергия  $\sigma_s$  [66]. Однако специально поставленные опыты [67] показали, что энергия  $\sigma_s$  отсутствует или, во всяком случае, на много порядков величины меньше предполагавшейся [66]. Выход я увидел в предположении, что на стенке плотность сверхтекучей компоненты  $\rho_s(0)$  равна нулю. Тогда поток сверхтекучей компоненты  $\mathbf{j}_s = \rho_s \mathbf{v}_s$  на стенке обращается в нуль, несмотря на то, что  $\mathbf{v}_s$  терпит разрыв на стенке. В  $\Psi$ -теории сверхтекучести, очевидно,

$$\rho_s = m|\psi|^2, \quad (23)$$

где можно считать, что  $m = m_{\text{He}}$  – масса атома гелия (имеем в виду сверхтекучесть гелия II) и, в силу сказанного, граничное условие на стенке таково:

$$\Psi(0) = 0, \quad (24)$$

вместо условия (3) для сверхпроводников. На этом этапе, насколько помню, выяснилось, что  $\Psi$ -теорией сверхтекучести начал независимо заниматься Л.П. Питаевский, и мы, естественно, объединили наши усилия. В результате появилась работа [68]; построенную в ней  $\Psi$ -теорию сверхтекучести называю «первоначальной», ибо ниже будет рассмотрена «обобщенная»  $\Psi$ -теория сверхтекучести, развитая нами с А.А. Собяниным [69, 70] (ряд других ссылок см. также в [1]).

Первоначальная  $\Psi$ -теория сверхтекучести [68] вполне аналогична  $\Psi$ -теории сверхпроводимости [3], но, конечно, с использованием граничного условия (24) и при отсутствии электрического заряда. При этом скалярная комплексная функция  $\Psi = |\Psi| \exp(i\varphi)$  подчиняется уравнению

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi + \alpha(T)\psi + \beta_\lambda |\psi|^2 \psi = 0 \quad (25)$$

$$\mathbf{j}_s = \rho_s \mathbf{v}_s = -\frac{i\hbar}{2} (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*) = \hbar |\psi|^2 \nabla \varphi \quad (26)$$

т.е.  $\mathbf{v}_s = \hbar/m \nabla \varphi$ , причем здесь  $m = m_{\text{He}}$  независимо от того, как нормировать  $\Psi$  (см. [1; 68]).

Далее, длина корреляции  $\xi$ , обозначавшаяся в [68] через  $l$ , равна ( $T_\lambda$  – температура  $\lambda$ -точки)

$$\xi(T) = \frac{\hbar}{\sqrt{2m|\alpha|}} = \xi(0)\tau^{-\frac{1}{2}}, \quad \tau = \frac{T_\lambda - T}{T_\lambda}. \quad (27)$$

Основанная на экспериментальных данных оценка [68] приводит для  ${}^4\text{He}$ , т.е. для гелия II, к значению  $\xi(0) \sim 3 \times 10^{-8}$  см. Вместе с тем  $\Psi$ -теория применима лишь в условиях, когда макроскопическая  $\Psi$ -функция мало меняется на атомных расстояниях. Отсюда следует условие  $\xi(T) \gg \alpha \sim 3 \times 10^{-8}$  см (здесь  $\alpha$  – среднее атомное расстояние в жидком гелии). Следовательно,  $\Psi$ -теория может быть пригодна лишь вблизи  $\lambda$ -точки (при  $\tau \ll 1$ ), скажем, при  $(T_\lambda - T) < (0,1 - 0,2)\text{K}$ . Аналогичное условие имеет место и в случае  $\Psi$ -теории сверхпроводимости, которая тоже, вообще говоря, пригодна лишь вблизи  $T_c$ . При этом очень существенно, что теория фазовых переходов Ландау, являющаяся теорией среднего поля, в случае сверхпроводников (т.е.  $\Psi$ -теория сверхпроводимости) применима и в непосредственной близости от  $T_c$ . Это объясняется относительно большим значением  $\xi(0)$  в сверхпроводниках (длина  $\xi(0)$  порядка размера куперовских пар, т.е. в обычных сверхпроводниках, скажем, порядка  $10^{-5}$  см). Дело в том, что область температур вблизи  $T_c$  (или  $T_\lambda$ ), в которой флуктуации уже велики и поэтому приближение среднего поля неприменимо, пропорциональна  $[\xi(0)]^{-6}$  (см. [1] и цитируемую там литературу, в особенности [34]). В гелии II, в связи с малостью  $\xi(0)$ , флуктуации вблизи  $T_\lambda$  относительно велики, и первоначальной  $\Psi$ -теорией [68] можно пользоваться лишь при  $(T_\lambda - T) > 10^{-3}$  К [1]. Между тем, особенно интересна значительно более близкая к  $T_\lambda$  область температур. О том, что для области  $\lambda$ -перехода в  ${}^4\text{He}$  теория среднего поля непригодна, свидетельствует само наличие  $\lambda$ -особенности в зависимости теплоемкости от температуры, но это обстоятельство можно было, по крайней мере, на первый взгляд, не связывать с температурной зависимостью плотности  $\rho_s(T)$ , пропорциональной  $|\Psi|^2$  (см. (23)). Поэтому в 1957 г., когда была выполнена работа [68], мы сразу и не увидели недостатков нашей теории. Это, однако, стало ясно несколько позже, после выяснения того, что в гелии II в хорошем приближении.

$$\rho_s(\tau) = \rho_{s0}\tau^\zeta, \quad \zeta = \frac{2}{3}. \quad (28)$$

В теории же среднего поля

$$\zeta = 1. \quad (29)$$

Кстати, на опыте индекс  $\zeta$  не равен строго  $2/3$ , но очень близок к этому значению. Например, согласно [71],  $\zeta = 0,6705 \pm 0,0006$ .

Таким образом, первоначальная  $\Psi$ -теория сверхтекучести [68] к жидкому  ${}^4\text{He}$  в количественном отношении плохо применима. Вместе с тем, на ее основе в [68] был получен ряд результатов, в качественном отношении интересных и для гелия II. Речь идет о распределении плотности  $p_s(z)$  вблизи твердой стенки и в пленках с толщиной  $d$  в зависимости от этой толщины. Были решены и задачи о циркуляции скорости  $v_s$  вокруг вихревой нити, на оси которой  $\Psi = 0$ , об энергии этой нити и поверхностной энергии на границе между гелием II и твердой стенкой. Не менее существенно, что жидкий  ${}^4\text{He}$  это не единственная существующая сверхтекучая жидкость. С такой жидкостью приходится сталкиваться и в случае растворов  ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ , жидкого  ${}^3\text{He}$ , нейтронных звезд и, возможно, в некоторых других случаях. При этом, правда, функция  $\Psi$  может уже не оказаться скалярной, но, с другой стороны, длина  $\zeta(0)$  относительно велика (например, в жидком  ${}^3\text{He}$   $\zeta(0) \sim 10^{-5}$  см), и флуктуационная область достаточно мала. Наконец, теория [68] сыграла, насколько могу судить, существенную роль при создании и развитии теории Гросса-Питаевского, широко используемой при исследованиях бозе-эйнштейновской конденсации (см. [72]).

В физике сверхтекучести как исторически, так и в отношении масштабов исследований, доминирующее место всегда занимал и занимает жидкий  ${}^4\text{He}$ , т.е. гелий II. Описывающая его поведение теория Ландау [7], в основном, макроскопическая или, если угодно, квазимакроскопическая. Но она не отвечает на ряд вопросов, особенно вблизи  $\lambda$ -точки. Вместе с тем, микротехники типа теории БКШ для сверхпроводников, в случае гелия II не существует. С другой стороны гелий II вблизи  $\lambda$ -точки интересен с различных точек зрения, в частности, при исследовании двухжидкостной гидродинамики вблизи  $\lambda$ -точки, при моделировании некоторых космологических вопросов [73] и т.д. Первоначальная  $\Psi$ -теория сверхтекучести [68; 74] до какой-то степени, по-видимому, может быть использована для решения этих задач, но лишь с указанным существенным ограничением,

обусловленным неприменимостью приближения среднего поля, т.е. неучетом флуктуаций. Устранить эти недостатки и призвана обобщенная  $\Psi$ -теория сверхтекучести [69; 70]. Она основана на некотором полуэмпирическом обобщении теории фазовых переходов Ландау (см., например, [75]). Именно в теории фазовых переходов Ландау и, в частности, в  $\Psi$ -теории сверхпроводимости, т.е. при выборе в качестве параметра порядка функции  $\Psi$ , плотность свободной энергии упорядоченной фазы вблизи точки перехода  $T_\lambda$  записывается в виде

$$F_{II} = F_1 + \alpha|\psi|^2 + \frac{\beta}{2}|\psi|^4 + \frac{\gamma}{6}|\psi|^6, \quad (30)$$

причем вдали от трикритической точки можно положить

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha'_\lambda(T - T_\lambda) = -a_0\tau, \beta = \beta_\lambda \\ \gamma &= 0, \tau = \frac{T_\lambda - T}{T_\lambda}. \end{aligned} \quad (31)$$

В обобщенной же теории

$$F_{II} = F_I - a_0\tau|\tau|^{1/3}|\psi|^2 + \frac{b_0}{2}\tau^{2/3}|\psi|^4 + \frac{g_0}{3}|\psi|^6. \quad (32)$$

При выборе выражения (32), при малых  $|\Psi|^2$  в равновесии  $|\Psi_0|^2 = -\alpha/\beta = (a_0/b_0)\tau^{2/3}$ , т.е. имеет место температурная зависимость, согласующаяся с наблюдаемой (см. (28)). Очевидно, как раз для достижения этой цели и выбирается выражение (32).

Обобщенная  $\Psi$ -теория сверхтекучести [69; 70] формально отличается от первоначальной теории [68; 74] как раз заменой выражений (30), (31) на (32). На такой основе был получен ряд выражений и заключений. Например, для плоской пленки гелия II с толщиной  $d$  температура  $\lambda$ -перехода

$$T_\lambda(d) = T_\lambda - 2,53 \times 10^{-11} \left( \frac{3+M}{M} \right) d^{-3/2} K, \quad (33)$$

где  $T_\lambda = T_\lambda(\infty)$  – температура  $\lambda$ -перехода в массивном гелии (как известно,  $T_\lambda = 2,17$  К) и  $M$  – параметр теории, пропорциональный коэффициенту  $g_0$  в (32). Если  $M < 1$ , то  $\lambda$ -переход является переходом второго рода (из сравнения с опытом для гелия II была получена лишь грубая оценка  $M = 0,5 \pm 0,3$ ). Кстати, если рассматривается не плоская пленка, а круглый

капилляр с диаметром  $d$ , то коэффициент 2,53 в (33) нужно заменить на 4,76. Получено и немало других выражений [69; 70; 76].

К сожалению, обобщенная  $\Psi$ -теория сверхтекучести не привлекла к себе внимания ни со стороны экспериментаторов, ни со стороны теоретиков. Правда, некоторые пессимистические суждения на ее счет в литературе высказывались (они упоминаются в [1]). Мы с А.А. Собяниным в бурный период перемен в СССР и в России, наступивший после 1985–1988 гг., также сверхтекучестью практически перестали заниматься. Лишь в [1] я подвел некоторые итоги нашей работы.

Несомненно, обобщенная  $\Psi$ -теория сверхтекучести это, так сказать, не теория высокого полета, основанная на «первых принципах». Вместе с тем ее простота (по крайней мере, по сравнению с другими известными методами) позволяет мне думать, что  $\Psi$ -теория сверхтекучести (как первоначальная, так и обобщенная) может еще много дать при изучении сверхтекучести. Во всяком случае, противоположное мнение совершенно не обосновано. Настоящий раздел лекции и написан с целью привлечь внимание физиков, работающих в соответствующих областях, к  $\Psi$ -теории сверхтекучести. Вполне возможно, по моему мнению, что невнимание к ней является заблуждением. Впрочем, вполне допустимо, что, напротив, заблуждаюсь я сам.



Л.П. Питаевский



А.А.Собянин

## **6. «Физический минимум» – какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века?**

Пришлось столкнуться с мнением, что моя работа в области сверхпроводимости и сверхтекучести – это дело далекого прошлого. Несомненно, выполненная еще в 1950 г. работа Гинзбурга-Ландау [3] выделяется. Но в целом, как ясно из изложенного выше и подробнее из [1], я занимался этой областью физики с 1943 г. и до недавнего времени. При этом, как мне кажется, был поставлен также ряд вопросов и задач до сих пор нерешенных и заслуживающих внимания. Разумеется, сегодня наиболее актуальными проблемами в области сверхпроводимости являются выяснение механизма и ряда особенностей ВТСП и создание КТСП. Точнее, в последнем случае нужно выяснить возможности и условия создания КТСП – комнатнотемпературных сверхпроводников. Ясно понимаю, что в обоих этих последних направлениях я уже ничего не смогу сделать. Хотелось хотя бы успеть узнать побольше новых результатов.

Поэтому в последние годы я уделяю, если говорить о физике, все больше внимания некоторой образовательной программе, условно называемой «физическим минимумом». Поскольку на Нобелевских лекциях, насколько осведомлен, присутствует много молодежи, я решил остановиться здесь на этом «физическом минимуме». Думаю, что молодым людям это будет интереснее, чем слушать о том, что делалось до их рождения.

Физика, особенно в прошлом веке, развивалась исключительно бурно и плодотворно. Ее лицо радикально изменилось уже за период одной человеческой жизни. Например, нейтрон и позитрон были открыты в 1932 г., когда мне было уже 16 лет. А что такое современная физика без нейтронов и позитронов? В результате столь стремительного развития физика и примыкающие к ней области (например, астрономия) колоссально расширились и по фундаментальному содержанию, и по объему сопутствующей информации.

Если еще в недалеком прошлом можно было опираться на требование: «кое-что знать обо всем и все об одном» (имеется в виду, скажем, в физике), то, как мне кажется, сейчас это уже невозможно. Вместе с тем,

поражает и угнетает меня, во всяком случае, когда молодой физик (а иногда и не очень молодой) ограничивается знаниями в «своей» области и не осведомлен, пусть и в общих чертах, о состоянии физики в целом, о ее наиболее «горячих» точках.

Такому положению нет оправдания в результате ссылок на то, что в физике уже нет стержня, что она стала необозрима. Напротив, в физике имеется (быть может, все еще имеется) вполне определенный стержень – это фундаментальные понятия и законы, сформулированные в теоретической физике. На базе теоретической физики, изучаемой еще на студенческой скамье, можно понимать всю современную физику или, точнее, понимать, о чем идет речь во всей физике, отдавать себе отчет о ситуации. Одновременно каждый физик (конечно, это относится и к другим специальностям, но я для определенности ограничиваюсь физиками) должен помимо теоретической физики знать и немало фактов из различных областей физики, знать и о важнейших новых достижениях.

Вместе с тем, мы в России любим приводить высказывания некоего вымышленного персонажа – Козьмы Пруtkова, который, в частности, изрек: «Нельзя объять необъятное». Итак, необходимо что-то выбрать. Вот я и пошел по этому пути: составил «список» особенно важных и интересных проблем. Очевидно, что любой такой «список» не может не иметь субъективной окраски. Ясно и то, что «список» с течением времени должен изменяться. Ясно, наконец, что все вопросы, не включенные в «список», никак не могут считаться неважными или неинтересными. Просто многие из них кажутся мне (или авторам других аналогичных списков) менее актуальными в данный момент времени. Опять же «нельзя объять необъятное». Те же, кто знают важное и интересное, находящееся за пределами «списка», не имеют никаких оснований обижаться и должны лишь дополнять или изменять «список». Я всего лишь предлагаю некоторое перечисление вопросов, о которых, по моему мнению, каждый физик должен иметь хотя бы беглое представление. Менее тривиально, по-видимому, утверждение, что это вовсе не так уж и трудно, как может показаться на первый взгляд. Думаю, что для этой цели нужно затратить времени не больше, чем хороший студент тратит на подготовку экзамена, скажем, по

электродинамике. Знакомство со всеми вопросами, включенными в «список», я и называю «физическим минимумом». Разумеется, этот «минимум» и его название являются отголоском «теоретического минимума», предложенного Л.Д. Ландау в тридцатые годы прошлого века. Но вот какой имеется существенный момент: по электродинамике (или другим предметам университетского курса) существует немало превосходных учебников, из которых я на первое место ставлю соответствующий том «Курса теоретической физики» Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица. Для ознакомления же с «физическим минимумом» начинающему нужно помочь. Этой цели и служило и, надеюсь, служат как составление самого «списка», так и комментарии к нему.

В 1995 г. в русском издании книги [16] я смог составить такие довольно подробные комментарии. Но в английском переводе [16] многое уже устарело, что вполне компенсировать уже не удалось. В книге [2], в ее начале тоже помещена статья, посвященная «физическому минимуму». В английском переводе этой книги, который, надеюсь, скоро появится, внесены некоторые дополнительные замечания. В целом же, если предложение использовать и развивать, «физический минимум» встретит поддержку, должны появиться новые книги на эту тему. К сожалению, это уже не моя задача.

В рамках же настоящей лекции мне остается только вспомнить известную поговорку: «Чтобы узнать, каков пудинг, нужно его попробовать» (The proof of the pudding is in the eating) и привести «список» на начало XXI века, который упоминался.

1. Управляемый ядерный синтез.
2. Высокотемпературная и комнатнотемпературная сверхпроводимость (ВТСП и КТСП)
3. Металлический водород. Другие экзотические вещества.
4. Двумерная электронная жидкость (аномальный эффект Холла и некоторые другие эффекты).
5. Некоторые вопросы физики твердого тела (гетероструктуры в полупроводниках, квантовые ямы и точки, переходы металл-диэлектрик, волны зарядовой и спиновой плотности, мезоскопика).



6. Фазовые переходы второго рода и родственные им. Некоторые примеры таких переходов. Охлаждение (в частности, лазерное) до сверхнизких температур. Бозе-эйнштейновская конденсация в газах.
7. Физика поверхности. Кластеры.
8. Жидкие кристаллы. Сегнетоэлектрики. Ферротороики.
9. Фуллерены. Нанотрубки.
10. Поведение вещества в сверхсильных магнитных полях.
11. Нелинейная физика. Турбулентность. Солитоны. Хаос. Странные аттракторы.
12. Разеры, гразеры, сверхмощные лазеры.
13. Сверхтяжелые элементы. Экзотические ядра.
14. Спектр масс. Кварки и глюоны. Квантовая хромодинамика. Кварк-глюонная плазма.
15. Единая теория слабого и электромагнитного взаимодействия.  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -бозоны. Лептоны.
16. Стандартная модель. Великое объединение. Суперобъединение. Распад протона. Масса нейтрино. Магнитные монополи.
17. Фундаментальная длина. Взаимодействие частиц при высоких и сверхвысоких энергиях. Коллайдеры.
18. Несохранение CP-инвариантности.
19. Нелинейные явления в вакууме и в сверхсильных электромагнитных полях. Фазовые переходы в вакууме.
20. Струны. М-теория.
21. Экспериментальная проверка общей теории относительности.
22. Гравитационные волны, их детектирование.
23. Космологическая проблема. Инфляция.  $\Lambda$ -член и «квинтэссенция». Связь между космологией и физикой высоких энергий.
24. Нейтронные звезды и пульсары. Сверхновые звезды.
25. Черные дыры. Космические струны (?).
26. Квазары и ядра галактик. Образование галактик.
27. Проблема темной материи (скрытой массы) и ее детектирования.
28. Происхождение космических лучей со сверхвысокой энергией.
29. Гамма-всплески. Гиперновые.

### 30. Нейтринная физика и астрономия. Нейтринные осцилляции.

Выделение именно 30 проблем (точнее, пунктов в списке), конечно, крайне условно. Да и некоторые из них можно было бы разделить. В первом моем «списке», опубликованном в 1971 г. [77], было 17 проблем. В дальнейшем их число возрастало (несколько подробнее об этом см. в [2]). Вероятно, и сейчас к «списку» следовало бы кое-что добавить, например, вопрос о квантовых компьютерах и успехах в оптике. Но я этого с достаточным пониманием уже не могу сделать.

В общем, несомненно, что любой «список» не догма, что-то можно выбрасывать, что-то дополнять в зависимости от интересов лекторов и авторов соответствующих статей. Более интересен вопрос об эволюции «списка» со временем по существу дела, ибо это отражает процесс развития физики. В «списке» 1970–1971 гг. [77] кваркам было уделено лишь три строчки при перечислении различных попыток объяснить спектр масс. Это не свидетельствовало о моей проницательности. Однако ведь тогда (в 1970 г.) кваркам было всего лет 5–6 (в смысле возраста соответствующей гипотезы), и судьба представлений о кварках была действительно неясна. Сейчас ситуация, конечно, совершенно иная. Правда, самый тяжелый  $t$ -кварк был обнаружен лишь в 1994 г. (его масса, по данным на 1999 г., составляет  $m_t = 176 \pm 6$  ГэВ). В списке [77] нет, естественно, фуллеренов, открытых в 1985 г., нет гамма-всплесков (первое упоминание об их обнаружении было опубликовано в 1973 г.). Высокотемпературные сверхпроводники были синтезированы в 1986–1987 гг., но в списке [77], тем не менее, эта проблема рассматривалась довольно подробно, ибо она обсуждается, начиная с 1964 г. (об этом я подробнее говорил в предшествующей части лекции). Вообще за 30–35 лет в физике сделано немало, но, по моему мнению, не так уж и много появилось существенно нового. Во всяком случае, «списки» в [77; 16] и вышеприведенный в какой-то мере характеризуют развитие и состояние физической и астрофизической проблематики с 1970–1971 гг. и по настоящее время.

Должен добавить, что в «физический минимум» следует включить также три «великих» проблемы современной физики. Включить в том смысле, что их нужно в какой-то мере выделить, специально обсуждать,

следить за развитием в соответствующих направлениях. Несколько подробнее речь об этом идет в [2].

Сами «великие проблемы» это, во-первых, вопрос о возрастании энтропии, необратимости и «стреле времени».

Во-вторых, это проблема интерпретации нерелятивистской квантовой механики и возможности узнать что-либо новое даже в области ее применимости (лично я в такой возможности сомневаюсь, но считаю, что глаза нужно оставлять открытыми).

В-третьих, это вопрос о редукции живого к неживому, т.е. вопрос о возможности объяснить происхождение жизни и мышления на основе одной физики.

На первый взгляд, казалось бы, как же может быть иначе? Но пока вопросы не выяснены, ни в чем нельзя быть уверенным. Думаю, что вопрос о происхождении жизни оказался бы убедительно выяснен, только если бы живое было создано «в пробирке» из неживого. Не исключено, что это будет сделано еще в этом веке. Но пока это не сделано, вопрос открыт.

В заключение еще одно замечание. В прошлом можно было, и даже в наши дни можно встретиться с мнением, что в физике уже почти все сделано. Имеются якобы только неясные «облачка» в небе или теории, которые скоро доделают, и возникнет «теория всего» (theory of everything). Я считаю подобные мнения просто какой-то слепотой. Вся история физики, в том числе и состояние физики и, в частности, астрофизики (включая космологию) на сегодняшний день убеждают в обратном. Перед нами еще, по моему мнению, безбрежное море нерешенных проблем.

Мне остается только позавидовать более молодым из присутствующих, которые увидят очень много нового, важного и интересного.

### Список литературы

1. Гинзбург В.Л. УФН 167 429 (1997); 168 363 (1998) [*Phys. Usp.* 40 407(1997); 41 307 (1998)]
2. Гинзбург В.Л. *О науке, о себе и о других* (М.: Физматлит, 2003)<sup>57</sup> [Ginzburg V.L. *About Science, Myself and Others* (Bristol: IOP Publ., 2005) Article 7 (to be published)]

---

<sup>57</sup> Помещенная в этом сборнике статья 7 представляет собой несколько отредактированную статью, указанную выше в ссылке 1.

3. Гинзбург В.Л., Ландау Л.Д. *ЖЭТФ* 20 1064 (1950). На английском языке эта статья имеется в томе: Tандау Г D *Collected Papers* (Oxford: Pergamon Press, 1965) p. 546
4. Абрикосов А.А. *ЖЭТФ* 32 1442 (1957) [Sov. Phys. *JETP* 5 1174 1957]
5. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. *Статистическая физика Ч. 2 Теория конденсированного состояния* (М.: Наука, 1978, 1999) [Tifshitz E.M, Pitaevskii Г.Р *Statistical Physics Pt. 2 Theory of Condensed State* (Oxford: Pergamon Press, 1980)]
6. Tinkham M. *Introduction to Superconductivity* 2nd ed. (New York: McGrawHill, 1996)
7. Ландау Л.Д. *ЖЭТФ* 11 592 (1941); Tандау TD *J.Phys. USSR* 5 71 (1941)
8. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 13 243 (1943); Ginzburg V Г *J. Phys. USSR* 7 305(1943)
9. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 14 134(1944)
10. Bardeen J, in *Kaltephtsik* (Handbuch der Physik, Bd. 15, Hrsg. S von FlUgge) (Berlin: Springer-Verlag, 1956) p. 274 [Перевод на русский язык: Бардин Дж, в сб. *Физика низких температур* (Под ред. А И Шальникова) (М.: ИЛ, 1959) с. 679]
11. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 14 177 (1944); Ginzburg V Г *J. Phys. USSR* 8 148 (1944)
12. London F., London H. *Proc. R. Soc. London Ser. A* 149 71 (1935); *Physica* 2 341 (1935)
13. Waldram J.R. *Superconductivity of Metals and Cuprates* (Bristol: Institute of Physics Publ., 1996)
14. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 16 87 (1946); Ginzburg V Г *J.Phys. USSR* 9 305 (1945)
15. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 15 739 (1945); Ginzburg V Г *J. Phys. USSR* 10 107 (1946)
16. Ginzburg V.L. *The Physics of a Lifetime. Reflections on the Problems and Personalities of 20th Century Physics* (Berlin: Springer-Verlag, 2001). Эта книга представляет собой в основном перевод книги: Гинзбург В.Л. *О физике и астрофизике* (М.: Бюро Квантум, 1995)
17. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 29 748 (1955) [Sov. Phys. *JETP* 2 589 (1956)]
18. Bardeen J., Cooper Г.N., Schrieffer J.R. *Phys. Rev.* 108 1175 (1957)
19. Гинзбург В.Л. *УФН* 48 25 (1952); Ginzburg V L *Fortschr. Phys.* 1 101 (1953)
20. Ogg R.A. (Jr) *Phys. Rev.* 69 243; 70 93 (1946)
21. Schafroth M.R. *Phys. Rev.* 96 1149 (1954); 100 463 (1955)
22. Cooper L.N. *Phys. Rev.* 104 1189 (1956)
23. Горьков Л.П. *ЖЭТФ* 36 1918; 37 1407 (1959) [Sov. Phys. *JETP* 9 1364 (1959); 10 998 (1960)]
24. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 31 541 (1956) [Sov. Phys. *JETP* 4 594 (1957)]

25. Shoenberg D. *Superconductivity* 3rd ed. (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1965) [Перевод на русский язык: Шенберг Д. *Сверхпроводимость* (М.: ИЛ, 1955)]
26. Гинзбург В.Л. *Сверхпроводимость* (М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1946)
27. Buckel W. *Supraleitung* (Weinheim, Bergster: Physik-Verlag, 1972) [Перевод на русский язык: Букель В. *Сверхпроводимость* (М.: Мир, 1975); Translated into English: Buckel W. *Superconductivity: Fundamentals and Applications* (Weinheim: VCH, 1991)]
28. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 23 236(1952)
29. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 34 113 (1958) [Sov. Phys. JETP 7 78 (1958)]
30. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 42 299 (1962) [Sov. Phys. JETP 15 207 (1962)]
31. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 36 1930 (1959) [Sov. Phys. JETP 9 1372 (1959)]
32. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 31 202 (1956) [Sov. Phys. JETP 4 153 (1957)]
33. Жарков Е.Ф. *ЖЭТФ* 34 412 (1958); 37 1784 (1959) [Sov. Phys. JETP 7 278 (1958); 10 1257(1959)]
34. Гинзбург В.Л. *ФТТ* 2 2031 (1960) [Sov. Phys. Solid State 2 1824 (1961)]
35. Little W.A. *Phys. Rev.* 134 A1416 (1964)
36. Ginzburg V.L. *Phys. Lett.* 13 101 (1964); Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 47 2318 (1964) [Sov. Phys. JETP 20 1549 (1965)]
37. Гинзбург В.Л., Киржниц Д.А. *ЖЭТФ* 46 397 (1964) [Sov. Phys. JETP 19 269(1964)]
38. Ginzburg V.L. *Phys. Scripta* T27 76 (1989)
39. Гинзбург В.Л., Киржниц Д.А. *ДАН СССР* 176 553 (1967) [Sov. Phys. Dokl. 12 880 (1968)]
40. *Проблема высокотемпературной сверхпроводимости* (Под ред. В.Л. Гинзбурга, Д.А. Киржница) (М.: Наука, 1977) [Translated into English: Ginzburg V.L., Kirzhnits D A (Eds) *High-Temperature Superconductivity* (New York: Consultants Bureau, 1982)]
41. Bednorz J.G, Muller K.A.Z. *Phys. B* 64 189 (1986)
42. Wu M.K., Ashburn J.R., Torng C.J., Hor P.H., Meng R.L., Gao L., Huang Z.J., Wang Y.Q., Chu C.W. *Phys. Rev. Lett.* 58 908 (1987)
43. Гинзбург В.Л. *Энергия* (научно-популярный журнал) (9) 2 (1984)
44. Ginzburg V.L. *Prog. Low Temp. Phys.* 12 1 (1989)
45. Ginzburg V.L., in *From High-Temperature Superconductivity to Microminature Refrigeration* (Eds B Cabrera, H Gutfreund, V Kresin) (New York: Plenum Press, 1996)
46. Ginzburg V.L. *J. Supercond.* 4 327 (1986)

47. Шаплыгин И.С., Кахан Б.Е., Лазарев В.Б. *Журн. неорганической химии* 24 1476 (1979)
48. Cava R J et al. *Phys. Rev. Lett.* 58 408 (1987)
49. Элиашберг Е.М. *ЖЭТФ* 38 966; 39 1437 (1960) [*Sov. Phys. JETP* 11 696(1960); 12 1000(1961)]
50. Максимов Е.Е. *УФН* 170 1033 (2000) [*Phys. Usp.* 43 965 (2000)]
51. Гинзбург В.Л., Максимов Е.Е. *Сверхпроводимость: физика, химия, техника* 5 1543 (1992) [*Superconductivity: Phys., Chem., Technol.* 5 1505 (1992)]
52. Meissner W.Z. *Ges. Kaltenindustr.* 34 197 (1927)
53. Burton E.F., Smith G.H., Wilhelm J.O. *Phenomena at the Temperature of Liquid Helium* (American Chemical Society: Monograph Ser., No. 83) (New York: Reinhold Publ. Corp., 1940)
54. Gorter C.J., Casimir H. *Phys. Z.* 35 963 (1934)
55. Гинзбург В.Л., Жарков Е.Ф. *УФН* 125 19 (1978) [*Sov. Phys. Usp.* 21 381 (1978)]
56. Selzer P.M., Fairbank W.M. *Phys. Lett. A* 48 279 (1974)
57. Гинзбург В.Л., Жарков Е.Ф. *Письма в ЖЭТФ* 20 658 (1974) [*JETP Lett.* 20 302 (1974)]
58. Еальперин Ю.М., Еуревич В.Л., Козуб В.Н. *ЖЭТФ* 66 1387 (1974) [*Sov. Phys. JETP* 39 680 (1974)]
59. Garland J.C., Van Harlingen D.J. *Phys. Lett. A* 47 423 (1974)
60. Van Harlingen D.J. *Physica B + C* 109-110 1710 (1982)
61. Арутюнян Р.М., Гинзбург В.Л., Жарков Е.Ф. *ЖЭТФ* 111 2175 (1997) [*JETP* 84 1186 (1997)]; *УФН* 167 457 (1997) [*Phys. Usp.* 40 435 (1997)]
62. Galperin Y.M. et al. *Phys. Rev. B* 65 064531 (2002)
63. Гинзбург В.Л., Жарков Е.Ф., Собянин А.А. *Письма в ЖЭТФ* 20 223 (1974) [*JETP Lett.* 20 97 (1974)]; Ginzburg V L, Sobyenin A A, Zharkov G F *Phys. Lett. A* 87 107 (1981)
64. Гинзбург В.Л., Собянин А.А. *ЖЭТФ* 85 1606 (1983) [*Sov. Phys. JETP* 58 934 (1983)]
65. Еамцемлидзе Е.А., Мирзоева М.И. *ЖЭТФ* 79 921 (1980); 84 1725 (1983) [*Sov. Phys. JETP* 52 468 (1980); 57 1006 (1983)]
66. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ* 29 254 (1955) [*Sov. Phys. JETP* 2 170 (1956)]
67. Еамцемлидзе Е.А. *ЖЭТФ* 34 1434 (1958) [*Sov. Phys. JETP* 7 992
68. Гинзбург В.Л., Питаевский Л.П. *ЖЭТФ* 34 1240 (1958) [*Sov. Phys. JETP* 7 858 (1958)]

69. Гинзбург В.Л., Собянин А.А. *УФН* 120 153 (1976) [Sov. Phys. *Usp.* 19 773 (1976)]; Ginzburg V.L., Sobyenin A.A. *J. Low Temp. Phys.* 49 507 (1982)
70. Гинзбург В.Л., Собянин А.А. *УФН* 154 545 (1988) [Sov. Phys. *Usp.* 31 289 (1988)]; Ginzburg V L., Sobyenin A.A. *Jpn. J. Appl. Phys.* 26 (Suppl. 26-3) 1785 (1987)
71. Golder L.S., Mulders N., Ahlers G.J. *Low. Temp. Phys.* 93 131 (1992)
72. Pitaevskii L., Stringari S. *Bose-Einstein Condensation* (Intern. Series of Monographs on Physics, Vol. 116) (Oxford: Clarendon Press, 2003)
73. Zurek W.H. *Nature* 382 296(1996)
74. Питаевский Л.П. *ЖЭТФ* 35 408 (1958) [Sov. Phys. *JETP* 8 282
75. Мамаладзе Ю.Е. *ЖЭТФ* 52 729 (1967) [Sov. Phys. *JETP* 25 479 (1967)]; Mamaladze Yu.G. *Phys. Lett. A* 27 322 (1968)
76. Ginzburg V.L., Sobyenin A.A., in *Superconductivity, Superdiamagnetism, Superfluidity* (Ed. V.L. Ginzburg) (Moscow: MIR Publ., 1987) p. 242
77. Гинзбург В.Л. *УФН* 103 87 (1971) [Sov. Phys. *Usp.* 14 21 (1971)]



*Андрей Константинович Гейм*

*(1958 г.р.)*



## БИОГРАФИЯ<sup>58</sup>

Андрей Константинович Гейм родился в Сочи в 1958 г. Его отец, Константин Алексеевич, работал главным инженером электровакуумного завода в городе Нальчик. Мать, Нина Николаевна, была главным технологом. В 1975 г. Андрей окончил среднюю школу с золотой медалью и пытался поступить в Московский инженерно-физический институт, но потерпел неудачу на вступительных экзаменах. На следующий год ему все-таки удалось успешно сдать вступительные экзамены и попасть на факультет общей и прикладной физики Московского физико-технического института (МФТИ). Потерянный год, перед удачной попыткой поступления в МФТИ, Андрей Гейм провел, подрабатывая на Нальчикском электровакуумном заводе. В 1982 г. он окончил МФТИ с отличием, имея единственную «четверку» в дипломе по политэкономии социализма. После этого Гейм поступил в местную аспирантуру. А в 1987 году стал кандидатом физико-математических наук в Институте Физики Твердого Тела (ИФТТ) академии наук СССР.

Андрей Гейм работал научным сотрудником во многих известных учреждениях: ИФТТ РАН, Ноттингемском университете, Батском университете, Копенгагенском университете, Неймегенском университете. С 2001 г. Андрей Гейм работает в Манчестерском университете. Ныне он является руководителем Манчестерского центра по «мезонауке и нанотехнологиям», а также главой отдела физики конденсированного состояния.

Андрей Гейм также почетный доктор таких заведений, как Делфтский технический университет, Швейцарская высшая техническая школа в Цюрихе и Антверпенский университет. Носит почетное звание «профессор-исследователь Лэнгворзи», которое в свое время имели такие известные ученые, как Эрнест Резерфорд, Лоурэнс Брэгг и Патрик Блэкетт.

В настоящее время Андрей Гейм является гражданином королевства Нидерланды. Женат на Ирине Григорьевой, которая работает вместе с ним в лаборатории Манчестерского университета. У четы Геймов есть дочь.

---

<sup>58</sup> Андрей Гейм (1958). Биография [Электронный ресурс] // Нобелевская премия. Нобелевские лауреаты : [сайт]. – Москва, 2010–2019. – Режим доступа: <http://nobeliat.ru/laureat.php?id=834>.

В 2007 г. Британский Институт физики наградил Гейма медалью Мотта и премией за «открытие нового класса материалов – двумерных кристаллов, в частности графена». Также Андрей Гейм, совместно с Константином Новосёловым, получил престижную премию «Еврофизика» «за открытие и получение одноатомного слоя углерода (графена) с его удивительными свойствами».

В 2010 г. Андрей Гейм, вместе со своим учеником Константином Новосёловым, были удостоены Нобелевской премии по физике за «передовые опыты с двумерным материалом – графеном». Ученым удалось «продемонстрировать, что монослойный углерод обладает исключительными свойствами, которые проистекают из удивительного мира квантовой физики», отметили представители Нобелевского комитета.

Среди других достижений ученого – создание биомиметического адгезива, позже ставшего известным как «gecko tape» – суперклеякого вещества; а также эксперименты с диамагнитной левитацией. Интересно, что соавтором одной из статей Гейма о диамагнитной левитации был его любимый хомяк Тиша.

В 2000 г. Андрей Гейм вместе с сэром Майклом Берри из Бристольского университета получили Шнобелевскую премию в области физики «за использование магнитов для того, чтобы демонстрировать возможность левитации лягушек».

В 2012 г. Королева Великобритании Елизавета II присвоила рыцарское звание Андрею Гейму. Церемония посвящения Гейма состоялась 4 мая 2012 г., её провёл наследный принц Чарльз.

Летом 2014 г. ученые из Великобритании, Китая, США, Южной Кореи, России и Японии, в число которых входят нобелевские лауреаты Андрей Гейм и Константин Новоселов, открыли новые свойства графена, которые изменяют его проводимость. Работа ученых опубликована в журнале Nature Physics. Ученые научились изменять свойства энергетической щели у графена. Для этого авторы нанесли графен на слой «белого графита» – нитрида бора с графитоподобной гексагональной (узлы решетки заключены в правильный многоугольник) аллотропной модификацией. Исследователи обнаружили, что такая комбинация позволяет регулировани-

ем взаимных ориентаций направлений в кристаллических решетках менять ширину энергетической щели у графена. Это связано с тем, что подложка из нитрида бора вызывает деформацию графеновой решетки, в связи с чем меняются ее проводящие свойства. Физики выяснили, что при угле наклона между направлениями решеток графена и нитрида бора менее одного градуса структура решетки нитрида бора почти идентична графеновой. При этом угол между атомами углерода в самой графеновой решетке увеличился на 1,8 градусов, что привело к возникновению энергетической щели. При углах наклона между направлениями решеток графена и нитрида бора более одного градуса энергетической щели не возникало. Наложение двух кристаллических решеток позволило ученым в образованной гетероструктуре воспроизвести эффект муарового узора в виде бабочки Хофштедтера – фрактальной структуры, описанной в 1976 г. сыном нобелевского лауреата Роберта Хофштедтера Дугласом Хофштедтером, которая воспроизводит зависимость значений уровней энергии электрона от величины магнитного поля в двумерном кристалле.

В своей работе ученые исследовали различные комбинации образцов графена и подложек из нитрида бора, используя сканирующие зондовые (атомный силовой и туннельный) и рамановскую методы спектроскопии. Энергетическая щель (запрещенная зона) – интервал энергий, в котором в идеальном кристалле, согласно квантовомеханической теории движения электронов в твердом теле, не могут находиться электроны. Такая щель отвечает интервалу между валентной зоной и зоной проводимости в кристалле. В графене ширина этой щели равна нулю, введением подложки из нитрида бора физикам удалось деформировать кристаллическую решетку графена и тем самым создать ненулевую энергетическую щель, которая позволяет менять свойства проводимости графена – в том числе и отключать ее. Ранее ученые также исследовали различные свойства графена на подложках из нитрида бора, однако в своей работе авторы впервые обнаружили зависимость таких свойств от угла взаимной ориентации направлений кристаллических решеток. Работа физиков открывает новые возможности в использовании графена в электронной промышленности.

## СЛУЧАЙНЫЕ БЛУЖДЕНИЯ: НЕПРЕДСКАЗУЕМЫЙ ПУТЬ К ГРАФЕНУ<sup>59,60</sup>

*Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2010 г.*

### 1. Введение

Всякий, кто захочет понять красоту физики графена, будет иметь огромный выбор среди множества уже имеющихся научных обзоров и научно-популярной литературы. Я надеюсь, что читатель простит меня, если для этого я отошлю его к своим собственным работам [1–3]. Вместо того чтобы повторяться в этой лекции, я решил описать мой извилистый научный путь, который, в конце концов, привёл меня к Нобелевской премии. Большая часть этой истории нигде не излагалась и продолжалась она с 1987 г., когда я защитил кандидатскую диссертацию, и до того момента, как была принята к публикации наша статья 2004 г., впоследствии признанная Нобелевским комитетом. Как и можно ожидать, количество событий и объяснений в этой истории увеличивается к её концу. Кроме того, эта лекция включает детальное описание работ, имеющих отношение к графену, но сделанных до 2004 г., и я пытаюсь проанализировать причину того, что графен привлёк к себе столько внимания. Насколько это было возможно, я старался сделать свой рассказ не просто информативным, но и легко читаемым, даже для людей, далёких от физики.

### 2. Особенности национальной науки<sup>61</sup>

Темой моей кандидатской диссертации было «Исследование механизмов транспортной релаксации в металлах методом геликонного резонанса». Всё, что я могу сказать – это то, что и в то время эта тема была столь же «актуальной», сколь «актуальной» звучит она и для сегодняшне-

<sup>59</sup> Название лекции в английском оригинале "Random walk to graphene" (*примеч. ред.*)

<sup>60</sup> Гейм, А.К. Случайные блуждания: непредсказуемый путь к графену : нобелевская лекция, Стокгольм, 8 декабря 2010 г. / А.К. Гейм // Успехи физических наук. – 2011. – Т. 181, № 12. – С. 1284–1298.

<sup>61</sup> В английском оригинале название этого раздела "Zombie management": от "zombie" – "живой мертвец" на языке колдунов африканских племён (*примеч. ред.*)

го читателя. Я опубликовал в журналах пять статей и уложился с защитой кандидатской диссертации в пять лет – официально отводимый срок на аспирантуру в нашем Институте физики твёрдого тела РАН. *Web of Science* беспристрастно отмечает, что статьи были процитированы дважды, да и то только соавторами. Тема была мертва уже за десять лет до того, как я начал работать над диссертацией. Однако «нет худа без добра», и что я чётко уяснил для себя из той истории, это то, что я никогда не буду мучить студентов, навязывая им «мёртвые» проекты.

После защиты диссертации я работал в Институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН в Черноголовке. Советская система позволяла и даже поощряла молодых сотрудников выбирать свои пути в науке. После года пробных экспериментов в различных направлениях я отошёл от тематики своего бывшего научного руководителя в аспирантуре Виктора Петрашова и начал создавать собственную нишу. Я придумал экспериментальную систему, которая была нова и в то же время могла быть реально сделана в тогдашних условиях; это, учитывая скудность ресурсов в советских научно-исследовательских институтах, был, можно сказать, оксюморон<sup>62</sup>. Я сделал сэндвич из тонкой металлической плёнки и сверхпроводника, разделённых тонким изолятором. Сверхпроводник служил только для концентрации внешнего магнитного поля в области вихрей Абрикосова, и возникающее сильно неоднородное магнитное поле действовало на исследуемую плёнку. Поведение электронов проводимости в микроскопически неоднородных полях, меняющихся на субмикронном уровне, представляло собой неосвоенную территорию. Я опубликовал свой первый экспериментальный результат на эту тему [4], за которым вскоре независимо последовала статья Саймона Бендина (Simon Bending) [5]. Это было интересное и актуальное направление для исследований, так что я продолжал заниматься этим несколько последующих лет, включая работу с Саймоном в университете города Бат (University of Bath, Великобритания), где я находился в 1991 г. в качестве постдока.

---

<sup>62</sup> Оксюморон (от греч. – «острая глупость») – термин античной стилистики, обозначающий нарочитое сочетание противоположных понятий («Литературная энциклопедия»)

Этот опыт преподавал мне важный урок: создание принципиально новой экспериментальной системы в целом более выигрышно, чем попытки искать новые явления в уже известных областях. Шанс на успех в новых областях гораздо выше. Конечно, фантастические результаты, на которые надеешься, не всегда реализуются, зато в процессе создания нового неизбежно появляется что-то оригинальное.

### 3. Что одному мусор, то другому золото

В 1990 г., благодаря директору моего института в Черноголовке Виталию Аристову, я получил шестимесячную стипендию от Британского Королевского общества, которая позволяла мне поработать в одном из английских университетов. Лоренц Ивс (Laurence Eaves) и Питер Мейн (Peter Main) из университета в Ноттингеме любезно согласились принять меня в качестве визитёра. Шесть месяцев – это очень короткий срок для экспериментальной работы, и обстоятельства предполагали, что я буду заниматься только изучением экспериментальных систем, уже имеющихся в лаборатории принимающей стороны. В моём распоряжении была субмикронная проволока (одномерная структура) из арсенида галлия, оставшаяся от предыдущих экспериментов, завершившихся на несколько лет ранее. В тех условиях мой опыт работы в бедствующих лабораториях советской Академии наук оказался полезным. Образцы, которые мои боссы считали отработанными и практически бесполезными, для меня представлялись золотыми жилами, и я начал работать с ними по 100 часов в неделю. В результате этого короткого визита появились две статьи вполне приличного качества в *Phys. Rev. Letters* [6; 7]. Я часто поддразниваю своих молодых коллег этой историей. Когда дела идут не по плану и они начинают жаловаться, то я подстёгиваю их, разъяняя, что «нет такого понятия, как плохой образец, а есть только плохой студент или аспирант». Ищите внимательней и всегда найдёте что-то новое. Конечно, лучше избежать подобного жизненного опыта и осваивать новые территории, но даже если повезёт настолько, что удастся найти такой уникальный объект исследования, как графен, то и в этом случае дотошность и настойчивость позволят достичь успеха гораздо быстрее.

Темп исследований в Ноттингеме был столь стремительным и одновременно вдохновляющим, что возвращение в Россию было невыносимым. Возвращение к советской действительности для меня казалось равноценным растрачиванию впустую остатка моей жизни. Так, в тридцать три года, с индексом Хирша<sup>63</sup>  $h = 1$  (последние работы тогда ещё в печати не появились), я вышел на западный рынок труда для постдоков. Последующие четыре года я переезжал с места на место между различными университетами: из Ноттингема в Копенгаген, потом в Бат, потом обратно в Ноттингем. Каждый переезд позволял ознакомиться с одной или с двумя новыми идеями, что существенно расширяло мои исследовательские горизонты. В широком смысле физику, которой я тогда занимался, можно назвать мезоскопией. Это включало в себя такие объекты и явления, как (назову только некоторые из них): двумерный электронный газ (ДЭГ), квантовые точечные контакты, резонансное тунелирование и квантовый эффект Холла (КЭХ). Вдобавок я ознакомился с GaAlAs-гетероструктурами, выращенными с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), улучшил свои навыки в области микротехнологии и технологии микроструктур, электроннолучевой литографии – технологий, которые я начинал осваивать в России. Всё это сошлось воедино и создало основу для успешной работы с графеном спустя 10 лет.

#### 4. Голландский комфорт<sup>64</sup>

К 1994 г. я уже имел достаточное количество хороших публикаций и посетил достаточно конференций для того, чтобы претендовать на штатную университетскую должность. Когда мне предложили должность доцента в университете Неймегена (University of Nijmegen, Netherlands), то я немедленно ухватился за эту возможность получить, наконец, некую стабильность в моей постсоветской жизни. Первоочередной задачей в Неймегене было, конечно, упрочить свои позиции. Но для продолжения моих

---

<sup>63</sup> Индекс Хирша (*h*-индекс) – наукометрический показатель, предложенный в 2005 г. американским физиком Хорхе Хиршем из университета Сан-Диего, Калифорния. Индекс Хирша является количественной характеристикой продуктивности учёного: индекс равен  $h$ , если у этого учёного есть  $h$  статей с цитируемостью выше  $h$  (*примеч. ред.*)

<sup>64</sup> Dutch comfort – имеет смысл: могло быть и хуже (*примеч. перев.*)

прежних исследований не было ни технологического оборудования, ни начального финансирования. Из имеющихся ресурсов у меня был доступ к магнитам, криостатам и электронному оборудованию в Неймегенской лаборатории сильных магнитных полей (Nijmegen's High Field Magnet Laboratory), руководимой Яном Кис Мааном (Jan Kees Maan). Он же был моим формальным боссом и ответственным за расходование денежных средств. Даже когда я выигрывал гранты (пока я жил там, голландский фонд Dutch Funding Agency FOM был щедр ко мне), то я, хотя и являлся руководителем проекта, не мог тратить деньги по своему усмотрению! Все средства распределялись через так называемые «рабочие группы», возглавляемые штатными профессорами. Кроме того, в Голландии формально только штатные профессора могли руководить аспирантами. Возможно, многим покажется всё это странным, но такова была голландская университетская система 1990-х гг. Это было трудное для меня время. В течение двух-трёх лет я пытался приспособиться к этим условиям, сильно контрастирующим со счастливыми и продуктивными годами, проведёнными в Ноттингеме. К тому же ситуация была в какой-то мере сюрреалистическая, так как за пределами университетских стен я чувствовал сердечную теплоту и доброжелательность, исходящую от каждого вокруг, включая Яна Киса и других профессоров.

Тем не менее условия для исследователей в Неймегене были гораздо лучше, чем в России и, в конечном счёте, позволяли выжить в научном плане: спасибо «загранице»! Ноттингенские коллеги (именно Мохамед Хенини – Mohamed Henini) прислали мне ДЭГ-образцы, которые были переправлены в Черноголовку, где Сергей Дубонос, мой близкий друг и коллега с 1980-х годов, изготовил всё, что мне требовалось. Направление исследований, к которому я, в конце концов, пришёл и на котором впоследствии сконцентрировался, можно определить как мезоскопическую сверхпроводимость. Сергей и я использовали структуры с холловской геометрией микронных размеров, изготовленные из ДЭГ-образцов, для локального анализа магнитного поля вокруг малых сверхпроводящих объектов. Это позволяло измерять их намагниченность с точностью, достаточной не только для наблюдений за движением отдельных вихрей, но и наблюдать



множество гораздо более тонких эффектов. Это была новая экспериментальная ниша, которую можно было "заполнить" благодаря развитию оригинальной методики баллистической холловской микромагнетометрии [8]. Последующие несколько лет мы осваивали эту нишу и опубликовали несколько статей в *Nature* и *Phys. Rev. Letters*. Статьи содержали результаты по парамагнитному эффекту Мейснера, по вихрям, несущим дробный поток, по конфигурации вихрей в ограниченном пространстве и т.д. Моя супруга, Ирина Григорьева, специалист по физике вихрей [9], не могла найти работу в Голландии, а потому имела достаточно времени, чтобы помогать в продвижении моих исследований и в написании статей. Так же и Сергей. Он не только изготавливал образцы, но во время своих визитов в Неймеген помогал в проведении измерений. У нас сложилась очень продуктивная система работы, когда он собирал данные, а я анализировал их в течение часа на компьютере в соседнем кабинете и потом решал, что надо бы сделать дальше.

### 5. Награда за легкомыслие

Первые результаты по мезоскопической сверхпроводимости начали появляться в 1996 г. Это позволило мне почувствовать себя увереннее в голландской академической среде и одновременно стимулировало интерес к другим вещам. Я стал искать новые области для исследований. Самой значимой частью из имеющегося в Неймегене оборудования были мощные электромагниты. Они же были и самой большой головной болью. Магниты обеспечивали поля до 20 Тл, что, хоть и не намного, но больше, чем те 16–18 Тл, которые достигались с помощью сверхпроводящих магнитов многими нашими конкурентами. С другой стороны, наши электромагниты так дорого обходились в эксплуатации, что мы могли включать их только на несколько часов по ночам, когда электричество было дешевле. До этого я не пользовался электромагнитами, так как мои работы по мезоскопической сверхпроводимости требовали очень слабых полей ( $< 0,01$  Тл). Такое положение вещей создавало во мне ощущение некой вины, и я считал себя обязанным предложить какие-нибудь эксперименты, которые оправдывали бы само наличие у нас электромагнитов. Единственное преимущество,

которое я в них видел, – это комнатная температура в зазорах. Такое положение часто рассматривают как сильный недостаток, поскольку исследования в физике конденсированного состояния требуют низких, гелиевых, температур. Противоречие подсказывало мне, как и моим коллегам, что надо бы поразмыслить об эффектах сильного поля при комнатных температурах. К сожалению, выбор у нас был небольшой.

В конце концов, я наткнулся на загадку так называемой магнитной воды. Считается, что если поместить ёмкость с горячей водой внутрь небольшого магнита, то это предотвратит образование осадка в ёмкости. Или, что если установить такой магнит на водопроводный кран, то чайник никогда не будет «зарастать» известковыми отложениями. В продаже имеется большое разнообразие таких магнитов. Кроме того, имеются сотни статей об этом явлении, но физика вопроса оставалась неясной, так что многие учёные скептически относились к самому существованию эффекта [10]. За последние пятнадцать лет я сделал несколько безрезультатных попыток исследовать «магнитную воду», так что прояснить ситуацию мне не удалось. Однако наличие сверхсильных полей при комнатных температурах побуждало между делом снова подумать на эту тему. Если магнитная вода действительно существует, думал я, то эффект должен лучше проявляться на 20 Тл, чем на типичных полях менее 0,1 Тл, создаваемых стандартными магнитами.

С такими мыслями, согласно легенде, в пятницу вечером, я налил воду в институтский электромагнит, когда тот был включён на максимальную мощность. Наливать воду в чей-либо прибор, очевидно, не есть правильный научный подход, и я не помню, почему я действовал тогда так «непрофессионально». Очевидно также, что до этого никто и не пытался проделать такую глупую вещь, хотя похожее оборудование десятилетиями имелось в различных местах по всему миру. К моему удивлению, вода не стекла на пол, а зависла в середине зазора магнита. Умберто Кармона (Humberto Carmona), приглашённый из Ноттингема аспирант, и я игрались с водой в течение часа, разбивая водяную пробку деревянной палочкой и изменяя напряжённость поля. В результате мы увидели шарики парящей в воздухе воды (рис. 1). Это было потрясающе! Сразу было понятно, что фи-

зика здесь – старый добрый диамагнетизм. Гораздо больше времени ушло на осознание того факта, что ничтожная магнитная восприимчивость воды ( $\sim 10^{-5}$ ), в миллиарды раз меньшая, чем у железа, оказалась достаточной для компенсации земного притяжения. Многие коллеги, включая тех, кто всю жизнь работал с сильными магнитными полями, были ошеломлены, а некоторые даже настаивали на том, что это всего лишь розыгрыш.

Несколько последующих месяцев я демонстрировал левитацию коллегам и гостям, пытаюсь «на пальцах» объяснять это красивое явление. Фотография парящей в воздухе лягушки (рис. 1) стала особенно известной из всего множества объектов, которые мы заставляли парить в магнитном поле. Фото наделало много шума в СМИ, но, что более важно, изображение левитирующей лягушки нашло своё место во множестве учебников. Несмотря на свою «ненаучность», эта фотография стала символом вездесущего диамагнетизма, который больше не воспринимается как пренебрежимо малое и незначительное явление. Бывало так, что на конференциях кто-нибудь останавливал меня и восклицал «Я вас знаю! Извините, это не про графен. Свои лекции я начинаю с демонстрации вашей лягушки. Студентам всегда интересно понять, что заставляет её летать». История с лягушкой, вместе с довольно тонкой физикой, объясняющей устойчивость диамагнитной левитации, изложена в моём обзоре в *Physics Today* [11].

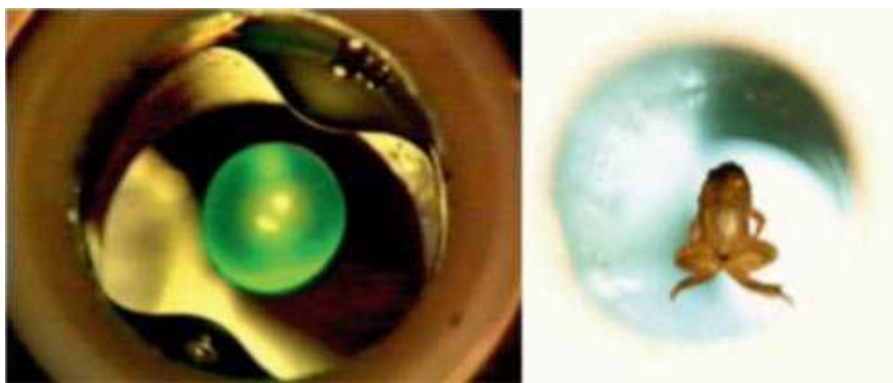


Рис. 1. Левитация в Неймегене. Слева – шарик воды (примерно 5 см в диаметре) свободно парит внутри вертикального отверстия электромагнита. Справа – лягушка, которую научили летать. Эта картинка продолжает оставаться символом того, что магнетизм «немагнитных веществ» не есть пренебрежимо малая величина. За этот эксперимент Майкл Берри (Michael Berry) и я получили Шнобелевскую премию в 2000 г.

Сначала нас спросили, отважимся ли мы принять эту премию, и я горжусь, что нам хватило чувства юмора и самокритичности согласиться

## 6. Понедельник начинается в пятницу вечером

История с левитацией была интересной и увлекательной. Она преподавала мне важный урок, что пробные эксперименты в направлениях, далёких от сиюминутных научных исследований, могут привести к интересным результатам, даже если изначальная идея была совсем незамысловатой. В свою очередь, это повлияло на стиль моей работы, так что я начал предпринимать похожие исследовательские туры, которые постепенно приобрели название «эксперименты в пятницу вечером». Термин, конечно, неточен. Серьёзную работу выполнить за один вечер невозможно. Как правило, она требует многих месяцев основательного обдумывания и перелопачивания гор не относящейся к делу литературы, и всё без особого прояснения проблемы. Со временем, скорее интуитивно, чем осознанно, начинаешь понимать, что надо делать. Потом пробуешь и, как правило, ошибаешься. Затем либо пробуешь снова, либо нет. В любом случае, в какой-то момент надо решить (и это самое трудное), продолжать ли дальнейшие попытки, или, для уменьшения потерь, начинать думать о другом эксперименте. Всё это происходит параллельно с основными исследованиями и занимает только незначительную часть времени и размышлений.

Ещё в Неймегене я начал использовать побочные, не основные идеи в качестве проектов для студентов и аспирантов. Им всегда нравится получить «кота в мешке». Костя Новосёлов, который приехал в Неймеген как аспирант в 1999 г., участвовал во многих таких проектах. Они никогда не продолжались более нескольких месяцев, чтобы не подвергнуть риску диссертационную работу или карьерный рост. Впоследствии некоторые студенты признавались, что тот опыт оказался для них бесценным, хотя энтузиазм неизбежно иссякал, когда ожидаемый результат не получался.

Самое удивительное то, что далеко не все такие проекты заканчивались неудачей. Один из таких примеров – гекко-лента. Случайно или нет, я прочёл статью, разъясняющую механизм, лежащий в основе удивительной способности ящериц-гекконов преодолевать вертикальные препятствия [12]. Физика довольно проста. Лапки гекконов покрыты крошечными волосками. Каждый волосок прилипает к поверхности, испытывая не-

большое ван-дер-ваальсово взаимодействие порядка нескольких наноНьютонов. Однако миллиарды таких волосков, действуя совместно, создают внушительное притяжение, достаточное для удержания гекконов на любой поверхности, даже на зеркальном потолке. Особенно привлекли моё внимание размеры волосков. Они оказались субмикронными в диаметре – типичный размер в мезоскопической физике. Обыгрывая эту идею, примерно через год мы с Сергеем Дубоносом нашли способ изготовления материала, подобного волосатой лапке геккона. Он изготовил квадратный сантиметр ленты, которая демонстрировала великолепную способность прилипать к поверхности (адгезию) [13]. К сожалению, этот материал не оказался столь же эффективным, как лапка геккона, и полностью терял свои свойства после нескольких прилипаний. Тем не менее это был знаковый эксперимент, доказавший правильность концепции и стимулировавший дальнейшую работу в этом направлении. Вполне возможно, что кому-то как-нибудь удастся найти способ воспроизвести иерархическую структуру щетинок гекконов и механизм их самоочистения. Тогда гекко-лента сможет появиться в продаже.

## **7. Новые ошибки лучше старого занудства**

Готовясь к своей лекции в Стокгольме, я составил список наших пятничных экспериментов. Тогда только я осознал любопытную вещь. За период примерно в пятнадцать лет проведено около двух дюжин экспериментов и, как и ожидалось, большинство из них бесславно провалилось. Но среди них оказались три хита: левитация, гекко-лента и графен. Таким образом, степень эффективности получилась довольно высокой: свыше 10%. Более того, по-видимому, имели место и близкие к удаче случаи – почти что удачи. Например, как-то я прочёл статью [14] о гигантском диамагнетизме сплавов FeGeSeAs, что интерпретировалось как признак наличия высокотемпературной сверхпроводимости. Я попросил авторов [14] прислать образцы и вскоре их получили. Костя и я с помощью баллистической холловской магнитометрии проверили наличие гигантского диамагнетизма, но ничего не обнаружили, даже при 1 К. Это было в 2003 г., задолго до открытия сверхпроводников на основе ферропниктидов. Я до

сих пор сомневаюсь, были ли там какие-либо небольшие включения сверхпроводящего материала, которые мы упустили при нашем подходе. Другая неудача, близкая к удаче, была связана с попыткой обнаружить «сердцебиение» отдельной живой клетки. Идея заключалась в использовании ДЭГ – «холловских крестов» – в качестве сверхчувствительных электродов для регистрации электрических сигналов, порождаемых физиологической активностью отдельных клеток. Никаких «сердцебиений» у живых клеток мы не обнаружили, но когда клетки подвергались воздействию большой дозы спирта, то на их «последнем вздохе» наши сенсоры регистрировали значительные всплески напряжения [15]. Сейчас я связываю такой результат с не совсем удачным выбором объекта исследования – дрожжевых клеток. Это очень пассивный микроорганизм. Четыре года спустя похожие эксперименты были проделаны над эмбриональными клетками сердца и (надо же!) с использованием графеновых сенсоров. Эти эксперименты [16] уже успешно зарегистрировали биоэлектрическую активность, которую искали мы.

Откровенно говоря, я не думаю, что обозначенная выше степень эффективности может быть объяснена тем, что мои побочные идеи были особенно хороши. Скорее всего, этот опыт говорит о том, что штурм новых направлений в исследованиях, пусть даже выбранных случайным образом, вознаграждается гораздо чаще, чем это принято считать. Возможно, что мы копаем слишком глубоко на уже хорошо освоенных территориях, оставляя в других местах много интересного прямо у поверхности, где для успеха достаточно копнуть только один раз. Если кто и осмелится это сделать, то награда совсем не гарантирована. Тем не менее это, как минимум, полезный опыт.

### **8. Наука по-манчестерски**

К 2000 г., имея за плечами мезоскопическую сверхпроводимость, диамагнитную левитацию и четыре статьи в *Nature*, я имел основания претендовать на должность полного профессора. Коллеги были очень удивлены, что я выбрал университет в Манчестере, проигнорировав ряд, на первый взгляд, более привлекательных предложений. Причина была проста. Руководитель конкурсного комитета Майк Мур (Mike Moore) знал мою

жену Ирину не столько как моего соавтора и, по совместительству, преподавателя-лаборанта в Неймегене, сколько как очень успешного постдока в Бристоле. Он предложил Ирине идею подать на лекторскую позицию, которая открылась в той же группе. После шести лет в Голландии даже сама мысль о том, что муж и жена могли бы официально работать вместе, не приходила мне в голову. Этот фактор был решающим. Нам не только понравилась возможность упорядочить наши совместные карьерные дела, но ещё мы были тронуты заботой о нас со стороны будущих коллег. Никогда мы не сожалели о переезде.

Так, в начале 2001 г. я взял под свою ответственность несколько запущенных помещений с ветхим и бесполезным оборудованием и начал работу с гранта на 100 тыс. фунтов стерлингов. За исключением гелиевого ожижителя, никакого существенно значимого оборудования, которое я мог бы использовать, не было. Не беда. Я пошёл тем же путём, что и в Неймегене, используя помощь из других мест, особенно от Сергея Дубоноса. Лаборатория стала развиваться на удивление быстро. В течение полугода я получил свой первый грант на 500 тыс. фунтов, что позволило обзавестись значительным оборудованием. Несколькими месяцами позже, несмотря на заботы о нашей годовалой дочке, Ирина тоже получила свой первый грант. Мы пригласили Костю присоединиться к нашей группе в качестве приглашённого исследователя (формально он продолжал числиться аспирантом в Неймегене, где и защитил диссертацию в 2004 г.). И наша группа начала выдавать результаты, приводившие к грантам, которые, в свою очередь, приводили к ещё большему количеству результатов.

К 2003 г. мы опубликовали несколько добротных статей, в том числе в *Nature*, *Nature Materials* и *Phys. Rev. Letters*, одновременно продолжая усиливать лабораторию новым оборудованием. Кроме того, при поддержке гранта на 1,4 млн фунтов от фонда развития научной инфраструктуры, управляемого тогдашним министром по науке Дэвидом Сейнсбери (David Sainsbury), Эрни Хилл (Ernie Hill) из Департамента компьютерных исследований и я организовали Манчестерский центр мезонауки и нанотехнологий (Manchester Centre for Mesoscience and Nanotechnology). Вместо того чтобы вливать неожиданно свалившиеся средства в новое строительство,

мы использовали уже существующие чистые комнаты (~ 250 м<sup>2</sup>). В этих помещениях находилось устаревшее оборудование, которое мы выбросили и заменили самыми современными установками для микроконструирования, включая новую установку электроннолучевой литографии. Предметом нашей с Эрни особой гордости является то обстоятельство, что многие исследовательские группы по всему миру имеют гораздо более дорогостоящее оборудование, но наш Центр непрерывно, начиная с 2003 г., выдаёт новые результаты. Здесь нет великолепного коня для показов, а есть рабочая лошадь для действительно напряжённой работы.

Когда я рассказываю заграничным коллегам об этом нашем опыте, им трудно представить, что, в принципе, возможно организовать полностью функционирующую лабораторию и действующие системы для микроконструирования за период меньший, чем три года, и без стартовых грантов астрономических масштабов. Я бы и сам в это не поверил, если бы не мой собственный опыт. Дела продвигались невероятно быстро. Университет помогал, но я особенно благодарен фонду Британского научного совета по инженерным и физическим исследованиям (the UK Engineering and Physical Sciences Research Council – EPSRC). Эта система финансирования проектов демократична и лишена ксенофобии. Статусу в академических кругах, так же как и связям, не придаётся большого значения. Кроме того, при рецензировании проектов ссылки на «многообещающие идеи» или заверения, что грант будет ориентирован на «социальные и экономические потребности», играют незначительную роль. На деле, фонд распределяет деньги на основе последних достижений заявителя соответственно тому, что под этим понимается в различных областях науки. Деньги, как правило, идут тем, кто работает усердно и эффективно. Конечно, совершенной системы финансирования не существует, и всегда можно представить себе нечто лучшее. Но, перефразируя Уинстона Черчилля, Британия имеет худшую систему поддержки науки, за исключением всех остальных систем, которые я знаю.



## 9. Три мысленных облачка

По мере формирования нашей лаборатории и Центра нанотехнологий у меня появилось немного свободного времени поразмышлять о новых путях в исследованиях. Гекко-лента, неудача с дрожжевыми клетками, квазипниктиды – всё это происходило именно в то время. Кроме того, Сергей Морозов – старший научный сотрудник из Черноголовки, который впоследствии стал регулярным гостем и бесценным сотрудником, растратил свои первые два визита на изучение магнитной воды. Осенью 2002 г. прибыл наш первый манчестерский аспирант, Да Цзян (Da Jiang), и мне нужно было придумать для него тему диссертации. Было ясно, что первые несколько месяцев ему будет необходимо изучать английский язык и ознакомиться с лабораторией. Соответственно для начала я предложил ему очередной «побочный» эксперимент. Задача состояла в том, чтобы изготовить плёнку из графита настолько тонкую, насколько это возможно. Если получится, то я обещал, что мы будем изучать её «мезоскопические» свойства. Недавно, пытаясь проанализировать, как всплыла такая идея, я вспомнил о трёх едва очерченных в мыслях «облаках».

Первое «облачко» – это концепция «металлической электроники». Если к металлу приложить внешнее электрическое поле, то число носителей заряда у его поверхности меняется, так что можно ожидать, что его поверхностные свойства тоже изменятся. На этом и работает современная полупроводниковая электроника. Почему бы не попробовать металл вместо кремния? Будучи студентом, я думал о том, как использовать эффект электрического поля (ЭЭП) и рентгеноструктурный анализ для воздействия на образец и определения того, как изменится при этом постоянная решётки. Это было весьма наивно, так как простые оценки показывают, что эффект был бы пренебрежимо малым. Действительно, нет диэлектриков, допускающих поля, существенно превышающие  $1 \text{ В нм}^{-1}$ , что соответствует максимальному изменению концентрации носителей заряда  $n$  у поверхности металла порядка  $10^{14}$  на  $\text{см}^2$ . Для сравнения, типичный металл (например Au) содержит  $\sim 10^{23}$  электронов на  $\text{см}^3$ , что даже для плёнки толщиной 1 нм приводит к относительному изменению величины  $n$  и

проводимости на  $\sim 1\%$ , не говоря уже о гораздо меньшем изменении постоянной решётки.

Многие исследователи и раньше стремились обнаружить эффекты внешнего поля в металлах. Первое упоминание относится к 1902 г., когда вскоре после открытия электрона Дж.Дж. Томсон (Нобелевский лауреат по физике, 1906 г.) предложил Чарльзу Мотту (Charles Mott), отцу Невилла Мотта (Nevill Mott, Нобелевский лауреат по физике, 1977 г.), поискать ЭЭП в тонкой металлической плёнке, но ничего обнаружено не было [17]. Первая попытка измерить ЭЭП в металлах, описанная в научной литературе, относится к 1906 г. [18]. Вместо нормального металла можно было бы поразмышлять о полуметаллах, таких как висмут, графит или сурьма, которые имеют гораздо меньше носителей. В течение всего предыдущего столетия многие исследователи использовали плёнки Вi ( $n \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), но обнаружили лишь незначительные изменения в их проводимости [19; 20]. Будучи осведомлённым об исследованиях в этой области и в области гетероструктур GaAlAs, я всё время, хотя и нерегулярно, искал других кандидатов, особенно среди сверхтонких плёнок сверхпроводников, в которых эффект внешнего поля мог бы возрасти вблизи перехода в сверхпроводящее состояние [21; 22]. Мой энтузиазм разгорелся, когда ещё в Неймегене я узнал о нанометровых Al-плёнках, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на GaAlAs-гетероструктурах. Однако после оценок возможных эффектов я решил, что шансы на успех малы и даже не стоит пробовать.

Углеродные нанотрубки были вторым «облачком», витавшим в воздухе в конце 1990-х и начале 2000-х гг. Это были годы пика их популярности. В Голландии я слышал выступления Сиза Деккера (Cees Dekker) и Лео Коувенховена (Leo Kouwenhoven), а также прочёл статьи Томаса Эббесена (Thomas Ebbesen), Пола МакЕуна (Paul McEuen), Сумио Ижимы (Sumio Iijima), Фидона Авориса (Pheadon Avornis) и других. Всякий раз эти блестящие работы неизбежно побуждали начать исследования в этой области. Но было уже слишком поздно, и нужно было находить новые перспективы в стороне от общего потока.

Что касается третьего облака, то я прочёл обзор Милли Дрессельхаус (Millie Dresselhaus) об интеркалированном графите [23], который ясно показал, что даже спустя много десятилетий графит остаётся малопонятным материалом, особенно с точки зрения его электронных свойств. Этот полезный обзор побудил меня поглубже покопаться в литературе по графиту. Так я наткнулся на статьи Пабло Эсквинази (Pablo Esqrnazi) и Якова Копелевича (Yakov Korelevich), которые писали о ферромагнетизме, сверхпроводимости и переходах металл–диэлектрик – всё в том же старом добром графите и при комнатных температурах [24; 25]. Эти провоцирующие работы оставили во мне чёткое ощущение того, что графит заслуживает особого к себе внимания.

Все три (может быть, и больше, я уже не помню) облачка в моих мыслях так или иначе сошлись в проекте Да Цзяна. Я просчитал, что если нам повезёт и вместо  $V_i$  удастся создать тонкие плёнки из графита, то в них уже смогут проявиться эффекты электрического поля и/или некоторые другие интересные свойства, похожие на те, что имеются у углеродных нанотрубок. При наихудшем сценарии, поскольку наши мезоскопические образцы представляли бы собой монокристаллы, это помогло бы прояснить дискуссионные вопросы, касающиеся графита. Почему бы, хотя бы на несколько месяцев, не углубиться в этом направлении.

## 10. Легендарная липкая лента

Для изготовления тонких графитовых плёнок я дал Да Цзяну таблетку пиролитического графита толщиной в несколько миллиметров и диаметром два с половиной сантиметра и предложил ему использовать полировальную машину. У нас была специальная машина, обеспечивающая субмикронную точность. Через несколько месяцев Да заявил, что достиг предельной толщины и показал мне крошечный кусочек графита на дне чашки Петри. Я взглянул на графит в оптический микроскоп и оценил его толщину в  $\sim 10$  мкм. «Слишком толстый», – подумал я, и предложил попробовать полировальную жидкость. Однако, как оказалось, для получения этого образца Да уже отработал всю таблетку. На самом деле это была моя вина. Позже Да успешно завершил работу над своим PhD, но на тот

момент он был всего лишь начинающим иностранным студентом с огромным языковым барьером. Более того, по ошибке я дал ему образец высокоплотного графита вместо высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ). Первый не так-то просто шлифовался, как ВОПГ.

Олег Шкляревский, старший научный сотрудник из Харькова (Украина), работал рядом и вынужденно услышал весь ход моих поддразниваний, на сей раз о горе, которую следует шлифовать до размера песчинки. Олег был экспертом по сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и работал над проектом, который позже пополнил список моих не оправдавшихся идей из «ночей по пятницам». Он вмешался, принес с собой кусок скотча – самоклеящейся ленты с графитовыми чешуйками, которую он только что выудил из мусорной корзины. В самом деле, ВОПГ – это стандартно используемый материал для СТМ, где образец со свежей поверхностью обычно готовится путём отслаивания верхнего слоя графита с помощью липкой ленты. Мы годами использовали эту технику, но никогда внимательно не смотрели на то, что же мы выбрасываем вместе с лентой. Я посмотрел в микроскоп на остатки графита (рис. 2) и обнаружил фрагменты намного меньшей толщины, чем та, что была у Да. Только тогда я осознал, как это было неразумно с моей стороны – предложить полировальную машину. Полировка умерла, да здравствует скотч!

Этот момент ещё не означал прорыва, но ситуация уже выглядела обещающей и требовала вовлечения большего числа людей. Олег в тот момент не вызвался стать добровольцем и участвовать в ещё одном проекте, зато вызвался Костя. Слово «доброволец», возможно, не совсем точное. Каждый в нашей лаборатории имел возможности для манёвра и мог участвовать в любом проекте, который ему нравился. В то время Костя работал над хорошо продвигающимся проектом по ферромагнетизму [26]. Кроме того, он присматривал за оборудованием, особенно за измерительными приборами. Что касается меня, то я, как правило, по несколько часов в день проводил в лаборатории, готовя образцы, делая измерения и анализируя результаты. Только после 2006 г. я превратился в машину по написанию статей, параллельно с анализом результатов. Мне всегда нравилось

последнее, но я ненавижу писать статьи. К сожалению, ни одна лаборатория не выживет без своего Шекспира.

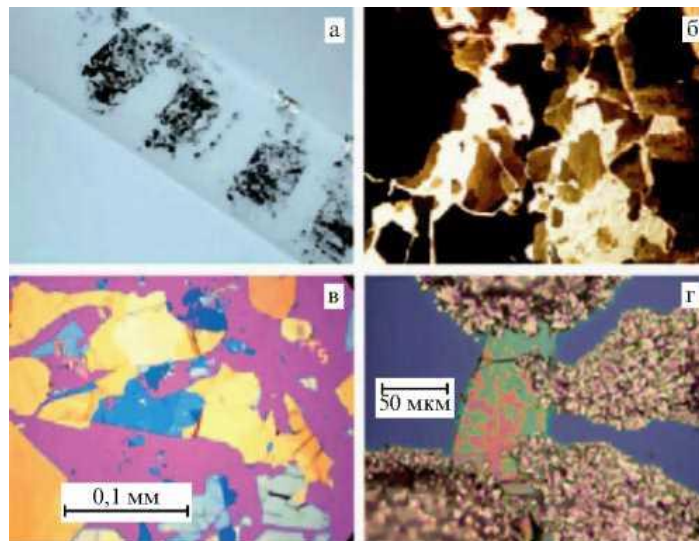


Рис. 2. (В цвете онлайн) Оборачиваясь назад: тонкие плёнки графита получить нетрудно. (а) Следы ВОПГ, оставшиеся на скотче. (б) Некоторые кристаллики оптически прозрачны, если взглянуть на них через оптический микроскоп или даже через увеличительное стекло. (в) На подложке из оксида кремния светопроницаемые кристаллики дают различные оттенки голубого цвета. (г) Одно из наших самых первых устройств, изготовленное с помощью «сургуча и верёвки»: в данном случае это пинцет, зубочистка и серебряная паста

Мы с Костей решили проверить электрические свойства графитовых чешуек, оставшихся на скотче, для чего он стал переносить их на предметное стекло микроскопа, вначале с помощью обычного пинцета. Через несколько дней, не забывая об изначальной идее (металлический транзистор), я принёс пластину кремния, покрытую тонким слоем оксида, чтобы использовать её в качестве подложки при измерении ЭЭП. Неожиданно это принесло плоды. Тонкие фрагменты (чешуйки) графита, помещённые на такие пластины, выглядели окрашенными в разные цвета вследствие интерференции, что указывало на то, что некоторые фрагменты оптически прозрачны. Более того, чешуйки разных цветов позволяли нам интуитивно судить о том, какие из них наиболее тонкие (рис. 2, в). Мы быстро обнаружили, что некоторые из чешуек были толщиной всего в несколько нанометров. Это был наш первый настоящий прорыв.

## 11. «Эврика!»

Литература по графену, особенно популярная, сильно подчеркивает роль методики, основанной на использовании скотча. Часто приходится слышать, что создание и идентификация сверхтонких графитовых плёнок, так же как и графена, стало возможным благодаря использованию липкой ленты. Для меня это было значительным шагом вперёд, но ещё не «Эврикой». Нашей целью всегда был поиск интересной физики, а не просто наблюдение ультратонких плёнок в микроскопе.

В течение пары дней после того, как Олег подсказал использовать скотч, Костя с помощью серебряной пасты уже изготавливал электрические контакты к графитовым плёнкам, перенесённым со скотча. К нашему удивлению, они обладали высокой проводимостью, а контакты на основе пасты имели приемлемо малое сопротивление. Электронные свойства изучать было уже можно, но нам казалось, что ещё слишком преждевременно помещать безобразно выглядящий образец (рис. 2, *г*) в криостат для точных измерений. В качестве следующего шага мы приложили напряжение, сначала к стеклянным подложкам, а чуть позже к кремниевой пластине, используя их в качестве нижнего затвора для проверки наличия эффекта внешнего электрического поля. Фотография одного из первых наших устройств показана на рис. 2, *г*. В центральной части находится кристалл графита толщиной  $\sim 20$  нм, а его поперечный размер соизмерим с диаметром человеческого волоса. Для того чтобы пинцетом перенести такой кристалл со скотча, а затем сделать четыре близко расположенных контакта с помощью всего лишь серебряной пасты и зубочистки, требуется высочайший уровень экспериментаторского мастерства. В наше время немногие экспериментаторы имеют пальцы, достаточно ловкие для того, чтобы изготовить такие образцы. Я призываю читателей опровергнуть мои слова, проверив свои собственные навыки!

В самом первом образце, сделанном вручную на стекле, ясно проявился ЭЭП, который заключался в том, что сопротивление образца можно было изменять на несколько процентов. Может показаться, что это незначительно, а значит, и маловажно, но вспомните, как трудно было ранее обнаружить вообще какой-либо ЭЭП. Я просто был шокирован. Если эти

безобразного вида устройства, сделанные вручную из относительно больших и толстых пластинок, уже демонстрируют некоторое влияние внешнего поля, то что будет, думал я, если мы начнём использовать самые тонкие кристаллы и применим весь арсенал технологического оборудования? В тот момент я понял, что мы наткнулись на что-то действительно потрясающее. Вот это и была моя «Эврика!»

То, что поледовало потом, не было уже случайным блужданием. С этого момента единственно логичным было продолжать держаться выбранного пути, улучшая методику отделения и поиска всё более тонких кристаллов, а также совершенствуя изготавливаемые нами конструкции. Это была кропотливая и одновременно невероятно быстро продвигающаяся работа – как посмотреть. Несколько месяцев ушло на то, чтобы научиться идентифицировать монослои с помощью оптического и атомно-силового микроскопов (АСМ). Что касается микроструктурирования, то для формирования подходящих структур с топологией холловского мостика мы начали применять электронно-лучевую литографию, а для изготовления контактов использовать не серебряную пасту, а напыление металла. Развитием техники микроконструирования (микроструктурирования) руководил Дубонос, ему помогал его аспирант Анатолий Фирсов. Сначала они использовали оборудование в Черноголовке, но после того как наш новый постдок Юань Чжан (Yuan Zhang) полностью освоила установку по литографии, недавно появившуюся в нашем Центре нанотехнологий, процесс существенно ускорился.

Переход от многослойных образцов к монослойным, а также переход от работы вручную к литографии концептуально весьма прост, но на практике не всегда гладок. Мы пробовали различные подходы и потратили много усилий на идеи, приводившие нас в тупик. Примером многообещающих планов, которым не суждено было реализоваться, была идея плазменного травления графитовой мезы в форме холловских мостиков, после расслоения которых можно было бы получить готовые структуры. Позже мы вынуждены были вернуться к графиту, не подвергавшемуся предварительной обработке. Болезни роста, которые мы тогда испытывали, можно проиллюстрировать также на таком примере. Вначале мы думали, что

кремниевые пластины должны иметь очень точно выверенную толщину оксидного слоя (в пределах нескольких нанометров), что позволило бы «поохотиться» за монослоями. Сегодня мы можем найти графен практически на любой подложке. Кроме того, путём перебора различных процедур и использования различных источников графита мы пришли к тому, что размеры используемых нами кристаллов выросли от нескольких микрометров до почти миллиметра.

Наиболее существенной частью нашей работы 2004 г. [27] были электрические измерения, и это потребовало больших усилий. В течение нескольких месяцев Костя и Сергей Морозов всё своё время проводили в измерениях. Я тоже находился рядом, обсуждая и анализируя результаты измерений, зачастую сразу после того, как данные появлялись на экране. Взаимодействие с ребятами-нанотехнологами было практически мгновенным. В тех первых экспериментах нам нужно было быть особенно осторожными. Так всегда бывает, когда сталкиваешься с чем-то новым и не знаешь, чего можно ожидать. Мы забраковывали любую кривую, пока она не воспроизводилась независимо на множестве образцов, и, во избежание преждевременных заключений, изучили более 50 сверхтонких образцов. Это были годы упорного труда, спрессованные всего в несколько месяцев, но мы воодушевлялись по мере того, как новые образцы становились всё совершеннее и совершеннее, так что мы могли работать 24×7, что на деле означало 14 часов в сутки без перерывов и выходных.

В итоге, к концу 2003 г. мы получили вполне надёжную экспериментальную картину, готовую к публикации. Между этим моментом и сентябрём 2004 г., когда наша статья в *Science* была, наконец, принята к публикации, получился длинный временной разрыв. Те девять месяцев прошли в изнурительных попытках опубликовать наши результаты в высокорейтинговом журнале. Содержание работы непрерывно пополнялось новыми результатами, и совершенствовался текст рукописи. В этом трудоёмком процессе помощь Ирины была бесценна. В полной мере всё это могут оценить только те читатели, которые когда-либо публиковались в подобных «глянцевых» журналах. Сначала мы отправили рукопись в *Nature*. Там её забраковали. Мы добавили информацию, которую требовали рецензенты,



но статью снова забраковали. Согласно одной из рецензий, наша рукопись «не содержит существенного научного достижения». Рецензенты *Science* оказались более великодушными (или более профессиональными?), кроме того, сама рукопись была к тому времени лучше подготовлена. Если вернуться назад, то мне, даже при том, что все мы чувствовали, что результаты работы являются весьма значимыми, наверное, следовало бы поберечь время и нервы и представить статью в журнал уровнем пониже. Эта история должна утешить тех читателей, которые стремились опубликоваться в подобных «глянцевых» журналах, но чьи статьи были забракованы: возможно, что эти статьи также заслуживают премии!

## 12. Существование вопреки

Самый удивительный экспериментальный результат нашей работы в *Science* – это то, что отдельные атомные плоскости обладают проводимостью и сохраняют свою целостность в свободном состоянии. Обращиваясь назад, можно сказать, что есть много причин этому удивляться.

Во-первых, учёные десятилетиями изучали сверхтонкие плёнки, и их общим заключением являлось то, что непрерывные атомные плоскости практически невозможно получить (см., например, [28; 29]). Попробуйте напылить металлическую плёнку толщиной в несколько нанометров, и вы увидите, что она не будет оставаться цельной. Вещество коагулирует в крошечные островки. Этот процесс, называемый островковым ростом, универсален и управляется стремлением системы минимизировать свою поверхностную энергию. Эпитаксиальные подложки обеспечивают взаимодействие, снижающее влияние поверхностной энергии. Однако даже при гелиевых температурах, предотвращающих миграцию осаждённых атомов, трудно создать условия, благоприятные для получения непрерывных слоёв нанометровой толщины, не говоря уже о монослоях [28; 29].

Вторая причина удивляться – это то, что теория определённо учит нас, что изолированный графеновый лист должен быть нестабилен термодинамически. Расчёты показывают, что «в пределах 6000 атомов графен представляет собой наименее (относительно) стабильную (углеродную) структуру» [30]. До ~ 24000 атомов (это соответствует размеру в ~ 25 нм)

различные 3D конфигурации энергетически более выгодны, чем 2D геометрия [30; 31]. Теория опять-таки показывает, что при больших размерах графеновый лист нестабилен, но теперь уже по отношению к свёртыванию. К такому заключению приводит рассмотрение конкурирующих вкладов изгиба и поверхностной энергии [32; 33]. Эти расчёты относились к углероду, но в основе их лежит физика, которая концептуально связана с механизмом поверхностной энергии, приводящим к островковому росту.

В-третьих, 2D кристаллы не могут быть выращены в изоляции, без эпитаксиальной подложки, которая обеспечивает дополнительную атомную связь. Это следует из аргументов Ландау–Пайерлса, которые показывают, что в 3D пространстве плотность термодинамических флуктуаций в 2D кристаллах расходится с ростом температуры [1]. Хотя эта расходимость всего лишь логарифмическая, рост кристалла, как правило, требует высокой температуры, достаточной для обеспечения подвижности атомов. Это приводит к несколько менее жёсткой решётке. Комбинация двух условий даёт ограничения на возможные размеры  $L$  у 2D атомных кристаллов. Можно оценить величину  $L$  как  $\sim a \exp(E/T_g)$ , где  $a \sim 1 \text{ \AA}$  – постоянная решётки,  $E \sim 1 \text{ эВ}$  – энергия связи атомов,  $T_g$  – температура роста кристалла. Эти рассуждения неприменимы к графену при комнатных температурах, для которого получились бы астрономические размеры. Величина  $T_g$  обычно соизмерима с энергией связи, что приводит к появлению механизма разупорядочения, несущественного при гораздо более низких температурах. Заметим, что, в принципе, взаимообъединение (самоупорядочение) атомов может допустить рост графена и при комнатной температуре, но пока что это было достигнуто только для нанометровых графеновых образцов [34].

Четвёртый, по-видимому, самый главный повод для удивления – это то, что графен остаётся устойчивым к внешним условиям. Поверхности материалов вступают в реакцию с воздухом и влагой, а монослой графена – это не одна, а две поверхности, что делает его более активным. Физика поверхности требует высокого вакуума и, зачастую, температур жидкого гелия для обеспечения стабильности поверхности и предохранения её от нежелательных реакций. Например, золото – один из самых инертных материалов в природе, но даже для его приповерхностных слоёв трудно

избежать частичного окисления на воздухе. Каковы же тогда шансы у монослоя остаться не подвергнутым влиянию внешней среды?

Графен насмехается над всеми этими рассуждениями. Полезно понять почему. Во-первых, любой существующий метод получения графена использует 3D кристалл, а не 2D рост. Графеновые листы изначально формируются либо в объёме, либо в верхнем слое эпитаксиальной подложки, что гасит расходящиеся тепловые флуктуации. Взаимодействие всегда существует, хотя, как в случае графена, растущего на графите [35], может быть относительно слабым. Это позволяет графену уклониться от аргументов Ландау–Пайерлса, а также избежать сворачивания в островки и 3D структуры. Во-вторых, если графен откалывается или выделяется с подложки, то процесс происходит обычно при комнатных температурах, так что энергетический барьер остаётся достаточно высоким. Это позволяет атомным плоскостям сохраняться в изолированном виде и не сворачиваться без всякой подложки [36], даже если энергетически это невыгодно. Кроме того, взаимодействие Ван-дер-Ваальса может оказаться достаточным для предотвращения скручивания графенового листа, когда графен оказывается на подложке. В-третьих, химически графит даже более инертен, чем золото. Будучи химически более активным, чем графит, графен, хоть и слабо, но взаимодействует с воздухом и примесями при комнатной температуре. Однако это не разрушает его кристаллическую решётку, и он остаётся высокопроводящим [37; 38]. Для необратимого разрушения графена на воздухе требуются температуры, в два раза превышающие комнатную. Условия нашей среды оказались вполне подходящими для сохранности графеновой решётки.

### **13. Реквием блестящим идеям**

Научная литература полна блестящих идей, которые, однако, не работают. Выискивать их в литературе в целом неразумно. Перед началом работы над новым проектом обычно достаточно пары подходящих обзоров для того, чтобы заново не изобретать колесо. Альтернатива может действительно принести вред. Я встречал много перспективных исследователей, которые не смогли многого достичь в науке потому, что они рас-

тратили своё время, копаясь в литературе, вместо того чтобы тратить его на поиск новых явлений. Более того, после месяцев изучения литературы они неизбежно приходят к одному и тому же выводу: всё, что они планировали, уже сделано. Поэтому они не видят причин опробовать свои собственные идеи, а значит, заново начинают копаться в литературе. Следует понимать, что идеи никогда не бывают новыми. Будучи даже блестящей, каждая идея всегда основана на предыдущем знании и, при множестве сообразительных людей вокруг, положение вещей таково, что кто-либо где-либо раньше уже думал над чем-то похожим. Это не должно оправдывать бездействия, поскольку обстоятельства на местах меняются, и, более того, вместе с ними меняются и возможности. Новые технологии дают реальный шанс тому, что старые, не оправдавшиеся идеи вполне могут на удивление хорошо реализоваться в следующий раз.

Все три мысленных облака, о которых говорилось выше и которые я не назвал бы блестящими идеями, послужили достаточным основанием, чтобы в 2002–2003 гг. начать новый проект. Они стали для нас той нитью Ариадны, которая помогла в выборе определённых направлений исследований. Анализ литературы проводился, когда для этого пришло время – после того как мы грубо ознакомились с новой областью и особенно, когда результаты уже готовились к публикации. Вдобавок к литературе, относящейся к тем облакам, наша статья в *Science* цитирует попытки получения изолированных 2D кристаллов, их термодинамическую нестабильность, обнаружение наноспиралей, а также статьи по эпитаксиальному росту. Эти ссылки важны для того, чтобы показать, какого экспериментального прогресса мы достигли. Первый обзор ранних работ был сделан в нашей статье 2007 г. [1]. С тех пор я обновляю презентации моих выступлений на конференциях, как только узнаю о важной в историческом плане статье. Лучшая возможность дополнить историческую часть – это добавить несколько новых ссылок. Более того, моё недавнее обращение к историческому контексту [39] выявило имена нескольких исследователей и, для полноты картины, я хочу отдать должное как их ранним идеям, так и их вкладу в науку.

## 14. Воплощения графена

Возвращаясь назад в историю графена, надо бы, по-видимому, начать с опытов британского химика Бенджамина Броди (Benjamin Brodie) [40]. В 1859 г., подвергая графит действию сильных кислот, он получил то, что он назвал «углеродной кислотой» (рис. 3, *а*). Броди верил, что он открыл «графон», новую форму углерода с молекулярным весом 33. Сегодня мы знаем, что он наблюдал суспензию крошечных кристалликов оксидов графена, т.е. графеновые листы, плотно покрытые молекулами гидроксильной и эпоксидной групп [41]. В течение следующего столетия было всего несколько работ, описывающих слоистую структуру оксида графита, но следующим ключевым шагом в истории графена было доказательство того, что эта «углеродная кислота» состоит из плавающих атомных плоскостей. В 1948 г. Дж. Руесс (G. Ruess) и Ф. Фогт (F. Vogt) применили просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ) и, после испарения капельки суспензии оксида графена на сетке ПЭМ, они обнаружили чешуйки с множеством складок толщиной в несколько нанометров [42]. Эти исследования продолжила группа Ульриха Хофмана (Ulrich Hofmann). В 1962 г. он и Ханс-Питер Бём (Hanns-Peter Boehm) занимались поиском фрагментов восстановленного оксида графита, настолько тонких, насколько это возможно, и определили, что некоторые из них являются монослойными [43] (рис. 3, *б*).

До 2009–2010 гг. это примечательное наблюдение не привлекало особого внимания. Я должен заметить, что результаты 1962 г. основывались на относительном ПЭМ-контрасте – подход, как мы теперь понимаем, неприменимый, так как контраст сильно зависит от условий фокусировки [44]. Как и можно было ожидать, Рахулу Наиру (Rahul Nair) и мне не удалось отличить монослои от несколько более толстых фрагментов с помощью только ПЭМ-контраста. Графеновые монослои были однозначно идентифицированы с помощью ПЭМ только спустя сорок лет после работы 1962 г. по количеству контрастных линий на сгибах [45–47]. Тем не менее работа Бёма-Хофмана, на мой взгляд, должна рассматриваться как первое наблюдение графена, так как монослои должны были присутствовать в осадке, а сама идея была правильной. Более того, именно Бём и его коллеги ввели термин «графен» в 1986 г., выведя его как комбинацию сло-

ва «графит» с суффиксом, указывающим на полициклические ароматические углеводороды [48].

Помимо ПЭМ, ещё одно важное направление в исследовании графена в период до 2004 г. – это его эпитаксиальный рост. Сверхтонкие графитовые плёнки и иногда даже монослои выращивались на металлических подложках [49–53], на непроводящих карбидах [54–57] и на графите [35] (рис. 3, з). Первые известные мне статьи восходят к 1970 г., когда Джон Ерант (John Grant) сообщил о графитовых плёнках на Ru и Rh [49], а Блэкли (Blakely) и др. – на Ni [50]. Эпитаксиальный рост на непроводящих подложках впервые продемонстрировали Ван Боммель (van Bommel) и др. в 1975 г. [54], тогда как Чухей Ошима (Chuhei Oshima) нашёл и другие карбиды, обеспечивающие рост графена (например TiC) [55]. Обычно выращенные плёнки анализировались методами физики поверхности, которые, как правило, включают в себя усреднение по значительной площади и мало говорят о гладкости плёнок и их качестве. Время от времени использовался СТМ для визуализации и локального анализа.

Более ранние попытки получить сверхтонкие плёнки графита путём микромеханического расслоения выглядят даже более значимо. Это уже похоже на то, что делали мы в 2003 г. В 1990 г. группа Генриха Курца (Heinrich Kurz) сообщила об «отслаивании оптически тонких слоёв прозрачной лентой» (читай, скотчем), которые потом использовались для изучения динамики носителей в графите [58]. В 1995 г. Томас Эббесен (Thomas Ebbesen) и Хидефуми Хиура (Hidefumi Niura) визуализировали «оригами» толщиной в несколько нанометров с помощью атомно-силового микроскопа на поверхности ВОПГ [59]. Род Руофф (Rod Ruoff) также сфотографировал тонкие графитовые пластиночки в СЭМ [60] (рис. 3, в). В 2003 г. о монослоях сообщил Ян Гань (Yang Gan), который использовал СТМ для их отслоения с поверхности ВОПГ [61].

Наконец, изучались и электрические свойства тонких графитовых плёнок. Между 1997 и 2000 гг. Йошико Охаша (Yoshiko Ohashi) преуспел в отслаивании кристаллов вплоть до толщин в  $\sim 20$  нм, изучил их электрические свойства, включая осцилляции Шубникова-де Гааза, и, что примечательно, обнаружил эффект электрического поля – изменение электриче-

ского сопротивления составляло до 8% [62; 63]. Группе Эббесена также удалось вырастить графитовые диски микронных размеров с толщиной в 60 атомных слоёв и измерить их электрические свойства [64].

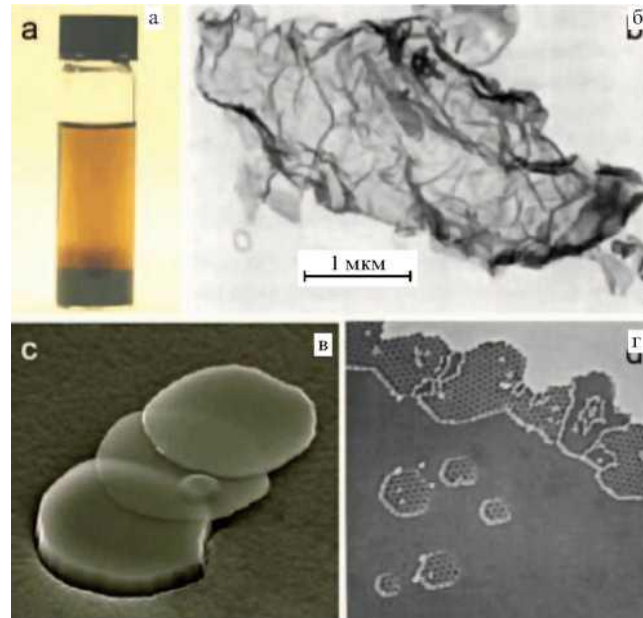


Рис. 3. (В цвете онлайн) Предыстория графена. (а) Графен, по-видимому, наблюдал Броди 150 лет назад. Оксид графита на дне ёмкости рассматривается в воде, образуя жёлтую суспензию плавающих графеновых хлопьев. (б) ПЭМ-изображение сверхтонких графитовых хлопьев начала 1960-х гг. (печатается с разрешения авторов [43]).

(в) Изображение тонких графитовых пластинок в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), полученных путём отслоения (похожие изображения представлены в [60]). (г) СТМ графена, выращенного на Pt (печатается с разрешения авторов [53]). Размер изображения 100 x 100 нм. Гексагональная сверхструктура имеет период  $\sim 22 \text{ \AA}$  и возникает вследствие взаимодействия графена с металлической подложкой

Что касается теории, то я дам только короткий комментарий (более подробно см. [1; 65]). Теоретически графен (монослой графита) исследуется примерно с 1947 г., когда Фил Уоллас (Phil Wallace) впервые рассчитал его зонную структуру в качестве отправной точки для понимания электронных свойств объёмного графита [66]. Гордон Семеновф (Gordon Semenoff) и Дункан Халдейн (Duncan Haldane) нашли, что графен является замечательным твердотельным аналогом (2+1)-мерной квантовой электродинамики (КЭД) [67; 68], и с тех пор графен приобрёл статус забавной модели для анализа различных вопросов в КЭД (см., например, [69; 70]). Многие теории вполне подходили для экспериментальной проверки задол-

го до 2004 г., когда были изучены электронные свойства углеродных нанотрубок (свернутых в цилиндр листов графена). Большая и важная теоретическая работа по графену была проделана Тсунея Эндо (Tsuneya Ando) и Милли Дрессельхаус (Millie Dresselhaus) с соавторами [71–73].

Для полноты истории графена надо отдать должное некоторым ранним идеям. Томас Эббесен (Thomas Ebbesen) и Хидефуми Хиура (Hidefumi Hiura) предвосхитили возможность создания наноэлектроники, основанной на графене в 1995 г. (в качестве примера они сослались на эпитаксиальный рост графена на SiC) [59]. В патентной литературе рассуждения о «полевых транзисторах на основе пиролитического графита» возвращают нас в 1970 г. [74]. Кроме того, как меня проинформировали Род Руоф (Rod Ruoff) и Реджинальд Литтл (Reginald Little), в их статьях, вышедших до 2004 г., обсуждалась возможность и отмечалось намерение получить изолированные монослои [60; 75]. Наконец, слоистая структура графита была известна с первых дней появления рентгеновской кристаллографии, так что исследователи уже довольно давно точно знали, что графит есть колода из слабосвязанных графеновых плоскостей. Это свойство широко используется для создания интеркалированных графитовых соединений [23] и, конечно, для привычного рисования. И последнее. Сейчас мы знаем, что изолированные монослои можно обнаружить в любом росчерке карандаша, если внимательно искать их через оптический микроскоп [2]. Без преувеличения можно сказать, что на протяжении многих веков графен был перед нашими глазами и перед нашим носом, но никто не знал, что же это такое на самом деле.

## **15. Πλανήτη Графен**

Читатель может счесть, что мой обзор идей и истории публикаций неполон. Я, насколько смог, постарался не пропустить ничего из результатов до 2004 г., особенно экспериментальных. Все упомянутые исследования были ориентированы в правильном направлении, но не вызвали той степени удивления, которая была бы достаточна для того, чтобы возбудить «золотую графеновую лихорадку». Возможно, это потому, что все предыдущие эксперименты имели одну общую черту – они носили характер наблюдений. Идентифицировались сверхтонкие графитовые плёнки, а иногда даже



и монослои без каких-либо указаний на замечательные свойства графена. Цитированные выше немногочисленные эксперименты по измерению электрических и оптических свойств тонких плёнок графита не могут отразить той физики, с которой графен вышел на арену после 2004 г.

Наша статья в *Science* ясно обозначила переломный момент. Разумеется, в статье говорится об изолированных кристаллах графена, достаточно крупных для того, чтобы на них возможны были всякого рода измерения, помимо просто наблюдений в электронном или сканирующем микроскопе. Описанный метод выделения и идентификации графена настолько очевиден и доступен, что, возможно, даже школьник сможет это сделать. Это, конечно, важная часть дела, но если бы мы ограничились только наблюдениями, то наша работа просто добавила бы кое-что к предыдущим сведениям, имевшимся в литературе и, я думаю, ушла бы в забвение. Не наблюдения и не выделение графена, а его электронные свойства – вот что заставляет исследователей удивляться. Из наших измерений получены новости значительно более значимые, чем возможность применения скотча, что побудило многих исследователей присоединиться к «графеновой лихорадке».

В работе 2004 г. мы впервые сообщили об амбиполярном эффекте электрического поля, при котором сопротивление меняется в  $\sim 100$  раз. Это в тысячи раз больше, чем изменения в те несколько процентов, которые наблюдались ранее для любой металлической системы, что указывает на качественные различия. Чтобы оценить, насколько этот результат необычен, представьте себе нанометровую плёнку золота. Безразлично, что вы сделаете с этой плёнкой, но с точки зрения физики она останется нормальным металлом с соответствующими свойствами. Напротив, свойства графена можно изменить простым изменением напряжения на затворе. Графен можно перестраивать из состояния, близкого к нормальному металлу с концентрацией электронов  $\sim 10^{21}$  см<sup>-3</sup>, до металла с такой же концентрацией дырок, т.е. можно проделать весь путь, минуя «полупроводниковое» состояние с невысокой концентрацией носителей заряда.

Ещё более примечательно то, что наши графеновые образцы продемонстрировали изумительное электронное качество. Графен был совершенно не защищён от внешней среды, поскольку он был помещён на гру-

бую (в микроскопическом смысле) подложку и с обеих сторон покрыт адсорбатами и полимерным осадком. Тем не менее электроны могли проходить субмикронные расстояния без рассеяния, «насмехаясь» над всем, что снаружи. Уникальность электронных свойств графена противоречит интуиции. Это также противоречит общепринятой точке зрения, что физика поверхности требует сверхвысокого вакуума и что даже при его наличии качество тонких плёнок непрерывно ухудшается по мере уменьшения их толщины. Оборачиваясь назад, можно сказать, что даже сейчас уникальность электронных свойств графена выглядит таинственно и фактически до сих пор в полной мере не раскрыта.

В физике полупроводников качество электронных свойств определяется подвижностью носителей заряда  $\mu$ . В нашей статье в *Science* для графена при комнатной температуре приводится значение  $\mu \approx 10000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  (по данным на 2010 г., значения  $\mu$  могут быть в 10 и 100 раз выше при комнатной и криогенных температурах соответственно [76; 77]). Для неподготовленного читателя 10000 может звучать просто как ещё одно число. Для пояснения его значимости представьте себе, что в 2004 г. мы изготавливали образцы из, например, восстановленного оксида графена, для которого, вследствие необратимо повреждённой кристаллической решётки этого материала,  $\mu \sim 1 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  [78]. В нашей второй статье [79] мы сообщаем о 2D диалъкогенидах со столь же низкими  $\mu$ . С тех пор интереса к ним мало. Выявленный нами баллистический транспорт на субмикронные расстояния был достаточен для того, чтобы разжечь интерес к графену, и сделал возможным наблюдение многих квантовых эффектов, отмеченных как в 2004 г., так и позже. Всё это было бы невозможным, если бы графен обладал подвижностью  $\mu$  ниже примерно  $1000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

Если бы не высокое качество структуры графена и его управляемость, то не было бы и новой физики, а следовательно, и графенового бума. В этом отношении история графена имеет что-то общее с историей изучения обращения планет вокруг Солнца. Древние греки наблюдали за ними и называли их скитающимися звёздами –  $\pi\lambda\alpha\nu\acute{\eta}\tau\eta$ . После того как была открыта физика этих скитаний, люди начали воспринимать планеты совсем по-другому, чем  $\pi\lambda\alpha\nu\acute{\eta}\tau\eta$ . Точно так же за последние шесть лет лю-

ди открыли, что такое графен на самом деле, и это полностью поменяло предыдущее восприятие. Наша работа в *Science* дала лишь некоторое первое представление о графене в его новом воплощении как о высококачественной 2D электронной системе.

## 16. Магия плоского углерода

Каково оно, это новое воплощение? Для меня 2004 г. был только точкой отсчёта, когда была только приподнята завеса с уникальных свойств графена. С тех пор мы обнаружили, что носители заряда в графене представляют собой безмассовые фермионы, описываемые не стандартным уравнением Шрёдингера, а уравнением типа уравнения Дирака [80]. В двухслойном графене электроны приобретают новый «наряд», становясь теперь массивными дираковскими фермионами [81]. Эти свойства раскрылись при обнаружении двух новых типов целочисленного квантового эффекта Холла, соответствующих двум типам дираковских фермионов [1; 65]. Мы также нашли, что графен остаётся металлическим в пределах отсутствия носителей заряда, даже тогда, когда в устройстве микронных размеров остаётся всего лишь несколько электронов [1; 77]. Наши эксперименты показали, что графен демонстрирует универсальную оптическую проводимость, равную  $\pi e^2/2h$ , так что его оптическая прозрачность в точности равна  $\pi\alpha$ , где  $\alpha$  – постоянная тонкой структуры [82]. Нами предложено использовать графеновые устройства для регистрации туннелирования Клейна [83] – эффекта, известного в квантовой электродинамике на протяжении многих десятилетий, но считавшегося ненаблюдаемым. Позже несколько групп продемонстрировали эффект экспериментально. Нам повезло, что мы оказались немного быстрее других в установлении того факта, что двухслойный графен есть полупроводник с управляемой запрещённой зоной [84] и что из графена можно точно вырезать нанометровые устройства [85]. Нами изготовлены самые чувствительные на сегодня сенсоры, способные детектировать отдельные молекулы [38]. Мы установили, что деформации в графене создают псевдомагнитные поля, изменяющие его электронные свойства [86], а позже рассмотрели возможность создания однородных псевдомагнитных полей и наблюдения квантового

эффекта Холла без внешнего магнитного поля [87]. Через полгода сообщалось уже о псевдомагнитных полях, превышающих 400 Тл. Нам первым удалось сделать шаг в области химии графена путём экспериментального получения графана и стехиометрического фторграфена [88; 89]. Всё это не исчерпывает список удивительных явлений, которые я и мои коллеги нашли в графене, как, конечно, и многие другие исследователи, раскрыв его красивые черты, возвысившие графен до его сегодняшнего статуса – статуса объекта, от которого исходит магия.

### **17. Ода одному**

Прочитав об удивительных свойствах графена, читатель может подумать: а почему множество атомных слоёв, уложенных друг на друга, как в графите, не обнаруживает подобных качеств? Безусловно, любая производная графита имеет нечто общее со своим родителем, но в случае графена различия между родителем и потомками фундаментальны. Чтобы понять это, упростим задачу и сравним графен с двойным его слоем. Уже здесь проявятся кардинальные отличия.

Первое. Графен демонстрирует рекордную жёсткость и механическую прочность [90]. Что касается двух его слоёв, то это качество размывается вследствие того что они могут скользить друг относительно друга. Это приводит к принципиальному отличию, если, например, графен или более толстые пластиночки используются в композитных материалах.

Второе. Химия графена различна в зависимости от того, задействованы одна или две поверхности монослоя. Например, атомарный водород не может соединиться с графеном только с одной стороны, но образует стехиометрическое соединение (графан), если задействованы обе поверхности. Это делает графен гораздо более химически активным, чем его бислой.

Третье. Электрическое поле в графите экранируется на длинах порядка расстояния между слоями, т.е. экранирование проявляется уже на уровне двух слоёв. В многослойном графене электрическое поле может охватить не более двух приповерхностных атомных плоскостей, оставляя без своего влияния остальной объём. Это делает наивными попытки использования многослойных графитовых материалов в активной электронике.

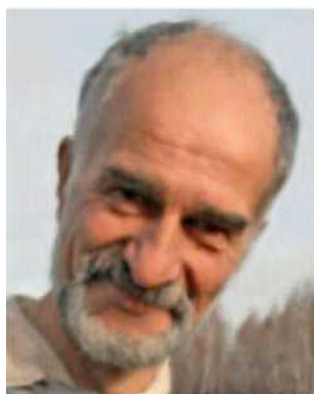
Четвёртое. Носители заряда в монослое представляют собой безмассовые дираковские фермионы, тогда как в графеновом двойном слое они уже обладают массой. Это приводит к существенным отличиям во множестве электронных свойств, включая осцилляции Шубникова-де-Гааза, квантовый эффект Холла, туннелирование Клейна и т.д. Известная апория (Sorites paradox) спрашивает о том моменте, когда куча песка уже перестаёт быть кучей по мере того как из неё извлекаются отдельные песчинки. Для графена даже бислой настолько отличается от монослоя, что два – это уже куча.

### 18. Коллегам и друзьям

Наша работа в *Science* – коллективный труд, и я бы снова хотел, как от Кости, так и от себя, поблагодарить всех остальных участников. Сергей Морозов был и остаётся нашей «многофункциональной измерительной машиной», работающей 24×7 часов в неделю, когда он находится в Манчестере (рис. 4). Его навыки по измерению электрических свойств несравненны, и я знаю, что любая полученная им кривая совершенно надёжна, и никогда не возникает вопросов, было ли то или это проверено и перепроверено. Да Цзян (Da Jiang) был с самого начала, и жаль, что я вынужден был отдалить его от проекта, так как это выходило за пределы возможностей одного молодого аспиранта. Сергей Дубонос и Юань Чжан (Yuan Zhang) изготовили все устройства, без которых наша работа была бы невозможной. Я очень сожалею, что наши жизненные пути потом разошлись и, особенно, что Сергей переключился с нанотехнологий на разведение коз. Также хочу отметить Анатолия Фирсова за помощь при изготовлении всё тех же устройств. Ирина Григорьева помогала со сканирующей электронной микроскопией и, что более важно, в написании статьи 2004 г.

Окончание этого этапа в моей жизни было только началом дальнейшей упорной работы, в которую было вовлечено много коллег. Наш быстрый прогресс был бы невозможен без Миши Кацнельсона, который обеспечил нам такую теоретическую поддержку, о которой экспериментаторы могут только мечтать. С 2006 г. мне посчастливилось сотрудничать с другими отличными теоретиками, включая Антонио Кастро Нето (Antonio Castro Neto), Пако Гинеа (Paco Guinea), Нуно Переса (Nuno Peres), Володю Фалько

(Volodya Fal'ko), Леонида Левитова (Leonid Levitov), Аллана Макдональда (Allan MacDonald), Диму Абанина (Dima Abanin), Тима Уилинга (Tim Wehling) и их коллег. В частности, я хочу с благодарностью отметить множество проясняющих дело дискуссий и дружеских подшучиваний за совместными обедами с Антонио и Пако. Что касается экспериментаторов, то список будет длиннее и включает в себя Филиппа Кима (Philip Kim), Эрни Хилла (Ernie Hill), Андреа Феррари (Andrea Ferrari), Еву Андрей (Eva Andrei), Алексея Кузьменко (Alexey Kuzmenko), Учи Бангерта (Uschi Bangert), Сашу Григоренко (Sasha Grigorenko), Ули Зейтлер (Uli Zeitler), Джанника Мейер (Jannik Meyer), Марека Потемски (Marek Potemskii) и многих других.



Сергей Дубонос



Сергей Морозов



Ирина Григорьева



Юань Чжан



Да Цзян



Анатолий Фирсов

Рис. 4. Те, кто сделал возможной нашу первую статью по графену, но не получил премии

Особого упоминания заслуживает Филипп. В августе 2004 г., до того как появилась наша статья в *Science*, его группа отослала для публикации другую важную работу [91]. Там изучались электронные свойства сверхтонких графитовых пластинок (до  $\sim 35$  атомных слоёв). За исключением толщины образца, группа Филиппа следовала той же методологии, которая ис-

пользовалась в нашей работе. О том, насколько близок он был к нашим работам, можно судить по такому факту, что после того как они стали использовать технику, основанную на скотче, Филипп уже в начале 2005 г. начал изучать монослои. Это позволило ему быстро нас догнать, и в середине 2005 г. обе наши группы независимо представили в печать статьи, которые появились в одном и том же выпуске журнала *Nature* и описывали наиболее важные свойства дираковских фермионов в графене [80; 92]. Позже я имел удовольствие тесно сотрудничать с Филиппом в работе над двумя совместными статьями для *Science* и *Scientific American*. Лично для меня те, появившиеся бок о бок, статьи в *Nature*, оказались знаковыми. Люди из большого сообщества физиков, занимающихся полупроводниками, больше не распространяли молву о том, что «эти результаты так же трудно воспроизвести, как и результаты Гендрика Шона<sup>65</sup> (Hendrik Schön)», а друзья больше не останавливали меня в коридорах со словами: «Будь более осторожен – ты же знаешь...». Я многим обязан Филиппу за это, и многие люди слышали от меня слова, которые я говорил и до, и после присуждения Нобелевской премии, что для меня было бы честью разделить её с Филиппом.

И последнее, не менее важное. Я хочу выразить признательность многим моим замечательным коллегам, молодым и постарше: Питеру Блейку (Peter Blake), Рахулу Наиру (Rahul Nair), Роману Горбачёву (Roman Gorbachev), Леониду Пономаренко (Leonid Ponomarenko), Фреду Шедину (Fred Schedin), Даниелу Элиасу (Daniel Elias), Саше Майорову (Sasha Mayorov), Жуй Яну (Rui Yang), Василию Кравцу (Vasyl Kravets), Чженьхуа Ни (Zhenhua Ni), Венсай Женью (Wencai Ren), Рашиду Джалилю (Rashid Jalil), Ибстаму Риазу (Ibstan Riaz), Сурену Нойбеку (Soeren Neubeck), Тарику Мохиуддину (Tariq Mohiuddin) и Тиму Буту (Tim Booth). Они были аспирантами и постдоками здесь, в Манчестере, за последние шесть лет, и по отношению к ним я, как всегда, избегаю феодального определения «мои».

Наконец, я благодарен Британскому фонду инженерных и физических исследований EPSRC за финансовую поддержку. Эта Нобелевская премия была бы совершенно невозможна без такой поддержки. Я также благодарен Королевскому обществу (Royal Society) и фонду Leverhulme Trust, содействие которых позволило мне уменьшить мою учебную

---

<sup>65</sup> Ошибочные работы Гендрика Шона вызвали в начале 2000 г. ставшую широко известной дискуссию о роли рецензентов и степени ответственности соавторов при опубликовании научных результатов (*примеч. перев.*)

нагрузку и сосредоточиться на проекте. Кроме того, я получал поддержку Управления военно-морских исследований (Office of Naval Research) и Управления научных исследований военно-воздушных сил (Air Force Office of Scientific Research), что позволило нам значительно ускорить работу. Хочу выразить благодарность Фонду Кёрбера за премию 2009 г. Я, однако, не могу сказать ничего хорошего о системе финансирования научных исследований Европейского союза (EU Framework programmes), которой, за исключением Европейского совета по исследованиям (European Research Council), могут быть довольны только еврофобы за дискредитацию самой идеи эффективно работающей Европы.

*Перевод с английского М.Х. Хоконов.  
Консультант перевода С.В. Морозов.  
Авторизация А.К. Гейма и И.В. Григорьевой*

### Список литературы

1. Geim A.K., Novoselov K.S. *Nature Mater.* 6 183 (2007)
2. Geim A.K., Kim P *Sci. Am.* 298 (4) 90 (2008)
3. Geim A.K. *Science* 324 1530 (2009)
4. Гейм А.К. *Письма в ЖЭТФ* 50 359 (1989) [Geim A.K. *JETP Lett.* 50 389 (1989)]
5. Bending S.J., von Klitzing K., Ploog K *Phys. Rev. Lett.* 65 1060 (1990)
6. Geim A.K., Main P.C., Beton P.H., Streda P., Eaves L., Wilkinson C.D.W., Beaumont S P *Phys. Rev. Lett.* 67 3014 (1991)
7. Geim A.K. , Main P.C, Beton P H, Eaves L, Beaumont S P, Wilkinson C.D.W. *Phys. Rev. Lett.* 69 1248 (1992)
8. Geim A.K., Dubonos S.V., Lok J.G.S., Grigorieva I.V., Maan J.C., Hansen L.T., Lindelof P.E. *Appl. Phys. Lett.* 71 2379 (1997)
9. Grigorieva I.V. *Supercond. Sci. Technol.* 7 161 (1994)
10. Baker J.S., Judd S.J. *Water Res.* 30 247 (1996)
11. Geim A. *Phys. Today* 51 (9) 36 (1998)
12. Autumn K., Lang Y.A., Hsieh S.T., Zesch W., Chan W.P., Kenny T.W., Fearing R, Full R J *Nature* 405 681 (2000)
13. Geim A.K., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Novoselov K.S., Zhukov A.A., Shapoval S. Yu. *Nature Mater.* 2 461 (2003)
14. Lamarche G., Lamarche F., Lamarche A-M. *Europhys. Lett.* 53 378 (2001)



15. Barbolina I.I., Novoselov K.S., Morozov S.V., Dubonos S.V., Missous M, Volkov A.O., Christian D.A., Grigorieva I.V., Geim A.K. *Appl. Phys. Lett.* 88 013901 (2006)
16. Cohen-Karni T., Qing Q., Li Q., Fang Y., Lieber C.M. *Nano Lett.* 10 1098 (2010)
17. Mott N. *A Life in Science* (London: Taylor & Francis, 1986)
18. Bose E. *Phys. Z.* 7 373 (1906)
19. Butenko A.V., Shvarts Dm., Sandomirsky V., Schlesinger Y., Rosenbaum R. *J. Appl. Phys.* 88 2634 (2000)
20. Petrashov V.T., Antonov V.N., Nilsson B. *J. Phys. Condens. Matter* 3 9705 (1991)
21. Glover R.E. (III), Sherrill M D *Phys. Rev. Lett.* 5 248 (1960)
22. Ahn C.H. et al. *Rev. Mod. Phys.* 78 1185 (2006)
23. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G. *Adv. Phys.* 30 139 (1981)
24. Kopelevich Y., Esquinazi P., Torres J.H.S., Moehlecke S. *J. Low Temp. Phys.* 119 691 (2000)
25. Kempa H., Esquinazi P., Kopelevich Y. *Phys. Rev. B* 65 241101(R) (2002)
26. Novoselov K.S., Geim A.K., Dubonos S.V., Hill E.W., Grigorieva I.V. *Nature* 426 812 (2003)
27. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. *Science* 306 666 (2004)
28. Venables J.A., Spiller G.D.T., Hanbucken M. *Rep. Prog. Phys.* 47 399 (1984)
29. Evans J.W., Thiel P.A., Bartelt M.C. *Surf. Sci. Rep.* 61 1 (2006)
30. Shenderova O.A., Zhirnov V.V., Brenner D.W. *Critical Rev. Solid State Mater. Sci.* 27 227 (2002)
31. Tomanek D., Zhong W., Krastev E. *Phys. Rev. B* 48 15461 (1993)
32. Setton R. *Carbon* 34 69 (1996)
33. Braga S.F., Coluci V.R., Legoas S.B., Giro R., Galvao D.S., Baughman R.H. *Nano Lett.* 4 881 (2004)
34. Simpson C.D., Brand J.D., Berresheim A.J., Przybilla L., Rader H.J., Mullen K. *Chem. Eur. J.* 8 1424 (2002)
35. Affoune A.M., Prasad B.L.V., Sato H., Enoki T., Kaburagi Y., Hishiyama Y. *Chem. Phys. Lett.* 348 17 (2001)
36. Booth T.J., Blake P., Nair R.R., Jiang D., Hill E.W., Bangert U., Bleloch A., Gass M., Novoselov K.S., Katsnelson M.I., Geim A.K. *Nano Lett.* 8 2442 (2008)
37. Ryu S., Liu L., Berciaud S., Yu Y-J, Liu H., Kim P., Flynn G.W., Brus L.E. *Nano Lett.* 10 4944 (2010)
38. Schedin F., Geim A.K., Morozov S.V., Hill E.W., Blake P., Katsnelson M.I., Novoselov K.S. *Nature Mater.* 6 652 (2007)

39. Geim A. "Many pioneers in graphene discovery" *APS News* 19 (1)4 (2010); <http://www.aps.org/publications/apsnews/201001/letters.cfm.html>
40. Brodie B.C. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 149 249 (1859)
41. Dreyer D.R., Park S., Bielawski C.W., Ruoff R.S. *Chem. Soc. Rev.* 39 228 (2010)
42. Ruess G., Vogt F *Monatshefte Chem.* 78 222 (1948)
43. Boehm H.P., Clauss A., Fischer G.O., Hofmann U.Z. *Anorg. Allgemeine Chem.* 316 119 (1962)
44. Meyer J.C., Geim A.K., Katsnelson M.I., Novoselov K.S., Obergfell D,
45. Roth S., Girit C., Zettl A. *Solid State Commun.* 143 101 (2007)
46. Shioyama H. *J. Mater. Sci. Lett.* 20 499(2001)
47. Viculis L.M., Mack J.J., Kaner R B *Science* 299 1361 (2003)
48. Horiuchi S., Gotou T., Fujiwara M., Asaka T., Yokosawa T., Matsui Y. *Appl. Phys. Lett.* 84 2403 (2004)
49. Boehm H.P., Setton R., Stumpp E. *Carbon* 24 241 (1986)
50. Grant J.T., Haas T.W. *Surf. Sci.* 21 76 (1970)
51. Blakely J.M., Kim J.S., Potter H.C. *J. Appl. Phys.* 41 2693 (1970)
52. Rosei R., De Crescenzi M., Sette F., Quaresima C., Savoia A., Perfetti P. *Phys. Rev. B* 28 1161 (1983)
53. McConville C.F., Woodruff D.P., Kevan S.D., Weinert M., Davenport J.W. *Phys. Rev. B* 34 2199 (1986)
54. Land T.A., Michely T., Behm R.J., Hemminger J.C., Comsa G. *Surf. Sci.* 264 261 (1992)
55. van Bommel A.J., Crombeen J.E., van Tooren A. *Surf. Sci.* 48 463 (1975)
56. Nagashima A., Nuka K., Satoh K., Itoh H., Ichinokawa T., Oshima C., Otani S. *Surf. Sci.* 287 609 (1993)
57. Terai M., Hasegawa N., Okusawa M., Otani S., Oshima C. *Appl. Surf. Sci.* 130-132 876(1998)
58. Forbeaux I., Themlin J-M., Debever J-M. *Phys. Rev. B* 58 16396 (1998)
59. Seibert K., Cho G.C., Kutt W., Kurz H., Reitze D.H., Dadap J.I., Ahn H., Downer M.C., Malvezzi A.M. *Phys. Rev. B* 42 2842 (1990)
60. Ebbesen T.W., Hiura H. *Adv. Mater.* 7 582(1995) Lu X., Yu M., Huang H., Ruoff R.S. *Nanotechnology* 10 269 (1999)
61. Lu X., Yu M., Huang H., Ruoff R.S. *Nanotechnology* 10 269 (1999)
62. Gan Y., Chu W., Qiao L. *Surf. Sci.* 539 120 (2003)
63. Ohashi Y., Koizumi T., Yoshikawa T., Hironaka T., Shiiki K. *TANSO* 180 235 (1997)
64. Ohashi Y., Hironaka T., Kubo T., Shiiki K. *TANSO* 195 410 (2000)
65. Dujardin E., Thio T., Lezec H., Ebbesen T.W. *Appl. Phys. Lett.* 79 2474 (2001)
66. Castro Neto A.H., Guinea F., Peres N.M.R., Novoselov K.S., Geim A.K. *Rev. Mod. Phys.* 81 109 (2009)

67. Wallace P.R. *Phys. Rev.* 71 622 (1947)
68. Semenoff G.W. *Phys. Rev. Lett.* 53 2449 (1984)
69. Haldane F.D.M. *Phys. Rev. Lett.* 61 2015 (1988)
70. Gonzales J., Guinea F., Vozmediano MAH *Phys. Rev. B* 59 R2474 (1999)
70. Gorbar E.V., Gusynin V.P., Miransky V.A., Shovkovy I.A. *Phys. Rev. B* 66 045108 (2002)
71. Ando T., Nakanishi T., Saito R. *J. Phys. Soc. Jpn.* 67 2857 (1998)
72. Zheng Y., Ando T. *Phys. Rev. B* 65 245420 (2002)
73. Saito R., Fujita M, Dresselhaus G, Dresselhaus M S *Appl. Phys. Lett.* 60 2204 (1992)
74. Teuschler H.J. "Method of producing isolated field effect transistors employing pyrolytic graphite", US Patent 3,522,649 (1970)
75. Little R.B. *J. Cluster Sci.* 14 135 (2003)
76. Dean C.R. et al. *Nature Nanotechnol.* 5 722 (2010)
77. Castro E.V., Ochoa H., Katsnelson M.I., Gorbachev R.V., Elias D.C., Novoselov K.S., Geim A.K., Guinea F. *Phys. Rev. Lett.* 105 266601 (2010)
78. Erickson K., Erni R., Lee Z., Alem N., Gannett W., Zettl A. *Adv. Mat.* 22 4467 (2010)
79. Novoselov K.S., Jiang D., Schedin F., Booth T.J., Khotkevich V.V., Morozov S.V., Geim A.K. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102 10451 (2005)
80. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.M., Katsnelson M.I., Grigorieva I.V., Dubonos S.V., Firsov A.A. *Nature* 438 197 (2005)
81. Novoselov K.S., McCann E, Morozov S.V., Fal'ko V.I., Katsnelson M.I., Zeitler U., Jiang D., Schedin F., Geim A.K. *Nature Phys.* 2 177 (2006)
82. Nair R.R., Blake P., Grigorenko A.N., Novoselov K.S., Booth T.J., Stauber T., Peres N.M.R., Geim A.K. *Science* 320 1308 (2008)
83. Katsnelson M.I., Novoselov K.S., Geim A.K. *Nature Phys.* 2 620 (2006)
84. Castro E.V., Novoselov K.S., Morozov S.V., Peres N.M.R., Lopes dos Santos J.M.B., Nilsson J., Guinea F., Geim A.K. , Castro Neto A.H. *Phys. Rev. Lett.* 99 216802 (2007)
85. Ponomarenko L.A., Schedin F., Katsnelson M.I., Yang R., Hill E.W., Novoselov K.S., Geim A.K. *Science* 320 356 (2008)
86. Morozov S.V., Novoselov K.S., Katsnelson M.I., Schedin F., Ponomarenko L.A, Jiang D., Geim A.K. *Phys. Rev. Lett.* 97 016801 (2006)
87. Guinea F., Katsnelson M.I., Geim A.K. *Nature Phys.* 6 30 (2010)
88. Elias D.C. et al. *Science* 323 610 (2009)
89. Nair R.R. et al. *Small* 6 2877 (2010)
90. Lee C., Wei X., Kysar J.W., Hone J. *Science* 321 385 (2008)
91. Zhang Y., Small J.P., Amori M.E.S., Kim P. *Phys. Rev. Lett.* 94 176803 (2005)
92. Zhang Y., Tan Y-W., Stormer H.L., Kim P. *Nature* 438 201 (2005)



*Константин Сергеевич Новосёлов*

*1974 г.р.*

## БИОГРАФИЯ<sup>66</sup>

Константин Сергеевич Новосёлов родился 23 августа 1974 г. в городе Нижний Тагил (Свердловской области). Его родители были обычными советскими гражданами: отец работал инженером, а мать – учителем.

В школьные годы Константин участвовал во всесоюзных олимпиадах по физике и математике. В 1991 г., после окончания школы, Новосёлов поступил в Московский физико-технический институт на факультет физической и квантовой электроники по специализации «нанoeлектроника», который окончил в 1997 г. с отличием. После выпуска он два года работал аспирантом в Черноголовском институте проблем технологии микроэлектроники РАН.

В 1999 г. Константин Новосёлов переезжает в Нидерланды, где становится аспирантом молодого ученого-физика Андрея Гейма в Неймегенском Университете. Вместе они в 2001 г. переходят работать в Манчестерский университет.

В 2004 г. Константин Новосёлов защитил диссертацию на степень доктора философии.

В настоящее время является профессором и членом Королевского научного общества Манчестерского университета. Занимается исследованиями в области мезоскопической физики и нанотехнологий.

В 2004 г. Константин Новосёлов вместе со своим руководителем Андреем Геймом открыли новую аллотропную модификацию углерода – графен, который представляет собой одинарный слой атомов углерода.

В 2007 г. получил европейскую премию Николаса Курти за работы в сфере исследования низких температур и магнитных полей.

В 2008 г. Константин Новосёлов и Андрей Гейм получили премию «Еврофизика» за «открытие графена и выяснение его замечательных электронных свойств».

---

<sup>66</sup> Константин Новосёлов (1974). Биография [Электронный ресурс] // Нобелевская премия. Нобелевские лауреаты : [сайт]. – Москва, 2010–2019. – Режим доступа: <http://www.nobeliat.ru/laureat.php?id=833>.

В 2010 г. вместе со своим учителем Андреем Геймом были удостоены Нобелевской премии по физике за «передовые опыты с двумерным материалом – графеном». Ученым удалось «продемонстрировать, что монослойный углерод обладает исключительными свойствами, которые происходят из удивительного мира квантовой физики», отметили представители Нобелевского комитета.

Новосёлов стал самым молодым нобелевским лауреатом по физике за последние 37 лет, и единственным на 2010 г. лауреатом, родившимся позже 1970 г.

12 мая 2012 г. Константин Новосёлов был посвящён в рыцари ордена Британской империи. Торжественную церемонию в Букингемском дворце провела дочь королевы Великобритании принцесса Анна.

Летом 2014 г. ученые из Великобритании, Китая, США, Южной Кореи, России и Японии, в число которых входят нобелевские лауреаты Андрей Гейм и Константин Новоселов, открыли новые свойства графена, которые изменяют его проводимость. Работа ученых опубликована в журнале *Nature Physics*. Ученые научились изменять свойства энергетической щели у графена. Для этого авторы нанесли графен на слой «белого графита» – нитрида бора с графитоподобной гексагональной (узлы решетки заключены в правильный многоугольник) аллотропной модификацией. Исследователи обнаружили, что такая комбинация позволяет регулированием взаимных ориентаций направлений в кристаллических решетках менять ширину энергетической щели у графена. Это связано с тем, что подложка из нитрида бора вызывает деформацию графеновой решетки, в связи с чем меняются ее проводящие свойства. Физики выяснили, что при угле наклона между направлениями решеток графена и нитрида бора менее одного градуса структура решетки нитрида бора почти идентична графеновой. При этом угол между атомами углерода в самой графеновой решетке увеличился на 1,8 градусов, что привело к возникновению энергетической щели. При углах наклона между направлениями решеток графена и нитрида бора более одного градуса энергетической щели не возникало. Наложение двух кристаллических решеток позволило ученым в образованной гетероструктуре воспроизвести эффект муарового узора в виде бабочки Хо-

фшtedтера – фрактальной структуры, описанной в 1976 г. сыном нобелевского лауреата Роберта Хофшtedтера Дугласом Хофшtdтером, которая воспроизводит зависимость значений уровней энергии электрона от величины магнитного поля в двумерном кристалле.

В своей работе ученые исследовали различные комбинации образцов графена и подложек из нитрида бора, используя сканирующие зондовые (атомный силовой и туннельный) и рамановскую методы спектроскопии. Энергетическая щель (запрещенная зона) – интервал энергий, в котором в идеальном кристалле, согласно квантовомеханической теории движения электронов в твердом теле, не могут находиться электроны. Такая щель отвечает интервалу между валентной зоной и зоной проводимости в кристалле. В графене ширина этой щели равна нулю, введением подложки из нитрида бора физикам удалось деформировать кристаллическую решетку графена и тем самым создать ненулевую энергетическую щель, которая позволяет менять свойства проводимости графена – в том числе и отключать ее. Ранее ученые также исследовали различные свойства графена на подложках из нитрида бора, однако в своей работе авторы впервые обнаружили зависимость таких свойств от угла взаимной ориентации направлений кристаллических решеток. Работа физиков открывает новые возможности в использовании графена в электронной промышленности.

## ГРАФЕН: МАТЕРИАЛЫ ФЛАТЛАНДИИ<sup>67</sup>

*Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2010 г.*

*Я называю наш мир Флатландией...*

Э. Эбботт «Флатландия. Роман во многих измерениях»

### 1. Введение

Графен является двумерным объектом – почти как мир, описанный во *Флатландии* Эбботта. И так же, как «Флатландия» является «романом во многих измерениях», графен – гораздо большее, чем просто плоский кристалл. Он обладает множеством необычных свойств, часто уникальных и превосходящих свойства других материалов. В этой краткой лекции мне хотелось бы объяснить причины того, что я (как и многие другие) очарован этим материалом, и пригласить читателя разделить хотя бы часть того волнения, которое я испытал при его исследовании.

### 2. Графен и его необычные свойства

Графен – это двумерный кристалл, состоящий из атомов углерода, выстроенных в гексагональную решётку (рис. 1). Хотя отдельные попытки его изучения прослеживаются до 1859 г. [1], активное и целенаправленное исследование этого материала началось всего лишь несколько лет назад, после того как был найден простой и эффективный способ изготовления относительно больших изолированных образцов графена [2; 3]. Первоначальный метод «клеякой ленты» [2; 3] оказался настолько простым и эффективным, что исследования графена стали развиваться чрезвычайно быстро, и сейчас над разными его аспектами работают сотни лабораторий по всему миру. Метод клейкой ленты, известный также как метод микромеханического расслоения, не требует больших инвестиций или сложного оборудования и поэтому не создаёт серьёзных препятствий для начала ис-

---

<sup>67</sup> Новоселов, К.С. Графен: материалы Флатландии : нобелевская лекция, Стокгольм, 8 декабря 2010 г. / К.С. Новоселов // *Успехи физических наук.* – 2011. – Т. 181, № 12. – С. 1299–1311.



следований, что сильно способствует расширению географии исследований графена.

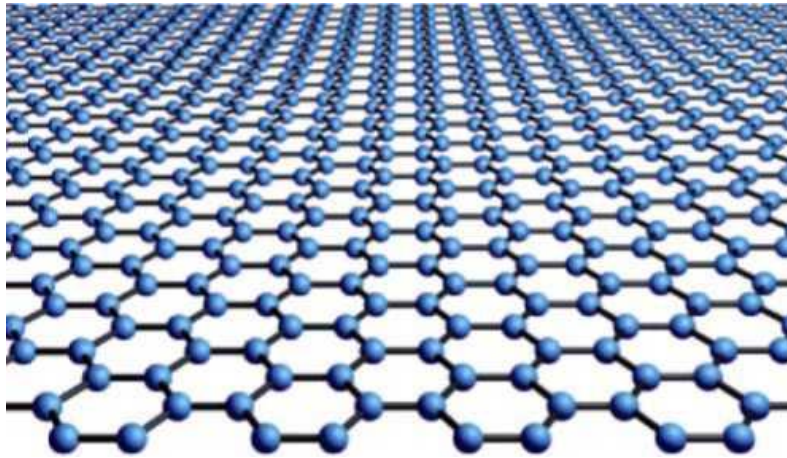


Рис. 1. Кристаллическая структура графена: атомы углерода, выстроенные в решётку «пчелиные соты».

Другая причина широкой популярности графена заключается в том, что он привлекает исследователей из множества различных областей. Это первый представитель двумерных атомных кристаллов, свойства которых в термодинамическом плане существенно отличаются от свойств трёхмерных объектов. Графен также является новой электронной системой с уникальными характеристиками [4]. Его можно рассматривать как гигантскую молекулу, пригодную для химической модификации [5; 6] и перспективную с точки зрения приложений [7; 8], простирающихся от электроники [7–9] до композитных материалов [8; 10; 11]. Все эти факторы позволяют проводить действительно междисциплинарные исследования. Благодаря этим качествам за семь лет, последовавших за первым успешным изготовлением графена, мы накопили огромное множество результатов и испробовали широкий набор различных подходов к его изучению – в других областях науки на это обычно требуется несколько десятилетий.

Тем не менее наиболее притягательная черта графена – его уникальные свойства, каждое из которых превосходит аналогичные свойства материалов-конкурентов. Этот материал представляет собой первый известный нам истинно двумерный атомный кристалл [3]; самый тонкий из когда-либо полученных объектов; самый прочный материал [12]; носители заряда в нём являются безмассовыми дираковскими фермионами [7; 13;

14]; он исключительно хорошо проводит электрический ток [15] и тепло [16]; очень упругий; непроницаем для любых молекул [17] – и этот перечень всё расширяется. Даже простое перечисление превосходных качеств графена потребовало бы нескольких страниц, и каждый месяц в этот список добавляются новые пункты.

В одной лекции невозможно дать исчерпывающий обзор всех свойств графена. Поэтому я ограничусь тремя из них, дающими, на мой взгляд, наиболее полное представление об этом удивительном материале: 1) графен – это первый пример двумерных атомных кристаллов, 2) он демонстрирует уникальные электронные свойства благодаря носителям заряда, ведущим себя как безмассовые релятивистские частицы, и 3) он перспективен для множества приложений.

### 3. Двумерные кристаллы

#### 3.1. Устойчивость двумерных кристаллов

Различие между двумерными и трёхмерными телами можно понять интуитивно: ограничьте размер или движение тела только его длиной и шириной и забудьте о его высоте (или уменьшите её до нуля), и вы получите «Флатландию». Последствия изъятия одного (или более) измерений из нашего трёхмерного мира часто очень серьёзны. Вот несколько примеров: в двумерном пространстве не существует узлов; вероятность достигнуть любой точки в  $d$ -мерном пространстве в процессе случайного блуждания в точности равна единице при  $d = 1$  и  $d = 2$ , но меньше единицы при большей размерности [18]; задача об отталкивающихся бозонах в одномерном пространстве полностью эквивалентна задаче о фермионах, поскольку частицы не могут проникнуть одна сквозь другую и не могут меняться местами [19; 20] (газ Тонкса-Жирардо и фермионизация бозонов в одномерной системе); в одномерных системах невозможно термодинамическое равновесие между разными фазами [21].

Многие необычные свойства, ожидаемые в двумерных системах, возникают из-за так называемых «логарифмических расходимостей», и самый известный пример этого – поправки к проводимости двумерной системы за счёт слабой локализации. В частности, в серии работ Пайерлса

[22; 23], Ландау [21; 24], Мермина [25] и Вагнера [26] была показана невозможность упорядочения (кристаллографического или магнитного) на больших расстояниях в двумерной системе при любой конечной температуре. Неустойчивость двумерных кристаллов является простым следствием расходимостей на малых волновых векторах  $k$  при интегрировании атомных смещений по всему  $k$ -пространству (в этом случае теория должна быть также дополнена учётом изгибных фононов, или смещений, перпендикулярных плоскости [27–29]).

Важно отметить, что такие неустойчивости являются проявлением тепловых флуктуаций и исчезают при  $T = 0$ . К тому же, строго говоря, при любой конечной температуре флуктуации расходятся только для бесконечно больших двумерных кристаллов ( $k \rightarrow 0$ ); поскольку расходимости являются слабыми (логарифмическими), кристаллы ограниченных размеров могут подвергаться бесконечно малым флуктуациям – по крайней мере при низких температурах.

Эти флуктуации накладывают фундаментальное ограничение на изготовление и саму возможность существования кристаллов пониженной размерности. Выращивание или синтез кристаллов обычно требует повышенных температур, при которых устойчивыми в плоской форме могут быть только кристаллы ограниченных размеров, и, поскольку изгибная жёсткость таких кристаллов, как правило, мала, они обычно сминаются и сворачиваются, образуя трёхмерные структуры (что также помогает понизить энергию оборванных связей по краям). Как следствие, самая большая плоская молекула, полученная до сих пор, – это  $C_{222}$  [30], и создана она методом низкотемпературной (при комнатной температуре) циклодегидрогенизации исходной трёхмерной молекулы.

Один из возможных способов обойти проблему неустойчивости двумерного кристалла – это синтез его как части трёхмерной структуры и последующее извлечение двумерной части при низкой температуре (фактически, это основа всех способов получения графена, разработанных по настоящее время) [7]. Флуктуации, которые могли бы расходиться при высоких температурах, подавляются во время синтеза за счёт взаимодействия с трёхмерной матрицей (подложкой), в то время как извлечение двумер-

ных кристаллов может быть произведено при низких температурах, когда флуктуации малы.

### **3.2. Создание графена**

Простейшая реализация этого метода в случае графитовых материалов состоит в расщеплении графита на отдельные плоскости. Графит – слоистый материал, он может рассматриваться как стопка отдельных слоёв графена. Выращивание высококачественного графита обычно требует температур свыше 3000 К, в то время как расщепление может проводиться при комнатной температуре – на порядок ниже температуры выращивания. В самом деле, многие из нас выполняли эту процедуру множество раз, используя карандаш, так как рисование карандашом основано на расщеплении графита (хотя и не до однослойных чешуек, которые были бы почти невидимы невооружённым глазом).

Несколько исследовательских групп [31–37] использовали методы расщепления графена, слегка более "продвинутые" по сравнению с рисованием карандашом, и получали тонкие графитовые плёнки. Но плёнки даже в 20 атомных слоёв ведут себя, в общем, так же, как объёмный графит, поэтому настоящий прорыв возник только тогда, когда были получены однослойные плёнки графена, достаточно большие для изучения традиционными методами [2; 3]. Используемая при этом технология известна как микромеханическое расслоение или метод клейкой ленты (рис. 2). Верхний слой высококачественного графита снимается при помощи фрагмента клейкой ленты, которая – вместе с кристалликами графита – прижимается затем к выбранной подложке. Если сцепление нижнего слоя графена с подложкой превышает сцепление слоёв графена между собой, то слой графена может переместиться на поверхность подложки. В результате при помощи такой удивительно простой процедуры мы получаем кристаллики графена очень высокого качества. В принципе, этот метод работает практически с любой поверхностью, демонстрирующей достаточно хорошее сцепление с графеном.

Однако, главным образом в первых экспериментах, полезный выход этого процесса был чрезвычайно низок и, для того чтобы найти чешуйку

графена микронного размера, приходилось обследовать большие площади поверхности (рис. 3)<sup>68</sup>. Очевидно, такой поиск при помощи традиционных методов микроскопии, таких как атомная силовая или сканирующая электронная микроскопия, является почти неосуществимой задачей; на практике эта задача по силам только оптической микроскопии, основывающейся на высокой чувствительности, быстродействии и производительности человеческих глаз и мозга. Поэтому весьма приятным сюрпризом оказалось то, что монослои графита на некоторых подложках (например Si/SiO<sub>2</sub> со слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 300 нм) могут обеспечивать оптический контраст вплоть до 15% для некоторых длин волн падающего света. Это явление, хорошо понятое сейчас [38; 39], позволило большинству экспериментаторов, в течение нескольких лет занимающихся изготовлением графена методом микромеханического расслоения, остановить свой выбор на подложке Si/SiO<sub>2</sub> со слоем оксида толщиной 100 либо 300 нм.

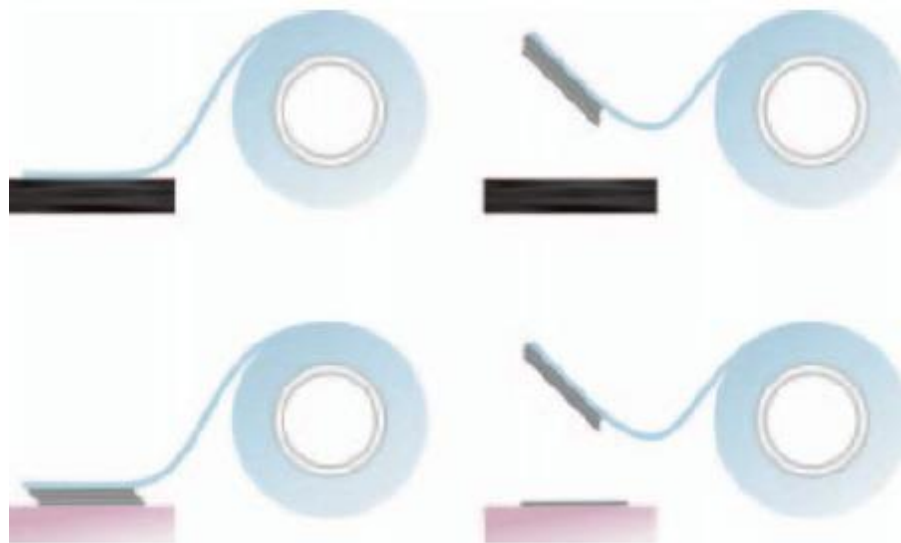


Рис. 2. Метод микромеханического расслоения (или метод клейкой ленты) для изготовления графена. Верхний ряд: клейкая лента используется, чтобы отщепить несколько верхних слоёв графита от объёмного кристалла. Внизу слева: лента с чешуйками графита затем прижимается к выбранной подложке. Внизу справа: некоторые чешуйки остаются на подложке даже после удаления ленты

<sup>68</sup> В электронной версии Нобелевской лекции рисунки даны в цветном изображении (см. сайт УФН [www.ufn.ru](http://www.ufn.ru)).

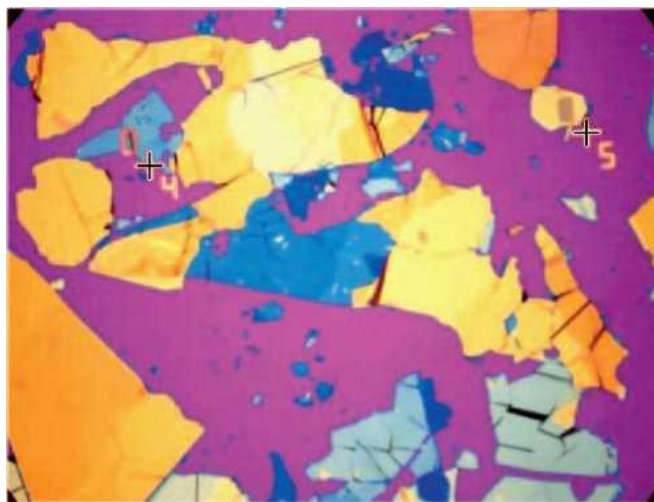


Рис. 3. (В цвете онлайн) Тонкие графитовые чешуйки на поверхности пластины Si/SiO<sub>2</sub> (слой SiO<sub>2</sub> толщиной 300 нм фиолетового цвета). Разные цвета отвечают чешуйкам разной толщины, от ~ 100 нм (бледно-жёлтые) до нескольких нанометров (наиболее близкие к фиолетовому). Масштаб задан расстоянием между литографическими отметками (200 мкм)

Похожие способы (выращивание графена как части трёхмерной системы при высокой температуре с последующим извлечением двумерной части при низкой температуре) были использованы в других методах изготовления графена. Возможно, самым близким к микромеханическому расслоению является метод химического расслоения, который может быть прослежен вплоть до оригинальной работы профессора Броди [1], обрабатывавшего графит кислотами и получившего «графон» (или оксид графена, каким мы знаем его сейчас). Оксид графена может рассматриваться как графит, интеркалированный кислородными и гидроксильными группами, которые превращают его в гидрофильный материал, легко рассыпающийся в воде. Этот метод даёт тонкие, иногда однослойные, чешуйки оксида [40–44], которые впоследствии могут быть восстановлены до низкокачественного графена [5; 10; 45–47].

Можно представить даже более простой способ химического расслоения. Хотя графен гидрофобен, он легко образует суспензию в других, главным образом органических, растворителях [48; 49]. Повторяя процессы растворения и очистки (центрифугирования) несколько раз, можно получить долю графена в суспензии 50% и более.

Существуют хорошо известные рецепты выращивания графена, пришедшие из науки о поверхностях. Давно известно, что каталитическое разложение углеводородов или осаждение углерода из раствора на поверхности металла с последующей графитизацией дают возможность получить слои графена высокого качества [50–57]. Похожим процессом является графитизация избыточных атомов углерода, образующихся после сублимации кремния с поверхности карбида кремния [58; 59]. Следует отметить, что во всех этих случаях графен также должен быть получен изначально как часть трёхмерной структуры, поскольку подложка помогает подавить расходящиеся флуктуации при высоких температурах.

### 3.3. Другие двумерные кристаллы

До сих пор мы говорили в основном о графене, но семейство двумерных материалов, разумеется, не ограничивается углеродными кристаллами, хотя при попытках синтеза других двумерных материалов возникают похожие проблемы. На ум сразу же приходят два способа получения других двумерных кристаллов.

Одна из возможностей – это применить к другим химическим соединениям те же приёмы, которые мы видели работающими в случае графена.

Микромеханическое или химическое расслоение может быть успешно использовано в случае других слоистых материалов (рис. 4), таких как  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  [3],  $\text{NbSe}_2$  [3],  $\text{BN}$  [3],  $\text{MoS}_2$  [3; 60],  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  [61] и другие дихалькогениды, а эпитаксиальное выращивание было использовано для получения монослоёв нитрида бора [62; 63]. Как и в случае графена, кристаллическое совершенство полученных однослойных образцов оказалось очень высоким. Многие из этих двумерных материалов проводят ток и даже демонстрируют эффекты поля (изменение сопротивления при электростатическом допировании). Свойства полученных двумерных материалов могут сильно отличаться от свойств их трёхмерных прекурсоров (веществ-предшественников). К примеру, перекрытие валентной зоны и зоны проводимости в графене в точности равно нулю, но отлично от нуля в графите [2], а монослой дисульфида молибдена яв-



ляется прямозонным полупроводником, в то время как объёмный материал имеет непрямую щель [60].

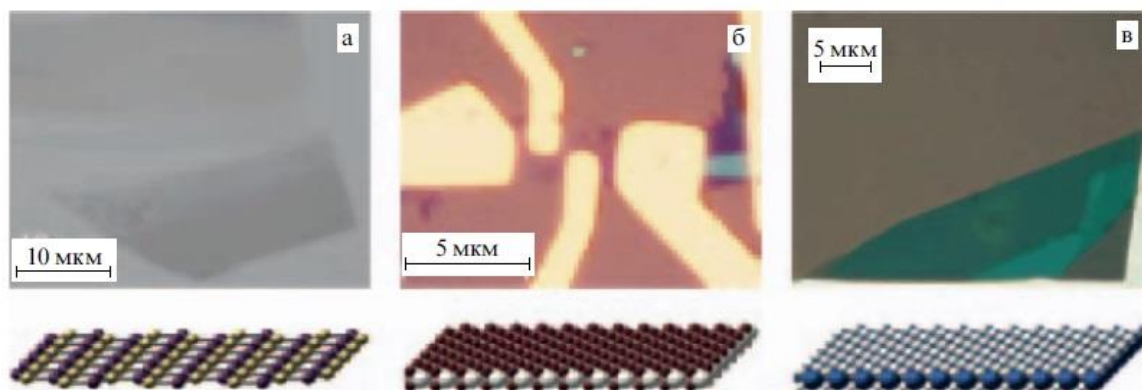


Рис. 4. (В цвете онлайн) Оптические микрофотографии различных двумерных кристаллов (сверху) и их кристаллическая структура (снизу): (а) Чешуйки нитрида бора на поверхности окисленной пластины Si (290 нм SiO<sub>2</sub>, снимок сделан с помощью узкополосного жёлтого светофильтра,  $\lambda = 590$  нм); центральный кристалл – однослойный; (б) устройство, изготовленное из одно- и двухслойных кристаллов NbSe<sub>2</sub> на окисленной пластине Si (290 нм SiO<sub>2</sub>); (в) чешуйки MoS<sub>2</sub> на поверхности пластины окисленного Si (90 нм SiO<sub>2</sub>). Фрагмент в правом нижнем углу – однослойный. Цветовые обозначения кристаллической структуры внизу: жёлтые сферы – бор, фиолетовые – азот; большие белые сферы – ниобий, красные – селен, синие – молибден, маленькие белые сферы – сера

Другой подход состоит в том, чтобы взять существующий двумерный материал и модифицировать его химически, получив новый материал. Например, графен может рассматриваться как гигантская молекула. В принципе, все атомы этой молекулы поддаются химическим реакциям (в противоположность трёхмерному случаю, где атомы из глубины кристалла не могут участвовать в реакциях).

Благодаря разносторонним свойствам атомов углерода графен является особенно хорошим кандидатом для такого рода модификаций. В зависимости от окружения, электронная конфигурация атома углерода (имеющего четыре электрона на внешней оболочке) может значительно изменяться, позволяя ему связываться с двумя, тремя или четырьмя другими атомами. Связь между атомами углерода исключительно сильная (все прочнейшие материалы на Земле основаны на углероде), в то время как связь углерода с атомами других элементов хоть и стабильна, но может меняться в ходе химических реакций. Вот пример такого многообразия свойств: каждый из атомов углерода, составляющих димер, может



присоединять к себе один, два или три атома водорода, образуя соответственно этин (также известный как ацетилен), этен (этилен) или этан. Каждое из этих соединений можно превратить в остальные добавлением или удалением водорода, приводя электронную конфигурацию атомов углерода к виду так называемой  $sp$ -,  $sp^2$ - или  $sp^3$ -гибридизации.

В графене атомы углерода  $sp^2$ -гибридизованы, а это означает, что только три электрона образуют сильные  $\sigma$ -связи, а оставшийся электрон обобществляется, образуя так называемые  $\pi$ -связи. Таким образом, графен оказывается полуметаллом с нулевым перекрытием зон и очень хорошо проводит электрический ток (в отличие от алмаза, где каждый атом углерода находится в  $sp^3$ -гибридизованном состоянии и, таким образом, имеет четырёх соседей. В этом случае все четыре электрона из внешней оболочки вовлечены в формирование  $\sigma$ -связей, в результате чего в зонной структуре возникает огромная щель, делающая алмаз изолятором). Поэтому разносторонность атомов углерода подаёт нам идею создания новых двумерных кристаллов: к атомам углерода можно присоединить что-либо, получая новый материал с другим химическим составом и интересными свойствами.

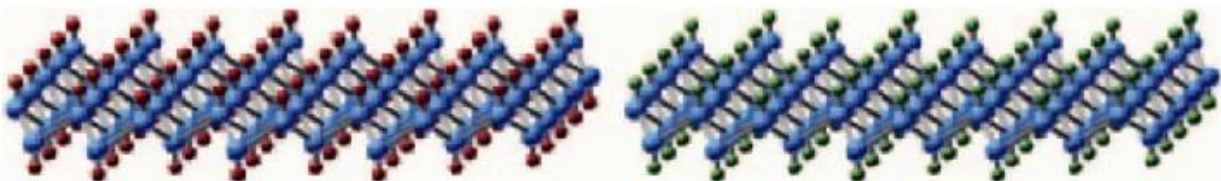


Рис. 5. (В цвете онлайн) Химически модифицированный графен.

К графеновой основе можно добавлять атомы разных видов (например водород или фтор). Атомы углерода представлены синими сферами

К графену может быть присоединено множество различных веществ. Однако до настоящего времени были предсказаны и получены только две кристаллически упорядоченные химические модификации графена: графан (с одним атомом водорода, присоединённым к каждому атому углерода) [64, 65] и фторграфен (рис. 5) [66-69]. Обе производные являются изоляторами (с широкой запрещённой зоной) очень хорошего кристаллического качества и очень устойчивы при комнатной температуре (хотя

следует упомянуть, что в целом фторграфен демонстрирует большую стабильность, вероятно, из-за большей прочности связи C–F по сравнению с C–H). Графан и фторграфен открывают возможности химических модификаций графена и создания новых двумерных атомных кристаллов с заданными свойствами. Было бы интересно увидеть другие производные, которые, возможно, заполнят зазор между графеном и графаном в плане электропроводности (ширины запрещённой зоны).

Теперь ясно, что значение графена состоит не только в том, что он обладает уникальными свойствами, но и в том, что он подготовил почву для получения и синтеза многих других двумерных материалов и стимулировал к ним интерес. Сейчас мы можем говорить о целом новом классе материалов – двумерных атомных кристаллах – и уже видим их представителей с очень разнообразными свойствами (от изоляторов с большой щелью до самых лучших проводников, от чрезвычайно прочных до мягких или хрупких и от химически активных до крайне инертных). Более того, многие свойства этих двумерных материалов сильно отличаются от свойств их трёхмерных прекурсоров. Таким образом, даже по истечении семи лет напряжённых исследований графен до сих пор регулярно преподносит сюрпризы, и можно ожидать огромного наплыва захватывающе интересных результатов в области двумерных атомных кристаллов.

### **3.4. Обратно в пространство: гетероструктуры на основе двумерных материалов**

Как отмечалось выше, свойства двумерных кристаллов сильно отличаются от свойств их трёхмерных прекурсоров. Даже двухслойный графен [70, 71] (два слоя графена, положенные один на другой посредством специальной, так называемой берналовской, или *A–B* укладки) поразительно отличается от однослойного графена. Последний является полуметаллом с нулевым перекрытием и линейной дисперсионной зависимостью, в то время как в двухслойном графене зоны параболические, причём в случае нарушения симметрии между двумя слоями (например, с помощью приложенного между слоями внешнего электрического поля) в спектре открывается щель [72–75]. Тем не менее, свойства многослойных материалов определяются не

только количеством слоёв [2; 76], но и тем, как именно эти слои сложены. К примеру, в случае графита можно рассмотреть берналовскую, ромбоэдрическую, гексагональную или турбостратическую укладки, а в двухслойном графене малый поворот между отдельными слоями приводит к появлению сингулярностей Ван Хофа при низких энергиях [77–80].

Поскольку двумерными кристаллами легко манипулировать, мы можем создавать также стопки этих кристаллов в соответствии с нашими требованиями. Здесь можно говорить не только о стопках одинаковых материалов: мы можем объединять в одну стопку несколько различных двумерных кристаллов. В один нужный нам слоистый материал мы можем скомпоновать изолирующие, проводящие и, вероятно, сверхпроводящие и магнитные слои, причём свойства таких гетероструктур будут зависимыми от порядка укладки и легко регулируемы.

Таким образом, нам открывается совершенно новый мир "материалов по заказу". Поскольку набор исходных двумерных кристаллов очень широк, свойства таких гетероструктур могут покрыть гигантский диапазон параметров, совмещая в себе характеристики, об объединении которых в одном материале мы раньше не смели даже думать.

Первые члены этого огромного семейства уже есть. Складывая (поочерёдно) монослои изолирующего нитрида бора и графена, можно получить слабо связанные слои графена, взаимодействие между которыми будет зависеть от количества слоёв нитрида бора между плоскостями графена (рис. 6). Взаимодействие между слоями графена варьируется от туннелирования (при одном или двух слоях нитрида бора в промежутках) до чисто кулоновского (при более широких промежутках).

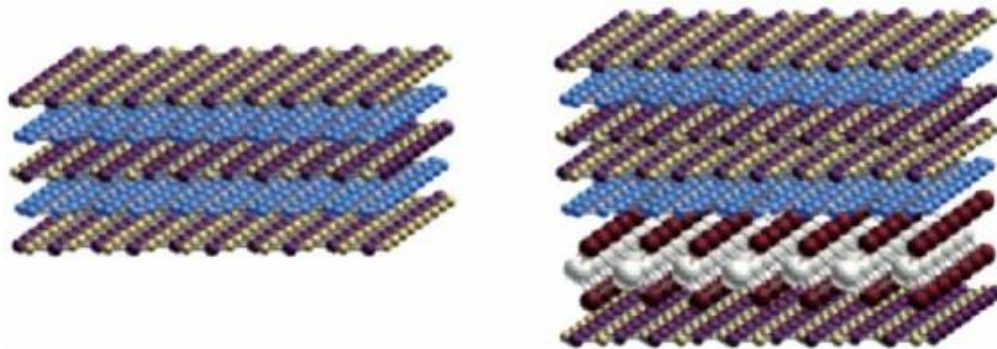


Рис. 6. (В цвете онлайн) Гетероструктуры на основе двумерных материалов. Синие сферы – атомы углерода, жёлтые – бор, фиолетовые – азот, белые – ниобий, красные – селен

## 4. Киральные квазичастицы и электронные свойства графена

### 4.1. Линейная дисперсионная зависимость и киральность

Электронные свойства – вот что действительно делает графен особенным. Графен – полуметалл с нулевым перекрытием зон, валентная зона и зона проводимости которого касаются в двух точках (К и К') зоны Бриллюэна [81–83] (рис. 7). Подобная электронная структура является следствием гексагональной симметрии решётки графена (не относящейся к решёткам Браве): она содержит два атома в каждой элементарной ячейке и может рассматриваться как две взаимопроникающие треугольные решётки. Орбитали  $p_z$  атомов углерода гибридизуются, формируя зоны  $\pi$  и  $\pi^*$ , пересечение которых в точках К и К' формирует бесщелевой спектр с линейной дисперсией. Итак, отсутствие щели между валентной зоной и зоной проводимости графена очень устойчиво и является следствием симметрии между подрешётками [83] (в нитриде бора симметрия между подрешётками нарушена – одна из них состоит из азота, другая – из бора, поэтому в спектре открывается огромная щель [84]).

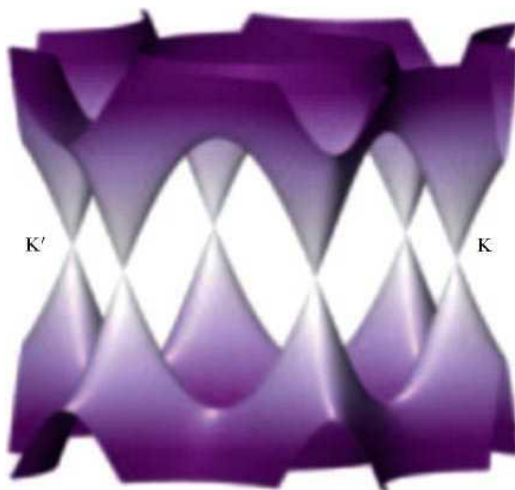


Рис. 7. Низкоэнергетическая зонная структура графена

Линейная дисперсия уже сама по себе делает графен особенным, однако этим дело не ограничивается. Состояния в валентной зоне и зоне проводимости описываются, по сути, одной и той же спинорной волновой функцией, поэтому электроны и дырки связаны зарядовым сопряжением.

Эта связь подразумевает, что квазичастицы в графене обладают киральной симметрией, подобной симметрии, существующей между частицами и античастицами в квантовой электродинамике (КЭД). Такая аналогия между релятивистскими частицами и квазичастицами в графене крайне полезна и приводит к интересным интерпретациям многих явлений, наблюдаемых в экспериментах [85].

#### 4.2. Парадокс Клейна

Наверное, самый удивительный результат киральной симметрии квазичастиц – это предсказание [86] и наблюдение [87; 88] парадокса Клейна в графене (естественным объектом для его исследования являются р–п переходы [89]). Парадокс [90; 91] связан с увеличением вероятности туннелирования релятивистской частицы, приближающейся к единице, когда высота барьера превышает  $2m_0c^2$  (здесь  $m_0$  – масса покоя частицы,  $c$  – скорость света), и в точности равной единице для безмассовых частиц. Это можно рассматривать как следствие подавления рассеяния назад (безмассовые релятивистские частицы, как и фотоны, всегда движутся с постоянной скоростью – скоростью света, в то время как рассеяние назад требует обращения скорости в нуль в точке поворота) или же как рождение и аннигиляцию пар частица–античастица в областях сильного электрического поля за счёт механизма Швингера [92].

Парадокс Клейна для киральных квазичастиц в графене приводит к превращению электрона внутри потенциального барьера в дырку и к равной единице вероятности туннелирования через такой барьер, по крайней мере, при нормальном падении [86; 89; 93; 94]. Это, в свою очередь, ведёт к отсутствию локализации [95;96] и конечной минимальной удельной проводимости [7] даже в графене с умеренным беспорядком, который в пределе формально нулевой концентрации носителей заряда разбивается на электронно-дырочные лужи [97]. Отсутствие рассеяния назад, ведущее к парадоксу Клейна, также обеспечивает положительный знак квантовых (интерференционных) поправок к проводимости (как минимум, в пренебрежении междолинным рассеянием и эффектом треугольного искажения)

[4; 98], приводящих к слабой антилокализации, которая действительно наблюдалась в экспериментах [99; 100].

### 4.3. Полуцелый квантовый эффект Холла

Симметрия по отношению к зарядовому сопряжению между электронами и дырками гарантирует также, что в точности при  $E = 0$  всегда будет существовать энергетический уровень. В магнитном поле эта симметрия приводит к последовательности уровней Ландау вида  $E_n = \pm[2e\hbar v^2 B(n + 1/2)]^{1/2}$  (здесь  $e$  – заряд электрона,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $B$  – магнитное поле,  $v$  – скорость Ферми,  $n = 0, 1, 2, \dots$ ), весьма отличающейся от таковой для нормальных массивных частиц. Член  $\pm 1/2$  связан с киральностью квазичастиц и обеспечивает существование двух энергетических уровней (электронного и дырочного) в точности при нулевой энергии, каждый из которых имеет вдвое меньшее вырождение, чем все остальные уровни Ландау [101-107].

В экспериментах такая цепочка уровней Ландау обнаруживается в наблюдении «полуцелого» квантового эффекта Холла [13; 14] (рис. 8). Вдвое меньшая степень вырождения нулевого уровня Ландау проявляется в виде плато в холловской удельной проводимости на значениях  $\pm 1/2(4e^2/h)$  при факторах заполнения  $\pm 2$ . Кроме того, из-за линейной дисперсионной зависимости и относительно большой величины скорости Ферми ( $v \approx 10^6$  м с<sup>-1</sup>) расстояние между нулевым и первым уровнями Ландау необычайно велико (превышает комнатную температуру даже в умеренном магнитном поле 1 Тл). В сочетании с малым уширением нулевого уровня Ландау [108] это приводит к возможности наблюдения квантового эффекта Холла даже при комнатных температурах [108]. Это весьма захватывающая новость для людей, работающих в области метрологии, поскольку появляется возможность сильно упростить реализацию квантового стандарта сопротивления (не требующую теперь сверхнизких температур), и такая идея была недавно подкреплена несколькими экспериментами [110; 111].

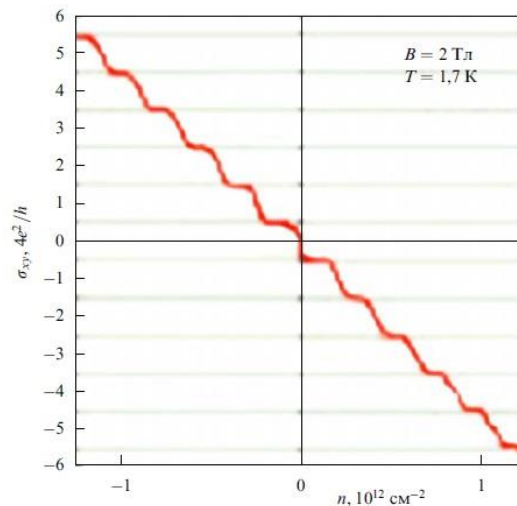


Рис. 8. Холловская удельная проводимость как функция концентрации носителей

#### 4.4. Влияние механических деформаций

Важно помнить, что графен – не просто ещё одна двумерная электронная система, подобная электронам в канале кремниевого полевого МОП-транзистора или в двумерных квантовых ямах на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs. Графен – настоящий двумерный атомный кристалл, имеющий все свойства двумерной электронной системы. Этот, по сути, самый тонкий материал из всех возможных может с лёгкостью механически деформироваться и растягиваться [12; 17; 112–116], сжиматься [117], сворачиваться [80, 118], покрываться рябью [119] и даже разрываться на куски [120]. Разумеется, любое из этих механических воздействий приводит к сильным изменениям электронной структуры [121–123].

Например, можно показать, что натяжение эквивалентно появлению локального магнитного поля (направленного в противоположные стороны для квазичастиц из долин  $K$  и  $K'$ , что сохраняет симметрию по отношению к обращению времени); в частности, этот сценарий использовался для объяснения подавления слабой локализации [99; 124] и дополнительного уширения всех уровней Ландау, за исключением нулевого [108]. В принципе, можно представить конструирование распределений натяжения специальной геометрии, при которых электронная структура будет изменяться так, как будто к определённой области образца приложено постоянное магнитное поле [125; 126]. Поскольку графен механически прочен и очень эластичен [12], прикладываемые натяжения (и соответственно псевдомаг-



нитные поля, которые при этом возникнут) могут быть чрезвычайно сильными и приводящими к открытию заметных щелей в электронном спектре [127]. Это позволяет нам говорить о совершенно новом и полностью не исследованном направлении в электронике: деформационной инженерии электронной структуры [123] и валлейтронике<sup>69</sup> [128–130].

#### 4.5. Графеновая оптика

Можно ли ждать чего-то интересного от оптических свойств графена? Несмотря на одноатомную толщину, графен поглощает довольно большую долю света, что весьма парадоксально. В инфракрасном пределе коэффициент поглощения в точности равен  $\pi\alpha \approx 2,3\%$  (где  $\alpha = e^2/\hbar c$  – постоянная тонкой структуры), а поправки к этому значению в видимой области спектра составляют менее 3% [131–134]. Такой заметный коэффициент поглощения даёт возможность видеть графен без использования микроскопа; получается, что наиболее фундаментальную константу нашей Вселенной можно наблюдать буквально невооружённым глазом. При более высоких частотах поглощение усиливается, достигая 10% из-за наличия сингулярностей Ван Хова на краях зоны [135; 136].

Регулируя концентрацию носителей заряда, можно сдвигать положение уровня Ферми и изменять оптическое поглощение графена за счёт действия принципа Паули [133]. Так как плотность состояний в графене относительно невелика (по крайней мере вблизи дираковской точки), то даже электростатического допирования может оказаться достаточно, чтобы сдвинуть уровень Ферми вплоть до нескольких сотен мэВ [137]; поэтому блокирование за счёт принципа Паули происходит в видимой области спектра. Осуществляя такое сильное допирование в последовательности из нескольких десятков слоёв графена, можно было бы в значительной степени регулировать прохождение света через такие структуры – а это было бы перспективно для создания новых устройств фотоники.

---

<sup>69</sup> Валлейтроника (*англ.*, valleytronics) – новая перспективная альтернатива электронике, в которой, как планируется, информация будет переноситься не электрическим током (как в обычной электронике), а переносом «поляризации» электронного газа по долинам К и К'. Аналогично, в спинтронике информация переносится спиновыми токами, представляющими собой движение спиновой плотности электронного газа (*примеч. перев.*)



#### 4.6. Двухслойный графен

Хотя для получения двухслойного графена нужно добавить всего лишь один слой графена поверх существующего, свойства получившейся системы не просто повторяют удвоенные свойства однослойного кристалла; это один из случаев, когда «один плюс один – больше, чем два». Двухслойный графен существенно отличается от однослойного, иногда показывая даже более богатые свойства, и полностью заслуживает того, чтобы его называли самостоятельным материалом.

Два слоя графена, сложенные вместе, не стремятся ложиться в точности один над другим так, чтобы каждый атом имел партнёра в соседнем слое (в отличие от нитрида бора, с которым именно это и происходит). Вместо этого двухслойный графен в основном [78] оказывается в состоянии с так называемой *A–B*, или берналовской, укладкой [138], названной в честь известного английского учёного Джона Десмонда Бернала, одного из основателей рентгеновской кристаллографии, определившего структуру графита в 1924 г. При таком размещении только половина атомов углерода имеет соседей в другом слое, а другая половина не имеет (и проецируется прямо в центры шестиугольников) (рис. 9). Квантовые перескоки электронов между взаимодействующими атомами разных слоёв (интегралы перескока, обычно обозначаемые как  $\gamma_1$ , составляют около 300 мэВ) формируют пару высокоэнергетических электронных подзон [70; 71; 139]. Их отклонение от нулевой энергии (положения уровня Ферми в недопированном двухслойном графене) в точности равно  $\gamma_1$ , поэтому эти подзоны не дают вклада в электронный транспорт до тех пор, пока не достигаются очень высокие уровни допирования (хотя в оптических экспериментах эти подзоны легко наблюдаются [140; 141]) (рис. 10).

Невзаимодействующие атомы разных слоёв дают начало низкоэнергетическим зонам, всё ещё пересекающимся при нулевой энергии (как и в однослойном графене), но имеющим параболическую форму (см. рис. 10). Симметрия между слоями является здесь аналогом симметрии подрешёток в однослойном графене и обеспечивает киральную симметрию между электронами и дырками. Таким образом, мы получаем квазичастицы нового типа в графене – массивные киральные фермионы – не имеющие анало-

гов в КЭД [70; 71]. Подобно случаю однослойного графена, киральность проявляется в квантовом эффекте Холла необычного вида. В магнитном поле последовательность уровней Ландау имеет вид  $E_N = \pm \hbar \omega_c \sqrt{N(N-1)}$ ; где  $\omega_c = eB/m^*$  – циклотронная частота,  $m^* = \gamma_1/2v^2$  – циклотронная масса. Легко видеть, что при нулевой энергии существуют два уровня Ландау (с  $N = 0$  и  $N = 1$ ), которые снова приводят к необычной последовательности холловских плато и металлическому поведению в пределе нулевого фактора заполнения (как минимум, в пренебрежении многочастичными эффектами) [70, 71].

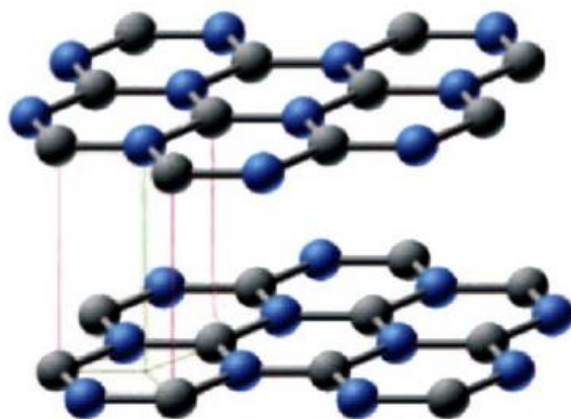


Рис. 9. Кристаллическая структура двухслойного графена



Рис. 10. Зонная структура двухслойного графена в окрестности точки К

Как было сказано, киральная симметрия однослойного и двухслойного графена обеспечивается симметрией между подрешётками. В случае

однослойного графена нарушить такую симметрию весьма трудно – для этого нужно аккуратно прикладывать какой-либо потенциал к атомам, принадлежащим только одной подрешётке, прикладывая в то же время к другой подрешётке другой потенциал, – но в двухслойном графене это сделать можно. Прикладывая затворное напряжение или химически допируя графен только с одной стороны, мы можем нарушить симметрию между слоями и, следовательно, между подрешётками (нарушив симметрию по отношению к пространственной инверсии). Это приводит к снятию киральной симметрии и открытию щели в спектре. Оба способа реализованы в экспериментах и дали замечательный результат: оказалось, что можно открыть щель до 0,5 эВ [72–74; 140–143]. Итак, двухслойный графен представляет собой редкий пример материала, в котором запрещённой зоной можно непосредственно управлять электрическим полем, приложенным поперёк слоёв (причем её ширина прямо пропорциональна величине поля).

По мере улучшения качества образцов двухслойного графена [144–146] мы обнаружим в нём ещё больше интересных явлений. В частности, ожидаются такие эффекты, как топологические переходы при низкой электронной плотности [146], экситонные эффекты [147] и топологические одномерные состояния [130].

## 5. Применения графена

Поклонники американского ситкома *Теория Большого взрыва* (блестяще снятого Чаком Лорри) могут вспомнить эпизод «Приближение Эйнштейна», в котором специалист по теории струн Шелдон Купер пытается решить «проблему графена»: почему квазичастицы в графене ведут себя как безмассовые дираковские фермионы? (рис. 11). Как обычно, всё снято восхитительно, особенно блестящее гротескное изображение актёром Джимом Парсонсом тяжёлого, но увлекательного процесса поиска решения научной задачи. Наверное, это лучший эпизод с точки зрения физики (благодаря Чаку Лорри, сценаристам и научному консультанту Дэвиду Зальцбергу), так как научная проблема в нём является центром всей интриги, вместо того чтобы, как обычно, просто служить для соединения частей (ещё один пример, который я могу вспомнить, – это эпизод о статье

про суперсолид). Хотелось бы думать, что причина этого – простая и привлекательная физика графена, сложная как Шелдон, красивая как Пенни, экзотическая как Радж, практичная как Леонард и назойливая как Говард. В день съятия этого эпизода профессор Зальцберг написал в своем блоге: «...графен захватил воображение физиков своим потенциалом для приложений». Действительно, приложения для графена уже готовы.

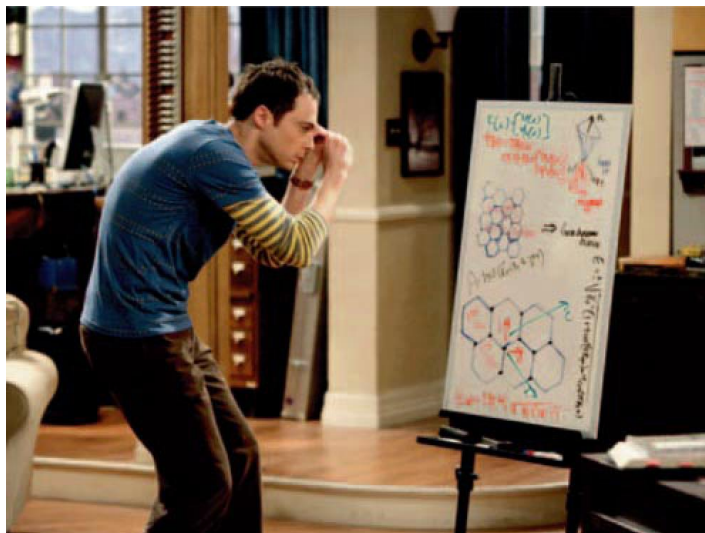


Рис. 11. Шелдон Купер (Джим Парсонс): «...или разделяя члены его формулы и изучая их по отдельности, или наблюдая за аллигатором, проглотившим его руку после того, как её отрезал Питер Пэн». Из *Теории Большого взрыва*, 3-я серия, 14-й эпизод, «Приближение Эйнштейна». Фотография: Sonja Flemming/CBS©2010 CBS Broadcasting Inc

Цель этой главы – не прорекламирровать *Теорию Большого взрыва*, а показать характер применений, которых мы ждём от графена. Тот факт, что одно из первых практических применений графена появилось не в такой предсказуемой области, как транзисторы или фотоника, а в индустрии развлечений, указывает на его огромный потенциал и разносторонность. Действительно, в графене мы получаем уникальное сочетание свойств, которое нигде больше не встречается: проводимость и прозрачность, механическая прочность и эластичность. Графен может успешно заменить множество материалов в огромном числе существующих приложений, но мне хотелось бы видеть, чтобы дела двигались в другом направлении – чтобы уникальное сочетание свойств графена способствовало появлению принципиально новых приложений.

### 5.1. Графеновая подложка

Хотелось бы начать с рассказа об относительно простых графеновых устройствах для довольно узкой области: графеновые подложки для изучения биологических и других образцов методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [148–150]. Они привлекательны по простой причине – графеновые мембраны уже имеются на рынке и продаются несколькими компаниями как в Европе, так и в США.

Графен – предельно тонкий, предельно проводящий, предельно механически прочный и кристаллографически упорядоченный материал, и использование его в качестве подложки для нанообъектов при наблюдении их с помощью ПЭМ было бы очень выгодным. Его механическая прочность обеспечивает достаточную жёсткость и простоту приготовления образцов, и, кроме того, он имеет очень высокий порог радиационных повреждений (порядка 80 кэВ). Высокая электропроводность снимает проблему накопления заряда на подложке. Имеющий толщину всего в один атом (и состоящий из очень лёгкого элемента), графен обеспечивает наивысшую возможную степень контрастности (более высокий контраст можно получить, только подвесив образец). Наконец, за счёт хорошей кристаллографической упорядоченности графен образует мало дифракционных пятен, которые могут быть легко отфильтрованы, что даст изображение, совсем не искажённое наличием подложки. Хотя графен сам по себе хорошо совместим с биомолекулами, он также может быть функционализирован для достижения нужного поверхностного потенциала (например, его свойства можно изменить от гидрофобных до гидрофильных). Химические модификации графена уже хорошо разработаны, но в этой области всё ещё остаётся множество новых возможностей [5; 6].

Свободно висящие графеновые мембраны первоначально были сделаны из графена, полученного методом микромеханического расслоения [151; 152], и для своего изготовления требовали нескольких литографических процедур. С появлением графена, выращенного химическим газофазным осаждением (CVD) [153; 154], процедура сильно упростилась, открыв путь к изготовлению мембран в промышленных масштабах. Графен, выращенный эпитаксиально на поверхности металла (либо осаждением раство-

рѐнного углерода при охлаждении, либо непосредственно каталитическим разложением углеводородов на горячей поверхности металла с последующей графитизацией), покрывается слоем полимера. Затем металлическая подложка удаляется травлением, а полимерная плѐнка (с прикреплѐнным к ней графеном) может быть перемещена практически на любую поверхность. Например, её можно поместить на металлическую сетку с отверстиями размером в несколько микрометров, где, после удаления полимерной плѐнки, образуется свободно висящая графеновая мембрана (рис. 12). Весь этот процесс хорошо воспроизводим и может дать в результате графеновые мембраны большой суммарной площади.

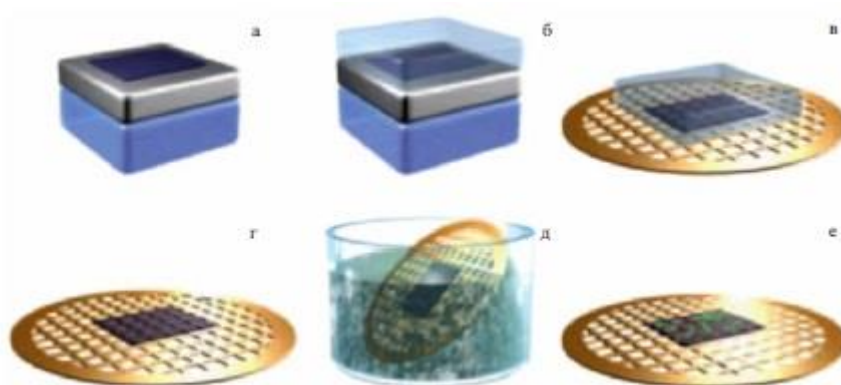


Рис. 12. Изготовление графеновых мембран для применения в качестве подложек в ПЭМ: Графен, выращенный на металле (а), покрывается слоем полимера (б). Слой металла вытравливается, и графен на полимере накладывается на стандартную ПЭМ-сетку (в). После удаления слоя полимера (г) графеновая мембрана может быть помещена в раствор биомолекул (д), которые адсорбируются на ней (е) и могут изучаться при помощи ПЭМ

## 5.2. Прозрачные проводящие покрытия

Другая область, которая должна значительно выиграть от появления CVD-графена, – это изготовление прозрачных проводящих покрытий. Графен необычайно оптически активен [131–133; 135], и его монослой поглощает довольно большую долю падающего света (2,3%), но это, тем не менее, гораздо меньше, чем типичные коэффициенты поглощения, достижимые у материалов, традиционно используемых для прозрачных и проводящих покрытий [155]. В сочетании с низким электрическим сопротивлением, высокой химической стабильностью и механической прочностью

такой коэффициент поглощения делает графен привлекательным материалом для оптоэлектронных устройств.

Прозрачные проводники являются существенной частью многих оптических устройств – от солнечных батарей до жидкокристаллических и сенсорных экранов. Для этих целей традиционно используют оксиды металлов или тонкие металлические плёнки [155]. Однако при существующих технологиях, которые зачастую сложны (например, тонкие металлические плёнки требуют антиотражательных покрытий) и дороги (часто используются редкие или благородные металлы), всегда вёлся поиск новых типов тонких проводящих плёнок. Более того, многие широко используемые оксиды металлов демонстрируют неоднородное поглощение в видимой области спектра и химически неустойчивы; например, известно, что часто применяемый оксид индия и олова (ИТО,  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ ) внедряет ионы кислорода и олова в активные среды устройства.

У графена все эти недостатки отсутствуют. Кроме того, недавно было показано, что методом CVD могут быть выращены и помещены практически на любую поверхность слои графена огромной площади [115; 153; 154]. Уже созданы первые устройства-прототипы (солнечные батареи и жидкокристаллические дисплеи), в которых графен использован как прозрачное проводящее покрытие [48; 156].

### 5.3. Графеновые транзисторы

Даже самые первые полевые транзисторы на основе графена показали хорошие характеристики: будучи изготовленными довольно простыми методами в плохо контролируемых внешних условиях, они продемонстрировали весьма высокую подвижность квазичастиц (доходящую до  $20000 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ) [2; 3] (рис. 13). Хотя роль различных механизмов рассеяния всё ещё является предметом дискуссий [95; 107; 157–168], тщательное устранение кулоновских и резонансных рассеивателей, так же как и ряби на поверхности графена, позволило достигнуть подвижностей более  $10^6 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  при низких температурах [169] и в свободно висящих образцах [144; 145] и подало надежду на то, что при комнатных температурах могут быть достигнуты значения около  $10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  [170].

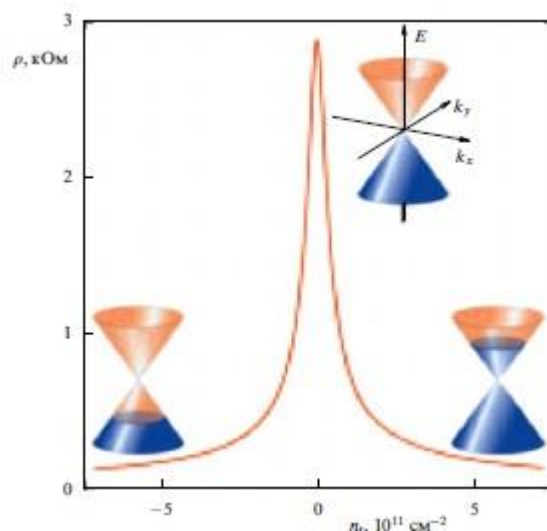


Рис. 13. Амбиполярный эффект поля в графене

Такие характеристики делают графеновые полевые транзисторы чрезвычайно многообещающими для применения в высокочастотных устройствах [171; 172]. Дополнительные преимущества возникают также из-за очень удобной электростатики двумерных плёнок и высокой скорости Ферми (важной в баллистическом режиме). Даже при использовании графена с весьма умеренной подвижностью ( $\sim 10^3 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ) усиление по току было достигнуто на частотах до 100 ГГц в транзисторах с каналом длиной 240 нм (усиление по мощности для подобных устройств достигалось до 14 ГГц) [173]; это выше, чем в кремниевых полевых МОП-транзисторах с такой же длиной канала.

Для интегральных схем обстоятельства не столь обнадеживающие. За счёт парадокса Клейна графен имеет минимальную удельную проводимость (порядка  $4e^2/h$ ) даже в предельно нулевой концентрации носителей. Это слишком большая величина для применений в логических элементах, поскольку ведёт к высоким токам утечки в состоянии «выключено» и ограничивает возможную величину отношения «включено/выключено» таких транзисторов примерно до  $10^3$  даже в очень благоприятных условиях.

Однако для повышения отношения включено/выключено графеновых транзисторов можно придумать ряд уловок. Одна из них – использование графеновых наноструктур пониженной размерности, таких как графеновые наноленты [174], квантовые точки [175] и одноэлектронные тран-



зисторы [175; 176], в которых может быть создана запрещённая зона за счёт размерного квантования или кулоновской блокады. Мельчайшие квантовые точки (размером в несколько нанометров) продемонстрировали значительную щель порядка нескольких сотен мэВ, которой достаточно для достижения в графеновых транзисторах отношения включено/выключено порядка  $10^5$  даже при комнатных температурах [175]. Сильная связь между атомами углерода обеспечивает механическую и химическую стабильность таких устройств, которые могут также проводить значительный ток без ухудшения своих свойств. По существу, это можно представить как молекулярную электронику, сконструированную по принципу «сверху вниз» – одна нанометровая квантовая точка содержит всего лишь  $\sim 10^2$  атомов. Главной проблемой при реализации таких квантовых точек станут пределы современных литографических методов, которые в настоящее время не обеспечивают нанометрового разрешения. Также придётся контролировать с атомной точностью химию и степень шероховатости краёв, что находится за пределами возможностей современных технологий.

Хотя современная микроэлектроника основывается на литографических методах, можно вообразить применение других подходов к изготовлению наноструктур, которые позволили бы в конечном счёте воспроизводить тонкие детали далеко за пределами разрешения литографии. Один из перспективных методов состоит в использовании способностей химических реакций к самоорганизации. К примеру, графеновые наноструктуры можно получать фторированием частей, которые должны стать изолирующими. Частичное фторирование или гидрирование может привести к образованию на поверхности графена самоорганизующихся структур [177; 178], которые, в принципе, могли бы использоваться для изменения его транспортных и оптических свойств.

Другой возможный способ открыть щель в спектре квазичастиц графена – это использовать химически модифицированный графен [65–69],  $\pi$ -электроны которого участвуют в образовании ковалентных связей с примесными атомами, присоединёнными к графеновой основе. Также можно использовать двухслойный графен, так как щель в нём может быть

открыта посредством прикладывания разности потенциалов между слоями [72–74; 140–143]. В таких устройствах с двойными затворами недавно было достигнуто отношение включено/выключено около 2000 при низких температурах [179].

#### **5.4. Графеновые композитные материалы**

Уникальное сочетание электронных, химических, механических и оптических свойств графена в полной мере может быть использовано в композитных материалах. Графен для такого рода применений относительно легко изготовить: можно применить либо прямое химическое расслоение графита [48; 49], дающее весьма высокий выход графеновых чешуек в ряде органических растворителей, либо провести процесс окисления графита (приготовив оксид графита, который с лёгкостью расслаивается в воде) с последующим восстановлением в ряде сред [10].

Будучи прочнейшим и одновременно одним из самых жёстких известных материалов (с модулем Юнга 1 ТПа), графен является идеальным кандидатом для армирования высококачественных композитов [11]. Его одноатомная толщина даёт огромное преимущество: он не может расколоться, что придаёт ему максимально возможную прочность на изгиб. Высокое аспектное отношение (отношение поперечного размера к толщине) графена позволяет ему быть идеальным ограничителем распространения трещин. Что же касается взаимодействия со связующим материалом – главной проблемы всех нанокompозитных наполнителей наподобие углеродного волокна или углеродных нанотрубок, – то химическая модификация поверхности или краёв графена может существенно усилить сцепление графена с полимером.

Использование химических производных графена не только расширит набор подходящих связующих материалов, но и увеличит функциональность возможных композитов. С учётом того, что механическая прочность фторграфена лишь ненамного ниже, чем у чистого графена [66], можно получить композиты с похожими механическими свойствами, но с широким разнообразием других характеристик – от оптически прозрачных до непрозрачных и от электропроводящих до изолирующих.

Большие преимущества открывает возможность оптического наблюдения за натяжениями в графене [11; 112–114]. Спектр комбинационного рассеяния графена [180–182] существенно изменяется при натяжении, поэтому можно легко обнаружить механические деформации даже в доли процента. Поскольку механические напряжения весьма хорошо передаются от полимера к графену [11], а комбинационный сигнал графена очень сильный (самые большие пики в спектре комбинационного рассеяния графена возникают за счёт однофотонных либо двухфотонных резонансных процессов), можно легко обнаружить накопление напряжений в исследуемом композитном материале при помощи наблюдения за положениями спектральных пиков.

### 5.5. Другие применения

В одной лекции невозможно привести обзор всех потенциальных применений графена. Поскольку практически все характеристики этого двумерного кристалла превосходят соответствующие характеристики других материалов (не говоря уже об уникальности комбинации этих характеристик), мы ограничены только нашим воображением. В плане электронных свойств следует упомянуть предельно чувствительные газовые детекторы [183] (графен, будучи поверхностью без объёма, может обнаруживать присоединившиеся к нему единичные молекулы) и переменные квантовые конденсаторы [184; 185]. В области фотоники необходимо отметить сверхбыстродействующие фотодетекторы [186] (использующие высокую подвижность и большую фермиевскую скорость квазичастиц в графене) и чрезвычайно эффективные синхронизаторы мод [187]. Кроме того, исключительная механическая прочность и высокое кристаллическое совершенство позволяют использовать графен для создания идеальных газовых барьеров [17] и тензодатчиков [115].

**Благодарности.** Огромное разнообразие изученных свойств графена и предпринятых экспериментов стало возможным благодаря большому и дружественному сообществу, которое до сих пор растёт день ото дня. Мне действительно хочется сказать спасибо всем и каждому его участнику за

взаимодействие с ними, за обучение меня новым методам и за то волнение, которое я чувствую каждое утро, открывая архив cond-mat (часто с оттенком разочарования из-за того, что не я сделал что-то первым!). К сожалению, здесь невозможно назвать всех, поэтому я ограничусь своими ближайшими коллегами и руководителями групп.

Больше всего я благодарен Андрею Гейму, который на протяжении многих лет является моим учителем, коллегой и другом. В университетах нас учат физике, математике, химии и десяткам других предметов, но как заниматься наукой – этому каждый из нас должен учиться сам. Для меня было исключительной удачей работать все эти годы рядом с таким превосходным и убеждённым учёным и исследователем.

Также меня многому научили мои коллеги из группы физики конденсированного состояния, из Центра мезо-науки и нанотехнологий и из Черноголовки: Ирина Григорьева, Эрни Хилл, Саша Григоренко, Фред Шедин, Александр Жуков, Юань Чжан, Синзия Касирагхи, Урсел Бангерт, Ян Кинлоч, Боб Юнг, Элен Глисон, Стэн Гиллот, Марк Селлерс, Олег Шкляревский, Юрий Дубровский, Женя Вдовин, Юрий Ханин, Сергей Дубонос и Всеволод Гантмахер. Отдельное спасибо Сергею Морозову, одной из ключевых фигур в исследованиях графена и превосходному другу.

Нельзя переоценить вклад наших студентов и постдоков: их находчивые, творческие и активные исследования часто открывали новые области для изучения. Хотелось бы их отметить: это Питер Блейк, Рахул Наир, Да Цзян, Леонид Пономаренко, Дэниел Элиас, Роман Горбачев, Саша Майоров, Толик Фирсов, Сурен Нойбек, Ирина Барболина, Чженьхуа Ни, Ибстам Риаз, Рахул Джалил, Тарик Мохиуддин, Жуй Ян, Тим Бут, Лиам Бритнелл, Света Анисимова, Фрэнк Фрейтаг, Василь Кравец, Пол Бримикомб, Маргарита Сепиони и Танасис Джорджи.

Теоретическая поддержка, оказанная рядом специалистов по теории конденсированного состояния со всего мира, была наиболее ценной, и мне остаётся только надеяться, что этот процесс был взаимным, и мы в равной мере направляли друг друга (или вводили в заблуждение). Длинный список теоретиков, внёсших большой вклад в наши исследования, включает следующих людей (но отнюдь не ограничивается ими): Миша Кацнельсон,

Антонио Кастро Нето, Пако Гинья, Нуно Перес, Володя Фалько, Эд МакКанн, Леонид Левитов, Дима Абанин, Тим Вехлинг, Аллан МакДональд, Саша Мирлин, Санкар Дас Сарма.

Наконец, как я уже упоминал, нам принесло огромную пользу сотрудничество, соперничество и обмен информацией с другими экспериментальными группами. В первую очередь я должен упомянуть Филиппа Кима – выдающегося физика и очень хорошего коллегу. Другие экспериментаторы, результаты которых оказали на нас влияние – это (к сожалению, только неполный список): Андреа Феррари, Ева Андрей, Янник Мейер, Алексей Кузьменко, Ули Зейтлер, Ян Кис Маан, Йос Гисберс, Робин Николас, Майкл Фюрер, Татьяна Латышевская, Милдред Дрессельхаус, Альберто Морпурго, Ливен Вандерсайпен, Клаус Энслин и Джонатан Коулмэн.

*Перевел с английского Ю.Е. Лозовик*

*Авторизировал К.С. Новосёлов*

### Список литературы

1. Brodie B.C. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 149 249 (1859)
2. Novoselov K.S. et al. *Science* 306 666 (2004)
3. Novoselov K.S. et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 102 10451 (2005)
4. Castro Neto A.H. et al. *Rev. Mod. Phys.* 81 109 (2009)
5. Ruoff R. *Nature Nanotechnol.* 3 10 (2008)
6. Loh K.P. et al. *J. Mater. Chem.* 20 2277 (2010)
7. Geim A.K., Novoselov K S *Nature Mater.* 6 183 (2007)
8. Geim A.K. *Science* 324 1530 (2009)
9. Schwierz F. *Nature Nanotechnol.* 5 487 (2010)
10. Stankovich S. et al. *Nature* 442 282 (2006)
11. Gong L. et al. *Adv. Mater.* 22 2694 (2010)
12. Lee C. et al. *Science* 321 385 (2008)
13. Novoselov K.S. et al. *Nature* 438 197 (2005)
14. Zhang Y. et al. *Nature* 438 201 (2005)
15. Meric I. et al. *Nature Nanotechnol.* 3 654 (2008)
16. Balandin A.A. et al. *Nano Lett.* 8 902 (2008)
17. Bunch J.S. et al. *Nano Lett.* 8 2458 (2008)
18. Polya G. *Math. Ann.* 84 149 (1921)
19. Girardeau M. *J. Math. Phys.* 1 516 (1960)

20. Lieb E.H., Liniger W *Phys. Rev.* 130 1605 (1963)
21. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Статистическая физика* Т. 1 (М.: Наука, 1976)  
[Landau L.D., Lifshitz E.M. *Statistical Physics* Vol. 1 (Oxford: Pergamon Press, 1980)]
22. Peierls R.E. *Helv. Phys. Acta* 7 81 (1934)
23. Peierls R.E. *Ann. Inst. Henri Poincare* 5 177 (1935)
24. Landau L.D. *Phys. Z. Sowjetunion* 11 26 (1937); *ЖЭТФ* 7 19 (1937)
25. Mermin N.D. *Phys. Rev.* 176 250 (1968)
26. Mermin N.D., Wagner H *Phys. Rev. Lett.* 17 1133 (1966)
27. Chaikin P.M., Lubensky T.C. *Principles of Condensed Matter Physics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995)
28. Nelson D., Piran T., Weinberg S. (Eds) *Statistical Mechanics of Membranes and Surfaces* (Singapore: World Scientific, 2004)
29. Fasolino A., Los J.H., Katsnelson M.I. *Nature Mater.* 6 858 (2007)
30. Simpson C.D. et al. *Chem. Eur. J.* 8 1424 (2002)
31. Mizushima S., Fujibayashi Y., Shiiki K. *J. Phys. Soc. Jpn.* 30 299 (1971)
32. Fujibayashi Y. *J. Phys. Soc. Jpn.* 34 989 (1973)
33. Fujibayashi Y., Mizushima S. *J. Phys. Soc. Jpn.* 34 281 (1973)
34. Ebbesen T.W., Hiura H. *Adv. Mater.* 7 582 (1995)
35. Ohashi Y. et al. *TANSO* 180 235 (1997)
36. Lu X. et al. *Appl. Phys. Lett.* 75 193 (1999)
37. Gan Y., Chu W., Qiao L. *Surf. Sci.* 539 120 (2003)
38. Blake P. et al. *Appl. Phys. Lett.* 91 063124 (2007)
39. Abergel D.S.L., Russell A., Fal'ko V.I. *Appl. Phys. Lett.* 91 063125 (2007)
40. Ruess G., Vogt F. *Monatshefte Chem.* 78 222 (1948)
41. Boehm H.P., Clauss A., Hofmann U. *J. Chim.Phys.Phys. Chim.Biol.* 58 141 (1961)
42. Boehm H. et al. *Z. Naturforsch. B17* 150 (1962)
43. Boehm H. et al. *Z. Anorg. Allgemeine Chem.* 316 119 (1962)
44. Horiuchi S. et al. *Appl. Phys. Lett.* 84 2403 (2004)
45. Dikin D.A. et al. *Nature* 448 457 (2007)
46. Park S., Ruoff R.S. *Nature Nanotechnol.* 4 217 (2009)
47. Gomez-Navarro C. et al. *Nano Lett.* 7 3499 (2007)
48. Blake P. et al. *Nano Lett.* 8 1704 (2008)
49. Hernandez Y. et al. *Nature Nanotechnol.* 3 563 (2008)
50. Grant J.T., Haas T.W. *Surf. Sci.* 21 76 (1970)
51. Галль Н.Р. *ФТТ* 27 2351 (1985) [Gall' NRet et al. *Sov. Phys. Solid State* 27 1410 (1985)]
52. Gall N.R. et al. *Surf. Sci.* 191 185 (1987)

53. Gall N.R., Rut'kov E.V., Tontegode A.Y.a *Int. J. Mod. Phys. B* 11 1865 (1997)
54. Nagashima A. et al. *Surf. Sci.* 291 93 (1993)
55. Forbeaux I. et al. *Surf. Rev. Lett.* 5 193 (1998)
56. Affoune A.M. et al. *Chem. Phys. Lett.* 348 17 (2001)
57. Harigaya K., Enoki T. *Chem. Phys. Lett.* 351 128 (2002)
58. van Bommel A.J., Crombeen J.E., van Tooren A *Surf. Sci.* 48 463 (1975)
59. Berger C. et al. *J. Phys. Chem. B*108 19912 (2004)
60. Mak K.F. et al. *Phys. Rev. Lett.* 105 136805 (2010)
61. Teweldebrhan D., Goyal V., Balandin A.A. *Nano Lett.* 10 1209 (2010)
62. Nagashima A. et al. *Phys. Rev. Lett.* 75 3918 (1995)
63. Nagashima A. et al. *Surf. Sci.* 357 307 (1996)
64. Sofo J.O., Chaudhari A.S., Barber G.D. *Phys. Rev. B* 75 153401 (2007)
65. Elias D.C. et al. *Science* 323 610 (2009)
66. Nair R.R. et al. *Small* 6 2877 (2010)
67. Worsley K.A. et al. *Chem. Phys. Lett.* 445 51 (2007)
68. Cheng S-H. et al. *Phys. Rev. B* 81 205435(2010)
69. Withers F., Dubois M., Savchenko A.K. *Phys. Rev. B* 82 073403 (2010)
70. Novoselov K.S. et al. *Nature Phys.* 2 177 (2006)
71. McCann E., Fal'ko V.I. *Phys. Rev. Lett.* 96 086805 (2006)
72. Castro E.V. et al. *Phys. Rev. Lett.* 99 216802(2007)
73. Oostinga J.B. et al. *Nature Mater.* 7 151 (2007)
74. Ohta T. et al. *Science* 313 951 (2006)
75. McCann E. *Phys. Rev. B* 74 161403(R) (2006)
76. Morozov S.V. et al. *Phys. Rev. B* 72 201401(R) (2005)
77. Aoki M., Amawashi H. *Solid State Commun.* 142 123 (2007)
78. Mak K.F., Shan J., Heinz T.F. *Phys. Rev. Lett.* 104 176404(2010)
79. Lopes dos Santos J.M.B., Peres N.M.R., Castro Neto A.H. *Phys. Rev. Lett.* 99 256802 (2007)
80. Li G. et al. *Nature Phys.* 6 109(2010)
81. Wallace P.R. *Phys. Rev.* 71 622 (1947)
82. McClure J.W. *Phys. Rev.* 108 612(1957)
83. Slonczewski J.C., Weiss P.R. *Phys. Rev.* 109 272 (1958)
84. Novoselov K. *Nature Mater.* 6 720 (2007)
85. Castro Neto A.H., Guinea F., Peres N.M.R. *Phys. World* 19 (11) 33 (2006)
86. Katsnelson M.I., Novoselov K.S., Geim A.K. *Nature Phys.* 2 620 (2006)
87. Young A.F., Kim P. *Nature Phys.* 5 222(2009)

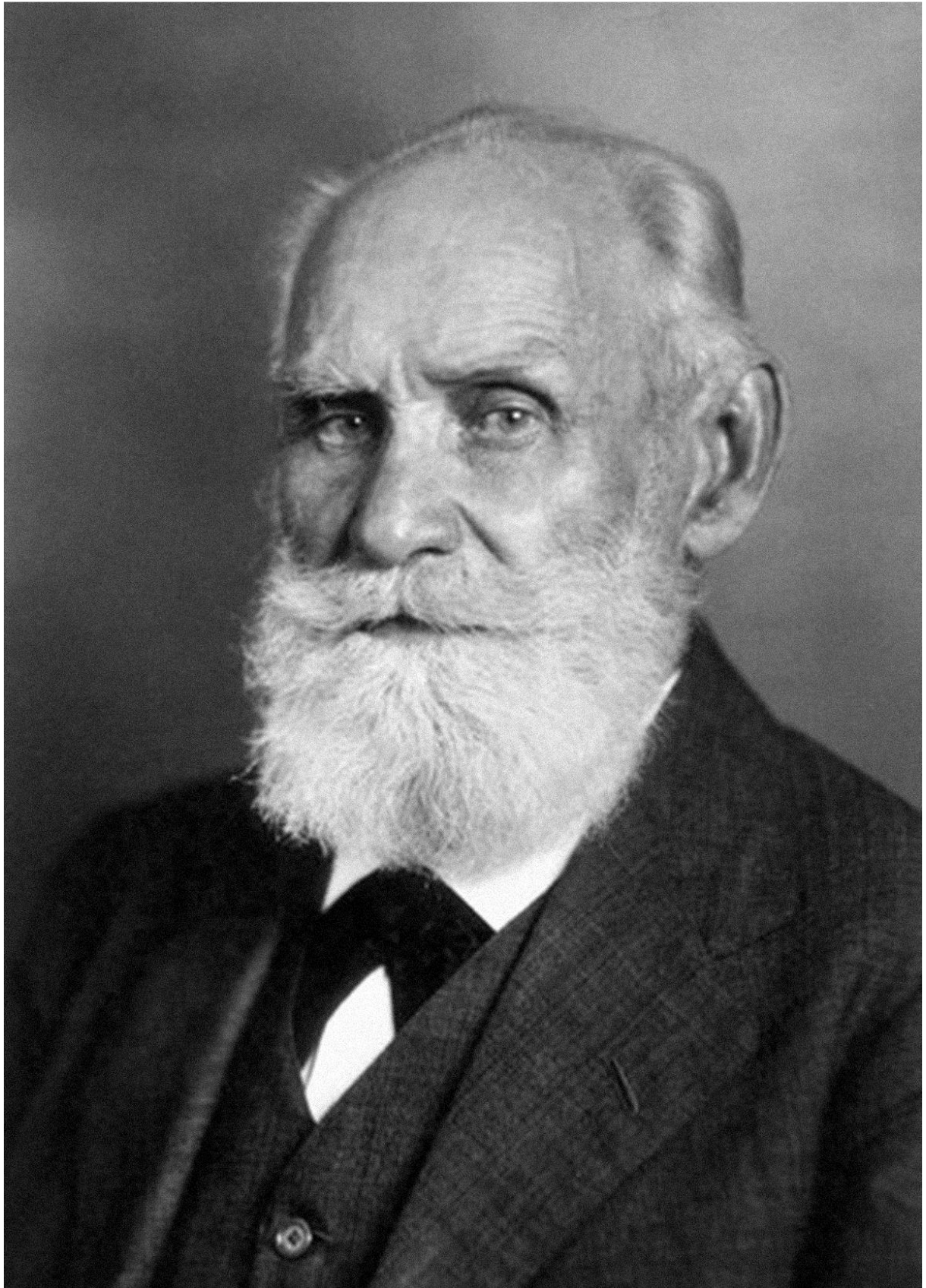
88. Gorbachev R.V. et al. Nano Lett. 8 1995(2008)
89. Cheianov V.V., Fal'ko V.I. Phys. Rev. B 74 041403(R) (2006)
90. Klein O.Z. Phys. 53 157(1929)
91. Sauter F.Z. Phys. 73 547(1932)
92. Schwinger J. Phys. Rev. 82 664 (1951)
93. Cheianov V.V., Fal'ko V., Altshuler B.L. Science 315 1252 (2007)
94. Beenakker C.W.J. Rev. Mod. Phys. 80 1337 (2008)
95. Ostrovsky P.M., Gornyi I.V., Mirlin A.D. Phys. Rev. B 74 235443 (2006)
96. Bardarson J.H. et al. Phys. Rev. Lett. 99 106801 (2007)
97. Martin J. et al. Nature Phys. 4 144(2008)
98. McCann E. et al. Phys. Rev. Lett. 97 146805(2006)
99. Morozov S.V. et al. Phys. Rev. Lett. 97 016801 (2006)
100. Tikhonenko F.V. et al. Phys. Rev. Lett. 100 056802(2008)
101. McClure J.W. Phys. Rev. 119 606 (1960)
102. Semenoff G.W. Phys. Rev. Lett. 53 2449(1984)
103. Shon N.H., Ando T.J. Phys. Soc. Jpn. 67 2421 (1998)
104. Haldane F.D.M. Phys. Rev. Lett. 61 2015 (1988)
105. Zheng Y., Ando T. Phys. Rev. B 65 245420 (2002)
106. Gusynin V.P., Sharapov S.G. Phys. Rev. B 71 125124(2005)
107. Peres N.M.R., Guinea F., Castro Neto A.H. Phys. Rev. B 73 125411 (2006)
108. Giesbers A.J.M. et al. Phys. Rev. Lett. 99 206803 (2007)
109. Novoselov K.S. et al. Science 315 1379 (2007)
110. Giesbers A.J.M. et al. Appl. Phys. Lett. 93 222109 (2008)
111. Tzalenchuk A. et al. Nature Nanotechnol. 5 186 (2010)
112. Ni Z.H. et al. A.C.S. Nano 2 2301 (2008)
113. Mohiuddin T.M.G. et al. Phys. Rev. B79 205433 (2009)
114. Huang M. et al. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 106 7304 (2009)
115. Kim K.S. et al. Nature 457 706(2009)
116. Bunch J.S. et al. Science 315 490 (2007)
117. Tsoukleri G. et al. Small 5 2397 (2009)
118. Hiura H. et al. Nature 367 148 (1994)
119. Bao W. et al. Nature Nanotechnol. 4 562(2009)
120. Sen D. et al. Small 6 1108 (2010)
121. Kim E-A., Castro Neto A.H.C. Europhys. Lett. 84 57007(2008)
122. Pereira V.M., Castro Neto A.H., Peres N.M.R. Phys.Rev.B 80 045401 (2009)
123. Pereira V.M., Castro Neto A.H. Phys. Rev. Lett. 103 046801 (2009)
124. Morpurgo A.F., Guinea F. Phys. Rev. Lett. 97 196804(2006)



125. Guinea F., Katsnelson M.I., Geim A.K. *Nature Phys.* 6 30 (2010)
126. Guinea F. et al. *Phys. Rev. B* 81 035408 (2010)
127. Levy N. et al. *Science* 329 544 (2010)
128. Low T., Guinea F. *Nano Lett.* 10 3551 (2010)
129. Rycerz A., Tworzydło J., Beenakker C.W.J. *Nature Phys.* 3 172 (2007)
130. Martin I., Blanter Ya.M., Morpurgo A.F. *Phys. Rev. Lett.* 100 036804 (2008)
131. Kuzmenko A.B. et al. *Phys. Rev. Lett.* 100 117401 (2008)
132. Nair R.R. et al. *Science* 320 1308 (2008)
133. Li Z.Q. et al. *Nature Phys.* 4 532 (2008)
134. Mak K.F. et al. *Phys. Rev. Lett.* 101 196405 (2008)
135. Kravets V.G. et al. *Phys. Rev. B* 81 155413 (2010)
136. Yang L. et al. *Phys. Rev. Lett.* 103 186802 (2009)
137. Pachoud A. et al. *Europhys. Lett.* 92 27001 (2010)
138. Bernal J.D. *Proc. R. Soc. London A* 106 749 (1924)
139. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G. *Adv. Phys.* 51 1 (2002)
140. Kuzmenko A.B. et al. *Phys. Rev. B* 80 165406 (2009)
141. Kuzmenko A.B. et al. *Phys. Rev. B* 79 115441 (2009)
142. Castro E.V. et al. *J. Phys. Condens. Matter* 22 175503 (2010)
143. Zhang Y. et al. *Nature* 459 820 (2009)
144. Du X. et al. *Nature Nanotechnol.* 3 491 (2008)
145. Bolotin K.I. et al. *Solid State Commun.* 146 351 (2008)
146. Feldman B.E., Martin J., Yacoby A. *Nature Phys.* 5 889 (2009)
147. Min H. et al. *Phys. Rev. B* 78 121401(R) (2008)
148. Pantelic R.S. et al. *J. Struct. Biol.* 170 152 (2010)
149. Wilson N.R. et al. *ACS Nano* 3 2547 (2009)
150. Nair R.R. et al. *Appl. Phys. Lett.* 97 153102 (2010)
151. Meyer J.C. et al. *Nature* 446 60 (2007)
152. Meyer J.C. et al. *Solid State Commun.* 143 101 (2007)
153. Reina A. et al. *Nano Lett.* 9 30 (2009)
154. Li X. et al. *Science* 324 1312 (2009)
155. Granqvist C.G. *Solar Energy Mater. Solar Cells* 91 1529 (2007)
156. Wang X., Zhi L., Mullen K. *Nano Lett.* 8 323 (2008)
157. Ando T. *J. Phys. Soc. Jpn.* 75 074716 (2006)
158. Ando T., Nakanishi T. *J. Phys. Soc. Jpn.* 67 1704 (1998)
159. Morozov S.V. et al. *Phys. Rev. Lett.* 100 016602 (2008)
160. Ponomarenko L.A. et al. *Phys. Rev. Lett.* 102 206603 (2009)
161. Chen J.H. et al. *Nature Phys.* 4 377 (2008)

162. Ni Z.H. et al. *Nano Lett.* 10 3868 (2010)
163. Stauber T., Peres N.M.R., Guinea F. *Phys. Rev. B* 76 205423 (2007)
164. Cheianov V.V., Fal'ko V.I. *Phys. Rev. Lett.* 97 226801 (2006)
165. Nomura K., MacDonald A.H. *Phys. Rev. Lett.* 96 256602 (2006)
166. Nomura K., MacDonald A.H. *Phys. Rev. Lett.* 98 076602 (2007)
167. Adam S. et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 104 18392 (2007)
168. Katsnelson M.I., Geim A.K. *Phil. Trans. R. Soc. A* 366 195 (2008)
169. Castro E.V. et al. *Phys. Rev. Lett.* 105 266601 (2010); arXiv:1008.2522
170. Dean C.R. et al. *Nature Nanotechnol.* 5 722 (2010)
171. Moon J.S. et al. *IEEE Electron Device Lett.* 30 650 (2009)
172. Lin Y-M. et al. *Nano Lett.* 9 422 (2009)
173. Lin Y-M. et al. *Science* 327 662 (2010)
174. Han M.Y. et al. *Phys. Rev. Lett.* 98 206805 (2007)
175. Ponomarenko L.A. et al. *Science* 320 356 (2008)
176. Stampfer C. et al. *Appl. Phys. Lett.* 92 012102 (2008)
177. Chernozatonskii L.A., Sorokin P.B., Bruning J.W. *Appl. Phys. Lett.* 91 183103 (2007)
178. Shytov A.V., Abanin D.A., Levitov L.S. *Phys. Rev. Lett.* 103 016806 (2009)
179. Xia F. et al. *Nano Lett.* 10 715 (2010)
180. Ferrari A.C. et al. *Phys. Rev. Lett.* 97 187401 (2006)
181. Ferrari A.C. *Solid State Commun.* 143 47 (2007)
182. Malard L.M. et al. *Phys. Rep.* 473 51 (2009)
183. Schedin F. et al. *Nature Mater.* 6 652 (2007)
184. Chen Z., Appenzeller J., in *IEEE Intern. Electron Devices Meeting 2008, Technical Digest* (2008) p. 509; arXiv:0812.3927
185. Ponomarenko L.A. et al. *Phys. Rev. Lett.* 105 136801 (2010)
186. Xia F. et al. *Nature Nanotechnol.* 4 839 (2009)
187. Zhang H. et al. *Opt. Express* 17 17630 (2009)

# **ФИЗИОЛОГИЯ И МЕДИЦИНА**



*Иван Петрович Павлов*

(1849–1936)

## БИОГРАФИЯ <sup>70</sup>

Иван Петрович Павлов (1849–1936) родился 14 сентября в Рязани в семье священника Петра Дмитриевича Павлова. Начальное образование он получил в церковноприходской школе в Рязани, затем в духовном училище.

Вдохновленный прогрессивными идеями Д.И. Писарева, выдающегося русского литературного критика 1860-х гг., и И.М. Сеченова, отца русской физиологии, Павлов отказывается от карьеры священнослужителя и решает посвятить свою жизнь науке. В 1870 г. он поступает в Петербургский университет на физико-математический факультет и начинает изучать естественные науки.

Павлов страстно увлекся физиологией и эту страсть пронес через всю свою жизнь. На первом курсе он вместе с другим студентом, Афанасьевым, выполнил свою первую научную работу, посвященную секреторной иннервации поджелудочной железы. Эта работа получила широкое одобрение, а Павлов и Афанасьев были награждены Золотой медалью университета.

В 1875 г. Павлов блестяще окончил университет и получил звание кандидата естественных наук. Однако, движимый огромным интересом к физиологии, он решает продолжить обучение в Медико-хирургической академии и поступает на третий курс. Окончив в 1879 г. Медико-хирургическую академию, он вновь был награжден Золотой медалью. Выдержав конкурсный экзамен, Павлов становится научным сотрудником Академии. Будучи одновременно руководителем лаборатории физиологии при клинике выдающегося врача С.П. Боткина, Павлов получает возможность продолжить исследовательскую деятельность. В 1883 г. он завершил докторскую диссертацию на тему «Центробежные нервы сердца», в которой развил идеи нервизма на примере открытого им усиливающего нерва сердца и заложил основные принципы трофической функции нервной системы. В этой, как и в других своих работах, выполненных в основном в

---

<sup>70</sup> Иван Петрович Павлов (1849–1936). Биография / пер. с англ. В. Халатова // Нобелевская премия. Физиология и медицина. : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 1 : 1901–1909. – С. 235–240. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

лаборатории при клинике С.П. Боткина, Павлов показал рефлекторный характер регуляции деятельности органов кровообращения.

В 1890 г. Павлову было предложено организовать и возглавить отдел физиологии в Институте экспериментальной медицины. Этот институт, которым Павлов руководил в течение 45 лет, стал основным центром физиологических исследований.

В 1890 г. Павлов был избран на должность профессора фармакологии Военно-медицинской академии, и через пять лет занял вакантную должность заведующего кафедрой физиологии, которую возглавлял до 1925 г.

Основная часть работ по физиологии пищеварения была выполнена Павловым в период с 1891 г. по 1900 г. Именно здесь он разработал хирургический метод «хронического» эксперимента с широким применением фистул, который давал возможность длительно наблюдать за функцией различных органов пищеварительной системы в относительно нормальных условиях. Его эксперименты открыли новую эру в развитии физиологии, так как до этого основным методом, применяемым в физиологии, был метод «острой» вивисекции, а функцию организма изучали только в процессе анализа. Это означает, что изучение функции любого органа требовало нарушения его естественных связей и не позволяло выяснить, каким образом регулируется функция органа, а также определить законы функционирования организма как целого в нормальных условиях. Отсутствие такой возможности препятствовало развитию медицинской науки. С помощью своего метода Павлов открыл путь к новым достижениям в теоретической и практической медицине. С исключительной ясностью он показал, что нервная система играет господствующую роль в регуляции процесса пищеварения, и это его открытие лежит, по существу, в основе современной физиологии пищеварения. Результаты своих исследований в этой области, которые имеют важное значение для практической медицины, Павлов изложил в лекциях в 1895 г., которые он опубликовал под названием «Лекции о работе главных пищеварительных желез» (1887 г.).

Логическим следствием исследований Павлова в области физиологии пищеварения явилось создание им учения об условных рефлексах.

При изучении рефлекторной регуляции активности пищеварительных желез Павлов уделял особое внимание явлению «психической секреции», которая обусловлена пищевой стимуляцией на расстоянии. Применение метода формирования фистулы протока слюнных желез, который разработал его коллега Д.Д. Глинский в 1895 г., позволило Павлову изучить их. Проведя серию экспериментов, Павлов отверг субъективное толкование «психической секреции» слюны. На основании гипотезы Сеченова о рефлекторной природе психической деятельности Павлов пришел к выводу, что она обусловлена рефлексами, но не постоянными, а временными, или условными.

Это открытие функционального значения условных рефлексов позволило объективно изучить психическую деятельность, не прибегая, как это делали до него, к субъективным методам. Появилась возможность исследовать в эксперименте наиболее сложную по своей природе связь между организмом и внешней средой.

В 1903 г. на XIV Международном конгрессе по медицине в Мадриде Павлов прочитал доклад «Экспериментальная психология и психопатология животных».

В этом докладе было дано определение условным и другим рефлексам и показано, что условный рефлекс является ключом к механизму познания высших форм реакций животных и человека на факторы окружающей среды и позволяет объективно изучать психическую деятельность.

В дальнейшем в систематической программе исследований Павлов превратил теоретические работы Сеченова, посвященные рефлекторным механизмам психической деятельности, в экспериментально доказанную теорию условных рефлексов.

В качестве ведущих принципов материалистического учения о законах управления деятельностью живых организмов Павлов указал следующие три: детерминизм, анализ и синтез, единство структуры и функции.

Развитие этих принципов Павловым и его школой в значительной степени способствовало созданию научной теории медицины и открытию законов управления функциями организма как целого.

Эксперименты, проведенные Павловым и его учениками, показали, что условные рефлексы формируются при участии коры головного мозга, которая выступает в роли «главного распределителя и организатора всей деятельности организма» и ответственна за хрупкое равновесие между животным и окружающей средой. В 1905 г. было установлено, что любой внешний фактор, сочетаясь по времени с простым рефлексом, становится условным сигналом для формирования нового условного рефлекса. После открытия этого явления Павлов приступил к исследованию «искусственных условных рефлексов». Многолетние эксперименты в его лаборатории позволили впервые открыть основные законы регуляции функции коры больших полушарий мозга. К изучению этих законов были привлечены многие ученые.

В результате этих исследований появилась общая теория Павлова о высшей нервной деятельности.

Уже на ранних стадиях своих исследований Павлов получил мировое признание. В 1901 г. он был избран членом-корреспондентом Российской академии наук, в 1904 г. ему была присуждена Нобелевская премия, а в 1907 г. он становится действительным членом Российской академии наук. В 1912 г. Павлов был удостоен звания почетного доктора Кембриджского университета, а в последующие годы он становится членом различных научных обществ за границей. По представлению Парижской медицинской академии он был награжден в 1915 г. орденом Почетного легиона.

После Октябрьской революции вышел специальный правительственный декрет, подписанный Лениным 24 января 1921 г., в котором отмечались «выдающиеся научные заслуги академика И.П. Павлова, имеющие огромное значение для рабочего класса всего мира».

Правительство Советской России заботилось о том, чтобы Павлов и его сотрудники имели неограниченные возможности для научных исследований. Советский Союз стал крупным центром изучения физиологии, о чем свидетельствует тот факт, что XV Международный конгресс физиологов состоялся 9–17 августа 1935 г. в Ленинграде и Москве.

Павлов направил всю свою неистощимую энергию на преобразование науки. Он приложил много усилий для превращения возглавляемого



им Института физиологии в мировой центр научного знания, и то, что ему это удалось, является общепризнанным фактом.

Павлов основал крупную школу физиологов, которая воспитала многих выдающихся ученых. Он оставил богатейшее научное наследие – пледу блестящих учеников, которые продолжали развивать идеи своего учителя, и многочисленных последователей по всему миру.

В 1881 г. Павлов женился на Серафиме Васильевне Карчевской, учительнице, дочери врача Черноморского флота. Первая беременность у нее закончилась выкидышем, причиной которого, как говорят, явилось то, что она побежала догонять мужа, который имел обыкновение быстро ходить. В дальнейшем у них родился сын Вирчик, который умер внезапно в детском возрасте, затем еще три сына, Владимир, Виктор и Всеволод (один из них стал известным профессором физики в Ленинграде в 1925 г.) и дочь Вера.

Павлов умер в Ленинграде 27 февраля 1936 г.

## **ФИЗИОЛОГИЯ ПИЩЕВАРЕНИЯ<sup>71</sup>**

*Нобелевская лекция, 12 декабря 1904 г.*

Недаром над всеми явлениями человеческой жизни господствует забота о насущном хлебе. Он представляет ту древнейшую связь, которая соединяет все живые существа, в том числе и человека, со всей остальной окружающей их природой. Пища, которая попадает в организм и здесь изменяется, распадается, вступает в новые комбинации и вновь распадается, олицетворяет собою жизненный процесс во всем его объеме, от элементарнейших физических свойств организма, таких как закон тяготения, инерции и т.п., вплоть до высочайших проявлений человеческой природы. Точное знание судьбы пищи в организме должно составить предмет идеальной физиологии, физиологии будущего. Теперешняя же физиология занимается лишь непрерывным собиранием материала для достижения этой далекой цели.

Первый этап, через который должны пройти введенные извне пищевые вещества, – это пищеварительный канал; первое жизненное воздействие на эти вещества или, вернее, объективнее говоря, их первое участие в жизни, в жизненном процессе, образует то, что мы называем пищеварением.

Пищеварительный канал представляет собою проходящую сквозь весь организм трубку, которая непосредственно сообщается с внешним миром, т.е. внешнюю, но загнутую внутрь и таким образом скрытую в организме поверхность тела.

Физиолог все более и более получает возможность глубже проникать в пищеварительный канал и при этом убеждается, что он состоит из целого ряда химических лабораторий, оборудованных различными механическими приспособлениями.

---

<sup>71</sup> Павлов, И.П. Физиология пищеварения: нобелевская лекция, Стокгольм, 12 декабря 1904 г. / И.П. Павлов // Нобелевская премия. Физиология и медицина : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 1 : 1901–1909. – С. 211–234. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

Механические аппараты образованы мышечной тканью, являющейся составной частью стенки пищеварительного канала. Они или обеспечивают продвижение составных частей пищи из одной лаборатории в другую, или задерживают их на некоторое время в соответственной лаборатории, или, наконец, удаляют их в том случае, если они вредны для организма; они служат, кроме того, для механической обработки пищи, ускоряя химическое воздействие на нее путем тесного смешивания и т.д.

Особой, так называемой железистой тканью, которая либо также образует составную часть стенки пищеварительного канала, либо лежит вне его отдельными массами, сообщаясь с ним посредством соединительных трубок, производятся химические реактивы, так называемые пищеварительные соки, изливающиеся в отдельные отрезки пищеварительной трубки. Реактивы представляют собою водные растворы, с одной стороны, хорошо известных химических веществ, таких как соляная кислота, сода и т.п., с другой стороны, – веществ, встречающихся лишь в живом организме, которые с такой легкостью (так быстро, при такой низкой температуре и в таких малых количествах) расщепляют главные составные части пищи (белки, углеводы и жиры), как это не в состоянии сделать ни одно из точно изученных химических веществ. Эти столь же хорошо действующие *in vitro*, как и в пищеварительном канале, вещества, представляют собою, таким образом, вполне закономерный объект химического исследования, однако противящийся до сих пор химическому анализу. Они, как известно, называются ферментами.

Опираясь на это общее изложение пищеварительного процесса, я хочу сообщить то, что я и заведываемая мною лаборатория установили относительно этого процесса. При этом я считаю своим долгом с глубочайшей благодарностью вспомнить моих многочисленных сотрудников по лаборатории.

Как сразу становится ясно, результат изучения пищеварительного процесса, как и каждой другой функции организма, в значительной мере зависит от того, насколько нам удастся занять возможно близкий и удобный исходный пункт в отношении наблюдаемого процесса и устра-

нить с пути все побочные процессы между наблюдаемым явлением и наблюдателем.

Для изучения образования секрета в больших пищеварительных железах, сообщающихся с пищеварительным каналом лишь посредством соединительных трубок, вырезались маленькие кусочки стенки пищеварительного канала, в центре которых находились нормальные отверстия выводных протоков; затем отверстие в стенке канала зашивалось, а вырезанные кусочки с отверстиями выводных протоков подшивались снаружи на соответственном месте на поверхность кожи. Благодаря этой процедуре сок вытекал уже не в пищеварительный канал, а мог быть собран в подставленные сосуды. Для того чтобы собирать сок, производимый микроскопическими железами, расположенными непосредственно в стенке пищеварительного канала, уже издавна вырезали большие куски из стенки пищеварительного канала и делали из них искусственные, открытые снаружки мешочки, причем дефект в пищеварительном канале, разумеется, закрывался соответственно наложенными швами. Если же в этом случае дело касалось желудка, то при приготовлении искусственно изолированного мешочка каждый раз перерезались нервы железистых клеток, чем, конечно, нарушалась нормальная работа.

Учитывая более тонкие анатомические отношения, мы модифицировали операцию в том смысле, что при устройстве изолированного мешочка из стенки желудка нормальные нервные пути оставались в полной сохранности.

Так как, наконец, пищеварительный канал представляет сложную систему, целый ряд отдельных химических лабораторий, то я прерывал связь между ними, чтобы точно изучить ход явлений в каждой отдельной лаборатории, и разделял таким образом пищеварительный канал на несколько отдельных частей. При этом, конечно, должны были быть проложены извне короткие и удобные ходы в каждую отдельную лабораторию, для чего уже издавна применяются металлические трубки, которые вставляются в искусственные отверстия и могут между периодами опытов затыкаться пробкой.

Для осуществления нашего метода часто проводились очень тщательные операции, иногда по нескольку на одном и том же животном. Само собою разумеется, что для того чтобы увереннее приступить к делу, не тратить зря усилия и время и по возможности сберечь опытных животных, мы должны были точно придерживаться всех предписаний, которые хирурги устанавливают в отношении своих пациентов. Здесь также должны были применяться подходящий наркоз, тщательнейшая чистота при операции, чистые помещения после операции и заботливый уход за раной. Но и этого всего нам было мало. После этой произведенной для наших целей перестройки животного организма, которая, разумеется, наносила ему в большей или меньшей степени повреждения, для подопытного животного должен был быть найден тот *modus vivendi*<sup>72</sup> который обеспечил бы ему совершенно нормальное длительное существование. Только при этом условии наши результаты могли считаться абсолютно доказательными и могли разъяснить нормальный ход явлений. Нам удалось этого добиться благодаря правильной оценке вызванных в организме изменений и целесообразно принятым мерам; наши здоровые и весело выглядевшие животные выполняли свою лабораторную службу с истинной радостью, постоянно стремились из своих клеток в лабораторию, вскакивали сами на стол, на котором ставились все опыты и наблюдения над ними. Прошу мне поверить, что я ничуть не преувеличиваю. Благодаря нашей хирургической методике в физиологии мы сейчас можем в любое время продемонстрировать относящиеся к пищеварению явления без пролития хотя бы единой капли крови и без единого крика подопытного животного. В то же время это крайне важное практическое применение достижений человеческого разума, которое сразу же может пригодиться и человеку, который благодаря неумолимым случайностям жизни часто калечится подобным же, но гораздо более разнообразным образом.

Во время наблюдений над нашими собаками мы вскоре ознакомились с одним основным фактом: смотря по тому, что попадало из внешнего мира в пищеварительный канал – нужное или негодное, сухое или жид-

---

<sup>72</sup> Образ жизни (лат.).

кое вещество – и какова была составленная из различных веществ пища, от этого зависело, начинали или не начинали функционировать пищеварительные железы; каковы были особенности их работы, производили они реактивы в большем или меньшем количестве, причем их состав был также каждый раз иным. Ряд примеров должен это доказать.

Проследим, например, образование слюны железами, выделяющими слизистую слюну. При каждом приеме пищи, когда в ротовую полость попадают съедобные вещества, из этих желез изливается густая и вязкая слюна с большим содержанием слизи. Если же влить животному в рот вещества, которые ему противны, как например соль, кислоты, горчицу и т.д., то слюна может излиться в том же количестве, как и в первом случае, но по качеству совсем теперь другая – жидкая, водянистая. Если собаке давать есть то мясо, то обыкновенный хлеб при одинаковых прочих условиях, то во втором случае изливается всегда гораздо больше слюны, чем в первом. Также из отвергаемых животным веществ одни, например химически раздражающие кислоты, щелочь и т.п., вызывают более обильное слюноотделение, чем другие, химически индифферентные вещества, такие как горечи; значит, и здесь наблюдается иная деятельность слюнных желез. Совершенно подобным же образом ведут себя и желудочные железы, изливающие свой секрет – желудочный сок – то в большем, то в меньшем количестве, то с более высокой, то с меньшей степенью кислотности и содержанием растворяющего белок фермента, так называемого пепсина. На хлеб изливается наиболее богатый ферментом, но наименее кислый желудочный сок, на молоко – наиболее бедный ферментом и на мясо – наиболее богатый кислотой. На определенное количество белка, предлагаемого в виде хлеба, мяса или молока, железы производят в первом случае в 2–4 раза больше белкового фермента, чем во втором и в третьем.

Многообразие работы желудочных желез не ограничивается, однако, вышеперечисленными свойствами; оно проявляется также еще и в своеобразных колебаниях количества и качества реактива за весь тот промежуток времени, в течение которого железы функционируют после принятия той или иной пищи.

Однако этого достаточно. Я бы лишь напрасно злоупотребил вашим вниманием, если бы стал перечислять все относящиеся сюда и собранные нами факты. Я хочу лишь заметить, что мы наблюдали те же соотношения и на всех остальных железах пищеварительного канала. Теперь можно было бы задать дальнейший вопрос.

Что означает эта изменчивость работы желез? Вернемся опять назад. На съедобные вещества изливается более густая и концентрированная слюна. Для чего? Ответ, разумеется, был бы следующий: чтобы дать возможность пищевым массам, попадающим в желудок, легко проскользнуть в него по трубке, ведущей изо рта в желудок. На определенные отвергаемые собакой вещества из тех же желез излилась жидкая слюна. Для чего может служить в этих случаях слюна? Очевидно, либо для того, чтобы посредством разжижения этих веществ ослабить их химически раздражающее действие, либо, как мы знаем из собственного опыта, чтобы начисто ополоснуть от них рот. В этом случае нужна исключительно вода, но не слюнь, и она и выделяется.

Но, как мы видим, на хлеб, и именно на сухой хлеб, изливается гораздо больше слюны, чем на мясо. И это ведь тоже понятно: при кормлении сухим хлебом слюна нужна, во-первых, для того, чтобы посредством растворения составных частей хлеба можно было отличить вкус хлеба (ведь в рот могло бы попасть и что-нибудь совсем несъедобное!), а во-вторых, чтобы размягчить жесткий сухой хлеб, ибо иначе он продвигался бы лишь с трудом и мог бы даже нарушить целостность стенок пищевода на своем пути от рта к желудку.

Совершенно таковы же отношения и в желудке. На белок хлеба производится гораздо больше белкового фермента, чем на молочный и мясной белок, и этому факту соответствует наблюдаемое в пробирке явление: белок мяса и молока гораздо легче расщепляется белковым ферментом, чем растительный белок.

И опять-таки можно было бы (что я позже при случае и сделаю) привести еще многочисленные примеры подобной целесообразной связи между работой пищеварительных желез и свойствами попадающего в пищеварительный канал объекта. В этом нельзя усмотреть решительно ничего

странного, других отношений и нельзя было бы ожидать. Как ясно каждому, животный организм представляет крайне сложную систему, состоящую из почти бесконечного ряда частей, связанных как друг с другом, так и в виде единого комплекса с окружающей природой, находящегося с ней в равновесии. Равновесие этой системы, как и всякой другой, является условием ее существования. Там, где мы в этой системе не умеем найти целесообразных связей, это зависит только от нашего незнания, что, однако, вовсе не означает, что эти связи при продолжительном существовании системы не имеются в наличии.

Теперь мы обратимся к дальнейшему вопросу, вытекающему из вышесказанного: как это равновесие осуществляется? Почему железы производят и выделяют в пищеварительный канал как раз такие реактивы, которые необходимы для успешной обработки соответственного объекта? Очевидно, нужно признать, что определенные свойства объекта каким-то образом влияют на железу, причем вызывают в ней специфическую реакцию, специфическую работу. Анализ этого воздействия на железу крайне длителен и сложен. Самое главное – это обнаружить в объекте те свойства, которые в данном случае действуют как раздражители на занимающие нас железы. Это исследование провести вовсе не так легко, как может показаться с первого взгляда. Вот некоторые тому доказательства.

Через металлическую трубку, о которой шла речь выше, мы вводим собаке в ее пустой и покойный желудок мясо, но так, чтобы она этого не заметила; через несколько минут из стенок желудка начинает сочиться желудочный реактив, кислый раствор желудочно-белкового фермента. Какое же из свойств мясной массы подействовало раздражающе на желудочные железы? Проще всего было бы признать, что это сделали ее механические свойства: давление, трение о желудочные стенки. Но это совсем не так. Механические воздействия совершенно бессильны по отношению к желудочным железам. Можно любым путем воздействовать механически на желудочную стенку: сильно или слабо, длительно или с перерывом, на ограниченных участках или диффузно, и все же при этом не получишь ни одной капли желудочного сока. Раство-



римые в воде составные части мяса и являются, в сущности, веществами, действующими раздражающим образом. Однако мы еще не вполне осведомлены об этих веществах, ибо экстрактивные вещества мяса представляют обширную группу, в настоящее время еще не изученную во всем ее объеме.

Теперь еще один пример. Лишь только пищевая кашица продвинулась в ближайший отрезок пищеварительного канала, в двенадцатиперстную кишку, как через несколько минут приводится в действие одна из желез этого отрезка кишки – большой, лежащий сбоку от пищеварительного канала и связанный с ним выводным протоком орган, поджелудочная железа. Какие же свойства продвигающейся по кишечнику пищевой кашицы действуют на железу как раздражающий агент? Против всякого ожидания оказалось, что это в первую очередь не свойства принятой пищи, а свойства сока, присоединившегося к ней в желудке, а именно – содержание в нем кислоты. Если влить в желудок или прямо в кишку чистый желудочный сок, или только содержащуюся в нем кислоту, или даже другую кислоту, то наша железа начинает так же энергично или даже еще энергичнее работать, чем в том случае, когда нормальная пищевая кашица попадает из желудка в кишечник. Более глубокий смысл этого неожиданного факта совершенно ясен.

Желудочная лаборатория работает со своим белковым ферментом при кислой реакции. Различные кишечные ферменты и между ними, стало быть, также и панкреатические ферменты не могут развивать свою деятельность в кислой среде. Отсюда ясно, что первая задача, которую выполняет эта лаборатория, состоит именно в том, что она старается обеспечить необходимую для ее плодотворной деятельности нейтральную или щелочную реакцию. Эти отношения создаются вышеупомянутыми взаимосвязями, ибо, как сказано, кислое желудочное содержимое вызывает (и чем оно кислее, тем в большей степени) секрецию щелочного панкреатического сока. Таким образом, панкреатический сок действует прежде всего как раствор соды.

Еще один пример. Как уже давно известно, панкреатический сок содержит все три фермента, действующие на все главные пищевые вещества: отличный от желудочного фермента белковый фермент, крахмальный и жировой фермент. Согласно нашим опытам, белковый фермент присутствует в панкреатическом соке постоянно или иногда, полностью или частично (об этом еще спорят) в недействительной латентной форме. Этот факт может найти свое объяснение в том, что активный белковый фермент мог бы стать опасным для обоих других панкреатических ферментов и мог бы их разрушить. Одновременно мы смогли установить, что стенки верхнего отрезка кишечника выделяют в кишку особое ферментное вещество, деятельность которого состоит в том, что оно превращает неактивный панкреатический белковый фермент в активный. Активный фермент, который теперь в кишечнике пришел в соприкосновение с белковыми веществами пищи, теряет тем самым свое вредоносное для остальных ферментов действие. Вышеупомянутый особый кишечный фермент выделяется кишечной стенкой лишь благодаря раздражающему действию панкреатического белкового фермента.

Таким образом, в основе целесообразной связи явлений лежит специфичность раздражений, которой соответствует такая же специфичность реакций. Но этим еще далеко не все исчерпано. Теперь нужно поставить следующий вопрос: каким образом данное свойство объекта, данный раздражитель достигает самой железистой ткани, ее клеточных элементов? Система организма, его бесчисленные части соединяются в единое целое двояким образом: посредством специфической ткани, которая существует только для поддержания взаимных отношений, а именно нервной ткани, и при помощи тканевых жидкостей, омывающих все тканевые элементы. Эти же самые посредники переносят также и наши раздражители на железистую ткань. Мы подробно занялись изучением взаимоотношений первого рода.

Еще задолго до нас было доказано, что работа слюнных желез регулируется сложным нервным аппаратом.

Окончания центростремительных чувствительных нервов раздражаются в ротовой полости различными раздражителями; по этим нервам раздражение передается в центральную нервную систему и отсюда при помощи особых центробежных секреторных, непосредственно связанных с железистыми клетками нервных волокон достигает до секреторных элементов, которые оно побуждает к определенной деятельности. Этот процесс в целом обозначается, как известно, как рефлекс или рефлекторное раздражение.

Мы утверждали и подтвердили это также опытами, что этот рефлекс в норме всегда специфичен, т.е. что окончания центростремительных нервов, воспринимающие раздражение, различны, так что каждое из них пускает в ход рефлекс лишь на совершенно определенные внешние раздражители. Соответственно с этим и раздражитель, доходящий до железистой клетки, должен быть особым, своеобразным. Это глубочайший механизм целесообразной зависимости работы органов от внешних воздействий – связи, осуществляющейся при помощи нервной системы.

Как и следовало ожидать, открытие нервного аппарата слюнных желез тотчас же дало физиологии повод искать такие же аппараты и для других, более глубоко лежащих желез пищеварительного канала. Несмотря на то что были приложены большие старания, в этом направлении очень долго не могли достигнуть никаких положительных результатов. Очевидно, новым объектам исследования присущи важные свойства, которые препятствовали исследователям выяснить здесь что-либо при помощи прежних методик.

Приняв во внимание эти особые отношения, мы, к своей радости, смогли достигнуть того, что в течение такого долгого времени являлось *primum desiderium*<sup>73</sup>. Физиология овладела, наконец, нервами, возбуждающими желудочные железы и поджелудочную железу. Главная причина того, что мы получили наши результаты, заключалась в том, что мы раздражали нервы у животных, которые свободно стояли на своих ногах и

---

<sup>73</sup> Благим намерением (лат.).

не подвергались ни во время раздражения нервов, ни непосредственно до него каким-либо иным болезненным раздражениям.

Нашими опытами могло быть доказано не только существование нервного аппарата у вышеупомянутых желез, но из них выяснились также некоторые факты, в которых ярко было выражено участие этих нервов в нормальной деятельности. Вот разительный пример. Мы проделали на собаках две простые операции, которые они очень легко переносят и после которых они при заботливом уходе живут много лет подряд как совершенно здоровые, нормальные животные. Эти операции следующие: 1) перерезка на шее идущей изо рта в желудок трубки и изолированное вшивание обоих ее концов в кожу шеи, так что теперь у животного пища не может попасть изо рта в желудок, а выпадает из верхнего конца трубки; 2) уже ранее упомянутая и издавна практикуемая операция, при которой через стенку живота в желудок вводится металлическая трубка.

Само собою понятно, что подобных животных надо кормить таким образом, чтобы пища через металлическую трубку попадала прямо в желудок. Если такой собаке после нескольких часов голодания тщательно промыть пустой желудок водой, а затем накормить ее нормальным путем, причем, как сказано, пища будет выпадать из пищевода, не достигнув желудка, то через несколько минут из пустого желудка начнет выделяться чистейший желудочный сок; это сокоотделение длится все время, пока животное получает еду, и иногда продолжается еще долго после прекращения так называемого мнимого кормления. Сокоотделение очень обильное; таким способом можно получить много сотен кубических сантиметров желудочного сока. Мы проделываем это в нашей лаборатории над многими собаками, и полученный при этом желудочный сок служит, не считая научных исследований, хорошим средством для лечения больных, страдающих недостаточной деятельностью желудочных желез. Таким образом, часть жизненных припасов нашего животного, которое живет много лет (более семи-восьми лет), не обнаруживая ни малейших отклонений в состоянии здоровья, пригодилась человеку.

Из упомянутого опыта ясно, что один акт принятия пищи, при котором пище даже не нужно попадать в желудок, обуславливает возбуждение желез желудка. Если у этой собаки перерезать на шее так называемые блуждающие нервы, то сколько бы времени собака ни жила и как бы прекрасно она себя ни чувствовала, мнимое кормление не повлечет за собою секреции желудочного сока. Таким образом, произведенное актом еды раздражение достигает желудочных желез через посредство нервных волокон, содержащихся в блуждающих нервах.

Теперь я позволю себе лишь на короткое время отклониться от моей главной темы. Перерезка блуждающих нервов уже издавна проделывалась на животных и представляла собою абсолютно смертельную операцию. В течение XIX столетия физиология познакомилась с множеством воздействий блуждающих нервов на различные органы, и из соответствующих исследований выяснились по меньшей мере четыре нарушения в организме после перерезки этих нервов, из которых каждое является само по себе смертельным. Мы приняли на наших собаках необходимые меры против каждого из этих нарушений, из которых одно относится к пищеварительной системе, и благодаря этому животные с перерезанными блуждающими нервами наслаждались здоровым и веселым существованием. Таким образом, сознательно были устранены четыре одновременно действующие смертельные причины. Наглядное доказательство того – сколь могущественна наука, рассматривающая организм как машину!

Около десяти лет тому назад мне и моему покойному другу, профессору Ненскому, оказал честь великий человек, которому ежегодные праздники науки в Стокгольме обязаны своим существованием, прислав письмо, к которому был приложен значительный денежный дар, предназначенный для вознаграждения руководимых нами лабораторий; Альфред Нобель проявил в этом письме живой интерес к физиологическим экспериментам и предложил нам несколько очень поучительных проектов-опытов, которые затрагивали высочайшие задачи физиологии: вопрос о старении и умирании организмов. В самом деле, физиология вправе ожидать для себя значительных побед в этой области; границы

физиологического могущества совсем еще не обязаны быть проведены здесь. Это могущество физиологии может быть обеспечено в будущем только в том случае, если мы будем проникать все глубже и глубже в нашем познании организма как чрезвычайно сложного механизма. Небольшое доказательство я привел выше.

Теперь я вернусь к теме моей лекции. Оказалось, что среди возбуждителей пищеварительных желез до сих пор не упоминалась одна категория, совершенно неожиданно выступившая при наших исследованиях на первый план. Правда, уже давно было известно, что у голодного при взгляде на вкусную пищу слюнки текут; отсутствие аппетита тоже всегда считалось нежелательным явлением, из чего можно заключить, что аппетит стоит в существенной связи с пищеварительным актом. В физиологии упоминалось также и о психическом возбуждении как слюнных, так и желудочных желез. Однако нужно заметить, что психическое возбуждение желудочных желез признавалось далеко не всеми и что вообще выдающаяся роль психического воздействия в механизме обработки пищи в пищеварительном канале отнюдь не нашла правильного признания.

Наши исследования заставили нас выдвинуть эти воздействия на самый первый план. Аппетит, это жадное стремление к пище, оказался постоянным и мощным возбуждателем желудочных желез. Нет такой собаки, у которой искусное, умелое поддразнивание пищей не вызвало бы более или менее значительного сокоотделения из пустого и до этого находящегося в покое желудка. Нервные, возбудимые животные выделяют при одном виде пищи несколько сотен кубических сантиметров желудочного сока; у солидных, спокойных животных при этом выделяется лишь несколько кубических сантиметров. Если же изменить опыт определенным образом, то у всех животных без исключения будет иметь место чрезвычайно обильное сокоотделение; я подразумеваю здесь уже упомянутый выше опыт с мнимым кормлением, при котором пища не может попасть изо рта в желудок.

Очень точный и многократно повторенный анализ этого опыта убедил нас в том, что сокоотделение не может рассматриваться здесь как ре-

зультат простого рефлекторного раздражения рта и глотки проглоченной пищей. Можно влить в рот оперированным таким образом собакам любые химические раздражающие вещества без того, чтобы на это раздражение излилась хоть единая капля желудочного сока. Казалось бы, можно признать, что ротовая поверхность раздражается не любыми химическими веществами, а только специфическими, содержащимися в съеденной пище. Но дальнейшие наблюдения не позволяют остановиться и на этом предположении. Одна и та же пища действует как совершенно различный раздражитель желез в зависимости от того, съедена ли она животным с жадностью или животное съело ее неохотно, по приказу. Постоянная картина следующая: любая пища, съеденная собакой при этом опыте, лишь тогда действует как сильный раздражитель, когда она ей по вкусу. Мы должны допустить, что при акте еды жадное стремление к еде, аппетит, – стало быть, психическое явление – служит сильным и постоянным раздражителем. Физиологическое значение этого сока, который мы обозначили как аппетитный сок, оказалось исключительно важным. Если собаке незаметно для нее, т.е. без возбуждения ее аппетита, ввести в желудок через металлическую трубку хлеб, то он может пролежать там целый час в неизменном виде, не возбуждая ни в малейшей степени сокоотделения, ибо он не содержит никаких раздражающих желудочные железы веществ. Если же этот самый хлеб съедается животным, то изливающаяся при этом порция желудочного сока, аппетитный сок, оказывает химическое воздействие на белковые вещества хлеба; как обычно говорят, он их переваривает. Среди веществ, получающихся из измененного таким способом белка, находятся такие, которые со своей стороны действуют как самостоятельные раздражители желудочных желез. Они, таким образом, продолжают работу, начатую угасающим естественным образом первым раздражителем желез – аппетитом.

Уже при рассмотрении работы желудочных желез можно было убедиться, что аппетит действует на железы не только вообще как раздражитель, но что он также возбуждает их в различной степени, смотря по тому, на что он направлен. Для слюнных желез является правилом, что все наблюдаемые в физиологических опытах вариации их деятельности точ-

но повторяются в опытах с психическим возбуждением, т.е. в тех, в которых определенный объект не входит в непосредственное соприкосновение со слизистой рта, но привлекает к себе внимание животного, находясь на некотором отдалении. Например, вид сухого хлеба вызывает более сильное слюноотделение, чем вид мяса, хотя, если судить по движениям животного, последнее может возбудить значительно более живой интерес. При поддразнивании собаки мясом или каким-либо иным съедобным веществом из слизистых слюнных желез изливается очень концентрированная слюна; наоборот, вид отвергаемых животным веществ обуславливает секрецию очень жидкой слюны из тех же желез. Короче говоря, опыты с психическим возбуждением представляют точную, хотя и уменьшенную, копию опытов с физиологическим возбуждением желез при помощи тех же веществ. Таким образом, в работе слюнных желез психология заняла место рядом с физиологией. Даже более того! Психическая сторона этой работы кажется на первый взгляд даже неопровержимее физиологической. Если какой-либо предмет, привлечший к себе внимание собаки, вызвал издали слюноотделение, то, естественно, каждый может с полным правом признать, что это – психическое, а не физиологическое явление.

Когда же собака что-нибудь съела или ей силой влили в рот какие-либо вещества и после этого выделилась слюна, то нужно еще прежде доказать, что это явление действительно имеет в себе нечто физиологическое, а не является всецело психическим, но увеличенным в своих размерах благодаря особенным, сопровождающим его условиям. Эти соображения тем более соответствуют действительности, что, как это ни странно, при перерезке всех чувствительных нервов языка большая часть веществ, попадающих в рот при еде или искусственным путем, вызывает совершенно такую же работу слюнных желез, как до нее. Нужно пойти дальше, прибегнуть к более радикальным мерам, отравлять животных или разрушать более высокие отрезки центральной нервной системы, чтобы убедиться, что между раздражающими ротовую полость объектами и слюнными железами существует не только психическая, но и физиологическая связь. Таким образом, мы имеем перед собою два ряда как будто совер-



шенно разных явлений. Что же делать физиологу с психическими явлениями? Оставить их без внимания невозможно, ибо они стоят в самой тесной связи с чисто физиологическими явлениями в интересующей нас работе пищеварительных желез. Если же физиолог все же желает их изучать, то перед ним встает вопрос: как именно?

Так как мы опирались на пример изучения низших организованных представителей животного мира и, естественно, хотели оставаться физиологами, а не превращаться в психологов, то мы решили занять и по отношению к психическим явлениям в наших опытах на животных чисто объективную позицию. Мы главным образом стремились строго дисциплинировать наш образ мыслей и слова, чтобы они совершенно не затрагивали душевного состояния животного, и ограничили нашу работу тем, что внимательно наблюдали и точно формулировали производимое на расстоянии действие объектов на работу слюнных желез. Результат соответствовал нашим ожиданиям: наблюдаемые отношения между внешними явлениями и вариациями работы желез могли быть подвергнуты систематическому анализу, они оказались закономерными, так как могли быть повторены как угодно часто; к нашей радости, мы могли убедиться, что наши наблюдения пошли по правильному плодотворному пути. Я приведу здесь ряд примеров, которые изображают результаты, полученные при помощи новой методики в интересующей нас области.

Если повторно раздражать собаку видом предметов, вызывающих слюноотделение на расстоянии, то реакция слюнных желез становится все слабее и, наконец, падает до нуля. Чем короче промежутки, через которые повторяется раздражение, тем скорее достигается нулевой уровень, и наоборот. Эти правила применимы в полном объеме лишь тогда, когда условия опытов остаются неизменно те же. Идентичность условий, однако, может быть лишь относительной; она может ограничиться лишь теми явлениями внешнего мира, которые однажды стояли в связи с актом еды или с насильственным введением соответственных веществ в рот животного; изменение других явлений не имеет значения. Упомянутая идентичность может быть очень легко достигнута экспериментатором, так что опыт, при котором повторно применяемый на некотором отдале-

нии раздражитель постепенно теряет свое действие, может быть легко продемонстрирован даже в течение одной лекции. Если при повторном раздражении вещество перестает действовать издали, этим ни в какой мере не устраняется действие другого вещества. Если, например, молоко перестает действовать, то действие хлеба – крайне резкое. Если и он при повторении опыта с раздражением утратил свое действие, то кислота или что-либо другое все еще проявляют свое полное действие. Эти соотношения объясняют также истинный смысл вышеупомянутой идентичности условий; каждая подробность окружающих предметов является новым раздражителем. Если данный раздражитель утратил свое действие, можно вновь вернуть его лишь после длительного отдыха, который должен продолжаться несколько часов. Однако утраченное действие может быть наверняка восстановлено в любое время особыми мерами.

Если вид хлеба повторно не раздражает больше слюнных желез собаки, то стоит только дать животному хлеба, чтобы вызываемое на расстоянии действие хлеба вновь полностью вошло в силу. Тот же результат получается, если дать собаке съесть что-нибудь другое, помимо хлеба. Более того! Если ввести собаке в рот что-либо, вызывающее слюноотделение, например кислоту, то даже этим восстанавливается первоначальное действие вида хлеба. Вообще угасшую реакцию восстанавливает все то, что возбуждает работу слюнных желез, и притом в тем большей степени, чем значительнее эта работа. Однако так же закономерно наша реакция может быть и заторможена определенными искусственными мерами, если, например, на собаку, на ее глаз или на ее ухо, воздействовать какими-либо необычайными раздражителями, вызывая этим у животного сильную двигательную реакцию, например дрожание всем телом.

Так как мое время ограничено, то я удовольствуюсь сказанным и перейду к теоретическому рассмотрению только что упомянутых опытов. Приведенные факты удобно укладываются в рамки физиологического мышления. Наши действующие с некоторого расстояния раздражители могут быть с полным правом обозначены и рассмотрены как рефлексy. При внимательном наблюдении выясняется, что работа слюн-

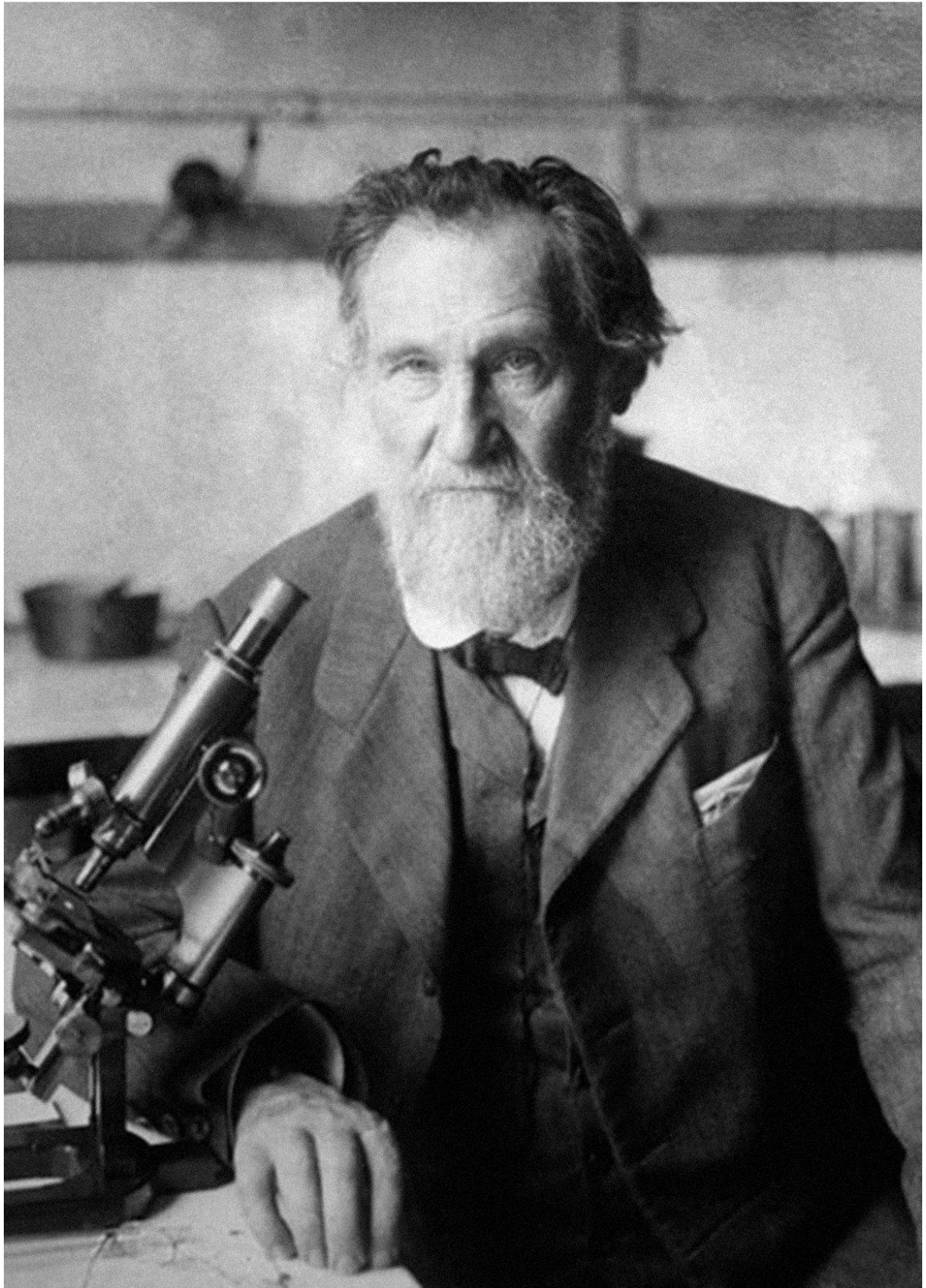
ных желез постоянно возбуждается какими-нибудь внешними явлениями, т.е. что она, как и обычный физиологический слюнный рефлекс, вызывается внешними раздражителями; только последний идет с поверхности рта, а первый – с глаза, с носа и т.д. Разница между обоими рефлексами состоит, во-первых, в том, что наш старый физиологический рефлекс является постоянным, безусловным, тогда как новый рефлекс все время колеблется и, следовательно, является условным. Если же ближе приглядеться к явлениям, то можно обнаружить следующую важную разницу между обоими рефлексами: при безусловном рефлексе в качестве раздражителя действуют те свойства объекта, с которыми слюне приходится иметь дело при физиологических отношениях – их твердость, сухость, определенные химические свойства; при условном рефлексе, наоборот, раздражителями являются такие свойства объекта, которые сами по себе не стоят ни в какой связи с физиологической ролью слюны, например их цвет и т.п. Эти последние свойства являются здесь как бы сигналами для первых. Мы не можем не видеть в их раздражающем действии более широкое, более тонкое приспособление слюнных желез к явлениям внешнего мира. Вот пример. Мы собираемся влить собаке в рот кислоту; в интересах целостности слизистой рта, очевидно, крайне желательно, чтобы до того, как кислота попала в рот, в нем собралась слюна; с одной стороны, она препятствует непосредственному соприкосновению кислоты со слизистой, с другой, сразу же разбавляет кислоту, чем ее вредное химическое действие вообще ослабляется. Однако сигналы, по существу, имеют лишь условное значение: с одной стороны, они легко изменяются, с другой стороны, сигнализирующий предмет не может вступить в соприкосновение со слизистой рта; значит, более тонкое приспособление должно состоять в том, что служащие сигналами свойства предметов то раздражают слюнные железы, то нет. Это мы и видим в действительности. Можно любое явление внешнего мира сделать временным сигналом раздражающего слюнные железы объекта, если повторно, один или несколько раз, связать раздражение слизистой рта этим объектом с действием данного внешнего явления на другие чувствительные части поверхности тела. В настоящее время мы

пробуем применять в нашей лаборатории многие подобные, в высшей степени парадоксальные комбинации; оказалось, что наш опыт увенчивается успехом. С другой стороны, можно быстродействующие сигналы лишить их действия, если повторять их в течение долгого времени, не приводя одновременно слизистую рта в соприкосновение с соответствующим объектом. Если собаке целыми днями и неделями показывать самую обыкновенную пищу, не давая ей ее есть, то в конце концов ее вид перестанет вызывать слюноотделение. Механизм раздражения слюнных желез сигнальными признаками объектов, т.е. механизм «условного раздражения», можно легко себе представить физиологически как функцию нервной системы. Как мы только что видели, в основе каждого условного рефлекса, т.е. раздражения сигнальными признаками объекта, лежит безусловный рефлекс, т.е. раздражение при помощи существенных признаков объекта. Таким образом, надо признать, что тот пункт центральной нервной системы, который сильно раздражается во время безусловного рефлекса, отвлекает на себя более слабые раздражители, направленные на другие пункты центральной нервной системы из внешнего мира, т.е. что благодаря безусловному рефлексу для всех других внешних раздражителей создается временный, случайный путь к центральному пункту этого рефлекса. Условия, которые влияют на открытие и закрытие этого пути, его использование или неиспользование, представляют внутренний механизм действительности и недействительности сигнальных признаков внешних предметов, физиологическую основу тончайшей реактивности живой субстанции, тончайшей приспособляемости животного организма.

Я выражаю здесь мое глубочайшее убеждение в том, что в этом направлении, как я его в общих чертах охарактеризовал, физиологическое исследование может весьма успешно и весьма далеко продвигаться вперед.

В сущности, нас интересует в жизни только одно: наше психическое содержание. Его механизм, однако, и раньше был и сейчас еще окутан для нас глубоким мраком. Все ресурсы человека – искусство, религия, литература, философия и исторические науки – все это объедини-

лось, чтобы пролить свет в эту тьму. Но в распоряжении человека есть еще один могучий ресурс: естествознание с его строго объективными методами. Эта наука, как мы все знаем, делает каждый день гигантские успехи. Приведенные в конце моей лекции факты и соображения представляют одну из многочисленных попыток воспользоваться последовательно проведенным, чисто естественнонаучным образом мышления при изучении механизма высших жизненных проявлений собаки, этого столь близко стоящего к человеку и дружественного ему представителя животного мира.



*Илья Ильич Мечников*

*(1845–1916)*

**БИОГРАФИЯ**<sup>74</sup>

Илья Мечников (1845–1916) родился 16 мая в деревне Ивановке под Харьковом. Он был сыном офицера Императорской гвардии, владевшего помещьем в степях Украины. Его мать, Эмилия Невахович, была еврейкой.

Мечников пошел в школу в Харькове и, хотя ему было еще совсем немного лет, всерьез стал интересоваться естественной историей, которой он обучал своих младших братьев и других детей. В то время он особенно увлекался ботаникой и геологией. После окончания школы он поступил в Харьковский университет, где изучал естественные науки. За два года Мечников прошел полный четырехлетний курс Харьковского университета. Закончив университет, он сначала занимался исследованием морской фауны на острове Гельголанд, а затем переехал в Гисенский университет, где работал под управлением Лекарта. Потом были Гёттинген и Мюнхен, где он проводил исследования в лаборатории фон Зибольда. В 1865 г. во время работы в Гисене Мечников открыл внутриклеточное пищеварение у одного из видов плоских червей. Это наблюдение повлияло на его последующие открытия. В Неаполе он написал докторскую диссертацию по эмбриональному развитию каракатицы *Sepiolo* и ракообразных *Nebalia*.

В 1867 г. Мечников возвратился в Россию, где он был избран доцентом нового Одесского университета, а затем стал приват-доцентом Петербургского университета. В 1870 г. он был избран профессором зоологии и сравнительной анатомии Одесского университета.

В Санкт-Петербурге он встретил свою первую жену Людмилу Федорович, которая так тяжело болела туберкулезом, что на венчание ее пришлось нести в церковь в кресле. В течение пяти лет Мечников делал все, что бы спасти ее жизнь, но 20 апреля 1873 г. она умерла. Убитый горем, страдая от слабого зрения и проблем университете, Мечников попытался покончить с собой, приняв большую дозу опия. Но, к счастью для него и для мира, он не умер. В Одессе в 1875 г. он встретил свою вторую жену, Ольгу. В 1880 г. его жена тяжело переболела брюшным тифом, и, хотя она

---

<sup>74</sup> Илья Мечников (1845–1916). Биография / пер. с англ. М. Сикачевой // Нобелевская премия. Физиология и медицина : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 1 : 1901–1909. – С. 427–431. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

не умерла, Мечников, чье здоровье оставалось все еще ослабленным, вновь попытался проститься с жизнью. На этот раз он сделал так, чтобы его смерть принесла пользу его жене и другим: привил себе возвратный тиф, чтобы выяснить, передается ли он с кровью. Последовавшее заболевание возвратным тифом протекало достаточно тяжело, но не убило его.

В 1882 г. после выздоровления Мечников увольняется из Одесского университета в связи с трудностями, возникшими во времена реакционного правления после убийства царя Александра II.

Мечников отправляется в Мессину, чтобы продолжить исследования по сравнительной эмбриологии в маленькой лаборатории, которую он там обосновал. Здесь он и сделал великое открытие фагоцитоза, которое навсегда прочно связано с его именем. Открытие было сделано, когда Мечников наблюдал в личинках морской звезды подвижные клетки, которые, по его мнению, могли служить составляющей защиты данных организмов. Для того чтобы проверить свою идею, он ввел в тело личинки кусочки шипов мандаринового дерева, которое он приготовил вместо новогодней елки для своих детей. На следующее утро он обнаружил, что шипики окружены подвижными клетками, и, зная, что при воспалении у животных, имеющих кровеносную систему, из кровеносных сосудов выходят лейкоциты, он предположил, что лейкоциты способны захватывать и переваривать бактерии, попавшие в организм.

По пути в Одессу Мечников заехал в Вену, где рассказал о своих идеях профессору зоологии Клаусу. Именно Клаус предложил термин «фагоциты» для подвижных клеток, действующих таким образом. Наконец, в 1883 г. Мечников в Одессе издает свою первую работу по фагоцитозу. Помимо огромной важности для иммунологии открытие оказало большое влияние на самого Мечникова. Он полностью изменил свои взгляды на жизнь: отверг пессимизм и решил искать дальнейшие доказательства своей гипотезы.

Определенные доказательства он обнаружил при изучении маленьких водных блох дафний. У дафний болезнетворные споры грибов были атакованы фагоцитами. Затем он занялся изучением бациллы сибирской



язвы и установил, что наиболее вирулентные штаммы не были атакованы фагоцитами.

В этот период Мечников назначается директором института, организованного в 1886 г. в Одессе для лечения бешенства пастеровской вакциной. Эта работа столкнулась с враждебными настроениями на местах. Мечников решил, что ситуация настолько сложна (отчасти потому, что он не был врачом), что ему следует покинуть Одессу и ехать в Париж за советом к Пастеру. Пастер предложил Мечникову лабораторию в своем институте, где он и проработал до конца своих дней.

Помимо работ по фагоцитозу, до своего открытия Мечников опубликовал большое число статей по эмбриологии беспозвоночных, включая эмбриологию насекомых в 1866 г. и эмбриологию медуз в 1886 г. В Пастеровском институте в Париже Мечников занимался поиском доказательств своей теории клеточного иммунитета, которая, как многие великие открытия в науке, была встречена достаточно враждебно. За этот период он опубликовал несколько статей и две книги по сравнительной патологии воспаления (1892) и труд «Иммунитет при инфекционных заболеваниях» (1901). В 1908 г. Мечников был награжден совместно с Эрлихом Нобелевской премией по физиологии и медицине.

Помимо этого Мечников совместно с Ру доказал, что сифилис может быть привит обезьяне. Позднее он занялся исследованием флоры кишечника человека и сформулировал теорию, согласно которой старение происходит вследствие отравления человека ядами некоторых бактерий кишечника. Для профилактики размножения этих бактерий он предлагал простоквашу, и на некоторое время эта диета стала очень популярной.

Мечников получил множество наград, среди которых звание почетного доктора наук Кембриджского университета, медаль Копли Королевского общества, иностранным членом которого он являлся, почетное членство в Медицинской академии в Париже, в Академии наук и Медицинской академии в Петербурге. Кроме того, он был членом-корреспондентом многих других обществ и иностранным членом Шведского медицинского общества.

Фотографии, сделанные во время его работы в Пастеровском институте, показывают Мечникова с длинными волосами и неопрятной бородой. Говорили, что он носит калоши и зонтик в любую погоду, его карманы набиты научными статьями, что у него всегда одна и та же шляпа и часто, когда он особенно волнуется, он на нее садится.

В 1913 г. Мечникова начинает беспокоить сердце. И хотя его здоровье, пошатнувшееся после стресса, вызванного началом Первой мировой войны, на некоторое время восстановилось, 16 июля 1916 г. Мечников умер.

*Илья Мечников*

## **НАСТОЯЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИММУНИТЕТА ПРИ ИНФЕКЦИОННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЯХ<sup>75</sup>**

*Нобелевская лекция, 11 декабря 1908 г.*

Я стою перед вами благодаря параграфу 9 Положения Нобелевского фонда, который гласит: «Лауреат премии, если это возможно, должен прочесть публичную лекцию по теме его работы, за которую он был награжден. Лекция должна быть прочитана в течение шести месяцев после дня объявления о присуждении премии в Стокгольме».

Мне, вместе с моим блестящим другом профессором Эрлихом, оказана высокая честь быть награжденным Нобелевской премией по медицине «за работы по иммунитету», что обязывает меня сделать сообщение по этой теме. Так как изучение иммунитета является разделом теоретической медицины, крайне сложно обойтись в аудитории без применения специальных терминов, что усложняет мою задачу. К счастью, теоретический вопрос, который будет обсуждаться сегодня, затрагивает защиту организма от заболеваний. И этот теоретический вопрос представляет огромный общественный интерес, что делает мою лекцию более легкой для восприятия. Кроме того, я постараюсь показать практическую значимость чистой науки.

Не нужно быть врачом или ученым, чтобы понять, что человеческий организм способен ежедневно бороться со многими опасными агентами. Давно замечено, что дома, где все члены семьи одинаково подвергались опасности, или в школах, или в войсках, где все живут в одинаковых условиях, болезнь не поражает всех поголовно. Существуют люди, подверженные заболеванию, и люди, имеющие в большей или меньшей степени иммунитет.

---

<sup>75</sup> Мечников, И. Настоящее состояние проблемы иммунитета при инфекционных заболеваниях : нобелевская лекция, Стокгольм, 11 декабря 1908 г. / И. Мечников // Нобелевская премия. Физиология и медицина : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 1 : 1901–1909. – С. 399–426. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

Определенное время существовало только смутное представление об иммунитете. С момента величайшего открытия Пастера и его коллег возможности создания иммунитета путем вакцинации вопрос с микробами стал проясняться. Проблема была открыта для исследований экспериментальными методами. Для Пастера, который был химиком, факт, что неповрежденный организм не позволяет распространиться в нем болезнетворным агентам, объяснялся простой химией окружающей среды. Так же как растения не растут на почве, в которой отсутствуют необходимые для их роста вещества, так и микробы, эти микроскопические растения, вызывающие инфекционные заболевания, неспособны размножаться в организме, который не предоставляет им всех необходимых веществ.

Эта теория абсолютно логична, но были найдены противоречащие ей факты. Пастер и его последователи поняли это, когда обнаружили, что инфекционные микробы очень хорошо развиваются в крови животных, обладающих иммунитетом.

Организм животного чрезвычайно сложен, и поэтому иногда не представляется возможным объяснить процессы, происходящие в нем, простой логикой. Для достижения цели часто необходимы различные подходы.

Требовалось рассмотреть этот вопрос с точки зрения биологии и постараться упростить исследования. Эта идея была положена в основу наших исследований. Болезнь не является прерогативой человека и домашних животных, поэтому вполне очевидно, что патологические процессы могут происходить в очень простых организмах и что инфекция, излечение и иммунитет присущи и им. Для решения медицинских задач должна была быть призвана сравнительная патология.

При изучении органов пищеварения в животном мире мы столкнулись с фактом, что некоторые элементы организма, которые не играют роли в переваривании пищи, способны, тем не менее, накапливать инородные тела. Нам казалось, что причина заключается в том, что эти элементы когда-то принимали участие в процессах пищеварения. Я не считаю нужным обсуждать сегодня этот вопрос чистой зоологии и перейду сразу к общему выводу наших исследований в данной области. Эти элементы организма человека и животных, способные самостоятельно двигаться и за-

хватывать инородные тела, являются не чем иным, как остатками пищеварительной системы примитивных существ.

У некоторых низших животных, достаточно прозрачных для прижизненного изучения, было обнаружено огромное количество маленьких клеток сдвигающимися выростами. У этих животных мельчайшее повреждение сопровождалось скоплением данных элементов в точке повреждения. В мелких прозрачных личинках легко было увидеть, что подвижные клетки, собранные в месте повреждения, часто захватывают инородные тельца.

Подобные наблюдения, с одной стороны, подтверждали наше предположение о природе этих мигрирующих элементов, а с другой, – заставляли думать, что скопление вокруг повреждения является вариантом естественной защиты части организма. Необходимо было разработать методики, способные доказать эту гипотезу. В то время, более 25 лет назад, я находился в Мессине, поэтому я решил взять для изучения личинок морской звезды, которая была впервые найдена у берегов Скандинавии и называлась *Vipinnaria*.

В тельца этих личинок были введены острые шипы, и на следующий день я увидел множество клеток, образовавших вокруг инородных тел толстый слой. Сходство между данным явлением и тем, что происходит, когда шип вызывает воспаление и нагноение у человека, было поразительным. Единственным различием было то, что у личинки морской звезды скопление подвижных клеток вокруг инородного тела происходило без какого-либо влияния кровеносных сосудов и нервной системы: этот организм не имеет попросту ни того, ни другого. Значит, клетки группируются вокруг шипа самостоятельно.

Описанный эксперимент демонстрирует первую стадию воспаления в животном мире. В настоящее время под воспалением у человека и высших животных понимают явление, возникающее практически всегда при проникновении в организм какого-либо патогенного микроба. Таким образом, приток подвижных клеток к месту повреждения отражает реакцию организма на инородные тела в целом и на инфекционные микробы в частности. Согласно данной гипотезе, заболевание возникает вследствие борьбы болезнетворного агента, микроба, с одной стороны, и подвижных

клеток организма – с другой. Излечение наступает при победе клеток организма, и иммунитет является признаком их достаточной активности для предотвращения микробного вторжения.

Это предположение, основанное на фундаментальном эксперименте с шипами у *Vipinnaria*, необходимо было подтвердить наблюдениями и специальными исследованиями. К счастью для нас, инфекционными заболеваниями страдают не только люди и высшие животные. Эти болезни существовали на земле задолго до появления человека, и редкое создание может избежать их.

Таким образом, для подтверждения приведенной мною гипотезы требовались опыты на животных, стоящих на более высокой ступени развития, но все же достаточно мелких и прозрачных, чтобы быть исследованными под микроскопом.

Необходимо было подготовить начальную базу. Решено было использовать для изучения прогресса воспаления водных животных, известных как «водные блохи». Эти маленькие создания обитают повсеместно в стоячих водоемах и страдают различными заболеваниями. Одно из них вызывается мельчайшим микробом, характеризующимся формированием спор в виде игл. Эти споры, проглоченные водной блохой, или дафнией (согласно научной терминологии), сразу же повреждают стенку кишечника и проникают в полость тела. Как только споры проникают в различные части организма, они вызывают накопление вокруг них подвижных клеток, которые соответствуют белым кровяным тельцам у человека. Начинается битва между двумя сторонами. Иногда спорам удается созреть. В этом случае образуются микробы, секретирующие вещество, которое способно разрушать подвижные клетки. Но эта ситуация в целом достаточно редка. Гораздо чаще подвижные клетки убивают и переваривают инфекционные споры, создавая таким образом иммунитет. Этот эксперимент на живом организме во всех подробностях очень хорошо виден под микроскопом.

Результаты, полученные в эксперименте на личинках морской звезды и на водных блохах, легли в основу теории, которую я здесь представляю. Эта теория подверглась сильнейшей критике со стороны известнейших ученых, и казалось, это противостояние нельзя переломить. Но вос-

поминание о *Vipinnaria* и шипах, окруженных подвижными клетками, и о дафниях с уничтожающими опасные споры инфекционного микроба подвижными кровяными клетками давали мне надежду на победу. Контролируемые наблюдения на живых организмах не могут быть неверными.

После создания базы теории иммунитета ее необходимо было применить к высшим животным и человеку. Конечно, условия при этом гораздо сложнее по сравнению с маленькими прозрачными созданиями, и трудности подстерегали со всех сторон. Учитывая невозможность исследования под микроскопом позвоночных, даже самых маленьких, например новорожденных мышей, приходилось интерпретировать результаты исследований крови и органов, выделенных из организма. В этих обстоятельствах дверь для разного рода ошибок широко открыта.

Изучение множества инфекционных заболеваний человека и высших животных в первую очередь показало, что результаты ни в коей мере не противоречат теории, сформулированной на основании исследований низших прозрачных животных. При наличии в организме иммунитета введение инфекционного микроба всегда сопровождалось накоплением подвижных клеток, и в частности лейкоцитов, которые абсорбировали и разрушали микроб. Эти лейкоциты и другие клетки, способные на захват и разрушение инородных частиц, были названы «фагоцитами», т.е. поглощающими клетками, а вся функция, обеспечивающая иммунитет, получила название «фагоцитоз».

Было сформулировано общее правило: во всех случаях иммунитета, естественного или приобретенного (путем профилактической вакцинации или после инфекционного заболевания), всегда наблюдается высокий уровень фагоцитоза, в то время как при смертельных или очень опасных заболеваниях этот феномен либо отсутствует вовсе, либо значительно менее выражен. Впервые этот результат был получен при исследовании животных, иммунизированных от сибирской язвы. При введении бациллы сибирской язвы под кожу чувствительного животного, например кролика или морской свинки, микроб свободно размножался в жидкостях организма, где практически полностью отсутствовали лейкоциты. Если эти же бациллы вводились кролику или морской свинке, которые были предвари-

тельно вакцинированы против сибирской язвы, результат коренным образом отличался. Очень быстро бациллы захватывались лейкоцитами, накапливающимися в большом количестве в месте инокуляции. Спустя короткий промежуток времени бациллы в фагоците умирали. Через несколько часов после захвата лейкоцитами бацилл они были уже мертвы.

Постепенно это правило распространилось на защиту от других инфекционных заболеваний. Всегда при наличии иммунитета в организме инфекционный агент попадал в фагоциты, которые окружали микроб. Это общее правило было подтверждено на всех патогенных микроорганизмах, открытых к тому моменту. Во всех случаях нечувствительности организма к чуме бациллы чумы поглощались и разрушались фагоцитами, в то время как при смертельных исходах большая часть микробов оставалась в жидкостях организма и беспрепятственно размножалась.

На сегодняшний день нам не удалось обнаружить ни одного исключения из данного общего правила.

В нескольких своих публикациях Вайль из Праги сообщает, что при иммунитете к холере у кур устойчивый организм отражает инвазию другими способами, но не фагоцитозом. Он обосновывает свой вывод отсутствием данного микроба внутри лейкоцитов у животных, нечувствительных к микробу. Это исключение не является истинным. Оно объясняется всего лишь слишком маленьким размером холерного микроба у кур, затрудняющим его поиск для ученых. В моей лаборатории Сулима прицельно занимался этой проблемой и установил, что в соответствии с общим правилом у животных, нечувствительных к холерной бацилле, лейкоциты захватывали микроб, и он в них исчезал.

Противники теории фагоцитоза длительное время отстаивали точку зрения, что лейкоциты и фагоциты в целом способны абсорбировать только микробы, уже убитые жидкостями организма, т.е. плазмой крови и экссудатом. Сегодня уже сложно найти кого-нибудь, кто придерживался бы этой точки зрения. Многочисленные четкие эксперименты доказали, что фагоциты окружают инфекционный микроб еще живым и способным вызвать смертельную инфекцию в организме, который не обладает иммунитетом.



Результаты, которые я сейчас представил в сжатом виде, получены после долгих лет исследований и обсуждений. Многие ученые все еще придерживаются той старой идеи, что лейкоциты являются элементами, вредными для здоровья. При тяжелых заболеваниях, как правило, обнаруживаются скопления гноя. Предполагалось, что гной состоит только из лейкоцитов, так как микробы были слишком малы, чтобы обнаружить их несовершенными методами микроскопирования. Поэтому был сделан вывод, что лейкоциты сами по себе могут стать источником заболевания. Когда позднее внутри лейкоцитов были обнаружены микробы, было сделано предположение, что данные клетки, как предназначенные для болезни составляющие нашего организма, необходимы только для питания и распространения возбудителей инфекции. Разрушение возбудителей при иммунитете приписывалось непосредственному влиянию жидких сред организма.

Теория бактерицидного действия жидкостей была противопоставлена теории фагоцитоза. Организму, имеющему естественный или приобретенный иммунитет, приписывалось свойство разрушения инфекционных микробов без какого-либо участия живых клеток. Это утверждение базировалось на хорошо известных случаях, когда кровь или сыворотка крови, взятые из организма, способны были убить значительное количество инфекционных микробов. Данная теория гуморального иммунитета с самого начала была встречена многочисленными и серьезными возражениями. Открытие Пфейфера оказало большую поддержку этой теории. Ему удалось показать разрушение холерного вибриона в жидкости брюшной полости животных, иммунизированных от микроба. Этот пример стал классическим. Вибрионы не умирают в фагоцитах, их убивает перитониальный секрет. Все усилия были направлены на доказательство того, что это не исключение, а основное правило иммунитета. Однако после многих лет тяжелых исследований было доказано, что подавляющее большинство инфекционных микробов не разрушается жидкостями организма, и случай с холерным вибрионом может быть объяснен чрезвычайной хрупкостью возбудителя. Также было показано, что разрушение вибрионов в жидкостях осуществляется бактерицидными веществами, которые выделяются лейкоцитами, имеющимися в брюшной полости. В случаях, когда микро-

бы вводились туда, где лейкоциты отсутствовали, разрушение вибрионов происходило внутри фагоцитов, прибывающих на поле битвы. Даже в брюшной полости вибрионы при удалении лейкоцитов и, соответственно, их бактерицидных веществ переставали разрушаться внеклеточно. Эти наблюдения в эксперименте отвергались многими учеными в течение нескольких лет. Однако некоторое время назад они были подтверждены Бейлем из Праги. Таким образом, было четко показано, что если лейкоциты не задействуются, разрушение вибрионов в организме, имеющем иммунитет, происходит внутри фагоцитов.

Тщательный анализ явлений иммунизации, основанный на чрезвычайно большом количестве экспериментов, продемонстрировал, что фагоцитоз является защитным механизмом организма против болезнетворных агентов. Некоторые ученые, бывшие сторонниками только гуморальных теорий иммунитета, позднее также подошли с большими или меньшими оговорками к клеточной теории. Таким образом, возникли промежуточные теории, в соответствии с которыми организм, подвергающийся микробной атаке, задействует все свои ресурсы, фагоциты и жидкости. В некоторых случаях инфекционный агент при иммунитете разрушается жидкостями организма, в частности плазмой крови. И только если микроб обладает большей устойчивостью, он уничтожается внутри фагоцитов. Эта эклектичная теория создана вашим соотечественником А. Петтерссоном.

Для подобного способа защиты организм вырабатывает два класса бактерицидных веществ, один из которых циркулирует в крови и появляется в экссудате вокруг микробов, а другой действует только внутри фагоцитов. Сначала реагирует первый класс веществ (в первую очередь для защиты от холерного вибриона, тифоидной бациллы и родственных им микробов), а второй разрушает бациллы сибирской язвы, гнойные микробы и другие микроорганизмы.

Учитывая два варианта бактерицидного действия организма, природа этих веществ также должна различаться. Бактерицидные вещества жидкостей должны были бы иметь сложное строение, обладая составляющим, которое бы подготавливало микробы, не повреждая их, для убивающих веществ. Для обозначения этих веществ были предложены самые

различные названия. Эрлих назвал амбоцептором подготовительное вещество и комплементом – разрушающую составляющую. Не усложняя и без того сложный вопрос, мы будем использовать терминологию, предложенную нашим блестящим коллегой, не затрагивая его точку зрения на истинную роль этих двух веществ.

Раньше, т.е. десять и более лет назад, некоторые ученые предполагали, что бактерицидные вещества, хотя и циркулируют в плазме крови, все же являются производным лейкоцитов. Позднее все больше и больше голосов высказывалось против этой версии. На сегодня принято считать, что комплемент не имеет никакого отношения к лейкоцитам и имеет абсолютно другое происхождение. Эта точка зрения основывается на исследованиях с использованием экстрактов из лейкоцитов, выделенных из организма. Для этой цели применяли экссудаты, богатые этими клетками. Из экссудата удалялась жидкая составляющая, а клетки уничтожались воздействием холода или в физиологическом растворе. Экстракты из лейкоцитов, полученные таким путем, не содержали комплемента, способного уничтожать микробы. Это было доказано много, много раз. Однако все же данный результат не доказывает, что лейкоциты не производят комплемент.

Для вывода по такому спорному вопросу я совместно с Левадिति стал изучать бактерицидные свойства белых кровяных клеток. В первую очередь мы установили, что эти клетки, взятые из организма, сохраняют способность абсорбировать и разрушать многие микробы. Используя вибрионы Денеке, сходные с микробами, вызывающими азиатскую холеру, нам достаточно легко удалось продемонстрировать их трансформацию в гранулы внутри лейкоцитов морских свинок. Данная трансформация, происходящая очень быстро при импрегнации вибрионов амбоцептором или подготовительным веществом, означает их разрушение. Таким образом, лейкоциты должны содержать в себе вещества, действующие как комплемент в жидкостях. Теперь давайте посмотрим, как вещество ведет себя в жидкостях, лишенных своих бактерицидных веществ, но содержащих большое количество белых кровяных клеток, имеющих комплемент. Необходимо всего лишь выдержать эти элементы в течение двадцати часов, для того чтобы обнаружить, что они абсолютно не способны транс-

формировать вибрионы, нагруженные амбоцептором. Клетки большей частью умирают, а вибрион остается в жизнеспособном состоянии.

Мы повторяли этот эксперимент несколько раз с одним и тем же результатом, доказав таким образом, что комплемент в лейкоцитах представляет собой очень хрупкую субстанцию. Не вызывает сомнений, что длительные манипуляции по отмыванию, замораживанию и высушиванию белых кровяных клеток оказывают разрушительное действие на комплемент. Поэтому следует избегать применения данных методов для изучения бактерицидных веществ лейкоцитов.

Не стоит думать, что если действие комплемента проявляется только при жизнеспособных лейкоцитах, это исключительно прижизненный феномен. Наоборот, более вероятно, что данный химический процесс изменяется в зависимости от состояния этих клеток. Приведем пример, который поможет подтвердить эту точку зрения. Значительные массы живого вещества, обнаруживаемые в некоторых грибах миксомицетах, способны, подобно лейкоцитам, окружать инородные тела и переваривать их внутри своих вакуолей. Вакуоли наполнены кислым соком, который облегчает переваривание. Функция вакуолей легко демонстрируется при абсорбции нескольких частиц синего лакмуса, который быстро становится розовым. Легкого нажатия (без умертвления живого вещества) достаточно, чтобы гранулы снова стали голубыми. Причиной изменения окраски становится переход в условиях шока в вакуоли щелочных веществ, нейтрализующих кислоту. Этот пример чисто химической реакции, напрямую зависящей от состояния живого материала в целом.

Можно задать вопрос, почему действие комплемента столь быстротечно в белых кровяных клетках и продолжается значительно дольше в жидкостях организма, например в сыворотке крови. Мы считаем, что различие связано с тем, что в лейкоцитах помимо комплемента содержатся антикомплемментарные вещества, которые ограничивают действие комплемента, так же как миксомицеты помимо кислого сока содержат щелочные вещества.

Не углубляясь далее в анализ этой проблемы, мы можем сделать вывод, что лейкоциты представляют собой микроскопические организмы, которые сложнее, чем они выглядят на первый взгляд, и исследование их в

экстрактах – почти такой же грубый метод, как раздавливание целого животного, например мышцы или лягушки, для изучения их пищеварения.

Таким образом, кратко суммируя наши результаты, позвольте подвести итоги. Мы по-прежнему считаем комплемент жидких сред производным лейкоцитов. Если на эти клетки оказывается легкая атака, они высвобождают только комплемент. Если повреждение более серьезное, выделяется вещество, нейтрализующее комплемент. В поддержку нашей точки зрения можно привести пример, что в иммунизированном организме, в котором лейкоциты интактны, вибрионы не подвергаются гранулярной трансформации в жидкостях и приобретают форму гранул только внутри лейкоцитов.

Мы считаем, что нет различий между комплементом, содержащимся в фагоцитах, и комплементом сыворотки крови. Существуют ли помимо комплемента другие вещества, способные разрушать микробы, вещества, исключительно и напрямую связанные с лейкоцитами? Этот вопрос по-прежнему требует ответа, получение которого осложняется техническими моментами. Вероятно, как следует из исследований Петтерссона, Макса Грубера и других, подобные вещества – *эндолизины* по Петтерссону или *лейкины* по Шнайдеру – действительно существуют.

Кроме того, было четко показано, что сила гуморальных веществ распространяется только на самые слабые микробы, в то время как противомикробный потенциал лейкоцитов и фагоцитов охватывает все инфекционные агенты, к которым организм может иметь иммунитет.

Как говорилось выше, бактерицидное действие комплементов тесно связано с другим классом веществ, амбоцепторами Эрлиха. Они не способны ни разрушать, ни повреждать болезнетворные агенты. Амбоцепторы прикрепляются к ним и облегчают бактерицидное действие комплемента. Комплемент находится в фагоцитах, в то время как амбоцепторы обнаруживаются в жидкостях организма и легко способны переходить в жидкости, накапливающиеся вокруг микробов. Амбоцепторы, вне всяких сомнений, представляют собой гуморальные вещества, участвующие в обеспечении иммунитета. Однако амбоцепторы являются не чем иным, как производными фагоцитов, которые экскретируются в жидкое окружение. Различные исследования доказали, что источники амбоцепторов – се-

лезенка, костный мозг и лимфатические узлы, другими словами, именно те органы, которые заполнены фагоцитами. Было даже показано в экспериментах Вассермана и Цитрона, что амбоцепторы возникают в местах внедрения инфекционных микробов – местах, кишущих белыми кровяными клетками.

В начале изучения амбоцепторов предполагалось, что данные вещества играют роль в разрушении микробов, но абсолютно чужеродны системе фагоцитарной защиты. Позднее стало ясно, что как производные фагоцитов амбоцепторы являются всего лишь одним из звеньев этой защиты.

Механизм действия амбоцепторов на микробы детально неизвестен, но постепенно проясняется. Фактически инфекционный агент, насыщенный амбоцепторами, продолжает жить и размножаться в обычном ритме. Микробы даже сохраняют свою патогенную силу, но становятся доступными для действия комплемента и более чувствительными для лейкоцитов.

В случае наиболее хрупких микробов, таких как холерный вибрион и родственные ему микроорганизмы, совместное действие амбоцептора и комплемента приводит к разрушению бактерии с появлением гранулярной трансформации или без нее. Однако подавляющее большинство патогенных агентов обладает большей устойчивостью к смеси этих двух веществ. В этом случае речь уже не идет о бактерицидном действии, как его обычно понимают. Однако микробы, насыщенные амбоцепторами и комплементом, менее устойчивы к лейкоцитам. Смесь этих двух веществ служит подготовительным этапом для фагоцитоза. Эта характеристика позволила назвать данную смесь *опсопином* (Райт) или *бактериотропином* (Нойфельд).

Убедившись в относительной незначимости жидкостей как разрушающего агента для инфекционных микробов, сторонники гуморальных теорий позднее вернулись к опсопинам и бактериотропинам, считая их гуморальными факторами иммунитета. Не повреждая микробы, они всего лишь изменяют их для облегчения абсорбции фагоцитами. Райт, наиболее ярый сторонник этой теории, настаивает на вторичной роли лейкоцитов, которые слепо идут туда, куда их приведет опсонин. Он даже уверен, что развитие иммунитета и излечение происходит только за счет силы опсопинов крови. Однако, настаивая на подготовке болезнетворных агентов

опсонинами, Райт все же оставляет фагоцитам функцию уничтожения микробов. Он даже заходит так далеко, что допускает существование спонтанного фагоцитоза без участия опсопинов. Опсопины важны для облегчения и совершенствования работы лейкоцитов.

*A priori* возможно, что фагоцитоз, т.е. поглощение и переваривание микробов фагоцитами, подвергается влиянию других сил организма. Ведь кишечное пищеварение под действием сока поджелудочной железы тоже облегчается другими веществами, например секретинотом. Таким образом, принципиальных возражений против теории Райта и Нойфельда не существует. Теории противоречат лишь методы, использованные для ее подтверждения. Все исследования опсопинов и бактериотропинов проводились на жидкостях и лейкоцитах, выделенных из организма и смешанных с микробами в стеклянных пробирках. Этот метод, конечно, очень демонстративен, но не отражает процессов, происходящих в живом организме. Тот факт, что бактерицидная теория жидкостей основана на экспериментах *in vitro*, не дает возможности полностью полагаться на полученные результаты. Если действительно опсопины и бактериотропины представляют собой смесь различных пропорций комплемента и амбоцепторов, как полагает в настоящее время большинство ученых, очевидно, что процессы в живом организме могут идти абсолютно не так, как в пробирке. Мы уже столкнулись с фактом, что комплемент связан с фагоцитами и выделяется только в исключительных обстоятельствах.

В исследованиях опсопинов и бактериотропинов ученые, руководимые гуморальными идеями, доказали только эффективность кровяной сыворотки в отношении улучшения фагоцитоза. Лейкоциты рассматривались как постоянные элементы, которые подчиняются исключительно приказам опсопинов. Теперь лейкоциты уже являются живыми организмами, сверхчувствительными к внешним условиям, что допускает большие вариации. Например, изменения концентрации соли в жидкости, которая их окружает, достаточно для значительного изменения параметров фагоцитоза. Лейкоциты больных различными заболеваниями демонстрируют реальное уменьшение своих жизненных характеристик. Работа Парвю на клетках,

взятых от больного миелолейкозом, продемонстрировала, что половина лейкоцитов не способна абсорбировать микробы.

Столкнувшись с этими фактами, некоторые ученые решили продолжить изучение не только опсонинистических свойств плазмы крови, но и фагоцитарной функции лейкоцитов. Эта идея имеет право на существование, учитывая, что основная цель защиты организма – разрушение микроба.

Это разрушение осуществляется живыми сильными фагоцитами. Абсорбция патогенных бактерий, облегченная опсонинами, важна, но является всего лишь начальным этапом серии процессов, завершающихся перевариванием микроба в фагоците. Если микроб абсорбировался лейкоцитами, но не умер из-за недостаточности бактерицидных веществ, организм теряет свою защиту и становится жертвой инфекционного заболевания. При большой устойчивости, как, например, у спор столбнячной палочки, микробы могут сохраняться внутри лейкоцитов, не вызывая заболевания. Только при воздействии каких-либо раздражающих условий, например переохлаждения или перегревания, споры, заключенные в лейкоцитах, высвобождаются и приводят к развитию смертельных тетанических судорог.

Вот почему, как уже было отмечено некоторыми врачами, силы опсопинов не всегда достаточно для поддержания защиты организма на нужном уровне.

Фагоциты, подвергающиеся благотворным и неблаготворным влияниям, вынуждены в борьбе с микробами сталкиваться с их способами защиты. В некоторых случаях микробы секретируют вещества, которые приводят к разрушению лейкоцитов. Но в большинстве случаев микробные вещества лишь защищают микробы от абсорбции и разрушения фагоцитами. Эти вещества, направленные против фагоцитов, были названы Бейлем агрессивинами. Они представляют собой особые яды, которые атакуют, в частности, фагоциты. Для сохранения своей функции защиты фагоциты должны быть, в свою очередь, защищены от микробных агрессивинов. Было показано, что эффективный фагоцитоз происходит только после нейтрализации действия агрессивинов. Это действие должно осуществляться какими-то элементами, не относящимися к системе фагоцитов. Ряд экспе-



риментов продемонстрировал, что лейкоциты также способны абсорбировать агрессивные, не изменяя их. Работа Вассермана и Цитрона показывает, что высушивание патогенных микробов вне организма сопровождается производством вещества, которое при введении в живой организм значительно нарушает фагоцитоз. Однако те же самые микробы, производители агрессивных, легко абсорбируются лейкоцитами, если те находятся на пике своей активности.

Фагоциты способны противостоять не только агрессивным, т.е. микробным ядам, в частности, действующим на лейкоциты, но и сильным ядам, убивающим организм. Этот факт чрезвычайно важен для изучения иммунитета. После замечательного открытия Берингом бактериальных противоядий было высказано мнение, что защита организма, имеющего иммунитет, заключается прежде всего в нейтрализации токсинов, которые производятся микробами. После нейтрализации микробы, утратившие свое основное оружие, становятся почти абсолютно безвредны и легко поддаются фагоцитозу.

В этом случае фагоцитоз, хотя и устранял бы живые микробы, но имел бы второстепенное значение.

Многочисленные результаты, полученные преимущественно в последние несколько лет, опровергают эту точку зрения. Было показано, что лейкоциты не боятся и микробных ядов, захватывают и обезвреживают их. Наилучшей иллюстрацией служит работа по ядам тел инфекционных микробов, называемым эндотоксинами. Наиболее завершённой считается работа Безредки. Он вводил в брюшную полость морских свинок мертвые бациллы брюшного тифа, которые не могли вызвать инфекционный процесс, но содержали тифоидный эндотоксин. Все животные умирали в течение двенадцати часов. Та же инъекция проводилась животным, в брюшной полости которых содержалось большое количество сильных лейкоцитов. Лейкоциты захватывали микробные тела и их эндотоксины и спасали животное от неминуемой гибели.

Бейль и Вайль получили сходные результаты с применением стафилококкового яда. Введенный сам по себе, этот яд убивал молодых кроликов

в течение нескольких часов. Однако при сочетанном введении определенного объема лейкоцитов яд инактивировался, и животные оставались жить.

Эти примеры можно продолжить. Таким образом, доказано, что фагоциты обеспечивают иммунитет, не только убивая инфекционные микробы, но и обезвреживая яды, производимые этими микробами. От других клеток организма фагоциты отличаются повышенной устойчивостью к токсинам. Это дополнительно подтверждается тем фактом, что лейкоциты способны выдерживать даже воздействие минеральных ядов. Когда эндотоксины еще не были так хорошо известны и исследование бактериальных ядов в живых организмах было крайне затруднительно, Безредка заинтересовался вопросом защиты от плохо растворимых препаратов мышьяка. Он выбрал трисульфид мышьяка, кристаллы которого легко абсорбировались и модифицировались фагоцитами. Он обнаружил, что если брюшная полость морской свинки содержит большое количество лейкоцитов, эти клетки, фагоцитируя кристаллы трисульфида мышьяка, спасают животное от смертельного отравления. С тех пор получены многочисленные подтверждающие это явление результаты и считается, что многие токсичные и лекарственные вещества, введенные в организм, могут быть обнаружены внутри лейкоцитов. Недавно Шарль из Бордо продемонстрировал абсорбцию лейкоцитами основных солей. Эти соли были абсорбированы в нерастворенном виде и становились прозрачными внутри фагоцитов. Однако если соли подвергались воздействию паров сероводорода, они сразу же становились черными. Абсорбируя яды, белые клетки своей относительной нечувствительностью к токсинам оберегают благородные клетки, например, клетки нервной системы, печени и других желез.

Итог многочисленных исследований не оставляет сомнений в ведущей роли системы фагоцитоза для защиты организма от инфекционного агента и его ядов. Естественный иммунитет, который имеется у человека к огромному числу заболеваний, является следствием достаточной эффективности фагоцитов при захвате и обезвреживании инфекционных агентов. Не стоит напоминать, что организм старается помогать фагоцитозу.

Так, при проникновении микроба лейкоциты нуждаются в расширении кровеносных сосудов, и нервная система, которой подчиняется этот процесс,

обеспечивает их транспорт к месту битвы в кратчайшие сроки. Любое влияние, ухудшающее фагоцитоз, естественным образом исключается.

При приобретенном иммунитете вследствие вакцинации или после перенесенного заболевания в организме происходят определенные изменения. В этих случаях большое значение приписывается нарастанию гуморальных защитных свойств. Действительно, в этих случаях в плазме крови содержится повышенное количество амбоцепторов и бактериотропинов (что, возможно, одно и то же), подготавливающих микробы к фагоцитозу. Но, как уже было сказано выше, амбоцепторы являются производным фагоцитов. При приобретении иммунитета фагоциты должны измениться и начать секретировать больший объем вспомогательных веществ в жидкости организма. Можно было бы это утверждать *a priori*, но это не так легко доказать результатами исследований. У Петтерссона возникла идея введения лейкоцитов в организм от животных, вакцинированных против определенных микробов. Он обнаружил, что данные элементы оказывают реальное защитное действие против количества микробов, в несколько раз превышающего летальную дозу. С другой стороны, лейкоциты организма, не имеющего иммунитета, такого результата не давали.

Учитывая эти результаты, Салимбени начал серию опытов в Пастеровском институте для подтверждения опытов Петтерссона. Применяя метод с максимальной точностью, он смог подтвердить эти результаты и даже продвинуться далее. Он продемонстрировал, что лейкоциты иммунизированного организма представляют собой источник защитных веществ, при этом в плазме крови никаких изменений не происходит. Несмотря на эффективное отмывание, фагоциты по-прежнему сохраняли иммунитет. В процессе этих исследований Салимбени доказал, что организм все еще остается нечувствителен и противостоит летальной дозе инфекционных микробов даже в тот момент, когда жидкости уже потеряли свою защитную силу. Данный результат в совокупности с другими данными позволяет прийти к выводу величайшей важности: даже в случае приобретенного иммунитета клеточная активность преобладает над гуморальной.

Исходя из этого кажется странным, что, несмотря на выраженные изменения, возникающие при приобретении иммунитета, лейкоциты прак-

тически не увеличивают свои фагоцитарные способности. Они захватывают то же количество инфекционных агентов, как и в организме без иммунитета. Уже первые эксперименты Дениса и Леклефа показали важность этого факта. Но не следует забывать, что данные эксперименты проводились с лейкоцитами, изъятыми из живого организма и исследованными в условиях *in vitro*. Однако все же необходимо признать справедливость этого возражения. Сравнение проводилось между уровнем фагоцитоза лейкоцитов организма, в который в течение недель и месяцев делались инъекции вакцины, и лейкоцитов организма, никогда не вступавшего в контакт. Как можно видеть, условия крайне неравнозначны.

Даже если бы было однозначно установлено, что фагоциты при приобретенном иммунитете абсолютно не изменяются и их способность захватывать микробы не увеличивается, этот результат никоим образом не обесценил общее правило увеличения защитной силы фагоцитарной системы в этой ситуации. Кроме того, необходимо добавить, что при приобретенном иммунитете нет данных ни за увеличение производства комплемента, ни за усиление способности захвата. То есть усиление защиты могло бы быть объяснено гиперпродукцией фагоцитами веществ, подготавливающих микробы к фагоцитозу.

Все явления иммунитета могут быть сведены к ряду биологических актов, например к чувствительности фагоцитов, их активному передвижению в зоны проникновения микробов, к серии химических и физических актов, которые приводят к разрушению и перевариванию инфекционных агентов. В течение десятка лет с момента опубликования теории Эрлиха многие ученые мужи стараются приоткрыть внутренние механизмы иммунитета. Эрлих считает, что амбоцепторы, которые образуются при приобретенном иммунитете, в определенной пропорции сочетаются с молекулами комплемента, с одной стороны, и с рецепторами на микробах – с другой. Многие ученые, возглавляемые Борде, высказывают другую точку зрения. Согласно ей, амбоцепторы, несмотря на свое название, не являются химическим соединением между комплементом и микробами, а служат как бы морилкой при окрашивании тканей. Таким образом, Борде называет амбоцепторы сенситизирующими веществами благодаря их свойству

усиливать действие комплемента на микробы. В целом данное явление рассматривается им в категории молекулярной абсорбции.

Полемика по этим двум теориям продолжается уже десять лет. Проблема внутреннего механизма иммунитета настолько сложна и деликатна, что ее не удастся решить окончательно. Однако следует добавить, что многие исследователи решили поддержать идею, что действие организма на микробы ограничивается узким рядом химических процессов и скорее относится к физическим процессам в коллоидах, одни из которых принадлежат организму, другие – микробам. Данный вывод сделан на основании аналогий между веществами, обнаруженными при иммунитете и в коллоидах. Некоторые ученые недалеко от мысли отнести комплемент к липоидам, аналогичным по составу тому, который содержится в организмах животных.

Все эти исследования обещают успехи в ближайшем или далеком будущем. На сегодня это всего лишь внедрение в область, полную неразрешенных проблем. Однако роль фагоцитарной системы в иммунитете вышла за рамки теории и является на современном этапе доктриной.

Подошло время рассмотреть, как все эти многолетние исследования и дискуссии повлияли на практическую жизнь медицины. Общий закон, что во всех случаях иммунитета ведущую роль играет фагоцитарная реакция, позволил сделать вывод, что уровень фагоцитоза может быть использован в качестве прогностического фактора течения заболевания. С момента начала наших исследований фагоцитоза мы все время убеждались, что чем больше микробов поглощается лейкоцитами, тем больше шансов у животного выжить и полностью выздороветь. Швейцарский эксперт по ветеринарии Щокке был первым, кто стал использовать это правило в борьбе против инфекционного мастита у коров. Данное заболевание является эпизоотией и вызывает выраженные изменения в молоке. Ему удалось показать, что достаточный уровень фагоцитоза стрептококков, которые служат причиной заболевания, – хороший признак благоприятного исхода. Судьба коров, страдающих от мастита, зависела от уровня фагоцитоза. При низком или нулевом уровне коровы были неспособны в течение длительного времени производить качественное молоко. Для определения уровня фагоцитоза была разработана целая схема, которая подтвердилась по резуль-

татам забоя скота. Хотя в большинстве случаев уровень фагоцитоза давал достаточно точный прогноз, известны случаи, когда коровы не выздоравливали, несмотря на то, что большая часть стрептококков была захвачена лейкоцитами. Это исключение открыло новое поле деятельности для Фрибурга. Согласно теории фагоцитоза, для окончательной победы организма микробы должны быть не только захвачены лейкоцитами, но и разрушены. В этих случаях мастита после абсорбции микробы разрушали фагоциты и в конечном итоге освобождались для своей смертельной работы. Таким образом, для оценки прогноза необходимо измерение уровня фагоцитоза, а также уточнение взаимодействия фагоцитов с микробами.

Этот пример инфекционного мастита должен убедить тех, кто считает достаточным для оценки заболевания и иммунитета определение опсонической силы.

Степень фагоцитоза может служить прогностическим фактором и при других заболеваниях, вызванных стрептококками. Профессор Бумм из Берлина использовал данный метод для оценки прогноза при родильной горячке. Выраженный фагоцитоз указывал на быстрое выздоровление, в то время как минимальный или ослабленный фагоцитоз заставлял опасаться худшего.

При лечении заболеваний вакцинотерапией по доктору Райту фагоцитоз отражает опсоническую силу крови. Таким образом, он является путеводной нитью для врача.

Мы уже сказали, что данный метод основан на определении свойств фагоцитоза, а не собственно опсонической силы. Некоторое время фагоцитоз успешно применялся для диагностики некоторых инфекционных заболеваний.

Среди точек практического приложения доктрины фагоцитоза необходимо упомянуть применение в хирургии веществ, вызывающих повышение притока лейкоцитов к зонам операции и зонам, открытым для инфекции. Хирурги во Франции и Германии вводят в брюшную полость или под кожу своих больных теплую сыворотку крови или нуклеиновую кислоту или другое вещество с целью привлечения защитной армии фагоцитов. Достигнутые результаты настолько впечатляющи, что остается ждать

новых подходов в лечении ран. В момент открытия новой эры в хирургии врачи брали в расчет только микробы, а пациентов лечили антисептиками. Вскоре установили, что эти вещества ядовиты для больного организма. Антисептики уступили дорогу асептикам. На сегодняшний день известно, что фагоцитоз служит основным звеном защиты организма, и проводятся попытки изменения хирургических методов с принятием мер для увеличения количества фагоцитов.

Из терапевтических методов нам хотелось бы назвать метод профессора Бира. Он заключается в систематической аппликации банок и резиновых прокладок вокруг абсцессов, фурункулов и т.д. для усиления венозного стаза. Излечение в этих случаях достигается быстрее, что, в общем, не удивляет. Следует задать вопрос: что приводит к подобному успеху? К успеху приводит использование последних достижений исследовательской медицины, хотя противоречия еще не устранены. Но в целом эффект метода доктора Бира доказывает, что фагоцитоз является важным элементом лечения. Наложение банок и прокладок вызывает венозный стаз, и вокруг зоны повреждения формируется отек. В то же время огромное число лейкоцитов приходит к месту повреждения, и все это усиливает фагоцитоз. В последней работе по данному предмету японский ученый доктор Шимодара, работающий в европейской лаборатории и не испытывающий особой любви к теории фагоцитоза, все же вынужден был отметить, что усиление фагоцитарной реакции в методе доктора Бира является одним из основных факторов эффективного лечения.

После стольких доказательств значения фагоцитов неудивительно, что исследования должны были бы сосредоточиться на условиях увеличения фагоцитарной реакции. По данному вопросу за последнее время опубликовано множество работ. Среди веществ, усиливающих фагоцитоз, следует назвать хинин – препарат, любимый многими практикующими врачами. Исследование Грюнспана показало, что слабый раствор (2%) значительно увеличивает эффективность фагоцитоза, – в то время как в 50 раз более концентрированный раствор дает противоположный результат. Нейссер и Гуэррини исследовали целый ряд веществ, стимулирующих фагоцитарную активность, среди которых они особо выделили определенные растворы пептонов. Глава

«Стимулины», которую мы открыли много лет назад и почти забыли, недавно снова стала интересной для общественности. Используются все средства для усиления фагоцитарной реакции как для лечения, так и для создания иммунитета. Как это далеко от тех идей, которые когда-то владели медициной. Я вспоминаю, что 40 лет назад знаменитый Гельмгольц, учившийся у Конгейма, считал, что гнойные частички в очаге воспаления происходят из лейкоцитов крови и, в соответствии с тогдашними представлениями, накопление этих элементов представляет опасность для организма. Эта опасность должна быть уничтожена хинином, способным парализовать движение лейкоцитов. Достаточно сравнить эту точку зрения с сегодняшней концепцией доброкачественной роли воспалительной реакции в целом и фагоцитарной реакции в частности, чтобы убедиться, как далеко мы продвинулись вперед.

Теория фагоцитов, сформулированная более 25 лет назад, выдержала яростные нападки со всех сторон. Только недавно она завоевала признание ученых во всех странах и только вчера стала находить свое практическое применение. Исходя из этого, мы имеем право надеяться, что в будущем медицина найдет много способов практического приложения теории фагоцитоза на благо здоровья.

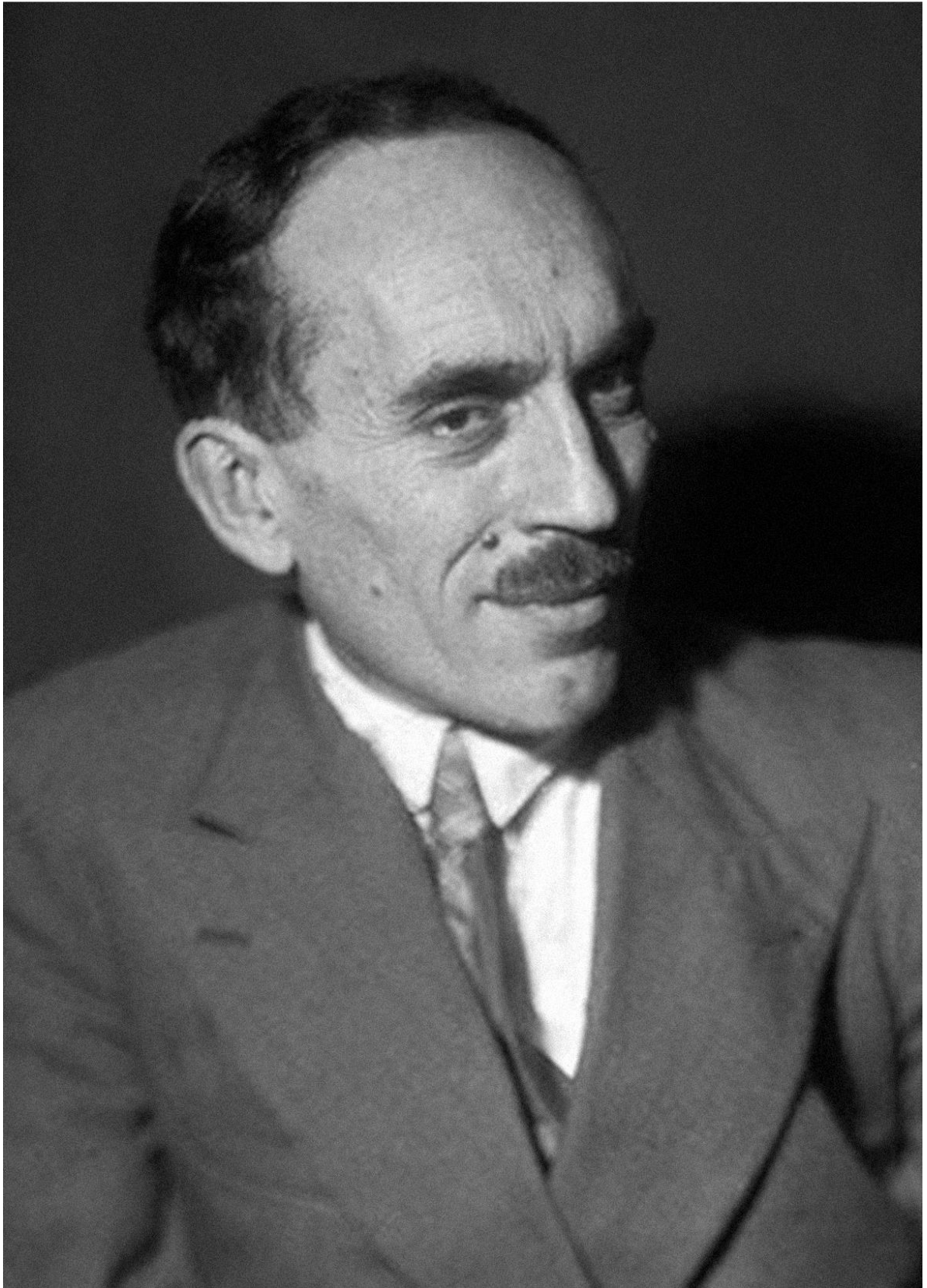
Я попытался представить современное положение по данному вопросу, который может служить примером практической значимости чисто теоретических исследований. Исследование природы пищеварительных органов низших животных постепенно открыло область, позволившую сформулировать новую концепцию иммунитета, создать методы борьбы с инфекцией и усиления устойчивости и жизнеспособности организма.

Наградив меня премией за исследования иммунитета, Нобелевский комитет оказал высокую честь всей моей работе на протяжении 26 лет, а также работе моих учеников в Пастеровском институте.

Я выражаю глубокую признательность Комитету за эту высокую награду, которую желает любой ученый. Я боюсь только одного. Того, что Комитет слишком переоценил мой труд. Я воодушевлен мыслью, что намерение основателя Альфреда Нобеля заключалось в награждении ученых, которые отдали свою жизнь ради получения знаний, не получая никакой практической награды.



**ХИМИЯ**



*Николай Николаевич Семенов*

*(1896–1986)*

**БИОГРАФИЯ<sup>76</sup>**

Николай Николаевич Семенов (1896–1986) родился 3 апреля в Саратове. Он окончил Петроградский университет в 1917 г., а в 1920 г. возглавил лабораторию электронных явлений Ленинградского физико-технического института. Он читал лекции в Политехническом институте и в 1928 г. был назначен профессором. В 1931 г. Семенов стал директором Института химической физики Академии наук СССР (в 1943 г. институт был переведен в Москву). С 1944 г. Семенов – профессор МГУ.

Выдающаяся работа Семенова по механизму химических превращений включает подробнейший анализ приложения цепной теории к разнообразным реакциям, особенно к процессам горения. Он предложил теорию вырожденного разветвления, благодаря которой удалось лучше понять явления, связанные с индукционным периодом в процессах окисления. Семенов внес большой вклад в развитие молекулярной физики. Он, кроме того, занимался исследованием электронных явлений, пробоя в диэлектриках и распространения взрывной волны.

Семенову принадлежат два фундаментальных труда. Монография «Химическая кинетика и цепные реакции» была опубликована в 1934 г. и переиздана в Оксфорде на английском языке в 1935 г. В этой книге Н. Семенов изложил современную теорию неразветвленных и разветвленных цепных реакций и показал, что такого рода процессы характерны для очень большой части химических реакций. Монография «*Некоторые проблемы химической кинетики и реактивность*», опубликованная впервые в 1954 г., была переиздана в 1958 г. Она издавалась в Англии, Америке, Германии и в Китае.

Н. Семенов в 1929 г. стал членом-корреспондентом Академии наук СССР, в 1932 г. был избран академиком, затем вице-президентом Академии наук. Он дважды Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской и двух Государственных премий, награжден орденом Ленина и орденом Трудового Красного Знамени.

---

<sup>76</sup> Николай Николаевич Семенов (1896–1986). Биография / пер. с англ. А. Стругацкой // Нобелевская премия. Химия : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 4 : 1947–1956. – С. 545–548. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

Н. Семенов – член Лондонского химического общества и иностранный член Лондонского Королевского общества, а также член Американской, Индийской, Немецкой и Венгерской академий наук. Он избран почетным доктором Оксфордского и Брюссельского университетов, с 1960 г. был председателем Всесоюзного общества по распространению политических и научных знаний<sup>77</sup>.

Н. Семенов был женат на Наталье Николаевне Семеновой; у них родились сын и дочь.

Семенов умер 25 сентября 1986 г.

---

<sup>77</sup> С 1963 г. — Всесоюзное общество «Знание». — Примеч. пер.

## Речь на торжественном обеде<sup>78</sup>

10 декабря 1956 г.

Ваше Величество, Ваши Королевские Высочества, Ваши превосходительства, дамы и господа!

Позвольте мне выразить от имени сэра Хиншелвуда и от себя лично глубокую сердечную признательность, которую пробудили в нас честь быть представленными к премии по химии за 1956 год и горячий прием, оказанный нам в Стокгольме.

Мы получили эту премию за исследования механизма цепных химических реакций.

Мне кажется, что химические процессы изучать труднее, чем физические или биологические. Физика уже приобрела опыт и проницательность, присущие старости, а биология имеет преимущество, которое дает оптимизм ранней юности. Теоретическая же химия достигла возраста зрелости. Вот почему все мы, кто посвятил себя ей, так хорошо понимаем, насколько сложна наша задача, и полностью отдаем себе отчет в слабостях наших научных методов.

Но в то же время нет ничего важнее и интереснее преодоления этих трудностей, и они нас не пугают.

Люди устроены так, что находят радость в том, чтобы бросить вызов, без сомнения, нелегкому, но отнюдь не неблагоприятному делу, которое нам предлагает, к примеру, наука.

Нобелевская премия символизирует своего рода соревнование ученых всего мира. Она способствует исследовательской работе и служит выражением идей гуманизма, единства общей воли к победе полного знания над тайнами природы. Она призывает применять эти знания ради благополучия и мирного развития человечества.

Я еще раз хочу выразить нашу большую признательность за то, что мы были удостоены такой чести.

---

<sup>78</sup> Семенов, Н.Н. Речь на Нобелевском банкете, Стокгольм, 10 декабря 1956 г. / Н.Н. Семенов ; пер. с фр. Е. Гугли // Нобелевская премия. Химия : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 4 : 1947–1956. – С. 547–548. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

## О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ ЦЕПНЫХ РЕАКЦИЙ И ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ<sup>79</sup>

*Нобелевская лекция, 11 декабря 1956 г.*

### Введение

Я хочу сообщить здесь о тех работах в области химической кинетики и горения, которые были проведены в последние 20–30 лет сначала в моей лаборатории в Ленинградском физико-техническом институте, а затем в Институте химической физики Академии наук. Эти работы явились результатом упорного труда большого и дружного коллектива сотрудников, многие из которых являются в настоящее время крупными учеными, руководителями отдельных направлений. Несомненно, что именно благодаря коллективности нашего труда, благодаря постоянной взаимной поддержке и в то же время личной инициативе ряда членов нашего коллектива нам удалось достичь тех результатов, которые удостоены здесь такой высокой оценки.

В создании этих работ, особенно в период становления новых идей, большую роль играли плодотворные научные дискуссии и дружественное соревнование с зарубежными учеными, главным образом с сэром Сирилом Хиншелвудом. Мы на своем опыте могли убедиться, что лишь объединенными усилиями ученых разных стран создаются условия для действительно успешного продвижения науки вперед.

Наши работы можно разделить на две различные, хотя и связанные между собой группы:

- 1) применение химической кинетики к вопросам теории горения и взрыва;
- 2) механизм химических реакций, в особенности цепных реакций.

---

<sup>79</sup> Семенов, Н. О некоторых проблемах цепных реакций и теории горения : нобелевская лекция, Стокгольм, 11 декабря 1956 г. / Н. Семенов // Нобелевская премия. Химия : сборник / пер. на рус. яз. и ред. ИФ «Физ.-мат. лит.» (Физматлит). – Москва, 2006. – Т. 4 : 1947–1956. – С. 501–544. – (Нобелевские лекции – 100 лет).

## Горение и взрыв

Всякое горение или взрыв есть прежде всего химическая реакция компонентов горючей смеси, сопровождаемая выделением тепла и созданием разного рода движений в газе. Поэтому все явления горения тесно связаны с представлениями и законами химической кинетики и прежде всего со скоростью химической реакции, протекающей в неизотермических условиях. При этом тепло, выделяемое реакцией, в свою очередь, в силу закона Аррениуса повышает скорость химической реакции. Наличие такой обратной связи в высшей степени характерно для большинства явлений горения.

Вследствие указанной выше взаимосвязи между нагревом смеси реакцией и вызываемым этим нагревом увеличением ее скорости возникает тепловая автоускоряющаяся лавина, воспринимаемая нами как самовоспламенение. Наличие теплоотвода через стенки сосуда делает развитие тепловой лавины возможным лишь при определенных условиях, от которых и зависит температура самовоспламенения. Температура эта, являющаяся величиной относительной (а вовсе не константой вещества, как это принимали ранее некоторые ученые), представляет собой функцию кинетических и тепловых параметров – порядка реакции, энергии активации, плотности и состава горючей смеси, теплоты реакции, теплоотдачи к стенкам.

В 1928–1940 гг. нами [1–14] была дана математическая формулировка тепловой теории самовоспламенения, следствия которой были многократно проверены на опыте сначала у нас, а затем за границей. Зная константу скорости реакции и условия теплопередачи, можно было предвычислить температуру самовоспламенения при различных давлениях. Для реакции автокаталитического типа с известной кинетикой тепловая теория позволила предвычислить время задержки взрыва (измеряемое иногда десятками минут и часами) как функцию температуры и давления.

Теория нормального распространения пламени базировалась на представлении о поджигании горящим слоем соседних холодных слоев путем теплопроводности. В прежних теориях предполагалось, что поджигание соседних слоев происходит при догреве их до температуры самовоспламенения. Такие попытки обойти химическую сторону процесса, т.е.

химическую кинетику, лежащую в основе самого процесса, конечно, были неверны и заключали в себе внутреннее противоречие. Вскоре после известной работы Льюиса и фон Эльбе [15] (1934 г.) о распространении пламени в озоне (где температура самовоспламенения не фигурировала, а была принята во внимание диффузия в зоне пламени свежего газа в сгоревший) нашему коллективу удалось построить общую тепловую теорию распространения пламени в газах [7; 16–20], а также теорию горения жидких и твердых вторичных взрывчатых веществ [19; 21–25]. Эта теория позволила вычислить нормальную скорость распространения пламени как функцию чисто кинетических и тепловых параметров. Теория была проверена нами на примере горения смесей окиси углерода с кислородом и горения жидкого нитрогликоля.

Вскоре была дана также теория концентрационных пределов нормального распространения пламени [19; 26] – явления, столь важного для техники безопасности. Это явление было нами объяснено тем, что теплотопотери в стенки трубы, по которой распространяется пламя, уменьшают температуру пламени и скорость распространения, а уменьшение скорости распространения, естественно, ведет к увеличению теплопотерь. Эта обратная связь при ее математической формулировке приводит к следствию, что скорость распространения не может быть меньше определенной величины, что и объясняет существование концентрационных пределов распространения пламени.

Роль механических движений в газе, в частности турбулентности, в распространении пламени отмечалась давно. Однако наиболее ярко она была продемонстрирована в нашем институте [27–29]. Оказалось, например, что размещение проволочной спирали вдоль внутренней стенки стеклянной трубки, содержащей смесь окиси углерода с воздухом, примерно.

В 1000 раз увеличивает скорость распространения пламени в этой смеси против скорости в той же трубке без спирали. В основе теории турбулентного горения, развитой Дамкёлером [30] и сотрудниками нашего института [31–34], лежит представление об увеличении поверхности фронта пламени в результате пульсаций. Суммарная скорость распространения пламени будет в этих случаях в значительной мере определяться



корнем квадратным из средней квадратичной скорости пульсации, т.е. расти с увеличением турбулизации.

При распространении пламени в достаточно длинных трубах происходит ускорение пламени вследствие турбулизации свежей смеси. Такое ускорение пламени приводит к возникновению детонационного режима горения, когда воспламенение происходит в результате высокой температуры, возникающей при сжатии газа в ударной волне.

Скорость детонации в широких трубах и смесях, близких стехиометрическим и имеющим достаточную теплоту реакции, не зависит от кинетики реакции, как это и следует из классической теории детонации, допускающей мгновенное сгорание вещества во фронте ударной волны. Эта теория не объясняет, однако, почему бедные энергией смеси (в частности, смеси, разбавленные инертным газом или находящиеся при пониженных давлениях) вообще не детонируют, почему имеет место концентрационный предел детонации, почему в узких трубках богатые энергией смеси не детонируют и т.п. Зависимость детонационной способности от химической кинетики была особенно ярко показана у нас в институте на примере смеси СО с воздухом [35]. Как известно, скорость реакции СО с воздухом сильно увеличивается в присутствии следов водорода. Оказалось, что обычно приготовленная смесь СО с воздухом не детонирует, а прибавление к ней 1% водорода делает смесь детонационноспособной.

В институте была развита теория детонации с учетом кинетики реакции, т.е. с учетом ширины зоны реакции [19; 36; 37]. При этом все указанные выше вопросы детонационной способности и пределов получили полуколичественное объяснение по типу, подобному объяснению пределов распространения нормального пламени.

Замечательное явление, так называемая спиновая детонация, открытое Кэмпбеллом [38] и Боуном [39; 40], было подробно исследовано в институте [29; 41–44], и эти опыты привели к построению первоначальной теории такого удивительного явления.

Мы видим, как всестороннее рассмотрение химических, физических и механических сторон явления в их взаимосвязи с учетом указанных выше обратных связей позволило сравнительно небольшому коллективу со-

трудников Института химической физики (А.В. Загулин, О.М. Тодес, Д.А. Франк-Каменецкий, Ю.Б. Харитон, А.Я. Апин, Я.Б. Зельдович, А.Ф. Беляев, П.Ф. Похил, К.И. Щелкин, А.С. Соколик, О. И. Лейпунский) во взаимодействии с рядом иностранных ученых: С.Н. Хиншелвудом, А.К. Эггертоном, Б. Льюисом, Г. фон Эльбе, В. Постом, Г. Дамкёлером, П.Ф. Лаффитом, Ф.П. Боуденом, Т. Фон Карманом и другими – заложить основы современной теории горения и взрывов газов и взрывчатых веществ.

Конечно, в этой теории многое еще не доведено до полной ясности и впереди предстоит огромная работа, но основные пути решения проблемы уже намечены.

### Цепные реакции

С другим направлением, являющимся основным направлением химической кинетики и трактующим об интимном механизме химических реакций, мы соприкоснулись в 1926–1927 гг., когда нами было замечено, что не всякое самовоспламенение носит тепловой характер, но что существует второй, существенно иной, тип самовоспламенения, который мы называли цепным.

30 лет прошло со времени открытия Харитонов и Вальтой [45] нижнего предела воспламенения фосфора и проведенного мной [1; 46–49] частично в сотрудничестве с Шальниковым изучения свойств этого явления, а также первой попытки его теоретического объяснения на основе предположений о разветвленных цепных реакциях и об обрыве цепей на стенках сосуда (последнее было доказано вскоре Трифоновым [50] путем прямого эксперимента). Полученные результаты оказались настолько значительными, что исследования по цепным реакциям, в особенности по разветвленным цепным реакциям, стали на долгие годы одним из основных направлений Института химической физики.

Цепная разветвленная лавина способна протекать в изотермических условиях (при полном отводе тепла реакции), в то время как при тепловой лавине отвод тепла ликвидирует возможность взрыва. Цепной разветвленный процесс порождает в веществе активные частицы – свободные ради-

калы, количество которых вследствие разветвления цепи быстро возрастает во времени.

Таким образом, достаточно появиться одному свободному радикалу (в результате, например, теплового движения), чтобы произошел процесс размножения радикалов, приводящий к быстрой реакции типа цепного воспламенения.

Наиболее строгой проверке теория была подвергнута в опытах Кондратьева, Кондратьевой [51] и Авраменко [52] по исследованию реакции цепного воспламенения смеси водорода с кислородом (вблизи предела, где температура пламени не превышает 700–800 °С) и в опытах Эмануэля [53–55] по изучению медленной реакции окисления сероводорода (реакция идет несколько минут). В обоих случаях при помощи прямых методов были обнаружены радикалы (H, OH, SO), причем в ходе окисления водорода (при некоторых условиях) количество атомов H доходило до 10% от исходного водорода, а радикала SO (при окислении сероводорода) – до 40% от исходного сероводорода. К концу реакции, разумеется, все радикалы исчезали. Исчезновение радикалов происходит в результате захвата радикалов стенками сосуда вследствие реакции их со специфическими примесями или в результате их рекомбинации между собой. Цепи при этом обрываются.

В разветвленных цепных реакциях возможны два случая:

1) скорость разветвления больше, чем скорость обрыва, что приводит к очень быстрому развитию цепной лавины;

2) скорость обрыва больше скорости разветвления, в связи с чем лавина не может развиваться и реакция практически совсем не идет (если, как это обычно бывает, скорость зарождения свободных радикалов очень мала).

Так, например, пары фосфора ниже предела могут стоять сутками в соприкосновении с кислородом без всяких следов реакции. Переход от практически полной инертности вещества к бурной реакции (вспышка) легко осуществить, например, увеличением давления кислорода, увеличением размеров реакционного сосуда, вдвиганием в сосуд и выдвиганием из него металлических проволочек, сильно поглощающих свободные радикалы, добавлением инертных примесей и другими методами. Этот пере-

ход от инертности к энергичной реакции происходит в очень узком, иногда практически неизмеримом интервале изменения одного из указанных параметров. Аналогичные предельные явления были замечены Хиншелвудом с сотрудниками [56–61] при давлениях выше некоторого второго «верхнего предела» (на примере реакции образования воды из кислорода и водорода). Верхний предел был объяснен на основе высказанного Хиншелвудом представления об обрыве цепей в объеме при тройных соударениях и того же понятия о разветвлении цепей.

Таким образом, наши исследования и исследования сэра Сирила Хиншелвуда с сотрудниками ввели в науку новое понятие предела реакции как следствия всякого разветвленного процесса, сопровождающегося обрывом цепей. Эти исследования были нами проведены в конце 20-х и начале 30-х гг.

После открытия физиками в конце 30-х гг. ядерных разветвленных цепных реакций в них, несмотря на совсем иную природу, были обнаружены предельные явления подобного же типа, что и в химических разветвленных цепных реакциях, ибо предел является общим свойством всяких разветвленных цепных реакций. С особой отчетливостью в ядерных разветвленных реакциях выявляется факт перехода от полной инертности материала к мощной реакции или взрыву вследствие одного только изменения размеров, плотности или других аналогично влияющих факторов (в частности, от продвижения или выдвигания в ядерный реактор стержней).

Из относительно медленных химических процессов следует назвать прежде всего цепные реакции с «вырожденными разветвлениями». Эти реакции отличаются тем, что их первичным продуктом является промежуточное молекулярное вещество, более или менее медленно вступающее в реакцию с образованием свободных радикалов. Предположение о существовании таких реакций было подтверждено еще в 30-х гг., когда было установлено, что реакции окисления углеводородов являются вырожденно-разветвленными. Теория «вырожденного взрыва», данная нами в 1931–1934 гг. [4], получила теперь широкое распространение.

Кроме процессов окисления, носящих характер разветвленных цепных реакций, Апиным [62] было показано, что распад хлористого азота

также идет как разветвленная цепная реакция, имеющая верхний предел воспламенения.

Большинство других химических реакций в газовой фазе идут как неразветвленные цепные реакции. В этих реакциях, как и в случае разветвленных, основная цепь быстро развивается благодаря чередованию свободных радикалов. Однако отсутствие разветвлений делает эти процессы неспособными к саморазвитию. Каждая цепь возникает лишь вследствие действия спонтанно образованного первичного свободного радикала (возникшего, например, в результате диссоциации исходных молекул за счет теплового движения).

Здесь мне хотелось бы сказать несколько слов об истории развития учения о химическом процессе. Вопрос о химическом превращении, его закономерностях и механизме является едва ли не основным вопросом химии и химической технологии. Отсюда и вырастают требования к созданию теории химического процесса и установлению механизма химических реакций.

В сущности, химики, особенно органики, всегда понимали значение этого вопроса и систематизировали свой синтетический опыт в виде различных правил реакционной способности, связывая эти правила с теорией строения. К сожалению, эти правила носили сугубо качественный характер, имели много исключений, зависели от условий проведения реакции. Теперь, спустя почти 100 лет после появления теории строения, вопросы реакционной способности трактуются также и с электронной и квантово-механической точки зрения. На этом, несомненно, прогрессивном пути получены значительные успехи. Однако теория продолжает оставаться качественной, а нередко дело сводится лишь к замене одного языка (классической теории строения) на другой (электронно-квантовый).

Во второй половине и особенно в последней четверти прошлого века ученые начали интересоваться химическим процессом как-то совсем с другой, я бы сказал физической, стороны. Это явилось одним из проявлений становления физической химии как науки, применившей термодинамику и молекулярную статистику к вопросам Химии. Так начала создаваться химическая кинетика – учение о скоростях химических реакций.

Основные успехи в этой области связаны с работами Я. Вант-Гоффа и С. Аррениуса.

Вант-Гофф и Аррениус открыли ряд фундаментальных законов химической кинетики. При этом Вант-Гофф полагал, что все химические процессы сами по себе идут как простые моно- и бимолекулярные реакции, если только они не осложнены какими-либо возмущающими действиями, к которым он относил, например, вторичные последующие реакции первичных продуктов, тепло, выделяемое реакцией, катализ конечными продуктами, катализ стенкой и т.п.

Если не считать самого Вант-Гоффа, широко интересовавшегося этими возмущающими действиями, большинство ученых, работавших в течение последующих нескольких десятилетий над вопросами химической кинетики, искусственно ограничивали поле своих исследований изучением реакций, подчиняющихся простым закономерностям. А поскольку таких реакций очень мало, это самоограничение чрезвычайно обедняло кинетическую науку.

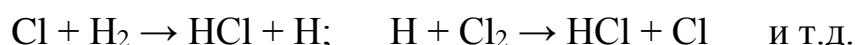
Правда, в конце прошлого и в первом десятилетии этого века группа исследователей занималась сложными реакциями в области сопряженного окисления, гомогенного катализа и автокатализа в растворах электролитов.

Я имею в виду работы В. Оствальда, Н.А. Меншуткина, Д.П. Коновалова, Р. Лютера, Ф. Габера, А.Н. Баха, К. Энглера, Н.А. Шилова, В. Гольдшмидта, И.Н. Брэнстеда и других. Многие из этих работ фиксировали внимание на большой роли в ходе химических реакций промежуточных, часто малостойких соединений.

В эти же годы начал свою научную деятельность Макс Боденштейн, который изучал кинетику газовых реакций, не занимаясь при этом поисками наиболее простых типов превращения. Наоборот, он особенно интересовался природой наиболее сложных реакций (см., например, классическую работу по реакции водорода с бромом 1907 г.). Как известно, изучая в 1913 г. фотохимическую реакцию хлора с водородом, Боденштейн открыл замечательный факт огромного квантового выхода этой реакции, что находилось в явном противоречии с законом Эйнштейна.

Так в химии впервые появилось представление о цепной реакции. Работа Боденштейна сыграла исключительно важную роль в развитии учения о химическом процессе.

Правильное объяснение механизма реакции водорода с хлором через несколько лет дал В. Нернст, предположивший, что под действием света молекула хлора распадается на два атома, которые начинают собой длинную цепь превращений:



В 1924 г. Христиансен, расширяя результаты Боденштейна, связывает замедляющее действие следов некоторых активных примесей (ингибиторов) на реакцию окисления в жидкой среде с цепной природой окисления и с обрывом цепей на этих примесях.

В 1927 г. Бекстрём экспериментально доказывает правильность этого предположения и использует метод ингибиторов для установления цепного механизма реакций. Эта работа не была почему-то достаточно оценена. Между тем в действительности она является одной из самых существенных в истории цепных реакций.

Следует также отметить работу Христиансена и Крамерса 1923 г., где авторы применили цепную теорию к термическим реакциям, в особенности мономолекулярным. Развита ими весьма интересная концепция чисто энергетических цепей в дальнейшем экспериментально не подтвердилась и была оставлена. Однако возможно, что в радикальных реакциях энергетические факторы иногда играют заметную роль; это следует, например, из анализа замеченного нами явления положительного взаимодействия цепей и из ряда соображений, появившихся в последнее время в литературе в связи с изучением быстрых реакций в горячих пламенах [63].

Итак, мы видим, что интерес к цепным реакциям в 20-е гг. постепенно возрастает. Все же изученных цепных реакций было в то время очень мало, и они казались, пожалуй, хотя и интересными, но редкими исключениями.

С 1926–1928 гг. начались работы по цепным реакциям нашей группы и группы Хиншелвуда [56–61].

В моей книге «Цепные реакции» 1934 г. я так оценивал роль этих работ:

*«В 1927 и 1928 гг. в Оксфорде, в Ленинграде и частично в Принстоне цепная теория была применена к изучению реакций между веществами, способными к воспламенению и взрыву.*

*Самое важное, – что теория шла здесь рука об руку с новыми экспериментами, приводящими к открытию новых и объяснению старых давно забытых и совершенно непонятных явлений. Эти работы привели к количественным формулировкам новых цепных закономерностей, общих для целого большого класса явлений, и очертили ту область реакций, которая специфична для новых представлений. Они подняли широкий интерес к этой новой области реакций и вызвали к жизни в 1930–1933 гг. широкую волну новых кинетических исследований. Поэтому мы склонны считать, что именно эти работы положили фундамент нового развития химической кинетики».*

Многочисленные и разнообразные опыты были проведены в 1929–1935 гг. для обоснования и развития новой теории. Наряду с нашим коллективом (В.Н. Кондратьев, А.А. Ковальский, Ю.Н. Рябинин, А. Трифонов, М.Б. Нейман, В.Р. Бурсиан и В.С. Сорокин, А.Б. Налбандян, Н.М. Чирков, Ф.И. Дубовицкий) и С. Хиншелвудом с сотрудниками (Х. Томпсон, К. Гибсон) над вопросами разветвленных цепных реакций начали работать многие другие ученые, например Х. Эмелеус, Р. Норриш, Х. Мелвилл, Э. Ладлэм, Р. Пиз, Б. Льюис, Г. фон Эльбе и многие другие.

В 1931 г. появились работы Ф. Габера и Р. Вильштеттера, в которых показывается, что ионы переменной валентности способны в ряде жидкостей легко создавать свободные радикалы. Эти авторы высказывали предположение, что ряд важных органических реакций, в частности биохимических, идет по цепному механизму.

В 1934 г. вышла моя книга «Цепные реакции» [4], в которой дана общая теория разветвленных и неразветвленных цепных реакций и на основе экспериментального материала доказано, что такие реакции являются наиболее распространенным типом химического превращения в газовой фазе и весьма часто встречающимся типом превращений в жидкой фазе.



Предположение о радикально-цепном характере процессов полимеризации вскоре было подтверждено, в частности, Медведевым [64–67], доказавшим наличие свободных радикалов в этих реакциях; Райе [68; 69] в США и позднее Фрост [70–72] в СССР доказали цепной характер реакции крекинга.

### **Некоторые вопросы реакционных механизмов**

Отличие цепной теории от классической теории химического процесса заключается в том, что она не отгораживается от всех усложнений в ходе реальных реакций, а, наоборот, ищет общие теоретические основы, позволяющие понять причины этих усложнений. Законы Вант-Гоффа и Аррениуса по-прежнему остаются основой кинетики, но в большинстве случаев лишь в элементарных актах реакций.

Значение цепных реакций для техники становится ясным из того, что многие химические промышленные процессы, например: крекинг, горение топлива, полимеризация, медленное окисление, хлорирование – являются типичными цепными реакциями. Учение о цепных, и вообще о радикальных, реакциях стало одним из основных направлений современной теоретической химии.

В настоящее время во многих лабораториях и у нас, и за границей (особенно здесь следует указать на плодотворные работы школы Стейси) изучается детальный химический механизм цепных реакций, развиваются способы получения свободных радикалов и исследуются их свойства. Выясняется связь между строением радикалов и их химической активностью, а также многие специфические вопросы, относящиеся к этой области химии.

Теперь я хочу рассказать о работах института, которыми я более всего интересуюсь в последние 5–6 лет. Многие из них начаты недавно, и поэтому теоретические выводы носят предварительный характер.

Представляет большой интерес вопрос о конкуренции цепных реакций с простыми молекулярными реакциями, протекающими без промежуточного образования радикалов. Реакции продолжения цепи (реакции радикалов с молекулами) идут обычно (во всяком случае при повышенных температурах) с большими скоростями. Наиболее медленной стадией яв-

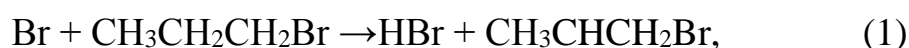
ляется стадия зарождения цепи, часто требующая большой энергии. Поэтому при искусственном иницировании цепей (например, фотохимическом или при помощи внесения добавок) цепная реакция идет практически всегда быстрее молекулярной реакции. Если такое искусственное иницирование отсутствует, то первостепенное значение приобретает образование свободных радикалов самими участвующими в реакции молекулами. Наиболее простым механизмом для образования свободных радикалов является распад молекулы по слабейшей связи. Проведенное в последнее время интенсивное изучение элементарного акта распада Шварцем [73] и другими авторами (в частности, и у нас в институте) показало, что зачастую распад молекулы на радикалы идет легче, чем непосредственный распад на насыщенные молекулы. Это означает, что при любых условиях термический распад этих соединений будет происходить радикально-цепным путем.

В некоторых случаях, однако, первичный распад на радикалы происходит медленнее молекулярного распада. Это, например, имеет место для некоторых хлор- и бромпроизводных углеводородов. Конкуренция радикального и молекулярного распада молекул определяется особенностями строения (например,  $C_3H_5Br$  [74] и  $C_3H_5Cl$  [75] распадаются первично с отрывом атома галоида, а  $C_2H_5Br$  [76] и  $C_2H_5Cl$  [77, 78] непосредственно отщепляют  $HI$  с образованием олефина,  $CH_3Br$  отщепляет атом  $Br$  [79], а для хлороформа нами показан непосредственный распад на  $HCl$  и бирадикал  $CCl_2$  [80]).

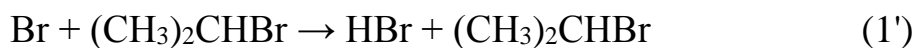
Нужно отметить, однако, что и в тех случаях, когда молекула распадается на молекулярные продукты легче, чем на радикалы, может превалировать цепная реакция. Это объясняется тем, что из-за большой длины цепи даже при медленном иницировании цепная реакция идет с большой скоростью и часто обгоняет молекулярную. Конкуренция молекулярного и цепного механизмов в различных конкретных реакциях была предметом неоднократного обсуждения, но и до сих пор вопрос еще далеко не решен окончательно. Дело в том, что цепные реакции часто имеют простые кинетические порядки и имитируют, таким образом, простые молекулярные реакции. Сейчас мы знаем, однако, несколько примеров, когда в опреде-

ленных условиях молекулярный механизм реакции достаточно обоснован. Оказалось, что такой механизм имеет место в тех случаях, когда строение молекул затрудняет цепную реакцию продолжения цепи.

Изучение связи строения молекул с механизмом их распада, проводимое у нас в институте, а также параллельно Макколом [81; 82] и другими авторами, позволило сделать некоторые интересные заключения. В качестве примера можно привести распад двух бромидов – бромистых н.пропила и изопропила [83]. В то время как первый распадается по цепному механизму, для второго наблюдается молекулярный распад непосредственно на HBr и пропилен. Это можно объяснить тем, что если для н. пропила легко идет цепная реакция:



то для изопропилбромида реакция типа (1)



приводит к образованию радикала  $(\text{CH}_3)_2\dot{\text{C}}\text{HBr}$ , не способного к распаду, в связи с чем цепная реакция затрудняется.

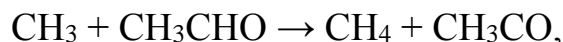
Чем же объясняется распространенность цепных реакций? Это является прямым следствием общих положений химии.

Во-первых, свободные радикалы являются весьма активными частицами и поэтому несравненно легче реагируют с валентно-насыщенными молекулами, чем молекулы между собой (мы имеем в виду гомолитические реакции).

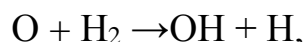
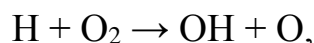
Во-вторых, при реакции свободного радикала с молекулой свободная валентность не может исчезнуть, т.е. по крайней мере один из продуктов этой реакции будет свободным радикалом. Этот радикал легко вступает в реакцию со следующей молекулой опять с образованием свободного радикала, и таким образом возникает цепь превращений.

При этом возможны три основных случая:

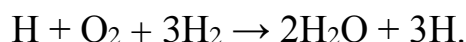
1 В результате реакции радикала с молекулой образуется монорадикал, что приводит к развитию неразветвленной цепи, например:



2. В результате реакции вместо одной возникают три свободные валентности и в конечном счете три монорадикала, каждый из которых начинает свою цепь. Это приводит к очень быстрому развитию разветвленной цепной реакции, например:

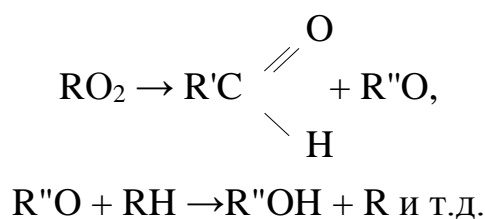


т.е. к брутто-процессу:

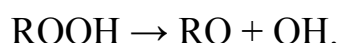


3. Если основная цепь реакции является неразветвленной, но продукт реакции в результате мономолекулярного распада или взаимодействия с какими-либо другими компонентами системы легко образует свободные радикалы и, следовательно, новые цепи, хотя реакция и идет медленно, она приобретает многие черты, свойственные разветвленным цепным реакциям (автоускорение, предельные явления). В этом случае принято говорить о наличии вырожденных разветвлений. Например, образование алкильных гидроперекисей или альдегидов идет по схемам:

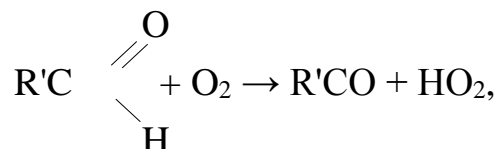




Но гидроперекись в силу малой энергии разрыва связи O—O (30–40 ккал) постепенно распадается с образованием свободных радикалов:

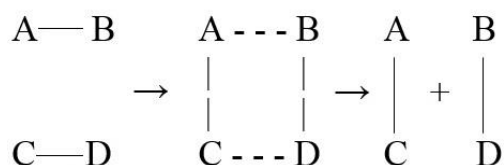


Альдегид, окисляясь, дает свободные радикалы:

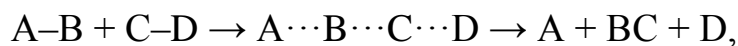


что приводит к медленному умножению числа цепей во времени и имитирует реакции автокаталитического типа.

Высокая реакционная способность свободных радикалов является в первую очередь опытным фактом и в некоторой мере может быть обоснована квантово-механически. Расчет показывает, что для реакции  $A + BD \rightarrow AB + D$  именно при линейном расположении атомов в активированном комплексе  $A...B...D$  высота активационного барьера оказывается небольшой (обычно не более 10 ккал). При реакции двух молекул

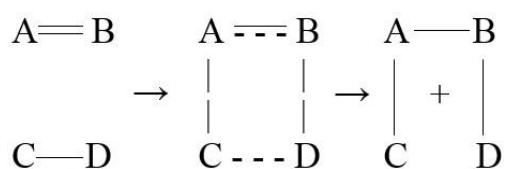


образуется четырехугольный комплекс, молекула CD приближается к молекуле AB по линии, перпендикулярной к связи AB, и вследствие этого высота активационного барьера измеряется многими десятками килокалорий. Если же в активированном комплексе молекулы расположатся линейно:



то в результате образуются два свободных атома, т.е. процесс окажется сильно эндотермичным. Хотя, как мы показали [84], активационный барьер в этом случае так же мал, как и в случае реакции радикала с молекулой, но полная энергия активации из-за сильной эндотермичности процесса будет очень велика.

При реакции атома или радикала с  $\pi$ -связью наиболее выгодным является, вероятно, приближение его под некоторым углом к линии двойной связи. Активационный барьер в таких реакциях также очень мал (2–5 ккал). Наличие довольно значительной энергии активации в случае присоединения насыщенную молекулы



связано, вероятно с необходимостью затраты энергии на изменение конфигурации реагирующих молекул при образовании активированного комплекса. В случае присоединения атома или радикала перестройка, необходимая для образования активированного комплекса, мала, что и объясняет незначительную высоту активационного барьера в этом случае.

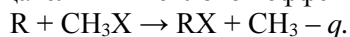
Следует отметить, что найденные экспериментально значения активационных барьеров реакций свободных радикалов с молекулами весьма различны и варьируют в пределах от 0 до 14 ккал. Еще Поляньи [85] обнаружил, что в ряду реакций какого-либо радикала с одноподобными молекулами высота активационного барьера  $\varepsilon_0$  закономерно падает с увеличением теплового эффекта  $q$  реакции приблизительно по закону  $\varepsilon_0 = A - \alpha q$ . Используя весь имеющийся в литературе экспериментальный материал, мы показали [84], что  $A$  и  $\alpha$  хотя и различаются для разных классов реакций, но незначительно. Предложенная нами эмпирическая формула  $\varepsilon_0 = 11,5 - 0,25q$  дает значения  $\varepsilon_0$ , отличающиеся от найденных на опыте

не более чем на  $\pm 2$  ккал. Исключений пока немного, главным образом это реакции с участием атомов галоида, особенно иода.

В указанном приближении активационный барьер реакции и, следовательно, активности радикалов и молекул определяется разностью энергий образующейся и разрываемой связей. Рассмотрение величин энергий разрыва связей и экспериментальных данных по реакционной способности радикалов и молекул приводит к выводу, что активности свободных радикалов, даже имеющих свободную валентность при одном и том же атоме (например, атом С), довольно сильно различаются между собой. Это связано с тем, что в свободном радикале свободен (не спарен) и *p*-электрон, что, естественно, облегчает его взаимодействие с остальной частью радикала и приводит к значительной энергии сопряжения в радикале, весьма различной в зависимости от его строения. В то же время тот же электрон после образования молекулы оказывается спаренным, теряет свою «подвижность» и слабо взаимодействует с остальной частью молекулы, т.е. его сопряжение мало. Особенно сильно сопряжение электрона в свободном радикале при взаимодействии его с *p*-электронами сопряженной системы  $\pi$ -связей радикала, что делает подобные радикалы малоактивными. Однако и в отсутствие такого взаимодействия будет иметь место более легкое взаимодействие, вызванное рядом других причин, в частности изменением конфигурации.

Сказанное выше дает возможность ввести понятие относительной активности радикалов, не зависящее от того, какую реакцию этих радикалов (с какой молекулой) мы выбрали для сравнения активностей<sup>80</sup>. Так, радикал NO<sub>2</sub> оказывается на 30 ккал, радикал аллил на 21,5 ккал, радикал бензил и CBr<sub>3</sub> на 17 ккал, радикал C<sub>3</sub>H<sub>7</sub> на 3 ккал менее активны, чем радикал CH<sub>3</sub> (иными словами, энергия связи R–X на соответствующую величину ниже, чем для CH<sub>3</sub>–X).

<sup>80</sup> Например, приняв за 0 активность радикала CH<sub>3</sub>, активность радикала R определяем как отрицательный тепловой эффект *q* процесса:



В силу сказанного выше *q* не должно существенно зависеть от природы X, что было нами наглядно продемонстрировано [84].

Полученные приближенные соотношения дают возможность для не слишком низких температур оценить величины констант скоростей реакций свободных радикалов с молекулами. Это позволяет (хотя и очень приближенно) оценивать скорости элементарных стадий в сложных реакциях, например в окислении и крекинге. К сожалению, до настоящего времени остается сильно запутанным вопрос о стерических факторах в реакциях замещения. По данным Стейси [86], во многих случаях стерические факторы на несколько порядков меньше единицы. В то же время никаких теоретических соображений, позволяющих оценивать эти величины, нет, а экспериментальный материал по стерическим факторам реакций этого типа скуден и противоречив.

Кроме того, до сих пор еще имеется мало данных по энергиям разрывов связей, необходимых для определения величины  $q$ , что связано, между прочим, с ограниченностью методов, применяемых для определения энергий связей, в том числе и метода электронного удара. Интересно отметить новый способ оценки энергий связи и сродства к протону молекул, предложенный в нашем институте Тальрозе [87]. Этот способ основан на установленном Тальрозе [88] и затем Стивенсоном [89] факте очень малой энергии активации элементарных реакций ионов с молекулами.

Из сложных процессов нами последнее время наибольшее внимание уделяется изучению процессов медленного окисления. Характерной чертой этих работ является изучение кинетики накопления всех основных продуктов и сведения баланса по ходу реакции. В газовой фазе детально изучена кинетика термического окисления пропилена и пропана. Налбандян [90–92] исследовал фотохимическое окисление метана и пропана. Данные Штерна [93–98] по кинетике окисления пропана и пропилена дали возможность предложить механизм, описывающий кинетику накопления всех основных продуктов окисления и продуктов крекинга, который сопровождает окислительный процесс и облегчается им. Важной чертой этой схемы является представление о конкуренции двух путей превращения промежуточного радикала  $RO_2$  – бимолекулярного, с отрывом атома Н от молекулы углеводорода и образованием гидроперекиси, и мономолекулярного – изомеризации  $RO_2$  с последующим разрывом углеродного ске-

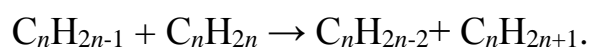


лета и образованием карбонильных соединений, минуя стадию перекиси. Вырожденное разветвление, как показал опыт, по-видимому, связано с реакцией окисления уксусного альдегида.

В жидкой фазе Эмануэлем [99–102] детально изучено окисление циклогексана и н.декана. Установлена последовательность образования устойчивых продуктов окисления, и, в частности, показано, впервые для случаев парафинов и циклопарафинов, что все продукты окисления являются продуктами превращения первичного промежуточного вещества – гидроперекиси. Интересно, что, по-видимому, не так обстоит дело, если процесс вести в металлическом сосуде. По предварительным данным, при окислении циклогексана в стальном сосуде основная масса продуктов образуется, минуя стадии гидроперекиси. Так как известно, что образование алкильных перекисей является гомогенной цепной реакцией, то изменение направления процесса означает, что стенка участвует в реакции продолжения цепи.

Большое значение для выполнения этих работ имел разработанный Нейманом [103] кинетический метод применения меченых атомов, позволяющий одновременно следить за скоростью образования и расходования устойчивых промежуточных веществ и таким образом выяснять последовательность их образования.

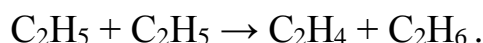
В последние годы в нашем институте были начаты работы по изучению механизма термического распада углеводородов. На основании подробного анализа литературных данных по исследованию крекинга олефинов Воеводский [104] пришел к выводу, что эти процессы являются, по-видимому, не радикальными, как это считалось ранее, а цепными. Основной особенностью предложенного им механизма является предположение о существовании реакций перераспределения водорода между свободными радикалами и молекулами олефина. Для радикала, образованного из молекулы олефина  $C_nH_{2n}$ , эта реакция может быть записана в виде:



Исходя из полученных при принятии этого предположения схем, Воеводский смог вполне удовлетворительно объяснить состав газовых продуктов крекинга для ряда олефинов.

Наибольший практический интерес представляют процессы инициирования цепных реакций, процессы образования свободных радикалов и атомов. Свет, электроразряд, примеси легко распадающихся на свободные радикалы соединений, а в последнее время проникающие излучения широко применяются для этой цели. Я хочу остановиться здесь на способах инициирования, теоретически еще недостаточно ясных, но имеющих непосредственное отношение к основным вопросам химической кинетики.

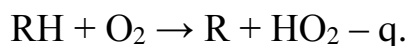
Полагаю, что источником свободных радикалов часто могут служить реакции между двумя молекулами [84] (а не распад молекулы на радикалы). Как уже упоминалось ранее, квантово-механические расчеты показывают, что такие реакции при определенном взаимном расположении реагирующих молекул могут идти без большого активационного барьера. Это следует и из экспериментальных данных. Известно, например, что при встрече двух свободных радикалов далеко не всегда дело сводится к прямому насыщению валентностей с образованием молекулы из обоих радикалов. Весьма часто происходят при этом процессы диспропорционирования, например:



Подобные реакции, как показывает опыт, либо совсем не требуют энергии активации, либо требуют очень малой. Но если это так, то, согласно общим термодинамическим соображениям, обратный процесс образования двух радикалов при встрече молекул, например  $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_6$ , будет идти с энергией активации, практически равной расходу теплоты на этот процесс. В данном случае затрата энергии велика (62 ккал), но она все же гораздо ниже, чем затрата энергии на образование радикалов при распаде  $\text{C}_2\text{H}_6 \rightarrow 2\text{CH}_3$  (83 ккал) и тем более при распаде  $\text{C}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5 + \text{H}$  (98 ккал).

При цепном окислении жидких веществ мы сталкиваемся со значительной скоростью окисления и, следовательно, значительной скоростью инициирования.

Распространяя высказанные предположения на эти системы, естественно написать реакцию



Если  $RH$  – альдегид, например ацетальдегид, то связь  $R-H$  составит приблизительно 80 ккал. Энергия реакции  $H + O_2 \rightarrow HO_2$  довольно точно оценена и составляет 45–47 ккал. Отсюда  $q$ , равное 35 ккал, является величиной того же порядка, что и энергия распада перекиси.

В последнее время получены данные (для окисления ацетальдегида в газовой фазе и окисления этиллинолеата), указывающие, что зарождение, по-видимому, идет путем бимолекулярной реакции между окисляемым веществом и кислородом. Мы знаем, что примесь кислорода ускоряет процессы крекинга и некоторые другие органические реакции, например гидробромирование олефинов. Действие кислорода в обоих случаях может быть связано с указанным выше процессом инициирования реакцией  $RH + O_2 \rightarrow R + HO_2$ . В последней реакции (гидробромирование пропилена) затрата энергии будет равна 30 ккал, т.е. она будет того же порядка, что и для распада перекисей (энергия связи  $C-H$  в группе  $CH_3$  пропилена равна 77 ккал).

Многие реакции окисления углеводородов протекают по механизму цепей с вырожденными разветвлениями и поэтому часто связаны с длинными периодами индукции. В жидкой фазе (например, при окислении парафина) такого рода периоды индукции длятся иногда сотни часов. Известно, что при высокотемпературном окислении углеводородов в газовой фазе прибавление к смеси небольшого количества окислов азота снижает период индукции за счет более быстрой генерации радикалов, возникающих в результате реакции окислов азота с углеводородами. Недавно Эмануэль и сотрудники [105, 106] показали, что такой же эффект окислы азота производят и при сравнительно низкотемпературном окислении в жидкой фазе. При этом достаточно через жидкий парафин продувать в течение до-

вольно короткого времени воздух с небольшими примесями  $\text{NO}_2$ , чтобы реакция началась. А начавшись, она затем идет за счет образующихся перекисей, в силу чего далее можно продувать только чистый воздух, так как в этой стадии добавка к нему окислов азота даже уменьшает скорость реакции (по-видимому, из-за разрушения перекисей). Это было проверено на реакции жидких или сжиженных парафинов.

Топчиев [107] заметил, что нитрование и хлорирование метана идет быстро при совместном присутствии  $\text{NO}_2$  и  $\text{Cl}_2$ , в то время как хлорирование в отсутствие  $\text{NO}_2$  и нитрование в отсутствие  $\text{Cl}_2$  протекают гораздо медленнее. Это, по-видимому, связано с образованием  $\text{NOCl}$ , генерирующего атомы  $\text{Cl}$ .

Одно из замечательных явлений инициирования было не так давно открыто Эмануэлем [108–110] в его работе по окислению пропана в ацетон при 180–200 °С в присутствии  $\text{HBr}$ . Было установлено, что окисление пропана начинается реакцией, протекающей в течение нескольких секунд после смешения газов, в которой пропан расходуется в ничтожном количестве. Однако именно эта реакция создает те активные частицы, которые определяют главную, тянущуюся в течение десятков минут реакцию образования ацетона. Интересно отметить, что продукт реакции – ацетон тормозит реакцию и при достаточных добавках ацетона в исходную смесь реакция вообще не идет. Если же ацетон добавлять в уже идущую реакцию после окончания первой стадии (несколько десятков секунд после начала), то ацетон не оказывает на реакцию никакого действия. Таким образом, ацетон воздействует лишь на первую иницирующую стадию реакции. Химический механизм инициирования пока не удается установить. По-видимому, здесь идет разветвленная цепная реакция между  $\text{HBr}$ , пропаном и кислородом, при которой образуются активные промежуточные вещества, постепенный распад которых является источником свободных радикалов, иницирующих цепи основной реакции окисления пропана.

Перспективной, хотя пока и недостаточно доказанной, является возможность инициирования цепных реакций твердыми поверхностями.

Несомненно, можно считать установленным в результате исследований Ковальского [111], разработавшего и применившего метод отдельного

калориметрирования, что действие некоторых гетерогенных катализаторов, например бокситных катализаторов промышленного получения серы из CO и SO<sub>2</sub>, сводится лишь к инициированию объемной реакции на поверхности (реакция идет в объеме на 96%). Методом отдельного калориметрирования несколько лет назад Маркевич [112] доказал, что цепи темновой реакции H<sub>2</sub>→Cl<sub>2</sub> начинаются на поверхности стекла. То же показал Чайкин [113] для темнового образования дихлорэтана при хлорировании этилена. Кстати, им впервые с полной очевидностью было доказано, что процесс непосредственного присоединения Cl<sub>2</sub> к этилену в газовой фазе не идет, но реакция протекает всегда цепным путем с участием атомов Cl.

### Обрыв цепей

Как мы уже отметили, еще в 20-х гг. нами было установлено, что цепи обрываются на твердых поверхностях. Последующее широкое изучение в СССР и за границей этого явления показало, что атомы и свободные радикалы почти всегда хемосорбируются твердыми поверхностями. В зависимости от свойств поверхности хемосорбция требует различной, всегда небольшой (до 10 кал) энергии активации.

Переходя к теории иницирующего действия стенки, нужно прежде всего отметить, что из давно и определенно установленного для большинства цепных реакций явления захвата свободных радикалов стенкой с термодинамической неизбежностью следует, что и обратный процесс генерации свободных радикалов стенкой сосуда всегда должен иметь место.

Иницирование цепных реакций стенками сосуда было отмечено также в реакциях распада алкилхлоридов. Как было известно, в чистых необработанных сосудах эти реакции протекают значительно (в десятки раз) быстрее, чем в сосудах, где в результате многократно проведенной реакции на поверхности образовалась пленка. Это явление не может быть объяснено гетерогенным катализом на чистых поверхностях. Опыты с изменением отношения  $s/v$  и особенно опыты по отдельному калориметрированию, проведенные недавно в нашем институте, отчетливо показали, что во многих случаях как в чистых, так и в обработанных сосудах реакция практически гомогенна. Эти факты не могут быть объяснены без

предположения о зарождении цепей на поверхности. По-видимому, этот процесс легко происходит на чистых поверхностях и значительно труднее – на обработанных. Ряд авторов (Бартон, Хаулетт [114; 115] и другие) изучали подавление реакции распада в обработанных сосудах добавками пропилена, н.гексана и других ингибиторов. В тех случаях, когда это ингибирование наблюдалось, скорость реакции в присутствии добавок изменялась в 3–4 раза. У нас недавно изучалось действие пропилена в чистых сосудах. Оказалось, что в этом случае наблюдается значительно более сильное ингибирование (в 20 раз). Такое различие само по себе ставит под сомнение общепринятое представление о том, что замедляющее действие пропилена связано с обрывом цепей в объеме.

Более подробное исследование этого вопроса методом отдельного калориметрирования, по-видимому, указывает на то, что по крайней мере основная часть ингибирования (80–90%) связана не с обрывом цепи в объеме, а с подавлением зарождения цепей на стенках в результате адсорбции пропилена.

Эти результаты могут рассматриваться как некоторое подтверждение гипотезы Воеводского [116; 117] о действии примеси NO на крекинг углеводородов. В соответствии с высказываниями Райса и Херцфельда [118] Воеводский считает, что и в крекинге углеводородов цепи зарождаются и обрываются на стенках. Роль же окиси азота, по его мнению, заключается в подавлении иницирующего действия стенок. Эти попытки найти новое решение вопроса связаны с тем, что общепринятая точка зрения сэра Сирила Хиншелвуда [119; 120], ясно и просто объясняющая природу предельного торможения примесями реакций крекинга, при ряде преимуществ встречается с трудностями при объяснении некоторых опытных фактов. Так, например, рядом авторов [121–124] было показано, что при проведении реакции в присутствии либо молекулярного дейтерия, либо устойчивых дейтеросодержащих соединений продукты реакции оказываются одинаково продейтерированными как в неингибированной, так и в ингибированной NO реакции. Одной из основных задач является поэтому всесторонний разбор вопроса о том, действительно ли гипотеза Хиншел-

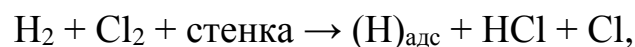
вуда в свете новых фактов должна быть отвергнута или эти факты могут быть объяснены в рамках указанной выше гипотезы.

### Свободные валентности на твердых поверхностях

Нам хотелось понять механизм генерации свободных радикалов твердыми поверхностями. Представляется вероятным, что как внутри, так особенно на поверхности твердых тел имеются свободные валентности [84]. Эти валентности аналогичны свободным радикалам и потому взаимодействуют с налетающими из объема молекулами с малой энергией активации. При этом молекула разрывается, один из радикалов насыщает валентность поверхности – хемосорбируется, а другой выходит в объем.

Захват стенкой свободного радикала происходит за счет его хемосорбции, но при этом разрывается та или иная связь в твердом теле и рядом возникает свободная валентность поверхности. В результате эти процессы не меняют число свободных валентностей (и на стенке, и в объеме). Свободные валентности уничтожаются лишь вследствие взаимодействия друг с другом.

Свободные валентности, вероятно, могут быть созданы путем специального приготовления твердого тела. При высоких температурах они могут возникать спонтанно за счет теплового движения. Не исключена возможность их появления за счет энергии актов химического превращения на поверхности, например:



Таким образом, на образование двух атомов Cl затрачивается 15 вместо 57 ккал, необходимых для диссоциации Cl<sub>2</sub> в объеме.

Изложенные представления о механизме участия стенки в процессах зарождения и обрыва цепей являются пока весьма гипотетическими. Воеводский, Волькенштейн и Семенов [125–127] связали их с полупроводниковыми свойствами твердых тел. Свойства носителей тока в полупровод-

никах – свободных электронов и дырок – очень близки к свойствам постулируемых нами свободных валентностей на поверхности: и те, и другие обладают основной характерной чертой свободных радикалов – они имеют нечетное число электронов. Так, электрон и дырка в решетке полупроводника (например, ZnO) в очень грубом приближении могут быть уподоблены ионам радикалов ( $Zn^+$  и  $O^-$ ).

Основываясь на этой аналогии, мы предположили еще в 1953 г., что свободные валентности стенки могут не только способствовать выбросу радикалов в объеме, но и играть существенную роль в механизме гетерогенного катализа окислительно-восстановительных процессов. Был предложен ряд схем, вполне удовлетворительно описывающих протекание ряда сложных каталитических превращений, в частности цепная схема процесса синтеза углеводородов на основе  $CO + H_2$ .

Прямых опытных данных, подтверждающих радикальный или ионно-радикальный механизм окислительно-восстановительных каталитических процессов, пока нет. Однако довольно многие наблюдения косвенно это подтверждают. В особенности надо отметить тот факт, что подавляющее число окислительно-восстановительных катализаторов является полупроводниками и металлами [128]. С другой стороны, накопилось довольно большое число сведений по сопоставлению электропроводности и каталитических свойств полупроводников. Все они указывают на существование тесной связи между двумя этими группами свойств. Наиболее ярким фактом является влияние малых добавок в решетку полупроводника ионов другой валентности (например,  $Li^+$  и  $Cr^{3+}$  в решетку  $Zn^{2+}O^{2-}$ ,  $Ni^{2+}O^{2-}$  и т.д.), резко изменяющих как каталитическую активность, так и электропроводность, увеличивая или уменьшая их. Примесь, влияющая на электропроводность, всегда вызывает и изменение каталитической активности. Направления этих изменений иногда совпадают, а иногда противоположны – в зависимости от типа реакции, типа примеси, *p*- или *n*-характера полупроводника и области температур. Хотя мы не имеем еще строгой количественной теории для описания всех этих данных, можно, по-видимому, утверждать, что при построении такой теории в основу ее должно быть положено четкое понятие о свободном радикале поверхно-



сти, позволяющее объединить в рамках одной концепции как электрическую, так и каталитическую сторону вопроса.

Следует отметить, что в области кислотно-основных катализаторов также имеется, как показал Чирков, соответствие между электропроводностью и каталитическими свойствами, но совсем иного рода. В 1947 г. мы показали [129-133], что в присутствии в газовой фазе небольшого количества хлористого водорода и паров воды пластинки поверхности типа слюды, кварца, стекла приобретают ярко выраженные свойства кислотно-основных катализаторов. Подробно были исследованы реакции этерификации и разложение паральдегида. Оказалось при этом, что поверхностная электропроводность изменяется параллельно с каталитической активностью. Дальнейшее изучение показало, что реакция идет в адсорбционном слое (содержащем от одного до нескольких молекулярных слоев) в общем так же, как она идет в подкисленных жидкостях.

### Резюме

Главным итогом работ современных школ химической кинетики является уверенность в том, что большое число реакций в газовой фазе и огромное большинство реакций в жидкой и твердой фазах, а также гетерогенные каталитические реакции на твердых поверхностях идут при помощи образующихся в ходе процесса своеобразных лабильных форм. Эти лабильные формы обладают реакционной способностью, значительно большей, чем даже самые нестойкие валентно-насыщенные молекулы.

Задача ближайшего будущего должна заключаться в разработке теоретических и экспериментальных методов исследования этих лабильных форм. Необходимо четко связать их свойства со строением молекул, из которых они возникают, и с химическим строением твердых тел (в случае гетерогенных реакций), а также детально разобраться, каким образом процесс может создавать лабильные формы, обеспечивающие его саморазвитие.

Значение цепной теории я прежде всего вижу в том, что на примерах газовых реакций ей удалось развить представления о соответствующих этим реакциям простейших лабильных формах – свободных атомах или радикалах. На отдельных примерах удалось показать, что учение о цепных

реакциях является подлинной теорией, позволяющей предвидеть удивительное богатство и разнообразие поведения реакции, которое характерно даже для таких сравнительно простых цепных процессов, как получение воды из водорода и кислорода.

Цепная теория позволяет подойти к решению одной из основных задач теоретической химии – установлению связи между реакционной способностью и строением реагирующих частиц.

Для цепных реакций характерно взаимодействие свободных радикалов с молекулами (реакции продолжения цепи). Такого рода взаимодействие является простейшим типом реакции, так как здесь рвется одна связь и образуется также одна связь. Поэтому изучение таких реакций позволяет наиболее легко наметить пути подхода к созданию теории реакционной способности, которые затем могли бы быть распространены на другие типы реакций.

Важнейшей задачей химии является создание возможностей рационального управления скоростью и направлением химического превращения. К сожалению, в этом отношении химия и химическая промышленность отстают от радиотехники, электроники, атомной техники и т.п., где технологические процессы в значительно большей мере основаны на теоретическом предвидении и расчете.

Теория цепных реакций намечает первоначальные пути подхода и к этому вопросу. Наличие в цепных реакциях стадий инициирования и обрыва цепей, скорость которых зависит от состояния среды и от внешних воздействий, открывает пути управления скоростью процесса, а иногда и выходами продуктов. Знание реакций продолжения цепи часто позволяет направить процесс в нужную сторону.

Таким образом, цепная теория создает перспективы усовершенствования существующих и нахождения новых процессов в промышленности, что в некоторой степени применяется уже сейчас. Особенно это относится к процессам полимеризации.

Ближайшей задачей является применение представлений цепной теории для создания новых технологических процессов прямого окисления и крекинга углеводородов.

Необходимо отметить, что практическое применение проникающих излучений для химической технологии, по-видимому, будет весьма перспективным именно в случае цепных реакций. Конечно, химические превращения не ограничиваются радикально-цепными процессами, идущими при помощи свободных радикалов, многие из них идут через другие лабильные формы, которые необходимо также изучить.

Я убежден, что необходимо развивать и ускорить работу по изучению механизма различных типов химических реакций. Вряд ли без этого можно существенно обогатить химическую технологию, а также добиться решающих успехов в биологии.

Естественно, что на этом пути стоят огромные трудности. Химический процесс есть то основное явление, которое отличает химию от физики, делает первую более сложной наукой. Создание теории химического процесса также значительно более сложно, чем создание теории строения химических веществ.

При решении этого важнейшего вопроса более чем где-либо необходимо дружное совместное усилие ученых всех стран для познания тайн химического и биологического процессов и использования этого познания на благо мирного развития и благоденствия человечества.

### Список литературы<sup>81</sup>

1. Семенов Н.Н. // ЖРФХО. 1928. Т. 60. С. 241-256.
2. Semenoff N.N. // Ztschr. physik. 1928. Bd. 48. S. 571-582.
3. Semenoff N.N. // Ztschr. phys. Chem. Abt. B. 1930. Bd. 11. S. 464-469.
4. Семенов Н.Н. Цепные реакции. – М.; Л.: Госхимтехиздат, 1934. – 555 с.
5. Семенов Н.Н. // Успехи физ. наук. 1940. Т. 23. С. 251-292.
6. Sagulin A. B. // Ztschr. phys. Chem. Abt. B. 1928. Bd. 1. S. 275-292.
7. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. 368 с.
8. Todes O.M. // Журн. физ. химии. 1933. Т. 4. С. 78-80.
9. Todes O.M. // Acta physicochim. USSR. 1936. V. 6. P. 785-806.
10. Конторова Т.А., Тодес О.М. // Журн. физ. химии. 1933. Т. 4, С. 81-91.
11. Тодес О.М. // Журн. физ. химии. 1939. Т. 13. С. 869-879.

---

<sup>81</sup> Список литературы приведен по оригиналу (*примеч. ред.*).

12. Мелентьев П.М., Тодес О.М. // Журн. физ. химии. 1939. Т. 13. С. 1594-1609.
13. Тодес О.М., Мелентьев П.М. // Журн. физ. химии. 1940. Т. 14. С. 1026-1042.
14. Апин А.Я., Тодес О.М., Харитон Ю.Б. // Журн. физ. химии. 1936. Т. 8. С. 866-882.
15. Lewis B., von Elbe G. // J. Chem. Phys. 1934. V. 2. P. 283-290.
16. Зельдович Я.Б., Франк-Каменецкий Д.А. // Журн. физ. химии. 1938. Т. 12. Вып. 1. С. 100-105.
17. Зельдович Я.Б., Семенов Н.Н. // Журн. техн. физики. 1940. Т. 10. С. 1116-1136.
18. Семенов Н.Н. // Успехи физ. наук. 1940. Т. 24. С. 433-471.
19. Зельдович Я.Б. Теория горения и детонации газов. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1944. 72 с.
20. Lewis B., von Elbe G. Combustion, flames and explosions of gases. Cambridge Univ. Press, 1938. 415 p.
21. Беляев А.Ф. // Журн. физ. химии. 1938. Т. 12. С. 93-99.
22. Беляев А.Ф. // Журн. физ. химии. 1940. Т. 14. С. 1009-1025.
23. Беляев А.Ф. // ДАН СССР. 1940. Т. 28. С. 715-718.
24. Беляев А.Ф. // Дис. ... д-ра хим. наук. М.: ИХФ АН СССР, 1947.
25. Аристова З.И., Лейпунский О.И. // ДАН СССР. 1946. Т. 54. С. 507-509.
26. Зельдович Я.Б. // ЖЭТФ. 1941. Т. 17. С. 159-169.
27. Щелкин К.И. // ЖЭТФ. 1940. Т. 10. С. 823-827.
28. Дицент В., Щелкин К.И. // Журн. физ. химии. 1945. Т. 19. С. 221-227.
29. Щелкин К.И. Быстрое горение и спиновая детонация газов. М.: Воениздат, 1949, 195 с.
30. Damkohler G. // Ztschr. Elektrochem. 1940. Bd. 46. S. 601-626.
31. Щелкин К.И. // Журн. техн. физики. 1934. Т. 13. С. 520-541.
32. Щелкин К.И. // ДАН СССР. 1939. Т. 23. С. 636-640.
33. Зельдович Я.Б. // Журн. техн. физики. 1947. Т. 17. С. 3-26.
34. Франк-Каменецкий Д.А., Минский Е. // ДАН СССР. 1945. Т. 50. С. 353-354.
35. Ривин М.А., Соколик А.С. // Журн. физ. химии. 1937. Т. 10. С. 692-699.
36. Зельдович Я.Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946. 186 с.
37. Зельдович Я.Б., Компанеец А.С. Теория детонации. 2-е изд., испр. и доп. М.: Гостехиздат, 1955. 268 с.

38. Campbell C., Woodhead D.W. // J. Chem. Soc. 1926. V. 129. P. 3010-3023.
39. Bone W.A., Fraser R.P. // Phil. Trans. 1929. V. 222. P. 123-157.
40. Bone W.A., Fraser R.P., Wheeler W.H. // Phil. Trans. 1936. V. 235. P. 29-68.
41. Щелкин К.И. // Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1947.
42. Щелкин К.И. // ДАН СССР. 1945. Т. 47. С. 501-503.
43. Ракипова Х.А., Трошин Я.К., Щелкин К.И. // Журн. техн. физики. 1947. Т. 17. С. 1409-1410.
44. Зельдович Я.Б. // ДАН СССР. 1946. Т. 52. С. 147-150.
45. Харитон Ю.Б., Вальта З. // ЖРФХО. 1926. Т. 58. С. 775-792; Ztschr. Phys. 1926. Bd. 39, S. 547-556.
46. Semenov N.N. // Ztschr. Phys. 1928. Bd. 46. S. 109-131; ЖРФХО. 1928. Т. 60. С. 271-298.
47. Semenov N.N., Rjabinin G. // Ztschr. phys. Chem. Abt. B. 1928. Bd. 1. S. 192-205.
48. Semenov N.N. // Ztschr. phys. Chem. Abt. B. 1928. Bd. 2. S. 161-169.
49. Semenov N.N. // Chem. Rev. 1929. V. 6. P. 347-379.
50. Trifonoff A. // Ztschr. phys. Chem. Abt. B. 1929. Bd. 3. S. 195-203.
51. Кондратьев В.Н., Кондратьева Е.Я. // ДАН СССР. 1946. Т. 51. С. 607-608.
52. Авраменко Л.И. // Журн. физ. химии. 1944. Т. 18. С. 197-206.
53. Эмануэль Н.М. Окисление сероводорода / Кинетика цепных реакций окисления. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. С. 79-117.
54. Эмануэль Н.М. // Журн. физ. химии. 1945. Т. 19, С. 15-48.
55. Маркович В.Г., Эмануэль Н.М. // Журн. физ. химии. 1947. Т. 21. С. 1251-1257.
56. Hinshelwood C.N., Thompson H.W. // Proc. Roy. Soc. London. 1928. V. 118. P. 170-183.
57. Gibson C.H., Hinshelwood C.N. // Proc. Roy. Soc. London. 1928. 119. P. 591-606.
58. Gibson C.H., Hinshelwood C.N. // Trans. Faraday Soc. 1928. V. 24. P. 559-562.
59. Thompson H.W., Hinshelwood C.N. // Proc. Roy. Soc. London. 1929. V. 122. P. 610-621.
60. Thompson H.W., Hinshelwood C.V. // Proc. Roy. Soc. London. 1929. V. 124. P. 219-227.
61. Dalton R.H., Hinshelwood C.V. // Proc. Roy. Soc. London. 1929. V. 125. P. 294-308.

62. Апин А.Я. // Журн. физ. химии. 1940. Т. 14. С. 494-504.
63. Ubbelohde A.R. // Fifth Symposium on Combustion. Pittsburg, 1955. P. 799-802.
64. Каменская С., Медведев С.С. // Журн. физ. химии. 1940. Т. 14. С. 922-935.
65. Kamenskaya S., Medwedew S.S. // Acta physicochim. URSS. 1940. V. 13. P. 565-586.
66. Медведев С.С., Корицкая О.М., Алексеева Е.Я. // Журн. физ. химии. 1943. Т. 17. С. 391-407.
67. Medwedew S.S., Koritskaya O.M., Alekseewa E.N. // Acta physicochim. URSS. 1944. V. 19. P. 457-482.
68. Rice F.O., Herzfeld K.F. // J. Amer. Chem. Soc. 1934. V. 56. P. 284-289.
69. Рапс Ф.О., Райе К.К. Свободные алифатические радикалы / Пер. с англ., под ред. А.В. Фроста. Л.: ОНТИ, Химтеорет, 1937, 201 с.
70. Динцес А.И., Фрост А.В. // ДАН СССР. 1934. Т. 3. С. 510-512.
71. Фрост А.В. // Журн. физ. химии. 1936. Т. 8. С. 290-294.
72. Фрост А.В. // Успехи химии. 1939. Т. 8. С. 956-969.
73. Szwarc M. // Chem. Rev. 1950. V. 47. P. 75-173.
74. Szwarc M., Gosh B.N., Sehon A.H. // J. Chem. Phys. 1950. V. 18. P. 1142-1149.
75. Шилов А.Е. // ДАН СССР. 1954. Т. 98. С. 601-604.
76. Leigh C.H., Szwarc M. // J. Chem. Phys. 1952. V. 20. P. 403-406.
77. Barton D.H.R. // J. Chem. Soc. 1949. P. 148-155.
78. Barton D.H.R., Hewlett K.E. // J. Chem. Soc. 1949. P. 165-169.
79. Szwarc M., Sehon A.H. // J. Chem. Phys. 1951. V. 19. P. 656-657.
80. Шилов А.Е. // Дис. ... канд. хим. наук. М.: ИХФ АН СССР, 1955.
81. Agius P.J., Массой А. // J. Chem. Soc. 1955. P. 965-973.
82. Массой А., Thomas P.I. // J. Chem. Soc. 1955. P. 979-986, 2445-2448.
83. Капралова Г.А., Семенов Я.Н., Сергеев Г. В. // ДАН СССР. 1955. Т. 105. С. 301-304.
84. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. М.: Изд-во АН СССР, 1954, 349 с.
85. Evans M.G., Polanyi M. // Trans. Faraday Soc. 1938. V. 34. P. 11-29.
86. Steacie E.W.R. Atomic and free radical reactions. 1954. 485 p.
87. Тальрозе В.Л., Франкевич Е.Л. // ДАН СССР. 1956. Т. 111. С. 376-379.
88. Тальрозе В.Л., Любимова А.К. // ДАН СССР. 1952. Т. 86. С. 909-912.
89. Stevenson D.P., Schlissler D.O. // J. Chem. Phys. 1955. V. 23. P. 1353-1354.

90. Фок Н.В., Береславский Б.Б., Налбандян А.Б., Штерн В.Я. // ДАН СССР. 1949. Т. 67. С. 499-501.
91. Фок Н.В., Налбандян А.Б. // ДАН СССР. 1952. Т. 85. С. 1093-1095.
92. Фок Н.В., Налбандян А.Б. // ДАН СССР. 1953. Т. 89. С. 125– 127.
93. Черняк Н.Я., Антоновский В.Л., Ревзин А.Ф., Штерн В.Я. // Журн. физ. химии. 1954. Т. 28. С. 240-253.
94. Репа Л.А., Штерн В.Я. // Журн. физ. химии. 1954. Т. 28. С. 414-421.
95. Ревзин А.Ф., Сергеев Г.Б., Штерн В.Я. // Журн. физ. химии. 1954. Т. 28. С. 985-996.
96. Штерн В.Я. // Журн. физ. химии. 1954. Т. 28. С. 613-626.
97. Поляк С.С., Штерн В.Я. // Журн. физ. химии. 1953. Т. 27. С. 341-354, 631-639, 950-959.
98. Поляк С. С., Штерн В. Я. // ДАН СССР. 1954. Т. 95. С. 1231-1234.
99. Березин И. В., Денисов Е.Т., Эмануэль Н.М. // Вопросы Химической кинетики, катализа и реакционной способности. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 273-291.
100. Кнорре Д.Г., Майзус З.К., Эмануэль Н.М. // Журн. физ. химии. 1955. Т. 29. С. 710-717.
101. Вартамян Л.С., Кнорре Д.Г., Майзус З.К., Эмануэль Н.М. // Журн. физ. химии. 1956. Т. 30. С. 665-675.
102. Вартамян Л.С., Майзус З.К., Эмануэль Н.М. // Журн. физ. химии. 1956. Т. 30. С. 856-861.
103. Нейман М.Б. // Журн. физ. химии. 1954. Т. 28. С. 1235-1242.
104. Воеводский В.В. // ДАН СССР. 1954. Т. 94. С. 909-912.
105. Эмануэль Н.М. // Журн. физ. химии. 1956. Т. 30. С. 847-855.
106. Эмануэль Н.М. // ДАН СССР. 1956. Т. 110. С. 245-248.
107. Топчиев А.В., Алания В.П. // ДАН СССР. 1949. Т. 67. С. 297-300. Майзус З.К., Эмануэль Н.М. // ДАН СССР. 1952. Т. 87. С. 241-244, 437-440, 801-803.
108. Майзус З.К., Маркевич А.М., Эмануэль Н.М. // ДАН СССР. 1952. Т. 87. С. 241-244, 437-440, 801-803.
109. Майзус З.К., Маркевич А.М., Эмануэль Н.М. // ДАН СССР. 1953. Т. 89. С. 1049-1052.
110. Майзус З.К., Эмануэль Н.М. // Цепные реакции окисления углеводов в газовой фазе. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 81-117.
111. Богоявленская М.Л., Ковальский А.А. // Журн. физ. химии. 1946. Т. 20. С. 1325-1331.

112. Маркевич А.М. // Журн. физ. химии. 1948. Т. 22. С. 941-952.
113. Чайкин А.М. // Дис. ... канд. хим. наук. М.: ИХФ АН СССР, 1955.
114. Barton D.H.R., Howlett K.E. // J. Chem. Soc. 1949. P. 155-164.
115. Barton D.H.R., Onyon P.F. // J. Amer. Chem. Soc. 1950. V. 72. P. 988-995.
116. Воеводский В.В. // Дис. ... д-ра хим. наук. М.: ИХФ АН СССР, 1954.
117. Полтораки В.А. // Дис. ... канд. хим. наук. М.: МГУ, 1953.
118. Rice F.O., Herzfeld K.F. // J. Phys. Coll. Chem. 1951. V. 55. P. 975-997.
119. Stubbs F.J., Hinshelwood C.N. // Disc Faraday Soc. 1951. V. 10. P. 129-136.
120. Jack J., Stubbs F.J., Hinshelwood C.N. // Proc. Roy. Soc London. 1954. V. 224. P. 283-286.
121. Полтораки В.А., Воеводский В.В. // ДАН СССР. 1953. Т. 91. С. 589-591.
122. Rice F.O., Varnerin R.E. // J. Amer. Chem. Soc. 1954. V. 76. P. 324-327.
123. Danby C.J., Spall B.C., Stubbs F.J., Hinshelwood C.N. // Proc Roy. Soc. London. 1955. V. 228. P. 448-454.
124. Varnerin R.E., Dooling J.S. // J. Amer. Chem. Soc. 1956. V. 78. P. 2042-2044.
125. Воеводский В.В. // Электронные явления в катализе и адсорбции. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 97-109. (Проблемы кинетики и катализа; Т. 8).
126. Семенов Н.П., Воеводский В. В. // Гетерогенный катализ в химической промышленности. М.: Госхимиздат, 1955, С. 233-255.
127. Воеводский В. В., Волькенштейн Ф.Ф., Семенов Н.Н. // Вопросы химической кинетики, катализа и реакционной способности. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 423-440.
128. Рогинский С.З. // Гетерогенный катализ. М.;Л.: Изд-во АН СССР, 1949. Т. 6. С. 9-53. (Проблемы кинетики и катализа; Т. 6).
129. Гольданский В.П., Семенов Н.Н., Чирков Н.М. // ДАН СССР. 1946. Т. 52. С. 783-785.
130. Семенов Н.Н., Чирков Н.М. // ДАН СССР. 1946. Т. 51. С. 37-40.
131. Чирков П.М., Винник М.И. // Д А Н СССР. 1947. Т. 58. С. 1697-1700.
132. Goldansky V.I., Tschirkow N.M. // Acta physicochim. URSS. 1947. V. 22. P. 363-380.
133. Чирков Н.М. // Журн. физ. химии. 1947. Т. 21. С. 1303-1316.



# ЭКОНОМИКА



*Леонид Витальевич Канторович*  
*(1912–1986)*

## БИОГРАФИЯ<sup>82</sup>

Русский экономист Леонид Витальевич Канторович (1912–1986) родился в 1912 г. в Санкт-Петербурге, Россия. Русская революция началась, когда ему было пять лет, во время гражданской войны его семья бежала на год в Белоруссию. В 1922 г. умер его отец, Виталий Канторович, оставив сына на воспитание матери, урожденной Паулины Сакс.

Канторович проявлял интерес к естественным наукам задолго до того, как он в 1926 г. в возрасте четырнадцати лет поступил в Ленинградский университет. Здесь он изучает не только естественные дисциплины, но и политэкономии, современную историю, математику. Его склонность к математике становится определяющей в работе по теории рядов, которую он представил на первом Всесоюзном математическом конгрессе в 1930 г. Закончив в том же году учебу, он остается в Ленинградском университете на преподавательской работе и продолжает свои исследования на кафедре математики. К 1934 г. он становится профессором, а годом позже, когда была восстановлена система академических степеней, получает докторскую степень.

В 30-е гг., в период интенсивного экономического и индустриального развития Советского Союза, Канторович был в авангарде математических исследований и стремился применить свои теоретические разработки в практике растущей советской экономики. Такая возможность представилась в 1938 г., когда он был назначен консультантом в лабораторию фанерной фабрики. Перед ним была поставлена задача разработать такой метод распределения ресурсов, который мог бы максимизировать производительность оборудования, и Леонид Витальевич, сформулировав проблему с помощью математических терминов, произвел максимизацию линейной функции, подверженной большому количеству ограничителей. Не имея чистого экономического образования, он тем не менее знал, что максимизация при многочисленных ограничениях – это одна из основных экономических проблем и что метод, облегчающий планирование на фа-

---

<sup>82</sup> Леонид Канторович (1912-1986). Биография [Электронный ресурс] // Нобелевская премия. Нобелевские лауреаты: [сайт]. – Москва, 2010–2019. – Режим доступа: <http://www.nobeliat.ru/laureat.php?id=424>.

нерных фабриках, может быть использован во многих других производствах, будь то определение оптимального использования посевных площадей или наиболее эффективное распределение потоков транспорта.

Метод Канторовича, разработанный для решения проблем, связанных с производством фанеры, и известный сегодня как метод линейного программирования, нашел широкое экономическое применение во всем мире. В работе «Математические методы организации и планирования производства», опубликованной в 1939 г., Канторович показал, что все экономические проблемы распределения могут рассматриваться как проблемы максимизации при многочисленных ограничителях, следовательно, могут быть решены с помощью линейного программирования.

В случае с производством фанеры он представил переменную, подлежащую максимизации, в виде суммы стоимостей продукции, выпускаемой всеми машинами. Ограничители были представлены уравнениями, которые устанавливали соотношение между количеством каждого из расходовемых факторов производства (например, древесины, электроэнергии, рабочего времени) и количеством продукции, выпускаемой каждой из машин, где величина любой из затрат не должна превышать имеющуюся в распоряжении сумму.

Затем Канторович ввел новые переменные (разрешающие мультипликаторы) как коэффициенты к каждому из факторов производства в ограничительных уравнениях и показал, что значения как переменной затрачиваемых факторов, так и переменной выпускаемой продукции могут быть легко определены, если известны значения мультипликаторов. Затем он представил экономическую интерпретацию этих мультипликаторов, показав, что они, в сущности, представляют собой предельные стоимости (или «скрытые цены») ограничивающих факторов; следовательно, они аналогичны повышенной цене каждого из факторов производства в режиме полностью конкурентного рынка.

И хотя с тех пор разрабатывались более совершенные компьютерные методики для определения значений мультипликаторов (Канторович использовал метод последовательного приближения), его первоначальное понимание экономического и математического смысла мультипликаторов

заложило основу для всех последующих работ в этой области в Советском Союзе. Впоследствии сходная методология была независимо разработана на Западе Гьяллингом Ч. Купмансом и другими экономистами.

Даже в тяжелые годы второй мировой войны, когда Канторович занимал должность профессора в Военно-морской инженерной академии в блокадном Ленинграде, он сумел создать значительное исследование «О перемещении масс» (1942). В этой работе он использовал линейное программирование для планирования оптимального размещения потребительских и производственных факторов.

Продолжая работать в Ленинградском университете, Канторович одновременно возглавил отдел приближенных методов в Институте математики АН СССР в Ленинграде. В последующие несколько лет он способствовал развитию новых математических методов планирования для советской экономики. В 1951 г. он (совместно с математиком, специалистом в области геометрии В.А. Залгаллером) опубликовал книгу, описывающую их работу по использованию линейного программирования для повышения эффективности транспортного строительства в Ленинграде. Через восемь лет он опубликовал самую, видимо, известную свою работу «Экономический расчет наилучшего использования ресурсов». В ней он сделал далеко идущие выводы по идеальной организации социалистической экономики для достижения высокой эффективности в использовании ресурсов. В особенности он рекомендовал шире использовать скрытые цены при распределении ресурсов по Союзу и даже применять процентную ставку для выражения скрытой цены времени при планировании капиталовложений.

Хотя некоторые советские ученые с опаской относились к этим новым методам планирования, постепенно методы Канторовича были приняты советской экономикой. В 1949 г. он был удостоен Сталинской премии за работу в области математики, в 1958 г. избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. Шестью годами позже он стал академиком. В 1960 г., переехав в Новосибирск, где был расположен самый передовой в СССР компьютерный центр, он стал руководителем отдела экономико-математических методов в Сибирском отделении АН СССР. Вместе со

своими коллегами, экономистами-математиками В.В Новожиловым и В.С. Немчиновым, Канторович стал лауреатом Ленинской премии в 1965 г., а в 1967 г. был награжден орденом Ленина. В 1971 г. он становится руководителем лаборатории в Институте управления народным хозяйством в Москве.

Премия памяти Нобеля 1975 г. по экономике была присуждена совместно Л.В. Канторовичу и Тьяллингу Ч. Купмансу «за вклад в теорию оптимального распределения ресурсов». В своей речи на церемонии презентации представитель Шведской королевской академии наук Рагнар Бенцель отмечал очевидность того, о чем свидетельствовали работы двух лауреатов, – «основные экономические проблемы могут изучаться в чисто научном плане, независимо от политической организации общества, в котором они исследуются». Работы Купманса и Канторовича по линейному программированию тесно соприкасались, а американский ученый подготовил в 1939 г. первую публикацию книги советского ученого на английском языке. В своей Нобелевской лекции «Математика в экономике: достижения, трудности, перспективы» Канторович говорил о «проблемах и опыте плановой экономики, особенно советской экономики».

В следующем году Канторович стал директором Института системных исследований АН СССР. Проводя собственные исследования, он в то же время поддерживал и обучил целое поколение советских экономистов.

В 1938 г. Канторович женился на Наталье Ильиной, враче по профессии. Их дети – сын и дочь – стали экономистами. Л.В. Канторович скончался 7 апреля 1986 г. в возрасте 74 лет.

Кроме Нобелевской премии и наград, полученных в СССР, ему были присуждены почетные степени университетами Глазго, Гренобля, Ниццы, Хельсинки и Парижа; он был членом Американской академии наук и искусств.

## АВТОБИОГРАФИЯ<sup>83</sup>

Родился я в Петербурге 19 января 1912 г. Мой отец, Виталий Канторович, умер в 1922 г. и меня воспитывала моя мать Полина (Сакс). Первыми событиями моего детства, которые я помнил, были февральская и октябрьская революции 1917 г. а также поездка в Белоруссию на один год во время Гражданской войны.

Первый интерес к наукам и первые проявления самостоятельного мышления я осознал приблизительно к 1920 г. Поступив на математический факультет Ленинградского университета в 1926 г. я стал интересоваться главным образом различными науками (в том числе политической экономией и современной историей – благодаря весьма ярким лекциям академика Е. Тарле). В университете я посещал лекции, совмещая работу на семинарах В.Н. Смирнова, Г.М. Фихтентольца, Б.И. Делонн. Моими университетскими друзьями были И.П. Натансон, С.Л. Соболев, С.Г. Михлин, Д.К. и В.Н. Фаддеевы.

В научной деятельности, начатой на втором курсе обучения в университете, я увлекался некоторыми достаточно абстрактными областями математики. Думаю, что самым важным результатом моей работы в те дни было исследование аналитических операций, связанных с множествами и проективными множествами (1929–1930 гг.); тогда я и решил некоторые проблемы, поднятые П.П. Лузиным. Я сообщил об этих результатах на Первом Всесоюзном математическом конгрессе в Харькове (1930 г.).

Участие в работе конгресса стало важным эпизодом в моей жизни: здесь я встретил таких выдающихся советских математиков, как С.П. Беринштейн, С. Александров, Л.Н. Колмогоров, А.О. Гельфонд и другие, а также некоторых гостей из-за рубежа, среди которых были Дж. Хадамард, П. Мотель, В. Блашке.

Петербургская математическая школа объединяла теоретические и прикладные исследования. По окончании университета в 1930 г. одновременно с преподавательской деятельностью в высших учебных заведениях

---

<sup>83</sup> Канторович, Л.В. Автобиография / Л.В. Канторович // Лауреаты Нобелевской премии по экономике / РАН, С.-Петерб. науч. центр ; науч. ред. В. В. Окрепилов. – Санкт-Петербург, 2007. – Т. 1 : 1969–1982. – С. 207–211.

я начал исследования в области прикладных проблем. Все более расширяющаяся индустриализация страны создавала соответствующую атмосферу для таких событий. Это было время, когда публиковались такие мои работы, как «Новый метод приближенных конформных отображений» (A New Method of Approximate Conformal Mapping) и «Новый вариационный метод» (The New Variational Method). Данные исследования были обобщены в книге «Методы аппроксимации в теории высшего анализа» (Approximate methods of Higher Analysis), которую я написал вместе с В.И. Крыловым (1936 г.). К тому времени я был уже полноправным профессором, подтвержденным в этом научном звании в 1934 г.; в 1935 г., когда в СССР была восстановлена система научных степеней, я получил степень доктора физико-математических наук. В то время я работал в Ленинградском университете и в Институте проектирования промышленных сооружений.

Тридцатые годы были временем интенсивного развития теории функционального анализа, который стал одной из фундаментальных частей современной математики. Мои собственные усилия в этой области в основном были сконцентрированы на новых исследованиях. К ним относилось, в частности, систематизированное изучение функциональных пространств упорядочением, заданным для некоторых пар элементов. Оказалось, что данная теория частично упорядоченных пространств была очень плодотворной и приблизительно в то же самое время развивалась в США, Японии и Нидерландах. По этим вопросам я контактировал с Дж. фон Нейманом, Г. Биркхофом, А.В. Такером, М. Фрече и другими математиками, с которыми встретился на Московском технологическом конгрессе (1935 г.). Одна из моих статей по функциональным уравнениям была опубликована в журнале *Acta Mathematica* по приглашению, присланному мне Т. Карлсманом. В 1950 г. я и мои коллеги. Б.З. Вулих и А.Г. Пинскер издали «Функциональный анализ в полуупорядоченных пространствах» (Functional Analysis in Semioordered Spaces) – первую публикацию по результатам наших исследований в этой области.

В те дни мои теоретические и прикладные исследования не были связаны между собой. Но позднее, особенно в послевоенный период, я попытался соединить их и показать широкие возможности применения идей



функционального анализа в численной математике. Об этом и была моя статья, само название которой «Функциональный анализ и прикладная математика» (Functional Analysis and applied mathematics) казалось в то время парадоксальным. В 1949 г. эта работа была представлена на соискание Государственной премии и позже включена в книгу «Функциональный анализ в нормированных пространствах» (Functional analysis in normed spaces), написанную вместе с Г.П. Акиловым (1959 г.)

Тридцатые годы также были важны для меня тем, что я начал первые исследования в области экономики. Отправная точка их была довольно случайной. В 1938 г. я, будучи профессором университета, консультировал сотрудников лаборатории треста, выпускающего фанеру, по очень узкой специализированной проблеме. С экономической точки зрения это была проблема распределения некоторого первоначального сырья, целью которого была максимизация производительности оборудования при некоторых ограничениях. Математически эта проблема касалась максимизации линейной функции на выпуклом полиноме (convex polytope). Обычная общеизвестная рекомендация расчета, заключающаяся в сравнении значений функции в вершинах полинома (polytope vertices), теряла силу, так как число вершин было чрезвычайно большим даже для очень простых задач.

Однако этот случай оказался довольно типичным. Я нашел много различных экономических проблем с такой же математической формой: распределение работы оборудования, лучшее использование посевных площадей, рациональное сокращение количества материалов, использование сложных ресурсов, распределение транспортных потоков<sup>84</sup>. Вместе все это было достаточной причиной, чтобы попытаться найти эффективный метод решения. Такой метод был найден под влиянием идей функционального анализа и получил название «метода множителей для нахождения решения» (method of resolving multipliers).

В 1939 г. типография Ленинградского университета напечатала мою брошюру под названием «Математические методы организации и планирования производства» (The Mathematical Method of Production Planning

---

<sup>84</sup> До меня эту проблему сформулировал А. Толстой (1930 г.). Он дал приблизительный метод ее решения. Позже она была сформулирована Ф. Хичкоком.

and Organization), которая была посвящена формулированию базисных экономических проблем, их математической форме, краткому обзору метода решения и первому обсуждению его экономического смысла. В сущности, эта брошюра содержала данные идеи относительно теории и алгоритмов линейного программирования, многие годы эта работа оставалась неизвестной западным исследователям. Позже Тьяллинг Купманс, Джордж Дарвин и другие ученые получили подобные результаты, – более того, своим собственным методом. Но их результаты оставались скрытыми для меня до середины 1950-х годов.

Широкие горизонты применения этих работ я выявил на ранней стадии исследований. Работа могла продвигаться в трех направлениях.

1. Дальнейшее развитие методов решения таких экстремальных проблем и их обобщенного применения, использование данных методов для деления на классы.

2. Математическое обобщение этих задач, например нелинейные проблемы, проблемы в функциональных пространствах, применение указанных методов к решению экстремальных задач в математике, механике и технических науках.

3. Перенос метода описания и анализа с отдельной экономической проблемы на общие системы, с их применением для решения вопросов планирования на уровне промышленности, региональной, общенациональной экономики, а также для анализа структуры экономических показателей.

Определенная работа проводилась по первым двум пунктам (результаты исследований были опубликованы по частям – сразу и после окончания войны), но последнее направление было для меня наиболее привлекательным. Надеюсь, что причины этого интереса достаточно объяснены в моей нобелевской лекции.

Мои исследования были прерваны войной. Во время войны я работал в должности профессора в Высшей школе военно-морских инженеров. Но даже тогда находил время для продолжения деятельности в области экономики. Именно тогда была написана первая версия моей книги. Вернувшись в Ленинград в 1944 г. я стал работать в университете и в Матема-

тическом институте Академии наук СССР, возглавляя отдел приближенных методов. В то время я заинтересовался также вычислительными проблемами, получил некоторые результаты в области автоматизации программирования и создания компьютера.

Мои экономические исследования тоже имели некоторый прогресс. Особенно хочу упомянуть работу, выполненную проектировщиком В.А. Зальфаллером под моим руководством в 1948–1950 гг. на Ленинградском вагоностроительном заводе. Здесь оптимальное использование стальных листов было рассчитано методами линейного программирования, что позволило сэкономить сырьевой материал. В изданной в 1951 г. совместной книге суммирован наш опыт и дано систематизированное объяснение алгоритмов, включая объединение линейного программирования с идеей динамического программирования (независимо от Р. Беллмана).

В середине 1950-х годов интерес к усовершенствованию управления экономикой в СССР значительно возрос и условия для изучения применения математических методов и компьютеров для решения общих проблем экономики и ее планирования стали более благоприятными. В это время я сделал ряд сообщений и публикаций и подготовил к изданию упомянутую выше книгу. Она вышла в свет в 1959 г. под названием «Наилучшее использование экономических ресурсов» (*The Best Use of Economic resources*) и содержала подробное описание оптимального подхода к таким центральным проблемам экономики, как планирование, оценка, величина арендной платы, эффективность запасов, проблемы хозрасчета (*hoz-gaschet*) и децентрализации принятия решений. Именно тогда я вошел в контакт с иностранными учеными, работающими в этой области. Конкретным результатом такого общения благодаря инициативе Тьялинга Купманса стала моя брошюра от 1939 г., изданная в журнале «Наука управления» (*Management Science*), а чуть позже (1959 г.) переведена на другие языки.

Некоторые из советских экономистов встретили новые методы сдержанно. Но я обязан упомянуть специальную конференцию по математическим методам в экономике и планировании, проведенную Академией наук. Участниками конференции были некоторые видные советские математики

и экономисты. Новое научное направление было одобрено. К этому времени мы уже имели некоторый положительный опыт его применения.

Данная область привлекла множество молодых талантливых ученых и позволила организовать подготовку «гибридных» специалистов (математиков-экономистов), начатую в Ленинграде, Москве и некоторых других городах. Стоит также отметить, что в недавно организованном Сибирском отделении Академии наук были созданы особенно благоприятные условия для развития новых научных направлений. Появилась специальная Лаборатория по применению математики в экономике, возглавляемая В.С. Немчиновым и мной. Костяк этой лаборатории составили специалисты, относящиеся к ленинградской и московской школам. В Академгородке лаборатория вошла в Институт математики в качестве его филиала.

Я был избран членом-корреспондентом Академии в 1958 г. и в 1960 г. прибыл в Новосибирск. Из моей группы в Новосибирске вышел ряд талантливых математиков и экономистов.

Несмотря на непрерывные дискуссии и определенный критический анализ, данное научное направление получало все большее признание со стороны как научного сообщества, так и государственных органов. Знаком этого признания стала Ленинская премия, которая была присуждена мне в 1965 г.

В настоящее время я возглавляю научно-исследовательскую лабораторию в Институте управления народным хозяйством. В Москве, где высокопоставленные руководители знакомятся с новыми методами контроля и управления, я работаю как консультант различных государственных органов.

В 1938 г. я женился. Моя жена Наталья – врач. У нас двое взрослых детей (сын и дочь), которые трудятся в области математической экономики.

Членство: Академия наук СССР, член-корреспондент (1958), академик (1964), Эконометрическое общество (действительный член общества, 1972), Венгерская Академия наук (1967), Американская Академия искусств и наук, Бостон (1969).

Почетные награды: Орден «Знак почета» (1944), Орден Трудового Красного Знамени (1949, 1950, 1975), орден Ленина (1967), Государственная премия (1949), Ленинская премия (1965) – вместе с В.В. Новожиловым и В.С. Немчиновым.

Почетный доктор: университеты Глазго, Гренобля, Ниццы, Хельсинки, Парижа (Сорбонна) и др.

Л.В. Канторович скончался 7 апреля 1986 г.

## МАТЕМАТИКА В ЭКОНОМИКЕ: ДОСТИЖЕНИЯ, ТРУДНОСТИ, ПЕРСПЕКТИВЫ<sup>85</sup>

*Лекция памяти Альфреда Нобеля, прочитанная Леонидом Канторовичем  
11 декабря 1975 г.*

Я глубоко взволнован той высокой честью, которая выпала на мою долю, и счастлив предоставленной мне возможностью выступить перед вами в качестве участника этого почетного цикла лекций.

В настоящее время математика так прочно, широко и разнообразно вошла в экономику, с выбранной темой связан столь обширный круг проблем и фактов, что попытка изложить такую тему в одной лекции невольно заставляет вспомнить популярный в нашей стране афоризм Козьмы Пруткова «Нельзя объять необъятное». Уместность этого мудрого выражения не снижается тем обстоятельством, что глубокий мыслитель представлен под псевдонимом.

Итак, я хочу ограничить свое выступление темами, которые мне ближе всего главным образом моделями оптимизации и их применением в управлении экономикой с целью наилучшего использования ресурсов для получения наилучших результатов. Я остановлюсь в основном на проблемах и практике плановой экономики, особенно советской. Конечно, в этих рамках я смогу рассмотреть лишь некоторые проблемы.

### **I. Особенности рассматриваемых проблем**

Прежде чем обсуждать методы и результаты их применения, думаю, полезно сказать о специфике наших проблем. Они характерны для советской экономики, и многие появились уже после Октябрьской революции. Тогда впервые в истории, все главные средства производства стали всенародной собственностью, возникла потребность в централизованном и еди-

---

<sup>85</sup> Канторович, Л.В. Лекция памяти Альфреда Нобеля, прочитанная 11 декабря 1975 г. / Л.В. Канторович // Лауреаты Нобелевской премии по экономике / РАН, С.-Петербург. науч. центр ; науч. ред. В.В. Окрепилов. – Санкт-Петербург, 2007. – Т. 1 : 1969–1982. – С. 211–221.

ном управлении экономикой огромной страны. И эти задачи надо было решать в очень сложных социальных условиях.

1. Прежде всего была изменена главная цель экономической науки. Появилась необходимость перехода от изучения и наблюдения происходящих экономических процессов и единичных политических воздействий на эти процессы к систематизированному управлению, общему и единому планированию, исходящему из общих целей и охватывающему длительную перспективу. Планирование должно быть детализировано так, чтобы в него были включены конкретные задания отдельным предприятиям на конкретные сроки со взаимным согласованием этого гигантского множества решений.

Ясно, что проблема планирования такого масштаба возникла впервые, так что ее решение не могло быть основано на существующих опыте и экономической теории.

2. Экономическая наука должна не только выдать заключения по общим экономическим проблемам народного хозяйства в целом, но и создать базу для принятия решений относительно отдельных предприятий и проектов. При этом требуются надлежащие информация и методология, чтобы обеспечить принятие решений в соответствии с общими целями и интересами народного хозяйства. Наконец, это должны быть не общие качественные рекомендации, а конкретные количественные и достаточно точные методы, обеспечивающие объективный выбор экономических решений.

3. Наряду с материальными потоками и фондами в капиталистической экономике изучаются и непосредственно наблюдаются такие важные экономические показатели, как цены, ренты, арендные платы, процентные ставки с их статическими и динамическими особенностями. Стало ясно, что в условиях последовательного планирования хозяйства необходимо использовать показатели, характеризующие аналогичные аспекты социалистической экономики. Их нельзя получить эмпирическим путем, они издавались как нормативы. Проблема их расчета и вычисления, однако, не ограничивается только техническими аспектами расчетов и статистики. Важно, что в новых социально-экономических условиях подобные показа-

тели приобрели совсем другой смысл и значение: возник ряд проблем относительно их природы, роли и структуры. Например, было неясно и требовало открытого обсуждения: должна ли существовать земельная рента в обществе, где земля является всенародной, имеет ли право на существование такой показатель, как процент капитала.

4. Предыдущие проблемы проявляются еще в одной особенности плановой экономики. Очевидно, что экономика такого масштаба и такой сложности не может быть полностью централизованной, как говорят, «до последнего гвоздя», и значительная часть решений должна быть передана более низким уровням управления. При этом решения, принимаемые на разных уровнях и в разных местах, должны быть согласованы между собой материальными балансовыми и следовать основным народнохозяйственным целям. Задача заключается в построении системы информации, отчетности экономических показателей и стимулов, которые разрешают местным органам управления оценить преимущества тех или иных решений с точки зрения хозяйства в целом. Другими словами, для того чтобы сделать решения, выгодные для них, решениями, выгодными для системы, необходимо иметь возможность проверить законность деятельности органов местной власти также с точки зрения экономики.

5. Новые проблемы управления экономикой и новые методы поднимают вопрос о наиболее эффективных структурных формах организации управления. Неоднократно осуществляющие изменения этих форм связаны как со стремлением к совершенствованию управления, так и с изменениями непосредственно в самом хозяйстве, увеличением его масштабов, усложнением взаимосвязей, появлением новых возможностей и требований. Проблема получения наиболее эффективной структуры управления имеет также научный аспект, но в этом отношении она еще продвинута недостаточно.

6. Некоторые сложные проблемы экономического управления были связаны с современным развитием экономики, так называемой научно-технической революцией. Я имею в виду проблемы прогнозирования и управления в условиях быстрой смены продукции и технологии, изменений соотношений различных отраслей в структуре национальной эконо-



мики: проблемы оценки технических нововведений и общего эффекта технического прогресса; проблемы экологии, связанные с коренными изменениями окружающей природы под влиянием человеческой деятельности, перспективами истощения природных ресурсов; прогнозирование социальных изменений и учет их влияния на экономку; изменения, связанные с внедрением современной электронно-вычислительной техники, средств связи, оргтехники и т.д.

Большинство этих проблем наблюдается и в странах с капиталистической экономикой, но в социалистическом хозяйстве они имеют свои трудности и особенности. До этого не существовало ни опыта, ни достаточной теоретической основы для решения этих трудных проблем.

Экономическая теория Карла Маркса стала методологической основой вновь созданной советской экономической науки и новой системы управления. Множество важных и фундаментальных утверждений его теории относительно общих экономических ситуаций оказалось применимым непосредственно к социалистическому хозяйству. Однако практическое использование идей Маркса нуждалось в серьезном теоретическом исследовании. Не было никакого практического опыта хозяйствования в новых условиях.

Указанные проблемы решались фактически государственными органами и руководителями экономических подразделений. Это были первые годы существования государства в трудных условиях Гражданской войны, опустошения, а затем послевоенного восстановления. Тем не менее, удалось создать достаточно эффективный экономический механизм. Не имея возможности останавливаться на этом подробно, я хотел бы указать на то, что система органов планирования была создана по инициативе основателя нашего государства В.И. Ленина, а также на введение по его же инициативе системы экономического учета (хозрасчет), которая задала определенную финансовую форму балансирования и контроля деятельности отдельных хозяйственных единиц.

Свидетельством высокой эффективности данного механизма являются значительные сдвиги в усовершенствовании хозяйства, успешное решение проблемы индустриализации, проблемы экономического обеспе-

чения обороноспособности страны до и во время Второй мировой войны, а также в период послевоенного восстановления и в последующие годы.

Деятельность планово-экономических органов успешно развивалась и изменялась в зависимости от возникающих проблем. Обобщение этого опыта стало началом задела экономической теории плановой социалистической экономики.

В то же самое время в нашей стране неоднократно обращалось внимание на необходимость дальнейшего совершенствования механизма управления, на некоторые факты неиспользования ресурсов, неполную реализацию потенциальных преимуществ плановой системы хозяйствования. Было очевидно, что все эти усовершенствования потребовали разработок новых идей и новых средств. Все эти задачи привели к естественной идее о более широком использовании внедрения количественных математических методов.

## **II. Новые методы**

Первые попытки использовать математику в советских экономических исследованиях были сделаны в 1920-х годах. Позвольте назвать хорошо известные модели спроса Н. Слуцкого и А. Конюса, первые модели экономического роста, разработанные Г. Фельдманом, анализ баланса «шахматный стол», проведенный в Центральном статистическом управлении, который позднее был развит математически и экономически с использованием данных В. Леонтьева по материалам экономики США, попытку Л. Юшкова определить эффективную норму капиталовложений, получившую глубокое развитие в работах В. Новожилова. Эти исследования имели общие особенности с математическим направлением в западной экономической науке, развившейся в то же самое время и представленной в работах Р. Харрода, Э. Домара, Ф. Рамсея, Л. Уальда, Дж. фон Неймана, Дж. Хикса и др.

Здесь я хотел бы говорить главным образом об оптимизационных моделях, которые появились в нашей стране в конце 1930-х годов (а позже независимо от нас – в США). В определенном смысле эти модели оказа-

лись наиболее подходящими для рассмотрения проблем, которые я перечислил.

Оптимизационный подход представляет здесь вопрос первостепенной важности. Рассмотрение экономики как единой системы, управляемой единой администрацией и подчиненной единой цели, позволило использовать эффективную систематизацию огромного информационного материала, провести его глубокий анализ для принятия имеющего силу решения. Интересно, что многие выводы остаются в силе даже в случаях, когда единую цель не удается явно сформулировать либо по причине, что она была не совсем понятна, либо что состояла из множества целей, каждую из которых нужно принимать во внимание.

До сих пор широко используется главным образом многопрофильная линейная оптимизационная модель. Я полагаю, что она получила не меньше распространения в экономике, чем, например, лагранжевы уравнения движения в механике.

Я не вижу никакой необходимости подробно описывать эту известную модель, которая базируется на описании экономической системы в виде ряда главных способов производства (или действий – термин профессора Т. Купманса), причем каждый способ характеризуется использованием или производством тех или иных товаров (или ресурсов). Хорошо известно, что выбор оптимальной программы, т.е. набора интенсивностей этих действий при заданных ресурсах и плановом ограничении, сводится к максимизации линейной функции многих переменных, удовлетворяющих некоторым линейным ограничениям.

Это явление так часто описывалось, что может считаться хорошо известным. Более важно показать те особенности модели, которые определили такое широкое и разнообразное ее применение. Я назвал бы следующие свойства.

*Универсальность и гибкость.* Структура модели позволяет разнообразные формы ее применения, так как она может описывать различные реальные ситуации в совершенно разных отраслях экономики и при различных уровнях управления. Можно рассматривать последовательности мо-

делей, в которых необходимые условия и ограничения вводятся постепенно, пока не будет достигнута требуемая точность описания.

В более сложных случаях гипотезы линейности в значительной степени противоречат специфическим задачам, и необходимо принимать во внимание нелинейность затрат и выпусков, неделимость решений или неопределенность информации. Здесь линейная модель становится хорошим «элементарным блоком» и отправным пунктом для обобщений.

*Простота.* Несмотря на универсальность и достаточно высокую точность, линейная модель линейного программирования элементарна с точки зрения ее средств, которые соответствуют применяемым в линейной алгебре. Поэтому ее могут понять и применить на практике даже люди с очень скромной математической подготовкой. Последнее обстоятельство очень важно для творческого и нерутинного использования аналитических средств, которые задаются моделью.

*Эффективная исчисляемость.* Безотлагательность решения экстремальных линейных задач подразумевает применение специальных, весьма эффективных методов, разработанных и в СССР (метод последовательных усовершенствований, метод нахождения решения с помощью множителей), и в США (известный симплекс-метод Дж. Данинга), а также детально разработанного теоретического обоснования этих методов. Алгоритмическая структура таких методов позволила позже описать соответствующие компьютерные коды, и в настоящее время современные варианты методов на современных компьютерах позволяют быстро решать проблемы с сотнями и тысячами ограничений, десятками и сотнями тысяч переменных.

*Качественный анализ, показатели.* Наряду с оптимальным плановым решением модель представляет ценное средство качественного анализа конкретных задач и проблемы в целом. Такая возможность задается системой числовых показателей активности и факторов ограничения, которые находятся одновременно с оптимальным решением и в соответствии с ним. Профессор Купманс назвал их теньевыми ценами, я же ввел термин «разрешающие множители» (resolving multipliers), поскольку они, подобно множителю Лагранжа, использовались как вспомогательное средство для нахождения оптимального решения. Однако вскоре было осознано их эко-

номическое и аналитическое значение, и они были названы в экономической литературе объективно обусловленными оценками (российская версия дает аббревиатуру о.о.о.). Эти показатели имеют смысл определяемых внутренне (в данной задаче) индексов стоимости товаров и эквивалентности фактора, свойственных для данной проблемы и показывающих как товары и факторы могут взаимозаменяться при переходе из одного экстремального состояния в другое. Таким образом, эти оценки показывают объективный путь к определению расчетных цен и других экономических показателей, а также анализ их структуры.

*Согласование средств с проблемами.* Хотя отдельные фирмы и даже государственные учреждения капиталистических стран успешно используют модели такого типа, все же по духу они наиболее соответствуют проблемам социалистической экономики. Свидетельством эффективности является их успешное применение в ряде конкретных задач экономики и исследования операций. Они применяются в решении таких крупномасштабных задач, как перспективное планирование некоторых отраслей советской экономики, территориальное размещение сельскохозяйственного производства.

Сейчас мы обсуждаем проблемы, связанные с комплексами модели, включая модель перспективного планирования народного хозяйства в целом. Исследования этих проблем проводятся в крупных специальных научно-исследовательских институтах – Центральном экономико-математическом институте в Москве (директор – академик Н. Федоренко), а также Институте экономики и организации промышленного производства в Новосибирске (директор – академик А. Аганбегян).

Необходимо указать также на современное состояние оптимального планирования и математических методов в теоретических исследованиях советской экономической науки. Линейная модель оказалась хорошим средством самого простого логического описания задач планового управления и экономического анализа. Основанный на ней анализ дал возможность существенно продвинуть проблемы ценообразования, например подтвердить базисные фонды учета в производственных ценах, принципов учета использования природных ресурсов, дать подход к количественному

учету фактора времени в инвестициях. Отметим, что модель, описывающая простой экономический показатель, имеет иногда довольно сложную математическую форму (в качестве примера можно упомянуть здесь модель использования запасов оборудования, из которой была получена структура амортизационных отчислений).

Проблема, которую необходимо выделить особо, – это принятие децентрализованных решений. Анализ комплекса модели с двумя уровнями приводит нас к выводу о принципиальной возможности значительной децентрализации принятия решений с соблюдением общих интересов комплекса за счет правильного формирования оценок в локальных моделях. Здесь мы должны отметить блестящую математическую формализацию идеи декомпозиции, проведенную Дж. Данингом и Ф. Вольфом. Значение замечательной статьи 1960 г. выходит далеко за рамки предложенного алгоритма и его математического обоснования. Статья активно обсуждалась во всем мире и особенно в нашей стране.

Вместе с анализом затрат – выпуск и моделями оптимизации как результата деятельности огромного сообщества ученых, экономические теории и практика получили в свое пользование такие аналитические инструменты, как статистика и стохастическое программирование, оптимальное управление, методы моделирования, анализ спроса, социально-экономическая наука и т.д.

Подводя итоги, можно сказать, что почти за 15-летний период интенсивного развития и распространения методов линейного программирования мы достигли существенных результатов.

### **III. Трудности**

Уровень развития, и особенно уровень применения экономической теории, может вызвать, однако, чувство неудовлетворенности. Отдельные проблемы не были решены. Многие виды применения носят эпизодический характер и не были объединены в систему. В наиболее сложных и перспективных проблемах, таких как народнохозяйственное планирование, до сих пор не найдены эффективные и вообще приемлемые формы реализации. Отношение к этим методам, как и ко многим другим новше-

ствам, иногда вызывает скептицизм и сопротивление, часто смещаемые энтузиазмом и преувеличенными надеждами, а затем снова – некоторым разочарованием и неудовлетворенностью.

Конечно, можно говорить, что результаты исследований, полученные за такой короткий период, не слишком плохие. Мы можем сослаться на более длительное время неприятия многих технических новшеств в физике или механике, где часть теоретических моделей не была признана, несмотря на двухсотлетний период их применения на практике. В то же время мы предпочитаем упомянуть некоторые конкретные проблемы, чтобы разъяснить главные трудности и их причины и наметить пути их преодоления. Трудности возникают как из-за специфических особенностей цели исследований, так и из-за ошибок в их исследованиях и их практической реализации.

С экономической точки зрения это трудный объект для формального описания ввиду его сложности и характерных особенностей. Любая модель подчеркивает лишь некоторые из его аспектов, очень грубо и приближенно учитывает реальную экономическую ситуацию, поэтому, как правило, трудно оценить оправданность ее описаний и достоверность полученных выводов.

В результате, несмотря на вышеупомянутую универсальность модели и ее обобщений, обычный подход при моделировании часто оказывается неэффективным. Разработка каждой серьезной модели и ее практическое применение требуют кропотливого научного исследования, объединенных усилий экономистов, математиков и специалистов в каждой конкретной области. Но даже в случае успеха широкое внедрение модели требует нескольких лет, особенно для целей ее испытания и совершенствования практических рекомендаций.

Особенно важно проверить влияние на полученный результат различия между моделью и действительностью, а также откорректировать непосредственно результат или саму модель. Этот аспект не всегда учитывается и осуществляется.

Значительные трудности в реализации модели вызывают получение, а часто и организация необходимых информационных данных, которые во

многих случаях имеют значительные погрешности, а иногда вообще отсутствуют, так как никто раньше в них не нуждался. Принципиальные сложности связаны с данными для будущего прогнозирования и оценками вариантов развития производства.

Численные методы оптимального решения также имеют свои трудности. Несмотря на имеющиеся эффективные алгоритмы и коды, применяемые на практике, линейные программы не слишком просты, так как очень громоздки. Трудности значительно возрастают, если мы имеем дело не с линейной моделью, а с любым из ее обобщений.

Мы уже говорили, что теоретически в модели линейной программирования существуют полное соответствие и гармония между оптимальным планом и показателями оценки и стимулов, основанных на объективно определенных оценках (о.о.о.). Однако реальные решения и деятельность местных органов оцениваются не по теоретическим показателям, а по фактическим ценам и характеристикам, которые не так просто изменить. Даже если одна отрасль или один регион примут свои, нужные им, показатели, скажется несоответствие в сложных областях. Более того, различные области экономической системы с трудом поддаются математическому описанию и не всегда имеют четкие количественные характеристики. Промышленное производство описывается лучше, чем предпочтения спроса и потребления. В то же время в широком изложении задачи оптимизации плана существует, естественно, тенденция не только к наименьшим затратам и использованию производственных ресурсов, но и к тому, чтобы продукция была оптимальной для потребителей. Это условие затрудняет правильный выбор целевой функции.

Безусловно, ситуация небезнадежна. Например, можно использовать идею экстремального состояния, т.е. состояния, которое нельзя улучшить всесторонним и достаточно содержательным «эффективным решением» (efficient decision), по терминологии А. Вальда. В таком случае возможно компромиссное совмещение нескольких критериев или, если быть менее строгими, решить производственную часть задачи методами оптимизации, а потребительскую – традиционными методами экспертизы. Можно попы-



таться использовать эконометрические методы. Такое множество означает, что проблема очень далека от разрешения.

При планировании идея децентрализации должна сочетаться с установившейся практикой согласования планов автономных частей общей экономической системы. Здесь можно использовать условное разделение системы путем фиксирования величин потоков и параметров, передаваемых от одной части к другой. Можно использовать идею последовательного перерасчета закреплённых параметров, которая была успешно разработана многими авторами для схемы Данинга–Вольфа и для составных линейных моделей.

Решение недавно возникших экономических проблем и, в особенности, проблем, связанных с научно-технической революцией, часто не может быть основано на существующих методах, а требует новых идей и подходов. Одной из таких проблем является проблема охраны природной среды. Проблема оценки экономической эффективности технических новшеств и степени их внедрения не может быть решена только на основе долгосрочной оценки прямых последствий и результатов без учета особенностей новой промышленной технологии, ее общего вклада в технический прогресс.

Методы учета, основанные на математических моделях, автоматизация расчетов и обработки информации представляют лишь часть механизма управления, другая часть – это структура управления. Поэтому успех управления зависит от того, в какой степени и как в системе гарантируется возможность и персональная заинтересованность в правильной и полной информации, в надлежащей реализации полученных решений. Создание такой заинтересованности и системы контроля этих действий – нелегкая задача. Более того, при достижении реального распространения новых методов важно, чтобы их изучали и осваивали лица, работающие в области планирования и экономики. Необходимо реорганизовать эту систему, преодолеть известный психологический барьер, заменить установившуюся в течение многих лет практику на новые методы управления

Для этой цели мы имеем образовательную систему, которая ознакомит плановых работников, вплоть до высших руководящих кадров, с но-

выми методами управления. Реорганизация учета обычно объединяется с внедрением информационно-вычислительных систем. Ясно, что такая перестройка методов работы и сознания – дело непростое и требующее много времени.

#### **IV. Перспективы**

Несмотря на указанные трудности, я оптимистично смотрю на перспективы широкого распространения математических методов, особенно методов, оптимизационных в управлении экономикой на всех уровнях. Эти методы могут дать нам существенное повышение планирования, обеспечить лучшее использование ресурсов, рост национального дохода и жизненного уровня за счет него.

Трудности моделирования и создания необходимой информации могут быть преодолены подобно тем, которые были устранены в естественных и технических науках. Моя надежда зиждется на развитии все более и более интенсивного потока исследований по развитию новых методов и алгоритмов в этой области; на фактическом появлении принципиально новых теоретических подходов и постановке задач: на последовательности конкретных анализов некоторых общих и отраслевых проблем на том факте, что целая армия талантливых молодых исследователей работает сейчас в этой области.

Значительный прогресс в настоящее время наблюдается в развитии вычислительной техники и методов программирования.

Математики-экономисты и менеджеры-практики достигли лучшего взаимопонимания.

Благоприятные условия для работы в этой области обеспечены хорошо известными важными объяснениями методов управления и их усовершенствования, сделанными в последние годы нашими органами власти.

#### ***Комментарий***

Канторович Леонид Витальевич (1912–1986) – советский математик и экономист, лауреат Нобелевской премии по экономике 1975 г. «за вклад

в теорию оптимального распределения ресурсов» (совместно с Тьяллингом Ч. Купмансом).

Использование математики в советской централизованной экономике было предпринято в 20-х годах XX в. Наиболее значительные результаты, полученные в те годы, это модели спроса Е. Слуцкого и А. Конюса, модели экономического роста Г. Фельдмана, анализ баланса типа «шахматный стол», проведенный в Центральном статистическом управлении и в 30-х годах математически и экономически развитый В.П. Леонтьевым при создании модели баланса экономики США. Попытка Л. Юшкова определить эффективную норму капиталовложений получила продолжение и практическое значение в работах В.В. Новожилова. Эти исследования напрямую пересекались с математическим направлением в западной экономической науке, которое было представлено в трудах Р. Харрода, Э. Домьяра, Ф. Рамсея, Л. Вальда, Дж Хикса и особенно Дж фон Неймана, в фундаментальном труде которого «Модель общего экономического равновесия» (1932 г.) впервые сформулирована динамическая модель линейного программирования.

Л.В. Канторович проявил интерес к естественным наукам еще до того, как в 1926 г. в возрасте четырнадцати лет поступил в Ленинградский государственный университет. Его научная деятельность, начатая на втором курсе, охватывала абстрактные области математики. Самым важным результатом, полученным в те годы, было исследование аналитических операций, связанных с проективными множествами. Данная работа была представлена на Первом Всесоюзном математическом конгрессе в Харькове в 1930 г.

Закончив в этом же году учебу, Леонид Витальевич остается работать в Ленинградском университете и наряду с преподавательской деятельностью начинает свои исследования в области прикладных проблем. Им были опубликованы такие работы, как «Новый метод приближенных конформных отображений» и «Новый вариационный метод», обобщенные в книге «Методы аппроксимации в теории высшего анализа», написанной вместе с В.И. Крыловым (1936 г.). К 1934 г. он становится самым молодым профессором университета, а годом позже получает степень доктора наук.

В это время интенсивно развивалась одна из фундаментальных частей современной математики – теория функционального анализа. В этом направлении Л.В. Канторовичем было проведено систематизированное исследование функциональных пространств с упорядочением, заданным для некоторых пар элементов. Оказалось, что теория частично упорядоченных пространств в то же самое время плодотворно развивалась в США, Нидерландах и Японии. По этим вопросам молодой математик контактировал с Дж. фон Нейманом, Г. Биркгоффом, А. Таккером, М. Фречем и другими математиками, с которыми встретился на Московском топологическом конгрессе в 1935 г. Одна из его статей по функциональным уравнениям была опубликована в журнале «Acta Mathematica». Таким образом, свой путь в большой науке Л.В. Канторович начинал как способный математик, подающий большие надежды. Подтверждением этому служат его книги «Функциональный анализ в полуупорядоченных пространствах» (совместно с Б.З. Вулихом и Л.Г. Пинскером, 1950 г.), «Функциональный анализ в нормированных пространствах» (совместно с Г.П. Акиловым, 1959 г.).

В 30-е годы, в период интенсивного индустриального развития Советского Союза, Л.В. Канторович, будучи в авангарде математических исследований, приступил к решению конкретных производственных задач. В 1938 г., когда он работал по совместительству консультантом в лаборатории треста, выпускающего фанеру, перед ним была поставлена задача распределения некоторого сырья таким образом, чтобы максимизировать выпуск продукции при некоторых ограничениях. Математически это была проблема максимизации линейной функции на выпуклом многограннике. Естественная, казалось бы, рекомендация такого расчета, заключающаяся в сравнении значений функции в вершинах многогранника, не может быть реализована, так как число вершин чрезвычайно велико даже для простых задач. Поэтому под влиянием идей функционального анализа Л.В. Канторович предложил эффективный метод решения этой проблемы, получивший название «метод разрешающих множителей». Идея метода заключалась в ведении новых переменных («разрешающих множителей») каждому из факторов производства. При этом оказалось, что значения искомым переменных выпускаемой продукции могут быть легко определе-

ны, если известны значения «разрешающих множителей», которые в экономической интерпретации представляют собой предельные стоимости (или «внутренние цены») ограничивающих факторов производства.

В 1939 г. в издательстве Ленинградского университета вышла монография «Математические методы организации и планирования производства», посвященная формулированию базисных экономических проблем, математической форме их описания, предлагаемому методу решения и первому обсуждению его экономического смысла. В сущности, эта работа содержит главные идеи теории линейного программирования. К сожалению, она многие годы оставалась неизвестной западным ученым. Примерно через десять лет Тьяллинг Купманс, Джордж Данинг и другие ученые получили аналогичные результаты своими собственными способами.

Статья Л.В. Канторовича «О перемещении масс» (1942 г.) явилась начальным этапом его следующей работы – «Применение математических методов в вопросах анализа грузопотоков», написанной совместно с М.К. Гавуриным в 1949 г. В ней в завершенном виде представлена теория транспортной проблемы, включая связь между прямой и двойственной задачами, использование графов транспортной сети, а также обобщение для задач с ограниченными пропускными способностями дорог.

В 1951 г. Л.В. Канторович вместе с В.Л. Залгаллером опубликовал монографию «Расчет рационального раскроя промышленных материалов», а в 1959 г. – фундаментальный труд «Экономический расчет наилучшего использования ресурсов», в котором закреплены основы оптимального распределения ресурсов. Кроме того, монография включала подробное описание оптимизационного подхода к таким глобальным проблемам экономики, как планирование, учет, оценка, величина арендной платы, эффективность запасов, хозяйственный расчет, децентрализация принятия решений. Именно в это время Канторович вошел в контакт с иностранными учеными, работающими в данной области. Как результат такого общения, благодаря инициативе Т. Купманса книга от 1939 г. была издана на английском языке в журнале «Management Science», а после, в 1959 г., переведена и на другие языки. В 1972 г. вышел в свет еще один его основной труд «Оптимальные решения в экономике».

Л.В. Канторович – первый, кто обнаружил, что широкий класс важнейших производственных, транспортных и других экономических и управленческих задач поддается четкой математической формулировке, позволяющей решать их численными методами. Он строго сформулировал понятие экономического оптимума, разработал метод решения линейных оптимизационных задач и определил оптимальные объективно обусловленные оценки («теневые цены» в формулировке западных ученых экономистов).

Л.В. Канторович, являясь основоположником линейного программирования, описал модель, основанную на представлении экономики в виде ряда главных видов производства (или действия – термин Т. Купманса), причем каждый вид характеризуется использованием и производством товаров и ресурсов. Отсюда выбор оптимальной программы, т.е. набора интенсивностей этих действий при заданных ресурсах, требует максимизации линейной функции многих переменных, удовлетворяющих некоторым линейным ограничениям. В случае нелинейных затрат и выпусков, неопределенности исходных данных, линейная модель может служить «начальным приближением» и отправным пунктом для обобщений. В целом же линейная оптимизация обладает следующими уникальными свойствами: универсальностью и гибкостью, простотой, директивным поиском оптимального плана, качественным анализом показателей, широким спектром применения. Линейная модель доказала, что она служит эффективным средством простого логического описания проблем планирования, управления и экономического анализа.

Некоторые из советских экономистов очень сдержанно приняли новые методы. Однако экономико-математические методы привлекли множество молодых талантливых ученых. В начале 60-х годов в Ленинграде, Москве и некоторых других городах была организована подготовка экономистов-математиков, которая продолжается и сегодня. В Сибирском отделении Академии наук СССР была создана специальная Лаборатория по применению математики в экономике, возглавляемая В.С. Немчиновым и Л.В. Канторовичем. В Москве организован Экономико-математический институт Академии наук. Несмотря на непрерывные дискуссии и критику, экономико-математическое направление получало все большее признание

со стороны научного сообщества, государственных органов и практических работников. Л.В. Канторович был награжден многочисленными правительственными наградами, в том числе Государственной премией (1949 г.), Ленинской премией (1965 г., вместе с В.С. Немчиновым и В.В. Новожиловым), орденом Ленина (1967 г.). С 1976 г. он стал директором Института системных исследований АН СССР. Ему присуждены почетные степени доктора университетов Глазго, Гренобля, Ниццы, Хельсинки, Парижа (Сорбонна). Он был академиком АН СССР (1964 г.), действительным членом Эконометрического общества (1972 г.), Американской академии наук и искусств (Бостон, 1969 г.).

Трудно переоценить возможности оптимизационных моделей при принятии управленческих решений. Представление экономики как большой и сложной системы, подлежащей управлению для достижения поставленной цели, позволяет, используя современные информационные технологии, обрабатывать огромные объемы информации и провести глубокий анализ для принятия оптимальных решений.

Экономико-математические методы, в частности линейное программирование, широко применяются в военном деле, промышленности, энергетике и других областях народного хозяйства. Например, в промышленности линейное программирование используется при решении следующих трех групп проблем. Во-первых, оно обеспечивает новую количественную точку зрения на технологические процессы, во-вторых, оно стимулирует исследования по количественному и качественному анализу структур промышленных систем, в-третьих, оно является эффективным инструментом производственного, коммерческого и финансового управления в части нахождения оптимальных решений.

Происходящее бурное развитие аппаратных средств и программного обеспечения компьютеров открывает перспективы широкого распространения математических методов, особенно методов оптимизации, в экономической науке и на всех уровнях управления обществом, в том числе и в России. Эти методы позволяют существенно улучшить планирование деятельности, обеспечить рациональное использование ресурсов, рост национального дохода и жизненного уровня.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Вступительная статья</b> .....	3
<b>ФИЗИКА</b> .....	5
<b>Игорь Евгеньевич Тамм (1895–1971)</b> .....	6
Биография .....	7
Речь на торжественном обеде. <i>10 декабря 1958 г.</i> .....	9
Общие свойства излучения, испускаемого системами, движущимися со сверхсветовыми скоростями, и некоторые приложения к физике плазмы. <i>Нобелевская лекция, 11 декабря 1958 г.</i> .....	11
<b>Илья Михайлович Франк (1908–1990)</b> .....	26
Биография .....	27
Оптика источников света, движущихся в преломляющих средах. <i>Нобелевская лекция, 11 декабря 1958 г.</i> .....	29
<b>Павел Алексеевич Черенков (1904–1990)</b> .....	58
Биография .....	59
Излучение частиц сверхсветовой скорости и некоторые возможности применения этого излучения в экспериментальной физике. <i>Нобелевская лекция, 11 декабря 1958 г.</i> .....	61
<b>Лев Давидович Ландау (1908–1968)</b> .....	76
Биография .....	77
Вступительная речь члена Шведской Королевской академии наук профессора И. Валлера. <i>10 декабря 1962 г.</i> .....	79
Речь посла СССР Н. Белохвостикова на торжественном обеде. <i>10 декабря 1962 г.</i> .....	82
<b>Николай Геннадьевич Басов (1922–2001)</b> .....	84
Биография .....	85
Речь на торжественном обеде <i>10 декабря 1964 г.</i> .....	90
Полупроводниковые квантовые генераторы. <i>Нобелевская лекция, 11 декабря 1964 г.</i> .....	91
<b>Александр Михайлович Прохоров (1916–2002)</b> .....	110
Биография .....	111
Квантовая электроника. <i>Нобелевская лекция, 11 декабря 1964 г.</i> .....	114



<b>Петр Леонидович Капица (1894–1984)</b> .....	122
Биография .....	123
Речь на торжественном обеде. <i>10 декабря 1978 г.</i> .....	129
Плазма и управляемая термоядерная реакция. <i>Нобелевская лекция, 8 декабря 1978 г.</i> .....	130
<b>Жорес Иванович Алферов (1930–2019)</b> .....	150
Автобиография .....	151
Речь на торжественном обеде. <i>10 декабря 2000 г.</i> .....	162
Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии. <i>Нобелевская лекция.</i> <i>Стокгольм, 10 декабря 2000 г.</i> .....	164
<b>Алексей Алексеевич Абрикосов (1928–2017)</b> .....	208
Биография .....	209
Сверхпроводники второго рода и вихревая решетка. <i>Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2003 г.</i> .....	212
<b>Виталий Лазаревич Гинзбург (1916–2009)</b> .....	226
Биография .....	227
О сверхпроводимости и сверхтекучести (что мне удалось сделать, а что не удалось), а также о «физическом минимуме» на начало XXI века. <i>Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2003 г.</i> .....	228
<b>Андрей Константинович Гейм (1958 г.р.)</b> .....	268
Биография .....	269
Случайные блуждания: непредсказуемый путь к графену. <i>Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2010 г.</i> .....	272
<b>Константин Сергеевич Новосёлов (1974 г.р.)</b> .....	312
Биография .....	313
Графен: материалы Флатландии. <i>Нобелевская лекция.</i> <i>Стокгольм, 8 декабря 2010 г.</i> .....	316
<b>ФИЗИОЛОГИЯ И МЕДИЦИНА</b> .....	351
<b>Иван Петрович Павлов (1849–1936)</b> .....	352
Биография .....	353
Физиология пищеварения. <i>Нобелевская лекция, 12 декабря 1904 г.</i> .....	358
<b>Илья Ильич Мечников (1845–1916)</b> .....	378
Биография .....	379
Настоящее состояние проблемы иммунитета при инфекционных заболеваниях. <i>Нобелевская лекция, 11 декабря 1908 г.</i> .....	383

<b>ХИМИЯ</b> .....	405
<b>Николай Николаевич Семенов (1896–1986)</b> .....	406
Биография .....	407
Речь на торжественном обеде. <i>10 декабря 1956 г.</i> .....	409
О некоторых проблемах цепных реакций и теории горения. <i>Нобелевская лекция, 11 декабря 1956 г.</i> .....	410
<b>ЭКОНОМИКА</b> .....	445
<b>Леонид Витальевич Канторович (1912–1986)</b> .....	446
Биография .....	447
Автобиография .....	451
Математика в экономике: достижения, трудности, перспективы. <i>Лекция памяти Альфреда Нобеля, прочитанная     Леонидом Канторовичем 11 декабря 1975 г.</i> .....	458

*Научное издание*

**ЛАУРЕАТЫ  
НОБЕЛЕВСКОЙ  
ПРЕМИИ**

**РОССИЙСКИЕ И СОВЕТСКИЕ УЧЕНЫЕ,  
ИЗМЕНИВШИЕ МИРОВУЮ НАУКУ**

Сборник материалов

Корректурa: Л.П. Котенко  
Компьютерная вёрстка: В.С. Берегова

Выпускающий редактор: Л.П. Котенко

Подписано в печать 11.03.2020. Формат 60×90/16  
Гарнитура Times New Roman. Усл. п. л. 30,0. Тираж 100 экз. Заказ 56  
Оригинал-макет подготовлен и тиражирован в ИД «БелГУ» НИУ «БелГУ»  
308015 г. Белгород, ул. Победы, 85. Тел.: 30-14-48