

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЙ  
ЛИТЕРАТУРЫ

ФИЗИКА

НАУКУ —  
ВСЕМ!



МОСКВА

или

КАК

М. Е. Перельман

# ФИЗИКИ ВЫЯВЛЯЮТ ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ



НАБЛЮДЕНИЯ И ОЗАРЕНИЯ

ОТ КВАНТА

ДО ТЕМНОЙ МАТЕРИИ



URSS

**М. Е. Перельман**

**НАБЛЮДЕНИЯ  
И ОЗАРЕНИЯ,  
или  
КАК ФИЗИКИ  
ВЫЯВЛЯЮТ  
ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ**

**От кванта  
до темной материи**



**URSS  
МОСКВА**

**Перельман Марк Ефимович**

**Наблюдения и озарения, или Как физики выявляют законы природы:**

**От кванта до темной материи.** — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ»,  
2012 — 248 с (НАУКУ — ВСЕМ! Шедевры научно-популярной литературы.)

Все мы знакомы с открытиями, ставшими заметными вехами на пути понимания человеком законов окружающего мира: начиная с догадки Архимеда о величине силы, действующей на погруженное в жидкость тело, и заканчивая новейшими теориями скрытых размерностей пространства-времени

Но как были сделаны эти открытия? Почему именно в свое время? Почему именно теми, кого мы сейчас считаем первооткрывателями? И что делать тому, кто хочет не только понять, как устроено все вокруг, но и узнать, каким путем человечество пришло к современной картине мира? Книга, которую вы держите в руках, поможет прикоснуться к тайне гениальных прозрений.

Рассказы «Наблюдения и озарения, или Как физики выявляют законы природы» написаны человеком равнодушным, любящим и знающим физику, искренне восхищающимся ее красотой. Поэтому книга не просто захватывает — она позволяет почувствовать себя посвященными в великую тайну. Вместе с автором вы будете восхищаться красотой мироздания и удивляться неожиданным озарениям, которые помогли эту красоту раскрыть.

Первая часть книги, «От Аристотеля до Николы Теслы», расскажет о пути развития науки, начиная с утверждения Аристотеля «Природа не терпит пустоты» и эпициклов Птолемея, и до гелиоцентрической системы Коперника и Галилея и великих уравнений Максвелла. Читатель проделает этот огромный путь рука об руку с гениями, жившими задолго до нас.

«От кванта до темной материи» — вторая часть книги. Она рассказывает о вещах, которые мы не можем увидеть, не можем понять с точки зрения обыденной, бытовой логики: о принципе относительности, замедлении времени, квантовании энергии, принципе неопределенности, черных дырах и темной материи. История загадочной, сложной и увлекательной современной физики раскроется перед читателем.

Итак, вперед — совершать открытия вместе с гениями!

Издательство «Книжный дом «ЛИБРОКОМ»»

117335, Москва, Нахимовский пр-т, 56

Формат 60×90/16 Печ л 15,5 Зак. № ПЖ-27

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД»

117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 11А, стр 11.

ISBN 978-5-397-02592-8

© Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011



11086 ID 157681



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

# Содержание

<b>Предисловие: как делаются открытия?</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>Раздел I</b>	
<b>Кванты и относительность: «драма идей» или «тридцатилетняя война против здравого смысла»? . . . . .</b>	<b>10</b>
<b>Глава 1. Концепция квантов . . . . .</b>	<b>10</b>
1. Проблема излучения . . . . .	10
2. Макс Планк . . . . .	11
3. Эйнштейн: теория квантов . . . . .	13
4. Эйнштейн: теплоемкость . . . . .	17
<b>Глава 2. Радиоактивность, атомы, ядра . . . . .</b>	<b>19</b>
1. Открытие . . . . .	19
2. Пьер и Мария Кюри . . . . .	20
3. Проблема определения исторических и природных дат . . . . .	22
4. Эрнест Резерфорд . . . . .	23
5. Нильс Бор . . . . .	26
6. Рентгеноструктурный анализ . . . . .	28
<i>Отступление I. Физика и математика . . . . .</i>	<i>34</i>
<b>Глава 3. Теория относительности: парадигма Эйнштейна . . . . .</b>	<b>39</b>
1. Предыстория . . . . .	39
2. Предшественники . . . . .	41
3. Об истоках мировоззрения Эйнштейна . . . . .	42
4. Порядок исследований Эйнштейна . . . . .	44
5. Специальная теория относительности (сокращенно СТО) . . . . .	49
6. Парадокс близнецов . . . . .	52
7. Соотношение масса — энергия . . . . .	53
8. Ускорители и релятивизм . . . . .	55
9. Черенковское излучение, переходное излучение . . . . .	56



10. Начала общей теории относительности (сокращенно ОТО) . .	58
11. Экспериментальные проверки ОТО . . . . .	61
<i>Отступление II. Научные школы . . . . .</i>	<i>65</i>
<b>Глава 4. Квантовая механика . . . . .</b>	<b>68</b>
1. Первый сольвеевский конгресс . . . . .	68
2. «Старая» квантовая механика . . . . .	69
3. Индуцированное излучение . . . . .	71
4. Спин электрона, квантовые статистики . . . . .	73
5. Луи де Бройль . . . . .	76
6. Вернер Гейзенберг . . . . .	79
7. Эрвин Шредингер . . . . .	82
8. Макс Борн . . . . .	86
9. Поль Дирак . . . . .	88
10. Туннельный эффект . . . . .	91
<b>Глава 5. Сверхпроводимость и сверхтекучесть . . . . .</b>	<b>94</b>
1. Камерлинг-Оннес . . . . .	94
2. Сверхтекучесть: исследования П. Л. Капицы и Л. Д. Ландау . .	96
3. На пути к теории сверхпроводимости . . . . .	99
4. Эффект Купера и теория БКШ . . . . .	100
5. Туннельные контакты и эффекты Джозефсона . . . . .	102
6. Успехи и проблемы . . . . .	104
<b>Раздел II</b>	
<b>Ядро? Элементарно! . . . . .</b>	<b>106</b>
<b>Глава 1. Атомное ядро . . . . .</b>	<b>106</b>
1. Протон . . . . .	106
2. Нейтрон . . . . .	108
3. Космические лучи . . . . .	110
4. Ядерные силы, барионный заряд . . . . .	111
5. Модели атомных ядер . . . . .	114
6. Эффект Мессбауэра . . . . .	117
<b>Глава 2. Ядерные реакции . . . . .</b>	<b>120</b>
1. Типы реакций и выделение энергии . . . . .	120
2. Отто Ган и Лизе Мейтнер . . . . .	123
3. Цепная реакция деления . . . . .	124
4. Ядерные реакторы . . . . .	126
5. Атомная (ядерная) бомба . . . . .	129

<b>Глава 3. Термоядерные реакции</b> . . . . .	<b>132</b>
1. Проблемы астрофизики . . . . .	132
2. Ганс Бете: источники энергии звезд . . . . .	133
3. А. Д. Сахаров: водородная бомба . . . . .	135
4. Управляемые термоядерные реакции . . . . .	139
<b>Глава 4. «Элементарные» частицы</b> . . . . .	<b>141</b>
1. Бета-распад: появление нейтрино . . . . .	142
2. Принципы симметрии и проблемы сохранения четности . . .	145
3. Типы нейтрино и лептонный заряд . . . . .	148
4. Структура нуклонов: «шуба» частиц . . . . .	151
5. Странные частицы . . . . .	153
6. Модель Ферми—Янга . . . . .	156
7. Теория кварков . . . . .	158

### Раздел III

#### Изобретать, чтобы наблюдать:

<b>микроскопы, лазеры, коллайдеры</b> . . . . .	<b>162</b>
---	------------

<b>Глава 1. Эволюция микроскопа</b> . . . . .	<b>162</b>
1. Оптический микроскоп . . . . .	162
2. Фазово-контрастный микроскоп . . . . .	164
3. Ультразвуковой микроскоп . . . . .	165
4. Электронный микроскоп . . . . .	166
5. Электронный и ионный проекторы . . . . .	167
6. Использование туннельного эффекта . . . . .	168
7. Микроскопия ближнего поля . . . . .	169
<b>Глава 2. Изобретение транзистора</b> . . . . .	<b>171</b>
<b>Глава 3. Мазеры и лазеры</b> . . . . .	<b>176</b>
1. Изобретение мазера . . . . .	176
2. Трехуровневая схема . . . . .	178
3. Нелинейная оптика . . . . .	181
<b>Глава 4. Приборы для физики ядра и частиц</b> . . . . .	<b>183</b>
1. Для чего они нужны? . . . . .	183
2. Камера Вильсона . . . . .	184
3. Пузырьковая камера . . . . .	186
4. Ускоритель Кокрофта—Уолтона . . . . .	188

5. Эрнест Лоуренс . . . . .	189
6. Коллайдеры . . . . .	191

## Раздел IV

### За гранью наблюдаемого:

<b>квасичастицы, темная материя и черные дыры . . . . .</b>	<b>193</b>
---	------------

<b>Глава 1. Квантовые поля . . . . .</b>	<b>193</b>
--	------------

1. Вторичное квантование: частицы и квазичастицы . . . . .	193
2. Лэмбовский сдвиг . . . . .	196
3. Квантовая электродинамика . . . . .	197
4. Электрослабое взаимодействие: промежуточные мезоны . . . . .	203
5. Спонтанное нарушение симметрии. Механизм Хиггса . . . . .	206
6. Калибровочные поля: квантовая хромодинамика . . . . .	208
7. Предвидение Эйнштейна . . . . .	211
8. «Квантовая лестница» . . . . .	213

<b>Глава 2. Космология и астрофизика . . . . .</b>	<b>215</b>
--	------------

1. История возникновения . . . . .	215
2. Начало релятивистской космологии: Фридман и Хаббл . . . . .	216
3. Реликтовое излучение . . . . .	219
4. О типах и эволюции звезд . . . . .	221
5. Открытие пульсаров . . . . .	223
6. Черные дыры . . . . .	226
7. Гравитационное излучение . . . . .	229
8. Темная материя (?), темная энергия (??) . . . . .	230
9. Что дальше? . . . . .	231

*Отступление III. Когда и почему*

<i>подростки выбирают физику . . . . .</i>	<b>233</b>
--	------------

<b>Приложение 1. Рейтинги замечательных экспериментов и великих физиков . . . . .</b>	<b>238</b>
---	------------

<b>Приложение 2. Некоторые обозначения . . . . .</b>	<b>241</b>
--	------------

<b>Заключение . . . . .</b>	<b>243</b>
-----------------------------	------------

## Предисловие: как делаются открытия?

Никто, увы, не может объяснить, как делаются открытия или, несколько точнее, как из груды предположений, ясных и совсем неясных или даже ошибочных данных выбираются те, которые помогают выявить (это слово более точно, чем «открыть») закон природы. Наитие, озарение — это ведь только слова...

Не следует ли обратиться к авторам открытий? Они-то могут или должны что-то и как-то объяснить?

И вот что говорят самые великие, авторы многих, не одного и не двух эпохальных открытий.

Альберт Эйнштейн в автобиографии пишет: «Открытие не является делом логического мышления», а в другом месте замечает, что какой-то процесс, по-видимому, происходит в подсознании, без словесного оформления, и затем как-то выскакивает в сознание.

Великий математик, физик и философ Анри Пуанкаре описывает, как он приходил к своим открытиям: «Случаи внезапного озарения, мгновенного завершения длительной подсознательной работы мозга, конечно, поразительны. Роль этой подсознательной деятельности интеллекта в математическом открытии можно считать, по-видимому, бесспорной». Но затем он продолжает: «Внезапное вдохновение никогда не могло бы прийти без многих дней предшествующих целенаправленных усилий, казавшихся в то время совершенно бесплодными и направленными по неправильному пути».

В обыденном сознании мыслитель часто ассоциируется со знаменитым «Мыслителем» Родена. Но говорят, что у глубоко задумавшегося гениального Нильса Бора был в такие моменты вид клинического идиота: полностью расслабленная мускулатура лица, опущенная нижняя челюсть... Так что прототип Родена рассуждает — возможно, он перебирает варианты ответа, но отнюдь не открывает нечто новое.

Но если нечто истинно новое возникает в виде смутной идеи, некоей картинки в подсознании, то скорее всего оно пробьется в сознание в моменты расслабленности, в полудреме или даже во сне. И действительно, именно об этом говорят многие из тех, кто совершал открытия, изобретал. Значит, логика здесь ни при чем, и машины, построенные на основе логических программ, никогда не смогут соперничать с людьми.

Что же делать, если нельзя научить делать открытия?

Нельзя забывать слова великого Т. А. Эдисона: в любом изобретении 99 % тяжелой работы и 1 % вдохновения. Так что нужно работать, тогда может прийти, а может и не прийти вдохновение.

Но можно попытаться восстановить условия, в которых совершенно открытие, и то, **как и почему** тот или иной ученый, изобретатель заинтересовался какой-то проблемой и как он подошел к ее решению. Такие примеры могут послужить, отчасти, путеводной звездой в будущем.

Вот такие примеры автор и попытался собрать в этой книге, отмечая при этом и явления, которые до сих пор не объяснены (может, они интересуют читателя?).

Книга эта не является ни учебником, ни последовательной историей развития физики. Скорее, это история открытий в физике, но в форме изложения для чтения, для всех тех — от школьников, студентов и их преподавателей до психологов и просто людей любознательных, — кто интересуется проблемой открытий. (В этом и отличие ее от многих популярных книг, которые обычно объясняют то, **что** открыто, не затрагивая психологические проблемы работы исследователей.) Поэтому в книге нет формул, а отдельные очерки по возможности сделаны независимыми — читать ее можно почти с любого места.

Преподавательский опыт автора показывает, что рассказ о том, как, каким человеком и почему было сделано то или иное открытие, какие трудности пришлось преодолеть, какие проблемы оно решило, придает некую эмоциональную окраску уроку или лекции — экзамены показывают несравнимо лучшее запоминание и понимание именно этого материала. В нашей книге как раз и собраны подобные рассказы.

Кроме того, автор убежден, что рассказ об эмоционально насыщенных эпизодах легче проникает в подсознание человека (нечто вроде резонанса?), а затем схожая идея может всплыть, уже вне воли индивидуума, во время упорядоченного изучения предмета или даже во время собственных исследований. Но ведь для этого в подсознании уже должны находиться некие примеры! Поэтому представляется, что знание некоторых деталей истории открытий не может быть бесполезным, во всяком случае для будущих ученых. А может, такие рассказы и обратят кое-кого из подростков к занятиям наукой?

В последние годы во многих школьных программах понизился статус естественных наук, в том числе физики, в пользу математики и компьютеров: для чего, мол, запоминать формулировки законов Ар-

химеда или Ома, если их можно в любой момент найти в Интернете. Хотелось бы напомнить организаторам просвещения, что, во-первых, ни одна поисковая система не выдаст вам сведений, если вы сами не знаете, что надо искать, а во-вторых, и это гораздо важнее, суть преподавания, скажем, физики состоит в том, чтобы привить некоторые навыки понимания явлений окружающего мира, показать возможности не формального (как в математике), а реального анализа всего нас окружающего.

Так что еще одна задача книги — показать, насколько физика интересна и увлекательна. Эта книга в некотором смысле продолжает предшествующую книгу автора: «А почему это так?» (Кн. 1: Физика вокруг нас в занимательных беседах, вопросах и ответах. М.: URSS, 2012; Кн. 2: Физика в гостях у других наук (в занимательных беседах, вопросах и ответах). М.: URSS, 2012). Если в ней рассматривались повседневные явления и окружающие нас предметы, показывалась роль и возможности поиска внутреннего смысла разнородных, казалось бы, проявлений законов физики, то здесь мы обращаемся к тому, как наблюдения — возможно разрозненные, а порой и случайные — вели к открытию самых общих законов природы.

**Необходимые пояснения.** 1. Автор писал о тех разделах физики, которые ему в той или иной степени близки и знакомы (поэтому в очень малой степени затронуты физика твердого тела, физика плазмы и т. д.). 2. Опущены вопросы, которые очень сложно изложить без привлечения математики. 3. Список литературы к проводимому изложению мог бы по объему сравниться с самой книгой, но поскольку наше изложение отнюдь не претендует на строгую научность, приведены лишь минимальные ссылки на литературу.

**Об иллюстрациях.** Великий Резерфорд любил повторять: «Все науки являются либо физикой, либо собиранием марок» (*«All science is either physics or stamp collecting»*). А поскольку имеется множество почтовых марок самых разных стран с портретами ученых и даже деталями аппаратуры и формулами, мы поместили некоторые из них здесь, руководствуясь при выборе лишь критериями правдоподобия и качества изображения. Заметим, что в мире найдется более 100 видов марок, посвященных Эйнштейну, причем некоторые из них напечатаны в странах, где вряд ли найдутся знатоки его творчества.

# **Кванты и относительность: «драма идей» или «тридцатилетняя война против здравого смысла»?**

---

## **Глава 1**

### **Концепция квантов**

*От малых причин бывают  
весьма важные последствия.*

Козьма Прутков

#### **1. Проблема излучения**

Изучая соответствие между линиями испускания и поглощения света, Кирхгоф доказал теорему о том, что всякое тело в нагретом состоянии излучает те же частоты, которые поглощает в холодном состоянии.

Тело, которое поглощает все частоты излучения, естественно называть абсолютно черным, тогда, в соответствии с теоремой Кирхгофа, именно абсолютно черное тело должно при нагревании излучать белый свет — без каких-либо выделенных линий, которые могут внести добавочные осложнения. Получить такое черное тело очень не просто: вначале с этой целью использовали зачерненную платину, потом появились специальные конструкции типа шаров с зачерненными изнутри стенками и маленьким отверстием — именно это отверстие и рассматривалось как модель черного тела.

Вскоре Йозеф Стефан (1835—1893) экспериментально, а затем Людвиг Больцман теоретически доказали, что интенсивность излучения черного тела очень быстро растет с его нагреванием — как четвертая степень температуры. Этот закон Стефана—Больцмана может быть выведен при рассмотрении цикла Карно, когда в цилиндрах вместо реального газа сжимается и нагревается некий «газ излучения».

Вильгельм Вин (1864—1928) продолжил аналогию между газом и излучением (но газ этот, подчеркнем, рассматривался как нечто целое) и определил понятие температуры излучения и его энтропии. Тогда сжатие газа излучения в цилиндре рассматривается как отражение от идеальной зеркальной стенки поршня, сжимающего газ. Вин смог показать, что при таком сжатии поднимается температура и растет частота излучения (отношение температуры и средней частоты не меняется — закон смещения Вина, 1896), что подтверждалось экспериментально. Казалось, что аргументы Вина, хотя и очень шаткие, ведут к правильной теории: его распределение хорошо описывало интенсивность высокочастотного излучения.

Но в июне 1900 г. лорд Рэлей показал, в статье всего из двух страниц, что если применить к излучению закон равного распределения энергии по степеням свободы (а на нем зиждется вся статистическая физика) то для зависимости интенсивности излучения от температуры получается формула, совсем не похожая на ту, которую вывел Вин (эти аргументы через несколько лет развил Дж. Джинс, и поэтому формула называется распределением Рэрея—Джинса). Это распределение великолепно описывало интенсивность излучения малых частот, как раз там, где формула Вина не работала.

Джон Уильям Стретт, 3-й лорд Рэлей (1842—1919, Нобелевская премия 1904 г.) — преемник Максвелла на посту директора Кавендишской лаборатории, классик теории колебаний и волн, в частности акустики, установил закон рассеяния света в газе и объяснил голубой цвет неба, открыл газ аргон (совместно с У. Рамзаем), ряд законов магнетизма, изобрел несколько оптических приборов. Его кредо заключалось в словах: «Физика — это измерения», — и потому он добивался все большей точности в опытах.

Ситуация стала парадоксальной: статистическая физика, законы которой, несомненно, правильны, ведет, с одной стороны, к формуле Вина, а с другой — к распределению Рэрея—Джинса, но при этом закон смещения Вина выполняется в обоих случаях. Формула Вина подтверждается на высоких частотах, формула Рэрея — на низких. Эти заключения вытекали из скрупулезных измерений О. Р. Люммера (1860—1925) и Э. Принсгейма (1859—1917), сумевших измерить к 1899 г. излучательную способность «черного» тела в очень широком интервале температур — от 85 до 1800 К.

## 2. Макс Планк

Экспериментаторы, проверившие все это, обратились к Макс Планку, признанному авторитету в термодинамике. Планк понял, что нужно искать некую формулу, такую, которая будет преобразовываться для малых и высоких частот в два уже известных выражения. Исходя из понятия энтропии, он отыскивает — точнее, угадывает — такую





формулу 25 октября 1900 г. Она действительно переходит в формулы Вина и Рэлея, но с какими-то неопределенными коэффициентами. Однако это еще не все: нужно ее доказать, понять каким изменениям в теории она соответствует.

И Планк обращается к статистической теории Больцмана: он начинает рассматривать излучающую среду как состоящую из набора отдельных излучателей, вернее осцилля-

торов (от латинского «осцилляре» — колебаться). И тут он совершает поистине революционный шаг — принимает, что энергия, испускаемая каждым осциллятором, должна быть пропорциональна его частоте. Тогда нужен коэффициент пропорциональности между частотой и энергией, а так как частота измеряется в обратных секундах, то этот

Макс Карл Эрнст Людвиг Планк (1858–1947, Нобелевская премия 1918 г.) — первый физик-теоретик по специальности (до него все физики занимались и экспериментом). Помимо работ по теории квантов, он провел важнейшие исследования в термодинамике, теории относительности (и ввел само это название), вывел законы химического равновесия в газах и разбавленных растворах. С самого начала поддерживал работы Эйнштейна, оставался его старшим товарищем во все времена.

Макс Планк происходил из традиционной прусской семьи военных и священников, один его сын погиб на фронте Первой мировой войны, второй был казнен как участник заговора 1944 г. против Гитлера. Планк был очень религиозен, после 1945 г. он руководил восстановлением науки в Германии.

коэффициент должен измеряться в эргах (или, сейчас, в джоулях), умноженных на секунду, — энергия на время.

Такая величина была введена еще Лейбницем и названа функцией действия, а позднее Лагранж, Гамильтон, Якоби показали, что знания этой функции достаточно для построения всех законов механики.

Но Планку нужна не функция действия, а некоторая постоянная величина, и он принимает, что в процессах излучения роль играет постоянная размерности действия, ее

квант (от латинского «квантум» — количество), и вычисляет величину, обозначаемую с тех пор латинской буквой  $h$ <sup>1</sup> (сейчас чаще используют  $\hbar = h/2\pi$ , т. е. в 6,28 раз меньшую), которая обеспечит точный переход к обоим предельным случаям формулы излучения. Как он писал Планк: «После нескольких недель самой напряженной работы в моей жизни тьма, в которой я барахтался, озарилась молнией, и передо мной открылись неожиданные перспективы».

Свою работу Планк скромно зачитывает 14 декабря 1900 г. тихим профессорским голосом на заседании Немецкого физического

<sup>1</sup> На могиле Планка нет надписи — стоит этот знак и годы рождения и смерти.

общества. Той же ночью Генрих Рубенс (1865–1922) пересчитывает экспериментальные данные и ранним утром радуется Планка — все сходится! Но они еще не понимают, что произошло...

Этот день, 14 декабря 1900 г., физики считают началом нового, XX в. Отсюда начинается научная революция 1900–1930 гг., полностью изменившая не только физику и связанные с ней науки, но и все научное мировоззрение: по известному определению А. Эйнштейна, это была «драма идей» или, по образному выражению Я. Б. Зельдовича, это была тридцатилетняя война против обывательского «здорового смысла»<sup>2</sup>. И при этом, как нужно отметить, сам Планк по натуре своей не был революционером, позже он писал в письме Р. Вуду, что это был с его стороны «акт отчаяния», предпринятый потому, что «теоретическое объяснение должно было быть найдено любой ценой, сколь бы высокой она ни была».

Вывод Планка математически и методологически не был безупречным: и он сам, и другие не раз его пересматривали и улучшали, но главное было уже сделано: в физику, имевшую до того дело только с непрерывными изменениями основных параметров, было введено понятие скачков энергии. (До Планка единственной величиной, которая изменялась скачком, был электрический заряд; открытие электрона показало, что он не может изменяться произвольно.)

Дважды в своей жизни Планк, всегда сдержанный и уравновешенный, выходил из себя: в 1908 г., когда начался многолетний спор с Э. Махом о реальности атомов, и в 1933 г., когда он пытался защитить перед Гитлером своих коллег, изгоняемых из Германии...

Когда М. Планк, тогда начинающий студент, обратился к известному физику Ф. И. фон Жолли (1809–1884) за советом по выбору темы исследований, то маститый профессор сказал: «Молодой человек, поищите себе лучше другое поле деятельности. Физика уже закончена, все интересное, что можно было исследовать, уже открыто». Это был не первый, но и не последний случай, когда физику объявляли завершённой, но конца ее и сегодня не видно.

### 3. Эйнштейн: теория квантов

Оценивая открытие Планка, А. Эйнштейн писал: «Именно закон излучения Планка дал первое точное определение абсолютных величин атомов, независимо от остальных предложений... Это открытие стало основой для всех исследований в физике XX в., и с того времени почти полностью обусловило ее развитие».

<sup>2</sup> Зельдович Я. Б., Хлопов М. Ю. Драма идей в познании природы // Библиотечка «Квант». Вып. 67. М.: Наука, 1988.

Но так до поры до времени думали далеко не все — вплоть до 1905 г. открытие Планка почти не упоминается в научной литературе. И так продолжалось до знаменитой статьи Эйнштейна «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света», появившейся в 1905 г. в том же томе журнала «Анналов физики» (*Annalen der Physik*), что и его статьи о броуновском движении (о ней мы говорили) и о теории относительности. Статья эта была, по мнению самого Эйнштейна, более революционной, чем создание теории относительности, хотя иногда данную работу цитируют только как теорию фотоэффекта.

Для того чтобы понять суть нововведений Эйнштейна, нужно рассказать о некоторых особенностях фотоэффекта. Явление это было обнаружено Г. Герцем в 1887 г., почти одновременно то же самое наблюдали еще несколько ученых, не понявших сути увиденного. (Вообще-то еще в 1839 г. А. С. Беккерель, дед первооткрывателя радиоактивности, заметил, что если на электрод одного из его гальванических элементов падает свет, то электродвижущая сила элемента меняется, однако никто этим явлением тогда не заинтересовался.) Вскоре начались интенсивные исследования фотоэффекта. Так, Александр Григорьевич Столетов (1839—1896) показал, что существует так называемая красная граница — если длина волны света становится больше определенной величины, своей для каждого металла, то эффект пропадает (1889), он же создал первый фотоэлемент, который включал электрическую цепь при попадании на него света. Дж. Дж. Томсон, а затем Ф. Ленард доказали, что фототок состоит из электронов (1899); было также установлено, что энергия этих электронов не зависит от интенсивности света.

Как же Эйнштейн приступает к этой проблеме?

Эйнштейн великолепно понимает, что явления интерференции и дифракции опровергли корпускулярную картину распространения света и утвердили волновую теорию, но, как он пишет, эти эксперименты говорят только о средних величинах. Поэтому не исключено, что волновые представления могут оказаться недостаточными, когда речь идет о мгновенных процессах, об излучении и поглощении света.

В упомянутой выше статье Эйнштейн принимает гипотезу Планка о квантованном испускании света, но идет много дальше: он показывает, что свет не только должен испускаться порциями, квантами, но и поглощаться он должен теми же квантами и распространяться в виде потока квантов. Поэтому Эйнштейн выдвигает такое положение: кванты (фотоны — это название для квантов света предложил в 1929 г. известный физико-химик Г. Н. Льюис (1875—1946))

поглощаются поодиночке, энергия каждого кванта, полученная одним электроном атома, идет на работу выхода электрона из вещества (сейчас эти величины приводятся в таблицах), а ее остаток превращается в кинетическую энергию электрона.

Статья Эйнштейна вызвала яростное сопротивление физиков: говоря о распространении света в виде потока фотонов, он тем самым покушался на уравнения Максвелла, требовавшие волн и только волн, а волна, по самому своему определению, не может быть локализована, т. е. не может сосредоточиться в очень малом объеме — она распространяется по всему пространству! Такой шаг Эйнштейна не сравним по своей дерзости даже с гипотезой Планка, который всего лишь говорил о поглощении порциями, но акт поглощения не описывается, вообще говоря, уравнениями Максвелла, и поэтому всеми допускалось, что там вполне может быть нечто необычное.

Еще в 1913 г., представляя Эйнштейна для избрания в Прусскую академию наук, Планк и другие академики пишут, что на фоне его новаторских достижений не стоит слишком нападать на сомнительную теорию квантов. По иронии судьбы, именно за работу по теории фотоэффекта Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии 1921 г., так как ее результаты были вскоре подтверждены рядом экспериментов,

наиболее значимыми и доказательными из которых были измерения Р. Э. Милликена в процессе определения величины заряда электрона.

Роберт Милликен придумал такой способ определения заряда электрона: в воздушный зазор горизонтально расположенного конденсатора вводилась крохотная заряженная капелька масла и напряжение на обкладках подбиралось так, чтобы капля зависла неподвижно — электрические силы уравновешивали ее вес. Если каплю осветить, то вследствие фотоэффекта ее покинут несколько электронов, электрические силы уменьшатся, и капелька начнет падать. Тогда нужно увеличить напряжение на обкладках, чтобы восстановить равновесие, но это изменение напряжения пропорционально ушедшему заряду, т. е. заряду электрона, умноженному на какое-то целое число. Поэтому, проделав множество таких измерений и найдя общий делитель

Роберт Э. Милликен (1868–1953, Нобелевская премия 1923) изучал в крохотном колледже Оберлин (штат Огайо) классические языки и литературу. Профессор греческого языка попросил его подучить физику, чтобы на следующий год преподавать ее элементарный курс. — «Но я не знаю физики», — говорил Милликен. — «Каждый, кто хорошо усваивает греческий, может преподавать физику», — отвечал профессор. — «Хорошо, — согласился студент, — но за все последствия отвечаете Вы». (Преподавание физики в США было в то время на очень низком уровне, в будущем именно Милликен сыграл большую роль в его модернизации.) Сам он, с помощью А. Майкельсона, смог приступить к исследованиям только в возрасте около 40 лет. Милликен выпустил подробную и живо написанную автобиографию.

Результаты Милликена были приняты отнюдь не без борьбы: в течение чуть ли не 20 лет продолжалась «битва за электрон» между ним и Феликсом Зренгафтом (1879–1952), опытным физиком, дружившим некогда с Эйнштейном. Зренгафт проводил опыты, схожие с экспериментами Милликена, но на малых, коллоидных частицах металлов, которые он заставлял двигаться, добавочно, в горизонтальном электрическом поле, при этом он получал дробные величины заряда электрона и предполагал существование неких «субэлектронов», о которых пытались вспомнить при введении в физику кварков (о них — ниже). Зренгафт сообщал также и об открытии им магнитных монополей. Все это говорит о той осторожности, которая необходима в оценке открытий.

всех результатов, можно определить заряд электрона. При этом, естественно, проверялась и теория Эйнштейна.

С годами спектроскопия фотоэлектронов стала обширной и разветвленной областью физики, ее методы нашли применение от физики твердого тела до астрофизики и биологии. Заметим только, что с появлением мощных лазеров пришлось модифицировать и теорию фотоэффекта (примерно после 1965 г.). Оказалось, что в интенсивном потоке электрон может поглотить несколько

фотонов прежде, чем он покинет атом. Поэтому возникают две новые возможности в физике многофотонных процессов: во-первых, если на атом направить интенсивный поток фотонов с частотой ниже порога, то фотоэффект (ионизация атома) все же может произойти за счет поглощения нескольких фотонов, сложения их энергий; во-вторых, электрон может поглотить много фотонов (в некоторых экспериментах даже сотни) до своего отхода от атома и тогда (это явление

В 1949 г. в сборнике статей, посвященном 70-летию Эйнштейна, Милликен написал: «Я потратил десять лет жизни на проверку уравнения Эйнштейна 1905 г. и вопреки всем ожиданиям был вынужден в 1915 г. недвусмысленно признать его справедливостью, несмотря на то, что оно казалось безрассудным, так как противоречило всему, что было известно об интерференции света».

называется надпороговой ионизацией) можно получить весьма энергичные электроны — на этот эффект возлагаются большие надежды. Ну а помимо того, вся накопленная энергия может излучиться в виде одного кванта (так называемые высшие гармоники излучения).

Окончательно существование фотонов доказал Артур Комптон в очень изящных и кажущихся простыми (после их осуществления!) экспериментах. Он рассматривал рассеяние рентгеновских лучей электронами в таких процессах, в которых, как, скажем, и в столкновении бильярдных шаров, должны сохраняться энергия и импульс. Поэтому если фотон в акте рассеяния передает часть своей энергии электрону, то он должен отдать и соответствующую такой энергии часть импульса. Комптон показал, что при этом меняется длина волны фотонов и скорость электрона, углы разлета фотона и электрона и их импульсы — и все это в полном соответствии с формулами Планка—Эйнштейна.

После опубликования эффекта Комптона сомневаться в существовании фотонов и в справедливости теории Планка—Эйнштейна было уже невозможно.

Артур Холли Комптон (1892–1962, Нобелевская премия 1927 г.) много работал в области исследования космических лучей, в 1942–1945 гг. руководил рядом работ по созданию атомной бомбы.

Но еще более выпуклым стало противоречие: явление интерференции безусловно говорило о том, что свет — это волны, эффект Комптона и фотоэффект — о том, что свет — поток частиц. Как совместить эти свойства, они ведь кажутся совсем разными?

#### 4. Эйнштейн: теплостойкость

Но еще до этого А. Эйнштейн, через год после работы по фотоэффекту, снова вернулся к квантам, на этот раз в физике твердых тел.

Тут уже несколько десятилетий стояла проблема удельной теплостойкости, т. е. количества тепла, необходимого для нагрева единицы массы на один градус. В классической физике каждой степени свободы со времен Больцмана (мы говорили об этом) приписывается одинаковая энергия, пропорциональная температуре, но эксперимент показывал отклонение от этих законов при низких температурах. Эйнштейн решает, что такой подход не совсем правилен: нельзя полностью уравнивать степени свободы, связанные с движением тела в целом и с колебаниями составных частей внутри него (например, внутри молекулы).

Действительно, температура относится к кинетической энергии тел, а частоты внутренних колебаний зависят от структуры молекулы, поэтому можно просто ввести собственные частоты этих колебаний и считать, что они для данного тела постоянны. А как увязать частоту колебаний с энергией? Ну, конечно, с помощью той же постоянной Планка, поскольку именно при таком выборе снова возникает распределение Планка (можно вместо частоты ввести постоянную температуру для каждого тела — она называется температурой Эйнштейна).

Так в физике в третий раз (после излучения черного тела и фотоэффекта) появилась постоянная Планка, но появилась уже в новом качестве — как результат квантования, дискретности энергии, передаваемой от одной частицы тела к другой.

Эта теория Эйнштейна была улучшена П. Дебаем, затем М. Борном и Т. фон Карманом и вылилась в теорию фононов, фактически, с нее началась квантовая теория твердых тел, занимающая сейчас по своему объему большую часть публикаций по физике.

Оказалось, что многие процессы в кристаллах (и не только) можно рассматривать так, как будто вся энергия, полученная ими, состоит

из квантов, распределение по энергии которых определяются формулами Планка, а в выражении для импульса скорость света заменена

Доказать существование фононов прямым опытом, аналогичным опыту Комптона, удалось намного позже. Для этого рассматривалось рассеяние нейтронов внутри кристалла: поскольку нейтрон не имеет электрического заряда, он не взаимодействует с электронами, и только незначительная часть нейтронов проникает так глубоко в атом, чтобы рассеяться на ядрах. Анализ этого рассеяния показал, что для него законы сохранения энергии и импульса выполняются так, как если бы энергия и импульс фонона определялись формулами Планка и Эйнштейна. (Эти эксперименты провели Б. Н. Брокхауз (р. 1918) и К. Г. Шалл (р. 1915), удостоенные Нобелевской премии в 1994 г.)

скоростью звука (отсюда и их название фонон, введенное И. Е. Таммом): дело в том, что частота их колебаний, со скоростью звука, ограничивается расстоянием между соседними атомами кристалла. Они, конечно, не могут существовать вне кристалла, и поэтому их называют квазичастицами. А такие процессы как прохождение зарядов или тепловых волн можно рассматривать как взаимодействие фононов с электронами или друг с другом.

# Радиоактивность, атомы, ядра

## 1. Открытие

Антуан-Анри Беккерель (1852–1908, Нобелевская премия 1903 г.) был физиком в третьем поколении: его дед и отец были членами Французской академии и даже, как позже и он сам, занимали некоторое время должность ее президента. Физиками стали позже его сын и внучка, и все пять поколений исследовали явления люминесценции (от латинского «люмен» — свет, светимость тел, вызываемая различными физическими причинами).

Когда в 1895 г. были открыты рентгеновские лучи, то, поскольку катодные лучи вызывают также люминесценцию катода, покрытого подходящим веществом, можно было предположить, что люминесценция и рентгеновские лучи создаются одним и тем же механизмом. Беккерель решил выяснить, не сопровождается ли, наоборот, люминесценция рентгеновским излучением, поэтому он поместил на фотопластинки, завернутые в плотную черную бумагу, люминесцентный материал, имевшийся у него под рукой — соль урана, и несколько часов держал этот пакет на ярком солнечном свете.

Оказалось, что излучение прошло сквозь бумагу и засветило фотопластинку — вывод был очевидным: соль урана испускает и видимый свет, и рентгеновские лучи после солнечного облучения.

Но вдруг, к удивлению Беккереля, оказалось, что пластинки, на которых лежали соли урана, засвечиваются и без облучения солнечным светом: это обнаружилось случайно — он решил проверить качество пластинок, пролежавших несколько дней в шкафу из-за пасмурной погоды. Следовательно, их засвечивали не рентгеновские лучи, а что-то иное. Беккерель пробовал класть на пластинки и всякие другие вещества — люминесцентные и нелюминесцентные: пластинки засвечивались только при наличии урана и тем сильнее, чем ближе они были к нему (май 1896 г.).

Так была открыта радиоактивность.

Интересно заметить, что совершенно разные явления, радиоактивность и радиосвязь, были открыты почти одновременно и поэтому получили такие близкие названия: оба, как и радиус в геометрии, от латинского «луч».



## 2. Пьер и Мария Кюри



Пьер Кюри (1859—1906) вместе с братом, Жаком Кюри, минералогом по специальности, открыл пьезоэффект, или явление пьезоэлектричества — появление зарядов на гранях некоторых кристаллов при их механическом сжатии или растяжении, и обратный эффект — деформацию кристаллов при их зарядании (пьезоэлементы нашли затем широкое применение в технике звукозаписи). Пьеру

Кюри принадлежит общий принцип выявления симметрии кристаллов при воздействии на них внешних полей, закон Кюри—Вейсса определяет исчезновение ферромагнитных свойств с ростом температуры и т. д.

Мария Склодовская (1867—1934) приезжает из Варшавы в Париж, оканчивает университет, где учится у Беккереля, выходит в 1895 г. замуж за Пьера Кюри и приступает в его лаборатории к исследованиям радиоактивных минералов. Начинает она с солей урана, радиоактивность которых установил Беккерель, и в 1897 г. доказывает, что это

Работа по исследованию радиоактивности солей урана была очень тяжелой физически (и опасной для здоровья, о чем еще не было известно): нужно было переработать вручную тонны урановой руды (ранее она использовалась только в производстве красок), для того, чтобы последовательными химическими реакциями выделить нужные компоненты — вначале только уран и торий, который также оказался радиоактивным.

свойство связано именно с атомами урана, а не с типом химического соединения, в которое входит уран.

И тут выяснилось, что некоторые части пустой, т. е. очищенной от урана и тория породы все же радиоактивны. Пришлось предположить, что эта порода содержит еще какие-то, возможно, новые ра-

диоактивные элементы. К работе подключился и Пьер Кюри, и в 1898 г. они открывают два новых элемента — полоний (по латинскому названию Польши) и радий (он примерно в миллион раз активней урана), а также явление наведенной радиоактивности атомов других веществ, находящихся вблизи источников этого излучения. Соль радия испускала голубоватое свечение и тепло. Это фантастически выглядевшее вещество привлекло к себе внимание всего мира.

Пьер Кюри сосредотачивается на исследовании физических параметров излучения, Мария Кюри — на химических свойствах веществ.

Радиоактивное излучение пространственно изотропно, т. е. одинаково распространяется во все стороны. Как же его исследовать? Поместив небольшое количество радия в толстый и длинный металлический

стакан, стенки которого поглощают излучение, они таким образом получают источник направленного радиоактивного излучения.

Оказалось, что это излучение разделяется в магнитном поле на три части. (Одновременно с ними этот эффект установил Э. Резерфорд и назвал эти три вида излучения по первым трем буквам греческого алфавита: альфа, бета и гамма, но до сих пор в учебниках приводится рисунок этих трех видов лучей, взятый из диссертации М. Кюри 1903 г.) Из них альфа-лучи положительно заряжены, а если их собрать в пробирку, то там, как выяснилось позже, появляется газ гелий, т. е. альфа-лучи — это поток ядер гелия; бета-лучи, их проще анализировать, — это поток электронов, гамма-лучи — это высокочастотное электромагнитное излучение.

Далее Пьер Кюри научился посылать потоки этих лучей в калориметр, который они нагревают, и таким образом возможно измерить энергию излучения. А однажды он надолго забыл в жилетном кармашке ампулу с микрограммом радия: под этим местом появилась язвочка — следовательно, радиоактивность биологически активна, а может быть, эта особенность пригодится в медицине?

К 1902 г. Мария Кюри получила несколько дециграммов чистой соли радия, а в 1910 — уже металлический радий. В 1903 г. супруги Кюри удостоиваются, вместе с А. Беккерелем, Нобелевской премии по физике за открытие радиоактивности, в 1911 Марии Кюри присуждается Нобелевская премия по химии за получение металлического радия. (Пьер Кюри трагически погиб в 1906 г. — на него налетела выскочившая из-за поворота телега с ломовой лошастью, его кафедра была передана Марии Кюри и она стала первой женщиной — профессором Сорбонны.) Отметим, что в своей Нобелевской лекции Пьер Кюри указал на потенциальную опасность, которую представляют радиоактивные вещества, попади они не в те руки, и добавил, что «принадлежит к числу тех, кто вместе с Нобелем считает, что новые открытия принесут человечеству больше бед, чем добра». Заметим также, что супруги Кюри решительно отказались от патентов и от перспектив коммерческого использования радия: по их убеждению, это противоречило бы духу науки — свободному обмену знаниями.

Мария Кюри до конца жизни продолжала интенсивную научную работу: было изучено множество радиоактивных веществ, создана аппаратура и методики таких исследований, впервые были опробованы применения радиоактивности в медицине и т. д. Умерла она от лейкемии — это следствие радиационного заражения в ходе ее исследований.

### 3. Проблема определения исторических и природных дат

Одна из очень привлекательных сторон физики состоит в том, что ее достижения оказываются вдруг решающими в исследовании совершенно иных проблем. Одной из таких проблем является точное датирование исторических и геологических событий, а также изменений климата на протяжении веков или тысячелетий и даже геологических эпох.

Помимо анализа письменных источников, сравнения находок в разных раскопках, использования стратиграфии, т. е. анализа относительного расположения слоев с теми или иными находками, археологи и палеоклиматологи уже давно используют методы дендрохронологии — в стволе многих пород деревьев ясно различимы ежегодные слои, по толщине которых можно судить о погодных условиях, а нахождение, к примеру, вулканической пыли в них позволяет увязать эти слои с известными датами извержений вулканов и т. д. (напомним, что возраст некоторых сейквой в Северной Америке превышает 4 тыс. лет). Аналогичный метод применим и к анализу ежегодных отложений слоев осадков на дне некоторых озер. Для более древних дат все большую популярность приобретает анализ слоев карбонатов, откладываемых в колониях кораллов: он, в частности, позволяет даже оценить количество дней в году в прошлом (в некоторых кораллах различимы ежедневные слои), т. е. замедление скорости вращения Земли — оказывается, в середине Девона продолжительность года была порядка 400 дней.

Все эти методы дают лишь относительную датировку, их нужно увязать с абсолютными значениями дат. Эту задачу решил радиохимик Уиллард Ф. Либби (1908–1980, Нобелевская премия по химии, 1960).

История, приведшая к этому открытию, началась с того, что в 1939 г. Серж Корф из университета Нью-Йорка обнаружил, что космические лучи вызывают в верхних слоях атмосферы поток нейтронов, которые легко поглощаются азотом, превращая его в радиоактивный изотоп углерод-14 ( $C-14$ ).

Далее, как сообщил Либби, такой углерод окисляется, а получившийся углекислый газ поглощается в процессе фотосинтеза растениями. Если предположить, что этот процесс идет с постоянной скоростью, то все живые организмы в процессе фотосинтеза или при поедании растений получают изотоп  $C-14$ . Тем самым, в них при жизни, несмотря на распад, поддерживается постоянный уровень этого изотопа, который, однако, начинает падать с прекращением его поглощения после смерти.

Период полураспада  $C-14$  равен 5730 годам, и Либби заключил, что «должна существовать возможность путем измерения оставшейся радиоактивности измерять время, которое прошло с момента смерти, если она произошла в период от 500 до 30 тыс. лет тому назад».

Либби проверил точность этого метода, измерив радиоактивность образцов красного дерева и пихты — их точный возраст был установлен подсчетом годовых колец. Он также проанализировал кусок дерева от погребальной лодки египетского фараона, кусочки льняной ткани, которыми были перевязаны манускрипты, найденные в районе Мертвого моря, хлеб из дома в Помпеях, погребенный под вулканическим пеплом в 79 г. н. э. и другие предметы, возраст которых был уже известен. При этом он получил блестящее подтверждение своей теории, и изобретенный им метод датирования стал широко применяться в археологии<sup>3</sup>. Сам Либби смог определить возраст древесного угля со стоянки древних людей в Стоунхендже (Англия) и кочерыжки курузного початка из пещеры в Нью-Мехико, т. е. определил время формирования соответствующих культур, а также установил, что последний ледниковый период в Северной Америке окончился 10 тыс. лет назад, а не 25 тыс., как было ранее подсчитано геологами и т. д.

Вскоре для гораздо более древних периодов были развиты методы, основанные для длительностей других распадов: калий-аргоновый, урановый и т. д. Так возникла новая область исследований: абсолютная или изотопная геохронология. И конечно, новые методы ведут к новым открытиям и заставляют пересмотреть многие устоявшиеся догмы и представления.

Уже давно в литературе, особенно популярной, обсуждается проблема гибели динозавров — страшной катастрофы, постигшей некогда Землю. Однако, как показал Марк Михайлович Рубинштейн (1915–1978), гибель динозавров и смена их млекопитающими вовсе не должна была быть мгновенной — она могла тянуться достаточно долго, соответствуя скорости эволюции, просто палеонтологи привыкли датировать слои по находкам останков животных и поэтому все слои с динозаврами относили к одному и тому же периоду — радиоактивные же методы разносят их по времени.

## 4. Эрнест Резерфорд

*Опыт без фантазии может дать немного.*

Э. Резерфорд

Как все же иногда случается, Эрнест Резерфорд (1871–1937, Нобелевская премия по химии 1908) словно предчувствовал свои будущие открытия или, точнее, ему удалось осуществить именно свои представления

<sup>3</sup> Время от времени появляются «революционные» пересмотры всей исторической хронологии. Последней по времени стала не признаваемая другими учеными попытка известного математика А. Т. Фоменко пересмотреть мировую историю (в сторону сокращения примерно вдвое ее длительности) на основе исправленной им датировки солнечных затмений и без учета методов физики.



о мире: еще студентом второго курса Кентербери-колледжа в Новой Зеландии он выступил на семинаре с докладом «Эволюция элементов». Он тогда уже думал, что атомы химических элементов должны представлять собой сложные системы, состоящие из одних и тех же элементарных частиц, хотя еще не бы-

ло практически никаких оснований думать о сложном строении атома и тем более — сравнивать атомы разных веществ (гипотеза Праута начала XIX в. о том, что все атомы построены из атомов водорода, была опровергнута и прочно забыта).

В 1895 г. Резерфорд приезжает в Англию, в Кавендишскую лабораторию, к самому Джи-Джи Томсону. Первое, по-видимому, его открытие, заброшенное из-за переезда, — это создание приемника электромагнитных волн, фактически, осуществление радиосвязи (раньше Попова и Маркони). Но в лаборатории у Томсона Резерфорд понимает: идут более фундаментальные разработки, — и поэтому он без сожаления, без публикаций, отказывается от всего, сделанного ранее, чтобы заняться проблемами строения вещества.

Он помогает Дж. Дж. Томсону в его исследованиях электрона, но затем полностью сосредотачивается на изучении радиоактивности. Первое же фундаментальное открытие Резерфорда в этой области — обнаружение неоднородности излучения, испускаемого ураном — сделало его имя известным в научном мире; благодаря ему в науку вошло понятие об альфа- и бета-излучениях, исследована их природа, введено понятие времени полураспада радиоактивных атомов.

В 1902–1903 гг. совместно с Фредериком Содди (1877–1956, Нобелевская премия по химии 1921) Резерфорд разработал теорию радиоактивного распада. Затем он изучает рассеяние альфа-частиц на атомах, строит их теорию, и альфа-частицы становятся его любимым орудием исследований.

Позже, в 1919 г. Резерфорд осуществляет вековую мечту алхимиков о трансмутации — превращении одного элемента в другой, правда, не свинца в золото, а азота в кислород, но важен был сам принцип — превращения элементов возможны.

Первым прибором, который использовался тогда в исследованиях излучений, был спинтарископ (от греческого «спинтер» — искра) Крукса — это коробочка, верх которой закрыт стеклом, а на дно нанесено вещество-сцинтиллятор, дающий вспышку при ударе альфа-

частиц, так что наблюдателю необходимо сидеть рядом и считать число вспышек за определенное время.

Вторым прибором стал счетчик Гейгера, разработанный Резерфордом и Хансом Вильгельмом Гейгером (1882—1945) к 1908 г. Он представляет собой металлическую трубку, по оси которой проходит тонкая нить, изолированная от корпуса, на корпус и нить подается электрическое напряжение, которое несколько меньше пробойного. Ток в цепи не идет, но как только через трубку проскочит заряженная частица, она ионизует на своем пути воздух, и по этому каналу начнет проходить ток — загорится лампочка, зазвенит звонок или т. п.

Со счетчиками Гейгера работать в то время было еще нелегко и поэтому часто пользовались методом сцинтилляций, считали вспышки. И вот однажды, в 1911 г., в ходе эксперимента по подсчету числа альфа-частиц, рассеянных в тонкой металлической фольге, студент-новозеландец Эрнест Марсден (1889—1970) расположил, возможно по ошибке, несколько таких счетчиков сзади мишени. Они, конечно, должны были молчать, но давали вспышки — редко, очень редко, одна-две на десять тысяч, но вспыхивали!

Но ведь этого не может быть — не может альфа-частица отлететь назад при ударе о пудинг или кисель, каковыми, согласно Томсону, должны быть атомы!

Резерфорд думал о результатах эксперимента по рассеянию альфа-частиц на металлических фольгах неустанно, но ничего не приходило в голову: «Это было самым невероятным событием в моей жизни. Оно было столь же невероятным, как если бы 15-дюймовый снаряд, выпущенный в кусок папиросной бумаги, отскочил от нее и ударил бы в стреляющего».

К тому времени он обзавелся новинкой, первым, как говорят, мотоциклом в Манчестере, и полюбил носиться на нем по окрестностям. (Пэр Британского королевства, получивший титул барона Нельсон оф Кембридж, к тому времени уже лауреат Нобелевской премии, он не забывал своего пастушеского детства на ферме в Новой Зеландии и так и не смог привыкнуть к великосветским манерам.) И вот как-то раз мотоцикл сломался на пустынной дороге, и Резерфорду пришлось заночевать в поле в стогу сена.

Он дремал, поглядывал на звезды, и тут перед ним возник образ: атом как Солнечная система — в середине ядро вместо Солнца, а вокруг крутятся электроны как планеты. Такая модель не могла быть принята современниками<sup>4</sup> — она противоречила теории электромагнетизма Максвелла, согласно которой любой заряд, движущийся с ускорением, в частности вращающийся, должен излучать волны

<sup>4</sup> Вообще говоря, схожие идеи выдвигали Хантаро Нагаока в 1904 г., Дж. Стони в 1906 г. и др., но как чисто умозрительные соображения, и все они с негодованием отвергались.

и терять на это энергию. Значит — в случае движения по окружности — падать на центр за одну миллиардную долю секунды. Но Резерфорд ее упрямо отстаивал (сотрудники называли его за упрямство, своеобразное чувство юмора и громогласность Крокодилом): атом почти пустой — ядро в 10 тыс. раз меньше атома в целом, а электроны крутятся вокруг него!

## 5. Нильс Бор

*Это высшая музыкальность в области мысли.*

А. Эйнштейн

В том же году к Резерфорду приехал на стажировку молодой датский физик Нильс Хендрик Давид Бор (1885–1962, Нобелевская премия 1922). Вся лаборатория быстро убедилась в том, что ни к каким приборам его и близко подпускать нельзя — ломались самые, казалось, проч-



ные установки (он некогда входил в сборную Дании по футболу, и когда в 1922 г. в Стокгольме ему была вручена премия, одна датская газета написала, что «известному футболисту Нильсу Бору» присуждена Нобелевская премия). Резерфорд со вздохом разрешил ему сидеть за столом и только думать — теоретиков он недолюбливал, да и профессия такая еще как-то официально не отделилась.

Бор думал медленно, но упорно и все равно ничего не получалось: ведь по электродинамике Максвелла, гениального и неоспоримого, всякий заряд, когда его ускоряют, должен излучать электромагнитные волны, по-

степенно терять энергию и замедляться, падать на ядро — такой атом заведомо неустойчив. Единственное, по сути дела, что уже установлено, но только подбором экспериментальных данных без теоретического обоснования — это комбинационный принцип Ридберга—Ритца: частоты излучений атомов (точнее всего, атома водорода) можно представить в виде серий, а все они являются разностью двух каких-то величин.

А в атоме Резерфорда электроны, если они крутятся вокруг ядра, должны все время испытывать ускорение (по Первому закону Ньютона, тело может двигаться без ускорения только по прямой линии).

Значит, кто-то не прав — или божественные Ньютон и Максвелл, или сам уже знаменитый Резерфорд!

И Бор испрашивает отпуск — он решил жениться и отправиться в свадебное путешествие в Южную Америку с красавицей Маргарет. (Она сохраняла красоту и какое-то особое благородство осанки даже в 70 лет, когда они посетили СССР.)

И вот с корабля Бор телеграфирует Резерфорду: решение найдено! Необходимо принять новые аксиомы: вообще говоря, все правы, но есть исключения — если электрон крутится вокруг ядра по определенным, только по строго определенным (стационарным) орбитам, то он ничего не излучает, т. е. к движению по этим орбитам законы Максвелла не применимы. А вот при переходе с орбиты на орбиту он излучает, переходя вниз, или поглощает при переходе вверх, но только определенную, согласно Планку, энергию. Вот так! (Насколько я знаю, это было единственное свадебное путешествие, внесшее такой вклад в науку!)

Это новая парадигма, новые аксиомы (1913), но Бор не только объясняет, вводя их, опыты Резерфорда, он объясняет, и притом точно, местоположения бесконечных (их путаницу называли зоологией) спектральных линий водорода — вспомните рассказ о Бальмере<sup>5</sup>, выводит те цифры, которые Бальмер нашел простым подбором, объясняет появление и других серий линий в спектре водорода, принцип Ридберга—Ритца и т. д. И всюду при этом присутствует постоянная Планка: без нее, на основе только величин заряда и массы электрона и скорости света, нельзя образовать те численные величины, которые нужны теории (подчеркнем, что соображения размерностей и простоты всегда играют существенную эвристическую роль в теории).

Фактическое подтверждение теории Бора (это, правда, не сразу поняли) дало определение точного местоположения электронных уровней, которое установили в 1912–1914 гг. Джеймс Франк (1882–1964) и Густав Людвиг Герц (1887–1975, племянник Г. Герца, в 1945–1956 гг. жил и работал в г. Сухуми). Они исследовали столкновения электронов с атомами и показали, при каких энергиях возбуждается, а потом излучает электрон на определенной боровской орбите, тем самым

В подростковом возрасте Н. Бор часто присутствует на обсуждениях философии Серена Кьеркегора (1813–1855), которые его отец, профессор-физиолог, ведет дома с коллегами. В своих романах и философских эссе Кьеркегор резко полемизирует с Гегелем, с его идеями спирального развития, много говорит о прерывности, о роли скачков в истории и в природе. И именно Бор ввел скачкообразность в ранее как бы гладко протекающие физические процессы. (Позднее Бор отмечал и влияние Б. Спинозы.)

<sup>5</sup> См.: Перельман М. Е. Наблюдения и озарения, или Как физики выявляют законы природы; От Аристотеля до Николы Теслы. М.: URSS, 2012 (далее: Перельман М. Е. От Аристотеля до Николы Теслы). Раздел III. Глава 1.



они доказали и справедливость соотношения Планка между энергией и частотой кванта (Нобелевская премия 1925 г.).

Как странную теорию Бора восприняли в мире? Наиболее авторитетный англичанин, лорд Рэлей, заявил, что пожилые люди не должны вмешиваться и мешать молодым в их фантазиях — все равно перестраиваться уже невозможно. Ну а молодые? Отто Штерн (1888–1969, Нобелевская премия 1943 г.) вспоминал в старости, что он и Макс фон Лауэ, тоже будущий нобелевский лауреат, ранее первым приехавший к Эйнштейну и поддержавший теорию относительности, поклялись друг другу в 1914 г., что они откажутся от занятий физикой, «если в этой боровской бессмыслице что-то есть»; оба, к счастью, обещания не сдержали...

Эйнштейн, с которым Бор познакомился в 1920 г., писал о нем Эренфесту: «Это необычайно чуткий ребенок, который расхаживает по этому миру как под гипнозом». Он, однако, сразу же принял и одобрил подход Бора (позже Эйнштейн как-то обронил, что схожие идеи и ему приходили в голову, но он был полностью занят разработкой общей теории относительности).

Нильс Бор обладал необычайной способностью генерировать новые научные идеи и обсуждать идеи своих учеников. Поэтому Копенгаген стал «столицей атомной физики» и Меккой для исследователей атома из всех стран. При этом, как писал его ученик К. Ф. фон Вайцзеккер, «выдающиеся математические способности или даже виртуозность в той мере, в какой ими обладают многие из его учеников, ему не даны. Он мыслит наглядно и с помощью понятий, но не собственно математически». Ученики Бора шутили, что он знает будто бы только два математических знака: «меньше, чем...» и «приблизительно равно». (Сюда же

Пауль (Павел Сигизмундович) Эренфест (1880–1933) выполнил с женой Татьяной Афанасьевой логический анализ статистической механики, ввел классификацию фазовых переходов, доказал правила перехода от квантовой теории к классической. В 1907–1911 гг. работал в Петербурге, затем стал преемником Лорентца в университете Лейдена, друг Эйнштейна и А. Ф. Иоффе. Трагически ушел из жизни: застрелил психически безнадежно больного сына и тут же покончил с собой.

относится его знаменитый афоризм: «Что не экспонента, то логарифм», — сложные формулы он не любил.)

## 6. Рентгеноструктурный анализ

Красота издавна превратила кристаллы (от греческого «кристаллос» — первоначально, лед) в предметы собирания и повысила их ценность. Физики не могли оставаться равнодушными к их свойствам и, естественно, пытались понять их структуру, классифицировать кристаллы по каким-то свойствам и по форме (вначале, еще в XVIII в., с целью найти наилучшие способы огранки). Поэтому кристаллография обычно делится на геометрическую, физическую и химическую.

Геометрическая кристаллография установила, используя математический аппарат теории групп, что все кристаллы можно подразделить

на определенное число классов и групп по их свойствам симметрии. Таким образом, если задать положение любого атома и его ближайших соседей, то можно восстановить всю кристаллическую решетку.

Схема эта, однако, оставалась чисто умозрительной — никто ведь расположения атомов не видел и не надеялся увидеть. История того, как их удалось увидеть, естественно разделяется на несколько частей.

Началась она с того, что в 1912 г. Арнольд Зоммерфельд (1868–1951, один из крупнейших физиков-теоретиков первой половины XX в.) поручил своему ассистенту Макс фон Лауэ (1879–1960) написать для «Физической энциклопедии» статью по волновой оптике, и Лауэ решил детальнее ознакомиться с дифракцией световых волн.

В это время его друг Пауль Эвальд (1888–1985), тоже ученик Зоммерфельда, изучал оптические свойства кристаллов и решил обсудить их с Лауэ, который ничего о кристаллах не знал. В разговоре он упомянул, что расстояние между атомами в кристаллической решетке должно быть порядка одной тысячной длины волны света. И тут Лауэ осенила неожиданная идея: он был сторонником волновой теории рентгеновских лучей (проблема их природы живо обсуждалась в то время), а так как получалось, что межатомные расстояния в кристаллических решетках примерно в 10 раз больше, чем предполагаемые длины волн рентгеновского излучения, то он предположил, что при прохождении лучей через кристалл должна отчетливо «высвечиваться» дифракционная картина. Получаться она должна потому, что из кристалла по различным направлениям должно исходить рассеянное на отдельных атомах рентгеновское излучение и порождать светлые точки, куда приходят лучи, совпадающие по фазе и поэтому усиливающие друг друга, и темные области, где сходятся лучи, в той или иной мере не совпадающие по фазе и поэтому гасящие друг друга.

Проверить это предположение Лауэ уговорил Вальтера Фридриха (1883–1968) и Пауля Книппинга (1883–1935). Для эксперимента был взят кристалл медного купороса: пластинки расположили со всех сторон вокруг кристалла, и один из снимков сразу же показал именно такую картину. (Опыт этот ставился тайно, так как Зоммерфельд запретил им тратить время на всякие глупости: он считал, что тепловые колебания атомов в решетке снижают их регулярность.)

В ходе исследований и при их обсуждениях с участием Эвальда выяснилось, что рентгеновские лучи, направленные на кристаллическую структуру, частично отклоняются под воздействием атомных электронов. Каждый из вторичных отклоненных пучков отходит под определенным углом и имеет определенную интенсивность. На выходе все они в комплексе образуют рисунок, характер которого зависит

от позиции атомов в кристалле. Смысл изучения именно кристаллов — структур, состоящих из одинаковых элементов (элементарных ячеек) — очевиден. Множество упорядоченных в трех измерениях отдельных атомов дает множество одинаково направленных отклоненных пучков, что в итоге значительно увеличивает четкость дифракционной картины по сравнению с плоской решеткой.

Лауэ смог быстро построить математическую теорию, которая установила соответствие между экспериментально наблюдаемыми лауэграммами, с одной стороны, и реальными положениями атомов в кристаллах и длиной волны рентгеновского излучения, с другой. Тем самым

Макс фон Лауэ продолжал плодотворно работать до конца своей жизни, он был одним из немногих ученых Германии, кто всегда и открыто выступал против фашизма. Но если сейчас поинтересоваться в Интернете его именем, то окажется, что более всего цитируется его афоризм, ставший расхожей фразой: «Образование — это то, что остается, когда все выученное забыто».

была открыта очень перспективная область исследования (рентгеновская кристаллография), в которой рентгеновское излучение используется для определения структуры кристаллов, а в кристаллах известной структуры — для определения длин волн рентгеновского

излучения. Анализ рентгеновского излучения, испускаемого атомами (рентгеновская спектроскопия), оказался весьма важным для понимания структуры атома. (До этих экспериментов немало исследователей пропускали рентгеновские лучи через кристаллы, но наблюдали они лишь те, которые проходили прямо и не обращали внимания на слабые интенсивности излучения, отклоненного под углом.)

«За открытие дифракции рентгеновских лучей на кристаллах» Макс фон Лауэ был удостоен Нобелевской премии по физике 1914 г. Эйнштейн, с его еще юношеской увлеченностью геометрией, называл открытие Лауэ «одним из наиболее красивых в физике» — фактически оно стало триумфом применения математики к физике: оправдались полностью абстрактные, казалось, рассуждения о симметриях и их роли во взаимодействиях атомов.

\* \* \*

Уильям Генри Брэгг (1862–1942) блестяще окончил курс Кембриджского университета, но затем уехал работать профессором в Австралию, в Аделаиду (физику он срочно доучивал на пароходе), занялся педагогической и общественной деятельностью. Почти 20 лет он не пытался проводить какие-либо самостоятельные исследования.

Но в 1904 г. (Брэггу уже 42 года) он заинтересовался радиоактивностью и начал изучать проникающую способность альфа-частиц.

Оказалось, что для каждого радиоактивного вещества они могут быть разбиты на группы, так что все частицы из одной группы проходят одинаковое расстояние до поглощения, а это означало, что альфа-частицы испускаются только с определенными начальными скоростями. Отсюда следовало, что каждое промежуточное дочернее ядро при последовательном каскаде распадов испускает альфа-частицу с определенной скоростью. Следовательно, по пройденному частицей расстоянию можно определить тип ядра, испустившего эту частицу. Это открытие принесло Брэггу международную известность, и в 1909 г. он возвратился в Англию. Здесь в течение нескольких следующих лет он проводит интенсивные исследования свойств рентгеновских и гамма-лучей, считая, что они больше похожи на поток частиц, чем на волны. Эту точку зрения, казалось, подкрепляло то, что в 1908 г., облучая рентгеновскими лучами вещества, он наблюдал возникновение потока электронов и немало современников ученого встали на его позицию.

Ее ошибочность обнаружилась четыре года спустя, после открытия фон Лауэ.

Разумеется, У. Г. Брэгг испытал чувство досады: его «корпускулярные» представления оказались несостоятельными. Тем не менее он решил повторить и продолжить исследования немецкого коллеги. Его помощником стал сын, Уильям Лоренс Брэгг (1890–1971), недавно окончивший Кембриджский университет у Дж. Дж. Томсона. Обсудив дифракцию рентгеновских лучей со своим отцом, Брэгг-младший пришел к убеждению, что волновая интерпретация Лауэ верна, но что описание деталей дифракции Лауэ неоправданно усложнил. Атомы в кристаллах располагаются в плоскостях (этого Лауэ не учел), и У. Л. Брэгг предположил, что дифракционная картина вызывается расположением этих атомных плоскостей в конкретной разновидности кристаллов. Если это так, то рентгеновскую дифракцию можно было использовать для более точного определения структуры кристаллов. В 1913 г. он опубликовал уравнение, позже названное законом Брэгга, описывающее углы, под которыми следует направить пучок



Распространенное мнение о том, что крупные открытия делаются лишь в молодости, не имеет серьезного обоснования. Как любил повторять известный физик Г. И. Будкер: «Ученые делятся не на старых и молодых, а на умных и глупых».

рентгеновских лучей, чтобы определить строение кристалла по дифракционной картине рентгеновских лучей, отраженных от кристаллических плоскостей. Затем он использовал свое уравнение для анализа различных кристаллов.

В том же году его отец изобрел рентгеновский спектрометр, позволяющий анализировать сложные кристаллы. Первым веществом, которое Брэгги исследовали, была поваренная соль. И на этом простейшем кристалле они совершили замечательное открытие.

К тому времени считалось, что химические соединения образованы молекулами: так, хлористый натрий (обычная соль) состоит из молекул, каждая из которых содержит атом натрия и атом хлора. Но исследования Брэггов показали, что кристаллы хлористого натрия состоят не из молекул, а из определенным образом расположенных ионов натрия и ионов хлора: в кристалле нет молекул хлористого натрия. Тем самым было установлено различие между молекулярными соединениями (кристаллы которых состоят из молекул) и ионными (кристаллы которых состоят из определенным образом расположенных ионов), что имело огромное значение и позволило ученым гораздо глубже понять строение кристаллов, а потом и поведение растворов. Работая совместно, отец в основном как экспериментатор, сын — как теоретик, Брэгги свели к 1914 г. рентгеновский анализ простых материалов к стандартной процедуре.

Экспериментируя с кристаллами различных веществ, отец и сын производили тщательный математический анализ получавшихся дифракционных картин. Подобные «обсчеты» позволили им в итоге вывести нехитрую формулу, пригодную для расчетов, и заложить основы современной рентгеновской кристаллографии. (Отметим, что аналогичную формулу несколько раньше вывел московский физик Юрий Викторович Вульф (1863–1925).) Анализ рентгеновских дифракционных картин служит мощным инструментом для минералогов, металлургов, керамистов и других исследователей, имеющих дело с атомной структурой материалов. Этот метод позволил также ученым определить строение очень сложных молекул, что вызвало к жизни целую область молекулярной биологии.

В 1915 г. отец и сын Брэгги были награждены Нобелевской премией «за заслуги в исследовании структуры кристаллов с помощью рентгеновских лучей».

\* \* \*

Петер Дебай (1884–1966) был очень разносторонним физиком и физико-химиком, но нас здесь интересуют его исследования распределения электрических зарядов в атомах и молекулах. Дебай показал,

что основную роль во взаимном расположении атомов в молекулах играет их полярность, ориентация положительных и отрицательных зарядов: знание степени полярности (дипольного момента молекулы и составляющих ее атомов) позволяет рассчитать относительное расположение химически соединенных атомов. А дифракция рентгеновских лучей позволяет, как он показал, проводить измерения межатомных расстояний в газах и тем самым проверять теоретические построения.

Далее Дебай продемонстрировал взаимосвязь между дифрагированными пучками и тепловым движением атомов в кристаллах — таким образом, этот анализ позволял не только устанавливать структуры кристаллов, но и рассматривать некоторые протекающие в них процессы. При этом он понял, работая в 1916 г. с Паулем Шеррером, что даже в порошке имеется достаточное количество мельчайших или неидеальных кристаллов, так что дифракция рентгеновских лучей может охарактеризовать их молекулярную структуру.

До того наибольшей сложностью анализа была необходимость получения совершенных кристаллов — задача далеко не всегда выполнимая. Совместно с Шеррером он и разработал метод исследования структуры порошков с помощью дифракции рентгеновских лучей (метод Дебая—Шеррера или метод дебаеграмм).

В 1936 г. Дебай был награжден Нобелевской премией по химии «за вклад в наше понимание молекулярной структуры в ходе исследований дипольных явлений и дифракции рентгеновских лучей и электронов в газах».

\* \* \*

Необходимо отметить, что у рентгеноструктурной кристаллографии есть и недостатки: поскольку рентгеновские лучи взаимодействуют с электронами, то они плохо улавливают узлы решетки, в которых находятся протоны — ионы водорода. Лучше в этом плане ведут себя нейтроны — они, согласно де Бройлю, также обладают волновыми свойствами и их пучки образуют, проходя через кристалл, дифракционную картину. При этом они «не замечают» электронов, но зато фиксируют местоположения всех ядер. Таким образом, нейтроннографические методы дополняют рентгеноструктурные (мы уже говорили о том, что именно так были подтверждены свойства фононов как частиц).

## Физика и математика

*Математика — вроде французов: когда говоришь с ними, они переводят твои мысли на свой язык, и сразу получается что-то совсем другое.*

И. В. Гёте

В русском языке весьма употребительно словосочетание «физико-математические» (науки, ученые степени, факультеты и т. д.), поэтому создается впечатление о некоем единстве физики и математики. А вот в старых английских университетах кафедры чистой математики относятся к отделениям искусств, а не наук. Кто же прав?

Движение, тепловое расширение, действие электрического тока или излучение атома не зависят от того, появилось на Земле человечество или нет. А вот, скажем, биссектрису, дробь  $7/13$  или квадратное уравнение никто никогда в природе не наблюдал — их выдумали. Поэтому физика — это наука, а математика — чистое творение нашего разума и этим близка к искусству. (Как отмечает выдающийся физик Р. Ф. Фейнман в начале своих «Лекций по физике», из того, что математика не является наукой, вовсе не следует, что она плоха — любовь ведь, например, тоже не наука.)

И действительно, искусство характеризуется всегда некими условными ограничениями: в балете все переживания передаются танцем, сонет должен содержать определенное число строк и т. д. Точно так же теория чисел ограничивается только и только целыми числами (в ней, вообще говоря, запрещена операция деления), геометрия Евклида допускает только построения с помощью циркуля и линейки без делений (поэтому в ней невозможно, например, деление произвольного угла на три части), теория действительного переменного запрещает некоторые типы квадратных уравнений и т. д. Дополнение этих аксиом вызывает интерес, если из них следует достаточное количество нетривиальных выводов.

Согласно Ричарду Фейнману, любая теорема, независимо от того как трудно было ее впервые доказать, рассматривается математиками, как только она доказана, как тривиальная. Поэтому есть два и только два типа математических утверждений: тривиальные и те, которые еще

не доказаны. Несколько по иному можно сказать так: доказанную теорему математики изменить уже нельзя, поскольку она следует установленным аксиомам теории, а физическое утверждение, как правило, может и будет изменяться и дополняться с изменением основной базы теории.

Итак, математика — творение чистого разума. Но почему математические расчеты на основе предположений, принимаемых физиками, ведут к результатам, которые оправдываются потом на практике, почему они описывают реальные явления?

В 1960 г. выдающийся физик, разрешавший многие тонкие проблемы, Юджин Вигнер (1902–1995, Нобелевская премия 1963 г.) опубликовал статью «О непостижимой эффективности математики в естественных науках», вызвавшую широкую полемику в научных и философских кругах. В ней он и задает вопрос: как и почему творение нашего разума, не связанное никакими условностями, приводит к решениям, которые могут столь адекватно отражать природные явления, — и не находит ответа.

Но это вовсе не значит, что все математические конструкции применяются в физике, биологии или экономике. Вот, скажем, математики рассматривали теорию функций, определенные степени которых удовлетворяют некоторому условию, причем, конечно, в общей теории рассматривали произвольные степени. Потом оказалось, что такая теория с первой степенью описывает классическую механику и термодинамику, а со второй — волновые явления и квантовую механику, остальные возможные степени, в том числе дробные, пока не востребованы, и никто не может сказать, нужны они будут когда-нибудь в какой-то теории или нет.

Таким образом, получается, что математика в ходе собственных исследований заранее готовит обширный арсенал средств, некоторые из которых затем оказываются чрезвычайно полезными для ученых иных специальностей.

Но иногда случается и наоборот: Ньютону пришлось изобретать математический анализ<sup>6</sup>; мы уже говорили, что Хевисайду пришлось выдумывать новые математические приемы — операционное исчисление<sup>7</sup>. С середины 1920-х гг. Поль Дирак проводил расчеты с помощью введенной им дельта-функции, которая во всех точках равна нулю, а в одной точке — бесконечности. Математики, придерживавшиеся традиционных взглядов, приходили в ужас от такой безграмотности, но в 1947 г. Лоран Шварц построил новую математическую

<sup>6</sup> См.: Перельман М. Е. От Аристотеля до Николы Теслы. Раздел II. Глава 1.

<sup>7</sup> См.: Там же. Раздел III. Глава 2.



теорию и ввел такие функции в стандартный математический оборот. Иногда и в гораздо менее значительных работах физикам приходится решать задачи, до которых руки математиков не доходили.

Различие между физикой и математикой проявляется еще в том, что мы говорим: «физик открыл такое-то явление», но «математик придумал или изобрел такой-то прием или теорию».

Так-то это так, а все же физику-теоретика приходится изучать и применять математику: во-первых, перевод с обычного языка на математический позволяет резко сократить и унифицировать описание явлений, тем более — ход их количественных изменений. Так, колоссальный объем экспериментальных наблюдений Фарадея, плюс еще больший объем всего, что было сделано до него, Максвелл свел всего к четырем уравнениям. Во-вторых, как уже отмечалось, хотя бы в связи с электродинамикой Максвелла, уравнения нередко оказываются «умнее» тех, кто их вывел — они приводят к совершенно неожиданным результатам, и мы еще не раз будем иметь повод об этом сказать.

Степень владения математикой у физиков-теоретиков различна: бывают виртуозы расчетов — А. Зоммерфельд, Г. Бете, Л. Д. Ландау<sup>8</sup>, Дж. Швингер; бывают физики, старающиеся ограничиться минимальными средствами, — Н. Бор, Э. Ферми, а иногда в физике с успехом входят математики — Дж. фон Нейман, С. Улам<sup>9</sup>, Н. Н. Боголюбов (вспоминаем только ученых XX в.). Некоторые физики считают, что математику для физиков нужно вообще излагать иным, чем для математиков, образом — такие курсы математики писали Х. А. Лорентц, Я. Б. Зельдович, Ли Цзян-дао (о двух последних — ниже), иногда в книги

и даже статьи по физике вставляются разделы по менее знакомым для читателей вопросам математики.



<sup>8</sup> Вспоминается такая история. Двое моих приятелей, молодые, но уже зарекомендовавшие себя теоретики, чуть ли не год безуспешно возились с каким-то уравнением. Наконец, директор их института, друживший с Ландау, не выдержал и понес ему листок с уравнением: Ландау долго отказывался на него взглянуть (любимая фраза в таких случаях: «Вас много, а я один!»), но все же взял и через пару часов, вернувшись от зубного врача, отдал тот же листок с решением на обороте — он сказал, что решал, пока ему сверлили зуб, чтобы отвлечься от боли... Один из приятелей впал после этого в глубокую депрессию — такой удар по самолюбию!

<sup>9</sup> С. М. Улам — выдающийся польско-американский математик, написал любопытную книгу воспоминаний: *Улам С. М. Приключения математика*. М.: РХД, 2001.

А о весьма противоречивом отношении к математике физиков, блистательно владевших ее методами, говорят их популярные афоризмы:

- «Физические законы должны обладать математической красотой» — П. Дирак.
- «Элегантность должна быть оставлена портным» — В. Паули.
- «В тех случаях, когда физическая сущность вопроса не ясна, не следует искать у математики путеводной нити для ее выяснения» — Я. И. Френкель.
- «Математическое требование высшей точности не очень полезно в физике» — Р. Фейнман.

Вкусы и установки у них, как видим, индивидуальны — общего рецепта нет.

Иное мнение у многих математиков. Великий математик Давид Гильберт любил повторять: «Физика слишком трудна для физиков, за нее должны взяться математики». Он даже включил в свой перечень самых острых проблем математики на XX в. задачу аксиоматизации физики и сам занялся проблемами общей теории относительности (успехи подключения математиков к этим проблемам не дали радикальных результатов).

А теперь, чтобы показать всю сложность и неоднозначность проблемы взаимосвязи физики и математики, такой пример. В 1982 г. Нобелевской премии был удостоен Кеннет Вильсон (р. 1936) за теорию фазовых переходов второго рода, причем впервые премия была присуждена за работу, которая не содержала новых физических идей, а носила — во всяком случае внешне — чисто математический характер.

Поясним смысл его работ, для этого нужно некоторое предисловие. Фазовыми переходами первого рода являются переходы, обусловленные поглощением или выделением теплоты, изменением удельной теплоемкости и других термических характеристик тела (например, конденсация пара, кристаллизация и т. п.). Фазовые переходы второго рода связаны с изменением энтропии, т. е., в основном, внутреннего порядка, симметрии: например, переход от ферромагнитного состояния железа к парамагнитному (он происходит при достижении так называемой температуры Кюри, при которой магниты сразу размагничиваются), сюда же относятся переходы в сверхпроводящее и сверхтекучее состояния, о которых мы еще будем говорить (такая классификация фазовых переходов не является абсолютно строгой, фактически существуют и промежуточные виды переходов и т. д.).

Фазовые переходы второго рода, определяемые критическими показателями температуры, давления, и напряженности поля, характеризуются такой особенностью: закон изменения этих величин при подходе к критической точке один и тот же, вне зависимости от того, какой параметр рассматривается, а все попытки расчетов давали только расходящиеся (бесконечные, лишенные физического смысла) значения.

Вильсон подошел к этой проблеме с неожиданной стороны. Он рассчитал эти величины не в обычном трехмерном пространстве или в виде модели в двухмерном или одномерном пространстве, а в пространстве нецелой размерности. Математически можно, например, рассчитать интегралы в пространстве размерности 2,745. Что это такое? — Не знаю.

Но зато, я знаю иное: Вильсон провел расчеты термодинамических величин в пространстве размерности (3 минус малая величина), а по окончании всех расчетов устремил эту самую малую величину к нулю — осталось, как и должно быть, пространство трех измерений и... правильные значения всех величин<sup>10</sup>!

Такие геометрии нецелых размерностей (они называются фрактальными) еще раньше рассматривались математиками. Сейчас они находят интересные применения в теории хаоса: в физике, экономике, социологии и т. д.

А всегда ли можно доверять математике и математикам? В 1931 г. знаменитый логик и математик Курт Гедель (1906—1978) показал, что



всякая логическая система аксиом в результате развития теории обязательно приводит к таким теоремам, которые противоречат исходному набору аксиом, т. е. приводит к внутренним противоречиям. Заранее установить, когда это произойдет (и подложить мягкую подушку), по-видимому невозможно — остается проверять на опыте... Иными словами, Гедель показал, что одна лишь логика не может дать ответ на все вопросы — необходимо

вмешательство человеческой интуиции, и в этом смысле математика остается искусством.

Итак, проблема соответствия между физикой и математикой существует. Можно и нужно ли ее решать? — Неизвестно.

<sup>10</sup> Автору удалось получить правильные наборы этих величин по-иному, используя понятия длительности взаимодействий (2007).

# Теория относительности: парадигма Эйнштейна

*Прости меня, Ньютон! Ты нашел тот единственный путь, который в свое время был возможен для человека наивысшего полета мысли и наибольшей творческой силы.*

А. Эйнштейн

1905 г. вошел в историю как год Эйнштейна: в этом году опубликованы три и закончена еще одна работа, все гениальны — они положили начало или завершили четыре направления в физике. О самой революционной из них — о теории квантов — мы уже говорили и еще к ней вернемся, писали и о теории броуновского движения, доказавшей существование атомов, и о теории удельной теплоемкости, с которой началась квантовая теория конденсированных сред. Во всех этих теориях Эйнштейн выступал, фактически, в одиночку, без явных и близких по уровню соперников, а вот в разработке принципа относительности он вступил в заочное соревнование с самыми блестящими умами того времени — и выиграл. По этой причине, а также для того, чтобы лучше понять кажущуюся парадоксальность выводов, начнем с истории проблемы относительности.

## 1. Предыстория

Согласно Ньютону, для описания мира вещей достаточно указать (измерить) такие независимые величины: пространственные координаты и скорости (в какой-то один момент времени) всех материальных точек, их массы и действующие силы. Время и пространство рассматриваются при этом как «абсолютные»: они не зависят от объектов, их заполняющих, и от событий, в них происходящих. Все процессы сводятся к перемещениям материальных точек в пространстве и во времени, а сами время и пространство строго разграничены между собой — законы Ньютона устанавливают только взаимосвязи между массами и силами.

Такая «механика материальных точек» была математически обоснована Эйлером, Лагранжем, Лапласом и Гамильтоном. Она блестяще себя оправдывала и оказалась чрезвычайно плодотворной — прежде всего в астрономии, в расчетах движения тел в Солнечной системе на основе сил дальнего действия, т. е. закона Всемирного тяготения. Позднее она так же успешно была распространена на движение жидкостей и газов, на упругие колебания тел, на явления акустики.

Но в оптике, в частности, и в электродинамике в общем, отчетливо выявилась ограниченность этой «механики материальных точек».

Пока свет представлялся в виде продольных волн, можно было вообразить себе эфир как разреженный газ. Если же световые волны являются поперечными, тогда эфир должен рассматриваться как твердое упругое тело, которое при своей малой плотности должно быть тверже стали. Но при этом световой эфир должен еще быть полностью проницаемым — ведь небесные тела движутся сквозь него без помех, это установлено всеми измерениями их движений. Помимо того, эфир не должен обладать гравитационной массой, т. е. не должен притягиваться к другим телам.

Все эти свойства никак нельзя было согласовать между собой, уж очень фантастично они выглядели. Гипотеза эфира (точнее, эфиров — существовало много различных его теорий) оказалась недостоверной в самой своей основе.

Но чем ее заменить? Согласно Фарадею и Максвеллу, существует электромагнитное поле, даже электромагнитные волны, и они распространяются в вакууме, со скоростью света. Существует ли какая-нибудь среда в этом самом пустом пространстве, колебаниями которой являются эти волны? Если такая среда существует, то именно она является главной, так сказать, системой отсчета, и все движения нужно рассматривать относительно именно этой среды, относительно эфира.

Итак, возникает концептуальная проблема, проблема эфира — она даже не связана ни с какими экспериментами, а является проблемой обоснования теории Максвелла.

При этом есть эксперимент Майкельсона—Морли: скорость света не зависит почему-то от скорости источника — она не увеличивается, когда источник движется навстречу наблюдателю, и не уменьшается, когда источник удаляется, — но все это противоречит законам Ньютона!

Теперь нужно как-то объяснить результаты этого эксперимента — даже если не вдаваться глубоко в проблемы эфира.

Таким образом, перед физикой стоят две проблемы: общая проблема эфира и результаты опыта Майкельсона—Морли — и пока не ясно, связаны они друг с другом или нет.

## 2. Предшественники

Со времен Галилея известно, что если человек находится в каюте равномерно движущегося корабля и не может выглянуть наружу, то он не может определить, движется ли корабль по инерции или стоит на месте: мячик на горизонтальном столе остается неподвижным, а силы действуют так же, как на берегу. Математически это означает, что уравнения Ньютона не меняются при равномерном движении.

Ясно, что тем же свойством должны были бы обладать и уравнения Максвелла — но при таких преобразованиях они меняются (связано это с тем, что сила, по Ньютону, определяется через ускорение, а в электродинамике, в магнитном поле, согласно Лорентцу, она зависит и от скорости). Появляются две возможности исправить этот явный их недостаток: либо изменить сами уравнения, либо принять какие-то особые правила перехода от неподвижного наблюдателя к движущемуся.

Вольдемар Фойгт (1850—1919), известный своими работами по электродинамике, физике кристаллов и др., принимает вторую точку зрения — в уравнениях Максвелла он уверен, и в 1887 г. выводит первые такие правила преобразования длины и времени, но считает их формальными, не дает никакой физической трактовки и никак не прилагает их к объяснению опытов Майкельсона—Морли. Работа Фойгта долго оставалась вне поля зрения специалистов, а он сам никогда не претендовал на приоритет.

В 1889 г. появляется краткая, в несколько строк и безо всяких формул, заметка Джорджа Фрэнсиса Фитцджеральда (1851—1901): опыт Майкельсона—Морли можно объяснить, если принять, что все тела сокращаются в направлении своего движения. Но идею эту он дальше не разрабатывает, а своему другу Оливеру Хевисайду пишет: «Я совершенно не боюсь допустить ошибку и поэтому предлагаю самые сырые идеи в надежде, что они заставят задуматься других и тем будут способствовать движению вперед».

В 1894 г. Х. А. Лорентц соглашается с идеей Фитцджеральда: «Я думал об этих опытах долго и безуспешно и наконец представил только одну возможность для выхода из создавшегося положения». Он продолжает развивать идею таких преобразований, которые приводили бы к сокращению размеров тел в направлении их движения. Окончательный результат он получил к 1899 г. (Эти формулы названы преобразованиями Лорентца, а сокращение длины называют сокращением Фитцджеральда—Лорентца.)

Великий математик Анри Пуанкаре с годами все больше занимался принципиальными проблемами физики. В 1898 г. он — с позиций скорее общеполитических, чем физических — критикует понятие од-



новременности: как два наблюдателя (возможно, движущихся) могут установить, что часы у них идут одинаково равномерно? Нет, как он говорит, такой реальной процедуры. В статьях 1900 и 1904 гг. Пуанкаре обрушивается на понятие эфира: «А наш эфир — существует ли он в действительности?». Но свое выступление 1904 г. он заканчивает пессимистически: нужны какие-то дополнительные гипотезы, вполне возможно, что старые принципы еще докажут свою справедливость.

Пуанкаре оставалось сделать лишь один шаг для построения теории относительности, практически все, что нужно, плюс колоссальный математический опыт, интуиция и энциклопедические знания — все это было, но решающий шаг так и не был сделан. Его предстояло совершить 26-летнему служащему Патентного бюро в городе Берне.

### 3. Об истоках мировоззрения Эйнштейна <sup>11</sup>

Пережив период глубокой юношеской религиозности, Альберт Эйнштейн (1879–1955) испытал в 12 лет потрясение, когда ему в руки попала книжка по евклидовой геометрии: утверждения, казалось бы,

<sup>11</sup> Полное собрание сочинений Эйнштейна в 35 томах издается совместно Еврейским университетом в Иерусалиме (университет был открыт лекцией Эйнштейна в 1925 г.) и Институтом перспективных исследований в Принстоне, США, где Эйнштейн работал с 1933 г. до конца жизни. На русском языке издано в 1965–1967 гг. одно из самых полных собраний его научных работ в 4 томах, вышло 13 томов «Эйнштейновских сборников» Эйнштейновского комитета Академии наук СССР.

Эйнштейн нередко обсуждал философские проблемы с Берtrandом Расселом и Куртом Геделем, когда все они жили в Принстоне. Помимо Канта, он штудировал Платона, Б. Спинозу, Д. Юма, Дж. С. Милля. Эти и некоторые другие сведения в основном из книг: *Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна*. М.: Наука, 1989; *Хофман Б. Альберт Эйнштейн, творец и бунтарь*. М.: Прогресс, 1983 (авторы, известные физики, сами много общались с Эйнштейном). См. также: *Зельг К. Альберт Эйнштейн*. М.: Атомиздат, 1966.

совсем не очевидные, «могли быть доказаны с уверенностью, исключаяющей всякие сомнения. Эта ясность и уверенность произвели на меня неопишемое впечатление». И далее в автобиографии следует фраза, очень важная для понимания мировоззрения Эйнштейна: «Меня не беспокоило то, что аксиомы должны быть приняты без доказательств» — именно так, на аксиоматической базе, он будет строить теорию относительности.

Можно думать, что интерес Эйнштейна к наиболее сложным проблемам мироздания пробудился еще в юности, когда в возрасте около 13–14 лет он со студентом Максом Талмудом (Талми), который был старше него на 10 лет, читал научно-популярные и философские книги, особенно «Критику чистого разума» Иммануила Канта. Много позже он писал: «Наука без теории познания (насколько это вообще мыслимо) становится примитивной и путаной».

И не может быть, чтобы его не заинтересовали декларированные Кантом ограничения возможностей чистого разума — четыре антиномии (т. е. противоречивые суждения, которые логически нельзя ни доказать, ни опровергнуть): 1) ограничен ли мир в пространстве и во времени или бесконечен; 2) состоит ли мир из неких простых (неделимых) частиц или он бесконечно делим; 3) существуют ли законы природы, которыми все можно объяснить, или есть нечто вне таких законов; 4) существует ли в мире или над миром некое высшее существо.

Эйнштейн и развитие физики на основе его теорий, как мы увидим, фактически разрешили первую антиномию — и именно на основе разума: мир возник в результате Большого взрыва 15–20 млрд лет тому назад и имеет определенные пространственные размеры. Вторая антиномия уже несколько раз как будто разрешалась: казалось, что весь мир состоит из неизменных атомов, затем их место заняли несколько элементарных частиц, сейчас есть другие претенденты, но проблема не кажется столь острой, как во времена Канта.

Что касается третьей антиномии, то физик исповедует незыблемую веру во всеобщее царствие причинности — иначе занятия наукой совершенно бессмысленны. И очень показательны слова, сказанные Эйнштейном его ассистенту Эрнсту Штраусу: «Что меня действительно интересует, так это то, мог ли Бог создать мир по-иному, т. е. остав-





ляет ли необходимость логической простоты место для какой-нибудь свободы?» Итак, мир прост и поэтому он познаваем, а много позже Эйнштейн даже пишет: «Главное достоинство теории заключается не столько в подтверждении ее частных следствий, сколько в существенном упрощении теоретического базиса всей физики в целом».

Четвертая антиномия — интимный вопрос для каждого человека и к его научным занятиям, во всяком случае в физике, отношения не имеет.

Интерес Эйнштейна к электродинамике и к проблеме эфира пробудился очень рано. Первую попытку разрешить эти проблемы он предпринимает еще в юности: в 16 лет пишет наивный трактат о состоянии эфира в магнитном поле. Чуть позже, как он отмечает в автобиографии, «у меня возник вопрос: если бы можно было погнаться за световой волной со скоростью света, то имели бы мы перед собой не зависящее от времени волновое поле? Такое, все-таки, кажется невозможным! Это был первый мысленный эксперимент, который относился к специальной теории относительности».

Можно предположить, что эти мысли возникли у него при чтении чрезвычайно популярных в то время книг Камилля Фламмарiona (1842—1925), известного астронома и популяризатора. В одной из них автор, сам глубоко верующий, описывает, как после смерти человека его душа, покинувшая тело, летит (по-видимому, в рай) со скоростью, большей скорости света. Душа нагоняет и обгоняет световые волны и поэтому видит все произошедшее в обратном, по времени, порядке: гроб выкапывают, вносят его, пятась, в дом, вскрывают, покойник встает, оживает и т.д. (Запустите киноленту наоборот...)

Таким образом, если двигаться быстрее света, то можно как бы поменять местами причины и их следствия! Это означало бы, что третья антиномия Канта имеет право на существование, а принцип причинности — основная аксиома науки! — может нарушаться.

#### 4. Порядок исследований Эйнштейна

Самостоятельная работа Эйнштейна начинается с молекулярно-кинетической теории капиллярности и разности потенциалов в растворах. Связано это, возможно, с интересами его преподавателя Г. Ф. Вебера (1843—1912) и влиянием соответствующих исследований в институтской лаборатории. Однако эти вполне рядовые изыскания приводят к тому, что образцом для него становится классическая термодинамика. Эйнштейн утверждал: «Это единственная физическая теория общего содержания, относительно которой я убежден, что в рамках

применимости ее основных понятий она никогда не будет опровергнута». В ходе освоения ее понятий Эйнштейн, «не будучи знакомым с появившимися ранее исследованиями Больцмана и Гиббса, ...развил статистическую механику и основанную на ней молекулярно-кинетическую теорию термодинамики».

При этом его построения, все же, отличаются от теории предшественников. Так, уже в конце статьи 1904 г. говорится о том, что флуктуации энергии излучения в объеме порядка длины волны должны быть того же порядка, что и сама энергия излучения: отсюда один шаг до рассмотрения потока излучения как потока частиц.

В автобиографии Эйнштейн пишет: «В эти годы... главным моим вопросом был следующий: какие общие выводы позволяет сделать формула излучения относительно электромагнитной основы физики?»

Но представляется, что раньше была обдумана, хотя и опубликована чуть позже статья о броуновском движении: «Не зная, что наблюдения над "броуновским движением" давно известны, я открыл, что атомистическая теория приводит к существованию доступного наблюдению движения взвешенных микроскопических частиц».

Эти слова излишне скромны. Ведь само существование атомов еще не доказано и ряд видных ученых (В. Оствальд, Э. Мах и др.) в нем сомневаются — атомарная гипотеза кажется в те годы излишним усложнением теории. Есть, правда, электроны, обнаруженные Дж. Дж. Томсоном, но это еще не доказывает пределов делимости веществ. Фактически именно исследование броуновского движения (аналогичную теорию практически одновременно выдвигает М. Смолуховский) дало неопровержимое доказательство существования атомов. Статья эта заканчивается эмоционально, не принятым в научной литературе призывом: «Если бы какому-либо исследователю удалось вскоре ответить на поднятые здесь важные для теории теплоты вопросы!»

Теории броуновского движения посвящен и ряд работ Эйнштейна на протяжении последующих трех лет, но концептуально важна эта, первая. По-видимому, еще до ее завершения и отсылки в печать, внутренне убедившись в существовании атомов, т. е. в невозможности бесконечной делимости вещества, можно обдумать проблему их взаимодействия с излучением. И этот шаг совершается в статье «Об одной точке зрения, касающейся возникновения и превращения света», которую сам Эйнштейн считал наиболее революционной из своих работ.

Во введении скромно говорится: «Я излагаю ход мыслей и факты, натолкнувшие меня на этот путь в надежде, что предлагаемая здесь точка зрения, возможно, принесет пользу и другим исследователям в их изысканиях».

Ход мыслей таков: состояние любого тела описывается пусть большим, но конечным числом величин, связанных с числом атомов и электронов, а вот энергия пучка света представляется непрерывно распределенной в пространстве волной, а потому и бесконечно делимой — два этих представления интуитивно не связываются друг с другом. Волновое представление правильно описывает явления дифракции, дисперсии и т. п., но, возможно, лишь потому, что обычно рассматриваются усредненные характеристики. Поэтому можно *предположить*, что энергия света также представляется конечным числом локализованных (не очень удачный термин) в пространстве неделимых квантов энергии, и при этом модифицировать закон равномерного распределения энергии по степеням свободы. Тогда, по аналогии, «свободно движущееся зеркало... должно совершать в пространстве, заполненном излучением, нечто вроде броуновского движения».

Но для того чтобы флуктуации давления привели к нужному, из термодинамики, значению энергии (сравниваются, что не совсем законно, выражения энтропии по Вину и Больцману), необходимо *предположить*, «что планковым квантам приходится приписывать своего рода непосредственную реальность; следовательно, в отношении энергии излучение должно обладать своего рода молекулярной структурой, что, конечно, противоречит теории Максвелла».

При этом, что знаменательно, Эйнштейн единственный раз употребляет слово «эфир», говоря, что «в нашей картине не может быть и речи о каком-либо однозначном распределении энергии между эфиром и веществом».

Далее понятие эфира ему не требуется. Зато тут есть ряд экспериментальных фактов, которые можно представить как подтверждение такой точки зрения. Первым из них является доказанное М. Планком в 1900 г. квантовое поглощение излучения, но Планк остановился только на актах поглощения света, хотя его ход рассуждения можно бы продолжить. Так, Дж. Г. Стокс еще в 1852 г. установил, что при люминесценции (последующем свечении некоторых, ранее облученных веществ) длина волны излучения всегда выше длины волны облучающего света. Введением концепции квантов — не только при поглощении, по Планку, но и при излучении света — Эйнштейн сразу же объясняет казавшееся таинственным правило Стокса: в слабом световом потоке квант, поглощенный одним электроном, может испуститься только с такой же или меньшей энергией, т. е. с такой же или большей, согласно формуле Планка, длиной волны<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> Рассуждения здесь не слишком строги, они были уточнены им при рассмотрении импульса квантов. Однако уже в этой статье рассмотрены возможности таких

Еще перед этим рассматривается проблема внешнего фотоэффекта: Ф. Ленард в 1899 г. показал, что при нем высвобождаются электроны, энергия которых не зависит от интенсивности света, но прямо пропорциональна его частоте. Гипотеза квантов Эйнштейна дает простое объяснение законам фотоэффекта и, аналогично, явлениям катодолюминесценции и ионизации газов ультрафиолетом. Потому чаще всего эта статья цитируется как теория указанных явлений, хотя ее физическое значение много выше: самым главным был фактический отказ автора от концепции эфира, возможность объяснения ряда световых явлений без необходимости введения такого «эфирного» костыля (см. стр. 15).

\* \* \*

Теперь можно перейти к созданию теории относительности — статье Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел» все в том же знаменитом 17-м томе «Анналов физики». Восстановить точно историю ее создания невозможно — так в 1922 г. в Японии, отвечая на многочисленные вопросы, Эйнштейн говорит: «Трудно сказать, как я пришел к теории относительности, поскольку многие скрытые факторы влияют на человеческое мышление и, кроме того, воздействие их различно».

А в автобиографии он пишет: «Открытие не является делом логического мышления, даже если конечный продукт связан с логической формой», — и при этом, что психологически очень важно, замечает, — «я приходил к заключению, что только открытие общего формального принципа может привести нас к надежным результатам. Образцом представлялась мне термодинамика. Там общий принцип дан в предложении: законы природы таковы, что построить вечный двигатель (первого и второго рода) невозможно. Но как же найти общий принцип, подобный этому?»

Можно поэтому думать, что логическая упорядоченность рассуждений в статье появилась позже, а ход рассуждений был, все же, связан именно с поиском такого «запрещающего» принципа. И действительно: в преобразованиях Лорентца, самостоятельно выведенные Эйнштейном из принципа инвариантности уравнений электродинамики Максвелла, входит квадратный корень от разности квадратов скорости света и скорости движения источника. Если верить этим

---

процессов, которые в будущем были названы антистоксовыми, а также возможность поглощения нескольких квантов с последующим испусканием одного, т. е. процесса сложения частот, основы развиваемой с 1960-х гг. физики многофотонных процессов.

формулам, если принять, в отличие от Лорентца и Пуанкаре, что они не являются формальными упражнениями в математических преобразованиях, а отражают физические явления, то скорость, большая скорости света, должна приводить к мнимым величинам времени, длины и т.д. А как их интерпретировать?

И тут можно попробовать просто — по некоторой аналогии с термодинамикой — их запретить, т.е. проверить возможность введения такого принципа: скорость, большая скорости света, невозможна.

Но с уравнениями Максвелла этот принцип согласуется только в случае отсутствия эфира, неподвижного или увлекаемого — однако именно ненужность, или точнее, не-необходимость, эфира Эйнштейн доказывает в своей квантовой теории. Так что здесь противоречий нет. Нужно теперь проверить кинематику, т.е. механику, — с нее логически и начинается статья. И здесь также не встречается противоречий — следовательно, можно провозгласить основным *принцип*: свет в пустоте распространяется с постоянной скоростью и эта скорость является предельно допустимой.

Основная новизна этой статьи содержится в ее части, относящейся к механике, но название «К электродинамике движущихся тел» отражает, по-видимому, ход мыслей автора, что и может оправдать наши попытки психологического анализа.

При этом, однако, очень важно такое замечание: в теории Фитцджеральда—Лорентца, при тех же математических выражениях, неявно принималось, что сокращение длины тела вдоль направления движения должно быть связано с каким-то изменением действия молекулярных сил (поэтому сам Лорентц отнюдь не считал, что его преобразования адекватны теории относительности Эйнштейна), а Пуанкаре говорил о возможной необходимости каких-то новых гипотез, т.е. опять-таки о каком-то изменении состояния или структуры движущегося тела. Следовательно, по их воззрениям, наблюдатель, который находится на движущемся теле, мог бы заметить эффекты сокращения и поэтому обнаружить, что он движется относительно некоей абсолютной системы отсчета: инерциальные системы отсчета при таком подходе не равноправны.

Но не так у Эйнштейна — как он сам писал в 1911 г. в связи с бесчисленными вопросами: «Сокращение не является реальным, поскольку оно не существует для наблюдателя, движущегося вместе с телом; однако оно реально, так как оно может быть принципиально доказано физическими средствами для наблюдателя, не движущегося вместе с телом».

\* \* \*

Итак, мы видим, что построение в 1905 г. теории относительности не было единичным, пусть даже гениальным прозрением. Для его осуществления необходимо было совершить последовательную серию исследований и открытий, каждое из которых, взятое по-отдельности, могло обессмертить имя автора:

- 1) убедиться в атомарной структуре материи;
- 2) пересмотреть закон равномерного распределения энергии по степеням свободы;
- 3) показать (или, во всяком случае, предположить) возможность распространения света в виде частиц-квантов, фотонов;
- 4) полностью отказаться на этом основании от концепции эфира, одним ударом разрубить этот многовековой gordien узел;
- 5) предложить общий «запрещающий» принцип (типа принципов термодинамики);
- 6) объединить принципы относительности в механике и в электродинамике.

Такая цепочка гениальных открытий, совершенных одним человеком за один год, не имеет даже приблизительных аналогов в истории науки: Эйнштейн последовательно прошел по всем этим ступеням, и поэтому создание им теории относительности вовсе не явилось некоторым одиночным, хоть и гениальным открытием. Но ни Лоренц, ни Пуанкаре осуществить такую программу не могли — психологически они так и не освободились от концепций эфира. Именно поэтому о них можно и должно говорить как о предшественниках Эйнштейна, но лавры творца теории относительности принадлежат ему и только ему.

## 5. Специальная теория относительности (сокращенно СТО)

В первой же статье по этой теме Эйнштейн принимает два постулата:

1. *Все законы физики имеют одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчета.*
2. *В любой инерциальной системе отсчета скорость света одинакова вне зависимости от движения того тела, которое этот свет испускает.* (Этот постулат иногда формулируется как невозможность скорости, большей скорости света в пустоте.)

Из этих постулатов сразу же следуют правила преобразования систем координат, включающие сокращение длины в направлении движения и замедление хода времени, т. е. преобразования Лорентца

(Лорентц не понял математической, так называемой групповой природы этих преобразований — ее выявили независимо Пуанкаре и Эйнштейн).

С общенаучной точки зрения чрезвычайно важным оказалось утверждение СТО об относительности понятия «одновременности»:

Трудность усвоения новых понятий хорошо иллюстрируется анекдотом, популярным в ту эпоху — Артуру Эддингтону, автору наиболее серьезной книги по теории относительности, задают вопрос: «Сэр, говорят, что Вы один из трех людей в мире, понимающих эту теорию?» Эддингтон морщит лоб и спрашивает: «А кто же третий?» Однако сейчас основы теории относительности часто включаются в школьные программы и никаких особых сложностей они уже не вызывают.

те события, которые представляются одновременными одному наблюдателю, могут казаться разновременными другому — из-за конечности скорости распространения информации, сигнала становится невозможным установить «истинную» последовательность близких по времени событий в пространственно разделенных точках.

Из этих преобразований следует, что сокращения длины и замедление времени зависят от квадрата отношения скорости движения к скорости света, которая равна примерно 300 тыс. км/с. Поэтому для используемых нами двигателей и скоростей, ими развиваемых, всеми такими изменениями можно пренебречь.

Тем не менее, все выводы Эйнштейна удалось проверить в эксперименте. Для особо неверующих точные атомные часы помещали на самолет и чуть ли не неделями держали в полете — отставание часов (это микросекунды, скорость самолета мала в сравнении со скоростью света) точно соответствовало теории. Для физиков достаточны и более простые способы проверки: частица мюон (или мю-мезон) живет, в среднем, две миллионные доли секунды и распадается на электрон или позитрон и два нейтрино, однако те мюоны, которые рождаются солнечными космическими лучами в верхних слоях атмосферы, успевают все же долететь до поверхности Земли — распадаются они «по собственным часам», а из-за их скорости, близкой к световой, за это же время, прошедшее по их часам, на Земле проходит в несколько раз больший промежуток времени, и поэтому их можно наблюдать, а рассчитывая их скорости, сравнивают это время с рассчитываемым по формуле лоренцевского сокращения, т. е. в соответствии с СТО.

Аналогично проверено и сокращение размеров тел вдоль линии движения с ростом скорости: два протона, разогнанные навстречу друг другу в ускорителе, взаимодействуют не как шарики, а как диски, сжатые в направлении движения согласно тем же формулам. Отметим также, что уже при определении точных координат спутников приходится учитывать эффекты СТО, иначе можно ошибиться на несколько километров.

Все эти вопросы, вопросы кинематики, составляют примерно половину первой статьи Эйнштейна, вторая половина посвящена электродинамике. При этом оказывается, что электродинамика Максвелла настолько опередила свое время и была такой завершенной, что полвека спустя Эйнштейн смог почти без изменений включить ее в СТО. Однако из своих же исследований фотоэффекта он знает, что уравнения Максвелла не являются абсолютно универсальными, и поэтому формулирует свой принцип относительности в более общем виде, чем нужно для этих уравнений. Здесь возникает очень любопытный психологический парадокс: практически одновременно в статье о квантах он отказывается от волновой теории света, а в определении скорости света в СТО именно на нее и опирается — такой дуализм (позднее именно он станет основой квантовой механики) говорит о безграничной вере Эйнштейна в свою физическую интуицию.

Любопытно заметить, что в этой статье Эйнштейн вообще не упоминает об эксперименте Майкельсона—Морли: то ли он его еще не знает, то ли считает, что важнее всего разобраться с кинематикой и с формой уравнений Максвелла.

Отметим, что СТО вместе с идеями Эйнштейна о квантах сразу же объяснила известный эффект Х. Доплера (1803—1853), согласно которому частота света (или звука) повышается, когда источник движется навстречу наблюдателю, и уменьшается, когда источник удаляется. И действительно, поскольку скорость кванта света при любом движении источника постоянна, то добавление или уменьшение его энергии (за счет кинетической энергии источника) ведет, согласно формуле Планка, к изменению частоты.

Первым теорию Эйнштейна приветствовал Макс Планк, он же первым продолжил ее развитие. Вероятно, наибольший вклад в ее описание

С публикацией первой статьи научная «изоляция» Эйнштейна, скромного эксперта Патентного бюро, кончилась — посетивший его первым Макс фон Лауэ позднее вспоминал: «Встретивший меня молодой человек произвел очень неожиданное впечатление. Я не мог поверить, что разговариваю с создателем теории относительности». Далее он пишет, что единственная комната, где живут Эйнштейны, завешана детскими пеленками, а сам он пишет, согнувшись у кухонного стола, и одновременно покачивает кроватку с ребенком.

За несколько десятилетий до объяснения эффекта Доплера Э. Мах, пытаясь объяснить этот принцип в акустике некоему научному собранию, привел своих оппонентов на железнодорожный вокзал и уговорил машиниста проехать взад и вперед с включенным гудком. Оппоненты были посрамлены: частота звука заметно менялась. Сейчас эффект Доплера используется полицией для определения скорости автомобилей по изменению частоты отраженного радиолуча.

Минковский (1864—1909) преподавал Эйнштейну математику в Швейцарском политехникуме. Он был невысокого мнения о своем студенте и изумлялся его научным достижениям. Сам Эйнштейн в автобиографии кается в том, что уделял в юные годы недостаточное внимание математике.



До проявления интереса к СТО Минковский был не очень высокого ценил о физику. Он полушутливо говорил, что единственная польза, которую он из нее извлек, состояла в том, что ранее ему было неприятно садиться в трамвае на только освободившееся теплое сидение, но когда он понял, что тепло — это всего лишь движение молекул, чувство безразличия исчезло (это высказывание Эйнштейн приписывал М. Гроссману).

этому описанию СТО как геометрии пространства-времени часто называют геометрией Минковского.

## 6. Парадокс близнецов

Парадоксальные выводы теории относительности долго будоражили научные и околону научные круги (до сих пор находятся дилетанты, пытающиеся ее опровергнуть).

Наиболее долго в печати обсуждался такой парадокс. Предположим, что один из пары близнецов отправляется на сверхбыстрой

Теория относительности вызвала громадный поток публикаций, особенно возросший после окончания Второй мировой войны 1914–1918 гг.: письма ее автору доходили с написанным адресом «Европа, Эйнштейну». Знаменитый философ А. Бергсон (1859–1941, Нобелевская премия по литературе 1927) пишет книгу «Длительность и одновременность» и пробует вместить содержание теории относительности в рамки своей концепции интуитивизма, а известный этнограф В. Г. Тан-Богораз пытается доказать, что основные ее положения близки к представлениям чукотских шаманов о путешествиях душ в моменты медитации. Между этими крайними проявлениями была масса иных, не менее экзотических трактовок, популярностью пользовались и такие стихи: «Юная леди по имени Кэт \ Двигалась много быстрее, чем свет. \ Но не попадала всегда не туда... \ Быстро помчишься — \ Придешь во вчера» — они должны были ясно показать справедливость второго постулата Эйнштейна, невозможность скорости, большей, чем скорость света! (Цит. по: *Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.: Наука, 1989.*)

внес известный математик Герман Минковский: он переписал результаты Эйнштейна в более современной математической форме (через тензоры), показал их геометрический смысл, ему, в частности, принадлежат вошедшие во всеобщее пользование термины «световой конус», «мировая линия» и т. д. По-

ракете в дальнейшее путешествие, часы у него в ракете идут медленнее, чем у брата, оставшегося на Земле, возвратившись, он оказывается моложе своего брата-близнеца. Здесь пока никакого противоречия нет — все в согласии с теорией относительности.

Но, говорят оппоненты, давайте обострим ситуацию. Пусть эти близнецы расстанутся не на Земле, а в стыкованных рядом ракетах. Тогда ведь путешествовавший брат мог считать, что движется не он, а второй брат, и поэтому при встрече тот должен быть моложе!

Как будто возникает некое противоречие, названное парадоксом близнецов.

Парадокс этот, конечно, ложный: теория преобразований Лоренца и вообще теория относительности,

о которой мы говорили, называется частной или чаще специальной (СТО) — она описывает лишь явления в инерциальных, т. е.

не испытывающих ускорения системах (ускорения будут учтены в общей теории относительности — см. ниже). Поэтому становится очевидным, что поскольку для встречи братьев один из них должен был испытывать периоды ускоренного движения (разгон ракеты, ее разворот и торможение — для встречи с братом), то двигался именно он, и поэтому показания именно его часов, в том числе физиологических, определяющих возраст, должны быть меньшими.

Отметим, что в 1967 г. Джеральд Фейнберг (р. 1933) заметил такую особенность преобразований Лорентца: им не противоречит предположение, что существуют частицы, скорость которых *всегда* больше скорости света. Но такие частицы (их называли тахионы, от греческого «тахес» — быстрый) не могут уменьшить свою скорость и взаимодействовать с обычными частицами. Некоторые энтузиасты и сейчас ищут тахионы, но пока не найдены способы ни запретить их, ни обнаружить их проявления. (Наука, повторим, придерживается принципа «все, что не запрещено, может существовать».)

## 7. Соотношение масса — энергия

Со времен Ньютона в механике были два определения массы: второй закон Ньютона определяет так называемую инертную массу — соотношение между действующей силой и получаемым телом ускорением, а закон Всемирного тяготения определяет так называемую гравитационную массу (Ньютон безо всяких доказательств принял, что две эти массы численно равны).

Но если гравитационное поле ведет к образованию массы, то почему какая-то масса не может создаваться электромагнитным полем? Или по-иному: увеличивает ли наличие заряда инерционность тела, т. е. существует ли инертная электромагнитная масса? И если она существует, то полностью ли именно она обуславливает всю массу электрона?

Вопрос этот живо обсуждался в конце XIX в., обсуждается он и сейчас — решения пока не видно.

Первые расчеты электромагнитной массы электрона провел Дж. Дж. Томсон: можно ли считать его шариком, энергия которого обусловлена взаимодействием его частей, и сжимаемым согласно преобразованиям Лорентца? Минковский, человек эмоциональный, написал, что пытаться вводить твердый электрон в теорию Максвелла — это все равно что идти на концерт, заткнув уши ватой.

Но уже в конце 1905 г. Эйнштейн находит в рамках СТО более общий подход к подобным вопросам (доказывает его чуть позже): он

выводит самую, наверно, знаменитую формулу в истории науки — ее все же придется написать:

$$E = mc^2,$$

где  $E$  — это энергия, содержащаяся в теле,  $m$  — масса тела, а через  $c$ , по традиции, обозначается скорость света в пустоте ( $c$  — первая буква латинского слова *constantis* — постоянный),  $c \approx 300\,000$  км/с.

Согласно этой формуле, если бы удалось целиком обратить в энергию массу одного грамма вещества, то выделилось бы девяносто триллионов джоулей, примерно столько же, сколько при сгорании двух миллионов тонн высокосортного бензина. Однако, как станет понятно дальше, это вовсе не столь просто осуществить: такое превращение возможно только при соединении половины грамма вещества с половиной грамма антивещества...

Но есть и другие пути, правда, далеко не столь эффективные. По этой теории, если два атома соединяются в молекулу, то масса молекулы чуть меньше, чем сумма масс обоих атомов — это уменьшение массы можно назвать дефектом массы, а можно, благодаря формуле Эйнштейна, назвать энергией связи. Таким образом, возникает двойственность: можно говорить, что атомы соединены в молекулу благодаря электромагнитным силам, действующим между ними, а можно сказать, что у них отняли малую толику массы, и они не могут разойтись, пока эта масса не будет им возвращена — нагревом, поглощением фотона, электрическим полем и т. п.

Выделение энергии связи в химических реакциях (например, при горении) представляется нам достаточно большим, но если эту энергию, по формуле, разделить на квадрат скорости света то доля теряемой массы окажется столь мала, что измерить ее в прямом эксперименте пока невозможно. Однако при соединении частиц (протонов и нейтронов) в атомные ядра доля теряемой массы (и выделяемой энергии) уже достаточно велика — она может составить до 0,8 % от всей массы при превращении четырех атомов водорода в атом гелия — это теоретический максимум. Именно такое и несколько меньшее энерговыделение и является источником светимости звезд. (Отложим дальнейшее обсуждение до рассмотрения ядерных и термоядерных реакций.)

Любопытно заметить, что такой же подход применим и к рассмотрению, например, системы Земля—Луна: наряду с расчетом сил Всемирного тяготения можно сказать, что у членов этой пары не хватает энергии, т. е. массы, для того, чтобы освободиться от взаимного притяжения. Получаемая величина гравитационного дефекта масс оказывается порядка миллиардных долей полной массы, т. е. тоже слишком

мала для непосредственного экспериментального измерения, но грандиозна в сравнении с используемыми источниками энергии.

И еще одна очень важная особенность массы и инерции: у Ньютона масса есть неизменная константа, характеристика предмета. Но если тело движется, если возрастает его энергия, то согласно той же формуле

(или несколько более сложной) должна пропорционально расти и масса тела, его инертность. Поэтому наряду с массой покоя нужно ввести еще и понятие массы движущегося тела<sup>13</sup>, которая должна возрастать с увеличением скорости, как и кинетическая энергия. Такая формула выводится из преобразований Лорентца, и она показывает, что при стремлении скорости тела к скорости света масса тела должна стре-

В 1999 г., в печати появились сенсационные сообщения: свет удалось остановить! На самом деле полученные результаты были несколько скромнее, хотя и очень интересны — была создана среда из тождественных атомов при температуре в несколько микрокельвинов (т. е. отличной от абсолютного нуля на несколько миллионных долей градуса), в которой атомы могли поглощать фотоны определенной частоты и без потерь через некоторое время переизлучать их точно в таком виде, в каком они были поглощены. Но фотоны не останавливались — они поглощались!

миться к бесконечности — но это ведь означает, что с ростом скорости все труднее и труднее придавать ему добавочное ускорение. А это и показывает, формально, что нельзя достичь скорости света — сила для этого должна была бы быть бесконечной.

Ну а что же тогда с фотоном — он-то ведь движется именно со скоростью света? Этот вопрос неизбежно должен был стать перед Эйнштейном, автором обеих теорий: и квантов, и СТО. Выход гениально прост: свет ведь нельзя остановить, как можно было бы остановить любое тело, обладающее массой. Следовательно, масса покоя фотона равна нулю, причем не приближенно, а точно. (Эйнштейн даже не пишет об этом отдельно — вывод представляется ему очень простым и естественным.)

## 8. Ускорители и релятивизм

Современные ускорители частиц — в основном, электронов и протонов — разгоняют их до скоростей, очень близких к скорости света. Вот тут-то ярко и проявляются различия классической, ньютоновой механики и релятивистской (от латинского «релятивус» — относительный) механики СТО. Все эти машины приходится конструировать в соответствии с принципами релятивизма.

<sup>13</sup> В современной физике масса движения обычно не вводится, т.к. эквивалентна энергии; как масса рассматривается только масса покоя.

Рассказывают, что когда строительство большого ускорителя в США приостановилось (Сенат урезал суммы на самую крупную статью расходов — трансформаторное железо для огромных магнитов), то Джулиан Швингер, блистательный теоретик и расчетчик, собрал команду, и они совершили невозможное — пересчитали все магниты на сердечники из отживших свое время и потому практически ничего не стоящих старых рельсов вместо фигурных листов перво-сортного специального железа.

В синхротроне электрон разгоняется до энергии в несколько ГэВ (ГэВ — гигаэлектронвольт, или миллиард электронвольт, раньше обозначался как БэВ — миллиард эВ, это энергия, приобретаемая электроном при прохождении разности потенциалов в миллиард вольт). Сейчас проектируются или уже строятся ускорители, которые смогут при-

дать частицам в тысячи раз большую энергию — ускорители в диапазоне ТэВ, т. е. триллионы или тысячи миллиардов эВ.

При такой энергии масса частицы, а следовательно и инерция, становится в 10 000—100 000 раз больше массы покоя. Соответственно требуется в 10 000—100 000 раз более сильное магнитное поле, чтобы удержать такой электрон на круговой орбите ускорителя, при этом скорости частиц отличаются от скорости света на одну миллиардную. Отсюда и гигантские размеры современных больших ускорителей — Большой адронный коллайдер, ускоритель Международного центра ядерных исследований (ЦЕРН) вблизи Женевы, собранный глубоко под землей, не уместился в Швейцарии — часть его оказалась во Франции (нужно было найти геологически безопасную площадку).

Такие машины стоят очень дорого, и поэтому их строят коллективно. Никто не может сказать, принесут ли эти исследования практическую пользу налогоплательщикам или нет, и когда можно эту пользу ожидать, но, во-первых, стоит вспомнить историю с английским королем Георгом IV, не ожидавшим ничего полезного от работ Фарадея, а во-вторых, как говорят, во время строительства ускорителя ЦЕРНа физиками и инженерами, работающими на нем, было сделано столько изобретений (все патенты брались на имя ЦЕРНа) по проходке туннелей, сбору конструкций, электротехнике и электронике сопутствующего оборудования, что доход от них превысил все расходы.

Ускорители показали, что говорить о проверке принципов СТО уже поздно: все они доказаны в инженерной практике.

## 9. Черенковское излучение, переходное излучение

Сергей Иванович Вавилов (1891—1951) много и успешно занимался исследованием люминесценции (от латинского «люмен» — свет), т. е. свечения различных материалов, вызванного их предварительным освещением (фосфоресценция, первоначально обнаружена на соединениях фосфора), а также химическими (например, гниением)

и механическими процессами (например, при раскалывании куска сахара) и т. д. В 1934 г. он поручил своему аспиранту Павлу Алексеевичу Черенкову (1904–1990) исследовать процессы люминесценции при облучении различных веществ потоком электронов от радиоактивных источников.

Черенков для уменьшения энергии этих электронов пропускал их через воду и вдруг обнаружил совершенно непонятное явление: вода, через которую проходил поток, начинала светиться слабым голубоватым светом. Черенкову довольно долго не удавалось уговорить кого-нибудь просто посмотреть на это свечение: оно было столь слабым, что для адаптации глаза нужно было долго просиживать в абсолютно темной комнате. Но когда Вавилов и другие убедились, что свечение действительно существует, его природа никак не проявлялась — это не люминесценция: оно мгновенно исчезало при отключении источника, его спектр никак не был связан со спектром воды, оно не зависело от температуры воды, да и наблюдалось оно и в иных жидкостях. Становилось ясно, что это совершенно новое явление.

Над ним упорно думали теоретики Игорь Евгеньевич Тамм<sup>14</sup> и Илья Михайлович Франк (1908–1990) и в итоге доказали, что это релятивистский эффект.

Их рассмотрение проводилось таким образом. Скорость света в воде определяется как скорость света в пустоте, деленная на показатель преломления (он для воды равен примерно  $4/3$ ), т. е. составляет около 225 тыс. км/с. Но электроны от радиоактивных источников могут иметь еще большую скорость — необходимо ведь только, чтобы она была меньше 300 тыс. км/с (они могут быть «сверхсветовыми» именно для этой среды). У каждого заряда есть собственное электрическое поле, которое должно при движении заряда за ним следовать, но оно-то ведь не может перемещаться со скоростью, большей скорости света в этой среде, и поэтому от электрона отрывается, т. е. меняется. Всякое изменение электромагнитного поля — это электромагнитная волна, надо теперь сосчитать длины волн, ее образующих, и показать, что этот спектр содержит частоты того голубого свечения, которые



<sup>14</sup> Игорь Евгеньевич Тамм (1895–1971) был не только замечательным физиком-теоретиком, по словам А. Д. Сахарова, «в нем, наряду с Ландау, советские физики-теоретики видели своего заслуженного и признанного главу».

наблюдает Черенков. Нужно, кроме того, выяснить, как и на какой длине пути электрон восстановит свое поле, и оно снова будет готово оторваться — это покажет какова может быть интенсивность свечения. (Позже выяснилось, что схожие формулы независимо вывели много раньше О. Хевисайд и А. Зоммерфельд, но... не подумали о том, где такое явление может иметь место, и их работы были забыты.)

Все эти представления и расчеты точно подтвердились в экспериментах — новое явление было названо черенковским излучением, а Черенков, Тамм и Франк были удостоены в 1958 г. Нобелевской премии. Сейчас черенковские счетчики широко применяются в физике и технике: так, например, по интенсивности этого излучения в водных рубашках ядерных реакторов судят об их работе.

В принципе, к этому явлению близко примыкают и эффекты переходного излучения, которое предсказали в 1942 г. Виталий Лазаревич Гинзбург (1916–2009, Нобелевская премия 2003 г., но за другие работы) и И. М. Франк: если заряженная частица переходит из одной среды в другую, в которой скорость света меньше, то собственное поле заряда должно быстро перестроиться, но любое изменение поля во времени ведет к излучению или поглощению электромагнитных волн. Поэтому при таком переходе заряд может излучать, а спектр и интенсивность этого излучения будут зависеть от скоростей света в обеих средах. Эффекты переходного излучения проявляются не только при переходе одиночных зарядов из одной среды в другую: при переходе должно изменяться собственное электромагнитное поле, например, электрического диполя (молекулы из двух разных атомов и т. д.) — все такие образования также должны излучать.

Эти эффекты были подтверждены экспериментами, и на их основе также создаются измерительные приборы.

## 10. Начала общей теории относительности (сокращенно ОТО)

В одной из рукописей Эйнштейна 1920 г. есть фраза: «И тогда мне в голову пришла счастливейшая мысль в моей жизни». Позже он рассказал во время выступления в Японии: «Я сидел в кресле в бернском патентном бюро, как вдруг мне в голову пришла мысль: „В свободном падении человек не ощущает своего веса!“ Я был поражен. Эта простая мысль произвела на меня огромное впечатление. Развив ее, я пришел к теории тяготения»<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Эти воспоминания Эйнштейна представляются психологически очень важными. Они показывают, что идея формируется в подсознании и потом, как-то сразу, про-

Эту мысль (она называется принципом эквивалентности Эйнштейна) мы и постараемся понять.

Ясно, что оставить теорию тяготения Ньютона без изменений нельзя — в ней ведь взаимодействие распространяется мгновенно, т. е. с бесконечной скоростью, и может, в принципе, разгонять тела до любой скорости — может придать телу скорость, большую скорости света. Еще в ходе работы над СТО Эйнштейн думает о том, как включить в нее гравитационное поле — трудности возникают уже потому, что в нем ведь все тела движутся ускоренно, а СТО не рассматривает ускоренное движение.

Но вот в той же рукописи он пишет: «Для наблюдателя, падающего с крыши, гравитационное поле, по крайней мере в его ближайшем окружении, не существует». И далее поясняет: если вместе с ним падают и другие предметы, то получается, что относительно некоторой, небольшой, локальной системы (с ним падающей) он может считать себя находящимся «в покое».

Отсюда Эйнштейн определяет принцип эквивалентности: можно найти такую систему отсчета, движущуюся с ускорением (например, ракету), в которой не нужно учитывать гравитационное поле — постоянное ускорение не отличимо от однородного поля тяготения. Таким образом, нельзя рассматривать тяготение и инерцию по-отдельности, точнее, как писал Эйнштейн: «Закон эквивалентности тяжелой и инертной масс предстал передо мной во всей своей значительности. Его существование поразило меня, и я почувствовал, что именно здесь должен быть спрятан ключ к более глубокому пониманию инерции и гравитации». (При этом, отметим, приходится отказываться от простых преобразований Лорентца, точнее, нужно усложнять их учетом гравитационных полей, в каждой точке разных.)



Еще Галилеем был установлен закон о том, что все тела, вне зависимости от своей массы, падают с одинаковым ускорением (Галилей не мог учесть разности ускорений с высотой поднятия). С центростремительным ускорением падает на Землю спутник — мы уже говорили, что сложение в каждой точке двух движений, инерционного по касательной к орбите и падения на центр, формируют орбиту. И поскольку спутник свободно падает, в нем выполняются условия наступления невесомости (аналогично: ввиду свободного падения Земли на Солнце мы не ощущаем солнечного притяжения — наш вес определяется лишь силой притяжения к Земле).

рывается в сознание. Такое утверждение Эйнштейн высказывает уже на склоне лет в автобиографических записках. Психологически удивительным является и обращение Эйнштейна к давно, казалось бы, пройденным этапам истории, к классикам науки.



До начала работы над ОТО все работы Эйнштейна писались легко, как бы изливались сами — это как бы «моцартовский» (любимейший композитор!) период его творчества. Но с теории тяготения, с построения ОТО начинается, можно сказать, «бетховенский» период с его тяжким трудом, сомнениями, переработкой статей. Как пишет Эйнштейн, ему пришлось преодолеть «довольно извилистый и неровный путь». Здесь в начале работы ему не хватает математического багажа — нужно выяснить, есть ли подходящие математические конструкции, и на помощь снова приходит сокурсник, математик Марсель Грассман (1878–1936), конспекты которого некогда спасали гораздо более ленивого студента Эйнштейна. В ОТО, как указал ему Грассман, для изложения этих идей придется пользоваться аппаратом абсолютного тензорного анализа, как будто специально развитого до того итальянскими математиками (так возникли две совместные статьи Эйнштейна и Грассмана, промежуточные в истории построения ОТО).

Дело, собственно, вот в чем: в механике Ньютона пространство описывалось геометрией Евклида (три оси) и к этому добавлялась еще независимая ось времени. В такой геометрии можно рисовать векторы (направленные отрезки), определяемые любыми величинами координат, например изображать зависимость скорости по одной из осей от времени. В СТО уже нельзя было считать эти четыре оси независимыми — в трактовке Минковского, принятой Эйнштейном, четырехмерное пространство описывается геометрией Римана. Поэтому, например, все векторы в этом пространстве делятся на две группы:

времени-подобные (скорости меньше скорости света) и пространственно-подобные (скорости больше скорости света), но последние запрещены.

А в соотношения ОТО, определяющие геометрию, входят уже параметры гравитационного поля: оказывается, что не только большие скорости замедляют ход часов, но и сильные гравитационные поля. Эти же поля сокращают пространственные размеры: помните, как в СТО тела сжимались в направлении своего движения? Но здесь положение иное: гравитационное поле занимает место пустого пространства СТО, а поэтому и оно само уже сжимается, по разному в разных точках — вводится понятие искривленного четырехмерного пространства-времени, пространство становится неевклидовым. (Интересно отметить, что еще в первой половине XIX в. великий математик Гаусс думал о проверке сохранения на больших расстояниях и в сильных полях геометрии Евклида, но тогда эта проверка оказалась невозможной.)

Итак, наличие гравитационного поля меняет и геометрию пространства, в котором поле находится, и «скорость» течения времени в этом пространстве. Теперь к движению тел в гравитационном поле можно подойти по-иному, исходя из соображений геометрии.

Давайте вспомним, как Фарадей описывал электрическое поле геометрически — с помощью силовых линий и эквипотенциальных (т. е. с равным потенциалом) поверхностей. Мы обычно считаем, что в поле можно вносить очень маленький (пробный) положительный заряд и проследивать силы, которые на него действуют. При этом

допустимы такие картинки: положительный заряд, образующий исследуемое поле, находится на вершине острого пика, стороны которого поднимаются вверх тем круче, чем больше величина заряда, отрицательные же заряды изображаются столь же остро спадающими вниз впадинами. Если в такое поле поместить неподвижный положительный пробный заряд, то он будет скатываться с вершин и устремляться к впадинам по кратчайшим, так называемым геодезическим кривым, постепенно набирая скорость, т.е. кинетическую энергию.

Математически ОТО является очень сложной теорией. Трудности расчетов в ней можно пояснить таким образом: некая масса создает гравитационное поле, но само это поле обладает энергией, а следовательно и массой, которая в свою очередь создает вторичное гравитационное поле, опять-таки обладающее энергией, и все должно начаться с начала, как в наборе вложенных друг в друга матрешек (уравнения такого типа с членами, влияющими сами на себя, называются нелинейными). Обычно приходится где-то останавливаться, отбрасывать остальные поля и довольствоваться приближенными решениями. Помимо того, все остальные поля, например, электромагнитное, также должны вносить свой вклад в поле тяготения: поскольку у них есть энергия, то согласно формуле Эйнштейна, ее можно переписать через массу — т.е. добавочное поле тяготения.

Если принять, что пробный заряд имеет изначально некую скорость по касательной к линиям силы и не может увеличивать эту скорость (точнее, момент импульса), то он будет вращаться по некоей орбите вокруг одиночного большого заряда по сечению того конуса (или впадины), которые создают эти заряды: по кругу, эллипсу — или начнет уходить по параболе или гиперболе.

Аналогичная картина теперь соотносится и с гравитационным полем, но здесь нет вершин — только одни впадины (в отличие от электричества, гравитация ведет только и только к силам притяжения, роль заряда играет величина массы). Поэтому наряду с описанием поля тяготения на основе сил Всемирного тяготения или дефекта масс, ОТО ведет к третьему представлению: поле центральной звезды искривляет пространство, а планеты как бы катятся (можно говорить об «инерции») по своим геодезическим траекториям в этом искривленном пространстве. И в этом концептуальное отличие от электродинамики Максвелла, а следовательно и от СТО — там все сводится к полю, в ОТО происходит фактический отказ от поля, на его место вступает геометрия. (Сам Эйнштейн говорил, что все его другие теории были бы, с некоторой, возможно, задержкой, предложены и другими теоретиками, а вот ОТО вряд ли появилась бы в течение ряда десятилетий, лет так 50-ти.)

## 11. Экспериментальные проверки ОТО

Первой и самой важной в этом направлении является проверка принципа эквивалентности: действительно ли равны инерционная и гравитационная массы? Очень скрупулезная проверка соответствия этих

масс была проведена, независимо от ОТО, в 1889—1908 гг. бароном Лорандом фон Этвешем (1848—1919) в Венгрии — Эйнштейн, надо заметить, узнал об этом уже после разработки своей теории.

Проблемой в расчетах движения планет Солнечной системы по закону Всемирного тяготения являлось смещение перигелия (самой ближней к Солнцу точки эллиптической орбиты планеты) Меркурия. Еще Леверье, который открыл «на кончике пера» планету Нептун, обнаружил, что это смещение, 38 угловых секунд за столетие, никак не укладывается в абсолютно точную картину движения планет по Ньютону—Лапласу. Предполагалось даже, что такое расхождение указывает на наличие еще одной планеты — ее искали долго и упорно, но не нашли.

А вот ОТО показала, что все правильно: Меркурий — самая близкая к Солнцу планета, он вращается в самом сильном поле тяготения, в котором уже заметны отклонения ОТО от закона Ньютона. И Эйнштейн получил точно наблюдаемые цифры.

Следующая проверка была уже оптической. Световые волны несут энергию, а энергия пропорциональна массе, следовательно, гравитационное поле должно действовать на световые лучи — загигать их в свою сторону. Отклонение это очень мало, и проверить его тогда можно было только во время солнечного затмения: положения звезд около края Солнца, согласно ОТО, на фотографиях должны быть в эти моменты несколько смещены.

Экспедиция, отправленная в Россию из Германии для наблюдений затмения 1914 г., не смогла доехать до места наблюдения из-за начала военных действий. Успех сопутствовал экспедиции Артура Стенли Эддингтона, астронома и физика-теоретика: 19 мая 1919 были получены фотографии звезд, и 6 ноября 1919 г. президент Королевского общества Дж. Дж. Томсон оглашает результаты обсчета полученных данных — Эйнштейн полностью прав, лучи отклоняются точно на предсказанный угол, на 1,7 угловых секунд! Томсон провозглашает открытие Эйнштейна «одним из величайших — а может быть, и самым великим — достижением в истории человеческой мысли!»

В этот день произошла, если можно так выразиться, «канонизация» Эйнштейна — он становится самым знаменитым человеком мира. И это легко понять: только что закончилась самая кровопролитная на то время война в истории человечества, Европа в руинах, голод в Германии, продолжаются непонятная гражданская война в России, погромы и резня на территориях бывшей Османской империи. И тут теорию ученого из Германии, гражданина Швейцарии, подтверждають ученые Англии — как будто восстанавливается интеллектуальное

братство бывших врагов, прославляется не воин, не создатель нового оружия, а человек, познающий тайны Вселенной, новый Ньютон!

Говорят, что лишь один человек, из тех кто узнал о сообщении Эддингтона, остался невозмутимым — это был сам Эйнштейн, он ведь и так знал, что лучи отклоняются!

В последующем все эти эффекты не раз проверялись со все возрастающей точностью — соответствие ОТО было полным.

Отклонение света в гравитационном поле объясняет такое интересное наблюдение. В 1960 г. были открыты мощные далекие источники электромагнитного излучения, квазары (сокращение от английского обозначения — квазизвездные источники радиоизлучения), которые, по-видимому, представляют собой активные ядра далеких галактик. Сейчас обнаружено много квазаров, но удивительно то, что среди них имеются пары (и даже одна четверка), почти абсолютно одинаковые и расположенные очень близко друг к другу. Поэтому возникло предположение (1979), что такие пары — это один квазар, излучение которого по пути к нам проходит через область мощного гравитационного поля и преломляется в нем, давая два (или даже четыре) изображения — т. е. могут существовать гравитационные «линзы».

Эффект Мессбауэра, о котором мы будем говорить, позволил достаточно легко проверить и такое предсказание ОТО: если свет распространяется в гравитационном поле, то должна меняться его энергия, т. е. частота электромагнитного излучения. (Этим способом точность предсказаний ОТО проверена вплоть до величины в 0,04 %.)

Согласно принципу относительности, скорость распространения гравитационного поля не должна превышать, в своей системе отсчета, скорости света. Как же будут распространяться изменения такого поля? Естественно предположить, что такой процесс должен быть волновым.

Теория относительности и сам Эйнштейн стали предметом поклонения и... моды. Писали, что человек не мог быть принятым в «обществе», если не был способен с умным видом поговорить о них. В Англии и Бельгии Эйнштейна поселяли в королевских дворцах, из Иерусалима ему с женой пришлось сбежать через два дня: по приказу британского генерал-губернатора просыпание ученого отмечалось по утрам артиллерийским салютом, а при выезде на автомобиле в город их пытался сопровождать эскадрон драгун.

Новые взгляды, конечно, принимались не сразу. К известной эпитафии А. Поупа на смерть Ньютона: «Был этот мир глубокой тьмой окутан. / Да будет свет! И вот явился Ньютон», — добавляли строки: «Но сатана недолго ждал реванша. / Пришел Эйнштейн — и стало все как раньше» (перевод С. Маршака).

Один из самых интересных и важных для космологии выводов ОТО состоит в том, что чем сильнее гравитационное поле, тем медленнее течение времени. Этот эффект был проверен прямым методом: брались две пары одинаковых часов и одни из них поднимали на гору Плато Роза (в Италии, близ Турина) — оказалось, что часы на вершине, в более слабом поле, уходили вперед на 30 наносекунд в день (опыт неоднократно проверяли, согласие с ОТО было полным).

Но зарегистрировать эти волны очень сложно: гравитационное поле во много раз слабее электромагнитного, а быстро сдвинуть большие массы невозможно. Основные надежды при этом возлагаются на анализ таких явлений, как вспышки звезд: в нескольких местах Земли в тщательно экранированных подземельях подвешены много-тонные однородные болванки (гравитационные антенны) — если они одновременно «вздрагнут» во всех лабораториях на разных континентах и это явление можно будет увязать, скажем, со взрывом сверхновой или столкновением пульсаров, то станет возможным пересчитать скорость и интенсивность гравитационных волн. (Описание фактического открытия существования гравитационных волн, как и другие подтверждения предсказаний ОТО отложим до главы о космологии и астрофизики.)

## Отступление II

### Научные школы

*Ученый, ты объясняешь нам науку, но кто объяснит нам твоё объяснение?*

Дж. Г. Байрон

Когда-то Вильгельм Оствальд разделил всех ученых на «классиков» и «романтиков», однако, критерии, им выбранные, отнюдь не являются бесспорными. Можно придумать много иных способов распределить ученых, о которых мы рассказываем, по группам: по национальности, по социальному происхождению, по отношению к религии, по социальным или философским убеждениям, по родному языку (он как-то отражается на ментальности человека, хотя, вероятно, не в полном соответствии со штампами: основательность немецкого, артистичность итальянского, сдержанность английского, остроумия французского), по отношению к женщинам... Вероятно, можно использовать для анализа характера любовь или нелюбовь к музыке: страстные ее поклонники — Больцман, Планк, Эйнштейн, Гейзенберг, Л. Альварец, Фейнман, равнодушные — Бор, Резерфорд, Ферми, Ландау и др., а может быть, критерием классификации ученых способно послужить и их отношение к спорту. Можно рассуждать о скорости реакции или о скорости решения задач (как на экзаменах), но тут такое противоречие: Эйнштейн, Ферми, Ландау мгновенно выдавали ответ, а вот Планк, Бор, Паули, а еще дольше Давид Гильберт, подолгу обдумывали даже достаточно простые вопросы.

Физики иногда вдруг начинают развлекаться, почти по-детски, какой-нибудь заковыристой задачей. Так в 1976 г. во время большой международной конференции по высоким энергиям Л. Б. Окунь решил проверить скорость решения задачи: «К стене прикреплена резиновая полоса, и по ней к свободному концу ползет улитка. Достигнет ли она этого конца, если полосу растягивать с произвольной скоростью?» Спрошенные начинали с азартом что-то вычислять, но А. Д. Сахаров ответил через несколько секунд и написал полный ответ тут же, на ресторанной салфетке: опрос сразу же утратил остроту...

Представляется, что психологически наиболее интересным является деление на две такие группы: на тех, кто смог создать научные школы, воспитать учеников, близких по научным интересам к учителю, и на тех, кто был и остался яркой, но одинокой индивидуальностью.

Практически ни одного ученика не было у Фарадея, Максвелла и Гиббса (в их случае можно, хоть и с натяжкой, говорить об отсутствии массовости в науке, о том, что неоткуда было их находить, хотя тогда же школа была у Гельмгольца). Ну а уже в XX в. одиночками оставались Планк, Эйнштейн, Шредингер, Дирак, Сахаров.

В то же время огромные школы исследователей сформировались вокруг Дж. Дж. Томсона, Э. Резерфорда, Н. Бора, М. Борна, П. Эренфеста, Э. Ферми. В России—СССР такие школы создали А. Ф. Иоффе (в первый период — с участием П. С. Эренфеста), Л. И. Мандельштам и И. Е. Тамм, Л. Д. Ландау, Н. Н. Боголюбов.

Ученые делятся и по своему отношению к научной литературе: кто-то внимательно следит за работами в своей области, широко пользуется библиотекой, а другие, если можно так выразиться, «все держат в голове».

Лев Давидович Ландау почти с самого начала научной деятельности занялся воспитанием и формированием будущих ученых. Уже с 1935 г. он последовательно создает свой «Курс теоретической физики»<sup>16</sup>: уникальный по объему изложения, полноте и одновременно

Примечательный пример человека, который может сам, без каких-либо книг под рукой, построить целую теорию, представляет история известного математика и механика Жана Виктора Помселе (1788–1867): офицер армии Наполеона, он попал в 1812 г. в российский плен и провел три года в Саратове, где написал, конечно безо всяких пособий, основополагающие трактаты по проективной геометрии.

по сжатости материала курс Ландау—Лифшица включает много новых и/или методически переработанных результатов авторов.

Ландау заставлял своих будущих учеников сдавать знаменитый теоретический минимум: теоретик, по его мнению, должен знать основы всех областей физики (полно-

стью — два экзамена по математике и основные книги «Курса» — этот минимум сдали 43 человека). Первый экзамен (у любого желающего, достаточно было просто позвонить ему) он всегда принимал сам, а это был экзамен по математике: нужно было взять какие-то там интегралы, не сверхсложные. Но если претендент использовал при этом известные стандартные подстановки, то его сразу же выгоняли: Ландау считал, что человек должен думать и идти своим путем, пусть он даже длиннее, а не использовать готовые рецепты, т. е. это был экзамен на оригинальность и самостоятельность мышления.

<sup>16</sup> Практически все книги писал Евгений Михайлович Лифшиц (1915–1985), обо-зненные популярностью «Курса» завистники бурчали, что в книгах нет ни одной фразы Ландау и ни одной мысли Лифшица. Это достаточно далеко от истины: последние два тома вышли через много лет после кончины Ландау. Запланированное некогда в 4 кни-гах последнее издание, под редакцией Льва Петровича Питаевского (р. 1933), вышло в 10 томах.

Энрико Ферми создал две школы — в Италии до отъезда в 1938 г. и затем в США. Он всегда на семинарах и в обсуждениях вслух разбирал возникающие проблемы до конца, т. е. до выявления именно тех фундаментальных положений, которые играли роль. Поэтому решение задачи строилось затем уже на основе простейших примеров. Ну а поскольку все это проделывалось устно — тут же на доске, то ученики получали предметные примеры того, как нужно работать. Изданные черновики его подготовки к лекциям ясно показывают весь путь расчетов и размышлений: тут нет блеска Ландау, его изумительной математической техники, зато больше внимания к аналогиям, к простым примерам.

С научной литературой Ферми обходился по-иному: он читал краткую аннотацию к статье, а затем сам проводил расчет — если совпадало с результатом автора, статья считалась правильной и навсегда запоминалась, если нет — она отвергалась.

Все это показывает, как представляется, основные различия двух выделяемых групп ученых. «Учителя» мыслят логически, поэтому они могут показывать, как именно идет ход рассуждений, и этот подход могут перенимать слушатели. У «индивидуалистов» превалирует интуитивный подход, а его-то и нельзя ни объяснить, ни передать другим. Собственно, о том же говорит Эйнштейн в своих воспоминаниях: идеи возникают и формируются в смутном, невербальном виде, т. е. не на словесном уровне.

Если принять популярное среди психологов мнение о том, что левое полушарие мозга отвечает за логические построения, а правое — за эмоциональные, т. е. и за интуитивные реакции, то ученых можно разделить на две группы: на левополушарных, у которых довлеет логичность, а отсюда и возможность показать ход размышлений другим, обучить их, и на правополушарных, которым иногда и самим не ясно, откуда и как появилась первая идея (потом, конечно, всему должно найтись логическое объяснение, и поэтому по законченной работе трудно установить психологический тип автора-профессионала).

Ландау с молодых лет, после появления первых учеников, перестал сам читать научную литературу: новые работы, свои и чужие, сотрудники рассказывали на семинарах, он их прерывал, тут же показывал новые пути и указывал на недоработки авторов — его «скорость» мышления была уникальной — вот это и была наглядная учеба! Говорят, что дома у Ландау не было ни одной научной книги: великолепная память и возможность в любой момент вывести все необходимые соотношения самому делали их излишними (могу свидетельствовать об отсутствии научных книг дома у А. Д. Сахарова).



Квантовая механика<sup>17</sup>

*На каждом существенно новом этапе познания нам всегда следует подражать Колумбу, который отважился оставить известный ему мир в почти безумной надежде найти землю за морем.*

В. Гейзенберг

## 1. Первый сольвеевский конгресс

В 1911 г. Вальтер Нернст сумел уговорить химика и удачливого предпринимателя Эрнеста Сольве организовать в Брюсселе конгресс для обсуждения проблемы квантов. На конгрессе собрались, за исключением П. Эренфеста и чрезмерно молодых еще Н. Бора и П. Дебая, все активно работающие ученые, в частности, встретились в первый

и последний раз Эйнштейн и Пуанкаре, но вопросы теории относительности там не обсуждались: все внимание уделили постоянной Планка. Мы уже не раз говорили, что для описания поведения физической системы нужно задать в какой-то момент времени ее координаты и скорости или импульсы — это так называемые начальные условия, которые позволяют специализировать для рассматриваемого случая уравнения движения. Если же нужно рассматривать поведение большого числа частиц (их ансамбля), то есте-

ственно, в одномерном случае, взять лист бумаги, нарисовать две оси (координату и импульс) и расставить точки — положения и импульсы

Значимость постоянной Планка можно частично иллюстрировать такими соображениями. Еще математик и механик Адриен Мари Лежандр (1752–1833) доказал замечательное свойство основных уравнений механики: если в уравнениях теории все координаты заменить на импульсы, а переменные времени на переменные энергии (или наоборот), то полученные уравнения имеют физический смысл. При этом необходимо подчеркнуть, что произведения импульса на координату и энергии на время имеют всегда одинаковую размерность — размерность функции действия. Таким образом, сама функция действия, при преобразовании Лежандра, не меняется — является инвариантом (латинское «инварианс» — неизменная).

<sup>17</sup> Превосходное популярное изложение основ квантовой теории, хотя и с некоторыми расчетами, дано во втором томе «Физики для всех» Леона Купера (о нем самом — ниже, при рассмотрении сверхпроводимости).

всех частиц в начальный момент времени, такой рисунок называется фазовой плоскостью. Площадь всех квадратиков на такой фазовой плоскости имеет размерность функции действия, а густота точек покажет начальное распределение ансамбля, и можно будет думать, что с ним произойдет при нагреве, передвижении и т. д. При этом преобразование Лежандра просто-напросто означает, что этот рисунок можно повернуть — переобозначение осей дает второе возможное состояние безо всяких вычислений.

Со времен Максвелла такой метод построения распределений является основным для статистической физики. Но при этом всегда встает вопрос о том, каковы должны быть размеры тех квадратиков, на которые делится эта фазовая плоскость. И вот, во время обсуждений на конгрессе начало становиться яснее, что площадь квадратиков должна быть пропорциональна постоянной Планка.

А затем стало ясно и более глубокое соображение: частицы, находящиеся в одной ячейке фазовой плоскости, можно считать неразличимыми, т. е. приписывать им одинаковые физические параметры. Так еще раз, помимо поглощения абсолютно черного тела, фотоэффекта и удельной теплоемкости, на сцену выходит постоянная Планка, а с ней — квантовая теория.

## 2. «Старая» квантовая механика

Первые расчеты Бора относились в основном к атому водорода, отчасти к гелию. Теперь нужно было рассмотреть более сложные атомы. Этот период развития теории закончился примерно к 1922 г., и называется он старой или боровской квантовой механикой. Основывалась она главным образом на принципе соответствия, предложенном Бором: если рассматривается такое состояние системы, при котором величиной постоянной Планка можно пренебречь, то все соотношения должны переходить в соотношения классической, т. е. неквантовой, теории.

Отметим, что схожий принцип применим, конечно, и к релятивистским, т. е. соответствующим теории относительности, выражениям: если в них можно устремить скорость света к бесконечности, то они должны перейти в соотношения механики Ньютона или соответствующие выражения электродинамики.

Как писал Макс Борн, «теоретическая физика жила этой идеей следующие десять лет. Искусство угадывания правильных формул, которые отклоняются от классических, но переходят в них, в смысле принципа соответствия было значительно усовершенствовано».

Принцип этот носил, конечно, эвристический характер, но все же помогал найти приближенные выражения и, в частности, помог объяснить структуру периодической системы элементов Менделеева, которая первоначально строилась исключительно на сходстве физико-химических свойств веществ.

Уже рассмотрение спектров атома водорода привело Бора к введению понятия электронных оболочек (или уровней) атома: есть первый уровень, второй, третий и т. д. По старой традиции, они обозначаются не в порядке алфавита: первый — это К-уровень, а потом идут L-уровень, M-уровень и т. д. Номер уровня называется главным квантовым числом и обозначается как  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Энергия электрона на уровне убывает обратно пропорционально квадрату главного квантового числа.

Но если электрон вращается по орбите, то у него, как и у планеты, должна быть не только определенная энергия, но и определенный момент импульса, который определяет форму этой орбиты (напомним, что Второй закон Кеплера как раз и соответствует закону сохранения момента импульса планеты). Размерность момента импульса равна размерности функции действия, поэтому естественно предположить, что он пропорционален постоянной Планка, а если учесть его зависимость от кинетической энергии, то получается, что он должен равняться постоянной Планка, умноженной на  $(n - 1)$ , или быть меньше, т. е. определяться главным квантовым числом. Такое квантовое число называется орбитальным.

В Солнечной планетной системе все орбиты находятся примерно в одной плоскости (плоскость эклиптики). Объясняется это, во-первых, наиболее вероятным происхождением всех планет из одного вращающегося протопланетного облака, а во-вторых, силами притяжения между планетами. В случае атома и при рассмотрении электронных орбит этих ограничений нет, но если атом внесен в магнитное поле, то магнитный момент, индуцируемый током (каждый электрон на орбите может рассматриваться как круговой ток), пропорционален моменту импульса: орбита может быть перпендикулярна силовым линиям поля, может развернуться на 180 градусов, может стать под углом к этим линиям. Но ведь можно потребовать, чтобы при всем при этом энергия в поле оставалась целой, кратной (в соответствии с принципом квантования) какой-то величине. Таким образом возникает еще одно квантовое число, азимутальное, т. е. отсчитывающее угол от азимута, от направления магнитного поля.

Теперь можно начать рассматривать периодическую систему элементов. В первой строке стоят водород (у него один электрон) и гелий с двумя электронами, а поскольку главное квантовое число равно

единице, то орбитальное равно нулю, т. е. орбиты электронов сами равномерно вращаются, и у этих уровней нет магнитных моментов (у атома водорода магнитный момент определяется моментом ядра, а у гелия полный момент равен нулю). Принимаем, что таким образом S-уровень (гелиевая оболочка) заполнен и со второй строки начинается заполнение Р-уровня.

Первый элемент второй строки, литий, содержит два электрона на первом уровне и один на втором, у бериллия там два электрона и т. д. вплоть до неона, у которого на втором уровне восемь электронов. А почему не может быть больше, почему после неона должна начать формироваться уже третья строка?

Бор может объяснить: главное квантовое число этого уровня равно двум, значит, допустимы орбитальное число нуль с нулевыми же азимутальными числами и орбитальное число один — с тремя азимутальными числами:  $+1, 0, -1$ . Итак, на втором уровне — четыре разных квантовых состояния. Если в каждом из них могут быть два электрона (потом будет доказано и объяснено это предположение), то получается, что на втором уровне как раз и помещается не более, чем восемь электронов.

И вот таким образом Бор объясняет все основные особенности периодической системы — это высшее достижение «старой» квантовой теории, для дальнейшего нужны новые идеи, новый прорыв. Многие более сложные вопросы этой теории разрешает глубокий физик и блистательный расчетчик Арнольд Зоммерфельд (1868—1951), неоднократно номинированный на Нобелевскую премию, но так ее и не дождавшийся.

Необходимо еще раз отметить, что в отличие от Ньютона, Максвелла, Эйнштейна, Шредингера, Дирака, фактически не имевших учеников, Бор был еще и прекрасным учителем: он создал так называемую копенгагенскую школу, в которую входили многие выдающиеся физики первой половины XX в.

Неоценимую помощь в работе Бора и его школы сыграли владельцы датского пивного концерна «Карлсберг»: осознавая роль Бора, величайшего своего соотечественника, концерн финансировал работу его института. Шутки того времени о «пивной основе» достижений Бора выдавали плохо скрываемую зависть ученых других стран — таких патриотов там не нашлось. Еще одной шуткой того времени были слова о том, что официальный язык в Копенгагене — это ломаный английский: физики собирались со всего света.

### 3. Индуцированное излучение

В 1916 г. Эйнштейн предпринимает новую попытку обосновать закон распределения Планка, но уже с учетом модели атома Бора.

Казалось бы, никакой особой проблемы не должно быть: если электрон переходит на верхний уровень, он поглощает фотон, а если

с верхнего, возбужденного уровня спускается вниз, то излучает соответствующий квант. Теперь нужно только определить сколько, при данной температуре, может быть возбужденных атомов — это определяется распределением Больцмана, а затем составить уравнение баланса поглощаемой и испускаемой энергии.

Но тут вдруг оказалось, что такой подсчет ведет не к распределению Планка, а к формуле Вина, давно уже отвергнутой как экспериментом, так и теорией.

И Эйнштейн вводит совершенно новый аспект проблемы излучения: он рассматривает резонансные явления. Суть здесь такова: предположим, что электрон сидит на одном из верхних уровней, при этом существует вероятность, что он спустится вниз и излучит фотон (вероятность эта определяется через обратное время его «жизни» на данном уровне), можно ли внешним воздействием убыстрить его спуск, сократить время жизни?

Эйнштейн рассуждает примерно так. Не будем забывать волновые свойства фотонов — это в какой-то степени и колебательный процесс, а в колебательных процессах попадание в резонанс, как известно может резко раскачать систему или, если действовать строго в противофазе, резко ее затормозить. Поэтому можно думать, что, если на атом с возбужденным электроном налетит фотон точно той же частоты, т. е. попадет в резонанс, то электрон в атоме раскачается и быстрее соскочит вниз, излучит фотон. А это означает, что помимо обычного, спонтанного (от латинского «спонтанеус» — самопроизвольный) излучения может происходить в резонансном поле и индуцированное (или стимулированное, от латинского «стимулус» — острая палка, которой погоняли животных) излучение. Аналогично ему может иметь место и индуцированное, а потому более быстрое поглощение. И вероятности обоих этих процессов должны, конечно, зависеть от интенсивности действующего поля.

Оказалось, что только учет вероятностей этих процессов приводит к распределению Планка. (Здесь можно отметить, что уравнение, которым пользовался Эйнштейн при составлении баланса, относится к диофантову типу — одно уравнение с двумя неизвестными. Поэтому Эйнштейн принимает добавочное условие — он ищет только самое простое решение, но можно показать, что от этого вывод распределения Планка не меняется.) По поводу сделанных предположений Эйнштейн сказал: «Простота гипотез позволяет мне считать весьма вероятным, что это рассмотрение станет основой будущих теоретических представлений». Отметим, что Эйнштейн здесь снова использует двойственность, дуализм теории: фотон — и волна, и частица!

Предсказанные возможности существования стимулированного излучения долгое время учитывались разве лишь в астрофизике, хотя экспериментально существование этого эффекта было показано Рудольфом Ладенбургом (1882–1952) в 1928 г. Такое отставание как-то даже не совсем понятно: ведь довольно ясно, что этот эффект должен позволить сначала возбудить много атомов среды, т. е. заставить электроны в них переместиться на верхние уровни, а затем разом, пропуская резонансное излучение, можно заставить их всех излучать, создать мощный, хотя, возможно, и короткий световой импульс. (Здесь допустима некоторая аналогия с накоплением энергии конденсатора в электрической цепи — можно долго его заряжать, а затем быстро, с выделением высокой мощности, разрядить.) Можно думать, что задержка с экспериментами в этой области была обусловлена переключением всеобщего внимания на ядерные исследования.

Первым возможности осуществления такого интенсивного излучения в плазме газового разряда еще в конце 1930-х гг. начал исследовать Валентин Александрович Фабрикант (1907–1991) и получил, после задержки, вызванной участием в войне, мощные импульсы индуцированного излучения. Оптическая накачка была предложена и продемонстрирована Альфредом Кастлем (1902–1984, Нобелевская премия 1966) еще в 1950 г.

Любопытно отметить, что советское авторское свидетельство на оптический квантовый генератор суд присудил, уже в 1970-х гг., В. А. Фабриканту, но Нобелевскую премию он не получил.

Однако переход от научных исследований к их практическому воплощению оказался непростым. И гораздо больших успехов добились фактически одновременно, Александр Михайлович Прохоров (1916–2002) и Николай Геннадиевич Басов (1922–2000), с одной стороны, и Чарлз Хард Таунс (р. 1915), с другой, построившие в 1954 г. первый квантовый генератор на парах аммиака, мазер, послуживший прообразом при создании лазеров — наибольшего достижения оптики второй половины XX в., и удостоенные за это Нобелевской премии 1964 г. (Мы еще вернемся к лазерам.)

Таким образом, между теоретическим предсказанием Эйнштейна и практическим его воплощением в лазерах прошло около сорока лет...

#### 4. Спин электрона, квантовые статистики

К 1923 г. физики были озабочены исследованием особенностей эффекта Зеемана, т. е. расщепления атомных уровней в магнитном поле: получалось, что эти уровни расщепляются очень по-разному (меняется энергия, излучаемая атомом при возбуждении). При этом количество зеемановских уровней различно при наблюдении в направлении

Вольфганг Паули (1900–1958, Нобелевская премия 1945) — крестник Эрнста Маха, много с ним занимавшегося. В 18 лет, по предложению Эйнштейна, написал книгу по теории относительности, ставшую классической. Построил первую теорию спина, выдвинул гипотезу о существовании нейтрино, доказал теорему о связи спина со статистикой и т. д. В течение многих лет признавался высшим арбитром при выдвижении новых фундаментальных идей в физике, был бескомпромиссным, очень жестким критиком. Так, в одних воспоминаниях приводится разговор Паули с его почитаемым учителем Н. Бором: « — Заполчите, Бор! Не стройте из себя дурака! — Но, Паули, послушайте... — Нет. Это чушь. Не буду больше слушать ни слова». В других мемуарах есть его ответ Л. Д. Ландау на просьбу указать ошибку: «Почему же я должен за Вас искать Вашу ошибку? Думайте сами».

В фольклоре физиков известен еще и такой «эффект Паули»: стоило ему взглянуть на любой прибор, как тот мгновенно выходил из строя, — поэтому его визитов страшно боялись экспериментаторы.

магнитного поля и перпендикулярно к нему. Таким образом, зеемановское расщепление указывает на наличие тонкой структуры атомных уровней.

Самым загадочным казалось то, что основная линия в спектре лития или его аналогов, в котором есть только один внешний (на верхнем уровне) электрон, разлагается в магнитном поле на два уровня — но если у них все квантовые числа одинаковы, то и энергии должны быть одинаковы. Чем же можно объяснить эти различия?

В день получения Нобелевской премии (1945) Вольфганг Паули вспоминал: «Один из коллег, повстречавший меня, когда я бесцельно бродил по прекрасным улицам Копенгагена, дружески сказал мне: „Вы

выглядите очень несчастным". На это я ответил свирепо: „Как можно выглядеть счастливым, думая об аномальном эффекте Зеемана!“».

Паули высказал предположение: есть какая-то особенность, чисто квантовая, которая разрешает двум и только двум электронам быть в одинаковом состоянии, некая двужначность. Но с чем она связана?

И тут, два молодых физика Сэмьюэл Гаудсмит (1902–1979) и Джордж Юджин Уленбек (1900–1974), поддержанные их учителем П. Эренфестом, выдвигают совсем, на первый взгляд, дикую гипотезу: у электрона есть спин (от английского — «крутиться»), собственный момент импульса, и равен он половине постоянной Планка! Но при этом нельзя рассматривать электрон как волчок — этот спин нельзя ни увеличить, ни уменьшить, это неотъемлемая характеристика электрона. Нельзя наклонить спин электрона под произвольным углом — в любом поле он направлен либо по полю, либо против него.

Понятие спина оказалось чрезвычайно важным вот по какой причине. Согласно постулатам Бора, электрон при переходе на верхний уровень поглощает квант света, а опускаясь вниз, должен его излучить. Почему же некоторые электроны (например, третий электрон в атоме лития) остаются на высших уровнях, не опускаясь и не излучая?

Ведь, согласно общим положениям физики, состояние системы тем устойчивее, чем ниже ее потенциальная энергия.

И вот тут на сцену выступает Паули, он выдвигает принцип запрета, носящий его имя: в каждом квантовом состоянии может находиться только один электрон. Именно поэтому на гелиевом уровне находятся только два электрона — они различаются только направлением спинов, но для третьего электрона здесь места уже нет, и он садится на новый уровень, начинает новую оболочку. Таким образом, только принцип Паули создал твердую основу для объяснения строения периодической системы элементов.

Отметим также, что между частицами, имеющими такой спин, действуют, согласно Паули, сверхмощные силы, принципиально не позволяющие им достичь минимума потенциальной энергии — это положение, в частности, оказалось очень важным для астрофизики.

Существенно в связи с этой теорией и то, что спин может иметь также и атомное ядро, поэтому оно тоже влияет на расщепление атомных уровней, причем у разных изотопов одного и того же элемента это расщепление может быть разным — из-за разных спинов ядер изотопов. Отсюда, кстати, следует, что и химические свойства изотопов могут различаться, вопреки первоначальному мнению Бора о том, что химия от ядра не зависит. Это различие было использовано, через много лет, в одном из методов разделения радиоактивных изотопов.

Несколько ранее, в 1924 г. Эйнштейн получил странное письмо из Индии: некий Шатъендранат Бозе (1894—1974) просил просмотреть его соображения о том, какой статистике должны подчиняться фотоны и как можно выводить распределение Планка для них. Переведя письмо на немецкий, исправив несколько описок или ошибок и снабдив своим комментарием, Эйнштейн переслал статью в редакцию — и Ш. Бозе навсегда вошел в историю физики (никаких значительных его работ после этого не появлялось). В этой статье и в последующей, самого Эйнштейна, была построена квантовая статистика, т. е. распределение по энергиям (при заданной температуре) частиц с нулевым или целым спином. Теория эта называется статистикой Бозе—

Спин, как и обычный механический момент, всегда измеряют в единицах постоянной Планка, но эти слова опускают, говорят просто: спин равен половине, единице, полтора и т. д. Спин — понятие чисто квантовое, поэтому его невозможно описать в классических, привычных нам понятиях. Но очень приблизительно можно сказать так: частица со спином ноль выглядит одинаково со всех сторон, если частицу со спином один повернуть вокруг оси симметрии на 360 градусов, она вернется в исходное состояние, частицу со спином два нужно для этого повернуть только на 180 градусов (их можно изобразить картинками), а вот частицу со спином  $1/2$  нужно дважды полностью обернуть вокруг оси — представить ее картинкой уже невозможно!



Эйнштейна, а все такие частицы с тех пор называются бозонами, газ из них называется бозе-газом и т. д.

Но если у частиц спин равен половине, то и статистика у них должна быть иной: по принципу Паули, они ведь не могут находиться в одинаковом состоянии. Распределение по энергии для них предложили почти одновременно Энрико Ферми и Поль Дирак (1926), оно называется статистикой Ферми—Дирака, а частицы, которые ей подчиняются — фермионами. И только в 1940 г. В. Паули окончательно доказал теорему: все частицы с целым спином подчиняются статистике Бозе—Эйнштейна, а частицы с полуцелым спином — статистике Ферми—Дирака.

Таким образом, все частицы, которые уже известны или только могут быть открыты, делятся на два резко различных класса — фермионы и бозоны. (Сейчас обсуждается так называемая теория —

Бозе-конденсат можно передвигать как целое — весь вместе. И вот в 1995 г. Эрик Корнелл и Карл Виман смогли создать его из атомов рубидия и т. п. в разреженном газе при температуре 0,17 микрокельвин: в нем все атомы абсолютно одинаковы, находятся в абсолютно одинаковом состоянии и могут двигаться как нечто целое (Нобелевская премия 2001). Множество новых и неожиданных свойств такого конденсата сейчас активно исследуется.

точнее гипотеза — суперсимметрии, которая как бы пренебрегает этими различиями и рассматривает то общее, что может проявиться у фермионов и бозонов при очень больших энергиях. Но теория эта пока весьма далека от завершения.)

Отметим здесь только одну особенность бозевской статистики: в соответствии с ней любое число частиц

может иметь одинаковую энергию (можно сказать, что бозоны — «коллективисты», а фермионы — «индивидуалисты», так как в каждом состоянии они могут находиться лишь поодиночке). В частности, любое число бозонов может иметь энергию, точно равную нулю. Такое состояние называется бозевским конденсатом, и в отличие, скажем, от конденсации водяного пара, когда молекулы собираются вместе (координаты почти совпадают), конденсация по Бозе—Эйнштейну означает, что у них одинаковые, равные нулю импульсы, т. е. они полностью неподвижны. Образование бозе-конденсата является фазовым переходом (второго рода), при котором резко меняется энтропия системы.

К свойствам ансамблей частиц мы еще вернемся — ими объясняются сверхтекучесть, сверхпроводимость и т. д., а пока нужно рассмотреть ход развития квантовой теории.

## 5. Луи де Бройль

Следующий этап развития квантовой теории связан с именем принца Луи де Бройля. Он с ранних лет помогал брату, участнику первого Сольвеевского конгресса, редактору его трудов, и, следуя интересам

брата, увлекся изучением свойств электрона, а также квантовой гипотезой. Во время Мировой войны Луи де Бройль служил радистом в действующей армии и там, на фронте, по его воспоминаниям, задумался над тем, почему фотоны представимы — в разных процессах — то как волны, то как частицы: нельзя ли предположить существование такого же корпускулярно-волнового дуализма (двойственности) и у других объектов?

Напомним сначала истоки этого дуализма. Х. Гюйгенс принимал, что свет распространяется в виде волн, Ньютон предложил корпускулярную теорию света. При исследовании многих явлений выводы обеих теорий совпадают, и связано это с такой особенностью математических уравнений: картину распространяющихся волн можно заменить на картинку, где каждой волне соответствует перпендикуляр к ее поверхности (нормаль), а изменение и распространение этих векторов-нормалей как раз и описывает лучевую картину. Таким образом, для многих явлений математические описания в обеих теориях совершенно одинаковы.

Проблема синтеза (сочетания) двух теорий, волновой и корпускулярной, вновь всплыла после работы Планка и, особенно, после возникновения квантовой теории Эйнштейна. Как же подойти к этому?

Де Бройль вспоминал: «После долгих размышлений и раздумий я внезапно понял в 1923 г., что открытие, сделанное Эйнштейном в 1905 г., следует обобщить и распространить на все материальные частицы, в частности электроны», т. е. определить для каждой частицы, в зависимости от ее импульса, определенную длину волны. Длину этой волны (ее называют волной де Бройля) он определяет как постоянную Планка, деленную на величину импульса



На примере семьи де Бройль любопытно проследить, как менялись приоритеты в течение последних веков. Франсуа-Мари, 1-й герцог де Бройль (1671–1745) — маршал Франции при Людовиках XIV и XV, командующий армией в Войне за Австрийское наследство. Виктор, 2-й герцог (1718–1814) — маршал Франции, эмигрант во время революции. 3-й герцог, тоже Виктор (1785–1870) — уже не военный, дипломат Наполеона, затем пэр Франции, премьер-министр в 1835–1836 гг., а после переворота Наполеона III мемуарист и писатель, член Французской академии. Альберт (1821–1901), 4-й герцог — премьер-министр Третьей республики, затем историк, член Французской академии. Морис, 6-й герцог (1875–1960) — сначала морской офицер, затем физик, он оборудовал домашнюю лабораторию, в которой измерил (1908) заряд электрона, открыл метод фокусировки рентгеновских лучей, создал на этой основе спектрограф, вел работы по рентгеновской спектроскопии. Луи (1892–1987, Нобелевская премия 1929 г.), брат Мориса де Бройля, при его жизни принц де Бройль, с 1960 г. носил титул 7-го герцога де Бройль.

Явления интерференции, часть из которых сам Ньютон и открыл, не укладывались в картину лучей. Гениальный Ньютон понимал, что эти явления требуют введения некоторой периодичности в распространении света, и поэтому вынужден был выдвинуть гипотезу, согласно которой частицы света попеременно испытывают приступы легкого прохождения и легкого отражения. Это предположение, на первый взгляд весьма странное и искусственное, было первой попыткой объединить представления о корпускулярной и волновой природе света. Однако на многие годы оно оказалось забытым.

проверки этой гипотезы: поток электронов через малое отверстие «должен давать дифракционную картину».

Итак, согласно де Бройлю, не только фотоны ведут себя, в зависимости от условий опыта, то как волны, то как частицы, но и электронам

Эйнштейн сразу откликается на присланную ему диссертацию Луи де Бройля: «Младший брат де Бройля предпринял очень интересную попытку интерпретации квантовых правил Бора—Зоммерфельда. Мне кажется, что это первый робкий луч света, пролитый на самую темную из физических загадок». Он пишет Макс Бору: «Ты должен ее прочитать; даже если она выглядит безумной, она все же совершенно самобытна».

частицы: «Электрон не может более рассматриваться как простая крупица электричества; с ним следует связать волну». При этом де Бройль объясняет причины возникновения стационарных орбит Бора: на каждой орбите должно укладываться целое число введенных так длин волн, откуда выводится энергия электрона на этой орбите. А во второй статье, уже через две недели, он пишет о возможности экспериментальной

(точнее, любым материальным телам) должна быть свойственна такая же двойственность. Иное дело, что для тел макроскопических размеров дебройлевская длина волны может быть много меньше размеров самого тела, а потому и должна быть незаметна. Но для такого фундаментального изменения всех

представлений физики необходимы строгие экспериментальные подтверждения.

Эксперименты по дифракции электронов осуществили в 1927 г. Джордж Паджет Томсон (1892—1975), сын Дж. Дж. Томсона, а также, независимо, Клинтон Джозеф Дэвиссон (1881—1958) и его сотрудники К. Х. Кансмен и Л. Х. Джермер: гипотеза Л. де Бройля была экспериментально доказана, а Дж. П. Томсон и К. Дж. Дэвиссон были удостоены Нобелевской премии 1937 г.

Любопытна такая подробность этого открытия. Дэвиссон уже давно вел со своими сотрудниками эксперименты по рассеянию электронов на поликристаллическом куске никеля. Стимулом к исследованию дифракции послужил, как его потом называли, «исторический взрыв» сосуда с жидким воздухом в лаборатории: попав на мишень из никеля он сильно ее окислил. Для ликвидации окисления эту мишень многократно длительно нагревали в атмосфере водорода, и она незаметно перекристаллизовалась в монокристалл — теперь повторение

прежних экспериментов по рассеянию привело к появлению пиков на некоторых углах, которые и удалось интерпретировать через два года после «взрыва» как следствие дифракции волн де Бройля. (Дэвиссон признавался, что он в ходе экспериментов вовсе об этом не думал.)

В дальнейшем эксперименты по волновым проявлениям электронов и других частиц, вплоть до атомов, неоднократно и в разных вариантах повторялись. Наиболее красивыми мне представляются опыты В. А. Фабриканта, Л. М. Бибермана и Н. Г. Сушкина 1949 г.: они пропускали электроны на мишень поодиночке, и в итоге при некоторой выдержке на ней все равно получалась интерференционная картина.

Имел место исторический казус: Томсон-отец доказал, что электрон — частица, а Томсон-сын, что электрон — волна (говорили, что Джи-Джи никогда в жизни так не радовался, как в день присуждения премии сыну).

Нужно еще заметить, что сам Л. де Бройль, один из основателей квантовой теории, перестал соглашаться с ее выводами и пытался построить новую, уже не настолько вероятностную теорию. Но эти попытки остались безуспешными.

Уже вскоре после признания волновой природы электрона начала строиться электронная оптика, но о ней поговорим позже, в главе о микроскопах.

## 6. Вернер Гейзенберг

Во всей научной деятельности Вернера Карла Гейзенберга (1901—1976, Нобелевская премия 1932 г.) — по-видимому, с самого начала — можно проследить такой принцип: нельзя пользоваться понятиями, которые принципиально не допускают проверки на опыте. В этом он следует за Эйнштейном, отказавшимся от понятий абсолютного времени и пространства (формально такой принцип Гейзенберг вводит в 1943 г. в так называемой теории оператора эволюции или S-матрицы).

Однако уже в 1923 г., когда он был молодым и, как сам потом признавался, не очень образованным физиком и занимался формулами Бора для спектральных линий, пытаясь приспособить их к более сложным атомам (Бор рассматривал только водород и немножко гелий), Гейзенберг начал думать о том, возможно ли точно измерить подряд две физические величины.



В научной работе невозможно предугадать какие знания могут сыграть роль. Так Гейзенберг за три года до своего прорыва чуть не провалил экзамен на вопросе о разрешающей силе микроскопа, а потом признавался, что «в последующей работе над соотношением неопределенностей... воспользовался знаниями, приобретенными мною в результате плохой сдачи экзамена».

Рассуждения, их потом называли «микроскопом Гейзенберга», были таковы. Когда мы измеряем местоположение атома, мы его освещаем, т. е. посылаем на него хотя бы один фотон и фиксируем его отражение, но атом очень мал и взаимодействия с фотоном меняют его энергию, его

скорость. Поэтому, точно измерив его координаты, мы уже ничего не можем сказать о его скорости. Теперь попробуем поступить наоборот, измерить скорость: для этого мы должны дважды его осветить, узнать два его положения и их разницу разделить на время между наблюдениями. Но такие наблюдения, даже если каждый раз мы их проводим с одним единственным фотоном, сбивают атом с места, и потому после измерения скорости мы уже ничего не знаем о местоположении атома.

Итак, если измерения точны, то действует принцип «либо-либо»: либо положение, либо скорость.

Но что же получается, если эти соображения начать переводить на язык математики? Обозначим процедуру измерения положения буквой  $A$  (позднее стали говорить: «введем оператор  $A$ »), а процедуру измерения скорости — буквой  $B$ . Рассмотрим теперь действия с ними, при этом сразу же возникает вопрос: а почему, собственно говоря, можно в произведении двух множителей их переставлять, почему, например, мы всегда считаем, что  $AB = BA$ ? Ведь в применении к физике атома это означало бы, что можно сначала измерить местоположение атома, т. е. определить  $A$ , а затем его скорость, т. е.  $B$ , но можно ведь, наоборот, сначала мерить скорость, а потом положение. Так вот: разве в обоих случаях результаты будут одинаковы? А это означает, что  $AB$  может быть не равно  $BA$ .

Со всеми этими идеями Гейзенберг пришел к своему руководителю, мудрому и опытному Макс Борну. Борн тактично улыбнулся и сказал, что математики давно построили такие величины, которые нельзя просто так переставлять — это матрицы, т. е. не отдельные цифры или символы, а составленные из них таблицы. Оказалось, что, действительно, атомные переменные нужно рассматривать не поодиночке, а целыми матрицами.

Год спустя в первой своей фундаментальной статье Гейзенберг попытался избавиться от всяких моделей. Поэтому он отказался от представлений об электронных орбитах Бора с определенными радиусами и периодами обращения — эти величины не могли быть наблюдаемы. Таким образом, Гейзенберг, по словам М. Борна, «рассек гордые узел при помощи философского принципа и заменил догадки математи-

ческим правилом». Эта статья заложила фундамент так называемой «матричной механики», детальная разработка математического аппарата и физической интерпретации которой принадлежит, прежде всего, Борну.

Итак, повторим, был вновь подтвержден эмпирический принцип: физические теории могут иметь дело только с наблюдаемыми и измеримыми величинами.

Ну а то утверждение, что нельзя одновременно измерить, скажем, скорость и положение микрочастицы, так как первое измерение настолько меняет состояние объекта, что второе измерение даст совершенно иные результаты, называется принципом неопределенности Гейзенберга. Согласно этому принципу, произведения двух величин, неточностей измерения координаты частицы и неопределенности измерения ее импульса, равны постоянной Планка (или больше нее), аналогично определяются относительные неточности измерения и других величин. Правда, установление принципа неопределенности потребовало гораздо больше работы — дискуссии и уточнения продолжают по сей час.

В 1927 г. Бор сформулировал свой второй принцип, принцип дополненности, сделавший возможным непротиворечивое толкование явлений квантовой механики: получение информации об одних физических величинах неизбежно связано с потерей информации о других величинах, дополнительных к первым (вместе они называются канонически сопряженными, и их произведение является слагаемым функции действия). Принцип этот Бор сформулировал и так: «Понятие частицы и волны дополняют друг друга и в то же время противоречат друг другу; они являются дополняющими картинами происходящего».

Макс Борн пояснял, что необходимо «разумным образом использовать эти понятия». Он говорил, что, по сути дела, некоторая неопределенность есть и в классической физике. Так, например, «граница между жидкостью и ее паром также нечетка, потому что атомы постоянно

Первые обсуждения квантовой механики Гейзенберг проводил с Бором в Копенгагене, где Бор поселил его на своем чердаке. Обычно Бор взбирался туда вечером, принося сахар, какое-нибудь печенье и табак (оба были еще бедны, а Бор, как и Эйнштейн, был заядлым курильщиком), и споры продолжались иногда всю ночь: вырабатывалась так называемая копенгагенская интерпретация квантовой теории. «Я вспоминаю, — писал позднее Гейзенберг, — о многочисленных дискуссиях с Бором, которые длились до поздней ночи и которые мы заканчивали почти в полном отчаянии. И если я после таких дискуссий один отправлялся на короткую прогулку в соседний парк, то повторял снова и снова вопрос о том, может ли природа действительно быть такой абсурдной, какой она кажется нам в этих атомных экспериментах».

В 1947 г. Н. Бор был награжден высшим датским орденом Слона и должен был выбрать для себя герб и девиз к нему. Девизом он взял слова (на латыни): «Противоположности дополняют друг друга».

улетучиваются и конденсируются, и несмотря на это, мы можем говорить о жидкости и паре».

О том, как воспринимали эти идеи физики старшего поколения, рассказал в 1938 г. Макс Планк: «Смелость этой идеи была так велика, что я сам, сказать по справедливости, только покачал головой, и я очень хорошо помню, как господин Лорентц доверительно сказал мне тогда: „Эти молодые люди считают, что отбрасывать в сторону старые понятия в физике чрезвычайно легко!“ Речь шла при этом о волнах де Бройля, о соотношении неопределенностей Гейзенберга — все это для нас, стариков, было чем-то очень трудным для понимания».

Огромное значение принципа неопределенности для философии связано с тем, что, говоря словами Гейзенберга: «В сильной формулировке принципа причинности „если точно знать настоящее, можно предсказать будущее“ неверна предпосылка, а не заключение. Мы в принципе не можем узнать настоящее во всех деталях». Эти положения вызвали ожесточенную, не утихающую с тех пор полемику среди философов.

Помимо матричной квантовой теории и принципа неопределенности, Гейзенберг развил многие аспекты ядерной физики, ферромагнетизма, квантовой электродинамики и т. д. В 1957 г. он попытался построить общую теорию взаимодействия полей и частиц. Однако, как выразился Н. Бор, эта теория была

недостаточно сумасшедшей для того, чтобы быть правильной — имелось в виду, что она недостаточно новаторская.

Остается добавить, что при Гитлере Гейзенберг, единственный по-настоящему крупный физик не эмигрировавший из Германии, считался как бы фюрером арийской физики, хотя сам он, все же, нацистом не был. Именно ему было поручено возглавить работы по атомной бомбе. Но тут начинаются неясности: с одной стороны он как будто пытался повлиять на Бора, чтобы тот настоял на прекращении таких работ союзниками, и даже как будто специально затягивал немецкие разработки, а с другой стороны он, вроде бы, и сам не додумался до практической конструкции. Дело в том, что в мае 1945 г. он сумел уехать на велосипеде из советской зоны и сдать англичанам (один из самых крупных промахов сотрудников Берия!). Там его вместе с другими физиками интернировали и вывезли в Англию. Когда он услышал по радио о взрыве бомбы над Хиросимой, то сначала не хотел этому верить, и только через день-два собрал коллег и объяснил, видимо, только-только сообразив, как эта бомба сделана.

## 7. Эрвин Шредингер

Эрвин Шредингер (1887–1961, Нобелевская премия 1933 г.) долго не мог найти своей дороги в науке: занимался, и без особо заметных успехов, теорией цветов и цветового зрения, еще чем-то далеким

от магистрального направления науки. Одно- временно, правда, он пытался работать и в области теории относительности (ее он изучал в период затишья на фронте, будучи офицером австрийской крепостной артиллерии).

С 1921 г. Шредингер стал профессором в Цюрихе, и вот тут он нашел свою «экологическую нишу»: замечательный физико-химик Петер Дебай (1884—1966) попросил его разобраться в непонятных статьях Гейзенберга и рассказать о них на семинаре. Шредингеру не удалось увильнуть и пришлось засесть за эти работы. Но настоящему профессионалу, а он им стал, интересуясь самыми разными областями, легче самому что-то рассчитать, чем вдумываться в ход мыслей другого.

Шредингер вспомнил идеи Луи де Бройля, первого, кто предположил, что электроны могут себя вести в определенных условиях не как частицы, а как волны<sup>18</sup>.

Но как совместить эти две ипостаси электрона? И тут основной прорыв, основное озарение: Шредингер, сам по матери ирландец, вспоминает работы гениального ирландского математика Уильяма Гамильтона (1805—1865), в то время несколько позабытые. Гамильтон рассматривал такой вопрос: свет — это, несомненно, волны, но в некоторых случаях можно говорить не о волнах, а о световых лучах, которые распространяются так, как будут двигаться, скажем, брошенные твердые шарики. И поэтому можно для некоторых явлений рассчитывать вместо оптических волновых траекторий механические, что много проще. Вот эту-то полузабытую оптико-механическую аналогию и стал развивать Шредингер: он распространил волновое уравнение де Бройля, которое описывало движения без применения сил, на случай действия сил (говорят, что Дебай и задал на семинаре ключевой вопрос: «А что произойдет с волной де Бройля, если на нее будет действовать сила?»). Теперь он уже принимал, что «все — вообще, все — является одновременно частицей и волновым полем».

Так Шредингер пришел к своему знаменитому уравнению, без которого не обходится практически ни одна современная работа (по частоте использования оно стоит в одном ряду со Вторым законом



<sup>18</sup> В письме Эйнштейну от 23 апреля 1926 г. он пишет: «Все это дело не возникло бы ни теперь, ни когда-либо позже (я имею в виду свое участие), если бы Вы в Вашей второй статье о квантовой теории газов не щелкнули меня по носу, указав на важность идей де Бройля».



Ньютона и уравнениями Максвелла). Решение этого уравнения он обозначил греческой буквой  $\Psi$  (читается «пси»), и с тех пор буква  $\Psi$  стала самой частой во всех физических работах, иногда сама по себе, а иногда в устойчивом словосочетании:  $\Psi$ -функция Шредингера.

С этими работами, по словам Планка, «волновая механика, казавшаяся ранее чем-то мистическим, сразу была поставлена на прочное основание», и еще: «я читаю это, как ребенок, размышляющий над тайной». В то же время Эйнштейн писал Шредингеру: «Замысел Вашей работы свидетельствует о подлинной гениальности». (Любопытно отражаются и личные пристрастия ученых. Так Гейзенберг пишет В. Паули: «Чем больше я размышляю о физическом содержании теории Шредингера, тем сильнее делается моя неприязнь к ней».)

Развитие представлений о волнах материи от де Бройля к Шредингеру можно, в некотором смысле, сравнить с переходом от наглядных силовых линий Фарадея к уравнениям Максвелла — гениальная догадка и последовательная теория. Шредингер при этом оперировал строго классическими методами (его консультировал знаменитый математик Герман Вейль, профессор того же университета) и, кроме того, к его уравнению вели наглядные представления, знакомые физикам по иным волновым теориям, а это способствовало быстрому признанию волновой механики.

Вскоре после знаменитых пяти статей Шредингера (они написаны так, что были практически без переделок изданы в виде книги) стало ясно, что волновая механика ведет к правильным решениям в тех случаях, когда отказывает старая теория Бора. В первое время казалось, что в физике возникло двоевластие: с одной стороны была матричная механика Гейзенберга, с другой — волновая механика Шредингера: они виделись вначале совершенно различными. Но Шредингер довольно быстро сумел доказать, что обе эти формы равнозначны — вытекают одна из другой.

Самый большой вклад в исследование уравнения Шредингера, даже точнее, в прояснение его смысла, внес Макс Борн. Если до него это уравнение решали, чтобы получить значения тех или иных параметров атома (потом и молекулы), то Борн показал, что общее решение этого уравнения,  $\Psi$ -функция, является амплитудой вероятности, т. е. ее квадрат (точнее, квадрат модуля) равен вероятности перехода, соответствующего состояния и т. д. Сам Шредингер долго, но безуспешно пытался интерпретировать эту функцию через волны материи.

Попробуем пояснить, что это значит. Так, решениями уравнений Максвелла являются напряженности электрического и магнитного полей, а основными наблюдаемыми — переносимая ими энергия, которая

определяется квадратами напряженностей (точнее, квадратами их модулей, но это сейчас не существенно). Поскольку энергия, переносимая или поглощаемая полем, не может быть бесконечна, то это автоматически определяет класс функций, к которому принадлежат напряженности полей. Аналогично обстоит дело со всеми волновыми теориями,

Язывительный и остроумный Шредингер, переехавший из Берлина в Вену, был ярким критиком нацизма, так что его имя стояло чуть ли не первым в списке подлежащих повешению при аншлюсе Австрии гитлеровцами. В ночь, когда немцы в 1938 г. вошли в Вену, немолодой ученый с рюкзаком за плечами ушел из дома и на лыжах пересек Альпы. В Италии он явился в первый же монастырь и попросил известить Папу Римского Пия XI, а затем в одеянии, как говорят, кардинала был переправлен в Ирландию, президент которой де Валера, физик по образованию, был некогда его соучеником.

в том числе квантовыми. Таким образом, определен тип уравнения Шредингера, и соответствующая математическая теория (она называется теорией пространств Гильберта) позволяет тут же, например, доказать соотношения неопределенностей Гейзенберга без перечисления тех примеров и опытов, которыми он пользовался — опять, как и в случае с теорией Максвелла, уравнения оказываются умнее тех, кто их получил!

Нужно отметить, что сам Шредингер, а также А. Эйнштейн, Л. де Бройль и М. фон Лауэ не верили в справедливость такого чисто вероятностного подхода к квантовой механике и до конца жизни пытались с ним бороться, старались найти иные трактовки. О позиции Эйнштейна лучше всего говорят его слова в письме к Эренфесту 1926 г.: «К квантовой механике я отношусь восторженно-недоверчиво». А на склоне лет, в 1951 г., он пишет другу своей юности М. Бессо: «Все эти пятьдесят лет бесконечных размышлений ни на йоту не приблизили меня к ответу на вопрос: что же такое кванты света? В наши дни любой мальчишка воображает, что это ему известно. Но он глубоко ошибается». (Был ли Эйнштейн прав? — Не знаю.)

Шредингер был страстным сторонником идей непрерывности и пытался обойтись без «скачков квантов» при переходе электрона с одной орбиты на другую. Но ничего не получалось, и во время одной из своих бесед с Бором он даже в отчаянии воскликнул: «Если мы собираемся сохранить эти проклятые квантовые скачки, то я вообще сожалею, что имел дело с атомной физикой!» Бор ответил ему: «Зато остальные весьма признательны Вам за это, ведь благодаря Вам был сделан решающий шаг вперед в развитии атомной теории». Шредингер не принимал копенгагенскую вероятностную трактовку и даже в одной из последних своих статей писал, что скачки квантов казались ему «год от года все более неприемлемыми».

А физика, тем не менее, продолжала развиваться именно в русле этого вероятностного подхода, хотя споры и дискуссии по данным направлениям продолжают и сейчас — никто не сдается.

Шредингер был очень разносторонним физиком, помимо квантовой теории он много и плодотворно работал в других областях, и не только в физике. Его отчасти научно-популярная книга «Что такое жизнь? С точки зрения физика» стимулировала многочисленные исследования по генетике и биофизике, в том числе работы, которые привели к раскрытию наследственного кода. Оригинальны и интересны его философские труды — своими наставниками он называл Спинозу, Шопенгауэра и Маха, был близок к Бертрану Расселу. Писал он и стихи, рисовал и лепил.

## 8. Макс Борн

О Максе Борне (1882—1970, Нобелевская премия 1954 г.) мы уже много говорили выше. Но его роль в истории физики и особенно квантовой теории столь велика и поучительна, что необходимо все же кое-что добавить. Для развития этой теории оказалось очень важным то, что Борн изучал в студенческие годы такие разделы математики, которые тогда казались совершенно абстрактными. Так, из курса математики особенно важными для будущего оказались лекции по матричному исчислению. Они дали Борну первое представление об алгебраическом методе, который имеет дело не с отдельными числами, а со множеством чисел и функций одновременно, расположенных в прямоугольной, составленной из строк и столбцов схеме-матрице, что в то время в физике (кроме, пожалуй, кристаллографии) еще не использовалось. Отметим, что такое же положение до появления теории относительности было у неевклидовой геометрии Римана, неожиданно востребованной Эйнштейном по совету М. Гроссмана в 1915 г.

Борн первым начал создавать единую физику кристаллов на атомистической основе и при этом использовал теорию удельной теплоемкости Эйнштейна. Затем он, основываясь на работах Лауэ и Дебая, рассмотрел вопрос о собственных колебаниях пространственной решетки кристалла и попытался вывести упругостные и электрические свойства кристаллов из атомного строения их решеток. Любопытно отметить обстановку, в которой он, призванный в армию в войну 1914—1918 гг., работал: «После того как я утвердился в военном ведомстве, я нашел время для того, чтобы снова начать свою научную работу. В моем письменном столе имелось два выдвижных ящика, один был полон бумаг по звукометрии, в области которой я работал вместе с десятком других военнообязанных физиков, а в другом лежали мои соб-

ственные исследования». Его коллеги-физики поступали точно так же. «Мы были совершенно гарантированы от того, — пишет Борн, — чтобы наш майор заметил различие между акустическими формулами по звукометрическим методам и другими нашими иероглифами».

После окончания войны Борн переехал в Геттинген, где основал большую интернациональную школу теоретической физики, к которой принадлежали такие теоретики как Э. Ферми, П. Дирак, Р. Оппенгеймер, Мария Гепперт-Мейер, И. фон Нейман, Э. Теллер, Ю. Вигнер, Л. Полинг, Г. Гамов, В. Гайтлер, В. Вайскопф, Л. Розенфельд и другие ученые, многие из которых были удостоены Нобелевской премии. Ассистентами Борна в это время были В. Паули и В. Гейзенберг. С ним работали и многие советские физики: В. А. Фок, И. Е. Тамм, Я. И. Френкель и др.

Именно Борн первым употребил выражение «квантовая механика», продумал и обосновал ее вероятностное толкование. И хотя направляющая идея матричной механики принадлежит Гейзенбергу (это Борн всегда подчеркивал), математическое оформление этой гениальной идеи, ее развитие в теорию — прежде всего, если не исключительно — заслуга Борна. Он создал «новый стиль мышления о явлениях природы» — в этом и состоит его самая большая научная заслуга.

Хотя некоторые ученики Борна уже успели получить Нобелевскую премию за работы по квантовой теории, вклад его самого недооценивался вплоть до 1954 г., когда он, наконец, был награжден Нобелевской премией «за фундаментальные исследования по квантовой механике, особенно за его статистическую интерпретацию волновой функции». В Нобелевской лекции Борн описал истоки квантовой механики и ее статистической интерпретации и задал вопрос: «Можем ли мы нечто, с чем нельзя ассоциировать привычным образом понятия "положение" и "движение", называть предметом или частицей?» — и заключил: «Ответ на этот вопрос принадлежит уже не физике, а философии».

В автобиографии Макс Борн писал: «Мне никогда не нравилось быть узким специалистом. Я не слишком подошел бы к современной манере проводить научные исследования большими группами специалистов. Философское основание науки — вот что всегда интересовало меня больше, чем конкретные результаты». И еще: «Мой метод работы состоит в том, что я стремлюсь высказать то, чего, в сущности, и высказать еще не могу, ибо пока не понимаю этого сам».

Отметим также, что его книги по динамике кристаллической решетки и оптике до сих пор дают самые ясные и четкие изложения этих дисциплин.

## 9. Поль Дирак



Четвертым, после де Бройля, Гейзенберга и Шредингера, автором идей квантовой механики называют обычно Поля Адриана Мориса Дирака (1902–1984, Нобелевская премия 1933 г.). Это был углубленный в себя застенчивый и молчаливый человек (шутили, что законченную фразу он произносит не чаще, чем раз в високосный год), непревзойденный виртуоз математических расчетов и убежденный, даже воинственный атеист (Гейзенберг и Шредингер — оба искренне верующие, протестант и католик, так что уже этот пример показывает, что к успехам в науке религия отношения не имеет).

Изучая работы по квантовой механике (точнее, переписывая их по-своему), Дирак понял ее главный на то время недостаток — она никак не состыковывалась с теорией относительности, т. е. описывала лишь частицы с малой скоростью (по сравнению со скоростью света). Шредингер попытался снять ограничение на скорость в квантовой механике, обобщая соотношение  $E = mc^2$ , но не преуспел в этом: из него никак не получался спин электрона. Кроме того, это уравнение показывало такую странность: центр масс электрона может двигаться с любой скоростью, а вот у его заряда мгновенная скорость всегда одинакова и равна скорости света — явление это названо «дрожанием» Шредингера, оно проявляется во всех релятивистских уравнениях и до сих пор вызывает своей непонятностью головную боль у теоретиков...

Дирак принял во внимание такую особенность электрона: у него есть спин, который может иметь лишь два направления (условно, вверх и вниз). Спин — это новая степень свободы частицы, не сводимая к прежним. Значит, уравнение для него должно разделяться на два — с разным направлением спина. Но спин этот может переворачиваться, поэтому уравнения должны быть как-то взаимосвязаны: если подставить одно в другое, то вероятности перескоков спина будут полностью учтены, и тогда они должны перейти в соотношения Эйнштейна—Шредингера.

А теперь посмотрим, каково должно быть уравнение, чтобы при такой подстановке (фактически, при возведении в квадрат), оно возвращалось к данному соотношению.

Это соотношение представляет собой сумму квадратов энергии и импульса, но как извлечь квадратный корень из суммы квадратов

$(E^2 + P^2)$ ? И Дирак придумывает: корень из такой суммы равен сумме энергии и импульса, умноженных на какие-то величины:  $(\beta E + \alpha P)$ . При возведении в квадрат и последующем анализе выясняется, что эти величины  $\alpha$  и  $\beta$  являются матрицами 4-го порядка, т. е. таблицами с четырьмя строками и столбцами (они называются, конечно, матрицами Дирака). Но поэтому уравнение разлагается не на два уравнения, как ожидал Дирак, а на четыре (1928). Спин оно, правда, описывает и, кроме того, позволяет предсказать магнитные свойства электрона (магнитный момент), но, все же, у него четыре компоненты, хотя нужными кажутся только две!

Нормальный исследователь после этого должен был бы забросить такую задачу и поискать что-нибудь попроще. Но Дирак — гений, и он не сдается: первые два уравнения описывают электрон с двумя возможными направлениями спина, но два других соответствуют отрицательной энергии. Что же это может значить?

Дирак продолжает думать. Вначале казалось, что эта вторая частица соответствует протону, ядру атома водорода, но ведь масса у протона в 1836 раз больше массы электрона — идея не проходит. И в 1931 г. он придумал: отрицательный знак энергии можно перенести на переменную знака заряда, т. е. вместо электрона с отрицательной энергией должен существовать антиэлектрон с положительной энергией, но с зарядом противоположного знака!

При этом Дирак показывает, что пара — частица и античастица — может аннигилировать (от латинского «нигиль» — ничто), т. е. исчезнуть, превратившись, например, в два или три фотона. Такая аннигиляция ничему не противоречит: закон сохранения заряда выполняется, поскольку у пары полный заряд равен нулю, энергия и импульс передаются другим частицам, например, фотонам. И наоборот — фотон может превратиться в такую пару. Позднее стало ясно, что такая же аннигиляция может иметь место в любой паре частица—античастица, более того, если существуют звезды из антивещества, то они могут аннигилировать с обычными звездами — это единственный процесс, при котором превращение массы в энергию может быть полным. (Фантасты часто описывают полеты ракет, двигатели которых работают на процессе аннигиляции, но, увы, пока не видно никаких технических возможностей получения и хранения больших количеств антивещества!)

Предсказанный Дираком антиэлектрон был открыт в 1932 г. Карлом Д. Андерсоном (1905–1991, Нобелевская премия 1936 г.) в космических лучах и назван позитроном (гибрид латинского «позитивус» — положительный с греческим окончанием).

Впоследствии Дирак выдвинул гипотезу о том, что и другие частицы, такие, как протон, также должны иметь свои аналоги из антиматерии, но для описания подобных пар частиц и античастиц потребовалась бы более сложная теория. Существование антипротона было подтверждено экспериментально в 1955 г. Эмилио Сегрэ (1905—1989) и Оуэном Чемберленом (р. 1920), и они были удостоены Нобелевской премии в 1959 г. В настоящее время известны и многие другие античастицы, практически для всех известных частиц — их так много, что премии за них не присуждают.

Вернемся к Дираку. В 1927 г. он положил начало новой области — квантовой электродинамике, о которой еще будем говорить, в 1931 г. выдвинул красивейшую (как и все его работы!) идею о возможности существования магнитных монополей (о ней мы уже говорили). Дирак также высказал предположение о том, что фундаментальные физические константы, например гравитационная постоянная, могут оказаться не постоянными в точном смысле слова, а медленно изменяться со временем. Ослабление гравитации, если оно вообще существует, происходит настолько медленно, что обнаружить его чрезвычайно трудно, но в последние годы некоторые астрофизики пытаются именно этими изменениями объяснить некоторые странности, характерные для очень далеких галактик.

И еще одно провидческое высказывание Дирака. Ко времени получения им Нобелевской премии (1933 г.) были известны следующие элементарные частицы: протон, нейтрон (он не сомневался, что будут найдены их античастицы), электрон, позитрон и, конечно, фотон. И вот Дирак говорит: «С общепроизвольной точки зрения, число различных типов элементарных частиц (по крайней мере, так кажется на первый взгляд) должно быть минимально, например один или самое большее два... Но из экспериментальных данных известно, что число различных типов гораздо больше. Более того, число типов элементарных частиц обнаруживает в последние годы весьма тревожную тенденцию к увеличению». И эта тенденция подтвердилась — к 1960-м гг. их можно было считать сотнями, поэтому неизбежным стало новое направление исследований: сокращение числа частиц, сведение их к некоему минимуму, но об этом позже.

В развитии квантовой механики нужно отметить, по крайней мере, еще три события. Это, во-первых, выход в 1932 г. книги фон Неймана «Математические основы квантовой механики» — несмотря на прошедшие с тех пор многие десятилетия, книга эта с каждым годом становится все более востребованной — идеи, в ней изложенные, все еще не полностью исчерпаны и использованы. Во-вторых,

в 1948 г. Р. Фейнман дал новую математическую трактовку квантовой механики, третью после матричной и волновой — через бесконечно кратные или континуальные интегралы (позже оказалось, что схожую процедуру ранее ввел Н. Винер в теории броуновского движения). В-третьих, Джон Белл в 1966 г. снова оживил давнюю проблему существования или несуществования скрытых (непосредственно не наблюдаемых) параметров квантовых систем, но об этой проблеме рассказывать еще рано — дискуссии о ней, горячие и противоречивые, продолжают.

Заметим еще, что квантовая механика продолжила тенденцию объединения наук: с развитием квантовой теории фактически исчезла большая часть теоретической химии: структура и процессы образования молекул из отдельных атомов, взаимодействие молекул — все это теперь рассматривается в рамках квантовой механики как основы химической физики. В свою очередь, необходимость таких расчетов привела к развитию некоторых специфических методов приближенных квантовых расчетов. Постепенно, в основном через биохимию, такие методы проникают и в биологию.

## 10. Туннельный эффект

Рассмотрим такой процесс: по гладкому столу катится шарик, перед ним препятствие — бугорок. Если у шарика достаточно большая скорость (кинетическая энергия) для подъема на высоту бугорка (при подъеме растет его потенциальная энергия за счет кинетической), он через бугорок перевалит, если нет — скатится обратно, т. е. отразится. Можно придумать такую же задачу, где телу надо, например, преодолеть не механический бугорок, а область магнитного поля или отразиться от нее. Решения для макроскопических тел однозначные: или преодолевает, или отражается — все определяется соотношением энергий, кинетической у движущегося тела и потенциальной энергии препятствия (физики говорят: высотой потенциального барьера). И это потому, что можно, в принципе, точно определить величины энергий и тела, и барьера.

Но вот в квантовой теории все не так просто: согласно соотношению неопределенностей Гейзенберга, частица может на какое-то время отдать или получить добавочную энергию, нужно только, чтобы произведение величин этой энергии и этого времени не превышало постоянной Планка. Но поскольку явления такой «отдачи-получения» носят вероятностный характер, то частица с какой-то энергией может отразиться от потенциального барьера, а может и проскочить через него и тогда, когда ее энергия, казалось, достаточно велика для



Георгий (Джордж) Антонович Гамов (1904–1968) жил в Ленинграде. Будучи в командировке за рубежом и узнав об арестах своих друзей и коллег во время «Большого террора» 1930-х гг., остался за границей. Гамов создал теорию реликтового излучения и эволюции звезд (см. ниже), теорию генетического кода (он автор трех теорий нобелевского уровня!), написал ряд великолепных научно-популярных книг. Он запомнился коллегам и тем, что придумывал множество розыгрышей и шуток. В знаменитом Массачусеттском технологическом институте Гамов как-то предложил своим студентам такое задание: некая цивилизация достигла высокого уровня развития, но колесо в ней не было изобретено — нужно придумать машины и всевозможные устройства этого мира, не используя эффектов вращения. Результатом игры стал целый ряд серьезных изобретений.

проскока, и тогда, когда она меньше, чем следовало бы. Нужно рассчитывать вероятности обоих процессов.

Первым такие особенности квантовой природы понял Г. А. Гамов и построил на этой основе теорию альфа-распада атомных ядер (вспомним, что при радиоактивном распаде ядер урана выделяются, в том числе, альфа-частицы; возникающие элементы, в частности торий, опять-таки являются радиоактивными). Дело в том, что если рассчитывать в рамках классической теории энергию альфа-части-

цы, испущенной ядром тория, то она должна быть равна 26 МэВ (единицы величин энергии описаны в Приложении), а на опыте оказывалось, что она около 5 МэВ — этого явно недостаточно для вылета из ядра.

Гамов рассмотрел такую картинку: ядро представляет собой «яму» на графике потенциальной энергии — по формуле Эйнштейна, масса

Стуннельными переходами до сих пор далеко не все ясно: если вероятности переходов, энергетические параметры рассчитываются с огромной точностью, то вот временные параметры, длительность переходов — это камень преткновения для теории. Цифры, вычисленные разными методами, оказываются подчас диаметрально противоположными, вплоть до отрицательных значений, до того, что скорость перехода может в некоторых случаях быть выше скорости света.

ядра, т. е. связанных в нем частиц, меньше их полной массы в свободном состоянии. Поэтому можно считать, что потенциальная энергия частиц в ядре отрицательна, но так как частицы эти притягиваются друг к другу какими-то, в то время еще неясными ядерными силами, то чтобы выскочить из

ядра, нужно иметь достаточную кинетическую энергию или... просочиться сквозь барьер притяжения за счет принципа неопределенности.

Расчет полностью подтвердил все эти положения. Так возникла теория туннельных переходов.

Отметим, что эффекты туннелирования наблюдались, фактически, много раньше: еще Ньютон видел «незаконное» явление нарушенного полного отражения, частичного захода света в область, в классической теории запрещенную. Явления туннелирования лежат в основе термоядерных реакций, множества процессов в квантовой электронике: в полупроводниках и сверхпроводящих контактах и т. д.

Длительностью квантовых процессов, помимо оценок по принципу неопределенностей, физики заинтересовались довольно поздно: первые исследования провели Давид Бом и Юджин Вигнер только к середине 1950-х — сюда относятся не только туннельные переходы, но и длительности актов рассеяния частиц. Проблема, однако, оказалась очень не ясной — у разных ученых разные определения и мнения (к их числу относится и автор), но решающих экспериментов пока не видно.

А между тем, с развитием микроэлектроники знание величины этой скорости, ее зависимости от других факторов становится уже практически необходимым. Нужны дальнейшие исследования или даже новые теории!

## Сверхпроводимость и сверхтекучесть

### 1. Камерлинг-Оннес

В студенческие годы Хейке Камерлинг-Оннес (1853—1926, Нобелевская премия 1913) был учеником химика Р. Бунзена и физика Г. Кирхгофа, но более всего его заинтересовала теория газов Ван-дер-Ваальса. Эта теория устанавливала связь между давлением, температурой и объемом и позволяла учесть различия в поведении реальных и идеальных газов.

Камерлинг-Оннес понимал, что добиться новых результатов в этой области можно, только повысив точность измерений, и свой принцип:

Согласно теории Ван-дер-Ваальса, все газы ведут себя одинаково, если переформулировать единицы измерения давления, объема и температуры, учесть силы молекулярного притяжения. Проверку этой теории наиболее просто можно было бы провести при низких температурах, но для этого необходимо сжижать газы. Камерлинг-Оннес и выбрал генеральным направлением работы криогенику (от греческих «криос» — холод и «генос» — рождение, происхождение) — исследование низкотемпературных эффектов. Он проявил огромный талант организатора: сумел построить крупный завод по сжижению кислорода, азота и воздуха, а помимо того в 1909 г. открыл училище для подготовки механиков и стеклодувов. Его лаборатория стала образцом для научно-исследовательских институтов XX в.

«Через измерение к знанию», — провозгласил еще во вступительной лекции (он стал профессором в 1882 г.). Этому принципу он неуклонно следовал на протяжении сорока двух лет преподавания в Лейденском университете — измерения в физических лабораториях должны производиться с астрономической точностью. Для требуемого им улучшения качества эксперимента нужно было заново, на новой основе создать лаборатории и техническую базу.

Методы получения низких температур и сжижения газов исследо-

довались уже довольно долго, но ожигить удавалось лишь небольшие их количества. Только Камерлинг-Оннесу удалось создать заводскую установку, которая производила 4 литра жидкого водорода в час. (Впервые его получил в 1898 г. в мизерных количествах Дж. Дьюар, температура кипения жидкого водорода составляет  $-252,77^{\circ}\text{C}$ , или  $20,38\text{ K}$ , т. е. градусов по шкале абсолютных температур Кельвина.)

А через два года Камерлинг-Оннесу впервые удалось ожигить гелий при температуре всего лишь на  $4\text{ K}$  выше абсолютного нуля

( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) — многие ученые сомневались, что это вообще достижимо. Ну а с помощью жидкого гелия ему удалось достичь еще более низких температур: 1,38 К в 1909 г. и 1,04 К в 1910 (за это стремление достигать все более низких температур сотрудники Камерлинг-Оннеса называли его «господин абсолютный нуль»<sup>19</sup>). Однако сама по себе задача достижения низких температур не была его главной заботой — он хотел исследовать свойства веществ при таких температурах. Для этого изучались спектры поглощения элементов, флуоресценция различных соединений, вязкость сжиженных газов и магнитные свойства веществ. Дело в том, что с понижением температуры затухают случайные колебания и вообще движения атомов и молекул, которые затевают суть некоторых явлений, и это может, по любимому выражению Камерлинг-Оннеса, «приподнять завесу, которую простирают над внутренним миром атомов и электронов тепловые движения при обычных температурах».

Наиболее поразительное открытие Камерлинг-Оннес сделал в 1911 г., причем совершенно случайно: он исследовал, как с понижением температуры уменьшается электрическое сопротивление металлов, и вдруг обнаружил, что при определенных, очень низких температурах электрическое сопротивление некоторых металлов (ртути, затем свинца и др.) полностью исчезает: можно в кольцо из такого металла запустить какой-то ток, и он будет годами, если не поднимется температура, течь в нем безо всяких потерь. (Представляете, какой идеальный аккумулятор, а с ним и электромобиль можно, в принципе, создать на основе этого эффекта!)

Это явление Камерлинг-Оннес назвал сверхпроводимостью, он предположил, что объяснение сверхпроводимости будет дано квантовой теорией, но так его и не дождался — оно было дано только через 46 лет. Явление сверхпроводимости бросило вызов физикам и не было, по-видимому, ни одного, кто ни пытался бы как-то его понять, но все усилия оставались тщетными. Требовались совершенно оригинальные, «безумные», по определению Н. Бора, идеи — мы к ним вернемся чуть позже.

<sup>19</sup> С тех времен техника получения низких температур шагнула далеко вперед. В 1989 г. в Хельсинкском технологическом университете (Финляндия) группой Олли Лоунасмаа (р. 1930) была достигнута температура  $2 \cdot 10^{-9}$  К (двухмиллиардная часть градуса выше абсолютного нуля). Интерес к таким температурам обусловлен тем, что во многие соотношения входит отношение абсолютных температур, так что снижение температуры, скажем, от одной миллионной к одной десятиллионной градуса может привести к наблюдению того же порядка новых явлений, как переход от 1000 к 100 градусам Цельсия.

## 2. Сверхтекучесть: исследования П. Л. Капицы и Л. Д. Ландау



Петр Леонидович Капица (1894–1984, Нобелевская премия 1978 г.) в 1921–1934 годах работал в Англии с Э. Резерфордом. Там он в 1924 г. создал устройство с магнитным полем напряженностью в 0,5 миллиона гаусс — рекорд, продержавшийся до 1956 г. Затем он переключается на физику низких температур, и в 1932 г. специально для него в Кембридже строится Мондовская лаборатория Королевского общества. Однако во время очередного ежегодного приезда в СССР в 1934 г. у него отбирают иностранный паспорт и заставляют остаться в Москве.

В 1935 г. после ряда ходатайств и переговоров для него в Москве открывается Институт физических проблем, а Резерфорд добивается перевоза к нему всего оборудования кембриджской лаборатории (его привез сам П. Дирак): Капица может продолжать работу.

Здесь он завершает конструирование и постройку турбодетандера — мощной установки сжижения газов. Со времен Г. Дэви охлаждение газа проводили откачкой газа — его внутренняя энергия при этом тратится на расширение, и газ охлаждается, если же откачивается газ над поверхностью жидкости, то охлаждение происходит благодаря затратам энергии на испарение. В установке Капицы расширяющийся газ совершает добавочную работу, вращая турбину, и поэтому его температура понижается быстрее — таким образом возникает возможность получения промышленных количеств жидкого воздуха и его отдельных компонент<sup>20</sup>.

Газообразный гелий переходит в жидкое состояние при охлаждении до температуры ниже 4,2 К (т. е. ниже  $-269^{\circ}\text{C}$ ). И тут, продолжая изучение свойств жидкого гелия, П. Л. Капица в 1938 г. вдруг обнаруживает совершенно неожиданный эффект: при охлаждении жидкого гелия ниже температуры в 2,17 К (т. е. ниже  $-270,96^{\circ}\text{C}$ ) гелий или какая-то его часть, которую Капица назвал гелием-II, в отличие от обычного гелия-I, начинает проявлять необычайные свойства.

<sup>20</sup> Таким образом, Капица смог, постепенно конденсируя воздух, делить его на составные части и выделять чистый кислород. Это было очень важным техническим достижением, потому что применение технологии кислородного дутья в металлургии, которое Капица со своими сотрудниками очень быстро наладил, сыграло громадную роль во время Великой Отечественной войны 1941–1945 гг., обеспечив лучшую броню советских танков по сравнению с противником.

Гелий-II протекает сквозь мельчайшие отверстия с такой легкостью, будто у него полностью отсутствует вязкость — он может проходить через капилляры так, словно сопротивление его течению скачком падает до нуля. (Важно подчеркнуть, что это не какое-нибудь очень-очень малое значение сопротивления, а точно нуль!) Он поднимается по стенке сосуда, словно на него не действует сила тяжести, и обладает теплопроводностью, в сотни раз превышающей теплопроводность меди — Капица назвал гелий-II сверхтекучей жидкостью. Но при проверке стандартными методами, например измерением сопротивления крутильным колебаниям диска с заданной частотой, выяснилось, что гелий-II не обладает нулевой вязкостью.

Полное объяснение явлению сверхтекучести дал Л. Д. Ландау<sup>21</sup> на основе введения новых физических механизмов: он рассмотрел квантовые состояния объема жидкости почти так же, как если бы та была твердым телом.

Мы уже говорили о том, что при достаточно низких температурах возбуждения в твердом теле можно рассмотреть как наличие фононов — квантов звуковых колебаний, описывающих относительно нормальное прямолинейное распространение звуковых волн при малых значениях импульса и энергии. Помимо фононов, Ландау постулировал существование еще одного типа квазичастиц — ротонов, появляющихся при температуре больше 0,6 К

Можно было бы объяснить необычное свойство жидкого гелия возникновением каких-то квантовых эффектов — они проявляются только при очень низких температурах, но при таких, когда жидким остается только гелий, он — единственное вещество, не затвердевающее при обычных давлениях вплоть до абсолютного нуля. В 1938 г. Л. Тисса предположил, что жидкий гелий в действительности представляет собой смесь двух фаз: гелия-I (нормальная жидкость) и гелия-II (сверхтекучая жидкость), доля которого растет с понижением температуры. Когда температура падает почти до абсолютного нуля, доминирующим компонентом становится гелий-II. Эта гипотеза позволяла объяснить, почему при разных условиях наблюдается различная вязкость.



<sup>21</sup> В это время, в основном благодаря хлопотам Капицы и под его поручительство, Лев Давидович Ландау был освобожден из тюрьмы, где просидел год: во время «Большого террора» его обвиняли в антисоветской деятельности. Ласло Тисса незадолго до этого успел уехать из СССР, куда он ранее, спасаясь от наступающего фашизма, эмигрировал из Венгрии. (По воспоминаниям Э. Теллера, именно рассказ Тиссы о судьбе арестованного Ландау привел его к идеологии антикоммунизма и далее к инициативам по созданию водородной бомбы, чтобы противостоять возможной коммунистической агрессии.)

Согласно квантовой теории, одиночный атом, помещенный в круговой сосуд (бублик) при абсолютном нуле, может вращаться только с определенными скоростями, включая, конечно, и нулевую. В обычной жидкости — например, в воде — при закручивании такого кольца температурные колебания быстро и по-разному изменяют скорости отдельных частиц, так что вся жидкость будет вращаться вместе с сосудом. А в сверхтекучей жидкости атомы должны иметь нулевой полный момент и подчиняться статистике Бозе—Эйнштейна. Газ таких атомов при некоторой температуре  $T_\lambda$  переходит в состояние бозе-конденсата, в котором все частицы, как правило, имеют наименьшую энергию, соответствующую абсолютному нулю. Принимается, что лямбда-переход изотопа гелия-4 как раз и является точкой бозе-конденсации (все другие вещества успевают за-долго до этой температуры отвердеть).

при более высоких значениях импульса и энергии и вносящих различные вклады в теплоемкость, энтропию и т. д. Ротоны доминируют при температуре выше 1 К, фононы — ниже 0,6 К, и при температурах ниже 1,7 К систему квазичастиц можно рассматривать как идеальный газ.

Жидкий гелий, согласно этой теории (1941), можно рассматривать как «нормальную» компоненту, погруженную в сверхтекучий «фон». При истечении гелия сквозь узкую щель сверхтекучая компонента течет, а фононы и ротоны сталкиваются со стенками, которые их и

удерживают. Аналогично в эксперименте с крутильными колебаниями диска фононы и ротоны сталкиваются с диском и замедляют его движение, тогда как сверхтекучая компонента на эти колебания не влияет. Отношение концентраций нормальной и сверхтекучей компонент зависит от температуры<sup>22</sup>.

Теорией Ландау исследование явления сверхтекучести не закончилось: много нового внесли в нее Н. Н. Боголюбов, Р. Фейнман и др. Принятое сейчас объяснение сверхтекучести основывается на том, что огромное количество атомов оказываются при температуре ниже точки перехода (она называется лямбда-точкой) абсолютно одинаковыми, а поэтому должны описываться одной функцией. Но раз так, то всю систему в целом можно сравнить, скажем, с одним электроном, который не может, согласно Бору, вращаться по произвольной орбите.

Таким образом, ниже лямбда-точки какая-то часть всех атомов кооперируется и занимает одно из возможных квантовых состояний. Если сосуд вращать со сравнительно небольшой скоростью, эти конденсированные атомы останутся в покое относительно лаборатории, т. е. не будут вращаться, в то время как остальные атомы будут вра-

<sup>22</sup> В 1962 г. Л. Д. Ландау был удостоен Нобелевской премии «за основополагающие теории конденсированной материи, в особенности жидкого гелия» (мы уже отмечали универсализм Ландау и его большой вклад практически во все области физики). После страшной автомобильной аварии Ландау, по состоянию здоровья, не мог отправиться в Стокгольм для получения премии, и ему вручали ее в больнице. Но он так и не оправился и наукой более не занимался.

щаться вместе с сосудом. С понижением температуры все больше атомов будут переходить в такое покоящееся состояние. По той же причине при течении сквозь капилляры конденсированные атомы не могут поодиночке сталкиваться со стенками (испытывать трение): поскольку они должны сохранять, согласно статистике Бозе, прежнее состояние, сталкиваться они могут только всем коллективом, а так как такое столкновение мало вероятно, то они протекают через капилляр без трения.

### 3. На пути к теории сверхпроводимости

Самое интересное и загадочное свойство сверхпроводников, после открытия этого явления Камерлинг-Оннесом, обнаружил в 1933 г. Вальтер Мейснер (1882—1974): оказалось, что они являются совершенными диамагнетиками, т. е. препятствуют проникновению магнитного поля внутрь металла. Так, если попытаться опустить магнит на сверхпроводник, то он останется висеть над ним в воздухе: малейшее опускание магнита под действием собственного веса вниз вызывает в сверхпроводнике ток, создающий отталкивающее магнитное поле, но при движении магнита вверх — возникает поле, притягивающее его вниз — в итоге магнит слегка колеблется около положения равновесия<sup>23</sup>. Если, однако, приложенное магнитное поле достаточно велико, сверхпроводник теряет свои свойства и ведет себя подобно обычному металлу.

В 1935 г. Фриц Лондон (1900—1954) предположил, что диамагнетизм является фундаментальным свойством сверхпроводников и что сверхпроводимость представляет собой некий квантовый эффект, проявляющийся каким-то образом во всем теле. Вместе со своим братом Гейнцем Лондоном (1907—1970) он построил феноменологическую теорию<sup>24</sup> сверхпроводимости, предположив, что имеется определенная глубина проникновения магнитного поля внутрь сверхпроводника. Эта теория была далее развита уже в виде квантовой феноменологической теории В. Л. Гинзбургом и Л. Д. Ландау в 1950 г., что позволило рассматривать явления в сильных магнитных полях.

В 1950 г. был открыт так называемый изотопический эффект: оказалось, что температура перехода в сверхпроводящее состояние

<sup>23</sup> Такое положение физики называют «гробом Магомета» — согласно Корану, Аллах подвесил его гроб между зенитом и надиром, т. е. между верхней и нижней точкой мира.

<sup>24</sup> Феноменологическая теория объясняет явление на основе каких-то предположений, характерных только для данного явления и не выводимых из более общих теорий. Обычно построение такой теории является первым шагом к объяснению группы явлений на общепринятой основе или стимулирует создание новой общей теории.



различна у разных изотопов одного и того же металла и растет с ростом его массы. (Явление казалось чрезвычайно странным, так как электронные оболочки у всех изотопов абсолютно одинаковы — поэтому и электрические свойства должны были быть одинаковыми!) Но тогда следует принять, что эта температура, важнейший параметр вещества, зависит от состояния кристаллической решетки — от взаимодействия электронов с фононами, с колебаниями решетки.

Такое свойство сверхпроводников позволило Герберту Фрелиху (1905–1991) и Дж. Бардину предположить, что между электронами могут возникать какие-то силы притяжения, т. е. что в сверхпроводимости металла участвует взаимодействие между подвижными электронами (они относительно свободны, так что могут двигаться, образуя электрический ток) и колебаниями атомов металла, и что именно в результате этого взаимодействия создается связь электронов друг с другом.

#### 4. Эффект Купера и теория БКШ



Бардин со своими коллегами уже несколько лет изучал эти взаимодействия перед тем, как в 1956 г. к ним присоединился Леон Купер (р. 1930). Очень скоро Купер показал, что взаимодействие между электронами и кристаллической решеткой может порождать удивительные связанные пары электронов, что как будто противоречит физической интуиции.

Казалось бы, электроны должны всегда, как одноименно заряженные частицы, отталкиваться друг от друга. Но во время движения сквозь кристалл металла электрон притягивает окружающие положительно заряженные атомы и вызывает тем самым небольшую де-

формацию кристаллической решетки. Эта деформация в свою очередь создает кратковременную концентрацию положительного заряда, которая может при каких-то определенных условиях притягивать второй электрон. Таким образом, два электрона могут оказаться связанными друг с другом посредством кристаллической решетки, образуя так называемую куперовскую пару.

Свойства такой пары очень интересны: поскольку у каждого электрона спин равен  $1/2$ , то у пары спин уже целый — куперовская пара является бозоном. Но бозоны, как мы знаем, могут, в отличие от фермионов, образовывать бозе-конденсат, состояние с нулевой энергией

и т. д. Получается, что теперь можно рассматривать сверхтекучесть куперовских пар в сверхпроводнике — их движение без трения, т. е. без электрического сопротивления.

А потом Бардин, Купер и Шриффер смогли показать, что такие пары, взаимодействуя между собой, заставляют многие свободные электроны в сверхпроводнике двигаться в унисон, единым потоком. Как и догадывался Ф. Лондон, сверхпроводящие электроны образуют единое квантовое состояние, охватывающее весь проводник. Критическая температура, при которой возникает сверхпроводимость, определяет тот момент, когда влияние куперовских пар на координацию движения свободных электронов преодолевает хаос температурных колебаний.

Но если бы даже один электрон отклонился от общего потока (возникло бы сопротивление), то это было бы равносильно нарушению единства всего квантового состояния (бозе-конденсата пар), повлияло бы на другие электроны, а такое возмущение, разрушение целого ансамбля весьма маловероятно — точнее, может происходить только при токах, которые больше критических. Поэтому сверхпроводящие электроны перемещаются коллективно, без потери энергии.

Всего за один месяц Шриффер, Бардин и Купер обобщили эту модель, построив общую теорию сверхпроводимости. Названная БКШ-теорией (по инициалам трех ее создателей), она утверждает, что в сверхпроводящем материале большая доля свободных электронов ведет себя согласованным образом.

Некоторые физики считают теорию БКШ наиболее важным вкладом в теоретическую физику с момента создания квантовой теории. Джону Бардину, Леону Куперу и Дж. Роберту Шрифферу была присуждена Нобелевская премия по физике 1972 г.

Отметим, что в 1958 г. они с помощью своей теории предсказали сверхтекучесть жидкого гелия-3 (изотоп гелия, ядро которого содержит два протона и один нейтрон) за счет спаривания атомов, каждый из которых является фермионом, при температуре существенно ниже лямбда-точки гелия-4. (Сверхтекучесть наблюдалась ранее только у гелия-4 и считалось, что она невозможна у изотопов с нечетным числом ядерных частиц.) Этот результат подтвердили экспериментально в 1972 г. Дуглас Ошеров, Дэвид Ли и Роберт Ричардсон (Нобелевская премия 1996 г.), их работа также привела к некоторому пониманию

Бардин и Дж. Роберт Шриффер (р. 1931) попытались с помощью концепции Купера объяснить поведение обширной популяции свободных электронов в сверхпроводящем металле, но у них долго ничего не получалось. Когда Бардин в 1956 г. отправился в Стокгольм получать Нобелевскую премию, Шриффер уже готов был признать поражение, но напутствие Бардина («Все образуется!») запало ему в душу, и ему удалось-таки развить статистические методы, необходимые для решения данной проблемы.

того, как формируются другие структуры, похожие на струны, которые могли возникнуть во время Большого взрыва.

Еще один важный пример такого спаривания «по Куперу» представляют собой нейтронные звезды: пары нейтронов (у каждого спин  $1/2$ ) также образуют бозон, а потому могут находиться в сверхтекучем, низшем по энергии состоянии. Только такие спаривания и могут объяснить свойства этих звезд.

## 5. Туннельные контакты и эффекты Джозефсона

Согласно классической физике, в электрической цепи, разорванной барьером из изолятора, постоянный ток течь не будет. Однако квантовая механика допускает «туннелирование» электронов через достаточно узкий барьер, и чем он тоньше, тем вероятность туннелирования выше. Эффект туннелирования (мы уже не раз говорили о нем) был установлен для ядер, но никогда не проверялся на макроскопических контактах.

Лео Эсаки (р. 1925) решил попытаться проверить эффект туннелирования на полупроводниковых диодах. Диод проводит ток в одном направлении и содержит барьер, не пропускающий ток в противоположном направлении. Барьер образуется, когда содержание носителей заряда вблизи области перехода обедняется, и при увеличении концентрации примесей ширина обедненной области уменьшается. Группе Эсаки удалось создать диоды с очень высокими концентрациями примесей, т. е. с высокой вероятностью туннелирования, и показать, что электрические характеристики таких диодов согласуются с квантовыми представлениями.

Но тут вдруг совсем неожиданно выяснилось, что если туннельные токи в диодах велики, то в некотором диапазоне изменений тока производная сопротивления диодов становится отрицательной — напряжение на диоде падает с увеличением тока (в обычном резисторе ток пропорционален напряжению — это закон Ома!).

Цепь, в которую включено такое отрицательное сопротивление, может генерировать высокочастотные колебания. Такие туннельные диоды (диоды Эсаки) с переходами шириной всего лишь в одну миллионную сантиметра (тридцать атомов по толщине) сразу же после создания их первых образцов в 1957 г. начали использоваться для генерации и детектирования в технике высоких частот.

Примерно в те же годы Айвар Джайевер (р. 1929), работая в «Дженерал электрик», исследовал электрическое поведение переходов, состоящих из металлических контактов, разделенных очень тонкими

изолирующими слоями. Эта работа представляла технический интерес, поскольку в большинстве электрических металлических контактов их поверхности разделены тонкими изолирующими слоями окислов и загрязнений.

Джайевер, инженер-электрик по первоначальному образованию, заинтересовался явлениями сверхпроводимости и начал изучать теорию БКШ. Согласно теории, в сверхпроводниках должна существовать так называемая энергетическая щель — область энергий, которые электрон не может иметь, запрещенные энергии. Вот Джайевер и решил выяснить, влияет ли такой запрет на электрические свойства перехода из изолятора между нормальным металлом и сверхпроводником.

Он обнаружил, что запрещенные энергии легко наблюдаемы и их можно измерять с помощью разработанной им раньше методики. Эти наблюдения стали подтверждением теории БКШ. А дальнейшие исследования напыленных пленок алюминия, разделенных только слоем окисла алюминия, показали, что электрические свойства таких переходов позволяют получить огромное количество информации о характеристиках атомных колебаний и поведении сверхпроводников. Метод туннелирования Джайевера быстро стал одним из основных способов наблюдения и определения свойств сверхпроводников.

Брайан Д. Джозефсон (р. 1940) в ранние студенческие годы занимался эффектом Мессбауэра. В 1962 г. он, как говорят, поспорил с экзаменатором, что можно найти случай, когда постоянный ток течет через разрыв в электрической цепи. Вспомнив, возможно, о работах Джайевера он теоретически рассчитал, как будет вести себя аналогичный контакт между двумя сверхпроводниками: получалось, что ток может течь через изолятор и при отсутствии разности потенциалов между двумя проводниками (стационарный эффект Джозефсона), — если барьер достаточно узок, то куперовскую пару могут образовывать два электрона, находящиеся по разные его стороны. Это был

Эффекты Джозефсона оказались необычайно важными в практическом применении. Так как частота переменного тока зависит от приложенного к контакту напряжения и отношения заряда электрона к постоянной Планка, то это позволило резко увеличить точность измерения их отношения. На основе этих эффектов созданы новые квантовые стандарты напряжения и т. д. Соединяя в замкнутую цепь два джозефсоновских контакта, экспериментаторы сконструировали необычайно чувствительные датчики магнитного поля. Такие устройства, называемые скивдами (от англ. сокращения *SQUID* — сверхпроводящее квантовое интерференционное устройство), являются самыми чувствительными детекторами магнитного поля. Они применяются в медицине для измерения магнитных полей живых организмов (например, выявления заболеваний мозга), для составления магнитных карт и детектирования объектов, скрытых под поверхностью. На основе эффектов Джозефсона создаются элементы криоэлектроники — перспективного направления конструирования компьютеров и т. д.

совершенно неожиданный, не согласующийся с классическими моделями результат.

Джозефсон также предположил, что если к такому контакту приложить разность потенциалов, то через него пойдет осциллирующий ток с частотой, зависящей только от величины приложенного напряжения (нестационарный эффект Джозефсона). Оба эффекта очень чувствительны к магнитному полю в области контакта. Эти явления были вскоре подтверждены экспериментально, и их свойства полностью согласовывались с теорией. (Оказалось, что многие экспериментаторы, использующие методику Джайевера, и ранее наблюдали эффекты Джозефсона, но отбрасывали их как «шумы».)

В 1973 г. Лео Эсаки, Айвар Джайевер и Брайан Д. Джозефсон были удостоены Нобелевской премии по физике.

## 6. Успехи и проблемы

Физика низких температур — обширная область исследований, не устающая преподносить сюрпризы ученым. Мы кратко перечислим некоторые из них.

В течение многих лет в мире физики безраздельно господствовала теория БКШ, ее положение казалось незыблемым. Сверхпроводимость вышла уже в технику: для больших ускорителей с начала 1970-х гг. строятся гигантские электромагниты с обмотками из сверхпроводников. Рассматриваются и возможности использования сверхпроводников в суперкомпьютерах.

Исследования сверхпроводимости, конечно, продолжались; в некоторых сплавах, в основном с ниобием, удавалось чуточку, на десятую, на сотую градуса поднять критическую температуру. Так дошли почти до 23 К, т. е. до минус 250 градусов по шкале Цельсия. Дело в том, что поиск сверхпроводников с более высокой температурой перехода имеет огромное техническое и экономическое значение: гелий очень дорог, и использование его для охлаждения, скажем, линий электропередач нерентабельно, но, если бы удалось найти сверхпроводники с температурой перехода порядка температуры сжижения воздуха (83 К, т. е.  $-190^{\circ}\text{C}$ ), это позволило бы решить множество проблем электротехники.

И вдруг, сенсация мирового масштаба: в 1986 г. Алекс Мюллер (р. 1927) и Иоганн Георг Бедхорц (р. 1950) сообщают об открытии ими веществ, совсем не металлов, а керамик, содержащих медь и некоторые редкоземельные элементы, но переходящих в сверхпроводящее состояние при гораздо более высоких температурах (в настоящее время — уже почти при комнатных!). Нобелевскую премию они, и это

тоже сенсационно, получают почти сейчас же. Но к этим веществам теория БКШ, по-видимому, не применима и природа высокотемпературной сверхпроводимости совершенно не ясна. К тому же керамики очень нетехнологичны — из них нельзя вытягивать провода, и у них очень низок критический ток разрушения сверхпроводимости.

А еще одна сенсация прозвучала в начале 2002 г.: очень простое соединение, диборид магния ( $\text{MgB}_2$  — фактически это просто тальк, которым присыпают припухлости у детей), переходит в сверхпроводящее состояние при 39 К, и притом это вовсе не керамика, а температура перехода у него много выше, чем предсказывает БКШ. Что это: интуиция исследователей, случайность, необходимость новой теории? Поиск продолжается и никаких признаков его окончания не видно.

## Ядро? Элементарно!

---

### Глава 1

## Атомное ядро

### 1. Протон

Как мы помним, в 1911 г. Резерфорд открыл существование атомного ядра. После этого, естественно, он продолжил облучение атомов различных веществ альфа-частицами с целью выявить особенности их структуры: к тому времени нельзя было исключить, что все ядра разных веществ — это принципиально разные частицы. Правда, при радиоактивном распаде одни элементы превращались в другие: уран в радий и т. д. Но, может быть, таковы только радиоактивные элементы? Вот если удастся превратить один стабильный элемент в другой, тогда можно будет говорить о том, что ядра не являются элементарными частицами, и даже думать об их составе.

В 1914 г. Резерфорд уже выдвигает идею об искусственном превращении одних ядер в другие: он предполагает, например, что ядро атома может поглотить один из своих электронов и тем самым понизить свой заряд на единицу, перейти на клетку влево в таблице элементов. (Такое явление действительно открыли, правда, гораздо позже — оно называется электронным захватом и сродни бета-распаду.) И только в 1919 г. мечта Резерфорда сбывается: азот, облученный альфа-частицами, превращается в кислород! (Деталей этого превращения он не выясняет, да они сейчас и не важны — главное, что превращения элементов возможны, ядра не являются элементарными частицами!)

Как об элементарной частице можно говорить только о ядре водорода — от него нечего отщеплять, поэтому такое ядро Резерфорд назвал протоном (по-гречески — «первый»).

Итак, к электрону и фотону добавилась третья элементарная частица, протон: масса его в 1836 раз больше массы электрона, а радиус в 10 000 раз меньше радиуса атома.

Теперь на повестку дня становится вопрос о структуре ядер других атомов, и в первую очередь естественно уточнить, что же происходит с ними при радиоактивных распадах. Такие исследования провел Фредерик Содди (1877—1956, Нобелевская премия по химии 1921), который до того разработал, вместе с Резерфордом, теорию радиоактивности. Начиная работать он вместе с Уильямом Рамзаем (1852—1916, Нобелевская премия по химии 1904 г. за открытие благородных газов): именно они сумели по тысячным долям микрограммов, накапливая альфа-частицы в каких-то очень хитро устроенных сосудах, выяснить, что они являются ядрами атома гелия. А совместно с Казимежом Фаянсом (1887—1975) Содди установил, что при испускании альфа-частицы образующееся ядро сдвигается влево на два номера в таблице Менделеева, а при испускании бета-частицы, т. е. электрона, подвигается на одно место вправо (закон Содди—Фаянса).

Теперь казалось естественным, что, поскольку из ядер вылетают альфа-частицы и электроны, то ядра состоят из этих тесно связанных частиц и протонов. Так, следующее по сложности после водорода — ядро атома гелия, т. е. сама альфа-частица: ее масса в четыре раза больше массы протона, а заряд вдвое больше, поэтому можно предположить, что она сама составлена из четырех протонов и двух электронов. Ну а дальше?

Явный сигнал о неблагополучии дал тот же Содди в 1913 г.: он доказал существование изотопов (греческие «изоз» — равный и «топос» — место), т. е. атомов, помещающихся в одну клетку периодической системы, но имеющих разную массу. Получается, что масса ядра может быть различной при одних и тех же химических свойствах атомов.

Но самое большое затруднение, полностью опрокинувшее эту модель ядра, связано со спином. Как мы говорили, спин электрона равен  $1/2$ , вскоре оказалось, что у протона спин такой же, тоже равен  $1/2$ . Следовательно, нейтральная система «протон + электрон» должна иметь спин, равный нулю или единице. (Резерфорд даже думал, что такая система может быть устойчивой, и иногда называл ее нейтроном.) Спины ядер прямо пропорциональны их магнитному моменту, от величины которого зависит, будут расщеплены спектральные линии атомов или нет. Поэтому спины ядер не так уж и сложно измерить.

И когда эти измерения начались, разразилась так называемая «азотная катастрофа». Ядро азота, массовое число которого равно 14,



а порядковый номер, т. е. заряд, согласно закону Мозли, равен 7, должно было бы содержать 14 протонов и 7 электронов, но складывая 21 раз величины спинов  $1/2$  (частично вверх, частично вниз направленных) никак нельзя получить нуль. А эксперимент упорно показывал, что спин ядра азота равен именно нулю!

Протонно-электронная модель ядра зашла в тупик.

## 2. Нейтрон

Выход из этого тупика и открытие нейтрона — заслуга Джеймса Чедвика (1891—1974, Нобелевская премия 1935 г.). Человек очень застенчивый, он попал в физику случайно: поступал в университет, собираясь изучать математику, однако, по недоразумению, с ним провели собеседование по физике. Слишком скромный, чтобы указать на ошибку, он внимательно выслушал вопросы, которые ему задавали, и решил сменить специализацию. Став физиком, Чедвик успешно работал с Резерфордом по проблемам радиоактивности.

В начале 1930-х гг. в нескольких лабораториях, занимавшихся радиоактивностью, стали наблюдаться странные явления: физикам было вполне ясно, что если какое-то излучение проходит через вещество, то

Примечательно такое его «приключение»: защитив диссертацию, Чедвик поехал в Германию поучиться у Г. Гейгера технике эксперимента. Но когда в 1914 г. началась Первая мировая война, он был интернирован как английский поданный и более 4 лет провел в лагере для гражданских лиц. Хотя условия в лагере были (для тех лет!) суровыми, Чедвик и его соотечественники создали научное общество, которое поддерживали и некоторые немецкие ученые, включая Вальтера Нернста. Надо сказать, что до возникновения тоталитарных режимов XX в. и вовлечения ученых в военные работы все они ощущали себя как бы членами одного научного братства.

его интенсивность и глубина проникновения в среду (проникающая сила) должны уменьшаться — потери энергии неизбежны. Но в 1930 г. Вальтер Боте (1891—1957, Нобелевская премия 1954 г.) и Ханс Беккер обнаружили, что когда при бомбардировании альфа-частицами некоторых легких элементов возникает излучение большей проникающей силы. Они предположили, что это гамма-лучи, у которых длина волны меньше, чем у рентгеновского из-

лучения, а поэтому и больше проникающая способность. Но радиоактивное излучение должно быть изотропным, т. е. одинаковым по всем направлениям, а тут было не так.

В 1932 г. супруги Фредерик Жолио и Ирен Кюри (дочь Марии и Пьера Кюри), исследуя проникающую способность этого излучения, начали помещать различные поглотители перед регистратором излучения. Но когда они для этого взяли парафин (вещество, богатое водородом), то обнаружили, что излучение, выходящее из парафина,

не только не уменьшается, хотя часть его должна была бы поглотиться, а увеличивается. Самый простой и, казалось, естественный вывод состоял в том, что это гамма-излучение, которое выбивает из парафина ядра водорода так же, как излучение с меньшей длиной волны выбивает из атомов электроны.

Но Чедвик расширил эксперимент, проведенный французской парой, и обнаружил, что даже толстая свинцовая пластина не ослабляет это излучение. А вот парафин почему-то вновь дал добавочный поток быстрых протонов. Чедвик, в отличие от Боте и супругов Жолио, не побоялся предположить, что видит нечто принципиально новое. Он определил энергию этих быстрых протонов, а затем доказал, что при столкновениях альфа-частиц с ядром крайне маловероятно возникновение гамма-лучей с энергией, которая позволит выбивать такие энергичные протоны из парафина.

Поэтому он сумел оставить естественную, казалось бы, идею о гамма-лучах и предположил, что это излучение состоит из каких-то нейтральных частиц, скажем, нейтронов. Его эксперименты показали, что в результате захвата альфа-частицы ядром бериллия может образоваться ядро углерода, причем освобождается один нейтрон. Затем он взялся за бор — альфа-частица и ядро бора соединяются, образуя ядро азота и нейтрон. Ну а высокая проникающая способность потока нейтронов, как он сразу смог заключить, возникает потому, что, поскольку нейтрон не обладает зарядом, то при движении в веществе ему не мешают электроны — он взаимодействует с ядрами лишь при прямых столкновениях. Нейтрону требуется также меньшая энергия, чем гамма-кванту, чтобы выбить протон, поскольку он обладает большей массой и поэтому большим импульсом, чем квант электромагнитного излучения той же энергии.

Анализируя обмен энергией между нейтронами и протонами, выбитыми из вещества, как если бы речь шла о соударении бильярдных шаров, Чедвик подтвердил гипотезу Резерфорда, что масса нейтрона должна быть равна массе протона. Точнее, оказалось, что масса нейтрона на 1,1 % превышает массу протона. («Если бы мы с женой читали лекцию Резерфорда 1920 г., то вероятно, сами идентифицировали бы нейтрон», — покаянно писал позже Ф. Жолио, но так или иначе, открытие было упущено...)

Итак, к электрону, протону и фотону добавилась новая частица — нейтрон (в том же году был открыт и позитрон — впоследствии 1932 г. назвали «Годом великих открытий»).

Почти сразу же, независимо друг от друга, Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904—1994) и Вернер Гейзенберг предположили, что атомные

ядра состоят из протонов и нейтронов: число протонов равно порядковому номеру элемента, а число нейтронов — разнице между массовым числом (атомным весом) и номером элемента. Поскольку одноименно заряженные протоны должны отталкиваться друг от друга, то можно предположить, что нейтроны каким-то образом играют роль «клея», удерживающего их вместе. Массы протона и нейтрона примерно одинаковы, в энергетических единицах, по формуле Эйнштейна, они составляют порядка 1000 МэВ, а энергия их связи в ядре (недостающая масса, по Эйнштейну!) — порядка 8 МэВ.

Протон и нейтрон вместе называются нуклонами, от латинского «нуклеус» — ядро. Число нуклонов как раз и соответствует массовому числу элемента.

Отметим, что существование нейтрона следовало также из проведенных в то же время исследований Гарольда К. Юри (1893—1981, Нобелевская премия по химии 1934), ученика Н. Бора.

Юри был убежден в существовании тяжелого изотопа водорода и занялся его поисками. Для этого он проводил дистилляцию жидкого водорода, предположив, что легкие изотопы испаряются быстрее, чем тяжелые. Накопив так некоторое количество «обогащенного» водорода и проанализировав его спектры, он обнаружил слабые линии там, где и предполагал появление спектральных линий искомого изотопа (из-за большей массы ядра они должны быть несколько сдвинуты относительно линий обычного водорода). С ростом концентрации интенсивность этих добавочных линий росла, и таким образом подтверждалось существование изотопа. В декабре 1931 г. Юри объявил о своем открытии, назвав этот второй по легкости атом дейтерием (от греческого «дейтерос» — второй). Он предложил также название «третий» для открытого вслед за этим еще одного изотопа водорода, масса которого в три раза превышает массу водорода, а ядро содержит протон и два нейтрона.

### 3. Космические лучи

Перед тем как излагать историю развития науки о ядре, нам нужно вернуться немного назад.

Уже очень давно было известно, что любой заряженный электроскоп со временем разряжается, явление это приписывалось слабой электропроводности воздуха, которая вызывается каким-то ионизирующим излучением Земли, например радиоактивными породами. Но в 1911—1913 годах Виктор Ф. Гесс (1883—1964, Нобелевская премия 1936 г.) обнаружил сначала, что заряженные конденсаторы на вершинах гор разряжаются быстрее, чем у ее подножья, а затем, поднимаясь со своей аппаратурой уже на воздушном шаре, выяснил, что радиация,

ионизирующая воздух и потому разряжающая конденсаторы, быстро растет с высотой. Поэтому Гесс предположил, что это излучение внеземного происхождения, называлось оно вначале лучами Гесса. Предположение об их существовании было подтверждено в 1925 г. Р. Миллиkenом, и так как различие в их интенсивности днем и ночью было мало, т. е. Солнце не могло быть основным источником, они были переименованы в космические лучи — название утвердилось после того, как стало ясно, что лучи эти идут равномерно со всех направлений.

Первые исследования космического излучения проводились по степени ионизации воздуха. Позже оказалось, что поднятые вверх фотопластинки (они все время оставались тщательно закрытыми) после проявления показывают какие-то следы (треки) на фотоэмульсии. Наконец, оказалось, что и счетчики Гейгера регистрируют пролетающие через них заряженные частицы.

В 1927 г. было показано, что интенсивность космических лучей выше вблизи магнитных полюсов, а следовательно, они состоят в основном из заряженных частиц, отклоняющихся в магнитном поле Земли. У этих частиц очень широкий спектр энергий, приблизительно 83 % из них составляют протоны, 16 % — альфа-частицы, есть ядра и других элементов, в том числе — огромный избыток легких ядер: лития, бериллия и бора, достаточно редких во Вселенной. Электроны встречаются примерно в сто раз реже, чем протоны, а позитроны — еще в десять раз реже.

Происхождение космических лучей до сих пор не вполне ясно: можно выделить низкоэнергичный поток солнечных протонов, гамма-лучи от газовых скоплений в нашей Галактике и от остатков вспышек сверхновых звезд (Крабовидная туманность). Но каково происхождение остальных, в том числе наиболее энергичных частиц?

Очень сомнительно, что их источником являются только взрывы звезд. Рассматривают, конечно, и всякие механизмы ускорения частиц в космических магнитных полях, но до завершения теории их происхождения, видимо, еще далеко. Важность этих исследований двоякая: во-первых, в космических лучах присутствуют частицы таких энергий, которые невозможно получить в ускорителях (можно сказать, что для их размещения не хватит размеров Земли), а во-вторых, они должны содержать информацию о строении звезд, галактик и т. д.

#### 4. Ядерные силы, барионный заряд

Принятие протон-нейтронной модели ядра означало, что предполагается существование каких-то ядерных сил, которые могут удерживать вместе одинаково заряженные, а потому взаимно отталкивающиеся

протоны. Из размеров ядер следовало, что такие силы должны действовать только на коротких расстояниях и этим принципиально отличаться от дальнодействующих гравитационных и электромагнитных сил.

В 1935 г. Хидеки Юкава (1907—1981, Нобелевская премия 1949 г.) предположил, что сила, удерживающая ядро от распада, связана с тем,



что нуклоны обмениваются какой-то пока неизвестной частицей большей массы. По принципу неопределенностей для размеров ядра, он подсчитал, ее массу (примерно 200 масс электрона) и предположил, что ее можно искать при столкновении космических лучей с атомными ядрами.

Карл Д. Андерсон, который открыл позитрон в 1932 г., очевидно, не знал о гипотезе Юкавы. Но, продолжая изучать фотографии треков, полученных при прохождении космических лучей через ионизационную камеру, он обнаружил в 1937 г. треки какой-то неизвестной частицы с массой того же порядка,

что была предсказана Юкавой. Сначала она была названа мезотроном, а затем мезоном (от греческого «мезо» — средний, ее масса промежуточная между массами электрона и протона). Однако довольно скоро стало ясно, что частицы Андерсона и Юкавы — это разные частицы:

Некоторую, хотя и отдаленную, эвристическую аналогию ядерным силам могло дать рассмотрение электромагнитных сил: согласно квантовой электродинамике, тогда только зарождавшейся, эти силы вызваны обменом фотонами, безмассовыми частицами. А что если рассмотреть обмен частицами, обладающими массой? Первую такую теорию — взаимодействие через обмен электронами — попытались построить И. Е. Тамм и Д. Д. Иваненко. Однако силы, возникающие при таком обмене, были слишком слабы.

наблюдаемый мезон слабо взаимодействовал с ядром, а время его жизни было более чем в 100 раз длиннее, чем предсказанная одна стомиллионная доля секунды. Стали возникать сомнения в теории Юкавы.

Но в 1947 г. Сесил Ф. Пауэлл (1903—1969, Нобелевская премия 1950) обнаружил мезон Юкавы с помощью ионизационной камеры, помещенной на больших высотах. А в

1948 г. такие мезоны были искусственно получены в лаборатории Калифорнийского университета в Беркли. Частица Юкавы стала называться пи-мезоном, затем просто пионом. Пионов оказалось три: положительно заряженный, отрицательно и нейтральный ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$  и  $\pi^0$ ) — их масса примерно в 270 раз больше массы электрона.

Ну а две более легкие частицы Андерсона получили название мю-мезонов, а затем мюонов ( $\mu^+$  и  $\mu^-$ ). Они не являются ядерно-актив-

ными и очень схожи с позитроном и электроном — имеют такой же спин (у пионов спин равен нулю, это облегчает их испускание и поглощение), но масса мюонов (положительных и отрицательных) в 207 раз больше массы электрона.

Теория Юкавы, несколько модифицированная, стала общепринятой. Обменное взаимодействие протекает, согласно этой теории, так: протон, например, может на какое-то время, диктуемое принципом неопределенностей, испустить положительный или нейтральный пион, его на такое же время поглотит соседний нейтрон; а поскольку при этом массы обоих отличны от масс свободных частиц (неважно — больше или меньше), то они и не могут отойти далеко друг от друга. Аналогично, нейтрон может испустить отрицательный пион, став на время протоном, или нейтральный, оставаясь нейтроном, но в обоих случаях — с дефицитом массы. Такие картинки похожи на игру в волейбол, но при этом игроки-частицы перекидываются не мячом, а частями собственных тел и поэтому вынуждены оставаться неподалеку, на расстояниях, определяемых, опять же, принципом неопределенностей.

Протон и нейтрон вместе с другими еще более тяжелыми частицами называют барионами (от греческого «барос» — тяжелый). Поскольку их спин равен  $1/2$ , они подчиняются уравнению Дирака, а раз так, то должны существовать и антибарионы (антипротон, антинейтрон, они вскоре были открыты на ускорителях).

У барионов должны быть какие-то общие, «семейные» характеристики. Поэтому Юджин Вигнер (1902–1995, Нобелевская премия 1963 г.), который первым еще в 1933 г. доказал, что ядерные силы являются короткодействующими, ввел в 1949 г. понятие барионного заряда и постулировал закон его сохранения: у всех барионов этот заряд положительный, а у антибарионов — отрицательный; поскольку античастицы должны быть во всем противоположны частицам, то электрический заряд у антипротона отрицательный. (Заметим, что если в атоме водорода электрон вращается вокруг протона с положительным зарядом, то в атоме антиводорода вокруг антипротона вращается позитрон — такие антиатомы были получены. Сейчас стараются их накопить и подробнее

Юджин (или Евгений) Вигнер получил диплом инженера-химика и работал на кожевенном заводе (перспективы работать по физике были тогда мизерны), но затем, все же, под влиянием своего друга и одноклассника Дж. фон Неймана, также получившего первоначально инженерную специальность, стал — сперва бесплатно — работать в физической лаборатории Берлинского университета. Работу Вигнер начал с расчетов скоростей химических реакций, вместе с фон Нейманом применил к квантовой физике теорию групп (раздел алгебры), а затем разработал принципы теории симметрий, что позволило сразу же выделить похожие процессы, определить их сходные параметры и т. д. Ему принадлежат классические работы по теории ядерных реакций, работы по философии и т. д.

исследовать.) В отличие от электрических зарядов, наличие одинаковых барионных зарядов ведет к силам притяжения между ними, переходящим в отталкивание на очень уж близких ядерных расстояниях (поэтому они не могут слиться вместе), но между барионом и антибарионом нет этого отталкивания, поэтому они могут при соударении аннигилировать так же, как пара электрон и позитрон; при этом, конечно, должен учитываться и закон сохранения электрических зарядов.

Введение барионного заряда сразу же вызвало такую проблему: наряду с веществом должно существовать антивещество, в котором место всех частиц занимают античастицы. Поэтому одинаковые образования из вещества и антивещества могут аннигилировать. Но существуют ли звезды и галактики из антивещества или нет? А если они не существуют, то почему?

Согласно теории Дирака, атомы вещества и антивещества оптически ничем друг от друга не отличаются, поэтому изучая их спектры мы не можем сказать, что наблюдаем звезды из вещества или антивещества. Отличить можно лишь весьма характерные спектры аннигиляции, скажем, электронов и позитронов, которые обязательно присутствовали бы при столкновениях звезд и антизвезд или даже космических облаков. Но ни в одной части Вселенной ничего похожего пока не обнаружено — загадка остается нерешенной.

## 5. Модели атомных ядер

Первая модель структуры атомного ядра была предложена в 1936 г. независимо Н. Бором и Я. И. Френкелем. По этой модели ядро можно представить себе как каплю жидкости, т. е. как смесь нуклонов, не имеющих никакой внутренней структуры. Поэтому можно определить величину «температуры» ядра при его возбуждении, а вылет

Якова Ильича Френкеля (1894–1952) можно назвать первопроходцем во многих областях теоретической физики. Он первым установил основные положения электронной теории металлов, ввел понятия дефектов в кристаллах и идею квазичастиц-экситонов, первым рассмотрел явления туннелирования на границах металл—полупроводник, объяснил природу ферромагнетизма, построил теорию жидкого состояния. Ему принадлежат также пионерские работы по гео-, астро- и биофизике.

частиц из него рассматривать по аналогии с испарением молекул из нагретой капли. Эта модель, как мы увидим, неплохо объясняла деление ядер, выделение энергии при некоторых ядерных реакциях и т. д.

Но теория ядра на этом, конечно, не закончилась: нужно было объяснить, почему одни

ядра устойчивы, а другие распадаются, и выяснить, как именно происходит такой распад. Но помимо того, ядра обладают и электро-

магнитной структурой, а она должна быть в каком-то смысле схожей с системой атомных уровней, только излучение ядер происходит в гамма-диапазоне, т. е. обладает гораздо более высокой энергией. Ю. Вигнер и Дж. фон Нейман применили теорию групп, чтобы связать эти уровни ядра с наблюдаемым его поведением: теория групп и следующие из нее принципы симметрий определяют, какие характеристики частиц не могут изменяться в ходе ядерных реакций. Например, принципы симметрии и требования инвариантности могут помочь предсказать, какие ядерные реакции возможны, а какие нет.

Эта работа оказалась особенно полезной при попытке объяснить существование того, что Вигнер назвал магическими числами.

Еще в 1933 г. В. Эльзассер (1904–1991) заметил, что атомы с некоторыми определенными числами протонов или нейтронов более устойчивы, т. е. реже бывают радиоактивными, чем другие ядра. Поэтому в любой земной породе атомов с такими ядрами оказывается больше, чем должно было быть при равномерном распределении: стабильные ядра остаются и накапливаются, тогда как остальные ядра распадаются.

Оказалось, что в ядрах элементов, распространенность которых в природе почему-то намного больше, чем у их ближайших соседей по таблице элементов и изотопов, число протонов либо число нейтронов чаще равно одному из чисел: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 — эти числа и были названы «магическими». Загадку их существования разрешили независимо Мария Гепперт-Майер (1906–1972) в США и Ханс Йенсен (1907–1973) в Германии, удостоенные за это достижение Нобелевской премии 1963 г., которую они разделили с Ю. Вигнером.

Они понимали, что эта проблема в чем-то сходна с проблемой стабильности атомов, у которых имеется разное число электронов на верхней оболочке. И действительно, если посмотреть на таблицу элементов Менделеева—Бора, то элементы правого столбца — инертные газы — химически наиболее устойчивы, они практически не вступают в соединения с другими атомами (в последние годы, правда, такие соединения научились получать, но только при экстремальных внешних воздействиях). Это их свойство объясняется тем, что соответствующие электронные подуровни в оболочках — у гелия, у неона, у аргона и т. д. — полностью заполнены: из них трудно вырвать электрон, чтобы





Отметим, что особенно стабильны, конечно, ядра, у которых и числа протонов, и числа нейтронов — магические, такие ядра называют дважды магическими: гелий-4, кислород-16, один из изотопов свинца. Есть надежда, что какие-то из далеких трансурановых ядер тоже окажутся магическими, и поэтому их поиски усердно продолжаются, хотя пока что чем более тяжелые атомы, далее урана, удавалось получить, тем короче было время их жизни. (Оболочечная модель оставила в стороне многие особенности ядер, поэтому их исследование далеко еще не закончено, но представляется, что в этой области не было уже столь ярких событий.)

получить положительный ион, так же как трудно добавить электрон, начать формирование нового уровня (или даже оболочки) для получения отрицательного иона. Так что числа 2, 8, 18,... в атоме тоже можно было бы назвать «магическими», только для электронов.

Но ядро сильно отличается от атома: в атоме основную роль играет центральная электрическая сила притяжения между протонами в ядре и электронами. Электроны на-

ходятся на относительно больших расстояниях друг от друга, и их взаимное отталкивание слабо, поэтому энергия одного электрона мало зависит от положения других, можно принять, что он вращается в некотором общем поле. Однако ядерные силы между нуклонами действуют на малых расстояниях, и энергия одной частицы сильно зависит от положения других внутриядерных частиц — здесь нет общего центра притяжения. Поэтому физики-теоретики на раннем этапе исследования заключили, что распределение по квантовым числам (оно диктуется так называемой спин-орбитальной связью), на основе которого построена теория периодической системы элементов, здесь должна быть малоэффективна.

Как писал позже Йенсен: «К счастью, я был не слишком хорошо образован, не был знаком с этими взглядами и не помнил особенно крепко о старых возражениях против сильной спин-орбитальной связи». И хотя уже его начальные подсчеты давали неплохие результаты, журнал, куда он послал первую заметку, отверг ее: «Это не физика, а игра с числами».

В это же время Мария Гепперт-Майер также упорно билась над решением проблемы структуры ядра. В начале своей работы она обнаружила два больших магических числа: 50 и 82. Затем, рассматривая экспериментальные данные, она нашла еще пять магических чисел, но объяснить их существование и свойства не могла. Решающий момент наступил в 1948 г., когда великий Энрико Ферми спросил у нее во время обсуждения: «Существуют ли в ядрах какие-либо признаки спин-орбитальной связи?»

И ее как бы озарило: сразу же поняв, что именно спин-орбитальная связь дает ключ к проблеме, она в тот же вечер сумела объяснить ядерные магические числа.

Гепперт-Майер показала, что атомное ядро по своему строению напоминает луковицу: оно состоит из слоев, содержащих протоны и нейтроны, которые обращаются и вокруг друг друга, и по орбите, как пары, вальсирующие на балу; ядра стабильны, если оболочки протонов или нейтронов заполнены. И поэтому, хотя ядерные магические числа отличаются от магических чисел для атомных электронов, все же, некоторая аналогия между ними существует.

Статьи обоих: М. Гепперт-Майер и Х. Йенсена с соавторами — вышли почти одновременно в одном и том же журнале (1948). Так была создана оболочечная модель ядра, полностью изложенная в их совместной книге 1955 г.

Мария Гепперт и ее муж, известный физико-химик Джозеф Э. Майер, написали совместно курс статистической механики. Дж. Э. Майер впервые ввел диаграммные методы рассмотрения взаимодействия частиц, развитые затем Р. Фейнманом. Супруги Майер бежали из Европы от фашизма, и в начале 1940-х гг. они вместе с супругами Ферми даже обсуждали планы переселения на какой-нибудь далекий остров.

## 6. Эффект Мессбауэра

Взаимодействие нуклонов в ядре, как и электронов в атоме, должно приводить к распределению их по уровням, установленным Ю. Вигнером, а также к расщеплению этих уровней, появлению тонкой структуры электромагнитных уровней. А наличие уровней означает, как и в атоме, что ядра могут излучать и поглощать фотоны определенных энергий. Однако уровни эти, в отличие от электронных, изучаемых методами флюоресценции, очень тонкие, т. е. требуют невероятно большой точности при наблюдении резонансов, и перспективы их измерения казались невероятно далекими.

Явление флюоресценции (оно было открыто на минерале флюорите) состоит в том, что некоторые газы, жидкости и твердые тела поглощают видимый свет и немедленно вновь его излучают. В некоторых случаях испускаемое излучение обладает такими же энергией, длиной волны и частотой, что и у поглощаемого (резонансная флюоресценция). Частоты резонансной флюоресценции точно соответствуют энергетическим уровням атома, и поэтому их анализ помогает выявить атомарную структуру веществ. Это же явление наблюдается в рентгеновском диапазоне, что дало важнейшую информацию о строении атомов.

Испускание или поглощение фотона протекает с сохранением как энергии, так и импульса, но при испускании фотона сам атом испытывает отдачу и поэтому отбирает у фотона часть его энергии, тем меньшую, чем больше масса атома. В случае видимого света энергия

Появление первых двух статей Мессбауэра в 1958 г. вызывало смех у всех читателей: непредставимая и неопишная точность, бабушкин патефон в ядерной физике, где привыкли к километровым ускорителям и многомиллионной стоимости экспериментов, — ну, конечно, это первоапрельская шутка и ничего больше. Затем наступила эпоха отрезвления, перешедшая во всеобщий ажиотаж: практически все лаборатории мира в бешеном темпе повторяли и видоизменяли опыты Мессбауэра, журналы так были заполнены статьями на эти темы, что скоро объявили об отказе принимать новые...

фотонов — порядка 1–3 эВ, и эффектом атомной отдачи можно пренебречь. Но у фотонов гамма-излучения ядер энергия — от 10 тыс. до 1 млн эВ, и отдача становится существенной: когда атомное ядро испускает фотон, то потери на отдачу заметно уменьшают энергию фотона, и он уже не попадает в резонанс со следующим ядром (не может быть погло-

щенным). Поэтому резонансная флюоресценция — при которой испускаемый и поглощаемый фотоны должны обладать равными энергиями — у гамма-лучей не наблюдалась.

Однако Рудольф Л. Мессбауэр (р. 1929, Нобелевская премия 1961 г.) смог придумать способ достижения резонансной флюоресценции ядер.

Его эпохальные эксперименты протекали так. Источником излучения являются атомы кристалла радиоактивного изотопа металла иридия. Охладив кристаллы жидким азотом, Мессбауэр с удивлением обнаружил, что флюоресценция заметно увеличилась. Он понял, что отдельные ядра, испускающие или поглощающие гамма-лучи, передают импульс взаимодействия непосредственно всему кристаллу, а поскольку кристалл гораздо более массивен, чем ядро, у излучаемых и поглощаемых фотонов частотный сдвиг очень мал (вспомните, насколько уменьшается отдача при выстреле, если прижать приклад винтовки к плечу, увеличив массу тела, участвующего в процессе).

Как же теперь избавиться от крошечной, но все же существующей потери энергии на отдачу, чем ее компенсировать? И Мессбауэр находит уникальный по остроумию прием: для этого нужно двигать оба образца навстречу друг другу — благодаря эффекту Доплера (мы говорили о нем в связи со специальной теорией относительности) частота кванта, испускаемого источником, движущимся навстречу поглотителю, чуть увеличится, возместит этим потери на отдачу и попадет в резонанс с ядром в приемнике. Для этого, по расчетам, достаточно скорость в несколько сантиметров в секунду. Но как это сделать? И он помещает либо излучатель, либо приемник на... диск патефона (да-да, того самого бабушкиного патефона с заводной ручкой, ничего другого в его бедной лаборатории не нашлось!) — перемещая излучатель по радиусу диска, т. е. меняя его касательную скорость, он в очень узких пределах меняет частоту гамма-квантов и как бы пробегает (сканирует) линию излучения или поглощения ядра!

Уже в первых экспериментах точность определения частоты достигала одной миллиардной доли их энергии, впоследствии она достигла одной статтиллионной — нигде и никогда такой точности, как в эффекте Мессбауэра, никому достичь не удавалось!

Одним из первых принципиальных приложений эффекта Мессбауэра стала в 1959 г. работа Р. В. Паунда и Г. А. Ребки. Идея ее заключалась в использовании такого следствия ОТО: поскольку фотон обладает энергией, то, согласно формуле Эйнштейна,

ему можно приписать массу движения, и поэтому на него должно действовать гравитационное поле. Но тогда при изменении гравитационного поля должны меняться, очень слабо, но все же меняться, его энергия и частота. Вот они и измерили изменения частоты гамма-лучей при прохождении в гравитационном поле, но главная прелесть их работы заключалась в том, что точность эффекта Мессбауэра позволила провести эти измерения при уменьшении гравитационного поля между подножием и вершиной башни, на пути всего в 21 метр и тем самым подтвердить общую теорию относительности Эйнштейна (ранее подобные измерения можно было планировать только в астрофизике, но осуществить их не удавалось).

Сейчас мессбауэровская спектроскопия находит применение не только в ядерной физике, но и в таких разнообразных областях как археология, химический катализ, строение молекул, валентность, физика твердого тела, атомная физика и биологические полимеры<sup>1</sup>.

Отметим, что узость ядерных электромагнитных уровней с начала 1960-х гг. и до сих пор бросает вызов физикам. Как мы уже говорили, эффект стимулированного излучения Эйнштейна позволил создать лазеры — электроны в атомах сначала поднимают на верхний уровень (атомы возбуждают), а затем под действием резонансных фотонов они разом спускаются вниз, излучая лазерный импульс. Самые мощные лазеры работают в инфракрасной области спектра, в видимой области их мощности существенно уменьшаются с ростом частоты, а вот для ультрафиолетовой части спектра мощных лазеров практически нет — приходится особыми ухищрениями создавать некое их подобие. В то же время ничто, казалось бы, не мешает создать лазер на ядерных уровнях, в гамма-диапазоне (для него уже давно придумано название — газер), но для этого нужно из-за узости уровней научиться компенсировать их отдачи. А как это сделать?

<sup>1</sup> В фольклоре физиков существует и «второй эффект Мессбауэра»: получив всемирное признание, Мессбауэр сумел существенно осовременнить структуру академического образования в Германии.

## Ядерные реакции

### 1. Типы реакций и выделение энергии

Для того чтобы какая-нибудь частица могла провзаимодействовать с ядром, она должна пройти сквозь электронную оболочку атома. Поэтому такая частица либо должна обладать достаточно большой энергией, либо быть нейтральной. Само взаимодействие может заканчиваться тем, что налетающая частица или какая-то ее компонента остается в ядре, т. е. масса ядра возрастает, после чего возникает новое ядро, стабильное, радиоактивное или быстро распадающееся.

Особый интерес при таких реакциях вызывает возможность выделения энергии обусловленная разницей энергии связи разных ядер.

Мы уже говорили, что образование связанных состояний (планетная система вокруг Солнца, атомы в молекуле, электроны в атоме) можно объяснить как наличием сил притяжения, гравитационных или электрических, так и тем, что, согласно формуле Эйнштейна  $E = mc^2$  (или, точнее,  $\Delta E = \pm \Delta mc^2$ , где греческой заглавной буквой  $\Delta$  — «дельта» обозначается изменение), полная масса связанной системы меньше суммы масс составляющих частей в свободном состоянии. Получаемая энергия связи позволяет вычислить дефект массы при соединении частей системы (надо разделить его на квадрат скорости света). Однако в тех случаях этот дефект масс был столь мал, что его практически трудно или невозможно измерить.

Однако в ядерной физике положение иное: дефект массы нуклонов в ядре может достигать 0,4 % полной массы — это приводит к грандиозной доле выделяемой энергии в некоторых ядерных реакциях. Максимальный дефект массы наблюдается в ядрах с массовым числом в интервале примерно от 30 до 100, и поэтому существуют две принципиально различные возможности выделения внутриядерной энергии: реакции деления тяжелых ядер с большим массовым числом или соединение ядер с малыми массовыми числами (реакции синтеза).

Физически очевидно, что реакции деления осуществить проще: можно думать, что достаточно сообщить ядру избыточную энергию,

дав ему поглотить нейтральные частицы, например фотоны или нейтроны, и тем самым «раскачав» его в надежде на последующее самопроизвольное деление. А вот для реакций синтеза нужно, чтобы два ядра слились, преодолев кулоновский барьер. Для этого им нужно придать, по крайней мере, достаточную кинетическую энергию, либо нужно каким-то образом понизить этот барьер.

Первая ядерная реакция была осуществлена Резерфордом в 1919 г., когда облучение атомов азота альфа-частицами радия привело к образованию одного из изотопов кислорода с излучением протона. Следующая реакция (о ней писали выше) была получена Кокрофтом и Уолтоном.

Как мы уже говорили, В. Боте и супруги Жолио-Кюри обнаружили при облучении легких ядер альфа-частицами возникновение какого-то излучения, которое, согласно Чедвику, является потоком нейтронов.

Фредерик Жолио, инженер по первоначальному образованию, сконструировал чувствительный детектор с камерой Вильсона для исследования этой проникающей радиации. Вместе с женой, Ирэн Кюри, они сумели приготовить образец с необычайно высокой концентрацией полония и на этой аппаратуре обнаружили то излучение, которое так успешно смог исследовать Чедвик, — фактически они потеряли открытие нейтрона и сопутствовавшее ряду актов излучение позитронов. Но в самом начале 1934 г. супруги Жолио-Кюри начали новый эксперимент. Закрыв отверстие камеры Вильсона тонкой алюминиевой фольгой, они облучали образцы бора и алюминия альфа-частицами. Как и ожидалось, позитроны действительно испускались, но, к удивлению экспериментаторов, эмиссия позитронов продолжалась в течение нескольких минут после того, как убрали полониевый источник.

Таким образом, Жолио-Кюри обнаружили, что в некоторых образцах алюминия и бора возникли новые химические элементы. Более того, эти новые элементы были радиоактивными: алюминий, поглощая два протона и два нейтрона альфа-частиц, превращался в радиоактивный фосфор, а бор — в радиоактивный изотоп азота. Поскольку такие неустойчивые радиоактивные изотопы не встречались в природе, ясно было, что они созданы искусственным путем. (Впоследствии супруги Жолио-Кюри синтезировали большое число новых радиоактивных элементов.)

В 1935 г. Фредерику и Ирен Жолио-Кюри была присуждена Нобелевская премия по химии «за выполненный синтез новых радиоактивных элементов». К. В. Пальмайер, представляя их от имени Шведской королевской академии наук, сказал: «Благодаря вашим открытиям впервые стало возможным искусственное превращение одного элемента в другой, до тех пор неизвестный».



В своей Нобелевской лекции Ф. Жолио отметил: «У нас есть основания полагать, что ученым... удастся осуществить превращения взрывного характера, настоящие химические цепные реакции», которые освободят огромное количество полезной энергии. «Однако если разложение распространится на все элементы нашей планеты. — предупреждал ученый, — то последствия развязывания такого катаклизма могут только вызвать тревогу».

Эти исследования были продолжены Энрико Ферми<sup>2</sup> и его группой в Риме, которая принялась последовательно бомбардировать нейтронами каждый элемент периодической таблицы с целью получить новые радиоактивные изотопы при присоединении нейтронов к ядрам. Первого успеха удалось достичь при бомбардировке фтора, а далее, методично бомбардируя все более тяжелые элементы, Ферми и его группа получили сотни новых радиоактивных изотопов. И самое главное: они показали, что вероятность ядерных процессов возрастает с уменьшением скорости нейтронов — их нужно уметь замедлять, чтобы они не проскакивали мимо ядер, а входили в них (именно за этот метод замедления нейтронов Ферми и была присуждена Нобелевская премия).

Сам Ферми так рассказывал С. Чандрасекару как возникла ключевая идея замедлять нейтроны: «Придя однажды в лабораторию, я подумал, что стоит попробовать посмотреть, что получится, если на пути нейтронного пучка поместить свинец. Свинцовая пластинка была тщательно изготовлена... Но вдруг решил: „Нет, свинец здесь ни к чему, мне нужен парафин“. Вот так примерно все и произошло — без глубоких раздумий и тщательного анализа. Я сразу же взял какой-то ненужный кусок парафина и поместил его на место свинцовой пластики». Эта история представляет одну из лучших иллюстраций роли подсознания в научном поиске, в совершении открытия.

<sup>2</sup> Энрико Ферми (1901—1954) начал с теоретических исследований: это основополагающие работы по квантовой статистике, теории бета-распада, модели атома, квантовой электродинамике. С 1934 г. уделял больше внимания эксперименту, об этих работах мы еще не раз будем говорить. Во время церемонии вручения Нобелевской премии в декабре 1938 г. в Стокгольме Ферми, вместо приветствия фашистским салютом, пожал руку королю Швеции, за что подвергся нападкам в итальянской печати и эмигрировал в США. О жизни Э. Ферми см. Лаура Ферми: «Атомы у нас дома» и Эмилио Сегре: «Энрико Ферми, физик». Сегре назвал его «последним человеком, владеющим всей физикой своего времени».

В этих работах группа Ферми, сама того не зная, вызвала деление урана, расщепив тяжелое ядро на два или больше осколков и других фрагментов. Но понят этот успех был другими.

## 2. **Отто Ган и Лизе Мейтнер**

Лизе Мейтнер (1878—1968) с 1907 г. работала совместно с Отто Ганом (1879—1968). Вместе и поодиночке они открыли целый ряд радиоактивных изотопов, выяснили свойства радиоактивных семейств, некоторые превращения ядер. Облучая уран нейтронами, они надеялись получить более тяжелые ядра — тогда всех интересовал вопрос о том, кончается ли ураном периодическая система, или могут существовать какие-нибудь трансурановые элементы. У Мейтнер, помимо того, были и пионерские работы по строению атомных ядер. Гонения на евреев, начатые в Германии в 1933 г., ее, как австрийскую подданную, первоначально не затрагивали, но в 1938 г. после аншлюса Австрии ей пришлось, с помощью Гана, бежать в Данию, откуда она перебралась в Швецию.

Ган продолжал работать и в том же 1938 г. получил, вместе со своим ассистентом Фрицем Штрассманом (1902—1980), ошеломляющий результат: в тщательнейшим образом очищенном уране неизвестно откуда появляются примеси, в основном атомы бария. После еще одной очистки их как будто нет, а затем они снова появляются! Отто Ган, в то время опытейший радиохимик мира, в недоумении: он пишет Лизе Мейтнер, описывает свои опыты, просит совета. Но и Мейтнер нелегко — давит груз опыта и лет (ей и Гану по шестьдесят), да она и не теоретик.

Она пытается привлечь к делу своего племянника Отто Фриша (1904—1979), молодого талантливого физика-теоретика. Фриш, правда, приехал в гости к тетке чтобы отдохнуть, покататься на лыжах и за кем-нибудь поухаживать, но тетка у него настырная, целиком погруженная в научные проблемы, и ловит она его для обсуждений в самых неподходящих местах. А идея, которая ее осенила, — гениальная и совсем неожиданная: она вспомнила, как амеба, которая поглотила достаточно пищи, делится надвое. Так может, атом урана, поглощая какую-то частицу, скорее всего нейтрон, тоже делится на два ядра, масса каждого из которых близка к половине массы урана: поэтому одно из них может быть барием? Отпуск Фриша, конечно, пропал — тетка заставила-таки его обсчитывать свою идею.

Идею и предварительные расчеты Мейтнер и Фриш тотчас сообщили Бору в Копенгаген. Бор уже ранее представлял себе ядро как жидкую каплю, поэтому идея о том, что после поглощения



Присуждение любых наград, в том числе и Нобелевских премий, зависит от многих факторов, не только научных, хотя премии по науке присуждаются наиболее объективно (непонятен, правда, пропуск имен таких ученых как А. Зоммерфельд, Г. Гамов, Е. К. Завойский и некоторых других). Но вероятно, самым досадным является присуждение премии О. Гану без Л. Мейтнер. Этот малоприятный факт был частично исправлен тем, что в 1959 г. на их 80-летие Институт ядерных исследований в Берлине был переименован в Институт имени Гана—Мейтнер (предлагается также назвать в ее честь 109-й элемент). После 1938 г. они вместе не работали, жили в разных странах, но умерли оба в 1968 г. в девяносто лет, он 28 июля, она 27 октября.

лишнего нейтрона в этой капле могут возникнуть такие колебания, что она распадется на две части, ему близка<sup>3</sup>.

Но здесь начинается уже иная история. Остается добавить, что Отто Гану была присуждена Нобелевская премия по химии 1944 г. «за открытие расщепления тяжелых ядер». При вручении премии, уже в 1946 г., представитель Шведской академии сказал: «Открытие расщепления тяжелых ядер при-

вело к таким последствиям, что мы все, все человечество, смотрим вперед с большими надеждами, но также и с большими опасениями за наше будущее».

### 3. Цепная реакция деления

Открытие явления деления ядер урана сразу же возбудило мысли о возможностях цепных ядерных реакций: суть дела в том, что при каждой такой реакции может высвобождаться много нейтронов, а они могут вызвать другие реакции.

Если взглянуть на периодическую таблицу, то можно заметить, что у легких элементов массовое число примерно вдвое больше порядкового номера (Мозли некогда думал, что это особый закон). С ростом порядкового номера, т. е. числа протонов в ядре, массовое число начинает нарастать быстрее и быстрее — требуется все большее число нейтронов для преодоления кулоновского отталкивания протонов. Но отсюда получается, что если бы удалось разделить, скажем, ядро урана точно пополам, т. е. вместо одного ядра с 92 протонами получить два ядра палладия с 46 протонами в каждом, то в каждом их них достаточно иметь 62–63 нейтрона, всего 124–126, а ведь в ядре урана-238 их было 146! Куда же денутся излишние нейтроны?

Они могут частью распасться — за счет бета-распада перейти в протоны и остаться в ядрах, но частью могут освободиться, вылететь из ядер и вызвать другие ядерные реакции. Сколько же может быть

<sup>3</sup> Отметим, что вскоре в 1940 г. Г. Н. Флеров и К. Н. Петржак обнаружили эффект спонтанного, т. е. самопроизвольного, деления ядер урана — именно это явление не позволяет, во всяком случае в настоящее время, получать долгоживущие тяжелые элементы.

таких освобождающихся нейтронов в реально наблюдаемом распаде, и какие реакции они могут вызвать?

Письмо Лизе Мейтнер и Отто Фриша Бор получил перед самым выездом в США, ситуацию он обдумывал на пароходе. В Нью-Йорке по телеграмме, посланной с корабля, его уже ждали собравшиеся в университете физики, и говорят, что некоторые из них, включая Э. Ферми, даже не дослушав доклад до конца, бросились в лаборатории проверять предположения Мейтнер и Фриша. Так началась работа над атомной бомбой.

У образованных ученых сразу же могла и должна была возникнуть аналогия с цепными химическими реакциями. Можно привести пример такой реакции: если соединить в темноте большие объемы газообразных хлора и водорода, а затем осветить смесь, то происходит взрыв — одиночный квант света стимулирует быструю реакцию синтеза, образования хлористого водорода  $\text{HCl}$ , но в ее ходе высвобождаются примерно два фотона той же частоты, т. е. становятся возможными два следующих акта синтеза, за ними следует возможность четырех таких актов и т. д., т. е. вероятность дальнейших реакций лавинно нарастает с каждым новым шагом — происходит взрыв. Для этого нужно, чтобы образующиеся кванты не выходили из реагирующего объема газа, т. е. необходима некоторая критическая масса — это, как увидим, важнейшее понятие реакции (можно, конечно, уменьшить величину критической массы, если поместить газ в сосуд с отражающими стенками!).

Теория цепных ядерных реакций была построена одновременно несколькими учеными, не думавшими в тот момент о возможности ее быстрого практического осуществления, в их числе были Я. Б. Зельдович<sup>4</sup>



<sup>4</sup> Яков Борисович Зельдович (1914–1987) начинал как химик, затем переключился на физику. Создал теорию горения, детонации и взрыва, основополагающие работы по теории элементарных частиц, а затем по релятивистской астрофизике и космогонии, сыграл (совместно с И. В. Курчатовым, Ю. Б. Харитоновым, А. Д. Сахаровым) огромную роль в работах по созданию ядерного оружия.

и Ю. Б. Харитон<sup>5</sup>, сотрудники Н. Н. Семенова (1896—1986, Нобелевская премия по химии 1956 г. за развитие теории цепных реакций), хорошо знакомые с этой химической проблематикой.

#### 4. Ядерные реакторы

По-видимому, первым о возможностях и опасностях военного применения реакций деления задумался Л. Сцилард<sup>6</sup>: по его оценкам, при делении ядра изотопа урана-235 должны были выделяться два-три нейтрона, и он боялся, что можно создать какой-нибудь портативный объем с ядерной взрывчаткой. Вместе с Вигнером (а вторично — с Э. Теллером) они обратились к Эйнштейну — будучи эмигрантами из Германии, они хорошо знали уровень ее науки и технологии, вышедший в мире до прихода Гитлера, и боялись, что Германия может первой создать такую «взрывчатку». Эйнштейн написал письмо президенту США Ф. Д. Рузвельту, которое общий знакомый смог лично ему передать. (Еще до того, по-видимому, схожее письмо отправил в военное министерство Э. Ферми, но оно и ряд последующих утонули в бюрократическом болоте. В Англии с аналогичным предупреждением к правительству обратились О. Фриш и Р. Пайерлс.)

В итоге этих хлопот Ферми было выделено 6 (именно шесть!) тысяч долларов на ведение урановых исследований — решение о создании бомбы было принято правительством 6 декабря 1941 г., за день до нападения Японии на Перл-Харбор и вступления США в войну. Сцилард пытался уговорить коллег добровольно отказаться от всех открытых публикаций по этой тематике: американцы и англичане в большинстве согласились — они поняли величину ставки в неизбежном соревновании с несомненным противником, Ф. Жолио во Франции и его группа вначале отказывались от самоцензуры, но вскоре Франция пала, и работа их прекратилась — Жолио смог переслать весь накопленный запас тяжелой воды, необходимый для экспериментов, в Англию.

---

<sup>5</sup> Юлий Борисович Харитон (1904—1996) — ученик Э. Резерфорда, являлся научным руководителем ядерных исследований СССР. Хотя ему принадлежало много идей в этих работах, отказывался подписываться как автор — поэтому нет его публикаций после 1940-х гг. По словам А. Д. Сахарова, бывают люди двужилые, а Харитон — трехжильный.

<sup>6</sup> Лео Сцилард (1898—1964) — уроженец Будапешта, как и Ю. Вигнер, Дж. фон Нейман и Э. Теллер, физик-теоретик. Изобрел вместе с Эйнштейном домашний холодильник без мотора и др., рассчитал, в частности, среднее число нейтронов, вылетающих при одном акте деления урана, придумал замедлители этой реакции. Первым понял проблемы порогов радиационной безопасности и экологии, выступал инициатором общественных кампаний за запрет ядерного оружия.

Уже очень быстро Н. Бор и Джордж А. Уилер теоретически, а затем Э. Ферми и его группа экспериментально показали, что для осуществления цепной реакции основной изотоп уран-238 малопригоден: вероятность захвата нейтрона его ядром очень мала, и поэтому нужно было бы собрать громадное его количество. Гораздо более перспективным представлялся изотоп уран-235, но он очень редок — примерно один атом на 140 атомов обычного урана.

Итак, возникла следующая задача: обогатить выделенный уран этим изотопом (отсюда термин: «обогащенный уран», в нем относительное содержание изотопов несколько изменено.) Трудность задачи состоит в том, что они почти не различимы химически, сыграть можно лишь на крохотной разнице их масс, чуть более одного процента.

Мы уже упоминали, что Лоуренс использовал для этого циклотрон: ионы разгонялись в нем и при этом ионы более легкого изотопа приобретали чуть большую скорость. В других группах пытались использовать центрифуги (такой способ применяется и сейчас), ионно-обменные смолы, осмос и т. д. Проблема стояла очень остро, и поэтому к ней подключился, в частности, Вигнер, инженер по первоначальному образованию.

Группе Ферми тем временем, все же, увеличили финансирование, и она сумела провести измерения громадного количества параметров всех атомов и ядер, которые могли встретиться в обогащенном уране. Выяснилось (это было основным), насколько нужно замедлить нейтроны, вылетающие при делении одного ядра, для того, чтобы вероятность его захвата следующим ядром стала максимальной. Для этого, как оказалось, нейтроны должны пройти определенный путь в сверхчистом графите (любая примесь их поглощала) или в так называемой тяжелой воде — это вода, в которой атомы обычного водорода заменены его изотопом дейтерием (самый большой завод по производству тяжелой воды для совсем иных нужд находился в Норвегии, поэтому союзники на всякий случай, чтобы опередить немцев, его разбомбили, а партизаны докончили уничтожение).

К концу 1942 г. удалось накопить столько обогащенного урана и выработать столько необходимого графита, что возникла возможность попробовать собрать первый «котел» — так для конспирации называли ядерный реактор.

Котел собирали под трибунами теннисного стадиона Чикагского университета, в рабочие ректор определил всю университетскую команду регбистов — парни здоровые, они никак не могли понять, зачем им нужно таскать тяжеленные и очень пачкающие блоки графита — им, конечно, ничего не объясняли. Реактор состоял из чередующихся

В современных атомных реакторах в качестве топлива используются изотопы урана и плутония. Ядра урана или плутония при взаимодействии с нейтронами делятся чаще всего на два осколка и испускают при этом 2–3 нейтрона. Осколки обладают огромной кинетической энергией в десятки тысяч электронвольт и, тормозя свое движение в топливном материале, нагревают его. Теплотворная способность ядерного топлива в миллионы раз выше органического топлива: при распаде одного грамма урана может образоваться столько же тепла, сколько при сгорании почти трех тонн угля. Это тепло поглощается теплоносителем, чаще всего жидким натрием, циркулирующим по первому тепловому контуру, а он греет второй контур, водяной, перегретый пар из которого подается на турбины электрогенераторов.

Помимо таких реакторов на медленных нейтронах, строятся реакторы на быстрых нейтронах (БР). У них нет замедлителей, и поэтому размер активной зоны, в которой происходит деление, у них меньше, чем у тепловых, а вокруг активной зоны размещается зона воспроизводства из урана-238. Процесс начинается с деления урана-235 или плутония-239 в активной зоне и испускания в среднем немногим более двух нейтронов (у плутония эта величина выше, чем у урана) на одно ядро. Один из них идет на деление нового ядра урана-235 и поддержания цепной реакции с выделением новых нейтронов, другой захватывается ядрами урана-238. Получившееся ядро изотопа урана-239 испускает электрон, превращаясь в ядро нептуния-239, ядро которого также испускает электрон и превращается в плутоний-239. Таким образом, в процессе работы БР происходит не только генерация тепловой энергии, но и воспроизводство плутония-239. Поэтому БР еще называют бридером (от английского «брид» — размножать).

в определенном порядке блоков урана и сверхчистого графита, между ними проходили стержни из кадмия — лучшего поглотителя нейтронов.

Великий день настал 2 декабря 1942 г. Реактор окружили счетчиками нейтронов, которые должны были зафиксировать начало и величину их потоков. На верхушку пирамиды забрался Сэмюэл К. Аллисон (1900–1965) с ведром жидкого кадмия, который он должен был лить в реактор, если реакция выйдет из-под контроля, и стержни поглотителя стали осторожно вытягивать: нейтроны сразу же пошли, расчеты оказались верными!

«Было ясно, — писал впоследствии Джон Кокрофт, — что Ферми открыл дверь в атомный век». Так началась ядерная эра!

Уже позже было проверено, сколько тепла выделяется при этой реакции, и т. д. Но, пожалуй, самое главное было в ином: в процессе работы реактора некоторые атомы урана переходят после ряда промежуточных реакций в атомы плутония, элемента за номером 94. Плутоний, как позже выяснилось, не менее урана-235 подходит для создания оружия, но так как химически он все же более отличен от обычного урана, то его много проще выделять уже из отработанного, т. е. лишённого урана-235, ядерного горючего.

Таким образом, ядерные реакторы не только дают тепло, на котором могут работать электростанции, но одновременно производят и новые радиоактивные вещества, в том числе так называемый оружейный плутоний — меньше на обычных реакторах, больше на бридерах. (Именно поэтому, подчеркнем, так опасно строить реакторы в политически нестабильных регионах.)

Бурное развитие ядерной энергетики породило несколько новых проблем. Первой из них, вероятно, нужно назвать вопросы обеспечения безопасности населения в случае аварий реакторов — особенно после страшных событий в Чернобыле в 1986 г. Вторая трудность в том, все реакторы имеют конечный эксплуатационный период — что делать с ними по окончании такого периода? (Эта проблема близка к проблеме утилизации ядерных отходов в процессе обслуживания реакторов.) Наконец, нужно максимально обезопасить реакторы от возможных налетов террористов.

Представляется, что все три проблемы решает, в оптимальной на сегодня форме, предложение А. Д. Сахарова: реакторы нужно строить в глубоких соляных пластах. Само существование таких слоев означает, что через эти пласты очень и очень давно не проходят подземные воды, а потому нет опасности выноса активных веществ на поверхность, при необходимости же захоронения реактора его можно просто оставить в этом слое и только закрыть сверху. Что же касается реактора в Чернобыле, то, по мнению Сахарова, его следовало направленными взрывами погрузить вглубь Земли...

## 5. Атомная (ядерная) бомба

После успешного запуска первого реактора вопрос создания ядерного оружия стал в практическую плоскость. Был организован так называемый Манхэттенский проект. Его возглавил 46-летний полковник Лесли Р. Гровс, профессиональный военный, который характеризовал ученых, работавших над созданием атомной бомбы, как «дорогостоящее собрание чокнутых». Научным руководителем проекта был назначен Роберт Оппенгеймер (1904—1967), известный американский физик-теоретик, стажировавшийся в свое время у Э. Резерфорда и М. Борна. Оппенгеймер организовал основную лабораторию вдали от населенных пунктов, в пустынном местечке Лос-Аламос (штат Нью-Мексико). Сюда перешла из Чикаго группа Ферми, а кроме того, Оппенгеймер смог собрать весь цвет эмигрантов из Европы и молодых американских физиков<sup>7</sup>.

Основным теоретическим отделом проекта заведовал Ганс Бете, бежавший в 1933 г. из Германии и в 1941 г., незадолго до того как США вступили во вторую мировую войну, ставший американским

<sup>7</sup> А. Эйнштейн не был привлечен к этой работе уже потому, что его отъезд из Принстона был бы сразу замечен и интерпретирован как участие в каком-то секретном проекте. Н. Бор как-то привлекался для экспертизы, но и тут были осложнения с соблюдением секретности — слишком уж заметными были их фигуры.

Настояв на свободном обмене информацией между учеными, которым строго-настроено запрещалось покидать пределы центра, Оппенгеймер создал атмосферу доверия и взаимного уважения, что способствовало удивительным успехам в работе. В этой группе было больше десятка тогдашних или будущих Нобелевских лауреатов, но большинство из них считали, что львиная доля заслуг в успехе проекта принадлежит Оппенгеймеру.

акции еще на переговорах с Управлением военно-морского флота в 1939 г. В ходе своей работы Ферми и итальянский физик Эмилио Сегре, бывший его студент и будущий Нобелевский лауреат, установили, что в качестве «взрывчатки» для атомной бомбы можно использовать тогда еще не открытый элемент плутоний (Pu, порядковый номер 94). И хотя он еще не был получен, оба ученых были убеждены в том, что

Интересно отметить тогдашние опасения, что взрыв может, в принципе, привести к глобальной цепной реакции, которая охватит всю Землю, т. е. вызовет всеобщую катастрофу. За консультацией обратились к Грегори Брейту (1899–1981), известному теоретику-ядерщику, не участвовавшему в Манхэттенском проекте. Брейт независимо пересчитал все экспериментальные данные и показал, что опасения эти необоснованны.

гражданином. Его глубокие знания в области ядерной физики, ударных волн и электромагнитной теории сыграли существенную роль в успехе программы: он отвечал за расчеты возможного поведения атомной бомбы.

Энрико Ферми впервые упомянул о возможности создания атомного оружия на основе цепной реакции его изотоп с массовым числом 239 должен возникать в урановом реакторе при захвате нейтрона ураном-238 и затем быстро распадаться.

Поэтому в Лос-Аламосе исследования шли одновременно в двух направлениях: планировались бомбы на уране-235 и на плутонии-239. Одна из бомб, «Малыш», соби-  
 ралась по такой схеме: в ней имелись два куска активного вещества,

масса каждого несколько больше половины критической массы — при включении детонатора они должны стремительно сблизиться, и, как только масса достигнет критического уровня, в них должна сама собой, от любого случайного нейтрона, начаться цепная реакция. Главная опасность состояла в том, что если цепная реакция начнется преждевременно, то активное вещество расплавится и растечется, не успев взорваться.

Второй тип бомбы, названный за ее выпуклую форму «Толстяком», был сконструирован иначе: вся масса активного вещества, несколько меньшая критической, находится вместе, она окружена оболочкой из бериллия, хорошо отражающего нейтроны. Радиус оболочки много больше радиуса активной начинки и потому вылетающие из нее и отражающиеся от бериллия нейтроны обратно практически не попадают. Вокруг оболочки расположены пороховые заряды, и при их одновременном, с высокой точностью, подрыве оболочка сжимается вокруг активной части и отражает все нейтроны внутрь,

что достаточно для цепной реакции. (Отметим, что КПД, если можно так выразиться, обеих конструкций очень низок: до взрыва и испарения всей конструкции успевают прореагировать много менее 1 % ядер урана. Величина критмассы «взрывчатки» нигде открыто не публиковалась, по оценке, она составляла порядка 5—7 кг.)

Ядерный взрыв поразил ученых и военных наблюдателей, находившихся рядом с местом испытания, и вскружил им головы. Но Оппенгеймеру, любителю санскрита и стариндийской поэзии, вспомнились строки из эпической поэмы «Бхагавадгита»: «Я стану Смертью, истребителем миров», — а сам взрыв напомнил строки о конце света: «Ярче тысячи звезд». До конца его жизни к удовлетворению от научных успехов всегда примешивалось чувство ответственности за их последствия.

Испытание первой в мире атомной бомбы типа «Толстяк» было проведено 16 июля 1945 г. в штате Нью-Мексико. Ее прикрепили к стальной вышке, установленной в пустынной местности. Ровно в 5.30 утра детонатор с дистанционным управлением привел бомбу в действие. С отдающимся эхом грохотом на участке диаметром в 1,6 км в небо взметнулся гигантский фиолетово-зелено-оранжевый огненный шар. Земля содрогнулась от взрыва, вышка исчезла. К небу стремительно поднялся белый столб дыма и стал постепенно расширяться, принимая на высоте около 11 км устрашающую форму гриба.

6 августа 1945 г. атомная бомба «Малыш» была взорвана над городом Хиросима, а через три дня точная копия первого «Толстяка» была сброшена на город Нагасаки. 15 августа Япония, чья решимость была окончательно сломлена этим новым оружием, подписала акт о безоговорочной капитуляции.

С тех пор конструкция атомных бомб претерпела много изменений: можно использовать иные типы ядерной взрывчатки с гораздо меньшей критической массой (созданы ядерные мины, даже артиллерийские снаряды), которые не приводят к такому разлету радиоактивных веществ, заражающих местность, как первые бомбы, и т. д. Но все это относится уже к ядерной технологии и нас здесь не интересует.



# Термоядерные реакции

## 1. Проблемы астрофизики

Астрономия, древнейшая из естественных наук, многие века ограничивалась чисто описательным подходом: наблюдались звезды и планеты, описывались их взаимоположение и законы движения (небесная механика). Гелиоцентрическая система Коперника предполагала, что планеты Солнечной системы должны быть схожи с Землей, и поэтому иногда высказывались предположения об истории их происхождения. Но звезды и Солнце могут состоять из какого-то особого, звездного вещества, о котором ничего не было известно, а потому наука не могла заниматься строением звезд или выяснением причин их свечения.

Но с открытием спектральных линий в излучении Солнца, а потом и других звезд появляется возможность взглянуть на эти небесные тела более пристально: такие линии уже говорят об их химическом составе, о том, что они, возможно, содержат те же элементы, что и Земля, и можно предположить, что никакого специфического «звездного вещества» вообще нет. Следовательно, появляется возможность думать о процессах внутри звезд или, по крайней мере, на их поверхности.

Так начала формироваться астрофизика, и так возникли ее главные проблемы: каковы состав и структура звезд, каковы источники их излучения, как они меняются в ходе своей эволюции. И тут астрофизика уже переплетается с исследованием строения Вселенной и ее историей, с космологией и космогонией (названия от греческого «космос» — это одновременно и высший порядок, и Вселенная), но эти более общие теории мы пока отложим.

Теория внутреннего строения звезд (1916), развитая в основном Артуром Стенли Эддингтоном (1882—1944), объясняла, почему нормальная звезда типа Солнца не сжимается дальше, несмотря на огромное гравитационное давление (средняя плотность Солнца всего  $1,41 \text{ г/см}^3$ ). По его теории, гравитационным силам сжатия противостоит давление электромагнитного излучения внутренних слоев, и из условия равенства этих сил следует, что температура вблизи центра звезды составляет порядка 15 миллионов градусов, а плотность вещества в сто с лишним раз больше средней.

Но как ведет себя вещество при таких температурах и давлениях? Почему и как оно излучает такие потоки электромагнитной энергии? Ясно, что там должны происходить какие-то ядерные реакции, но их природа оставалась совершенно неясной.

Внешние слои Солнца содержат (по массе) 71 % водорода, 26–27 % гелия, и лишь остаток приходится на все остальные элементы. Можно

думать, что внутренний состав примерно такой же. Наивысший выход энергии можно было бы получить из такой реакции: четыре атома водорода превращаются в атом гелия (точнее, надо бы говорить не об атомах, а о ядрах, так как в условиях близ центра звезды все атомы полностью ионизованы, т. е. с них сорваны электронные оболочки, и они вместе образуют плазму). Действительно, если взглянуть на таблицу Менделеева, то видно, что атомный вес водорода 1,008, а гелия — 4,003. Следовательно, при такой реакции  $(4 \cdot 1,008 - 4,003) = 0,029$  атомной единицы массы может, согласно формуле Эйнштейна, перейти в энергию (на самом деле, несколько меньше, так как в такой реакции должны возникнуть и другие частицы, но это сейчас не существенно).

Однако как же может быть, чтобы четыре одинаково заряженных протона одновременно преодолели силы кулоновского отталкивания и сблизилась настолько, чтобы в игру могли вступить уже ядерные силы? Вероятность такого стечения обстоятельств столь мизерна, что ее не стоит и пытаться рассматривать. Роль могут играть только столкновения двух частиц.

## 2. Ганс Бете: источники энергии звезд

Именно такой процесс впервые рассмотрел Вайцзеккер<sup>8</sup> в 1938 г.: столкновение двух протонов, при котором образуется дейтерий (или тяжелый водород, ядро которого, дейтрон, содержит протон и нейтрон), позитрон и нейтрино (реакцию записывают как  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$ ), между которыми и распределяется энергия, соответствующая формуле Эйнштейна. Дальше он пробовал рассмотреть столкновение двух дейтронов, но вероятности таких двухступенчатых процессов оказались слишком малы.

В 1869 г. Джонатан Г. Лейн (1819–1880) предположил, что Солнце — это гигантский газовый шар и давление в нем возрастает к центру. Отсюда он смог впервые рассчитать температуру на его поверхности: источником светимости, по такой модели, развитой далее лордом Кельвином, является сжатие газового шара. Однако эта модель приводила к очень малому сроку светимости звезд — для Солнца получались какие-то десятки, в крайнем случае, сотни тысяч лет, что вполне укладывается в библейскую хронологию, но никак не согласуется хотя бы с теорией эволюции Дарвина.

<sup>8</sup> Карл Фридрих фон Вайцзеккер (1912–2007) — физик-теоретик, ученик Бора и сотрудник Гейзенберга. Его отец был статс-секретарем министерства иностранных дел Германии в 1930-х гг., а младший брат — президентом ФРГ в 1990-х гг.



В 1938 г. на конференции по теоретической физике в Вашингтоне эта проблема заинтересовала Ганса Бете (1906–2005). Быстро освоившись с астрономическими данными и применив свои энциклопедические знания в области ядерной физики, он решил всю задачу за шесть недель. Согласно Бете, после образования дейтерия при столкновении протонов возникший позитрон аннигилирует с электроном (они имеются в плазме), дейтрон сталкивается еще с одним протоном и переходит в изотоп гелий-3 (радиоактивный, но с достаточно большим временем жизни); а столкновение двух ядер гелия-3 ведет к образованию уже стабильного ядра гелия-4 с выделением двух лишних протонов. Таким образом, Солнце представляет собой непрерывно действующую водородную бомбу, скрытую под слоем газа толщиной в полмиллиона километров.

В ходе этого исследования Бете рассмотрел такие солнечные характеристики, как температура, плотность, состав, рассчитал ожидаемые скорости реакции и показал, что реакция синтеза по этой цепочке (она называется водородным циклом) идет как раз с такой скоростью, которая обеспечивает наблюдаемое выделение энергии Солнцем.

Его расчеты также показали, что для звезд, более массивных, чем Солнце, в реакции должны участвовать более тяжелые ядра. И Бете рассчитал также другие циклы, заканчивающиеся формированием ядер изотопов углерода и азота.

В 1967 г. Бете был удостоен Нобелевской премии по физике «за вклад в теорию ядерных реакций, особенно за открытия, касающиеся источников энергии звезд». Представляя лауреата, Оскар Клейн, известный теоретик и член Шведской королевской академии наук, отметил широту знаний и интересов Бете и сказал, что некоторые из его открытий в области физики, каждое в отдельности, заслуживали самостоятельной Нобелевской премии. Работа Бете над источниками энергии звезд, сказал Клейн, «представляет собой одно из наиболее важных приложений фундаментальной физики в наше время и ведет к углублению наших знаний о Вселенной».

В 1967 г. Бете был удостоен Нобелевской премии по физике «за вклад в теорию ядерных реакций, особенно за открытия, касающиеся источников энергии звезд». Представляя лауреата, Оскар Клейн, известный теоретик и член Шведской королевской академии наук, отметил широту знаний и интересов Бете и сказал, что некоторые из его открытий в области физики, каждое в отдельности, заслуживали самостоятельной Нобелевской премии. Работа Бете над источниками энергии звезд, сказал Клейн, «представляет собой одно из наиболее важных приложений фундаментальной физики в наше время и ведет к углублению наших знаний о Вселенной».

Отметим здесь, что поиски источника энергии звезд и не могли начаться ранее XX в. В XIX в. писали, что источником нагрева могут служить падения метеоритов на Солнце, а Кельвин рассматривал нагрев вследствие гравитационного сжатия газового шара, но получаемые цифры были слишком малы.

После завершения Второй мировой войны почти все крупные ученые, включая Бете и Ферми, вернулись к довоенным исследованиям. Но перед ними маячила возможность создания более страшного оружия — термоядерного. Многие требовали передать право распоряжения ядерным оружием некоему международному органу, другие считали, что СССР, единственный потенциальный соперник Америки, еще долго не сможет овладеть «секретами» атомного оружия.

Но единственным секретом являлось то, что такая бомба реально существует, а он уже был раскрыт. Важнейшими были технологические ноу-хау: методики очистки материалов. Самостоятельно или с частичной помощью агентурных данных, но уже к 1947 г. в СССР был запущен первый реактор, а вскоре был произведен и первый ядерный взрыв.

Более проницательные ученые, первым из них нужно назвать Э. Теллера<sup>9</sup>, настаивали перед правительством на продолжении и интенсификации работ по созданию термоядерного оружия. Возражения Р. Оппенгеймера и многих других ни к чему не привели, и работы эти были развернуты, но в СССР они начались уже совершенно независимо примерно в то же время или даже раньше.

### 3. А. Д. Сахаров: водородная бомба

В рамках общего ядерного проекта СССР, руководителем которого был Игорь Васильевич Курчатов (1903–1960), теоретические термоядерные исследования вела группа Я. Б. Зельдовича, автора теории детонации и взрыва. В 1948 г. к этой работе привлекли И. Е. Тамма, а он включил в нее своего недавнего аспиранта А. Д. Сахарова<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> Эдвард Теллер (1908–2003) — уроженец Будапешта, физик-теоретик, автор известных работ по квантовой механике, физической химии, теории ядра, считается «отцом» американской водородной бомбы. Согласно его интервью последних лет, он стал убежденным противником коммунизма после бегства из СССР Г. Гамова и Л. Тиссы и ареста в 1937 г. Л. Д. Ландау (он был освобожден под личное поручительство П. А. Каницы)

<sup>10</sup> Андрей Дмитриевич Сахаров (1921–1989) — замечательный физик, гуманист, общественный деятель. Помимо водородной бомбы и разработок в области управляемых термоядерных реакций, создал вакуумную теорию гравитации и ряд основополагающих работ по космологии и теории элементарных частиц. Сахаров — фактический глава движения за гражданские права в СССР, в 1980–1986 гг. — в ссылке в г. Горький, в 1989 г. — депутат. Он был удостоен Нобелевской премии мира 1975 г. за «бесстрашную поддержку фундаментальных принципов мира между людьми» и за «мужественную борьбу со злоупотреблением властью и любыми формами подавления человеческого достоинства». Автобиография: «Воспоминания», «Горький, Москва: далее везде», дополненная воспоминаниями его жены Елены Георгиевны Боннэр «Постскриптум. Книга о горьковской ссылке» и др. Воспоминания коллег-физиков, в том числе и автора этих строк, собраны в книге «Он между нами жил: Воспоминания о Сахарове». (Он между нами жил: Воспоминания о Сахарове / Ред. Б. А. Альтшуллер и др. М., 1996.)



По первоначальному замыслу, нужно было соорудить трубу, заполненную дейтерием, в одном ее конце помещалась бы атомная бомба как детонатор. Взрыв этой бомбы должен был привести к внутризвездным температурам, при которых, как считалось, дейтерий «загорится» по типу реакции Вайцзекара и реакция под действием ударной волны пойдет дальше по трубе.

Точные значения распределения температур, как при взрыве атомной бомбы, так и те, что нужны для начала синтеза при столкновениях дейтронов, были неизвестны. Оценки и расчеты (к ним, в частности, привлекли Л. Д. Ландау и И. М. Халатникова) показывали сомнительность успеха при такой конфигурации ядерного запала. Нужно было думать, и думать упорно<sup>11</sup>.

И Сахаров предлагает принципиально новую конструкцию, которую называли «слоистой»: в центре шара находится запал, атомная бомба, вокруг нее — дейтерий, а оболочка этого шара делается из тяжелого металла, например урана или свинца. Хитрость здесь вот в чем: для реакций синтеза нужны не только высокие температуры, но и высокие давления, а величина давления зависит от количества ударов частиц о стенки сосуда и друг о друга. Но при первоначальном взрыве вещество атомной бомбы и ее оболочек ионизуется, образуется множество разнообразных частиц, и у каждой из них, согласно закону равнораспределения энергии по степеням свободы, одинаковая (приблизительно, так как равновесие не достигнуто) кинетическая энергия. Таким образом, чем более разрушительным будет взрыв запала, тем выше будет давление в первые микросекунды после него.

Это была первая идея, ведущая к цели. Способ сдавливания физики называли (между собой, конечно) «сахаризацией».

Вторая идея, вскоре появившаяся, принадлежит Виталию Лазаревичу Гинзбургу. Уже должно быть ясно, что водородная бомба первого проекта скорее должна была бы называться дейтериевой (или тяжело-водородной), но во всех вариантах заполнять ее газообразным дейтерием или поддерживать сверхнизкие температуры для его сжижения

<sup>11</sup> Интересны мнения физиков о возникающих проблемах. Энрико Ферми об этой работе отзывался так: «Превосходная физика!». Сахаров выражался еще сильнее: «Рай для теоретиков!» Многие теоретики, в том числе Я. И. Френкель, сомневались в возможности получения такой реакции.

слишком сложно. И вот Гинзбург сообразил, что можно сделать внутреннюю оболочку из такого твердого материала, который сразу же, в мгновение взрыва запала, выдавал бы горючее для термояда (обычное сокращение от «термоядерных реакций»). Для этого он рассмотрел реакцию воздействия нейтронов (их порождает атомная бомба) на изотоп литий-6: его распад на гелий-3 и тритий с выделением энергии. Тритий — это сверхтяжелый изотоп водорода, у него в ядре один протон и два нейтрона, поэтому вероятность его синтеза с дейтоном раз в сто больше, чем при столкновении двух дейтонов. А если в качестве оболочки использовать химическое соединение лития-6 и дейтерия (формула соединения  ${}^6\text{LiD}$ , поэтому его называли «либочка»), то получается колоссальный выигрыш: все компоненты, нужные для термоядерного взрыва, собраны вместе и притом в твердом виде.

На этом, однако, возможности дальнейшего усиления «слойки» были исчерпаны: для начального взрыва атомного запала вокруг него нужно расположить пороховые заряды, т. е. занять определенный объем, а это не позволяет использовать очень уж много «либочки» для эффективного термояда — получалось, что энергия взрыва такой бомбы всего раз в десять выше взрыва обычной атомной.

Тут появляется третья идея: атомную «бомбу-зажигалку», надо помещать не внутри, а снаружи, но так, чтобы она приводила к нужному сжатию и нагреву. В отличие от первоначальной трубы, сжатие (точнее, обжатие) и нагрев должны быть всесторонними. Как этого добиться?

Повторим: для равномерного обжатия термоядерного объекта давление должно одновременно включаться со всех сторон, но при взрыве «зажигалки» разлетающиеся частицы, как бы ни ставить отражатели, скорее, достигнут ближней части объекта и вместо взрыва разнесут его в клочья. Значит, нужно предельно уменьшить разницу времен подхода, а этого можно добиться только и только, если сжимать будут не частицы, а... свет! Для этого нужно сделать оболочку в виде



Заметим, что позже конструкции водородных бомб были усовершенствованы, габариты их уменьшены настолько, что они устанавливаются на ракетах. Разработаны также так называемые нейтронные бомбы, не содержащие урановой оболочки и поэтому не создающие долгоживущего радиационного фона, они, вместо соединений лития, содержат тритий и дейтерий, могут использоваться в артиллерии и решать тактические, а не стратегические задачи.

эллипсоида вращения (его сечения, эллипсы, научился рисовать юный Максвелл, по эллипсам, согласно законам Кеплера, вращаются планеты вокруг Солнца). Эллипсы обладают таким замечательным свойством, которое, несомненно, знали Сахаров и Зельдович: если в один из двух фокусов поместить светящийся объект, то все лучи, отраженные

В 1950 г. в Москву на имя Сталина поступило с Сахалина письмо от солдата Олега Александровича Лаврентьева, в котором были изложены основные идеи создания водородной бомбы. И хотя у автора было всего семиклассное образование, его идеи были оригинальны, а некоторые даже предвосхищали дальнейшие разработки. О. Лаврентьев был вызван в Москву, его зачислили на физический факультет, предоставили кураторов по всем предметам, вход в лабораторию, специальную стипендию, но большим ученым он так и не стал, оставшись своеобразной психологической загадкой.

от стенок, соберутся во втором фокусе, причем все они дойдут до второго фокуса *одновременно!*

Итак, бомба должна быть эллипсоидом, в фокусах которого находятся запал и объект, нужно только поставить между ними перегородку, задерживающую более ранний подход прямых лучей. Идея завершена, нужно всего лишь ее как следует рассчитать и воплотить в металл, как говорят конструкторы.

Трудности, которые при этом возникают, конечно, громадные, нужно еще много и много думать, делать и переделывать; над воплощением проекта работает множество людей, физиков — теоретиков и экспериментаторов, химиков,



взрывотехников, инженеров, техников (их называют, на немецкий лад, файн-мастерами, т. е. тонкими, особо ловкими) и т. д. Но 22 ноября 1955 г. первая в мире водородная бомба сброшена с самолета — испытания прошли успешно!

Еще до того США испытали 1 ноября 1952 г. на атолле Эниветок неподъемное расположенное на земле термоядерное устройство, сконструированное Э. Теллером. Аналогичное устройство Сахарова было испытано в СССР 12 августа 1953 г. Самая мощная по сей день бомба в истории, разработанная под руководством Сахарова, эквивалентная 50 Мт ТНТ (миллионам тонн тринитротолуола), была взорвана в атмосфере 30 октября 1961 г.<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Сахаров и Теллер пришли, несомненно, к одним и тем же решениям, но пришли независимо. Сравнивать их сложно или даже невозможно: они принадлежат к разным поколениям, к разным школам, и у них различен жизненный опыт. Оба они, помимо разработок бомбы, сделали многое в физике и оставили свой след в мировой истории: возможно, они предотвратили третью мировую войну между великими державами.

## 4. Управляемые термоядерные реакции

Реакции ядерного синтеза обладают, по крайней мере, двумя преимуществами перед реакциями деления. Во-первых, исходными продуктами для них может служить если не водород, то дейтерий, а запасы его на Земле, в отличие от запасов урана, неограниченны. Во-вторых, продукты синтеза, в отличие от радиоактивных отходов деления, слабо или совсем не радиоактивны, т. е. исчезает не решенная до сих пор проблема их захоронения.

Поэтому одновременно с разработкой оружия начались исследования возможностей термоядерной энергетики. Первая же проблема, которая возникла, состояла в том, как и где хранить вещество, точнее, плазму заряженных частиц, разогретых до температур, приближающихся к миллионам градусов. (Напомним, что самое термостойкое вещество на Земле остается твердым примерно до 5000. градусов.)

И это была первая проблема, которую еще до работы над бомбой решил А. Д. Сахаров: нужен сосуд, в котором нет материальных стенок, но который не выпустит наружу заряженные частицы. Эту задачу могут выполнить только силовые линии Фарадея — нужно так подобрать магнитные поля, чтобы они заворачивали назад все приближающиеся к ним заряды — вот вам и сосуд без стенок! Такие «сосуды» называли магнитными бутылками. Но в любой бутылке есть еще горлышко и дно — через них заряды могут убежать...

Тогда, предложил Сахаров, сделаем сосуд без горлышка и дна — завернем его в тор, т. е. в бублик. Такой ядерный реактор называли токамак (сокращение от «ТОроидальная КАмера с МАгнитной КАтушкой», одно из немногих русских слов, вошедших — наряду со словом «спутник» — во все языки мира).

Схожие устройства создаются во многих лабораториях. И если в 1965 г. токамак работал не более одной десятиmillionной секунды, то уже к 1991 г. длительность его работы на смеси дейтерий-тритий дошла до двух секунд, а температура в нем достигла 200 миллионов градусов. Физики уверены, что они в этих исследованиях на правильном пути — нужно терпение, работа и... финансирование. (Стоимость большого токамака, который строят вместе США, Россия, Европейское сообщество и Япония, — порядка 10 миллиардов долларов, но перспективы столь грандиозны, что затраты могут очень быстро окупиться в случае ожидаемого успеха.)

А существуют ли другие возможности для развития термоядерной энергетики?

В 1947 г., как мы говорили, Пауэлл обнаружил в космических лучах след мезона, который затем превращался в чуть более легкую



Проблема управляемых термоядерных реакций столь важна, а решение ее столь многообещающе, что время от времени появляются сообщения об их наблюдении в самых экзотических условиях. Так, в начале 1990-х гг. два исследователя сообщили, что они наблюдают такую реакцию при накачке кристалла чистого металла палладия дейтерием: между узлами кристаллической решетки палладия как раз помещаются атомы дейтерия, и, по уверению авторов, они так сближаются, что начинается синтез гелия. К сожалению, это наблюдение не подтвердилось — возможно, авторы были вполне искренни, но у них что-то случилось с аппаратурой.

В конце 1990-х гг. появились новые сообщения. При прохождении мощной ультразвуковой волны через воду в ней, как известно, возникают пузырьки — это явление кавитации. Затем эти пузырьки схлопываются, иногда с грохотом, что говорит о сильном давлении, возникающем в них, — вот это давление, по мнению авторов статей, и приводит к термояду, следы которого они как будто наблюдали. Но и эта сенсация, увы, не подтвердилась.

частицу, но не протон и не электрон. Пауэлл решил, что первоначальная частица — это пи-мезон, предсказанный Юкавой переносчик ядерных взаимодействий. Он, по видимому, превращался в несколько более легкий мю-мезон, тот самый, который еще в 1937 г. нашел К. Андерсон. Поэтому возник вопрос: как они соотносятся друг с другом? (Доказательство справедливости его предположения о распаде пи-мезона на мю-мезон и нейтрино было установлено позже.) Поскольку вопрос оставался дискуссионным, С. Франк в том же 1947 г. опубликовал маленькую заметку о том, что, возможно, самая первая частица, найденная Пауэллом, — это все тот же мю-мезон, но севший на место электрона в атоме.

Сахаров заинтересовался этой заметкой и рассмотрел такую возможность: масса мю-мезона в 207 раз больше массы электрона, значит, радиус мю-мезоатома будет в 207 раз меньше радиуса водорода с обычным электроном на орбите. Поэтому мю-мезоатом как нейтральное образование может так близко подойти к ядру другого атома, что начнется реакция синтеза — и все это при нормальной температуре. Более того, сам мю-мезон в такой реакции не участвует, поэтому он может, сблизив два ядра, полететь дальше и снова привести к такой же реакции. Таким образом, эта частица может играть роль катализатора реакции (от греческого «катализис» — разрешение), но недолговечного — время жизни мюона длится около двух миллионных секунды. Этот процесс Сахаров назвал мю-мезонным (или мюонным) катализом, и с тех пор он интенсивно изучается: планируется, в принципе, строить специальные ускорители, так называемые мезонные фабрики, энергия для которых будет вырабатываться в ходе самой каталитической реакции.

Еще одна возможность, тоже впервые рассмотренная Сахаровым, — это нагрев малых количеств ядерных реагентов одновременными импульсами мощных лазеров. Лазерный термояд также продолжает исследоваться.

# «Элементарные» частицы

*Сущности не следует умножать  
без необходимости.*

У. Оккам

Поиск исходных «кирпичиков», из которых построен весь мир, — одна из характерных черт любой цивилизации (и, согласно И. Канту, одна из антиномий чистого разума). Не вдаваясь в седую древность, можно сказать, что к концу XIX в. цель, казалось, была достигнута: мир состоит из нескольких десятков видов неизменных атомов и электромагнитного излучения (такое количество исходных атомов выглядит как-то неубедительно, но что поделаешь?). Затем появились: электрон, фотоны, превращения атомов, а позже — структуры этих самых атомов. С открытием нейтрона можно было, как снова казалось, успокоиться: есть протоны, нейтроны, электроны (и их античастицы) и кванты — этих элементарных частиц достаточно для построения всего вещества. Потом добавились пи-мезоны, обеспечивающие связи в ядрах и нейтрино — уже не так мало видов частиц, но среди них как будто ни одной излишней, ненужной...

Ах да, мы забыли о мюоне — для чего он нужен, он же явно излишен в этой утилитарной схеме?

Но с конца 1940-х гг. новые частицы посыпались как из рога изобилия, к 1980-м их можно было считать чуть ли не сотнями. С нашей антропоцентрической (т. е. ставящей во главу угла существование человека) точки зрения, это явный перебор природы. И тут стали возникать разные идеи: рассматривать одни частицы как основные, а другие как составленные из них или их возбужденные состояния, придумать схемы их классификации и взаимозависимости — т. е. как-то упорядочить все это неожиданное обилие объектов и, если не целиком, сразу, то хоть по частям, свести их к определенным типам взаимодействия или к полям с соответствующими квантами взаимодействия.

Частицы, обнаруженные в таком количестве, стало даже как-то неудобно называть «элементарными» или «фундаментальными», поэтому эти названия постепенно вышли из употребления (иногда их называют субъядерными частицами). Остались только подразделения частиц на лептоны, мезоны, барионы, кванты калибровочных полей (в том числе фотон) и кварки<sup>13</sup>, или по-иному: на частицы, участвующие в сильных, электромагнитных, слабых и гравитационных взаимодействиях (некоторые из этих типов можно еще подразделить).

Но четыре типа взаимодействия — это тоже слишком много: нельзя ли их как-нибудь объединить? Сумели же Эрстед и Ампер начать объединять электричество и магнетизм, а Максвелл успешно объединил электромагнетизм и оптику!

Но нужно сохранять последовательность изложения. Поэтому мы рассмотрим в этом разделе, как открывали частицы, а позже — типы их взаимодействий и возможности их объединения<sup>14</sup>.

## 1. Бета-распад: появление нейтрино

Еще в 1914 г. Дж. Чедвик, измерявший энергии электронов, вылетающих во время превращения радиоактивного изотопа висмута в полоний, пришел к очень странному результату: энергии этих электронов принимали все значения — от очень малого до некоторого самого высшего, причем с почти одинаковой вероятностью. Вначале, конечно, подумалось, что после вылета электрона и превращения ядра излишняя энергия излучится как гамма-квант, но их не обнаружили. Но тогда эта произвольная энергия должна была оставаться в самом ядре, а ведь в нем существуют только определенные уровни, т. е. могут оставаться только определенные порции энергии?

Положение казалось столь безвыходным, что Н. Бор с соавторами предположили, что в элементарных актах взаимодействия энергия сохраняется только «в среднем». Но тогда этот самый бета-электрон должен был бы иметь то меньшую энергию, то большую, а все измерения, начиная с опытов Чедвика, показывали, что есть верхний порог, максимальная энергия электронов распада.

<sup>13</sup> Частицы, участвующие в сильных взаимодействиях, барионы и мезоны, называются общим именем — адроны (от греческого «хадрос» — крепкий, сильный).

<sup>14</sup> Стоит отметить, что для этих областей исследования характерна ситуация, когда одни и те же теории и модели выдвигают одновременно несколько человек. Можно даже думать, что «плотность интеллекта» в них, число талантов, сосредоточенных одновременно над одной и той же проблемой, было (или до сих пор остается?) самым большим в истории человечества.



В 1930 г. В. Паули предлагает, в противовес своему учителю Бору, другое объяснение: при бета-распаде помимо электрона испускается еще одна частица, она нейтральная, имеет спин  $1/2$  и, вероятно, очень малую массу, поэтому ее не замечают. (Это весьма еретическое предположение Паули не опубликовал, а послал письмом в адрес семинара по физике, на который не смог приехать — готовился к балу в своем университете. Сам он настолько скептически относился к собственной гипотезе, что даже заключил пари, что нейтрино

никогда не будет обнаружено — признать свой проигрыш ему пришлось только через 25 лет.)

Однако гипотеза Паули очень понравилась Энрико Ферми — она спасала закон сохранения энергии, и он стал после открытия нейтрона называть эту гипотетическую частицу «нейтрино» (итальянское уменьшительно-ласкательное от «нейтрон»). А через два года после открытия нейтрона Ферми построил первую теорию бета-распада, по которой нейтрон испускает одновременно электрон и нейтрино и превращается в протон ( $n \rightarrow p + e^- + \nu$ , нейтрино обозначают греческой буквой  $\nu$  — «ню»). Заметим, что только при этом все в порядке со спинами: в начальном состоянии спин равен  $1/2$ , а в конечном три фермиона с таким же спином, которые в сумме снова могут дать  $1/2$ .

Теперь, конечно, хотелось как-нибудь это нейтрино зафиксировать, но задача оказалась весьма не простой. Первый, и то не полный, успех был достигнут только в 1942 г. Д. Алленом: он исследовал, как ядро бериллия захватывает электрон и превращается в литий — при этом должно испускаться нейтрино и уносить с собой энергию и импульс. Соотношения энергия-импульс ядра лития и углов разлета показали, что, действительно, должно вылетать нейтрино, а масса его должна равняться нулю.

Следовательно, нейтрино, как и фотон, может двигаться только со скоростью света, но у нейтрино спин равен  $1/2$ , а у фотона он равен единице, поэтому у них ничего общего, кроме скорости, нет. Поскольку нейтрино является фермионом, то оно должно описываться уравнением Дирака (или каким-нибудь его аналогом), и тогда помимо нейтрино должно существовать еще и антинейтрино (его обозначают добавочной черточкой над буквой «ню»:  $\bar{\nu}$ ). Поэтому принято писать, что при распаде нейтрона вылетают электрон и антинейтрино ( $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ ), а при превращении протона в нейтрон внутри ядра

из него должны вылетать позитрон и нейтрино ( $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ ). Но чем еще антинейтрино может отличаться от нейтрино?

Трудности регистрации нейтрино связаны с тем, что оно очень слабо взаимодействует с веществом: нейтрино с характерной ядерной энергией в 3–10 МэВ (единицы энергии описаны в Приложении) «спокойно» пролетает Землю насквозь, а в веществе с плотностью воды его длина свободного пробега (до первого взаимодействия) составила бы 100 световых лет! (Трудности усугубляются тем, что, как будет рассказано ниже, существуют, по крайней мере, три разных типа нейтрино: обычное, мюонное и тау.)

Поэтому первая полная регистрация нейтрино произошла лишь через 23 года после выдвижения гипотезы Паули, когда появились мощные ядерные реакторы с их колоссальными потоками нейтрино. В 1953–1956 гг. Ф. Рейнес (1918–1998, Нобелевская премия 1995 г.) и К. Коуэн наблюдали такие реакции в огромном баке с водой, содержащей молекулы-сцинтилляторы.

Громадные потоки нейтрино должны, если справедлива теория термоядерного цикла реакций в звездах Г. Бете, вылетать из нашего Солнца — в этот цикл входят и реакции бета-распада. Для их поиска Реймонд Дэвис (1914–2006) создал принципиально новый детектор, огромный бак, заполненный 600 тоннами специальной жидкости и расположенный в глубокой шахте. В течение самого длинного в истории физики эксперимента, 30-летних (!) наблюдений, ему удалось, по реакциям превращения атомов хлора в атомы аргона, зарегистрировать около 2000 солнечных нейтрино. (Представьте себе задачу по вылавливанию атомов аргона в таком объеме: это почище поиска булавки в стоге сена величиной со всю Солнечную систему!) Наблюдения Дэвиса послужили прямым доказательством того, что в центре Солнца на самом деле идут термоядерные реакции. Однако количество нейтрино было меньше, чем требовали расчеты цикла Бете: проблема «солнечных нейтрино» надолго оставалась болезненной темой для теоретиков. Самый простой выход, возможность преобразования электронных типов нейтрино в мюонные или тау по пути через вещество звезды, требовал новых экспериментов.

Другой гигантский детектор нейтрино, названный «Камиоканде», был создан в Японии группой исследователей во главе с Масатоси Косиба (р. 1926), главным образом, для проверки результатов Дэвиса. Им, к счастью, не пришлось ждать 30 лет: вдруг, 23 февраля 1987 г., во время вспышки сверхновой звезды, обозначаемой как SN1987A, этот детектор смог зарегистрировать поток нейтрино, пришедший к Земле из соседней галактики — Большого Магелланова Облака.

Детектор «поймал» 12 нейтрино из  $10^{16}$  (десять миллионов миллиардов), прошедших сквозь него. (Взрыв сверхновой звезды сравним по мощности излучения с излучением триллионов нормальных звезд, поэтому поток его нейтрино и мог быть зарегистрирован на таком расстоянии. Взрывы эти, однако, абсолютно непредсказуемы, и потому их можно долго и очень долго ждать...)

Результаты группы Косибо подтвердили справедливость теории взрыва на втором, после Солнца, объекте. Их наблюдения показали также некоторую асимметрию потоков нейтрино, непосредственно попадающих на детектор и прошедших через толщу Земли. А это как раз и означает возможность преобразования одного типа нейтрино в другие, т. е. возможность нарушения законов сохранения лептонных зарядов по отдельности. (В 2001 г. в нейтринной обсерватории Садбери сумели измерить интенсивность солнечных нейтринных потоков всех трех типов: их соотношения оказались иными, чем в момент излучения. Таким образом была показана возможность их взаимных переходов.)

Работы Дэвиса и Косибо привели к неожиданным открытиям и создали новое поле деятельности для астрономов — нейтринную астрофизику, а они оба удостоены Нобелевской премии за 2002 год.

Но история нейтрино отнюдь не исчерпывается проблемой его регистрации.

## 2. Принципы симметрии и проблемы сохранения четности

Мы уже говорили о замечательной теореме Эмми Нётер<sup>15</sup>, согласно которой неизменность системы при ее переносе как целого в пространстве, ее поворотах, сдвиге начала отсчета времени ведут к законам сохранения импульса, момента вращения и энергии. Но помимо таких непрерывных преобразований нужно рассмотреть и дискретные преобразования: отражение в зеркале (пространственная инверсия, обозначается символом  $P$ ), обращение времени (обозначается символом  $T$ ), зарядовое сопряжение, т. е. замена всех частиц на античастицы (обозначается символом  $C$ ). Из очень общих соображений была установлена СРТ-теорема Людерса—Паули: если проделать все три операции над любой системой, то она должна вернуться в свое прежнее состояние.

Нарушение СРТ-инвариантности означало бы фактическое крушение основ современной физики, не менее значимое, чем, скажем, успешное построение вечного двигателя. Поэтому проверке этой теоремы всегда уделялось особое внимание.

<sup>15</sup> См.: Перельман М. Е. От Аристотеля до Николы Теслы. Раздел II. Глава 5.

Есть фантастический рассказ о том, как космонавты-земляне гибнут от голода на какой-то вновь открытой планете: она изобилует съедобными продуктами, но все они в правой конфигурации, не усваиваемой организмом. Причины такой хиральности органики на Земле до сих пор не выяснены.

Но еще раньше, до установления СРТ-теоремы в начале 1950-х гг. рассматривались по-отдельности симметрии относительности операций  $P$ ,  $C$  и  $T$ . Например, симметрия относительно пространственной инверсии  $P$  означает, что наряду с существо-

ванием некоторого образования может существовать и другое, получаемое при его зеркальном отображении. Так, еще Жан-Батист Био обнаружил в 1815 г., что существуют вещества, вращающие плоскость поляризации света только вправо или только влево. А Луи Пастер (1822–1895), основоположник современной микробиологии, открыл, что многие органические вещества могут существовать в двух зеркально противоположных конфигурациях — левой и правой. Эти разновидности он определил оптически — они вращают плоскость поляризации света в разные стороны (явление хиральности, от греческого «хир» — рука, как бы «разнорукость»), причем, например, наш организм усваивает только и только «левые» соединения.

Казалось естественным и соответствовало множеству наблюдений, что если из симметричной системы, например набора неорганических веществ, синтезировать органические молекулы, то в общем случае получится одинаковое количество левых и правых соединений: если первоначальное состояние было симметричным относительно зеркального отображения, оно таким и останется. И наоборот — для асимметричного синтеза нужно заранее заложить в процесс какую-то асимметрию.

При математическом описании процессов зеркальное отображение соответствует изменению знака пространственных координат. Поэтому симметричные состояния частиц называются четными — знак функции, которая их описывает, не меняется, а антисимметричные — нечетными. Отсюда Вигнер постулировал в 1932 г. закон сохранения четности: каждая частица имеет определенную четность, а четность их соединений определяется произведением четностей составных частей и моментом системы.

Обращение времени  $T$  означает, что наряду с прямой реакцией может происходить и обратная: из перехода, например,  $A + B \rightarrow C + D$ , следует возможность и обратного перехода:  $C + D \rightarrow A + B$  (вероятности их различны, но связаны так называемой теоремой баланса).

Симметрия относительно зарядовой четности  $C$  означает, например, что если продукты распада частицы вылетают в одну сторону, то продукты распада античастицы вылетят в противоположную сторону.

Законы сохранения определенных четностей казались столь естественными, что как-то даже не поднимался вопрос о возможности их нарушения. И вдруг, в 1956 г. совершенно неожиданно появляется статья двух теоретиков, американцев китайского происхождения, Ли Чжендао (р. 1926) и Янг Чжэньнина (р. 1922): оказывается, ни один существующий эксперимент не доказывает, что в реакциях с участием нейтрино (они называются слабыми) пространственная четность сохраняется. А может быть, этот закон справедлив только для сильных и электромагнитных взаимодействий и не выполняется для слабых? И они предлагают ряд экспериментов для проверки такой гипотезы.

Статья эта вызвала в первый момент впечатление шутки или абсурда: под удар ставилась, казалось, самая основа физики. Но очень скоро, буквально через несколько месяцев, их компатриотка мадам Ву Цзин-сян (р. 1913) подтверждает гипотезу Ли и Янга: поставив эксперименты по бета-распаду строго ориентированных при низких температурах ядер кобальта и измеряя поляризацию электронов, она показала, что нейтрино бывают только лево-поляризованными. Значит, их нельзя отразить в зеркале — поляризация должна при этом измениться на правую, но таких нейтрино не существует!

Сразу же и почти одновременно Янг и Ли, Л. Д. Ландау и Абдус Салам предположили, что должна сохраняться комбинированная СР-четность: при отражении в зеркале одновременно с изменением знака координат и поляризации нейтрино переходит в антинейтрино. (Ли и Янг очень быстро, уже в 1957 г. получили Нобелевскую премию.)

Позднее закон сохранения комбинированной четности (и несохранения Р- и С-инвариантности по отдельности в слабых и только в слабых взаимодействиях) был подтвержден во многих других экспериментах.

Но в 1964 г. Джеймс У. Кронин (р. 1931) и Вел Л. Фитч (р. 1923) обнаруживают, что при одном из типов распадов К-мезонов (или каонов, о них ниже) даже комбинированная четность не сохраняется. Нейтральные каоны существуют в двух формах: одна из них четная и поэтому может распадаться только на два пи-мезона ( $K_S^0 \rightarrow 2\pi$ ), а вторая, нечетная и в 500 раз более долгоживущая, распадается на три пи-мезона ( $K_L^0 \rightarrow 3\pi$ ) — именно такие типы распадов им строго предписывает сохранение СР-инвариантности.

Однако в эксперименте оказалось (в 45 случаях из 23 тыс. сфотографированных событий в искровой камере), что иногда каон  $K_L^0$  распадается на два пиона, а не на три — из-за редкости этого процесса его называют сверхслабым. Эти наблюдения были встречены с таким



недоверием, что еще около полугода все эксперты их тщательно анализировали до того как отправить в печать.

Итак, вне подозрений осталась только полная СРТ-симметрия. Но тогда нарушение СР означает, что нарушается, для компенсации СРТ-сохранения, и Т-симметрия, т. е. из существования прямого процесса вовсе не следует, что должен существовать и обратный процесс. А это сообщение ведет уже к грандиозным выводам. Так, мы дальше будем говорить, что вся наша Вселенная возникла 15–20 млрд лет тому назад в результате Большого взрыва, но в момент этого взрыва должно было возникнуть равное количество материи и антиматерии, почему же сейчас мы наблюдаем только материю и не видим антиматерию?

Если все процессы Т-инвариантны, то сейчас должно наблюдаться такое же соотношение материи и антиматерии, которое было в самом начале существования Вселенной. Но нарушение СР- или Т-инвариантности позволяет античастицам распадаться быстрее, чем частицам, и, следовательно, быстрее исчезать, оставляя избыток частиц в виде вещества Вселенной. (Аннигилировавшие частицы и античастицы пополняют запас электромагнитного излучения и нейтрино во Вселенной.)

Принципиально важно отметить, что здесь физика самых малых по времени жизни и по размерам образований смыкается с физикой самых грандиозных процессов в мире.

Кронин и Фитч были за свой эксперимент удостоены Нобелевской премии 1980 г., однако до сих пор остается все же непонятным, чем вызван этот факт несохранения — полной теории, как объяснения причин такого распада, так и оценок итогов этих процессов в эволюции Вселенной, все еще нет.

### 3. Типы нейтрино и лептонный заряд

Итак, существуют только левополяризованные нейтрино и правополяризованные антинейтрино. Но это означает, что к ним не подходит уравнение Дирака, описывающее остальные фермионы: оно дает для частицы и античастицы четыре решения, а здесь их только два. И тут вспомнили, что еще в 1929 г. знаменитый математик Герман Вейль предлагал двухкомпонентное уравнение для электрона, отброшенное как раз потому, что оно не сохраняло четность<sup>16</sup>. Но согласно этому

<sup>16</sup> В весьма авторитетном обзоре В. Паули «Общие принципы квантовой механики», изданном в 1933 г. в составе немецкого «Handbuch der Physik», Bd 24/1 (русское издание 1947), специально подчеркиваются недостатки уравнения Вейля. В новом издании «Handbuch der Physik», Bd. 5/1, вышедшем в 1958 г. (русский перевод этого обзора 1975) есть единственное изменение — опущена критика уравнения Вейля.

уравнению масса нейтрино должна строго равняться нулю, и хотя большинство теоретиков в этом уверены, поиски и определение его массы все еще продолжается. На сегодня (2010 г.) можно сказать, что масса нейтрино, вылетающих при бета-распаде ядер, не превышает в энергетических единицах 3 эВ, т. е. менее одной стотысячной от массы электрона (0,51 МэВ).

Но оказалось, что существует много разных нейтрино. И дело было так.

Со дня своего открытия в 1937 г. мюоны представляли особый предмет, вызывающий головную боль у теоретиков. Вначале думали, что они имеют отношение к ядерным силам, потом оказалось, что они очень слабо взаимодействуют с ядрами и столь схожи с электронами, только в 207 раз тяжелее, так что их хотелось принять за «возбужденные» электроны. Но если это возбужденные электроны, то они должны, испустив гамма-квант, пре-

вращаться в электроны или позитроны, т. е. обязательно должен наблюдаться такой распад:  $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ . Этот распад искали все и... никто никогда его не наблюдал!

Нет, мюон распадался, и при этом энергия вылетающих электрона или позитрона менялась в очень широких пределах, а это означало, что он распадается, по крайней мере, на три частицы, две из которых — типа нейтрино:  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$ . Но если бы они были действительно нейтрино и антинейтрино, они могли бы превратиться в гамма-квант, а раз этого не происходит — значит, они частицы разного типа!

Приходилось признать, что есть какие-то электронные нейтрино и мюонные нейтрино, а реакции распада мюонов должны записываться как

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e,$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu.$$

Непосредственно получить мюонные нейтрино смогли в 1960–1962 гг. Леон Ледерман (р. 1922), Мелвин Шварц (р. 1932) и Джек Штейнбергер (р. 1921). Чтобы оценить всю сложность подобных экспериментов, опишем их работу чуть подробнее.

По расчетам из каждых 10 миллиардов нейтрино, проходящих через Землю, только одна частица вступает во взаимодействие со своим окружением. Поэтому их эксперимент проводился таким образом. Мощный поток протонов из ускорителя направлялся на мишень из бе-

Р. Фейнман как-то рассказывал, что когда его что-то особенно интересует, то он пишет условия задачи на одной из досок в кабинете, чтобы они были всегда перед глазами, и потом вносит добавочные сведения. Так вот, на одной из досок он нарисовал в верхнем левом углу значки: « $\mu^-$ ?», — а за следующие 20 лет ничего к ним не добавил...

рилия, так что поток образовавшихся на ней частиц включал в себя множество пионов. Их распад на лету порождал мюоны и мюонные нейтрино, и продукты распада направлялись на стальной барьер толщиной в 13,4 м, который заведомо должен был поглотить все частицы кроме нейтрино. Затем этот поток нейтрино вводился в большой алюминевый детектор, в котором несколько нейтрино могли, наконец, провзаимодействовать с атомами алюминия. Анализируя эти взаимодействия, физики и обнаружили мюонные нейтрино и смогли определить некоторые их параметры (Нобелевская премия 1988 г.).

Таким образом, семейство слабо взаимодействующих частиц включало в себя пары  $(\mu^+, \mu^-)$ ,  $(e^+, e^-)$ ,  $(\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu)$ ,  $(\nu_e, \bar{\nu}_e)$  — их всех называли лептонами (от греческого и еврейского — мелкая монета, мелочь, ср. русскую идиому «внести свою лепту»). Название это прижилось, хотя оказалось не очень удачным.

В 1975 г. Мартин Перл (р. 1929, Нобелевская премия 1995 г.) открыл — при изучении на коллайдере столкновений высокоэнергичных пучков электронов и позитронов — еще один лептон, названный

Неизвестно также, могут ли существовать и другие типы лептонов. Дело в том, что еще одно двухкомпонентное уравнение предлагал в 1937 г. Этторе Майорана (1906–1938, гениальный, по-видимому, физик, сотрудник Ферми, причины исчезновения которого остаются неизвестными). В его теории частицы и античастицы должны быть тождественными — эти майорановские лептоны тоже ищут, но пока безрезультатно. (Опять физики берут на вооружение старый принцип демократии: все, что не запрещено, — разрешено, а запреты на существование таких частиц тоже нет.)

триконом (от греческого — третий) или  $\tau$ -лептоном. Как будто в насмешку над родовым именем «лептон», масса его оказалась примерно вдвое больше массы протона или нейтрона, но свойства были того же типа, как у электронов или мюонов: его рождение или распад всегда связаны с появлением специфического, только ему сопутствующего тау-нейтрино. Если среднее время жизни мюона — порядка двух миллионов секунды, то тау-лептон распадается в миллиард раз быстрее, но зато, так как у него большая масса, он может распадаться многими разными путями.

А вот есть ли у этих нейтрино, мюонного и тау-лептонного, масса или нет — вопрос до сих пор нерешенный: из измерений следует пока только, что у  $\nu_\mu$  масса не может превышать одной десятой массы электрона, а у  $\nu_\tau$  она не больше, чем масса сорока электронов.

Лептоны подразделяются, очевидно, на три семейства: электронное ( $e$ ,  $\nu_e$ ), мюонное ( $\mu$ ,  $\nu_\mu$ ) и тау ( $\tau$ ,  $\nu_\tau$ ) — и для каждого из них есть свой закон сохранения, есть, иными словами, три вида лептонных «зарядов» (впервые, по-видимому, понятие лептонного заряда ввел Я. Б. Зельдович еще в 1952 г.). А вот являются эти законы сохранения

абсолютными, или возможны переходы одного типа нейтрино в другой — это точно не известно, хотя астрономические данные говорят, как будто, в пользу возможности таких переходов.

#### 4. Структура нуклонов: «шуба» частиц

Можно ли говорить о том, как устроены внутри элементарные частицы? Это, казалось бы, бессмысленно, потому что, если у них есть внутренняя структура, то их можно будет разбить на более простые части.

Но с другой стороны, представлять их точечными образованиями тоже не удастся. И фактически, первый пример тому дало изучение свойств нейтрона. У нейтрона нет электрического заряда, но есть, однако, магнитный момент, а он, мы знаем, эквивалентен наличию электрического тока. Отсюда следует, что нейтрон должен какое-то время пребывать в виде двух заряженных частиц, вращающихся вокруг общего центра, а потому эквивалентных току. И Э. Ферми вскоре после открытия пионов подсчитал, что нейтрон должен примерно 20 % времени проводить в виде системы «протон + пи-минус-мезон» ( $n \leftrightarrow p^- \pi^+$ ) — возможность возникновения такой системы определяется принципом неопределенности Гейзенберга, по которому, напомним, частица может на какое-то время «одалживать» часть своей энергии (массы) другой, только бы произведение этой энергии на время отдачи не превышало величины постоянной Планка.

Но тогда и протон может часть своего времени проводить как «нейтрон + пи-плюс-мезон» ( $p \leftrightarrow n^+ \pi^-$ , возможны и переходы  $p \leftrightarrow p^0 \pi^+$  — «протон + пи-ноль-мезон»). А дальше естественно заключить, что на какую-то меньшую часть времени и, соответственно, на более близком к центру расстоянии нейтрон может породить не один, а два, три и т. д. пионов, а может, скажем, породить на еще меньшее время пару протон-антипротон и т. д. Все такие «временные» частицы называются *виртуальными* (от латинского «виртуалис» — скрытые, но могущие проявиться) и, как видим на примере магнитных моментов нейтрона, их свойства весьма ясно проявляются и могут быть, в принципе, измерены.

Все эти возникающие и снова исчезающие виртуальные частицы образуют вокруг своего «хозяина» некую виртуальную «шубу». Поэтому основную рассматриваемую частицу никак, с одной стороны, нельзя считать точечной, а с другой стороны, ей нельзя приписывать и строго определенные размеры: ее «шуба» все время дышит, меняется, является динамическим образованием. Приходится для описания свойств этой «шубы», т. е. самой частицы, вводить понятие форм-

фактора, распределения вероятности найти заряды на таком-то расстоянии от ее центра.

Тут естественно было бы задать вопрос: почему мы говорим о виртуальных образованиях вокруг нуклонов, чем электрон хуже? И действительно, вокруг электрона тоже должна образовываться такая шуба, но поскольку его масса мала, то испускать и ловить обратно он скорее всего будет не мезоны, а фотоны, а на меньшие расстояния — и пары электрон-позитрон. О такой шубе электрона мы уже говорили — благодаря ее наличию и возникает черенковское излучение: шуба периодически отрывается от «сверхсветового» в данной среде электрона и превращается в реальный фотон.

Форму форм-факторов нуклонов экспериментально смог определить Роберт Хофштадтер (1915–1990, Нобелевская премия 1961 г.)<sup>17</sup>. Начал он с того, что еще в 1948 г. разработал сцинтилляционный детектор на основе кристалла соли иодида натрия, «легированного» небольшим количеством таллия. При столкновении с таким кристаллом частицы высокой энергии или фотона возникает вспышка света, интенсивность которой пропорциональна энергии частиц или фотона (сцинтилляторами пользовался некогда и Резерфорд, но они были гораздо менее чувствительными). На этой основе Хофштадтер построил сцинтилляционный спектрометр и приспособил его как регистратор углов рассеяния электронов от ускорителя, разгонявшего их до энергии в 500 МэВ, при которой длина волны электрона меньше характерных размеров атомных ядер. Следовательно, ускоритель можно было бы использовать как гигантский электронный микроскоп, позволяющий исследовать структуру ядер: при столкновении с ядром разогнанный электрон в некоторых случаях только отклоняется, как бильярдный шар (случаи, при которых ядро разрушалось, он отбрасывал).

Так Хофштадтеру удалось измерить величину и определить форму многих атомных ядер. Оказалось, что у них примерно одна и та же средняя плотность и объем ядра пропорционален полному числу протонов и нейтронов. Это означает, что в тяжелых ядрах частицы упакованы не более плотно, чем в легких, а почти постоянная плотность ядер оказалась порядка 150 млрд кг на куб. метр (капля воды такой плотности весила бы 2 млн тонн). Но при этом выяснилось, что у всех ядер есть что-то вроде более мягкой «шкурки», именно она и соответствует облаку виртуальных частиц, окружающих ядро.

<sup>17</sup> Его сын, Д. Хофштадтер, автор культовой книги «Гёдель, Эшер, Бах: эта бесконечная гирлянда» (Хофштадтер Д. Гёдель, Эшер, Бах: эта бесконечная гирлянда. Бахрах-М, 2001), пытается синтезировать миропонимание науки и искусства.

Когда ускоритель, на котором он работал, был реконструирован и стал разгонять электроны до энергии в 1 ГэВ, Хофштадтер смог перейти к исследованию уже не только ядер, но и структуры протонов и нейтронов. Эту работу он со своей группой выполнил в 1956—1957 годах: были определены размеры такой «шубы» и распределение зарядов внутри обоих нуклонов.

Нуклоны действительно оказались распределенными динамическими образованиями с шубой из облаков виртуальных частиц.

Ну а что будет видно, если залезть в нуклоны еще глубже, т. е. рассмотреть рассеяние более энергичных частиц? В 1969 г. Р. Фейнман, и почти одновременно Дж. Бьеркен (р. 1934), выдвигают партонную (от латинского «партис» — часть) модель нуклона: при глубоконеупругих, т. е. высокоэнергичных и потому чрезвычайно коротких по времени актах рассеяния, нуклон можно рассматривать как совокупность точек-партонов, т. е. при таких энергиях и, соответственно, столь коротких длительностях взаимодействия уже не играет роли, виртуальные ли это образования или нет. Такие акты рассеяния на отдельных партонах (уже не на нуклонах в целом) порождают целые струи вторичных частиц, по составу которых, в принципе, и можно выявить природу самих этих партонов и их распределение по «объему» нуклона. Имеющиеся результаты как будто показывают, что таким партонами являются в основном кварки (о них немного ниже). За это открытие Джером И. Фридман (р. 1930), Генри У. Кендалл (1926—1999) и Ричард Е. Тэйлор (р. 1929) удостоены в 1990 г. Нобелевской премии.

## 5. Странные частицы

Открытие пионов в 1947 г. произошло таким образом: на экспонированной фотопластинке видно, что некий трек превращается в другой, в известный уже след мюона (тот переходил вследствие распада в видимый след электрона). Таким образом, важно было отметить точку перехода одной частицы в другую: след, во-первых, шел под углом к начальному, а во-вторых, оказывался, если у нее меньше энергии, более толстым. По толщине следа определялась скорость частицы, по длине — время жизни, а если наблюдения шли в магнитном поле, в камере Вильсона, то по радиусу закручения можно было найти отношение скорости и массы.

И вот в 1947 г. К. Ч. Батлер и Дж. Д. Рочестер заметили в камере Вильсона очень странные и слишком длинные следы частиц космических лучей: время жизни нестабильных частиц, согласно принципу неопределенности, должно быть обратно пропорционально энергии,

высвобождающейся при распаде частицы, а тут оно было в сотни миллионов раз больше — это уже очень серьезный вызов всей квантовой теории.

Наблюдаемые частицы оказались двух типов: частицы первого типа распадались на два-три пиона, т. е. они сами были бозонами, а частицы второго типа (найденные позже) превращались после испускания пиона в протон или нейтрон, т. е. они были фермионами. Частицы эти, постепенно открываемые во все большем многообразии, но каждая с определенной массой<sup>18</sup>, были названы, соответственно, К-мезонами и гиперонами (от греческого «гипер» — над, сверху).

При более детальном изучении оказалось, что существуют  $K^+$ - и  $K^-$ -мезоны, а также  $K^0$  и  $\bar{K}^0$  (частица и античастица, хотя они и не подчиняются уравнению Дирака). Эти самые две частицы,  $K^0$  и анти- $K^0$ , могут по пути следования переходить друг в друга, и именно на такой их странной смеси, их интерференции Кронин и Фитч, как мы писали выше, обнаружили несохранение СР- или Т-инвариантности.

Из гиперонов первоначально в 1951 г. был найден нейтральный лямбда-гиперон ( $\Lambda$ ), затем в 1953–1954 гг. — несколько более тяжелое семейство сигма-гиперонов ( $\Sigma$ , плюс, минус и электрически нейтральный), и в 1956 г. — еще более тяжелые кси-минус- и кси-ноль-гипероны ( $\Xi^-$  и  $\Xi^0$ , отметим сразу же, что положительного кси-гиперона не существует, точнее, положительный электрический заряд имеет антикси-минус-частица). Гипероны и нуклоны вместе называются барионами (от греческого «барос» — тяжелый), и у всех них одинаковый барионный заряд.

Первый шаг к теории этих новых частиц сделали в 1951 г. Йосиро Намбу (р. 1921, Нобелевская премия 2008 г.) с соавторами и Абрахам Пайс (р. 1918): они предположили, что странные частицы рождаются обязательно попарно — это фактически означало, что существует какая-то характеристика, положительная у одной частицы пары и отрицательная у другой, которые друг друга уравнивают, но при последующем распаде эти характеристики пропадают, так как у обычных, нестранных частиц их нет. Таким образом, предполагалось, что есть такая странная квантовая характеристика, которая сохраняется в сильных взаимодействиях и не сохраняется в слабых взаимодействиях.

<sup>18</sup> Ажиотаж с поисками и обнаружением таких частиц был очень велик, а аппаратура была еще очень несовершенна, поэтому неизбежными были и промахи. Так, на станции космических лучей близ Еревана, которую возглавляли известные физики братья Абрам Исаакович Алиханов (1904–1970) и Артемий Исаакович Алиханьян (1908–1978), открыли, будто бы, новый тип частиц, варитроны, у которых вообще была переменная масса.

В 1953 г. эту характеристику уточнили независимо М. Гелл-Манн<sup>19</sup> и К. Нишиджима (р. 1926) и назвали ее квантовым числом «странность».

Исходным пунктом для их теорий является понятие зарядовой независимости, впервые введенное Гейзенбергом еще в 1932 г. Суть его состоит в такой группировке частиц, которая подчеркивает их сходство. Например, несмотря на то что протон и нейтрон отличаются электрическим зарядом (протон имеет заряд  $+1$ , нейтрон  $-0$ ), во всех остальных отношениях они тождественны. Следовательно, их можно считать двумя разновидностями одного и того же типа частиц, дублетом нуклонов, имеющих средний заряд, или центр заряда, равный  $1/2$ . Если таких частиц три (например, три пиона), то они образуют триплет со средним зарядом нуль, если одна частица — это синглет, а общее название группы, состоящей из любого числа частиц, — мультиплет.

Однако все попытки так же сгруппировать странные частицы не удавались. Пришлось предположить, что средний электрический заряд мультиплетов их барионов отличается от  $1/2$  (среднего заряда нуклонов), а средний заряд К-мезонов равен, в отличие от среднего заряда пионов, не нулю, а  $-1/2$ , и эти отличия могут быть фундаментальным свойством странных частиц. Странностью как раз и назвали разность между средним зарядом мультиплета и средним зарядом нуклонов  $+1/2$  (чтобы не возиться с дробями эту разность умножают на 2). Было показано, что странность сохраняется во всех реакциях с сильным и с электромагнитным взаимодействиями, поэтому странные частицы рождаются парами — странность одной частицы компенсирует странность другой (если одна частица в паре имеет странность  $+1$ , то странность другой равна  $-1$ ). Таким образом, странные частицы, родившись, выживают вплоть до распада, определяемого слабым взаимодействием, которое не сохраняет странность.



<sup>19</sup> Мюррей Гелл-Манн (р. 1929, Нобелевская премия 1969 г.) — ученик и сотрудник Э. Ферми, один из ведущих теоретиков в этой области и в теории поля. Мы еще будем возвращаться к его достижениям, а сейчас отметим его высказывание, важное для нашей цели: «В генерации новых идей существуют три основных этапа. Первые два — это скрупулезная работа: накопление знаний, опыта и анализ этих данных. Третий этап наступает внезапно. Это озарение. Вот тут-то и рождаются гениальные идеи. Остается только не прогнать эти идеи и задать самому себе вопрос: „А почему бы нет?“».



Ювал Неэман (1926–2006) окончил инженерный факультет, с 15 лет в подпольных вооруженных формированиях, с начала Войны за независимость Израиля в 1948 г. в армии, непосредственно в боевых частях. Несмотря на блестящие перспективы службы (с 1952 г. начальник отдела стратегического планирования Генштаба), переходит на должность военного атташе посольства Израиля в Лондоне, параллельно в 1958 г. поступает на физический факультет Лондонского университета (самый старый студент!) и за три года, с военными перерывами, заканчивает его. Кроме теоретических исследований организовал ядерный центр Израиля, был также министром науки.

В 1961 г. Мюррей Гелл-Манн и Ювал Неэман независимо обнаруживают, что эта система мультиплетов, предложенная для описания странных частиц, может быть включена в гораздо более общую теоретическую схему, позволяющую сгруппировать все сильно взаимодействующие частицы в «семейства». Эту схему Гелл-Манн, поклонник Востока, назвал восьмеричным путем (по аналогии с семьей атрибутами праведного жи-

тия в буддизме), так как некоторые частицы были сгруппированы в семейства из восьми членов (в науке она называется, по правилам алгебры,  $SU(3)$ -симметрией<sup>20</sup>).

Схему Гелл-Манна—Неэмана можно сравнить с Периодической системой Менделеева, поскольку она не только упорядочила известные частицы, но и предсказала свойства неизвестных еще частиц. Теория эта была подтверждена в 1964 г. открытием синглета, предсказанной частицы — омега-минус-гиперона ( $\Omega^-$ ).

Согласно этой модели, у лямбда- и сигма-гиперонов странность  $S = -1$ , поэтому они рождаются в паре с одним К-мезоном (у которых странность  $S = 1$ ). У кси-гиперонов (они образуют дублет) странность  $S = -2$ , и их рождение сопровождается появлением двух К-мезонов, а вот у омега-гиперона (синглет, хоть и заряженный) странность  $S = -3$ , поэтому он рождается только вместе с тремя К-мезонами. Очевидно также, что поскольку при распаде частиц странность должна меняться на единицу, то кси-гипероны распадаются на лямбда-или сигма-частицы и пионы, а затем те уже распадаются дальше. Ну а омега-гиперон должен претерпеть цепочку трех последовательных распадов с изменениями странности в каждом из них на единицу.

## 6. Модель Ферми—Янга

Мы уже не раз говорили о том, что масса связанной системы меньше суммы масс составляющих частиц в свободном состоянии, а возникающий дефект масс соответствует, согласно формуле Эйнштейна,

<sup>20</sup> Математически такие схемы означают, что характеристики частиц и их систем рассматриваются в некотором специфическом «пространстве» дискретных величин, часто называемом изотопическим (к изотопам оно отношения не имеет). В данном случае берется трехмерное пространство, но можно рассматривать и другие варианты.

энергии связи частиц. При образовании химических соединений или планетных систем дефекты масс столь малы, что практически не измеримы. В ядрах атомов энергия связи нуклонов уже составляет до полупроцента их массы, и именно поэтому изменение величины этого дефекта масс является источником получения атомной (точнее, ядерной) энергии.

Но, вообще говоря, нет никаких ограничений на величину дефекта масс — в принципе, он может составлять и большую часть массы. Вот такую идею и ввели в 1949 г. Ферми и Янг для представления пионов как составных систем.

Они предложили рассматривать пи-плюс-мезон как тесно связанную систему из протона и антинейтрона с противоположно направленными спинами:  $\pi^+ = (p + \bar{n})$  и соответственно  $\pi^- = (n + \bar{p})$ , при этом пи-ноль-мезон половину времени проводит как система протон-антипротон, а вторую половину — как нейтрон-антинейтрон. Если такая система нечетная, то она соответствует  $\pi^0$ , а если комбинация четная, то другой частице, также позже обнаруженной. Дефект масс при образовании пионов составляет 13/14 полной массы двух нуклонов, но ничего невозможного такой дефект масс собой не представляет — зато сразу становится на три частицы меньше!

К тому же нуклон-антинуклон могут составлять и другие системы, например, со спинами, направленными в одну сторону, — в этом случае они образуют семейство так называемых ро-мезонов; можно рассматривать системы нуклон-антинуклон с высшими моментами и т. д. Такого рода «частицы» имеют очень короткие времена жизни, и их обычно называют нуклонными или мезонными резонансами или резононами, в принципе, для них можно установить некое подобие системы возбужденных состояний атомов в модели Бора.

Модель Ферми-Янга выглядела очень заманчивой — существенно уменьшался список основных «кирпичиков» мироздания. Поэтому с открытием новых частиц естественным выглядело распространить на них схожие представления.

Первым в этом направлении был Сенти Саката (1911–1970): он показал, что если помимо нуклонов принять за основную частицу лямбда-гиперон, то можно построить все остальные странные частицы (1956). Так  $K^+$ -мезон составляется из протона и анти-лямбда,  $K^-$ -мезон составляется из лямбда-гиперона и антипротона, сигма-гипероны — из лямбда и пионов. Было создано еще несколько подобных моделей, в которых к нуклонам добавлялась та или иная странная частица, и в конце концов стало ясно, что достаточно принять в качестве основной любую из них, — никаких особых преимуществ

ни одна из частных моделей не имела — наступившее положение называли «ядерной демократией» (автор также принимал участие в этих поисках).

## 7. Теория кварков

Казалось, что явление ядерной демократии полностью обесценило возможность выбора тех частиц, которые можно принять за основные. И тут возникла совершенно новая, поистине «сумасшедшая» идея: а почему этот поиск идет только среди уже найденных частиц, может быть, нужно придумать новые частицы, которые единственным, точнее, самым простейшим образом (это основное требование!) позволят построить составные модели всех остальных?

Цвейг назвал эти придуманные частицы тузами, а Гелл-Манн — кварками и этим задал работу интерпретаторам: обычно принимается, что это слово, несколько искаженное, он заимствовал из романа Джеймса Джойса «Поминки по Финнегану», где официант почему-то выкрикивает: «Три кварка, три кварка для сэра Марка!».

Именно по такому пути Джордж Цвейг (родился в 1937 г. в Москве) и Мюррей Гелл-Манн сумели в 1963–1964 гг. оптимизировать составную модель частиц: они нашли, независимо, простейший вариант основных частиц, кварков, из кото-

рых можно составить все остальные. Однако при этом им пришлось предположить совершенно, казалось бы, невероятные, противоречащие всему опыту физики параметры таких частиц: их электрические и барионные заряды должны были бы составлять, соответственно, одну или две трети от заряда электрона и по одной трети барионного заряда протона. (Напомним, что заряд электрона всегда считался наименьшим возможным, равно как и барионный заряд нуклона.)

Попробуем пояснить, как они могли конструировать эту модель. Хотя во многих моделях гипероны составлялись из трех частиц (двух барионов и одного антибариона, общая формула  $\bar{B}B\bar{B}$ ), они приняли, что *каждый* барион (и нуклон, и гиперон) состоит из трех кварков, обозначаемых буквой  $q$ , поэтому барионный заряд каждого кварка равен одной трети обычного, и все барионы составлены по общей формуле  $B = qqq$ , а все антибарионы — из трех антикварков. Все мезоны состоят из кварка и антикварка, поэтому их общая формула имеет вид  $M = \bar{q}q$ . Ясно также, что все кварки должны иметь спин равный  $1/2$ , т. е. быть фермионами.

Теперь нужно посмотреть, сколько, по минимуму, нужно типов кварков для конструирования всех барионов, и каковы необходимые для этого странность и электрические заряды. Поскольку барионный заряд составляет одну треть наблюдаемого, то естественно начать с такого же деления и электрического заряда, тогда элементарный

перебор всех возможностей показывает, что достаточно ввести три кварка: *u*-кварк с зарядом в две трети элементарного заряда ( $\frac{2}{3}e$ ), *d*-кварк с зарядом минус одна треть ( $-\frac{1}{3}e$ ), оба с нулевой странностью, и *s*-кварк с зарядом  $-\frac{1}{3}e$ , но со странностью  $-1$ . (Обозначения соответствуют первым буквам английских слов *up*, *down*, *strange* — верхний, нижний, странный.)

В этой теории известные частицы представимы так: протон  $p = uud$ , нейтрон  $n = udd$ , лямбда-гиперон  $\Lambda = uds$ , пион  $\pi^+ = \bar{d}u$ , каон  $K^+ = \bar{s}u$  и так далее вплоть до  $\Omega^- = sss$ . И естественно, что резонаны могут теперь рассматриваться как возбужденные состояния системы кварков. Именно эти кварки играют роль партонa в составе частиц: они были обнаружены, как упоминалось выше, в экспериментах Дж. И. Фридмана, Г. У. Кендалла и Р. Е. Тэйлора — идейно этот эксперимент напоминает опыт Резерфорда, в котором была определена структура атома, только измерялось рассеяние электронов — их структура известна, и поэтому их можно использовать для выявления структуры других частиц.

Казалось бы, все хорошо, но, помимо проблем наблюдения, сразу же возникает противоречие: согласно принципу запрета Паули, никакие два фермиона не могут, имея одинаковыми все квантовые числа, находиться точно в одинаковом положении, а в этих моделях одинаковые кварки занимают одно и то же положение (в резонане  $\Delta^{++}$ , который был открыт еще Ферми в рассеянии  $\pi^+$ -мезона на протоне и имеет двойной заряд и спин  $\frac{3}{2}$ , оказалось три *u*-кварка в одинаковом состоянии!). Эту проблему пришлось разрешать привычным образом — вводить новое квантовое число: поскольку в частице не более трех кварков, то это число может принимать три значения, и его называли «цвет» — Н. Н. Боголюбов, А. Н. Тавхелидзе и др. (по аналогии с синтезом любого видимого цвета из трех составляющих: красного, зеленого, синего). Таким образом, например, омега-минус-гиперон нужно писать как  $\Omega^- = s_K s_3 s_C$  — все кварки различны и поэтому могут иметь остальные квантовые числа одинаковыми. Наблюдаемые частицы должны быть бесцветными, т. е. барионы должны содержать кварки всех трех цветов, а мезоны — по кварку и антикварку одинакового цвета. После этого законы взаимодействия между «цветными» кварками были, естественно, названы квантовой хромодинамикой (о ней — в следующем разделе).

Но довольно скоро выяснилось, что тремя кварками ограничиться нельзя.

В ноябре 1974 г. двумя группами экспериментаторов под руководством Бартона Рихтера (р. 1931) и Сэмуэля С. С. Тинга (р. 1936) при

исследовании аннигиляции позитронов и электронов из встречных пучков коллайдера были обнаружены очень узкие и поэтому необычно долго живущие резонансы. Эти группы обнаружили их одновременно и дали им разные названия, они так и обозначаются двумя значками как  $J/\psi$  или  $J/\psi$ , а само открытие долго называли «Ноябрьской революцией» — оно отмечено Нобелевской премией 1976 г.

Открытие вызвало поток гипотез и множество теорий. Для объяснения причин, которые мешают им распадаться с нормальной для частиц такой массы скоростью, пришлось ввести еще одно квантовое число, помимо странности, и соответствующий кварк, названный очарованным (обозначается как  $c$  — от английского *charm*, в русском языке превалирует французское произношение: шарм). Этот кварк имеет электрический заряд в  $2/3 e$ , как у  $u$ -кварка, но у него добавочно есть квантовое число  $s = +1$ . Частица  $J/\psi$  является связанным состоянием  $c$ -кварка и его антикварка со спином 1. Такое состояние может распасться только на три глюона, причем с большими энергиями — поэтому-то этот распад происходит медленно, а эти глюоны уже с обычной скоростью превращаются в кварк-антикварковые пары и т. д. Потом были обнаружены и барионы, в состав которых входит и очарованный (шармированный) кварк.

Ну а позже пришлось ввести еще два кварка:  $b$ -кварк (красивый, от английского *beauty*) в 1977 г. и  $t$ -кварк (верхний или истинный от *top* или *truth*) в 1994 г. — каждому из них соответствуют свои квантовые числа. Все эти новые квантовые числа уже как-то неудобно называть «зарядами», и поэтому для них ввели новый термин: «ароматы» ( $u$ — $d$  или обычный,  $s$ ,  $c$ ,  $b$ ,  $t$ ).

Для исследований свойств кварков очень важны структуры кварк-антикварк, их называют кваркониями: можно рассматривать разные уровни энергии в этих образованиях в зависимости от их полного момента — это ведь некоторый аналог системы уровней Бора в атомах. А время их жизни и продукты аннигиляции кварка и антикварка — важнейший источник сведений о них.

Мы не выписывали величины масс кварков, они оцениваются пока что с очень большой неопределенностью: масса  $u$ -кварка в 2—10 раз больше массы электрона,  $d$ -кварк вдвое тяжелее, масса  $s$ -кварка в интервале 8—16 % массы протона,  $c$ -кварк несколько тяжелее протона,  $b$ -кварк в 4 раза тяжелее, а вот  $t$ -кварк может иметь колоссальную массу, чуть ли не порядка массы атома урана!

Измерения этих масс весьма приблизительны из-за того, что никто не видел и, возможно, никогда не увидит кварков в свободном состоянии: если в привычных нам ядерном, гравитационном или

электромагнитном взаимодействии их сила падает с расстоянием, то с кварками положение, видимо, иное — сила притяжения между ними растет с расстоянием (можно провести аналогию с нарастанием силы при растяжении пружины). Поэтому и возникает проблема невылета или удержания кварков — ее называют обычно «проблемой конфайнмента», без перевода с английского на русский.

Итак, сейчас экспериментально зафиксировано шесть кварков, каждый из которых может быть трех цветов, и шесть лептонов (мы пока не рассматривали кванты полей, переносящих взаимодействие между ними). Существующие теории не требуют наличия еще каких-либо кварков или лептонов, но ручаться головой, что их больше нет и что именно они представляют собой последние кирпичики мироздания, вряд ли стоит.

# Изобретать, чтобы наблюдать: микроскопы, лазеры, коллайдеры

## Глава 1

### Эволюция микроскопа

Первыми специализированными научными приборами были микроскопы и телескопы. На примере их развития хорошо прослеживается ход научного и технического прогресса. Поэтому интересно рассмотреть, как эволюционировали эти приборы (мы остановимся только на истории микроскопов) и как менялось отношение к ним.

#### 1. Оптический микроскоп



Микроскоп (от греческих «микрос» и «скопео» — малый и смотрю) — это, в принципе, любой прибор для создания увеличенных изображений малых объектов: наш глаз различает размеры только до 0,1 мм. Самым простым микроскопом является лупа — одиночная линза с сильным увеличением, которая использовалась уже в середине XV в. К 1673 г. голландский натуралист-любитель Антони ван Левенгук (1632–1723) научился создавать линзы почти с 300-кратным увеличением, что дало ему возможность наблюдать бактерии размером в 2–3 микрометра, открыть

существование сперматозоидов и т. д. Микроскоп Левенгука — это просто круглый стеклянный шарик, через который надо было смотреть держа его вблизи глаза и располагая объект на миллиметровых расстояниях от линзы. Левенгук производил эти «микроскопы» десятками и с каждым скреплял какой-нибудь объект, но в своих наивных письмах Лондонскому королевскому обществу, переполненных

рассуждениями о погоде, о своем здоровье и т. п., он описывает множество сделанных им открытий.

Еще в XVI в. конструируется составной микроскоп с дополнительной линзой: увеличенное изображение, даваемое объективом, рассматривается, для добавочного увеличения, через окуляр. Такой микроскоп собирал и Галилей, еще более совершенный микроскоп с микрометрическим винтом построил Р. Гук (он написал книгу «Микрография», где описал свои многочисленные, хотя и не систематизированные наблюдения). Однако только в 1830 г. английский микроскопист Дж. Дж. Листер (1786—1869) установил теоретические принципы комбинации линз, после чего оказалось возможным создавать сложные составные линзы, не привносящие геометрические и цветовые искажения в изображения.

Дальнейшие успехи оптической микроскопии связаны, в основном, с работами Эрнста Карла Аббе (1840—1905) на предприятиях Карла Цейсса. Аббе сочетал в себе способности теоретика, инженера-конструктора и технолога. Его уникальная всесторонность и увлеченность работой позволили достичь того, что конструкции оптических приборов Цейсса стали не только лучшими в мире, но и почти не менялись в течение долгих десятилетий<sup>1</sup>.

Аббе разработал теорию построения изображений в микроскопе (1872), перестроил технологию получения оптических стекол и сконструировал первый современный микроскоп (1878), который продолжал все время улучшать — можно сказать, что все дальнейшие микроскопы ничем, кроме деталей дизайна, от него не отличаются (Аббе изобрел и построил еще целый ряд оптических приборов).

Помимо того, Аббе определил пределы разрешимости оптического микроскопа — они оказываются порядка 1500 крат и определяются длиной волны света — не менее 0,35 мкм для фиолетового конца спектра ( $0,35 \cdot 1500 = 525 \text{ мкм} \sim 0,5 \text{ мм}$ ). Дело в том, что для наблюдения предмета необходимо, чтобы он искажал волновое поле, а предмет, размеры которого меньше длины волны, колеблется вместе с волною и на ее форму не влияет.

Оптические микроскопы имеют, помимо невозможности увеличить разрешение, и другие недостатки: прозрачные объекты нужно окрашивать, невозможно заглянуть внутрь непрозрачных объектов. В направлении преодоления этих ограничений и стали думать физики.

<sup>1</sup> Необходимо отметить и взгляды обоих создателей этих приборов, Карла Цейсса и Эрнста Аббе: Цейсс завещал все предприятия Аббе, а он, в свою очередь, оставил их своим сотрудникам и рабочим. Таким образом, фирма «Карл Цейсс» стала первым в мире и единственным по-настоящему социалистическим предприятием, управляемым советом владельцев, служащих на нем.



Но сперва расскажем о замечательном открытии, связанном как раз с одним из этих недостатков.

Пауль Эрлих (1854–1915, Нобелевская премия по физиологии 1908), врач, долго колебался между медициной и живописью. Точнее, его очаровывали картины, видимые под микроскопом при различном окрашивании препаратов: в бесцветных или прозрачных препаратах разные органы и микроорганизмы по-разному воспринимали вводимые краски и становились легче различимыми. И тут ему как-то сразу, в готовом виде, пришла в голову идея: а что если придумать такие краски, которые будут окрашивать только и только определенные органеллы или определенные микроорганизмы, а к ним присоединить ядовитые соединения, т. е. придумать такие «магические пули», которые избирательно, селективно будут убивать то, что надо, и поэтому лечить?

Так возникло новое направление в медицине — химиотерапия. И первым делом Эрлих решил испытать этот метод на самой сложной и неподдающейся тогда радикальному лечению болезни, на сифилисе. Было известно, что бледная спирохета, возбудитель сифилиса, погибает под действием ртутных препаратов, но они губят заодно и другие органы. Так что следовало изобрести такую краску, которая окрашивала бы только и только спирохеты, и прицепить к ней атомы ртути. Эрлиху удалось этого добиться на 606-м — по счету в лабораторном журнале — из исследованных красок-препаратов!

## 2. Фазово-контрастный микроскоп

Этот совершенно новый тип микроскопа придумал и создал, используя волновые особенности света, Фриц Цернике (1888–1966, Нобелевская премия 1953 г.).

Цернике занимался усовершенствованием дифракционных решеток для астрономических приборов. Дифракционная решетка — это прозрачное стекло или зеркало с нанесенным на поверхность множеством тонких параллельных и равноотстоящих бороздок (щелей). Каждая бороздка является как бы независимым источником света, и все излучаемые ими потоки света соединяются на экране, но складываются или вычитаются в зависимости от того, прибывают они в данную точку в одинаковых или противоположных фазах. (Фазой называется определенное положение в процессе колебания: когда луч света проходит расстояние, равное длине волны, то за это время колебание совершает полный цикл, возвращается к исходной фазе.) Поскольку лучи от разных щелей проходят различные расстояния до заданной точки на экране, они приходят туда в разных

фазах. Если свет монохроматичен (имеется только одна длина волны), то в результате такого сложения возникает интерференционная картина, состоящая из узких полос или линий, попеременно светлых (когда лучи приходят в одинаковых фазах) и темных (когда лучи приходят в противофазе). Если свет представляет собой смесь разных длин волн (цветов для видимого света), каждая длина волны дает свою дифракционную картину, отличную от остальных, и в результате получается непрерывный спектр отдельных цветов, подобный разложению в призме.

Цернике учел, что свет, проходящий через прозрачные объекты, должен отличаться от света, прошедшего такой же путь мимо них, своей фазой (скорость света в этих объектах обычно ниже). Теперь нужно было как-то превратить эту разницу фаз в разницу амплитуд, т. е. в различие яркости. Принцип, предложенный им, состоял в том, чтобы наложить свет, проходящий сквозь прозрачный объект, на однородное фоновое освещение светом, прошедшим мимо объекта, но у которого изменили фазу на четверть длины волны (в этот поток вставляется специальная пластинка). В результате сложения потоков света, проходящего сквозь прозрачный объект с запаздыванием по фазе относительно прямого света, и фонового освещения, которое как бы опережает его по фазе, образуется деструктивная интерференция, т. е. понижение яркости. Для глаза наблюдателя картина выглядит так, как если бы объект поглощал свет.

Фазово-контрастный микроскоп Цернике (1938) позволил наблюдать бесцветные организмы, клетки или бактерии без красителей, которые зачастую убивали образцы или меняли их свойства. (Наследники Аббе не обладали его интуицией: когда Цернике предложил им разработку этой идеи, они отказались. Как вспоминал Цернике: «Они сказали, что если бы это имело практическое значение, они бы уже изобрели это сами».)

### 3. Ультразвуковой микроскоп

Область применения оптического микроскопа ограничена, но сам его принцип — расширение волнового поля, прошедшего или отраженного, применим, в принципе, и к волнам других типов. Отсюда следовала возможность использования звуковых волн вместо световых: такие идеи появились уже в 1940-х гг., но работающие устройства (звуковизоры) были построены только в 1970-х.

В 1953 г. Цернике был награжден Нобелевской премией по физике «за обоснование фазово-контрастного метода, особенно за изобретение фазово-контрастного микроскопа». «Когда Нобелевская премия присуждается за вклад в классическую физику, — сказал Эрик Хюльтен, член Шведской королевской академии наук, представляла лауреата, — то сам этот факт столь уникален, что в поисках аналогов нам придется вернуться к самым первым Нобелевским премиям», поскольку, за малым исключением, все последующие премии были присуждены «за открытия в области атомной и ядерной физики».

Первый такой микроскоп спроектировал в начале 1940-х гг. инженер С. Я. Соколов в Ленинграде: он рассчитал, что микроскоп, использующий звуковые волны с частотой 3 000 мегагерц ( $3 \cdot 10^9$  Гц), будет иметь такую же разрешающую силу, как оптический микроскоп. В этих расчетах он исходил из того, что ультразвук этой частоты обладает той же длиной волны, что и видимый свет, но, повышая частоту ультразвука, можно добиться и более высокого разрешения. (Длины волн звука и света отличаются при равной частоте примерно в 100 тыс. раз, в отношении скоростей света и звука.)

Основное затруднение заключалось в отсутствии источников высокочастотных ультразвуковых колебаний. Но когда в результате развития радиолокационной техники, а затем и микроэлектроники такие генераторы были созданы, акустические микроскопы были построены и с тех пор активно используются для просмотра непрозрачных объектов и т. д. в промышленности, в контрольных устройствах.

Интересно и другое применение идейно сходной техники: никто не станет рассматривать в микроскоп большие объекты, а ведь их тоже нужно бывает увидеть — в уменьшенном виде. Сюда, например, относятся детали строения отдельных участков

Земли: их можно «просветить» акустическими волнами, только, конечно, большой длины волны, часто инфразвуком, а потом, уменьшив, рассматривать. (Такие методы называются визуализацией акустических полей.)

## 4. Электронный микроскоп

Гипотеза де Бройля и ее подтверждение показали, что всем частицам можно приписать волновые свойства, а это означало, что их можно использовать и в микроскопии. Фактическую базу для таких построений можно было найти в теории У. Гамильтона, который еще в середине XIX в. установил оптико-механическую аналогию, т. е. аналогию между распространением света и движением частиц — мы говорили, что ее использовал в своей работе Э. Шредингер.

В 1926 г. Х. Буш рассчитал фокусирующие действия магнитных полей и предложил строить на этой основе магнитные линзы для потоков электронов. Осуществив такие линзы, Эрнст Руска (1906—1988, Нобелевская премия 1986 г.) смог построить электронный микроскоп: поскольку легко получить электронный пучок с длиной волны в 100 тыс. раз короче световой, то и разрешающая сила (увеличение) такого микроскопа должна быть в сто тысяч раз больше!

В 1931 г. он сконструировал подходящую электронную линзу, электромагнит, который мог бы сосредоточить поток электронов точно так, как обычная линза сосредотачивает лучи света. А затем, используя комбинации нескольких таких линз, он завершил изобретение

первого электронного микроскопа (1933). В этом приборе поток электронов проходил через тонкую пластину объекта, равномерно расширялся в полях линз и попадал на фотопленку или на флюоресцентный экран, а изображение на них затем можно было добавочно увеличить. Первый коммерческий электронный микроскоп был выпущен фирмой Сименс в 1939 г.

Разрешающая сила современных электронных микроскопов достигает 250 000, разработано и выпускается множество их модификаций: наряду с электронно-лучевой трубкой они являются важнейшим достижением целой дисциплины — электронной оптики (существуют электронные аналоги практически всех оптических устройств). Точнее, нужно отметить, что наряду с электронами можно использовать и ионы, поэтому можно говорить об электронной и ионной оптике.

Однако электронные микроскопы отнюдь не лишены серьезных недостатков: во-первых, интенсивный поток электронов может разрушить исследуемые образцы, во-вторых, поверхность образцов должна сильно рассеивать налетающие электроны, а поэтому ее часто приходится декорировать — напылять на образцы тяжелые металлы, например платину, или же снимать с образцов реплики из металла и уже их, а не образец, снимать под увеличением.

Микроскоп этого типа называется просвечивающим, позже был изобретен ряд электронных микроскопов других типов. Наиболее оригинальный из них — сканирующий электронный микроскоп: в нем на образец направляется остро сфокусированный пучок электронов и наблюдаются рассеянные на нем электроны. Магнитные катушки перемещают электронный луч по поверхности образца так же, как конденсаторы передвигают электронный луч по экрану телевизора, наблюдатель фиксирует изменения распределения рассеянных электронов и получает объемное изображение поверхности. (Разрешение на сканирующем электронном микроскопе ниже, чем разрешение у просвечивающего микроскопа, так что они дополняют друг друга.)

## 5. Электронный и ионный проекторы

Еще большее увеличение дает безлинзовый автоэлектронный микроскоп, придуманный еще в 1936 г. Э. В. Мюллером (1911–1977). Он задумался над очень простым вопросом: для чего нужно облучать объект электронным пучком — ведь электроны имеются и в самом объекте, т. е. он решил объединить объект и излучатель.

Работа оказалась сложной и заняла много лет, хотя к концу работы идея стала очень простой, как во всех по-настоящему оригинальных изобретениях. Итак, в одном из вариантов, берется металлическая полусфера, к центру которой подведено металлическое острие, если теперь подать на эту систему высокое напряжение так, чтобы острие заряжалось отрицательно, то с острия начнут срывать электроны и устремляться к полусфере. Если эта полусфера идеальна, то выле-

тающие электроны имеют равную вероятность попасть в любую ее точку, но если на острие имеется, скажем, какая-нибудь молекула, то на экране появится ее тень — увеличение будет определяться отношением радиуса полусферы к радиусу кончика иглы. В таких устройствах Мюллер достиг увеличения в миллионы раз (после каждого снимка приходилось обрабатывать или даже менять полусферы, искаженные потоком электронов).

В 1951 г. Мюллер сконструировал на схожих принципах ионный проектор и смог, впервые, получить снимки биологических молекул, доменов ферромагнетиков, дефектов кристаллической структуры и т. д.

## 6. Использование туннельного эффекта

Нобелевскую премию 1986 г. с Эрнстом Руской разделили Герд Бинниг (р. 1947) и Гейнрих Рорер (р. 1933) за создание сканирующего туннельного (или туннелирующего) микроскопа.

Если со времен создания рентгеноструктурного анализа можно было с достоверностью установить положение атомов внутри кристаллической решетки, а более или менее точно и внутри некристаллических тел, то определить расположение частиц на поверхности во много раз сложнее. Исследования в этой области столь сложны, что Вольфганг Паули однажды воскликнул: «Поверхность, несомненно, была изобретением дьявола!»

В 1978 г. Рорер и Бинниг предложили исследовать поверхности с помощью квантово-механического эффекта туннелирования. Это явление, о котором мы говорили в главе о квантовой механике, является одним из проявлений принципа неопределенностей Гейзенберга и состоит в том, что частицы могут «туннелировать», проникать в такие узкие области, проход через которые запрещен классическими законами, в частности тогда, когда им для этого не хватает энергии, как, например, в явлении альфа-распада. Отметим, что этот эффект использовался и для получения множества данных о границах, разделяющих отдельные слои в «сэндвичах» из разных материалов.

Рорер и Бинниг избрали иной путь: они заставляли электроны туннелировать через вакуум. Основная идея их изобретения очень проста и состоит в том, чтобы сканировать поверхность твердого тела в вакууме с помощью кончика острой иглы: если между образцом и кончиком иглы приложено напряжение и расстояние между ними достаточно мало, то электроны туннелируют с острия иглы на образец. Сила туннельного тока зависит от расстояния между образцом и острием иглы и выражается вполне определенной формулой, зависящей от этого расстояния. Поэтому исследователи надеялись,водя

иглой вдоль поверхности образца и измеряя ток, получить возможность «нанести на карту» расположение микроскопических (атомных размеров) холмов и долин на поверхности образца.

Как сказал позже Рорер: «Мы были совершенно уверены в успехе. С самого начала мы знали, что это будет важным продвижением вперед. Удивительно лишь то, что нам удалось так быстро достичь желаемого». Первое успешное испытание сканирующего микроскопа они провели уже весной 1981 г.: им удалось достичь разрешения «шероховатостей» на поверхности кристалла высотой всего лишь в один атом. (Понять важность и новизну чужого открытия, да еще принадлежащего незнакомым авторам, не всегда легко: рецензент журнала, куда Рорер и Бинниг послали первую статью, отверг ее как «недостаточно интересную».)

Самой большой трудностью в их работе была необходимость исключения всех источников колебаний и шумов: расстояние между острием и предметом должно контролироваться с точностью до доли диаметра атома. Поэтому даже шаги прохожих могут нарушить работу сканирующего микроскопа: его пришлось помещать на тяжелом каменном постаменте,

Сканирующие микроскопы были затем усовершенствованы и миниатюризированы, сейчас это стандартный лабораторный прибор небольшого размера (десятки сантиметров). Он позволяет разрешать по вертикали детали размером в 0,1 ангстрема (1 ангстрем равен  $10^{-10}$  м), т. е. в одну десятую диаметра атома водорода. Разрешающая способность сканирующего острия шириной всего в несколько атомов позволяет разрешать детали в горизонтальной плоскости размером не более 2 ангстремов, а в настоящее время удается изготовлять острия шириной всего лишь в 1 атом.

изолированном от внешних шумов амортизаторами из сплюснутых шин и т. п. Острие при этом перемещается пьезоэлектрическими устройствами, которые чутко реагируют на изменения управляющего напряжения.

Отметим, что сканирующий туннельный микроскоп, помимо вакуума, работает и в других средах, в том числе в воздухе, воде и криогенных жидкостях. Он применяется для исследования не только неорганических, но и органических веществ, в том числе вирусов и дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК).

## 7. Микроскопия ближнего поля

Критерий Аббе, о котором мы говорили выше, или соответствующие ему критерий Рэлея и принцип неопределенностей Гейзенберга — все они утверждают, что невозможно рассмотреть объект, размеры которого меньше длины волны.

Но вот в 1928 г. в старейшем английском физическом журнале *Philosophical Magazine* появляется статья некоего Синга, в которой приводятся его снимки — не очень высокого, правда, качества — деталей предметов с размерами, в 3–5 раз меньшими длины волны!

Нонсенс? — Но статью рекомендует к печати А. Эйнштейн!

Следующую статью с чуть лучшими снимками Синг помещает в том же журнале в 1932 г., но затем замолкает. И молчание по поводу возможности или невозможности такого разрешения продолжается примерно 65 лет — точнее, все эти годы никто не подвергает сомнению критерий Аббе и ему соответствующие.

И вдруг прорыв: в ряде журналов почти одновременно начинают появляться снимки, нарушающие, казалось бы, самые святы положения теории, проводятся конференции, даже издаются учебники и начинается промышленный выпуск *оптических* микроскопов, в которых можно фотографировать большие молекулы. Сейчас можно увидеть снимки деталей, в 300 раз меньших длины волны света...

Что же происходит, нарушаются ли этим законы физики?

Оказывается, в течение многих десятилетий ученые обращали очень мало внимания на факт, давно известный в радиотехнике: поле излучения антенны можно, весьма условно, подразделить на две части: дальнее поле и ближнее поле. Уравнения Максвелла описывают, в принципе, дальнее поле: на расстоянии одной или даже нескольких длин волн от источника — именно в этой области электрическое и магнитное поля взаимно перпендикулярны, именно оно убывает обратно пропорционально расстоянию от источника и т. д. Ближнее поле быстро затухает в отдалении от источника, оно, в принципе, аналогично, а быть может, и просто соответствует той «шубе» частиц (и антенн?), которые мы рассматриваем в главах о частицах и полях.

Поэтому можно думать, что если дальнее поле волны проквантовано, т. е. представлено в виде совокупности квантов с определенными свойствами, то ближнее поле не является квантовым, или же в нем нельзя выделить определенные наборы квантов, т. е. в нем присутствуют при данной частоте все длины волн — эта проблема еще не решена. Но если есть все длины волн, то они могут отражать свойства малых деталей предметов.

Снимки в ближнем поле производятся, например, так: световод с заостренным кончиком подводится к снимаемому объекту на расстояние меньшее длины волны, т. е. на такое, в котором выходящее из него поле не разделилось на ближнее и дальнее. Рассматривается интерференционная картина между потоками света, выходящими из световода и отраженными от поверхности, эта картина фотографируется и добавочно увеличивается. (Исследуются и другие схемы.)

Сейчас можно только сказать, что область ближнего поля и ее возможности в микроскопии пока еще недостаточно изучены. Подождем новых исследований и изобретений...

# Изобретение транзистора

Зарождение радиотехники потребовало создания детектора, т. е. устройства, пропускающего электрический ток только в одном направлении. Дело в том, что обычная радиопередача идет на волнах высокой (несущей) частоты, амплитуда или фаза которых меняются (модулируются) гораздо более низкой звуковой частотой. Поэтому ток, генерируемый на антенне приемника, является высокочастотным, и нужно сперва выделить из него колебания одного направления, а затем уже можно будет по одной линии пустить колебания высокой частоты (несущей), а по другой — полезный сигнал.

В первых радиоприемниках, их называли детекторными, такое выделение осуществлял обычно кристалл галенита (свинцового блеска) — его припаивали к одному концу цепи, а ко второму присоединяли иголку («кошачий ус») и, двигая ею по кристаллу, искали «точку», то есть место, в котором электроны могли проходить только в одну сторону, и тогда в наушниках возникал долгожданный шум, а иногда даже речь и музыка<sup>2</sup>.

Однако ламповые диоды, основанные на эффекте Эдисона, о которых мы говорили в главе «Электротехника и радиотехника», были надежнее, а звуковые колебания могли в таких приемниках усиливаться триодами. Казалось, что ламповая электроника одержала бесспорную и окончательную победу.

Но со временем стали ясны и ее недостатки: лампы были громоздкими, срок их службы — сравнительно коротким, а для подогрева катодов требовался дополнительный расход энергии, кроме того, стеклянные баллоны были хрупкими.

По-видимому, первыми взялись за создание нового типа электроники Уильям Шокли (1910–1989), Уолтер Браттейн (1902–1987) и Джон Бардин (1908–1991). Они и разделили Нобелевскую премию 1956 г.

---

<sup>2</sup> В начале Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. у населения были конфискованы все радиоприемники. Тогда и сразу после нее мальчишки (в том числе и автор) начали соорудить такие приемники заново.





(Вторую Нобелевскую премию по физике Бардин получил в 1972 г. за теорию сверхпроводимости.)

Успех этой группы был обусловлен тем, что все трое начинали свою научную работу под руководством выдающихся ученых, т. е. прошли хорошую школу, и смотрели на исследуемые явления с разных, но, как оказалось, дополняющих друг друга точек зрения.

Шокли учился в знаменитом Массачусетском технологическом институте (МТИ) и начинал с расчетов поведения электронов в кристаллах, а затем стал работать в лаборатории телефонной компании «Белл» под руководством К. Дж. Дэвиссона, нобелевского лауреата, открывшего волновые свойства электронов. Первым заданием Шокли было проектирование электронного умножителя — особого рода электронной лампы, действующей как усилитель. Затем он возвращается к физике твердого тела и уже в 1939 г. выдвигает план разработки твердотельных усилителей, прообразов будущих транзисторов, для замены электронных ламп. Этот проект, правда, оказался в то время неосуществимым, но цель работы была ясна.

Бардин учился в Принстонском университете под руководством Ю. Вигнера, а диссертацию написал по силам притяжения, удерживающим электроны внутри металла. Затем в Гарварде он работал с Дж. Г. Ван Флеком и П. У. Бриджменом над проблемами атомной связи и электрической проводимости в металлах — его учителями были три будущих нобелевских лауреата.

В те же годы Браттейн изучает такие явления, как влияние адсорбционных пленок на эмиссию электронов горячими поверхностями, электронные столкновения в парах ртути, занимается магнитометрами, инфракрасными явлениями и эталонами частоты.

Любопытно отметить, что если Шокли и Бардин были потомственными горожанами, то Браттейн был из села, и, хотя жизнь на ранчо на лоне природы ему нравилась, фермерский труд он ненавидел. «Хожdenие в пыли за тремя лошадьми и бороной — вот что сделало из меня физика», — скажет он впоследствии.

В годы войны все трое работали над проблемами радиолокации и радиосвязи, что также добавило им опыта в области, где они потом прославились. В 1945 г. они возвращаются в «Лаборатории Белл» на работу в программе научных исследований по физике твердого тела и возобновляют начатые перед войной исследования полупроводников. В этом содружестве Шокли

следований по физике твердого тела и возобновляют начатые перед войной исследования полупроводников. В этом содружестве Шокли

определил первоначальное направление работ, Бардин разрабатывал теорию явлений, Браттейн экспериментально определял свойства и поведение исследуемых материалов и приборов.

Для всего дальнейшего нам нужно коротко рассказать о свойствах полупроводников. Их электропроводность является промежуточной между электропроводностью хороших проводников (к числу которых относится большинство металлов) и изоляторов и сильно изменяется в зависимости от характера и концентрации примесей в материале, а также от температуры. К этому времени уже появились квантовые расчеты полупроводников, но эти теории еще не были адекватно проверены экспериментами.

В совершенном кристалле, как принято говорить, связи между атомами «насыщены» или «заполнены». Электроны трудно оторвать, они с трудом перемещаются, что приводит к очень высокому электрическому сопротивлению — это изолятор. Однако вкрапления чужеродных атомов, которые не вполне подходят к данной структуре, приводят либо к появлению избыточных электронов, способных участвовать в электрическом токе, либо к дефициту электронов, известному как «дырки», — электропроводность возрастает.

Причина роста электропроводности заключается в следующем. Если в чистый кристалл ввести примеси в виде атомов, нарушающих регулярную кристаллическую структуру и могущих отдать на один электрон больше, то будет создан кристалл *n*-типа (от *negative* — отрицательный) с избытком электронов. Если же вводить атомы, отдающие связям на один электрон меньше, чем атомы решетки, создается кристалл *p*-типа (от *positive* — положительный). Так как электрон несет отрицательный заряд, то незаполненное электронное состояние ведет себя как положительный заряд такой же величины и при этом может двигаться: когда соседний электрон перемещается «вперед», чтобы заполнить дырку, он оставляет позади себя новую дырку, поэтому создается впечатление, будто дырка движется назад, хотя, в среднем, и не с такой скоростью, как электроны, и в противоположном направлении (до работ этой группы вклад дырочного тока в полный ток недооценивался).

Вначале Шокли намеревался моделировать основной принцип устройства электронной лампы: приложить электрическое поле поперек полупроводника и с его помощью управлять прохождением электрического тока вдоль образца. Но хотя расчеты показывали, что такое поле должно приводить к усилению тока, получить практические результаты не удавалось. (Заметим, что такое устройство удалось осуществить, пока в лабораторной модели, только в 2010 г. с развитием нанотехнологии.)

Тогда Бардин предположил, что электроны оказываются запертыми в поверхностном слое, и этот слой не пропускает поле внутрь полупроводника, экранирует его. Пришлось взяться за исследование поверхностных эффектов — это и помогло понять сложное поведение полупроводниковых устройств.

В 1947 г. Бардин и Браттейн достигли первого успеха, построив полупроводниковый усилитель, или транзистор (от английских слов *transfer* — перенос, плюс *resistor*, от лат. *resisto* — сопротивляюсь). Это был блок германия (полупроводника *n*-типа) с электродом на широкой грани (база), а на противоположной грани были два близко расположенных золотых точечных контакта («кошачьи усы»). К одному контакту (эмиттеру) прикладывалось небольшое положительное напряжение относительно базы и большое отрицательное напряжение относительно второго контакта (коллектора). Сигнал, подаваемый на эмиттер вместе с постоянным смещением, передавался со значительным усилением в цепь коллектора. В основе действия транзистора лежит внедрение дырок в германий через контакт-эмиттер и их движения к контакт-коллектору, где дырки сливаются коллекторный ток.

Ныне этот тип транзисторов, которые легко сделать миниатюрными, наиболее широко используется в электронных устройствах. Оказалось, что их не нужно изготавливать и выпускать по-отдельности — можно производить непосредственно на кристаллах вместе с остальными деталями электронных схем, это и есть современные чипы.

Шотки предложил заменить неустойчивые точечные контакты на выпрямляющие переходы между областями *p*- и *n*-типа в том же кристалле (1950). Такой плоскостный транзистор состоял из тонкой *p*-области, заклю-

ченной между двумя *n*-областями (все они с независимыми внешними контактами), работал он надежнее предшествующей модели и был проще в изготовлении. А дальнейшее усовершенствование методов выращивания, очистки и обработки кристаллов кремния позволило осуществить давнюю идею Шокли о создании транзистора на основе полевых эффектов.

Отметим, что Шокли проявил большую активность и после своих эпохальных успехов: ему принадлежат более 90 патентов в различных областях электроники (в том числе, в создании элементов магнитной памяти). Браттейн продолжал исследовать и улучшать параметры полевых транзисторов, которые очень чувствительны к поверхностным дефектам, и разрабатывать солнечные батареи. О работах Бардина по сверхпроводимости, принесших ему вторую нобелевскую премию, нужно рассказывать отдельно.

Заметим, что если переход от германия к кремнию позволил резко улучшить качество полупроводниковых приборов, то новый скачок

может быть достигнут с переходом от кремния к углероду (взгляните на таблицу Менделеева — они в одном столбце!), но для этого нужно научиться получать дешевые промышленные алмазы, точнее — алмазные (не ювелирные!) пленки. Можно также усложнять вид полупроводниковых устройств — переходить к гетероструктурам, микроминиатюризовать их. Так что вся эта область остается предметом активных разработок.

## Мазеры и лазеры

### 1. Изобретение мазера

Первые квантовые генераторы построили, одновременно и независимо, как мы уже говорили, Чарлз Х. Таунс (р. 1915) в США и Александр Михайлович Прохоров (1916–2002) и Николай Геннадиевич Басов (1922–2000) в СССР. По-видимому, Прохоров и Басов сделали такое устройство чуть раньше, но из-за проволочек в редакции журнала их статья вышла несколько позже статьи Таунса (между собой они вопросы приоритета никогда не дискутировали). Поэтому мы постараемся параллельно рассмотреть пути, которые привели их к открытию.

Любопытно отметить, что Н. Г. Басов — по первому образованию ветеринар, так и прошел фронт в этой специальности, но после известий о ядерных взрывах решил стать физиком.

Таунс в 1939–1947 гг. проводил исследования в знаменитых Лабораториях телефонной компании «Белл», где разрабатывал, главным образом, авиационный

радар (радиолокатор) для прицельного бомбометания. Таким образом, он шел в физику от радиофизики, точнее, от радиотехники микроволн — электромагнитных волн сантиметрового и миллиметрового диапазонов<sup>3</sup>.

В то время в радиолокационных установках излучение генерировалось электронами, которые осциллировали (колебались) внутри металлических резонаторов и создавали стоячие волны между параллельными стенками резонатора. Поэтому длины волн излучения были кратны размерам резонатора и самая короткая достижимая длина волны была около 1 мм (частота — 300 000 МГц).

Еще занимаясь радаром, Таунс понял, что для них нельзя использовать все длины волн: молекулы воды в воздухе, например, интенсивно поглощают миллиметровые волны. Но отсюда следовало, что поглощение микроволн может служить основой для новой техники —

<sup>3</sup> Примечательна разносторонность интересов Таунса: в течение этого периода он также учился музыке и вокалу в вечерних классах музыкальной школы; он владеет многими языками, включая русский.

микроволновой спектроскопии, позволяющей определять строение молекул.

А затем Таунсу пришла в голову идея: микроволны такого диапазона соответствуют разности энергий между некоторыми молекулярными уровнями. Значит, можно попробовать кардинально перестроить всю радарную технику — вместо того, чтобы возбуждать электроны в резонаторе, заставить молекулы прямо излучать нужные кванты.

Но ведь каждая молекула излучает, вообще говоря, сама по себе, а нужно получить мощный импульс. Как же заставить их излучать одновременно?

Давайте вспомним, как происходит процесс излучения. Электрон в атоме или молекуле может поглотить фотон, энергия которого равна разности между двумя уровнями, и подняться, в результате, на более высокий энергетический уровень — атом или молекула возбуждаются, т. е. приобретают избыточную энергию (правильнее, конечно, сказать, что в них на верхний уровень поднимается электрон). Через какое-то время после возбуждения (время высвечивания) они переходят на более низкий энергетический уровень спонтанным, случайным образом, выделяя энергию, равную разности между двумя уровнями, в виде фотона. В 1917 г. Альберт Эйнштейн, как мы уже говорили, доказал необходимость существования еще и индуцированного излучения, при котором возбужденные атомы или молекулы, под действием резонансных фотонов, немедленно возвращаются в основное состояние, испуская фотоны, неотличимые от тех, которые стимулировали этот возврат.

Но для того, чтобы получить мощный излучатель, надо собрать вместе много возбужденных молекул. Как сделать, чтобы они не начали излучать преждевременно? Таунс решает эту задачу и в декабре 1953 г. строит такую установку уже в Колумбийском университете. Этот прибор он называет «мазер» (аббревиатура английского выражения *microwave amplification by stimulated emission of radiation* — микроволновое усиление с помощью стимулированного излучения).

В первом мазере молекулы аммиака проходили через электрические поля специальной конфигурации, которые отталкивали молекулы находящиеся в основном состоянии и фокусировали возбужденные молекулы в резонансной полости. Когда в полости накапливалась достаточная концентрация возбужденных молекул, то небольшая порция излучения резонансной частоты (фотоны с энергией, равной разности между основным и возбужденным состояниями молекулы аммиака) вызывала лавинообразный рост индуцированного излучения, возбуждение еще большего числа молекул, находившихся в основном

состоянии, и еще большее возрастание этого излучения. В результате получается мощный усилитель излучения на резонансной частоте (в случае аммиака — в микроволновом диапазоне).

Как при этом оказалось, частота мазеров настолько стабильна, что они могут служить высокоточными часами. С помощью двух мазеров Таунс и его коллеги проверили и подтвердили специальную теорию относительности Эйнштейна, причем эту проверку позже назвали наиболее точным физическим экспериментом в истории. А в радиоастрономии мазеры, усиливающие чрезвычайно слабые, ранее неизмеримые сигналы, позволили распознавать радиоисточники на огромных расстояниях от Земли.

Прохоров и Басов шли к построению молекулярного генератора (предложенное ими название, позже вытесненное словом мазер) несколько иным путем. Прохоров, до войны аспирант в Лаборатории колебаний Физического института АН СССР им. П. Н. Лебедева (ФИАН) в Москве, возвращается после двух ранений на фронте к работе с ламповыми генераторами. Но в 1947 г. его интересы перемещаются в микроволновую область, к так называемому синхротронному излучению вращающихся электронов, а затем к радиоспектроскопии. Он организует группу молодых исследователей, которые, используя радар и радиотехнику, разработанные главным образом в США и Англии во время и после Второй мировой войны, исследуют вращательные и колебательные спектры молекул.

Помимо чисто спектроскопических исследований, Прохоров проводит теоретический анализ применения микроволновых спектров поглощения для усовершенствования эталонов частоты и времени. Полученные выводы привели Прохорова и его молодого сотрудника Басова к идее использования индуцированного излучения.

Для своих опытов они избрали то же вещество, что и Таунс — аммиак, разница состояла лишь в деталях отделения возбужденных молекул от молекул, находящихся в основном состоянии. В 1964 г. Н. Г. Басов, А. М. Прохоров и У. Таунс разделили между собой Нобелевскую премию по физике.

## 2. Трехуровневая схема

Метод накопления возбужденных молекул, использованный в первых мазерах, был очень громоздок и мало эффективен. Нужно было придумать нечто иное. И новые схемы были, по-видимому, практически одновременно предложены несколькими исследователями.

В 1955 г. Прохоров и Басов предлагают новый «трехуровневый метод» создания мазера: атомы (или молекулы) с помощью «накачки»,

частота которой соответствует разности энергий между третьим и первым уровнями, загоняются на самый верхний уровень. Система уровней выбрана так, что электроны быстро сваливаются на второй, промежуточный энергетический уровень, который оказывается плотно заселенным. Ну а далее мазер испускает излучение на частоте, соответствующей разности энергий между промежуточными и нижним уровнями. (Разделение частоты накачки и рабочей частоты сыграло большую роль в эволюции всех квантовых приборов.)

В 1956 г. Николас Бломберген (р. 1920, Нобелевская премия 1981 г.) предлагает отойти от использования только газовых сред как рабочего вещества и взять за основу при разработке мазеров принцип трех уровней в кристаллах.

В том же 1956 г. Таунс показывает, что такие трехуровневые системы можно найти в некоторых твердых кристаллах, содержащих примеси. Эти атомы, будучи возбуждены высокой частотой накачки, могут затем достаточно долго сохранять возбуждение на промежуточном, рабочем уровне, чтобы потом, когда их количество достигнет критического значения, разом под действием фотона резонансной частоты излучить накопленную энергию.

В 1958 г. Таунс и его шурин, муж младшей сестры, Артур Л. Шавлов (р. 1921, Нобелевская премия 1981 г.) сформулировали условия построения мазера, излучающего в инфракрасной, видимой и даже ультрафиолетовой областях спектра.

А в 1960 г. Теодор Г. Мейман (р. 1927) запустил первый твердотельный лазер (от английского выражения *light amplification by stimulated emission of radiation* — световое усиление с помощью стимулированного излучения), излучавший красный свет, со стержнем из искусственного рубина с зеркальными концами. Рубин химически представляет





собой прозрачный окисел алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), матрицу с примесями в виде атомов хрома, которые и создают его окраску, а в лазерах являются «работающими» трехуровневыми системами.

В дальнейшем были предложены и осуществлены различные схемы построения лазеров. Одной из самых популярных стало стекло с атомами неодима, работающее по четырехуровневой схеме — рабочим переходом является переход между третьим и вторым уровнями, что обеспечивает возможность получения больших мощностей<sup>4</sup> и т. д. Дальнейшее развитие лазеров носило лавинообразный характер, приведя к образованию новой области — квантовой электроники. Накачка лазеров может производиться током, светом, излучением других типов лазеров, а также в ходе химических реакций. Ныне лазеры — газовые, жидкостные, полупроводниковые, твердотельные — используются в связи, машиностроении, медицине, инструментальных и измерительных приборах, в искусстве и в военных областях.

Особую роль, включая сейчас уже даже домашнюю электронику, играют миниатюрные лазеры на так называемых гетеропереходах, созданные группой Жореса Ивановича Алферова (р. 1930). Он разделил Нобелевскую премию 2000 г. с Хербертом Кроемером за «работы по получению полупроводниковых структур, которые могут быть

Нередко в ходе исследований приходится придумывать какие-то необычные приспособления их подручных материалов. Так, поскольку измерить интенсивность излучения лазера было в начале работ не очень просто, в лабораториях стали использовать такую «единицу»: число лезвий безопасных бритв (выбирали стандартные), прожигаемых одиночным импульсом. И вот в серьезных докладах зазвучали слова типа: «Использовали лазер в три бритвы...»

использованы для сверхбыстрых компьютеров», и с Джеком Килби за работы в области интегральных схем.

Развитие физики лазеров привело к выделению такой области исследований как лазерная химия, возможно лазерное разделение изотопов, исследуются возможности лазерного индуцирования термоядерных реакций (А. Д. Сахаров, 1962)

и т. д. Рассматриваются возможности объяснения ряда наблюдаемых небесных явлений с учетом мазерных эффектов в их излучениях.

Уже очень давно высказывались предположения, что, в принципе, можно было бы осуществить эффект индуцированного излучения не на атомных, а на ядерных уровнях — это позволило бы строить лазеры в рентгеновском и даже гамма-диапазонах (их заранее называли

<sup>4</sup> Поскольку развитие квантовой электроники шло от радиотехники, то в качестве неперменного требования ко всем приборам выступало наличие резонатора, отбирающего нужные частоты. Однако теория стимулированного излучения вовсе этого не требует, и нашей группе удалось в 1966 г. построить лазер в форме стеклянной нити с неодимом, который генерировал сигналы безо всякого резонатора.

разерами и газерами), однако до сих пор реальных результатов в этом направлении получено не было.

Важнейшими особенностями лазерного излучения являются его высокая монокromaticность, т. е. строгая одинаковость частоты всего излучения, когерентность, т. е. равенство фаз по всему излученному импульсу (напомним, что только когерентные волны могут интерферировать), краткость импульсов и их мощность, острая направленность луча, выходящего из резонатора. Так, еще 9 мая 1962 г. луч лазера, направленный на Луну, создал на ее поверхности освещенное пятно диаметром около 6,4 км, видимое с Земли. Современные лазеры могли бы послать «зайчик» меньшего размера, но гораздо большей яркости.

Стоит упомянуть еще одно направление лазерных исследований. Представляется естественным, по-

пытаться использовать лазеры для ускорения частиц, например электронов. И такие попытки, конечно, делались и продолжают делаться. Но вот совсем не тривиальной представляется постановка обратной задачи: использовать лазерное излучение для охлаждения вещества — так послать лучи, чтобы они тормозили тепловое движение атомов.

Эту задачу поставили и решили Стивен Чу и Уильям Дэниел Филлипс (оба род. 1948) в США и Клод Нессим Коэн-Тануджи (р. 1933) во Франции, удостоенные Нобелевской премии 1997.

### 3. Нелинейная оптика

В 1962 г. Н. Бломберген опубликовал, вместе с коллегами, общую теорию нелинейной оптики, которую впоследствии он и многие другие исследователи существенно расширили (работы по нелинейным эффектам в оптике, которые вели до того — например, С. И. Вавилов — упирались в малую мощность существовавших источников излучения).

Бломберген показал, что в лазере или в среде, через которую проходит его излучение, могут появиться гармоники, кратные основной частоте и подобные обертонам в звуке, в результате чего можно получить излучение более высоких частот. Описав предполагаемое взаимодействие трех лазерных пучков, в результате которого образуется четвертый пучок, частотой которого можно управлять с высокой

В 1985 г. Чу и его коллеги создали такое пересечение лазерных лучей (его назвали «оптической патокой»), в котором скорость атомов газа уменьшалась в несколько тысяч раз, а это соответствует уменьшению температуры в сотни раз. Разработанная ими же атомная ловушка, использующая лазеры и магнитные катушки, могла фиксировать охлажденные атомы и давала возможность их исследования. Между 1988 и 1995 гг. Коэн-Тануджи и его коллеги добились охлаждения атомов до температуры в 1 микрокельвин, что соответствует скорости их колебаний всего в 2 см/с. Среди других прикладных программ методы, которые они разработали, позволяют создать атомные часы чрезвычайно высокой степени точности, порядка одной секунды за три миллиарда лет.

точностью, Бломберген заложил теоретические основы для создания лазера с перестраиваемой частотой. А это позволило Шавлову развивать лазерную спектроскопию, получить новые, весьма подробные сведения о строении атомов и молекул: отмечая, какие именно частоты предпочтительно поглощаются или испускаются, спектроскопист может определить характеристические энергетические уровни, т. е. строение исследуемого материала. Точное знание частоты пучка, что обеспечивается монохроматической (одночастотной) природой лазерного света, а также возможность точно настраивать частоту на различные энергетические уровни позволяют проводить более глубокий анализ веществ.

Нелинейные оптические процессы можно попытаться разделить на две группы: первая — это те, которые определяются взаимодействием света со многими атомами и через это — самих атомов друг с другом, а вторая группа определяется взаимодействием многих фотонов с одним атомом, когда влиянием соседей можно пренебречь, эту группу явлений называют многофотонными процессами.

Один из самых красивых эффектов первого типа — это явление самофокусировки (Г. А. Аскарян, 1967): сходящийся пучок света в веществе так увеличивает показатель преломления на своем пути, что в среде возникает «световод» — луч далее не расходится, а распространяется в виде трубки или пучка нитей.

Среди многофотонных процессов особенно примечательны два: образование высших гармоник и многофотонная ионизация. Дело в том, что как уже отмечалось, прямым путем не удастся построить лазер, генерирующий достаточно мощное излучение в ультрафиолете, не говоря уж о более высокочастотных частях спектра. Поэтому основные надежды возлагаются на получение гармоник достаточно высокого порядка — к настоящему времени получены уже более чем сотые гармоники, но с малыми КПД. В этой области остается еще очень много неясного, и поэтому она интенсивно исследуется.

## Приборы для физики ядра и частиц

### 1. Для чего они нужны?

Аппаратура, используемая в исследованиях ядра и частиц, состоит из детекторов частиц (приборов для их регистрации) и устройств для их создания и ускорения. Но помимо того, разработка таких приборов ведет к созданию энергетических установок (ядерных реакторов), а в будущем, возможно, к термоядерным реакторам и, не исключено, — к новым типам двигателей, новому оружию и т. д.

Простейшим способом регистрации является, конечно, метод фотозумульсий. Он был в значительной степени инициирован С. Ф. Пауэллом, настаивавшим на разработке более чувствительных фотоматериалов — именно такие фотопластинки позволили ему открыть пионы в космических лучах, прорыв здесь был технологическим, и потому мы его не рассматриваем. Однако метод фотозумульсий является безальтернативным: на пленке фиксируется все, что через нее проходит, и хотя вам, быть может, интересен всего один случай из многих-многих миллионов, его следы могут затеряться на фоне бесполезных треков.

Еще раньше были придуманы счетчики Гейгера, а затем камера Вильсона. Позже были созданы и другие камеры, которые мы постараемся чуть подробнее рассмотреть.

С развитием техники ускорителей, с ростом энергии частиц пришлось переходить на новые типы детекторов, «калориметры». Нужно измерить полную энергию частицы, а она такова, что порождается целый ливень вторичных частиц — их улавливает, например, сверхпроводящий цилиндр, в котором можно измерить повышение температуры на миллиардные доли градуса.

Детекторы должны отбирать интересные для данного исследования случаи (примерно, один на сто миллионов) и только при их

Сейчас к каждому эксперименту на ускорителях приходится конструировать новые типы детекторов: нередки статьи, в которых тексту в четыре страницы (стандарт для журнала «Физикл Ревью Леттерс», самого авторитетного в этой области) предшествует список из трехсот-четырёхсот авторов и нескольких десятков научных учреждений из многих стран!

появлении включать регистрирующее устройство (сложнее всего переключать магнитные поля). Если раньше, когда исследования шли на низких энергиях, достаточно было, например, поместить над и под камерой Вильсона счетчики Гейгера и включать ее при совпадении (или несовпадении) сигналов от обоих счетчиков, то сейчас устройство и программы детекторов много сложнее, а их электроника должна быть несравнимо более быстродействующей — нас интересуют частицы со все более коротким периодом распада.

Ускорение заряженных частиц происходит в электрическом поле. При этом возможны два типа ускорителей: линейные, в которых частицы все время ускорения движутся по прямой, и круговые, в которых магнитное поле заворачивает их траектории в окружности (или спирали). Оба типа имеют свои преимущества и свои недостатки, но конструирование их, как и детекторов, и регистрирующих устройств, требует такой изобретательности и такого таланта, что нередко увенчивается Нобелевскими премиями. (Мы коротко говорили об ускорителях в главе о теории относительности и потому здесь продолжим рассказ без повторений.)

## 2. Камера Вильсона

Мы уже писали о двух методах регистрации быстрых частиц: сцинтилляторах и счетчиках Гейгера. Но последующие успехи ядерной физики и затем физики элементарных частиц обусловлены изобретением туманной, или конденсационной, камеры Чарльзом Томсоном Рисом Вильсоном (1869—1959, Нобелевская премия 1927 г.). Вильсон, которого все называли Ч. Т. Р., собирался стать медиком, изучал философию, латынь и греческий, но потом увлекся физикой. Семья очень нуждалась, и он какое-то время работал школьным учителем, но затем все же начал эксперименты в Кавендишской лаборатории, зарабатывая на жизнь как лаборант при студентах-медиках.

Ч. Т. Р. происходил из горной Шотландии и любил бродить по горам. Особое впечатление на него произвели оптические атмосферные явления, кольца вокруг Солнца, видимые сквозь туман. Поэтому он строит камеру, в которой можно имитировать туман и дождь при расширении и охлаждении водяного пара. Много позже он писал: «Почти немедленно я натолкнулся на нечто, представляющее гораздо больший интерес, чем оптические феномены, которые я намеревался изучать». Дело вот в чем: давно было известно, что пары воды начинают конденсироваться на пылинках в атмосфере, но Ч. Т. Р. удалял их всех, очищая воздух многократной конденсацией и испарением, а туман при большой влажности воздуха все равно образовывался.

В поисках источника зародышей пара возникла идея, что ими могут быть ионы воздуха. Тут как раз подоспело открытие рентгеновских лучей, и Вильсон начал ионизовать воздух в камере с помощью примитивной рентгеновской трубки. А так как ему в 1896 г. присудили стипендию Максвелла, он мог уже спокойно, не отвлекаясь на приработки, продолжать работу по изучению атмосферного электричества.

В 1911 г., когда камера была усовершенствована, Вильсон решил использовать ее для регистрации пролетающих атомных частиц: своим зарядом альфа- и бета-частицы должны ведь ионизовать молекулы газа по линии пролета, а водяной пар, конденсирующийся вокруг ионов в капельки, должен образовывать следы, которые можно будет фотографировать. Эти надежды оправдались, и он смог сообщить, что видел впервые «восхитительные облачные следы», сконденсировавшиеся вдоль треков альфа- и бета-частиц, причем треки эти можно было отличить друг от друга с невероятной четкостью: чем быстрее частица, тем меньше она успевает создать ионов на своем пути, поэтому по толщине следа можно оценить скорость и энергию пролетевшей частицы. Фотографии треков произвели глубокое впечатление в научном мире — они послужили первым зримым свидетельством существования этих частиц.

В 1924 г. Дмитрий Владимирович Скобельцын (1892—1986) первым догадался, что если поместить такую камеру в магнитное поле, то по отклонению следа частицы влево или вправо можно определить ее заряд. Работы у него шли весьма успешно: электроны из космических лучей отклонялись, как частицы с отрицательным зарядом, в одну сторону, а положительные протоны и альфа-частицы — в другую.

Но вдруг в 1929 г. он получает снимки, на которых явно запечатлен след электрона, но отклоняется он в противоположную сторону. Скобельцын решил, что это электроны, но они влетели в камеру не с той стороны, т. е. не сверху, как все нормальные космические частицы, а снизу, прошли, понимаете ли, всю Землю насквозь. Он не знал, по видимому, созданной к тому времени, но еще, правда, не общепринятой и не совсем понятой теории Дирака, по которой каждой частице должна сопутствовать античастица с такой же массой, но с противоположным зарядом. Позитрон был открыт только через три года на точно таком же снимке...

Как писал Дж. Дж. Томсон, прибор, подобный камере Вильсона, «трудно сыскать; она служит примером изобретательности, проницательности, умения работать руками, неизменного терпения и негибкой целеустремленности». Именно на такой камере проводили свои исследования П. М. С. Блэккетт, П. А. Капица, В. Боте, супруги Жюлио-Кюри и многие-многие другие. С ее помощью были открыты позитрон и другие частицы.

### 3. Пузырьковая камера

Многочисленные усовершенствования камеры Вильсона сделали ее основным рабочим инструментом ядерной физики и зарождавшейся физики элементарных частиц, однако она не лишена недостатков. Главнейшие из них такие: во-первых, чем быстрее частица, т. е. чем выше ее энергия, тем меньше ионов она успевает создать на своем пути — поэтому для частиц высоких энергий нужно увеличивать размеры камеры, что технически очень сложно, а то и невозможно. Во-вторых, после каждого снимка нужно заново оживать пар в ней и снова его испарять, а это требует немало времени. Следовательно, нужен поиск новых способов регистрации частиц.

Новый тип камер, пузырьковых, был изобретен и осуществлен Дональдом А. Глэзером (р. 1926, Нобелевская премия 1960 г.), учеником и сотрудником Карла Андерсона.

Талантливый музыкант, Глэзер думал о карьере скрипача и даже в возрасте шестнадцати лет выступал с Кливлендским симфоническим оркестром, но затем победила физика, и после университета его

Рассказывают, что основная идея новой камеры зародилась тогда, когда Глэзер сидел в кафе и меланхолично попивал из кружки пиво. По восточноевропейской привычке (его семья родом из России), он сыпал понемножку соль в пиво и вдруг заметил, что от каждой крупинки в кружке поднимается след из пузырьков. Но ведь то же самое произойдет, если через доведенную почти до кипения жидкость пропустить заряженную частицу: она образует ионы, а на них возникнут пузырьки пара. Вот и быстрая действующая замена камере Вильсона!

увлекли космические лучи. Работа с камерой Вильсона, длительные простои при ее очищении и наладке, сложности исследования при больших энергиях частиц — все это возвращало его к мыслям о новых приборах.

Глэзер попытался установить, могут ли частицы высоких энергий быть «пусковыми механизмами» кипения перегретой жидкости под

давлением. Первые опыты он проводил с бутылками подогретого пива и газированных напитков, чтобы определить, что влияет на пенообразование. После более тонких экспериментов и расчетов он обнаружил, что при соответствующих условиях пролетающие заряженные частицы могут «запускать» кипение перегретой, находящейся под давлением жидкости.

Начал он со стеклянных камер разной формы с объемом в несколько кубических сантиметров и с перегретым эфиром внутри. Уже в них ему со временем (в 1952 г.) удалось создать очень неустойчивое состояние и зафиксировать четкие треки частиц с помощью высокоскоростной киносъемки прежде, чем жидкость закипала. Фактически метод Глэзера был как бы зеркальным отражением метода Вильсона: в камере Вильсона трек образуют капельки жидкости в газе, а в пузырьковой камере трек создавался из газовых пузырьков в жидкости.

Большую камеру Глэзер построил на жидком водороде при температуре  $-246^{\circ}\text{C}$  в 1953 г. На ней были зафиксированы новые типы реакций, не поддававшихся ранее наблюдению, и удалось получить о них в тысячи раз большую информацию.

Отметим, что после получения Нобелевской премии Глэзер заинтересовался приложением физики к молекулярной биологии и начал изучать микробиологию. Он исследовал эволюцию бактерий, регуляцию клеточного роста, канцерогенные вещества и генетические мутации. При этом он разработал компьютеризованную сканирующую систему, которая автоматически идентифицирует виды бактерий с помощью тех методов анализа фотографий, которые используются при работе на пузырьковых камерах.

\* \* \*

В следующем типе приборов используются другие физические принципы — это искровые камеры: между двух горизонтальных пластин, на которые подается напряжение, близкое к пробойному, находится газ. Когда через эту систему проходит заряженная частица, то по ее следу, иногда даже закрученному в спираль, происходит пробой, пробегает как бы микромолния, которая сама включает фотокамеру и себя снимает<sup>5</sup>.

В такой камере можно поместить много пластин, а еще лучше поместить в нее систему проволочек и рассматривать далее разряды и возникающие электрические поля. Такая система, если сигналы передаются прямо на компьютер, может анализировать трехмерную и быстроменяющуюся картину взаимодействий и вспышек, всего до миллиона событий в секунду — множество резонансов и частиц, о которых мы будем потом говорить, — а для этого нужно было придумать и осуществить системы световодов, счетчиков фотонов и т. д. и т. п.<sup>6</sup> Для сравнения заметим, что в пузырьковой камере можно было

<sup>5</sup> Камера эта, в основном, была придумана и построена моим другом, безвременно скончавшимся Георгием Евгеньевичем Чиковани (1928–1968) в ЦЕРНе, международном физическом центре в Женеве.

<sup>6</sup> Эти системы сконструировал и осуществил в ЦЕРНе Жорж Шарпак (р. 1924, Нобелевская премия 1992 г.), помимо применений на ускорителях, его камеры с успехом используются в медицине. Уроженец Польши, он ребенком попал во Францию, партизанил в годы войны, чудом выжил в концлагере Дахау, получил образование горного инженера, но увлекся физикой и начал работать в физических лабораториях. Сейчас он трудится над созданием приборов, предупреждающих о приближении землетрясений по анализу потоков радона из Земли. (См.: Шарпак Ж. и Согинос А. Жизнь как связующая нить. М., 2001.)



зафиксировать и визуализировать (от латинского «визуз» — зрение) не более двух событий в секунду.

#### 4. Ускоритель Кокрофта—Уолтона

Джон Кокрофт (1897—1967) и Эрнест Уолтон (р. 1903) работали в лаборатории Резерфорда. Кокрофт вместе с П. Л. Капицей разрабатывал мощные магниты и решил применить их для ускорения альфа-частиц, любимого им и в то время единственного оружия для проникновения в атомное ядро — именно при бомбардировке ими удалось ранее превратить атомы азота в атомы кислорода.

Но поскольку альфа-частицы, как и ядра, положительно заряжены, т. е. взаимно отталкиваются, то для их столкновения нужно увеличить энергию альфа-частиц или же увеличить интенсивность их потока (вероятность столкновения будет очень мала, но не равна нулю при любой энергии).

Для преодоления ядерного барьера требуется энергия альфа-частиц в несколько миллионов эВ, что в то время было абсолютно недостижимо. Но тут Кокрофт прочитал в 1928 г. статью Г. Гамова о том, что, поскольку альфа-частицы обладают волновыми свойствами, некоторые из них могут покинуть ядра, туннелировать сквозь барьер, хотя, согласно классической теории, это невозможно.

Вероятно, полагал Гамов, некоторые альфа-частицы даже малой энергии могут покинуть ядра, но для их обнаружения нужно исследовать очень большое число ядер. Когда Гамов посетил Кавендишскую лабораторию, Кокрофт расспросил его о возможности обратного процесса, о том, могут ли альфа-частицы малой энергии проникнуть в ядро, несмотря на силы отталкивания. Гамов подсчитал, что такие случаи можно обнаружить, если направить на ядро достаточно большое число альфа-частиц.

И тогда Кокрофт и Уолтон разработали установку, способную подавать напряжение всего лишь в 600 киловольт к трубке, содержащей водород. С помощью этой установки они в апреле 1932 г. бомбардировали литий ядрами водорода, протонами. «Почти сразу же, — вспоминал потом Кокрофт, — при энергии в 125 киловольт доктор Уолтон увидел ядерную сцинтилляцию, характерную для альфа-частиц». На этой установке они превратили литий и водород в два атома гелия, став, тем самым, первыми учеными, которым удалось искусственно расщепить атом.

Поскольку число высокоэнергичных альфа-частиц в пучке было мало, то только одна из каждых десяти миллионов частиц, направленных на легкие атомы вроде лития и бора, расщепляла ядро

и высвобождала энергию. Однако именно их достижения послужили экспериментальным подтверждением теории туннелирования Гамова и показали, что количество энергии, освобождающейся при превращениях атомов, точно соответствует основному уравнению теории относительности Эйнштейна:  $E = mc^2$ .

Создание ускорителя и полученные результаты были увенчаны Нобелевской премией по физике 1951 г.

## 5. Эрнст Лоуренс

Первой значительной работой Эрнеста О. Лоуренса (1901—1958, Нобелевская премия 1939 г.), о которой нужно рассказать, является экспериментальная демонстрация принципа неопределенности Гейзенберга. Согласно этому принципу, измерение энергии, например, фотона, становится тем неопределеннее, чем короче время измерения. Так как энергия фотонов, согласно М. Планку, пропорциональна частоте света, то неопределенность в энергии сводится к неопределенности в частоте. Линия в оптическом спектре в действительности представляет собой узкую, но четкую и хорошо определенную полосу световых частот. Включая и очень быстро выключая свет во время измерения частоты спектральной линии, Лоуренс показал, что линия расширяется. Источник света не претерпевал никаких изменений, хотя его частота становилась менее определенной, как и следовало из принципа неопределенности Гейзенберга.



Но затем Лоуренс обратился к ядерной физике. Ему было ясно, что для дальнейших исследований нужны ускорители: радий, излучением которого пользовался Резерфорд, был дорогим и редким элементом, альфа-частицы вылетали из источника по всем направлениям, число наблюдаемых столкновений было чрезвычайно мало, а наблюдения трудоемкими. В линейных ускорителях из-за высокого напряжения должна была часто пробиваться изоляция...

И тут помог случай. В 1929 г. Лоуренсу попалась на глаза статья Рольфа Видерое, в которой рассматривалась схема ускорителя частиц, предложенная ранее Густавом А. Изингом (1883—1960). Изинг в 1925 г. предложил использовать синхронное (от греческого — совпадение во времени) включение относительно небольшого разгоняющего напряжения при появлении частиц в нужном месте, а Видерое построил

первый вариант такого линейного ускорителя. Кроме того, он рассмотрел некоторые возможности циклического ускорителя с заворотом электронов на круговые орбиты магнитным полем (поскольку сила Лорентца всегда перпендикулярна к скорости заряда, она может быть только центростремительной).

Статья эта была на немецком, которого Лоуренс практически не знал, но в ней были вполне ясные картинки! Он понял по ним, что траекторию частиц можно изогнуть в окружность и ускорять их отдельными «толчками», а для этого вовсе не нужно громадное напряжение. И при этом очень существенно то, что частицы всегда описывают полную окружность за одно и то же время — независимо от скорости.

В 1930 г. он приступил к расчетам и постройке первого циклотрона (от греческого «циclos» — круговой). Именно с его созданием обычно связывают имя Лоуренса.

Циклотрон представляет собой круглый полый диск — как бы плоскую консервную банку, разделенную по диаметру на две половины в форме латинской буквы D (они называются дуантами, от латинского «дуо» — два). Диск помещен между плоскими полюсами большого магнита, в зазоре между дуантами создается переменное напряжение. Когда заряженная частица, например протон, попадает в зазор, она притягивается к дуанту с отрицательным напряжением и набирает скорость при проходе через зазор. Внутри дуанта частица описывает в магнитном поле полуокружность с постоянной по величине скоростью и выходит из него в точке, диаметрально противоположной входу. К этому времени знак напряжения изменяется, и протон устремляется к другому дуанту, ставшему теперь отрицательным, притягивается им и добавочно ускоряется напряжением, приложенным к зазору. Поэтому во втором дуанте он движется по дуге окружности большего радиуса, чем прежде.

Так протон как бы «подталкивается» при каждом проходе через зазор и движется со все возрастающей скоростью по дугам окружностей все большего радиуса (с ростом скорости растет его масса движения) пока не достигнет наружной стенки диска. Тогда протон вылетает из циклотрона на выбранную мишень. Дуанты изготавливаются из немагнитного материала, в камере должен быть глубокий вакуум, чем больше размер дуантов и чем крупнее и мощнее магниты, тем выше будет энергия разгоняемых частиц.

Создание циклотрона открыло перед физиками обширное новое поле исследований. Бомбардировка атомов многих элементов позволила расщепить их ядра на фрагменты, которые оказались изотопами,

часто радиоактивными. Циклотрон использовался и для измерения энергий связи многих ядер, и (путем сравнения величин разности масс до и после ядерной реакции) для проверки соотношения Эйнштейна между массой и энергией.

На основе циклотрона Лоуренс построил еще и масс-спектрометр, прибор для разделения изотопов: так как массы изотопов несколько отличаются, изотопы движутся по близким, хотя и не совпадающим траекториям, поэтому могут быть разделены. Хотя этот способ их разделения не слишком эффективен, именно им был получен уран-235 для первых атомных бомб. После войны Лоуренс продолжал строительство ускорителей, способных разгонять частицы до энергий в миллиарды электронвольт. На одном из таких ускорителей, получившем название бэватрона — от БэВ, старого названия миллиарда эВ, ныне ГэВ — группа Эмилио Сегре открыла антипротон, а вскоре и антинейтрон.

## 6. Коллайдеры

Циклотрон был значительно усовершенствован введением методов автофазировки Владимира Иосифовича Векслера (1907–1966) и Эдвина М. Мак-Миллана (р. 1907, Нобелевская премия по химии за открытие трансурановых элементов 1951 г.) и др.

Дальнейшее развитие ускорительной техники привело к созданию коллайдеров (от английского «коллайд» — сталкиваться) — это ускорители, в которых два пучка частиц направляются друг на друга. При этом, во-первых, энергии частиц обоих встречных пучков складываются, а во-вторых, не мешают посторонние частицы, всегда имеющиеся в составе мишени.

Первый такой аппарат для исследования взаимодействий электронов с электронами был запущен в Новосибирске в 1967 г. Самый большой линейный ускоритель электронов находится в Пало-Альто (США) и называется SLAC (сокращенно от «Стенфордский линейный ускоритель»), а его модификация — SLC. В нем ускоряют электроны и позитроны до энергий в 50 ГэВ, а затем сталкивают их друг с другом по схеме коллайдера, в SLC после его отладки были достигнуты еще большие энергии.

Один из самых больших к настоящему времени коллайдеров с 1982 г. работает в Женеве в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН). Называется он LEP и в нем исследуются столкновения протонов и антипротонов, совершающих 50 000 оборотов в секунду по кольцу с длиной окружности более 20 км.

Самый большой ускоритель диаметром 83,6 км, называемый SSC (сверхпроводящий суперколлайдер), должен разгонять протоны и антипротоны до энергии в 20 ТэВ (двадцать триллионов эВ). Стоимость его, утвержденная еще в 1983 г., должна была составить 6 млрд долларов, а строительство должно было закончиться к 1995 г., но затем его финансирование было прекращено. О Большом адронном коллайдере мы уже говорили.

Наиболее ярким событием, с которого началась работа этой машины, было открытие так называемых промежуточных мезонов, о них будем говорить ниже. Сейчас только заметим, что, поскольку массы этих  $W$ - и  $Z$ -частиц велики, для их наблюдения требуется выделение огром-

ного количества энергии. О сложности оборудования, используемого в этих экспериментах, говорит уже то, что больший из двух детекторов весит 1200 тонн.

Идея такого эксперимента была разработана физиком Карло Рубиа (р. 1934) и другими, а основной вклад в перестройку ускорителя внес Симон ван дер Мер (р. 1925), они и разделили Нобелевскую премию 1984 г. Ван дер Мер изобрел устройства, которые позволяли — при таких скоростях! — впрыскивать в уже существующие и вращающиеся сгустки частиц и античастиц добавочные частицы и уравнивать «на лету» их параметры.

<sup>6</sup> В начале 1990-х гг. американские физики полушутя упрекали советских коллег: не могли разве несколько задержать начало перестройки? Ведь с распадом СССР исчезли проблемы соревнования мировых систем, и Сенат США сразу сократил финансирование амбициозных научных программ...

## За гранью наблюдаемого: квазичастицы, темная материя и черные дыры

---

### Глава 1

## Квантовые поля

*И можно свернуть, обрыв обогнуть,  
Но мы выбираем трудный путь,  
Опасный, как военная тропа.*

В. Высоцкий

### 1. Вторичное квантование: частицы и квазичастицы

В первые годы развития квантовой механики Гейзенберга — Шредингера — Борна ситуация с квантами выглядела в ней парадоксально: сами кванты как бы отсутствовали — все интересы были сосредоточены на энергиях переходов, и числа квантов, осуществляющих эти переходы, в явном виде не учитывались. Но в 1927 г. П. Дирак придумал метод разложения электромагнитных волн, входящих в уравнения, по числам частиц-фотонов, а затем Ю. Вигнер и Паскуале Йордан (1902–1980) распространили этот способ и на частицы, подчиняющиеся статистике Ферми—Дирака.

По-видимому, такой подход начинался по некоторой аналогии с акустикой (Дирак, несомненно, был хорошо знаком с классической «Теорией звука» Рэлея). Рассмотрим, для сравнения, возбуждение струны какого-нибудь музыкального инструмента: если ее оттянуть и отпустить, она начнет колебаться, но только на таких частотах, длины волн которых укладываются на ней целое число раз, т. е. эта струна квантует возбуждение, выделяет из него только определенные, резонансные частоты (основную частоту и ее обертоны). Теперь полную энергию струны можно записать как сумму выражений для каждой резонансной частоты, умноженных на ее энергию.

Перейдем к электромагнитным волнам и рассмотрим плоско-параллельный резонатор (два параллельных идеальных плоских зеркала), в который запускается электромагнитная волна. Вскоре в таком резонаторе устанавливается система стоячих волн, т. е. сохраняются те и только те волны, которые укладываются целое число раз на длине резонатора. Таким образом, и здесь происходит квантование — энергия снова может быть выражена через энергии отдельных резонансов. А во многих случаях каждая такая волна может описываться простым осциллятором — аналогом сжимаемой-разжимаемой пружинки или маятника.

Теперь осталось совершить предельный переход: если плотность энергии (энергия на единицу длину резонатора) не зависит от этой длины, то можно ведь рассматривать и бесконечный резонатор, т. е. свободное пространство, в котором остаются определенные осцилляторы, у каждого из которых своя доля энергии. Таким образом, мы сумели представить электромагнитное поле в виде набора квантов-фотонов. Ну а поскольку, согласно гипотезе де Бройля, каждой материальной частице, в том числе электрону, можно сопоставить свою волну, то аналогичным образом можно представить и материальные частицы — нужно только учесть, что, согласно принципу Паули, в каждом квантовом состоянии может находиться не более одной частицы-фермиона.

Итак, волновую функцию, знаменитую пси-функцию Шредингера, можно представить как сумму по таким вот элементарным возбуждениям-частотам. Это и есть основа метода вторичного квантования (первичное заключалось во введении постоянной Планка с указанием на то, что все энергии и частоты прямо пропорциональны друг другу).

Единство физики, возможность переноса методов, развитых для одних явлений, в совершенно иные области особенно ярко проявляется в том, что метод вторичного квантования применим не только к полям, находящимся в свободном пространстве, и к соответствующим им частицам. Формально, те же методы можно применить к частицам, находящимся в среде, причем теории эти являются существенно нерелятивистскими, что обычно несколько упрощает их построение.

Давайте рассмотрим электрон проводимости, т. е. электрон, могущий перемещаться в металле (такое рассмотрение первым провел Я. И. Френкель). Свободный электрон, как мы отмечали выше, испускает и перепоглощает виртуальные кванты, т. е. имеет определенную «шубу». Электрон в металле тоже испускает и перепоглощает виртуальные фотоны, но не так, как свободный — часть этих фотонов поглощается соседями, он в свою очередь получает кое-что от них. А это все означает, что его «шуба» устроена уже не так, как в свободном состоянии, и он не может вместе с ней выйти на волю, в пустое

пространство — поэтому такой электрон естественно называть уже квазичастицей или одночастичным возбуждением. Такими же квазичастицами являются, например, нуклон в ядре, атом гелия в сверхтекучей жидкости.

Но есть и другие квазичастицы, строение которых не сводится к перестройке только шубы, и проще всего начать их рассмотрение со звуковых волн в кристалле (И. Е. Тамм). Здесь, как и в струне, возникают условия резонанса — звук ведь передается колебаниями атомов, а их частоты зависят от характеристик этих атомов и от расстояний между ними (резонатором является сама кристаллическая решетка). Поэтому естественными для кристалла являются только определенные частоты, на каждой из которых могут быть сосредоточены различные энергии, а энергия, импульс и частота будут связаны соотношениями Планка—Эйнштейна, в которых скорость света заменяется скоростью звука — такую «частицу» естественно, по аналогии с фотоном, назвать фононом (от греческого «фоне» — звук). Тогда, например, нагрев можно представить как возбуждение всех таких колебаний, но с разными амплитудами — в соответствии со статистическим распределением Больцмана и т. п.

В проводящих средах, где происходят колебания и движения зарядов, такие явления можно рассматривать как процессы, связанные с возникновением, движением и взаимодействием квазичастиц «плазмонов». Так, например, можно рассмотреть взаимодействие звуковых или тепловых волн с зарядами как взаимодействие фононов и плазмонов. Вводится и квазичастица «магنون», описывающая волны, связанные с колебаниями спинов — от их величины, упорядоченности и направленности зависят магнитные поля в средах. Дырки в кристаллах (места отсутствующих положительных ионов), которые могут «путешествовать» по нему за счет последовательного перехода в дырку соседних частиц, могут связаться с электроном и образовать так называемый экситон — еще одну квазичастицу и т. д.

Таким образом, вместо того чтобы рассматривать слабые возбуждения в среде, состоящей из огромного количества атомов, молекул, ионов, электронов, рассматривают сравнительно небольшое количество элементарных возбуждений-квазичастиц. (Такой подход, очевидно, может быть наиболее плодотворным при низких абсолютных температурах, когда возбуждения слабы, т. е. квазичастиц мало.)





## 2. Лэмбовский сдвиг

Знаменитое уравнение Дирака (1928) описывало все известные свойства электрона: его волновые свойства, электрический заряд, спин, магнитный момент и релятивистскую зависимость массы от скорости. В качестве основы значительной части квантовой механики уравнение Дирака позволило с большой точностью предсказать энергетические уровни атома водорода (уровни других атомов рассчитываются с гораздо меньшей точностью).

В атоме водорода единственный электрон движется вокруг ядра по одной из серии орбит, на каждой из которых он обладает точно определяемой энергией (вообще говоря, у каждого уровня, кроме основного, существует ширина, т. е. некоторый разброс энергий, но он тоже должен быть строго определенным). Для перехода электрона на более высокую орбиту атом должен поглотить фотон, энергия которого в точности соответствует разности энергий между орбитами. А при переходе электрона на более низкую орбиту атом испускает фотон соответствующей энергии. Такие переходы порождают спектр атомарного водорода, состоящий из отдельных четких линий.

Обычно возбужденное (или высокоэнергетическое) состояние атома быстро распадается, время распада обратно пропорционально ширине уровня — атом переходит, испуская излучение, в состояние

Уиллис Ю. Лэмб (1913–2008) — физик-теоретик, много работал по микроволновым излучениям. Как он рассказывал, задуманный эксперимент никто не хотел выполнять, и чтобы отвлечься, ему выделили аппаратуру и практиканта для работы. Человек очень сдержанный, близорукий и неловкий, Лэмб ограничивался лишь указаниями, изредка ему «разрешалось» списывать результаты с осциллографа. Известие о присуждении премии ничуть не повлияло на его поведение: он как всегда спокойно провел со студентами плановые занятия и только потом вышел к давно ожидавшим репортерам.

с более низкой энергией. Наиболее сильно возбужденные состояния распадаются с испусканием одного фотона примерно за одну стотысячную секунды. Но существуют и метастабильные, т. е. «почти стабильные» состояния с гораздо большим временем жизни: так, второе возбужденное состояние атома водорода «живет» примерно в 700 млн раз дольше, поскольку его распад требует испускания двух фотонов. При этом из уравнения Дирака выводилась эквивалентность двух

особых уровней, один из которых метастабилен: эти уровни соответствуют различным состояниям, имеют весьма различные времена жизни, но тем не менее должны обладать точно одинаковой энергией.

Но еще в 1934–1939 гг. появились замечания о том, что между ними есть какая-то разница. Эксперименты были, однако, не очень надежными — разница энергий столь мала, что ее не удавалось точно промерить, а война прервала дальнейшую работу.

Прояснение этого вопроса сыграло ключевую роль в развитии квантовой электродинамики (КЭД), основы всех теорий квантовых полей, и связано оно в основном с экспериментом, задуманным Лэмбом и проведенным им совместно со студентом Робертом К. Ризерфордом в 1947 г.

В эксперименте Лэмба приготовленный пучок атомов, находящихся именно в этом долгоживущем метастабильном состоянии, переводился при облучении в микроволновом (сверхвысокочастотном, СВЧ) диапазоне в короткоживущее состояние — работы Лэмба в военное время по радиолокационной технике позволили сконструировать нужное для этого эксперимента специальное оборудование. Используемая аппаратура позволяла с большой точностью менять частоту облучения в диапазоне около 1000 МГц, а количество распадающихся атомов (уже перешедших на другой уровень) показывало вероятность процессов.

Результаты Лэмба были сенсационными: уравнение Дирака не точно описывает уровни энергии атома водорода, между двумя исследуемыми уровнями существует разница — она составляет порядка одной стотысячной энергии уровня, но это вопрос принципиальный — что-то мы не понимаем в самых основах теории!

В тот же период Поликарп Куш (1911–1993), также работавший в военные годы над радиолокационной техникой, измерял в атомных пучках магнитные свойства электрона в атоме водорода. Результаты его чрезвычайно скрупулезных измерений магнитного момента электрона тоже вступили в противоречие с результатами расчетов по теории Дирака — примерно на 0,1 % — и стали одним из стимулов развития КЭД. Поэтому он разделил Нобелевскую премию 1955 г. с Лэмбом.

### 3. Квантовая электродинамика

Начиная с 1927 г. П. Дирак, В. Гейзенберг и В. Паули пытались согласовать квантовую механику с теорией относительности, связать свойства электронов с параметрами электромагнитного излучения. Согласно теории Дирака, фотон может превратиться в пару электрон-позитрон, а такая пара может, в свою очередь, аннигилировать, превращаясь в один или несколько фотонов. Совокупность таких расчетов и составляла квантовую электродинамику.

Как мы уже упоминали, соседние электроны могут обмениваться виртуальными фотонами, перебрасываясь ими, как мячиками (еще раз повторим, по принципу неопределенностей, они могут на определенное время терять или приобретать добавочную энергию, т. е.

массу). Сила реакции, испытываемая каждым электроном, когда он испускает или поглощает фотон, проявляется как электромагнитное отталкивание электронов друг от друга. Именно такие виртуальные излучения-приобретения недостатка-избытка массы и создают шубу, одеяние частицы.

Если попробовать подсчитывать энергию этих виртуальных фотонов по принципу неопределенности Гейзенберга, то получается некоторая несообразность: виртуальные фотоны могут иметь любую энергию, только при этом сокращается длительность их «существования». Следовательно, по мере сближения взаимодействующих электронов все более поднимается верхняя граница энергии виртуальных фотонов, которыми они обмениваются, правда, из-за кулоновского отталкивания они не могут подойти друг к другу вплотную.

Но что произойдет при этом с самовоздействием электрона, т. е. с учетом виртуальных фотонов, которые он сам испускает и сам же поглощает? В этом случае промежуток между актами испускания и поглощения, время существования виртуального фотона, может приближаться к нулю и, следовательно, допустимая энергия становится неограниченной, может стремиться к бесконечности. Получается, что непрерывное испускание и самопоглощение таких виртуальных фотонов должно будет придать электрону бесконечную массу!

Эти виртуальные фотоны могут также превращаться в виртуальные пары электрон-позитрон, которые могут расходиться на некоторое расстояние, и тогда нужно будет признать, что по мере приближения к электрону можно зафиксировать любой, даже, возможно, и бесконечный электрический заряд!

Выводы, безусловно, абсурдные: величины массы и заряда электронов хорошо известны и конечны. Тем не менее, теорией, приводящей к таким несуразицам, продолжали пользоваться, поскольку ее недостатки должны проявляться, казалось бы, только в экспериментах с большими энергиями, которым соответствуют малые расстояния, а для большинства измерений, осуществляемых в то время, теория Дирака давала верные предсказания. Но эксперименты Лэмба и Куша ясно показали, что какие-то недостатки КЭД проявляются уже в наблюдаемых интервалах энергии — положение стало нетерпимым даже при сравнительно малых энергиях.

Г. Бете первым рассчитал сдвиг Лэмба при произвольно ограниченных энергиях виртуальных фотонов, испускаемых электроном, т. е. фактически отбрасывая возникающие бесконечности, но это не сулило полного объяснения новых эффектов: нужны были более оригинальные идеи.

С. Томонага<sup>1</sup> и Дж. Швингер<sup>2</sup> не стали отбрасывать эти бесконечности, а решили (независимо друг от друга) использовать их для пересмотра структуры собственного поля частиц. Фактически они использовали именно понятие виртуального облака, или «шубы», окружающей любую частицу, о которой мы говорили выше. Они показали, что измеряемая масса электрона должна состоять из двух частей: истинной, или собственной, массы изолированного от всех взаимодействий (голоого) электрона и массы, связанной с «шубой», облаком виртуальных фотонов (и других виртуальных частиц), которые электрон непрерывно испускает и перепоглощает. Если это облако виртуальных фотонов обладает бесконечной энергией, то отсюда следует, что собственная масса (или энергия) «голоого» электрона тоже должна быть бесконечной, но отрицательной. У наблюдаемого электрона разделить эти две массы невозможно, а они, складываясь, почти полностью друг друга компенсируют — остается только небольшая измеряемая масса. Затем при аналогичном подходе к собственному заряду электрона Томонага и Швингер постулировали бесконечный отрицательный собственный заряд, который притягивает облако положительно заряженных виртуальных частиц. Бесконечно большой положительный заряд виртуального облака экранирует почти полностью, за исключением небольшого остатка, отрицательный собственный заряд.

Такая изощренная математическая процедура, изобретенная Томонага и Швингером для исключения бесконечных масс и зарядов, называется перенормировкой.

Третий создатель КЭД — Ричард Филиппс Фейнман (1918–1988). Он и Джулиан Швингер — ровесники, оба родились в Нью-Йорке в схожих семьях эмигрантов из бывшей Российской империи, бедных и религиозных. Оба рано оставили старые традиции и оба были очень музыкальны, но если Швингер музицировал на рояле в одиночку и предпочитал Баха и Брамса, то Фейнман очень гордился своим искусством джазового барабанщика (в день получения им Нобелевской премии Луис Армстронг поздравил мир с тем, что наконец первый джазмэн ее удостоился). Швингер был застенчив и оттого всегда

<sup>1</sup> Синъитиро Томонага (1906–1979) — японский теоретик, работал до 1939 г. в Германии с В. Гейзенбергом над проблемами КЭД и ядерной физики. Изолированный в послевоенной Японии от западных коллег, он узнал о результатах Лэмба из научно-популярной колонки в еженедельном американском журнале.

<sup>2</sup> Джулиан С. Швингер (1918–1994) в 14 лет поступил в университет, в 18 его закончил, опубликовав уже несколько научных статей. Помимо создания КЭД, развил общие методы квантовой теории поля и теории многих частиц, выдвинул гипотезу о двух типах нейтрино, предложил новый подход к теории элементарных частиц, развил теорию волноводов и устройств СВЧ техники. Виртуозно владел математической техникой.



но идя принципиально разными путями: Швингер шел напролом, преодолевая любые сложности и оставляя после себя широкую дорогу для продолжателей, Фейнман с таким же успехом придумывал оригинальные и фантастически красивые трюки. (Оригинальность его мышления хорошо видна в его знаменитом курсе лекций по физике.)

Метод перенормировки в КЭД оказался спасительной концепцией, хотя многие физики считали, а некоторые (уже явное меньшинство) и сейчас продолжают считать, что подобное лекарство хуже самой болезни: их аргументы сводятся к тому, что перенормировка, устраняющая некоторые бесконечности, сама вводит другие, включая массы, которые не только бесконечны, но еще и отрицательны. Однако Тоноага и Швингер всегда подчеркивали, что в их теории КЭД наблюдаемые величины масс конечны и положительны — электрон нельзя отделить от его облака виртуальных частиц, поэтому бесконечные массу и заряд «голой» частицы наблюдать невозможно.

КЭД с учетом процедур перенормировки оказалась самой точной из всех физических теорий: такие характеристики электрона, как магнитный момент можно измерить с точностью до нескольких миллиардных (до 8–9-го знака после запятой) и значения, предсказанные теорией, точно согласуются с экспериментом. (В последние годы появились публикации о том, что аналогичные значения для мюонов несколько отличаются от расчетных, но нужны еще дополнительные эксперименты.)

Необходимо подчеркнуть, что КЭД, вместе с ее методом перенормировки, послужила моделью для теорий, описывающих иные силы природы.

серьезен, Фейнман острил напрапо- лую и охотно вовлекался во всевоз- можные розыгрыши типа вскрытия сверхсекретных сейфов или устрой- ства маленьких взрывов в лаборато- риях. Их конгениальность проявля- лась и в том, что они часто обраща- лись к одним и тем же проблемам, как бы соперничая друг с другом,

Фейнман рано начал разрабаты- вать радикально новые теоретиче- ские подходы к решению проблем КЭД. В первых своих исследовани- ях он назвал допущение о самодей- ствии электрона «глупым» и предло- жил считать, что электроны испы- тывают действие только со стороны других электронов, причем с запаз- дыванием из-за конечной скорости фотонов между ними. Такой подход как будто исключал само понятие поля, т. е. бесконечности, доставляв- шее столько хлопот. Хотя на этом пути не удалось достичь удовлетво- рительных результатов, Фейнман со- хранил на всю жизнь нетрадицион- ность мышления.

В годы аспирантуры у Дж. А. Уи- лера<sup>3</sup> он продолжал предлагать все новые и новые подходы к пробле- мам КЭД, а в их совместной, но

<sup>3</sup> Джон Арчибалд Уилер (1911–2008) разработал вместе с Н. Бором теорию деления ядер, независимо от Гейзенберга предложил теорию матрицы рассеяния, внес большой вклад в релятивистскую космологию, считается генератором новых идей в этой области.

не законченной теории даже содержалось предположение, что электрон может получать кванты, движущиеся не только нормальным образом, но и против хода времени, из будущего. Как по этому поводу выразился Фейнман: «К тому времени я уже в достаточной мере стал физиком, чтобы не говорить: „О нет, это невозможно!“»

Одним из решающих шагов в построении его варианта КЭД, как он рассказал в Нобелевской лекции, был ночной звонок Уилера: «Знаете, Дик, — произнес Уилер, — в мире существует только один электрон. Когда он движется вверх по времени — это электрон, а когда из будущего к нам, — то это позитрон. Так как он совершает множество движений, то мы, рассекая их плоскостью данного мгновения, видим много электронов и позитронов!»

Такая образность, картинность мышления была свойственна и самому Фейнману. Поэтому в его картине взаимодействия в КЭД рассматривались с новой точки зрения — как траектории в пространстве-времени. Он описывает их как распространение частицы из начальной точки траектории в конечную; а возможные взаимодействия «по дороге» выражаются через их относительные вероятности (точнее, амплитуды этих вероятностей). Эти вероятности суммируются в ряды (иногда очень запутанные), для вычисления которых были разработаны правила и графическая техника (графики или диаграммы Фейнмана).

Графики строятся таким образом<sup>5</sup>: рисуется, скажем, сплошная линия электрона, идущая слева направо, к ней слева подходят волнистые или пунктирные линии поглощаемых фотонов, а направо отходят линии испускаемых фотонов. Теперь каждой линии со свободным концом приписывается волновая функция частицы, точке их соприкосновения — оператор взаимодействия, отрезку между этими точками — функция-пропагатор (от латинского «пропагацио» — распространение), и таким образом выписывается матричный элемент процесса. После этого нужно провести некоторые стандартизован-

Подобные эффекты вызывают так называемые радиационные поправки к величинам основных процессов и учитываются в высших порядках теории: Фейнман и Швингер создали алгоритмы, т. е. набор строгих правил их расчета. Возможность пренебрежения ими (или частью таких поправок) обусловлена тем, что каждая добавочная линия в диаграммах Фейнмана вносит квадрат величины электрического заряда, точнее, величину, которая называется постоянной тонкой структуры:  $\alpha = e^2/c$ , а она в КЭД составляет около  $1/137$ . Вот эта малость и позволяет ограничиваться в КЭД диаграммами низших порядков<sup>4</sup>.

<sup>5</sup> См., например: Фейнман Р. КЭД — странная теория света и вещества М.: Наука, 1988. Отметим еще две любопытные книги, написанные со слов Фейнмана: «Какое тебе дело до того, что думают другие?» и «Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман?», обе есть в русском переводе.

ные математические действия (они могут, конечно, быть более или менее сложными), и вероятность процесса рассчитана.

А для качественного анализа иногда бывает достаточно просто нарисовать и сравнить графики различных процессов — сейчас очень трудно понять, как физики могли существовать и работать до изобретения этих графиков! (Внешне простые, но очень наглядные, графики теперь широко используются не только в КЭД, но и во многих других областях физики.) Фейнману на их основе удалось объяснить «лэмбовский сдвиг», магнитный момент электрона и другие свойства частиц.

В КЭД, в основном в работах Швингера и Фейнмана, становится понятной и проблема вакуума. В классической физике вакуум рассматривается как пустота (точный перевод с латыни), но в квантовой теории это уже не так: в любой точке в любой момент времени, согласно принципу неопределенности, могут возникнуть вакуумные флуктуации (от латинского «флуктуацио» — колыхания, колебания) — родиться пары электрон-позитрон, нуклон-антинуклон и т. п., необходимо лишь, чтобы длительность их виртуального существования не превышала величины постоянной Планка, деленной на их полную энергию.

Но за это время, сколь бы коротким оно ни было, они могут провзаимодействовать, скажем, с электроном: виртуальный позитрон к нему притянется, электрон — оттолкнется, т. е. вакуум поляризуется, а следовательно, изменится взаимодействие нашего вполне реального электрона с другими частицами. Более того, притянувшийся позитрон может аннигилировать с первоначальным электроном, возникнет гамма-квант, который будет поглощен электроном той пары, но уже находящимся на некотором расстоянии от первоначального, и тот электрон из виртуального превратится в реальный — получится, что электрон как бы скакнул, кстати, со скоростью света, на некоторое расстояние (такой эффект, математически ранее известный, называется «дрожанием Шредингера»).

Квантовая электродинамика, развитая Фейнманом, Швингером и Томонагой, является наиболее точной из известных ныне физических теорий. Правильность ее подтверждена экспериментально в широком

---

<sup>5</sup> Наглядность и физическая ясность диаграмм Фейнмана позволила сразу же попытаться описать на их языке и другие типы взаимодействий, например в теории сильной связи — при взаимодействиях нуклонов и мезонов. Однако, константа взаимодействия здесь иная:  $\alpha_l = g^2/c \sim 14$ , т. е. отнюдь не меньше единицы. Поэтому каждая следующая диаграмма, в принципе, может быть важнее предыдущей. Многолетние усилия по приспособлению такой теории к проблемам сильных взаимодействий оказались, вообще говоря, тщетными, хотя отдельные детали взаимодействия они проясняли.

диапазоне масштабов — от субатомных до астрономических. Поэтому Фейнману, Швингеру и Томонаге была присуждена Нобелевская премия по физике 1965 г. «за фундаментальные работы по квантовой электродинамике, имевшие глубокие последствия для физики элементарных частиц»<sup>6</sup>. В речи на церемонии вручения премии Ивар Вальер из Шведской королевской академии наук отметил, что лауреаты привнесли новые идеи и методы в старую теорию и создали новую, занимающую ныне центральное положение в физике. Она не только объясняет прежние расхождения между теорией и экспериментом, но и позволяет глубже понять поведение мю-мезона и других частиц в ядерной физике, проблемы твердого тела и статистической механики.

КЭД продолжает развиваться как в направлении уточнения общей теории, так и в многочисленных приложениях к другим областям физики.

#### 4. Электрослабое взаимодействие: промежуточные мезоны

Слабое взаимодействие, которое обуславливает распад частиц, гораздо слабее электромагнитного, но много сильнее гравитационного взаимодействия между частицами. Если сравнивать между собой скорости процессов при одинаковой характерной энергии частиц в 1 ГэВ (миллиард электронвольт), то электромагнитные процессы протекают в тысячу раз медленнее сильных, а слабые — примерно в сто миллиардов раз медленнее электромагнитных. Если сильное взаимодействие между частицами происходит на расстояниях порядка размеров ядра или несколько больших, то слабое взаимодействие заметно лишь на много меньших расстояниях.

И тем не менее без слабого взаимодействия невозможны термоядерные процессы в недрах звезд, радиоактивные распады и т. д. А важнейшая его особенность в том, что вероятность слабых процессов быстро нарастает с ростом энергии — на расстояниях в сто миллионов раз меньших размеров ядра его интенсивность уже сравнивается с интенсивностью электромагнитных процессов, а дальше начинает их превосходить.

Первую теорию бета-распада, как мы говорили, построил Э. Ферми еще в 1934 г. По этой теории нейтрон превращался одновременно в протон, электрон и антинейтрино, причем имелось пять вариантов

<sup>6</sup> Очень велик вклад в нее и Фримена Джона Дайсона (р. 1923), который смог прояснить связи между их подходами, доказать, что в КЭД ничего, кроме заряда и массы, перенормировать не нужно (Нобелевская премия Дайсону не досталась, так как по статуту ее могут получить лишь три человека). Он известен также своими работами в теории поля. Дайсон глубоко религиозен и написал большой трактат о связи науки и религии.



этой теории, и долго казалось, что разные эксперименты говорят, для разных случаев, в пользу разных теорий — поэтому очень долго проводились расчеты всех вариантов и все они проверялись. После открытия несохранения четности число возможных вариантов, по крайней мере, удвоилось, и теория стала казаться необозримой.

Только к 1957 г. М. Гелл-Манн и Р. Фейнман, а также Р. Маршак (1916—1996) и Э. Сударшан (р. 1931) независимо установили, уже с учетом несохранения четности, правильный вариант этой четырехфермионной теории слабого взаимодействия — оказалось, что оно, как и КЭД, носит векторный характер. Но на этом сходство с КЭД кончалось. Графики Фейнмана для таких процессов выглядели как-то неэстетично: в КЭД все ясно — заряженная частица испускает или поглощает фотон, т. е. все взаимодействия сводятся к тому, что выражение для тока этой частицы умножается на потенциал электрического поля. А тут, видите ли, в одной точке встречаются сразу четыре линии!

Поэтому, по аналогии, могла возникнуть такая мысль: попробуем ввести новый тип тока, который может изменять заряд частиц, скажем, барионный ток, превращающий в момент взаимодействия протон в нейтрон, но испускающий при этом не фотон с нулевым зарядом, а какую-то заряженную частицу (без изменения барионного или лептонного заряда). Если при этом ввести аналогичный лептонный ток, превращающий при поглощении этой промежуточной частицы электрон в нейтрино или позитрон в антинейтрино (можно, конечно, и наоборот), то удалось бы построить график Фейнмана для бета-распада таким же образом, как в КЭД. Но только при этом, вместо обмена фотоном, шел бы обмен между двумя токами этим самым промежуточным мезоном (его спин должен обязательно быть целым, т. е. он должен быть бозоном).

В 1960 г. Шелдон Глэшоу попытался объединить именно на такой основе электромагнетизм и слабое взаимодействие. Его подход предсказывал существование четырех частиц — переносчиков взаимодействий. Одна из них, очевидно, должна быть фотоном, переносящим электромагнитное взаимодействие. Остальные три частицы, которые он обозначил как  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$ , должны быть безмассовыми переносчиками слабого взаимодействия.

Теория эта страдала явными недостатками. Во-первых, частица, имеющая электрический заряд, не может не иметь массу — она ведь может виртуально испускать-поглощать фотоны, а следовательно, должна обладать какой-то инерцией. Во-вторых, радиус электромагнитных взаимодействий бесконечен, и связано это с тем, что масса фотона равна нулю. А вот у слабых взаимодействий радиус действия

очень мал, поэтому масса промежуточных мезонов должна быть очень велика — тогда, согласно принципу неопределенностей, они возникают лишь на короткое время, и в следующем варианте теории Глэшоу постулировал большие массы бозонов  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$ , но и при этом из теории следовало, что некоторые слабые взаимодействия должны осуществляться и с бесконечной силой.

Множество исследований в этом направлении оставалось безрезультатным, пока в 1967 г. к этой работе не подключился Стивен Вайнберг<sup>7</sup>, одноклассник и друг Глэшоу (они оба ученики Швингера), сумевший преодолеть громадные математические трудности. Прямое постулирование массы частиц невозможно — в такой теории не удастся избежать бесконечностей вроде тех, что были ранее преодолены в КЭД. И Вейнберг предлагает использовать в этой теории механизм спонтанного нарушения симметрии: так называемый механизм Хиггса (о нем чуть ниже).

Решение, которое построил Вейнберг, показывает, через механизм Хиггса, что фотон по-прежнему остается безмассовым, а остальные три частицы приобретают массу. (Такую же теорию независимо от них и с аналогичной процедурой перенормировки построил гораздо более опытный А. Салам.) В этой теории электромагнитные и слабые взаимодействия уравниваются по силе при крайне высоких энергиях. Однако, массы  $W$ - и  $Z$ -бозонов слабо влияют на процесс, поскольку обмен ими в пределе высоких энергий в точности таков же, как и обмен фотонами, а силы слабого взаимодействия столь же сильны, как и электромагнитные. Но при более низких энергиях частицы  $W$  и  $Z$  образуются редко, так что слабые взаимодействия проявляются на меньших расстояниях, чем электромагнитные. (Отметим, что температуры и энергии земной физики, очевидно, таковы, что разница между этими двумя силами проявляется больше, чем их сходство.)

Важнейшее отличие этой теории от всех предшествующих состояло в том, что один из трех промежуточных бозонов должен быть нейтральным, т. е. в ней есть, помимо заряженных, и слабые нейтральные токи. Поэтому возможно, например, за счет этих токов рассеяние нейтрино на электроне без изменения типа частиц.



<sup>7</sup> Необходимо обратить внимание на его блестящую книгу: Вайнберг С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. М.: Энергоиздат, 1981.

Узнав об этой теории, группа из 80 физиков ЦЕРНа старательно пересмотрела архив фотографий, полученных на большой пузырьковой камере «Гаргамель» при облучении потоком мюонов. Прodelав титаническую работу пересмотра и обработки примерно 1,4 млн изображений, они нашли три случая рассеяния мюонных нейтрино на электронах — эти электроны как бы получали сильный, ничем иным не вызванный толчок и оставляли свой след на снимке. Это количество соответствовало числу случаев, ожидаемых на основе электрослабой теории.

Три снимка доказали справедливость долгожданной электрослабой теории, объединившей два типа взаимодействий, и за ее построение Шелдон Л. Глэшоу (р. 1932), Стивен Вейнберг (р. 1933) и Абдус Салам (1926–1996) были удостоены Нобелевской премии по физике 1979 г. Их достижение сравнивали с успехом Максвелла, объединившего электромагнетизм и оптику.

А в 1983 г. группа Карло Руббиа обнаружила в экспериментах с коллайдером на аппаратуре, задуманной и созданной Симоном дер Мером (мы писали о ней в главе об аппаратуре), все промежуточные мезоны:  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$ . Массы  $W$ - и  $Z$ -мезонов оказались, соответственно, примерно в 82 и 92 раза больше, масс нуклонов. Оба руководителя эксперимента получили Нобелевскую премию 1984 г.

Однако сложности с пониманием природы электрослабого взаимодействия на этом не кончились: Глэшоу, Вейнберг и Салам не смогли довести теорию до той ясности, которая была достигнута в КЭД. В частности, они не сумели провести полностью перенормировку массы, т. е. в их расчетах возникали какие-то неопределенности, на которые приходилось закрывать глаза. А это могло означать, что они не полностью учитывали возможные взаимодействия или неправильно их трактовали.

Для преодоления этих трудностей потребовалось еще очень много усилий: нужно было придумать какие-то специфические приемы расчетов. Так, оказалось, что в этих взаимодействиях нужно учитывать еще и модель кварков: только на этом пути удалось точно вычислить массы и времена жизни промежуточных бозонов и шестого кварка (у него, как мы выше писали, оказалось совсем уж неожиданно большая масса). Эту работу смогли выполнить Мартинус Й. Г. Вельтман (р. 1931) и его ученик Герард т-Хоофт (р. 1946), удостоенные «за прояснение квантовой структуры электрослабых взаимодействий» Нобелевской премии 1999 г.

## 5. Спонтанное нарушение симметрии. Механизм Хиггса

Рассмотрим такой простой пример: пусть прямая стальная спица установлена строго вертикально и на нее сверху чем-то давят. С началом давления она будет сжиматься, но при какой-то пороговой величине

давления вдруг, возможно без добавочных внешних воздействий, изогнется — такое положение энергетически выгоднее. Итак, вначале наша система была полностью симметрична относительно вращений, но вдруг эта симметрия спонтанно пропала, причем направление, в котором изогнулась спица, — совершенно произвольно. Именно такой процесс и называется спонтанным нарушением симметрии.

Перейдем теперь к другому примеру. Имеется намагниченный ферромагнетик, он не симметричен, так как в нем выделена ось намагничивания. Однако, если нагреть его выше так называемой точки Кюри, когда исчезают ферромагнитные свойства, то спины всех атомов разбредутся по разным сторонам, и он станет в этом плане симметричным. Но если начать его охлаждать, то при переходе через точку Кюри у него появится, возможно, слабая намагниченность в каком-то направлении — и это тоже пример спонтанного нарушения симметрии.

Таким образом, в разных системах симметрия может появляться или исчезать при разных изменениях — увеличении или уменьшении внешнего воздействия. Для элементарных частиц, как мы говорили, характерно, что с ростом энергии силы разных взаимодействий, в том числе слабого и сильного, сближаются. Следовательно, при каких-то очень больших энергиях они одинаковы: существует симметрия по всем взаимодействиям, а вот с понижением энергии эта симметрия пропадает — частицы разделяются по типам.

Действительно, рассмотрим энергию частиц, скажем, в 1000 ГэВ, когда вся энергия, соответствующая массе протона или нейтрона, несколько меньше 1 ГэВ. Ясно, что при таких энергиях различия в массе между нуклоном и безмассовым нейтрино пренебрежимо малы — их можно рассматривать на единой основе.

За счет чего же у некоторых частиц появляется масса? По общей идеологии квантовой теории поля, масса как мера инерции соответствует возможности испускать и поглощать виртуальные частицы, т. е. создавать вокруг себя виртуальное облако, «шубу». Проще всего, конечно, испускать и перепоглощать частицу с нулевым спином и без зарядов — при этом она сама по себе может быть полностью симметрична (напомним, что сила, действовавшая на спицу в первом примере, была симметрична относительно вращений, как и температурное поле второго примера).

Понятие спонтанного нарушения симметрии возникло в теории фазовых переходов Л. Д. Ландау, а в теорию частиц оно было первоначально перенесено в 1961 г. Дж. Голдстоуном, но он показал, что при таком изменении симметрии должно происходить излучение или поглощение скалярной частицы нулевой массы. А в 1964 г. Питер Хиггс

доказал, что достаточно допустить существование одного скалярного поля, взаимодействие с которым разрешит все трудности с приобретением массы при снижении энергии частиц.

Эта частица была названа бозоном Хиггса, масса его должна быть порядка 100 ГэВ или больше, но до сих пор он не найден (возможно и существование семейства таких частиц). Основная надежда на его долгожданное открытие, крайне необходимое физике частиц, возлагается сейчас на Большой адронный коллайдер в Женеве — это, фактически, основная его задача.

## 6. Калибровочные поля: квантовая хромодинамика

Мы уже не раз говорили о замечательной теореме Эмми Нётер<sup>8</sup>, согласно которой любое преобразование физической системы, когда ее основные положения не меняются, ведет к закону сохранения какой-то величины. Первоначально эта теорема применялась к более строгому выводу известных уже законов сохранения — энергии, импульса, момента и к доказательству того, что никаких добавочных законов сохранения, связанных с перемещениями системы как целого, не должно быть.

Но можно рассмотреть еще такое преобразование: умножим функции, описывающие частицы, на постоянный множитель — изменим их калибр. Тогда окажется: для того, чтобы функции, отвечающие за полную энергию в теории Максвелла, не менялись, нужно вводить поле, кванты которого имеют нулевую массу и спин 1. Это, очевидно, и есть электромагнитное поле, так что входящую в это выражение постоянную можно отождествить с электрическим зарядом электрона.

Этот результат был известен очень давно, называется он калибровочной (или градиентной) инвариантностью уравнений Максвелла. Его воспринимали как некое чисто формальное свойство электродинамики. А сама инвариантность, согласно теореме Нётер, означала закон сохранения электрического заряда, но, поскольку никаких иных зарядов тогда не было, все эти построения принимались как чисто академические (есть такое жаргонное выражение: «наводить гигиену на физику», т. е. проводить более строгие доказательства и без того ясных положений).

Но в 1954 г. Янг и Миллс обобщили эту процедуру: если ранее функции, описывающие частицы, умножали на некую постоянную, то они решили посмотреть, что произойдет, если потребовать сохранения инвариантности при умножении на функцию, меняющуюся

<sup>8</sup> См.: Перельман М. Е. От Аристотеля до Николы Теслы. Раздел II. Глава 5.

от точки к точке (прежнюю калибровочную инвариантность называли глобальной, т. е. единой для всего мира, а эту, новую — локальной, зависящей от рассматриваемой точки).

Первые лет десять эта работа не привлекала к себе особого внимания. Но потом теоретики спохватились: если поля, вводимые глобально, должны быть дальнodelствующими (именно таково электромагнитное поле), то новые поля, вводимые локально, оказались короткodelствующими. Кроме того, процедура Янга-Миллса вводила все поля и соответствующие им законы сохранения на некоей единой основе — для этого нужно было рассмотреть инвариантности уже не в обычном пространстве-времени, а в том пространстве внутренних характеристик, которое являлось обобщением изотопического пространства Гейзенберга и пространства Гелл-Манна—Незмана.

При этом оказалось, что кваркам должны соответствовать восемь полей взаимодействия, несколько схожих с электромагнитным: кванты этих полей имеют спин 1 и не имеют массы покоя, их называли глюонами (от английского *glue* — клей). Все восемь глюонов, как и фотоны, не могут переносить электрические заряды, не имеют они и барионных или лептонных зарядов, т. е. они не могут при испускании или поглощении менять аромат кварков. Но каждый глюон несет зато две цветовые характеристики и поэтому при поглощении или испускании меняет цвет кварка. По той же причине глюоны не могут оказаться свободными — для этого они должны были бы стать бесцветными. Но отсюда следует возможность вылета из частицы бесцветной группы глюонов, так называемого глюбола, порождающего струи адронов — в отличие от фотонов глюоны могут достаточно легко взаимодействовать друг с другом, порождать кварк-антикварковые пары, а затем и адроны, считается даже, что на долю глюонов приходится около половины всей энергии (массы) барионов.

Самое удивительное свойство кварков и глюонов — это явление асимптотической свободы: если сила взаимодействия электрических зарядов убывает с расстоянием (вспомните закон Кулона), то у этих частиц — возрастает (как у растягиваемой пружины), и поэтому на близких расстояниях они могут рассматриваться как свободные! Но отсюда следует, что при рассеянии налетающих частиц с высокой энергией, скажем, на протоне эти частицы рассеиваются как бы на отдельных центрах — кварках (возможно, с участием глюонов).

Таким образом подтверждается модель партонов, выдвинутая Фейнманом, а любой барион можно при таких энергиях рассматривать как «мешок с кварками». Парадоксальным выглядит и такое положение: чем выше энергия, тем проще рассчитывать процессы с участием

этих частиц — в КЭД, как и в классической физике, прямо наоборот: чем выше энергия, тем большее количество процессов становится возможным, и тем труднее предсказывать результат.

Тут сразу же возникает вопрос: а что если выбить из нуклона такой партон, каким он будет? Такие опыты, процессы глубоко неупругого рассеяния, конечно, ставились: при этом из нуклона вылетают две противоположно направленные адронные струи, два глюбола, но состоят они из «целых» частиц и отдельных кварков или глюонов не содержат.

Квантовая хромодинамика (КХД) еще очень далека от своего завершения, поэтому при рассмотрении процессов с сильными взаимодействиями часто приходится строить различные специфические модели, развивать частные теории. Однако за все годы развития фи-



*Верхний ряд:* первая марка слева посвящена объединению слабых и электромагнитных взаимодействий (Глэшоу, Вейнберг, Салам), вторая — открытию промежуточных мезонов (Руббин), третья — приобретению частицами массы за счет гипотетического механизма Хиггса. *В нижнем ряду:* первая марка слева — выявление трех «поколений» основных частиц, лептонов и кварков, вторая — предсказание кварков Гелл-Манном и Цвейгом, последняя марка посвящена теории суперсимметрии, гипотетическому объединению всех типов взаимодействий — сильных, электромагнитных, слабых и гравитационных — при очень высоких энергиях. Потверждение этой теории будет означать исполнение мечты Эйнштейна о единой теории поля

зики сильных взаимодействий (их нужно отсчитывать, по крайней мере, от появления теории ядерных сил Юкавы в 1935 г.) — это первая и самая стройная теория таких взаимодействий.

## 7. Предвидение Эйнштейна

Последние десятилетия своей жизни Эйнштейн посвятил попыткам создания единой теории поля: объединению электромагнетизма и гравитации. В речи, посвященной Планку, он говорил: «Высшим долгом физиков является поиск тех общих элементарных законов, из которых путем дедукции можно получить картину мира. К этим законам ведет не логический путь, а только основанная на опыте интуиция... Душевное состояние, способствующее такому труду, подобно чувству верующего или влюбленного».

В течение многих лет над этими попытками слегка посмеивались — причуда гения, чисто философское построение, такое объединение в принципе невозможно! Сейчас становится яснее, что Эйнштейн, по-видимому, просто слишком опережал свое время: не были еще известны все виды взаимодействия, а ведущая его идея — идея фундаментального единства сил природы — вполне работоспособна!

В последние десятилетия фундаментальная физика развивается в направлении, предвиденном Эйнштейном — это теории великого объединения, суперсимметрии, струн. Рассмотрим, очень кратко, идеи, лежащие в их основе.

Начать следует с того, что три типа взаимодействия (слабое, электромагнитное и сильное) строятся по одной модели: основные фермионы — это кварки и лептоны — взаимодействуют через обмен квантами калибровочных полей — глюонами и промежуточными бозонами (фотон и три векторных мезона). Кроме того, при очень больших энергиях слабое и электромагнитное взаимодействия объединяются в электрослабое взаимодействие.

Теперь естественно попытаться присоединить к этим двум и сильное взаимодействие, т. е. попробовать выяснить, не могут ли все эти три столь различных вида, совпадать при каких-то условиях. Поскольку интенсивность кварк-глюонных взаимодействий падает с расстоянием, а вероятности электрослабых, напротив, растут, то такую область можно найти — она оказывается на уровне энергий  $10^{14}$  ГэВ, что





очень далеко выходит за все мыслимые возможности аппаратуры и соответствует расстояниям в  $10^{-28}$  см (напомним, что размер атомного ядра — порядка  $10^{-12}$  см). Однако, во-первых, некоторые ее следствия могут проявиться при гораздо более низких энергиях, во-вторых, такая система может прояснить ряд принципиальных проблем уже существующих, вполне земных теорий (в частности, дать возможность, наконец, теоретически вычислить величину заряда электрона — сейчас она берется из эксперимента), а в-третьих, она необходима для решения проблем космологии (об этом ниже).

Такие модели (их несколько) рассматривают все частицы сгруппированными в поколения фермионов — сейчас известны три поколения, каждое включает два кварка и два лептона, и каждому соответствует такое же семейство античастиц:

$$(u, d, e^-, \nu_e), \quad (c, s, \mu^-, \nu_\mu), \quad (t, b, \tau^-, \nu_\tau),$$

причем каждый кварк существует в трех цветовых модификациях.

При этом в ряде моделей уже предполагается нарушение закона сохранения барионного числа, сохраняется лишь разность барионного и лептонного чисел, а также электрический заряд. Поэтому теория допускает возможность распада протона на позитрон и пи-ноль-мезон и т. п. (первым такую гипотезу с учетом несохранения СР-инвариантности выдвинул еще в 1967 г. А. Д. Сахаров). Однако время жизни протона при этом оказывается не менее  $10^{30}$  лет, что на много порядков превосходит время существования Вселенной и означает, что такие случаи должны быть очень редки, хотя и могут быть, в принципе, обнаружены (несколько сообщений о наблюдении распада протона были затем опровергнуты). Того же порядка — рассчитанная вероятность превращения нейтрона в антинейтрон. Более перспективными выглядят сравнение распадов некоторых тяжелых мезонов и их античастиц и поиски превращения одних в другие, когда нарушается закон сохранения барионного заряда на уровне кварков высших ароматов — такие поиски активно продолжаются, они представляются доступными на современных ускорителях, хотя и требуют многих усилий.

Дальнейшее обобщение теории — это теория супергравитации, включающая в себя уже все существующие поля и взаимодействия, именно она является наиболее полным воплощением идеи Эйнштейна (заметим, что вывод теории гравитации из калибровочных полей Янга-Миллса предложил еще в 1956 г. Р. Утияма). Дело в том, что если при обычных энергиях электрическое отталкивание двух электронов в  $10^{42}$  раз сильнее их гравитационного притяжения, то с ростом энергии гравитационное притяжение быстро нарастает, как квадрат энергии, и при фантастической энергии в  $10^{19}$  ГэВ, т. е. на расстояниях

порядка  $10^{-33}$  см, гравитационная энергия сравнивается с кинетической энергией электронов: гравитационное взаимодействие становится сильным.

При таких энергиях масса движения электрона возрастает до примерно  $10^{-5}$  г, что в миллиард миллиардов раз выше его массы покоя. Эту величину называют массой Планка: она близка к расчетной массе монополя Дирака и не очень, всего на несколько порядков, отличается от массы великого объединения.

Гравитационное взаимодействие должно осуществляться обменом специальными квантами — гравитонами, они, как и фотоны, должны быть безмассовыми, но в отличие от фотонов их спин должен равняться не единице, а двум. Это различие ведет к тому, что они осуществляют лишь гравитационное притяжение, отталкивания не существует. Но их поток столь слаб, что нет никаких надежд создать и зафиксировать их в земных условиях — сейчас остается лишь уповать на то, что во время какого-нибудь звездного катаклизма их мощный поток достигнет земной лаборатории с соответствующими приборами.

Одним из следующих шагов в направлении объединения является теория суперсимметрии: объединяются воедино частицы, подчиняющиеся статистикам Ферми и Бозе, т. е. с целым и полуцелым спинами. При этом каждому фермиону должен соответствовать бозон, и поэтому приходится постулировать целый ряд еще не наблюдавшихся частиц — нахождение хотя бы одной из них можно будет считать серьезной заявкой на справедливость такой теории.

Трудности, стоящие перед всеми этими теориями, громадны, эксперименты их пока не опровергают, но и не подтверждают — работа продолжается...

## 8. «Квантовая лестница»

Поскольку мы рассмотрели, как открывали новые частицы, и определяли свойства их взаимодействий, теперь можно взглянуть на эти процессы в целом и определить, где и когда физика с ними встречается. Оказывается, все, о чем мы говорили, может быть распределено по таким ступеням «квантовой лестницы»:

1. Атомная ступень, для которой характерны энергии порядка 1 эВ и размеры порядка  $10^{-8}$  см, размеры атома.
2. Ядерная ступень с энергиями порядка 1 МэВ и размерами порядка  $10^{-12}$  см.

3. Субъядерная ступень с энергиями порядка 1 ГэВ и размерами порядка  $10^{-13} - 10^{-14}$  см.
4. «Гипотетическая» ступень с энергиями более  $10^3$  ГэВ и размерами менее  $10^{-16}$  см.

Как мы видим, они резко отделены друг от друга — энергии при переходе с одной ступени на другую возрастают примерно в тысячу раз. Поэтому на каждой из ступеней можно почти полностью пренебрегать свойствами более низких уровней, считать их «замороженными». Так, например, находясь на самой верхней ступени, мы при рассмотрении многих процессов можем считать атом элементарным образованием и не вдаваться в его структуру. На второй ступени, в атомной физике, нас не интересует структура нуклонов, из которых состоит ядро — его почти во всех случаях можно считать «элементарной частицей».

Именно этот разрыв между ступенями и позволяет заниматься на каждой из них только своими делами, фактически делит физику на части. При этом важно подчеркнуть: открытие новых ступеней вовсе не означает, что на предыдущей все уже закончено и никакие крупные открытия не возможны — все, о чем мы говорим, показывает, что на верхних ступенях остается еще очень много неясного, требующего исследования.

# Космология и астрофизика

*Когда ученый говорит: «Это предел, ничего больше сделать нельзя», — он уже не ученый.*

Э. Хаббл

В этом разделе, как и ранее, при рассмотрении вопросов астрономии мы обратим внимание только на те проблемы астрофизики, которые близки к общефизическим построениям. Несомненная важность астрофизики в общефизическом плане состоит в том, что мы дошли до необходимости исследовать такие энергии и плотности частиц, которые принципиально не достижимы в лаборатории, но которые крайне важны для понимания и земных проблем. В частности, именно по этой причине придется рассмотреть некоторые вопросы эволюции звезд.

## 1. История возникновения

Первая космологическая теория, модель Птолемея, правильно описывала только систему Земля—Луна. Следующая, модель Коперника, более или менее удовлетворительно описывала уже всю Солнечную систему, а Уильям Гершель смог дать описание Галактики с учетом нашего положения в ней (при этом принималось, что вне Галактики ничего нет, только пустота). В начале XX в. выяснилось, что туманность Андромеды (а за ней и остальные) находится вне пределов Галактики и сама является галактикой, поэтому возникло представление о Метагалактике, а позже оказалось, что во Вселенной есть много групп и скоплений галактик (наша, как имя собственное, пишется с большой буквы).

Вопрос о происхождении Вселенной возник, фактически, только к середине XIX в. До того царствовали те или иные креационистские (от латинского «креацио» — сотворение) представления. И не так уж важно, принимать за длительность этого процесса шесть дней творения в соответствии с каноническим прочтением Книги Бытия или, следуя филологической трактовке Б. Спинозы, говорить о шести эрах творения. Во всех вариантах эти представления не согласуются, в первую очередь, с теорией эволюции Дарвина.

К тому же, при рассмотрении наиболее, казалось бы, приемлемой для материалистов модели бесконечной во времени и в пространстве Вселенной стали проявляться парадоксы.

Об одном из них, парадоксе тепловой смерти мира, мы уже упоминали: поскольку все процессы в мире идут с ростом энтропии, т. е. со все большим выравниваем температур, Вселенная не могла существовать вечно — все ее части давно должны были прийти к тепловому равновесию. Единственное возражение, которое мог найти Л. Больцман, состояло в том, что бывают флуктуации — неожиданные и притом локальные, происходящие только в каком-то участке Вселенной отклонения от положения равновесия, — и наш мир как раз представляет собой такую флуктуацию. Оно выглядело уж очень неубедительным.

Следующий парадокс называется гравитационным, он был сформулирован в XIX в. астрономом Хуго Зелигером и математиком Карлом Нейманом. Они показали, что если справедливы законы тяготения Ньютона и во Вселенной имеется бесконечное количество звезд, то потенциал поля тяготения в каждой ее точке должен быть бесконечным. Поэтому не ясно, от чего следует отказываться: от закона Всемирного тяготения или от бесконечной Вселенной?

А еще один, самый ранний, фотометрический парадокс был в наиболее ясной форме высказан Генрихом Вильгельмом Ольберсом в 1826 г., после того как Гершель разрешил Галактику на множество звезд: если во Вселенной бесконечное число звезд, то в любом направлении по лучу зрения имеется звезда, и поэтому все небо должно быть одинаково и притом ярко освещено. Если же пространство между звездами не пустое и там есть некий газ, поглощающий это излучение, то он должен был бы, вследствие бесконечного времени, разогреться и все равно светиться.

Но можно ли тогда предположить, что мир не бесконечен, что конечное число звезд сосредоточено в конечном объеме? Нет, нельзя, потому что такое скопление будет гравитационно-неустойчивым, т. е. все звезды будут постепенно стягиваться друг к другу или к какому-то центру масс.

Таким образом, любой вариант плох — о строении Вселенной мы ничего не знаем. И в целом, нужно сказать, этот вопрос в науке и не поднимался.

## 2. Начало релятивистской космологии: Фридман и Хаббл

Эйнштейн был хорошо осведомлен обо всех этих парадоксах, и в 1917 г. он делает первый шаг к их решению: Вселенная предполагается конечной в пространстве, а для того, чтобы добиться этого, он постулирует так называемый космологический, или лямбда-член, фактически это

некая глобальная сила или кривизна пространства, отличная от ньютоновской и ведущая к уменьшению притяжения на больших расстояниях. Как он пишет Эренфесту: «Я опять набрел в теории тяготения на нечто такое, за что меня могут упрячь в сумасшедший дом».

Эйнштейн сперва связывает с полученным так уравнением надежды на объединение тяготения с электромагнетизмом, но затем отказывается от введения лямбда-члена, охладевает к проблемам космологии и сосредотачивается на построении единой теории поля. (Поиски силы, соответствующей лямбда-члену, — ее иногда называют пятой силой — продолжают некоторыми энтузиастами и сейчас. В ее пользу говорит, как будто, замедление расхождения галактик с расстоянием.)

В 1922 г. А. А. Фридман<sup>9</sup> находит решения основного уравнения Эйнштейна для вещества, равномерно заполняющего все пространство, в котором все направления равноправны. Эти решения описывают три возможности: существование как неизменной во времени, так и расширяющейся или сжимающейся Вселенной, всего Мира в целом — так что статическая модель оказывается лишь частным случаем полной теории. Эйнштейн вначале выступает против этой теории, но очень скоро меняет свое к ней отношение.

Согласно Фридману, то или иное решение о структуре и поведении Вселенной зависит от плотности вещества в ней. Уравнения Фридмана и становятся основой релятивистской космологии (к аналогичным решениям независимо, но позже пришел профессор-иезуит аббат Жорж Леметр (1894–1966)).

Но решающими успехами и признанием космология обязана Эдвину Хабблу<sup>10</sup>. На самом большом тогда в мире 100-дюймовом (диаметр зеркала около 2,5 м) телескопе он получает фотографии спиральной туманности Андромеды и различает на ее краях отдельные звезды. К концу 1924 г. он нашел среди них двенадцать так называемых цефеид, переменных звезд, зависимость свечения и периодов которых хорошо

<sup>9</sup> Александр Александрович Фридман (1888–1925), метеоролог, математик, астрофизик и пилот-воздухоплаватель (организатор, в частности, авиационной службы российской армии в 1914–1917 гг.).

<sup>10</sup> Эдвин Пауэлл Хаббл (1889–1953) с детства был увлечен астрономией и боксом, в котором ему сулили большое будущее. Но, воспитанный в строгой пуританской семье, он решает, что необходима солидная, признанная в обществе специальность, и заканчивает юридический факультет, его даже посылают от штата на доквалификацию в Англию. Однако, возвратясь на родину, на Юг США, он так ни разу и не использует полученные знания и, протосковав несколько лет, едет в Калифорнию устраиваться — кем угодно, лишь бы ближе к астрономии! — работать младшим наблюдателем в обсерваторию. И конечно, одна из наибольших промашек Нобелевского комитета — это пропуск имени Хаббла.



известны. По их видимым величинам и наблюдавшимся периодам он рассчитывает расстояния до них и получает, по всем двенадцати в отдельности, что эти расстояния... много больше размеров Галактики! (В оценке расстояний он ошибся примерно в два раза, но это не столь существенно.)

Таким образом, Хаббл доказал, что Вселенная вовсе не ограничивается нашей Галактикой — вне ее есть и другие галактики, многие из которых он же открыл и изучил.

К этому времени В. М. Слайфер (1875—1969) проделал большую работу по изучению лучевых скоростей небесных тел (компоненты скорости по линии наблюдения). Для этого он использовал эффект Доплера: смещение спектральных линий удаляющихся объектов в красную сторону, а приближающихся объектов — в фиолетовую сторону.

Хаббл совмещает свои измерения расстояний до далеких объектов и их скорости: звездный, во всех смыслах, час наступает для него к 1929 г. Он анализирует расположение спектральных линий далеких, на пределе видимости, источников. Расстояния между линиями такие, как требует теория Бора, но сами линии не на месте, их частоты много ниже, чем следует, и притом, чем слабее, а следовательно, как можно предположить, дальше этот источник, тем больше и сдвиг.

Более того, Хаббл показывает, что между сдвигом уровней и расстоянием до источника имеется прямая пропорциональность, а ее коэффициент — постоянная величина (закон Хаббла).

Объяснений может быть два. Во-первых, можно предположить, что фотоны теряют на своем пути часть энергии, и чем этот путь больше, тем выше потери (зависимость от расстояния, правда, иная, но все можно списать на недостаток данных) — объяснение это разумно и вполне достаточно для хорошего ученого, не гения. Во-вторых, можно предположить, что все эти источники от нас удаляются, и чем они дальше, тем с большей скоростью, приближающейся для очень далеких объектов чуть ли не к скорости света, они движутся.

В пользу этого предположения говорят только теоретические расчеты, подобные тем, что провел А. А. Фридман. По одному из вариантов этой теории, вся, подчеркнем, вся Вселенная была сжата некогда в один «Папа-атом», точнее, в одну сингулярную точку. При этом поле тяготения было такой силы, что ни времени, ни пространства вообще не было — время с ростом тяготения течет все медленнее, так что там оно вообще останавливалось, а все измерения пространства как бы не могли

развернуться (поэтому бессмысленно спрашивать, что было до этого или вне этого образования — ничего не было и не могло быть). Затем этот Папа-атом взорвался (произошел Большой взрыв, его часто называют по-английски: Биг Бэнг), начали образовываться и расходиться группы галактик, сами галактики, стали образовываться составляющие их звезды, и с тех пор продолжается это расхождение, следы которого впервые обнаружил и идентифицировал Хаббл. Поэтому как размеры Вселенной, так и длительность ее существования, определяются через постоянную Хаббла, одну из самых фундаментальных величин теории Вселенной.

Современная скорость расширения, по Хабблу, составляет порядка 60–70 км/(с·Мпс) (возможная ошибка не более 10 %), т. е. наблюдаемая скорость расширения Вселенной растет на такую величину по мере роста расстояния от нас на каждый мегапарсек, по мере ухода в прошлое, когда возникли те кванты, которые сейчас нас достигли. Таким образом, становится ясно, что скорость расширения была больше на начальных этапах расширения, после Большого взрыва.

Если теперь подсчитать, когда начали расходиться все наблюдаемые объекты, то получаем момент Большого взрыва, длительность существования Вселенной, составляющую порядка 12–16 млрд лет.

Необходимо заметить, что в такой конечной, но безграничной Вселенной нельзя дойти до ее «края», как бы его ни определять, поскольку для этого необходима скорость, большая скорости света. Кроме того, каждый наблюдатель, где бы он ни находился, может считать себя центром этой Вселенной: лучи, посланные из любой точки в диаметрально противоположных направлениях, должны, в принципе, возвратиться в исходную точку за одинаковое время.

### 3. Реликтовое излучение

Радиофизики Арно Э. Пензиас (р. 1933) и Роберт В. Вильсон (р. 1936) изготавливали в 1964–1965 гг. особо чувствительные антенны для радиотелескопов. Эти телескопы могут, например, просматривать центр нашей Галактики, закрытый непрозрачным для видимого света облаком, так называемым «угольным мешком». Для всего этого антенна должна отстраиваться от всех посторонних радиошумов. В 1964 г. ученые использовали свою систему для измерения мощного источника радиосигналов в созвездии Кассиопеи, остатка сверхновой, вспыхнувшей в 1064 г. и описанной в китайских летописях.

Однако результаты измерений фона озадачили исследователей — помехи оказались настолько сильными, что их нельзя было связать с известными источниками. Аномалии сохранялись и при повторных измерениях. Пензиас и Вильсон осмотрели всю систему в поисках источника помех,



закрыв клепанные соединения и очистив антенну от птичьего помета, однако даже это не оказало существенного влияния на результаты измерений. Им никак не удавалось ликвидировать шумы, появляющиеся на длинах волн, начиная примерно с 3 и более см. Причем сколько они ни старались, оказалось невозможным вы-

яснить направление этого излучения — оно было изотропным, т. е. шло одинаково со всех направлений и не менялось со временем.

Плотность этого реликтового излучения очень велика: на один атом во Вселенной приходится примерно 100 миллионов его фотонов. Очень интересно, что, поскольку такое излучение должно быть абсолютно одинаковым со всех сторон (изотропным), оно является фактически общим фоном Вселенной, а это позволяет определить абсолютную скорость движения относительно него: измерение сдвига Доплера показало, что Солнечная система в целом движется в направлении к созвездию Льва со скоростью около 390 км/ч.

В это же время Роберт Х. Дикке (р. 1916) рассматривал космологическую модель, согласно которой Вселенная попеременно расширяется и сжимается: в настоящий момент она расширяется, но гравитационные силы могут со временем изменить расширение на сжатие, и тогда Вселенная сожмется до невероятной плотности, до точки. Дикке предположил, что излучение от крайне раскаленного, высококонденсированного раннего состояния Вселенной после примерно 18 млрд лет охлаждения можно наблюдать еще и сегодня, а П. Дж. Пиблс подсчитал, что на сегодняшний день температурный эквивалент такого реликтового (от латинского «реликтус» — оставленное) излучения равен 10 К — позднее его уточнили до значения в 3 К — и рассказал об этой теории на семинаре.

Из случайного разговора с одним из участников семинара об этой работе узнал Пензиас, а отсюда нити потянулись к теории горячей Вселенной Дж. Гамова<sup>11</sup>, развитой еще в 1946 г., но тогда ведущие радиоастрономы не допускали и мысли о возможности ее экспериментальной проверки современными приборами.

Теория Гамова предсказывала, что если Большой взрыв действительно имел место, то возникающее при этом электромагнитное излучение должно при расширении Вселенной постепенно остывать вследствие эффекта Доплера и иметь к настоящему времени во всей Вселенной так называемый тепловой (планковский) спектр, соответствующий температуре примерно в 3 градуса Кельвина, т. е. именно такой спектр, какой сейчас обнаружили. Так было найдено второе, наряду с хаббловским сдвигом, подтверждение Большого взрыва, а Вильсон и Пензиас были удостоены Нобелевской премии 1978 г.

<sup>11</sup> Знаменитую работу 1948 г. Г. Гамов написал вместе с Р. Альфером и вставил в список авторов фамилию Г. Бете, чтобы он читался как Альфер, Бете, Гамов и цитировался как первые буквы греческого алфавита: альфа-бета-гамма. (Г. Бете обижался, но шутки Гамова физикам были хорошо известны.)

## 4. О типах и эволюции звезд

Мы уже говорили о том, что, согласно Г. Бете, светимость Солнца вызвана постепенным превращением водорода в гелий, который происходит при самой низкой для звезд температуре — порядка 10 млн градусов (температура поверхности Солнца около 6 400 градусов). Равновесие звезды поддерживается тем, что силам гравитационного сжатия противостоит давление излучения, образующегося в ходе термоядерных реакций. Но на этом водородном цикле процессы нуклеосинтеза (образования ядер, в том числе тяжелых) не заканчиваются.

Когда мощность излучения уменьшается за счет выгорания водорода, звезда начинает гравитационно сжиматься, а вследствие этого ее температура растет и доходит до порога открытия каналов следующих циклов Бете — углеродного и т. д. Таким образом, звезды являются саморегулирующимися системами, и можно сказать, что звезды — это большие фабрики Вселенной. Они постепенно трансформируют первоначальное сырье (водород) в другие элементы, в том числе тяжелые, из которых в значительной степени состоит Земля и другие планеты нашей системы. Юпитер и Сатурн, во всяком случае, являются гигантскими газовыми шарами (иногда даже полагают, что они — небольшие звезды, захваченные Солнцем). Считается, что в процессе старения звезды обогащаются тяжелыми элементами, а затем, взрываясь, обогащают ими межзвездные газовые облака, из которых формируются звезды следующих поколений — их состав определяется спектроскопически — и планеты<sup>12</sup>.

Звезды можно разделить на три больших класса: нормальные звезды, белые карлики, нейтронные звезды. Рассмотрим их структуры чуть подробнее.

Как мы говорили, нормальная звезда находится в равновесии, если давление излучения в ней уравнивает силы гравитационного сжатия<sup>13</sup>. Кроме того, должна быть обеспечена возможность выхода

<sup>12</sup> Спектры облаков, в которых начинают формироваться планеты, отличаются огромным избытком инфракрасного излучения. Как показал автор, этот избыток можно сопоставить со скрытой теплотой конденсации газа в пылинки и протопланетные образования.

<sup>13</sup> Теория устойчивости нормальных звезд была разработана астрономом и физиком Карлом Шварцшильдом (1873—1916, умер после ранения на фронте). Он дал первое решение уравнений ОТО Эйнштейна и нашел решение для гравитационного (шварцшильдского) радиуса звезды, при котором напряженность гравитационного поля такая, что излучение из него не может выйти — для этого скорость должна быть больше скорости света. Такое образование называется черной дырой, ее радиус, если бы его можно было измерить, составил бы около 30 км для массы, в десять раз большей, чем масса Солнца.

наружу энергии ядерных реакций, идущих внутри звезд, в виде потоков фотонов и нейтрино. Если же выход энергии наружу недостаточно быстр, то происходит взрыв звезды, сопровождаемый расширением ее верхних оболочек, их сбрасыванием.

Все это является достаточно очевидным с позиций физики, но нужно определить, каким звездам и когда, на каком этапе развития грозит опасность подобной катастрофы.

С самого начала ясно, что чем больше масса звезды, тем вероятнее ее взрыв, а убедиться в этом позволяет просто теория размерностей — та самая, исходя из которой еще Леонардо да Винчи утверждал, что слишком большие животные существовать на Земле не могут. И действительно, если радиус звезды увеличится в два раза (принимая, что плотность вещества в ней не меняется), то объем ее, а значит, и скорость накопления энергии ядерного синтеза, возрастет в восемь раз. Но ведь поверхность звезды, через которую эта энергия должна удаляться, возрастает только в четыре раза (сравниваем зависимости объема и поверхности шара от радиуса), а она не всегда может пропустить через себя такое количество энергии. Таким образом, может наступить перегрев звезды — вот и причина ее раннего взрыва. (Еще раз подчеркнем, что рассуждения такого типа, размерные прикидки служат обязательным начальным импульсом для последующих более тонких и несравнимо более трудоемких расчетов.)

Отсюда было показано, что звезда с массой Солнца может существовать порядка 30 миллиардов лет, а звезда с массой в 50 раз большей может взорваться всего через 3 миллиона лет. Этот срок много меньше возраста Галактики (около 15 миллиардов лет), а так как яркие гигантские звезды в ней существуют, то, стало быть, их формирование продолжается и сейчас. И притом яркие синие, т. е. более горячие, звезды в нашей Галактике и во внешних галактиках всегда находятся вблизи гигантских облаков газа и пыли, откуда, видимо, и черпают материал своей массы. (Плотность тяжелых элементов в составе Земли указывает как будто на то, что это вещество дважды было переработано во взрывах сверхновых звезд.)

В белый карлик, после сброса оболочки, может обратиться звезда, масса которой составляла не более 1,4 от массы Солнца (чандрасекаровский предел<sup>14</sup>, примерно тогда же аналогичный результат получил и Л. Д. Ландау). Это очень плотные образования, их радиус порядка

---

<sup>14</sup> Субрахманьян Чандрасекар (1910—1995, Нобелевская премия 1983 г.), астрофизик и математик, племянник Ч. В. Рамана, лауреата Нобелевской премии по физике 1930 г. Вместе с ним премию получил Уильям А. Фолмер (1911—1995) за теорию происхождения всех элементов, вплоть до тяжелых, в ходе эволюции звезд.

1 % от радиуса Солнца, а плотность до тысячи кг на куб. см. Давление в них, которое противостоит силам гравитационного сжатия, обусловлено принципом Паули: вспомним, что никакие два фермиона, в частности два электрона, не могут иметь одинаковые квантовые числа, поэтому в такой звезде спектр энергий частиц должен быть велик, и их соответствующие импульсы не позволяют ей продолжать сжатие.

Если же масса звезды выше чандрасекаровского предела, то наступает гравитационный коллапс (от латинского «коллапсус» — ослабевший, одряхлевший), ее дальнейшее сжатие. Для звезд с массой не больше 2—3 масс Солнца оно заканчивается на стадии нейтронной звезды, более массивные звезды преобразуются в релятивистские черные дыры.

Нейтронную звезду можно представить себе как одно гигантское атомное ядро: большинство протонов при его образовании превращается в нейтроны, испуская при этом нейтрино и позитроны, аннигилирующие с электронами, которые были в среде (впервые предположение о возможности существования таких объектов выдвинул в 1932 г. Л. Д. Ландау). Поэтому плотность вещества в них достигает  $10^{14}$  г/см<sup>3</sup> (до млрд тонн на куб. см), температура в центре в начале процесса  $10^{11}$  градусов, а интенсивность всплеска излучения такова, что за 10—100 с она падает в сто раз. У нейтронных звезд должны существовать твердые нейтронные кора и ядро, между которыми находится жидкая — из нейтронов! — оболочка и тому подобные чудеса.

Итак, момент образования нейтронной звезды должен характеризоваться коротким всплеском излучения нейтрино. Именно такой всплеск повезло зафиксировать, как описано выше, группе Масато-си Косиба в момент образования сверхновой звезды SN1987A. Таким образом, был подтвержден один из сценариев образования сверхновых, самых ярких из наблюдаемых вспышек (в нашей Галактике их зафиксировано шесть, последняя — вспышка сверхновой Кеплера — произошла в 1604 г.).

А что должно наблюдаться на месте этой вспышки?

## 5. Открытие пульсаров

Астрономические наблюдения издавна проводили лишь в видимой области спектра, но для выявления физических процессов в небесных телах нужно следить за всем спектром электромагнитного излучения. Развитие радиолокации в годы войны 1939—1945 гг. позволило начать разработку методов и устройств радиоастрономии (необходимо отметить большую роль В. Л. Гинзбурга и И. С. Шкловского в создании ее методов). Исследования в этом диапазоне во много раз расширили понимание процессов на Солнце и в межзвездном газе и привели

О том, что при этом случилось в июле 1967 г., она спустя несколько лет вспоминала так: «Через шесть или восемь недель после начала исследований я обратила внимание на какие-то отклонения сигнала, зарегистрированного самописцем. Эти отклонения не очень походили на мерцания радиоисточника; не были они похожи и на земные радиопомехи. Кроме того, мне вспомнилось, что подобные отклонения мне однажды встречались и раньше, когда регистрировалось излучение от этого же участка неба... Импульсы были разделены интервалом в одну и одну треть секунды. Я тотчас же связалась с Тони Хьюишем, который читал в Кембридже лекцию для первокурсников. Первой реакцией его было заявить, что импульсы — дело рук человеческих. Это было естественно при данных обстоятельствах. Однако мне почему-то казалось возможным, что сигнал может идти и от какой-нибудь звезды. Все-таки Хьюиш заинтересовался происходящим и на другой день пришел на телескоп как раз в то время, когда источник входил в поле зрения антенны — и сигнал, к счастью, появился снова».

ния от космических источников, попадающих в поле зрения телескопа при суточном вращении Земли.

С одной стороны, источник, по всей очевидности, имел внеземное происхождение, поскольку сигнал появлялся всякий раз, когда телескоп

Сейчас наблюдается такое количество пульсаров, что в нашей Галактике их должно быть около миллиона. Уже несколько десятилетий ведутся наблюдения удаленных галактик, чтобы установить, сколько взрывов сверхновых происходит в среднем за столетие. А это позволит выяснить, сколько нейтронных звезд возникло с древнейших времен в нашем Млечном Пути. Оказывается, что число пульсаров значительно превосходит то количество нейтронных звезд, которое могло образоваться в результате взрывов сверхновых. Значит ли это, что пульсары могут возникать и иным путем? Быть может, некоторые пульсары образуются не в результате взрывов звезд, а в ходе менее эффективных, но более упорядоченных и мирных процессов?

к открытию целого ряда источников, не видимых в оптическом диапазоне или не проявлявших в нем каких-либо особенностей (так были, в частности, открыты целые радиогалактики).

В Кембридже в 1960-е гг. был построен радиотелескоп, состоящий из сочетания более 2000 отдельных антенных элементов, установленных на площади в два гектара. Такой телескоп, конечно, не вращается — он просматривает определенные участки неба, меняющиеся с вращением Земли. Среди прочих наблюдениями на нем и обработкой результатов под руководством Энтони Хьюиша (р. 1924) занималась аспирантка Джоселин Белл: ее темой были быстрые флуктуации радиоизлуче-

ния. С другой стороны, импульсы выглядели так, как будто их посылают люди. Быть может, это представители внеземной цивилизации? Хьюиш и Белл попросту перепутались: вдруг им сигнализируют инопланетяне, представились почему-то какие-то «зеленые человечки»!

Но если это не «азбука Морзе», а естественный процесс, излучение некоего «пульсара», то как он может происходить с таким малым периодом — около секунды с повторениями импульсов? У наиболее

«быстрых» переменных звезд период изменения блеска может составлять один час или того меньше, но ведь не секунды!

По скорости изменения интенсивности излучения можно оценить размеры той области пространства, из которой оно исходит, — до нас ведь свет от разных частей участка доходит за чуть разное время. Из наблюдаемой длительности импульсов можно было заключить, что объект, от которого исходит импульс, имеет в поперечнике не больше нескольких сотен километров.

Вскоре из разных мест земного шара стали поступать сообщения о вновь открываемых пульсарах, их нашли более трехсот с периодами от нескольких сотых до 4,3 секунды. Хотя по форме отдельные импульсы не вполне повторяют друг друга, период каждого пульсара отличается высоким постоянством.

В 1968 г. Томас Голд (р. 1920) предложил такую гипотезу: пульсары (латинское «пульсус» — удар, толчок) назвали так по ошибке, это быстро вращающиеся нейтронные звезды, у которых магнитная ось не совпадает с осью вращения. Поэтому направления импульсов их излучения колеблются в пространстве с частотой, совпадающей с частотой вращения (как у вращающегося проблескового маяка), а энергия импульсов черпается из энергии вращения нейтронной звезды. Вращение могло бы постепенно замедляться только из-за потерь энергии на излучение, хотя в действительности торможение сильнее — именно его энергия объясняет излучение всей туманности, в которой находится пульсар.

За открытие пульсаров Энтони Хьюишу в 1974 г. была присуждена Нобелевская премия по физике — открытие действительно было выдающимся. Эту премию с ним разделил Мартин Райл (1918—1984), создавший тот самый радиотелескоп и открывший множество радиогалактик. (Райл получил также ряд аргументов в пользу нестационар-

«Если допустить, что где-то во Вселенной нами были обнаружены живые существа, то возникала любопытная проблема: как следует обнародовать эти результаты, чтобы это было сделано со всей ответственностью? Кому первому сообщить о них? В тот день мы так и не решили эту проблему: я отправилась домой в полной растерянности. Мне нужно было писать свою диссертацию, а тут откуда-то взялись эти окаянные „зеленые человечки“, которые выбрали именно мою антенну и рабочую частоту моего телескопа, чтобы установить связь с землянами... Незадолго до закрытия лаборатории я просматривала запись, относящуюся к совершенно другому участку неба, и на фоне сигнала от мощного радионисточника Кассиопея А заметила знакомые возмущения.

Было совершенно невероятно, чтобы „зеленые человечки“ из двух разных цивилизаций выбрали одну и ту же волну и то же время для отправки сигналов на нашу планету».

Поскольку в сообщении было упомянуто, что первоначально астрономы Кембриджа не исключали возможности того, что сигналы посланы другой цивилизацией, вскоре там появились представители прессы. «Когда журналисты обнаружили, что здесь замешана женщина, они проявили еще большую активность. Меня фотографировали стоящей на стуле, сидящей на стуле, стоящей на стуле и рассматривающей какие-то диаграммы, сидящей на стуле, уставившись на какие-то диаграммы. Один из журналистов заставил меня бегать с воздетыми руками: глядите, друзья, я сделала настоящее открытие! (Архимед и не знал, чего ему в ту пору удалось избежать!) При этом журналисты расспрашивали меня о страшно важных вещах: например, выше я ростом или ниже, чем принцесса Маргарет».

ной, т. е. расширяющейся модели Вселенной.) Но история пульсаров на этом не кончается: с ними связано и открытие гравитационного излучения — об этом ниже.

## 6. Черные дыры

*Оставь надежду всяк сюда входящий.*

Данте.

Божественная комедия. Ад

Черные дыры — это своеобразный триумф человеческой мысли, объект, который должен существовать, но который нельзя непосредственно увидеть. Наличие черных дыр — всего лишь одно из следствий ОТО Эйнштейна, призванное в случае своего обнаружения явиться одним из доказательств теории... Но астрофизики говорят об этих объектах все более и более уверенно — их местоположение выдают косвенные признаки.

Черная дыра — объект настолько плотный и массивный, что поле тяготения вокруг него «запирает» в своих объятиях не только любое материальное тело, но и световое излучение<sup>15</sup>. Границу области, которую не в силах покинуть даже фотоны, называют горизонтом событий, она определяется радиусом Шварцшильда, для которого вторая космическая скорость должна была бы превышать скорость света. Этот объект, непосредственно не наблюдаемый, должен обладать рядом парадоксальных свойств. «Выдать» черную дыру может поведение объектов, попавших в ее чудовищное поле тяготения, но еще не достигших горизонта событий. Так, именно ему приписывают интенсивное рентгеновское излучение в двойных звездных системах, вызванное тем, что черная дыра постепенно втягивает в себя и поглощает вещество звезды-компаньона: этот процесс наблюдается, по видимому, около звезды Х1 созвездия Лебедя — такое излучение было открыто Рикардо Джиаккони (р. 1931, Нобелевская премия 2002 г.), одним из создателей космического телескопа «Хаббл».

К концу 2002 г. группа астрономов под руководством Райнера Шедела из германского Института внеземной физики имени Макса Планка объявила о доказательстве наличия гигантской черной дыры в центре Галактики.

<sup>15</sup> Можно упомянуть, что существование таких объектов предположил почти на два века раньше, в 1783 г. Джон Мичел: исходя из доказанной Ремером конечности скорости света, он предположил, что в сильном гравитационном поле эта скорость должна уменьшаться и может дойти до нуля, т. е. звезда станет невидимой. Аналогичные предположения высказывал и П. Лаплас.

Центр нашей Галактики, Млечного Пути, расположенный в созвездии Стрельца, закрыт мощным скоплением межзвездной пыли, «утольным мешком», и поэтому может наблюдаться только в рентгеновском и инфракрасном диапазонах. Давно уже было признано, что в центре Галактики находится скопление особенно массивных объектов или одно сверхмассивное тело. А сравнительно недавно космическая рентгеновская обсерватория Чандра (так физики называли С. Чандрасекара) зафиксировала в этом направлении рентгеновскую вспышку продолжительностью в три часа: она могла означать только то, что какое-то тело (например, комета) попало в зону действия черной дыры и было поглощено ею. Но ведь зафиксировано только направление, а вдруг это объект, находящийся вне центра Галактики?

Группа Шедела занималась еще и другим проявлением влияния возможной черной дыры (или скопления других тел?) в центре Галактики на звездные объекты — искажением траекторий близлежащих звезд. Для этого с 1992 г. в инфракрасном диапазоне и с помощью радиотелескопов велись наблюдения за движением звезды, которую обозначили как S2. Оказалось, что период ее обращения вокруг скрытой массы — 15,2 года, скорость на орбите 5 тыс км/с (!), а средний радиус орбиты всего в три раза превышает расстояние от Солнца до Плутона (период обращения Плутона вокруг Солнца — 248 лет, скорость на орбите — 4,7 км/с).

Звезда S2 могла выжить только при условии, что скрытый объект не только массивный (3,7 млн масс Солнца), но и сверхкомпактный — то есть один-единственный. Поэтому большинство астрономов полагает, что наличие черной дыры является единственной возможностью объяснить эти и другие данные наблюдений объектов в центре Галактики.

«Наша» черная дыра невелика по сравнению с ядрами других галактик и при этом относительно неактивна — центры других звездных систем, как правило, содержат в себе массы миллиардов звезд, жадно заглатывают вещество близлежащих звезд и преобразуют его частично в рентгеновское и радиоизлучение, заполняющее всю Вселенную. Крайний их случай — квазары (сокращение от «квази-звезды» — как бы звезды), нестационарные ядра далеких галактик, — самые мощные по излучению космические объекты.

Однако этими объектами возможности появления черных дыр отнюдь не исчерпываются. В 1963 г. Рой П. Керр (р. 1934) обобщил работу Шварцшильда по решению уравнений ОТО и рассмотрел черные дыры, которые вращаются вокруг оси, так что их линейная скорость у горизонта событий может приближаться к скорости света. Такие





дыры обладают рядом своеобразных свойств: перед горизонтом событий у них должна существовать некая промежуточная область, эргосфера, в которой все попавшие туда тела должны вращаться, а гравитационная энергия связи может достигать 42 % всей массы покоя и превращаться в излучение.

Возможность (вероятно, и необходимость) существования другого вида незвездных черных дыр была выявлена Стивеном Хокингом. Он сумел объединить в некоторой мере эффекты ОТО и квантовой теории: согласно его теории, за счет гравитационной энергии воз-

можно рождение электрон-позитронных и других пар вблизи горизонта событий. Если при этом одна из частиц пары уходит за горизонт и становится невидимой, то другая может остаться вовне, аннигилировать с какой-нибудь иной частицей, а порожденное таким образом

Стивен Хокинг (р. 1942), английский астрофизик, в начале 1960-х гг. заболел редкой и неизлечимой болезнью, приводящей к постепенной атрофии всей мускульной системы. Вскоре он смог шевелить лишь двумя пальцами правой руки, но продолжает работать и читать лекции (занимает кафедру Ньютона в Кембридже), любит путешествовать, передвигается и разговаривает с помощью сконструированного для него кресла и компьютера с синтезатором речи, оставаясь веселым и остроумным собеседником. Его популярная книга «Краткая история времени» стала всемирным бестселлером.

излучение укажет на существование черной дыры — по расчетам Хокинга дыра должна светиться как нагретое тело, с температурой, определяемой ее массой.

Хокинг также показал возможность того, что в момент Большого взрыва должны были возникнуть многочисленные мини-черные дыры с массой, равной массе, скажем, среднего астероида или меньше, но с размерами протона. Прав-

да, такие мини-дыры, созданные в состоянии чрезвычайно высоких температур и плотности, должны были, в основном, исчезнуть за счет электрослабых взаимодействий, превосходящих при такой плотности сильные взаимодействия.

Теория черных дыр никак не может считаться законченной — она продолжает активно развиваться. Так, очень интересен вопрос об энтропии черных дыр: они ведь упорядочивают вещество вокруг себя — следовательно, с их ростом должна расти и энтропия. Яков Д. Беккенштейн (р. 1947) предлагает считать ее мерой площадь горизонта событий, тогда Второй закон термодинамики должен формулироваться так: сумма энтропии и площади горизонтов событий черных дыр не может убывать.

## 7. Гравитационное излучение

Любой электрический заряд, движущийся ускоренно, излучает электромагнитные волны. По аналогии, следует ожидать, что любая масса должна излучать при ускорении гравитационные волны, а распространяться они должны со скоростью света (эти волновые решения соответствуют уравнениям ОТО).

Такое излучение должно иметь место в системах двойных звезд: они быстро вращаются вокруг общего центра тяжести, а значит, испытывают центростремительное ускорение. Оно, конечно, должно происходить при взрыве и столкновении звезд, например нейтронных звезд и черных дыр.

Для фиксации такого излучения в ряде лабораторий установлены гравитационные детекторы — это массивные тела, часто монокристаллы, весом в тонны, малейшие синхронные колебания которых в разных местах Земли должны сигнализировать о приходе такой волны. Так что оставалось наблюдать и ждать... какого-нибудь взрыва.

Решение проблемы пришло с несколько иной стороны. В 1974 г. Джозеф Х. Тейлор (р. 1941) и тогда еще его студент Рассел А. Халс (р. 1950) обнаружили, что интенсивность излучения открытого ими пульсара (он назывался PSR 1913+16) регулярно меняется с периодом в восемь часов. Это означало, что пульсар представляет собой двойную звезду, точнее, что он вращается вокруг какой-то другой звезды, которая тоже должна быть весьма массивной и компактной, т. е., скорее всего, тоже нейтронной звездой.

Изменения огромных взаимодействующих гравитационных полей двойного пульсара должны проявляться в излучении гравитационных волн, т. е. в уменьшении энергии этого поля. Действительно, измерение периодов обращения пульсара в течение четырех лет показало, что он уменьшается со скоростью 75 миллионов секунды в год. Уменьшение периода соответствует сближению обоих партнеров этой пары, которое с точностью не хуже 0,5 % соответствует предсказаниям ОТО по потере энергии на излучение гравитационных волн (Нобелевская премия 1993 г.).

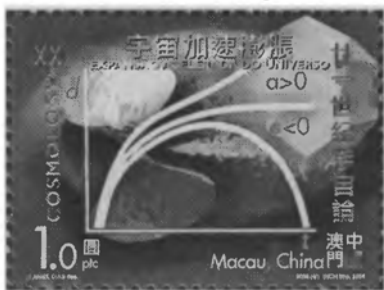
Таким образом, впервые была установлена реальность существования гравитационных волн. А уже в конце 2002 г. С. Копейкин и Э. Фомалон (США) сумели впервые измерить скорость этих волн: их наблюдения напоминали наблюдения Эддингтона 1919 г., установившие отклонения света звезд в поле Солнца во время полного солнечного затмения, но если тогда сравнивались только два снимка — до затмения и в момент его максимума, то сейчас регистрировалась скорость уменьшения радиоизлучения квазара при прохождении Юпитера точно между ним и Землей вследствие взаимодействия радио-

и гравитационных волн. И их скорости оказались, как и предполагал Эйнштейн, одинаковыми.

Гравитационные волны, конечно, тоже должны состоять из квантов, их называют гравитонами. Гравитоны, как мы говорили, должны иметь нулевую массу покоя и спин 2, их существования требует и теория калибровочной инвариантности, но до сих пор не просматривается никакая реальная возможность их непосредственного наблюдения.

## 8. Темная материя (?), темная энергия (??)

В 1937 г. выдающийся астрофизик Фриц Цвикки (1898—1974) показал, что наблюдаемая масса галактик много меньше той, которая требуется для объяснения их вращения: центростремительная сила и скорость



вращения должны убывать от центра к периферии, а они остаются постоянными. Более того, наблюдаемая по свечению масса никак не может уберечь галактики от разлетания.

Значит, в галактиках присутствует некая скрытая, несветящаяся масса, восполняющая наблюдаемую?

Наблюдавшиеся позже облака водорода в галактиках, потухшие звезды и т. д. были не достаточными для объяснения этих эффектов. У многих исследователей получается даже, что на обычную материю в галактиках приходится лишь около 5 % всей массы, а около 25 % — это несветящая материя, участвующая только в гравитационных взаимодействиях и никак себя в остальном не проявляющая. На роль такой материи выдвигаются массивные нейтрино и другие еще не наблюдавшиеся частицы.

Но и это еще не все. Основная проблема космологии — вопрос о расширении Вселенной после Большого взрыва. Здесь возможны, как мы говорили, три модели: расширение продолжается вечно, расширение в какой-то момент должно смениться сжатием (начнется новый цикл существования Вселенной, закрытая модель), Вселенная достигнет какого-то стационарного состояния (нулевой кривизны). Выбор между моделями соответствует средней плотности Вселенной. Для нулевой модели она должна составлять около 5 атомов водорода в куб. метре.

Светящаяся масса составляет почти в 100 раз меньше, т. е. как будто Вселенная должна безудержно расширяться. Но наблюдаемые данные никак с этим не согласуются.

Еще в 1917 г. Эйнштейн феноменологически ввел в свои уравнения так называемый лямбда-член, дополнительную силу отталкивания на больших расстояниях, которая могла обеспечить стационарность Вселенной. Но в 1922 г., после работ Фридмана он отказался от этого решения и даже признавал его своей самой большой ошибкой.

Однако к 1998 г. ряд наблюдений показал, что постоянная Хаббла не является постоянной, а как будто меняется со временем, точнее — Вселенная расширяется с ускорением. Для объяснения такого ускорения приходится постулировать существование темной, т. е. «скрытой» энергии пространства и т. д.

Все эти построения пока что далеки от какого-либо завершения и общего признания, существуют и другие возможности типа видоизменения Закона Всемирного тяготения. Поэтому ограничимся ссылкой на популярное изложение этих теорий<sup>16</sup>.

## 9. Что дальше?

*Мы не можем предсказать общий тон науки будущего, так же как не можем предвидеть те открытия, которые принесет это будущее.*

Дж. К. Максвелл

В теории частиц и полей и в космологии остается множество проблем, которые могут, в принципе, кардинально изменить лицо физики. Давайте просто перечислим некоторые из рассматриваемых сейчас возможностей, о которых ранее не упоминали или говорили слишком кратко.

Если Большой взрыв и последующее расширение Вселенной можно считать доказанными, то остаются такие возможности: расширение необратимо, и Мир будет продолжать всегда расширяться, возможно, с постепенным замедлением, или же расширение на каком-то этапе сменится сжатием с возможными повторениями, т. е. не исключено, что Вселенная осциллирует. Выбор между этими возможностями зависит от плотности материи во Вселенной, а для ее оценок нужно выявить всю «темную», несветящуюся материю. Как это сделать?

В момент Большого взрыва возник, точнее, развернулся мир с тремя пространственными и одной временной осью, но кто доказал, что этот мир  $3 + 1$  является единственно возможным?

Лет сто тому назад в околонуучной литературе были очень модными рассуждения о возможности четвертого пространственного изме-

<sup>16</sup> Чернин А. Д. Темная материя вблизи нас. [Электронный ресурс]  
<http://www.astronet.ru/db/msg/1210535/index.html>

рения, которое мы, мол, не ощущаем, но которому можно приписать различные таинственные проявления. Вскоре, однако, было показано, что принцип Гюйгенса (он регулирует распространение волн) имеет место лишь в мирах с нечетным числом пространственных осей, т. е. четырехмерный мир невозможен.

Все же, можно предположить, что пространственных измерений на самом деле больше, но все остальные «свернуты», т. е. радиус трех из них пропорционален постоянной Хаббла, а радиус других остается на уровне микрочастиц. Тогда частицы можно рассматривать как окончания «струн», протянутых в этих свернутых измерениях. Некоторые из таких теорий обладают математически изяществом и позволяют строить непротиворечивые теории полей и частиц и избегать многих современных трудностей.

А в одной из теорий А. Д. Сахаров рассматривал случай возможности разворачивания и добавочных временных измерений. В другой, более ранней теории он строил гравитацию не как отдельное поле, а как результат поляризации пространства под действием вакуумных флуктуаций других полей.

Немало внимания уделяется и макроструктуре Вселенной: есть некоторые указания на то, что она отнюдь не однородна — можно выделить группы галактик, нечто вроде стенок между ними и т. д. А может, Больших взрывов было несколько?

Мы несколько раз говорили о том, что гравитационное взаимодействие уменьшает массу тел. Поэтому ее можно считать отрицательной, а тогда можно предположить, что полная масса Вселенной, масса «Папы-атома», равна нулю — масса (энергия) всех тел точно равна энергии их гравитационного взаимодействия. Далее, ясно, что полный электрический заряд Вселенной равен нулю — все тела вместе электрически нейтральны. А что же с остальными зарядами, барионным и лептонными?

Этот вопрос, проблема асимметрии Вселенной, очень беспокоит теоретиков: почему материи настолько больше, чем антиматерии, чему равнялся барионный заряд «Папы-атома»?

Реальны ли бозоны Хиггса, и каковы их свойства? Очень многое в теории покоится на гипотезе об их существовании. Существуют ли суперсимметричные партнеры известных частиц?

Есть, конечно, и теории, в которых строятся субкварковые поля, проверки которых можно ожидать с вводом в строй следующего поколения ускорителей. (Мы не упоминаем о существующих сложностях в уже более или менее развитых теориях — их немало, и их исследования могут радикально менять статус этих теорий.) Представляется, что вряд ли стоит ждать завершения фундаментальной физики в ближайшем будущем.

## Когда и почему подростки выбирают физику

*При каждом внимательном взгляде, брошенном на мир, мы уже теоретизируем.*

И. В. Гёте

Я всегда помнил, что будущую специальность, физику, выбрал после прочтения «Гиперболоида инженера Гарина» и газетного сообщения о какой-то совсем непонятной «атомной» бомбе, и произошло это в 1945 г., когда мне было 13 лет.

А через много лет, читая попадавшиеся автобиографии физиков и других ученых, я вдруг осознал, что и они этот выбор совершали примерно в том же возрасте. Вот несколько выписок, почти наугад.

**Г. В. Лейбниц:** «Когда я начал слушать логику, то был сильно поражен разделением и порядком мыслей, о чем узнал из нее. Я тотчас же начал замечать, насколько это доступно тринадцатилетнему мальчику, что тут кроется нечто значительное». Затем он описывает, как пытался претворить эти идеи в жизнь.

**А. Эйнштейн:** он вырос в нерелигиозной семье, но в детстве «пришел к глубокой религиозности, которая, однако, уже в возрасте 12 лет резко оборвалась». И далее: «В возрасте 12 лет я пережил еще одно чудо совсем другого рода: источником его была книжечка по евклидовой геометрии на плоскости, которая попала мне в руки в начале учебного года».

**Э. Ферми:** в 13 лет к нему случайно попадает книга по физике, а затем он встречается друга отца, инженера Амедеи, который умно и тонко руководит его занятиями.

**А. Б. Мигдал,** известный физик-теоретик: «Мне было двенадцать лет, когда я раздобыл книгу Доната „Физика в играх“, — и далее описывает, как это увлечение сохранилось навсегда.

**Я. Б. Зельдович,** знаменитый теоретик-энциклопедист, физико-химик, физик-ядерщик, космолог: «Хорошо помню первый, еще детский (12 лет) выбор области знаний». И дальше он описывает, как физика казалась почти законченной, а потому выбиралась химия — в физику он пришел несколько позже, через химию.

**А. П. Александров**, физик, президент Академии наук СССР: в 13 лет «вступил в физико-химический кружок — отсюда пошло мое увлечение физикой и химией».

**Н. Н. Боголюбов**, знаменитый математик: «Еще с двенадцати лет заинтересовался некоторыми вопросами сперва элементарной, а затем и высшей математики».

А вот, не физик, а знаменитый и удачливый изобретатель **Генри Форд**: «Важнейшим событием моих детских лет была встреча с автомобилем, милях в восьми от Детройта, когда мы однажды ехали в город. Мне было тогда двенадцать лет. Вторым по важности событием, которое приходится на тот же самый год, были подаренные мне часы» — ведь именно Форд впервые построил конвейер на заводе и старался организовать его работу по часам.

**Луи де Бройль**: ему было ровно 13, когда его старший брат Морис измеряет в домашней лаборатории заряд электрона.

В возрасте двенадцати лет **Макс фон Лауэ** стал интересоваться физикой, и его мать предоставила ему возможность посещать «Уранию» — берлинское общество популяризации науки.

Но может быть, все эти воспоминания случайны? Выше мы специально отмечали случаи, когда люди попадали в физику позже и притом случайно: например, Дж. Чедвик и Р. Милликен.

Проводить опросы среди коллег, конечно, можно — большинство вспоминает, кстати, именно события в этом возрасте, но лучше поступить по-иному. Я взял для начала биографический справочник (Ю. А. Храмов. «Физики», Москва: Наука, 1983) и составил два графика: количества физиков, родившихся в каждом году после 1880 г. — отдельно для России—СССР и для остального мира.

Графики эти ясно показывают наличие пиков-максимумов (много людей становятся физиками) и провалов-минимумов в какие-то годы. Если бы такие распределения были случайными, то два графика должны были получиться различными — с разным расположением пиков и провалов, а они точно соответствовали друг другу (первые российские пики отставали от общемировых на год-два, но это потом удалось объяснить). Значит, эти максимумы и минимумы чем-то обусловлены и должны иметь какое-то объяснение.

С чем же могут быть связаны эти максимумы? Эйнштейну случайно попала книжка по геометрии, Л. де Бройль видел лабораторию брата, но большинство будущих ученых могли прочесть в газетах и журналах (позднее услышать по радио, увидеть по телевидению) сенсационные известия о каких-то эпохальных открытиях и именно это яркое впечатление могло привлечь их к физике, а не к другой

науке или иному виду деятельности. В каком же возрасте такое впечатление оказывается наиболее действенным?

И еще: куда же пойдут потенциальные физики, если в этом возрасте таких впечатлений они не получают? Пришлось составить такие же графики «рождений» для химиков, биологов и математиков: у них тоже есть пики и провалы — но, и это показательно, если рождалось много будущих физиков, то на других графиках в том году — провалы, молодые талантливые люди могли пойти в эти науки, но предпочли физику.

Я сравнил по годам пики рождений физиков с наиболее сенсационными, отраженными в СМИ открытиями. И оказалось, что все пики на графиках рождений физиков как раз соответствуют, с отставанием именно на 11–13 лет, наиболее нашумевшим, а следовательно, и наиболее сильно действующим на воображение открытиям.

Так, в 1895–1896 гг. открыты рентгеновские лучи, электрон, осуществлена беспроволочная телеграфия — им соответствует пик рождения физиков 1881–1882 гг. Этому пику можно присвоить имя Рентгена и Дж. Дж. Томсона или же Попова и Маркони. В Россию тогда известия о новых открытиях поступали с запозданием, и этот пик «рождаемости» приходится на 1883 г.

Следующий пик, 1887–1889 гг., — это пик исследования радиоактивности и Всемирной выставки 1900 г. в Париже с показом достижений века электричества. (Ему, кстати, соответствуют глубокие провалы в распределениях математиков и химиков! В России достижения электротехники не очень видны.)

Пик 1900–1902 гг. — пик имени Резерфорда—Бора, 1911–1913 гг. — планетарной модели атома (опять отставание на два года в России). А пики 1904–1907 гг. соответствуют блистательному подтверждению общей теории относительности экспедицией Эддингтона во время солнечного затмения 1919 г. Возможно, конечно, что с Эйнштейном связан лишь второй пик — 1907 г., а первый обусловлен усталостью от переживаний бессмысленной Мировой войны. В России пик Эйнштейна, самый высокий, проявляется годом позже, он мог быть усилен окончанием гражданской войны к 1921 г.

Весьма характерен провал в аналогичном распределении химиков, родившихся в 1907–1908 гг.: он мог быть вызван как уходом талантов в физику, так и отрицательной реакцией общества на применение отравляющих газов в войне. Очень показательны узкий провал 1910 г. у физиков и строго соответствующий ему пик у химиков: Бор объяснил в 1922–1923 гг. структуру Периодической системы элементов — в физике, кажется, уже все ясно, на передний край выдвигается химия!



(Узость провала и пика подтверждают предположение о малой длительности периода такого воздействия.)

Но уже через год кристаллизуются идеи волновой структуры материи де Бройля—Эйнштейна—Бора и налицо самый резкий пик физиков, родившихся в 1911 г. Пик 1915 г. — отзвук публикаций и дискуссий по принципу неопределенностей Гейзенберга (с 1927 г.). Пик 1920 г. и у физиков, и у химиков — это открытие в 1932–1933 гг. нейтрона, позитрона, дейтерия, построение модели атомного ядра и т. д. Пик 1924–1926 гг. у физиков и провал у химиков могут иметь иную природу: массовое вовлечение ученых в атомные и другие проекты.

Но неужели только будущие физики или, говоря в общем, ученые, изобретатели обладают такой особенностью интеллекта — выбором основных интересов в возрасте около 13 лет?

Нет, конечно, это общее явление, общее свойство нашего сознания или подсознания. Я собрал множество свидетельств (по автобиографиям!) художников, музыкантов, актеров, писателей, политиков (консерваторов и революционеров) — людей самых различных склонностей и специальностей: большинство из них выбирало направленность своего интеллекта, своих устремлений именно в этом возрасте — такое явление можно назвать импрессионгом<sup>17</sup> («импрессия» — впечатление), по некоторой аналогии с известным в психологии животных явлением импринтинга («впечатывание») — молодые животные усваивают определенные навыки (например, следования за матерью, постройки гнезда) только в строго определенный период жизни, и если в этот период им не показали такие действия, они уже никогда эти навыки не приобретут.

С позиций психологии развития, наличие феномена импрессионга можно описать таким образом: анализ явлений сознания и подсознания позволяет выделить в них шесть уровней, постепенно развивающихся в ходе взросления и развития человека — это уровни: 1) сенсорный («ощущающий»), 2) моторный, 3) когнитивный (познавательный или, скорее, любопытствующий), 4) эмоциональный, 5) уровень стиля мышления, 6) уровень шкалы относительных ценностей и предпочтений. В ходе эволюции животных эти уровни появлялись

<sup>17</sup> Перельман М. Е. Феномен интеллекта. Почему физики становятся физиками, а политики — политиками. Памяти А. Д. Сахарова // Наука в СССР. № 1. 1991. 10–16 (Mark (ошибочно: Michael) Perel'man. Science in the USSR. № 2. 1991. 10–16.). В статье приведены графики, о которых мы говорили, и проведено их сравнение с аналогичными графиками для политиков, в этой первой публикации явление неудачно называлось интеллектуальным импринтингом. Более популярное описание представлено в израильском еженедельнике «7 дней» от 27 мая 1999.

и развивались постепенно, так что само их количество (и их сложность) увеличивается по мере движения по эволюционной лестнице, от низших животных к высшим. А в соответствии с общими законами биологии развития, можно думать, что и при индивидуальном развитии они проявляются постепенно, как бы поочередно. (Понаблюдайте за развитием любого ребенка.)

Формирование и развитие этих уровней определяется как наследственностью, так и средой, условиями воспитания. Можно предположить, что изменчивость этих уровней после их формирования, особенно в подсознании, не очень велика — поэтому очень трудно воспитать в более позднем возрасте те особенности стиля и приоритетов поведения, морали, которые не были вовремя преподаны и усвоены.

Отсюда следует важность показа подросткам — и именно в возрасте импрессинга — таких впечатляющих, эмоционально насыщенных примеров, картин, явлений, которые, в частности, могут стимулировать в них, если не интерес к карьере будущего ученого, то, во всяком случае, интерес к новому, к возможностям его анализа, к адаптации в нашем быстро меняющемся мире.

Настоящая книга направлена именно к такому показу и поэтому, в основном, предназначена подросткам критического, наиболее восприимчивого, как мы старались продемонстрировать, возраста. Ну а в целом принятие изложенной концепции требует серьезного изменения системы воспитания и преподавания, но такие идеи выходят за рамки нашей задачи.

## Приложение 1

### Рейтинги замечательных экспериментов и великих физиков

*Чем дальше эксперимент от теории,  
тем он ближе к Нобелевской премии.*

Фольклор

Поскольку на протяжении книги мы упоминали множество имен, описывали много разных теорий и экспериментов, приведем, только для ориентации, рейтинги известнейших экспериментов и знаменитых физиков. Так, известный английский журнал «Физикс Уорлд» провел в 2002 г. опрос среди ученых: какой физический эксперимент за всю историю нашей науки можно считать наиболее красивым?

Рейтинг, по результатам голосования, таков (в скобках год проведения):

1. Эксперимент по интерференции одиночных электронов на двух щелях (год не указан, так как он одновременно был проведен несколькими группами; этот эксперимент, схожий с опытом Юнга, окончательно доказал волновую природу электрона).
2. Эксперимент Галилея с падающими телами (1600-е гг.).
3. Эксперимент Милликена с заряженными каплями (1910-е гг.).
4. Разложение солнечного света в спектр Ньютоном (1665–1666).
5. Эксперимент Юнга по интерференции света (1801).
6. Определение Кавендишем гравитационной постоянной (1798).
7. Измерение радиуса Земли Эратосфеном (III в. до н. э.).
8. Опыты Галилея с шарами на наклонной плоскости (1600-е гг.).
9. Открытие атомного ядра Резерфордом (1911).
10. Маятник Фуко (1851).

В ответах фигурировали и такие эксперименты:

- эксперимент Архимеда по гидростатике,
- определение скорости света Ремером,
- определение механического эквивалента теплоты Джоулем,

- опыты Рейнольдса по течению жидкости в трубах,
- опыт Маха по акустическим ударным волнам,
- опыт Майкельсона—Морли,
- определение максвелловского тока смещения Рентгеном,
- открытие магнитного действия тока Эрстедом,
- опыты Бреггов по дифракции в кристаллах,
- измерение сдвига изображения звезд Эддингтоном и т. д.

Практически все эти эксперименты мы описали<sup>18</sup>, а сам рейтинг показывает, что в понятие красоты у физиков входят неожиданность результата и... простота самого опыта. Этот рейтинг можно, в общем, признать справедливым.

Более сложно распределить «по рангам» самых ученых. Такой опрос по рейтингу физиков всех времен был проведен тем же журналом в 1999 г. (каждому из выбранных 120 «судей» — действующих ученых — позволялось назвать до пяти имен). В списке после занятого места указано число отданных голосов:

1. (119) Альберт Эйнштейн (1879–1955).
2. (96) Исаак Ньютон (1642–1727).
3. (67) Джеймс Кларк Максвелл (1831–1879).
4. (47) Нильс Бор (1885–1962).
5. (30) Вернер Гейзенберг (1901–1976).
6. (27) Галилео Галилей (1564–1642).
7. (23) Ричард Фейнман (1918–1988).
- 8–9. (22) Поль Дирак (1902–1984) и Эрвин Шредингер (1887–1961).
10. (20) Эрнест Резерфорд (1871–1937).
- 11–13. (16) Людвиг Больцман (1844–1906), Макс Планк (1858–1947), Майкл Фарадей (1791–1867).
14. (13) Энрико Ферми (1901–1954).
15. (6) Мария Кюри (1867–1934).
- 16–17. (4) Джон Бардин (1908–1991), Л. Д. Ландау (1908–1968).
- 18–20. (3) Джон Белл (1928–1990), Ганс Бете (1906–2003), Дж. У. Гиббс (1839–1903).

<sup>18</sup> Более подробные описания большинства этих экспериментов даны в книге: Липсон Г. Великие эксперименты в физике. М.: Мир, 1972; основные эксперименты в квантовой области описаны в книге: Тригг Дж. Решающие эксперименты в современной физике. М.: Мир, 1974.

По два голоса были отданы Архимеду, Копернику, Пьеру Кюри, Дж. т-Хофту, Э. Хабблу, И. Кеплеру, В. Паули, У. Шокли, Дж. Дж. Томсону, Ч. Таунсу, Х. Юкаве, и еще больший список включает имена, упомянутые лишь по одному разу.

Опрос этот показывает только безусловность первых трех-четырех мест: разница между последующими слишком мала и субъективно окрашена. Но при этом, несомненно, достижения всех названных ученых (как и многих, сюда не вошедших) достойны самого глубокого почтения.

О роли физики и великих физиков в развитии человечества могут говорить результаты широкого (несколько тысяч респондентов) опроса, проведенного в середине XX в. среди преподавателей университетов США и Англии. Нужно было назвать человека, оказавшего наибольшее влияние на интеллектуальное и духовное развитие мира в эпоху после Леонардо и отметить его основную заслугу (в скобках). Опрос показал, что в резко выделяющуюся лидирующую группу вошли восемь имен: У. Шекспир (впервые показана многоплановость личности), У. Блейк (единство словесного и живописного изображения), Н. Коперник (развенчал представления об уникальности Земли), И. Кеплер (показал возможность математического описания явлений природы), Г. Галилей (эксперимент как основа науки), Х. Гюйгенс (введения индукции как метода рассуждения и доказательства), М. Планк (введение дискретности, прерывности в науку), А. Эйнштейн (обновление понятий времени и пространства, эволюция Вселенной): шестеро из восьми — физики.

В последующей группе были уже не только физики: наряду с И. Ньютоном и Н. Бором туда вошли Ч. Дарвин, З. Фрейд, И. Кант, Ф. Достоевский, К. Маркс, Бетховен и др. К таким опросам нельзя относиться чересчур серьезно: в других странах или в иное время они дали бы несколько отличные результаты, но общая тенденция, можно думать, должна была бы сохраниться. (Из нашей прошлой истории можно вспомнить бурную полемику вокруг стихотворения Бориса Слуцкого «Физики и лирики» и фильма М. Ромма «Девять дней одного года» в конце 50-х — начале 60-х гг. XX в.)

## Приложение 2

### Некоторые обозначения

1. В ядерной физике и в космогонии приходится пользоваться очень большими цифрами и выписывать их названия становится затруднительным. Ну как, скажем, назвать цифру с 26 нулями? Поэтому принято использовать сокращенную запись в виде степени числа:

$$1 \text{ тысяча} = 1\,000 \rightarrow 10^3$$

$$1 \text{ миллион} = 1\,000\,000 \rightarrow 10^6$$

$$1 \text{ миллиард (или биллион)} = 1\,000 \text{ миллионов} \rightarrow 10^9 \text{ и т.д.}$$

Аналогичные правила позволяют записывать малые доли чисел:

$$1 \text{ тысячная часть} = 1:1\,000 \rightarrow 10^{-3}$$

$$1 \text{ миллионная часть} = 1:1\,000\,000 \rightarrow 10^{-6}$$

$$1 \text{ миллиардная часть} \rightarrow 10^{-9} \text{ и т.д.}$$

2. Единицей работы и энергии в международной системе единиц является джоуль. Однако, это слишком большая величина при рассмотрении, скажем, энергии одного электрона. Поэтому энергию в атомной физике принято измерять в электронвольтах, эВ: это энергия, приобретаемая электроном, прошедшим разность потенциалов в один вольт (в сокращенной записи единиц первая буква фамилии пишется большой). Величина эВ очень мала в сравнении с используемыми в обыденной жизни, одному джоулю соответствует  $6,25 \cdot 10^{18}$  эВ. Для ионизации атома, т.е. для освобождения электрона, нужна энергия в несколько эВ. Но в ядерных процессах энергии намного большие, они измеряются в тысячах, миллионах, миллиардах, триллионах эВ. Таким образом определяются:

$$1 \text{ КэВ} = 10^3 \text{ эВ}, 1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}, 1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}, 1 \text{ ТэВ} = 10^{12} \text{ эВ}.$$

3. Согласно формуле Эйнштейна  $E = mc^2$ , каждой величине массы сопоставляют энергию. И оказывается, что гораздо удобнее измерять массу частиц именно в терминах энергии — при этом отпадает необходимость в выписывании длинных цифр. Ниже, для справок, значения массы электрона и протона приведены в обычных и в энергетических величинах.

4. В обыденной жизни температуру измеряют в градусах, но, поскольку температура — это мера средней кинетической энергии, ее

можно измерять в единицах энергии. Для этого нужно умножить температуру в градусах на  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянную Больцмана. При этом энергия в 1 эВ соответствует температуре 11 400 °С.

5. Приведем для справок примерные значения некоторых физических величин:

$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> — число Авогадро, т. е. число молекул в одном моле, в массе вещества, равной его молекулярному весу в граммах;

$c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света в пустоте;

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  кулон — величина заряда электрона;

$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж · с — постоянная Планка;

$\alpha = e^2/c = 1/137$  — постоянная тонкой структуры;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана;

$m_e = 9,1 \cdot 10^{-28}$  г  $\sim 0,51$  МэВ — масса электрона;

$m_p = 1,67 \cdot 10^{-24}$  г  $\sim 0,938$  ГэВ — масса протона;

$G = 6,67 \cdot 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/г · с<sup>2</sup> — гравитационная постоянная;

1 световой год (св. год)  $\sim 10^{13}$  км,

1 парсек (пк)  $\sim 3$  св. год, 1 Мпс =  $10^6$  пс  $\sim 3 \cdot 10^{19}$  км.

## Заключение

Первую часть<sup>19</sup> этой книги мы начали со слов великого детектива Шерлока Холмса: *«Я не раз говорил вам, что когда вы удалите невозможное, то все, что останется, должно быть правдой — как бы оно ни казалось невероятным»*. Именно они должны быть признаны символом веры, и именно это мы старались показать на протяжении всей книги, которую вы прочли или просмотрели.

Сопоставления детективного расследования и научного исследования — вполне естественны: и тут, и там вы видите и следы, которые могут открыть истину, и множество ложных направлений поиска, в которых так легко запутаться. Но, как любил повторять Эйнштейн, «Бог не играет в кости» — природа управляется не случайностями, а законами, которые нужно открыть и понять, и она сама подсказывает направление поиска, которое люди не всегда сразу же замечают. Вспомним, что до Г. Х. Эрстеда, В. Рентгена, К. Андерсона, Б. Джо-зефсона многие квалифицированные ученые видели, но не обратили внимания на те, казалось бы, очевидные особенности, которые привели к открытиям.

Итак, нужно внимательно смотреть по сторонам, не бояться фантазии, не доверять полностью чужим мнениям, но и не впадать в грех полного неверия, изучать критически то, что уже достигнуто, пытаться создать полную, но свою картину окружающей действительности, той науки, которая вас интересует.

«Наука вовсе не является коллекцией законов, собранием несвященных фактов, — пишут Эйнштейн и Инфельд в своей книге. — Она является созданием человеческого разума с его свободно изобретенными идеями и понятиями. Физические теории стремятся образовать картину реальности и установить ее связь с обширным миром чувственных восприятий».

Ждут ли нас новые открытия, и если да, то где? Я старался не затушевывать имеющиеся трудности, неясности в развитых, казалось бы,

---

<sup>19</sup> Перельман М. Е. Наблюдения и озарения, или Как физики выявляют законы природы: От Аристотеля до Николы Теслы. М.: URSS, 2012.



теориях — во всех них можно и должно искать новые явления. Помимо того, все время возникают новые направления научного поиска — и они открываются порой на давно как будто заезженных дорогах.

Так, топографы вдруг обнаружили, что они не могут назвать длину береговой линии Англии: ведь с увеличением масштаба карт проявляются новые подробности этой линии и растет ее длина, которую измеряют линейкой по карте, — на каком же масштабе нужно остановиться? Эта проблема не является, конечно, практически важной, но вот другая, математически того же класса: многие химические процессы резко ускоряются на поверхности катализатора, например платины, и при этом можно создать не гладкую поверхность, а причудливо «корявую», но как измерить ее площадь? Для всего этого пришлось развить так называемую фрактальную геометрию (мы упоминали о ней в связи с теорией фазовых переходов К. Вильсона) — береговая линия Англии не имеет, как обычная линия, размерность 1, а некоторую промежуточную между 1 и 2 (размерности длины и площади), размерность площади катализатора — промежуточная между 2 и 3, т. е. между размерностями площади и объема, и т. д.

Во время обсуждения в Сенате США весьма дорогостоящего проекта нового ускорителя кто-то из сенаторов задал замечательному теоретику Дж. Швингеру такой вопрос: «Когда же вы, наконец, построите эту вашу теорию элементарных частиц?». Швингер ответил примерно так: «Не знаю, но вполне возможно, что именно сейчас, где-нибудь в сельских районах Огайо или Миннесоты, растет мальчишка, в голове которого формируются нужные для этого новые идеи. Подождем его, а пока будем работать и надеяться, что новый ускоритель и наша работа ускорят его приход».

В 1963 г. метеоролог Эдвард Лоренц положил начало новому направлению не только в физике атмосферы, но во всем естествознании — исследованию хаоса в детерминированных системах. Он просчитал на компьютере, как казалось, простейшую задачу, решение системы трех уравнений, и совершил замечательное открытие — увидел множе-

ство явлений, для которых невозможен долгосрочный прогноз: малейшая — и неизбежная! — неточность в начальных данных ведет к абсолютно различным последующим мирам. Много раньше об этом писал М. Борн, но не сумел превратить такую идею в новое направление. Есть известный рассказ Рэя Брэдбери о путешественнике в прошлое, который нечаянно раздавил там бабочку и вернулся в совершенно иной мир — закономерности, открытые Э. Лоренцем, иногда именуют «эффектом бабочки». Это новое научное направление (его называют нелинейной динамикой, иногда синергетикой) можно назвать теорией хаоса, а применимо оно не только к физике, но и к поведению финансовых рынков, к анализу кардиограмм, к деятельности анти-

глобалистов и террористов и т. д. и т. п., но для изложения этих идей нужно писать новую книгу<sup>20</sup>.

И еще одно, главное: Макс Планк пишет в автобиографии, что новые теории побеждают не потому, что кого-то удастся переубедить, а потому, что старые ученые уходят, а молодые, только вступающие в науку, привыкают к новым воззрениям.

Науки вообще, и физика в частности, меняются с каждым поколением, и они ждут эти новые поколения, задачу которых сформулируем очень точными словами Льюиса Кэрролла из бессмертной «Алисы в Зазеркалье»: *«Здесь, как видишь, надо бежать, что есть мочи, чтобы только удержаться на месте. А если тебе надо попасть в другое место, то ты должен бежать еще в два раза быстрее».*

---

<sup>20</sup> И конечно, в такой книге следовало бы подробно рассказать о теории катастроф — новой, как будто, области математики, многие результаты и методы которой были предвосхищены физиками: в теории спонтанного нарушения симметрии, теории фазовых переходов, в оптике и т. д. Пока можно лишь сослаться на небольшую популярную (отчасти) книгу В. И. Арнольда «Теория катастроф» (5-е изд. М.: URSS, 2009), на некоторые главы «Теории катастроф и ее приложения» Т. Постона и Й. Стюарта (М.: Мир, 1980) и др.

## Другие книги нашего издательства:



URSS



*Лиза Рэндалл*

### **Закрученные пассажи**

**Проникая в тайны скрытых размерностей пространства**

*Перевод с английского*

Вселенная полна удивительных тайн. Возможно, она скрывает от нас дополнительные измерения, разительно отличающиеся от всего, что может себе представить наш здравый смысл, взращенный в обычном трехмерном пространстве. И хотя с каждым годом мы узнаем все больше и больше о нашем мире, сегодня как никогда ранее мы осознаем, что для понимания истинной природы Вселенной нам необходимо сделать еще очень многое.

Лиза Рэндалл принадлежит к разряду тех ученых, которые сами, своими собственными исследованиями совершают прорывы и раздвигают границы современной науки, пытаясь найти ответы на фундаментальные вопросы, поставленные природой.

Л. Рэндалл проводит нас через потрясающий мир закрученных дополнительных измерений, лежащих, возможно, в основе нашей Вселенной, и показывает путь, следуя которому мы сможем убедиться в их существовании.

Книга «Закрученные пассажи» увлекает читателя в удивительное путешествие, проводя его через цепочку открытий от начала двадцатого века до настоящих дней, объясняя суть противоречий между теорией относительности, квантовой механикой и гравитацией, описывая достижения физики элементарных частиц, проблему иерархии, скейлинг, Великое объединение, суперсимметрию, дополнительные измерения, параллельные миры, эволюцию струнных теорий и многое другое.

*Бартон Цвибах*

### **Начальный курс теории струн**

*Перевод с английского*

«Начальный курс теории струн» Бартон Цвибаха уникален по стилю и форме изложения. Он позволит начинающим исследователям избежать чувства подавленности и отчаяния, которые нередко сопутствуют штудированию традиционных фолиантов, — ведь далеко не секрет, что теория струн имеет репутацию невероятно сложной науки. На каждой странице книги автор твердо следует поставленной цели — сделать теорию струн доступной любому физику, желающему расширить свои знания в этой области.

Книга охватывает практически весь спектр теории струн. Изложение ведется в замкнутой форме, так что читателю для понимания достаточно лишь твердых знаний основ механики и некоторых элементов квантовой теории. Автор стремится развить у читателей интуицию, подкрепляя формальное изложение многочисленными иллюстративными примерами.

Монография отражает современное состояние теории. С этой целью во второе издание включены актуальные вопросы, такие как АС/КПТ-соответствие, струны на орбифолдах, стабилизация модулей, ландшафт теории струн и некоторые другие.



## Другие книги нашего издательства:



URSS

### История физики

- Паннекук А. История астрономии.  
 Горобец Б. С. Круг Ландау: Жизнь гения.  
 Горобец Б. С. Круг Ландау: Физика войны и мира.  
 Горобец Б. С. Круг Ландау и Лифшица.  
 Горобец Б. С. Секретные физики из Атомного проекта СССР: Семья Лейпуных.  
 Конобеев Ю. В. и др. (ред.) Физики продолжают шутить.  
 Дорфман Я. Г. Всемирная история физики: С древнейших времен до конца XVIII века.  
 Дорфман Я. Г. Всемирная история физики: С начала XIX до середины XX вв.  
 Тропп Э. А. и др. Александр Александрович Фридман. Жизнь и деятельность.  
 Козенко А. В. Сэр Джеймс Джинс: Ученый, философ, музыкант.  
 Урвалов В. А. Манфред фон Арденне. 1907–1997: Путь ученого-энциклопедиста.  
 Милантьев В. П. История возникновения квантовой механики и развитие представлений об атоме.  
 Хайтун С. Д. История парадокса Гиббса.  
 Абрамов А. И. История ядерной физики.  
 Богуш А. А. Очерки по истории физики микромира.  
 Тимошенко С. П. История науки о сопротивлении материалов.  
 Кадомцев С. Б. Геометрия Лобачевского и физика.  
 Сачков И. Н. Электромагнетизм: Эффекты, история, парадигма.  
 Бетяев С. К. Записки гидродинамика.  
 Лебедев В. И. Исторические опыты по физике.

- Хаан М. П. Неистовая Вселенная: от Большого взрыва до ускоренного расширения, от кварков до суперструн.  
 Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. Физика в поисках самых фундаментальных законов природы. Пер. с англ.  
 Грин Б. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. Пер. с англ.  
 Грин Б. Ткань космоса: Пространство, время и текстура реальности. Пер. с англ.  
 Грин Б. Скрытая реальность: Параллельные миры и глубинные законы Космоса. Пер. с англ.

### Наши книги можно приобрести в магазинах:

Тел./факс:  
 +7 (499) 724-25-45  
 (многоканальный)

E-mail:  
 URSS@URSS.ru  
 http://URSS.ru

- «НАУКУ – ВСЕМИ!» (м. Профсоюзная, Нахимовский пр-т, 56. Тел. (499) 724-2545)  
 «Библио-Глобус» (м. Лубянка, ул. Мясницкая, 6. Тел. (495) 625-2457)  
 «Московский дом книги» (м. Арбатская, ул. Новый Арбат, 8. Тел. (495) 203-8242)  
 «Молодая гвардия» (м. Полянка, ул. Б. Полянка, 28. Тел. (495) 238-5001, 780-3370)  
 «Дом научно-технической книги» (Ленинский пр-т, 40. Тел. (495) 137-6019)  
 «Дом книги на Ладомской» (м. Бауманская, ул. Ладомская, 8, стр. 1. Тел. 267-0302)  
 «СПб. дом книги» (Невский пр., 28. Тел. (812) 448-2355)  
 «100 000 книг» (г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 13. Тел. (343) 22-12-979)  
 Сеть магазинов «Дом книги» (г. Екатеринбург, ул. Антона Валена, 12. Тел. (343) 253-50-10)

## Уважаемые читатели! Уважаемые авторы!

Наше издательство специализируется на выпуске научной и учебной литературы, в том числе монографий, журналов, трудов ученых Российской академии наук, научно-исследовательских институтов и учебных заведений. Мы предлагаем авторам свои услуги на выгодных экономических условиях. При этом мы берем на себя всю работу по подготовке издания — от набора, редактирования и верстки до тиражирования и распространения.



URSS

Среди вышедших и готовящихся к изданию книг мы предлагаем Вам следующие:

### Серия «НАУКУ — ВСЕМ! Шедевры научно-популярной литературы»

*Перельман М. Е.* Наблюдения и озарения, или Как физики выявляют законы природы. Кн. 1, 2.

*Перельман М. Е.* А почему это так? Физика вокруг нас.

*Перельман М. Е.* А почему это так? Физика в гостях у других наук.

*Фрова А.* Почему происходит то, что происходит: Окружающий мир глазами ученого.

*Уле О.* Почему и потому: Учебник физики в вопросах и ответах.

*Гартман З.* Занимательная физика, или Физика во время прогулки.

*Ланге В. Н.* Физические парадоксы, софизмы и занимательные задачи. Кн. 1, 2.

*Ланге В. Н.* Физические опыты и наблюдения в домашней обстановке.

*Точидловский И. Я.* Что можно в школе сделать и показать по физике.

*Тисандье Г.* Научные развлечения.

*Гампсон В., Шеффер К.* Парадоксы природы.

*Спиридонов О. П.* Биографии физических констант.

*Чернин А. Д.* Физика времени.

*Владимиров Ю. С.* Пространство-время: явные и скрытые размерности.

*Петров А. З.* Пространство-время и материя.

*Хвольсон О. Д.* Теория относительности А. Эйнштейна и новое миропонимание.

*Сазанов А. А.* Четырехмерная модель мира по Минковскому.

*Перельман Я. И.* Занимательная астрономия.

*Кононович Э. В.* Солнце — дневная звезда.

*Липунов В. М.* В мире двойных звезд.

*Циолковский К. Э.* Труды по воздухоплаванию.

*Каганов М. И.* Электроны, фононы, магноны.

*Каганов М. И., Цукерник В. М.* Природа магнетизма.

*Тарасов Л. В., Тарасова А. Н.* Беседы о преломлении света.

*Губанков В. Н.* Солитоны.

*Ашкинази Л. А.* Электронные лампы: Из прошлого в будущее.

*Харкевич А. А.* Автоколебания.

*Кац Е. А.* Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры.

*Меньчуков А. Е.* В мире ориентиров.

*Закгейм А. Ю.* Системность — симметрия — эволюция в физике, химии, биологии.

*Покровский В. В.* Космос, Вселенная, теория всего почти без формул, или Как дошли до теории суперструн.

По всем вопросам Вы можете обратиться к нам:  
**тел. +7 (499) 724-25-45** (многоканальный)  
 или **электронной почтой** [URSS@URSS.ru](mailto:URSS@URSS.ru)  
 Полный каталог изданий представлен  
 в **интернет-магазине:** <http://URSS.ru>

**Научная и учебная  
литература**

# URSS

НАШИ НОВЫЕ  
КООРДИНАТЫ

## НАШИ НОВЫЕ КООРДИНАТЫ

Ул. Дм. Ульянова



**Академическая**

Ленинский пр-т

URSS

Ломоносовский пр-т

Остановки  
«Черемушкинский  
рынок»

ул. Вавилова

Остановка  
Ул. Вазирова

ул. Кржижановского

Нахимовский пр-т

Остановка  
«уд. Иван  
Бабушкина»

Являясь

# Профсоюзная



**От м. Профсоюзная:**

8 мин. пешком (до офиса)  
или одна остановка  
наземным транспортом:  
автобусы № 67, 67к, 130;  
троллейбус № 49;

до остановки  
«Ул. Ивана Бабушкина»

От м. Университет:

трамваи № 14, 39  
до остановки  
«Черемушкинский рынок»;  
трамваи № 22, 26  
до остановки  
«Ул. Вавилова»;  
автобусы № 67, 67г, 130;  
троллейбус № 49  
до остановки  
«Ул. Ивана Бабушкина».

ул. Вавилова

ул. Кржижановского

URSS

ул. Ивана Баб, шкина

Нахимовский пр-т

## Детальная схема



Доктор физико-математических наук. До 1997 г. — заведующий отделом теоретической физики и биофизики Института кибернетики Академии наук Грузии, вел курсы физики в вузах. С 1997 г. сотрудничал с Еврейским университетом в Иерусалиме, а также с Институтом физики им. Дж. Рака. Автор около 200 опубликованных работ по теоретической физике и ее приложениям в геофизике, биофизике, оптоэлектронике, а также по психологии, истории и популяризации науки; ему принадлежит ряд изобретений.

Основное направление исследований — теория длительностей взаимодействий частиц и ее приложения. Исследования понятий длительностей взаимодействий и различных их приложений подытожены в книге: *Perel'man M. E. Quantum Kinetics: duration of interactions. N.Y.: Nova Sc. Publ., 2010.*

### Наше издательство предлагает следующие книги:



11086 ID 157681



Отзывы о настоящем издании, а также обнаруженные опечатки присылайте по адресу [URSS@URSS.ru](mailto:URSS@URSS.ru). Ваши замечания и предложения будут учтены и отражены на web-странице этой книги в нашем интернет-магазине <http://URSS.ru>



URSS

E-mail: [URSS@URSS.ru](mailto:URSS@URSS.ru)  
Каталог изданий в Интернете: <http://URSS.ru>

**URSS** НАШИ НОВЫЕ  
КООРДИНАТЫ

ТЕЛЕФОН/ФАКС +7(499)724-25-45  
(многоканальный)  
117335 Москва Нахимовский пр-т, 56