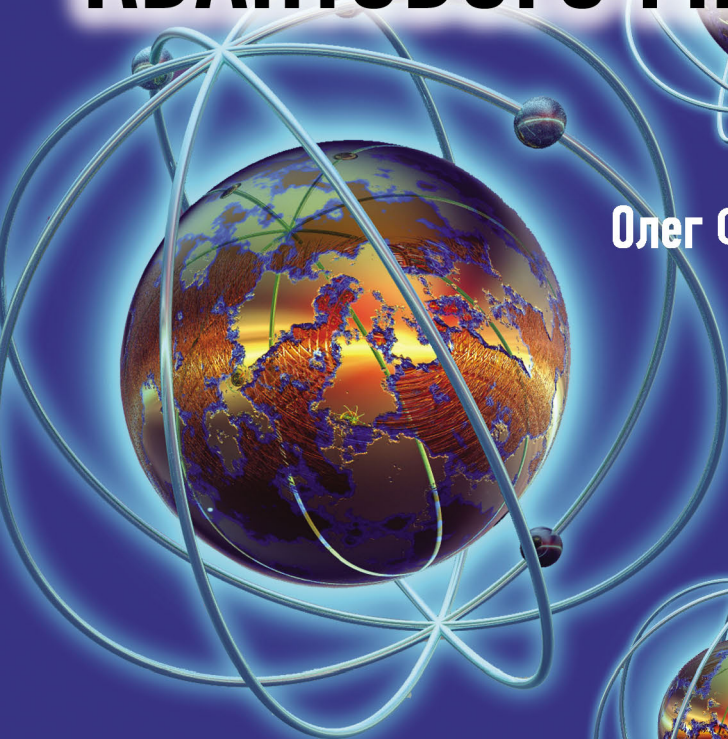




# ПАРАДОКСЫ КВАНТОВОГО МИРА

Олег Фейгин





# ПАРАДОКСЫ

---

# КВАНТОВОГО МИРА

Олег Фейгин



Москва  
2012

УДК 530.1  
ББК 22.314  
Ф 31

**Фейгин О.**

Ф 31 Парадоксы квантового мира / Олег Фейгин. — М. : Эксмо, 2012. — 288 с. : ил. — (Тайны мироздания).

ISBN 978-5-699-53016-8

Современная физика находится в ожидании грядущих революционных изменений. И одним из таких изменений может стать создание единой теории на основе квантовой механики и теории относительности. Мы проследим весь путь развития квантовой физики, пытающейся на основании новейших открытий создать эту единую теорию.

УДК 530.1  
ББК 22.314

Никакая часть настоящего издания ни в каких целях не может быть воспроизведена 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, если на это нет письменного разрешения ООО «Издательство «Эксмо».

ISBN 978-5-699-53016-8

© Фейгин О. О., 2011  
© ООО «Аудиономикс», 2011  
© ООО «Издательство «Эксмо», 2011

# Оглавление

Предисловие .....	4
Введение.....	6
Глава 1. На пороге квантовой эры.....	11
Античная атомистика.....	14
Х-лучи и радиоактивность .....	24
Открытие электрона.....	39
Глава 2. Рождение кванта.....	48
Ультрафиолетовая катастрофа.....	50
Гипотеза Планка .....	56
Квантовая теория излучения .....	60
Глава 3. Квантовая физика .....	65
Кванты и атомы.....	66
Волны и частицы .....	78
Квантовая механика Шрёдингера и Гейзенберга.....	86
Глава 4. Неизбежность сверхстранного мира.....	100
Великое противостояние: Бор против Эйнштейна .....	101
Квантовый кот Шрёдингера .....	115
Запутанный вопрос микромира .....	125
Глава 5. Удивительный мир микрочастиц .....	137
Проходящие сквозь стены.....	138
Восьмеричный путь кварков .....	163
Сверхпроводимость и лазеры .....	171
Глава 6. Колдовское исчисление.....	192
Мультиреальность .....	193
Миры на квантовых бранах .....	208
Квантовое время Космоса .....	230
Заключение .....	240
Биографический справочник.....	248
Словарь терминов.....	270
Литература по теме.....	284

*Моей любящей жене, совершенно не верящей  
в реальность миров хроноквантового Мультиверса*

## Предисловие

*«Путешественники, побывав в далеких странах, пишут путевые заметки. Они рассказывают о том, что видели, о том, что пленило их необычностью и новизной. Пишут для тех, кто там не бывал.*

*В современной науке для каждого из нас есть незнакомые страны... В своих путевых заметках автор и рассказал о том, что увидел. Рассказал для тех, кому еще не случалось проходить тем же маршрутом...»*

Д. Данин. Неизбежность странного мира

В школьные годы автору попала в руки замечательная книга, во многом определившая его судьбу и путь в науке: знаменитая «Неизбежность странного мира» Даниила Семеновича Данина. Увлекательно написанные заметки путешественника, побывавшего в удивительной стране элементарных частиц материи, где перед ним приоткрылся странный мир неожиданных идей и представлений, рассказывали о чудесах и парадоксах новой физической реальности атомного века, возникшей из классической науки века пара и электричества. Впоследствии Даниил Семенович не оставил эту тему и из-под его пера вышли научные популяризации «Вероятный мир», «Эрнест Резерфорд» и «Нильс Бор». Вместе с произведениями других талантливых авторов, таких как Виталий Исаакович Рыдник и Владимир Петрович Карцев, книги Данина составляют прекрасную научную библиотеку, открытую для всех любознательных.

Сегодня на полках книжных магазинов — совсем другие книги. Многие из них окончательно подрывают доверие к печатному слову. Религиозное мракобесие, оккультизм, спиритизм, астрология, экстрасенсорика, лженаука, наполненная безграмотными рассуждениями новых «гениев», получивших возможность беспрепятственно публиковать любую глупость за собственные деньги. К сожалению,

отдельные профессиональные ученые неожиданно увлеклись мистицизмом, идеализмом всяческих толков и другими околонучными измами.

Однако интерес к научным знаниям совсем не пропал, и об этом наглядно свидетельствует электронная почта автора. Читатели спрашивают, спорят и советуют, как лучше рассказать о современных исследованиях мира квантов, атомов и других элементарных частиц. Разумеется, объяснить, что собой представляет сотканная из суперструн и бран вероятностная текстура пространства-времени так же непросто, как принять глубоко парадоксальный образ новой физической реальности. Среди наиболее талантливых представителей научно-популярной литературы, чье влияние испытал автор, можно назвать такие известные имена, как Артур Давидович Чернин, Игорь Дмитриевич Новиков, Александр Владимирович Виленкин, Андрей Дмитриевич Линде, Стивен Хокинг, Роджер Пенроуз, Мичио Каку, Брайан Грин, Ли Смолин и Дэвид Дойч.

Автор благодарен всем коллегам за высказанные мнения о содержании и структуре рукописи, в первую очередь крупному ученому и общественному деятелю, председателю комиссии РАН по борьбе с лженаукой, академику Эдуарду Павловичу Круглякову, а также ныне покойному нобелевскому лауреату по физике Виталию Лазаревичу Гинзбургу.

# Введение

*«...А речь пойдет об элементарных частицах материи. Вернее, о радостях и горестях ищущей мысли ученых, исследующих нейтрино и электроны, протоны и нейтроны, мезоны и гипероны, античастицы и многое другое. Все это не просто заманчиво звучащие термины из хитроумного научного словаря. Все это, несомненно, существующие вещи. Столь же несомненно существующие, как атомы или молекулы, как видимое световое излучение или невидимые радиоволны».*

Д. Данин. Неизбежность странного мира



Радиотелескоп — парадоксальный пример современного научного инструментария, исследующего с помощью обитателей микромира (квантов электромагнитного излучения) мегамир видимой части Вселенной — Метагалактики (см. вклейку)

*«Самое, пожалуй, удивительное в современной физике — это неожиданная связь между космосом, где галактики и звездные скопления разбросаны подобно редким пылинкам, и тесным, исчезающе малым микромиром элементарных частиц. Два полюса мироздания! На одном огромная, расширяющаяся*

*Вселенная, на другом — не видимые ни под каким микроскопом, почти эфемерные „кирпичики“ вещества. И вот оказывается, что при определенных условиях Вселенная может обладать свойствами микрочастицы, а некоторые микрообъекты, возможно, содержат внутри себя целые космические миры. Во всяком случае, так говорит теория. Большое и малое, сложное и простое — здесь все переплелось».*

В. С. Барашенков. Кварки, протоны, Вселенная

Сегодня аура физической науки, по крайней мере ее теоретической части, наполнена тревожными флюидами грядущих революционных изменений. Это отмечают и ведущие физики-теоретики: Мичио Каку, Роджер Пенроуз, Стивен Хокинг, Стивен Вайнберг, Брайан Грин и Дэвид Дойч. По общему мнению, главная задача — поиск пути к «великому объединению» микро-, мезо-, макро- и мегамира в единое уравнение на основе квантовой механики и теории относительности. Именно этому великий Эйнштейн посвятил последние годы жизни, пытаясь найти священный Грааль физической науки. Дальнейшее развитие творческого наследия великого теоретика привело к своеобразной геометризации физики, выразившейся в исследовании квантовых миров иных измерений далеко за гранью наших трехмерных представлений. Чтобы хоть как-то осознать это, необходимо выйти за рамки привычных понятий и попытаться вообразить себе все чаще мелькающий на страницах научных журналов квантовый Мультиверс, такую возможную «луковицу миров».

Настоящая книга появилась благодаря вопросам, которые возникли у читателей после знакомства с книгами «Великая квантовая революция», «Большой взрыв» и «Физика нереального». Многие из них, увы, вызваны пробелами в школьном образовании и, что еще хуже, нездоровыми околонуучными сенсациями. Подобные вопросы, по-разному сформулированные, часто задают в средствах массовой информации, на конференциях и симпозиумах, научных форумах в Интернете, в студенческой и не только аудитории, в дружеской и семейной обстановке. Они довольно любопытные, разные по уровню и подтексту.



- ❑ Из чего состоят элементарные частицы: электрон, протон и нейтрон?
- ❑ Что будет, если бесконечно дробить частички материи?
- ❑ Как смогла родиться из первоатома или даже некоей элементарной частицы наша Вселенная?
- ❑ Существуют ли миры из антивещества, антигравитирующие и зеркальные?
- ❑ Что такое квантовый апокалипсис и когда его следует ожидать?
- ❑ Возможно ли возникновение черной дыры, в которой исчезнет Земля, в сверхмощном ускорителе элементарных частиц — Большом адронном коллайдере (принадлежит Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН), Женева, Швейцария)?
- ❑ Можно ли с помощью собственного сознания управлять ходом событий в микромире и если да, как это изменит окружающую реальность?

В итоге возникла идея написать книгу, которая согласно пожеланиям замечательного ученого-популяризатора Владилена Сергеевича Барашенкова была бы полезна и тем, кто выбирает свой жизненный путь, и тем, кто просто интересуется современной наукой. В ходе работы над рукописью, как и предсказывал Козьма Прутков, объять необъятное не удалось, так как даже выборочный перечень нерешенных задач современной квантовой физики с краткими комментариями составил бы солидный труд. Поэтому материал о квантовой космологии и квантовом Универсуме любознательные найдут в других недавно вышедших книгах автора.

Первая глава знакомит с истоками современной физики, а именно античной атомистикой. Это связано не только с преемственностью знаний, но и частым обращением современных квантовых теоретиков к творческому наследию древних мудрецов. Их ничем не ограниченный полет фантазии на основании очень скудных сведений об окружающем мире иногда приводил к удивительным прозрениям. Например, видный современный разработчик суперструнных

сценариев эволюции Вселенной Хуан Малдасена черпает свое вдохновение в творчестве древних элеатов (представителей философской элеатской школы, основанной в городе Элее в Великой Греции). Именно поэтому мы с помощью видного историка науки Павла Степановича Кудрявцева познакомимся со знаменитыми элистами-атомистами и их взглядами на неделимые фундаментальные «кирпичики» Мироздания, опытами естествоиспытателей XIX столетия — века пара и электричества, с началами новой атомистики, что зародилась в экспериментах с катодным и рентгеновским излучением, а также радиоактивностью.

Вторая глава посвящена собственно открытию квантовой структуры микромира и рассказывает об ультрафиолетовой катастрофе, следующей из классических принципов излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Содержит основные положения квантовой теории, такие как принцип неопределенности, и историю основного уравнения квантовой механики, выведенного Шрёдингером. При этом особое внимание уделено физическому смыслу волновой функции.

Третья глава о квантовой науке, изучающей микромир: экспериментальные исследования Резерфорда и теоретические построения Бора, планетарная модель атома Бора — Резерфорда, а также корпускулярно-волновой дуализм, «волны материи» и «волна-пилот» де Бройля. Она расскажет о квантовой механике Гейзенберга и Шрёдингера с ее принципами неопределенности и дополненности.

Четвертая глава о знаменитой полемике Бора и Эйнштейна, ЭПР-парадоксе, квантовом коте Шрёдингера и удивительной запутанности квантовых объектов.

Пятая глава об удивительном квантовом мире. В нем возможны такие макроквантовые явления, как туннелирование, сверхпроводимость, вынужденное излучение и целый спектр процессов, изучаемых физикой элементарных частиц.

Шестая глава, заключительная, приоткроет квантовые тайны микромира, нарисует современную квантовомеханическую картину Мироздания, включая многомировую интерпретацию квантовой механики, нелокальность микро-частичных объектов, суперструны, браны и квантовое время.

Книга включает биографический справочник и словарь терминов.

Итак, читатели, если вы еще не совсем позабыли школьную программу и хотите понять, как квантовый мир стимулирует развитие современных, иногда очень спорных, концепций физической реальности, эта книга для вас. Как и в других своих работах автор старался сосредоточиться на сути научных идей без их математической детализации, используя метафоры, аналогии, исторические экскурсы. Таким образом, можно не просто получить представление о взглядах на физику того или иного явления, но и понять, как и почему эти взгляды стали общепризнанными.

Приятного чтения.

# Глава 1

## На пороге квантовой эры

*Вот посмотри: всякий раз, когда солнечный свет проникает  
В наши жилища и мрак прорезает своими лучами,  
Множество маленьких тел в пустоте, ты увидишь, мелькая,  
Мечутся взад и вперед в лучистом сиянии света,  
Будто бы в вечной борьбе они бьются в сраженьях и битвах,  
В схватки бросаются вдруг по отрядам, не зная покоя,  
Или сходясь, или врозь непрерывно опять разлетаясь,  
Можешь из этого ты уяснить себе, как неустанно  
Первоначала вещей в пустоте необъятной мятутся.  
Так, исходя от начал, движение мало-помалу  
Наших касается чувств, и становится видимым также  
Нам и в пылинках оно, что движутся в солнечном свете,  
Хоть незаметны толчки, от которых оно происходит...*

Тит Лукреций Кар. О природе вещей



Фреска «Афинская школа»,  
художник Рафаэль Санти (1509–1511). Ватикан, Рим

*«С V в. до н. э. центр греческой науки переместился в Афины. Здесь появились учителя мудрости — первые научные школы. В Афинах высокого уровня достигли искусство, литература. В эпоху Перикла был создан знаменитый Акрополь, великим скульптором Фидием воздвигнуты статуи, греческий драматург Софокл писал трагедии, ставившиеся на сцене греческого театра, Аристофан сочинял комедии. В Афины приезжали выдающиеся представители греческой науки. Здесь учил математик Гиппократ, философ и физик Анаксагор (около 500–428 гг. до н. э.), создавший учение о „семенах“ всех вещей и движущем начале „нус“ (дух), сообщившем элементам материи вращательное движение, в результате которого образовалась Земля и все вещи».*

П. С. Кудрявцев. Курс истории физики.  
Возникновение атомистики

*«Несмотря на огромные заслуги науки Древнего Востока, подлинной родиной современной науки стала Древняя Греция. Именно здесь возникла теоретическая наука, разрабатывающая научные представления о мире, не сводящиеся к сумме практических рецептов, именно здесь развивался научный метод. Если египетский или вавилонский писец, формулируя правило вычисления, писал: „поступай так“, не поясняя, почему надо „поступать так“, то греческий ученый требовал доказательства. Основатель атомистики Демокрит высказал по этому поводу, замечательные слова: „Найти одно научное доказательство для меня значит больше, чем овладеть всем персидским Царством“. Современная наука хорошо запомнила, кому она обязана своим Рождением. Об этом свидетельствуют названия наук: математика, механика, физика, биология, география и т. д., взятые из греческого языка научные термины греческого происхождения (масса, атом, электрон, изотоп и т. д.), употребление греческих букв в формулах и, наконец, имена греческих ученых: Фалеса, Пифагора, Демокрита, Аристотеля, Архимеда, Евклида, Птолемея и других, сохранившиеся в научной литературе».*

П. С. Кудрявцев. Курс истории физики.  
Начальный этап античной науки

*«В настоящее время мы представляем себе идеальное научное объяснение совершенно иначе, чем в прошлом столетии. Физики второй половины XIX века считали понятной только такую вещь, для которой можно было построить модель, то есть известную конструкцию из рычагов, колес, винтов и других механических приспособлений. По их мнению, природа, строя Вселенную, не имела в своем распоряжении других средств, кроме тех, которые известны современному инженеру; так что объяснить данное явление — значит, вскрыть лежащий в его основе механизм. Человек, который объяснил бы тяготение действием механизма из зубчатых колес, был бы героем того времени».*

А. Эддингтон. Относительность и кванты

*«Атомный век имеет длительную предысторию. Его социально-экономические основы лежат в развитии общественных отношений конца XIX — начала XX века. В естественно-научном и техническом отношении он был подготовлен открытиями в физике, волновавшими мир с начала 90-х годов, но его корни уходят в более отдаленные времена.*

*С середины XIX столетия неустанно строился фундамент, на котором могло быть возведено здание физики XX века. При этом не обошлось без изменения проектов. Основные положения естественных наук либо утрачивали свою всеобщность, либо опровергались. Привычные убеждения, считавшиеся незыблемыми, рушились. Больше чем когда-либо физика в эти десятилетия становилась, по словам Эйнштейна, „приключением познания“».*

Ф. Гернек. Пионеры атомного века

*«И наконец, самой зияющей пропастью, в которую предстояло заглянуть классической физике в последние годы ее безраздельного царствования, было открытие радиоактивности. В таинственных процессах радиоактивности рушились не только атомные ядра. Рушились коренные, казавшиеся совершенно очевидными с точки зрения здравого смысла положения старой физики. И сквозь трещины в ее здании бурно проросли семена новых теорий — теории относительности и теории квантов».*

В. Рьдник. Что такое квантовая механика

*«Мы... полагали, что то вещество, которое мы извлекли из смоляной руды, содержит какой-то металл, до сих пор еще не замеченный, по своим аналитическим свойствам близкий к висмуту. Если существование этого нового металла подтвердится, мы предлагаем назвать его полонием, по названию страны, из которой один из нас родом...»*

Пьер и Мария Кюри. О новом радиоактивном веществе, содержащемся в смоляной руде

## Античная атомистика

*«Философы ионической школы, знаменитым представителем которой был Фалес Милетский (630–550 до н. э.), признавали только один элемент — воду, „на которой покоится земля и которая дала начало всему, что есть“. Впоследствии Эмпедокл (490–430 до н. э.) добавил к воде еще три элемента: землю, огонь и воздух. Наконец, Аристотель (384–322 до н. э.) к этим четырем элементам присоединил пятый, духовный — quinta essential, — воспоминание о котором сохранилось до сих пор в слове „квинтэссенция“».*

Л. Пономарев. Под знаком кванта

За тысячелетия войн, пожаров, наводнений канули в Лету множество культурных ценностей: папирусов, книг, картин. Поэтому все, что известно о самых первых догадках и предположениях относительно строения материи из неких неделимых или ограниченно делимых элементов, в основном дошло благодаря последующим пересказам. Вероятно, именно таким образом пальма первенства в развитии подобных идей досталась сицилийскому мудрецу Эмпедоклу из Агригента (490–430 до н. э.).

У Эмпедокла можно встретить утверждения о наличии в окружающем мире некоего всеобщего «атомистического» начала сохранения. Согласно его учению все известные в природе элементы представляли абсолютно вечными и неизменными, поскольку «они остаются сами собой». При этом

Эмпедокл задает вопрос: если бы они (природные элементы) совсем погибли и их не было бы более, как бы возникла Вселенная? Откуда она явилась бы?



Эмпедокл Акрагантский

*«Эмпедокл предполагает четыре материальных элемента, а именно: огонь, воздух, воду и землю; эти элементы, будучи вечными, изменяются по числу и величине путем соединения и разделения. Существуют два начала в современном смысле этого слова, при помощи которых элементы приводятся в движение; эти начала — Любовь и Вражда, ибо элементы должны подвергаться двоякому движению, а именно: то соединению путем Любви, то разделению путем Вражды».*

Теофраст, греческий философ и историк науки



По мысли философа, элементарные составляющие Мира — Космоса (так в Элладе обозначали Вселенную в отличие от освоенной человечеством части — Ойкумены) не могут исчезнуть, поскольку «нет пространства, не наполненного ими».

Вечность Космоса Эмпедокла, обуславливалась неким всеобщим «принципом сохранения», гласящим, что «ничто не может произойти из ничего, и никак не может то, что есть, уничтожиться». С подобных натурфилософских принципов и начинается история фундаментальных законов сохранения.

Учение Эмпедокла продолжил «триумвират великих атомистов»: Анаксагор из Клазомен (500–428 до н. э.), Левкипп из Милета (500–440 до н. э.) и Демокрит из Абдеры (460–370 до н. э.).

Атомистика Анаксагора в пересказе выглядит скорее как некое материально-молекулярное учение, рассматривающее круговорот веществ в природе. Древнегреческий ученый полагал, что вся видимая простейшая пища, включая воду и хлеб, превращается в волосы, ногти, кожу, кости, кровь и внутренние органы. Значит, в хлебе и воде содержатся мельчайшие волосы и прочие органы человека или животного, которые нельзя обнаружить из-за их малости. Анаксагор в своих рассуждениях приходил к парадоксальным выводам: снег на самом деле темен, как вода, поскольку состоит из ее элементов, а белым его воспринимают наши несовершенные глаза.

Анаксагор был современником отцов античной атомистики Левкиппа и Демокрита. Учение этих современников и соратников во многом переплетается между собой и часто выступает как общее. Левкиппу в нем приписывают следующие тезисы.

- ❑ Все вокруг наполнено абсолютной пустотой.
- ❑ В этой пустоте вечно движутся самые мелкие элементы вещества — атомы.

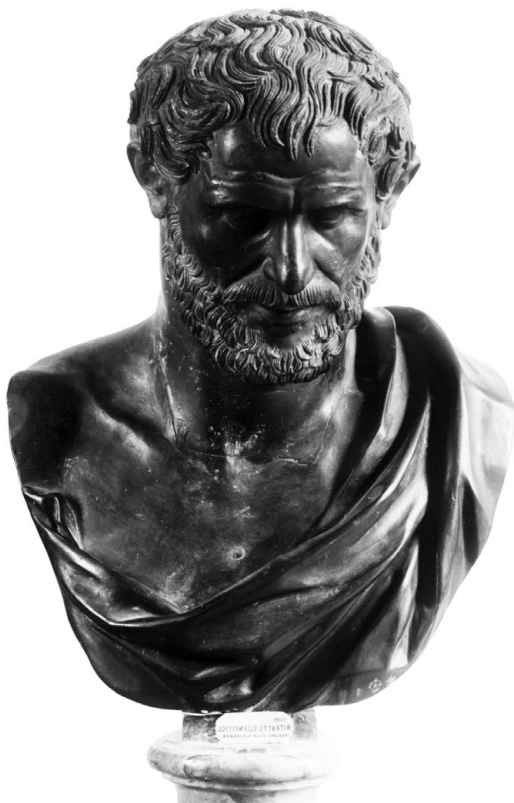
Несколько больше известно о творчестве Демокрита, ученика и продолжателя атомистических традиций Анаксагора и Левкиппа.

- ❑ Из ничего не происходит ничего. Ничто существующее не может быть разрушено. Все изменения происходят благодаря соединению и разложению частей.
- ❑ Ничто не совершается случайно, но все совершается по какому-нибудь основанию и с необходимостью.
- ❑ Не существует ничего, кроме атомов и чистого пространства, все другое только воззрение.
- ❑ Атомы бесконечны по числу и бесконечно разнообразны по форме. В вечном падении через бесконечное пространство большие, которые падают скорее, ударяются о меньшие; возникающие из этого боковые движения и вихри служат началом образования мира. Бесчисленные миры образуются и снова исчезают одни рядом с другими и одни после других.
- ❑ Различие между вещами происходит от различия их атомов в числе, величине, форме и порядке; качественного различия между атомами не существует. В атоме нет никаких «внутренних состояний»; они действуют друг на друга только путем давления и удара.
- ❑ Душа состоит из тонких, гладких и круглых атомов, подобных атомам огня. Эти атомы наиболее подвижны, и движения их, проникающие в тело, производят все жизненные явления.

В натурфилософии Демокрита нет места богам и высшим силам, которые обычно двигают все частицы, элементы, предметы и стихии. Движение атомов Демокрита вечно само по себе и вообще не нуждается в каком-либо особом начале. По мысли этого древнего ученого, атомы движутся в бесконечно протяженном пустом пространстве, при этом они непрерывно сталкиваются друг с другом, порождая все сущее, включая бесчисленные миры, подобные Ойкумене.

Понятие пустого бесконечного пространства Демокрита — совершенно новый элемент Космоса, в значительной степени связанный с развитием планиметрии. Успехи в геометрии формировали образ некоего пустого пространства, вечного и неизменного и совершенно лишённого каких-либо чувственно воспринимаемых свойств. При этом возникало

фундаментальное понятие некоей вселенской сцены, очерченной точками, линиями и поверхностями геометрических тел. Эти абстрактные образы составляли абсолютное пространство, свойства которого так блестяще систематизировал Евклид. Именно с тех пор евклидово пространство является собой некую «чистую протяженность», лишенную материального содержания, вселенскую арену для бесконечного движения атомов под воздействием различных природных сил. Между тем учение атомистов было не просто универсальным (бесконечные вихри атомов в абсолютно пустом пространстве), но и описывало разнообразные социальные и психические явления Космоса.



Демокрит Абдерский

*«Сам Демокрит был крупным математиком. Одним из фундаментальных результатов его математических работ было доказательство, что объем пирамиды равен одной третьей объема призмы, а объем конуса — одной третьей объема цилиндра. В математических доказательствах Демокрита огромную роль играла атомистика. Атомами линии были точки, атомами поверхности — линии, атомами объемов — тонкие листки».*

П. С. Кудрявцев. Курс истории физики.  
Возникновение атомистики

Древнегреческий атомистический материализм столкнулся с идеалистическими измышлениями Сократа (469–399 до н. э.) и его знаменитого ученика Платона (427–347 до н. э.). В силу исторических обстоятельств он был вытеснен на обочину философской мысли, ибо был слишком разнороден и во многом противоречив, а общество нуждалось в систематизированном знании. Такой свод различных сведений составил ученик Платона, знаменитый мыслитель древности Аристотель из Стагира (384–322 до н. э.). Своими обобщающими трудами, которые отражали представления того времени, великий Стагирит открыл новую эпоху в развитии метафизики Древнего Мира.

Любая религия с момента своего возникновения (впоследствии особенно христианская и ислам) была ярким врагом познания природы, науки, всячески уничтожала и ограничивала свободу научной мысли. В истории науки, в том числе и античной натурфилософии, оставили страшный след религиозные фанатики. Они обвиняли выдающихся мыслителей в безбожии и колдовстве. До нас дошла прекрасная «научно-популярная» поэма «О природе вещей» римского поэта и философа Тита Лукреция Кара (99–55 до н. э.). В этом классическом произведении научного естествознания критикуется «тягостный гнет религии». Против него восстал блестящий представитель афинской научной мысли метафизик Эпикур (341–270 до н. э.). Борясь с религиозным порабощением, под которым «безобразно влачила» жизнь людей, он талантливо продолжил и развил атомистическое учение Демокрита. В произведениях Эпикура, пересказанных

его учениками и учениками учеников, встречаются веяния новой эпохи, опирающейся на материальный Космос.

Мысли Эпикура о природе вещественного Космоса в общем основывались на концепции атомов Левкиппа — Демокрита. Само представление об атомах Эпикуром выводилось из хорошо известных фактов. Например, он объяснял, что мокрая одежда высыхает под действием ветра и солнечного тепла, так как от полотна отрываются внешне невидимые частички-атомы воды, а левая рука медного идола у городских ворот, которую полагалось лобызать паломникам, входившим в древнегреческий полис, заметно тоньше по сравнению с правой рукой из-за того, что при поцелуе губы уносят частицы-атомы меди. Атомы Эпикура и Лукреция выглядят сегодня вполне современно, особенно если их обобщить с молекулами: они рисовались непрерывно увлекаемыми вихрями беспорядочного движения. Лукреций представлял модель движения атомов как хаотический полет пылинок в солнечных лучах. Это одна из самых первых в истории науки картин молекулярного движения, представленная древним автором. Эпикур объясняет хаос атомарного движения несколько иначе, чем Демокрит. Он отходит от строгого детерминизма и предопределенности всего сущего, считая хаотическое движение началом непредсказуемого и случайного. Весьма любопытна мысль Эпикура о том, что в скорости падения малых и больших атомов нет никакого различия, поскольку в пустоте все частицы-атомы движутся с абсолютно одинаковой скоростью.

Эпикур, а за ним и Лукреций пытались объяснить не только природные, но и психические и социальные явления. По случайным причинам возникают самопроизвольные отклонения той или иной атомарной частицы от «предопределенного» ей пути движения. Одна только необходимость никак не в состоянии объяснить все наблюдаемое разнообразие природных явлений и особенности поведения «живой материи», включая людей и животных. Лукреций прямо указывал, что необходимо допускать наличие некоторых случайных атомарных отклонений «в неопределенных местах, в неопределенное время». Эти отклонения римский натурфилософ считал совершенно необходимыми, чтобы обосновать свободу волеизъявления,

так что атомы как бы обладают собственным прообразом «свободой воли». Так впервые в истории в научный анализ наряду с необходимостью вошла случайность. При желании здесь можно разглядеть зерно науки будущего, намного опередившей абсолютный детерминизм эпохи Возрождения.



Тит Лукреций Кар (99–55 до н. э.)

*Ты видишь отсюда,  
Что из материи все вырастает своей и живет ей.  
...Нет никакого конца ни с одной стороны у вселенной,  
Ибо иначе края непременно она бы имела.  
...И безразлично, в какой ты находишься части вселенной:  
Где бы ты ни был, везде, с того места, что ты занимаешь,  
Всё бесконечной она остается во всех направленьях.*

Тит Лукреций Кар. О природе вещей

Лукреций прямо критиковал господствовавший в те времена религиозный тезис о сотворении мира из ничего по божественной воле, противопоставляя ему идею о вечных превращениях состоящей из атомов неразрушимой материи.

Поразительна космология и космогония Лукреция, в его трудах можно встретить удивительные озарения, опередившие свое время. Например, отвергая учение Аристотеля о Земле как естественном центре Вселенной, он считал, что существует множество обитаемых миров, которые непрерывно возникают из все новых и новых сочетаний атомов.

Итак, древние атомисты дали науке плодотворную материалистическую идею огромного исторического значения. Сейчас это современная наука об атомах, ядрах и элементарных частицах. Эллинисты смело строили первые натурфилософские теории, основанные на атомизме, и многие из их гениальных догадок так или иначе предопределили будущий успех диалектического материализма в естествознании. Можно сказать, что и современная кинетическая теория вещества когда-то начиналась с феерических картин, художественно нарисованных Лукрецием в поэме «О природе вещей». В ней есть обсуждение воззрений Гераклита Эфесского, Эмпедокла, Анаксагора, Демокрита, причем все они не только критически оценивались, но и дополнялись более современными идеями Эпикура. Атомистике Лукреция присущи новые черты, она более конкретна и научна, чем теории его предшественников. И если атомы школы Левкиппа по сути лишь абстрактные геометрические образы, характеризующиеся исключительно формой и объемом, то эпикурейцы вместе с Лукрецием наделяли атомы весом, плотностью, твердостью и некоторой внутренней способностью к самопроизвольным отклонениям в непрерывном движении. Подобные модели движения атомов в пустоте показывают, что естествознание начало переходить из сферы философских умозаключений, основанных лишь на формальной логике, в сферу природных фактов и явлений.

Между тем вопросы о том, как выглядят атомы и как взаимодействуют друг с другом, оставались без ответа: античная атомистика не располагала какими-либо опытными

наблюдениями. Затем западный мир погрузился во мрак средневековой инквизиции, озаряемый кострами из книг и их авторов.

После 20 веков забвения принципы атомистики попробовал возродить французский натурфилософ — просветитель Пьер Гассенди (1592–1655), неоднократно подвергавшийся гонениям со стороны церкви. Несмотря ни на что, учение об атомах все шире распространялось среди передовых ученых того времени, включая Исаака Ньютона. Однако и в устах великого физика оно осталось хоть и продуманным, но во многом чисто умозрительным построением.

Первое опытное подтверждение гипотезы о неделимых «элементарных основах Мироздания» получил ботаник из Шотландии Роберт Броун (1773–1858). На посту директора ботанического отдела Британского музея он изучал многочисленные препараты из растений. В 1827 году при исследовании пыльцы гербариев, собранных в очередном кругосветном путешествии, он неожиданно заметил, что мельчайшие частички произвольно колеблются и вращаются в воде под действием какой-то неизвестной силы. Так возник «Краткий отчет о микроскопических наблюдениях, сделанных в июне, июле и августе 1827 года над частицами, содержащимися в пыльце растений; и о существовании активных молекул в органических и неорганических телах».

Вначале Броун очень неудачно объяснил наблюдаемое микроскопическое движение некой «живой силой», якобы присущей всем органическим молекулам, которые подталкивают со всех сторон мельчайшие частицы пыльцы. Вполне естественно, что подобное излишне прямолинейное объяснение движения, к тому времени уже получившего название «броуновское», вызвало сильное сомнение и подтолкнуло исследователей к новым опытам. Вскоре выяснилось, что броуновское движение не зависит от таких внешних условий, как время года и суток, добавления химических веществ, вида пыльцы и даже «...наблюдается одинаково хорошо ночью в деревне и днем вблизи многолюдной улицы, где проезжают тяжелые экипажи».

Первоначально на странные колебания и вращения мелких частичек в водных растворах не обращали особого



внимания, поскольку их отождествляли с микроскопическими движениями самой жидкости, подобно «танцу» пылинок в воздушных течениях. Лишь несколько десятилетий спустя, в конце XIX века, начала формироваться идея о том, что видимые в микроскоп беспорядочные колебательные движения мельчайших частиц вызваны случайными толчками невидимых частиц жидкости, столь малых, что они не разрешаются оптической силой микроскопа.

## Х-лучи и радиоактивность

*«Кусок бумаги, покрытой платиносинеродистым барием, при приближении к трубке, закрытой достаточно плотно прилегающим к ней чехлом из тонкого черного картона, при каждом разряде вспыхивает ярким светом: начинает флюоресцировать. Флюоресценция видна при достаточном затемнении и не зависит от того, подносить ли бумагу стороной, покрытой или не покрытой платиносинеродистым барием, флюоресценция заметна еще на расстоянии двух метров от трубки... Черный картон, не прозрачный ни для видимых и ультрафиолетовых лучей солнца, ни для лучей электрической дуги, пронизывается каким-то агентом, вызывающим энергичную флюоресценцию.*

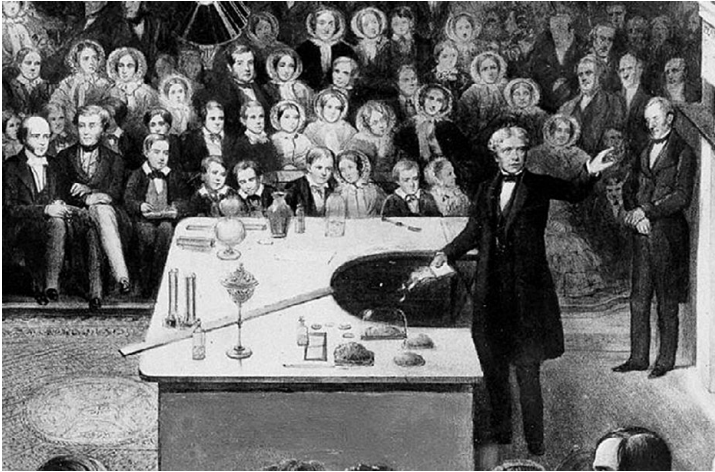
*Если держать между разрядной трубкой и экраном руку, то видны темные тени костей в слабых очертаниях тени самой руки...*

*Х-лучи не идентичны с катодными лучами, но возбуждаются ими в стеклянных стенках разрядной трубки и ведут себя иначе, чем известные до сих пор ультрафиолетовые, видимые, инфракрасные лучи...»*

К. Рентген. О новом роде лучей (доклад 28 декабря 1895 года на заседании Вюрцбургского физико-медицинского общества)

*«Природа катодного свечения из самых общих рассуждений может быть связана с яростными столкновениями мельчайших частичек материи, возможно связанных с неделимыми атомами в древнегреческой традиции деления вещества».*

М. Фарадей. Экспериментальные работы по электричеству



Майкл Фарадей проводит публичную лекцию

В конце XIX века среди физиков-экспериментаторов наблюдался повышенный интерес к процессам прохождения электричества через газы. Еще выдающийся экспериментатор Майкл Фарадей (1791–1867) серьезно изучал подобные явления и сумел выделить разнообразные формы разряда, открыв при этом фарадеево темное пространство, отделяющее розоватое катодное свечение от синеватого анодного.

Дальнейшие опыты с высокоразреженными газами показали, что давление внутри колб существенно влияет на характер свечения. В экспериментах использовали довольно высоко вакуумированные колбы — гейслеровы трубки. Немецкий физик Юлиус Плюккер (1801–1868), снабдив их электродами, заметил, что при определенном напряжении вокруг катода появляется зеленоватое свечение. Плюккер также выяснил, что, если к колбе поднести достаточно сильный магнит, свечение отталкивается от одного полюса и притягивается к другому. Это напрямую указывало на электрическую природу свечения, к тому же вскоре стало очевидно, что нечто, связанное со свечением, перемещается в пространстве между анодом и катодом. Этим феноменом занялись ученик Плюккера физико-химик Иоганн Вильгельм Гитторф (1824–1914) и британский физик Уильям Крукс (1832–1919).

Они независимо друг от друга показали, что при помещении в гейслерову трубку куска металла на стекле на противоположном от катода конце появлялась тень. Германский физик Эуген Гольдштейн (1850–1930), который всю жизнь изучал это таинственное свечение, в 1876 году опубликовал работу о «катодных лучах». Под этим названием загадочное явление и вошло в науку.

Через три года Крукс подтвердил материальную природу катодных лучей, посчитав их некоей разновидностью «лучистой материи», вещества, находящегося в особом четвертом состоянии. На основе гейслеровских трубок он создал специальный электровакуумный прибор, трубку Крукса, в виде герметичной колбы, заполненной разреженным газом. С двух сторон в трубку Крукса было впаяно по электроду: катод, подключавшийся к отрицательному полюсу электрической батареи, и анод, соединенный с положительной клеммой. При подключении высокого напряжения разреженное пространство в колбе переливалось разным цветом под действием катодных лучей.

Именно с подобными вакуумированными колбами, наполненными различными сильно разреженными газами, экспериментировал в конце 1895 года немецкий профессор Вильгельм Конрад Рентген. Как-то раз по окончании очередной серии экспериментов, он, выключив освещение, накрыл трубку чехлом из черного картона, однако газовая трубка продолжала оставаться под напряжением, вызывая заметное свечение у случайно оказавшегося рядом синеродистого бария. Удивленный этим загадочным явлением, Рентген начал лихорадочно проводить самые различные опыты с разными трубками и бариевыми экранами. Прежде всего ученый занялся исследованием проникающей способности таинственного излучения, которое он назвал X-лучами. Было обнаружено, что X-лучи практически свободно проникают сквозь бумагу, дерево, эбонит (запеченный каучук), тонкие слои металлов, но сильно экранируются свинцом.

Рентген случайно наткнулся на воздействие X-лучей на живые ткани. После того как он получил снимки различных человеческих органов, стало возможным возникновение

медицинской диагностики для выявления скрытых (латентных) заболеваний на ранней стадии их развития.

Экспериментальные исследования Рентгена позволили твердо установить существенное отличие Х-лучей от катодного излучения, которое их и генерирует. Они не несли заряда и не отклонялись в магнитном поле, при определенных условиях могли возбуждаться не только в толще стекла, но и в металлах. Физик считал, что Х-лучи имеют «эфирную природу», но ему не удалось обнаружить их волновых свойств, и в конце концов он начал склоняться к мысли, что по своему химическому и люминесцентному действию они более всего сходны с ультрафиолетовым излучением.

Открытие Х-лучей стало настоящей сенсацией в основном из-за их способности просвечивать человеческие ткани, их загадочная природа вызвала огромный интерес и в научном обществе. опыты Рентгена повторяли во многих лабораториях мира. В России с Х-лучами экспериментировали замечательный русский ученый Петр Николаевич Лебедев (1866–1912) и изобретатель радио Александр Степанович Попов (1859–1906). Эти выдающиеся исследователи усовершенствовали технику эксперимента и часто демонстрировали на своих публичных лекциях самые различные рентгенограммы.



Вильгельм Конрад Рентген

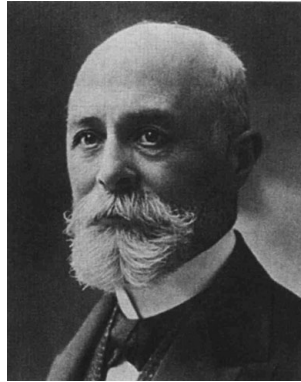
Профессор Вюрцбургского университета Рентген открыл таинственные лучи в ноябре 1895 года, а в декабре об этом была опубликована короткая заметка. Более полутора месяцев ученый тщательно их исследовал и установил, что они возникают под ударами катодных лучей на флюоресцирующих стенках электровакуумной трубки. За это открытие он

был удостоен в 1901 году Нобелевской премии, став самым первым нобелевским лауреатом по физике. С 1900 года и до последних дней жизни Рентген работал в Мюнхенском университете. Открытые им лучи теперь все называют рентгеновскими, а один из методов медицинской диагностики *рентгенографией* (рентгеном).

Опыты Рентгена неожиданно способствовали открытию еще одного поразительного природного явления — радиоактивности. 20 января 1896 года Анри Пуанкаре (1854–1912) на очередном заседании Французской академии наук сделал доклад об открытии еще одного вида необычного излучения. При этом он показал снимки, напоминающие рентгеновские, но полученные вблизи флуоресцирующих солей тяжелых металлов. Так было высказано предположение, что рентгеновское излучение как-то связано с флуоресценцией и, вполне возможно, генерируется люминесцирующими веществами (люминофорами), поэтому можно обойтись и без катодной трубки для получения X-лучей. На этом ученом собрании присутствовал Анри Беккерель, представитель целой династии исследователей флуоресценции и фосфоресценции. Беккерель тут же взялся за проверку гипотезы Пуанкаре и вскоре уже демонстрировал парижским академикам действие люминофора сернистого цинка на фоточувствительную эмульсию, завернутую в черную бумагу. Зная о сильной флуоресценции солей урана, Беккерель использовал двойной сульфат уранита калия. Он обернул фоточувствительную пластинку плотной черной бумагой и положил на нее металлический экран с причудливым узором из соли урана. После многочасовой экспозиции в прямых солнечных лучах пластинка была проявлена и на ней четко запечатлелись «урановые узоры». Проверочные опыты полностью подтвердили результаты Беккереля, 24 февраля 1896 года он в присутствии самого Пуанкаре сделал доклад на очередном заседании Французской академии наук.

Это сообщение было воспринято как безусловное подтверждение теории Пуанкаре, но Беккерель интуитивно чувствовал тут какую-то недосказанность и продолжал

свои исследования. Как-то раз он приготовил все для очередной солнечной экспозиции, но погода испортилась и ученый отложил оборудование. Через несколько дней Беккерель решил возобновить опыты и проявил неиспользованные пластинки, пролежавшие несколько дней в темном шкафу вблизи солей урана. Каково же было его восторженное изумление, когда на проявленных фотопластинках четко выступили контуры образцов минералов!



Антуан Анри Беккерель

*«...26 и 27 февраля солнце появлялось лишь изредка, так что я прекратил эксперименты и поместил незавернутые пластинки в ящик стола, а соли урана оставил на том же месте. Солнце не появлялось в течение нескольких последующих дней, поэтому я проявил пластинки 3 марта, ожидая увидеть лишь слабые изображения. А силуэты медного экрана, напротив, оказались чрезвычайно отчетливыми...*

*С 3 марта по 3 мая эти соли урана находились в свинцовом контейнере, который хранился в темноте... Но и при этих условиях соли продолжали активно излучать... Все урановые соли, которые я исследовал, независимо от того, фосфоресцировали они или нет на свету или в растворе, дали сходные результаты. Тогда я вынужден был сделать заключение, что наблюдаемый эффект связан с присутствием в этих солях элемента урана».*

А. Беккерель. Фосфоресценция соли урана — бисульфата урана-натрия

Данный минерал засвечивал фотопластинку некими совершенно невидимыми лучами, они испускались без всякой внешней подсветки и к тому же легко проникали через непрозрачные экраны. После длинной серии повторных

опытов 2 марта 1896 года Беккерель сообщает о своем удивительном открытии на очередном заседании Французской академии наук. Во множестве последующих экспериментов, в которых кроме Беккереля приняли участие и другие физико-химики, было открыто, что таинственные лучи могут испускать только различные соединения урана. Отсюда и их название — «урановые лучи», или «излучение Беккереля». Излучение оказалось феноменально устойчивым и могло месяцами ионизировать воздух и разряжать заряженные лепестки электроскопа. Поздней осенью 1896 года Беккерель подвел первые итоги своих исследований и со всей определенностью констатировал: излучательной способностью в разной мере обладают практически все урановые соединения и сам уран. Причем их излучательные свойства совершенно не зависят от химического и физического состояния урансодержащих препаратов.

Природу открытого им явления Беккерель долгое время относил к особой разновидности фосфоресценции, считая свойства урановых лучей во многом подобными свойствам световых волн, так как уран «представляет первый пример металла, обнаруживающего свойство, подобное невидимой фосфоресценции».

Вскоре Беккерель и независимо от него Джозеф Томсон (1856–1940) с Эрнестом Резерфордом (1871–1937) обнаружили и тщательно исследовали ионизирующее действие урановых лучей, резко повышающих электропроводность воздушной и газовой среды. Так был обнаружен важнейший метод исследования радиоактивности, причем в сообщении о результатах наблюдений разряда под действием урановых лучей Беккерель отметил, что активность урановых препаратов практически не менялась за весь годичный срок наблюдений.

В 1897 году к исследованиям Беккереля присоединились и другие ученые, прежде всего супруги Пьер и Мария Кюри. В апреле 1898 года была опубликована первая статья знаменитых супругов по радиоактивности, где собственно и вводился данный термин, скоро ставший общепринятым. Мария Склодовская-Кюри сделала радиоактивные явления главной темой своей докторской диссертации и написала,

что с самого начала поставила перед собой цель: поиск иных радиоактивных веществ, аналогичных по своим излучающим свойствам урану.

Супруги Кюри превратили заброшенный сарай Парижской школы промышленной физики и химии в самую настоящую радиологическую лабораторию, проводя в ней титаническую работу по обогащению урановой руды. Это был очень опасный и изнурительный труд, но вначале исследователи только смутно догадывались о вредоносном воздействии радиоактивного излучения. В конечном итоге именно смертельная передозировка «урановых лучей Беккереля» вызвала тяжелую болезнь крови и привела к безвременной кончине Марии Склодовской-Кюри.

В 1898 году физический раздел июльского выпуска докладов Французской академии наук открывался статьей супругов Кюри «О новом радиоактивном веществе, содержащемся в смоляной руде». В ней приводились методы химической сепарации радиоактивных соединений, без всякого преувеличения положившие начало всей современной радиохимии. Новое радиоактивное вещество было названо полонием в честь родины Марии Кюри. Излучающая способность полония более чем в 400 раз превосходила активность урана. А в декабре того же года уже появилась новая работа супругов Кюри «Об одном новом, сильно радиоактивном веществе, содержащемся в смоляной руде». В ней рассказывалось об открытии очень радиоактивного вещества с химическими свойствами, напоминающими барий, а хлористое соединение нового элемента более чем в 900 раз превышало активность урана. В спектре загадочного соединения была обнаружена линия, которая не принадлежала ни одному из известных веществ. Новый радиоактивный элемент супруги Кюри назвали радий. Согласно точке зрения, высказанной Марией Кюри в этой работе, открытия полония и радия завершили новый этап в истории радиоактивности. Супруги Кюри отмечали по этому поводу, что радиоактивность — свойство атомов, сохраняющееся во всех химических и физических состояниях вещества. Затем в одной из работ, написанных уже после смерти Пьера, Склодовская-Кюри уточняла, что радиоактивность урановых и ториевых соединений



представляется именно спецификой их атомных свойств, связанных с наличием атомов радиоактивных элементов, которая не уничтожается ни переменной физического состояния, ни химическими преобразованиями.

Научное сообщество полностью разделяло этот вывод выдающихся ученых, и уже в декабре 1903 года Беккерель и супруги Кюри стали лауреатами Нобелевской премии.



Пьер и Мария Кюри в лаборатории

*«Я измеряла напряженность урановых лучей, пользуясь их свойством сообщать воздуху электропроводность... При этих измерениях употреблялась металлическая пластинка, покрытая слоем уранового порошка...*

*Торий и его соединения имеют то же свойство... Таким образом, уран, торий и их соединения испускают беккерелевые лучи. Вещества, обладающие этим свойством, я назвала радиоактивными. С тех пор это имя стало общепринятым...*

*Мне доводилось обрабатывать зараз до двадцати килограммов первичного материала и в результате уставлять сарай большими сосудами с химическими осадками и жидкостями.*

*Это был изнурительный труд — переносить мешки в сосуды, переливать жидкости из одного сосуда в другой, несколько часов подряд мешать кипящий материал в чугунном сосуде...»*

М. Кюри. Пьер Кюри

После подтверждения в сотнях опытов радиоактивности атомов урана, тория, полония и радия ученые вплотную занялись исследованием природы радиоактивного излучения. Первым достиг здесь успеха молодой физик-экспериментатор из Новой Зеландии Эрнест Резерфорд. После переезда в Кембридж ему удалось обнаружить сложный состав радиоактивных лучей, и в публикации 1899 года «Излучение урана и вызываемая им электропроводность» он наглядно показал электрическими методами, что излучение урана имеет довольно сложный состав. В своих опытах Резерфорд использовал массивный воздушный конденсатор, пластины которого были покрыты порошком солей урана. При измерении скорости разряда исследовалось ионизирующее действие урановых лучей. Впоследствии Резерфорд подчеркивал, что именно эти опыты убедительно доказали, что излучение урана принципиально неоднородно по составу и в нем присутствуют по крайней мере два типа радиационного излучения. Одно из них, характеризующее сравнительно интенсивным поглощением, ученый назвал для удобства альфа-излучением, а другое, с высокой проникающей способностью, бета-излучением.

После открытия радиоактивности тория Резерфорд сразу же приступил к исследованию нового элемента и вскоре обнаружил, что альфа-излучение тория обладает большей проникающей способностью, чем аналогичное излучение урана. Кроме того, оказалось, что радиация тория довольно неоднородна по своему составу, и в ней присутствуют какие-то странные «лучи большой проникающей способности». Однако точного анализа излучения тория Резерфорд проводить не стал, и позже уже другие исследователи окончательно выделили сильно проникающее слабое излучение, названное гамма-лучами.

Все три разновидности радиоактивного излучения отличаются не только проникающей способностью. В 1900 году сразу несколько экспериментаторов показали, что бета-лучи отклоняются магнитным полем в ту же сторону, что и катодное излучение. Это позволило Резерфорду прямо говорить о бета-лучах как о потоках электронов. А в феврале 1903 года он успешно показал, что и не отклоняемые альфа-лучи на самом деле испытывают воздействие достаточно сильных магнитных и электрических полей. По сравнению с катодными лучами альфа-лучи отклонялись в противоположную сторону, что позволило сделать вывод: состоят из положительно заряженных частиц, движущихся с очень высокой скоростью.

Подытожив все известные факты, Склодовская-Кюри в 1903 году привела в своей докторской диссертации «Исследования радиоактивных веществ» знаменитую «веерную» схему структуры радиоактивного излучения, испытывающего разное отклонение в магнитном поле. В ходе открытия супругами Кюри полония и радия было установлено, что лучи, испускаемые этими веществами, действуя на радиационно-неактивные вещества, способны сообщить им радиоактивность и что эта наведенная радиоактивность сохраняется в течение достаточно длительного времени.

Несколько позже Резерфорд, изучая радиоактивность соединений тория, писал, что эти соединения, кроме обычных радиоактивных лучей, выделяют еще и некие частицы, названные им радиационной эманацией. Резерфорд на опытах с соединениями тория подтвердил явление наведенной радиоактивности, наблюдаемой за год до этого Склодовской-Кюри. Далее он показал, что между эманацией тория и индуцированной радиоактивностью имеется определенная связь, а его последователи наглядно продемонстрировали: радий может точно так же испускать эманацию, как и торий.

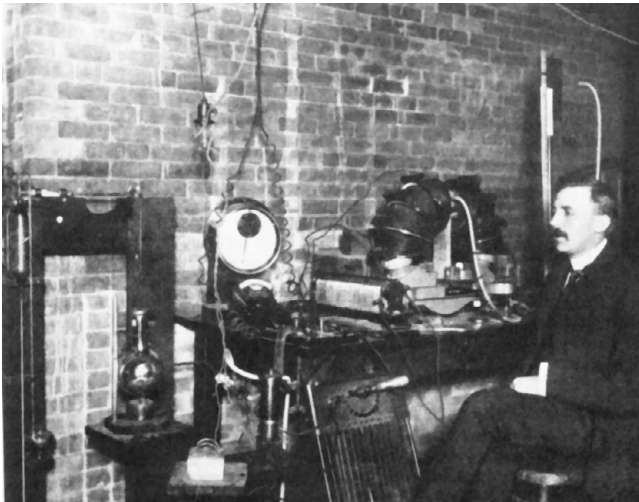
Склодовская-Кюри писала в своей докторской диссертации, что, по мнению Резерфорда, эманация радиоактивного тела представляет собой некий вполне материальный радиоактивный газ. В 1902 году вышла совместная статья Резерфорда и Фредерика Содди (1877–1956) «Причина и природа радиоактивности». В этой работе исследовалась

способность соединений тория генерировать радиоактивную эманацию, которую авторы выделяли химическими способами из гидроокиси тория. В заключении отмечалось, что получен активный компонент, «обладающий специфическими химическими свойствами и активностью, по меньшей мере в 1000 раз большей активности вещества, из которого он был выделен».

В результате скрупулезных исследований Резерфорд и Содди пришли к выводу, что «радиоактивность тория в любой момент есть радиоактивность двух противоположных процессов:

- образования с постоянной скоростью соединением тория нового активного вещества;
- уменьшения со временем излучающей способности активного вещества.

Нормальная или постоянная радиоактивность тория есть равновесное состояние, при котором скорость роста радиоактивности, обусловленная образованием нового активного вещества, уравновешивается скоростью уменьшения радиоактивности уже образовавшегося вещества».



Эрнест Резерфорд экспериментирует с радиоактивным излучением

*«Соединения тория непрерывно испускают какие-то радиоактивные частицы, сохраняющие радиоактивные свойства в течение нескольких минут...»*

*По своим фотографическим и электрическим действиям эманация похожа на уран. Она способна ионизировать окружающий газ и действует в темноте на фотопластинку при экспозиции в несколько дней...*

*Эманация возбуждает в любом твердом веществе, расположенном рядом, радиоактивность, которая со временем исчезает, и в некотором смысле это и есть непосредственная причина возбуждения радиоактивности...»*

Э. Резерфорд, Ф. Содди. Радиоактивное превращение

Разобравшись с опытами по измерению эманационной способности различных радиационных веществ, Резерфорд и Содди констатировали: «Было приведено достаточно данных, чтобы ясно показать, что как в радиоактивности тория, так и радия проявляются сложнейшие превращения, каждое из которых сопровождается непрерывным образованием особого вида активного вещества. Образующаяся из радия и тория эманация является инертным газом».

При этом ученые обращали внимание на связь радиоактивности с гелием, который, по их мнению, мог являться конечным продуктом распада. Весной 1903 года вышли новые работы Резерфорда и Содди: «Сравнительное изучение радиоактивности радия и тория» и «Радиоактивное превращение». В них уже со всей определенностью утверждалось, что все изучавшиеся случаи радиоактивного превращения, если не учитывать испускаемые лучи, сводятся к образованию одного вещества из другого. Причем, когда происходит несколько превращений, они происходят не одновременно, а последовательно. Далее Резерфорду и Содди удалось сформулировать закон радиоактивного превращения: «Во всех случаях, когда отделяли один из радиоактивных продуктов и исследовали его активность независимо от радиоактивности вещества, из которого он

образовался, было обнаружено, что активность при всех исследованиях уменьшается со временем по закону геометрической прогрессии...

Скорость превращения все время пропорциональна количеству систем, еще не подвергнувшихся превращению...

Относительное количество радиоактивного вещества, превращающегося в единицу времени, есть величина постоянная».

Постоянную распада Резерфорд и Содди первоначально назвали «радиоактивная константа».



Эрнест Резерфорд и Фредерик Содди

*«...Радиоактивность есть атомное явление, одновременно сопровождаемое химическими изменениями, в результате которых появляются новые типы вещества, причем эти изменения должны протекать внутри атома, а радиоактивные элементы должны испытывать спонтанные превращения...*

*...Энергия, скрытая в атоме, во много раз больше энергии, освобождающейся при обычном химическом превращении,*

*и эта огромная энергия должна учитываться при объяснении явлений космической физики. В частности, постоянство солнечной энергии можно объяснить тем, что на Солнце идут процессы субатомного превращения...»*

Э. Резерфорд, Ф. Содди. Радиоактивное превращение

Открытие Резерфорда и Содди позволило сделать важнейший вывод о принципиальной возможности существования еще не открытых радиоактивных элементов, которые легко будет опознать по их радиоактивности и в весьма незначительных количествах. Это предвидение ученых блестяще оправдалось со временем, а созданные ими совместно с супругами Кюри методы радиохимии вскоре стали незаменимы при открытии новых радиоактивных элементов. В своих исследованиях Резерфорд и Содди впервые приступили к анализу фундаментальных вопросов, касающихся природы энергии радиоактивных превращений. После тщательного подсчета энергии испускаемых радиом альфа-частиц исследователи пришли к выводу: «Энергия радиоактивных превращений, по крайней мере, в 20 000 раз, а может, и в миллион раз превышает энергию любого молекулярного превращения». При этом данные оценки энергии касаются лишь энергии излучения, а не полной энергии радиоактивного превращения, которая, в свою очередь, может составлять лишь часть внутренней энергии атома, так как внутренняя энергия образующихся продуктов остается неизвестной».

Постепенно трудами многих ученых понятие радиоактивной энергии расширилось до внутриатомной, и даже космической ядерной энергии, определяющей звездную энергетику. В том же, 1903 году, в Париже Пьер Кюри со своими сотрудниками сумел измерить теплоту, самопроизвольно выделяемую солями радия. «Непрерывное выделение такого количества тепла, — отмечал Кюри, никак не может быть объяснено только обычными химическими метаморфозами. Если искать причину образования тепла в каких-то внутренних превращениях, то эти превращения должны быть более сложной природы и должны быть вызваны какими-то

изменениями самого атома радия». Правда, сначала супруги Кюри допускали возможность и какого-то другого механизма выделения энергии, полагая, что, например, радиоактивные элементы могут черпать энергию из внешнего пространства. В качестве аргумента они предлагали схему, по которой радиоактивные элементы «постоянно пронизывались некими еще неизвестными радиациями, которые при встрече с радиоактивными телами задерживаются ими, с преобразованием в радиоактивную энергию». К сожалению, эта замечательная гипотеза (она вполне могла бы привести к открытию космических ливней из элементарных частиц, ионов и ядер атомов), высказанная еще в 1900 году, так и не получила дальнейшего развития. Через 3 года Кюри констатировали, что новейшие исследования, скорее всего, благоприятствуют гипотезе атомных превращений радия.

Итак, очередной этап радиационных исследований закончился открытием закона радиоактивных превращений и нового вида энергии — атомной, проявляющейся в этих превращениях.

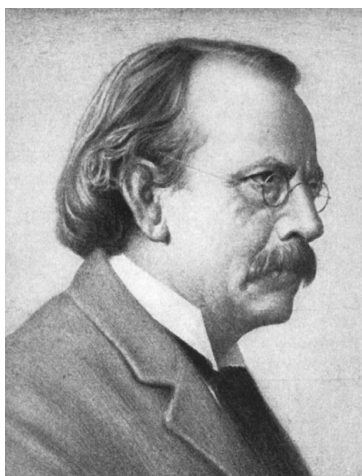
## Открытие электрона

*Быть может, эти электроны —  
Миры, где пять материков,  
Искусства, знания, войны, троны  
И память сорока веков!*

В. Брюсов. Мир электрона

В 1897 году в кембриджской лаборатории Кавендиша была решена загадка катодных лучей. Ее молодой директор Джозеф Джон Томсон наглядно показал корпускулярную природу катодного излучения. Неожиданное развитие получили в Кембридже и исследования с X-лучами, в которых Томсон успешно использовал ионизирующее действие рентгеновского излучения для анализа закономерностей прохождения электричества через газы. В результате





Джозеф Джон Томсон

этой коллективной работы и самого Томсона, и некоторых из его наиболее талантливых сотрудников в 1903 году появилась классическая монография «Прохождение электричества через газы». Именно данное направление исследований в конечном итоге привело к открытию первой субатомной элементарной частицы — электрона.

*«Исследования, которые привели к открытию электрона, начались с попыток объяснения расхождения поведения катодных лучей под действием магнитных и электрических сил».*

Дж. Томсон. Прохождение электричества через газы

Между тем история поиска элементарных «атомов электричества» началась еще с экспериментов Фарадея. После своего великого открытия электромагнитной индукции он перешел к исследованию законов электролиза, имеющих ко всему прочему большое практическое значение. Выясняя природу электрического тока, Фарадей первым начал изучать прохождение зарядов через растворы солей, кислот и щелочей, что и привело к открытию законов электролиза.

Результаты таких опытов по прохождению токов в различных электролитах внесли раскол в лагерь сторонников неделимой электрической субстанции, послужив серьезным аргументом в пользу атомарности электрических зарядов.

Сам Фарадей связывал с понятием «атом» довольно глубокие представления, хотя и высказывал их в достаточно осторожной форме, не желая вступать в открытую

конфронтацию с противниками атомистических взглядов на строение вещества.



Великий экспериментатор Майкл Фарадей  
за исследованием электролиза

*«Хотя нам ничего не известно о структуре атома, все же трудно удержаться от искушения сформулировать некую идею о маленькой частице, в виде которой мы мысленно представляем его; и хотя в равной, если не в большей, степени мы не сведуци в электричестве (так как не можем сказать, является ли оно особым веществом или веществами, некой силой третьего рода или просто каким-то видом движения обычных материальных частиц), существует множество фактов, оправдывающих наше предположение о том, что атомы в той или иной мере связаны с электрическими силами; именно этим силам они и обязаны своими наиболее поразительными свойствами, в частности взаимным химическим сходством».*

М. Фарадей. Экспериментальные исследования  
по электричеству

В 1874 году ирландский физик и астроном Джордж Стоней (1826–1911) выступил в Белфасте с докладом, в котором на основе законов электролиза Фарадея предложил «атомарную» теорию электричества. Оценив величину полного заряда, прошедшего через электролит, и сопоставив его с ориентировочным количеством выделившихся

на катоде атомов водорода, Стоней вывел довольно близкое к современному значение элементарного заряда порядка  $10^{-20}$  Кл (действительно,  $1,60\ 217\ 646 \times 10^{-19}$  Кл). Этот доклад был полностью опубликован только после того, как немецкий физик, математик и физиолог Герман фон Гельмгольц (1821–1894), читая в 1881 году лекции для членов Лондонского королевского общества, высказал мысль о наличии «атомов электричества». В своих рассуждениях германский ученый опирался на логический вывод из гипотезы атомарного строения химических элементов, заключавшийся в том, что из атомарности вещества должна следовать и парциальность электрических зарядов.

Стоней пробовал отстаивать приоритет концепции атомов электричества, но в истории науки сохранилось утверждение, что именно Гельмгольц высказал на примере электролиза гипотезу о связи атомной валентности с минимальным электрическим зарядом. Тем не менее в ходе полемики со сторонниками Гельмгольца Стоней все же стал «крестным отцом» атомов электричества в 1891 году, назвав носитель элементарного заряда электроном.

Еще в конце 1870-х годов в Кавендишской лаборатории были проведены обширные серии экспериментов, которые показали, что проводимость газов, скорее всего, обусловлена движением потоков ионов, а сами катодные лучи возникают в результате бомбардировки катода ионами газа, ускоренными в мощном электрическом поле. Там же в 1884 году было предложено измерять удельный заряд, равный отношению заряда к массе катодно-лучевых частиц, по их отклонению в магнитном поле как потока молекул или атомов.

В эти же годы исследования катодных лучей проводились в Германии, однако там опыты по электрическому отклонению катодных лучей не были признаны достаточно убедительными. Известный физик Генрих Герц (1857–1894) описал в 1891 году открытую им проникаемость катодным излучением тонких металлических слоев, при этом он не обнаружил значимого отклонения в электрополях и пришел к выводу, что катодное излучение представляет собой некий колебательный процесс в «мировом светоносном эфире».

Ученик Герца Филипп фон Ленард (1862–1947), лауреат Нобелевской премии 1905 года за исследование катодных лучей, в 1894 году показал, что, проходя через алюминиевый экран из фольги, катодное излучение вызывает хорошо различимое свечение в заэкранном пространстве. Эффектам прохождения катодного излучения через достаточно тонкие металлические экраны Герц посвятил свои последние работы, в которых описывались результаты опытов по преодолению лучами экранов из золотых, серебряных, платиновых и алюминиевых пластин. Но и после этого природа катодных лучей оставалась неясной, так как самые мельчайшие известные тогда микрочастицы — молекулы водорода — не обладали такой проникающей способностью. Именно поэтому возникла и вторая интерпретация катодного излучения как сугубо волнового процесса.

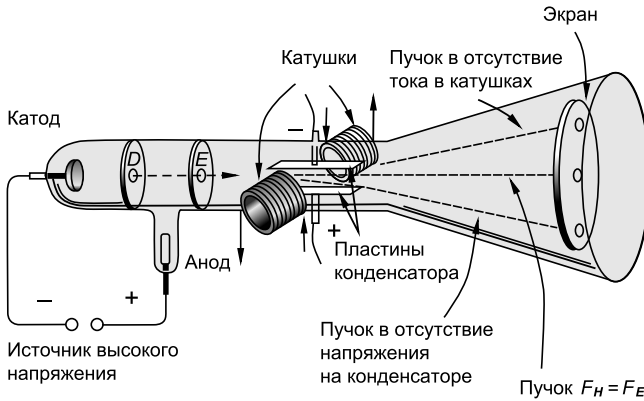
В этой обстановке зреющего открытия к экспериментам с катодными лучами в 1894 году приступила «кембриджская команда Томсона», а уже через год во Франции Жан Батист Перрен (1870–1942) предложил удачный метод для определения знака заряда катодного излучения, убедительно продемонстрировав, что лучи действительно переносят отрицательный заряд. Классические эксперименты Томсона и Перрена были последним и решающим аргументом в пользу признания корпускулярной природы катодного излучения как потока, состоящего из мельчайших отрицательно заряженных частиц.

Действие магнитного поля на катодные лучи было практически одновременно обнаружено многими исследователями, но при интерпретации воздействия электрического поля возникли существенные разногласия между разными группами исследователей. Одни авторы рьяно доказывали, что они наблюдали действие электрического поля на катодные лучи, другие, напротив, не менее упорно отрицали подобную возможность. Наконец стороны примирил сам Томсон, который наглядно продемонстрировал, что это расхождение экспериментальных данных на самом деле обусловлено просто низкой техникой вакуумирования и разными методами откачки воздушной среды. Иногда остатки ионизированного газа эффективно нейтрализовали

влияние внешнего электрического поля. В Кавендишской лаборатории сумели под руководством Томсона так усовершенствовать технику откачки, что стали четко заметны отклонения катодного излучения электрическим полем.

Томсон со своими ассистентами и учениками — шотландским физиком Чарльзом Вильсоном (1869–1959) и Джоном Таунсендом (1868–1957) — разработали уникальную методику получения громадного количества ионов в разряженном воздухе и других газах с помощью воздействия на вакуумированные колбы рентгеновских лучей и радиового излучения. Детально изучив диффузию и подвижность ионов, они убедительно доказали, что в пределах погрешностей экспериментов, произведение концентрации газовых ионов на заряд электрона близко к аналогичной величине для одновалентных ионов, растворенных в электролите. При этом средний заряд ионов практически не зависел от вида газовой среды самого источника ионизации. Таким образом, элементарный электрический заряд в электролите, переносимый ионами, оказался в точности равным ионному элементарному заряду в газовой среде.

Используя электронно-лучевую трубку собственной конструкции с электродами в виде пластин конденсатора и магнитными катушками, Томсон подвергал катодный пучок попеременному действию электрического и магнитного полей. При этом ученый получил возможность надежно и достаточно точно определять отношение заряда к массе катодных лучей. Подобное отношение оказалось независимым от вида разреженной газовой среды в вакуумированной колбе и в тысячу раз большим, чем такое же отношение для водородных ионов в электролитах, полученное на основе законов электролиза. Этот результат имел ошеломляющие последствия. Если допустить, что заряд «катодной корпускулы» равен заряду водорода, то ее масса будет в тысячу раз меньше, чем у легчайшего атома водорода. В 1906 году Томсон сделал окончательный вывод, что катодные лучи состоят из заряженных частиц, а их элементарный заряд соответствует аналогичной величине одновалентных ионов и равен  $1,03 \times 10^{-19}$  Кл, при средней массе в  $1/1700$  атома водорода.



Электронно-лучевая трубка Томсона ( $D$  и  $E$  — ускоряющие и фокусирующие поток электронов промежуточные решетчатые пластины, соединенные с анодом;

$F_H = F_E$  — магнитная сила катушек индуктивности, в точности равная электрической силе пластин конденсатора)

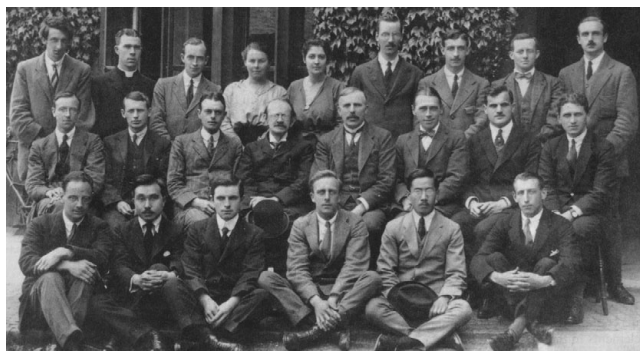
В своем опыте Томсон использовал усовершенствованную катодно-лучевую трубку, конструкция которой была дополнена электрическими катушками, создававшими внутри трубки магнитное поле, и набором параллельных электрических конденсаторных пластин, создававших внутри трубки электрическое поле. Благодаря этому появилась возможность исследовать поведение катодных лучей под воздействием и магнитного, и электрического поля. Трубка Томсона с электродами в виде пластин конденсатора стала прообразом всех современных электронно-лучевых трубок.

Между тем Томсон упорно продолжал свои исследования, перейдя к анализу отношений для зарядов к их массам уже для частиц, генерируемых ультрафиолетовым излучением и просто испускаемых накалившимся катодом. Во всех случаях порядок отношения заряд/масса оказался очень близким к катодному излучению. Эти мельчайшие частицы вещества Томсон назвал «катодными корпускулами», однако это громоздкое название не прижилось.

Бурное обсуждение природы катодных лучей во многом способствовало дальнейшему развитию теоретических

и экспериментальных исследований. В конечном итоге были сделаны важные выводы о природе катодных лучей как потоков электронов, при этом был измерен их удельный и абсолютный заряд. Причем был выявлен единый характер «корпускул электричества» как фундаментальной составляющей материи, проявляющейся не только в катодном излучении, но и в виде самых различных термо- и фотоэлектронов. Все эти исследования так или иначе основывались на концепции электрона Томсона, а сам он в 1906 году стал нобелевским лауреатом за теоретические и экспериментальные исследования прохождения электричества через газы.

Между тем общее признание факта существования электрона пришло лишь в 1911 году после блестящих измерений элементарного заряда, выполненных американским физиком-экспериментатором Робертом Миллиkenом (1868–1953), удостоенным Нобелевской премии в 1923 году за исследования в области элементарных зарядов и фотоэлектрического эффекта. Сам по себе термин «электрон» стали повсеместно употреблять только после того, как в 1925 году немецкие физики Джеймс Франк (1882–1964) и Густав Герц (1887–1975) стали нобелевскими лауреатами за открытие законов столкновений электронов с атомами.



Сотрудники Кавендишской лаборатории и члены  
Кавендишского физического общества  
(Дж. Томсон и Э. Резерфорд четвертый и пятый слева в среднем ряду)

В 1893 году Томсон организовал Кавендишское физическое общество, на заседаниях которого обсуждались статьи,

готовившиеся к публикации. Такие дискуссии помогали исследователям разрешать многие неясности, стимулировали поиск перспективной проблематики и вообще поднимали интерес к пионерским исследованиям. В этот период лаборатория становится признанной международной школой физической науки, где начали свой путь в науке Резерфорд, Бор, Ланжевен и многие другие, в том числе и русские ученые. Заслуги многих учеников Томсона были всемирно признаны. Нобелевской премии были удостоены У. Г. Брэгг и У. Л. Брэгг, Ч. Баркла, О. Ричардсон, Ч. Вильсон, Э. Резерфорд.

Сегодня считается, что именно Томсон разработал экспериментальную технику управления электронными лучами, дополнив это физическими методами изучения положительно заряженных частиц. В кембриджской лаборатории Томсона начались первые измерения элементарного электроразряда путем наблюдения движения потоков заряженных частиц в электромагнитных полях. Так появились основные методы электронной оптики, конструирования электронных ламп, электронных пушек и ускорителей элементарных частиц. Под руководством Томсона были созданы модели первых масс-спектрометров и разработаны методики анализа и разделения изотопов. Все экспериментальные разработки были суммированы и тщательно классифицированы в монографии ученого «Лучи положительного электричества», изданной в 1913 году.

Итак, значение работ Томсона и его учеников в становлении и развитии атомной и ядерной физики, а также физики элементарных частиц очень велико. Но сам Джи-Джи, как называли своего учителя и коллегу сотрудники Кавендишской лаборатории, всегда оставался горячим сторонником мирового светоносного эфира, разрабатывал всяческие модели движения в этой призрачной среде и искал (увы, безуспешно) хоть какие-либо наблюдаемые свидетельства реальности эфирных представлений. Одно время Томсон упорно пытался ошибочно интерпретировать отклонение катодного пучка в магнитном поле своей трубки как некую эфирную прецессию гироскопической природы, наделяя совокупность электрического и магнитного полей эфирным вращательным моментом.



## Глава 2

# Рождение кванта

*«Можно понять, какое существенное влияние было оказано на само направление развития человеческих знаний в тот день, когда кванты исподтишка вошли в науку. В тот самый день величественное и грандиозное здание классической физики было потрясено до самого основания, хотя никто тогда еще и не отдавал себе ясного отчета в этом. В истории науки немного было подземных толчков, сравнимых по силе с этим...»*

*Существование кванта действия приводит к противоречию между концепцией строгой локализации в пространстве и во времени и концепцией динамического развития. Каждая из них в отдельности может быть использована для описания действительного мира. Однако их нельзя одновременно применять со всей строгостью».*

Л. Де Бройль. Революция в физике



Медаль имени Макса Планка

Одна из самых престижных наград в научном сообществе — награда имени Макса Планка. Она состоит из свидетельства и золотой медали с портретом ученого и присуждается ежегодно начиная с 1929 года (впервые была присуждена самому Макс Планку (1858–1947) и Альберту Эйнштейну (1879–1955)) Немецким физическим обществом за выдающиеся достижения в области теоретической физики.

*«Итак, для понимания пестрого многообразия явлений следовало найти в нем формальный единый принцип, который можно выразить математическим языком. В результате обнаруживается тесная связь между понятным и прекрасным. Ведь если в прекрасном видеть согласие частей друг с другом и с целым и если, с другой стороны, та же формальная взаимосвязь впервые делает возможным какое бы то ни было понимание вообще, переживание прекрасного почти отождествляется с переживанием понятой или хотя бы предугаданной взаимосвязи».*

В. Гейзенберг. Физика и философия. Часть и целое

*«После того как Зоммерфельд показал, что при надлежащем распространении закона распределения квантов на систему со многими степенями свободы при условии учета изменяемости массы, требуемой теории относительности, получается волшебная формула, по которой спектры водорода и гелия должны были открыть загадку своей тонкой структуры, насколько она вообще могла быть определена измерениями, тончайшими из всех ныне возможных (достижение, вполне равноценное знаменитому открытию планеты Нептун, существование и элементы орбиты которой были вычислены Леверье раньше, чем ее видел человеческий взгляд) — после всего этого даже те, кто, видя количественные совпадения, которые при чрезвычайной точности спектроскопических измерений должны быть особенно убедительны, все еще склонялись считать все это игрой случая, в конце концов, принуждены были оставить последние сомнения».*

М. Планк. Квантовый постулат  
и новое развитие атомистики

## Ультрафиолетовая катастрофа

*«Чтобы уложить поведение света в рамки классической физики, пришлось придумать некую среду — эфир, обладающую совершенно фантастическими свойствами с точки зрения самой же классической физики... Но эфир не мог спасти и, действительно, не спас старую физику.*

*Другим камнем преткновения для классической физики оказалось тепловое излучение нагретых тел».*

В. Рьдник. Что такое квантовая механика



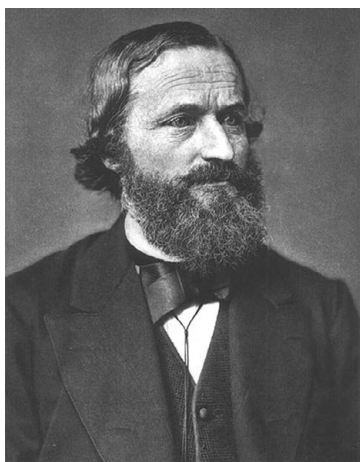
Тепловое излучение вагранок доменной печи

В начале XX века возник глубокий парадокс при анализе законов излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Моделью АЧТ в идеальном случае может служить замкнутая полость с зеркальной внутренней поверхностью. В окружающем мире хорошее приближение к АЧТ дает внутренний жар костра с ровным белым пламенем, вагранка (окошко) в мартеновской печи или внутренняя поверхность солнечных пятен.

Открытие X-лучей Рентгеном в 1895 году, радиоактивности Беккерелем в 1896 году, электрона Томсоном в 1897 году и радия супругами Кюри в 1898 году часто называют реальным началом нового века, поскольку именно эти исследования положили начало изучению атомной и ядерной физики. В 1899 году кембриджский экспериментатор Эрнест Резерфорд выступил с обширным обзором физики радиоактивности урана и тория, указав, на довольно сложный характер радиоактивного излучения. А в 1900 году, изучая давным-давно хорошо известное тепловое излучение, Макс Планк открыл его парциальный характер.

Тепловое излучение хорошо знакомо людям еще с тех времен, когда первобытный человек научился поддерживать огонь в костре и готовить на нем пищу. Согреваясь лучами солнца или разжигая очаг, люди не только наслаждались теплом, но и обжигали глиняные изделия, выплавляли металлы, наблюдая, как огонь меняет цвет и фактуру раскаленных изделий. Однако сама природа огня и его тепловое действие долго оставались загадкой. Понятие «тепловых лучей» возникло еще в эпоху Возрождения, когда опыты с теплом и холодом наглядно показали, что жар от огня и холод от глыбы льда можно концентрировать в фокусе вогнутых зеркал, причем эффективность их действия во многом зависит от качества обработки отражающей поверхности. Впоследствии известный астроном и композитор Фридрих Гершель (1738–1822) открыл инфракрасные лучи в виде «теплого излучения за красной гранью видимого спектра».

Теория теплового излучения возникла в 1859 году, когда один из основателей математической физики Густав Кирхгоф (1824–1887) открыл основные закономерности теплового излучения, обосновав их с помощью принципов термодинамики и сформулировал понятие АЧТ. Вскоре пришло понимание, что испускательные способности АЧТ имеют универсальное значение. Иначе говоря, АЧТ все поглощает во всех мыслимых энергетических диапазонах и совершенно ничего не излучает, оправдывая этим свое название.



Густав Роберт Кирхгоф

*«Этот закон Кирхгофа утверждает, что если в откачанном пустом пространстве, ограниченном полностью отражающими стенками, находятся совершенно произвольные излучающие и поглощающие тела, то с течением времени устанавливается такое состояние, при котором все тела имеют одну и ту же температуру, а излучение по всем своим свойствам, в том числе по спектральному распределению энергии, зависит только от температуры,*

*но не от свойств тел. Это равновесное излучение и есть излучение абсолютно черного тела, закон распределения которого по длинам волн спектра представляет универсальную функцию длин волн и температуры. Это так называемое нормальное распределение энергии представляет собой нечто абсолютное».*

М. Планк. Научная автобиография

Через 20 лет словенский физик, математик и поэт Жозеф Стефан (1835–1893) на основе измерений, сделанных французскими учеными, обосновал вывод, что в модели АЧТ полная энергия всех длин волн может быть пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры излучающей поверхности. При этом коэффициент подобной пропорциональности есть универсальная константа.

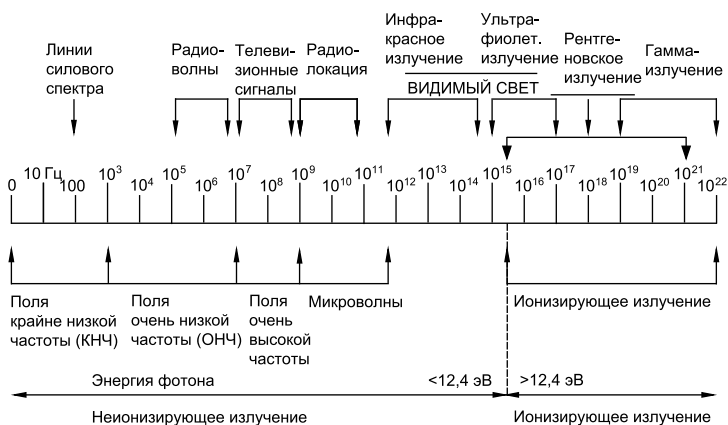
Стефан сформулировал свой закон в 1879 году, а через 5 лет его вывел теоретически его ученик Людвиг Больцман (1844–1906). Для этого он применил к излучению хорошо известные законы термодинамики, исходя при этом из понятия светового давления, равного согласно исследованиям Максвелла для однородного (изотропного) потока энергии  $1/3$  ее объемной плотности. Закон излучения АЧТ назван

законом Стефана-Больцмана, а входящая в него универсальная константа — постоянной Стефана-Больцмана.

Русский физик Владимир Александрович Михельсон (1860–1927) в 1887 году применил принципы термодинамики, электромагнитную теорию света и кинетическую теорию материи для теоретического объяснения распределения энергии в спектре АЧТ. В том же году в «Журнале Русского физико-химического общества» была опубликована его статья «Опыт теоретического объяснения распределения энергии в спектре твердого тела». В своей работе русский ученый широко использовал экспериментальные данные, полученные американским астрофизиком Самуэлем Ланглеем (1834–1906) в ходе исследования инфракрасных лучей с помощью изобретенного им болометра — прибора для измерения энергии электромагнитного излучения, основанного на зависимости электрического сопротивления от температуры. Опираясь на результаты Ланглея и давние работы английского астронома немецкого происхождения Фридриха Гершеля, построившего энергетический спектр солнечного излучения, Михельсон блестяще провел теоретический анализ распределения энергии в непрерывном спектре. При этом он неоднократно подчеркивал, что полученные им теоретические графики «обладают всеми без исключения общими свойствами, какие указывает Ланглей, описывая свои экспериментальные кривые», такими как наличие максимумов, которые смещаются по мере повышения температуры в сторону коротких волн.

К сожалению, русскому физiku не удалось точно сформулировать закона смещения, и это сделал в 1893 году Вильгельм Вин (1864–1928). В том же году русский теплофизик Борис Борисович Голицын представил в ученый совет Санкт-Петербургского университета диссертацию «Исследования по математической физике», содержащую новый взгляд на теорию теплового излучения. В своей работе он впервые уточнил понятие «температура излучения», которое долгое время представлялось весьма спорным, поскольку довольно парадоксальным образом отождествлялось с понятием «равновесная температура

эфирной среды». Дальнейшее развитие теоретической физики полностью доказало правоту Голицына, а сам эфир был раз и навсегда удален из научной картины мира, как совершенно ложное понятие. Таким образом, Голицыну принадлежит неоспоримая заслуга привнесения в науку важнейшего понятия температуры излучения. Кроме того, в его диссертации содержались и другие серьезные результаты, во многом предвосхитившие более поздние исследования Вина и Рэля — Джинса. Русский ученый, основываясь на выводах Михельсона, дал оригинальную трактовку так называемой «ультрафиолетовой катастрофы», неизбежной исходя из классической теории излучения. Выяснилось, что, чем выше частота и короче длина излучения, тем больше его доля внутри АЧТ. Однако чем выше частота волнового процесса, тем большая энергия им переносится, значит, энергия излучения внутри АЧТ должна стремиться к бесконечности. А поскольку высокочастотная часть излучения лежит в ультрафиолетовой области спектра, данный физический парадокс и получил название «ультрафиолетовая катастрофа».



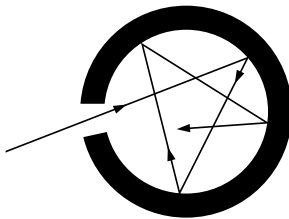
Спектр электромагнитного излучения в современном представлении

Совокупность всех длин электромагнитных волн образует непрерывный спектр излучения от сверхнизких до сверх-

высоких частот. В центральной части спектра расположен участок видимого света от инфракрасного до ультрафиолетового излучения.

Чтобы понять этот физический парадокс с таким устрашающим названием (на самом деле, разумеется, никакой катастрофы не существует), представим себе модель АЧТ в виде массивной емкости, покрытой сверху черным бархатом, с зеркальной внутренней поверхностью. Луч света проникает в объем только через узкую горловину, и при достаточно малом входном отверстии он навсегда остается внутри, бесконечное количество раз отражаясь от стенок. С микроскопической точки зрения поглощенный АЧТ свет должен взаимодействовать с атомами внутренней зеркальной поверхности, последовательно поглощаясь ими и испускаясь до момента достижения состояния полного равновесного насыщения. В процессе нагрева АЧТ до равновесного состояния баланс интенсивности испускания и поглощения внутреннего излучения и переизлучения постепенно уравнивается, так как при поглощении определенного количества энергии определенной частоты одним атомом всегда статистически найдется другой атом, в тот же момент испускающий точно такое же количество энергии той же частоты.

Объяснять таким образом физическую суть «ультрафиолетового парадокса», значит, забегать далеко вперед. «Катастрофические» проблемы в классической физике начались после анализа баланса энергии излучения внутри полости АЧТ в равновесном состоянии.



Структура АЧТ (стрелками показана траектория лучей света)



Несмотря на существенные результаты в построении теории теплового излучения, вид универсальной функции распределения энергии излучения по длинам волн оставался неопределенным. Отто Люммер (1860–1925) и Вин в 1895 году построили модель АЧТ тела в виде замкнутой полости с малым отверстием. Через два года, в 1897 году, Луммер и Эрнст Принсгейм (1859–1917), проводя опыты с АЧТ, построили экспериментальные кривые распределения энергии по длинам волн. В этом же году проблему излучения начал исследовать Планк.

### Гипотеза Планка

*«Представьте себе горняка, который с напряжением всех своих сил ведет разведку благородной руды и которому однажды попадается жила самородного золота, причем при ближайшем рассмотрении она оказывается бесконечно богаче, чем можно было предполагать заранее. Если бы он сам не натолкнулся на этот клад, то, безусловно, вскоре посчастливилось бы его товарищу...»*



Макс Планк

М. Планк.

Речь на торжественном юбилейном заседании Немецкого физического общества

*«Когда я начинал изучение физики и мой почтенный учитель Филипп фон Жолли рассказывал мне об условиях и перспективах моей учебы, он изобразил мне физику, как высокоразвитую, едва ли не полностью исчерпанную науку, которая теперь, после того как ее увенчало от-*

*крытие принципа сохранения энергии, близка, по-видимому, к тому, чтобы принять окончательную стабильную форму. Вероятно, в том или ином углу есть еще пылинки или пузырьки, которые можно исследовать и классифицировать, но система как целое построена довольно прочно, и теоретическая физика заметно приближается к той степени законченности, какой, например, обладает геометрия уже в течение столетия».*

М. Планк. Научная биография

Квантовая наука началась с гениальной идеи скромного берлинского профессора Макса Планка, когда он ввел в теорию излучения новый для классических представлений всеобщего атомизма элемент и выдвинул свой знаменитый постулат: «Вещество не может испускать энергию излучения иначе как конечными порциями, пропорциональными частоте этого излучения».

Вся суть этого простого и явно парадоксального утверждения содержится в коэффициенте пропорциональности. Именно он в виде некоторой универсальной константы, имеющей размерность механического действия, и представляет собой знаменитую постоянную Планка ( $h$ ). Предложив на суд экспериментаторов свою гипотезу, Планк создал совершенно необычную теорию теплового излучения и наконец-то решил проблему распределения спектральной плотности энергии АЧТ, выведя закон излучения — закон Планка.

Наблюдая за неудачными попытками объяснить парадокс ультрафиолетовой катастрофы, Планк напрямую занялся решением проблемы теплового излучения АЧТ где-то в середине 1890-х годов. Главным результатом его исследований было открытие методом подбора удачной функции распределения энергии по частотам, позднейшая интерпретация которой и вывела на свет кванты действия. Свои исследования в этом направлении Планк суммировал в классической монографии «Лекции по теории теплового излучения» (вышла в 1906 году). А в 1918 году Макс Планку была присуждена Нобелевская премия по физике.

Как уже отмечалось, главным достижением в допланковскую эру в спектральном анализе теплового излучения АЧТ были исследования Вильгельма Вина, нашедшего в 1893–1896 годах удачную формулу для объемной плотности невидимого излучения. Однако вскоре выяснилось, что выводы Вина с теоретической точки зрения были далеко не безупречны. Его спектральная формула, хорошо описывая область высоких частот (вблизи ультрафиолетового диапазона), совершенно не соответствовала инфракрасной области длинноволнового излучения.

Все это подтолкнуло Планка к построению модели АЧТ в виде совокупности электромагнитных осцилляторов (колеблющихся возле положения равновесия антенн-грузиков, воспринимающих электромагнитное излучение), излучающих и поглощающих электромагнитную энергию каждый определенной частоты. Свои построения Планк назвал «гипотезой естественного излучения», приведя систему осцилляторов АЧТ в полное соответствие с больцмановской теорией термодинамических процессов. В мае 1899 года Планку удалось найти соотношение между объемной плотностью электромагнитного излучения и средней энергией осцилляторов АЧТ и связать его с понятием термодинамической энтропии.

Ученый доложил свою формулу для излучения на заседании Немецкого физического общества 19 октября 1900 года, и квантовая эпоха в физике начала свой отсчет!

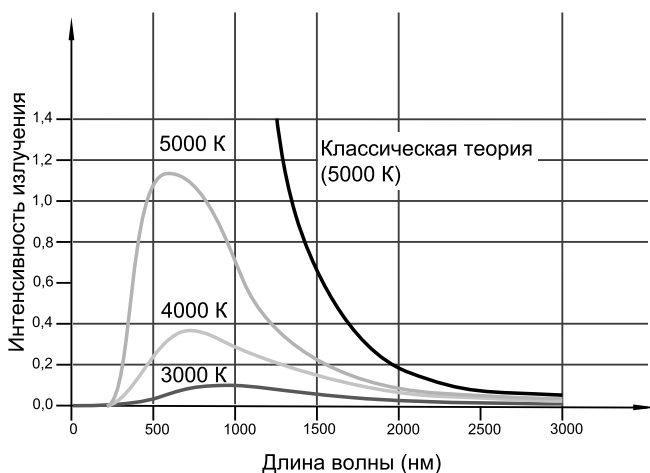
Буквально ночью его коллеги физики-экспериментаторы Рубенс и Курлбаум проверили формулу Планка и наутро восторженно поздравили ученого с тем, что на всех участках спектра излучения опытные данные вполне удовлетворительно соответствовали его формуле. Впрочем, как впоследствии не раз скромно указывал Планк, метод подбора его формулы содержал «только формальный смысл удачно угаданного закона».

Как физик-теоретик, Планк не мог считать свою работу законченной без объяснения смысла своей формулы. После двух месяцев размышлений он пришел к парадоксальному выводу: элементы внутренней поверхности АЧТ излучают

и поглощают энергию парциально! А сами энергетические порции описываются простейшей формулой:  $\Delta E = h\omega$ , где  $h$  — новый коэффициент пропорциональности, а  $\omega$  — частота тепловых колебаний. По законам классической физики, интенсивность может падать с увеличением их частоты по экспоненте. При этом высокочастотные колебания будут вносить незначительный вклад в общее количество излучаемой тепловой энергии. Так был устранен парадокс несостоявшейся «ультрафиолетовой катастрофы». Закон излучения Планка изумительно точно описывал процессы излучения, что позволило быстро определить значение коэффициента  $h$ , знаменитой постоянной Планка.

Итак, 14 декабря 1900 года Планк сделал доклад в аудитории Физического института Берлинского университета Немецкому физическому обществу о новой формуле, которая описывает излучение АЧТ во всех диапазонах. Из закона излучения Планка, справедливого для всех участков спектра, легко вытекали закон Стефана — Больцмана и закон смещения Вина. В области высоких частот формула Планка переходила в формулу Вина, а при малых частотах — в формулу Рэлея, выведенную им в июле 1900 года в небольшой заметке «Замечания о законе черного излучения». Рэлей получил свою формулу путем применения закона равномерного распределения энергии по степеням свободы. В 1905 году Джеймс Джинс (1877–1946) независимо от Рэлея показал, что классическая статистика приводит именно к формуле Рэлея, а не к формуле Планка, после чего данное спектрально-энергетическое соотношение стало называться законом Рэлея — Джинса.

Исследования Планка — настоящий переворот в научных представлениях, по своему мировоззренческому значению сравнимый с великими открытиями Коперника, Галилея и Ньютона. Тем не менее ученый, воспитанный на канонах классической физики, еще очень долго безрезультатно пытался хоть как-то ввести свою квантовую гипотезу в систему представлений доквантовой науки. Гениальная гипотеза помимо воли отца квантов стала захватывать все новые и новые области науки и стала одним из центров развития нового физического знания.



Реальная зависимость излучения АЧТ от длины волны для разных температур по классической формуле Релея – Джинса

Как и открытие рентгеновских лучей, радиоактивности и электрона, открытие квантованности энергии излучения во многом определило характер великой научной революции начала XX века.

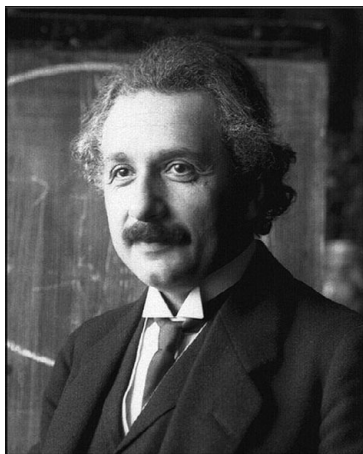
## Квантовая теория излучения

*«Согласно теории Максвелла во всех электромагнитных, а значит, и световых явлениях энергию следует считать величиной, непрерывно распределенной в пространстве, тогда как энергия вesoмoгo тела, по современным физическим представлениям, складывается из энергий атомов и электронов. Энергия вesoмoгo тела не может быть раздроблена на сколь угодно большое число произвольно малых частей, тогда как энергия пучка света, испущенного точечным источником, по максвелловской (или вообще по любой волновой) теории света непрерывно распределяется по все возрастающему объему...»*

А. Эйнштейн. Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света

В бурных полемиках начала XX века на фоне радиоактивных превращений, внутриатомных процессов и перевернувшей представление о пространстве-времени и связи массы с энергией теории относительности идея квантов сначала выглядела довольно невыразительно. Единицы из физиков догадывались о роли теории квантов в начавшейся физической революции. Немалую роль в таком невнимании к квантовой науке сыграло то, что и сам Планк, хотя и использовал открытый им закон парциального излучения для определения отдельных атомных констант, таких как число Авогадро, постоянная Ридберга и заряд электрона, не верил в реальность квантования полей и частиц, искренне надеясь, что с течением времени странную дискретность излучения удастся полностью примирить с классическими представлениями электромагнитной теории Максвелла.

Впервые обратил внимание на идею квантов и развил ее Альберт Эйнштейн, опубликовавший в 1905 году статью «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света»: «В этой формуле содержится следующее, по крайней мере в общем и целом, справедливое утверждение: чем более электроположительным является металл, тем меньше низшая частота света, вызывающая фотоэффект».



Альберт Эйнштейн

Одним из первых оценил открытие Планка великий Альберт Эйнштейн. В судьбоносном для мировой науки 1905 году он опубликовал работу, в которой заложил основы теории относительности и использовал понятие квантованности излучения в теории фотоэффекта.

Явление фотоэффекта впервые наблюдал немецкий ученый Генрих Герц в 1887 году, затем его основные закономерности были экспериментально исследованы замечательным русским физиком профессором Московского университета Александром Григорьевичем Столетовым (1839–1896). Основатель русской школы физиков-экспериментаторов, Столетов исследовал далекий прообраз будущих электронных ламп в виде герметичной вакуумированной колбы с двумя внутренними пластинками — электродами. При освещении этих пластинок ртутной лампой во внешней электрической цепи возникал ток. Столетов дал правильную трактовку своих опытов, считая, что происходит испускание электронов (фотоэлектронов) веществом электродов под действием света, при этом они начинают упорядоченно двигаться во внешнем электрическом поле, образуя электрический ток (фототок).

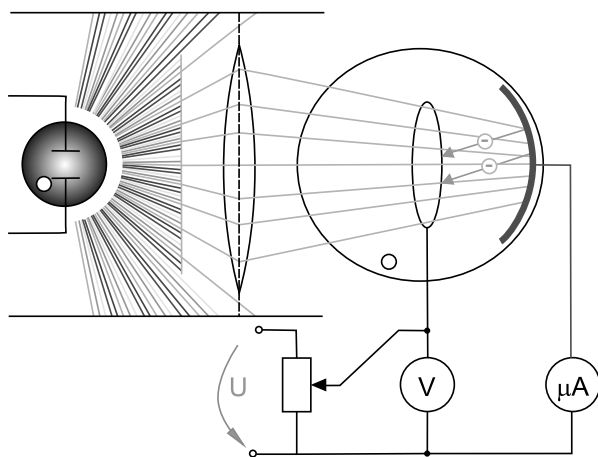


Схема фотоэффекта ( $U$  — разность потенциалов;  $V$  — показания вольтметра;  $\mu A$  — значения миллиамперметра)

Согласно теории Эйнштейна, квант электромагнитного излучения, фотон, поглощаясь электроном, сообщал ему кинетическую энергию для преодоления внутреннего потенциального барьера  $U$ . Так что измерения электрических параметров тока фотоэффекта на вольтметре и миллиамперметре позволяли легко определить работу выхода

электрона. Однако, подавая задерживающий потенциал  $U$ , можно было воспрепятствовать электронам покинуть освещаемую поверхность и добиться полного отсутствия фотоэффекта.

Наблюдения, сделанные Ленардом в 1902 г., как указывал Эйнштейн в своей статье, не противоречили его теории. На самом деле скорости фотоэлектронов не зависели от интенсивности световых лучей, а число их пропорционально интенсивности. Что же касается зависимости энергии фотоэлектронов от частоты, то лишь в 1912 г. ее исследовали Ричардсон, Комптон и Милликен. Последние классические эксперименты наряду с измерениями Милликоном элементарного заряда удостоены Нобелевской премии.

При исследовании фототока выяснилась парадоксальная закономерность, противоречащая классической электродинамике. Согласно классической теории падение световой волны на поверхность проводника приводит к попаданию электронов вблизи поверхности в переменное электромагнитное поле волны. Под действием электромагнитных сил электроны начинают разгоняться, наращивая энергию. Постепенно их энергия становится достаточной для преодоления притяжения атомов проводника, и электроны вырываются наружу. Здесь и начинаются противоречия. По классической электродинамике накопление энергии электроном требует вполне определенного времени. Это время, по расчетам, должно составлять около минуты! Это полностью противоречит опытным данным, так как фототок возникает мгновенно после падения света на поверхность проводника. В то же время покинувшие поверхность проводника электроны по волновой теории света энергонасыщаются пропорционально амплитудам падающих волн и интенсивности излучения в целом. Тут можно применить своеобразную гидродинамическую аналогию, уподобив электроны частичкам вещества, плавающим на поверхности волн. Чем больше волны, тем сильнее возрастает энергия плавающих частичек. Опытные данные и тут полностью противоречат классической теории: энергия вызванных электронов совершенно не зависит от интенсивности света, но линейно зависит от частоты!



Тем не менее Эйнштейн вполне справедливо заметил: «Теория света, оперирующая непрерывными пространственными функциями, приведет к противоречию с опытом, когда ее будут применять к явлениям возникновения и превращения света».

По его мнению, непосредственно связанные с возникновением и превращением световых волн явления фотолюминесценции, катодолюминесценции, фосфоресценции и фотоэффекта, «лучше объясняются предположением, что энергия света распределяется по пространству дискретно».

В статье 1905 года «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света» он предположил: «Энергия пучка света, вышедшего из каждой точки, не распределяется непрерывно во все возрастающем объеме, а складывается из конечного числа локализованных в пространстве неделимых квантов энергии, поглощаемых или возникающих только целиком».

Эйнштейн фактически вернулся к еще ньютоновским представлениям, сформулированным великим физиком в его знаменитой «Оптике»: «Свет надо полагать состоящим из целостных и неделимых световых корпускул, поглощаемых или возникающих только целым образом».

Эйнштейн проявил гениальную физическую интуицию, увидев квантовую природу света в загадках классической теории фотоэффекта. Вначале он рассматривал квантовый характер световых волн для коротковолновой области электромагнитного спектра, где удовлетворительно работал закон Вина. Уже через год Эйнштейн высказал догадку об универсальности квантования всего диапазона электромагнитных волн. Работы великого теоретика послужили отличной «рекламой» квантовой парадигме и привлекли к ней всеобщее внимание в научном обществе. Рассуждения Эйнштейна в теории фотоэффекта стали казаться логически выверенными и чуть ли не тривиальными, поскольку указывали естественный путь к необходимости введения в теорию света квантовых представлений. Работы Эйнштейна подтолкнули и самого Планка, долгое время считавшего, что гипотеза квантов — временное отступление от магистрального пути развития классической физики.

## Глава 3

# Квантовая физика

*«...Я вспоминаю 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. Гейзенберг. Физика и философия. Часть и целое



Творцы квантовой физики (слева направо: Нильс Бор, Джеймс Франк, Альберт Эйнштейн, Мюррей Гелл-Манн)

*«Вначале он мог быть доволен, когда пришел к однозначному и непротиворечивому объяснению перехода от континуума к дискретному квантованию и, более того, принципиально связал индетерминизм элементарных процессов с методами,*

*предполагающими возможность наблюдения. Иными словами, он должен был исследовать с теоретико-познавательных позиций сущность всякого наблюдения. Много лет посвятил Бор разработке этих проблем, пока, наконец, не пришел к удовлетворительным результатам. Они были изложены в написанной вместе с Розенфельдом работе, которая, насколько я могу ее оценить, представляет собой одну из самых прекрасных и самых глубоких работ по теории познания».*

Д. Франк. Биографические заметки о Нильсе Боре

*«Процесс наблюдения в квантовой механике напоминает скорее вкус, чем зрение. „Для того чтобы узнать свойства пудинга, его необходимо съесть“, — любил повторять создатели квантовой механики. И подобно тому как, съев однажды пудинг, мы не в состоянии еще раз проверить свое впечатление о его достоинствах, точно так же мы не можем беспредельно уточнять наши сведения о квантовой системе: ее разрушит, как правило, уже первое измерение. Гейзенберг не только понял впервые этот суровый „факт, но и сумел записать его на языке формул“».*

Л. Пономарев. Под знаком кванта

## Кванты и атомы

*«Проще всего было бы понимать каждый атом как планетную систему, которая состоит из положительно заряженного центра, вокруг которого обращаются электроны, как планеты. Но такая система не может быть устойчивой вследствие излучаемой электронами энергии. Поэтому мы вынуждены обратиться к системе, в которой электроны находятся в относительном покое или обладают ничтожными скоростями, хотя такое представление содержит много сомнительного».*

В. Вин. Доклад на съезде немецких естествоиспытателей и врачей в Мюнхене «Объяснения линейчатых спектров атомов с точки зрения электронной теории»

*«В это время (Манчестер, 1912 год) вокруг Резерфорда группировалось большое число молодых физиков из разных стран мира, привлеченных его чрезвычайной одаренностью как физика и редкими способностями как организатора научного коллектива. В этой атмосфере коллективного научного творчества родились крупные научные достижения Резерфорда, из которых в первую очередь следует отметить разгадку природы альфа-частиц и открытие ядерного строения атома».*

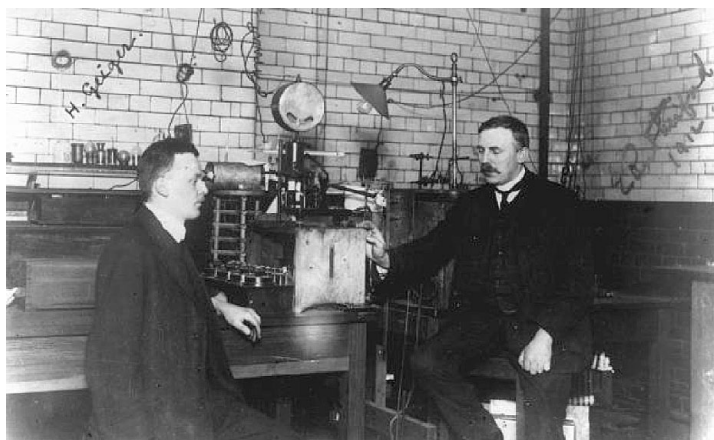


Эрнест Резерфорд

#### Н. Бор. Атомная физика и человеческое познание

Развитие исследований радиоактивности и построение квантовой теории постепенно привели к созданию квантовой модели атома. Однако этому предшествовали попытки построить атомарные структуры лишь на основе классических электродинамических и просто механических схем. В 1904 году свои представления о строении атома опубликовали японский физик Хантаро Нагаока (1865–1950) и английский теоретик Дж. Томсон.

Нагаока несколько неожиданным образом исходил из астрономических исследований построения колец Сатурна, представляя строение атома аналогичным Солнечной системе. В его работе рассматривалась идея придания роли Солнца положительно заряженной центральной части атома, вокруг которой располагается планетарная система электронов. При орбитальных смещениях электроны генерируют электромагнитные импульсы, образующие спектральные линии соответствующих химических элементов.



Эрнест Резерфорд исследует атом

*«Однажды Гейгер пришел ко мне и сказал: „Не считаете ли Вы, что пора бы молодому Марсдену, которого я обучаю радиоактивным методам, начать небольшое исследование?“ Я думал так же, а поэтому ответил: „Почему бы не поручить ему посмотреть, не могут ли некоторые  $\alpha$ -частицы рассеяться на большой угол?“ Скажу вам по секрету, что я не предполагал, что они так могут рассеяться, поскольку известно было, что  $\alpha$ -частицы — это очень быстрые массивные частицы, обладающие чрезвычайно большой энергией. Можно убедиться, что если большое рассеяние есть результат накопления некоторого числа малых рассеяний, то вероятность рассеяться назад для  $\alpha$ -частицы очень мала. Помню, что через 2 или 3 дня ко мне пришел страшно возбужденный Гейгер и сказал: „Нам удалось наблюдать  $\alpha$ -частицы, возвращающиеся назад“. Это было самым невероятным событием, которое мне пришлось пережить. Это было почти столь же невероятно, как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом в листок папиросной бумаги, и он вернулся бы назад и угодил бы в вас».*

Э. Резерфорд. Сорок лет развития физики

После того как стало ясно, что электроны — составные части атомов всех веществ, Томсон построил собственную

электромагнитную модель атома, назвав ее «пудинг с изюмом», где отрицательно заряженные корпускулы — электроны располагались как изюминки — вкрапления внутри положительно заряженной сферы — пудинга. Этот «атомный пудинг Томсона» был распространенной моделью атома до открытия ядра Резерфордом и модели атома Бора.

В «пудинговой» модели атома Томсона положительное электричество представлялось как бы «размазанным» по всему объему атомной структуры, чаще всего представляемой сферой с четко очерченными границами. В этот положительный пудинг, как изюм, были вкраплены электроны. Для простейшего атома водорода электрон вообще находился в центральной части некоего положительно заряженного сфероида. При этом смещение электрона из центра должно было порождать квазиупругую силу электростатического притяжения, заставлявшую электрон совершать вынужденные колебания. Параметры таких колебаний должны были определяться радиусом атомного сфероида, положительным зарядом и массой электрона. Для многоэлектронных атомов Томсон рассчитал набор устойчивых конфигураций, в которых и должны были располагаться «изюмины» электронов. При этом кембриджский ученый полагал, что каждая из подобных конфигураций однозначно определяет химические свойства атомов. Томсон даже попытался теоретически объяснить схему построения периодической системы элементов Д. И. Менделеева. Позднее сам Нильс Бор (1885–1962) очень высоко оценил подобные попытки, подчеркнув, что со временем «идея о разделении электронов в атоме на группы сделалась исходным пунктом и более новых воззрений». С глубоким сожалением замечая, что модель атома Томсона несовместима с опытными фактами, датский теоретик тем не менее признал, что эта теория «содержит много оригинальных мыслей и оказала большое влияние на развитие атомной теории».

Вскоре проверкой опытных данных занялся выдающийся физик-экспериментатор Эрнест Резерфорд, убедительно опровергнувший модель Томсона и утвердивший триумф планетарной модели. Одновременно исследованием строения атомов занимался Н. Бор. После анализа модели

Резерфорда Бор взял ее за основу своих построений. Уже было достоверно известно, что заряд атомного ядра и число электронов строго равны в «электронейтральном» состоянии атома, определяя место данного химического элемента в периодической системе Д. И. Менделеева. Несомненно, это — важнейший шаг в интерпретации физико-химических свойств веществ. Однако при этом не находила приемлемых объяснений необычайная устойчивость атомных структур, совершенно несовместимая с представлениями о вращении электронов по замкнутым орбитам, и тем более строение конкретных атомных спектров, набора определенных линий. В общем было понятно, что фиксированность вида спектров с их четко выраженной химической индивидуальностью должна быть как-то связана с атомным строением.

При этом сама устойчивость атома в целом противоречила основным положениям электродинамики, согласно которым любой электрон, двигаясь ускоренно по замкнутой орбите, должен был бы непрерывно излучать энергию, теряя при этом свою скорость в неминуемом падении на ядро. Сам характер движения электронов по классическим законам электродинамики не должен был бы приводить к наблюдаемым характеристикам линейчатых спектров. Известные к тому времени линии спектров можно было сгруппировать в определенные серии, сгущающиеся в коротковолновой части. В то же время частоты спектральных линий для соответствующих серий подчинялись каким-то непонятным арифметическим закономерностям.

Так, Иоганн Бальмер (1825–1898) в 1885 году нашел, что четыре спектральные линии, соответствующие нейтральному водороду, вполне могут быть выведены из единого соотношения. Несколько позже было получено около 20 линий в ультрафиолетовой части спектра, и они полностью укладывались в формулу спектральной серии Бальмера. Иоганн Ридберг (1854–1919) в 1889–1900 годах нашел серийное распределение для спектральных линий щелочных металлов. При этом выяснилось, что частоты линий для каждой серии представимы в виде разности двух термов, простейших численных выражений, определяемых неким постоянным числом, названным постоянной Ридберга.

Бор долго искал объяснение спектральным сериям Бальмера и Ридберга, и ему удалось вычислить постоянную Ридберга, оперируя такими фундаментальными понятиями, как масса и заряд электрона, постоянная Планка и скорость света. Для этого ему пришлось разработать модель атома исходя из физических представлений, совершенно чуждых классической науке. Прежде всего это представления о так называемых стационарных атомных состояниях, когда существуют орбиты, на которых электроны не излучают, хотя и движутся с ускорением. При переходе с одной орбиты на другую электрон излучает и поглощает энергию, равную кванту.



Строение атома, модель Бора — Резерфорда

*«Так как планковская квантовая гипотеза в то время еще считалась спорной, не удивительно, что попытка Бора основать модель атома на понятии квантов не имела сначала у физиков большого успеха. Некоторым теория Бора казалась поразительным гибридом, полученным с помощью прививки некоторых черт квантовой теории, исходящей из представлений о прерывности материи, к теории планетарных орбит — типичной классической теории, рассматривающей мир как нечто непрерывное».*

Н. Винер. Автобиография



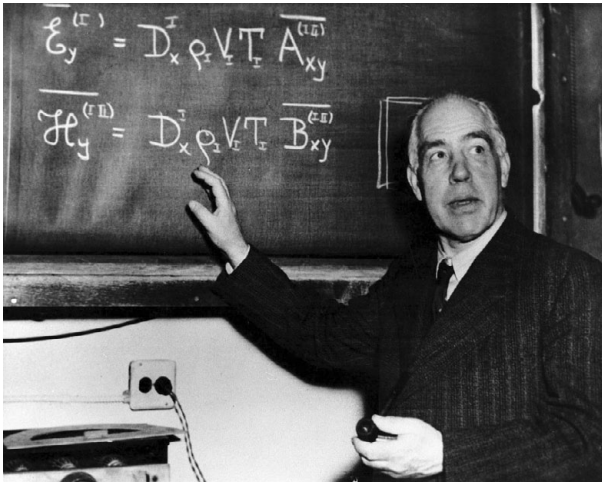
В заключительных замечаниях к статье «О строении атомов и молекул» Бор сформулировал основные гипотетические предположения.

1. Испускание (или поглощение) энергии происходит не непрерывно, как это принимается в обычной электродинамике, а только при переходе системы из одного стационарного состояния в другое.
2. Динамическое равновесие системы в стационарных состояниях определяется обычными законами механики, тогда как для перехода системы между различными стационарными состояниями эти законы недействительны.
3. Испускаемое при переходе системы из одного стационарного состояния в другое излучение монохроматично, и соотношение между его частотой  $\nu$  и общим количеством излученной энергии  $E$  дается равенством  $E = h\nu$ , где  $h$  — постоянная Планка.
4. Различные стационарные состояния простой системы, состоящей из вращающегося вокруг положительного ядра электрона, определяются из условия, что отношение между общей энергией, испущенной при образовании данной конфигурации, и числом оборотов электрона  $n$  является целым кратным  $A / 2n$ . Предположение о том, что орбита электрона круговая, равнозначно требованию, что момент импульса вращающегося вокруг ядра электрона был бы целым кратным  $h / 2n$ .
5. «Основное» состояние любой атомной системы, то есть состояние, при котором излученная энергия максимальна, определяется из условия, чтобы момент импульса каждого электрона относительно центра его орбиты равнялся  $h / 2n$ .

Далее Бор пишет: «Было показано, что при этих предположениях с помощью модели атома Резерфорда можно объяснить законы Бальмера и Ридберга, связывающие частоты различных линий в линейчатом спектре».

Бор дал объяснение спектральной серии, наблюдаемой в 1896–1897 годах Пикерингом в звездных спектрах, показав, что она соответствует ионизированному гелию. В дальнейшем Бор постоянно уточнял и дополнял основы своей

теории, неоднократно возвращаясь к вопросам пространственного квантования, позволившего объяснить влияние электромагнитных полей на вид атомных спектров. Одним из первых Бор рассмотрел атомные рентгеновские спектры, предположив, что «характеристическое рентгеновское излучение испускается при возвращении системы в нормальное состояние, если каким-либо воздействием, например катодными лучами, были предварительно удалены электроны внутренних колец».



Нильс Хенрик Давид Бор

*«Факты и логика заставили Бора прийти к простой, но неожиданной идее: атом устроен природой так, что среди бесконечно обилия всех мысленных электронных путей существует набор устойчивых орбит. Пока электроны вращаются вокруг ядра по этим орбитам, атом пребывает в неизменном энергетическом состоянии. На таких избранных путях электроны действительно ведут себя, как идеальные планеты: они движутся, не теряя энергии. И весь атом в таких устойчивых состояниях действительно подобен солнечной системе: планеты-электроны подчиняются законам классической механики».*

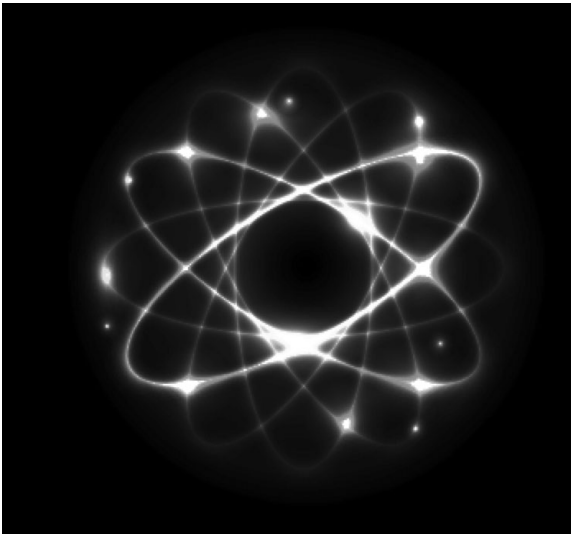
Д. Данин. Неизбежность странного мира

Теоретическое исследование рентгеновских спектров атомов, по идеи Бора, состояло в том, что электроны излучали высокоэнергетические кванты при переходах на глуболежащих внутренних оболочках. Теория рентгеновских спектров Бора получила серьезное подтверждение после публикации результатов экспериментов Джеймса Франка и Густава Людвига Герца. Эти физики-экспериментаторы в 1913 году приступили к изучению соударений электронов с атомами различных газов. В результате анализа экспериментов выяснилось, что электроны могут сталкиваться с атомами газов упругим и неупругим образом. В случае упругого удара электрон как бы отскакивает от намного более тяжелого атома, практически не теряя энергии, а при неупругом соударении энергия электрона передается атому, который при этом может стать ионом путем ионизации либо перейти в возбужденное состояние. За свои многолетние исследования, наглядно подтвердившие квантовые закономерности событий в микромире, Франк и Герц в 1925 году стали нобелевскими лауреатами.

Квантовый характер излучения и поглощения энергии атомом лег в основу теоретического исследования о световых квантах, выполненного Эйнштейном в 1916–1917 годах. Эйнштейн вывел формулу Планка исходя из представления о направленном излучении для атомов, которые излучают и поглощают квантованную энергию. Кроме спонтанных электронных переходов, введенных Бором в своей атомной модели, Эйнштейн рассмотрел индуцированные переходы при воздействии света для атомов и молекул, находящихся в световом поле. Долгое время эта пионерская идея Эйнштейна оставалась не востребованной, но во второй половине XX века ее развитие привело к созданию физики индуцированного излучения, нашедшей применение в мазерной и лазерной технологиях.

Модель атома Бора получила всестороннее развитие в работах многочисленных исследователей и прежде всего самого ее автора. После экспериментальных подтверждений теория Бора стала общепризнанной, однако остались еще трудные вопросы, в первую очередь связанные с построением

теоретических моделей многоэлектронных атомов. Кроме того, требовалось объяснить так называемый аномальный эффект Зеемана и многое другое. Стало очевидно, что в атомной теории Бора, несмотря на ее поразительные успехи, есть и существенные недостатки, можно сказать, принципиального характера. В конце концов, противоречия и трудности «боровской атомистики» превысили критический уровень, и теоретики принялись искать выход из сложившегося положения.



Квантовое излучение и поглощение энергии газовой молекулой

Выстреливая квант в определенном направлении, атом сообщает ему не только энергию  $h\nu$ , но и импульс  $h\nu / c$ . При излучении молекула газа переходит из энергетического состояния  $Zm$  с энергией  $em$  в состояние  $Zn$  с энергией  $en$ , излучая энергию  $em - en$ . Поглощая такую же энергию, молекула переходит из состояния  $Zn$  в состояние  $Zm$ . Молекула может перейти из состояния  $Zm$  в состояние  $Zn$  самопроизвольно, спонтанно.

И прежде всего сам соавтор планетарной модели атома Резерфорд. Ознакомившись еще с первыми работами Бора,

Резерфорд сразу указал на трудности эклектического сочетания квантовых идей и классической электродинамики. Действительно, в классической науке нет места квантовым скачкообразным переходам и совершенно непонятно, откуда электрон «знает», на какую же орбиту необходимо совершить переход.

Бор с очень большим вниманием отнесся к замечаниям Резерфорда. Они ясно показали противоречивость случайных квантовых переходов и строго детерминированных закономерностей движения электронов по атомарным орбитам. Одно время успехи модели Бора при объяснении спектральных серий во многом затмили противоречия атома Бора — Резерфорда. Однако затем недостатки теории снова проявились, особенно на примере интерпретации эффекта Зеемана.

В 1896 году голландский физик Питер Зееман (1865–1943) провел серию экспериментов, воспроизводя знаменитый опыт Фарадея. Этот великий экспериментатор помещал пламя натриевой горелки между полюсами достаточно сильного магнита и пытался найти изменение в спектре излучения. В своей модификации этого исторического опыта Зееман использовал мощный электромагнит с просверленным каналом для наблюдения не только перпендикулярного силовым линиям поля (поперечный эффект), но и вдоль поля (продольный эффект). В наблюдении поперечного эффекта кроме линии с частотой колебаний, равной частоте колебаний в отсутствие поля, наблюдалось еще две дополнительные линии, но им разумного объяснения в модели атома Бора — Резерфорда не нашлось.

Большой вклад в дальнейшее развитие модели атома Бора внес видный немецкий физик Арнольд Зоммерфельд (1868–1951). Он полагал, что, если атом подобен солнечной системе, электроны могут, как и планеты, вращаться по эллипсам. При этом эллипсы с одинаковыми большими полуосями могли бы соответствовать электронам одинаковой энергии с одними и теми же главными квантовыми числами. Для характеристики вытянутости эллиптических орбит Зоммерфельд предложил последовательность целых орбитальных квантовых чисел.

Зоммерфельд старательно развивал теорию Бора, введя принцип пространственного квантования. По Зоммерфельду движение электронов по разрешенным орбитам связано с их особыми параметрами, названными радиальными и азимутальными квантовыми числами: главным квантовым числом, определяющим энергию электрона, и побочным квантовым числом, определяющим форму орбиты. Объясняя эффект Зеемана Зоммерфельд учел, что пространственное положение электронных орбит должно определяться третьим магнитным квантовым числом. Именно введение этого дополнительного числа и последующее квантование по отношению к внешнему магнитному полю и позволило дать разумное объяснение эффекта Зеемана. Однако и оно в известном смысле было неполным, поскольку ничего не говорило о поляризации линий, а разъясняло лишь частотные характеристики линий, но не их интенсивность.

Таким образом, противоречия в теории атома Бора — Резерфорда постоянно множились, а квантовое описание спектроскопических эффектов усложнялось. Наиболее запутанной оказалась теория света. Эйнштейн в 1917 году в классической работе по теории фотоэффекта ввел понятие световых квантов. Далее великий физик предположил, что атом не просто излучает фотоны, а генерирует кванты света во вполне определенном направлении. При этом квант света будет обладать такими корпускулярными свойствами, как энергия материальной частицы, масса и импульс.

Эта идея блестяще подтвердилась после открытия, сделанного американским физиком Артуром Комптоном (1892–1962). В 1922 году Комптон изучал рассеяние рентгеновских лучей графитом как веществом со слабо связанными электронами. В ходе различных опытов он выяснил, что частота рассеянных рентгеновских лучей неуклонно изменяется в зависимости от углов рассеяния. При увеличении угла падения излучения на вещество частота излучения отдачи существенно уменьшается, оно становится более «мягким». За открытие этого эффекта Комптон стал нобелевским лауреатом в 1927 году.

## Волны и частицы

*«Каким образом материальной частице или системе материальных частиц можно сопоставить (скалярное) волновое поле показал в своей работе Луи де Бройль, заслуживающей всякого внимания».*

А. Эйнштейн. Теоретическая атомистика

*«При этом следует полагать, что каждая корпускула сопровождается определенной волной и каждая волна связана с движением одной или многих корпускул...»*

*«Электрон не может более рассматриваться как простая крупица электричества; с ним следует связывать волну...»*

Л. де Бройль. Свет и материя



Луи Виктор Пьер Раймон, 7-й герцог Брольи (Луи де Бройль)

*«Перед мысленным взором де Бройля маячили разрешенные орбиты электронов в атомном пространстве, рассчитанные в 1913 году Нильсом Бором, эти орбиты спасли планетарную модель Резерфорда. Но физики уже десять лет задавали себе*

*вопрос: почему одни орбиты разрешены природой, а другие нет? Почему они образуют прерывистую последовательность, как ряды в круговом амфитеатре цирка или нити в паутине? Что вынуждает электроны к скачкам с одной устойчивой орбиты на другую? Почему в атоме создается лестница дозволенных уровней энергии — почему лестница, а не пандус?»*

Д. Данин. Неизбежность странного мира

В 1924 году Бор с соавторами опубликовал статью «Квантовая теория излучения». В ней рассматривалось два основных способа энергетического переноса: с помощью волн и частиц. Со свойственными ему философскими рассуждениями глава копенгагенской школы писал, что в обыденной жизни между двумя механизмами передачи энергии не наблюдается видимых противоречий. Однако в микромире на сверхмалых масштабах строения вещества картина существенно меняется. Даже из простейших опытов с микроскопическими объектами становится ясно, что на этом уровне организации материи привычные принципы и законы макромира не действуют. Свет, который привыкли считать волной, порой ведет себя так, будто состоит из потока частиц — фотонов, а элементарные частицы, такие как электрон, проявляют свойства волны.

Для иллюстрации можно легко поставить опыт, известный еще задолго до написания ньютоновской «Оптики». Если взять экран с двумя тонкими и достаточно близко расположенными щелями и направить на него луч света, можно предположить, что частицы света будут проходить через оба отверстия прямо и за экраном возникнут две четкие световые полосы. Однако на практике мы наблюдаем совершенно иной эффект. Каждая из прорезей играет роль независимого источника вторичных световых волн, как поплавок на воде, и за экраном образуется сложная картина из перемежающихся полос света. Причем часть из них будет располагаться в «мертвой зоне» вне прямой линии попадания света. Это полностью соответствует модели звуковых волн, исходящих из двух стереодинамиков и дающих пик громкости стереоэффекта на линии равного удаления между ними.



Совершенно очевидно, что частицы света ведут себя принципиально иначе, чем окружающие нас объекты. Почему же это происходит? Этот очень важный и сложный вопрос напрямую связан с фундаментальной природой корпускулярно-волнового дуализма, и ответ на него может звучать так: в любом материальном теле содержится «зародыш» его волновой природы. Чем меньше становится материальный объект, тем существеннее возрастает его вторая «волновая сущность». Поэтому и кванты электромагнитного поля — фотоны представляют собой не волны или частицы, а совершенно особые корпускулярно-волновые образования.

Между тем именно принцип корпускулярно-волнового дуализма позволил наконец-то понять сущность квантования атомных орбит. И здесь главная роль принадлежит удивительной концепции французского физика, нобелевского лауреата Луи де Бройля (1892–1987). Он выдвинул предположение, что все без исключения микроскопические объекты: — частицы, атомы и даже молекулы — обладают такими же корпускулярно-волновыми свойствами, как и фотоны. Эта удивительная гипотеза была подтверждена через несколько лет в опытах по волновой дифракции электронов. Электрон действительно проявил свою волновую природу и вел себя как некая волна материи!

В 1923 году Луи де Бройль представил три доклада во Французскую академию наук: «Волны и кванты», «Кванты, кинетическая теория газов и принцип Ферма», «Кванты света, дифракция и интерференция», в которых излагалась совершенно парадоксальная идея, переносящая дуализм теории света на сами материальные частицы. Поначалу эти статьи не вызвали особого интереса и содержащиеся в них указания на возможность наблюдения дифракции электронов не заинтересовали экспериментаторов. Дифракция электронов была открыта только через 5 лет после выхода статей де Бройля вне всякой связи с ними и до известной степени случайно. Тем не менее на идеи де Бройля обратили внимание выдающиеся теоретики Эйнштейн и Эрвин Шрёдингер и с успехом развили их в дальнейших исследованиях.

В своих работах французский физик рассмотрел волновые процессы, связанные с материальными телами. Начал де Бройль теоретическое построение очень осторожно: «Мы будем рассматривать ее лишь как фиктивную волну, связанную с перемещением движущегося тела». Но затем он высказал смелое утверждение, что для орбитального электрона, движущегося в атомарной структуре по замкнутой траектории с постоянной скоростью, не превышающей скорость света, орбита будет устойчивой, только если на ней укладывается целочисленное количество подобных «фиктивных волн». Это условие в основном совпадает с боровским квантованием орбит, причем скорость частицы-волны представлялась скоростью целой группы волн с очень мало отличающимися частотами.

Эту «фиктивную волну» де Бройль назвал волной фазы, соотнося с ней некий волновой процесс, как бы пилотирующий движение частицы. Так возник знаменитый образ волны-пилота, что вызвало много споров среди физиков и философов. По словам Бора, гипотеза де Бройля позволяет осуществить синтез волнового движения и квантов. Несколько позже французский ученый решил расширить понятие волновых процессов и для частиц вещества, мотивируя это тем, что «дифракционные явления обнаруживаются в потоке электронов, проходящих сквозь достаточно малые отверстия. Быть может, экспериментальное подтверждение наших идей следует искать в этом направлении».

Фактически 25 ноября 1924 года, в день защиты де Бройлем своей докторской диссертации «Исследования по теории квантов», на основе квантовых представлений возник новый раздел физики — волновая механика. Сам автор «корпускулярно-волновой картины Мироздания», по словам Эйнштейна, неоднократно указывал, что его новая механика относится к классической и релятивистской, так же как волновая оптика относится к геометрической. Он пишет, что предложенный им синтез «представляется логическим венцом совместного развития динамики и оптики со времени XVII века».

За открытие волновой природы электронов (волновые свойства других частиц были доказаны гораздо позже) де Бройль был удостоен в 1929 году Нобелевской премии.



Макс Борн

*«...Борн основал большую школу теоретической атомной физики с интернациональным коллективом учеников и сотрудников. К ней принадлежали такие исследователи, как Ферми, Дирак, Оппенгеймер, Мария Гепперт-Майер, И. фон Нейман, Теллер, Вигнер, Полинг, Гайтлер, Вайскопф, Розенфельд и другие знаменитые ученые, многие из которых стали лауреатами Нобелевской премии. Ассистентами Борна были Вольфганг Паули и Вернер Гейзенберг. Вместе с ним или под его руководством работали*

*советские физики Фок, Тамм, Френкель и Румер. Его институт посещали Иоффе и Капица; американский физик Гамов, получивший известность благодаря своим космологическим исследованиям, также был учеником Борна».*

Ф. Гернек. Пионеры атомного века

В своей статье «Кванты, кинетическая теория газов и принцип Ферма» де Бройль разработал статистику газов и световых квантов, используя новые представления о волнах материи, вывел закон распределения Максвелла для газов и формулу Планка для квантов света. Эти идеи де Бройля опять первым поддержал великий Эйнштейн, использовав их для исследований по квантовой статистике идеального одноатомного газа.

*«Точная математическая формулировка квантовой теории сложилась в конечном счете в процессе развития*

*двух различных направлений. Одно направление было связано с принципом соответствия Бора. На этом направлении нужно было прежде всего отказаться от понятия „электронная орбита“ и использовать его лишь приближенно в предельном случае больших квантовых чисел, то есть больших орбит. В этом последнем случае частота и интенсивность излучения некоторым образом соответствует электронной орбите... Исходя из таких представлений, возникает возможность перейти к математически представляемым отношениям для величин, которые соответствуют частоте и интенсивности излучения.*



Вернер Карл  
Гейзенберг

*Эта программа действительно могла быть осуществлена. Летом 1925 года она привела к математическому формализму, который был назван „матричной механикой“, или, вообще говоря, квантовой механикой...»*

В. Гейзенберг. Физика и философия. Часть и целое

Совершенно иначе отнеслись к теории «волн материи» и концепции «волны-пилота» де Бройля Бор и его коллеги по копенгагенской школе. Странники копенгагенской интерпретации квантовой механики искали объяснения квантовомеханических парадоксов на пути создания неких математических схем, полностью лишенных наглядности, однако вполне адекватно описывающих наблюдаемые явления. Одна из таких теоретических схем была найдена в 1925 году Вернером Гейзенбергом (1901–1976). В своей статье «О квантовотеоретическом истолковании кинематических и механических соотношений» этот немецкий теоретик предлагал «основываться исключительно на соотношениях между принципиально наблюдаемыми величинами...»

«Надо отказаться от всякой надежды на наблюдение до сих пор ненаблюдаемых величин (таких как положения,

период обращения электрона)» и «построить квантовую теоретическую механику, более или менее аналогичную классической механике, в которой встречались бы только соотношения между наблюдаемыми величинами».

Позиция Гейзенберга, заключающаяся в отказе от «до сих пор ненаблюдаемых величин» очень напоминала призывы отдельных философов-метафизиков начала XX века «отказаться от ненаблюдаемых» атомов и электронов. Сам Гейзенберг первоначально не сознавал, что необходимо не отказываться от понятия «ненаблюдаемые положения и скорости электронов», а просто уточнить само понятие «наблюдение» в микромире. Вскоре после появления этой работы Гейзенберга его учитель Макс Борн (1882–1970) и молодой гёттингенский математик Пауль Йордан (1902–1980) представили статью о матричной теории гармонического осциллятора и указали, что предложенная Гейзенбергом математическая схема описания квантово-теоретических величин по своей сути представляет матричную алгебру.

В матричной механике каноническим переменным классической механики соответствовали матрицы.

Математика имеет дело с величинами и символами, и каждый символ в ней подчиняется своим правилам. Законы математики одни для арифметических действий с простыми числами и совершенно иные для более сложных объектов, таких, как отрицательные числа, комплексные выражения и, разумеется, матрицы. Матрицы — это таблицы величин, для которых существуют свои строго определенные операции сложения и умножения. Результат перемножения двух матриц зависит от порядка действия. Вообще говоря, это и отличает матрицы от других математических формализмов. В популярной литературе суть матриц часто объясняют с помощью шахматного образа, в котором положение фигур описывается буквенно-численными параметрами по вертикали и горизонтали. Но законы царицы наук, математики, принципиально независимы от физики, да и всех иных наук. Математические закономерности описывают символическим образом все возможные причинно-следственные связи в нашей реальности. Безусловно, без практического опыта понять, какие именно связи соответствуют математическим

образам, нельзя. Иногда их можно лишь угадать, что близко к научной спекуляции.

Математические матрицы были известны задолго до начала квантовой эры в естествознании. Тем не менее для физиков-теоретиков было большой неожиданностью, что подобные математические конструкции с необычными свойствами управляют квантовыми объектами.

Тут надо сказать, что в начале XX века теория матриц еще не входила в университетские курсы для математических факультетов и совершенно не была известна физикам-теоретикам. Поэтому даже Гейзенберг, получивший фундаментальное университетское образование в Мюнхене у Арнольда Зоммерфельда, не представлял себе, что это такое, и фактически самостоятельно создал данный раздел математики исходя из постановки физических задач. Последняя проверка правильности основных принципов новой матричной механики была проведена 17 января 1926 года Вольфгангом Паули (1900–1958) в статье «О спектре водорода с точки зрения новой квантовой механики».

Однако вопреки впечатляющим результатам матричной квантовой механики при объяснении самых различных явлений микромира новая форма квантовой теории была встречена с большим недоверием многими видными физиками того времени. Основная причина — трудность в понимании совершенно непривычного математического аппарата и сложность универсального алгоритма нахождения энергетических спектров квантовых систем. Следующей причиной были неясности физического смысла новой теории: она содержала кроме квантовых скачков и дискретности излучения еще и невозможность приписать определенной микрочастице траекторию движения. Понадобилось еще около 10 лет, чтобы прояснить статус квантовых скачков и траекторий микрочастиц в созданной Бором и Гейзенбергом копенгагенской интерпретации квантовой механики.

*«В 1924 году Паули сформулировал общий принцип, который, как оказалось, не только совершенно универсален, но и имеет величайшее значение. В своем первоначальном виде этот*



Вольфганг Паули

*принцип устанавливал, что в системе, состоящей более чем из одного электрона, никакие два электрона не могут находиться в одинаковом квантовом состоянии. Принцип Паули в сочетании со знанием распределения возможных уровней энергии в водородоподобных атомах дает ключ к построению электронной структуры атомов и периодической таблицы».*

Г. Мессе. Новая эра  
в физике

Не последнюю роль в прохладном отношении к новой механике немецкой физической школы сыграло и неприязненное отношение одного из признанных физиков-экспериментаторов Вильгельма Вина лично к Вернеру Гейзенбергу. Дело в том, что за несколько лет до начала собственной научной деятельности Гейзенберг не смог сдать экзамен Вину, показав недостаточное знание основных экспериментальных физических методов. Только личная просьба Зоммерфельда спасла Гейзенберга от судьбы вечного студента без университетского диплома. Однако уступив рекомендациям своего друга, Вин до конца жизни считал Гейзенберга молодым выскочкой-неучем.

## Квантовая механика Шрёдингера и Гейзенберга

*«Изучение работ основоположников квантовой теории Эрвина Шрёдингера и Вернера Гейзенберга принесло мне непередаваемое ощущение силы человеческого гения, величайшим триумфом которого*

*является то, что человек способен понять вещи, которые он уже не в силах вообразить...»*

Л. Ландау. Речь на торжественном заседании АН СССР, посвященном юбилею Нильса Бора

*«Математика неожиданно проявила себя „умнее“ физики; и здесь мы опять встречаемся с тем случаем в теоретической физике, когда с помощью такой математики нападают на след новых открытий...»*

*Позднее Борну, Иордану и Дираку полностью удалось проникнуть во внутреннюю структуру подобного рода математики и успешно применить математическую схему к расчету атома...*

*В работах Борна и Иордана матричная механика впервые стала законченной математической схемой».*

В. Гейзенберг. Физика и философия. Часть и целое

*«Математические разработки Шрёдингера имели для гениально предугаданных де Бройлем волн материи такое же значение, какое имели уравнения поля Максвелла для силовых линий Фарадея. Шрёдингер оперировал при этом строго классическими методами и пользовался наглядными представлениями, которым физики доверяли и которые были доступны пониманию: обстоятельство, в немалой степени способствовавшее быстрому признанию волновой механики».*



Эрвин Шрёдингер

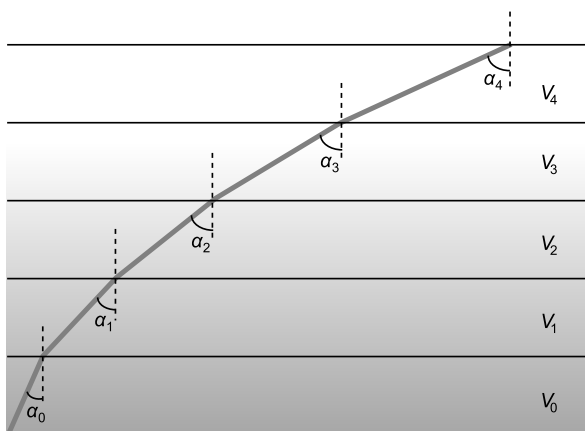
Ф. Гернек. Пионеры атомного века

Следующий по значению этап в развитии квантовой физики связан с именем нобелевского лауреата, сумевшего обобщить и развить гипотезу де Бройля, Эрвина Шрёдингера (1887–1961). Борн спрашивал впоследствии: «Что существует



более выдающегося в теоретической физике, чем его первые шесть работ по волновой механике?» Именно в этих работах впервые появились и уравнение Шрёдингера, и представление Шрёдингера, и функция Шрёдингера, которые затем вошли в золотой фонд физической науки.

В конце первой четверти XX века Шрёдингер прочитал в одной из научных работ Эйнштейна положительные замечания по теории «волн материи» де Бройля. Он не только поддержал теоретические построения французского коллеги, но и развил их до логического завершения. В своих рассуждениях Шрёдингер исходил из идей де Бройля и оптико-механической аналогии Гамильтона. По этой аналогии, геометрической оптике соответствуют уравнения классической механики, определяющие траекторию частицы, так же как законы геометрической оптики определяют форму лучей света. Геометрическая оптика применима к малым длинам волн; когда же длиной волны нельзя пренебречь, вступают в силу законы волновой оптики, описываемые волновым уравнением.



Оптико-механическая аналогия  
( $\alpha_n$  — углы преломления;  $V_n$  — плотность среды)

В 1834 году знаменитый астроном Уильям Роуан Гамильтон (1805–1865) предположил, что формальная аналогия между траекториями движения частицы и светового

луча может иметь строгое математическое обоснование. Гамильтон наглядно доказал, что в механике можно заменить траекторию частицы движением фронта определенной волны. Гамильтон получил новый физический принцип: движение частицы по траектории можно представить как распространение луча света без учета его волновых свойств. Пример — траектория луча в плоском слое неоднородной оптической среды, где показатель преломления зависит только от высоты. Ему удалось записать уравнения движения механики в таком виде, что они полностью совпали с уравнениями геометрической оптики для луча света без учета его волновых свойств и получили впоследствии название «оптико-механическая аналогия».

Шрёдингер прекрасно знал, что оптико-механическая аналогия справедлива лишь для геометрической оптики. Он сделал смелое предположение, что данную аналогию можно распространить и на волновую среду в целом, так что любое движение частиц будет подобно распространению соответствующих волн. Шрёдингер попытался ввести в квантовую теорию атома классическое математическое описание волн. Первая попытка закончилась неудачей, ибо Шрёдингер полагал, что скорости атомных электронов близки к световым, и это в соответствии с теорией относительности приводило к нереальному увеличению их масс. Много позже выяснилось, что причина неудачи — неучет у электрона спина, прообраза вращения вокруг собственной оси, о котором тогда мало что было известно. Для следующей попытки ученый выбрал достаточно небольшие скорости электронов, и в итоге он успешно вывел знаменитое волновое уравнение Шрёдингера. Его решения и есть те самые «волны материи» де Бройля.

К этому времени физики уже убедились, что постулат Гейзенберга: «не существует понятия траектории электрона в атоме» вполне справедлив и электроны действительно не занимают определенного положения в атоме, тем более не вращаются по орбитам наподобие спутников планет или Солнца. Само по себе понятие движения пришло из классической механики, и часто мало применимо

к квантовым объектам. «Движение» в атоме электрона не сопоставимо с какими-нибудь определенными траекториями, электрон просто рассредоточен в некотором объеме пространства. Именно эта не совсем ясная вначале идея и содержалась в знаменитом уравнении Шрёдингера. Впоследствии он рассказывал, что на помощь ему пришла физическая интуиция и догадливость, и ему самому не вполне понятно, как это удалось сделать. Между тем Шрёдингер вместе с де Бройлем назвали свою теорию «волновой квантовой механикой». Спустя время экспериментаторы выяснили, что решения волнового уравнения Шрёдингера полностью отвечают опытным данным, а их всесторонний анализ и сегодня составляет одну из главных задач квантовой механики.

Итак, звезда Шрёдингера зажглась на научном небосклоне, когда он, развивая идеи де Бройля, в 1926 году получил свое знаменитое уравнение, описывавшее поведение волн-частиц. Один из главных моментов — понятие волновой функции частицы, которую изначально обозначили греческим символом  $\psi$  (пси) и поэтому часто называют  $\psi$ -функцией. Волновая пси-функция представляет собой наиболее полное из возможных описаний квантовых систем. Разумеется, прямые наблюдения «волн материи» де Бройля невозможны из-за их крайней малости, и с очень большой точностью движение атомарных структур и их элементов можно описать законами классической физики. Тем не менее и волновой природой микрообъектов пренебрегать нельзя, так как закономерности их движения определяются уравнением, аналогичным волновому уравнению, выведенному в оптике из предпосылок о волнах света.

Форму уравнения Шрёдингер нашел в следующем виде:

$$[(d^2 \times \psi) / (d \times x) + 2m / (\hbar^2)][E - U(x)]\psi = 0$$

Талантливый физик и популяризатор науки Леонид Иванович Пономарев в своей книге «Под знаком кванта» (недавно она получила престижную награду Международного института книги и фонда «Династия», что дает возможность очередного переиздания) предлагал увидевшим

впервые уравнение Шрёдингера читателям воспринимать его вначале просто как символ квантовой механики, как некий герб квантовой страны. Однако кое-какие штрихи в гербе «невероятного квантового мира» можно понять даже с помощью школьных знаний:  $m$  — это масса электрона,  $\hbar$  — постоянная Планка  $h$ , деленная на  $2\pi$ ,  $E$  — полная энергия электрона в атоме,  $U(x)$  — его потенциальная энергия,  $x$  — расстояние от ядра до электрона. Сложнее тем, кто основательно подзабыл школьную математику и физику, понять «вторую производную»  $d^2 / dx^2$ . Это символ дифференциального исчисления, собственно из-за которого уравнение Шрёдингера и называется дифференциальным.

Главное при анализе уравнения понять смысл загадочной  $\psi$ -функции. Это совсем не просто, и вначале сам Шрёдингер не совсем верно его истолковывал. При первом знакомстве с этим ключевым понятием квантовой теории важно усвоить, что, несмотря на свою волновую оригинальность, пси-функция все же прекрасно представляет движение электрона в атоме. Конечно, ее представление иное, чем с помощью матриц Гейзенберга, но с ее помощью можно успешно решать любые задачи квантовой механики, причем намного быстрее и проще, чем используя матричное исчисление Гейзенберга.

Таким образом, если в классической физике полное описание системы включало задание координат и скоростей всех ее частиц, позволяя при этом корректно описать прошлое и будущее физических систем, то в квантовой механике подобная ситуация принципиально невозможна. Согласно квантовой теории описание микросистемы (и не только) заканчивается заданием волновой пси-функции и соответственно лишь задание соответствующих волновых функций позволяет описать прошлое и будущее микроскопических объектов. Надо сразу же подчеркнуть, что физический смысл пси-функции — один из самых сложных вопросов квантовой теории, и даже сегодня для этого фундаментального квантовомеханического понятия выдвигаются все новые представления.



Давид Гильберт

*«Летом 25-го года, когда волновой механики еще не существовало, а матричная только-только появилась на свет, два геттингенских теоретика пошли на поклон к знаменитому Давиду Гильберту — признанному главе тамошних математиков. Бедствуя с матрицами, они захотели попросить помощи у мирового авторитета. Гильберт выслушал их и сказал в ответ нечто в высшей степени знаменательное: всякий раз, когда ему доводилось иметь дело с этими квадратными таблицами, они*

*появлялись в расчетах „как своего рода побочный продукт“ при решении волновых уравнений.*

*— Так что, если вы поищете волновое уравнение, которое приводит к таким матрицам, вам, вероятно, удастся легче справиться с ними, — закончил он.*

*Оба теоретика решили, что услышали глупейший совет, ибо Гильберт просто не понял, о чем шла речь. Зато сам Гильберт потом с наслаждением смеялся, показывая им, что они могли бы открыть шрёдингеровскую волновую механику на шесть месяцев раньше ее автора, если бы повнимательней отнеслись к его, гильбертовым, словам».*

Э. Ю. Кондон. Создание квантовой науки

В свое время Шрёдингер много сил потратил на интерпретацию физического смысла волновой пси-функции, которая, как он считал, должна наконец-то избавить теорию от странных квантовых скачков, пытался даже дать наглядную интерпретацию пси-функции. Он посчитал, что наложение волновых функций может образовать своеобразный «волновой пакет», определяющий образ движущейся

микрочастицы. Между тем по де Бройлю скорость группы «волн материи» равна скорости унитарной частицы, но уже для пары частиц такая наглядная интерпретация теряет свой смысл. «Волны», описываемые пси-функциями, мало напоминают привычные волны на поверхности жидкости или в газе, они строятся в некоем сугубо абстрактном, конфигурационном пространстве. К тому же «волновой пакет» с течением времени должен был бы расплываться. Именно поэтому в 1926 году Борн разработал новую интерпретацию пси-функции: квадрат ее модуля определял плотность вероятности нахождения микрочастицы в данной области пространства.

Получается, что загадочную волновую функцию можно представить себе как некоторую «волну вероятности». Например, вероятность того, что квантовая частица находится в точке с заданными координатами, равна квадрату ее волновой функции, аргументом которой будет координата. Соответственно вероятность того, что частица имеет определенный импульс, равна квадрату волновой функции с импульсом в качестве аргумента. Поэтому у квантовой частицы нет определенной координаты или импульса, они принимают то или другое значение лишь с какой-то вероятностью. Однако измерение этих величин сразу же делает их определенными. Пропустив частицу через щель, можно утверждать, что ее координаты равны координатам отверстия. При этом волновая функция частицы оказывается ненулевой только в месте прохождения щели. Подобная процедура измерения называется коллапсионной редукцией волновой функции, она как бы «схлопывается», коллапсирует, сокращая (редуцируя) свои значения к классико-механическим координатам в месте регистрации.

В матричном представлении (о нем рассказывалось выше) каждая физическая величина показана двумя индексами, определяющими начальное и конечное состояние системы. Координате соответствует совокупность матричных элементов, где два индекса определяют соответствующие состояния системы. Матричные уравнения Гейзенберга, как отмечалось, позволяют в принципе получить все возможные наблюдаемые величины. Тем не менее матричная квантовая

механика в своей первоначальной форме очень многим казалась неоправданно усложненной по сравнению с волновой механикой Шрёдингера — де Бройля. Впрочем, после того как эти две теории приняли более-менее законченный вид, тот же Шрёдингер показал их полную эквивалентность, после чего разные теоретические подходы объединились в квантовую физику.

Так возникла оригинальная ситуация, когда к окончанию первой четверти XX века на физической арене начали борьбу за приоритет описания микромира сразу две квантовые теории с различными исходными концепциями. В матричной механике Гейзенберг при поддержке Бора доказывал корпускулярную природу электронов, отражая это в своих системах матриц. Совершенно иной на первый взгляд подход предлагал Шрёдингер при поддержке де Бройля, отражая волновую природу электрона в своем уравнении. Подход Гейзенберга основывался на оперировании только наблюдаемыми величинами, он в принципе не рассматривал понятия каких-либо атомных траекторий. Со своей стороны Шрёдингер также избегал «планетарного» смысла орбит электронов вокруг «солнечного» ядра и ограничивался абстрактным образом таинственной пси-функции в своем уравнении. Великий судья всех физических споров — опыт оказался в совершенно беспомощном положении: часть экспериментов обнаруживала у электрона корпускулярные, а часть — волновые свойства! Это был период бурных дебатов, разделивших тогда еще немногочисленных физиков на два непримиримых лагеря: приверженцев пионерской матричной механики и сторонников математически прозрачной волновой квантовой физики. В этой непростой ситуации главным парламентом в 1927 году и выступил Шрёдингер, убедительно продемонстрировав скептикам и сторонникам, что обе квантовые теории в своей математической сущности едины. Отсюда следовал основной вывод о физической эквивалентности двух механик в описании атома Бора. Иначе говоря, представления матричной теории о корпускулярном образе электрона также достоверны, как и представления волновой квантовой механики о волнах электронов.

С помощью волновой механики Шрёдингер начал создавать теорию атомных процессов, опубликовав на протяжении 1926 года несколько статей по следующей тематике: «Об отношении механики Гейзенберга-Борна-Иордана к моей», «Квантование как проблема собственных значений», «Непрерывный переход от микро- к макромеханике». В конце года Шрёдингер издал эти работы отдельным сборником под общим названием «Статьи по волновой механике».

Книга вызвала бурю обсуждений среди теоретиков по всему миру. В ней Шрёдингер предельно ясно выразил тезис всей своей последующей жизни: единственная реальность в квантовом микромире — всяческие волновые процессы, досконально объясняемые волновой механикой. Волнам материи просто не существует разумной альтернативы, а квантовые скачки являются лишь спекулятивной иллюзией теоретиков. Позиция Шрёдингера подверглась резкой критике со стороны представителей копенгагенской школы, прежде всего самого Бора, а также Гейзенберга и Борна, ставивших во главу угла физическую интерпретацию микрочастиц как полностью «корпускулярных» объектов, обладающих целостностью и устойчивостью. При этом они безоговорочно признавали, что поведение частиц в микромире существенным образом отличается от того, как ведут себя те же корпускулы Ньютона в классической физике.

Весной 1927 года Гейзенберг написал статью, которая стала буквально судьбоносной для дальнейшего развития квантовой механики: «О наглядном содержании квантотеоретической кинематики и механики». В этой работе немецкого теоретика впервые содержалась ясная формулировка одного из основных принципов квантовой механики, ключевого при анализе поведения частиц на микроуровне, принципа неопределенности. Долгое время, анализируя разнообразные теоретические схемы по одновременному определению скорости и координат микрочастиц, он пришел к совершенно поразительному с точки зрения классической физики выводу: точность измерения одного параметра неразрывно связана с точностью измерения другого! В целом это хорошо укладывается в современный образ квантового микромира, где волновые функции частиц не связаны



с какими-либо физическими полями и представляют собой просто формальные записи для результирующих вероятностей наблюдаемых явлений.

Простейший пример — уточнение координаты того же электрона. Для того чтобы точно определить его место в пространстве, необходимо взять как можно более короткую электромагнитную волну, «осветить» его и при этом посмотреть в некий сверхсильный «микроскоп». Из оптики известно, что подобный метод определения местоположения микрочастицы дает погрешность порядка длины волны использованного света. Следовательно, для уточнения координаты можно было бы максимально уменьшить длину волны освещения, но при этом скорость электрона становится неопределенной из-за эффекта отдачи при взаимодействии с волной. Чем короче волна, тем выше ее энергия, тем больше эффект отдачи. Понижим энергию, возрастет длина и неопределенными станут пространственные координаты...

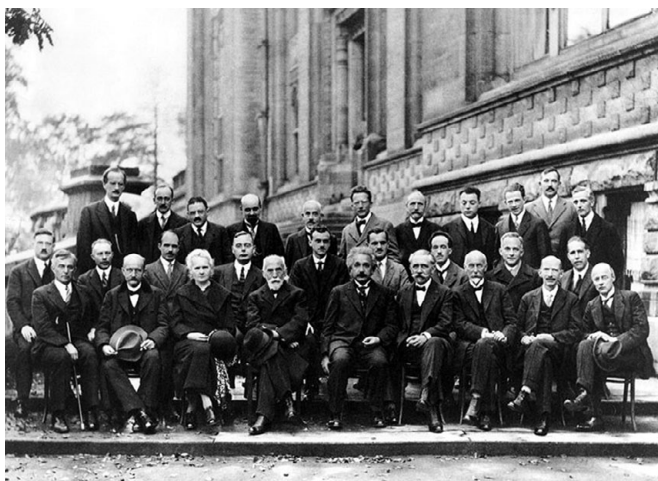
Соотношение Гейзенберга гениально просто:  $\Delta q \Delta p \geq \hbar$ , где  $\Delta q$  — неопределенность координаты,  $\Delta p$  — неопределенность импульса,  $\hbar$  — постоянная Планка.

Принцип неопределенности Гейзенберга справедлив и для других параметров микрочастиц. Например, он связывает такие характеристики микрообъектов, как энергия и время в самых различных квантовых явлениях. Получается, что, чем быстрее протекает процесс в микромире, тем труднее определить задействованное в нем количество энергии. Справедливо тут и обратное утверждение: чем точнее характеризуется энергия в некоем квантовом явлении, тем неопределеннее время его продолжительности. Многие физики сегодня считают, что именно в этом зерно возможной фундаментальной дискретности потока времени и существования атомов времени — хроноквантов.

Осенью того же года Бор посвятил новому квантовомеханическому принципу обширный доклад «Квантовый постулат и новейшее развитие атомной теории», прочитанный им на международной теоретической конференции в Копенгагене. Бор не только дал высочайшую оценку работе Гейзенберга, но и развил новое квантовое понимание природы,

сформулировав свой философский «принцип дополнительности», тесно связанный со смыслом соотношения неопределенности Гейзенберга.

Бор считал, что принцип неопределенности отлично иллюстрирует его принцип дополнительности: те же координаты и импульсы одновременно ограничивают и дополняют друг друга.



Делегаты 5-го Сольвеевского конгресса 1927 года

*«...Многие из нас пришли на это заседание в надежде узнать, какова будет реакция Эйнштейна на новейший этап развития теории — этап, который, по нашему мнению, принес удовлетворительное разъяснение проблем, впервые выдвинутых с такой пронизательностью самим Эйнштейном. Во время дискуссий тема была освещена... со многих сторон... Эйнштейн же выразил свою глубокую тревогу по поводу того, что в квантовой механике так далеко отошли от причинного описания в пространстве и времени...»*

Н. Бор. Дискуссии с Эйнштейном по проблемам теории познания

Вскоре, в октябре 1927 года, в Брюсселе начался 5-й Сольвеевский конгресс по теме «Электроны и фотоны».

Лейтмотив дискуссий на этом представительном форуме ведущих физиков того времени — критика воззрений копенгагенской школы Эйнштейном, Шрёдингером и де Бройлем. Так начали развиваться две основные линии в понимании квантовой физики. Одна из них привела к концепции квантовой механики со скрытыми параметрами, а вторая — к теории нелокальных взаимодействий.

Можно считать, что на этом первый период развития квантовой физики в общем закончился. На следующем этапе, с одной стороны, началось философское обсуждение фундамента квантовой теории с основным акцентом на сути волновой пси-функции. С другой стороны, произошел качественный переход в экспериментальной технике, поскольку та же волновая функция прекрасно описывала поведение микробиъектов, заменяя множество величин классической физики, таких, как скорость, координата, энергия и импульс. В середине 1930-х годов в университетские учебники прочно вошла формулировка пси-функции как определяющей состояние микробиъекта с некоторыми распределенными значениями «классических» параметров, причем эта «параметрическая неопределенность» следовала из самого характера волновой функции.

Между тем не прекращались попытки каким-то образом связать классические механические представления с парадоксальной квантовой картиной микромира. Первые шаги на этом пути пытался сделать еще «отец квантов» Планк, но основной успех выпал на долю видного теоретика Пауля Эренфеста (1880–1933). Суть его исследований в следующем. Существует явная аналогия между квантовой волновой механикой и теорией волновых явлений в классической физике. Так, интерференции и дифракции были разработаны задолго до того, как Максвелл описал природу света с помощью своих знаменитых электромагнитных уравнений. Вначале считалось, будто всякий источник света испускает некие волны, а интенсивность света пропорциональна именно квадрату параметра, определяющего волновой характер этого явления.

Эренфест рассуждал так: пусть мы не можем достаточно наглядно представить себе квантовое движение в микромире

и не совсем ясно, как понимать тут импульс или координаты элементарной частицы, однако при этом нам достоверно известно, что усредненные значения квантовых величин полностью удовлетворяют уравнениям классической физики. Можно сказать, что в этом и содержится суть принципа соответствия, введенного в 1918 году Бором и доказанного в 1927 году Эренфестом.

*«В совокупности с важными работами Эренфеста и Эйнштейна эти усилия привели к формулировке так называемого принципа соответствия, согласно которому наличие переходов между стационарными состояниями, сопровождающихся излучением, связано с гармоническими компонентами колебаний, на которые можно разложить движение атома и которые определяют в классической теории свойства излучения, испускаемого вследствие движения частиц».*



Пауль Эренфест (1880–1933)

Н. Бор. Избранные научные труды

Подводя итоги, необходимо заметить, что основные идеи квантовой механики, сформулированные Бором, Шрёдингером, де Бройлем, Эренфестом и Гейзенбергом, дали не только математический аппарат расчета энергетических состояний атомов и молекул. Стандартная формальная модель для вычисления матричных элементов межорбитальных переходов была не только незамедлительно востребована экспериментальной физикой, но и содержала определенный философский подтекст. На первое место при анализе квантовых явлений вышла вероятность протекания процесса локализации или делокализации микрообъекта.

## Глава 4

# Неизбежность сверхстранного мира

*«Открытие принципа неопределенности показало, что человек в процессе познания природы может оторваться от своего воображения, он может открыть и осознать даже то, что ему не под силу представить».*

Л. Ландау. Нильс Бор



Скульптуры Альберта Эйнштейна  
и Нильса Бора. Парк искусств «Музеон», Москва

*«Вероятность состояния. Вероятность столкновения. Вероятность распада. Вероятность излучения. Вероятное время жизни...*

*Эйнштейн надеялся доказать невероятность этого господства вероятностей. Он конструировал парадоксы, к которым, по его мнению, неизбежно должна была приводить квантовая механика. Он придумывал мысленные опыты, которые должны были посрамить толкование пси-волн, как „волн вероятности“. Он выдвигал возражения, которые всем сомневающимся в квантовой механике казались неотразимыми...*

*Дискуссии Эйнштейна с Нильсом Бором остались яркой страницей в современной истории науки о микромире. Один противник был достоин другого: каждый удар Эйнштейна Бор отражал с такой же тонкой изобретательностью, с какой удар наносился. И квантовая механика выстояла против самой мощной атаки, какой вообще могла подвергнуться в XX веке любая физическая теория: против атаки современного Ньютона.*

*Очевидно, на стороне квантовой механики была природа».*

Д. Данин. Неизбежность странного мира

*«Если бы мы жили в мире, где постоянная Планка сравнима с его привычными масштабами, наши представления об этом мире резко отличались бы от нынешних. Например, нам было бы трудно представить себе дома с резкими очертаниями или стоящий спокойно паровоз. Более того, в этом мире вообще не может быть железнодорожных расписаний: в нем нельзя проложить рельсы-траектории, а можно лишь отметить станции отправления и назначения поездов. Конечно, это мир гипотетический, поскольку величину постоянной Планка мы не в состоянии менять по своему произволу — она всегда неизменна и очень мала. Но атомы тоже так малы, что постоянная Планка сравнима с их масштабами. „Для них“ этот необычный мир реально существует, и его непривычную логику нам предстоит теперь понять точно так же, как Гулливеру пришлось привыкать к нравам лилипутов».*

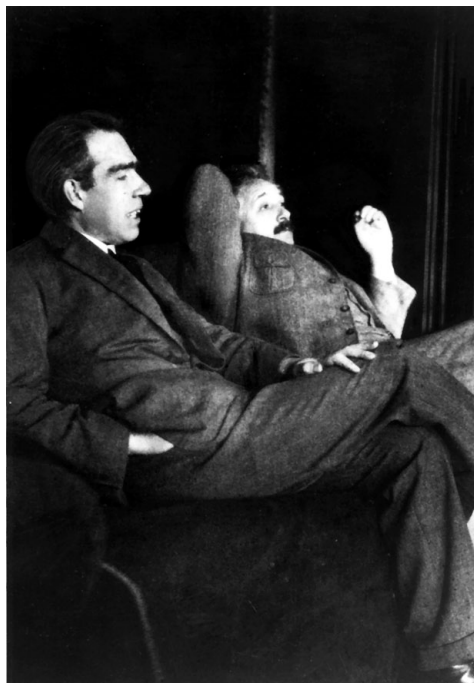
Л. Пономарев. Под знаком кванта

## Великое противостояние: Бор против Эйнштейна

*«Философия успокоения Гейзенберга — Бора (или религия?) так тонко придумана, что предоставляет верующему до поры до времени мягкую подушку, с которой его не так легко спугнуть.*

*Пусть спит... Большой первоначальный успех квантовой теории не может заставить меня поверить в лежащую в основе всего игру в кости».*

А. Эйнштейн. Физика и реальность



Нильс Бор и Альберт Эйнштейн — полемика гениев

В разгоревшейся полемике по фундаментальным основам теории квантов Альберт Эйнштейн, оппонируя Бору, использовал свой любимый метод мысленных экспериментов. Сама суть полемики Бор — Эйнштейн свелась к принципам устройства окружающего мироздания. Может ли объект быть принципиально непредсказуем в своем поведении? Или его непредсказуемость есть недостаток нашего знания об устройстве Вселенной на «сверхквантовом» уровне? Тогда какие новые параметры микрообъектов здесь могут скрываться? Можно сказать, что точка зрения Бора с самого начала превалировала в «официальной физике»,

однако всегда находились «еретики», которые предлагали свои версии того, что лежит за границей квантового мира, внося изрядный переполох и сумятицу в сообщество теоретиков. Можно отметить две любопытные реплики в споре великих.

Эйнштейн: «Я не верю, что бог бросает кости...»

Бор: «Альберт, не стоит указывать богу, что ему делать...»

Итак, кипучий период становления квантовой физики завершился созданием Стандартной теории, основанной на копенгагенской интерпретации. Она позволяла описывать поведение микрообъектов на основании решений уравнения Шрёдингера и включала в себя принципы: неопределенности, дополненности, соответствия и пр. На Стандартной теории основывается вся атомная и ядерная физика, ее использует микроэлектроника и астрофизика, с ее помощью созданы сверхминиатюрные микрочипы и гигантские лазеры. Однако почему именно так, вероятностным образом, устроена физика глубин мироздания, теория молчит. Ее основу составляют интуитивно угаданные природные закономерности, их общепризнанное обоснование — дело науки будущего.

Все это, конечно, не означает, что физики не пытались объяснить первоначальную природу квантовых явлений. Эти попытки в конечном итоге привели к двум обширным направлениям исследований. К первому относятся построения для единичных микрочастиц, например одного единственного электрона, летящего в вакууме. А ко второму — моделирование ансамблей взаимодействующих между собой микрочастиц (например, поток электронов в луче осциллографа или кинескопе телевизора), которые проявляют себя статистическим образом, наподобие того, как давление газа проявляет себя статистически бесчисленными ударами молекул о стенки сосуда.

Копенгагенская интерпретация, иногда называемая ортодоксальной, основывается на теории одной микрочастицы, волновая пси-функция которой максимально полно описывает физическую реальность микромира. Исторически



копенгагенская версия квантовой науки была тесно связана с квантовой теорией атома Бора — Резерфорда.

В противоположность ортодоксальным трактовкам квантовой механики ее статистические, или ансамблевые, интерпретации предполагают, что каждая микрочастица ансамбля (например, электрон в пучке) характеризуется именно своими индивидуальными значениями физических параметров и они обнаруживаются в ходе экспериментов. При этом каждая из частиц ансамбля, естественно, имеет свои индивидуальные «черты характера» вне всякой связи с тем, проводятся ли в данное время какие-либо измерения или нет. Уже это в корне противоречит одному из главных тезисов копенгагенской школы о том, что до измерения говорить о параметрах микрочастицы бессмысленно.

В процессе разработки квантовой физики возникло новое видение реальности микромира, в котором принцип причинности определялся изменениями волновой пси-функции в полном согласии с соответствующими решениями уравнения Шрёдингера. Квантовая реальность мало соответствует обыденному понятию причинности, чаще всего сводящемуся к жестко связанной цепочке тех или иных событий. Например, в классической механике поведение механических тел полностью определяется уравнениями законов Ньютона, абсолютно точно предсказывающими траекторию движения объекта. Подобная однозначная определенность принципа причинности в классической механике носит название детерминизма. Иногда к нему добавляют определение «лапласовский», отмечая вклад в его разработку выдающегося французского физика, математика и астронома Пьера Лапласа (1749–1827).

Классический лапласовский детерминизм совершенно не нашел себе места в квантовой науке. Здесь царит квантовая причинность, определяемая лишь уравнением Шрёдингера. Между тем принцип дополнительности Бора в том и состоит, что никакого логического парадокса при совместном использовании понятий «случайность» и «определенность» просто нет в силу их полной взаимной дополняемости. Принцип дополнительности логически соединяет оба данных понятия как равно необходимые

для объяснения природы новой «квантовомеханической причинности» с более обширным смыслом, чем сумма исходных концепций.

Нужно признать, что свыкнуться с парадоксальной квантовой логикой непросто даже физикам-профессионалам. Обыденный смысл таких понятий, как «случайность», «вероятность», «закономерность», «достоверность», всегда связан с причинностью явлений и совершенно иной для квантового микромира. Смысл лапласовского детерминизма заключается в том, что одинаковые эксперименты, проводимые в одних и тех же условиях, обязательно приведут к одному и тому же результату... Выходит, что можно лишь предсказывать общую картину квантового явления и вероятность прогноза будет возрастать с количеством проведенных опытов.



Дискуссия Бор – Эйнштейн продолжается...

*«Мы не привыкли к реальности, которая остается неопределенной до восприятия. Но странности квантовой механики на этом не заканчиваются. По меньшей мере, поразительной является особенность, восходящая к статье Эйнштейна,*

*написанной в 1935 с двумя юными коллегами, Натаном Розеном и Борисом Подольским, и предназначавшейся для атаки на квантовую теорию. Вместе с происходившими затем извивами научного прогресса сейчас статья Эйнштейна может рассматриваться как одна из первых, указывающих, что квантовая механика — если брать по сути — подразумевает, что нечто, что вы сделали здесь, может мгновенно быть связанным с чем-то, происходящим где-то, несмотря на расстояние. Эйнштейн рассматривал такие мгновенные связи как нелепые и интерпретировал их появление из математики квантовой механики как свидетельство, что теория нуждается в больших доработках, прежде чем она достигнет приемлемой формы. Но в районе 1980-х, когда как теоретические, так и технологические разработки привели экспериментальные наблюдения к рождению этих подразумевающихся квантовых абсурдностей, исследователи подтвердили, что возможна мгновенная связь между тем, что происходит в сильно удаленных друг от друга местах. При четких лабораторных условиях реально происходит то, что Эйнштейн считал абсурдом».*

Б. Грин. Ткань космоса и текстура реальности

С помощью понятия квантовомеханической вероятности и принципа дополнительности Бора можно непротиворечиво конструировать пары таких понятий, как волна — частица, причинность — случайность, явление — наблюдение, непрерывность — дискретность. Таким образом, ясно, что понятие вероятности в квантовом мире — логическая основа всей квантовой механики. По мере построения квантового Мироздания все чаще стал обсуждаться принципиальный вопрос: а действительно ли квантовая теория достаточно полно описывает объективную реальность парадоксального микромира?

В свое время сам создатель релятивистской физики Альберт Эйнштейн вел долгую полемику с другим великим физиком XX столетия Нильсом Бором. В то время опытная база квантовой механики только складывалась, и в своих спорах два великих теоретика активно использовали мысленные эксперименты. Один из них показался Эйнштейну

настолько удачным, что в дальнейшем он вместе с учениками Борисом Подольским (1896–1966) и Натаном Розеном (1909–1995) посвятил ему отдельную статью «Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным?». Так возник знаменитый парадокс Эйнштейна – Подольского – Розена (ЭПР-парадокс), породивший дискуссию о законченности квантовой теории и полноте описания микросистем в ней. Эта полемика продолжается до настоящего времени, сейчас в ней участвуют два известных теоретика: Роджер Пенроуз (р. 1931) в роли Эйнштейна и Стивен Хокинг (р. 1942) в роли Бора.

Эйнштейн и его соавторы в результате блестящего умозрительного анализа сделали удивительный вывод: «...поскольку эти (квантовые – *примеч. автора*) системы уже не взаимодействуют, то в результате каких бы то ни было операций на первой системе, во второй системе уже не может получиться никаких реальных изменений...»

Эйнштейн, Подольский, Розен полагали, что два различных измерения над одной частью квантовой системы не могут привести к различным состояниям второй составляющей в силу отсутствия взаимодействия между ними. Это гипотетическое свойство квантовых систем получило впоследствии название локальности. Альтернативную точку зрения, согласно которой «в результате двух различных измерений, произведенных над первой системой, вторая система может оказаться в двух различных состояниях...», исследователи отвергли.

Здесь необходимо вспомнить об еще одном фундаментальном квантовом принципе – соотношении неопределенностей. Исходя из данного принципа нельзя проводить парные измерения определенных физических параметров. Например, невозможно одновременно измерить координату и импульс микрообъекта. В научно-популярной литературе это часто объясняется взаимным влиянием дуальных измерений. Есть свидетельства, что подобной аргументацией вначале пользовался сам автор принципа неопределенности, один из создателей квантовой механики Вернер Гейзенберг. Однако впоследствии он развил и дополнил теорию так,

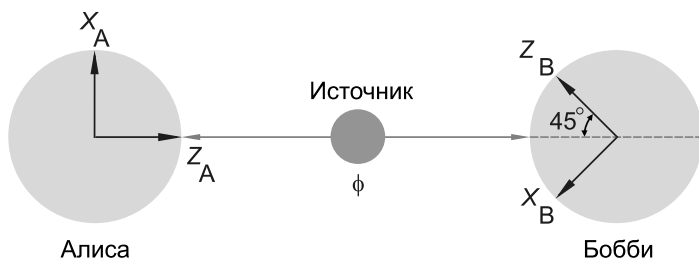
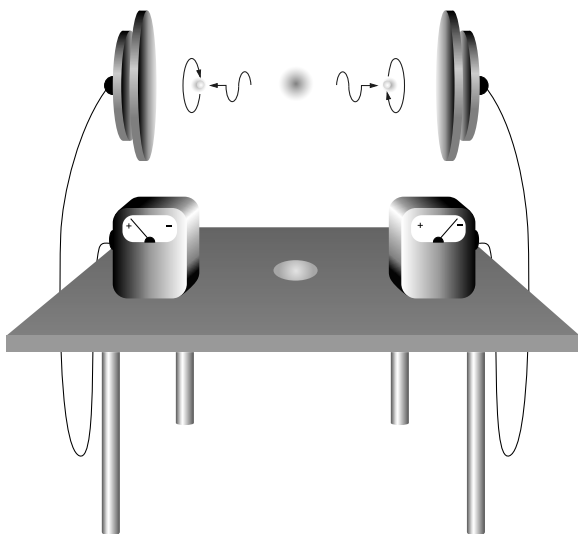
что влияние координатного измерения на импульс стало несущественно.

Рассмотрим произвольный ансамбль невзаимодействующих частиц, находящихся в одном и том же самом состоянии; для каждой частицы в ансамбле измерим либо импульс, либо координату, но не обе величины. В результате измерения обязательно получим, что все значения параметров распределены с некоторой вероятностью и для них верно отношение неопределенности.

Одним из первых с обширными комментариями к работе Эйнштейна выступил Нильс Бор. Вскоре после выхода знаменитой статьи, содержащей описание ЭПР-парадокса, Бор на страницах печати провозгласил: мысленный эксперимент ЭПР не только не отменяет соотношения неопределенностей, но и не создает никаких препятствий для применения квантовой механики.

Полемику двух великих физиков можно проиллюстрировать мысленным экспериментом с двумя микрочастицами (в свое время автор придумал его для книги «Великая квантовая революция»).

Пусть опыт проходит на ускорителе элементарных частиц Харьковского физико-технического института (здесь впервые в СССР был расщеплен атом). В ходе эксперимента коллектив украинских физиков измеряет импульсы двух частиц и проводит их столкновение на встречных пучках таким образом, что одна из частиц попадает тут же на детекторы, а вторая летит в подмосковный Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна). Если харьковские ученые получают определенное значение импульса частицы на своих детекторах, они тут же смогут рассчитать импульс второй частицы, позвонить своим российским коллегам и сделать впечатляющее предсказание о результатах их опытов. Из этого следует, что волновая функция «российской» частицы определилась в результате «украинских» измерений! Однако если убрать со сложившейся ситуации налет сенсационности, окажется, что мы имеем дело с обычным случаем изменения вероятности предсказаний по мере получения новых информационных посылок.



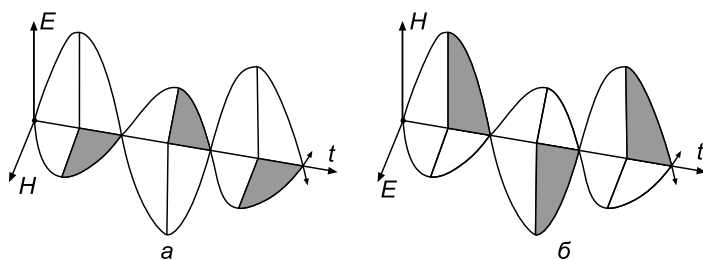
Квантовая запутанность ( $X$  и  $Z$  — условные направления спинов предварительно «запутанных» микрочастиц, фиксируемых Алисой и Бобби)

Возьмем две микрочастицы и назовем их  $A$  — Алиса и  $B$  — Боб. Пусть данные квантовые объекты рождаются в одной точке, а затем разлетаются в разные стороны. В момент рождения ни у одной из частиц не определены координата и импульс, но в силу закона сохранения импульса сумма их импульсов в любой последующий момент времени равна нулю (как до рождения частиц). Теперь любое измерение координатного местоположения Алисы приведет к коллапсу ее волновой функции, и в тот же момент коллапсирует и волновая функция Боба, так как

его координаты автоматически уточняются через данные Алисы! Если волновая функция полностью характеризует частицу, значит, с Бобом действительно что-то произойдет, а ведь измерение проводилось над Алисой, которая могла быть в этот момент очень далеко, даже на другом краю Метагалактики от Боба! Это напоминает мистическую магию: Алиса дергает за невидимую ниточку и где-то во Вселенной возникает улыбающийся Боб! В этом и заключается суть ЭПР-парадокса.

Давайте спросим: какова вероятность того, что дубнинские ученые из ОИЯИ определят то или иное значение импульса микрообъекта при условии, что уже известен результат харьковских физиков?

Для ответа на этот вопрос нужно было бы проанализировать результаты всех многократных подмосковных и харьковских измерений импульса, при этом отобрать только те случаи, когда украинские физики получали значения, соответствующие результату их российских коллег. Вполне естественно, что после такой селекции данных все дубнинские измерения будут соответствовать вполне определенному значению импульса частицы. Получается, что по своей сути наш украинско-российский эксперимент лишь в неисчислимый раз подтвердил закон сохранения импульса! Разумеется, можно сконструировать и более сложную схему мысленного опыта с участием американских ядерщиков из лаборатории им. Лоуренса Калифорнийского университета в Беркли (США). Однако в любом случае вывод один: все влияния измерений в одной из частей квантовой системы (такой, как рассмотренная пара микрочастиц) на результаты измерений в другой ее части необходимо рассматривать именно как отбор результатов, соответствующих определенному условию. Все это хорошо известно из математической статистики, где вероятность событий при выполнении некоего условия так и называется «условная вероятность». Введение набора дополнительных условий каждый раз определяет иную последовательность математических событий. У физиков при этом изменяются вероятности измерений и, как следствие, волновая функция квантовой системы.



Поляризация электромагнитного излучения: *a* — поперечная; *б* — продольная (*E* и *H* — электрический и магнитный векторы электромагнитной волны; *t* — время)

Электромагнитную волну можно упростить до колеблющихся перпендикулярно магнитных и электрических компонентов; это хорошо демонстрирует пример квантов электромагнитного излучения — фотонов. Поляризующая пленка или специальный объектив фотоаппарата — поляририд пропускают весь свет, если он поляризован вдоль штриховки на пленке, и задерживают весь свет, если его поляризация перпендикулярна штриховке.

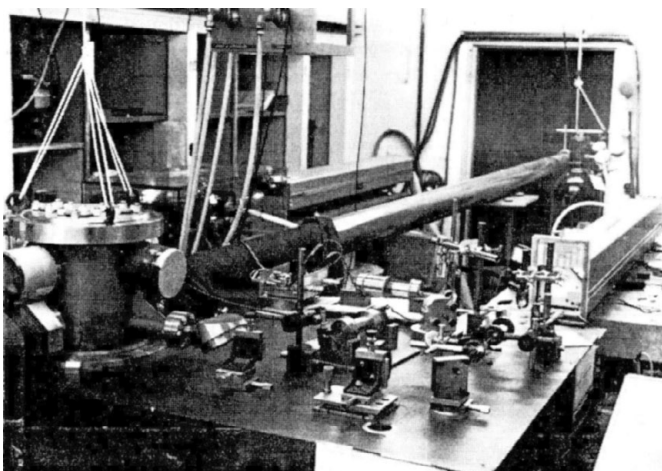
Все закономерности условной вероятности проявления того или иного явления постоянно проявляются и в повседневной действительности. Например, какова вероятность поступления абитуриента на физический факультет университета? Для среднего школьника, уступившего с неохотой настояниям родителей, и для медалиста, который видит себя в будущем исследователем ЭПР-парадокса, она будет совершенно разной.

В свое время, проанализировав многие мысленные эксперименты, Бор высказал соображение, что ЭПР-парадокс есть результат предположения о локальности квантовых систем. По мысли Бора, именно отказ от локальности и признание существования связи между разделившимися частями целостной квантовой системы устраняет ЭПР-парадокс. Результаты измерения квантовой системы зависят от ее состояния и устройства измерительных приборов. В полном соответствии с принципами волновой квантовой механики ЭПР-коррелированные частицы могут характеризоваться



одной общей волновой функцией. Следуя за мыслью Бора, можно предположить, что в момент измерения над одной частицей происходит изменение общей волновой функции двухчастичной системы как квантового объекта из коррелированных подсистем.

В заключение полемики Бор подытожил, что Эйнштейн вправе полагать квантовую теорию неполной, но ее практическая эффективность от этого не уменьшается. С Бором согласились многие теоретики, однако противоположной точки зрения придерживались научные школы во главе со Шрёдингером и видным советским физиком, академиком Владимиром Александровичем Фоком (1898–1974). Не в полной мере были согласны с выводами, следующими из копенгагенской интерпретации, и выдающиеся авторитеты в области атомной физики, советские академики А. С. Компанец и Б. Б. Кадомцев.



Проверка парадокса  
Эйнштейна — Подольского — Розена (1970-е годы)

*«Какова вероятность высказать неверное суждение в квантовой механике? Она резко увеличится, если добавить: „не подумав“. Вот довольно распространенное утверждение: „как бы далеко ни разошлись две подсистемы, они остаются жестко связанными“. Это и есть та физическая*

*бессмыслица, против которой правильно возражали Эйнштейн, Подольский и Розен. А разгадка такова: подсистемы на большом расстоянии, разумеется, физически никак не связаны, они независимы. Но условная вероятность для одной из них, разумеется, зависит от того, какое состояние второй подсистемы мы отбираем. И явление это, как мы видим, не специально квантовое, а есть и в классической физике, и даже в повседневной жизни. Предсказание скачком изменяется при изменении условий отбора событий».*

А. Мигдал. Поиски истины

Парадокс ЭПР имел большое значение для развития квантовой теории. Прежде всего, он стимулировал интерес к коррелированным состояниям квантовых частиц. Когда такие состояния были обнаружены экспериментально для фотонов, началось бурное развитие новой области в физике — квантовой оптики. Кроме того, эксперименты с коррелированными парами квантовых частиц (их также называют ЭПР-парами) позволили проверить, действительно ли вероятностное поведение характерно для отдельной квантовой частицы или это свойство совокупности частиц.

Что же получили физики в результате многочисленных экспериментальных исследований различных сторон ЭПР-парадокса и кто же оказался прав в историческом споре Эйнштейна и Бора?

Увы, однозначного ответа, который можно было бы записать в анналы «официальной» науки, еще не получено, но чаша весов давно склоняется в пользу школы Бора.

Тут нужно познакомиться с несколькими ключевыми словами из очень странного и необычного языка квантовой физики. Вспомним, что вероятностный характер квантовых микросистем не сводится только к классической неопределенности неполного знания параметров объекта. Поэтому для описания квантовых систем используется специальное понятие «состояние». Иначе говоря, можно считать, что, если квантовый объект находится в определенном состоянии, ему можно сопоставить каталог Шрёдингера, включающий уже известную нам волновую функцию и новые понятия: вектор

состояния и матрицу плотности. Что же такое вектор состояния и матрица плотности?



Джон фон Нейман (второй слева) со своими сторонниками нелокальной квантовой механики на фоне одного из первых электронно-вычислительных комплексов (ЭНИАК)

*«„Принципиальная разница“ в месте, занимаемом измерением в квантовой и классической механике — миф. Отцами этого мифа являются Бор и фон Нейман. Формулировка этой „проблемы“ связана отчасти с обсуждавшимся выше неверным утверждением „копенгагенцев“ — что одно измерение определяет состояние квантовой системы, отчасти — с „копенгагенскими“ попытками с помощью этой „особости“ выйти из-под эйнштейновской критики».*

А. Липкин. Две методологические революции  
в физике — ключ к пониманию  
оснований квантовой механики

Вектор состояния — одно из основных понятий квантовой физики, представляет собой математический вектор, задание которого в определенный момент времени полностью

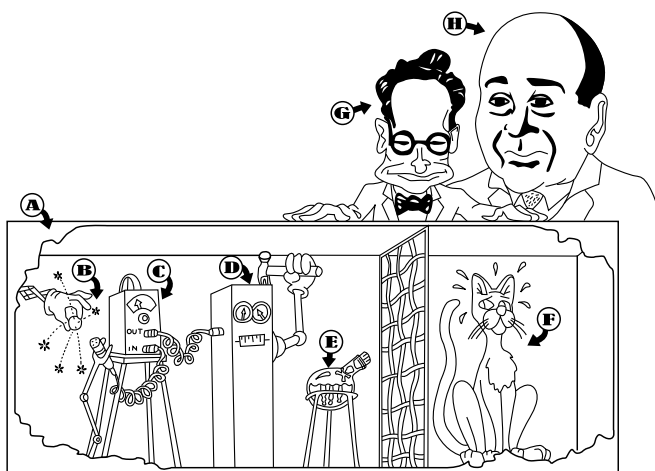
определяет состояние квантовой системы, а если известно, как она взаимодействует со своим окружением, то и ее эволюцию в дальнейшем. Понятие вектора, или амплитуды состояния, было предложено Дираком. То, что амплитуда состояния представляет собой вектор, следует из еще одного важнейшего положения квантовой теории — принципа суперпозиции состояний. Состояние квантовой системы, которое можно описать вектором состояния, называется чистым состоянием, в отличие от более широкого класса смешанных состояний, описываемых матрицами плотности. В свою очередь, матрица плотности (или оператор, то есть математический элемент, переводящий одну величину в другую) — один из способов описания состояния квантовой системы. В отличие от волновой функции, пригодной лишь для описания чистых состояний, оператор плотности в равной мере может задавать как чистые, так и смешанные состояния.

Каталог Шрёдингера — своеобразный «паспорт» квантовой системы, он содержит статистическую информацию о функциях распределения тех или иных параметров, полученных в результате ансамбля измерений.

## Квантовый кот Шрёдингера

*«Ящик представляет собой гладкостенный эллипсоид, шесть на три метра в поперечнике, который я при всем желании не покину до самой смерти. ...В корпусе спрятана капсула с отравляющим газом. Она вмонтирована в воздушный фильтр, и всякая попытка добраться до нее или проделать дыру в корпусе приведет к тому, что внутрь начнет поступать цианид. Кроме того, в окружающем статико-динамическом поле находятся счетчик радиации, изотопный элемент и таймер. Мне не суждено узнать, когда именно таймер включит счетчик, когда крохотный изотоп лишится свинцовой оболочки, когда в камеру устремится поток частиц... Но в ту секунду, когда это случится, я пойму, что счетчик заработал, и успею еще ощутить перед смертью запах горького миндаля».*

Д. Симмонс. Песни Эндимиона



Мысленный эксперимент Шрёдингера с котом

Герметичный ящик (A) содержит радиоактивный источник (B), который равновероятно вызывает срабатывание счетчика радиации Гейгера (C), запускающего механизм (D), разбивающий колбу с ядом (E), убивающим кота (F). Наблюдатель (G, напоминающий Гейзенберга) должен открыть ящик для того, чтобы вызвать схлопывание вектора квантового состояния системы в одно из двух возможных состояний. Второму наблюдателю (H, напоминающему Шрёдингера), возможно, требуется сколлапсировать вектор состояния большей системы, содержащей первого наблюдателя и установку (A–F). Жизнь кота зависит от того, как поведет себя частица: как корпускула или как волна. В первом случае счетчик включается, во втором нет. По законам квантовой механики частица может находиться в суперпозиции, то есть одновременно в двух когерентных состояниях, и соответственно подопытный кот в закрытом ящике одновременно и жив, и мертв. Однако стоит наблюдателю открыть «черный кошачий ящик», как он увидит либо мертвую, либо живую кошку, что вполне соответствует нашим логическим представлениям о природе наблюдаемых явлений.

Чтобы обратить внимание на необычный характер квантовых суперпозиционных состояний, Шрёдингер сконструировал парадоксальный мысленный эксперимент, противоречащий нашему обыденному восприятию окружающей реальности. Он предположил, что в замкнутом пространстве (ящике) находится сосуд с ядом, который может быть разбит механизмом, управляемым радиоактивным распадом. Внутри ящика находится кот (в оригинале статьи Шрёдингера это была кошка), он будет либо жив, либо мертв в зависимости от радиоактивного распада. Процесс измерения как взаимодействия с макроскопическими измерительными приборами есть принципиально необратимый процесс, в результате которого состояние измеряемого объекта претерпевает редукцию.

Явление редукции (схлопывания, коллапса) волновой функции, несмотря на внешнюю простоту, например, падающая на некую поверхность экрана волна в момент соприкосновения с ним превратилась в частицу, считают одной из наиболее «болевыми точками» современной физики. Многие видные ученые вообще отказывают в праве на существование этому явлению, возражая против использования бесструктурных понятий. Действительно, если подходить к явлению редукции волновой функции как к обычному физическому явлению, то имеет смысл разбить его на этапы с характеристическими временами, присущими квантовым измерениям. Однако приверженцы редукционного подхода, как правило, всячески избегают разговора о внутренней структурной динамике процесса, мотивируя это его краткосрочностью. Много копий сломано и вокруг вопроса о скорости распространения процесса редукции. До сих пор в околонаучных комментариях, давно перекочевавших из-за своей экстравагантности на страницы научно-популярных журналов, можно встретить описания квантовых явлений с «бесконечной скоростью распространения». За все время существования новой физики, недавно отметившей свой 100-летний юбилей, никогда ни в одном добросовестно поставленном эксперименте или наблюдении какого-то явления, ни в сверхмалых, ни в сверхбольших масштабах не наблюдалось сверхсветовой передачи материальных

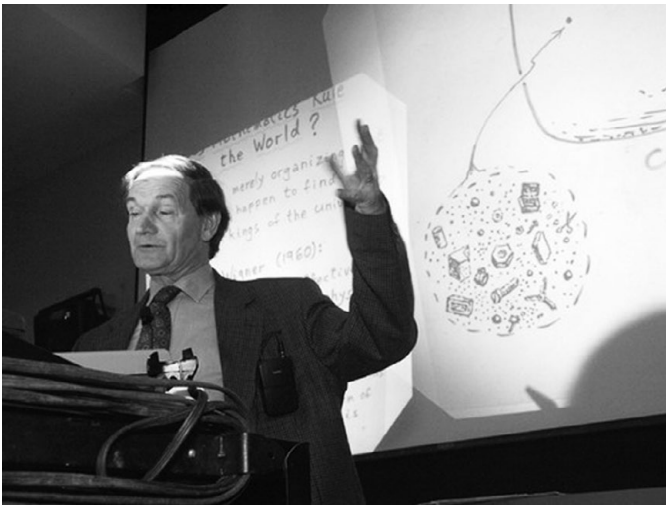
носителей: тел или информации. Сейчас очень модно «преобразовывать» теорию относительности, однако в этом ее пункте критики всегда терпят фиаско. Поэтому, когда рассказывают, что по самым «инновационным» достижениям процесс редукции происходит практически мгновенно, что, несомненно, противоречит теории относительности, которая запрещает распространение сигналов, превышающих скорость света, тут же уточняют, что рассматривается не реальный физический процесс, а математическая схема, прием его описания.

За прошедшие годы к образу многострадального квантового кота обращалось много физиков, журналистов и писателей. Недавний интерес к нему связан с именем английского теоретика из Оксфордского университета Роджера Пенроуза: он заявил о намерении воспроизвести на практике мысленный эксперимент Шрёдингера с котом. Выступление Пенроуза связано с серией экспериментов по проверке парадоксальных выводов принципа квантовой неопределенности о том, что частица может находиться в нескольких местах одновременно. Это наглядно продемонстрировал не только для атомов, но и для сложных молекул физик-экспериментатор из Венского университета Антон Цайлингер (р. 1945). В поставленных им опытах сложные молекулы, состоящие из десятков атомов, проходили одновременно через два отверстия в экране. В общении с журналистами Цайлингер уверял, что, усовершенствовав технику эксперимента, он сможет регистрировать суперпозиции еще более крупных объектов, вплоть до бактерий и котов.

Пенроуз придерживается противоположной точки зрения. Он считает, что суперпозиции разрушаются не только под воздействием внешней среды, но и сами по себе, естественным путем. О возможности такого процесса говорил еще выдающийся физик-теоретик Ричард Фейнман (1918–1988), который назвал это гипотетическое явление «объективной редукцией состояния». Исходя из идей Фейнмана Пенроуз намерен воссоздать эксперимент Шрёдингера именно с тем, чтобы опровергнуть его выводы. Иначе говоря, он пытается доказать, что в 50 % случаев кот в ящике будет

жив независимо от поведения наблюдателя, что можно оценить, например, по мурлыканью.

Если Пенроуз экспериментально докажет свою идею, ему удастся осуществить то, чего безуспешно добивались физики на протяжении XX века: посмертно примирить Эйнштейна и Шрёдингера с Бором и Гейзенбергом. Может быть, даже удастся соединить теорию относительности с квантовой механикой в обобщенную теорию под названием «квантовая гравитация».



Ричард Пенроуз рассказывает, как «поймать» квантового кота Шрёдингера

*«Я высказываю гипотезу, что при учете эффектов общей теории относительности возникают проблемы с суперпозицией альтернативных пространственно-временных геометрий. Возможно, что суперпозиция двух различных геометрий нестабильна и распадается в одну из двух альтернатив. Для примера, могут быть геометрии пространства-времени живого или мертвого кота. Я называю такой распад на одну или другую альтернативу объективной редукцией...»*

Р. Пенроуз. Квантовая теория и пространство-время



Однако практическое воссоздание эксперимента Шрёдингера с котом, несмотря на его кажущуюся простоту, связано с очень серьезными инженерными трудностями.

На общем проектном плане все технические детали выглядят не сложнее знаменитого ящика для квантового кота. Правда, вместо несчастного живого детектора предполагается использовать микроскопический кристалл — молекулу, размером в несколько десятков атомов, облучаемый расщепленными лазерными лучами. Теоретически лазерный фотон в состоянии суперпозиции, сталкиваясь с кристаллом и незначительно сдвигая его, переводит его в суперпозицию. Остается только с помощью системы зеркал и датчиков замерить время, в течение которого кристалл будет находиться в этой суперпозиции. Согласно стандартной квантовой модели, в основе которой лежит копенгагенская интерпретация Бора, суперпозиция будет продолжаться до тех пор, пока на нее не подействует внешняя среда. В классическом кошачьем эксперименте Шрёдингера роль внешней среды играл лаборант — наблюдатель, открывающий крышку ящика с котом.

По предварительным теоретическим оценкам Пенроуза, суперпозиция довольно большого по квантовым масштабам кристалла из полутора десятков атомов должна разрушиться естественным путем за десятые доли секунды.

Практическое осуществление эксперимента по объективному редуцированию волновой функции осложняется тем, что сдвинуть подобный кристалл с места может лишь фотон рентгеновского спектра излучения, но такие фотоны обладают повышенной проникающей способностью и для них чрезвычайно сложно добиться зеркального отражения, что совершенно необходимо для проведения замеров. Кроме того, по условиям эксперимента фотон должен находиться в состоянии полета не менее десятой доли секунды, значит, он должен пройти расстояние, примерно равное диаметру Земли. Наиболее реально было бы провести эксперимент в космосе на двух достаточно удаленных платформах (уже запланирована на ближайшее будущее космическая миссия по обнаружению гравитационных волн).

По поводу перспективности экспериментов Пенроуза мнения в научном мире разделились. Большинство специалистов в области квантовой физики все же убеждены: Пенроуз не совсем прав в своих далеко идущих теоретических предположениях. Тем не менее и сторонники и критики одинаково поддерживают проведение нового «квантово-кошачьего» эксперимента хотя бы для того, чтобы убедиться в правомерности существования объективной редукции.

Многие, в том числе автор, разделяют мнение профессора Пенроуза, когда он подчеркивает, что его озадачивает не сама загадка пресловутого полуживого квантового кота в коробке, а то, с какой готовностью часть физиков принимают на веру подобный логический абсурд и с каким упорством они его защищают.

Когда-то, в период становления квантовой физики, Шрёдингер придумал свой мысленный эксперимент как демонстрацию логической несуразности основ квантовой механики, однако с тех пор его кот зажил собственной жизнью, проник в иные миры и измерения, литературу, неожиданно приобрел большой вес в научных кругах. В квантовой теории шрёдингеровский кот получил такую популярность, о которой его хозяин, похоже, и не помышлял, иллюстрируя разрушительную декогеренцию суперпозиционных квантовых состояний под воздействием окружающей среды или вмешательства наблюдателя.

На лекциях по квантовой механике в этом месте обязательно кто-то из студентов интересуется: так жив или нет представитель кошачьего племени? И в ответ слышит: следуя сложившейся традиции, можно предположить, что когда квантовая система вступает во взаимодействие со средой, в которой она находится, ее суперпозиция распадается и она переходит в одно из альтернативных состояний. Правда, остается еще любопытный вопрос: а в какой именно момент бедный кот растворяется (или полурастворяется?) в окружающем мире при вступлении квантовой системы во взаимодействие с внешней средой? Можно назвать десяток видных и не очень физиков, которые тут же отправят путешествовать

измученное неопределенностью животное по совершенно невообразимым мирам, пространствам и реальностям. Более того, некоторые предположат, что ваше сознание вступит в «квантовую связь» с сознанием кота, а то и с реальностью, а ваше — с реальностью, отраженной в сознании кота... Стоп, здесь не следует торопиться, вторгаясь в теоретические владения знаменитого конструктора многомирья Хью Эверетта.

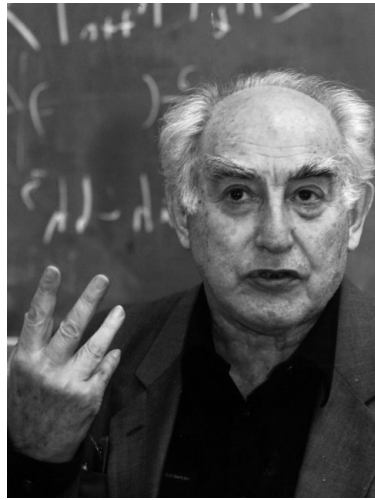
Как не вспомнить сейчас слова несравненного Стивена Хокинга, заметившего, что, когда он слышит о коте Шрёдингера, его рука тянется к ружью! Ответ на вопрос, вызвавший столь бурные эмоции у физика, все чаще называемого современным Эйнштейном, довольно прост: все связи квантового мира с макроскопической реальностью начинаются и заканчиваются в момент редукции, коллапса, схлопывания одного из самых загадочных образов физического мира — волновой пси-функции. Впрочем, у физиков ответы на подобные вопросы — всего лишь дело вкуса. Вот поэтому в окружающей физической реальности не встречается полуживых квантовых котов.

К феномену Шрёдингерова кота можно подойти и с совершенно иных позиций, наиболее четко и остроумно отстаиваемых профессором Московского государственного университета Д. Н. Клышко и профессором Московского физико-технического института А. И. Липкиным, не говоря уже о лидере российской науки академике В. Л. Гинзбурге. Коротко это звучит так: существуют фундаментальные квантовые эффекты вероятностной природы на микроуровне в строго ограниченных масштабах молекул, атомов и элементарных частиц. Существуют также очень редкие макроквантовые эффекты, лежащие в основе действия лазеров, туннельных диодов и сверхпроводящих устройств. Есть даже намеки на мегаквантовые эффекты, управляющие эволюцией нейтронных звезд. Однако эффекты усиления квантовых явлений в макроквантовую суперпозицию котов, пусть и ведущих свой род от кошки великого Шрёдингера, науке не известны!

*«...В статьях некоторых физиков, не говоря уже о популяризаторах (журналистах), все еще приходится сталкиваться*

*с утверждениями чуть ли не о „конце“ физики. Имеется в виду мнение о том, что почти все вопросы решены, еще немного и будет создана „теория всего“ (Theory of Everything). На самом же деле фундаментальных вопросов в физике осталось отнюдь не меньше, чем в прошлом...*

*Несомненно, такое возрождение интереса к основам квантовой механики связано с колоссальными успехами в области экспериментальных исследований квантовых эффектов, особенно в оптике. Здесь важно подчеркнуть только одно: все новые опыты только подтверждают квантовую теорию (квантовую механику и квантовую оптику). Ни малейших отклонений от существующей теории не обнаружено».*



Нобелевский лауреат, академик  
Виталий Лазаревич Гинзбург

В. Гинзбург. Сто лет квантовой теории

Означает ли это, что квантовая механика в принципе неприменима для макрообъектов? И где тут видимая граница?

У замечательного советского фантаста Георгия Гуревича есть занимательное произведение «Темпоград». В нем речь идет об удивительных, но вполне «близконаучных» вещах, в том числе о путешествии экипажа отважных «темпонавтов» в сверхглубины микрокосмоса. В чудесном «темпоскафе» исследователи микромира проходят последовательно молекулярный, атомарный, частично элементарный уровни и где-то за волнами электронов исчезают навсегда в пучинах микробесконечности. Печальные итоги столь удивительной экспедиции не должны никого останавливать, поэтому

воспользуемся темпоскафом Гуревича для изучения границы между микро- и макромиром.

Давайте совершим прыжок сразу на атомарный уровень, сегодняшнюю границу наблюдаемого микрокосмоса, решим очень непростой вопрос о пределе реальной наблюдаемости трансатомарных объектов? Если представить, что в отдаленном будущем будет создан некий прообраз кваркового микроскопа (разумеется, это совершенно условный образ), «рабочим веществом» которого будут волны-частицы с длиной, сравнимой (а лучше меньшей) с диаметром атомного ядра, то, вполне возможно, в школьных учебниках рядом с уникальными фотографиями атомов найдется место и для фотографии ядер. Что содержат глубины материи? Скорее всего, именно в них и пролегает граница принципиально *прямо наблюдаемого*, которую условно можно принять за «рабочий» критерий микро-макроскопического.

Приблизительно такая точка зрения принимается по умолчанию в большинстве школьных учебников. Если учебник хороший, в нем обязательно оговаривается, что существуют «макроквантовые» явления, такие как сверхпроводимость, сверхтекучесть, излучение лазеров и мазеров, работа туннельных микроэлектронных приборов. В этих явлениях закономерности квантового мира проявляются на макроскопическом уровне. Если учебник не просто хороший, а умный (это сейчас большая редкость), в нем будет указано, что границу между микро- и макромиром надо «делимитировать» каждый раз в конкретном процессе, опыте или явлении в прямой зависимости от условий их протекания, постановки и наблюдения. Но опять же возникает вопрос: если макроскопические явления далеко не всегда четко сопоставимы классическим объектам, может быть, границы между классической и квантовой реальностью вообще не существует? Разумеется, школьные учебники, даже очень хорошие и умные, ответа на него не дают.

Вопрос о границе квантовой реальности возник сразу же после рождения квантовой теории, и одним из первых его задал Бор. Он считал (а вместе с ним и его копенгагенская

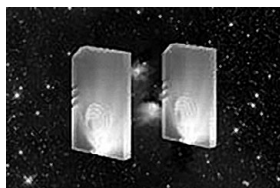
школа), что классический мир начинается с наблюдательного прибора, необходимого для выявления результата квантового микроскопического измерения. В процессе развития копенгагенской интерпретации Бор остановился на точке зрения, согласно которой разделительная линия между квантовой и классической теориями должна быть подвижной, так что даже «конечный прибор» — нервная система наблюдателя в принципе может быть измерена и проанализирована в качестве квантового объекта. Очевидно, здесь Бор имел в виду, что для практически любой задачи квантовых измерений всегда может быть подобран подходящий классический детектор. В отсутствие жесткого критерия для выявления различия между квантовыми и классическими объектами часто использовалось отождествление классического объекта с макроскопическим.

## Запутанный вопрос микромира

*«Но изменения в представлении о реальности, ясно выступающие в квантовой теории, не являются простым продолжением предшествующего развития. По-видимому, здесь речь идет о настоящей ломке в структуре естествознания».*

В. Гейзенберг. Физика и философия.  
Часть и целое

*«Роль измерения состоит в преобразовании квантовых состояний и квантовых корреляций (с их характерной неопределенностью и расплывчатостью) в классические, определенные исходы. Декогеренция ведет к суперотбору (отбору собственных состояний), индуцированному окружением, что оправдывает*



Художественный образ запутанных квантовых объектов

*существование выделенного набора состояний. Это позволяет определить эффективную границу между квантовой и классической областями в ясных формулировках, которые не апеллируют к „коллапсу волнового пакета“ или к чему-либо типа „бога из машины — *dues ex machina*...“»*

В. Зурек. Декогеренция и переход от квантового мира к классическому

Не так давно средства массовой информации сенсационно сообщили о так называемой квантовой телепортации.

Теоретически существует возможность, при которой законы квантовой механики останутся абсолютными. Для этого нужно предположить, что две взаимодействовавшие частицы остаются каким-то образом связанными между собой. Тогда возмущения, вносимые измерением в состояние первой частицы, мгновенно перенесутся на состояние второй. Связанные таким образом частицы называются в квантовой механике запутанными и описываются единой волновой функцией, на каком бы расстоянии они ни находились. Передаваемое возмущение соответствует коллапсионной редукции волновой функции. Подобное мгновенное изменение описания квантового состояния микрообъекта, происходящее в процессе физических измерений, было детально описано в 1920-х годах одним из создателей математического аппарата квантовой теории Джоном фон Нейманом (1903–1957).

Отдельные ученые полагают, что квантовая запутанность это не просто наложение друг на друга различных состояний и такое их переплетение, когда нет возможности отделить содержимое одной физической системы от содержимого другой. Они вполне серьезно обсуждают наличие «мистических» связей между подсистемами, необъяснимых с точки зрения известных физических полей и взаимодействий. Иногда можно услышать, что квантовые корреляции это не просто взаимодействия, а скорее «квантовая телепатия», когда один объект непосредственно «ощущает» свое единство с другими телами, когда все внешние изменения мгновенно отзываются

в нем самом, и наоборот, изменения в объекте тут же сказываются в его окружении.

Квантовая запутанность возникает в системе, состоящей из двух и более взаимодействующих подсистем (например, нескольких элементарных частиц), и представляет собой суперпозицию макроскопически различных состояний. Для таких систем флуктуации отдельных частей взаимосвязаны, но не посредством обычных классических взаимодействий, ограниченных, например, скоростью света, а посредством особых квантовых корреляций. В этом случае изменение одной части системы в тот же момент времени сказывается на остальных ее частях (даже если они разделены в пространстве вплоть до бесконечно больших расстояний). И это не просто теория. «Магические» свойства запутанных состояний подтверждены многочисленными физическими экспериментами, о которых чуть ниже, и именно эти «сверхъестественные» возможности лежат в основе работы принципиально новых электронно-вычислительных устройств — квантовых компьютеров.

Величина квантовой запутанности обычно условно измеряется от нуля до единицы. Этот параметр квантовых систем и определяет степень связности отдельных локальных частей. Например, для слабо связанных друг с другом квантовых фрагментов мера запутанности стремится к нулю. В противном случае, если система составляет единое и неразделимое целое, мера запутанности стремится к единице. В принципе разделить квантовую структуру на строго независимые субструктурные фрагменты можно лишь в том случае, если она изначально находилась в незапутанном, сепарабельном (допускающем разделение) состоянии при мере запутанности, равной нулю. Это можно сделать только для квантовой системы, отдельные фрагменты которой никогда не вступали во взаимодействие друг с другом.

Легко предположить, что величина запутанности зависит от интенсивности взаимодействия квантовых систем с окружением.

Управляя взаимодействием с окружением, можно манипулировать мерой квантовой запутанности между составными



частями системы. Например, замкнутая система может находиться в максимально запутанном состоянии и не иметь внутри себя локальных (классических) составных частей (подсистем). Но если она начинает взаимодействовать с окружением, мера запутанности между ее подсистемами постепенно уменьшается и они «проявляются» в виде локальных объектов. При наличии взаимодействия с окружением суперпозиция разрушается и проявляется то или иное классическое состояние в зависимости от типа взаимодействий. Именно этот физический процесс и называется декогерентизацией. Это явление тесно связано с понятием квантовой запутанности и в своей основе подобно потере слаженности волновых колебаний отдельных микрообъектов в результате взаимодействия системы с окружающей средой.

Квантовая запутанная система чем-то напоминает фотопластинку с непроявленным изображением. Это своеобразное физическое состояние объекта, когда видимая информация может появиться только после проявления фотопластинки (взаимодействия с окружением). Конечно, ситуация с запутанностью выглядит несколько сложнее и там нет заранее отображенной «негативной» информации. Скорее, это напоминает ситуацию, когда великое множество изображений равномерно распределено по фотографическому негативу и поэтому невидимо.

Микрочастицы — наиболее удобные объекты для изучения и манипулирования квантовой запутанностью в физических исследованиях. Для них квантовая запутанность проявляется особенно сильно, и ее уже невозможно игнорировать, как в случае с макрообъектами. Ситуация здесь напоминает применение понятия «волновая функция» в микро- и макромире.

Квантовая запутанность связана с количеством информации, содержащейся в физической системе, что позволяет описывать физические процессы изменения степени квантовой запутанности между компонентами системы как обмен информацией с ее окружением.

Проблема квантовой запутанности, особенно в микроскопических системах, до сих пор представляет собой

предмет полемики. При этом наиболее бурно обсуждается вопрос квантового принципа несепарабельности. Он заключается в том, что взаимодействующие системы квантово-запутанные между собой связаны нелокальными квантовыми корреляциями. При этом некоторые теории склоняются к мысли, что все акты взаимодействия в окружающем Мире вне зависимости от их масштабности — предпосылки для квантовой запутанности взаимодействующих объектов. Однако большинство специалистов считает подобное теоретизирование проявлением «квантового экстремизма», так как пока еще физикам не удалось построить непротиворечивую модель нашей реальности, состоящей из несепарабельных материальных систем и объектов. В еще большей степени сказанное касается количественного описания макроквантовой запутанности окружающих нас тел на «бытовом уровне».

Будет логичным спросить: как такая «запутанная» квантовая теория согласуется с экспериментальными данными?

При экспериментировании с квантовыми системами отличить суперпозицию от смеси состояний в принципе можно по интерференционным эффектам. Это напоминает отбраковку посуды, когда контролер легкой металлической палочкой ударяет по бокалам и тарелкам. Если посуда цела (полная суперпозиция), возникает чистый тон, если в стакане есть трещина, слышен дребезжащий звук (смесь состояний).

Первые эксперименты по проверке теории квантовой запутанности связаны с именем профессора Венского университета Антона Зайлингера. Для своих опытов Зайлингер выбрал обыкновенные фотоны и попытался «телепортировать» их в иную точку пространства. Важным элементом экспериментов Зайлингера была подготовительная фаза: необходимо, чтобы в некоторой точке пространства оказался фотон, изменяющий свои характеристики в ходе телепортации точь-в-точь как исходная частица. Оказывается в экспериментах по квантовой телепортации происходит не перемещение материальных объектов, а своеобразная череда мгновенных превращений их состояний.

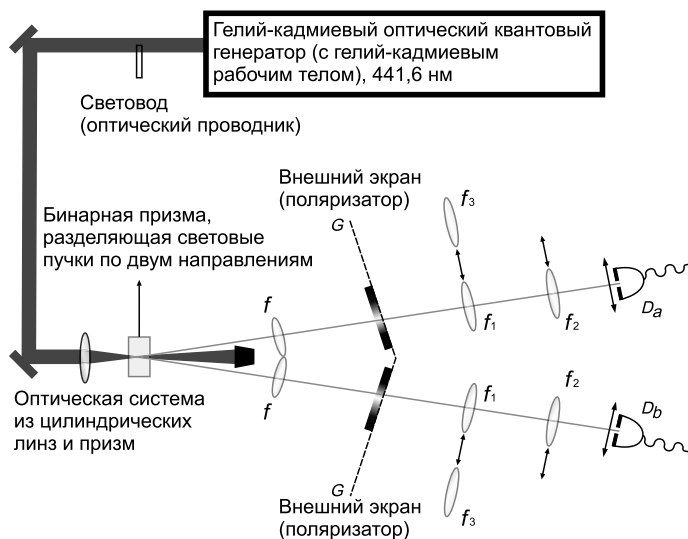


Схема квантового запутывания ( $f$  – параметры поляризации световых пучков;  $D_a$  и  $D_b$  – детекторы излучения)

Лазеры возбуждают в вакуумной камере отдельные атомы, испускающие при этом фотоны (фотон – элементарная частица, квант электромагнитного излучения). Фотоны разлетаются в противоположных направлениях по длинным световодам (специальным проводникам света с внутренней зеркальной поверхностью). После поляризаторов, пропускающих только частицы с определенным направлением волновых колебаний, они попадают на фотодетекторы. Согласно квантовой механике должна существовать тонкая корреляция между поляризациями разлетающихся фотонов, и эксперименты это подтвердили.

Предположим, что в точке выхода квантового «телепортационного портала» находится зеркало. Что бы ни происходило с исходным фотоном, зеркало отражает его образ, поменяв местами «левое» и «правое». Правда, аналогия здесь не полная, поскольку изображение в зеркалах отражается со скоростью света, а скорость квантовой телепортации пока еще считается практически неограниченной. Это не противоречит теории относительности, поскольку

подобная квантовая телепортация никак не связана с переносом материи.

Основным объектом опыта профессора Зайлингера, поставленного в Инсбруке, были незримо связанные друг с другом фотоны. Чтобы их получить, ученые направляли на кристалл с особыми оптическими свойствами лазерные световые импульсы длительностью в сотни миллионных долей миллиардной доли секунды. После преобразования видимого света в ультрафиолетовые сигналы их направляли на еще один оптический кристалл, где и возникала пара фотонов инфракрасного диапазона с плоскостями колебаний, строго перпендикулярных друг другу. Так возникали пары микрочастиц, завязанные в «квантовый узел», причем одна из них была поляризована в горизонтальной плоскости, а другая — в вертикальной. Выходило, что свойства фотонов неким образом передавались друг другу, и они принимали состояние точно такое же, как и их прототипы, разделенные многометровой дистанцией.

Следует подчеркнуть, что ни в этом, ни в других подобных опытах не происходило какого-либо материального переноса элементарной частицы в пространстве. Происходила лишь передача квантовой информации о состоянии микрочастицы, в данном случае о поляризационных характеристиках фотона.

Сегодня ученые могут телепортировать тысячи квантовых микрообъектов и даже успешно проводят опыты по телепортации атомов и молекул. Но проблем у квантовой телепортации еще много, так как одно из главных требований «правильного» запутывания — создание сверхчистой квантовой среды, а чем сложнее устроен квантовый объект, тем труднее изолировать его от внешнего окружения.

Кажется парадоксальным, но к настоящему времени квантовая теория наиболее полно и точно описывает наш Мир, Универсум в целом. Дело в том, что космологи считают окружающую нас Вселенную замкнутой системой, а в квантовой механике принято, что описание замкнутой системы ее вектором состояния должно быть полным. Проблема лишь в том, что нас окружают именно открытые

системы, активно контактирующие с соседними физическими объектами, так что мы постоянно должны решать задачу задания вектора состояния эволюционирующей системы.

Чтобы хоть немного разобраться в головоломках квантовой натурфилософии, давайте обратимся к мнению одного из самых выдающихся теоретиков современности и блестящему научному популяризатору, нобелевскому лауреату Стивену Вайнбергу (р. 1933). Для своей книги «Мечты об окончательной теории» он выбрал форму и героев бессмертного произведения Чарльза Диккенса «Рождественская песнь в прозе» и получил изумительный диалог о смысле квантовой механики.

Крошка Тим: «Я думаю, квантовая механика — замечательная наука. Мне никогда не нравилось, что в ньютоновской механике, зная положение и скорость каждой частицы в данный момент, вы можете полностью предсказать будущее поведение системы, так что при этом не остается места ни для свободной воли, ни вообще для особой роли людей. В квантовой механике все ваши предсказания расплывчаты и вероятностны, ничто не находится в определенном состоянии до тех пор, пока человеческие существа не совершат акт наблюдения. По-моему, что-то похожее говорили некоторые восточные мистики».

Дядюшка Скрудж: «Э-э! Я, может быть, и поменял свое мнение насчет Рождества, но чепуху-то я всегда узнаю. Конечно, у электрона нет определенных значений положения и скорости в один и тот же момент времени, но это просто означает, что такие величины не подходят для описания электрона. В каждый момент времени и электрон, и любой коллектив частиц имеют волновую функцию. Если есть человек, наблюдающий частицы, то и состояние всей системы, включая человека, описывается волновой функцией. Эволюция волновой функции так же детерминирована, как и орбиты частиц в ньютоновской механике. На самом деле она еще более детерминирована, так как уравнения, определяющие то, как волновая функция меняется со временем, слишком просты, чтобы обладать хаотическими решениями. Так где же твоя свободная воля?»

Крошка Тим: «Меня поражает, что вы отвечаете столь ненаучным образом. Волновая функция не представляет объективной реальности, так как ее нельзя измерить. Например, если мы наблюдаем, что частица находится здесь, мы не в силах из этого заключить, что волновая функция до наблюдения имела нулевое значение там; у нее могли быть любые значения здесь и там, и нам просто посчастливилось обнаружить частицу здесь, а не там в результате акта наблюдения. Но если волновая функция не реальна, то почему же вы придаете так много значения тому, что она эволюционирует детерминированным образом? Все, что мы когда-либо можем измерить, это величины типа положения, импульса или спина, и для них мы можем получить только вероятностные предсказания. При этом до тех пор, пока какой-нибудь человек не вмешивается с тем, чтобы измерить эти величины, мы вообще не можем сказать, что частица находится в каком-то определенном состоянии».

Дядюшка Скрудж: «Мальчик мой, похоже, ты проглотил без всякой критики родившуюся в девятнадцатом веке доктрину, называемую позитивизмом, которая утверждает, что наука должна иметь дело только с теми вещами, которые можно реально наблюдать. Согласен, что ни в одном эксперименте невозможно измерить волновую функцию. Ну и что? Много раз повторив измерения для одного и того же начального состояния, ты можешь узнать, какой должна быть волновая функция этого состояния и применять результаты для проверки наших теорий. Чего же еще требовать? Тебе на самом деле нужно привести свои мысли в соответствие с двадцатым веком. Волновые функции реальны настолько же, насколько реальны кварки и симметрии: их просто удобно включить в наши теории. Любая система находится в определенном состоянии независимо от того, наблюдает ее какое-либо человеческое существо или нет; состояние описывается не своим положением или импульсом, а волновой функцией».

Крошка Тим: «Не думаю, что мне стоит спорить о том, что реально, а что нет, с тем, кто проводит вечера, прогуливаясь с духами. Позвольте мне только напомнить вам серьезную проблему, с которой сталкиваешься немедленно, как

только представляешь, что волновая функция реальна. Эта проблема была упомянута во время той атаки на квантовую механику, которую предпринял Эйнштейн на Сольвеевском конгрессе 1927 г. в Брюсселе, а затем в 1933 г. была изложена им письменно в знаменитой статье совместно с Борисом Подольским и Натаном Розеном. Представьте систему, состоящую из двух электронов и приготовленную таким образом, что в какой-то момент времени электроны находятся на известном большом расстоянии друг от друга и обладают известным суммарным импульсом. (Это не нарушает соотношение неопределенностей Гейзенберга. Например, можно с любой желаемой точностью измерить расстояние между электронами, послав от одного к другому пучок света очень короткой длины волны; это, конечно, исказит импульс каждого из электронов, но в силу закона сохранения импульса не изменит их полный импульс.) Если затем кто-то измеряет импульс первого электрона, то импульс второго также можно немедленно найти, поскольку известна сумма импульсов. С другой стороны, если кто-то измеряет положение первого электрона, то и положение второго становится немедленно известным, так как измерено расстояние между ними. Но все это означает, что, наблюдая состояние первого электрона, вы можете мгновенно изменить волновую функцию, так что второй электрон станет обладать определенным положением или определенным импульсом даже несмотря на то, что вы и близко не подходили ко второму электрону. И что же, вы продолжаете настаивать на реальности волновой функции, которую можно менять таким способом?»

Дядюшка Скрудж: «Я готов все это принять. Точно так же меня не беспокоит проблема с выполнением закона специальной теории относительности, запрещающего распространение сигналов со скоростью, большей скорости света; нет никакого противоречия и с этим законом. У физика, который измеряет импульс второго электрона, нет способов узнать, не исказилось ли значение, измеренное им, в результате наблюдения первого электрона. Все, что ему известно, что электрон перед измерением мог в том числе иметь и определенное положение, и определенный импульс. Даже Эйнштейн не смог бы воспользоваться измерениями

подобного рода, чтобы послать мгновенный сигнал от одного электрона к другому. (Можно было бы заметить, что Джон Белл сравнительно недавно столкнулся с еще более фантастическими следствиями квантовой механики, касающимися атомных спинов, а физики-экспериментаторы показали, что спины в атомных системах ведут себя так, как предсказывает квантовая механика, то есть на самом деле законы квантовой механики отражают устройство самого мира.) Мне кажется, что ничто из сказанного не может заставить нас отказаться от мыслей о волновых функциях как о реальности; просто волновая функция ведет себя непривычным для нас образом, допуская мгновенные изменения, влияющие на волновую функцию всей Вселенной. Я думаю, что тебе надо перестать выискивать в квантовой механике глубокие философские откровения и предоставить мне возможность пользоваться ею».

Крошка Тим: «Прошу меня извинить, но я должен заметить, что если вы готовы признать мгновенные изменения волновой функции во всем пространстве, то, как я подозреваю, вы готовы признать что угодно. Кроме того, надеюсь, вы простите меня, если я скажу, что вы не очень последовательны. Вы сказали, что волновая функция любой системы эволюционирует во времени совершенно детерминированным образом и что вероятности появляются только тогда, когда мы производим измерения. Но, согласно вашей точке зрения, не только электрон, но также измерительный прибор и человек, производящий с его помощью наблюдения, — все они образуют одну большую систему, описываемую волновой функцией с невероятно большим количеством значений, причем все эти значения меняются причинным образом даже во время измерения. Но если что-то происходит детерминировано, откуда же берется неопределенность в результатах измерений? Откуда берутся вероятности, когда производятся измерения?»

В заключение увлекательного диалога сказочных героев Вайнберга приведем мнение знаменитого физика XX века Ричарда Фейнмана, изложенное им в лекции «В поисках новых законов». Фейнман, один из создателей квантовой электродинамики, признает, что амплитуды вероятностей выглядят очень странно, и с первого взгляда можно даже



решить, что в этом квантовая теория, безусловно, нелепа. Но все, что можно вывести из представления о квантово-механических амплитудах вероятности, как бы странно это представление ни выглядело, оказывается верным, и так на протяжении всей теории странных частиц, на все 100 %. Поэтому сам профессор Фейнман не думает, что когда будут открыты законы внутренней структуры нашего мира, эти представления окажутся неправильными: «В то же время теория, согласно которой пространство непрерывно, мне кажется неверной, потому что она приводит к бесконечно большим величинам и другим трудностям. Кроме того, она не дает ответа на вопрос о том, чем определяются размеры всех частиц. Я сильно подозреваю, что простые представления геометрии, распространенные на очень маленькие участки пространства, неверны. Говоря это, я, конечно, всего лишь пробиваю брешь в общем здании физики, ничего не говоря о том, как ее заделать. Если бы я это смог, то я закончил бы лекцию новым законом».

## Глава 5

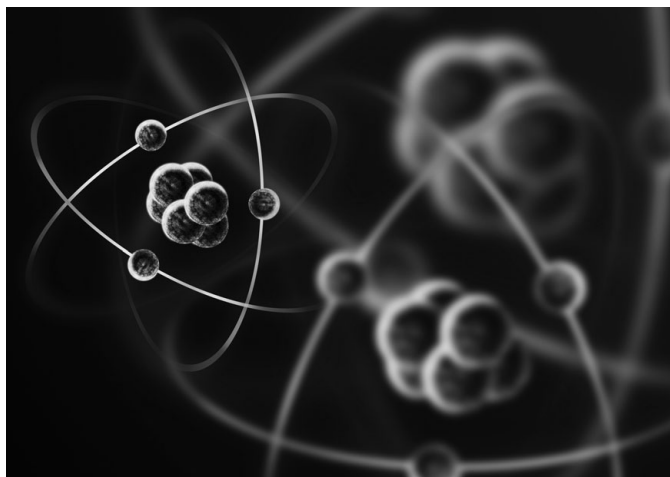
# Удивительный мир микрочастиц

*«Масса, заряд, спин, четность... Попробуйте дать точное определение каждой этой характеристике частиц! Причем определение самостоятельное, не выражая одну величину через другую, например массу — через силу веса, а заряд — через силу притяжения и отталкивания.*

*С полной уверенностью можно сказать, что ничего из этого не получится. Мы очень часто пользуемся этими понятиями, но каков их „глубинный“ смысл, сегодня не знает ни один физик.*

*Такое положение характерно для современной квантовой механики. Она широко пользуется понятиями массы, заряда и другими, заимствованными ею еще из классической физики. Квантовая механика открыла и новые характеристики частиц, например спин, четность. Но о происхождении этих характеристик она может сказать не больше, чем о происхождении массы и заряда».*

В. Рыдник. Что такое квантовая механика



Удивительный микромир частиц и полей (см. вклейку)

## Проходящие сквозь стены

*«...Туннельные процессы — та общая черта, которая связывает очень разные явления, протекающие на разных „этажах“ микромира. Иногда в этих процессах участвует макроскопическое тело — целый кристалл, иногда они протекают на атомно-молекулярном и еще более глубоком, ядерном уровне... „Цокольный“ этаж — царство элементарных частиц... все процессы на этом уровне носят релятивистский характер, при их рассмотрении необходимо помимо квантовой механики привлекать и теорию относительности, а это уже совсем другая история».*

Н. Работнов. Ларчик можно не открывать:  
Квантовый туннельный эффект.  
Полвека загадок и открытий



Георгий Антонович Гамов

*«С детства мы привыкаем к окружающему миру, каким он воспринимается нашими пятью чувствами; именно в детстве у нас формируются фундаментальные представления о пространстве, времени и движении. Наш разум вскоре настолько осваивается с этими понятиями, что впоследствии мы склонны считать единственно возможным наше основанное на них представление о внешнем мире и любая мысль об изменении этих понятий кажется нам парадоксальной. Однако*

*развитие точных физических методов наблюдения и более глубокий анализ наблюдаемых соотношений привели современную науку к вполне определенному выводу о том, что ее „классические“ основы оказываются совершенно несостоятельными, когда их пытаются применить к подробному описанию явлений, обычно недоступных наблюдениям, и что для правильного и непротиворечивого описания нашего утонченного опыта совершенно необходимо внесение*

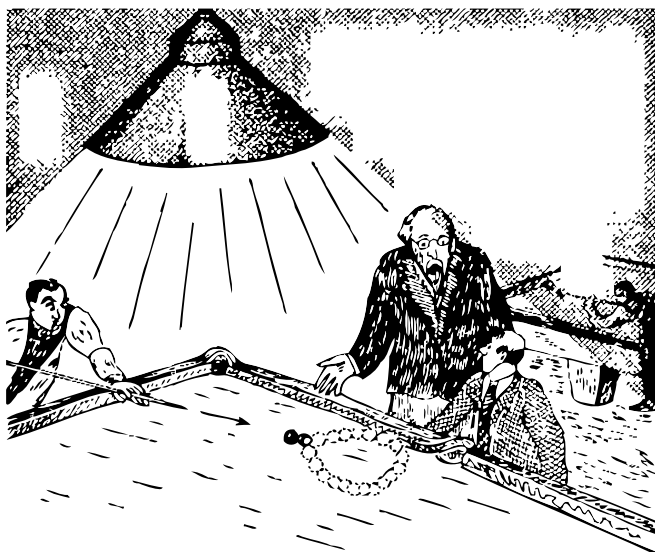
*некоторых изменений в фундаментальные понятия — пространство, время и движение».*

Г. Гамов. Мистер Томпкинс в Стране Чудес

Замечательно в популярной форме описал парадоксы квантового мира в книге «Приключения мистера Томпкинса» выдающийся русский физик Георгий Антонович Гамов (1904–1968), эмигрировавший в 1930-е годы в США. В главе «Квантовый бильярд» есть весьма любопытный отрывок.

«Однажды мистер Томпкинс возвращался к себе домой страшно усталый после долгого рабочего дня в банке, где он служил. Проходя мимо паба, мистер Томпкинс решил, что было бы недурственно пропустить кружечку эля. За первой кружкой последовала другая, и вскоре мистер Томпкинс почувствовал, что голова у него изрядно кружится. В задней комнате паба была бильярдная, где игроки в рубашках с застученными рукавами толпились вокруг центрального стола. Мистер Томпкинс стал смутно припоминать, что ему уже случалось бывать здесь и прежде, как вдруг кто-то из его приятелей-клерков потащил мистера Томпкинса к столу учиться играть в бильярд. Приблизившись к столу, мистер Томпкинс принялся наблюдать за игрой. Что-то в ней показалось ему очень странным! Играющий ставил шар на стол и ударял по шару кием. Следя за катящимся шаром, мистер Томпкинс к своему большому удивлению заметил, что шар начал „расплываться“. Это было единственное выражение, которое пришло ему на ум при виде странного поведения бильярдного шара, который, катясь по зеленому полю, казался все более и более размытым, на глазах утрачивая четкость своих контуров. Казалось, что по зеленому сукну катится не один шар, а множество шаров, к тому же частично проникающих друг в друга. Мистеру Томпкинсу часто случалось наблюдать подобные явления и прежде, но сегодня он не принял ни капли виски и не мог понять, почему так происходит.

— Посмотрим, — подумал мистер Томпкинс, — как эта размазня из шара столкнется с другой такой же размазней.



Белый шар двигался одновременно по всем направлениям

*«Должно быть, игрок, нанесший удар по шару, был знатоком своего дела: катящийся шар столкнулся с другим шаром в лобовом ударе, как это и требовалось. Послышался громкий стук, и оба шара — покоившийся и налетевший (мистер Томпкинс не мог бы с уверенностью сказать, где какой шар) — разлетелись „в разные стороны“. Выглядело это, что и говорить, весьма странно: на столе не было более двух шаров, выглядевших несколько размазано, а вместо них бесчисленное множество шаров (все — с весьма смутными очертаниями и сильно размазанные) поразлеталось по направлениям, составлявшим от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  с направлением первоначального соударения. Бильярдный шар скорее напоминал причудливую волну, распространяющуюся из точки соударения шаров».*

Г. Гамов. Приключения мистера Томпкинса

Присмотревшись повнимательнее, мистер Томпкинс заметил, что максимальный поток шаров направлен в сторону первоначального удара.

— Рассеяние S-волны, — произнес у него за спиной знакомый голос, и мистер Томпкинс, не оборачиваясь, узнал профессора.

— Неужели и на этот раз что-нибудь здесь искривилось, — спросил мистер Томпкинс, — хотя поверхность бильярдного стола мне кажется гладкой и ровной?

— Вы совершенно правы, — подтвердил профессор, — пространство в данном случае совершенно плоское, а то, что вы наблюдаете, в действительности представляет собой квантовое явление.

— Ах эти матрицы! — рискнул саркастически заметить мистер Томпкинс.

— Точнее, неопределенность движения, — заметил профессор. — Владелец этой бильярдной собрал здесь коллекцию из нескольких предметов, страдающих, если можно так выразиться, „квантовым элифантизмом“. В действительности квантовым законам подчиняются все тела в природе, но так называемая квантовая постоянная, управляющая всеми этими явлениями, чрезвычайно мала: ее числовое значение имеет двадцать семь нулей после запятой. Что же касается бильярдных шаров, которые вы здесь видите, то их квантовая постоянная гораздо больше (около единицы), и поэтому вы можете невооруженным глазом видеть явления, которые науке удалось открыть только с помощью весьма чувствительных и изощренных методов наблюдения».

Отвлечемся немного от увлекательного квантового бильярда и вспомним из предыдущих глав о том, что в процессе становления квантовой теории возникло новое понимание реальности микромира, в котором закон причинности сводился к изменениям волновой функции согласно уравнению Шрёдингера. Обыденное понятие причинности как поиск истоков любого события вполне понятно без всяких объяснений, но малопригодно в науке. Научное применение принципа причинности требует достаточно строгих закономерностей, определяющих последовательность событий во времени.

Классический детерминизм отсутствует в квантовой физике, его место занимает квантовомеханическая причинность,

определяемая решениями уравнения Шрёдингера. Применяемые в квантовой механике понятия статистической причинности и вероятностной закономерности несовместимы в классическом смысле, однако в физике микромира они наиболее полно объясняют специфику квантовых процессов. Если вспомнить смысл универсального принципа дополненности Бора, то случайность и закономерность равно необходимы для определения новой «квантовомеханической причинности», причем ее смысл более обширен, чем простая сумма исходных понятий.

Вернемся теперь к «Приключениям мистера Томпкинса».

«Тут профессор умолк и ненадолго задумался.

— Не хочу ничего критиковать, — продолжал он, — но мне очень хотелось бы знать, откуда у владельца бильярдной эти шары. Строго говоря, они вообще не могут существовать, поскольку для всех тел в мире квантовая постоянная имеет одно и то же значение.

— Может быть, их импортировали из какого-нибудь другого мира, — высказал предположение мистер Томпкинс, но профессор не удовлетворился такой гипотезой и не избавился от охвативших его подозрений.

— Вы заметили, что шары „расплываются“, — начал он. — Это означает, что их положение на бильярдном столе не вполне определено. Вы не можете точно указать, где именно находится шар. В лучшем случае вы можете утверждать лишь, что шар находится „в основном здесь“ и „частично где-то там“.

— Все это в высшей степени необычно, — пробормотал мистер Томпкинс.

— Наоборот, — возразил профессор, — это абсолютно обычно в том смысле, что всегда происходит с любым материальным телом. Лишь из-за чрезвычайно малого значения квантовой постоянной и неточности обычных методов наблюдения люди не замечают этой неопределенности и делают ошибочный вывод о том, что положение и скорость тела всегда представляют собой вполне определенные величины. В действительности же и положение, и скорость всегда в какой-то степени неопределены, и чем точнее известна

одна из величин, тем более размазана другая. Квантовая постоянная как раз и управляет соотношением между этими двумя неопределенностями. Вот взгляните, я накладываю определенные ограничения на положение этого бильярдного шара, заключая его внутрь деревянного треугольника.

Как только шар оказался за деревянным заборчиком, вся внутренность треугольника заполнилась блеском слоновой кости.

— Видите! — обрадовался профессор. — Я ограничил положение шара размерами пространства, заключенного внутри треугольника, то есть какими-то несколькими дюймами. И в результате — значительная неопределенность в скорости, шар так бегаёт внутри периметра треугольника!

— А разве вы не могли бы остановить шар? — удивленно спросил мистер Томпкинс.

— Ни в коем случае! Это физически невозможно, — последовал ответ. — Любое тело, помещенное в замкнутое пространство, обладает некоторым движением. Мы, физики, называем такое движение нулевым. Таково, например, движение электронов в любом атоме».

Естественно, что по мере формирования квантового образа мироздания все чаще стал возникать принципиальный вопрос: насколько полно описывают объективную реальность парадоксальные законы микромира?

Давайте посмотрим, как оригинально отвечает на данный вопрос профессор Гамова.

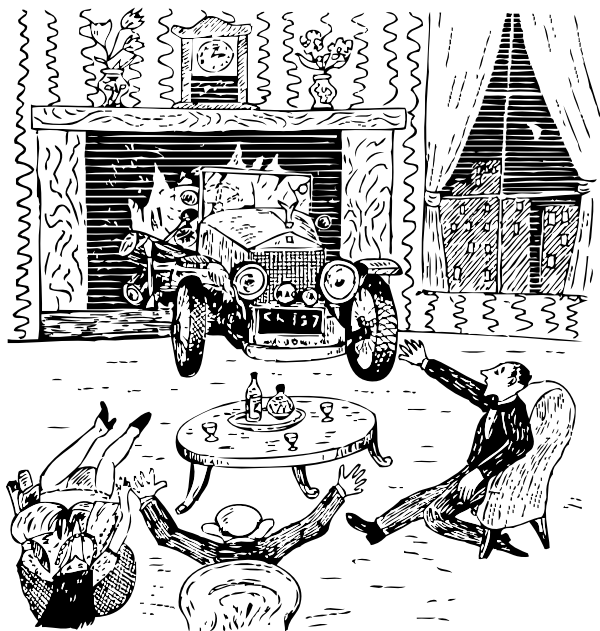
«Пока мистер Томпкинс наблюдал за бильярдным шаром, мечущимся в треугольной загородке, как тигр в клетке, произошло нечто весьма необычное: шар „просочился“ сквозь стенку деревянного треугольника и в следующий момент покатился в дальний угол бильярдного стола.

Самое странное было в том, что шар не перепрыгнул сквозь деревянную стенку, а прошел сквозь нее, не поднимаясь над уровнем бильярдного стола.

— Вот вам ваше „нулевое движение“, — с упреком сказал мистер Томпкинс. — Не успели оглянуться, а шар „сбежал“. Это как, по правилам?



— Разумеется, в полном соответствии с правилами, — согласился профессор. — В действительности вы видите перед собой одно из наиболее интересных следствий квантовой теории. Если энергии достаточно для того, чтобы тело могло пройти сквозь стенку, то удержать его за стенкой невозможно: рано или поздно объект „просочится“ сквозь стенку и будет таков.



Автомобиль прошел сквозь стену, как доброе старое привидение во времена Средневековья

«— А сколько мне понадобится ждать, — поинтересовался мистер Томпкинс у профессора, — пока автомашина, сделанная не из того, из чего делают автомашины здесь, а из обычной стали, „просочится“ сквозь стену гаража, построенного, скажем, из кирпичей? Хотел бы я своими глазами увидеть такое „просачивание“!»

Наскоро произведя в уме необходимые вычисления, профессор привел ответ:

— Ждать вам придется каких-нибудь 1 000 000 000...000 000 лет.

*Даже привыкший к внушительным числам в банковских счетах мистер Томпкинс потерял счет нулям в числе, приведенном профессором. Впрочем, он несколько успокоился: число было достаточно длинным для того, чтобы можно было не беспокоиться о том, как бы автомашина не сбежала, „просочившись“ сквозь стенку в гараже...*

— В таком случае я ни за что на свете не пойду в зоопарк, — решил про себя мистер Томпкинс, и его живое воображение тотчас же нарисовало ужасающую картину львов и тигров, „просачивающихся“ сквозь стенки своих клеток. Затем мысли мистера Томпкинса приняли несколько иное направление: ему привиделся автомобиль, „просочившийся“ из гаража сквозь стены, как доброе старое привидение во времена Средневековья».

Г. Гамов. Приключения мистера Томпкинса

— Предположим, что все, о чем вы мне рассказали, не вызывает у меня ни малейших сомнений. Однако мне все же остается непонятно, как можно было бы наблюдать такие вещи (разумеется, я не говорю об этих бильярдных шарах).

— Разумное выражение, — заметил профессор. — Конечно, я не утверждаю, будто квантовые явления можно было бы наблюдать на таких больших телах, с какими вам обычно приходится иметь дело. Действие квантовых законов становится гораздо более заметным применительно к очень малым массам, таким, как атомы или электроны. Для таких частиц квантовые эффекты настолько сильны, что обычная механика становится совершенно неприменимой. Столкновение двух атомов выглядит точно так же, как столкновение двух бильярдных шаров, которое вы здесь наблюдали, а движение электронов в атоме очень напоминает „нулевое движение“ бильярдного шара, который я поместил внутрь деревянного треугольника.

— А часто ли атомы выбегают из своего гаража? — спросил мистер Томпкинс.

— О да, весьма часто. Вам, конечно, приходилось слышать о радиоактивных веществах, атомы которых претерпевают спонтанный распад, испуская при этом очень быстрые частицы. Такой атом или, точнее, его центральная часть, называемая атомным ядром, очень напоминает гараж, в котором стоят автомашины, то есть другие частицы. И частицы убегают из ядра, просачиваясь через стенки, — порой внутри ядра они не остаются ни секунды! В атомных ядрах квантовые явления — дело совершенно обычное!»

А теперь самое время побывать на лекции Георгия Антоновича, которую он устами профессора читает мистеру Томпкинсу. Между прочим, это один из самых первых и, несомненно, один из талантливейших рассказов о парадоксальности квантового мира.

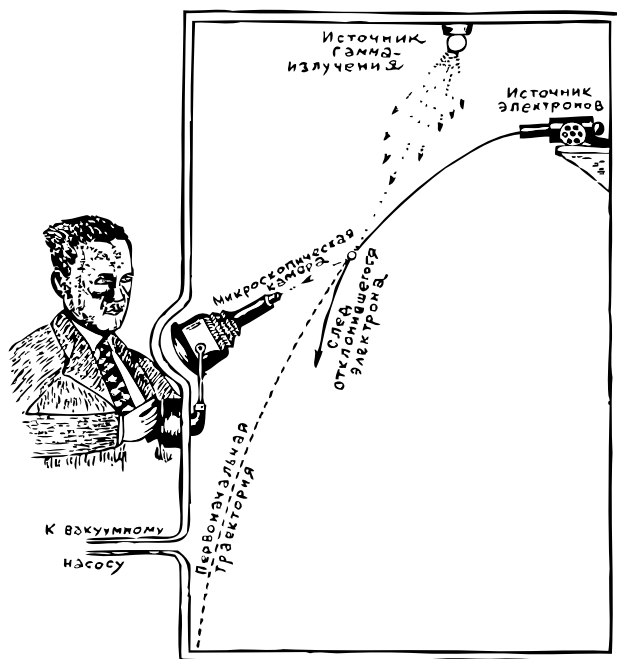
«Если я спрошу кого-нибудь, почему он (или она) верит, что любая движущаяся частица занимает в любой данный момент определенное положение, описывает во время движения определенную линию, то в ответ мой собеседник, скорее всего, скажет: „Потому, что я вижу все это именно так, когда наблюдаю за движением“. Проанализируем такой метод образования классического понятия траектории и попытаемся выяснить, действительно ли он приводит к определенному результату. Для этого представим себе мысленно физика, оснащенного всевозможной чувствительнейшей аппаратурой и пытающегося проследить движение маленького материального тела, брошенного со стены лаборатории. Наш физик решает производить наблюдения, глядя, как движется тело, и использует для этого небольшой, но очень точный теодолит. Разумеется, чтобы увидеть движущееся тело, физику необходимо освещать его. Зная, что свет оказывает давление на освещаемое тело и поэтому возмущает движение тела, физик решает освещать тело короткими вспышками только в те моменты, когда он производит наблюдения. В первом эксперименте физик намеревается наблюдать только десять положений тела на траектории и выбирает источник, дающий вспышки света, настолько слабый, что интегральный эффект светового давления в течение десяти последовательных сеансов наблюдения лежит в пределах требуемой точности эксперимента. Таким

образом, освещая падающее тело десятью вспышками, наш физик получает в пределах требуемой точности десять точек на траектории.

Затем он хочет повторить эксперимент и получить сто точек. Физик знает, что сто последовательных вспышек слишком сильно возмутят движение, и, готовясь ко второй серии наблюдений, выбирает фонарь, дающий в десять раз менее интенсивное освещение. Для третьей серии наблюдений, готовясь получить тысячу точек на траектории, физик выбирает фонарь, дающий в сто раз менее интенсивное освещение, чем источник света, который был использован в первой серии наблюдений.

Продолжая в том же духе и постоянно уменьшая интенсивность освещения, даваемого источником, физик может получить на траектории столько точек, сколько сочтет нужным, не увеличивая экспериментальную ошибку выше установленного с самого начала предела. Описанная мной сильно идеализированная, но принципиально вполне осуществимая процедура представляет собой строго логический способ, позволяющий построить движение по траектории, „глядя на движущееся тело“, и, как вы видите, в рамках классической физики такое построение вполне возможно.

Попытаемся теперь выяснить, что произойдет, если мы введем квантовые ограничения и учтем, что действие любого излучения может передаваться только в форме квантов света. Мы видели, что наблюдатель постоянно уменьшал количество света, падающего на движущееся тело, и теперь нам следует ожидать, что, дойдя до одного кванта, наш физик не сможет продолжать в том же духе и дальше. От движущегося тела будет отражаться либо весь квант света целиком, либо ничего, и в последнем случае наблюдение становится невозможным. Мы знаем, что в результате столкновения с квантом света длина волны света уменьшается, и наш наблюдатель, также зная об этом, заведомо попытается использовать для своих наблюдений свет со все увеличивающейся длиной волны, чтобы компенсировать число наблюдений. Но тут его подстерегает другая трудность.

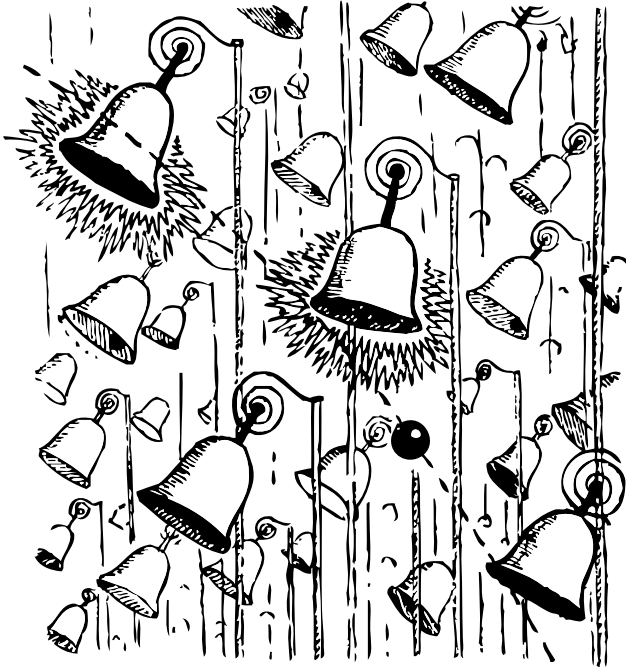


Гамма-лучевой микроскоп Гейзенберга

«Хорошо известно, что при использовании света определенной длины волны невозможно различить детали, размеры которых меньше длины волны: нельзя нарисовать персидскую миниатюру малярной кистью! Но используя все более длинные волны, наш физик испортит оценку положения каждой точки и вскоре достигнет той стадии, когда каждая оценка будет содержать погрешность, или неопределенность, величина которой сравнима с размерами всей его лаборатории и превышает их. Тем самым наш наблюдатель будет вынужден в конце концов пойти на компромисс между большим числом наблюдаемых точек и неопределенностью в оценке положения каждой точки и не сможет получить точную траекторию — в виде линии в математическом смысле в отличие от своих классических коллег. В лучшем случае квантовый наблюдатель получит весьма широкую размазанную полосу, и если он попытается построить понятие траектории,

*опираясь на свой опыт, то оно будет сильно отличаться от классического понятия траектории».*

Г. Гамов. Приключения мистера Томпкинса



Колокольчики на пружинках

*«Предложенный выше метод построения траектории был оптическим, а теперь мы можем испробовать другую возможность и воспользоваться механическим методом. Для этого наш экспериментатор может построить какой-нибудь миниатюрный механический прибор, например колокольчики на пружинках, который будет регистрировать прохождение материальных тел, если тело проходит достаточно близко. Большое число таких „колокольчиков“ он развешивает в той области пространства, где ожидается прохождение движущегося тела, и „звон колокольчиков“ будет указывать траекторию, описываемую телом. В классической физике*

*„колокольчики“ можно сделать сколь угодно малыми и чувствительными. В предельном случае бесконечно большого числа бесконечно маленьких колокольчиков понятие траектории и в этом случае может быть построено с любой требуемой точностью. Однако, как и в предыдущем случае, квантовые ограничения на механические системы портят все дело. Если „колокольчики“ слишком малы, то величина импульса, которую они смогут забрать у движущегося тела...), будет слишком большой и движение окажется сильно возмущенным даже после того, как тело заденет один-единственный колокольчик. Если же колокольчики велики, то неопределенность в положении каждого будет очень большой. В этом случае построенная в результате наблюдения окончательная траектория, как и в предыдущем случае, окажется широкой полосой!»*

Г. Гамов. Приключения мистера Томпкинса

Боюсь, что все эти рассуждения об экспериментаторе, желающем наблюдать траекторию, покажутся вам слишком специальными и вы будете склонны думать, что если используемые средства не позволяют нашему наблюдателю оценить траекторию, то желаемый результат удастся получить с помощью какого-нибудь другого более сложного устройства. Однако я должен вам напомнить, что мы рассматривали не конкретный эксперимент, выполненный в какой-то физической лаборатории, а некую идеализацию самого главного вопроса физического измерения. Поскольку любое существующее в нашем мире действие можно отнести либо к числу действий поля излучения, либо к чисто механическим, любая сколь угодно сложная схема измерения непременно сводится к элементам, описываемым теми двумя методами, о которых я уже упоминал раньше, — оптическим и механическим, и в конечном итоге приводит к тому же результату. А поскольку идеальный „измерительный прибор“ может вместить весь физический мир, мы в конце концов приходим к выводу, что в мире, где действуют квантовые законы, нет ни точного положения, ни траектории, имеющей строго определенную форму линии.

Но вернемся теперь снова к нашему экспериментатору и попытаемся облечь в математическую форму ограничения,

вытекающие из квантовых условий. Мы уже видели, что в обоих методах — оптическом и механическом — всегда существует конфликт между оценкой положения и возмущением скорости движущегося объекта. В оптическом методе столкновение с квантом света (в силу закона сохранения импульса, действующего в классической механике) порождает неопределенность в импульсе частицы, сравнимую с импульсом самого кванта света...

В механическом методе импульс становится неопределенным на величину, передаваемую „колокольчиком“... Соотношение, впервые выведенное немецким физиком Вернером Гейзенбергом, описывает фундаментальную неопределенность, следующую из квантовой теории: чем точнее определено положение, тем неопределеннее скорость, и наоборот...

Для тел, с которыми нам обычно приходится иметь дело, неопределенность до смешного мала... Однако в случае электрона... Это дает... неопределенность, сопоставимую с полными размерами атома. Таким образом, „орбита“ электрона в атоме расплывается до такой степени, что „толщина“ траектории становится равной ее „радиусу“ — электрон оказывается одновременно всюду вокруг ядра.

На протяжении последних двадцати минут я пытался нарисовать вам картину разрушительных последствий нашей критики классических представлений о движении. Изящные и четко определенные классические понятия оказываются вдребезги разбитыми и уступают место тому, что я назвал бы бесформенной размазней. Естественно, вы можете спросить меня, как физики собираются описывать какие-нибудь явления, если квантовый мир буквально захлестывает волны океана неопределенности. Ответ состоит в том, что до сих пор нам удалось лишь разрушить классические понятия, но мы еще не пришли к точной формулировке новых понятий.

Займемся этим теперь. Ясно, что мы не можем, вообще говоря, определить положение материальной частицы с помощью материальной точки, а траекторию ее движения — с помощью математической линии, поскольку в квантовом мире все объекты расплываются. Нам необходимо обратиться к другим методам описания, дающим, так сказать, „плотность



размазни“ в различных точках пространства. Математически это означает, что мы используем непрерывные функции (такие, как, например, в гидромеханике), а физически требует, чтобы при описании квантового мира мы употребляли такие обороты речи, как „этот объект в основном находится здесь, частично там и даже вон там“ или „эта монета на 75 % находится в моем кармане и на 25 % — в вашем“. Я понимаю, что такие утверждения кажутся вам дикими, но в нашей повседневной жизни из-за малости квантовой постоянной в них нет надобности. Но если вы вознамеритесь изучать атомную физику, то я настоятельно рекомендую вам предварительно привыкнуть к такого рода выражениям.

Считаю своим долгом предостеречь вас от ошибочного представления о том, будто функция, описывающая „плотность пребывания“ объекта в различных точках пространства, обладает физической реальностью в нашем обычном трехмерном пространстве. Действительно, если мы описываем поведение, например, двух частиц, то нам необходимо ответить на вопрос, находится ли одна частица в одном месте и одновременно вторая частица в другом месте. Для этого нам необходима функция шести переменных (координат двух частиц), которую невозможно „локализовать“ в трехмерном пространстве. Для описания более сложных систем нам понадобились бы функции еще большего числа переменных. В этом смысле „квантовомеханическая функция“ аналогична „потенциальной функции“, или „потенциалу“, системы частиц в классической механике или „энтропии“ системы в статистической механике: она только описывает движение и позволяет нам предсказывать результат любого конкретного движения при данных условиях. Физическая реальность остается за частицами, движение которых мы описываем...

На необходимость наделять движение материальных частиц волновыми свойствами впервые указал французский физик Луи де Бройль на основе своих теоретических исследований строения атома. В последующие годы волновые свойства движения материальных частиц были надежно подтверждены многочисленными экспериментами, продемонстрировавшими такие явления, как дифракция пучка электронов при прохождении через малое отверстие

и интерференционные явления, происходящие даже с такими сравнительно большими и сложными частицами, как молекулы.

Экспериментально установленные волновые свойства материальных частиц были совершенно непонятны с точки зрения классических представлений о движении, и де Бройль был вынужден принять весьма необычную (чтобы не сказать неестественную) точку зрения: по де Бройлю, все частицы „сопровождаются“ определенными волнами, которые, так сказать, „направляют“ их движения.

Но как только мы отказываемся от классических понятий и переходим к описанию движения с помощью непрерывных функций, требование о волновом характере становится гораздо более понятным. Оно просто утверждает, что распространение нашей функции аналогично (например) нераспространению тепла сквозь стенку, нагреваемую с одной стороны, а распространению сквозь ту же самую стенку механической деформации (звука). Математически это означает, что мы ищем уравнение определенного (а не ограниченного) вида. Это фундаментальное условие вместе с дополнительным требованием, чтобы наши уравнения, если их применять к частицам большой массы, переходили в уравнения классической механики, поскольку квантовые эффекты для таких частиц становятся пренебрежимо слабыми, практически сводят проблему вывода уравнения к чисто математическому упражнению.

Если вас интересует, как выглядит окончательный ответ — фундаментальное уравнение Шрёдингера... „Волновое уравнение Шрёдингера“ (так принято называть выведенное Шрёдингером фундаментальное уравнение) позволило физикам в последующие сорок лет его существования построить наиболее полную и логически непротиворечивую картину явлений, происходящих в мире атомов.

Некоторые из вас, должно быть, удивляются, почему я до сих пор ни разу не употребил слово „матрица“, которое часто приходится слышать в связи с квантовой теорией. Должен признаться, что лично я питаю сильную неприязнь к матрицам и предпочитаю обходиться без них. Но чтобы

не оставлять вас в абсолютном неведении относительно этого математического аппарата квантовой теории, я скажу о матрицах несколько слов. Как вы уже знаете, движение частицы или сложной механической системы всегда можно описать с помощью некоторых непрерывных волновых функций. Эти функции часто бывают очень сложными и представимы в виде набора из некоторого числа более простых колебаний (так называемых „собственных функций“) подобно тому, как сложный звук можно составить из некоторого числа простых гармонических тонов. Сложное движение можно описывать, задавая амплитуды его различных компонент. Поскольку число компонент (обертонов) бесконечно, мы выписываем бесконечную таблицу амплитуд...

Над такими таблицами можно производить математические операции по сравнительно простым правилам. Каждая такая таблица и называется „матрицей“, и некоторые физики вместо того, чтобы иметь дело непосредственно с волновыми функциями, предпочитают оперировать с матрицами. Такая „матричная механика“, как ее иногда называют, представляет собой не более чем математическую модификацию обычной „волновой механики“. В наших лекциях, посвященных главным образом принципиальным вопросам, было бы излишне входить в эти проблемы более подробно.

Очень жаль, что недостаток времени не позволяет мне рассказать вам о дальнейшем прогрессе квантовой теории в связи с теорией относительности. Эта глава в развитии квантовой теории, связанная главным образом с работами британского физика Поля Адриена Мориса Дирака, приводит ко многим интереснейшим проблемам и стала основой некоторых чрезвычайно важных экспериментальных открытий. Возможно, когда-нибудь в другой раз я еще вернусь к этим проблемам, а пока я должен остановиться. Надеюсь, что прочитанная мной серия лекций позволила вам составить более ясное представление о современной концепции физического мира и пробудила в вас интерес к дальнейшим научным занятиям».

Трудно удержаться и не привести настоящую жемчужину «квантовой популяризации», в которой Георгий Антонович рассказывает об охоте в «квантовых джунглях».

«...На причал участники экспедиции прибыли как раз время для того, чтобы наблюдать за погрузкой на борт судна груза из нескольких длинных ящиков с ружьями сэра Ричарда и специальными пулями, изготовленными из свинца, который профессор получил от управляющего свинцовыми рудниками, расположенными неподалеку от квантовых джунглей. Мистер Томпкинс еще раскладывал вещи в каюте, когда мерная вибрация корпуса судна возвестила ему, что пароход отошел от причала. В морском путешествии всегда есть нечто неотразимо привлекательное, и мистер Томпкинс не заметил, как их судно пришвартовалось в очаровательном восточном городе — ближайшем к таинственным квантовым джунглям населенном пункте.

— Для путешествия по суше нам нужно приобрести слона, — объявил профессор. — Не думаю, что кто-нибудь из местных жителей рискнет отправиться с нами, поэтому управлять слоном придется нам самим. Полагаю, что вы, мистер Томпкинс, прекрасно справитесь с этой задачей. Я буду слишком поглощен научными наблюдениями, а сэр Ричард должен будет управляться со всем охотничьим снаряжением.

На душе у мистера Томпкинса было очень беспокойно, когда, придя на слоновый рынок, расположенный на окраине города, он увидел огромных животных, одним из которых ему предстояло управлять. Сэр Ричард, великолепно разбиравшийся в слонах, выбрал красивого крупного слона...

— Вы говорите, что это квантовый слон, а для меня он вполне обычный слон и ведет себя не так занятно, как бильярдные шары, сделанные из бивней некоторых из его сородичей. Например, почему он не расплывается по всем направлениям? — обратился мистер Томпкинс к профессору.

— Вы медленно схватываете суть дела, — заметил профессор. — Слон не расплывается из-за своей очень большой массы. Некоторое время назад я уже объяснял вам, что неопределенность в положении и скорости зависит от массы. Чем больше масса, тем меньше неопределенность. Именно поэтому квантовые законы не наблюдаются в обычном мире даже для таких легких тел, как пылинки, но становятся вполне заметными для электронов, которые в миллиарды

миллиардов раз легче пылинок. Но в квантовых джунглях квантовая постоянная гораздо больше, но все же недостаточно велика, чтобы порождать поразительные эффекты в поведении столь тяжелого животного, как слон. Неопределенность в положении квантового слона можно заметить, только если пристально взглядеться в его очертания. Возможно, вы заметили, что поверхность слоновой кожи не вполне определена и кажется несколько неотчетливо видимой. Со временем эта неопределенность увеличивается очень медленно. Мне кажется, что именно с этим обстоятельством связана местная легенда, будто у старых слонов из квантовых джунглей длинная шерсть. Я полагаю, что на не столь крупных животных, обитающих в квантовых джунглях, замечательные квантовые эффекты будут более заметными.

— Хорошо, что в эту экспедицию мы отправляемся не верхом на лошадях, — подумал мистер Томпкинс. — Ведь если бы мы вздумали отправиться в квантовые джунгли на лошадях, я никогда не мог бы сказать с уверенностью, где моя лошадь — у меня под седлом или в следующей долине.

После того как профессор и сэр Ричард со своими ружьями взгромоздились в корзину, укрепленную на спине слона, а мистер Томпкинс в новой для себя должности погонщика занял свое место на шее слона, крепко сжимая в руке некое подобие багра — стрекало, которым настоящие погонщики управляют своим подопечным, экспедиция тронулась в путь к таинственным джунглям.

От жителей города наши путешественники узнали, что добраться до джунглей можно примерно за час, и мистер Томпкинс, изо всех сил пытаясь сохранить равновесие между ушами слона, вознамерился с пользой использовать время, чтобы порасспросить у профессора о квантовых явлениях.

— Скажите, пожалуйста, — начал мистер Томпкинс, повернувшись к профессору, — почему тела с малой массой ведут себя столь необычно и как можно истолковать с точки зрения обычного здравого смысла ту квантовую постоянную, о которой вы все время говорите?

— О, — воскликнул профессор, — понять это не так уж трудно. Необычное поведение всех объектов в квантовом мире объясняется просто тем, что вы на них смотрите.

— Они настолько стыдливы? — улыбнулся мистер Томпкинс.

— „Стыдливы“ — не то слово, — сурово ответил профессор. — Суть дела в том, что всякий раз, производя любое наблюдение, вы непременно возмущаете движение наблюдаемого объекта. Раз вы узнаете что-то о движении какого-то тела, то это означает, что движущееся тело произвело какое-то действие на ваши органы чувств или на прибор, который вы использовали при наблюдении. В силу равенства действия и противодействия мы приходим к заключению, что ваш измерительный прибор также воздействовал на тело и, так сказать, „испортил“ его движение, введя неопределенность в положение и скорость тела.

— Если бы я тронул бильярдный шар пальцем, то, конечно, внес бы возмущение в его движение, — недоуменно произнес мистер Томпкинс. — Но я только посмотрел на него. Неужели этого достаточно, чтобы возмутить движение бильярдного шара?

— Разумеется, вполне достаточно! Вы же не можете видеть бильярдный шар в крошечной тьме. А если вы вынесете шар на свет, то лучи света, отражающиеся от шара и делающие его видимым, воздействуют на него (мы говорим о таком воздействии как о „давлении света“) и „портят“ движение шара.

— А что если я воспользуюсь очень тонкими и очень чувствительными приборами? Разве не смогу я сделать воздействие моих приборов на движущееся тело пренебрежимо малым?

— Именно так мы считали, когда у нас была только классическая физика, до открытия кванта действия. Но в начале XX столетия стало ясно, что действие на любой объект не может быть низведено до уровня ниже определенного предела, называемого квантовой постоянной и обозначаемого символом  $h$ . В обычном мире квант действия очень мал; в обычных единицах он выражается числом с двадцатью семью нулями после десятичной запятой. Квант действия становится существенным только для таких легких частиц, как электроны: из-за их очень малой массы на движении таких

частиц заметно сказываются и очень слабые воздействия. В квантовых джунглях, к которым мы сейчас приближаемся, квант действия очень велик. Это грубый мир, в котором деликатные действия невозможны. Если кто-нибудь в таком мире попытается погладить котенка, то тот либо вообще не ощутит никакой ласки, либо его шея будет сломана при первом же прикосновении.

— Все это хорошо, — задумчиво проговорил мистер Томпкинс, — но ведут ли тела себя прилично, то есть так, как обычно принято думать, когда на них никто не смотрит?

— Когда на тела никто не смотрит, — ответил профессор, — никто не может сказать, как они себя ведут. Ваш вопрос не имеет физического смысла.

— Должен признаться, — заметил мистер Томпкинс, — что все это изрядно смахивает на философию, а не на физику.

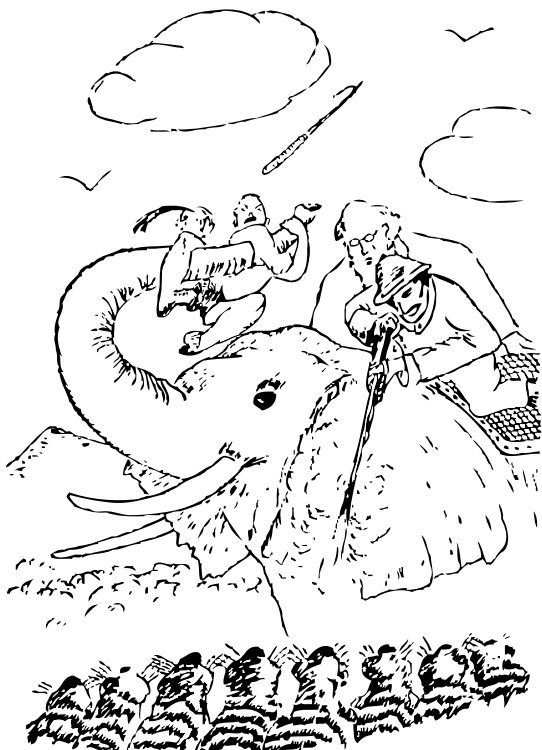
— Можете называть это философией, — профессор был явно задет, — но в действительности речь идет о фундаментальном принципе современной физики — никогда не говорить о том, чего не знаешь. Вся современная физическая теория основана на этом принципе, между тем как философы обычно упускают его из виду. Например, знаменитый немецкий философ Кант провел немало времени, размышляя о свойствах тел не таких, какими они „видятся нам“, а таких, какие они есть „в себе“. Для современного физика имеют смысл только так называемые „наблюдаемые“ (то есть принципиально наблюдаемые свойства), и вся современная физика основана на отношениях между наблюдаемыми свойствами. То, что невозможно наблюдать, хорошо только для праздных размышлений: вы можете придумывать что угодно, и плоды ваших размышлений нельзя ни проверить (то есть убедиться в их существовании), ни воспользоваться ими. Должен сказать, что...

В этот момент ужасный рев потряс воздух. Слоновил как вкопанный так внезапно, что мистер Томпкинс чуть не свалился. Огромная стая несколько размазанных тигров напала на слона, выпрыгнув из засады со всех сторон. Сэр Ричард схватил свое ружье и, прицелившись ближайшему тигру между глаз, спустил курок. В следующий момент

мистер Томпкинс отчетливо услышал, как сэр Ричард пробурчал себе под нос некое крепкое выражение, принятое среди охотников. Еще бы! Выстрел был метким, но пуля прошла сквозь голову тигра, не причинив тому ни малейшего вреда!

— Стреляй еще! — закричал профессор. — Не цельтесь! Постарайтесь создать вокруг себя как можно большую плотность огня! На нас напал только один тигр, но он распределен вокруг нашего слона, и наш единственный шанс на спасение состоит в том, чтобы поднять гамильтониан...

— А кто этот Гамильтониан? — спросил мистер Томпкинс, когда все немного успокоилось. — Знаменитый охотник, которого вы хотели поднять из могилы, чтобы он спас нас?



Огромная стая несколько размазанных тигров напала на слона



*«Профессор схватил другое ружье, и грохот выстрелов смешался с ревом квантового тигра. Мистеру Томпкинсу показалось, что прошла целая вечность, прежде чем весь этот ужасный шум затих. Одна из пуль „попала в цель“, и к величайшему удивлению мистера Томпкинса тигр, внезапно превратившийся в одного-единственного тигра, был с силой отброшен назад, и его мертвое тело, описав дугу в воздухе, приземлилось где-то за маячившей в отдалении пальмовой рощей».*

Г. Гамов. Приключения мистера Томпкинса

— О, прошу великодушно простить меня! — сказал профессор. — В пылу битвы я перешел на научную терминологию, которую вы не понимаете! Гамильтонианом принято называть математическое выражение, описывающее квантовое взаимодействие между двумя телами. Оно получило свое название в честь ирландского математика Гамильтона, который первым начал использовать эту математическую форму. Я хотел сказать, что, выпуская как можно больше пуль, мы можем увеличить вероятность взаимодействия между пулей и телом тигра. В квантовом мире вы не можете точно прицелиться и быть уверены, что попадете в цель. Из-за расплывания пули и цели всегда существует лишь отличная от нуля вероятность попадания в цель, но эта вероятность никогда не равна единице. В нашем случае мы выпустили по крайней мере тридцать пуль, прежде чем действительно попали в тигра, и тогда действие пули оказалось столь сильным, что тигра отбросило далеко назад. То же самое, только в меньших масштабах, происходит и в нашем привычном мире. Как я уже упоминал, в обычном мире, чтобы заметить нечто подобное, необходимо исследовать поведение таких малых частиц, как электроны. Возможно, вам приходилось слышать о том, что каждый атом состоит из сравнительно тяжелого ядра и нескольких электронов, обращающихся вокруг него. Сначала принято было думать, что движение электронов вокруг ядра совершенно аналогично движению планет вокруг Солнца, но более глубокий анализ показал, что обычные понятия, относящиеся к движению, слишком грубы для такой миниатюрной системы, как атом. Действия,

играющие важную роль внутри атома, по порядку величины сравнимы с элементарным квантом действия, и поэтому вся картина в целом сильно расплывается. Движение электрона вокруг атомного ядра во многих отношениях аналогично движению нашего квантового тигра, который в одиночку окружил нашего слона со всех сторон.

— А не стрелял ли кто-нибудь в электрон так, как мы стреляли в тигра? — спросил мистер Томпкинс.

— Стреляли, и не раз! Ядро само испускает иногда кванты света высокой энергии, или, что то же, элементарные порции действия света. В электрон можно выстрелить и снаружи атома, освещая атом пучком света. При этом все произойдет так же, как с тигром: многие кванты света пройдут через то место, где находится электрон, не оказав на того ни малейшего действия, пока, наконец, один из квантов света не столкнется с электроном и не выбьет его из атома. На квантовую систему нельзя воздействовать чуть-чуть: она либо вообще не испытывает никакого воздействия, либо претерпевает в результате воздействия сильные изменения.

— Как тот несчастный котенок, которого нельзя приласкать в квантовом мире, не рискуя нанести ему смертельное увечье, — заключил мистер Томпкинс.

— Взгляните вон туда! Газели! Множество газелей! — воскликнул сэр Ричард, поднимая свое ружье. И действительно, огромное стадо газелей показалось из бамбуковой рощи.

— Дрессированные газели, — подумал мистер Томпкинс. — Бегут строем, как солдаты на параде. Хотел бы я знать, уж не квантовый ли это эффект?

— Вы глубоко заблуждаетесь, — возразил профессор. — Здесь перед нами только одна маленькая газель, которая, испугавшись чего-то, мчится сквозь бамбуковую рощу. Дело в том, что „расплывание“ всех тел обладает одним свойством, аналогичным свойству обычного света: проходя через правильную систему отверстий („решетку“, например между стволами бамбука в роще), оно порождает явление дифракции, о котором вам, вероятно, приходилось слышать в школе. Поэтому мы говорим о волновом характере материи.



Сэр Ричард изготовился было стрелять, как вдруг профессор остановил его

*«Группа газелей быстро приближалась к слону, на котором восседали наши путешественники, и сэр Ричард изготовился было стрелять, как вдруг профессор остановил его.*

*— Не тратьте напрасну ваши охотничьи припасы, — сказал профессор. — Очень мало шансов попасть в животное, когда оно движется в дифракционной картине.*

*— Почему вы говорите не о животных, а об одном животном, удивленно спросил сэр Ричард. — Здесь по крайней мере несколько дюжин газелей!»*

Г. Гамов. Приключения мистера Томпкина

Но ни сэр Ричард, ни мистер Томпкинс не могли вспомнить, что же, собственно говоря, означает загадочное слово „дифракция“ и разговор оборвался.

Углубившись в дебри квантовых джунглей, наши путешественники повстречали множество других интереснейших явлений, например познакомились с квантовыми москитами. Определить местонахождение этих насекомых в пространстве было почти невозможно из-за их малой массы. Очень забавны были квантовые обезьяны.

Но вот впереди показалось что-то напоминающее туземное селение.

— Я не знал, что в этих местах живут люди, — заметил профессор. — Судя по шуму, у них какое-то празднество. Вы только прислушайтесь к неумолкаемому звону колокольчиков.

Различить отдельные фигуры туземцев, исполнявших вокруг большого костра какой-то дикий танец, было очень трудно. Из толпы, куда ни глянь, всюду поднимались темно-коричневые руки с колокольчиками всех размеров. Когда путешественники приблизились, все, включая хижины и окружавшие селение большие деревья, начало расплываться. Звон колокольчиков стал невыносимым для мистера Томпкинса. Он протянул руку, схватил что-то и отбросил в сторону. Будильник разбил стакан с водой, стоявший на ночном столике, и поток холодной воды привел мистера Томпкинса в чувство. Он вскочил и принялся быстро одеваться. Через полчаса ему нужно было быть в банке».

## Восьмеричный путь кварков

*«Стандартная модель останавливается на уровне кварков в детализации строения материи, из которой состоит наша Вселенная; кварки — самое фундаментальное и элементарное в ее структуре. Однако некоторые физики-теоретики полагают, что „луковицу можно лущить и дальше“, но это уже чисто умозрительные построения. По моему личному мнению, Стандартная модель правильно описывает строение вещества, и хотя бы в этом направлении наука дошла до логического завершения процесса познания».*

Д. Трефил. 200 законов мироздания



Мюррей Гелл-Манн

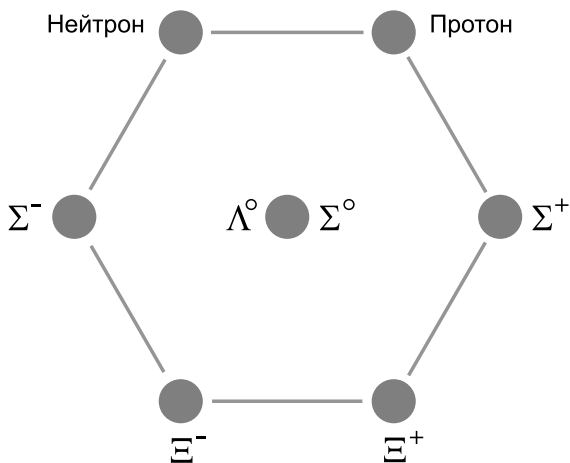
*«Кварки вошли в физику подобно троянскому коню. Придумали их два американских теоретика, Мюррей Гелл-Манн и Джордж Цвейг, для того, чтобы сделать более симметричной составленную ими таблицу элементарных частиц. Название для новых частиц было взято из романа ирландского писателя Джеймса Джойса „Поминки по Финнегану“. Мало кто поначалу верил в реальность кварков. Уж очень необычными были их*

*свойства. Большинство ученых считали их всего лишь неким теоретическим курьезом, временными строительными лесами на пути к более совершенной теории. Однако не успели физики оглянуться, как кварки проникли буквально всюду. Неожиданно для всех оказалось, что с их помощью очень просто и наглядно объясняются самые различные экспериментальные факты и сильно упрощаются теоретические вычисления. Без кварков теперь просто невозможно обойтись — так же, как, например, в химии нельзя обойтись без атомов и молекул...»*

В. С. Барашенков. Кварки, протоны, Вселенная

В 1930-х годах все чаще стали возникать умозрительные схемы сложного и сверхсложного строения атомарных структур, особенно после открытия в 1932 году британским физиком Джеймсом Чедвиком (1891–1974) следующей элементарной составляющей атомного ядра — микрочастицы нейтрона. Получая Нобелевскую премию 1935 года за открытие нейтрона, сэр Чедвик удовлетворенно отметил, что «судя по всему картина атомного мира начинает упорядочиваться». Микромир казался относительно простым и рационально состоящим из трех элементарных частиц: электронов, вращающихся вокруг протонно-нейтронного ядра. Однако эйфория длилась недолго, и вскоре из разных

лабораторий и исследовательских центров стали поступать сообщения о все новых элементарных компонентах совсем уже не элементарного микромира. Некоторые частицы, подобные неуловимому нейтрину, вначале открывали «на кончике пера» теоретики, анализируя результаты различных реакций столкновения уже известных компонентов. Другие непрерывно обнаруживались опытным путем, и уже скоро пришлось менять сам смысл первоначального термина «элементарная частица» как нечто абсолютно элементарного. В конце 1950-х годов стало окончательно ясно, что сотни новых микрочастиц с похожими свойствами должны обладать какой-то внутренней «субэлементарной» структурой, вовсе не являясь по-настоящему элементарными.



Восьмеричный путь для кварков (в среднем ряду — три сигма-гиперона и парный нейтральному сигма-гиперону лямбда-гиперон; в нижнем ряду — два кси-гиперона (отрицательно и положительно заряженные))

*«Схематическое изображение одной из восьмеричных групп адронов. В нижнем ряду — два кси-гиперона (отрицательно и положительно заряженные); в среднем ряду — три сигма-гиперона и парный нейтральному сигма-гиперону лямбда-гиперон; в верхнем ряду — нейтрон и протон. Интересно, что по своим свойствам гиперон  $\Lambda^0$  ничем не отличается от гиперона  $\Sigma^0$ , однако это разные частицы: они являются*

*зеркальным отражением друг друга с точки зрения их структурного строения».*

Д. Трефил. 200 законов мироздания

Постепенно сформировалась гипотеза, что «элементарные» частицы в свою очередь построены из очень специфических микрообъектов. Одним из первых здесь достиг значительного успеха Мюррей Гелл-Манн (р. 1929).

В 1961 году этот молодой американский теоретик разделил все известные к тому времени частицы на несколько семейств по восемь членов, назвав свою систему «восьмеричным путем». В названии иронично обыгрывался аналогичный термин буддизма, означающий восемь ступеней погружения в нирвану.

Вскоре систематика Гелл-Манна была подтверждена экспериментально открытием предсказанной ранее неизвестной частицы — омега-минус-гиперона. Но настоящий звездный час Гелл-Манна пришел в 1963 году, когда он предположил, что в отдельные семейства частицы сводит их составная субструктура. Каждая из частиц должна состоять из различных «сверхэлементарных» компонентов с дробным электрическим зарядом протона. В наиболее законченном варианте эта идея была впервые выдвинута Мюрреем Гелл-Манном и независимо от него Джорджем Цвейгом (р. 1937) в 1964 году, в 1969 году Гелл-Манн получил Нобелевскую премию по физике за открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействий. Но еще в 1959 году выдающийся советский кристаллофизик Иван Степанович Желудев (1921–1996), исходя из принципов сохранения и симметрии, предложил систематизацию элементарных частиц, состоящих из «элементарных возмущений», и в основных чертах предвосхитил модели Гелл-Манна и Цвейга.

*«Сегодня согласно теории предсказывается существование шести разновидностей кварков, и в лабораториях уже открыты элементарные частицы, содержащие все шесть типов. Самые распространенные кварки — верхний, или протонный (обозначается  $u$  — от английского  $up$ , или  $p$  —  $proton$ ),*

*и нижний, или нейтронный (обозначается  $d$  — от *down*, или  $n$  — от *neutron*), поскольку именно из них состоят единственные по-настоящему долгоживущие адроны — протон ( $uud$ ) и нейтрон ( $udd$ ). Следующий дублет включает странные кварки  $s$  (*strange*) и очарованные кварки  $c$  (*charmed*). Наконец, последний дублет состоит из красивых и истинных кварков —  $b$  (*om beauty*, или *bottom*) и  $t$  (*om truth*, или *top*). Каждый из шести кварков, помимо электрического заряда, характеризуется изотопическим (условно направленным) спином. Наконец, каждый из кварков может принимать три значения квантового числа, которое называется его цветом (*color*) и обладает ароматом (*flavor*). Конечно же, кварки не пахнут и не имеют цвета в традиционном понимании, просто такое название сложилось исторически для обозначения их определенных свойств».*

Д. Трефил. 200 законов мироздания

Слово «кварк» было заимствовано Гелл-Манном из романа Дж. Джойса «Поминки по Финнегану». В одном из его эпизодов чайки выкрикивают странную фразу: «Три кварка для Мастера Марка!». Собственно говоря, здесь слово «кварк» можно понимать всего лишь как подражание крику морских птиц. Еще одна версия связывает это необычное слово с немецким словом «чепуха». Между прочим, Цвейг также предложил новый термин — «туз», но он не прижился, поскольку тузов в карточной колоде четыре, а кварков в первоначальной модели было три вида.

Новые кварковые обитатели микромира оказались весьма странными, они не только обладают дробным электрическим зарядом, но и принципиально невидимы по одиночке, поскольку их природа запрещает им пребывать в свободном, не связанном друг с другом состоянии. Поэтому о самом факте их связанного «внутричастичного» существования можно судить только по специфическим сторонам поведения самих элементарных частиц, в состав которых они входят. Этот странный феномен назван конфайнментом. Конфайнмент — это пленение кварков внутри адронов. Представим, что имеется длинный эластичный шнур, каждый конец которого представляет собой кварк. Если приложить к такой



системе достаточно энергии — растянуть и порвать шнур, он порвется где-то посередине, и получится два резиновых шнура покороче, и у каждого из них опять окажется два конца. То же и с кварками: какими бы энергиями ни воздействовали на элементарные частицы, стремясь «выбить» из них кварки, ничего не получится: частицы будут распадаться на другие частицы, сливаться, перестраиваться, но свободных кварков мы не получим.

Спустя 10 лет Гелл-Манн независимо от других ученых предположил существование глюонов — частиц с нулевой массой, которые осуществляют взаимодействие между кварками.

**Поколения кварков**

Символ	Название		Заряд	Масса
	рус.	англ.		
<b>Первое поколение</b>				
d	Нижний	Down	$-1/3$	$\sim 5 \text{ МэВ}/c^2$
u	Верхний	Up	$+2/3$	$\sim 3 \text{ МэВ}/c^2$
<b>Второе поколение</b>				
s	Странный	Strange	$-1/3$	$95 \pm 25 \text{ МэВ}/c^2$
c	Очарованный	Charm (charmed)	$+2/3$	$1,8 \text{ ГэВ}/c^2$
<b>Третье поколение</b>				
b	Прелестный	Beauty (bottom)	$-1/3$	$4,5 \text{ ГэВ}/c^2$
t	Истинный	Truth (top)	$+2/3$	$171 \text{ ГэВ}/c^2$

В силу еще не выясненных досконально причин кварки неким естественным образом группируются в три так называемые поколения. В каждом поколении один кварк обладает зарядом  $+2/3$ , а другой — зарядом  $-1/3$ . Подразделяясь на поколения, кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях. Сильные взаимодействия, состоящие в обмене глюонами, могут изменять цвет кварка, но не меняют его аромата. Слабые взаимодействия, наоборот, не меняют цвет, но изменяют аромат. Необычные свойства сильного взаимодействия приводят к тому, что одиночный кварк не может удалиться

на какое-либо заметное расстояние от других кварков, а значит, кварки не могут наблюдаться в свободном виде (конфайнмент).

Три поколения материи (Фермионы)

	I	II	III	
Масса	2,4 МэВ	1,27 ГэВ	171,2 ГэВ	0
Заряд	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Спин	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Название	Верхний	Очаровательный	Истинный	Фотон
Кварки	4,8 МэВ $-\frac{1}{3}$	104 МэВ $-\frac{1}{3}$	4,2 ГэВ $-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	Нижний	Странный	Прелестный	Глюон
Лептоны	<2,2 эВ	<0,17 МэВ	<15,5 МэВ	91,2 ГэВ
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	Электронное нейтрино	Мюонное нейтрино	Тау нейтрино	Слабое взаимодействие
	0,511 МэВ	105,7 МэВ	1,777 ГэВ	80,4 ГэВ
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	Электрон	Мюон	Тау	Слабое взаимодействие

Бозоны (переносчики взаимодействия)

Стандартная модель элементарных частиц

*«Стандартной моделью сегодня принято называть теорию, наилучшим образом отражающую наши представления об исходном материале, из которого изначально построена Вселенная. Она же описывает, как именно материя образуется из этих базовых компонентов, и силы и механизмы взаимодействия между ними...»*

*Стандартная модель в обобщенном виде представляет собой теорию строения Вселенной, в которой материя состоит из кварков и лептонов, а сильные, электромагнитные и слабые взаимодействия между ними описываются теориями великого объединения. Такая модель, очевидно, не полна, поскольку не включает гравитацию. Предположительно, более полная теория со временем все-таки будет разработана,*

*а на сегодня Стандартная модель — это лучшее из того, что мы имеем».*

Д. Трефил. 200 законов мироздания

Последние теоретические исследования квантов выявили, что при определенных температурах и сверхвысоких плотностях ядерного вещества оно может перейти в совершенно новое состояние — кварк-глюонную плазму. Это поистине удивительное состояние материи: нет ни отдельных ядерных частиц, ни многокварковых объединений, которых физики называют «мешками». Получается поистине фантастический образ некоего гигантского кваркового мешка, наполненного возбужденным кварковым морем. Сегодня поисками кварковой плазмы занимаются в лабораториях, обладающих достаточно мощными ускорителями тяжелых ионов. Главная идея подобных опытов в том, что при столкновении тяжелых ионов, включающих множество ядерных частиц — нуклонов, образуется громадное количество осколочных мезонов — частиц, состоящих из четного числа кварков и антикварков, которые и могут перейти при соответствующих условиях в плазменное состояние.

Кварк-глюонная плазма может существовать в природе, организуясь в очень плотных астрономических объектах — кварковых звездах и, вероятно, реализуясь во «вселенскую» среду на определенном этапе Большого взрыва.

Впервые гипотезу о таких поразительных макроквантовых объектах высказал еще в 1965 году замечательный советский теоретик Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904–1994), он писал: «Как известно, при сжатии звезды после образования вырожденного электронного газа происходит „вдавливание“ электронов в протоны, развал ядер и переход к нейтронной звезде... Естественно предполагать, что выгодным окажется переход к еще более тяжелым барионным резонансам и, наконец, гипотетическим субчастицам: кваркам и т. д.

Переход к кваркам соответствует сильному внутреннему возбуждению барионов, приводящему в конце концов к их развалу на фундаментальные субчастицы».

## Сверхпроводимость и лазеры

*«...Трудно назвать другую наблюдаемую и измеримую физическую величину, которая обращалась бы в такой же „круглый нуль“, как сопротивление сверхпроводника ниже критической температурной точки. Ток в замкнутом контуре из сверхпроводящего материала с отключенным питанием может циркулировать буквально неделями. Если записать нуль и заменить все буквы на этой странице нулями после запятой, а потом поставить единицу, то и получившееся число (в Омах на сантиметр) будет больше удельного сопротивления настоящего сверхпроводника».*

Н. Работнов. Ларчик можно не открывать:  
Квантовый туннельный эффект.  
Полвека загадок и открытий

*«...Но еще в 1911 году, когда находилась в „младшем школьном возрасте“ и мало что могла объяснить в твердом теле из-за сложности этого объекта, голландский ученый Г. Камерлинг-Оннес экспериментально обнаружил факт, поразивший не только физиков, но и всех, кто хоть сколько-нибудь интересовался электричеством. Оказалось, что при очень низких температурах электрическое сопротивление некоторых металлов, исправно и плавно уменьшавшееся при охлаждении, с достижением некоторого критического значения температуры вдруг скачком исчезало начисто. Обращалось в нуль...»*



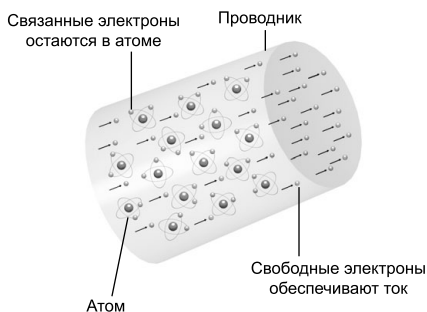
Гейке Камерлинг-Оннес

Н. Работнов. Ларчик можно не открывать:  
Квантовый туннельный эффект.  
Полвека загадок и открытий

Пожалуй, все слышали о явлении сверхпроводимости, открытом около 100 лет назад. Суть его в том, что у некоторых материалов при достаточно низких температурах отсутствует электрическое сопротивление, и они отталкивают от себя магнитное поле.

Долгое время это удивительное макроквантовое явление, так как его сравнительно легко наблюдать в макромире, было неразрывно связано с низкими и даже сверхнизкими температурами. Еще недавно в своей повести о сверхпроводниковых процессах «Электроны шагают в ногу, или История сверхпроводимости» популяризатор научно-технических достижений В. И. Рыдник писал: «Мы начнем рассказ о сверхпроводимости с краткой истории достижения низких температур. Эту историю нередко называют „путем к абсолютному нулю“, она сама по себе чрезвычайно интересна. Может быть, лучше было бы называть не восхождением, а спуском в глубокую пропасть температур, на дне которой покоится голубоватый и обманчиво застывший мир.

В этом мире хозяйничают квантовые законы. Не замутненные хаосом тепловых движений частиц вещества, эти законы при низких температурах проявляются в уникальной упорядоченности движений, но движений совершенно необычных. Одним из их видов и является сверхпроводимость — прохождение электрического тока по проводникам без всякого сопротивления».



Электрический ток в металлах

*«Свободные электроны в вакууме, обладая одинаковыми по значению и знаку электрическими зарядами, отталкиваются*

*друг от друга по закону Кулона. Они не могут образовать связанного состояния, объединившись в „биэлектрон“, который был бы уже бозоном. Такое образование возможно только для частиц, испытывающих взаимное притяжение, но электроны в твердом теле нельзя считать совсем свободными, они там движутся в поле фононов — рождают их, рассеивают, поглощают, обмениваются ими. Это может привести к изменению в наблюдаемом взаимодействии между самими электронами».*

Н. Работнов. Ларчик можно не открывать: Квантовый туннельный эффект. Полвека загадок и открытий

Впервые о сверхпроводимости заговорили в ученом мире после заседания Королевской академии наук в Амстердаме 28 апреля 1911 года. В этот день самый известный в мире «укротитель низких температур» голландский физик Гейке Камерлинг-Оннес (1853–1926) рассказал своим коллегам об очень необычном эффекте, открытом им при охлаждении жидким гелием ртути. Электрическое сопротивление ртути внезапно скачкообразно исчезало!

В уже упоминавшейся книге В. И. Рывника можно прочитать: «С этого времени начинается почти полувековое восхождение к пониманию сверхпроводимости и первому практическому ее использованию. Но путь к „базовому лагерю“, с которого начинается почти полувековое восхождение, был еще более долгим: он занял два с половиной столетия.

Те, кто шел по нему, естественно не предвидели конечной цели. Будучи настоящими исследователями, они и не могли ставить ее перед собой. Они хотели немногого: изучить и понять обыкновенные, каждодневно наблюдаемые тепловые и электрические явления. В те далекие годы никто не прослеживал связь между теплотой и электричеством. Лишь во второй половине XIX века между ними начали возводить мосты для их совместного практического использования».

Открытие сверхпроводимости было тем более неожиданным, что принципиально противоречило существующей в те времена классической электронной теории металлов.

Тем не менее оно было не случайным, именно Камерлинг-Оннес был лидером в гонке к абсолютному нулю температур и именно ему удалось впервые решить труднейшую научно-техническую задачу получения жидкого гелия и заглянуть в неведомый мир сверхохлажденных веществ.

К концу XIX века связь между электрическим сопротивлением, напряжением и силой тока была прекрасно известна, а рабочей гипотезой принято, что электрический ток в металлах переносят отрицательно заряженные «корпускулы электричества» — электроны. Первое теоретическое описание электрического тока на атомарном уровне сделал в 1900 году немецкий физик Пауль Друде (1863–1906).

Друде прозорливо предположил, что внутри металла свободные электроны, заполняющие все межатомное пространство между атомными остовами ионов металла, ведут себя подобно идеальному газу. Ученый применил уравнение состояния идеального газа, справедливо сопоставив соударения электронов и хаос теплового движения молекул идеального газа. Современная электронная теория проводимости сводится к течению газа свободных электронов сквозь трехмерную кристаллическую решетку из атомов металла, часто практически не тормозящую их движение. При включении внешнего источника напряжения свободные электроны приходят в упорядоченное равноускоренное движение, однако тут же перестают ускоряться из-за множества столкновений или, правильнее сказать, рассеиваний на атомах решетки. При этом и сами металлические ионы повышают частоту колебания — проводник разогревается вследствие термоэлектрического эффекта.

При этом сами электроны при комнатной температуре в обычных алюминиевых или медных проводниках тормозятся до скорости миграции несколько миллиметров в секунду. Световая скорость передачи электрических сигналов связана с движением электрического поля, создающего разность потенциалов, единовременно «сдвигающую» с места абсолютно все свободные медлительные электроны.

Долгое время после открытия сверхпроводимости считалось, что проводник в этом состоянии все же должен сохранять сверхмалое остаточное сопротивление, которое

просто не могут зафиксировать приборы. Однако по современным представлениям, в сверхпроводящем состоянии сопротивление именно стремится к нулю, так что его зафиксировать практически невозможно. Этот любопытный факт несколько раз пытались проверить, замыкая циркуляцию тока в сверхпроводящем контуре. При этом ток без всяких изменений мог существовать годами, и никакими самыми точными измерениями не удавалось зафиксировать его ослабление.

Камерлинг-Оннес вовсе не старался, подобно некоторым современным исследователям, сохранить за собой монополию на низкотемпературные эксперименты, скорее наоборот, этот замечательный голландский ученый всячески способствовал аналогичным опытам в других лабораториях, готовя для них кадры и помогая с оборудованием. Во многом благодаря этому сверхпроводимость была обнаружена в других металлах и их соединениях.

1933 год принес открытие новых фундаментальных свойств сверхпроводящих состояний, сделанное Вальтером Фрицем Мейснером (1882–1974) и Робертом Оксенфельдом (1901–1993). Немецкие физики обнаружили, что в определенных условиях может происходить полное выталкивание магнитного поля из объема массивного сверхпроводника, а само явление было названо эффектом Мейснера. Впервые его природу объяснили братья Фриц Лондон (1900–1954) и Хайнц Лондон (1907–1970). С помощью квантовой механики немецкие теоретики вывели «уравнение Лондонов», показав, что магнитное поле проникает внутрь сверхпроводника строго на фиксированную («лондоновскую») глубину, обычно составляющую сотые доли микрометра.

За последующие полвека после открытия сверхпроводимости была проведена гигантская экспериментальная работа по накоплению опытных данных, но физическая природа этого удивительного явления была еще не понята. Между тем над тайной сверхпроводимости бились лучшие теоретики того времени, такие как академики Л. Д. Ландау (1908–1968), В. Л. Гинзбург (1916–2010), Н. Н. Боголюбов (1909–1992) и Р. Фейнман. Например, знаменитый американский физик



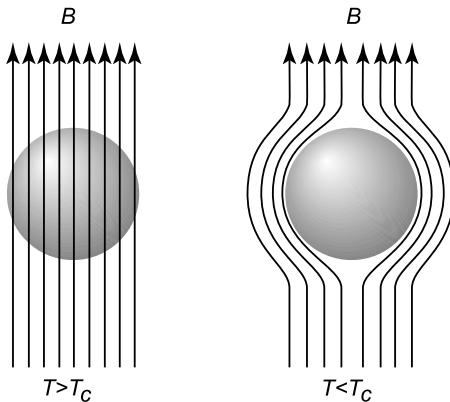
Фейнман отмечал, что «теория сверхпроводимости — это настолько сложная задача, что решить ее, скорее всего, невозможно». Качественный прорыв в понимании природы сверхпроводимости произошел во второй половине 1950-х годов, когда американские физики Джон Бардин (1908–1991), Леон Купер (р. 1930) и Джон Шиффер (р. 1931) предложили свою теорию сверхпроводниковых явлений.

Прежде всего эта группа теоретиков показала, что два электрона в кристалле могут образовать связанные состояния, обмениваясь особыми квазичастицами, связанными с колебаниями кристаллической решетки — фононами. Впоследствии такие сверхпроводящие «биэлектроны» были названы в честь предложившего их Купера куперовскими парами. Так возникла теория Бардина — Купера — Шриффера, а ее авторы стали нобелевскими лауреатами 1972 года за создание теории сверхпроводимости (БКШ-теории). При этом Бардин двукратный нобелевский лауреат (первую премию он получил за разработку транзистора).

Таким образом, теория БКШ показала, что сверхпроводимость связана с возникновением какого-то притяжения между электронами проводимости. Природа этого микроскопического явления, проявляющего себя макроскопическим образом, носит чисто квантовый характер. При этом сами куперовские пары пребывают в особом, квантовом состоянии, переносят электроток без малейших потерь. Размеры таких сверхпроводящих биэлектронов достигают весьма внушительных в микромире масштабов, превышая сотни, а иногда и тысячи межатомных дистанций. Конечно, определяющее значение при этом имеет сверхнизкая температура, «замораживающая» ионные остовы атомов металлов, они практически прекращают тепловые колебания и в некотором приближении становятся стационарными. Если к такому сверхпроводнику приложить разность потенциалов, то электроны проводимости начнут свое медленное движение. При этом один из них, «проскакывая» между положительно заряженными ионами, вызовет их сближение, сопровождаемое появлением кратковременного (пока ионы вновь не разойдутся) дополнительного положительного потенциала, к которому тут же притянется вторая половинка

куперовской пары. Создавая друг другу выгодные энергетические условия, компоненты куперовских пар начинают солидарное движение среди ионов атомно-кристаллической структуры сверхпроводника.

Тут важно понять, что при сверхнизких температурах все электроны образуют куперовские пары. Теперь вообразим, что каждая такая пара представляет собой связку наподобие вермишели, на каждом конце которой находится заряд-электрон, что перед нами целая миска подобной «вермишели»: она вся состоит из переплетенных между собой куперовских пар. Иными словами, электроны в сверхпроводящем металле попарно взаимодействуют между собой, и на это уходит вся их энергия. Следовательно, у электронов просто не остается энергии на взаимодействие с ядрами атомов кристаллической решетки. В итоге доходит до того, что электроны замедляются настолько, что им больше нечего терять (энергетически), а окружающие их ядра «остывают» настолько, что они более не способны «тормозить» свободные электроны. В результате электроны начинают перемещаться между атомами металла, практически не теряя энергии в результате соударения с атомами, и электрическое сопротивление сверхпроводника устремляется к нулю.



Магнитные свойства сверхпроводников — эффект Мейснера  
 ( $B$  — магнитное поле;  $T$  — текущая температура;  $T_c$  — критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние)

*«Открытие Мейснера и Оксенфельда, сделанное на сплошных образцах из олова и свинца, состояло в том, что... когда охлаждался образец с заранее введенным в него магнитным потоком, в момент наступления сверхпроводящего перехода этот поток мгновенно выталкивался из образца. Магнитная индукция сразу обращалась в нуль... Иными словами, сверхпроводники оказывались идеальными диамагнетиками: они выталкивали из себя магнитное поле во всех случаях, независимо от того, в каких условиях оно к ним прикладывалось.*

*Стало ясно, что сверхпроводники — это нечто большее, нежели вещества с бесконечной электропроводностью. В отличие от идеальных проводников они не позволяют магнитному полю проникнуть в их толщу. Разумеется, это имеет место до тех пор, пока поле не достигает критического значения. Но критическое поле просто вызывает исчезновение сверхпроводимости».*

В. Рыдник. Электроны шагают в ногу,  
или История сверхпроводимости

Уже после первого сообщения Камерлинг-Оннеса «Исчезновение сопротивления ртути» в Нидерландскую академию наук в научных кругах стали обсуждать возможные перспективы практического применения открытого явления. На первый взгляд они казались просто безграничными: создание сверхмощных электромагнитов, линий передачи электроэнергии без потерь на сопротивление, динамо-машин и трансформаторов с невиданными характеристиками и прочих чудес технического прогресса. Однако более детальный анализ на пути практической реализации сверхпроводимости выявил два очень существенных препятствия. Во-первых, сверхпроводящее состояние возникало лишь при сверхнизких температурах, для достижения которых требовался остродефицитный жидкий гелий. Запасы его довольно ограничены, поэтому многообещающие «сверхпроводящие» проекты оказались совершенно нерентабельны. Второе обстоятельство, которое обнаружил еще сам Камерлинг-Оннес, было связано с тем, что проводники очень чувствительны в сверхпроводящем состоянии к магнитным полям, которые по достижению некоего критического значения тут же разрушали

сверхпроводящее состояние. Отсюда же следовало и жесткое ограничение на величины протекающих в сверхпроводящем состоянии токов.

Впоследствии важную роль для технического внедрения сверхпроводимости сыграло открытие выдающимся физиком Алексеем Алексеевичем Абрикосовым (р. 1928) весьма необычного сверхпроводящего состояния в магнитном поле. Академик Абрикосов теоретически доказал, что магнитное поле может в принципе проникнуть в объем сверхпроводниковой структуры в виде неких квантовых вихрей тока, сердцевина которых соответствует нормальной фазе, а периферия — сверхпроводящей. После этого все сверхпроводники по их поведению в магнитном поле стали разделять на два рода: первый и второй. Позднее было доказано, что сверхпроводники первого рода можно преобразовать во второй род путем введения в них определенных химических примесей или других специфических дефектов кристаллической решетки. В 2003 году академик А. А. Абрикосов совместно с В. Л. Гинзбургом и Энтони Леггетом (р. 1938) получил Нобелевскую премию по физике за основополагающие работы по теории сверхпроводников и сверхтекучих жидкостей.

Некоторые сверхпроводники второго рода были способны выдерживать очень большие токи и громадные магнитные поля. Так было преодолено одно из основных препятствий к использованию сверхпроводниковых структур и соединений. Однако проблема повышения критической температуры оставалась, и если критические магнитные поля в 1960-е годы возросли в тысячи раз (по сравнению с первыми опытами Камерлинг-Оннеса), то критическая температура для отдельных сложных интерметаллических соединений возросла лишь на пару десятков градусов Кельвина. А это не исключало использования в работе сверхпроводящих устройств все того же дорогостоящего жидкого гелия.

Повышение критической температуры сверхпроводящего перехода стало особенно актуальным после того, как в 1962 году Брайан Джозефсон (р. 1940) обнаружил принципиально новый квантовый эффект, отмеченный Нобелевской премией 1973 года за теоретические исследования по сверхпроводимости и туннелированию, в частности за открытие

явления, получившего название эффекта Джозефсона. Открытие Джозефсона существенно расширило область применения сверхпроводников в микроэлектронике, электронной технике и медицине.

Суть эффекта Джозефсона состоит в том, что «сэндвич» из двух сверхпроводящих слоев, разделенных тончайшей прослойкой изолятора буквально в несколько атомов толщиной, ведет себя как единая квантовая макросистема. Квантовая физика показывает, что в такой системе куперовские пары будут преодолевать изолирующий барьер, называемый переходом Джозефсона, даже в отсутствие приложенного напряжения. Если попробовать приложить напряжение по обе стороны перехода, согласно квантовомеханическим закономерностям куперовские пары электронов будут перемещаться по переходу Джозефсона сначала в одном направлении, а затем в обратном, в результате чего возникнет переменный ток, частота которого увеличивается по мере роста напряжения. Эта разновидность явления получила название нестационарного эффекта Джозефсона.

Ситуация кардинально изменилась в 1986 году, когда два швейцарских физика — Карл Александр Мюллер (р. 1927) и Георг Беднорц (р. 1950) — обнаружили способность керамики на основе оксидов меди, лантана и бария переходить в сверхпроводящее состояние при 30 К. Уже через год (редчайший случай!) они стали лауреатами Нобелевской премии за важный прорыв в физике, выразившийся в открытии сверхпроводимости в керамических материалах.

Любопытно, что ученые начали изучать свойства металлокерамики еще в 1970-х годах, однако ничего необычного не нашли и отложили на полку, не подозревая о скрытых возможностях. Подобные химические соединения были синтезированы еще в 1978 году, но их электропроводность была исследована лишь до температуры 77 К, что соответствует кипению жидкого азота. Открытое Мюллером и Беднорцем явление получило название высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП) и сразу же привлекло всеобщее внимание не только самим фактом выхода к «азотным температурам», но и тем, что металлоксидные керамики — сугубо диэлектрические и полупроводниковые соединения. Хотя температура

в 30 К может показаться довольно низкой, она намного выше, чем температура перехода в сверхпроводящее состояние для ниобиевых сплавов (примерно 23 К), широко применяемых в науке и промышленности.

Дальнейшие события развивались стремительно. В феврале 1987 года была синтезирована металлокерамика из оксидов бария, иттрия и меди с критической температурой 93 К, превышающей точку кипения жидкого азота. В январе 1988 года японские физики синтезируют серию соединений с бериллием с критической температурой 108 К, а месяц спустя немецкие технологи доводят ее до 125 К. Наконец, в 1993 году русские физико-химики, экспериментируя с рядом ртутисодержащих сверхпроводников, достигли рекордной критической температуры в 135 К; при очень высоком внешнем давлении температура перехода возрастала до 164 К, что уже довольно близко к минимальной температуре (около 90 °С, или 183 К), зарегистрированной в природных условиях на поверхности Земли.

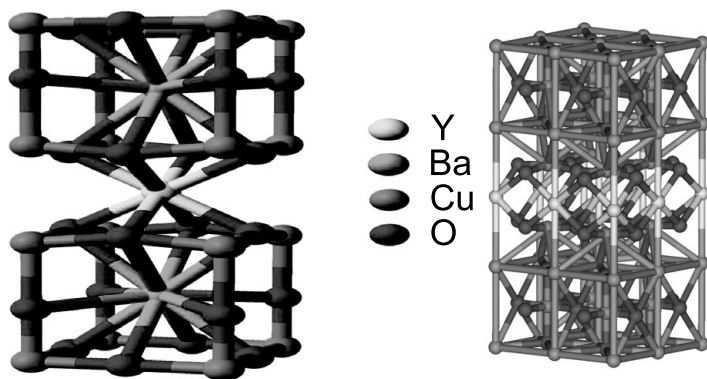
Сегодня хорошо известно более полусотни оригинальных слоистых ВТСП-соединений, причем время от времени появляются сенсационные сообщения об открытии новых вариантов металлооксидных керамик с комнатной критической температурой. К сожалению, все они признаны несостоявшимися, поскольку новые рекордсмены оказались крайне нестабильными и повторить эксперименты невозможно.

Несмотря на то что после экспериментаторов за дело принялись теоретики, природа ВТСП во многом еще скрыта от нас и сам механизм образования сверхпроводимости в общем не понят.

В свое время автору посчастливилось быть аспирантом видного физика-материаловеда Льва Самойловича Палатника и заниматься теоретическим изучением высокотемпературных сверхпроводников — металлокерамик. Профессор Л. С. Палатник обратил внимание на то, что в составе всех сверхпроводящих высокотемпературных металлокерамик обязательно присутствуют вакансии и ионы меди, которые выполняют роль микроскопических магнетиков. Разумеется, не следует думать, что любой материал, содержащий

подобные атомно-молекулярные магнитные диполи, есть ВТСП-соединение. Подобные ионы-магнетики активно взаимодействуют друг с другом и образуют собственную упорядоченную подструктуру, включающую и вакансионные узлы. В итоге ВТСП-керамики предстают как вложенные друг в друга подрешетки из ионов и вакансий.

Между тем и сами электроны проводимости в магнитных материалах обладают некоторым дополнительным магнитным моментом, зависящим от того, как выглядит магнитная подрешетка данного вещества. Подобная зависимость энергии свободных электронов от магнитных параметров кристалла может иметь важное значение.



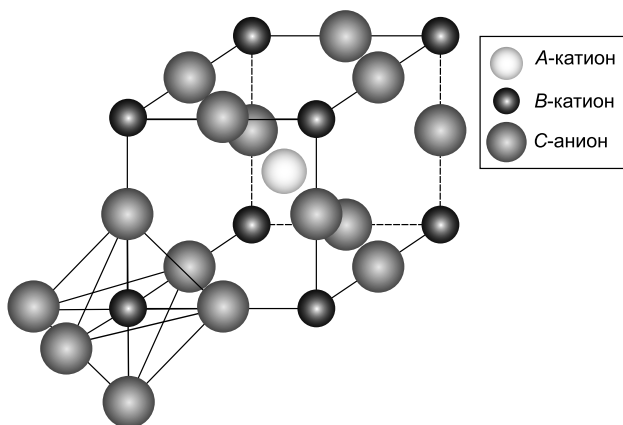
Структура высокотемпературного сверхпроводника (см. вклейку)

*«Наша первая реакция была проверить, не допустили ли мы ошибки измерения. В истории сверхпроводимости уже появлялось столько много сенсационных результатов (которые затем не подтверждались), что у нас были все основания сомневаться в таком открытии!»*

К. Мюллер, Ж. Беднорц, Д. Тарновски. Открытие высокотемпературной сверхпроводимости

Поскольку магнитное упорядочение в кристалле влияет на энергию электронов проводимости, должно быть в чем-то справедливо и обратное утверждение, что и электронная подсистема оказывает некоторое влияние на магнитное

упорядочение. В силу своей микроскопичности электронные подсистемы могут эффективно воздействовать только на локальные области магнитной подрешетки и именно там, где располагаются вакансионные образования.



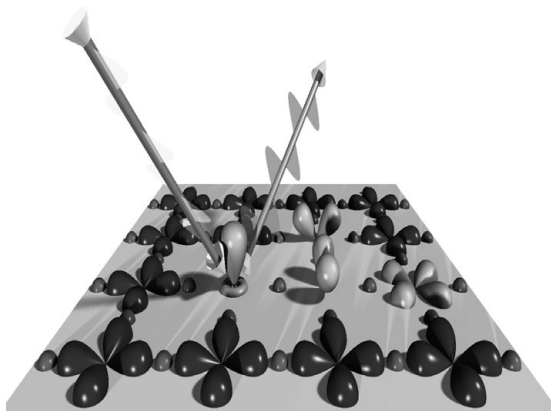
Кристаллическая структура перовскита  
( $A$  — кальций,  $B$  — титан,  $C$  — кислород) (см. вклейку)

Существуют и природные аналоги сверхпроводящих керамик, это так называемый минерал *перовскит* с химической формулой  $\text{CaTiO}_3$  (титанат кальция).

Если допустить, что концентрация газа свободных электронов в решетке металла кристаллита достаточно высока, то кое-какие из них вполне могут преодолеть взаимное отталкивание и дислоцироваться вблизи вакансий. Такая конфигурация, несмотря на свою температурную метастабильность, может быть в чем-то энергетически выгодной. Все свободные электроны не могут сосредоточиться в одной области, поскольку этому препятствует их взаимное электрическое отталкивание. Таким образом, при ВТСП в металлокерамике будут образовываться некие вакансионные структуры, чем-то напоминающие ферромагнитные капли, включающие несколько десятков ассоциированных свободных электронов. Результаты детального анализа показывают, что подобные капли могут образовывать квазипериодическую подструктуру внутри изолирующей



антиферромагнитной основной части кристалла, который будет вести себя как полупроводник или даже изолятор при комнатной температуре. С понижением температуры и ростом концентрации электронов, входящих в ферромагнитные капли, эти вакансионные образования должны начинать контактировать друг с другом, инициируя наступление сверхпроводящего состояния.

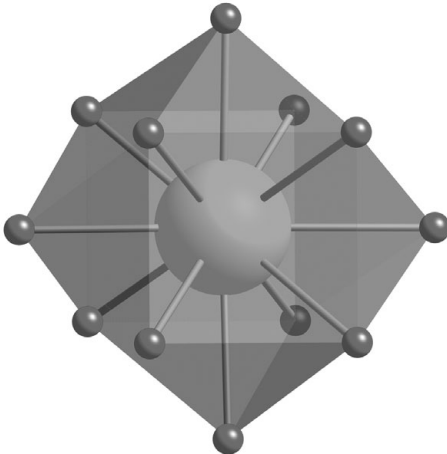


Квантовое спаривание электронных пар  
вблизи облученных вакансий (см. вклейку)

Будущая теория высокотемпературной проводимости должна будет объяснить, как объединенные пары электронов проводимости могут без сопротивления преодолевать узлы кристаллической решетки. Невозможное на первый взгляд притяжение двух одинаково заряженных частиц возникает из-за того, что металлокерамики состоят не только из анионов, но и из положительных ионных вакансий. Движущийся электрон оставляет за собой след в виде кратковременных искажений кристаллической решетки, притягивающих другой электрон, образующий вместе с первым куперовскую пару. Куперовские электронные пары начинают накладываться друг на друга, при температуре ниже критической образуют электронное состояние, охватывающее весь проводник, и перестают испытывать электрическое сопротивление. Согласно упрощенной теории сверхпроводящий переход будет зависеть от количества электронов, которые

могут участвовать в создании состояния сверхпроводимости, характеристической частоты колебаний решетки и концентрации кислородных вакансий, вовлекающих электроны в куперовские пары.

Высокотемпературная сверхпроводимость очень чувствительна к образованию кислородных вакансий, составляющих свой особый порядок внутри кристалла. Как известно, заряд в металлооксидных керамиках может переноситься не только свободными электронами, но и вакантными состояниями — дырками. Разумеется, на самом деле ток течет благодаря потоку именно электронных носителей, но с точки зрения описания процесса удобнее считать, что движутся навстречу электронам именно их дырки. Поэтому, когда на свободные электроны начинает действовать электрическое поле, можно представить, как в противоположном направлении начинает движение электронная дырка. Фактически здесь дырка предстает некой квазичастицей с единичным положительным зарядом. Именно в подобных модельных схемах и проявляются все преимущества теории вакансионной сверхпроводимости: вокруг вакансий одинаково эффективно концентрируются как электроны, так и дырки.



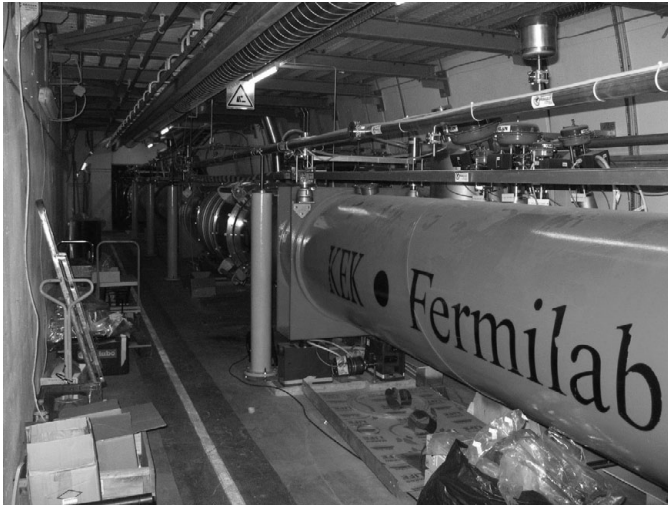
Структурная ячейка вакансий в сверхпроводнике (см. вклейку)

Если удалить атом из узла кристаллической решетки, образуется полость — вакансия. Подобные вакансии обязательно присутствуют в реальных высокотемпературных сверхпроводниках и в соответствии с теорией Палатника — Фалько — Фейгина играют главную роль в образовании сверхпроводящего состояния. Один из вариантов реализации высокотемпературного сверхпроводящего состояния можно представить в виде объединения двух электронов проводимости в сверхпроводящую пару вблизи вакансии. Профессор Л. С. Палатник при объяснении теории часто использовал очень наглядный образ двух шариков — электронов, скатывающихся в лунку — вакансию с выпуклым дном.

В случае с открытием ВТСП-металлооксидных керамик в чем-то повторилась история обычной «низкотемпературной» сверхпроводимости. Вначале бурные восторги физиков обещали самые заманчивые перспективы как в области фундаментальных исследований, так и в прикладных областях инженерно-технических задач. Иногда казалось, что на следующем этапе появятся ВТСП-структуры, успешно работающие почти при комнатной температуре, и многочисленные генерирующие, распределяющие и трансформирующие электростанции будут экономить фантастическое количество энергии, «отапливающей небо» при нагреве проводов линий электропередач. Несмотря на все инженерные ухищрения, значительная часть производимой динамо-машинами электроэнергии так и не доходит до потребителя, безвозвратно теряясь среди тех 30 % тепла, которые электроны проводимости вынуждены оставить ионам кристаллической решетки. Применение ВТСП-материалов, безусловно, могло бы существенно улучшить ситуацию, надолго отсрочив грядущий коллапс энергетического кризиса.

Однако стоит признать, что в целом ожидания не сбылись и замечательный макроквантовый ВТСП-эффект так и не смог стать затравочным зерном новой научно-технической революции. Природа не спешит раскрыть свои секреты: как же создать стабильные ВТСП-структуры, работающие хотя бы в 40–50-градусные морозы. Интенсивные исследования в этой области продолжаются, но, вероятно, общее

решение проблемы комнатной сверхпроводимости придет еще не скоро.



Сверхпроводящий модуль ускорителя элементарных частиц

*«В 50-х годах нашего столетия начали бурно создаваться первые ускорители. Тогда же выдающийся физик Э. Ферми, оценивая перспективы развития физики высоких энергий и экстраполируя в будущее темпы создания элементарных частиц, провел любопытный анализ. Если столь же высокие скорости прогресса в ускорительной технике сохранились бы еще полвека, то к 2000 г. надо бы ждать появления конструкции с гигантской энергией 1015 эВ. Эта машина опоясала бы весь земной шар по экватору. Для создания глобального ускорителя пришлось бы загрузить работой всю промышленность планеты, а все население Земли должно было обслуживать единственную в мире физическую фабрику.*

*И что же? Фантастический прогноз Ферми выполняется даже более высокими темпами, но благодаря сверхпроводникам ускорительные комплексы становятся много компактнее... А сейчас проекты таких ускорителей без сверхпроводящих электромагнитов даже не рассматриваются...»*

В. Околотин. Сверхзадача для сверхпроводников

Тем не менее уже десятки лет практическому использованию в разнообразных научных приборах сверхпроводящих электромагнитов, работающих при температуре сравнительно дешевого жидкого азота, а не гелия. Эффект экономии особенно очевиден при конструировании современных гигантских ускорителей элементарных частиц — коллайдеров и экспериментальных термоядерных реакторов. Сверхпроводящие элементы и конструкции все шире внедряются на высокоскоростном транспорте,двигающемся на магнитных подушках, подобных монорельсу, и в медицинских магниторезонансных томографах со сверхпроводящими магнитами в азотных криостатах, заменивших гелиевые. Несомненно, использование ВТСП-приборов и оборудования так или иначе будет расти, открывая новые области практического применения. Среди них можно назвать производство квантовых компьютеров и проекты термоядерных реакторов, базирующихся на использовании гигантских сверхпроводящих магнитов, удерживающих высокотемпературную плазму внутри термоядерного котла. Для поддержания их в сверхпроводящем состоянии требуются громадные объемы жидкого хладоносителя, оптимальный вариант которого — сжиженный азот.

Еще один очень интересный вопрос связан со сверхпроводящими квантовыми генераторами — лазерами. А интересен он потому, что здесь в едином техническом решении столкнулись два макроквантовых явления.

В работе, написанной в 1913 году, великий Эйнштейн предположил, что в недрах звезд могут формироваться потоки излучения очень высокой «чистоты» и единообразности. Его физики называют когерентным. В следующей своей работе на данную тему «Квантовая теория излучения» в 1917 году великий физик показал, что когерентные пучки могут генерироваться под воздействием вынуждающих фотонов из самых общих принципов квантовой механики и термодинамики, при этом индуцированное излучение должно быть высоко когерентно инициирующему воздействию, имея одинаковое направление, фазу, длину волны и поляризацию. Именно в эти годы Эйнштейн своими исследованиями заложил теоретические основы науки будущего — квантовой оптики.

Физическая интуиция подсказывала гению, что квантовая теория излучения обязательно будет иметь прикладное значение и породит удивительные технические приборы и устройства. Например, можно было бы построить некий микроволновой генератор, использующий в качестве «рабочего тела» пучок многоуровневых молекул. Для этого нужно было бы разделить эти молекулы электростатическими полями и загнать их возбужденный пучок в некую металлическую полость, где они синхронно перейдут на более низкий уровень, излучая когерентные электромагнитные волны. При этом для работы данной проводящей полости как резонатора необходимо так подобрать ее линейные размеры, чтобы они равнялись длине излучаемых волн.

Это можно представить в виде физической иллюстрации: кванты электромагнитного поля — фотоны наполняют собой некую плотину фотонной мельницы. Затем мельник-оператор движением рычага освобождает входной клапан, и лавина электромагнитных квантов мгновенно приводит в движение фотонную мельницу. Подобно тому как разные зерна обычная мельница перемалывает в совершенно одинаковую муку, так же и фотонная мельница перемалывает входящие кванты в совершенно одинаковую фотонную массу когерентных частиц.

Так в физическую почву новой науки попали первые квантовые зерна будущей теории квантовой электродинамики (КЭД). Сегодня КЭД — квантовополевой раздел электромагнитных взаимодействий, входящий в квантовую теорию поля. Классическая электродинамика, созданная Максвеллом, учитывала исключительно непрерывные свойства электромагнитного поля, а вот в основе квантовой электродинамики — уже совсем иные представления: это концепция дискретных свойств электромагнитного поля, носителями которых являются хорошо нам знакомые кванты — фотоны. При этом процессы взаимодействия электромагнитного излучения с заряженными частицами в КЭД рассматривают как поглощение и испускание частицами фотонов.

Теория КЭД замечательно точно объясняет все основные количественные эффекты взаимодействия излучения с веществом, такие как поглощение, испускание и рассеяние.

Она последовательно рассматривает электромагнитные взаимодействия между заряженными частицами. К числу важнейших проблем, которые не нашли объяснения в классической электродинамике, но успешно решаются в квантовой электродинамике, относятся тепловое излучение тел, рассеяние рентгеновских лучей на свободных или слабо связанных электронах, излучение и поглощение фотонов атомами и молекулами, испускание фотонов при рассеянии быстрых электронов во внешних полях и другие процессы взаимодействия элементарных частиц. В это же время физик Поль Дирак (1902–1984) опубликовал свою работу с весьма многообещающим названием «К вопросу о возможности электромагнитной фокусировки высокоэнергетического излучения атомных корпускул».

Увы, тернисты пути истиной науки, вот и труды Эйнштейна поняли всего лишь несколько человек, и среди них Поль Дирак. Он развил и дополнил основные положения квантовой оптики. В 1928 году видный немецкий физико-химик Рудольф Ладенбург (1882–1952) и его коллега Ганс Копферманн (1895–1963) поставили эксперименты, которые должны были ознаменовать рождение самого настоящего квантового генератора, испускающего мощный поток когерентного излучения. Необходимо было сделать последний шаг, даже не шаг — шажок, но... открытие не состоялось.

Путь к созданию квантовых генераторов был найден не оптиками, а радиофизиками, которые давно научились создавать генераторы и усилители электромагнитных колебаний, использующие резонаторы с обратной связью. Именно радиофизики сконструировали самые первые квантовые генераторы когерентного излучения, только не светового, а микроволнового, и они получили название — мазеры (MASER — Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Мазер оказался именно тем устройством, для которого низкие температуры принципиально необходимы.

Подводя итоги проектированию перспективных сверхпроводящих систем, В. И. Рыдник отмечал, что, возможно, в не таком уж и отдаленном будущем создадут грандиозные сверхпроводящие энергетические комплексы, включающие

циклопические приемники солнечного излучения, снабженные оптическими квантовыми генераторами со сверхпроводящими элементами. Потоки лазерного излучения будут направлены на Землю, где их энергию снова преобразуют в электричество и по ВТСП-линиям отправят потребителям. В то же время гигантские термоядерные реакторы со сверхпроводящими электромагнитами будут вырабатывать электрическую энергию из океанской воды. В дальнем и ближнем космосе колоссальные сверхпроводящие магнитные экраны навсегда избавят жителей обитаемых спутников земли от грозных отголосков солнечных бурь и защитят обитаемые космические зоны от мощных всплесков потоков заряженных частиц солнечной плазмы.

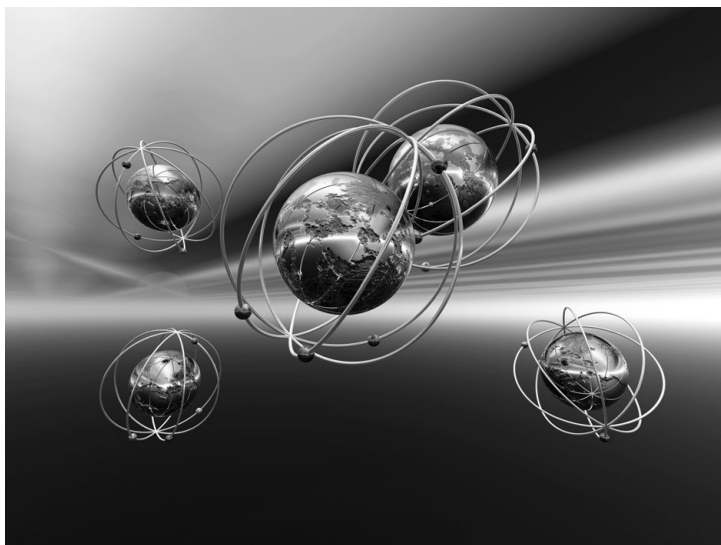


## Глава 6

# Колдовское исчисление

*Еще, быть может, каждый атом —  
Вселенная, где сто планет;  
Там все, что здесь, в объеме сжатом,  
Но также то, чего здесь нет.  
Их меры малы, но все та же  
Их бесконечность, как и здесь;  
Там скорбь и страсть, как здесь, и даже  
Там та же мировая спесь.*

В. Брюсов. Мир электрона



Новые квантовые миры (см. вклейку)

*«В наше время человеческое знание развивается с фантастической быстротой. И с каждым его крупным достижением взорам людей открываются новые миры».*

В. Рьдник. Что такое квантовая механика

«Вследствие этого возникло несколько конкурирующих „интерпретаций“ квантовой механики. Во-первых, это наиболее популярная „боровская“, или „копенгагенская“, интерпретация. Во-вторых, — „эйнштейновская“ позиция, вокруг которой объединился ряд отцов квантовой механики недовольных своим детищем. Главными претензиями Эйнштейна к „копенгагенцам“ были, во-первых, копенгагенское решение вопроса о соотношении между состоянием физической системы и измерением: „Состояние системы в момент времени  $t$ , когда не производится никаких наблюдений, не может служить предметом рассмотрения“ — говорит „копенгагенец“ М. Борн (то есть до измерения нет состояния). Во-вторых, вероятностный тип описания. Свою позицию они выразили в виде ряда „парадоксов“, якобы возникающих в формулировке квантовой механики и говорящих о ее неполноте и незаконченности (классический набор состоит из парадоксов „кота Шрёдингера“, „редукции (коллапса) волновой функции“ и мысленного эксперимента Эйнштейна, Подольского, Розена (ЭПР)). В попытках решения этих парадоксов сегодня доходят до „шизометрии“ (от греч. *schizo* — расщепляю) „многомировой интерпретации“ или введения сознания в основания квантовой механики».

А. Липкин. Квантовая механика как раздел физики.  
Формулировка системы исходных понятий и постулатов

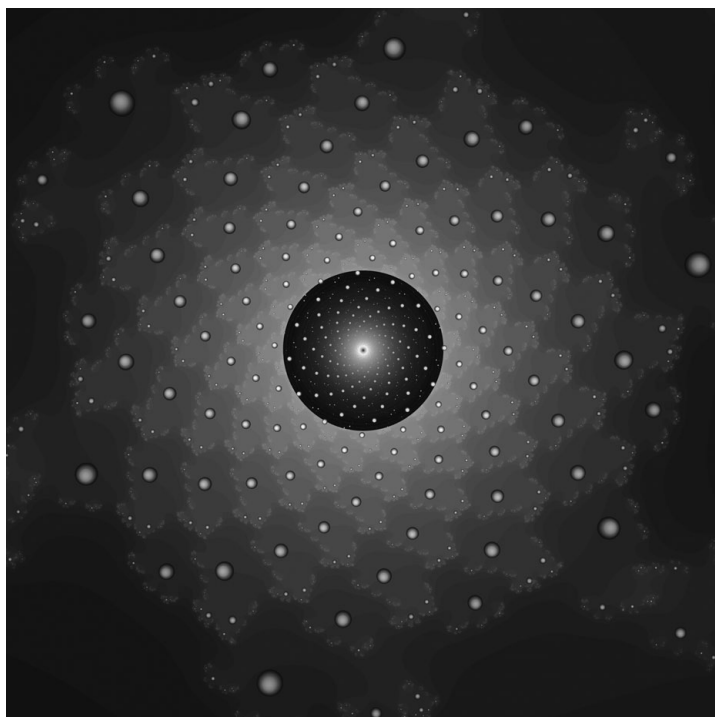
## Мультиреальность

«Многочисленны и удивительны миры, плывущие подобно пузырькам пены по Реке Времени. Иные, их очень мало, движутся против или поперек течения; еще меньше таких, что находятся вне его пределов, и не ведают ни будущего, ни прошлого».

А. Кларк. Стена Мрака

Когда-то великий Эйнштейн в письме своему однокурснику по Цюрихскому политехникуму Мишелю Бессо так охарактеризовал рождающуюся квантовую теорию:

«Настоящее колдовское исчисление». Заканчивалась первая четверть XX века, и завершалась научная революция, породившая новую физику, но один из ее создателей даже не предполагал, насколько крылатой станет оброненная им в письме фраза. Прошло без малого 100 лет и литературные штампы «колдовское исчисление» и «квантовая магия» встречаются даже в названии фирм по созданию квантовых компьютеров.



Квантовые глубины атомного мира (см. вклейку)

*«Квантовая механика... показывает, как минимум, в определенных обстоятельствах, способность преодолеть пространство; далекодействующие квантовые взаимодействия могут обойти пространственное разделение. Два объекта могут находиться в пространстве на большом расстоянии друг от друга, но, что касается квантовой механики, они*

*ведут себя так, как если бы они были единой сущностью. Более того, поскольку Эйнштейн нашел тесную связь между пространством и временем, квантовые взаимодействия также протягивают щупальца во времени...»*

Б. Грин. Ткань космоса. Пространство, время  
и текстура реальности

Несмотря на обилие мнений вокруг основополагающих принципов квантовой механики, большинство прикладных специалистов чувствует себя совершенно уверенно за непробиваемой стеной математических формул, подобных тому же уравнению Шрёдингера, считая, что особых причин для беспокойства у них просто нет. Квантовая физика хотя иногда и воспринимается, как крылатое выражение Эйнштейна — «колдовское исчисление», но отлично работает в самых разных подразделах инженерных наук. Например, она позволяет с очень высокой точностью предсказывать и рассчитывать разнообразные эффекты в электронной оптике, атомной и ядерной физике, микроэлектронике. Квантовая физика не только полностью определила облик XX столетия и нашего времени, но и подняла многие философские вопросы. Центральным среди них — отношения между наблюдателем-экспериментатором и материальным объектом исследований.

Можно ли распространить этот фундаментальный принцип на весь окружающий нас макромир? Совсем недавно страницы многих газет и журналов, а также Интернет облетело краткое сообщение, приписываемое исследовательской группе американских ученых, о приближении даты «квантового апокалипсиса» из-за постоянных наблюдений астрономами таинственной темной энергии, в которую, по самым последним представлениям, погружена наша Метагалактика. Оставим на совести околонуучных журналистов полное искажение смысла несостоявшейся сенсации. Удивителен сам факт возникновения под квантовым соусом давнего схоластического вопроса: что представляет собой наш Мир в тот момент, когда мы, закрыв глаза, его не видим, и существует ли он в этот миг вообще?

По копенгагенской интерпретации квантовой механики, созданной в свое время Бором и его учениками, любая квантовая система в любой момент времени находится сразу во всех возможных состояниях с разной потенциальной вероятностью их реализации. Точнее говоря, в динамике изменений любого квантового объекта как бы сосуществуют многие альтернативы, переход которых к конкретному состоянию физической системы возникает только в процессе измерения ее параметров.

С самого начала перед создателями копенгагенской интерпретации стоял вопрос о глубинной природе квантовой вероятности, однако и сегодня на него нет исчерпывающего ответа. Даже великий Эйнштейн, хотя и полностью признавал работоспособность математического аппарата квантовой механики, был глубоко убежден в ее неполноте и несовершенстве. В классической науке также есть разделы с вероятностной основой процессов и явлений, такие, как статистическая физика, вполне успешно объясняющая макроскопические законы термодинамики на основе микроскопических процессов между атомами и молекулами. В данном случае вероятность тех же газовых явлений основывается на том, что измерить параметры каждого отдельного атома или молекулы, участвующих в данном процессе, просто нереально.

Эйнштейн в своих воспоминаниях признавал: интуиция всегда подсказывала ему, что и на квантовом уровне должно содержаться подобное объяснение вероятностного поведения квантовых систем и объектов. Самый тривиальный ответ здесь был вполне очевиден: нужно в анализе квантовой вероятности просто перейти на более глубокий, субквантовый уровень физической реальности. Однако за простотой такого предположения — громадная проблема поиска этого самого сверхглубокого уровня организации материи. После многих десятилетий безрезультатных поисков все чаще слышны мнения, что субквантовый уровень физической реальности просто может быть принципиально недоступным, как принципиально ненаблюдаемы составные части элементарных частиц — кварки. Такие мысли высказывали Гейзенберг, Фейнман и Гелл-Манн. Противоположного мнения придерживались Дэвид Бом (1917–1992), де Бройль, Брайс Девитт (1923–2004)

и другие физики, которых не устраивал тезис копенгагенцев о том, что каждый квантовый объект представляет по своей сути черный ящик и исследовать его внутреннюю структуру принципиально невозможно.

Диалектика спирали исторического материализма вернула на круги своя и знаменитую полемику между Эйнштейном и Бором о смысле вероятностной интерпретации квантовой теории. Сейчас дискуссию продолжают Роджер Пенроуз, занимающий позицию Эйнштейна, и Стивен Хокинг, выступающий на стороне Бора. Конечно, за прошедшее столетие обсуждаемые вопросы стали сложнее и изощреннее, но их глубинная суть практически не изменилась. Одни физики считают, что вероятностный характер квантовомеханических представлений — фундаментальная особенность окружающей природы, он не может быть выведен из каких-то иных более глубоких «первых» принципов. Другие продолжают доказывать, что неоправданное расширение понятия неопределенности физических процессов микромира на окружающую реальность неизбежно приводит к логическим противоречиям (кот Шрёдингера). Так что далеко не все закономерности квантовой теории выявлены, особенно на уровне ее связи с макромиром.



Научная фантастика на субквантовом уровне материи

*«Я хочу обобщить принцип неопределенности, сказав, что, грубо говоря, квантовая механика делает вещи дрожащими и турбулентными. Если скорость частицы не может быть описана с абсолютной точностью, мы также не можем описать, где частица будет располагаться даже через долю секунды, поскольку скорость сейчас определяет положение потом. В известном смысле частица свободна иметь ту или эту скорость или, более точно, принять смесь многих скоростей, а потому она неистово скачет, бессистемно двигаясь по тому или иному пути. Для полей ситуация аналогичная. Если темп изменения поля не может быть определен с абсолютной точностью, тогда мы также не можем определить, какая величина поля будет в любом месте даже мгновением позже. В известном смысле поле колеблется вверх или вниз с той или иной скоростью или, более точно, оно принимает странную смесь многих различных темпов изменения, а потому его величина будет подвергаться бешеному, смазанному, хаотичному дрожанию».*

Б. Грин. Ткань космоса. Пространство, время  
и текстура реальности

Обсуждение фундамента квантовой парадигмы в наше время захватывает и такие интереснейшие темы, как «квантовая гравитация», «квантовая космология», «квантовая стрела времени» и «квантовая нелокальность». С другой стороны, в орбиту этой давней дискуссии со второй половины XX столетия все чаще начинают попадать весьма необычные и даже фантастические понятия, такие как «ветвящиеся вселенные» и «сознание наблюдателя». Несомненно, что в научных спорах большую роль играет личный фактор восприятия той или иной научной парадигмы. Вот и после сенсационного вывода об ускоренном расширении Вселенной (ранее полагали, что наш Мир «раздувается» совершенно равномерно и даже с очень небольшим замедлением) вновь вспомнили о гениальной физической интуиции Эйнштейна, вписавшего в свои уравнения некий таинственный «лямбда-член». А ведь скоро уже 100 лет, как не умолкают всевозможные ученые и не очень критики этого «интеллектуального промаха» создателя релятивистского мира. Теперь многие их продолжатели стали гораздо осторожнее относиться и ко второй главной

«ошибке» великого физика в вопросе о «недоопределенности квантовой теории».

Все это свидетельствует, насколько до сих пор не устоялись современные концепции теоретической физики. К тому же у многих околонуточных философов, журналистов, писателей-популяризаторов и даже профессионалов-теоретиков существует огромный соблазн распространить глубоко парадоксальные закономерности микромира на окружающую реальность. Яркий пример — книга Фреда Адамса «Наш живой Мультиверс. Книга Бытия в 0+7 главах» и труд одного из главных апологетов «квантовой нелокальности» известного физика-теоретика Дэвида Дойча «Структура реальности».

Во второй половине XX века спор о реальности квантового мира перешел в совершенно необычную плоскость обсуждения реальности существования множества одновременных вариаций Вселенной. Несмотря на кажущуюся фантастичность, эта идея прижилась, получила дальнейшее развитие и вскоре термин «Мультимир» (Мультиверс, Мультиуниверсум, Мегамир и Метавселенная) появился в статьях серьезных профессиональных теоретиков. Сейчас целые научные школы развивают подобные концепции, считая, что в будущем подобные построения могут занять свое место во всеобщей парадигме физической реальности.

Особенно часто концепцию Мультивселенной рассматривают в космологическом аспекте как неотъемлемую часть окружающей реальности. В 1957 году следующий шаг в поисках границ квантовой реальности сделал молодой аспирант патриарха физической космологии Джона Арчибальда Уилера (1911–2008) Хью Эверетт (1930–1982). Его «многомировая интерпретация», или «интерпретация со многими вселенными», квантовой теории описывала Вселенную в целом. В концепции Эверетта каждый раз, когда происходит взаимодействие между двумя квантовыми системами, волновая функция Вселенной расщепляется, порождая «ветвистый куст» разнообразных исторических последовательностей. Что такое волновая функция Вселенной? Вероятно, и сам Эверетт не имел ясного представления о столь глубокой абстракции. Разумеется, он



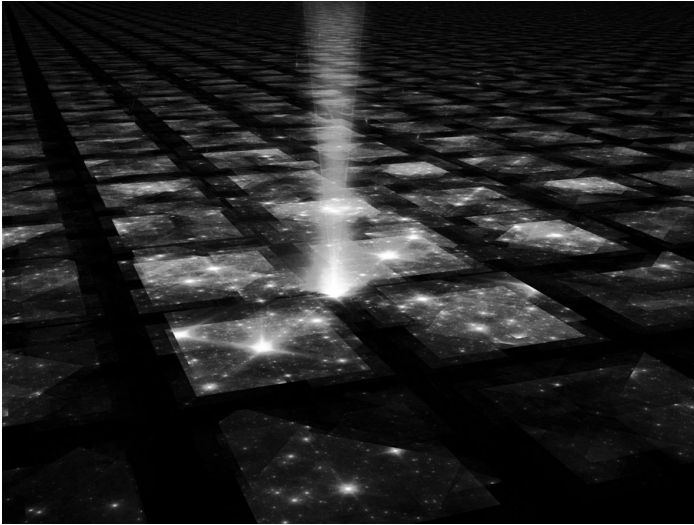
оперировал с соответствующим математическим образом и использовал довольно развитый математический аппарат, но реальная сущность его построений до сих пор вызывает головокружительное впечатление.

В космологическом плане многомировая интерпретация описывает некий вектор состояния для Вселенной в целом, точно так же как делает это для пси-функций микрочастиц. В этом смысле многомирье просто не имеет границ между классической и квантовой реальностью. Однако некоторые теоретики считают, что многомировая интерпретация в своем исходном варианте реально не упраздняет границу микро- и макромира, а смещает ее в направлении «управляющего квантовым выбором сознания наблюдателя». Комментировать подобные спекуляции очень трудно, скорее, их можно просто рассматривать как построения, весьма мало соотносящиеся с окружающей объективной реальностью.

Согласно многомировой интерпретации существует бесконечное множество равноправных «копий» параллельных миров, воплощающих окружающую физическую реальность. Тогда волновая функция будет описывать единый квантовый Универсум, который представляет собой наложение бесконечного числа всех возможных состояний. В определенном смысле многомировая интерпретация кажется проще копенгагенской, но за эту простоту приходится платить, постулируя постоянное расслоение квантового Универсума на множество классических миров.

Если обратиться к истории развития идеи квантового Универсума, то надо честно признать, что в самом начале профессиональное сообщество ученых отнеслось к ней с большим сомнением, сочтя ее автора по меньшей мере беспочвенным фантазером. И это несмотря на то, что благожелательную, но очень осторожную рекомендацию к публикации первой статьи Эверетта дал сам Бор, а ходатайствовал перед ним об этом сам Уилер. Ситуация изменилась только после того, как у многомировой интерпретации появились комментарии и развивающие идеи таких крупных теоретиков, как Уилер и Девитт. Собственно говоря, сам термин «многомировая интерпретация» возник только после аналитических работ Уилера и Девитта.

Вообще-то такое название не точно и уже ввело в заблуждение журналистов, литераторов и философов, правильнее было бы употреблять словосочетание «многопроекционная интерпретация».



Квантовый Мультиверс (см. вклейку)

*«Обращение к воображаемым вселенным не работает, потому что мы можем представить любые желаемые нами вселенные в любых желаемых нами соотношениях. Но в Мультиверсе вселенные присутствуют в определенных соотношениях, так что имеет смысл говорить, что некоторые типы событий „очень редки“ или „очень часты“ в Мультиверсе и что некоторые события следуют за другими „в большинстве случаев“. Большая часть логически возможных вселенных не присутствует совсем — например, не существует вселенных, в которых заряд электрона отличался бы от заряда электрона в нашей вселенной или в которых не работали бы законы квантовой физики. Законы физики, к которым неявно обращается противоречащее фактам высказывание, — это законы, которые действительно работают в других вселенных, а именно законы квантовой теории».*

Д. Дойч. Структура реальности

В квантовом Универсуме Эверетта совершенно реальны все возможные варианты измерений, скажем, того же спина электрона, но вот реализуются они в совершенно разных квантовых проекциях нашей Вселенной. Причем в многомировой интерпретации (общепринятый термин) проблема выбора результата измерений формулируется иначе, чем в традиционной квантовой физике. Вместо поиска возможных результатов измерений возникает вопрос: в каком именно проекционном отражении квантового Универсума произошла локализация лабораторного наблюдателя?

В свое время Уилер предложил довольно наглядную формулировку многомировой парадигмы, получившей название «железнодорожная аналогия». Он представил, что в момент измерения параметров квантового объекта перед экспериментатором как бы возникает некая железнодорожная стрелка, и состав нашего Мира может двинуться в самых разных направлениях. И только тогда в полной зависимости от выбранной «железнодорожной колеи» наблюдатель зафиксирует тот или иной параметр измерения. При этом каждое направление маршрута железнодорожного состава, соответствующее альтернативным измерениям, будет пролегать уже по рельефу иных миров, как проекций нашей Вселенной.

Тем не менее самое уязвимое место многомировой интерпретации — отсутствие реальных физических механизмов воплощения того или иного Мира, составляющего нашу Реальность. Несмотря на внешнюю элегантность и внутреннюю логику построения Универсума, интерпретация квантовой механики Эверетта — Уилера — Девитта при всей своей парадоксальности не вводит ни одного нового физического объекта, существование которого можно было хотя бы косвенно подтвердить или опровергнуть экспериментальным путем.

Чтобы понять буквально гипнотизирующую привлекательность квантового многомирья, нужно вспомнить, что воздействие любого измерительного прибора мгновенно схлопывает волновой вектор, вызывая так называемый коллапс волновой функции, или редукцию волнового пакета.

Однако подобные «катастрофические» решения неправомерны для математической структуры уравнения Шрёдингера, проще говоря, это неправильные решения и их надо отбрасывать в конечном итоге.

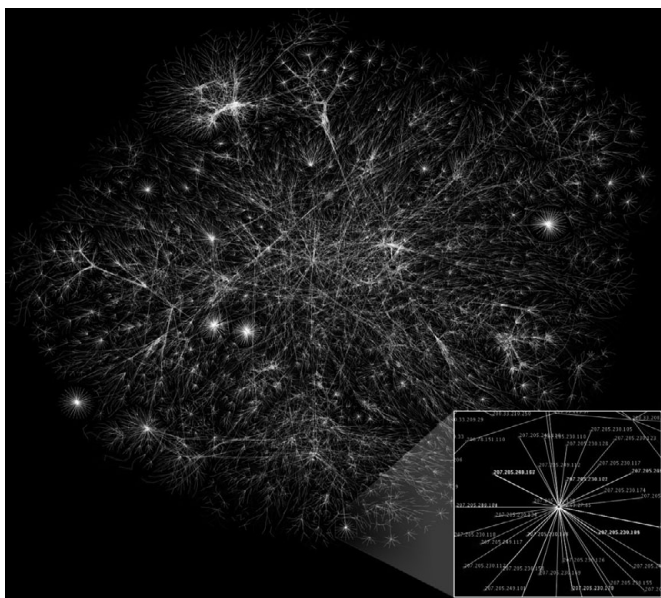
Что же тогда происходит с волновой пси-функцией при лабораторных измерениях и как же правильно рассказать об этом на языке квантовой физики?

Вопрос до сих пор не имеет однозначного ответа, так как с точки зрения стандартной копенгагенской интерпретации измерение представляет собой взаимодействие квантовой системы с классическими объектами, в результате которого она переходит от одного состояния макроскопического детектора к другому. Поэтому сам процесс измерения и не должен описываться решениями уравнения Шрёдингера, справедливого лишь для квантового мира. В копенгагенской интерпретации редукция пси-функции считается объективной реальностью квантового мира. Собственно говоря, на этом и строится детально разработанный формализованный аппарат расчетов поведения квантовых систем. За всю историю квантовой науки он всегда выдавал стопроцентно верные результаты, предсказывающие экспериментальные данные. Именно поэтому все возможные физические расчеты, например, в квантовой оптике, выполненные на основе самых разных квантовомеханических интерпретаций, дают совершенно одинаковые результаты, что заставляет глубоко задуматься о правомерности разделения таких подходов.

Сама по себе гипотеза Мультивселенной оказалась довольно продуктивной как в теоретическом, так и в философском плане, вызвав еще один поток работ в области квантовой космологии. В их основе — удивительная модель инфляционного Большого взрыва: при рождении наш Мир испытал кратковременное сверхбыстрое (инфляционное) расширение, в ходе которого его размеры выросли по экспоненте от времени.

Эта стадия эволюции Космоса началась через  $10^{-43}$  с после возникновения космологической сингулярности, формальной точки отсчета истории нашей реальности. Этот этап носит название «планковский», поскольку в свое время «отец

квантов», используя комбинации из известных фундаментальных констант, включая постоянную Планка, сконструировал набор величин длины, массы, времени, температуры и энергии. Планковское время составляет труднообразимую величину близкую к  $10^{-44}$  с, поэтому все временные интервалы этого порядка получили название «планковские». В этот период теоретики смогли «нащупать» только следы физического вакуума, наполненного неким силовым полем, насыщенным квантовыми флуктуациями, вспенивающимися пространство-время. Эти спонтанные квантовые всплески первичного поля, «зародыши» исполинских областей континуума, развились в миры Мультивселенной. При этом отдельные вселенные могут находиться в едином пространстве-времени, но совершенно непонятно, как они могут наблюдаться относительно друг друга.



Отражение многомирья на карте Интернета

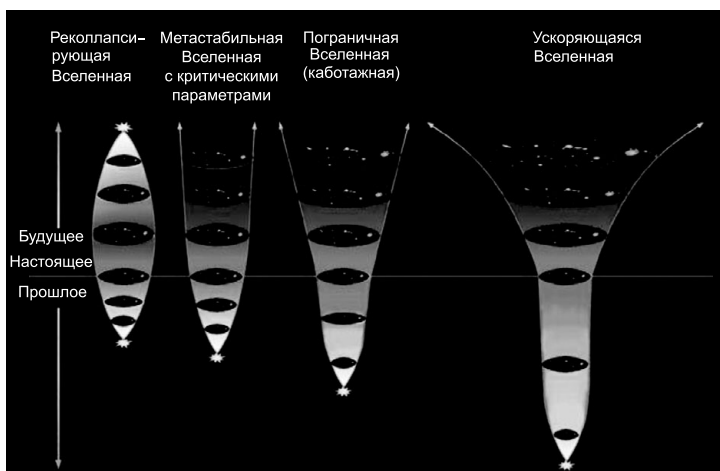
*«Согласно изначальной интерпретации Эверетта, каждая из компонент суперпозиции описывает целый мир, и ни одна из них не имеет преимущества перед другой. Имеется*

*столько миров, сколько альтернативных результатов имеет рассматриваемое измерение. В каждом из этих миров имеется и измеряемая система, и прибор, и наблюдатель. И состояние системы, и состояние прибора, и сознание наблюдателя в каждом из этих миров соответствует лишь одному результату измерения, но в разных мирах результаты измерения различны. Несколько неожиданную аналогию Мультиверсу Эверетта можно найти, рассматривая карту Интернета. Ветвление и развитие информационных потоков во многом напоминают эволюцию реальностей, возникающих и исчезающих самым причудливым образом».*

О. Арсенов. Физика времени

В конце концов, одна из флуктуаций достигла критического размера, что привело к острому локальному экстремуму интенсивности поля, после чего она стала быстро спадать. Данный квантовый скачок как раз и создал предпосылки для выхода расширения Вселенной на инфляционный режим, который начался с генерации молниеносно расширяющегося сгустка силовых полей зародыша нашего Мира. И вот за невообразимо малый «квантовый» срок заполнился как минимум объем Метагалактики.

Так пространство нашей Вселенной приобрело современные размеры, в них и начал развиваться собственно процесс Большого взрыва. Именно на этапе инфляции и сформировалось «физическое лицо» нашего Мира, представляющее систему фундаментальных физических законов, с тех пор управляющих поведением вещества и излучения в нашей реальности. После всплеска, что вызвал распространение пространства-времени, скалярное поле устремилось к минимуму, при этом в нем возникли очень быстрые колебания — осцилляции, рождающие элементарные частицы. Таким образом, к окончанию инфляционной фазы наш Мир уже был переполнен высокотемпературной плазмой, включающей свободные кварки, глюоны, лептоны и сверхвысокоэнергетичные фотоны — кванты электромагнитного излучения. Затем началась интенсивная конденсация кварков и глюонов в протоны и нейтроны, плавно перешедшая в первичный нуклеосинтез ядер гелия, дейтерия и лития.



Инфляционные сценарии космической эволюции (см. вклейку)

«...Вселенная возникла в результате Большого Взрыва в очень горячем, но довольно хаотическом состоянии. Высокие температуры означают, что частицы во Вселенной должны были очень быстро двигаться и иметь большие энергии. Как уже говорилось, при таких высоких температурах сильные и слабые ядерные силы и электромагнитная сила должны были все объединиться в одну. По мере расширения Вселенной она охлаждалась, и энергии частиц уменьшались. В конце концов, должен был бы произойти так называемый фазовый переход, и симметрия сил была бы нарушена: сильное взаимодействие начало бы отличаться от слабого и электромагнитного. Известный пример фазового перехода — замерзание воды при охлаждении. Жидкое состояние воды симметрично, то есть вода одинакова во всех точках и во всех направлениях. Образующиеся же кристаллы льда имеют определенные положения и выстраиваются в некотором направлении. В результате симметрия воды нарушается».

С. Хокинг. Рождение и гибель Вселенной

Судьба нашей Вселенной решалась в первые секунды после Большого взрыва квантовой физикой, управляющей балансом плотности вещества и энергии. Даже ничтожное преобладание энергии привело бы к быстрому раздуванию

и охлаждению, а вещества — к скорой смене расширения на сжатие в точку и, возможно, новому взрыву. Вид нашей Вселенной также определила величина внутриядерных сил, связывающих вместе нейтроны и протоны. Если бы она была меньше существующей, атомные ядра просто бы не возникли, а если бы больше, то еще на этапе первичного нуклеосинтеза весь наличный водород практически мгновенно превратился бы в гелий. Не совсем понятную, но, несомненно, очень важную роль играет в эволюции нашего Мира скрытая «темная энергия» физического вакуума. В силу каких-то совершенно неясных причин где-то 7 млрд лет назад эта странная энергия сместилась от нулевого к положительному значению, подтолкнув Вселенную к ускоренному расширению. Существуют предположения, что энергия вакуума определяет структуру космической материи, и будь она хоть немного ближе к нулю, наш Мир так бы и остался бесформенным газопылевым облаком, равномерно рассеянным по космическим просторам. В противном случае, чем больше была бы величина темной энергии, тем быстрее первичное вещество сконденсировалось бы в сверхмассивные галактики, которые через несколько миллиардов лет сколлапсировали бы в черные дыры гравитационных провалов космоса.

Хотя в квантовой инфляционной космологии еще очень много белых пятен, да и сам по себе механизм инфляции малопонятен, теоретики уже разработали инновационный сценарий вечной инфляции. Эта парадоксальная концепция считает, что квантовые флуктуации, положившие начало нашему Миру, продолжают самопроизвольно возникать, порождая все новые Вселенные. Не исключено, что и наша Вселенная сформировалась подобным образом в мире-предшественнике. Тут можно допустить возникновение и в нашем Мире флуктуации, которая разовьется в новую вселенную, может быть, с иными физическими законами и структурой пространства-времени, способную впоследствии к космологической «редубликации».

Вообще говоря, в науку XX столетия парадигма многомирности внесла много путаницы, так что даже многие профессиональные физики употребляют одни и те же термины в разном по смыслу контексте. Так, понятие Мультиверса



обычно связывают именно с парадоксальной многомировой интерпретацией квантовой теории измерений Эверетт — Уиллера — Девитта.

Кроме того, в квантовой космологии широко употребляется термин «Мультиуниверсум». Он возник на основе модельного варианта инфляционного развития сингулярности Большого взрыва, предложенного в 1980 году Аланом Гуттом и вскоре развитом в полноценную теорию Алексеем Старобинским (р. 1948), Андреем Линде (р. 1948) и Дэвидом Киржницем (р. 1926).

На первый взгляд теории квантового Мультиверса и инфляционного Мультиверсума как бы не связаны, мало того, они принадлежат к разным разделам теоретической науки: квантовой механике и теоретической астрономии. Однако если начать более тщательнее анализировать их содержание, открываются поистине удивительные вещи.

Во-первых, «квантовая шизометрия» совершенно по-иному освещает самый таинственный момент в истории — рождение нашего Мира в релаксации (или наоборот, активации?) первичной квантовой флуктуации (чего — инфлатона?). Квантовая флуктуация при этом из редчайшего случайного явления превращается в свою полную противоположность — бессчетное множество квантовых проекций изначальной реальности.

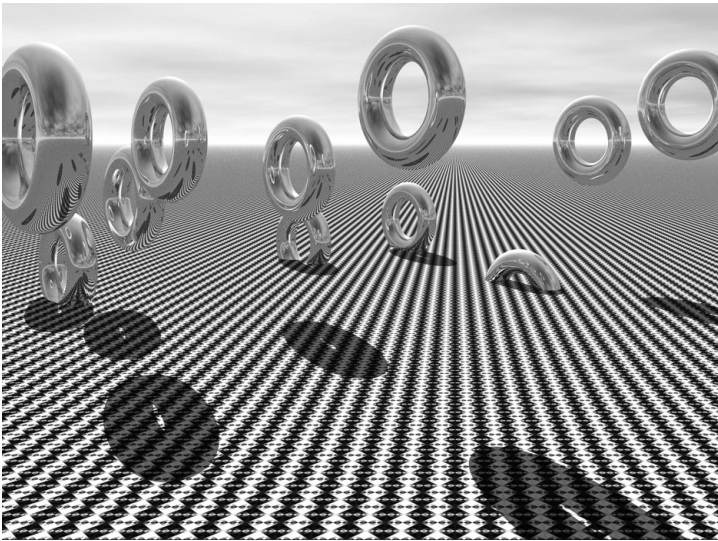
Во-вторых, в каждый квант последующего времени (хроноквантовый шаг) «квантовая шизофрения» продолжается и продолжается... Трудно даже представить общее количество населения такого многомирья. Проще говоря, это Мультиуниверсум в степени Мультиверса, гуглы и гуглы миров (гугл равен  $10^{100}$  — это число с сотней нулей), а может быть, и вообще нечто невообразимо фантастическое — гуглы в степени гуглов.

## Миры на квантовых бранах

*«М-теория похожа на пазл: проще всего найти и составить вместе фрагменты, лежащие по краям мозаики. Так и М-теорию легче развивать в пределах, в которых те или иные параметры малы.*

*На сегодня у нас есть замечательные идеи об этих краях, но в центре паза остается зияющая дыра, происходящее в которой остается для нас неизвестным. Фактически мы не можем сказать, что нашли Теорию Всего, пока не заполним эту дыру».*

С. Хокинг. Мир в ореховой скорлупке



Ландшафт теории петлевой квантовой гравитации

*«Согласно теории петлевой квантовой гравитации, пространство подобно атомам: числа, получаемые при измерении объема, образуют дискретный набор, то есть объем изменяется отдельными порциями. Другая величина, которую можно измерить, — площадь границы  $V$ , которая тоже оказывается дискретной. Иными словами, пространство не непрерывно и состоит из определенных квантовых единиц площади и объема.*

*Возможные значения объема и площади измеряются в единицах, производных от длины Планка, которая связана с силой гравитации, величиной квантов и скоростью света. Длина Планка очень мала:  $10^{-33}$  см; она определяет масштаб, при котором геометрию пространства уже нельзя считать непрерывной. Самая маленькая возможная площадь, отличная*

*от нуля, примерно равна квадрату длины Планка, или  $10^{-66}$  см<sup>2</sup>. Наименьший возможный объем, отличный от нуля, — куб длины Планка, или  $10^{-99}$  см<sup>3</sup>. Таким образом, согласно теории в каждом кубическом сантиметре пространства содержится приблизительно  $10^{99}$  атомов объема. Квант объема настолько мал, что в кубическом сантиметре таких квантов больше, чем кубических сантиметров в видимой Вселенной ( $10^{85}$ )».*

Л. Смолин. Атомы пространства и времени

Решая проблему квантовой версии общей теории относительности, физики-теоретики пришли к поразительному образу текстуры пространства-времени на самых нижних этажах Мироздания, можно сказать, в самой непосредственной близости от его фундамента. В этих сверхмалых масштабах, вполне сопоставимых с планковской длиной ( $\sim 10^{-33}$  см), само пространство-время превращается в кипящую пену квантовых флуктуаций, покрывающих океан виртуальных частиц. Известно, что на таких масштабах уравнения общей теории относительности теряют всякий смысл и действуют исключительно квантовые законы. Соединить в единое целое квантовую теорию и гравитацию как с физической, так и с математической точек зрения сегодня пытается квантовая теория гравитации. Логично предположить, что если релятивистская гравитация связана с искривлением пространства-времени, то и квантовая теория гравитации будет иметь предметом исследования квантовое пространство-время.

В конце XX столетия был заложен фундамент двух наиболее популярных конкурирующих направлений в теории квантовой гравитации: петлевой квантовой гравитации (ПКГ) и теории струн. Для построения ПКГ важную роль сыграли новые оригинальные формы теории относительности. Эти релятивистские формализации привели к тому, что вскоре после начала исследований структуры ПГТ теоретики обнаружили новые подходы, вполне пригодные для реального «зондирования» квантового пространства-времени. Эти соотношения в теории квантовой гравитации выявили особенности микроскопической структуры в пространственной

геометрии и показали, что квантовый мир чем-то напоминает причудливо изогнутую сеть ячеек. А уже в начале XIX века на базе новых моделей квантовой гравитации была создана глубокая теория, представляющая изумительную панораму сверхмикроскопического пространства-времени. Удивительно, но концепция ПКГ, исходя из тех же предпосылок единого «квантового базиса» Мироздания, оказывается полностью противоположной по смыслу квантовому потенциалу Боба. В теории ПКГ на планковских масштабах пространство-время предстает не непрерывным, а «сложенным» из дискретных элементов, мельчайших единиц пространства. Объем этих «кирпичиков Мироздания» приблизительно задается кубом планковской длины ( $\sim 10^{-33}$  см).

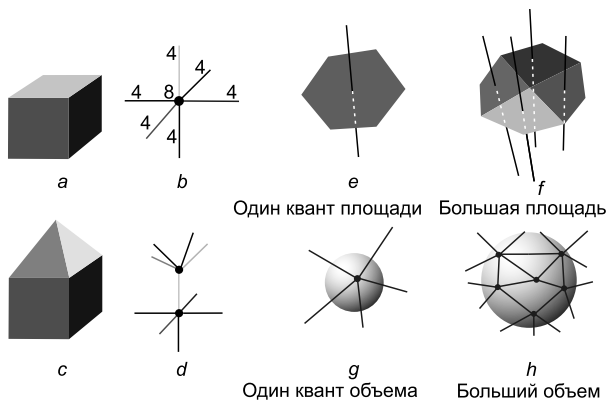
Выходит, что если выбрать любой произвольный объем окружающего нас пространства, то, обладая неким фантастическим квантовым измерителем, можно всегда сказать, сколько в нем содержится фундаментальных «атомов» пространства-времени.

В квантовых теориях у объектов нет определенных положений и скоростей, и все описывается вероятностями и волнами, занимающими определенные области пространства. Все пребывает в постоянном движении: даже «пустое» пространство заполнено так называемыми виртуальными частицами, которые непрерывно возникают и исчезают. Вместе с тем общая теория относительности, как и теория гравитации, принципиально классическая и не квантовая. Великое творение Эйнштейна гласит, что вблизи любого сгустка вещества или энергии искривляется пространство-время, а вместе с ним и траектории частиц, которые словно оказываются в гравитационном поле. Общая теория относительности чрезвычайно стройна и красива, а многие ее предсказания проверены с величайшей точностью.

Зная координаты, скорости и массы, можно с помощью уравнений общей теории относительности вычислить искривления пространства-времени и определить влияние тяготения на траектории рассматриваемых тел. Кроме того, пустое релятивистское пространство-время — идеально гладкое независимо от того, насколько детально его исследуют.

Оно представляет собой абсолютно ровную арену, и на ней выступают вещество и энергия.

В большинстве ситуаций противоречивые требования квантовой механики и общей теории относительности не представляют проблемы, поскольку или квантовые, или гравитационные эффекты оказываются настолько малыми, что ими можно пренебречь. Однако при сильном искривлении пространства-времени становятся существенными квантовые аспекты гравитации. Чтобы создать большое искривление пространства-времени, требуется очень большая масса или большая ее концентрация. Даже Солнце не способно настолько искривить пространство-время, чтобы проявления квантовых эффектов гравитации стали очевидными.



Квантовые спиновые сети теории петлевой квантовой гравитации

«*Диаграммы, называемые спиновыми сетями, используются для представления квантовых состояний пространства при минимальном масштабе длины. Например, куб (а) — это объем, окруженный шестью квадратными гранями. Соответствующая спиновая сеть (b) содержит точку (узел), представляющую объем, и шесть линий, изображающих грани. Число возле узла указывает величину объема, а число возле линии — площадь соответствующей грани. В рассматриваемом случае объем равен восьми кубическим единицам Планка, а каждая из граней имеет площадь в четыре квадратных единицы Планка. Если на верхней грани куба помещена пирамида (с), то линия, представляющая эту*

*грань в спиновой сети, должна соединять узел куба с узлом пирамиды (d). Линии, соответствующие четырем свободным граням пирамиды и пяти свободным граням куба, должны выходить из соответствующих узлов. Вообще в спиновой сети один квант площади изображается одной линией (e), а площадь, составленная из многих квантов, обозначается многими линиями (f). Аналогично один квант объема изображается одним узлом (g), тогда как больший объем содержит много узлов (h)...»*

Л. Смолин. Атомы пространства и времени

Много надежд физики-теоретики связывают с оригинальной теорией струн, появившейся в 1970-х годах. Современная версия «струнной физики» — суперсимметричная теория струн (теория суперструн или суперстрингов). С ее помощью удалось если не устранить, то хотя бы преодолеть большинство препятствий на пути к построению логически не противоречивой теории квантовой гравитации. Однако несмотря на солидные усилия, прилагаемые со стороны международного коллектива теоретиков, теория струн так и не вышла из стадии разработки. Ученым пока не известны ни окончательный вариант ее математического аппарата, ни фундаментальные системы уравнений, определяющие ее форму.

Изначально в ней видели весомого кандидата на долгожданную общую теорию всех частиц и сил. Однако после появления в начале 1970-х годов концепции кварков, которая быстро выросла в целый раздел физики элементарных частиц, модель стрингов стала явно проигрывать объединяющей модели кварков. Кварковая микрофизика названа квантовой хромодинамикой (КХД), поскольку связана с динамикой цветовых зарядов кварков. Как эффективный способ расчета сильных взаимодействий, кварковая модель прекрасно согласовывается с экспериментальными данными, не выходя за границы квантовой теории поля, универсальной основы для объяснений фундамента микромира. Струнная теория на фоне КХД выглядит не очень солидно, поскольку не обладает особой внутренней стройностью и какими-либо опытными подтверждениями.

Ко всему прочему струнная теория с самого начала столкнулась с трудностями размерности пространства, поскольку все ее модельные варианты так или иначе включают дополнительные размерности пространственно-временного континуума. Вскоре выяснилось, что многомерность струнных моделей реализуется никак не менее чем в десятимерном пространственно-временном континууме из девяти пространственных и одного временного измерения. Это было очень необычно, поскольку физики-теоретики и прикладные математики еще не сталкивались с теориями, автоматически диктующими разработчикам требуемую размерность. Все известные уравнения механики, электродинамики и теории относительности в принципе справедливы для самого разного числа измерений. В данной ситуации казалось, что модели суперструн со своими шестью лишними измерениями останутся сугубо умозрительными построениями.

Помощь пришла со стороны теоретиков, много лет пытавшихся найти квантовую версию для общей теории относительности, поскольку из соответствующих уравнений теории гравитации Эйнштейна следует существование в природе волн тяготения, которые превращаются при квантовании в кванты поля тяготения — гравитоны, переносящие силы тяготения. При этом теория предсказывала, что гравитоны должны обладать, как и фотоны электромагнитного поля, нулевой массой. И вот в научных работах 1970-х годов появились таинственные безмассовые частицы, входящие в различные вариации струнных построений, сопоставлялись они именно с гравитонами! Сразу же последовали выводы, что струнная теория может содержать долгожданный математический каркас для развития квантовой теории тяготения, которая объединит все известные фундаментальные взаимодействия в Теорию всего.

Важно было понять, почему же никак не ощущаются все эти дополнительные измерения окружающего мира. В качестве ответа струнные теоретики предложили модель, в которой все дополнительные измерения свернуты в ультрамикроскопические клубки, или по-научному — «компактифицированы». Именно поэтому все наши измерительные приборы, включая сверхмощные ускорители элементарных

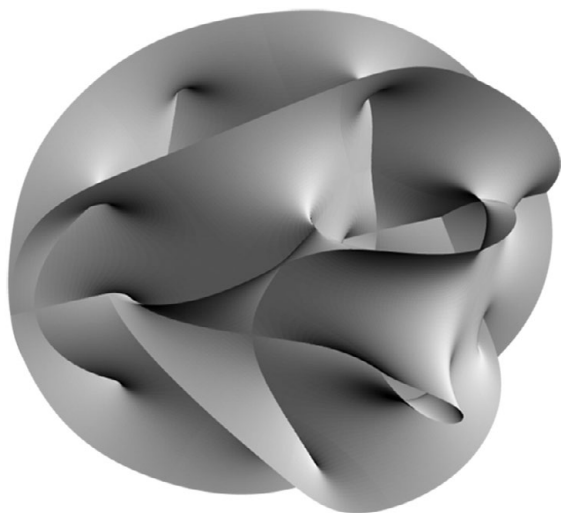
частиц, не «чувствуют» их присутствия. Впрочем, в последнее время появились идеи о том, что в кое-каких экспериментах на самом мощном в мире ускорителе — Большом адронном коллайдере — может проявиться влияние скрытых измерений.

Что обещает дальнейшее развитие теории струн?

Самым грандиозным успехом была бы долгожданная единая концепция всех частиц и сил — Теория всего. На пути к этому, безусловно, возникнут новые модели пространства и времени (их и сейчас более чем достаточно), способные прояснить многие загадки гравитации и квантовой космологии. Это грандиозная цель, и вполне возможно, что для ее осуществления потребуется еще одна революция в представлениях о структуре физической реальности. Уже сейчас струнные работы имеют интересные результаты в математике, включая создание новых математических структур, есть инновационные идеи и методы их решения. На последних конференциях, посвященных различным аспектам струнной теории, часто можно встретить физиков-теоретиков и математиков, совместно докладывающих свои исследования из таких областей математики, как, например, алгебраическая геометрия.

Как выглядят одномерные квантовые струны с добавленными измерениями, не рискнет себе представить ни один фантаст. Еще более далеки от нашей реальности струнные построения в виде очень странных двумерных объектов, называемых мембранами. Теоретический конструктор из струн может создавать плоские браны различной размерности: от единичных до девятимерных. Однако кубиками этого вселенского конструктора всегда остаются одномерные струны, так как считают, что именно их вибрации и генерируют все известные нам элементарные частицы. Не так давно появилась парадоксальная теория, согласно которой зародыши струн в далекие времена Большого взрыва могли дорасти вместе со всей Вселенной до гигантских сверхтонких нитей со свободными концами. Такие же, но замкнутые в кольца космоструны могут опутывать целиком всю Метагалактику, заключая ее в кокон невидимой, но ощущаемой по движению скоплений галактик темной энергии.





Пространство и время на планковских масштабах — геометрия Калаби — Яу (названа по имени теоретиков, наиболее активно участвовавших в ее разработке)

*«Когда мы проникаем все глубже, последовательно увеличивая область наблюдения, мы видим, что неровности пространства становятся все более неустойчивыми. На низшем уровне ткань пространства предстает в масштабе меньше планковской длины — миллионной миллиардной миллиардной доли ( $10^{-33}$ ) сантиметра и становится кипящим котлом бурлящих флуктуаций. Обычные понятия пространственных измерений и направлений здесь так перепутаны ультрамикроскопической суетой, что они теряют всякий смысл. Даже обычные понятия „до“ и „после“... делается бессмысленным квантовыми флуктуациями на временных масштабах, короче планковского времени, около десяти миллионов триллионных триллионных триллионных доли ( $10^{-43}$ ) секунды (которое приблизительно равно времени, необходимому свету, чтобы пролететь планковскую длину). Подобно размытой фотографии, неустойчивые колебания делают невозможным однозначно отделить один временной срез от другого, когда интервал времени*

*между ними становится короче планковского времени. Итог таков: на масштабах короче, чем планковские расстояние и продолжительность, квантовая неопределенность делает ткань космоса настолько перекрученной и искаженной, что обычные концепции пространства и времени больше не применимы».*

Б. Грин. Ткань космоса. Пространство, время и текстура реальности

Теория струн началась со сверхмалых — планковских — масштабов, лежащих за трудновообразимой гранью в  $10^{-33}$  см, однако, совершенно неожиданно появились умозрительные идеи, связанные, можно сказать, с «космическими» мегаизмерениями. Переход от сверхмалых, закольцованных на планковских масштабах в некие «компактифакты» измерений к очень масштабным и даже практически бесконечным размерностям просто поражает воображение. И опять возникает вопрос восприятия столь странного Мира в нашем пространственно-временном континууме, и струнные теоретики вновь удивляют своим ответом: многообразие «внешней Вселенной» не ощущается, поскольку мы навечно прикованы к трехмерной гиперповерхности нашей браны, парящей в пространстве больших измерений.

Теория струн подсказывает способ почувствовать или даже увидеть иные пространственные размерности, научившись детектировать гравитационные флуктуации «подпространства». Подобные умозаключения могут в принципе воплотиться уже при нынешнем уровне техники эксперимента, например в космических наблюдениях с орбитальной гравитационной обсерватории НАСА LISA. Существование сверхмасштабных дополнительных размерностей по идее должно было бы привести к очень интересным эффектам, причем наблюдаемым как во вселенских, так и планковских масштабах. Можно, например, представить себе образование микроколлапсаров в результате столкновения сверхэнергичных микрочастиц.

Теория струн предлагает и оригинальные космологические сценарии эволюции нашего Мира. Например, что

Вселенная на современном этапе развития может быть заполнена космическими струнами галактических или метагалактических масштабов. В основе — идея о том, что поскольку расширение нашей Вселенной началось с планковского масштаба Большого взрыва, то на этой стадии пространство-время было плотно заполнено «обычными» микроскопическими суперструнами с планковской длиной. Для их растяжения до метагалактических размеров потребовалась бы колоссальная энергия, и она нашлась естественным образом в ходе разлета нашего Мира. Конечно, тут за скобками остается очень интересный вопрос: что предшествовало появлению суперструн в сверхмикроскопическом пузырьке — зародыше нашей Вселенной? Следующий вопрос состоит в характере непосредственного влияния микро-мезо-макро-мегасуперструн на эволюцию Вселенной, а также изменение их физических характеристик при этом. Гипотезу мегаскопических суперструн можно привлечь и для объяснения перехода этапа равномерного расширения в ускоренное около 8 млрд лет назад.

Пожалуй, суперструны на всех этапах своего «растяжения» каким-то образом должны были взаимодействовать и с таинственными темной материей и энергией хотя бы потому, что данные «темные стороны» Мироздания составляют основное содержание Метагалактики. А так как исследование этих загадочных субстанций ведется интенсивно во многих направлениях, есть определенная вероятность экспериментального подтверждения столь экзотичной теории. Во всяком случае и для объяснения новых эффектов на сверхмощных ускорителях, и для наблюдений галактических аномалий появляются новые очень необычные аргументы одной природы.

Поскольку первые мгновения Большого взрыва прошли под знаком сил тяготения, это дает мощный импульс к развитию квантово-гравитационного сценария эволюции Вселенной по крайней мере на начальном этапе. Именно концепция ПКГ предсказывает впечатляющий результат исчезновения изначальной космологической сингулярности из-за квантовых флуктуационных эффектов. При этом процесс инициации Большого взрыва перестает

быть самым загадочным процессом Мироздания, и появляются определенные надежды не только проследить изначальную эволюцию Вселенной, но и заглянуть за грань реальности субсингулярного состояния. Теория ПКГ принципиально отличается от других теорфизических построений. Например, суперструнные объекты, такие как разнообразные стринги и многомерные мембраны, «обитают» исключительно в искусственно приготовленных для них пространственно-временных «апартаментах», при этом вопрос о самом происхождении многомерного пространства-времени здесь не решается.

В ПКГ-теории основные объекты — субмикроскопические квантовые ячейки пространства, скрепленные друг с другом в некие соты внутренним полем. Теоретики ПКГ утверждают, что величина этого поля представляет для петлевых сот нечто, что можно было бы назвать внутренним временем, и даже форма этого полевого потенциала напоминает стрелу времени, летящую из прошлого в будущее. Теория ПКГ предсказывает, что формирование квантовых петлевых сот должно происходить на определенном этапе эволюции Вселенной, когда концентрация энергии в ней становится сравнительно небольшой. Именно тогда, достаточно далеко от момента сингулярности, начинается «сплавление» ячеек квантовых сот в четырехмерный пространственно-временной континуум.

Не исключено, что в отдаленной перспективе такие построения помогут решить задачу о генезисе Вселенной в окрестностях сингулярности Большого взрыва. Анализ результатов, полученных в теории ПКГ, показывает, что при экстремальном сжатии метрики нашего четырехмерного континуума он начинает как бы рассыпаться, но квантовая геометрия останавливает этот коллапс на этапе планковских размеров ячеек, после чего начинается расширение, в целом повторяющее историю Большого взрыва. Подобные космологические циклы «Большой взрыв — Большой коллапс» можно проанализировать с помощью аппарата ПКГ как вперед, так и назад во времени, что позволяет совершенно по-новому взглянуть на старый сценарий циклически пульсирующей Вселенной.



Суперструнные построения «хромосом» Мироздания (см. вклейку)

*«Образ вибрирующей струны или мембраны — как фундаментального базиса всех элементарных частиц в общем-то довольно ясен, если, конечно, опустить сверхсложный математический аппарат. Вообще же говоря, на момент написания книги физики-теоретики еще далеко не полностью построили из стрингов и бран здание М-теории.»*

*Возможно, что природа на фундаментальном субквантовом уровне выглядит совершенно фантастично. Там, на самом „доньшке Мироздания“, она скачкообразно непредсказуема и переменчива, к тому же граница между непрерывным и дискретным размыта. Там в невообразимой внутренней глубине капли материи непрерывно переливаются в океан энергии и обратно...»*

О. Арсенов. Параллельные Вселенные

Кроме новых космологических сценариев, теория ПГТ предлагает также ответ на вопрос: что удержало наш новорожденный Мир от практически мгновенного коллапса? Согласно концепции петлевой гравитации первично устойчивое состояние вакуума в результате флуктуации

топологии стало неустойчивым по отношению к нашей Вселенной. Эта неустойчивость приводит к тому, что внутри оболочки аномалии вакуум начинает изменять свои свойства, стремясь к новому устойчивому пределу. Процесс перестройки вакуума сопровождается гигантским выделением энергии, в результате чего новообразованная Вселенная начинает расширяться с колоссальной скоростью. Сам процесс можно интерпретировать как своеобразный взрыв вакуума.

Теория ПКГ многое проясняет и в концепции инфляционной Вселенной, особенно на начальном этапе рождения нашего Мира, когда внутри быстро расширяющегося пространственно-временного континуума возникает локальная переохлажденная область, которая начинает расширяться с более высокой скоростью, напоминая стремительную кристаллизацию с увеличением объема переохлажденных водных растворов. Чтобы понять физические механизмы, приводящие к столь странной асимметрии расширяющейся Вселенной, нам придется обратиться к «непустой пустоте» — физическому вакууму.

Как уже отмечалось, современная модель физического вакуума представляет собой море виртуальных субатомных частиц, стохастическим (случайным) образом переходящих из виртуального в овеществленное состояние. Это явление хорошо известно как вакуумное флуктуирование, которое хотя и невозможно наблюдать непосредственно, имеет множество побочных явлений в микромире элементарных частиц. Согласно физике элементарных частиц вакуум непрерывно генерирует неисчислимое количество пар частица-античастица, они тут же аннигилируют друг с другом, порождая всплески энергии. В теории ПКГ предполагается, что в какой-то момент квантовая флуктуация не релаксировала, а послужила началом удивительной реакции, в результате которой из пенящегося квантовыми всплесками вакуума, как Афродита из пены морской, возникла наша Вселенная.

Более всего в этом сценарии интересен сугубо квантовый период планковского времени порядка  $10^{-43}$  с после

начала стабилизационного роста инициирующей процесс Большого взрыва квантовой флуктуации. Именно тогда начался процесс инфляционного расширения в странной «непустой пустоте» физического вакуума, заполненной неким первичным полем, параметры которого существенно менялись из-за квантовых флуктуаций, вспенивающих совершенно случайным образом первичный субстрат пространства-времени.

Инфляция прообраза нашего Мира была чрезвычайно быстрой и продолжалась где-то  $10^{-34}$  с, причем за это сверхмалое время поперечник новорожденной Вселенной неизмеримо вырос, приобретая мегаскопические размеры. Именно инфляция окончательно сформировала весь набор фундаментальных физических констант, вошедших в природные закономерности, что управляют нашим Миром. В самом конце инфляционного процесса силовое поле (его называют скалярным инфлатоном) стало стремительно скатываться к минимуму, быстро осциллируя и рождая поток элементарных частиц. Таким образом, к окончанию инфляционной эпохи наш Мир наполнился сверхвысокотемпературной плазмой из глюонов, лептонов, свободных кварков и высокоэнергетичных квантов электромагнитного излучения. Однако и у этого космологического сценария есть существенные недостатки. Во-первых, трудно экстраполировать достаточно скромные экспериментальные данные о виртуальных субатомных частицах очень высоких энергий на рождение целой вселенной. Во-вторых, квантовый физический вакуум, строго говоря, представляет собой довольно сложную субструктуру, происхождение которой само по себе достаточно загадочно.

За недолгое свое существование (скоро 50-летний юбилей) суперструнная физическая доктрина испытала и взлеты, и падения. В начале XXI века от нее отделилось новое направление — теория многомерных мембран (М-теория). Скоро оно стало доминирующим. Можно сказать, что эта модная теория, по сути, исследует те же струны, но плоские, или, по меткому выражению одного из ее создателей профессора Хуана Малдасены (р. 1968), мембраны отличаются от струн примерно так же, как макароны от лепешек.

Согласно М-теории пространство изначально имеет 11 размерностей, и внутри его скрываются многомерные мембраны, так называемые р-браны, обладающие р-размерностью. Так, 0-брана — это некая точка в пространстве, 1-брана — это знакомая нам струна, а 2-брана — некая плоскость, называемая обычно мембраной.



Суперструнный гравитон

*«Гравитоны — это закольцованные струны, и потому бранные границы им не помеха. Они могут покидать нашу 3-брану и уходить в другие измерения. Но если переносчики гравитации способны на это, то сила тяготения должна убывать с увеличением расстояния не по ньютоновскому закону обратных квадратов, а гораздо быстрее! То, что мы этого не замечаем, может свидетельствовать о компактификации дополнительных измерений. В этом случае отклонения от ньютоновской формулы должны проявляться лишь на очень малых дистанциях. Однако есть и другие предположения о том, что наша 3-брана в состоянии удерживать гравитоны своим собственным притяжением. Если это так, то внешние измерения могут быть хоть бесконечно большими, а закон Ньютона все равно будет выполняться на любых дистанциях».*

О. Арсенов. Параллельные Вселенные



Подобным образом можно представить и браны более высоких размерностей, причем колебания стрингов здесь заменяют вибрации мембран.

Рассматривая разные версии струнной теории, можно сделать вывод, что базис суперструнных построений составляет единая теория многомерных квантовых мембран. Эта единственность выглядит столь привлекательной, что вскоре после построения основ М-теории научные и популярные журналы заполнили прогнозы о близости окончательной победы в борьбе с тайнами окружающей нас Вселенной с помощью концепции многомерных квантовых мембран. Однако при очередных попытках получить всеобщие закономерности эволюции нашего Мира разразился грандиозный кризис суперструнной М-теории.

Суть этого кризиса, полностью не преодоленного и в настоящее время, очень кратко можно выразить так: неопределенность ландшафта струнных бран в новых вариациях М-теории. Самые «продвинутые» версии теории струн описывают эволюцию сверхмикроскопических стрингов в 11-мерном пространстве-времени при сверхвысоких температурах, плотностях и давлениях первичной среды. В процессе космологической инфляции и последующего расширения Вселенной температура, плотность и давление начинают стремительно падать, так что семь из одиннадцати измерений становятся крайне неустойчивы и спонтанно сворачиваются в сверхмикроскопические самозамкнутые структуры. Макроскопическими остаются только привычные нам три пространственных измерения и время, составляя четырехмерный пространственно-временной континуум нашей реальности. Вот здесь в ходе действия таинственного механизма компактификации и возникает немислимо гигантское количество самых разных конфигураций свернутого «лишнего» пространства. Между тем буквально каждая из таких конфигураций приведет к совершенно новому Миру со своими параметрами полевых сил, видами элементарных частиц и прочими индивидуальными отличиями. Вся эта практически бесконечная совокупность конечных вселенных, вытекающая из М-теории, при самых

разных «свертках» дополнительных пространственных размерностей и называется парадоксальным «ландшафтом» теории струн.

Как упорядочить в разумное количество браны струнных миров, пока еще не известно, и физики пошли по другому пути, пытаясь найти способы проверки принципов построения самой теории квантовых стрингов. Для ревизии такой необычной концепции потребовались и очень необычные объекты — гравитационные коллапсары, более известные как черные дыры. Застывшие звезды коллапсаров действительно могут оказаться подходящими космическими лабораториями по изучению струнных теорий, так как из-за фантастически высокой напряженности поля тяготения у них должны зримо проявляться эффекты квантовой гравитации, например такие, как испускание гравитационных волн, рябью покрывающих пространственно-временной континуум.

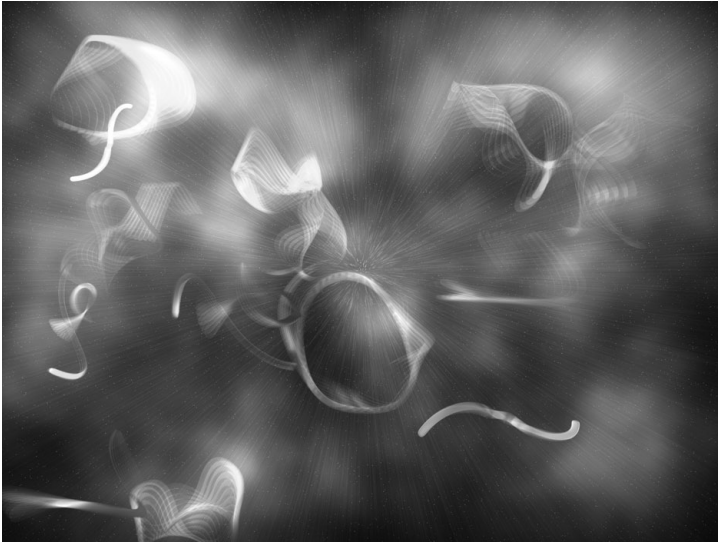
Кроме космических далей физики-экспериментаторы ищут новые силовые взаимодействия, следующие из М-теории, в лабораторных условиях. Например, исследователи постоянно совершенствуют проведение очень чувствительных экспериментов по оценке силы гравитационного тяготения между массивными телами, разделенными микроскопическими расстояниями, но, честно говоря, никто еще никогда не наблюдал хоть малейшего отклонения от знаменитого закона всемирного тяготения Ньютона. Однако отрицательный результат — тоже важный результат, и на основе очень скудных опытных данных суперструнные теоретики постепенно селекционируют свои построения, исключая отдельные варианты моделей.

Итак, концепция квантовой гравитации настойчиво предсказывает, что временная шкала, непосредственно прилегающая к некой условной точке 0 начала отсчета времени существования нашей реальности, полна загадочных событий. Стремящиеся в бесконечность плотности материи и энергии пока еще не могут быть описаны современной физикой. Тем поразительнее, что теория суперструн берет на себя немислимую смелость моделировать не только сам момент Большого

взрыва, но и предшествующее развитие событий. Существует даже несколько моделей досингулярного состояния нашего Мира. Самая экзотичная из них предполагает, что наш Мир существует внутри... черной дыры!

Основывается этот суперструнный космологический сценарий на том, что внутри гравитационного коллапсара пространство и время как бы меняются местами, так что мнимая центральная точка сингулярности предстает нам не в пространственном виде, а во временном. По теории струн получается, что падающая в черную дыру материя, по мере приближения к центру, становится все более горячей и плотной, а по достижении некоторых граничных значений вместе с кривизной пространства-времени начинает уменьшаться. В момент такого поворота и возникает сингулярность космического катаклизма Большого взрыва. Получается, что, если следовать такому суперструнному космологическому сценарию, наш Мир — это бывшая внутренность некой Вселенной — черной дыры.

Неудивительно, что подобный сверхпарадоксальный сценарий вызвал много дискуссий среди физиков-теоретиков. Некоторые космологи вполне справедливо замечают, что для согласования подобной модели с наблюдательными данными наш Мир должен был родиться из чрева гравитационного коллапсара довольно внушительных размеров по сравнению с планковскими масштабами теории квантовых мембран. Их оппоненты при этом возражают, что поскольку уравнения М-теории не вводят никаких дополнительных ограничений на размер черных дыр, то формирование Вселенной внутри достаточно большого коллапсара — случайное событие. Если считать, что характер поведения материи и самого пространства-времени вблизи сингулярности Большого взрыва был хаотическим, то в таком хаосе вполне мог возникнуть достаточно плотный газ «мембранных протомикроколлапсаров» в виде сверхмикроскопических массивных мембран, балансирующих на грани гравитационного коллапса. Именно здесь может содержаться ключ к решению проблем загадочной сингулярности и не менее таинственной первичной экспансии пространства-времени в стандартной космологии Большого взрыва.



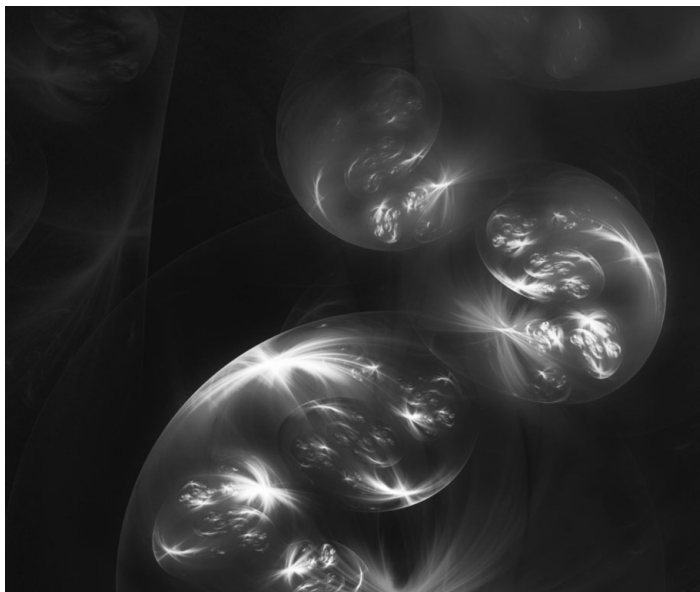
Эволюция суперстринговых бран

*«Сценарии мира на бране работают, только если вы делаете специальные предположения о геометрии дополнительных измерений и способе, которым трехмерная поверхность, которая является нашим миром, помещается внутри них. В добавление ко всем проблемам, от которых страдали старые теории Калуца-Кляйна, имеются новые проблемы. Если может быть одна брана, плавающая в высокоразмерном мире, почему их не может быть много? И если имеются другие, то как часто они сталкиваются? В самом деле, имеются предположения, по которым Большой Взрыв возник из-за столкновения миров на бранах. Но если это может произойти один раз, почему с тех пор это больше не происходило? Прошло около 14 млрд лет. Ответ может быть в том, что браны встречаются редко, но в этом случае мы опять получаем тончайшие настроенные условия».*

Л. Смолин. Неприятности с физикой: взлет теории струн, упадок науки и что за этим следует

Как же еще может описывать М-теория рождение нашей Вселенной в мире квантовых бран? Один из популярных

среди струнных физиков-теоретиков космологических сценариев — экипротический (от греч. *εκρυotic* — «пришедший из огня»). В нем предлагается модель досингулярного Мироздания — Универсума, состоящего из неисчислимого количества квантовых мембран, дрейфующих в многомерном пространстве. При столкновении таких мембран происходит множество прообразов нашего Большого взрыва, рождающих новые миры. Можно представить, что зародыш нашего Мира в виде многомерной мембраны парит в еще более многомерном пространстве. Вот в непосредственной близости (хотя понятие «далеко — близко» в многомерном Универсуме глубоко условно) появился еще один мембранный зародыш, второй родитель нашей реальности. Когда расстояние между двумя параллельными бранами уменьшится до критического в точке условного соприкосновения, начнется процесс рождения нашей Вселенной, космологи называют его Большим взрывом. Естественно, Универсум не может содержать лишь две браны, поэтому подобные столкновения повторяются циклически.



Квантовая космология бесконечной череды  
Больших взрывов (см. вклейку)

*«Притягиваясь, мембраны сжимаются в направлении, перпендикулярном движению. Их соударение порождает начало Большого Взрыва, преобразуя кинетическую энергию в материю и излучение. После удара мембраны расходятся и начинают расширяться, а материя проходит все стадии формирования от элементарных частиц до скопления галактик. В циклической модели силы притяжения замедляют движение расходящихся мембран, затем мембраны останавливаются и снова начинают сближаться, порождая новый Большой Взрыв, и так до бесконечности...»*

Б. Грин. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории

Экспиротический сценарий имеет и циклический вариант, когда мембраны, сталкиваясь, отскакивают друг от друга и расходятся, затем снова притягиваются и соударяются, снова расходятся и так практически до бесконечности. Расходясь после очередного столкновения, они как бы растягиваются и в цикле сближения снова сжимаются. При смене направления движения мембраны на противоположное, она расширяется все быстрее и быстрее, поэтому наблюдаемое сейчас ускоренное расширение Вселенной может свидетельствовать о грядущем грандиозном катаклизме мембранного столкновения.

У различных струнных космологических сценариев есть общие черты. Многие из них начинаются с практически безграничного, холодного и заполненного сверхразреженным веществом досингулярного Универсума. Затем у всех происходит труднообъяснимый «транссингулярный» переход через катаклизм инициации Большого взрыва к стадии расширения. Сценарии имеют и существенные отличия. Например, в предвзрывном все силовые поля вначале незначительны по величине и, лишь постепенно возрастая, достигают экстремального максимума в момент Большого взрыва. В экспиротической модели все происходит наоборот: в момент столкновения значения силовых полей минимальны.

Сейчас уже можно определенно сказать, что одна из главных проблем космологической теории квантовых

суперструн в том, что она не может предсказать, какая именно Вселенная реализуется в реальности после тех же множественных столкновений мембран. Многие ученые находят, что теория космических суперструн настолько неопределенна, что из ее различных вариантов можно получить любое конечное состояние нашей Вселенной. Космологи формулируют этот парадокс как бесконечную многовариантность ландшафта теории суперструн. Это означает, что теория имеет очень высокий уровень научной спекулятивности и ее крайне трудно аргументированно опровергнуть, так как для объяснения любого экспериментального результата можно подобрать подходящую модификацию суперструнной парадигмы.

И все же струнные теоретики надеются, что при внимательном изучении космологических сценариев М-теории им откроется некий единственно верный механизм сворачивания многомерных бран в наше привычное четырехмерное многообразие. Разумеется, поиск такого механизма представляет собой чрезвычайно сложную проблему теорфизики, поэтому большинство исследователей пребывают в готовности разрубить данный Гордиев узел суперструнной проблематики новыми опытными данными, подобными тем, что все время поступают с Большого адронного коллайдера.

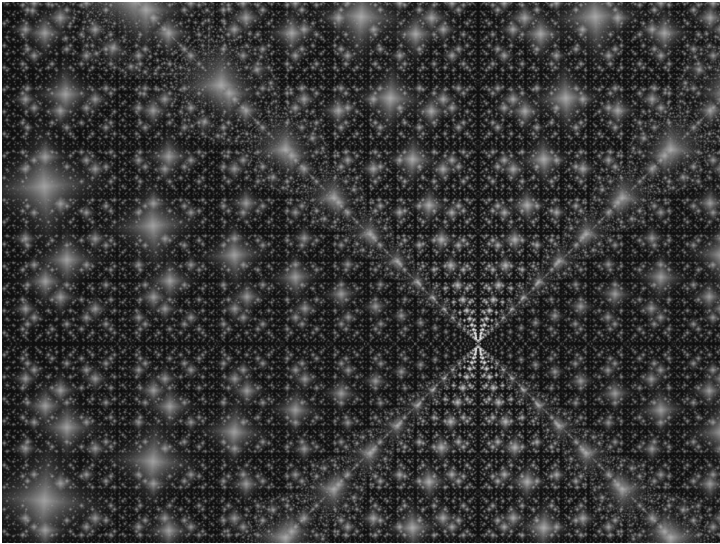
## Квантовое время Космоса

*«...Существует множество причин, позволяющих уверовать в бесконечность Вселенной.*

*А раз так, значит, она состоит из бесконечного количества регионов, соизмеримых по масштабу с тем, который доступен для нашего наблюдения (80 млрд световых лет в поперечнике). Исходя из положений квантовой механики можно сделать вывод, что число историй, которые могут произойти за конечный отрезок времени (начиная с Большого взрыва) — конечно. Под историями я понимаю не только историю цивилизаций, а любые события, которые могут произойти, вплоть до атомного уровня. Возможных*

*историй невероятно много (грубо их количество можно оценить как  $(10^{10})^{50}$ , но важно то, что мы имеем дело с конечным множеством».*

А. Виленкин. Мир многих миров



Бесконечное количество историй Мироздания

*«Таким образом, есть бесконечное количество регионов, подобных нашему, и только конечное количество историй, которые могут в них произойти. Следовательно, каждая возможная история произойдет в бесконечном множестве регионов. В частности, будет бесконечное количество регионов, чьи истории идентичны нашим. Так что, если вы не удовлетворены результатами президентских выборов, не отчаивайтесь: ваш кандидат пришел к власти в бесчисленном количестве Земель».*

*Такая картинка Вселенной лишает нашу цивилизацию возможности претендовать на уникальность: таким, как мы, рассеянным по всему космосу, нет числа. Это, конечно, грустно, но, возможно, что все обстоит именно так».*

А. Виленкин. Мир многих миров



Вернемся к представлениям квантовой теории гравитации, предсказывающей существование фундаментальных ячеек пространства-времени. Если с образом пространства, состоящего из скрученных в единый узел — компактифицированных дополнительных измерений, все более-менее ясно, то как быть с принципиально иной характеристикой Мироздания — временем. Простая логика подсказывает, что если на планковских масштабах существуют атомы пространства, определяющие эффекты квантовой гравитации, то им должны соответствовать некие атомы времени. Величину этих самых малых, можно сказать, фундаментальных отрезков длительности легко определить, разделив условный диаметр ячеек пространства ( $10^{-33}$  см) на самую большую скорость в нашей Вселенной — света ( $3^{10}$  см/с), что дает нам приблизительную величину, порядка  $10^{-44}$  с. Представить себе отрезок времени, выражаемый сорока с лишним нулями после нуля и запятой, очень трудно, да что там говорить — просто невозможно, однако из такой простенькой на первый взгляд модели дискретного времени следуют многие важные обстоятельства.

Прежде всего наличие «атомов времени» как-то должно учитываться в сценарии рождения нашего Мира. Ведь родился он на планковских масштабах пространства-времени! В модели «вечной инфляции» инфлатон, как безмассовое поле, постоянно испытывает случайные квантовые скачки, порождающие новые Большие взрывы. Так возникает схема Мультивселенной, разделенной на экспоненциально большие области дочерних Вселенных. В этих параллельных Мирах плотность энергии поля инфлатона, достигая минимума своего эффективного потенциала, также начинает флуктуировать, генерируя очередную серию Больших взрывов с «внучатыми» Вселенным, и так далее до бесконечности в полном соответствии с названием данного космологического сценария. Именно бесконечные квантовые флуктуации инфлатона и порождают то, что космологи называют космической или вселенской стрелой времени, управляющей течением всех процессов и явлений нашего Мира. Причем эта квантовая космологическая стрела времени оказывается разделенной на фундаментальные отрезки длительности — хронокванты, или, как их еще иногда называют, хрононы.

Представить течение квантового времени далеко не просто хотя бы по той причине, что у него есть «внутренний облик» в нашем Мире, облик привычной в повседневности длительности, и «наружный» для квантового Мультиверса, неожиданно предстающий бесконечной вереницей иных миров и измерений. Поэтому для рассказа о чудесах хроно-квантового времени было бы неплохо возродить давнюю традицию физиков придумывать всяческих сказочных существ, наделенных сверхъестественными способностями, такими, как демон Максвелла из школьного курса физики.

Впрочем, одной сказочной сущностью в нашем случае никак не обойтись, придется создать целый квантовый НИИЧАВО (научно-исследовательский институт чародейства и волшебства, как у братьев Стругацких) со штатом потусторонних наблюдателей во главе со старшим демоном — демиургом, разглядывающим строение нашего Мультимира из бесконечной глубины вселенского «ничто».

Структура Мультиверса предстанет перед всепроникающим взором демиурга, парящего среди сполохов квантовых флуктуаций первичного скалярного поля инфлатона, наподобие луковицы, где каждая из множественных Вселенных представляет собой замкнутую оболочку изолированного мира. Ну а в центре луковицы Мультимира демиург с любопытством разглядит главную вселенскую тайну — космологическую сингулярность Большого взрыва, в которую только что развилась одна из бесчисленных квантовых флуктуаций.

Впрочем, он тут же вспомнит полученный накануне свыше указ, подкрепленный статьей из солидного физического журнала, в котором прямо указано, что космологическую сингулярность следует считать самой обычной точкой бифуркации в процессе космического фазового перехода, правда, имеющего не совсем ясную природу и сопровождающегося непонятными изменениями пространственно-временного континуума. Довольно почесав кончиком хвоста за ухом и полистав пудовый фолиант, испещренный бесконечными формулами, с горящими на обложке литерами: «М — теория суперструн», демиург решает, что в высших сферах наконец-то приняли что-то дельное, потому как иметь дело с бесконечными плотностями «сингулярной» материи

и энергии и нечистой силе не очень-то приятно... Ну а теперь, поскольку понятие главной космической сингулярности так удобно аннулировано простым волевым решением, можно пристальнее взглядеться в феерический процесс рождения новых миров, с немислимой хроноквантовой частотой возникающих в катаклизме квантовых флуктуаций колеблющегося марева инфлатона.

Через несколько миллиардов лет, устав от непрерывного мелькания возникающих, растущих и лопающихся пузырей вакуумной пены дочерних и внучатых Вселенных, руководящий демон впадает в сладостную дремоту. Во сне ему, конечно же, привиделся образ Многомирья, так напоминающий пышную шапку пены над запотевшей пивной кружкой (образ известного английского теорфизика Ричарда Готта), что, проснувшись, он тут же решает передать эстафету наблюдения младшим демонам, рассаженным по отдельным мирам, а самому отправиться несколько освежиться в одну из подходящих вселенных, славящуюся осенним элем, романами Клиффорда Саймака и заповедниками гоблинов.

В это время каждый из внутренних демонических наблюдателей уже успел вообразить себя кондуктором вагончика-Мироздания, стремительно летящего по монорельсу стрелы времени в неизвестность. Внутри «вагончика» демон чувствует себя вполне комфортно, здесь течет свое время, рождаются и гибнут галактики и в общем-то идет нормальная эволюция локальной вселенной. Однако скоро демону начинает досаждать периодическое хриплое мяуканье полуживого Шрёдингеровского кота, клетка с которым вместе с портативной системой кошачьего полуумервителя входит в обязательный набор демонического научного инструментария. Пошикав на вредное создание великого теоретика и подумав в очередной раз о том, чем же так досадило Шрёдингеру в свое время кошачье племя, демон тычет кочергой в кошачью клетку, отчего мяуканье переходит в хриплый пульсирующий вой.

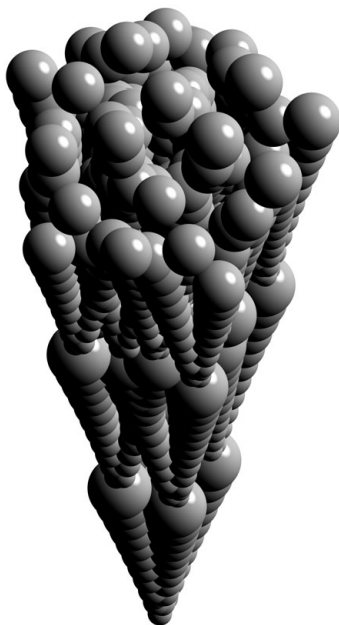
Не выдержав несмолкающего кошачьего концерта, младший бес садится писать длинную жалобу демиургу, сетуя на невозможные условия работы в присутствии кошмарного

порождения одного из основателей квантовой механики, очень досаждающего своим шумным оживлением через каждый хроноквант. Скучающий в небытие демиург, только что вернувшийся с третьей планеты желтого карлика на окраине Млечного Пути, незамедлительно присылает ответ по сверхпространственной почте, от которого шерсть демона становится дыбом, а хвост закручивается в спираль Мебиуса. Забыв о вредном коте, бес стремительно летит в тамбур своего вагончика-Мироздания и распахивает дверь вселенского тамбура... Тут его изумленному взору и предстает весь состав Мультиверса с клацающими буферами запутанных квантовых состояний и практически бесконечным количеством стрелок на каждом хроноквантовом стыке монорельса стрелы времени. С трудом придя в себя и отдышавшись, демон начинает осознать, что не только мерцающая жизнь квантового кота, но и его собственная в реальности данного мира решается каждый хроноквант, локализуясь в полном соответствии с квантовой теорией в новую историческую последовательность хроноквантовых вселенных.

Теперь можно отвлечься от квантовой демонологии и заглянуть в одну из теорфизических работ, описывающую квантовое время Мультиверса. С точки зрения стороннего наблюдателя, совокупность миров Мультиверса будет составлять единую историческую последовательность, по оси времени которой они, расширяясь, движутся. В системе отсчета отдельной Вселенной внутренний наблюдатель отметит прошедшие и наступающие события как абсолютное отражение собственной истории данной реальности. Выходит, что всеобщий принцип атомизма должен распространяться и на длительность событий в нашей Вселенной. Так что в этом смысле вполне можно говорить о возможности существования неких ячеек времени, частиц времени и даже поля времени — хронополя.

Множество всех отражений миров Мультиверса будут образовывать последовательные точки субстанциональной оси времени, на которой и локализуется любой материальный объект при движении по своей мировой линии. Теоретический анализ таких хроноквантовых моделей позволяет

расширить границы логической реинтерпретации фундаментального принципа причинности и детерминизма окружающего физического мира.



Темпоральные отображения Мультиуниверсума

*«Существует несколько вариантов сценариев развития Вселенной, включающих группы моделей в виде последовательности независимых темпоральных отображений нашего Мультиуниверсума. Следует сразу уточнить, что на современном уровне знания количественные оценки темпоральных параметров миров Мультиуниверсума можно рассматривать как дело вкуса каждого исследователя, например их можно считать принципиально ограниченными, но практически бесконечными. Так, в одном из анализируемых сценариев оценка числа Вселенных, реализованных после Большого взрыва до наших дней, составляет  $N = T/t(pl) \sim 10^{60}$ , где  $T$  — время существования нашего Мира,  $t(pl)$  — планковское время».*

О. Арсенов. Физика времени

Таким образом, новые концепции квантового времени способны объединить множественные миры в единую структуру квантового Мультиверса. Например, кембриджский профессор Стивен Хокинг вводит понятие мнимого времени, связывающего воедино все миры Мультиверса. В подобных теоретических схемах миры многомирья напоминают костяшки бухгалтерских счетов, нанизанные на единую стрелу общего времени Мультиверса. Каждый хронквант в сингулярности Большого взрыва возникает новый мир, отправляясь в путешествие по стреле времени. В этой практически бесконечной череде Вселенных действует и собственное время, показывающее возраст каждого конкретного мира. Оно отражает перемещение по стреле времени, как по спидометру автомобиля можно легко узнать время поездки по пройденному расстоянию при строго определенной скорости. Так связь «внешнего» и «внутреннего» времен образует единую структуру Мультиверса.

Строгая последовательность подобных миров, абсолютных дубликатов нашей физической реальности, и будет в целом определять привычный образ реляционного (относительного) физического времени. Определенные логические предпосылки для дальнейшего развития данных представлений, как уже упоминалось, можно найти в интерпретациях теории Эверетта — Уилера — Девитта и моделях Виленкина и Линде. С разработкой новой теоретической модели физического времени возникла возможность анализа существования практически бесконечного множества последовательных и вложенных Вселенных как изолированных и в то же время абсолютно схожих частей единого Мультиверса.

Возникновение квантовой стрелы времени при любых физических сценариях так или иначе вызывает вопросы, связанные с исследованием сингулярного развития Вселенной. В качестве примера можно привести теоретические построения академика Андрея Дмитриевича Сахарова (1921–1989), касающиеся определения физических величин для значения времени  $t < 0$  относительно точки Большого взрыва ( $t = 0$ ). Академик А. Д. Сахаров предложил оригинальную космологическую модель возникновения квантового времени, отличающуюся от модели Фридмана тем, что в ней можно

определить все физические величины для досингулярных значений событий.

Эту гипотетическую модель Сахаров назвал космологической моделью с поворотом квантовой стрелы времени. В подобной модели удастся так сформулировать все законы физики, что они действуют при любом направлении течения времени или, говоря по-научному, инвариантны при темпоральной инверсии. Для этого одновременно с изменением направления времени ( $T$ -преобразование) происходит зеркальное отражение пространства ( $P$ -преобразование), и все частицы меняются на античастицы ( $C$ -преобразование). В результате возникает всеобщий закон  $TPC$ -инвариантности. На его основе в далеком будущем наши потомки смогут создать  $TPC$ -агрегат — машину времени и пространства.

И в заключение. У концепции хроноквантового времени есть еще один крайне любопытный аспект, связанный с исследованиями соотношения неопределенности Гейзенберга, которые проводил в 1930-е годы выдающийся советский теоретик В. А. Фока. Он настолько детально рассмотрел соотношение неопределенности для энергии и времени:  $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ , что его иногда называют соотношением Фока. Один из главных выводов академика Фока, впоследствии не раз возвращавшегося к своим рассуждениям, в том, что квантуемость энергии силовых полей самым естественным образом ведет к квантуемости некоего гипотетического поля времени — хронополя.

В своей хрестоматийной работе «Об интерпретации квантовой механики» советский физик указывал, что именно квантовая природа времени и может в значительной степени объяснить вероятностный характер квантовой науки в целом. Проще говоря, величина темпорального интервала в хроноквантовом исчислении определяет вероятность реализации того или иного квантового процесса. И вот тут было бы уместно вспомнить о полемике Бор — Эйнштейн, где новая концепция хроноквантового времени явно могла бы послужить еще одним аргументом творцу теории относительности. Это прекрасно понимает и современный искатель «скрытого физического смысла» в природе квантовых явлений Роджер

Пенроуз (так его называет друг и коллега Стивен Хокинг). В своих последних статьях он указывает, что моделирование фундаментальных свойств пространства в виде «сверхфундаментальных» частиц, таких, как планкионы, фридмоны или максимоны, прямо приводит нас к концепции времени с хрононами или хроноквантами.

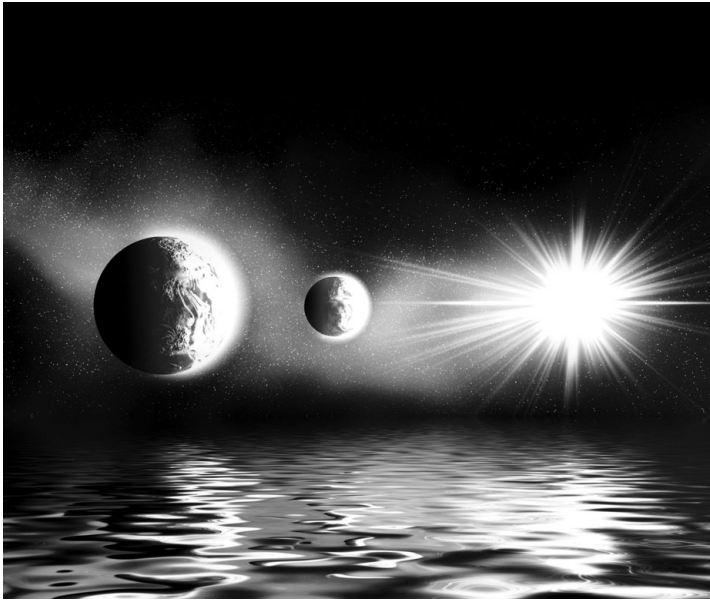
Но существуют ли атомы времени на самом деле? Пока мы еще очень далеки от исследования подобных глубин пространства-времени, а квантовая структура темпоральных процессов вполне может проявлять себя по крайней мере в трех случаях: рождении нашего Мира, далеких явлениях вблизи черных дыр — квазаров и в тонких реакциях рассеивания — столкновении микрочастиц на гигантских ускорителях. Может быть, уже в самом ближайшем времени что-то подскажет анализ экспериментов на БАКе...



## Заключение

*«Сильное оружие нужно физике, чтобы раскрывать тайны природы, и физика выковала такое оружие. В ее арсенале — мощная артиллерия точных и убедительных экспериментов. В штабах ее — сотни и тысячи теоретиков, планирующих пути, по которым ведется наступление, тщательно изучающих трофеи, добытые в экспериментах. Это наступление физика ведет не вслепую. Она освещает поле боя с неизвестным прожекторами могучих физических теорий. И наиболее сильные прожекторы современной физики — теория относительности и квантовая механика».*

В. Рывдик. Что такое квантовая механика



Мир Ньютона и Лапласа? Квантовый Мультиверс? Или вечно инфляционный Мультиуниверсум? (см. вклейку)

*«...При объединении уравнений общей теории относительности и квантовой механики начинается тряска, грохот и шипение пара, как в перегретом котле. Если выразиться*

*менее образно, несчастливый союз этих двух теорий может приводить к появлению бессмысленных ответов на корректно поставленные физические вопросы. Даже если вы позволите глубинам черных дыр и началу Вселенной и далее скрываться под покровом тайны, вам не удастся избежать ощущения, что враждебность между квантовой механикой и общей теорией относительности вопиет о необходимости выработки более глубокого уровня понимания. Возможно ли, чтобы Вселенная была разделена на наиболее фундаментальном уровне, требуя одного набора законов для больших объектов и другого, несовместимого с первым, для малых?»*

Б. Грин. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории

Сегодня квантовая наука пытается не только понять саму суть строения материи, но и смело связать самые верхние метагалактические этажи Мироздания с его субкварковыми подвалами, задавая природе вопросы, о которых ученые во времена Галилея не могли и помыслить. Например, что такое материальная масса и почему окружающие нас вещи ее имеют? В 1960-х годах данный вопрос в очередной раз поднял шотландский физик-теоретик, член Королевского Общества Эдинбурга и Лондонского королевского общества, в настоящее время профессор в отставке Питер Хиггс (р. 1929). Его идея — детально рассмотреть механизм спонтанного нарушения электрослабой симметрии, объясняющей происхождение массы элементарных частиц, в частности векторных бозонов. В результате было предсказано существование новой частицы. В настоящее время и механизм, и частица-бозон носят имя Хиггса. Хотя бозон только собираются открыть в экспериментах на БАКе, построения Хиггса считаются весьма перспективными и хорошо согласующимися с принципами Стандартной модели. Бозоны Хиггса иногда уподобляют некой волшебной палочке, своим прикосновением превращающей кварки и лептоны в барионы — массу содержащие частицы.

Хорошо известно, что ученых ничто так не раздражает, как назойливые попытки некоторых философов-метафизиков проанализировать их исследования, да еще с идеалистических или религиозных точек зрения. От подобных

демаршей современных натурфилософов пользы никто не видел, а вред от внедрения лженаучных взглядов вполне ощутим. Чего стоят хотя бы попавшие в прессу данные о командах экстрасенсов-колдунов, астрологов и прочие на военной и государственной службе!

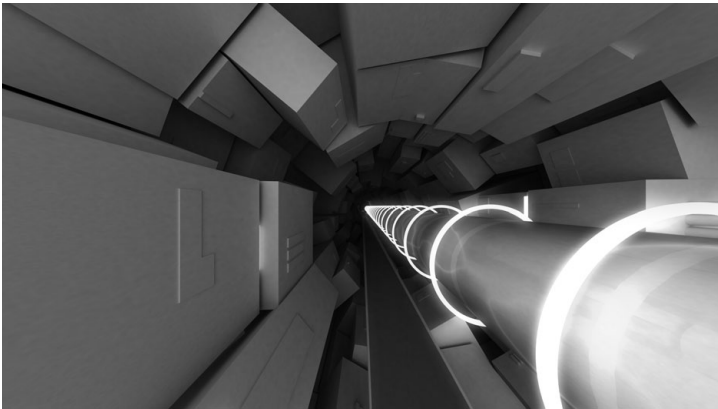
Возможно, именно поэтому нобелевский лауреат Стивен Вайнберг назвал одну из глав своей увлекательной книги «Мечты об окончательной теории» так: «Против философов». Не менее известный «отец кварка», нобелевский лауреат Мюррей Гелл-Манн полностью солидарен со своим коллегой: «Философия мутит воду и затуманивает важнейшую задачу теоретической физики — отыскивать согласованную работоспособную структуру». Наличие у физика идеалистической философской позиции, по мнению Гелл-Манна, может даже стать причиной «отвержения какой-нибудь хорошей идеи».

Между тем квантовая механика, несомненно, самая востребованная у философов современная научная теория, поскольку как никакая другая фундаментальная парадигма имеет не одну, а сразу несколько физических интерпретаций используемого в ней математического аппарата. Среди наиболее обсуждаемых в последнее время философских концепций квантовой физики можно назвать многомировую интерпретацию Эверетта — Уилера — Девитта. Этот удивительный взгляд на окружающую квантовую реальность получил необычное развитие в виде гипотезы о темпоральном характере последовательности эвереттовских миров. При этом возникает очень оригинальный реляционно-субстанциональный образ явления, воспринимаемого как физическое время. Этот небольшой, но принципиальный шаг за грань нашего пространственно-временного континуума приводит к парадоксальной теоретической конструкции «вселенского древа» ветвящихся миров и может быть новым аспектом изучения как для квантовой теории, так и для квантовой релятивистской космологии.

Подобные взгляды на множественность пространственно-временных отражений, наполняющих Мультиверсум, прежде всего по-новому объединяют разные уровни организации материи, сводя воедино законы развития микро-, мезо-

и мегаструктур. Отдельный вопрос — вид фундаментальных корреляций между последовательными мирами Мультиуниверсума. В бурных полемиках так и не выяснено, существует ли принципиальная возможность хотя бы информационной связи между разными Вселенными, входящими в структуру Мультиуниверсума.

Чтобы осмыслить методологический кризис в современной физике, необходимо вспомнить, что квантовая теория, как и 100 лет назад, базируется прежде всего на вероятностной интерпретации. Отсюда неизбежность фундаментального индетерминизма физических явлений, и многомировая парадигма, и геометродинамика Вселенной. В сложившейся ситуации, возможно, ввод новых модельных представлений, таких, как «квантовая нелокальность» или «квантовая запутанность» позволит иначе взглянуть на квантовую науку.



Надежда квантовой науки — Большой адронный коллайдер (ЦЕРН, Швейцария, Женева) (см. вклейку)

*«...Один из критериев глубины физической теории — это степень, в которой она изменяет наше мировоззрение в отношении тех понятий, которые до этого считались незыблемыми. В соответствии с этим критерием квантовая механика и теория относительности находятся за гранью самых безумных ожиданий. Волновые функции, вероятности, квантовое туннелирование, беспорядочные флуктуации вакуумной энергии, перемешивание пространства и времени, относительность*

*одновременности, искривление пространства, черные дыры, Большой взрыв. Кто мог предположить, что интуитивный, механистический, раз и навсегда заведенный мир Ньютона окажется жалким частным случаем, и что существует целый мир, лежащий прямо за порогом мира обычных вещей?»*

Б. Грин. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории

Квантовая наука давно уже смело вторгается в довольно необычную область исследований — биологию. Впрочем, здесь у теоретиков, начиная с Эрвина Шрёдингера и Георгия Гамова, есть богатые традиции предсказания и открытия генных структур передачи информации. Однако и эти достижения в определенной степени меркнут перед феерическими сценариями непрерывно рождающихся инфляционных миров, входящих в очень странное образование, названное отечественными космологами Мультивселенной. Возникает искушение совершенно по-иному взглянуть на вероятность зарождения жизни. Сложность до сих пор не найденного механизма запуска жизненных процессов позволяет считать, что даже действия всех возможных факторов на протяжении эволюции нашей Вселенной (после образования первых звезд) может не хватить для его реализации. Однако существование практически бесконечного количества разнообразных миров коренным образом меняет ситуацию. Естественно, что многие миры Мультиуниверсума могут быть абсолютно безжизненны, например, если в них действуют иные фундаментальные физические константы, исключающие появление белковой жизни. Среди таких факторов важнейший — сама размерность пространства. В М-теории на планковских масштабах квантовая реальность наполнена компактифицированными дополнительными измерениями, однако в иных мирах эти пружины пространственно-временных размерностей могли и не скрутиться, или просто не возникнуть на уровне первичных квантовых флуктуаций. В таких «скособоченных» мирах не могли возникнуть галактики, а звезды бы мгновенно сторали. К тому же ни в двумерном, ни тем более в одномерном пространстве не могут сформироваться полноценные биомолекулы.

*«С твердой верой, что законы большого и малого должны сливаться вместе в согласованное целое, физики упорно охотятся за ускользающей единой теорией. Поиск не завершен, но благодаря теории суперструн, обобщенной до М-теории, возникла, в конце концов, убедительная схема для объединения квантовой теории, общей теории относительности, а также теорий сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий. Изменения наших взглядов на мир, порожденные этими достижениями, фундаментальны: мы представляем себе струнные петли и вибрирующие капли, которые увлекают все элементы мироздания в танец колеблющихся мод, педантично исполняемый во Вселенной с многочисленными скрытыми измерениями, способными претерпевать экстремальные изгибы, при которых структура пространства-времени рвется и затем снова себя восстанавливает. Кто мог подумать, что слияние гравитации и квантовой механики в единую теорию материи и взаимодействий приведет к такой революции в нашем понимании устройства Вселенной?»*



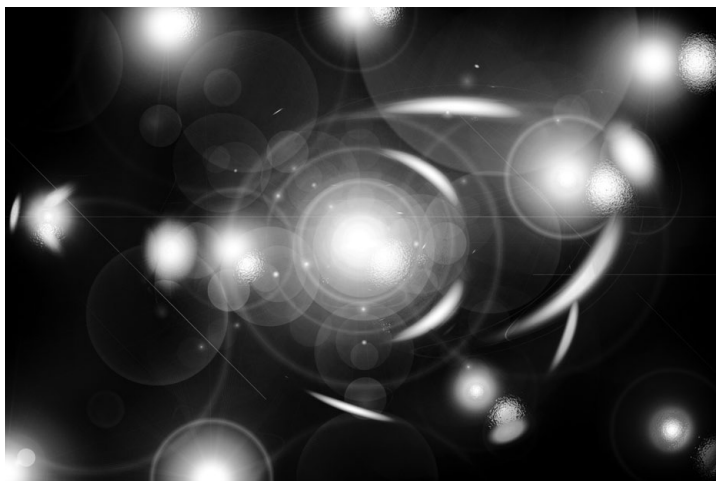
Миры, рожденные  
в квантовой  
«пробирке»  
сверхмощных  
ускорителей  
элементарных частиц

Б. Грин. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории

Итак, наша прекраснейшая Вселенная с удивительной Солнечной системой и бесподобной третьей от Солнца планетой в принципе не имеет ни малейшего отношения к проектам неких высших сил, она просто такова в силу действия тривиальной статистики и таинственных квантовых флуктуаций. Перебор всяческих миров Мультиверса при стремящемся к бесконечности количестве вариантов

обязательно приведет к возникновению жизни и разума любой степени сложности.

Есть и уфологический сценарий развития событий: некая сверхцивилизация одной из дочерних вселенных Мультиверса нашла способ связи через барьеры пространства-времени иных измерений (например, через транстемпоральное запутывание). Тогда нить жизни теряется в глубине миров Мультиуниверсума, возникнув из случайных факторов, а вот ее споры на протяжении сотен миллиардов лет неким чудесным образом могли передаваться из одного мира в другой и достичь, наконец, нашей Вселенной. Однако это — зона научных спекуляций и беспочвенного теоретизирования.



Космический океан Мультивселенной (см. вклейку)

*«Без сомнения, поиск законченного и удобного вычислительного формализма теории суперструн сулит еще более грандиозные сюрпризы. Уже сейчас в исследованиях по М-теории мы увидели скрывающуюся за планковской длиной новую область Вселенной, в которой, возможно, нет понятия пространства и времени. И вот противоположная крайность: мы видели, что наша Вселенная может оказаться всего лишь одним из неисчислимых пузырей пены на поверхности широкого и турбулентного космического*

*океана Мультивселенной. Эти рассуждения сейчас кажутся невероятными, но они могут предвещать следующий скачок в нашем понимании Вселенной».*

Б. Грин. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории

По мнению одного из самых замечательных популяризаторов квантовой науки, суперструнного теоретика Брайана Грина, все современные открытия, потрясающие основы Мироздания, — лишь элементы некой всеобъемлющей схемы. При этом сам человек — часть того целого, что древние эллины называли Космосом. Он ощущает себя, свои мысли и чувства как нечто, независимое от остального, своего рода оптический обман человеческого сознания. Это заблуждение есть что-то вроде тюрьмы, оно ограничивает возможности личности частными желаниями и привязанностью к нескольким близким людям. Главная цель должна состоять в том, чтобы вырваться из этой тюрьмы, расширив круг познаваемого, включить в него все живые существа и природу во всей ее красоте. Никто не может добиться этого полностью, но стремление к достижению такого состояния уже само по себе — залог освобождения и внутренней гармонии.

Альберт Эйнштейн не раз обсуждал со своими коллегами, как же близко может приблизиться человеческий разум к основным тайнам Вселенной. Этот гений долгих 30 лет тщетно искал волшебный Грааль теоретической физики — некую формулу единой теории поля, которая описывала бы все процессы, возможные в природе.

И в заключение слова этого великого мыслителя XX века: «Идея осуществится, и она прекрасна. Но над всем этим застыла холодная мраморная улыбка непреклонной природы, которая скорее осеняет нас печалью, чем умножает наши знания».



# Биографический справочник

## **Антуан Анри Беккерель (1952–1908)**

Видный французский физико-химик, родился в семье физика Александра Беккереля, известного благодаря своим исследованиям фосфоресценции и флуоресценции. В доме знаменитого французского натуралиста и естествоиспытателя Ж. Л. Кювье (1769–1832), принадлежащем Национальному музею естественной истории, Беккерель сделал свое выдающееся открытие, отмеченное на мемориальной доске на фасаде здания: «В лаборатории прикладной физики Анри Беккерель открыл радиоактивность 1 марта 1896 года».

Анри учился в лицее, затем в Политехнической школе, по окончании ее работал инженером в Институте путей сообщения. В 1888 году он защищает докторскую диссертацию и ведет вместе с отцом разностороннюю научную работу. Через год его избирают в Французскую академию наук, а с 1892 года он становится профессором Национального музея естественной истории.

В 1903 году вместе с четой Кюри он стал лауреатом Нобелевской премии по физике за открытие радиоактивности.

## **Джозеф Джон Томсон (1856–1940)**

Английский физик, родился в семье букиниста-антиквара, в пригороде Манчестера, где закончил колледж, после чего поступил в Кембриджский университет. В 1876–1880 годах учился в знаменитом колледже святой Троицы (Тринити-колледже), где когда-то профессорствовал сам Исаак Ньютон. В январе 1880 года Томсон успешно сдал выпускные экзамены и был принят на работу в Кавендишскую лабораторию ее директором Джоном Стреттом (лордом Рэлеем). После отставки Рэля Томсон был избран одним из самых молодых профессоров Кавендишской лаборатории

В 1895 году Томсон инициировал административно-учебную реформу, благодаря чему в Кавендишской лаборатории стали стажироваться выпускники из других

университетов. Студенты съезжались из всех стран мира, среди них: Э. Резерфорд из Новой Зеландии, Д. Таунсенд из Ирландии, П. Ланжевен из Франции, П. Капица из России, Н. Бор из Дании, Ч. Вильсон из Австралии и многие другие.

За 35 лет бессменного руководства Кавендишской лабораторией Томсон создал блестящую школу физиков, пятеро из них — нобелевские лауреаты.

Научные интересы самого Томсона были сосредоточены на изучении прохождения тока через разреженные газы, исследовании катодных и рентгеновских лучей. В мае 1897 года он публикует работу «Катодные лучи», в которой утверждал, что заряженные «корпускулы» по меньшей мере в 1000 раз легче легчайшего атома водорода. Обретя количественные характеристики, электрон стал полноправной составляющей материального мира.

Отдельные историки науки полагают, что ему в чем-то удалось предвосхитить идею об эквивалентности массы и энергии как одного из важнейших следствий теории относительности Эйнштейна.

### **Макс Карл Эрнст Людвиг Планк (1858–1947)**

Выдающийся немецкий физик-теоретик родился в семье профессора юриспруденции Кильского университета. Окончил гимназию в Мюнхене и поступил в Мюнхенский университет на факультет экспериментальной физики и математики. На третьем курсе перешел в Берлинский университет, где обучался у таких выдающихся ученых, как Г. Гельмгольц и Г. Кирхгоф.

В 1889 году он защитил докторскую диссертацию в Мюнхенском университете по теме второго начала термодинамики и в том же году приступил там к преподаванию математических и теорфизических дисциплин. В 1892 году после смерти Кирхгофа был приглашен занять кафедру теоретической физики, где и проработал до самой отставки в 1928 году.

Первые работы относились к термодинамике, в 1896 году он заинтересовался парадоксами излучения АЧТ. Пытаясь

теоретически объяснить процесс взаимодействия между электромагнитными волнами и атомами АЧТ, пришел к революционной идее квантования энергии. В 1900 году он доказал, что лучеиспускание и поглощение должно происходить скачкообразно, парциальным образом, а в основе всего лежит «квант действия», представляющий собой новую фундаментальную физическую константу, впоследствии названную постоянной Планка. Вскоре Н. Бор представил упрощенную модель атома Бора — Резерфорда, согласующуюся с квантовыми принципами Планка, где любой атом мог излучать широкий спектр дискретных частот, зависящих от атомных орбит электронов.

Планк стал свидетелем расцвета и крушения классической физики, создания максвелловской электродинамики, больцмановской термодинамики, электронной теории и теории относительности, открытия радиоактивности, развития квантовой механики, ядерной физики и первых ядерных испытаний.

### **Пьер Кюри (1859–1906)**

Выдающийся французский физико-химик и кристаллофизик родился в Париже в семье врача, получил домашнее образование. Еще в юности проявил незаурядные способности и в 16 лет сдал экзамен на звание бакалавра, поступив на физико-математическое отделение Сорбонны. Тогда же стал работать в Фармацевтическом институте, в лаборатории профессора Леру и уже в 18 лет защитил первую ученую степень лиценциата физических наук. С 1878 года он 5 лет занимал должность ассистента на физико-математическом факультете Парижского университета. В этот период вместе с братом Жаком Кюри (1855–1941) начинает исследование кристаллов, и они открывают пьезоэлектричество. Братья Кюри, изучая электрические деформации кварца, создали устройство для измерения слабых электрических токов и зарядов на основе пьезокварца. Впоследствии пьезокварц применялся для генерации ультразвука и стабилизации электрических колебаний в кварцевых генераторах. В это же время Пьер Кюри выполнил важные теоретические работы о законах кристаллической симметрии. В 1883 году он был

назначен руководителем экспериментальных физических исследований в Парижской школе промышленной физики и химии.

В 1891 году он от кристаллографических исследований минералогических симметрий обратился к опытам по магнетизму и четко разделил диамагнитные и парамагнитные явления по их температурным зависимостям. Изучая влияние температуры на ферромагнетизм, он определил «точку Кюри» исчезновения ферромагнитных свойств и открыл «закон Кюри» температурной зависимости парамагнитной восприимчивости. В 1904 году он сформулировал «принцип Кюри», связывающий кристаллическую симметрию и результат внешнего воздействия механическим, электрическим или иным путем. Итог всех этих исследований — докторская диссертация Пьера Кюри, которую он блестяще защитил на математико-естественном факультете Парижского университета.

В 1895 году состоялось бракосочетание Пьера Кюри и Марии Склодовской, занимавшейся тогда исследованиями радиоактивности. С 1897 года они начинают совместные исследования, и после 3 лет кропотливого труда в апреле 1898 года он сделал сообщение во Французской академии наук о присутствии в окиси урана нового высокорadioактивного элемента. В том же году супругами Кюри были открыты полоний и радий.

В 1903 году супруги Кюри стали нобелевскими лауреатами за исследование радиоактивности, а вскоре Пьер Кюри занял кафедру физики естественно-математического факультета Парижского университета.

19 апреля 1906 Пьер Кюри трагически погиб под колесами конной телеги, возвращаясь с собрания Ассоциации преподавателей точных наук. Мария Склодовская-Кюри написала в некрологе: «Угас один из тех, кто был истинной славой Франции».

### **Владимир Александрович Михельсон (1860–1927)**

Родился в городе Тульчине Подольской губернии в купеческой семье. В 1878 году окончил в Москве частную

гимназию и поступил в Петербургский институт инженеров путей сообщения. Уже на младших курсах настолько заинтересовался физикой, что добился перевода в Московский университет. Там его способности заметил и оценил патриарх русской физики А. Г. Столетов. Он по окончании Михельсоном университета в 1883 году рекомендовал оставить его для подготовки к профессорскому званию. В 1887 году Михельсон был отправлен в Германию, где в лаборатории Гельмгольца работал над магистерской диссертацией «О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей». Эта диссертационная работа получила очень высокие оценки, и Столетов предложил Совету физико-математического факультета присудить Михельсону докторскую степень, минуя магистерскую. После этого он был избран профессором кафедры физики и метеорологии Московского сельскохозяйственного института, где развернул большую работу по практической организации метеорологических наблюдений в России и созданию всеохватывающей сети метеорологических обсерваторий.

### **Борис Борисович Голицын (1862–1916)**

Видный русский физик из старинного дворянского рода князей Голицыных. Воспитывался в Морском корпусе, который окончил в 1880 году в чине гардемарина. Продолжил учебу в Морской академии, в 1886 году попытался поступить в Петербургский университет. Сложная и запутанная российская система высшего образования требовала для поступления в университет наличия гимназического аттестата зрелости, и Голицыну пришлось уехать в Страсбург, где он после нескольких лет стажировки защитил диссертацию на степень доктора философии «О законе Дальтона».

Возвратившись в Россию, он успешно сдал магистерские экзамены в Петербургском университете и был направлен на должность приват-доцента в Московский университет. Представленная им магистерская диссертация «Исследования по математической физике» вызвала, с одной стороны, настолько восторженные оценки, что послужила причиной редчайшего случая избрания в Петербургскую Академию наук.

### **Мария Склодовская-Кюри (1867–1934)**

Родилась в Варшаве в семье преподавателя варшавской гимназии.

В 1891 году поступила на физико-математический факультет Сорбонны и в 1893–1894 годах получила первые научные степени лиценциата физических и математических наук. Тогда же выполнила свою первую научную работу по теме «Магнитные свойства закаленной стали». Работая над данной темой, она перешла в Школу промышленной физики и химии, где встретила со своим будущим супругом Пьером Кюри. Совместно они выделили и открыли несколько новых радиоактивных элементов. После трагической гибели в 1906 году Пьера Кюри приняла его профессорскую должность в Парижском университете. А 13 мая 1906 года стала первой женщиной-профессором знаменитой Сорбонны, где впервые в мире начала читать уникальный для того времени курс лекций по физике, химии и технике радиоактивности.

В 1911 году становится первым дважды лауреатом Нобелевской премии, получив премию по химии: «В знак признания ее вклада в развитие химии, который она внесла открытием элементов радия и полония, определением свойств радия и выделением радия в металлической форме, и, наконец, за ее эксперименты с этим элементом».

Во время Первой мировой войны разрабатывала рентгеновские установки для военных госпиталей. Перед Первой мировой войной в Париже был открыт Институт радия, где она успешно работала со своей дочерью Ирен и зятем Фредериком Жолио.

### **Арнольд Иоганн Вильгельм Зоммерфельд (1868–1951)**

Немецкий физик-теоретик, член-корреспондент Берлинской академии наук.

Родился в Кёнигсберге, окончил Кёнигсбергский университет и начал работать в Гёттингенском университете. С 1897 года профессор Горной академии в Клаустале, с 1900 года Высшей технической школы в Ахене, а с 1906 года Мюнхенского университета. Основные работы связаны с квантовой теорией атома, спектроскопией,

квантовой теорией металлов, теоретической и математической физикой. На основе электромагнитной теории Максвелла получил в 1894 году строгое решение для задачи оптической дифракции при экране в виде бесконечной, прямолинейно ограниченной полуплоскости, а в 1909 году нашел корректное решение задачи об излучении вертикального диполя. В квантовой физике исходя из модели атома Бора — Резерфорда уточнил теорию возникновения спектральных линий, осуществив синтез квантовой теории и теории относительности. В 1915–1916 годах разработал квантовую теорию эллиптических орбит, ставшую известной, как концепция Бора — Зоммерфельда. При этом успешно ввел новые атомно-орбитальные параметры в виде радиальных и азимутальных квантовых чисел. Разработал теорию тонкой структуры водородного спектра, введя постоянную тонкой структуры и объяснив тонкую структуру рентгеновских и водородоподобных спектров.

В 1916 году в сотрудничестве с П. Дебаем рассмотрел квантовую теорию эффекта Зеемана и ввел магнитное квантовое число. В 1919 году разработал теорию спектроскопического закона смещения Вина и получил формулы для интенсивностей мультиплетных линий. В 1920 году ввел внутренние квантовые числа и составил правила отбора для дублетных и триплетных спектров. В 1928 году рассмотрел модель свободных электронов в металлах как разреженного газа, подчиняющегося статистике Ферми — Дирака, и разработал квантовую электронную теорию металлов. В 1931 году дополнил теорию тормозного излучения электронов, движущихся со скоростью, значительно меньшей скорости света.

Автор учебников по теоретической физике и основатель мюнхенской школы теоретической физики, видными представителями которой были В. Гейзенберг, В. Паули, П. Дебай, Х. Бете, Г. Вентцель и др.

### **Жан Батист Перрен (1870–1942)**

Видный французский физик, с 1923 года член Французской академии наук. В 1894 году окончил Высшую нормальную школу в Париже и с 1898 года начал работать в Парижском университете. После оккупации Франции эмигрировал в США.

Основную известность принесли исследования природы катодных и рентгеновских лучей, выполненные в 1895–1898 годы и доказавшие, что катодное излучение представляет собой поток заряженных частиц. С начала XX века занялся изучением электрокинетических явлений и разработал конструкцию прибора для исследования электроосмоса. В 1908 году провел цикл исследований по изучению броуновского движения, экспериментально подтвердив теорию Эйнштейна — Смолуховского, при этом ему удалось уточнить значение числа Авогадро, полученное с помощью других методов, окончательно доказав справедливость молекулярно-кинетического учения о строении вещества. Совместно с сыном Ф. Перреном установил бимолекулярную структуру тонких мыльных пленок и исследовал явления флуоресценции.

Лауреат Нобелевской премии 1926 года за исследование явлений при седиментации.

### **Эрнест Резерфорд (1871–1937)**

Выдающийся английский физик-экспериментатор родился в семье новозеландского фермера. Окончив среднюю школу, получил стипендию для продолжения образования в колледже провинции Нельсон, а в 1889 году сдал экзамены в Кентерберийский колледж, филиал Новозеландского университета. Окончив колледж с отличием и получив степень магистра по физике и математике, занялся изучением магнитного действия электромагнитных разрядов. В 1894 году опубликовал свою первую научную статью «Намагничивание железа высокочастотными разрядами».

В 1895 году Резерфорд получил стипендию для стажировки в Кембриджском университете и Кавендишской лаборатории под руководством Д. Д. Томпсона, продолжил свою работу над магнитным детектором электромагнитного излучения. В 1896 году вышла совместная работа Томсона и Резерфорда «О прохождении электричества через газы, подвергнутые действию лучей Рентгена».

С 1898 года он начинает исследование «урановых лучей», в результате чего появляется обширная работа «Излучение урана и созданная им электропроводность». В это же время



Резерфорд переезжает в Канаду, где вступает в должность профессора кафедры теоретической физики Монреальского университета. Здесь им была открыта радиационная эманация тория, раскрыта природа индуцированной радиоактивности и открыты совместно с Ф. Содди законы радиоактивного распада, начато исследование прохождения через вещество альфа-частиц. Все эти достижения были описаны им в книге «Радиоактивность».

Весной 1907 года Резерфорд возвращается в Европу, начинает исследования на кафедре физики Манчестерского университета. Здесь им заложены экспериментальные основы атомной и ядерной физики. С 1919 года — на посту директора Кавендишской лаборатории в Кембридже. В 1919 году ему удалось впервые осуществить искусственную ядерную реакцию при бомбардировке быстрыми альфа-частицами атомов азота, получив при этом кислород.

В 1933 году Резерфорд опытным путем доказал справедливость взаимосвязи массы и энергии в ядерных реакциях, а через год провел ядерную реакцию синтеза дейтерия с образованием трития. Все это вместе с сенсационным открытием искусственного превращения элементов стимулировало развитие атомной физики. В начале тридцатых годов Резерфорд предсказал существование нейтральной ядерной частицы, близкой по массе ядру водорода, и в 1932 году его учениками и сотрудниками Чедвиком (1891–1974) и Астоном (1877–1945) был открыт протон и осуществлена реакция расщепления лития протонами, разогнанными с помощью высоковольтного ускорителя.

В 1908 году Резерфорд был удостоен Нобелевской премии по химии за исследования по превращению элементов и химии радиоактивных веществ.

### **Фредерик Содди (1877–1956)**

Английский физико-химик, родился в семье лондонского купца. У Ф. Содди рано проявился интерес к науке. Закончив Истборн-колледж он решил поступать в Оксфордский университет, чтобы изучать химию. После годичной подготовки в Университетском колледже Уэльса он в 1895 году был принят в Мертон-колледж Оксфордского университета и получил

научную стипендию. После окончания Оксфорда совместно с Э. Резерфордом в Монреальском университете разрабатывал теорию радиоактивных превращений. В 1903 году перешел в Лондонский университет, где в сотрудничестве с У. Рамсеем доказал спектроскопическим путем, что в радиевых лучах содержатся атомы гелия. В 1904 году занимает профессорскую должность в университете в Глазго, где ему удалось открыть закон радиоактивного смещения и ввести в радиационную физику понятие изотопов. С 1919 по 1936 год Содди — профессор кафедры общей и экспериментальной физики Оксфордского университета. В Оксфорде им были написаны обширные труды по радиоактивности и радиохимии, среди них выделяются такие, как «Материя и энергия», «Радий и его разгадка», «Радий и строение атома», «Химия радиоэлементов».

В 1921 году Содди был удостоен Нобелевской премии по химии за вклад в изучение химии радиоактивных веществ и исследование процессов образования и природы изотопов.

### **Альберт Эйнштейн (1879–1955)**

Великий физик родился в Ульме германского округа Вюртемберг в семье мелкого коммерсанта. Учился в католической народной школе в Ульме, а после переезда семьи в Мюнхен — в гимназии. В учебе предпочитал самостоятельные занятия по геометрии и чтение популярных книг по естествознанию, при этом сумел овладеть дифференциальным и интегральным исчислением. В 1895 году, не окончив гимназии, пытался поступить в Цюрихское Федеральное высшее политехническое училище, но не сдал всех экзаменов. Доучившись в кантональной школе в Аарау, без экзаменов поступил в Цюрихский политехнический институт, где много времени проводил в физических лабораториях и библиотеках, читая классические труды Г. Кирхгофа, Дж. Максвелла и Г. Гельмгольца.

После его окончания он долго не мог найти работу, пока в 1902 году не получил по протекции место технического эксперта в Бернском патентном бюро, где и проработал до 1907 года. В 1905 году в немецком журнале «Анналы физики» вышли три работы Эйнштейна, принесшие ему всемирное признание и славу: «О движении взвешенных

в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты», «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света», «К электродинамике движущихся тел». С этого момента возник пространственно-временной континуум специальной теории относительности, с новых позиций были объяснены фотоэффект и броуновское движение, а масса превратилась в форму энергии. В том же, 1905, была опубликована работа Эйнштейна, в которой излагалась специальная теория относительности (СТО), основанная на расширенном постулате относительности Галилея и принципе постоянства скорости света. Из СТО Эйнштейн вывел взаимосвязь массы и энергии, позволившую упростить законы сохранения в единый принцип постоянства массы и энергии в замкнутых системах при любых процессах. Сегодня этот закон составляет основу всей атомной физики.

В 1909 году Эйнштейн получил место экстраординарного профессора на кафедре теоретической физики Цюрихского университета, а вскоре последовало почетное приглашение на кафедру теоретической физики пражского Немецкого университета. Там в 1911 году исходя из принципа относительности он заложил основы релятивистской теории тяготения, высказав мысль, что световые лучи должны отклоняться в поле тяготения. Проверка этих идей была сделана в 1919 году английской астрофизической экспедицией Эддингтона, в общем подтвердившей выводы Эйнштейна.

Летом 1912 года Эйнштейн возвратился в Цюрих на новую кафедру математической физики Высшей технической школы, где приступил к дальнейшему развитию математического аппарата теории относительности. Результатом совместных с Марселем Гроссманом усилий стал фундаментальный труд «Проект обобщенной теории относительности и теории тяготения». В 1913 году Эйнштейн был избран в Берлинскую академию наук и переехал в Берлин для работы в университете Гумбольдта, где в должности директора Физического института провел последующие 19 лет. Здесь он закончил общую теорию относительности (ОТО), показав, что гравитацию можно свести к изменению геометрии пространства-времени вокруг тяготеющих тел. В 1915 году

Эйнштейн попытался распространить ОТО на Вселенную в целом и получил модель замкнутого Мира.

В 1916–1917 годах вышли работы, содержащие квантовую теорию излучения Эйнштейна. В них рассматривались вероятности переходов между стационарными состояниями атома Бора — Резерфорда и выдвигалась идея индуцированного излучения, в дальнейшем это стало теоретической основой создания квантовых генераторов.

В 1921 году Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии по физике за основные работы в области теоретической физики, особенно за создание квантовой теории света.

После прихода нацистов к власти в Германии в 1933 году Эйнштейн заявил о своем выходе из Берлинской академии наук и отказался от немецкого гражданства. С октября 1933 года он приступил к работе в Принстонском институте высших исследований, основная тема его работ — создание единой теории поля.

### **Пауль Эренфест (1880–1933)**

Родился и вырос в Вене в семье торговцев, выходцев из Моравии. После окончания гимназии поступил в Венский университет, где под руководством Л. Больцмана изучал кинетическую теорию и термодинамику. В 1904 году после окончания университета приступил к занятиям теоретической физикой, одновременно учась в Гёттингенском университете.

Защитив докторскую диссертацию по теме движения негибких тел в жидкостях, одно время преподавал в Венском университете, а затем вернулся в Гёттинген. В 1907 году под влиянием жены Т. А. Афанасьевой переехал в Санкт-Петербург, где познакомился с А. Ф. Иоффе и другими видными физиками, читал лекции в Петербургском политехническом институте и вел на дому теоретический семинар. Столкнувшись с кастовостью и обскурантизмом российской научной системы, в 1912 году вернулся в Европу, где совершил поездку по университетам Германии, Австрии и Швейцарии, встречаясь с М. Планком, А. Зоммерфельдом и А. Эйнштейном. Вскоре поступило престижное

предложение сменить Г. Лоренца в связи с его отставкой в Лейденском университете, и в декабре 1912 года он вступил в профессорскую должность.

В Лейденском университете возникла научная школа Эрэнфеста. Основные направления исследований захватывали обоснование квантовой физики, статистической механики, теории относительности и теории фазовых переходов. В квантовой механике Эрэнфест сформулировал теорему о средних значениях квантово-механических величин, разработал метод адиабатических инвариантов и совместно с Р. Оппенгеймером исследовал статистические свойства атомных ядер, выведя теорему Эрэнфеста — Оппенгеймера. Это привело его к гипотезе о недостаточности существовавшей в то время протонно-электронной модели ядерного строения в объяснении экспериментальных результатов.

Последние годы жизни Эрэнфест страдал тяжелой депрессией, вызванной сомнениями в собственных творческих силах, и под влиянием тяжелых семейных проблем покончил с собой.

### **Макс Борн (1882–1970)**

Выдающийся немецкий физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии по физике 1954 года за работы в области квантовой механики. В 1901 году после поступления в университет Бреслау на инженерно-физический факультет заинтересовался математической физикой и в 1904 году перешел в Гёттингенский университет. В Гёттингене обучался у выдающихся математиков: Д. Гильберта, Ф. Клейна, Г. Минковского. В 1905 году под руководством Гильберта защитил докторскую диссертацию по теории устойчивости упругих тел. Впоследствии под влиянием работ Дж. Томсона, А. Эйнштейна и Г. Минковского занялся поиском новых методов вычисления массы электрона, а также исследованиями свойств кристаллов и теорией температурной зависимости теплоемкости в физике кристаллического состояния.

В 1915 году занял должность ассистент-профессора теоретической физики в Берлинском университете на кафедре М. Планка. В Берлине, продолжая исследования кристаллов, приступил к построению математических основ квантовой

теории с целью обобщить все квантовые эффекты в микромире. В 1926 году вместе со своими ассистентами В. Гейзенбергом и П. Йорданом создал один из вариантов математических основ квантовой физики, дав статистическую интерпретацию волновой пси-функции Шрёдингера и выяснив, что квадрат амплитуды волновой функции равен вероятности нахождения микрочастицы в данной точке пространства. Им также разработаны методы решения квантовомеханических задач о рассеивании частиц друг на друге и введено понятие квантовомеханического оператора, важнейшее в квантовой физике высоких энергий. Разработал основы квантовой химии и теорию строения двухатомных молекул.

В 1933 году эмигрировал в Кембридж, а в 1936 году занял пост профессора натурфилософии в Эдинбургском университете, где преподавал и проводил научную работу до самой отставки в 1953 году. В 1948 году был награжден медалью Макса Планка Германского физического общества. После отставки вернулся в Гёттинген, где продолжил научные исследования, готовя свои многочисленные труды к публикации. В последние годы активно занялся общественной деятельностью, выступая с лекциями и заявлениями о необходимости запретить создание ядерного и прочего оружия массового уничтожения.

### **Нильс Хенрик Давид Бор (1885–1962)**

Великий датский физик, один из основателей квантовой теории атома, родился в Копенгагене в семье известного профессора-физиолога. Уже на защите магистерской диссертации в Копенгагенском университете он удивил своей работой, посвященной исследованию поверхностного натяжения жидкостей. Новоиспеченный магистр был награжден за эту работу золотой медалью Датской королевской академии. Это было первое и последнее экспериментальное исследование молодого ученого, после которого он всецело переключился на теоретическую физику. Тема докторской диссертации была связана с поведением электронов в металлах. В 1911 году отправился в Англию для стажировки в кембриджской лаборатории первооткрывателя электрона Д. Д. Томсона. Затем он переехал в Манчестер, где влился

в группу Эрнеста Резерфорда, подтвердившего экспериментально наличие положительного атомного ядра. Там ему удалось всего за несколько месяцев создать знаменитую модель атома Бора — Резерфорда, положившую начало современному пониманию субатомного мира.

Новая планетарная модель атома быстро завоевала признание физиков. Бор занял должность профессора в Копенгагенском университете. Через 3 года датское правительство приняло решение о строительстве для него знаменитого Института теоретической физики в Копенгагене, ставшего на долгие годы главным центром европейских теоретиков.

В 1922 году Бор стал лауреатом Нобелевской премии по физике за создание теории строения атома. В 1930-е годы Бор занялся теоретическим моделированием процессов ядерного распада урана и разработкой ядерного реактора и атомной бомбы. Вскоре после начала Второй мировой войны ученый нелегально эмигрировал из оккупированной Дании в Британию, а затем в США, где участвовал в Манхэттенском атомном проекте по разработке ядерного оружия.

### **Эрвин Шрёдингер (1887–1961)**

Австрийский физик-теоретик, один из создателей квантовой физики. Родился в Вене, в семье богатого промышленника, получил хорошее домашнее образование, поступил в Венский университет. Еще на младших курсах посещал лекции по теоретической физике, защитил по окончании докторскую диссертацию именно по данной специальности.

После Первой мировой войны обосновался в Цюрихе, где и разработал теорию волновой механики, фундаментальную основу современной квантовой теории. В 1927 году принял кафедру теоретической физики Берлинского университета, заменив ушедшего М. Планка. В 1933 году эмигрировал в Великобританию, получив место профессора Оксфордского университета, и в том же году стал лауреатом Нобелевской премии по физике за дальнейшее развитие квантовой механики.

В 1936 году вернулся в Австрию, занял профессорское место в университете. В 1939 году после начала Второй мировой войны и неожиданной оккупации Бельгии ему

с трудом удалось выехать в Ирландию. В Дублине он остался до 1956 года, после чего вернулся в Вену на специально созданную для него университетскую кафедру.

### **Луи-Виктор Пьер Раймон де Бройль (1892–1987)**

Луи де Бройль родился во Франции. Под влиянием брата, Мориса де Бройля, занялся физикой. В 1913 году он был призван на военную службу, где служил в радиотехнических войсках. В 1925 году он представил в Сорбонну докторскую диссертацию «Исследования по теории квантов». К тому времени он успел опубликовать несколько важных работ о свойствах электронов, атомов и рентгеновского излучения, а также о квантах света. В 1924 года Луи де Бройль предпринял атаку на устоявшиеся представления о частицах и волнах. Он считал, что если свет ведет себя в одних случаях как волна, а в других — как частица, квант излучения, почему те объекты, которые все привыкли считать материальными частицами, например электроны, не могут проявлять свойства волны? Аналогия со световыми квантами привела де Бройля к формуле для длины волны, связанной с любой частицей (такую волну стали называть волной де Бройля, или волной вероятности). Гипотеза де Бройля позволяет сделать далеко идущие выводы. В частности, у электронов с энергиями от 1 до 10 000 эВ длины волн де Бройля те же, что и у рентгеновских лучей! Но тогда облучение кристаллической решетки пучком электронов должно давать на фотопленке примерно такую же дифракционную картину, какая наблюдается на рентгенограмме. И в 1927 году эксперименты полностью подтвердили гипотезу де Бройля. В 1926 году Эрвин Шрёдингер вывел уравнение для волн де Бройля. Защитив диссертацию, де Бройль читал лекции в Сорбонне, а с 1928 года — и во вновь организованном Институте Анри Пуанкаре. Тогда же он стал профессором теоретической физики в Сорбонне.

### **Вольфганг Паули (1900–1958)**

Швейцарский физик-теоретик, родился в Вене, в 1921 году окончил Мюнхенский университет.

Первая научная работа была посвящена математическим вопросам единой теории гравитации и электромагнетизма



и вышла в свет в 1918 году, а в 1921 году Паули защитил докторскую диссертацию в Мюнхенском университете под руководством А. Зоммерфельда. В 1921–1922 годах был ассистентом М. Борна на кафедре теоретической физики в Гёттингенском университете. Познакомился с Н. Бором и в 1922–1923 годах работал в Институте теоретической физики в Копенгагене, помогал в издании работ Бора на немецком языке. В 1923 году — доцент университета в Гамбурге; с 1928 года — профессор Высшего технического училища в Цюрихе, в 1935–1936 и 1940–1946 годах работал в Институте фундаментальных исследований в Принстоне.

Когда Паули работал в Гёттингене, Бор занимался поисками закономерностей заполнения электронных оболочек атома, в частности, пытался объяснить, почему у атома, находящегося в основном энергетическом состоянии, не все электроны находятся на нижней орбите. Принимая участие в решении этой проблемы, Паули ввел понятие спина и в 1925 году сформулировал один из важнейших принципов современной теоретической физики, согласно которому две тождественные частицы с полуцелыми спинами не могут находиться в одном состоянии, то есть не могут обладать одинаковыми значениями всех четырех квантовых чисел (главного, орбитального, магнитного и спинowego). За открытие этого принципа Паули в 1945 году был удостоен Нобелевской премии по физике. Принцип Паули дал объяснение закономерностям, которым подчиняется заполнение электронных оболочек атомов, и послужил исходным пунктом для объяснения тонкой и сверхтонкой структуры атомных спектров.

В 1927 году Паули опубликовал статью, объясняющую природу парамагнетизма металлов. В ней содержится вывод, что поведение электронов в металлах подчиняется законам, основанным на принципе запрета, а не классическим статистическим законам. Совместно с П. Иорданом и В. Гейзенбергом заложил основы релятивистской квантовой теории поля и предпринял попытку формулировки квантовой электродинамики, введя общую схему квантования полей и заложив тем самым основы систематической теории квантования полей.

При обсуждении особенностей бета-распада Паули выдвинул гипотезу о существовании нейтрино (1930–1933). Паули принадлежат также работы по мезонной теории ядерных сил, обзоры по важнейшим вопросам современной теоретической физики, статьи по истории и философии науки и др.

Паули был удостоен медалей Х. Лоренца (1930), Б. Франклина (1952), М. Планка (1958).

### **Вернер Карл Гейзенберг (1901–1976)**

Выдающийся немецкий физик-теоретик родился в семье профессора истории Мюнхенского университета. В 1920 году поступил на физико-математический факультет, где начал с кафедры математики, перейдя затем на кафедру теоретической физики. Защитив магистерский диплом в 1923 году, приступил к теоретическим исследованиям строения атома. В 1925 году разработал теорию матричной квантовой механики.

Матричная механика, как показало время, в математическом понимании эквивалентна появившейся год спустя квантово-волновой механике, заложенной в уравнении Шрёдингера, с точки зрения описания процессов квантового мира. Однако на практике использовать аппарат матричной механики оказалось труднее, и сегодня физики-теоретики в основном пользуются представлениями волновой механики. В 1926 году Гейзенберг стал ассистентом Н. Бора в Копенгагене. Именно там в 1927 году он сформулировал свой принцип неопределенности — его самый большой вклад в развитие науки. В том же году Гейзенберг стал профессором Лейпцигского университета — самым молодым профессором в истории Германии. Начиная с этого момента он вплотную занялся созданием единой теории поля, но безуспешно. В 1932 году Гейзенберг был удостоен Нобелевской премии по физике за создание квантовой механики.

### **Поль Адриен Морис Дирак (1902–1984)**

Выдающийся британский физик родился в Бристоле. В 1921 году с отличием окончил электротехнический факультет Бристольского университета и поступил в аспирантуру Кембриджского университета. Там он познакомился

с работами Гейзенберга по матричной механике и предложил свой оригинальный подход к квантовой проблематике, опубликовав серию статей в «Трудах Лондонского королевского общества». В 1926 году защитил диссертацию доктора философии и прошел годичную стажировку в копенгагенском Институте Бора и в Гёттингене у Борна. В 1929 году после нескольких лет преподавания в Кембридже переехал в США, где прочитал свои знаменитые лекции по квантовой механике, послужившие основой для дальнейшего дираковского курса основ квантовой физики. По возвращении в Англию был избран действительным членом Королевского общества (академиком), и в 1932 году занял «ньютоновскую» кафедру физики Кембриджского университета. В 1933 году вместе со Шрёдингером был удостоен Нобелевской премии по физике за создание квантовой механики. После отставки в 1968 году преподавал в университетах США.

Дирак разработал многие важные разделы математического аппарата квантовой механики: квантовую электродинамику, теорию поля, теорию элементарных частиц, статистическую физику. В конце 1920-х годов он применил принципы квантовой механики к электромагнитному полю, построив модель квантованного поля, и заложил основы квантовой электродинамики. В этот же период вместе с Гейзенбергом выдвинул идею обменного взаимодействия. Дираку удалось решить проблему релятивистского уравнения для электрона, используя понятие спина и объяснив тонкую структуру спектров атома водорода, вместе с эффектом Зеемана. В начале 1930-х годов Дирак выдвинул гипотезы о существовании элементарного унитарного магнитного заряда — монополя и антивещества как «зеркальной» материи, состоящей из античастиц. Дирак внес большой вклад в разработку квантовой статистики, получившей название «статистика Ферми — Дирака». В 1937 году он высказал гипотезу об изменении гравитации во времени, а в 1960-х годах разработал теорию мюона как колебательного состояния электрона и занимался проблемой квантования гравитационного поля.

Среди основных его трудов: «Принципы квантовой механики», «Развитие квантовой теории», «Спиноры в гильбертовом пространстве», «Общая теория относительности».

**Джон фон Нейман (Иоганн фон Нейман) (1903–1957)**

Выдающийся американский физик-теоретик и кибернетик австро-венгерского происхождения. Родился в Будапеште в семье банкира, учился в Австрии, Швейцарии и Германии. В 1930 году эмигрировал в США и через три года приступил к научной работе в Принстонском Институте перспективных исследований. В институте фон Нейман встретился с Альбертом Эйнштейном и многими другими выдающимися теоретиками.

Во время Второй мировой войны фон Нейман активно участвовал в секретном атомном проекте «Манхэттен» по созданию ядерного оружия, примененного впоследствии при бомбардировке японских городов Хиросима и Нагасаки. В тот же период он работал еще в одном секретном военном проекте, включавшем создание электронно-вычислительного комплекса «ЭНИАК». В ходе выполнения данного исследования и анализа конструкционных просчетов ЭНИАКа фон Нейман разработал логическую схему и архитектуру нового типа компьютерных систем. Впоследствии при его непосредственном участии был создан весьма успешный вариант компьютера, названный в его честь ДЖОНИАКом. Эта электронно-вычислительная система сыграла большую роль в успешном проектировании и сопутствующей обработке информации при реализации атомного проекта следующего поколения по созданию водородной бомбы.

**Ричард Филлипс Фейнман (1918–1988)**

Выдающийся американский физик родился в Нью-Йорке. С детства интересовался естественными науками и проведением экспериментов в домашней лаборатории.

По окончании средней школы в 1935 году успешно поступил в Массачусетский технологический институт (МТИ) и в 1939 году окончил его с дипломом бакалавра по физике. В МТИ, как говорил впоследствии Фейнман в своей нобелевской речи, он впервые осознал, что наиболее важной проблемой того времени было неудовлетворительное состояние квантовой теории электричества и магнетизма — квантовой электродинамики, занимавшейся изучением взаимодействий между элементарными частицами и между частицами и электромагнитным полем.

В 1942 году защитился в Принстонском университете, получив степень доктора философии, продолжил там работать свободным исследователем. В 1940-х годах принял самое непосредственное участие в создании ядерного оружия, провел много уникальных исследований в Лос-Аламосской лаборатории. В 1950-х годах профессорствовал на кафедрах физики Корнельского университета и Калифорнийского технологического института в Пасадене. Основные работы Фейнмана связаны со специальными вопросами квантовой электродинамики, квантовой механики и статистической физики. С помощью созданной Фейнманом современной версии квантовой электродинамики успешно удалось преодолеть многие трудности, связанные с применением квантовой механики в теории взаимодействия электронов и других заряженных элементарных частиц с электромагнитным полем. В конце 1940-х годов Фейнману удалось разработать оригинальные схемы, иллюстрирующие возможные превращения элементарных частиц, названные «диаграммы Фейнмана». В 1958 году Фейнман совместно с Гелл-Манном предложил новую количественную теорию слабых взаимодействий, а в 1969 году предложил новую модель нуклона. В 1972 году он создал полуфеноменологическую картину генерации новых частиц при их столкновениях и создал метод интегрирования по траекториям квантовых объектов. В последние годы он занимался разработкой теории квантованных вихрей в сверхтекучем гелии и настойчиво пытался применить методы теории возмущений в задаче квантования гравитационных полей. Фейнман был замечательным педагогом и одним из создателей знаменитого университетского курса лекций по физике.

Нобелевский лауреат 1965 года по физике за фундаментальный вклад в развитие квантовой электродинамики, имевший глубокие последствия для физики элементарных частиц.

### **Мюррей Гелл-Манн (р. 1929)**

Выдающийся американский физик-теоретик родился в Нью-Йорке в семье иммигрантов из Черновцов. После окончания средней школы в возрасте 15 лет успешно поступил в Йельский университет, а затем в аспирантуру

Массачусетского технологического института, где и защитил докторскую диссертацию по физике. В 1952 перешел в Чикагский университет, где работал с Энрико Ферми. Еще молодым 23-летним постдоком положил начало «кварковой» революции в физике элементарных частиц, опубликовав основополагающую работу по новым микрочастичным характеристикам: «странностям» и «очарованиям». Классифицируя новые частицы, Гелл-Манн в 1964 году предложил особую группировку элементарных частиц. В этой модели вводились кварки — необычные частицы, из которых состоят адроны. Кварки вскоре были признаны составляющими элементарных частиц и прочно вошли в современную теорию кваркового взаимодействия, называемую квантовой хромодинамикой (КХД) и во многом основывающуюся на работах Гелл-Манна. В сотрудничестве с Ричардом Фейнманом ему удалось впервые прояснить природу электрослабого внутриядерного взаимодействия. В 1990-х годах он занялся новой проблемой сложных систем и по результатам своих исследований написал популярную книгу «Кварки и ягуар: приключения в простом и сложном».

## Словарь терминов

**Абсолютно черное тело (АЧТ)** — физическая абстракция, введенная Густавом Кирхгофом в 1862 году и широко применяемая в термодинамике. Идеализированное тело, поглощающее все падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах и ничего не отражающее. Спектр излучения АЧТ определяется только его температурой. В классической теории излучения анализ спектра АЧТ привел к парадоксу «ультрафиолетовой катастрофы», решенной с помощью гипотезы квантов действия Макса Планка.

**Адроны** — элементарная частица, состоящая из кварков и участвующая в сильных взаимодействиях. Адроны делятся на две группы — мезоны с целым спином и барионы с полуцелым.

**Альфа-излучение** — испускание альфа-частиц — ядер атомов гелия, состоящих из двух протонов и двух нейтронов при радиационном распаде атомных ядер.

**Аннигиляция** — процесс столкновения частицы и ее античастицы, при котором происходит рождение новых частиц и взрывное выделение энергии, а исходные частицы взаимно уничтожают друг друга.

**Античастица** — у каждой частицы материи есть соответствующая античастица. При соударении частицы и античастицы происходит их аннигиляция, в результате чего выделяется энергия и рождаются другие частицы.

**Апейрон** — понятие древнегреческой науки для обозначения неопределенной в своей беспредельности материальной среды, находящейся в вечном и непрерывном движении. Все бесконечное многообразие вещей, все миры возникли путем выделения из апейрона противоположностей и их борьбы.

**Атом** — наименьшая частица каждого химического элемента. Атом состоит из ядра, занимающего крайне

незначительную часть общего условного объема и состоящего из нуклонов — протонов и нейтронов, вокруг которых обращаются электроны.

**Бозоны (бозе-частицы)** — микрочастицы с нулевым или целым спином, подчиняющиеся статистике Бозе — Эйнштейна.

**Большой взрыв** — гипотетический космический катаклизм взрывного характера. Из него, согласно современным представлениям, возникла наблюдаемая Вселенная. В основу сценария Большого взрыва положена космологическая модель Вселенной. Она развилась из первичной космологической сингулярности, наличие которой проистекает из решений уравнений общей теорией относительности. Из состояния первичной космологической сингулярности Вселенная однородно и изотропно расширяется (сегодня ускоренным образом) по закону Хаббла. Парадигма Большого взрыва в настоящее время общепризнана в физической космологии, объясняет большой объем наблюдательных данных. Сегодня считается, что Вселенная возникла  $13,7 \pm 0,2$  млрд лет назад, но процесс ее рождения неясен. Скорее всего, это было некое изначальное «сингулярное» состояние с гигантскими температурой и плотностью, перешедшее в однородную и изотропную среду с необычайно высокой плотностью энергии, температурой и давлением. По мере дальнейшего расширения Вселенной непрерывно охлаждалась и разряжалась, что сопровождалось космологическими фазовыми переходами, напоминающими конденсацию атомарной «жидкости» из газа элементарных частиц.

**Брана** — теорфизическое представление М-теории. Сценарий мира на бране включает образ в рамках теории струн или мембран, где наши привычные три пространственных измерения — абстрактное понятие 3-браной. Чаще всего встречаются D-браны или «клейкие» p-браны, к которым прикреплены концы открытых струн, с несколькими пространственными измерениями.

**Вакуум (вакуумное состояние)** — в квантовой физике представляет собой физический вакуум как основное состояние



с минимальной энергией, нулевыми импульсом, угловым моментом, электрическим зарядом и другими квантовыми числами квантованных полей. Часто физический вакуум определяют как состояние, в котором отсутствуют реальные частицы, то есть состояние, действие на которое операторов уничтожения дает нулевой результат (математический вакуум). По современным представлениям, вакуум перенаселен виртуальными частицами, участвующими в виртуальных процессах.

**Векторное поле** — физическое поле, состоящее из трех независимых компонент, преобразующихся при поворотах координатных осей или преобразованиях Лоренца как компоненты вектора или 4-вектора. Примером векторного поля может служить поле скоростей или электромагнитное поле (описывается четырехмерным вектор-потенциалом). В квантовой теории поля кванты векторного поля — векторные частицы с единичным спином. При этом действительному векторному полю соответствует электрически нейтральная частица, а комплексному — заряженная частица (и ее античастица с зарядом противоположного знака). По поведению относительно пространственной инверсии с заменой координат векторные поля делят на собственно векторные, меняющие знак при инверсии, и аксиальные, или аксиально-векторные, не меняющие знака.

**Вселенная (Мир, Мироздание, Космос)** — вся окружающая нас объективная физическая реальность, данная нам в ощущениях. В целом Вселенную изучают космологи и философы, а астрономы и физики обычно считают корректным исследовать лишь ту ее часть, что в принципе доступна естественнонаучным методам. Видимая часть Вселенной называется Метагалактикой. Она непрерывно увеличивается благодаря созданию сверхмощных телескопов и астрофизических лабораторий земного и космического базирования. Возраст Вселенной — время, прошедшее от начала ее расширения из сингулярного состояния в катаклизме Большого взрыва, определяется в 13,7 млрд лет. Будущее Вселенной неопределенно и в основном зависит от точного значения плотности вещества; при этом возможны разные

космологические сценарии, включая такие, как Большой хлопок, Большой разрыв и Большой мороз.

**Виртуальные частицы** — сверхкороткоживущие микро-частицы, возникающие и исчезающие в флуктуациях соответствующих квантовых полей. Чаще всего в физическом вакууме рождаются и исчезают гамма-кванты и электрон-позитронные пары.

**Гравитационная волна** — возмущение метрики пространства-времени в виде гравитационного поля, распространяющееся со скоростью света. Образ гравитационных волн возник в теоретической физике при поиске решений волновых уравнений, входящих в общую теорию относительности. Гравитационные волны — поперечный процесс, он описывается двумя независимыми поляризационными компонентами. В теории гравитационные волны должны излучать любые ускоренно движущиеся массы, а в реальности для их детектирования существенной амплитуды требуются чрезвычайно большие массы и ускорения, поскольку амплитуда гравитационных колебаний прямо пропорциональна данным параметрам. Астрофизики предполагают, что идеальными генераторами возмущений метрики пространства-времени могут быть гипотетические космические объекты — гравитационные коллапсары или черные дыры. При слиянии и вращении пар подобных объектов от них должна распространяться существенная «рябь» пространства-времени, которую можно было бы зафиксировать в окрестностях нашей планеты в космических обсерваториях.

**Гравитация (всемирное тяготение, притяжение)** — одно из главных фундаментальных природных взаимодействий сверхуниверсального типа. Ему подвержены абсолютно все материальные тела, называемые гравитирующей материей. По современным данным, тяготение не только абсолютно универсально, но и всем телам, состоящим из гравитирующей материи, вне всякой зависимости от их массы, сообщает совершенно одинаковое ускорение. Гравитационное взаимодействие входит в четыре фундаментальные силовые поля: электромагнитное, сильное и слабое. В классической

механике гравитация описывается законом всемирного тяготения, установленным Ньютоном и гласящим: сила притяжения между двумя телами прямо пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. При этом сила всемирного притяжения всегда приводит только к притяжению любых тел. Современная концепция тяготения описывается теорией гравитации Эйнштейна, или общей теорией относительности (ОТО). Согласно ОТО любое массивное тело искажает метрику пространства-времени, что и определяет видимое действие гравитационного поля. Гигантские космические объекты, такие, как звезды и их компактные скопления — галактики, составляют колоссальные массы и создают очень значительные даже по космическим масштабам гравитационные поля. Гравитация, слабейшее из известных полей, в то же время есть важнейшая сила во Вселенной, поскольку в отличие от других взаимодействий универсальна при действии на любую материю и энергию. До сих пор в природе не обнаружены негравитирующие и антигравитирующие объекты.

**Квантовая гравитация** — направление работ в теоретической и математической физике. Их цель — квантовое описание гравитационного взаимодействия и последующее объединение общей теории относительности с остальными фундаментальными силовыми полями (электромагнитным, сильным и слабым) для создания Теории всего. Основные направления развития квантовой гравитации — струнная М-теория и петлевая квантовая гравитация. В них транс-частичными элементами предстают одномерные струны и их многомерные аналоги — браны. Перспективы развития квантовой гравитации связывают с объединенным развитием так называемой мембранной теории, сводящейся в пределе к общей теории относительности и квантовой теории поля.

**Квантовая механика** — область физики, изучающая свойства и поведение атомов и субатомных частиц. Квантовая (волновая) механика основывается на корпускулярно-волновом дуализме и принципе неопределенности, объясняя

и корпускулярные, и волновые свойства микромира. Любая квантовомеханическая система описывается комплексной волновой функцией, фаза и амплитуда которой полностью определяют ее состояние. При этом аппарат квантовой теории позволяет естественным образом рассматривать волновые явления интерференции и дифракции элементарных частиц. Вероятность найти любую микрочастицу в определенном состоянии определяется квадратом модуля волновой функции. Отличие квантовой механики от классической физики состоит в том, что вероятность локализации микрочастицы не полностью определяет ее состояние. Для полного описания состояния квантового микрообъекта необходимо вычислить комплексную вероятность, как волновую функцию.

**Квантовая запутанность** — особое состояние составной микроскопической системы, которую нельзя разделить на отдельные, полностью самостоятельные и независимые части. В квантовой теории оно принципиально неразделимо, или несепарабельно. Запутанность и несепарабельность представляют собой тождественные понятия.

**Кварки** — субэлементарные частицы, то есть частицы, которые по современным представлениям не имеют своей внутренней структуры (по крайней мере, так считается). К настоящему времени открыто 6 кварков. Из кварков, в частности, состоят протоны ( $2u + d$ ) и нейтроны ( $2d + u$ ). Каждый из 6 кварков имеет свое собственное имя, и за каждым из них стоят годы попыток его обнаружить.

Гипотеза о том, что тяжелые элементарные частицы — адроны построены из специфических субъединиц — кварков, была впервые выдвинута М. Гелл-Манном и независимо от него Д. Цвейгом в 1964 году для системного упорядочения открытых на тот момент микрочастиц. С тех пор она получила многочисленные косвенные экспериментальные подтверждения (рассеяние на протоне идет так, как будто протон состоит из трех бесконечно малых центров). Гипотеза о существовании кварков сильно упростила классификацию теперь уже не истинно элементарных частиц.

**Корпускулярно-волновой дуализм** — один из основополагающих квантовых принципов, согласно которому любой микробъект одновременно обладает волновыми и корпускулярными свойствами. При измерениях в зависимости от их характера проявляется либо та, либо иная сторона объекта.

**Коллапс** (гравитационный) — явление катастрофически быстрого сжатия массивного тела под действием собственного гравитационного поля. Если масса звезды превышает две солнечных, то в конце своего жизненного пути светило может коллапсировать при исчерпании своего ядерного горючего. Звезда стремительно теряет свою механическую устойчивость и с увеличивающейся скоростью «падает» к центру. После того как радиус светила уменьшится до некоего граничного значения — «гравитационного радиуса», никакие силы уже не могут воспрепятствовать дальнейшему сжатию коллапсирующей звезды.

**Коллапсар** (застывшая, замерзшая звезда, черная дыра) — очень сильно искривленное пространство-время, включающее сингулярность, окруженную горизонтом событий. Гравитационное притяжение коллапсаров настолько велико, что покинуть их не могут даже объекты, движущиеся со скоростью света. Граница этой области называется горизонтом событий, а ее радиус — гравитационным радиусом, или радиусом Шварцшильда. Существование коллапсаров следует из точных решений уравнений общей теории относительности, полученных Карлом Шварцшильдом.

**Компактификация** — сокращение пространственных измерений в таких теоретических построениях, как М-теория, при переходе от планковских масштабов к квантовым. Согласно наиболее развитым представлениям компактификации подлежат 6 из 10 измерений в суперструнных моделях.

**Космология** — физическое учение о Вселенной как о целом, основанное на наблюдательных данных и теоретических выводах, относящихся к охваченной астрономическими наблюдениями части Вселенной. Теоретический фундамент

космологии — основные физические теории тяготения, электромагнетизма и квантов, эмпирическая база данных формируется на основе внегалактических астрономических наблюдений. Выводы и обобщения космологии имеют большое общенаучное и философское значение. Важную роль в космологических сценариях эволюции Вселенной играет тяготение, определяющее взаимодействие масс на метагалактических расстояниях, характерных для динамики космической материи.

**Многомировая интерпретация** — интерпретация квантовой механики, в которой все возможности вероятностной волны реализуются в отдельных Вселенных.

**М-теория** — незавершенная теория объединения всех 5 версий теории струн, полностью квантовомеханическая теория всех сил и всей материи.

**Нейтрино** — стабильная незаряженная частица с полужелтым спином и сверхмалой массой, отличается очень высокой проникаемостью, участвует только в слабых и гравитационных взаимодействиях.

**Нуклоны** — частицы входящие в состав атомных ядер — протоны и нейтроны.

**Общая теория относительности (ОТО)** — теория гравитации, выражающая тяготение через геометрию пространства-времени, созданная в 1915–1916 годах Альбертом Эйнштейном. По своей сути ОТО — развитие специальной теории относительности. Главная идея ОТО: гравитация обусловлена не силовым взаимодействием гравитирующей материи, а искривлением самого пространства-времени под воздействием массы и энергии. В ОТО тяготение — не силовое взаимодействие, а кривизна пространства-времени, возникающая под распределением космических масс и энергетических потоков. Общеизвестная теория гравитации подтверждена многочисленными наблюдениями. Признание ОТО получила после объяснения аномальной прецессии перигелия Меркурия и отклонения световых лучей вблизи солнечной поверхности при полном затмении. С тех пор опытные наблюдения

подтвердили такие предсказания ОТО, как гравитационное красное смещение, гравитационное замедление времени и запаздывание электромагнитных сигналов в сильных гравитационных полях. Астрономические наблюдения отчасти подтверждают такое необычное предсказание ОТО, как гравитационный коллапс, в результате которого возникает черная дыра.

**Принцип причинности** — утверждение, что следствия должны происходить после своих причин, а не до них.

**Причинно-следственные связи** — объективная закономерность окружающего нас мира, состоящая в том, что сначала возникает причина какого-либо явления или события, а затем наступает следствие.

**Планковская длина (масштаб)** — расстояние порядка  $10^{-33}$  см. На нем нулевые квантовые колебания гравитационного поля полностью искажают геометрию пространства-времени.

**Пространство-время** — непрерывное четырехмерное многообразие (континуум), в котором три измерения пространственные, а четвертое — временное. Как физическая модель дополняет пространство классической физики временным измерением, создавая новую теоретико-физическую конструкцию пространственно-временного континуального многообразия. В нерелятивистском пределе концепция пространства-времени переходит в классическую механику с взаимно независимыми пространством и временем. В теории относительности время неотделимо от пространственных измерений и также зависит от скорости наблюдателя. Один из первых вариантов модели объединения пространства и времени в единый континуум предложил в 1908 году Герман Минковский (пространство Минковского) на основе специальной теории относительности.

**Симметрия** — преобразование физической системы, которое оставляет проявление системы неизменным (например, вращение совершенной сферы относительно ее центра

оставляет сферу неизменной) и не влияет на законы, описывающие физическую систему.

**Сингулярность** — место, где кривизна пространства-времени обращается в бесконечность (например, в центре черной дыры или в изначальный момент Большого взрыва).

**Сильное взаимодействие** — самое сильное из известных фундаментальных взаимодействий элементарных частиц, проявляется внутри атомных ядер.

**Слабое взаимодействие** — одно из фундаментальных обменных взаимодействий с участием всех элементарных частиц, проявляющееся в явлении радиоактивности. В слабом взаимодействии нарушается пространственная четность и зеркальная симметрия.

**Специальная, или частная, теория относительности (СТО)** — дальнейшее развитие принципов классической механики и электродинамики. Теория обобщает их для тел, движущихся с субсветовыми скоростями. При сравнительно (со скоростью света) малых скоростях перемещения уравнения СТО переходят в свои классические аналоги. Вводит понятие нового континуального многообразия — четырехмерное пространство-время, где и описываются все события релятивистской физики.

**Спин** — собственный момент количества движения микрочастицы, не связанный с ее перемещением как целого, может быть целым или полуцелым в единицах постоянной Планка.

**Стационарное состояние** — устойчивое состояние квантово-механической системы, когда все характеризующие ее параметры не зависят от времени.

**Струнная теория** — теорфизические построения, которые основываются на одномерных колеблющихся нитях энергии на планковских масштабах. Возбуждения струн описывают бесконечный набор полей — векторных, тензорных, скалярных. В них фундаментальные составляющие — одномерные петли (замкнутые струны) или обрывки (открытые струны)



колеблющейся энергии. Теория суперструн объединяет общую теорию относительности (теорию гравитации Эйнштейна) и квантовую механику на основе суперсимметрии как симметрии, в которой законы не изменяются, когда частицы с целочисленным спином (частицы сил) взаимозаменяются на частицы с полуцелым (частицы материи).

**Темная материя** — невидимая вещественная составляющая космического пространства, проявляющая себя исключительно в гравитационных взаимодействиях. Согласно современным оценкам, составляет около 1/4 всей массы Метагалактики. Природа темной материи не установлена, предполагается, что она может концентрироваться в сгущениях галактических размеров, участвует в гравитационных взаимодействиях с группами галактик и их отдельными членами, как обычная гравитирующая материя. Теоретически темная материя может состоять из не открытых еще микрочастиц. Поиск следов темной материи ведется в экспериментальной физике элементарных частиц на сверхмощных ускорителях — коллайдерах. Если частицы темной материи тяжелее протона в сотни или даже тысячи раз, они должны рождаться при столкновении на встречных пучках такого ускорителя, как Большой адронный коллайдер. Согласно гипотезам квантовой космологии частицы темной материи входят в новое семейство элементарных частиц, которые как-то должны проявлять себя при сверхвысоких энергиях взаимодействия известных микрочастиц.

**Темная энергия** — субстанция неизвестной природы, она составляет около 70 % всей энергии и равномерно распределена по всей Вселенной. Темная энергия испытывает антигравитацию, следующую из современных астрономических методов измерения темпа расширения Вселенной, которые свидетельствуют о том, что около 7 млрд лет назад Вселенная стала расширяться с ускорением, так что темп расширения постоянно возрастает. Данный парадоксальный факт не противоречит теории гравитации Эйнштейна, поскольку допускает интерпретацию в рамках гипотезы о том, что темная энергия обладает уникальным свойством — «отрицательным

давлением». Чаще всего темную энергию связывают с «отрицательным давлением» физического вакуума, плотность энергии которого не изменяется на протяжении всей истории расширения Вселенной.

**Теоретическая физика** — теоретический способ описания окружающей объективной реальности, при котором с теми или иными природными явлениями сопоставляется определенная математическая модель. В своей основе теоретическая физика содержит абстрагированные образы, вытекающие из экспериментальных данных, являясь при этом совершенно самостоятельным методом изучения материальной природы. Область ее интересов охватывает всю физику и смежные науки с учетом последних достижений прикладной математики и математической физики. В своих методах теорфизика исходит из высочайшей эффективности математического описания природных и искусственных явлений, изучает не столько свойства неких реальных процессов, сколько свойства их математических моделей. Наиболее ценный продукт теорфизики — новые физические теории. Два основных направления приложения теорфизических исследований: объяснение известных физических процессов и предсказание новых, еще не открытых наукой природных явлений, реальность которых затем проверяется опытным путем. Одна из высших целей теорфизики — создание Теории всего в виде единой системы уравнений, объединяющей все известные частицы и силы.

**Тепловое излучение** — электромагнитное излучение непрерывного спектрального состава, испускаемое нагретыми телами. Основной математической моделью теплового излучения служит АЧТ, описываемое классическими законами Стефана — Больцмана, Кирхгофа и Вина, а также квантовым законом Планка. Тепловое излучение вместе с конвекцией и теплопроводностью составляет один из основных видов переноса тепла. Важную роль в физике играет понятие равновесного теплового излучения, как находящегося в термодинамическом равновесии с веществом.

**Ультрафиолетовая катастрофа** — гипотетическое явление в виде парадокса классической физики, состоящее

в том, что полная мощность излучения АЧТ должна стремиться к бесконечности. Свое название мысленный парадокс получил из-за предсказания классических законов излучения о практически неограниченном росте спектральной плотности мощности излучения в его коротковолновой — ультрафиолетовой части. Так как это противоречит опытным данным, в конце XIX века возник кризис теории излучения, решенный в 1900 году введением новых принципов квантовой теории излучения, созданной Максом Планком.

**Фермионы (ферми-частицы)** — микрочастицы с полупуцелым спином, подчиняющиеся статистике Ферми — Дирака.

**Флуктуация** — случайное отклонение некоторой физической величины от заданного (в экспериментах) или среднего (в природе) значения. Среди флуктуаций встречаются: квантовые — в силу фундаментальных свойств материи, термодинамические — из-за неустойчивости потоков тепла, броуновское движение — молекулярные тепловые перемещения.

**Электромагнитное излучение (электромагнитные волны)** — распространяющиеся в пространстве неоднородности и возмущения электромагнитного поля в виде взаимосвязанных друг с другом магнитных и электрических полей. В состав электромагнитного излучения входят жесткое гамма-излучение, рентгеновское, ультрафиолетовое, видимый свет, инфракрасное излучение и радиоволны. Электромагнитное излучение абсолютно свободно распространяется в пространстве, свободном от вещества — вакууме, и в некоторых конденсированных средах. Оно экранируется проводящими поверхностями, генерируется и принимается на специальные системы проводников — антенны.

**Эфир, мировой, светоносный** — исторический аналог физического вакуума. Первые модели некоей всепроникающей универсальной среды возникли еще в рассуждениях античных метафизиков. В дальнейшем идея эфира получила развитие в трудах энциклопедистов эпохи Возрождения, считавших,

что мировое пространство заполнено сверхтонкой субстанцией, невидимой и неосязаемой для человеческих чувств. В физику эфир вошел как среда для распространения электромагнитных волн, описываемого уравнениями Максвелла. Он полагал, что электромагнитные волны распространяются в эфире точно так же, как акустические — в газовой среде, а гидродинамические — в водной. Концепция эфира неоднократно подвергалась критике за внутреннюю противоречивость и эклектичность, окончательно она была развенчана как научное заблуждение после создания теории относительности.

## Литература по теме

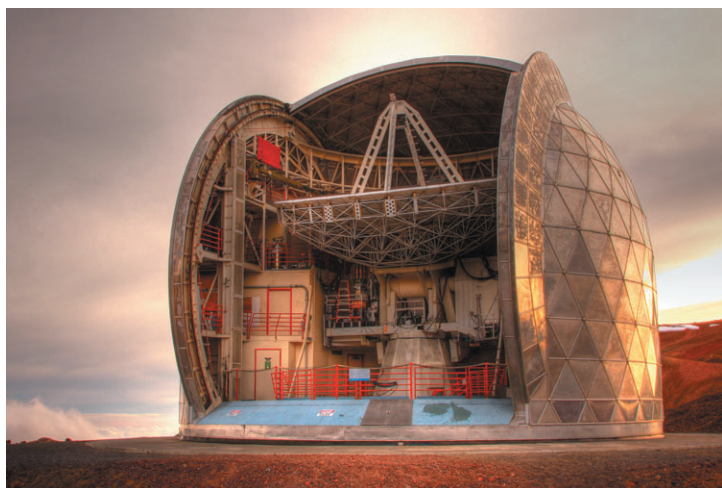
1. Азимов А. Загадки микрокосмоса. М., 2004.
2. Азимов А. Миры внутри миров. М., 2004.
3. Арсенов О. Физика времени. М., 2010.
4. Арсенов О. Параллельные Вселенные. М., 2011.
5. Белокуров В. В., Тимофеевская О. Д., Хрусталеv О. А. Квантовая телепортация — обыкновенное чудо. Ижевск, 2000.
6. Борн М. Моя жизнь и взгляды. М., 2004.
7. Бройль де Луи. Революция в физике (Новая физика и кванты). М., 1965.
8. Вайнберг С. Открытие субатомных частиц. М., 1996.
9. Виленкин А. Мир многих миров. Физика в поисках параллельных вселенных. М., 2010.
10. Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое. М., 1990.
11. Глэшоу Ш. Л. Очарование физики. Ижевск, 2002.
12. Грин Б. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. М., 2008.
13. Грин Б. Ткань космоса. Пространство, время и текстура реальности. М., 2009.
14. Гринштейн Дж., Зайонц А. Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики. М., 2008.
15. Данин Д. С. Неизбежность странного мира. М., 1966.
16. Данин Д. С. Резерфорд. М., 1966.
17. Данин Д. С. Нильс Бор. М., 1978.
18. Данин Д. С. Вероятностный мир. М., 1981.
19. Дойч Д. Структура реальности. Ижевск, 2001.
20. Каку М. Введение в теорию суперструн. М., 1999.
21. Каку М. Параллельные миры. К., 2008.

22. Кляус Е. М., Франкфурт У. И., Френк А. М. Нильс Бор. 1885–1962. М., 1977.
23. Линкольн Д. Большой адронный коллайдер. На квантовом рубеже. М., 2011.
24. Марков М. А. О трех интерпретациях квантовой механики: Об образовании понятия объективной реальности в человеческой практике. Бор, Эйнштейн и Эверетт. М., 2010.
25. Мигдал А. Б. Квантовая физика и Нильс Бор. М., 1987.
26. Мигдал А. Б. Квантовая физика для больших и маленьких. М., 1989.
27. Милантьев В. П. История возникновения квантовой механики и развитие представлений об атоме. М., 2009.
28. Окунь Л. Б. Альфа, бета, гамма... Элементарное введение в физику элементарных частиц. М., 1985.
29. Окунь Л. Б. Физика элементарных частиц. М., 1988.
30. Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. Большое, малое и человеческий разум. М., 2004.
31. Пономарев Л. И. Под знаком кванта. М., 1989.
32. Работнов Н. С. Ларчик можно не открывать: Квантовый туннельный эффект. Полвека загадок и открытий. М., 1983.
33. Розенталь И. Л., Архангельская И. В. Геометрия, динамика, Вселенная. М., 2003.
34. Трейман С. Этот странный квантовый мир. Ижевск, 2002.
35. Утияма Р. К чему пришла физика (От теории относительности к теории калибровочных полей). М., 1986.
36. Фейгин О. О. Великая квантовая революция. М., 2009.
37. Фейгин О. О. Физика нереального. М., 2010.
38. Фейгин О. О. Стивен Хокинг. Гений черных дыр. М., 2010.
39. Фейгин О. О. Тайны квантового мира. М., 2010.

## Литература по теме

---

40. Фейнман Р. КЭД: странная теория света и вещества. М., 1988.
41. Хван М. П. Неистовая Вселенная: от Большого взрыва до ускоренного расширения, от кварков до суперструн. М., 2006.
42. Хокинг С., Пенроуз Р. Природа пространства и времени. Ижевск, 2000.
43. Хокинг С. Черные дыры и молодые вселенные. СПб., 2006.

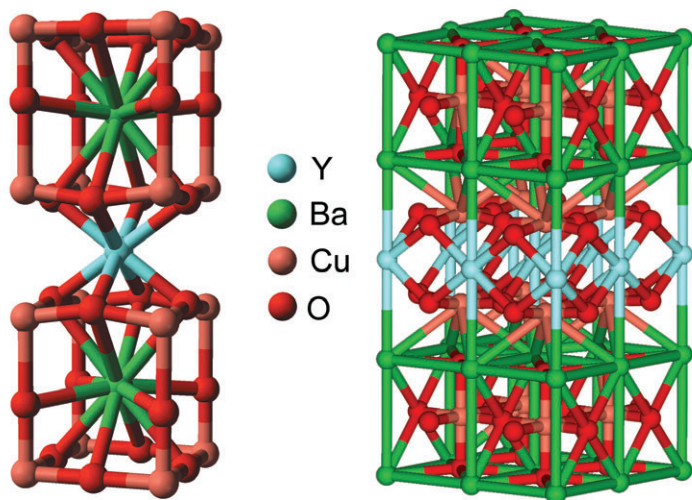


Радиотелескоп — парадоксальный пример современного научного инструментария, исследующего с помощью обитателей микромира (квантов электромагнитного излучения) мегамир видимой части Вселенной — Метагалактики

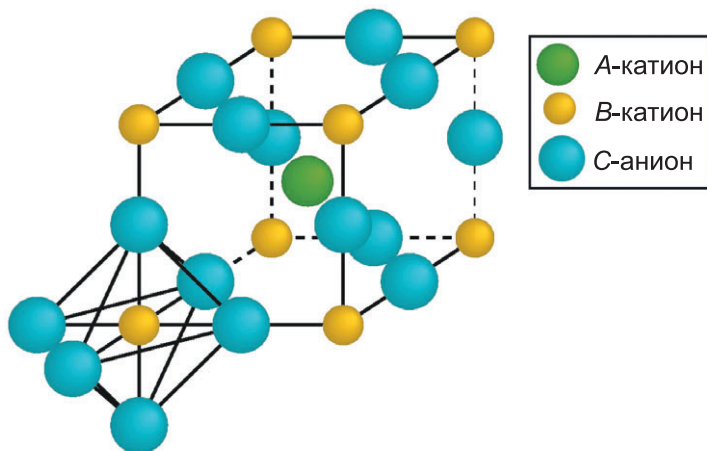


Удивительный микромир частиц и полей

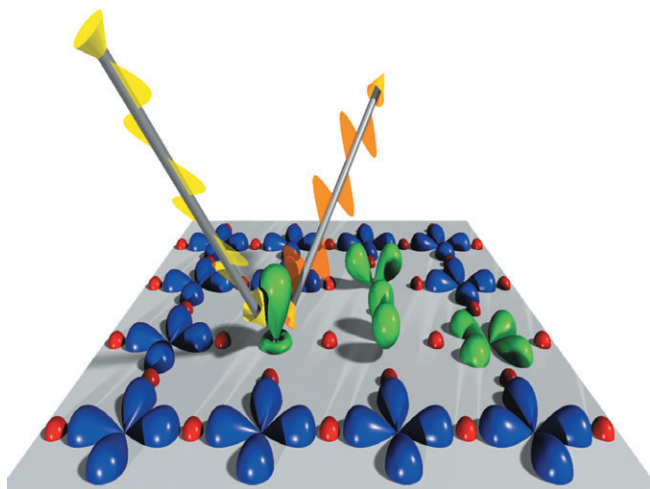




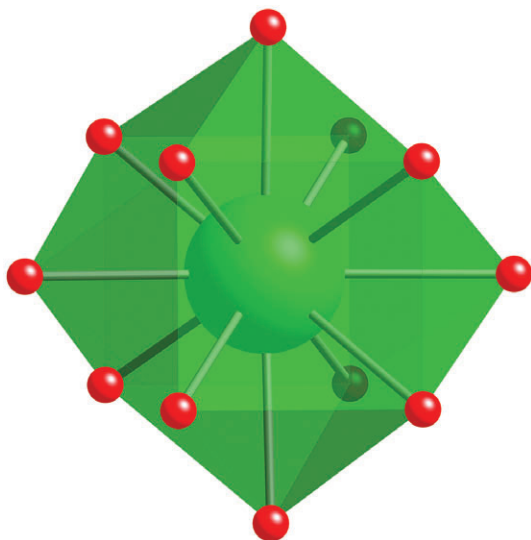
Структура высокотемпературного сверхпроводника



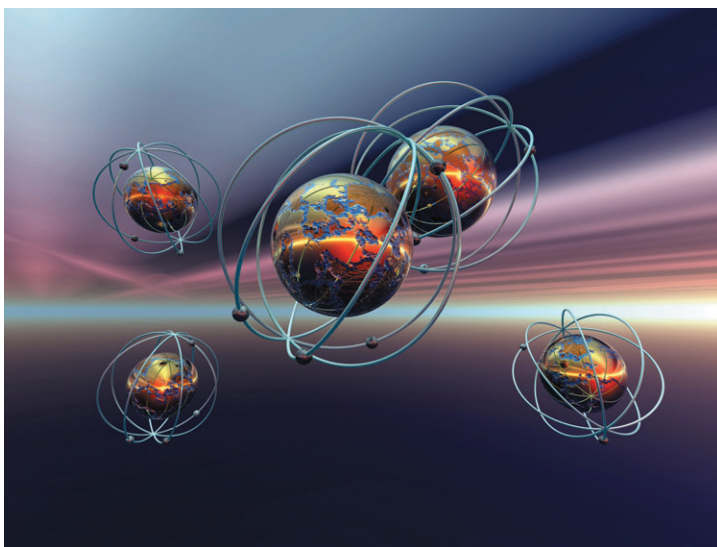
Кристаллическая структура перовскита  
(*A* – кальций, *B* – титан, *C* – кислород)



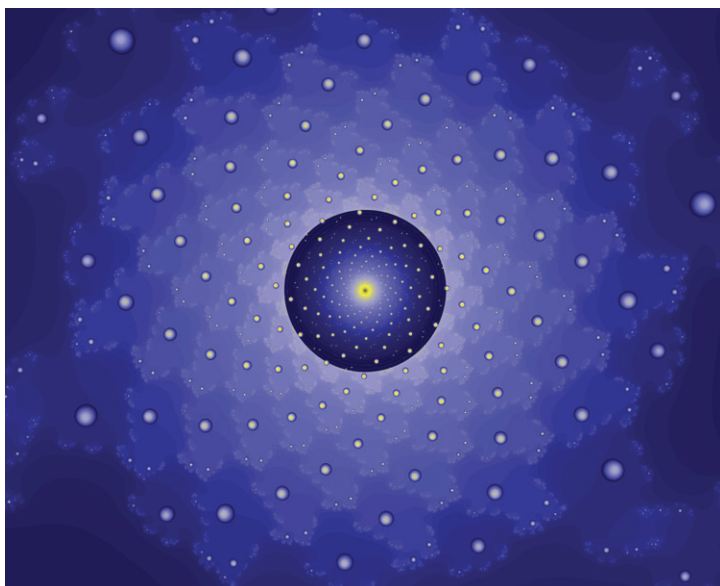
Квантовое спаривание электронных пар  
вблизи облученных вакансий



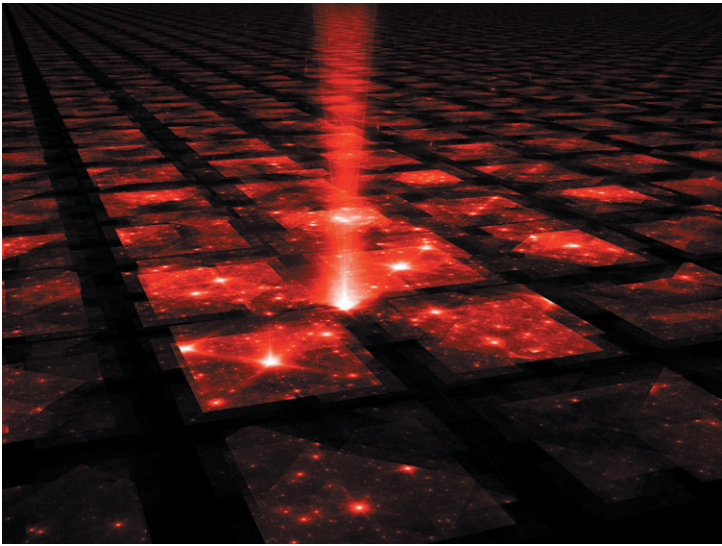
Структурная ячейка вакансий в сверхпроводнике



Новые квантовые миры



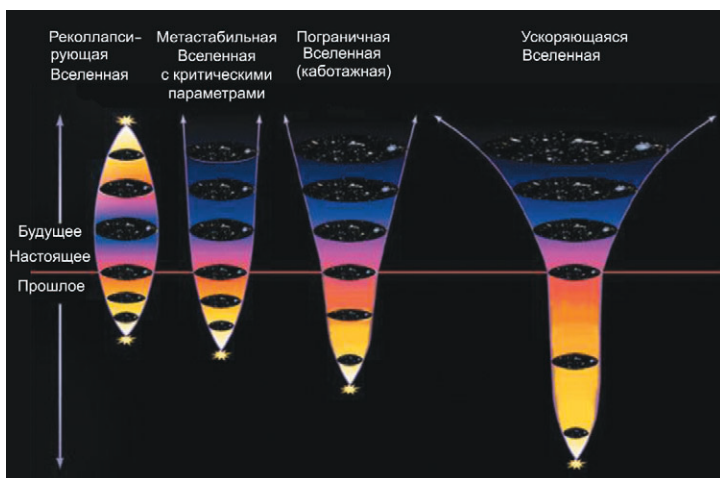
Квантовые глубины атомного мира



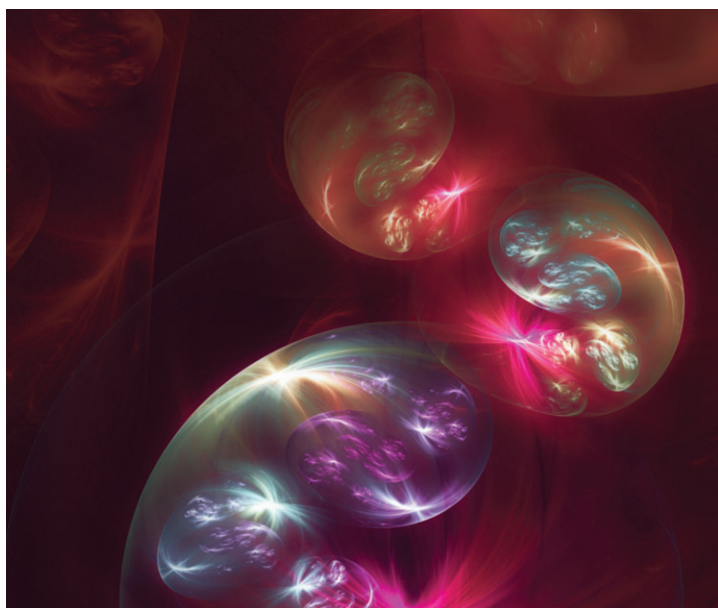
Квантовый Мультиверс



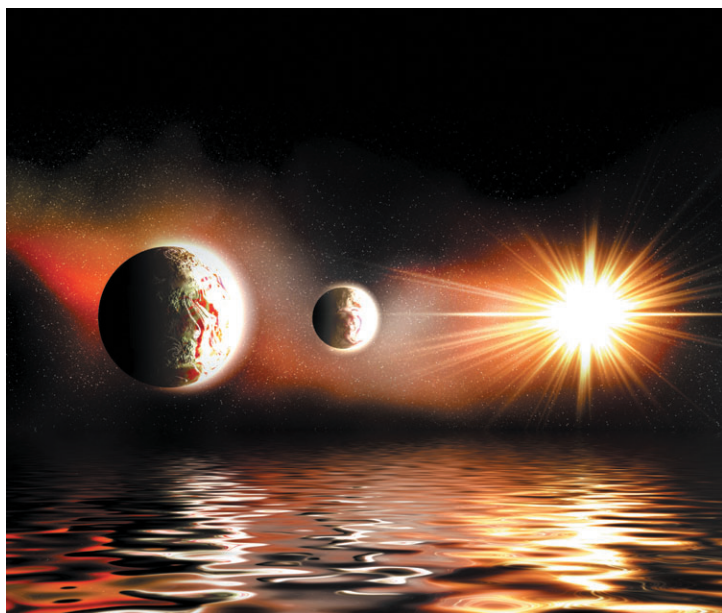
Суперструнные построения «хромосом» Мироздания



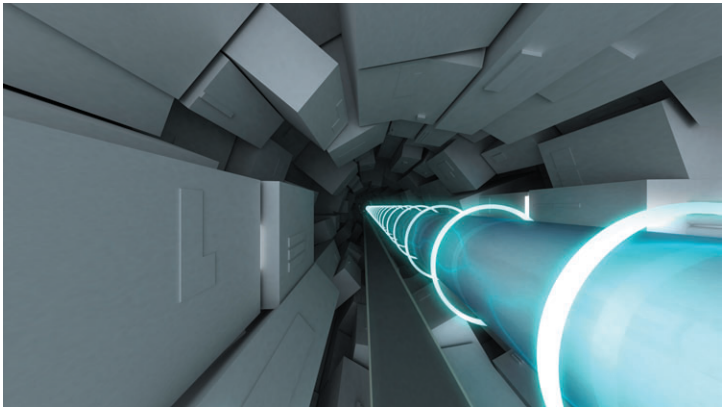
Инфляционные сценарии космической эволюции



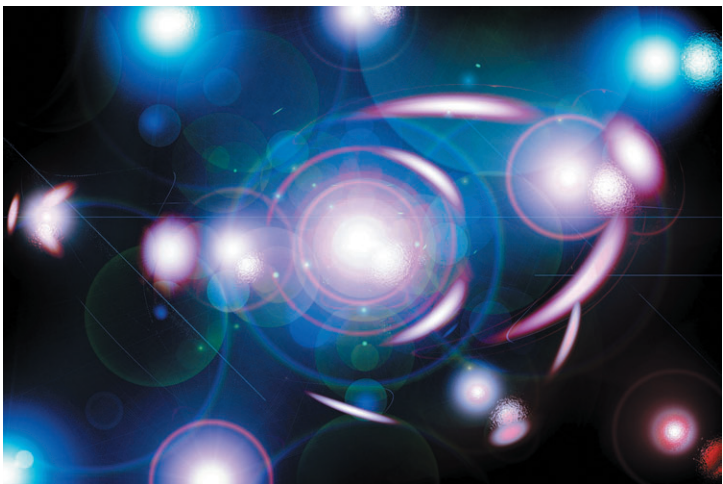
Квантовая космология бесконечной череды Больших взрывов



Мир Ньютона и Лапласа? Квантовый Мультиверс?  
Или вечно инфляционный Мультиуниверсум?



Надежда квантовой науки — Большой адронный коллайдер (ЦЕРН, Швейцария, Женева)



Космический океан Мультивселенной

Научно-популярное издание

ТАЙНЫ МИРОЗДАНИЯ

**Фейгин Олег Орестович**

**ПАРАДОКСЫ КВАНТОВОГО МИРА**

Ответственный редактор *В. Обручев*  
Художественный редактор *А. Дурасов*

ООО «Издательство «Эксмо»  
127299, Москва, ул. Клары Цеткин, д. 18/5. Тел. 411-68-86, 956-39-21.  
Home page: [www.eksmo.ru](http://www.eksmo.ru) E-mail: [info@eksmo.ru](mailto:info@eksmo.ru)

Подписано в печать 22.09.2011. Формат 84x108<sup>1/32</sup>.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,12.  
Тираж экз. Заказ

ISBN 978-5-699-53016-8



9 785699 530168 >



# Современная физика находится в ожидании грядущих революционных изменений. И одним из таких изменений может стать создание единой теории на основе квантовой механики и теории относительности.

Эта теория, как надеются ученые, сможет ответить на многие вопросы, например:

- Из чего состоят элементарные частицы: электрон, протон и нейтрон?
- Что будет, если бесконечно дробить частички материи?
- Как наша Вселенная смогла родиться из некоей элементарной частицы?
- Существуют ли миры из антивещества?
- Можно ли с помощью собственного сознания управлять ходом событий в микромире?

Мы проследим весь путь развития квантовой физики, пытающейся на основании новейших открытий создать эту единую теорию.

ISBN 978-5-699-53016-8



9 785699 530168 >



ЭКСМО