

Олег Фейгин
Pro квантовые чудеса

От автора

Если вы о квантовой механике знаете только то, что она «...разрешила вековую загадку таинственной страны микромира» и еще: «...перевернула все наше мировоззрение», вы знаете о ней примерно столько же, сколько знают путешествующие по незнакомой стране, не изучив предварительно ее культуру и язык: они видят вокруг людей, которые спешат, смеются, машут руками, но цель их движений туристам неизвестна, а радость – непонятна. В результате же память путешественников сохраняет только яркие пятна рекламы на незнакомом языке.

Л. И. Пономарев.

По ту сторону кванта

После выхода в свет моих первых книг о драматической истории возникновения новой физики микромира – «Великая квантовая революция», «Тайны квантового мира», «Парадоксы квантового мира» и «Наука будущего» – я с сожалением думал о том, что данная тема практически исчерпана и пора переходить к популяризации других страниц бесконечно прекрасного естествознания.

Однако поток электронных писем читателей через некоторое время снова заставил вернуться к вопросам:

- Из чего же состоят элементарные частицы, такие как электрон, протон и нейтрон?
- Что будет, если бесконечно дробить частички материи, и есть ли у такого дробления предел?

- Как смогла родиться из первоатома или даже некой элементарной частицы наша необозримая Вселенная?
- Существуют ли миры из антивещества, антигравитирующие и зеркальные?
- Что такое квантовый апокалипсис и когда его следует ожидать?
- Что может произойти при работе сверхмощного ускорителя частиц в Швейцарии? Не возникнет ли черная дыра, в которой исчезнет Земля?
- Можно ли с помощью собственного сознания управлять ходом событий в микромире и как это может изменить окружающую реальность?

Все это, к большой радости, показывает, что интерес к общедоступным научным знаниям все же не пропал. Особенно отрадно, что множество любознательных читателей не только спрашивают, но спорят и даже советуют, как лучше рассказать о современных исследованиях удивительных глубин вещества – мира квантов, атомов и элементарных частиц.

Разумеется, объяснять «на пальцах», как выглядит сотканная из суперструн и мембран вероятностная текстура пространства – времени, далеко не просто. Главным образом это связано с глубоко парадоксальным образом новой физической реальности, очень сильно отличающейся от привычной повседневности. Здесь мне постоянно приходилось лавировать между «сциллой» доступности и «харибдой» научности...

Надо заметить, что сама идея общедоступного изложения квантовых «чудес» родилась в ходе переписки с известным физиком-экспериментатором, а в то время председателем комиссии РАН по борьбе со лженаукой, академиком Эдуардом Павловичем Кругляковым (1934–2012).

В заключение хотелось бы подчеркнуть литературный вклад таких известных ученых-популяризаторов, 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.

Введение

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*

Нет сомнения, что вне зависимости от профессии, возраста и образования современного человека в его культурный багаж обязательно должен входить некоторый объем физических сведений. Ведь постижение научного знания вырабатывает особый аналитический склад ума, логическое мышление и критическое отношение к действительности.

Предлагаемая книга чем-то напоминает сборник репортажей с передовой научного фронта познания тайн природы, где каждая победа

над неведомым расширяет круг знания, возвеличивая человеческий разум. В отличие от страниц школьных учебников, описывающих то, что уже достоверно установлено наукой и что обязан знать каждый учащийся, в настоящей книге доступно рассказывается не только о современном окончательном состоянии какого-либо научного вопроса, но и о неоднозначных поисках, ошибках, сомнениях искателей истины.

Одним из неприятных парадоксов школьного курса физики является то, что на современную науку, включающую теорию относительности и квантовую механику, выделяется всего лишь несколько уроков. Это положение является совершенно недопустимым и отчасти объясняет значительные пробелы в знаниях выпускников средней школы и даже абитуриентов физико-математических специальностей вузов. Настоящая книга призвана хотя бы отчасти исправить сложившуюся ситуацию, будучи во многом рассчитанной на внимание учащейся молодежи. Тем не менее автор искренне надеется, что многое в ней будет интересно педагогам и читателям всех возрастов и профессий, интересующихся историей возникновения и сутью современных взглядов на окружающую реальность.

В ходе работы над рукописью, вполне естественно, как и предсказывал Козьма Прутков, объять необъятное не удалось, ведь даже выборочный перечень интересных задач современной квантовой физики с краткими комментариями составил бы отдельный солидный труд. Поэтому автор надеется еще продолжить общение со своими читателями на страницах будущих книг, рассказывающих о фантастических параллельных вселенных, квантовом Мультиверсе, подпространственных измерениях и прочих трудновообразимых вещах квантовой реальности.

Удивительно, но современные квантовые теоретики часто обращаются к творческому наследию древних мудрецов. К примеру, видный современный разработчик суперструнных сценариев эволюции Вселенной Хуан Малдасена черпает свое вдохновение в творчестве древних элеатов, создавших одну из первых античных философских школ в итальянском городе-государстве Элее.

Философские взгляды первых античных атомистов привнесли в наш мир принцип неделимых фундаментальных кирпичиков мироздания. В конце позапрошлого века «пара и электричества» возникли начала новой атомистики, родившейся из экспериментов с катодным и

рентгеновским излучением, а также радиоактивными элементами. Вскоре была открыта и первая элементарная частица – электрон.

Затем последовала «великая квантовая революция», неразрывно связанная с именем немецкого физика-теоретика Макса Планка (1858–1947). В 1919 году Планк стал нобелевским лауреатом по физике «в знак признания его заслуг в деле развития физики благодаря открытию квантов энергии». Теоретические исследования 1896–1900 годов, приведшие Планка к открытию квантов (термин «квант» также ввел он), стали толчком к созданию одного из важнейших разделов современного естествознания – квантовой физики. Именем Планка названа введенная им фундаментальная физическая константа h – «постоянная Планка», связавшая макро- и микромиры и входящая в ряд уравнений и законов в различных разделах физики. Элементарные представления о планковских квантах энергии включены в современные программы школьной физики, а о постоянной Планка сочиняют анекдоты.

Можно образно сказать, что как прошлый, так и нынешний век прошли «под знаком кванта», начиная с первой работы отца-основателя, вышедшей в 1901 году. Через несколько лет еще один выдающийся участник «квантовой революции» Альберт Эйнштейн применил гипотезу квантов энергии для объяснения фотоэффекта. Эта работа стала первым шагом к изобретению квантовых оптических генераторов (лазеров), без которых невозможно представить себе современную технику. К началу Второй мировой войны в эксперименте были обнаружены два макроскопических квантовых эффекта – сверхпроводимость и сверхтекучесть. Лазерный луч можно считать третьим таким эффектом, но его люди впервые увидели только в 1960-м. А к этому времени уже появилась такие обширные области приложений квантовой физики, как электроника и физика твердого тела.

В множестве книг и статей, посвященных Планку, отмечается, что, хотя его работы в значительной степени революционизировали физику, сам Планк в науке был скорее консерватором. Тем не менее именно глубокая приверженность принципам классической физики привела Планка к его революционному открытию. Один из создателей квантовой механики, Вернер Гейзенберг (1901–1976) писал, что революции в науке вызываются не внезапными открытиями или

гениальными идеями, а, наоборот, предельной последовательностью в применении традиционных понятий. Революции, по мнению Гейзенберга, делают те ученые, которые стремятся вносить как можно меньше изменений в прежнюю науку, так как именно стремление минимизировать изменения делает очевидным, что к введению принципиально новых представлений нас толкает сама природа, а не жажда славы или оригинальности.

Именно к таким гениальным «радикальным консерваторам» и можно было бы отнести одного из основателей современной физики Макса Планка.

Настоящая книга предназначена преимущественно для массового читателя, который еще не полностью позабыл остатки школьных знаний и жаждет понять, как неизбежность квантового мира дает стимул развитию современных сложнейших, а иногда и спорных концепций физической реальности. Как и в других своих книгах: «Взорванное мироздание», «Механика машины времени», «Удивительная относительность», автор старался повсюду сосредоточиться на сути научных идей, исключив громоздкие математические детализации в пользу метафор, аналогий, исторических экскурсов и литературных иллюстраций. Таким образом, читателю предстоит заново пройти путь открытия квантового мира, получив ни с чем не сравнимое удовольствие расширения своего горизонта мировоззрения...

Глава 1. Лучистая материя

Каждая наука является зданием, воздвигнутым ценою бесчисленных усилий многих поколений исследователей. В среднем вклад каждого – это лишь крохотный камушек для строительства целого. Но иногда приходит человек, который возводит целый этаж или сносит часть здания и строит ее заново.

Г. Тирринг.

Путь теоретической физики от Ньютона до Шредингера

Двадцатого января 1896 года выдающийся французский физик, математик и философ Анри Пуанкаре (1854-1912) на очередном заседании Парижской академии наук сделал доклад об открытии еще одного вида необычного излучения. При этом он демонстрировал снимки, напоминающие рентгеновские, но полученные вблизи флуоресцирующих солей тяжелых металлов.

На этом знаменательном ученом собрании присутствовал Анри Беккерель, представляющий целую династию 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; обернув фоточувствительную пластинку плотной черной бумагой, он положил на нее металлический экран с причудливым узором из соли урана. После многочасовой экспозиции в прямых солнечных лучах пластинка была проявлена, и на ней очень четко запечатлелись «урановые узоры». Проверочные опыты полностью подтвердили результаты Беккереля. Двадцать четвертого

февраля 1896 года он в присутствии самого Пуанкаре сделал доклад на очередном заседании академии.

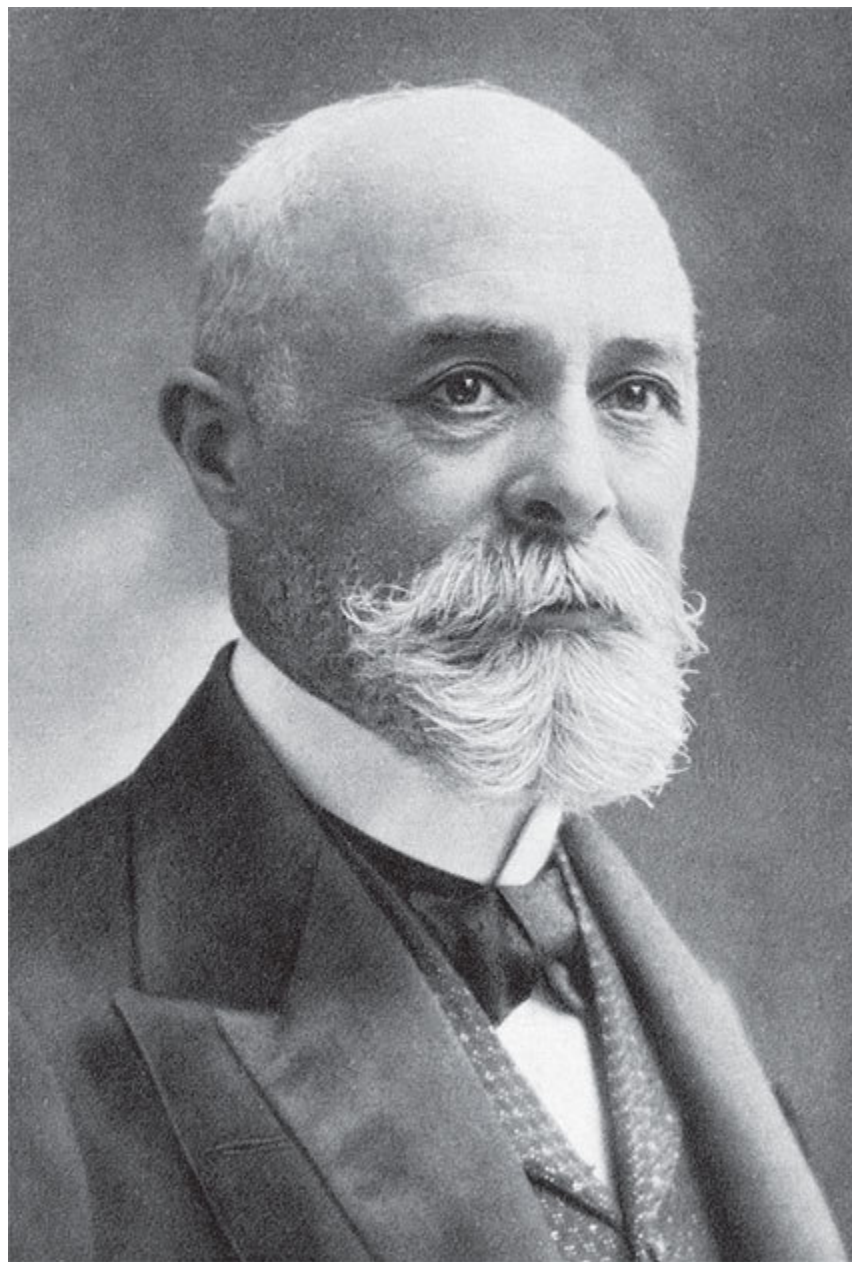
Это сообщение было воспринято как безусловное подтверждение теории Пуанкаре, но Беккерель интуитивно чувствовал тут какую-то недосказанность и продолжал свои исследования. Как-то раз он приготовил все для очередной солнечной экспозиции, но погода испортилась, и ученый отложил оборудование до лучших времен. Через несколько дней Беккерель решил возобновить свои опыты, но предварительно он, руководствуясь импульсом, решил проявить неиспользованные пластинки, прошедшие несколько дней в темном шкафу вблизи солей урана. Каково же было его восторженное изумление, когда на проявленных фотопластинках четко выступили контуры образцов минералов!

Получалось, что данный минерал засвечивал фотопластинку некими совершенно невидимыми лучами, которые испускались без всякой внешней подсветки и к тому же легко проникали через непрозрачные экраны. После длинной серии повторных опытов 2 марта 1896 года Беккерель решился сообщить о своем удивительном открытии на очередном заседании Парижской академии наук. Во множестве последующих экспериментов, где кроме Беккереля приняли участие и другие физико-химики, было открыто, что таинственные лучи могут испускать только различные соединения урана. Отсюда и возникло их название – «урановые лучи», или «излучение Беккереля». Кроме всего прочего, 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, что излучательной способностью в разной мере обладают как практически все урановые соединения, так и сам уран. Причем их излучательные свойства совершенно не зависят от химического и физического состояния урансодержащих препаратов.

В 1897 году к исследованиям Беккереля присоединились и другие ученые, прежде всего супруги Пьер и Мария Кюри. Мария Склодовская-Кюри даже сделала радиоактивные явления главной темой своей докторской диссертации. А уже в апреле 1898 года была опубликована первая статья супругов Кюри по радиоактивности, где собственно и вводился данный термин, быстро завоевавший всеобщее

признание. Позднее в своей докторской диссертации Мария Склодовская-Кюри писала, что с самого начала поставила себе цель поиска 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, хотя вначале исследователи только смутно догадывались о вредоносном воздействии радиоактивного излучения. В конечном итоге именно смертельная передозировка «урановых лучей Беккереля» и привела к безвременной кончине Марии Склодовской-Кюри.



Антуан Анри Беккерель (1852–1908)

...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

Между тем в 1898 году физический раздел июльского выпуска докладов Парижской 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. Само новое радиоактивное вещество было названо «полоний» в честь родины Марии Кюри. Полоний оказался феноменально активным на то время, поскольку его излучающая способность более чем в четыре сотни раз превосходила активность урана. А в декабре того же года появилась новая работа супругов Кюри, озаглавленная «Об одном новом, сильно радиоактивном веществе, содержащемся в смоляной руде». В ней рассказывалось об открытии нового, очень сильно радиоактивного вещества с химическими свойствами, напоминающими барий, а хлористое соединение нового элемента более чем в 900 раз превышало активность урана. В самом спектре загадочного соединения была обнаружена линия, не принадлежащая ни одному из известных веществ и отождествленная супругами Кюри с новым радиоактивным элементом, названным ими «радий». Согласно точке зрения, высказанной Марией Кюри в этой работе, открытие полония и радия завершило новый этап в истории радиоактивности.



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 беккерелевы лучи. Вещества, обладающие этим свойством, я назвала радиоактивными. С тех пор это название стало общепринятым.

М. Кюри.

Пьер Кюри

Супруги Кюри отмечали по этому поводу, что радиоактивность является свойством атомов, сохраняющимся во всех химических и физических состояниях вещества. Затем в одной из работ, написанных после смерти Пьера, Склодовская-Кюри уточняла, что радиоактивность урановых и ториевых соединений представляется именно спецификой их атомных свойств, связанных с наличием именно атомов радиоактивных элементов, которая не уничтожается ни переменной физического состояния, ни химическими преобразованиями.

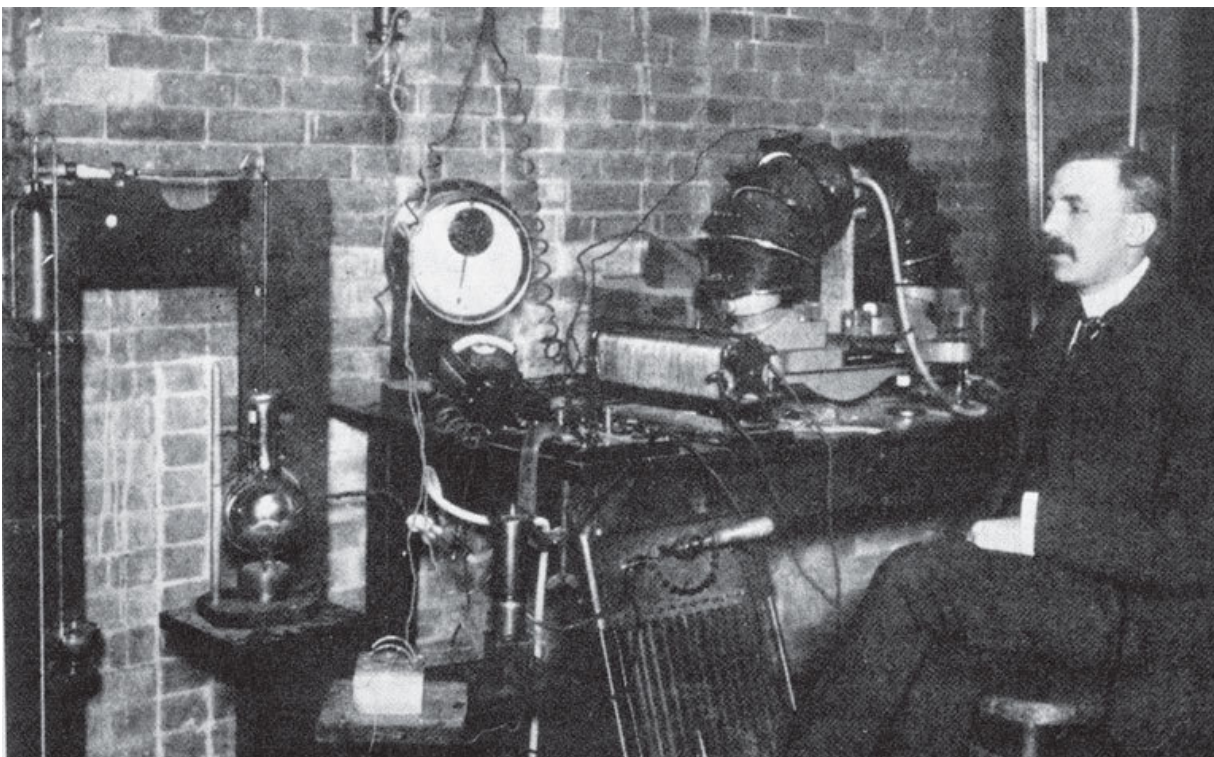
Научное сообщество полностью разделяло этот вывод выдающихся ученых, и уже в декабре 1903 года Беккерель и супруги Кюри стали лауреатами Нобелевской премии.

После подтверждения в сотнях опытов радиоактивности атомов урана, тория, полония и радия ученые вплотную занялись исследованием природы радиоактивного излучения. Первым достиг успеха молодой физик-экспериментатор из Новой Зеландии Эрнест Резерфорд (1871–1937). 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. Измеряя скорость 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, характеризующееся сравнительно интенсивным поглощением, ученый назвал для удобства «альфа-излучение», а другое, с высокой проникающей способностью – «бета-излучение».

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 этого 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».

Оказалось, что 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 неотклоняемые альфа-лучи на самом деле испытывают воздействие достаточно сильных магнитных и электрических полей. По сравнению с катодными лучами альфа-излучение отклонялось в противоположную сторону, что позволило сделать вывод о их составе из положительно заряженных частиц, к тому же движущихся с очень высокой скоростью.



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

Подытожив все известные факты, Склодовская-Кюри в 1903 году привела в своей докторской диссертации «Исследования о радиоактивных веществах» знаменитую «веерную» схему структуры

радиоактивного излучения, испытывающего разное отклонение в магнитном поле. Затем последовали открытия супругами Кюри полония и радия, в ходе которых 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, которые он назвал «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, что радий может точно так же испускать эманацию, как и торий.

В 1902 году вышла совместная статья Резерфорда и английского радиохимика Фредерика Содди «Причина и природа радиоактивности». В работе исследовалась способность соединений тория генерировать радиоактивную эманацию, которую авторы выделяли химическими способами из гидроокиси тория. В заключение 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:

- 1) образования с постоянной скоростью соединением тория нового активного вещества;
- 2) 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».

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 изученные 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.

Данную постоянную распада Резерфорд и Содди первоначально назвали «радиоактивная константа».

Открытие Резерфорда и Содди позволило сделать важнейший вывод о принципиальной возможности существования еще неоткрытых радиоактивных элементов, которые легко будет опознать по их радиоактивности, даже в весьма незначительных количествах.

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, вначале супруги Кюри допускали возможность и какого-то другого механизма выделения энергии, полагая, что, к примеру, 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, которая 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.

Итак, очередной этап радиационных исследований закончился знаменательной вехой открытия закона радиоактивных превращений и нового вида энергии – атомной, проявляющейся в этих превращениях.

Глава 2. Тайны катодных лучей

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

А. Томсон.

Прохождение электричества через газы

В 1897 году в кембриджской лаборатории Кавендиша была решена загадка катодных лучей. Молодой директор лаборатории 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 этой коллективной работы, где кроме самого Томсона участвовали некоторые 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.

В 1874 году ирландский физик и астроном Джордж Стони (1826–1911) выступил в Белфасте с докладом, в котором на основе законов электролиза Фарадея предложил «атомарную» теорию электричества. 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».

Вернемся теперь к катодным лучам и вспомним, что еще в конце семидесятых годов позапрошлого века в Кавендишской лаборатории были проведены обширные серии экспериментов, показавшие, 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.

Тогда же исследования катодных лучей проводились в Германии, однако там опыты по электрическому отклонению катодных лучей не были признаны достаточно убедительными. 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 стали тем последним и решающим аргументом в пользу признания корпускулярной природы катодного излучения как потока, состоящего из мельчайших отрицательно заряженных частиц.

Томсон со своими ассистентами и учениками, шотландским физиком Чарльзом Томсоном Рисом Вильсоном (1869–1959) и Джоном Сили Эдвардом 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 радиевого излучения. Детально изучив диффузию и подвижность ионов, они убедительно доказали, что в пределах погрешностей экспериментов произведение концентрации газовых ионов на заряд электрона близко совпадает с аналогичной величиной 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 следствия, ведь 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 о том, что катодные лучи состоят из заряженных частиц, а их элементарный заряд соответствует аналогичной величине одновалентных ионов и равен $1,03 \times 10^{-19}$ Кулона, при средней массе в $1 / 1700$ атома водорода.



Джозеф Джон Томсон (1856–1940)

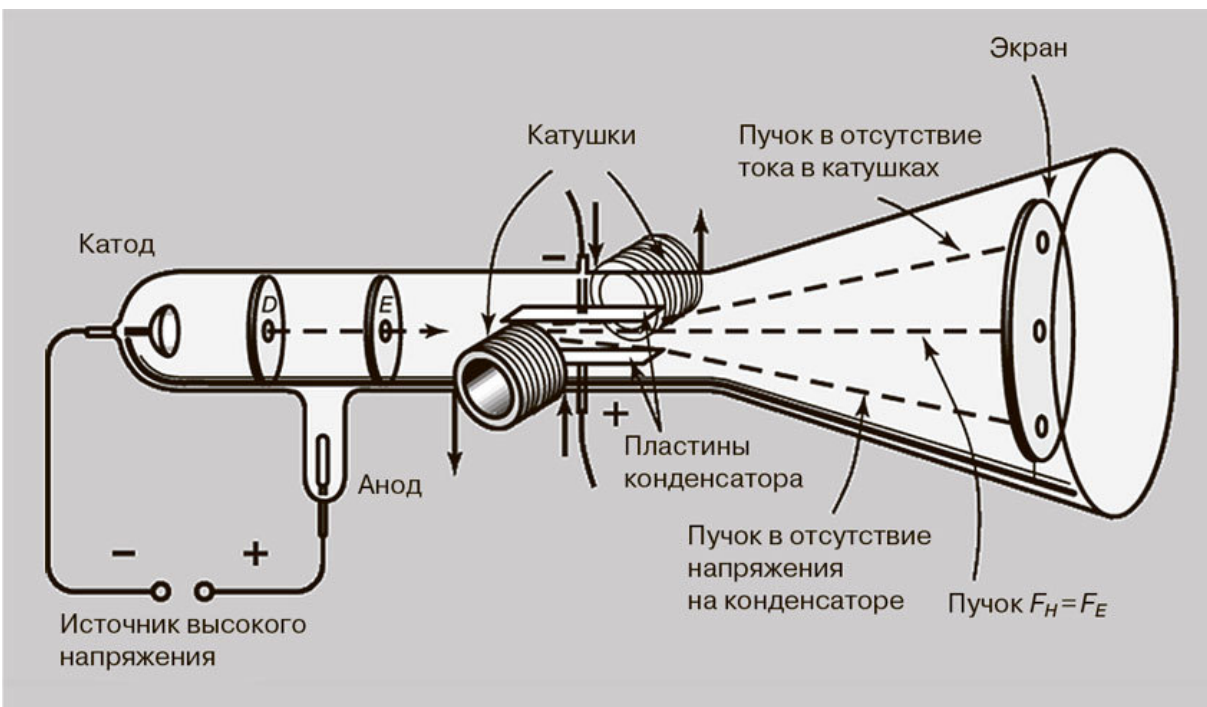
Томсон был гениальным ученым, отличался творческим воображением и оригинальностью, его работы имели новаторский характер – они явились исходной точкой для всех дальнейших исследований.

Р. Собесяк.

Шеренга великих физиков

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 несколько громоздкое название не удержалось.

Между тем общее признание факта существования электрона пришло лишь в 1911 году после ряда блестящих измерений элементарного заряда, выполненных американским физиком-экспериментатором Робертом Эндрюсом Милликеном (1868-1953), удостоенным Нобелевской премии 1923 года «За исследования в области элементарных зарядов и фото электрического эффекта». Сам по себе термин «электрон» вошел в широкое повсеместное употребление только после того, как в 1925 году немецкие физики Джеймс Франк (1882-1964) и Густав Людвиг Герц (1887-1975) стали нобелевскими лауреатами «За открытие законов столкновений электронов с атомами».



Электронно-лучевая трубка Томсона

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

Таким образом, роль Томсона и его учеников в становлении и развитии атомной и ядерной физики, а также физики элементарных частиц очень велика. Но сам Джи-Джи, как называли своего учителя и коллегу сотрудники Кавендишской лаборатории, до самого конца

своего жизненного пути оставался горячим сторонником «мирового светоносного эфира», разрабатывая всяческие модели движения в этой призрачной среде и пытаясь (увы – безуспешно) найти хоть какие-либо наблюдаемые явления, свидетельствующие о реальности эфирных представлений. Так, 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 3. Парадокс АЧТ

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.

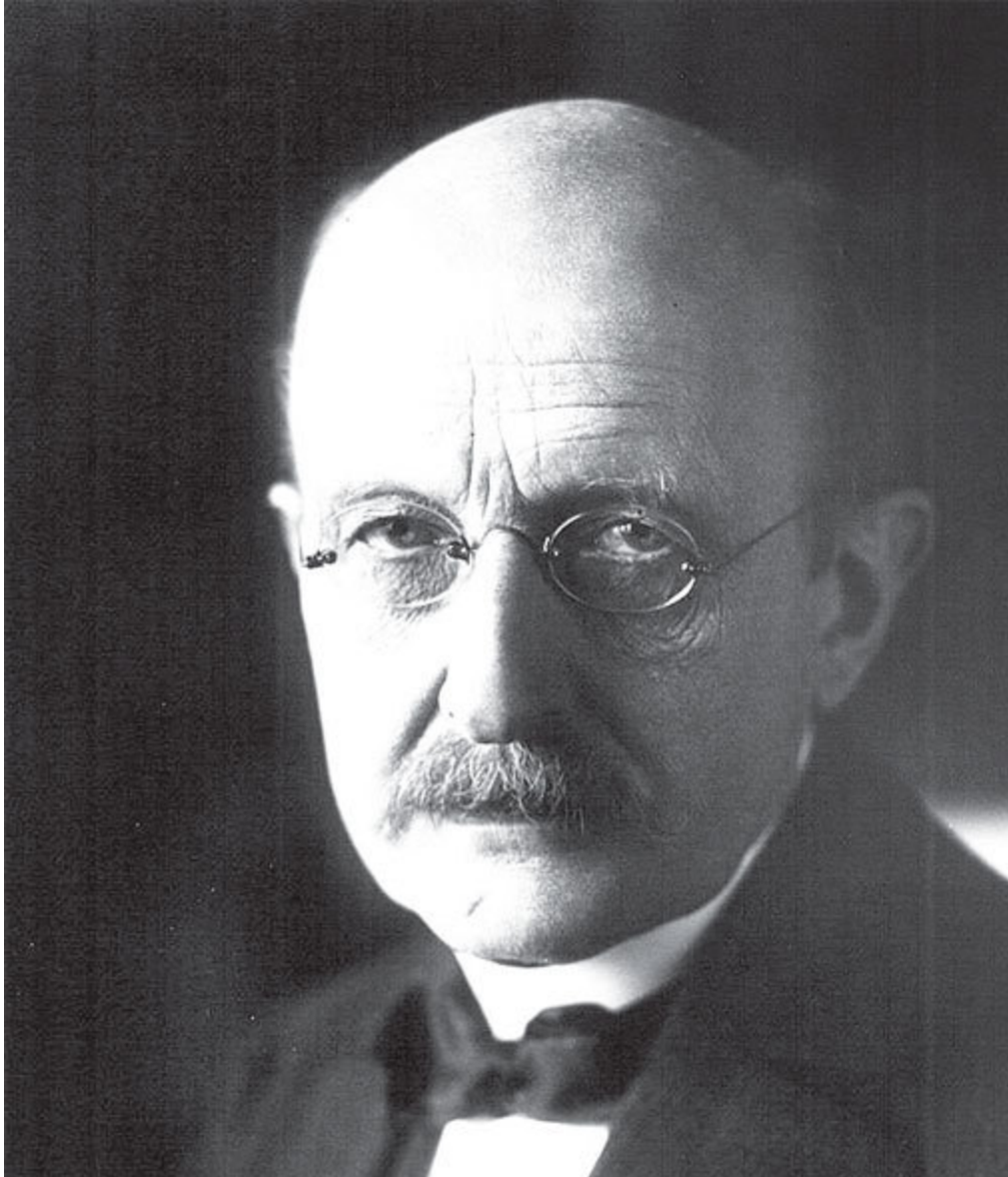
М. Планк.

Научная автобиография

Макс Планк родился 23 апреля 1858 года в городе Киле в семье профессора гражданского права. В 1867 году семья будущего ученого переехала в Мюнхен. Там Макс Планк поступил в Королевскую Максимилиановскую классическую гимназию, прекрасные преподаватели которой сумели пробудить в юноше глубокий интерес как к гуманитарным, так и к естественным и точным наукам. С 1874 по 1878 год Планк изучал физику и математику вначале в Мюнхенском, а затем Берлинском университете.

В 1879 году Планк успешно защитил докторскую диссертацию, посвященную проблемам обоснования второго начала термодинамики, и продолжал вести теоретические исследования в области термодинамики и ее приложений к физической химии и электрохимии.

В 1896 году Планк заинтересовался проблемой теплового излучения так называемого абсолютно черного тела (АЧТ), т. е. тела, которое поглощает все падающее на него излучение и ничего при этом не отражает. Однако АЧТ обязательно должно что-то излучать само, в противном случае его температура росла бы до бесконечности. Из общих соображений ясно, что АЧТ должно излучать тем больше энергии, чем выше его температура. Значит, при некоторых условиях будет достигаться термодинамическое равновесие, когда поглощается столько же, сколько излучает. Отсюда возникла интересная теоретическая задача: найти эту температуру, а главное – спектр излучаемого света. Вот тут-то классическая физика зашла в тупик: даваемый ею теоретический результат оказался практически абсурдным: энергия излучения при любой температуре получалась бесконечной, при этом ее излучалось тем больше, чем короче длина волны. Обыкновенная печка должна была бы «светить» сильнее любой рентгеновской трубки.



Макс Планк (1858-1947)

...Планк стал революционером против собственной воли. Ошеломленный неожиданными с точки зрения классической физики последствиями своего открытия, он долгое время сопротивлялся признанию вытекающих из него следствий.

Ф. Гернек.

Пионеры атомного века

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

Через два десятилетия 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 является универсальной константой.

Стефан сформулировал свой закон в 1879 году, а через пять лет его вывел теоретически Людвиг Эдуард Больцман (1844-1906), ученик Стефана. 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 одной трети ее объемной плотности. Так возник закон излучения АЧТ Стефана – Больцмана, а входящая в него универсальная константа названа 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

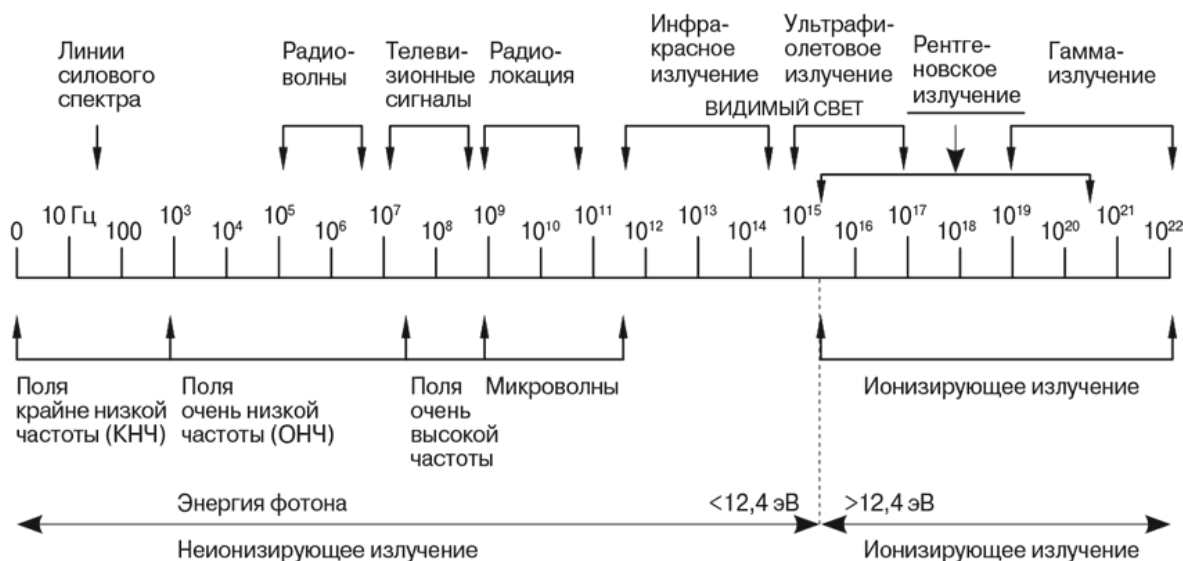
электрического сопротивления от температуры. Опираясь на результаты Ланглея и давние работы английского астронома немецкого происхождения Фридриха Вильгельма Гершеля (1738–1822), построившего энергетический спектр солнечного излучения, Михельсон блестяще провел теоретический анализ распределения энергии 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 физика не удалось дать точную формулировку закона смещения, 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 новые взгляды на теорию теплового излучения. В своей работе ученый впервые доопределил понятие «температура излучения», которая долгое время представлялась весьма спорной, поскольку довольно парадоксальным образом отождествлялась с некоей «равновесной температурой эфирной среды».

Дальнейшее развитие теоретической физики полностью доказало правоту Голицына, а сам эфир был раз и навсегда исключен из научной картины мира как совершенно ложное понятие. Таким образом, Голицыну принадлежит неоспоримая историческая заслуга принесения в науку важнейшего понятия температуры излучения. Впрочем, в его диссертации содержались и другие серьезные результаты, во многом предвосхитившие более поздние исследования Вина и Рэлея – Джинса. Среди прочего русский ученый, основываясь на выводах Михельсона, дал оригинальную трактовку так называемой «ультрафиолетовой катастрофе», непреложно следовавшей 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, и, соответственно, мы сразу же приходим к «катастрофическому» выводу о том, что 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 сверхвысоких частот. В центральной части спектра расположен участок видимого света от инфракрасного до ультрафиолетового излучения.

Чтобы понять этот физический парадокс с таким устрашающим названием (на деле, конечно же, никакой катастрофы не происходит), представим себе модель АЧТ в виде массивной емкости, покрытой сверху черным бархатом, с зеркальной внутренней поверхностью. Луч света может проникнуть в такой объем только через узкую горловину, 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 захватываясь 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, поскольку 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.

Глава 4. Гипотеза Планка

Представьте себе горняка, который с напряжением всех своих сил ведет разведку благородной руды и которому однажды попадает 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...

М. Планк.

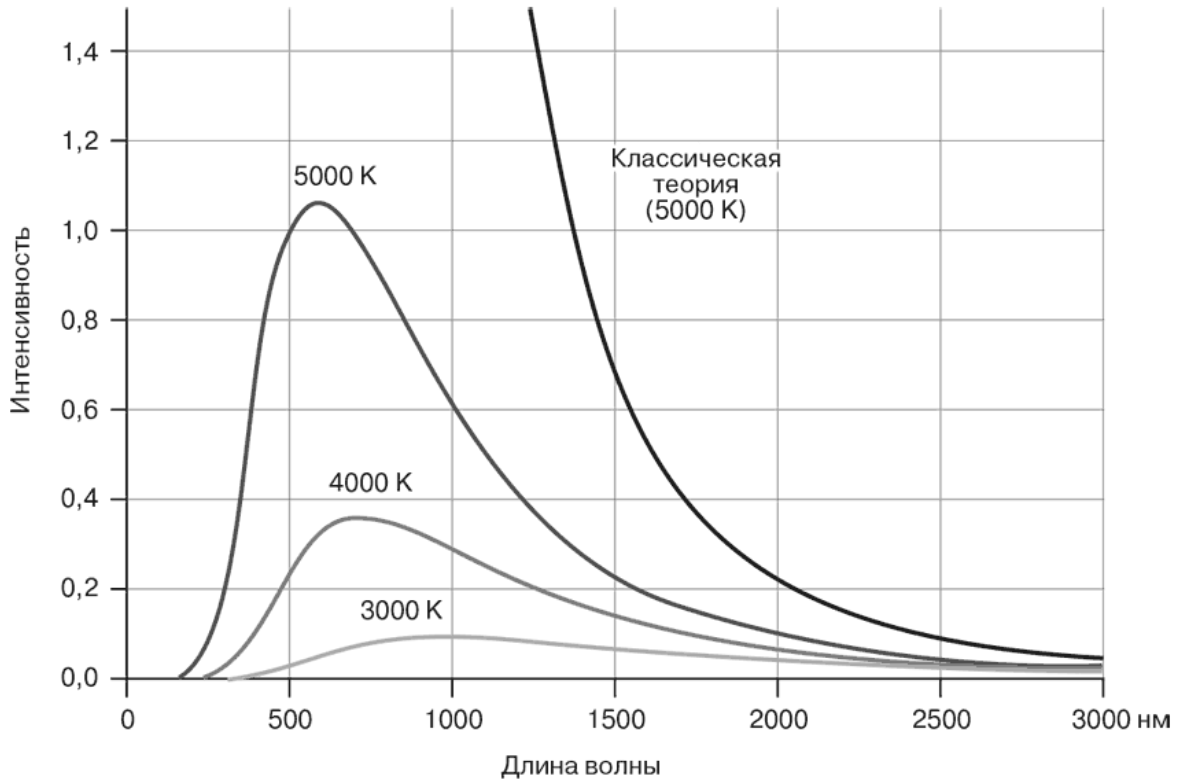
Речь на торжественном юбилейном заседании Немецкого физического общества

Для решения парадокса «ультрафиолетовой катастрофы» Планк придумал красивый вычислительный прием: не прибегая к «тяжелой артиллерии» в виде интегрального исчисления, как делали все другие занимавшиеся этой проблемой физики, просто просуммировать отдельные порции энергии, полагая их конечными. Он надеялся получить ответ, который не будет зависеть от величины отдельной порции. А вместо этого получил точное значение каждой из них – $h\nu$, где ν – частота излучения, а h – постоянная Планка, имеющая размерность действия, т. е. произведения энергии на время. Сам Планк называл эту постоянную «квантом действия». Согласно современным данным $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Дж \times с. Днем рождения квантовой теории принято считать 14 декабря 1900 года, когда на заседании Прусской королевской академии наук Планк сделал доклад «К теории распределения энергии излучения нормального спектра».

Буквально тут же, следующей 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 тяжелых раздумий он пришел к парадоксальному выводу, что элементы внутренней поверхности АЧТ излучают и поглощают энергию порционно! Ну, а сами энергетические порции описываются простейшей формулой: $\Delta E = \hbar\omega$, где \hbar – новый коэффициент пропорциональности, а ω – 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 разрешился парадокс несостоявшейся «ультрафиолетовой катастрофы». Закон излучения Планка изумительно точно описывал процессы излучения, что позволило быстро определить значение коэффициента \hbar , получившего название «постоянная Планка».



Реальная зависимость излучения АЧТ от длины волны для разных температур и ее вид по классической формуле Рэля – Джинса

Итак, 14 декабря 1900 года Планк сделал доклад Берлинскому физическому обществу о новой формуле, описывающей 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 Рэля, выведенную им в июле 1900 года в небольшой заметке «Замечания о законе черного излучения». Надо заметить, что Рэлей получил свою формулу путем применения закона равномерного распределения энергии по степеням свободы. В 1905 году Джинс независимо от Рэля показал, что классическая статистика приводит именно к формуле Рэля, а не к формуле Планка, после чего данное спектрально-энергетическое соотношение стало называться законом Рэля – Джинса.

Изложению истории посвящено необозримое количество книг и статей, написанных физиками, философами, историками, социологами

и даже политологами. В 1970-е годы широкий резонанс получила работа американского философа Пола Формана «Веймарская культура, причинность и квантовая теория» о том, как социально-политическая атмосфера неустойчивости, разочарования в прежних идеалах в Веймарской Германии содействовала распространению идей индетерминизма, что, в свою очередь, сыграло важную роль в становлении квантовой механики.

Что же касается Макса Планка, то он, как и большинство других физиков, с нескрываемым сожалением воспринял крушение классической физики. Тем не менее продолжал научно-исследовательскую, педагогическую и организационную деятельность. С 1912 по 1943 год Планк оставался непременным секретарем своей академии, получившей теперь название Берлинской академии наук, а в 1930 году он стал президентом Общества фундаментальных наук кайзера Вильгельма – теперь оно носит имя самого Планка и играет роль национальной Академии наук в Германии.

Глава 5. 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 весомого тела, по современным физическим представлениям, складывается из энергий атомов и электронов. Энергия весомого 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»

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

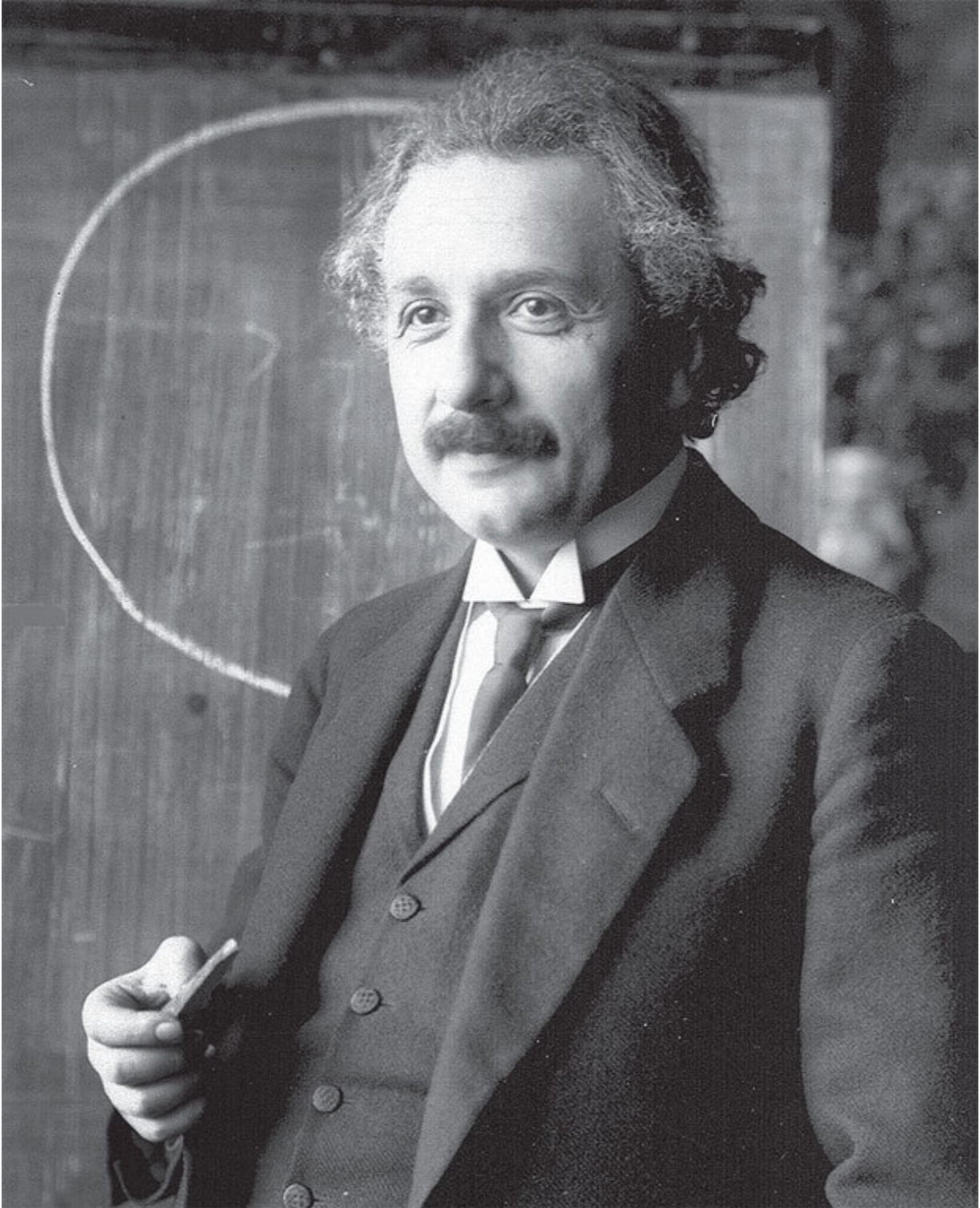
Наблюдения, сделанные Ленардом в 1902 году, как указывал Эйнштейн в своей статье, не противоречили его теории. В самом деле, скорости фотоэлектронов не зависели от интенсивности световых лучей, а число их было пропорционально интенсивности. Что же касается зависимости энергии фотоэлектронов от частоты, то она была

исследована лишь в 1912 году Ричардсоном, Комптоном и Милликеном (1916). Последние классические эксперименты наряду с измерениями Милликеном элементарного заряда были удостоены Нобелевской премии.

В работе 1906 года Эйнштейн установил количественные соотношения между рядом напряжений Вольта и пороговой частотой фотоэффекта. Это соотношение выражается формулой:

$$U = (R / A) \beta \nu.$$

Явление фотоэффекта впервые наблюдалось немецким ученым Генрихом Герцем в 1887 году, затем его основные закономерности были экспериментально исследованы замечательным русским физиком, профессором Московского университета А. Г. Столетовым. 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).



Альберт Эйнштейн (1879-1955)

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», где отмечалось: «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».

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, ведь по классической электродинамике накопление энергии электроном требует вполне определенного времени. И это время, по расчетам, должно составлять около минуты, что полностью противоречит опытным данным, ведь 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 здесь опять полностью противоречат классической теории, ведь энергия вызванных электронов совершенно не зависит от интенсивности света, но линейно зависит от частоты!

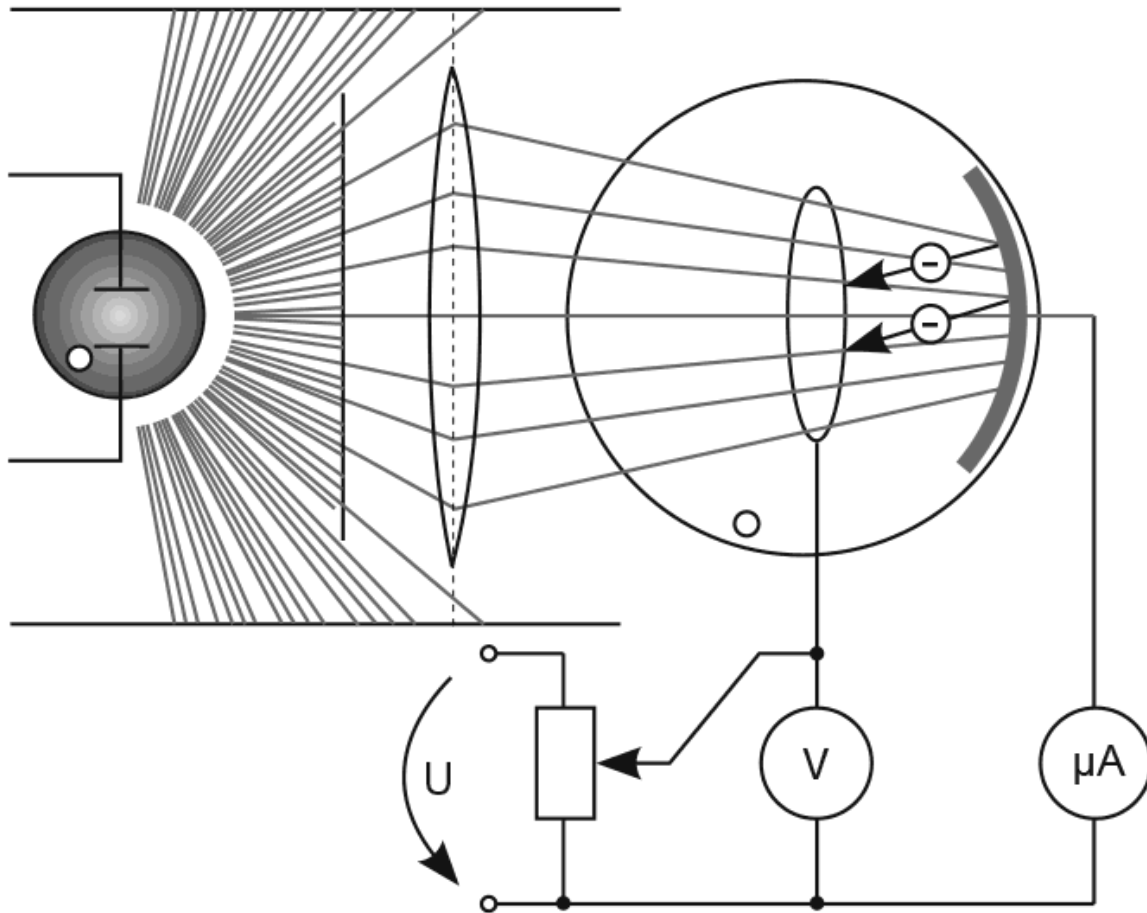


Схема фотоэффекта

Особенно важное значение имеет объяснение Эйнштейном фотоэффекта. Квант энергии света, поглощаясь электроном, сообщает ему кинетическую энергию $(R / N) \beta v - P$, где P – работа выхода электрона. При наличии задерживающего потенциала, препятствующего электрону покинуть освещаемую поверхность, выполняется равенство: $\Pi = (R / N) \beta v - P$

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

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 там, 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 сообществе. 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 принижавшего значения гипотезы квантов как временного отступления от магистрального пути развития классической науки.

Глава 6. Квантовая модель атома

...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

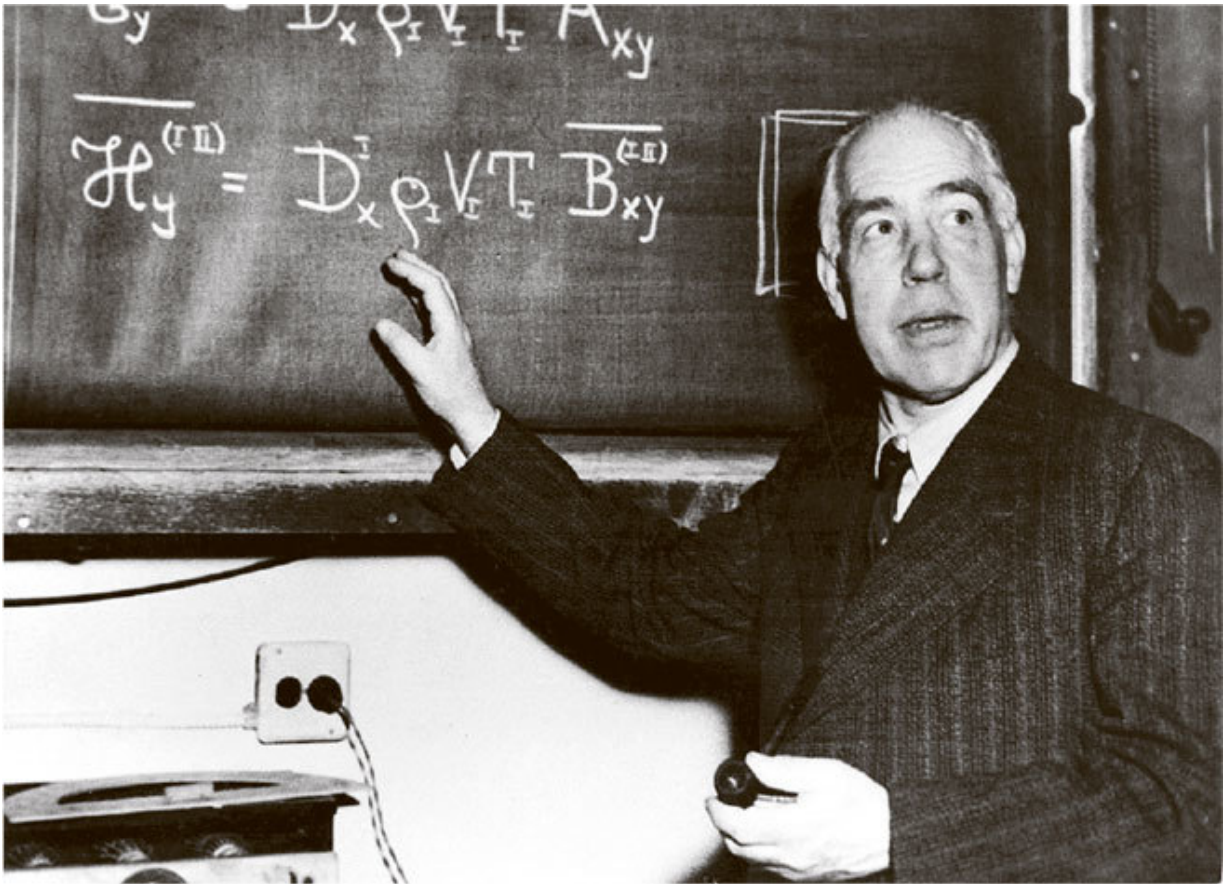
Развитие исследований радиоактивности и построение квантовой теории постепенно привели к созданию квантовой модели атома. Однако этому предшествовали многие попытки построить атомарные структуры лишь на основе классических электродинамических и даже просто механических схем. Так, в 1904 году свои представления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

После того как стало ясно, что электроны являются составными частями 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, и 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 некую 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 считал, что каждая из подобных конфигураций однозначно определяет химические свойства атомов. Томсон даже попытался теоретически объяснить схему построения Периодической системы элементов Д. И. Менделеева.



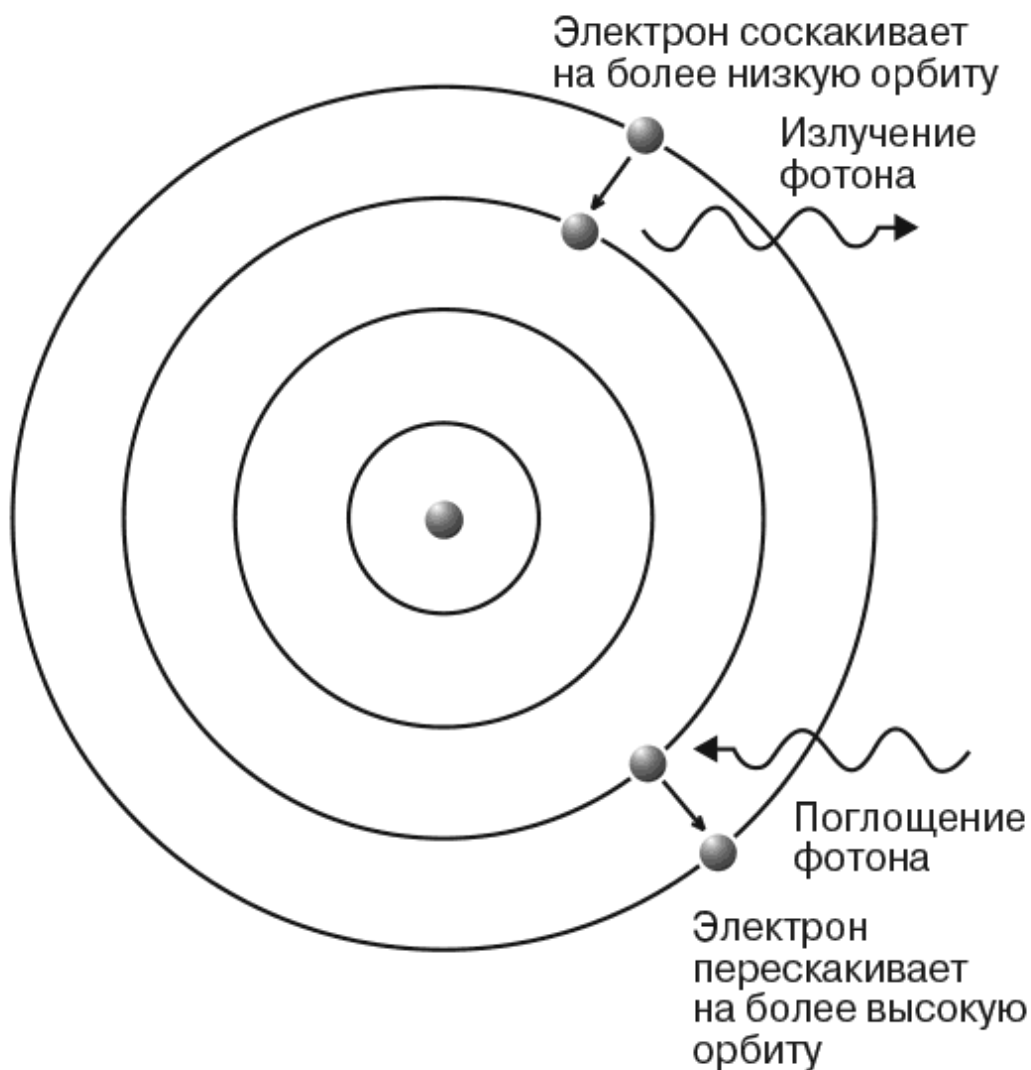
Нильс Бор (1885-1962)

Вскоре проверкой опытных данных занялся выдающийся физик-экспериментатор Эрнест Резерфорд, убедительно опровергнувший модель Томсона и утвердивший триумф планетарной модели. В это же время исследованием строения атомов занимался еще один из основателей новой физики, датский теоретик Нильс Бор. После анализа модели Резерфорда Бор взял ее за основу своих построений. К тому времени было достоверно известно, что заряд атомного ядра и число электронов строго равны в «электронейтральном» состоянии атома, определяя место данного химического элемента в Периодической системе Менделеева. Несомненно, это было важнейшим шагом 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, состоящих из набора определенных линий. В общем-то 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. Ко всему прочему и сам характер движения электронов по классическим законам электродинамики не должен был бы приводить к наблюдаемым характеристикам линейчатых спектров. Ведь известные к тому времени линии спектров можно было сгруппировать в определенные серии, сгущающиеся в коротковолновой части серии. 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 двух десятков линий в ультрафиолетовой части спектра, полностью укладывавшихся в формулу спектральной серии Бальмера. В последующем 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.



Строение атома Бора – Резерфорда

Так как планковская квантовая гипотеза в то время еще считалась спорной, неудивительно, что попытка Бора основать модель атома на понятии квантов не имела сначала у физиков большого успеха. Большинству теория Бора казалась 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

Бор долго искал объяснение спектральным сериям Бальмера и Ридберга, 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. Это были прежде всего представления о так называемых стационарных атомных состояниях, когда существует ряд орбит, на которых электроны не излучают, хотя и движутся с ускорением. При переходе с одной орбиты на другую электрон излучает и поглощает энергию, равную кванту. В заключительных замечаниях к трем своим статьям «О строении атомов и молекул» Бор сформулировал свои 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 ν 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 является целым кратным $A/2$ я. Предположение о том, что орбита электрона круговая, равнозначно требованию, что момент импульса вращающегося вокруг ядра электрона был бы целым кратным $h/2$ л.

5. «Основное» состояние любой атомной системы, т. е. состояние, при котором излученная энергия максимальна, определяется из условия, чтобы момент импульса каждого электрона относительно

центра его орбиты равнялся $\hbar / 2n$.

Бор дал объяснение спектральной серии, наблюдаемой в 1896-1897 годах Пикерингом в звездных спектрах, показав, что это соответствует ионизированному гелию. В дальнейшем Бор непрестанно уточнял и дополнял основы своей теории, неоднократно возвращаясь к вопросам теории пространственного квантования, позволившей объяснить влияние электромагнитных полей на вид атомных спектров. Одним из первых Бор включился в рассмотрение атомных рентгеновских спектров, предположив следующее: характеристическое рентгеновское излучение испускается при возвращении системы в нормальное состояние, если каким-либо воздействием, например катодными лучами, были предварительно удалены электроны внутренних колец.

Теоретическое исследование рентгеновских спектров атомов по идее Бора состояло в том, что электроны излучали высокоэнергетические кванты при переходах на глубоколежащих внутренних оболочках. Теория рентгеновских спектров Бора получила серьезное экспериментальное подтверждение после публикации результатов экспериментов Джеймса Франка (1882–1964) и Густава Людвиг Герца (1887–1975). Эти физики-экспериментаторы начиная с 1913 года 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.

Модель атома Бора получила всестороннее развитие в работах многих исследователей и прежде всего самого ее автора. После множества экспериментальных подтверждений теория Бора стала общепризнанной, однако осталось еще много трудных вопросов, в первую очередь связанных с построением теоретических моделей многоэлектронных атомов. Кроме того, требовалось объяснить так

называемый аномальный эффект Зеемана и многое другое, показывающее, 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 целый ряд видных теоретиков принялись за поиск выхода из сложившегося положения.

При бурном развитии атомных моделей Бора в «арьергарде» с самого начала осталось много загадочных вопросов. Прежде всего, их озвучил сам соавтор планетарной модели атома – Резерфорд. Ознакомившись еще с первыми работами Бора, Резерфорд сразу же заострил внимание автора на трудностях, проистекавших из эклектического сочетания квантовых идей и классической механики электродинамикой. Действительно, в классической науке совсем нет места квантовым скачкообразным переходам, тем более совершенно непонятно, откуда электрон «знает», на какую же орбиту необходимо совершить переход.

Бор с очень большим вниманием отнесся к замечаниям Резерфорда, ясно показывавших 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 всплыли на поверхность, особенно это было заметно на примере интерпретации эффекта Зеемана.

История открытия этого замечательного явления началась в 1896 году, когда голландский физик Питер Зееман (1865–1943) провел ряд экспериментов, пытаясь воспроизвести 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, наблюдались еще и две дополнительные линии, не нашедшие разумного объяснения в модели атома Бора – Резерфорда.

Большой вклад в дальнейшее развитие модели атома Бора внес видный немецкий физик Арнольд Зоммерфельд (1868–1951). В своих рассуждениях он говорил, 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 много сил приложил к развитию теории Бора, введя принцип пространственного квантования. Считая, что движение электронов по разрешенным орбитам определяется их особыми параметрами, названными радиальными и азимутальными квантовыми числами, главным квантовым числом, определяющим энергию электрона, и побочным квантовым числом, определяющим форму орбиты, он попытался объяснить эффект Зеемана. Для этого 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 это объяснение в известном смысле было неполным, поскольку ничего не говорило о поляризации линий, а разъясняло лишь частотные характеристики линий, не объясняя их интенсивность.

Таким образом, противоречия в теории атома Бора – Резерфорда стали множиться на каждом шагу, при этом квантовое описание спектроскопических эффектов постоянно усложнялось. Наиболее запутанное положение сложилось в теории света, где Эйнштейн после своей классической работы по теории фотоэффекта, введшей световые кванты (1917), решил перейти к дальнейшему развитию теории света. 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». В 1927 году Комптон стал нобелевским лауреатом за открытие этого эффекта.

Глава 7. Кентавры микромира

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 крупинка электричества; с ним следует связывать волну...

Л. де Бройль.

Свет и материя

В 1924 году Бор с соавторами опубликовал статью «Квантовая теория излучения», в которой 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 нам принципы и законы макромира не действуют. Свет, который мы привыкли считать волной, порой ведет себя так, будто состоит из потока частиц фотонов, проявляют свойства волны. Это называется «корпускулярно-волновым дуализмом».

Между тем именно принцип корпускулярно-волнового дуализма позволил наконец-то понять сущность квантования атомных орбит. И здесь решающее значение принадлежит удивительной концепции французского физика, нобелевского лауреата Луи де Бройля, выдвинувшего предположение, что все без исключения микроскопические объекты — частицы, атомы и даже молекулы — обладают такими же корпускулярно-волновыми свойствами, что и

фотоны. Эта удивительная гипотеза была подтверждена уже 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 в Парижскую 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 в теории света на сами материальные частицы. Поначалу эти статьи не вызвали особого интереса, содержащиеся в них указания на возможность наблюдения дифракции электронов не заинтересовали экспериментаторов. Дифракция электронов была открыта лишь через пять 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 Шредингер, с успехом развившие их в своих исследованиях.

В своих работах французский физик приступил к рассмотрению неких волновых процессов, связанных с материальными телами. Вначале де Бройль назвал свое теоретическое построение очень осторожно: «Мы будем рассматривать ее лишь как фиктивную волну, связанную с перемещением движущегося тела». Однако 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», сопоставляя ее с неким волновым процессом, как бы пилотирующим движение частицы, так возник знаменитый образ «волны-пилота», вызвавший 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.

Следует признать, что 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 соотносится с классической и релятивистской так же, как волновая оптика относится к геометрической». Он писал, что предложенный 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 года Нобелевской премии.

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

Совершенно иначе отнеслись к теории «волн материи» и концепции «волны-пилота» де Бройля Бор и его коллеги по копенгагенской школе. Сторонники копенгагенской интерпретации квантовой механики искали объяснения квантово-механических 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. В своей статье «О квантовом теоретическом истолковании кинематических и механических соотношений» этот немецкий теоретик предлагал: «...отказаться от всякой надежды на наблюдение до сих пор ненаблюдаемых величин (таких как положения, период обращения электрона) и пытаться построить квантово-теоретическую механику, более или менее аналогичную

классической механике, в которой встречались бы только соотношения между наблюдаемыми величинами».

Нельзя не заметить, что эта позиция Гейзенберга, заключающаяся в отказе от «до сих пор ненаблюдаемых величин» очень напоминала призывы некоторых философов-метафизиков начала прошлого века «отказаться от ненаблюдаемых» атомов и электронов. Сам Гейзенберг первоначально не признавал, 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 и молодой геттингенский математик Пауль Йордан представили статью о матричной теории гармонического осциллятора. В ней они указали, что предложенная Гейзенбергом математическая схема описания квантово-теоретических величин по своей сути представляет матричную алгебру.



Луи Виктор Пьер Раймон (Луи де Бройль) (1892–1987)

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

Тут надо обратить внимание на то, что в начале прошлого 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, что это такое, и фактически самостоятельно создал этот раздел математики, исходя из постановки физических задач процессов измерения состояний микрочастиц. Последняя проверка правильности основных принципов новой матричной механики была проведена 17 января 1926 года Вольфгангом Паули в статье «О спектре водорода с точки зрения новой квантовой механики».

Однако вопреки впечатляющим результатам матричной квантовой механики при объяснении самых различных явлений микромира эта новая форма квантовой теории была встречена с большим недоверием многими видными физиками того времени. Основной причиной тут, конечно же, была трудность в понимании совершенно непривычного аппарата и сложность универсального алгоритма нахождения энергетических спектров квантовых систем. Следующей причиной были неясности физического смысла новой теории, содержавшей кроме далеко не всеми понятых квантовых скачков и дискретности излучения еще и невозможность приписать определенной микрочастице траекторию движения. Понадобилось еще около десяти лет, чтобы достаточно прояснить статус квантовых скачков и траекторий микрочастиц в созданной Бором и Гейзенбергом копенгагенской интерпретации квантовой механики.

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 самого конца жизни считал Гейзенберга молодым выскочкой-неучем.

Глава 8. Волновая механика Шредингера

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

М. Борн.

Моя жизнь и взгляды

Следующий по значению этап в развитии квантовой физики связан с именем нобелевского лауреата Эрвина Шредингера, сумевшего обобщить и развить гипотезу де Бройля.

В самом конце первой четверти прошлого века Шредингер прочитал в одной из научных работ Эйнштейна ряд положительных замечаний касательно теории «волн материи» де Бройля. Это привело его не только к поддержке теоретических построений французского коллеги, но и к развитию их до логического окончания. В своих рассуждениях Шредингер 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.

Шредингер прекрасно знал, что оптико-механическая аналогия справедлива лишь для геометрической оптики, в пренебрежении волновыми параметрами излучения. Он сделал смелое предположение,

что оптико-механическую аналогию можно распространить и на волновую среду в целом, так что любое движение частиц будет подобно распространению соответствующих волн. Свои теоретические построения Шредингер начал с попыток ввести в квантовую теорию атома классическое математическое описание волн. Первая попытка закончилась неудачей, поскольку Шредингер 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 причиной неудачи был неучет наличия у электрона спина – прообраза вращения вокруг собственной оси, о котором тогда мало что было известно. При следующей попытке он выбрал достаточно небольшие скорости электронов, и она увенчалась успешным выводом знаменитого волнового уравнения Шредингера. Его решения и представляют собой те самые «волны материи» де Бройля.

Звезда Шредингера зажглась на научном небосклоне, когда он, развивая идеи де Бройля, в 1926 году получил свое знаменитое уравнение, описывавшее поведение волн-частиц. Одним из главных моментов здесь является понятие *волновой функции* частицы, изначально обозначаемой греческим символом ψ (пси) и поэтому часто называемой *ψ (пси) – 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, поскольку закономерности их движения определяются уравнением, аналогичным волновому уравнению, выведенному в оптике из предпосылок о волнах света.

Форму этого уравнения Шредингер нашел в следующем виде:

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

Замечательный физик и популяризатор науки Леонид Иванович Пономарев в своей блестящей книге «Под знаком кванта» предлагал увидевшим впервые уравнение Шредингера читателям воспринимать его вначале просто как символ квантовой механики, как некий герб

квантовой страны. Причем некоторые штрихи в этом гербе «невероятного квантового мира» можно понять даже с помощью школьных знаний, так, m – это масса электрона, \hbar – постоянная Планка \hbar , деленная на 2π , 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 символ «второй производной» d^2 / dx^2 , но можно запомнить этот символ дифференциального исчисления, собственно из-за которого уравнение Шредингера и называется дифференциальным.

Главное при анализе уравнения Шредингера – понять смысл загадочной пси-функции. Это действительно совсем непросто, и вначале даже сам Шредингер не совсем правильно понимал ее смысл. 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, по-иному, 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 в 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. Тут надо сразу же подчеркнуть, что физический смысл пси-функции является одним из самых сложных вопросов квантовой теории, и даже сегодня для этого фундаментального квантово-механического понятия выдвигаются все новые и новые представления.

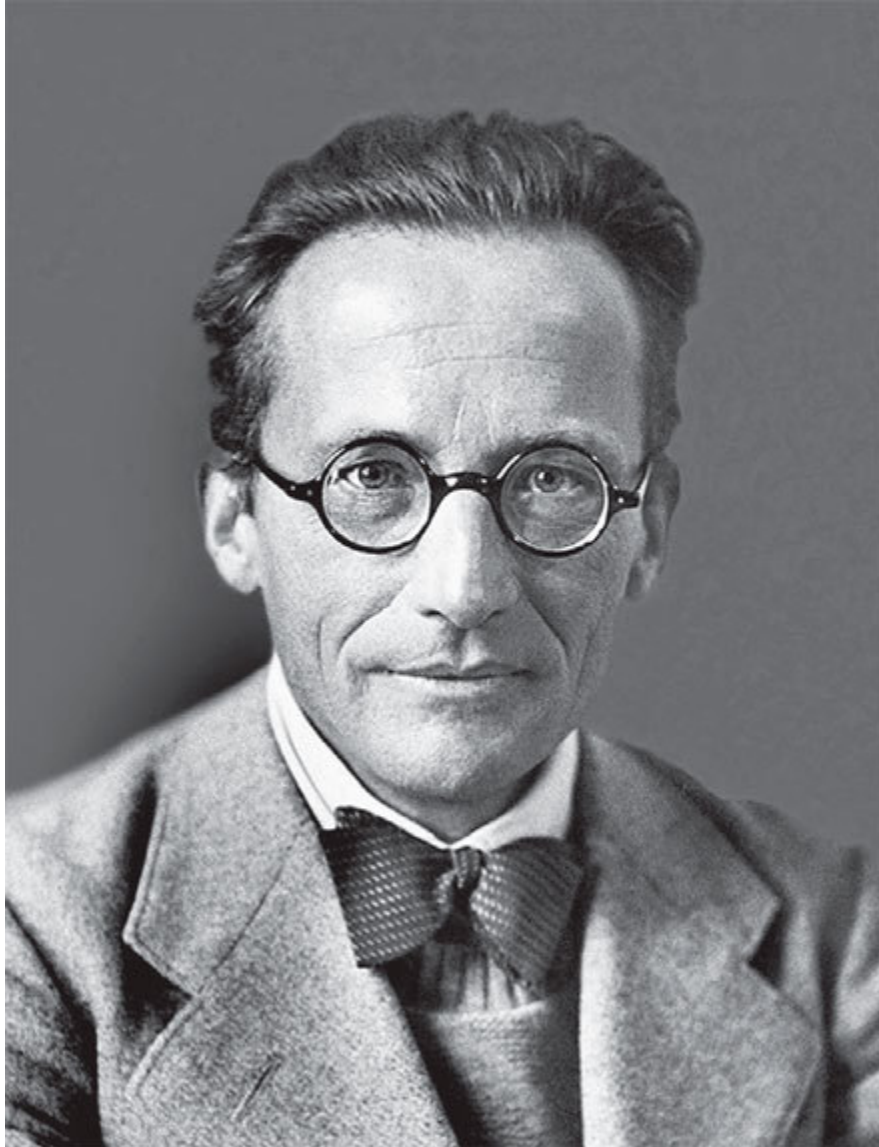
В свое время Шредингер потратил много сил на интерпретацию физического смысла волновой пси-функции, которая, как он считал, должна наконец-то избавить теорию от странных квантовых скачков, попытался даже дать наглядную интерпретацию пси-функции. Он посчитал, что наложение волновых функций может образовать 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. Ведь «волны», описываемые пси-функциями, мало напоминают привычные волны на поверхности жидкости или в газе, поскольку строятся в некоем сугубо абстрактном, конфигурационном пространстве. К тому же «волновой пакет» с течением времени должен был бы расплываться, релаксируя. Именно поэтому в 1926 году Борн разработал новую интерпретацию пси-функции, в которой квадрат ее модуля определял плотность вероятности нахождения микрочастицы в данной области пространства.

Итак, 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 является 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 – так, 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 носит название коллапсионной редукции волновой функции – она как бы «схлопывается», коллапсирует, сокращая (редуцируя) свои значения к «классико-механическим» координатам в месте регистрации.

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 Шредингер при поддержке де Бройля, отражая волновую природу электрона в своем уравнении. Подход Гейзенберга основывался на оперировании только наблюдаемыми

величинами, он в принципе не рассматривал понятие каких-либо атомных траекторий. Со своей стороны, Шредингер тоже избегал «планетарного» смысла орбит электронов вокруг «солнечного» ядра и ограничивался абстрактным образом таинственной пси-функции в своем уравнении. Великий судья всех физических споров – опыт – также оказался в совершенно беспомощном положении, ведь часть экспериментов обнаруживала у электрона корпускулярные, а часть – волновые свойства! Это был период бурных дебатов, разделивших тогда еще совсем 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 Шредингер, убедительно продемонстрировав своим скептикам и сторонникам, что обе квантовые теории в своей математической сущности едины. Отсюда сразу же следовал и основной вывод о физической эквивалентности двух механик. Иначе говоря, представления матричной теории о корпускулярном образе электрона так же достоверны, как и представления волновой квантовой механики о волнах электронов.



Эрвин Шредингер (1887-1961)

Математические разработки Шредингера имели для гениально предугаданных де Бройлем волн материи такое же значение, какое имели уравнения поля Максвелла для силовых линий Фарадея.

Шредингер 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...

Ф. Гернек. Пионеры атомного века

С помощью волновой механики Шредингер 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» и «Квантование как проблема собственных значений». В конце года Шредингер собрал все эти работы и издал их отдельным сборником под общим названием «Статьи по волновой механике».

В этой книге, вызвавшей бурю обсуждений среди теоретиков по всему миру, Шредингер предельно ясно выразил тезис всей своей последующей жизни: единственной реальностью в квантовом микромире являются всяческие волновые процессы, досконально объясняемые волновой механикой. Волнам материи просто не существует разумной альтернативы, а квантовые скачки являются лишь спекулятивной иллюзией теоретиков.



Давид Гильберт (1862-1943)

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 поищите 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 шредингеровскую волновую механику на шесть месяцев раньше ее автора, если бы повнимательней отнеслись к его, гильбертовым, словам.

Э. Кондон. Создание квантовой науки

Позиция Шредингера подверглась резкой критике со стороны представителей копенгагенской школы – прежде всего самого Бора, Гейзенберга и Борна, ставивших во главу угла физическую интерпретацию микрочастиц как полностью «корпускулярных» объектов, обладающих целостностью и устойчивостью. Разумеется, 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, ставшую буквально судьбоносной для дальнейшего развития квантовой механики, ее название: «О наглядном содержании квантотеоретической кинематики и механики». В этой работе немецкого теоретика впервые содержалась ясная формулировка одного из основных принципов квантовой механики, являющегося ключевым 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, представляя

собой просто некоторые формальные записи для результирующих вероятностей наблюдаемых явлений.

Простейшим примером может быть уточнение координаты того же электрона. Для того чтобы поточнее определить его место в пространстве, необходимо взять как можно более короткую электромагнитную волну, «осветить» электрон 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. Понизим энергию, возрастет длина и неопределенными станут пространственные координаты...

Соотношение Гейзенберга гениально просто: $\Delta q \Delta p \geq \hbar$, где Δq – неопределенность координаты, Δp – 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 более трудно определить задействованное в нем количество энергии, справедливо тут и обратное утверждение: чем точнее мы характеризуем энергию в некоем квантовом явлении, тем менее определено время его продолжительности. Многие физики сегодня считают, что именно здесь заложено зерно возможной фундаментальной дискретности потока времени и существования атомов времени – хроноквантов.

Уже 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 дополненности», тесно связанный со смыслом соотношения неопределенности Гейзенберга.

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 то, чем же является «на самом деле» волновая пси-функция. С другой стороны, произошел качественный переход в экспериментальной технике, поскольку та же волновая функция прекрасно описывала поведение микрообъектов, заменяя множество классических физических величин, таких как скорость, координата, энергия и импульс. В середине тридцатых годов прошлого века в университетские учебники уже прочно вошла формулировка пси-функции как определяющей состояние микрообъекта 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 пришелся на долю видного теоретика Пауля Эренфеста. Суть его исследований сводилось к следующему: 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. Любопытно, что 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.

Глава 9. Спор великих

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 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. Б. Мигдал.

Поиски истины

Подводя итоги историческим аспектам и параллелям развития квантовой механики, необходимо заметить, что ее основные идеи, сформулированные Бором, Шредингером, 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 того или иного процесса локализации микрообъекта или же его делокализации.

В разгоревшейся полемике по фундаментальным основам теории квантов Альберт Эйнштейн, оппонировав Бору, широко 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 лишь 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...»

В то время опытная база квантовой механики только складывалась, и в своих спорах теоретики активно использовали мысленные эксперименты. Один из них показался Эйнштейну настолько удачным, что в дальнейшем он вместе с учениками, Подольским и Розеном, посвятил ментальному опыту 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 вплоть до настоящего времени, так, сейчас в ней участвуют два известных теоретика: Роджер Пенроуз в роли Эйнштейна и Стивен Хокинг в роли Бора.

При анализе эксперимента Эйнштейн, Подольский и 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.

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

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 парадокс ЭПР. Результаты измерения квантовой системы зависят от ее состояния и устройства измерительных приборов. Так, в полном соответствии с принципами волновой квантовой механики, ЭПР-коррелированные частицы могут характеризоваться одной общей волновой функцией. Следуя Бору, можно предположить, что в момент измерения над одной частицей происходит изменение общей волновой функции двухчастичной системы, как квантового объекта из коррелированных подсистем.



Нильс Бор и Альберт Эйнштейн – спор гениев

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.

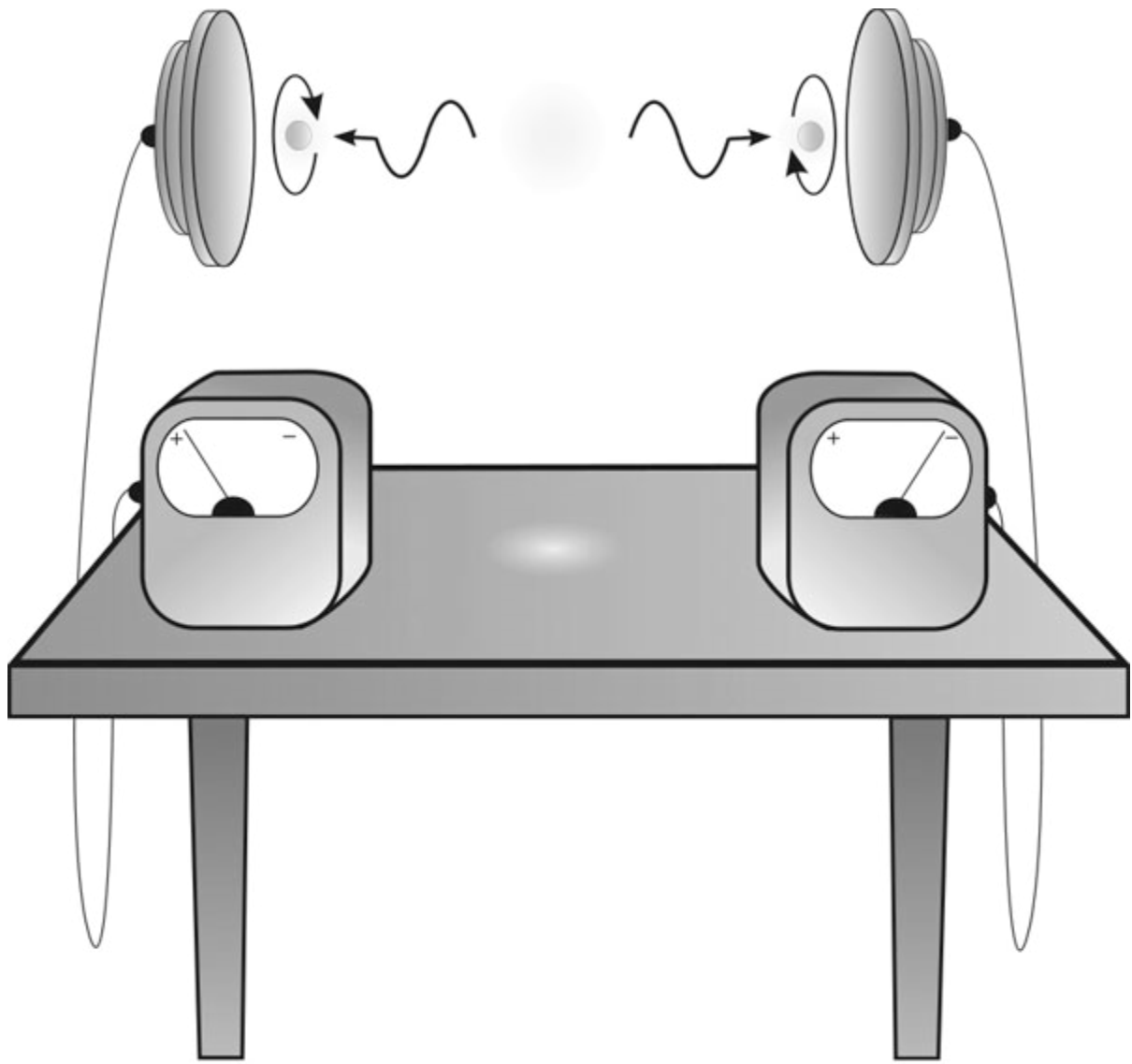
Физика и реальность

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 Шредингером и видным советским физиком академиком В. А. Фоком. Не в полной мере были согласны с выводами, следующими из копенгагенской интерпретации, и выдающиеся авторитеты в области атомной физики, советские академики А. С. Компанеец и Б. Б. Кадомцев.

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?

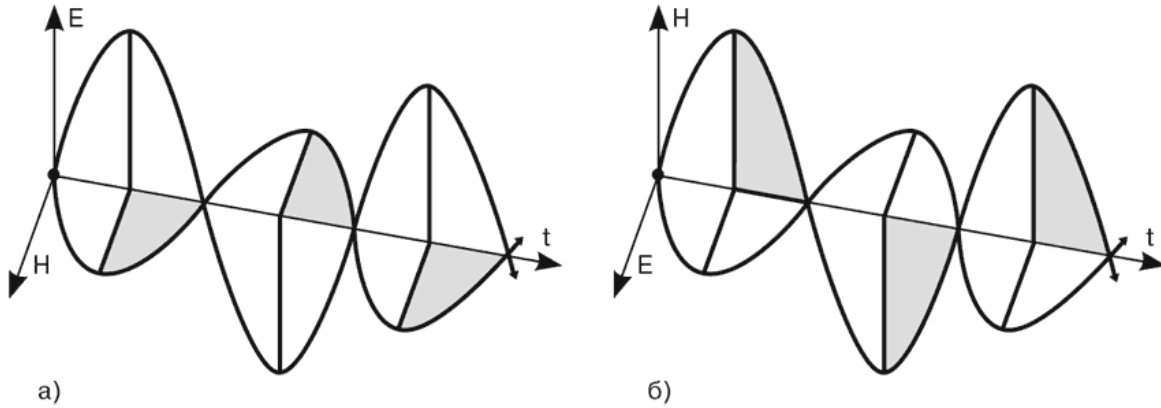
В течение последних десятилетий прогресс в теоретической физике, достигнутый группой исследователей, возглавляемых ирландским физиком Джоном Беллом, и экспериментальные данные Алана Аспекта и его коллег убедительно продемонстрировали, что Эйнштейн был не прав. Про электроны, как и про любые другие частицы, нельзя одновременно сказать, что они находятся в таком-то месте и имеют такую-то скорость. Квантовая механика показывает, что это утверждение не только не может быть проверено экспериментально, но оно, кроме того, прямо противоречит другим, недавно полученным экспериментальным данным.



Квантовая запутанность

Возьмем две микрочастицы и назовем их для образности А – «Алиса» и Б – «Боби». 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 «схлопнется» волновая функция Боба, поскольку его координаты автоматически уточняются через данные Алисы! Если волновая функция полностью характеризует частицу, то, 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.

Тут нам надо познакомиться еще 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, то ему можно сопоставить некоторый каталог Шредингера, включающий уже известную нам волновую функцию и новые понятия: вектор состояния и матрицу плотности. Что же такое вектор состояния и матрица плотности?



Поляризация электромагнитного излучения: а – поперечная, б – продольная

Электромагнитную волну можно упростить до колеблющихся перпендикулярно магнитных и электрических компонент, это хорошо демонстрирует пример квантов электромагнитного излучения – фотонов. Поляризующая пленка или специальный объектив фотоаппарата поляроид пропускает весь свет, если он поляризован вдоль штриховки на пленке, и задерживает весь свет, если его поляризация перпендикулярна штриховке.

Вектор состояния является одним из основных понятий квантовой физики, представляя 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 принципа 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, т. е. математический элемент, переводящий одну величину в другую) представляет собой 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 Шредингера является своеобразным «паспортом» квантовой системы, содержащим статистическую информацию о функциях распределения тех или иных параметров, полученных в результате ансамбля измерений.

Глава 10. Жизнь и смерть квантового кота

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.

Дэн Симмонс.

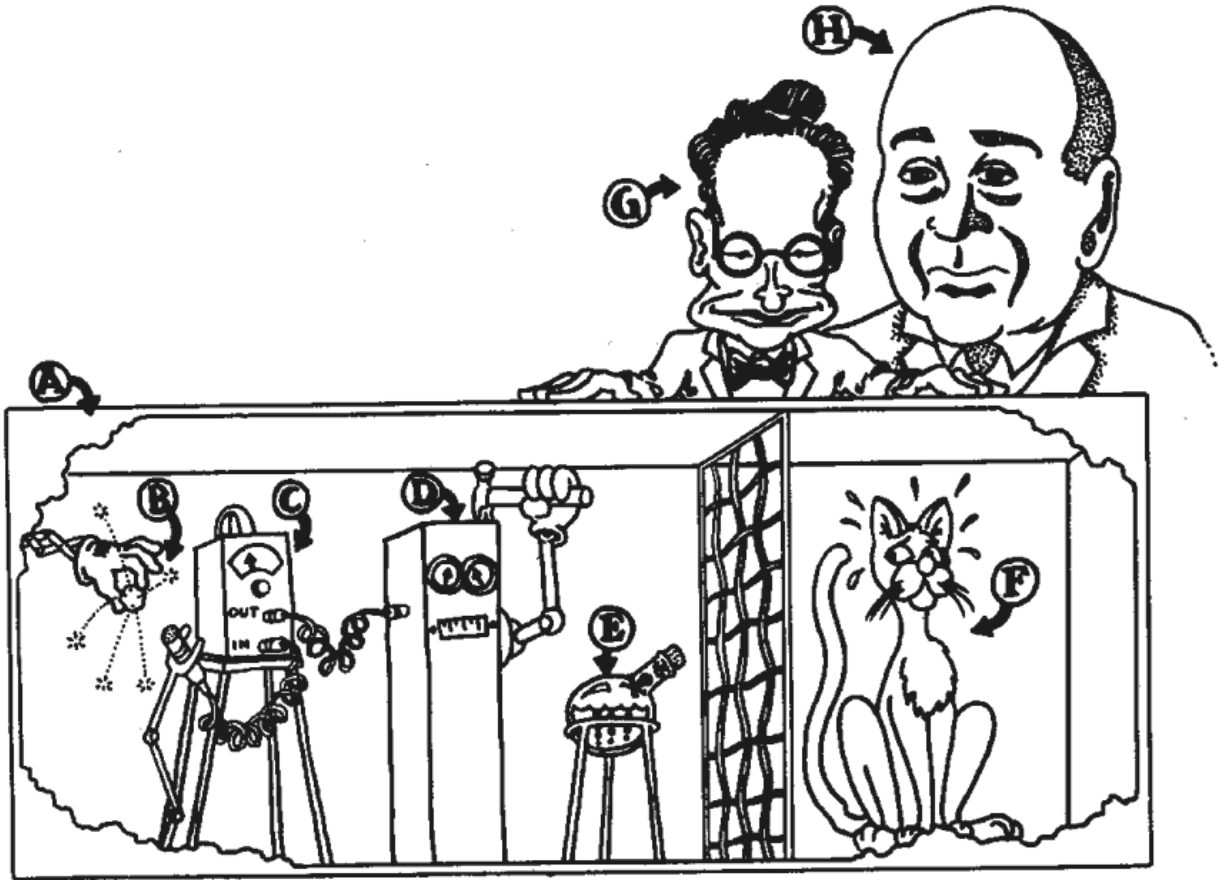
Песни Эндимиона

Чтобы обратить внимание на необычный характер квантовых суперпозиционных состояний, Шредингер сконструировал парадоксальный мысленный эксперимент, противоречащий нашему обыденному восприятию окружающей реальности. Так, он предположил, что в замкнутом пространстве (ящике) находится сосуд с ядом, который может быть разбит механизмом, управляемым радиоактивным распадом. Внутри клетки находится кот (в оригинале

статьи Шредингера это была кошка, но традиция превратила ее в кота), который является либо живым, либо мертвым в зависимости от радиоактивного распада. Отметим, что процесс измерения, как взаимодействия с макроскопическими измерительными приборами, является принципиально необратимым процессом, в результате которого состояние измеряемого объекта претерпевает редукцию.

Явление редукции (схлопывания, коллапса) волновой функции, несмотря на внешнюю простоту – к примеру, падала на некую поверхность экрана волна и в момент соприкосновения превратилась в частицу, – является одним из наиболее «болевых узлов» 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 вопроса о внутренней структурной динамике процесса, мотивируя это его краткосрочностью. Много копий было сломано и вокруг вопроса о скорости распространения процесса редукции. До сих пор в околonaучных комментариях, давно уже перекочевавших из-за своей экстравагантности на страницы научно-популярных журналов, можно встретить описания различных квантовых явлений, имеющих «бесконечную скорость распространения». Тут надо сразу же подчеркнуть, что за все время существования новой физики никогда и ни в одном добросовестно поставленном эксперименте или наблюдении какого-то явления, ни в сверхмалых, ни в сверхбольших масштабах не наблюдались сверхсветовые передачи материальных носителей – тел или информации. Сейчас очень модно «преобразовывать» теорию относительности, однако в этом ее пункте критика всегда терпит полное фиаско. Поэтому чаще всего, когда рассказывается, что по самым «инновационным» представлениям процесс редукции происходит практически мгновенно, что несомненно противоречит теории относительности, запрещающей распространение сигналов, превышающих скорость света, тут же проговаривается, что рассматривается не реальный физический

процесс, а математическая схема – прием его описания.



Мысленный эксперимент с котом Шредингера

Герметичный ящик (А) содержит радиоактивный источник (В), который равновероятно вызывает срабатывание счетчика радиации Гейгера (С), запускающего механизм (D), разбивающий колбу с ядом (Е), 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 Шредингера), возможно, требуется сколлапсировать вектор состояния большей системы, содержащей первого наблюдателя и установку (А – 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, т. е. одновременно в двух когерентных состояниях,

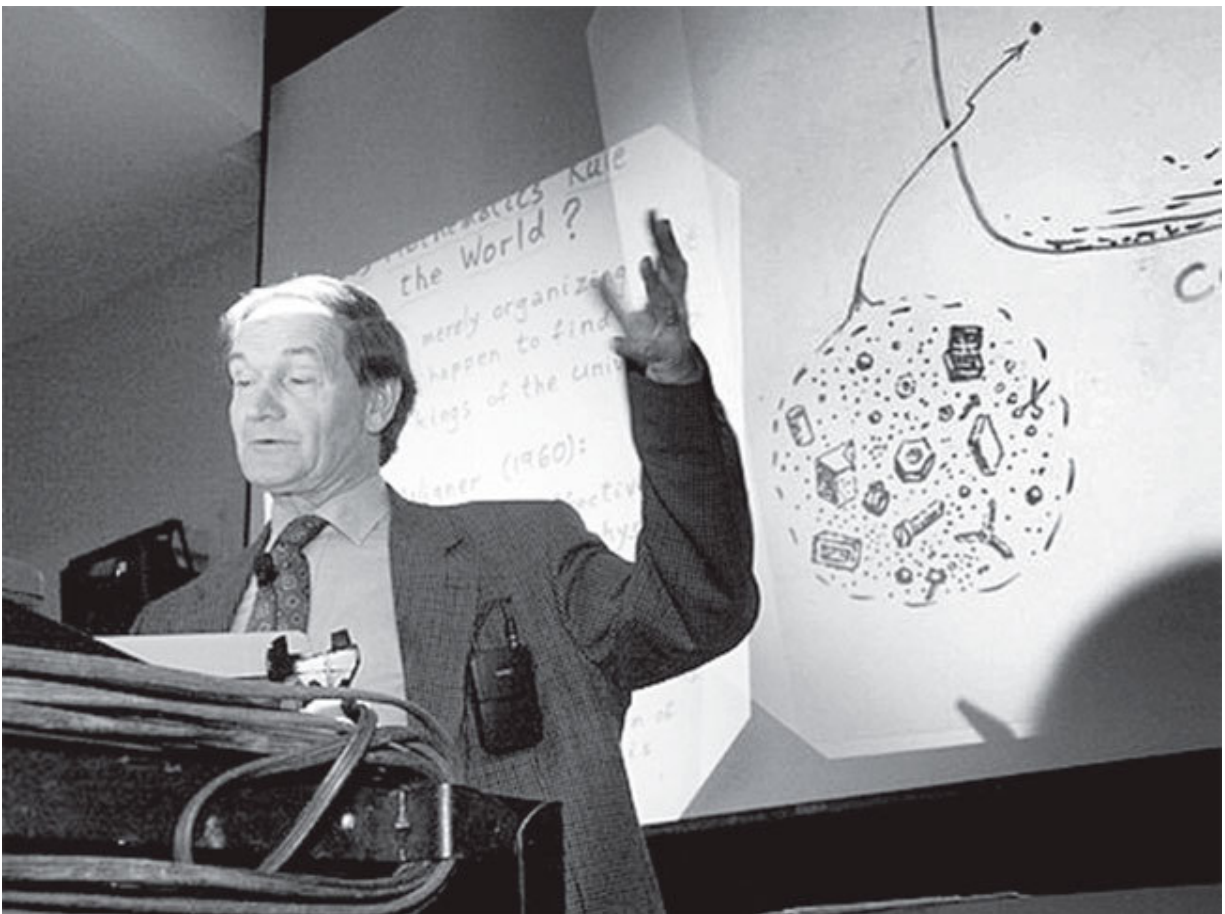
и, соответственно, подопытный кот в закрытом ящике одновременно и жив, и мертв. Однако стоит наблюдателю открыть «черный кошачий ящик», и он увидит либо мертвую, либо живую кошку, что вполне соответствует нашим логическим представлениям о природе наблюдаемых явлений.

За прошедшие годы к образу многострадального квантового кота обращалось множество физиков, журналистов и писателей. Одна из последних вспышек интереса к этому квантовомеханическому парадоксу связана с именем видного английского теоретика из Оксфордского университета Роджера Пенроуза, который заявил, что намерен воспроизвести на практике мысленный эксперимент Шредингера с котом. Выступление Пенроуза связано с серией экспериментов по проверке парадоксальных выводов принципа квантовой неопределенности, гласящего, что частица может находиться в нескольких местах одновременно. В частности, это ярко продемонстрировал не только для атомов, но и для сложных молекул физик-экспериментатор из Венского университета Антон Зайлингер. В поставленных им опытах сложные молекулы, состоящие из десятков атомов, проходили одновременно через два отверстия в экране. В общении с журналистами Зайлингер уверял, что, усовершенствовав технику эксперимента, он сможет регистрировать суперпозиции еще более крупных объектов, вплоть до бактерий и даже 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, который назвал это гипотетическое явление «объективной редукцией состояния». Исходя из идей Фейнмана, Пенроуз намеревается воссоздать эксперимент Шредингера именно с тем, чтобы опровергнуть его выводы. Образно говоря, он пытается доказать, что в пятидесяти процентах случаев кот в ящике будет жив, независимо от поведения наблюдателя, что можно было бы оценить, например по мурлыканью.

Если Пенроуз экспериментально докажет свою идею, ему удастся осуществить то, чего безуспешно добивались физики на протяжении прошлого века – посмертно примирить позицию Эйнштейна и

Шредингера с позицией Бора и Гейзенберга. При этом, может быть, даже удастся соединить теорию относительности с квантовой механикой в обобщенную научную теорию под названием «квантовая гравитация».



Ричард Пенроуз рассказывает, как «поймать» квантового кота Шредингера

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 на 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 Шредингера с котом, несмотря на его кажущуюся простоту, наталкивается на очень серьезные инженерные трудности.

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, который облучается расщепленными лазерными лучами. В теории лазерный фотон в состоянии суперпозиции, сталкиваясь с кристаллом и незначительно сдвигая его, также 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 Шредингера 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 ряда замеров. Кроме того, по условиям эксперимента фотон должен находиться в состоянии полета не менее десятой доли секунды, а это значит, что он должен пройти расстояние, примерно равное диаметру Земли. Наиболее реально было бы провести эксперимент в космосе на двух достаточно удаленных платформах, причем тут складывается

уникальная ситуация для объединения с уже реально запланированной на близкое будущее космической миссией по обнаружению гравитационных волн.

Мировое научное сообщество глубоко разделилось во мнениях по поводу перспективности экспериментов Пенроуза. Причем большинство специалистов в области квантовой физики все же считает, что 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 идеи «объективной редукции».

Здесь я не могу не заметить, что сам в полной мере разделяю 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 принимает на веру подобный логический абсурд и с каким упорством его защищает.

Когда-то, еще в период становления квантовой физики, Шредингер придумал свой мысленный кошачий эксперимент как иллюстрацию логической несуразности основ квантовой механики, однако вскоре оказалось, что его кот зажил собственной жизнью, проник в иные миры и измерения, приобрел имя в литературе и неожиданно большой вес в научных кругах. В квантовой теории шредингеровский кот часто стал использоваться таким образом, о котором 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 замученный физиками представитель кошачьего племени? И в который раз следует ответ, что, 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 окружением? Вообще-то, тут можно «навскидку» назвать десяток видных и не очень физиков, которые тут

же отправят путешествовать измученное неопределенностью животное создание по совершенно невообразимым мирам, пространствам и реальностям. Более того, некоторые даже предположат, что ваше сознание вступит в «квантовую связь» с сознанием кота... Впрочем, здесь мы немного забегаем вперед, вторгаясь в теоретическую вотчину знаменитого конструктора Многомирья Хьюго Эверетта.

Как хорошо тут начнешь понимать несравненного Стивена Хокинга, заметившего, что, когда он слышит о коте Шредингера, его рука тянется к ружью! Ну а ответ на вопрос, вызвавший столь бурные эмоции у физика, которого все чаще называют 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, читатель, наверное, уже догадался, что у физиков ответы на подобные вопросы всего лишь дело вкуса... Вот поэтому в окружающей нас физической реальности не встречается полуживых квантовых котов.

К феномену шредингеровского кота можно подойти и с совершенно иных позиций, наиболее четко и остроумно отстаиваемых профессором МГУ Д. Н. Клышко и профессором МФТИ А. И. Липкиным, не говоря уже о лидере российской науки академике В. Л. Гинзбурге. В двух словах 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 даже ведущих свой род от кошки великого Шредингера, науке неизвестны!

Тут читатель вправе задать решающий вопрос: означает ли это, что квантовая механика в принципе неприменима для макрообъектов? И где тут видимая граница?

У замечательного советского фантаста Георгия Гуревича есть весьма занимательное произведение «Темпоград». В нем рассказывается о

многих 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 – частичноэлементарный уровни и где-то за маревом волн электронов исчезают навсегда в пучинах микробесконечности. Печальные итоги столь удивительной экспедиции не должны нас останавливать, и мы также воспользуемся темпоскафом Гуревича для изучения границы между микро- и макромиром.

Давайте совершим прыжок сразу на атомарный уровень, как сегодняшнюю границу наблюдаемого микрокосмоса. Здесь мы должны решить очень важный и непростой вопрос: где предел реальной наблюдаемости трансатомарных объектов? Если представить, что в отдаленном будущем создадут 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 свое место займут и фотографии ядер. Ну а что содержится дальше в глубинах материи? Скорее всего, именно где-то здесь и пролегает граница принципиально прямонаблюдаемого, которую условно можно принять за «рабочий» критерий микро- и макроскопического.

Приблизительно такая точка зрения если и не излагается прямо, то принимается «по умолчанию» в большинстве обычных школьных учебников. Если учебник хороший, в нем обязательно оговаривается, что существует ряд «макроквантовых» явлений, таких как сверхпроводимость, сверхтекучесть, излучение лазеров-мазеров и работа туннельных микроэлектронных приборов. В этих явлениях закономерности квантового мира проявляются на макроскопическом уровне. Если же учебник не просто хороший, а умный, 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. Правда, тут возникает отнюдь не риторический вопрос: если макроскопические явления далеко не всегда четко сопоставимы классическим объектам, то, может быть, границы между классической и квантовой реальностью вообще не существует? Разумеется,

школьные учебники, даже очень хорошие, ответа на подобные вопросы не дают.

Исторически вопрос о границе квантовой реальности возник сразу же после рождения квантовой теории, и одним из первых на нем заострил внимание Бор, считавший (а вместе с ним и вся 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, что 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, 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.

Ну а теперь позвольте предложить забавную юмореску, присланную моим читателем Денисом Абсентисом после выхода книги «Великая квантовая революция».

Время действия – Великобритания, январь, 1935 год.

– Что за бред вы здесь понаписали, Эрвин?! – редактор отложил рукопись, протер очки и уставился изумленным взглядом на посетителя, смущенно сидящего перед ним. – Как вам в голову пришел этотдохлый кот? Неужели без таких сомнительных аллегорий никак не объяснить сущность законов квантовой механики? Если бы я вас раньше не знал и не печатал ваши статьи...

– Ханс, мне этот кот тоже совсем не нравится... Но это как раз ваш референт настоял на нем. Сейчас я объясню. Видите ли, первоначально мне показалось, что я для популярного объяснения нашел очень яркий и знакомый всем с детства образ, который описывается суперпозицией двух состояний... Я ведь человек религиозный, и знаете... Квантовая механика ведь тоже создана по милости Господней. Просто некоторые ее моменты многим непонятны, и надо было найти соответствующий и волнующий воображение образ, драматизирующий интерпретационную проблему. Тогда люди заинтересуются и

преодолеют мнимую сложность понимания. Вот образ Иисуса на кресте – это как раз то, что было бы понятно всем...

– Эрвин... – Ханс Дитл перестал вертеть очки в руках и положил их на стол. – Вы хорошо себя чувствуете? Вы уверены, что у вас не горячка? Сначала дохлый кот, а теперь дохлый...

Редактор запнулся, поняв, что чуть не сказал что-то кощунственное. Но захваченный своей идеей профессор ничего не заметил.

– Да ведь в том и дело, – быстро перебил редактора Шредингер, – что Иисус на кресте лучше всего демонстрирует суть квантового парадокса, а удар сотника с копьем – момент коллапса волновой функции. Вот представьте: наш Господь без сознания висит распятый на кресте, истекая кровью, и никто – слышите: никто! – не может на этот момент сказать, мертв он или жив. Ведь это и есть в самом чистом виде понятие квантовой неопределенности. В онтологическом смысле Христос не может быть жив и мертв одновременно – это квантовая суперпозиция. Только удар копьем может дать нам ответ о его состоянии. Только такая вот эмпирическая проверка. В квантовом смысле посланный Пилатом римский сотник с копьем – это внешний наблюдатель, экспериментатор, дающий нам окончательный ответ на вопрос, жив Иисус или нет на этот момент. Это и есть образ мгновенного изменения описания квантового состояния объекта, происходящего при измерении. А до того мы ничего точно не знаем, Христос для нас не жив и не мертв одновременно!

Шредингер победно откинулся на спинку кресла, оглядывая растерянного редактора.

– Вы же понимаете, что научный журнал не может ничего такого печатать, это же явное богохульство, – выдавил из себя, наконец, онемевший Дитл. – Вы представляете, как бы обрушились на нас представители всех конфессий? Да это даже обсуждать нельзя в здравом уме. Seriously, Эрвин, вы хорошо себя чувствуете?

– Мне это сначала не показалось никаким богохульством, – сразу погрузился Шредингер. – Ведь такое состояние Христа прекрасно известно каждому, верующему и неверующему. Поэтому я подумал, что этот общеизвестный факт был бы очень нагляден для пояснения проблемы. Но ваш референт уже убедил меня и предложил заменить Христа на кота...

– На кота? – казалось, редактора вот-вот хватит удар. – Вы теперь предлагаете распятую кошку вместо Христа? Да вы думаете, что говорите?

– Нет-нет, – торопливо прервал Шредингер. – Не распятую, конечно. Просто кошку, состояние которой нам неизвестно. Ну, не живую и не мертвую одновременно. Вот ваш референт и предложил заменить крест на коробку. Кошка помещается в герметичную коробку, и мы не знаем, жива она или уже задохнулась. Ее квантовое состояние...

– Стоп! Прекратите, Эрвин. Вы сегодня явно не в себе. Давайте перенесем разговор на завтра. Только исков от всевозможных обществ защиты животных нам не хватало!

– Но это же абстрактная кошка. Причем тут... Ну, ладно. Если душить кошку – это, на ваш взгляд жестоко, то можно оставить в коробке дырочки, и кошка просто умрет от голода, но мы не будем знать, случилось это уже или нет. И узнаем это только тогда, когда откроем ящик.

– А экспериментатору, очевидно, надо выдать затычки для ушей, – неожиданно у редактора прорвалась злая ирония. – Чтобы он не слышал мяуканья голодной кошки?

– Ну, кошке можно зашить рот... – профессор посмотрел на выражение лица редактора и осекся. – Хорошо, не так. Кошку можно намочить и подвести к ней два электрода... Нет, не то... Можно добавить в коробку ампулу с ядом. Вот! Действительно, так лучше. Помещаем внутрь ящика кошку, запечатываем его и оставляем систему в покое на час. Мы не знаем, разбилась ампула или нет. А соответственно, мы не знаем, умерла ли кошка.

– Эрвин! – Ханс Дитл уже успокоился и попытался настроить разум на аналитический лад. – Но какого дьявола эта чертова ампула должна произвольно разбиться?

– Ну, это же технические детали! Привяжем к этой ампуле молоточек, который сработает, когда... когда...

– Молоточек? – участливо поинтересовался редактор. – Да, да. Действительно, этот ваш убийственный молоточек в вашей адской машинке каким образом будет приведен в действие?

– Ну... К этому молоточку мы приспособим счетчик Гейгера, а рядом расположим радиоактивный источник, испускающий гамма-лучи...

– Так-так-так... – в голосе редактора уже пробивались иногда необходимые ему по должности елейные нотки психиатра. – И что же дальше?

– А механизм счетчика мы соединим с соленоидом, который, если отсчет случится, разобьет колбу с синильной кислотой...

– Колбочка с синильной кислотой? Да, да, это очень интересно. – Дитл уже внутренне смирился с тем грустным фактом, что старина Шредингер сошел с ума, и думал уже только о том, как бы избавиться от неадекватного профессора.

– Таким образом, ящик заполнится смертоносными парами, и наш кот умрет! Или, если отсчет не случится и колба останется нетронутой, то не умрет! Но до того для нас кот все еще «мертвоживой». И только процесс наблюдения переводит кота в определенное состояние. – Шредингер победоносно посмотрел на редактора.

– Ну, хорошо, дорогой Эрвин, хорошо, – успокаивающим сладким голосом произнес тот. – Я сейчас, к сожалению, уже опаздываю на совещание, так что мы вернемся к этому обсуждению завтра, ладно? Или послезавтра... Очень интересная идея, мы обязательно... Но мне уже пора, покорнейше прошу меня извинить...

Шредингер вышел за дверь кабинета и пошел вниз по широкой лестнице.

Если бы он задержался у двери, то, возможно, смог бы расслышать, как на повышенных тонах Ханс Дитл давал инструкции своей секретарше: «Если этот сумасшедший богохульный маньяк-вивисектор и распинатель кошек еще раз здесь появится, гоните его поганой метлой! Пусть он хоть был бы десять раз нобелевский лауреат, но позорить наше уважаемое издание описаниями мучений дохло-недохлых кошек я из-за него не собираюсь. И запомните: меня для него никогда нет. Слышите, никогда!»

Шредингер этого монолога не слышал. Впрочем, то, что ни завтра, ни послезавтра ему сюда смысла возвращаться нет, профессору было и так понятно. Выйдя на улицу, физик остановился, вздохнул, покачал головой и, окинув взглядом ближайшую церковь, пробормотал вполголоса: «Да, действительно, бред какой-то с этой кошкой получается... Вот с Христом так все просто и понятно... Но нельзя так нельзя... Здесь Ханс все же прав. Зря я вообще о Христе упомянул.

Придется теперь пробовать обратиться в другую редакцию. Пожалуй, надо ехать в Берлин...»

Вздыхнув, Шредингер отправился домой, твердя себе: «В следующий раз ни слова о Христе, ни звука о Христе, только кот. Только кот – иначе вообще не напечатают».

– Ну, дорогой профессор, это, конечно, забавная иллюстрация... – редактор немецкого журнала «Естественные науки» задумчиво прошелся по кабинету и повернулся к окну. – Но мне кажется, что с кошкой вы слишком уж намудрили. Ну хорошо бы еще просто кот. Но столько лишних дополнительных приспособлений – и коробка, и смертельный газ, и молотки, соленоиды, счетчики Гейгера, гамма-излучатели... Что-то во всем этом есть садистко-маниакальное, вы не находите? За что вы так не любите кошек? Может, все же можно придумать хоть что-то немного попроще, а?

– Я уже думал на эту тему, но...

Шредингер в нерешительности подошел к редактору и вдруг с ужасом понял, что тот смотрит в окно на церковь. Физик застыл на месте. Секунду спустя редактор махнул рукой, словно отгоняя от себя ненужные мысли, и быстро направился к столу:

– Ну что ж, профессор, дело ваше. Хотите кота – пусть будет кот. Завтра отдаем в печать.

Шредингер облегченно вздохнул.

Глава 11. Запутанная перепутаница

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. Язык и реальность в современной физике

Средства массовой информации заполнили сенсационные сообщения, казалось, сошедшие со страниц научно-фантастических романов. Речь шла о так называемой «квантовой телепортации».

Однако 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 возмущение, вносимое измерением в состояние первой частицы, мгновенно перенесется 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 20-х годах прошлого века одним из создателей математической квантовой теории Йоганном фон Нейманом.

Некоторые ученые даже полагают, что квантовая запутанность – это не просто наложение друг на друга различных состояний и такое их переплетение, когда нет возможности отделить содержимое физической системы одно от другого. Они вполне серьезно обсуждают наличие «мистических» связей между подсистемами, которые

необъяснимы с точки зрения известных физических полей и взаимодействий. Иногда даже можно слышать, 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: изменяя что-то в себе, эти действия тут же сказываются в окружении.

Квантовая запутанность возникает в системе, состоящей из двух и более взаимодействующих подсистем (например, нескольких элементарных частиц), и представляет собой суперпозицию макроскопически различимых 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 мы скажем 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. Именно этот параметр квантовых систем и определяет степень связности отдельных локальных частей. К примеру, 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. Вообще говоря, 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.

Так, управляя взаимодействием с окружением, можно манипулировать мерой квантовой запутанности между составными частями системы. Например, замкнутая система может находиться в максимально запутанном состоянии и не будет иметь внутри себя локальных (классических) составных частей (подсистем). Но если она начинает взаимодействовать с окружением, то 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 являются лишь наиболее удобными объектами для изучения и манипулирования квантовой запутанностью в физических исследованиях. Для них квантовая запутанность проявляется особенно сильно и ее уже невозможно игнорировать, как в случае макрообъектов. 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.

Надо сказать, что проблема квантовой запутанности, особенно в макроскопических системах, до сих пор представляет собой предмет

бурной полемики. При этом наиболее интенсивно обсуждается вопрос квантового принципа несепарабельности, заключающегося в том, что взаимодействующие системы, квантово-запутанные между собой, связаны нелокальными квантовыми корреляциями. При этом некоторые теоретики даже склоняются к мысли, что все акты взаимодействия в окружающем мире вне зависимости от их масштабности являются предпосылками для квантовой запутанности взаимодействующих объектов. Однако большинство специалистов считает подобное теоретизирование проявлением своеобразного «квантового экстремизма», ведь 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».



Антон Цайлингер (р. 1945) – австрийский физик, известный пионерскими работами в области квантовой информации

Естественно, что у читателя уже давно должен был возникнуть вопрос: как такая «запутанная» квантовая теория согласуется с экспериментальными данными?

Здесь надо заметить, что при экспериментировании с квантовыми системами отличить суперпозицию от смеси 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, а если в стакане есть трещина, то слышен дребезжащий звук (смесь состояний).

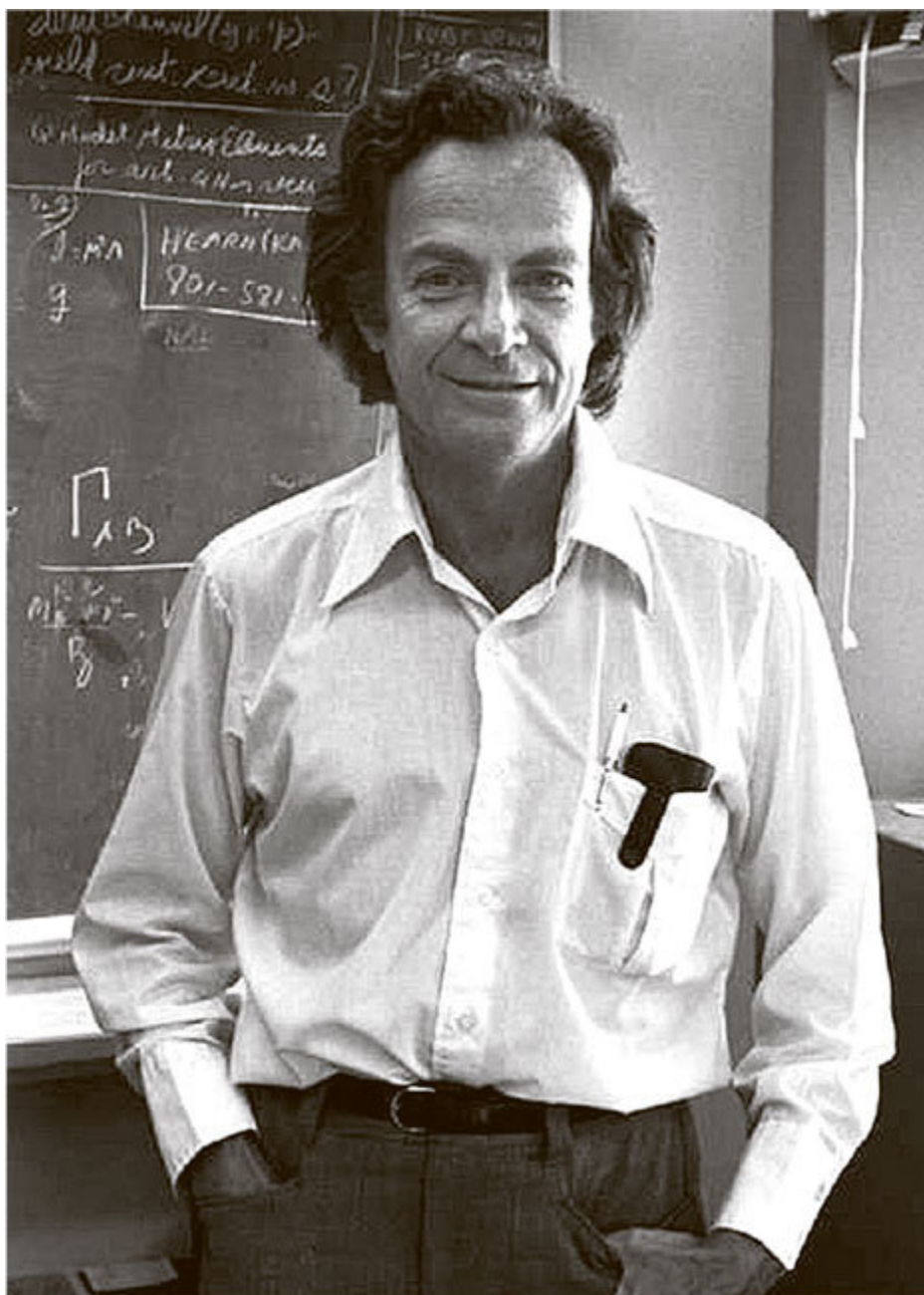
Первые эксперименты по проверке теории квантовой запутанности связаны с именем профессора Венского университета Антона Цайлингера. Для своих опытов Цайлингер выбрал обыкновенные фотоны – кванты электромагнитного излучения, попытавшись «телепортировать» эти элементарные частицы в иную точку пространства. Важным элементом экспериментов Цайлингера была подготовительная фаза, ведь необходимо, чтобы в некоторой точке пространства оказался фотон, изменяющий свои характеристики в ходе телепортации и точь-в-точь как исходная частица. Итак, оказывается, что в экспериментах по квантовой телепортации происходит не перемещение материальных объектов, а своеобразная череда мгновенных превращений их состояний.

Мы можем прибегнуть к следующему сравнению: представим себе, что в точке выхода квантового «телепортационного портала» находится зеркало. Что бы ни происходило с исходным фотоном, зеркало отражает его образ, чуть переиначив его, 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 (тут надо подчеркнуть, что это не противоречит теории относительности, поскольку подобная квантовая телепортация никак не связана с переносом материи).

Основным объектом опыта профессора Цайлингера, 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 части 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. Итак, 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 категорически 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.



Ричард Фейнман (1918–1988) – выдающийся американский физик, один из создателей квантовой электродинамики

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.

Сегодня ученые могут телепортировать тысячи квантовых микрообъектов и даже успешно проводят опыты по телепортации атомов и молекул. Однако и проблем вокруг квантовой телепортации еще предостаточно, ведь одним из главных требований «правильного» запутывания является создание «дистиллированно» сверхчистой квантовой среды, а чем сложнее устроен квантовый объект, тем труднее изолировать его от внешней среды.

Кажется парадоксальным, но к настоящему времени квантовая теория наиболее полно и точно описывает весь наш мир – Универсум в целом. Дело в том, что космологи считают окружающую нас Вселенную замкнутой системой, а в квантовой механике считается, что описание замкнутой системы ее вектором состояния должно являться полным. Проблема лишь в том, что нас сплошь и рядом окружают именно открытые системы, активно контактирующие с соседними физическими объектами, так что мы постоянно должны решать задачу задания вектора состояния эволюционирующей системы.

В заключение приведем мнение знаменитого физика прошлого века Ричарда Фейнмана, изложенное им в лекции «В поисках новых законов». В ней Фейнман, как один из создателей квантовой электродинамики, признал, 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 квантовомеханических амплитудах вероятности, как бы странно это представление ни выглядело, оказывается верным, и так на протяжении всей теории странных частиц, на все сто процентов. Поэтому сам профессор Фейнман не думает, что, когда будут открыты законы внутренней структуры нашего мира, эти представления окажутся неправильными.

Глава 12. Стрелы небесных громовержцев

**Я утверждаю, что, хотя сигналы нейронов и могут вести себя как детерминированные в классическом смысле события, управление синаптическими связями между нейронами происходит на более глубоком уровне, то есть там, где можно ожидать наличия существенной физической активности на границе между квантовыми и классическими процессами. Выдвигаемые мною специфические предположения требуют возникновения внутри микроканальцев цитоскелета нейронов макроскопического квантовокогерентного поведения...
Иначе говоря, я полагаю, что упомянутая квантовая активность должна быть неким невычислимым образом связана с поддающимся вычислению процессом, который имеет место внутри этих самых микроканальцев.**

Р. Пенроуз.

Тени разума. В поисках науки о сознании

Одной из самых больших проблем современной кибернетики является поиск алгоритмов искусственного интеллекта. Пока еще результаты здесь более чем скромные. Ведь несмотря на то, что компьютеры обыгрывают гроссмейстеров в шахматы, управляют

космическими аппаратами и контролируют многие стороны жизни человека, они ни на шаг не приблизились к тайне разума.

В свое время воодушевленные первыми успехами робототехники философы-футуристы предрекали, что еще в конце прошлого века все вокруг заполнят «искины» – андроиды с искусственным интеллектом (ИИ), мало отличимые от людей. Все это прекрасно изобразил Филипп Дик в культовом романе «Бегущий по лезвию бритвы».

Некоторые кибернетики считают, что создание ИИ – дело далекого будущего, и, чтобы с конвейера сошел первый искин, надо полностью разобраться с принципами нашего собственного мышления. Здесь все чаще возникают мысли о квантовой природе мышления. Например, видный теоретик Роджер Пенроуз посвятил данному вопросу свои книги «Новый ум короля» и «Тени разума. В поисках науки о сознании».

В предыдущем разделе мы увидели, что в квантовом мире мы можем получить довольно неожиданные ответы на подобные вопросы, ведь квантовая телепортация осуществляется за счет разделения информации на «квантовую часть» и «классическую». Для передачи «квантовой части» используется вышеописанное квантовое запутывание частиц, а для передачи классической информации годится любой обычный канал связи. Например, если бы игральные кости были запутанными, как квантовые частицы, то каждая пара показывала бы одинаковый результат, даже если бы их бросали на разных концах нашей Галактики или даже в разное время.

Мы уже говорили, что состояния характеризуются степенью запутанности, например, существует максимально запутанное состояние данной системы. Для количественной характеристики вводят понятие меры запутанности. Исходные объекты, находящиеся в минимально запутанных состояниях, можно с сохранением общего количества запутанности преобразовывать в меньшее число объектов, которые находятся в максимально запутанных состояниях. Принято различать чистые запутанные состояния, которые содержат только квантовые корреляции, и смешанные запутанные состояния, которые могут включать в себя наряду с квантовыми и классические корреляции.

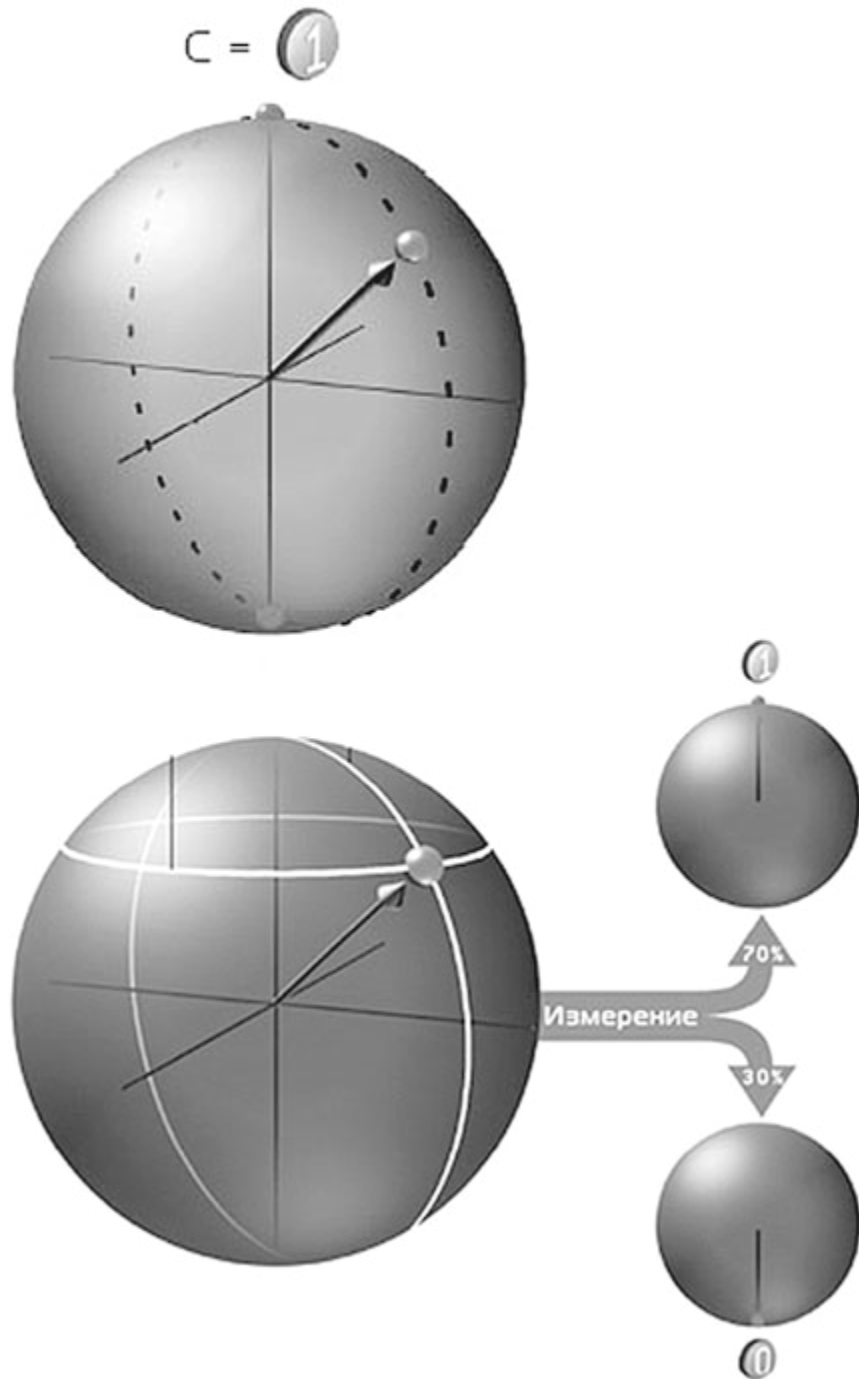
Базовый ресурс квантовой теории информации – квантовые биты, или кубиты. Подобно биту кубит – абстрактный квантовый объект, не

связанный с принципами квантовой механики. Биты можно представлять как намагниченные участки на дисках ЭВМ, напряжения в схемах или графитовые метки, сделанные карандашом на бумаге. Как и в случае бита, свойства кубита не зависят от его физической реализации, скажем, в виде спина атомного ядра или в виде поляризации фотона.

Как и классический бит, кубит олицетворяет единицу или ноль. Однако в квантовой механике любому объекту непременно свойствен диапазон суперпозиций, содержащих в разной степени оба исходных состояния. Поэтому значения кубита как бы соответствуют точкам на поверхности сферы, а наличие набора состояний между 0 и 1 составляет особенность многих необычных свойств квантовой информации.

Сколько классической информации мы можем сохранить в кубите? Казалось бы, бесконечное количество. Чтобы задать квантовое состояние, мы должны указать широту и долготу соответствующей точки на сфере в принципе с произвольно большой точностью. Эти числа можно записать в виде длинной строки битов. Однако, хотя в одном кубите можно закодировать бесконечное количество классической информации, извлечь ее обратно нельзя. Определение состояния кубита с помощью обычного прямого измерения даст в результате либо 0, либо 1 с вероятностью, зависящей от широты исходного состояния. Таким образом, при любом способе измерения прочесть можно один-единственный бит.

Совершенно по-иному ведет себя квантовая информация, ведь когда два кубита сцеплены между собой, они лишены индивидуальных квантовых состояний. Вместо этого появляется зависимость между ними. Например, для одного типа максимально сцепленной пары кубиты при измерении дают противоположные результаты. Если один дает 0, то другой – 1, и наоборот. Так максимально запутанная пара микрочастиц несет один кубит сцепленности. Используя увеличение и уменьшение степени запутанности, можно создать воображаемую систему весов для измерения количества запутанности в стандартных кубитах.



Измерение квантовой информации

В микромире информация может измеряться с помощью особых единиц – квантовых битов – кубитов, которые имеют большое количество возможных состояний. Эти состояния можно представить стрелкой, указывающей на точку сферы. Северный полюс сферы эквивалентен 1, а южный – 0. Другие положения

соответствуют квантовым суперпозициям 0 и 1. В общем, это стандартное представление для бита информации, имеющего единичное или нулевое значение, но с учетом вероятностного характера взаимодействующих квантовых подсистем.

Представим, что у отправителя есть частица, находящаяся в произвольном квантовом состоянии, и он хочет передать это квантовое состояние получателю, т. е. сделать так, чтобы у получателя оказалась в распоряжении частица в том же самом состоянии.

Иными словами, необходимо передать информацию с максимальной точностью. Для этого отправитель и получатель договариваются заранее о создании пары квантово-запутанных частиц, одна из которых попадет отправителю, а другая – получателю. Поскольку эти частицы запутаны, то каждая из них не обладает своей волновой функцией, но вся пара целиком описывается единой волновой функцией. Когда отправитель совершает какие-либо действия, волновая функция всей системы частиц коллапсирует в некое новое состояние, и мгновенно запутанная частица у получателя также коллапсирует в некоторое определенное состояние. Именно в этот момент происходит передача «квантовой части» информации. Отметим, что объем передаваемой при этом информации равен объему информации, запасенной в исходном состоянии, и может быть сколь угодно большим. Однако восстановить передаваемую информацию пока невозможно: получатель знает, что состояние его частицы как-то связано с состоянием частицы отправителя, но не знает, как именно!

Для выяснения этого необходимо, чтобы отправитель сообщил получателю по обычному каналу связи результат своего измерения. Имея данную информацию, получатель сможет совершить необходимое преобразование над состоянием своей частицы и восстановить исходное состояние частицы отправителя. Итак, полная передача информации осуществится только после того, как получатель будет обладать данными, полученными по обоим каналам.

На основе теории квантовой информации возникла принципиально новая технологическая наука квантовая информатика, включающая специальные знания из математики, физики и инженерной кибернетики. Ее задачи состоят в исследовании и техническом

применении фундаментальных квантовых закономерностей запутанных состояний, декогеренции и редукции волновой функции.

Кроме квантовых линий связи и квантовой криптографии возникла еще одна удивительная отрасль квантовой информатики – квантовый компьютеринг. Так в интенсивно разрабатываемых сейчас квантовых компьютерах запутанность также является основным рабочим ресурсом.

В отличие от обычного компьютера, регистры памяти которого могут принимать лишь два возможных значения (например, ноль и единица) и содержат классический бит информации, квантовый компьютер использует кубиты. За счет суперпозиции состояний кубитов возможности квантовых компьютеров намного превышают возможности обычных электронно-вычислительных машин.

Автором идеи квантового компьютера явился выдающийся физик прошлого века Ричард Фейнман. В 1958 году, моделируя на компьютере квантовые процессы, он понял, что для решения многочастичных квантовых задач объем памяти классического компьютера совершенно недостаточен. Все квантовые задачи, которые сейчас рассчитываются на классических компьютерах, – очень грубые приближения.

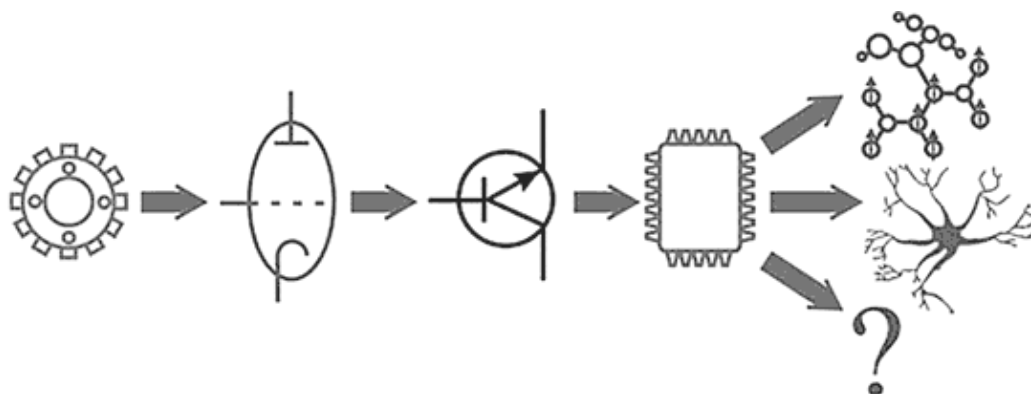
Фейнман высказал мысль о том, что квантовые задачи должен решать квантовый компьютер: природе задачи должен соответствовать способ ее решения. В своей знаменитой статье «Моделирование физики на компьютерах», опубликованной в Международном журнале теоретической физики, он убедительно доказал, что для решения задач, предметом рассмотрения которых являются квантовые объекты и их взаимодействия, обычные компьютеры не годятся. По мнению Фейнмана, с задачами такого класса, требующими огромного объема вычислений, могут справиться принципиально другие вычислительные устройства, использующие квантовую логику и квантовые способы вычисления. Но настоящий бум начался в середине девяностых годов прошлого века, когда американский математик Шор переложил для квантового компьютера алгоритм вычисления простых множителей больших чисел.

Первые прообразы квантовых вычислительных систем обычно связывают с приборами, использующими принцип ядерного магнитного резонанса – ЯМР-спектрометрами. Это явление, связанное

с переориентацией магнитных моментов атомных ядер во внешнем магнитном поле, сегодня активно используется физиками, химиками, биологами и врачами в разного рода анализаторах и томографах, позволяющих заглянуть внутрь самых разнообразных устройств, материалов и живых объектов.

Другой подход основан на использовании ионных ловушек в виде «подвешенных» в вакууме ионов. У каждого иона берутся два уровня энергии, составляющих один кубит квантовой информации; между собой эти ионы связаны через колебания внутри одномерного кристалла, который имеет набор резонансных частот. Однако создание таких ионных цепочек, квазикристаллов, сталкивается с большими практическими трудностями, и количество звеньев пока еще ограничено десятками ионов.

Существует и третий подход – квантовый компьютер на твердом теле. Это могут быть сверхпроводники или квантовый компьютер точно на том кремнии, на котором сегодня работает традиционная микроэлектроника. Роль кубитов здесь выполняют ядерные спины атомов обычной примеси, помещенной в кристалл кремния. Их электронные облака перекрываются между собой, и атомы могут обмениваться состояниями: один атом «управляет» электронами другого, тем самым осуществляется взаимодействие ядер удаленных атомов примеси. Над атомами примеси устанавливают крошечные электроды и, регулируя величину текущего по ним тока, изменяют магнитное поле, а как следствие – частоту вращения спина атомного ядра.



Эволюция электронно-вычислительной техники

Еще одно направление – сверхпроводниковый квантовый компьютер. Несмотря на имеющиеся достижения в реализации отдельного кубита, в таком квантовом компьютере также имеется ряд недостатков. Они связаны с необходимостью жесткого контроля за изготовлением так называемых сквидов – сверхпроводящих квантовых интерференционных детекторов. Технология сквидов позволяет достаточно легко построить квантовый кубит. Основные трудности возникают при попытке соединить несколько таких кубитов, ведь лучшим достижением в этой области пока считается управление взаимодействием всего десятком кубитов.

Совершенно неожиданное применение нашла квантовая информатика в криптографии – искусстве создания и расшифровки разнообразных кодов. Основная трудность, с которой сталкиваются современные шифровальщики, состоит в обеспечении такого обмена шифровальными ключами между отправителем и получателем, при котором никто не может скопировать их. Наступление эры квантовой информатики и, в частности, появление квантовых компьютеров, способных быстро производить невероятно трудное разложение числовых шифровальных кодов на простые множители, ознаменует крах многих криптографических схем. Но тут квантовая информатика преподнесла второй сюрприз, ознаменовавший возникновение еще одной научной отрасли знания – квантовой криптографии. Как оказалось, абсолютно секретную связь вполне реально создать, используя квантовые способы передачи информации. К примеру, чтобы «подслушать» шифровку, передающуюся отдельными фотонами (квантами) через оптоволокно, необходимо каждый квант поймать,

измерить его состояние и только затем вновь послать адресату. Вся беда в том, что проделать эти манипуляции без нарушения состояния отдельных квантов и квантовой системы в целом невозможно. Такие системы связи позволяют безопасным способом осуществлять передачу секретного ключа практически на неограниченные расстояния. Они уже выпускаются и используются для нужд спецслужб при наземной передаче информации, вскоре планируется их вывод в космос для создания системы глобальной секретности.

Некоторые ученые полагают, что мечта о появлении квантовых компьютеров сможет осуществиться лишь при определенных прорывах в физике и технике эксперимента, когда квантовый мир станет более понятным людям. Однако вне зависимости от того, будет построен квантовый компьютер или нет, квантовые вычисления уже заняли свое место в информатике и математике, а опыт работы с отдельными атомами существенно обогатил возможности экспериментальной физики, химии и инженерии. Не вызывает никаких сомнений тот факт, что будущее компьютерной техники тесно связано с квантовой физикой. И наиболее перспективными направлениями ее развития на данный момент считается создание квантовых компьютеров. Квантовые компьютеры будут использовать в качестве базовых элементов отдельные молекулы, поэтому, очевидно, их развитие невозможно без применения аппарата квантовой механики.

На примере истории квантовой информатики мы можем понять, как тесно развитие высоких технологий связано с развитием фундаментальных наук, насколько сильно первое зависит от второго. Поэтому, чтобы добиться успеха в сфере новых технологий, надо помнить о том, что служит их основой, и в первую очередь – о теоретической физике. Только успехи фундаментальной науки могут привести к открытию новых горизонтов в прикладных работах, к новым удивительным достижениям цивилизации.

Глава 13. «Три кварка для мистера Марка»

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

В тридцатых годах прошлого века все чаще стали возникать умозрительные схемы сложного и даже сверхсложного строения атомарных структур. Особенно эти настроения усилились 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 множиться сообщения о все новых и 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. Большинство же непрерывно обнаруживалось опытным путем, и уже скоро пришлось менять сам смысл первоначального термина «элементарная частица», как нечто абсолютно элементарного. В конце пятидесятих годов прошлого века стало окончательно ясно, что сотни новых микрочастиц с похожими свойствами должны обладать какой-то внутренней «субэлементарной» структурой, вовсе не являясь по-настоящему элементарными.

Так постепенно сформировалась гипотеза, что «элементарные» частицы в свою очередь построены из очень специфических микрообъектов. Вооружившись соображениями симметрии, законами сохранения и новейшей математикой, физики-теоретики принялись раскладывать «пасьянсы» из элементарных частиц, тасуя, перекладывая их и так и этак. Обнаружилось: многие частицы могут быть сгруппированы в семейства, близкие по своим основным свойствам.

К примеру, если учитывать лишь главные характеристики – спины, барионные заряды, близость массы, внутреннюю четность, – закрывая глаза на некоторые различия, то 8 частиц: протон, нейтрон и гипероны Λ^0 , Z^+ , Z^0 , Z^- , E^0 , E^- могут быть объединены в одно семейство барионов (октет) со спином $1/2$ и положительной четностью. Подобные группы частиц получили название супермультиплетов.

Нашлась и довольно абстрактная математика, «узаконившая» подобную классификацию: раздел теории групп, известный под названием группы Ли, созданная норвежским математиком позапрошлого века.

Математика допускала существование разных наборов частиц: из одной, трех, шести, восьми, десяти и т. д. Физики же наблюдали лишь синглеты (одна частица), октеты (восьмерки) и дециметы (десятки). Эту прихоть природы надо было объяснить.

Одним из первых здесь достиг значительного успеха Марри Гелл-Ман. В 1961 году этот американский теоретик разделил все известные к тому времени частицы на несколько семейств по восемь членов, назвав свою систему «восьмеричным путем». В этом названии иронично обыгрывался аналогичный термин из буддизма, означающий

восемь ступеней погружения в нирвану. Вскоре систематика Гелл-Мана была подтверждена экспериментально открытием предсказанной ранее неизвестной частицы – омега-минус-гипериона.

И вот в 1963 году одновременно и независимо, находясь даже на разных континентах, один в Америке, другой в Европе, Гелл-Ман и Цвейг высказали гипотезу о существовании трех фундаментальных субъядерных частиц, различными комбинациями которых и является большинство элементарных частиц.

Прежде чем дать имя своему творению, Гелл-Ман, как большой почитатель романа Д. Джойса «Поминки по Финнегану», припомнил место, где дублинский трактирщик возомнил себя персонажем средневековой легенды – королем Марком.

Королю кажется, что его племянник Тристан украл у него жену, прекрасную Изольду. Марк преследует похитителя на корабле. В небе над парусами кружат то ли чайки, то ли крылатые судьи, которые зловеще кричат-каркают – «три кварка для мистера Марка». Короля мучают кошмары, а чайки все чаще повторяют – «три кварка, три кварка, три кварка»...

Собственно говоря, здесь слово «кварк» можно понимать всего лишь как подражание крика морских птиц. Еще одна версия связывает это необычное слово с немецким «чепуха».

Цвейг в своем выборе терминологии оказался гораздо менее удачлив. Он предложил называть гипотетические субчастицы, претендующие на роль истинных кирпичиков праматерии, тузами. Эта карточная терминология оказалась не столь привлекательна, поскольку тузов в карточной колоде четыре, а кварков в первоначальной модели было три вида.

В 1969 году Гелл-Ман получил Нобелевскую премию по физике «За открытия, связанные с классификацией элементарных частиц и их взаимодействий». Надо отметить, что еще в 1959 году выдающийся советский кристаллофизик Иван Степанович Желудев (1921-1996), исходя из принципов сохранения и симметрии предложил систематизацию элементарных частиц, в основных чертах предвосхитившую модели Гелл-Мана 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 s ($strange$) и очарованные кварки c ($charmed$). Наконец, последний дублет состоит из красивых и истинных кварков – b (от $beauty$ или $bottom$) и t (от $truth$ 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 ($favor$). Конечно же, кварки не пахнут и не имеют цвета в традиционном понимании, просто такое название сложилось исторически для обозначения их определенных свойств.

Новые кварковые обитатели микромира оказались весьма странными сущностями, не только обладающими дробным электрическим зарядом, но и принципиально невидимыми 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.

Кварк	Заряд
u или p (верхний или протонный)	+2/3
d или n (нижний или нейтронный)	-1/3
c (очарованный)	+2/3
s (странный)	-1/3
b (красивый)	+2/3
t (истинный)	-1/3

Кварковая спецификация

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 $-1/3$. 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 аромат. Слабые взаимодействия, наоборот, не меняют цвет, но меняют 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. Представьте, что у вас в руках длинный эластичный шнур, каждый конец которого представляет собой кварк. Если приложить к такой системе достаточно энергии – растянуть и порвать шнур, то он порвется где-то посередине, и свободного конца вы не получите, а получите два резиновых шнура покороче, и у каждого из них опять окажется два конца. То же и с кварками: какими бы энергиями мы ни воздействовали на элементарные частицы, стремясь «выбить» из них кварки, нам этого не удастся – частицы будут распадаться на другие частицы, сливаться, перестраиваться, но свободных кварков мы не получим.

Десять лет спустя Гелл-Ман независимо от других ученых предположил существование глюонов – частиц с нулевой массой, которые осуществляют взаимодействие между кварками.

Так была построена «Стандартная модель частиц», которая в обобщенном виде представляет собой теорию строения Вселенной. В ней 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 – лучшее из того, что может предложить квантовая физика элементарных частиц и сил.

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, где нет ни отдельных ядерных частиц, ни многокварковых объединений, которые физики называют «мешками». Получается поистине фантастический образ некоего гигантского кваркового мешка, наполненного возбужденным кварковым морем. Сегодня поисками кварковой плазмы занимаются во многих лабораториях, обладающих достаточно мощными ускорителями тяжелых ионов. Главная идея подобных опытов состоит в том, что при столкновении тяжелых ионов, включающих множество ядерных частиц нуклонов, образуется громадное количество осколочных мезонов – составных частиц, состоящих из четного числа кварков и антикварков, которые и могут перейти при соответствующих условиях в плазменное состояние.

Любопытно, что кварк-глюонная плазма может существовать в природе, организуясь в очень плотных астрономических объектах – кварковых звездах и, вероятно, реализуясь во «вселенскую» среду на некотором этапе Большого взрыва.

Впервые гипотезу о таких поразительных макроквантовых объектах высказал еще в 1965 году замечательный советский теоретик Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904-1994), который 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.

Глава 14. Множественность квантовых миров

Нет ничего удивительного в том, чтобы в большом магазине готового платья подобрать костюм себе по плечу. Аналогично в великом множестве вселенных, в каждой из которых реализуется какой-то определенный набор космологических параметров, вполне может найтись хоть одна, где существуют предпосылки для возникновения жизни. В такой Вселенной мы и находимся.

М. Рис.

Наша космическая обитель

Во второй половине прошлого века спор о реальности квантового мира перешел в совершенно необычную плоскость обсуждения реальности одновременного существования множества различных вселенных. Несмотря на кажущуюся фантастичность (образ множества взаимопревращающихся миров действительно пришел из научно-фантастической литературы), эта идея быстро прижилась среди теоретиков.

Однако некоторые из них так до конца и не поверили в «шизоидность мироздания». В качестве примера можно привести известного британского астрофизика, лауреата премии М. Планка Виктора Вита. В одной из своих статей он писал:

Я до сих пор помню потрясение, которое испытал, впервые ознакомившись с теорией множественности миров. Идея о том, что каждое мгновение из меня появляется 10^{100} -й степени слегка отличающихся друг от друга двойников, и каждый из них продолжает беспрестанно делиться, пока не изменится до

неузнаваемости, не укладывается в рамки здравого смысла. Вот уж поистине картина бесконечно прогрессирующей шизофрении.

Тем не менее с течением времени теория множественных вселенных получила дальнейшее развитие и термин «Мультиверс» вместе со своими аналогами (Мультимир, Мультиуниверсум, Мегамир, Метавселенная) замелькал в серьезных научных журналах. Сейчас уже многие теоретики полагают, что когда-нибудь в далеком будущем из подобной «научной фантастики» вполне может возникнуть новая наука о фундаментальной структуре мироздания.

Особенно часто концепция Мультивселенной рассматривается в космологическом аспекте как неотъемлемая часть окружающей реальности. Однако в физику идея многомирности впервые вошла в совершенно ином контексте парадоксальной интерпретации квантовой теории измерений, которую в 1957 году предложил аспирант знаменитого космолога и астрофизика Джона Уилера Хью Эверетт.

Эверетт обратился к анализу одного из основных принципов квантовой теории, согласно которому любой макроскопический измерительный прибор мгновенно «схлопывает» волновой вектор микрочастицы при ее наблюдении. Это явление называют коллапсом волновой функции, или редукцией волнового пакета. С точки зрения стандартной копенгагенской интерпретации измерение представляет собой взаимодействие квантового объекта с классической системой, в результате которого она переходит от одного состояния макроскопического детектора к другому. Если разместить в пространстве детекторы для определения параметров пучка квантовых микрообъектов, например электронов, то в определенный момент один из данных детекторов пошлет сигнал о поимке электрона. Это означает, что вероятность нахождения отслеживаемой частицы в этот момент в месте расположения детектора тут же превращается в единицу, тогда как вероятность ее появления в любом другом месте и в иное время сразу падает до нуля. Но если бы мы решили уравнение Шредингера до срабатывания детектора, то оказалось бы, что волновая функция непрерывно распределена во времени и пространстве.

Поэтому измерение и не должно описываться уравнением Шредингера, которое действует лишь для квантовых систем. Копенгагенская интерпретация принимает редукцию как объективную

реальность квантового мира и строит на этом хорошо разработанный формальный аппарат расчетов поведения квантовомеханических объектов, дающий результаты, стопроцентно совпадающие с данными эксперимента.

Однако этот подход с самого начала не удовлетворял многих физиков, которые периодически предпринимали попытки так представить теорию квантовых измерений, чтобы она не нуждалась в редукционном постулате. В области многомировой интерпретации поиски ведутся с большой энергией и подчас дают весьма остроумные решения, весьма далекие от первоначальной концепции Эверетта. Общим для всех этих теорий является то, что коллапсионная редукция волновой функции просто не имеет места!

Согласно многомировой интерпретации существует бесконечное множество параллельных и равноправных «копий» нашего мира, воплощающих окружающую физическую реальность. Тогда волновая функция будет описывать единый квантовый Универсум, который представляет собой наложение бесконечного числа всех возможных состояний. В вышеприведенных экспериментах Универсум разбивается на классические «срезы», в которых и оперируют независимые наблюдатели. Любой возможный результат каждого конкретного измерения с разной степенью вероятности реализуется в той или другой из этих альтернативных мировых проекций.

В определенном смысле интерпретация Эверетта проще традиционной копенгагенской, поскольку обходится без загадочного и противоречивого коллапса волновой функции. Но за эту простоту приходится платить, допуская постоянное расслоение квантового Универсума на классические миры. Теория Эверетта парадоксальна, оригинальна и элегантна, но она не вводит новых физических объектов, существование которых можно было хотя бы косвенно подтвердить или опровергнуть на опыте. Более того, все физические расчеты, выполненные на основе стандартной квантовой механики и ее эвереттовской интерпретации, дают абсолютно одинаковые результаты.

Несмотря на то что статью Эверетта с его первоначальным вариантом многомировой интерпретации к опубликованию рекомендовал сам Бор, большинство физиков не приняло такую фантастическую идею. Ситуация изменилась только после того, как к

ней проявили интерес такие крупные физики, как Брюс де Витт и Джон Уилер. Особенно много для популяризации новой теории сделал Уилер, именно после его работ термин «многомировая интерпретация Эверетта – Уилера» получила широкое распространение. Вообще-то такое название не точно и уже ввело в заблуждение множество журналистов, литераторов и философов, правильнее было бы говорить «многопроекционная интерпретация», однако менять что-то уже было поздно – терминология устоялась.

Согласно мысли Эверетта, при измерении какого-либо эффекта в микромире имеется столько миров, сколько возможно альтернативных результатов. 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. Проще всего эту головокружительную картину можно понять на примере того же поляризованного фотона из опытов профессора Зайлингера. Если такой фотон проходит поляризатор, который отсеивает частицы только со строго одним направлением поляризации, то он оказывается в одном мире Эверетта – Уилера, а если не проходит, то в другом. Любопытная ситуация, не правда ли? Как здорово было бы реализовать в одном мире надоедливую тещу, в другом сварливую жену, в третьем оболтусов-студентов, а самому в четвертом (лучшем из миров) с приятелями-теоретиками обсуждать за кружкой пива хитросплетения Мультиверса, изредка (чтобы контролировать ситуацию) реализуясь в первых трех вселенных. Прекрасная, но, увы, судя по всему, абсолютно недостижимая мечта... Дело в том, что в интерпретации Эверетта проблема выбора результата измерения все же существует, она лишь иначе формулируется. Вместо основного вопроса квантовой физики: «Какой из возможных результатов реализуется в ходе процедуры измерения?» – возникает новая задача: «В каком из эвереттовских миров локализовалась лаборатория наблюдателя?». Так что ни управляющего воздействия на выбор мира, ни тем более связи между альтернативными вселенными не существует даже в теории, а жаль...

Несмотря на шокирующую экзотику построений Эверетта – Уилера, сама по себе гипотеза множественных вселенных оказалась довольно продуктивной, вызвав еще один поток работ в области квантовой

космологии. В их основе лежит удивительная модель инфляционного Большого взрыва. Согласно инфляционному сценарию, наш мир родился из неизвестно чего под названием «космологическая сингулярность» (иногда, чтобы поставить на место излишне любопытствующих об этом совершенно непонятном состоянии материи, ученые весоמו добавляют: «Это была квантовая космологическая сингулярность!»). По истечении 10^{-43} секунды постсингулярного развития Вселенная «приобрела свое тело», мгновенно расширившись до наблюдаемых размеров. Это кратковременное сверхбыстрое (инфляционное) расширение и дало название данной теории. Что же «сдетонировало» в ходе Большого взрыва, породившего наш мир?

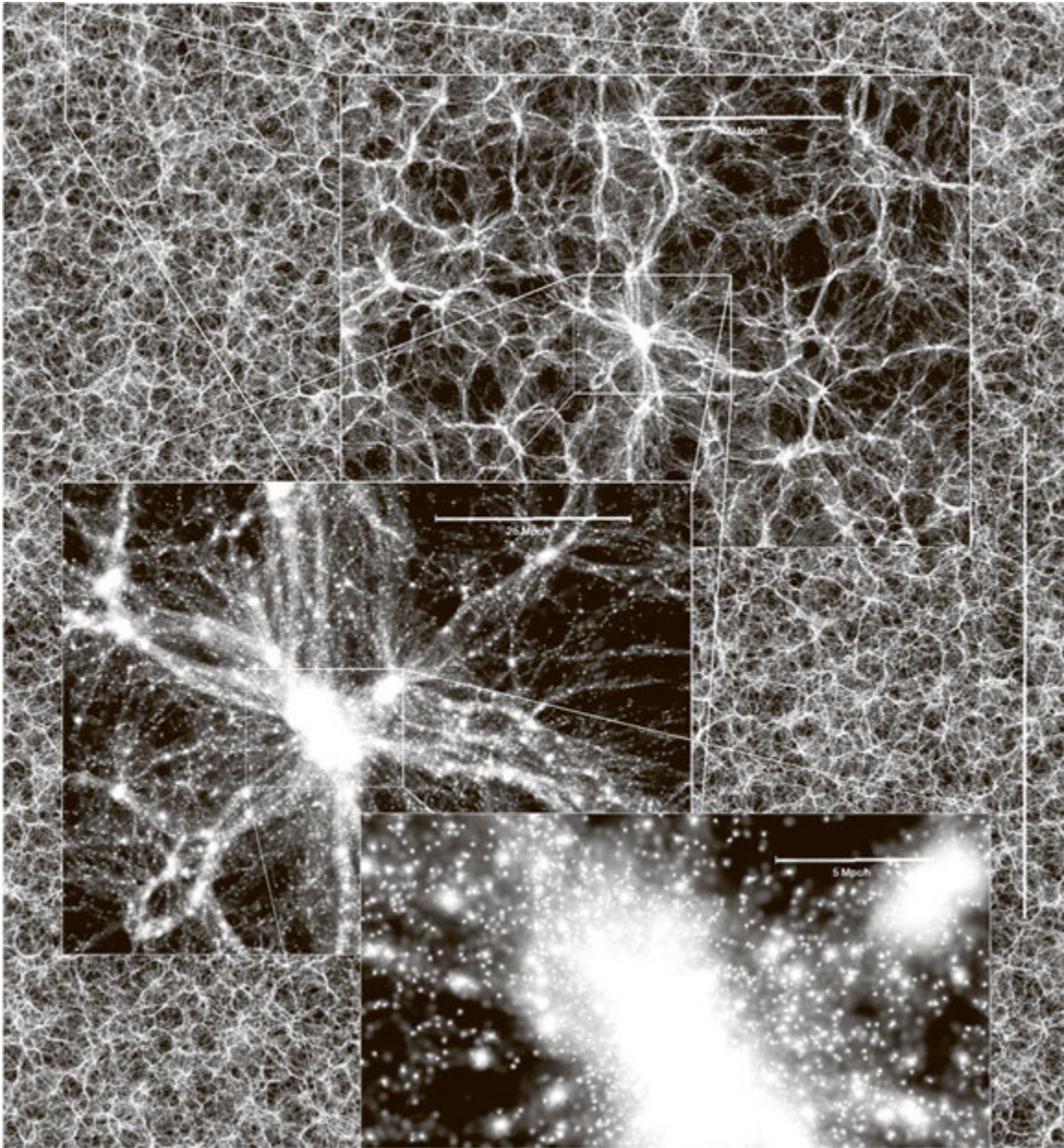


Железнодорожная аналогия Уилера

В свое время Уилер предложил оригинальный образ многомировой модели, получивший название «железнодорожная аналогия». Он представил, что в момент квантового измерения перед наблюдателем как бы оказывается железнодорожная стрелка и его поезд может пойти в одном из нескольких направлений. В зависимости от того, в каком направлении пойдет поезд, наблюдатель увидит тот или иной результат измерения. Возможные направления движения поезда соответствуют альтернативным результатам измерения или различным эвереттовским мирам.

Приверженцы инфляционной теории раздувающейся Вселенной во главе с нашим бывшим соотечественником А. Д. Линде считают, что на изначальном этапе существовал только физический вакуум, пронизанный неким первичным полем, параметры которого сильно менялись из-за квантовых флуктуаций, «вспенивающих» изначальное пространство – время. Квантовая флуктуация – это неопределенность параметров какого-то процесса, его «размазанность», и если одна из таких флуктуаций достигнет надкритического размера («размытость» параметра пересечет своим краем некоторую критическую границу), это может привести к острому локальному экстремуму (вспоминаем школьную математику!) интенсивности поля. Этот полевой «подскок» параметров и может создать условия для выхода на инфляционный режим. В итоге возникает молниеносно расширяющийся пузырек – зародыш нашей Вселенной, за невообразимо малый «квантовый» срок заполняющий как минимум объем Метагалактики.

Так, по крайней мере умозрительно, рождается вселенская сцена, на которой материя и энергия по тщательно и не очень выписанным сценариям теоретиков-космологов начинают разыгрывать грандиозный спектакль под названием «Наша физическая реальность»! Тут надо заметить, что режущее вначале слух слово «сценарий» ученые, работающие в области космологии – науки о Вселенной в целом, любят применять к любым «глобальным» процессам, ведь все же приятно хоть изредка чувствовать себя таким всемогущим демиургом – сверхъестественным существом, создающим иные миры!



Структура нашего мира

Большинство современных космологов считает, что судьба нашей Вселенной решалась в первые секунды после Большого взрыва в балансе плотности вещества и энергии. Преобладание энергии на ничтожные доли процента 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 ядерная сила связи протонов

с нейтронами. Если бы она была меньше существующей, атомные ядра просто бы не возникли, а если больше, то еще на стадии первичного синтеза атомных ядер (нуклеосинтеза) практически весь наличный водород превратился бы в гелий, и наша водородная Вселенная имела бы гелиевое лицо. Не совсем понятную, но, несомненно, очень важную роль играет в эволюции нашего мира скрытая «темная энергия» физического вакуума.

По неизвестным причинам около семи миллиардов лет назад она сдвинулась от нуля к положительному значению, из-за чего Метагалактика начала ускоренно расширяться.

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 предполагает, что квантовые флуктуации, подобные той, которая, возможно, положила начало нашей Вселенной, не исчезли в первые мгновения Большого взрыва, а продолжают самопроизвольно возникать, порождая все новые и новые миры. Не исключено, что и наша Вселенная сформировалась подобным образом в мире-предшественнике. Точно так же можно допустить, что и в нашем мире возникнет флуктуация, которая разовьется в новую вселенную, может быть, даже с иными физическими законами и структурой пространства – времени, тоже впоследствии способную к космологической «редубликации». Конечно же, в подобных сценариях очень много загадок, так, не совсем ясна роль энергии вакуума (а эту загадочную «пустую» субстанцию теоретики мысленно буквально пересытили энергией!). Существуют предположения, что именно энергия вакуума определяет структуру космической материи. Будь она немного ближе к нулю, Вселенная так бы и осталась безжизненной и бесформенной смесью газа и пыли, равномерно распределенной по космическому пространству. В противном случае, чем больше была бы величина темной энергии, тем быстрее первичное вещество сконденсировалось в массивные галактики, которые давным-давно сколлапсировались бы в черные дыры.

Любопытно, что сценарий непрерывно рождающегося инфляционного мира позволяет совершенно по-иному взглянуть на

вероятность зарождения жизни. Эта величина по мере продвижения вперед исследований в области молекулярной биологии и генетики все более приобретает поистине отрицательное астрономическое значение. 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 наличие практически бесконечного количества разнообразных миров коренным образом меняет ситуацию. Естественно, что многие миры Мультиверса могут быть абсолютно безжизненны, например, если в них будут иные фундаментальные физические константы, не способствующие развитию жизненных процессов. Среди таких постоянных важнейшими могут быть гравитационная константа и размерность пространства. Если бы гравитация была слабее, первичные газопылевые туманности не могли бы конденсироваться в плотные скопления вещества, дающие начало звездам; в противном случае звезды сгорали бы так быстро, что жизнь не успела бы возникнуть. Для размерности пространства вряд ли надо доказывать, что ни двумерное, ни тем более одномерное пространство не могут вмещать биомолекулы. С другой стороны, в четырехмерном пространстве и пространствах более высоких размерностей были бы невозможны стабильные планетные орбиты, определяющие космические «зоны жизни».

Конечно, все эти соображения основаны на предположении, что жизнь возникает лишь в привычных для нас формах, но ведь других мы не знаем. Можно, конечно, вспомнить знаменитые научно-фантастические романы «Солярис» Станислава Лема и «Облако» Фреда Хойла и порассуждать о мыслящем поле или разумной плазме, но вряд ли стоит прибегать к таким аргументам без достаточных оснований. Иначе говоря, наш мир таков, каков есть, не потому, что его так спроектировали неведомые высшие силы, а просто в силу действия закона больших чисел. Перебор такого стремящегося к бесконечности количества вариантов обязательно приведет к возникновению жизни и разума. Ну а когда-нибудь сверхцивилизации будущего могут найти и способ связи через барьеры пространства – времени иных измерений.

Существует и еще более фантастическая гипотеза, согласно которой нить жизни может теряться в глубине прошлого Мультиуниверсума,

Если охлаждать воду очень осторожно, то ее можно «переохладить», т. е. охладить ниже точки замерзания (0° Цельсия) без образования льда. Гут предположил, что Вселенная могла себя вести похожим образом: ее температура могла упасть ниже критического значения без нарушения симметрии сил. Если бы это произошло, то Вселенная оказалась бы в нестабильном состоянии с энергией, превышающей ту, которую она имела бы при нарушении симметрии. Можно показать, что эта особая дополнительная энергия производит антигравитационное действие аналогично космологической постоянной, которую Эйнштейн ввел в общую теорию относительности, пытаясь построить статическую модель Вселенной. Поскольку, как и в горячей модели Большого взрыва, Вселенная уже вращалась, отталкивание, вносимое космологической постоянной, заставило бы Вселенную расширяться со все возрастающей скоростью. Даже в тех областях, где число частиц вещества превышало среднее значение, гравитационное притяжение материи было бы меньше отталкивания, вносимого эффективной космологической постоянной. Следовательно, такие области должны были тоже расширяться с ускорением, характерным для модели раздувающейся Вселенной. По мере расширения частицы материи расходились бы все дальше друг от друга, и в конце концов расширяющаяся Вселенная оказалась бы почти без частиц, но все еще в переохлажденном состоянии. В результате расширения все неоднородности во Вселенной должны были просто сгладиться, как разглаживаются при надувании морщины на резиновом шарике. Следовательно, нынешнее гладкое и однородное состояние Вселенной могло развиваться из большого числа разных неоднородных начальных состояний.

Разумеется, вполне естественно было бы считать, что в нашем ускоренно расширяющемся мире свету хватило бы времени для перехода из одной области ранней Вселенной в другую. В то же время расширением Вселенной можно было бы объяснить, почему в ней так много вещества и откуда оно взялось. Здесь просто надо принять как должное, что вокруг нас в диалектическом круговороте материи и энергии постоянно происходят взаимные переходы этих двух основных физических сущностей мироздания. Вот и в микромире частицы могут рождаться в переходах. При этом любопытно, как

современная физика объясняет временно возникающий энергетический дефицит. В частности, Хокинг рассуждает, что полная энергия Вселенной в точности равна нулю. Вещество во Вселенной образовано из положительной энергии. Но все вещество само себя притягивает под действием гравитации. Два близко расположенных куска вещества обладают меньшей энергией, чем те же два куска, находящиеся далеко друг от друга, потому что для разнесения их в стороны нужно затратить энергию на преодоление гравитационной силы, стремящейся их соединить. Следовательно, энергия гравитационного нуля в каком-то смысле отрицательна...

Так ученый постепенно подводит нас к мысли, что, поскольку дважды ноль тоже ноль, количество положительной энергии вещества во Вселенной может удвоиться одновременно с удвоением отрицательной гравитационной энергии; закон сохранения энергии при этом не нарушится. Такого не бывает при нормальном расширении Вселенной, в которой плотность энергии вещества уменьшается по мере увеличения размеров Вселенной. Но именно так происходит при раздувании, потому что в этом случае Вселенная увеличивается, а плотность энергии переохлажденного состояния остается постоянной: когда размеры Вселенной удвоятся, положительная энергия вещества и отрицательная гравитационная энергия тоже удвоятся, в результате чего полная энергия остается равной нулю. В фазе раздувания размеры Вселенной очень сильно возрастают. Следовательно, общее количество энергии, за счет которой могут образовываться частицы, тоже сильно увеличивается. Гут по этому поводу заметил: «Говорят, что не бывает скатерти-самобранки. А не вечная ли самобранка сама Вселенная?»

Глава 15. Квантовая магия

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

Когда-то великий Эйнштейн в письме своему однокурснику по Цюрихскому политехникуму Мишелю Бессо так охарактеризовал рождающуюся квантовую теорию: «Настоящее колдовское исчисление». Заканчивалась первая четверть прошлого века, завершалась научная революция, породившая новую физику, но один из ее создателей даже не предполагал, что это выражение станет крылатым.

Несмотря на бушующую бурю мнений вокруг основополагающих принципов квантовой механики, большинство прикладных специалистов чувствует себя совершенно уверенно за непробиваемой стеной математических формул, подобных тому же уравнению Шредингера, считая, что особых причин для беспокойства у них

просто нет. Квантовая физика хотя иногда и воспринимается как «колдовские вычисления», отлично работает в самых различных подразделах инженерных наук. Например, она позволяет с очень высокой точностью предсказывать и рассчитывать самые разнообразные эффекты в электронной оптике, атомной и ядерной физике, микроэлектронике. Квантовая физика не только полностью определила облик прошедшего столетия и нашего времени, но и подняла множество философских вопросов. Одним из центральных среди них является отношение между наблюдателем-экспериментатором и материальным объектом исследований.

А можно ли распространить этот фундаментальный принцип на весь окружающий нас макромир? Так, страницы многих газет и журналов, а также электронные СМИ, не говоря уже об Интернете, 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 околонучных журналистов полное искажение смысла этой несостоявшейся сенсации, тут удивителен сам факт возникновения «под квантовым соусом» давнего схоластического вопроса о том, что же 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 с 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, очень много сделавший для введения в науку квантовой теории, хотя и полностью признавал работоспособность математического аппарата квантовой механики, был глубоко убежден в ее неполноте и

несовершенстве. Надо заметить, что 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, что 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: надо в анализе квантовой вероятности просто перейти на более глубокий – субквантовый уровень физической реальности. Однако за простотой такого предположения скрывалась громадная проблема поиска этого самого сверхглубокого уровня организации материи. После многих десятилетий безрезультатных поисков все чаще стали появляться мнения, что субквантовый уровень физической реальности просто может быть принципиально недоступным точно так же, как принципиально ненаблюдаемы составные части элементарных частиц – кварки. Такие мысли высказывали Гейзенберг, Фейнман и Гелл-Ман. Противоположного мнения придерживались Бом, де Бройль, Девитт и другие физики, которых не устраивал тезис копенгагенцев о том, что каждый квантовый объект представляет по своей сути черный ящик, исследовать внутреннюю структуру которого принципиально невозможно.

Диалектика спирали исторического материализма вернула на круги своя и знаменитую полемику между Эйнштейном и Бором, касающуюся смысла вероятностной интерпретации квантовой теории. Бурные научные споры на эту тему когда-то разделили физиков и философов на два идеологически непримиримых лагеря. Сейчас дискуссию продолжают Роджер Пенроуз и Стивен Хокинг. Конечно, за прошедшее столетие обсуждаемые вопросы стали сложнее и изоощреннее, но их глубинная суть практически не изменилась. Все так же одни физики считают, что вероятностный характер квантовомеханических представлений является фундаментальной особенностью окружающей природы и 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 целому ряду логических противоречий вроде «квантового кота Шредингера», так что далеко не все закономерности квантовой теории выявлены, особенно на уровне ее связи с макромиром.

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 прошедшего столетия все чаще начинают попадать весьма необычные и даже фантастические предметы, такие как «ветвящиеся вселенные» и «сознание наблюдателя». Несомненно, в научных спорах большую роль играет личный фактор восприятия той или иной научной парадигмы. Вот и после сенсационного вывода об ускоренном расширении Вселенной (ранее считалось 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 уже столетие не умолкают всяческие ученые и не очень критики, смакуя этот «интеллектуальный промах» создателя релятивистского мира. Теперь многие из их продолжателей стали гораздо осторожнее относиться и ко второй главной «ошибке» великого физика в вопросе о «недоопределенности квантовой теории».

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

Во второй половине прошлого 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 и получила дальнейшее развитие. Сейчас уже целые научные школы развивают подобные концепции, считая, что в будущем подобные построения могут занять видное место во всеобщей парадигме физической реальности.

Особенно часто концепция Мультивселенной рассматривается в космологическом аспекте как неотъемлемая часть окружающей реальности. 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? Мне кажется, что и сам Эверетт не имел ясного представления о столь глубокой абстракции, конечно, 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 калейдоскопической пестроты 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 некотором смысле многомировая интерпретация кажется проще копенгагенской, но за эту простоту приходится платить,

постулируя постоянное расслоение квантового Универсума на множество классических миров. Здесь следует вспомнить замечание квантового теоретика Дэвида Дойча:

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 все ленных, 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.

Если обратиться к истории становления и развития идей 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 начала несколько меняться 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 множество журналистов, литераторов и философов, правильнее было бы употреблять словосочетание «многопроекционная интерпретация».

Таким образом, в квантовом Универсуме Эверетта будут совершенно реальны все возможные варианты измерений, скажем, того же спина

электрона, но вот реализовываться они будут в совершенно разных квантовых проекциях нашей Вселенной. Причем в многомировой интерпретации (будем употреблять этот 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?

Тем не менее самым узким местом многомировой интерпретации является отсутствие реальных физических механизмов воплощения того или иного мира, составляющего нашу реальность. Несмотря на свою 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 даже опровергнуть экспериментальным путем.

Чтобы понять буквально гипнотизирующую привлекательность квантового многомирья, надо вспомнить, что воздействие любого измерительного прибора мгновенно «схлопывает» волновой вектор, вызывая так называемый коллапс волновой функции. Однако подобные «катастрофические» решения неправомерны для математической структуры уравнения Шредингера, проще говоря, для тех, кто еще хоть что-то помнит из школьной алгебры, – это неправильные решения, которые надо отбрасывать в конечном итоге.

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

Этот вопрос до сих пор не имеет однозначного ответа, так, 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 Шредингера, которое справедливо 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.

Глава 16. ПКГ и М-теория

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 пазла остается зияющая дыра, происходящее в которой остается для нас неведомым. Фактически мы не можем сказать, что нашли Теорию Всего, пока не заполним эту дыру.

С. Хокинг.

Мир в ореховой скорлупке

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 ($\sim 10^{-35}$ м), 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 тут 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. Естественно предположить, что если релятивистская гравитация связана с искривлением пространства – времени, то и квантовая теория гравитации будет иметь предметом исследования квантовое пространство – время.

В конце прошлого столетия, независимо 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 ПКГ 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 нашего 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, оказывается полностью противоположной по смыслу квантовому потенциалу Бома. 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 ($\sim 10^{-35}$ м).

Получается, что если выбрать любой произвольный объем окружающего нас пространства, то, обладая неким фантастическим квантовым измерителем, мы могли бы всегда сказать, сколько в нем содержится фундаментальных «атомов» пространства – времени.

В квантовых теориях у объектов нет определенных положений и скоростей, все описывается вероятностями и волнами, занимающими определенные области пространства. В квантовом мире 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 теория гравитации является принципиально классической и неквантовой. 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 является идеально гладким независимо от того, насколько детально его исследуют. Оно представляет собой абсолютно ровную арену, на которой 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.

Много надежд физики-теоретики связывают с оригинальной теорией струн, появившейся в семидесятых годах прошлого столетия. Современная версия такой «струнной физики» носит название суперсимметричной теории струн (теории суперструн, или суперстрингов). С ее помощью вроде бы удалось если и не устранить, то хотя бы обойти множество препятствий на пути к построению логически непротиворечивой теории квантовой гравитации. Однако, несмотря на солидные усилия, прилагаемые со стороны международного коллектива теоретиков, теория струн не вышла из стадии разработки. Ученым пока еще неизвестны ни окончательный вариант ее математического аппарата, ни фундаментальные системы уравнений, определяющие ее форму.

Изначально в ней видели очень весомого кандидата на долгожданную общую теорию всех частиц и сил. Однако после появления в начале семидесятых годов прошлого века концепции кварков, быстро выросшей в целый раздел физики элементарных частиц, модель стрингов явно стала проигрывать объединяющей модели кварков. Кварковая микрофизика носит название квантовая

хромодинамика (КХД), поскольку связана с динамикой цветковых зарядов кварков. Как эффективный способ расчета сильных взаимодействий, кварковая модель прекрасно согласовывается с экспериментальными данными, не выходя за границы квантовой теории поля, как универсальной основы для объяснений фундамента микромира. Струнная теория на фоне КХД выглядела не очень солидно, поскольку не обладала особой внутренней стройностью и какими-либо опытными подтверждениями.

Ко всему прочему струнная теория с самого начала столкнулась и с трудными требованиями для размерности пространства, поскольку все ее модельные варианты так или иначе включали дополнительные размерности пространственно-временного континуума. Тем более, 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. Ведь 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, ведь из соответствующих уравнений теории гравитации Эйнштейна следует существование в природе волн тяготения, превращающихся 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 семидесятых годах прошлого века появились научные работы, в которых таинственные безмассовые частицы, входящие в различные вариации струнных построений, сопоставлялись именно с гравитонами! Сразу же последовали выводы о том, что струнная теория может содержать долгожданный математический каркас для развития квантовой теории тяготения, объединяя все известные фундаментальные взаимодействия в Теорию Всего.

При этом было важно понять, почему же мы никак не ощущаем всех этих дополнительных измерений окружающего пространства. Отвечая на данный вопрос, струнные теоретики предлагают модель, в которой все дополнительные измерения свернуты в ультрамикроскопические клубки, или, по-научному, «компактифицированы». Именно поэтому все наши измерительные приборы, включая даже сверхмощные ускорители элементарных частиц, не «чувствуют» их присутствия. Впрочем, в последнее время появились идеи о том, что в некоторых экспериментах на самом мощном в мире ускорителе, Большом адронном коллайдере, может проявиться влияние скрытых измерений.

Что обещает дальнейшее развитие теории струн?

Самым грандиозным успехом здесь была бы долгожданная единая концепция всех частиц и сил – Теория Всего. На пути к этому, конечно же, возникнут новые модели пространства и времени (впрочем, их и сейчас более чем достаточно), способные прояснить многие загадки гравитации и квантовой космологии. Это грандиозная цель, и вполне возможно, что для ее осуществления потребуются еще одна революция в наших представлениях о структуре физической реальности. Уже сейчас «струнные» работы привели ко многим интересным побочным результатам в математике, включая создание новых математических структур, а также инновационных идей и методов 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, ведь считается, что именно их вибрации и генерируют все известные нам элементарные частицы. А не так давно появилась вообще парадоксальная теория, которая предполагает, что 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.

Здесь в очередной раз можно вспомнить рассуждения Брайа на Грина о том, что, когда мы проникаем все глубже, последовательно увеличивая область наблюдения, мы видим, что неровности пространства становятся все более неистовыми. 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 теряют всякий смысл. Даже обычные понятия «до» и «после»... делаются бессмысленными 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, неистовые 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 неприменимы.

Теория струн началась со сверхмалых – планковских – масштабов, 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 поражает воображение. Здесь опять возникает вопрос восприятия столь странного мира в нашем пространственно-временном континууме, и струнные теоретики опять удивляют нас своим ответом – мы не ощущаем многомерья «внешней вселенной», поскольку навечно прикованы к трехмерной

гиперповерхности нашей браны, парящей в пространстве больших измерений.

И вот здесь теория струн подсказывает способ почувствовать или даже увидеть иные пространственные размерности, научившись детектировать гравитационные флуктуации «подпространства». Примечательно, что 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, к примеру, представить себе образование микроколлапсаров в результате столкновения сверхэнергичных микрочастиц.

Теория струн предлагает и оригинальные космологические сценарии эволюции нашего мира. Они предполагают, что Вселенная на современном этапе развития может быть заполнена космическими струнами галактических или даже метагалактических масштабов. В основе лежит 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, за скобками остается очень интересный вопрос о том, что предшествовало появлению суперструн в сверхмикроскопическом пузырьке – зародыше нашей Вселенной. Следующий вопрос состоит в характере непосредственного влияния микро-мезо-макро-мега-суперструн 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 миллиардов лет назад.

Наверное, суперструны на всех этапах своего «растяжения» каким-то образом должны были взаимодействовать и с таинственными темной материей и энергией, хотя бы исходя из простейших соображений, что данные «темные стороны» мироздания составляют

основное содержание Метагалактики. А поскольку исследование этих загадочных субстанций идет полным ходом во многих направлениях, есть некоторые надежды и на экспериментальное подтверждение 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 сильный импульс развитию квантово-гравитационного сценария эволюции Вселенной, по крайней мере на начальном этапе. Именно концепция ПКГ предсказывает довольно впечатляющий результат исчезновения изначальной космологической сингулярности из-за квантовых флуктуационных эффектов. При этом сам 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 основными объектами являются 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.

Вполне возможно, что в отдаленной перспективе такие построения помогут решить задачу о генезисе Вселенной в окрестностях сингулярности Большого взрыва. Между тем анализ некоторых 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 сот, 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.

Кроме новых космологических сценариев, теория ПКГ предлагает также ответы на вопрос: что же задержало 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. Этот процесс перестройки вакуума сопровождается гигантским выделением энергии, в результате чего новообразованная Вселенная начинает расширяться с колоссальной скоростью. Этот процесс можно интерпретировать как своеобразный взрыв вакуума.

Теория ПКГ многое проясняет и в концепции инфляционной Вселенной, по крайней мере на изначальном 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 проявлений в микромире элементарных частиц. Согласно физике элементарных частиц, вакуум непрерывно генерирует неисчислимо количество пар частица-античастица, которые 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 конечном итоге которой из пенящегося квантовыми всплесками вакуума, как Афродита из пены морской, возникла наша Вселенная.

Инфляция прообраза нашего мира была чрезвычайно быстрой, продолжаясь где-то 10^{-34} секунды, причем за это сверхмалое время поперечник новорожденной Вселенной неизмеримо вырос, приобретая мегаскопические размеры. Именно инфляция окончательно сформировала весь тот набор фундаментальных физических констант, вошедших в природные закономерности, управляющие 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, касающиеся виртуальных субатомных частиц очень высоких энергий, на рождение целой Вселенной. Во-вторых, строго говоря, квантовый физический вакуум представляет собой довольно сложную субструктуру, происхождение которой само по себе достаточно загадочно.

За недолгое свое существование суперструнная физическая доктрина уже успела испытать много взлетов и падений. В начале нашего века от нее отделилось новое мощное направление, которое скоро стало доминирующим – теория многомерных мембран (М-теория). 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, мембраны отличаются от струн примерно так же, как макароны от лепешек.

Согласно М-теории, пространство изначально имеет одиннадцать размерностей, и внутри него 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.

Подобным образом можно представить и браны более высоких размерностей, причем колебания стрингов здесь заменяются вибрациями мембран. Таким образом, рассматривая разные версии струнной теории, можно сделать вывод о том, 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 заполнились прогнозами о близости окончательной победы в борьбе с тайнами окружающей нас Вселенной с помощью концепции многомерных квантовых мембран. Однако вместо этого при очередных попытках получить всеобщие закономерности эволюции нашего мира разразился очередной грандиозный кризис суперструнной М-теории.

Суть этого кризиса, полностью не преодоленного и по настоящее время, можно выразить очень кратко так: неопределенность ландшафта струнных бран в новых вариациях М-теории. Чтобы понять эти 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 7 из 11 измерений становятся крайне неустойчивы и спонтанно сворачиваются в сверхмикроскопические самозамкнутые структуры. Макроскопическими остаются только привычные нам 3 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.

Физики пытаются найти способы проверки принципов построения самой теории квантовых стрингов. Для ревизии такой необычной концепции потребовались очень необычные объекты – гравитационные коллапсары, более известные как черные дыры. Застывшие звезды коллапсаров действительно могут оказаться подходящими космическими лабораториями по изучению струнных теорий, поскольку 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 и 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 закона всемирного тяготения Ньютона. Однако отрицательный результат – тоже важный результат, и на основе очень скудных опытных данных суперструнные теоретики постепенно начинают селекцию своих построений, исключая некоторые варианты моделей стринговых бран.

Итак, концепция квантовой гравитации настойчиво предсказывает, что временная шкала, непосредственно примыкающая к некоей 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, описывающих досингулярное

состояние нашего мира. Самая экзотичная из них даже 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 своими 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 некоей Вселенной – черной дыры.

Неудивительно, что подобный сверхпарадоксальный сценарий вызвал много дискуссий среди физиков-теоретиков, так, 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 является случайным событием. Если же считать, что характер поведения материи и самого пространства – времени вблизи сингулярности Большого взрыва был хаотическим, 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.

Ну а как же еще может описывать М-теория рождение нашей Вселенной в мире квантовых бран? Один из популярных среди струнных физиков-теоретиков космологических сценариев носит название экпиротического. В нем предлагается модель досингулярного

мироздания как состоящего из неисчислимого количества квантовых мембран, дрейфующих в многомерном пространстве. При столкновении таких мембран происходит множество прообразов нашего Большого взрыва, рождающих новые миры.

Давайте попытаемся 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 или, если хотите, второй родитель нашей реальности. Когда расстояние между двумя параллельными бранами уменьшится до критического, в точке условного соприкосновения начнется процесс рождения нашей Вселенной, который космологи называют Большим взрывом. Естественно, что Универсум не может содержать лишь две браны, поэтому подобные столкновения могут повторяться циклически.

Экпиротический 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 ряд общих черт, так, многие из них начинаются с практически безграничного, холодного и заполненного сверхразряженным веществом «досингулярного Универсума». Затем у всех происходит труднообъяснимый «транссингулярный» переход через катаклизм инициации Большого взрыва к стадии расширения. Естественно, некоторые сценарии имеют и существенные отличия, например, в предвзрывном сценарии все силовые поля вначале незначительны по величине, и, лишь постепенно возрастая, достигают экстремального максимума в момент Большого взрыва. В экпиротической модели все происходит наоборот и в момент столкновения значения силовых полей минимальны.

Сейчас уже можно определенно сказать, что одной из главных проблем космологической теории квантовых суперструн является то, что она не может предсказать, какая именно Вселенная реализуется в реальности после тех же множественных столкновений мембран. Некоторые физики-теоретики справедливо указывают, 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. Вообще говоря, это означает, что теория имеет очень высокий уровень научной спекулятивности и ее крайне трудно аргументированно опровергнуть, ведь для объяснения любого экспериментального результата можно подобрать подходящую модификацию суперструнной парадигмы.

И все же струнные теоретики не оставляют надежды, 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 надеются разрубить данный гордиев узел суперструнной проблематики новыми опытными данными, подобными тем, что все время поступают с Большого адронного коллайдера.

Глава 17. Водовороты квантового времени

А что могло бы означать планковское значение времени (10⁻⁴⁵ секунд)? Мы уже говорили о нем как об одном из кандидатов на роль «атома времени». В духе космологических соображений ее нужно, вероятно, понимать как квантовую неопределенность в момент начала расширения. Этот мельчайший отрезок времени должен тогда рассматриваться как нерасчленимый – внутри него нельзя выделить какие-то отдельные моменты, которым соответствовали бы те или иные «промежуточные» состояния Вселенной. Пусть это и не универсальный «атом времени», но это квантовая мера точности, с которой мы можем судить о времени в начальной Вселенной.

А. Д. Чернин.

Физика времени

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» вселенными, и так далее до бесконечности в полном соответствии с названием данного космологического сценария. Получается, что 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.

В качестве еще одного примера можно привести замечательные теоретические построения академика Андрея Дмитриевича Сахарова, касающиеся определения физических величин для значения времени $t < 0$ относительно точки Большого взрыва ($t = 0$). Академик 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 Андрей Дмитриевич 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 (Т-преобразование) происходит зеркальное отражение пространства (Р-преобразование), и все частицы меняются на античастицы (С-преобразование). В результате возникает всеобщий закон ТРС-инвариантности, на основе которого в далеком будущем наши потомки смогут создать ТРС-агрегат – машину времени и пространства.

В заключение стоит заметить, что у концепции хроноквантового времени есть и еще один крайне любопытный аспект, связанный с исследованиями соотношения неопределенности Гейзенберга, которые проводил в тридцатые годы прошлого века выдающийся советский теоретик В. А. Фок. Владимир Александрович настолько детально рассмотрел соотношение неопределенности для энергии и времени: $\Delta E \Delta t \sim \hbar$, что его даже иногда называют «соотношением Фока». Один из главных выводов академика Фока, впоследствии не раз возвращавшегося к своим рассуждениям, состоял в том, что квантуемость энергии силовых полей самым естественным образом вела к квантуемости некоего гипотетического поля времени – хронополя.

В своей хрестоматийной работе «Об интерпретации квантовой механики» советский физик прямо 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 и определяет вероятность реализации того или иного квантового процесса. А вот здесь опять-таки было бы уместно вспомнить о полемике Бор – Эйнштейн, где новая концепция хроноквантового времени явно могла бы послужить еще одним аргументом со стороны творца теории относительности. Это прекрасно понимает и современный искатель «скрытого физического смысла» в природе квантовых явлений Роджер Пенроуз, прямо указывающий в своих статьях, что моделирование фундаментальных свойств пространства в виде «сверхфундаментальных» частиц, таких как планкионы, фридмоны или максимоны, прямо приводит нас к концепции времени с хроноквантами-хрононами.

Ну, а существуют ли «атомы времени» на самом деле? Пока мы еще очень далеки от исследования подобных глубин пространства – времени, но квантовая структура темпоральных процессов вполне может проявлять себя по крайней мере в трех случаях: в рождении нашего мира, далеких явлениях вблизи черных дыр квазаров и в тонких реакциях рассеивания-столкновения микрочастиц на гигантских ускорителях. Так, может быть, уже в самом ближайшем времени что-то на этот счет может подсказать анализ экспериментов на БАКе...

Академик Сахаров, развивая теорию пульсирующей Вселенной, много внимания уделял теории изначального момента рождения мироздания. И однажды ему в голову пришла невероятная мысль: а если процесс появления новых миров в пучинах Большого взрыва никогда не прерывается? Тогда появляется образ динамичного, можно даже сказать, «живого» Метамира, стремительно растущего, как луковица миров, где в каждое неизмеримо малое мгновение появляется листок новорожденной Вселенной.

Выдающийся мыслитель почему-то не стал достраивать столь необычный космологический сценарий и больше к нему не возвращался. Между тем в последнее время квантовая механика добавила много существенных деталей в возникающую на наших глазах физику времени. Эксперименты показали, что в мире существует удивительное явление квантовой нелокальности, когда частицы связаны друг с другом не силами, а особым квантовым образом. Когда-то подобное очень не нравилось Эйнштейну, который критически называл это «квантовой телепатией». Сейчас мало кто сомневается в эффекте «квантовой запутанности», приводящей к квантовой телепортации, тем более что на его основе собираются строить квантовые системы связи с совершенно фантастическими характеристиками.

Есть догадки, что существует и «хроноквантовая спутанность». Тогда миры, возникающие в сингулярности Большого взрыва, должны быть не только прошиты временными нитями, но и полностью повторять друг друга.

Теперь представьте себе бесконечную вереницу развивающихся одинаковых миров, нанизанных на стрелу времени. Что это будет напоминать стороннему наблюдателю?

Ну конечно же! Перед нами предстает хорошо знакомый образ «линейного времени», возникающий в детстве и сопровождающий всю оставшуюся жизнь. Классическая физика учит, что это мнимый образ, помогающий решать школьные задачи. А вот современная квантовая теория предлагает считать подобные модели вероятным образом множественного мироздания. И тогда возникает удивительный парадокс: оказывается, что лишь невообразимый хроноквант отделяет наш мир от предшествующей и соответственно последующей Вселенной, летящей вместе с нами в будущее. А вместе с этими мирами несутся по стреле времени и неисчислимы множества наших двойников... Может быть, подобная феерическая картина многомирья когда-нибудь подскажет сюжет для какого-нибудь писателя-фантаста, пишущего на тему «иных времен».

Это вполне соответствует общим положениям релятивистской квантовой космологии и концептуально близко как многомировой интерпретации квантовой механики эвереттовского толка, так и теории дочерних вселенных по инфляционным сценариям. Введение такой хронодинамической структуры атемпорального Мультимира достаточно тривиально, поскольку каждая из вселенных этого атемпорального ряда, с точки зрения внутреннего наблюдателя, представляет собой изолированный мир, а для внешнего наблюдателя-демиурга является последовательностью хроноквантовых кадров развития Вселенной, проецируемых в некотором иррациональном информационном пространстве абсолютных событий. Отдельный и достаточно актуальный вопрос составляет интерференционная дифракция границ ближайших соседей в строгой последовательности хроноквантовых миров. Основным здесь является гипотеза о наличии прямых связей между принципами хроноквантовой локализации микрообъектов и космологическими фазовыми переходами по схеме генерации последовательности континуальных образований в виде временных оболочек с мировыми линиями в пространстве реальных физических событий. Наподобие параллельных миров Эверетта – Уилера такие последовательные Универсумы распространяются по стреле времени от момента возникновения космологической сингулярности Большого взрыва.

Можно даже попытаться оценить число вселенных, реализованных после Большого взрыва до наших дней. Получается, что их количество

составляет $N = T / t (pl) \sim 10^{60}$, где T – время существования нашего мира, $t (pl)$ – планковское время.

Строгая последовательность подобных миров, являющихся абсолютными дубликатами нашей физической реальности, и будет в целом определять привычный образ физического времени. Подчеркнем, что, с точки зрения стороннего сверхъестественного наблюдателя-демиурга, совокупность миров составляет единую материальную историческую последовательность, по оси времени которой они, расширяясь, движутся. В системе отсчета отдельной Вселенной ординарный наблюдатель-гуманоид отметит прошедшие и наступающие события как абсолютное отражение собственной истории данной реальности. Для наглядности можно ввести и третью сущность – наблюдателей-демонов, способных видеть как бы изнутри всю череду миров квантового Мультиверса.

Вероятность квантовых переходов, ведущих к увеличению локальной плотности потенциальной энергии, может быть очень малой, но область, где они произошли, начинает расширяться значительно быстрее остальных, и квантовые флуктуации в ней приводят к рождению новых инфляционных областей. Это ведет к эффекту самовоспроизводства Вселенной, характерной для стандартных сценариев.

В инфляционной космологии при планковской плотности происходит локальное изменение количества компактифицированных измерений, и Вселенная оказывается разделенной на экспоненциально большие области различной размерности. Теория включает также возможность разделения Вселенной на несвязанные части из-за эффектов квантовой гравитации, при этом дочерние вселенные могут акцептировать комбинации частиц и полей, разрешенные законами сохранения.

В определенных сценариях за основу можно принять и теорию генерации дочерних вселенных, как процесс самовоспроизводства вселенных в квантовой космологии. К сожалению, все эти подходы основаны на различных начальных предположениях, и результаты их могут существенно различаться, хотя вполне возможно, что это является лишь временными трудностями.

Вот что говорит о современной картине развития Метагалактики видный современный космолог Александр Виленкин из Института

космологии Университета Тафтса (США, штат Массачусетс):

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^{1050}), но важно то, что мы имеем дело с конечным множеством.

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...

Таким образом, применение принципа хроноквантовой реинтерпретации постулатов квантовой механики приводит к новым модификациям сценариев развития космологической сингулярности Большого взрыва. При этом исходные посылки не противоречат современным физическим представлениям о пространственно-временных соотношениях, а только расширяют квантово-космологическую парадигму. Особый интерес здесь составляют модельные исследования физического механизма космологических

фазовых переходов, деструктурирующих метрику протопространства в псевдоевклидову метрику нашего мира.

Вполне возможно, что подобные космологические явления следует считать процессами третьего рода, т. к. при них происходит скачкообразная перестройка досингулярной метрики с возможным изменением симметрии пространства – времени. Это не только обуславливает качественный скачок в состоянии Мультиверса, но и определяет взаимно однозначное соответствие между симметрией исходной метрической фазы и вновь образующимися модификациями. Можно с известной степенью вероятности предположить, что такие переходы будут сопровождаться мультипликацией исходных фундаментально-элементарных метрических ячеек пространства – времени, определяемой некоторым первичным параметром реструктуризации. Последующее протекание скорее всего деструктурирует метрику и изменяет состояние Вселенной непрерывным образом на основе трансформационных свойств критического параметра порядка.

Подобное расширение концепции возникновения квантового Мультиверса позволяет вернуться к вопросу о волновой функции Вселенной. Конструирование решений уравнения Шредингера для волновой функции всей Вселенной показывает, что эта волновая функция не зависит от времени, так как полный гамильтониан Вселенной, включающий гамильтониан гравитационного поля, тождественно равен нулю. Описание хроноквантовых Вселенных с помощью их волновых функций возможно сопоставить генерации подобных фридмонам квазичастиц. При этом вполне допустимо, что Мультиверс как целое неизменен во внешнем хронополе.

Концепцию эволюции Вселенной в образе мегагигантской квазичастицы – фридмона – можно попытаться понять, представив внешнее пространство иной размерности со стрелой времени и демоном-наблюдателем с часами, не принадлежащими Вселенной. Таким образом, весь мир формально можно разделить на две главные части, включающие демона-наблюдателя с его измерительными приборами и остальную Мультивселенную. Тогда волновые функции Мультивселенной будут определяться показаниями хронометра другого наблюдателя – демиурга, т. е. собственным временем внешнего наблюдателя, отсчитываемым на хроноквантовой стреле. Эта

зависимость от времени в некотором смысле объективна: результаты, полученные различными внутренними обитателями Мультимиров, живущими в одном и том же хроноквантовом состоянии Вселенной, будут абсолютно совпадать.

Дискретная субстанция ячеек метрики континуума может рассматриваться как состоящая из частиц Планка – планкионов. Очевидно, динамика континуальной метрики должна определяться параметрами элементарных сущностей планкионов.

Таким образом, основные физические характеристики материи только проявляются в базовом подпространстве, а формируются в других подпространствах, предшествующих на стреле времени. Вследствие экспансии инфлатона можно ввести для замкнутой космологической модели понятие экстремального радиуса Мультиуниверсума, по достижении которого планкионные ячейки континуальной метрики начнут сжиматься вплоть до состояния с минимально возможной топологией внутреннего подпространства. Вполне естественно, могут существовать сценарии метастабильного равновесия, по которым радиус Вселенной стабилизируется вблизи некоторого квазиравновесного значения, а также неограниченной экспансии. Последние гипотетические построения наиболее проблематичны с точки зрения современной физики, т. к. допускают неограниченное увеличение инфлатона с катастрофическим падением плотности псевдоевклидова пространства.

Тем не менее с философской точки зрения одной из наиболее интересных и последовательных теорий, описывающих окружающую действительность, является многомировая интерпретация Эверетта – Уилера. Если попытаться дополнить эту интерпретацию гипотезой об атемпоральном характере последовательности эвереттовских миров, то мы получим оригинальный реляционно-субстанциональный образ явления, воспринимаемого нами как время. Этот небольшой, но принципиальный шаг приводит к достаточно интересной теоретической конструкции и может представлять собой новый аспект развития как для квантовой теории, так и для релятивистской космологии.

Естественно считать, что всякая новая теория, в том числе и хроноквантовая механика, представляет в своей основе лишь относительную истину, но это, конечно, не дает оснований для

априорного непризнания внесенных ею новых идей и понятий. Хронофизические понятия в той или иной форме, несомненно, будут претерпевать дальнейшее развитие, но скорее всего их эволюция пойдет в сторону дальнейшего отхода от классических представлений квантовой механики.

Как же хроноквантовая космология описывает несущий нас в бесконечность поток времени?

Прежде всего, надо привыкнуть к мысли, что, если мы хотим построить полноценную модель квантового времени, объясняющую многие космологические и физические парадоксы, нам придется решительно отказаться от целого ряда «бытовых» штампов. Самое трудное – вникнуть в образ непрерывной динамики потока времени. В начале начал Большого взрыва мы «видим» непрерывные рождения вселенных, т. е. с высочайшей скоростью, через каждый хроноквантовый промежуток (напомним, что это часть секунды, выраженная дробью с 44 нулями в знаменателе), космологическая вервь «Сингулярность Мультиверсум» отправляет в путь по реке времени новый мир. Собственно говоря, эта практически бесконечная вереница вселенных, «сцепленных» квантовыми закономерностями, и составляет образ квантового времени.

Структура Мультиверса предстанет перед всепроникающим взором демиурга, парящего среди сполохов квантовых флуктуаций первичного скалярного поля инфлатона, наподобие «луковицы миров», где каждая из множественных вселенных представляет собой замкнутую оболочку изолированного мира. Ну, а в центре луковицы Мультимира демиург с любопытством зафиксирует призрачные сполохи главной вселенской тайны – космологической сингулярности 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 указывалось, 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, ведь 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 попрестальнее взглядеться в феерический процесс рождения новых миров, с немислимой хроноквантовой частотой возникающих в катаклизме квантовых флуктуаций колеблющегося марева инфлатона.

Но уже через несколько миллиардолетий, устав от непрерывного мелькания возникающих, растущих и лопающихся пузырей вакуумной пены дочерних и внучатых вселенных, наш руководящий демон впадает в сладостную дремоту. Во сне ему, конечно же, видится 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 своим младшим собратьям – демонам, рассаженным по отдельным мирам, а самому отправиться несколько освежиться в одну из наиболее 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 стреле-монорельсу времени в неизвестность. Внутри своего мира 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 шредингеровского кота, клетка с которым вместе с портативной системой кошачьего полуумертвителя входит в обязательный набор демонического научного инструментария. Пошикав на вредное создание великого теоретика и подумав в очередной раз о том, чем же так досадило Шредингеру в свое время кошачье племя, демон тычет кочергой в кошачью клетку, отчего мяуканье переходит в хриплый пульсирующий вой.

Не выдержав оглушительного кошачьего концерта, младший бес садится писать длинную жалобу демиургу, сетуя на невозможные условия работы в присутствии кошмарного порождения одного из

основателей квантовой механики, досаждающего своим шумным оживлением через каждый хроноквант потока времени. Скучающий в «небытии» демиург, только что вернувшийся с третьей планеты желтого карлика на окраине Млечного Пути, незамедлительно присылает ответ по сверхпространственной почте, от которого шерсть демона становится торчком, а хвост закручивается в спираль Мебиуса. Забыв о вредном коте, бес стремительно летит в тамбур своего вагончика-мироздания и распаивает дверь вселенского тамбура...

Тут его изумленному взору предстанет весь состав поезда-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 осознавать, что не только мерцающая жизнь квантового кота, но и его личная судьба в реальности данного мира решается каждый хроноквант времени, локализуясь в полном соответствии с квантовой теорией в новую историческую последовательность хроноквантовых вселенных.

Ну а теперь мы немного отвлечемся от «квантовой демонологии» и заглянем в одну из работ, описывающих 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. Получается, что всеобщий принцип атомизма должен распространяться и на длительность событий в нашей Вселенной. Так что в этом смысле мы вполне можем говорить о возможности существования неких ячеек времени, частиц времени и даже поля времени – хронополя.

Таким образом, мы видим, что новые концепции квантового времени способны объединить множественные миры мироздания в единую структуру квантового Мультиверса. Например, Стивен Хокинг вводит понятие «мнимого времени», связывающего воедино все миры Мультиверса. В подобных теоретических схемах миры многомирья напоминают костяшки на бухгалтерских счетах, нанизанные на единую стрелу общего времени Мультиверса. Каждый хроноквант 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 спидометр автомобиля показывает время поездки по пройденному расстоянию при строго определенной скорости. Так связь «внешнего» и «внутреннего» времен образует единую структуру Мультиверса.

Строгая последовательность подобных миров, являющихся абсолютными дубликатами нашей физической реальности, и будет в целом определять привычный образ физического времени. Определенные логические предпосылки для дальнейшего развития данных представлений, как уже упоминалось, можно найти в интерпретациях теории Эверетта – Уилера – ДеВитта и в 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.

Что же дает нового такая парадоксальная картина окружающей реальности и почему она начиная с середины прошлого века привлекает самое пристальное внимание физиков?

Во-первых, она дает возможность построить хотя бы приблизительную непротиворечивую картину возникновения нашей Вселенной с самой начальной «нулевой» точки, и даже более того, в определенном смысле заглянуть за занавес сингулярности Большого взрыва.

Во-вторых, наконец-то возникает непротиворечивая физическая концепция времени, включающая объяснение всех его спорных «узлов» и «петель»...

Заключение

Как ни странно, по мере того как Вселенная все более удаляется от мира наших ощущений, становится очевидной заключенная в ней глубокая гармония. В ней обнаруживаются невиданные порядок и единство, и каждое последующее открытие демонстрирует новую гармонию, новый порядок, новое единство.

Б. Паркер.

Мечта Эйнштейна: в поисках единой теории строения Вселенной

Сегодня квантовая наука пытается не только понять саму суть строения материи, но и смело связать самые верхние метagalacticкие этажи мироздания с его глубинными субкварковыми подвалами, задавая природе вопросы, о которых ученые во времена Галилея и не могли помыслить. К примеру, что такое материальная масса и почему окружающие нас вещи ее имеют? В шестидесятых годах прошлого столетия данный вопрос в очередной раз поднял шотландский физик-теоретик, член Королевского общества Эдинбурга и Лондонского королевского общества Питер В. Хиггс. Его идея заключалась в том, чтобы детально рассмотреть механизм спонтанного нарушения электрослабой симметрии, объясняющей происхождение массы элементарных частиц, в частности векторных бозонов. Так был предложен новый механизм, предсказывающий существование новой частицы (в настоящее время и механизм, и частица-бозон носят имя Хиггса). Хотя бозон Хиггса только собираются открыть в экспериментах на БАК, построения Хиггса считаются весьма перспективными и хорошо согласующимися с принципами стандартной модели. Бозоны Хиггса иногда уподобляют некоей волшебной палочке, своим прикосновением превращающей кварки и лептоны в «массосодержащие» частицы.

Мы часто и подолгу задумываемся над вопросом: как устроен физический мир в своей глубинной основе? Куда может привести нас бесконечность движения в недрах материи? Молекулы, атомы, ядра атомов, протоны, электроны и нейтроны? Что же дальше? А если двинуться в другую сторону? Уходят в бесконечность этажи мироздания. На одном из них планеты и планетные системы со всеми светилами, на другом – галактики и галактические скопления, на третьем – Вселенная. Где границы этого огромного мира, существуют ли они?

Мы живем в четырехмерном мире Минковского. И очень может быть, что этот мир, затерянный где-то в глубинах необъятного Мультиверсума, представляет собой лишь ничтожный кирпичик мира, а наш мир, в свою очередь, состоит из невообразимо большого числа миров, которые мы считаем частицами. И так до бесконечности как вширь, так и вглубь.

Итак, хотя представление о множественности миров веками витает в умах, научное обоснование оно получило лишь в последние десятилетия при исследовании свойств замкнутой Вселенной, или так называемого замкнутого мира Фридмана, возможность существования которого вытекала из гравитационных уравнений общей теории относительности.

Гипотетические пока еще фридмоны уводят человеческую мысль в такую даль, что захватывает дух. Мы, земляне, безуспешно вот уже которое десятилетие ищем собратьев по разуму. Но если Вселенная способна уместиться в элементарной частице, то мыслящие организмы мы буквально держим в руках. Эти бесчисленные миры окружают нас в потоках воздуха и воды, в каждой ничтожной пылинке заключено несчетное множество миров, бесконечно большое число планет, населенных, возможно, разумными существами. И быть может, каждое рождение элементарной частицы на коллайдере соответствует генерации бесчисленного множества миров, а каждый акт аннигиляции – их гибели?

Очень может быть, что наши размышления о бесконечности материального мира скорее всего слишком прямолинейны. Почему бесконечную череду размеров мы представляем себе что-то вроде прямой, уходящей, с одной стороны, в область исчезающих малых размеров (микромир), с другой – в область неограниченно больших

(макромир)? Кто знает, не является ли бесконечность более похожей на круг, где поразительно малые величины как бы переходят, замыкаются на бескрайне большие?

Теперь давайте взглянем на наш мир в свете теории множественных вселенных. Если в каком-то месте началось инфляционное расширение, оно растягивает квантовые флуктуации, и в конечном счете они как бы замерзают, накладываясь на существующее повсюду скалярное поле. Кое-где они приводят к росту этого поля, в других местах – уменьшают. Где-то несколько положительных флуктуаций могут наложиться друг на друга и повысить значение скалярного поля настолько, что начнется новый всплеск инфляции. Из теории следует, что если один раз началось инфляционное расширение, оно будет само себя воспроизводить все в новых и новых местах, и Вселенная приобретет вид не раздувающегося шара, а дерева из раздувающихся пузырей. Каждый из пузырей можно рассматривать как отдельный Большой взрыв.

В общефилософском смысле такая картина выглядит более естественной, чем уникальный Большой взрыв. Существует бесконечное множество различных вселенных, каждая из которых развивается по своим законам, и весь процесс бесконечен в пространстве и во времени. В чем-то шары отдельных больших взрывов наводят на мысль о том, что и человек также рождается среди подобных себе, развивается и уходит, а человечество может жить гораздо больше, чем жизнь одного его участника.

Главное, что необходимо усвоить, – новая теория полностью меняет наши представления о космосе в целом. Раньше мы считали, что Вселенная расширяется, оставаясь в то же время чем-то единственным и уникальным. Современная теория говорит, что космос непрерывно растет, вновь и вновь рождается, воспроизводя себя в новых и новых формах с разными физическими законами и принципами. И чтобы понять свойства нашего участка Вселенной, мы, кроме анализа обширных просторов Метагалактики, должны не менее пристально исследовать мир субэлементарных частиц в поиске аналогий между мега- и микромиром!

Рассуждая о структуре Галактики, астрономы уже не имеют в виду только ее звездное население. Разумеется, есть в Галактике и незвездное вещество, межзвездные газовые облака, планеты,

космические лучи, фотоны, магнитные поля. Но их суммарная масса не превосходит 5 % от массы звезд. Главная проблема, выходящая на первый план, – это проблема скрытой массы. Речь идет о том, что притяжение многих галактик оказывается гораздо сильнее, чем если бы просто суммировалось притяжение всех входящих в них звезд. Очевидно, что помимо звезд в галактиках присутствует какое-то невидимое вещество, которого намного больше. Что это за вещество, как оно распределено в разных галактиках и во всех ли галактиках оно есть – этого пока никто не знает.

Следовательно, 90 % массы этой гигантской системы остается для нас невидимым. Это очень любопытно само по себе – из чего же почти целиком состоит галактика? Если таковы же свойства всех подобных систем, то придется сделать весьма важный вывод: средняя плотность Вселенной больше критической, т. е. в ней достаточно вещества (неизвестного пока вида), чтобы гравитация остановила в будущем расширение Вселенной и сменила его на сжатие.

Что такое галактика для всей Вселенной? Песчинка. Уж если измерять среднюю плотность мира, то зачерпывая сразу большими кусками, например целыми скоплениями галактик. А измерить массу скопления в принципе несложно: чем быстрее движутся в нем галактики, тем больше масса скопления. Судьба Вселенной зависит от того, достаточно ли велика масса скоплений галактик, чтобы их взаимное притяжение со временем затормозило расширение Вселенной и повернуло бы этот процесс вспять.

А как обстоит дело со средней плотностью Вселенной? Сейчас, вычисленная по результатам работ обширного интернационального коллектива ученых, она колеблется вблизи критического значения. Значит, в будущем расширение Вселенной не прекратится? Независимо это подтверждается другим результатом данной работы: оказалось, что богатые газом спиральные галактики предпочитают располагаться вдали от центров скоплений и при этом движутся интенсивнее, чем населяющие внутреннюю часть скоплений эллиптические галактики. Создается впечатление, что многие спиральные системы еще ни разу не пересекли ядро скопления и, следовательно, что сами скопления динамически молоды и их формирование еще не завершилось. Это согласуется с тем, что масса

скоплений и средняя плотность Вселенной невелики: в такой Вселенной все динамические процессы протекают медленно.

Итак, какой же из двух представленных работ верить? Какова истинная плотность мира, а значит, и его судьба? Очевидно, нужны новые эксперименты. Как известно, чтобы узнать будущее, лучше всего заглянуть в прошлое. Уже много десятилетий задача о будущем Вселенной кажется достаточно близкой к практическому решению. Все упирается в выбор всего из двух возможностей, как соотносится плотность Вселенной с критическим значением – больше или меньше, плюс или минус, черное или белое...

Когда мы думаем о Вселенной, она представляется нам чем-то безграничным, как огромное помещение или зал. Однако последние исследования топологии космоса показывают, что он скорее напоминает баранку или велосипедную шину. Силы гравитации могут закручивать его таким необычным образом. Ученые пришли к этому необычному выводу, наблюдая за самыми удаленными от Земли объектами – квазарами. Они сравнили группы объектов в противоположных направлениях и с удивлением обнаружили будто бы один и тот же объект. Как же это может быть? Космологи предлагают такое объяснение: мы сидим внутри баранки и принимаем световые лучи, распространяющиеся не по прямой. От одного и того же далекого квазара лучи могут прийти на Землю и с одной, и с другой стороны. После долгого и тщательного перебора всех известных квазаров астрофизики нашли несколько групп таких взаимно подобных объектов. Этого, конечно, мало для законченной теории и может оказаться просто влиянием случайных факторов. Но вот математики говорят, что в принципе баранка ничему не противоречит и эта гипотеза требует дальнейшей разработки и проверки.

Так из чего же построен наш мир? Какова его глубинная фундаментальная структура?

Тут хочется еще раз обратиться к мыслям одного из самых замечательных популяризаторов новейшей квантовой науки, суперструнного теоретика Брайана Грина, который считает, что все современные открытия, потрясающие основы мироздания, – лишь элементы некой всеобъемлющей схемы. При этом сам человек является лишь частью того целого, что древние эллины называли Космосом, частью, ограниченной в пространстве и времени. Он

ощущает себя, свои мысли и чувства как нечто, не зависимое от остального, – своего рода оптический обман человеческого сознания. Это заблуждение является чем-то вроде тюрьмы, ограничивая наши возможности личными желаниями и привязанностью к нескольким близким нам людям. Наша миссия должна состоять в том, чтобы вырваться из этой тюрьмы, расширив наш круг милосердия, включить в него все живые существа и всю природу во всей ее красоте.

Альберт Эйнштейн не раз обсуждал со своими коллегами, как же близко может приблизиться человеческий разум к основным тайнам Вселенной. Этот гений долгих тридцать лет тщетно искал волшебный Грааль теоретической физики – некую формулу «единой теории поля», которая бы описала все процессы, возможные в природе. И нашу краткую экскурсию по квантовым идеям современного естествознания стоит закончить словами 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.

Глоссарий

Абсолютно черное тело (АЧТ) – физическая абстракция, введенная Густавом Кирхгофом в 1862 году и широко применяемая в термодинамике, как 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 – микрочастицы, включающие барионы с полуцелым спином, состоящие из трех кварков, и мезоны, участвующие в сильных ядерных взаимодействиях.

Альфа-распад – радиационный распад атомных ядер с испусканием альфа-частиц – ядер атомов гелия, состоящих из двух протонов и двух нейтронов.

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 которой выделяется энергия и рождаются другие частицы.

Апейрон – понятие древнегреческой науки для обозначения неопределенной в своей беспредельности материальной среды, находящейся в вечном и непрестанном 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.

Бета-распад – радиоактивное превращение атомных ядер с генерацией электронов, позитронов, нейтрино и антинейтрино.

Бозоны (Бозе-частицы) – микрочастицы с нулевым или целым спином, подчиняющиеся статистике Бозе – Эйнштейна.

Большой взрыв – гипотетический космический катаклизм взрывного характера, из которого, согласно современным представлениям, возникла наблюдаемая Вселенная. В основу сценария Большого взрыва положена космологическая модель Вселенной, развивающаяся 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 является общепризнанной в физической космологии, объясняя большой объем наблюдательной информации. Сегодня считается, что Вселенная возникла $13,7 \pm 0,2$ миллиардов лет назад, но процесс ее рождения неясен. Скорее всего, это было некое изначальное «сингулярного» состояния с гигантскими температурой и плотностью, перешедшее в однородную и изотропную среду с необычайно высокой плотностью энергии, температурой и давлением.

Брана – теорфизическое представление М-теории. Сценарий мира на бране включает образ в рамках теории струн или мембран, где наши привычные три пространственных измерения являются абстрактным понятием 3-браной. Чаще всего встречаются D-браны или «клейкие» p-браны Дирихле, 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, нулевым импульсом, угловым моментом, электрическим зарядом и другими квантовыми числами квантованных полей. В математической физике используется понятие «математического вакуума», определяемый как состояние, в котором отсутствуют какие-либо реальные частицы и действие на который операторов уничтожения дает нулевой результат. По современным представлениям вакуум перенаселен виртуальными частицами, участвующими в виртуальных процессах, проявляющихся в специфических эффектах взаимодействия с реальными частицами.

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 (описываемое четырехмерным вектор-потенциалом. В квантовой теории поля квантами векторного поля являются 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, которая в принципе доступна естественнонаучным методам. Видимая часть Вселенной называется Метагалактикой и непрерывно возрастает с введением в строй новых сверхмощных телескопов и астрофизических лабораторий земного и космического базирования. Будущее Вселенной неопределенно и в основном зависит от точного значения плотности вещества, при этом возможны разные космологические сценарии конца нашего мира, включая такие как:

Большой хлопок, Большой разрыв и Большой мороз.

Виртуальные частицы – сверхкороткоживущие микрочастицы, возникающие и исчезающие в флуктуациях соответствующих квантовых полей. Чаще всего в физическом вакууме рождаются и исчезают гамма-кванты и электрон-позитронные пары.

Гравитация (всемирное тяготение, притяжение) – одно из главных фундаментальных природных взаимодействий сверхуниверсального типа, которому 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 фундаментальных силовых поля: электромагнитное, сильное и слабое. В классической механике гравитация описывается законом всемирного тяготения, установленным Ньютоном и гласящим, что 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, создавая очень значительные даже по космическим масштабам гравитационные поля. Гравитация, будучи слабейшим из известных полей, в то же время является важнейшей силой 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.

Камера Вильсона – измерительное устройство, сконструированное в 1912 году шотландским физиком Чарльзом Вильсоном для

исследования заряженных частиц. Действие камеры основано на использовании явления конденсации пересыщенного пара в виде мельчайших капель жидкости на различных центрах конденсации, которыми могут служить ионы, образующиеся вдоль следов-треков заряженных частиц. Подобные следы хорошо видны и могут быть легко сфотографированы. Исследования в камере могут проводиться с искусственным и естественным радиационным фоном с использованием внутрикамерных источников и естественных потоков радиации, таких как ливни космических частиц, попадающие в камеру через прозрачную мембрану. Природа и свойства исследуемых частиц устанавливаются по их пробегу в скрещенных магнитных полях. Для исследования малоэнергетичных частиц камеру вакуумируют, а для высокоэнергетичных, наоборот, заполняют газом при повышенном давлении. Камера Вильсона сыграла важную роль в изучении радиации, будучи на протяжении десятилетий практически единственным методом регистрации потоков и ливней самых различных излучений. Однако впоследствии камера Вильсона уступила свое место искровым и пузырьковым камерам.

Квантовая гравитация – направление работ в теоретической и математической физике с целью описания гравитационного взаимодействия и последующего объединения 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 транскластичными элементами предстают одномерные струны и их многомерные аналоги – браны. Перспективы развития квантовой гравитации обычно 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 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 измеряется 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. Запутанность и несепарабельность представляют собой тождественные понятия.

Кварки – субэлементарные частицы, т. е. 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 шести кварков имеет свое собственное имя и за каждым из них стоят годы попыток его обнаружить.

Корпускулярно-волновой дуализм – один из основополагающих квантовых принципов, согласно которому любой микрообъект одновременно обладает волновыми и корпускулярными свойствами. При измерениях, в зависимости от их характера, проявляются либо та, либо иная сторона объекта.

Коллапс (гравитационный) – явление быстрого катастрофического сжатия массивного тела под действием собственного гравитационного поля. Если масса звезды превышает две солнечных, то в конце жизненного пути светило может коллапсировать при исчерпании своего ядерного горючего. При этом звезда стремительно теряет свою механическую устойчивость и с увеличивающейся скоростью «падает» к центру. После того как радиус светила уменьшится до некоторого

граничного значения – «гравитационного радиуса», никакие силы уже не могут воспрепятствовать дальнейшему сжатию, и коллапсар превращается в черную дыру застывшей (или «замерзшей») 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 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.

Многомировая интерпретация – интерпретация квантовой механики, в которой все возможности, содержащиеся в вероятностной волне, реализуются в отдельных вселенных.

М-теория – незавершенная теория объединения всех пяти версий теории струн, полностью квантовомеханическая теория всех сил и всей материи.

Общая теория относительности (ОТО) – теория гравитации, выражающая тяготение через геометрию пространства – времени, созданная в 1915-1916 годах Альбертом Эйнштейном. ОТО по своей сути является развитием специальной теории относительности, что и отражает ее название. Главная идея ОТО в том, что гравитация обусловлена не силовым взаимодействием гравитирующей материи, а искривлением самого пространства-времени под воздействием массы и энергии. Так, в ОТО тяготение – не силовое взаимодействие, а кривизна пространства-времени, возникающая под распределением

космических масс и энергетических потоков. ОТО получила признание 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. Кроме всего, эти астрономические наблюдения отчасти подтверждают такое необычное предсказание ОТО, как гравитационный коллапс, заканчивающийся возникновением черных дыр застывших звезд.

Принцип эквивалентности – представление о том, что в малых областях пространства – времени тяготение невозможно отличить от ускорения. Формулируется так же как утверждение о равенстве инертной и гравитационной масс, являясь одним из главнейших постулатов общей теории относительности.

Планковская длина (масштаб) – расстояние порядка 10^{-33} см, на котором 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 со 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 или многообразие Минковского) на основе специальной теории относительности.

Симметрия – преобразование физической системы, которое оставляет проявление системы неизменным; преобразование физической системы, которое не влияет на законы, описывающие 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. Является обменным и 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, обобщающее их для тел, движущихся с субсветовыми скоростями. СТО 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, основывающиеся на одномерных колеблющихся нитях энергии на планковских масштабах. Возбуждения струн описывают бесконечный набор полей – векторных, тензорных, скалярных. В них фундаментальными

составляющими являются 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).

Супергравитация – суперсимметричное обобщение теории гравитации Эйнштейна (общей теории относительности).

Темная материя – невидимая вещественная составляющая космического пространства, проявляющая себе исключительно в гравитационных взаимодействиях. Согласно современным оценкам составляет около четверти всей массы Метагалактики. Природа темной материи не установлена, предполагается, что она может концентрироваться в сгущения 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 проводится и в экспериментальной физике элементарных частиц на сверхмощных ускорителях – коллайдерах. Считается, что если частицы темной материи тяжелее в сотни или даже тысячи раз протона, то они должны рождаться при столкновении на встречных пучках такого ускорителя, как Большой адронный коллайдер (ЦЕРН, Женева, Швейцария). Согласно некоторым 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, составляющая около 70 % и равномерно распределенная по всей Вселенной. Чаще всего темную энергию связывают с «отрицательным давлением» физического вакуума, плотность энергии которого не изменяется на протяжении всей истории расширения Вселенной. Кроме того, существует «полевая» гипотеза о наличии нового сверхслабого

физического поля, наполняющего всю Вселенную, под названием «квинтэссенция». Еще одна альтернативная гипотеза объясняет ускоренное расширение тем, что сам закон всемирного тяготения меняет свой вид на метагалактических дистанциях за космологические времена. Из этого может проистекать наличие дополнительных размерностей у нашего пространственно-временного континуума, которые не проявляют себя в нашей «мезоскопической» реальности, будучи «компактифицированными».

Теоретическая физика – теоретический способ описания окружающей объективной реальности, при котором тем или иным природным явлениям 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 теоретическая физика исходит из высочайшей эффективности математического описания природных и искусственных явлений, изучая не столько свойства неких реальных процессов, сколько свойства их математических моделей. Наиболее ценным продуктом теоретической физики являются новые физические теории. Два основных направления приложения теоретических исследований – объяснение известных физических процессов и предсказание новых, еще не открытых наукой природных явлений, реальность которых затем проверяется опытным путем. Одной из высших целей теоретической физики является 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 абсолютно черное тело, 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 абсолютно черного тела должна стремиться к бесконечности. Свое название данный 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 позапрошлого века возник кризис теории излучения, решенный в 1900 году введением новых принципов квантовой теории излучения, созданной Максом Планком.

Фермионы (ферми-частицы) – микрочастицы с полуцелым 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 – неустойчивости потоков тепла, броуновское движения – 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, инфракрасное, видимый свет 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. 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, который 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 была развенчана как научное заблуждение после создания теории относительности.

Олег Фейгин

PRO **К**ВАНТОВЫЕ чудеса

