

# Квантовая физика и стандартная модель

Андрей Рублев: «А ты разве не в рай попал?»  
Призрак Феофана Грека: «Господи! Скажу только,  
что там совсем не так, как вы все тут думаете!»  
Кинофильм «Андрей Рублев»  
А.Тарковского

Я уже излагал в предыдущих постах, как в начало 20 века снесло крышу у многих физиков теориями Эйнштейна, сначала специальной, потом общей. То, что казалось незыблемым, было низвергнуто. Время (время!) не абсолютно, течёт по-разному в зависимости от системы отсчёта и близости массы. Свет в нашем восприятии явственно изгибает свой путь у массивных звезд, а на самом деле это прогибается пространство. Но оказалось, что это были ещё цветочки. В 20-е годы группа вчерашних студентов во главе с Нильсом Бором, и примкнувший к ним Дирак, и не примкнувший Шрёдингер создали квантовую механику (или физику, не будем копаться в тонкостях терминологии). И её постулаты и выводы настолько шли и идут вразрез с естеством человека, что восстал даже Эйнштейн (кстати, приложивший руку к началу этих квантовых чудес, и это не теория относительности). И до сих пор где-то треть физиков в сомнении качают головой. Но давайте по порядку.

Квантовая физика – удивительнейшая область знания. За 100 лет своего существования она прошла необычайно богатую историю экспериментальных открытий, гениальнейших догадок, для которых десятилетиями загадок, что, по моему мнению, превышает суммарно события других наук, вместе взятых. Ни одна область знания не выворачивала так наизнанку представления о мире, причём неоднократно. Рассказывать о квантовой механике непросто, как из-за обилия фактического материала, множества её «быстрых разумов» героев, физиков-первооткрывателей и основателей, так и необычности её постулатов, представлений и выводов, резко противоречащих обыденной жизни. Тем не менее, сейчас в интернете огромное количество как увлекательного, добротного научно-популярного материала, так и доступных вузовских учебников. Я тоже попробую сделать небольшой вклад, поделиться своим удивлением и восхищением необычайной игры ума творцов квантовой физики. Еще раз повторю, что это взгляд «извне», поскольку я не являюсь физиком, но имею математическое образование одного из ведущих университетов СССР.

Кто начал читать – приготовьтесь: эта статья по объёму существенно превышает предыдущие.

В 19 веке физика Ньютона царствовала во всех приложениях, прекрасно справляясь со всеми научными и технологическими задачами – расчетами движения небесных тел, проектированием машин и механизмов. Попутно активно осваивались смежные разделы физики.

Джеймс Максвелл создал теорию электромагнетизма, где открыл единую природу электричества и магнетизма, сформулировал законы классической электродинамики. Из уравнений Максвелла следовало существование электромагнитных волн. Изобретение тепловых машин породило направление физики – термодинамику. Исследователи проводили различные опыты, всё более хитроумные, имеющие дело с не совсем привычными вещами.

Ранее, в 18-том веке, в целом завершила своё существование алхимия, с её попытками превратить свинец в золото и вообще, с каким-то мистически-колдовским содержанием. Но из неё родилась химия, полноценная наука с порожденным Ньютоном естественно-научным подходом к исследованиям. Химия развивалась, возможно, даже продуктивнее физики. В 19 веке стало ясно, что вещества состоят из атомов и молекул. Менделеев открыл периодическую таблицу химических элементов, сформировалась техника химических формул для обозначения составных веществ, для исследования вещества химики стали использовать открытый ещё Ньютоном спектр. То есть эмпирически нащупывались свойства вещества в его уже атомно-молекулярных размерах. И пытливый ум исследователей хотел проникнуть в более мелкие измерения, объяснить суть строений атомов и их связей.

Физики активно изучали свойства электричества и света. Стало ясно, что свет имеет волновую природу, и цвет – это не что иное, как длина волны. Более того, свет –

электромагнитные волны, и таковыми являются уже невидимое глазу и инфракрасное излучение, и ультрафиолет, и радиоволны.

Тем не менее, к концу 19 века в мире физической науки было впечатление, что больше открывать и разрабатывать практически нечего. Юному первокурснику Мюнхенского университета Максу Планку (в будущем одному из основателей квантовой физики), профессор фон Жолли не советовал заниматься физикой, дескать, бесперспективно, там почти всё сделано. Хорошо, что он не послушался.

Период с 1900 по 1925 год – период «старой квантовой механики», предтечи «настоящей квантовой механики». Старая квантовая механика обязана Максу Планку и Альберту Эйнштейну. СТО и ОТО тут ни при чём, теория относительности Эйнштейна и квантовая механики впоследствии оказались почти независимы друг от друга. Начал всё Планк. Чтобы объяснить реальный эксперимент, противоречащий классической электродинамике, он принял, что излучение может испускаться только порциями – квантами, и энергия отдельного кванта пропорциональна частоте излучения:

$$E = h\nu$$

Где  $E$  – энергия,  $\nu$  – частота излучения,  $h$  – постоянная Планка. С этой формулой мы уже встречались в статье про теорию относительности. Следующим шагом было объяснение в 1905 году Эйнштейном фотоэлектрического эффекта. К этому времени был известен эксперимент, опять же противоречащий классической электродинамике. Когда к электродам подводили электрическое напряжение, между ними ожидался разряд. Обнаружилось, что при определённом напряжении разряд возникал, когда освещали концевики ультрафиолетом, и не возникал, когда освещали видимым светом, причём эффект не зависел от интенсивности света, то есть амплитуды электромагнитных волн.

Здесь нужно сказать, что за предыдущее столетие физики свыклились с волновой природой света, существовали серьёзные, практически работающие формулы электродинамики, хотя оптика при Ньютоне начиналась с корпускулярного представления, то есть свет рассматривался как какие-то мельчайшие частички (корпускулы). Эйнштейн в объяснении предложил теорию, при которой он как бы снова возродил корпускулярную модель света. Он ввёл понятие фотона, который и переносит дискретную долю (квант) энергии, и взаимодействие электрона и фотона зависит от энергии единственного фотона. Эйнштейн это подкрепил математическими выкладками, согласующимися с экспериментальными данными. Энергия электрона, достаточная для его отделения от металла и его последующей скорости (если хотите, импульса), зависит только от энергии уловленного электроном единственного фотона, а уж энергия этого фотона зависит только от частоты. Но частота – это свойство волны! Хочешь, не хочешь, а свет имеет двойственную природу. Впоследствии за это объяснение фотоэффекта Эйнштейн и получил Нобелевскую премию, а не за теорию относительности.

В экспериментах всё чаще натыкались на то, что в одних случаях свет ведёт себя, как волна (явление дифракции), в других – как частица.

В начале 20 века стали появляться средства и открытия, которые позволяли ставить информативные эксперименты для изучения строения вещества. Беккерель и супруги Кюри (Мария и Пьер) открыли радиоактивное излучение, физики научились отклонять частицы в магнитных полях и фиксировать куда эти частицы попадают – по проявлениям на фотопластинке. В 1912 году шотландец Вильсон изобрел замечательную вещь – камеру, которая называется его именем, в которой в перегретом паре движущиеся частицы оставляли траектории.

В эти же годы начала 20 века предпринимаются попытки объяснить устройство атома. К этому времени знали о существовании электрона, приняли, что его заряд отрицателен (условно, нужно было дать какой-то знак) и одинаков у любого электрона. Томсон (который и открыл электроны) предполагал, что атом – это нечто вроде булочки с изюмом, где в качестве теста была сфера с равномерно распределенным положительным зарядом, а в качестве изюма выступали электроны с отрицательными зарядами. По опытам с газами определили размер атома, примерно  $10^{-8}$  см. Для сравнения, если размеры Земли умножить на  $10^{-8}$ , то она будет размером с крупное яблоко.

В 1909 году под руководством Резерфорда затеяли довольно длительный эксперимент (подробнее в приложении), который дал весьма неожиданный результат. Эксперимент

заключался в бомбардировке атомов золота альфа-частицами, и они пролетали таким образом, что пространство вокруг атомов золота как будто было в основном почти свободно проницаемым для альфа-частиц, но часть отскакивала как биллярдный шар от чего-то очень маленького и «твёрдого». Таким образом Резерфорд к 1911 году открыл, что атом состоит из положительно заряженного ядра в центре и электронов вокруг, и сформулировал «планетарную» модель атома, а также провел расчёты размеров: ядро по крайней мере в 3000 раз меньше размера атома. По современным данным, ядро еще меньше, по сравнению с атомом в от 10000 до 100000 раз. Если поместить в центр нашего яблока настолько же меньшее ядро, то оно было бы уже невидимой песчинкой, меньше одной сотой миллиметра.

Казалось бы, замечательно! Отрицательно заряженные легонькие электроны притягиваются положительно заряженным тяжелым ядром, но имеют большую скорость и за счёт центробежной силы держатся на устойчивых круговых орбитах. Картинка, которая до сих имеет место то там, то сям в виде популярной схемы устройства атома.



Но сразу же была ясно: по классической электродинамике Максвелла следовало, что имеющее центробежное ускорение электрон должен излучать энергию, терять скорость и, двигаясь по спирали, быстро упасть на ядро. Ну, очень-очень быстро, за  $10^{-11}$  секунды!

Положение спас в 1913 году молодой датчанин Нильс Бор, прибывший к Резерфорду на стажировку. К этому времени уже были известны формула Планка  $E = \hbar\nu$  и работы Эйнштейна по фотоэффекту, поэтому Бор применил идею квантования и для орбит электронов: в целом электрон устойчиво крутится на орбите, но может перескакивать на меньшую или большую орбиту, поглощая или излучая также определенные кванты энергии в виде электромагнитного излучения. Орбиты не абы какие, а строго определённые. И Бор сразу сказал, что момент перескача с орбиты на орбиту никак внутри не описывается, а происходит типа мгновенно.

Уважаемые физики в мире закатили было глаза, как это, у нас так не принято, хоть и очень быстро, но должен быть понятный во времени процесс. Тем не менее нашлись последователи, стали совершенствовать эту модель. У Бора были расчёты, размер наибольшей орбиты чудесным образом совпал с ранее другим способом измеренным размером атома (в 10 миллионов раз меньше миллиметра), а через несколько лет, после появления волновой интерпретации электрона, шаги размеров орбит определялись кратностью длин соответствующей волны. Но Бор пока ещё трактовал электрон в атоме как летающий шарик вокруг ядра.

Собственно, с события «первой» теории Бора можно отсчитывать годы самых ярких и драматических событий квантовой механики, хотя физики достоверно знали о существовании только одной частицы, электрона, а известное уже понятие «фотон» пока не очень твердо относили к частицам.

Последователи Бора стали создавать теорию, где электрону приписывали разные числовые характеристики.

В 1919 году тот же гениальный экспериментатор Резерфорд провёл первую искусственную ЯДЕРНУЮ реакцию, не химическую, то есть из одних химических элементов получались другие, с другим составом ядер. И заодно (!) при этой же реакции открыл протон (собственно, ядро водорода), тяжёлую частицу с положительным зарядом, по величине равным заряду электрона. Стало догадываться, что в ядре атомов более тяжёлых элементов, чем водород, несколько протонов. Это порождало загадки. Во-первых, они же одинаково заряжены, и должны на мизерных расстояниях с огромной силой отталкиваться друг от друга. Во-вторых, к этому времени уже умели измерять атомные веса, и общая масса атомов в общем (кроме случая водорода) была больше суммарной массы протонов. Поэтому для начала в основном разбирались с загадками только водорода.

В 1922 году у электрона открыли важную характеристику – спин. Вначале его трактовали как магнитное поле, возникающее при вращении электрона, как маленького отрицательного заряженного по всей толщине шарика. А раз так, то вращающийся электрон – это магнитик, значит должен отклоняться во внешнем магнитном поле. Эксперимент Штерна-Герлаха, который

позволил открыть спин, очень знаковый, схема этого эксперимента, всё усложняясь, повторялась и повторяется неоднократно, вплоть до нынешних дней, поэтому он рассмотрен в дополнении. Да, частица отклоняется, в общем получается, что магнитный момент электронов есть, а про вращение говорить нельзя, поверхность электрона вращаться будет быстрее света, а так нельзя, Эйнштейн запретил. Позднее оказалось, что спин есть у любых частиц, открытых много позднее, в том числе у незаряженных, то есть нейтральных. Это некоторая внутренняя характеристика частицы, которую можно измерять, об этом несколько позже.

Еще до 20 века столкнулись со странным поведением света. Вроде бы все уверились в том, что это волна, более того, волна электромагнитная, и Максвеллом была создана прекрасная теория, на этом обосновывающаяся. В то же время в некоторых экспериментах свет ведет себя как частица. В начале 20 века Планк и Альберт Эйнштейн посчитали, что электромагнитное излучение распределяется порциями, появились термины фотон и квант. И как-то вроде бы как физики попривыкли, что свет может себя иногда проявляться как частица, иногда как волна.

К двадцатым годам набрал достаточную силу метод спектрального анализа. Так, для развития квантовой механики было важно открытие спектральных линий химических элементов, а следовательно атомов: каждое вещество из таблицы Менделеева в раскаленном виде излучало, а в холодном виде поглощало электромагнитное излучение строго определённых узких интервалов длин, которые наблюдались в спектре соответственно в виде ярких или тёмных полос. Ко временам Нильса Бора их стали однозначно связывать с излучением или поглощением электромагнитных волн электронами при переходе на энергетически более низкие или более высокие орбиты (или, по современным понятиям, оболочки, орбитали). При переходе на энергетически более низкую электрон излучал, а на более высокую – поглощал. Отсюда и либо яркие, либо тёмные полосы в одних и тех же местах, скажем, для атома водорода. Но почему именно на этих местах, с вполне определенной частотой волн?

Так вот, в 1923 году француз Луи де Б्रойль, из очень аристократической семьи, и, кстати, историк по первому образованию, но увлекшийся под влиянием брата физикой(!), предположил, что двойственно, как волна и частица, могут вести себя любые частицы, не только фотоны. Он положил, что длину волны частицы с массой можно вычислить из уравнения Планка  $E = h\nu$  и значения импульса для безмассового фотона  $p = h/\lambda$ , где  $\lambda$  - длина электромагнитной волны. Де Б्रойль перевернул эту формулу для частиц с массами, для которых импульс  $p = mv$  (масса на скорость, кто забыл), отсюда очень просто вывел значение длины волны частицы в зависимости от её скорости и массы:  $\lambda = h/mv$ . Волну он называл «фиктивной волной», которая, впрочем, позднее была признана вовсе не фиктивной, а фазовой, и даже получила собственное имя «волны де Брайля». И это предположение де Брайля вообще положило начало «волновой механики».

Идея де Брайля вдохновила австрийца Шрёдингера, и он в 1925 году вывел знаменитейшее волновое «уравнение Шрёдингера», которая стала играть важнейшую роль в рождающейся квантовой механике. Уравнение Шрёдингера основывалось на том, что электрон, протон, фотон и всё прочее в микромире (я бы сказал, наномире) это волны, и однозначно описывало их поведение, как волновой функции, зависящей от времени. Таким образом, Шрёдингер придерживался детерминистского подхода, то есть прошлое однозначно определяет поведения в будущем всего, что есть в природе, очень естественного для всех предыдущих поколений физиков.

Примечательно, что Де Брайль и Шрёдингер были участниками Первой мировой войны, бушевавшей в Европе совсем недавно (1914-1918 гг), и находились во время войны по разные стороны фронта.

Уравнение Шрёдингера представляло собой уравнение в частных производных от трех координат и времени, в котором присутствовали полная энергия, импульс, масса частицы, постоянная Планка, и решение уравнения должно было давать функцию, которая описывало поведение волны, соответствующее частице. Как выглядят некоторые варианты написания уравнения Шрёдингера, можно посмотреть в дополнении.

Уравнение Шрёдингера не выводится, а является постулатором. Шрёдингер его придумал, приняв, как вызов, замечание почтенного профессора (Петера Дебая) на лекции Шрёдингера об идеях де Брайля, дескать, что говорить о возможном волновом поведении электрона, а где

уравнение? Неизвестно, по какому наитию Шрёдингер взял в уравнении, где присутствуют вторые производные от координат первую производную искомой функции от времени и добавил минимую единицу  $i$  (в результате чего решения уравнения должны быть комплекснозначными), но к следующей лекции он принес уравнение, которое объяснило многие экспериментальные данные об атоме и электроне. Из уравнения Шрёдингера следовало, что электроны в атоме представляют из себя стоячие волны, на орбите должно укладываться целое число полуволн, получается, что разрешены только некоторые радиусы, и тем самым объяснились дискретность энергетических уровней атома.

Параллельно вокруг Нильса Бора появилась группа совсем молодых ученых, которые в 1922 – 1927 годы внесли основной вклад в главный этап развития квантовой механики: немцы Вернер Гейзенберг и Макс Борн, австриец-швейцарец Вольфганг Паули, англичанин Поль Дирак, немец Паскуаль Йордан. Их понимание квантовых процессов позднее было названо копенгагенской интерпретацией. Название понятно, босс то из Копенгагена, хотя молодежь из разных мест Европы. Так, Гейзенберг и Паули в начале 20-х начали работать у Макса Борна в Гёттингене (тогда научной столице Германии) в должностях по нашему соответствующей стажеру и м.н.с., а Йордан был еще совсем студент. Дирак работал в Кембридже (Англия).

Бор понимал неполноту своей модели атома, её противоречия. Не удавалось расширить модель с водорода даже на чуть более тяжелый атом гелия, хотя Бор в начале 1920-х сумел объяснить периодическую таблицу Менделеева. В попытках решить противоречия, Бор даже покусился было на закон сохранения энергии! Но образовавшаяся команда, постоянно общаясь и образуя типа мозговых штурмов, сделала прорыв. Он заключался в отказе от принципов классической физики. Первые мысли пришли в голову Гейзенбергу именно в Копенгагене, когда он в 1924 году был там в творческой командировке, жил в доме Бора, и они вели многочасовые беседы, как же трактовать и описывать поведение частиц в атоме. Временами эти ребята разъезжались, то на отдых, то на лечение, и при этом они ломали головы, как же объяснить те странности, которые проявляли фотон и электрон. И к ним приходили озарения!

И вот этот коллектив стал формулировать свои принципы, и эти принципы резко расходились с классическими представлениями. Во-первых, по классике любой физический объект, когда движется, имеет траекторию, в каждый момент времени – координату и скорость. Копенгагенцы от этого отказались. В 1925-27 годы стали публиковаться важнейшие принципы и выводы команды Бора. Вот парочка из них:

- Знаменитый принцип неопределенности Гейзенberга, который является ключевым в Копенгагенской интерпретации. Нельзя одновременно точно измерить и импульс (или скорость) и координаты частицы. Более того, это не потому, что у нас несовершенные средства измерения, или происходит неточность из-за влияния аппаратуры на измеряемую частицу. Нильс-Боровцы считали, что это фундаментальное свойство элементарных частиц. Вот не может электрон, как это делают объекты в классической механике, находиться в отдельный момент времени в конкретной точке с конкретной скоростью. В общем, Фигаро и здесь, и Фигаро там.

- Можно вычислить вероятность всех этих характеристик, при этом эта вероятность не есть мера нашего незнания о явлении, как её иногда в математике определяют, а природное свойство материального мира.

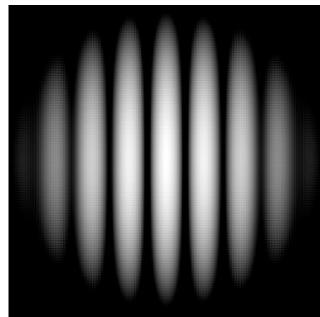
К настоящему времени (и, собственно, уже с конца 20х годов) постулаты квантовой механики формулируются математическими понятиями, там есть и волновые функции, и собственные значения эрмитовых операторов. Я с ними сейчас не буду тужиться, чтобы не раздражать физиков, которые вдруг вот это будут читать. Но вот ещё утверждение копенгагенцев: поведение частиц в микромире недетерминировано, то есть из прошлого их будущее однозначно не следует. Кстати, отсюда и наш макромир не детерминирован, а принципиально случаен.

Отвлечёмся на несколько абзацев от последовательного исторического повествования и скажем несколько слов о роли эксперимента. Физика, как известно, наука по большей части экспериментальная, теории в ней часто должны объяснять экспериментальные данные, а развивающиеся теории подтверждаться экспериментально. Мы уже упоминали Эйнштейна, который объяснил явление фотоэффекта, подкрепив догадку о квантовании света Макса Борна.

Из бесчисленного множества знаменитых и не очень экспериментов, сыгравших свою роль в появлении и развитии квантовой механики, рассмотрим некоторые явления, методы и технические средства, которые, на мой взгляд, во-первых, проявляются неоднократно, во-вторых, влияние экспериментов с их использованием, явились наиболее продуктивными и эпохальными.

Явление разбиения света прозрачной призмой на радужный спектр, рассмотренное ещё Ньютона, дало могучий средство исследования вещества, а в последние лет 60 и огромной Вселенной. Спектры, причём не только и не столько видимого света, а вообще электромагнитного излучения, играли и играют всё более важную роль как в повседневных технических, криминалистических задачах, так и, как говорится, на передовых рубежах науки. В следующей статье мы ещё познакомимся с их ролью в астрофизике.

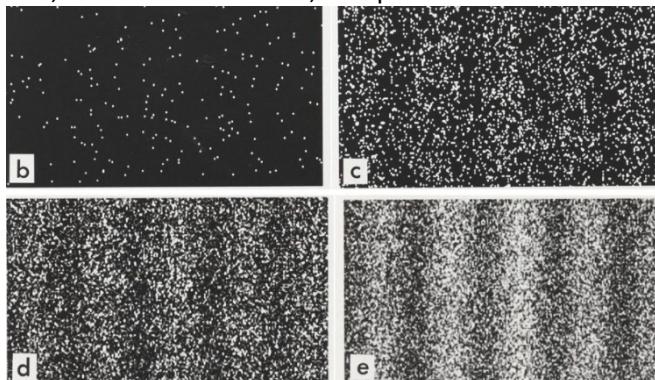
Важным видом эксперимента является так называемый двухщелевой опыт. Его впервые провёл Томас Юнг в 1801 году, направив свет на две близко расположенные узкие щели, и наблюдая результат на экране, расположенном за этими щелями. На экране вместо двух световых полосок, как можно было бы ожидать от потока корпускул света, появились несколько полос, так называемая интерференционная картина. Это следствие разбиения одной волны на две и последующее их объединение снова в одно явление сдвигом фаз. Это доказало было волновую природу света, поскольку это явление типично для волн. Любой из вас может легко воспроизвести этот опыт, налив в ванну воду, сделав из каких-нибудь преград два проливчика, и наблюдая за поведением возбуждаемых Вами волн. Ниже этого абзаца показана фото реальной интерференционной картины источника света в двухщелевом эксперименте.



Источник: <https://engines.egr.uh.edu/episode/2631>

В 20-м веке этот щелевой эксперимент стали проводить не только со светом, но и с потоками электронов, и атомов, вплоть до довольно тяжелых молекул, ставить в щелях детекторы для фиксации прохождения отдельных фотонов или частиц, и обнаруживались поразительнейшие вещи.

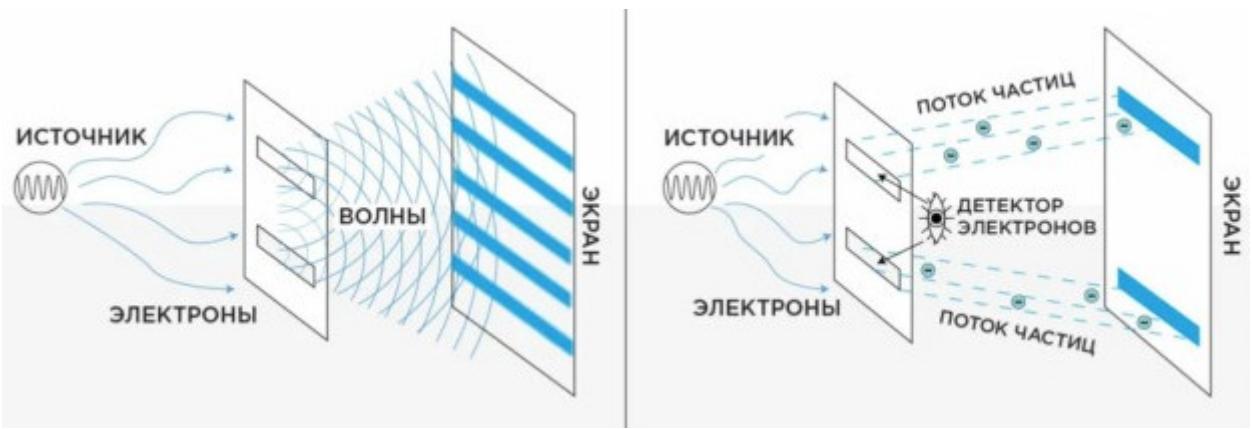
И электроны, хотя проявляют себя при попадании на экран точечной вспышкой, тоже проявляют волновые свойства, только в статистике, см. фото ниже



Источник: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-slit\\_experiment\\_results\\_Tanamura\\_four.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-slit_experiment_results_Tanamura_four.jpg)

Если потоки электронов направить на экран с двумя щелями, то они согласно вероятностному, или, если хотите, волновому принципу, начинают проецироваться на мишени в

виде полосок, ниже на картинке слева. Но если поставить в щелях детекторы электронов, эксперимент опять показывают нечто невероятное (на картинке справа)!



Источник: <https://trends.rbc.ru/trends/social/628f1d959a794790c9639fe4>

Волновые свойства куда-то делись, электроны начинают себя вести, чисто как частицы и проецируются после щелей на экране в две полоски!

Физики это объясняют тем, что любое измерение нельзя производить без воздействия на объект. Например, летящий электрон нужно подсветить фотоном (или электромагнитным полем, что то же самое). И, мол, от этого поведение электрона меняется (вот только мне непонятно, почему оно меняется таким «разумным» образом, как будто электрон дразнит экспериментатора, а, например, поведение потока не становится ещё более хаотичным).

Еще одним весьма продуктивным экспериментом является уже упомянутый опыт Штерна-Герлаха, при котором частицы движутся между полюсами одного неоднородного магнита или системы таких магнитов. Он позволил доказать существование собственного магнитного момента частиц, открыть характеристику спин. Чем порождается, непонятно, вращение частицы мы исключили, но магнитный момент есть, более того, его значение не принимает промежуточные значения, а только определенные, дискретные. Этим эксперимент Штерна-Герлаха не исчерпывается. Заметим, что спин измеряют по какой-нибудь одной оси, их обозначают X, Z (Y – направление вперед). Поставили подряд три аппарата Штерна-Герлаха, первый разделил частицы на 2 дискретных значения, исключили спин Z-, оставили только поток Z+, стали измерять фильтрованный поток по другой оси, а в третьем аппарате стали измерять опять по оси Z. И что же вы думаете? Опять в потоке есть и Z+, и Z-! То есть второе измерение сбросило результаты измерения первого! Вот если бы пошла компания в общественную баню, день оказался женский, честно разделились на мужчин и женщин, мужчин оставили за воротами, женщины в кассе перед женской раздевалкой посмотрели, кто пенсионерка, кто нет, у кого льготная оплата, после оплаты пошли в раздевалку – ба, половина из них опять мужики!

Как показали прошедшие 100 лет, вообразить все эти фокусы человек не может, эволюция не выработала у него таких нейронов в мозгу. Конечно, можно представить электроны в атоме в виде каких то размазанных облаков, пульсирующих сфер или эллипсоидов, но это никак созданию верных формул или вычислений, как это бывает в макромире, не способствует.

Нужно было математически представить даже не то чтобы состояние частиц, а состояние в целом как бы системы, что можно сказать про частицы или вычислить, что будет, когда их характеристики измеряешь.

У физиков, можно сказать, со времен Ньютона и даже раньше, теория без математики – ничто. Причём математически аппарат должен предсказывать, что будет. И чем компактнее математический аппарат, тем стройнее теория. И копенгагенцы создали такой аппарат, и использовали для этого матричную алгебру.

Но, как привыкли в классической механике, числовыми значениями местоположения (координат), массы, скорости – уже нельзя, принцип неопределенности! (Честно говоря, я немного переставил порядок постулирования отцами-основателями, но так проще излагать 😊).

Поэтому вводится постулат, что состояние системы и её процессы описывается таблицей значений, и не просто таблицей, а матрицей, которую можно умножать на числа или опять же матрицы, искать обратные и прочее.

О том, как они пришли к матрицам, есть байка, что это подсказал студент Йордан, случайно вклинившись в разговор профессоров на вокзале. И якобы ни Гейзенберг, ни Паули, до этого о матрицах ничего не знали, и поэтому поначалу формулировали свои теории самими придуманными математическими конструкциями. Мне в это верится с трудом (про незнание матриц). Ведь эти ребята до этого изучали общую теорию относительности, восхищались её красотой. Но математический аппарат ОТО основан на тензорах, а как можно влезть в тензорное исчисление, миновав матрицы и линейную алгебру, я не очень представляю.

Когда описали всё математическими знаками, и бытовавшими ранее и вновь придуманными, аппарат оказался вполне рабочим. То есть он предсказывал результаты экспериментов, позволял делать гипотезы, которые подтверждались, эти безумные состояния частиц или систем получали названия. Нужно заметить, что нельзя сказать, что частица может быть уж совсем-совсем в неопределенном состоянии. У неё есть возможные проявления при измерении, среди этих состояний можно выделить особые, называемые базовыми (и это комплекснозначные взаимно «перпендикулярные» векторы), и неопределенное состояние описывается линейной комбинацией этих базисных векторов. Эта линейная формула позволяет вычислить вероятность того, с каким значением характеристики (например, спина) частица проявится после воздействия на неё измерением. Так, вот это положение, когда частица не имеет определенных значений характеристик, но всё же некоторому правилу подчиняется, назвали красивым словом суперпозиция. Суперпозиция может выражаться и в терминах векторно-матричного пространства, а может и на языке волновых функций.

В истории создания квантовой механики в копенгагенской интерпретации поражает и восхищает всё. И гениальность очень молодых учёных, сформулировавших совершенно безумные для обыденного мышления постулаты, создавшие невероятный математический аппарат для вычислений и предсказаний, лидерские качества Нильса Бора, который не задавил авторитетом, а как-то умел организовать мозговые штурмы, в которых молодые учёные, с чувством абсолютной исследовательской свободы, не испытывая к результатам соратников ни ревности, ни зависти, а наоборот, вдохновляясь ими, за какие-то 2-3 года стремительно создали основной каркас могучей теории. Причём они имели небольшой экспериментальный материал, из частиц более менее в деталях были известны электрон и фотон, только-только (в 1922 году) был поставлен в первом варианте опыт Штерна-Герлаха по измерению магнитного момента атомов серебра, двухщелевой опыт был проведён только для света, а описанный выше эксперимент с электронами был осуществлен только в 1927 году, когда квантовая механика в своей основе уже была придумана.

Таким образом практические одновременно появились два подхода к созданию физики, описывающей поведение субатомных частиц, то есть квантовой механики – уравнения Шрёдингера и модель команды Нильса Бора. Примечательно, что Шрёдингер не принял копенгагенскую трактовку до 1950-х годов, он не мог принять недетерминизма.

Уравнение Шрёдингера не всё объясняло, оно было первоначально предназначено для описания поведения нерелятивистской бесспиновой частицы. Волновая функция представляется функцией трехмерных координат от времени, но решение уравнения Шрёдингера может быть только комплекснозначным и не может трактоваться физически. Интерпретация Шрёдингером электрона в атоме как пакета волны поначалу конфликтовала с представлениями боровцев электрона как частицы. Но очень скоро, в 1926 году, Макс Борн разработал компромиссное представление, в котором электроны по прежнему рассматривались как элементарные частицы с набором числовых характеристик, но их движение имело вероятностный характер, причём значение квадрата волновой функции  $|\psi|^2$ , которое Шрёдингер трактовал как плотность облака-электрона, Борн стал объяснять его как вероятность нахождения частицы в определённой точке, таким образом это значение приобретает физический смысл. Борн, таким образом, чётко сформулировал принцип корпускулярно-волнового дуализма.

Вообще Нильс-Боровцы и Макс Планк были гибче «старых» квантовых физиков, в стане которых оказались и Эйнштейн, и Шрёдингер. Копенгагенская школа легко восприняла уравнение Шредингера. Они легко (психологически) адаптировали к своему формальному аппарату теорию

Шрёдингера, хотя их собственный математический аппарат был самодостаточен. Так, Паули ввёл в уравнения спин, Фок, Клейн и Гордон обобщили уравнение для релятивистского случая (то есть для движения частиц с околосветовыми скоростями), а Дирак обобщил уравнение Шрёдингера и некоторые другие до такой степени, что объяснил многое в поведении электрона, предсказал существование античастицы электрона – позитрона и получил за всё это Нобелевскую премию.

В 1927 году, после публикации и уравнения Шрёдингера, и копенгагенского подхода, разразилась «война» физиков.

В общем историю квантовой физики 20х годов можно изучать как детектив, как историю какого-то сражения. Сравнительно спокойное развитие 1905 – 1920 годы переходит в бурное побоище 1920-1927 годов и завершается решающим генеральным сражением - Пятым Сольвеевским конгрессом в 1927 году в Брюсселе. Слово «генеральное» здесь имеет непосредственный смысл, участвовали «генералы»: сориентировано было закрытым, присутствовали только приглашенные, всего 30 человек, из которых 18 настоящие или будущие нобелевские лауреаты (дважды лауреат Мария Кюри посчитана дважды)!

Гиганты физической мысли обменивались массивными фразами, как дубинами. Эйнштейн, отвергая случайность, как фундаментальное свойство материи, заявлял: «Бог не играет в кости со Вселенной!» (кости, кто не знает, это те самые кубики, на сторонах которых нанесены от одной до шести точек). Учёные, которые попроще, заробели бы, как никак сам Эйнштейн. Но Нильс Бор, тоже не лаптем щи хлебал, тоже нобелевский лауреат, отвечает: «Альберт, не решайте за Бога, что ему делать!». И к настоящему времени всё новые эксперименты подтверждали копенгагенскую интерпретацию. Но новоявленные классики 20-го века никак не могли отказаться от детерминированности мира. Эйнштейн стал придумывать, как у него было заведено, мысленные эксперименты, чтобы показать, как вот эти эксперименты можно повернуть к детерминизму.

Очень Эйнштейна задевало, что пока не измеришь, частиц как бы не существует. Он задавал каверзные вопросы: «А что, Луна, пока Вы её не видите, не существует?» А Шрёдингер (позже, в 1935 году) даже придумал мысленный эксперимент, ставший хорошо известным, как «Кот Шрёдингера», который в виде эксперимента формулирует тот же вопрос Эйнштейна о Луне. Этот эксперимент, кому интересно, посмотрите в интернет, там очень много о коте Шрёдингера, с картинками. Я рассказывать не хочу, там кота изощренно убивают.

В общем, Эйнштейн не успокоился, и тоже в 1935 году вместе с Подольским и Розеном придумал ЭПР-парадокс. К этому времени было известно, что есть такие частицы (тогда было известно о фотонах и электронах), которые в определенные моменты, например, при зарождении в одном ядерном процессе, дальше показывают удивительные вещи. Их характеристики, включая спин (если не упрощать, то проекции спина), могут сколь угодно долго по-настоящему существовать в неопределенном состоянии (в суперпозиции), и одна из частиц проявляет свой спин только при измерении. Так вот, если после этого измерить спин другой частицы, он обязательно окажется противоположного знака! Как будто был, конечно, по настоящему в вероятностном состоянии, в суперпозиции, но где-то вначале они договорились, кто как проявится при измерении. Или, может быть, что тоже не менее странно, когда первая частица претерпевает измерение, она как-то об этом мгновенно, на любом расстоянии, сообщает другой, вместе с ней зарождённой, игнорируя запрет на превышение информацией скорости света. Такие частицы называют запутанными (в общем, это не очень удачный термин), и существование этого эффекта показывается экспериментально, опять же в разновидности эксперименте Штерна-Герлаха. Так вот, мысленный эксперимент ЭПР показывал, что частицы как бы взаимодействуют на любом, сколь угодно большом расстоянии. В русскоязычных источниках приводятся слова Эйнштейна о «призрачном дальнодействии», но в немецком Эйнштейн говорил «spukhafte Fernwirkungen», что переводится как «жуткие эффекты на расстоянии».

*Я к этому месту достаточно подробно рассказал, как выпустили джина из бутылки. Дальше было тоже очень интересно, но я скажу коротко, «галопом по Европам».*

Этот парадокс, как и кот Шредингера, так и висел над физиками, никто его не объяснил, даже Бор, его фактически игнорировали, как математический фокус, лет 30. Но вот в 1964 году ирландец Джон Белл придумал неравенства, названные его же именем, на основании которых можно было это дальнодействие обнаруживать или опровергать экспериментально.

Эксперименты создали в 1972 году, совершенствуют до настоящего времени, всё удлиняют расстояние между запутанными частицами, пока возможное взаимодействие запутанных частиц по времени не достигло рождения Вселенной. И что же вы думали? Дальнодействие реально! Как будто частицы или взаимодействуют в тысячи раз быстрее света, или договорились о слаженном проявлении при измерениях, задолго до своего рождения, 14 миллиардов лет назад. Вот теперь с этим и живите дальше, друг Горацио<sup>1)</sup>. Ну а ребята, которые экспериментально доказали нарушение неравенства Белла, то есть реальность дальнодействия, в 2022 году получили Нобелевскую премию. Поэтому получается, что с квантовой точки зрения в реальности есть вся эта дичь, имеет место отсутствие детерминизма, или же нужно придумывать новые теории. Например, искать скрытые параметры (но их некуда всовывать в частицы!), или говорить о мультивселенной, по которой наш мир каждый раз в бесчисленном множестве случаев, когда частицам нужно выходить из суперпозиции, КЛОНИРУЕТСЯ! Вместе со всеми звёздами, галактиками, чёрными дырами и даже с неведомой тёмной материи неведомо в каких измерениях! Тут у меня мысль окончательно останавливается. Но не у хитромудрых физиков. Они тут же на эффекте запутанности придумали, как создать неподслушиваемые линии связи и быстродействующие квантовые компьютеры.

Итак, в 1919 году Резерфорд открыл ядро водорода – протон. Частица, почти в 2 тысячи раз массивнее электрона. У протона заряд равен по величине электрону, только положительный. В 1932 году открыли нейтрон, частицу массой, примерно как протон, но без электрического заряда. Дирак теоретически вывел антиэлектрон (положительно заряженный электрон - позитрон), затем его обнаружили в космическом излучении. Паули в 1930 году предсказал, а в 1952 году зарегистрировали почти невесомые частицы – нейтрино. Без нейтрино оказалось никак, потому что при распадах частиц куда-то девалась часть энергии, и Нильс Бор докатился до доклада, что закон сохранения энергии не соблюдается. Вообще-то Паули вначале назвал эту частицу нейtronом из-за отсутствия заряда, но параллельно (смотри выше) открыли спутник протона, который тоже назвали нейtronом. Пошла было путаница, но быстренько практически невесомую частицу переименовали в нейтрино, что в переводе означает «нейтрончик» ☺. Сейчас знают, что их даже три сорта. Оказалось, анти- есть для протона, и для нейтрального нейтрона и вообще для любой частицы. Выяснили, что ядра более тяжёлых, чем водород, атомов состоят из протонов и нейтронов. Поскольку одинаково заряженные частицы, стиснутые внутри ядра, быстро бы разлетелись из-за взаимного отталкивания, пришли к тому, что кроме электромагнитного, есть ещё и притягивающее **сильное** взаимодействие, а потом ещё и **слабое**. То есть на сегодняшний момент есть 4 вида взаимодействия (гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое).

Физики не остановились, и пошли ещё дальше вглубь материи. Протон и нейтрон не стали неделимыми, они тоже состоят из ещё более элементарных частиц – кварков, да и сами протоны и нейтроны являются частными случаями адронов – комбинаций кварков. Кварки придумали в 1964 году, позднее экспериментально доказали их существование. Кварков тоже несколько видов, а именно шесть, если не считать их анти. Кроме адронов есть еще лептоны и бозоны. И к концу 20 столетия физики сформулировали Стандартную модель, которую можно изобразить красивой таблицей:

<i>Кварки</i>	<i>Лептоны</i>				
<i>Massa</i> → ≈2,3 МэВ/c <sup>2</sup> Заряд → 2/3 Спин → 1/2	<i>Massa</i> → ≈1,275 ГэВ/c <sup>2</sup> Заряд → 2/3 Спин → 1/2	<i>Massa</i> → ≈173,07 ГэВ/c <sup>2</sup> Заряд → 2/3 Спин → 1/2	<i>Massa</i> → 0 Заряд → 0 Спин → 1	<i>Massa</i> → ≈126 ГэВ/c <sup>2</sup> Заряд → 0 Спин → 0	
у Верхний	с Очарованный	т Истинный	глюон Глюон	Хиггса Бозон Хиггса	
<i>Нижний</i>	<i>Странный</i>	<i>Прелестный</i>	<i>Фотон</i> $\gamma$		
<i>Электрон</i> ≈4,8 МэВ/c <sup>2</sup> -1/3 1/2	<i>Мюон</i> ≈95 МэВ/c <sup>2</sup> -1/3 1/2	<i>Тау</i> ≈4,18 ГэВ/c <sup>2</sup> -1/3 1/2	<i>Z-бозон</i> 91,2 ГэВ/c <sup>2</sup> 0 1		
<i>Электронное нейтрино</i> <2,2 эВ/c <sup>2</sup> 0 1/2	<i>Мюонное нейтрино</i> <0,17 МэВ/c <sup>2</sup> 0 1/2	<i>Тау-нейтрино</i> <15,5 МэВ/c <sup>2</sup> 0 1/2	<i>W-бозон</i> 80,4 ГэВ/c <sup>2</sup> ±1 1		

Стандартная модель элементарных частиц, сведенная в таблицу

Тут у меня соблазн остановиться и поговорить, откуда и как Стандартная модель, уж очень в 60-е годы тоже интересно было. Появились хорошие ускорители, производительные детекторы, и попёрли открытия частиц массой порядка протона, да столько, что заговорили о зоопарке частиц. Но американцы Мюррей Гелл-Манн и Джордж Цвейг предположили, что есть частицы помельче протонов-нейtronов - кварки, и из них собираются адроны, и то некоторые, может, ненадолго, и стала вырисовываться картина из предыдущего абзаца. Конечно, нашлись ретрограды, мол как это, заряды у кварков дробные? Да, дробные, отвечали им, ну и что, главное в адроне в сумме должны давать целое значение. В самом деле, чтобы составить протон, нужно сложить кварки с зарядами 2/3, 2/3 и -1/3. Но большинству идея понравилась, да ещё табличку красивую предложили, вначале в ней ещё были пустоты. Мол, это по-нашему, по-Менделеевски, можно же в пустотах задарма новые частицы открывать!

Раз уж отвлеклись - о терминологии. Я говорю традиционно «микромир», хотя речь идет об объектах, размеры которых по крайней мере в тысячу раз меньше, чем микрометр (атомы размером - нанометр и меньше), а размер электронов точно неизвестен, он, по крайней мере в 100000000000 меньше размера атома, да и говорить о размере объекта, о котором нельзя сказать, где он находится и чем его мерить, не совсем корректно. Но процессы квантовой механики в основном проходят в нанопространствах и много меньше, а не в микропространствах (то есть сравнимых с микрометром). Термин квантовая «запутанность». Тоже пример не совсем корректного перевода. По-русски можно было бы сказать «зацепленность», «сцепленность», но это накладывает ещё более сильные аналогии из макромира. Лучше бы «единорожденность», «братьство»?! - ну вы поняли, что ничего путного не придумать. Поэтому давайте говорить «запутанность».

Или вот я все время говорю «частицы», и многие тут же представляют какую-то крошку, может даже с зазубренными краями. Но этот термин – дань, на мой взгляд, неудачной традиции, лучше бы говорить «сущность». Уже с уровня электрона и протона это нечто невообразимое. Электрон ведёт себя то как волна, то как какая то точка, даже вспышку даёт точечную при ударении об экран (например, старого лампового телевизора). Кварки вообще самостоятельно, поодиноке существовать не могут, а бозоны скорее какие-то функции, роли. Например, глюон осуществляет сильное взаимодействие внутри протона и нейтрона, стягивая три кварка, иногда его даже рисуют какой-то пружинкой. Глюон имеет спин и не имеет массы, но содержит львиную часть внутренней энергии протона или нейтрона, поэтому ( $E = mc^2$  !!!), даёт то ли третью, то ли половину, то ли 90 процентов массы ощущаемого нами вещества! То есть в веществе больше всего весят не кирпичики (кварки дают меньше 10 процентов массы), а раствор, клей – глюоны!

Стандартная модель, это, конечно, не эта маленькая табличка, а огромный и очень сложный математический аппарат, несмотря на свою сверхсложность, на удивление слаженно работает, и объяснял до конца 20 века практически всё. Некоторым физикам не нравилась его громоздкость (как-то это не Ньютоновски), и пытались создать более стройные теории. В Новосибирском

академгородке, где я выучился в университете и долго работал, такие тоже были. Один из них знаменитый Юрий Борисович Румер, разработал «пятиоптику» другой, менее известный, Юрий Иванович Кулаков, предложил теорию физических структур. Но даже Румеру не удалось заинтересовать своего друга Ландау! В ставшей чрезвычайно продуктивной физике 20 века царил принцип: «Заткнись и вычисляй!» (фраза принадлежит то ли Мейману, то ли Фейману, то ли Дираку). И Ландау, видимо, как и подавляющее большинство физиков, работал в этой успешной концепции, и проявил к подходу Румера равнодушие. Дескать, ты там стал косным на отшибе, в своих сибирских снегах, а мы вот тут в столицах, в европах на острие физической мысли!

Но! В конце 20го века астрономы подкинули физикам парочку сверхсюрпризов. Во первых, наблюдения и измерения вращений галактик показали, что есть какая-то неведомая «тёмная материя», которая проявляется только гравитацией, больше никак (кстати, из этого следует, что в названии неудачный перевод. Имелось в виду «скрытая», а так то эта материя не тёмная, а наоборот, сверхпрозрачная). При этом её на порядок больше по массе, чем привычной нам «барионной» материи (то есть звезды, планеты, межзвездные пыль и газ, потоки электромагнитных волн).

Во вторых, Вселенная расталкивается и раздувается под действием какой-то «тёмной энергии». Это вообще трэш. Если частицы тёмной материи ещё как-то пытаются уловить, то как подступиться к тёмной энергии, вообще никаких идей. При этом её по энергии в два раза больше тёмной и барионной материи, вместе взятых!

И вот в начале 21 века физики оказались у разбитого корыта. А ведь так было славно, Стандартная модель всё объясняла, мир был как на ладони, хотя не без странностей, и на тебе, никогда этого не было и вот опять! Стандартная модель объясняет малую толику сущности бытия, остальное даже не в тумане, а во мраке!

И что же, стали оживать все эти попытки создания суперфизик. Вспомнили, что гравитацию тоже нужно как-то притягивать к квантовой физике, и с этими новыми тёмными материями что-то нужно делать. Да и астрофизика движется семимильными шагами (о ней я собираюсь написать отдельную статью, уж слишком там всё удивительно), и Вселенная расширяется всё быстрее из чего-то вначале сверхплотного, и гипотетические чёрные дыры вот они, а главное, эти тёмные сущности! И мультивселенная, и теория струн с её одиннадцатью измерениями вдруг снова внимательно рассматриваются. Я, конечно, не специалист, но, похоже, Румер просто обогнал время со своей пятимерной пятиоптикой.

Опять оживились попытки создать единую теорию поля, о которой грезил ещё Эйнштейн, и которая бы с единой позиции объединила бы все известные поля. С некоторых пор в квантовой физике обо всём могут говорить в представлении поля, то есть взаимодействия частиц. Известные поля – это вокруг четырех взаимодействий: гравитационного, электромагнитного, сильного и слабого. Где поля, там и волны, и любая частица – одновременно волна. Даже для недавно экспериментально подтверждённой гравитационной волны должно быть представление в виде частицы – гравитона. В своё время Энрико Ферми так развил теорию поля, что по ней для каждой частицы существует свое поле, простирающееся на всю Вселенную. Частица в ней – это бугорок возмущения.

Кое-какие достижения в объединении полей есть. Так, свели воедино электромагнитное взаимодействие и слабое. Но гравитацию никак не удается затащить в квантовую область, уж слишком различаются масштабы их проявления.

Есть попытки создать Суперсимметрию. Это вот о чём. Со времён создания Стандартной модели (или много раньше, но применяли интуитивно) в физических теориях есть принцип симметрии. Это не только и не столько то, что отражается зеркально, но более общий смысл неизменности величин, свойств или законов физической системы при каких либо изменениях: смен системы координат, поворотах на кратные чему-то углы или вообще абстрактные преобразования в смысле алгебраической теории групп. Экспериментальные наблюдения каких либо симметрий могут привести к открытиям физических законов.

А Суперсимметрия подразумевает возможность такого расширения Стандартной модели, что она становится стройной, избавляется от многих недостатков и объясняет много-много чего, включая вопросы моментов рождения нашего мира. К сожалению, экспериментально подтвердить возможность суперсимметрии не удалось, а жаль. Если бы Стандартная модель до

неё расширилась, то там были бы помимо прочего суперсимметричные частицы - нейтралино, которые вполне могли бы составлять тёмную материю.

В общем, если молодой человек сейчас в сомнениях, как Макс Планк в конце 19 века, стоит ли заниматься физикой, может, лучше в банкиры, скажу – стоит. Физика стоит перед вызовами, и открытия в ней таковы, что удовольствие их понимания будет несравненно дороже владения миллионами долларов, евро или биткоинов. И, конечно, открытия и озарения ждут своих исследователей. Кто это будет? Нынешний студент первого курса МФТИ или НГУ, трепещущий перед первой сессией? Или понюхавшие пороха русский и украинец, распри позабыв<sup>2)</sup>, соединят усилия перед неведомым, как 100 лет назад Шрёдингер и Де Бройль? Ведь по-прежнему актуальны строки нашего всё<sup>3)</sup>:

О сколько нам открытий чудных  
Готовят просвещенья дух  
И Опыт, сын ошибок трудных,  
И Гений, парадоксов друг,  
И Случай, бог-изобретатель.

---

## ДОПОЛНЕНИЯ

### **Дополнение 1**

В 1909 году под руководством Резерфорда (вскорости получившего титул лорда) толковые парни, Гейгер и Марсден, облучали очень тонкую золотую пластинку альфа-частицами, и смотрели, куда они летят после пронзания фольги (куда они попадают, фиксировалось вспышками на специальном экране). Обнаружилось, что большая часть их пролетает насквозь почти прямолинейно, но некоторые немного отклоняются. Эксперимент длился более 2x лет, Резерфорд в это время напряженно думал о результатах эксперимента (понятно, не лордское дело установки мастрячить да круглые сутки вспышки считать). И таки да, не зря он морщил свой высокий лоб, додумался загнуть экран вокруг золотой фольги. Увидели, что некоторые альфа-частицы отклоняются сильно вбок, а некоторые вообще считай обратно летят! Получается, что большинство альфа-частиц пролетают через пустоту ни с чем не реагируя, но небольшая часть наталкиваются на что-то существенно меньшее всего атома (точнее, на положительно заряженное нечто), отскакивают вроде бильярдных шаров. Вывод: атом – это вещь вроде солнечной системы, по орбитам летают отрицательно заряженные электроны, в середине – положительно заряженное ядро.

### **Дополнение 2**

Открытие спина состоялось в 1922 году в опыте Штерна-Герлаха (вот здесь хорошая иллюстрация установки:

<https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/00001.74/45444/1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>).

Тогда господствовала планетарная модель атома, а электрон представляли небольшим шариком с равномерно распределенным зарядом. Появилась мысль узнать направление оси вращения электрона. Поскольку вращающиеся заряды образуют магнит, то если такой магнитик летит через другой, мощный магнит, причем неоднородный, у которого один полюс сильнее другого, то маленький магнитик будет отклоняться, причем направление и амплитуда отклонения будет зависеть от направления оси вращения электрона или ориентации большого магнита, иногда должны попадать в центр экрана. Да, магнитик отклонялся, то есть вроде бы вращение есть, и очень похоже, как планета вращается вокруг оси. Но не тут-то было. Электроны отклоняются при любой ориентации большого магнита, причем амплитуда отклонения всегда одинакова, либо вверх, либо вниз, на одно и тоже расстояние на мишени, без всяких промежуточных значений амплитуд. То есть некая характеристика есть, некоторый собственный магнитный момент, её назвали спин (в переводе с английского «вращение» хотя вращения в обычном понимании нет). Позднее выяснилось, спин есть у любых других частиц, даже электрические нейтральных.

Ну это ещё ладно, что-то есть, существующее само по себе. Но стали отфильтровывать спины с ориентацией вниз, поставили несколько больших магнитов подряд. Оказалось, что спин можно измерять относительно любой оси, причём новое измерение «аннулирует» предыдущие измерения! То есть если поставить большой магнит «прямо», потом фильтр и оставить только электроны со спином вверх, потом большой магнит «поперек», потом опять большой магнит «прямо», то в последнем опять половина электронов будет спином вверх, половина спином вниз! Вот и гадай после этого, то ли измеряющее поле как-то взаимодействует с электроном, то ли Бог шутит с экспериментатором!

При повороте ориентации полюсов большого магнита электроны испускают фотоны. Что интересно, отдельный электрон испускает непредсказуемо, по вероятности, зависящей от угла поворота, но вероятность зависит от угла поворота. А вот если электронов много, то суммарная мощность излучения пропорциональна углу поворотов магнита, как в классической физике. То есть суть перехода от квантовой механики к классической – в статистике!

Впрочем, спин получается и чисто теоретически, как показал Дирак, из его релятивистского волнового уравнения электрона.

Мода на квантовые термины не миновала и слово «спин». В 1960е годы в Новосибирском академгородке, заповеднике всяких круtyх ученых, в том числе физиков-ядерщиков, появилась студия бального танца «Спин» (руководитель - незабвенный Геннадий Мальков). Понятно, что обыгрывалось вращение, свойственное танцорам, и правило держать прямую спинку, но физиков аналогия с вращением корежила.

**Дополнение к дополнению 2.** Как создавали пучок электронов в эксперименте? Электрон были в составе нейтрального атома серебра, а разгоняли атомы просто хорошим нагревом в печке. Чтобы получить узкий пучок летящих атомов, их фокусировали несколькими дырочками в экранах, расположенных один за другим в направлении к большому магниту.

### Дополнение 3

В 1928 году Дирак из своих уравнений предсказал существование античастиц. Такие «зеркальные» по свойствам к частицам: если у частицы заряд положительный, то у античастицы отрицательный. У нейтральных по заряду тоже есть чему менять знак (магнитный момент-спин). Эту идею сначала тоже считали математическим фокусом, мало ли что можно нарисовать этими математическими крючками, тем более что Дирак рассуждал довольно замысловато: он говорил и об отрицательной энергии, о всём пространстве, плотно занятом антиэлектронами, и в силу плотности ненаблюдаемыми, и только незанятые дырки являются электронами (?). Но вот в 1932 году Карл Андерсон в космических лучах обнаружил по отклонению магнитом в камере Вильсона и электроны, и отклоняемые в другую сторону антиэлектроны, которые назвали позитронами! Конечно, сразу захотели искать антипротоны, и теория говорила, что если хорошоенько ударить протоном по другой частице, то высвобождающаяся энергия из закона сохранения энергии-массы родит новые частицы, и там могут быть антипротоны. Космические лучи не годились, там маловато было высокогенергетических частиц, но в 50-е годы появились очень мощные ускорители, и вот в 1956 году Сегре и Чемберлен (США), бомбардируя протонами высокой энергии медную пластинку, сумели выделить 40 антипротонов. Заметим, что один антипротон при помощи хитроумной ловушки фильтровался из следов примерно 30000 других частиц. Вы, конечно, знаете, что при столкновении материи и antimатерии происходит аннигиляция, частица и античастица исчезают, рождаются частицы с высокой энергией (например, электрон и позитрон порождают два фотона), и в обоих направлениях этих ядерных реакций справедлива формула Эйнштейна  $E = mc^2$ .

### Дополнение 4

Как мы видим, в экспериментах 20 века появились установки, позволяющие производить ядерные реакции, роль которых просто неоценима при исследовании микромира. Но ядерные реакции не происходят просто при соприкосновении атомов веществ (как при химических реакциях), они должны встречаться с определенной энергией. И если Резерфорду в его опыте, когда он впервые реализовал искусственно полученную ядерную реакцию превращения атомов азота в кислород, достаточно было небольшой энергии альфа-частиц (по сути ядер гелия),

вылетающих в дырочку из свинцовой камеры с радиоактивным веществом (у Резерфорда вроде бы был радий), то в дальнейшем для прогнозируемых ядерных реакций нужны были более и более высокие энергии сталкивающихся частиц. Для этого физики стали разгонять заряженные частицы посредством магнитных или электромагнитных полей в специальных установках – ускорителях. Если первые ускорители умещались на столе в лаборатории, то в настоящее время самый большой ускоритель имеет в диаметре около 8 с половиной километров и стоит немеряных денег. Вообще квантовым физикам стали отпускать очень большие деньги примерно с конца 1930-х годов, когда в Америке стали создавать атомную бомбу. А со второй половины 20 века стало ясно, что физические теории позволяют создавать множество приятных ништяков: атомные электростанции, лазеры, полупроводники, ныне имеющих размеры всего в несколько раз больше атомов, МРТ для медицины и прочее, и прочее. Об ускорителях более подробно в дополнении 5.

Заметим, что в конце 20 века в каждой квартире на самом видном месте располагался ускоритель частиц, в некоторых квартирах они сохранились до настоящего времени. Это электронно-лучевые трубы тогдаших телевизоров. Яркие следы их бомбардировок хозяева квартир видели на «голубых» экранах, где эти лучи, управляемые шустрыми электромагнитами, воспроизводили нам фильмы и телепередачи.

Хорошо, частицы разгоняем до нужных, иногда очень больших энергий, сталкиваем, но нужно же как-то посмотреть, что происходит. В начале 20 века либо смотрели результаты на фотопластинках, либо портили глаза в опытах Резерфорда, наблюдая за вспышками на экранах, устроенных наподобие выше упомянутых телевизоров. Прорывом было изобретение камеры Вильсона, представляющей герметичный стеклянный цилиндр, в котором поршнем или ещё чем создавали перенасыщенный пар воды и/или спирта. Когда заряженная частица пролетает через этот пар, она создаёт ионы – заряженные атомы, на которых пар конденсируется в капельки. В результате создаётся след в виде трека, который можно фотографировать. Камеру Вильсона помещают в магнитное поле, которое влияет на заряженные частицы, и по радиусам и длинам треков можно вычислять характеристики частиц. В случае ядерных реакций создаются всякие разветвления, и, анализируя целостную картину, можно сделать вывод о характере ядерной реакции. Вслед за камерой Вильсона появились более совершенные пузырьковая и искровая камеры. Первая камера Вильсона была размером с напёрсток. В современных ускорителях используются детекторы, основанные на изменениях проводимости кристаллов, например, полупроводников, и фиксация прохождения частицы может производиться электронными устройствами. Обычно собирают большие массивы таких детекторов. Например, в установке ATLAS Большого адронного коллайдера содержится 12 тысяч кремниевых детекторов и 440 тысяч дрейфовых трубок, весит ATLAS несколько тонн, а результаты получающихся реакций обрабатывает суперкомпьютер.

### Дополнение 5

Большой адронный коллайдер – самый большой в мире ускоритель. Длина его кольцевой камеры, где разгоняются частицы – 27 километров, частицы разгоняются электромагнитами, обмотки которых сверхпроводящие, то есть погружены в жидкий гелий. Слово адронный означает, что он разгоняет не какие-нибудь лёгкие электроны-позитроны, а серьёзные частицы вроде протонов. А коллайдер – это означает, что в его кольцевой камере разгоняются навстречу друг другу два пучка частиц.

Ускорители на встречных пучках одним из первых придумал советский физик Будкер Герш Ицкович и первым в мире реализовал в новосибирском академгородке. До этого способа ускорители разгоняли пучок частиц и потом направляли на неподвижную мишень. Естественно, чем выше энергия столкновений, тем больше возможностей у эксперимента. Но формулы Лоренца показывают, что вблизи скорости света каждое удвоение энергии столкновения требует многократного увеличения энергии, прилагаемой электромагнитами (я в предыдущих постах приводил расчёты). А вот если сталкивать частицы, которые разгоняются навстречу друг другу, то удвоение энергии их столкновений даётся практически даром.

## **Дополнение 6**

Два подхода, Шрёдингера и Нильс-Боровцев сформировались практически одновременно. Физики сначала было растерялись, кто же прав. Но Максом Борном, попозже самим Шрёдингером была показана их эквивалентность, что само по себе удивительно.

Поэтому физики вольны в том, каким представлением пользоваться. Большинство сейчас предпочитают волновую трактовку. Во всяком случае, в бытность моей работы в одной лаборатории с молодыми тогда учёными в области квантовой физики (главенствовали в их коллективе Виталий и Ольга Ткаченко) во время их бурных дискуссий они ссылались на уравнение Шредингера чаще, чем учитель геометрии на теорему Пифагора.

На мой же взгляд первое знакомство с аппаратом квантовой механики проще через матрицы, доступно головастому и любознательному старшекласснику. Не случайно матричные алгебры изучают на первых курсах вузов, а дифференциальные уравнения в частных производных попозже. По-моему, эта матричная наука не требует напряжения при изучении, правила их работы очень алгоритмичны.

## **Дополнение 7**

Я уже немножко говорил о том, что есть внутри ядра. Сейчас чуть поподробнее. Итак, с появлением мощных ускорителей и хороших детекторов стали открывать всё новые частицы, всякие ка-мезоны и ро-мезоны, наоткрывали несколько десятков. Стал появляться, как тогда выразились, зоопарк частиц. Но в 1960-е американцы Мюррей Гелл-Манн и Джордж предположили, что это проявление более подробной структуры внутри ядер атомов, и что протоны сами состоят из кварков. Это предположение подтвердилось экспериментально (не спрашивайте, как можно подтвердить существование частиц, которые могут существовать только внутри элементов, типа протонов и нейтронов), тем не менее это подтвердили, и не только З кварка, о которых говорили Мюррей и Джордж, а целых 6, а с антикварками - 12, кроме кварков стали открываться другие частицы и стала быстро проявляться Стандартная модель. О ней мы тоже говорили в основной части.

В квантовой физике содержание частиц выражается в значениях очень немногих характеристик: масса (она же энергия), заряд, непонятно оттуда берущийся спин, но оказавшийся чрезвычайно важной составляющей частицы. В Стандартной модели добавили ещё аромат и цвет (не модель, а уже какой-то разноцветный салат<sup>⑤</sup>).

У кварка заряды – дробные: 1/3, 2/3, -1/3 или 0. Кварки соединяются в адроны. Правило: сумма зарядов – целое значение, -1, 0 или 1. Известные адроны – протон, нейtron и их анти. Какие романтические названия давали кваркам (точнее, их ароматам), можно посмотреть в табличке в конце основной части.

Есть несколько понятий, не попавшие в эту таблицы, привожу их подряд просто для полноты: фермионы, бозоны, лептоны.

Масса адронов в основном сосредоточена в глюонах. В протоне суммарная масса кварков – порядка 2-х процентов (я в разных источниках встречал разные значения). Причём массу физики меряют в электрон-вольтах, то есть в единицах энергии. Килограммы и граммы и даже их мельчайшие доли в глубине атома неуместны. Но когда мириады адронов слепляются в наши гантели и гири – тогда да, вот они - килограммы. В килограмме гантели 980 граммов составляют глюоны, а 20 граммов - кварки!

Протон – в свободном полёте (не в ядре атома) живет долго, может быть, вечно, нейtron – распадается в среднем через 15 минут на протон, электрон и антинейтрино, но в составе атома стабилен, потому что живет в состоянии нуклона (то протон, то нейtron). Другие известные адроны тоже часто нестабильны.

Бозоны бывают очень разные (элементарные, калибровочные, фундаментальные, составные), главное, чтобы спин был целый. Функции тоже разные. Калибровочные бозоны осуществляют взаимодействие: фотон – электромагнитное, глюоны – сильное и стягивают кварки в адроны и не дают разлетаться протонам в ядрах, W и Z –бозоны осуществляют слабое взаимодействие. Должен ещё иметь место калибровочный бозон гравитон, осуществляющий гравитационное взаимодействие, но настолько эфемерная штука, что маловероятно, что его когда-нибудь пощупают экспериментально.

Особая штука – бозон Хигса. Его Питер Хигс теоретически предсказал на заре возникновения Стандартной модели, чтобы объяснить возникновение масс частиц, но экспериментально существование доказали только в 2012 году на Большом адронном коллайдере очень хитроумными экспериментами, на основе огромной статистической обработки. Поиски проявлений бозона Хигса были похожи на загонную охоту: предшествовало несколько экспериментов на других ускорителях, где уточняли возможные границы массы этого бозона.

Что приятно, Питер Хигс дожил до этого замечательного события и получил за свой оказавшимся невыдумкой бозон Нобелевскую премию. Вы, наверно, знаете, что эту премию присуждают только живым учёным. Хигсу было уже 84 года.

Бозон Хигса из-за его фундаментальнейшего назначения называли и частичкой бога, и частичкой чёрта, а за свойства – донышком бутылки шампанского. Наверно, о бозоне Хигса слышали миллиарды людей, 99 процентов из них не знают о существовании других Бозонов.

В современной Вселенной отличают барионную материю (сводящаяся к протонам, нейтронам и электронам), темную материю и тёмную энергию. Но об этом – в следующей статье.

Стандартная модель не объясняет темную материю.

Могут быть небольшие нарушения стандартной модели, например, бозон Хигса нарушает.

Но в целом стандартная модель очень хороша, позволяет прогнозировать все явления, с которыми мы сталкиваемся.

### **Дополнение 8**

Выше говорилось, что частицы живут разное время, протон сверхдолго, а нейtron – 14 минут. Но это в среднем! Хотя частицы могут родиться одновременно и быть похожими, как однодайловые близнецы, дальше существуют, кому как повезёт, по вероятности. Вот есть шанс (только более чем крошечный) обнаружить распад протона, хотя он в среднем живет так же долго, как Вселенная. И некоторые ядерные процессы могут происходить, хотя для этого в среднем энергии не хватает – это так называемый туннельный эффект. В классической механике это выглядело бы так. Вот сталкиваете Вы одинаковые шарики с горки с одинаковой высоты и катятся они на пригорок такой же высоты, может даже чуть повыше. Ясень пень, они не перекатываются через пригорок, поднимаются до одинаковой для всех высоты, потом катятся обратно. Но если эти шарики ведут себя по квантовому, то да, большинство шариков покатятся обратно, причём некоторые чуть-чуть залезая на пригорок, другие повыше, но найдётся пара взбесившихся шариков, которые перепрыгнут пригорок!

И этому обстоятельству мы обязаны нашей жизнью на Земле. Солнце бы не зажглось термоядерной энергией, не хватает там в среднем давления и температуры, но часть «взбесившихся» частиц всё же соединяются, и этого хватает, чтобы Солнце светило.

Вероятность проявляется ещё, например, следующим образом. Электрон в атоме находится неподалеку от ядра (боюсь сказать «крутится»), в среднем много меньше нанометра. Но с какой-то небольшой вероятностью может оказаться и существенно дальше от своего ядра, например, возле соседней галактики, а с ещё меньшей – на краю видимой Вселенной!

### **Дополнение 9**

Паскуаль Йордан (Германия) изобрёл «йорданову алгебру», которая важна для аксиоматизации квантовой механики. Но с 1933 года, с приходом Гитлера к власти у Йордана начались шашни с нацистами, в результате он (уже после 2-й мировой войны) не получил Нобелевскую премию, которую заслуживал. Да и в науку вернулся благодаря просьбе Паули.

### **Дополнение 10**

Уравнение Шрёдингера. Как и договорились, мы не будем влезать глубоко в математику, и здесь уравнение Шрёдингера приведём, чтобы почувствовать её красоту и лаконичность. Покажем одно из первых представлений уравнения, сначала для одномерного случая.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} = i\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t}$$

Искомая волновая функция имеет вид

$$\Psi(x, t) = A \exp\left[-\frac{i}{\hbar}(Et - px)\right]$$

где  $\hbar = h/2\pi$  – приведенная постоянная Планка,  $E$  – полная энергия частицы,  $p$  – импульс,  $x$  – расстояние,  $\exp$  – экспоненциальная функция или по-простому число  $e$  в указанной степени,  $i$  – мнимая единица, такая, что  $i^2 = -1$ .

Для трехмерного случая уравнения Шрёдингера может выглядеть так (здесь без учёта потенциальной функции частицы в силовом поле, или т.н. стационарное уравнение):

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Psi(x, y, z, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, y, z, t)}{\partial t}$$

А искомая функция  $\Psi$  выглядит так:

$$\Psi = A \exp\left[-\frac{i}{\hbar}(Et - \vec{p}\vec{r})\right]$$

Здесь присутствуют векторные варианты импульса и расположения в линейном трехмерном пространстве.

Комплекснозначное решение уравнения физического смысла не имеет, а вот квадрат волновой функции  $|\Psi|^2$  толкуется как плотность вероятности расположения частицы в определенной точке, то есть для определенного объёма вероятность нахождения частицы в нём можно было получить интегрированием плотности по этому объёму.

Уравнение Шрёдингера имеет приятное свойство в том, что оно линейно, и поэтому его легко распространять на совокупность частиц. То есть если вы описали волновым уравнением каждую из двух или любого количества частиц (например, всех электронов в атоме), то вы легко получите уравнение всей системы, просто сложив уравнения отдельных частиц, и решение будет волновой функцией для всей системы.

Уравнение Шрёдингера имеет варианты, зависящие от времени, и стационарные (не зависящие). Как мы писали в основной части, оно расширено для релятивистского случая, а также является частным случаем уравнения Дирака.

Решение уравнения может представлять сложную задачу в зависимости от исходных условий ( $E$ ,  $p$  или потенциальной функции в полном варианте), поэтому часто решают приближёнными способами.

## Дополнение 11

Комплексные числа и матрицы для квантовой механики.

Как мы видим, в создании формализма квантовой механики не обойтись без комплексных чисел. Интересно, что у копенгагенцев, что у Шрёдингера. Напомню, это объекты вида  $z = a+ib$ , где  $a$  и  $b$  – действительные числа, а  $i$  есть такая штука, что  $i^2 = -1$ , то есть вещь, которую сходить нельзя сопоставить чему-нибудь в нашем привычном пространстве. Заметим, что определение  $i$  как корень квадратный из  $-1$  не совсем корректно, потому что таких объекта два:  $+i$  и  $-i$ .

Теория функций комплексного переменного (ТФКП) возникла и развивалась как вспомогательная абстракция из внутренних потребностей математики – решения алгебраических уравнений (чтобы количество корней равнялось степени уравнения), для полноты исследования теории функций в математическом анализе. Реальный мир вначале был ни причём. Но в 19 веке появляется электродинамика, и оказывается, что если полное сопротивление электрической цепи представить как комплексное число, то операции над ними очень классно обобщают закон Ома. И вообще, без комплексных числах уже в классической физике оказалось как без рук: и в термодинамике, и в гидродинамике, и в оптике. Созданная вроде бы для красоты часть ТФКП о конформных отображениях, то есть таких, которые в малых величинах ведут себя как привычные повороты маленьких участков поверхности, а в больших как угодно перекручиваются, красиво легли не только в физике (для описания изменения сред в аэро-, газо- гидромеханике, теории пластичности и др.), но и в картографии!

И в квантовой физике комплексные числа оказались очень кстати.

Такое впечатление, что математика загодя нащупывает какие-то структуры и взаимоотношения, которые соответствуют не только тысячелетней человеческой практике, но и

фундаментальным свойствам природы, далёким от обыденного мира человека. Но зарождаются эти теории в голове человека, которая эволюционно формировалась в макромире, и это удивительно!

Основные понятия квантовой механики сформировались к 1927 году (Сольвейская конференция). В уже сложившемся к концу 1930-х годов математическом аппарате есть операторы, можно описать которые описать матрицами. Операторы действуют в гильбертовом пространстве, в котором координаты векторов - комплексные числа. У операторов есть понятия собственных векторов и собственных значений (вектор переходит сам в себя при умножении на число – собственное число. Только числа могут быть комплексными!). Операторы бывают сопряженные, или эрмитовы, последнее понятие определяется через понятие скалярного произведения.

Следующим аппаратом, который использовали Нильс-Боровцы, была матричная алгебра.

Слово алгебра в математике понимают не столько предмет, а как множество с алгебраическими действиями. Например, числа с операциями сложения и вычитания образуют алгебру. В алгебре матриц элементами являются вектора и матрицы. В контексте квантовой механики вектор – это набор чисел, например  $(-5, 6.5+2i, 14)$  размерностью 3, а матрица – это таблица чисел. Вектора могут быть в виде строк или столбцов, и являются также матрицами. В квантовой механике кроме векторов используют квадратные матрицы любой размерности. Матрицы можно перемножать, например ниже перемножение матриц размерности 2:

$$\begin{pmatrix} 3 & 1-i \\ 1+i & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 & 2i \\ -2i & -4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9-2i & -4+10i \\ 5+3i & 11 \end{pmatrix}$$

Можно умножать матрицы на столбец или строку на матрицу, размерности должны совпадать. Есть матрицы, которые являются эрмитовыми, то есть такие, у которых на главной диагонали – действительные числа, а элементам вне неё симметрично главной диагонали стоят комплексно-сопряженные числа. Так, первые две матрицы в нашем примере являются эрмитовыми. Этим ограничим знакомство с матрицами.

В математическом аппарате векторной механики есть понятия базисных векторов, компонентного сложения векторов с учётом базисных векторов, скалярного произведения векторов, собственных векторов оператора-матрицы, собственных значений. Здесь появляются эрмитово сопряжение и сопряжение комплексных чисел, я всё это не расписывая, но если вы задумаете изучить это самостоятельно, тут нет ничего сложного, всё наглядно и алгоритично, в интернете полно учебников и материалов.

Состояние частицы или системы частиц описывается вектором состояния в гильбертовом пространстве, то есть элементами вектора могут быть как действительные, так и комплексные числа, их ныне обозначают так (для простоты двумерный случай):

$$|\mathbf{a}\rangle = \begin{pmatrix} ax \\ ay \end{pmatrix}$$

Где  $ax$  и  $ay$  – это комплексные числа в разложение вектора состояния  $\mathbf{a}$  по базисам, в нашем случае в двумерном пространстве.

Приведём ещё обозначение эрмитового сопряжения для вектора состояний  $|\mathbf{a}\rangle$ . Оно является строкой и обозначается как  $\langle \mathbf{a}| = (ax^*, ay^*)$ , является матрицей-строкой,  $ax^*$  и  $ay^*$  обозначают комплексно сопряженные числа к  $ax$  и  $ay$ .  $|\mathbf{a}\rangle$  и  $\langle \mathbf{a}|$  называются соответственно кет-вектор и бра-вектор. Эти обозначения придумал Поль Дирак в 1939 году как составные слоги слова «bracket», что по-английски означает «скобка». Скалярное произведение двух векторов состояний обозначается как  $\langle \mathbf{a} | \mathbf{b} \rangle$  и называется амплитудой вероятности. Скалярное произведение будет уже не матрицей, а комплексным или действительным числом.

Состояния системы изменяются воздействием операторов. Так вот операторы в матричной квантовой механике являются квадратными матрицами, и изменение вектора состояния осуществляется просто матричным умножением: матрица слева от кет-вектора и справа от бра-вектора. Матрицы-операторы могут воздействовать на всё пространство векторов, вектора, которые при этом переходят в такой, который можно представить как его умножение на число (действительное или комплексное), то есть  $\mathbf{N}|\mathbf{a}\rangle = k|\mathbf{a}\rangle$ , где  $\mathbf{N}$  – матрица а  $k$  – комплексное число, называются собственными векторами этого оператора. Число  $k$  называется собственным

значением оператора. Как увидим далее, собственные значения операторов играют особую роль в квантовой механике.

Так вот, сформулирован постулат квантовой механики, что наблюдаемым величинам (энергии, импульсу, спину и др.) соответствуют эрмитовы операторы. А следующий постулат (правило Борна) гласит, что наблюдаемыми нами вещественными величинами являются собственные значения этих операторов! Верно и наоборот, что каждому эрмитовому оператору соответствует наблюдаемая величина. Но в первом случае подбор эрмитовой матрицы для частицы или системы является нетривиальной задачей, а во втором непросто угадать, для какой величины или системы соответствует конкретный эрмитов оператор.

Коллекция эрмитовых матриц квантовой механики началась со знаменитых матриц Паули (1927 год), размерности 2 на 2, которые описывают спины частиц.

Зная, как выглядит эрмитова матрица, например, для энергетических уровней электрона в атоме, путем вычисления собственных значений этой матрицы, можно получить значения этих энергетических уровней. При этом нужно вычислять собственные значения. В теории алгебры матриц есть алгоритмы их вычисления, но заметим, что приложение Mathcad позволяет вычислять все собственные значения эрмитовых матриц. Поэтому, для того, чтобы «поиграться» с вычислениями для каких либо задач или экспериментов есть нетрудоёмкий способ, нужно только овладеть Mathcadом.

В 1926 году Макс Борн сформулировал следующий постулат:

Вероятность  $P$  того, что произойдет событие перехода состояния  $|a\rangle$  в состояние  $|b\rangle$  равно квадрату амплитуды вероятности, то есть  $P = |\langle a | b \rangle|^2$ .

Формула позволяет вычислять вероятность перехода частицы (или системы) из одного состояния в другое. И здесь вероятность уже выступает как фундаментальное свойство природы. Причём это подтверждают всё более изощренные эксперименты. Здесь появляется свойство предсказательности матричной квантовой механики.

Примечательно, что хотя сущности квантовых состояний в мире частиц описываются комплексными числами, и в векторе состояний, в элементах эрмитовой матрицы, собственные значения этого оператора, которые вылезут при измерениях, гарантированно будут вещественными, то есть при переходе из мира частиц в наш макромир мы будем видеть привычные действительные числа!

Что интересно, этот математический аппарат позволяет теоретически вывести принцип неопределенности Гейзенберга. Матрицы в общем случае некоммутируемы: результат умножения матрицы А на матрицу В не равен умножения матрицы В на А. В частности, некоммутируемы матрицы Паули, а также некоммутируют операторы координаты и импульса. Отсюда можно видеть, что: 1) Значения спинов относительно разных осей невозможно знать одновременно, более того, измерение спина относительно одной оси делает неактуальной измерение спина относительно другой оси, как будто этого измерения и не было. Или измерение относительно одной оси влияет на значение измерения по другой оси! 2) Значения координат и импульса частицы нельзя одновременно измерить с абсолютной точностью.

Эти факты обобщены в виде постулата: «Значения величин, операторы которых не коммутируют, невозможно знать одновременно». Собственно, это вариант принципа неопределенности Гейзенберга.

## Дополнение 12

Важнейшим в квантовой механике является понятие суперпозиции. На мой взгляд, её удобно понять в следующей интерпретации. Любой вектор состояний системы можно представить как линейную комбинацию её базисных векторов, а именно нормированных собственных векторов. Например, если допустимы два состояния  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  (например, спин по какой либо оси), то допустима и их любая линейная комбинация

$$\Psi = c_1 \Psi_1 + c_2 \Psi_2$$

$c_1$  и  $c_2$  согласно матричной механике, будут амплитудами вероятности, и  $|c_1|^2$  будет вероятностью, что при измерении проявится  $\Psi_1$  со своим собственным значением, а  $|c_2|^2$  будет вероятностью, что при измерении проявится  $\Psi_2$ , причём согласно изложенному выше постулату  $\Psi$

перейдет с этими вероятностями либо в  $\Psi_1$  либо в  $\Psi_2$ . Этот переход называется коллапсом вектора состояний  $\Psi$ . И тут начинается самое интересное.

Измерение затирает предыдущую информацию. Мы получаем значение, но в общем случае после измерения не можем узнать ни  $c_1$ , ни  $c_2$ . Для того, чтобы знать вероятности  $|c_1|^2$  и  $|c_2|^2$ , нам нужно как то знать исходные  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$ . Вот для этого в эксперименте Штерна-Герлаха начинают громоздить два или три магнита друг за другом и первый является фильтром. В этом случае можно при прохождении второго магнита заведомо знать, с каким спином заходят электроны во второй магнит и вычислять вероятности измерений спина после второго. Такой эксперимент, а также многие другие, подтверждают предсказательную силу математики квантовой механики.

### **Дополнение 13**

Поведение частиц в микромире недетерминировано, то есть из их прошлого будущее однозначно не следует. Значит, и наш макромир недетерминирован, а глубоко принципиально случаен. Но в законах макромира, в частности, Ньютоновской физике, детерминировано однозначен, удобен в вычислениях и предсказаниях поведения. С этим несоответствием можно было бы как то примириться, мало ли чего там можно насочинять в микромире, у нас в макромире всё по-настоящему. Но дело в том, что есть мостики между микромиром и макромиром, они сочетаются в некоторых экспериментах, а иногда отражаются в поведении каких-нибудь кристаллов, которые даже невооружённым глазом можно разглядеть. И таки да, все эти фокусы с неопределенностями находят своё проявление в макромире.

Кстати, детерминированность классической физики была доводом против чудес, описываемых в религиозных сочинениях. Ведь всё определяется физическими законами, а чудеса противоречат этим законам. Но вот квантовая физика даёт шанс объяснить чудеса! Например, если самолёт падает и разбивается вдребезги, то элементарные частицы разлетаются так, что их поведение вероятностно, и существует очень-очень-очень (написать это слово триллион триллионов раз) вероятность, что все эти частицы вновь слепятся в целый самолёт со всеми пассажирами. Как сказал известный популяризатор физики Алексей Семихатов,: «Чудо - это не то, что не может произойти. Чудо - это маловероятное событие».

### **Дополнение 13**

Так уж повелось, что поведение великих физиков, начиная с начала 20 века, довольно оригинально и эксцентрично. Видимо, это обусловлено сочетанием их гениальности с и парадоксальностью существа тех процессов, с которыми они столкнулись.

Дирак. Обладал очень лаконичной речью и непосредственным пониманием смысла. На одной из конференций после доклада Дирака встал уважаемый профессор и сказал: «Господин Дирак, я не понял, как вы сделали вот этот вывод». Дирак молчит. Ведущий заседания не выдерживает и говорит: «Господин Дирак, может быть Вы соблагоизволите ответить на вопрос?!». Дирак: «Это был не вопрос, а утверждение».

Шредингер. В поездках всегда путешествовал в прогулочных ботинках и с рюкзаком. Сейчас эти мало кого удивишь, но в 20-х годах учёные были довольно чопорными людьми. Вот и на знаменитый Сольвеевский конгресс в 1927 году, где собирались почти одни респектабельные нобелевские лауреаты, он пришёл с вокзала в гостиницу именно в таком виде, и выглядел скорее как бродяга, чем всемирно признанный учёный. По свидетельству того же Дирака потребовалось немало споров на ресепшене, пока его заселили.

Да и Эйнштейн уже в зрелом возрасте приехал в Америку в старом пальто. Встречавший его друг сказал, что негоже такому учёному позориться в таком пальто. На что Эйнштейн ответил: «Меня же здесь никто не знает». Через 15 лет этот же знакомый встретил его в том же пальто! «Как? Вы позоритесь в том же пальто?». На что Эйнштейн ответил: « Ну и так же все знают, кто я такой».

### **Дополнение 14**

Я приведу примеры советских физиков, двоих из которых я видел на близком расстоянии а, с одним из которых - Кулаковым Юрием Александровичем, был лично знаком.

Юрий Иванович Кулаков. В 1970 году он читал нам, студентам матфака НГУ, лекции по физике. В НГУ всегда были свободные нравы, преподаватели могли экспериментировать на своих курсах, и Юрий Иванович, как я понял много позже, примерно треть курса читал нам начальные варианты своей теории физических структур. Будучи в молодости аспирантом академика Тамма, он хорошо разбирался в тогдашней современной физике, дал прекрасные представления о теории относительности Эйнштейна. Но однажды случилось, ошибка в расписании, мы не принесли тетрадей для конспектов по физике. Наверно, сейчас это не так, но в начале 1970-х было принято на лекциях кратко записывать то, что скажет или напишет на доске лектор. В условиях дефицита учебников, а то, что излагал Юрий Иванович, не было не то что в учебниках, но даже в статьях, и конспектирование было оправдано. И по случаю отсутствия конспектов Кулаков нам прочитал вольную, незапланированную лекцию о своём участии в экспериментах физика Козырева Николая Александровича. Эти эксперименты проводились под эгидой министерства обороны, которое заинтересовалось о некоторых эффектах, которые предсказывал Козырев и которые не вписывались в «официальную» теорию. Мы слушали великолепный рассказ Юрия Ивановича, обо всём позабыв. Я тогда впервые услышал, что в точной науке могут быть бунтари.

Кулаков нередко навещал компанию физиков в нашей лаборатории (во главе с Ткаченко Виталием), об их экспрессивных дискуссиях я уже писал. И, о чудо, становился слышен только незабываемый, спокойный бархатный баритон Кулакова и очень приглушенные фразы молодых физиков.

Кулаков был совершенно необыкновенным человеком. Прекрасный рассказчик, его лекции завораживали. Был заурядной внешности, сутулый, хромой (!), он обладал каким-то магнетизмом. Когда ему было под 60, ушёл из семьи к влюблённой в него студентке. Я был хорошо знаком с его первой женой, Протасевич Татьяной Ивановной, очень душевным, интеллигентнейшим человеком. Для неё это был большой удар, тем более, это случилось вскоре после гибели в горах одного из трех их детей. Но опять же, не берусь судить таких неординарных людей.

Кулаков, как и Дирак, был апологетом математической красоты. В связи с этим приведу необычный факт смягчения партийной идеологии в СССР. В конце семидесятых я не совсем по своей воле по вечерам учился в Университете марксизма-ленинизма при НГУ, были такие курсы идеологического направления. И, в общем, не пожалел. При наличии определенного вольнодумства в УМЛ читали лекции по очень неординарным направлениям. И большую лекцию прочитал Кулаков. Она была крайне оппозиционна марксистской философии, и в целом материалистическому мировоззрению. В основу понимания мироздания Кулаковставил КРАСОТУ! Он возводил её в основу физического устройства мира. «Физические формулы истинны, потому что красивы! Поэтому они будут выведены одинаково и у землян, и у марсиан!».

Многих физиков и заботило и заботит некая эклектичность стандартной модели. Хотелось бы найти какие-то фундаментальные основы, аксиоматику теоретической физики.

Румер Юрий Борисович. Был в 1927 году направлен молодой советской властью вместе со своим другом Львом Ландау на стажировку, за границу, в самый центр мировой науки, германский Гётинген. Сам Эйнштейн был готов взять его своим ассистентом, но Румер захотел заниматься более свежими тогда вещами из квантовой химии, и пошёл в ассистенты к Максу Борну. Безусловно, был не менее талантлив, чем будущий нобелевский лауреат Ландау, но не повезло. Через несколько лет после возвращения попал под каток репрессий. Кстати, тот же Ландау был арестован несколько раньше, и показания на Румера выбили у Ландау, и Румеру вменялось «пособничество врагу народа Ландау». Но Льва вытащил из тюрьмы академик Пётр Капица, а Румера уже не смог, не вынес Боливар двоих<sup>4)</sup>.

Румеру ещё повезло, если можно так выражаться в этих обстоятельствах, он не попал на лесоповал, а много лет проработал на интеллектуальной почве в так называемой шараге. Это было заключение, но такое, в котором учёные и конструкторы занимались умственным трудом: конструировали самолёты, создавали взрывчатые вещества, и жили в относительно комфортных условиях. Румер и в заключении продолжал размышлять о физических проблемах, и ещё в неволе он сформулировал свои идеи «Пятиоптики», в которой к трем пространственным координатам и времени он добавил ещё координату «действие». Квантовая механика и теория поля получались гораздо элегантнее классического изложения. После освобождения он пытался донести эту теорию до действующих физиков, включая своего друга Ландау, но понимания не встретил.

Я его увидел уже на склоне его лет, он преподавал в Новосибирском университете. Когда Юрий Борисович, большой и грузный, шёл по коридору - он не шагал, а странным образом передвигал ноги. Выглядел, конечно, больным, но когда на лекции включал голос, он оказывался неожиданно сильным, громовым.

Моя будущая жена училась в одной группе с его дочерью, Татьяной Михайловой, бывала у них дома. Характерно, что Румер за чаепитием её, молоденькую девушку озадачивал вопросами типа «При растворении сахара в чашке чая объём жидкости увеличивается или уменьшается?».

### **Дополнение 15**

Общаясь с физиками, я обращал внимание, что говоря о необычных свойствах материи, они не проявляют удивления или эмоций. Оно и понятно – пройдя горнила изучения и исследований, начиная от самых трудных в университетах вступительных экзаменов, жестоких сессий, отсеивающих, например, в МФТИ до трети студентов, результатов собственных экспериментов и постоянно появляющихся статей, переворачивающих прежние представления, они уже адаптировались к зазеркалью физики. Как говорится, кто в армии служил, тот в цирке не смеётся.

#### **Комментарии.**

1). Отсылка к трагедии Шекспира «Гамлет. Принц датский», Акт 1. Гамлет обращается к своему другу Горацио, который изумлен общением с призраком отца Гамлета: «Есть многое в природе, друг Горацио, что и не снилось нашим мудрецам», в первом переводе трагедии Михаилом Вронченко на русский язык (1928). Переводов трагедии на русский язык множество. «Например, в известном переводе Бориса Пастернака это же место звучит так: «Гораций, много в мире есть того, Что вашей философии не снилось». Горацио учился в университете, в которых в те времена науки назывались философией.

2). Частичная цитата из стихотворения А.С.Пушкина «Он между нами жил» о поэте-«иноагенте» Адаме Мицкевиче: «Он говорил о временах грядущих, Когда народы, распри позабыв, В великую семью соединятся».

3). Фраза «Наше всё» закрепилась за А.С.Пушкиным после статьи Аполлона Григорьева (1858г.).

4). Из новеллы О.Генри «Дороги, которые мы выбираем». Два бандита, Акула-Додсон и Боб Титбол, ограбив поезд, с добычей скрываются на лошадях. Но лошадь Титдола ломает ногу. Боб рассчитывает, что они ускакут вдвоём на лошади Додсона, Боливаре. Но Додсон говорит подельнику: «Боливару не снести двоих», пристреливает Боба и уезжает с добычей один.

Алсынбаев Камиль, Калининград, 2023 г.- 2024г.

[kamil.alsynbaev@mail.ru](mailto:kamil.alsynbaev@mail.ru)