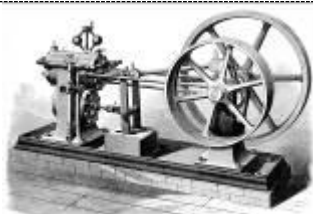


Как появилась квантовая физика?



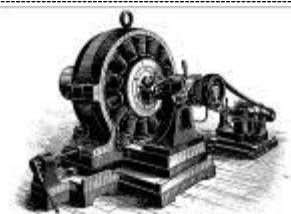
Токарный станок



Двигатель



Паровой транспорт



Электродвигатель



Электропривод



Телеграф



Пароходы



Лампочка Яблокова

На стыке 19-го и 20-го веков в мире произошел беспрецедентный научный и технологический скачок. Именно в этот период были сделаны величайшие открытия в математике, химии, физике, в биологии и медицине, появились паровые машины, двигатели внутреннего сгорания, механический транспорт, электрические генераторы и приводы станков, телеграф, радио, железнодорожный и морской транспорт на паровой и дизельной тяге, электрические лампы для искусственного освещения и многие другие удивительные изобретения.

Почему это произошло именно в самом начале 20-го века, не раньше и не позже? Вероятно, на технологический прорыв повлияло сразу несколько факторов:

- открытие новых источников энергии;
- обмен знаниями между учёными всего мира (семинары, журналы, опубликование научных трудов в прессе и научных журналах);
- появился ряд прорывных исследований (радио, резина, бензин, атомная энергия, много открытий в медицине, открытие и глубокое изучение элементов периодической таблицы Менделеева);
- вышло так, что наука стала для общества прибыльной;
- в мире появилась потребность вкладывать в науку огромные деньги, создавать прекрасные лаборатории;
- у ученых появилась возможность заниматься наукой не за свой счет, как это было раньше, а на инвестированные в науку деньги.

В физике конца XIX века царил оптимистичное настроение – весь мир активно развивался благодаря научным достижениям, и казалось, что технический прогресс будет бесконечно приносить новые блага.

В то время вся физика, как еще совсем недавно Земля, держалась на трех китах – трех законах Ньютона. Они составляли основу классической механики. Благодаря им, мы можем описывать движение тел под воздействием сил: и падение яблока со стола, и перемещение машины по дороге. К трем китам позже добавились уравнения Максвелла – такая же основа, но уже в электродинамике. Именно им мы обязаны многим, уже

базовым технологиям вроде электричества, так как с их помощью описываются практически все магнитные и электрические явления. В конце XIX века ученым казалось, что осталось совсем немного, и скоро все тайны физики наконец будут ими раскрыты.

В то же время в абсолютно разных областях физики начали появляться экспериментальные данные, которые ньютоновская механика объяснить не могла. Эти данные шли от явлений абсолютно разных масштабов – от света огромных звезд и от мельчайших молекул и атомов. Ученые начали сомневаться и задумываться: а почему так?

Например, ученые открыли спектры поглощения и излучения разных веществ. Сейчас нам стоит заглянуть в прошлое Швеции 1888-го года. Тогда в городе Лунде физик Йоханнес Ридберг вывел свою самую знаменитую формулу спектров водородоподобных химических элементов, которая выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

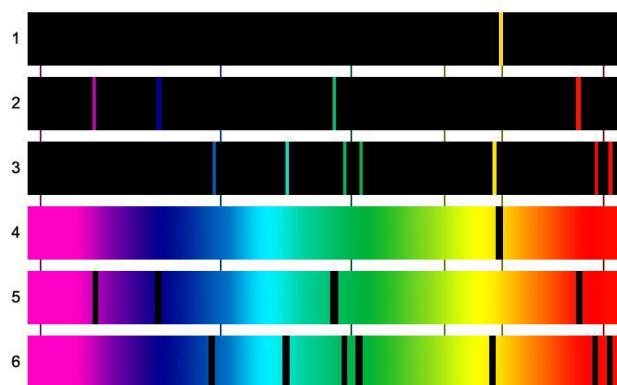
где λ — длина волны света в вакууме;

R — постоянная Ридберга в общем случае различна для разных химических элементов;

Z — атомный номер, или число протонов в ядре атома данного элемента;

n_i — целые числа, такие что $n_1 < n_2$.

Она описывала длины волн в спектрах излучения атомов. Попробуем разобраться. С точки зрения физики мы окружены электромагнитными волнами – это и видимый свет, и радиоволны, и рентгеновское излучение. Чтобы их описывать, физики используют несколько характеристик, и одна из них – длина волны. Если частицу вещества нагреть, чтобы она стала светиться, то получится набор отдельных узких полосок определенного цвета – спектр. У каждого вещества он свой.



Спектры испускания: 1 - натрия; 2 - водорода; 3 - гелия.
Спектры поглощения: 4 - натрия; 5 - водорода; 6 - гелия.

Спектры испускания и поглощения некоторых атомов.

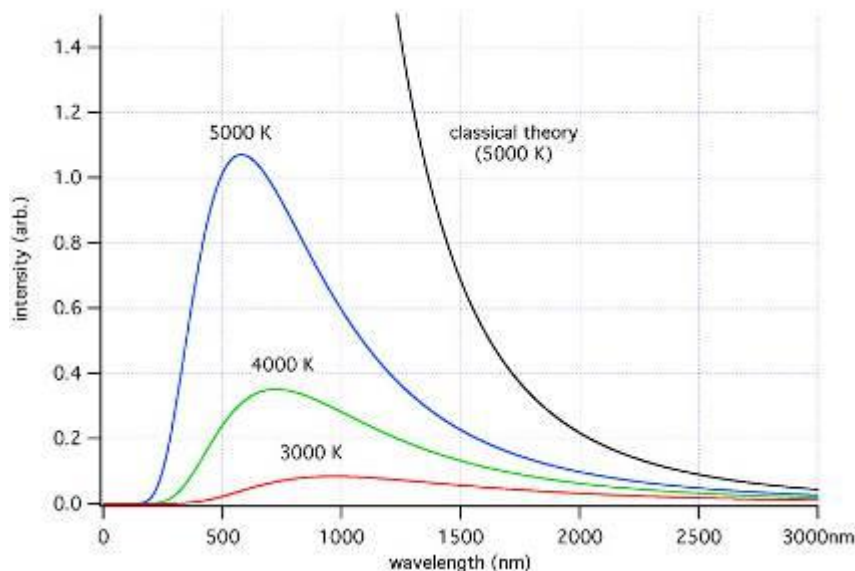
Все звезды, включая Солнце, постоянно излучают электромагнитные волны, часть из которых мы можем легко увидеть. Еще в середине XIX века ученые заметили, что каждый химический элемент имеет свой спектр излучения – в упрощенном варианте это

можно представить как разные цвета какого-либо элемента при нагреве. При этом важной деталью было то, что каждый атом испускал волны только с определенной длиной. И именно Йоханнес Ридберг предложил формулу, которая смогла описать эту зависимость и даже предсказать новые линии в спектрах некоторых элементов. Это на первый взгляд незначительное открытие по сей день приносит свои плоды. С помощью формулы Ридберга ученые могут точнее определять состав вещества и понимать их природу. Но самое главное, что именно формула Ридберга в свое время послужила доказательством модели атома Нильса Бора. Но об этом – чуть позже.

Скажем, хорошо известно, что свечение нагретого металла с ростом температуры меняется от красного к светло-голубому. Почему это так?

Оказалось, что решение этой задачи связано с излучением, так называемого, абсолютно черного тела, абстракции, представляющей собой тело, которое поглощает все упавшее на него излучение. Название, как оказалось, было выбрано довольно неудачно — например, с достаточной степенью точности абсолютно черным телом можно считать Солнце.

И в этот момент физики столкнулись вот с чем: модель излучения, которая была у них на руках (так называемый закон Рэля-Джинса) неплохо описывала излучение для длинных волн, но для коротких не работала совершенно. Более того, она давала невозможный результат: энергия, излучаемая телом в ультрафиолетовой зоне, в расчетах давала бесконечность. Этот парадокс и получил название ультрафиолетовой катастрофы.



Сравнение классического и квантового законов излучения для разных температур.

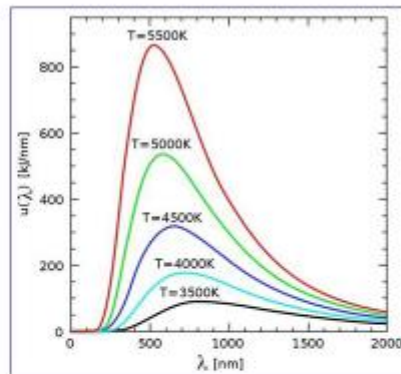
В 1900 году Макс Планк предложил совершенно неочевидное объяснение тому, что результаты экспериментов с короткими волнами противоречат теории — правда, сам термин «ультрафиолетовая катастрофа» появился только в 1911 году, а бесконечность энергии была обнаружена Рэлеем и Джинсом уже после появления планковского объяснения. Планк заявил, что излучение испускается не непрерывно, как считалось ранее, а порциями (квантами). Энергия каждого кванта оказывается связана с частотой излучения простым линейным законом. На основе этих предположений он вывел свой

закон излучения, который показал отличное согласование с экспериментальными данными и принес Планку нобелевскую премию по физике в 1918 году.

Спектральная объемная плотность энергии излучения АЧТ (энергия, излучаемая в узком спектральном интервале):

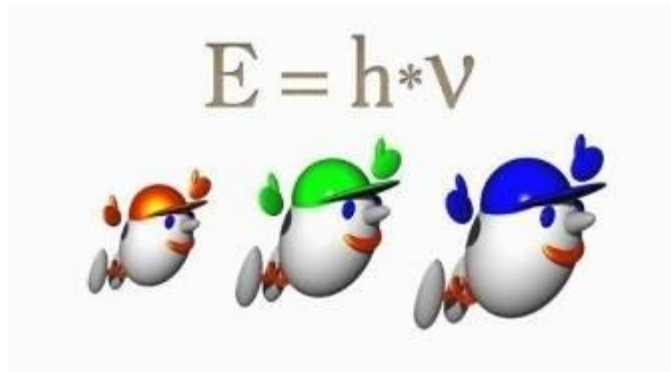
$$u_\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$$u_\lambda = \frac{\pi h \nu^3}{c^2 \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$



Макс Планк (20.04.1858 – 04.10.1947)

Обнаруженный закон невозможно было объяснить с точки зрения физики того времени, строго разделявшей две основные сущности — поля и частицы. Возник нетривиальный и, скорее, философский вопрос: если физика описывает нашу обычную действительность, то какую действительность описывают новые уравнения?



Планк предположил, что энергия электромагнитного излучения переносится в виде маленьких порций, пропорциональных некоторой постоянной величине h , или квантов. Так, сам того не подозревая, Макс Планк дал начало совершенно новой науке — квантовой механике. Сам он продолжительное время считал, что это был всего лишь математический прием, который позволял описывать явление излучения абсолютно черного тела.

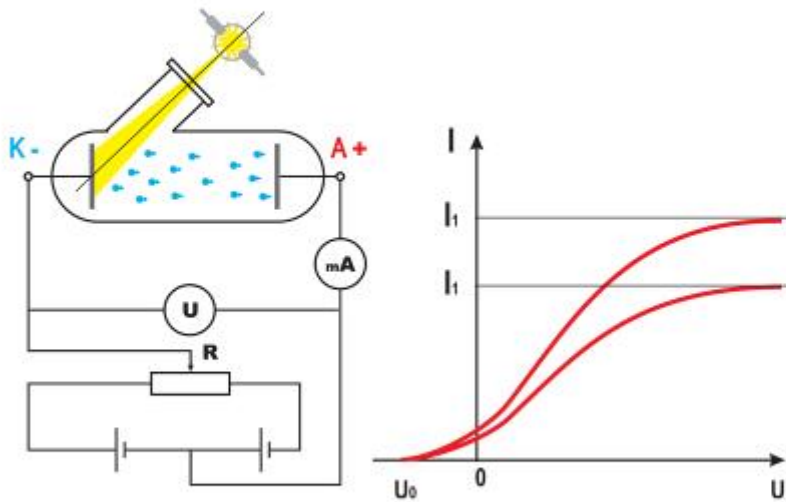
Идеи Планка о квантах развил и расширил Альберт Эйнштейн. В 1905 году он опубликовал работу, объясняющую явление фотоэффекта, открытого Генрихом Герцем в 1886-87 гг., когда он наблюдал за прохождением излучений через экраны из различных материалов.



Генрих Герц (22.02.1857 – 01.01.1894)

Подробно фотоэффект был исследован русским ученым Александром Столетовым, который установил, что фотоэффект начинает работать только при облучении материалов светом определенной длины волны и зависит от состава облучаемого материала.

Установка по изучению фотоэффекта Столетова



Александр Столетов (29.07.1839 - 16.05.1896)

УРАВНЕНИЕ ЭЙНШТЕЙНА ДЛЯ ФОТОЭФФЕКТА

$$h\nu = A_{\text{ВЫХ}} + \frac{m_e v^2}{2}$$

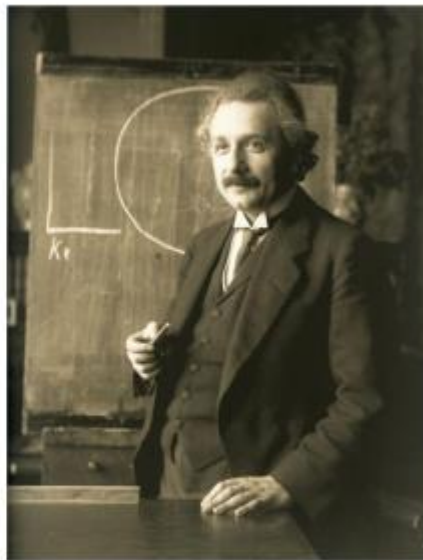
$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка

ν – частота падающего света, Гц

$A_{\text{ВЫХ}}$ – работа выхода, Дж

$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона

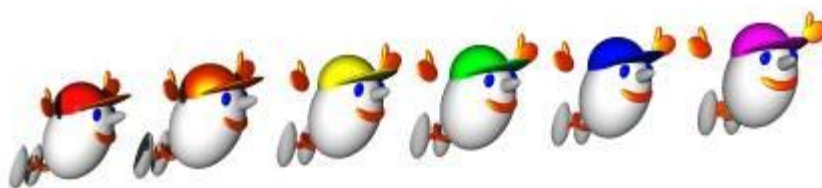
v – скорость фотоэлектронов, м/с



Альберт Эйнштейн (14.03.1879 – 18.04.1955)

За объяснение природы фотоэффекта Альберт Эйнштейн получил Нобелевскую премию (а не за его знаменитую «теорию относительности»).

Одним из ключевых предположений Эйнштейна для квантовой механики и было существование световых квантов – фотонов. При этом Эйнштейн отметил, что описание света в виде отдельных частиц прекрасно подходит для описания фотоэффекта, но описание света в виде волн в классической оптике прекрасно подходит для описания всех оптических явлений. Таким образом, он предвосхитил следующий этап в развитии физики – корпускулярно-волновой дуализм, когда свет (и не только) рассматривается одновременно как волна и как частица. Свет в теории Планка одновременно является и волной, и частицей с энергией кратной некоторому числу – постоянной Планка (h). Мельчайшую и неделимую частицу излучения ученые назвали **квантом**.



Учитывая формулу Макса Планка, можно сказать, что энергия красного кванта меньше зеленого, а зеленого меньше синего и так далее.

Начало квантовой механики.

Итак, с легкой руки Макса Планка и Альберта Эйнштейна в самом начале 20-го века появился новый раздел физики – **квантовая механика**.

Если Вы вдруг поняли, что подзабыли основы и постулаты квантовой механики или вообще не знаете, что это за механика такая, то самое время освежить в памяти эту

информацию. Ведь никто не знает, когда квантовая механика может пригодиться в жизни.

Зря вы усмехаетесь и ехидствуете, думая, что уж с этим предметом вам в жизни вообще никогда не придется сталкиваться. Ведь квантовая механика может быть полезной практически каждому человеку, даже бесконечно далекому от нее. Например, у Вас бессонница. Для квантовой механики это не проблема! Почитайте перед сном учебник – и Вы спите крепчайшим сном на странице уже, эдак, третьей. Или можете назвать так свою крутую рок группу. Почему бы и нет?

Шутки в сторону, начинаем серьезный разговор. С чего начать? Конечно, с того, что такое **квант**.

Квант (от латинского quantum – "сколько") – это неделимая порция какой-то физической величины. Например, говорят - квант света, квант энергии или квант поля.

Что это значит? Это значит, что меньше быть уже просто не может. Когда говорят о том, что какая-то величина квантуется, понимают, что данная величина принимает ряд определенных, дискретных значений. Так, энергия электрона в атоме квантуется, свет распространяется «порциями», то есть квантами.

Сам термин «квант» имеет множество применений. Квантом света (электромагнитного поля) является фотон. По аналогии квантами называются частицы или квазичастицы, соответствующие иным полям взаимодействия. Здесь можно вспомнить про знаменитый бозон Хиггса, который является квантом поля Хиггса. Но в эти дебри мы пока не полезем.

Как механика может быть квантовой?

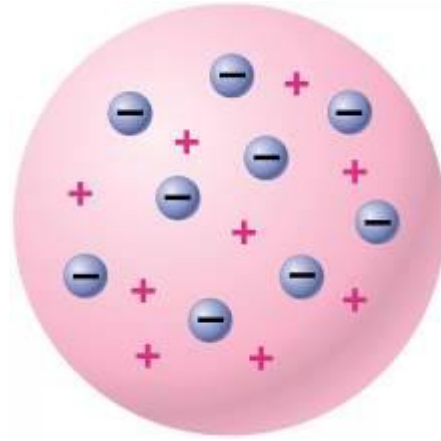
Как Вы уже заметили, в нашем разговоре мы много раз упоминали о частицах. Возможно, Вы и привыкли к тому, что свет – это волна, которая просто распространяется со скоростью C . Но если посмотреть на все с точки зрения квантового мира, то есть мира частиц, все изменяется до неузнаваемости.

Квантовая механика – это раздел теоретической физики, составляющая квантовой теории, описывающая физические явления на самом элементарном уровне – уровне частиц.

Наблюдение явлений в объемах, сравнимых с величиной постоянной Планка, обескуражило ученых. Здесь классическая механика Ньютона и электродинамика оказались совершенно непригодными для их описания. Например, согласно классической теории электрон, вращаясь с большой скоростью вокруг ядра, должен излучать энергию и, в конце концов, упасть на ядро. Этого, как известно, не происходит. Именно поэтому и придумали квантовую механику – открытые явления нужно было как-то объяснить, и она оказалась именно той теорией, в рамках которой объяснение было наиболее приемлемым, а все экспериментальные данные "сходились".

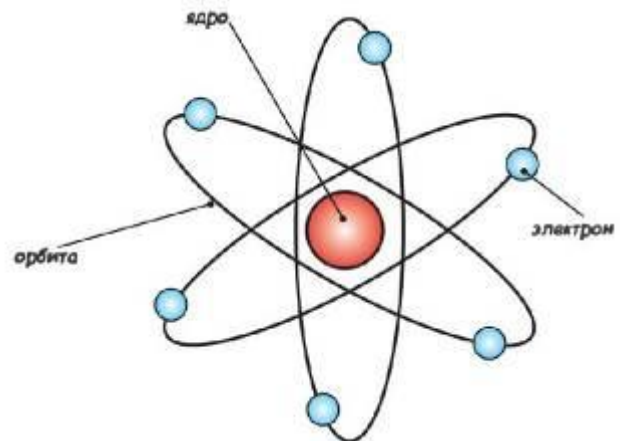
Параллельно с описанием природы света ученые бились над устройством атома. Это сейчас о нем можно узнать на уроке физики в школе, а в начале XX века десятки ученых пытались изучить эту крохотную частицу. К тому времени уже точно было понятно, что атом не имеет заряда и в нем содержатся положительно заряженные протоны и отрицательно заряженные частицы – электроны.

Первым свое видение предложил англичанин Джозеф Джон Томсон в 1904 году – он предположил, что атом представляет собой некое облако с положительным зарядом, в котором плавают электроны с отрицательным зарядом. Такую модель можно представить как кекс с изюмом – изюм играет роль электронов, а сам кекс – роль положительно заряженного облака.



Сэр Джозеф Джон Томсон (1856-1940) — английский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1906 года.

Такая «вкусная» модель строения атома не прошла проверку временем. Уже в 1911 году Эрнест Резерфорд доказал, что у атома в центре должно быть положительно заряженное ядро, и предложил свою модель атома – планетарную. Свою гипотезу Резерфорд выдвинул благодаря результатам проведенного им опыта.



Эрнест Резерфорд. (1871-1937)

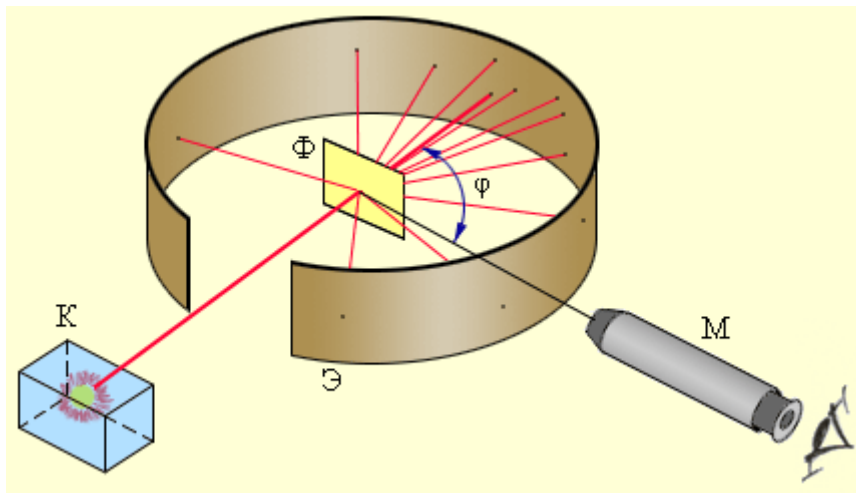
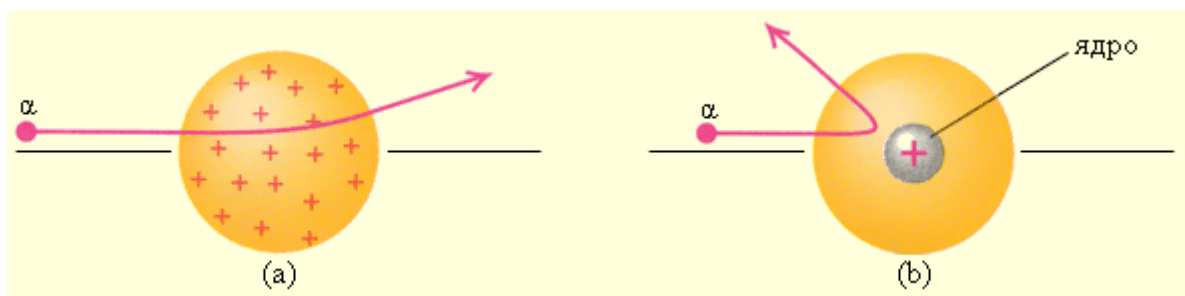


Схема опыта Резерфорда по рассеянию α -частиц, где K – свинцовый контейнер с радиоактивным веществом, \mathcal{E} – экран, покрытый сернистым цинком, Φ – золотая фольга, M – микроскоп.

Опыт проводился следующим образом. Радиоактивный источник, заключенный в свинцовый контейнер, располагается таким образом, что α -частицы направляются от него к тонкой металлической фольге. Рассеянные фольгой частицы попадают на экран со слоем кристаллов сульфида цинка, светящиеся от их ударов. Сцинтилляции (вспышки) можно наблюдать при помощи микроскопа. Угол φ к первоначальному направлению пучка не имеет ограничений для данного опыта. После испытаний было выявлено, что α -частицы, проходящие через тонкий слой металла, не испытывали отклонений. (**Альфа-частица** – ядро атома гелия, состоящее из связанных вместе двух протонов и двух нейтронов.) Наблюдались их отклонения и на углы, превышающие 30 градусов и близкие к 180. Результат Резерфорда противоречил модели Томпсона, так как положительный заряд не был распределен по всему объему атома.



Согласно модели Томпсона, заряд не имеет возможности создавать сильное электрическое поле, которое впоследствии отбросит α -частицы. Такое поле однородно заряженного шара максимально на его поверхности и убывает до нуля к центру.

При уменьшении радиуса шара с положительным зарядом атома максимальная сила отталкивания, действующая на α -частицы, по закону Кулона увеличилась бы в n^2 раз. Если размеры α -частиц достаточно большие, тогда рассеивание может достичь угла в 180 градусов. Резерфорд пришел к выводу, что пустота атома связана с наличием положительного заряда, сосредоточенного в малом объеме, названная атомным ядром.

Однако и эта модель имела свои недостатки – согласно классической физике, электроны в таком атоме должны были практически мгновенно падать на ядро, при этом было очевидно, что это не происходит. Дело в том, что при вращении электрона вокруг

ядра он испытывает ускорение, а согласно законам электродинамики в таком случае он должен терять энергию за счет излучения электромагнитных волн и, в конце концов, упасть на ядро атома.



Нильс Хенрик Давид Бор (07-10-1885 - 18-11-1962)

Спустя всего лишь два года Нильс Бор предложил свою модель атома, оказавшись ближе всех к истине. В качестве основы он взял модель Резерфорда, но добавил в нее стационарные орбиты. Так, электрон мог вращаться только по этим орбитам и переходить с одной на другую с излучением или поглощением энергии. Таким образом, электрон больше не падал на ядро. Более того, переходы электронов с одной орбиты на другую сопровождалось испусканием квантов, что прекрасно объясняло линии в спектрах химических элементов и давало еще одно подтверждение формуле Ридберга, с которой мы и начали рассказ о квантовой механике. Как итог – квантовая механика окончательно вошла в научный мир, а классической физике пришлось подвинуться. Важно понимать, что все эти открытия происходили в разных странах, в разные временные периоды и довольно сумбурно. Но в итоге вылились в то, о чем сейчас говорит весь научный мир.

На этом полная перипетий история квантовой физики не закончилась, как и не закончится она еще довольно долго. Вместо точки пришлось поставить запятую, когда Эрвин Шредингер в 1925 году открыл свое уравнение, а через три года его модифицировал Поль Дирак.

$$E = h \cdot \nu$$



Пример зависящего от времени уравнения Шрёдингера:

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) + U\psi = E\psi$$



Эрвин Шрёдингер
(12.08.1887 – 04.01.1961)

По важности эти уравнения можно сопоставить с уравнениями Максвелла в электродинамике или с уравнениями Ньютона в классической механике. Именно этот период и сделал квантовую механику общепризнанной частью физики и, более того, показал, что классическая механика является лишь частным случаем квантовой.

Шрёдингер в своей работе все-таки допустил неточность. Волновую функцию он отождествил с распределением плотности заряда в пространстве, что оказалось не совсем верным. Уравнение Шрёдингера не может описывать состояния для частиц со спином и для частиц, движущихся со скоростью, близкой к скорости света.



Поль Дирак (08.08.1902 – 20.10.1984)

Тут на помощь приходит уравнение Поля Дирака, в итоге и ставшее основным уравнением квантовой механики – оно позволяет учесть все эти эффекты и описывать квантовые состояния в более сложных системах.



Луи де Бройль (15.08.1892 – 19.03.1987)

Двойственная корпускулярно-волновая природа оказалась справедливой не только для фотонов, но и для любых движущихся частиц. К такому выводу пришел французский физик Луи де Бройль в 1924 г. Он предположил, что соотношение (1) имеет универсальный характер и справедливо для любых волновых процессов, связанных с частицами, обладающими импульсом p .

Длина волны де Бройля, которой обладает движущаяся частица, вычисляется по формуле:

$$\lambda = h/p \quad (1)$$

где h - постоянная Планка, p - импульс частицы.

Если скорость движущейся частицы много меньше скорости света в вакууме ($v \ll c$), то импульс равен:

$p = m \cdot v$; где m - масса частицы.

Если скорость частицы соизмерима со скоростью света в вакууме $v \sim c$, то импульс вычисляется по формулам теории относительности Эйнштейна:

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

, где m_0 - масса покоя частицы.

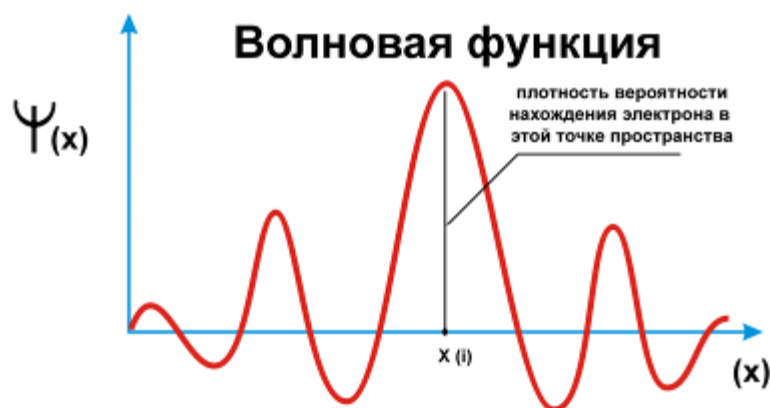
Волновые свойства электронов впервые были обнаружены в опытах по наблюдению дифракционной картины при рассеянии их на кристаллах, которые служили естественной дифракционной решеткой.

Многие ученые задумались над тем, что же представляет собой волна де Бройля? Как превращается частица в волну? Ответ не заставил себя долго ждать. Луи де Бройль обратился к уравнению Шредингера и интерпретировал волновую функцию электрона не как изначально считал Шредингер, что это распределение в пространстве плотности заряда электрона, а как плотность вероятности положения самого электрона. И в чем же здесь разница, спросит пытливым читатель? Дело в том, что данная интерпретация

волновой функции Шрёдингера означает, что электрон можно найти в разных местах одновременно, но с разной вероятностью.

Если вы не изучали математический анализ и не знаете что такое частные производные – ничего страшного! Просто надо принять, что с помощью этого уравнения мы можем вычислить Ψ функцию, которая и описывает вид волны электрона!

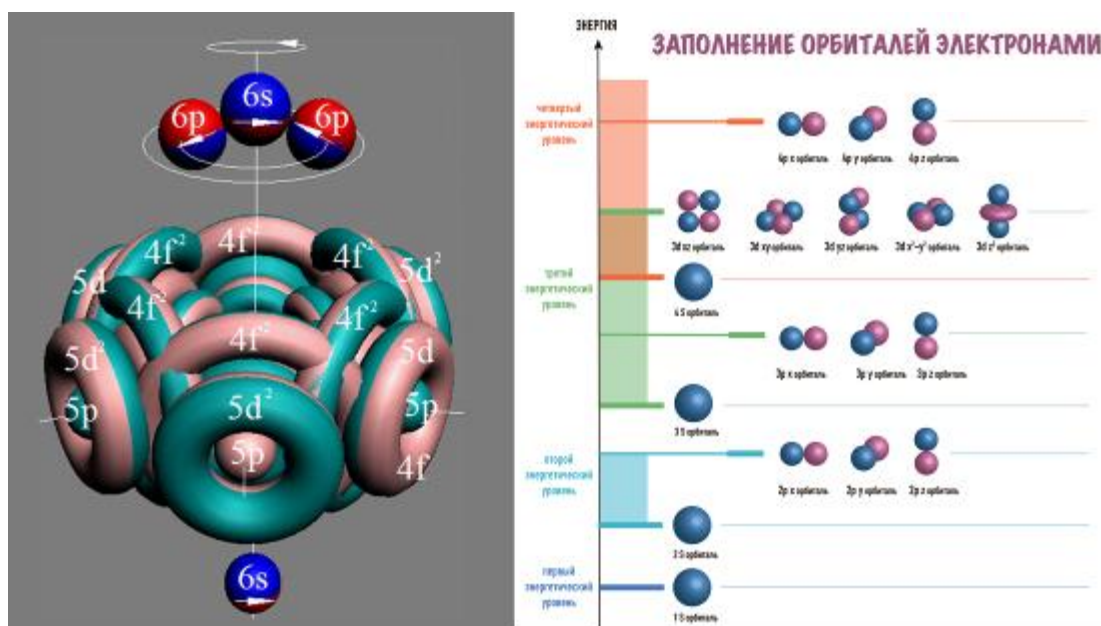
Поскольку Пси-функция зависит от (x) , то мы можем графически изобразить эту функцию:



Интерпретация волновой функции по Макс Борну.

Другими словами, квадрат волновой функции Шрёдингера равняется вероятности нахождения электрона в той или иной точке пространства при проведении большого количества измерений. И все-таки до сих пор большинство ученых не пришли к однозначному пониманию интерпретации волновой функции Шрёдингера. Например, волновая функция описывает результат одного или множества опытов по обнаружению электрона в пространстве.

Тем не менее, волновая функция является хорошим математическим инструментом для проведения множества весьма точных расчетов поведения электрона в квантовом мире.



Интерпретация орбиталей атома с помощью волновой функции Шрёдингера.

Так что же описывает уравнение Шредингера? Говоря простыми словами – изменение состояния квантовой системы, которое задается в этом уравнении волновой функцией. А квантовое состояние – это набор значений, который однозначно описывает квантовую систему. Например, если взять в качестве системы движущуюся машину (которая, конечно, не является квантовой системой), то ее состояние можно описать координатами в пространстве, скоростью и ускорением. Для квантовых систем состояние будет характеризоваться другими величинами, но суть останется той же. Более того, в случае квантовых систем волновая функция (а точнее, ее квадрат) из уравнения Шредингера описывает даже не состояния системы, а вероятность системы находиться в одном из этих состояний – то есть система находится не в одном состоянии, а как бы сразу во всех одновременно (в физике это называется суперпозицией состояний). На примере автомобиля это можно представить как нахождение его на всей длине трассы одновременно.

При переходе от мира квантового к миру привычных нам вещей законы квантовой механики естественным образом трансформируются в законы механики классической. Можно сказать, что классическая механика – это частный случай квантовой механики, когда действие имеет место быть в нашем с вами привычном и родном макромире. Здесь тела спокойно движутся в неинерциальных системах отсчета со скоростью, гораздо меньшей скорости света, и вообще - все вокруг спокойно и понятно. Хочешь узнать положение тела в системе координат – нет проблем, хочешь измерить импульс – всегда пожалуйста.

Совершенно иной подход к вопросу имеет квантовая механика. В ней результаты измерений физических величин носят **вероятностный** характер. Это значит, что при изменении какой-то величины возможно несколько результатов, каждому из которых соответствует определенная вероятность.



Приведем пример: монетка крутится на столе. Пока она крутится, она не находится в каком-то определенном состоянии (орел-решка), а имеет лишь вероятность в одном из этих состояний оказаться.

Здесь мы плавно подходим к принципу неопределенности Гейзенберга. Но почему? Почему мы должны иметь дело с этими непонятными вероятностями и волновыми функциями, когда, казалось бы, нет ничего проще, чем просто взять и измерить расстояние до частицы или ее скорость. Все очень просто! Ведь в макромире это действительно так – мы с определенной точностью измеряем расстояние рулеткой, а погрешность измерения определяется характеристикой прибора. С другой стороны, мы можем практически безошибочно на глаз определить расстояние до предмета, например, до стола. Во всяком случае, мы точно дифференцируем его положение в комнате относительно нас и других предметов. В мире же частиц ситуация принципиально иная – у нас просто физически нет инструментов измерения, чтобы с точностью измерить искомые величины. Ведь инструмент измерения вступает в непосредственный контакт с измеряемым объектом, а в нашем случае и объект, и инструмент – это частицы. Именно это несовершенство, принципиальная невозможность учесть все факторы, действующие на частицу, а также сам факт изменения состояния системы под действием измерения и лежат в основе принципа неопределенности Гейзенберга.

Приведем самую простую его формулировку. Представим, что есть некоторая частица, и мы хотим узнать ее скорость и координату. В данном контексте принцип неопределенности Гейзенберга гласит: невозможно одновременно точно измерить положение и скорость частицы.

Математически это записывается так:

$$\Delta x * \Delta \vartheta > \frac{h}{m}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$



Вернер Карл Гейзенберг (05.12.1901 - 01.02.1976)

Здесь Δx - погрешность определения координаты, дельта $\Delta \vartheta$ - погрешность определения скорости. Подчеркнем – данный принцип говорит о том, что чем точнее мы определим координату, тем менее точно будем знать скорость. А если определим скорость, не будем иметь ни малейшего понятия о том, где находится частица.

Таким образом, к концу 20-х годов XX века физики, наконец, получили практически все основные формулы для создания новой области науки – квантовой механики.

Финалом всех этих исследований стала Копенгагенская интерпретация – общее объяснение и толкование всех ранее описанных явлений и формул. Ее необходимость была очевидна, потому что квантовая механика содержала огромное количество парадоксов и явлений, трудных для понимания.

Создание квантовой физики стало переломным моментом. Она показала, как небольшие нестыковки и парадоксы в классической физике, которые поначалу замечали немногие, привели к появлению совершенно нового раздела.



Пятый Сольвеевский конгресс физиков, Брюссель 1927го года.

С другой стороны, она объединила ученых практически из всех стран, и каждый из них внес значительную часть в итоговую модель квантовой физики. Это и шведский ученый Ридберг, и английские физики Томсон и Дирак, и немецкие ученые Эйнштейн и Планк, и французский ученый де Бройль, и датский физик Бор, и японец Хантаро Нагаока, и наши соотечественники Иоффе и Лебедев. Может показаться, что эти люди работали над своими трудами отдельно, каждый над чем-то своим, но это далеко не так. Практически все они общались и переписывались, делились своими идеями и наблюдениями, обсуждали различные гипотезы. Пожалуй, такую организацию науки и можно назвать одним из главных достижений квантовой физики – когда ученые работают сообща и за счет этого достигают невиданных ранее результатов, которые помогли совершить небывалый скачок в технологиях в середине XX века.

Парадокс Эйнштейна, Подольского, Розена

ЭПР-парадокс или ЭПР-эффект был достаточно серьезным контраргументом против квантовой физики, и поэтому в истории науки имел большое значение. Сейчас раскроем его суть в популярном изложении.

Первая треть XX века была отмечена крупными спорами, до которых широкой публике дела было мало, поскольку спорили физики и спорили как всегда о чем-то своем. И до сих пор еще многие граждане даже не подозревают, что спор этот касался всех нас. Потому что это был спор о реальности сущего. Это был не просто спор. Это была последняя битва между силами света и силами тьмы! В столице Дании Копенгагене сошлись два титана – Альберт Эйнштейн и Нильс Бор. Все-таки поразительные кульбиты порой делает история, тот самый Эйнштейн, который своей теорией относительности разрушил фундамент классической физики, теперь яростно набрасывался на Бора, выступая защитником именно классической, объективной физической реальности. А Бор, как новое поколение физиков, выступал против реальности.

«Старое представление о рациональном и механистическом мире, которым управляют причинно-следственные связи, кануло в Лету, уступив место таинственному миру парадоксов и «потусторонней реальности» – напишет об этом через полвека в книге «Суперсила» английский физик Пол Девис. «Потусторонняя реальность» – лучше о современной физике не скажешь. Когда родилась квантовая механика – физика удивительная, непохожая на прежнюю, то даже ее создатель Макс Планк так и не принял в глубине души всей причудливости этой науки. А Эйнштейн попросту считал квантовую механику абсурдной теорией, называл ее «безумием». Кризис восприятия был так велик, потому что с появлением квантовой механики (и последующих теорий микромира) под ногами физиков полностью пропала опора в виде наглядных схем и понятных интерпретаций. Физика чем дальше, тем больше становилась математикой, то есть формульной абстракцией, которую иногда даже невозможно проверить опытным путем! Причем формулы порой выдавали попросту абсурдные решения. Тогда физики над формулами немножко издевались – проводили так называемую «перенормировку», а попросту говоря – подгоняли теорию под ответ. Но это было уже потом, а тогда, в Копенгагене все только начиналось...

Нильс Бор, возглавлявший в 1920-е годы XX века физический институт в Копенгагене, был лидером «темных сил», наступавших на привычную реальность. Эйнштейн был лидером «светлых сил» – защитников традиционной реальности. По правую руку от него сражался Вернер Гейзенберг. Этот рыцарь печального образа практически повторил путь Эйнштейна: он был в числе тех из молодого поколения физиков, кто своими славными деяниями громил фундамент Классики. Именно он открыл знаменитый принцип неопределенности – основу основ квантовой механики! А потом поднял меч в защиту старого мира.

Да если бы не «предательство» такими, как Эйнштейн и Гейзенберг, светлого и ясного ньютоновского мира, не пришлось бы потом его и защищать! Так всегда бывает – революции поедают своих героев... Вот что написал храбрый Гейзенберг позже в своей книге «Физика и философия» (характерное, кстати, названьице, не правда ли?!..):

«Я вспоминаю дискуссии с Бором, длившиеся за полночь, которые приводили меня почти в отчаяние. И когда я после таких обсуждений отправлялся на прогулку в соседний парк, передо мной снова и снова возникал вопрос: действительно ли природа может быть столь абсурдной, какой она предстает перед нами в этих атомных

экспериментах?»

...Ах, Эйнштейн и Гейзенберг, не надо было вам открывать ящик Пандоры!..

Раз за разом, день за днем сходились в великой битве титаны. Эйнштейн, блестящий гений которого позволил ему когда-то раскачать и опрокинуть элегантное и совершенное здание прежней физики, наносил Бору удар за ударом. Каждый раз он выбрасывал противнику очередную мысленную задачу, которая логически разбивала внутренне противоречивый и потому неверный (как полагал Эйнштейн) Мордор квантовой теории. Но Бор был тоже не простак. Каждый раз он не без труда, но отражал выпады Эйнштейна.

Вот пример одного из таких поединков той серии битв, на которых, без всякого сомнения решалась судьба нашего мира. Да-да! Дело в том, что главное отличие старого, традиционного мира – его принципиальная предсказуемость, фатальность, тотальная причинность. Суть этого мира в том, что если бы мы знали все координаты и импульсы всех частиц во Вселенной, мы могли бы со стопроцентной точностью предсказать будущее. В светлом, ясном мире все частицы движутся по своим траекториям, в определенных направлениях, каждая имеет вполне определенную массу и скорость, каждая частица существует в реальности и «действует» сама по себе, вне зависимости от того, смотрит на нее кто-то или не смотрит. Если умрут все ученые в мире, все наблюдатели, смотрящие за миром, мир не изменится. Он объективен. Он существует сам по себе. Он абсолютен. В нем можно физически различить добро и зло. Одна причина порождает в нем одно конкретное следствие. В этом мире есть истина.

Новый, квантовый мир совсем другой. В нем нет ничего абсолютного. Он принципиально относителен. В нем нет точных местоположений. В нем нет траекторий. В нем нет направлений. Этот мир принципиально непредсказуем. Неопределенен. В нем нет четких ответов. Одна причина в нем может породить тысячи разных следствий. Одно следствие в нем может быть вызвано тысячью разных причин. А главное – в этом мире нет реальности в том ее понимании, которое существовало в ньютоновском мире. В нем действуют нереальные (виртуальные) частицы. То есть этот мир отчасти нереален. Больше того – облик этого мира зависит от сознания. От того, смотрит кто-то на этот мир или нет. Этот мир требует введения в физические формулы наблюдателя. В этом смысле он един – в него на равных входят мертвая материя и наблюдатель.

Подобная позиция выглядела слишком непривычно для позитивистского научного мышления. Поэтому, борясь с принципом неопределенности, Эйнштейн предложил остроумную схему.

Вы говорите, ваш мир принципиально неопределенен? Что в нем нельзя одновременно точно узнать энергию частицы и момент времени, в который эта частица данной энергией обладает? Хм, это уже лазеечка для нарушения главного закона Вселенной – закона сохранения массы-энергии, что уже само по себе – немалое преступление! Мы сейчас эту лазеечку в законе перекроем!.. Смотрите, в чем ваш прокол, господин рыцарь хаоса: время я измеряю непосредственно, а энергию определю взвешиванием! Я взвешиваю частицу и таким образом узнаю ее массу – по моей же формуле $E = mc^2$! Вот и конец вашей неопределенности! Так сказал Эйнштейн...

Удар был силен. «На этот раз Бор был обеспокоен, и те, кто видел, как он провожал Эйнштейна в гостиницу, заметили, что Бор был сильно взволнован» – пишет Девис. Однако, проведя бессонную ночь, на следующий день Бор нашел эйнштейновскую ошибку: согласно эйнштейновской же теории относительности, гравитация замедляет течение времени. А при взвешивании частицы без гравитации не обойтись, и эффект замедления времени внесет в эти измерения свои коррективы. В пользу неопределенности... Победа опять осталась за Бором.

Однако самый тяжелый и решающий бой между тьмой кванта и светом классики закончился все же вничью. Эйнштейн, как показалось тогда ему и многим, нанес почти смертельный удар Бору. Но могучий Бор выстоял. Он отразил удар. Не так успешно, как прежние выпады. И потому вопрос о победителе той битвы остался неразрешенным. До поры...

Что же сказал Бору Эйнштейн в той схватке, когда мироздание зависло в точке равноденствия между ночным и дневным дозором?

Это случилось в 1935 году. И Эйнштейн был в той схватке не один. На его стороне сражались еще два рыцаря истины – Борис Подольский и Натан Розен. Они предложили мысленный эксперимент, который с тех пор получил название «эффект Эйнштейна – Подольского – Розена» или попросту ЭПР-эффект.

Хитроумная схема трех рыцарей, общей дамой сердца коих была объективная истина, нацеливалась на основу основ теории неопределенности – может ли частица одновременно обладать определенным положением и определенным импульсом. То есть существовать в классическом смысле этого слова. Мир тьмы, мир неопределенности, ставящий под сомнение самую физическую реальность, гласил: знать все невозможно! Потому что ничего определенного не существует! Все размыто, искажено... В частности, мы не можем совершенно точно одновременно узнать координаты и импульс элементарной частицы. Либо вы меряете с точностью, где находится частица, и тогда вы не знаете ничего об ее характеристиках (импульсе), либо вы точно узнаете свойство частицы, но не знаете, где она находится.

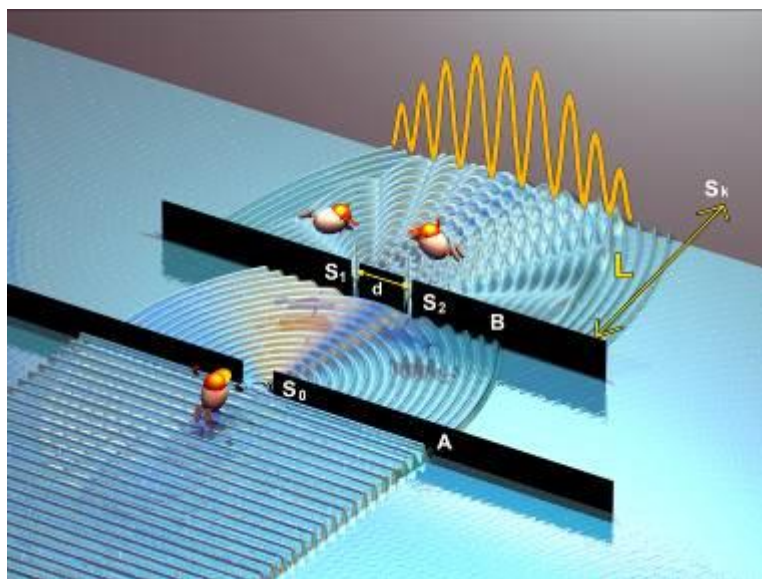
Это непредставимо для обычного мира. Если летит пуля, мы в любой момент знаем, где она находится и какова ее скорость. Странно, если бы узнав, где пуля, мы тем самым автоматически закрывали себе знание о ее скорости. И наоборот, узнав скорость, мы полностью теряли бы информацию о ее местоположении... Где ружейная пуля, чья скорость 800 м/с? Как где? На траектории полета!.. А вот и нет, а вот и нет! Нет у нее никакой траектории! И координаты нет. Теперь пуля вполне может оказаться в Антарктиде или на Луне. Возможен вариант: есть точная координата пули на траектории (в 30 см от ружейного ствола), но тогда нет точной скорости. То есть скорость может быть нулевой. Или бесконечной. ...Запускаем ракету. Какова ее скорость через секунду после старта? – Десять метров в секунду, товарищ полковник!.. – А где она? – А кто ее знает! Квантовая механика, товарищ полковник. Теперь уже непонятно...

И прав ведь товарищ полковник в своем справедливом возмущении! Действительно, что это за блажь такая? Не может Родина стрелять вслепую. А как же баллистика? Есть

же такая наука – баллистика! И этой науке все равно, какой массы пуля – хоть 9 граммов, хоть тонна, хоть с электрон размером... Подставь в формулы, получишь результат – где пуля и что с ней в данный момент происходит. Увы! В микромире баллистика работать перестает. Как же тогда рассчитывать прицел?

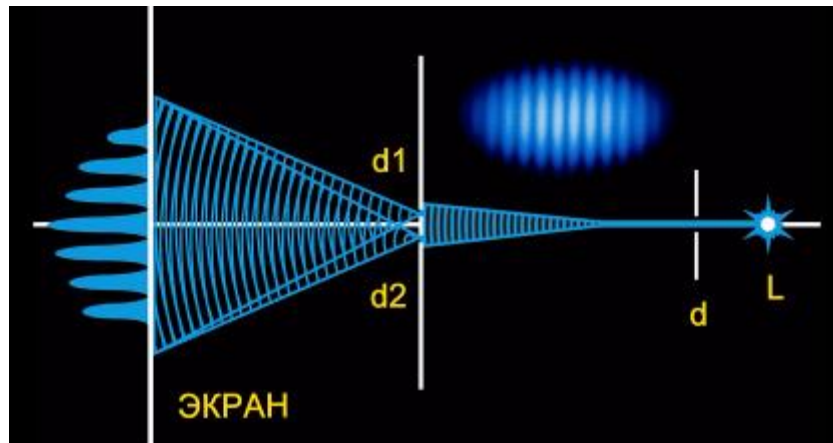
А по вероятности. Есть так называемая волновая функция – она описывает «размазанную в пространстве вероятность» того, что в данной точке может оказаться электрон, вздумай мы его здесь поискать... Это ключевое выражение – «вздумай мы его поискать»! Если бы мы поискать электрон не вздумали, он был бы... где? Вот в ответе на этот вопрос и разошлись Бор с Эйнштейном. Эйнштейн считал, что электрон где-то, в каком-то определенном месте да был бы. Просто мы пока не можем точно рассчитать это место. Поэтому и предсказываем вероятностно. Бор полагал по-другому. Он считал, что, пока мы не интересуемся, где находится электрон, он в определенном месте не находится. Он действительно размазан в пространстве! И размазанность эта намного превышает диаметр самого электрона. Это как если бы пуля, вылетев из ствола, превращалась в летящее облачко тумана. Электрон как бы летит по всем траекториям сразу. Но! Но если мы проведем замер, то обнаружим частицу на вполне определенной траектории, в конкретной точке. То есть если под «туманную пулю» мы подставим мишень, то в момент удара по мишени пуля тут же локализуется, превращается в обычную твердую пулю, которая делает в мишени маленькую дырку.

Первая мысль от подобного поведения элементарных частиц именно эйнштейновская – на самом деле электрон летит по вполне конкретной траектории, как пуля, просто мы ее не знаем, а можем лишь примерно, вероятностно определить – таков наш пока несовершенный математический аппарат. Второе впечатление от дурного поведения элементарных частиц – головокружительное, и более всего кружится голова от дикости происходящего, когда знакомишься со знаменитым двух щелевым экспериментом. Сейчас я его вкратце опишу.



Волны, как вам известно, умеют складываться – и морские, и звуковые, и электромагнитные. Если встречаются две волны в противофазе, они гасят друг друга. А

если в одной фазе – усиливают: растет амплитуда волны. Представьте себе набегающую на берег широким фронтом волну. Мы ставим на ее пути плотину с двумя щелями, расположенными неподалеку друг от друга. Через плотину волна не проходит, а через щели – проходит, разбегаясь от щелей двумя конусами в сторону берега. Волновые конусы возле берега встречаются, перекрываясь. И в тех местах, где амплитуды волн получаются синфазными, они складываются, и о берег бьют удвоенные волны. А там, где волны гасят друг друга, берег спокоен.



Такой же эксперимент, проведенный со световой волной, дает на экране (который здесь заменяет берег) так называемую интерференционную картину, то есть картинку сложения волн. Где световые волны складываются – там на экране яркие полосы света, а там, где вычитаются – темные полосы тени. Световая зebra.

Такой же эксперимент проводили не только с волнами, но и с частицами – электронами. Если бы электроны были большими, как, например, шарики от подшипников, никакой интерференции не получилось бы: шарики не волны, там нечему складываться – барабанили бы просто в мишень, образуя два пятна попаданий – от каждой щели по одному.

Но в микромире, как вам опять-таки известно, все частицы обладают свойствами волн. И наоборот – волны обладают свойствами частиц. И если двухщелевой эксперимент проводить с электронами, на экране образуется интерференционная картина – и электроны ведут себя как волны. Получается зebra.

Когда я учился в школе, то думал, что интерференция электронов получается от того, что электронов много – одни пролетают через левую щель, другие через правую, а за щелью как-то там складываются, взаимодействуют, и на экране получается интерференционная картина. Так многие думают. Но это не так. В эксперименте ученые запускали в установку по одному электрону. И наблюдали интерференционную картину! Что это значит? Это значит, что один электрон пролетал одновременно через две щели! И за экраном интерферировал – складывался сам с собой.

Неожиданный вывод, согласитесь. Сознание, которое привыкло относиться к электрону, как к малюсенькому шарикуну, противится такому поведению шарика. Один

шарик не может пролететь сразу через две щели, как одна пуля не может лететь по двум траекториям сразу. Пуля не может, а электрон летит!

Слушайте, а если возле щели поставить какой-нибудь детектор, который определял бы, через какую щель «на самом деле» проскочил этот прыгающий? Отличная идея! Ставим детектор. Можно поставить два детектора – у каждой щели по одному, можно один – без разницы, ведь если детектор у нас стоит только у одной щели, и он не фиксирует пролет электрона, значит, электрон пролетел через другую щель.

Ставим! Фиксируем! Да, электрон пролетает только через одну щель! Либо через правую, либо через левую! Ура! Но вот какой ужас – при этом интерференционная картинка пропадает! То есть, как только мы начинаем знать, где пролетел электрон, как только он начинает вести себя в соответствии с нашими ожиданиями (как маленький шарик), так сразу волновая картина на экране пропадает!

Хитрые люди могут спросить: а как мы детектируем электрон – как узнаем, что он пролетел именно через эту щель? Ну, например, ставят фотонный детектор, и по рассеянию света делают вывод. «Ага! – воскликнет читатель, сторонник определенности, – Так вы забомбардировали несчастный электрон фотонами, а после удивляетесь, что он полностью изменил свое поведение! И еще сознание свое приплели зачем-то!»

Да, доля истины в этих рассуждениях есть. Если мы детектируем с помощью фотонов пулю (то есть попросту смотрим на ее полет, ловя глазами отраженные фотоны), то никак, конечно, на пулю мы этим не влияем. Во-первых, фотоны от пули и так отражаются, потому что Солнце светит, а во-вторых, что пуле фотон? Меньше, чем слону дробина! А вот электрончик – маленький, ему от фотонов больно. В микромире, чтобы получить информацию, мы воздействуем на объект сравнимыми с ним штуковинами. И, естественно, вносим при этом сильную помеху. Подставьте под пулю не фотоны, а сравнимую с ней вещь – деревянную щитовую мишень, например, и увидите, как повлияет это «измерение» на траекторию и скорость пули.

Но вот ведь какая штука... Если даже мы поставили всего один детектор на одну щель, и электрон не детектировался, то есть пролетел через другую щель, где его фотонами не бомбардировали, все равно интерференционная картина пропадает!.. Откуда электрон узнал, что его «секут» на второй щели? Квантовая механика объясняет это чудо так: та компонента (часть) волновой функции, которая подверглась бомбардировке фотонами, изменила поведение электрона – превратив его из туманного облачка в шарик, пролетевший в другую щель.

Бр-р-р... Что это еще за компонента такая? А это просто кусок формулы! Поведение электрона описывается формулой, как сумма возможных состояний. Упрощенно это можно записать так:

Состояние электрона = электрон пролетел через первую щель + электрон пролетел через вторую щель.

Или короче:

$$E = \Psi_1 + \Psi_2;$$

где E – функция электрона,

Ψ_1 – состояние электрона, соответствующее пролету через первую щель,

Ψ_2 – состояние электрона, соответствующее пролету через вторую щель.

То есть полностью поведение электрона описывается как сумма всех его возможных состояний. Это и есть знаменитая волновая функция.

При измерении, то есть при воздействии или на «сам» электрон или на некую «виртуальную» его часть, то есть попросту на одно из формальных слагаемых в формуле, электрон локализуется в пространстве. То есть обретает в нем конкретное место взамен размазанного.

Еще раз, это важно: детектируя электрон, мы можем облучать фотонами не только его самого, пролетающего через щель, но и тот кусок формулы, которая «пролетает» (описывает пролет) через другую щель – эффект будет один! То есть, либо «живой» электрон пролетает через щель, и мы это прямо фиксируем детектором (интерференционная картина при этом пропадает), либо электрон пролетает через другую щель, где нет фотонного детектора, и мы облучаем фотонами ту часть электрона, которая не пролетает через эту щель (интерференционная картина при этом тоже пропадает).

Мистика какая-то, правда?

Вывод: воздействие локализует частицу. Она перестает описываться волновой функцией. И становится конкретной штукой в конкретном месте. Это называется редукцией волновой функции.

Еще раз: редукция волновой функции – это когда мы путем воздействия на частицу превращаем ее из размазанного, вероятностного состояния в определенное. То есть измерение не выясняет истину, а присваивает частице эту истину.

Вот против чего так яростно выступал Эйнштейн. Ему вообще все это активно не нравилось. Неопределенность не нравилась... И он придумал, как эту неопределенность перехитрить.

Ладно, рассуждали Эйнштейн, Подольский и Розен – три героя, решившие перехитрить принцип неопределенности, – пусть мы не можем измерить у частицы импульс и координату одновременно. Но узнать можем! Это делается так. Нужно «спутать» две частицы, чтобы их свойства были взаимосвязаны. Аналогия далекая, но тем не менее... Это, примерно, как в бильярде – бьем шаром по шару, шары разлетаются... Суммарный импульс шаров до соударения равен суммарному импульсу после соударения – простая механика, закон сохранения импульса, в школе проходят. То есть измерив импульс у одного шара, мы можем вычислить импульс другого, не измеряя его скорости.

Сталкиваем две частицы, они разлетаются, поделив импульс. Далее мы измеряем координату у первой частицы и импульс у второй. И таким образом узнаем и координату первой частицы (которую измерили непосредственно), и ее импульс (который просто вычислили, измерив импульс у второй частицы). Такова была схема мысленного эксперимента, предложенная троицей ЭПР.

Это было сильным ударом, от которого великий Бор покачнулся. Спор их в тот день закончился вничью. Бор назвал натяжкой рассуждения Эйнштейна. Эйнштейн полагал, что импульс, как объективная характеристика, уже имеется у частицы. И путем вычисления мы его узнаем. Бор же считал, что, пока мы импульс не измерили, приписывать частице конкретное значение импульса нельзя: импульс присваивается измерением, стало быть, мы не обманули неопределенность.

Много позже, а именно в 1960-е годы физик Джон Белл из швейцарского ЦЕРНа, размышляя над ЭПР-парадоксом, формализовал эту придуманную схему, написав некое математическое неравенство, которое позже назвали неравенством Белла. Из формулы вытекало, что если в эксперименте справедливость неравенства подтвердится, значит, прав Эйнштейн. Если не подтвердится – Бор.

Такой эксперимент удалось поставить только в 1982 году. Поставил его Ален Аспек. Результат эксперимента с двумя поляризованными фотонами неопровержимо показал: прав был Бор. Никакой «объективной физической реальности», о которой грезил Эйнштейн, в микромире не существует.

Парадокс Эйнштейна — Подольского — Розена на пальцах, и при чём тут эфир.

Парадокс Эйнштейна — Подольского — Розена сейчас активно изучают во многих лабораториях мира и научных институтах. Пишутся тонны научных статей. Поднято много хайпа в около-научных кругах. Только лишь одна загвоздка, хотя и достаточно парадоксальная. В самой квантовой механике нет ничего парадоксального в парадоксе ЭПР! Ни граммольки! Так почему же его так пристально изучают? И при чём тут эфир?!

Поиск новой физики

Ответ прост — при изучении парадокса ЭПР идёт активный поиск новой физики. Если быть точным — поиски новой фундаментальной физики, так как развитие прикладной физики идёт своим чередом.

К концу 19 века, когда многие физики считали, что почти всё открыто, осталось лишь найти одни штрихи. Сейчас наоборот, даже физики-консерваторы думают, что фундаментальная физика далеко не полна. Естественно, интерес к поиску новой физики сейчас просто колоссальный!

Одно остаётся понять: как определить, где искать эту золотую жилу новой физики? Один из вариантов — найти несоответствие теорий и пытаться копать там. Возьмём для примера теорию электродинамики Максвелла. Эта теория настолько хорошо согласуется со всеми принятыми теориями, что там и искать нечего. И не ищут. Ну, кроме объединительных теорий. Днём с огнём вы не найдёте свежих статей по фундаментальной электродинамике.