

Я хочу рассказать о *законе фазовой гармонии*, сформулированном Луи де Бройлем в 24-ом году. Закон этот редко упоминается в трудах по квантовой теории, хотя с него эта теория по существу и берет своё начало, и, несмотря на то, что сам де Бройль считал это своё открытие самым важным делом своей жизни.

Луи де Бройль родился в 1892 г. в одном из самых аристократических семейств Франции. В нём текла голубая кровь французских королей, он был принцем, но несмотря на такое знатное происхождение, жизнь его протекала как и множества людей обыкновенных. Закончив лицей, он поступает в Парижский университет на гуманитарный факультет. Он изучает здесь палеонтологию, историю и литературу.

Занятия гуманитарными дисциплинами явно пошли ему на пользу и впоследствии дали свои плоды. Он прекрасно писал, о чём свидетельствует ряд книг по труднейшим вопросам волновой механики, с увлечением читал труды по истории науки (исторических книг он прочёл больше, чем книг по физике – по его собственному признанию), а занятия палеонтологией, возможно, подвели его к мысли, что всё – живое, ибо даже мёртвые с виду камни хранят в себе отпечаток жизни, бушевавшей миллионы лет назад...

Учась на гуманитарном факультете, молодой Луи де Бройль почувствовал неодолимое влечение к физике и, решив, что в этом его призвание, откладывает в сторону только что полученный им диплом и поступает снова в Парижский университет, но теперь уже на факультет естественных наук. Он блестяще его заканчивает и приступает к исследованию животрепещущих для того времени вопросов, касающихся корпускулярно-волнового дуализма – феномена странного, но недвусмысленно проявляющегося при экспериментальном изучении свойств света, а также рентгеновских и γ -лучей.

Его ближайшими учителями были Поль Ланжевен и старший брат – Морис де Бройль. Морис был к тому времени уже маститым физиком (он на 17 лет старше Луи), участвовал в первом Сольевевском конгрессе и владел прекрасно оборудованной лабораторией, специализирующейся на исследованиях по рентгеновской спектроскопии. Здесь молодой Луи овладел премудростями экспериментальной науки, полностью вошёл в круг проблем, проникся ими и взялся за их решение. Здесь началась его теоретическая деятельность, результаты которой легли в основу его докторской диссертации.

Центральным моментом его диссертации и был *закон фазовой гармонии*. Суть идеи де Бройля прекрасно изложена Ж. Лошаком [1] – ближайшим его учеником и соратником.

Идея, с одной стороны, вроде бы и проста, но, с другой, - кажется поистине удивительным, как до этого вообще можно было додуматься. Самый ход мысли – совершенно неординарен. По-моему, без озарения здесь явно не обошлось, хотя, может быть, всё дело – в определенных особенностях мышления де Бройля.

Де Бройль, надо отметить, обладал сугубо образным мышлением. Понять что-либо для него означало - ясно представить (как можно более ясно: «увидеть, как наяву», - подчёркивал он [2]). Нет образа, – нет понимания. Абстрактный физико-математический метод, овладевающий (и овладевший) мыслями физиков, был ему чужд.

Де Бройль, далее, был страстным приверженцем релятивизма. Теория относительности появилась сравнительно недавно, но уже добилась успехов и признания, и де Бройля привлекла необычная её красота. В ряде основополагающих рассуждений теории относительности фигурировали «наблюдатели с часами». Это был, на взгляд де Бройля, очень удачный образ – наглядный и глубокий. Под «наблюдателями» (по контексту теории) подразумеваются не теоретики вовсе, пытающиеся представить себе что и как происходит в микромире, а сами обитатели этого мира: электрон, протон и пр.

Элементарные частицы – и есть наблюдатели. Это – важно. Все они обладают собственными часами и взаимодействуют посредством обмена волновыми сигналами. Очень ёмкая аналогия, и де Бройль, в силу присущего ему образного мышления, воспринял её буквально.

Элементарные частицы, рассуждал он, – сложные системы (т.к. только сложные системы способны взаимодействовать подобным образом). Каждой частице свойственен некий внутренний периодический процесс, который, с одной стороны, служит мерой внутреннего времени (т.е. определяет «часы»), а с другой, – обеспечивает создание тех самых волновых сигналов, посредством которых происходит взаимодействие.

Для распространения волновых сигналов требовалась, вообще говоря, среда-посредник, причём эфир (в классическом его понимании) на эту роль не годился, т.к. его введение привело бы к конфликту с теорией относительности. А этого де Бройль не хотел, т.к. свято верил в справедливость релятивизма. Позже он всё же ввёл такую промежуточную среду, причём так, что релятивизм не пострадал. Сначала же, в 24-ом году, при написании своей докторской диссертации он всё внимание сосредоточил на «внутренних часах».

Итак, каждой элементарной частице присущ внутренний колебательный процесс. Он задаёт масштаб времени и реализует собой внутренние часы, с помощью которых только частица и может ориентироваться во времени. Каков этот процесс конкретно, де Бройль не обсуждает. Его волнует, прежде всего, частота процесса, и он определяет её своей знаменитой формулой:

$$m_0 c^2 = \hbar \omega_0 \quad (1)$$

Обе части этого соотношения были известны и ранее, но де Бройль был первым, кто приравнял их друг другу. «Так должно быть, – писал он – в силу великого закона природы».

Это – первая формула в его диссертации. Она – очень красива и, безусловно, была бы самой красивой, если бы не одно «но». Это соотношение определяет частоту внутреннего процесса только в *собственной системе* отсчёта. При переходе в другую систему оно нарушается, поскольку не является лоренц-инвариантным. Действительно, в случае движущегося электрона (под элементарной частицей де Бройль чаще всего подразумевал электрон) масса возрастает, как: $m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$ а частота хода часов уменьшается, как: $\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ (здесь $\beta = v/c$). Таким образом, соотношение (1) теряет силу.

Де Бройль сразу это заметил, и это обстоятельство глубоко его озадачило. Он, как говорилось, был проникнут идеями релятивизма, и никогда в них не сомневался. Он стремится отстоять соотношение (1), но в то же время понимает, что для этого нужно сделать его релятивистским. И де Бройль справляется с этой задачей, делая второй шаг – решительный и кардинальный: он вводит представление о *стационарной волне*.

Суть заключается в следующем. Предположим, говорит он, что колебательный процесс, происходящий где-то в недрах частицы на частоте ω_0 , - отражается (или - выходит каким-либо образом) во вне, так, что в каждой точке окружающего частицу пространства инициируется колебание с точно такой же частотой. Или, иначе, - в каждой точке Вселенной появляются часы, идущие в такт с собственными часами элементарной частицы.

Математически это обстоятельство можно определить формулой:

$$\exp\{i\omega_0 t\} \quad (2)$$

(В каждой точке происходит колебательный процесс с частотой ω_0 . Все процессы – синфазны вне зависимости от координат).

Такая ситуация имеет место в собственной системе, где электрон неподвижен. Если же электрон движется, то время преобразуется по Лоренцу, как: $t \rightarrow \frac{t - \beta x/c}{\sqrt{1 - \beta^2}}$. Вследствие этого все часы рассинхронизируются и

выражение (2) приобретает вид: $\exp\{i \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} [t - vx/c^2]\}$. Это и есть

стационарная волна.

То, что это – волна, видно из определения. Её частота равна: $\tilde{\omega} = \omega_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$, то есть изменяется также как и масса. Так что соотношение (1) можно сделать релятивистским, если под частотой в нём подразумевать не частоту внутреннего процесса, а частоту процесса внешнего – частоту Вселенной, настроившейся на ритм частицы. Можно стереть в (1) «нолики» и записать:

$$mc^2 = \hbar \tilde{\omega}$$

Эта формула уже релятивистская!

Стационарная волна распространяется с фазовой скоростью: $V = c^2/v$ и имеет длину волны: $\lambda = 2\pi V / \tilde{\omega} = 2\pi \hbar \sqrt{1 - \beta^2} / m_0 v = 2\pi \hbar / p = \lambda_B$, где $p = m_0 v / \sqrt{1 - \beta^2}$ - импульс частицы. Это – *длина волны де Бройля.*

Итак, де Бройль добился того, что соотношение между энергией и частотой стало лоренц-инвариантным. Но какой ценой! Общая картина, по сравнению с классикой, существенно усложнилась. В классике, когда рассматривается движущаяся частица, имеется только один объект – эта самая частица. У де Бройля же появляется два объекта: частица и связанная с ней стационарная волна. Оба объекта – самостоятельные, хотя и зависимые.

У де Бройля, кстати, нет вообще корпускулярно-волнового дуализма, то есть нет представления о некоей частице-волне. Этот «физический кентавр» родился позже, и его ввёл в физику не де Бройль, а позднейшие интерпретаторы. Де Бройль же рассматривал и частицу, и волну, как самостоятельные сущности, причём волну он считал – физически реальной волной.

Исследуя эти два объекта, как отдельные, он приходит к своему знаменитому закону *фазового соответствия* или *фазовой гармонии*. Он звучит так: «Движущийся электрон находится всегда в фазе со своей стационарной волной, или – фаза стационарной волны в точке нахождения электрона всегда совпадает с фазой (внутренних часов) самого электрона».

Это утверждение доказывается очень просто. Фаза, которую набирает электрон за время t равна: $\Phi = \omega t = \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2} t$, а фаза стационарной волны в точке нахождения электрона (при $x = vt$) составляет: $\tilde{\Phi} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} [t - \frac{v}{c^2} vt] = \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2} t$, то есть ту же самую величину.

Итак $\Phi \equiv \tilde{\Phi}$. Но что из этого следует? Де Бройль полагал, что связанная с электроном стационарная волна, будучи физически реальной, способна каким-то образом влиять на поведение самого электрона, коль скоро их фазы всегда согласованы. Следуя этой идее, он рассматривает атом водорода с целью применить свои соображения к конкретной задаче и получить с их помощью правила квантования для орбит. (Эти правила были уже установлены Бором. Выглядели они очень красивыми, но совершенно непонятными).

Ход рассуждений – следующий. Пусть электрон, говорит де Бройль, - движется по круговой орбите со скоростью v . С ним связана стационарная волна, которая движется по той же орбите, но со скоростью $V = c^2/v$ (т.е. много быстрее). Спустя какое-то время τ , определяемое из соотношения: $V\tau = l_0 + v\tau$,

откуда: $\tau = l_0 / (V - v) = \frac{l_0 v}{c^2(1 - \beta^2)}$. К этому времени электрон набирает фазу:

$$\Phi = \omega \tau = \frac{\omega_0 l_0 v}{c^2 \sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{l_0 p}{\hbar}. \text{ И такую же фазу набирает стационарная волна.}$$

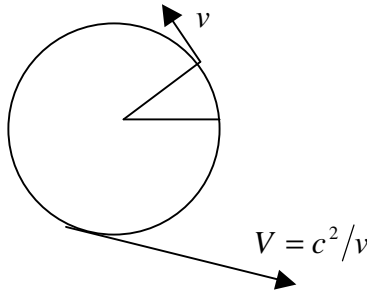


Рис. 1

«Кажется почти очевидным (собственные слова де Бройля), что эта фаза должна соответствовать целому числу колебаний электрона», то есть:

$$\frac{l_0 p}{\hbar} = 2\pi n \quad \rightarrow \quad l_0 = \frac{2\pi \hbar}{p} n = \lambda_B n$$

Таким образом, на орбите должно укладываться целое число волн де Бройля (длин волн стационарной волны). Отсюда вырисовывается и физический смысл утверждения о целочисленности колебаний, т.к. только в этом случае стационарная волна, многократно обегая окружность орбиты, не будет подавлять сама себя.

Поскольку $l_0 = 2\pi r_0$, где r_0 - радиус орбиты, то последнее равенство можно переписать в виде:

$$p r_0 = \hbar n$$

а это – второй постулат Бора. Таким образом, введенные де Бройлем представления о внутреннем процессе и о стационарной волне оказываются весьма действенными, раз они позволяют столь легко и непринужденно получить правило квантования момента импульса для боровских орбит.

Это было явным достижением, и все его оценили. Де Бройль безоговорочно принимается в физическую элиту, его труды изучаются, и прилагаются усилия к их развитию [3]. Концепция де Бройля явно что-то проясняла, но вместе с тем вызывала множество новых вопросов. Например,

--- каким образом (почему) стационарная волна движется по кругу? (Для этого, по-видимому, необходима радиальная неоднородность, из-за которой волна может замкнуться сама на себя, вследствие внутреннего отражения. Этим вопросом занимался Э. Шредингер);

--- что конкретно подразумевается под «внутренним периодическим процессом»?

--- что такое «стационарная волна»? Нужна ли для её распространения некая среда и, если да, то, как её ввести, не входя в противоречие с ТО? Как она соотносится с электроном: порождается ли им (только) или в её формировании (каким-то образом) участвует вся Вселенная?

--- как стационарная волна влияет на поведение электрона, и что вообще стоит за «законом фазовой гармонии»?

И т.д., и т.п. – вплоть до вопроса: «что» или «кто» есть электрон? Вполне серьёзно обсуждались идеи о свободе воли электрона, и в этом принимал участие сам Н. Бор.

В общем, страсти кипели, и физика быстро развивалась. Шредингер написал своё знаменитое уравнение. Борн предложил его вероятностную интерпретацию. Стремительно развивался математический аппарат, и теория обретала уже вполне отчётливые формы.

Неустанно трудился и сам де Бройль. Он разрабатывал так называемую «теорию двойного решения», согласно которой частицы, оставаясь локализованными сущностями, представлялись как бы вкрапленными в волну в виде сингулярностей единого решения. Они по этой концепции приобретали как бы волнообразные крылья. Работа двигалась, но весьма медленно, из-за больших математических трудностей. Нужно было исследовать нелинейные уравнения, дающие солитоноподобные решения, а это было непросто и требовало времени и сил.

А физика между тем неудержимо двигалась вперёд. Двигалась она несколько не тем путём, который избрал сам де Бройль, и с помощью иных и ему чуждых абстрактно-математических методов. «На его глазах рождался совершенно иной подход к теоретической физике. Он основывался не на описании законов природы с помощью пространственно-временных образов, а на алгебраических и геометрических построениях в абстрактных, чаще всего комплексных и многомерных пространствах» [4].

Физика подменялась математикой. Но этот подход, как это ни удивительно, приносил плоды. Теоретики смело ныряли в математическое море и доставали из его глубин сокровища в виде изящных формул, подтверждаемых экспериментом.

Такой абстрактный метод был чужд де Бройлю. Его мышление было образным, и образным – принципиально. Он упорно шёл своим путём, хотя чувствовал, что отстаёт, и это отставание грозит стать необратимым. В 27-ом году на четвёртом Сольвеевском конгрессе он всё же идет в бой и выступает со своей теорией двойного решения, хотя ещё и незавершенной к тому времени. Выступление, однако, повисает в воздухе. Де Бройля не понимают и не поддерживают, и он остается в одиночестве. Победу одерживает индетерминистская интерпретация квантовой механики, разработанная

Копенгагенской школой (и общепринятая и сейчас). Де Бройль т.о. терпит поражение, после чего по существу сходит с авансцены.

В удрученном состоянии духа он возвращается в Париж. Здесь он получает кафедру в институте Анри Пуанкаре и посвящает себя преподавательской деятельности. Свои поиски он прекращает, или, во всяком случае, приостанавливает, убедив себя (в какой-то мере), что путь, которым двигался он ранее, - ложный, и истинным является другой, магистральный, - тот, по которому устремились физики всего мира. Преподаёт он среди прочих дисциплин также и квантовую механику (которую он все же упорно называет *волновой механикой*), причём придерживается её ортодоксального канонического изложения.

А время между тем шло. Бурная молодость становилась воспоминанием. Де Бройль, казалось, смирился со своим поражением и даже не слишком переживал по поводу того, что его основополагающая идея о *фазовой гармонии* была по существу предана забвению. Орёл сложил крылья, и так продолжалось 25 лет.

Но вот однажды, когда де Бройлю было уже слегка за шестьдесят, пелена вдруг спала с его глаз. Излагая на очередной лекции теорему фон Неймана, где строго доказывалось, что никакой теории со скрытыми параметрами, для объяснения явлений микромира, в принципе не может быть построено, он вдруг осознал, что его *концепция волны-пилота* как раз и является такой теорией, – теорией, которой не может быть. Следовательно, в рассуждениях фон Неймана где-то имелся логический прокол (неувязка), но тогда всё монолитное и незыблемое здание квантовой механики теряло опору, т.к. из его фундамента изымался краеугольный камень.

Внешним мотивом для резкого поворота мыслей де Бройля послужила статья Д. Бома – молодого, энергичного, но ещё зелёного по сравнению с де Бройлем физика, где он излагал переоткрытую им дебройлевскую концепцию и нападал, соответственно, на основы квантовой механики.

И у де Бройля открылись вдруг глаза. Он понял, что идеи его молодости значительно превосходят по богатству содержания идеи современной ему квантовой механики, и что путь, которым он шёл прежде и который оставил, как раз и является путём истинным и наиболее перспективным. С этого момента начинается второй творческий взлёт в жизни де Бройля. Он пишет многочисленные статьи и одну за другой издает целый ряд книг, посвященных ниспровержению основ, критике и реинтерпретации квантовой теории (всего более 50-ти статей и 12 книг!). Он возвращается к идеям своей юности, извлекает на свет Божий всё написанное им по этому поводу и приступает к последовательному рассмотрению многочисленных трудных вопросов, в своё время им оставленных.

Прежде всего, - о составе, строении и внутренней динамике элементарных частиц, а также о заполняющей межчастичные пространства промежуточной среде, необходимой для самого существования стационарных волн, в качестве их опоры и переносчика. Он вводит представление о такой среде, называет её *субквантовой средой* и моделирует тахионным газом. Тахионы – частицы с мнимой массой и сверхсветовыми скоростями. Идею о них де Бройль почерпнул у нашего физика – Терлецкого и взял на вооружение, поскольку, по его мнению, такого рода среда не противоречила постулатам релятивизма.

Частица по де Бройлю – сложнейшая система, находящаяся в состоянии непрерывного массового и энергетического обмена со средой. Это нечто вроде капли тумана, капли, взвешенной в паре. Для описания бытия (жизнедеятельности) такой системы: частица плюс среда, он использовал

методы термодинамики, обобщая их и распространяя на следующий по глубине иерархический уровень материи. Одна из его книг так и называется: «Термодинамика изолированной частицы» [5]. Субквантовую среду он считает энергоёмкой субстанцией и называет её «скрытым термостатом». Физические и термодинамические, в частности, характеристики этой среды, а также внутренние характеристики самих элементарных частиц – и представляют собой «скрытые параметры», о которых сейчас часто говорят.

Свою великую битву де Бройль начал и повёл один. Ему помогала только молодёжь. Он был в таком же положении, как и во времена молодости, и даже в ещё более сложном, поскольку квантовая теория давно и полностью оформилась, и сам он был уже в годах и занимал солидное положение в ученом мире. Коллеги недоумевали. Мнения разделились. Одни приветствовали и интересовались, другие придерживались нейтралитета, третьи же откровенно сторонились. Но де Бройля это не смущало. Он был полон энтузиазма и юношеской энергии и работал с азартом, с упоением и восторгом. Новый его взлёт был уверенным и длительным. Основная интенсивность творческой активности приходится на возраст от 70-ти до 80-ти. «Я часто спрашиваю себя, - говорит он своему ученику Ж. Лошаку в канун своего восьмидесятилетия, - не было ли время после 70-ти с точки зрения интеллектуального бытия самым прекрасным в моей жизни?».

И де Бройль пробил-таки брешь в укреплениях квантовой теории, успевшей уже стать «классической», нарушил привычный покой физиков, взбудоражил умы, вселив в них сомнение и надежду, и подвиг к новым научным поискам. Ему всё же это удалось! Завершить свою теорию он не успел, хотя очень многое сделал для её развития и укрепления. Концепции «волны-пилота» и «фазовой гармонии» пережили по существу второе рождение.

Де Бройль возлагал большие надежды на тех, кто пойдёт следом за ним. Он призывал думать самостоятельно, не соблазняться поверхностными результатами, дающими красивые формулы, но не вскрывающие сущность, но идти вперёд – неустанно и во что бы то ни стало, дальше и глубже – до самой сокровенной сути вещей. Он призывал всех, молодых и не очень, всех, в ком есть страсть к познанию первооснов природы, обратить пристальное внимание на *закон фазовой гармонии* и раскрыть содержащуюся в нем глубокую и очень важную тайну. Он верил, что тайна эта в скором времени будет раскрыта и принесет свои плоды, и он очень стремился передать свою веру и надежды – идущим следом, в том числе – и нам с вами.

* * *

Литература.

1. G. Lochak. “De Broglie’s initial conception of de Broglie waves”. Из книги: “The wave-particle dualism”, Dordrecht, Holland, 1984.
2. Луи де Бройль. «Революция в физике». М: Атомиздат, 1965.
3. М. Джеммер. «Эволюция понятий квантовой механики». М: Наука, 1985.
4. Л. де Бройль. «Соотношение неопределённостей Гейзенберга». М: Мир, 1986.
5. Broglie, Louis de. “La thermodynamique de la particule isolée”. Paris, Gauthier-Villars, 1964.