

П.С. Тартаковский

**Экспериментальные основания волновой
теории материи**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
П11

П11 **П.С. Тартаковский**
Экспериментальные основания волновой теории материи / П.С. Тартаковский – М.: Книга по Требованию, 2020. – 152 с.
ISBN 978-5-458-57834-9

ISBN 978-5-458-57834-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2020
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2020

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ВВЕДЕНИЕ.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ДЕ БРОЙЛЯ И ШРЕДИНГЕРА.

Кризис атомистики, наметившийся к концу первой четверти XX в., выразился в невозможности рассматривать внутратомные явления, явления, непосредственно обусловленные мельчайшими частицами материи — электронами и протонами, пользуясь методами и образами старой физики, хотя бы и дополненными постулатами теории квантов.

Выход из этого кризиса наметился с появлением квантовой механики, которая сперва развивалась в виде так называемой волновой механики де Бройля и Шредингера, а также новой квантовой механики Гейзенберга.

Эти теории, используя совершенно новые представления о материи, применили и новый математический аппарат к разрешению задач атомистики и пришли к весьма существенным результатам, объяснив те явления, которые уже были известны и ждали правильного теоретического истолкования, и предсказав ряд новых явлений.

Бурное развитие новых теорий, связанных с именами де Бройля, Шредингера, Гейзенберга, Борна, Дирака и других, не могло не отразиться и на экспериментальной физике. Был выдвинут целый ряд новых задач, связанных с новыми взглядами на природу материи.

Обратили внимание на то, что в некоторых случаях материальные частицы — электроны ведут себя совсем особым образом, непонятным с точки зрения прежних воззрений. Новые явления стали предметом изучения для многих экспериментаторов и в настоящее время мы имеем уже довольно богатый экспериментальный материал в этой области нашей науки. Обзору этой области экспериментальной физики и посвящена настоящая книга.

Главную руководящую нить в этих экспериментах дает теория де Бройля, основные положения которой мы сейчас и изложим.

Физика XIX в. резко противопоставляла *материю*, из которой состоит весь окружающий нас внешний мир, и свет, испускаемый

этой материей и дающий нам наиболее полные и ценные сведения о материи. Атомизм древних материалистов в наше время принял новые формы, соответствующие развитию экспериментальной науки, и сделался господствующей идеей в наших воззрениях на материю. К концу XIX в. атомизм перестал быть гипотезой. Атомное строение материи сделалось прочным опытным фактом. Дальнейшее изучение атомов и молекул привело к выяснению сложности их структуры, выяснило, что они состоят из более мелких элементарных частичек — электронов, несущих отрицательный, и протонов, несущих положительный заряд. Таким образом *материя состоит из первичных частиц*, характеризующихся определенными значениями энергии, скорости (количества движения) и массы (выяснилась еще необходимость приписать элементарным частицам магнитный момент). Масса, впрочем, согласно теории относительности не постоянна, а зависит от скорости.

Типичным для материи свойством является *дискретность* частиц ее составляющих.

В противоположность этому физика XIX в. рассматривает свет как явление *волновое*. Ряд фактов, открытых в течение XVIII в. (интерференция, диффракция света и т. п.) заставили отказаться от Ньютоновой теории истечения и утвердили волновую теорию света. При этом сначала свет рассматривался как волны в особой упругой среде — эфире, затем была открыта связь между явлениями световыми и электромагнитными и создавалась электромагнитная теория света Максвелла. Но и в новой теории за светом, как электромагнитными волнами, сохранилось прежнее типичное свойство — *непрерывность*: световые волны распространяются в пространстве непрерывным образом.

Однако явления, открытые в самом конце XIX и начале XX в. привели к тому, что резкость этого противопоставления света и материи — волн и частиц — стала стираться. Явления, связанные с поглощением и испусканием света (фотоэффект, фотохимические реакции, черное излучение и т. п.), привели к необходимости введения *прерывности* в представления о свете. В 1905 г. создавалось учение о квантах света (теперь их называют фотонами), согласно которому свет состоит из *частиц*, имеющих энергию, количество движения, массу (Эйнштейн). От частиц обычной материи они отличаются тем, что их покоящаяся масса равна нулю — остановившись, они уничтожаются. Таким образом начала создаваться далеко идущая аналогия между материей и светом. Эта точка зрения, как известно, особенно четко подтвердилась с открытием эффекта Комптона (1923 г.).

Эта аналогия света и материи не исключила, однако, из учения о свете тех представлений и величин, которые связаны с его волновой природой. Новая теория не поглотила старую, как это обычно бывало в науке: от всякой новой теории требовали, чтобы она, объясняя новые факты, в то же время содержала в себе и трактовку старых фактов. В данном случае учение о квантах света лишь с натяжкой позволяло объяснить некоторые факты волновой оптики (например, дифракцию). Таким образом, наряду с новым представлением о световых квантах пришлось сохранять для описания ряда явлений старые образы волн. Создался в области учения о свете своего рода дуализм, который сейчас часто называют дуализмом волн и частиц. Противопоставление света и материи смягчилось благодаря тому, что в учение о свете вошла идея атомизма, идея частиц, столь характерная для материи. Но уже в характеристики света, как частиц, вошли величины хорошо знакомые нам из учения о волнах — мы имеем в виду частоту и длину волны. В самом деле, энергия, количество движения и масса фотона определяются, как известно, формулами:

$$E = h\nu, \quad g = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad m = \frac{h\nu}{c^2}, \quad (1)$$

где ν — частота, λ — длина волны и h — постоянная Планка ($6,55 \cdot 10^{-27}$ эрг. сек.). Если бы мы захотели полностью отказаться от волновых свойств света, нам были бы совершенно непонятны соотношения (1) — в них фигурируют величины, не имеющие смысла в корпускулярной теории света. Величины, стоящие в правой части равенств, определяются из опытов, которые мы считаем типичными для света, как волнового явления (интерференция, дифракция).

Стремление объединить обе точки зрения, исключавшие, казалось, друг друга, привело Луи де Бройля к теории, которой суждено было сыграть решающую роль в смягчении противоречия частиц и волн не только в области учения о свете, но и в учении о материи.

Представим себе частицу материи массы m . Согласно теории относительности мы приписываем этой частице энергию $E = mc^2$ и количество движения $g = mv$. Масса же m выражается формулой $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Здесь v — скорость частицы, c — скорость

света и m_0 покоящаяся масса частицы. В случае фотонов эти величины связаны с величинами, характеризующими световые волны, формулами (1). Аналогия частиц материи и световых частиц

позволила де Бройлю высказать допущение, что *со всякой частицей связан периодический процесс определенной частоты ν* ; при движении частицы мы воспринимаем этот периодический процесс как волну. Как мы увидим, к этому приводят соображения теории относительности. Естественно сопоставить для всех частиц механические величины — энергию и количество движения — с волновыми так, как это делает теория световых квантов. Отсюда основные соотношения теории де Бройля:

$$E = mc^2 = h\nu, \quad mv = \frac{h}{\lambda} \quad (2)$$

Для частоты и длины волн, связанных с частицей материи, мы получаем соотношения:

$$\nu = \frac{mc^2}{h} \quad \text{и} \quad \lambda = \frac{h}{mv} \quad (3)$$

Если частица движется настолько медленно, что можно пренебречь поправкой на изменчивость массы по теории относительности, в эти формулы вместо m вставляют просто m_0 (покоящуюся массу). Для быстрых частиц

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

и

$$\nu = \frac{m_0 c^2}{h} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad \lambda = \frac{h}{m_0 v} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (4)$$

Из уравнений (3) мы можем определить и скорость распространения наших волн материи w . В самом деле, общая теория волн связывает длину волны, частоту и скорость распространения: волн соотношением $w = \nu\lambda$ (для световых волн мы имеем $c = \nu\lambda$). Это дает в связи с формулами (2):

$$w = \frac{c^2}{v}. \quad (5)$$

Эта скорость всегда больше скорости света c , так как согласно теории относительности скорость частицы v всегда меньше c . Таким образом, эти волны всегда опережают частицу.¹

¹ Приведем более убедительный аналитический вывод того, что периодический процесс, связанный с движущейся частицей, представляет волну со скоростью w . Периодический процесс представим некоторой функцией, напр. $\psi = A \sin 2\pi\nu_0 t$. Если частица движется со

Несмотря на это, они органически связаны с частицей, предопределяя ее движение. Одним из основных выводов теории де Бройля является то, что так называемая *групповая скорость* этих волн, с которой связано распространение энергии, оказывается равной *скорости частицы* v . Этот результат легко получить, пользуясь выражением групповой скорости, как ее дает общая теория волн:

$$\bar{w} = \frac{d\nu}{d\left(\frac{1}{\lambda}\right)},$$

и подставляя значения величин для волн материи.

Законы общей теории волн определяют распространение волн материи, а с ним и движение потока частиц, связанных с этими волнами. Поэтому-то в ряде случаев поведение потока материальных частиц оказывается тождественным поведению волн: для описания этих явлений часто бывает достаточно пользоваться только обрывками волновой теории, забывая о корпускулярной природе материи.

Дуализм волн и фотонов в световых явлениях позволяет по аналогии сделать еще одно сопоставление между частицами и волнами материи. Интенсивность света (энергия) по волновой теории пропорциональна квадрату амплитуды волн; с другой стороны, интенсивность светового пучка пропорциональна числу фотонов, в нем несущихся.

■ ■ ■ ■ ■
 скоростью v , то в системе координат, движущейся вместе с частицей (относительно этой системы частица покоится), будем иметь $\psi = A \sin 2\pi\nu_0 t'$.
 Время t' и движущейся системе связано со временем в покоящейся

системе преобразованием Лоренца: $t' = \frac{t - \frac{xv}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Подставляя это значе-

ние для t' в выражение для функции ψ и полагая

$$\nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

получим:

$$\psi = A \sin 2\pi\nu \left(t - \frac{xv}{c^2}\right) = A \sin 2\pi\nu \left(t - \frac{x}{w}\right).$$

Это выражение, как известно, представляет синусоидальную волну, распространяющуюся вдоль оси x со скоростью $w = \frac{c^2}{v}$. Частота волны определяется действительно формулой (3). Волна эта, как показывает де Бройль, находится в фазе с колебательным процессом частицы и потому носит название *фазовой*.

Мы можем заключить по аналогии, что число движущихся материальных частиц, например электронов, пропорционально квадрату амплитуды волн материи. Следовательно, если расчет какого-либо явления показывает, что в некоторой точке амплитуда волн равна нулю, мы можем заключить, переводя этот результат на язык частиц, что в эту точку вовсе не попадают частицы материи.

Мы видим, что противопоставление света и материи, как волн и частиц, теорией де Бройля еще более смягчается, можно сказать устраняется: и в случае обычной материи, как и в случае света, мы имеем дело с двойственностью, с дуализмом волн и частиц.

В дальнейшем развитии теорий некоторые ученые до известной степени пытались вовсе вычеркнуть из своего рассмотрения частицы, описывая явления при помощи математического аппарата теорий волн. Такова была одно время позиция даже и Шредингера (основанная на ошибке).

Ряд фактов экспериментальной физики говорит однако за невозможность полного устранения понятия частиц: с индивидуальным существованием частиц связаны, например, такие эксперименты, как счет частиц (электронов, α -частиц) счетчиком Гейгера или опыты с камерой Вильсона, позволяющей фотографировать пути отдельных частиц и т. д.

Мы изложим здесь очень кратко вывод основного уравнения квантовой механики — знаменитого волнового уравнения Шредингера.

Рассмотрение волнового процесса, связанного с движущейся частицей, какова бы ни была его истинная природа, не может ограничиться указанием частоты и длины волны. Следует написать и волновое уравнение волн материи. Теория волн дает следующее общее волновое уравнение:

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{w^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

Здесь ψ — «волновая функция», а $\nabla^2 \psi$ — сокращенное обозначение для $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}$ («Лапласов оператор»). Для случая волн, распространяющихся вдоль оси X имеем:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{w^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0. \quad (7)$$

Мы будем рассматривать только тот случай, когда зависимость функций ψ от времени является чисто синусоидальной

(выражается через синус или косинус). Такую зависимость — как известно, удобнее всего записать в комплексной форме:

$$\psi = \psi_0 e^{2\pi i \nu t}, \quad (8)$$

где частота ν определяется из формулы (2). Из (8) находим:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = -4\pi^2 \nu^2 \psi.$$

и

$$\nabla^2 \psi + \frac{4\pi^2 \nu^2}{w^2} \psi = 0$$

или

$$\nabla^2 \psi + \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \psi = 0. \quad (9)$$

Но по (3),

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

а из равенства

$$\frac{1}{2} mv^2 = E - V \quad (10)$$

(кинетическая энергия равна разности полной энергии и потенциальной) получаем:

$$mv = \sqrt{2m(E - V)};$$

таким образом вместо (9) будем иметь:

$$\nabla^2 \psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \psi = 0. \quad (11)$$

Это основное уравнение теории Шредингера, являющееся в настоящее время основой для рассмотрения всех явлений физики атома и электрона.¹ Здесь величина V является функцией координат. Функция ψ является функцией координат и времени, на которую естественно налагается требование конечности, непрерывности и однозначности для всех точек пространства. Тогда оказывается, что уравнение имеет решение только для избранных значений E и удовлетворяется избранными функциями ψ . Эти функции «распространяются» волновым образом.

¹ В ряде случаев приходится пользоваться не этим уравнением, а рядом его обобщений на случай быстрых движений, когда приходится учитывать поправки теории относительности, чем мы здесь пренебрегли; обобщениями уравнения Шредингера приходится пользоваться и в случае наличия магнитного поля или же для случая многих взаимодействующих частиц.

Решение любой задачи сводится к нахождению избранных «собственных» значений энергии E (иначе говоря, *частоты*) и соответствующих данной задаче собственных функций ψ . О движении частицы в обычном механическом смысле ничего не говорится; материю, в сущности, не приходится рассматривать состоящей из частиц, мы имеем чистую теорию волн материи, если добавим к (11) уравнение для потенциала. В этой теории заряд может принимать любые значения (это неверно, конечно). В этой стадии теории Шредингера частица в известном смысле слова размазана по всему пространству. Это представление связано с тем физическим толкованием, которое дает функции ψ Шредингер. Он считает, что величина $|\psi|^2$ или $\psi\bar{\psi}$ (произведение функции ψ на комплексно-сопряженную с ней величину) определяет плотность зарядов частиц, если умножить ее на элементарный заряд, и плотность масс, если умножить на массу как функцию координат. Для получения истинной квантовой теории необходимо волны материи подвергнуть квантованию, тогда получается, в частности, атомизм и кратность всякого заряда основному e .

Характернейшей чертой квантовой теории и является эта эквивалентность описания материи — или как волн или как частиц.

В связи с развитием новой квантовой механики Гейзенберга (названной так в отличие от «старой квантовой механики» Бора) была высказана иная, соответственно, точка зрения на физический смысл величины $|\psi|^2$. Согласно этой точке зрения, высказанной Борном, $|\psi|^2 = \psi\bar{\psi}$ представляет вероятность, которую частица, например, электрон, имеет находиться в данном месте, сама же частица рассматривается обычным образом. Таким образом, умножив $\psi\bar{\psi}$ на заряд e , мы получим не истинную плотность зарядов в данной точке, а лишь *вероятное* значение ее. Таким образом весь формальный аппарат уравнения Шредингера полностью сохраняется; при рассмотрении явлений мы говорим о материи, как волнах, длины волны $\lambda = \frac{h}{mv}$; но

в то же время полностью сохраняется и понятие частиц. Какова же истинная причина того, что материальные частицы ведут себя столь отличным от законов обычной механики образом? Ответ на этот вопрос дает важный принцип, введенный в науку Гейзенбергом и называемый обычно *принципом неопределенности*. Согласно этому принципу, желая описать поведение элементарных частиц материи в обычных образах пространства и времени, мы не можем пренебречь взаимодействием наблюдаемой частицы со средствами наблюдения, как это делала старая фи-

зна (последнее вполне возможно для тел макроскопических размеров). Благодаря этому при одновременном определении положения и скорости (или количества движения) частицы мы неизбежно делаем ошибки, которые не можем одновременно уменьшить произвольным образом. Эти ошибки (Δq и Δp) связаны условием:

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq h \quad (12)$$

Таким образом, уменьшая Δq , мы неизбежно увеличиваем Δp и наоборот.¹ Численный подсчет показывает, что это не имеет никакого значения для достаточно больших тел, но для тел, размеров атомных, ошибкой невозможно пренебречь. Последнее обстоятельство создает невозможность точного определения положения и скорости электрона в начальный момент времени, а следовательно и невозможность вполне достоверного предсказания последующего поведения электрона. Таким образом исключается возможность обычного механического описания движения электрона (последовательные положения и скорости, орбита и т. п.) и остается только указывать *вероятное* его поведение, оставляя поле действия для случая. Такое «*вероятностное*» описание явлений и является характерным для современной атомной физики вообще и для теорий Гейзенберга — Шредингера в частности. Оно оказывается необходимым дополнением дуализма волн и частиц, если мы только хотим описывать явления в образах пространства и времени и сохранить основные материалистические позиции, неразрывно связанные с атомизмом; а к последнему нас побуждает прежде всего опыт. Замечательно, что к соотношениям неопределенности вида (12) проще всего и можно подойти, начав описание частицы, как корпускулы, и учтя затем и волновой ее характер (или наоборот). Чисто корпускулярное или чисто волновое представление не было в этом смысле неопределенным.²

КРАТКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАССЕЯНИЮ ЭЛЕКТРОНОВ ДО ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ.

II

Противопоставление света и материи, как мы видели в предыдущей главе, сменялось, если можно так выразиться, *параллелиз-*

¹ По квантовой теории, вообще говоря, любая пара величин не может быть измерена одновременно с абсолютной точностью. Для парной соизмеримости должны быть выполнены специальные, вообще не имеющие места, условия.

² Обо всех этих вопросах см. В. Гейзенберг, Физические принципы квантовой теории, ГТТИ, 1932.

мом света и материи: и в случае света, и в случае материи мы имеем двойственную корпускулярно-волновую природу. Поэтому при рассмотрении вопроса, в какой области явлений следует искать непосредственных проявлений волновой природы материи, вполне возможно пользоваться аналогиями из области световых явлений.

Квантовая природа света (корпускулярная) резко проявляется в случае взаимодействий света и материи, связанных с поглощением или испусканием световой энергии. Мы знаем, что самая теория квантов возникла при теоретическом истолковании явлений черного излучения, где основную роль играет поглощение и испускание света. Представление о квантах света, как частицах, было применено Эйнштейном прежде всего к истолкованию явлений фотоэлектрических, основой которых является поглощение света: энергия фотоэлектронов создается за счет энергии поглощенных фотонов. В фотохимических явлениях квантовая природа света также играет основную роль. Наконец, количество движения фотона особенно четко проявляется в явлении Комптона, представляющем особый вид рассеяния света (рентгеновых лучей), с изменением энергии фотонов.

Явления, в которых проявляется волновая природа света, это преимущественно явления *распространения*. Однако, всякое наблюдение над светом связано с взаимодействием его с материей и в конечном счете с поглощением. Наблюдать распространение волн в пустом пространстве без взаимодействия с материей невозможно. Взаимодействия с материей, в которых не сказывается квантовая природа света, связаны с изменением направления распространения света, а также с *пространственным* перераспределением *интенсивностей*. Сюда относятся явления отражения, рассеяния (кроме некоторых отдельных случаев, когда сказывается квантовая природа), преломления, диффракции и т. п. Это все явления, изучение которых и послужило главной основой для установления волновой теории. Во всех этих явлениях мы всегда имеем взаимодействие света и материи, причем это взаимодействие определяет распространение световых волн.

Проводя аналогию между волнами материи и волнами света, мы должны ожидать, что волновая природа материи должна проявиться в тех случаях, когда мы имеем изменение направления движения частиц материи или пространственное их перераспределение; при этом нас должны больше всего интересоваться случаи, когда эти явления не связаны с изменением энергии частиц. Такого рода явления имеют место в области эксперимента, имеющей весьма существенное значение и подвергав-