

П.С. Тартаковский

Кванты света

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
П11

П11 **П.С. Тартаковский**
Кванты света / П.С. Тартаковский – М.: Книга по Требованию, 2021. – 188 с.

ISBN 978-5-458-57819-6

ISBN 978-5-458-57819-6

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

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 первозданном 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.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Настоящая книга представляет собою в несколько переработанном виде курс лекций, читанных мной на физико-механическом факультете Ленинградского Политехнического Института в осеннем семестре 1926 г. Основной целью книги является ознакомление читателя с теми объективными фактами, которые приводят к представлению о квантах света; при этом мне казалось желательным остановиться достаточно подробно на экспериментальной методике, при помощи которой получены те или иные выводы. А это требовало подчас рассмотрения и таких особенностей явлений, которые не имеют непосредственного отношения к вопросу о квантах. Руководящей нитью в изложении являлись определенные теоретические представления учения о квантах, которые и изложены в соответствующих местах. Предлагаемое изложение вопроса отнюдь не претендует на полноту: многие важные вопросы не затронуты вовсе, литература приведена далеко не исчерпывающая. Кроме того, благодаря значительной пестроте материала, возникла некоторая неравномерность в изложении. Подбор экспериментального материала не мог не иметь несколько субъективного характера. Более подробно рассмотрены те экспериментальные и теоретические вопросы, которые мало или вовсе не освещены в русской обзорной литературе и представляют существенный интерес для нашей темы. Характер изложения достаточно элементарный, но предполагает у читателя некоторое знакомство с важнейшими вопросами современной физики, хотя бы по популярным книгам. Трактовки вопросов, затронутых в этой книге, по новой квантовой механике, я не касался, хотя в главе IX и даны некоторые указания о теории Шредингера.

Главы I и II, содержащие краткий исторический обзор теорий света и основы учения об излучении и строении атома, представляют как бы введение к последующему. Главы III, IV, V и VI рассматривают явления, сущность которых определяется главным образом законом сохранения энергии в применении к квантам света. Глава VII посвящена явлениям, для которых основную роль играет сохра-

нение количества движения при взаимодействии квантов с электронами. В главе VIII рассмотрен вопрос о применимости законов сохранения энергии и количества движения к элементарным актам. Наконец, в главах IX и X даны некоторые указания относительно теорий де-Бройля и Шредингера и вытекающих из них следствий.

Я хотел бы и здесь выразить мою благодарность П. И. Лукирскому, С. С. Прилежаеву и Д. В. Скобельцыну, давшим мне возможность воспользоваться еще не опубликованными материалами. Ленинградскому Отделению Государственного Издательства, особенно Заведывающему Научной Редакцией П. В. Ромму, всегда любезно шедшему навстречу всем желаниям автора, я также выражаю мою искреннюю признательность.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

	СТР.
Предисловие	V
I. Очерк развития взглядов на природу света .	1
II. Черное излучение, теория атома Бора и общие основы теории квантов	12
Основные законы. Вывод формулы Планка по Вер- моту. Теория Бора. Вывод формулы Планка по Эйнштейну. Принцип Допплера с точки зрения квантов света. Опыт- ная проверка формулы Планка.	
III. Фотоэлектрический эффект	43
Основные факты и методы исследования. Теория фото- эффекта по Эйнштейну. Экспериментальное определение скоростей. Зависимость числа электронов от интенсив- ности освещения и частоты. Влияние состояния поверх- ности металла.	
IV. Фотоэлектрический эффект диэлектриков и фотоэлектрическая проводимость	71
Фотоэффект с диэлектриков. Фотоэлектропроводность.	
V. Фотохимия и флуоресценция	80
Фотохимический закон Эйнштейна. Хемилюминисценция и флуоресценция.	
VI. Фотоэффект в области рентгеновских лучей .	87
Наблюдения и опыты. Теория.	
VII. Явление Комптона	114
Теория. Экспериментальная проверка теории. Электроны отдачи. Интенсивность линий при эффекте Комптона.	
VIII. Кванты или волны?	133
Теория Бора, Крамерса и Слэтера. Экспериментальная проверка теории и результаты ее.	
IX. Теории де-Бройля и Шредингера	148
Теория де-Бройля. Теория Шредингера.	
X. Заключение	169
Предметный указатель	177
Именной указатель	179

ГЛАВА ПЕРВАЯ.

ОЧЕРК РАЗВИТИЯ ВЗГЛЯДОВ НА ПРИРОДУ СВЕТА.

Что такое свет? Какова истинная природа этого явления, при помощи которого мы получаем о внешнем мире больше сведений, чем при помощи каких бы то ни было других явлений? Такой вопрос ставили себе древние философы, им интересовались ученые и после эпохи Возрождения; благодаря ряду крупных исследований XVIII и XIX веков вопрос этот к концу XIX века казался решенным, и утверждение, что „свет представляет электромагнитные волны“ представлялось еще недавно чем-то неоспоримым. Но вот появились новые факты, казавшееся твердо установленным и разрешенным стало опять возбуждать сомнения и снова вопрос о природе света стоит в центре проблем современной физики, и вряд ли найдется в наши дни физик, который решился бы дать на этот вопрос тот или иной, но совершенно определенный ответ.

Проследим вкратце историю вопроса о природе света со времен Ньютона⁽¹⁾. Создателю механики естественно было и природу света понимать так, чтобы объяснение световых явлений сводилось к простым механическим законам. Ньютон считал, что светящееся тело испускает мельчайшие „световые частицы“, движущиеся по законам механики. Попадая в наш глаз, эти частицы и вызывают ощущение света. Это представление очень хорошо объясняло ряд фактов оптики, известных в то время. Например, движение частичек по инерции по первому закону движения Ньютона происходит по прямой — это соответствует прямолинейному распространению света. Когда упругий шарик отскакивает от плоской стенки, причем имеет место закон сохранения количества движения, то угол падения равен углу отражения; в оптике этот закон применим к световым лучам потому, что он применим к световым частичкам, образующим эти лучи. Объяснение ряда фактов геометрической оптики, как легко видеть, не представляет с этой точки зрения особых затруднений. Но уже в то время были факты, объясне-

Корпускулярная теория света Ньютона.

ние которых не укладывалось в рамки основных законов механики, а требовало создания специальных гипотез, часто довольно искусственных. Мы имеем в виду, например, объяснение Ньютоном явления ньютоновых колец, которого мы здесь не станем приводить. Для объяснения существования различных цветов спектра пришлось положить, что световые частицы бывают различной величины. Кроме того пришлось допустить еще, что со световыми частицами могут случаться какие-то „приступы“ („fits“) легчайшего преломления или прохождения, следующие через определенные промежутки времени и расположенные в пространстве на определенных интервалах, соответствующих длинам волн по современной терминологии.

Волновая
теория
Гюйгенса.

Сравнительно долго Ньютонова теория истечения была господствующей, чему может быть способствовало не столько отсутствие в то время фактов, резко идущих в разрез с этой теорией, сколько громадный научный авторитет Ньютона. Почти одновременно с теорией истечения была создана и другая оптическая теория — волновая, которой суждено было сыграть столь выдающуюся роль в дальнейшем ходе развития учения о свете. Основные положения волновой теории света были высказаны Христианом Гюйгенсом⁽²⁾ в его мемуаре о природе света, вышедшем во второй половине XVII века. Здесь были высказаны те классические основы учения о волнах, которые и по сейчас являются основой наших рассуждений, если мы хотим рассматривать какие-либо явления с волновой точки зрения. Мы имеем в виду так называемый принцип Гюйгенса, согласно которому всякая точка поверхности световой волны, испускаемой источником, сама является центром „вторичных“ волн.

В этом же мемуаре Гюйгенс объяснил с волновой точки зрения все те явления геометрической оптики, которые Ньютоном объяснялись с точки зрения теории истечения. В области геометрической оптики обе теории оказались одинаково удачными, одинаково хорошо выражающими факты. И некоторые современные нам исследователи, например, Л. де Бройль, склонны считать это не простой случайностью, а чем-то соответствующим сущности природы света. Но к этому вопросу нам еще придется вернуться в конце нашего изложения.

В XVII и XVIII веках наука обогатилась фактами, которые уже не укладывались в рамки теории истечения. Была открыта поляри-

зация света, возникающая при отражении лучей от зеркал, при преломлении их и при прохождении их через кристаллы. К поляризации присоединились явления, которые мы называем интерференционными, затем диффракция — все то, одним словом, что мы знаем из элементарных курсов физики⁽³⁾. Исследования Т. Юнга и особенно Френеля, ставших на точку зрения волновой теории Гюйгенса и давших с этой точки зрения последовательное объяснение всей совокупности известных фактов физической оптики, создали для волновой теории света твердую основу, и уже с первой половины XIX века она стала господствующей.

Мы ограничимся здесь тем, что напомним, к каким выводам о природе света привели исследования начала XIX века. Было установлено, что свет представляет волны, распространяющиеся во все стороны от источника света в особой среде — эфире, заполняющей не только пустое пространство, но и находящейся внутри всех тел. Если среда, где распространяется свет, однородна и изотропна (напр., пустое пространство), то скорость распространения волн во все стороны одинакова и фронт волны (поверхность волны) шаровой. Если скорость распространения не одинакова по всем направлениям (как это имеет место в ряде кристаллов), то поверхность волны более сложная, например, эллипсоид той или иной формы, а в общем случае она представляет довольно сложную поверхность 4-го порядка. Всякая волна представляет периодический процесс во времени и в пространстве, в волне происходят какие-то колебания. Волновая трактовка явлений поляризации привела к выводу, что колебания, имеющие место в световых волнах, поперечны, т. е. происходят в плоскостях, перпендикулярных к направлению распространения света, к лучу. Точка зрения на свет как на поперечные колебания эфира дала возможность не только объяснить всю совокупность известных в то время явлений, но и предсказать ряд новых, которые и были затем открыты в действительности (например, коническая рефракция).

Поперечность световых колебаний.

Говоря о световых волнах, мы умышленно не упомянули об истинной природе этих волн, а сказали совершенно формально о „периодическом процессе во времени и пространстве“. Но вопрос о природе этого процесса естественно должен был встать перед исследователем. И ответ на этот вопрос совершенно естественно вытекал из общего физического мировоззрения того времени. Со времен Ньютона мировоззрение физики было механистическим, т. е.

Свет-упругие волны в эфире.

Механические свойства эфира.

всякое явление казалось необходимым привести к простым механическим явлениям, т. е. к движениям определенного типа. Волновые движения известны механике, и глава механики о сплошной упругой среде и волнах, в ней распространяющихся, была достаточно разработана. Таким образом, естественно было считать, что свет — это упругие волны в особой среде, обладающей определенными механическими свойствами. Отсюда — возможность определить некоторые механические свойства светоносного эфира, как упругого тела, из свойств световых волн. Известно, например, что в среде газообразной или жидкой возможно распространение лишь продольных волн. Но в свете мы имеем дело с волнами поперечными; следовательно эфир не жидкость и не газ. В реальных твердых телах механика знает волны и продольные и поперечные. Следовательно, эфир твердое тело. Но все попытки обнаружить продольные световые волны оказались тщетными. Следовательно, эфир — твердое тело с совершенно особыми свойствами; эфир несжимаем. Формулы теории упругости, связывающие скорость распространения волн с упругими постоянными среды и плотностью, позволили дать численные характеристики эфира, как упругой среды. Лорд Кельвин⁽⁴⁾ подсчитал, например, что плотность упругого эфира должна быть порядка $5 \cdot 10^{-18}$. Отсюда для модуля упругости его получается весьма малая величина 180 абс. ед., что весьма странно в связи с выводом об абсолютной несжимаемости эфира.

Изложенные выводы о природе эфира явились серьезным затруднением волновой теории света, как теории волн упругих. Но стремление сохранить последовательное механическое миропонимание еще долго существовало, и еще почти в наши дни лорд Кельвин продолжал понимать эфир как упругую среду, но для того, чтобы не разойтись с фактами, приходилось приписывать этой среде весьма странные, придуманные ad hoc свойства.

Началом нового этапа в развитии взглядов на природу света явилось открытие Фараде^{ем} магнитного вращения плоскости поляризации. Свет и явления электромагнитные оказались чем-то связанными, что-то общее есть в их природе. Согласно взглядам Фарадея, для электрического взаимодействия тел нужна промежуточная среда — эфир, совершенно так же, как она нужна для передачи световых колебаний. Теория Максвелла⁽⁵⁾ ясно сформулировала взгляды Фарадея и придала им математическую, количественную форму. Создалось представление об электро-магнитных волнах. Под-

тверждение для ряда веществ соотношения между показателем преломления n и диэлектрической постоянной ϵ , вытекавшего из теории Максвелла ($n^2 = \epsilon$), привело к выводу, что свет представляет волны электро-магнитные, что светonosный эфир тождествен с эфиром электро-магнитным; открытие электрических волн Герца окончательно утвердило этот взгляд. Невозможность объяснения уравнений Максвелла никаким „механизмом“, скрытым в эфире, привела к упразднению механической картины оптических явлений и установила электро-магнитную теорию света и даже электро-магнитную картину мира. Нам нет необходимости излагать дальнейшие открытия, которые все более и более подтверждали эту точку зрения. Заполнение промежутка между наиболее короткими электрическими волнами и наиболее длинными оптическими сделало различие между этими областями лишь количественным; расщепление спектральных линий в магнитном поле (эффект Зеемана), объяснение явлений дисперсии света с помощью теории электронов — все это связало электро-магнетизм и оптику в одно целое. Свет остался „волнами“, но волны эти приобрели совершенно иной характер. Это уже не упругие волны старой теории. Всякий кризис электро-магнетизма явился в то же время и кризисом оптики. В таком положении учение о природе света вступило в XX век.

Электро-магнитный

Если волны в упругом эфире можно было мыслить столь же „материальными“, как волны на поверхности жидкости или акустические волны, то при переходе к электро-магнитному эфиру световые волны потеряли значительную долю своей „осязаемости“. Однако, все же можно было говорить о волнообразном распространении возмущений в среде (эфире), правда, лишенной значительной части признаков материальной среды. Принцип относительности нанес эфиру последний сокрушительный удар и понятие эфира оказалось настолько лишенным всякого физического содержания, что оказалось предпочтительным вовсе от него отказаться; электро-магнитное поле пришлось мыслить в „пустоте“; в этой „пустоте“ распространяются световые волны. Теперь нельзя уже говорить о возмущениях какой-то среды, хотя бы и загадочного характера. Однако, как указывает Ритц, вся совокупность новых понятий, столь непривычных, так плохо укладывавшихся в круг обычных представлений о пространстве и времени, введена для того, чтобы сохранить в силе уравнения Максвелла, чтобы сохранить представления об электро-магнитном поле, о волнах. Но тот же принцип относительности

Принцип относительности—отказ от эфира.

Теория
Ритца.

именно и лишил волны последних признаков „осязаемости“, лишил их того субстрата, в котором они распространяются. Не лучше ли, предлагает Ритц, сохранить обычные представления о пространстве и времени, но отказаться от представления об электро-магнитном поле, заменив световые волны потоком частиц, испускаемых светящимся телом, как это раньше сделал Ньютон. Такую корпускулярную теорию света и предложил Ритц⁽⁷⁾, объяснив на почве ее ряд явлений оптики и электро-магнетизма. Но не эти соображения критического характера, не стремление создать последовательную и стройную картину явлений явились настоящим мотивом для почти стихийного врывания корпускулярных воззрений на природу света в круг идей современной физики. Толчок в этом направлении дал опыт, являющийся, конечно, *ultima ratio* для всякого естествоиспытателя. Подробное рассмотрение этого опытного материала и является главной частью содержания этой книги. Сейчас же мы должны вкратце наметить некоторые этапы в развитии представлений о квантах света.

К концу XIX и началу XX века стали накапливаться факты, поставившие под сомнение волновую концепцию света и приведшие к установлению теории квантов.

Законы чер-
ного излу-
чения.

В 1899 г. Луммер и Курльбаум произвели точное исследование распределения энергии в спектре черного излучения. Попытки теоретического объяснения результатов опыта с точки зрения классических представлений привели к формуле, резко противоречащей данным опыта (формула Рэлея-Джинса). Рассматривая вопрос о законе распределения энергии в спектре черного излучения, Планк нашел, что для получения правильной формулы черного излучения необходимо решительно отказаться от некоторых представлений классической теории. Задача о черном излучении — статистическая. При решении подобного рода задач так называемая статистическая механика пользуется представлением об особом, в общем случае многомерном, пространстве, носящем название фазового пространства.^(*) Фазовое пространство приходится разбивать на особые ячейки — элементы фазового пространства („элементы равной вероятности“). В классической теории элементы фазового про-

Исследова-
ния Планка.

(*) Если какая-либо механическая задача описывается при помощи координат q (числом n) и соответствующих им „моментов“ p (числом n ; „ n “ — число степеней свободы), то такой задаче соответствует $2n$ -мерное фазовое пространство, координатами которого служат $2n$ величин p и q .