

СОДЕРЖАНИЕ

На какие вопросы отвечает эта книга.....	5
ПРЕДИСЛОВИЕ	7
Глава I. Как все начиналось.....	8
Глава II. Корпускулярно-волновой дуализм	11
Глава III. Высокая планка Планка.....	14
Глава IV. Деление неделимого.....	18
Глава V. На сцену выходят фотоны, или Понятый свет.....	21
Глава VI. Не верь глазам своим.....	27
Глава VII. Гениальная догадка Бора	32
Глава VIII. Запретить нельзя разрешить	35
Глава IX. Электронные волны де Бройля.....	38
Глава X. Уравнение Шредингера	41
Глава XI. Обретение неопределенности.....	47
Глава XII. Дополнительность Бора.....	51
Глава XIII. Спин	55
Глава XIV. Статистика Ферми — Дирака.....	59
Глава XV. Статистика Бозе — Эйнштейна.....	61
Глава XVI. Сверхпроводимость	66
Глава XVII. Квантовая теория поля	69
Глава XVIII. Релятивистская квантовая механика. Уравнение Дирака.....	72
Глава XIX. Квантовая электродинамика.....	75
Глава XX. Слабые взаимодействия. Энрико Ферми.....	78

Глава XXI. Создание ускорителей заряженных частиц	84
Глава XXII. Кварки и глюоны.....	88
Глава XXIII. Ядерные реакции и термоядерный синтез	92
Глава XXIV. Парадоксы квантовой физики	95
Глава XXV. Квантовая теория конденсированных сред.....	99
Глава XXVI. Квантовая теория твердого тела.....	105
Глава XXVII. Квантовая оптика.....	108
Глава XXVIII. Квантовая криптография	113
Глава XXIX. Квантовый компьютер.....	116
Глава XXX. Теория струн.....	120
Список источников	126

НА КАКИЕ ВОПРОСЫ ОТВЕЧАЕТ ЭТА КНИГА

ЧТО ТАКОЕ СВЕТ — ЧАСТИЦА ИЛИ ВОЛНА?

На самом же деле квантовые объекты не являются ни классическими волнами, ни классическими частицами, приобретая свойства первых или вторых лишь в некотором приближении.

См. главу II

КАК ТОМСОН ПРЕДСТАВЛЯЛ СЕБЕ АТОМ?

Модель напоминала пудинг, в котором находились изюминки, впоследствии она получила название «пудинговая модель атома». *См. главу IV*

ПОЧЕМУ ЭЛЕКТРОН НЕ ПАДАЕТ НА ЯДРО АТОМА?

Электрон в атоме водорода может находиться только на орбитах, для которых значение момента импульса электрона равно целому числу постоянных Планка. *См. главу VII*

ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОН — ВОЛНА ИЛИ ЧАСТИЦА?

Впервые идею о корпускулярно-волновой природе электрона французский физик выдвинул еще в 1923 году. Позднее это оказалось справедливым и для других составляющих атома. Выдвинутая им гипотеза хорошо обосновала казавшийся загадочным принцип стационарных орбит в модели атома Бора. *См. главу IX*

ЧТО ОЗНАЧАЕТ ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ БОРА?

Если мы возьмем отдельно понятия «состояние» и «наблюдение», то, согласно Бору, они будут дополнительные. Ведь взятые каждый в отдельности они неполны, а значит, могут быть определены только друг через друга. Фактически эти понятия не существуют отдельно. Мы всегда наблюдаем только конкретное состояние объекта! Само же состояние объекта остается вещью в себе, пока мы не найдем способ его «наблюдения». *См. главу XII*

КАК ВОЗНИКАЕТ КВАНТОВОЕ ПОЛЕ?

В квантовых полях процесс передачи взаимодействия происходит порциями — квантами. В качестве квантов выступают

элементарные частицы, имеющие строго фиксированные характеристики массы, спина, заряда. Таким образом, с одной стороны, сами взаимодействующие частицы имеют квантованные характеристики, а с другой — взаимодействие между ними передается квантовым полем со своими квантованными характеристиками. *См. главу XVII*

ЧТО ТАКОЕ БОЗОН ХИГГСА, ИЛИ «ЧАСТИЦА БОГА»?

Бозон Хиггса — это элементарная частица, играющая ключевую роль в понимании механизмов образования и развития нашей Вселенной после так называемого Большого взрыва. Сама частица имеет много почетных прозвищ: «Частица Бога», «Ангел Творения», «Кирпич, который построил Вселенную». Можно сказать, бозон Хиггса улавливает частицы, которые перемещаются вокруг, и превращает их в материю. *См. главу XXI*

ЭЛЕМЕНТАРЕН ЛИ ПРОТОН?

Как можно протон называть элементарной частицей, если он состоит из кварков? Очень просто: протон элементарен, так как его невозможно расщепить на составные части — кварки. Все частицы, которые участвуют в сильном взаимодействии, состоят из кварков и при этом являются элементарными. *См. главу XXII*

КАК ПОНИМАТЬ КВАНТОВУЮ ЗАПУТАННОСТЬ?

Если взять частицу из определенного множества частиц и повлиять на нее любым способом, то изменится состояние и остальных частиц, даже если они находятся в совершенно иных условиях. *См. главу XXIV*

ЧТО ТАКОЕ ТЕОРИЯ СТРУН?

Согласно гипотезе, Вселенная возникла благодаря расширению микропространства размером в струну, соответствующую постоянной Планка. По мере увеличения этой области растягивались и ультрамикроскопические струны — теперь их длина соизмерима с размерами Вселенной. Но они точно так же взаимодействуют между собой и производят те же вибрации и колебания. Продольные колебания порождают гравитационное излучение. *См. главу XXX*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Многие века человеческие умы будоражили рассказы и проявления магических феноменов. И только в наши дни появилась наука, определившая качественные и количественные закономерности перехода энергетических структур в более или менее плотное состояние. Эта наука — квантовая физика.

Классическая физика, как известно, описывает поведение материальных объектов. В противоположность ей квантовая физика сосредоточена только на математическом описании процессов наблюдения и измерения. При этом элементом анализируемой картины мира становится сам наблюдатель.

Эта наука является относительно молодой, что не мешает, а может, и способствует появлению в ней множества фантастических гипотез.

Перед учеными стоит все еще много задач и вопросов, которые пока кажутся неразрешимыми. Однако интенсивное развитие прикладного направления квантовой физики с каждым годом снимает все большее количество вопросов, при этом порождая новые, ранее непредвиденные. При этом перспективы, которые открывают современные прикладные разделы квантовой теории, способны поразить любое воображение.

Нас окружает удивительный и замечательный мир. Многие проявления реальности до сих пор кажутся нам магическими и необъяснимыми. Любой прочитавший эту книгу станет немного магом, сможет приоткрыть завесу мироздания, взглянуть на эзотерику и физику иначе.



Герб города Обнинска с геральдическим (несколько упрощенным) изображением атома Бора — Резерфорда. Изображение атома используется в геральдике с 1955 года

КАК ВСЕ НАЧИНАЛОСЬ

Наука нуждается в воображении, но воображение находится в ужасной смиренной рубашке знания.

Ричард Фейнман

Квантовая физика уже давно вошла в нашу жизнь. Но пользоваться благами, созданными с ее помощью, еще не значит понимать, что это такое. У многих знания физики заканчиваются на уровне средней школы, и далеко не все изучали легендарный третий том «Теоретической физики» Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица, и для многих такие понятия, как волновая функция и уравнение Шредингера, — это что-то из потустороннего мира. Специфический же математический аппарат квантовой механики — это сложные формулы и малопонятные слова. Поэтому в данной книге мы постараемся придерживаться общедоступного уровня изложения, избегая элементов тензорного анализа и прочей специфики квантовой механики, и изложить отдельные аспекты этого постоянно развивающегося и самого молодого раздела физики.

Квант — это неделимая порция какой-либо величины, в частности энергии. В основе этого понятия лежит представление о том, что некоторые физические величины могут принимать только определенные значения (говоря научным языком, физическая величина квантуется)

ТОЧКА ОТСЧЕТА

Для подавляющего большинства людей квантовая механика находится за гранью понимания. И дело тут даже не столько в сложном математическом аппарате, сколько в том, что законы квантовой механики не имеют подсознательной ассоциации — их невозможно себе представить.

История квантовой физики началась 14 декабря 1900 года. Именно в этот день немецкий физик и будущий нобелевский лауреат Макс Планк доложил на заседании Берлинского физического общества о фундаментальном открытии квантовых свойств теплового излучения. Так в физике появилось понятие кванта энергии, а среди других

фундаментальных постоянных — постоянная Планка.

Открытие Планка и появившаяся затем, в 1905 году, теория фотоэлектрического эффекта Альберта Эйнштейна, а также создание в 1913 году Нильсом Бором первой квантовой теории атомных спектров стимулировали создание и дальнейшее бурное развитие квантовой теории и экспериментальных исследований квантовых явлений.

ВСЕ ПОЗНАЕТСЯ... В РАЗВИТИИ

Уже в 1926 году Эрвин Шредингер сформулировал свое знаменитое волновое уравнение, а Энрико Ферми и Поль Дирак получили квантово-статистическое распределение для электронного газа, учитывающее заполнение отдельных квантовых состояний.

В 1928 году Феликс Блох произвел анализ квантово-механической задачи о движении электрона во внешнем периодическом поле кристаллической решетки и показал, что электронный энергетический спектр в кристаллическом твердом теле имеет зонную структуру. Фактически это стало началом нового направления в физике — теории твердого тела.

Весь XX век — это период интенсивного развития всех тех разделов физики, для которых квантовая теория стала прародителем.

Данная книга представляет собой краткий экскурс в квантовую физику и охватывает далеко не все ее тонкости и нюансы, а только дает общее представление о том, о чем еще и сегодня спорят ученые. И кто знает, может быть, пройдет время и появится знаменитая единая теория поля, родится

АНЕКДОТ ОТ МАКСА ПЛАНКА

Обычная чайная чашка имеет две ручки, а не одну, как нам кажется. Просто они развернуты друг относительно друга не на 180 градусов (как, скажем, у кастрюли), а на 360...

Студенты перед сессией:

— Что читаешь?

— Квантовую механику.

— А чего книга вверх ногами?

— А какая разница...

(Анекдот)

новый Ньютон или Эйнштейн, который, провозгласив сакраментальное «элементарно», просто и доступно объяснит природу вещей. Но это еще впереди. А пока попытаемся разобраться, что же кроется за вызывающими трепет у многих читателей словами «квантовая физика» и что, собственно, о ней известно на сегодняшний день.

КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

*Был этот мир глубокой тьмой окутан.
Да будет свет! И вот явился Ньютон.*
Эпиграмма XVIII века

*Но сатана недолго ждал реванша.
Пришел Эйнштейн — и стало все, как раньше.*
Эпиграмма XX века. Самуил Маршак

Свет всегда оставался самой загадочной областью изучения физики. Около четырехсот лет ученые спорили, что же он собой представляет. В одних случаях он ведет себя как частица, в других — как волна. Необходим был новый подход, чтобы как-то объяснить создавшееся положение.

Первым, кто предположил, что свет — это частица, был гениальный английский ученый Исаак Ньютон. Он создал стройную для своего времени теорию света на корпускулах. Вместе с тем оставались загадочные на тот момент явления, такие как дифракция и интерференция, которые явно не вписывались в корпускулярную теорию. Тогда англичанин Роберт Гук и нидерландский ученый Христиан Гюйгенс предположили, что свет — это все-таки волна. Но авторитет Ньютона был настолько силен, что весь научный мир продолжал считать свет частицами.

ФИГАРО ЗДЕСЬ, ФИГАРО ТАМ!

Споры продолжались до начала XIX века, когда Томас Юнг поставил свой знаменитый опыт: свет проходит через две щели и падает на экран, где появляются темные и светлые интерференционные полосы. Это можно объяснить тем, что в некоторых местах световые волны взаимно усиливаются, а в других — гасятся. Напрашивался однозначный вывод: свет — это все-таки электромагнитная волна! Волновая теория электромагнитного

Корпускулярно-волновой дуализм — свойство любой микрочастицы обнаруживать признаки частицы или корпускулы и волны

Ультрафиолетовая катастрофа — физический термин, описывающий парадокс классической физики, состоящий в том, что полная мощность теплового излучения любого нагретого тела должна быть бесконечной

излучения нашла свое теоретическое описание в работах Джеймса Максвелла. Использование представления о свете как волне позволяет объяснить явления, связанные с интерференцией и дифракцией, в том числе структуру светового поля, а именно объяснить построение изображений и метод голографии.

Прошло еще почти сто лет, и Макс Планк, чтобы решить проблему ультрафиолетовой катастрофы, ввел понятие фотона. Научный мир снова обратился к проблеме света, и вот тут опять возник вопрос. Что же он такое: частица или все же волна? И как все это описать? Свет в одних случаях ведет себя как поток частиц, в других — обладает волновыми свойствами. То есть обладает корпускулярно-волновым дуализмом.

Дальше — больше. В 1923 году Луи де Бройль предположил, что не только свет есть одновременно и волна, и частица, но и электрон, и вообще — все!

Наиболее ярко корпускулярно-волновой дуализм проявляется у элементарных частиц. Электрон, нейтрон, фотон в одних условиях ведут себя как локализованные в пространстве материальные объекты — частицы, обладающие определенными энергиями и импульсами, а в других — как волны, что проявляется в их способности к интерференции и дифракции.

И НИ ТО, И НИ ДРУГОЕ

Явления интерференции и дифракции света убедительно свидетельствуют о волновой природе света. Закономерности теплового излучения, фотоэффекта можно успешно

объяснить с классической точки зрения только на основе представлений о свете как о потоке отдельных фотонов. Однако волновой и корпускулярный способы описания света не противоречат, а взаимно дополняют друг друга, так как свет одновременно обладает и волновыми, и корпускулярными свойствами.

Волновые свойства света играют определяющую роль в закономерностях его интерференции, дифракции, поляризации, а корпускулярные — в процессах взаимодействия света с веществом.

Сейчас концепция корпускулярно-волнового дуализма представляет лишь исторический интерес, так как, во-первых, некорректно сравнивать и противопоставлять материальный объект, например электромагнитное излучение, и способ его описания — корпускулярный или волновой; и, во-вторых, число способов описания материального объекта может быть больше двух — корпускулярный, волновой, термодинамический и так далее, так что сам термин «дуализм» становится по сути неверным. На момент своего возникновения концепция корпускулярно-волнового дуализма служила способом описания поведения квантовых объектов путем подбора аналогий из классической физики. На самом же деле квантовые объекты не являются ни классическими волнами, ни классическими частицами, приобретая свойства первых или вторых лишь в некотором приближении.

И тем не менее именно споры о теории света и привели в конце концов к созданию квантовой физики, о которой и пойдет речь дальше.

«Нет особой физической разницы между радиоволнами и видимым светом с точки зрения физики — Вы будете описывать их одними и теми же уравнениями и математикой. Только наше повседневное восприятие различает их»

(Элефтериос Гулильмакис)

Свет ведет себя как волна и как частица, по сути не являясь ни тем ни другим, в то же время являясь и тем и другим одновременно. Другими словами, свет — это парадокс

ВЫСОКАЯ ПЛАНКА ПЛАНКА

*Физика теперь снова зашла в тупик.
Во всяком случае, для меня она слишком сложна,
и я предпочел бы быть комиком в кино...
и не слышать ничего о физике.*
Вольфганг Паули

Почему тела, нагретые до высоких температур, светятся? Как кванты Планка приоткрыли занавес над загадкой излучения абсолютно черного тела? В поисках ответов на подобные вопросы зарождалась квантовая физика.

Ученые отличаются от обычных людей прежде всего тем, что могут задавать себе вопросы о тривиальных вещах, о которых мы с вами и не задумываемся. Почему нагретое тело — назовем это тепловым излучением — светится? Какова причина этого явления и почему с увеличением температуры цвет нагретого тела смещается к более высокочастотной части спектра? Напомним, что длина электромагнитной волны, а именно такой волной является свет, обратно пропорционально зависит от частоты, то есть чем больше длина волны, тем короче ее частота и наоборот. Эти рассуждения нам пригодятся в дальнейшем еще не раз.

Абсолютно черное тело — физическое тело, которое при любой температуре поглощает все падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах

А ПОЧЕМУ ЖЕ ОНО СВЕТИТСЯ?

В конце XIX века сразу несколько ученых — австрийцы Людвиг Больцман и Йозеф Стефан, немцы Густав Кирхгоф и Вильгельм Вин — задались именно этим вопросом и занялись изучением количественной и качественной характеристики теплового излучения.

При изучении физических явлений возникает очень много побочных факторов, влияющих на конечный результат, поэтому физики часто

абстрагируются и строят идеальную модель с отсутствием каких-либо помех. Сразу скажем, что это только допущения и в природе подобных ситуаций просто не существует.

Для изучения теплового излучения ученые ввели понятие абсолютно черного тела, которое поглощает все падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах. Заметьте, что, несмотря на название, само абсолютно черное тело может испускать электромагнитное излучение любой частоты и может иметь цвет! Излучение его определяется только температурой.

ДОЛОЙ НЕПРЕРЫВНОСТЬ!

С одной стороны, абсолютно черное тело поглощает энергию, с другой — способно излучать. Считается, что система находится в тепловом равновесии, если с течением времени тело в единицу времени будет поглощать столько же энергии, сколько и излучать.

Первым обосновал зависимость частоты излучения от температуры абсолютно черного тела немецкий ученый Густав Кирхгоф. Он же, собственно, и ввел этот термин.

Идеи Кирхгофа подхватили немецкий ученый Вильгельм Вин и британцы Джон Рэлей и Джеймс Джинс. В процессе изучения теплового излучения они сформулировали более точные законы зависимости частоты излучаемого телом электромагнитного излучения от температуры, впоследствии



Макс Карл Эрнст Людвиг Планк (1858–1947) — немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики. Лауреат Нобелевской премии по физике 1918 года

Количественной характеристикой теплового излучения служит спектральная плотность энергетической светимости тела, иными словами, мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале единичной ширины частот

«Мои тщетные попытки как-то ввести квант действия в классическую теорию продолжались в течение ряда лет и стоили мне немалых трудов. Некоторые из моих коллег усматривали в этом своего рода трагедию. Но я был другого мнения об этом, потому что польза, которую я извлекал из этого углубленного анализа, была весьма значительной. Ведь теперь я точно знаю, что квант действия играет в физике гораздо большую роль, чем я вначале был склонен считать...»

(Макс Планк)

получившие соответствующие названия: законы излучения Вина и закон Рэлея — Джинса. Проблема, однако, состояла в том, что закон Рэлея — Джинса хорошо согласовался с экспериментом в низкочастотной области, но при повышении частоты он показывал бесконечные данные. А формула Вина, которая также неплохо сходилась с экспериментом, явно не объясняла зависимость при низких частотах. На том этапе ученые назвали образовавшуюся проблему ультрафиолетовой катастрофой. А значит, до истины было еще очень далеко.

ДЕНЬ РОЖДЕНИЯ КВАНТА

В 1900 году немецкий физик Макс Планк, несколько лет параллельно занимавшийся этой же проблемой, в противоречие классической физике предположил, что энергия электромагнитной волны может излучаться и поглощаться только целыми порциями — квантами, или, как говорят физики, дискретно, в отличие от считавшегося до этого незыблемым понятия непрерывного изменения параметров физических характеристик. Формула зависимости была до изящества проста: $e = hn$, где e — энергия излучения, n — его частота, а h — постоянная величина, получившая впоследствии название постоянной Планка.

В этом, пожалуй, и заключается гениальность Макса Планка: в отличие от коллег, выведивших огромные формулы

нахождения энергии излучения в зависимости от температуры и частоты излучения, смог свести расчеты к трем простым величинам, одна из которых — постоянная.

Теория Планка поначалу не вызвала у коллег особенного интереса, и только спустя несколько лет, когда всплыла проблема фотоэффекта, на нее наконец обратили должное внимание. Тем не менее 14 декабря 1900 года, день, когда Макс Планк предложил теоретический вывод о соотношении между температурой тела и испускаемым этим телом излучением, считается днем рождения квантовой механики и квантовой физики в целом.

*«Молодой человек!
Зачем вы хотите
испортить себе
жизнь, ведь теоре-
тическая физика
в основном закон-
чена... Стоит ли
браться за такое
бесперспективное
дело?!»*

(Филипп Жолли —
юному
Максу Планку)