И. Кикоин

Квант. №01/1970

Журнал Академии наук СССР и Академии педагогических наук СССР

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 53
ББК 22.3
К38

Кикоин И.К.

К38 Квант. №01/1970: Журнал Академии наук СССР и Академии педагогических наук СССР / И. Кикоин – М.: Книга по Требованию, 2019. – 67 с.

ISBN 978-5-458-50058-6

Идею создания «Кванта» первым высказал академик П.Л. Капица в 1964 году. А в начале 1970 года читатели получили первый номер журнала. Главным редактором стал академик И.К. Кикоин, первым заместителем главного редактора — академик А.Н. Колмогоров. До начала 1990-х годов журнал выходил ежемесячно, а тираж колебался около 250–350 тысяч экземпляров. Сейчас журнал выходит лишь раз в два месяца, а тираж в сто раз меньше. Тем не менее, мы продолжаем создавать и публиковать новые интересные статьи. Хотя авторам непросто писать статьи в расчёте скорее на будущего, чем на ныне существующего читателя, работа продолжается и каждый год несколько шедевров научно-популярной литературы (и весьма много просто хороших статей!) появляются на страницах «Кванта»

ISBN 978-5-458-50058-6

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.

Серия Книжный Ренессанс
www.samizday.ru/reprint

*Академия педагогических наук
рада поздравить читателей
с выходом журнала «Квант».*

*Мы надеемся, что новый журнал
поможет воспитать
больше одаренных ученых,
инженеров и техников,
достойных продолжателей
великих традиций Ломоносова,
Лобачевского, Менделеева,
Циолковского, Вавилова, Королева
и других крупнейших
отечественных ученых.*

*Нашей Родине
принадлежит выдающаяся роль
в мировом научном прогрессе,
в современной
научно-технической революции.*

*Пусть «Квант»,
содействуя росту
молодых дарований,
внесет свой вклад в могущество
и процветание Советской страны.*

*Желаем читателям «Кванта»
почерпнуть на его страницах
как можно больше знаний,
а затем применить эти знания
на благо нашему великому народу.*

*Президент Академии
педагогических наук СССР
академик В. М. ХВОСТОВ*

*Желаю новому журналу «Квант»
больших успехов
в пропаганде достижений
физико-математических наук,
в развитии у своих юных читателей,
интереса к познанию природы.*

*Уверен,
что «Квант» будет способствовать
формированию материалистического
мировоззрения учащихся,
их научно-атеистических убеждений,
воспитанию советского патриотизма
и пролетарского интернационализма,
коммунистического отношения
к труду.*

*Желаю читателям журнала «Квант»
активно участвовать
в техническом творчестве,
в рационализации
и изобретательстве,
в решении трудных,
но увлекательных задач
и вопросов из области
физико-математических наук.*

*Министр просвещения СССР
М. А. ПРОКОФЬЕВ*

К НАШИМ

В нашей стране издается много научных журналов. Они нужны математикам и физикам, биологам и врачам, географам и геологам, инженерам разных специальностей, учителям и, конечно,... школьникам. Но СВОЕГО научного журнала у школьников пока не было. Настала пора заполнить этот пробел. Мы хотели бы, чтобы для школьников, интересующихся математикой и физикой, «Квант» стал бы их первым научным журналом.

Создание нового журнала для школьников — свидетельство постоянной заботы партии и правительства о молодежи. Знаменательно, что журнал рождается в год великого юбилея — 100-летия со дня рождения В. И. Ленина, открывшего всем народам нашей страны доступ к вершинам человеческих знаний.

Конечно, мы рассчитываем на школьников, которым математика и физика просто «нравятся» или могут понравиться. Но сейчас очень велика потребность страны в молодежи, занимающейся наукой с увлечением и сверх обязательных школьных требований. В СССР на конец 1968 года было более 800 000 научных работников и среди них более 80 000 специалистов по физико-математическим наукам. Общее же число научных работников, инженеров, экономистов и т. п., которым надо с инициативой и собственной выдумкой владеть математическими методами и искусством физического эксперимента, скоро будет исчисляться миллионами. Поэтому наша страна заинтересована в том, чтобы школьники, которые чувствуют в себе способности справляться с математическими и физическими задачами, своевременно задумались о выборе такого дальнейшего жизненного пути, на котором их способности и интересы не пропадут даром.

Поэтому и создаются все возможности для усиленных занятий математикой и физикой. Организуются специальные физико-математические школы, со старшими школьниками ведутся дополнительные факультативные занятия, устраиваются физические и математические олимпиады. Этой же цели служит и «Квант». В журнале будет много материала, подходящего для работы в школьных кружках. Но по журналу можно будет работать и самостоятельно.

ЧИТАТЕЛЯМ

Сразу надо подчеркнуть это слово — РАБОТА. В журнале вы найдете и веселые странички, и материал для сравнительно легкого чтения. Но основные материалы журнала рассчитаны на школьников, которые будут над ними РАБОТАТЬ. Задачи надо решать, статьи читать с бумагой и карандашом в руках, описываемые опыты надо постараться самим воспроизвести.

Бóльшая часть материалов журнала рассчитана на старшеклассников, но и ученики 6—7 классов, мы надеемся, найдут в журнале кое-что интересное.

Не пугайтесь, если вначале что-либо покажется вам недоступным и трудным. Возьмитесь за другие материалы журнала, попроще, но через некоторое время попробуйте вернуться к тем, которые сначала оставили в стороне. Пишите нам свои впечатления о первых номерах, задавайте вопросы и высказывайте свои пожелания. В особенности же присылайте аккуратно оформленные решения задач. Наш адрес: Москва, В-71, Ленинский проспект, 15, издательство «Наука».

В заключение о том, почему журнал назван «Квант». В статье «Рассказ о кванте» вы можете прочесть о том, сколь глубокие изменения в физической науке произошли в результате появления идеи о кванте. Нам хочется надеяться, что появление нового журнала тоже вызовет большое продвижение и даже заметный скачок вперед в деле приобщения школьников к современной науке. Повторим еще раз: чтобы наши надежды стали реальностью, надо, чтобы читатели сразу включились вместе с нами в активную работу.

Желаем успеха!

Редакционная коллегия

Макс Планк
(1858—1947)

РАССКАЗ О КВАНТЕ

Я. А. СМОРОДИНСКИЙ

В статье речь идет об очень сложном и вместе с тем фундаментальном понятии, играющем огромную роль в современной физике. Именно поэтому статья несколько трудна для понимания. Но не рассказать в первом номере журнала о кванте как физическом понятии мы не могли, так как наш журнал называется «Квант».

ДВЕ САМЫЕ КОРОТКИЕ ФОРМУЛЫ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

Современная квантовая физика родилась 14 декабря 1900 года. В этот день на заседании Берлинского физического общества выступил с докладом Макс Планк. В его докладе впервые появилась новая мировая постоянная, обозначенная буквой h и названная элементарным квантом действия. Элементарным она была названа потому, что определяла самую малую энергию, которую может нести с собой электромагнитное излучение.

Слово квант происходит от латинского слова quantum, означающего «столько» (например, quantum placet означает «столько, сколько хочется»). h называют теперь постоянной Планка, и ее наиболее точное значение равно:

$$h = 6{,}6262 \cdot 10^{-34} \text{ джоулей} \cdot \text{сек.}$$

(система СИ),

или

$$h = 6{,}6262 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{сек}$$

(система СГС).

Вместо h физики чаще пользуются другой величиной, которая в 2π раз меньше. Ее также называют постоянной Планка и обозначают

$$\frac{h}{2\pi} = \hbar = 1{,}05459 \cdot 10^{-34} \text{ джоулей} \cdot \text{сек.}$$

Формула Планка записывается так:

$$E = h\nu.$$

Здесь E — наименьшая порция света (или радиоволн, или рентгеновских лучей, или любого другого электромагнитного излучения), которую может испустить или поглотить атом, молекула или кристалл при заданной частоте излучения ν. Для видимого света частота определяет «цвет» света. Синему цвету соответствует бо́льшая частота, красному — меньшая. Частота колебаний излучения связана с длиной волны λ соотношением

$$\nu = \frac{c}{\lambda},$$

где c — скорость света, которая в пустоте равна $3 \cdot 10^8$ *м/сек* (точнее 299792,5 *км/сек*). Таким образом, постоянная Планка связывает наименьшую энергию излучения с его частотой, показывая, что отношение E к ν есть всегда величина постоянная.

Формула Планка вместе с формулой Эйнштейна, связывающей массу и энергию: $E = mc^2$,— две самые короткие и самые знаменитые формулы современной физики.

Попробуем понять, что привело Планка к необходимости квантовой гипотезы и почему формула Планка оказалась столь важной.

С ЧЕГО ВСЕ НАЧАЛОСЬ?

Если пропустить свет через призму, то на экране, поставленном за ней, возникнет разноцветный спектр. (Его впервые наблюдал Ньютон.) Позже узнали, что спектр дает не только солнечный свет, но и излучение от любого нагретого тела. Чем выше температура тела, тем больше в спектре синих лучей. Не очень нагретое тело (градусов до 500 С) — красного цвета, сильно нагретое (градусов до 1000 С) — белого. Постепенно перед исследователями встали два вопроса: как зависит спектр тела от его температуры и как распределяется энергия вдоль спектра?

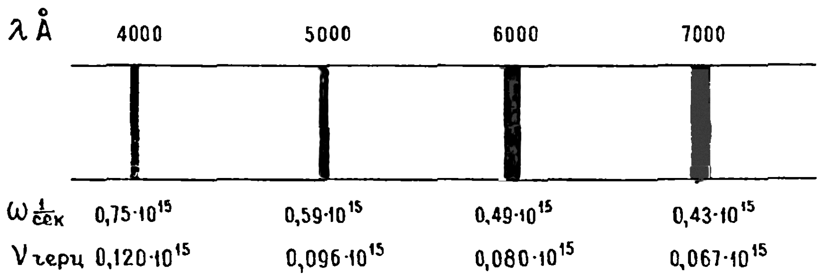
Если к разным местам спектра приложить термометры, то можно измерить, какая доля энергии приходится на каждый участок спектра. Еще лучше взять не термометры, а прямо калориметры. Измеренные количества тепла, которые падают, скажем, на полоску спектра шириной в 1 *см*, и будут теми величинами, которые нам нужны. Геометрическая длина спектра зависит от расстояния до экрана, поэтому обычно измеряют энергию, упавшую не на 1 *см*, а на участок спектра, соответствующий определенной частоте излучения ν или определенной длине волны λ.

Отношение величины энергии, сосредоточенной в узкой полоске спектра на участке частот в промежутке от ν до $\nu + \Delta\nu$, к $\Delta\nu$ называют спектральной плотностью энергии или просто спектральной функцией и обозначают $f(\nu)$.

Какой вид имеет спектральная функция $f(\nu)$? Ясно, что она зависит от температуры тела. Вообще говоря, $f(\nu)$ разная и у разных тел. Как же определить вид спектральной функции? Это была трудная задача, и чтобы рассказать о том, как она решалась, придется начать издалека. Но сначала еще несколько слов о спектральной функции.

Схема спектра видимого света

Слева фиолетовый конец спектра, справа красный. Наверху длины волн в ангстремах ($1\ \mathring{A} = 10^{-8}$ *см*), внизу частоты в обратных секундах ($\frac{1}{сек} = \frac{1}{2\pi}$ герц). Количества энергии, падающие на выделенные четыре полоски спектра, относятся, как значения спектральной функции — $f(0{,}120 \cdot 10^{15})$: $f(0{,}096 \cdot 10^{15})$: $f(0{,}080 \cdot 10^{15})$: $f(0{,}067 \cdot 10^{15})$.



СПЕКТРАЛЬНАЯ ФУНКЦИЯ

Спектральная функция $f(\nu)$ — это, вероятно, самое трудное, что нужно понять в этой статье. Спектр, который мы видим на экране, тянется непрерывной полоской, и в нем представлены все частоты. Не имеет смысла спрашивать, какую энергию можно сопоставить в спектре точно данной частоте ν.* Когда из источника течет вода, нельзя спросить, сколько воды вытечет в какой-то определенный момент времени, например, ровно в 12 часов дня. Точно в этот момент вытекает объем воды, равный нулю. Для того чтобы вытекло какое-то количество воды, надо чтобы прошел хотя бы небольшой промежуток времени. Можно спросить, сколько воды вытечет за время от 12.00 до 12.01. Можно спросить, сколько вытечет воды за любой интервал времени Δt от 12 часов до 12 часов$+\Delta t$ минут. Если вода течет более или менее равномерно и за 1 минуту вытекает g $см^3$ воды, то за время Δt вытечет $g(t)\ \Delta t$ $см^3$.

Мы написали не g, а $g(t)$, так как в разное время (в час дня, в два часа дня и т. д.) вода может течь по-разному. Это, например, означает, что количество воды, вытекающее за 1 минуту в 12.15 дня, и количество воды, вытекающее за 1 минуту в 12.30, относятся как $g(15):g(30)$, если за начало отсчета времени взять полдень — 12.00.

При подсчете количества воды мы сталкиваемся с новой величиной, которая описывает интенсивность непрерывного процесса. g есть отношение количества воды, вытекающего за интервал времени Δt, к этому интервалу, когда он взят очень маленьким.

Спектральная функция имеет аналогичный смысл; она определяет отношение количества энергии в полоске спектра к ширине этой полоски, когда ширина полоски взята очень маленькой. Ширина при этом измеряется, как было уже сказано, не в длинах, а в частотах.

ЧАСТИЦЫ ИЛИ ВОЛНЫ?

С самого начала механика встречалась с задачами, которые можно было разбить на два совершенно разных класса. Движение материальных точек и твердых тел описывалось уравнениями Ньютона. Из этих уравнений можно было определять траектории движения тел, например, планет солнечной системы, и описывать, как происходит движение вдоль траекторий. Но были и другие объекты. Движение воды в каналах, распространение звука в воздухе, изгиб железной балки — все эти задачи относились к механике сплошных сред, и ими занимались гидродинамика, аэродинамика, теория упругости и другие разделы механики.

Сплошная среда и система материальных точек представлялись совершенно разными физическими объектами. Если даже, решая задачу о течении воды, и выделяли мысленно небольшой объем жидкости, то этот объем никак не связывали с молекулами жидкости (о молекулах вообще узнали через много лет после того, как были написаны уравнения гидродинамики).

Волны в воде или в воздухе (например, те, которые называют звуком) и планета, движущаяся вокруг Солнца, имели, казалось, мало общего. Все было ясно, вот только в оптике оставался нерешенным вопрос: что такое свет? Поток мельчайших частиц, как это думал Ньютон — сторонник корпускулярной теории, или это волны в какой-то среде — мировом эфире, как думал Гюйгенс — создатель волновой оптики? Популярность каждой из теорий в разное время была различной, но никто не мог найти решающего аргумента в пользу одной из них: свет в одних явлениях вел себя, как поток корпускул, в других — как волны. Сейчас мы хорошо знаем, что в этом нет противоречия — поверить в это стало возможным лишь благодаря квантовой теории. В прошлом же веке противоречие казалось неразрешимым. Свет должен был быть либо волной, либо частицей. Это утверждение выглядело логически безупречным.

СТЕПЕНИ СВОБОДЫ

Разница между системой материальных частиц и сплошной средой выступает очень четко, если посмотреть, каким числом координат задается состояние системы.

Положение каждой точки в пространстве задается тремя числами — тремя координатами. Говорят, что материальная точка имеет три степени свободы. Если в систему входит N материальных точек, то говорят, что она имеет $3N$ степеней свободы.

Такое же рассуждение можно провести и для скоростей. Скорость одной точки описывается тремя числами — тремя компонентами вектора скорости. Скорости N точек требуют для своего описания $3N$ чисел.

Сколько чисел надо задать, чтобы описать состояние поверхности моря? Строго говоря, для каждой точки поверхности надо задать три числа — вектор скорости воды в данной точке; следовательно, чисел будет бесконечно много. Поверхность моря представляется нам как система с бесконечно большим числом степеней свободы. Даже тот факт, что вода состоит из молекул, а потому число степеней свободы можно определить, сосчитав молекулы, не облегчает задачу: молекул настолько много, что практически число степеней свободы остается бесконечно большим. В действительности же нас не интересует движение каждой молекулы. Когда по морю бегут волны, например, от идущего корабля, то мы можем описать картину распределения волн, используя сравнительно немного чисел. Мы можем задавать величину амплитуды и фазы каждой волны; волн хотя и много, но все же меньше, чем молекул. Кроме того, картина, в основном, повторяется со временем: волны более или менее одинаковые.

В каждой волне движется много молекул, движение носит коллективный характер, и мы можем говорить о коллективных степенях свободы на поверхности моря, в отличие от индивидуальных степеней свободы, скажем, отдельной молекулы воды.

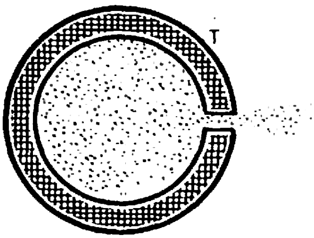
Такое же коллективное описание можно использовать, рассказывая о свойствах света. В частности, мы так и делаем, когда пытаемся описать распределение энергии по спектру.

Свет — волновой процесс, и его описание проще всего выглядит с позиций волновой теории. Конечно, подобное описание света совсем непохоже на описание системы точек. Здесь нет даже намека на какие-то степени свободы — волны и частицы совсем непохожи друг на друга. Но это все-таки не совсем так. У волн и частиц есть общие свойства. Это, прежде всего, те, которые проявляются, когда мы начинаем изучать тепловые явления и думать, как распределяется между волнами и частицами тепловая энергия.

ТЕМПЕРАТУРА И ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Рассмотрим газ, находящийся в нагретом сосуде. Мы знаем, что температура газа и стенок сосуда должна быть одинаковой. Если это вначале было не так, то тепло будет до тех пор перетекать от более теплого тела к более холодному, пока температуры не станут равными, то есть пока не установится тепловое равновесие между стенками сосуда и находящимся в нем газом.

Температура газа связана с кинетической энергией его атомов (мы будем для простоты говорить об одноатомном газе). Один из самых первых выводов кинетической теории газа состоял в том, что каждый атом газа обладает энергией $\frac{3}{2}kT$, по $\frac{1}{2}kT$ на каждую степень свободы, а полная энергия газа равна $\frac{3}{2}NkT$, где



Сосуд с газом

Атомы сталкиваются со стенками, и в результате устанавливается тепловое равновесие между газом и сосудом — газ приобретает температуру стенок. Число атомов при столкновениях не меняется. Чтобы измерить температуру газа, можно выпустить небольшую порцию через маленькое отверстие.

N — число частиц в газе ($3N$ — полное число степеней свободы). Здесь k — постоянная Больцмана ($k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ джоуль/градус); она играет роль переводного коэффициента от градусов на шкале Кельвина к джоулям. Дальше в кинетической теории газов показывалось, что если есть колебания, то на каждую колебательную степень свободы приходится энергия kT, вдвое большая, чем на степень свободы, отвечающую поступательному движению. Эти утверждения, доказанные и проверенные, относились к газу. Естественно, возник вопрос: а что можно сказать об энергии излучения?

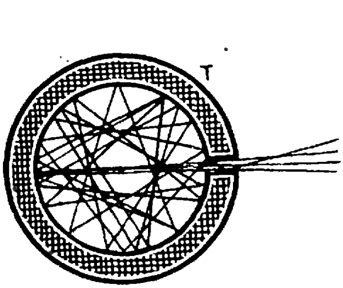
Представим себе, что у нас есть сосуд (как говорили раньше «полость»), в котором нет газа. Однако в таком сосуде всегда будет электромагнитное поле. Электромагнитные волны излучаются и поглощаются стенками, и эта энергия как-то будет распределена по спектру. Если стенки сосуда имеют какую-то фиксированную температуру, то распределение энергии будет, очевидно, различным при разных температурах. Мы можем изучить поле внутри сосуда, сделав в нем маленькое отверстие и выпустив пучок света.

Когда впервые начали обсуждать свойства такой «полости», то заметили, что если свет снаружи попадает в отверстие, то он, очень много раз отразившись от стенок и «заблудившись», почти не будет иметь шансов выйти наружу. Отверстие поглощает весь падающий на него свет, поэтому тело и назвали «черным», а свет, который выходит из отверстия, назвали «излучением черного тела» (так что «черное тело» светится!).

Представьте теперь, что «черное тело» нагревают. Тогда можно задать вопрос: какое количество тепловой энергии перейдет в свет? Ответ на него был дан в конце XIX века и состоял в том, что свет, заключенный внутри «черного тела», должен находиться в тепловом равновесии со стенками сосуда. Это равновесие устанавливается и поддерживается процессами излучения и поглощения световых волн нагретыми стенками (сколько излучают, столько же поглощают обратно), а количество энергии и ее спектральная плотность полностью определяются только одним параметром — температурой. Никакого разговора о числе степеней свободы (как это было в случае газа) здесь как будто и не возникает.

Сосуд с излучением («черное тело»)

Волны или лучи света много раз отражаются от стенок, при этом они поглощаются стенками и излучаются вновь; в результате устанавливается тепловое равновесие между излучением и стенками. При таких процессах число квантов не остается постоянным: количество энергии и число квантов полностью определяется температурой сосуда. Свет, выходящий из маленького отверстия в таком сосуде, будет иметь спектр «черного тела».



Если в сосуде, в котором установилось тепловое равновесие, есть маленькое отверстие, то световые волны будут выходить из него. Количество энергии, выходящее из отверстия «черного тела», определяется законом Стефана — Больцмана. Согласно этому закону количество энергии, излученное «черным телом» с единицы поверхности отверстия, пропорционально четвертой степени абсолютной температуры и не зависит от природы тела: $\varepsilon=\sigma T^4$ (постоянная Стефана — Больцмана $\sigma=5{,}67\cdot10^{-12}\frac{дж}{см^2\cdot сек\cdot град^4}$.)

Закон Стефана — Больцмана был хорошо проверен экспериментально. Опыты подтвердили, что к излучению можно применять те же понятия — энергия, температура,— которые используются при описании тепловых свойств газа в кинетической теории.

ФОРМУЛА ВИНА И ФОРМУЛА РЕЛЕЯ — ДЖИНСА

Теперь пора вернуться к вопросу, который был поставлен в начале статьи: как получить из теории спектральную функцию, которая описывает распределение энергии излучения по спектру, и как она зависит от температуры?

Прежде всего этот вопрос попробовали решить по аналогии, но аналогия с газом не помогла. Число степеней свободы светового потока, как их ни считай, бесконечно велико, и если на каждую степень свободы выделить по одинаковой порции энергии, скажем, по kT (световым волнам разумно сопоставить колебательные степени), то общая энергия будет бесконечной при любой конечной температуре. Рассуждение «по аналогии» приводит нас к абсурдному выводу, что вся тепловая энергия стенок (а за ними и всего остального) должна перейти в электромагнитные волны, так что температура всех предметов должна стремиться к абсолютному нулю. Если это было бы так, то любой предмет в комнате излучал бы свет (видимый или невидимый). Но мы знаем, что этого не случается.

Точные физические измерения говорят, что при каждой температуре тело излучает волны в сравнительно узком интервале спектра. Максимальная энергия излучения сосредоточена вблизи длины волны, которая определяется так называемым законом Вина:

$$\lambda_{max}=\frac{a}{T}.$$

Этот закон был открыт в 1893 году. Постоянная Вина $a=0{,}29\cdot10^{-2}$ *м·град* была определена из опыта, но ее происхождение оставалось неясным. Мы увидим дальше, что она связана с постоянной Планка (так же, как и постоянная Стефана — Больцмана).

Закон Вина показывает, что с нагреванием тела максимум спектра смещается в сторону меньших длин волн, то есть в сторону бо́льших частот (этот закон часто так и называют законом смещения).

Итак, закон Стефана — Больцмана говорит о полной энергии излучения, а закон Вина — о положении максимума в спектре. Другими словами, известно, где спектральная кривая имеет максимум и какова площадь под кривой. Настала очередь обсудить более подробно форму этой кривой.

К началу XX века существовали две формулы, с помощью которых пытались описать форму кривой распределения энергии по спектру. Одну из них предложили два англичанина — это формула Релея — Джинса *)

$$f(\nu)=\frac{8\pi\nu^2}{c^3}kT.$$

Сравнение с опытом показало, что формула Релея — Джинса правильно описывает спектр только для самых малых частот (слева от максимума кривой).

Если посмотреть на эту формулу с точки зрения числа степеней

*) Релей дал ее первым в 1900 году. Джинс вывел формулу много позже, в 1909 году.

свободы, то можно дать ей красивое объяснение. Формула Релея — Джинса имеет такой вид, как будто участок спектра $\Delta\nu$ содержит $8\pi\nu^2/c^3$ степеней свободы, на каждую из которых приходится тепловая энергия kT. Однако эта эффектная интерпретация порочна. Число степеней свободы быстро растет, если переходить ко все бо́льшим частотам в ультрафиолетовую часть спектра (направо от максимума кривой). Это значит, что чем больше частота, тем больше энергии содержит спектр. То есть и по этой формуле все тела должны излучать электромагнитные волны с бесконечно большой частотой.

Этот странный вывод носил драматическое название «ультра-фиолетовой катастрофы», так как демонстрировал полный провал попыток объяснить свойства спектра, оставаясь в рамках понятий классической физики.

Другую формулу предложил уже известный нам Вин в 1890 году:

$$f(\nu) = A\nu^3 e^{-\frac{b\nu}{T}} \text{*)}$$

(Правда, он писал эту формулу несколько иначе, выражая частоту через длину волны.) В формуле Вина A и b — некоторые постоянные, связанные, как мы это увидим в дальнейшем, с постоянной Планка. Формула Вина описывала ультра-фиолетовую часть спектра, но была беспомощна, когда речь заходила о длинноволновой его части.

Итак, перед работами Планка физики знали уже довольно много: площадь под кривой распределения энергии по спектру, положение максимума и форму кривой в «начале» и в «конце». Оставалось сделать последний смелый шаг. Он-то и привел к рождению новой физики.

ФОРМУЛА ПЛАНКА

Сейчас трудно восстанавливать ход мыслей физиков, живших много лет тому назад. По-видимому, Планк просто искал какую-нибудь формулу, которая объединила бы вместе все, что было известно о спектре «черного тела». Пробуя разные подходы, он в конце концов пришел к выводу, что надо рассматривать свойства атомов, из которых состоит стенка и которые излучают свет. Гипотеза Планка состояла в том, что излучающие атомы могут иметь не любую энергию, а только энергию, равную целому числу $h\nu$, где ν — частота колебаний атома. Отсюда уже получилось, что атом может излучать свет только квантами (хотя эту связь фактически поняли несколько позже).

Планк записал свою формулу так: $f(\nu)=n(\nu)\cdot h\nu$, где $n(\nu)$ — число квантов, равное $\frac{8\pi\nu^2}{c^3}\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}$, а $h\nu$ — энергия кванта. Последняя формула может показаться не совсем точной, так как из нее $n(\nu)$ получается не целым. В этом ничего страшного нет, так как формула дает среднее число квантов. Например, если в каком-то объеме половину времени есть один квант, а половину времени квантов нет совсем, то среднее число квантов равно $^1/_2$!

Формула Планка отличается от формулы Релея — Джинса тем, что ее нельзя объяснить с точки зрения степеней свободы. Если считать, что каждый квант имеет три степени свободы, то число степеней свободы системы, равное $3\,n(\nu)$, оказывается функцией температуры: число степеней свободы растет с повышением температуры. Вывод абсурдный с точки зрения старых представлений о свойствах частиц. Но именно в этом нарушении привычной логики и лежал выход из тупика. Ведь количество излучающих частиц может и не быть строго определенным числом; оно может изменяться с изменением условий. Это

*) $e=2{,}7182\ldots$ Эта постоянная (основание натуральных логарифмов) будет часто встречаться в журнале. В данной статье будет использовано следующее свойство этого числа: при малых значениях x

$$e^x \approx 1+x.$$