

## ГЛАВА 13

### ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Учение о тепловом излучении является одной из самых молодых ветвей физики. Понятие теплового излучения было установлено химиком Карлом Вильгельмом Шееле (1742—1786); первые эксперименты произвел Марк Огюст Пикте (1752—1825). Пьер Прево (1751—1839) сделал из них вывод в 1791 г., что каждое тело излучает независимо от окружающей его среды. Сообщенное телу количество тепла представляет собой разность между теплом, которое оно получает от среды, и тем, которое оно излучает; это — важный закон, который только при теплопроводности не имеет никакого значения. В течение первой половины XIX столетия знали только единый спектр; тепловое и световое излучения часто спутывали (гл. 4). Поскольку в то же самое время были установлены оба основных начала, термодинамика и оптика теперь настолько развились, что из их объединения могло родиться дитя, предназначенное совершить величайшую революцию в физике. Это еще одно из тех событий, которые доказывают истинность физики.

Новый путь проложил Густав Роберт Кирхгоф (1824—1887). Он показал, что в замкнутом пустом пространстве, не проницаемом для излучения и поддерживаемом при постоянной температуре, устанавливается универсальное излучение «черного тела», зависящее только от температуры, но не от природы стенок. Интенсивность излучения любого тела может быть определена, исходя из излучения «черного тела», если

известны поглощение и показатель преломления данного тела (1859). Только для излучения черного тела имеет строгое значение закон косинусов, который в 1760 г. был выведен Иоганном Генрихом Ламбертом (1728—1777) из наблюдений над излучением источников света. Так вся проблема излучения свелась к исследованию излучения черного тела. Никто не подозревал значения этих открытий. К тому же считали невозможным наблюдение излучения черного тела. В 1895 г. Отто Луммер (1860—1925) и Вильгельм Вин (1864—1928) изобрели способ изучать его, глядя внутрь замкнутого пространства через маленькую щель, столь маленькую, что это заметно не изменяет состояния излучения в замкнутой полости. Лишь с тех пор существуют количественные измерения интенсивности излучения черного тела.

За несколько месяцев до установления закона, носящего имя Кирхгофа, последний вместе с Робертом Вильгельмом Бунзенем (1811—1899) опубликовал открытие, которое произвело большое впечатление на современников: темные фраунгоферовы линии в солнечном спектре совпадают с линиями испускания хорошо известных газов и паров. Таким образом, было доказано в общем виде, что материя вне нашей планеты состоит из тех же химических элементов, что и на Земле. До тех пор это можно было предполагать только на основе анализа метеоритов.

Спектроскопия, как инструмент астрономии, обещала большое расширение наших знаний о неподвижных звездах. Но результаты вскоре превзошли все ожидания. Элемент гелий, вопреки обычным правилам, был раньше найден на Солнце Ж. Жансеном (1824—1907) в 1868 г. и лишь потом, в 1895 г., в минерале клевеите Вильямом Рамзаем (1852—1916) и Теодором Клеве (1840—1905). Спектроскопия звезд в настоящее время не является еще исчерпанной наукой.

Кирхгоф считал связь между этим открытием и термодинамикой более тесной, чем она есть на самом деле. Он заблуждался, предполагая, что испускание

спектральных линий совершается за счет тепловой энергии. В большинстве случаев электрическое или химическое возбуждение вызывает в газах свечение; температура излучения — как мы выражаемся теперь — становится тогда гораздо выше температуры самого газа. Совпадение линий поглощения и испускания связано с явлением резонанса, которое было объяснено лишь теорией квантов.

---

Второй шаг в исследовании теплового излучения сделал в 1884 г. Людвиг Эдуард Больцман (1844—1906). На основании электромагнитной теории света он заключил о давлении излучения черного тела на стенки, равном одной трети энергии излучения, приходящейся на единицу объема. Путем простого применения обычных термодинамических способов он вывел, что эта энергия пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры; коэффициент пропорциональности — универсальная постоянная. Так был обоснован и уточнен результат, который еще в 1879 г. был выведен Джозефом Стефаном (1835—1893) из измерений французских физиков. Это было триумфом электромагнитной теории света. В своем некрологе о Больцмане Лорентц назвал перлом теоретической физики \*) его маленькое, но глубоко продуманное сочинение, в котором он смело применил к тепловому излучению термодинамические понятия — давление и температуру, а неявно — также понятие энтропии.

---

Закон Стефана—Больцмана говорит о суммарной энергии всего спектра. Целью исследования стало изучение распределения энергии в спектре. Существен-

\*) H. A. Lorentz, Verh. d. Deutschen Phys. Gesellschaft (1907).

ное приближение к этой цели означало третий шаг теории теплового излучения. Его сделал в 1893 г. Вильгельм Вин (1864—1928) путем комбинации методов термодинамики с принципом Допплера. Закон смещения Вина — великое открытие, недостаточно оцененное в современных учебниках, — дает возможность вычислить распределение энергии при любой температуре, если оно известно при данной температуре. Но даже без этого знания закон дает объяснение, почему с возрастанием температуры максимум интенсивности в спектре все больше и больше смещается к коротким волнам; почему, таким образом, тепловое излучение при более низких температурах остается невидимым, а при температурах около  $6000^{\circ}$  максимум интенсивности становится видимым; если известно его положение, то возможно вычислить температуру источника излучения, например Солнца. Вин первый распространил понятие энтропии не только на излучение черного тела, но также на направленное излучение, что было в связи с законом увеличения энтропии тем более необходимо, что энтропия источника излучения уменьшается. Вскоре после этого оказалось, что закон смещения ведет так далеко, как вообще могла пойти классическая физика, т. е. к порогу квантовой теории.

---

Было сделано много попыток решения проблемы вычисления интенсивности излучения как функции частоты колебаний и температуры. Мы упомянем закон, названный по имени лорда Рэлея (1842—1919) и Джемса Хопвуда Джинса (1877—1946), согласно которому интенсивность пропорциональна температуре и квадрату частоты колебаний. Этот закон недействителен для произвольно высоких частот колебаний (коротких длин волн) потому, что при этом не получается конечная общая энергия излучения. Однако он содержит определенную истину, поскольку имеет значение для небольших частот (больших длин волн). С 1896 г.

В. Вин и позднее также М. Планк (1858—1947) выдвинули закон распределения, согласно которому интенсивность уменьшается экспоненциально по мере возрастания длин волн. Так пытались избежать «ультрафиолетовой катастрофы». В 1899 г. удалось экспериментально подтвердить этот закон, но затем усовершенствованные измерения Отто Луммера (1860—1925) и Эрнста Принсгейма (1859—1917) привели к значительным отклонениям от этого закона, послужившим для Планка источником новых размышлений.

Двадцатилетняя деятельность Планка в области термодинамики и ясное понимание значения энтропии, которое тогда еще многими оспаривалось, сыграли большую роль в развитии его идей. Ядром проблемы он считал не формулу интенсивности, а однозначно связанное с нею отношение между энергией, частотой и энтропией излучения. Закону распределения Вина соответствовала одна связь этих величин, закону Рэлея—Джинса — другая. Когда Планк в октябре 1900 г. узнал о новых измерениях Фердинанда Курлбаума (1857—1927) и Генриха Рубенса (1865—1922), подтверждающих закон для длинных волн, он установил на основе обоих видов связи интерполяционную формулу, из которой непосредственно получался названный по его имени закон излучения, содержащий прежде установленные формулы как предельные случаи \*). Он доложил об этом в Немецком физическом обществе 19 октября 1900 г. Несмотря на некоторые сомнения, этот закон в последующем все больше и больше эмпирически подтверждался.

Оставалось, правда, главное дело, а именно: проблема надлежащего теоретического обоснования этого полуэмпирически найденного закона. Планк вернулся к обнаруженной Больцманом связи между энтропией и вероятностью (гл. 10) и вычислил вероятность числа колебаний линейного осциллятора. При этом он исходил

---

\*) M. Planck, Zur Geschichte der Auffindung des physikalischen Wirkungsquantums, Naturwiss. 31, 153 (1943).

из неслыханно новой, только по необходимости им введенной идеи о том, что возможны только дискретные ступени энергии. Отсюда, действительно, получался закон излучения. Этот закон удовлетворял закону смещения Вина, если ступени энергии отличались друг от друга на величину  $h\nu$ , где  $h$  — новая универсальная константа, элементарный квант действия. Таким путем теоретическая формула излучения становилась тождественной формуле, найденной путем интерполяции. Численное значение  $h$  получилось на основании измерений равным  $6,5 \cdot 10^{-27}$  эрг·сек. Константа Больцмана, которая также входит в закон излучения (поскольку применяется установленное Больцманом отношение между энтропией и вероятностью состояния), имеет значение  $1,37 \cdot 10^{-16}$  эрг/град. Этот вывод Планк также доложил в Немецком физическом обществе 14 декабря 1900 г. С этого дня началось развитие теории квантов.

Закон квантов энергии  $h\nu$  Планка был не продолжением прежней физики, а переворотом в ней. Следующие десятилетия все яснее показывали, насколько глубок был этот переворот и также насколько он был необходим. Именно с помощью теории квантов стало возможным понимание атомных явлений.

---

В последующие годы были сделаны еще некоторые другие попытки теоретически вывести закон излучения Планка. В 1910 г. П. Дебай, например, применил  $h\nu$ -закон к электромагнитным собственным колебаниям черного тела и достиг таким путем, может быть, еще более простого подхода к формуле излучения. В 1917 г. Эйнштейн сделал интересный вывод, который дальше всего отходит от представления о колебаниях излучения черного тела. Он характеризует это излучение посредством спектральных областей и квантов энергии, которые относятся к этим областям. При этом он придает каждому возбужденному атому излучения черного тела определенную вероятность излучения в единицу

времени, а также пропорциональную энергии излучения вероятность поглощения или вынужденного испускания. Для невозбужденных атомов устанавливается только вероятность поглощения. Мысль Швейдлера о вероятности распада при радиоактивности находит здесь свое применение к другим атомным процессам; эта мысль распространилась на всю теорию квантов.

С другой стороны, термодинамика излучения доставила поразительное подтверждение принципа Больцмана. Две пространственно разделенные системы частиц в общем статистически независимы, так что их вероятности умножаются, когда вычисляют вероятности всей системы; этому соответствует, согласно принципу Больцмана, аддитивное сложение их частных энтропий в общую энтропию, которое принадлежит к числу неявных предпосылок классической термодинамики. Если производят такое вычисление у двух когерентных лучей, которые возникают из одного луча при отражении и преломлении, то находят, что общая энтропия их больше, чем энтропия первоначальных лучей. Но в 1906 г. М. Лауэ смог доказать, что этот процесс обратим; можно два когерентных луча опять сложить в один путем соответствующего отражения и преломления. Общая энтропия двух когерентных лучей должна, следовательно, быть равна энтропии первоначальных лучей. Противоречие разрешается, если отказываются от правила аддитивности частных энтропий когерентных лучей. Согласно принципу Больцмана это действительно необходимо, так как колебания обоих когерентных лучей полностью согласуются друг с другом; колебания в этих лучах не являются, следовательно, статистически независимыми. Это единственное исключение из правила аддитивности энтропий было бы без принципа Больцмана совершенно непонятным.

