

т. е. тело не может далее уменьшать своей энергии и его тепловое излучение прекращается.

Каждое тело при данной температуре характеризуется своей кривой лучеиспускательной способности в различных частях

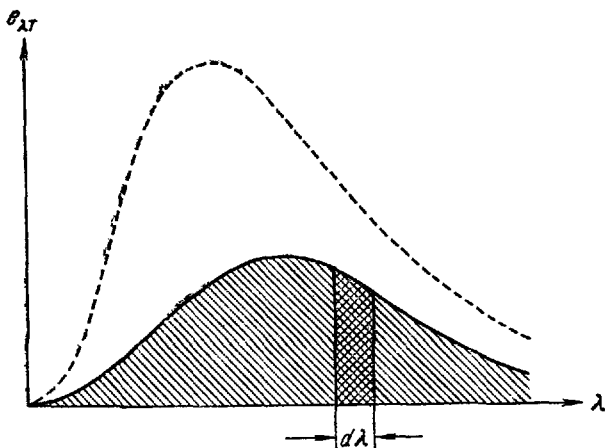


Рис 1.136.

спектра $e_{\lambda, T}$ и своим значением полной (или интегральной) лучеиспускательной способности e_T . Как указывалось в § 22, жидкости и твердые тела дают сплошной спектр испускания, аналогично изображенному на рис. 1.136, а нагретые газы и пары испускают линейчатые и полосатые спектры.

§ 31. Закон Кирхгофа. Излучение абсолютно черного тела

При тепловом излучении энергия теплового движения в теле переходит в энергию испускаемых электромагнитных волн. При поглощении света происходит обратный процесс перехода лучистой энергии в тепловую энергию тела. В обоих случаях взаимные превращения тепловой и лучистой энергии протекают через промежуточную стадию колебания электрических зарядов в теле. Поэтому лучеиспускательная и лучепоглощательная способности тела обусловлены одними и теми же деталями его строения и тесно связаны друг с другом. Для установления этой связи применимы термодинамические методы исследования.

Представим себе произвольное тело в виде бесконечной однородной пластины 1 (рис. 1.137). Расположим параллельно ему такую же пластину 2, вырезанную из абсолютно черного тела. При данной температуре T нечерное тело характеризуется определен-

ной лучеиспускающей способностью e_T и соответственно полной лучепоглощательной способностью a_T . Для абсолютно черного тела $a=1$, а его лучеиспускающую способность, в отличие от всех других тел, обозначим большой буквой E_T .

Если в пространстве между пластинами 1 и 2 создать абсолютный вакуум, то они будут обмениваться энергией только с помощью излучения. При таком чисто лучистом теплообмене оба тела через некоторое время придут в термодинамическое равновесие и их температуры сравняются. В дальнейшем лучистая энергия, испускаемая каждым телом, должна в точности равняться энергии, поглощаемой им за то же время. Если бы при одинаковых температурах тел испускание не равнялось поглощению, то одно из этих тел начало бы нагреваться, а другое — остывать. В этом случае поток тепла переходил бы от более холодного тела к более горячему. Как мы видели в т. I, § 36, такой процесс связан с уменьшением энтропии системы и самопроизвольно происходить не может.

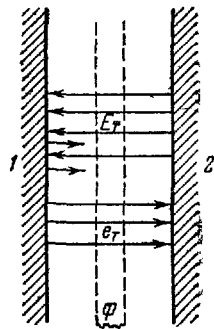


Рис 1 137

Заметим, что наличие между пластинами газа может за счет теплопроводности ускорить достижение равновесного состояния, но никак не скажется на окончательном равновесии. Температура газа в конце процесса станет равной температуре обеих пластин и его наличие никак не изменит условий теплового баланса.

Составим при равновесии ($T_1=T_2=T$) баланс лучистой энергии для каждой из пластин. В силу полной симметрии их расположения можно для упрощения выкладок считать, что каждая единица площади одной из пластин находится в равновесии с расположенной непосредственно против нее единичной площадкой второй пластины.

Для нечерной пластины поток лучистой энергии, испускаемой единицей площади за единицу времени, равен e_T . За то же время на эту площадку падает лучистая энергия E_T , испущенная единицей площади абсолютно черного тела. Из этой величины, однако, лишь доля $a_T E_T$ поглощается нечерной пластиной 1, а остальная часть $(1-a_T)E_T$ отражается обратно. Следовательно,

$$e_T = a_T E_T. \tag{31.1}$$

Единица площади абсолютно черной пластины 2 испускает за единицу времени поток лучистой энергии E_T . За это же время на эту площадку со стороны нечерной пластины приходит излученная последней энергия e_T и отраженная от нее энергия $(1-a_T)E_T$. Вся эта пришедшая энергия полностью поглощается абсолютно черным

телом ($a=1$) и, следовательно,

$$E_T = e_T + (1 - a_T) E_T. \quad (31.2)$$

Из обоих уравнений (31.1) и (31.2) вытекает одно и то же соотношение:

$$\frac{e_T}{a_T} = \frac{E_T}{1} = E_T. \quad (31.3)$$

Отношение полной лучеиспускательной способности любого тела к его лучепоглощательной способности при данной температуре есть величина постоянная, равная лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же самой температуре.

Это соотношение было теоретически выведено в 1860 г. Кирхгофом и прекрасно подтвердилось на опыте. Если поместить между рассматриваемыми пластинами светофильтр, пропускающий лишь узкий участок длин волн $d\lambda$ и полностью отражающий все остальные, то можно точно таким же путем доказать справедливость закона Кирхгофа не только для интегральных величин, но и для дифференциальных, т. е. установить соотношение

$$\frac{e_{\lambda, T}}{a_{\lambda, T}} = \frac{E_{\lambda, T}}{1} = E_{\lambda, T}. \quad (31.4)$$

Отношение лучеиспускательной и поглощательной способности для любых тел при одинаковой их температуре T и для одной и той же длины волны λ одинаково и не зависит от природы этих тел. Это отношение является универсальной функцией длины волны и температуры и равно лучеиспускательной способности абсолютно черного тела $E_{\lambda, T}$.

Поскольку для абсолютно черного тела $a=1$, а для других тел $a_{\lambda, T} < 1$, то из (31.4) вытекает весьма важное утверждение. Излучение, которое тело сильнее поглощает, сильнее и испускается. При данной температуре

$$e_{\lambda, T} = a_{\lambda, T} E_{\lambda, T} < E_{\lambda, T}, \quad (31.5)$$

т. е. тепловое излучение абсолютно черного тела во всех частях спектра интенсивнее, чем для нечерного тела, нагретого до той же самой температуры.

Возьмем белую фарфоровую тарелку и нанесем на нее какой-либо узор, зачернив отдельные участки ее поверхности сажей. При комнатной температуре собственное тепловое излучение тарелки будет пренебрежимо слабым. Чтобы видеть эту тарелку, нам придется осветить ее светом от какого-либо постороннего горячего источника света (электрическая лампочка, Солнце). Тогда покрытые сажей участки будут сильнее всего поглощать падающий свет, и мы увидим черный узор на белом фоне (рис. 1.138, а).

Нагреем эту тарелку до температуры $\sim 1000^\circ \text{C}$ и перенесем ее в темную комнату, пока она не остыла. В отсутствие посторонних источников света мы увидим собственное тепловое излучение тарелки. Тогда, по закону Кирхгофа, зачерненные участки будут сильнее всего излучать, и мы увидим яркий светящийся узор на более тусклом фоне остальной части тарелки (рис. 1.138, б).

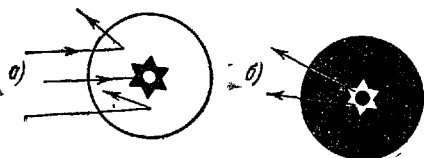


Рис. 1.138.

При данной температуре T абсолютно черное тело является наиболее сильным излучателем на любой длине волны и суммарно. Для проверки этого утверждения и экспериментального исследования универсальной функции $E_{\lambda, T}$ В. А. Михельсон предложил весьма простую и остроумную модель абсолютно черного тела. Такой моделью является маленькое отверстие в стенке полости, сделанной из любого материала (рис. 1.139). Луч, падающий извне на отверстие, попадет внутрь полости и, прежде чем выйти обратно наружу, испытает многократное отражение от стенок. Из чего бы ни были сделаны внутренние стенки полости, при каждом отражении луча всегда будет происходить частичное поглощение его энергии.

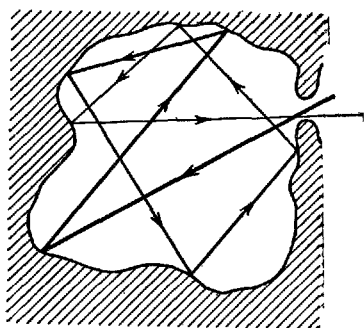


Рис. 1.139.

Поэтому после многократного отражения интенсивность выходящего обратно луча будет практически равна нулю. Таким образом, это отверстие будет практически полностью поглощать все падающие на него лучи и является абсолютно черным телом.

Это отверстие может излучать. Если мы нагреем стенки полости до некоторой температуры T , то они начнут испускать электромагнитное излучение. Это излучение будет распространяться внутри

полости, частично отражаясь от стенок, частично поглощаясь последними. В результате внутри полости установится равновесие между испусканием и поглощением, и она заполнится электромагнитными волнами разной длины, поляризации и интенсивности, хаотически движущимися во все стороны.

Свойства этого равновесного излучения будут разобраны подробнее в следующем параграфе. Здесь же отметим, что, выходя через малое отверстие, оно будет определять спектральную

характеристику последнего, т. е. лучеиспускательную способность $E_{\lambda, T}$ этого абсолютно черного тела.

Сконструировав описанную выше модель, можно измерить излучение, выходящее из отверстия в полости. Направляя это излучение на чувствительный термоэлемент или болометр, можно измерить интегральное излучение E_T . Разлагая предварительно, с помощью призмы или дифракционной решетки, это излучение в спектр (рис. 1.140), можно детальнее изучить спектральный состав теплового излучения и найти на опыте функцию $E_{\lambda, T}$.

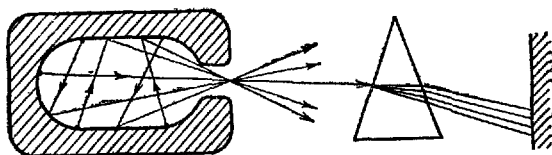


Рис. 1.140.

Сопоставление этих теоретических выводов с результатами прямых измерений позволило, как мы увидим в следующем параграфе, произвести детальную проверку законов распространения света и взаимодействия его с веществом. При этом выяснился целый ряд новых, ранее не известных нам свойств света.

Настоятельная необходимость теоретического и экспериментального изучения функции $E_{\lambda, T}$ выдвигалась и потребностями практики. В 1872 г. А. Н. Лодыгин сконструировал лампу накаливания в стеклянном баллоне с угольным стерженьком. В 1876 г. П. Н. Яблочков изобрел свою дуговую лампу. В 1894 г. А. Н. Лодыгин получил патент на лампу накаливания с вольфрамовой нитью. Широкое применение этих тепловых источников света и развитие спектрального анализа потребовали от физиков создания правильных расчетных формул и указаний правильных и перспективных путей развития осветительной техники.

§ 32. Равновесное излучение. Формула Планка и ее следствия

Рассмотрим замкнутую полость внутри твердого тела, нагретого до некоторой температуры T . Стенки полости будут излучать, отражать и поглощать электромагнитные волны, и в результате, как отмечалось в § 31, внутри полости установится вполне определенное равновесное излучение. Это излучение будет характеризоваться средней объемной плотностью энергии $\omega(T)$ дж/м³ и определенным спектральным составом. Средняя плотность энергии электромагнитных волн в интервале от λ до $\lambda + d\lambda$ будет про-