

## Статья 4. Излучение

### Раздел 4.01 Свойства равновесного теплового излучения

Для фотонов (частиц света), движущихся в вакууме со скоростью  $c$ , энергия  $E_\phi$  и импульс  $p_\phi$  связаны между собой:

$$E_\phi = p_\phi c.$$

В объёме пустого сосуда  $V$ , имеющего температуру  $T$  содержится энергия равновесного излучения, равная:

$$E = \frac{4V\sigma T^4}{c}.$$

То есть плотность энергии равновесного излучения в вакууме равна:

$$\frac{E}{V} = \frac{4\sigma T^4}{c}.$$

Постоянная Стефана-Больцмана  $\sigma$  равна:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2.$$

Если внутренность сосуда, находящегося при температуре  $T$ , не содержит частиц вещества, а заполнена только тепловым равновесным излучением, то на внутреннюю поверхность  $S$  за время  $t$  падает энергия излучения  $E_s$ , и в точности такая же энергия  $E_s$  за этот промежуток времени уходит от этой же поверхности. В соответствии с законом Стефана - Больцмана

$$E_s = St\sigma T^4.$$

Излучение приходит ко всем малым частям этой поверхности  $S$  из телесного угла  $2\pi$ , следовательно, можно считать, что после отражения (частичного) или поглощения и последующего излучения света на эту поверхность оказывается давление:

$$P = \frac{E}{3V} = \frac{4\sigma T^4}{3c}.$$

Этот вывод делается на основе аналогии поведения молекул разреженного газа в сосуде, которые вследствие хаотического теплового движения оказывают давление на внутренние стенки сосуда, и квантов света. И в одном и в другом случае давление равно 1/3 плотности энергии, связанной с поступательным хаотическим движением частиц в объёме.

Приведенные соотношения (закон Стефана – Больцмана и выражение для плотности энергии равновесного излучения) являются следствиями квантовых законов, то есть не выводятся в классической физике.

Теплоёмкость равновесного теплового излучения при постоянном объёме  $C_V$  равна:

$$C_V = \frac{16V\sigma T^3}{c}.$$

Сравним теплоёмкости вещества и излучения в процессе с постоянным объёмом. При нормальных условиях один моль любого газа занимает объём 22,4л. Теплоёмкость при этом постоянном объёме, например, всех частиц, полученных из одного моля одноатомного газа He, при температурах выше  $10^6\text{К}$ , когда уже все атомы He полностью ионизованы (а это 3 моля частиц), не превышает  $9/2R=37,4\text{Дж/К}$ . Эта температура

соответствует совсем «небольшой» энергии  $kT=86\text{эВ}$ . Такого порядка ( $10^2\text{эВ}$ ) кинетические энергии имеют, например, частицы в короне Солнца (однако теплового равновесия в этой области пространства нет).

Чтобы равновесное тепловое излучение имело в таком же объёме (22,4л) такую же теплоёмкость (37,4Дж/К), его температура должна быть примерно  $0,8 \times 10^6\text{К}$ .

Конденсированные вещества при низких температурах и атмосферном внешнем давлении имеют такую плотность, что в объёме 22,4 литра может поместиться порядка  $10^3$  молей атомов. Это означает, что температура, при которой теплоёмкость  $C_V$  излучения сравнится по порядку с теплоёмкостью  $C_V$  свободных частиц с концентрацией, соответствующей концентрации всех частиц (ядер и электронов) в конденсированном He, равна примерно  $10^7\text{К}$  ( $\sim 10^3\text{эВ}$ ). Если взять не гелий, а, например, уран, «обжатый» до плотности в 30 раз большей нормальной, то для выполнения того же условия равенства теплоемкостей вещества и излучения температура должна быть  $\sim 10^8\text{К}$ . Поэтому при расчетах теплоемкостей  $C_V$  конденсированного вещества в большинстве случаев вкладом излучения в теплоемкость пренебрегают. Пренебрегают в большинстве случаев и давлением, которое создаётся излучением. А оно существует и в некоторых случаях играет определяющую роль, превосходя давление, создаваемое частицами. И это бывает не только при образовании хвостов комет. Такие температуры и давления излучения характерны для условий внутри горячих звёзд или при взрыве ядерной бомбы. На фотографии ядерный взрыв с выделившейся энергией эквивалентной 20 килотоннам ТНТ (вид через несколько секунд после его инициации).



## **Раздел 4.02 Взаимодействие частиц и излучение**

Модельное описание взаимодействия молекул или атомов вещества в молекулярно-кинетической теории основывается на *допущении* об отсутствии «трения», то есть потерь суммарной энергии взаимодействующих частиц. Отмеченное допущение об отсутствии потерь нужно уточнить. На самом деле потери энергии есть, и они связаны с тепловым *излучением*, которое возникает вследствие ускоренного движения заряженных частей атомов и молекул при их столкновениях. Мощность теплового излучения с единицы поверхности нагретого тела пропорциональна четвёртой степени температуры. При *тепловом равновесии* тела с окружающей средой эти потери тела на излучение компенсируются обратным потоком излучения, которое, попадая на поверхность физического тела из окружающего пространства, поглощается телом.

Если рассматриваются, например, тела, находящиеся в космосе, то в этом случае, конечно, нужно учитывать тепловые потери, связанные с излучением нагретых тел.

### **Раздел 4.03 Задачи для главы 4**

Задача 1.

Средняя плотность Солнца равна примерно  $0,3\text{г/см}^3$ , а в его центре плотность по оценкам равна примерно  $100\text{г/см}^3$ . Температура в центре Солнца оценивается величиной  $10^7\text{К}$ . Оцените долю плотности Солнца, обеспечиваемую излучением.

Задача 2.

Оцените давление в центре Солнца и сравните его с давлением равновесного теплового излучения, которое имеется в центре Солнца.

Задача 3.

Для запуска термоядерной реакции дейтерия и трития вещество нужно разогреть до температуры  $10^8\text{К}$ . Используется жидкая вода, в которой протоны заменены этими изотопами водорода. Какое давление нужно создать, чтобы достичь этой температуры адиабатическим сжатием вещества? Сравните с этим давлением давление равновесного теплового излучения при этой же температуре.

Задача 4.

На фотографии ядерного взрыва отчетливо видны две области с ярким свечением. Каковы возможные причины их возникновения в данном случае?

Задача 5.

В сосуд с идеально отражающими излучение стенками внесли горячее тело, имеющее температуру  $T$ , долго его там держали, а затем убрали это тело. Объем сосуда с излучением стали уменьшать. Будет ли излучение равновесным в этом адиабатическом процессе? Как будет зависеть давление излучения на стенки от объема?

Задача 6.

В шарообразный сосуд объема  $V$  с идеально отражающими излучение стенками внесли лазер малых размеров, имеющий мощность монохроматического (длина волны  $\lambda$ ) излучения  $W$ , посветили в разные стороны в течение времени  $t < V^{1/3}/c$ , а затем убрали этот лазер. Каким будет через большое время среднее давление излучения на стенки сосуда? Объем сосуда с излучением стали уменьшать. Будет ли излучение равновесным в этом адиабатическом процессе? Как будет зависеть давление излучения на стенки от объема?