

С квантовой точки зрения эл.-магн. поле представляет собой ансамбль фотонов, каждый из к-рых обладает энергией  $\hbar\omega$  и импульсом  $\hbar k$ , где  $\omega$  — частота излучения,  $k$  — его волновой вектор. Такое представление, необходимое при исследовании взаимодействия поля с квантовыми объектами (напр., с квантовым осциллятором), оказывается также удобным при изучении обмена энергией между полем и классич. заряж. частицами, поглощающими, излучающими и рассеивающими эл.-магн. волны (напр., при рассмотрении *Черенкова — Вавилова излучения, тормозного излучения*). Плотность энергии фотонного газа, находящегося в термодинамич. равновесии с окружающими материальными телами с темп-рой  $T$ , определяется выражением

$$w = aT^4,$$

здесь  $a = 7,91 \cdot 10^{-15}$  эрг/К<sup>-4</sup> см<sup>-3</sup>, темп-ра  $T$  в градусах Кельвина.

Лит.: Тамм И. Е., Основы теории электричества, 10 изд., М., 1989; Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988; их же, Электродинамика сплошных сред, 2 изд., М., 1982; Страттон Дж. А., Теория электромагнетизма, пер. с англ., М.—Л., 1948; Гинзбург В. Л., Распространение электромагнитных волн в плазме, 2 изд., М., 1967; его же, Теоретическая физика и астрофизика, 3 изд., М., 1987; Агранович В. М., Гинзбург В. Л., Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов, 2 изд., М., 1979; Леонович М. А., Введение в термодинамику. Статистическая физика, М., 1983.

А. М. Фейгин.

**ЭНТАЛЬПИЯ** (от греч. enthalpō — нагреваю) (теплосодержание, тепловая функция Гиббса) — потенциал термодинамический, характеризующий состояние макроскопич. систем в термодинамич. равновесии при выборе в качестве осн. независимых переменных энтропии  $S$  и давления  $p$ . Термин «Э.» ввёл Х. Камерлинг-Оннес (H. Kamerlingh-Onnes). Обозначается  $H(S, p, N, x_i)$ , где  $N$  — число частиц системы;  $x_i$  — др. макроскопич. параметры системы. Э. — аддитивная функция, т. е. Э. всей системы равна сумме Э. составляющих её частей. Э. связана с внутр. энергией  $U$  системы соотношением

$$H = U + pV, \quad (1)$$

где  $V$  — объём системы. Полный дифференциал Э. (при неизменных  $N$  и  $x_i$ ) имеет вид:

$$dH = TdS + Vdp. \quad (2)$$

Из формулы (2) можно определить темп-ру  $T$ , объём  $V$  и теплоёмкость  $c_p$  системы:

$$T = \left( \frac{\partial H}{\partial S} \right)_p, \quad V = \left( \frac{\partial H}{\partial p} \right)_S, \quad c_p = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p.$$

Эти свойства Э. при постоянном  $p$  аналогичны свойствам внутр. энергии при постоянном  $V$ :

$$T = \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_V, \quad p = - \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_S, \quad c_v = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V.$$

Равновесному состоянию системы при постоянных  $S$  и  $p$  соответствует мин. значение Э. Изменение Э. ( $\Delta H$ ) равно кол-ву теплоты, к-рое сообщают системе или отводят от неё при постоянном давлении, поэтому значения  $\Delta H$  характеризуют тепловые эффекты фазовых переходов (плавления, кипения и т. д.), хим. реакций и др. процессов, протекающих при постоянном давлении. В теплоизолированной системе при постоянном  $p$  Э. сохраняется, поэтому её называют иногда теплосодержанием или тепловой ф-цией (условие сохранения Э. лежит, в частности, в основе *Джоуля — Томсона эффекта*). Д. Н. Зубарев.

**ЭНТРОПИЙНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ** — тип малых неоднородностей в пространственном распределении вещества и излучения во Вселенной, при к-ром суммарная плотность энтропии и темп-ра на ранних стадиях эволюции Вселенной оставались однородными. Э. ф. называют также изотермическими. Э. ф. являются одной из мод *первичных флуктуаций* в моделях ранней Вселенной на радиационно-

доминированной стадии в том случае, когда материя состоит только из обычного вещества и излучения. В более общем случае, когда материя во Вселенной является многокомпонентной и в её состав входят разл. типы слабозвзаимодействующих частиц — нейтрино и др. («тёмное» вещество; см. *Скрытая масса*), Э. ф. оказываются частным случаем изоэнергетических, или изометрических, возмущений. Характерным свойством как Э. ф., так и изоэнергетич. флуктуаций является то, что в масштабах  $L$ , больших характерной джинсовской длины волны  $l_{Дж}$  (см. *Гравитационная неустойчивость*), флуктуации полной плотности энергии материи и метрического тензора пространства-времени малы по сравнению с флуктуациями плотности энергии отд. компонент (на радиационно-доминированной стадии  $l_{Дж}$  порядка радиуса космологич. горизонта  $R_H$ ; см. *Вселенная*). После рекомбинации водорода, к-рая произошла при красном смещении  $z \approx 10^3$ , джинсовская масса падает до величины  $\sim 10^5 M_\odot$ . После этого в больших масштабах Э. ф. перемешиваются с адиабатич. флуктуациями и растут пропорционально масштабному фактору Вселенной  $a(t)$  [т. е.  $\propto (1+z)^{-1}$ ] из-за гравитац. неустойчивости, а в меньших масштабах быстро затухают. Поэтому Э. ф. подобно *адиабатическим флуктуациям* могут приводить к образованию компактных объектов во Вселенной. Их роль в формировании *крупномасштабной структуры Вселенной* в масштабах, больших размеров галактик ( $M > 10^{12} M_\odot$ ), считается ничтожной, хотя и не исключена полностью.

А. А. Старобинский.

**ЭНТРОПИЯ** (от греч. entropia — поворот, превращение) — понятие, впервые введённое в *термодинамике* для определения меры необратимого рассеяния энергии. В *статистической физике* Э. служит мерой вероятности осуществления к.-л. макроскопич. состояния, в *теории информации* — мерой неопределённости к.-л. опыта (испытания), к-рый может иметь разл. исходы. Эти трактовки Э. имеют глубокую внутр. связь. Напр., на основе представлений об информационной энтропии можно вывести все равновесные статистич. распределения (см. *Гиббса распределение*).

**Энтропия в термодинамике** была введена Р. Клаузиусом (R. Clausius, 1865) на основе *второго начала термодинамики*, к-рое можно сформулировать математически в виде *Клаузиуса неравенства*  $\oint \delta Q/T \geq 0$ . Интеграл берётся по замкнутому циклич. процессу, при к-ром система получает (или у неё отбирают) малые количества теплоты  $\delta Q$  при соответствующих значениях абс. темп-ры  $T$ . Знак равенства относится к *обратимым процессам* (равенство Клаузиуса). Из равенства Клаузиуса следует, что для обратимого процесса

$$dS = \delta Q/T \quad (1)$$

есть полный дифференциал ф-ции состояния  $S$ , называемый Э. (дифференциальное определение Э.). Разность Э. системы в двух произвольных состояниях  $A$  и  $B$  (заданных, напр., значениями темп-р и объёмов) равна

$$S_B - S_A = \int_A^B \delta Q/T \quad (2)$$

(интегральное определение Э.). Интегрирование здесь ведётся вдоль пути любого квазистатич. обратимого процесса, связывающего состояния  $A$  и  $B$ . Т. о., из второго начала термодинамики следует, что существует однозначная ф-ция состояния  $S$ , к-рая при обратимых адиабатич. процессах ( $\delta Q = 0$ ) остаётся постоянной. Из неравенства Клаузиуса вытекает, что при необратимых процессах  $S_B - S_A > \int \delta Q/T$ , поэтому в адиабатически изолированных системах (см. *Термодинамическая система*) при необратимых процессах Э. может только возрастать (закон возрастания Э.).

Согласно *первому началу термодинамики*,

$$\delta Q = dU + \sum_i A_i da_i,$$