

С квантовой точки зрения эл.-магн. поле представляет собой ансамбль фотонов, каждый из к-рых обладает энергией $\hbar\omega$ и импульсом $\hbar k$, где ω — 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⁻⁴ см⁻³, 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. (ΔH) равно кол-ву теплоты, к-рое сообщают системе или отводят от неё при постоянном давлении, поэтому значения ΔH 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 δQ 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,

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