

В общем случае в соответствии с принципами термодинамики хаотич. эл.-магн. поле в вакууме, находящееся в тепловом равновесии с окружающими телами, обладающими определённой темп-рой T , или изолированное после такого равновесного контакта, полностью характеризуется этой темп-рой и занимаемым им объёмом. Спектральная интенсивность такого равновесного, чернотельного излучения подчиняется Планка закону излучения и в отсутствие поля тяжести не зависит от координат. В искривлённом пространстве-времени его интенсивность изменяется, становится неоднородной. Более того, как показал В. Унру [(W. Unruh), 1976], рассматривая для простоты однородное поле тяжести (или, что эквивалентно, равномерно ускоренную систему отсчёта, движущуюся с ускорением a относительно инерциальной системы), наименьшее энергетич. состояние (нулевые колебания) эл.-магн. поля там обладает ненулевой темп-рой $T_a = \hbar a / (2\pi c k)$ (в земном поле тяжести $T_a \approx 4 \cdot 10^{-20}$ К). Такому же мин. темп-ру T_a приобретает любое пробное тело, приведенное в тепловой контакт с излучением вакуума. С указанными тепловыми свойствами вакуума в ускоренной системе отсчёта связан, напр., известный эффект деполаризации электронного пучка в магн. поле накопительного кольца [Дж. Белл (J. Bell), Дж. Лейнаас (J. Leinaas), 1983], описанный ранее А. А. Соколовым и И. М. Терновым (1963) в инерциальной системе отсчёта. При испарении чёрной дыры с массой M_0 и поверхностной «напряжённостью» гравитационного поля $a_0 = GM_0/r_{ch} \equiv c^4/4GM_0$ соответствующая чернотельная темп-ра, измеряемая наблюдателем на бесконечности, $T_{ch} = \hbar c^3 / (8\pi G k M_0)$ и по Вина закону смещения отвечает характерной длине волны λ порядка гравитационного радиуса $r_{ch} = 2GM_0/c^2$ [С. Хокинг (S. Hawking), 1974]. Квантовые свойства эл.-магн. излучения в его собств. гравитац. поле ставят также абс. предел и максимально достижимой темп-ры $T^* = m^* c^2 / k \sim 10^{32}$ К, отвечающей характерной длине волны $\lambda^* \sim L^* = \hbar / m^* c$, где $m^* = \sqrt{\hbar c / G}$ — планковская масса (А. Д. Сахаров, 1966).

Электрон-позитронный вакуум. В классич. гравитац. поле, как и во внеш. эл.-магн. поле, эл.-магн. взаимодействие меняется также вследствие неустраиваемой поляризации электрон-позитронных пар физ. вакуума. Последняя возникает за счёт приливного эффекта, т.е. разности сил тяжести, растягивающей электрон и позитрон в парах, имеющих виртуальный размер порядка комптоновского λ_e . Это явление, квантовое в своей основе, видоизменяет ур-ния Э. (6'')—(8''). Для перем. гравитац. полей с характерной частотой $\omega_r \gtrsim m_e c^2 / \hbar$ и масштабом $\lambda_r \lesssim \lambda_e$ оно может приводить к эфф. рождению пар реальных зарядов (электронов и позитронов) и поглощению эл.-магн. волн, напр. в ранней Вселенной или в окрестности чёрных мини-дыр. Для более плавных в пространстве-времени гравитац. полей с характерным масштабом $\lambda_r \gg \lambda_e$ поляризация пар в осн. является виртуальной, но она вполне классич. образом влияет на эл.-магн. волны [И. Драммонд (I. Drummond), С. Хатрел (S. Hathrell), 1980]. Именно, при неизменном втором ур-нии в (8'') первое ур-ние приобретает дополнит. слагаемые, пропорциональные производным от разл. произведений нормированного тензора кривизны ($\sim \alpha \lambda_e^2 / \lambda_r^2$) на тензор эл.-магн. поля ($F^{\alpha\beta}$). Для эл.-магн. волн с длинами λ в интервале $\lambda_e \ll \lambda \ll \lambda_r$, не испытывающих поглощения в вакууме, но допускающих применение геом. оптики, обнаруживается, что в зависимости от поляризации и направления распространения их скорость (фазовая и групповая) может быть как меньше, так и больше «обычной скорости света» c на величину $\sim c \alpha \lambda_e^2 / \lambda_r^2$. Классич. принцип причинности и второй постулат спец. теории относительности этим не нарушаются ввиду неоднородности и анизотропии самого вакуума, обуславливающего взаимную неинерциальность соседствующих наблюдателей.

Согласно (16), вследствие поляризации вакуума в квази-однородных эл.-магн. полях $E, B \ll E_c = B_c$ с масштабами $\lambda \sim c/\omega \gg m_e c^2 / e(E+B)$, векторы индукции D и B в (22)

приобретают ещё дополнит. слагаемые электрич. поляризации P и намагничённости M :

$$4\pi P = \alpha [2E(E^2 - B^2) + 7E(EB)] (45\pi E_c^2)^{-1},$$

$$4\pi M = \alpha [2B(B^2 - E^2) + 7E(EB)] (45\pi B_c^2)^{-1}.$$

Поэтому даже в плоском пространстве-времени распространение света с волновым вектором k под углом θ к однородному магн. полю B_0 сопровождается двойным лучепреломлением — фазовая скорость волн $v^\Phi = \omega/k$ зависит от их поляризации (направления E):

$$\frac{c}{v_1^\Phi} = 1 + 7\alpha B_0^2 \sin^2 \theta (90\pi B_c^2)^{-1}$$

[E параллельно плоскости (k, B_0)];

$$\frac{c}{v_2^\Phi} = 1 + 4\alpha B_0^2 \sin^2 \theta (90\pi B_c^2)^{-1}$$

[E перпендикулярно плоскости (k, B_0)], если

$$\hbar \omega \ll m_e c^2 |\sin \theta| B_c B_0^{-1}.$$

В таком намагничённом вакууме происходят параметрич. взаимодействия и распад волн (фотонов), образование гармоник, простых и ударных волн [С. Адлер (S. Adler), 1970; В. В. Железняков, А. Л. Фабрикант, 1982], а при движении зарядов наряду с магнитотормозным излучением возникает Черенкова — Вавилова излучение и переходное излучение [Т. Эрбер (T. Erber), 1976; В. Л. Гинзбург, В. Н. Цытович, 1978]. При наличии реальной среды, напр. плазмы, многообразие явлений генерации излучения, пространственно-временной дисперсии и нелинейности волн значительно возрастает. Отметим, что многие имеющиеся здесь теоретич. предсказания Э. (особенно в задачах астрофизики), напр. коллективная аннигиляция сгустков электрон-позитронной плазмы с образованием когерентного γ -излучения, пока являются весьма экзотическими с точки зрения их наблюдательной проверки.

Макроскопическая электродинамика

С общих позиций Э. случай электрон-позитронного вакуума и даже плазмы во внеш. полях является не более чем характерным примером среды. В общем случае при наличии большого числа заряд. частиц (связанных или нет), возможность описания движения каждой из k -рых ограничена, хотя бы в силу квантово-статистич. законов, ур-ния Максвелла представляются стохастическими, описывающими эл.-магн. поля как случайные ф-ции координат и времени. Стохастическими являются и ур-ния движения вещества (зарядов среды), в частности материальные соотношения, характеризующие отклик на эл.-магн. поле, т.е. представляющие плотность тока как функционал поля: $j^\alpha(x^\beta) = j^\alpha \{F_{\nu\mu}(x^\delta)\}$. Последний может быть нелинейным и нелокальным (интегриродифференциальным) и, вообще говоря, определяется независимыми от Э. закономерностями устройства среды.

Макроскопические уравнения. Флуктуации обычно отходят на второй план при наличии достаточно большого кол-ва однотипных частиц на масштабе изменения поля. Тогда без существенных потерь информации об эл.-магн. процессах можно провести квантово-статистич. усреднение ур-ний (6), (7) (без магн. зарядов) и материальных соотношений, записав их как ур-ния макроскопич. электродинамики для средних полей и токов:

$$\operatorname{div} D^n = 4\pi \rho_{ext}, \quad \operatorname{rot} B = \frac{1}{c} \frac{\partial D^n}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} j_{ext};$$

$$\operatorname{div} B = 0, \quad \operatorname{rot} E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}; \quad (23)$$

$$D^n = E + 4\pi P^n, \quad \frac{\partial P^n}{\partial t} = j\{E, B\}.$$

На резких границах раздела в среде необходимы граничные условия для нормальных (n) и тангенциальных (τ)