

ет на неразделимость заряда и его собственного ближнего поля (эл.-магн. шубы). Это «связанное» поле автоматически учитывается в локальном балансе 4-импульсов, следующим из приведённого второго закона Ньютона: приращение 4-импульса комплекса и создание 4-импульса «свободного» поля излучения происходят за счёт поглощения 4-импульса внешнего поля.

Непротиворечиво введение самовоздействия путём добавления силы (18) к силе Лоренца (1) для каждого точечного ускоренно движущегося заряда q_n в рамках Э. предполагает дополнит. условие отсутствия ускорений в областях вне поля, $\mathbf{E} = \mathbf{B} = 0$ в (1). Иначе в получающихся ур-ниях движения, содержащих теперь третьи производные координат частиц r_n по времени, могли бы появиться неприемлемые решения, отвечающие неогранич. самоускорению заряда за счёт бесконечной энергии собственного поля. Разумеется, упомянутый выше «одетый» эл.-магн. комплекс вообще не испытывает самоускорения, поскольку в любой мгновенно сопутствующей системе отсчёта для перенормированного импульса $\tilde{p} = (\tilde{p}^i/c)$ справедливо ур-ние (1). Автоматич. отбор физически приемлемых решений ур-ний движения «голой» заряженной частицы, независимо от соотношения между силой реакции излучения и силой Лоренца, возможен также при их формулировке в эквивалентном интегральном виде, включающем начальные и конечные условия (Ф. Рорлих, 1961). Так, рассматривая (для простоты) нерелятивистский случай [Д. Д. Иваненко, А. А. Соколов, 1948; Р. Хааг (R. Haag), 1955], при конечном условии $dv/dt = 0$ (при $t \rightarrow \infty$) имеем

$$m_n \frac{dv_n}{dt} = \exp\left(\frac{t}{T_n}\right) \int q_n \left\{ \mathbf{E}(t) + [\mathbf{v}_n(t) \mathbf{B}(t)] c^{-1} \right\} \times \\ \times \exp\left(-\frac{t'}{T_n}\right) dt'; T_n = \frac{2q_n^2}{3m_n c^3}.$$

Здесь налицо формальное нарушение причинности, поскольку ускорение выражается не через прошлое, а через будущее движение частицы, т. е. определяется полями, до k -рых частица ещё не дошла, на временном интервале $\sim T_n$. Однако для всех заряд. частиц (тел) времена $T_n = 2r_n/3c \leq T_e = 2e^2/(3m_e c^3) \approx 6 \cdot 10^{-24}$ с, следовательно, все соответствующие проблемы непричинности и нелокальности эл.-магн. взаимодействия оказываются за пределами применимости Э. А именно, принципиальным становится учёт квантовых флуктуаций движения электрона (или любой заряд. частицы), для k -рых характерный временной, $\hbar/m_e c^2$, и пространственный, $\hbar/m_e c$, масштабы в $\hbar c/e^2 = 137$ раз больше соответственно временного, T_e , и пространственного, cT_e , масштабов самоускоряющихся решений. Эти проблемы корректно разрешаются при квантово-электродинамич. анализе самовоздействия [Е. Моуиц, Д. Шарп (E. Moiz, D. Sharp), 1977; В. К. Кривицкий, В. Н. Цытович, 1991]. Оказывается, что при достаточно длительном действии сила реакции излучения действительно проявляется на классич. уровне, напр., она обуславливает спиральное (скручивающееся) движение электронов в однородном магн. поле, отличающееся от винтового движения с постоянным радиусом благодаря трению о собственное синхротронное излучение.

Запаздывание. Причинности принцип играет в Э. важнейшую роль, поскольку, согласно условиям излучения (при постановке нач. задачи в ограниченной области пространства), он требует ограничиться только запаздывающими решениями ур-ний Максвелла, нарушающих их обратимость во времени (при замене $\mathbf{j} \rightarrow -\mathbf{j}$, $\rho \rightarrow \rho$, $\mathbf{B} \rightarrow -\mathbf{B}$, $\mathbf{E} \rightarrow \mathbf{E}$). Если для определённости выбрать условие калибровки Лоренца $A_n^0 = 0$, то вынужденное решение соответствующего (8) волнового ур-ния $A_n^\alpha = 4\pi j^\alpha/c$ для системы точечных зарядов можно записать в виде

$$A^\alpha(x^\beta) = \sum_n q_n \int G[x^\beta - x_n^\beta(\tau_n)] \frac{dx_n^\alpha}{d\tau_n} d\tau_n \quad (19)$$

(Льенара — Вихерта потенциалы). Здесь интегрирование ведётся по собств. времени τ_n каждой из заряд. частиц и использована запаздывающая Грина функция $G(x^\mu)$, отличная от нуля только в световом конусе будущего ($x^0 > 0$) и равная там $2\delta(-x_\mu x^\mu)$ (для свободного пространства). Из решения (19) вытекают, по существу, все результаты Э. об излучении и взаимодействии зарядов; для пространственно ограниченных задач в нём необходимо лишь соответствующим образом изменить ф-цию Грина.

Дальное действие. Можно совсем не вводить распределённое в пространстве поле, а подставить его явные значения в точках нахождения зарядов в ур-ния их движения. Тогда Э. примет вид теории прямого межчастичного взаимодействия с ф-цией Лагранжа, зависящей только от координат и скоростей зарядов [Х. Тетроде (H. Tetrode), 1922; А. Фоккер (A. Fokker), 1929]. Для такой переформулировки Э. в решении (19) удобнее использовать непричинную ф-цию Грина, всюду определяемую полуразностью запаздывающего и опережающего потенциалов:

$$G_0(x^\mu) = \delta(-x_\mu x^\mu) \equiv \frac{1}{2r} [\delta(r - x^0) - \delta(r + x^0)], \quad r^2 = -x_\mu x^\mu$$

(для свободного пространства). В полевой трактовке этим учитывалось бы «свободное» поле излучения и снималась бы проблема самовоздействия и перенормировки массы в пределе точечных зарядов (П. Дирак, 1938). Вместе с тем добавлением к получающейся ф-ции Лагранжа полных производных по времени удаётся придать новой теории явно причинную форму, причём симметричную по перестановкам частиц [Р. Мур (R. Moore), Т. Скотт (T. Scott), М. Монахан (M. Monahan), 1988]. В частности, для заряда q_k , взаимодействующего со всеми остальными зарядами Вселенной, ф-ция Лагранжа принимает вид:

$$L_k = -m_k c^2 \sqrt{1 - \frac{v_k^2}{c^2}} - \frac{1}{2} \sum_{n \neq k} (V_{kn} + V_{nk});$$

$$V_{kn} = \frac{q_k q_n v_k v_n^\beta}{c v_{na} (x_k^\alpha - x_n^\alpha)} \Big|_{x_k^0 - x_n^0 = |r_k - r_n|}.$$

Поправка на силу реакции излучения (в нерелятивистском случае)

$$\sum_{n \neq k} \left(\frac{2}{3c^3} \right) q_k q_n \frac{d^3 x_n^i}{dt^3} = \frac{2}{3c^3} q_k^2 \frac{d^3 x_k^i}{dt^3}$$

к запаздывающей силе Лоренца, $-\sum_{n \neq k} \partial V_{kn}/\partial x_k^i$, обусловлена одними и теми же (остальными, $n \neq k$) зарядами Вселенной и возникает в уравнении движения $d[\partial L_k/\partial v_k^i]/dt = \partial L_k/\partial x_k^i$ естеств. образом из требования самосогласованности движения всех заряд. частиц при условии квазинейтральности Вселенной и отсутствия электрич. поляризации при усреднении по всем рассматриваемым зарядам, $\sum_n q_n r_n = 0$. Здесь проблема самоускорения заряда не возникает, поскольку отсутствует внутренний бесконечный источник энергии (собственное кулоновское поле), и без силы Лоренца невозможно появление «силы реакции излучения», автоматически низведённой на роль поправки.

Что касается свойств необратимости во времени и выделения обычных запаздывающих решений, то они связываются со свойствами эволюционирующей материи и всей Вселенной и ввиду наличия незлектромагн. сил выходят за рамки Э., требуя включения дополнит. физ. постулатов [Дж. Уилер (J. Wheeler), Р. Фейнман (R. Feynman), 1945; Д. Пегг (D. Pegg), 1975]. В целом исследование Э. как теории прямого межчастичного взаимодействия направлено на то, чтобы преодолеть внутр. противоречия полевой Э., связанные с точечностью зарядов, перенормировкой их массы, нарушением причинности при самовоздействии, ограничением макс. потенциалов и мин. расстояний взаимодействия зарядов и пр. Однако, поскольку эти противоречия затрагивают лишь область квантовых явлений,