

где u^i — 4-вектор скорости частицы, q и m — её заряд и масса, F^{ik} — тензор внеш. эл.-магн. поля, $ds = c dt \sqrt{1 - (v/c)^2}$, v — трёхмерная скорость частицы. В системе отсчёта, в к-рой $v \ll c$, (1) можно записать в виде

$$m\dot{v} = qE + \frac{q}{c} [vH] + \frac{2}{3} \frac{q^2}{c^3} \ddot{v}, \quad (2)$$

где точка обозначает дифференцирование по времени, E и H — векторы внешних электрич. и магн. полей. Первые два члена в (2) представляют собой Лоренца силу, третий член — силу реакции излучения (называемую также силой торможения излучением или силой радиац. трения). Ур-ния (1) и (2) учитывают, что частица, движущаяся с ускорением, излучает в единицу времени энергию, равную $2q^2 \dot{v}^2 / 3c^3$ (в системе отсчёта, где $v=0$). Из (1) следует выражение, полученное ранее (из условия баланса энергии и импульса) М. Абрагамом (М. Abraham, 1904) для силы торможения излучением, справедливое при любых скоростях частицы:

$$f = \frac{2q^2}{3c^3} \left[\frac{\ddot{v}}{1-\beta^2} + \frac{v(v\ddot{v})}{c^2(1-\beta^2)^2} + \frac{3\dot{v}(v\dot{v})}{c^2(1-\beta^2)^2} + \frac{3v(v\dot{v})^2}{c^4(1-\beta^2)^3} \right], \quad (3)$$

$\beta = v/c.$

В задачах классич. электродинамики сила торможения излучением $2q^2 \dot{v}^2 / 3c^3$ мала (в системе покоя частицы) по сравнению с силой Лоренца. Условия малости силы торможения излучением можно записать в виде

$$\lambda \gg r_0, \quad H \ll \frac{q}{r_0}, \quad E \ll \frac{q}{r_0},$$

где $r_0 = q^2 / mc^2$ — классич. радиус частицы (см. *Классический радиус электрона*), λ — характерная длина волны поля излучения. В области применимости классич. электродинамики эти условия всегда выполняются, т. к. уже при значительно больших длинах волн ($\sim 137 r_0$) и значительно меньших полях ($\sim q/137 r_0$) начинают проявляться квантовые эффекты.

В отсутствие внеш. поля ур-ние (2), кроме физически разумного решения $v = \text{const}$, имеет также решение $v = v(t) = v(0) \exp(3mc^3 t / 2q^2)$, описывающее самоускоряющуюся частицу. Обычно считается [1], что существование таких абсурдных решений Л.—Д. у. указывает на серьёзную и неустранимую внутр. трудность классич. электродинамики, связанную с бесконечностью эл.-магн. массы точечного заряда. Однако ситуация, когда не все решения нек-рого ур-ния имеют физ. смысл, является довольно общей [2]. Напр., из волновых решений ур-ний Максвелла обычно используются только запаздывающие потенциалы, а для описания финитного движения в квантовой механике пригодны только нормируемые решения ур-ния Шрёдингера. Не существует принципиальных затруднений, препятствующих отбору физически разумных решений Л.—Д. у. даже в случаях, когда сила радиац. трения не мала по сравнению с внеш. силой.

Ещё одной, парадоксальной на первый взгляд, особенностью силы радиац. трения является обращение её в нуль при равномерном ускоренном движении. В релятивистской теории равномерно ускоренное движение — это движение, при к-ром ускорение частицы постоянно в сопутствующей (собственной) системе отсчёта. Это означает, что 4-вектор скорости частицы u^i удовлетворяет условию

$$c^4 \frac{d^2 u^i}{ds^2} = w^2 u^i, \quad (4)$$

где w — инвариантное ускорение, т. е. ускорение в сопутствующей системе отсчёта, в к-рой условию (4) соответствуют соотношения

$$\ddot{v} = 0, \quad \dot{v}^2 = w^2. \quad (5)$$

Условия (4) и (5) приводят к исчезновению силы радиац. трения в ур-ниях (1) и (2). Т. к. частица, движущаяся с постоянным инвариантным ускорением, за время t излучает энергию

$$\mathcal{E} = \frac{2q^2}{3c^3} w^2 t,$$

то возникает вопрос: как частица может излучать, если радиац. трение равно нулю? Понять, как это происходит, можно, рассмотрев конкретную физ. ситуацию [3]. Релятивистское равноускоренное движение с инвариантным ускорением $w = qE/m$ реализуется в случае движения заряж. частицы вдоль пост. однородного электрич. поля E . Пусть поле заключено в объёме между пластинами конденсатора, тогда частица, двигавшаяся с пост. скоростью, попадает в электрич. поле в момент t_1 и покидает его в момент t_2 . Т. к. ускорение при этом изменяется скачкообразно (формально), то сила радиац. трения (3) в эти моменты времени обращается в бесконечность (в рамках принятой формализации), причём так, что работа этой силы в точности равна излучённой энергии.

Лит.: 1) Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Теория поля, 7 изд., М., 1988; 2) Клепиков Н. П., Силы торможения излучением и излучение заряженных частиц, «УФН», 1985, т. 146, с. 317; 3) Гинзбург В. Л., Теоретическая физика и астрофизика, 3 изд., М., 1987. Ю. П. Степановский.

ЛОРЕНЦА — ЛОРЕНЦА ФОРМУЛА — связывает показатель преломления n вещества с электронной поляризуемостью $\alpha_{эл}$ составляющих его частиц (атомов, ионов, молекул). Установлена в 1880 Х. А. Лоренцем и независимо от него Л. Лоренцем (L. Lorentz). Л.—Л. ф. имеет вид

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4}{3} \pi N \alpha_{эл},$$

где N — число поляризующихся частиц в единице объёма.

Л.—Л. ф. является частным случаем ф-лы Клаузиуса—Моссотти для оптич. частот (видимого и УФ-диапазона), когда смещением ионов под действием электрич. поля излучения можно пренебречь и рассматривать только электронную поляризуемость $\alpha_{эл}$. При этом в Л.—Л. ф. стоит n^2 , а в ф-ле Клаузиуса—Моссотти — диэлектрич. проницаемость $\epsilon = n^2$ (для оптич. диапазона магн. проницаемость $\mu = 1$). Подробнее см. в ст. *Клаузиуса—Моссотти формула* и лит. при ней.

ЛОРЕНЦА — МАКСВЕЛЛА УРАВНЕНИЯ — фундамент. ур-ния классич. электродинамики, определяющие микроскопич. эл.-магн. поля, создаваемые отдельными заряж. частицами. Л.—М. у. лежат в основе электронной теории (классич. микроскопич. электродинамики), построенной Х. А. Лоренцем в кон. 19 — нач. 20 вв. В этой теории среда рассматривается как совокупность заряж. частиц (электронов и атомных ядер), движущихся в вакууме. Основной постулат теории Х. А. Лоренца состоит в предположении, что ур-ния классич. электродинамики (*Максвелла уравнения*) точно описывают поля в любой точке пространства (в т. ч. межатомные и внутриатомные поля) в любой момент времени t .

В Л.—М. у. эл.-магн. поле описывается двумя векторами: напряжённостями микроскопич. полей — электрич. e и магн. h , иногда обозначаемыми также $E_{\text{микро}}$ и $H_{\text{микро}}$. Все электрич. токи (за исключением тока смещения) в электронной теории — чисто конвекционные токи, т. е. обусловлены движением заряж. частиц. Плотность тока $j = \rho v$, где ρ — плотность заряда, v — его скорость.

В дифференц. форме в Гаусса системе единиц Л.—М. у. имеют вид

$$\begin{aligned} [\nabla h] &= \frac{4\pi}{c} \rho v + \frac{1}{c} \frac{\partial e}{\partial t}, \quad \nabla h = 0, \\ [\nabla e] &= -\frac{1}{c} \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (\nabla e) = 4\pi \rho. \end{aligned} \quad (1)$$

Микроскопич. напряжённости e и h очень быстро меняются во времени и пространстве вблизи элементарных заряж. частиц и не могут быть измерены классич. измерит. приборами. Для описания макроскопич. процессов