

Формула силы

Дм. Ватолин

В работе исследуется согласованность обычного релятивистского определения электромагнитной силы с простым механическим движением тел. Формулируются «парадоксы лоренцевой силы».

Находится «формула силы», устраняющая парадоксы и приводящая к тем же кинематическим уравнениям для одиночной частицы, что и «старая теория». Находится, что и новая формула не может быть окончательной. Изменение формулы силы сказывается и на определении тензора энергии-импульса электромагнитного поля, и на определении релятивистского импульса тела.

§1. Что правильно понимать под «силой» в принятой релятивистской теории

«Лоренцев закон» изменения импульса частицы под действием электромагнитного поля имеет две эквивалентных формы (скорость света далее везде принята единичной): $\frac{d}{dt} \mathbf{P} = q\mathbf{E} + q\mathbf{V} \times \mathbf{H}$ и $\frac{d}{ds} \mathbf{P} = \Gamma q\mathbf{E} + \Gamma q\mathbf{V} \times \mathbf{H}$, где q – заряд частицы, \mathbf{V} – скорость частицы, Γ – гамма-фактор частицы, \mathbf{P} – импульс частицы, $\frac{d}{ds} \mathbf{P}$ – производная по пространственно-временному интервалу, $\frac{d}{dt} \mathbf{P}$ – производная по времени, \mathbf{E} , \mathbf{H} – напряжённости электрического и магнитного полей. В нынешней релятивистской электродинамике термин «сила» правильно применять к величине, приравняваемой к производной по времени от импульса тела в какой-нибудь фиксированной системе отсчёта, т.к. сумма производных по времени от импульсов частиц есть производная от суммы их импульсов в один момент времени, к которому привязаны частицы. Этим обосновано суммирование сил в один момент времени по разным пространственным точкам, выражение для пространственной плотности силы, и закон сохранения импульса именно «при перемене времени». Термин «сила» бесполезно применять к «пространственной части» набора четырёх чисел, именуемого «4-силой», т.к. отсутствует смысл сложения 4-сил в разных пространственных точках.

§2. Парадокс продольной силы

Рассмотрим покоящуюся в некоторой системе отсчёта плиту. Пусть вдоль плиты действуют две противоположно направленных силы: сила F_L , направленная «влево» и имеющая покоящуюся точку приложения, и F_P , направленная «вправо», имеющая точку приложения, движущуюся вдоль поверхности плиты со скоростью β также вправо. Пусть силы «уравновешивают» друг друга. Это означает, что плита не ускоряется, импульс плиты с течением времени остаётся нулевым. Та сила, точка приложения которой движется, пусть выделяет в тело энергию трения. Тем самым, в плиту с течением времени переходит инертная масса. Можно считать, что обе силы равномерно распределены по плите, по многим точкам приложения сил и, поэтому выделение массы в плиту происходит равномерно по всему объёму плиты.

Предположим, что в точках приложения сил находятся заряженные частицы, которые перетаскиваются электрическим полем. Тогда, по закону преобразования электрических сил, при переходе в «штрихованную систему отсчёта», движущуюся со скоростью β вправо относительно первоначальной системы отсчёта, получаем, что составляющие сил вдоль направления такого движения не меняются. В самом деле, в преобразованиях Лоренца не меняется величина qE , где E – составляющая электрического поля по направлению движения «штрихованной системы отсчёта». Соответственно такой же закон преобразования обязан соблюдаться для всех уже не электрических сил. Т.е. $F_L = F'_L$, $F_{II} = F'_{II}$, где F'_L и F'_{II} – силы, измеряемые в «штрихованной системе отсчёта», «производимые теми же источниками».

Из релятивистского закона, связывающего импульс и силу, извлекаем, что $\frac{d}{dt}P = F_L + F_{II} = 0$. Тем самым, получаем, что для равновесия плиты необходимо строгое равенство сил. Очевидно, что это не очевидный факт принятой релятивистской теории сил.

В «штрихованной системе отсчёта», с одной стороны, равенство сил должно также соблюдаться как следствие лоренцевых преобразований, и потому $\frac{d}{dt'}P' = F'_L + F'_{II} = 0$, но с другой, $\frac{d}{dt'}P' \neq 0$, так как масса плиты увеличивается из-за тепловой передачи, и скорость плиты не равна нулю и направлена влево. В итоге получаем противоречие для принятой релятивистской формулы силы.

§3. Парадокс поперечной силы

Пусть в системе отсчёта S , без трения, по покоящейся плите массой M движутся заряды $+q$ и $-q$. Скорость заряда $+q$ пусть равна V , направлена «вправо» и «положительна», а скорость заряда $-q$ пусть по абсолютной величине равна U , и может быть направлена «вправо» или «влево» по нашему произволу. Пусть в S включено постоянное во времени, однородное в пространстве электрическое поле E , перпендикулярное направлению движения зарядов, а магнитное поле H везде равно нулю. Пусть электрические силы, действующие на заряды, передаются на плиту уже в виде «механических сил».

Перейдём в систему отсчёта S' , движущуюся «вправо» со скоростью V . По измерениям в системе отсчёта S' , плита движется «влево», т.е. со скоростью $= -V$, заряд $+q$ неподвижен, заряд $-q$ движется с некоторой скоростью U' , электрическое поле имеет ненулевое значение E' и перпендикулярно движению плиты.

По лоренцеву закону, действующие на заряды электрические силы не зависят от скоростей частиц и уравновешены в системе отсчёта S . Тогда и в системе отсчёта S' электрические силы также не зависят от скоростей зарядов и уравновешены. Но в S' существует магнитное поле $H' \neq 0$. Магнитная и полная сила, действующая на заряд $-q$, поэтому, будет зависеть от скорости U' , которую выставим произвольно, выставляя произвольно U . Отсюда, задавая через разные значения U разный «ток заряда», можно добиться ненулевого ускорения плиты в системе отсчёта S' . Но в системе отсчёта S ускорение будет нулевым. Это противоречие.

В других вариантах вывода это противоречие также не устранимо. Так, если заряд уменьшать «быстрее» размера занимаемой им области, ростом E сохраняя величину магнитной силы $qU'H'$, то влияние электромагнитной массы оказывается пренебрежимо малым, т.к. тогда исчезающе мало поле излучения, пропорциональное ускорению заряда.

В конечном итоге, можно убрать заряды, движущиеся по плите, и приложить к плите «обычные механические силы». Тогда, если принять «лоренцеву связь силы и импульса», выводим, что в окрестности некоторого момента времени плита не будет менять импульс даже от очень большой силы.

§4. Нахождение некоей точной формулы связи «между силой и импульсом», и для «электромагнитной силы»

Рассмотрим классическое движение твёрдого тела T при малой по отношению к скорости света, постоянной во времени скорости \mathbf{V} . Пусть к T присоединяются другие твёрдые тела так, что они имеют составляющую скорости по направлению движения тела T равную \mathbf{V} , и не вынуждают T поменять свою скорость. Быстрота роста массы тела T во времени из-за такого присоединения есть величина $\dot{M} \neq 0$. Сила, действующая на T , определима через конкретный способ измерения, например, через измерение сжатия пружин или через реакцию пьезоэлемента. Тогда получаем, что даже в этом классическом случае, для объёма, на который действуют силы, закон $\mathbf{F} = \frac{d}{dt}\mathbf{P}$ не выполнен. В самом деле, компонента силы в направлении движения тела T в каждом элементе тела и в каждом присоединяемом элементе в классическом способе измерения сил даёт нуль. Но приращение импульса в объёме тела T не нулевое. Переопределение «силы для объёма тела T » непоследовательно и противоречит измерениям, так как тогда «предназначенные для измерения силы» приборы в принципе не могут дать значение «силы», и окончательно необходимо знать присоединяется ли к T дополнительная масса. Потребуется каскад переопределений, так как «масса» определяется похожим измерением. В итоге, равенство $\mathbf{F} = \frac{d}{dt}\mathbf{P}$ можно применять лишь с полным пониманием того, что же оно означает в каждом конкретном случае.

В классической теории вышеописанное ещё можно достаточно естественно истолковать. Если же мы привлекаем релятивистское описание сил для данного случая, то уже невозможно отделить «силу, действующую на объём» и «силу, действующую на тело». Кроме того, даже для малых скоростей, отождествляя присоединение массы и присоединение энергии, в релятивистской теории необходимо признать «действие некоторой силы», поскольку, закон $\mathbf{F} = \frac{d}{dt}\mathbf{P}$ обязан быть верен уже для такой теории. Отсюда находим, что принятая релятивистская теория силы отчётливо не согласована с классическими измерениями посредством приборов.

Попытаемся найти другую «формулу силы». Примем в качестве «настоящего релятивистского импульса» величину $\mathbf{P} = \Gamma^2 m \mathbf{V}$, где Γ – гамма-фактор частицы с массой покоя m , движущейся со скоростью \mathbf{V} . Пусть $\Gamma^2 m = M$. Тогда:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P} = M \frac{d\mathbf{V}}{dt} + \frac{dM}{dt} \mathbf{V} = \Gamma^2 m \frac{d\mathbf{V}}{dt} + 2\Gamma^4 m \langle \frac{d\mathbf{V}}{dt} \mathbf{V} \rangle \mathbf{V}$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P} = \mathbf{f} + \langle \mathbf{fV} \rangle \mathbf{V}, \text{ где } \mathbf{f} = M \frac{d\mathbf{V}}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dM}{dt} \mathbf{V}$$

Величины \mathbf{f} и $w = \langle \mathbf{fV} \rangle$ составляют лоренц-вектор, т.е. при переходах между системами отсчёта подчиняются правилам преобразования:

$$f'_{\parallel} = \gamma(f_{\parallel} - w\beta), w' = \gamma(w - f_{\parallel}\beta), f'_{\perp} = f_{\perp}, \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \text{ где:}$$

β – скорость «штрихованной системы отсчёта» S' относительно системы отсчёта S (скорость света принимается единичной), f_{\parallel} и f'_{\parallel} – составляющие векторов \mathbf{f} и \mathbf{f}' в направлении движения системы отсчёта, f_{\perp} и f'_{\perp} – в направлении, перпендикулярном движению S' . Соответственно штрихи означают, что величины измеряются в S' , отсутствие штрихов – измеряются в S . Отсюда находим, что если «настоящая сила» \mathbf{F} и «настоящая мощность» N подчиняются лоренцеву закону преобразования

$$F'_{\parallel} = \gamma(F_{\parallel} - N\beta), N' = \gamma(N - F_{\parallel}\beta), F'_{\perp} = F_{\perp},$$

то обе части равенства $\frac{d}{dt} \mathbf{P} = \mathbf{F} + N\mathbf{V}$ преобразуются одинаково в переходах между системами отсчёта. При том, $\frac{dM}{dt} = 2N$. Не обязательно, что $\langle \mathbf{FV} \rangle = N$. N может быть задана независимо. Но часть мощности, равная $\langle \mathbf{FV} \rangle$, всегда должна учитываться.

Проверим, что если принять закон для связи между силой и импульсом в виде $\frac{d}{dt} \mathbf{P} = \mathbf{F} + N\mathbf{V}$, и постулировать равновесие для плиты как «нулевую интенсивность передачи импульса в сумме», то оба «парадокса силы» устраняются.

Рассмотрим сначала «парадокс продольной силы». В отличие от принятого релятивистского закона преобразования сил, т.е. когда $F_L = F'_L = -F_{\parallel} = -F'_{\parallel}$, по нашему закону получаем: $F'_{\parallel} = \gamma(F_{\parallel} - N\beta) = \gamma F_{\parallel} (1 - \beta^2) = \frac{1}{\gamma} F_{\parallel}$, $F'_L = \gamma F_L$, где $F_{\parallel}\beta = N > 0$. $N' = -\gamma F_L \beta = \gamma F_{\parallel} \beta = \gamma N > 0$, $F_{\parallel} > 0$. Скорость плиты в изначальной системе отсчёта равна нулю, $NV = 0$, изменение импульса плиты в той же системе отсчёта равно нулю (берём «импульс» P как одну скалярную компоненту), и по предполагаемому закону $\frac{d}{dt} P = F_L + F_{\parallel} + NV = 0$. Отсюда $F_L = -F_{\parallel}$. В «штрихованной» же системе отсчёта, т.к. $V' = -\beta$,

$$\frac{d}{dt'} P' = F'_L + F'_{\parallel} + N'V' = -F_{\parallel} \gamma \left(\frac{1}{\gamma^2} - 1 - \beta^2 \right) = -2N'\beta = \frac{dM'}{dt'} V',$$

так как $\frac{dM'}{dt'} = 2N'$ и плита движется с постоянной скоростью V' , т.е. $M' \frac{dV'}{dt'} = 0$.

Рассмотренная формула для силы немедленно устраняет и «парадокс поперечной силы», т.к. \mathbf{F} – пространственная часть лоренц-вектора, поперечная компонента которого не меняется от перехода между системами отсчёта. Но всё же, необходимо в явном виде указать подходящую формулу для электромагнитной силы, вернее для связи между силой и производной по импульсу:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P} = \Gamma q \mathbf{E} + \Gamma q \mathbf{V} \times \mathbf{H} + \Gamma q \langle \mathbf{E} \mathbf{V} \rangle \mathbf{V}$$

где \mathbf{V} , Γ , q – скорость, гамма-фактор и заряд частицы, \mathbf{E} и \mathbf{H} – электрическое и магнитное поле. Непосредственно проверяется, что векторная величина $\mathbf{F} = \Gamma q \mathbf{E} + \Gamma q \mathbf{V} \times \mathbf{H}$ и скаляр $N = \Gamma q \langle \mathbf{E} \mathbf{V} \rangle$ образуют лоренц-вектор. Тем самым, поперечная составляющая $\frac{d}{dt} \mathbf{P}$ (перпендикулярная скорости частицы) если была равна нулю в одной системе отсчёта, то будет нулевой и в другой системе отсчёта.

Проверим, что последняя формула «для электромагнитной силы» приводит к тем же кинематическим уравнениям для одиночной частицы во внешних электромагнитных полях, что и в принятой релятивистской теории. Действительно, по принятой в настоящее время теории мы должны записать:

$$\frac{d\Gamma m \mathbf{V}}{dt} = q \mathbf{E} + q \mathbf{V} \times \mathbf{H}$$

Для составляющей силы, параллельной скорости $V_{\parallel} = V$, т.к. $V_{\perp} = 0$, получаем:

$$\begin{aligned} \frac{d\Gamma m V_{\parallel}}{dt} &= \Gamma m \frac{dV_{\parallel}}{dt} + \Gamma^3 m \left(\frac{dV_{\parallel}}{dt} V_{\parallel} + \frac{dV_{\perp}}{dt} V_{\perp} \right) V_{\parallel} = \\ &= \Gamma m \frac{dV_{\parallel}}{dt} + \Gamma^3 m \frac{dV_{\parallel}}{dt} V^2 = \Gamma m \frac{dV_{\parallel}}{dt} (1 + \Gamma^2 V^2) = \Gamma^3 m \frac{dV_{\parallel}}{dt} = q E_{\parallel} \end{aligned}$$

Новая же формула даёт следующую цепочку равенств:

$$\begin{aligned} \frac{d\Gamma^2 m V_{\parallel}}{dt} &= \Gamma^2 m \frac{dV_{\parallel}}{dt} + 2\Gamma^4 m \left(\frac{dV_{\parallel}}{dt} V_{\parallel} + \frac{dV_{\perp}}{dt} V_{\perp} \right) V_{\parallel} = \\ &= \Gamma q E_{\parallel} + \Gamma q \langle E_{\parallel} V_{\parallel} \rangle V_{\parallel} = \Gamma q E_{\parallel} (1 + V^2) = \\ &= \Gamma^2 m \frac{dV_{\parallel}}{dt} (1 + 2\Gamma^2 V^2) = \Gamma^4 m \frac{dV_{\parallel}}{dt} (1 + V^2) \end{aligned}$$

Из последнего снова получаем

$$\Gamma^3 m \frac{dV_{\parallel}}{dt} = q E_{\parallel}$$

Для поперечной силы, по старой теории:

$$\begin{aligned}\frac{d\Gamma m \mathbf{V}_{\perp}}{dt} &= \Gamma m \frac{d\mathbf{V}_{\perp}}{dt} + \Gamma^3 m \left(\frac{dV_{\parallel}}{dt} V_{\parallel} + \frac{dV_{\perp}}{dt} V_{\perp} \right) \mathbf{V}_{\perp} = \\ &= \Gamma m \frac{d\mathbf{V}_{\perp}}{dt} = q \mathbf{E}_{\perp} + q \mathbf{V} \times \mathbf{H}\end{aligned}$$

По рассматриваемой же теории получаем:

$$\begin{aligned}\frac{d\Gamma^2 m \mathbf{V}_{\perp}}{dt} &= \Gamma^2 m \frac{d\mathbf{V}_{\perp}}{dt} + 2\Gamma^4 m \left(\frac{dV_{\parallel}}{dt} V_{\parallel} + \frac{dV_{\perp}}{dt} V_{\perp} \right) \mathbf{V}_{\perp} = \\ &= \Gamma^2 m \frac{d\mathbf{V}_{\perp}}{dt} = \Gamma (q \mathbf{E}_{\perp} + q \mathbf{V} \times \mathbf{H})\end{aligned}$$

– так как вектор $\Gamma q \langle \mathbf{E} \mathbf{V} \rangle \mathbf{V} = \Gamma q \langle \mathbf{E} \mathbf{V} \rangle V_{\parallel}$ ортогонален вектору $\Gamma^2 m \frac{d\mathbf{V}_{\perp}}{dt}$. Т.е. в итоге также имеем $\Gamma m \frac{d\mathbf{V}_{\perp}}{dt} = q \mathbf{E}_{\perp} + q \mathbf{V} \times \mathbf{H}$.

Тем не менее, введённую векторную величину \mathbf{F} не будем пока рассматривать в качестве «полноценной силы» из-за того, что для примера с присоединяемыми телами мы снова получаем отсутствие «склейки» с классическим измерением сил. Действительно, если \mathbf{P} – «импульс» и M – «масса» тела T , то

$$\frac{d}{dt} \mathbf{P} = M \frac{d\mathbf{V}}{dt} + \frac{dM}{dt} \mathbf{V} = \mathbf{F} + N\mathbf{V},$$

и так как $\frac{dM}{dt} = 2N$, и $\frac{d\mathbf{V}}{dt} = 0$, то $\mathbf{F} \neq \mathbf{0}$. Последнее противоречит обычному способу измерения сил. Подробности другого определения измерения сил пока отсутствуют. Равенство $\frac{dM}{dt} = 2N$ ставит под сомнение известную связь между «энергией покоя» и «массой», что требует разбирательств, вероятно также ведущих к отказу от данного определения. В итоге, при всей полезности рассмотренного, окончательная формула силы пока не известна. Также находим, что «формулу электромагнитной силы для произвольной системы отсчёта» не возможно вывести «только из электрической силы в системе отсчёта частицы». Тензор энергии-импульса электромагнитного поля находится и обоснуется только через аксиому для электромагнитной силы. Без знания «формулы силы», нельзя поэтому определить импульсы и энергии для полей и частиц. Требование же «новых определений импульса и энергии» несёт радикальные последствия для релятивистских теорий.

Литература

1. Фок. В.А. Теория пространства, времени и тяготения. Москва 1961.