РАЗДЕЛ V. ФИЗИКА

Кузьменко С.Н.

О свойствах силы Лоренца

Керченский государственный морской технологический университет

(Россия, Керчь)

doi: 10.18411/lj-10-2019-48

idsp: ljjournal-10-2019-48

Аннотация

На основе самых общих, в частности, симметричных соображений анализируются фундаментальные свойства магнитной составляющей силы Лоренца. Показано, что определяющую роль в формировании этих свойств играет аксиальная симметрия и скоростная зависимость собственного магнитного поля движущегося заряда. Малый масштаб локализации собственного магнитного поля частиц, сравнимый с их классическими радиусами, обуславливает высокую точность воспроизведения свойств силы Лоренца. Традиционная концепция квазистатического полевого взаимодействия, согласно которой внешнее поле действует на частицу, не отражает определяющей роли ее собственного поля в этом процессе. Она может быть скорректирована следующим образом. Частица является особенностью единого поля и стремится двигаться или движется так, чтобы энергия единого поля стремилась к минимуму. Обобщенный механизм формирования силы Лоренца связан с различием объемных плотностей энергии магнитного поля с разных сторон заряда, что равносильно разнице сил давления на заряд. Ввиду общности использованных методов анализа, они могут быть использованы для анализа других взаимодействий.

Ключевые слова: электрический заряд, магнитное поле, полевое взаимодействие, сила Лоренца, симметрия в физике.

Abstract

The fundamental properties of the magnetic component of the Lorentz force are analyzed on the basis of the most General, in particular, symmetric considerations. It is shown that the determining role in the formation of these properties is played by axial symmetry and velocity dependence of the intrinsic magnetic field of the moving charge. The small scale of localization of the intrinsic magnetic field of particles, comparable to their classical radii, causes a high accuracy of reproduction of the properties of the Lorentz force. The traditional concept of quasi-static field interaction, according to which the external field acts on the particle, does not reflect the determining role of its own field in this process. It can be adjusted as follows. The particle is a feature of the uniform field and tends to move or moves so that the energy of the uniform field tends to a minimum. The generalized mechanism of the Lorentz force formation is associated with the difference in the volume densities of the magnetic field energy from different sides of the charge, which is equivalent to the difference in the pressure forces on the charge. Due to the commonality of the analysis methods used, they can be used to analyze other interactions.

Keywords: electric charge, magnetic field, field interaction, Lorentz force, symmetry in physics.

Введение. Фундаментальные взаимодействия – гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное – являются основой современной физической картины мира [1, 2]. Базовые законы этих взаимодействий устанавливаются экспериментально

или подгоняются теоретически под эксперимент. Хорошо известны такие базовые законы как закон всемирного тяготения, закон Кулона, сила Лоренца. По отношению к этим законам всегда возникало много интересных вопросов. Например, почему законы всемирного тяготения и Кулона так похожи? Почему магнитная составляющая силы Лоренца

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

существенно отличается от силы всемирного тяготения и кулоновской силы? В выражении (1): q - заряд частицы, $\vec{v}$ - ее скорость, $\vec{B}$ - индукция внешнего магнитного поля, в котором движется частица. Можно отметить следующие самые яркие отличительные свойства этой силы.

Свойство 1. Она действует только на движущиеся заряды и пропорциональна скорости движения.

Свойство 2. Всегда одновременно перпендикулярна скорости заряда и индукции внешнего поля.

Свойство 3. Оба, названные выше, свойства выполняются с высокой точностью и эта точность ограничена только квантовыми эффектами.

Свойство 4. Для нее при взаимодействии двух точечных движущихся зарядов нарушается третий закон Ньютона.

В статьях физической энциклопедии, связанных с силой Лоренца [2], в большом объеме литературы по электромагнетизму и квантовой электродинамике не удалось обнаружить каких-либо соображений о перечисленных свойствах силы Лоренца. Очевидно, что ответы на такие вопросы могли бы дать более фундаментальные «микротеоории», которые пока не созданы. Но в физике есть универсальные методы анализа, на основе которых можно делать предварительные, иногда существенные, выводы о явлениях, для которых теории еще не построены. Это, так называемые, общие соображения – философские, теоретико-множественные, энергетические, симметричные и др. В частности, на мощь симметричных методов указывает, например, возможность получения многих фундаментальных законов сохранения именно из соображений симметрии [3, 4]. В данной работе все эти соображения применяются для анализа перечисленных «необычных» свойств силы Лоренца.

Закономерен вопрос о смысле и ценности такого анализа. В физике всегда ценилось понимание природы используемых законов, соотношений и понятий, взгляд на них с разных точек зрения. Это усиливает эффект их естественности, а иногда и указывает направления более глубокого их изучения, построения соответствующих им «микротеорий».

Принципы анализа. При самом общем анализе можно исходить из принципа причинности и теории множеств, а именно. Пространство можно рассматривать как множество точек, в которых может находиться заряд. Сила возникает в том случае, если точки пространства чем-либо различаются для заряда. В рассматриваемой проблеме главным фактором, отличающим точки пространства друг от друга, является величина поля. Поэтому, используя самые общие соображения, проанализируем следующую проблему. В пространстве находится покоящаяся или движущаяся частица, на которую действует какое-нибудь поле. Информация о силовых центрах, создающих это поле, отсутствует. Предполагается, что они расположены за пределами рассматриваемой области поля вокруг частицы. Основной вопрос ставится так: можно ли только по информации о поле вокруг частицы сделать заключение о том действует ли на нее сила или нет? Ответ на этот вопрос утвердительный и может быть следующим. Сила - векторная величина, т.е. имеет выделенное направление в пространстве. Поэтому можно сформулировать правило 1: результирующее поле

вокруг частицы, на которую действует сила, должно иметь выделенное направление, вдоль которого и будет направлена сила. Одним из аргументов в пользу такого утверждения является сферическая или цилиндрическая симметрия полей свободных частиц. В таком случае выделенных направлений нет – сила действия поля на частицу равна нулю. Если выделенное направление одно, то поле вокруг частицы имеет явную асимметрию вдоль этого направления. Выделенных направлений может быть несколько, тогда поле вокруг частицы должно иметь соответствующую симметрию, а ее положение будет неустойчивым равновесием. Например, как у заряда в центре правильного n -угольника, в вершинах которого расположены равные заряды.

Для определенности анализа необходимо также правило 2: при квазистатических взаимодействиях, пока несущественны процессы излучения, сила полевого взаимодействия определяется соотношением собственного и внешнего полей; ядро частицы формирует только ее инерционные свойства. Частица в таком случае является особенностью единого поля и стремится двигаться или двигаться так, чтобы минимизировалась полная энергия поля.

Сформулированные правила основаны на самых общих, в частности, симметричных соображениях и огромном массиве экспериментальных и теоретических задач. Прежде всего, это задачи для гравитационного и электрического взаимодействий, для теории точечных и линейных дефектов в кристаллах и их моделированию в механике сплошной среды [5, 6], для микромагнитных структурных элементов [7, 8] в магнетиках и т.д.

Для потенциальных полей отмеченное направление определяется оператором градиента от потенциальной энергии частицы $U(r)$

$$\vec{F} = -grad U(r)$$

Магнитные силы не являются потенциальными, для них аналогичного соотношения не существует. Поэтому применим сформулированные правила для анализа отмеченных выше особенностей магнитной составляющей силы Лоренца.

Анализ свойств силы Лоренца. Магнитное поле, создаваемое точечным зарядом при его равномерном движении, определяется выражением

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{(\vec{v} \times \vec{r})}{r^3} \quad (2)$$

Если заряд движется во внешнем поле $\vec{B}_2$, то суммарное поле вокруг него согласно принципу суперпозиции равно векторной сумме обоих полей

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{(\vec{v} \times \vec{r})}{r^3} + \vec{B}_2 \quad (3)$$

Рассмотрим простейший случай, когда поле $\vec{B}_2$ однородно и направлено перпендикулярно вектору скорости. Геометрия полей $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ такова, что с одной стороны заряда результирующее поле усиливается, а с другой ослабляется (рис. 1). Это приводит к явной асимметрии поля вокруг частицы и, согласно приведенным выше правилам, на нее должна действовать сила. Выделенное направление асимметрии поля, а значит, направление действующей силы определим из геометрии равнодействующего поля. В выбранной системе координат (рис.1) вектор индукции результирующего поля (3) определяется выражением.

Рисунок 1 - Наложение силовых линий однородного поля и поля движущегося положительного заряда(слева); направления векторов в выбранной системе координат (справа)

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} qv \vec{i} \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} + \vec{k} \left(B_2 - \frac{\mu_0}{4\pi} qv \frac{y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \right). \quad (4)$$

Соответствующий модуль этого вектора

$$B = \sqrt{\left(\frac{\mu_0}{4\pi} qv \right)^2 \frac{x^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^3} + \left(B_2 - \frac{\mu_0}{4\pi} qv \frac{y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \right)^2}. \quad (5)$$

Объемная плотность энергии результирующего поля определяет тот энергетический «рельеф», в котором частица совершает движение

$$\omega = \frac{1}{2\mu_0} \left(\left(\frac{\mu_0}{4\pi} qv \right)^2 \frac{x^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^3} + \left(B_2 - \frac{\mu_0}{4\pi} qv \frac{y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \right)^2 \right) \quad (6)$$

По переменным z, x выражения (5, 6) зеркально симметричны, а по переменной y они имеют явную асимметрию (рис.2). Следовательно, сила Лоренца должна быть направлена именно вдоль этой оси. Причем геометрия поля не будет изменяться при повороте вокруг оси вращения, т.е. сделанные выводы остаются справедливыми при вращении заряда под действием силы Лоренца. Направление вдоль оси Y означает также перпендикулярность силы Лоренца к векторам скорости и магнитной индукции. Это объясняет фундаментальное свойство 2 данной силы. Из данного анализа очевидно, что это свойство является следствием аксиальной симметрии магнитного поля движущегося заряда и однородности внешнего поля.

Рисунок 2- Численное моделирование магнитного поля движущегося точечного заряда во внешнем поле. На правом рисунке значение внешнего поля в три раза больше, чем на левом. Как следствие, асимметрия поля на правом рисунке выражена сильнее

Характерным пространственным масштабом, определяющим асимметрию поля, является расстояние, на котором индукция поля движущегося заряда равна индукции внешнего поля

$$y_{as} = \sqrt{\frac{\mu_0 qv}{4\pi B_2}}$$

Рисунок 3 – Распределение объемной плотности энергии магнитного поля (6) вокруг заряда, движущегося в однородном магнитном поле, в зависимости от координаты y при $x=z=0$ (слева) и при небольшом смещении вдоль оси z (справа).

С уменьшением индукции внешнего поля параметр y_{as} возрастает, асимметрия поля вокруг частицы уменьшается, как следствие, уменьшается сила Лоренца. Это хорошо видно на рисунке 2, на котором представлены результаты численного моделирования магнитного поля движущегося точечного заряда во внешнем магнитном поле. Еще отчетливее асимметрия единого поля вокруг заряда представлена на рисунке 3 зависимостью энергетического рельефа (6) от координаты y . Эти рисунки хорошо иллюстрируют обобщенный механизм формирования силы Лоренца. Объемная плотность энергии магнитного поля равна давлению магнитного поля. Поскольку она имеет различное значение с разных сторон от заряда, то сила Лоренца образуется за счет этой разницы давлений.

Выражения (4-6) явно указывают на причину скоростной зависимости силы Лоренца (свойство 1). Ведь с ростом скорости заряда пропорционально ей растет величина его собственного магнитного поля (2) и, как следствие, увеличивается асимметрия суммарного поля (3-5) вокруг частицы. Если заряд неподвижен, то у него нет собственного магнитного поля и он находится в однородном внешнем поле, все точки которого равноправны – причины для возникновения силы нет.

Выше предполагалось, что внешнее магнитное поле является однородным. Более общая геометрия этого поля не изменяет сделанных выводов. Вектор индукции внешнего поля в любой точке можно разложить на две составляющие: параллельную и перпендикулярную вектору скорости. Параллельная составляющая не влияет на симметрию собственного магнитного поля частицы (2), а для перпендикулярной составляющей справедливы высказанные выше соображения. Степень неоднородности поля в данном анализе ограничена только условием квазистатичности процесса движения заряда.

Высокая точность выполнения свойств 1,2, отмеченная выше как свойство 3, связана, прежде всего, с высокой степенью локализации полей частиц. Так как электростатическое и магнитное поля зарядов изменяются по закону обратных квадратов, то основная энергия этих полей локализована на масштабах сравнимых с

классическими радиусами частиц (для электрона $2,818 \cdot 10^{-15}$ м). На таких масштабах практически любое внешнее поле можно считать однородным, симметрию собственного магнитного поля частицы – идеально аксиальной. По этой же причине сила Лоренца для частиц определяется локальным, а не усредненным значением внешнего поля как для макроскопических зарядов, в пределах объема которых магнитное поле может изменяться. Но при высокоэнергетичных столкновениях зарядов можно ставить вопрос о возможности нарушения свойств 1-3, так как на малых расстояниях от ядер взаимодействующих частиц их поля существенно неоднородны.

Из нарушения третьего закона при магнитном взаимодействии частиц (свойство 4) наиболее существенными кажутся следующие выводы. Все взаимодействия можно разделить на два типа: статические и динамические. Статические взаимодействия определяются только относительным положением частиц и не зависят от их скоростей. К ним можно отнести упругое, гравитационное, электростатическое взаимодействия. Для них третий закон Ньютона хорошо выполняется, т.к. статичность означает уравнивание. Динамические взаимодействия зависят не только от относительного положения, но и от скоростей частиц. Например, силы сопротивления сплошных сред, сила Лоренца. Для этих взаимодействий существенную роль играют динамические свойства среды, поля, в которых происходит движение. Именно из-за динамического влияния электромагнитного поля и происходит нарушение третьего закона при магнитном взаимодействии.

Выводы.

- 1) Определяющую роль в формировании отличительных свойств магнитной составляющей силы Лоренца играет аксиальная симметрия и скоростная зависимость собственного магнитного поля движущегося заряда.
- 2) Масштаб локализации собственного магнитного поля частиц сравним с их классическими радиусами, поэтому сила Лоренца определяется локальным значением внешнего магнитного поля в каждой точке пространства. Его неоднородность влияет только на форму траектории заряда.
- 3) Традиционная концепция квазистатического полевого взаимодействия, согласно которой внешнее поле действует на частицу, не отражает определяющей роли ее собственного поля в этом процессе. Она может быть скорректирована следующим образом. Частица является особенностью единого поля – собственного и внешнего - и стремится двигаться или движется так, чтобы энергия единого поля стремилась к минимуму. Это условие по существу является принципом наименьшего действия и определяет направление действия силы.
- 4) Обобщенный механизм формирования силы Лоренца связан с различием объемных плотностей энергии магнитного поля с разных сторон заряда, что равносильно разнице сил давления на заряд.

1. Белокуров В.В., Ширков Д.В. Теория взаимодействия частиц. М: Наука, 1986, 160 с
2. Взаимодействие в физике. Физическая энциклопедия / Глав. ред. А.М. Прохоров. — Москва: Большая российская энциклопедия, 1998. — Т.2. — 703 с.
3. Эллиот Дж., Добер П.. Симметрия в физике. Т. 1-2, М.: Мир, 1983. 368 с.
4. Аминов Л.К. Теория симметрии. М: Институт компьютерных исследований, 2002, 192 с.
5. Теодосиу К. Упругие модели дефектов в кристаллах. М.:Мир,1985,352 с.
6. Косевич А.М. Основы механики кристаллической решетки. М: Наука, 1982
7. Зубов В.Е., Кринчик Г.С., Кузьменко С.Н. // ЖЭТФ 102, 235 (1992).
8. Зубов. В.Е., Гаджилов М.В, Кринчик Г.С., Кузьменко С.Н. // Письма в ЖЭТФ 69,6, 443 (1999).