

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА КВАНТОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА

В.В. Сидоренков

МГТУ им. Н.Э. Баумана

В рамках гипотезы монополя Дирака установлен магнитный заряд электрона, тождественно равный кванту магнитного потока, наблюдаемого в условиях сверхпроводимости. На этой основе сделан вывод о том, что любая микрочастица обладает в совокупности как электрическим, так и магнитным зарядами, которые в изоляции друг от друга в Природе не существуют, поскольку содержатся в одном и том же материальном носителе, а подтверждающий данный факт спин микрочастицы есть результат электромагнитного взаимодействия этих собственных зарядов.

В физике известен эффект квантования магнитного потока [1] - макроскопическое квантовое явление, состоящее в том, что магнитный поток через кольцо из сверхпроводника с электрическим током может принимать лишь строго дискретные значения, кратные минимальной величине $\Phi_0^m = 2,07 \cdot 10^{-15}$ Вб (Вебер) - кванту магнитного потока. Указанный физический феномен был предсказан в 1948 году Ф. Лондоном [2], который теоретически получил для кванта магнитного потока соотношение $\Phi_0^m = h/e$, где h - постоянная Планка, e - заряд электрона. Однако позднее (1961г.) экспериментально установлено [3, 4] вдвое меньшее значение этого кванта: $\Phi_0^m = h/2e$, что общепринято считать объективным непосредственным подтверждением основной идеи созданной к тому времени микроскопической теории сверхпроводимости [1].

Согласно этой теории, сверхпроводящее состояние кристалла обусловлено фазовой пространственно-временной когерентностью носителей тока в виде квазичастиц Бозе-конденсата, образованных электрон-фононным взаимодействием пространственно разнесенных пар электронов проводимости (*Купера эффект* [1]), обладающих нулевым спином и зарядом, равным удвоенному заряду электрона. Именно пространственное парное взаимодействие электронов проводимости (*куперовских пар* $l_{e-e} \sim 10^{-6}$ м) физически реализует явление сверхпроводимости, поскольку в процессе электропроводности «столкновения» отдельного электрона с ионами кристаллической решетки не способны изменить суммарного механического импульса его электронной пары (ее центра масс).

Анализ эффекта квантования магнитного потока начнем с исследования базовой в теории электричества теоремы Гаусса [5], описывающую электрическую поляризацию материальной среды, представленной как в дифференциальной $\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho$, так и в интегральной $\Phi^e = \oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = \int_{V_S} \rho dV = q$ формах. Здесь $\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}$ - поле вектора электрической индукции (смещения), обусловленное откликом среды при воздействии на нее поля вектора \mathbf{E} - электрической напряженности; $\varepsilon \varepsilon_0$ - абсолютная электрическая проницаемость, ρ - объемная плотность стороннего электрического заряда. Однако следует иметь в виду, что равенство нулю стороннего заряда, соответственно, электрического потока $q = \Phi^e = 0$ отнюдь не означает отсутствие электрического поля в этой области пространства, поскольку электрические заряды бывают положительными и отрицательными, и указанное поле может создаваться электронейтральными источниками, например, электрическими диполями, посредством которых реализуется процесс поляризации. Такое свойство электростатического поля качественно отличает его от ньютоновского поля тяготения, там источники этого поля – гравитирующие массы имеют лишь один знак.

Итак, уравнение $\operatorname{div} \mathbf{D} = 0$ описывает поляризацию локально электронейтральной ($\rho = 0$) среды, откуда с учетом тождества векторного анализа $\operatorname{div} \operatorname{rot} \mathbf{a} = 0$ получим фундаментальное следствие теоремы Гаусса: $\operatorname{rot} \mathbf{A}^e = \mathbf{D}$, где \mathbf{A}^e - векторный электрический потенциал. В интегральной форме это соотношение описывает функциональную связь циркуляции поля вектора $\mathbf{A}^e(\mathbf{r})$ по замкнутому контуру C с потоком вектора электрической индукции $\mathbf{D}(\mathbf{r})$ через опирающуюся на этот контур поверхность S_C , на которой, согласно физике явления поляризации, индуцирован порождающий это поле электрический поляризационный заряд:

$$\oint_C \mathbf{A}^e d\mathbf{l} = \int_{S_C} \mathbf{D} d\mathbf{S} = \Phi^e = n \cdot \Phi_0^e = \int_{S_C} \sigma^e dS = q^e = n \cdot e, \quad (1)$$

n - целые числа. Таким образом, имеем тождественную симметрию размерностей потока вектора поля электрической индукции (смещения) и электрического заряда: *электрический поток* - $\Phi^e \equiv q^e$ - [А·с = Кулон] - *электрический заряд*. При этом *квант электрического заряда* - *электрон* может быть тождественно представлен *квантом электрического потока*: $e \equiv \Phi_0^e$.

Полностью следуя логике вышеприведенных рассуждений при анализе связи квантов электрического заряда и потока его поля перейдем теперь собственно к анализу эффекта квантования магнитного потока. Для этого воспользуемся соотношением, описывающим результат магнитной поляризации материальной среды $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$, часто называемое теоремой Гаусса для магнитного поля, в виде его математического следствия: $\operatorname{rot} \mathbf{A}^m = \mathbf{B}$, где \mathbf{A}^m - векторный магнитный потенциал, а \mathbf{B} - вектор поля магнитной индукции. Интегральная форма данного соотношения описывает функциональную связь циркуляции вектора $\mathbf{A}^m(\mathbf{r})$ по контуру C с потоком вектора индукции $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ через опирающуюся на этот контур поверхность S_C , на которой, согласно нашему предположению, индуцирован порождающий это магнитное поле гипотетический магнитный поляризационный заряд:

$$\oint_C \mathbf{A}^m d\mathbf{l} = \int_{S_C} \mathbf{B} d\mathbf{S} = \Phi^m = \int_{S_C} \sigma^m dS = q^m. \quad (2)$$

Таким образом, имеем тождественную симметрию размерностей вектора поля магнитной индукции и магнитного заряда (если таковой существует): *магнитный поток* - $\Phi^m \equiv q^m$ - [Вольт·секунда = Вебер] - *магнитный заряд*. А поскольку величина кванта магнитного потока Φ_0^m однозначно установлена в экспериментах [3, 4], то, согласно соотношению (2), *квант магнитного заряда* тождественно определится *квантом магнитного потока*: $m \equiv \Phi_0^m = h/2e$. В этой связи приходится констатировать, что положительные результаты экспериментов по наблюдению кванта магнитного потока в [3, 4] безусловно являются физическим открытием магнитного заряда и величины его кванта.

Кстати, именно этот вопрос является центральным в настоящем исследовании. Главная здесь задача – это независимым путем аналитически доказать объективность неразрывной связи и равноправного единства сущностно разных зарядов в виде соотношения « $e \cdot m = h/2$ », полученного нами при анализе экспериментов по наблюдению эффекта квантования магнитного потока [3, 4].

Напомним, что гипотеза о возможности существования *магнитного монополя* - частицы, обладающей положительным или отрицательным магнитным зарядом, аналогичным электрическому заряду, была высказана П.А.М. Дираком (1931г.) с целью концептуального обоснования симметричной квантовой электродинамики, именно эту частицу и называют *монополем Дирака* [1, 6]. Однако

монополю Дирака не только экспериментально неуловим, но и теоретические построения по этому вопросу не позволяют даже по порядку величины определить еще один важный параметр магнитного заряда – массу его носителя. Справедливости ради отметим, что и масса электрона также не устанавливается настоящими теориями, являясь экспериментальным фактом. И все же каких-либо физических законов и очевидных логических возражений против идеи существования магнитных монополей нет, а потому в течение уже многих десятилетий интерес к этой физически актуальной проблеме не ослабевает.

Вот и мы представим себе, что наряду с реально наблюдаемыми положительными и отрицательными электрическими зарядами, порождающими в пространстве электрическое кулоновское поле [5], в Природе существуют и *свободные магнитные заряды* - источники магнитного поля, отвечающего *закону Кулона взаимодействия неподвижных точечных зарядов*. Конечно, здесь надо иметь в виду, что многолетние упорные поиски свободных магнитных зарядов остаются безуспешными, хотя закон Кулона магнитного взаимодействия в эксперименте действительно наблюдается, но только для магнитных полюсов на концах длинных намагниченных спиц.

Для физико-математического моделирования эффекта квантования магнитного потока рассмотрим взаимодействие постоянного во времени электрического тока с магнитным статическим полем, созданным предполагаемыми магнитными зарядами. Конкретно, проведем анализ поведения элементарного электрического заряда - электрона « e » при его движении с постоянной по модулю скоростью \mathbf{v} ортогонально силовым линиям однородного статического поля магнитной индукции $\mathbf{B}(\mathbf{r}) = const$. Согласно теории электричества [5], взаимодействие движущегося электрического заряда с магнитным полем реализуется посредством магнитной составляющей силы Лоренца $\mathbf{F}_{Лор}^m = e [\mathbf{v}, \mathbf{B}]$, сообщающей частице центростремительное ускорение $m^e v^2 / R = e v B$ (m^e - масса электрона), приводящее к движению заряда по окружности радиуса R . Тогда момент импульса электрона запишется в виде $L_z = R m^e v = e R^2 B$. Однако здесь важно то, что согласно принципам *корпускулярно-волнового дуализма материи* [7] орбитальный момент (момент импульса) микрочастицы квантуется, когда $L_z = R m^e v = (2\pi R m^e v / h) h / 2\pi = (2\pi R / \lambda_B) \hbar = n \hbar$, где $n = 2\pi R / \lambda_B$ - целое число длин волн де Бройля частицы $\lambda_B = h / m^e v$, укладывающихся на траектории ее орбиты, $\hbar = h / 2\pi$ - модифицированная постоянная Планка.

А вот теперь будем считать, что источником магнитного поля являются гипотетические магнитные заряды q^m со свойствами, идентичными реальным электрическим зарядам q^e . Для анализа воспользуемся результатами уже проведенной выше процедуры получения соотношения (2) функциональной связи магнитного заряда и потока его магнитного поля:

$$\int_{S_c} \mathbf{B} dS = \int_{S_c} \sigma^m dS = q^m.$$

Отсюда находим нормальную составляющую вектора магнитной индукции $B_n = \sigma^m = q^m / \pi R^2$, где $S_c = \pi R^2$ - площадь орбиты электрона. Итак окончательно момент импульса частицы запишется как $L_z = eR^2 B = eq^m / \pi = n\hbar$. В итоге получаем тождественные друг другу квантованные величины магнитного заряда и потока его поля: $q^m \equiv \Phi^m = n (h/2e)$, при этом *квант магнитного заряда* представится как $m = h/2e$, где в произведение минимальных величин электрического и магнитного зарядов входит постоянная Планка. Как видим, соотношение $e \cdot m = 2\pi \cdot \hbar/2$ описывает объективно неразрывную связь сущностно разных зарядов, с коэффициентом 2π равную модулю *кванта собственного момента микрочастицы*, отвечающего, как известно [1, 7], *спину электрона* $s = \pm \hbar/2$.

Таким образом, результаты физико-математического моделирования эффекта квантования магнитного потока действительно совпадают с итогами экспериментов, описанными в работах [3, 4]. Но тогда выходит, что широко известное аналитическое выражение для кванта магнитного потока $\Phi_0^m = h/2e$, где якобы в знаменателе фигурирует величина заряда электронной пары $2e$ - физической сути явления сверхпроводимости, на поверку представляет собой отношение значений корпускулярных электромагнитных характеристик только одного электрона: спина этой микрочастицы к ее электрическому заряду.

Кстати, по результатам анализа эффекта квантования магнитного потока, приходим, на наш взгляд, к вполне разумному выводу о том, что непосредственным источником магнитного поля при электропроводности являются, как и должно быть физически, именно и только спины носителей тока, а не некий мифический релятивизм. Как представляется, электрический ток в виде упорядоченного дрейфового движения, например, электронов проводимости за счет нулевой в среднем их относительной скорости в направлении тока создает условия для взаимодействия магнитных моментов этих зарядов, то есть возникающее при этом упорядочение спинов проявляет себя на макроуровне в виде

магнитного поля тока. В процессе сверхпроводимости величина флуктуаций силы тока, соответственно, шумовой фон магнитного поля настолько малы, что дают возможность наблюдать еще более тонкое явление - *эффект квантования магнитного потока*. В итоге можно считать, что, наконец-то, удалось вскрыть физический механизм магнитного поля тока, напрямую коррелирующий с традиционными представлениями о спиновом механизме истинного магнетизма.

Итак, сравнительно простые рассуждения с привлечением базовой идеи квантовой (волновой) механики - корпускулярно-волнового дуализма материи позволили получить ряд действительно фундаментальных результатов, которые со всей определенностью ставят вопрос о необходимости серьезной концептуальной модернизации основ классической электродинамики.

Однако сейчас перед нами стоит не столь глобальная, но не менее важная задача: хотелось бы понять, почему не удастся экспериментально обнаружить свободных магнитных монополей, да и вообще, возможны ли они в Природе? Для этого определим отношение сил Кулона взаимодействия пар неподвижных элементарных электрических « $e - e$ » и магнитных « $m - m$ » зарядов в вакууме:

$$\frac{F_{Кул}^{ee}}{F_{Кул}^{mm}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} / \frac{m^2}{4\pi\mu_0 r^2} = \frac{e^2 \mu_0}{m^2 \epsilon_0} = \left(\frac{e}{m} Z_0 \right)^2, \quad (3)$$

где $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ - импеданс пространства физического вакуума. Как видим, результат, несомненно, физически интересен, так как обе силы Кулона связаны друг с другом фундаментальными константами: $F_{Кул}^{ee} = [(e/m)Z_0]^2 F_{Кул}^{mm}$, причем сила кулоновского взаимодействия магнитных зарядов больше аналогичной электрической силы на три порядка: $F_{Кул}^{mm} = 1,2 \cdot 10^3 F_{Кул}^{ee}$.

В качестве примера сделаем оценку энергетических затрат по реализации свободного заряда на примере процесса ионизации атома - характерной стационарной электронейтральной структуры, удовлетворяющей теореме Ирншоу [5]. Согласно теории Н. Бора атома водорода [7], формула минимальной энергии ионизации такого атома имеет вид $E_1^e = (m^e e^4) / [(4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2]$ и численно равна $E_1^e = 13,6$ эВ. Тогда для *магнитной атомной структуры* с учетом соотношений (3) получим боровскую формулу энергии ионизации магнитного атома: $E_1^m = (m^m m^4) / [(4\pi\mu_0)^2 2\hbar^2]$. При числовой оценке энергии E_1^m учтем замечание выше о заряде в соотношении для кванта магнитного потока $\Phi_0^m = h/2e$ и возьмем массу кванта магнетизма m^m , равную массе электрона m^e . В итоге

имеем $E_1^m \sim 5,3 \cdot 10^7 \text{ эВ}$. Как видим, разделение на части магнитонейтральной структуры в виде атома потребует энергии на 6 порядков больше, в сравнение с аналогичной процедурой над подобной электронной нейтральной структурой.

И хотя атомы, их ядра и всякого рода элементарные частицы обладают магнитными моментами, однако многочисленные эксперименты по ионизации атомов, изучение ядерных реакций, анализ взаимодействия и распада элементарных частиц в отношении наблюдения свободных магнитных зарядов оказались безуспешными. Причем при энергиях больше 10^6 эВ получают множество различного сорта элементарных частиц с кратным заряду электрона электрическими зарядами и кратным постоянной Планка магнитными моментами, но и здесь магнитных монополей никто пока не наблюдал.

Согласно выводам нашего анализа, в любых физических процессах на современных установках, в том числе и на суперколлайдере (БАК) с энергией $\sim 1,3 \cdot 10^{13} \text{ эВ}$, создать магнитный монополь энергетически невозможно. Одна надежда - это потоки частиц космических излучений, где энергия разного рода событий во Вселенной, образно говоря, беспредельна. Но и здесь многолетние технически сложные поиски монополя Дирака остаются безуспешными.

Таким образом, имеем парадоксальную ситуацию: с одной стороны, прямое наблюдение изолированных магнитных монополей невозможно энергетически, а, скорее всего, в таком виде в Природе их просто нет, но с другой стороны, установлено равноправное сосуществование электрических и магнитных зарядов, произведение квантов которых $e \cdot m = 2\pi \cdot \hbar / 2$ отвечает *кванту собственного момента микрочастиц* [7]. Такая взаимозависимость физических характеристик разнородных q^e и q^m зарядов явно указывает на реальность силового взаимодействия между ними, а это уже повод задуматься над, казалось бы, логически бессмысленным вопросом: а вообще, могут ли существовать эти заряды по отдельности друг от друга? Конечно, здесь вполне естественны определенные сомнения в правомерности столь странной трактовки полученных результатов, а потому необходима весомая дополнительная аргументация.

С этой целью аналогично электрическому закону Кулона чисто формально запишем закон Кулона взаимодействия электрического и магнитного зарядов, который для их квантов « $e - m$ » представится равенством соотношений:

$$F_{Кул}^{em} = \frac{em}{4\pi \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} r^2} = \frac{em}{4\pi r^2} c = \frac{\hbar c}{4r^2}, \quad (4)$$

$c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ - скорость света в вакууме. Видно, что данный результат физически примечателен и требует осмысления. Однако нас он интересует с конкретной целью выяснения допустимости такого, казалось бы, экзотического взаимодействия двух существенно разных зарядов. Согласно численной оценке, сила Кулона электромагнитного взаимодействия квантов « $e - m$ » зарядов на единичном расстоянии (1м) друг от друга равна $F_{Кул}^{em} = 7,9 \cdot 10^{-27} \text{ Н}$. Для сравнения приведем величины сил Кулона: электрической для « $e - e$ » $F_{Кул}^{ee} = 2,3 \cdot 10^{-28} \text{ Н}$ и магнитной для « $m - m$ » $F_{Кул}^{mm} = 2,7 \cdot 10^{-25} \text{ Н}$. Итак, кулоновское взаимодействие разнородных зарядов q^e и q^m энергетически допустимо, то есть имеем реальный аргумент за то, что указанные заряды могут совокупно содержаться в одном и том же материальном носителе. Обобщая, приходим к неожиданному, но логически вполне обоснованному выводу: электрические и магнитные заряды по отдельности, в изоляции друг от друга в Природе не существуют.

Такой кардинальный вывод подтверждается объективно, поскольку корпускулярными электромагнитными характеристиками частиц микромира [1, 7] являются *электрический заряд* $|q^e| = n \cdot e$, определяющий ее электрические свойства и *собственный угловой момент* $|s| = n \cdot (\hbar/2)$ – *спин*, ответственный за магнитные свойства, который, как теперь установлено, связан с магнитным зарядом частицы: $q^m = n \cdot (h/2e)$. Как видим, непосредственным подтверждением равноправного сосуществования электрических и магнитных зарядов в одном и том же материальном носителе является именно $q^e \cdot q^m = n \cdot (2\pi \cdot \hbar/2)$ – *спин микрочастицы*, физический механизм реализации которого обусловлен выявленным в данной работе электромагнитным взаимодействием указанных зарядов.

Кстати, здесь вполне уместна историческая справка [8]: еще Дж.Дж. Томсон в учебнике по электромагнетизму предлагал студентам в виде упражнения вычислить момент импульса электромагнитного поля, созданного системой из электрического и магнитного зарядов. Согласно решению задачи, угловой момент такой системы и ее поля определяется произведением этих зарядов.

Резюме. В рамках гипотезы монополя Дирака установлен магнитный заряд электрона, тождественно равный кванту магнитного потока, наблюдаемого в условиях сверхпроводимости. На этой основе сделан вывод о том, что любая микрочастица обладает совокупно как электрическим, так и магнитным зарядами, которые в изоляции друг от друга в Природе не существуют,

поскольку содержатся в одном и том же материальном носителе, а подтверждающий данный факт спин микрочастицы есть результат электромагнитного взаимодействия этих ее собственных зарядов. Следовательно, и поля указанных зарядовых объединений должны быть структурно значительно сложнее нынешних электромагнитных полей, а для описания таких новых полей требуются иные фундаментальные уравнения другого глубинного уровня

Анализ вопроса выявления таких полей и построение описывающих их уравнений проведены ранее, например, в работах [9].

Литература

1. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983.
2. *London F.* // Phys. Rev., 1948. vol. 74. № 5. p. 562-573.
3. *Deaver B.S., Fairbank W.M.* // Phys. Rev. Lett., 1961. vol. 7. № 2. p. 43-46.
4. *Doll R., Nabauer M.* // Phys. Rev. Lett., 1961. vol. 7. № 2. p. 51-52.
5. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Электричество. М.: Наука, 1977.
6. *Коулмен С.* // УФН. 1984. Том 144. Вып. 2. С. 277-340.
7. *Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В.* Квантовая физика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
8. *Карриган Р.А., Трауэр У.П.* // УФН. 1983. Том 139. Вып. 2. С. 333-346.
9. *Сидоренков В.В.* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2006. № 1. С. 28-37; // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. Т. 3. № 11. С. 75-82; // Необратимые процессы в природе и технике: Сборник научных трудов. Вып. 3. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 71-83; либо // <http://scipeople.ru/publication/67585/> .

PHISICAL-MATHEMATICAL MODELING AND ANALYSE OF MAGNETIC FLUX QUATIZATION EFFECT

V.V. Sidorenkov
MSTU named after N.E. Bauman

Within the bounds of Dirac's monopole hypothesis was ascertained the magnetic charge of the electron equals to magnetic flux quantum, observed in conditions of superconductivity. On this base was made a conclusion that micro particles possess in the aggregate as electric as well the magnetic charges, and their spin is the result of electromagnetic interaction of these inherent charges.