

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

538.1

## ПОИСКИ МАГНИТНОГО МОНОПОЛЯ\*)

МАГНИТНЫЕ МОНОПОЛИ В КЛАССИЧЕСКОЙ  
И КВАНТОВОЙ ТЕОРИЯХ

Фактически представление о магнитных полюсах существует в науке о магнетизме с незапамятных времен. О полюсах уже упоминается в любопытных исследованиях Перегринна (1269 г.), и хотя позднее автор прославленной книги «О магнитах» Гильберт (1600 г.) относится к «небесным полюсам» Перегринна с оттенком презрения, как к «заграничным безделушкам», далеким и чуждым вещам, «объектам мечтаний», все же понятие о магнитных полюсах в том или ином виде существует в физике и сегодня. В большей части современных учебников существование магнитного полюса либо признается, либо отвергается. Наконец, совсем недавно начались его поиски с использованием всего арсенала средств современной физики. И все же он не существует (пока!).

Классический подход к вопросу достаточно хорошо выразил Максвелл, которому эта точка зрения во многом обязана своим происхождением и существованием: «Концы длинного тонкого магнита называются его полюсами. В случае бесконечно тонкого магнита, равномерно намагниченного вдоль длины, источником сил являются концы и кажется, что остальная часть магнита не обнаруживает магнитного действия, ... (хотя)... во всех существующих магнитах намагниченность такова, что никакая точка, выделенная из магнита, не может служить полюсом»<sup>1</sup>. Концы длинных тонких магнитов действуют как «полюсы»; взаимодействие между полюсами достаточно точно описывается законом Кулона. Существенное различие между электрическими и магнитными полюсами четко установил Максвелл: «В каждом магните полное количество магнетизма (подсчитанное алгебраически) равно нулю»<sup>2</sup>. Это равенство нулю полного количества магнетизма даже для самых малых магнитных частиц впервые привело к гипотезе, что «магнитные жидкости», первоначально перемешанные в молекуле в равных количествах, не могут в процессе намагничивания перейти от одной молекулы к другой, но могут быть разделены лишь внутри молекулы (которая сама по себе предполагалась неделимой)<sup>3</sup>.

Позднее Максвелл признал, что даже эта ограниченная концепция магнитных полюсов (раздельных магнитных жидкостей) менее правдоподобна, чем гипотеза Ампера, согласно которой «магниты обязаны своими свойствами электрическим токам, циркулирующим в молекуле ...»<sup>4</sup>; хотя самые последние экспериментальные данные, на которые Максвелл мог сослаться (1873 г.), были еще недостаточны, чтобы установить «существование таких молекулярных токов», ясно, что он почти не сомневался в преимуществе гипотезы Ампера перед любой другой, предполагающей — пусть даже ограниченное — существование магнитных полюсов.

Короче говоря, сам Максвелл признал существенную асимметрию элементарных источников электрических и магнитных сил, несмотря на то, что именно он создал те самые уравнения поля, в которых обнаружилась удивительная симметрия электрических и магнитных полей. Большинство преемников Максвелла были даже еще более заигноризированы этой симметрией, чем он сам!

Более поздние достижения атомной физики, влияя на атомно-молекулярное объяснение электрических и магнитных явлений, конечно, видоизменили оригинальное предположение Ампера, но оказалось, что в основном утверждение Ампера и Максвелла о глубоком различии между электрическим полюсом и магнитным диполем (или

\*) S. D e v o n s, Search for Magnetic Monopole, Sci. Progr. 51 (No. 204), 601 (1963). Перевод и примечания М. Н. Якименко. Дополнение Б. М. Болотовского см. на стр. 761.

эквивалентными диполями) было совершенно правильным. Электрон, имеющий электрический заряд (полюс) и магнитный момент (диполь), является основным (и простейшим) источником электромагнитных явлений: другие «элементарные» частицы являются подобными ему (хотя и более сложными) источниками. Как с точки зрения классической электродинамики, так и с точки зрения существующей в настоящее время микроскопической интерпретации электрических и магнитных явлений (включая свойства отдельных частиц), элементарная асимметрия электрических и магнитных явлений общепринята, несмотря на то, что, по-видимому, ее нельзя объяснить на основе каких-либо фундаментальных принципов.

Введение изолированного магнитного полюса (магнитного монополя) в классическую электродинамику, хотя и не является необходимым для объяснения наблюдаемых явлений, в принципе не приводит к трудностям; появление таких полюсов должно рассматриваться как дальнейшее увеличение уже и так приятной симметрии уравнений поля. Иная ситуация существует в квантовой теории. В замечательной работе, опубликованной в 1931 г.<sup>5</sup>, Дирак рассматривает следствия предположения о том, что наряду с уже имеющимися электрическими зарядами (полюсами) существуют магнитные монополи и в то же время сохраняются основные аксиомы и положения квантовой механики. Во вступительных замечаниях к этой статье, озаглавленной «Квантованные особенности электромагнитного поля», Дирак обращается к некоторым «наиболее фундаментальным проблемам теоретической физики, ждущим своего решения, к таким например, как релятивистская формулировка квантовой механики и природа атомных ядер (за которыми следуют более сложные проблемы, такие, как проблема жизни)». Для решения столь сложных проблем должны быть использованы методы, соизмеримые с задачами, и Дирак предлагает, по крайней мере как возможность, сначала поиск и формулировку абстрактной, логически законченной теории для того, чтобы затем перейти к нахождению соответствия между теорией и наблюдаемыми явлениями.

В этой работе вначале выражается некоторая надежда, что будет пролит свет на таинственную «постоянную тонкой структуры» ( $e^2/\hbar c \approx 1/137$ ), и хотя эта замечательная безразмерная константа не «объяснена», полученные результаты не менее удивительны. Показано, что по квантовой теории, электрические заряды и магнитные монополи могут сосуществовать только в том случае, если оба квантованы: первые кратны кванту электричества  $e$  (как и наблюдается), а другие — кванту  $g$  (магнитные монополи), причем  $e$  и  $g$  связаны соотношением  $eg = \hbar c/2$ .

Принимая как наблюдаемый факт, что квантование  $e$  приводит к величине, даваемой (приблизительно) выражением

$$e^2 = \frac{\hbar c}{137},$$

получим, что «возможные» магнитные монополи имеют заряд  $ng$  ( $n$  — целое число), определяемый соотношением

$$n^2 g^2 = \frac{n^2 \hbar^2 c^2}{4 e^2} = n^2 \frac{137}{4} \hbar c.$$

Если элементарный электрический заряд, выраженный в единицах  $\hbar c$ , мал, элементарный магнитный заряд в тех же единицах велик. Таким образом, полная симметрия магнитных и электрических полей и источников, которую можно представить себе на основании классической теории, остается иллюзией: даже если магнитные монополи существуют, их свойства, количественно и, по существу, качественно должны существенно отличаться от свойств электрических зарядов, величина которых равна заряду электрона.

Выводы Дирака стимулировали последующие исследования магнитных монополей, как теоретические, так и экспериментальные. Более детальные исследования и достижения современной теории, по-видимому, не смогли видоизменить выводы Дирака сколько-нибудь существенно. В области эксперимента рост энергий частиц, получаемых на ускорителях, и улучшение методики детектирования частиц (включая монополи!) стимулируют работы ряда исследователей по поиску магнитных монополей как в продуктах ядерных столкновений при высоких энергиях на ускорителях, так и в космическом излучении и вторичных продуктах этого излучения, рожденных в атмосфере. Прежде чем описывать попытки и их результаты, имеет смысл обсудить кратко физические свойства и поведение этих гипотетических частиц.

### СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ МОНОПОЛЕЙ

Важнейшей особенностью магнитных монополей, по существу, единственным определенно предсказанным свойством их, является большой магнитный заряд и, следовательно, их очень сильное электромагнитное взаимодействие. В принципе это сильное взаимодействие приводит к большой массе покоя: например, если предположить, что монополь имеет «классический радиус», то наименьшая масса таких

частиц (несущих единичный магнитный заряд  $g$ ) оказывается равной примерно двум с половиной протонным массам ( $2,4 \text{ Гэв}$ ). Обычно считают, что магнитные заряды, подобно электрическим, сохраняются, так что магнитные монополи могут быть рождены только парами (если вообще они могут рождаться),  $+$  и  $-$ , или северный ( $N$ ) и южный ( $S$ ). Кроме того, так как в обычном веществе нет заметного числа монополей (каждой полярности), ясно, что по крайней мере самые легкие монополи должны быть стабильны.

Монополи высоких энергий должны очень сильно ионизовать газ, через который они проходят; в этом отношении они сравнимы с осколками деления. Их ионизация, однако, не зависит от скорости при высоких энергиях; потери энергии составляют около  $12 \text{ Мэв}$  на сантиметр воздуха при нормальных условиях \*). Пройдя примерно  $1 \text{ г/см}^2$  вещества или меньше, монополь, потеряв большую часть своей энергии и испытав многочисленные упругие или квазиупругие рассеяния, достигнет «тепловых» энергий и будет двигаться диффузно, пока на его пути не встретится твердое вещество. Поведение магнитного монополя в твердом веществе гораздо сложнее и неопределеннее, хотя некоторые особенности кажутся ясными. Малкус<sup>6</sup> показал, что одиночный электрон и одиночный монополь не могут существовать в связанном состоянии \*\*). (Фактически связанное состояние возможно при наличии некоего дополнительного электрического поля.)

Однако между сложным атомом и магнитным монополем должны существовать короткодействующие диамагнитные силы отталкивания и дальнедействующие парамагнитные силы притяжения. Последние обязаны своим возникновением электронам незаполненных оболочек. По-видимому, в неферромагнитных веществах монополи Дирака слабо связаны, причем энергия связи оказывается того же порядка или несколько меньше, чем обычная межмолекулярная энергия связи (порядка нескольких эв). Как правило, в случае ферромагнитных материалов ожидаются большие энергии и силы связи. Так как ионизационные потери энергии монополя в веществе порядка  $8 \text{ Гэв}$  на  $1 \text{ г/см}^2$ , даже быстро движущийся монополь должен вскоре остановиться и будет захвачен, если он попадает в достаточно большой объем твердого вещества. Медленные («тепловые») монополи должны быть захвачены вблизи поверхности твердого вещества; следует ожидать, что в жидкости они будут диффундировать через вещество со скоростью, зависящей от вязкости жидкости, температуры и размеров образовавшегося вокруг монополя облака соседних молекул, связанных с ним. Все эти свойства существуют при рассмотрении вопросов детектирования предполагаемых монополей; они изучены рядом исследователей<sup>10,12</sup> в той мере, чтобы можно было правильно истолковывать результаты проводимых экспериментов.

Ядерные взаимодействия гипотетических монополей совсем не известны: связанные состояния монополя с ядром возможны, хотя, по-видимому, маловероятны. Ожидают (или надеются!), что в ядерных столкновениях при достаточно большой энергии должны рождаться пары монополей ( $N + S$ ), однако сечение такого процесса рождения может быть оценено лишь приблизительно, да и то с большим трудом. Из-за большого электромагнитного взаимодействия (большая величина  $g$ ) можно предположить возможность фоторождения монополей. Но именно из-за того, что электромагнитное взаимодействие так сильно, расчеты, проведенные обычным путем, не могут дать надежных результатов, так что даже в этом наиболее определенном случае теоретические предсказания помогают лишь грубо сориентироваться при постановке экспериментов и истолковании их результатов<sup>12</sup>.

Задавшись определенным значением массы монополя, легко, конечно, рассчитать минимальную энергию частиц, необходимую для рождения пар монополей, хотя бы в протон-протонных соударениях. Так, например, с помощью протонов  $30 \text{ Гэв}$  могут быть рождены монополи с максимальной массой  $2,9 \text{ Гэв}$ , т. е. несколько большей, чем теоретически «предсказанная» величина  $2,4 \text{ Гэв}$ . Для рождения пары монополей с массой  $2,4 \text{ Гэв}$  в поле одиночного нуклона необходимо, чтобы энергия фотона составляла

\*) Б. М. Болотовский и В. С. Воронин показали<sup>13</sup>, что, вообще говоря, потери монополя могут быть несколько меньше.

С точки зрения поиска монополей представляет интерес работа А. А. Коломенского<sup>14</sup>, который показал, что при прохождении через плотное вещество монополи должны создавать сильное черенковское излучение. Потери монополя на черенковское излучение примерно в 4700 раз больше, чем у электрона, летящего с той же скоростью. Это обстоятельство можно использовать (но никто не использовал) для детектирования монополей при их поиске.

\*\*) Автор допустил здесь ошибку. Систему монополь — электрон исследовал И. Е. Тамм еще в 1931 г. и показал, что в ней отсутствуют связанные состояния. Работа Малкуса посвящена исследованию связанных состояний монополя в поле атома. Показано, что для данной системы такие состояния возможны. При довольно грубых предположениях рассчитана энергия связи монополя в поле атома. Она оказалась порядка нескольких электрон-вольт.

17 Гэв, но тот же фотон может родить пару монополей, каждый с массой 5,6 Гэв, если имеет место когерентный процесс на всем сложном ядре углерода. Все эти энергии в настоящее время достижимы на ускорителях, и конечно, частицы таких энергий имеются и рождаются в космическом излучении.

Возможно, наиболее заметной особенностью монополей с большим зарядом  $g$  является ускорение их в магнитном поле. В однородном поле  $H$  гс ускорение монополей соответствует приросту (или потере) энергии  $20H$  кэв/см! Из-за таких больших сил магнитные поля, которые находятся в распоряжении экспериментаторов, могут быть использованы (и используются во всех экспериментах) для того, чтобы вытянуть монополи из твердых и жидких веществ, в которых они, по предположению, должны быть связаны. Например, были приложены поля около 600 гс на поверхности жидкости (масла) и более сильные (импульсные) поля порядка  $50 \div 100$  кгс на поверхности ферромагнитных материалов; из оценок вытекало, что такие поля достаточны для извлечения монополей, застрявших вблизи поверхности материала, или, в случае жидкости, монополей, которые движутся к поверхности из объема жидкости под влиянием магнитного поля.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОИСК МОНОПОЛЕЙ

Первый поисковый эксперимент (подобно всем последующим,— безрезультатный) был проведен Малкусом в 1951 г.<sup>6</sup> Оборудование было предельно простое. Соленоид, по которому протекал ток, был установлен вертикально, так что любой магнитный монополи, присутствующий или же рожденный в космических лучах и продиффундировавший через атмосферу, должен был бы втянуться магнитным полем соленоида внутрь вакуумной трубы, занимающей внутри соленоида всю его длину. В конце трубы были расположены подходящие фотографические эмульсии, в которых легко могли бы наблюдаться следы ускоренных монополей. Если монополи космического происхождения существуют и находятся после остановки в сильно связанном состоянии в земных породах, то поток монополей, равный  $1 \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$ , должен был бы свести на нет земной магнетизм примерно за месяц. Предположив поток постоянным в течение  $10^9$  лет, получим, что он меньше  $10^{-10} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$ . С другой стороны, слабо связанные и, следовательно, легко диффундирующие монополи не должны бы создавать столь драматические эффекты, но должны легко регистрироваться в используемом приборе. Отсутствие наблюдаемых монополей в эксперименте указывает, что их поток в космических лучах меньше  $10^{-10} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$  без всяких ограничений, о которых шла речь выше. Если монополи рождаются космическими частицами достаточно больших энергий в атмосфере, верхний предел сечения этого процесса может быть оценен величиной около  $3 \cdot 10^{-35} \text{ см}^2$ .

Гораздо более низкие пределы были получены позднее на ускорителях. Методы измерений имеют много общего с только что описанными. Либо монополи попадали в фотоэмульсию или в другой детектор непосредственно из точки, где они должны рождаться (т. е. оттуда, где пучок высокоэнергичных протонов падает на некоторую подходящую мишень), либо «рожденные» монополи накапливались в каком-либо материале, а затем извлекались из него сильным магнитным полем, которое сообщало монополям соответствующую энергию, так что их регистрация не представляла проблемы.

Первый эксперимент такого рода был проведен Баднером и Исбеллом в 1959 г.<sup>7</sup> Они использовали протоны 7 Гэв на беватроне в Беркли. Для извлечения монополей, «накопленных» в полиэтилене, применялось импульсное магнитное поле до 200 кгс. Вследствие того, что энергия была сравнительно невелика, могли быть рождены монополи лишь с массой до 1 Гэв. Для этих монополей было показано, что сечение рождения (протон-протонное соударение) меньше или равно  $10^{-40} \text{ см}^2$ , если энергия связи монополей велика ( $3-20$  эв), а для энергий связи меньше 3 эв предел сечения несколько выше ( $\leq 10^{-37}$ ), так как в этом случае нет «накопления» монополей.

Эксперименты с протонами более высоких энергий (27—30 Гэв) были проведены в последние годы на ускорителях Брукхейвенской национальной лаборатории в в Нью-Йорке и ЦЕРНа в Женеве.

Использованные методы во всех исследованиях очень сходны. В некоторых экспериментах монополи застревали бы в твердых материалах и впоследствии извлекались бы с помощью сильных магнитных полей: регистрация возможна даже в том случае, если энергия связи в твердом веществе велика.

В одном эксперименте<sup>10</sup> монополи оказывались бы связанными в жидкости (масле). Затем они вытягивались бы через поверхность и ускорялись бы в вакууме с помощью соответствующих магнитных полей. Эти поля служили также для фокусировки частиц на чувствительную область детектора. В некоторых экспериментах должны были бы детектироваться пары монополей (если бы они были), рожденные вторичным  $\gamma$ -излучением, так же как и непосредственно в протонно-ядерных соударениях первичным пучком. Ни в одном случае не было зарегистрировано ни одного факта рождения

монополю, так что могли быть оценены лишь верхние пределы сечения их рождения. Полученные величины приведены в таблице.

$\sigma$ (протон— нуклон), $\text{см}^2$	Пределы массы монополя, $\text{эв}$	Магнитный заряд, $q$	Другие особенности	Лите- ратура
$<10^{-40}$	1	1	Энергия связи в полиэтилене между 3 и 20 $\text{эв}$	7
$<10^{-39}$	2,8	$0,3 \div 4$		8
несколько $\times 10^{-40}$	$<2,94$	1	Энергия связи (в различных материалах) больше 0,6 $\text{эв}$ и мень- ше $\sim 40 \text{ эв}$	9
$1,5 \cdot 10^{-40}$	$<2,9$	1	Метод нечувствителен, если существует довольно специфиче- ская и невероятно большая энер- гия связи	10
$10^{-36}$	$<2,9$		$\sigma$ для когерентного фоторожде- ния	10
$10^{-34}$			$\sigma$ для фоторождения на нукло- нах	10

Для сравнения одна из теоретических оценок <sup>12</sup> сечения фоторождения монополей на нуклонах дает величину в области  $10^{-32}$ — $10^{-34} \text{ см}^2$  для масс монополей порядка 2—3-х протонных масс.

В самой последней опубликованной работе <sup>12</sup> с помощью метода, предложенного ранее Гото <sup>11</sup>, была предпринята попытка найти частицы, уловленные метеоритами, а также магнитными породами \*), выходящими на земную поверхность. Результаты этих исследований дополняют работы, выполненные на ускорителях. Последние дают достаточно строгое доказательство отсутствия монополей с массой меньше 2,9  $G\text{эв}$ , но, конечно, ничего не говорят о возможности существования монополей с большей массой. Доказать что-либо в этом случае можно, лишь исследуя процессы, протекающие в космических лучах. Любые монополи, вошедшие в атмосферу, кроме тех, которые имеют сверхвысокую энергию, замедляются до определенной дрейфовой скорости в магнитном поле Земли. Если они достигнут Земли вблизи области с ярко выраженными ферромагнитными свойствами, концентрация магнитного поля должна помочь собрать монополи в ферромагнитном материале, где они будут накапливаться. Были оценены силы, действующие на монополь, связанный вблизи поверхности ферромагнитного вещества <sup>12</sup>. Их величина была положена в основу расчета магнитного поля, необходимого для извлечения таким образом связанных монополей. Для монополей с единичным зарядом  $g$  это поле порядка  $50 \div 60 \text{ кэс}$  для железа и около 17  $\text{кэс}$  для магнетита. Из-за эффектов насыщения эти цифры мало меняются, если монополь имеет заряд больше  $g$ , например 2 $g$ .

В эксперименте использовался мощный импульсный соленоид, устанавливаемый непосредственно в горах на поверхности скал (выходы магнетитовых пород в горах Адирондак, штат Нью-Йорк, США). Максимальное приложенное поле составляло 170  $\text{кэс}$  в центре соленоида и 60  $\text{кэс}$  на поверхности пород. Если бы монополи были в породе, они легко извлекались бы и ускорялись в магнитном поле, оставляя след в фотоэмульсионном детекторе. В экспериментах с метеоритом, по существу, исполь-

\*) Одновременно с Гото подобная работа была выполнена в ФИАНе <sup>15</sup>. В качестве мишени был взят железный Сихотэ-Алиньский метеорит, который облучался космическими лучами около  $5 \cdot 10^8$  лет. Для извлечения монополей было предложено испарить метеорит. Вместе с молекулами газа в газообразное состояние должны были бы перейти и монополи.

В дальнейшем испарение было заменено хлорированием железа и испарением хлоридов. Для того чтобы освободить монополи от комплекса связанных с ними парамагнитных молекул, ускорение производилось в атмосфере разреженного диамагнитного газа. Комплекс при столкновениях с молекулами газа нагревался и рассыпался. Свободные ускоренные монополи должны были бы попасть в сцинтилляционный счетчик. Как и в предыдущих работах, монополей зарегистрировано не было. Получен предел сечения рождения в протон-нуклонных столкновениях порядка  $2 \cdot 10^{-40}$  для монополей с массой около трех протонных масс.

Полученный результат дает также информацию о пределе сечения рождения более тяжелых монополей.

зовалась та же самая система. Малые образцы могли быть введены непосредственно внутрь соленоида ( $\sim 100$  кгс).

Для объяснения результатов необходимо оценить время, в течение которого скалы (или метеорит) облучались потоком гипотетических монополей. Исходя из скорости эрозии поверхности скал, в этом случае была взята цифра 300 лет (для метеорита время облучения примерно оценена величиной около  $5 \cdot 10^8$  лет). Отрицательные результаты, полученные в исследованиях на скалах, подтверждают данные наблюдений, выполненных на ускорителях: исследования Гото менее чувствительны, если масса монополя около  $2,5$  Гэв, но расширяют диапазон «запрещенных» масс вплоть до области  $10$  Гэв. Существование монополей с массой около  $10$  Гэв или еще более тяжелых пока не исключается никакими законченными экспериментами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ни в одном из приведенных экспериментов не найдено каких-либо следов существования магнитного монополя типа, предсказанного Дираком. Конечно, и к а к о й эксперимент вообще не может о п р о в е р г н у т ь окончательно их существование. По-видимому, наиболее слабым местом большинства экспериментов и относящихся к ним рассуждений является предположение о массе монополя. Едва ли можно удивляться, если масса окажется по порядку величины, скажем, большей, чем значение, даваемое простыми арифметическими прикидками, а в этом случае все поисковые эксперименты действительно должны приводить к отрицательным результатам. (По-видимому, с л и ш к о м м а л о е значение массы монополей невозможно не только по результатам опытов, но и по теоретическим соображениям; например, если бы существовали монополи с массой порядка массы  $\mu$ -мезона, «виртуальное» рождение пар таких монополей должно бы войти в расчеты таких величин как лэмбовский сдвиг и магнитный момент электрона и мюона. Имеющееся согласие теории и эксперимента (без учета монопольных пар) говорит против существования таких монополей.)

Дирак в заключение своей работы заметил, что поскольку существование магнитных монополей теоретически возможно, «было бы удивительно, если бы Природа не воспользовалась такой возможностью». Нет нужды говорить, что отсутствие монополей (а будущие эксперименты могут подтвердить и высказанные Дираком предположения) не будет первым сюрпризом\*), преподнесенным противоречивостью Природы. Вывод, что простое сосуществование магнитных монополей и электрических зарядов, которое достаточно для квантования обеих величин, окажется неприемлемым только из-за того, что оно не согласуется с экспериментальными наблюдениями, может вызвать разочарование. (С точки зрения «экономии» в Природе существование только о д н о г о -единственного монополя было бы достаточно для квантования всех электрических зарядов: поиск тогда был бы поиском именно э т о г о магнитного монополя без каких-либо надежд на успех.) Если будущие исследования на самом деле снова подтвердят отсутствие магнитных монополей, то вряд ли можно и дальше бранить Природу за ее безрассудное пренебрежение столь превосходной возможностью. В самом деле, отсутствие монополей может повести к выводам куда более важным, чем те, которые были бы продемонстрированы их существованием. Несомненно, что если бы можно было надежно показать, что существование магнитных монополей исключено, необходимо было бы снова пересмотреть все аргументы, касающиеся симметрии электрических и магнитных явлений, на которые опирались теоретические выводы о возможности существования монополей. По-видимому, такая симметрия скорей иллюзорна, чем реальна.

С. Дэвис

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. C. M a x w e l l, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., Pt. 3, Art. 373 (1891).
2. Там же, Art. 377.
3. Там же, Art. 380.
4. Там же, Art. 833.
5. P. A. M. D i r a c, Proc. Roy. Soc. A133, 60 (1931).
6. W. V. R. M a l k u s, Phys. Rev. 83, 899 (1951).
7. H. B r a d n e r, W. M. I s b e l l, Phys. Rev. 114, 603 (1959).

\*) Отсутствие монополей не противоречит теории Дирака, так как в соотношении

$$g^2 = \frac{n^2}{4} \cdot 137 \hbar c$$

(стр. 756) целое число  $n$  может равняться нулю.

8. M. Fidencaro, G. Finocchiaro, G. Giacomelli, Nuovo cimento **22**, 657 (1961).
9. E. Amaldi, G. Baroni, H. Bradner, L. Hoffman, A. Manfredini, G. Vanderhaege, H. G. De Carvalho, Proc. Aix-en-Provence Intern. Conference on Elementary Particles, vol. 1, 1961, стр. 195.
10. E. M. Purcell, G. B. Colling, T. Fujii, J. Hornbostel, F. Turkot, Phys. Rev. **129**, 2326 (1963).
11. E. Goto, J. Phys. Soc. Japan, **10**, 1413 (1958).
12. E. Goto, H. Kolm, K. W. Ford, Preprint (1963).
- 13\*. Б. М. Болотовский и В. С. Воронин, Изв. вузов (Радиофизика) **5**, 1033 (1962)\*).
- 14\*. А. А. Коломенский, Вестн. МГУ **3**, № 6 (1962).
- 15\*. I. Tamm, Zs. Phys. **71**, 141 (1934).
- 16\*. V. A. Petukhov, M. N. Yakimenko, Nucl. Phys. **49**, 87 (1963).

## ДОПОЛНЕНИЕ К СТАТЬЕ С. ДЕВОНСА «ПОИСКИ МАГНИТНОГО МОНОПОЛЯ»

Статья Девонса дает представление об одной из проблем современной физики, не решенной окончательно до настоящего времени.

Если справедливо предсказание Дирака о том, что существует элементарный магнитный заряд, величина которого примерно в семьдесят раз превышает величину элементарного электрического заряда, то это должна быть очень «заметная» частица. Ионизационные потери магнитного заряда столь большой величины должны быть на три порядка больше, чем у электрического заряда. Если бы магнитный заряд хоть раз попал в эмульсию ядерной фотопластинки, его трек невозможно было бы не заметить. Потери энергии магнитного заряда на излучение Вавилова — Черенкова, как показано А. А. Коломенским<sup>1</sup>, также должны быть на несколько порядков больше, чем потери энергии элементарного электрического заряда. Поэтому трудно было бы не зарегистрировать магнитный заряд, попади он в черенковский счетчик. О. С. Мергелян<sup>2</sup> исследовал еще один чисто классический радиационный эффект — переходное излучение магнитного заряда, падающего на границу с преломляющей средой. В этом случае энергия излучения также пропорциональна квадрату магнитного заряда, т. е. излучение должно быть велико. Добавим еще, что в двух последних случаях (излучение Вавилова — Черенкова и переходное излучение) поляризация излучаемых волн резко отличается от той, какую дает электрический заряд. Таким образом, большая предсказываемая величина магнитного заряда позволяет предложить ряд эффектов, по которым этот заряд может быть отделен от электрического и зарегистрирован. Однако магнитный заряд до сего времени не обнаружен, несмотря на ряд экспериментов, проведенных в самое последнее время с использованием всего арсенала средств современной физики. Одним из объяснений этого факта может явиться утверждение, что магнитного заряда не существует в природе. Однако пока такое утверждение не сформулировано в виде запрета, вытекающего из физических законов, оно не является доказательным; во всяком случае оно является не более доказательным, чем противоположное утверждение о существовании магнитного заряда. Запрета же на существование магнитного заряда до сих пор не сформулировано, хотя многие физики и считают, что магнитный заряд не существует. Другое объяснение неудачных опытов по обнаружению магнитного заряда может состоять в том, что в силу тех или иных причин магнитные заряды очень редки в природе.

Эти два объяснения — или магнитных зарядов нет, или их очень мало — не исчерпывают, однако, всех возможностей. Может оказаться, что сами теоретические представления о магнитном заряде, существующие в настоящее время, далеки от завершенности. В таком случае отрицательный результат опытов по обнаружению магнитного заряда находит свое естественное объяснение в том, что физики ищут не там, где надо, и не то, что существует на самом деле. До сих пор, например, не ясно, какими свойствами должен обладать четырехмерный ток  $J_\mu$ , связанный с магнитным зарядом. Такой ток может быть либо вектором, либо псевдовектором. Если  $J_\mu$  — псевдовектор, то четность поля магнитного заряда будет такой же, как и четность поля электрического заряда. Если же  $J_\mu$  — вектор, то четности полей электрического и магнитного зарядов противоположны. Очевидно, если  $J_\mu$  — псевдовектор, то четность электромагнитного поля сохраняется, в противном случае четность не сохраняется. Как указал Л. М. Томильчик<sup>3</sup>, последняя возможность может, естественно, объяснить экспериментальный факт отсутствия магнитных зарядов, если предположить, что четность сохраняется в электромагнитных взаимодействиях. Сохранение четности в электромагнитных взаимодействиях не является абсолютным, поэтому из предположения

\*) Литература, помеченная звездочкой, добавлена переводчиком.

о векторном характере магнитного тока не вытекает абсолютного запрета на существование магнитных зарядов. Степень несохранения четности в электромагнитных взаимодействиях можно оценить независимым путем, как это сделано, например, М. Саксом <sup>4</sup>. Это позволяет установить верхний предел сечений для процессов, вызванных взаимодействием магнитных зарядов с электромагнитным полем. Оценка показывает, что константа связи магнитного заряда с электромагнитным полем должна уменьшиться не менее чем в  $10^{14}$  раз по сравнению с дираковской величиной  $g$  (если  $J_\mu$  — вектор и если справедливы оценки М. Сакса). Таким образом, хотя предположение о векторном характере  $J_\mu$  и не накладывает абсолютного запрета на существование магнитного заряда, оно легко объясняет отрицательные результаты всех попыток обнаружить монополю на опыте.

Отметим еще вопрос о симметрии уравнений Максвелла по отношению к электрическим и магнитным зарядам. Сам факт существования этой симметрии долгое время служил аргументом в пользу существования магнитных зарядов. Однако эту симметрию не удастся сохранить при формулировке вариационного принципа, из которого получались бы одновременно уравнения поля и уравнения движения частиц при одновременном «сосуществовании» электрического и магнитного зарядов. Формулируя вариационный принцип, П. А. М. Дирак <sup>5</sup> ввел для описания магнитного заряда некоторую нефизическую величину, в которой нет необходимости, если речь идет об электрическом заряде. Такого вариационного принципа, в котором электрический и магнитный заряды были бы равноправны, до сих пор не сформулировано. Некоторые попытки формулировки такого принципа <sup>6</sup> скорее подчеркивают трудность задачи, чем служат ее разрешению. Эта трудность также может указывать на неполноту наших представлений о магнитном заряде. Возможно, что отсюда также следует некоторый запрет на существование монополей.

*Б. М. Болотовский*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. См. <sup>14\*</sup> в статье С. Девонса.
2. О. С. Мергелян, ДАН Арм. ССР 36 (1), 17 (1963).
3. Л. М. Томильчик, ЖЭТФ 44, 160 (1963).
4. M. Sacks, Ann. Phys. 6, 244 (1959).
5. P. A. M. Dirac, Phys. Rev. 74, 817 (1948).
6. Ю. И. Окулов, Геомагн. и аэронавигация 4, 1002 (1964).