

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

СВЕРХТЯЖЕЛЫЕ МАГНИТНЫЕ МОНОПОЛИ *)*Р. А. Карриган (мл.), У. П. Трауэр*

Существование изолированных северного и южного магнитных полюсов предсказывается теорией, но они никогда не наблюдались. Новая теория может объяснить, почему такие частицы, по-видимому, должны быть редкими, медленно движущимися и слишком тяжелыми.

В 1269 г. Петрус Перегринус, ранний французский исследователь магнитных свойств материалов, описал ориентацию кусочков железа у поверхности различных магнитных руд. Он заметил, что линии сил вокруг такого естественного магнита неизменно сосредоточиваются в двух точках подобно тому, как меридианы Земли сходятся в противоположных географических полюсах. Аналогия привела его к тому, чтобы назвать эти две точки северным и южным полюсами магнита. Последующие наблюдения подтвердили, что все обычные магнитные объекты имеют парные области противоположной полярности, т. е. все магниты являются диполями.

Легко представить себе изолированный северный или южный магнитный полюс. Предположение о возможном существовании таких магнитных монополей продолжало жить в течение столетий, но не было никаких фактов, указывающих на их существование. Интерес к этой идее возрос в 1931 г., когда английский физик П. А. М. Дирак показал, что важные наблюдаемые свойства электрически заряженных частиц можно было бы объяснить, если предположить существование элементарных частиц, обладающих магнитным зарядом. Предложение Дирака стимулировало шквал теоретических работ об ожидаемых свойствах гипотетических монополей, и было поставлено несколько экспериментов с целью их регистрации. Ни одна из этих попыток не была успешной.

Недавние усилия построить единую теорию фундаментальных сил природы вновь привлекли внимание к отсутствию магнитных монополей. Одна из предложенных теорий требует, чтобы монополи создавались в первые мгновения грандиозного взрыва, в котором предположительно была создана Вселенная. Эта теория предлагает объяснение того, как монополи могли бы существовать, не будучи обнаруженными ни в одном из выполненных до сих пор экспериментов: они должны быть чрезвычайно массивными и поэтому должны иметь свойства, резко отличающиеся от свойств обычных частиц. В настоящее время готовятся несколько новых экспери-

*) Carrigan R. A., Jr., Trower W. P. Superheavy Magnetic Monopoles. — Scientific American, April 1982, v. 246, pp. 91—97, 99. — Перевод И. В. Андреева.

Р. А. Карриган (мл.) — помощник заведующего исследовательского отдела Национальной лаборатории ускорителей им. Э. Ферми, У. П. Трауэр — профессор Политехнического института и Университета шт. Виргиния, США.

© Scientific American, Inc., 1982.

© Перевод на русский язык,
Издательство «Наука». Главная редакция
физико-математической литературы.
«Успехи физических наук», 1983.

ментов с целью поиска сверхтяжелых магнитных монополей среди частиц, оставшихся от «большого взрыва».

Биполярную природу обычных магнитных материалов легко продемонстрировать. Если железные опилки насыпать на лист бумаги, помещенный над большим магнитом, то они расположатся вдоль плавных дуг, идущих от одного конца магнита к другому. Эти дуги представляют линии магнитного поля между полюсами. Там, где линии расположены близко одна к другой, магнитное поле сильное; где они далеко одна от другой — магнитное поле слабо. Разрезание магнита пополам не изолирует полюса; вместо этого возникают два магнитных стержня меньшего размера. (Можно

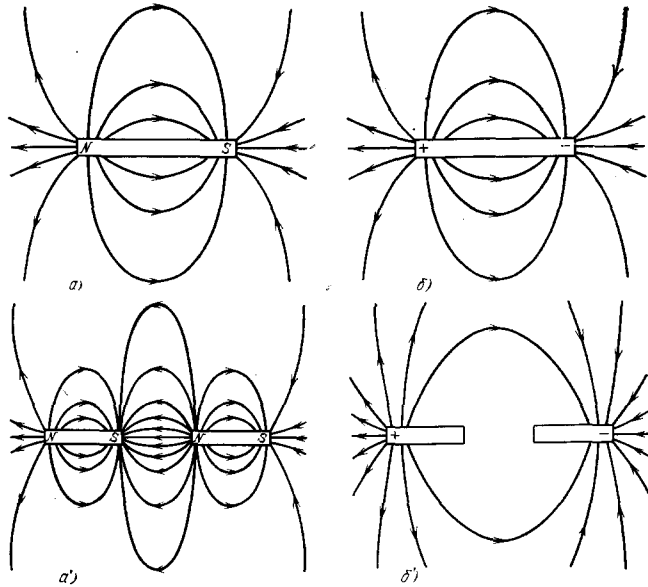


Рис. 1. Дипольные поля создаются стержневым магнитом (а) и аналогичным устройством, состоящим из диэлектрического стержня, на концы которого помещены электрические заряды противоположного знака (б).

Когда магнит разрезается пополам, возникают два диполя меньшего размера (а'). Когда электрический аналог разрезается пополам, поле остается биполярным, так как электрические заряды, создающие поле, остаются на своих местах (б').

воспроизвести поле, окружающее изолированный магнитный полюс, поставив магнит на торец так, чтобы один полюс находился прямо под бумагой, однако в этом случае линии сил, связывающих полюса, просто не заметны в плоскости бумаги.)

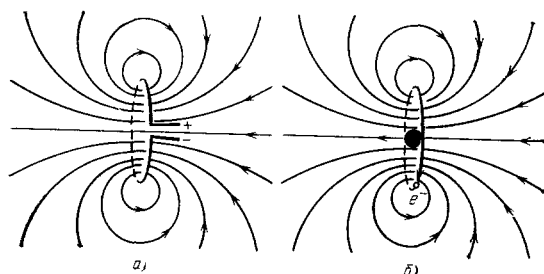
Аналогичный электрический диполь можно получить, поместив электрические заряды противоположного знака на концы диэлектрического стержня. Когда электрический диполь разрезается, возникают два изолированных электрических полюса. Причина состоит в том, что каждый электрический полюс представляет собой набор отдельных электрически заряженных частиц — отрицательно заряженных электронов на одном конце и положительных ионов на другом. Когда полюса разделяются, это не сказывается на совокупности зарядов. Возможность разделения электрических, но не магнитных полюсов — это одно из фундаментальных различий между электричеством и магнетизмом (рис. 1).

Объяснение этого различия существует уже более столетия. Магнетизм обычного объекта, такого как магнитный стержень, возникает не из-за наличия магнитно заряженных частиц, а благодаря замкнутым элект-

рическим токам (с точки зрения классической физики). Например, магнитное поле соленоида (цилиндрического электромагнита) создается электрическим током, циркулирующим в катушке. На микроскопическом уровне подобные токи возникают при циркуляции электронов вокруг атомных

Рис. 2. Электрический заряд, циркулирующий в проволочной петле, создает дипольное магнитное поле, ось которого составляет прямой угол с плоскостью петли (а).

Движение связанных электронов вокруг ядра атома образует такую же петлю тока, наделяя атом соответствующим дипольным полем (б). Показан только один электрон атома.



ядер (рис. 2). В немагнитных материалах атомы, а следовательно, и токи ориентированы случайно. Если же атомы каким-то образом выстроены, в материале появляется намагниченность. В постоянном магните выстроены

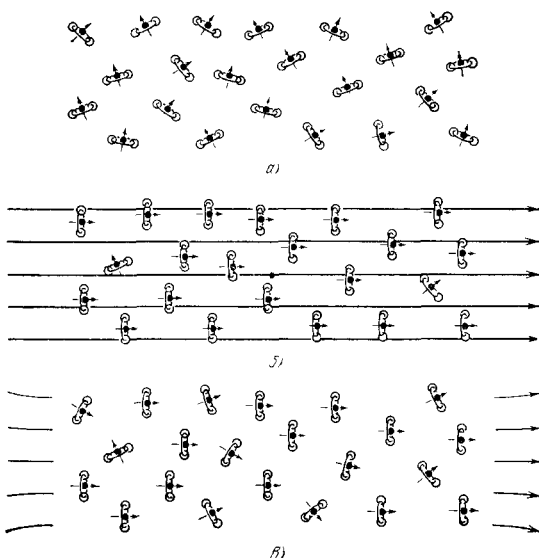


Рис. 3. Атомные магниты в обычном немагнитном образце ориентированы случайно (а).

При наложении внешнего магнитного поля атомы могут выстраиваться (б). В отсутствие внешнего поля (в) в некоторых материалах многие из атомов могут оставаться выстроенными, образуя постоянный магнит. Разрезание такого магнита на две части не сказывается на атомных токах и, следовательно, не приводит к изоляции магнитных полюсов. (В случае реального магнетика надо говорить об ориентации не отдельных атомов, а магнитных доменов.)

ность атомов имеется и в отсутствие ориентирующей силы (рис. 3). Разрезание магнита пополам не может привести к изоляции полюсов, так как каждый атом представляет собой диполь.

Это фундаментальное различие между электричеством и магнетизмом лежит в основе теории электромагнитных явлений, сформулированной Джеймсом Клерком Максвеллом в 1864 г. В теории Максвелла возможность существования изолированных магнитных зарядов отвергалась, так как они никогда не наблюдались. Вместо этого весь магнетизм объяснялся с помощью движущихся электрических зарядов. За последнее столетие теория Максвелла была подвергнута многочисленным экспериментальным проверкам и никаких недостатков не было обнаружено. Этот факт сам по себе сильно ограничивает те ситуации, в которых можно найти монополи.



Вклад Дирака в рассматриваемую проблему возник в результате его усилий объяснить квантование электрического заряда, т. е. факт, что наблюдаются только электрические заряды, кратные заряду электрона и протона. Дирак показал, что если изолированный магнитный полюс существует где-либо во Вселенной, то электрический заряд должен быть квантованным. До недавнего времени гипотеза магнитного монополя Дирака была единственным объяснением наблюдаемой квантованности электрического заряда. (Существование частиц, называемых кварками, с зарядами, равными одной третьей и двум третьим долям заряда электрона, не изменило бы вывода Дирака. Большинство физиков думает, что кварки должны постоянно удерживаться внутри частиц, которые всегда имеют целочисленные значения заряда.)

Аргументация предложения Дирака может быть изложена без использования математики следующим образом. Атом, который был возбужден до состояния с более высокой энергией, стремится вернуться в состояние с меньшей энергией, одновременно испуская избыток энергии в виде фотона, или кванта электромагнитного излучения. Фотон не только забирает энергию от атома, но и уносит часть внутреннего углового момента атома. Следовательно, электромагнитное поле, например, в виде пучка света, обладает некоторым угловым моментом.

Величина углового момента электромагнитного поля находится прямым вычислением. Более 80 лет назад Дж. Дж. Томсон в учебнике по электричеству и магнетизму предложил эту проблему в качестве упражнения для студентов. Определим угловой момент электромагнитно связанной системы, состоящей из одного электрического и одного магнитного заряда. Решение показывает, что угловой момент этой системы зависит от произведения электрического и магнитного зарядов и не зависит от расстояния между ними. Другими словами, электрический и магнитный заряды могут находиться на расстоянии, равном размеру атома или размеру Вселенной; в обоих случаях угловой момент электромагнитного поля одинаков.

Известно далее, что угловой момент любой системы такого рода квантован: наименьшее значение углового момента в природе равно величине, называемой постоянной Планка, а все большие значения кратны этой величине. Если принять, что угловой момент системы равен некоторому целому числу, умноженному на постоянную Планка, а магнитный заряд имеет определенное значение, то отсюда следует, что электрический заряд также фиксирован. Таким образом Дирак смог математически показать, что если существует магнитный заряд, то электрический заряд должен быть квантован.

Теория Дирака содержит любопытную математическую конструкцию, которую он назвал струной. Струна Дирака напоминает бесконечно длинный соленоид с магнитным монополем на одном конце; другой конец струны уходит бесконечно далеко в пространство. Струна препятствует детальным расчетам, основанным на модели Дирака. Однако недавнее развитие математической физики позволило избавиться монополю от его доставляющего беспокойство хвоста.

Условие квантования Дирака означает, что монополю обладает рядом определенных свойств. Например, для соответствия с наблюдаемым квантованием углового момента электромагнитного поля минимальная единица магнитного заряда должна быть примерно в 70 раз больше, чем соответствующая единица электрического заряда. Согласно другому предсказанию Дирака каждая частица, включая монополю, должна иметь соответ-

ствующую античастицу. Подобно тому, как электрон имеет свою античастицу (позитрон, открытый в 1932 г. спустя четыре года после того, как Дирак предсказал его существование), ожидается, что магнитный монополю

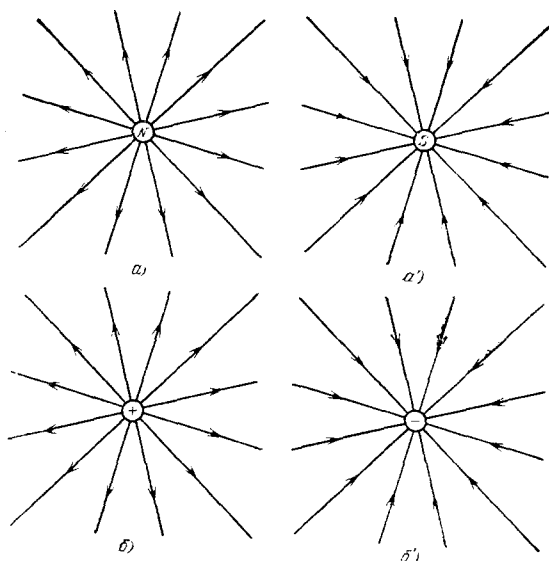


Рис. 4. Симметрия между магнитными монополями и электрически заряженными частицами, такими, как протон, распространяется в теории также и на соответствующие им античастицы.

Северный монополю (а) будет иметь в качестве своей античастицы южный монополю (а'), подобно тому как протон (б) имеет в качестве своей античастицы антипротон (б').

составляет пару с магнитным антимониполюм (рис. 4). Придерживаясь произвольной терминологии Перегринуса, частицы такой пары называют северным монополюм и южным монополюм. Теория Дирака ничего не говорит о массе или размерах магнитных монополей или об их распространенности во Вселенной.

□

Ряд интересных эффектов возникает, когда максвелловские уравнения электромагнетизма дополнены, чтобы включить магнитные заряды и магнитные токи. Например, когда скорость движущегося электрического заряда приближается к скорости света, его свойства должны все больше напоминать свойства магнитного заряда; аналогично, движущийся магнитный монополюм должен приобретать свойства электрического заряда при скорости, приближающейся к скорости света. Эти преобразования, которые следуют из специальной теории относительности Эйнштейна, были подтверждены экспериментально для движущихся электрических зарядов, но, разумеется, не для движущихся магнитных зарядов.

Движущийся электрический заряд может терять энергию на ионизацию вещества (т. е. на выбивание электронов из атомов). Обычно потери энергии составляют несколько миллионов электрон-вольт на каждый сантиметр пути в веществе. Энергия, необходимая для ионизации атома, равна нескольким десяткам электрон-вольт, поэтому движущийся электрический заряд может ионизовать сотни тысяч атомов на сантиметре пути.

Из-за гораздо большей величины заряда магнитного монополя он должен ионизовать атомы примерно в 10 000 раз более сильно. Поэтому магнитный монополюм, проходящий через фотографическую эмульсию такого типа, который применяется физиками для детектирования электрически заряженных частиц, должен оставлять трек в тысячи раз более темный, чем трек, оставляемый электрическим зарядом, движущимся с той же скоростью. Так как монополюм должен терять энергию в результате про-

цесса ионизации столь быстро, он должен замедляться гораздо быстрее при входе в вещество, чем электрически заряженная частица, имеющая ту же кинетическую энергию.

Подобно тому как электрическое поле может ускорять электрически заряженную частицу, так и магнитное поле могло бы ускорять магнитный монополю. Из-за гораздо большей силы полюса магнитной частицы она приобретала бы энергию в магнитном поле гораздо быстрее, чем это делает электрически заряженная частица в эквивалентном электрическом поле.

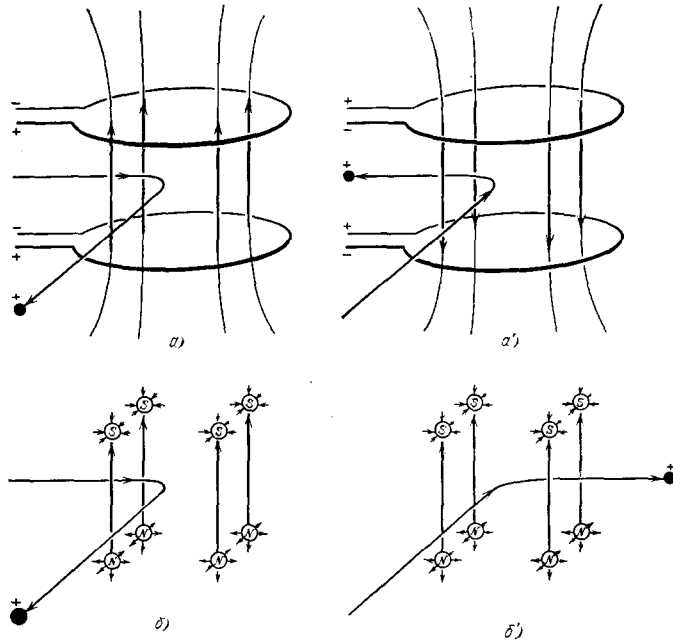


Рис. 5. Обращение времени приводило бы к специфическому результату для электрически заряженной частицы, движущейся в магнитном поле, создаваемом магнитным монополюм.

На рис. а) показан протон, движущийся по криволинейному пути в магнитном поле, созданном электрическими токами, текущими в двух проводочных кольцах. При обращении направления времени (a') и токи (а следовательно, и магнитное поле), и движение протона изменили бы направление на обратное. Однако траектория протона осталась бы инвариантной: частица просто прошла бы тот же путь в обратном направлении. На рис. б) показан протон, движущийся по такому же пути в магнитном поле, созданном идеально выстроенными северными и южными монополями. В этом случае обращение времени оставляет магнитное поле неизменным (b'). Хотя протон изменил бы направление движения, он не возвратился бы по пройденному пути; этот результат означал бы нарушение принципа инвариантности при обращении времени.

Магнитный монополюль, прошедший через сверхпроводящую катушку длиной в один метр, приобрел бы больше энергии, чем получает протон в крупнейшем из до сих пор построенных ускорителей частиц.

Физика магнитных монополей имеет другую любопытную черту, которая проявляется, если представить, что направление хода времени может быть обращено. В мысленном эксперименте, предложенном Робертом К. Адейром из Йельского университета, протон движется в магнитном поле, искривляющем его траекторию. В одном случае магнитное поле создается электрическим током катушки. При обращении времени происходит обращение движения как протона, так и электронов, создающих ток; следовательно, магнитное поле также меняет направление. При этом протон описывает ту же траекторию в обратном направлении; как говорят, траектория протона инвариантна относительно обращения времени.

Предположим теперь, что магнитное поле не создается электрическим током, а возникает из-за наличия магнитного монополя. Обращение времени не изменяет полярность монополя и, следовательно, оставляет направление магнитного поля неизменным. Как и раньше, направление движения протона обращается, но он не повторяет свою траекторию. Короче говоря, траектория протона в поле монополя зависит от направления времени — эффект, который нарушает принцип инвариантности относительно обращения времени (рис. 5).

Предсказанное поведение системы с магнитным монополем при обращении времени в течение многих лет рассматривалось как серьезный аргумент против существования монополей. Однако в 1964 г. Вэл Л. Фитч, Джеймс В. Кроини и их коллеги из Принстонского университета в эксперименте, сделанном в Брукхэйвенской Национальной лаборатории, открыли эффект, подобный нарушению инвариантности при обращении времени в распаде частиц, называемых нейтральными каонами. Полное теоретическое значение этого открытия только недавно начало осознаваться. С ростом этого понимания отпал ряд возражений против идеи магнитных монополей.

□

Каково состояние экспериментальных исследований, которые могли бы доказать существование магнитных монополей, обладающих столь экзотическими свойствами? Вскоре после того, как каждый новый ускоритель частиц вступал в строй, на нем искали монополи среди продуктов соударений частиц высоких энергий; такие поиски стали фактически своего рода обрядом. Монополи искали также среди продуктов соударений космических лучей с атомами атмосферы. В экспериментах другого типа пытались обнаружить монополи среди атомов железа в земных и внеземных образцах. До сих пор все эти поиски были безуспешными.

Как ставятся такие эксперименты? Один из подходов состоит в том, чтобы искать монополи в железе, подвергнутом воздействию пучка частиц высокой энергии на ускорителе. Если монополи рождаются таким пучком, они должны захватываться железом в результате индукции в нем противоположного магнитного заряда (подобно магнитному держателю, например, защелке в дверце холодильника). Затем мощный электромагнит должен вытянуть монополи из железа. Освобожденные таким образом монополи должны быть зарегистрированы в счетчиках частиц, сконструированных таким образом, чтобы регистрировались только очень сильно ионизирующие частицы. Другой потенциальный источник материала, подходящего для этого метода извлечения монополей, представляют образцы железных руд, собранные со скалистых обнажений старых гор. Такой подход был первоначально использован в 40-х годах Уиллемом Малкусом из Чикагского университета.

Другой метод поиска монополей, впервые обсуждавшийся в 1960-х годах, был разработан в 70-х годах Льюисом В. Альваресом и его коллегами из Лоуренсовской лаборатории Калифорнийского университета в Беркли. В их установке образец материала, в котором могли быть магнитные монополи, многократно проходил через сверхпроводящую катушку. При каждом прохождении магнитного монополя электрический ток в катушке немного возрастал бы. Так как катушка сверхпроводящая, возникающий индуцированный ток циркулировал бы неограниченное время. При этом встает задача измерения чрезвычайно слабого сигнала, индуцированного многократным прохождением единичного монополя. Альварес и его коллеги смогли показать, что плотность магнитных монополей в образцах скал, взятых с поверхности Луны, меньше, чем один на 10^{28} протонов.

Однако даже при этой предельной концентрации все еще мог бы присутствовать в среднем один монополюсь примерно в 20 килограммах вещества.

Менее прямой метод поиска магнитных монополей состоит в том, чтобы искать признаки рождения и уничтожения монополюсь-антимонополюсьных пар. Согласно теории, такая пара могла бы возникнуть при прохождении фотона высокой энергии около протона, подобно тому, как рождается электрон-позитронная пара (рис. 6). Противоположно заряженные монополюсь существовали бы, однако, только очень малое время. Они немедленно притянулись бы друг к другу, искривляя траектории движения и испуская вследствие этого фотоны тормозного излучения. Вскоре они сошлись бы и проаннигилировали друг с другом, потратив свою массу на создание дополнительных фотонов.

Этот гипотетический механизм был привлечен Мелвином А. Рудерманом и Даниэлем Цванцигером из Нью-Йоркского университета в середине

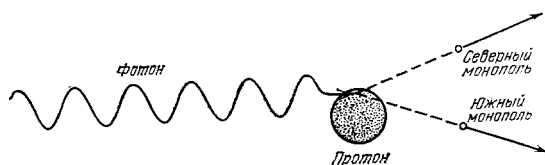


Рис. 6. Пара частиц -античастица, состоящая из северного и южного монополей, может быть создана, когда фотон высокой энергии (квант электромагнитного излучения) взаимодействует с электрически заряженной частицей, такой, как протон. Однако, взаимное притяжение между монополями заставит их столкнуться, превратив их массу обратно в фотоны.

1960-х годов для объяснения нескольких необычных событий, зарегистрированных в космических лучах в конце 50-х годов. Каждое из этих событий состояло из одной узкой струи индуцированных фотонами очень энергичных электронных ливней, в которых не было указаний на наличие каких-либо сильно взаимодействующих ядерных частиц. Два эксперимента, сделанных впоследствии на большом протонном ускорителе в Фермиевской национальной ускорительной лаборатории, не обнаружили ливней такого типа. (Один из этих экспериментов был выполнен группой Виргинского политехнического института и университета, а другой — группой из Мичиганского университета.) Если такой процесс действительно существует, он должен происходить при гораздо более высоких энергиях, чем доступные сейчас на ускорителях частиц. Альтернативно, процесс мог бы быть гораздо более редким, чем указывают данные космических лучей.

□

В 1975 г. мир физиков был взволнован сообщением об открытии магнитного монополя. Такое заявление было сделано исследователями из Калифорнийского университета в Беркли и Хьюстонского университета. Их доказательством был аномально плотный темный трек, предположительно космического происхождения, зарегистрированный в стопке фотографических эмульсий и пластиковых пленок. Детектор подвергался воздействию космических лучей, будучи подвешенным к баллону, летавшему на большой высоте в течение двух с половиной суток. Вскоре после сообщения интерпретация этого события как доказательства существования магнитного монополя подверглась критике. Космические эксперименты такого рода характеризуются произведением площади на время: величиной площади детектора, умноженной на время экспозиции. Детектор, в котором

был зарегистрирован подозрительный трек, имел произведение площади на время примерно в миллион раз меньше, чем то, которое было достигнуто в предыдущих экспериментах, в которых монополю не был обнаружен. Например, в случае анализа лунных пород Альварецем и его коллегами эти породы подвергались воздействию всевозможных частиц в течение миллиардов лет.

Ряд других проблем, возникших при монополюной интерпретации этого события, впоследствии привел экспериментаторов к другому предположению, согласно которому этот трек мог возникнуть при прохождении сверхтяжелого атомного ядра или массивной античастицы. Польза этого эпизода состояла в том, что он стимулировал тщательное рассмотрение вопроса об ионизационных потерях энергии монополюм. Этот вопрос, однако, до сих пор окончательно не выяснен.

Примерно в это же время перспективы охотников за монополями неожиданно улучшились. Работая независимо, Герард 'т Хоофт из Утрехтского университета в Нидерландах и Александр Поляков из Института теоретической физики им. Ландау вблизи Москвы обнаружили, что некоторый класс теорий взаимодействия элементарных частиц не только допускает наличие магнитных монополей, но и требует их. Более того, новые теории, называемые калибровочными теориями, указывают, что монополи должны быть гораздо более массивными, чем какие-либо другие ранее наблюдавшиеся или даже предсказываемые частицы. В таком случае неудивительно, что они до сих пор не были обнаружены.

Помимо необычайно большой массы, магнитные монополи, предложенные 'т Хоофтом и Поляковым, в некоторых других отношениях отличаются от первоначальных монополей Дирака. С одной стороны, монополи 'т Хоофта — Полякова не требуют наличия струны. С другой стороны, они не являются точечными частицами, хотя и ожидается, что их размеры слишком малы, чтобы быть непосредственно измеренными.

Сверхтяжелые монополи 'т Хоофта — Полякова играют важную роль в попытках построить «теорию великого объединения», которая описывала бы три из четырех известных сил природы. Две этих силы, электромагнитная и слабая, уже связаны очень успешной электрослабой теорией, которая рассматривает их как различные проявления единой силы. Цель большинства современных попыток создать «теорию великого объединения» состоит в том, чтобы найти более общую математическую структуру, которая включала бы как электрослабые, так и сильные ядерные силы (опуская только гравитацию, четвертую известную силу).

Одно из наиболее интересных следствий такой теории великого объединения — это предсказание, что протон будет распадаться на другие частицы. Для описания такого распада вводятся новые частицы, называемые лептокварками, которые переводят кварки (предполагаемые составные части таких частиц, как протон) в лептоны (частицы, подобные электронам, которые подвержены действию слабых, но не сильных ядерных сил). Лептокварки должны быть чрезвычайно тяжелыми, вероятно, в 10^{14} раз тяжелее протона. Если, как предполагает гипотеза 'т Хоофта — Полякова, сверхтяжелые магнитные монополи связаны с лептокварками, то монополи должны иметь массу, равную примерно 10^{16} протонных масс, то есть около 20 нанограммов. Это — чрезвычайно большая масса для элементарной частицы, сравнимая с массой парамедии или амёбы.

□

Сверхтяжелые монополи могли быть созданы только в первые 10^{-13} секунды после рождения Вселенной. «Большой взрыв» — это единственная ситуация, когда температура достаточно высока (почти 10^{30} К), чтобы мог-

ли рождаться такие частицы. При этом рождались бы как северный, так и южный магнитные монополи, и часть их должна была рекомбинировать в результате взаимной аннигиляции. Однако большинство сверхтяжелых монополей должно было избежать этой участи, и нет причины думать, что они не сохранились до настоящего времени. Неясно, где могли бы сосредоточиться монополи в ходе развития Вселенной, так же как и неясно, каким образом развивалась Вселенная от стадии большого взрыва до галактической структуры, которую мы сейчас наблюдаем.

Одна характерная черта нашей Галактики позволяет установить строгое ограничение на число монополей, которые могут в ней находиться. Галактика имеет магнитное поле, которое хотя и слабое (порядка одной стотысячной доли земного магнитного поля), но обладает огромной протяженностью. Монополи, захваченные галактическим полем, ускорялись бы до очень высокой энергии и могли бы преодолеть гравитационное притяжение Галактики. Однако, так как монополи должны быть чрезвычайно массивными, они двигались бы все еще довольно медленно (со скоростями, составляющими несколько тысячных частей от скорости света).

Юджин М. Паркер из Чикагского университета указал, что если бы в Галактике было слишком много таких монополей, они бы разрушили галактическое магнитное поле. Его аргументация основана на том факте, что магнитное поле Галактики создается крупномасштабной циркуляцией электрически заряженных частиц. При ускорении монополь отбирал бы энергию от галактического поля, замедляя токи движущихся электрических зарядов. Следовательно, существование галактического магнитного поля накладывает верхний предел на распространенность монополей в Галактике.

Максимальная плотность монополей во Вселенной связана с нерешенным вопросом, будет ли Вселенная всегда продолжать расширяться или она в конце концов коллапсирует. Результат зависит от количества вещества во Вселенной. Величина видимой массы (то есть массы светящихся объектов, таких как звезды) не вполне достаточна для того, чтобы замедлить расширение, прекратить его и в конечном счете обратить процесс. Если нет добавочной невидимой массы, расширение Вселенной будет все время замедляться, но никогда не прекратится.

Имеется ли достаточное количество невидимой материи во Вселенной, чтобы изменить ее судьбу? Какая форма материи может присутствовать в больших количествах и оставаться до сих пор необнаруженной? Одна из возможностей состоит в том, что недостающая масса состоит из нейтрино, которые редко взаимодействуют с другими частицами и не испускают свет. Долго думали, что нейтрино — безмассовые частицы, но сейчас многие предполагают, что они имеют малые массы. Так как считается, что нейтрино заполняют Вселенную со средней плотностью около миллиона частиц на кубический сантиметр, то даже малая масса нейтрино могла бы дать существенный вклад, хотя, вероятно, не намного больший, чем видимая масса.

По всей вероятности, сверхтяжелые магнитные монополи должны излучать мало света и, следовательно, также должны относиться к невидимой компоненте Вселенной. Если монополи имеют массу, в 10^{16} раз превосходящую массу протона, то не потребовалось бы много монополей, чтобы резко увеличить полную массу. При концентрации один монополь на 10^{16} протонов в монополях была бы сосредоточена примерно такая же масса, как и в светящемся веществе. Не представляется возможным, чтобы полная масса Вселенной более, чем в 10 раз превосходила видимую массу, и поэтому верхний предел для отношения числа магнитных монополей к числу протонов должен быть меньше, чем 10^{-15} .

□

В 1979 г. Джон П. Прескилл, в то время выпускник Гарвардского университета, скомбинировав модель «великого объединения» сильных, слабых и электромагнитных сил со стандартной космологией, пришел к выводу, что на каждый протон во Вселенной должен приходиться примерно один магнитный монополю. С другой стороны, из анализа скорости расширения Вселенной следует, что не должно быть более одного монополя на 10^{15} протонов. Прескилл сформулировал дилемму: или роль магнитных монополей в теориях «великого объединения» понимается неправильно, либо стандартная космология неверна. Одна из путей обойти дилемму Прескилла состоит в том, чтобы видоизменить космологическую модель, допустив более интенсивную аннигиляцию монополю-антимонополюных пар на ранней стадии расширения Вселенной. Другая возможность — обеспечить подавление первоначальной скорости рождения магнитных монополей с помощью того или иного механизма*).

Недавно Джордж Лазаридис, Кейзер Шафи и Томас Уолш из Европейского Центра ядерных исследований в Женеве рассмотрели, как можно было бы понизить предсказываемую плотность сверхтяжелых магнитных монополей во Вселенной, видоизменяя либо теорию частиц, либо космологическую теорию. Они пришли к выводу, что взаимодействие монополей с галактическим магнитным полем дает предельное значение для отношения числа магнитных монополей к числу протонов, равное примерно 10^{-20} . При такой концентрации ожидается, что около 200 монополей должны проходить в год через площадь один квадратный километр. Более консервативная оценка, основанная на более однородном распределении монополей во Вселенной, привела бы к потоку из нескольких монополей в год через квадратный километр.

Таким образом, теория магнитных монополей впервые дала оценки для массы и ожидаемого потока магнитных монополей. Вооружившись этими оценками, как бы грубы они ни были, экспериментатор имеет теперь новое поле деятельности. Предсказываемый поток магнитных монополей мал, но не настолько, чтобы не вставал вопрос об их поисках.

Одно из возможных направлений поиска сверхтяжелых магнитных монополей — это крупномасштабные естественные эффекты. Фактически, это то направление, которое было первоначально предложено Паркером десять лет назад. Один из нас (Карриган) рассмотрел судьбу монополей в веществе, из которого образовалась Солнечная система. Например, в процессе конденсации Земли магнитные монополи должны были бы опускаться к центру под влиянием гравитационного и магнитного полей планеты. Северные монополи собрались бы около южного геомагнитного полюса, и наоборот.

Из геологической истории известно, что магнитное поле Земли много раз изменяло направление на обратное. Такое обращение поля вызывало бы миграцию двух отдельных скоплений монополей в направлении друг друга, а затем и друг сквозь друга. Во время этого путешествия некоторые монополи и антимонополи аннигилировали бы, освобождая огромную энергию, заключенную в их массе (рис. 7). Исходя из измеренного теплового потока у поверхности Земли, можно установить грубый предел на возможное число монополей, захваченных в ядре; значения, вычисленные таким образом, согласуются с другими экспериментальными ограничениями на распространенность сверхтяжелых монополей.

*) Проблема реликтовых монополей была поставлена в работе: Zeldovich Ya. B., Khalopov M. Yu. — Phys. Lett. Ser. B, 1978, v. 79, p. 239. (Прим. перев.)

Более прямой подход состоит в том, чтобы построить детектор специально для поисков этих тяжелых редких частиц. Однако конструкция такого детектора не очевидна. Действительно, поиск массивных монополей находится сейчас в той чудесной стадии, когда множество идей, зачастую весьма эксцентричных, сталкиваются между собой на бумаге и за обеденными столиками. Ожидается, что массивные монополи должны двигаться

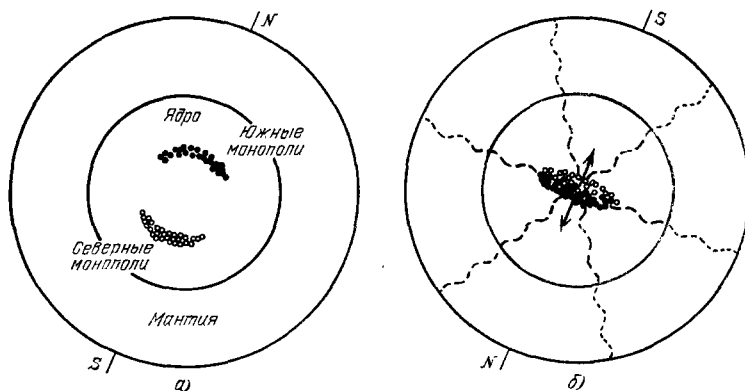


Рис. 7. Монополи, захваченные в Земле, стремились бы собраться в двух областях земного ядра.

Согласно оценке, сделанной одним из авторов (Карриган), точки равновесия, в которых концентрация монополей максимальна, располагались бы менее, чем в 1600 километрах от центра Земли. Северные монополи накапливались бы ближе к южному геомагнитному полюсу и наоборот (а). Следуя за обращением земного магнитного поля (что неоднократно происходило в геологической истории), два разделенных скопления монополей мигрировали бы друг сквозь друга (б). Некоторые пары северных и южных монополей встречались бы и аннигилировали друг с другом, высвобождая энергию, заключенную в их массе. Даже очень небольшая плотность сверхтяжелых монополей могла бы дать значительный вклад в поток тепла у поверхности Земли. Поэтому наблюдаемый тепловой поток устанавливает предел на число монополей, которые могли быть захвачены таким образом.

довольно медленно, со скоростями, гораздо меньшими, чем скорость света. Что произойдет, когда медленно движущийся монополь столкнется с атомом, в настоящее время неясно.

Соударение сверхтяжелого монополя с неподвижным атомным ядром должно быть подобным столкновению парового катка с муравьем. Монополь космических лучей мог бы потерять огромное количество энергии в большом числе таких соударений, пробираясь сквозь Землю, и тем не менее он мог бы появиться практически невредимым с другой стороны Земли. В этих условиях трудно предсказать величину ионизации, которая наблюдалась бы в детекторе. Имеется мнение, что существует достаточное число быстро движущихся монополей, чтобы при поисках можно было использовать детекторы, основанные на ионизации. Согласно другой точке зрения, ионизация будет слабой и редко заметной, так что для регистрации монополей понадобилась бы необычная техника. В любом случае ясно, что нужен очень большой детектор, чтобы экспериментатор мог наблюдать монополь за время своей жизни.

□

Детектор, который регистрирует свет, возникающий при ионизации и покрывает много квадратных километров, был разработан Хэвенсом Е. Бергсоном, Джорджем Л. Кессидей и Юджином С. Лохом из Университета Юты. Установка, называемая «глаз мухи», состоит из множества фотоумножительных трубок, направленных в ночное небо; она регистрирует свет, испускаемый вторичными частицами, которые возникают при редких взаимодействиях космических лучей сверхвысокой энергии в верх-

ней атмосфере. Когда ливневые вторичные частицы летят по направлению к Земле, они сталкиваются с атмосферными атомами азота, вызывая их свечение. Детектор «глаз мухи» может различить этот свет, только если полная энергия, выделяющаяся в событии, эквивалентна по крайней мере 100 миллионам протонных масс. Прохождение магнитного монополя, даже при наиболее оптимистической оценке его ионизационной способности, привело бы к излучению менее одной десятитысячной того света, который необходим для срабатывания детектора.

Способность такого детектора реагировать на вызванное частицей свечение ограничена фоновой освещенностью от звезд, пролетающих самолетов и других источников, таких как сигнальные огни отдаленных радиовышек. Одно из предложений, направленных на уменьшение трудностей, связанных с фоновой освещенностью, состоит в том, чтобы установить детектор у края Большого Каньона, нацелить его в каньон и вести запись данных только в облачные ночи. Однако даже эта мера снизила бы фоновый свет только в десять раз. Кроме того, трудно было бы побудить туристов отказаться от приготовления пищи на костре в течение нескольких лет. Вероятно, детектор «глаз мухи» можно было бы установить в большой пещере или соляной шахте, подобной тем, которые сейчас используются для поисков распада протона.

Другой разрабатываемый сейчас детектор большого размера — это Глубокий подводный мюонный и нейтринный детектор (ДЮМАНД), который сможет регистрировать события внутри куба со стороной около километра в океане (см.: Дж. Г. Лёрнд, Д. Эйхлер, «Глубоководный нейтринный телескоп», *Scientific American*, февраль 1981 г. *). ДЮМАНД будет регистрировать черенковское излучение, испускаемое при движении частицы в морской воде со скоростью, превосходящей скорость света в воде. К сожалению, сверхтяжелые магнитные монополи двигались бы, вероятно, слишком медленно, чтобы давать черенковское излучение.

Крупнейшие из существующих спцинтилляционных детекторов, такие как гигантские нейтринные детекторы в Фермиевской лаборатории и ЦЕРНе, имеют размеры, примерно в 100 раз меньшие, чем это нужно, чтобы иметь хорошие шансы наблюдать магнитные монополи, если их поток ограничен галактическим магнитным полем. Тем не менее, могло бы оказаться полезным использовать эти детекторы для поисков монополей во время остановок ускорителя, когда они не работают, так как экспериментальные пределы для медленно движущихся сверхтяжелых частиц плохо известны. В предварительных исследованиях, недавно выполненных Джеком Д. Ульманом из Лемановского колледжа в Нью-Йорке, использовался детектор размером 0,5 м², действовавший в течение нескольких месяцев, что дало единственное до сих пор экспериментальное ограничение. Решающие эксперименты должны быть в 10 000 раз более чувствительными.

□

Имеется и противоположное мнение, что все поиски с ионизационными детекторами обречены на неудачу, так как медленно движущиеся сверхтяжелые монополи не будут вызывать ионизацию. В то же время, прохождение любой заряженной частицы через металл сопровождается вихревыми токами, независимо от скорости частицы и от того, является ее заряд электрическим или магнитным. Можно ожидать, что вихревые токи будут создавать акустические импульсы, которые можно зарегистрировать. Карл В. Акерлоф из Мичиганского университета проверил возможность

*) См. перевод: УФН, 1982, т. 137, с. 449. (Прим. перев.)

создания сферического металлического детектора, основанного на этом принципе, и пришел к выводу, что сигнал мог бы быть зарегистрирован на фоне теплового шума, только если детектор охлажден до нескольких миллиградусов выше абсолютного нуля. Это сложное техническое требование сочетается с необходимостью сооружения достаточно большого детектора, который мог бы заметить малый ожидаемый поток монополей.

Сравнительно простой способ детектирования магнитных монополей предусматривает использование сверхпроводящей катушки, подобной той, которая использовалась Альваресом и его коллегами. Детектор называется СКВИД (сверхпроводящее квантовое интерференционное устройство) и регистрирует изменение электрического тока при прохождении через него магнитного монополя. Блас Кабрера из Стенфордского университета в настоящее время ищет монополи с помощью сверхпроводящей ниобиевой катушки диаметром пять сантиметров. Кабрера готовит также второй эксперимент по поиску монополей с использованием цилиндрического сверхпроводящего баллона длиной один метр и диаметром 20 сантиметров. Пронизывая баллон, магнитный монополь будет оставлять захваченный магнитный поток в тех частях стенки, где он входит и выходит. Периодически измеряя картину магнетизма баллона, можно приписать изменение распределения потока прохождению магнитного монополя. Если монополь будет зарегистрирован, то будет получена и грубая информация о направлении его движения.

Недавно Дэвид Б. Клайн из Фермиевской лаборатории и Висконсинского университета в Медисоне и Карло Руббиа из ЦЕРНа и Гарвардского университета выдвинули претенциозную программу детектирования монополей. Они планируют установить сверхпроводящий детектор под перерабатывающей железную руду фабрикой в Висконсине. На этой фабрике более миллиона тонн руды в год нагревается до температуры 1700 градусов Цельсия. При такой температуре захваченные железом монополи освобождались бы и падали, проходя через детектор.

□

История гипотезы о магнитном монополе не имеет аналога в физике. Начатая полстолетия назад одним из гигантов современной физики, охота за монополями была плодотворной областью теоретических построений, но до сих пор она остается бесплодной, если говорить о поддерживающих ее экспериментальных доказательствах. Обнаружение магнитного монополя стало бы одним из открытий столетия, сравнимым с открытием позитрона, — другого предсказания Дирака. Если бы монополи оказались очень массивными, это усилило бы доводы в пользу того или иного варианта единой теории взаимодействия элементарных частиц.

В более вероятном случае, если магнитные монополи не будут обнаружены, эти отрицательные свидетельства не будут рассматриваться как решающие. Необходимые эксперименты будут трудными, и даже если они будут превосходно выполнены, отрицательный результат мало прояснит ситуацию. Тем не менее, окончательное оправдание идеи монополя лежит в этих поисках, так как физика в конечном счете — это экспериментальная наука.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ford K. W.— Sci. American, December 1963, v. 209, p. 122.
2. Pickering A.— Soc. Stud. Sci., 1981, v. 11, p. 63.