

суббота, Сентябрь 05, 2009

По поводу магнитных монополей

По разным СМИ пробежала новость об открытии магнитных монополей в спиновом льду. Человека, немножко следящего за новостями в физике, она при беглом чтении может сбить с толку (*"Неужели монополи, за которыми охотились десятилетиями, наконец -то открыты?!"*). Мне показалось полезным пояснить, что на самом деле там было сделано, и подчеркнуть по поводу этой новости несколько вещей.

Что обнаружено?

Прежде всего, речь тут конечно **не идет** об открытии магнитного монополя **как отдельной элементарной частицы**. Такие частицы как были, так и остаются гипотетическими объектами; существуют ли они в природе или нет -- неизвестно.

То, что экспериментально обнаружено сразу в нескольких работах (см. ссылки в конце поста) -- это **коллективные электронные возбуждения** в особых магнитных средах, выглядящие мезоскопически (т.е. на расстояниях много больше атомных) словно магнитные монополи.

В принципе, в сообщениях СМИ это тоже написано, но только зачем-то заметки там начинаются со слов про настоящие монополи Дирака и иногда про их поиски, а затем переходят к новым работам. Это сбивает с толку.

Откуда взялись монополи?

Теперь простая картинка, помогающая визуально представить себе эти монополи.

Что такое магнитный монополь? Это "магнитный заряд", т.е. магнитный аналог изолированного электрического заряда. Т.е. такой объект, от которого радиально расходятся силовые линии магнитного поля, и причем магнитное поле спадает с расстоянием по закону Кулона $1/r^2$.

Некий отдаленный аналог магнитного монополя хорошо известен тем, кто хоть немножко знает про магнетизм -- это доменные стенки, разделяющие домены в ферромагнетиках, а еще лучше -- в ферромагнитной проволоке (см. например картинку к [этой новости](#)). В нее (стенку) тоже с обеих сторон утыкаются линии магнитного поля (если конечно не следить дальше, что происходит с полем внутри самой стенки). Только доменная стенка двумерная, а монополь -- точечный.

Как такие монополи можно создать? Представьте себе цепочку из атомов, обладающих ненулевыми спинами (а спины электронных оболочек атомов как раз и порождают магнетизм). Можно устроить взаимодействием между спинами так, чтобы в нормальном состоянии все спины в цепочке смотрели друг другу в затылок:

.... $0 \rightarrow 0 \rightarrow 0 \rightarrow 0 \rightarrow 0 \rightarrow 0 \rightarrow 0 \rightarrow 0$

Такая цепочка порождает более-менее однородное (вдоль цепочки) магнитное поле; она выглядит наподобие тонкого и длинного соленоида. Если же теперь развернуть спины в некоторой области, то получится такая структура:

.... $0 \rightarrow 0 \rightarrow (-) \leftarrow 0 \leftarrow 0 \leftarrow (+) \rightarrow 0 \rightarrow 0$

Т.е. атомам, на которых происходит разворот направления, можно как бы сопоставить положительный и отрицательный магнитный заряды -- т.е. участок "неправильной" ориентации спинов ограничен с двух сторон "магнитными зарядами".

Это, в принципе, нормально, в такой ситуации еще никто не говорит про наблюдение монополей -- ведь у нас есть цепочка, и есть ее концы. Ситуация изменяется, если у нас есть материал, который (с магнитной точки зрения) целиком состоит из переплетения таких цепочек, магнитное поле от которых в среднем компенсируется. Тогда если в какой-то из цепочек возникнет "неправильный" участок, то его концы -- магнитные заряды - - будут заметны, а сама цепочка -- нет. Т.е. будет казаться, что в веществе поодаль друг от друга расположены два противоположных магнитных заряда.

И теперь последний шаг -- взаимодействие между электронами в этом материале должно быть устроено так, чтобы цепочка не сдерживала эти магнитные заряды, чтобы она позволяла им без проблем удаляться на любое расстояние. И при желании перепрыгивать в другую цепочку. Т.е. чтоб "полюса одного магнита" перестали быть связанными друг с другом (хотя оба полюса, конечно, где-то присутствуют в образце). Вот тогда-то можно уже говорить про отдельно путешествующие по кристаллу положительные и отрицательные магнитные заряды. Именно такие отдельные "магнитные дефекты" кристалла и были обнаружены в эксперименте.

Разные комментарии

Что тут такого нетривиального?

Нетривиально было найти такое вещество, в котором имеются такие выстроенные и переплетенные друг с другом спиновые цепочки. При этом вещество не должно спонтанно намагничиваться. Более того -- в этом веществе у спинов должна быть некоторая "свобода переворота", если соседний спин перевернулся. И наконец взаимодействие между электронами не должно быть слишком жестким, оно должно позволять спинами переворачиваться, а магнитным зарядам удаляться друг от друга.

Всё это удалось реализовать в материале, называемом **спиновым льдом**. С одной стороны, такой материал (при низких температурах, конечно) обладает вполне четкой кристаллической решеткой. Но с другой стороны, там имеется четыре равноправных свободных спина на каждом узле -- два смотрят внутрь, два наружу. Такая конфигурация допускает несколько разных ориентаций, что очень похоже на ориентацию молекул воды в обычном льде. Именно такое больше разнообразие энергетически эквивалентных ориентаций и придает спинам свободу переворота.

Такого типа явление, кстати, называется в физике красивым словом **фрустрация**, а сами материалы -- **фрустрированными**.

Кстати, необходимым условием тут является наличие достаточно большого числа "свободных" спинов во внешней электронной оболочке атомов. Это объясняет, почему в состав соединений входят f-элементы, например, диспрозий в

$\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$.

Еще замечу, что такая ситуация -- переплетение и даже конденсат "невидимых" струн, у которых видны только их концы -- уже давно рассматривается в самых разных разделах физики. Есть даже попытки так описать настоящие элементарные частицы (см. новость [Предложен новый взгляд на природу элементарных частиц](#)).

Еще подчеркну вот что. Есть мнение, что физика конденсированного вещества не шибко фундаментальна -- типа, всё в ней состоит из ядер и электронов, и никаких принципиально новых частиц там нет. Так вот, большое открытие в физике конденсированного вещества состоит в том, что **коллективное поведение** взаимодействующих и **мешающих друг другу** частиц приводит к объектам ("квазичастицам") с **совершенно экзотическими свойствами**, иногда вообще нереализуемыми на уровне отдельных элементарных частиц. Это, например, квазичастицы с дробным электрическим зарядом в квантовом эффекте Холла, это "безмассовые" электронные возбуждения в графене, это [расщепление заряда и спина электрона на две квазичастицы](#), и т.п. Сейчас сюда добавился к "магнитный монополь" в конденсированных средах. В этом смысле -- по богатству самовозникающих объектов -- с физикой конденсированных сред не сравнится никакой другой раздел физики.

Ну и последнее. Я недавно, когда описывал [практическую пользу от теоретической физики элементарных частиц](#), приводил

такой пример: некоторые коллективные возбуждения на поверхности кристалла напоминают аксионы -- еще один класс гипотетических элементарных частиц. "Коллективные магнитные монополи" тоже прекрасно вписываются в эту группу -- объекты, которые напоминают гипотетические элементарные частиц, но реализуются в виде коллективных возбуждений. Это лишний раз подчеркивает, что абстрактные теоретические разработки в физике элементарных частиц могут найти применение в конденсированных средах.

Ссылки

Идея о том, что в спиновом льду может действительно происходить развязывание диполей на свободно блуждающие монополи:

C. Castelnovo, R. Moessner, S.L. Sondhi, [Magnetic monopoles in spin ice](#), Nature 451, 42-45 (2007). Статья доступна в архиве епринтов: [arXiv:0710.5515](#).

Четыре статьи 2009 года с наблюдением магнитных монополей как отдельных магнитных дефектов кристалла

D.J.P. Morris et al, [Dirac Strings and Magnetic Monopoles in Spin Ice Dy₂Ti₂O₇](#), Science DOI: 10.1126/science.1178868 (published Online September 3, 2009).

T. Fennell et al, [Magnetic Coulomb Phase in the Spin Ice Ho₂Ti₂O₇](#), Science DOI: 10.1126/science.1177582 (published Online September 3, 2009). Препринт статьи доступен как [arXiv:0907.0954](#).

H. Kadowaki et al, [Observation of Magnetic Monopoles in Spin Ice](#), eprint

arXiv:0908.3568 [cond-mat], 25 August 2009.

S.T. Bramwell et al, [Magnetic Charge Transport](#), eprint arXiv:0907.0956 (6 July 2009).

Англоязычные популярные заметки:

[Magnetic monopoles spotted in spin ices](#) (PhysicsWorld.com), ['Overwhelming' evidence for monopoles](#) (Nature News).

Рубрики: [конденсированные среды](#), [новости физики](#), [теоретическая физика](#)
