Из курса общей физики известно, что между **электричеством** и **магнетизмом** существует теснейшая связь. Электричество и магнетизм входят в физику почти симметричным образом. Движение зарядов, т.е. электрический ток, создает магнитное поле. Изменение магнитного потока создает электродвижущую силу, которая в замкнутом проводнике порождает электрический ток.

Такая симметрия в представлениях о природе электричества и магнетизма существовала не всегда. Очень долго электричество и магнетизм изучались раздельно. Но с тех пор как Эрстед в 1820 г. открыл магнитные свойства электрического тока, физиков не оставляла мысль о необходимости существования обратного явления: магнитное поле должно порождать электрический ток. Наконец, в 1831 г. Фарадей открыл электромагнитную индукцию. С этого момента физики уже не забывали о всеобщей взаимосвязанности электричества и магнетизма: они никогда не говорят об электрических и магнитных явлениях в отдельности, а всегда имеют в виду электромагнитные явления в целом.

Учение об электромагнитных явлениях — электродинамика (для макрообъектов) и квантовая электродинамика (для всех объектов, включая микрочастицы), пожалуй, является самой точной наукой из числа наук о взаимодействиях между частицами и полями. На её счету имеются не только объяснение всех макроскопических и микроскопических электромагнитных явлений от излучения радиоволн гигантскими антеннами до излучения **γ**-квантов атомными ядрами, но и предсказание существования радикально нового состояния материи в форме антивещества, а также количественных оценок очень тонких эффектов типа взаимодействия электрона с его собственным электромагнитным полем. И всё же современная электродинамика не полностью удовлетворяет физиков, и опять по причине несимметрии между электричеством и магнетизмом. Оказывается, основные уравнения электродинамики (уравнения Максвелла) почти, но не вполне симметричны относительно электрических и магнитных явлений.

В эти уравнения входят напряженность электрического поля **E**, напряженность магнитного поля **H**, плотность электрического тока **j** и плотность электрического заряда **ρ**. Для вакуума, например, уравнения Максвелла записываются следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \frac{4\pi}{c}\mathbf{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t};\ \operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho; \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t};\ \operatorname{div} \mathbf{H} = 0. \end{aligned}\right\}$$

Даже человеку, не знакомому с высшей математикой, видно, что **E** и **H** входят в уравнения симметричным образом (над ними производятся одинаковые математические операции). Однако симметрия уравнений в целом получается неполной из-за того, что в одну их группу входят плотность электрического заряда **ρ** и плотность тока **j**, а в другую не входят аналогичные им плотность магнитного заряда и плотность магнитного тока.

Вы, конечно, понимаете, почему так получилось? Потому что многолетний опыт физиков показывает, что магнитные заряды никогда не наблюдались, т.е. получить отдельно северный или южный магнитный полюс никому не удавалось. Так что уравнения Максвелла правильно отражают ситуацию, существующую в природе, и, казалось бы, ни в каком усовершенствовании не нуждаются. Однако отмеченная выше несимметрия уравнений всё же вызывает некоторую неудовлетворенность. Эту неудовлетворенность можно сформулировать так: в связи с симметрией электрических и магнитных явлений было бы естественнее, если бы уравнения Максвелла, оставаясь правильными, выглядели вполне симметрично, т.е. содержали бы плотность магнитного заряда и плотность магнитного тока. Другими словами, хочется думать, что в природе существуют магнитные заряды (и, следовательно, магнитные токи), которые, однако, обладают такими свойствами, что их пока никто не мог обнаружить ни в одном из множества сделанных опытов.

Теоретически такую возможность впервые обосновал в 1931 г. Поль Дирак, который показал, что наряду с общепринятой несимметричной (но проверенной многими экспериментами) квантовой электродинамикой может быть построена непротиворечивая с ней симметричная квантовая электродинамика, учитывающая существование магнитных зарядов. Гипотетический магнитный заряд, введенный Дираком, принято называть **монополем Дирака**.

С тех пор прошло около 80 лет, а проблема существования монополя Дирака всё ещё не решена: не доказано ни его наличие, ни его отсутствие. Поэтому проблема монополя остается актуальной до сих пор, и для её разрешения ставятся всё новые и новые эксперименты.

Какие же это эксперименты и почему они не дают результатов? Для ответа на эти вопросы предположим, что монополь существует, и познакомимся с его предполагаемыми свойствами сначала качественно, а затем и количественно.

Мы уже говорили, что гипотетический монополь Дирака — это отдельный магнитный заряд, подобный отдельному электрическому заряду (либо положительному, либо отрицательному). Поэтому монополь Дирака должен вести себя по отношению к магнитному полю так же, как электрический заряд ведёт себя по отношению к электрическому полю. В частности, вокруг монополя должно возникать магнитное поле, подобное электростатическому полю, возникающему вокруг электрического, заряда, т.е. силовые линии магнитного поля должны начинаться или кончаться на магнитных зарядах; напряженность магнитного поля, созданного точечным магнитным зарядом μ, должна изменяться по закону $\mathbf{H} = (\mu/r^3)\,\mathbf{r}$ [*подобно тому как напряженность электрического поля, создаваемого электрическим зарядом* e, *изменяется по закону* $\mathbf{E} = (e/r^3)\,\mathbf{r}$].

Сила $\mathbf{F}$, действующая на магнитный заряд μ в магнитном поле $\mathbf{H}$, должна быть равна: $\mathbf{F} = \mu\mathbf{H}$.

Взаимодействие двух магнитных зарядов μ_1 и μ_2 будет определяться законом, аналогичным закону Кулона:

$$V\mu = \mu_1\mu_2/\,r\,;$$

В однородном магнитном поле монополь должен ускоряться подобно электрическому заряду в электрическом поле (магнитные диполи, например магнитные стрелки, в однородном магнитном поле не ускоряются, а только ориентируются).

При движении в среде (например, в атмосфере или в жидкости), содержащей частицы, которые обладают магнитными моментами, монополь должен обрастать ими подобно тому, как обрастает полюс полосового магнита, если вы проведете им над рассыпанными булавками (для более полной аналогии надо брать очень длинный магнит, т.е. почти отдельный магнитный заряд, и магнитные стрелки — диполи). Монополь, обросший магнитными диполями, из-за резкого увеличения массы должен стать менее подвижным и медленно дрейфовать в среде.

При попадании монополя в среду с примесью парамагнитных веществ монополь будет притягиваться ими и образовывать связанные системы с энергией связи около 1 эВ. Постоянные магниты и обыкновенное мягкое железо должны быть настоящими ловушками для монополей; они должны захватывать монополи столь прочно, что для вырывания их оттуда нужны магнитные поля очень высокой индукции. Это свойство парамагнетиков и ферромагнетиков можно использовать для накопления монополей, если последние стабильны , т.е. не распадаются со временем.

Стабильность монополя является прямым Следствием (во всяком случае, для монополя с наименьшей массой) естественного предположения о существовании для магнитного заряда закона сохранения, аналогичного закону сохранения электрического заряда.

Взаимосвязь магнитного монополя с электрическим полем тоже вполне аналогична связи электрического заряда с магнитным полем. Подобно тому как при движении электрического заряда возникает магнитное поле **H**, при движении магнитного монополя должно возникать электрическое поле **E**. А это означает, что движущийся монополь должен ионизовать атомы среды, через которую он движется, причем ионизирующая способность должна быть тем больше, чем больше значение магнитного заряда монополя.

Наконец, по аналогии с образованием **γ**-квантом электрон-позитронной пары за счёт энергии электромагнитного поля можно представить существование процесса рождения быстрым **γ**-квантом и монополь-антимонопольной пары (ведь монополь благодаря магнитному заряду участвует в электромагнитном взаимодействии).

Чтобы сделать все эти рассуждения из качественных количественными, т.е. ответить на вопросы: с какой силой притягивается монополь, как велика производимая им ионизация, при какой энергии **γ**-квант может родить пару монополь — антимонополь и другие, нужны количественные характеристики свойств монополя. Такие характеристики также были даны Дираком.

Дирак показал, что если монополь существует, то его магнитный заряд **μ** должен быть связан с элементарным электрическим зарядом **e** соотношением:

$$2\mu e/c = nh \text{ , } (1)$$

где **n** - произвольное целое число; **h** - постоянная Планка.

$$\mu = nhc/2e = (1/2)\,(hc/e^2)\,ne,$$

и так как $e^2/hc = 1/137$ (величина e^2/hc, называемая постоянной тонкой структуры, играет важную роль в квантовой электродинамике), имеем:

$$\mu = 68{,}5ne.$$

Таким образом, по Дираку минимальное значение магнитного заряда в 68,5 раза больше элементарного электрического заряда **e**, т.е. заряда электрона. Он может быть также равен $2 \cdot 68{,}5e = 137e$; $3 \cdot 68{,}5e = 205{,}5e$ и т.д..

Частица со столь большим магнитным зарядом при движении со скоростью $V \sim c$ должна ионизовать атомы окружающей среды в $(68{,}5)^2 \sim 4700$ раз сильнее, чем релятивистский электрон. Благодаря этому обстоятельству след монополя должен быть совершенно отчетливо виден в трековом детекторе, например в фотопластинке (в которой виден под микроскопом даже след релятивистского электрона). Этот след будет отличаться от следов тяжёлых ядер с зарядом $Z \sim 70$ (которые производят такую же ионизацию) равномерной толщиной по всей длине (следы тяжёлых ядер утончаются к концу из-за обрастания ядер электронами).

Вследствие большого магнитного заряда монополь должен очень легко приобретать энергию в магнитном поле. Например, пройдя путь 1 см в сравнительно слабом поле индукцией 0,1 Тл, монополь приобретает энергию около $2 \cdot 10^7$ эВ. Для сравнения заметим, что электрон может приобрести такую же энергию, пройдя 1 см в электрическом поле **E** = 20000000 В/см.

Массу монополя можно оценить, если сделать какое-то разумное предположение о его размерах. Считая, например, что масса монополя имеет электромагнитную природу, и предполагая, что его радиус равен классическому радиусу электрона.

$$r_e = e^2/m_e c^2 = 2{,}8 \cdot 10^{-13} \text{ см},$$

$$m_\mu = \mu^2/r_e c^2 = (\mu/e)^2 \; e^2/r_e c^2 = (\mu/e)^2 \, m_e \sim 4700 \cdot 0.5 = 2350 \text{ МэВ}/c^2$$

или, $m_\mu \sim 2{,}5 m_p$

Если же радиус монополя положить равным радиусу протона (около $0{,}8 \cdot 10^{-13}$ см), то для массы монополя получается значительно большее значение:

$$m_\mu \sim 8{,}2 \text{ ГэВ}/c^2 = 8{,}7 m_p$$

Рассмотрим далее возможные способы поисков монополя.