

ловню

$$2\pi R = n\lambda = n \frac{h}{p}$$

где  $\lambda = h/p$  — длина волны де Бройля электрона (здесь  $p = mv$  — импульс электрона,  $h$  — постоянная Планка). В нашем случае мы можем считать, что носитель заряда — электрон — движется по круговой орбите в однородном магнитном поле  $B$ . Сила Лоренца будет вызывать центростремительное ускорение:

$$evB = m \frac{v^2}{R}$$

Комбинация этих двух результатов даст:

$$B(\pi R^2) = n \frac{h}{2e}$$

Таким образом, поток через петлю с током квантован:

$$\Phi = B(\pi R^2) = n \frac{h}{2e}$$

Квант потока (или флюксон) очень мал — порядка  $2 \cdot 10^{-15}$  Тл·м<sup>2</sup>. В типичной макроскопической системе это квантование не заметно, т.е. не каждый электрон, движущийся по круговой орбите, надо рассматривать квантово-механически. Однако сверхпроводники — это редкий класс материалов, у которых квантово-механическое поведение становится заметным на макроскопическом уровне. (Это должно быть темой другой статьи, а сейчас достаточно отметить, что в процессах типа сверхпроводимости и сверхтекучести — когда жидкость течет, не обнаруживая вязкости, квантовые корреляции макроскопического масштаба между одиночными электронами очень реальны и очень заметны.) В результате прохождения монополя через сверхпроводящую петлю возникает магнитный поток величиной всего в пару флюксонов. Замечательно, что современная технология может аккуратно измерить столь малый поток (и это возможно только благодаря развитию сверхпроводящих полупроводниковых устройств).

Скомбинируем наши результаты для полного потока, который должен быть уравновешен потоком петли с током из-за прохождения монополя, и условий квантования потока. Мы в

конечном счете приходим к равенству

$$\mu_0 q^2 e = n \frac{h}{2}$$

Это — знаменитое дираковское условие для магнитного заряда монополя. Здесь оно выражено в единицах СИ, которая обычно не используется для квантово-механических расчетов (вот почему оно может показаться с первого взгляда незнакомым тому, кто видел его ранее выраженным в единицах других систем). Дирак впервые вывел это условие в 1931 году, и монополи, которые оно описывает, до сих пор называются монополями Дирака. То, что оно утверждает, замечательно. Если хотя бы один монополь с каким угодно магнитным зарядом существует во Вселенной, то электрический заряд обязательно должен быть квантованным. То, почему электрический заряд квантован, на самом деле великая тайна физики. Нет причин, почему это должно быть именно так. Просто так оно есть. Существование монополя Дирака объяснило бы причину квантования заряда (а физики любят знать причины вещей).

Мы можем оценить массу монополя Дирака по результатам квантования. Энергии электрического и магнитного полей даются выражениями

$$W_e \sim E^2, \quad W_m \sim \frac{B^2}{c^2},$$

где  $c$  — скорость света, а  $E$  и  $B$  — электрическое и магнитное поля. Поскольку поля электрона и монополя пропорциональны электрическому и магнитному зарядам соответственно, мы можем оценить массу монополя Дирака так:

$$m_m = \frac{q^2}{c^2 e^2} m_e$$

Используя наше условие квантования, мы находим, что минимальная масса монополя Дирака

$$m_m \geq \frac{h^2 m_e}{4 \mu_0 c^2 e^4} \geq 4700 m_e$$

Таким образом, у монополя Дирака должна быть масса лишь немного больше двух протонных масс. Не исключено, что монополь Дирака мог бы возникнуть в современном

ускорителе, но оказалось, что это не самый эффективный путь его поиска.

Большой магнитный заряд и относительно маленькая масса монополей Дирака означают, что один из них может быть ускорен до очень больших скоростей галактическими магнитными полями и затем сильно взаимодействовать с веществом. (Монополь, влетая в вещество с большой скоростью, действует как шар для боулинга в магазине фарфора.) Тогда почему ученые не видят монополей? Может быть, их вокруг очень мало (если они вообще существуют)?

Модель расширяющейся Вселенной может предложить объяснение. Предполагается, что если «первобытные» монополи и возникли бы в достаточно больших количествах при Большом Взрыве, то быстрое раздувание Вселенной ограничило бы плотность монополей до значений, которые находятся в согласии с тем верхним пределом их плотности, который можно определить, опираясь на факт ненаблюдаемости монополей.

Наконец, дираковская теория монополя не является единственным претендентом на истину. Так, наиболее известная среди других теорий — Теория великого объединения (ТВО для краткости) также предсказывает существование монополей. Эти ТВО-монополи должны иметь свойства, весьма отличные от монополей Дирака. Наиболее существенно, что их массы могут быть даже в  $10^{16}$  раз больше массы монополей Дирака. Эта огромная масса означала бы, что ТВО-монополь мог быть порожден только во время Большого Взрыва. Если бы это было так, было бы вполне вероятно, что имеется некоторый высший смысл в квантовании как электрического, так и магнитного зарядов. В физике тайны порождают тайны.