

К ИСТОРИИ ОТКРЫТИЯ КВАНТОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА

К.А.Томилин

В 1948 году немецким физиком-эмигрантом Ф.Лондоном (1900-1954), работавшим в США, крупным ученым, специалистом в области низких температур и сверхпроводимости, создателем вместе со своим братом Г.Лондоном первой макроскопической теории сверхпроводимости, был предсказан эффект квантования магнитного потока в сверхпроводящем кольце с током [1, р.570] (обычно ссылки даются на его книгу 1950 года [2, р.151-152]). В 1953 году идея квантования магнитного потока была поддержана норвежским физико-химиком Л.Онсагером на Международной конференции по теоретической физике в Киото [3].



Фриц Лондон

Суть эффекта заключается в следующем. Замкнутый неодносвязный проводник (например, кольцо) помещается в магнитное поле, которое индуцирует в проводнике ток. При переходе к низким температурам (проводник погружается в жидкий гелий) кольцо становится сверхпроводящим и «захватывает» часть внешнего магнитного поля, соответствующую дискретным значениям магнитного потока: $\Phi = nhc/2e = n\Phi_0$ ($n=0, 1, 2 \dots$), где c , h и e – фундаментальные физические постоянные: скорость света, постоянная Планка и элементарный заряд. Этот сверхпроводящий ток и магнитный поток сохраняются бесконечно долго и при выключении внешнего поля; образуется структура, напоминающая магнит. Величина $\Phi_0 = hc/2e = 2,067833636(81) \cdot 10^{-7}$ гаусс·см² (СГС) называется квантом магнитного потока (в системе СИ $\Phi_0 = h/2e = 2,067833636(81) \cdot 10^{-15}$ Вб, формулы отличаются из-за того, что в СИ и СГС используются понятия магнитного поля, отличающиеся на эту постоянную). Сверхпроводящий ток это коллективное явление создаваемое частицами (парами электронов с противоположными спинами), находящимися в одном состоянии (фазовая когерентность). Макроскопическая дискретность связана с тем, что электроны при изменении внешних условий переходят в другое квантовое состояние не по отдельности, а все сразу.

Первоначально предсказанная Лондоном величина кванта потока была $\Phi_0=hc/e$, так как Лондон исходил из того, что сверхпроводящий ток создается электронами. Лишь в 1950-е годы была принята модель сверхпроводящего тока, создаваемого спаренными электронами с противоположными спинами и имеющими общий заряд $2e$. Это предположение легло в основу микроскопической теории сверхпроводимости Бардина-Купера-Шриффера (1957). После ее создания стало ясно, что в формулах макроскопических теорий сверхпроводимости под зарядом носителей тока e , который ранее отождествлялся с зарядом электрона, следует понимать заряд куперовской пары $2e$. Отсюда вытекала необходимость корректировки формул путем замены e на $2e$. Такое предположение в отношении эффекта квантования магнитного потока, а именно, что квантом магнитного потока может являться именно величина $\Phi_0=hc/2e$, а не $\Phi_0=hc/e$, было высказано в 1959 году Л.Онсагером в частной беседе с У.М.Фэрбенком на конференции по сверхпроводимости в Кэмбридже (Англия) (это было отмечено в статье Дивера и Фэрбенка [4]).

В июне 1961 года две группы экспериментаторов – Б.С.Дивер и У.М.Фэрбенк (Стенфордский ун-т, Калифорния, США), и Р.Долл и М.Нёбауэр (Баварская Академия наук, Германия) объявили об открытии квантования магнитного потока [4, 5]. Эксперименты носили исключительно тонкий характер. Сам квант магнитного потока очень мал и чтобы действительно зарегистрировать квантование магнитного потока необходимо было работать со слабыми магнитными полями и кольцами, имеющими как можно меньшую площадь. Чтобы создать такие проводники Долл и Нёбауэр напыляли на кварцевую нить тонкий слой металла (свинца). В результате получался проводник цилиндрической формы диаметром 10 микрон. Этот

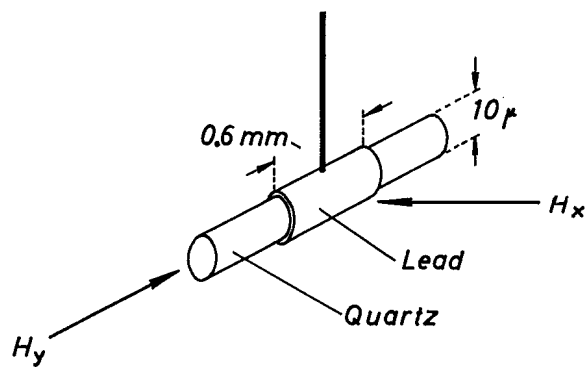


Рис. 1. Схема установки Долла и Нёбауэра.

проводник подвешивался перпендикулярно на другую кварцевую нить и по ее закручиванию при подаче дополнительного магнитного поля можно было судить о захваченном магнитном потоке (см. рис.1). Дивером и Фэрбенком такой же оловянный полый цилиндр диаметром ок. 2 микрон приводился в колебательное движение, что индуцировало в окружающей регистрирующей системе токи, величина которых зависела от величины захваченного кольцом магнитного потока. Эксперименты показали, что поле меньшее определенного значения вообще не захватывается, при превышении его захватывается 1 квант потока, соответствующий величине $hc/2e$; при превышении следующего критического значения захватывается два кванта потока и т.д., т.е. полностью подтвердили теоретическое

предсказание Ф.Лондона 1948 года с корректирующим множителем $\frac{1}{2}$ для кванта магнитного потока (см. рис. 2 и 3). Одновременно это стало первым экспериментальным подтверждением теории Бардина-Купера-Шриффера. Третья пара экспериментаторов – Дж.Меркьюри и Л.Вант-Халл, по-видимому из-за тонкости эффекта его зарегистрировать в 1961 году не смогла (они использовали 1 мм кольца) [6].

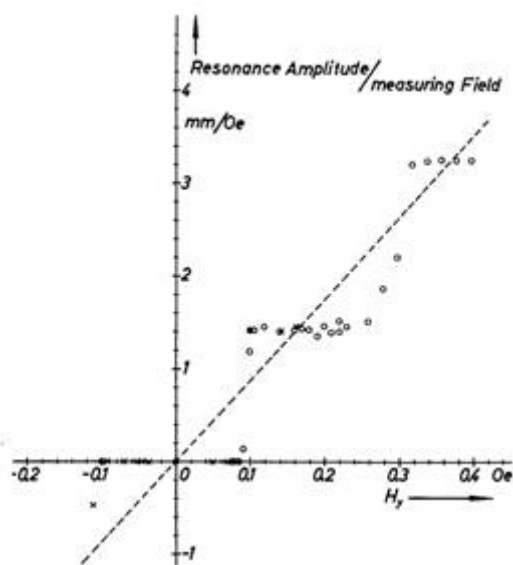


Рис.2 Результаты Р.Долла и М.Нёбауэра

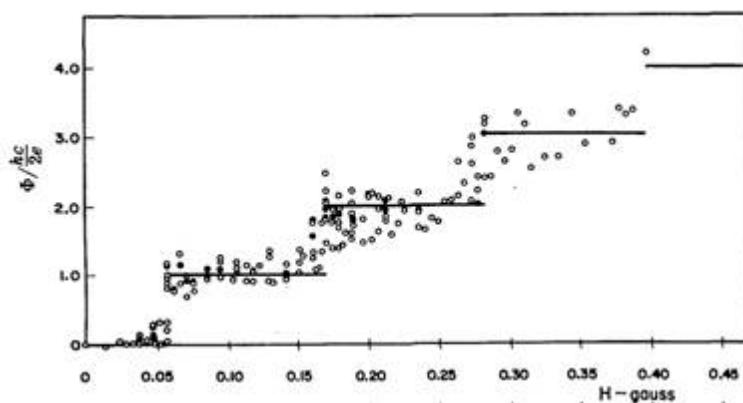


Рис.3 Результаты Б.С.Дивера и У.М.Фэрбенка

Статьи Дивера и Фэрбенка и Долла и Нёбауэра были опубликованы в одном номере «Physical Review Letters» за 15 июля 1961 года вместе с двумя статьями теоретиков, объясняющими этот эффект – Л.Онсагера [7] и Н.Байерса и Ч.Янга, также работавших в Стенфордском ун-те и получившими возможность познакомиться с результатами Дивера и Фэрбенка еще до их публикации [8]. Все четыре статьи были представлены в журнал в течение нескольких дней с 16 до 19 июня 1961 года, причем в статье Долла и Нёбауэра, представленной 19 июня, отмечалось, что статья была доложена на конференции по сверхпроводимости, прошедшей с 15 по 17 июня в Нью-Йорке. Возможно, эта конференция и побудила всех участников озаботиться о немедленной публикации. Это свидетельствовало о том, что открытие уже состоялось и началась борьба за приоритет и потенциальную Нобелевскую премию. Это открытие несомненно заслуживало наивысшей научной награды, однако в отличие от последовавших затем открытий других макроскопических квантовых эффектов – Джозефсона и квантового эффекта Холла, Нобелевской премией оно не было отмечено. Это произошло, очевидно, по формальным причинам: сам Ф.Лондон, предсказавший эффект, к этому времени уже умер, а оставшихся претендентов оказалось слишком много (по положению о присуждении Нобелевской премии она не дается посмертно и дается не более чем трем ученым одновременно).

Следует отметить, что формально еще до Лондона было высказано утверждение о квантовании магнитного потока. В 1931 году П.А.М.Дирак выдвинул гипотезу о существовании изолированных магнитных зарядов (монополей) как реальных объектов (до него понятие магнитных зарядов (магнитных масс) широко использовалось как вспомогательное при расчетах в магнитостатике для незамкнутых поверхностей). Существуют полярные точки зрения на эту идею Дирака. Не касаясь ее анализа, отметим, что Дирак попутно (и это не было замечено) не только вывел формулу квантования магнитного заряда $\mu = n\hbar c/4\pi e$, но и формулу квантования полного магнитного потока вокруг такого заряда (Дирак получил, что полный магнитный поток равен $2\pi n\hbar c/e$, где n – целое число, $\hbar = h/2\pi$, а это и есть формула квантования магнитного потока $\Phi = n\Phi_0$ при $\Phi_0 = hc/e$) [9, с.395]. Таким образом, Дирак оказался первым, кто формально заявил о квантовании магнитного потока, хотя речь и шла о полном магнитном потоке вокруг некоего гипотетического объекта. В целом идея Дирака изолированного магнитного заряда до сих пор выглядит чужеродной для электродинамики (например, она не излагается в учебниках по электродинамике). Магнитных монополей, несмотря на многолетние поиски, так и не обнаружили, однако их существование следует из принципа спонтанного нарушения симметрии, лежащего в основе современных теорий великого объединения. Стремясь выявить конструктивные идеи в любых математически корректных теориях, позволим себе высказать следующее предположение. Вспомогательное понятие магнитного заряда, которое применяется в электромагнетизме, может быть дополнено идеей квантованности магнитного заряда в соответствии с формулой Дирака, что оказывается продуктивным для незамкнутых поверхностей, например, как раз для случая поверхности, охватываемой кольцом с током. По крайней мере, с помощью такого подхода можно было прийти к реальному эффекту квантования магнитного потока через контур с током и получить правильную формулу, описывающую этот эффект.

Еще более простой путь к формулам макроскопических квантовых эффектов лежит через метод анализа размерностей. Из фундаментальности постоянных c , h и e следует, что и их комбинации также соответствуют неким фундаментальным количествам (квантам) соответствующих физических величин (с точностью до безразмерных множителей). Уже в 1920-30-е годы можно было на основе анализа размерностей выявить те физические величины, размерности которых являются комбинациями действия, скорости и электрического заряда (это магнитный поток, проводимость, сопротивление и магнитный заряд) и целенаправленно искать квантовые закономерности, связанные с этими физическими величинами (соответственно характерные масштабы hc/e , e^2/h , h/e^2 , hc/e с точностью до безразмерных множителей). Этот путь, если бы был реализован, мог бы

привести к более раннему открытию квантования магнитного потока и квантового эффекта Холла [10].

Выражаю признательность директору Центра истории физики при Американском институте физики С.Вирту за предоставление в распоряжение библиотеки ИИЕТ РАН книги и электронного диска «Physical Review» за 100 лет, содержащего все основные статьи, опубликованные в этом журнале, в том числе 7 статей по теме статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *London F.* On the problem of the molecular theory of superconductivity // *Phys. Rev.*, vol.74, № 5, p.562-573 (предст. 25 апреля 1948).
2. *London F.* Superfluids. Vol.1.: Macroscopic Theory of Superconductivity. N.Y.: John Wiley&Sons, 1950, p.151-152.
3. *Onsager L.* // Proceedings of the International conference on Theoretical Physics. Kyoto, Tokyo, September, 1953 (Science Council of Japan, Tokyo, 1954), p.935-936.
4. *Deaver B.S., Fairbank W.M.* Experimental evidence for quantized flux in superconducting cylinders // *Phys. Rev. Letters*, v.7, №2, p.43-46.
5. *Doll R., Näbauer M.* Experimental proof of magnetic flux quantization in a superconducting ring // *Phys. Rev. Letters*, v.7, №2, p.51-52.
6. *Onsager L.* Magnetic flux through a superconducting ring // *Phys. Rev. Letters*, v.7, №2, p.50.
7. *Byers N., Yang C.N.* Theoretical considerations concerning quantized magnetic flux in superconducting cylinders // *Phys. Rev. Letters*, v.7, №2, p.46-49.
8. *Mercereau J.E., Vant-Hall L.L.* // *Bull. Am. Phys. Soc.*, 6, 121 (1961).
9. *Dirac P.A.M.* Quantized singularities in the electromagnetic field // *Proc. Roy. Soc. A.* 1931, vol.133, p.60-72. Рус. пер.: *Дирак П.А.М.* Собрание научных трудов. Т.2. М.: Физматлит, 2003, с.388-398.
10. *Томилини К.А.* Постоянные h и e : от от попыток редукции к фундаментальному статусу // *Исследования по истории физики и механики.* 2001. М.: Наука, 2002, с.238-276.