

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Вопрос по выбору
Эффект Ааронова – Бома

Володин Максим

Б02-206

Физтех-школа физики и исследований имени Ландау

Содержание

| | |
|--------------------------------------|----------|
| Введение | 1 |
| Первый эксперимент | 1 |
| Теоретическое описание | 2 |
| Экспериментальное обнаружение | 2 |
| Второй эксперимент | 3 |
| Список литературы | 4 |

Введение

Реальны ли потенциал электромагнитного поля (φ, A) или это просто математические абстракции, которые введены для того, чтобы было удобнее решать те или иные задачи? В классической физике действие силы на частицу всегда локально. То есть надо найти значение силы со стороны электромагнитного поля, которое действует именно в этой точке. И тогда сила со стороны электромагнитного поля, действующая на частицу, это есть обобщённая сила Лоренца

$$\vec{F} = q \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}, \vec{B}] \right)$$

$$\vec{E} = -\nabla\varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad \vec{B} = \text{rot } \vec{A}$$

Удобно выразить электрическое поле и \vec{B} , введя потенциалы (φ, A) . Конечно, эти потенциалы, как всякие потенциалы, неоднозначны, нужно вводить специальную калибровку, чтобы устранить эту неоднозначность. В классической физике постулируется, что реальны поля, то есть силы, а потенциалы – это уже способ их описания

В квантовой механике, где система описывается волновой функцией, оказывается возможным бесилловое влияние на фазу волновой функции. И именно это делает электропотенциалы электромагнитного поля реальными (наблюдаемыми) величинами. Эффект Ааронова – Бома, авторами которого считается Аарон и Бом, хотя подобные мысли высказывались и до них Эренбергом и Сидаем, состоял в том, чтобы придумать такие мысленные эксперименты, которые могут, будучи реализованными, подтвердить физичность потенциалов поля

Первый эксперимент

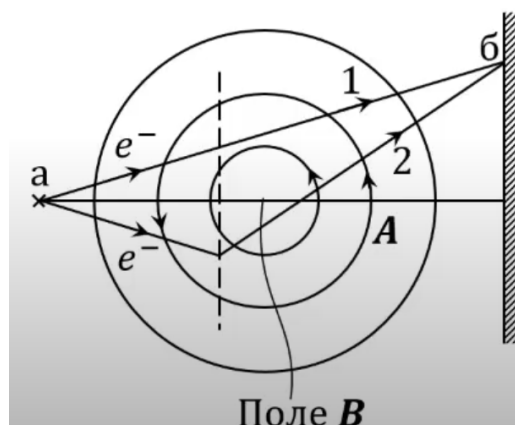


Рис. 1: Интерференция пучков электронов на двух щелях

Рассматриваем интерференционный опыт по типу опыта Юнга на двух щелях, схема которого дана на Рис 1. Если мы в точку А за щелями вставим бесконечно тонкий соленоид, внутри которого будет магнитное поле \vec{B} , то Ааронов и Бом показали, что результат интерференции будет сильно зависеть от векторного потенциала. Математически можно сказать так: если бы не было этого соленоида, (а он, грубо говоря, представляет из себя прокол, если вот это считать плоской картиной) и если бы прокола не было, я мог бы непрерывно деформировать путь этого электрона к этому электрону и разницы никакой не было. А проколота плоскость не позволяет мне это сделать непрерывно. То есть это есть некая топологическая особенность с математической точки зрения наличия вот такого магнитного поля. Причем, что интересно, магнитное поле, как мы знаем, заключено внутри соленоида, снаружи его нет. Поэтому вдоль пути а1б и вдоль пути а2б на электрон не действуют никакие силы. Электрического поля нет, магнитное находится в, грубо говоря, бесконечно малой области, в соленоиде. Но снаружи соленоида существуют векторные линии векторного потенциала (нарисованы в виде концентрических окружностей) То есть известно, что потенциал – векторный потенциал соленоида – представляет из себя силовые линии и оказывается, что, проходя в области, где есть векторный потенциал, электрон приобретает дополнительную фазу волновой функции. А это можно продемонстрировать, сбив на экране два луча, прошедшие с разных сторон от соленоида

Теоретическое описание

При наличии магнитного поля векторного потенциала вводится обобщённый импульс (большой импульс частицы не равен её количеству движения)

$$\vec{P} = m\vec{v} - \frac{e}{c}\vec{A}$$

Посчитаем фазу (точнее, её набег) от А до Б по пути 1 и второй раз по пути А2Б. Тогда фаза будет зависеть формально от магнитного поля, поскольку оно тут в той или иной мере присутствует.

$$\begin{aligned}\Delta\varphi(B) &= \frac{1}{\hbar} \int_a^b \vec{P} d\vec{l} = \frac{m}{\hbar} \int_a^b \vec{v} d\vec{l} - \frac{e}{c\hbar} \int_a^b \vec{A} d\vec{l} = \\ &= \Delta\varphi(0) - \frac{e}{c\hbar} \int_a^b \vec{A} d\vec{l}\end{aligned}$$

Это будет в единицах \hbar интеграл от а до б и поскольку обобщённый импульс состоит из двух частей, то будут два вклада в интеграл

$$\Delta\varphi_1(B) = \Delta\varphi_1(0) - \frac{e}{c\hbar} \int_1 \vec{A} d\vec{l} \quad \Delta\varphi_2(B) = \Delta\varphi_2(0) - \frac{e}{c\hbar} \int_2 \vec{A} d\vec{l}$$

Первый вклад мы назовём просто фазой при нулевом магнитном поле. Второй же будет зависеть непосредственно от циркуляции векторного потенциала. Аналогично для пути а2б. Давайте посмотрим, с какой разностью фаз придут в точку б два электрона, которые идут разными обходящими путями

$$\begin{aligned}\delta(B) &= \Delta\varphi_2(B) - \Delta\varphi_1(B) = \\ &= \delta(0) + \frac{e}{c\hbar} \left[\int_{a1b} \vec{A} d\vec{l} - \int_{a2b} \vec{A} d\vec{l} \right] = \delta(0) + \frac{e}{c\hbar} \oint \vec{A} d\vec{l}\end{aligned}$$

Здесь использована теорема Стокса, по которой интеграл был преобразован в поверхностный интеграл от $\text{rot } \vec{A}$, и он представляет собой нечто иное, как магнитный поток через контур. Причем надо отметить, что магнитный поток не размазан по всему контуру, а сосредоточен только в узкой области, где расположен соленоид

$$\oint \vec{A} d\vec{l} = \int_S \text{rot } \vec{A} d\vec{S} = \Phi$$

Таким образом, окончательно записываем, что полная разность представляется в виде некой разности, не зависящей от магнитного поля, и разности фаз, зависящей от магнитного.

$$\delta(B) = \delta(0) + \frac{e}{c\hbar} \Phi = \delta(0) + 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0}$$

Φ_0 – это знакомый нам сверхпроводящий квант и, соответственно, сдвиг интерференционной картины напрямую зависит от магнитного потока, имеющегося в соленоиде

$$\Phi_0 = \frac{hc}{e} = 2\pi \frac{\hbar c}{e} = 4,14 \cdot 10^{-7} \text{Gs} \cdot \text{cm}^2$$

Экспериментальное обнаружение

Рассмотрим два эксперимента, которые были сделаны в 80-х годах на Рис 2. Первый эксперимент сделала группа физиков под руководством Тономуры. Идея этого опыта состояла в двухлучевой интерференции: был источник электронов; он обходил тонкий и длинный. Разность фаз путей на экране приводила к смещению интерференционной картины в зависимости от того, какой ток пропусклся по соленоиду. Экран закрывал прямое попадание электронов. Тономура получил более-менее результаты, согласующиеся с формулой, но его эксперимент был подвержен критике, потому что не было гарантии, что все-таки силовые линии где-то там не выходят и тем не менее не оказывают действия.

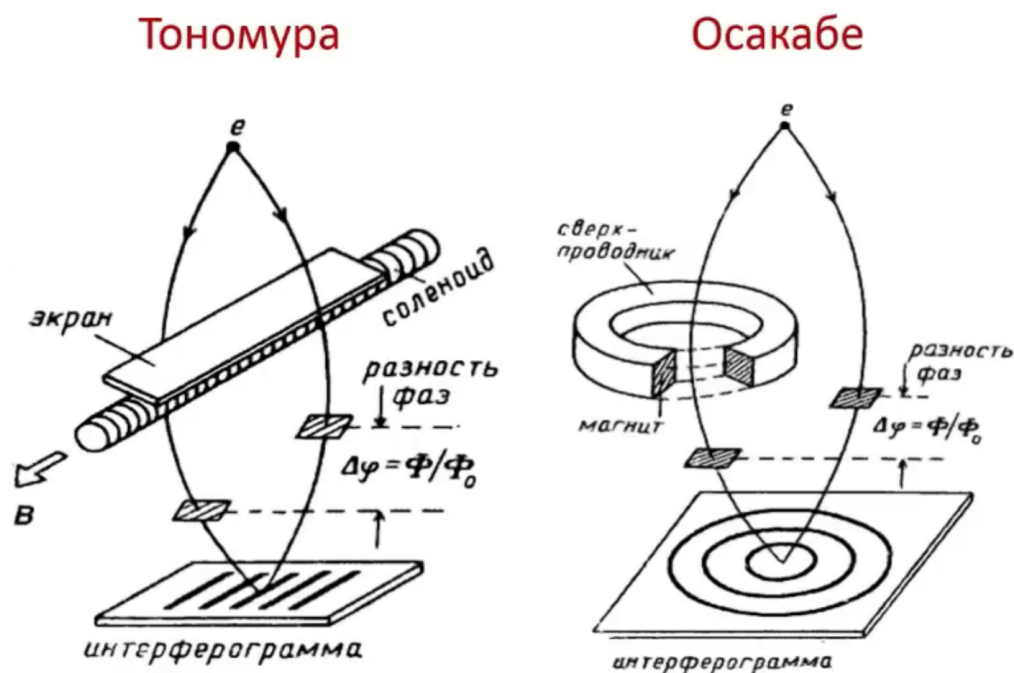


Рис. 2: Схемы экспериментов

Окончательное и бесповоротное подтверждение положения, выдвинутое Аароновым и Бомом было сделано другим японским физиком Осакабе и его группой, которые воспользовались простой народной мудростью: у кольца начала нет и нет конца. Они сделали тороидальный магнит и провели такой же опыт. Здесь уже, как говорится, крыть было нечем критикам: из тороидального магнита рассеяния уже никакого нет.

Более того, Осакабе, как говорится, сумел убить двух зайцев: он сделал опыт два раза. Дело в том, что его магнит был покрыт специальной ниобиевой плёнкой, который становится сверхпроводником и поэтому опыт делали два раза (один раз при температуре выше критической). Тогда сдвиг полос согласовывался с формулой, что мы привели выше, в которой фигурирует обычный квант магнитного потока, не сверхпроводящий, а после охлаждения плёнки до температуры ниже критической магнитный поток внутри сверхпроводящей плёнки стал квантоваться. Это привело к тому, что части силовых линий пришлось покинуть внутренность тороидального магнита из-за квантования магнитного потока в сверхпроводнике и в момент фазового перехода произошёл скачок сдвига фаз и картина сдвинулась и соответствующий сдвиг оказался пропорционален кванту в два раза меньшему, то есть сверхпроводящему. Поэтому это было ещё кроме доказательства существования эффекта Ааронова – Бома, доказательством наличия куперовских пар.

Второй эксперимент

Поскольку потенциалов было два, то Ааронов и Бом в своей работе предложили идею двухплечевого интерферометра, где на пути электронов были поставлены металлические трубки, на которые подавались электростатические потенциалы разной величины; таким образом, идея на Рис 3 та же самая: проходя по путям ABDF и ACEF электроны набирали дополнительную фазу, что в конечном счёте должно было привести к сдвигу интерференционной картины, если бы потенциалы не подавались вообще.

Такая же формула, только теперь интегралы по времени, которое электрон пролетает внутри трубки, в которой есть потенциал. Аналогичная формула будет для другого пути

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \delta(0) + \frac{e}{\hbar} \int \varphi_1 dt \\ \delta_2 &= \delta(0) + \frac{e}{\hbar} \int \varphi_2 dt \\ \delta &= \delta_2 - \delta_1\end{aligned}$$

К сожалению, в такой постановке сделать эксперимент не удалось, но к сегодняшнему дню получены доказательства для скалярного потенциала такие же надёжные, как и для векторного. Таким образом

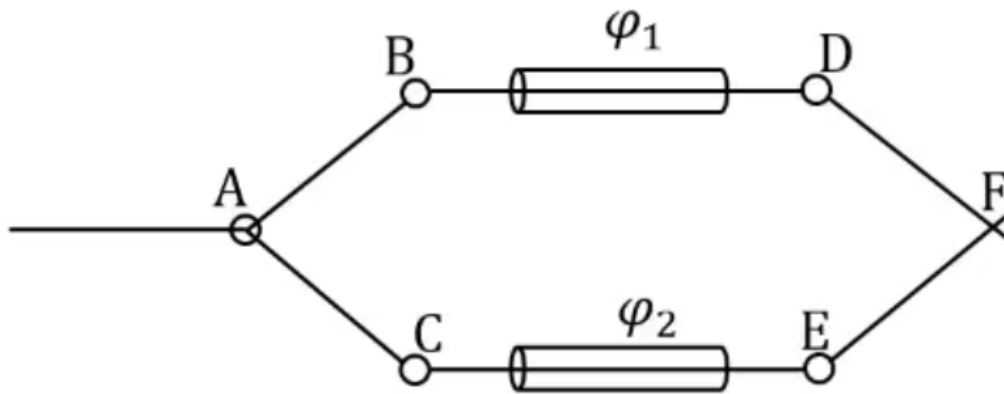


Рис. 3: Двухплечевой интерферометр Ааронова – Бома

можно считать, что в квантовой механике возможно нелокальное бессилловое воздействие на частицу. Раньше ещё Эйнштейн выражал бурное негодование тому, что квантовая механика допускает такие вещи.

Список литературы

- [1] Ehrenberg, W. and R. E. Siday, «The Refractive Index in Electron Optics and the Principles of Dynamics», London, 8—21 (1949)
- [2] Aharonov Y. and D. Bohm, «Significance of electromagnetic potentials in quantum theory», Phys. Rev. 115, 485—491 (1959)
- [3] Batelaan, H. and Tonomura, A. (Sep 2009). The Aharonov–Bohm effects: Variations on a Subtle Theme. Physics Today. 62 (9): 38–43
- [4] Osakabe, N., T. Matsuda, T. Kawasaki, J. Endo, A. Tonomura, S. Yano, and H. Yamada et al. Experimental confirmation of Aharonov–Bohm effect using a toroidal magnetic field confined by a superconductor // Physical Review A : journal. — 1986. — Vol. 34, №2. — P. 815—822
- [5] [Источник изображений] Алексей Понятов, Эффект Ааронова—Бома. Наука и жизнь, 2023, № 2. — с. 34