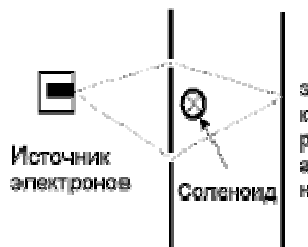


Эффект Ааронова-Бома и энергетические представления силовых взаимодействий

В.Л. Данилов
E-mail: vld53@mail.ru

(Получена 08 июля 2008; опубликована 15 июля 2008)

С.И.Доронин в статье «Магия запутанных состояний и современная физика» (<http://physmag.h1.ru/theory.files/article.html>) приходит к выводу, «что *любая* внешняя сила, действующая на объект, характеризуется соответствующим ей градиентом энергии внутри тела» и далее делается более сильное утверждение о том, что любая физическая сила в природе обусловлена наличием градиента энергии в рассматриваемой системе. Здесь мне хотелось бы показать плодотворность такого подхода на примере рассмотрения эффекта Ааронова-Бома, суть которого состоит в появлении несилового (с традиционной точки зрения) воздействия магнитного поля, заключенного в длинном соленоиде, на заряженную частицу, движущуюся в направлении, перпендикулярном соленоиду в области, где магнитное поле отсутствует. Это взаимодействие обнаруживается в интерференционном эффекте пучков электронов – картина интерференции меняется в зависимости от того, включен или выключен ток, создающий магнитное поле в соленоиде (см. рис.):



Электронная пушка испускает электроны с определенной энергией и импульсом, которые падают на экран с двумя щелями. Посредине между щелями расположен маленький соленоид, ток через который может быть либо включен, либо выключен. На втором экране наблюдается картина интерференции двух электронных пучков, которая зависит от наличия или отсутствия магнитного поля внутри соленоида.

В настоящее время этот эффект (подтвержденный экспериментально, но до сих пор вызывающий недоумение) объясняется тем, что в области движения электрона не равен нулю векторный потенциал **A**, который входит в формулу для канонического импульса электрона

$$\mathbf{\Pi} = \mathbf{P} + e \mathbf{A}$$

и, соответственно, в формулу для длины волны Де Бройля

$$l = \frac{2\pi\hbar}{\Pi}$$

Таким образом, векторный потенциал влияет на изменение фазы волн Де Бройля, падающих на экран, меняя тем самым картину интерференции. При этом исследователи делают вывод о существовании некоторого несилового взаимодействия, поскольку вектор-потенциал, по их мнению, является всего лишь удобной математической абстракцией, не имеющей реального физического содержания в смысле соответствия какому-либо силовому полю. Однако в последнее время все чаще встречается такие представления, в которых поле вектор-потенциала полагается реально существующим наравне с электромагнитными полями. Например, Ю.А.Бауров предложил теорию космического вектор-потенциала и даже предлагает технические решения для его обнаружения и использования энергии поля космического вектор-потенциала.

Однако, если принять справедливым утверждение о том, что любая физическая сила в природе обусловлена наличием градиента энергии в рассматриваемой системе, то поле вектор-потенциала можно представить силовым полем и, таким образом, объяснить эффект Ааронова-Бома именно силовыми взаимодействиями.

Не трудно показать, что в области нахождения однородного магнитного поля присутствует *градиент* вектор-потенциала. Например, можно рассмотреть поперечное сечение соленоида с током и найти распределение векторного потенциала **A** по радиусу *r* соленоида, применив теорему Стокса

$$\oint_{\partial S} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = \int_S (\text{rot } \mathbf{F}) \cdot d\mathbf{S}$$

с учетом связи магнитной индукции **B** с ротором векторного потенциала (**B**=rot**A**). Получим, что векторный потенциал **A** имеет постоянный градиент вдоль радиуса, равный *B*/2, при этом в центре соленоида (вернее, вдоль всей его оси) *A*=0, а на окружности поперечного сечения соленоида с радиусом *R* имеем *A*=*BR*/2. Компоненты вдоль оси соленоида вектор **A** не имеет.

Однако я не встречал, что бы кто-либо интересовался распределением вектор-потенциала вне соленоида, т.е. конфигурацией поля вектора **A** в той области, где магнитного поля нет. Есть лишь упоминания, что вектор **A** там отличен от нуля и *постоянен*. Если же применить теорему Стокса для того случая, когда поток магнитного поля (т.е. поток ротора вектора **B**) ограничен окружностью с радиусом *R*, а циркуляцию вектора **A** вычислять по контурам в виде окружностей с радиусами *r*, большими радиуса соленоида *R* и приняв во внимание, что для всех контуров с радиусами, большими *R*, поток магнитного поля будет постоянной величиной, равной произведению модуля вектора **B** на площадь кругового сечения соленоида (магнитное поле по-прежнему локализовано в области соленоида и отсутствует вне его), то можно получить, что вектор **A** вне соленоида также имеет градиент по радиусу – модуль вектора **A** зависит от *r* как 1/*r*, а градиент **A** пропорционален квадрату этой величины.

Таким образом, если полю вектора **A** сопоставить некоторую энергию, то в рассматриваемой картине имеем радиальные потоки этой энергии как внутри соленоида, так и снаружи, направленные противоположно друг другу.

Далее, если рассматривать электрон не как точечный заряд, а как сферический объект с радиусом, не равным нулю и рассматривать его движение как электрический ток по проводнику с радиусом поперечного сечения, равному радиусу электрона, можно обнаружить, что внутри этого «проводника» с током также присутствует поток энергии, соответствующей векторному полю $\mathbf{A}$, которое связано с магнитным полем, создаваемым этим «проводником» с током.

Таким образом, как внутри соленоида, так и снаружи мы наблюдаем взаимодействие потока некоей энергии с градиентами этой же энергии, что обнаруживается как отклонение наблюдаемого потока энергии (траектории движения электрона). Можно показать, что эти взаимодействия очень слабы по сравнению с магнитными, поэтому могут быть обнаружены только с помощью чувствительных интерференционных методов, при чем только в отсутствии магнитного поля, поскольку на фоне магнитных взаимодействий они вообще будут не видны. Можно еще добавить, что и магнитные взаимодействия могут быть объяснены наличием градиента магнитного поля, появляющегося в постоянном магнитном поле при движении заряженного объекта (электрона) ненулевого объема. Это может означать, что аналогично силе Лоренца для магнитных взаимодействий, наличию градиентов векторного потенциала также можно сопоставить некоторую силу, а поле векторного потенциала можно рассматривать как силовое поле. Тогда эквивалентность языка силовых полей и потенциалов при описании взаимодействий, которая была поставлена под сомнение в связи с существованием эффекта Ааронова-Бома, будет восстановлена.

Выявление силового характера поля вектор-потенциала может быть осуществлено с помощью конструкции в виде «двойного» соленоида: миниатюрный соленоид диаметром несколько микрон (такой, как в некоторых экспериментах по наблюдению эффекта Ааронова-Бома) наматывается на длинный цилиндр для получения большого соленоида так, чтобы диаметр последнего был намного больше диаметра исходного миниатюрного соленоида. Можно показать, что внутри большого соленоида при прохождении тока по обмотке малого соленоида появится однородное постоянное поле вектор-потенциала, аналогичное постоянному магнитному полю в обычном соленоиде. Далее, если во внутреннюю область полученного двойного соленоида поместить такой же двойной соленоид меньшего размера, можно обнаружить воздействие на него силы, аналогичной той, которая действует на намагниченный объект в магнитном поле. В техническом плане этот эксперимент можно существенно упростить, заменив миниатюрный соленоид тонкой нитью из магнитного материала (такие нити толщиной в единицы микрон также использовались при наблюдении эффекта Ааронова-Бома), при этом нежелательные эффекты, связанные с рассеянным магнитным полем, которое возникает из-за неоднородного намагничивания нити в некоторой степени скомпенсируются за счет именно такой конструкции двойного соленоида, но в конечном итоге это будет лишь незначительно сказываться на однородности поля вектор-потенциала.

Таким образом, появляется возможность построения некоторого аналога электромагнитного двигателя, в котором взаимодействие магнитных полей заменено на взаимодействия полей вектор-потенциалов с одним существенным отличием: для

создания полей вектор-потенциалов нужной конфигурации не нужно подводить электрический ток, как это делается в электродвигателях, его роль будет исполнять нить из магнитного материала.

Интересно отметить, что двойной соленоид с постоянным полем вектор-потенциала можно использовать для обнаружения (и, возможно, измерения) космического векторного потенциала Баурова аналогично тому, как магнитная стрелка компаса указывает направление магнитного поля Земли.