

## Комментарий к статье Р.И.Храпко «О возможности эксперимента, касающегося «нелокальности» электродинамики»

В.Ю.Венедиктов

*Методическая заметка посвящена анализу мысленного эксперимента, предложенного в статье Р.И.Храпко «О возможности эксперимента, касающегося «нелокальности» электродинамики» (Квантовая электроника, 42, 1133 (2012)).*

**Ключевые слова:** манипуляция макроскопическими частицами, момент вращения, эффект Бета, эффект Ригги.

Опыт Бета (R.A.Beth, [1]) явился одним из ключевых опытов, обосновавших квантово-механические воззрения на оптическое излучение. Суть этого опыта заключалась в демонстрации того, что изменение спина кванта света при его взаимодействии с веществом сопровождается передачей веществу момента вращения. Например, при прохождении циркулярно поляризованного света через полуволновую пластину состояние его поляризации меняется на противоположное. Это означает, что спин каждого фотона при этом меняет знак, и пластинка приобретает момент вращения, пропорциональный числу прошедших через нее квантов света. Интересно отметить, что при одной и той же энергии импульса излучения эффект тем сильнее, чем больше длина волны света. Эффект этот весьма слаб – достаточно заметить, что для его наблюдения приходится нейтрализовать значительно более сильный эффект давления света. Однако Бет смог его наблюдать. Он использовал крутильный маятник, вращающаяся масса которого была образована полуволновой пластиной. Влияние давления света обнулялось за счет двукратного прохождения света через пластину в обоих направлениях. Бет смог зафиксировать изменение параметров крутильных колебаний и провести количественные оценки эффекта. Этот классический эксперимент не только подтвердил вращательную природу спина, но и позволил впервые количественно оценить (т. е. измерить) постоянную Планка.

Позднее этот опыт неоднократно повторялся (см., напр., [2, 3]). Использование излучения непрерывного СО<sub>2</sub>-лазера [2] позволило получить непосредственное «закручивание» крутильного маятника, а с использованием микроволнового излучения [3] эффект становится вполне «осязаемым».

Сегодня особый интерес вызывают применения этого эффекта для манипуляции малыми, но макроскопически частицами. В этой связи представляет интерес его опи-

сание на языке классической, макроскопической физики, т. е. в данном случае – на языке обычной электродинамики. Насколько нам известно, последовательной теории данного эффекта с учетом распространения излучения через двулучепреломляющую среду пока не создано, однако в ряде работ (см., напр., [4, 5]) было показано, что для осуществления передачи момента импульса световое электромагнитное поле должно обладать ненулевой составляющей в направлении распространения световой волны. Такая ненулевая составляющая возникает в пучках с непостоянной по сечению фазой и (или) интенсивностью, т. е. во всех случаях, кроме идеальной плоской волны. В этом случае попытки анализа приводят к «парадоксу плоской волны». В настоящее время большинство авторов (см, напр., те же работы [4, 5]) полагают, что этот парадокс кажущийся – плоская волна есть идеализация, в реальном эксперименте все пучки и элементы имеют конечную апертуру, и дифракция на ней и дает необходимую продольную составляющую электромагнитного поля световой волны.

Однако автор [6] пытается найти иное разрешение этого парадокса, предполагающее нелокальный характер действия электромагнитного поля. В частности, ранее он предложил [7] мысленный эксперимент по наблюдению эффекта Бета в концентрической составной поглощающей пластине, предполагающий, что внутренняя пластинка, в апертуре которой нет краевых эффектов, будет, тем не менее, вращаться под действием внешнего поля. Этот мысленный эксперимент был детально разобран в [8], где показано, что никакой воображаемой «нелокальности» уравнений Максвелла в данном случае не наблюдается, принцип соответствия при переходе от квантового описания к классическому выполняется, и каждая из пластинок будет вращаться в строгой зависимости от падающего на нее потока фотонов и передаваемого ими момента импульса, а с формальной точки зрения за это ответственен градиент интенсивности, возникающий на границе раздела концентрических полуволновых пластин.

В статье [6] автор предлагает аналогичный мысленный эксперимент, в котором вместо концентрической поглощающей пластины использовалась бы аналогичная полуволновая фазовая пластинка. Очевидно, что при реализации опыта Бета в этом случае результаты соответствующего мысленного эксперимента будут теми же, и выводы [8] полностью справедливы и в этом случае.

---

**В.Ю.Венедиктов.** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Россия, 197376 С.-Петербург, ул. проф. Попова, 5; Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, Россия, 198504 С.-Петербург, Старый Петергоф, ул. Ульяновская, 3; e-mail: vlad.venediktov@mail.ru

Поступила в редакцию 12 сентября 2014 г., после доработки – 27 января 2015 г.

---

Далее автор [6] совершает серьезную методологическую ошибку, пытаясь провести с той же составной полуволновой пластиной мысленный эксперимент по схеме опыта Ригхи. В классическом эксперименте Ригхи (A. Righi [9, 10]) используется двухлучевой интерферометр Маха–Цендера, в каждом из плеч которого содержится полуволновая пластина. На вход интерферометра подается циркулярно поляризованная волна, меняющая в указанных пластинах свое направление поляризации на противоположное, и на выходе интерферометра наблюдается двухлучевая интерференция. Ригхи заметил, что при вращении одной из пластин вокруг оптической оси интерферометра полосы в картине интерференции начинают «смещаться», и после полного оборота пластины они «смещаются» на два периода.

На квантовом (микроскопическом) языке эффект Ригхи объясняется аналогично эффекту Бета: при прохождении через пластину фотоны обмениваются моментом импульса с веществом и меняют начальное значение спина на противоположное. Соответственно автор [6] предположил, что и в этом случае возможны проявления гипотетической «нелокальности» электромагнитного поля, что, по его мнению, должно приводить к тому, что «сдвиг полос на краю освещенной области будет большим, когда вращается внешняя часть пластинки» [6] (в смысле – больше, чем два периода смещения интерференционных полос за один полный оборот пластины – *примеч. автора*).

Ошибка автора [6] заключается в том, что он не учел принципиальное различие в трактовках опытов Бета и Ригхи в макроскопическом (классическом) приближении. Если такая трактовка опыта Бета действительно сталкивается с вышеупомянутыми трудностями, приводящими к «парадоксу плоской волны», то макроскопическая трактовка опыта Ригхи абсолютно прозрачна и не приводит ни к каким парадоксам, что видно из следующего.

Для простоты изложения воздержимся от математического описания и рассмотрим простейший мысленный эксперимент. Представим себе, что в начальный момент в опыте Ригхи обе полуволновые пластины стоят в одинаковой позиции – например, кристаллические оси обеих двулучепреломляющих пластин направлены вертикально. Пусть длины плеч интерферометра совпадают. В этом случае волны на выходе интерферометра совпадают по фазе, происходит конструктивная интерференция и интенсивность суммарной волны максимальна. Циркулярно поляризованная волна на входе интерферометра может быть представлена как суперпозиция вертикально и горизонтально линейно поляризованных волн, и в вышеописанной схеме обе пары линейно поляризованных волн интерферируют конструктивно.

Теперь пусть одну из полуволновых пластин повернуть вокруг оптической оси интерферометра на  $90^\circ$ . Набег

фазы для вертикально поляризованной волны изменится по сравнению с исходным положением пластины на  $\lambda/2$ , и на выходе интерферометра вертикально поляризованные волны будут интерферировать деструктивно (с точностью до погрешности изготовления пластины). То же произойдет и с горизонтально поляризованной волной, и в результате интенсивность совокупной циркулярно поляризованной волны на выходе интерферометра также будет минимальна.

Поворот пластины еще на одну четверть оборота приведет к восстановлению первоначальной картины (опять же, в предположении плоскостности пластины) и т.д. Совершенно очевидно, что приведенные рассуждения справедливы и для идеальной плоской волны, и для расходящихся волн, рассматриваемых в [6]. Предскажем и тривиальный результат предложенного в [6] мысленного эксперимента: в пределах апертуры пучка, соответствующего вращаемой пластине, полосы будут «бежать», а в остальной его части – покоиться.

Вероятной причиной ошибочных предсказаний автора [6] является другая, весьма распространенная методологическая ошибка, а именно попытка интерпретировать нестационарную картину интерференции двух световых пучков в терминах «смещения» интерференционных полос. В ряде случаев, в частности тогда, когда в стационарной схеме картина интерференции носит сложный характер, такая интерпретация может приводить к заблуждениям. Во избежание этого целесообразно пользоваться представлением об изменяющемся во времени значении интенсивности в исследуемой картине интерференции. В опыте Ригхи в каждой точке выходного поля, соответствующего вращаемой полуволновой пластине, при ее полном обороте интенсивность интерференционного поля будет претерпевать двукратный полный цикл осцилляции и возвращаться к первоначальному значению.

Автор настоящей заметки является исполнителем государственной работы «Организация проведения научных исследований» базовой части госзадания Минобрнауки России.

1. Beth R.A. *Phys. Rev.*, **50**, 115 (1936).
2. Delannoy G., Emile O., Le Floch A. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 081109 (2005).
3. Tamburini F., Mari E., Thidé Bo, Barbieri C., Romanato F. *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 204102 (2011).
4. Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C., Woerdman J.P. *Phys. Rev. A*, **45**, 8185 (1992).
5. Allen L., Padgett M.J. *Opt. Commun.*, **184**, 67 (2000).
6. Храпко Р.И. *Квантовая электроника*, **42** (12), 1133 (2012).
7. Khrapko R.I. *Am. J. Phys.*, **69**, 405 (2001).
8. Allen L., Padgett M.J. *Am. J. Phys.*, **70**, 567 (2002).
9. Righi A. *Mem. d. Accad. d. Scienze di Bologna*, [IV] **4**, 247 (1882).
10. Atkinson R. *Phys. Rev.*, **47**, 623 (1935).