

ЭФФЕКТ А.И. САДОВСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЙ НЕИЗОТРОПНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА

В.Б. Лапшин, А.В. Белинский

*Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы*

Аннотация. Предложена новая интерпретация эффекта А.И. Садовского и описан связанный с ним эксперимент. Показано, что наблюдаемое при взаимодействии электрона с плоской однородной электромагнитной волной невыполнение закона сохранения момента импульса позволяет выдвинуть гипотезу о нарушении изотропности пространства. Проанализирован также вопрос о неоднородности пространства.

Ключевые слова: эффект А.И. Садовского, спиновый и орбитальный момент фотона, электрон в электромагнитном поле, поляризация электромагнитной волны, закон сохранения момента импульса, теорема Нётер.

Эффект А.И. Садовского, представляющий собой возникновение механического момента у материальных объектов под действием плоской однородной циркулярно-поляризованной, а в общем случае – эллиптически поляризованной волны, был открыт в 1898 году [1] и впервые экспериментально подтвержден Р.А. Бетсом (Beth R.A.) в 1935 году [2]. Казалось бы, природа эффекта совершенно очевидна: вращается вектор поля, а с ним начинает вращение и облучаемое микротело. Но эта кажущаяся ясность оказывается ясной лишь на первый взгляд. Дело в том, что вдоль вектора Пойнтинга невозможен перенос составляющей момента импульса. В частности, в плоской электромагнитной волне $\exp i(-\omega t + kz)$, распространяющейся вдоль оси z , вектор Пойнтинга направлен по z , и поэтому $g_{zz} = 0$. Значит, момент импульса плоской электромагнитной волны всегда равен нулю независимо от поляризации [3–5].

Откуда же возникает вращение частиц, зарегистрированное как Р.А. Бетсом [2], так и в других экспериментах [6; 7]? Передается ли спиновый момент материальным объектам при взаимодействии или нет? Ведь в экспериментах [2; 6; 7] излучение с круговой поляризацией заставляло вращаться микрообъекты. Но последние были анизотропными, и волна в них за счет преломлений и переотражений может приобретать орбитальный момент \vec{l} вследствие изменения топологии волнового фронта. В результате появляются вихревые дислокации. Например, Р.А. Бетс облучал анизотропную двулучепреломляющую среду [2], которая преобразует спиновый момент импульса фотонов в орбитальный, а последний уже и раскручивает образец.

Рассмотрим особенности передачи момента импульса электромагнитного поля материальным объектам. Вообще говоря, импульс может передаваться вследствие давления света – эффекта Лебедева – пондеромоторными силами. Но применительно к элементарным частицам, особенно к электрону, площадь поверхности которых исчезающе мала, этот механизм передачи практически отсутствует.

Как и всякая элементарная частица, фотон может обладать моментом импульса \vec{j} . В квантовой электродинамике момент импульса состоит из ее орбитального момента \vec{l} и собственного момента – спина \vec{s} [8]. Физический смысл этих величин состоит в следующем.

Поляризация фотона связана со спиновой компонентой волновой функции. Направление спинового момента фотона \vec{s} совпадает с направлением его движения, и модуль его не может быть нулевым (см., напр., [8]), а лишь $s = \pm 1$. Это означает, что одномодовое однофотонное состояние $|1\rangle$ может иметь только циркулярную поляризацию. Альтернативные два вида круговой поляризации при заданном импульсе означают двукратное вырождение каждого собственного значения импульса. Линейная же поляризация фотона может быть лишь суперпозицией двух циркулярных поляризаций.

Парадоксальность эффекта А.И. Садовского замечена давно, и попытки ее преодоления предпринимались неоднократно. И.В. Соколов так интерпретирует ситуацию [3]. Действительно, у плоской безграничной волны момента импульса нет, и вращать, по его утверждению, она ничего не может. Но безграничных плоских однородных волн в природе не существует, и эффект вращения возникает вследствие краевых эффектов на границе пространственно ограниченной волны. Он приводит расчеты, которые подтверждают эту интерпретацию. Но согласуются ли они с реальностью? Ведь хорошо известно, что электрон в поле плоской безграничной электромагнитной волны имеет круговую траекторию. Причем же тут краевой эффект?

Действительно, в поле плоской монохроматической волны с частотой ω электрон вращается по круговой орбите радиуса [9]
$$\rho = \frac{eE}{\omega\sqrt{m^2\omega^2 + E^2}},$$
 в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, с постоянным по величине импульсом $p = eE/\omega$. Направление импульса электрона \vec{p} в каждый момент противоположно направлению магнитного поля \vec{B} волны.

Мы предлагаем другую трактовку эффекта А.И. Садовского, которая не только проясняет физику явления, но и дает наглядную модель возникающего вращения.

Обратимся к простой аналогии: ветер вращает лопасти ветрогенератора. Энергию ветрогенератор получает от потока воздуха, импульс которого обычно перпендикулярен плоскости вращения лопастей генератора, а момент импульса потока воздуха, тем не менее, отсутствует, лопасти вращаются, причем вращение не зависит от того, насколько обширен фронт потока. Почему

же вращаются лопасти? Потому, что их структура и геометрия такова, что ненулевой момент импульса лопастей мельницы является следствием взаимодействия стационарного воздушного потока с лопастями – силы Жуковского. Так же и электрон в результате взаимодействия с плоской однородной электромагнитной волной, не имеющей момента импульса, приобретает момент импульса, то есть взаимодействие является источником момента импульса для электрона.

Обратимся к еще одной аналогии. Турбина в аэродинамической или гидродинамической трубе начинает вращаться под действием набегающего на нее стационарного потока. Поток за турбиной закручивается в ту же сторону! В этой схеме есть источник пары сил, который закручивает и турбину, и поток за турбиной. Таким источником момента импульса турбины и потока за турбиной является взаимодействие стационарного потока и турбины посредством силы Жуковского.

Рассмотрим вторичную электромагнитную волну, излучаемую вращающимся электроном. Запишем напряженность магнитного поля, создаваемого вращающимся по кругу электроном [10]:

$$\vec{H} = e\omega^2 \rho \left((-\sin \omega t \cos \theta) \vec{i} + (\cos \omega t \cos \theta) \vec{j} + (-\cos \omega t \sin \theta) \vec{k} \right), \quad (1)$$

где θ – угол между осью вращения z и направлением наблюдения создаваемого излучения, а $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – ортонормированный декартовый базис.

Электрическое поле однозначно связано с магнитным и легко вычисляется с помощью (5). Известно, что синхротронное или циклотронное излучение электрона направлено коническим раструбом вперед, а не назад по отношению к вектору его движения.

Подводя итог, можно утверждать, что при взаимодействии электрона с плоской однородной электромагнитной волной нарушается закон сохранения момента импульса. Каковы причины этого нарушения?

Краевые эффекты, конечно, имеют место, но они не объясняют момента импульса электрона при взаимодействии с плоской однородной циркулярно поляризованной электромагнитной волной. Основа же – в свойстве взаимодействия электрона с плоской однородной электромагнитной волной, аналогичном силе Жуковского в лопастях турбины при турбулизации ламинарных потоков в трубе с пассивной турбиной.

В связи с явным нарушением закона сохранения момента импульса появляются следующие соображения. Если в пассивной турбине вращение возникло за счет пары сил, причиной чего была геометрия турбины, то в случае вращающегося электрона такой пары сил нет. Поэтому грубая механическая аналогия не исчерпывает парадоксальности ситуации. С электроном рассматриваемый эффект гораздо сложнее.

Кроме того, многомодовое электромагнитное поле имеет бесконечное число степеней свободы, а у любой механической системы их всегда конечное число. Эти простые соображения следует учитывать при построении аналогий с гидро- и аэродинамикой.

Какие же следствия можно вывести из нарушения закона сохранения момента импульса? Согласно теореме Нётер [11], достаточным условием выполнения этого закона является изотропность пространства [12].

Сохранение *углового момента* $\vec{l} = \vec{r} \times \vec{p}$, где \vec{p} – импульс, а \vec{r} – декартовы координаты, следует из симметрии вращения лагранжиана, то есть лагранжиан L не зависит от абсолютной ориентации физической системы в пространстве. Для определенности предположим, что лагранжиан не меняется при малых поворотах на угол χ вокруг некоторой оси \vec{n} . Такое преобразование вращения преобразует *декартовы координаты* следующим образом: $\vec{r} \rightarrow \vec{r} + \chi \vec{n} \times \vec{r}$.

Поскольку время не трансформируется, и принимая χ в качестве параметра и декартовы координаты \vec{r} в качестве обобщенных координат \vec{q} , соответствующие переменные \vec{Q} задаются в виде $\vec{Q}_r = \vec{n} \times \vec{r}$. Тогда теорема Нётер утверждает, что величина $\frac{\partial L}{\partial \vec{q}} \cdot \vec{Q}_r$ сохраняется. Итак, компонента углового

момента \vec{l} вдоль оси \vec{n} неизменна. Если \vec{n} произвольно, то есть если система нечувствительна к любому повороту, каждая компонента \vec{l} сохраняется. Таким образом, *угловой момент* инвариантен. Если же закон сохранения не выполняется, согласно теореме Нётер, то пространство в области взаимодействия электрона с полем не изотропно.

Рассматриваемый эффект можно считать экспериментальным подтверждением гипотезы о нарушении изотропности пространства.

Правда, можно было бы возразить: классическая электромагнитная волна не обладает моментом импульса, а у фотона есть спин, который и раскручивает электрон. В этом случае приобретаемый электроном момент импульса был бы пропорционален числу фотонов в плоской электромагнитной моде. Но радиус вращения пропорционален амплитуде поля, а не интенсивности, то есть такое объяснения некорректно.

Опять же можно возразить: а может быть, фотоны передают не весь свой суммарный спин, а только часть его за счет того, что некоторые фотоны передают момент импульса, а некоторые – нет? Но тогда бы суммарный момент импульса поля уменьшался бы, а он увеличивается за счет синхротронного излучения электрона. Итак, и эта гипотеза не выдерживает критики.

Проведенный анализ позволяет сделать следующее предположение: пространство в области взаимодействия электрона с плоской однородной электромагнитной волной не изотропно. Такой вывод вполне согласуется и с квантовыми расчетами. Например, в работе [13] показано, что при взаимодействии безмассового скалярного поля и массивного фермионного поля в пространстве-времени с однородной изотропной метрикой открытого типа возникает эффект спонтанного P- и CP-нарушения. Вычислена поправка к плотности числа рожденных частиц, возникающая за счет эффекта спонтанного нарушения симметрии.

Аналогичную гипотезу можно выдвинуть, анализируя закон сохранения импульса при взаимодействии электрона с плоской однородной электромагнитной волной. Импульс плоской электромагнитной моды направлен по нормали к фронту, а электрон в поле этой волны приобретает поперечный импульс, перпендикулярный нормали фронта. Учет вторичного излучения электрона проблемы не решает. Значит и закон сохранения импульса не выполняется, что, возможно, свидетельствует о неоднородности пространства.

Актуальность темы подтверждается свежими публикациями, посвященными вопросам нарушения законов сохранения (см., например, [14]).

Какие же выводы можно сделать из представленного рассмотрения?

Прежде всего, возникает вопрос: можно ли писать закон сохранения момента импульса (да и просто импульса) для кинетического движения частицы и электромагнитной волны? Являются ли их моменты импульсов и импульсы сопоставимыми настолько, что их можно складывать, записывая законы сохранения? Вполне возможно, что это настолько различные несопоставимые величины, что их суммирование просто бессмысленно. Тогда снимается вопрос и об изотропности и неоднородности пространства.

Но если все-таки механический момент и момент электромагнитной волны в совокупности подчиняются закону сохранения, то остается лишь единственная возможность – констатация неизотропности и неоднородности пространства в области взаимодействия частицы с волной. Это удивительный результат, базирующийся на эксперименте, который, разумеется, нуждается в дальнейших исследованиях.

Литература

1. Садовский А.А. // Уч. Зап. Имп. Юрьевск. университета. 1899. No. 1. С. 1-126.
2. Beth R.A. Mechanical Detection and Measurement of the Angular Momentum of Light // Phys. Rev. 1936. 50. P. 115.
3. Соколов И.В. Момент импульса электромагнитной волны, эффект Садовского и генерация магнитных полей в плазме // УФН. 1991. 161. С. 175–190.
4. Соколов А.А. Введение в квантовую электродинамику. М.: Физматлит, 1958.
5. Розенберг Г.В. Наблюдение спинового момента сантиметровых волн // УФН. 1950. Т. 40. В. 2. С. 328–331.
6. Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н. Физика элементарных частиц и атомного ядра // Физика элементарных частиц. 2004. 35. С. 1368–1432.
7. Кундикова Н.Д. Поляризационная оптика: история и перспективы. URL: <https://mipt.ru/abiturs/schools/leto/upload/6e4/04-3-kundikova-arpgb9ppxd0.ppt>
8. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Теоретическая физика. Т. 4: Квантовая электродинамика. М.: Физматлит, 2002. 720 с.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 2: Теория поля. М.: Наука, 1988. С. 160.
10. URL: <http://phys.nsu.ru/cherk/Eldin/Urok18.pdf>
11. Нётер Э. Инвариантные вариационные задачи // Вариационные принципы механики / под ред. Л.С. Полак. М.: Физматлит, 1959. С. 613–614.
12. URL: https://ru.qwe.wiki/wiki/Noether's_theorem

13. Гриб А.А., Мостепаненко В.М., Фролов В.М. Спонтанное нарушение CP-симметрии в нестационарной изотропной метрике // ТМФ. 1978. Т. 37. № 2. С. 212–223.
14. Etkin V. On the incompatibility of the laws of energy and pulse conservation // Annali d'Italia. 2020. № 3. P. 41–47.

THE EFFECT OF A.I. SADOVSKY AND THE LAW OF CONSERVATION OF ANGULAR MOMENTUM

V.B. Lapshin, A.V. Belinsky

*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Leninskie Gory, Moscow 119991, Russian Federation*

Abstract. A new interpretation of the effect of A.I. Sadovsky is proposed and an experiment associated with it is described. It is shown that the non-fulfillment of the law of conservation of angular momentum observed in the interaction of an electron with a plane homogeneous electromagnetic wave makes it possible to put forward a hypothesis about violation of the isotropy of space. The issue of space inhomogeneity is also analyzed.

Keywords: A.I. Sadovsky effect, spin and orbital momentum of a photon, electron in an electromagnetic field, polarization of an electromagnetic wave, law of conservation of angular momentum, Noether theorem.