

ОБ ИСТИННОМ СМЫСЛЕ ОПЕРЕЖАЮЩИХ ПОТЕНЦИАЛОВ

1. Близкодействие и дальноедействие

В общепринятой трактовке теории электромагнитного поля (см. [Ландау и Лифшиц, 1967]) действие для частицы с зарядом e и массой m описывается (без учета внешнего поля и в отсутствие других зарядов) выражением

$$S = - m \int ds - (e/c) \int A_k dx^k$$

где c – скорость света, A_k – компоненты вектор-потенциала поля, а интегралы берутся по 4-мерной мировой линии от точки, отвечающей *началу* движения, до *конечной* точки. Реальной мировой линии отвечает экстремум этого интеграла.

Традиционная концепция описания электромагнитного излучения одиночного заряда лишь запаздывающими потенциалами создает, как может показаться, определенную коллизию с *обратимостью исходных уравнений электродинамики*, которая приводит к формальной допустимости использования симметричного во времени решения – линейной комбинации выражений $f(t - x/c)$ и $f(t + x/c)$. При этом нельзя не отметить, что и *обратимые* уравнения механики чаще всего используются лишь для описания *будущего* поведения объектов. В то же время именно *обратимость* уравнений механики является, как убедительно показано в [Хайтун, 1996], непреодолимым препятствием для *априорного* обоснования необратимости стохастического поведения физических ансамблей.

Между тем, идея *симметричного* во времени процесса электромагнитного взаимодействия в начале 20-го века начала завоевывать умы физиков. Так, авторы работы [Уилер и Фейнман, 1945] приводят яркое и глубокое высказывание Тетраде (1922 год), который считал излучение следствием непосредственного взаимодействия между излучателем и поглотителем (перевод мой – М.Х.Ш.):

...источник света не излучал бы, если бы где-либо не нашлось тела, способного поглотить это излучение... например, если я вчера наблюдал с помощью телескопа звезду, удаленную, скажем, на 100 световых лет, то не только я знаю, что испущенный ею 100 лет назад свет достиг моего глаза, но также и звезда или ее отдельные атомы уже 100 лет назад знали, что я, который даже еще не существовал тогда, вчера вечером увижу этот свет...

В результате Фоккером и другими физиками была сделана попытка представить действие в более симметричной по отношению ко времени форме (см. [Владимиров и Турыгин, 1985]), где интегралы в выражении для действия (в пространстве Минковского) берутся уже не от *начальной* точки движения до *конечной*, а от *некоторой 4-мерной точки в прошлом до симметричной ей точки в будущем*, причем вектор-потенциал A представляет собой просто сумму таких симметризованных во времени парных взаимодействий выбранной (излучающей) частицы с каждой из остальных частиц Вселенной. В результате действие поля заменяется совокупностью *прямых и нелокальных* в пространстве-времени межчастичных взаимодействий.

Такой формализм эквивалентен уравнениям Максвелла, однако “опережающее” взаимодействие, которое в нем присутствует наравне с “запаздывающим”, входит в противоречие с физической интуицией и отвечающим

ей принципом причинности. С другой стороны, имеются глубокие физические основания использовать именно симметричный во времени формализм для описания *микроскопических* взаимодействий.

Дальнейшее развитие эти идеи получили в середине 20-го века, когда были опубликованы знаменитые работы [Уилер и Фейнман, 1945, 1949], придавшие идее нелокального дальнего действия зарядов вполне конкурентоспособный статус по сравнению с идеей ближнего действия. Напомню, что согласно последней поле распространяется локально – от одной точки к другой, соседней с ней. Акт и источник излучения в теории ближнего действия никак не связываются с актом поглощения и его будущим приемником (поглотителем). Напротив, в теории дальнего действия источник и приемник излучения связываются воедино этим процессом. При этом в основе всех моделей симметризованного во времени процесса излучения лежит представление о существовании во Вселенной распределенной среды, состоящей из *большого числа вторичных зарядов*, которые и определяют важнейшие особенности этого феномена.

Надо сказать, что роль такого рода среды велика и в классической электродинамике. В частности, эта роль заключается в эффекте замедления скорости распространения по сравнению со скоростью света в вакууме. Данный эффект связан с наличием в той или иной среде связанных зарядов, которые создают вторичные поля, т.е. переизлучают электромагнитные колебания с определенной фазовой задержкой. Действительно, в отсутствие *промежуточных* зарядов *исходный* осциллирующий заряд создавал бы для *пробного* заряда поле, пропорциональное множителю $\cos(\omega t - r/c)$, где r – расстояние между исходным и пробным зарядами. Однако исходный заряд действует также и на промежуточные заряды, которые вследствие этого (с фазовой задержкой) создают *дополнительное* воздействие на пробный заряд. В результате действия большого числа таких связанных зарядов возникает (см.[Фейнман и др., 1963]) так называемый показатель преломления среды. При прохождении света через среду показатель преломления может быть комплексным. Появление мнимой части означает, что кроме сдвига фазы происходит еще и поглощение энергии колебаний излучения.

Фейнман рассматривает механизм *обратного* воздействия вторичных зарядов на первичный, вводя два основных предположения. Первое из них состоит как раз в *симметричном* использовании *опережающего* потенциала реакции наряду с *запаздывающим*. Оно, однако, позволяет вывести значение для силы радиационного трения, пропорционального самому исходному ускорению (а не его производной по времени, как должно быть в окончательном результате) излучающего первичного заряда и объемной концентрации вторичных зарядов, окружающих источник излучения.

Ситуацию исправляет второе предположение, которое заключается в обязательном наличии достаточно большого количества вышеупомянутых вторичных зарядов, распределенных во Вселенной (и связанного с ними показателя преломления). Благодаря этому при интегрировании по всему множеству вторичных зарядов учитывается дополнительный фазовый множитель, также зависящий от объемной концентрации частиц. В результате после интегрирования зависимость от объемной концентрации исчезает (интеграл берется от нуля до бесконечности, в случае конечного радиуса “облака зарядов” зависимость оставалась бы), и для каждой отдельной частотной компоненты силы появляется множитель, равный ее частоте, что соответствует переходу от самой функции к ее производной по времени.

2. Обсуждение модели излучения Уилера-Фейнмана

В данном разделе я позволю себе обнародовать критическую оценку модели излучения Уилера и Фейнмана. Прежде всего, авторы этой концепции утверждают, что из исходной симметричной суммы опережающих и запаздывающих потенциалов удастся вывести в итоге правильное результирующее соотношение, в котором (в согласии с опытом) остаются лишь запаздывающие слагаемые. Должен (к стыду своему) честно признаться, что формальное доказательство этого факта (как в оригинальной статье, так и в изложении других авторов) не показалось мне ни ясным, ни бесспорным.

Между тем опережающие потенциалы привлекаются не столько с целью добиться формальной симметрии решения во времени как таковой, сколько для того, чтобы *объяснить* так называемое *радиационное трение обратным действием* вторичных зарядов (поглотителей) на первичный (излучающий), а не “самодействием электрона” по Лоренцу. Именно в успехе такого объяснения и кроется привлекательность гипотезы Уилера-Фейнмана. А нельзя ли соединить такой механизм обратной связи с традиционным использованием одних только запаздывающих потенциалов?

Анализ рассуждений Уилера и Фейнмана показывает, что они оперируют с сугубо *стационарным* процессом электромагнитных колебаний, используя разложение поля в ряд Фурье по отдельным гармоникам. Этот прием, во всяком случае, характерен для первых двух из четырех альтернативных способов, с помощью которых указанные авторы приходят к окончательному результату. При таком подходе исходное электромагнитное воздействие не имеет во времени ни начала, ни конца, и каждый конкретно рассматриваемый период колебаний при соответствующем выборе фазы *не отличим* от любого другого, предшествующего ему или следующего за ним. Замечу, что аналогичный подход подразумевается и при традиционном рассмотрении, поскольку подсчет силы радиационного трения основан на оценке мощности *стационарного* излучения, т.е. на зависимости от частоты для *равновесного (установившегося)* процесса.

Таким образом, для обоснования механизма обратной связи достаточно, чтобы обратное *гармоническое* воздействие приходило к излучающему заряду в *нужной фазе*. Но такое обратное воздействие может создаваться не за счет *реально* опережающего воздействия, а за счет запаздывающего влияния поглотителя, удаленного на определенное расстояние от излучателя, причем очевидно, что это (выделенное) расстояние должно быть *кратно длине волны*.

А как быть с обратным воздействием от всех *остальных* поглотителей, которые расположены не в этих *узловых* точках? Я полагаю, что их суммарный вклад равен нулю. Действительно, рассмотрим любую пару таких точек, расположенных *симметрично* по обе стороны от узла. В силу строгой нечетности синусоиды фазы приходящей от них к излучателю реакции противоположны и поэтому взаимно компенсируют друг друга.

Если принять такую интерпретацию, то конкретный механизм возникновения радиационного трения, предложенный Фейнманом, утрачивает всякие элементы мистики и становится адекватным природе вещей.

Следует отметить, что сам факт существования реакции, т.е. обратной связи, совершенно не обязательно должен связываться с наличием *опережающего* воздействия. Скорее, напротив. Так, сила F_{mp} обычного *механического* трения возникает, как физическое следствие внешней движущей силы F , и никоим образом не является опережающей. Учет трения производится заменой закона движения Ньютона $a = F/m$ на $a = (F - F_{mp})/m$, где a – ускорение, m – масса тела.

Скорректированное выражение показывает, что *реальное* ускорение оказывается меньше *потенциально возможного* из-за потери энергии вследствие реакции.

Что касается электромагнитных явлений, то процесс излучения в пространстве имеет глубокое и неслучайное внутреннее сходство с распространением сигнала в электрической цепочечной схеме или в длинной линии. Поэтому учет *радиационного* трения аналогичным образом может быть осуществлен в эквивалентной электрической схеме замещения путем перехода в законе Ома от величины тока $i = E/z$ к величине $i = (E - U_{рад})/z$. Здесь E – внешняя электродвижущая сила (в реальности обусловленная механическими колебаниями первичного излучающего заряда), z – импеданс вакуума (477 Ом). Слагаемое $U_{рад}$, ответственное за радиационное трение, может быть интерпретировано как падение напряжения на *внутреннем сопротивлении* источника, который, таким образом, является не *идеальным*. *Реальный* ток оказывается меньше *потенциально возможного* из-за потери энергии вследствие реакции.

Возможность существования колебаний в пространстве обычно воспринимается как само собой разумеющийся факт. В действительности это требует наличия *специфической среды*, заполняющей пространство. Такая среда обладает способностью (выраженной строго количественно) запасать, возвращать и передавать с конечной скоростью далее энергию электромагнитного поля, и притом с определенными типом и степенью инерционности, что и приводит к появлению колебаний, стоячих, прямых и отраженных бегущих волн.

Трактовка радиационного трения как обычной (не опережающей в истинном смысле этого слова) реакции имеет глубокий физический смысл еще по одной причине. Эта реакция, как известно, описывается уравнением третьего порядка по координате колеблющегося заряда. В случае стационарного гармонического колебания это, как и для членов первого порядка, приводит, в полном соответствии с действительностью, к *необратимой* потере активной энергии.

Хотел бы дополнительно обратить внимание читателя на следующую непоследовательность, присущую, как мне кажется, модели Уилера-Фейнмана. Авторы этой модели, с одной стороны, говорят о *прямом* межчастичном взаимодействии, а с другой стороны (при описании этого взаимодействия) учитывают наличие *промежуточной* среды и соответствующего показателя преломления. Хотя зависимость от величины этого показателя при бесконечном радиусе поглощающей среды, как мы видели, исчезает, но он играет важную роль, если этот радиус конечен.

Добавлю, что учитывая потери энергии на радиационное трение для первичного излучателя, авторы модели совершенно не затрагивают вопрос о подобных потерях энергии для вторичных зарядов (поглотителей). Если этот фактор учитывать, получается, что среды без поглощения не бывает (что, видимо, сущая правда). Более того, фактор рассеяния энергии вследствие обратного воздействия введен Уилером и Фейнманом “руками”, вне рамок волнового уравнения, поскольку это уравнение выводится из уравнений Максвелла для области, свободной от зарядов. Учет зарядов и их взаимодействия должен привести – в принципиальном плане – к замене обычного волнового уравнения на более сложное, а его решение должно будет содержать, в том числе, полное описание обратного влияния зарядов на излучатель и эффекта радиационного трения.

3. Заключение

Значит ли вышесказанное, что прямое межчастичное взаимодействие – фикция? С одной стороны, световой квант от звезды движется к глазам земного наблюдателя с предельно возможной скоростью, вследствие этого его (кванта) движение может быть связано с *единственной* инерциальной системой отсчета, сравнить показания часов в этой системе и в системе отсчета наблюдателя, связанного с Землей, *невозможно*. В самом деле, во всех остальных системах отсчета распространение света требует конечного промежутка времени, тогда как в собственной системе отсчета рождение и поглощение кванта происходит *одновременно*, так что гипотеза Тетроде о *прямом* взаимодействии излучателя (звезды) и поглотителя (глаза земного наблюдателя) оказывается удивительным образом верна.

С другой стороны, как только мы говорим об *обратном* действии поглотителя на излучатель в связи с моделью непосредственного межчастичного взаимодействия, мы вынуждены обратиться к решению (в предельном случае световой скорости) для парадокса часов (см. оригинальную заметку [Лаури, 1963], или ее изложение в [Тэйлор и Уилер, 1971] или в [Шульман, 2006]. Вначале, когда световой квант уносится от источника, ему можно соотнести одну инерциальную систему. При отражении сигнала эта сопутствующая ему инерциальная система благополучно продолжает свой мысленный полет, а отраженный квант “перепрыгивает” в *другую* (движущуюся назад к Земле) инерциальную систему отсчета и на *другую* изохрону, *меняя* при этом *знак* скорости и вектора *импульса* на противоположный. Если считать, что этот процесс прыжка занимает все же какое-то (очень малое) время, то частота фотона как бы очень быстро снижается до нуля, а затем снова возрастает до исходной величины; тут-то и возникает скачок времени! Именно поэтому между посылкой исходного сигнала (например, на Луну или на Марс) и приемом отраженного сигнала возникает пауза, которая в точности равна двойному промежутку времени, необходимому для распространения света на соответствующее расстояние.

Библиография

- [Владимиров и Турыгин, 1985] Владимиров Ю.С., Турыгин А.Ю. *Теория прямого межчастичного взаимодействия*. Москва, Энергоатомиздат, 1985.
- [Ландау и Лифшиц, 1967] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теория поля*. Москва, Наука, 1967.
- [Лаури, 1963] Edward S. Lowry, *The Clock Paradox*. American Journal of Physics, vol. 31, p. 59, 1963
- [Тэйлор и Уилер, 1971] Э. Ф. Тейлор, Дж. А. Уилер, *Физика пространства-времени*. 2-е изд., Москва, Мир, 1971
- [Уилер, Фейнман, 1945] Wheeler J.A., Feynman R.P. *Interaction with the Absorber as the Mechanism of Radiation*, Reviews of Modern Physics, **17**, 156, (1945)
- [Уилер, Фейнман, 1949] Wheeler J.A., Feynman R.P. *Classical Electrodynamics in Terms of Direct Interparticle Action*, Reviews of Modern Physics, **vol. 21**, numb. 3, p. 425-433 (1949)
- [Фейнман и др., 1963] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. *Фейнмановские лекции по физике*. Москва, Мир, 1978
- [Хайтун, 1996] Хайтун С.Д. *Механика и необратимость*. Москва, Янус, 1996.
- [Шульман, 2006] Шульман М.Х. *Парадоксы, логика и физическая природа времени*. Доступно по ссылке http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/shulman_paradoksy.pdf