

Закон Кулона как предельный переход в квантовой электродинамике

О том, что фундаментальные взаимодействия в природе, с точки зрения современной теоретической физики, представляют собой обмен виртуальными частицами, сегодня знает, каждый любознательный школьник. Я тоже, со школьной скамьи это знаю. Однако практически с того момента, как я об этом узнал, я задался простым вопросом: а как это происходит? Каким образом обмен зарядов виртуальными фотонами приводит к возникновению взаимодействия, известного в классической электродинамике под названием «закон Кулона»? Я долго бился над этим вопросом, может быть, достаточно кустарным способом, однако ни в какой научной или популярной литературе исчерпывающего, да что там — хоть сколь-либо внятного ответа я так и не встретил. Впрочем, каюсь, — одно дополнение — хотелось бы не только внятного, но еще и короткого ответа. Судя по всему, его нет! Нижеследующее небольшое рассмотрение представляет собой попытку восполнить этот пробел.

Рассмотрим точечный элементарный (для удобства) заряд, масса которого, однако, достаточна, чтобы считать частицу классической. Опять же, для удобства, назовем ее тяжелым протоном. То есть, с одной стороны, тяжелый протон подчиняется законам классической механики. С другой стороны, мы хотим получить закон Кулона как интегральный квантовый эффект, а значит, должны рассмотреть поведение тяжелого протона на квантовом уровне. Имеется в виду то самое испускание заряженной частицей виртуального фотона. Почему, собственно фотон виртуальный? Да потому что процесс его испускания противоречит основным соотношениям квантовой механики и релятивистской динамики. Для полноты картины, приведем соответствующую выкладку (кому лень вникать, может ее пропустить).

Свяжем инерциальную систему отсчета с протоном массы m до поглощения им фотона энергии E . В этом случае рассматриваемый процесс описывается законами сохранения энергии и импульса:

$$E + mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$
$$\frac{E}{c} = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}};$$

где v — скорость протона после поглощения. Выразим энергию из второго равенства и подставим ее в первое. Объединяя, члены, содержащие радикалы, и выполнив несложные преобразования, получим:

$$c - v = \sqrt{c^2 - v^2}.$$

Последнее может быть верным только при $v = 0$, либо при $c = 0$, но ни то, ни другое не соответствует реальности. Полученный результат, понятное дело, справедлив не только для протона и фотона: процесс испускания (поглощения) любой массивной частицей безмассовой частицы (брадионом люксона) невозможен.

Таким образом, квантовая теория электростатического взаимодействия, кажется, рубит сук, на котором сидит. Однако, как гласит другое известное выражение: кто нам мешает, тот нам поможет! Одним из важнейших (а также известнейших) результатов квантовой механики является принципиальная невозможность одновременного точного определения импульса p и координаты x частицы. Формула, описывающая этот квантовый люфт, называется соотношением неопределенностей и выглядит следующим образом:

$$\Delta p \Delta x \sim \hbar,$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ — так называемая постоянная Планка с чертой. Таким образом, тяжелый протон все же может «размазать» свой импульс на величину Δp , растянувшись посредством виртуального фотона на расстояние r от своего основного положения, при условии, что

$$\Delta p \sim \frac{\hbar}{r}. \quad (1)$$

Если на этом расстоянии находится второй тяжелый протон, последний способен также «воспользоваться» соотношением неопределенностей и поглотить виртуальный фотон. Парадоксальным образом второе «противоправное» действие восстановит законы сохранения, однако импульсы обоих протонов, при этом, изменятся: поглотитель получит импульс Δp , а излучатель — импульс $-\Delta p$, что находится в полном соответствии с третьим законом Ньютона.

С другой стороны, дебройлевская волна виртуального фотона, распространяясь в направлении протона-поглотителя со скоростью света, достигнет его за время

$$\Delta t = \frac{r}{c}.$$

По истечении указанного промежутка времени процесс обмена виртуальным фотоном может повториться (в любом порядке). Все это можно интерпретировать, как если бы тяжелые протоны действовали друг на друга с силой:

$$F_e = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \alpha \hbar c \frac{1}{r^2}. \quad (2)$$

Закон Кулона просматривается здесь уже более чем наглядно. Осталось получить зависимость силы от величины зарядов. Пусть теперь у нас есть пара заряженных частиц (материальных точек), состоящих из многих протонов. Тогда (2) будет давать вклад, в общее взаимодействие, любой пары протонов, принадлежащих разным частицам. Если выразить заряды составных частиц через элементарный заряд ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл):

$$q_1 = N_1 e,$$

$$q_2 = N_2 e,$$

то сила взаимодействия составных частиц друг с другом будет определяться соотношением:

$$F = \alpha \hbar c \frac{1}{r^2} N_1 N_2 = \alpha \frac{\hbar c}{e^2} \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (3)$$

Сочетание констант в последнем выражении, очевидно, должно давать константу Кулона:

$$\alpha \frac{\hbar c}{e^2} = k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}. \quad (4)$$

Из нашей модели мы не можем вычислить константу Кулона, но, похоже, это вряд ли возможно в принципе. Чтобы понять, в чем тут дело, решим обратную задачу: пользуясь (4), вычислим постоянную α

$$\alpha = \frac{k e^2}{\hbar c} = \frac{2 e^2}{\hbar c \epsilon_0} = 7,31 \cdot 10^{-3} \approx \frac{1}{137}. \quad (5)$$

Безразмерная константа α называется постоянной тонкой структуры. В теоретической физике она считается мерой интенсивности электромагнитного взаимодействия, и это не случайно. Действительно, если бы (1), всегда было строгим равенством, если бы каждый виртуальный фотон поглощался тяжелым протоном и, наконец, если бы после поглощения одного фотона сразу испускался другой, то постоянная α была бы равна единице. Стало быть, истинное значение постоянной тонкой структуры (а, значит, и константы Кулона) говорит нам о том, насколько реальное электростатическое взаимодействие отличается от всех этих «если».

В заключение данной статьи, хотелось бы высказать некоторые

ЗАМЕЧАНИЯ, ВОПРОСЫ, ГИПОТЕЗЫ

1. На порядке убывания силы Кулона у нас никак не сказывается размерность пространства. Однако согласно представлениям Эренфеста, такая зависимость должна быть: силы с бесконечным радиусом действия (типа кулоновских и гравитационных) должны убывать пропорционально расстоянию в степени на единицу меньшей размерности пространства, n :

$$F_n \sim \frac{1}{r^{n-1}}$$

(наше пространство трёхмерно, поэтому $F_{\text{кул}} = F_3 \sim 1/r^2$). Возможно, размерность как-то проявляется в постоянной тонкой структуры: в пространстве иных размерностей она перестает быть постоянной, но содержит, при этом, постоянную часть. Однако, пока что, подобное предположение выглядит чисто спекулятивным.

2. Если виртуальный фотон ничем не поглощается (вблизи нет зарядов или заряды есть, но поглощения не случилось) то не будет преувеличением сказать, что вообще ничего не случилось. Когда же поглощение все-таки случилось, вполне правомерно задать вопрос: почему его вероятность никак не зависит от расстояния до поглотителя (а ведь в нашей модели она действительно от него не зависит!)? Очевидно, подобное возможно, только если тяжелый протон — точечная частица. Таким образом, элементарные частицы проявляются точечными объектами во всех актах, по крайней мере, электрического взаимодействия друг с другом.

3. Не ясной остается роль знака зарядов: он никак не сказывается на ходе наших рассуждений. То есть модель не выводит направления сил из сочетания знаков, по сути, нужно вводить их руками. Доводя рассуждения до логического завершения, нужно признать, что виртуальный фотон является квантом электростатического поля, то есть несет информацию о направлении того, что в классической электростатике станет вектором \vec{E} . То есть наш фотон — продольный, хотя классические электромагнитные волны поперечные. Правда, фотон — объект, в любом случае, не классический, тем более — фотон виртуальный. Кроме того, импульс классической электромагнитной волны перпендикулярен вектору как электрического, так и магнитного поля и сонаправлен волновому вектору, то есть направлению распространения волны, при этом, чисто электрическое и чисто магнитное поле не обладают импульсом в классической электродинамике. Что же касается обмена виртуальными фотонами, то ситуация, по сути, сводится к следующему. Направление импульса виртуального фотона определяется в момент его поглощения, в зависимости от сочетания знаков зарядов. На классическом уровне это можно интерпретировать как взаимодействие зарядов посредством электростатического поля, вектор которого коллинеарен импульсу виртуального фотона.

4. (Наиболее часто задаваемый вопрос) Каким образом один заряд «знает, куда стрелять»? Когда-то на эту тему мой коллега А.С. Ольчак высказал настолько простое, насколько и странное предположение: никаких виртуальных фотонов НЕТ! Подобное заявление почище самой идеи виртуальных фотонов — оно просто шокирует поначалу. Выходит того, за что мы так драматично боролись, не существует? Не совсем так... Если признать, что заряды действительно как-то «знают» о расположении друг друга, то гипотеза обмена зарядов виртуальными фотонами — это математическое воплощение теории дальнего действия, с учетом конечной скорости передачи импульса между зарядами! В подобном ключе в свое время высказывался другой мой коллега, С.С. Кокарев — руководитель научно-образовательного центра «[ЛОГОС](#)». И, кажется, к такому же выводу пришел и сам Ричард Фейнман. Вот такая вот диалектика.

Возможны, однако, следующие интерпретации «феномена узнавания» зарядами местоположения друг друга.

Интерпретация №1. В пространстве вокруг заряда существует несчетное множество виртуальных фотонов, испускаемых им во всех направлениях. Они обладают как положительными, так и отрицательными энергиями и разными направлениями импульсов, модуль импульса, однако, в среднем диктуется соотношением (1). В этом случае проблема узнавания, конечно, снимается. Однако чтобы плотность виртуальных фотонов была бесконечной, интенсивность их испускания также должна быть бесконечной. С другой стороны, чтобы сохранить предложенный вывод закона Кулона, эта же интенсивность, отнесенная к единице телесного угла, должна быть обратно пропорциональной расстоянию, на которое улетает виртуальный фотон. Здесь можно говорить лишь о некоем пределе типа:

$$\frac{dI}{d\Omega} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{r}. \quad (6)$$

Тогда вероятность поглощения виртуального фотона должна описываться соотношением:

$$W = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\alpha}{n}. \quad (7)$$

В этом случае

$$F_e = \frac{dI}{d\Omega} W \frac{\Delta p}{\Delta t},$$

откуда снова получаем (2).

Интерпретация №2. Вселенная вероятностей представляет собой бесконечномерное гиперпространство, состоящее из несчетного множества клонов нашего трехмерного пространства. В каждом клоне испускается по одному виртуальному фотону в абсолютно случайном направлении. Но, так как клонов несчетное множество, в каком либо из них фотон обязательно полетит в нужном направлении, и заряды провзаимодействуют. Этот клон взаимодействия и становится нашим реальным пространством, после чего происходит следующий акт виртуализации—реализации. Кажется, интерпретация №2 объясняет феномен узнавания и, в то же время, сохраняет наши выкладки, без дополнительных условий типа (6), (7), выглядящих несколько искусственными. Ясно, что она применима также для произвольного количества зарядов: реализуется тот клон, в котором к данному моменту времени произошли все взаимодействия, которые к этому моменту могли произойти. Может быть не всегда именно этот клон, может быть с какой-то вероятностью, тут остается простор для фантазии, что не меняет сути.

Ситуация, описанная в интерпретации №1, похоже, имеет нечто общее с проблемой [перенормировки](#), а интерпретацию №2 можно рассматривать как некий микс [многомировой](#) и [копенгагенской](#) интерпретаций квантовой механики, где вместо [коллапса волновой функции](#) происходит аналогичный процесс только в пространствах-клонах. Или не происходит? В любом случае мы имеем дело либо со вселенной-неудачником где «ничего у них не клеится», либо... с еще одной версией параллельных миров, сейчас это очень модно, и вполне в духе обоснования слабого антропного принципа. Концепция [мультиверса](#) — спасительная соломинка, за которую в последнее время активно хватаются физики-атеисты.

Подытожив диалог с умным человеком, могу сказать, что в обеих интерпретациях мы приходим к тому же, что высказано первоначально в п. 4: все электрические заряды, возможно, по тем или иным причинам, обладают способностью испускать виртуальные фотоны в направлении друг друга! Был бы весьма признателен за обсуждение всех затронутых здесь вопросов не только с самим собой, но и специалистами в области квантовой электродинамики. Ау-у, специалисты, откликнитесь! Я готов внимательно выслушать Ваши критические замечания и предложения по доработке темы или ее полной переработке...☺