

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ  
621 ГРУППА

---

**ВИРТУАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ.  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Журавлев Владимир

# Вступление

Несмотря на то, что работа предназначена для конкурса первокурсников от кафедры фундаментальных проблемы физики квантовых технологий, часть ее уже была написана в первом семестре. В работе, конечно, нет претензий на объемное и строгое описание процессов взаимодействий. Скорее я попытаюсь познакомить читателя (и слушателя) с самыми основами и предложить интересную и понятную физическую модель. На мой взгляд это будет полезно каждому начинающему физику :)

## Часть I

# Полезные приложения

Соотношение неопределённостей:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (1)$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2)$$

Последнее, пожалуй, лучше всего трактовать в рамках этой темы так: состояние замкнутой системы в течении промежутка времени  $\Delta t$  может произвольно изменяться на

$$\Delta E \sim \frac{\hbar}{\Delta t}$$

## 1 Релятивистские инварианты

В релятивистской механике вводится 4-вектор положения частицы:

$\tilde{r}(ct, x, y, z)$  перемещения  $d\tilde{r}(cdt, dx, dy, dz)$ , скорости:  $\tilde{v}(\gamma c, \gamma \vec{v})$

По аналогии с Ньютоновской механикой вводим 4-х импульс как произведение 4-скорости на инвариантную массу покоя:

$$m\tilde{v} = \tilde{P}(\gamma mc, \gamma m\vec{v}) = \tilde{P}(P_0, \vec{P}) \quad (3)$$

Заметим:

$$P_0^2 - \vec{P}^2 = m^2 c^2 \gamma^2 - m^2 v^2 \gamma^2 = m^2 \gamma^2 (c^2 - v^2) = \frac{m^2 (c^2 - v^2)}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = m^2 c^2 \quad (4)$$

Правая часть этого равенства - инвариант, поэтому левая часть тоже инвариант.

Используя закон Ньютона и закон сохранения энергии в релятивистской механике можно получить что  $E = \gamma mc^2$

Отсюда:  $P_0 = \frac{E}{c}$ .

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \quad (5)$$

Для частиц с нулевой массой покоя видно  $E = pc$

## 2 Диаграммы Фейнмана

В квантовой теории создан удобный способ описания и расчета вероятностей квантовых процессов, основанный на использовании т.н. Диаграмм Фейнмана.

Диаграммы Фейнмана строятся по особым правилам, которые и определяют удобство и практичность этого метода.

1) В диаграммах Фейнмана физическому процессу сопоставляется его графическая схема.

2) Каждой участвующей в процессе частице соответствует линия. Линии на диаграммах со свободными концами обозначают реальные частицы, линии конечной длины, как вы догадались, обозначают

виртуальные частицы.

3) Взаимодействие частиц описывается узлом (вершиной) диаграммы, в каждой вершине волновой функции сопоставлена константа взаимодействия.

4) Линии на ДФ могут описывать распространение, как частиц, так и античастиц: направление стрелок на линиях античастиц противоположно направлениям стрелок на линиях частиц.

Диаграммы задают алгоритмы вычисления волновых функций определенных процессов, сопоставляя каждому элементу множитель для расчета амплитуды вероятностей.

Диаграммы Фейнмана это удобный способ описания квантовых процессов, поэтому далее мы будем пользоваться им. Мы будем иногда обращаться (во время доклада) к диаграммам, но в письменной работе фигурировать они не будут.

## Часть II

# Виртуальные частицы

### 3 Фундаментальные взаимодействия

Стандартная модель на данный момент является доминирующей теорией описания взаимодействий элементарных частиц. Взаимодействия делятся на четыре вида: электромагнитное, слабое, сильное и гравитация, не описанная в рамках современной СМ. Эти взаимодействия не происходят сами по себе, они требуют существования *частиц-переносчиков*, которые обуславливают наблюдаемые эффекты: притяжение и отталкивание зарядов, рождение новых частиц, стабильность ядра и т.п.

Частицы-переносчики не являются классическими объектами, в противном случае возникло бы множество парадоксов. Описание поведения этих частиц завершено не везде - гравитоны до сих пор не зарегистрированы, зато электромагнитное и слабое взаимодействия претерпели объединение совместными усилиями С. Вайнберга, Ш. Глэшоу и А. Салама (Нобелевская премия по физике 1979 г.).

### 4 Массовая поверхность. Введение в виртуальные частицы

Определение: частица лежит на массовой поверхности (оболочке), если для нее выполняется соотношение (5). Может показаться, что соотношение (5) выполняется всегда: оно получено из двух фундаментальных законов природы: закона сохранения энергии и закона сохранения импульса. Но теперь мы вспомним о соотношении неопределенностей: В общем-то, энергия квантовой системы может флуктуировать, а значит на короткие промежутки времени (5) может не выполняться.

Определение: Частица, обладающая квантовыми числами одной из реальных частиц, для которой тем не менее не выполняется соотношение (5) называется виртуальной.

В виртуальных процессах продолжают действовать ограничения связанные с сохранением различных зарядов, странности и пр., но не выполняются законы сохранения энергии и импульса. [2] Например поглощение (испускание) электроном фотона:

$$e^- + \gamma \rightarrow \hat{e}^- \quad (6)$$

где  $\hat{e}^-$  обозначает виртуальный электрон, который долго существовать не может:

$$e^- + \gamma \rightarrow \hat{e}^- \rightarrow e'^- + \gamma' \quad (7)$$

Этот процесс так же известен из школьного курса как комптоновское рассеяние на электроне. Полезным упражнением будет оценка времени существования виртуальной частицы (в нашем случае электрона):

В процессе существования виртуального электрона неопределенность энергии

$$\Delta E \geq mc^2$$

А значит применяя соотношение (2) определяем что время жизни такого электрона:

$$\tau \leq \frac{\hbar}{mc^2} \quad (8)$$

А максимальное расстояние, которое он сможет пройти ( $v \rightarrow c$ )

$$\Delta x \leq \frac{\hbar}{mc} \quad (9)$$

Отметим, что (9) как раз совпадает с комптоновской длиной волны частицы. [1] Она естественным образом появляется в уравнениях Дирака, Клейна-Гордона, и даже может появиться в уравнении Шредингера для водородоподобного атома.[3] Эти соотношения верны и для всех виртуальных частиц.

Как оказалось с помощью таких "математических" частиц получается описывать реальные процессы, а делается это с помощью диаграмм Фейнмана.

## 5 Электромагнитное взаимодействие

Простым и наиболее понятным на мой взгляд является описание электромагнитного взаимодействия с помощью виртуальных фотонов. Рассмотрим пару взаимодействующих протонов: один из них испускает фотон с импульсом  $p$ , по соотношению неопределенностей он может существовать на расстоянии  $r \sim \frac{\hbar}{p}$ , фотон пройдет этот промежуток за  $\Delta t = \frac{r}{c}$ . Определяя силу как  $F = \frac{dp}{dt}$  получим для нее выражение:

$$F = \frac{dp}{dt} = \alpha \hbar c \frac{1}{r^2} \quad (10)$$

Константа (строго говоря не константа)  $\alpha$  введена для того, чтобы можно было записать равенство. Закон кулона просматривается уже наглядно, что важно - получено выражение содержащее  $r^2$ . **Впрочем, не до конца ясно, как на законе отразится изменение размерности пространства, а это очень важно для описания взаимодействий.**

Теперь попытаемся привести формулу (10) к "классическому" виду. Для этого рассмотрим далекие группы протонов.

Пусть первая группа имеет заряд  $q_1$ , соответственно число частиц в ней  $N_1 = q_1/e$ . Для второй группы аналогично определим  $q_2, N_2$ . Т.к. каждый протон из первой группы взаимодействует с каждым протоном из второй, то сила взаимодействия одного протона со второй группой  $F = \alpha N_2 \hbar c \frac{1}{r^2}$ , а всей первой группы со второй:

$$F = \alpha \frac{\hbar c}{e^2} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (11)$$

Зная, "оригинальный" закон кулона можно получить константу связи из (11):

$$\alpha = \frac{1}{k} \cdot \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad (12)$$

Безразмерная константа  $\alpha$  называется *постоянной тонкой структуры* и считается мерой электромагнитного взаимодействия. Строго говоря,  $\alpha$  логарифмически растет с ростом энергии, но мы рассматриваем нерелятивистский случай.

Попробуем подвести промежуточный итог: мы получили закон кулона с некоторыми "уловками". И тем более, он работоспособен лишь на четверть. Пока что остались без объяснения процесс *притяжения* и взаимодействия *разноименных* зарядов (Так же было бы хорошо решить задачу квантовой гравитации, но вне нашей компетенции :с). Попробуем найти ответы:

Пока что обмен виртуальным фотоном выглядел как бросание "квантового мяча" - фотона от протона к протону. Трудно себе представить, чтобы такое взаимодействие могло привести к чему-то, кроме отталкивания: ведь сначала мы сообщаем импульс переносчику взаимодействия, а затем уже он несет его другому участнику. Впрочем, понимать взаимодействие как прямое "бросание" фотонами не совсем правильно: рассмотрим хорошо локализованные взаимодействующие частицы А и Б. В процессе взаимодействия фотон несет какой-то импульс на расстояние  $R$ , при этом сам фотон "размывается" "расползается" между частицами, о точном месте его рождения, как и "направлении импульса" конечно, ничего сказать нельзя. Таким образом, импульс просто перераспределяется между частицами и проблема притяжения оказывается решаемой, если вспомнить основные законы квантовой механики.

## 6 Характерные расстояния

$$\Delta x \leq \frac{\hbar}{mc}$$

Как было показано в (9), дистанция, на которую могут распространяться виртуальные частицы не превышает комптоновской длины частицы, но для безмассовых частиц, таких как фотон или гравитон (рассеяние фотона на фотоне вещь довольно экзотическая [4], Дельбрюковское рассеяние) радиус взаимодействия может быть сколь угодно большим.

А как только частица-переносчик получает массу покоя, взаимодействия сразу становятся ограниченными по радиусу. Причем, проводя некоторую аналогию со статистической физикой, можно ожидать падение силы взаимодействия по экспоненте, подобно тому, как падают импульсы нормально распределенных частиц. (Но это не точно)

Это предположение об ограниченности радиуса отлично согласуется с реальностью: слабое и сильное взаимодействия имеют массивные частицы переносчики:  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ,  $g$ ,  $\pi^{+,-,0}$ , и их характерные расстояния как раз одного порядка с комптоновскими длинами соответствующих частиц.

## Заключение

Такой математически простой способ описания электромагнитного взаимодействия привел к интересным результатам: была получена характерная зависимость от расстояния, выведена одна из важнейших констант, описано не только отталкивание частиц, но и их притяжение.

Современные методы математически намного сложнее, часто там используются поля частиц: электронное поле, электромагнитное поле и.т.п. В этих моделях частицы рассматриваются как колебания этих полей, что вполне согласуется в волновой природой частиц.

В заключение хочу оставить [ссылку](#) об явлении отталкивания в гравитации

## Список литературы

- [1] Фриш Д., Торндайк А. *Элементарные частицы*, Атомиздат, 1966. — 151 с.
- [2] Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. *Квантовая электродинамика. 2-е изд.* Наука, 1980
- [3] W.Gordon *Der Comptoneffekt nach der Schrödingerschen Theorie* / «Эффект Комптона в теории Шредингера», Zeitschrift für Physik, v. 40, iss. 1, pp. 117–133 (1926)
- [4] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. *Квантовая электродинамика* Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989,—728 с