

Физика атома, атомного ядра и элементарных частиц

51.(2). Диаграммы Фейнмана.
Электромагнитные взаимодействия.

Диаграммы Фейнмана

Для описания процессов взаимодействия элементарных частиц существует удобный графический метод, разработанный Р.Фейнманом (R.Feynman) в 1949 году. В этом методе каждому механизму исследуемого процесса сопоставляются определенные графические схемы, называемые диаграммами Фейнмана.

Основные элементы диаграмм Фейнмана.

-----	фотоны, глюоны, W^+ , W^- , Z^0 - бозоны
—————	лептоны и кварки
══════════	мезоны
══════════	барионы

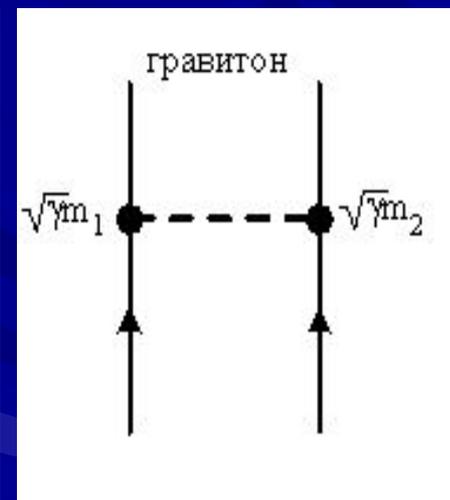
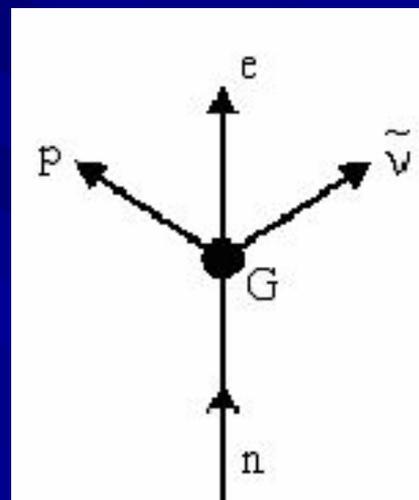
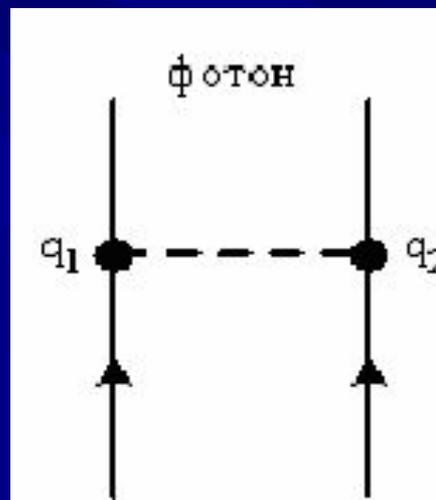
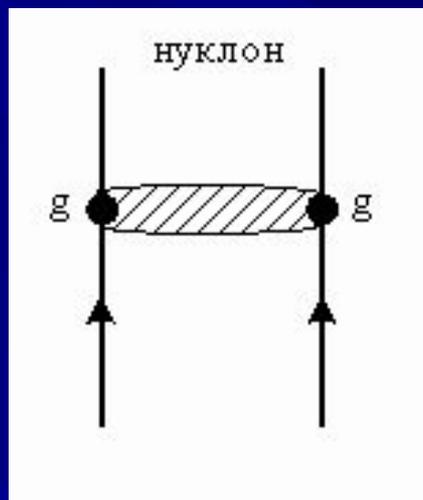
Каждой участвующей в рассматриваемом процессе частице на диаграмме Фейнмана соответствует линия. Обычно используются следующие условные обозначения. Волнистой или пунктирной линией изображаются фотоны, гравитоны и бозоны-переносчики слабых взаимодействий W^+ , W^- , Z^0 ; прямыми тонкими линиями изображаются: одиночными линиями лептоны и кварки, двойными - мезоны, тройными - барионы (в соответствии с кварковой теорией, согласно которой барионы состоят из трех кварков, а мезоны - из двух).

Основные элементы диаграмм Фейнмана.

- Взаимодействие частиц изображается точками или кружками с входящими и выходящими линиями; эти точки и кружки называются узлами, или вершинами диаграммы. Точки изображают элементарные процессы, происходящие "мгновенно" и в одной точке пространства. Кружок изображает сложный процесс, происходящий в некотором интервале времен и расстояний.

Условные обозначения фундаментальных взаимодействий (диаграммы Фейнмана)

Сильное Электромагнитное Слабое Гравитационное



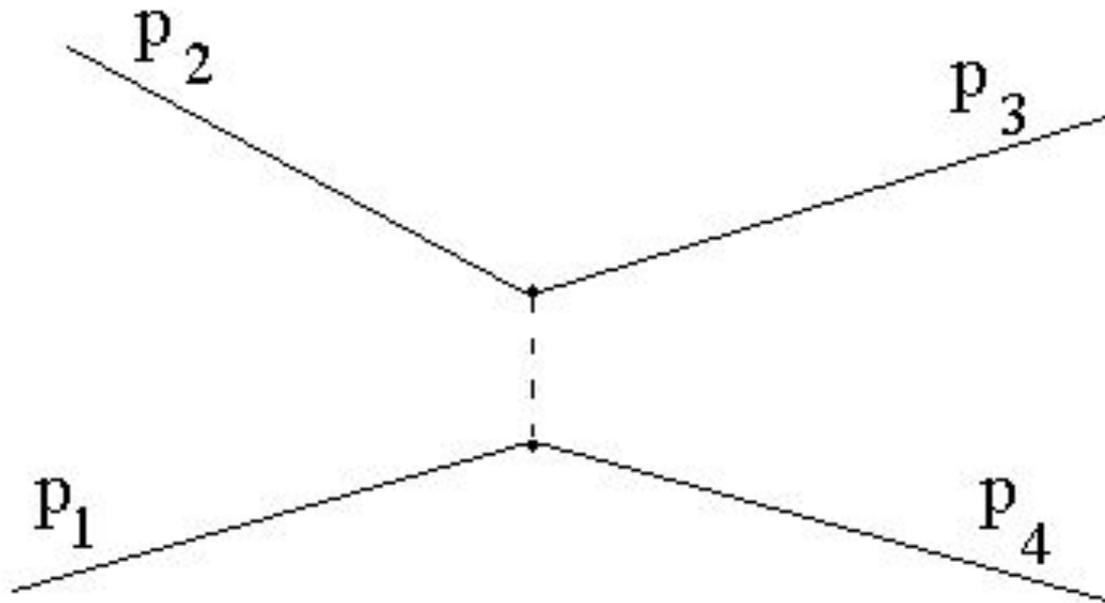
- Линии, имеющие свободные концы, называются внешними; они изображают "настоящие", т.е. не виртуальные частицы. Линии, не имеющие свободных концов, т.е. начинающиеся и заканчивающиеся в узлах, называются внутренними; они, как правило, изображают виртуальные частицы. За исключением закона сохранения энергии, в каждом узле соблюдаются все законы сохранения, присущие данному взаимодействию (сохраняются все заряды, импульсы, моменты импульсов и т.д.).

Импульс сохраняется, но для виртуальных частиц не выполняется, как уже говорилось, соотношение

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4, \quad (51.1)$$

поэтому невозможно в каждом узле и сохранение энергии. При этом для всего взаимодействия энергия, конечно, сохраняется. Наглядно это можно представить так, что виртуальная частица берет у частицы, ее излучившей, "лишнюю энергию взаймы", но при поглощении ее в другом узле баланс энергии восстанавливается.

Простейший пример диаграммы Фейнмана



Рассеяние электрона на электроне путем обмена одним виртуальным фотоном

Применение диаграмм Фейнмана

Польза от диаграмм Фейнмана заключается в том, что с их помощью можно вычислить вероятность исследуемого процесса и наглядно представить его как последовательность элементарных процессов.

Для вычисления вероятности с помощью диаграмм разработан специальный алгоритм (правила Фейнмана). Согласно этим правилам, вероятность (или, как часто говорят, интенсивность) процесса определяется тремя факторами:

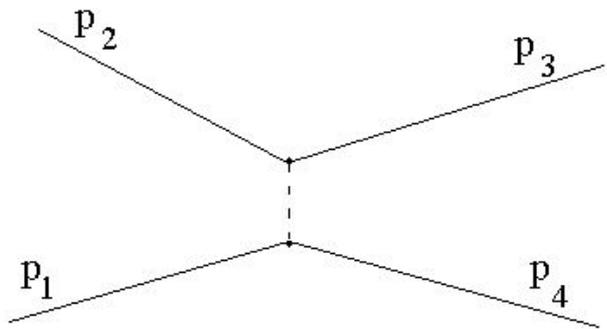
- Константой взаимодействия α (чем больше α , тем выше вероятность). Если диаграмма содержит несколько узлов, то соответствующая вероятность пропорциональна произведению констант каждого узла.
- Степенью виртуальности частицы (т.е. насколько сильно нарушено соотношение (51.1)): чем сильнее нарушение, тем меньше вероятность.
- Полной энергией столкновения или распада (чем больше энергия, тем более вероятен процесс)

Квантовая электродинамика (КЭД).

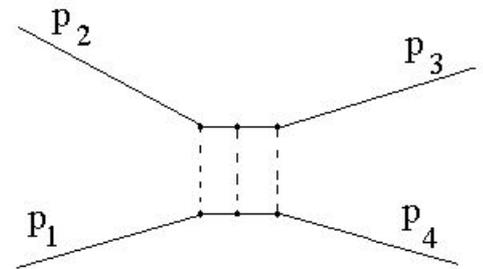
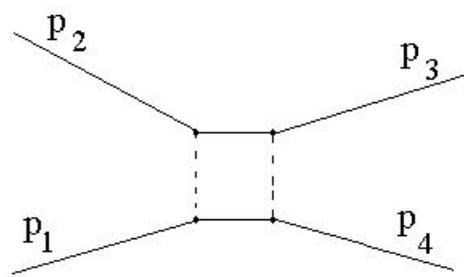
Из всех четырех типов фундаментальных взаимодействий лучше всего исследовано электромагнитное. Теория электромагнитного взаимодействия называется квантовой электродинамикой (КЭД). За ее создание Р.Фейнман (R.Feynman), Ю.Швингер (J.Schwinger) и С.Томонага (S.Tomonaga) в 1965 году получили нобелевскую премию. С помощью КЭД можно количественно с любой точностью рассчитать любой процесс с фотонами, электронами, позитронами и мюонами. Для других типов взаимодействий это пока невозможно.

В КЭД существует только один элементарный процесс: излучение (или поглощение) виртуального фотона электроном; через него могут быть выражены все остальные процессы. Константа электромагнитного взаимодействия («постоянная тонкой структуры») равна

$$\alpha_e^2 = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad (51.2)$$



Рассеяние электрона на электроне путем обмена одним виртуальным фотоном



Рассеяние электрона на электроне путем обмена двумя и тремя виртуальными фотонами

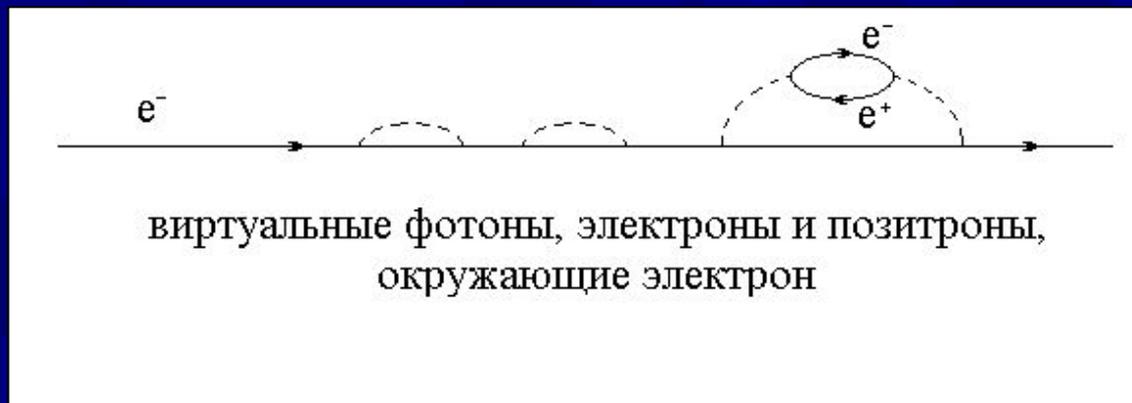
Для любого процесса можно придумать сколько угодно изображающих его диаграмм Фейнмана. Например, рассеяние электрона на электроне можно изобразить не только простейшей однофотонной диаграммой, но диаграммами, изображающими двухфотонный обмен, трехфотонный и т.д.

- Реальный процесс рассеяния электрона на электроне изображается бесконечной суммой всевозможных диаграмм, однако вероятность каждого процесса, изображенного на отдельных диаграммах, быстро убывает с ростом числа узлов, т.е. основной вклад дает однофотонный обмен, а остальные диаграммы дают поправки, причем ряд быстро сходится, т.к. $\alpha_e^2 \ll 1$. Поэтому для расчета конкретного процесса достаточно учесть несколько диаграмм с наименьшим числом узлов.

Поляризация вакуума.

Ранее рассматривался процесс образования гамма-квантом электронно-позитронных пар, и было доказано, что в вакууме этот процесс происходить не может из-за того, что при этом не сохраняются одновременно импульс и энергия. Однако для виртуальных частиц вследствие квантовых флуктуаций возможно рождение на короткое время виртуальной электронно-позитронной пары, которая через время Δt , определяемое соотношением неопределенностей, аннигилирует. Соответствующая диаграмма Фейнмана называется *вакуумной петлей*.





Таким образом, свободный электрон постоянно излучает и поглощает виртуальные фотоны, которые, в свою очередь, рождают виртуальные электрон-позитронные пары. Эти пары, просуществовав короткое время, аннигилируют, образуя фотоны и т.д. Поэтому, согласно современным представлениям, электрон окружен облаком (или "шубой") виртуальных зарядов, которое поляризовано так, что виртуальные позитроны располагаются ближе к электрону и частично его экранируют.

Рассмотрим два экспериментальных доказательства этой модели.

Лэмбовский сдвиг уровней энергии атома водорода.

Так называется небольшое отклонение тонкой структуры уровней энергии водородоподобных атомов от значений, которые дает квантовая теория без учета поляризации вакуума. Согласно решению уравнения Дирака для водородоподобных атомов, уровни энергии $2s_{1/2}$ и $2p_{1/2}$ должны совпадать. Однако характеристики движения электрона в этих состояниях различны: s -электроны проводят основную часть времени вблизи ядра, т.е. в более сильном поле, чем p -электроны, которые в среднем находятся на большем удалении от ядра. Поэтому поправки к энергиям за счет поляризации вакуума (они называются *радиационными поправками*) должны быть разными.

На языке теории Бора это можно представить так. Взаимодействие с вакуумом (испускание и поглощение виртуальных фотонов) как бы раскачивает, "трясет" электрон в процессе его движения по стационарной орбите радиуса r . При отклонении в каждую сторону на Δr его энергия меняется по-разному. При увеличении r на Δr энергия электрона меняется на величину ΔE_1 :

$$\Delta E_1 \approx \frac{1}{r + \Delta r} - \frac{1}{r} = -\frac{\Delta r}{r(r + \Delta r)}$$

т.е. уменьшается.

При уменьшении r на Δr энергия электрона увеличивается на ΔE_2 :

$$\Delta E_2 \approx \frac{1}{r - \Delta r} - \frac{1}{r} = \frac{\Delta r}{r(r - \Delta r)}$$

т.е. увеличивается, причем, очевидно, что по абсолютной величине ΔE_2 больше, чем ΔE_1 . Особенно эта разница должна быть заметна вблизи ядра, т.к. там энергия велика и быстро меняется с изменением r . Таким образом, для s -электрона радиационные поправки должны быть больше, чем для p -электрона, что и приводит к лэмбовскому сдвигу.

- Называется сдвиг так потому, что он впервые экспериментально был обнаружен У.Лэмбом (W.Lamb) в 1947 году (нобелевская премия 1955 года). Теоретическое значение лэмбовского сдвига для атома водорода 1057.864 МГц хорошо совпадает с экспериментальным: 1057.851 ± 0.002 МГц. Небольшое расхождение объясняется влиянием структуры протона, которое не может быть учтено в КЭД.

Аномальный магнитный момент электрона.

Из квантовой теории электрона (уравнения Дирака) следует, что электрон должен обладать магнитным моментом, равным магнетону Бора:

$$\mu_0 = \frac{e\hbar}{2m_e}$$

Однако из-за экранировки заряда вследствие поляризации вакуума в действительности магнитный момент электрона немного отличается от μ_0 и называется *аномальным магнитным моментом*.

Поправка вычислена и измерена с огромной точностью. Теоретическое значение:

$$\mu_{theory} = \mu_0 \cdot \left[1 + \frac{\alpha_e^2}{2\pi} - 0.32848 \left(\frac{\alpha_e^2}{\pi} \right)^2 + 1.184175 \left(\frac{\alpha_e^2}{\pi} \right)^3 \right] =$$
$$= 1.001159652236 \cdot \mu_0$$

современное экспериментальное значение

$$\mu_{exp} = (1.00115965241 \pm 0.000000000002) \cdot \mu_0.$$

Совпадение теоретического и экспериментального значений настолько хорошее, что не оставляет никаких сомнений в правильности КЭД.

- Экспериментальное значение аномального магнитного момента электрона впервые получил американский физик П.Каш (P.Kusch), нобелевская премия 1955 года (вместе с У.Лэмбом).
- Схема экспериментальной установки и методика эксперимента, в котором был с такой высокой точностью измерен магнитный момент электрона, приведены, например, на стр. 165-169 книги Г. Фрауэнфельдера и Э.Хенли "Субатомная физика". - М.: Мир, 1979.