

## Квантовая хромодинамика

Анализ цветового зрения говорит, что все богатство окружающих нас красок — различные сочетания трех основных цветов. Таково свойство человеческого восприятия. Многообразие адронных превращений — результат взаимодействий трех цветов кварков, проявление фундаментального цветового взаимодействия. Оказалось, что такое взаимодействие можно описать по аналогии с квантовой теорией электромагнитного взаимодействия — квантовой электродинамикой (которую сокращенно называют КЭД). Для квантовой теории цветового взаимодействия даже используют созвучное название *квантовая хромодинамика* (сокращенно КХД). Достаточно популярное изложение представлений КХД содержится в книге Л. Б. Окуня « $\alpha\beta\gamma \dots Z$ ». Ограничимся поэтому лишь некоторыми аспектами этих представлений, развивая их аналогию с представлениями КЭД.

В квантовой электродинамике важнейшую роль играет безразмерная величина, называемая *постоянной тонкой структуры*  $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$ , где  $e$  — электрический заряд электрона. Величина  $\alpha$  характеризует вероятность испускания или поглощения электромагнитного кванта, вероятность превращения этого кванта в пару электрон — позитрон или аннигиляции такой пары в электромагнитный квант. Все эти процессы сводятся к одному и тому же элементарному акту взаимодействия. Любой электромагнитный процесс оказывается при этом комбинацией элементарных актов взаимодействия.

Для расчета вероятности того или иного квантового процесса теоретики используют *диаграммы Фейнмана* — графические картинки, позволяющие выделить структуру такого процесса, складывающуюся из элементарных актов взаимодействия, связанных виртуальными частицами\*). Элементарному акту электромагнитного взаимодействия отвечает простейшая диаграмма Фейнмана (рис. 12). Рассматривая ее с разных сторон, мы получаем либо (рис. 12, а) квантовый переход, в котором начальный электрон  $e_1$  (или позитрон) уничтожается и рождается конечный элек-

\*) См., например, книгу: Фейнман Р. КЭД — странная теория света и вещества. — М.: Наука, 1988. — Библиотечка «Квант», вып. 66.

трон  $e_2$  (позитрон) и при этом рождается или уничтожается электромагнитный квант  $\gamma$ , либо (рис. 12, б) процесс уничтожения электромагнитного кванта и рождения пары электрон — позитрон, либо (рис. 12, в) процесс уничтожения пары электрон — позитрон и рождения электромагнитного кванта. Все эти процессы отвечают одному и тому же элементарному

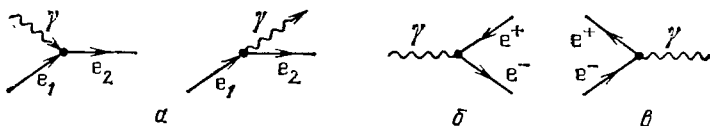


Рис. 12. Элементарный электромагнитный процесс изображается одной и той же картинкой — графиком Фейнмана. Рассматривая эту картинку с разных сторон, мы наблюдаем изображения различных эффектов: а — поглощение и рождение электромагнитного кванта  $\gamma$  электроном, б — рождение пары электрон — позитрон электромагнитным квантом, в — рождение электромагнитного кванта при аннигиляции электрона и позитрона

акту взаимодействия с электромагнитным квантом тока и заряда) электромагнитного перехода, т. е. превращения электрон — электрон (позитрон — позитрон), рождения или аннигиляции пары электрон — позитрон.

На основе элементарного акта КЭД, вероятность которого пропорциональна  $\alpha = 1/137$ , можно описать любой квантовый процесс электромагнитного взаимодействия.

Например, для того чтобы произошел квантовый процесс рассеяния электрона на электроне (рис. 13), требуется одно рождение и одно уничтожение электромагнитного кванта. В одном квантовом переходе квант должен родиться, во втором уничтожиться. В процессе электронного рассеяния могут происходить и другие процессы: может родиться и уничтожиться еще один квант (рис. 14), квант может превратиться в пару электрон — позитрон и снова родиться при их аннигиляции (рис. 15). Все эти процессы с дополнительным рождением и уничтожением электромагнитных квантов можно рассматривать как поправки к основному процессу (рис. 13), потому что они характеризуются величиной, пропорциональной дополнительной степени  $\alpha^2 = (1/137)^2$ .

Учет всех процессов дополнительных рождений и уничтожений электромагнитных квантов приводит к

некоторой (хотя и слабой) зависимости «постоянной»  $\alpha$  от расстояния. На малых расстояниях  $\alpha$  возрастает.

В квантовой хромодинамике гипотеза о цвете кварков позволяет определить заряды (и токи) сильного взаимодействия и ввести поле цветового взаимодействия, связанное с этими зарядами. Такое поле, «склеивающее» кварки в адронах, называют *глюонным*, от английского glue — клей. Частица — квант глюонного

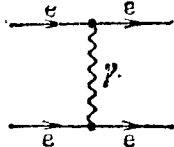


Рис. 13. Электромагнитное взаимодействие электронов обусловлено рождением и поглощением электромагнитного кванта  $\gamma$ .

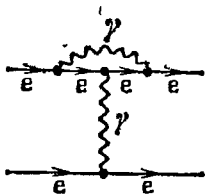


Рис. 14. В процессе взаимодействия двух электронов может происходить дополнительное рождение и поглощение электромагнитного кванта  $\gamma$

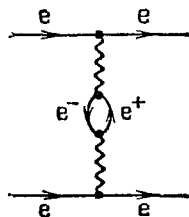


Рис. 15. Электромагнитный квант, рождаемый и уничтожаемый в процессе взаимодействия электронов может «по пути» превращаться в пару электрон — позитрон

поля называется *глюоном* и обозначается  $g$ . Токи (и заряды) цветовых переходов являются источниками глюонов аналогично тому, как ток (и заряд) электромагнитного перехода является источником электромагнитного кванта. Элементарный акт сильного взаимодействия описывается диаграммой Фейнмана, изображенной на рис. 16 и отвечающей взаимодействию глюона  $g$  с током (и зарядом), цветового перехода между кварками  $q$ .

В квантовой хромодинамике вводится константа  $\alpha_s$ , которая характеризует вероятность испускания или поглощения глюона цветовыми зарядами, вероятность рождения глюоном пары кварк — антикварк или аннигиляции такой пары в глюон. Эти процессы — разные проявления одного и того же элементарного акта сильного взаимодействия на рис. 16. Рассматривая переходы кварков из любых 3-х начальных цветовых состояний в любые 3 конечные цветовые состояния, легко убедиться, что полное число таких переходов

дов равно  $3 \times 3 = 9$ . Однако только 8 таких переходов связаны с цветовыми превращениями. Девятый переход — это переход между кварками одного и того же цвета, переход, в котором цвет кварков не меняется и не различается. Девятый глюон был бы «дальтони́ком» и непосредственно связывался бы с числом квар-

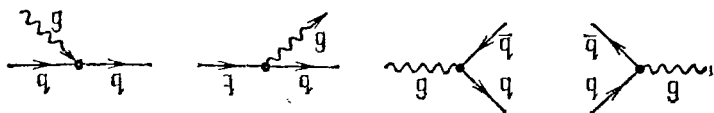


Рис. 16. Рассматривая с разных сторон элементарный процесс взаимодействия кварков с глюонами, мы получаем изображения процессов: поглощения и рождения глюона кварком, превращения глюона в пару кварк — антикварк или рождения глюонов при аннигиляции кварка и антикварка

ков в адроне (минус число антикварков), т. е. с барионным зарядом. Такое бесцветное поле отвечало бы взаимодействию между барионными зарядами. Экспериментальная проверка принципа эквивалентности инертной и гравитационной массы, проведенная в опытах типа опыта Этвеша с высокой точностью, исключает возможность существования дальнедействующего поля, связанного с барионным зарядом.

Таким образом, все 8 глюонов оказываются «окрашенными». Между ними также возможны квантовые переходы — источники новых глюонов. Поэтому структура КХД оказывается сложнее, чем структура КЭД. Помимо элементарного акта, изображенного на рис. 16, в КХД имеются элементарные процессы «самодействия глюонов». В этих процессах, описываемых диаграммами рис. 17, источниками новых глюонов являются квантовые переходы между глюонами.

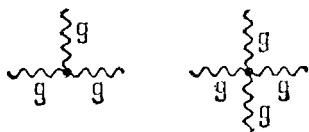


Рис. 17. В отличие от квантовой электродинамики в квантовой хромодинамике имеются дополнительные элементарные процессы самодействия глюонов

То обстоятельство, что глюоны сами несут цветовой заряд, существенно меняет закон их взаимодействия на больших расстояниях. Возникает так называемый *конфайнмент* — невылетание цветового заряда. Вследствие невылетания цветовой заряд экранируется,

поэтому свободные цветные частицы — глюоны и кварки — не существуют.

Различие в электромагнитных и цветовых взаимодействиях проявляется и в том, что квантовая хромодинамика обладает асимптотической свободой — чем меньше расстояние между цветовыми зарядами, тем слабее их взаимодействие. Из принципа неопределенности следует, что процессы на малых расстояниях происходят при большой передаче импульсов. Это позволило объяснить наблюдавшиеся в экспериментах закономерности взаимодействия кварков на малых расстояниях. Асимптотическая свобода на малых расстояниях между цветовыми зарядами является обратной стороной конфайнмента на больших расстояниях.

### Свободные кварки в нуклоне

Если рассеяние меняет внутреннее состояние частиц, участвующих в рассеянии, то говорят о неупругом рассеянии. В рассеянии частиц высокой энергии состояние нуклона меняется настолько сильно, что вводят специальный термин — *глубоконеупругое рассеяние*. Рассеяние адрона на нуклоне — это взаимодействие двух сложных составных объектов. А вот лептон (или фотон) в сильном взаимодействии не участвует. И его превращения можно рассчитывать количественно.

Физика взаимодействия лептонов с адронами позволила заглянуть внутрь адронов, экспериментально исследовать свойства их составляющих. Такие исследования начали интенсивно проводиться в конце 60-х — начале 70-х гг. с созданием на ускорителях интенсивных пучков энергичных лептонов.

Подобно тому как  $\alpha$ -частицы в опытах Резерфорда взаимодействовали с отдельными составляющими атома, проникая в глубь нуклона, лептоны взаимодействовали с отдельными его составляющими. Нуклон оказывался действительно составной частицей, составленной из кварков. Опыты по глубоконеупругому рассеянию подтверждали асимптотическую свободу цветового взаимодействия.

Асимптотическая свобода цветового взаимодействия обеспечивает слабое взаимное влияние составляющих нуклона в процессах глубоконеупругого рассеяния