

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 α -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

лептонов. В этих процессах лептон передает кварку большую энергию ΔE и большой импульс ΔP . Этот процесс происходит очень быстро за время $\sim \hbar/\Delta E$. Из-за асимптотической свободы взаимодействия кварков с глюонами передать всю эту энергию и импульс сразу, так сказать, «единым глюоном», кварк не может — вероятность этого мала. Более вероятно передача энергии и импульса по частям — вероятность этого больше, но и характерное время передачи энергии и импульса по частям — небольшими порциями — оказывается значительно больше, чем время взаимодействия кварков с лептонами.

Поэтому с лептонами кварк взаимодействует быстро, а с окружающими его в нуклоне кварками и глюонами — медленно. В кратковременном процессе взаимодействия лептона с кварком медленные процессы взаимодействия с другими кварками не успевают проявиться. Вот почему глубоконеупругое рассеяние лептонов на нуклонах выглядит так, как если бы кварки в нуклоне вообще не взаимодействовали. Но наиболее яркие подтверждения квантовой хромодинамики связаны с открытием *очарованного кварка*.

«Ноябрьская революция»

В 1974 г. в экспериментах по аннигиляции электронов и позитронов, разогнанных навстречу друг другу, была открыта частица нового типа.

Частицу открыли независимо две группы физиков. Одна группа назвала ее J -частицей (джей-частицей); другая назвала ее ψ -частицей (пси-частицей). Частицу стали называть J/ψ (джей-пси).

Рождение J/ψ -частиц проявлялось как очень узкий резонанс (значительно более узкий, чем все известные частицы-резонансы) в процессе: электрон + позитрон $\rightarrow J/\psi$ -частица \rightarrow продукты ее распада. Новая частица была нейтральной; она взаимодействовала и с лептонами, и с адронами; обладала спином 1.

Было открыто целое семейство таких частиц. J/ψ все более уверенно отождествлялась со связанным состоянием нового очарованного кварка и его антикварка. Существование такого кварка было предсказано в теории слабого взаимодействия (см. ниже). Очарование s -кварка в J/ψ компенсировалось присутствием анти- s -кварка. В J/ψ очарование явным образом не

проявлялось. Это была частица со *скрытым очарованием*. Начался интенсивный поиск частиц с явным очарованием. И такие частицы вскоре были открыты.

Открытие J/ψ произошло в ноябре 1974 г. Это открытие вызвало бурный поток теоретических идей и экспериментальных предложений. На равной основе рассматривались самые разные теоретические объяснения природы J/ψ . При обсуждении таких идей не смущало предсказание новых частиц. Экономным теориям предпочтение не оказывалось. В физике происходил переворот. Этот переворот иногда именовался в литературе «ноябрьской революцией».

Средневековый философ У. Оккам выдвинул принцип «бритвы», отсекающий в науке все лишнее, не необходимое. Принцип бритвы Оккама гласил: «*Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem*» («Сущности не следует умножать без необходимости»). Это была древнейшая формулировка принципа экономии: все, что не необходимо, не существует. Отсекай все, что не доказано. Э. Мах доводил этот принцип до абсурда в своих представлениях о науке как о принципе экономии мышления.

Ноябрьская революция, казалось, впадала в другую крайность, предавая этот принцип забвению. Теории, содержащие новые гипотетические частицы, стали выдвигаться безбоязненно. Единственной возможностью их отсесть была проверка их предсказаний в экспериментах.

И среди обилия различных теоретических объяснений свойств семейства J/ψ -частиц все ярче выявлялась доказательная сила квантовой хромодинамики.

Квантовая хромодинамика позволила объяснить, почему J/ψ -резонанс оказывается таким узким. Адроны и, в частности, J/ψ -частица не имеют цветового заряда. Поэтому в паре cc , составляющей J/ψ , цветовой заряд полностью скомпенсирован. Из сохранения цветового заряда следует, что не обладающая цветовым зарядом пара cc не может превратиться в один глюон, несущий цветовой заряд. Связанная пара cc подобна электрически нейтральной системе связанных электрона и позитрона — системе позитрония — «атому», у которого ядром является позитрон. Исходя из этой аналогии систему cc называют *чармонием* (от английского слова *charm* — очарование).

Если спины электрона и позитрона направлены в противоположные стороны, то это — система с нулевым полным спином — *парапозитроний*. При аннигиляции электрона и позитрона парапозитроний превращается в два фотона.

Если спины электрона и позитрона ориентированы в одном направлении, то это — система с единичным полным спином — *ортопозитроний*. Такая система может превратиться только в три фотона.

J/ψ имеет спин 1. Это связанное состояние очарованного кварка c и его антикварка \bar{c} подобно ортопозитронию, и превратиться это состояние может только в три глюона. Этим глюонам передается довольно большая энергия и импульс, поэтому вероятность испускания каждого глюона оказывается небольшой, а распад J/ψ происходит, если все три глюона рождаются одновременно. Потом глюоны саморазмножаются, рождаются пары легких кварков и антикварков, но вероятность этих последующих процессов уже можно считать равной единице. Они медленно разворачиваются после быстрого процесса распада на глюоны. При этом вероятность распада J/ψ , пропорциональная произведению трех малых величин α_s , подавляемая дополнительно малым коэффициентом, оказывается малой.

Кварки в e^-e^+ -аннигиляции

Другой пример успешного применения представлений квантовой хромодинамики дает физика процессов аннигиляции электронов и позитронов в адроны.

В рамках гипотезы кварков процесс электрон-позитронной аннигиляции в адроны выглядит следующим образом: электрон и позитрон уничтожаются и рождается электромагнитный квант. Потом этот квант уничтожается и рождается пара кварк—антикварк. Эта пара затем как-то превращается в адроны, но на вероятность процесса это последнее превращение уже не влияет. Полная вероятность аннигиляции электрона и позитрона в адроны определяется вероятностью рождения пары кварк — антикварк. Глюоны электрически нейтральны и не дают вклада в эту вероятность.