

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