

Превращение: электрон \dagger позитрон \rightarrow электромагнитный квант \rightarrow электрон \dagger позитрон интерферирует с рассеянием электрона на позитроне. Поэтому e^+e^- -аннигиляцию в пару e^+e^- экспериментально трудно выделить. В результате обоих процессов получается одно и то же. А вот превращение: электрон \dagger позитрон \rightarrow электромагнитный квант \rightarrow пара $\mu^+\mu^-$ может происходить только за счет аннигиляции электрона и позитрона. Именно это превращение и взяли за эталон для сравнения с аннигиляцией электрона и позитрона в адроны.

Согласно квантовой электродинамике вероятность рождения пары кварк — антикварк отличается от вероятности рождения пары $\mu^+\mu^-$ только величиной заряда кварков (ее, согласно кварковой модели, надо брать дробной). Вероятность рождения пары анти-и (\bar{u}) и u -кварка относится к вероятности рождения $\mu^+\mu^-$ как $4/9$; а для пар $\bar{d}d$ и $\bar{s}s$ — как $1/9$. В электрон-позитронной аннигиляции может родиться любая из пар кварков. Отношение полной вероятности аннигиляции в любую пару к вероятности аннигиляции в пару $\mu^+\mu^-$ должно было равняться сумме этих величин: $4/9 + 1/9 + 4/9 = 2/3$. Тем самым отношение R вероятности аннигиляции электрона и позитрона в адроны к вероятности их аннигиляции в $\mu^+\mu^-$ должно было составлять $R = 2/3$. На опыте наблюдается величина, близкая к 2 ниже порога рождения очарованных частиц. Отличие в 3 раза связано с тем, что каждый тип кварка выступает в трех различных цветовых состояниях и все эти состояния рождаются в e^+e^- -аннигиляции. Но почему тогда разные цвета кварков не проявляются у образующихся адронов?

Конфайнмент

Согласно квантовой хромодинамике на больших расстояниях между цветовыми зарядами величина α_s становится совсем большой. Как оборотная сторона асимптотической свободы цветовых зарядов, удаленных друг от друга на малое расстояние, возникла идея об абсолютном связывании — конфайнменте (английское confinement — тюремное заключение, ограничение свободы передвижения) цветовых зарядов на расстояниях порядка размеров ядра. На большие расстояния цветовые заряды друг от друга уда-

ляться не могут. Из-за саморазмножения глюонов, из-за самодействия глюонных полей цветковое взаимодействие «самозамыкается» в размерах порядка ядерных. Кварки — объекты цветные. Конфайнмент цветковых зарядов объясняет, почему кварки или цветные частицы не наблюдаются в свободном состоянии.

Иногда связывание цветковых зарядов представляют себе как стягивание глюонного поля (поля цветкового заряда) в трубку с постоянной плотностью

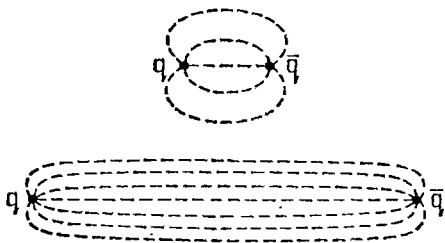


Рис. 18. Глюонное поле между кварком и антикварком на больших расстояниях стягивается в трубку

энергии (рис. 18). Эта трубка стягивает цветковые заряды, так что потенциальная энергия их взаимодействия растет пропорционально расстоянию между зарядами.

На малых расстояниях система чармония сходна с атомом водорода или с позитронием. Масса глюонов предсказывается равной нулю, поэтому на малых расстояниях цветковое взаимодействие кварков подобно электромагнитному — потенциал их взаимодействия подобен кулоновскому потенциалу. На больших расстояниях глюонное поле стягивается в трубку и отвечает потенциалу, линейно растущему с расстоянием между кварками.

Количественный анализ системы чармония для потенциала, выбираемого в виде суммы «цветового кулоновского» потенциала и линейно растущего с расстоянием между s -кварками, позволяет хорошо описать свойства частиц семейства J/ψ .

Представление о трубке глюонного поля позволяет также понять, почему во всех случаях e^+e^- -аннигиляции независимо от цвета рождающихся кварков адроны получаются одинаково бесцветными?

Если, например, цветковые заряды разлетаются, как разлетаются два кварка, рожденные в электрон-позитрон-

тронной аннигиляции, то по мере разлета потенциальная энергия взаимодействия цветовых зарядов растет и в некоторый момент начинает превышать энергетический порог рождения новой пары кварк—антикварк. Трубка разрывается. На месте разрыва появляются новые кварк и антикварк. Возникают уже две трубки (рис. 19), которые в свою очередь растягиваются, разрываются и образуют новые пары кварк—антикварк. Так можно качественно понять, почему образующиеся

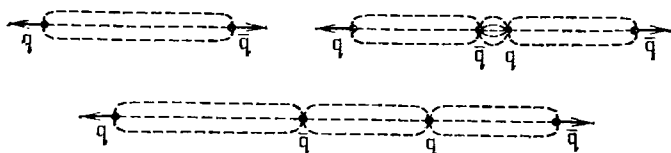


Рис. 19. Разрыв трубки глюонного поля между разлетающимся кварком и антикварком и рождение пар кварк—антикварк на месте разрыва—механизм множественного рождения адронов в процессах при высоких энергиях

в e^+e^- -аннигиляции адроны не несут цвета рождающихся кварков. Конфайнмент цветовых зарядов приводит к полному экранированию цвета.

Представление о разрывах трубок глюонного поля позволяет наглядно представить, как образуются в e^+e^- -аннигиляции мезоны — связанные состояния кварка и антикварков. Но среди продуктов e^+e^- -аннигиляции наблюдают и пары барион—антибарион. В рамках представлений о трубках глюонного поля описать рождение этих пар не так-то просто.

Когда речь идет о малых энергиях и, в частности, о нижнем энергетическом состоянии, кварки далеко не удаляются друг от друга, длинные трубки не образуются. Тогда возможно другое описание конфайнмента. Адрон представляют как мешок, в котором движутся почти свободные кварки (или в мезонах и антибарионах — антикварки), составляющие адрон. В этой модели есть свои проблемы. Например, что такое «мешковина».

Количественная теория конфайнмента пока не разработана. Да и качественные представления о его механизмах нужно еще уточнять. Продолжается поиск специфических для квантовой хромодинамики новых частиц — связанных состояний глюонов — глюболлов. Обсуждается возможность существования новых экзо-

тических частиц (например, связанных шестикварковых систем — дибарионов). Физики надеются, что развитие квантовой хромодинамики позволит построить на ее основе и количественную теорию конфайнмента цветового заряда. Дело это не простое. Квантовая хромодинамика пока еще — количественная теория сильного взаимодействия в условиях, когда это взаимодействие оказывается совсем не сильным. Нет сомнения, что картина, основанная на кварках и глюонах, качественно верна и в тех областях, где их взаимодействие действительно сильное. Уже появляются работы, в которых специфика ядерных сил анализируется с учетом кварковой структуры. Но количественные проблемы здесь пока не решены.

В квантовой хромодинамике ядерные силы оказываются аналогичными силам Ван-дер-Ваальса, действующим между нейтральными атомами. Кулоновское взаимодействие между атомами отсутствует, но имеются существенно более слабые, чем кулоновские, силы Ван-дер-Ваальса между атомами, имеющие квантовую природу и отражающие наличие электрических сил между электронами и ядрами. Нечто подобное должно возникать и между нуклонами в ядре — межнуклонные силы должны появляться как остаточный эффект цветового взаимодействия кварков и глюонов. Однако в отличие от случая ван-дер-ваальсовых сил, явная связь межнуклонного и цветового взаимодействия не так проста. Поэтому в ядерной физике до сих пор широко применяют представления теории Юкавы о межнуклонном взаимодействии как обмене пионами и другими мезонами, рассматривая эти представления как способ описания эффектов цветового взаимодействия в области конфайнмента.

Замечательным свойством цветового взаимодействия оказалась его слабость на малых расстояниях. Вместе с тем конфайнмент принципиально более важен по сравнению с асимптотической свободой.

Конфайнмент дает новое качество. Оказывается, что могут быть элементарные частицы — кварки и глюоны — принципиально не наблюдаемые в свободном состоянии по отдельности. Понятие составной частицы не обязательно означает возможность разделить ее на составляющие. Такого не было ни у атома, ни у ядра.