

тральных мезона, составленные из $d\bar{s}$ и $s\bar{d}$. На их очень интересных свойствах мы не останавливаемся.

В кварковой модели барионы и барионные резонансы состоят из трех кварков, а антибарионы — из трех антикварков.

Например, протон состоит из двух u -кварков и одного d -кварка, нейтрон — из двух d -кварков и одного u -кварка, Δ^{++} -резонанс — из трех u -кварков, Δ^- -резонанс — из трех кварков, антипротон — из двух анти- u -кварков (\bar{u}) и одного анти- d -кварка (\bar{d})*).

Трудности теории кварков

Кварки имеют спин $1/2$ (в единицах \hbar). Как и электроны. Как и нуклоны. Для кварков одного и того же типа должен быть справедлив принцип запрета Паули. Два одинаковых кварка не могут находиться в состоянии с одним и тем же направлением спина. Но для резонансов Δ^{++} , Δ^- кварковая модель предсказывала именно такую ситуацию. Согласно теории кварков они состоят из трех кварков одного типа: Δ^{++} — из трех u -кварков, Δ^- — из трех d -кварков. Спин кварков равен $1/2$. Спин Δ^{++} и Δ^- равен $3/2$. Было естественно считать, что все кварки находятся на одном и том же низшем энергетическом уровне, в состоянии с нулевым орбитальным моментом. Но тогда спины трех составляющих кварков должны быть ориентированы в одном и том же направлении. Это противоречит принципу запрета Паули — основе статистики систем тождественных частиц с полуцелым значением спина.

*) В процессах сильного и электромагнитного взаимодействия кварк данного типа может рождаться или уничтожаться только в паре со своим антикварком. Поэтому-то и наблюдается парное рождение странных частиц. Например, реакция сильного взаимодействия $p + N \rightarrow \Lambda + K^+$ обусловлена рождением пары s и \bar{s} , входящих, соответственно, в состав Λ и K^+ . В процессах слабого взаимодействия кварк одного типа может поодиночке превращаться в кварк другого типа. При этом в модели кварков вся совокупность процессов слабого взаимодействия адронов сводилась к взаимодействию токов превращений u -кварка в d -кварк и u -кварка в s -кварк. Например, превращение нейтрона в протон при β -распаде нейтрона — это процесс, в котором один из d -кварков нейтрона превращается в u -кварк. Слабый ток именно этого перехода взаимодействует со слабым током рождающейся в β -распаде пары электрон — нейтрино (см. далее).

Другая проблема — отсутствие кварков в свободном состоянии.

Разве можно сказать, что адроны действительно состоят из кварков?

Если дом построен из бревен, мы можем раскатать его на бревна. Дом из кирпича можно разобрать на отдельные кирпичи. Если что-то построено из чего-то, мы можем разделить это что-то на то, из чего оно построено. Можно составить — можно и разобрать. Можно выделить составляющие в чистом виде.

Химическое соединение можно разложить на отдельные химические элементы. Атом можно ионизовать и получить составляющие его ядро и электроны. Можно расщепить ядро на протоны и нейтроны, из которых оно состоит. *А расщепить частицы на кварки оказалось невозможным.*

Росли энергии частиц, разгоняемых на ускорителях. Частицы все большей энергии дробили протоны и нейтроны. Как в сказке: били-били — не разбили. Во взаимодействиях частиц с адронами адроны не расщеплялись на кварки. Адроны превращались в новые адроны. Эти превращения можно было описать на языке теории кварков. Можно было указать, сколько новых пар кварк — антикварк родилось. Какие переходы между кварками произошли. Но в чистом виде кварки не рождались. Наблюдались только их связанные состояния.

Другое доказательство отсутствия свободных кварков пришло из космологии. Расширяющуюся Вселенную можно назвать «ускорителем для бедных». В ходе своей эволюции Вселенная проходила стадии сверхвысоких плотностей энергии, на которых в естественных условиях разворачивались процессы, предсказываемые теорией для частиц сверхвысоких энергий. Применяя эти представления для кварков и рассматривая расширение Вселенной как способ спасения свободных кварков, можно было убедиться в том, что, если бы кварки могли существовать в свободном состоянии, они существовали бы в очень ранней Вселенной и, пройдя через все этапы эволюции Вселенной, содержались бы в земном грунте в количестве, сравнимом с обилием золота. Поиск кварков в веществе показал, что свободных кварков в грунте нет и в количестве на 10 порядков меньше, чем предсказывалось космологией. Этот результат служил сильным

аргументом против существования кварков в свободном состоянии. Кварки могли быть только связанными в адронах.

Цвет кварков

С чем связано нарушение принципа Паули в системах связанных кварков? С тем, что кварки одного типа тождественны, неотличимы один от другого.

Δ^{++} и Δ^{-} являются системами трех одинаковых кварков, помещенных с одинаковым направлением спина в одно и то же состояние. Но может, у кварков есть еще какое-нибудь отличие? Может, их можно как-то пометить и отличить по этим меткам один от другого, покрасить три составляющих Δ кварка в разные цвета?

Да, именно покрасить!

Не только u , d и s отличаются друг от друга. Может быть, есть три различных u -кварка, три различных d -кварка, три различных s -кварка.

Осторожный человек постарался бы спрятать это нововведение, ввести индексы: u_1, u_2 и u_3 ; d_1, d_2 и d_3 ; s_1, s_2 и s_3 — замаскировать тот факт, что число взаимодействующих элементарных частиц утроилось!

К счастью, физики не лишены темперамента и стремления к яркости. Умножение числа кварков обернулось образной красочной картиной. Физики решили, что у невидимых кварков есть невидимые «цвета» (этот цвет не имеет отношения к оптике). Есть цвета, которые прячутся вместе со своими носителями — кварками — внутри адрона. Внутри адрона кварки можно различить по цвету. Между кварками разного цвета полная симметрия. Их массы, электрические заряды и все остальные (кроме цвета) характеристики — *точно* одинаковы. Тогда Δ^{++} (Δ^{-}) оказываются системами трех разных u - (d -) кварков — они состоят из кварков одного типа (аромата), но разного цвета. Например, Δ^{++} состоит из одного желтого u -кварка, одного красного u -кварка и одного синего u -кварка. Составляющие Δ^{++} u -кварки находятся в разных цветовых состояниях — в полном соответствии с принципом запрета Паули.

Итак, физики обратились к динамике цветовых зарядов и связанных с ними полей.