**Пентакварк, опять пентакварк?**

Николай Никитин, НИИЯФ МГУ

В последние месяцы среди экспериментальных групп развернулась настоящая "гонка престижа". После сообщения японской коллаборации LEPS об открытии первого пятикваркового состояния (эту новость уже несколько раз доступно пересказывали в русскоязычном секторе Интернет, например, в популярных заметках [1], [2] и [3]), многие экспериментальные группы принялись перепроверять свои данные на предмет обнаружения пентакварка или его собратьев по антидекуплету, существование которого было предсказано в теоретической работе [4]. В предисловии и следующем за ним переводе из международного журнала по физике высоких энергий "CERN Courier" рассказывается о последних экспериментальных открытиях на пути изучения пентакварков.

Из множества вопросов, которые возникают у людей, впервые заинтересовавшихся пентакварками, можно выделить три основных.

Первый: чем интересны пятикварковые состояния? Следует сразу подчеркнуть, что существование пентакварков не переворачивает современную картину мира и не противоречит принятой на сегодняшний день теории элементарных частиц -- так называемой Стандартной Модели (СМ), которая включает в себя калибровочную теорию электрослабых взаимодействий Глэшоу-Вайнберга-Салама и калибровочную теорию сильных взаимодействий -- Квантовую хромодинамику (КХД). Более того, предсказание существования антидекуплета пентакварков является прямым следствием приближенной SU(3)-симметрии сильных взаимодействий, которая возникает в КХД, если считать, что массы трех самых легких кварков u, d и s примерно одинаковы по сравнению с характерным адронным масштабом ~1 ГэВ.

Подобная SU(3) массовая симметрия является прямым обобщением SU(2) массовой симметрии сильных взаимодействий (изотопической симметрии), когда одинаковыми предполагаются только массы u- и d-кварков. Поскольку конституентные массы u- и d-кварков численно примерно равны между собой, а масса конституентного s-кварка больше примерно в три раза, то изотопическая симметрия в природе реализуется с гораздо большей точностью, чем массовая SU(3)-симметрия.

Стоит подчеркнуть, что обсуждаемую выше ПРИБЛИЖЕННУЮ SU(3)-симметрию сильных взаимодействий ни в коем случае нельзя путать с ТОЧНОЙ цветовой SU(3)-симметрией сильных взаимодействий. Хотя, с точки зрения математического аппарата теории групп, эти две симметрии задаются при помощи одинаковых математических преобразований, но, с точки зрения физики, их происхождение имеет совершенно различную природу. Поэтому разную природу и степень предсказательной точности имеют следствия существования этих двух SU(3)-симметрий сильных взаимодействий. Студентам-физикам старших курсов и читателям с высшим образованием, более подробно заинтересовавшимся данным вопросом, для изучения SU(3)-симметрий сильных взаимодействий "не отходя от компьютера" можно рекомендовать курс лекций [14].

Интерес ученых к пентакваркам можно сравнить с работой мастера-гончара, который уже вылепил кувшин для воды, а теперь добивается идеальной формы его стенок, горлышка и ручки. Ученые тоже имеют в своем распоряжении "кувшин для описания сильных взаимодействий" -- Квантовую хромодинамику, с момента создания которой прошло уже более 30 лет. КХД дает множество предсказаний, в том числе предсказание о возможности существования в природе состояний с четырьмя кварками и одним антикварком (именно такие состояния получили названия "пентакварк") и, например, абсолютной невозможности состояний с двумя кварками и одним антикварком. До недавнего времени ни те, ни другие состояния не наблюдались. В настоящее время "разрешенные" пентакварки, по всей видимости, наблюдаются в нескольких экспериментах, а принципиально невозможные с точки зрения КХД двукварково-одноантикварковые состояния по-прежнему не открыты.

Таким образом, наблюдение пентакварков позволило ученым дополнительно подтвердить правильность КХД и получить новые данные для более детального исследования сильных взаимодействий, иными словами довести до совершенства "ручку" "кувшина", ведь именно совершенство отличает высокохудожественное творение настоящего мастера-физика от грубой поделки ремесленника-одержимца.

Второй вопрос: в каких еще экспериментах, помимо японского эксперимента LEPS, зафиксированы сигналы от ? Ниже приводится таблица с перечнем экспериментов, которые заявили о наблюдении , каналов, в которых эти наблюдения были выполнены, и найденых характеристик -частицы. В Таблице 1 требуют пояснения некоторые обозначения: A -- ядро (применяется для тех эксперимнтов, в которых рождение пентакварка исследовалось в однотипных реакциях на нескольких ядрах), X -- все возможные другие частицы (применяется для обозначения несущественных частиц в инклюзивных реакциях), d -- дейтон, -- короткоживущая компонента -мезона.

Из таблицы хорошо видно, что имеется существенный разброс в массах пентакварка и в его ширинах. Однако, во многих случаях измерение ширины лимитировалось разрешающей способностью аппаратуры.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Таблица: Сводка экспериментальных данных по обнаружению сигнала от . Частицы в скобках образуют те пары, в распределении по инвариантной массе которых был обнаружен пентакварк. Следует напомнить, что инвариантной массой двух частиц называется величина , где и -- энергия и импульс каждой из частиц в некоторой системе координат. Эксперимент | Страна | Масса | Ширина | Реакция | Ссылка |
|   |   | (МэВ) | (МэВ) |   |   |
| LEPS | Япония |  | 25 |  | [5] |
| CLAS(d) | США |  | 21 |  | [6] |
| DIANA | Россия |  | 9 |  | [7] |
| SAPHIR | Германия |  | 25 |  | [8] |
| ИТЭФ | Россия |  | 20 |  | [9] |
| CLAS(p) | США |  |  |  | [10] |
| HERMES | Германия |  |  |  | [11] |
| СВД-2 | Россия |  | 24 |  | [12] |
| ZEUS | Германия |  | -- |  | [13] |

Третий: почему ученые уверены, что они видят именно пятикварковые образования, ведь кварки спрятаны внутри адронов и их число не поддается прямому определению? Прежде всего отмечу, что несмотря на бравурный тон статей, особенно в научно-популярной периодической литературе и СМИ, ученые пока совсем не уверены, что пентакварки обнаружены. И, как ни странно, эта неуверенность крепнет с каждым новым экспериментом, сообщающем об обнаружении очередного кандидата в пентакварки.

Какие рассуждения привели физиков-экспериментаторов к мысли, что есть пентакварк? Частица наблюдалась в двух модах распада: и . Барионные заряды протона и нейтрона равны единице, а каонов -- нулю; суммарный барионный заряд конечной системы в обеих реакциях равен единице. Если бы распад шел с нарушением барионного заряда, то при существующей статистике эксперимента LEPS и его последователей подобный распад было бы невозможно наблюдать (существуют чрезвычайно жесткие экспериментальные ограничения на вероятность нарушения барионного заряда, связанные, в основном, с измерением времени жизни протона на японских установках KamiokaNDE и SuperKamiokaNDE). Поскольку распады наблюдаются, то естественно предположить, что в данном случае барионный заряд сохраняется, то есть его величина для равна единице.

Странность состояния измерялась в распаде . Если предположить, что распад идет за счет сильного взаимодействия (характеристики распада указывает именно на эту возможность), то странность также сохраняется. Поскольку странность -мезона равна +1, то и странность тоже должна быть равна +1, то есть частица должна содержать хотя бы один странный антикварк. Таким образом, -- это частица с барионным зарядом +1, но содержащая хотя бы один антикварк. Минимальным подобным состоянием может быть состояние, содержащее четыре кварка и странный антикварк, что соответствует теоретическим предсказаниям группы Д.Дьяконова [4].

Масса и полная ширина состояния также хорошо согласуются с предсказаниями группы Дьяконова, так что наиболее естественным предположением является гипотеза, что состояние есть пентакварк с положительной странностью из антидекуплета легчайших пентакварков. Его ожидаемый кварковый состав . Однако, необходимо подчеркнуть еще раз, что до абсолютно бесспорных суждений относительно природы очень далеко. Плохо стыкующиеся друг с другом данные из Таблицы 1 - лучшее этому подтверждение.

Необходимо обратить внимание сетевых читателей на одну тонкость: невозможно ПРЯМО измерить странность пентакварка по распаду , поскольку основной модой, по которой экспериментально обнаруживается -мезон, является распад , идущий за счет слабого взаимодействия и, следовательно, нарушающий странность.

Н.Никитин

**Новые пятикварковые состояния найдены в CERNе**

Прошло всего несколько месяцев после вспышки энтузиазма, вызванной почти одновременным наблюдением сразу в нескольких экспериментах новой частицы, состоящей из пяти кварков, -- а уже приходят сообщения о наблюдении других пятикварковых состояний, родственных первому.

Рис.1: Гипотетический барионный антидекуплет пентакварков. Эти состояния образуют треугольник. Возможно, что в настоящее время открыты три состояния, лежащие на сторонах этого треугольника (обведены кружками).

Предложенная в 1960-х годах кварковая модель оказалась весьма удачной для описания известных барионов как связанных состояний трех кварков. Однако, Квантовая хромодинамика не запрещает существование барионов, содержащих и более трех "кирпичиков". Поиски таких многокварковых состояний велись много лет, но до недавнего времени экспериментально не было обнаружено ни одного приемлемого кандидата. Новый импульс поискам придали теоретические работы Дмитрия Дьяконова, Виктора Петрова и Максима Полякова. Российские теоретики предсказали, что массы легчайших пентакварков (то есть состояний вида ), входящих в барионный антидекуплет (см. рис.1), сравнительно невелики и что ширина распада самого легкого из пентакварков должна быть чрезвычайно узкой [4]. Недавнее наблюдение такого состояния, получившего обозначение , открыло новую главу в барионной спектроскопии. Ожидается, что исследование прольет новый свет на поведение сильных взаимодействий в непертурбативной области (Н.Н.: то есть в области, в которой неприменима теория возмущений). является экзотическим барионом, поскольку он не может состоять из трех кварков. Это верно и для двух других членов барионного антидекуплета, обведенных на рис.1 красными кружками, которые имеют странность S = -2, заряды Q = -2 и 0 соответственно и входят в изотопический квартет -частиц (Н.Н.: напомню, что эта загадочная греческая буква читается КСИ).

Рис.: а) Суммарное распределение инвариантных масс -, -, - и -систем; b) распределение по инвариантной массе за вычетом комбинационного фона, -пик аппроксимируется при помощи распределения Гаусса.

В эксперименте NA49, который проводится в CERN-е на ускорителе SPS (Super Proton Synchrotron), велись поиски состояния и в протон-протонных столкновениях при энергии 158 ГэВ [15]. Треки частиц, родившихся в протонных столкновениях, регистрировались в четырех больших камерах, наполненных газом. Высокое разрешение достигалось при помощи точной реконструкции траекторий и импульсов частиц, в то время как идентификация частиц проводилась по их ионизационным потерям в газе. Реконструкция вершин вторичных распадов дала возможность наблюдать сложные цепочки распадов пентакварковых состояний. После подавления фона при помощи подходящих экспериментальных ограничений в распределении по инвариантной массе -системы был обнаружен узкий пик на уровне 5,6 стандартного отклонения. Этот пик соответствовал инвариантной массе 1,862 0,002 ГэВ/c2 (см. рис.2). Реальная ширина пика должна быть меньше, чем наблюдаемая полная ширина на полувысоте пика, которая равна 0,017 ГэВ/c2 и сопоставима с разрешением экспериментальной установки.

Пики с фактически одинаковой массой были зарегистрированы в распределениях по инвариантной массе для - и -систем, а также для систем, состоящих из их античастиц. Сигнал от найден не был. Это связано с тем, что для канала , в котором потенциально можно наблюдать , ситуация с фоном значительно хуже. Экзотические барионы (с зарядом Q = -2 и странностью S = -2) и (Q = 0, S = -2) являются хорошими кандидатами в изоспиновый квартет пентакварков на роль состояний с кварковым составом и соответственно (см. рис.1). Открытие этих состояний является важным шагом на пути подтверждения существования пентакваркового барионного антидекуплета.

Представленная выше статья из журнала "CERN Courier" является достаточно краткой. Поэтому при ее прочтении может возникнуть неясность, развеять которую и призвано послесловие.

Во-первых, все барионы, в состав которых входит два странных кварка, принято обозначать буквой . Поэтому два предполагаемых пятикварковых состояния с кварковым составом и соответственно, а также один из продуктов их распада, имеющий кварковый состав , в статье обозначены одинаково (что является неудачным с точки зрения первого знакомства с предметом).

На самом деле, в эксперименте NA49 искали распады вида и , которые в подавляющем числе случаев идут за счет сильного взаимодействия. Если принять, что пентакварки имеют массу около 1860 МэВ, то на языке элементарных частиц эти распады можно записать в виде: и , где -- это хорошо известный барион из изотопического дублета , имеющий кварковый состав . Пентакварки пытались обнаружить в распределении по инвариантным массам и -систем (либо по инвариантным массам систем их античестиц).

Во всех четырех случаях были найдены пики при массе около 1860 МэВ, что указывает либо на отличное выполнение изотопической симметрии в пентакварковом антидекуплете, либо на невыясненные пока методические ошибки эксперимента.

Последние теоретические предсказания [16] (январь 2004 г.) для масс уже наблюдавшихся в экспериментах пентакварков дают следующие значения:

Видно, что экспериментальные результаты для масс предполагаемых - и -состояний очень хорошо согласуются с вычислениями теоретиков.

В феврале 2004 года свои данные по поиску пентакварков опубликовала китайская коллаборация BES-II (Beijing Spectrometer-II) [17]. Они пытались найти пентакварки в эксклюзивных реакциях

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|   |   |  |   |
|   |   |  |   |
|   |   |  | (1) |
|   |   |  |   |

При статистике в 14 миллионов и 58 миллионов реакции (1) найдены не были, что привело к ограничению на парциальные ширины распадов и в два пентакварка на уровне при уровне достоверности 90%.

Результат коллаборации BES-II не противоречит гипотезе о существовании пентакварков. Действительно, если масса лежит в районе 1540 МэВ, то масса -пары равна примерно 3080 МэВ. Масса -мезона порядка 3097 МэВ, то есть в распаде выигрыш в массе составляет около 17 МэВ или чуть больше. Таким образом, данная реакция должна быть сильно подавлена по фазовому объему. Заметим, что такое подавление при бОльшей статистике можно использовать для точного определения массы пентакварка.

Масса -мезона около 3686 МэВ. В этом случае нет подавления по фазовому объему. Однако хорошо известно, что парциальная ширина распада меньше . Для распадов возникает дополнительное подавление порядка , где -- бегущая константа сильного взаимодействия, что автоматически приводит к парциальной ширине, меньшей .

Приведенные выше рассуждения по поводу результатов коллаборации BES-II в настоящее время активно циркулируют среди физиков-теоретиков всего мира. Можно надеяться, что в ближайшее время результаты BES-II могут быть проверены и улучшены на установках CLEO, BaBar и BELLE.

**Список литературы**

1 И.Иванов, "Текущие открытия в ФЭЧ: открытие бариона с положительной странностью", http://www.scientific.ru/spark/zplus.html

2 Н.Никитин, "Экзотические многокварковые состояния. Как обстоят дела на сегодняшний день?", http://phys.web.ru/db/msg/1187352/

3 А.Крашенинников, "Пентакварк существует", http://phys.web.ru/db/msg/1186499/

4 D.Diakonov et al., Z.Phys.A359 (1997), p.305.

5 T.Nakano et al., Phys.Rev.Lett.91 (2003), 012002.

6 S.Stepanyan et al., Phys.Rev.Lett.91 (2003), 252001.

7 V.V.Barmin et al., Phys.Atom.Nucl.66 (2003), p.1715.

8 J.Barth et al., hep-ex/0307083.

9 A..E. Asratyan, A.G.Dolgolenko, M.A.Kubantsev, hep-ex/0309042.

10 V.Kubarovsky et. al. hep-ex/0311046.

11 A.Airapetian et al., hep-ex/0312044.

12 A.Aleev et al., hep-ex/0401024.

13 По материалам доклада на семинаре в DESY.

14 Б.В.Мартемьянов, "Девять лекций по кварковой структуре адронов", http://www.pereplet.ru/pops/quark/quark.html

15 C.Alt et al., hep-ex/0310014.

16 J.Ellis, M.Karliner, M.Praszalowicz, hep-ph/0401127.

17 J.Z.Bai et al., hep-ex/0402012.