

Квартет из кварков

В международном эксперименте «Belle», проводившемся на коллайдере в Японии, зарегистрированы экзотические элементарные частицы с двухуровневой кварковой структурой

Всего лишь полвека назад считалось, что частицы, из которых состоят ядра атомов всех химических элементов – являются неделимыми. Однако с началом эпохи высоких энергий было экспериментально доказано, что протон и нейтрон имеют внутреннюю неоднородную структуру. В соответствии с современными представлениями о строении материи, они, как и многочисленные короткоживущие элементарные частицы, состоят из небольшого числа фундаментальных частиц – *кварков*, различных по массе, заряду и другим внутренним свойствам. Есть шесть типов кварков и столько же типов антикварков, отличающихся от них знаком электрического заряда.

Все известные на сегодня составные элементарные частицы (*адроны*) классифицируются либо как связанные состояния одного кварка и одного антикварка (*мезоны*), либо как связанные состояние трех кварков (*барионы*). Кварковые системы, состоящие из других комбинаций (например, четырех или пяти кварков), не запрещены теорией, но до последнего времени их существование достоверно не было установлено. Теоретическое предсказание свойств таких систем чрезвычайно усложнено ввиду нелинейности уравнений, описывающих взаимодействие кварков.

Системы, состоящие из тяжелых кварка и антикварка (т.е. с- или b- типов) представляют особый интерес для теоретиков, поскольку позволяют провести не только качественный, но и количественный анализ их взаимодействий. В этом отношении уникальной является связанная система кварка и антикварка b-типа, называемая *боттомонием* (от английского *bottom*, по первой

букве которого и получил имя b-кварк). Хотя и не все из предсказанных состояний еще обнаружены экспериментально, характеристики уже наблюдаемых хорошо согласуются с расчетами.

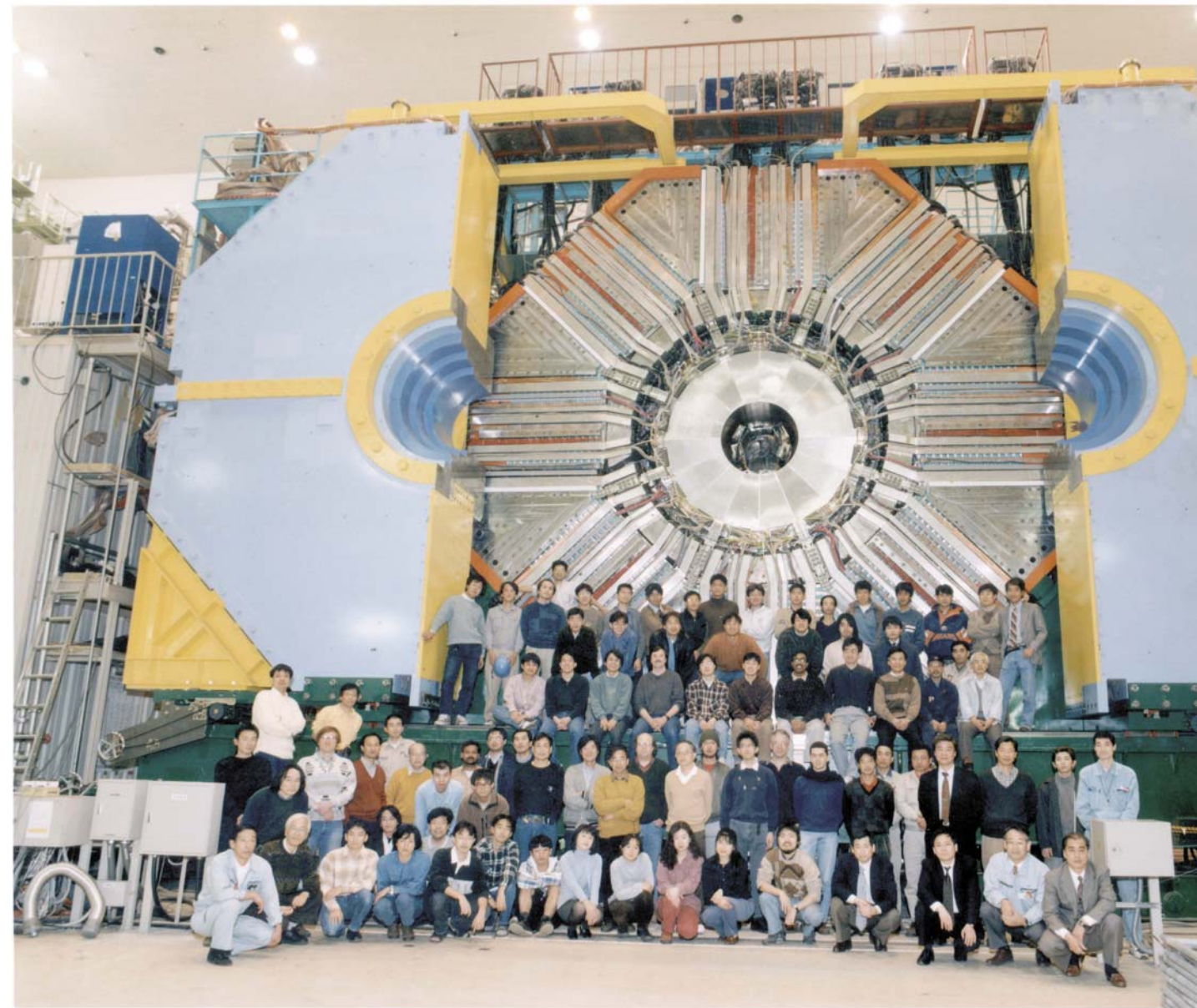
Свойства систем (частиц), в состав которых входят кварки b-типа, изучаются с помощью детектора «Belle», работающем на ускорительно-накопительном комплексе КЕКВ в Японии с 2001 г. Получают их в результате столкновения ускоренных электронов и позитронов, суммарная энергия которых около 10 ГэВ (это в сотни раз меньше, чем в Большом адронном коллайдере).

В эксперименте Belle участвовало более 400 физиков из 13 стран мира. Россия в этом проекте представлена группами из Института теоретической и экспериментальной физики (Москва), Института физики высоких энергий (Протвино) и Института ядерной физики СО РАН (Новосибирск). Главной задачей исследований было изучение распадов B-мезонов, в состав которых входит тяжелый b-кварк и легкий антикварк u- или d-типа.

Первая активная фаза работы была завершена в 2010 г. В ходе многолетних исследований был накоплен огромный объем данных, анализ которых и по сей день продолжается, а получаемые результаты порой являются полной неожиданностью для физиков.

Одним из первых сюрпризов стало обнаружение нового *резонансного* состояния кварковой системы (отличающегося повышенным временем существования), впоследствии обозначенного X(3872)*. Механизм его рождения и распада указывает на то, что в его состав должна входить пара (с- и анти-с-) кварков. Однако отождествить обнаруженное состояние с одним из возможных «табличных» состояний *чармония* (от английского *charm* – связанной системы кварка и антикварка с-типа) оказалось затруднительным. Изучение свойств X(3872) показало, что оно может являться связанным

* Число в скобках означает массу частицы, измеренную в мегаэлектронвольтах (МэВ)



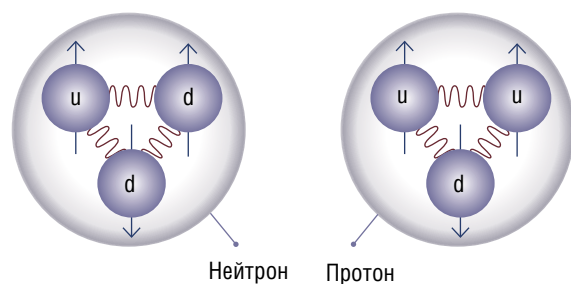
Международный коллектив завершил серию экспериментов на коллайдере КЕКВ в Японии

состоянием двух мезонов D-типа, т.е. как бы «двух-мезонной молекулой». Если бы это удалось доказать однозначно, то X(3872) мог бы стать первым объектом, не укладывающимся в стандартную схему классификации элементарных частиц. Однако полностью не исключены и другие возможные структуры этой частицы.

При увеличении энергии электронов и позитронов выше уровня 9,46 ГэВ (в системе центра масс), соответствующего основному состоянию боттомония $\Upsilon(1S)$, в результате взаимодействия может образоваться пара более массивных мезонов – B-типа. Дальнейшее повышение энергии до резонанса $\Upsilon(5S)$ – 10,86 ГэВ – приводит к тому, что электрон-позитронная пара может аннигилировать во многие состояния, включающие другие типы мезонов. Это существенно расширяет возможности изучения кварковых систем, содержащих b-кварки.

Проведя совместный анализ результатов, полученных в эксперименте «Belle», и данных предыдущих экспериментов, российские ядерщики выдвинули предположение о том, что при распаде $\Upsilon(5S)$ также возможно более частое, чем ожидается, рождение одного из еще не обнаруженных на тот момент состояний боттомония, условно обозначенное h_b . Проведенный анализ данных полностью подтвердил эту гипотезу – оно впервые было обнаружено экспериментально, причем вероятность его рождения на несколько порядков превышает ожидаемую величину.

Попытки объяснить механизм наблюдаемого явления привели к гипотезе о том, что h_b рождается не непосредственно из исходного состояния $\Upsilon(5S)$, а с образованием некоторого промежуточного состояния, которое в дальнейшем распадается на h_b и π -мезон. Дальнейший детальный анализ блестяще подтвердил это смелое предположение. Более того, выяснилось, что на промежуточном этапе образования состояния

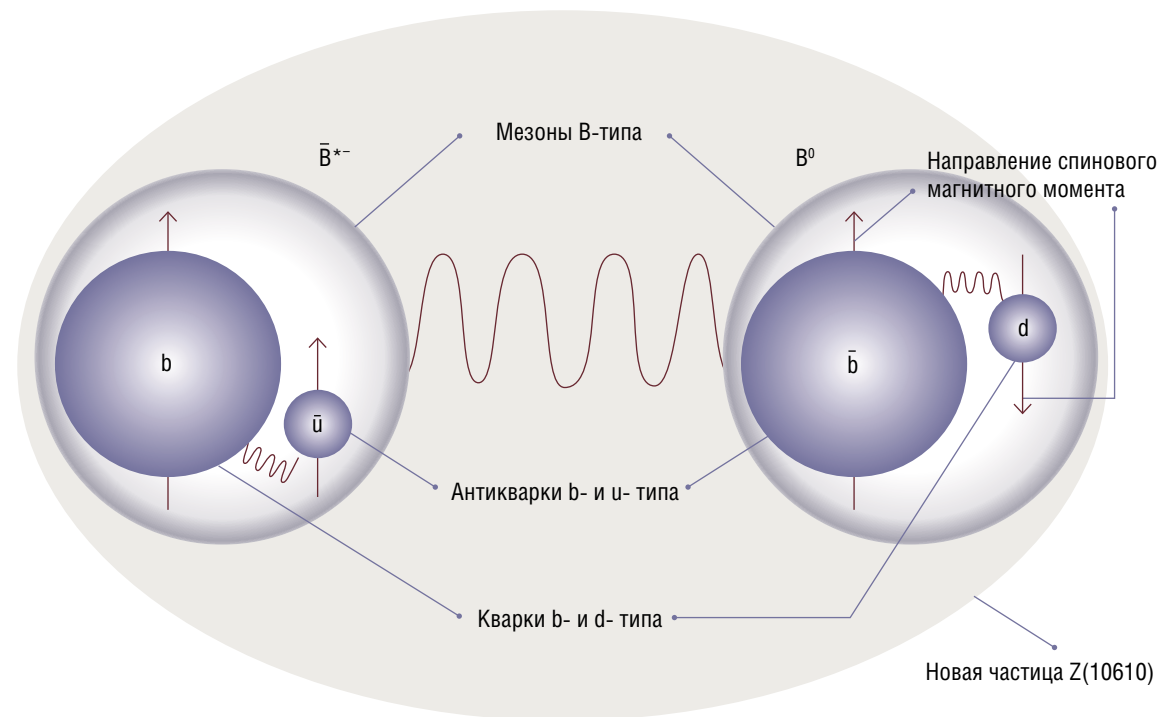


Нуклоны – компоненты ядра любого атома – обладают внутренней структурой. Каждый состоит из трех связанных кварков u- и d- типов

h_b из исходного $\Upsilon(5S)$ в действительности существует не одно, а сразу два новых состояния.

Новые состояния получили временные обозначения Z(10610) и Z(10650). Они оказались объектами совершенно новой природы. Ясно, что в их состав должна входить пара из b-кварка и \bar{b} -антикварка. Но поскольку частицы Z(10610) и Z(10650) имеют электрический заряд, значит, в дополнение к электрически нейтральной паре кварков (b и анти-b) в их состав должна входить, по крайней мере, еще одна пара кварк-антикварк разных типов. Таким образом, обнаруженные состояния нарушают применяемую до сих пор схему построения частиц из кварков.

Объединяя всю известную на сегодня экспериментальную информацию о свойствах Z(10610) и Z(10650), российскими физиками совместно с коллегами из США была предложена модель описания новых состояний, согласно которой Z(10610) и Z(10650) являются



не просто комбинацией двух кварков и двух антикварков (b, анти-b, d, анти-u), они имеют более сложную внутреннюю структуру, в которой четыре кварка скомбинированы в две пары тесно связанных между собой тяжелого и легкого кварков (мезонов B-типа). В свою очередь, эта пара B-мезонов образует слабо связанную систему. Таким образом, система в целом представляет собой как бы молекулу, роль атомов в которой играют B-мезоны. Интересно, что B-мезоны, состоящие из тяжелого b-кварка и почти в 10^3 раз более легкого антикварка, напоминают атомы водорода, состоящие из протона и электрона.

Хоть экзотическая внутренняя структура новых частиц и несомненно, предложенная молекулярная модель пока является всего лишь одним из возможных описаний, другие варианты еще не исключены. Если оно окажется верным, тогда должен существовать целый ряд схожих состояний.

Впервые зарегистрированная частица с полной энергией 10,61 ГэВ (что приблизительно соответствует массе атома углерода) состоит из 2 кварков и 2 антикварков разного типа, сгруппированных в уникальной иерархической структуре, напоминающей двухатомную молекулу водорода

Некоторые из предсказаний модели можно проверить, используя уже имеющиеся данные, но для проверки других нужны новые эксперименты. Их планируется начать в 2016 г., а пока идут работы по модернизации ускорительно-накопительного комплекса и детектора.

К.ф.-м.н. А.Ю. Гармаш
(Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск)