

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Р. В. Мизюка “Кварконий и кваркониеподобные состояния”, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 — физика высоких энергий.

Диссертация посвящена изучению одной из наиболее актуальных тем современной физики адронов – спектроскопии тяжелого кваркония и кваркониеподобных состояний.

Задача описания спектра адронов из первых принципов еще не решена. С одной стороны, большие успехи здесь достигнуты в рамках решеточной квантовой хромодинамики (КХД), с другой – значительное понимание здесь возникло благодаря использованию эффективных теорий и феноменологических моделей. Тяжелый кварконий всегда вызывал повышенный интерес, поскольку система является в грубом приближении нерелятивистской, что упрощает ее рассмотрение на качественном уровне. Тяжелый кварконий успешно описывается релятивистскими потенциальными моделями и правилами сумм КХД.

Ситуация изменилась с началом работы В-фабрик, когда стала доступной для изучения область сильно возбужденных состояний выше порогов рождения открытых ароматов. Начиная с 2003 ежегодно в экспериментах находят состояния, свойства которых противоречат ожидаемым для систем связанных кварка и антикварка, в частности, обнаружены заряженные состояния. Аномальные свойства новых состояний могут объясняться их экзотической структурой, такой как гибрид (примесь глюонов), тетракварк или адронная молекула, однако общего подхода, позволяющего описать всю экспериментальную картину, пока нет. Эта область является объектом интенсивного экспериментального и теоретического изучения.

В диссертации представлены результаты изучения как низко возбужденных уровней кваркония, расположенных ниже порогов рождения открытых ароматов, так и состояний в области порогов и выше.

Получение новой экспериментальной информации о низко возбужденных состояниях представляет повышенный интерес ввиду трудностей теории в описании высоко возбужденных состояний. В течение длительного времени спин-синглетные состояния боттомония оставались плохо изученными, поскольку они плохо рождаются на e^+e^- коллайдерах и не имеют удобных для восстановления каналов. Эти трудности удалось преодолеть в данном исследовании по обнаружению Р-волновых спин-синглетных уровней $h_b(1P)$ и $h_b(2P)$. Был найден канал рождения этих состояний, $\Upsilon(5S) \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$, для которого применялось инклюзивное восстановление с использованием недостающей массы $\pi^+\pi^-$ пар. Знание массы состояний $h_b(nP)$ позволяет найти сверхтонкие расщепления в 1P и 2P мультиплетях. Полученные значения согласуются с нулем в пределах экспериментальной ошибки, равной приблизительно $1\text{МэВ}/c^2$, как и предсказывали вычисления в рамках потенциальных моделей. Этот результат показывает, что непертурбативные эффекты не дают существенного вклада в спин-спиновое взаимодействие. Последнее согласуется с

решеточными вычислениями. Неожиданным результатом работы по обнаружению состояний $h_b(nP)$ стало отсутствие подавления переходов $\Upsilon(5S) \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$, в которых переворачивается спин тяжелого кварка, по сравнению с переходами $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$, в которых спин тяжелых кварков сохраняется. Этот результат соответствует нарушению симметрии тяжелых кварков и свидетельствует об экзотическом механизме распадов $\Upsilon(5S) \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$.

Обнаружение $h_b(nP)$ мотивировало ряд дальнейших исследований. С одной стороны, значительное количество инклюзивно восстановленных $h_b(nP)$ позволило изучать состояния $\eta_b(mS)$ с использованием радиационных E1 переходов, с другой – исследование механизма распадов $\Upsilon(5S)$ с излучением двух пионов привело к обнаружению заряженных боттомониеподобных состояний $Z_b(10610)$ и $Z_b(10610)$.

Были обнаружены переходы $h_b(1P) \rightarrow \eta_b(1S)\gamma$, $h_b(2P) \rightarrow \eta_b(1S)\gamma$ и $h_b(2P) \rightarrow \eta_b(2S)\gamma$, при этом состояние $\eta_b(2S)$ наблюдалось впервые, масса $\eta_b(1S)$ была измерена более точно, чем мировое среднее 2012 года, и впервые была измерена ширина $\eta_b(1S)$. Измеренное значение массы $\eta_b(1S)$ находится на $11.4 \pm 3.61 \text{ МэВ}/c^2$ выше среднего предыдущих измерений, выполненных в экспериментах BaBar и CLEO с использованием подавленных M1 переходов $\Upsilon(2S,3S) \rightarrow \eta_b(1S)\gamma$, где ситуация с фоном более сложная, и могут давать вклад дополнительные форм-факторы. Предварительные результаты эксперимента Belle по измерению параметров $\eta_b(1S)$ с использованием другого канала рождения $h_b(1P)$: $\Upsilon(4S) \rightarrow h_b(1P)\eta$, находятся в хорошем согласии с представленными в диссертации результатами. Значения сверхтонких расщеплений для 1S и 2S мультиплетов и их отношение находятся в согласии с решеточными вычислениями и предсказаниями значительного количества потенциальных моделей. Значение ширины согласуется с ожиданиями, а вероятности радиационных переходов несколько выше предсказаний потенциальных моделей, что может быть связано с вкладом адронных петель.

В 2012 году группа из университета North-Western, которая использовала данные эксперимента CLEO, сообщила об обнаружении $\eta_b(2S)$ кандидата в переходах $\Upsilon(2S) \rightarrow \eta_b(2S)\gamma$ с массой, отличавшейся от результата Belle на 5 стандартных отклонений. При этом сверхтонкое расщепление в мультиплете 2S оказывалось аномально большим. В диссертации показана ложность этого сигнала. При этом использовались данные Belle с интегральной светимостью, в семнадцать раз превышающую статистику эксперимента CLEO. Следовательно, спин-спиновое взаимодействие хорошо описывается в современных подходах, и никаких аномальных явлений в области ниже порогов не найдено.

При анализе резонансной структуры переходов $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$ и $\Upsilon(5S) \rightarrow h_b(nP)\pi^+\pi^-$ были обнаружены пики в инвариантной массе $\Upsilon(nS)\pi^+$ и $h_b(nP)\pi^+$ пар, которые интерпретировались как сигналы новых состояний $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$. Минимальный кварковый состав заряженных кваркониеподобных состояний экзотический: это комбинация из двух кварков и двух антикварков. Было найдено, что нерезонансный вклад в каналах $h_b(nP)\pi^+\pi^-$ совместим с нулем, а в каналах $\Upsilon(nS)\pi^+\pi^-$ доминирует. Измеренные массы $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$ находятся вблизи порогов $B\bar{B}^*$ и B^*B^* соответственно, что может служить указанием на их молекулярную структуру. В

диссертации показано, что в предположении о молекулярной структуре удается объяснить основные свойства состояний Z_b . Действительно, соответствующая молекулярная волновая функция содержит вклады как орто-, так и паработтомония, причем эти компоненты являются максимально смешанными. Отсюда следует, что состояния Z_b должны распадаться как на $\Upsilon(nS)\pi^+$, так и на $h_b(mP)\pi^+$, причем с близкими вероятностями. Кроме того, фаза между амплитудами $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$ должна равняться нулю в канале $\Upsilon(nS)\pi^+$ и 180 градусам в канале $h_b(mP)\pi^+$, что согласуется с результатами амплитудного анализа. Изучение состояний Z_b продолжается, в частности, предварительные результаты Belle показывают, что для $Z_b(10610)$ доминирует распад на BB^* , а для $Z_b(10650)$ – на B^*B^* , что также согласуется с ожиданиями для молекулы. Вопрос построения динамической модели и, тем самым, о природе состояний Z_b остается открытым.

Первое заряженное кваркониеподобное состояние с экзотическим кварковым составом было обнаружено в 2007 году в распаде $B \rightarrow Z(4430)^+ K \rightarrow \psi(2S)\pi^+ K$. Этот результат мотивировал поиск аналогичных состояний в распаде $B \rightarrow \chi_{c1}\pi^+ K$, для изучения которого в диссертации был выполнен Далиц-анализ. Использовалась модель изобар, которая содержала известные $K\pi$ резонансы и резонансы в канале $\chi_{c1}\pi^+$. В результате были обнаружены два состояния: $Z(4050)^+$ и $Z(4250)^+$, которые, как и $Z(4430)^+$, имеют экзотический кварковый состав.

Судьба состояния $Z(4430)^+$ оказалась драматичной: после обнаружения в эксперименте Belle с использованием фитирования одномерного распределения по инвариантной массе $\psi(2S)\pi^+$ пар это состояние не было подтверждено в эксперименте BaBar, где также использовалось одномерное фитирование. Далее подтверждение $Z(4430)^+$ в амплитудном анализе диаграммы Далица было успешно проведено автором диссертации. В дальнейшем в эксперименте Belle был выполнен полный амплитудный анализ с учетом угловых корреляций продуктов распада $\psi(2S)$, и, наконец, состояние $Z(4430)^+$ было подтверждено на большей статистике в эксперименте LHCb.

Состояния $Z(4050)^+$, $Z(4250)^+$ и $Z(4430)^+$ расположены в области выше порога DD. Для их интерпретации предложены модели связанных дикварка и антидикварка, адронных молекул, адрочармония, тетракварка Борна-Опенгеймера и другие. Однако дискриминировать эти модели пока не удается.

Представленные в диссертации результаты соответствуют значительному продвижению в изучении тяжелого кваркония и кваркониеподобных состояний. В области ниже порогов рождения открытого аромата найдены новые спин-синглетные состояния $h_b(1P)$, $h_b(2P)$ и $\eta_b(2S)$, а также впервые точно измерены параметры единственного известного ранее спин-синглетного состояния боттомония $\eta_b(1S)$. В области вблизи порогов обнаружены заряженные состояния $Z_b(10610)$ и $Z_b(10650)$, обладающие выразительными признаками молекулярной структуры. Наконец, в области выше порогов в результате Далиц-анализа распадов B мезонов обнаружены $Z(4050)^+$ и $Z(4250)^+$, а также впервые в амплитудном анализе подтверждено состояние $Z(4430)^+$. Результаты вызывают высокий интерес, в частности, обнаружение Z_b мотивировало эксперимент BESIII набрать данные при высокой энергии для поиска их аналога в области чарма.

К недостаткам можно отнести некоторые не совсем точные высказывания. Например, чармоний назван “приближенно нерелятивистской системой”, хотя v/c кварков достигает значения 0,5. При обсуждении сверхтонкого расщепления P- уровней боттомония получен результат, согласующийся с предсказанием пертурбативной КХД (одноглюонный обмен). Отсюда делается вывод, что “обмен мягкими глюонами не дает заметного вклада в спин-спиновое взаимодействие в P- волновых мультиплетах”. Однако непертурбативные вклады могут возникать не только от обмена мягкими глюонами, но и из других источников, например инстантонов.

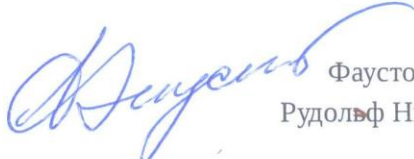
В целом диссертация Р.В. Мизюка представляет собой завершённый научный труд, результаты которого составляют крупное научное достижение в физике элементарных частиц и открывают новые перспективы в этой области.

Результаты исследований своевременно опубликованы и неоднократно докладывались, автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Подводя итог, можно с уверенностью сказать, что диссертация удовлетворяет всем требованиям предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Мизюк Роман Владимирович, несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 — физика высоких энергий.

04 декабря 2014 г.

Доктор физ.-мат. наук, профессор
Главный научный сотрудник
ВЦ РАН ул.Вавилова, 40
111 333, Москва
тел. 8(499) 135 8831
e-mail: faustov@ccas.ru

 Фаустов
Рудольф Николаевич

