

ОТЗЫВ

Официального оппонента Горелова Игоря Владимировича
на диссертацию Поликарпова Сергея Михайловича
«Спектроскопия B_s^0 мезонов в эксперименте CMS», представленную на соискание
учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.23 – Физика высоких энергий.

Диссертация Поликарпова Сергея Михайловича написана о фундаментальной проблеме современной физики высоких энергий, а именно о спектроскопии тяжелых кварков. В представленном исследовании проведен поиск возможных новых резонансных прелестных странных много-кварковых состояний в эксклюзивной моде $B_s^0 \pi^\pm$, представлены первые наблюдения и точные измерения орбитальных возбуждений прелестных странных мезонов $B_{s1,2}^{(*)}$, распадающихся сильно в конечные эксклюзивные состояния $B^{(*)0} K_S^0$ и $B^{(*)+} K^-$. Исследование проведено в рамках коллаборации CMS, проводящей эксперимент на Большом Адронном Коллайдере (БАК). Оба анализа основаны на данных, набранных универсальным детектором CMS в период 2012 года, когда энергия \sqrt{s} протон-протонных столкновений составляла 8 TeV.

Адроны, содержащие тяжелый кварк, являются удобной системой для изучения различных подходов КХД в непертурбативном режиме в силу непертурбативной сущности адронов, в частности тяжелых, где кварки связаны силами конфайнмента. Поэтому экспериментальные измерения массовых спектров, а также вероятностей распадов адронных состояний, содержащих прелестный кварк b , составляют набор критических проверок применяемых моделей, дающих предсказания для спектров b -

адронов. Примерами непertурбативных методов КХД являются Правила сумм КХД, Эффективная теория тяжелых кварков (HQET), алгоритмы массивных вычислений КХД на решетках. Результаты диссертации, вне сомнений, являются актуальными, соответствующими переднему краю экспериментальных исследований, выполняющими тесты КХД моделей и дающие ценную информацию для теоретического сообщества.

Поиск резонансных структур в спектре $B_s^0 \pi^\pm$ мотивирован публикацией коллаборацией D0 (Fermilab, США) значимого сигнала $X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm$, интерпретированного как кандидата тетракварка ($b s u d$). Экспериментальные условия детектора CMS подобны детектору D0, физически чувствительный объем обеих детекторов выбирает события рожденные в центральной области $p - \bar{p}$ или $p - \bar{p}$ взаимодействий, а именно $|\eta| < 2.5$ для трека и мюонной системы CMS и $|\eta| < 3.0$ для треков и $|\eta| < 1.9$ для мюонов в детекторе D0. При этом энергия событий в CMS, $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ (БАК, 2012 г.) больше энергии $p - \bar{p}$ столкновений $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$ в D0 (Тэватрон, Run II), что приводит к большим сечениям рождения b - адронов в CMS детекторе. Более того, большая светимость пучков БАК обеспечила объем доступных для обсуждаемого анализа данных в $\int \mathcal{L} dt = 19.7 \text{ fb}^{-1}$, что превышает $\int \mathcal{L} dt = 10.4 \text{ fb}^{-1}$ интегральной светимости, набранной детектором D0 за весь период Run II. Поэтому, базовый нормировочный образец B_s^0 мезонов, реконструированных в моде $J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) \phi(\rightarrow K^+ K^-)$ включает ~ 49300 кандидатов против ~ 5600 кандидатов восстановленных в детекторе D0, в ~ 8.8 раз меньше. Ожидая подобный механизм рождения экзотического состояния $X(5568)$ в детекторе CMS и при значительно превышающем статистическом образце, чувствительность поиска оказывается весьма конкурентной с результатом коллаборации D0.

Подход и методы, примененные С. М. Поликарповым, позволили установить самые строгие верхние пределы на относительный выход $\rho_X = \sigma \times B(X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm) / \sigma(B_s^0)$ (например $\rho_X < 1.1\% @95\% \text{ CL}$ при $p_T > 10 \text{ GeV}/c$) в сравнении с подобными же, так же отрицательными по отношению к результату D0, поисками, проведенными на детекторах LHCb и ATLAS активными на БАК и коллаборацией CDF, использовавшей окончательный набор данных, соответствующим $\int \mathcal{L} dt = 9.6 \text{ fb}^{-1}$, набранных на Тэватроне в течение всего Run II периода. Более того, С. М. Поликарпов расширил область поиска до масс $\sim 5.9 \text{ GeV}/c^2$ и для нескольких значений натуральной ширины $\Gamma(X) = (10, 20, 30, 40, 50) \text{ MeV}/c^2$, $X \in (5.5, 5.9) \text{ GeV}/c^2$, установив верхние пределы для рождения экзотического состояния $X(5568)$ в широком диапазоне возможных масс и ширин экзотического резонанса.

Результаты исследования, осуществленного С. М. Поликарповым, опубликованы в престижном международном научном журнале Phys. Rev. Lett. 120, 202005 (2018).

Вторая часть диссертации описывает экспериментальное измерение масс и выходов орбитальных резонансных состояний прелестных странных мезонов ($\bar{b}s$), P-волновых, ($L = 1$), возбуждений $B_{s1}(5830)^0$ ($j = \frac{3^-}{2}$, $J = 1^+$) и $B_{s2}^*(5840)^0$ ($j = \frac{3^-}{2}$, $J = 2^+$). Сигналы идентифицируются как ожидаемо узкие структуры в разностных спектрах $M(B^+K^-) - M(B^+) + M_{B^+}^{PDG}$ и $M(B^0K_S^0) - M(B^0) + M_{B^0}^{PDG}$ разрешенных D-волновых распадов в известных заряженных модах $B_{s1} \rightarrow V^{*+}(\rightarrow V^+\gamma)K^-$ и $B_{s2}^* \rightarrow V^{*+}(\rightarrow V^+\gamma)K^-, V^+K^-$ и в нейтральных модах, наблюдаемых в представленном исследовании впервые, а именно $B_{s1} \rightarrow V^{*0}(\rightarrow V^0\gamma)K_S^0$ и $B_{s2}^* \rightarrow V^{*0}(\rightarrow V^0\gamma)K_S^0, V^0K_S^0$. Анализ проведен, как и предыдущее исследование, на наборе данных, отобранных ди-мюонным J/ψ – триггером и составляющим $\int \mathcal{L}dt = 19.6 \text{ fb}^{-1}$ светимости при $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ (БАК, 2012 г.). Использованный набор данных обеспечил доступ к статистически мощным образцам реконструированных базовых состояний, $N(B^+ \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu^+\mu^-)K^+) \sim 850 \cdot 10^3$ и $N(B^0 \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu^+\mu^-)K^+\pi^-) \sim 340.5 \cdot 10^3$ кандидатов, соответственно, что успешно конкурирует с образцом $N(B^+) \sim 1000 \cdot 10^3$, использованным коллаборацией LHCb для аналогичного измерения, но сделанного только лишь в $B^{(*)+}K^-$ модах распада.

Измеренные значения разностей масс для заряженных мод, $\Delta M_{B_{s2}^*}^\pm = M(B^+K^-) - M_{B^+}^{PDG} - M_{K^-}^{PDG}$ и $\Delta M_{B_{s1}}^\pm = M(B^+K^-) - M_{B^{*+}}^{PDG} - M_{K^-}^{PDG}$, прекрасно согласуются с LHCb и CDF и стоят вторыми по точности после рекордных LHCb и существенно превосходят в точности результаты CDF. Используя измеренные разности, извлекаются также и абсолютные значения масс $M(B_{s1})$ и $M(B_{s2}^*)$, которые с необходимостью дадут весомый вклад в мировое среднее, публикуемое группой PDG. Аналогичные измерения, сделанные для впервые обнаруженных нейтральных $V^0K_S^0$ мод, $\Delta M_{B_{s2}^*}^0 = M(B^0K_S^0) - M_{B^0}^{PDG} - M_{K_S^0}^{PDG}$ и $\Delta M_{B_{s1}}^0 = M(B^0K_S^0) - M_{B^{*0}}^{PDG} - M_{K_S^0}^{PDG}$, хорошо согласуются с измерениями для V^+K^- распадов, хотя, что ожидаемо, имеют большие статистические неопределенности. Однако, именно эти измерения позволяют извлечь уникальные разностные измерения масс изо-спиновых партнеров в B-мезонном секторе, а именно $M_{B^0} - M_{B^+}$ и $M_{B^{*0}} - M_{B^{*+}}$, причем, последняя разность масс измерена впервые. Следует отметить, что извлеченная из фитов натуральная ширина B_{s2}^* резонанса, $\Gamma(B_{s2}^*)$, имеет статистическую неопределенность больше, но систематическую неопределенность меньше, чем в статье, выпущенной LHCb, т.к. LHCb использовал несколько различных мод распада V^+ мезона для увеличения исходного

статистического образца до 10^6 . Следует особенно отметить громадную и детальную работу, проведенную С. М. Поликарповым по оценке систематических неопределенностей измеряемых значений в спектрах разности масс.

Следующий блок результатов, полученных для орбитальных B_{s1} и B_{s2}^* , касается измерений относительных выходов. Прежде всего следует отметить впервые измеренные отношения вероятностей распада между нейтральными (числитель) и заряженными (знаменатель) модами, а именно $R_2^{0\pm} = \mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0) / \mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+ K^-)$

и $R_1^{0\pm} = \mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0) / \mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*+} K^-)$. Оба измеренных отношения имеют в числителе и знаменателе изотопически сопряженные моды распада для B_{s2}^* и для B_{s1} ,

что позволяет дать простую оценку $R_2^{0\pm} \cong 0.5$ и $R_1^{0\pm} \cong 0.5$, без учета массовых и других адронных эффектов. Представленные измерения, $R_2^{0\pm} = 0.432 \pm 0.077 \pm 0.078$ и $R_1^{0\pm} \cong 0.492 \pm 0.122 \pm 0.072$ (сист. ошибки объединены в квадратуре) прекрасно согласуются с наивной оценкой и находятся в отличном согласии с более детальными теоретическими предсказаниями. Представленные отношения вероятностей распада $R_{2*}^{\pm}(B_{s2}^*)$ и $R_{2*}^0(B_{s2}^*)$ между резонансными (числитель) и нерезонансными, как заряженными так и нейтральными модами состояния B_{s2}^* также в прекрасном согласии с ЛНСб, но только для $R_{2*}^{\pm}(B_{s2}^*)$, тогда как относительное измерение $R_{2*}^0(B_{s2}^*)$ сделано впервые. Оба измерения в согласии с теоретическими предсказаниями. Наконец

относительные выходы $R_{\sigma}^{\pm} = \sigma \times \mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*+} K^-) / \sigma \times \mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^+ K^-)$ и

$R_{\sigma}^0 = \sigma \times \mathcal{B}(B_{s1} \rightarrow B^{*0} K_S^0) / \sigma \times \mathcal{B}(B_{s2}^* \rightarrow B^0 K_S^0)$ также измерены, с результатами в

согласии с ЛНСб и теоретическими вычислениями, тогда как R_{σ}^0 представлена впервые. Опять же следует особенно отметить детальное исследование по оценке различных источников систематических неопределенностей, проведенное С. М. Поликарповым для относительных измерений вероятностей и выходов. Результаты измерений орбитальных мезонных резонансов B_{s1} и B_{s2}^* , проведенных С. М. Поликарповым, опубликованы в одном из ведущих европейских научных журналов Eur. Phys. J. C 78, no. 11, 939 (2018).

В целом следует отметить высокий методический уровень, примененный С. М. Поликарповым в обеих частях представленного исследования. Диссертация хорошо структурирована.

По прочтении представленного исследования имеется несколько замечаний формального характера, а именно, текст содержит некоторое количество неточностей или требует иногда дополнительные разъяснения. На стр. 21, строка 18-19 (гл. 2.4) фразу «Кристаллы служат в качестве останавливающего материала...» следовало бы изменить на «Кристаллы служат в качестве поглощающего материала...», следуя традиционной терминологии, а также убрав противоречие для случаев мюонов (частицы с минимальной ионизацией) или адронов, когда адронный ливень может только начинать развитие в ECAL и давать вклад или даже максимум в адронной секции HCAL. Аналогичное замечание верно и для стр. 22, строка 15 (гл. 2.5). На стр. 25, строка 2 следует изменить падеж «...ей ...» на «...ею...». В главах 3.5.1 и 3.5.2 на стр. 42 и 43 обсуждаются эффективности кандидатов B_s^0 и $B_s^0 \pi^\pm$ и их отношение. Однако сам факт взаимного сокращения триггерных эффективностей числителя и знаменателя в измеряемом ρ_x не отмечается, что можно было бы сделать краткой ссылкой на исходный набор данных, отобранных ди-мюонным J/ψ - триггером (стр. 30, гл. 3.3.1) с подтвержденными на уровне анализа триггерными J/ψ кандидатами. Аналогичное замечание верно и для части диссертации, описывающей анализ резонансов а именно глава 4.9, стр. 82, где вклад триггерной эффективности также не обсуждается, хотя здесь опять же имеет место взаимное сокращение этих факторов в числителе и знаменателе измеряемых отношений вероятностей или выходов. В данном случае можно дополнить текст кратким объяснением сославшись на стр. 56, гл. 4.4, параграф 2. На стр. 81, строка 13, гл. 4.8.4, по-видимому, допущена неточность в формуле вероятности флуктуации нулевой гипотезы в сигнал. Формула, согласно теореме Вилкса (Wilks' theorem), должна была бы соответствовать известной функции пакета ROOT, $P = TMath::Prob(2 \cdot (\ln(L_S) - \ln(L_0)), \Delta n_{\text{dof}}, \Delta n_{\text{dof}} = 1$. В главе 4.11 можно было бы отметить согласие измерений $R_2^{0\pm}$ и $R_1^{0\pm}$ с изотопической сопряженностью распадов в числителе и знаменателе отношений. Приведенные выше замечания, однако, ни в коей мере не уменьшают научную ценность проведенного исследования.

В заключение, диссертация Сергея Михайловича Поликарпова выполнена на высоком научном уровне, результаты диссертации опубликованы в высокорейтинговых рецензируемых международных научных журналах, таких как Phys. Rev. Lett. и Eur. Phys. J. C. Все публикации процитированы в базах данных Web of Science и Scopus. Автореферат полно и корректно отражает содержание диссертации, эффективно суммируя достигнутые результаты. Диссертация удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор,

Сергей Михайлович Поликарпов, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – Физика высоких энергий.

Официальный оппонент

Горелов Игорь Владимирович

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Отдела экспериментальной физики высоких энергий Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского Государственного Университета имени М.В. Ломоносова

Адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 58

Телефон: +7 495 939 3064

Электронный адрес: *igor.v.gorelov@gmail.com*



подпись

20.05.2019

дата

Подпись Горелова Игоря Владимировича заверяю:

Директор Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского Государственного Университета имени М. В. Ломоносова,
Доктор физико-математических наук, Профессор

Панасюк Михаил Игоревич



подпись

дата