

## ОТЗЫВ

Официального оппонента Соколова Анатолия Александровича на диссертацию Поликарпова Сергея Михайловича на тему “Спектроскопия  $V_s^0$  мезонов в эксперименте CMS”, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – Физика высоких энергий

Диссертационная работа С.М. Поликарпова посвящена поиску экзотических состояний, распадающихся на  $V_s^0 \pi^\pm$ , а также исследованию  $P$ -волновых возбуждённых состояний  $V_s^0$  мезона.

### Актуальность и научная новизна темы исследования

Изучение спектроскопии прелестных частиц позволяет проверять предсказания различных теоретических моделей. Кварковая модель адронов не исключает существование экзотических частиц, т.е. частиц, состоящих из более, чем трёх кварков. В начале 2016 г. коллаборация D0 заявила об обнаружении частицы  $X(5568)$ , распадающейся на  $V_s^0 \pi^\pm$ , – кандидата в экзотическое тетракварковое состояние. Однако, существование  $X(5568)$  не было подтверждено коллаборацией LHCb, поэтому является актуальным провести изучение образования этой частицы в других экспериментах. В частности, эксперимент CMS позволяет провести подобный поиск в кинематическом диапазоне  $(p_T, \eta)$ , более близком к эксперименту D0, чем кинематический диапазон LHCb.

Экспериментальная информация по изучению  $P$ -волновых состояний  $V_s^0$  мезонов ограничена. Точное измерение их масс и естественных ширин и обнаружение новых распадов обогатит экспериментальные знания об этих состояниях, что позволит проверить различные теоретические предсказания и произвести настройку теоретических моделей.

### Достоверность полученных результатов

Полученный в представленном эксперименте верхний предел на долю  $V_s^0$  мезонов, рождающихся из распада  $X(5568) \rightarrow V_s^0 \pi^\pm$ , согласуется с результатом коллаборации LHCb и полученными позже результатами коллабораций CDF и ATLAS, и является более строгим. Алгоритм восстановления кандидатов на изучаемый распад проверен изменением критериев отбора, при котором в полученном распределении массы  $V_s^0 \pi^\pm$  видны сигналы от известных распадов возбуждённых состояний  $V^+$  мезона на  $V^{(*)0} K^+$ . Измеренные массы  $V_{s2}^*(5840)^0$  и  $V_{s1}(5830)^0$  мезонов в канале  $V^+ K^-$  согласуются с предыдущими результатами коллабораций CDF и LHCb, также как и естественная ширина  $V_{s2}^*(5840)^0$  мезона. Измеренные разности масс и отношения вероятностей распадов также согласуются с предыдущими измерениями. Вероятности распадов  $P$ -волновых состояний  $V_s^0$  мезона на нейтральный

В мезон и нейтральный каон, измеренные по отношению к вероятностям соответствующих распадов на заряженный В мезон и заряженный каон, согласуются с теоретическими предсказаниями.

### **Теоретическая и практическая ценность**

Результаты работы демонстрируют возможность выполнять исследования по спектроскопии прелестных адронов на экспериментальной установке CMS, которая изначально не была оптимизирована под исследования в этой области. Полученный в ходе исследований верхний предел на долю  $B_s^0$  мезонов, рождающихся из распада экзотического состояния  $X(5568)$ , является наиболее строгим из результатов, представленных другими экспериментами, и противоречит результату, представленному коллаборацией D0. Разработанные методы работы с данными и моделированием широко используются в других экспериментальных исследованиях по физике тяжёлых адронов в коллаборации CMS. Впервые исследованные распады  $P$ -волновых состояний  $B_s^0$  мезона на нейтральный В мезон и нейтральный каон обогащают знания об этих состояниях. Измеренные значения естественной ширины, масс и разностей масс (включая новые измерения) позволят уточнить табличные значения свойств частиц и произвести настройку теоретических моделей.

### **Оценка содержания диссертации**

Диссертация является завершённой работой. Ее содержание и структура соответствуют заявленной специальности и цели исследования.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

Во **введении** изложены недавние результаты по спектроскопии тяжёлых адронов, а также дана общая характеристика диссертационной работы. Здесь обоснована актуальность работы, сформулированы цели и предмет исследования, а также описана структура диссертации.

Во **второй главе** описана экспериментальная установка CMS (Компактный Мюонный Соленоид) на ускорителе БАК, с помощью которой были получены данные, используемые в работе. В частности, представлены основные поддетекторы экспериментальной установки, методы реконструкции частиц и описание работы триггерной системы, а также описание набора данных, использованного в работе, описание алгоритма получения Монте Карло данных.

В **третьей главе** описан поиск состояния  $X(5568)$ , распадающегося на  $B_s^0 \pi^\pm$ . Здесь представлен краткий обзор результатов других экспериментов по изучению образования  $X(5568)$ . Дано краткое содержание представляемого исследования, а также описан алгоритм реконструкции событий и детали используемых наборов моделирования. Описаны два набора используемых данных моделирования: сигнальный (для сигнального процесса  $X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm$ , где  $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ ) и контрольный (содержащий инклюзивный распад  $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ ).

Представлено распределение инвариантной массы отобранных кандидатов  $V_s^0 \pi^\pm$ . В частности, распределение из сигнальной области  $V_s^0$  сравнивается с распределением из контрольной области  $V_s^0$ . Значимое отличие между этими распределениями не обнаружено, ни на одном из них не обнаружено пика на массе, где коллаборацией D0 заявлено существование состояния  $X(5568)$ . Полученное количество сигнальных событий  $X(5568)$  согласуется с нулём.

Верхний предел на долю  $V_s^0$  мезонов, рождающихся из распада  $X(5568) \rightarrow V_s^0 \pi^\pm$  составляет  $\rho_X < 1.1\%(1.0\%)$  на уровне достоверности 95% для кинематического диапазона  $p_T(V_s^0) > 10(15)$  ГэВ, что противоречит результатам коллаборации D0. Полученный верхний предел является более строгим, чем пределы, представленные в других экспериментах.

В четвертой главе описано исследование  $P$ -волновых состояний  $V_s^0$  мезона  $V_{s2}^*(5840)^0$  и  $V_{s1}(5830)^0$ . Здесь представлен обзор теоретических и экспериментальных результатов по  $P$ -волновым состояниям  $V_s^0$ . Приведено краткое содержание исследования, включающее описание измеряемых величин и методы их вычисления. Представлены методы восстановления и отбора кандидатов. Дана информация об используемых наборах данных моделирования.

Описано исследование распределения инвариантных масс отобранных  $V^+$  и  $V^0$  кандидатов. Анализируются сигналы от распадов  $V_{s1,2}^{(*)}$  мезонов на  $V^{(*)}K^-$ .

В восьмой части четвертой главы исследуется распределение инвариантной массы отобранных  $V^0 K^0$  кандидатов. С использованием моделирования получены разрешения по инвариантной массе и формы вкладов от  $K^\pm \leftrightarrow \pi^\pm$  для трёх сигналов:  $V_{s2}^* \rightarrow V^0 K^0$ ,  $V_{s2}^* \rightarrow V^0 K^0$ ,  $V_{s1} \rightarrow V^0 K^0$ . Проведена аппроксимация распределения  $m(V^0 K^0)$ , вычислены значимости первого и третьего из этих распадов.

Вычислены отношения полных эффективностей изучаемых распадов, необходимые для вычисления отношений вероятностей распадов. Описаны систематические погрешности измеряемых величин: отношений вероятностей распадов; отношений вероятностей распадов, умноженных на отношение сечений рождения  $V_{s1}$  и  $V_{s2}^*$  мезонов; шести разностей масс и естественной ширины  $V_{s2}^*$  мезона. Для каждого источника систематических погрешностей приведён алгоритм вычисления соответствующей погрешности.

В последней части четвертой главы приведены результаты исследования: впервые обнаружен распад  $V_{s2}^* \rightarrow V^0 K^0$  и получено первое свидетельство распада  $V_{s1} \rightarrow V^0 K^0$ ; измерены отношения вероятностей различных распадов  $V_{s2}^*$  и  $V_{s1}$ ; измерены их массы; с использованием вышеприведенных измерений, вычисляются также разности масс между заряженными и нейтральными  $V$ -мезонами  $M(V^0) - M(V^+)$ ,  $M(V^0) - M(V^{*+})$  (разность масс  $M(V^0) - M(V^{*+})$  измерена впервые); измерена естественная ширина  $V_{s2}^*$  мезона.

В заключении приведены основные результаты работы, которые выносятся на защиту.

## Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Автореферат полно и корректно отражает содержание диссертации. В автореферате обоснована актуальность темы, приведены цели работы, кратко изложено основное содержание работы, представлены результаты работы и список публикаций, содержащий основные результаты работы.

## Личный вклад диссертанта

Вынесенные на защиту результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии. Автор принимал активное участие в работе международной физической группы коллаборации CMS по исследованиям в области В-физики. В работу по поиску  $X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm$  автор внёс ключевой вклад. Все основные результаты работы получены автором с использованием разрешения по инвариантной массе и отношения эффективности, вычисленных иностранными коллегами. Исследование  $P$ -волновых  $B_s^0$  мезонов выполнено автором полностью. Кроме этого, автор принимал участие в наборе данных на установке CMS и в настройке триггерных алгоритмов.

## Замечания по диссертации:

1. В разделе 3.3.3., стр. 34 отмечено, что "...применялись ограничения на генераторном уровне (т.н. генераторные фильтры). ... Используются два набора данных моделирования: ..."  
Необходимо дать качественные пояснения, почему используемые ограничения на генераторном уровне слабо искажают распределения восстановленных кандидатов.  
Учитывались ли систематические ошибки от наложения данных ограничений?
2. В разделе 4.4., стр. 57 написано: "... Для того, чтобы определить, какому из двух треков приписать массу каона, а какому – пиона, требуется, чтобы их масса лежала в диапазоне  $\pm 90$  МэВ от известной массы  $K^{*0}$  мезона, для какой-либо из гипотез  $K^+ \pi^-$  или  $K^- \pi^+$ . Если обе эти гипотезы удовлетворяют этому требованию, из них выбирается та, в которой масса ближе к массе  $K^{*0}$ . Таким же образом эта неопределённость решалась в предыдущих анализах коллаборации CMS [90, 91]."  
Какова доля неверных гипотез при подобном отборе? Насколько совпадают экспериментальные результаты с результатами моделирования?
3. В разделе 4.4., стр. 58 отмечено, что "...Множественные кандидаты, восстановленные в одном событии, не удаляются."  
Необходимо пояснить каким образом производится работа с этими кандидатами.

## Заключение

Отмеченные недостатки не влияют на качество исследования, а также на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты. Результаты диссертации имеют большую научную и практическую ценность и могут быть использованы при проведении других экспериментов подобного типа.

Рассмотренная диссертация является законченной научно-исследовательской работой и характеризуется высоким научным уровнем. Работы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в рецензируемых научных изданиях и являются достоверными и оригинальными.

Диссертация Сергея Михайловича Поликарпова на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, которая посвящена поиску экзотических состояний, распадающихся на  $V_s^0 \pi^\pm$ , а также исследованию  $P$ -волновых возбуждённых состояний  $V_s^0$  мезона. Считаю, что диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – Физика высоких энергий.

Официальный оппонент


**Соколов Анатолий Александрович**

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отделения экспериментальной физики Федерального Государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий» имени А.А. Логанова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Адрес: 142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, д.1

Телефон: (4967) 71 36 23

Электронный адрес: sokolov\_a@ihep.ru

  
подпись  
15.05.2019  
дата

Подпись Соколова Анатолия Александровича заверяю:

Учёный секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий» имени А.А. Логанова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

**Прокопенко Николай Николаевич**

