

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 201.004.01,**  
созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения  
«Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,  
по диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 30.06.2022 г. № 5-2022

О присуждении **Попову Алексею Валерьевичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация Попова А.В. «Поиск новой физики и изучение процессов квантовой хромодинамики в эксперименте D0» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – «физика высоких энергий» принята к защите 24.03.2022 (протокол заседания № 4-2022) диссертационным советом Д 201.004.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 142281, пл. Науки, д.1, г. Протвино Московской области приказом Минобрнауки РФ № 105/нк от 11.04.2012 г. с частичными изменениями в соответствии с приказом по Федеральной службе по надзору в сфере образования и науки № 898/нк от 23 июля 2021 года.

Соискатель, Попов Алексей Валерьевич, 1968 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук защитил в 2000 году, работает старшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Диссертация выполнена в Отделении экспериментальной физики Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики

высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

**Официальные оппоненты:**

- Бережной Александр Викторович, доктор физико-математических наук, заведующий Лабораторией тяжелых кварков и редких распадов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына;

- Завертяев Михаил Васильевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории взаимодействия излучений с веществом Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук;

- Капишин Михаил Николаевич, доктор физико-математических наук, начальник отдела Лаборатории физики высоких энергий Международной межправительственной организации Объединенный институт ядерных исследований;

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», в своём положительном отзыве, подписанном заместителем директора Института ядерной физики и технологий (ИЯФиТ) д.ф.-м.н. профессором Тихомировым В.Г. и ученым секретарем Гуровым Ю.Б., утвержденном на заседании научно-технического совета ИЯФиТ 16 мая 2022 года (протокол №1-05/22), указала, что диссертация Попова А.В. представляет собой законченную научно-квалифицированную работу, в которой получены приоритетные научные результаты в поисковых исследованиях новой физики за пределами Стандартной модели. Эти результаты уже были использованы при формировании программы исследований на Большом адронном коллайдере и будут полезны при проведении других подобных

поисковых исследований. Совокупность полученных научных результатов является серьёзным научным достижением в поисках новой физики за пределами Стандартной модели. Диссертационная работа Попова А.В. «Поиск новой физики и изучение процессов квантовой хромодинамики в эксперименте D0» удовлетворяет требованиям п.9 действующего Положения о присуждении учёных степеней.

Соискатель имеет 21 опубликованные работы по теме диссертации, которые опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах Web of Science и/или Scopus:

1. V. M. Abazov, ..., A. V. Popov *et al.*, “Search for associated production of charginos and neutralinos in the trilepton final state using 2.3 fb<sup>-1</sup> of data”, Phys. Lett. B 680 (2009) 34;

2. А. В. Попов, “Поиск новой физики в эксперименте D0: последние результаты”, Ядерная физика, 2009, том 72, №4, стр. 743–754;

3. А. В. Попов, “Поиски новой физики на Теватроне: последние результаты”, Ядерная физика, 2011, том 74, №3, стр. 498–507;

4. V. M. Abazov, ..., A. V. Popov *et al.* (D0 Collaboration), “Measurement of  $\sigma(p\bar{p} \rightarrow Z + X)Br(Z \rightarrow \tau^+\tau^-)$  at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV”, Phys. Lett. B 670 (2009) 292;

5. А. В. Попов, “Новые результаты поиска физики за пределами стандартной модели в эксперименте D0”, Ядерная физика, 2010, том 73, №6, стр. 1052–1062;

6. V. M. Abazov, ..., A. V. Popov *et al.* (D0 Collaboration), “Search for Randall-Sundrum Gravitons with 1 fb<sup>-1</sup> of Data from  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV”, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 091802;

7. V. M. Abazov, ..., A. V. Popov *et al.* (D0 Collaboration), “Search for Randall-Sundrum Gravitons in the Dielectron and Diphoton Final States with 5.4 fb<sup>-1</sup> of Data from  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96$  TeV”, Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 241802;

8. V. M. Abazov,..., A. V. Popov *et al.* (D0 Collaboration), “Search for Diphoton Events with Large Missing Transverse Energy in  $6.3 \text{ fb}^{-1}$  of  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$ ”, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 221802;
9. А. В. Попов, “Последние результаты поисков новой физики в эксперименте D0”, Ядерная физика, 2013, том 76, №9, стр. 1182–1186;
10. V. M. Abazov,..., A. V. Popov *et al.* (D0 Collaboration), “Measurement of direct photon pair production cross sections in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$ ”, Phys. Lett. B 690, (2010) 108;
11. V. M. Abazov,..., A. V. Popov *et al.*, “Observation and studies of double  $J/\psi$  production at the Tevatron”, Phys. Rev. D 90, (2014) 111101(R);
12. А. В. Попов, “Исследование одиночного и парного рождения  $J/\psi$  частиц в эксперименте D0 на ускорителе Тэватрон”, Ядерная физика и инжиниринг, том 7, №6, (2016) стр. 559–562;
13. V. M. Abazov,..., A. V. Popov *et al.* (D0 Collaboration), “Muon reconstruction and identification with the Run II D0 detector”, NIM A 737, (2014) 281;
14. V. M. Abazov,..., A. V. Popov *et al.* (D0 Collaboration), “Double parton interactions in  $\gamma+3 \text{ jet}$  and  $\gamma+b/\text{cjet}+2 \text{ jet}$  events in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$ ”, Phys. Rev. D 89, (2014) 072006;
15. V. M. Abazov,..., A. V. Popov *et al.* (D0 Collaboration), “Evidence for Simultaneous Production of  $J/\psi$  and  $Y$  Mesons”, Phys. Rev. Lett. 116, (2016) 082002;
16. V. M. Abazov,..., A. V. Popov *et al.* (D0 Collaboration), “Evidence for  $Z_c^\pm(3900)$  in semiinclusive decays of b-flavored hadrons”, Phys. Rev. D 98, (2018) 052010;
17. A. Popov, “The New Results from Multi-quark Exotic States Searches at D0 Experiment”, J. Phys.: Conf. Ser. 1390, (2019) 012035;
18. V. M. Abazov,..., A. V. Popov *et al.* (D0 Collaboration), “Inclusive Production of the  $X(4140)$  State in  $p\bar{p}$  Collisions at D0”, Phys. Rev. Lett. 115, (2015) 232001;

19. V. M. Abazov,..., A. V. Popov *et al.* (D0 Collaboration), “Properties of  $Z_c^\pm(3900)$  produced in  $p\bar{p}$  collisions”, Phys. Rev. D 100, (2019) 012005;

20. А. В. Попов, “Последние результаты по поиску и изучению экзотических состояний в эксперименте D0”, Ядерная физика и инжиниринг, том 11, №2, (2020) стр. 114–122;

21. А. В. Попов, “Search for and Study of Exotic Hadrons in the Fermilab D0 Experiment: Recent Results”, Physics of Atomic Nuclei, Vol. 83, No. 9, (2020), pp. 1383-1390.

Все работы, вошедшие в диссертацию, выполнены при определяющем вкладе соискателя, что подтверждается официальным письмом от коллаборации D0.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

а) Оппонента Бережного А.В., сделавшего следующие замечания:

- Так, по всей видимости, систематическая ошибка в результатах по отдельному измерению сечений парного рождения  $J/\psi$  в механизмах SPS и DPS занижена, так как разделение экспериментально полученного сечения на эти две компоненты сильно зависит от теоретической модели, применяемой для описания  $J/\psi$  в механизме SPS. Кроме того, следует отметить, что дифференциальный аналог формулы (3.2) формулы может описывать данные весьма приближённо, а это обстоятельство тоже увеличивает систематическую ошибку.

- В работе также содержится незначительное количество опечаток, а оси Y на некоторых графиках не имеют подписи (например, это графики на рисунках 3.8, 3.16 и 3.28).

- Также необходимо отметить, что аббревиатуры «фбн» и «нбн» более распространены в русской научной литературе, нежели аббревиатуры «фб» и «нб», которые используются автором диссертационной работы.

б) Оппонента Завертяева М.В., который сделал следующие замечания:

- Символ псевдо быстроты нигде не определяется, что для новичка приступающего к работе в области может вызвать затруднения.

- Рис. 2.2 - 2.7 - перегружены информацией – вклады от 6-8 моделей, приведенные на рисунках малого формата – зрительно трудно разрешимы.

- Неоднократно встречаются рисунки, у которых нет обозначений на оси ординат или присутствуют перекрытия обозначений и величин.

- Во многих случаях перечень различных величин, перечисленных последовательно в тексте, следовало бы представить в виде таблиц, что существенно облегчило бы чтение диссертации.

- В тексте работы встречаются неудачные выражения, и опечатки.

- в) Оппонента Капишина М.Н., который сделал следующие замечания:

- Результаты, представленные в трех частях диссертации, а именно: 1) по поиску супер-симметричных партнеров калибровочных бозонов и проявлений дополнительных размерностей, 2) измерению вклада двух-партоновых взаимодействий в процессах парного образования тяжелых мезонов со скрытыми  $s$  и  $b$  кварками и 3) изучению одного из экзотических много-кварковых состояний адронов, слабо связаны между собой по темам исследований, не являются составными частями более общего исследования как в эксперименте, так и со стороны теории.

- Результаты, изложенные в диссертации, несомненно, были актуальными на момент докладов, представленных автором на конференциях, и публикации статей коллаборации D0. Представление диссертации в тот момент было бы более своевременным. С тех пор исследования по темам диссертации были выполнены в экспериментах на коллайдере LHC, что позволило повысить экспериментальные пределы в поисках новой физики за пределами Стандартной модели и продолжить исследования экзотических мульти-кварковых состояний.

- При изложении материала автор многократно приводит детали анализа подобных процессов и состояний, критериев отбора событий, что несколько затрудняет выделение главных результатов анализа. Систематизация в виде таблиц критериев отбора и кинематических областей измеряемых величин

помогла бы более наглядно следовать этапам анализа и сравнивать критерии при выделении физических процессов.

- При сравнении результата измерения вклада двух-партонных взаимодействий в образование  $J/\psi$   $J/\psi$  с предсказаниями теоретических расчетов на основе  $k_T$  факторизации (формулы 3.26 и 3.28 диссертации) автор слишком оптимистично указывает на согласие измерений и расчетов в пределах  $1\sigma$ . Разница между экспериментом и моделью составляет величину порядка 1.6 от квадратичной суммы экспериментальных и модельных ошибок. В диссертации приводятся измеренные сечения образования  $J/\psi$   $J/\psi$  в одно-партонных и двух-партонных взаимодействиях, умноженные на квадрат вероятности канала распада  $J/\psi$  (формулы 3.25 и 3.26). При этом результаты измерения сравниваются с теоретическими расчетами для полного сечения образования  $J/\psi$   $J/\psi$  (формулы 3.27-3.30), что, по-видимому, является опечаткой. Также не совсем понятно, при каких предположениях выполнялись теоретические расчеты, так как в публикациях, где описан теоретический подход на основе  $k_T$  факторизации, нет самих расчетов сечений данных процессов.

г) Ведущей организации (МИФИ), указавшей следующие замечания:

- В диссертации отсутствует раздел о достоверности полученных результатов, и хотя большой экспериментальный материал и использование при обработке методов, разработанных и опробованных коллаборацией D0, вселяет уверенность в достоверности полученных результатов, тем не менее, обсуждение этого вопроса в диссертации является необходимым.

- Текст диссертации не свободен от стандартной для многих научных трудов ошибки – замены глагола «проводится» на глагол «производится». Например, на стр. 108 «Вычисление акцептанса производилось по формуле 3.10», на стр. 125 дважды написано «произведён фит», хотя на стр. 127 использовано правильное выражение «были проведены фиты». Аналогичные ошибки и в автореферате на страницах 26, 27, 28 (два раза) «был произведён фит», и только на странице 29 – «был проведён отдельный фит».

- При сокращении текста диссертации до размера автореферата появились и такие утверждения (стр. 14) «Соответствующая интегральная светимость составила  $8.1 \pm 0.5 \text{ фб}^{-1}$ . Автор играл в ней одну из ведущих ролей» (в светимости?), хотя если посмотреть текст диссертации (стр. 66), то речь идёт о ведущей роли автора в работе.

Во всех поступивших отзывах дана общая положительная оценка на диссертацию и автореферат, а также указано, что соискатель заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высочайшим уровнем экспертизы в вопросах, на которых сосредоточена диссертация, что подтверждается соответствующими публикациями.

Диссертационный совет Д 201.004.01 отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Разработана методика мониторинга работы передней мюонной системы и системы измерения светимости эксперимента D0 на основе измерения мюонных выходов.

- Произведен поиск суперсимметричных партнеров калибровочных бозонов и бозонов Хиггса в конечном состоянии с тремя лептонами и большой недостающей энергией. Поставлены верхние пределы на сечение  $\sigma(\tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_2^0) \times \text{Br}(3l)$ , которые, будучи преобразованы в область исключения на плоскости параметров  $(m_0, m_{1/2})$ , значительно расширили эту область по сравнению с результатами других экспериментов по поиску гаужино и слептонов на момент публикации этого результата.

- Произведен поиск RS-гравитонов, распадающихся на пару фотонов или электронов. Поставлены верхние пределы на величину сечения  $\sigma(p\bar{p} \rightarrow G + X) \times \text{Br}(G \rightarrow e^+e^-)$  для легчайшего КК гравитона и поставлен нижний предел на его массу от 560 до 1050 ГэВ/c<sup>2</sup> для значений параметра  $0.01 \leq k/\bar{M}_p \leq 0.1$ . На момент

публикации этой работы (2010 год) это были самые строгие ограничения на параметры модели RS.

- Исследованы события с двумя фотонами, имеющими большой поперечный импульс, и с большой недостающей энергией. Интерпретация результатов этого исследования проводилась в рамках двух моделей: суперсимметрии (GMSB) и универсальных дополнительных измерений (UED). Сделано заключение о том, что в спектре по недостающей энергии для событий  $\gamma\gamma + MET + X$  не наблюдается статистически значимых отклонений от предсказаний стандартной модели. Для модели GMSB значения для эффективного масштаба нарушения суперсимметрии  $\Lambda < 124$  ТэВ исключены на уровне значимости 95 %. Массы для легчайшего нейтралино  $m(\tilde{\chi}_1^0) < 175$  ГэВ/c<sup>2</sup> также исключены, что на момент публикации этой работы являлось лучшим результатом в рамках модели GMSB SUSY. Впервые была проведена оценка чувствительности к модели UED с распадами частиц КК, вызванными гравитационными взаимодействиями. В результате исключены значения радиуса компактификации  $R^{-1} < 477$  ГэВ на уровне значимости 95 %.

- Впервые на ускорителе Тэватрон наблюдается парное рождение  $J/\psi$  мезонов и показано, что оно идет как за счет однопартонных, так и за счет двухпартонных взаимодействий. Измерены сечения парного рождения  $J/\psi$  для обоих случаев. Также измерено эффективное сечение двухпартонных взаимодействий,  $\sigma_{\text{eff}}$ , и показано, что его величина находится в согласии с результатами предыдущих измерений для конечных состояний с 4 струями, где доминируют глюон-глюонные взаимодействия в начальном состоянии, но при этом заметно меньше значений, полученных для систем  $\gamma(W) + \text{jets}$ , где в начальном состоянии доминируют кварк-кварковые и кварк-глюонные взаимодействия.

- Впервые представлено свидетельство совместного рождения  $J/\psi$  и  $Y$  мезонов, статистическая значимость этого результата составила  $3.2\sigma$ . Измерено сечение их совместного рождения, а также эффективное сечение двухпартонных

взаимодействий в предположении, что совместное рождение  $J/\psi$  и  $Y$  идет только через двухпартонные взаимодействия. Величина измеренного эффективного сечения подтверждает вывод, сделанный в предыдущей работе.

- Выполнен поиск и исследование экзотического состояния  $Z_c^\pm(3900) \rightarrow J/\psi \pi^\pm$  в полуинклюзивных распадах  $b$ -адронов  $B_b \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$  и в прямом рождении. Получены свидетельства рождения состояния  $Z_c^\pm(3900)$  в диапазоне инвариантных масс  $4.2 < M(J/\psi \pi^+ \pi^-) < 4.7$  ГэВ/ $c^2$ , включающем в себя нейтральные  $c\bar{c}$ -подобные состояния  $\psi(4230)$  и  $\psi(4360)$ . Статистическая значимость сигнала, с учетом систематических ошибок, составила  $4.6\sigma$ . Также выполнен поиск прямого рождения состояния  $\psi(4260)$  с последующим распадом на  $Z_c^\pm(3900)\pi^\mp$ . В отсутствии статистически значимого сигнала, поставлен верхний предел на отношение числа событий от прямого и непрямого рождения  $R = N_{\text{prompt}}/N_{\text{nonprompt}} < 0.70$  при 95% C.L. Это значение для верхнего предела значительно меньше, чем значения отношения  $R$  для состояний  $X(3872)$  ( $R \approx 2-3$ ) и  $X(4140)$  ( $R \approx 1.5$ ).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что полученные результаты по поискам новой физики помогли расширить пределы на параметры соответствующих моделей (суперсимметрия, дополнительные измерения) и послужили основой для дальнейших работ в этой области. Большое значение для понимания двухпартонных взаимодействий имеет обнаруженное в представленных работах уменьшение эффективного сечения двухпартонных взаимодействий для глюон-глюонного рассеяния в начальном состоянии, которое наблюдалось впервые и в дальнейшем получило подтверждение в эксперименте ATLAS. Впервые обнаруженное рождение экзотического состояния  $Z_c^\pm(3900) \rightarrow J/\psi \pi^\pm$  в полуинклюзивных распадах  $b$ -адронов и то, что не было обнаружено прямого рождения этого состояния, имеет большое значение для лучшего понимания природы подобных экзотических состояний.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- Опыт разработки методики мониторинга стабильности мюонной системы и системы измерения светимости может быть востребован при улучшении характеристик детекторов, как существующих, так и вновь проектируемых экспериментов.

- Методы и подходы, разработанные в ходе работ, представленных в диссертации, легли в основу дальнейших исследований в рассматриваемых областях экспериментальной физики высоких энергий, как проведенных в экспериментах на ускорителе Тэватрон, так и проводимых на ускорителе LHC.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- Результаты диссертации прошли всестороннее обсуждение, строгий контроль качества и утверждены коллаборацией D0.

- Результаты диссертации прошли неоднократную апробацию в виде докладов на российских и международных конференциях, а также публикаций в специализированных реферируемых журналах по физике высоких энергий.

Личный вклад соискателя состоит в следующем:

- Совместно с другими участниками эксперимента автор разработал методику измерения одномюонных выходов и долговременного (2004 - 2011 годы) мониторинга стабильности работы передней мюонной системы и системы измерения светимости эксперимента D0 при различных значениях мгновенной светимости.

- В работе по поиску суперсимметричных партнеров калибровочных бозонов и бозонов Хиггса в конечных состояниях с тремя лептонами и большой недостающей энергией автором было выполнено моделирование фонов от процессов стандартной модели и сравнение их с данными, а также вычислены пределы на сечения и массы суперсимметричных частиц.

- В работе по поиску гравитона Рэндалл-Сандрума (RS-гравитона) в конечных состояниях с двумя электронами или фотонами автором было

выполнено моделирование событий от предполагаемого сигнала и фонов стандартной модели. Автором были получены пределы на сечение рождения и массу RS-гравитона.

- В работе по поиску суперсимметрии и универсальных дополнительных измерений в конечном состоянии с двумя фотонами и большой недостающей энергией автором была выполнена оптимизация отборов для выделения сигнала, моделирование фонов от процессов стандартной модели, а также проведен мультивариационный анализ с целью разделения событий от предполагаемого сигнала и фоновых событий.

- В работе по измерению сечений одиночного и парного рождения мезонов  $J/\psi$  автором были выполнены измерение триггерной эффективности для событий с двумя и четырьмя мюонами, измерение корректирующих коэффициентов от данных к Монте-Карло для эффективности идентификации мюонов, моделирование сигнала и вычисление акцептанса, а также измерение числа событий в сигнале от парного рождения мезонов  $J/\psi$ .

- В работе по измерению сечений одиночного рождения  $Y$  и совместного рождения мезонов  $J/\psi$  и автором были измерены числа событий в сигнале и фоне для одиночного рождения  $J/\psi$  и  $Y$ , а также их совместного рождения. Автором были измерены триггерные эффективности для событий с двумя и четырьмя мюонами, корректирующие коэффициенты от данных к Монте-Карло для эффективности идентификации мюонов, выполнено моделирование сигнала и вычисление акцептанса.

- В работах по поиску и изучению экзотического состояния  $Z_c^\pm(3900) \rightarrow J/\psi \pi^\pm$  автор провел фиты распределений по инвариантной массе  $M(J/\psi \pi)$  в различных интервалах по инвариантной массе  $M(J/\psi \pi^+ \pi^-)$  и измерил массу и ширину состояния  $Z_c^\pm(3900)$ , а также получил статистическую значимость его наблюдения с учетом систематических ошибок.

- Все проведенные исследования, представленные публикации и результаты, вынесенные на защиту, получены при определяющем участии автора;
- Значимость личного вклада автора подтверждает официальное письмо от коллаборации D0, в котором дается согласие на использование опубликованных результатов соискателем.

На заседании 30.06.2022 г. диссертационный совет Д 201.004.01 принял решение присудить Попову А.В. ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий за работу «Поиск новой физики и изучение процессов квантовой хромодинамики в эксперименте D0», в которой получены научные результаты, совокупность которых является серьезным научным достижением в поисках новой физики за пределами Стандартной модели.

При проведении тайного голосования диссертационный совет Д 201.004.01 в количестве 19 человек, из них 5 докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав диссертационного совета, проголосовали: за – 19, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета Д 201.004.01

Тюрин Н.Е.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 201.004.01

Прокопенко Н.Н.

30 июня 2022 г.