

УТВЕРЖДАЮ

Директор  
НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ,

д. ф.-м. н., академик

С. В. Иванов

23.02.2021 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация на тему «Поиск новой физики и изучение процессов квантовой хромодинамики в эксперименте D0» выполнена Поповым Алексеем Валерьевичем, старшим научным сотрудником Отделения экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ.

По итогам обсуждения на заседании семинара Отделения экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ принято следующее заключение:

Диссертационная работа Попова А. В. выполнена на высоком научном уровне при непосредственном участии соискателя. В диссертации представлены итоги работы автора в трех рабочих группах коллаборации D0: группе по поиску новой физики, группе по изучению явлений квантовой хромодинамики и группе по изучению b-физики за период с 2004 по 2019 годы. При участии автора диссертации были выполнены несколько работ по поискам новой физики: поиск суперсимметричных партнеров калибровочных бозонов и бозонов Хиггса в конечном состоянии с тремя лептонами и большой недостающей энергией; поиск RS-гравитона и универсальных дополнительных измерений в конечном состоянии с двумя электронами/фотонами и большой недостающей энергией.

При непосредственном участии соискателя были выполнены работы по исследованию процессов одиночного рождения кваркониев  $J/\psi$  и  $\Upsilon$ , а также, впервые на ускорителе Тэватрон, процессов парного рождения  $J/\psi J/\psi$  и  $J/\psi \Upsilon$  и измерению эффективного сечения двухпартонных взаимодействий в указанных конечных состояниях.

При ведущей роли автора диссертации были выполнены работы по изучению в полуинклюзивных распадах b-адронов экзотического мультикваркового состояния  $Z_c(3900)$  в канале  $J/\psi\pi$ , а также поиск этого состояния в прямом рождении.

При участии автора диссертации была разработана методика мониторинга стабильности работы передней мюонной системы и системы измерения светимости детектора D0 на основе измерения мюонных выходов, с помощью которой производилось регулярное долговременное мониторингирование стабильности работы этих систем в 2004–2011 годах.

В диссертации представлены:

1. Результаты разработки методики мониторинга работы передней мюонной системы и системы измерения светимости эксперимента D0 на основе измерения мюонных выходов.

2. Результаты поиска суперсимметричных партнеров калибровочных бозонов и бозонов Хиггса в конечном состоянии с тремя лептонами и большой недостающей энергией. Были 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 расширяют эту область по сравнению с результатами других экспериментов по поиску гаузино и слептонов на момент публикации этого результата.
3. Результаты поиска RS-гравитонов, распадающихся на пару фотонов или электронов. Были 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.
4. Результаты исследования событий 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). Было сделано заключение о том, что в спектре по недостающей энергии для событий  $\gamma\gamma + \text{MET} + X$  не наблюдается статистически значимых отклонений от предсказаний стандартной модели. Для модели GMSB значения для эффективного масштаба нарушения суперсимметрии  $\Lambda < 124$  ТэВ были исключены по уровню значимости 95 %. Массы для легчайшего нейтралино  $m(\tilde{\chi}_1^0) < 175$  ГэВ/c<sup>2</sup> также были 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 были исключены значения радиуса компактификации  $R^{-1} < 477$  ГэВ по уровню значимости 95 %.
5. Впервые на ускорителе Тэватрон было наблюдено парное рождение  $J/\psi$  мезонов и показано, что оно идет как за счет однопартонных, так и за счет двухпартонных взаимодействий. Были измерены сечения парного рождения  $J/\psi$  для обоих случаев. Также было 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.
6. Впервые было представлено свидетельство совместного рождения  $J/\psi$  и  $Y$  мезонов, статистическая значимость этого результата составила  $3.2\sigma$ . Было 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.
7. Результаты поиска и исследования 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. Были получены свидетельства рождения состояния  $Z_c^\pm(3900)$  в диапазоне инвариантных масс  $4.2 < M(J/\psi \pi^+ \pi^-) < 4.7$  ГэВ/c<sup>2</sup>, 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 был выполнен поиск прямого рождения состояния  $\psi(4260)$  с последующим распадом на  $Z_c^\pm(3900)\pi^\mp$ . В отсутствие статистически значимого сигнала, был 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  $X(4140)$  ( $R \approx 1.5$ ).

Материалы диссертации были лично доложены автором на 14 международных конференциях и представлены в 21 научной работе, опубликованных в рецензируемых научных журналах:

1. V. M. Abazov *et al.*, “Search for associated production of charginos and neutralinos in the trilepton final state using  $2.3 \text{ fb}^{-1}$  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 *et al.* (D0 Collaboration), “Measurement of  $\sigma(p\bar{p} \rightarrow Z + X)\text{Br}(Z \rightarrow \tau^+\tau^-)$  at  $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$ ”, *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 *et al.* (D0 Collaboration), “Search for Randall-Sundrum Gravitons with  $1 \text{ fb}^{-1}$  of Data from  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$ ”, *Phys. Rev. Lett.* 100 (2008) 091802.
7. V. M. Abazov *et al.* (D0 Collaboration), “Search for Randall-Sundrum Gravitons in the Dielectron and Diphoton Final States with  $5.4 \text{ fb}^{-1}$  of Data from  $p\bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$ ”, *Phys. Rev. Lett.* 104 (2010) 241802.
8. V. M. Abazov *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 *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 *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 *et al.* (D0 Collaboration), “Muon reconstruction and identification with the Run II D0 detector”, *NIM A* 737, (2014) 281.
14. V. M. Abazov *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 *et al.* (D0 Collaboration), “Evidence for Simultaneous Production of  $J/\psi$  and  $Y$  Mesons”, *Phys. Rev. Lett.* 116, (2016) 082002.
16. V. M. Abazov *et al.* (D0 Collaboration), “Evidence for  $Z_c^\pm(3900)$  in semiinclusive decays of b-flavored hadrons”, *Phys. Rev. D* 98, (2018) 052010.
17. А. Попов, “The New Results from Multi-quark Exotic States Searches at D0 Experiment”, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1390, (2019) 012035.
18. V. M. Abazov *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. Abazov V.M. *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. A. V. Popov, "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.

Теоретическая и экспериментальная части работы представлены в диссертации в надлежащем объеме. Тематика работы полностью соответствует специальности 01.04.23 – физика высоких энергий. Диссертационная работа рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Заключение принято на заседании семинара Отделения экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ. На заседании присутствовало 17 человек, среди которых 9 докторов и 5 кандидатов физико-математических наук. Результаты открытого голосования: «за» 17 человек, «против» – 0 чел., «воздержались» – 0 чел., протокол № 11/21 от 15 декабря 2021 г.

Секретарь семинара ОЭФ,  
д. ф.-м. н., внс  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

  
С.А. Садовский