

**Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ)**

30 июня 2022 г.

Заседание Диссертационного совета Д 201.004.01

Протокол № 5-2022 от 30 июня 2022 г.

Стенограмма заседания Диссертационного совета Д 201.004.01

Защита диссертации Попова Алексея Валерьевича
«Поиск новой физики и изучение процессов квантовой хромодинамики в
эксперименте D0»
по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий

Председатель: председатель Диссертационного совета Д 201.004.01 доктор физико-математических наук, профессор, Тюрин Николай Евгеньевич.

Секретарь: учёный секретарь Диссертационного совета Д 201.004.01 кандидат физико-математических наук, Прокопенко Николай Николаевич.

Всего членов совета: 22 человека.

Присутствует: 19 человек.

На заседании присутствуют следующие члены Диссертационного совета Д 201.004.01:

1. Тюрин Н.Е., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02 - председатель;
2. Зайцев А.М., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23 - заместитель председателя;
3. Прокопенко Н.Н., кандидат физ.-мат. наук, 01.04.23 – учёный секретарь;
4. Арбузов Б.А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
5. Денисов С.П., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
6. Иванов С.В., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
7. Качанов В. А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
8. Козуб С.С., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
9. Мочалов В. В., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
10. Петров В.А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
11. Петрухин А.А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.23;
12. Полозов С.М., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;

13. Разумов А.В., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
14. Саврин В.И., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
15. Сенько В.А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
16. Ткаченко Л.М., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
17. Трошин С.М., доктор физ.-мат. наук, 01.04.02;
18. Фещенко А.В., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20;
19. Чесноков Ю.А., доктор физ.-мат. наук, 01.04.20.

Диссертационный совет Д 201.004.01 утверждён приказом по Федеральной службе по надзору в сфере образования и науки № 105/нк от 11 апреля 2012 года, с частичными изменениями в соответствии с приказом по Федеральной службе по надзору в сфере образования и науки № 898/нк от 23 июля 2021 года, в составе 22-х человек. На заседании присутствуют 19 членов совета, из них 5 докторов наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий, кворум имеется. На заседании присутствует также официальные оппоненты доктора физ.-мат. наук Бережной Александр Викторович и Завертяев Михаил Васильевич.

Тюрин Н.Е. объявляет повестку дня: Защита диссертации Попова Алексея Валерьевича «Поиск новой физики и изучение процессов квантовой хромодинамики в эксперименте D0» на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Николай Николаевич, пожалуйста, приступим к процедуре.

Прокопенко Н.Н. представляет материалы, имеющиеся в деле: Соискатель, Попов Алексей Валерьевич, 1968 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук защитил в 2000 году, работает у нас в Институте старшим научным сотрудником. В деле есть все положительные отзывы от официальных оппонентов и ведущей организации. Также имеется официальное письмо от коллаборации D0, в котором подтверждается ведущая роль соискателя в работах по теме диссертации и дается согласие на использование опубликованных результатов. Диссертационная работа выполнена в Отделении экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ. Диссертация принята к защите диссертационным советом Д 201.004.01 24 марта 2022 года.

Официальными оппонентами выступают: Бережной Александр Викторович, доктор физико-математических наук, заведующий Лаборатории тяжелых кварков и редких распадов НИЯФ МГУ, Завертяев Михаил Васильевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории взаимодействия излучений с веществом, ФИАН, и Капишин Михаил Николаевич, доктор физико-математических наук, начальник отдела Лаборатории физики высоких энергий, ОИЯИ.

Ведущей организацией является Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Тюрин Н.Е.: Есть вопросы к секретарю диссертационного совета? Нет? Алексей Валерьевич, Вам слово для сообщения по диссертации.

Попов А.В.: Уважаемый председатель, уважаемые члены диссертационного совета, вашему вниманию предлагается доклад по диссертации на соискание учёной степени доктора физико-математических наук «Поиск новой физики и изучение процессов квантовой хромодинамики в эксперименте D0».

Основные положения, выносимые на защиту:

- Методика мониторинга стабильности работы передней мюонной системы эксперимента D0 с помощью измерения мюонных выходов.
- Пределы на сечение рождения и массы суперсимметричных партнеров калибровочных бозонов и бозонов Хиггса в конечном состоянии с тремя лептонами и большой недостающей энергией.
- Пределы на сечение рождения и массу RS-гравитона в конечных состояниях ee и $\gamma\gamma$.
- Пределы на эффективный масштаб нарушения GMSB SUSY и массу легчайшего нейтралино; предел на обратный радиус компактификации для модели UED (конечное состояние $\gamma\gamma + MET$).
- Сечения одиночного и парного рождения J/ψ , а также совместного рождения $J/\psi Y$ и эффективное сечение двухпартонных взаимодействий для этих состояний.
- Наблюдение экзотического состояния $Z_c(3900) \rightarrow J/\psi \pi$ в полуинклюзивных распадах b-адронов и в прямом рождении, измерение его массы и ширины. Верхний предел на отношение чисел событий включающих в себя $Z_c(3900)$ в прямом и непрямом рождении.

Коротко о детекторе эксперимента. Эксперимент D0 был одним из двух экспериментов на коллайдере Тэватрон, энергия столкновения пучков $p\bar{p}$ составляла 1.96 ТэВ. Сам детектор D0 включал в себя центральную трековую систему непосредственно вокруг области столкновения пучков, которая была окружена соленоидальным сверхпроводящим магнитом, создававшим поле 2 Т. Уран-жидкоаргоновый калориметр обеспечивал геометрический аксептанс до $|\eta| < 4$. Мюонная система состояла из центральной ($|\eta| < 1$) и передней ($1 < |\eta| < 2$) систем. Каждая из них включала в себя три слоя детекторов (дрейфовые камеры и сцинтилляционные триггерные счетчики), ближний к пучковой области слой находился внутри тороидального сверхпроводящего магнита, создававшего поле 1.8 Т, а два других слоя находились вне него.

С передней мюонной системой связано одно из положений, выносимых на защиту: разработка методики мониторинга стабильности работы передней мюонной системы эксперимента D0 с помощью измерения мюонных выходов. Был разработан набор триггеров, с помощью которого отбирались только мюонные треки в передней мюонной системе. В течение всего периода работы детектора D0, с 2005 по 2011 год, периодически набирались специальные наборы данных, состоящие из 100-150 тыс. событий, отобранных с помощью этих триггеров. Для каждого такого набора вычислялся выход мюонов как отношение числа реконструированных мюонных треков к интегральной светимости для рассматриваемого набора данных. Очевидно, что в случае корректной работы передней мюонной системы и системы измерения светимости, такие выходы должны быть с хорошей точностью одинаковы. Разница в значениях мюонных выходов за все время, в течение которого набирались соответствующие наборы данных, составила $\sim 1\%$. Также такие наборы набирались и при различных значениях мгновенной светимости, в этом случае разница также не превышала 1% , что говорит о высокой стабильности работы как мюонной системы эксперимента D0, так и его системы измерения светимости.

Следующим большим разделом диссертационной работы является поиск новой физики в эксперименте D0, в котором описываются те работы в этой области, в которых я принимал участие. Необходимость новой физики диктуется, в том числе, проблемой иерархии, которая, в частности, выражается в аномально большой величине поправок к массовому множителю в потенциале Хиггса $V(H) = m_H^2 |H|^2 + \lambda |H|^4$, величина поправок к m_H^2 на много порядков превосходит эту величину. Одним из возможных решений является наличие нового типа симметрии между фермионами и бозонами, получившей название «суперсимметрии». Каждая из известных фундаментальных частиц в суперсимметричных теориях должна иметь соответствующего суперпартнера, спин которого отличается на величину $1/2$. Вклады от частиц и их суперпартнеров в m_H^2 взаимно компенсируют друг друга, что решает проблему поправок к m_H^2 .

Я принимал участие в работах по поиску суперпартнеров калибровочных бозонов и бозонов Хиггса в конечном состоянии с тремя лептонами и большой недостающей энергией. Из за нарушения электрослабой симметрии, суперпартнеры калибровочных бозонов (*гаужино*) и бозонов Хиггса (*хиггсино*), смешиваются, образуя четыре нейтральных массовых состояния: $\tilde{\chi}_{1,2,3,4}^0$, называемые *нейтралино* и два заряженных массовых состояния: $\tilde{\chi}_{1,2}^\pm$, называемых *чаржино*. На коллайдерах чаржино и нейтралино должны рождаться парами и одним из конечных состояний, которое можно обнаружить экспериментально, является состояние с тремя лептонами и большой недостающей энергией.

Преимуществом изучения именно этого состояния является очень чистая «сигнатура» – три изолированных лептона, хотя сечение парного рождения чаржино и нейтралино весьма мало (0.1 – 0.5 пб). Интерпретация результатов проводилась в рамках модели mSUGRA с сохранением R-четности, наилегчайшая суперсимметричная частица ($\tilde{\chi}_1^0$) тут стабильна и избегает регистрации. Рассматривалось конечное состояние с двумя заряженными лептонами и заряженным треком, от которого не требовалось идентификации (для увеличения эффективности регистрации), а также большой недостающей энергией, уносимой нейтралино и нейтрино. Не было найдено статистически значимых отклонений от предсказаний стандартной модели.

Соответственно, были поставлены пределы на сечение $\sigma(\tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_2^0) \times Br(3l)$ которые, на момент публикации результатов работы, были наиболее строгими в мире.

Еще одним возможным решением проблемы иерархии является уменьшение фундаментальной планковской массы до масштаба нескольких ТэВ путем введения дополнительных измерений, в которых может распространяться только гравитация. Одной из подобных моделей является модель Рендалл-Сундрума (RS), в которой вводится одно дополнительное измерение с искривленной метрикой. Рассматриваются две (3+1) мерные «браны», «планковская» и «ТэВ-ная» (Стандартной модели). Гравитация, зарождаясь в «планковской» бране, в «ТэВ-ной» области оказывается экспоненциально подавленной. Основными параметрами модели являются масса первого возбужденного состояния M_1 и безразмерная константа связи с полями стандартной модели, сечение образования гравитонов пропорционально её квадрату.

В области стандартной модели первый RS-гравитон должен проявлять себя через распады на два фермиона или два фотона. Поиск проводился в эксперименте D0 на статистике, соответствующей интегральной светимости 5.4 фб^{-1} в диэлектронном и дифотонном массовом спектрах. Моделирование сигнала проводилось с помощью Монте-Карло в той области параметров модели, в которой значение фундаментальной массы Планка составляет несколько ТэВ. При сравнении экспериментальных данных с данными моделирования не было обнаружено значимых расхождений с предсказаниями стандартной модели. Были поставлены пределы на сечение рождения первого RS-гравитона, а также выделена область исключения на плоскости параметров модели Рендалл-Сундрума. На момент опубликования результатов данной работы это были самые строгие ограничения в мире.

Ещё одной моделью, использующей дополнительные измерения, является модель универсальных дополнительных измерений (UED). В этой модели в дополнительных измерениях могут распространяться все поля стандартной

модели. Соответственно, каждой частице стандартной модели соответствует свой набор состояний Калуды-Клейна (КК). Сохраняется КК-четность, что приводит к тому, что КК-состояния могут рождаться только парами, а наилегчайшее КК-состояние должно быть стабильным. Все это напоминает суперсимметрию с сохранением R-четности. Это позволяет исследовать различные конечные состояния как в рамках модели UED, так и в рамках суперсимметричных моделей. На коллайдерах UED должны проявлять себя через парное рождение КК-кварков, которые, через КК-калибровочные бозоны и КК-лептоны должны распадаться до КК-фотона, который является наилегчайшей КК-частицей.

Я принимал участие в работе по поиску суперсимметрии и UED в конечном состоянии с двумя фотонами и большой недостающей энергией на статистике, соответствующей накопленной светимости 6.3 фб^{-1} . В рамках модели UED наиболее вероятно парное рождение КК-кварков, которые, через цепочку распадов, распадаются на КК-фотоны (γ_1). Если в природе существуют и UED, и большие дополнительные измерения (LED), то КК-фотоны не являются стабильными частицами, распадаясь $\gamma_1 \rightarrow G\gamma$, где G – гравитон, который избегает регистрации в детекторе, что приводит к конечному состоянию с двумя фотонами и большой недостающей энергией. В качестве суперсимметричной модели рассматривалась модель, в которой наилегчайшей суперсимметричной частицей является гравитино (\tilde{G}). Если предположить сохранение R-четности, то наиболее вероятными процессами рождения суперсимметричных частиц будут $p\bar{p} \rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_1^\mp$, с последующим распадом последних на легчайшее нейтрино, которое, в свою очередь, распадается $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G}\gamma$, что также приводит к искомому конечному состоянию.

В ходе поисков в данных не было найдено статистически значимых отклонений от предсказаний стандартной модели и были поставлены пределы на сечения рождения суперсимметричных частиц и существования UED. Для рассматриваемой модели суперсимметрии эти ограничения являлись наиболее строгими в мире на момент опубликования соответствующего результата. Модель, в которой предполагалось одновременное существование и UED, и LED, рассматривалась впервые.

Далее я хотел бы перейти к следующей большой части диссертации, посвященной квантовой хромодинамике. И начать я хотел бы с работ, посвященных измерению эффективного сечения двухпартонных взаимодействий. Двухпартонные взаимодействия характеризуются так называемым эффективным сечением двухпартонных взаимодействий (σ_{eff}), которое, по сути, характеризует эффективную площадь области взаимодействия.

Первая из рассматриваемых работ посвящена парному рождению J/ψ мезонов. Тут следует обратить внимание на две вещи: во-первых, парное

рождение J/ψ мезонов может происходить как через двухпартонные, так и через однопартонные взаимодействия, поэтому одной из главных целей этой работы было измерение соответствующих долей. Во-вторых, при энергиях Тэватрона (и БАК) основной вклад в парное рождение J/ψ мезонов должно вносить глюон-глюонное рассеяние в начальном состоянии. Для измерения эффективного сечения двухпартонных взаимодействий в этом случае необходимо измерить как сечение одиночного рождения J/ψ , так и ту часть сечения парного рождения, которая определяется двухпартонными взаимодействиями.

Для данного анализа использовался набор данных, соответствующий накопленной светимости $8.1 \pm 0.5 \text{ фб}^{-1}$. Рассматривались J/ψ от прямого рождения (непосредственно в $p\bar{p}$ столкновениях или в «быстрых» распадах χ_{c1} , χ_{c2} , $\psi(2S)$). Рассматривался распад $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$, конечное состояние – 4 мюона. Была измерена триггерная эффективность как для двух, так и для четырех мюонов (по отдельности для однопартонных – SP и двухпартонных – DP взаимодействий). В этих измерениях учитывались кинематические зависимости триггерной эффективности от поперечных импульсов J/ψ мезонов и мюонов.

Для измерения эффективного сечения двухпартонных взаимодействий необходимо измерить сечение одиночного рождения J/ψ мезонов. Было измерено число J/ψ мезонов в используемом наборе данных. Аксептанс для событий одиночного рождения J/ψ определялся с помощью Монте-Карло с учетом поправок, учитывающих разницу между Монте-Карло и данными. Также, для вычисления сечения, измерялась доля J/ψ мезонов от прямого рождения.

Измеренное значение сечения одиночного рождения J/ψ составила $\sigma(J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu) = 23.9 \pm 4.6(\text{стат.}) \pm 3.7(\text{сист.}) \text{ нб}$, что хорошо соответствует теоретическим предсказаниям для этой величины: $23.0 \pm 8.5 \text{ нб}$ (модель кТ-факторизации). Далее необходимо было измерить сечение парного рождения J/ψ . Были получены число событий под пиком в распределении по $(M_{\mu\mu}^{(1)}, M_{\mu\mu}^{(2)})$ (димюонные массы, соответствующие первому и второму J/ψ) и фракция фона под пиком, измеренная с помощью 2D-фита к вышеупомянутому распределению.

Аксептанс рассчитывался тем же методом, что и для одиночного рождения J/ψ , по отдельности для событий с однопартонными и двухпартонными взаимодействиями. Для выделения событий с прямым рождением J/ψ использовалось двумерное распределение по st обоих J/ψ .

Следующим важным шагом для измерения эффективного сечения двухпартонных взаимодействий является измерение долей однопартонных и двухпартонных взаимодействий в парном рождении J/ψ мезонов. Для этого измерения использовалось распределение по величине $|\Delta\eta(J/\psi, J/\psi)| = |\eta^{J/\psi_1} - \eta^{J/\psi_2}|$. Полученный результат: $f^{SP} = 0.58 \pm 0.12$, $f^{DP} = 0.42 \pm 0.12$.

Достоин внимания тот факт, что доля двухпартонных взаимодействий в парном рождении J/ψ оказалась весьма значительной.

Измеренные сечения парного рождения J/ψ (в том числе и по отдельности для однопартонных и двухпартонных взаимодействий):

$$\sigma(J/\psi, J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu)^2 = 129 \pm 9(\text{стат.}) \pm 31(\text{сист.}) \text{ фб},$$

$$\sigma_{SP}(J/\psi, J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu)^2 = 70 \pm 6(\text{стат.}) \pm 22(\text{сист.}) \text{ фб},$$

$$\sigma_{DP}(J/\psi, J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu)^2 = 59 \pm 6(\text{стат.}) \pm 22(\text{сист.}) \text{ фб}.$$

Теоретические предсказания (модель kT-факторизации, $\sigma_{\text{eff}} = 15$ мб):

$$\sigma_{SP}^{kT}(J/\psi, J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu)^2 = 55.1_{-15.6}^{+28.5}(\text{PDF})_{-17.0}^{+31.0}(\text{scale}) \text{ фб},$$

$$\sigma_{DP}^{kT}(J/\psi, J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu)^2 = 17.6 \pm 13.0 \text{ фб}.$$

Теоретические предсказания (модель NRQCD):

$$\sigma_{SP}^{NRQCD, LO}(J/\psi, J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu)^2 = 51.9 \text{ фб},$$

$$\sigma_{SP}^{NRQCD, NLO}(J/\psi, J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu)^2 = 90_{-50}^{+180} \text{ фб}.$$

Полученные центральные значения для сечений, особенно в случае двухпартонных взаимодействий, находятся выше теоретических значений. Но следует учесть, что теоретические оценки не учитывают, к примеру, прямого рождения DJ в процессах $\psi(2S) \rightarrow J/\psi + X$ и им подобных. Вклад от таких распадов в сечение может быть весьма значительным.

Теперь можно рассчитать величину эффективного сечения двухпартонных взаимодействий. Она составила $\sigma_{\text{eff}} = 4.8 \pm 0.5(\text{стат.}) \pm 2.5(\text{сист.})$ мб. Если сравнить эту величину с величинами, полученными для других конечных состояний, то можно заметить, что полученное значение σ_{eff} хорошо согласуется со значениями, полученными для состояний с 4 струями. Но оно меньше значений, полученных для состояний $\gamma + jets$ и $W + jets$. Следует обратить внимание на то, что в первом случае (как и в случае $J/\psi J/\psi$) в начальном состоянии доминируют глюон-глюонные (gg) взаимодействия, во втором – кварк-глюонные (qg) и кварк-кварковые (qq) взаимодействия. То есть можно предположить, что в gg-взаимодействиях в начальном состоянии эффективное сечение двухпартонных взаимодействий уменьшается по сравнению с qg и qq-взаимодействиями. Этот результат был подтвержден в эксперименте ATLAS, измеренное эффективное сечение двухпартонных взаимодействий в системе $J/\psi J/\psi$ там составило $\sigma_{\text{eff}}(J/\psi J/\psi) = 6.3 \pm 1.6(\text{стат.}) \pm 1.0(\text{сист.})$ мб., что с хорошей точностью соответствует результату, полученному в эксперименте D0.

Следующей работой, в которой измерялось эффективное сечение двухпартонных взаимодействий, стало изучение совместного рождения мезонов J/ψ и Y . Как и в случае рождения $J/\psi J/\psi$, совместное рождение J/ψ и Y происходит в gg-взаимодействиях, поэтому измерения σ_{eff} в этом случае может подтвердить уменьшение σ_{eff} в gg-взаимодействиях, наблюдаемое в рождении

$J/\psi J/\psi$. Такое измерение было проведено в эксперименте D0 на статистике $8.1 \pm 0.5 \text{ фб}^{-1}$. Рассматривались $Y(1S, 2S, 3S)$.

Измеренные сечения одиночного рождения J/ψ и Y составили $\sigma(J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu) = 28.3 \pm 0.4(\text{стат.}) \pm 7.2(\text{сист.}) \text{ нб}$ и $\sigma(Y) \times Br(Y \rightarrow \mu\mu) = 2.1 \pm 0.04(\text{стат.}) \pm 0.26(\text{сист.}) \text{ нб}$. Сечение совместного рождения J/ψ и Y составило $\sigma(J/\psi Y) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu) \times Br(Y \rightarrow \mu\mu) = 27.3 \pm 8.7(\text{стат.}) \pm 7.2(\text{сист.}) \text{ фб}$.

Полученное значение для эффективного сечения двухпартонных взаимодействий составило $\sigma_{\text{eff}} = 2.2 \pm 0.7(\text{стат.}) \pm 0.9(\text{сист.}) \text{ мб}$. Данный результат совместим в пределах ошибок с результатом, полученным для парного рождения J/ψ , и может служить дополнительным подтверждением этого результата.

И, наконец, последняя часть моей диссертации и доклада, посвящена поиску экзотических состояний в эксперименте D0, точнее, тем работам в этой области, в которых автор принимал непосредственное участие. Возможность существования «экзотических» состояний отмечалась еще в самых первых работах, посвященных кварковой модели. Однако в течение долгого времени такие состояния не обнаруживались экспериментально. Наблюдение состояния $X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ в эксперименте Belle в 2003 году стало началом новой эры – эры экспериментального исследования экзотических состояний. С 2003 года было обнаружено более 20 различных экзотических состояний. В эксперименте D0 было выполнено значительное количество работ, посвященных поиску и исследованию экзотических состояний, таких как $X(3872)$, $X(4140)$, $X(5568)$, $Z_c(3900)$. К рассмотрению последнего из них я и хочу перейти.

Состояние $Z_c^\pm(3900)$ было открыто в 2013 году в экспериментах Belle и BESIII в процессе: $e^+e^- \rightarrow \psi(4260) \rightarrow Z_c^\pm(3900) \pi^\mp$, $Z_c^\pm(3900) \rightarrow J/\psi \pi^\pm$. В эксперименте BESIII также было показано, что «родительское» состояние $\psi(4260)$ включает в себя два состояния: более узкое $\psi(4230)$ и более широкое $\psi(4360)$. Эти результаты порождают два вопроса:

- Какое из этих двух состояний распадается на $Z_c^\pm(3900)$?
- Рождаются ли $\psi(4260)$ и $Z_c^\pm(3900)$ в распадах b-адронов (H_b), т.е. происходят ли распады вида: $H_b \rightarrow \psi(4260) (\rightarrow Z_c^\pm(3900) \pi^\mp) + X$?

Целью данного анализа, проведенного в эксперименте D0 на статистике 10.4 фб^{-1} , был поиск таких распадов. Использовался набор данных, содержащий J/ψ и пару разнозаряженных треков, выходящих из смещенной (вторичной) вершины.

В распределении по инвариантной массе $M(J/\psi \pi^\pm)$ хорошо виден пик, соответствующий сигналу от $Z_c^\pm(3900)$. Параметры сигнала, полученные из фита составили $M_X = 3895.0 \pm 5.2(\text{стат.})_{-2.7}^{+4.0}(\text{сист.}) \text{ МэВ}$, $N_{\text{ev}} = 505 \pm 92(\text{стат.}) \pm$

64(сист). Локальная значимость сигнала составила 5.6σ , значимость с учетом систематических ошибок – 4.6σ . Также, в диапазоне инвариантных масс $4.2 < M(J/\psi \pi^+ \pi^-) < 4.7$ ГэВ были измерены выходы сигнала от $Z_c^\pm(3900)$. Наибольшие значения этих выходов находятся в той области по массе, где находится резонанс $\psi(4230)$.

Дальнейшее исследование свойств экзотического состояния $Z_c^\pm(3900)$ было обусловлено необходимостью исследовать прямое рождение $\psi(4260) \rightarrow Z_c^\pm(3900) \pi^\mp$ в $p\bar{p}$ взаимодействиях. При этом использовался новый набор данных, при отборе которых не требовалось смещение вершины рождения J/ψ относительно первичной вершины. Кроме того, для получения этого набора данных использовался новый алгоритм поиска треков, оптимизированный для треков с малым p_T . Это позволило уменьшить нижний предел обрезания на поперечный импульс заряженных треков и увеличило объем используемых данных на $\sim 50\%$. Данные делились на два неперекрывающихся набора: набор «смещенной вершины» – условия отбора событий такие же, как и в предыдущем анализе, и набор «первичной вершины» – все остальные события. Рассматривался диапазон по инвариантной массе $4.1 < M(J/\psi \pi^+ \pi^-) < 4.7$ ГэВ.

Как и в предыдущей работе, измерялись выходы сигнала от $Z_c^\pm(3900)$ для различных диапазонов по инвариантной массе $M(J/\psi \pi^+ \pi^-)$. Для набора «смещенной вершины» результат оказался таким же, как и в прошлом анализе, что было ожидаемо. Но вот для набора «первичной вершины» не было обнаружено статистически значимого сигнала от $Z_c^\pm(3900)$ во всем рассматриваемом диапазоне инвариантных масс $M(J/\psi \pi^+ \pi^-)$.

Для набора «смещенной вершины» в диапазоне инвариантных масс $4.2 < M(J/\psi \pi^+ \pi^-) < 4.3$ ГэВ, в котором находится большинство событий с рождением $Z_c^\pm(3900)$, был проведен фит распределения по инвариантной массе $M(J/\psi \pi^\pm)$, из которого были получены следующие параметры этого резонанса: $M = 3902.6_{-5.0}^{+5.2}(\text{стат})_{-1.4}^{+3.3}(\text{сист})$ МэВ, $\Gamma = 32_{-21}^{+28}(\text{стат})_{-7}^{+26}(\text{сист})$ МэВ, $N_{\text{ev}} = 364 \pm 156(\text{стат}) \pm 49(\text{сист})$. Статистическая значимость сигнала составила 5.6σ . Как уже отмечалось выше, не было найдено статистически значимого сигнала от прямого рождения $\psi(4260) \rightarrow Z_c^\pm(3900)$. Соответственно, был поставлен верхний предел на отношение числа событий с рождением $Z_c^\pm(3900)$ в прямом и непрямом рождении $R = N_{\text{prompt}}/N_{\text{nonprompt}} < 0.7$ при 95% CL. Интересным является тот факт, что это значительно меньше, чем соответствующие значения для $X(3872)$ ($R \approx 2-3$) или $X(4140)$ ($R \approx 1.5$), что является важным результатом этого анализа.

В заключении я хотел бы выделить основные научные достижения, представленные в данной диссертационной работе:

- Получение в эксперименте D0 пределов (рекордных на момент их публикации) на возможные проявления новой физики;
- Обнаружение уменьшения эффективного сечения двухпартонных взаимодействий в глюон-глюонных взаимодействиях по сравнению с кварк-кварковыми и кварк-глюонными взаимодействиями в начальном состоянии;
- Свидетельство рождения состояния $Z_c(3900) \rightarrow J/\psi \pi$ в полуинклюзивных распадах b-адронов и измерение верхнего предела на отношение числа событий от прямого и непрямого рождения $Z_c(3900)$, которое оказалось значительно меньше, чем значения этого отношения для других экзотических состояний.

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 21 статье в реферируемых журналах и представлены на 14 российских и международных конференциях. Спасибо за внимание.

Тюрин Н.Е.: Спасибо. Вопросы, пожалуйста.

Петров В.А.: Исследовалась ли возможность «утечки» частиц стандартной модели в дополнительные измерения для модели универсальных дополнительных измерений?

Попов А.В.: Нет, в данной работе такое исследование не проводилось, основной задачей было либо обнаружить сам факт рождения КК-частиц, либо, при его отсутствии, поставить пределы на сечения соответствующих процессов, что и было сделано.

Петров В.А.: Еще один вопрос. Исследовалась ли зависимость величины эффективного сечения двухпартонных взаимодействий от энергии взаимодействующих в начальном состоянии глюонов?

Попов А.В.: Опубликованные значения эффективного сечения двухпартонных взаимодействий являются интегральными, относящимися ко всему исследуемому набору данных. Исследований зависимостей значения этого сечения от других параметров, в частности от энергии глюонов, не проводилось.

Петров В.А.: Можете ли вы сказать, в каком диапазоне находилась инвариантная масса двух J/ψ мезонов для исследуемого набора данных?

Попов А.В.: Насколько я помню, максимум этого распределения был в диапазоне 10-12 ГэВ.

Трошин С.М.: Каков физический смысл эффективного сечения двухпартонных взаимодействий? Что означает его уменьшение в глюон-глюонных взаимодействиях?

Попов А.В.: Как я уже говорил ранее, эффективное сечение двухпартонных взаимодействий характеризует эффективную площадь таких взаимодействий в плоскости, поперечной направлению движения сталкивающихся нуклонов. В этом смысле уменьшение этого сечения для глюон-глюонного рассеяния может означать, говоря несколько упрощенно, большую плотность, концентрацию глюонов в нуклоне, то, что глюоны расположены более «компактно» нежели кварки.

Трошин С.М.: Можете ли вы вывести слайд, где показаны значения эффективного сечения двухпартонных взаимодействий для разных конечных состояний и разных экспериментов? Скажите, а как обстоит дело с зависимостью этого сечения от энергии столкновения в системе центра масс?

Попов А.В.: Тут можно сказать, что величина этого сечения остается с хорошей точностью постоянной. И хотя в последнее время появились работы, указывающие на некоторое изменение эффективного сечения в зависимости от энергии/поперечного импульса, до сих пор эту величину используют для сравнения результатов полученных в различных экспериментах, при различных значениях энергии.

Тюрин Н.Е.: Еще есть вопросы? Если вопросов нет, будем двигаться дальше, и перейдем к отзывам.

Прокопенко Н.Н.: Первое заключение – это заключение организации, в которой выполнялась работа.

Прокопенко Н.Н. зачитывает заключение организации, где выполнялась работа (НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ):

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/ψ и Υ , 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 гаужино 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^2 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/c² 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/ψ мезонов и показано, что оно идет как за счет однопартонных, так и за счет двухпартонных взаимодействий. Были измерены сечения парного рождения J/ψ для обоих случаев. Также было измерено эффективное сечение двухпартонных взаимодействий, σ_{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/ψ и Y мезонов, статистическая значимость этого результата составила 3.2σ . Было измерено сечение их совместного рождения, а также эффективное сечение двухпартонных взаимодействий в предположении, что совместное рождение J/ψ 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/c², включающем в себя нейтральные $c\bar{c}$ -подобные состояния $\psi(4230)$ и $\psi(4360)$. Статистическая значимость сигнала, с учетом систематических ошибок, составила 4.6σ . Также был выполнен поиск прямого рождения состояния $\psi(4260)$ с последующим распадом на $Z_c^\pm(3900)\pi^\mp$. В отсутствии 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.

Теоретическая и экспериментальная части работы представлены в диссертации в надлежащем объёме. 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. Отзыв подписан доктором физ.-мат. наук Садовским С.А. и утвержден директором НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, доктором физ.-мат. наук, академиком РАН Ивановым С.В.

Тюрин Н.Е.: Николай Николаевич, прошу зачитать отзыв ведущей организации – НИЯУ МИФИ.

Прокопенко Н.Н.: зачитывает отзыв ведущей организации (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»):

В диссертационной работе Попова А.В. «Поиск новой физики и изучение процессов квантовой хромодинамики в эксперименте D0» подводятся итоги исследований, проведенных в эксперименте D0 по поиску новой физики за пределами Стандартной модели, а также исследование редких процессов, возможных в квантовой хромодинамике, но недостаточно изученных. Автором получены верхние пределы на целый ряд процессов, в которых могла проявиться Новая физика, которые на момент их публикации были лучшими в мире.

Актуальность тематики работ, включенных в диссертацию, определяется тем местом, которое она занимает в поисковых исследованиях новой физики, проводимых на современных ускорителях. Вклад эксперимента D0 в эти исследования трудно переоценить. Полученные в этом эксперименте результаты внесли существенный вклад в формирование программы исследований на Большом адронном коллайдере (БАК).

В диссертации Попова А.В. рассматриваются четыре направления таких исследований: поиск суперсимметричных частиц, поиск проявления дополнительных измерений, изучение эффективного сечения двухпартонных взаимодействий и поиск экзотических резонансов.

В рамках первого направления проведён поиск суперсимметричных партнёров калибровочных бозонов и бозонов Хиггса в рамках модели минимальной суперсимметрии с тремя лептонами в конечном состоянии и большой недостающей энергией. И хотя не было найдено суперсимметричных частиц, удовлетворяющих поставленным требованиям, большая статистическая обеспеченность эксперимента позволила получить верхние пределы на произведение сечения рождения таких частиц и вероятности их распада в состояние с тремя лептонами.

По второму направлению был выполнен поиск гравитонов Рэндалл-Сандрума (RS-гравитонов) и универсальных дополнительных измерений (UED). Поиск RS-гравитонов проводился по каналам его распада с двумя электронами или двумя фотонами, и хотя таких событий также не было найдено, результаты эксперимента позволили оценить верхние пределы на величину сечения образования RS-гравитонов, умноженную на вероятность их распада по соответствующему каналу, а также получить нижний предел на массу RS-гравитонов в интервале 560 - 1050 ГэВ/c² в зависимости от значений параметров модели. Отрицательный результат был получен также и в поиске универсальных дополнительных измерений с двумя фотонами в конечном состоянии и большой недостающей энергией, что позволило вычислить пределы для исследуемых моделей.

По третьему направлению автору удалось получить положительные результаты как по наблюдению парного рождения J/Ψ и Υ мезонов, которые позволили оценить сечение двухпартонного взаимодействия, в предположении, что эти мезоны рождаются за счёт такого взаимодействия.

По четвёртому направлению был проведён поиск резонансного состояния $Z_c^\pm(3900)$ в полуинклюзивных распадах b-адронов. Статистическая значимость сигнала от наблюдения этого резонанса составила 4.6σ. Был выполнен также поиск прямого рождения состояния Ψ(4260), которое распадается на $Z_c^\pm(3900)\pi^\mp$ и поставлен верхний предел на отношение их прямого и непрямого рождения.

На первый взгляд рассмотренные результаты имеют слабое отношение друг к другу, но они хорошо коррелируют с широким фронтом поисковых

исследований Новой физики, т.к. априори невозможно предсказать, в каком направлении таких исследований Новая физика будет обнаружена.

Учитывая, что на момент получения перечисленных результатов они были лучшими в мире, проведённую в диссертации работу следует оценить как большое научное достижение в комплексе исследований по поиску новой физики за пределами Стандартной модели, что в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к докторской диссертации.

Диссертация написана чётким и ясным языком, хорошо структурирована и легко читается. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

По диссертации можно сделать 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 $8.1 \pm 0.5 \text{ fb}^{-1}$. Автор играл в ней одну из ведущих ролей» (в светимости?), хотя если посмотреть текст диссертации (стр. 66), та речь идёт о ведущей роли автора в работе.

В целом, 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.

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, а её автор Попов Алексей Валерьевич заслуживает присуждения ему учёной степени

доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий за получение научных результатов, совокупность которых является серьёзным научным достижением в поисках новой физики за пределами Стандартной модели.

Диссертационная работа Попова А.В. и отзыв на нее были рассмотрены и одобрены на заседании Научно-технического совета Института ядерной физики и технологий 16 мая 2022 года, протокол №1-05/22.

Отзыв подписан заместителем директора ИЯФиТ, доктором физ.-мат. наук, профессором Тихомировым В.Г., ученым секретарем Гуровым Ю.Б. и утвержден ректором НИЯУ МИФИ Шевченко В.И. 8 июня 2022 года.

Тюрин Н.Е.: Хорошо. Алексей Валерьевич, хотели бы вы что-то ответить на замечания?

Попов А.В.: Спасибо. В целом согласен с первым замечанием, хотя могу отметить, что все результаты, представленные в диссертации, были опубликованы в реферируемых журналах и прошли многоуровневый процесс проверки как в коллаборации D0, так и на уровне соответствующих журналов.

Что же касается стилистических замечаний, то тут я полностью согласен и принимаю их.

Тюрин Н.Е.: Спасибо, Алексей Валерьевич. Теперь мы переходим к выступлению официальных оппонентов. Первым оппонентом является Бережной Александр Викторович из Московского государственного университета. Пожалуйста, Вам слово.

Бережной А.В.:

Диссертационная работа Алексея Валерьевича Попова посвящена экспериментальному исследованию в рамках эксперимента D0 трёх актуальнейших проблем современной физики высоких энергий: поиску частиц за пределами Стандартной модели, изучению двойного партонного рассеяния в парном рождении кваркониюв и поиску тяжёлых экзотических адронов.

Касаясь поиска частиц за пределами Стандартной модели, следует отметить, что, несмотря на перенормируемость и самосогласованность Стандартной модели, а также её неоспоримые успехи, имеются убедительные свидетельства того, что Стандартная модель не является полной теорией. Например, в её рамках нельзя объяснить барионную асимметрию Вселенной, наличие в ней тёмной материи, массивность нейтрино. Стандартная модель также не лишена внутренних проблем, таких как проблемы иерархии и унификации бегущих калибровочных констант связи. В связи с этим поиск явлений за

рамками Стандартной модели является одной из приоритетных задач современной физики высоких энергий.

Парное рождение кваркониев в адронных взаимодействиях крайне интересно тем, что, по всей видимости, в него вносят вклад два принципиально разных механизма: привычное одинарное партонное рассеяние (SPS) и двойное партонное рассеяние (DPS). Если в механизме SPS взаимодействует одна пара партонов, то в механизме DPS – две. Измерение доли двухпартонных взаимодействий в таких процессах может дать информацию о пространственном распределении партонов в протоне. Кроме того, изучение однопартонного взаимодействия для системы $J/\psi J/\psi$ может улучшить наше понимание экзотических адронных состояний.

Исследованию экзотических адронных состояний, а именно изучению рождения заряженного чармония $Z_c^\pm(3900)$ в условиях эксперимента D0, полностью посвящен ещё один раздел рассматриваемой диссертационной работы. Здесь следует сказать, что это очень важное и бурно развивающееся направление, практически каждый год приносящее открытия. При этом, несмотря на все усилия, научное сообщество очень плохо понимает природу этих состояний, которые с очевидностью не могут быть описаны в рамках тех же моделей, что и обычные мезоны или барионы.

Из сказанного выше можно заключить, что актуальность темы исследования, выбранной Поповым А.В. для докторской диссертации, не может вызывать никаких сомнений.

Не вызывает сомнений и научная значимость полученных Поповым А.В. результатов. Так, им проведён поиск суперсимметричных партнёров калибровочных бозонов и бозонов Хиггса в рамках модели минимальной суперсимметрии в конечном состоянии с тремя лептонами и большой недостающей энергией; поиск RS-гравитонов, распадающихся на пару фотонов или электронов; исследованы события с двумя фотонами с большим поперечным импульсом и большой недостающей энергией с целью выявления с последующей интерпретацией результатов в рамках модели суперсимметрии GMSB и модели универсальных дополнительных измерений UED. Полученные в этих исследованиях верхние пределы являлись рекордными на момент соответствующих публикаций.

Кроме того, Поповым А.В. впервые измерены сечения парного рождения J/ψ отдельно для механизмов SPS и DPS. Поповым А.В. обнаружено уменьшение эффективного сечения двухпартонных взаимодействий в глюон-глюонных взаимодействиях по сравнению с кварк-кварковыми и кварк-глюонными взаимодействиями в начальном состоянии.

Также диссертантом впервые получено свидетельство рождения экзотического состояния $Z_c^\pm(3900)$ в полуинклюзивных распадах прелестных адронов с J/ψ и π^\mp в конечном состоянии и впервые произведён поиск процесса прямого рождения кваркония $\psi(4260)$ с последующим распадом на $Z_c^\pm(3900)$ и π^\mp .

Помимо участия в анализе физических данных автором разработана методика мониторинга передней мюонной системы и системы измерения светимости эксперимента D0 на основе измерения мюонных выходов, которая применялась в 2004 – 2011 годах.

Необходимо отметить, что в работе имеется небольшое количество недостатков. Так, по всей видимости, систематическая ошибка в результатах по раздельному измерению сечений парного рождения J/ψ 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/ψ в механизме SPS. Кроме того, следует отметить, что дифференциальный аналог формулы (3.2) 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.

Очевидно, что перечисленные недостатки абсолютно не влияют на научную значимость обсуждаемого исследования.

Результаты диссертации опубликованы в реферируемых журналах и доложены на конференциях. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Определяющий вклад автора в представленное исследование подтверждён экспериментом D0. Полученные в диссертации результаты представляют значительный интерес для современной физики высоких энергий.

Таким образом, диссертационная работа Попова А.В. отвечает всем требованиям предъявляемым ВАК России к докторским диссертациям. Её результаты представляют значительный интерес для современной физики высоких энергий и востребованы в теоретических и экспериментальных исследованиях. Считаю, что соискатель, Попов Алексей Валерьевич, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – «физика высоких энергий».

Тюрин Н.Е.: Спасибо. Алексей Валерьевич, Вам слово для ответа на замечания.

Попов А.В.: Спасибо. По поводу первого замечания я могу сказать, что для моделирования однопартонного рассеяния использовалось Монте-Карло, которое, разумеется, зависит от моделей, используемых для генерации таких событий. Тоже можно сказать и про моделирование двухпартонных взаимодействий. Поэтому я не буду спорить с оппонентом относительно величины систематической ошибки. Однако могу заметить, что для моделирования DPS использовался также набор данных, в которых парное рождение J/ψ «составлялось» из двух независимых событий одиночного рождения J/ψ (обозначенный в тексте диссертации как «Datalike DP») и этот набор был модельно-независим, поскольку содержал в себе реальные данные. При этом основной вклад в систематическую ошибку для фракций SPS/DPS вносила именно разница в результатах между наборами для моделирования DPS (по сути, разница «данные/МС»), что уменьшает модельную зависимость систематической ошибки, хотя, конечно, не устраняет её полностью.

Что касается замечаний по тексту диссертации, то я их, безусловно, принимаю.

Тюрин Н.Е.: Спасибо, Алексей Валерьевич. Вторым оппонентом является Михаил Васильевич Завертяев из ФИАН. Пожалуйста, Вам слово.

Завертяев М.В.:

Диссертационная работа Алексея Валерьевича Попова основана на результатах исследований, проведенных в рамках эксперимента D0, проведенного на ускорителе Тэватрон Национальной лаборатории имени Ферми, Батавия, США. Предметом исследований являлись поиск признаков физических процессов, указывающих на возможность выхода за рамки Стандартной модели, а именно поиск суперсимметрии и дополнительных измерений. Также проведено исследование многопартонных взаимодействий в адрон-адронных взаимодействиях, изучение много-кварковых состояний. Оценка сечений исследуемых вышеупомянутых процессов базируется на разработанной методике контроля стабильности работы мюонной системы, светимости эксперимента D0.

Актуальность проведенных исследований, помимо их, несомненно, чисто академического интереса, определяется накопленным опытом практической работы с установкой большого масштаба, который сыграл положительную роль при создании установок следующего поколения на ускорителе LHC CERN.

Говоря о научной новизне результатов, представленных в диссертационной работе, необходимо отметить следующее:

- разработана методика измерения одномюонных выходов и долговременного мониторингования стабильности работы передней мюонной системы, системы измерения светимости эксперимента при различных значениях мгновенной светимости;
- выполнены поиск и оценка масс, верхних пределов на сечение процессов с участием суперсимметричных частиц в протон-антипротонных взаимодействиях;
- наложены ограничения на массу и на верхний предел на сечение рождения RS-гравитона в протон-антипротонных взаимодействиях;
- поставлен верхний предел на эффективный масштаб нарушения суперсимметрии и массу легчайшего нейтралино для модели GMSB SUSY, на обратный радиус компактификации для модели универсальных дополнительных измерений. Значения упомянутых выше величин были лучшими на момент опубликования соответствующих работ;
- впервые на ускорителе Тэватрон измерены сечения парного рождения мезонов J/ψ в одно- и двухпартонных взаимодействиях в протон-антипротонных пучках;
- впервые измерены сечения парного рождения мезонов J/ψ и Υ в двухпартонных взаимодействиях в протон-антипротонных пучках;
- получено значение эффективного сечения двухпартонных взаимодействий для парного рождения мезонов J/ψ и Υ , для определения которого измерены все индивидуальные сечения;
- впервые получено свидетельство рождения состояния $Z_c^\pm(3900)$ в распадах b-адронов, поставлен верхний предел на вероятность прямого рождения состояния $\psi(4260)$ с последующим распадом на $Z_c^\pm(3900)$ в протон-антипротонных пучках.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, рисунков и таблиц. Каждая из глав содержит краткое резюме её содержания. Основные выводы диссертации приведены в заключении. Объём диссертации 170 страниц, 71 рисунок, 16 таблиц и 101 наименование цитируемой литературы. Содержание диссертации полно и точно отражено в автореферате.

Практическая значимость данной диссертационной работы заключается в том, что:

- опыт разработки методик мониторингования мюонной системы и светимости будет востребован при улучшении характеристик детекторов, как существующих, так и вновь проектируемых экспериментов;
- результаты исследования одиночного и парного рождения мезонов J/ψ и Υ остаются уникальными в настоящее время и определяют направление исследований этого процесса.

Достоверность полученных результатов обусловлена тщательностью всей проведённой работы и подтверждается результатами успешно проведенных экспериментов на ускорителе LHC ЦЕРН (г. Женева).

Результаты работы докладывались на 14 российских и международных конференциях. По результатам диссертации опубликована 21 работа в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК. Личный вклад автора подтверждается внутриколлекторными препринтами, отчётами, препринтами FNAL и материалами, представляемыми на конференциях (приведены в списке цитируемой литературы), выступлениями диссертанта на коллекторных совещаниях, а также материалами трудов конференций.

Автор диссертации представил рекомендательные письма от международной коллектории D0, в которой были получены результаты, подписал Paul D. Grannis, руководитель D0 Collaboration, FNAL. Вклад автора в получение защищаемых им результатов является определяющим.

Говоря о замечаниях к диссертационной работе необходимо отметить, что диссертация выполнена на высоком профессиональном уровне и отвечает лучшим стандартам, принятым в современных экспериментальных исследованиях в физике высоких энергий. Все замечания носят по большей части стилистический характер:

- 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 первую очередь хотелось бы получить комментарии по некоторым вопросам:

- исходя из размерности величину в левой части eq.(2.1) следовало бы называть не потенциалом, а плотностью лагранжиана. Для потенциала это GeV, для выражения в правой части это GeV^4 , для плотности лагранжиана $\text{GeV}/\text{fm}^3 = \text{GeV}^4$;
- сделано утверждение: «оператор Q должен быть антикоммутирующим спинором» (eq. 2.4). Коммутационное соотношение включает два оператора - по отношению к чему Q является антикоммутирующим?;

- сделано утверждение: «Отличная работа центральной трековой системы была необходима ...» – в каком смысле «отличная»? - осмелюсь предположить, что требуется высокая точность определения координат вторичных вершин;
- при использовании подхода – «смешивание» J/ψ из 2х различных событий, сколько событий, следующих за текущим, использовалось для создания комбинаций? Какие критерии «близости» накладывались на события?
- почему в определении величины сигнала для состояния $Z_c^\pm(3900)$ не использовался метод «смешивания» событий? Ширина пика в распределении по эффективной массе достаточно велика и результат может быть чувствительным к выбору функциональной зависимости.

Также в тексте работы встречается небольшое количество неудачных выражений и опечаток. Приведенные выше замечания никак не отражаются на представленных результатах и никоим образом не умаляют их значимости.

Подводя итог можно сказать, что диссертация Алексея Валерьевича Попова «Поиск новой физики и изучение процессов квантовой хромодинамики в эксперименте D0» представляет собой законченное научное исследование. Диссертация основана на работах, опубликованных в реферируемых высокорейтинговых журналах. Основные её результаты докладывались автором на семинарах, рабочих совещаниях и международных конференциях. Выводы диссертации обоснованы, полностью соответствуют поставленной задаче и логично вытекают из проведённой работы. Выносимые на защиту результаты получены при определяющем вкладе самого автора. Автореферат полно и ясно отражает содержание диссертации. Полученные диссертантом результаты могут использоваться в ИТЭФ, ИФВЭ, ИЯИ, НИИЯФ, ПИЯФ, ОИЯИ, ФИАН, а также других научных центрах России, Европы, Азии и США.

Диссертация Попова А.В. отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Попов А.В. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – «Физика высоких энергий».

Тюрин Н.Е.: Алексей Валерьевич, Вам слово для ответа на замечания.

Попов А.В.:

Спасибо. Во-первых, хочу сказать, что согласен с большинством стилистических замечаний уважаемого оппонента. Единственное пояснение хотелось бы сделать относительно замечания: «Символ псевдо быстроты нигде

не определяется, что для новичка приступающего к работе в области может вызвать затруднения». На самом деле, в тексте диссертации присутствует определение символа псевдобыстроты (стр. 12, первый абзац). Возможно, тут было бы уместно дать более развернутое определение псевдобыстроты (её физического смысла и связи с классической быстротой), но это уже другой вопрос.

Теперь о том, что касается вопросов уважаемого оппонента:

- *«Исходя из размерности величину в левой части eq.(2.1) следовало бы называть не потенциалом, а плотностью лагранжиана».* Оппонент совершенно прав, когда говорит о том, что выражение (2.1) на стр. 22 диссертации на самом деле является (имеет размерность) плотностью энергии. Называя его выражением для «потенциала поля Хиггса», я просто следовал общеупотребительной терминологии, в большинстве статей на эту тему данное выражение описывается как «потенциал Хиггса».
- *«Сделано утверждение: Оператор Q должен быть антикоммутирующим спинором» (eq. 2.4). Коммутационное соотношение включает два оператора - по отношению к чему Q является антикоммутирующим?»* По отношению к самому себе, т.е. выполняются антикоммутиационные соотношения $\{Q_\alpha, Q_\beta\} = \{Q_\alpha^\dagger, Q_\beta^\dagger\} = 0$, где Q_α, Q_β – генераторы преобразований суперсимметрии;
- *«Сделано утверждение: Отличная работа центральной трековой системы была необходима ... – в каком смысле «отличная»? - осмелюсь предположить, что требуется высокая точность определения координат вторичных вершин».* Соглашусь с оппонентом в том, что «отличная точность ...» является не самым удачным выражением в данном случае. Пожалуй, правильнее было бы написать «высокая точность...», однако стоит заметить, что данная фраза является вводной и описательной, что не подразумевает привязки к какой-то конкретной работе, просто отмечая высокую точность работы трекового детектора. В частности, для b-физики действительно важна высокая точность измерения положения вторичной вершины и длины распада;
- *«При использовании подхода – «смешивание» J/ψ из 2х различных событий, сколько событий, следующих за текущим, использовалось для создания комбинаций? Какие критерии «близости» накладывались на события?».* Насколько я понял вопрос, под «событиями» имеются в виду различные взаимодействия партонов при столкновении двух нуклонов (два независимых взаимодействия в случае двухпартоновых взаимодействий). В работе по изучению парного рождения J/ψ отбирались события с 4 мюонами в конечном состоянии. В дальнейшем отбирались события, в которых для двух «непересекающихся» попарных комбинаций мюонов (т. е. ни один мюон из

одной пары не мог входить во вторую пару) для каждой из пар выполнялось условие $2.85 < M(\mu\mu) < 3.35$ ГэВ;

- *«Почему в определении величины сигнала для состояния $Z_c^\pm(3900)$ не использовался метод «смешивания» событий? Ширина пика в распределении по эффективной массе достаточно велика и результат может быть чувствительным к выбору функциональной зависимости».* Комбинации $J/\psi \pi$ для построения распределения по инвариантной массе выбирались из конечного состояния $J/\psi \pi\pi$ и, соответственно, в событии имелось две таких комбинации. При этом для дальнейшей работы выбиралась только одна из них – с наибольшей массой. В этом мы следовали процедуре, применявшейся в экспериментах Belle и BESIII. Это обусловлено тем, что доля комбинаций с наименьшей массой в области масс, соответствующей $Z_c^\pm(3900)$, очень мала и это, в основном, комбинаторный фон. А неопределенности, связанные с выбором формы для параметризации фона, оценивались с использованием различных функциональных зависимостей (в данном случае – различных степеней полиномов Чебышева) и вошли в систематическую ошибку.

Тюрин Н.Е.: Третий оппонент, Капишин Михаил Николаевич из ОИЯИ отсутствует на заседании. Николай Николаевич, прошу зачитать его отзыв.

Прокопенко Н.Н. зачитывает отзыв официального оппонента Капишина М.Н.:

Диссертация посвящена актуальным направлениям в физике высоких энергий – поиску физики за пределами Стандартной модели, изучению двух-партонных взаимодействий и поиску экзотических состояний на установке D0 на протон-антипротонном коллайдере Tevatron. Необходимо отметить, что эксперименты на Tevatron сделали большой вклад в физику высоких энергий, был открыт топ-кварк, прецизионно измерены свойства W-бозона и b-кварка, определены другие параметры Стандартной модели. Одним из направлений исследований был поиск физических процессов и состояний за пределами Стандартной модели, чему посвящена первая часть диссертации. Поиск партнеров калибровочных бозонов согласно моделям суперсимметрии и поиск проявлений дополнительных размерностей на экспериментальных данных D0 являются темами, изучаемыми в диссертации. Вклад двух-партонных взаимодействий по отношению к одно-партонным взаимодействиям изучался во второй части диссертации в процессах парного образования тяжелых мезонов со скрытыми c и b кварками. Полученные экспериментальные данные были интерпретированы на основе теоретических подходов квантовой хромодинамики. Такие исследования являются актуальными, так как вклад мульти-партонных взаимодействий необходимо учитывать при интерпретации

жестких адрон-адронных взаимодействий при высоких энергиях и поиске процессов, в которых проявляется новая физика. Третья часть диссертации посвящена изучению одного из экзотических много-кварковых состояний адронов. Эта тема исследований также вызывает большой интерес физиков и является областью применения непертурбативной хромодинамики.

Для реализации исследований, представленных в диссертации, автор сделал значительный вклад в развитие методики эксперимента, а именно, в разработку мониторинга стабильности работы передней мюонной системы и системы измерения светимости эксперимента D0. Поддержание стабильности работы данных систем являлось необходимым условием для получения физических результатов в эксперименте.

В диссертации выполнен поиск партнеров калибровочных бозонов и бозонов Хиггса в рамках модели минимальной суперсимметрии (MSSM). В результате анализа экспериментальных данных была определена область исключений для супер симметричных партнеров в зависимости параметров модели. Данный результат на момент публикации превосходил результаты других экспериментов. Также был проведен поиск возможного проявления дополнительных размерностей в физических процессах образования RS-гравитонов, распадающихся на пары фотонов или электронов, поставлен верхний предел на величину сечения образования первого гравитона и в рамках модели поставлен нижний предел на его массу. Данный результат также был наиболее строгим ограничением на момент публикации.

В диссертации также проведено исследование событий с двумя фотонами, имеющими большой поперечный импульс и с большой недостающей энергией в конечном состоянии. В спектре по недостающей энергии для таких событий не наблюдалось статистически значимых отклонений от предсказаний Стандартной модели. Результат был интерпретирован в виде ограничения на значения эффективного масштаба нарушения суперсимметрии и массы легчайшего нейтралино, а также в рамках модели универсальных дополнительных измерений.

Во все результаты по поиску новой физики в эксперименте D0, представленные в диссертации, автор внес значительный вклад. Описанные в диссертации результаты давали наиболее строгие ограничения на возможные проявления новой физики и заложили основу для дальнейших поисков за пределами Стандартной модели в экспериментах на Большом Адронном Коллайдере (LHC), что подтверждает новизну и актуальность исследований, представленных в диссертации.

Вызывает большой интерес представленное в диссертации исследование двух-партонных взаимодействий в экспериментальных событиях парного образования мезонов со скрытыми s и b кварками: $J/\psi J/\psi$ и $J/\psi \Upsilon$. Автор детально описал экспериментальную методику выделения сигналов данных процессов, оценки фоновых процессов, коррекций экспериментальных распределений на акцептанс установки D0 и эффективность триггера. Не вызывает сомнения глубокое владение автором методикой анализа экспериментальных данных. В результате анализа был также определен вклад одно-партонных взаимодействий в процесс парного образования $J/\psi J/\psi$. Нужно отметить, что процессы парного образования $J/\psi \Upsilon$ были исследованы впервые и результаты измерения до сих пор являются уникальными. В таких процессах доминируют двух-партонные взаимодействия, так как одно-партонные взаимодействия подавлены законами сохранения. Измерение сечения образования состояний $J/\psi J/\psi$ и $J/\psi \Upsilon$ позволило определить эффективное сечение двух-партонных взаимодействий для данных процессов. Результаты измерения были интерпретированы в рамках эффективного поперечного размера глюон-глюонных взаимодействий, которые дают доминирующий вклад в образования пар мезонов $J/\psi J/\psi$ и $J/\psi \Upsilon$. Обнаруженное подавление эффективного сечения двух-партонных взаимодействий в процессах образования $J/\psi J/\psi$ и $J/\psi \Upsilon$ по отношению к процессам образования струй в кварк-кварковых и кварк-глюонных взаимодействиях требует теоретического объяснения. Таким образом, полученные результаты по определению вклада двух-партонных взаимодействий являются новыми и актуальными как для дальнейших исследований в экспериментах на коллайдере LHC, так и для развития теоретических подходов в рамках пертурбативной квантовой хромодинамики.

Заключительная часть диссертации посвящена поиску рождения экзотического состояния $Z_c^\pm(3900)$, которое распадается на $J/\psi \pi^\pm$, а также исследованию свойств такого экзотического много-кваркового состояния, образованного в полу-инклюзивных распадах b -адронов. В диссертации также был представлен результат измерения верхнего предела для доли событий от прямого образования состояния $\psi(4260)$ со скрытым c -кварком с дальнейшим распадом на $Z_c^\pm(3900)\pi$ и непрямого образования $\psi(4260)$ от распадов b -мезонов. Полученные результаты являлись актуальными на момент публикации. Систематическое исследование образования экзотических много-кварковых состояний в адронных взаимодействиях было реализовано в дальнейшем в эксперименте LHCb.

В диссертации приводится детальный анализ при выделении экспериментальных сигналов, подавлении и оценке вероятности фоновых

процессов, вычислении сечений и предельных вероятностей процессов, оценке систематических ошибок измерений. Несомненно, автор показал высокую квалификацию при применении методов анализа и интерпретации экспериментальных данных. Методы анализа данных и их интерпретация являются обоснованными.

К недостаткам диссертационной работы можно отнести:

1. Результаты, представленные в трех частях диссертации, а именно, 1) по поиску супер-симметричных партнеров калибровочных бозонов и проявлений дополнительных размерностей, 2) измерению вклада двух-партонных 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;

2. 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;

3. 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;

4. При сравнении результата измерения вклада двух-партонных взаимодействий в образование J/ψ J/ψ 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 1σ . Разница между экспериментом и моделью составляет величину порядка 1.6 от квадратичной суммы экспериментальных и модельных ошибок. В диссертации приводятся измеренные сечения образования J/ψ J/ψ в одно-партонных и двух-партонных взаимодействиях, умноженные на квадрат вероятности канала распада J/ψ (формулы 3.25 и 3.26). При этом результаты

измерения сравниваются с теоретическими расчетами для полного сечения образования J/ψ J/ψ (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.

Отмеченные недостатки не умаляют достоинств диссертации. Диссертация является законченным научным исследованием высокого уровня. Результаты опубликованы в престижных научных журналах, в том числе коллаборацией D0. Автор представлял результаты в докладах от имени коллаборации D0 на международных научных конференциях, что подтверждает значительный вклад автора в исследования. Полученные результаты являются актуальными для физики высоких энергий, так как они стали основой для дальнейших исследований, которые в настоящее время ведутся на коллайдере LHC в ЦЕРН, а также для развития теоретических моделей, как за пределами Стандартной модели, так и в рамках квантовой хромодинамики. Положения и выводы диссертации обоснованы с научной точки зрения.

Автореферат диссертации полностью соответствует тексту диссертации. Диссертация Попова А.В. безусловно удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – «Физика высоких энергий», а ее автор заслуживает присуждения ему этой степени.

Тюрин Н.Е.: Алексей Валерьевич, Вам слово для ответа на замечания.

Попов А.В.:

Спасибо. Постараюсь ответить по пунктам, обозначенным уважаемым оппонентом.

1. Да, я согласен с тем, что результаты, представленные в диссертации, не получены в рамках какой-то одной большой темы. Это связано со спецификой данной диссертационной работы, которая во многом отражает тематику моих работ за время участия в эксперименте D0, как бы подводит итог проделанной мной работы. Однако я считаю, что полученные результаты внесли важный вклад в науку и поэтому счел возможным объединить их в данной диссертации.
2. В этом случае мы видим отражение имеющейся на данный момент ситуации с поисками физики за пределами Стандартной модели. Поскольку достоверных экспериментальных подтверждений существования таких явлений все еще не получено, основными результатами работ в этой области являются все более строгие ограничения на параметры различных моделей, результаты

тут постоянно меняются. Отвечая оппоненту, могу только повторить, что представленные в диссертации результаты были наиболее строгими на момент их публикации, а разработанные методики внесли важный вклад в дальнейшую работу в данной области.

3. Соглашусь с оппонентом по третьему замечанию. Хотя я и прибегал к такого рода систематизации при работе над диссертацией, было бы правильным использовать её в тексте диссертации более широко.

4. Следует отметить, что для значений сечения парного рождения J/ψ в однопартонных взаимодействиях согласие между экспериментом и предсказаниями модели даже лучше, чем 1σ . Что же касается значений сечения для двухпартонных взаимодействий, то тут следует учесть, что при расчете теоретических значений не учитывался вклад от «быстрых» распадов типа $\psi(2S) \rightarrow J/\psi + X$, учет таких вкладов может заметно изменить значение теоретического сечения в сторону его увеличения. И оппонент прав в том, что в тексте диссертации допущена ошибка – для теоретических значений сечения приведены не полные сечения, а сечения помноженные на $Br(J/\psi \rightarrow \mu\mu)^2$. Все величины теоретических предсказаний для сечений были получены теоретиками именно для условий, в рамках которых проводился данный анализ.

Тюрин Н.Е.: Спасибо, Алексей Валерьевич. Теперь переходим к общей дискуссии. Есть ли желающие выступить?

Денисов С.П.: Конечно, основной вклад Алексея Валерьевича в работу Сотрудничества D0 состоял в обработке экспериментальных данных, что и отражено в представленной им диссертационной работе. Однако следует отметить, что Алексей также активно участвовал в поддержании бесперебойной работы детектора эксперимента D0, на его счету участие в около 200 сменах, а также в работе по поддержанию высокой эффективности функционирования передней мюонной системы детектора. Алексей также является одним из основных авторов многих статей, опубликованных сотрудничеством D0, и представлял результаты эксперимента D0 на многих конференциях, зачастую весьма престижных (к примеру, Moriond QCD), причем многие его выступления представляли собой обзорные доклады, что говорит о высокой степени доверия, оказываемого Алексею Валерьевичу Сотрудничеством D0. Хотелось бы также отметить, что это Сотрудничество продолжает работать и публиковать результаты, хотя, конечно, уже не в том объеме, что раньше.

Тюрин Н.Е.: Спасибо, Сергей Петрович. Алексей Валерьевич, Вам предоставляется заключительное слово.

Попов А.В.: Спасибо. В заключительном слове мне хотелось бы отметить, что результаты, представленные в данной диссертационной работе, были получены в составе больших коллективов, прежде всего коллаборации D0 и, особенно,

группы НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ в составе этой коллаборации. Я выражаю большую благодарность участникам этих коллективов, особенно руководителю группы НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ в коллаборации D0, действительному члену РАН Сергею Петровичу Денисову, а также одному из руководителей коллаборации D0 Дмитрию Сергеевичу Денисову. Также хотелось бы выразить большую благодарность Д. Бандурину, П. Свойскому и А.Г. Друцкому за их большой вклад в совместные исследования. Я благодарен руководству НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, коллаборации D0 и Национальной лаборатории имени Ферми за предоставленную возможность заниматься этими исследованиями.

Тюрин Н.Е.: Спасибо, Алексей Валерьевич. Теперь давайте выберем счетную комиссию. В неё предлагается делегировать Сергея Сергеевича Козуба, Александра Витальевича Разумова и Василия Александровича Качанова. Есть другие предложения? Нет. Предлагаю утвердить состав избранной комиссии открытым голосованием. Единогласно. Приступаем к процедуре тайного голосования.

Перерыв на голосование.

Тюрин Н.Е.: Уважаемые члены диссертационного совета, давайте заслушаем итоги голосования. Слово предоставляется председателю счетной комиссии.

Разумов А.В.: Протокол заседания счетной комиссии №1 от 30.06.2022, состав избранной комиссии был объявлен и утвержден ранее. Комиссия избрана для подсчета голосов при тайном голосовании по диссертации Попова Алексея Валерьевича на тему «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.

Постоянный состав диссертационного совета Д 201.004.01 утверждён в количестве 22 человек. В состав диссертационного совета дополнительно введены 0 человек. На заседании присутствовало 19 членов совета, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации – 5. Роздано бюллетеней – 19. Осталось не розданных бюллетеней – 3. Оказалось в урне бюллетеней – 19.

Результаты голосования по вопросу о присуждении учёной степени доктора физико-математических наук Попову Алексею Валерьевичу: «за» – 19, «против» – 0, «недействительных бюллетеней» – 0.

Тюрин Н.Е.: Давайте открытым голосованием утвердим протокол? Нет возражений? Нет. Единогласно. Протокол утвержден. Теперь мы должны обсудить и принять заключение диссертационного совета о значении

диссертации Попова А.В. Проект заключения был роздан, какие будут замечания? Нет замечаний?

Петров В.А.: Мое замечание или, скорее, вопрос, относится не к заключению совета, а к тексту автореферата. В тексте автореферата упомянут распад гравитона на e^+e^- , хотя правильно было бы говорить о его распаде на e^+e^- .

Попов А.В.: Разумеется, вы совершенно правы. Имелся в виду именно распад гравитона на e^+e^- .

Тюрин Н.Е.: Хорошо. Посмотрите еще раз внимательно проект заключения, есть ли еще замечания? Нет. Давайте примем это заключение за основу и проголосуем. Есть возражения? Нет. Воздержавшиеся есть? Нет. Заключение принимается единогласно.

Тюрин Н.Е.: Алексей Валерьевич, поздравляю Вас с успешной защитой и желаю Вам новых достижений!

Попов А.В.: Большое спасибо!

Заседание Диссертационного совета завершено.

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.