

УДК 539.126

Я.А. Бердников, В.А. Ребякова, Д.О. Спири

**ФОНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ СОБЫТИЙ
КОГЕРЕНТНОГО ФОТОРОЖДЕНИЯ J/Ψ -МЕЗОНОВ
В УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИХ СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРОТОНОВ**

Ya.A. Berdnikov, V.A. Rebyakova, D.O. Spirin

St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

**BACKGROUND PROCESSES WHILE MONITORING COHERENT
 J/Ψ -MESONS PHOTOPRODUCTION EVENTS
IN ULTRAPERIPHERAL PROTON-PROTON COLLISIONS**

В работе получены количественные оценки вклада двух основных фоновых процессов в величину сечения когерентного фоторождения J/ψ -мезонов в ультрапериферических столкновениях протонов при энергиях Большого адронного коллайдера.

УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ, ФОТОРОЖДЕНИЕ, J/Ψ -МЕЗОН.

The contribution of two main background effects to the cross-section value of coherent J/ψ -meson photoproduction in ultraperipheral proton-proton collisions at Large Hadron Collider has been evaluated.

ULTRAPERIPHERAL COLLISIONS, PHOTOPRODUCTION, J/Ψ -MESON.

В настоящее время экспериментальное исследование процессов фоторождения векторных мезонов на протонных и ядерных мишенях при высоких энергиях возможно только в ультрапериферических столкновениях (УПС) протонов и ядер на Большом адронном коллайдере (БАК).

Ультрапериферическими называются столкновения, происходящие на расстояниях, превышающих сумму радиусов сталкивающихся частиц, где сильные взаимодействия подавлены по сравнению с электромагнитными. Поэтому взаимодействие частиц происходит через окружающие их потоки эквивалентных фотонов.

Протон испускает эквивалентные фото-

ны когерентно, при этом длина волны фотона превышает радиус протона R_p . В соответствии с принципом неопределенности, можно оценить верхний предел поперечного импульса фотона p_T , испущенного протоном:

$$p_T \leq \hbar c / R_p \approx 330 \text{ МэВ} / c.$$

В продольном направлении, в соответствии с преобразованием Лоренца, максимально возможный импульс фотона $\hbar c / R_p$ необходимо умножить на γ_L -фактор Лоренца протона, значение которого для энергий БАК составляет порядка нескольких тысяч [1]. С учетом γ_L -фактора значения импульса эквивалентных фотонов оказываются до-

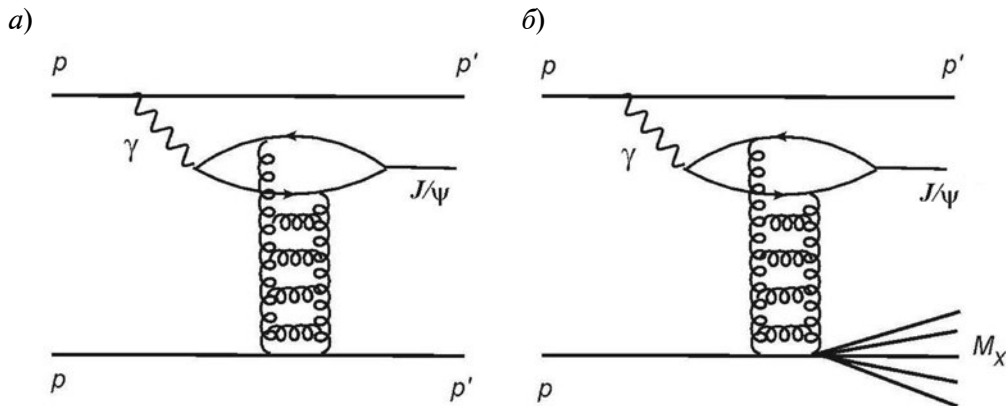


Рис. 1. Схематические диаграммы процессов фоторождения векторных мезонов (J/ψ) в ультрапериферических столкновениях (УПС) протонов: *а* – когерентное фоторождение, *б* – фоторождение при больших значениях t (сопровождается диссоциацией одного из протонов); M_X – инвариантная масса образовавшейся системы адронов

статочными для рождения векторных мезонов.

Использование метода эквивалентных фотонов [2] позволяет представить сечение когерентного фоторождения векторного мезона в УПС протонов в виде произведения потока эквивалентных фотонов, испускаемых одним из сталкивающихся протонов, и сечения когерентного фоторождения векторного мезона на втором протоне:

$$\frac{d\sigma_{p_1 p_2 \rightarrow p_1 V p_2}}{dt dy} = \frac{dN_{\gamma/p_1}(y)}{dy} \cdot \frac{d\sigma_{\gamma p_2 \rightarrow p_2 V}(y, t)}{dt} + \frac{dN_{\gamma/p_2}(-y)}{dy} \cdot \frac{d\sigma_{\gamma p_1 \rightarrow p_1 V}(-y, t)}{dt}, \quad (1)$$

где t , $(\text{ГэВ})^2$ – квадрат переданного импульса; y – быстрота образовавшегося векторного мезона V ; $[dN_{\gamma/p_1}(y)]/dy$ – поток эквивалентных фотонов, испускаемых одним из сталкивающихся протонов; $[d\sigma_{\gamma p_i \rightarrow p_i V}(y, t)]/dt$ – сечение когерентного фоторождения мезона на втором протоне.

Процесс когерентного фоторождения векторного мезона (J/ψ) в УПС протонов схематично изображен на рис. 1, *а*.

Появление двух слагаемых в выражении (1) связано с симметрией УПС на встречных пучках, поскольку фоторождение векторного мезона может произойти на каждом из сталкивающихся протонов. Правомерность факторизации сечения в виде (1) и возможность точного определения величины по-

токов эквивалентных фотонов [3] делают исследование УПС эффективным способом изучения процессов фоторождения.

Процесс фоторождения J/ψ -мезона (тяжелого кваркония) относится к жестким процессам, которые являются одним из основных источников информации о структуре частиц и динамике их взаимодействий на малых расстояниях. Жесткий масштаб обусловлен большой массой J/ψ -мезона ($\sim 3 \text{ ГэВ}/c^2$), достаточной для применения теории возмущений квантовой хромодинамики (КХД) при расчете сечений эксклюзивного фоторождения тяжелых кваркониев при высоких энергиях. В лидирующем порядке теории возмущений КХД сечение фоторождения J/ψ -мезона на протоне пропорционально квадрату глюонной плотности [4]. Таким образом, анализ сечений фоторождения J/ψ позволяет исследовать непосредственно поведение глюонной плотности в протоне [5]. Распределение глюонных плотностей в нуклонах и ядрах является одним из ключевых параметров в формировании экстремальных состояний материи при высоких температурах.

Механизмы и вероятности процессов фоторождения векторных мезонов в УПС протонов и ядер были подробно исследованы в работах [5, 6]. Рассчитанная в работе [5] величина сечения когерентного фоторождения J/ψ -мезона в УПС протонов при энергии $\sqrt{S} = 7 \text{ ТэВ}$ с быстротой в диа-

пазоне $-4 < y < -2,5$ составляет примерно 7 нб.

При измерении сечений когерентного фоторождения J/ψ в условиях конкретных экспериментов на ускорителях частиц, необходимо учитывать источники фоновых процессов. Последние подразумевают все возможные способы рождения J/ψ , исключая когерентное фоторождение J/ψ -мезона.

В настоящей работе проанализированы два наиболее значимых фоновых процесса [1], вклад которых в величину сечения фоторождения J/ψ -мезона должен быть надежно оценен и учтен при обработке экспериментальных данных.

В качестве первого значимого фонового процесса в настоящей работе рассмотрено рождение J/ψ -мезонов в сильных взаимодействиях протонов.

Роль этого фонового процесса рассмотрена на примере эксперимента ALICE (A Large Ion Collider Experiment) на БАК. Эксперимент ALICE позволяет регистрировать J/ψ -мезоны по димьюонному каналу распада с помощью мюонного спектрометра, перекрывающего диапазон псевдобыстрот

$$-4 < \eta < -2,5,$$

где $\eta = -\ln[\text{tg}(\theta / 2)]$ (θ – полярный угол) [7, 8].

Величина инклюзивного сечения рождения J/ψ -мезона в сильных взаимодействиях протонов в диапазоне быстрот мюонного спектрометра, измеренная в эксперименте ALICE, составляет приблизительно 6,31 мкб [9], что значительно больше величины сечения когерентного фоторождения J/ψ . Для исключения фоновых событий рождения J/ψ -мезона в сильных взаимодействиях протонов необходимо на этапе анализа экспериментальных данных наложить дополнительные ограничения на характеристики частиц, рожденных в столкновениях протонов.

Такие ограничения в настоящей работе были получены следующим путем. С помощью генератора событий PYTHIA [10], позволяющего на основании метода Монте-Карло моделировать процессы столкновения элементарных частиц при

высоких энергиях, были смоделированы события рождения J/ψ -мезонов в сильных взаимодействиях протонов. В результате моделирования были получены множественности частиц в каждом столкновении, углы вылета и энергии частиц.

Процессы когерентного фоторождения векторных мезонов характеризуются небольшими значениями переданного импульса $|t| \ll 1$ (ГэВ)²/c², и диссоциации взаимодействующих протонов не происходит. Поэтому в когерентном фоторождении J/ψ образуется только один мезон и нет других частиц. Для учета подобной специфики когерентных процессов фоторождения необходимо отбирать события с рождением J/ψ -мезона только в том случае, когда сигналы заряженных и нейтральных частиц отсутствуют в детекторной системе, то есть рассматривать в качестве фоновых только случаи рождения одиночных J/ψ в сильных взаимодействиях. Это дает возможность получить оценку величины сечения рождения фоновых J/ψ в сильных взаимодействиях на уровне около 10 нб, что уже сопоставимо с величиной исследуемого сечения когерентного фоторождения J/ψ -мезонов.

Величина вклада фоновых J/ψ , рожденных в сильных взаимодействиях, в когерентное фоторождение J/ψ -мезонов может быть дополнительно уменьшена, если принять во внимание описанное далее обстоятельство. На рис. 2 представлено полученное в данной работе импульсное распределе-

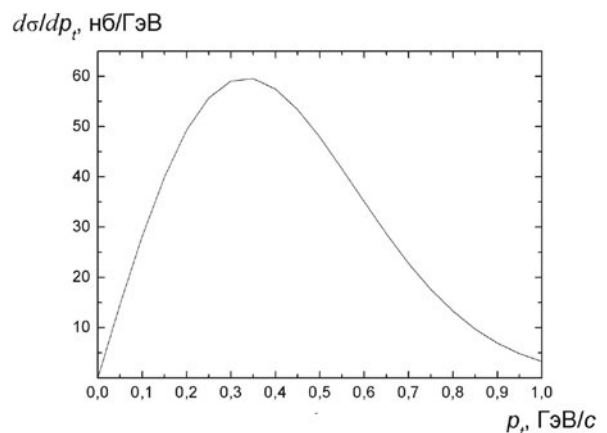


Рис. 2. Распределение по поперечному импульсу J/ψ -мезонов, рожденных в УПС протонов (энергия $\sqrt{S} = 7$ ТэВ)

ние J/ψ , рожденных когерентно в ультрапериферических столкновениях протонов. Из рисунка видно, что большая часть когерентно рожденных J/ψ -мезонов обладает поперечным импульсом $p_t < 1$ ГэВ/с. Поэтому если наложить это ограничение на величину поперечного импульса J/ψ -мезонов, рожденных в сильных взаимодействиях, то это приведет к дополнительному снижению величины сечения фонового процесса.

Таким образом, рассчитанный вклад фонового процесса рождения J/ψ -мезонов в сильных взаимодействиях протонов в величину сечения когерентно рожденного J/ψ -мезона в УПС протонов, при учете всех вышеперечисленных критериев отбора событий, составляет порядка 10 % от 7 нб.

Вторым фоновым процессом, требующим учета, является фоторождение J/ψ -мезонов в УПС, сопровождающееся дифракционной диссоциацией мишени.

Если переданный мишени импульс $|t|^{1/2}$ велик, то фоторождение векторного мезона в ультрапериферических столкновениях протонов может сопровождаться дифракционной диссоциацией мишени с образованием струи адронов. Такой дифракционный процесс фоторождения векторного мезона схематично изображен на рис. 1, б. При этом в конечном состоянии ультрапериферического взаимодействия будут наблюдаться: исходный протон, испустивший поток эквивалентных фотонов; рожденный векторный мезон; струя адронов, образованная при диссоциации протона (M_x – инвариантная масса образовавшейся системы адронов).

Хотя дифракционные процессы фоторождения векторных мезонов сами по себе несут важную информацию о динамике сильных взаимодействий, а при высоких энергиях и при наличии достаточной статистики их можно использовать для получения сведений о глюонных распределениях внутри нуклона в области малых значений x (доля импульса протона, переносимая глюоном) [5], все же в нашем случае они являются фоновыми и дают дополнительный вклад в исследуемое сечение когерентного фоторождения векторного мезона.

Если образовавшаяся при диссоциации протона струя адронов M_x обладает значениями псевдобыстрот из диапазонов $5,1 < \eta < 8,6$ и $-8,6 < \eta < -3,7$, то в условиях эксперимента ALICE заряженные вторичные частицы M_x зарегистрированы не будут. Другими словами, это событие будет зарегистрировано так же, как событие когерентного фоторождения J/ψ -мезона, и будет являться источником погрешности. Для учета этого эффекта в настоящей работе были рассчитаны величины сечений рождения J/ψ -мезонов в УПС протонов, сопровождающиеся диссоциацией протона, при условии, что рожденная струя адронов не будет зарегистрирована в детекторах ALICE.

Процессы фоторождения J/ψ , сопровождающиеся диссоциацией протона, характеризуются большими, достаточными для диссоциации протона, значениями переданного импульса, в отличие от процессов когерентного фоторождения J/ψ , когда t имеет значение, близкое к нулю. В рамках подхода, описанного в работе [5], сечения фоторождения J/ψ -мезонов, сопровождающегося диссоциацией протона, не могут быть

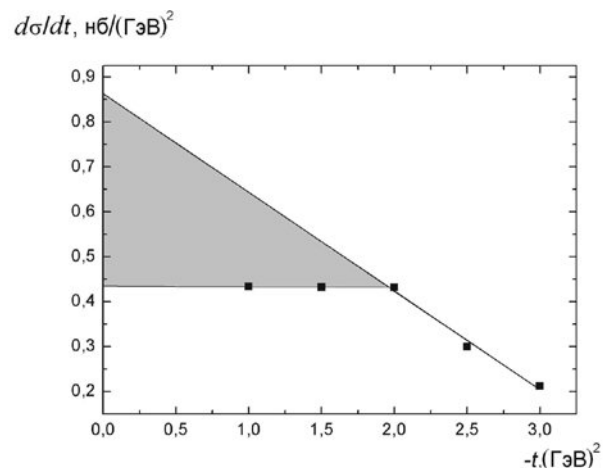


Рис. 3. Зависимость сечения фоторождения J/ψ -мезонов в УПС протонов, сопровождающегося диссоциацией протона (см. рис. 1, б), от квадрата переданного импульса (для случая, когда J/ψ обладает псевдобыстротой диапазона $-4 < \eta < -2,5$). Точками отмечены рассчитанные величины сечения при энергии $\sqrt{S} = 7$ ТэВ в рамках подхода из работы [5]; затемненная область – возможные значения сечения при $|t| < 2$ ГэВ



надежно рассчитаны для значений квадрата переданного импульса $|t| < 2$ (ГэВ)². Однако для оценки вклада этого фонового процесса в величину сечения когерентного фоторождения J/ψ необходимо знать величину сечения фонового процесса именно при значениях t , близких к нулевым.

На рис. 3 точками отмечены значения сечений фоторождения J/ψ -мезонов, вычисленные для разных значений t в рамках подхода, принятого в работе [5]. Видно, что в области $|t| < 2$ (ГэВ)² сечение фоторождения практически не зависит от величины t , а с ростом $|t|$ наблюдается спад зависимости сечения от квадрата переданного импульса. Для оценки данного значения сечения была проведена экстраполяция зависимости, приведенной на рис. 3, в область t , примерно равную нулю. Затемненная область на рис. 3 ограничивает диапазон возможных значений сечения фоторождения J/ψ при $|t| < 2$ (ГэВ)². Оцененная таким образом возможная величина сечения дифракционного рождения J/ψ -мезона при значениях t , близких к нулю, лежит в диапазоне примерно от 0,45 до 0,90 нб. Это дает вклад около 5 – 15 % в величину сечения когерентного фоторождения J/ψ -мезона в УПС протонов [5].

Проведенные в данной работе исследования показали, что в условиях эксперимента ALICE вклад фонового процесса дифракционного фоторождения векторного мезона, сопровождающегося дифракционной диссоциацией мишени, в величину сечения когерентного фоторождения векторного мезона составляет около 5 – 15 %. Вклад фонового процесса рождения J/ψ -мезона в сильных взаимодействиях протонов составляет порядка 10 %. Таким образом, суммарный вклад рассмотренных фоновых процессов может достигать 25 %. Это необходимо учитывать на этапе обработки экспериментальных данных для правильной оценки величины сечения когерентного фоторождения J/ψ -мезона в УПС протонов.

Авторы выражают глубокую благодарность М.Б. Жалову, ведущему научному сотруднику отделения физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова, за обсуждение рассмотренных в статье вопросов.

Работа поддержана в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baltz A.J., Baur G., d'Enterria D., Frankfurt L., Gelis F., Guzey V., Hencken K., Kharlov Yu., Klasen M., Klein S. R., Nikulin V., Nystrand J., Pshenichnov I.A., Sadovsky S., Scapparone E., Seger J., Strikman M., Tverskoy M., Vogt R., White S.N., Wiedemann U.A., Yepes P., Zhalov M. The physics of ultraperipheral collisions at the LHC // *Phys. Rep.* 2008. Vol. 458. P. 1–171.
2. Williams E.J. Nature of the high energy particle of penetrating radiation and status of ionization and radiation formulae // *Phys. Rev.* 1934. Vol. 45. P. 729–730.
3. Drees M., Zeppenfeld D. Production of supersymmetric particles in elastic ep collisions // *Phys. Rev. D.* 1989. Vol. 39. № 9. P. 252–253.
4. Ryskin M.G. Diffractive J/ψ electroproduction in LLA QCD // *Z. Phys. C.* 1993. Vol. 57. P. 89–92.
5. Rebyakova V., Strikman M., Zhalov M. LHC potential for study of the small x gluon physics in ultraperipheral collisions of 3.5 TeV protons // *Phys. Rev. D.* 2010. Vol. 81. № 3. P. 125–130.
6. Rebyakova V., Strikman M., Zhalov M. Coherent ρ and J/ψ photoproduction in ultraperipheral processes with electromagnetic dissociation of heavy ions at RHIC and LHC // *Phys. Lett. B.* 2012. Vol. 710. № 4–5. P. 647–653.
7. ALICE Collaboration. ALICE: Physics Performance Report, Vol. I // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2004. Vol. 30. P. 1517–1763.
8. ALICE Collaboration. ALICE: Physics Performance Report, Vol. II // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2006. Vol. 32. P. 1295–2040.
9. ALICE Collaboration. Rapidity and transverse momentum dependence of inclusive J/ψ production in pp collisions at $\sqrt{S} = 7$ TeV // Режим доступа: arXiv: 1105.0380v2 [hep-ex]. 2011.
10. Sjostrand T., Lonnblad L., Mrenna S., Skands P. PYTHIA 6.3 Physics and Manual // Режим доступа: arXiv: hep-ph/0308153. 2003.
11. Bartels J., Forshaw J.R., Lotter H., Wusthoff M. Diffractive production of vector mesons at large t // *Phys. Lett. B.* 1996. Vol. 375. P. 301–309.

REFERENCES

1. Baltz A.J., Baur G., d'Enterria D., Frankfurt L., Gelis F., Guzey V., Hencken K., Kharlov Yu., Klasen M., Klein S.R., Nikulin V., Nystrand J., Pshenichnov I.A., Sadovsky S., Scapparone E., Seger J., Strikman M., Tverskoy M., Vogt R., White S.N., Wiedemann U.A., Yepes P., Zhalov M. The physics of ultraperipheral collisions at the LHC. *Phys. Rep.*, 2008, Vol. 458, pp. 1–171.
2. Williams E.J. Nature of the high energy particle of penetrating radiation and status of ionization and radiation formulae. *Phys. Rev.*, 1934, Vol. 45, pp. 729–730.
3. Drees M., Zeppenfeld D. Production of supersymmetric particles in elastic ep collisions. *Phys. Rev. D*, 1989, Vol. 39, No. 9, pp. 252–253.
4. Ryskin M.G. Diffractive J/ψ electroproduction in LLA QCD. *Z. Phys. C*, 1993, Vol. 57, pp. 89–92.
5. Rebyakova V., Strikman M., Zhalov M. LHC potential for study of the small x gluon physics in ultraperipheral collisions of 3.5 TeV protons. *Phys. Rev. D*, 2010, Vol. 81, No. 3, pp. 125–130.
6. Rebyakova V., Strikman M., Zhalov M. Coherent ρ and J/ψ photoproduction in ultraperipheral processes with electromagnetic dissociation of heavy ions at RHIC and LHC. *Phys. Lett. B*, 2012, Vol. 710, No. 4–5, pp. 647–653.
7. ALICE Collaboration. ALICE: Physics Performance Report, Vol. I. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, 2004, Vol. 30, pp. 1517–1763.
8. ALICE Collaboration. ALICE: Physics Performance Report, Vol. II. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, 2006, Vol. 32, pp. 1295–2040.
9. ALICE Collaboration. Rapidity and transverse momentum dependence of inclusive J/ψ production in pp collisions at $\sqrt{S} = 7$ TeV. Available at: arXiv: 1105.0380v2 [hep-ex]. 2011.
10. Sjostrand T., Lonnblad L., Mrenna S., Skands P. PYTHIA 6.3 Physics and Manual. Available at: arXiv: hep-ph/0308153. 2003.
11. Bartels J., Forshaw J.R., Lotter H., Wusthoff M. Diffractive production of vector mesons at large t . *Phys. Lett. B*, 1996, Vol. 375, pp. 301–309.

БЕРДНИКОВ Ярослав Александрович — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
berdnikov@spbstu.ru

РЕБЯКОВА Виктория Александровна — кандидат физико-математических наук, инженер кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
victoria.rebyakova@gmail.com

СПИРИН Денис Олегович — ассистент кафедры экспериментальной ядерной физики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
dspirin@phmf.spbstu.ru