

P10-2017-21

О. Ю. Дереновская<sup>1</sup>, В. В. Иванов<sup>1,2</sup>, Д. С. Огородникова<sup>2</sup>

**КРИТЕРИИ ОТБОРА РАСПАДОВ  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$   
В СОУДАРЕНИЯХ Au + Au ПРИ ЭНЕРГИИ  
10 ГэВ/НУКЛОН В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CBM**

---

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва

Дереновская О. Ю., Иванов В. В., Огородникова Д. С.

P10-2017-21

Критерии отбора распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  в соударениях Au + Au при энергии 10 ГэВ/нуклон в эксперименте CBM

В настоящее время на строящемся в GSI (Дармштадт, Германия) ускорительном комплексе FAIR большая международная коллаборация с участием ОИЯИ ведет подготовку эксперимента CBM. Измерения распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  относятся к ключевой задаче эксперимента CBM, при этом регистрацию таких событий планируется проводить в режиме реального времени. В настоящей работе предлагаются критерии, обеспечивающие эффективный отбор сигнальных событий на примере соударений Au + Au при энергии 10 ГэВ/нуклон. Указанная энергия соответствует первой стадии эксперимента CBM.

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2017

Derenovskaya O. Yu., Ivanov V. V., Ogorodnikova D. S.

P10-2017-21

$J/\psi \rightarrow e^+e^-$  Decays Selection Criteria for Au + Au Collisions at 10A GeV in the CBM Experiment

Currently the CBM experiment is being developed in GSI (Darmstadt, Germany) at the FAIR accelerator complex of an international collaboration with JINR. Measurements of the  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  decays are the key objectives of the CBM experiment, the registration of such decays is planned to be held in real-time experiment. The current paper presents criteria that provide an effective selection of signal events for Au + Au collisions at 10A GeV. This energy corresponds to the first stage of the CBM experiment.

The investigation has been performed at the Laboratory of Information Technologies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2017

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Центре им. Гельмгольца по исследованию тяжелых ионов (Дармштадт, Германия) ведется строительство ускорительного комплекса антипротонов и тяжелых ионов FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research). На этом комплексе планируется проведение экспериментов на установке СВМ (Compressed Baryonic Matter) [1], создаваемой большой международной коллаборацией с активным участием ученых из ОИЯИ [2]. Физическая программа СВМ нацелена на изучение свойств барионной материи в области относительно низких энергий и высоких барионных плотностей, отвечающих ядро-ядерным соударениям при энергии пучка 2–45 ГэВ/нуклон [1, 3]. Измерения с высокой точностью выходов, функции возбуждения, прямых и эллиптических потоков  $J/\psi$ -мезонов, выполненные в указанной области, должны предоставить важную экспериментальную информацию, необходимую для понимания происходящих процессов.

Схема экспериментальной установки СВМ, предназначенной для изучения диэлектронных распадов  $J/\psi$ , приведена на рис. 1.

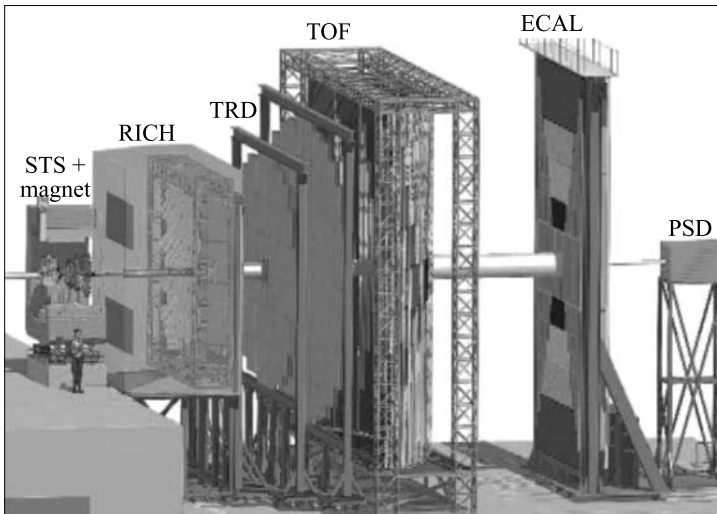


Рис. 1. Схема экспериментальной установки СВМ

Непосредственно за мишенью между полюсами сверхпроводящего дипольного магнита располагается система координатных трековых детекторов STS (Silicon Tracking System), состоящая из восьми двухсторонних кремниевых микростриповых детекторов, и вершинный детектор MVD (Micro-Vertex Detector). Детекторы STS и MVD предназначены для реконструкции траекторий и определения импульсов заряженных частиц, а также для восстановления первичных и вторичных вершин. Система идентификации электронов/позитронов включает детекторы черенковского (RICH, Ring Imaging CHerenkov) и переходного (TRD, Transition Radiation Detector) излучений\*. TRD также используется для реконструкции траекторий регистрируемых детектором заряженных частиц. Детектор измерения времени пролета частиц TOF (Time-Of-Flight) предназначен для идентификации адронов, а электромагнитный калориметр ECAL (Electromagnetic CALorimeter) — для идентификации фотонов и электронов. Калориметр PSD (Projectile Spectator Detector) используется для определения центральности соударений и плоскости реакций.

Для регистрации очень редких процессов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  будут использоваться интенсивные потоки частиц падающего пучка (до  $10^7$  ядро-ядерных соударений в секунду). Учитывая высокую множественность вторичных частиц (от 100 до 1000 частиц в результате одного соударения), идентификацию и реконструкцию исследуемых распадов нужно будет проводить в условиях доминирующего адронного (в основном пионного) фона. При этом регистрацию таких событий планируется проводить в режиме реального времени.

В настоящей работе предлагаются критерии, обеспечивающие эффективный отбор сигнальных событий на примере соударений Au + Au при энергии 10 ГэВ/нуклон. Указанная энергия соответствует первой стадии эксперимента CBM [4].

В связи с вышеизложенным актуальной и важной задачей для коллаборации CBM является разработка эффективных математических методов, критериев и алгоритмов, позволяющих надежно и с высокой скоростью осуществлять набор приемлемой статистики распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ .

## 1. МЕТОДИКА РЕКОНСТРУКЦИИ $J/\psi$ -МЕЗОНОВ

С целью оценки возможности регистрации распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  были сгенерированы наборы вторичных частиц, рождающихся в Au + Au-соударениях при энергии пучка 10 ГэВ/нуклон. При этом набор фоновых частиц,

---

\*Так как в нашем случае задачи идентификации электронов и позитронов идентичны, далее будем рассматривать только идентификацию электронов.

отвечающих Au + Au-соударению, моделировался с использованием пакета UrQMD [5], а распад  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  (сигнальные события) генерировался с помощью пакета PLUTO [6]. Подготовленные таким образом наборы частиц транспортировались через детектор CBM с использованием GEANT3 [7]. Модель установки CBM, построенная в программной среде CBMROOT [8], помещалась в декартову систему координат с началом в месте расположения мишени, ось  $OZ$  совпадала с направлением падающего пучка, а ось  $OY$  была направлена вертикально вверх.

В результате проведенного анализа поведения сигнальных и фоновых событий выработаны следующие критерии выделения и реконструкции распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ :

- поперечный импульс регистрируемых заряженных частиц больше 1 ГэВ/с;
- количество отсчетов в детекторе TRD больше 2;
- частицы должны быть идентифицированы как электроны с помощью детекторов TRD и TOF;
- отклонение траектории частицы в TRD в заданном коридоре  $|d_{t_x}| < 0,035$ ;
- наличие кольца черенковского излучения в детекторе RICH.

Более подробное обсуждение указанных критериев приводится ниже. При этом следует заметить, что каждый последующий критерий применяется к выборке частиц, оставшейся после применения предыдущего критерия.

На последнем этапе проводится построение спектра инвариантной массы с помощью пакета KFParticleFinder [9].

## 2. ВЕЛИЧИНА ПОПЕРЕЧНОГО ИМПУЛЬСА

На первом шаге проводится реконструкция траекторий и импульсов заряженных частиц с помощью детектора STS. В основу алгоритма распознавания треков положена концепция клеточного автомата (КА) [10]. Процедура определения характеристик найденных траекторий включает аппроксимацию измерений с целью уточнения их пространственных параметров и восстановления импульсов заряженных частиц. Она выполняется с помощью итерационного процесса, реализованного на основе фильтра Калмана [11].

На рис. 2 представлено распределение значений поперечного импульса для фоновых (пунктирная линия) и сигнальных (сплошная линия) частиц. Затемненная область отвечает отобранными частицам, т.е. таким, у которых поперечный импульс больше 1 ГэВ/с.

Видно, что подавляющее большинство частиц, отвечающих сигнальным событиям, имеет большой поперечный импульс. Это согласуется с тем фактом, что кинематический критерий по поперечному импульсу работает осо-

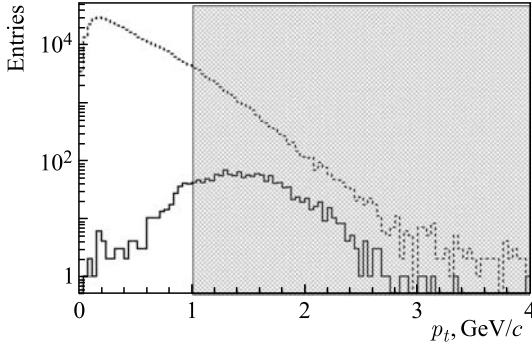


Рис. 2. Распределение значений поперечного импульса для фоновых (пунктирная линия) и сигнальных (сплошная линия) событий; затемненная область отвечает отобраным случаям

бенно хорошо тогда, когда сумма масс дочерних частиц намного меньше массы родительской частицы. Это как раз наш случай, так как  $2m_e \ll m_{J/\psi}$ ; здесь  $m_e$  — масса электрона, а  $m_{J/\psi}$  — масса  $J/\psi$ -мезона. Если выбрать ограничение на поперечный импульс больше 1 ГэВ/с, то можно подавить значительную часть фоновых событий (рис. 2, незакрашенная область) [12].

### 3. КОЛИЧЕСТВО ОТСЧЕТОВ В ДЕТЕКТОРЕ TRD

Одновременно с реконструкцией траекторий заряженных частиц с помощью детектора STS планируется проводить обработку данных в детекторе переходного излучения TRD.

Основное назначение детектора TRD — это исключение из выборки частиц примеси пионов. Процедура удаления пионов включает в себя два этапа: 1) поиск и реконструкцию траекторий частиц, зарегистрированных координатными детекторами TRD; 2) идентификацию частиц с учетом потерь энергии только в тех модулях TRD, которые дали вклад в реконструированные треки.

Детектор TRD имеет четыре плоских детектирующих станции, каждая из которых регистрирует место пересечения частицей плоскости детектора (хит) и потери энергии. Для поиска и реконструкции треков используется метод слежения по треку и фильтр Калмана [13]. С каждым из реконструированных треков ассоциируется набор потерь энергии, оставленной заряженной частицей в станциях TRD. Используя указанный набор потерь энергии, необходимо решить задачу идентификации частицы, состоящую в определении того, к какому из распределений (электронов или пионов) эти потери относятся.

На рис. 3 представлено распределение числа хитов в TRD-треках.

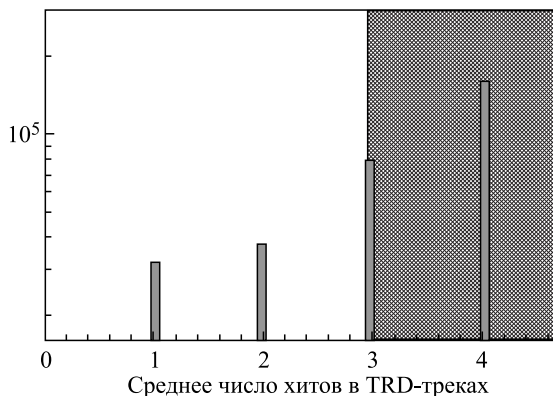


Рис. 3. Распределение числа хитов в TRD-треках; затемненная область — события, которые проходят дальнейший отбор

Для того чтобы провести адекватную идентификацию частиц, требуются знания о потерях энергии как минимум в трех точках. Поэтому дальнейший отбор проходят те частицы, которые оставили отсчет минимум в трех станциях детектора TRD (затемненная область на рис. 3)

#### 4. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА TRD

На рис. 4 приведены распределения полных потерь энергии пионов и электронов в первом модуле детектора TRD. Из рисунка видно, что эти распределения сильно перекрываются. Поэтому сложно отличить электроны от пионов, используя измерения с одного модуля. Для этого потери энергии регистрируемой частицы измеряются многослойным детектором TRD, а при обработке набора потерь энергии применяют методы многомерного анализа данных, учитывающие одновременные измерения несколькими модулями.

В работах [14, 15] была исследована возможность идентификации электронов и пионов с помощью искусственной нейронной сети — многослойного перцептрона (МСП). В настоящее время в эксперименте CBM для идентификации частиц с помощью детектора TRD используется трехслойный перцептрон, реализованный в среде CBMROOT [16].

В этой сети количество нейронов во входном слое задается равным числу хитов в реконструированном треке (т.е. принимает значения 3–4 с учетом ограничения, описанного в разд. 3), число нейронов в скрытом слое равнялось 12. Для определения типа частицы использовался один выходной нейрон, который принимал значения в окрестности  $-1$  для пионных событий и  $1$  — для электронных событий. На рис. 5 приведены распределения значений

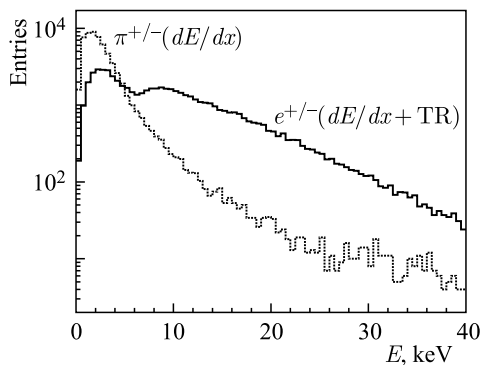


Рис. 4. Распределения потерь энергии пионов (пунктирная линия) и электронов (сплошная линия) в одном модуле TRD

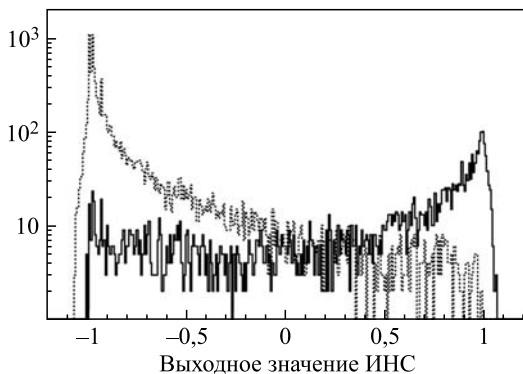


Рис. 5. Распределения значений сигнала на выходе нейронной сети для пионов (пунктирная линия) и электронов (сплошная линия)

сигнала на выходе нейронной сети для пионов (пунктирная линия) и электронов (сплошная линия), из которых видно, что МСП позволяет надежно идентифицировать электроны.

## 5. ОГРАНИЧЕНИЕ НА ОТКЛОНЕНИЕ ТРЕКА В ДЕТЕКТОРЕ TRD

Дополнительно отсеять комбинаторный фон можно, введя ограничение на отклонение траектории частицы, регистрируемой детектором TRD, под влиянием магнитного поля. Так как основная компонента магнитного поля направлена вдоль оси  $OY$  (вертикально вверх), магнитное поле в плоскости  $XOZ$  будет отклонять положительно и отрицательно заряженные частицы в противоположные стороны.



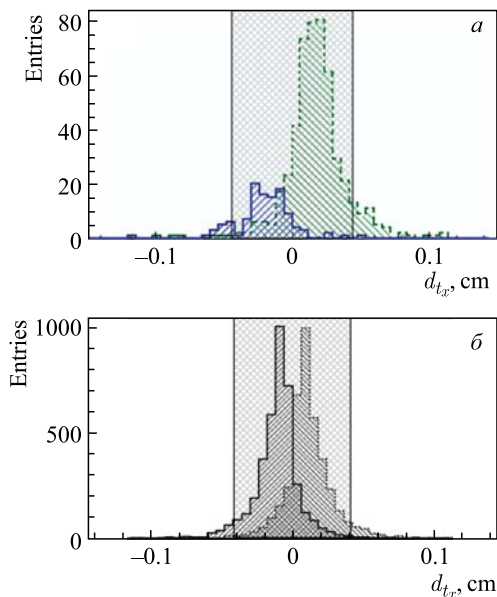


Рис. 6. Распределение углов отклонения электронов (пунктирная линия) и позитронов (сплошная линия) для фоновых (а) и сигнальных (б) событий соответственно

Процедура вычисления угла отклонения  $d_{t_x}$  состоит в следующем:

а) соединяем отрезком прямой центр мишени с  $x$ -координатой первого хита рассматриваемого TRD-трека;

б) все хиты TRD-трека аппроксимируем прямой линией в плоскости  $XOZ$ ;

в) вычисляем угол между прямыми а) и б).

На рис. 6 представлено распределение углов отклонения электронов (пунктирная линия) и позитронов (сплошная линия) для фоновых (а) и сигнальных (б) событий соответственно. Если наложить ограничение на  $|d_{t_x}| < 0,035$ , то можно дополнительно подавить фон.

Кроме того, отклонение траектории частицы в детекторе TRD можно использовать для определения знака заряда электронов/позитронов.

## 6. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА TOF

В дополнение к TRD для селекции электронов/позитронов используется детектор TOF. С его помощью измеряется время  $t$ , за которое частица (идентифицированная ранее детектором TRD как электрон/позитрон) пролетает

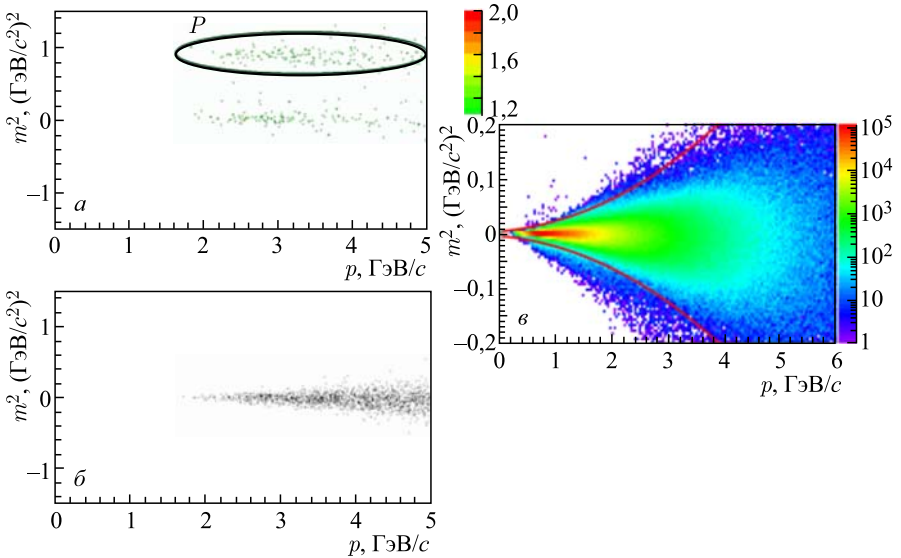


Рис. 7. Зависимость квадрата массы от импульса для фоновых (а) и сигнальных (б) частиц соответственно; в) границы, используемые для отбора электронов (сплошные линии) [9]

расстояние  $l$  от мишени до плоскости TOF: зная импульс частицы  $p$ , можно вычислить ее массу  $m$ . Для идентификации частицы с помощью TOF используется зависимость квадрата ее массы  $m^2$  от импульса  $p$  (см. рис. 7).

Видно, что в случае фоновых событий имеет место большой вклад от протонов (рис. 7, а). Чтобы удалить протоны из интересующей нас выборки, можно использовать границы, показанные на рис. 7, в: в качестве электронов/позитронов принимаются такие частицы, которые попадают в область, отмеченную линиями [9].

## 7. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА RICH

Далее отобранные треки транспортируются до плоскости детектора RICH, который используется для идентификации электронов в диапазоне импульсов от 0,5 до 15 ГэВ/с [15, 17]. При движении заряженной частицы в радиаторе детектора со скоростью, превышающей скорость распространения света в данной среде, образуется черенковское излучение. Оно регистрируется фотодетектором в виде колец.

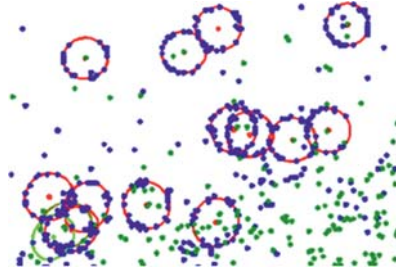


Рис. 8. Результат регистрации одного Au + Au-соударения детектором RICH

На рис. 8 представлен результат регистрации детектором RICH заряженных частиц от одного Au + Au-соударения. Точками отмечены места регистрации черенковского излучения многоканальными фотоумножителями на рабочей плоскости RICH, а также найденные кольца.

Далее рассматриваются только такие частицы, для которых были найдены кольца черенковского излучения.

## 8. ПОСТРОЕНИЕ СПЕКТРА ИНВАРИАНТНЫХ МАСС ДЛЯ ОТОБРАННЫХ КАНДИДАТОВ В $J/\psi$ -МЕЗОНЫ

Для реконструкции  $J/\psi$ -мезонов, распадающихся по диэлектронному каналу, используется специализированный пакет KFParticleFinder [9]. Этот пакет предназначен для поиска и реконструкции короткоживущих частиц по продуктам их распада. Путем комбинирования всех электронов, отобранных с помощью описанных выше критериев, со всеми отобранными позитронами формируется набор кандидатов в  $J/\psi$ -мезоны. Для того чтобы уменьшить вклад фона, рассматривались только такие частицы, которые были испущены из области мишени [12].

Наблюдаемое число сигнальных событий  $N(s)$  можно оценить из следующего выражения [15]:

$$N(s) = N(i) \cdot M \cdot \text{Br} \cdot \text{Eff},$$

где  $N(i)$  — количество центральных Au + Au-соударений при энергии 10 ГэВ/нуклон (согласно сделанным оценкам нам нужно около  $10^{12}$  соударений);  $M$  — вероятность рождения  $J/\psi$  в центральном соударении [18] (для указанных соударений  $M = 5 \cdot 10^{-6}$ );  $\text{Br}$  — вероятность распада  $J/\psi$  по диэлектронному каналу 6% [19];  $\text{Eff}$  — эффективность регистрации сигнала установкой СВМ. Данная нормировка использовалась для построения распределения, соответствующего распадам  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ .

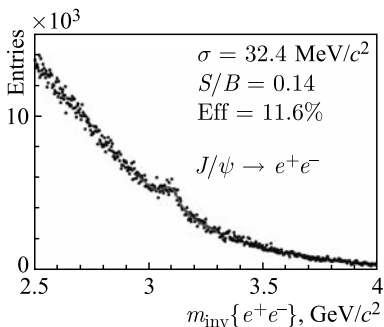


Рис. 9. Спектр инвариантной массы для реконструированных распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  в случае Au + Au-соударений при энергии 10 ГэВ/нуклон

Комбинаторный фон формировался в результате моделирования центральных UrQMD-событий для указанных выше соударений. Поскольку сгенерировать  $10^{12}$  соударений практически нереально, для подготовки необходимой статистики использовалась методика комбинирования событий, в которой каждый фоновый электрон, прошедший все описанные выше критерии отбора, из рассматриваемого события комбинировался со всеми позитронами из других событий. Этот подход позволяет квадратично увеличить статистику, отвечающую фоновому спектру [15].

На рис. 9 приведен итоговый спектр инвариантной массы для реконструированных распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ , отвечающий центральному соударениям Au + Au при энергии 10 ГэВ/нуклон, полученный путем суммирования двух распределений: сигнала и фона. При этом отношении сигнала к фону составило  $S/B = 0,14$ ; эффективность реконструкции сигнала  $\text{Eff} = 11,6\%$ .

## 9. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В таблице представлены потери сигнальных событий и соответствующие факторы подавления фоновых событий для каждого из рассматриваемых критериев: а) поперечный импульс больше 1 ГэВ/с, б) количество отсчетов в детекторе TRD больше 2, в) частицы идентифицированы как электроны/позитроны с помощью детектора TRD, г) отклонение траектории ча-

### Потеря сигнальных событий и фактор подавления фоновых событий для каждого из рассматриваемых критериев отбора

Критерий	Потеря сигнальных событий, %	Фактор подавления фона
а	16	92
б	18	26
в	28,5	99,5
г	7,5	16
д	1,1	54
е	1,6	61,5
Суммарно	55	99,9

стицы в TRD в заданном коридоре  $|d_{t_x}| < 0,035$ , д) частицы идентифицированы как электроны/позитроны с помощью детектора TOF, е) наличие кольца черенковского излучения в детекторе RICH. В последней строке показаны суммарный процент потерь сигнальных событий и коэффициент подавления фона.

Из приведенной таблицы видно, что предложенная система критериев отбора позволяет практически полностью подавить комбинаторный фон. При этом потеря отбираемых распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  составляет 55 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report, GSI, Darmstadt, 2005 ([http://www.gsi.de/onTEAM/dokumente/public/DOC-2005-Feb-447\\_e.html](http://www.gsi.de/onTEAM/dokumente/public/DOC-2005-Feb-447_e.html)).
2. *CBM Collab.* // Nucl. Phys. A. 2013. V. 904-905. P. 1059c–1062c.
3. The CBM Physics Book / Ed. by B. Friman, P. Senger et al. // Lecture Notes in Physics. 2011. V. 814.
4. The CBM Collaboration: Nuclear matter physics at SIS-100, CBM Report 2012-01, GSI, Darmstadt, 2012 (<http://www-alt.gsi.de/documents/DOC-2011-Aug-29-1.pdf>).
5. *Bleicher M. et al.* Relativistic Hadron-Hadron Collisions in the Ultra-Relativistic Quantum Molecular Dynamics Model (UrQMD) // J. Phys. G. 1999. V. 25. P. 1859.
6. <http://www-hades.gsi.de/computing/pluto/html/PlutoIndex.html>.
7. GEANT — Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library, Long Write-up, W5013, 1995.
8. <http://cbmroot.gsi.de/>
9. *Zyzak M.* Ph. D. thesis. Darmstadt, Germany, 2016. P. 165.
10. *Kulakov I. S. et al.* Performance Analysis of Cellular Automaton Algorithm to Solve the Track-Reconstruction Problem on a Multicore Server at the Laboratory of Information Technologies, Joint Institute for Nuclear Research // Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10, No. 2. P. 162–170.
11. *Зызак М. В. и др.* Метод фильтра Калмана для реконструкции траекторий заряженных частиц в эксперименте СВМ и его параллельная реализация на многоядерном сервере ЛИТ ОИЯИ // Вестн. РУДН. Сер. Математика. Информатика. Физика. 2014. № 2. С. 191–196.
12. *Дереновская О. Ю., Васильев Ю. О.* Критерии отбора распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ , регистрируемых установкой СВМ в AuAu-соударениях при энергии пучка 25 ГэВ/нуклон // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 7(184). С. 1163–1174.
13. *Lebedev A. et al. (for CBM Collab.)* Track Reconstruction Algorithms for the CBM Experiment at FAIR, CHEP'09 // J. Phys.: Conf. Ser. 2010. V. 219. P. 032048, doi:10.1088/1742-6596/219/3/032048.
14. *Акишина Т. П., Дереновская О. Ю., Иванов В. В.* Об идентификации электронов и пионов с помощью многослойного перцептрона в детекторе переходного излучения

эксперимента CBM // Вестн. РУДН. Сер. Математика. Информатика. Физика. 2010. № 1. С. 94–103.

15. Дереновская О.Ю., Иванов В.В. Реконструкция и отбор распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ , регистрируемых установкой CBM в AuAu-соударениях при энергии пучка 25 ГэВ/нуклон // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 4(188). С. 862–885.
16. <http://root.cern.ch/root/html/TMultiLayerPerceptron.html>
17. Ring Imaging Cherenkov (RICH) Detector. Technical Design Report for the CBM, GSI, Darmstadt, 2013 (<http://www.fair-center.eu/en/for-users/experiments/cbm.html>)
18. Steinheimer J., Botvina A., Bleicher M. Sub-threshold charm production in nuclear collisions. arXiv:1605.03439 [nucl-th]
19. Nakamura K. et al. (Particle Data Group): Review of Particle Physics // J. Phys. G. 2010. V. 37; 2011 partial update for the 2012 edition (URL: <http://pdg.lbl.gov>).

Получено 17 апреля 2017 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 29.05.2017.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,94. Уч.-изд. л. 1,15. Тираж 200 экз. Заказ № 59124.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)