

## КРИТЕРИИ ОТБОРА РАСПАДОВ $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА MUCH В ЭКСПЕРИМЕНТЕ СВМ

Т. О. Аблязимов<sup>а, 1</sup>, В. В. Иванов<sup>а, б, 2</sup>

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

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

В настоящее время на строящемся в GSI (Дармштадт, Германия) ускорительном комплексе FAIR большой международной коллаборацией с участием ОИЯИ ведется подготовка эксперимента СВМ. Одна из ключевых задач эксперимента — это исследование процессов рождения чармония в ядро-ядерных соударениях при высоких энергиях. При этом регистрацию таких распадов, как  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ , планируется проводить в режиме реального времени. В настоящей работе предлагаются критерии, обеспечивающие эффективный отбор сигнальных событий с использованием только информации о траекториях, оставленных заряженными мюонами в координатных станциях камеры MUCH (MUon Chamber).

Currently the CBM experiment is being developed in GSI (Darmstadt, Germany) at the FAIR accelerator complex of an international collaboration with JINR. One of the main aims of the experiment is the study of charmonium production process in nucleus–nucleus collisions at high energies. The registration of such decays as  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  is planned to be held real-time in the CBM experiment. The current paper presents criteria that provide an effective selection of signaling events using only track data of charged muons in MUCH (MUon Chamber) coordinate stations.

PACS: 29.85.-c

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в GSI (Дармштадт, Германия) ведутся работы по созданию ускорительного комплекса антипротонов и тяжелых ионов FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research). Для проведения экспериментов на пучках тяжелых ионов создается установка СВМ (Compressed Baryonic Matter) [1], разрабатываемая большой международной коллаборацией с участием ОИЯИ [2]. Физическая программа СВМ нацелена на изучение свойств сверхплотной барионной материи, образующейся в ядро-ядерных соударениях при энергии пучка 2–45 ГэВ/нуклон [1, 3].

Детальные исследования процессов рождения  $J/\psi$ -мезонов, распадающихся как по диэлектронному, так и димюонному каналам, относятся к ключевым задачам эксперимента СВМ. Схема экспериментальной установки СВМ, предназначенной для регистрации димюонных распадов, приведена на рис. 1.

---

<sup>1</sup>E-mail: abl@jinr.ru

<sup>2</sup>E-mail: ivanov@jinr.ru

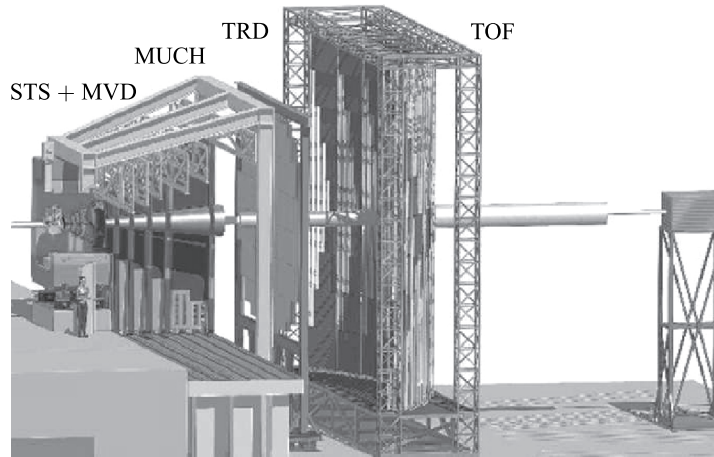


Рис. 1. Схема установки CBM для изучения димюонных распадов

Непосредственно за мишенью между полюсами сверхпроводящего дипольного магнита располагается система координатных трековых детекторов STS (Silicon Tracking System), состоящая из восьми двусторонних кремниевых микростриповых детекторов. Детекторы STS предназначены для реконструкции траекторий и определения импульсов заряженных частиц, а также для восстановления первичных и вторичных вершин. Для регистрации и идентификации установкой CBM высокоэнергичных заряженных мюонов используется детектор MUCH (MUon Chamber). Детектор измерения времени пролета TOF (Time-Of-Flight) предназначен для идентификации адронов.

Очень редкие распады  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  можно будет регистрировать в условиях интенсивных потоков (до  $10^7$  ядро-ядерных соударений в секунду) и высокой множественности вторичных частиц (от 100 до 800 частиц в одном соударении). Регистрацию и реконструкцию распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  (сигнальные события) планируется проводить в режиме реального времени. Это означает, что используемые методы и критерии распознавания сигнальных событий должны быть не только эффективными, но и максимально быстрыми.

В настоящей работе нами предлагаются простые и эффективные критерии для распознавания и отбора распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  с использованием информации о траекториях заряженных частиц, зарегистрированной координатными детекторами станции MUCH. В основе этих критериев лежит быстрый алгоритм поиска и реконструкции прямолинейных треков в детекторах MUCH, реализованный на модели клеточного автомата [4].

## 1. ПРОЦЕДУРА ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ

Так как установка CBM находится сейчас в стадии разработки, то для исследования рассматриваемых ниже методов и алгоритмов использовались физические события, смоделированные методом Монте-Карло.

Для оценки эффективности регистрации и отбора распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  были использованы: пакет UrQMD [5] — для генерации фона, пакет PLUTO [6] — для добавления сигнального распада  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ . В каждый набор «фоновых» частиц

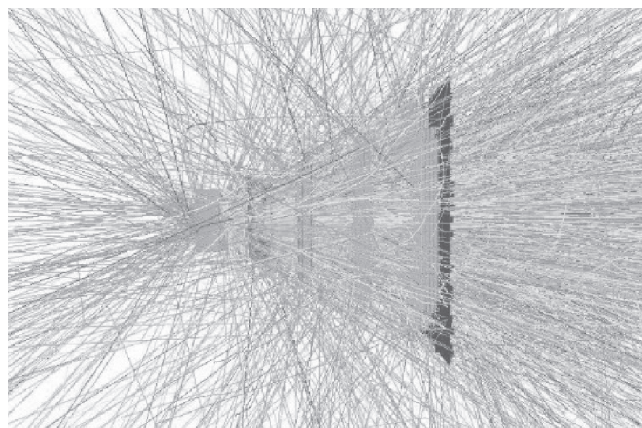


Рис. 2. Типичное смоделированное событие, отвечающее одному центральному соударению (Au + Au) при энергии падающего пучка 25 ГэВ/нуклон, регистрируемое установкой CBM

добавлялось одно сигнальное событие. Подготовленные таким образом наборы частиц транспортировались через установку CBM с применением средств пакета GEANT3 [7] в среде CBMROOT [8].

На рис. 2 представлено типичное смоделированное событие, отвечающее одному центральному (Au + Au)-соударению. В результате такого соударения в апертуру MUCH (на детекторы первой станции) попадает в среднем свыше 1700 заряженных частиц, большинство из которых является вторичными.

Основное назначение MUCH (рис. 3): 1) подавление интенсивного адронного фона и выделение заряженных мюонов; 2) реконструкция траекторий, оставленных мюонами

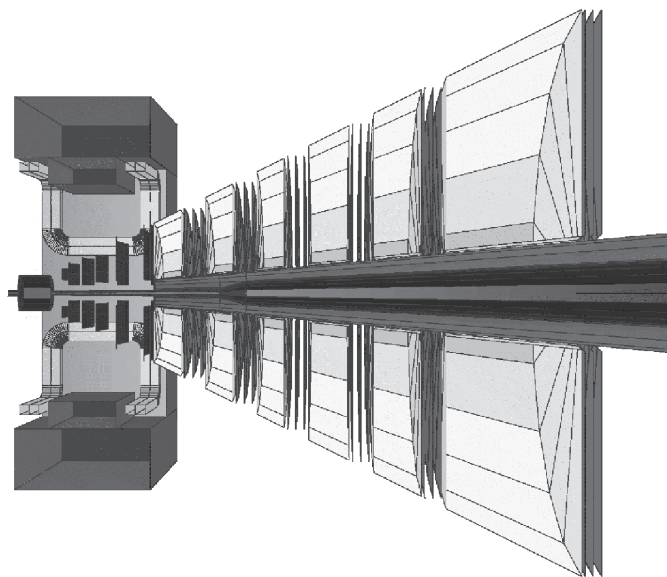


Рис. 3. Схема размещения магнита, системы STS и детектора MUCH (в разрезе)

в MUCH. Первое достигается с помощью поглотителей (в основном из железа), а для реализации второй задачи используются координатные детекторы, которые располагаются в промежутках между поглотителями: на приведенной на рис. 3 схеме их шесть. Каждый из детекторов содержит три координатные плоскости, обеспечивающие регистрацию  $(x, y)$ -координат места попадания заряженных мюонов в детектор.

Реализованная нами процедура выделения сигнальных событий включает три последовательных этапа:

1) поиск и реконструкцию треков от заряженных мюонов, зарегистрированных детекторами MUCH; очевидно, что таких треков должно быть не менее двух;

2) определение зарядов мюонов, отвечающих реконструированным трекам; при этом очевидно, что два трека в сигнальном событии должны быть вызваны мюонами с разными зарядами;

3) надежное отделение сигнальных событий от фона, возможное ввиду следующей их особенности: так как  $2m_\mu \ll m_{J/\psi}$ , то мюоны от распада  $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  должны разлетаться с большими поперечными импульсами относительно оси падающего пучка; эта особенность сигнальных событий должна позволить надежно отделять их от фона.

## 2. АЛГОРИТМ ПОИСКА И РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕКОВ

Для упрощения и ускорения алгоритма поиска и реконструкции треков в MUCH были сделаны два очевидных допущения: 1) из-за пренебрежимо малого (см. [9]) воздействия магнитного поля на заряженные мюоны в области первой станции MUCH траектории частиц можно аппроксимировать отрезками прямой, 2) в рассмотрение принимаются только такие треки, которые имеют отсчеты (хиты) во всех координатных станциях.

Алгоритм включает три последовательных шага:

- 1) вычисление средних точек;
- 2) формирование сегментов — элементов для построения треков;
- 3) связывание сегментов и реконструкция треков.

**2.1. Вычисление средних точек.** Каждая из координатных станций детектора MUCH содержит три детектирующих слоя, расположенных параллельно и на расстоянии 10 см друг относительно друга. С учетом эффективности регистрации заряженных частиц детектирующими плоскостями (более 90 %) мюон должен оставить хиты как минимум на двух (из трех) плоскостях станции.

При формировании сегментов трека в алгоритме используются хиты со средней плоскости. Будем называть их «средними точками». Под «вычислением средних точек» подразумевается восстановление хитов со средней плоскости, не зарегистрированных из-за неэффективности детекторов, а также очистка массива данных от хитов, не имеющих подходящих соседей на крайних плоскостях станции.

**2.2. Формирование сегментов.** Сегменты — это отрезки прямых, соединяющие средние точки соседних детектирующих станций (рис. 4). На рис. 4 сплошной линией показаны сегменты, которые будут использоваться при последующей реконструкции треков, а пунктирной линией показаны сегменты, которые исключаются из дальнейшего рассмотрения из-за того, что их наклоны превышают допустимые пределы.

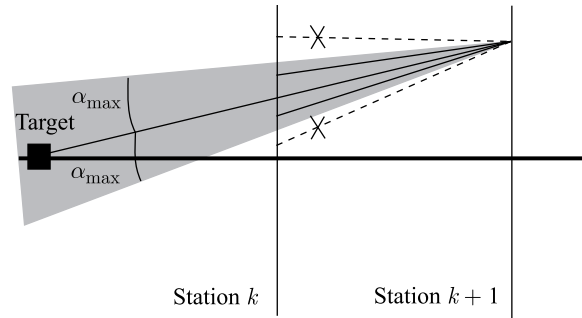


Рис. 4. Формирование сегментов

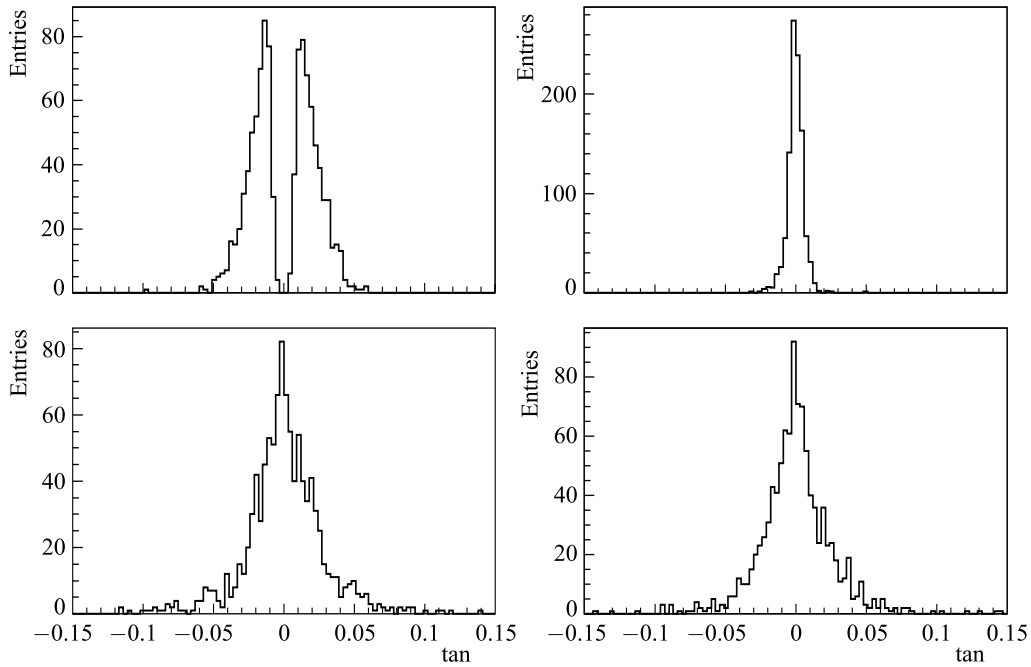


Рис. 5. Распределения тангенсов углов наклона в плоскостях  $XOZ$  (слева) и  $YOZ$  (справа) для сегментов между первой и второй (сверху) и пятой и шестой (снизу) станциями MUCH

Для определения предельных углов наклона сегментов было проведено специальное моделирование Монте-Карло. Его результаты представлены на рис. 5. На этом рисунке сверху приведены распределения тангенсов углов наклона для сегментов между первой и второй станциями MUCH в плоскостях  $XOZ$  (слева) и  $YOZ$  (справа); на нижних рисунках приведены аналогичные распределения для сегментов между пятой и шестой станциями MUCH.

**2.3. Связывание сегментов и реконструкция треков.** После того как все сегменты-кандидаты построены, проводится процедура связывания соседних сегментов, имеющих общую среднюю точку (рис. 6). Соседние сегменты связываются, если их взаимные углы наклона не превышают некоторых, заранее заданных предельных величин.

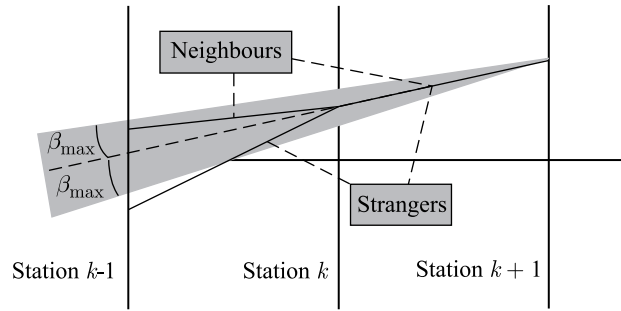


Рис. 6. Процедура связывания сегментов

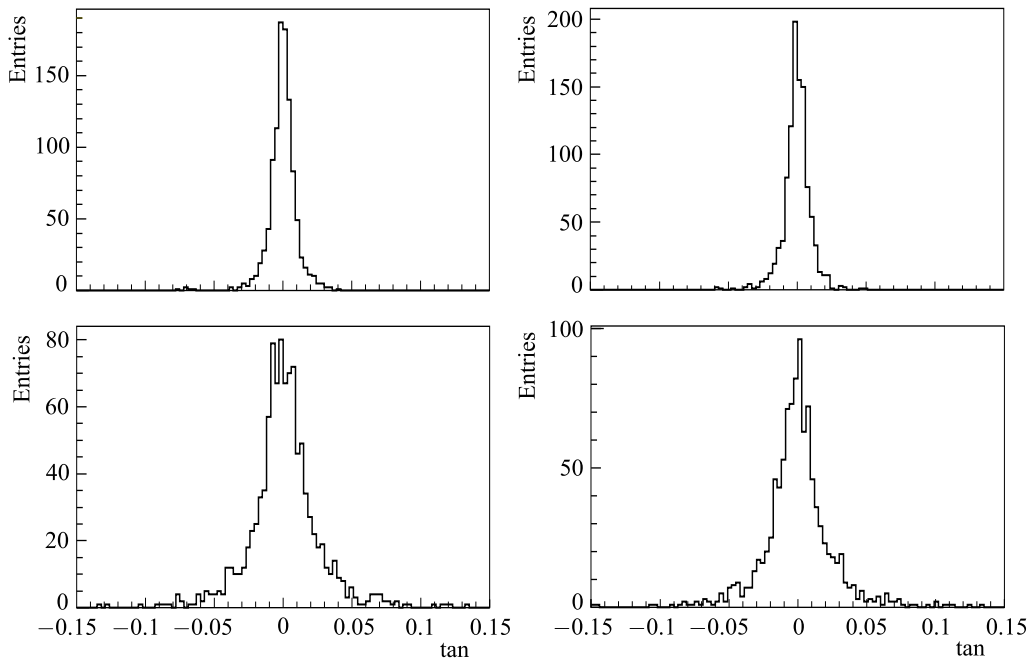


Рис. 7. Распределения углов между соседними сегментами для мюонных треков

На рис. 6 схематично представлена ситуация, когда наклон одного из двух сегментов во втором промежутке существенно отличается от наклона сегмента в первом промежутке.

Для определения предельных углов наклона между соседними сегментами было проведено специальное моделирование Монте-Карло (рис. 7).

На рис. 7 сверху представлены распределения тангенсов углов наклона между связываемыми сегментами первого и второго промежутков между координатными станциями MUCH в плоскостях  $XOZ$  (слева) и  $YOZ$  (справа); на нижних рисунках приведены аналогичные распределения для сегментов предпоследнего и последнего промежутков.

Трек-кандидат формируется из последовательности сегментов: справа налево (в направлении, противоположном направлению падающего пучка) путем добавления сегментов-соседей. При этом первый сегмент должен начинаться на шестой станции MUCH, а последний сегмент должен завершаться на первой станции MUCH. Если в процессе формирования треков-кандидатов возникают альтернативные треки, то из них отбирается такой трек, который, в соответствии с критерием  $\chi^2$ , наилучшим образом аппроксимируется отрезком прямой.

**2.4. Эффективность реконструкции мюонных треков.** Для оценки эффективности реконструкции треков в зависимости от импульса мюонов (рис. 7) использовались модельные данные, сгенерированные с помощью PLUTO (распад  $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ , сигнал) и UrQMD (центральные (Au + Au)-соударения при 25 ГэВ/нуклон, фон).

На рис. 8 представлена эффективность реконструкции треков в зависимости от импульсов регистрируемых мюонов. Видно, что для эффективной регистрации заряженные мюоны должны иметь импульсы не менее 3 ГэВ/с. Усредненная по всему диапазону импульсов эффективность составила 99 %.

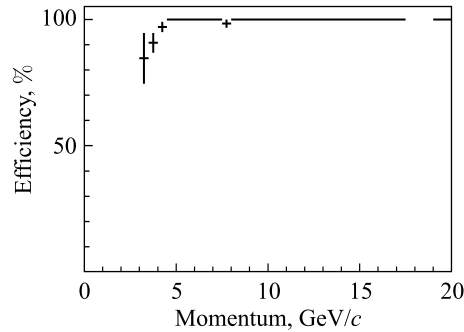


Рис. 8. Зависимость эффективности реконструкции треков от импульсов мюонов

**2.5. Количество треков в одном (Au + Au)-соударении.** Важной характеристикой работы алгоритма поиска и реконструкции треков является количество мюонных треков, образующихся в результате одного (Au + Au)-соударения.

На рис. 9 приведено распределение числа мюонных треков, регистрируемых MUCH в одном центральном (Au + Au)-соударении при 25 ГэВ/нуклон. Из приведенного рисунка

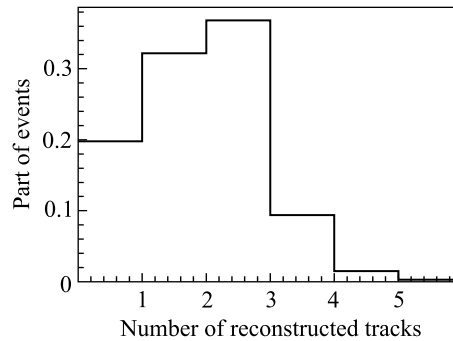


Рис. 9. Количество мюонных треков в одном (Au + Au)-соударении

видно, что из 1000 разыгранных соударений примерно в половине случаев регистрируются менее двух треков: в 20 % случаев не зарегистрировано ни одного мюонного трека, а в 34 % случаев всего один трек. Так как события с числом треков менее двух не представляют для нас интереса, они могут быть отброшены. Среди оставшихся случаев могут быть как сигнальные, так и фоновые события. Наша задача состоит в том, чтобы отбросить максимум фоновых событий с минимальной потерей сигнальных.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАКОВ ЗАРЯДОВ РЕГИСТРИРУЕМЫХ МЮОНОВ

Для определения знака заряда мюона может быть использовано отклонение его траектории под воздействием магнитного поля дипольного магнита (см. рис. 1). Так как основная (доминирующая) компонента магнитного поля направлена вдоль оси  $OY$  (вертикально вверх), магнитное поле будет отклонять в плоскости  $XZ$  положительно и отрицательно заряженные мюоны в противоположные стороны.

Процедура вычисления искомого угла отклонения состоит в следующем:

1) соединяем отрезком прямой центр мишени с  $x$ -координатой хита рассматриваемого трека на первой станции MUCH;

2) вычисляем угол между указанной прямой и проекцией на плоскость  $XOZ$  первого сегмента (между первой и второй станциями) трека.

На рис. 10 приведено распределение углов отклонения для отрицательно (пик слева от нуля) и положительно (пик справа от нуля) заряженных мюонов. Указанные распределения были сгенерированы без учета пространственного разрешения координатных станций MUCH. Видно, что в этом случае удастся практически однозначно определить знак заряда мюона по его треку в MUCH.

При учете пространственного разрешения координатных детекторов ситуация с определением знаков зарядов у мюонов заметно ухудшается (рис. 11), однако с вероятностью более 93 % можно правильно установить знак заряда регистрируемого мюона. При этом доля ошибочно определенных знаков зарядов для анализируемых мюонов не превышает 7 %.

Если обозначить разницу тангенсов проекций на плоскость  $XOZ$  углов, которые образуют с осью  $OZ$  первый сегмент реконструированного MUCH-трека, и отрезок, со-

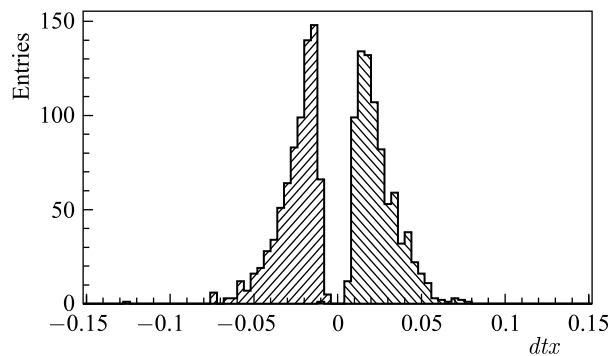


Рис. 10. Распределение углов отклонения для отрицательно (пик слева от нуля) и положительно (пик справа от нуля) заряженных мюонов



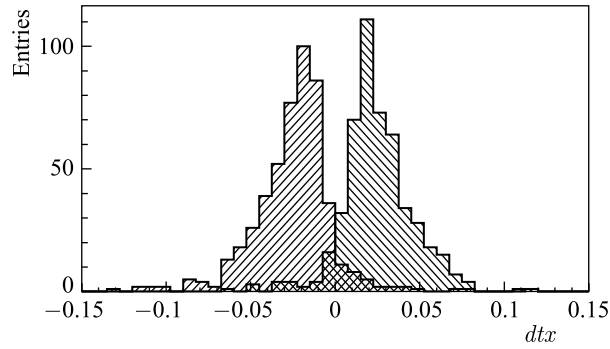


Рис. 11. Распределение углов отклонения для отрицательно (пик слева от нуля) и положительно (пик справа от нуля) заряженных мюонов

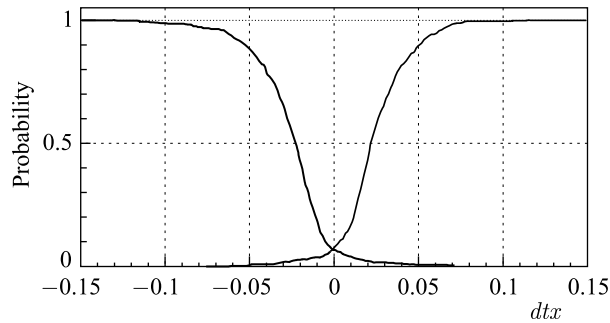


Рис. 12. Графики функций  $F_{\text{pos}}(dtx)$  и  $1-F_{\text{neg}}(dtx)$

единяющий хит этого трека с центром мишени, как  $dtx$ , то можно построить функции накопленной вероятности для положительно  $F_{\text{pos}}(dtx)$  и отрицательно  $F_{\text{neg}}(dtx)$  заряженных мюонов. На рис. 12 приводятся графики  $F_{\text{pos}}(dtx)$  и  $1-F_{\text{neg}}(dtx)$ .

#### 4. ВЫДЕЛЕНИЕ СИГНАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ ПО РАССТОЯНИЮ МЕЖДУ ТРЕКАМИ

Как отмечалось выше, мюоны от распадов  $J/\psi$  должны разлетаться в лабораторной системе отсчета с большими поперечными импульсами. Кроме того, для того чтобы заряженный мюон пересек весь детектор MUCH, он должен иметь импульс не менее 3 ГэВ/с. Из этого следует, что мюоны сигнальной пары в среднем должны иметь расстояния между точками, в которых они пересекают первую станцию MUCH, больше некоторого предельного значения.

На рис. 13 приведены распределения указанного расстояния для сигнальных (наклон штриховки влево) и фоновых (наклон штриховки вправо) событий. Из рисунка следует, что, если выбрать критическую границу равной 50 см, мы потеряем 1% сигнальных событий, но при этом отбросим около 50% фоновых.

Обозначив как  $\text{dist}$  расстояние между треками пары из положительно и отрицательно заряженных мюонов, построим графики функций вероятности  $F_{\text{sig}}(\text{dist})$  и  $1-F_{\text{bg}}(\text{dist})$

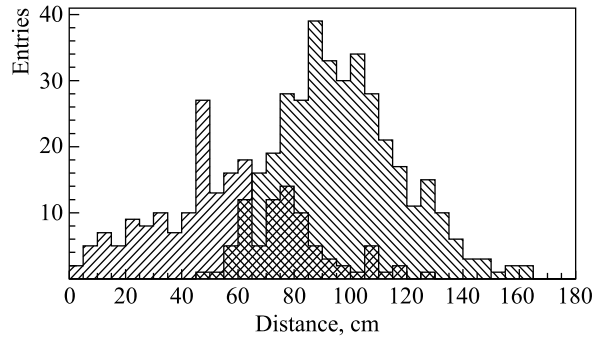


Рис. 13. Распределения расстояния между точками, в которых два мюона сигнальной и фоновой пары пересекают первую станцию MUCH

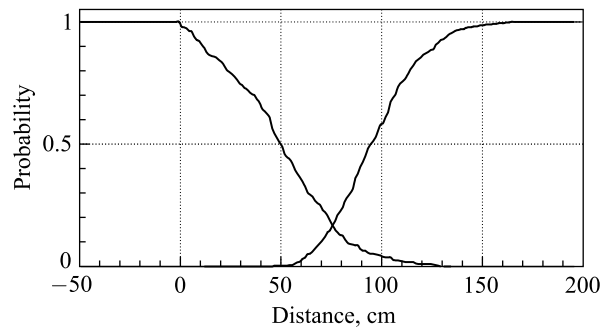


Рис. 14. Графики функций  $F_{\text{sig}}(\text{dist})$  и  $1 - F_{\text{bg}}(\text{dist})$

(рис. 14), где  $F_{\text{sig}}(\text{dist})$  — функция накопленной вероятности для сигнала, а  $F_{\text{bg}}(\text{dist})$  — для фона.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки эффективности развитой нами процедуры отбора сигнальных распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  использовались два набора модельных данных:

1. Сто тысяч фоновых событий, сгенерированных с помощью пакета UrQMD для Minimum Bias (Au + Au)-соударений при 25 ГэВ/нуклон. Это события, в которых параметр соударения сталкивающихся ядер разыгрывается случайным образом. В указанных событиях наблюдается в среднем 150 вторичных заряженных частиц. Именно такие события и будут в основном регистрироваться в эксперименте CBM.

2. Одна тысяча «реалистичных» событий: фоновые события, сгенерированные с помощью пакета UrQMD для центральных (Au + Au)-соударений при 25 ГэВ/нуклон, к каждому из которых добавлялась пара от распада  $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ , сгенерированная с помощью пакета PLUTO. В одном центральном соударении указанного типа в среднем возникает около 800 вторичных заряженных частиц.

Проведенное тестирование дало следующие результаты:

- 1) при обработке  $10^5$  фоновых событий было отобрано 100 событий, удовлетворивших всем критериям, используемым в нашей процедуре для выделения мюонной пары

от распада  $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ ; таким образом, коэффициент подавления фона оказался равным 1000, что отвечает максимальным требованиям эксперимента СВМ;

2) анализ реалистичных событий показал, что развитая нами процедура позволяет отбирать 87,5% мюонных пар от распада  $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ .

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЛАНЫ НА БУДУЩЕЕ

Разработана эффективная процедура для подавления фона и отбора сигнальных событий с использованием только информации о траекториях, оставленных заряженными мюонами в координатных станциях камеры MUCH. Полученные нами результаты показывают, что данная процедура может быть реализована в триггере установки СВМ для регистрации распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  в режиме реального времени.

Основу рассматриваемой процедуры составляет алгоритм для поиска и реконструкции треков, регистрируемых станцией MUCH. Используемая в настоящий момент рабочая версия алгоритма не оптимизировалась по времени вычислений, поэтому предстоит разработка параллельной версии алгоритма, позволяющей проводить расчеты на многоядерных процессорах, и ее сравнение со скалярной версией.

Далее нужно будет провести исследования по связыванию треков, реконструированных в детекторе STS, с треками, найденными в MUCH. Успешно проведенная операция по связыванию треков STS и MUCH позволит определять импульсы зарегистрированных мюонов и вычислять эффективные массы отобранных мюонных пар.

Кроме того, мы планируем исследовать возможность применения аналогичного подхода для отбора распадов  $J/\psi \rightarrow e^+ + e^-$  с использованием информации о траекториях, оставленных заряженными частицами в координатных станциях детектора переходного излучения TRD.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report. Darmstadt: GSI, 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 / Eds. Friman B. et al. // Lecture Notes in Phys. 1st Ed. 2011. V. 814. 960 p.
4. *Ablyazimov T. O. et al.* Muon Tracks Recognition in the MUCH Detector Using CA Algorithm. <https://indico.gsi.de/getFile.py/access?contribId=62&sessionId=16&resId=0&materialId=slides&confId=2184>.
5. *Bleicher M. et al.* Relativistic Hadron–Hadron Collisions in the Ultra-Relativistic Quantum Molecular Dynamics Model (UrQMD), 1999-09-16 // 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. *Bertini D. et al.* The FAIR Simulation and Analysis Framework // Proc. of CHEP'07, Intern. Conf. on Computing in High Energy and Nuclear Physics. Victoria, BC, Canada, Sept. 2–5, 2007; J. Phys.: Conf. Ser.
9. *CBM Collab.* Technical Design Report for the Superconducting Dipole Magnet. 2013.

Получено 4 декабря 2014 г.