

# БЫСТРАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРАЕКТОРИЙ МЮОНОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ ДЕТЕКТОРОМ 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 этого эксперимента — 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 статье предлагается быстрый алгоритм реконструкции траекторий мюонов от распадов  $J/\psi$ , регистрируемых детектором MUCH.

The CBM experiment is currently being developed in GSI (Darmstadt, Germany) at the FAIR accelerator complex by an international collaboration including JINR. One of the main goals of the experiment is a research 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 carried out in real time. The current paper presents an algorithm suitable for fast reconstruction of trajectories of charged muons from  $J/\psi$  decays recorded by the MUCH detector.

PACS: 02.70.-c; 07.05.Kf; 13.20.Gd; 95.55.Vj

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Центре по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца (GSI) 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), разрабатываемая большой международной коллаборацией с участием ОИЯИ. Физическая программа СВМ нацелена на изучение свойств сверхплотной барионной материи, образующейся в ядро-ядерных соударениях при энергиях пучка вплоть до 45 ГэВ/нуклон [1].

---

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

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

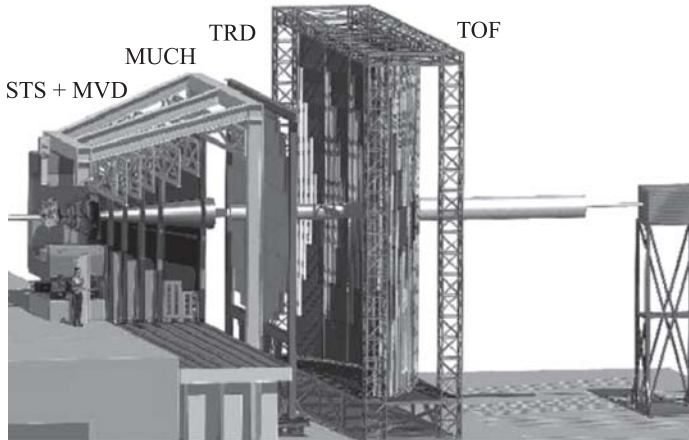


Рис. 1. Схема установки CBM для изучения димюонных распадов  $J/\psi$ -мезонов

Детальные исследования процессов рождения  $J/\psi$ -мезонов относятся к одной из ключевых задач эксперимента CBM. Детектирование этой чрезвычайно короткоживущей частицы (время жизни  $7,2 \cdot 10^{-21}$  с) осуществляется по продуктам ее распада. Одной из возможных реакций распада, продукты которой можно зарегистрировать существующими в экспериментальной физике высоких энергий средствами, является распад по димюонному каналу:  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ .

Схема экспериментальной установки CBM, предназначенной для регистрации указанных распадов, приведена на рис. 1. 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 высокоэнергичных мюонов используется мюонная станция MUCH (MUon Chamber).

Множественность чармония при энергиях эксперимента 10–40 А ГэВ чрезвычайно низка ( $1,5 \cdot 10^{-5}$  для 25 А ГэВ [2]), а вероятность распада по димюонному каналу составляет всего 5,93 %. В этой связи для детектирования указанных распадов требуется высокая частота ядро-ядерных соударений — в эксперименте CBM планируется регистрировать до  $10^7$  соударений в секунду [3,4]. При этом для описания одного соударения в среднем требуется такое количество информации, что, с учетом частоты ядро-ядерных соударений, интенсивность информационного потока с детекторов установки по разным оценкам [3–5] может в 400–1000 раз превысить планируемую производительность системы сбора данных для эксперимента CBM.

С учетом вышеизложенного необходимо разработать высокопроизводительную триггерующую систему, позволяющую отбирать в реальном времени эксперимента только такие события, которые потенциально могут представлять интерес для физиков.

Ранее, в работе [6], нами была предложена простая и вместе с тем очень эффективная процедура для подавления фона и отбора распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  (сигнальные события), использующая только информацию о траекториях, оставленных мюонами в

координатных станциях детектора MUCH. Основу указанной процедуры составляет алгоритм поиска и реконструкции треков, регистрируемых MUCH. Учитывая то, что селекцию сигнальных событий планируется проводить в режиме реального времени, указанный алгоритм должен быть не только эффективным, но и максимально быстрым.

## 1. ДЕТЕКТОР MUCH

На рис. 2 приведена схема размещения дипольного магнита, системы STS и детектора MUCH (в разрезе). Основное назначение MUCH — это: 1) подавление интенсивного адронного фона и выделение мюонов; 2) регистрация траекторий, оставленных мюонами в MUCH.

Первая из указанных задач решается с помощью системы поглотителей (в основном из железа). Суммарная толщина всех поглотителей в направлении падающего пучка выбиралась таким образом, чтобы полная потеря энергии проходящего сквозь них мюона отвечала тому минимальному значению энергии, которое может иметь мюон от распада  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ . Подавляющая часть мюонов, образующихся в результате других реакций, не обладает энергией, достаточной для преодоления всех поглотителей детектора MUCH. Поэтому ключевым критерием для отбора мюонов от сигнальных событий является тот факт, что они должны пересечь насквозь весь детектор MUCH.

Для выполнения второй задачи используются координатные станции, которые располагаются в промежутках между поглотителями: на приведенной на рис. 2 схеме их шесть. Каждая такая станция содержит три координатные плоскости, расположенные параллельно и на расстоянии 10 см друг от друга. Координатные плоскости позволяют с высокой эффективностью ( $> 90\%$ ) фиксировать  $x, y$ -координаты места попадания заряженных частиц в детектор.

С учетом вышесказанного мы ищем и реконструируем только такие треки, которые имеют «хиты» (отсчеты) на всех станциях MUCH.

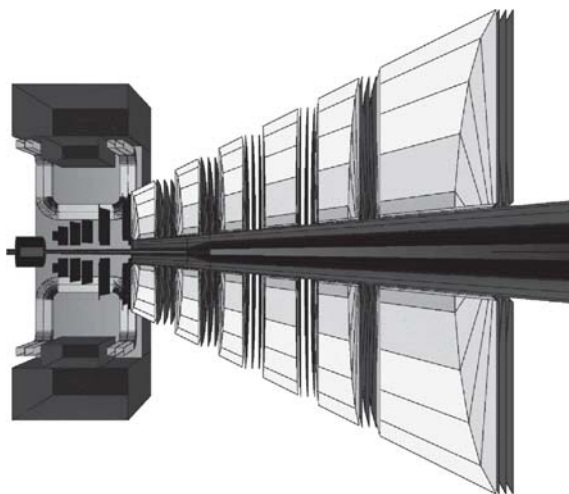


Рис. 2. Схема размещения магнита, системы STS и детектора MUCH (в разрезе)

## 2. АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ МЮОНОВ В MUCH

Мюоны высокой энергии тормозятся в веществе за счет электромагнитного взаимодействия с электронами и ядрами вещества. В области энергий вплоть до  $10^{11}$ – $10^{12}$  эВ мюоны теряют энергию в основном на ионизацию атомов среды (около  $2 \text{ МэВ}/(\text{г}/\text{см}^2)$  вещества, или примерно  $1,5 \text{ ГэВ}$  на  $1 \text{ м}$  пути, проходимого в железе). Средний пробег мюонов в этой области растет пропорционально их энергии, а угловое отклонение определяется многократным кулоновским рассеянием на ядрах вещества. Так как  $m_\mu \gg m_e$ , то вероятность потери энергии мюонов в результате тормозного излучения или рождения пар  $e^+e^-$  значительно меньше, чем для электронов. Эти процессы, а также расщепление атомных ядер, начинают играть доминирующую роль при энергиях мюонов выше  $10^{12}$  эВ [7].

Указанные факторы вместе с отсутствием у мюонов сильного взаимодействия обуславливают их высокую проникающую способность как по сравнению с адронами, так и по сравнению с электронами и  $\gamma$ -квантами. Большая проникающая способность при высоких энергиях позволяет легко выделять мюоны экспериментально среди других заряженных частиц по их способности проходить через толстые (в несколько метров) фильтры, например, из железа (см. статью [8] и ссылки в ней).

Заметим также, что поле дипольного магнита мало уже в районе первой станции MUCH [9], поэтому его влиянием на траектории быстрых мюонов от распада  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  можно пренебречь.

С учетом вышеизложенного, а также результатов моделирования прохождения мюонов от распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  через детектор MUCH нами было принято решение использовать при реконструкции траекторий мюонов в MUCH линейную модель трека. Из-за многократного рассеяния мюонов в поглотителях MUCH реконструируемый трек формируется из отрезков ломаной, соединяющих хиты на соседних станциях. При этом углы между сочленяемыми отрезками не должны превышать определенных пределов, зависящих от номера станции, на которой находится хит, общий для двух связываемых отрезков.

Так как  $J/\psi$  — короткоживущая частица, то за время своего существования она не может удалиться на заметное расстояние от места рождения. Поэтому можно допустить, что мюоны от распада  $J/\psi$  испускаются из центра мишени. Это означает, что все сегменты ломаной, в виде которой ищется аппроксимация реальной траектории, должны быть близки к прямой, проведенной через центр мишени и любой из узлов указанной ломаной. Кроме того, так как интересующие нас мюоны обладают импульсами, достаточными для прохождения насквозь всего детектора MUCH, то в рассмотрение принимаются только такие треки, которые имеют хиты во всех координатных станциях. Следует также заметить, что в рассматриваемом алгоритме распознавание треков проводится пособытийно, таким образом, что результаты каждого ядро-ядерного соударения анализируются по отдельности.

В основу алгоритма распознавания треков положена модель клеточного автомата (КА), которая успешно применена в ряде экспериментов в области физики высоких энергий [10–12]. Модель КА хороша тем, что позволяет уменьшить количество рекурсивных операций на массиве входных данных и провести большую часть вычислений локально.

В нашем случае элементами КА («клетками») являются отрезки ломаной, из которых строится аппроксимация прямолинейного трека. Алгоритм распознавания треков включает три последовательных этапа:

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

**2.1. Вычисление средних точек.** Как отмечалось выше, каждая из координатных станций детектора MUCH содержит три детектирующих слоя, расположенных параллельно друг другу на расстоянии 10 см. С учетом эффективности регистрации заряженных частиц детектирующими плоскостями мюон должен оставить хиты как минимум на двух из них.

Траектория реконструируемого трека моделируется ломаной, состоящей из сегментов, концевые точки которых располагаются на соседних станциях — каждая станция привносит в точности один узел ломаной. При формировании сегментов трека в алгоритме используются хиты со средних координатных плоскостей, которые мы называем «средними точками».

Процедура вычисления средних точек включает в себя: 1) проверку корректности хитов в средней плоскости; 2) восстановление хитов в средней плоскости, которые не были зарегистрированы из-за неэффективного функционирования детектирующих плоскостей; 3) удаление хитов, не имеющих подходящих соседей на крайних плоскостях станции.

Для проверки корректности хита, зарегистрированного средней плоскостью, строилась базовая прямая, которая соединяла рассматриваемый хит с центром мишени и пересекала обе крайние (левую и правую) детектирующие плоскости станции, как схематично показано на рис. 3.

Затем проверялось наличие хитов в крайних (левой и правой) плоскостях, попадающих в допустимые растворы относительно базовой прямой. На рис. 3 представлено три возможных варианта, соответствующих ситуации, когда хит на центральном слое станции может принадлежать сигнальному треку.

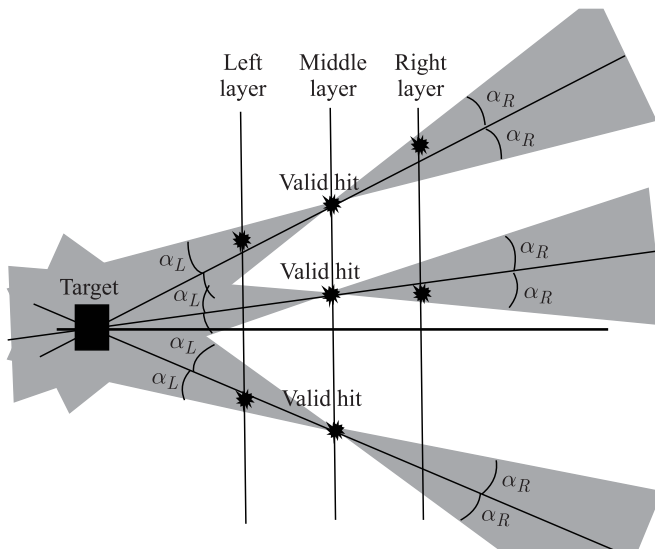


Рис. 3. Проверка корректности хитов, зарегистрированных средней плоскостью

Для определения допустимых растворов было проведено монте-карло-моделирование распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  с использованием пакета PLUTO [13] и трассировка распадных мюонов через детектор MUCH с помощью пакета GEANT3 [14]. На рис. 4 приведены распределения отклонений мюонов от базовой прямой в плоскостях  $XOZ$  и  $YOZ$  для первой и шестой станций MUCH.

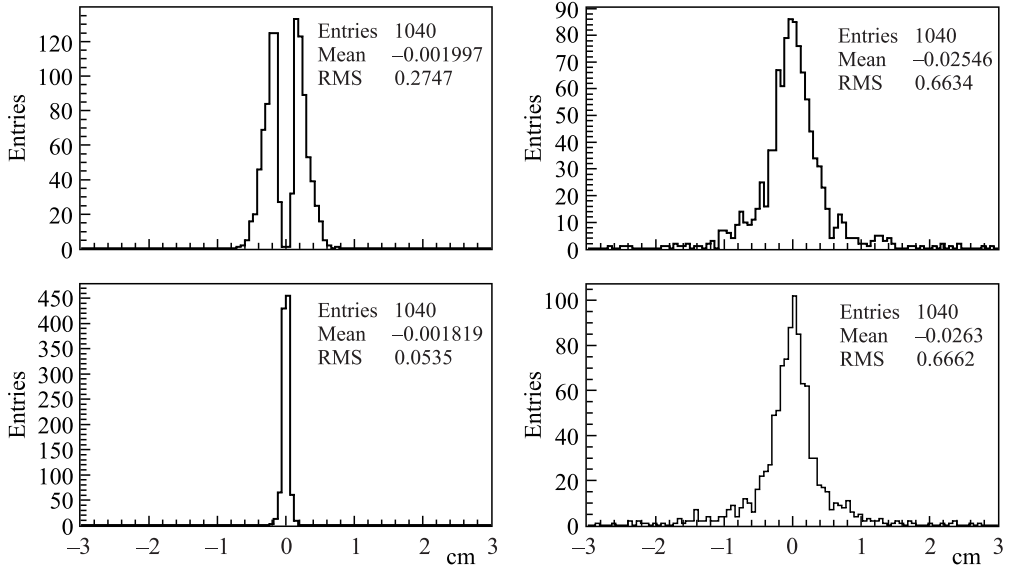


Рис. 4. Распределения отклонений мюонов от базовой прямой в плоскостях  $XOZ$  (сверху) и  $YOZ$  (снизу) для первой (слева) и шестой (справа) станций MUCH

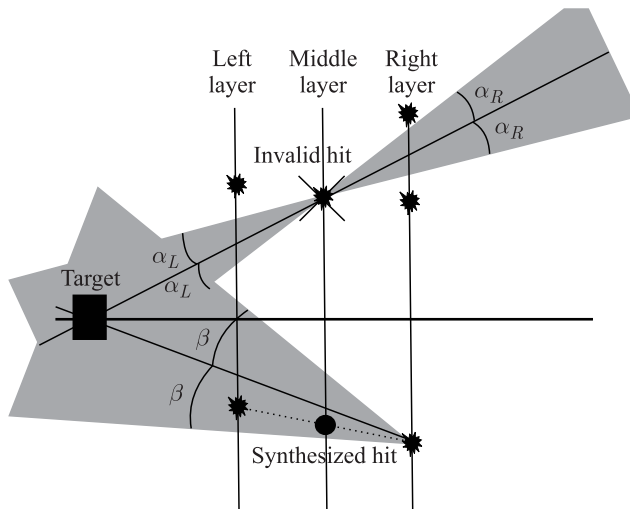


Рис. 5. Удаление хита в среднем слое, для которого не найдено соответствующих хитов на крайних плоскостях (сверху). Реконструкция средней точки по хитам на двух крайних плоскостях станции (снизу)

На рис. 5 (сверху) показан пример, когда случайный (фоновый) хит в среднем слое удаляется из массива данных по причине отсутствия соответствующих хитов на обоих крайних слоях.

В том случае, когда отсутствует хит в средней плоскости, но имеются хиты на двух крайних плоскостях станции такие, что угол между прямыми, проведенными через указанные хиты и центр мишени, мал, проводится реконструкция средней точки. На рис. 5 (снизу) изображена схема реконструкции средней точки.

**2.2. Формирование сегментов.** Сегменты — это отрезки прямых, соединяющие между собой средние точки соседних станций. При этом для того чтобы существенно сократить число комбинаторных переборов на следующем этапе (когда нужно будет формировать из сегментов треки), из всего набора возможных сегментов отбираются только такие, которые отклоняются от базовой прямой в допустимых пределах. В этом случае в качестве базовой прямой берется прямая, проведенная через правый край анализируемого сегмента и через центр мишени (рис. 6). Из-за многократного рассеяния в веществе поглотителя между левой и правой станциями MUCH быстрый мюон испытывает некоторое отклонение от первоначального направления. Для определения допустимых

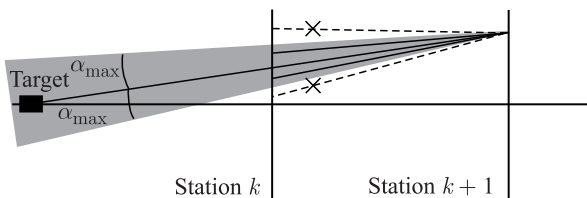


Рис. 6. Формирование сегментов

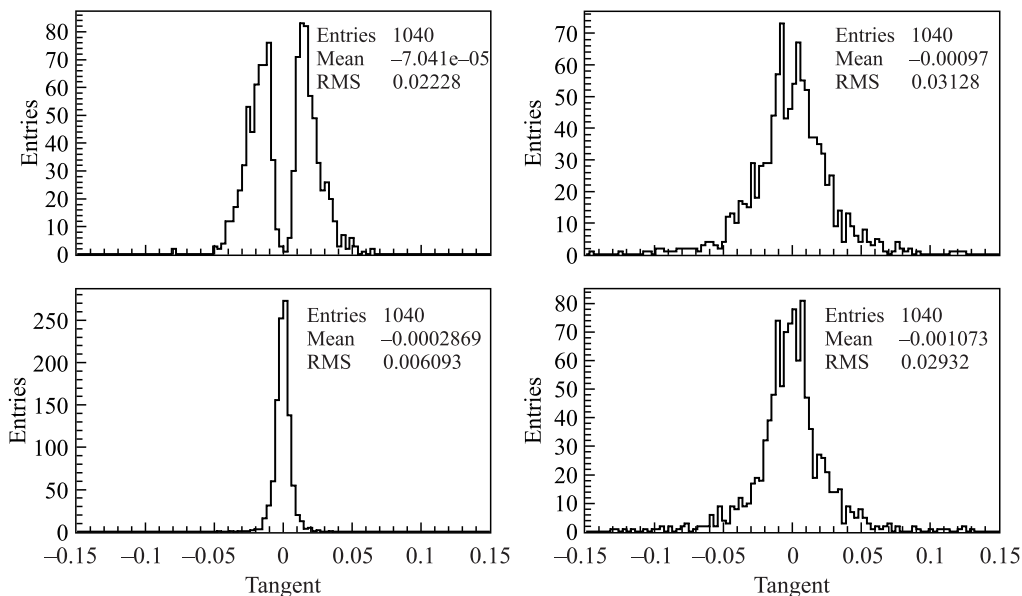


Рис. 7. Распределения тангенсов углов наклона в плоскостях XOZ (сверху) и YOZ (снизу) для сегментов между первой и второй (слева) и пятой и шестой (справа) станциями MUCH

отклонений сегментов от базовой прямой (см. рис. 6) использовались результаты монте-карло-моделирования распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  и трассировки распадных мюонов через детектор MUCH.

На рис. 7 приводятся распределения тангенсов углов отклонений сегментов от соответствующих им базовых прямых в  $XOZ$ - и  $YOZ$ -проекциях для сегментов между первой и второй, а также пятой и шестой станциями MUCH.

На рис. 6 сплошной линией схематично изображены те сегменты, которые попадают в допустимые пределы и будут использоваться на последующем этапе реконструкции треков, а пунктирной линией показаны сегменты, которые отбрасываются из-за того, что они слишком сильно отклоняются от базовой прямой.

**2.3. Связывание сегментов и реконструкция треков.** Трек-кандидат формируется в результате связывания пяти последовательных сегментов — справа налево (в направлении, противоположном направлению падающего пучка) путем добавления сегментов-соседей (рис. 8).

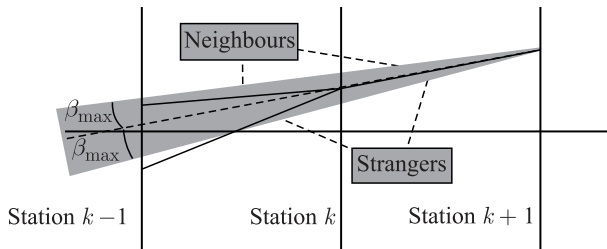


Рис. 8. Процедура связывания сегментов

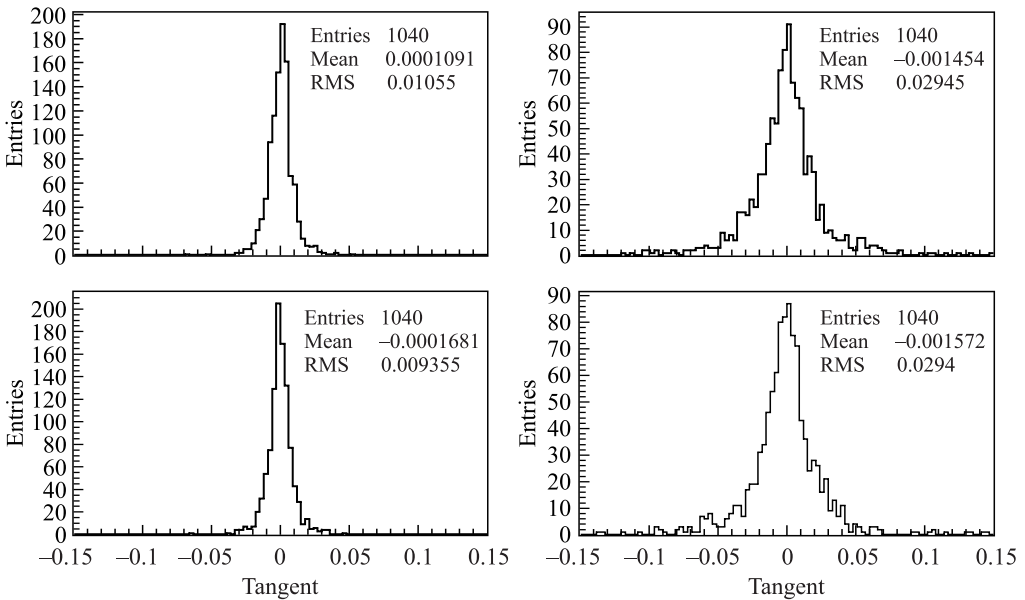


Рис. 9. Слева: распределения тангенсов углов наклона между первым и вторым связываемыми сегментами в  $XOZ$  (сверху) и  $YOZ$  (снизу) плоскостях. Справа: аналогичные распределения для четвертого и пятого сегментов



При этом первый сегмент берет свое начало на шестой станции MUCH, а последний (пятый) сегмент оканчивается на первой станции. Два сегмента, принадлежащих смежным станциям, связываются между собой в том случае, если они имеют общий хит и угол между ними не превышает заданных пределов (см. рис. 8). Указанные пределы определяются заранее с помощью специального монте-карло-моделирования (рис. 9).

На рис. 8 схематично изображен случай, когда наклон одного из двух сегментов в промежутке слева относительно сегмента в правом промежутке попадает в допустимую область, в то время как наклон второго сегмента существенно превышает допустимые пределы.

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.** Оценка эффективности реконструкции треков в зависимости от импульса мюонов была проведена для одной тысячи модельных событий, полученных добавлением распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ , сгенерированных с помощью пакета PLUTO (сигнал), в события, сгенерированные с помощью UrQMD [15], — центральные Au + Au-соударения при 25 ГэВ/нуклон (фон).

Эффективность реконструкции треков для данного диапазона импульсов определяется как отношение числа «эталонных» модельных треков, имеющих импульс в этом диапазоне, которые были реконструированы, к общему числу модельных треков с импульсом в этом диапазоне:

$$\text{Эффективность} = \frac{\text{число реконструированных эталонных модельных треков в диапазоне}}{\text{общее число эталонных модельных треков в диапазоне}}.$$

«Эталонный» трек определяется как модельный трек, принадлежащий мюону, являющемуся продуктом распада  $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  и имеющему монте-карло-точки во всех детектирующих слоях установки MUCH. Модельный трек считается реконструированным, если существует хотя бы один реконструированный трек, как минимум 70 % хитов которого порождены данным модельным треком.

На рис. 10 представлена эффективность реконструкции треков в зависимости от импульсов регистрируемых мюонов. Видно, что для эффективной регистрации мюоны должны иметь импульсы не менее 3 ГэВ/с.

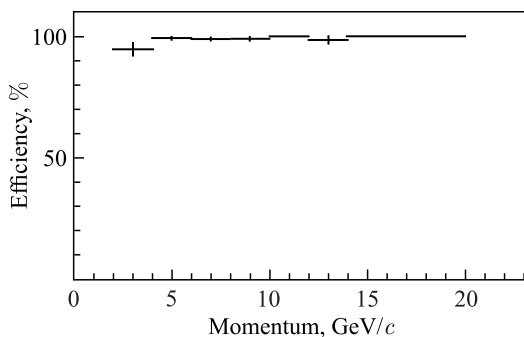


Рис. 10. Зависимость эффективности реконструкции треков от импульсов мюонов

Усредненная по всему диапазону импульсов эффективность реконструкции мюонных треков составила около 99 %.

Аналогично тому, как модельный трек считается реконструированным, если для него найдется как минимум один реконструированный трек, не менее 70 % хитов которого порождены данным модельным треком, реконструированный трек считается реконструированным корректно, если не менее 70 % его хитов порождены одним и тем же модельным треком. В противном случае данный трек рассматривается как «ghost»-трек — устоявшийся термин, используемый в англоязычной литературе, касающейся реконструкции треков частиц, обозначающий артефакты реконструкции, образованные из хитов, оставленных различными частицами.

Количество «ghost»-треков, производимых описанным в данной статье алгоритмом реконструкции, невелико — менее 1 % для комбинированных событий сигнал (одна мюонная пара от распада  $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  на событие) + фон (центральные Au + Au-соударения при 25 ГэВ/нуклон) и около 3 % для чистого minimum bias фона (Au + Au, 25 ГэВ/нуклон).

### 3. ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АЛГОРИТМА

Как отмечалось во введении, селекцию распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  планируется проводить в режиме реального времени. Поэтому алгоритм поиска и реконструкции мюонных треков должен быть не только эффективным, но и максимально быстрым. С этой целью была проведена работа по векторизации и распараллеливанию его кода. При векторизации использовались векторные инструкции AVX [17] для процессоров Intel® Xeon®, а распараллеливание проводилось с применением примитивов программной среды OpenMP [18].

На рис. 11 показана зависимость среднего времени, затрачиваемого на обработку одного фонового события — minimum bias (Au + Au)-соударения при 25 ГэВ/нуклон, генерируемые с помощью UrQMD. События такого типа будут доминировать при ядерных соударениях в эксперименте CBM.

Тестирование производительности алгоритма проводилось на сервере phi.jinr.ru ЛИТ ОИЯИ, оснащенный двумя процессорами Intel® Xeon® E5-2695 v2, работающими на частоте 2,40 ГГц. Суммарное количество физических ядер — 24 (что отвечает 48 логическим ядрам).

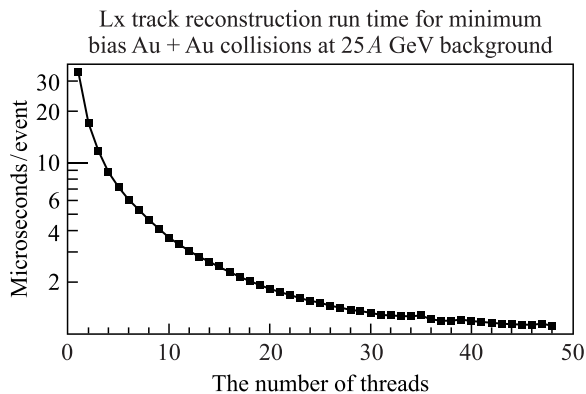


Рис. 11. Зависимость времени обработки события от количества параллельных потоков выполнения

Из приведенной на рис. 11 зависимости можно видеть, что на обработку одного события тратится около 1 мкс. Поэтому для применения рассматриваемого алгоритма в триггере для отбора распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  будет достаточно около 10 серверов указанного типа.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЛАНЫ НА БУДУЩЕЕ

В настоящей работе создан быстрый и эффективный алгоритм для реконструкции мюонных треков от распадов  $J/\psi$ , регистрируемых детектором MUCH.

Алгоритм включен в пакет CBMROOT [16] в качестве динамически подключаемой библиотеки под именем Lx. В эту же библиотеку включены алгоритмы, реализующие триггер для отбора распадов  $J/\psi \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ , и набор методик для настройки параметров алгоритма на модельных данных.

Планируется исследовать возможность применения аналогичного подхода для отбора легких векторных мезонов, распадающихся по мюонному каналу.

Описанный в работе алгоритм и результаты тестирования его программной реализации докладывались на 23-м рабочем совещании коллаборации CBM [19].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *The CBM Collab.* Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report. Darmstadt: GSI, 2005. P. 6.
2. *Cassing W., Bratkovskaya E. L., Sibirtsev A.* Open Charm Production in Relativistic Nucleus–Nucleus Collisions // *Nucl. Phys. A.* 2001. V. 691. P. 769.
3. *Kiseleva A. et al.* The Di-muon Trigger for CBM. CBM Progress Report 2008. GSI Report 2009-03. P. 69.
4. *Bhaduri P., Chattopadhyay S., Ghosh P.* Development of a Trigger Algorithm for the Measurement of Rare Probes in the CBM Experiment at FAIR. CBM Progress Report 2008. GSI Report 2009-03. P. 70.
5. *Friese V.* Computational Challenges for the CBM Experiment // *Math. Modeling Comp. Sci.* V. 7125 of the Series Lecture Notes in Comp. Sci. 2012. P. 17–27.
6. *Ablyazimov T. O., Ivanov V. V.* Selection Criteria for  $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  Decays Using MUCH Detector in CBM Experiment // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12, No. 4. P. 559.
7. <http://pdg.lbl.gov>
8. <http://www.femto.com.ua/articles/part1/2381.html>
9. *The CBM Collab.* Technical Design Report for the Superconduction Dipole Magnet. Darmstadt: GSI, 2013. P. 15.
10. *Bussa M. P. et al.* Application of a Cellular Automaton for Recognition of Straight Tracks in the Spectrometer DISTO // *Comp. & Math. with Appl.* 1997. V. 34. P. 695.
11. *Ferrero L. et al.* On a Possible Second-Level Trigger for the Experiment DISTO // *Nuovo Cim. A.* 1996. V. 109, No. 3. P. 327.
12. *Kisel I. et al.* Cellular Automaton and Elastic Net for Event Reconstruction in the NEMO-2 Experiment // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1997. V. 387, No. 3. P. 433.
13. <http://www-hades.gsi.de/computing/pluto/html/PlutoIndex.html>

14. GEANT — Detector Description and Simulation Tool. CERN Program Library, Long Write-up, W5013. 1995.
15. *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.
16. *Bertini D. et al.* The FAIR Simulation and Analysis Framework // Proc. of CHEP'07, Intern. Conf. on Comp. in High Energy and Nucl. Phys., Sept. 2–5, 2007; J. Phys. Conf. Ser. Victoria, BC Canada.
17. <https://software.intel.com/sites/default/files/m/d/4/1/d/8/CompilerAutovectorizationGuide.pdf>
18. OpenMP. <http://openmp.org>.
19. *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>.

Получено 9 июня 2016 г.