

РЕГИСТРАЦИЯ РЕДКИХ СОБЫТИЙ $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ СВМ

О. Ю. Дереновская^а, Т. О. Аблязимов^б, В. В. Иванов^{а, в, 1}, Ю. В. Руссов^в

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Компания «Rock Flow Dynamics», Москва

^в Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

В данной работе предлагается простой и эффективный вариант триггера для регистрации редких событий $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ в эксперименте СВМ. Для его реализации требуется только информация, регистрируемая координатными детекторами станции MUCH.

In this paper, we propose a simple and effective trigger option for detecting rare $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ events in the СВМ experiment. For its implementation, only information recorded by the coordinate detectors of the MUCH station is required.

PACS: 02.70.-c; 02.50.Sk; 13.20.-v; 07.05.Kf; 29.85.Ca

ВВЕДЕНИЕ

Исследование фазовой диаграммы квантовой хромодинамики в области высокой барионной плотности является главной задачей физической программы эксперимента СВМ (Compressed Baryonic Matter), подготовка которого ведется международной коллаборацией с участием ученых ОИЯИ на ускорительном комплексе FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) [1, 2].

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки СВМ. В ее состав входят высокоточные координатные детекторы MVD (Micro-Vertex Detector) и STS (Silicon Tracking System), которые расположены в поле сверхпроводящего дипольного магнита. Их основное назначение — реконструкция траекторий регистрируемых заряженных частиц. Детектор PSD (Projectile Spectator Calorimeter) используется для измерения энергии спектаторов в переднем направлении, оценки центральности взаимодействия, его положения на входе в калориметр и определения плоскости реакции.

Две различные конфигурации детекторов будут использоваться в СВМ для регистрации и идентификации частиц.

1. Электронно-адронная конфигурация включает в себя детекторы черенковского RICH (Ring Imaging CHerenkov detector) и переходного TRD (Transition Radiation Detector) излучений, детектор измерения времени пролета ToF (Time-of-Flight

¹E-mail: ivanov@jinr.ru

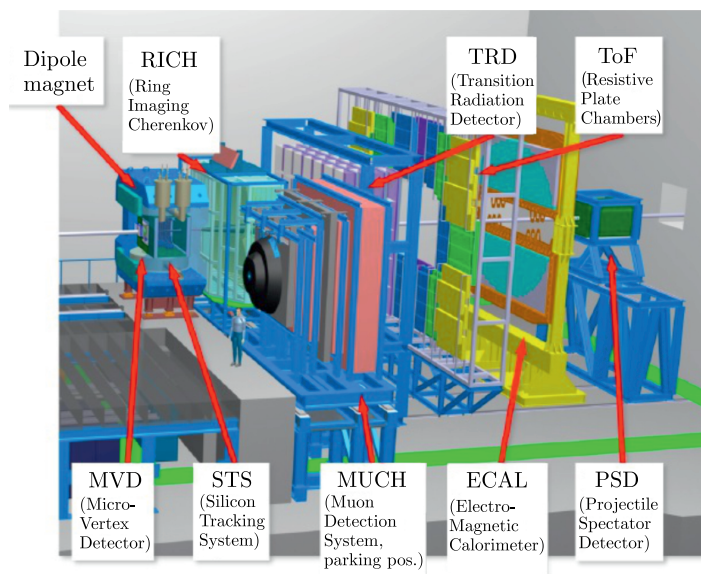


Рис. 1. Схема экспериментальной установки СВМ в двух конфигурациях: электронной для регистрации электронов, позитронов и адронов; мюонной для регистрации мюонных пар

detector) и электромагнитный калориметр ECAL (Electromagnetic CALorimeter). Данная конфигурация детекторов позволяет одновременно регистрировать электроны, позитроны и заряженные адроны, а также все материнские частицы, распадающиеся на указанные составляющие.

2. Мюонная конфигурация состоит из детекторов MUCH (MUon CHamber), TRD, ToF и нацелена на измерение димюонных пар, образующихся в результате распадов векторных мезонов и чармония.

Во всем мире интерес к изучению свойств квантовой хромодинамики в настоящее время отражен рядом экспериментальных программ, таких как программа сканирования энергии пучка на коллайдере RHIC, эксперимент NA61 в ЦЕРН и планируемые новые установки в Германии, России, Китае и Японии [3]. Среди них СВМ уникален своей амбициозной целью: проводить измерения при очень высоких скоростях взаимодействий — до 10^7 столкновений в секунду, что более чем на два порядка выше, чем в других текущих или запланированных экспериментах. Такие скорости взаимодействий дадут доступ к чрезвычайно редким наблюдаемым, например к странным антигиперонам или очарованным адронам. Эта цель ставит сложные задачи не только для детекторов и считывающей электроники с точки зрения скорости и радиационной стойкости, но также для системы сбора и обработки данных [4, 5].

Концепция считывания данных в СВМ не предусматривает аппаратного триггера. Вместо этого предлагается включать в электронику каждого детектора элементы, дающие запуск триггера, а также записывать времена срабатывания детек-

тирующего оборудования. Полная информация с детектора агрегируется системой DAQ (Data Acquisition) и доставляется в онлайн-вычислительный кластер. Здесь необработанные данные будут проверяться в режиме реального времени, а данные о событиях, содержащих сигнатуры редких наблюдаемых, будут выбраны для хранения.

В данной статье обсуждается система триггера для регистрации редких событий $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$, использующая только информацию, регистрируемую координатными детекторами мюонной станции MUCH.

1. ПРОЦЕДУРА РЕГИСТРАЦИИ $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$

В работах [6, 7] нами была разработана процедура для регистрации $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ («сигнальных событий») с помощью детектора MUCH. Данная процедура включает три последовательных этапа:

- 1) поиск и реконструкцию треков от заряженных мюонов, зарегистрированных координатными детекторами MUCH;
- 2) определение зарядов мюонов, отвечающих реконструированным трекам;
- 3) надежную идентификацию «сигнальных событий».

1.1. Поиск и реконструкция треков от заряженных мюонов. Поиск и реконструкция треков от заряженных мюонов, зарегистрированных детектором MUCH, реализованы с помощью алгоритма на основе клеточного автомата [6]. В этом подходе с учетом того, что в зоне первой станции MUCH влияние магнитного поля пренебрежимо мало, траектории частиц аппроксимировались отрезками прямых. Кроме того, принимались во внимание только такие треки, которые оставили отсчеты во всех станциях MUCH.

Алгоритм реконструкции траекторий заряженных частиц включает в себя следующие шаги: а) определение средних точек; б) формирование сегментов; в) связка сегментов и реконструкция траекторий.

Каждая из станций детектора MUCH состоит из трех детектирующих слоев, которые расположены параллельно относительно друг друга на расстоянии 10 см [8]. С учетом эффективности детектирующих слоев (более 90%) каждый мюон при прохождении детектора должен оставлять отсчеты минимум в двух слоях одной станции. Они используются при вычислении «средних точек», на основе которых затем строятся сегменты.

Сегменты — это фрагменты прямых линий, соединяющих средние точки соседних станций MUCH (рис. 2, а). Пределы для наклонов сегментов определялись с помощью моделирования методом Монте-Карло [7].

После того, как сегменты построены, последовательные сегменты связываются, если они имеют общую точку и угол между ними не превышает предела, найденного путем моделирования (см. рис. 2, б) [7].

Трек-кандидат формируется из последовательности сегментов: справа налево (против направления пучка) путем соединения соседних сегментов. Первый сегмент берется на последней станции MUCH, а последний должен заканчиваться на первой

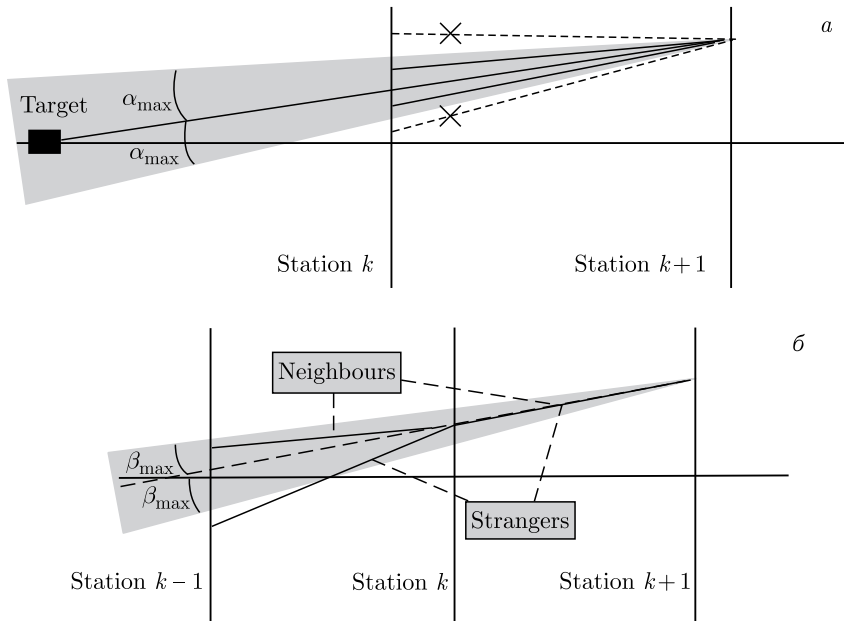


Рис. 2. а) Формирование сегмента; б) процедура связывания сегментов

станции. На этапе, когда все треки найдены, при появлении нескольких альтернатив одного трека выбирается тот, который имеет наименьшее значение χ^2 .

1.2. Учет времени при построении сегментов трека. В реализованной для триггирования версии реконструкции треков учитывается время детектирования хитов (попаданий в станцию) при их объединении в сегменты и далее при связывании сегментов в треки-кандидаты. При построении сегмента проводится линейная экстраполяция параметра, обозначающего время, по длине сегмента трека s , которая легко находится по координатам его концов, так как сегменты в нашем случае — это просто отрезки прямой. Чтобы два хита могли быть объединены в сегмент, время, экстраполированное от одного из них, должно быть близко (находиться в пределах 4σ , $\sigma = 4$ нс, что соответствует точности детектора MUCH [8]) от измеренного времени другого хита.

При экстраполяции полагается, что частица от распада (мюон) имела скорость, равную скорости света, что можно считать достаточно хорошим приближением для быстрых мюонов от распада J/ψ . Формула для вычисления искомого времени для зарегистрированного мюона имеет следующий вид:

$$t_{\text{ext}} = t_h + \frac{s}{c},$$

где t_h — время хита, от которого проводится экстраполяция; s — длина сегмента; c — скорость света.

1.3. Определение зарядов регистрируемых мюонов. Очевидно, что два трека в «сигнальном событии» должны быть вызваны мюонами с противоположными за-

рядами. Для определения знака заряда мюона можно использовать отклонение его траектории в магнитном поле дипольного магнита. Поскольку доминирующая составляющая магнитного поля расположена вдоль оси OY (вертикально вверх), она будет отклонять в плоскости XOY положительно и отрицательно заряженные мюоны в противоположных направлениях [6].

1.4. Отбор сигнальных событий по расстоянию между треками. 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. Данная особенность «сигнальных событий» должна позволить надежно отделять их от фона. Кроме того, для того чтобы заряженный мюон успешно пересек детектор MUCN, он должен иметь импульс не менее 3 ГэВ/с. Из этого следует, что мюоны сигнальной пары должны иметь расстояние между попаданиями (хитами), в которых они пересекают первую станцию MUCN, больше некоторого предельного значения.

С помощью моделирования методом Монте-Карло найдено оптимальное значение для такого расстояния, которое составило 50 см [6]. Также было показано, что предлагаемая процедура регистрации «сигнальных событий» позволяет отбирать в реальном времени эксперимента не менее 87% $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$. При этом коэффициент подавления фона составляет более 10^3 , что превышает максимальные требования для эксперимента CBM [6].

2. ТРИГГЕР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СОБЫТИЙ $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$

Для выработки сигнала запуска триггера мюоны сигнальной пары должны быть зарегистрированы первой станцией MUCN, при этом расстояние между хитами сигнальной пары в этой станции должно быть не менее 50 см.

Результаты, описанные выше, были получены на основе модельных данных, отвечающих отдельным ядро-ядерным соударениям (событиям). Для адаптации рассмотренных выше алгоритмов к условиям реального эксперимента необходимо учесть пространственно-временную структуру пучков на ускорительном комплексе FAIR.

Такая адаптация должна позволить анализировать потоки экспериментальных данных, регистрируемые установкой, в течение конечных «временных интервалов». Указанные временные интервалы, получившие название «time slices» (TS), содержат измерения (хиты) от довольно большого количества соударений частиц падающего пучка с мишенью.

При этом каждая станция MUCN представляется в виде трехмерной (x, y, t) иерархически организованной структуры (рис. 3), в которую заносятся хиты, зарегистрированные детектором MUCN за время конкретного TS. Отдельный канал рассматриваемой структуры содержит ограниченное количество хитов (либо не содержит ни одного).

Процедура вычисления местоположения ячейки, отвечающей зарегистрированному хиту в трехмерном пространстве (x, y, t) , проста и очевидна. Данная процедура должна обеспечить определение координат (x_1, y_1, x_2, y_2) и времени регистрации (t_1, t_2) для «сигнальных событий» в потоке измерений («сырых» данных), попавших в конкретный TS.

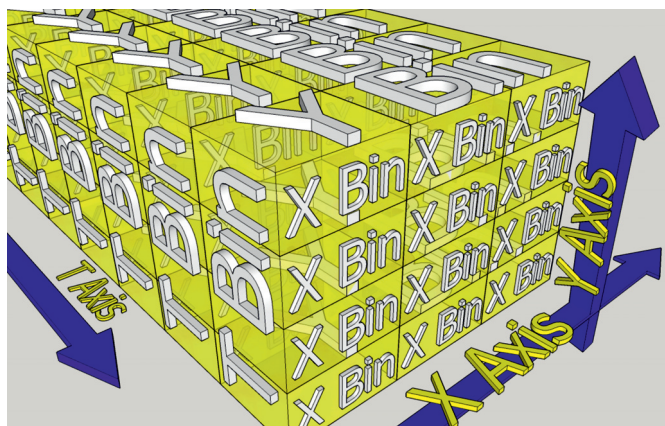


Рис. 3. Трехмерная (x, y, t) иерархическая структура

В будущем планируется разработать специализированную базу данных, предназначенную для регистрации информации, относящейся к «сигнальным событиям», и занесения этих данных в долговременное хранилище.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предлагается простой и эффективный вариант триггера для регистрации редких распадов $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ в эксперименте СВМ. Для его реализации требуется только информация, регистрируемая координатными детекторами станции MUCH.

На конкретном примере может быть разработана процедура для отработки технологии формирования «сигнальных событий», которая включает в себя:

- программную реализацию алгоритма триггера для регистрации событий $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ (назначение указанного алгоритма — анализ данных, попавших в конкретный TS, поиск событий, отвечающих критериям отбора событий $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$, фиксация координат (x_1, y_1, x_2, y_2) и времени регистрации (t_1, t_2) для «сигнальных событий», занесение их в специализированную базу данных);
- процедуру сбора дополнительной информации с других детекторов установки СВМ, необходимой для реконструкции импульсов заряженных частиц (детектор STS), измерения времен пролета (детектор ToF) и определения их масс (согласование информации с STS и ToF с информацией с детектора MUCH реализуется путем определения подходящих временных интервалов относительно времени срабатывания триггера);
- разработку специализированной базы данных для сбора информации, относящейся к «сигнальным событиям», и занесения ее в долговременное хранилище.

Следующим важным шагом является формирование «сигнальных событий» для более сложного случая: распада $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ [9]. На основе информации, собранной со всех детекторов, можно сформулировать решение о целесообразности включения события в список «сигнальных событий».

С нашей точки зрения, оба этих случая охватывают практически все возможные варианты для формирования «сигнальных событий», которые могут иметь место при изучении других физических процессов в эксперименте CBM.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. www.fair.center.eu
2. *Ablyazimov T. et al. (CBM Collab.)* // Eur. Phys. J. A. 2017. V. 53. P. 60.
3. *Friese V.* // PoS (CORFU2018). 2018. V. 186. P. 1–14.
4. *Volker F.* Computational Challenges for the CBM Experiment // Lect. Notes Comp. Sci. 2012. V. 7125. P. 17–27.
5. *Friese V. (CBM Collab.)* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 898. P. 112003.
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. 867–877.
7. *Ablyazimov T., Ivanov V.* // Part. Nucl., Lett. 2017. V. 14, No. 3(208). P. 504–511.
8. Technical Design Report for the CBM Muon Chambers / Eds: S.Chattopadhyay et al. Darmstadt: GSI, 2015. GSI-2015-02580. <http://repository.gsi.de/record/161297>.
9. *Derenovskaya O. Yu., Ablyazimov T. O., Ivanov V. V.* // Eur. Phys. J. Web of Conf. 2018. V. 173. P. 04004.

Получено 24 октября 2019 г.