

Об идентификации $e^{+/-}$ с помощью детектора переходного излучения при регистрации распадов $J/\psi \rightarrow e^+ + e^-$ в эксперименте CBM

О.Ю. Дереновская, В.В. Иванов

Лаборатория информационных технологий, ОИЯИ, Дубна

Измерения чармония (J/ψ , ψ') относятся к ключевым задачам эксперимента CBM [1]. Для его регистрации по диэлектронному каналу распада необходимо надежно идентифицировать электроны/позитроны¹, в условиях доминирующего адронного, в основном от пионов, фона. Наиболее подходящим для решения указанной задачи является детектор переходного излучения TRD (Transition Radiation Detector), который должен обеспечить надежную идентификацию электронов, высокий уровень подавления пионов, восстановление траекторий проходящих через него заряженных частиц в условиях интенсивных потоков (до 10^7 соударений в секунду) и высокой множественности вторичных частиц (от 100 до 1000 частиц в одном ядро-ядерном соударении). При этом следует отметить, что регистрацию событий, связанных с рождением чармония, планируется проводить в реальном времени эксперимента. Поэтому, чтобы решать указанные задачи надежно и быстро, необходимо использовать адекватные математические методы и вычислительные алгоритмы.

В эксперименте CBM для идентификации электронов и подавления пионов, используя измерения потерь энергии заряженной частицы в многослойном TRD, применяются искусственная нейронная сеть (ИНС) [2] и непараметрический критерий согласия ω_n^k [3]. Ниже детально анализируются особенности данных методов при решении рассматриваемой задачи, обсуждаются их преимущества и недостатки. Проводится сравнение мощностей указанных подходов на примере реконструкции событий $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, образующихся в Au+Au-соударениях при энергии пучка 25 ГэВ/нуклон. В заключение обосновывается выбор в пользу подхода на основе непараметрического критерия согласия ω_n^k .

Процедура реконструкции $J/\psi \rightarrow e^+ + e^-$ включает в себя следующие этапы [4, 5]:

- 1) Реконструкция траекторий и импульсов заряженных частиц, зарегистрированных системой координатных детекторов STS [4].
- 2) Формирование выборок электронов и позитронов, отвечающих отдельному Au+Au со-

¹Так как, в нашем случае, задачи идентификации электронов и позитронов идентичны, то далее будем рассматривать только идентификацию электронов.

ударению.

В эксперименте CBM электроны/позитроны идентифицируются по характерному черенковскому и переходному излучениям, образующимся в детекторах RICH и TRD при регистрации заряженных частиц. В дополнение к указанным детекторам используется также информация с детектора TOF для отделения адронов от электронов по времени их пролета от мишени до детектора RPC [5].

- 3) Исключение из указанных выборок электронов/позитронов, не удовлетворяющих специальным критериям отбора [6]:
 - поперечный импульс частиц должен быть больше 1 ГэВ/с;
 - частицы должны быть испущены из области мишени: прицельный параметр $\chi_{prim} < 3,5$.
- 4) Отбор кандидатов в J/ψ -мезоны и определение их характеристик. Для формирования выборки кандидатов в J/ψ -мезоны и реконструкции их характеристик использовался пакет KFParticle [7].
- 5) Построение спектра инвариантных масс для отобранных кандидатов в J/ψ -мезоны.

Из вышеизложенного следует, что ключевой момент в процедуре выделения и реконструкции J/ψ -мезонов – это идентификация электронов, регистрируемых детекторами RICH, TRD и TOF в условиях интенсивного пионного фона. Остановимся более подробно на методах идентификации электронов с помощью детектора TRD, т.к. TRD вносит определяющий вклад в этот процесс.

Детектор TRD в эксперименте CBM

Основное назначение детектора переходного излучения TRD – это исключение из выборки частиц, идентифицированных с помощью детектора RICH как электроны, примеси пионов. Процедура удаления пионов включает в себя несколько этапов: 1) поиск и реконструкция траекторий частиц, зарегистрированных координатными детекторами TRD, 2) связывание треков, найденных в TRD, с треками, реконструированными системой STS и отобранными детектором RICH, 3) идентификация частиц с учетом потерь энергии только в тех модулях TRD, которые дали вклад в треки, реконструированные детектором TRD.

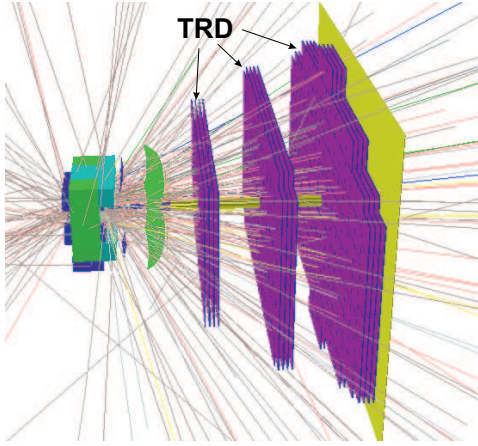


Рис. 1: Схема размещения стандартной версии детектора TRD в установке CBM

На рис. 1 приведена схема размещения детектора TRD в установке CBM. Стандартная версия TRD состоит из трех станций, расположенных от мишени на расстояниях 5 м, 7,2 м и 9,5 м, соответственно. Отдельная станция включает четыре детектирующих модуля, каждый из которых содержит два элемента: 1) радиатор, в котором происходит генерация фотонов переходного излучения высокоэнергичными электронами/позитронами ($\gamma > 2000$), и 2) многопроволочная пропорциональная камера (МПК), предназначенная для измерения потерь энергии регистрируемых заряженных частиц и фиксации координат места их прохождения через TRD.

Для поиска и реконструкции треков регистрируемых МПК используются метод слежения по треку и фильтр Калмана [9]. В алгоритме слежения по треку при инициализации процедуры поиска треков в качестве начальных приближений используются треки, найденные в детекторе STS. Поэтому трек, найденный в TRD, оказывается однозначно связанным с конкретным STS-треком. Считается, что трек в TRD найден, если он содержит число хитов (координатных отсчетов) не менее 9.

С каждым из реконструированных треков ассоциируется набор потерь энергий ($\Delta E_i, i = 1, \dots, n$), оставленных заряженной частицей в $n = 12$ модулях TRD. При этом, если координатный детектор i -го модуля не внес своего вклада (в виде соответствующего хита) в реконструкцию трека, потеря энергии в этом модуле принимается равной нулю: $\Delta E_i = 0$. Используя указанный набор потерь энергий и специальные математические методы для многомерного анализа данных решается задача идентификации частицы, состоящая в определении к какому из распределений (в нашем случае, электронов или пионов) эти потери относятся.

Распределения потерь энергии электро-

нов и пионов в TRD

На рис. 2 приведены распределения полных потерь энергии пионов (пунктирная линия) и электронов (сплошная линия) с импульсом 3 ГэВ/с в первом модуле детектора TRD. Из рисунка видно, что оба этих распределения сильно перекрываются. Из этого следует, что используя измерения только одного модуля невозможно отличить электроны от пионов. С этой целью потери энергии частицы регистрируются многослойным детектором TRD, а при обработке измерений с такого детектора применяют методы многомерного анализа данных, учитывающие одновременные измерения несколькими модулями.

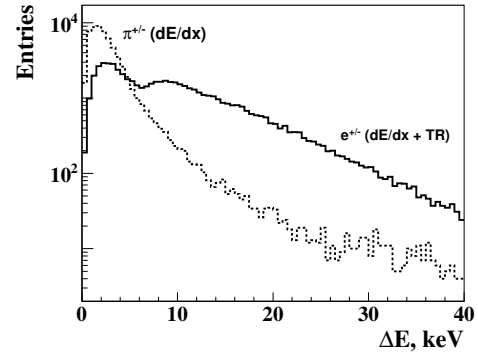


Рис. 2: Распределения потерь энергии π (пунктирная линия) и e (сплошная линия) с $p=3$ ГэВ/с в одном модуле TRD

Распределение ионизационных потерь энергии пионов достаточно хорошо аппроксимируется функцией логнормального распределения (рис. 3):

$$f(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma x}} \exp^{-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln x - \mu)^2}, \quad (1)$$

где σ - дисперсия, μ - средняя величина и A - нормировочный коэффициент [8].

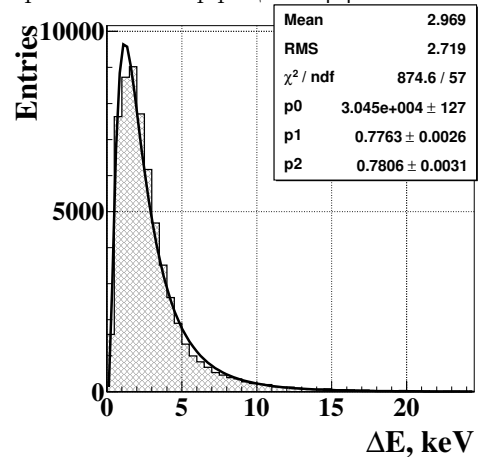


Рис. 3: Распределение потерь энергии пионов с $p=3$ ГэВ/с и его аппроксимация функцией (1)

Распределение потерь энергии электронов носит более сложный характер: ионизационные по-

тери энергии + потери энергии на переходное излучение. Причем примерно в половине случаев при прохождении электрона через модуль TRD в радиаторе не образуется переходное излучение, что, конечно же, серьезно усложняет задачу идентификации электронов/пионов [3].

Для решения задачи идентификации электронов в детекторе TRD на основе потерь энергии частиц ниже будут рассмотрены методы многомерного анализа данных на основе искусственной нейронной сети и критерия согласия ω_n^k [3].

Идентификация электронов в TRD с помощью ИНС

Ранее в работе [2] нами была исследована возможность решения задачи идентификации e/π на основе искусственной нейронной сети - многослойного перцептрона (МСП), и приведены рекомендации по выбору структуры такой сети. В настоящее время в эксперименте СВМ для идентификации частиц с помощью детектора TRD используется трехслойный перцептрон, реализованный в среде SVMROOT [4, 5].

Следует отметить, что ИНС является инструментом чувствительным к выбору входных данных. Для ее применения требуется знать распределения потерь энергии обеих частиц – электронов и пионов. Распределения потерь энергии пионов в веществе хорошо изучены, в то время как потери энергии электронов носят сложный характер. В этой связи нельзя гарантировать надежность получаемых результатов.

Кроме того, МСП необходимо обучать и тестировать отдельно для частиц с разным числом хитов в TRD-треке (от 9 до 12) и разными импульсами. Это потребует большого числа переборов и, как следствие, увеличение времени расчетов.

Следует также отметить, что для достижения приемлемого уровня подавления пионов требуется преобразование величин потерь энергии в слоях TRD к более "эффективным" переменным, характерным для критерия согласия ω_n^k .

Идентификация электронов в TRD с помощью модифицированного критерия ω_n^k

Для того чтобы применить критерий ω_n^k (k - степень критерия, n - размер выборки, соответствующий числу слоев в детекторе TRD), требуется вычислить значение статистики:

$$\omega_n^k = -\frac{n^{\frac{k}{2}}}{k+1} \sum_{j=1}^n \left\{ \left[\frac{j-1}{n} - \phi(\lambda_j) \right]^{k+1} - \left[\frac{j}{n} - \phi(\lambda_j) \right]^{k+1} \right\}, \quad (2)$$

где $\phi(\lambda)$ – значение величины функции распределения Ландау, которое вычислялось с помощью функции DSTLAN (из библиотеки CERNLIB), λ

– значение новой переменной. Значения переменной λ упорядочены по величине и связаны с первоначальным набором потерь энергии частицы следующим выражением:

$$\lambda_i = \frac{\Delta E_i - \Delta E_{mp}^i}{\xi_i} - 0.225, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где ΔE_i – величина потери энергии частицей в i -ом радиаторе TRD, ΔE_{mp}^i – величина наиболее вероятной потери энергии для пионов, $\xi_i = \frac{1}{4.02}$ FWHM (Full Width on Height Medium – полная ширина на половине высоты) для распределения потерь энергии пионов в i -ом радиаторе, n – число модулей в детекторе TRD.

Для вычисления значений переменных ΔE_{mp}^i и ξ_i распределение ионизационных потерь энергии пионов фитировалось функцией плотности логнормального распределения (1).

Значения параметров наиболее вероятной потери энергии и величины ξ_i меняются в зависимости от импульса пиона. Поэтому были получены формулы для вычисления данных величин путем аппроксимации зависимостей ΔE_{mp}^i и ξ_i от импульса пиона полиномом третьей степени $f(p) = ap^3 + bp^2 + cp + d$:

$$\Delta E_{mp}(p) = 0.0002598p^3 - 0.008862p^2 + 0.1176p + 0.9129$$

$$\xi(p) = 0.00008938p^3 - 0.003022p^2 + 0.03999p + 0.5292$$

где p – импульс частицы.

В работе [3] критерий ω_n^k был модифицирован с учетом характера распределений потерь энергии электронов. При вычислении статистики с помощью формулы (2) используется выборка величин λ (смотри равенство (3)), в которой все значения упорядочены по их величине. Заметим, что величина λ_i прямо пропорциональна потере энергии частицей, зарегистрированной в i -м слое TRD. В этой связи, и принимая во внимание тот факт, что наиболее вероятное значение отсчетов переходного излучения в 12-слойном TRD составляет в среднем 6, мы можем использовать только ту часть выборки λ_i , которая отвечает индексам $i > 6$, т.е. наибольшим потерям энергии частицей.

Таким образом, следует вычислять значение статистики ω_5^k или ω_6^k для частиц, треки которых содержат от 9 до 12 хитов соответственно. Проведенные исследования показали, что без потери эффективности идентификации электронов для всех частиц можно использовать статистику ω_6^k со степенью k , равной 4.

Следует подчеркнуть, что в отличие от ИНС для применения критерия ω_n^k необходимо знание только параметров распределения ионизационных потерь энергии пионов.

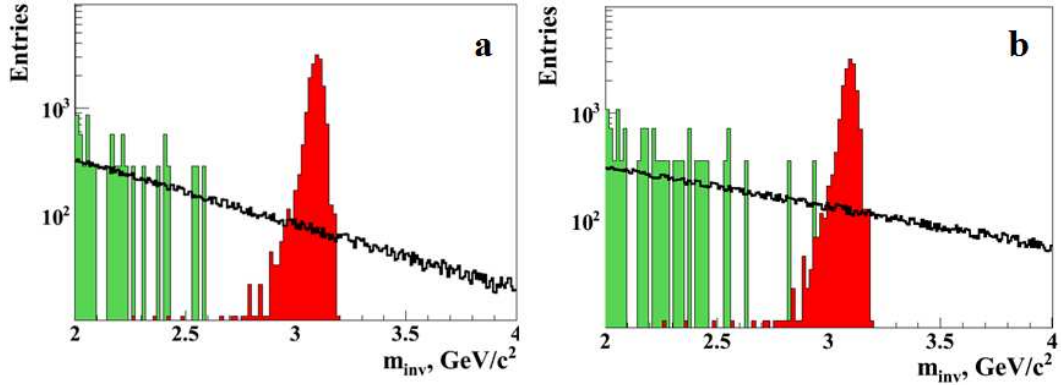


Рис. 4: Реконструированный спектр инвариантной массы для кандидатов в J/ψ , в случае когда для идентификации электронов в TRD используется: (а) МСП или (б) модифицированный критерий ω_6^4

Реконструкция J/ψ в AuAu-соударениях при энергии 25 ГэВ/нуклон

Сравним мощности указанных подходов на примере реконструкции распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, образующихся в Au+Au-соударениях при энергии пучка 25 ГэВ/нуклон.

Для построения спектра инвариантной массы использовалась процедура, подробно описанная в работах [4, 5, 6]. На рис. 4 представлен итоговый спектр инвариантной массы для кандидатов в J/ψ , в случае когда для идентификации электронов в TRD используется МСП (а) или модифицированный критерий ω_6^4 (б). Спектр соответствует 10^{11} центральным Au+Au соударениям при энергии пучка 25 ГэВ/нуклон.

Из приведенных рисунков видно, что сигнал от J/ψ -мезонов четко выделяется над комбинаторным фоном. Эффективность регистрации сигнала составляет 13.5% в обоих случаях. При этом отношение сигнала к фону составляет ~ 7.5 . Это означает, что с помощью установки CBM и разработанных алгоритмов отбора можно регистрировать до 525 распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ за 1 час работы при частоте соударений 1 МГц.

Выводы

Рассмотрена задача отбора и реконструкции распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, регистрируемых установкой CBM в AuAu-соударениях при энергии пучка 25 ГэВ/нуклон. Ключевая проблема в этой задаче – быстрая и надежная идентификация электронов/позитронов на основе потерь энергии заряженных частиц, регистрируемых детектором переходного излучения. Детально проанализированы особенности применения двух методов для решения указанной задачи: многослойный перцептрон и модифицированный критерий согласия ω_n^k .

Проведенный нами анализ показал, что оба подхода дают близкие результаты по выходу $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ и отношению сигнал/фон. При этом, по сравнению с критерием ω_n^k , метод на основе ИНС имеет ряд существенных ограничений, ко-

торые подробно обсуждаются в работе. Учитывая простую программную реализацию алгоритма критерия ω_n^k , его можно будет использовать для отбора распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ в реальном времени эксперимента.

Список литературы

- [1] The CBM Physics Book, editing by B. Friman, C. Höhne, S. Leupold, J. Knoll, J. Randrup, R. Rapp, P. Senger, Lecture Notes in Physics, Vol. 814, 1st Edition, 2011, 960 pages.
- [2] Акишина Т.П., Дереновская О.Ю., Иванов В.В.: Об идентификации электронов и пионов с помощью многослойного перцептрона в детекторе переходного излучения эксперимента CBM, Вестник РУДН Серия Математика. Информатика. Физика, No.1, 2010, стр. 94-103.
- [3] Т.П. Акишина: Особенности применения критерия ω_n^k к задаче идентификации электронов с помощью детектора переходного излучения в эксперименте CBM, Письма в ЭЧАЯ, 2012, Т.9, No.3(173), стр. 440-462.
- [4] О.Ю. Дереновская и Ю.О. Васильев: Методика реконструкции $J/\psi \rightarrow e^+ + e^-$ при энергиях SIS100 в эксперименте CBM, this report.
- [5] О.Ю. Дереновская и Ю.О. Васильев: Реконструкция J/ψ в диэлектронном канале распада при энергиях SIS100 в эксперименте CBM, Письма в ЭЧАЯ, Т.10, No.5(182), 2013, стр. 694-705.
- [6] О.Ю. Дереновская и Ю.О. Васильев: Критерии отбора распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, регистрируемых установкой CBM в AuAu-соударениях при энергии 25 ГэВ/нуклон, Письма в ЭЧАЯ, Т.11, No.1(185), 2014, стр. 63-73.
- [7] Gorbunov S. and Kisel I.: Reconstruction of Decayed Particles Based on the Kalman Filter, CBM-SOFT-note-2007-003, GSI, Darmstadt, 2007.
- [8] Akishina E.P., Akishina T.P., Ivanov V.V., Denisova O.Yu.: Distributions of energy losses for electrons and pions in the CBM TRD, JINR Communication, E10-2007-158, JINR, Dubna, 2007.
- [9] Лебедев А., Ососков Г.: Реконструкция траекторий частиц в детекторах TRD и MUCH эксперимента CBM, Сообщ. ОИЯИ P10-2010-3, ОИЯИ, Дубна, 2010.