

© 2011 І. С. Кулаков¹, І. В. Кисіль², М. В. Зизак¹¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ²GSI Гемгольццентр по вивченню зіткнень важких іонів, Дармштадт, Німеччина

ПОШУК ТРАЕКТОРІЙ ЧАСТИНОК У ВЕРШИННОМУ ДЕТЕКТОРІ ЕКСПЕРИМЕНТУ CBM

Пошук траекторій частинок у вершинному детекторі є основою реконструкції зіткнення в майбутньому експерименті CBM (GSI, Німеччина). Вимоги для сучасного експерименту з фіксованою мішенню дуже високі, а саме: до 10^7 зіткнень за секунду, до 1000 заряджених частинок у детекторі, неоднорідне магнітне поле, близько 85 % додаткових фонових комбінаторних вимірів у детекторі, повна реконструкція події в режимі реального часу. Метод кліткового автомату використовується для пошуку траекторій заряджених частинок. У статті наведено опис алгоритму та результати тестів.

Ключові слова: CBM, важкі іони, клітковий автомат, пошук треків.

Вступ

Задачею експерименту Compressed Baryon Matter (CBM), проведення якого планується на прискорювальному комплексі FAIR, є всебічне дослідження властивостей баріонної матерії при високих густинах та температурах [1]. При високих температурах та/або високих баріонних густинах очікується фазовий перехід від адронних до партонних ступенів вільності. Перевірка його існування та дослідження фазової діаграми сильно взаємодіючої матерії є однією з ключових задач CBM експерименту. Це дослідження надасть інформацію про два фундаментальних, але досі невіршених аспекти квантової хромодинаміки: конфайнмент та порушення киральної симетрії.

Також до запропонованої експериментальної програми входять: вивчення властивостей адронів у сильно взаємодіючому середовищі, пошук критичної точки сильно взаємодіючої матерії, вивчення рівняння стану баріонної матерії при високих густинах, пошук нових екзотичних станів матерії, таких як конденсат дивних частинок.

Дослідницька програма експерименту сфокусована на: короткоживучих легких векторних мезонах (ρ , ω , ϕ); дивних частинках, таких як баріони (антибаріони), що містять більше, ніж один дивний кварк (антикварк), так званих мультидивних гіперонах (Ξ , Ω); мезонах, що містять чарівний або античарівний кварк (D , Λ_c^+), або ($c\bar{c}$) пару (J/ψ , ψ'); колективних ефектах; флуктуаціях виходів частинок.

Більшість спостережуваних експерименту представляють собою надзвичайно рідкі сигнали, умовою спостереження яких є обробка величезної кількості подій, що будуть зібрані при частотах зіткнень до 10^7 Гц.

Детектуюча система експерименту CBM (рис. 1) складається з MVD (Micro Vertex System), STS (Silicon Tracking System), RICH (Ring Imaging

Cherenkov detector), MUCH (Muon Chambers), TRD (Transition Radiation Detector), TOF (Time of Flight Detector) та ECAL (Electromagnetic Calorimeter). Детектори MVD та STS є базовими для пошуку частинок, вони визначають аксептанс усієї детектуючої системи. STS складається з тонких двосторонніх стріпових детекторів, розташованих у неоднорідному магнітному полі, за допомогою якого вимірюється імпульс частинок. Місце проходження частинки через детектуючу станцію (хіт) визначається перетином спрацювавших стріпів на передній та задній сторонах стріпового детектора. При цьому додатково до реальних точок взаємодій утворюється до 85 % фонових хітів унаслідок комбінування стріпів, що зреагували на різні частинки.

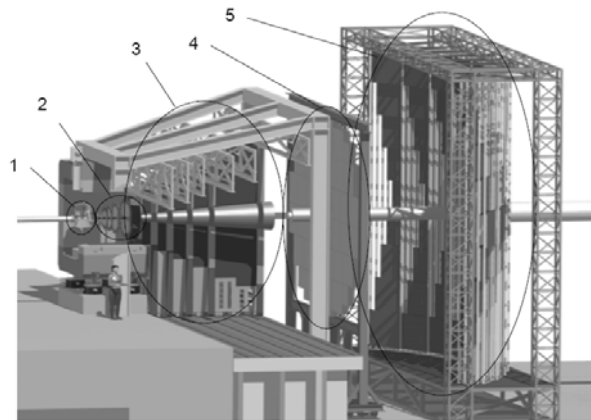


Рис. 1. Установа детектуючої системи мюонного каналу експерименту CBM: 1 – MVD; 2 – STS; 3 – MUCH; 4 – TRD; 5 – TOF.

Згідно з експериментальною програмою проведення зіткнень важких іонів планується при енергіях в інтервалі від 8 до 45 АГев. У типовому центральному зіткненні при таких енергіях утворюються біля тисячі заряджених частинок.

Основою пошуку частинки є визначення траекторії частинки, яке полягає у знаходженні хі-

тів, утворених частинкою вздовж свого шляху на станціях детектуючої системи. Сукупність знайдених хітів називається треком частинки.

Таким чином, задача пошуку треків частинок полягає у виділенні з-поміж усіх зареєстрованих детектором хітів таких, що відповідають окремим частинкам. Зазначені умови (10^7 зіткнень за секунду, 1000 заряджених частинок у центральному зіткненні, неоднорідне магнітне поле, 85 % фонових хітів) роблять цю задачу надзвичайно складною.

Після проведення інтенсивних вивчень різних методів пошуку найбільш придатним для даних умов був визнаний метод кліткового автомату. На даний момент цей метод використовується для пошуку траєкторій частинок на базі MVD та STS детекторів.

Метод кліткового автомату для пошуку треків частинок

Ідея алгоритму кліткового автомату [2] полягає у створенні коротких фрагментів треків (триплетів) та подальшому їхньому відборі. При цьому триплети об'єднуються у треки, з-поміж яких відбираються ті, що не мають спільних хітів.

Триплети створюються шляхом поступового об'єднання хітів на сусідніх станціях та перевірки отриманих комбінацій на фізичність (можливість утворення частинкою, що виникла при зіткненні важких іонів) та належність акцептансу детектора. Так, наприклад, моделювання показує, що переважна більшість первинних частинок мають малі кути вильоту і продовження їхніх траєкторій проходить в області первинної вершини (місця взаємодії іонів з мішенню). Майже усі частинки, що несуть інформацію про процеси, під час зіткнення мають імпульс більше 0,1 GeV. Акцептанс детекторної системи не включає частинок із меншим імпульсом.

Із самого початку триплет створюється, базуючись на фізичній моделі, що у відповідності з числом ступенів вільності частинки в магнітному полі включає п'ять параметрів: координати – x , y , тангенси кутів нахилу до осі Z – t_x , t_y , відношення заряду до імпульсу – q/p та їхню коваріаційну матрицю. П'ять параметрів при певній z -координаті частинки однозначно визначають траєкторію частинки та дають змогу визначити параметри при будь-яких значеннях координати z методом екстраполяції [3]. Для всіх триплетів параметри ініціалізуються нулями, а коваріаційна матриця має діагональний вигляд, де діагональні елементи відповідають акцептансу детектора. Далі, по мірі додавання хітів до

триплету, параметри та коваріаційна матриця уточнюються.

Створений таким чином триплет містить хіти, апроксимовані фізичною моделлю треку. Три хіти представляють собою шість одномірних вимірів і дозволяють точно визначити п'ять параметрів треку та одночасно оцінити χ^2 -відхилення хітів від знайденої траєкторії.

Апроксимація проводиться за методом фільтра Калмана [4] та враховує неоднорідність магнітного поля й розсіяння частинок у матеріалі детекторів. Завдяки точній апроксимації більшість випадкових триплетів може бути відібрано згідно з χ^2 -критерієм.

Враховуючи, що в магнітному полі імпульс частинки зберігається, отримані триплети об'єднуються у трек-кандидати за двома критеріями: наявність двох спільних хітів та однаковість, у межах похибки, імпульсів.

Трек-кандидати, отримані таким шляхом, мають велику кількість спільних хітів, що мало ймовірно для треків реальних частинок. Тому більшість трек-кандидатів має бути відсіяна. Так як при збільшенні кількості хітів імовірність випадкового утворення такої комбінації швидко падає, при відсіюванні перевага надається більш довгим трекам. Так само перевага надається трекам, які згідно з χ^2 -критерієм краще апроксимуються фізичною моделлю треку. Кінцеві треки не можуть мати жодного спільного хіта, що є необхідною умовою зниження рівня гост-треків – треків, що складаються з хітів, випадково розташованих уздовж можливої траєкторії.

Пошук усіх треків проводиться у три етапи: пошук високоенергетичних ($p > 0,5$ GeV/c) квазіпервинних (тих, що летять безпосередньо з області мішені) треків; пошук низькоенергетичних ($0,1$ GeV/c $< p < 0,5$ GeV/c) квазіпервинних треків; пошук треків вторинних частинок. Після кожного етапу усі хіти, що належать знайденим трекам, вилучаються з подальшого розгляду. За такого підходу послаблення критеріїв пошуку супроводжується зменшенням кількості хітів, це робить можливим знаходження треків при високих густинах хітів, що будуть мати місце в експерименті CBM.

Результати

Основною характеристикою алгоритму пошуку треків є ефективність. Для її визначення вводяться поняття знайденого треку частинки – реконструйовані треки, та частинок, що потенційно можуть бути знайдені – потенційно реконстру-

йовані частинки. Частка множини потенційно реконструйованих частинок, що була знайдена алгоритмом, називається ефективністю алгоритму пошуку. За умов, що будуть мати місце при центральних зіткненнях при енергіях порядку 25 АГеВ, у детекторах MVD та STS неможливо відрізнити комбінації трьох хітів, що були утворені однією частинкою, від тих, що випадково лежать на фізичній траєкторії. Більш того, число останніх перевищує число перших на декілька порядків. Схожа проблема має місце для треків з імпульсом, меншим 0,1 ГеВ/с: вони мають високу кривину й вилітають з чутливого об'єму детектора, перетнувши недостатню кількість станцій. З огляду на це, для оцінки алгоритму пошуку потенційно реконструйованими було вирішено вважати тільки ті частинки, що перетинають чотири або більше детекторних станцій та мають імпульс більше 0,1 ГеВ/с.

Для всебічної оцінки алгоритму всі частинки та треки діляться на декілька категорій. Перш за все промодельовані частинки діляться за імпульсом на швидкі ($p > 1$ ГеВ/с) та повільні ($0,1$ ГеВ/с $< p < 1$ ГеВ/с). Також треки поділяються на первинні, які відповідають частинкам, що утворилися в первинній вершині, та вторинні, що утворилися внаслідок розпаду короткоживучих частинок. Реконструйований трек співставлятиметься з певною частинкою у випадку, якщо не менше 70 % хітів треку були утворені взаємодією цієї частинки з детектором.

Частинка вважається знайденою, якщо вона була співставлена з принаймні одним реконструйованим треком. Якщо одній частинці біло співставлено більше одного реконструйованого треку, усі додаткові треки вважаються клонами. Реконструйований трек вважається гостом, якщо він не відповідає жодній фізичній частинці.

Ефективність пошуку треків різних категорій, а також рівень клонів та гостей

Категорія треків	Ефективність, %
Швидкі первинні	95,4
Швидкі вторинні	77,0
Повільні первинні	87,2
Повільні вторинні	46,2
Усі треки	86,3
Клони	0,4
Гости	5,1

Ефективність пошуку треків наведено також на рис. 2. Більшість сигнальних треків – продукти розпаду D-мезонів, J/ψ , ψ' , ω , ϕ та ρ частинок – є високоенергетичними, вилітають з округу

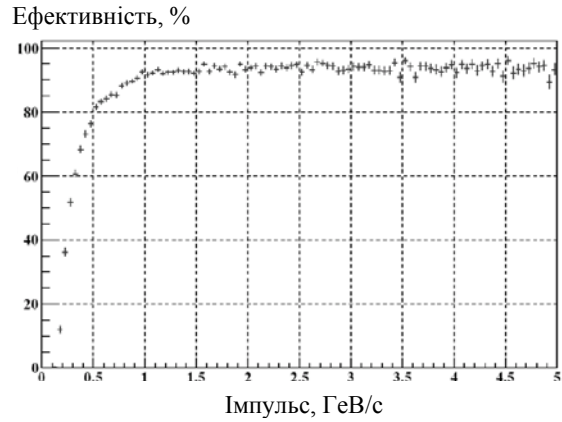


Рис. 2. Залежність ефективності пошуку треків від імпульсу частинок.

первинної вершини і, таким чином, ефективність їхнього пошуку визначається першою категорією – швидких первинних частинок – і є рівною 95 %. Вторинні швидкі треки можуть утворюватися при розпадах K_s^0 , Λ та каскадних розпадах Ξ та Ω . Такі треки утворюються далеко від мішені, вони перетинають менше станцій та для них неможливо використовувати місце розташування мішені як додаткову інформацію. Як наслідок, ефективність їхнього пошуку дещо менша ніж для первинних – 77 %. Вторинні низькоенергетичні частинки можуть утворюватися при розпадах Ξ та Ω гіперонів. Також для зниження рівня фону при реконструкції розпадів векторних мезонів та J/ψ по електронному каналу важливий пошук повільних первинних треків. Однією із складових такого фону є електрони, що виникають при розпадах $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$ та $\gamma \rightarrow e^+ e^-$. Багатократне розсіяння в матеріалі детектора та висока кривизна траєкторії приводить до ще більших втрат при пошуку повільних частинок, відповідні ефективності – 87 та 46 %.

Усереднена по всіх категоріях частинок ефективність дорівнює 86 %. Доля клонів, утворених при реконструкції, дорівнює 0,4 %, гостей – 5 %.

Для аналізу якості алгоритму були проведені тести реконструкції розпадів K_s^0 мезонів по каналу $K_s^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ та Λ^0 баріонів по каналу $\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-$. З метою зменшення рівня фону було застосоване відсіювання реконструйованих розпадів з використанням мінімальних умов на треки.

Ефективність реконструкції розпадів та відношення сигналу до фону (S/B)

Частинка	Ефективність, %	S/B
K_s^0	37,0	0,6
Λ^0	29,5	1,1

Якість знайдених алгоритмом треків дає змогу отримати високі ефективності реконструкції та відношення сигналу до фону. Ефективності реконструкції частинок, що належать акцептансу детекторної системи, становлять приблизно 37 та 30 % для K_s^0 та Λ^0 відповідно. Різниця в ефективностях зумовлена різницею в часі життя частинок та кінематикою розпаду.

Висновки

Розроблено алгоритм пошуку треків частинок в MVD та STS детекторах CBM експерименту. Алгоритм базується на методах кліткового автомату та фільтра Калмана, показує високу

ефективність пошуку для більшості сигнальних треків – 95 % та низький рівень некоректно знайдених треків – 5 %. Реконструкція розпадів K_s^0 -мезонів та Λ^0 -баріонів на базі знайдених алгоритмом треків показує ефективність близько 35 % при достатньо високому відношенні сигналу до фону.

Автори висловлюють щирю подяку д-ру Ю. О. Васильєву за детальні консультації щодо мети та задач експерименту CBM, задачі пошуку треків і проф. д-ру П. Зенгеру. (P. Senger) за можливість проведення цієї роботи та матеріальну підтримку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Friman B., Hohne C., Knoll J. et al.* The CBM Physics Book. - Heidelberg: Springer, 2010. - 1014 p.
2. *Kisel I.* Event reconstruction in the CBM experiment // Nucl. Instr. and Meth. - 2006. - Vol. A566. - P. 85 - 88.
3. *Gorburnov S., Kisel I.* An analytic formula for track extrapolation in an inhomogeneous magnetic field // CBM-SOFT-note-2005-001. - 18 March 2005. - 16 p.
4. *Gorburnov S., Kobschull U., Kisel I. et al.* Fast SIMDized Kalman filter based track fit // Comp. Phys. Comm. - 2008. - Vol. 172. - P. 374 - 383.

И. С. Кулаков, И. В. Кисель, М. В. Зызак

ПОИСК ТРАЕКТОРИЙ ЧАСТИЦ В ВЕРШИННОМ ДЕТЕКТОРЕ ЭКСПЕРИМЕНТА CBM

Поиск траекторий частиц в вершинном детекторе – основа реконструкции столкновения в будущем эксперименте CBM (GSI, Германия). Требования к современному эксперименту с фиксированной мишенью очень высоки, а именно: до 10^7 столкновений за секунду, до 1000 заряженных частиц в детекторе, неоднородное магнитное поле, около 85 % дополнительных фоновых комбинаторных измерений в детекторе, полная реконструкция события в режиме реального времени. Метод клеточного автомата используется для поиска траекторий заряженных частиц. В статье приводится описание алгоритма и результаты тестов.

Ключевые слова: CBM, тяжелые ионы, клеточный автомат, поиск треков.

I. S. Kulakov, I. V. Kisel, M. V. Zyzak

PARTICLES TRAJECTORIES FINDING IN THE VERTEX DETECTOR OF THE CBM EXPERIMENT

Particles trajectories search in the vertex detector is a basis of collision reconstruction of the CBM experiment (GSI, Germany). The requirements for a modern experiment with fixed target are very high, specifically: up to 10^7 collisions per second, up to 1000 charged particles in the detector, inhomogeneous magnetic field, about 85 % additional fake combinatorial measurements in the detector, full on-line event reconstruction. Cellular automaton method is used to reconstruct charged particles trajectories. Description of the algorithm and results of tests are presented.

Keywords: CBM, heavy ions, cellular automaton, search of tracks.

Надійшла до редакції 04.05.11,
після доопрацювання - 25.07.11.