

УДК 539.171

А.С. Юдін, О.Т. Богорош, С.О. Воронов

РЕКОНСТРУКЦІЯ АДРОННИХ СТРУМЕНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КЛАСТЕРНИХ АЛГОРИТМІВ І СУЧАСНИХ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ДАНИХ У ФІЗИЦІ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

In a wide range of statistical data processing in high energy physics jet clustering algorithms and applications for function minimization were used. The aim of the study is to validate the acceptability of the programs FastJet and MINUIT, that provide a powerful tool for finding jets from data and Monte Carlo models after the selection of events and for the subsequent approximation method of least squares. The study is performed using as an example a recent measurements of ZEUS experiment at the collider HERA, which conducted the collision of a proton with an energy of 920 GeV and an electron with an energy of 27,5 GeV. The extraction of the two-pion invariant mass distribution and the electromagnetic pion form factor $\psi(2S)$ in the two-pion electroproduction with a mass in the range $0,4 < M_{\pi\pi} < 2,5$ GeV is shown. Integrated luminosity of 82 pb^{-1} in the kinematic range of virtuality $2 < Q^2 < 80 \text{ GeV}^2$, the energy of the photon-proton center of mass of $32 < W < 180 \text{ GeV}$ and squared momentum transfer $|T| \leq 0,6 \text{ GeV}^2$ was used. Good agreement within errors between measured data and theoretical calculations after jet selection and minimization indicate the reliability and acceptability of these programs.

Вступ

Прорив у галузі фізики частинок значною мірою став можливим завдяки проведенню досліджень за енергій більше 1 TeV. Це дає нам змогу розглянути підструктуру Всесвіту більш детально. Різні експериментальні установки приводять до розвитку найрізноманітніших методів розпізнавання та реконструкції заряджених частинок, які не так просто зіставити один з одним [1]. Сьогодні виникає нове покоління експериментів, у яких щільність треків настільки висока, що успіх вирішальною мірою залежатиме від потужності методів відновлення. Примітно, що навіть сьогодні не існує загальноприйнятого стандартного пакета програмного забезпечення [2], який би виконував пошук треку в різних детекторних установках, що різко контрастує з, наприклад, симуляціями детекторів.

Оскільки пошук треків, як правило, займає найбільше часу в реконструкції, то використання все більш витончених і економічних методів розпізнавання істотно впливає на обчислювальні зусилля. Нові експерименти також вимагають величезних обчислювальних ресурсів для реконструкції даних [3]. Розпізнавання відіграє також важливу роль в інших компонентах детектора, таких як, наприклад, кластерна реконструкція в калориметрах або пошук кілець у детекторах, що реєструють кільця від випромінювання Черенкова. Однак саме в реконструкції полягають найбільш важливі проблеми нового покоління експериментів. На сьогодні для цього пропонується використання

програм FastJet і MINUIT у різних процесах, таких як фото- та електронородження.

Постановка задачі

Метою дослідження є обґрунтування прийнятності програм FastJet і MINUIT для знаходження струменів з даних і моделі Монте-Карло після відбору подій і подальшої апроксимації методом найменших квадратів отриманням розподілу двопіонної інваріантної маси, а також порівняння цього розподілу з теоретичними передбаченнями.

Теоретичні відомості

Адронний струмінь являє собою коліміровані пучки адронів, які утворюються в результаті фрагментації кварків або глюонів високих енергій. Вони, як правило, мають візуально очевидну структуру, якщо дивитися на відображення експериментальних подій, і через вимірювання їхніх енергій та напрямків можна знайти початкову частинку, з якої вони утворилися. Тому струмені є кількісно істотною складовою експериментів на прискорювачах, які використовуються в широкому спектрі аналізів: від нових фізичних пошуків до вивчення квантової хромодинаміки (КХД) — калібрувальної квантової теорії поля, що описує сильну взаємодію елементарних частинок. Кластерним струменевим алгоритмом називається звід правил, дотримуючись яких, можна зіставити набори частинок із наборами струменів.

Зазвичай кластерний струменевий алгоритм включає в себе один або кілька параметрів, які чітко керують його поведінкою. Поєднання алгоритму струменя і його параметрів називають визначенням струменя. Відповідним чином можна визначати струмені з інформації частинок, веж калориметра і партонних подій з розрахунків КХД збурення. Отримані в результаті струмені не тільки близькі фізично до поняття партона, але також їх може бути порівняно один з одним.

Знаходження струменів бере початок від плідної праці Г. Стермана і С. Вайнберга [1] та ряду оглядів, які описують різні види струменевих шукачів, їх різні застосування та властивості й навіть історію (напр., [2, 3]). Це дає можливість класифікувати більшість струменевих алгоритмів на два великі класи: послідовної рекомбінації та конусні алгоритми.

Алгоритми послідовної рекомбінації [4] зазвичай працюють з деякою мірою відстані, що може враховувати не лише геометричне положення, а й різні залежності від імпульсів частинок. Ці алгоритми розраховують міру відстані між частинками та відбирають ту пару частинок, що мають між собою найменшу відстань, рекомбінують їх, а потім повторюють процедуру знову і знову, поки не буде досягнутий якийсь критерій зупинки. Міра відстані, як правило, пов'язана зі структурою розбіжностей у КХД. Різні послідовні алгоритми рекомбінації різняться переважно за конкретним вибором мір відстаней і критеріїв зупинки.

Конусні алгоритми [5] збирають частинки в межах визначених кінчних кутових областей таким чином, щоб сума імпульсів частинок, що містяться в даному конусі, збігалася з віссю конуса ("стабільний конус"). Оскільки КХД випромінювання й адронізація залишають напрямки потоку енергії партона практично незмінними, то стабільні конуси фізично близькі до вихідних частинок за напрямком та енергією. Відмінності між різними конусними алгоритмами по суті подаються стратегією, яку прийнято для пошуку стійких конусів (наприклад, ітераційною або повною), і процедурою, яка використовується для розгляду випадків, коли частинка перебуває в кількох стійких конусах (наприклад, спліт-процедура злиття). Однією з цілей програми FastJet [6] є забезпечення простої, ефективної реалізації алгоритмів послідовної рекомбінації, що найбільш широко використовуються як в адрон-адронних, так і в e^+e^- -прискорювачах, а також легкого доступу

до алгоритмів струменів конусного типу. Ця програма поширюється відповідно до умов другої версії GNU General Public License (GPL) [7] та забезпечує швидку реалізацію поздовжньо інваріантних струменевих алгоритмів kt [8], анти-kt [9] і Кембриджа/Аахена [9] для зіткнень протонів (так званих pp -зіткнень), електронів та позитронів (e^+e^- -зіткнень). Дана програма частково заснована на засобах і методах Спільноти обчислювальної геометрії, а також на власній реалізації покращеного тривіального алгоритму (kt-алгоритму) для e^+e^- . Інші струменеві алгоритми, в т.ч. і більшість інших часто застосовуваних алгоритмів для pp - і e^+e^- -зіткнень, можна отримати з FastJet-інтерфейсу за допомогою механізму плагіну. FastJet також забезпечує різні способи визначення області струменя.

MINUIT є інструментом фізичного аналізу мінімізації функцій [10]. Серед них можуть бути: логарифмічна функція правдоподібності, чи функція χ^2 -квадрат – неперервний розподіл, що визначається як розподіл суми квадратів n незалежних випадкових величин зі стандартним нормальним розподілом, чи якась специфічно визначена функція. MINUIT містить ряд інструментів для мінімізації функцій і спеціального аналізу помилок. MINUIT спочатку був написаний мовою Фортран у 1970 р. у ЦЕРНі Фредом Джеймсом. Основною сферою застосування є статистичний аналіз експериментальних даних, що записано в ЦЕРНі, але він також використовується людьми за межами фізики високих енергій (ФВЕ). Нині розвивається проект, який спрямовано на повторну реалізацію MINUIT об'єктно орієнтованим способом за допомогою мови програмування високого рівня C++.

Мабуть, найбільш поширеним застосуванням мінімізації в наукових дослідженнях є апроксимація методом найменших квадратів, де функція, яка повинна бути мінімізована, являє собою суму квадратів відхилення прогнозів моделі, що містить змінні параметри, від вимірних значень:

$$F(x) = \sum_{k=1}^K f_k^2(x) = \sum_{k=1}^K \left(\frac{Y_k - T_k(x)}{\sigma_k} \right)^2,$$

де Y_k і σ_k – вимірні значення і похибки, $T_k(x)$ – значення, що передбачаються за допомогою моделі залежно від деяких параметрів x [10]. Мінімізація F дає найкращі значення (оцінки) n параметрів x на основі k вимірювань

Y_k з випадковими похибками σ_k , де k має бути більшим або дорівнює n , і, як правило, воно набагато більше, ніж n .

Тепер розглянемо другу похідну матрицю $F(x)$, виражену через окремі $f_k(x)$ [10]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial x_j} \sum_k f_k^2 = \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_k 2f_k \frac{\partial f_k}{\partial x_j} = \\ &= \sum_k 2 \frac{\partial f_k}{\partial x_i} \frac{\partial f_k}{\partial x_j} + \sum_k 2f_k \frac{\partial^2 f_k}{\partial x_i \partial x_j}. \end{aligned} \quad (1)$$

У правій частині формули (1) зазвичай, роблячи наближення, припускають, що друга сума за участю других похідних мала порівняно з першою за участю перших похідних. Це називається лінеаризацією. У важливому окремому випадку лінійних найменших квадратів друга сума точно дорівнює нулю, так що $F(x)$ є квадратною функцією і вся задача мінімізації зводиться до інверсії наведеної вище матриці. У більш загальному випадку нелінійних найменших квадратів наближення лінеаризації [10] полягає в допущенні

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} \approx \sum_k 2 \frac{\partial f_k}{\partial x_i} \frac{\partial f_k}{\partial x_j},$$

основною перевагою якого є те, що його легко підрахувати і, крім того, воно завжди позитивно визначене (за досить слабких умов, таких як існування похідних без особливостей). Насправді у багатьох випадках використання наведеного вище наближення в обчисленнях більш ефективно, ніж за використання точної матриці другої похідної через позитивну визначеність. Однак необхідно пам'ятати, що коваріаційні матриці, які отримано оберненням цієї наближеної матриці, зазвичай не сходяться до істинної коваріаційної матриці, хоча мінімізація на їх основі може сходиться до істинного мінімуму.

Реконструкція струменів FastJet з даних і моделі та мінімізація отриманих розподілів

На прикладі останніх результатів [11] було розглянуто в об'єктно орієнтованому середовищі для ядерних досліджень ROOT ефективність і придатність програмних засобів для проведення аналізу результатів апроксимації MINUIT. Вимірювання проведено як частину роботи в співпраці з ZEUS (Гамбург, Німеччина) на електрон-протонному прискорювачі HERA з енергією

протона 920 ГеВ і енергією електрона 27,5 ГеВ. Було вивчено процес фотонародження з низькими співвідношеннями перерізу ψ -мезону в першому збудженому стані (2S) для ψ -мезону основного стану (J/ ψ -мезону) з підтриманням існування ефекту пригнічення. Народження π^+ - і π^- -мезонів було виміряне раніше в процесі анігіляції електрона з позитроном [12], а також у фотонародженні [13].

Для вибору подій у режимі онлайн вимагалися наявність електронного кандидата в калориметрі (CAL), а також виявлення хоча б одного трека (але не більше шести) в Центральному трековому детекторі (CTD), що є верхнім детектором, який безпосередньо оточує мішень. У офлайн-відбір було введено такі додаткові вимоги:

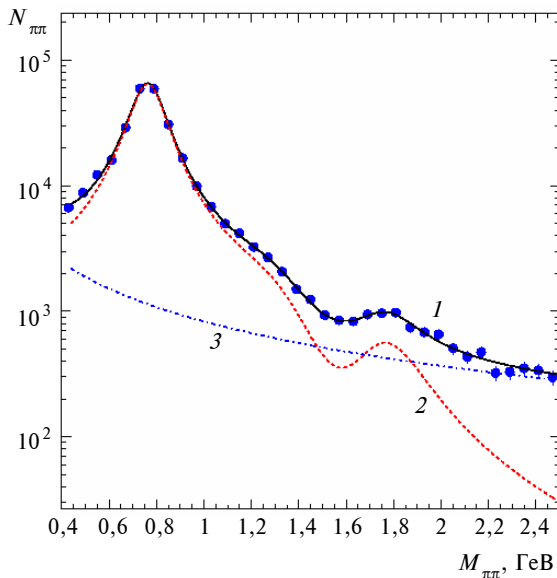
- наявність розсіяного електрона з енергією більше 10 ГеВ з точкою зіткнення в задній частині калориметра поза площею $26,4 \times 26$ см²;
- координата по осі z точки взаємодії повинна була лежати в межах ± 50 см від точки номінальної взаємодії;
- крім розсіяного електрона, необхідна була наявність рівно двох протилежно заряджених треків із псевдошвидкістю менше 1,75 і поперечним імпульсом більше 150 ГеВ. Це забезпечувало ефективність реконструкції і відмінну роздільну здатність по імпульсу в CTD;
- $E - P_z > 45$ ГеВ, де $E - P_z = \sum_i (E_i - P_{zi})$ і сума йде по енергії і поздовжньому імпульсу електрона в кінцевому стані та піонах;
- події, в яких відкладалося в CAL більше 300 МеВ і які не було асоційовано з треками піонів, були відсіяні.

Після попередньої селекції отримані події проходять через програму FastJet, де будуються струмені та накладаються вимоги по енергіях, кутах чи масах. Для генерації Монте-Карло було використано програми ZEUSVM разом із HERACLES 4.4 [14]. Ефективні розподіли віртуальності Q^2 , енергії фотон-протонного центра мас W і квадрата переданого імпульсу $|T|$ були параметризовані для відтворення даних. Маси та кутові розподіли було отримано рівномірно, потім МК-події багаторазово перезважувалися за результатами аналізу.

Створені події пройшли повне моделювання детектора ZEUS на основі програми GEANT 3.21 [15], і їх було оброблено з урахуванням тригерів за допомогою тієї ж струменевої програми, що й дані, а також ефекти прийняття та розмиття детектора. Число модельованих подій після реконструкції було приблиз-

но в сім разів більшим, ніж кількість реконструйованих подій у даних.

Ексклюзивне двопіонне електропородження вивчали на детекторі ZEUS на прискорювачі HERA в діапазоні $0,4 < M_{\pi\pi} < 2,5$ GeV, $2 < Q^2 < 80$ GeV², $32 < W < 180$ GeV і $|T| \leq 0,6$ GeV². Розподіл ефективної маси ($M_{\pi\pi}$) включає області мас трьох резонансів ρ (770), ρ' (1450) і ρ'' (1700).



Розподіл двопіонної інваріантної маси $M_{\pi\pi}$, де $N_{\pi\pi}$ є корекцією прийняття кількості подій у кожному осередку 60 MeV: 1 — дані та повний спектр, що є результатом параметризації з використанням програми MINUIT (світність 8 pb^{-1}); 2 — квадрат модуля формфактора піона, що нормований на дані; 3 — внесок фону

Спостерігається залежність Q^2 від $|F_{\pi}(M_{\pi\pi})|^2$, яку видно, зокрема, в області інтерференції між ρ і ρ'' . Електромагнітний форм-фактор піона, що отриманий з даного аналізу, нижчий (вищий), ніж той, що отриманий з $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ при $M_{\pi\pi} < 0,8$ GeV ($0,8 < M_{\pi\pi} < 1,8$ GeV). Вони рівні в межах помилок для $M_{\pi\pi} > 1,8$ GeV. Роз-

поділи двопіонної інваріантної маси $M_{\pi\pi}$, що виміряні як частина роботи в співпраці ZEUS на електрон-протонному прискорювачі HERA, за результатами параметризації з використанням програми MINUIT наведені на рисунку. Також показано квадрат модуля форм-фактора $|F_{\pi}(M_{\pi\pi})|^2$ піона та фоновий сигнал. Практично повний збіг апроксимації (суцільна лінія) і виміряних даних (точки) в межах похибок свідчить про придатність використаних програмних засобів.

Висновки

Було проаналізовано використання різних режимів побудови диференціальних перерізів інклюзивних струменів у програмі FastJet і апроксимацію з використанням програми MINUIT на прикладі електронородження $\psi(2S)$. Енергія центра мас перерізів становила 318 GeV. Було знайдено добре узгодження в межах похибок між виміряними даними та теоретичними розрахунками, що свідчить про надійність і прийнятність для використання розглянутих програм.

Збільшення щільності треків у детекторах на прискорювачах створює додаткові проблеми для відновлення та апроксимації. Реконструкція струменів є завданням, одним із рішень якого є застосування програми FastJet та оцінювання методом найменших квадратів MINUIT. Подальший розвиток у напрямі дослідження структури Всесвіту за допомогою розглянутих програм буде можливим завдяки існуючим експериментам, таким як Великий адронний колайдер, та майбутнім, які будуть проводити зіткнення за ще більшої енергії у системі центра мас. Зокрема, важливим стає вдосконалення існуючих і використання нових засобів реконструкції адронних струменів у різних процесах та статистичний аналіз результатів.

1. G. Sterman and S. Weinberg, "Jets From Quantum Chromodynamics", Phys. Rev. Lett., vol. 39, pp. 1436–1439, 1977.
2. G.C. Blazey et al. (2000). Run II Jet Physics: Proceedings of the Run II QCD and Weak Boson Physics Workshop [Online]. Available FTP: <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0005012v2/>
3. S.D. Ellis et al., "Jets in Hadron-Hadron Collisions", Prog. Part. Nucl. Phys., vol. 60, pp. 484–551, 2008.
4. S.D. Ellis et al. (2009). Recombination Algorithms and Jet Substructure: Pruning as a Tool for Heavy Particle Searches [Online]. Available FTP: <http://arxiv.org/abs/0912.0033v1/>
5. G. Arnison et al. (UA1 Coll.), "Observation of Jets in High Transverse Energy Events at the CERN Proton-anti-Proton Collider", Phys. Lett. B, vol. 123, pp. 115–122, 1983.
6. FastJet [Online]. Available FTP: <http://www.fastjet.fr/>

7. GNU Operating Systems [Online]. Available FTP: <http://www.gnu.org/licenses/gpl-2.0.html/>
8. S. Catani *et al.*, “Longitudinally invariant kt clustering algorithms for hadron hadron collisions”, Nucl. Phys. B, vol. 406, pp. 187–224, 1993.
9. M. Cacciari *et al.*, “The anti- k_t jet clustering algorithm”, JHEP, is. 04, p. 063, 2008.
10. MINUIT: CERN Program Library Long Writeup D506 [Online]. Available FTP: <http://wwwasdoc.web.cern.ch/wwwasdoc/minuit/minmain.html/>
11. H. Abramowicz *et al.* (ZEUS Coll.), “Exclusive Electroproduction of two Pions at HERA”, Eur. Phys. J. C., vol. 72, p. 1869, 2012.
12. L.M. Barkov *et al.*, “Electromagnetic pion form factor in the timelike region”, Nucl. Phys. B, vol. 256, pp. 365–384, 1985.
13. D. Aston *et al.*, “Observation of the $\rho'(1600)$ in the channel $\gamma p \rightarrow \pi^+ \pi^- p$ ”, Phys. Lett. B, vol. 92, pp. 215–218, 1980.
14. A. Kwiatkowski *et al.* Proceedings of the Workshop on Physics at HERA, vol. III, W. Buchmueller and G. Ingelman, Eds. DESY, Hamburg, 1991, p. 1294.
15. R. Brun *et al.*, “Geant3, Technical Report CERN-DD/EE/84-1”, CERN, Geneva, Switzerland, p. 123, 1987.

Рекомендована Радою
Фізико-технічного інституту
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
16 квітня 2012 року