

**Проволовська Д.В., Ткаченко Р.В., Іванова І.М.**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, Київ,  
email: darinaprowolowska@gmail.com

## **МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ АДРОННИХ СТРУМЕНІВ В СУЧАСНИХ КОЛАЙДЕРАХ: ТЕОРІЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ**

**Анотація.** Розглянуто адронні струмені як ключовий інструмент для дослідження взаємодії частинок на сучасних колайдерах, зокрема на Великому адронному колайдері (БАК). Адронні струмені утворюються внаслідок адронізації кварків і глюонів, що відбувається через механізм конфайнменту у квантовій хромодинаміці (КХД). Описано методи реконструкції струменів за допомогою алгоритмів кластеризації  $k_{\perp}$  та анти- $k_{\perp}$ , Cambridge-Aachen) та технік, таких як Soft Drop, Trimming, Mass Drop Tagging, а також застосування кореляційних функцій енергії (ECF). Особливу увагу приділено методам аналізу струменів, зокрема кореляційним дослідженням та вивченню підструктури струменів. Розглянуто використання методу Монте-Карло (PYTHIA, HERWIG, SHERPA) для моделювання процесів струменеутворення. Обговорено сучасні підходи до реконструкції та алгоритмам Монте-Карло, дослідження струменів на адронних колайдерах.

**Annotation.** This paper considers hadron jets as a key tool for studying particle interactions at modern colliders, particularly at the Large Hadron Collider (LHC). Hadron jets are formed due to the hadronization of quarks and gluons, which occurs through the confinement mechanism in quantum chromodynamics (QCD). Methods for jet reconstruction using clustering algorithms ( $k_{\perp}$  and anti- $k_{\perp}$ , C-A) and techniques such as Soft Drop, Trimming, Mass Drop Tagging, and energy correlation functions (ECF) are described. Particular attention is paid to methods for jet analysis, particularly correlation studies and the study of the substructure of jets. The use of Monte Carlo methods (PYTHIA, HERWIG, SHERPA) for modelling jet formation processes. Modern approaches to reconstruction, Monte Carlo algorithms, and research on jets in hadron colliders are discussed.

**Ключові слова:** Адронні струмені, фізика частинок, метод Монте-Карло.

**Keywords:** Hadronic jets, particle physics, Monte Carlo method.

Адронні струмені – інструмент для репрезентації адронних дощів в детекторі, які своєю чергою утворюються під час зіткнень частинок і є каскадом

вторинних частинок, що утворюються в результаті взаємодії високоенергетичної частинки зі щільною матерією, вимірюються в адронних колайдерах та вивчаються з метою визначення властивостей вихідних кварків та глюонів. [1]

Частинки, що несуть кольоровий заряд, тобто кварки та глюони, не можуть існувати у вільному стані, що пояснюється законами квантової хромодинаміки (КХД), яка допускає лише безбарвні стани. Коли протони стикаються при високих енергіях, кожен із їхніх кольорових заряджених компонентів забирає частину кольорового заряду. [2]

Відповідно до параметра, що зветься конфайнментом, фрагменти частинок створюють навколо себе інші кольорові об'єкти, утворюючи безбарвні адрони. [3,4] Сукупність цих об'єктів називається струменем, оскільки всі фрагменти прагнуть рухатися в одному напрямку, утворюючи вузький «струмінь» частинок.

До методів струменевого аналізу відносять реактивну кореляцію, маркування смаку (наприклад, b-мітки) та струмеву підструктуру. [5]

Реконструкція адронних струменів за допомогою алгоритмів кластеризації  $k_{\perp}$  та анти- $k_{\perp}$  (Кембридж-Аахенівський, K-A), а також доповнюючі алгоритми техніки м'якої краплі (англ. *Soft Drop*) і підстригання (англ. *Trimming*), мітки масового падіння (англ. *Mass drop Tagging*), кореляційні функції енергії (англ. *Energy Correlation Functions (ECF)*) тощо, допомагає описати важливі аспекти поведінки кварків та глюонів. [6]

Є декілька видів адронних струменів, що в основному визначаються хронологією взаємодії між кварками чи глюонами, смаками (верхні, нижні, дивні тощо), енергіями (низько- та високоенергетичні джети), кратністю (високо- та низько-кратні), формою (широкі та вузькі), зарядом (заряджені чи нейтральні), субструктурою (прості, складні), масою (високі чи низькі маси) та поперечним імпульсом  $p_T$  (“низько- $p_T$ ” та “високо- $p_T$ ” струмені). [7]

Метод Монте-Карло моделює розпад глюонів і утворення кварк-антикваркових пар. Такі алгоритми, як PYTHIA, HERWIG, або SHERPA, моделюють ці процеси на основі експериментально підтверджених моделей КХД (квантової хромодинаміки). Метод Монте-Карло дозволяє описати кластеризацію струменів, корекцію детекторних ефектів для перевірки алгоритмів реконструкції й застосовується для детекторних симуляцій. [8]

Завдяки методам реконструкції та алгоритмам Монте-Карло, дослідження струменів на прискорювачах дає змогу точніше ідентифікувати частинки та вивчати процеси поза Стандартною моделлю.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Cherman, A., Jacobson, T., Sen, S., & Yaffe, L. G. (2010). Line operators, vortex statistics, and Higgs versus confinement dynamics. *Physical Review D*, 82(10), 105022. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.105022>
- [2] Catani, S., & Zeppenfeld, D. (1993). Jet algorithms. *Nuclear Physics B*, 406(1), 187–224. [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(93\)90169-Z](https://doi.org/10.1016/0550-3213(93)90169-Z)
- [3] Cui, Y., Han, Z., & Schwartz, M. D. (2011). W-jet tagging: Optimizing the identification of boosted hadronically-decaying W bosons. *Physical Review D*, 83(7), 074023. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.074023>
- [4] Fedkevych, O., Khosa, C. K., Marzani, S., & Sforza, F. (2020). Identification of b jets using QCD-inspired observables. *Physical Review D*, 101(3), 034022. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.034022>
- [5] Jung, H. (2006). Lectures on Quantum Chromodynamics. DESY. Retrieved November 20, 2024, from <https://www.desy.de/~jung/qcd>
- [6] Jung, H. (2007). Jet Hadronization at LHCb. QCD & Collider Physics III: LHC. CERN. Retrieved November 20, 2024, from <https://cds.cern.ch>
- [7] Kogler, R., Nachman, B., Schmidt, A., Asquith, L., Winkels, E., Campanelli, M., Delitzsch, C., Harris, P., & Hinzmann, A. (2018). Jet substructure at the Large Hadron Collider. *Reviews of Modern Physics*, 91(4), 045003. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.91.045003>
- [8] Salam, G. P. (2010). Towards jetography. Retrieved November 20, 2024, from <https://arxiv.org/abs/0906.1833>