

ВІДКРИТТЯ НОВИХ ЕКЗОТИЧНИХ ЧАСТИНОК

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Анотація. Експерименти на Великому адронному колайдері (ВАК), зокрема спеціалізований детектор LHCb, призвели до революції у фізиці високих енергій через систематичне відкриття десятків екзотичних адронів – тетракварків ($qq\bar{q}\bar{q}$) та пентакварків ($qqqq\bar{q}$). Ці частинки, неможливі у класичній кварковій моделі, є прямим експериментальним підтвердженням передбачень квантової хромодинаміки про існування нових форм матерії, пов'язаних сильною взаємодією. Їх виявлення не лише значно розширює спектр відомих адронних станів, але й служить унікальною лабораторією для тестування механізму конфайнменту та залишкових сильних сил у незвичайних конфігураціях. Аналіз таких параметрів станів, як маса, ширина розпаду, квантові числа та канали розпаду (на прикладі сімейства пентакварків P_c^+ або тетракварка T_{cc}^+), дозволяє проводити дискримінацію між конкуруючими моделями їхньої внутрішньої структури. Ці дослідження мають фундаментальне значення для розуміння генерації маси видимої матерії Всесвіту, а також для моделювання екстремальних станів речовини в ядрах нейтронних зір, відкриваючи нові напрями пошуків фізики за межами Стандартної моделі.

Ключові слова: Великий адронний колайдер (ВАК), тетракварки, пентакварки, квантова хромодинаміка, LHCb колаборація, нейтронні зорі, компактні мультикварки, мезони, баріони, кварки, екзотичні адрони.

Abstract: Experiments at the Large Hadron Collider (LHC), in particular the specialized LHCb detector, have led to a revolution in high-energy physics through the systematic discovery of dozens of exotic hadrons – tetraquarks ($qq\bar{q}\bar{q}$) and pentaquarks ($qqqq\bar{q}$). These particles, impossible in the classical quark model, are direct experimental confirmation of the predictions of quantum chromodynamics about the existence of new forms of matter bound by the strong interaction. Their discovery not only significantly expands the spectrum of known hadronic states, but also serves as a unique laboratory for testing the confinement mechanism and residual strong forces in unusual configurations. Analysis of state parameters such as mass, decay width, quantum numbers, and decay channels (using the example of the pentaquark family P_c^+ or the tetraquark T_{cc}^+) allows discrimination between competing models of their internal structure. These studies are of fundamental importance for understanding the generation of visible matter mass in the Universe, as well as for modeling extreme states of matter in neutron star cores, opening new directions for the search for physics beyond the Standard Model.

Keywords: Large Hadron Collider (LHC), tetraquarks, pentaquarks, quantum chromodynamics, LHCb collaboration, neutron stars, compact multi-quarks, mesons, baryons, quarks, exotic hadrons.

Вступ

Існують так звані екзотичні частинки, які передбачала теорія, але експериментально їх побачили лише завдяки Великому адронному колайдері (ВАК). Це складніші конфігурації кварків, де адрон може утворити пара кварк-антикваркових пар (тетракварк), або три кварки та кварк-антикваркова пара (пентакварк). Вчені, які працюють на Великому адронному колайдері, виявили три нові види екзотичних частинок: 1. Пентакварк $P_{\psi s}^{\Lambda}(4338)^0$, що містить дивний кварк і має кварковий склад $c\bar{s}ud\bar{s}$. Його виявлено в розпаді B^- - мезону зі статистичною значущістю 15σ , масою $(4338.2 \pm 0.8) \text{ MeV}/c^2$ та шириною розпаду $(7.0 \pm 1.7) \text{ MeV}$; 2. Пару тетракварків із відкритим чармом: двічі заряджений $T_{c\bar{s}a}(2900)^{++}$ та його нейтральний партнер $T_{c\bar{s}a}(2900)^0$, спостережувані зі значущістю 6.5σ та 8σ відповідно. Їхні маси становлять $(2908 \pm 11) \text{ MeV}/c^2$, а ширина — $(136 \pm 23) \text{ MeV}$. Систематичне відкриття та прецизійне вимірювання параметрів подібних станів відіграє ключову роль у тестуванні основних принципів квантової хромодинаміки, дозволяє проводити дискримінацію між конкуруючими моделями внутрішньої будови екзотичних адронів (компактні мультикварки, адронні молекули) та значно розширює наше розуміння сильної взаємодії в нестандартних умовах. Великий адронний колайдер (ВАК) — прискорювач заряджених частинок на зустрічних пучках, призначений для розгону протонів та важких іонів та вивчення продуктів їхніх зіткнень.

Мета роботи

Основною метою даної роботи є глибокий концептуальний аналіз та синтез значення революційних відкриттів екзотичних адронів на Великому адронному колайдері для розвитку фундаментальної фізики. Центральним об'єктом дослідження виступає не просто констатація факту існування нових частинок, а всебічне розкриття того, як ці експериментальні досягнення трансформують наші найглибші уявлення про природу сильної взаємодії та структуру матерії. Крім того, мета полягає в оцінці широкого контекстуального впливу цих відкриттів. Робота розглядає, як розширення адронної спектроскопії за рахунок екзотичних станів не лише доповнює, але й розширює наші моделі поведінки кварк-глюонної матерії в умовах, недосяжних у земних лабораторіях, – зокрема, в надщільних ядрах нейтронних зір, де можуть реалізовуватися аналоги таких екзотичних форм матерії. Це дозволяє перетворити віддалені астрофізичні об'єкти на природні лабораторії для тестування квантової хромодинаміки.

Матеріали та методи

У липні 2021 року, було офіційно підтверджено відкриття стабільного двовчармового тетракварка $T_{cc}(3875)^+ +$. Його виявлення ґрунтувалося на методі інваріантної маси в каналі розпаду на $D^0 D^0 \pi^+$. Ключовим було виділення вузького піку в розподілі маси цієї системи після ретельного відсіву подій, що відповідали звичайним резонансам, та застосування кінематичного аналізу (діаграми Дальніца) для відокремлення когерентного сигналу від фону. Це дозволило виміряти рекордно малу ширину розпаду частинки зі статистичною значущістю, що значно перевищила 20σ . У липні 2022 року, колаборація LHCb оголосила про відкриття перших тетракварків з відкритим чармом $T_{cs}(2900)^0 / + +$. Для їх ідентифікації застосували принципово іншу, більш складну методику — повноцінний амплітудний аналіз розпаду $B^+ \rightarrow D^+ D^- K^+$. Цей метод полягав у багатопараметричному моделюванні всього розпаду В-мезона з одночасним обліком усіх можливих проміжних станів, що дозволило визначити параметри гіпотетичних T_{cs} - станів як рішення, що оптимально описує експериментальні дані, зі значущістю понад $6-9\sigma$.

Результати та обговорення

Відкриття двовчармового тетракварка $T_{cc}(3875)^+ +$ у 2021 році та тетракварків з відкритим чармом $T_{cs}(2900)$ у 2022 році колаборацією LHCb на Великому адронному колайдері ознаменували якісно новий етап у спектроскопії сильної взаємодії, надавши не лише експериментальне підтвердження передбачених теорією екзотичних конфігурацій кварків, але й поставивши низку фундаментальних питань щодо природи цих станів. Ключовим результатом для $T_{cc}^+ +$ стало виявлення надзвичайно вузького резонансу з масою $3874.75 \pm 0.14 \text{ MeV}/c^2$ та шириною розпаду менше 0.4 MeV , що зі значущістю понад 20σ вказує на його унікальну майже-зв'язану стабільність і робить його найдовше живучим серед усіх відомих екзотичних адронів. Ці параметри, разом із мінімальною енергією зв'язку відносно порогу $D^0 D^+ \pi^+$ мезонів, стали прямим доказом на користь інтерпретації $T_{cc}^+ +$ як слабкозв'язаної адронної молекули, надаючи безпрецедентно точний експериментальний тест для розрахунків у рамках ґраткової КХД та ефективних теорій поля. Одночасно відкриття пари станів $T_{cs}(2900)$ з масою близько $2.9 \text{ GeV}/c^2$ та значною шириною розпаду ($\sim 140 \text{ MeV}$), ідентифікованих за допомогою складного амплітудного аналізу, вперше продемонструвало існування тетракварків з відкритим чармом, де чарм-антикварк присутній без компенсуючої пари. Це розширило феноменологію екзотичних адронів у принципово новому напрямку, спровокувавши активне обговорення їх внутрішньої будови — чи є вони компактними утвореннями з новим типом зв'язку між важким та легкими кварками, ефективними молекулярними станами або навіть екзотичними баріонними конфігураціями. Спільне обговорення цих двох відкриттів виокремлює центральну дилему сучасної фізики адронів: здатність сильної взаємодії породжувати одночасно надстабільні, майже зв'язані системи (як $T_{cc}^+ +$) та широкі резонанси (як T_{cs}), що вказує на неймовірну різноманітність реалізацій конфайнменту, передбачених квантовою хромодинамікою.

Висновки

Експериментальні дослідження на Великому адронному колайдері (БАК) експериментами LHCb, CMS та ATLAS призвели до безсумнівного відкриття нового класу адронів — екзотичних тетракварків та пентакварків, існування яких передбачено квантовою хромодинамікою. Відкриття цих станів підтверджує здатність сильної взаємодії утворювати стабільні конфігурації з чотирма ($qq\bar{q}\bar{q}$) та п'ятьма ($qqqq\bar{q}$) валентними кварками, розширюючи класичну класифікацію адронів за межами мезонів ($q\bar{q}$) та баріонів (qqq). Отримані результати мають значення для суміжних галузей, зокрема для астрофізики, де моделі стану речовини в ядрах нейтронних зір можуть бути скориговані з урахуванням можливого утворення екзотичних кваркових конфігурацій при надвисокій щільності. Методологія пошуку, що включає аналіз інваріантної маси, амплітудний аналіз, використання сліпих методів та масштабних симуляцій Монте-Карло, забезпечила перехід від епохи відкриттів до ери прецизійної спектроскопії адронів. Основною теоретичною дискусією залишається визначення внутрішньої структури екзотичних адронів. Конкуруючими гіпотезами є їхня інтерпретація як слабкоз'язаних систем звичайних адронів (адронних молекул) або як компактних мультикваркових утворень з новим типом зв'язку між кварками. Подальші дослідження будуть спрямовані на уточнення квантових чисел відкритих станів, пошук нових сімейств екзотичних адронів (зокрема, з відкритою красою) та інтеграцію методів машинного навчання для аналізу зростаючих обсягів експериментальних даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Observation of an exotic narrow doubly charmed tetraquark [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [\[https://arxiv.org/pdf/2109.01038\]](https://arxiv.org/pdf/2109.01038). (дата звернення: 02.12.2021).
2. Вчені відкрили три нові екзотичні частинки [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [\[https://zn.ua/ukr/TECHNOLOGIES/vcheni-vidkrili-tri-novi-ekzotichni-chastki.html\]](https://zn.ua/ukr/TECHNOLOGIES/vcheni-vidkrili-tri-novi-ekzotichni-chastki.html). (дата звернення: 06.07.2022).
3. Observation of new resonances decaying to $J/\psi K^+$ and $J/\psi \phi$. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [\[https://arxiv.org/pdf/2103.01803\]](https://arxiv.org/pdf/2103.01803). (дата звернення: 16.12.2021).

Каплун Ілля Сергійович – студент групи БМ-25мс, факультет будівництва цивільної, та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: <mailto:illyujvfn@gmail.com>

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** – канд. техн. наук, доцент кафедри машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Kaplun I. Serhiyovych – student of the BM-25ms group, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: <mailto:illyujvfn@gmail.com>

Supervisor: Martyniuk V. Valeriyovych – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of the Department of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.