

## РЕЦЕНЗІЯ

кандидата фізико-математичних наук, старшого дослідника,  
завідувача відділу фізики лептонів Інституту ядерних досліджень НАН України

Кобичева Владислава Валерійовича

на дисертаційну роботу Добішука Василя Миколайовича на тему

“Утворення чармонію в ультрапериферичних зіткненнях ядер  $^{208}\text{Pb}$  за умов експерименту ЛНСб та спосіб їх моніторингу”, подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

### 1. Актуальність обраної теми дисертаційної роботи

Сучасні ядерно-фізичні експерименти на колайдерах досліджують фундаментальні взаємодії та частинки матерії із високою точністю та достовірністю. Одним із флагманів цих досліджень у галузі фізики високих енергій є експеримент ЛНСб на Великому адронному колайдері (ВАК). Маючи виняткові прецизійні характеристики свого форвардного адронного спектрометра, експеримент ЛНСб дозволяє досліджувати зіткнення важких іонів поряд із іншими спеціалізованими експериментами. З-поміж можливих ядро-ядерних взаємодій якісно виділяються ультрапериферичні зіткнення (УПЗ) ядер. У них ядра зазнають електромагнітної взаємодії при прицільних параметрах, що більші за суму їхніх радіусів, таким чином уникаючи просторового перекриття ядер, що взаємодіють. Такі взаємодії є дуже частими для важких ядер, оскільки ймовірність протікання фотонно-опосередкованих взаємодій для них пропорційна до квадрату заряду ядра, і вони характеризуються дуже малою множинністю,

Інтерес до досліджень фотонародження чармонію в УПЗ важких ядер можна пояснити можливістю та важливістю прецизійних вимірювань внутрішньої структури ядер за рахунок фотона (обмінного бозона) у таких реакціях, що є актуальною проблемою. До головного теоретичного значення результатів даних досліджень варто віднести такі: перевірка феноменологічних моделей в рамках кваркової хромодинаміки (КХД), пряме обстеження розподілу глюонів у нуклонах та ядрах, ефекти насичення глюонів при малих значеннях змінної Бйоркена  $x$ , можливість розширення спектра дослідження станів векторних мезонів, нових станів з відкритою чарівністю.

Детекторний комплекс ЛНСб зазнав суттєву модернізацію, що забезпечує виконання експерименту в новій серії фізичних вимірів (Run 3) за кратно збільшеної світності колайдера (близько у 5 разів, порівняно із Run 2), потоку зчитуваних та оброблених онлайн даних (у 15-

17 разів). За цих умов надійний і комплексний моніторинг, вимірювання та зберігання характеристик нового середовища, створеного пучками ВАК в області взаємодій LHCb, є необхідним для успішної реалізації експерименту. Нова система моніторингу RMS-R3 призначена для незалежного моніторингу умов зіткнення пучків та фону в експерименті LHCb.

## **2. Оцінка структури дисертації, її наукового рівня та обґрунтованості/достовірності положень, що в ній сформульовані**

Дисертація містить вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та чотири додатки.

У **вступі** викладено обґрунтування вибору теми дослідження, мета і завдання (відносно фізичної та методичної частин дослідження), методи дослідження. Охарактеризовано наукову новизну отриманих результатів, а також особистий внесок здобувача. Представлено список конференцій, де відбувалась апробація основних результатів роботи, надано кількість та склад публікацій, де викладено її результати, список наукових програм та тем, в рамках яких виконувалось дисертаційне дослідження.

У **першому розділі** автор робить короткий огляд модернізованої детекторної установки LHCb, особливостей постановки експерименту, набору та обробки даних. Окрему увагу приділено деяким перевагам експерименту LHCb для вибраних напрямків фізичної програми досліджень, зокрема досліджень із важкими ядрами.

У **другому розділі** автором детально викладено методи та результати виконання фізичного аналізу утворення чармонію в ультрапериферичних зіткненнях ядер свинцю-208 при ультрарелятивістській енергії 5,02 TeV в експерименті LHCb. Дослідження фотоутворення  $J/\psi$ - та  $\psi(2S)$ -мезонів в ультрапериферичних зіткненнях ядер свинцю ґрунтується, по-перше, на методі відбору подій, що відповідають критеріям УПЗ, і, по-друге, на методі реконструкції двох станів чармонію за парами протилежно заряджених мюонів. Виміряно диференціальний поперечний переріз  $d\sigma/du$  когерентного утворення  $J/\psi$ -мезонів в інтервалі по стрімкості  $2 < u < 4,5$ . Для отриманих результатів приведено порівняння з передбаченнями теоретичних моделей.

У **третьому розділі** на прикладі експерименту LHCb автор стисло висвітлює основні характеристики типового ядерно-фізичного експерименту на колайдері, що визначають його унікальні умови, а також методи та конкретні технічні засоби для їх надійного та всебічного моніторингу.

У **четвертому розділі** представлено розробку RMS-R3 -- спеціальної системи моніторингу умов зіткнення пучків та фону в експерименті LHCb. У тексті розділу автор детально описав функціональне призначення системи, її апаратну та програмну складову, розглянув особливості формування потоку даних RMS-R3 та алгоритмів вимірювання фізичних величин. Представлено тестування з використанням джерел іонізуючого випромінювання та пряме застосування системи RMS-R3 в структурі контролю LHCb під час набору даних в експерименті (серія вимірювань Run 3).

У **п'ятому розділі** розглянуто методи моніторингу стабільності робочих умов, а саме частоти взаємодій пучків та фону в експерименті LHCb, за допомогою системи RMS-R3 та продемонстровано результати відповідних вимірювань. Намічено подальший розвиток досліджень із допомогою RMS-R3, зокрема для моніторингу абсолютної світності та відносного положення області взаємодії тощо.

У **висновках** наводиться перелік основних наукових результатів, представлений у дисертаційній роботі.

Дисертаційна робота є завершеним, цілісним дослідженням, виконаним з використанням комплексу сучасних взаємодоповнюючих теоретичних та експериментальних підходів. Робота відзначається належним науковим рівнем. Сформульовані в ній положення є обґрунтованими і достовірними, вони базуються на результатах проведених автором теоретичних та експериментальних досліджень. Зміст дисертації і обрані методи дослідження є адекватними поставленим меті і завданням дослідження.

Дисертаційна робота виконана на основі досліджень, які були проведені в рамках 5 наукових тем та грантових проектів (від НАН України, НФДУ, УНТЦ) в Інституті ядерних досліджень НАН України. Автор дисертації був співвиконавцем цих тем.

Результати дисертації пройшли апробацію на 12 українських та міжнародних конференціях.

### **3. Наукова новизна одержаних результатів**

Вагомим науковим результатом дисертаційного дослідження здобувача є отримання нових експериментальних даних для перерізу когерентного утворення  $J/\psi$ -мезонів, що виміряно в ультрапериферичних зіткненнях ядер свинцю при енергії  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  TeV в межах форвардної стрімкості 2...4,5 в експерименті LHCb. Результати аналізу засвідчують дієвість розроблених методів відбору даних фізичних подій за критерієм малої множинності та їх реконструкції за мюонним каналом розпаду із високою роздільною здатністю за масою та по-

перечним імпульсом. Отримані поперечні перерізи надають можливості до розвитку теоретичних підходів (моделей) для опису механізмів утворення чарівних адронів в опосередкованих фотонно-ядерних взаємодіях в ультрапериферичних зіткненнях важких ядер при надвисоких релятивістських енергіях.

За участю автора дисертації розроблено та сконструйовано спеціальну систему моніторингу умов зіткнення пучків та фону в експерименті LHCb як на основі власних розробок ІЯД НАН України із технології детектування потоків заряджених частинок за допомогою металевих сенсорів та високопрецизійних перетворювачів заряду, так із використанням комерційної мікропроцесорної електроніки. Система моніторингу RMS-R3 забезпечує незалежний моніторинг частоти зіткнення пучків ВАК та індукованого пучками фону в режимі реального часу в експерименті LHCb. Достовірність вимірювання даних системою RMS-R3 ґрунтується на таких фізико-технічних характеристиках системи, як супервисока чутливість до зарядів малої амплітуди в металевих сенсорах, відмінна лінійність відгуку, висока часова стабільність відгуку, довготривале функціонування сенсорів під впливом надвисоких доз радіації ( $\sim 1$  ГГр), широкий динамічний діапазон, що дозволяє вимірювати номінальну абсолютну миттєву світність колайдера для протонно-протонних взаємодій порядку  $2 \times 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Систему моніторингу RMS-R3 було протестовано та впроваджено в ЦЕРНі.

#### **4. Теоретичне та практичне значення одержаних результатів**

Отримані в експерименті LHCb результати з утворення чармонію в ультрапериферичних зіткненнях ядер  $^{208}\text{Pb}$  при енергії 5,02 TeV збагачують базу нових експериментальних даних та надають перспективного розвитку напрямку фізики ультрапериферичних зіткнень важких ядер на ВАК. На їх основі можна досліджувати розподіли густини партонів у ядрі у чутливій кінематичній області при мало досліджених значеннях змінної Бйоркена та переданого імпульсу. Окрім цього, результат має ще одне важливе теоретичне значення для тестування феноменологічних моделей, що описують такі явища, як ядерне затінення, глюонне насичення тощо.

Практичним значенням розробки спеціальної системи моніторингу RMS-R3, інтегрованої в систему контролю експерименту, є її безпосереднє застосування (впровадження) в ядерно-фізичному експерименті LHCb на Великому адронному колайдері з метою забезпечення на основі безпечної, стабільної та безперебійної роботи модернізованої детекторної установки LHCb для усієї серії досліджень Run 3 (2022-2025 pp.). Важливою функціональ-

ною здатністю системи RMS-R3 є дублювання вимірювання миттєвої світності (із застосуванням абсолютного калібрування за допомогою системи PLUME) з метою оперативного забезпечення цими даними центру управління ВАК. Система RMS-R3 може слугувати прототипом для розробки новітніх радіаційно стійких систем моніторингу умов та безпеки ядерно-фізичних експериментів, які здатні функціонувати при надвисоких рівнях світності (радіаційного навантаження, множинності при взаємодії пучків ядер) тощо. Система RMS-R3 та її модульні складові можуть бути використані для розв'язання прикладних завдань із моніторингу первинного іонізаційного випромінювання, із реалізації радіаційної безпеки експерименту та контролю за радіаційними умовами його виконання, діагностики пучків, а також для розробки спеціалізованих детекторних систем та ядерної зчитувальної електроніки тощо.

Таким чином, у роботі автора отримано вагомні наукові та прикладні результати, які мають істотне теоретичне і практичне значення.

#### **5. Повнота викладення наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях**

Основні результати досліджень були опубліковані у 3 статтях у реферованих фахових журналах, які індексуються в наукометричній базі даних SCOPUS (в тому числі 2 статті в журналах 2-го квартилю і 1 в журналі 4-го квартилю). Ці публікації містять виклад ключових результатів роботи та всебічно розкривають основні наукові положення дисертації. Крім того, апробація роботи підтверджується списком з 12 тез конференцій, в тому числі 1 в працях міжнародної конференції (проіндексована у SCOPUS, 4-й квартиль),.

Матеріали публікацій у повній мірі розкривають суть дисертаційного дослідження. Їх аналіз дає підстави для висновку про визначальний особистий внесок здобувача на всіх етапах роботи та підготовки статей до друку.

Отже, наявний масив публікацій свідчить про належний рівень апробації результатів дисертації та обґрунтованість наукових положень, викладених у ній. Наукові публікації відповідають вимогам п. 8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р.

## **6. Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи**

Не завжди можна погодитись з обраною автором роботи термінологією (наприклад, «рапідіті» замість стрімкості, «псевдорапідіті» замість псевдострімкості, «СтандартН» замість розширення Стандартної моделі, «фітування» замість апроксимації). Більшість використаних абревіатур не подано в списку скорочень. Митне оформлення розробок (с.26) не слід включати до наукового внеску. На с.141 порівнюються величини різних розмірностей (доза та потужність дози). В деяких частинах роботи (наприклад, підрозділ 1.4) стиль викладення відхиляється від наукового до науково-популярного або ж публіцистичного. Деякі посилання в тексті на інші розділи дисертації замінено знаками питання (с.143). Наявні також суто текстові помилки (наприклад, двічі «люменометр» замість люмінометр на с.164). В наданому файлі дисертації українську «і» скрізь замінено на латинську «i» (навіть у прізвищі автора), що викликає проблеми з текстовим пошуком. Автор мав ретельно вчитати роботу. Незважаючи на всі відмічені недоліки, робота не втрачає своєї цінності, вони не мають суттєвого впливу на результати дослідження і не погіршують загальну позитивну оцінку роботи.

## **7. Відповідність дисертації встановленим вимогам**

Оформлення дисертації за структурою, стилем представлення матеріалу та мовою відповідає вимогам оформлення дисертацій, затвердженим у наказі № 40 Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р.

Дисертаційна робота є самостійним дослідженням здобувача. Відсутні ознаки порушення здобувачем вимог академічної доброчесності. Усі використані результати, матеріали і висновки мають відповідні літературні посилання.

## **8. Загальний висновок.**

Представлена на розгляд дисертаційна робота Василя Миколайовича Добішука на тему «Утворення чармонію в ультрапериферичних зіткненнях ядер  $^{208}\text{Pb}$  за умов експерименту ЛНСб та спосіб їх моніторингу» є самостійним, цілісним та логічно завершеним науковим дослідженням. Робота справляє загалом позитивне враження. Деякі недоліки, які вказано вище, не знижують її вартість.

Зміст дисертації характеризується належною логічністю, послідовністю і структурованістю викладу матеріалу. Текст написаний академічною мовою на достатньому науковому рівні. Дотримано усіх вимог до оформлення наукових праць: чітка структура, всі необхідні складові, змістовне наповнення. Результати досліджень мають важливе наукове і практичне значення та можуть бути корисними для подальших досліджень у цій галузі.

На основі викладеного вище вважаю, що рецензована дисертаційна робота на тему «Утворення чармонію в ультрапериферичних зіткненнях ядер  $^{208}\text{Pb}$  за умов експерименту ЛНСь та спосіб їх моніторингу» відповідає спеціальності 104 «Фізика та астрономія» та вимогам «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах)», затвердженого постановою № 261 Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 року (зі змінами і доповненнями від 03 квітня 2019 року № 283); п. 6, 7, 8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року. Автор роботи Василь Миколайович Добішук заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

04 серпня 2024 р.

Кандидат фізико-математичних наук,  
старший дослідник,  
завідувач відділу фізики лептонів  
ІЯД НАН України



Владислав КОБИЧЕВ

Підпис В.В. Кобичева засвідчую:

Вчений секретар ІЯД НАН України

Наталія ДОРОШКО