

Голові разової спеціалізованої вченої ради  
Інституту ядерних досліджень НАН України  
члену-кореспонденту НАН України,  
доктору фізико-математичних наук,  
професору, виконуючому обов'язки  
головного наукового співробітника відділу  
фізики лептонів Інституту ядерних  
досліджень НАН України  
Федору Анатолійовичу Даневичу

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

члена-кореспондента НАН України, доктора фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника, завідувача відділу квантово-електродинамічних явищ та електродинаміки адронів Інституту теоретичної фізики ім. О. І. Ахієзера, Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України  
Корчина Олександра Юрійовича  
на дисертацію Добішука Василя Миколайовича «Утворення чармонію в ультрапериферичних зіткненнях ядер  $^{208}\text{Pb}$  за умов експерименту ЛНСб та спосіб їх моніторингу», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 «Природничі науки», за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

### 1. Актуальність обраної теми дисертаційної роботи

Дисертаційну роботу виконано відповідно до напрямку досліджень за науковою програмою ядерно-фізичного експерименту ЛНСб на Великому адронному колайдері (БАК) в Європейській організації ядерних досліджень (ЦЕРН). Робота проводилася в рамках співпраці ІЯД НАН України з колаборацією ЛНСб. Тема дослідження присвячена розв'язанню важливих і актуальних питань сучасної фізики високих енергій.

По-перше, це дослідження утворення в експерименті ЛНСб станів чармонію  $J/\Psi$  і  $\Psi(2S)$ , тобто векторних мезонів які є зв'язаними станами чарівних кварка та антикварка, в ультрапериферичних зіткненнях (УПЗ) важких ядер свинцю (Pb), що мають релятивістські енергії. Одержання нових експериментальних даних з народження чармонію в УПЗ є важливим для розробки теоретичних моделей, які базуються на пертурбативній та непертурбативній квантовій хромодинаміці (КХД). Такі експериментальні вимірювання сьогодні можливі в ядерно-фізичних експериментах на колайдерах БАК (ЦЕРН) та RHIC (Брукхевен, BNL).

По-друге, що є не менш важливим та актуальним для експериментів на БАК і майбутніх колайдерах, це модернізація детекторного комплексу ЛНСб. Це дозволяє забезпечити більш ефективну роботу ЛНСб та проведення експериментів при збільшеній світності колайдера до  $2 \times 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  у майбутній серії фізичних вимірювань Run 3. Надійний моніторинг умов експерименту ЛНСб, зокрема таких його характеристик, як світність і фон, набуває особливої ваги для забезпечення стабільної роботи та безпеки детекторної установки. Окрім цього, ці вимірювання важливі для досягнення прецизійності результатів експериментів. Тому друге наукове питання, яке вирішується в дисертації, це розробка, виготовлення та впровадження нової спеціальної системи моніторингу умов зіткнення пучків та фону в експерименті ЛНСб.

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

Дисертаційна робота складається зі списку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 225 стор., в т.ч. основний текст викладено на 155 стор. із 41 рисунком, 11 таблицями та 180 бібліографічними посиланнями.

У **вступі** коротко представлено фізичну проблему дослідження, резюмовано стан розробки даної тематики, зокрема в експерименті LHCb, та обґрунтовано актуальність подальшого виконання експериментальних досліджень; сформульовано мету і завдання, об'єкт і предмет досліджень; чітко викладено наукову новизну отриманих результатів, їх теоретичне та практичне значення, особистий внесок здобувача тощо.

У **першому розділі** міститься огляд основних напрямків досліджень та окремих технічних аспектів ядерно-фізичних експериментів на LHCb (БАК), одного з провідних у світі центрів у фізиці високих енергій. Розглянуто функціональну структуру детекторної установки та загального тракту електроніки, методи постановки експериментів та конфігурацій умов їх протікання. Згадано пріоритетні наукові проблеми, на розв'язання яких націлений експеримент LHCb; наведено декілька отриманих фізичних результатів; окреслено перспективу традиційних та нових напрямів досліджень у планах модернізації експерименту із відповідними технологічними викликами. Окрему увагу зосереджено на дослідженнях зіткнень важких ядер в колаборації LHCb.

У **другому розділі** на основі огляду літератури висвітлено елементи фізики УПЗ, головні механізми фотонно-опосередкованих реакцій та мотивацію дослідження фотонародження векторних  $J/\psi$  і  $\psi(2S)$  мезонів. Проаналізовано дані LHCb з когерентної генерації чармонію в УПЗ ядер свинцю при енергії 5 TeV. Аналіз ґрунтується на вибірці подій із малою множинністю із масиву Pb+Pb даних, що відповідає інтегральній світності  $10 \text{ мкб}^{-1}$ . Два стани чармонію,  $J/\psi$  і  $\psi(2S)$ , реконструйовані через канал розпаду чармонію на пару мюонів. Розроблено оригінальний експериментальний метод реконструкції векторних мезонів за парами протилежно заряджених мюонів із дуже високою роздільною здатністю за інваріантною масою та поперечним імпульсом. Виміряно диференціальний поперечний переріз когерентного утворення  $J/\psi$  мезонів як функція швидкості (англ. rapidity)  $y$ , в інтервалі від  $y=2$  до  $y=4,5$ . Проведено порівняння одержаних перерізів із теоретичними моделями, які в цілому узгоджуються з експериментом.

У **третьому розділі** розглянуто питання безпечної та стабільної роботи детекторної установки та прецизійних фізичних вимірювань з точки зору надійного моніторингу умов перебігу ядерно-фізичного експерименту на колайдері. Наведено міркування щодо важливості моніторингу нового експериментального середовища LHCb, що можна охарактеризувати такими експериментальними характеристиками, як енергія в системі центра мас, світність та фон. Стисло висвітлено відомі експериментальні методи вимірювання миттєвої світності, метод визначення індукованого фону в експерименті LHCb (метод Монте-Карло), що враховує різні механізми та джерела фонового випромінювання. Розроблені нові реалізації систем онлайн моніторингу в структурі контролю експерименту LHCb, що включає спеціальну систему моніторингу RMS-R3.

У **четвертому розділі** докладно представлено спеціальну систему моніторингу RMS-R3 у структурі контролю експерименту LHCb. Обґрунтовано необхідність цієї розробки та її функціональне призначення. Наведено опис (специфікації) апаратної (включає сенсорні модулі та зчитувальну електроніку) та програмної складової системи RMS-R3. Детально описано формування потоку даних RMS-R3 та алгоритми вимірювання фізичних величин. За результатами тестування/калібрування системи RMS-R3 за допомогою джерел іонізуючого випромінювання, перевірено та підтверджено такі принципові фізико-

технічні характеристики системи, як фемтокулонна чутливість до зарядів у металевих сенсорах, відмінна лінійність відгуку в усьому динамічному діапазоні, висока часова стабільність відгуку, довготривале функціонування сенсорів під впливом надвисоких рівнів радіації. Наведено рекомендації щодо удосконалення функціоналу системи RMS-R3 та/або її наступних версій для майбутніх серій вимірювань на колайдері Run 4 та Run 5.

У **п'ятому розділі** описано спосіб застосування спеціальної системи моніторингу RMS-R3 для відстеження відтворюваності робочих умов та характеристик експерименту LHCb у серії вимірювань Run 3. Продемонстровано результати експериментальних вимірювань світності за допомогою системи RMS-R3, що дуже добре узгоджуються у порівнянні з даними основного люмінометра. Показано, що вимірювальний діапазон системи RMS-R3 по світності характеризується кратним запасом відносно її номінального значення. Зроблено висновок про забезпечення системою RMS-R3 дублювання вимірювання світності в режимі реального часу. Наведено метод вимірювання фонових випромінювання для моніторингу еволюції повільних втрат у пучках на стадіях підготовки до зіткнень. Розглянуто можливість калібрування за абсолютною світністю.

У **висновках** подано основні наукові результати, вказано їх теоретичну та практичну цінність. Зазначено про результат впровадження системи моніторингу умов експерименту та рекомендації щодо сфери її можливого практичного використання.

Зміст розділів дисертації відповідає темі дослідження та вичерпно розкриває її суть. У розділах та висновках наукові положення і результати є обґрунтованими та підтвердженими теоретичними або експериментальними даними. Мету дисертації досягнуто і всі поставлені завдання вирішено. Текст дисертації викладено логічно, послідовно та добре аргументовано українською фаховою мовою із дотриманням наукового стилю. В цілому, дисертаційну роботу виконано на високому науковому рівні.

Актуальність та важливість напрямку експериментальних досліджень дисертаційної роботи Добішука Василя Миколайовича засвідчуються ще й тим, що їх виконано в рамках 3-х науково-дослідних робіт держбюджетних тем ІЯД НАН України (0118U006182, 0116U002883, 0121U110762) та 2-х грантових проєктів за фінансової підтримки НФДУ (0120U105298, 0121U112548) та УНТЦ (P9903), співвиконавцем яких був здобувач.

Матеріали та результати дисертації було апробовано та опубліковано в матеріалах / тезах 12-ти міжнародних і вітчизняних наукових конференцій і семінарів.

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

Вперше виконано дослідження когерентного утворення  $J/\psi$  і  $\psi(2S)$  мезонів в експерименті LHCb в ультрапериферичних зіткненнях Pb+Pb при енергії в системі центра мас двох нуклонів 5,02 TeV, та отримано поперечний переріз когерентного утворення чармонію  $J/\psi$  у залежності від швидкості в інтервалі  $2 < y < 4,5$ . Повний переріз в цьому інтервалі становить  $\sigma = 4,45 \pm 0,24 \pm 0,61$  мб. Ці нові експериментальні дані розширюють напрям фізики ультрапериферичних зіткнень, які досліджувалися при такій рекордній енергії лише на БАК.

Вперше розроблено та впроваджено унікальну систему моніторингу RMS-R3 із динамічним діапазоном від приблизно 1 Гц до 1 МГц для вимірювання частоти взаємодій пучків ВАК. Винайдено новий підхід та технічні рішення до конструювання надійної та суперчутливої системи, призначеної для онлайн моніторингу зіткнення пучків та фону, на основі технологій металевих сенсорів та високопрецизійних перетворювачів заряду, що

дозволяють досягнути таких фізико-технічних характеристик, як фемтокулонна чутливість до зарядів у металевих сенсорах, відмінна лінійність відгуку в усьому динамічному діапазоні, висока часова стабільність відгуку, довготривале функціонування сенсорів під впливом надвисоких рівнів радіації (порядку 1 ГГр).

Одержані в дисертаційній роботі результати є новими та становлять суттєвий внесок у вдосконалення методики і техніки для моніторингу умов ядерно-фізичних експериментів, а також сприятимуть розвитку теоретичних підходів до опису народження чармонію в ультрапериферичних зіткненнях важких ядер.

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

Диференціальний переріз когерентного утворення векторних  $J/\psi$  мезонів у залежності від швидкості при енергії 5,02 TeV надає можливість вивчати кінематичну область мало досліджених значень змінної Бйоркена та переданого імпульсу. Цей результат є важливим для перевірки теоретичних моделей, що описують такі явища, як ядерне затінення, глюонне насичення та визначення початкового стану кварк-глюонної плазми.

Спеціальна система моніторингу RMS-R3 експерименту LHCb забезпечує на основі незалежних та достовірних даних стабільну та безпечну роботу детекторної установки LHCb для серії фізичних вимірів Run 3. Важливою функціональною здатністю системи RMS-R3 є дублювання роботи основного люмінометра PLUME, а саме паралельне вимірювання миттєвої світності з метою оперативного забезпечення цими даними центру управління ВАК. Ця система впроваджена в ЦЕРН, що може слугувати перспективним прототипом новітніх систем моніторингу, здатних функціонувати при надвисоких рівнях світності в експериментах на майбутніх колайдерах HL-LHC, FCC тощо. Система RMS-R3 може бути використана для розв'язання завдань із моніторингу первинного іонізаційного випромінювання, діагностики пучків, розробки нових детекторних систем та ядерної зчитувальної електроніки тощо.

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

Основні наукові результати дисертаційного дослідження опубліковано в трьох статтях у реферованих періодичних наукових виданнях, що мають кuartили Q2 і Q4. Публікації безпосередньо пов'язані з темою дисертаційної роботи та вичерпно висвітлюють зміст і суть особистих досліджень автора. Сформульовані положення та висновки мають переконливе обґрунтування на основі здобутих власних наукових результатів дисертанта, що відповідають цілям наукових праць. Особистий внесок здобувача є вагомим, він чітко відображений на всіх етапах дослідження та підготовки публікацій.

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.**

Робота написана на дуже високому професійному рівні. Навіть при уважному читанні важко знайти місця, які потребують уточнень, чи викликають питання або зауваження. Втім, у мене є незначні зауваження та одна пропозиція.

- 1) На стор. 45 перед посиланням на роботу [47] є друкарська помилка - вказано розпад анти- $B_s^0$  мезону, в якому не зберігається електричний заряд. В кінцевому стані має бути  $D_s^-$ .
- 2) На стор. 96 обговорюються результати вимірювання народження  $J/\Psi$  і  $\Psi(2S)$  мезонів в колаборації LHCb, а також в експериментах інших колаборацій CMS і ALICE. Є посилання на таблицю 2.7, в якій представлено всі експериментальні дані. Було би доцільно в цьому місті обговорити, як узгоджуються між собою результати різних колаборацій, чи можна їх порівнювати в деяких інтервалах швидкості  $y$  та енергії, і таке інше.
- 3) Наступне не є зауваженням, а скоріше пропозицією для майбутніх досліджень. На Рис. 2.11 (стор. 94), залежність експериментальних даних з когерентного народження  $J/\Psi$  мезону від швидкості добре параметризується формулою

$$d\sigma/dy = A - B y$$

з деякими параметрами  $A$  і  $B$ . Тобто ця залежність при  $y > 2$  є лінійною функцією швидкості, що має відзеркалювати нетривіальну фізику та може вказувати на деякий «скейлінг» у механізмі народження чармонію в УПЗ. Таке спостереження можна дослідити більш детально в майбутньому.

Ці дискусійні положення та зауваження жодним чином не знижують загальної дуже позитивної оцінки даної дисертації.

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

За структурою та обсягом, за стилем та зрозумілістю викладення матеріалу представлена для експертизи дисертація має високий рівень підготовки, написана українською професійною мовою, а тому повністю відповідає вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим наказом № 40 Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р.

За результатами вивчення дисертаційної роботи та опублікованих наукових праць здобувача встановлено, що дисертація є самостійним науковим дослідженням, не містить порушення вимог академічної доброчесності, а усі використані результати, матеріали та висновки інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

## **8. Загальний висновок.**

Дисертаційна робота Добішука Василя Миколайовича присвячена актуальним експериментальним дослідженням, спрямованим на одержання нових фізичних даних (спектрів, перерізів утворення мезонів - так званих чармоніїв) та реалізацію методу спостереження умов експерименту на основі оригінально розробленого пристрою (системи). Представлені в ній наукові результати є цінними для подальшого розвитку Стандартної Моделі фізики елементарних частинок, а також методів (техніки) ядерно-

фізичних експериментів в області фізики високих енергій. Вони мають практичну цінність для впровадження в ЦЕРН системи моніторингу умов та безпеки експерименту LHCb. Останнє може мати конкретне прикладне застосування для моніторингу первинного іонізаційного випромінювання, діагностики пучків прискорених частинок тощо. В цілому, дисертаційна робота виконана в рамках міжнародного співробітництва з колаборацією LHCb (БАК, ЦЕРН). Це свідчить про високу кваліфікацію автора і всієї групи фізиків ІЯД НАН України, що є престижним і важливим для наукової спільноти України.

За змістом та методичним викладенням матеріалу дисертація є належним чином структурованою, логічно зв'язаною та мотивованою з фізичної точки зору, що висвітлює методологію (логіку) фізичного аналізу, а потім й експериментальної розробки, націленої на покращення експериментальних вимірювань. Досягнуті результати характеризуються обґрунтованістю та достовірністю; вони повністю опубліковані у наукових виданнях та пройшли апробацію на численних наукових конференціях і семінарах; сформульовані висновки засвідчують виконання поставленої мети та завдань дослідження. Дисертаційне дослідження Василя Добішука є самостійною, цілісною та завершеною науковою працею, що містить конкретну новизну та практичне значення.

У підсумку, я вважаю, що дисертаційна робота Добішука Василя Миколайовича «Утворення чармонію в ультрапериферичних зіткненнях ядер  $^{208}\text{Pb}$  за умов експерименту LHCb та спосіб їх моніторингу» відповідає стандарту вищої освіти за спеціальністю 104 Фізика та астрономія галузі знань 10 «Природничі науки» для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти та вимогам пп. 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 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44. Василь Добішук виконав кваліфікаційну роботу на високому рівні, тому я абсолютно впевнений, що Василь Добішук заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:

член-кореспондент НАН України,  
доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,  
завідувач відділу квантово-електродинамічних явищ та електродинаміки адронів  
Інституту теоретичної фізики ім. О. І. Ахієзера,  
Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України



Олександр КОРЧИН