

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

доктора фізико-математичних наук, професора, головного наукового співробітника
відділу фізики високих густин енергії
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України
Синюкова Юрія Михайловича
на дисертацію Добішука Василя Миколайовича на тему “Утворення чармонію в
ультрапериферичних зіткненнях ядер ^{208}Pb за умов експерименту LHCb 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

Теоретичні та експериментальні дослідження процесів з утворенням важких кварк-антикваркових пар при зіткненнях важких ультрарелятивістських іонів є наріжним інструментом для перевірки теоретичних моделей та методів, які достовірно описують як механізми народження адронів (і передбачають нові стани), так й еволюцію утворених нуклонних систем. Дисертаційна робота Добішука В.М. присвячена експериментальному аналізу утворення чармонію у фотонно-ядерних реакціях при ультрапериферичних зіткненнях PbPb з енергією в системі центра мас двох нуклонів 5,02 TeV в експерименті LHCb. Фізика ультрапериферичних зіткнень важких ядер на ВАК (ЦЕРН) є перспективним та актуальним напрямком фізичних досліджень, оскільки такі взаємодії характеризуються значними ймовірностями та відкривають нові енергетичні горизонти для ядро-ядерних досліджень. У роботі досліджено процеси когерентного та некогерентного народження чарвінних векторних мезонів, механізми яких чутливі до зондування внутрішньої структури ядер. Виміряно масовий та поперечно-імпульсні спектри J/ψ та $\psi(2S)$ мезонів, розраховано поперечний переріз когерентного утворення J/ψ . Одержані експериментальні дані є новими у цій царині. Дисертаційне дослідження також включає реалізацію методу моніторингу умов та безпеки протікання експерименту LHCb, що націлений на покращення вимірювальної методики експерименту у новій серії набору даних. Представлено розробку та впровадження нової спеціальної системи моніторингу, що забезпечує незалежний моніторинг умов зіткнення пучків та фону експерименту LHCb в режимі реального часу.

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 зі 180 бібліографічних посилань, чотирьох додатків (на 24 стор.), 41 рисунка, 11 таблиць. Загальний обсяг дисертації сягає 225 сторінок (основна частина – 155 стор.).

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми експериментального дослідження, визначено його мету і завдання, об'єкт і предмет, методи, зазначено наукову новизну здобутих результатів, їх теоретичне та практичне значення, особистий внесок здобувача тощо.

У **першому розділі** наведено короткий опис детекторної установки та особливостей постановки ядерно-фізичного експерименту LHCb на БАК у колайдерному режимі та на нерухомій мішені. Акцентовано на унікальній методиці постановки експерименту одночасно у двох режимах із широкою конфігурацією зіткнень важких ядер при релятивістських енергіях. На прикладі вибраних фізичних результатів LHCb висвітлено актуальність традиційних та перспективність нових напрямків досліджень в експерименті LHCb, зокрема у фізиці важких іонів, та пояснено переваги, що їх надає саме LHCb у порівнянні з іншими експериментами.

У **другому розділі** розглянуто особливості взаємодій при надвисоких електричних та магнітних полях в ультрапериферичних зіткненнях релятивістських важких іонів. Обговорено різні типи процесів та механізмів реакцій в УПЗ, при цьому окрему увагу зосереджено на фотоядерних реакціях із утворенням чармонію. Виконано експериментальний аналіз із дослідження когерентного утворення чармонію в ультрапериферичних PbPb зіткненнях при енергії 5,02 TeV в експерименті LHCb на БАК. На основі розробленого експериментального методу реконструкції векторних J/ψ та $\psi(2S)$ мезонів за парами протилежно заряджених мюонів отримано експериментальні спектри частинок за масою та поперечним імпульсом. Виміряно диференціальний поперечний переріз когерентного утворення J/ψ мезонів в інтервалі по бистроті у від 2 до 4,5, який порівнюється із наявними експериментальними даними та з теоретичними передбаченнями.

У **третьому розділі** обґрунтовано необхідність забезпечення надійного моніторингу умов перебігу ядерно-фізичного експерименту на колайдері на прикладі експерименту LHCb. Розглянуто ключові питання щодо характеристики експериментальних умов та основні методи їх моніторингу. Представлено спеціальні системи моніторингу, що виконують ці функції в структурі контролю експерименту LHCb, та технічні вимоги до них.

У **четвертому розділі** представлено розробку та впровадження спеціальної системи онлайн моніторингу умов зіткнення пучків та фону в експерименті LHCb, скор. системи RMS-R3. Пояснено функціональне призначення системи RMS-R3, детально описано її дизайн та апаратну комплектацію, до якої входять сенсорні модулі та автономна зчитувальна електроніка. Описано особливості побудови зчитувального тракту, формування потоку даних та алгоритми вимірювання фізичних величин. Тестуванням та калібруванням функціональних збірок RMS-R3 різними методами за допомогою джерел іонізаційного випромінювання підтверджено ключові фізико-технічні характеристики системи, а саме: фемтокулонну чутливість до зарядів у металевих сенсорах, відмінну лінійність відгуку в усьому робочому діапазоні, високу часову стабільність відгуку, довготривале функціонування сенсорів під впливом надвисоких рівнів радіації. Представлено результати застосування системи RMS-R3 під час робочих циклів колайдера.

У **п'ятому розділі** наведено приклади застосування спеціальної системи моніторингу RMS-R3 для моніторингу умов та безпеки протікання експерименту LHCb у серії вимірювань Run 3. Показано, що результати вимірювання миттєвої світності за допомогою системи RMS-R3 узгоджуються з даними основного люмінометра з достатньо високою точністю. Продемонстровано важливу функціональну характеристику системи – широкий вимірювальний діапазон, що дозволяє відстежувати миттєву світність до величини, що на порядок переважає її номінальне значення. Наголошено на особливому значенні системи RMS-R3 у забезпеченні контрольованої стабільності та відтворюваності умов зіткнення пучків та фону, що досягається методом балансування світністю в LHCb. Показано

функціональну здатність вимірювати еволюцію фону на стадіях підготовки до зіткнень стабільних пучків. Обговорено можливість калібрування відгуку RMS-R3 на абсолютну світність.

У **висновках** до дисертації містяться головні наукові результати, отримані здобувачем; у частині фізичного аналізу зазначено наукове значення експериментальних даних для розвитку феноменологічних методів, що описують механізми утворення адронів; у частині експериментальної розробки – її впровадження та практичне застосування у якості пристрою для моніторингу умов ядерно-фізичного експерименту в ЦЕРН.

Зміст дисертації за своїм наповненням відповідає темі наукового дослідження. У розділах вичерпно висвітлено суть виконаних завдань, а у висновках підсумовано досягнення поставленої мети. Дисертація написана українською професійною мовою із дотриманням наукового стилю. Наукові положення, висновки та результати, сформульовані в дисертаційній роботі Добішука В.М., є достатньо обґрунтованими, оскільки їх було перевірено та підтверджено експериментальними та теоретичними даними на основі розвинутих методів, широко застосованих в експерименті LHCb. Виконання та підготовку дисертаційної роботи проведено на високому науковому рівні.

Дисертаційне дослідження було виконано в рамках трьох бюджетних тем ІЯД НАН України (№0118U006182, №0116U002883, №0121U110762) та грантових проєктів НФДУ (№0120U105298, №0121U112548) та УНТЦ (Р9903).

Результати роботи було апробовано на 12 наукових конференціях в Україні та за кордоном і було оприлюднено у відповідних роботах (матеріалах) конференцій. Також матеріали дослідження було представлено здобувачем на численних наукових семінарах відділу фізики високих енергій ІЯД НАН України та засіданнях робочих груп в межах організації LHCb, і вони отримали схвальний відгук.

3. Наукова новизна одержаних результатів

Варто відзначити такі нові результати та підходи дисертанта до об'єкта / предмета дослідження.

Уперше виконано дослідження когерентної генерації J/ψ та $\psi(2S)$ мезонів в ультрапериферичних PbPb зіткненнях при енергії в системі центра мас двох нуклонів 5,02 TeV в експерименті LHCb (CERN) та виміряно диференціальний поперечний переріз когерентного утворення J/ψ в залежності від величини бистроти u в інтервалі $2 < u < 4,5$.

Розроблено метод реконструкції векторних мезонів за парами диміюонів в ультрапериферичних зіткненнях важких іонів при ультрарелятивістській енергії, що дозволяє аналізувати експериментальні спектри по масі та поперечному імпульсу частинок з високою роздільною здатністю.

Уперше створено систему онлайн моніторингу умов зіткнення пучків та фону експерименту LHCb (CERN) на основі радіаційно стійкої технології металевих-фольгових сенсорів та високопрецизійних перетворювачів заряду, що характеризується шестидекадним діапазоном для вимірювання частоти взаємодій пучків Великого адронного колайдера.

Винайдено новий підхід та нові технічні рішення до конструювання надійної та суперчутливої системи моніторингу умов ядерно-фізичного експерименту.

4. Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.

Отримано експериментально диференціальний поперечний переріз когерентного утворення J/ψ мезонів в ультрапериферичних зіткненнях PbPb при енергії 5,02 TeV в нуклон-нуклонній с.ц.м. Ці дані є важливим внеском для розвитку та апробації

феноменологічних моделей та підходів, що описують утворення адронів в рамках квантової хромодинаміки. Зокрема теоретична цінність полягає в тому, що на їх основі можливо вивчати ядерну структуру у вигляді партонних розподілів (що враховують ефекти ядерного затінення, глюонного насичення тощо) у слабкодослідженій кінематичній області. У свою чергу функції розподілу партонів в ядрі є важливими вхідними параметрами для визначення початкового стану кварк-глюонної плазми.

Реалізовано спосіб моніторингу умов зіткнення пучків та фону в експерименті LHCb для триваючої серії вимірювань за допомогою нової системи моніторингу RMS-R3. Практичне значення цієї системи полягає в тому, що вона забезпечує на основі незалежних та достовірних даних вимірювання частоти взаємодій пучків Великого адронного колайдера та фонового внеску в режимі реального часу. Надійний моніторинг умов експерименту гарантує безпечну та стабільну роботу детекторної установки LHCb та є надважливим для прецизійних фізичних вимірювань. Система RMS-R3 пройшла етап впровадження в ЦЕРН та має перспективне значення для реалізації в майбутніх ядерно-фізичних експериментах або для інших практичних цілей з моніторингу пучків (потоків) заряджених частинок тощо.

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

Основні наукові результати дисертаційного дослідження здобувача опубліковано в трьох статтях у наукових виданнях, що віднесені до другого (2 праці) та четвертого (1 праця) кuartилів (Scopus). Усього за темою дисертації опубліковано 16 робіт, з яких 12 – апробаційного характеру. Усі публікації чітко взаємопов'язані із метою та завданнями дисертаційної роботи та відображають її зміст. Висунуті здобувачем положення, висновки та результати є науково обґрунтованими на основі власних експериментальних досліджень здобувача. Особистий внесок дисертанта є суттєвим, що відображено при виконанні дослідження та публікацій.

Наукові публікації здобувача 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.

У цілому дисертаційна робота Добішука В.М має схвальний відгук, але разом із тим до неї є певні питання та зауваження.

1. При порівнянні отриманих експериментальних значень диференціального поперечного перерізу когерентного утворення J/ψ мезонів з передбаченнями теоретичних моделей недостатньо пояснено теоретичні підходи (формалізми), що застосовані в них. На мою думку, було б доцільним присвятити цьому більше уваги.
2. У табл. 2.7 наведено порівняння експериментальних даних для когерентного утворення чармонію в ультрапериферичних зіткненнях PbPb для трьох експериментів. Чи це усі наявні результати для такої конфігурації зіткнень? Чим пояснюються відмінності між ними?
3. У тексті дисертації використано неправильні терміни або з неточностями: наприклад, “з нейтронним розвалом мішені” на стор. 53, треба “з нейтронним розщепленням мішені”; “сильно взаємодійної речовини” на стор. 55, треба “сильновзаємодійної речовини”; “при малих змінних Бйоркена” на стор. 95, треба “при малих значеннях змінної Бйоркена”; “колізій” на стор. 49, треба “зіткнень”; “часток” на стор. 162, треба “частинок” тощо.

Виявлені неточності в дисертації та наведені до неї зауваження не є істотними щодо змісту та суті роботи, і разом вони не зменшують наукову цінність її висновків та результатів. На мою думку, дисертаційна робота є в цілому завершеним науковим дослідженням, що характеризується логічною та змістовою єдністю, науковою результативністю, а тому заслуговує на загальну позитивну оцінку.

7. Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Подану до захисту дисертацію підготовлено у повній відповідності до вимог щодо оформлення дисертацій, затверджених наказом № 40 Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р.: витримано усі необхідні структурно-методологічні елементи; текст викладно грамотною українською професійною мовою; дотримано науково стилю представлення матеріалу.

На підставі вивчення дисертації та наукових праць здобувача, опублікованих за темою дисертації, зроблено висновок про те, що дисертаційна робота В.М. Добішука є самостійним науковим дослідженням здобувача, і в них дотримано вимоги щодо академічної доброчесності.

8. Загальний висновок.

Дисертаційна робота Добішука В.М. присвячена вирішенню актуальної проблеми утворення адронів та містить вагомі наукові результати, застосування яких може стимулювати розвиток відповідних теоретичних підходів та удосконалення експериментальної методики (техніки) в галузі фізики високих енергій. Ступінь обґрунтованості та достовірності здобутих результатів є цілком прийнятним: висновки та результати ґрунтуються на експериментальних даних. Окремо варто відмітити підхід дисертанта до методологічно чіткої постановки, розробки, виконання свого наукового дослідження та апробації його результатів. Загалом дисертаційне дослідження виконано на гідному науковому рівні.

Враховуючи вищесказане, вважаю, що дисертаційна робота «Утворення чармонію в ультрапериферичних зіткненнях ядер ^{208}Pb за умов експерименту LHCb та спосіб їх моніторингу» відповідає спеціальності 104 «Фізика та астрономія» 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, а її автор, Добішук Василь Миколайович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук,
професор, головний науковий співробітник
відділу фізики високих густин енергії
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України

Юрій СИНЮКОВ

