

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Інституту ядерних досліджень НАН
України
Доктору фізико-математичних наук,
Старшому науковому співробітнику,
зав. відділом фізики важких іонів
Інституту ядерних досліджень НАН України
Олегові ПОНКРАТЕНКУ

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора фізико-математичних наук, професора,
завідувача кафедри ядерної фізики та високих енергій фізичного факультету
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
Каденка Ігоря Миколайовича
на дисертацію Чернишенка Сергія Борисовича
на тему: **“Концепція фіксованої металевої мікромішені
та спосіб її реалізації в експерименті ЛНСь (ЦЕРН)”**
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

Тематика дисертаційної роботи Чернишенка С.Б. є актуальною в умовах сучасного розвитку експериментальної фізики, особливо у зв'язку з проведенням передових досліджень на Великому Адронному Колайдері (ВАК) в ЦЕРН - одному з найпотужніших науково-дослідних центрів світу. Експеримент ЛНСь, реалізований на ВАК, спрямовано на вивчення фізики порушення СР-парності в розпаді важких мезонів як можливої причини асиметричної розбудови Всесвіту, дослідження рідкісних процесів розпаду адронів з метою пошуку сигналів нової фізики за межами Стандартної Моделі, вивчення процесів зіткнень важких іонів у різних ділянках фазової діаграми квантової хромодинаміки. При цьому необхідність підвищення статистичної значущості отриманих результатів та розширення фізичних цілей експерименту стає ключовим завданням при модернізації експерименту.

Розробка концепції фіксованої металевої мікромішені для експерименту ЛНСь має велике значення, оскільки таке рішення дозволяє значно розширити коло фізичних завдань та підвищити ефективність експерименту завдяки унікальній можливості вимірювати фізичні дані одночасно в режимах як колайдерному, так і фіксованої мішені при високих значеннях світності пучка. Запровадження такого підходу відкриває можливості для проведення експериментів, що раніше були неможливими, та дозволяє вивчати властивості матерії за нових умов екстремальних густин і температур.

Актуальність дисертаційної роботи є зумовленою також викликами як необхідності модернізації експерименту ЛНСь (UPGRADE II, 2030-2040 pp.) для подальшого удосконалення методик отримання фізичних даних, так і можливістю виконання

експерименту на принципово новому якісному рівні (мікронний масштаб із запропонованою мікромішенню у порівнянні з на сьогодні досяжними сантиметровими областями) локалізації ядерних взаємодій при релятивістських енергіях.

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

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та п'яти додатків. Загальний обсяг дисертації становить 235 сторінок, з яких основна частина займає 149 сторінок, серед яких представлено 87 рисунків та 2 таблиці, а список літератури лічить 172 джерела.

У першому оглядовому розділі надано детальний опис експерименту LHCb, відзначено основні фізичні цілі з акцентом на його побудові як форвардного спектрометра, а також обґрунтування його нещодавньої модернізації, що демонструє глибоке розуміння автором контексту дослідження. Підкреслено необхідність удосконалення детекторних підсистем для забезпечення високої ефективності подальших вимірів при запланованому істотному підвищенні світності.

Другий розділ присвячено опису концепції фіксованої металеві мікромішені, що є оригінальним, інноваційним напрямком досліджень у фізиці високих енергій, запропонованим для реалізації в експерименті LHCb з принциповою можливістю виконання фізичних вимірів одночасно в колайдерному режимі та режимі фіксованої мішені. Зокрема, наголошується на створенні неординарної можливості отримання фізичних даних одночасно в двох ділянках фазової діаграми квантової хромодинаміки: за високих температур та малих значеннях хімічного баріонного потенціалу (колайдерний режим) та за низьких температур, але надвисокій густині матерії (режим фіксованої мішені).

У третьому розділі наведено результати Монте-Карло симуляцій, що підтверджують доцільність та можливість реалізації фіксованої металеві мікромішені в експерименті LHCb. Логічним чином викладено текст, починаючи з фізичної мотивації проекту й аж до деталей технічної реалізації (товщина мішені, температура нагрівання, механічні та електронні пристрої для руху мікромішені тощо). Представлено конструкцію одного із прототипів мішенного комплексу, включаючи систему прецизійного позиціонування металеві мікромішені з використанням пристроїв, створених за технологією MEMS (мікро-електронні мікромеханічні системи). Все це свідчить про високий рівень знань автором найдосконаліших сучасних науково-технічних досягнень.

У четвертому розділі представлено опис системи управління мікромішенним комплексом RMS-R4 для дистанційного позиціонування металеві мікромішені в гало пучка ВАК з метою забезпечення визначеної технічним завданням номінальної світності експерименту LHCb. Фактично, це удосконалений варіант створеної за участю дисертанта та нині успішно функціонуючої системи RMS-R3 для моніторингу умов експерименту LHCb. Викладений матеріал демонструє здатність автора до розробки складних систем контролю умов перебігу та безпеки експерименту. Це оригінальний здобуток до сих пір є реалізованим лише в експерименті LHCb.

У п'ятому розділі розглянуто аспекти практичної реалізації та тестування прототипів запропонованих мікромішенних комплексів в складних умовах високоінтенсивних, сфокусованих до мікронних масштабів пучків ВАК. В їх основі є надтонкі (мікронного розміру) металеві мікростріпові детектори, позиціювання яких з субмікронною точністю в гало пучка ВАК здійснюється зі застосуванням MEMS пристроїв та крокових двигунів, придатних для функціонування за умов ультрависокого вакууму. Автором продемонстровано гарне володіння теоретичними і практичними основами функціонування сучасного експерименту з фізики високих енергій.

Висновки відображають отримані результати та містять необхідні підсумовуючі положення.

3. Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна дослідження полягає в низці нових підходів та результатів, що були вперше запропонованими та реалізованими в рамках дисертаційної роботи. Перш за все, вперше в експериментах з фізики високих енергій було розроблено та застосовано методику спостереження області світності експерименту. З цією метою було створено прецизійно сконструйований детекторний комплекс на основі радіаційно стійких металевих фольгових сенсорів. Цей комплекс дозволяє контролювати умови проведення експерименту та їх еволюцію з часом, зокрема - їх відновлюваність на різних етапах вимірів. Результати цілого ряду фізичних вимірів критично залежать від положення області взаємодії пучків ВАК.

Крім того, в дисертації в рамках розвитку ідеї про можливість дослідження потрійних ядерних зіткнень вперше зроблено оцінку залежності кількості таких подій від товщини мікромішеней для процесів $p+C+p$ та $Pb+Pb+Pb$ в умовах експерименту LHCb. Цей результат є дуже важливим для оптимізації параметрів експерименту та підвищення його ефективності.

Також, вперше проведено розробку мікростріпової металевий надтонкої мішені з використанням MEMS-систем та крокових двигунів, функціонуючих в умовах ультрависокого вакууму ВАК. Це дозволяє забезпечити прецизійне позиціювання мішеней, що є критичним для успішного проведення експериментів з високими величинами світності.

Інноваційною є розробка концепції нової системи моніторингу (RMS-R4) для управління мікромішеним комплексом, що включає програмне забезпечення для візуалізації даних RMS-R3 на пульті управління експериментом LHCb. Це значно підвищує точність та надійність управління експериментом, а також забезпечує ефективний моніторинг процесів у реальному часі.

4. Теоретичне та практичне значення одержаних результатів

Теоретичне значення одержаних результатів дисертаційної роботи полягає в розробці нових методологічних підходів до аналізу і моделювання процесів у високоточних фізичних експериментах. У роботі вперше було застосовано метод асиметрії відгуку детекторів детекторного ансамблю RMS-R3 для моніторингу умов

експерименту LHCb, що дозволяє детально відстежувати зміни положення області взаємодій як у режимі зіткнень пучків ВАК, так і в режимі фіксованої газової мішені (SMOG2). Цей метод надає нові можливості для аналізу та інтерпретації даних, отриманих в експерименті LHCb на ВАК.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи є суттєвим, оскільки вони надають можливість отримання раніше недосяжних значень стосовно області взаємодій пучків та відновлюваності її локалізації впродовж усієї серії фізичних вимірів. Така методика може бути застосованою в інших експериментах з фізики високих енергій для підвищення їх ефективності. Одним із ключових практичних досягнень є впровадження методу асиметрій детекторного комплексу RMS-R3 в експерименті LHCb на ВАК. Ця система забезпечує відображення та моніторинг даних у режимі реального часу, що є критично важливим для управління складними експериментами з надвисокою щільністю світності. Вона також дає можливість дослідникам швидко реагувати на будь-які зміни в умовах експерименту, забезпечуючи тим самим його ефективне безперебійне функціонування. Сама RMS-R3 слугує прототипом системи контролю запропонованого мікромішеного комплексу для режиму фіксованої мішені RMS-R4 в рамках запланованої модернізації LHCb (UPGRADE II) в термінах 2035 – 2040 рр.

Ще одним важливим практичним досягненням є розробка фіксованої металеві надтонкої мішені для впровадження в експерименті LHCb. Запропонована технологія для експерименту може значно покращити ефективність збору даних та їх точність завдяки локалізації ядерних взаємодій у мішенях мікронних розмірів, що відкриває нові можливості для проведення досліджень у різних ділянках фазової діаграми квантової хромодинаміки з імовірним виходом за межі Стандартної Моделі фізики елементарних частинок. Використання таких мікромішених дозволяє проводити дослідження з більшими величинами світності та зменшити систематичні похибки, що є особливо важливими при дослідженні рідкісних процесів.

Також, розроблені у дисертації підходи можуть бути адаптованими для застосування в інших експериментах, таких як CBM (FAIR, Дармштадт, Німеччина) та інших проектах з дослідження властивостей ядерної матерії при високих енергіях. Упровадження цих технологій забезпечує підвищення ефективності досліджень, зменшення експериментальних похибок, і, відповідно, отримання більш надійних наукових результатів.

Загалом, практичне значення роботи не лише підвищує ефективність поточних експериментів, але й сприяє створенню передумов для нових наукових відкриттів, що можуть суттєво розширити сучасне розуміння фундаментальних законів природи.

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

У дисертації представлено значну кількість наукових публікацій, що повністю відповідають темі роботи та розкривають її зміст. За матеріалами дослідження опубліковано 16 наукових праць, серед яких 2 (Q4) статті в реферованих наукових виданнях України, проіндексованих у наукометричній базі даних Scopus. Додатково,

2 статті були опублікованими у виданнях Scopus з кuartилями Q1 та Q3, що свідчить про високий рівень представлених наукових результатів. Крім того, автор підготував 7 тез доповідей на наукових конференціях в Україні та 2 тези - на міжнародних конференціях, а це підтверджує активну участь здобувача у обговоренні отриманих результатів.

Основні положення і висновки дисертації є обґрунтованими на основі особистих досліджень автора, що є відображеними у відповідних публікаціях. Дисертант брав участь у роботах на всіх етапах наукового дослідження, включаючи постановку мети, виконання експериментів, аналіз даних та підготовку наукових статей. Це підтверджує високий рівень особистого внеску автора у наукові публікації, навіть у випадках, коли вони виконані у співавторстві.

Наукові публікації здобувача повністю відповідають вимогам пункту 8 “Порядку присудження ступеня доктора філософії”, затвердженого Постановою № 44 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р., що ще раз підкреслює високий науковий рівень і значущість досліджень, виконаних у рамках дисертаційної роботи.

6. Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи

1. Перш за все, назва дисертаційної роботи не є вдалою вже в першому слові: «Концепція фіксованої металевої мікромішені...», бо концепція за визначенням є системою поглядів, тим або іншим розумінням явищ і процесів, або єдиним визначальним задумом. В такому розумінні потрібно захищати в роботі визначальну послідовність подій, або задум, причому один, але ж дана робота спрямована на вирішення дуже специфічних і конкретних декількох завдань у фізиці високих енергій.
2. Відповідно до назви маємо першу мету досліджень: «Розробка концепції мікростріпових надтонкої фіксованої мішені...», де окрім пропущеного терміну фігурує нова концепція чогось «мікростріпових»... Далі маємо третю мету досліджень як «Розробка концепції RMS-R4 ...». Тобто, автор роботи заплутався в термінологічних хащах концепцій, що є просто зайвими.
3. Далі для досягнення мети визначається завдання «створення концепцій фіксованих мікростріпових надтонких мішеней, створення концепції системи управління такими мішенями». Знову маємо набір концепцій у множині, що протирічить назві роботи, де перше слово наведено у однині.
4. Невдало сформульовано один з об'єктів досліджень, де знову фігурує «концепція RMS-R4».
5. Також предмет досліджень у формулюванні «використання даних» не є прийнятним.
6. Маємо серед положень наукової новизни: «розроблений концепт мікростріпової металевої надтонкої мішені ...» та «розроблений концепт RMS-R4...» Тобто, задекларовано розробку концепції, а в результаті виконання роботи натомість отримали два концепти. Чи концепт є еквівалентом концепції? Ні, за визначенням, концепт є інноваційною ідеєю, що містить в собі творчий сенс.

- Більш того, на стор. 23 вже фігурує «... концептуальна ідея впровадження режиму...»
7. При оцінці потрійних ядерних зіткнень маємо на стор. 93 визначення часової затримки $t_{del} \leq 10$ фм/с. Як може часова затримка визначатися в одиницях швидкості? Далі в формулі для середньої відстані $D_{AB} = 2R_T + t_{del}/2$ - ця ж змінна, поділена на 2, вже є відстанню. І на стор. 94 та ж сама змінна фігурує вже як $t_{del} \leq 10$ фм.
 8. На стор. 94 маємо оцінку величини непружного перерізу у 100 мб, що дорівнює 10^{-25} , що є коректною числовою величиною, але ж в одиницях обернених сантиметрів у квадраті!!!
 9. Також на стор. 94 наведено формулу для розрахунку радіусу ядра, що складається з A нуклонів, як 1.25 мінус корінь кубічний з величини A . Має бути знак множення.
 10. На цій же сторінці при визначенні кількості ядер мішені, що входять до взаємодіючого об'єму, маємо добуток заданої густини мішені на об'єм, де відбувається взаємодія потрійні ядерні зіткнення. Але ж у такій інтерпретації даний добуток є масою, що має бути поділеною на молярну масу та помноженою на число Авогадро. Якщо числові оцінки робилися на підставі математичних виразів, про які йдеться в пп. 7-10, то отримані оцінки для потрійних ядерних зіткнень не є коректними.
 11. У тексті роботи також відмічаються помилки, термінологічні невідповідності тощо, а саме:
 - стор. 20: «фроненд», має бути фронтенд, як і правильно наведено на стор. 53;
 - стор. 26: «протікання експерименту», де протікання є ознакою, скоріше, нещільної труби з водою; має бути: перебіг;
 - визначена на стор. 22 вторинна електронна емісія ВЕЕ на стор. 71 вже фігурує як ВВЕ;
 - на рис. 1.21-1.22 наведено криві, позначені римськими цифрами I, II та III, при цьому пояснення до них відсутні;
 - на стор. 77 введено термін «надвисоких енергій» без визначення, тому він не має сенсу;
 - стор. 90: «... число пучків у пучку...» - чи має якийсь фізичний зміст?
 - тощо.
 12. Деякі висновки до розділів та підрозділів не є гарно сформульованими, оскільки не містять логічно сформульованих заключень, а є лише переліком того, що наведено у відповідному розділі/підрозділі.

Однак для фахівця, який читає дану роботу і розуміється на предметі виконаних досліджень, зазначені зауваження не впливають на результати та загальну позитивну оцінку роботи, але їх урахування в рамках подальших досліджень або публікацій могло б підвищити якість і наукову цінність майбутніх досліджень.

7. Відповідність дисертації встановленим вимогам

Дисертаційна робота повністю відповідає встановленим вимогам до оформлення наукових праць, що затверджено наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40. Структура роботи чітко організована, включаючи вступ, п'ять основних розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Обсяг основного тексту та кількість рисунків, таблиць і додатків відповідають стандартам для наукових дисертацій, а використані методи та підходи відповідають вимогам наукової етики та академічної доброчесності.

Дисертація є самостійним дослідженням здобувача. В тексті чітко простежується авторський підхід до розв'язання поставлених наукових завдань, а результати дослідження є підкріплені належними посиланнями на відповідні джерела. Робота не містить порушень академічної доброчесності, таких як плагіат або фабрикація даних. Всі наукові положення, висновки та результати, які наведено в дисертації, базуються на особистих дослідженнях автора і відповідних публікаціях, що підтверджує оригінальність та самостійність виконаної роботи .

8. Загальний висновок

Дисертаційна робота повністю відповідає спеціальності "104 Фізика та астрономія" і вимогам, викладеним у "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. Дисертація характеризується високим науковим рівнем, чіткою структурою та глибоким аналізом досліджуваних проблем. Усі наукові положення та результати є обґрунтованими та підтвердженими власними дослідженнями здобувача.

Робота містить значний науковий внесок у галузь фізики високих енергій, а також новаторські методи, які можуть бути застосованими у майбутніх експериментах. Практичні результати досліджень мають велике значення для подальших досліджень у галузі, що підтверджується публікаціями здобувача в реферованих наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus.

Зважаючи на вищевикладене, автор дисертаційної роботи, Чернишенко Сергій Борисович, заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю "104 Фізика та астрономія".

Офіційний опонент:

*Завідувач кафедри ядерної фізики
та високих енергій фізичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
доктор фізико-математичних наук,
професор*

Ігор КАДЕНКО