

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Бондаренка Миколи Вікторовича**

**«Розсіювання та випромінювання високоенергетичних заряджених частинок в аморфних та кристалічних середовищах»,**

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.02 - «теоретична фізика»

Дисертаційна робота присвячена теоретичному дослідженню розсіювання та випромінювання швидких заряджених частинок в аморфних тілах та кристалах.

### **Актуальність обраної теми**

Фізика проходження швидких частинок крізь речовину в першій половині ХХ століття була тісно пов'язана із бурхливим розвитком фізики, але сьогодні по багатьох напрямках планомірно переходить до все складніших процесів та дослідження нових ефектів. Важливий внесок до неї внесли, зокрема, українські науковці. Наразі дана область залишається фундаментальною по таких напрямках як співвідношення між класичною та квантовою механікою, а також має численні паралелі з іншими галузями фізики, де бурхливий розвиток ще не завершений (фізика адронних процесів, астрофізика), і безумовно є важливою з практичного погляду.

Із загально-теоретичного погляду, привабливою є та обставина, що за високої енергії в багатьох задачах ефективно зменшується число істотних ступенів свободи, що підвищує можливості для інтегрування задач, і водночас робить низьковимірні задачі реалістичними. Високі енергії також дозволяють розділяти швидкі та повільні процеси, що є корисним для розвитку теорії стохастичних та кінетичних явищ і когерентних процесів випромінювання.

Дисертація складається зі вступу, огляду літератури, трьох розділів основного тексту, списку використаної літератури та чотирьох додатків.

Розділ 1 містить огляд літератури.

Розділ 2 починається з розгляду фундаментального процесу для фізики частинок в аморфному середовищі – пружного розсіювання швидкої зарядженої частинки на екранованому кулонівському потенціалі окремого атома. Для цієї задачі ускладнення виникають вже внаслідок того, що типові передачі імпульсу (визначальні також для багаторазового розсіювання) залежать від кулонівського параметра, а отже, не лише від речовини, але й від заряду та швидкості частинки, яка проходить крізь неї. Автором було встановлено зв'язок між відповідними асимптотиками при малих і великих кулонівських параметрах, завдяки чому виявляється, що всю непертурбативну функцію, за великим рахунком, можна охарактеризувати єдиним параметром (позначеним як  $\mu_2$ ).

Для детальнішої характеристики розсіювання на атомах, автором були введені ще два параметри:  $\mu_0$  та  $\mu_1$ , що характеризують логарифмічно модифіковану степеневу поправку до асимптотики Резерфорда, яка може бути виміряна в сучасних експериментах. Можна відзначити, що відхилення від асимптотики Резерфорда мали бути присутніми ще у перших експериментах Гейгера з розсіювання альфа-частинок у речовині, оскільки кулонівський параметр в них був великим, але оскільки в цих експериментах значним було багаторазове розсіювання на малих кутах відхилення, основна увага приділялася розсіюванню назад. Експериментальне ж дослідження одноразового розсіювання на малі кути в області резерфордівської асимптотики та перед нею розпочалося лише в 1970-і роки. Таким чином, введені автором параметри можна визначати експериментально.

Решта розділу присвячена розсіюванню в аморфній речовині. Щоб позбутися труднощів, присутніх в теорії Мольєра (осциляційна поведінка членів розкладення та розбіжність їх суми), автор застосовує деформацію шляху інтегрування з дійсної осі в комплексну площину і обчислення інтеграла методом перевалу. При цьому виникає розділення функції розподілу на м'яку та напівжорстку компоненти, а для їх інтерпретації автор пропонує використовувати поняття псевдо-ймовірності. З погляду загальної теорії ймовірності його потрібно розуміти наступним чином. На рівні окремих випадкових подій не можна відрізнити акт м'якого розсіювання від акту напівжорсткого. Але функція розподілу лінійним і взаємно однозначним способом пов'язана зі своєю характеристичною функцією (перетворенням Фур'є), яка в свою чергу має чітку структуру в комплексній площині, і тому може бути чітко розділена на дві компоненти з різними властивостями.

Зворотньо, кожен з цих компонент окремо можна конвертувати в компоненту функції розподілу ймовірностей, але інтерпретувати таким чином їх можна лише за умови, що обидві вони є скрізь позитивними. В даній задачі ця умова виконується. Подібний підхід може застосовуватися також до інших задач.

Автор також розраховує сукупні розподіли багаторазово розсіяних частинок по кутах відхилення та просторових координатах. Найдетальніший розподіл виражається через одноразовий інтеграл, з якого можна знайти будь-які кореляції, потрібні на практиці. Зокрема, можна легко отримати пригнічений спектр гальмівного випромінювання Ландау-Померанчука-Мигдала.

В Розділі 3 розглядається проходження швидких заряджених частинок крізь кристали. Елементарним підпроцесом тут виступає розсіяння на окремому атомному ланцюжку або площині. Задача розв'язується за допомогою наближення ейконалу, причому (завдяки конформним властивостям розсіяння в кулонівському полі) вдається провести підсумовування за всіма атомами в ланцюжку. Можна відзначити, що ейкональне наближення застосовувалось раніше для розв'язку багатьох задач, зокрема у ядерній фізиці, але в розсіянні частинки на атомних ланцюжках та площинах асиметрії є найбільшими. Асиметричною виявляється навіть некогерентна компонента, хоча зазвичай вона вважається аналогічною багаторазовому розсіянню в аморфній речовині.

Коли наближення неперервного потенціалу застосовується для опису розсіювання на атомних ланцюжках (донат-розсіювання), виникає задача, схожа на блукання Пірсона, але у дифузійному наближенні. Нетривіальною вона стає з урахуванням конвекції, коли одночасно враховується еволюція розподілу ймовірності по просторових координатах. В такому розподілі в дифузійному наближенні виникає «реліктовий» зсув, до того ж дифузія в цілому пригнічується. Автор відзначає, що в останньому аспекті ситуація схожа на квантовий парадокс Зенона.

Значних зусиль автор докладает до аналізу задачі про площинне деканалювання швидких позитивно заряджених частинок. Ця важлива з практичного погляду задача має цінність також тому, що містить перспективу для аналітичного розв'язку, якщо усереднити рух частинки по швидким осциляціям в каналі. Але питання полягає в тому, як провести цю процедуру послідовно. Для звичайних і нестохастичних диференціальних рівнянь метод усереднення по періоду був запроваджений М.М. Криловим, М.М.

Боголюбовим та Ю.О. Митропольським (в дисертації є посилання на їх монографію). Для стохастичного диференціального рівняння в частинних похідних у поєднанні зі швидко-селективними граничними умовами проблема є значно складнішою, але автор знаходить шляхи для дослідження різних її аспектів, важливих з практичного погляду. Втім, в цій задачі ще належить багато чого зробити.

Автор розглядає також проходження швидких заряджених частинок крізь зігнутий кристал в надбар'єрному режимі, зокрема, задачу про об'ємне відбиття. Якщо кристал зігнутий нерівномірно, навіть одновимірне рівняння руху в ньому неможливо розв'язати точно, оскільки це нелінійний та неавтономний рух, який, взагалі кажучи, є хаотичним. У випадку постійної кривизни кристала, найважливішого для практики, рівняння руху інтегрується. Проте, навіть за цих умов задача залишається складною, оскільки інтегрування проводиться по багатьом міжплощинним інтервалам. Автором було знайдено розв'язок цієї задачі в компактній формі.

Розділі 4 присвячений випромінюванню високоенергетичних частинок. Спочатку розглядається випромінювання в дипольному режимі. Хоча ця задача є базовою в квантовій електродинаміці, але автором було знайдено новий підхід для опису розподілу поляризації (на основі стереографічної проекції), а також показано, що загальна структура диференціальної ймовірності випромінення поляризованого фотона визначається універсальним тензором, який залежить від кута випромінення.

Для недипольного випромінювання, подібно відомій задачі про глибоко непружне розсіяння лептонів на адронах, автор вводить структурні функції, але в електродинаміці їх вдається обчислити при довільному відношенні переданого імпульсу до маси електрона.

Вихід за рамки дипольного наближення дає можливість точно врахувати кулонівський характер розсіяння в атомній речовині. Враховуючи екранування феноменологічно, автором було встановлено зв'язок між двома параметрами, що характеризують речовину – радіаційною довжиною та мольєрівським кутом.

Єдності дисертації сприяє використання представлення прицільних параметрів для випромінення. Для пружного розсіяння воно добре відоме, але у застосуванні до задач випромінювання є нетривіальним, оскільки в початковому стані фотон відсутній, до того ж електрон, з якого випромінюється фотон

змінює свої прицільні параметри в процесі руху, особливо якщо він описується класичною, а не квантовою механікою. Тим не менш, авторові вдалося розробити підхід до обчислення амплітуд випромінення в представленні прицільних параметрів і отримати представлення для спектра електромагнітного випромінення, що має вигляд співвідношення унітарності. Асимптотики спектра Ландау-Померанчука-Мигдала та синхротронного випромінення були узагальнені в рамках підходу, що враховує загальну властивість масштабної інваріантності руху частинки в однорідному середовищі – аномальну дифузію.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації**

Результати, здобуті автором, ґрунтуються на фізично правдоподібних наближеннях, таких як наближення ейконалу для амплітуди пружного розсіяння, наближення Фоккера-Планка для інтеграла зіткнень, наближення класичної механіки для руху в неперервному потенціалі, ультра-релятивістські наближення в теорії випромінювання. Тому результати можна вважати обґрунтованими.

### **Достовірність**

Результати автора кореспондуються з відомими аналітичними результатами, а також узгоджуються з експериментами та комп'ютерним моделюванням. Застосовуються відомі та ефективні математичні методи, такі як метод найшвидшого спуску в комплексній площині, розкладення по повній системі власних функцій, та ін. Тому результати, отримані в дисертації, є достовірними.

### **Новизна**

Питання, які висвітлюються в Розділах 2 та 4.1, значною мірою належать до класичного фонду теорії розсіяння швидких заряджених частинок на окремих атомах та в аморфній речовині. Проте, автор доводить необхідність їх сучасної ревізії, узагальнення та суворих обґрунтувань. Для цього необхідне належне застосування математичного апарату. Зокрема, автором було доведено й узагальнено гіпотезу Ліндхарда про скейлінг в класичному розсіянні, встановлено сувору відповідність між асимптотиками ефективного імпульсу екранування в розсіянні при великих та при малих кулонівських параметрах. В теорії просторових розподілів при багаторазовому розсіюванні в аморфній

речовині автор спирається на метод резукції транспортного рівняння до аналога рівняння Шредінгера для гармонічного осцилятора, але з уявним потенціалом. Подібний метод застосовувався раніше в теорії випромінення (зокрема, ефекту ЛПМ), але автор розвинув його в застосуванні виключно для процесу пружного розсіювання, з функції розподілу якого потім можна просто отримати як спектр ЛПМ, так і характеристики інших непружних процесів.

Деякі результати, ймовірно, могли б бути отримані раніше, якби вони не перебували довгий час поза досяжністю для експериментів. Зокрема, це стосується виведених автором класичних і квантових степеневих поправок до асимптотики Резерфорда. Сьогодні їх вимірювання є можливим завдяки виготовленню дуже тонких мішеней та використанню дуже точних детекторів координат та імпульсів. До того ж суттєво, що ці поправки є чутливими до функції екранування поблизу ядра, і кількісно не передбачаються існуючими загальноживаними параметризаціями атомних потенціалів. Також ідея методу поліпшеного обчислення кутового розподілу багаторазового кулонівського розсіяння з використанням деформації контуру інтегрування існувала раніше, але вона була реалізована автором лише нещодавно у зв'язку з підвищенням статистики та точності вимірювання таких розподілів на практиці.

Більшість результатів отримана автором новими, оригінальними методами. Всі винесені на захист результати є новими. Автор також об'єднує результати з різних розділів, спираючись на єдині просторово-часові принципи. Наприклад, при проходженні крізь зігнутий кристал, відзначається, що часова затримка радіальної компоненти руху призводить до повороту пучка в бік згину, тоді як часове випередження – до відхилення в бік, протилежний згину (об'ємне відбиття). В теорії випромінювання часова затримка чи випередження частинки в мішені відносно асимптоти траєкторії у вигляді кута визначає нахил спектру при малих частотах фотонів. Ці загальні принципи можуть бути корисними для розв'язку багатьох задач, і також можуть вважатися новими результатами автора.

### **Опубліковані праці**

Дисертація написана за результатами 22 робіт. Більшість з них опублікована в провідних міжнародних журналах, і цитується як теоретиками, так і експериментаторами і авторами комп'ютерних програм, що підкреслює практичне значення результатів. Переважна більшість статей за тематикою

дисертації опублікована здобувачем без співавторів, тому самостійність його досліджень не викликає сумніву. Результати дисертації також усно доповідались на багатьох фахових міжнародних конференціях, і тому можуть вважатися загально відомими та апробованими.

### **Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях**

Результати дисертації достатньо повно відображені в публікаціях, але іноді викладені більш спрощено. Наприклад, поправка до факторизаційної теореми для спектра гальмівного випромінення в статті автора отримана для загальних умов, коли енергія випроміненого фотона є сумірною з енергією електрона, тоді як в дисертації вона сформульована лише для класичної електродинаміки. Також в дисертації не дається повною мірою порівняння з експериментом, яке можна знайти в статтях. Втім, спрощення змісту дисертації можна вітати, оскільки вона містить вже достатню кількість матеріалу і досить велику кількість саме розрахунків.

### **Зауваження**

1. В підрозділі 2.3 просторовий розподіл обчислюється для випадку гаусівської дифузії, а не в рамках теорії Мольєра. Втім, таке наближення використовується в багатьох роботах, а сам коефіцієнт дифузії обчислюється або параметризується з урахуванням кулонівського характеру розсіювання.

2. Хоча дисертація викладена загалом доброю українською мовою, проте слід вживати «ступеневий» замість «ступінний», «спадає» замість «убуває», «в'язка» замість «пучок» та інш.

Проте зазначені зауваження жодним чином не понижують загальної високої оцінки дисертації. Підсумовуючи, в дисертаційній роботі М.В. Бондаренка розв'язано сучасні і актуальні задачі в галузі проходження заряджених високоенергетичних частинок крізь речовину. Всі розділи дисертації є взаємопов'язаними. Дисертація виконана на належному математичному рівні, і встановлює паралелі з теорією стохастичних процесів та адронною фізикою високих енергій. Тому вона є завершеним, самостійним дослідженням, що повністю відповідає паспорту спеціальності. В сукупності представлені результати є значним досягненням для розвитку теорії проходження високоенергетичних заряджених частинок крізь речовину. Ознак плагіату не виявлено. Викладення ведеться загалом доброю українською мовою.

Автореферат повністю відображає зміст дисертації. Матеріали досліджень, за якими здобувач захистив кандидатську дисертацію, не вносилися до докторської дисертації.

Вважаю, що дисертаційна робота Миколи Вікторовича Бондаренка «Розсіювання та випромінювання високоенергетичних заряджених частинок в аморфних та кристалічних середовищах» задовольняє усім вимогам до докторських дисертацій п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р., № 567 від 27.07.2016 р.), а її автор, Микола Вікторович Бондаренко, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – «теоретична фізика».

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук

Ю.О. Ситенко

Підпис офіційного опонента доктора фіз.-мат. наук Ю.О. Ситенка засвідчую

Вчений секретар Інституту теоретичної  
фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України,  
кандидат фіз.-мат. наук



С.М. Перепелиця