

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Бондаренка Миколи Вікторовича

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

яка представлена на здобуття наукового ступеню доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 - «теоретична фізика»

Широке застосування прискорювачів заряджених частинок у сучасній науці та повсякденному житті означає, що задачі про проходження швидких заряджених частинок крізь речовину не втрачають актуальності. Найбільш популярними мішенями, особливо при високих енергіях, є твердотільні. Вони мають кристалічну структуру, яка може бути ідеальною і розповсюджуватися на весь монокристал, або ж проявлятися на макроскопічному рівні лише як текстура. Цю структуру з сучасної точки зору потрібно не лише враховувати, але й доцільно використовувати.

При високій енергії частинка рухається майже прямолінійно, тому щоб кристалічна ґратка істотно впливала на її рух, кристал має бути, по-перше, дуже точно орієнтованим, по-друге, поздовжня і поперечна динаміка частинки суттєво відрізняються, і нетривіальною є саме поперечна динаміка. При цьому, в залежності від типу орієнтації, структура кристала може проявлятися як одновимірною (при площинній орієнтації), або двовимірною (при аксіальній), тобто ефективно ставати низьковимірною. В прискорювальній практиці, для керування пучками заряджених частинок використовуються також слабо зігнуті кристали, в яких структура не є строго періодичною, але може розглядатися як періодична структура в зовнішньому (відцентровому) полі. Все це створює аналогії з іншими підрозділами фізики твердого тіла, але разом з тим, додає фізиці процесів в твердих тілах при високій енергії своєрідності.

З огляду на велику кількість прикладних застосувань, а також різноманітність типів кристалів і режимів проходження крізь них швидких частинок, ця галузь науки не втрачає актуальності як з практичного, так і з загальнотеоретичного погляду. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаної літератури і 4 додатків.

Розділ 1 містить огляд літератури, який простежує розвиток концепцій в фізиці проходження швидких частинок крізь речовину та виникнення нових, сучасних проблем та задач.

В **Розділі 2** спочатку розглядається розсіювання в екранованому кулонівському потенціалі окремого атома. Аналіз автора показує, що для опису

поправок до резерфордівської асимптотики розсіювання наближення Томаса-Фермі для функції екранування (або навіть точніші підходи, такі як наближення Томаса-Фермі-Дірака або функціонала електронної щільності) непридатне, потрібен підхід, який здатен описати оболонкову структуру атома, такий як метод Хартрі-Фока. Це не дивно, оскільки, наприклад, параметр μ_0^2 , введений автором, пропорційний другій похідній функції екранування в початку координат, тобто електронній щільності в точці знаходження атомного ядра. Але відомо, що в достатньо малій просторовій області наближення багаточастинкової електронної Фермі-рідини втрачає силу. Автор зазначає, що найкраще визначати ці параметри з відповідних експериментів. Це може мати сенс, оскільки в речовині електрони, до того ж, перерозподіляються, в тому числі ті, що знаходяться поблизу ядер. Отже дана проблема є викликом і для теорії.

В підрозділі 2.2 розглядається багаторазове розсіювання в однорідній аморфній речовині. Внаслідок кулонівського характеру розсіювання на атомах, дифузія по кутах відхилення виявляється слабко аномальною. За цих умов не спрацьовує ні Центральна гранична, ні Узагальнена центральна гранична теорема, яка б гарантувала, що в товстій мішені функція розподілу наближається до універсальної форми (Гаусові чи Леві). Натомість, функція розподілу має дві компоненти, одна з яких близька до нормальної, а інша (напівжорстка) містить всі аномальні властивості.

В підрозділі 2.3 розглядається також просторова складова еволюції розподілу швидких частинок в аморфній мішені, тобто врахування конвекції. Нетривіальними в такому процесі є кореляції між різними динамічними змінними, від яких можуть залежати різноманітні непружні процеси, наприклад, випромінення від швидкого електрона. З погляду транспортного рівняння, ці кореляції можна вважати газодинамічними, хоча фізично вони виникають як конвекція окремих частинок при високій енергії.

В **Розділі 3** автор аналізує різні актуальні проблеми взаємодії швидких заряджених частинок з кристалами. В підрозділі 3.1 розглядається взаємодія з окремими елементами орієнтованого кристала – атомними ланцюжками та площинами, на які частинка падає під невеликим кутом. При цьому кореляції між розсіюваннями на складових атомах в ланцюжку або площині повністю не втрачаються, оскільки корелюють прицільні параметри. Таким чином, принцип Боголюбова про ослаблення кореляції в даному випадку не працює, але натомість, корельовані розсіювання можна розглядати як дію неперервного потенціалу. Що ж стосується тих кореляцій, що ослаблюються, насправді вони можуть теж включати когерентні ефекти. Автор приділяє значну увагу їх розділенню і розрахунку. Некogerентна компонента зазвичай небажана, і при

дуже високих енергіях нею в першому наближенні можна знехтувати. Але це не завжди прийнятно з кількісної точки зору, тому для площинної орієнтації, яка, строго кажучи, задається двома кутами, постає питання про мінімізацію некогерентної компоненти. Автор показує як цього досягти, причому співвідношення між двома кутами орієнтації площини виявляється квадратичним.

В аксіальній орієнтації (підрозділ 3.2) можлива ситуація коли взаємодія швидкої зарядженої частинки описується переважно неперервним потенціалом, тобто корельованими розсіяннями на атомах в межах ланцюжка, але кореляція розсіань на різних ланцюжках врешті решт втрачається і процес можна описувати своєрідним кінетичним рівнянням з когерентним диференціальним перерізом розсіяння по азимуту. Без кореляцій між ланцюжками, періодичність кристалічної структури не відіграє ролі, але залишається періодичність по азимутальному куту. Це приводить до рівняння Мат'є, але з уявним параметром, на відміну від відомих задач про зонну структуру при квантовому площинному каналюванні, чи про резонансне деканалювання на «струнах струн», де параметр рівняння Мат'є є дійсним. Розв'язуючи дану задачу, автор відзначає, що дифузія в даному процесі пригнічується, і є обернено пропорційною коефіцієнту дифузії. На перший погляд, це є контрінтуїтивним, але подібні ефекти відомі в фізиці твердого тіла (можна згадати, наприклад, андерсонівську локалізацію).

Випадок площинного каналювання, особливо для позитивно заряджених частинок (підрозділ 3.3), є прикладом того, що неперервний потенціал може визначати рух частинки протягом досить довгого періоду. Проте, навіть в цьому випадку, змінною, по якій відносно швидко втрачаються кореляції, є фаза коливання частинки в каналі. Традиційна теорія деканалювання будується на рівнянні Фоккера-Планка по поперечній енергії та на припущенні про випадкові фази (так зване наближення статистичної рівноваги), і математично є аналогічною задачі про охолодження рівномірно нагрітого циліндра з замороженими краями. Обґрунтованість припущення випадкових фаз аналізується автором, але для цього доводиться розв'язувати значно складніші диференціальні рівняння в часткових похідних із крайовими умовами, подібно задачі Крамерса про вихід броунівської частинки з потенціальної ями.

В підрозділі 3.4 автор розглядає задачу про рух швидкої частинки при площинній орієнтації кристала над потенціальними ямами, але для зігнутого кристала, коли до неперервного потенціалу додається лінеаризований відцентровий потенціал. Для цієї задачі здобуто загальний розв'язок. Можна відзначити, що він може бути корисним і в інших областях фізики, оскільки нахилені періодичні потенціали, подібні до ефективного потенціалу зігнутого кристала, зустрічаються, наприклад, в суперіонних провідниках, тунельних

джозефсонівських контактах в надпровідниках, обертанні диполів в зовнішніх полях, ланцюгах фазової синхронізації в теле- та радіо-приймачах, в фізиці лазерів та фізиці солітонів та ін.

В Розділі 4 спочатку викладається загальна квантова теорія елементарного процесу гальмівного випромінення (підрозділ 4.1). Для розрахунку кутових розподілів поляризації випромінення автор пропонує підхід, в якому поляризація випромінення в лабораторній системі відліку пов'язується в системі спокою початкового електрона за допомогою послідовності лоренцівських бустів та калібровочних перетворень, причому результатом є звичайний евклідовський поворот. Ситуації, коли послідовність унітарних перетворень зводиться до чистого повороту, в теоретичній фізиці є типовими (прикладом є поворот Вігнера та поворот Мелоша). З урахуванням недипольності випромінення, виводиться також формула, що пов'язує кут Мольтера та радіаційну довжину в наближенні, наступному за головним логарифмічним. Вона є корисною з огляду на широке застосування цих величин, що характеризують електромагнітні процеси в речовині при високих енергіях, а також складність їх точного розрахунку.

В підрозділ 4.2 виводиться дипольний аналог формули Байєра-Каткова для спектра випромінення в протяжному полі, який не можна отримати граничним переходом з Байєра-Каткова напряму внаслідок розбіжності інтегралів. Завдяки явній білінійності отриманої формули по траєкторії електрона, вона є зручною для різноманітних усереднень при проходженні релятивістського електрона крізь речовину.

Далі розглядаються загальні властивості випромінення від ультра-релятивістських електронів (підрозділ 4.3), та особливості спектрів в випромінення в необмеженій речовині (підрозділ 4.4). Серед характеристик середовища розглядаються дискретна атомна структура (на відміну від ідеалізованого ланжевєнівського джерела), яка дає дробовий ефект, а також аномальну дифузію. Нарешті, в підрозділі 4.5 аналізуються різні типи крайових ефектів в спектрі випромінення при проходженні електрона крізь мішені скінченної товщини. Відзначається, що аналоги перехідного випромінення є різноманітними і можуть існувати навіть без присутності речовини (в магнітному полі скінченної довжини або при декількох розсіяннях).

У Висновках наведені основні наукові результати, що отримані в дисертаційній роботі. Вони відповідають завданням, які були поставлені для вирішення основної мети дисертації.

Проблеми, які вирішуються у дисертації, викликані сучасними експериментами. Прийняті наближення при їх розв'язку є достатньо добре

обґрунтованими та використовуються багатьма дослідниками в цій галузі. Результати отримуються з перших принципів, та добре узгоджуються з експериментальними даними, або ж допомагають покращити узгодження з ними. Запропоновані узагальнення базуються на вирішенні задач, що допускають точний розв'язок. Аналітичні розрахунки проведені на хорошому математичному рівні та є коректними. Вони підкріплюються чисельним моделюванням та побудовою графіків. На основі аналітичних розрахунків автора розроблені додатки до програми FLUKA, яка використовується у ЦЕРН та інших прискорювальних центрах. Тому результати автора можна вважати **достовірними**.

Серед чималої кількості **нових результатів**, отриманих в дисертації, можна відзначити, зокрема, наступні:

- Запропоновано принцип розділення потенціалу орієнтованого атомного ланцюжка чи площини на неперервну та некогерентну компоненти, остання з яких відповідає за багаторазове розсіювання, і може описуватись інтегралом зіткнень.
- Одержано критерій для оптимальної площинної орієнтації кристала.
- Побудовано опис просторової дифузії при донат-розсіянні.
- Побудована аналітична теорія площинного деканалювання поза рамками наближення статистичної рівноваги.
- Побудована аналітична теорія об'ємного відбиття.
- Одержано формулу, яка пов'язує мольєрівський кут та радіаційну довжину в аморфній речовині, з урахуванням кулонівського характеру розсіювання на складових атомах.
- Одержано лінійну по частоті фотона поправку до інфрачервоної факторизаційної теореми для спектра випромінення при розсіянні ультра-релятивістського електрона.

Вагомим є також **практичне значення** отриманих результатів. Уточнення закону деканалювання у часі як на початковій, так і на пізній стадіях є важливим для практичних застосувань каналювання. Вираз кута об'ємного відбиття через неперервний потенціал довільного вигляду дозволяє швидко і реалістично обчислювати його у будь-якому кристалі будь-якої площинної орієнтації. Відповідні формули на сьогодні використовуються у оновленнях комп'ютерної програми FLUKA, розробленої у CERN. Квадрупольний формфактор спектра випромінення дозволяє описувати пригнічення м'якого випромінювання у тонких мішенях, подібно до того, як функція Мигдала робить це для товстих мішеней.

Слід відмітити низку здобутих результатів, запропонованих методів розрахунків, які мають важливе чисто методичне значення.

Результати дисертації повністю відображені в **публікаціях**, а також доповідалися на багатьох міжнародних конференціях за спеціальністю.

До змісту дисертації та її оформленню є такі зауваження:

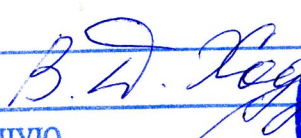
- Хоча автор розглядає розсіювання як в аморфній речовині, так і у кристалах, випромінювання в кристалах не розглядається. Можливо, це пов'язане з обмеженням на обсяг дисертації.
- Не розглянуто вплив температури на розсіювання швидкої частинки на атомних ланцюжках та площинах.

Але ці зауваження не зменшують наукового та практичного значення результатів дисертації. Вона є завершеним, самостійним дослідженням, що повністю відповідає паспорту спеціальності. Враховуючи це та актуальність теми дисертації, рівень і кількість публікацій, вважаю, що дисертаційна робота Бондаренка Миколи Вікторовича «Розсіювання та випромінювання високоенергетичних заряджених частинок в аморфних та кристалічних середовищах» відповідає 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, Бондаренко Микола Вікторович, безумовно, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент –

доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувача кафедри теоретичної ядерної фізики
та вищої математики імені О.І. Ахієзера
Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна

Ходусов В. Д.

Підпис 
ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар Харківського національного
університету імені В.Н. Каразіна

