

ВІДГУК

на дисертацію Бондаренка Миколи Вікторовича

Розсіювання та випромінювання високоенергетичних заряджених

частинок в аморфних та кристалічних середовищах,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних

зі спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Розвиток сучасної фізики високих енергій, як експериментальної, так і теоретичної, відзначається пошуком нової теорії, що узагальнює стандартну модель фундаментальних взаємодій – теорію Глешоу-Вайнберга-Салама, яка отримала багатопланове експериментальне підтвердження при енергіях порядку сотні ГеВ. Подальше просування вгору за шкалою енергій ставить нові вимоги перш за все експериментального характеру. Мова йде про фізику звичайної речовини при надвисоких енергіях пучків заряджених частинок, що зіштовхуються. Фактично висуваються нові вимоги до всього комплексу матеріалів, пристроїв, обчислювальної техніки і таке інше. Отже це новий крок при вивченні процесів у екстремальних умовах нових експериментів, а також у астрофізиці. Про них відомо досить багато, але багато залишається не зрозумілим і вимагає подальших зусиль.

У такій ситуації дослідження в даній галузі, які розвивають нові адекватні методи обчислень, та виконуються на засадах загальних принципів теорії поля, дозволяють виявити нові загальні риси та специфічні закономірності. В теорії взаємодії високоенергетичних заряджених частинок з речовиною існує ціла низка не розв'язаних задач, які стосуються взаємодії з кристалами, генерації електромагнітного випромінювання, послідовного врахування обмеженості середовищ, тощо. Саме дослідженню цих проблем, а також низки інших, які до них примикають, і присвячена дана дисертація. Тема дисертації є безумовно актуальною, оскільки розкриває низку нових закономірностей та узагальнює відомі раніше результати.

Дисертаційна робота Бондаренка М.В. присвячена теоретичному опису електромагнітних процесів, що відбуваються при проходженні безструктурних ультра-релятивістських заряджених частинок крізь речовину – розсіюванню та випромінюванню швидких заряджених частинок в аморфних мішенях та кристалах (в тому числі зігнутих), а також у магнітних полях. Характерною рисою роботи є трактування просторово-часових аспектів процесів, що розглядаються, з єдиної точки зору.

Дисертація складається зі Вступу, огляду літератури, трьох розділів основного тексту, висновків, чотирьох додатків та списку літератури із 499 джерел.

У ВСТУПІ відображені актуальність, мета і задачі дисертаційної роботи, а також внесок здобувача в отриманні результати.

ПЕРШИЙ розділ має оглядовий характер. У ньому висвітлена проблематика і етапи розвитку досліджень з низки споріднених до дисертації питань. Фактично, таким чином фіксується коло завдань, які будуть розв'язуватися в дисертації. Цей розділ визначає науковий рівень завдань, поставлених автором, та демонструє його глибоку обізнаність у предметі.

У ДРУГОМУ розділі розглядається розсіювання в аморфній речовині, але спершу аналізується диференціальний переріз розсіяння на окремому атомі. Для нього знайдені вищі борнівські наближення, кулонівська поправка, а також сформульований узагальнений скейлінг.

Наступною розглянутою задачею є багаторазове кулонівське розсіювання в аморфній речовині. В теорії цього процесу в класичній роботі Мольєра було запроваджене припущення, що типові кути розсіяння мають певний порядок величини. На цій основі було побудовано асимптотичне розкладення для функції розподілу по кутах розсіяння. Але це лише припущення. Автором було запропоновано більш послідовний підхід, що спирається на деформацію шляху інтегрування по прицільних параметрах в комплексну площину і подальшу інтерпретацію частин цього контуру як жорсткої та м'якої компоненти. Таким чином, хоча не існує абсолютно чіткої фізичної межі між м'якою та жорстко розсіяними частинками, в підході автора виникає математична – в комплексній площині. З феноменологічного погляду, можна відзначити, що ширина знайденої автором м'якої компоненти розподілу є вужчою, ніж розподіл Мольєра при типових кутах. Таке звуження дійсно спостерігалось експериментально.

Наприкінці розділу автор розраховує поєднаний розподіл швидкої частинки в аморфній речовині по швидкостях та координатах, включно з поздовжньою. Ці формули узагальнюють відомий розподіл Фермі, в якому відсутня поздовжня координата. На використанні отриманого розподілу ґрунтується запропонований автором новий метод для обчислення спектра Ландау-Померанчука-Мигдала, який дійсно є простішим ніж традиційний метод, розроблений Мигдалом.

У ТРЕТЬОМУ розділі розглядаються задачі про проходження швидких заряджених частинок крізь кристали. Аналізується розсіювання в осьовій та в площинній орієнтаціях, багаторазове розсіювання на ланцюжках, площинне каналювання та деканалювання, а також об'ємне відбиття в зігнутому кристалі. Стосовно останнього, автор відзначає аналогію з задачею Якова Бернуллі про брахістохрону.

В задачі про площинне деканалювання виникла ситуація, коли автору знадобилася функція Гріна для броунівського руху одновимірного (в напрямку, ортогональному атомним площинам) руху гармонічного осцилятора. Ця задача вельми давно розв'язувалася Чандрасекаром, але він опублікував результат лише для розподілів, проінтегрованих за одною з динамічних змінних, тоді як в даній задачі потрібна функція Гріна за всіма початковими та кінцевими поперечними координатами та швидкостями. Ця функція, а також власні функції еволюції, що згасають чисто експоненціально, були отримані в явному вигляді автором.

ЧЕТВЕРТИЙ розділ починається з розвитку підходів для опису елементарного процесу гальмівного випромінювання від релятивістських електронів. Для опису його кутового розподілу (за припущення про факторизацію розсіювання та випромінювання) автором було запропоновано метод, в якому диференціальний переріз випромінювання ультрарелятивістського електрона в лабораторній системі виражається через диференціальний переріз в системі спокою початкового електрона. При цьому в обох системах зручно вибрати калібровку випроміненого фотона чисто просторовою, і автором відзначається, що ці два вектори пов'язані чистим просторовим поворотом. На основі цього автором розвивається метод, в якому кутовий розподіл випромінювання в лабораторній системі координат отримується стереографічною проекцією з простішого розподілу у системі спокою початкового електрона.

Результати стосовно елементарного процесу гальмівного випромінювання загалом збігаються з відомими результатами квантової електродинаміки, але автором були також знайдені нові аспекти:

- Було знайдено, що загальна структура диференціальної ймовірності випромінювання фотона визначається універсальним тензором, який залежить від кута випромінювання.
- Було показано, що кутовий розподіл м'якого випромінювання має два «коліна», в той час як жорстке випромінювання – лише одне.
- Було знайдено повну систему недипольних формфакторів для поляризованого спектра. З урахуванням кулонівського характеру

розсіяння в атомній речовині, було також встановлено зв'язок між двома параметрами, що характеризують речовину – радіаційною довжиною та мольєрівським кутом.

Цікавим є також підхід до обчислення спектрів випромінювання, проінтегрованих за кутами випромінювання, шляхом вираження їх через подвійний інтеграл за часом. Такі інтегральні представлення були відомі раніше, але автором було показано, що їх можна інтерпретувати в термінах співвідношення унітарності.

Для спектрів випромінювання в формально нескінечних однорідних середовищах був розвинутий спрощений підхід до усереднення, коли квадрат різниці кутів відхилення та часова затримка між різними точками траєкторії окремо усереднюються та підставляються до загальної формули для спектра випромінювання. Автором було показано, що при правильному використанні цей метод дає чисельно задовільні результати.

У випадку сильно недипольного випромінювання, кути відхилення частинки є більшими від типових кутів випромінювання. Тому з'являються струмені випромінювання, хоча також залишається і істотна міжструменева компонента. До того ж, ці компоненти можуть інтерферувати між собою в представленні приціальних параметрів, а при найнижчих частотах, випромінювання перестає залежати від Лоренц-фактора електрона.

У ДОДАТКАХ містяться допоміжні питання і деякі нові результати, які меншою мірою відносяться до теоретичної фізики. Наприклад, Додаток В, присвячений властивостям узагальненої функції Рімана, може мати математичну цінність.

Переходячи до оцінок зазначимо, що результати роботи ґрунтуються на фізично розумних та загальноприйнятих наближеннях, таких як малість кутів розсіяння та випромінювання фотонів при високих енергіях, застосовність дипольного наближення (наближення еквівалентних фотонів) в тонких шарах речовини. В дослідженнях випромінювання, автор нехтує ефектами діелектричної сприйнятливості речовини. Застосовність такого наближення залежить від енергії електрона та випромінюваних ним фотонів, але при достатньо високих енергіях електронів, таких як енергії CERN SPS, воно зазвичай буває виправданим. Таким чином, результати автора є фізично обґрунтованими і мають вагоме практичне значення.

На захист винесено 15 результатів, всі вони, на мій погляд, є новими.

Одним з найбільш цікавих результатів, на мій погляд, є поправка до факторизаційної теореми до спектру гальмівного випромінювання. Її аналогом на перший погляд є теорема Лоу, яка виражає поправку такого ж порядку до амплітуди процесу через похідну по енергії від амплітуди пружного розсіяння. Але в класичній механіці така поправка до амплітуди виявляється чисто уявною, і тому дає поправку до інтенсивності випромінювання лише у другому порядку, але при цьому інтеграл по кутах від неї розходиться. Таким чином, після розкладення амплітуди, інтенсивність випромінювання вже не можна проінтегрувати по кутах. Щоб подолати це ускладнення, автор використав представлення для спектра, точно проінтегрованого за кутами, і вивів з нього відповідну поправку. На відміну від теореми Лоу, вона виявилася залежною від траєкторії електрона всередині області розсіяння, не зводяться до кінцевих характеристик розсіяння.

Інший новий результат стосується спектрів випромінювання у однорідному середовищі. Оскільки найвідоміші представники – спектр ЛПМ-пригнічення і синхротронний спектр мають спільні риси, в дисертації пропонується їх узагальнення на основі опису руху електрона як аномальної дифузії з довільним показником ступеня. При цьому цікавим є той факт, що в інфрачервоній асимптотиці головний член не залежить від Лоренц-фактора (тобто, за термінологією автора, має «радіофізичне» походження), тоді як поправочний член, навпаки, залежить лише від Лоренц-фактора, але не від сили поля. Цей результат варто було б теж підкреслити в положеннях, що виносяться на захист.

У випадку сильно недипольного випромінювання, коли формуються струмені випромінювання в кутовому розподілі, автором було звернуто увагу, що вони можуть проявлятися навіть в спектрі випромінювання, інтегральному по кутах, як осциляції в м'якій частині спектра. Було з'ясовано, що ці осциляції виникають внаслідок інтерференції між струменями та міжструменевою компонентою в представленні прицільних параметрів. Цей тип осциляцій відрізняється від осциляцій, передбачених Бланкенбеклером і експериментально підтверджених колаборацією НА-63.

Для фундаментальної задачі про гальмівне випромінювання в аморфній пластинці скінченної товщини, автором досліджено випадок, протилежний випадку Терновського-Шульги-Фоміна, тобто коли типові кути відхилення електрона в мішені є значно меншими від Лоренц-фактора. В головному порядку тут спектр є подібним до спектра Бете-Гайтлера, але в наступному (квадрупольному) порядку виникає пригнічення, форма якого була розрахована

автором. В якості узагальнення, автор відзначає, що незважаючи на малість поперечних просторових відхилень для ультра-релятивістських частинок, вони виявляються важливими в багатьох процесах, таких як розсіяння поверхнями, нахиленими під малим кутом до пучка, в площинному деканалюванні позитивно заряджених частинок, і для опису інтерференційних явищ у випромінюванні, де фотони відриваються від електрона на скінченній поперечній відстані. Автор також інтерпретує з єдиного погляду ефекти поздовжньої затримки в різних процесах. В теорії випромінювання часова затримка чи випередження частинки в мішені відносно асимптоти траєкторії у вигляді кута визначає нахил спектру при малих частотах фотонів. При проходженні крізь зігнутий кристал, часова затримка радіальної компоненти руху означає поворот пучка в бік згину, тоді як часове випередження -- відхилення в бік, протилежний згину (об'ємне відбиття). Ці концепції, розроблені автором, можна вважати новими.

Таким чином, результати роботи є новими. Вони опубліковані в провідних наукових виданнях і відомі науковій громадськості.

Разом з тим, дисертаційна робота не вільна від ряду недоліків. Як на мій погляд, основним є практична відсутність посилань та встановлення відповідності із відомими методами квантової теорії поля у зовнішніх умовах. Наприклад, загальним методом Келдиша для нерівноважних процесів. Не обговорюється відношення або відповідність до опису середовищ за допомогою функцій відгуку або інших феноменологічних підходів. Фактично, більшість результатів відповідаю умовам застосовності квазикласчного наближення, але корисно було б більш детально дослідити параметри, що відповідають йому за різних умов. Також, певних нарікань викликає стилістика написання роботи, особливо її синтаксис. Він практично є калькою з англійського варіанту викладення. Те ж саме стосується подання матеріалу в авторефераті.

Але названі недоліки не впливають на отримані в роботі наукові результати, які є важливими для теоретичної фізики високих енергій, а також для фізики конденсованих систем. Дисертація є закінченим дослідженням. Вона задовольняє всім вимогам, які пред'являються до докторських дисертацій, автореферат повністю відображає зміст дисертації.

Вважаю, що на підставі отриманих результатів Бондаренко Микола Вікторович заслуговує присудження йому наукового ступеню доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Доктор фіз.-мат. наук, професор
Університет імені Олесея Гончара
Відділ кадрів
Скालозуб В.В.
Начальник відділу кадрів
04.01.2019



В.В. Скалозуб