

ВІДГУК  
на дисертацію ТРОФИМЕНКА Сергія Валерійовича

**Інтерференційні ефекти в іонізаційних втратах,  
перехідному та когерентному рентгенівському  
випромінюванні релятивістських частинок**

представлену на здобуття наукового ступеня доктора  
фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Розвиток сучасної фізики високих енергій, як експериментальної, так і теоретичної, ставить нові жорсткі вимоги до всього комплексу матеріалів, пристроїв, обчислювальної техніки і таке інше, що забезпечує проведення експериментів та обробку отриманих даних. Саме планування нових експериментів повинно враховувати різноманітні властивості матеріалів та ефекти, пов'язані з розробкою апаратури різного призначення. Отже потрібен новий крок при вивченні процесів в екстремальних умовах експериментів, а також у астрофізиці, де необхідно враховувати надвисокі енергії частинок, надпотужні зовнішні поля. Про них багато залишається не зрозумілим і вимагає подальших досліджень різного характеру.

В теорії взаємодії високоенергетичних заряджених частинок з речовиною існує ціла низка нових задач, які стосуються взаємодії з кристалами, генерації електромагнітного випромінювання, послідовного врахування обмеженості середовищ, тощо. Дослідженню цих задач електродинаміки і присвячена дана дисертація. Тема дисертації є безумовно актуальною, оскільки розкриває низку нових закономірностей та узагальнює відомі раніше результати.

Дисертаційна робота Трофименка С.В. присвячена теоретичному опису електромагнітних процесів, що відбуваються при проходженні релятивістських заряджених частинок крізь складні комплекси речовини. Значна увага приділяється випромінюванню та втратам енергії в мішенях та кристалах різного розміру, дослідженню механізмів їх формування для різних умов спостереження, а також у потужних магнітних полях пульсарів. Робота виконана методами класичної електродинаміки та квантової механіки.

Дисертація складається зі Вступу, шістьох розділів основного тексту, висновків, додатку, списку використаної літератури із 331 джерела, 69 рисунків, обсяг дисертації 348 сторінок.

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 та етапи розвитку досліджень з низки споріднених до теми дисертації питань. Фактично, таким чином фіксується коло завдань, які будуть розв'язуватися в



дисертації. Відзначено також велике практичне значення процесів, що вивчаються, для розробки нових методів досліджень. Тут окремо наголошено на недостатнє вивчення інтерференційних ефектів у даній галузі. Їх роль визначається великими розмірами довжин формування, та ультрамалими розмірами банчів частинок, що проходять крізь речовину.

У розділі також наведено ряд результатів, щодо визначення базового поняття, яким користується автор дисертації — поняття “напівголого” електрона. Поле такого “НГ-електрона” не є розв'язком будь-якого рівняння для розподілу заряду. Воно може розглядатися як результат деструктивної інтерференції його власного кулонівського поля з полем перехідного випромінювання (ПВ), що виникає при вильоті заряду з мішені. Таке поле поступово трансформується у звичайне кулонівське поле на відстані довжини формування  $l_F$ . Остання може бути значною, чим й обумовлена нова фізика процесів в зоні формування. Модифікацію характеристик процесів автор розглядає як інтерференційний ефект в середині зони формування. Вивчення впливу такого поля на різноманітні електродинамічні процеси присвячена значна частина дисертації.

У підрозділі 1.2 методом зображень досліджено ПР НГ-електрона при його падінні на металеву пластину і отримано вираз для спектрально-кутового розподілу такого поля. Також у 1.4 надано новий зручний для врахування інтерференційних ефектів метод обчислення іонізаційних втрат енергії (ІВ) частинок.

**ДРУГИЙ РОЗДІЛ** присвячено вивченню когерентного рентгенівського випромінювання (КВР) НГ-електронів у кристалічних мішенях. Таким випромінюванням називають розсіювання, що виникає внаслідок брегівського розсіювання на періодичних кристалічних площинах. Побудовано кінематичну теорію такого розсіювання КРВ НГ-електрона в ультратонкому кристалі і отримано вираз для спектрально-кутової густини випромінювання. Із нього випливає істотна модифікація кутового розподілу спектральної густини КРВ при  $l < l_F$ , порівняно з розподілами, типовими для ПРВ і для дифрагованого перехідного випромінювання.

У підрозділі 2.3 розглянуто вплив обмеженого поперечного розміру кристалічної мішені на характер випромінювання. Отримано вираз для спектрально-кутового розподілу КРВ. Показано, що цей вплив призводить до залежності інтенсивності від відстані між мішенями, коли відстань перевищує довжину формування. У підрозділі 2.4 розраховано вплив НГ-стану електрона на кутовий розподіл числа фотонів дифрагованого перехідного випромінювання в залежності від відстані між аморфною та кристалічною мішенями. Спеціально розглянуто випадок розсіювання назад, коли це розсіювання має проходити крізь аморфну мішень на шляху до детектора.

**ТРЕТІЙ РОЗДІЛ** присвячено вивченню ефектів, обумовлених довжиною формування, у ПВ релятивістських електронів, а також в іонізації атомних К-



оболонки і характеристичному випромінюванні таких електронів у реєстрації ПВ міліметрового діапазону довжин хвиль у ближній зоні за допомогою параболічного фокусного дзеркала обмеженого розміру. Отримано відповідний вираз для розподілу ПВ в залежності від радіуса дзеркала та відстані. Показано, що розподіл може суттєво відрізнятися від розподілів, що реєструються точковим детектором як у хвильовій, так і у ближній зоні.

У підрозділі 3.2 узагальнено теорію рентгенівського ПВ електронів у багатошарових періодичних мішенях на випадок, коли на мішень налітає пучок електронів із аксіально-симетричним розподілом електронів, і активна область детектора випромінювання має обмежений розмір. Отримано вираз для спектральної густини випромінювання. Продемонстровано, що він добре описує відповідні експериментальні результати.

Виявлено значне посилення інтенсивності випромінювання при певних параметрах мішені у випадку вузької колімації пучка фотонів випромінювання. Цей ефект може бути важливим при використанні багатошарових мішеней у якості джерел вузько колімованих пучків фотонів.

У підрозділі 3.3 розроблено теорію процесу іонізації атомних оболонок високоенергетичними електронами в багатошарових періодичних мішенях та характеристичного рентгенівського випромінювання, що виникає при рекомбінації цих оболонок. Отримано вираз для середніх спектральної густини числа фотонів у просторі навколо НГ-електрона. Цей спектр також враховує інтерференцію між класичними полями власного поля частинки та поля ПВ з різних поверхонь. Отримані результати дають підстави для розгляду характеристичного рентгенівського випромінювання в багатошарових мішенях як перспективне джерело рентгенівських фотонів.

У ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ досліджено іонізаційні втрати енергії (ІВ) високоенергетичних електрон-позитронних пар у тонких мішенях. Розглянуто конфігурацію, коли мішень розташована на різних відстанях від мішені, де народилася пара. Досліджено вплив паралельності траєкторій електрона і позитрона пари на ІВ. Зокрема, досліджена модифікація ефекту Чудакова для випадків паралельного та непаралельного руху частинок пари. У підрозділі 4.2 розвинуто теорію ІВ високоенергетичних електрон-позитронних пар у тонких мішенях для випадку, коли пара народжується в іншій більш товстій мішені. Враховується вплив непаралельності траєкторій частинок і ПВ, що генерується при вильоті пари з товстої мішені, на ІВ пари у тонкій мішені, яку вона перетинає. Отримано розподіли, які враховують всі фактори даної постановки експериментів. Зокрема визначено внесок, обумовлений ПВ, яке генерується електронем і позитроном при вильоті їх з товстої мішені, де пара народжується. Особливо цікавим і показовим тут є відкритий ефект асимптотичного пригнічення ІВ пари, що принципово відрізняється від відомого ефекту Чудакова у квазіобмеженому середовищі.



У підрозділі 4.4 відкрито ефект підвищення ІВ пари порівняно з відповідною сумою для окремих частинок пари. Досліджено залежність величини підвищення від енергії пари, кута розльоту та координати точки народження в середині мішені. Оцінено відносну величину такого ефекту, протилежного ефекту Чудакова, яка може сягати 10 %.

У П'ЯТОМУ РОЗДІЛІ побудовано класичну і квантову теорії втрат енергії банчів релятивістських електронів ультрамалого розміру на збудження та іонізацію атомних оболонок речовини з урахуванням інтерференційних ефектів на ці втрати. Це достатньо глибоке дослідження, яке враховує багато факторів, які раніше не приймалися до уваги. Зокрема, найбільш важливо і теоретично новим є врахування макроскопічних форм-факторів банчів. Такий підхід виявив можливість резонансного підсилення ІВ для банчів із періодичною модуляцією густини, а також суттєву модифікацію когерентних ефектів для ІВ банчів в ультратонких шарах речовини. Показано, що з урахуванням названих ефектів їх ІВ можуть підвищуватися на декілька порядків, порівняно із сумою незалежних внесків окремих частинок банчу в ІВ. В підрозділі 5.1 це зроблено в рамках класичної електродинаміки. Показано, що в твердотільних мішенях найбільш придатними є товщини мішеней, коли ефект густини в ІВ відсутній. Вивчено випадки різного (зокрема, гауссового) просторового розподілу частинок у шарі речовини. Отримано відповідні вирази та їх проаналізовано. Відмічено, що внесок у втрати має додатний інтерференційний член, який може для певних умов перевищувати некогерентні доданки.

У пункті 5.2 розроблено квантовомеханічний підхід до обчислення когерентних ефектів у ІВ релятивістських банчів електронів. У цьому підході більш коректно враховано електронну структуру атомів, збуджених потоком частинок, що налітають. Отримано вираз для ІВ газоподібних середовищ. Із проведеного аналізу, зокрема, впливає, що інтерференційні ефекти можуть призводити до різкого зростання величини втрат, у випадку, коли повна ширина розподілу частинок у банчі у поздовжньому напрямку стає меншою за 170 нм. Окремо розглянуто випадок електронних пучків із періодичною поздовжньою модуляцією густини. Для них передбачено ефект резонансного підсилення ІВ для дискретного набору періодів модуляції густини пучка, які визначаються частотами збудження атомних оболонок мішені. Вивчено залежність цього ефекту від величини маси елементів середовища. Показано, що при збільшенні маси частоти зміщуються до рентгенівського діапазону.

У ШОСТОМУ РОЗДІЛІ досліджується проблема зміщеного по фазі інтерімпульсу у радіовипромінюванні пульсара у Крабовидній туманності. Запропоновано механізм випромінювання частинками високих енергій у магнітосфері пульсара, який, з урахуванням інтерференційних ефектів, може привести до пояснення природи цього інтерімпульсу. Також оцінено верхню частоту випромінюванні, коли зміщений інтерімпульс зникає.



В основі запропонованого механізму покладено випромінювання позитронів, що прискорюються магнітним полем в напрямку поверхні зірки вздовж викривлених силових ліній магнітного поля тим самим електричним полем, що прискорює електрони в протилежному напрямку. Це випромінювання відбивається від поверхні та інтерферує з перехідним випромінюванням, яке генерується при падінні позитронів на поверхню зірки. Показано, що у разі невеликого нахилу магнітної осі відносно нормалі до її поверхні можливо пояснити появу зміщеного імпульсу. Показано, що інтерференція випромінювання кривини позитронів із перехідним випромінюванням призводить до пригнічування випромінювання позитронів на низьких частотах. У рамках зроблених припущень отримано оцінку спектральної густини потоку когерентного випромінювання позитронів, які рухаються над полярною поверхнею пульсара, та проаналізовано її структуру в залежності від довжини хвиль випромінювання, Лоренц-фактора позитронів, частоти. Показано, зокрема, що при певних відношеннях довжини хвиль до характерних розмірів неоднорідності у потоках позитронів спектр відповідає існуючим спостереженням. В рамках даної моделі передбачається зникнення зміщеного імпульсу на певній верхній частоті випромінювання. Останнє передбачення є критичним для даної моделі і потребує подальших спостережень.

Таким є зміст і основні отримані результати дисертаційної роботи Трофименка С.В. Переходячи до оцінок зазначимо, що результати ґрунтуються на фізично розумних та загальноприйнятих уявленнях про формування електромагнітних полів заряджених частинок після проходження ними границь середовища. В більшості випадків мова йде про перехідне випромінювання 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. Значне місце відводиться методам класичної електродинаміки в середовищі та відповідним моделям середовища. Ці методи виправдані в задачах, які розглядає автор. Таким чином, представлені на захист результати є фізично обґрунтованими і мають вагомим практичне значення.

На захист винесено 14 результатів, всі вони, як на мій погляд, є новими. Привабливою і цікавою є сама мета дослідження – виявити і оцінити роль інтерференційних ефектів, обумовлених великими довжинами формування випромінювання та малими розмірами згустків заряджених частинок при високих енергіях зіткнення та з урахуванням реальних умов експериментів, їх геометрії та матеріалів, що використовуються в детекторах. Тут важливо відзначити, що інтерференційні умови істотно змінюють результати, відомі із стандартних міркувань і традиційних методів досліджень. Практично неможливо передбачити заздалегідь в чому конкретно вони будуть визначатися. В якомусь



сенсі можна сказати, що «стандартна інтуїція не працює». Отже приходиться покладатися на результати обчислень та оцінки надійності тих уявлень, які призводять до отриманих результатів. Ряд із них є піонерськими і відповідають новим ефектам. Наприклад, істотна модифікація ефекту Чудакова, пояснення (модель) походження інтерімпульса у випромінюванні пульсару, квантовомеханічний підхід до обчислення когерентних ефектів у ІВ релятивістських банчів електронів. І це стосується практично всіх результатів, отриманих автором у більшості випадків одноосібно або з його головним внеском.

У той же час, хочу зробити зауваження різного змісту, хоча вони в основному носять характер побажань до продовження досліджень.

Почнемо з питання про ІВ втрати у вузьких банчах електронів при їх проходженні через тонкі мішені, досліджені для гауссового розподілу частинок у банчах. Виникає питання про природу частинок у банчі. Якщо це класичні частинки, то як їх скласти у вибраний розподіл, якими механізмами? Якщо ж це квантові частинки, то для створення гауссового координатного розподілу необхідно зробити перетворення Фур'є і отримати гауссів же розподіл в імпульсному просторі хвиль Де-Бройля частинок пучка. У випадку, коли мішень тонка і можна не враховувати ефекти густини, проходження банчу нагадує тунелювання хвильового пакету через потенційний бар'єр. В такому разі застосовувати класичні методи є некоректним підходом.

Оскільки класичні і квантові методи істотно відрізняються, треба б було обговорити область застосовності класичної електродинаміки для процесів, що вивчаються. Це необхідно для проведення надійних оцінок та отримання обмежень на отримані результати. Замість того у дисертації наголошується, що класичні методи дають якісно коректні результати.

У дисертації в різних місцях використовується поняття «фотонів» рентгенівського випромінювання та в багатьох випадках не розрізняються поняття рентгенівського випромінювання та випромінювання відповідних фотонів. Формально кажучи, це не впливає на проведення обчислень чи обговорення результатів. Але рентгенівське випромінювання є класичним поняттям. Відповідно, воно генерується прискореними зарядами. Фотони є квантовими сутностями, обумовленими переходами між рівнями ядер, атомів, молекул. Теоретично такі різні механізми не сумісні. Узгодження обох підходів є вельми корисним.

Дивним, на мій погляд, також є термін «напівголий електрон», запозичений у літературі з нерелятивістської фізики. В релятивістській квантовій теорії поля використовується термін «голий електрон», який означає електрон без урахування ренормування заряду поляризацією вакууму. Тобто мова йде про властивості електрона як такого. Його поле є розв'язком рівняння Пуассона. Аналогічно, дебаєвський потенціал екранований, він є розв'язком рівняння з ефективною масою в середовищі. Навпаки, термін НГ-електрон відноситься до поля, яке є суперпозицією кулонівського поля заряду і поля перехідного

випромінювання. Яке це має відношення до заряду? Взагалі, в класичній фізиці заряд є заданою властивістю частинки, і не пояснюється. Напроти, у квантовій теорії поля заряд є параметром (функцією) зовнішніх умов. Зокрема, імпульсу електрона, якщо мова йде про задачі розсіювання. Наприклад, електричний інваріантний безрозмірний заряд у стандартній моделі  $e^2/(2 \hbar c)$ , де  $c$  - швидкість світла,  $\hbar$  – стала Планка, дорівнює при низьких енергіях  $1/137$  та  $1/127$  при енергіях пучків на LHC. Ці значення треба враховувати при аналізі експериментальних даних та проведенні розрахунків.

В зовнішніх умовах поле випромінювання може генеруватися різними механізмами. Сама процедура обчислення поля в області формування може підказати більш вдалу назву для нього.

Але наведені вище зауваження не впливають на отримані в роботі нові наукові результати, які є важливими для теоретичної фізики й практично важливі для поточних та майбутніх досліджень з фізики високих енергій. Робота задовольняє всім вимогам, які пред'являються до докторських дисертацій, автореферат повністю відображає зміст дисертації.

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

Доктор фіз.-мат. наук, професор

В.В. Скалозуб

