

Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Трофименка Сергія Валерійовича

«Інтерференційні ефекти в іонізаційних втратах, перехідному та когерентному

рентгенівському випромінюванні релятивістських частинок»,

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

Дисертаційна робота Трофименка С.В. присвячена теоретичному дослідженню інтерференційних ефектів в іонізаційних втратах енергії, перехідному та когерентному рентгенівському випромінюванні релятивістських частинок, що пов'язані з великими розмірами довжин формування випромінювання та надмалими розмірами згустків заряджених частинок, що проходять крізь речовину. В ній побудовано теоретичний опис цих процесів за умов суттєвого прояву зазначених ефектів, коли добре відомі формули непридатні для такого опису.

Електродинамічні процеси, що мають місце при взаємодії частинок високих енергій із речовиною та зовнішніми полями, можуть розвиватися на макроскопічно великих відстанях вздовж напрямку руху частинок, відомих як довжини формування. У межах таких довжин частинки перебувають у так званому «напівголому» стані з сильно модифікованим електромагнітним полем навколо себе. Характеристики електродинамічних процесів, що виникають при взаємодії таких частинок із речовиною, можуть помітно відрізнятися від подібних характеристик, типових для випадку, коли налітаючі частинки мають кулонівське поле. Крім того, значної модифікації такі характеристики можуть зазнати внаслідок інтерференції власних полів частинок між собою при проходженні крізь речовину ультракоротких банчів із великої кількості заряджених частинок. Особливо суттєвими такі ефекти стають при параметрах, які планується досягти на майбутніх лептонних колайдерах, або таких, що вже є досяжні на сучасних лазерах на вільних електронах. Для ряду процесів, які, зокрема, представляють практичний інтерес для проблем діагностики параметрів пучків та розвитку джерел рентгенівського випромінювання, вищезгадані ефекти раніше не вивчалися, і їх всебічне дослідження є метою даної дисертаційної роботи, що зумовлює її **актуальність**.

Також **актуальність** досліджень, проведених у дисертації С.В. Трофименка, підтверджується тим, що вони є складовою частиною низки науково-дослідних робіт і проєктів, які виконувались в Інституті теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України з 2014 по 2020 роки, а результати, отримані дисертантом впродовж цього періоду, були опубліковані в 41 роботі, які містять у своєму складі статті у високореєтингових фахових журналах та тези доповідей на вітчизняних і міжнародних конференціях.

Зміст і структура дисертаційної роботи повністю відповідають вимогам, які висуваються до докторських дисертацій: робота містить 348 сторінок друкованого тексту і складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 331 найменування і одного додатку. У **вступі** обґрунтовано актуальність проведених досліджень, сформульовано мету роботи, основні завдання та методи досліджень, представлено основні

результати роботи та вказано їх новизну і науково-практичне значення, наведено інформацію про апробацію результатів дисертаційної роботи та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** наведено огляд основних результатів, що були отримані при попередніх дослідженнях процесів, вивченню яких присвячено дану дисертаційну роботу. Особливу увагу приділено обговоренню методів теоретичного опису цих процесів. Окрім суто оглядової частини, у даному розділі також представлені й оригінальні дослідження ряду проблем пов'язаних із перехідним випромінюванням та іонізаційними втратами енергії частинок. Зокрема, отримано аналітичні вирази, що описують просторову еволюцію компонент Фур'є електромагнітного поля навколо ультрарелятивістського електрона після проходження ним товстої аморфної мішені у широкому діапазоні відстаней від мішені. Продемонстрована можливість утворення «напівголого» стану електрона в цьому процесі та існування тривалого процесу відновлення поля частинки. Отримано вирази, що описують спектрально-кутовий розподіл перехідного випромінювання «напівголого» електрона при його похилому падінні на провідну мішень при довільно низьких енергіях релятивістської частинки. Проведено аналіз нового методу обчислення іонізаційних втрат частинок, який є зручним для дослідження впливу інтерференційних ефектів на такі втрати.

Другий розділ присвячено дослідженню особливостей когерентного рентгенівського випромінювання (КРВ) «напівголих» електронів у кристалічних мішенях. Вважається, що електрон опиняється у такому стані в результаті попереднього проходження крізь товсту аморфну мішень. Даний розділ можна розглядати як такий, що складається з двох частин. У першій частині розглянуто задачу про КРВ електрона в ультратонкому кристалі. Показано, що в даному випадку не можна розділити дві складові КРВ, що представляють собою параметричне рентгенівське випромінювання і дифраговане перехідне випромінювання (ДПВ), які сильно інтерферують одне з одним. Отримано вирази для спектрально-кутового розподілу КРВ. Досліджено модифікацію цього розподілу порівняно з відповідним розподілом, типовим для електрона з кулонівським полем, та його еволюцію зі збільшенням відстані між аморфною і кристалічною мішенями. Аналогічне дослідження виконано і для інтегральної інтенсивності випромінювання. Вивчено вплив обмеженого поперечного розміру кристалічної мішені на інтенсивність КРВ у даному випадку. У другій частині даного розділу вивчено ДПВ «напівголого» електрона у товстому кристалі у геометрії Брега. Отримано точні та наближені спрощені аналітичні вирази для кутового розподілу та інтегральної інтенсивності випромінювання та досліджено їх модифікацію порівняно з випадком налітаючого електрона з кулонівським полем.

У **третьому розділі** розглянуто інтерференційні ефекти у процесах, пов'язаних із перехідним і характеристичним випромінюванням електронів. Спочатку теоретично досліджено проблему вимірювання характеристик перехідного випромінювання міліметрового діапазону у ближній зоні з використанням параболічного дзеркала у якості фокусуючої системи. Отримано вираз для спектрально-кутового розподілу випромінювання, що реєструються при довільному розмірі і положенні дзеркала. Далі виконано узагальнення теорії рентгенівського перехідного випромінювання релятивістських електронів у багатошарових періодичних мішенях на випадок довільного поперечного розподілу електронів у пучку та обмеженого розміру активної області детектора. Отримано вираз для спектрального розподілу випромінювання, що реєструється у цьому випадку. Показана можливість різкого посилення інтенсивності випромінювання при певному періоді мішені за умов вузької колімації пучка фотонів випромінювання. Також у даному розділі побудована теорія іонізації атомних К-оболонки і характеристичного рентгенівського випромінювання

релятивістських електронів у багатошарових періодичних мішенях. Показана можливість прояву інтерференційних ефектів для даних процесів. Передбачено ефект суттєвого посилення перерізу іонізації та інтенсивності характеристичного випромінювання при певних оптимальних параметрах мішені.

Четвертий розділ присвячено дослідженню інтерференційних ефектів в іонізаційних втратах високоенергетичних електрон-позитронних пар у тонких шарах речовини. Розглянуто випадок, коли такий шар розташовано на певній відстані від мішені, у якій пара народжується. Показано, що при цьому інтерференційні ефекти можуть впливати на іонізаційні втрати пари на значно більшій відстані від точки її народження, ніж у випадку іонізаційних втрат пари у тому самому середовищі, де вона народжується. Показана можливість існування залишкового ефекту пригнічення іонізаційних втрат пари у тонкій мішені порівняно з сумою незалежних втрат електрона і позитрона при асимптотично великих значеннях відстані між мішенями. Передбачено ефект, який є зворотним до відомого ефекту Чудакова і полягає в перевищенні величиною іонізаційних втрат пари суми незалежних втрат електрона і позитрона. Виявлено найбільш сприятливі умови для прояву такого ефекту.

У **п'ятому розділі** подібні інтерференційні ефекти розглянуто для іонізаційних втрат макроскопічних ансамблів (банчів) із великої кількості частинок. Розгляд проведено з використанням як класичної електродинаміки, так і теорії збурень квантової механіки. Показано, що в ультратонких шарах речовини умови, необхідні для прояву зазначених ефектів, значно послаблюються, і дані ефекти можуть мати місце для банчів значно більшого поперечного розміру, ніж у товстих мішенях. Продемонстровано, що при параметрах банчів, які є наразі досяжними на сучасних лазерах на вільних електронах, такі ефекти можуть призводити до посилення іонізаційних втрат банчів в ультратонких мішенях на декілька порядків величини. Досліджено випадки, що відповідають різним видам просторового розподілу частинок у банчі. Для пучка з густиною, періодично модульованою у поздовжньому напрямку, передбачено ефект резонансного посилення іонізаційних втрат.

Шостий розділ присвячено дослідженню проблеми зміщеного за фазою інтерімпульсу пульсара у Крабоподібній туманності. Запропоновано і досліджено новий механізм випромінювання релятивістськими частинками, що рухаються в магнітосфері такої зірки, який може розглядатися як кандидат на роль джерела зміщеного інтерімпульсу. Даний механізм полягає у випромінюванні позитронів, що прискорюються в напрямку поверхні зірки і падають на цю поверхню. Продемонстровано роль інтерференційних ефектів для можливості пояснення природи зміщеного інтерімпульсу на основі зазначеного механізму. Проведено оцінку інтенсивності когерентного випромінювання потоку позитронів, що рухаються над полярною шапкою пульсара. Зазначено, що інтенсивність такого випромінювання досить добре узгоджується з наявними даними спостережень. Передбачено частоту, при якій зміщений інтерімпульс має зникати.

Таким чином, у дисертаційній роботі С.В. Трофіменка **отримано ряд нових вагомих теоретичних результатів**, які мають фундаментальний характер, а також представляють інтерес для практичних застосувань. Дисертація **відповідає спеціальності 01.04.02 – «теоретична фізика»**.

Автореферат повністю відображає зміст і основні положення дисертаційної роботи.

Достовірність і обґрунтованість результатів, отриманих у дисертації, забезпечується використанням добре перевірених методів класичної електродинаміки і квантової механіки.

Крім того, усі отримані результати перевірялися на предмет збігу з загальновідомими результатами у відповідних граничних випадках.

Вважаю, що результати, отримані в даній дисертаційній роботі, можуть бути використані при проведенні теоретичних робіт у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України (м. Харків), Харківському національному університеті ім. В.Н. Каразіна МОН України, Інституті монокристалів НАН України (м. Харків), Радіоастрономічному інституті НАН України (м. Харків), Київському національному університеті ім. Т. Шевченка, а також для підготовки відповідних експериментальних досліджень у таких закордонних лабораторіях як CERN (м. Женева, Швейцарія), DESY (м. Гамбург, Німеччина) та ін.

По змісту дисертації можна зробити наступні **зауваження**:

- 1) Залежність інтенсивності когерентного рентгенівського випромінювання «напівголого» електрона від відстані між мішенями, зображена на Рис. 2.8, не є монотонною, що ніби суперечить інтуїтивному уявленню про поступове відновлення електромагнітного поля навколо електрона після проходження ним товстої мішені. Добре було б прокоментувати, чому, з фізичної точки зору, ця інтенсивність може не тільки зростати зі збільшенням зазначеної відстані, а й зменшуватися і осцилювати навколо свого асимптотичного значення.
- 2) При оцінюванні інтенсивності випромінювання потоку позитронів, що рухаються над полярною шапкою пульсара, у якості спектральної густини випромінювання окремої частинки обиралася низькочастотна асимптотика [формула (6.19)] відповідного виразу для спектральної густини синхротронного випромінювання. Було б добре прокоментувати можливість застосування такого наближення в даному випадку.
- 3) У якості установок, на яких можливе спостереження ефектів, передбачених у дисертації, згадуються, зокрема, Європейський рентгенівський лазер на вільних електронах, прискорювач ультракоротких банчів SINBAD та майбутні лінійні колайдери (ILC, CLIC). Можливо, варто було б приділити увагу короткому огляду основних характеристик цих прискорювачів (наприклад, у вигляді окремого додатку) та більш детально обговорити можливі експерименти з виявлення вищезгаданих ефектів.

Втім, наведені зауваження мають рекомендаційний характер і не впливають на важливість отриманих результатів і загальну високу оцінку роботи. Дисертація добре структурована і якісно написана. Результати роботи опубліковано в 20 статтях у фахових вітчизняних і міжнародних журналах, більшість із яких мають квартилі Q1, Q2 та Q3. Також ці результати були представлені на близько 25 міжнародних конференціях і школах. Особистий внесок дисертанта в роботу є визначальним, що, зокрема, підтверджується помітною кількістю одноосібних публікацій. Новизна та наукове значення отриманих результатів не викликають сумнівів. Дисертація С.В. Трофименка є закінченою науковою роботою, у якій отримано нові результати, що вирішують важливу наукову проблему теоретичної фізики, а саме: побудову теоретичного опису ряду електродинамічних процесів при взаємодії релятивістських частинок із речовиною за умов суттєвого прояву інтерференційних ефектів, пов'язаних із великими довжинами формування випромінювання та ультрамалими розмірами згустків заряджених частинок.

Беручи до уваги актуальність теми дисертації, наукову значимість і новизну отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, вважаю, що дисертація «Інтерференційні ефекти в іонізаційних втратах, перехідному та когерентному рентгенівському випромінюванні релятивістських частинок» повністю задовольняє вимогам до докторських дисертацій, зокрема, 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 Трофименко Сергій Валерійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент
доктор фізико-математичних наук,
професор, завідувач відділу
теорії конденсованого стану речовини
Інституту монокристалів НАН України



В.В. Яновський

Підпис засвідчую:
Учений секретар Інституту монокристалів
НАН України
Канд. фіз.-мат. наук



К.М.Кулик