

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 дослідженню ряду електродинамічних процесів, що мають місце при взаємодії частинок високих енергій із речовиною, за умов значного впливу інтерференційних ефектів на характеристики цих процесів. Процеси, що розглядаються, містять у своєму складі перехідне, когерентне рентгенівське і характеристичне випромінювання в аморфних та кристалічних середовищах, іонізаційні втрати енергії, а також випромінювання релятивістськими позитронами у магнітосфері пульсара. Інтерференційні ефекти, що вивчаються, викликані макроскопічно великими довжинами формування випромінювання та ультрамалими масштабами згустків заряджених частинок, що взаємодіють із речовиною.

На ряді сучасних прискорювачів, зокрема, на рентгенівських лазерах на вільних електронах, а також на прискорювачах, запланованих для введення в експлуатацію в майбутньому, можуть бути реалізовані умови, за яких інтерференційні ефекти, які є предметом дослідження дисертації, суттєво впливають на характеристики електродинамічних процесів, що відбуваються при взаємодії релятивістських частинок із речовиною. Ретельне вивчення цих процесів є **важливим** для створення нових технологій з діагностики пучків заряджених частинок на прискорювачах. Останні часи дуже гостро постала задача з створення компактного обладнання джерел монохроматичного рентгенівського випромінювання для наукових і практичних цілей, зокрема, не тільки для традиційної рентгенодіагностики атомної структури речовини, дефектоскопії, а й для ядерної медицини, криміналістики, збереження культурної спадщини. Звичайно, такі компактні машини не можуть конкурувати за властивостями випромінювання з крупними машинами, такими як синхротрони, лазери на вільних електронах. Проте їх компактність та ціна дозволяють їх використання в клініках, музеях та ін.. Тому, будь які нові знання з властивості рентгенівського випромінювання, яке виникає при взаємодії релятивістських заряджених частинок

із речовиною, є надзвичайно **актуальними**. Крім того, про актуальність досліджень, представлених у даній роботі свідчить те, що вони є складовою частиною ряду проєктів, які виконувались в Інституті теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

Дисертація складається з шести розділів. **Перший розділ** органічно поєднує ретельний огляд літератури за темою дисертації, загальні положення теорії та методи дослідження електромагнітного випромінювання зарядженої частинки в речовині, та низку нових результатів, здобутих автором, зокрема:

аналітичний опис просторової еволюції електромагнітного поля навколо високоенергетичного електрона після його вильоту з речовини до вакууму, узагальнення опису спектрально-кутового розподілу перехідного випромінювання релятивістського електрона при його похилому падінні на металеву пластинку на випадок низьких енергій частинки, побудова нового методу обчислення іонізаційних втрат частинок.

У **другому розділі** досліджено властивості когерентного рентгенівського випромінювання, що генерується в монокристалічних мішенях «напівголими» електронами, які опиняються в такому стані внаслідок проходження крізь товсту аморфну мішень. Знайдено спектрально-кутовий розподіл випромінювання. Показано, що такий розподіл відрізняється від розподілу, характерного для електрона з кулонівським полем, і значно змінюється зі збільшенням відстані між аморфною мішенню і кристалом у межах довжини формування. Знайдено вираз для інтегральної інтенсивності випромінювання як функції відстані між мішенями з урахуванням обмеженого поперечного розміру кристалічної мішені. Далі досліджено дифраговане перехідне випромінювання «напівголого» електрона у товстому кристалі. Вивчено еволюцію кутового розподілу та інтегральної інтенсивності випромінювання зі збільшенням відстані між мішенями для різних орієнтацій кристалічної мішені.

У **третьому розділі** досліджено ефекти довжини формування для перехідного і характеристичного випромінювання релятивістських електронів у багатошарових періодичних мішенях. Враховано довільний поперечний аксіально симетричний розподіл електронів у налітаючому пучку та довільний розмір активної області детектора випромінювання. Продемонстровано придатність знайдених виразів для спектрального розподілу випромінювання до опису відповідних експериментальних результатів. Знайдено умови, за яких відбувається різке посилення інтенсивності випромінювання для випадку малого розміру активної області детектора. Зазначено практичну цінність даного ефекту при використанні багатошарової мішені у якості джерела вузькоколімованого

пучка фотонів. Передбачено ефект посилення у декілька разів середньої величини перерізу іонізації К-оболонок при врахуванні ефекту густини, який дозволяє отримати значно більшу інтенсивність характеристичного випромінювання із багат шарової мішені порівняно з монолітною мішенню.

У **четвертому розділі** проведено дослідження інтерференційних ефектів в іонізаційних втратах енергії (ІВ) електрон-позитронної пари у тонкій мішені, що розташована у вакуумі на деякій відстані від іншої мішені, де пара народжується. Враховано непаралельність траєкторій електрона і позитрона. Продемонстровано значне збільшення відстані від точки народження пари, на якій інтерференційні ефекти проявляються в її ІВ у даному випадку, порівняно з ситуацією, коли такі ІВ розглядаються у тій самій мішені, де пара утворюється. Показана можливість існування «антиефекта Чудакова» для ІВ пари у тонкій мішені, який полягає в перевищенні величиною ІВ пари суми ІВ електрона і позитрона.

У **п'ятому розділі** побудовано класичну і квантову теорії ІВ ультрарелятивістських електронних банчів малого розміру з урахуванням впливу когерентних ефектів на такі ІВ. Знайдено вирази для втрат енергії таких банчів на іонізацію та збудження атомних оболонок речовини через їх форм-фактори. Показано, що когерентні ефекти можуть приводити до посилення іонізаційних втрат банчів в ультратонких твердотільних мішенях на декілька порядків величини при параметрах, що є досяжні на сучасних лазерах на вільних електронах, а також на ряді прискорювачів, які наразі готуються до введення в експлуатацію. Передбачено ефект резонансного посилення ІВ для пучка з періодичною модуляцією густини.

Шостий розділ присвячено дослідженню радіовипромінювання ультрарелятивістських позитронів, що прискорюються вздовж викривлених силових ліній магнітного поля поблизу поверхні пульсара. Показано, що таке випромінювання дає можливість пояснити загадку зміщеного інтерімпульсу пульсара у Крабоподібній туманності. Зазначено, що при цьому важливу роль відіграє інтерференція викривного та перехідного випромінювань, що виникає при падінні позитронів на поверхню зірки.

Результати, здобуті в дисертаційній роботі є **обґрунтованими і достовірними**. Це обумовлюється тим, що дані результати знайдено з застосуванням добре перевірених і апробованих методів теоретичної фізики та у граничних випадках порівнювалися автором із відповідними загальновідомими результатами.

Наукова і практична цінність здобутих результатів полягає в тому, що вони забезпечують теоретичний опис характеристик електродинамічних процесів, що розглядаються, за умов суттєвого впливу на ці характеристики з боку

інтерференційних ефектів, коли добре відомі формули не є придатними для такого опису. Також здобуті результати представляють практичний інтерес для проблем діагностики параметрів пучків на майбутніх лінійних колайдерах та для створення нових джерел рентгенівського випромінювання.

Таким чином, у дисертаційній роботі **здобуто низку нових науково вагомих результатів** фундаментального характеру, які, крім того, представляють інтерес з точки зору їх практичного застосування. Дисертація С.В. Трофименка **відповідає спеціальності 01.04.02 – «теоретична фізика»**. Автореферат повністю відображає зміст і основні положення дисертаційної роботи.

Результати роботи належним чином опубліковані в 20 статтях у фахових вітчизняних і міжнародних виданнях, переважна частина яких має квартилі Q1, Q2 та Q3, а також пройшли апробацію на більш ніж 20 міжнародних і вітчизняних конференціях. Особистий внесок дисертанта в роботу визначальний, про що свідчить, зокрема, значна кількість одноосібних публікацій.

Вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами даної дисертаційної роботи фахівців таких інститутів НАН України і університетів МОН України: Інститут прикладної фізики НАН України (м. Суми), Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна МОН України (м. Харків), Інститут монокристалів НАН України (м. Харків), Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України (м. Харків), Радіоастрономічний інститут НАН України (м. Харків), Київський національний університет ім. Т. Шевченка МОН України (м. Київ).

До змісту дисертації є такі **зауваження**:

1) Ключовим моментом в дисертації є ефект «напівголого» електрона, який є результатом деструктивної інтерференції кулонівського поля частинки і поля відгуку середовища на цю частинку в зоні формування випромінювання. Чи можливий ефект «напіводягненого» електрона внаслідок конструктивної інтерференції в розглянутій зоні? Це не погано б було відмітити та пояснити.

2) Розділ 4.3 вивчає вплив непаралельності траєкторій частинок на ІВ електрон-позитронної пари при народженні пари у товстій мішені. На мій погляд, додаткова зміна іонізаційних втрат пари також відбуватиметься завдяки таким ефектам::

- Баркас ефект, внаслідок якого позитрони швидше втрачають енергію при ІВ;
- розподіл енергії первинного фотона між електроном і позитроном може бути нерівним. Тому було б добре узагальнити даний розділ з урахування цих ефектів.

Дрібні зауваження:

3) Рівняння (1.1) – це рівняння для потенціалів електромагнітного поля. Непогано б вказати, що це в калібровці Лоренца.

- 4) В розділі 2 використовуються параметри $\mathcal{G}_\perp, \mathcal{G}_\parallel$. Вони задають напрям до детектора відносно кута Брега. Тому термін «чисто перпендикулярна поляризація ($\mathcal{G}_\parallel = 0$)» вважаю невдалим, оскільки поляризація випромінювання (лінійна, циркулярна ...) – це виключно його властивість у фіксованій точці простору.
- 5) Наприкінці розділу 3 проведено порівняння ХРВ і ПВ. Проте у висновках до розділу 3 ці результати відсутні. Вважаю, що вони важливі.
- 6) В розділі 6 не був би зайвим рисунок за формулою (6.1) про модель електричного поля.

Наведені зауваження мають виключно характер побажань і не знижують загальну високу оцінку роботи.

Дисертація С.В. Трофименка є завершеною науковою працею, в якій вирішено важливу задачу теоретичної фізики, а саме, побудовано теоретичний опис ряду електродинамічних процесів при взаємодії релятивістських частинок із речовиною за умов суттєвого прояву інтерференційних ефектів, що пов'язані з великими довжинами формування випромінювання та надмалими розмірами згустків заряджених частинок.

Вважаю, що за актуальністю обраної теми дослідження, науковою новизною та значимістю отриманих результатів, достовірністю і обґрунтованістю висновків, дисертація «Інтерференційні ефекти в іонізаційних втратах, перехідному та когерентному рентгенівському випромінюванні релятивістських частинок» повністю задовольняє вимогам, які висуваються МОН України 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,
старший науковий співробітник,
заступник директора з наукової роботи
Інституту прикладної фізики НАН України



Р.І. Холодов