

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

ТРОФИМЕНКО СЕРГІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 537.8, 539.1, 524.3

**ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНІ ЕФЕКТИ В ІОНІЗАЦІЙНИХ ВТРАТАХ,
ПЕРЕХІДНОМУ ТА КОГЕРЕНТНОМУ РЕНТГЕНІВСЬКОМУ
ВИПРОМІНЮВАННІ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЧАСТИНОК**

01.04.02 — теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків — 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера
ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор,
академік НАН України
Шульга Микола Федорович,
ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»
НАН України, Генеральний директор.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор,
Скалозуб Володимир Васильович,
Дніпровський національний університет
ім. Олеся Гончара МОН України, завідувач
кафедри теоретичної фізики;

доктор фізико-математичних наук, професор,
Яновський Володимир Володимирович,
Інститут монокристалів НАН України, завідувач
відділу теорії конденсованого стану речовини;

доктор фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник,
Холодов Роман Іванович,
Інститут прикладної фізики НАН України,
заступник директора з наукової роботи.

Захист відбудеться « 6 » квітня 2021 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 64.845.02 Національного наукового центру «Харківський
фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул.
Академічна, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного наукового
центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою:
61108, м. Харків, вул. Академічна, 1, та на офіційному сайті ННЦ ХФТІ.

Автореферат розісланий « 3 » березня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
канд. фіз.-мат. наук

А.І. Кірді́н

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електродинамічні процеси, що мають місце при проходженні високоенергетичних заряджених частинок крізь речовину та зовнішні поля, грають важливу роль для сучасних досліджень у галузі фізики високих енергій, ядерної фізики, хімії та біології, а також широко застосовуються в медичних цілях. Наприклад, процеси іонізаційних втрат енергії, черенковського та перехідного випромінювання покладені в основу роботи детекторів елементарних частинок. Перехідне випромінювання також дозволяє проводити вимірювання параметрів пучків заряджених частинок на прискорювачах з метою їх контролю. На явищі ондуляторного випромінювання базується робота лазерів на вільних електронах, створення яких дозволило зробити великий крок вперед у дослідженні мікроструктури речовини і швидких хімічних реакцій. Різні інші види випромінювання частинками в аморфних і кристалічних мішенях використовуються як джерела вузько спрямованих монохроматичних пучків фотонів для наукових і прикладних цілей. Крім того, шляхом ресстрації випромінювання, що генерується ультрарелятивістськими частинками в різноманітних космічних об'єктах, ми маємо змогу дізнатися про їх існування і отримати інформацію про їх фізичні властивості.

Електродинамічні процеси за участю високоенергетичних частинок можуть розвиватися в межах макроскопічно великих відстаней вздовж їх траєкторій, відомих як довжини формування. Ці відстані швидко зростають зі збільшенням енергії частинок та можуть перевищувати розміри вимірювальної апаратури або навіть усієї лабораторії. У межах довжини формування поле навколо частинки є суттєво модифікованим порівняно зі звичайним кулонівським полем, що помітно впливає на характер подальших взаємодій такої частинки з речовиною (наприклад, з елементами детектуючої апаратури), а також на властивості електродинамічних процесів, які при цьому відбуваються. Це можна розглядати як інтерференційний ефект, адже зазначена модифікація поля виникає внаслідок інтерференції кулонівського поля частинки з полями випромінювання, що породжуються при взаємодії частинки з речовиною або зовнішніми полями. Подібна інтерференція, що сильно змінює характер взаємодії частинок з речовиною, може виникати і між власними полями частинок у пучках достатньо великої густини.

Теоретичне дослідження зазначених ефектів було розпочато вже більш ніж півстоліття тому. В останні десятиліття, у зв'язку з розвитком прискорювальної техніки та детектуючої апаратури, інтерес до таких досліджень відновився, і в лабораторіях SLAC та CERN було проведено серію перших експериментів із вивчення таких ефектів. Втім, для ряду процесів, які представляють, зокрема, інтерес для задач діагностики параметрів пучків та створення компактних

джерел монохроматичного випромінювання, ці ефекти не вивчалися, і метою даної дисертаційної роботи є заповнення цієї прогалини.

Розвиток прискорювальних технологій призводить до можливості отримання пучків заряджених частинок все більш високої енергії та густини частинок. При параметрах пучків, що планується досягти на майбутніх лінійних колайдерах (як наприклад, ILC та CLIC), чи таких, що вже є досяжними на сучасних рентгенівських лазерах на вільних електронах (наприклад, European XFEL), роль вищезгаданих ефектів у взаємодії частинок з речовиною суттєво зростає порівняно з багатьма сучасними прискорювачами. Це зумовлює актуальність всебічного вивчення даних ефектів, яке є важливим, зокрема, для розвитку методів діагностики та контролю параметрів пучків на майбутніх колайдерах та сучасних рентгенівських лазерах. Такі дослідження цікаві і з фундаментальної точки зору, адже за умов прояву інтерференційних ефектів добре відомі формули неправильно описують характеристики відповідних електродинамічних процесів, і потрібен розвиток нових теорій, які враховують такі ефекти.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії ряду електродинамічних процесів при взаємодії частинок високих енергій із речовиною за умов суттєвого прояву інтерференційних ефектів, пов'язаних із великими довжинами формування випромінювання та ультратональними розмірами згустків заряджених частинок.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні завдання:

- розвинути теорію когерентного рентгенівського випромінювання «напівголого» електрона, що опиняється в такому стані в результаті вильоту з речовини до вакууму, в ультратонких та товстих кристалічних мішенях;
- побудувати теоретичний опис спектрально-кутових характеристик перехідного випромінювання міліметрового діапазону довжин хвиль у ближній зоні при їх вимірюванні з використанням параболічного фокусуєчого дзеркала, в залежності від його розміру та розташування;
- узагальнити теорію рентгенівського перехідного випромінювання електронів у багат шарових мішенях для довільного аксіально симетричного поперечного розподілу електронів у налітаючому пучку та обмеженого розміру детектора випромінювання;
- розвинути теорію іонізації К-оболонки атомів речовини та характеристичного рентгенівського випромінювання при проходженні електронів високих енергій крізь багат шарові періодичні мішені;
- побудувати аналітичний опис іонізаційних втрат електрон-позитронної пари у тонкому шарі речовини, що розташований на певній відстані від мішені, у якій пара народжується;

- розвинути класичну і квантову теорію інтерференційних ефектів у втратах енергії релятивістських електронних банчів ультрамалого розміру з високою густиною частинок на іонізацію та збудження атомних оболонок;

- дослідити можливість пояснення загадки зміщеного інтерімпульсу пульсара у Крабоподібній туманності на основі особливостей радіовипромінювання релятивістськими частинками у магнітосфері цього пульсара.

Об'єктом дослідження є процеси іонізаційних втрат, перехідного, характеристичного і когерентного рентгенівського випромінювання релятивістських частинок при їх взаємодії з речовиною.

Предметом дослідження є інтерференційні ефекти в електродинамічних процесах при взаємодії релятивістських частинок із речовиною.

Методи дослідження. Обчислення полів перехідного випромінювання, що виникають при проходженні заряджених частинок крізь різноманітні мішені, проводилося на основі розв'язку рівнянь Максвелла з граничними умовами на поверхнях мішеней, а також на основі методу зображень. Розрахунок полів когерентного рентгенівського випромінювання в ультратонких кристалах виконувався шляхом розв'язку рівнянь Максвелла на основі теорії збурень (кінематичний підхід). Розподіли дифрагованого перехідного випромінювання у товстих мішенях обчислювалися з використанням коефіцієнтів відбиття рентгенівських хвиль від поверхні кристалу. Іонізація атомних К-оболонок і характеристичне випромінювання розглядалися на основі методу еквівалентних фотонів. Середня величина іонізаційних втрат обчислювалася з використанням моделі речовини як набору гармонійних осциляторів та методів класичної електродинаміки і теорії збурень квантової механіки. Процеси радіовипромінювання частинок у магнітосфері пульсарів розглядалися на базі класичної теорії випромінювання.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі побудовано аналітичний опис характеристик ряду електродинамічних процесів при взаємодії частинок високих енергій із речовиною за умов суттєвого впливу на ці характеристики з боку інтерференційних ефектів, спричинених великими довжинами формування випромінювання та ультрамалими розмірами згустків заряджених частинок. Тут вперше здобуто наступні результати:

1. Отримано спрощені аналітичні вирази, що описують просторову еволюцію напруженості та спектральної густини енергії поля навколо електрона після його вильоту з речовини до вакууму у широкій області відстаней від речовини в межах довжини формування.

2. Узагальнено опис спектрально-кутового розподілу перехідного випромінювання «напівголого» релятивістського електрона при його похилому падінні на металеву мішень на випадок низьких енергій частинки.

3. Отримано вирази для спектрально-кутової густини та інтегральної інтенсивності когерентного рентгенівського випромінювання релятивістського «напівголого» електрона в ультратонкому кристалі.

4. Здобуто формули, що описують кутові розподіли та інтегральну інтенсивність дифрагованого перехідного випромінювання у геометрії Бреґга при падінні «напівголого» електрона на товсту кристалічну мішень.

5. Отримано точні та наближені вирази для спектрально-кутового розподілу перехідного випромінювання у ближній зоні при його реєстрації за допомогою параболічного фокусуючого дзеркала для довільного розміру і положення дзеркала.

6. Здобуто формули для спектрального розподілу рентгенівського перехідного випромінювання електронів у багат шарових періодичних мішенях для довільного аксіально симетричного поперечного розподілу частинок у пучку та обмеженого розміру активної області детектора випромінювання.

7. Отримано умови для суттєвого посилення інтенсивності рентгенівського перехідного випромінювання електронів у багат шарових періодичних мішенях при достатньо малому куті аксептансу детектора.

8. Передбачено ефект суттєвого збільшення перерізу іонізації атомних К-оболонки та інтенсивності характеристичного рентгенівського випромінювання високоенергетичними електронами при їх проходженні крізь багат шарові періодичні мішені.

9. Показано, що на іонізаційні втрати електрон-позитронної пари у тонкій мішені, яку вона перетинає після вильоту з іншої мішені, де вона народжується, інтерференційні ефекти впливають на значно більших відстанях від точки народження пари, ніж на іонізаційні втрати пари у тій самій мішені, де вона народжується.

10. Передбачено інтерференційний ефект в іонізаційних втратах електрон-позитронних пар у тонкій мішені, подібний до такого, що має місце при дифракції Фраунгофера в оптиці.

11. Для іонізаційних втрат пари у тонкій мішені виявлено ефект, що є зворотним до ефекту Чудакова і полягає в перевищенні величиною іонізаційних втрат пари суми незалежних втрат електрона і позитрона.

12. Отримано класичні та квантові вирази для втрат енергії релятивістського електронного банча ультрамалого розміру на іонізацію та збудження атомних оболонок речовини через його форм-фактори в умовах прояву когерентних ефектів у цих втратах.

13. Для електронних ансамблів із періодичною модуляцією густини виявлено можливість прояву резонансних ефектів у іонізаційних втратах.

14. Запропоновано новий механізм радіовипромінювання частинками у магнітосфері пульсара, який дає можливість пояснити загадку зміщеного інтерімпульсу для пульсара у Крабоподібній туманності та передбачено частоту, при якій зміщений інтерімпульс має зникати.

Практичне і наукове значення отриманих результатів полягає в тому, що вони надають теоретичний опис характеристик розглянутих електродинамічних процесів за умов прояву інтерференційних ефектів, коли добре відомі формули не можуть бути застосовані для такого опису. Результати досліджень можуть бути використані для розробки пропозицій відповідних експериментальних досліджень на прискорювачах частинок високих енергій. Результати щодо когерентного рентгенівського випромінювання в кристалах можуть бути використані при розробці нових технологій для діагностики параметрів пучків на майбутніх колайдерах. У свою чергу, результати, що стосуються інтерференційних ефектів у іонізаційних втратах електронних ансамблів, можуть бути корисні при розробці нових методів діагностики параметрів банчів малого розміру з високою густиною частинок, що використовуються на рентгенівських лазерах на вільних електронах. Результати щодо характеристичного випромінювання в багат шарових мішенях можуть бути використані для створення нового джерела монохроматичних рентгенівських фотонів на базі такого випромінювання, у той час як результати, що стосуються рентгенівського перехідного випромінювання у таких мішенях, – для оптимізації роботи вже існуючих джерел. Результати проведеного дослідження нового механізму радіовипромінювання пульсарів є важливими для поглиблення розуміння процесів, що відбуваються в магнітосфері цих зірок.

Особистий внесок здобувача. Результати дисертації опубліковані у статтях [1–20] і тезах доповідей наукових конференцій [21–41]. В усіх опублікованих роботах здобувач брав участь у постановці задач, формулюванні основних ідей і концепцій та обранні методів дослідження, написанні тексту робіт та особисто проводив усі розрахунки.

Статті [1,2,9,14] опубліковані здобувачем особисто. У статті [3] здобувачем було побудовано теорію дифрагованого перехідного випромінювання «напівголого» електрона в кристалі та отримано вирази для кутового розподілу та інтегральної інтенсивності такого випромінювання. У роботах [4,5] було побудовано аналітичний опис перехідного випромінювання «напівголого» електрона довільної енергії в міліметровому діапазоні довжин хвиль та розроблено пропозиції щодо відповідних експериментальних досліджень. У статтях [6,7] здобувачем було отримано вирази для спектрально-кутового розподілу перехідного випромінювання у ближній зоні при його реєстрації з

використанням параболічного дзеркала для довільного розміру та положення дзеркала. В роботі [8] було узагальнено теорію рентгенівського перехідного випромінювання електронів у багатошарових періодичних мішенях для довільного поперечного розподілу частинок у пучку і розміру активної області детектора випромінювання та отримано умови для значного посилення інтенсивності такого випромінювання при малому куті акцептансу детектора. У статтях [10–12] здобувачем було побудовано теорію іонізаційних втрат електрон-позитронної пари у тонкій мішені, крізь яку вона проходить після вильоту з іншої мішені, де пара народжується, досліджено вплив непаралельності траєкторій електрона і позитрона на іонізаційні втрати пари та передбачено інтерференційний ефект в іонізаційних втратах пари, подібний до такого, що має місце при дифракції Фраунгофера в оптиці. У роботі [13] була продемонстрована можливість існування ефекту, що є зворотним до ефекту Чудакова в іонізаційних втратах електрон-позитронних пар. У статті [15] здобувачем було побудовано класичну теорію інтерференційних ефектів у втратах енергії електронних банків на іонізацію та збудження атомних оболонок та показана можливість значного посилення цих втрат при параметрах, типових для рентгенівських лазерів на вільних електронах. У роботі [16] було побудовано квантову теорію іонізаційних втрат у зазначеному випадку і детально досліджено резонансний ефект в іонізаційних втратах електронних ансамблів із періодичною модуляцією густини. У статтях [17–19] здобувачем було виконано теоретичні розрахунки спектрально-кутової густини випромінювання позитронів у магнітосфері пульсара, що прискорюються в напрямку його поверхні, оцінено спектр цього випромінювання з урахуванням його когерентності та максимальне значення частоти, при якому даний механізм випромінювання може мати місце. У роботі [20] було продемонстровано значення інтерференційних ефектів для можливості пояснення на базі даного механізму випромінювання загадки зміщеного інтерімпульсу пульсара в Крабоподібній туманності.

Таким чином, особистий внесок здобувача у вирішенні задач, поставлених у дисертації, є визначальним.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на загальнофізичному семінарі фізико-технічного факультету Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, семінарі Лабораторії лінійного прискорювача (м. Орсе, Франція), семінарі Міжнародної науково-освітньої лабораторії радіаційної фізики Белгородського державного національного дослідницького університету (м. Белгород, Росія), лекціях в рамках Транс-європейської школи з фізики високих енергій (2016 р., м. Яремче; 2018 р., м. Полтава; 2019 р., оз. Світязь, Волинська обл.), а також на наступних міжнародних наукових конференціях та школах: International School of Subnuclear Physics (Erice, Italy, 24 June – 3 July,

2014), International Conference “Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena – Channeling 2014” (Capri, Italy, 5–10 October, 2014), Summer School on Diffractive and Electromagnetic Processes at High Energies (Bad Honnef, Germany, 17–21 August, 2015), French-Ukrainian workshop on the instrumentation developments for HEP (Orsay, France, 15–16 October, 2015), 16th IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Lviv, Ukraine, 5–7 July, 2016), International Conference “Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena – Channeling 2016” (Sirmione-Desenzano del Garda, Italy, 25–30 September, 2016), II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering YSF-2016 (Kharkiv, Ukraine, 10–14 October, 2016), XII International Symposium “Radiation from relativistic electrons in periodic structures” (RREPS-17) (Hamburg, Germany, 18–22 September, 2017), 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering YSF-2017 (Lviv, Ukraine, 17–20 October, 2017), French-Ukrainian workshop on the instrumentation developments for HEP (Orsay, France, 6–8 November, 2017), XLVIII Міжнародна Туліновська конференція з фізики взаємодії заряджених частинок із кристалами (Москва, Росія, 29–31 травня, 2018), 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Kyiv, Ukraine, 2–5 July, 2018), International Conference “Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena – Channeling 2018” (Ischia, Italy, 23–28 September, 2018), Міжнародна конференція молодих вчених та аспірантів – ІЕФ-2019 (Ужгород, Україна, 21–24 травня, 2019), XLIX Міжнародна Туліновська конференція з фізики взаємодії заряджених частинок із кристалами (Москва, Росія, 29–31 травня, 2019), XXXI International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions “ICPEAC 2019” (Deauville, France, 23–30 July, 2019), XIII International Symposium “Radiation from relativistic electrons in periodic structures” (RREPS-19) (Belgorod, Russia, 15–20 September, 2019), French-Ukrainian workshop on the instrumentation developments for HEP (Orsay, France, 2–4 October, 2019), щорічні конференції з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів (Харків, Україна, 2014–2018), щорічні конференції з фізики високих енергій та ядерної фізики (Харків, Україна, 2019–2020).

Зв’язок праці з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано в Інституті теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України. Вона є складовою частиною наступних програм і проєктів:

- базова програма «Відомче замовлення НАН України на проведення наукових досліджень з атомної науки і техніки Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» на 2011–2015 рр. по темі «Розвиток теорії електродинамічних процесів при взаємодії заряджених частинок високих та ультрависоких енергій з аморфною речовиною, кристалічними структурами та інтенсивними зовнішніми полями» (шифр теми ШІ-6-11 (ІТФ), номер держреєстрації 0111U009550, виконавець);

- базова програма «Відомче замовлення НАН України на проведення наукових досліджень з атомної науки і техніки Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» на 2016–2020 рр. по темі «Електромагнітні процеси в інтенсивних зовнішніх полях та при взаємодії заряджених частинок великої енергії з кристалічними та аморфними середовищами» (шифр теми П-6-16 (ІТФ), номер держреєстрації 0116U007070, виконавець);

- проєкт Державного фонду фундаментальних досліджень України за темою «Дослідження динаміки заряджених частинок великої енергії в прямих та зігнутих кристалах» (шифр теми Ф64/39, номери державної реєстрації 0115U005610, 0116U002983, термін виконання 2015–2016 рр., виконавець);

- науково-дослідна робота НАН України за темою «Розробка детекторних систем для експериментів на прискорювачах та технологій для фізики прискорювачів» (номери державної реєстрації 0115U005153, 0120U103567, терміни виконання 2015–2018 рр., 2020 р., виконавець);

- проєкт для молодих вчених НАН України за темою «Дослідження іонізаційних втрат енергії високоенергетичних електрон-позитронних пар, що мають нерівноважне електромагнітне поле» (шифр теми М63/56, номер державної реєстрації 0115U003806, термін виконання 2015–2016 рр., керівник);

- проєкт (спільний з ХНУ ім. В.Н. Каразіна) за темою «Електромагнітні процеси та процеси за участю короткоживучих частинок у кристалах при енергіях, досяжних у ЦЕРНі» (номер держреєстрації 0117U004866, термін виконання 2017–2019 рр., виконавець);

- проєкт для молодих вчених НАН України за темою «Когерентні ефекти в динаміці та втратах енергії високоенергетичних заряджених частинок у кристалічних і аморфних середовищах» (шифр теми Л10/56, номер державної реєстрації 0118U100199, термін виконання 2018–2019 рр., виконавець).

У 2019–2021 рр. робота над дисертацією проводилася в докторантурі Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут».

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 41 науковій праці: у 20 статтях у фахових вітчизняних і міжнародних виданнях та у 21 тезі доповідей на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 331 найменування на 33 сторінках та одного додатку. Робота містить 69 рисунків у тексті. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 348 сторінок, обсяг основної частини складає 287 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та важливість досліджень, представлених у дисертаційній роботі, сформульовано мету, основні завдання та методи досліджень, наведено основні результати роботи, зазначено їх новизну і науково-практичне значення. Представлено також відомості щодо апробації результатів дисертаційної роботи та особистого внеску здобувача.

У **першому розділі** наведено основні результати, що були отримані раніше іншими авторами при дослідженні електродинамічних процесів, яким присвячена дана дисертаційна робота, розглянуто методи, які використовуються для теоретичного опису цих процесів у наступних розділах, та виконано огляд літератури, що має безпосереднє відношення до тематики роботи. Зазначені процеси містять у своєму складі перехідне, характеристичне та когерентне рентгенівське випромінювання релятивістськими електронами в аморфних і кристалічних мішенях, іонізаційні втрати енергії заряджених частинок, а також процеси радіовипромінювання частинками високих енергій у магнітосфері пульсарів. Відзначено велике практичне значення цих процесів для розвитку нових методів досліджень у галузі фізики високих енергій, астрофізики, хімії та біології. Зауважено, що, незважаючи на численні дослідження вищезгаданих процесів, у їх вивченні залишилися прогалини, що стосуються, зокрема, впливу різноманітних інтерференційних ефектів на характеристики таких процесів. Цей вплив спричиняється великими розмірами просторових ділянок (довжин формування), що відповідають за розвиток зазначених процесів при високих енергіях частинок, та ультрамалими розмірами згустків заряджених частинок, що проходять крізь речовину.

Окрім суто оглядової частини, даний розділ містить також ряд оригінальних результатів, представлених у підрозділах 1.1, 1.2 та 1.4. Зокрема, у підрозділі 1.1 побудовано аналітичний опис еволюції електромагнітного поля навколо високоенергетичного електрона після проходження ним товстої аморфної мішені у вакуумі. При цьому на додачу до отриманих раніше асимптотичних виразів для компоненти Фур'є електричного поля частинки на малих та великих відстанях від мішені виведено аналітичний вираз для такої компоненти в широкій проміжній області відстаней. На основі розв'язку рівнянь Максвелла з граничними умовами на поверхні мішені показано, що одразу після проходження електроном мішені у полі, що його оточує, суттєво пригнічені компоненти Фур'є з частотами $\omega < \gamma\omega_p$ (де γ – Лоренц-фактор електрона, а ω_p – плазмова частота мішені) порівняно зі звичайним кулонівським полем релятивістської частинки у вакуумі. Такий стан частинки є подібним до того, що виникає після її розсіювання на великий кут (наприклад, у полі ядра або зовнішньому магнітному полі). При вивченні такого розсіювання в роботі [1*]

електрон із подібним пригніченим полем було названо «напівголим». У випадку проходження електроном крізь мішень пригнічення поля навколо нього можна розглядати як результат деструктивної інтерференції його власного кулонівського поля та поля перехідного випромінювання (ПВ), що виникає при вильоті електрона з мішені. Зі збільшенням відстані z від мішені відбувається поступова регенерація поля навколо електрона внаслідок формування ПВ у вигляді сферично розбіжних хвиль та їх відокремлення від кулонівського поля частинки. У цій області простору для спектральної густини енергії поля навколо електрона, на відстанях $\rho > 1/\omega_p$ від його траєкторії, отримано вираз

$$\frac{dW(\omega, z)}{d\omega} = \frac{2e^2}{\pi} \ln \frac{\omega_p^2 z}{\omega}. \quad (1)$$

Він свідчить про логарифмічне зростання потоку електромагнітної енергії зі збільшенням z , що відображає поступове відновлення власного поля частинки після проходження нею мішені. Вираз (1) є дійсним при $z \ll l_F$, де $l_F \sim \gamma^2 / \omega$ – довжина формування ПВ у напрямку руху частинки. При $z > l_F$ частинка повністю відновлює власне кулонівське поле, а ПВ відокремлюється від нього та набуває вигляду сферично розбіжних хвиль. При цьому інтерференція між цими видами полів зникає.

При достатньо високих енергіях частинок величина l_F може бути макроскопічно великою та навіть перевищувати розміри експериментального обладнання або всієї лабораторії. Наприклад, при енергії електрона $\varepsilon = 100 \text{ MeV}$ у міліметровому діапазоні довжин хвиль l_F досягає кількох десятків метрів. При параметрах, типових для майбутніх лінійних колайдерів, ця довжина може становити кілька сотень метрів навіть у рентгенівському діапазоні частот. При цьому частинки можуть зазнавати нових взаємодій із речовиною або зовнішніми полями в межах цієї відстані. Характеристики електродинамічних процесів, що матимуть місце при таких взаємодіях, будуть суттєво відрізнятися від подібних характеристик у випадку, коли налітаюча частинка має кулонівське поле. Подібну модифікацію характеристик процесів можна розглядати як інтерференційний ефект, адже вона виникає внаслідок інтерференції власного поля частинки із полем випромінювання всередині довжини формування.

Розглянутий випадок проходження електрона крізь шар речовини є загальним прикладом подібних випадків, що часто мають місце за реальних експериментальних умов і можуть бути неминучими. Наприклад, електрони можуть проходити крізь вхідні вікна вакуумних камер, мішені телескопів, що вимірюють розбіжність пучка, сцинтилятори й інші мішені на попередніх стадіях діагностики пучка тощо. Через те, що при високих енергіях частинка

може зберігати «напівголий» стан, який утворюється внаслідок таких взаємодій, на макроскопічно великих відстанях від області взаємодії, задача про вивчення впливу такого стану частинки на різноманітні електродинамічні процеси, якій присвячена частина даної дисертаційної роботи, є актуальною і представляє практичний інтерес.

У підрозділі 1.2 на основі методу зображень досліджено ПВ «напівголого» електрона при його похилому падінні на металеву пластину. Вважається, що частинка опиняється в зазначеному стані внаслідок попереднього проходження крізь провідну мішень, що розташована на певній відстані від пластини. Отримано вираз для спектрально-кутового розподілу такого ПВ, який є справедливим не тільки при високих, але й при достатньо малих енергіях релятивістської частинки, коли розподіл випромінювання за кутом спостереження є істотно асиметричним.

У підрозділі 1.4 проведено кількісний аналіз нового методу обчислення іонізаційних втрат енергії (ІВ) частинок, який є зручним для дослідження впливу інтерференційних ефектів на ці втрати. У цьому методі величина ІВ подається безпосередньо через електричне поле, що створюється частинками в речовині. Цей метод вперше було застосовано в одній із попередніх робіт за участю автора [2*] на базі якісних фізичних міркувань. Показано, що, незважаючи на те, що даний метод базується на розгляді речовини в рамках моделі гармонійних осциляторів (які представляють собою зв'язані електрони в атомах), поле, що його створюють частинки, в даному методі можна обчислювати на базі плазмової моделі речовини, вважаючи атомні електрони вільними. Крім того, при обчисленні цього поля також треба не брати до уваги полюси, пов'язані з нулями діелектричної проникності.

Другий розділ присвячено дослідженню особливостей когерентного рентгенівського випромінювання (КРВ) «напівголих» електронів у кристалічних мішенях. Розглянуто випадок, коли електрони опиняються в такому стані внаслідок проходження крізь товсту аморфну мішень, що розташовується на певній відстані l перед кристалом. Показано, що у випадку, коли кристал знаходиться на відстані від мішені, меншій за довжину формування, характеристики КРВ зазнають суттєвої модифікації порівняно зі звичними характеристиками такого випромінювання (див., наприклад, [3*,4*]), що генерується налітаючим електроном із кулонівським полем.

Під КРВ ми маємо на увазі випромінювання, що виникає внаслідок бреггівської дифракції поля частинки на періодично розташованих кристалічних площинах. При високих енергіях частинки його можна розглядати як таке, що складається з параметричного рентгенівського випромінювання (ПРВ) та дифрагованого перехідного випромінювання (ДПВ). ПРВ виникає внаслідок дифракції віртуальних фотонів власного поля частинки, в той час як

ДПВ – внаслідок дифракції реальних фотонів ПВ, що генерується при вльоті частинки до кристалу. У достатньо товстих кристалах ці два види монохроматичного випромінювання можна розглядати окремо один від одного через те, що вони майже не інтерферують, маючи трохи відмінні частоти та різні положення максимумів кутового розподілу.

У підрозділі 2.1 на основі кінематичного підходу розглянуто КРВ релятивістського електрона з кулонівським полем в ультратонкому кристалі. Показано, що в такому кристалі не можна відділити один від одного внески ПРВ та ДПВ через їх суттєву інтерференцію. Обчислено кутову ширину монохроматичного піку випромінювання в даному випадку.

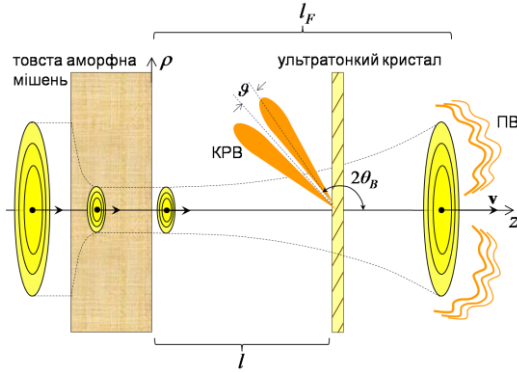


Рис 1: Проходження електронем системи з двох мішеней – товстої аморфної і тонкої кристалічної. Зображена схематична картина перебудови поля, що при цьому відбувається, та КРВ, що генерується в кристалі. θ_B – кут між напрямком швидкості v частинки та кристалічними площинами (кут Брега).

У підрозділі 2.2 побудовано кінематичну теорію КРВ «напівголого» електрона в ультратонкому кристалі (рис. 1). Сумарне поле навколо частинки, яке зазнає дифракції всередині кристала, обчислено на основі розв’язку рівнянь Максвелла з граничними умовами на поверхнях аморфної та кристалічної мішеней. Отримано наступний вираз для спектрально-кутової густини випромінювання:

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 \omega^2}{4\pi^2} |n_g|^2 |\mathbf{k} \times \boldsymbol{\kappa}_\perp|^2 \left\{ K_s^2 S_s^2 + S_f^2 \left| K_f - K'_f e^{-i l/l_F} \right|^2 + 2K_s S_s S_f \operatorname{Re} \left[e^{iL(q_f - q_s)/2} \left(K_f - K'_f e^{-i l/l_F} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

де \mathbf{k} – хвильовий вектор випромінювання, n_g – коефіцієнти розкладання діелектричної проникності кристала в ряд Фур’є за векторами оберненої ґратки \mathbf{g} , $\boldsymbol{\kappa} = (\kappa_\perp, \kappa_z) = \mathbf{k} - \mathbf{g}$, L – товщина кристала, $K_s = 1/(\kappa_\perp^2 + \omega_p^2 + \omega^2/\gamma^2)$, $K_f = 1/(\kappa_\perp^2 + \omega^2/\gamma^2) - K_s$, а K'_f відрізняється від K_f заміною $\omega_p \rightarrow \eta_p$, де ω_p та η_p – відповідно плазмові частоти кристалічної та аморфної мішеней.

Також тут $S_{s,f} = \sin(Lq_{s,f}/2)/(q_{s,f}/2)$, $q_s = \omega/v - \kappa_z$, $q_f = \sqrt{\omega^2 - \omega_p^2 - \kappa_\perp^2} - \kappa_z$, а $l_F = 2\omega^{-1}/(\gamma^{-2} + \kappa_\perp^2/\omega^2)$.

Вираз (2) свідчить про суттєву модифікацію кутового розподілу спектральної густини КРВ при $l < l_F$ порівняно з розподілами, типовими як для ПРВ, так і для ДПВ. У даному випадку максимум розподілу КРВ відповідає значенню $\mathcal{G} = \mathcal{G}_m$, що є проміжним між такими значеннями, характерними для ПРВ ($\mathcal{G}_m \approx \omega_p/\omega_B$, де ω_B – частота Бреґга) і ДПВ ($\mathcal{G}_m \approx 1/\gamma$), та змінюється зі збільшенням відстані між мішенями. При достатньо великих енергіях електрона в області $0 < l < l_F$ величина \mathcal{G}_m може зазнавати зміни на декілька порядків.

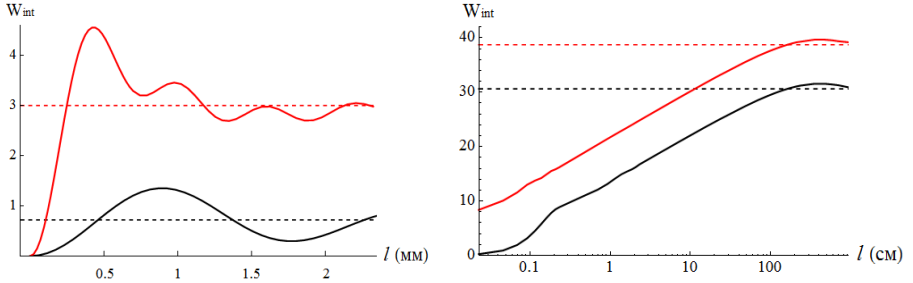


Рис 2: Залежність інтегральної інтенсивності КРВ від відстані між мішенями при $2\theta_B = \pi$. Зліва: $\varepsilon = 1\text{ГеВ}$, кут аксептансу дорівнює $2/\gamma$ (нижня суцільна крива) та $4/\gamma$ (верхня суцільна крива); справа: $\varepsilon = 100\text{ГеВ}$, кут аксептансу дорівнює $200/\gamma$ (нижня суцільна крива) та $600/\gamma$ (верхня суцільна крива). Штрихові лінії – відповідні асимптотичні значення при $l \gg l_F$.

Рис. 2 демонструє залежність інтенсивності КРВ (помноженої на коефіцієнт $4\pi^2 10^{-5}/e^2 \omega^2 |n_g|^2 L^2$), проінтегрованої за ω і \mathcal{G} , від відстані між мішенями. Під кутом аксептансу детектора тут мається на увазі подвоєне значення верхньої межі \mathcal{G}_0 інтегрування за \mathcal{G} . Графіки демонструють, що характер розглянутої залежності може бути достатньо різноманітним в залежності від енергії частинок та кута аксептансу. Зокрема, при великих ε та $\mathcal{G}_0 \gg 1/\gamma$ така залежність набуває вигляду монотонного логарифмічного зростання, але є значно більш складною при менших значеннях цих параметрів.

Також у даному підрозділі оцінено внесок від дифракції фотонів гальмівного випромінювання, що генерується електроном у товстій мішені, та показано, що за розглянутих умов ним можна знехтувати.

У підрозділі 2.3 розглянуто вплив обмеженого поперечного розміру кристалічної мішені на характеристики випромінювання. Отримано вираз для

спектрально-кутового розподілу КРВ у даному випадку. Показано, що зазначений вплив призводить до залежності інтенсивності випромінювання від відстані між мішенями у випадку, коли ця відстань значно перевищує довжину формування.

У підрозділі 2.4 вивчено вплив «напівголого» стану налітаючого електрона на характеристики ДПВ у товстому кристалі. Розглянуто випадок геометрії Брегга за умови паралельності кристалічних площин поверхні кристала. Спочатку вивчено випадок довільного кута θ_B між поверхнею кристала та швидкістю частинки (за умови $\theta_B \gg 1/\gamma$). На основі використання поняття про коефіцієнти відбиття рентгенівського випромінювання від поверхні кристала отримано наступний вираз для кутового розподілу числа фотонів ДПВ в залежності від відстані між аморфною та кристалічною мішенями:

$$\frac{dN}{do} = \frac{16\alpha |\chi_g| \left(\frac{\omega_B}{cg}\right)^2}{3\pi^2} (\mathcal{G}_\perp^2 + |\cos\phi| \mathcal{G}_\parallel^2) \left\{ G^2(\mathcal{G}, \omega_p) + G^2(\mathcal{G}, \eta_p) - 2G(\mathcal{G}, \omega_p)G(\mathcal{G}, \eta_p)\cos(l/l_F) \right\}, \quad (3)$$

де $G(\mathcal{G}, x) = (\mathcal{G}^2 + \gamma^{-2} + x^2/\omega_B^2)^{-1} - (\mathcal{G}^2 + \gamma^{-2})^{-1}$, $l_F = 2\omega_B^{-1}/(\gamma^{-2} + \mathcal{G}^2)$, l – відстань між мішенями, а ϕ – кут між напрямком спостереження та швидкістю частинки, що є близьким до $2\theta_B$. Також тут χ_g – коефіцієнти розкладання діелектричної сприйнятливості кристала в ряд Фур'є за векторами оберненої ґратки \mathbf{g} , а $\mathcal{G}_\parallel, \mathcal{G}_\perp \ll 1$ – компоненти кута \mathcal{G} (що відраховується від напрямку Брегга $\phi = 2\theta_B$), відповідно паралельна та перпендикулярна до площини векторів \mathbf{v} та \mathbf{g} . У широкій проміжній області відстаней між мішенями $\omega_B/\eta_p^2 \ll l \ll \gamma^2/\omega_B$ вираз (3) спрощується і набуває вигляду

$$\frac{dN}{do} = \frac{16\alpha |\chi_g| \left(\frac{\omega_B}{cg}\right)^2}{3\pi^2} \frac{4(\mathcal{G}_\perp^2 + |\cos\phi| \mathcal{G}_\parallel^2)}{\mathcal{G}^4} \sin^2\left(\frac{\omega_B l \mathcal{G}^2}{4c}\right). \quad (4)$$

На основі (4) можна отримати вираз для залежності положення максимуму кутового розподілу ДПВ від l (а саме, $\mathcal{G}_m(l) \approx \sqrt{4.66c/\omega_B l}$), а також спрощений вираз для повної кількості фотонів ДПВ ($\mathcal{G}_0 \gg 1/\gamma$):

$$N(l, \mathcal{G}_0) = \frac{32\alpha |\chi_g| \left(\frac{\omega_B}{cg}\right)^2}{3\pi} \left\{ \Gamma + \ln \frac{\omega_B l \mathcal{G}_0^2}{2c} \right\}, \quad (5)$$

де Γ – постійна Ейлера.

Рис. 3 демонструє кутові розподіли ДПВ при різних відстанях між мішенями. Звідси видно, що, подібно до розподілів КРВ в ультратонкому кристалі, при $l < l_F$ вони є значно ширшими за розподіл ДПВ, типовий для електрона з кулонівським полем. При збільшенні l у кутовому розподілі з'являються додаткові максимуми, та при $l \gg l_F$ він набуває характер швидких осциляцій. У цьому випадку має сенс розглядати розподіл, усереднений за такими осциляціями. Як видно з графіку, максимум такого розподілу має положення $\vartheta_m = 1/\gamma$, типове для ДПВ частинки з кулонівським полем, але відповідає більшій інтенсивності випромінювання. Це пов'язано з додатковим внеском від ПВ, що генерується при вильоті електрона з аморфної мішені та зазнає дифракції у кристалі.

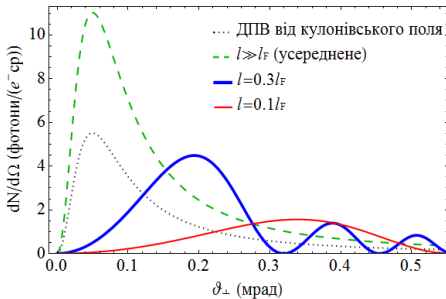


Рис 3: Кутовий розподіл кількості фотонів ДПВ для різних відстаней l між мішенями при $\vartheta_{\parallel} = 0$. Енергія електронів дорівнює 10 ГеВ.

Особливу увагу в даному підрозділі приділено випадку геометрії випромінювання назад ($2\theta_B \approx \pi$), коли ДПВ має проходити крізь аморфну мішень на шляху до детектора. Для обчислення характеристик випромінювання у цьому випадку треба також враховувати граничні умови на лівій поверхні аморфної мішені. Для даного випадку отримано аналоги виразів (4) і (5) та наведено умови для найбільш зручного експериментального спостереження розглянутих ефектів.

Третій розділ присвячено дослідженню ефектів, пов'язаних із довжиною формування, у ПВ ультрарелятивістських електронів, а також в іонізації атомних К-оболонки і характеристичному випромінюванні таких електронів у багат шарових періодичних мішенях. У підрозділі 3.1 досліджено проблему реєстрації ПВ міліметрового діапазону довжин хвиль у ближній зоні (на відстані $z < l_F$ від мішені) за допомогою параболічного фокусуєного дзеркала обмеженого розміру. Відомо, що у ближній зоні спектрально-кутові характеристики ПВ, що їх реєструє детектор достатньо малого розміру (точковий детектор), суттєво відрізняються від таких характеристик у хвильовій зоні та залежать від довжини хвилі випромінювання λ та відстані між детектором і мішенню. Як показано в [5*], такий ефект ближньої зони можна

усунути (що є зручним, наприклад, для діагностики пучків), якщо проводити вимірювання з використанням великого параболічного металевого дзеркала, що збирає ПВ у точці свого фокуса, де знаходиться детектор. Це має місце за умов, коли радіус дзеркала ρ_0 значно перевищує характерний лінійний розмір ділянки на поверхні мішені $l_T = \gamma\lambda / 2\pi$, що відповідає за формування ПВ. Однак при достатньо високих енергіях електронів відстань l_T (поперечна довжина формування) стає макроскопічно великою і може перевищити розміри фокусуєчого дзеркала. При цьому ефект ближньої зони зникає не повністю, і виникає необхідність коректно описувати результати вимірювань для довільного значення ρ_0 . У даному підрозділі запропоновано підхід, в рамках якого спектрально-кутовий розподіл ПВ, що реєструється точковим детектором у фокусі параболічного дзеркала, обчислюється як спектрально-кутовий розподіл ПВ, відбитого плоским дзеркалом такого самого радіусу і розташованим на такій самій відстані z_0 від мішені, у хвильовій зоні (на відстані від дзеркала, значно більшій за $l_F \sim \gamma^2\lambda$). З використанням цього підходу отримано наступний вираз для розподілу ПВ в залежності від ρ_0 та z_0 :

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 w^4}{\pi^2 c} \left| \int_0^{\rho_0} d\rho \rho J_1(w\rho) \int_0^\infty d\eta \frac{\eta^2 J_1(w\eta\rho)}{\eta^2 + \gamma^{-2}} e^{-i w z_0 \eta^2 / 2} \right|^2, \quad (6)$$

де $w = \omega / c = 2\pi / \lambda$. Для $z_0 \ll l_F$ отримано спрощені наближені форми виразу (6). Показано, що в загальному випадку розподіл, що визначається цим виразом, може суттєво відрізнятися від розподілів, що реєструються точковим детектором як у хвильовій, так і у ближній зоні.

У підрозділі 3.2 проведено узагальнення теорії рентгенівського перехідного випромінювання електронів у багат шарових періодичних мішенях на випадок, коли на мішень налітає не одна частинка, а пучок із довільним поперечним аксіально симетричним розподілом електронів, і активна область детектора випромінювання має обмежений розмір. Розглянуто випадки круглої та квадратної форми цієї області. Отримано вираз для спектральної густини випромінювання, що її реєструє детектор у такому випадку. Продемонстровано, що даний вираз добре описує відповідні експериментальні результати.

Виявлено ефект значного посилення інтенсивності випромінювання при певних параметрах мішені за умов достатньо вузької колімації пучка фотонів випромінювання. Зокрема, отримано вираз для оптимального періоду мішені, при якому залежність інтенсивності випромінювання від цього періоду має різкий максимум. Такий ефект виникає внаслідок конструктивної інтерференції внесків окремих фольг, із яких складається мішень. Даний результат може бути

важливим, із практичної точки зору, при використанні багат шарових мішеней у якості джерел вузькоколімованих пучків фотонів.

У підрозділі 3.3 побудовано теорію процесу іонізації внутрішніх атомних оболонок високоенергетичними електронами в багат шарових періодичних мішенях та характеристичного рентгенівського випромінювання (ХРВ), що виникає при рекомбінації цих оболонок. Для обчислення перерізу іонізації К-оболонок використано підхід [6*], що базується на методі еквівалентних фотонів. На основі розв'язку рівнянь Максвелла з граничними умовами на поверхнях тонких фольг, із яких складається мішень, отримано наступний вираз для середньої (щодо шляху частинки всередині мішені) спектральної густини числа фотонів у просторі навколо електрона в мішені:

$$\frac{d\bar{N}}{d\omega} = \frac{2\alpha}{\pi\omega} \left\{ \ln \frac{q_0}{\sqrt{\omega^2 / \gamma^2 + \omega_p^2}} - 1/2 + \frac{1 - e^{-\mu a}}{\mu a} \int_0^\infty dq q^3 (Q_s - Q_v)^2 G(q) \right. \\ \left. - \frac{4}{a} \int_0^\infty dq q^3 (Q_s - Q_v) Q_s \operatorname{Re} \left(\frac{1 - e^{-a[\mu + i\omega(\gamma^{-2} + (q^2 + \omega_p^2)/\omega^2)]/2}}{\mu + i\omega(\gamma^{-2} + (q^2 + \omega_p^2)/\omega^2)} S(q) \right) \right\}, \quad (7)$$

де $Q_s = 1/(q^2 + \omega_p^2 + \omega^2/\gamma^2)$, $Q_v = 1/(q^2 + \omega^2/\gamma^2)$, ω_p – плазмова частота фольг, товщина яких дорівнює a (проміжки між ними вважаються вакуумними), μ – коефіцієнт поглинання ПВ всередині фольг, q_0 – максимальний імпульс, що передається налітаючим електроном при зіткненні з атомом. Функції $G(q)$ та $S(q)$ представляють собою інтерференційні множники, які в загальному випадку мають достатньо складний вигляд. В області $q \gg \sqrt{2\omega/b}$, де b – відстань між фольгами, ці функції швидко осцилюють, і для них можна використовувати вирази, усереднені за цими осциляціями: $\langle S(q) \rangle = 1$ та

$$\langle G(q) \rangle = 1 + 2 \frac{\operatorname{sh}^2[\mu a / 4] + \sin^2[\phi_s / 2]}{\operatorname{sh}[\mu a / 2]} \left\{ 1 - \frac{e^{-\mu Na} - 1}{N(e^{-\mu a} - 1)} \right\}, \quad (8)$$

де $\phi_s = \omega a(\gamma^{-2} + q^2 / \omega^2 + \omega_p^2 / \omega^2) / 2$, а N – сумарна кількість фольг у мішені.

При $b > l_F$ наведені усереднені вирази дійсні на всьому проміжку інтегрування за q . Спектр (7) містить віртуальні фотони власного поля частинки та реальні фотони ПВ, а також враховує інтерференцію між цими видами полів та інтерференцію між полями ПВ з різних поверхонь.

На основі виразу (7) обчислено середнє значення перерізу іонізації К-оболонки всередині мішені $\bar{\sigma}_d$ за рахунок далеких зіткнень (відповідний внесок від близьких зіткнень є відносно малим і обчислюється окремо іншими методами). Показано, що при $b < l_F$, величина $\bar{\sigma}_d$ логарифмічно зростає зі збільшенням b . Завдяки цьому, відповідний вихід ХРВ не визначається однозначно матеріалом мішені та її сукупною товщиною $L = Na$, а залежить від кількості фольг, на які розділена мішень, та відстані між ними. Передбачено ефект збільшення $\bar{\sigma}_d$ у декілька разів порівняно зі звичайним перерізом іонізації К-оболонки без впливу ефекту густини при певних оптимальних параметрах мішені (рис. 4). Показано, що завдяки такому ефекту, а також меншому поглинанню випромінювання, у багат шаровій мішені інтенсивність ХРВ може значно перевищувати відповідну інтенсивність із однієї фольги тієї ж сукупної товщини, що й мішень. Цей результат дозволяє розглядати ХРВ частинок високої енергії в багат шарових мішенях як перспективне і зручне джерело рентгенівських фотонів.

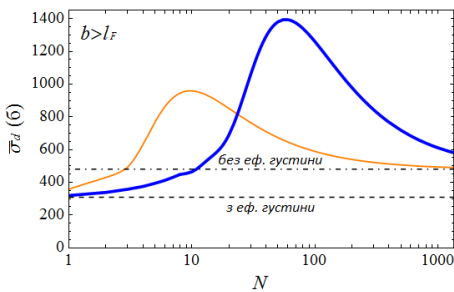


Рис 4: Залежність $\bar{\sigma}_d$ у багат шаровій мідній мішені з фіксованою сукупною товщиною фольг $L=141$ мкм (товста крива) та $L=20$ мкм (тонка крива) від кількості фольг у ній. Енергія налітаючого електрона становить 5 ГеВ. Штрихова лінія – переріз за умови повноцінного прояву ефекту густини; штрих-пунктирна лінія – переріз за відсутності ефекту густини.

Четвертий розділ присвячено дослідженню іонізаційних втрат енергії (ІВ) високоенергетичних електрон-позитронних пар у тонких мішенях. Розглянуто випадок, коли тонка мішень розташована у вакуумі на певній відстані вздовж напрямку руху пари від іншої мішені, у якій пара народжується. Досліджено вплив непаралельності траєкторій електрона і позитрона на ІВ пари та передбачено ряд нових ефектів для ІВ у даному випадку.

Високоенергетичні e^+e^- пари є найпростішими мікроскопічними системами, для яких суттєво проявляються інтерференційні ефекти в ІВ. Зокрема, це стосується ефекту Чудакова [7*], який полягає у пригніченні ІВ пари поблизу точки її народження порівняно з сумою незалежних ІВ електрона і позитрона, спричиненого деструктивною інтерференцією власних полів частинок. e^+e^- пари є зручними об'єктами для всебічного дослідження впливу подібних ефектів на ІВ ультрарелятивістських частинок. Поміж іншим, таке дослідження можна вважати необхідним попереднім кроком перед вивченням

значених ефектів у значно більш складних системах, як наприклад, банчі релятивістських електронів, які розглядаються у наступному розділі даної роботи.

У підрозділі 4.1 розгляд задачі про ІВ e^+e^- пари у тонкій мішені проведено в рамках наближення паралельних траєкторій електрона і позитрона, яке зазвичай використовується при обчисленні ІВ пари. Це пов'язано з дуже малим значенням кута її розльоту при високих енергіях. У цьому наближенні отримано вираз для ІВ пари у тонкій мішені. Показано, що в даному випадку інтерференційні ефекти впливають на ІВ пари, призводячи до їх пригнічення, в межах відстані від точки народження пари, яка складає $l_I \sim \gamma^2 / I$, де I – середній потенціал іонізації атомів тонкої мішені, а γ – типове значення Лоренц-фактору однієї з частинок пари. Ця відстань значно перевищує відповідну відстань $l_p \sim \gamma / \omega_p$ у випадку, коли ІВ пари розглядаються у тому самому середовищі, де вона народжується (саме такий випадок вивчався в усіх попередніх теоретичних роботах, присвячених даній проблемі).

У підрозділі 4.2 досліджено вплив непаралельності траєкторій електрона і позитрона на ІВ пари у тонкій мішені. Розглянуто випадок народження пари у достатньо тонкій мішені, коли можна знехтувати впливом ПВ, що генерується при вильоті пари з мішені, де вона народжується, на її ІВ. Показано, що в даному випадку непаралельність траєкторій частинок призводить до невеликого послаблення ефекту Чудакова, та ІВ пари виявляються дещо менш пригніченими порівняно з сумою незалежних ІВ електрона і позитрона.

У підрозділі 4.2 побудовано теорію ІВ високоенергетичних e^+e^- пар у тонких мішенях для випадку, коли пара народжується в іншій набагато товщій мішені. При цьому враховано вплив як непаралельності траєкторій частинок, так і ПВ, що генерується при вильоті пари з мішені, де вона народжується, на ІВ пари у тонкій мішені, яку вона згодом перетинає. Для величини ІВ пари у тонкій мішені отримано наступний вираз ($q_0 \gg \omega_p$):

$$\frac{d\varepsilon}{dz} = 2\eta_p^2 e^2 \left\{ \ln \frac{q_0 \gamma}{I} - \frac{1}{2} + \ln \frac{\omega_p \gamma}{I} - 1 + \varepsilon_{\text{int}}(l, \theta, \gamma) \right\}, \quad (9)$$

де θ – кут розльоту пари, l – відстань між мішенями, η_p та ω_p – відповідно плазмові частоти товстої і тонкої мішеней (Лоренц-фактори частинок тут вважаються такими, що дорівнюють один одному). Перші два доданки в дужках у (9) описують іонізацію, що здійснюється власними полями електрона і позитрона, яка, через малу товщину мішені, відбувається без впливу ефекту густини. Третій та четвертий доданки визначають внесок в іонізацію мішені з боку вільних електромагнітних полів ПВ, що генеруються електроном і

позитроном при вильоті з мішені, де пара народжується. Доданок, пов'язаний з ε_{int} , має достатньо громіздку структуру та описує вплив на ІВ з боку інтерференції між власними кулонівськими полями частинок, між власними полями частинок і полями ПВ, а також інтерференції полів ПВ, що генеруються обома частинками, між собою. Подібно до результату, отриманому в рамках наближення паралельних траєкторій частинок, вираз (9) свідчить про поступове зростання ІВ пари зі збільшенням l при $l < l_l$. Однак врахування непаралельності траєкторій частинок у даному випадку призводить до того, що асимптотичне значення ІВ пари при $l \gg l_l$ є відмінним від суми незалежних ІВ електрона і позитрона. Зокрема, при достатньо високих енергіях пари має місце асимптотичне пригнічення її ІВ (на величину Δ на рис. 5) порівняно з зазначеною сумою, а відносна абсолютна величина такого пригнічення зростає зі збільшенням енергії пари. Цей ефект зумовлений інтерференцією полів ПВ, що генеруються електроном і позитроном, між собою, яка не зникає зі збільшенням відстані від товстої мішені. Тут має місце аналогія з випадком дифракції Фраунгофера плоскої хвилі, що проходить крізь дві щілини у непрозорому екрані. А саме, в даному випадку інтерференційна картина розглядається на відстані від екрана, що вважається фізично нескінченно великою. Існування зазначеного ефекту асимптотичного пригнічення ІВ пари є принциповою відмінністю від випадку «класичного» ефекту Чудакова у квазі-безмежному середовищі, що вивчався в усіх попередніх роботах.

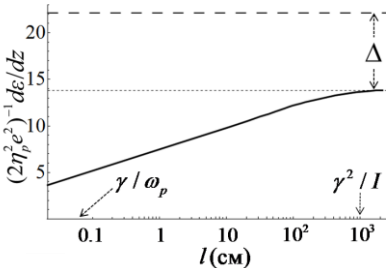


Рис 5: Залежність ІВ пари у тонкій мішені від відстані l між мішенями (суцільна крива) при енергії пари $\varepsilon = 100 \text{ GeV}$ і $\theta = 2/\gamma$. Верхня штрихова лінія – сума асимптотичних значень незалежних ІВ електрона і позитрона в даному процесі.

У підрозділі 4.4 передбачено ефект, що є зворотним до ефекту Чудакова і полягає в перевищенні величиною ІВ пари відповідної суми незалежних ІВ електрона і позитрона. Продемонстровано, що в тонкій мішені (яку пара перетинає після вильоту з товстої мішені, де вона народжується) величина такого «антиефекту» є значно більшою, ніж у випадку руху пари в тій самій речовині, де вона народжується (в останньому випадку ефект є дуже незначним). Досліджено залежність величини даного антиефекту від різноманітних параметрів, як-от енергія пари, кут її розльоту та координата точки її народження всередині мішені. Показано, що відносна величина такого антиефекту може досягати близько 10% при достатньо малих енергіях пари

(порядка 100 MeV) та кутах її розльоту θ , що перевищують найбільш імовірне значення цієї величини $2/\gamma$.

У **п'ятому розділі** побудовано класичну і квантову теорії втрат енергії релятивістських електронних ансамблів (банчів) ультрамалого розміру на збудження та іонізацію атомних оболонок речовини з урахуванням впливу інтерференційних (когерентних) ефектів на ці втрати. Раніше ефекти такого типу вивчалися для втрат енергії банчів на утворення колективних поляризаційних коливань речовини [8*]. Для енергетичних втрат внаслідок збудження та іонізації окремих атомів (тобто, власне, для ІВ) такі ефекти розглядалися лише для нерелятивістських електронних згустків [9*]. При цьому також не досліджувалося важливе питання про вплив розподілу частинок у згустку та його просторових розмірів на величину та можливість прояву таких ефектів. У даному розділі проведено розгляд ІВ банчів у загальному релятивістському випадку та отримано вирази для величини таких ІВ через макроскопічні характеристики банча (форм-фактори). Такий підхід дозволяє виявити ряд нових аспектів ІВ банчів, пов'язаних із проявом інтерференційних ефектів. Зокрема, це стосується можливості резонансного посилення ІВ для банчів із періодичною модуляцією густини, а також суттєвої модифікації умови прояву когерентних ефектів для ІВ банчів в ультратонких шарах речовини. Показано, що внаслідок прояву зазначених ефектів при параметрах банчів, що є досяжними на сучасних рентгенівських лазерах на вільних електронах (ЛБЕ; як наприклад, European XFEL [10*]), а також на ряді прискорювачів, що готуються до введення в експлуатацію (зокрема, SINBAD [11*]), їх ІВ можуть посилюватися на декілька порядків величини порівняно з сумою незалежних ІВ частинок, які утворюють банч.

У підрозділі 5.1 розгляд ІВ банча виконано в рамках класичної електродинаміки з використанням моделі речовини як набору класичних гармонійних осциляторів, власні частоти ω_0 , яких співпадають з ефективними потенціалами іонізації атомних оболонок [12*]. Показано, що в твердотільних мішенях найкращі умови для прояву когерентних ефектів реалізуються для ультрамалих товщин мішеней, у яких ефект густини в ІВ відсутній. Це пов'язано зі значним послабленням у таких мішенях обмеження на поперечний розмір банча, необхідний для прояву когерентних ефектів у його ІВ. Вивчено випадки, що відповідають різним видам просторового розподілу електронів у банчі. Зокрема, для ІВ високоенергетичного банча з гаусовим розподілом частинок в ультратонкому шарі речовини отримано наступний вираз:

$$\frac{d\varepsilon}{dz} = \frac{4\pi n N e^4}{m} \sum_i f_i \left\{ \ln \frac{q_0}{\Omega_i} - \frac{1}{2} - (N-1) e^{-\alpha_0^2 t^2} \times \right. \quad (10)$$

$$\times \left[e^{d^2 \Omega_i^2} (1 + d^2 \Omega_i^2) \text{Ei}[-d^2 \Omega_i^2] / 2 + 1/2 \right],$$

де $\Omega_i = \omega_{0i} / \gamma$, f_i – дипольні сили осциляторів, n – концентрація атомних електронів речовини, N – повна кількість частинок у банчі. Величини l та d характеризують відповідно поздовжній і поперечний розміри банча, а підсумовування виконується за всіма атомними оболонками. Перші два доданки (некогерентні) у фігурних дужках у (10) описують ІВ як суму незалежних внесків окремих частинок, що визначаються формулою Бете-Блоха, тоді як третій доданок (когерентний) визначає вплив інтерференції власних полів частинок на ІВ банча. Зазначимо, що він є додатним, адже вираз у другому рядку формули (10) від’ємний. Показано, що для параметрів банчів, що є досяжними на сучасних рентгенівських лазерах на вільних електронах, когерентний доданок у виразі (10) може на декілька порядків величини перевищувати некогерентні доданки. Отримано критерій, що визначає можливість прояву когерентних ефектів у ІВ банча в ультратонкому шарі речовини для фіксованого значення n_0 густини частинок у центрі банча.

У підрозділі 5.2 на основі теорії збурень квантової механіки розвинено більш точний підхід до розгляду когерентних ефектів у ІВ макроскопічних релятивістських електронних ансамблів. На відміну від класичного розгляду, який достатньо добре підходить для наближених оцінок, такий підхід дозволяє більш точно врахувати електронну структуру атомів, збуджених або іонізованих налітаючим ансамблем. Це є важливим кроком вперед, адже величина інтерференційних ефектів у ІВ макроскопічних ансамблів частинок є досить чутливою до деталей цієї структури і, зокрема, до значень ефективних потенціалів іонізації атомних оболонок. Даний підхід дозволяє обчислити ці потенціали, які наразі виявляються такими, що залежать не тільки від структури атомних рівнів, а також і від форм-факторів ансамблю. Основну увагу приділено розгляду ІВ у газоподібних середовищах та наведено результати чисельних розрахунків для найпростішого подібного випадку, який відповідає атомарному водню.

В рамках зазначеного підходу отримано наступний загальний вираз для ІВ банча:

$$\frac{d\varepsilon}{dz} = \frac{4\pi n_a Z e^4}{m} N \left\{ \ln \frac{q_0}{\Omega} - \frac{1}{2} + (N-1)G(\gamma, \omega_p) \right\}, \quad (11)$$

де

$$\ln \bar{\Omega} = 2m / (\hbar Z) \sum_k \omega_{k1} |x_{k1}|^2 \ln \sqrt{\omega_{k1}^2 / \gamma^2 + \omega_p^2}, \quad (12)$$

Z – атомний номер речовини, n_a – концентрація атомів речовини, ω_{k1} – частоти переходів атомних електронів з основного на k -й рівень дискретного або неперервного спектру, x_{k1} – відповідні матричні елементи,

$$G(\gamma, \omega_p) = \frac{2m}{Z\hbar} \sum_k \omega_{k1} |x_{k1}|^2 F_{\parallel}(\omega_{k1}) \int dq \frac{q^3 F_{\perp}(q)}{(q^2 + \omega_{k1}^2 / \gamma^2 + \omega_p^2)^2}, \quad (13)$$

а F_{\parallel} та F_{\perp} – поздовжній та поперечний форм-фактори банча, що визначаються розподілами частинок у відповідних напрямках. Отримано умови, що визначають область придатності виразу (11) до опису ІВ банчів.

Рис. 6 демонструє залежність ІВ банча з гаусовим розподілом частинок від його довжини в розрахунку на одну частинку для параметрів, що плануються досягти на прискорювачі SINBAD. Тут l_f та d_f представляють собою повні ширини розподілу частинок у поздовжньому та поперечному напрямках на половині його висоти, а $dE/dz = m/(4\pi n_a e^4) d\varepsilon/dz$. Із графіку видно, що в даному випадку при $l_f < 170$ нм когерентні ефекти впливають на ІВ банча. Зі зменшенням l_f вони стають значними і призводять до різкого зростання величини $d\varepsilon/dz$ на кілька порядків.

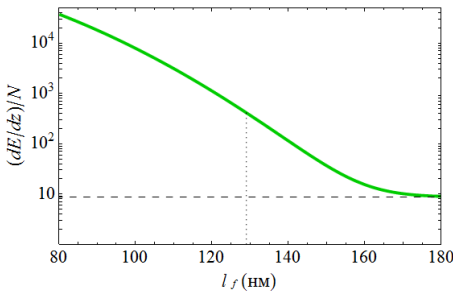


Рис 6: Залежність ІВ ансамблю від l_f у водні при $d_f = 0.75$ мкм, $n_0 = 6 \times 10^{19}$ см $^{-3}$ і гаусовому розподілу частинок. Штрихова лінія – жодних когерентних ефектів, пунктирна лінія позначає довжину банча $l_f \approx 130$ нм (0.43 фс), типову для прискорювача SINBAD.

Окремо розглянуто випадок електронних пучків із періодичною поздовжньою модуляцією густини, які є моделлю пучків, що зазнають мікробанчування в ондуляторній секції ЛВЕ. Для таких пучків передбачено ефект резонансного посилення іонізаційних втрат для дискретного набору періодів модуляції густини (мікробанчування) пучка l_k , які визначаються частотами збудження атомних оболонок мішені: $l_k = 2\pi / \omega_{k1}$. На рис. 7 наведено числові оцінки ІВ мікробанчованого ансамблю для параметрів, які досяжні на сучасних рентгенівських та ультрафіолетових ЛВЕ. З графіку видно, що в даному випадку при l , що відповідає найменшій частоті ω_{21} для водню, ІВ пучка можуть збільшуватися на два порядки. Для більш важких елементів

резонанси зміщуються в область менших l , що відповідають частотам ω_{k1} у рентгенівському діапазоні.

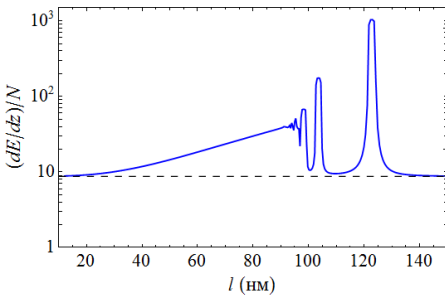


Рис 7: Залежність IV пучка електронів від періоду мікробанчування l у водні при $d_f = 40 \mu\text{м}$ та $\gamma \gg l/\omega_p$, де l – середній потенціал іонізації. Проведено усереднення за 2% варіації довжини пучка навколо значення $L \approx 25 \mu\text{м}$. Штрихова лінія – жодних когерентних ефектів.

Шостий розділ присвячено дослідженню проблеми зміщеного по фазі інтерімпульсу у радіовипромінюванні пульсара у Крабоподібній туманності. Запропоновано та досліджено новий механізм випромінювання частинками високих енергій у магнітосфері пульсара, який може бути застосований для пояснення природи цього інтерімпульсу. Продемонстровано роль інтерференційних ефектів для можливості застосування даного механізму з метою пояснення природи зміщеного інтерімпульсу. Оцінено інтенсивність та спектр випромінювання в рамках запропонованого механізму. Передбачено верхню частоту, при якій даний механізм перестає працювати, що відповідає зникненню зміщеного інтерімпульсу.

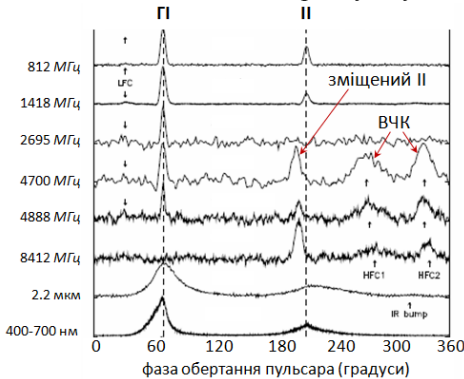


Рис 8: Середні залежності інтенсивності зареєстрованого випромінювання від фази обертання пульсара протягом одного періоду, отримані при багаточастотних спостереженнях пульсара у Крабі (фрагмент рисунку з роботи [13*] із додатковими позначками). Головний імпульс (ГІ) та інтерімпульс (ІІ) можуть походити від різних магнітних полюсів зірки. Позначено зміщений інтерімпульс та високочастотні компоненти (ВЧК, про можливу природу цих компонент див. [14*, 15*]). Із вдячністю авторам.

Згідно з сучасними уявленнями, пульсар представляє собою нейтронну зірку з надпотужним магнітним полем, яка швидко обертається навколо своєї осі. Взагалі кажучи, напрямки осі обертання і магнітної осі такої зірки не збігаються. Магнітні полюси пульсара є джерелами електромагнітного випромінювання, що може належати до дуже широкого діапазону частот – від радіохвиль до гамма-квантів. Діаграма спрямованості такого випромінювання є

досить вузькою. Тому якщо при обертанні зірки ця діаграма «зачіпає» Землю, телескопи фіксують періодичні імпульси випромінювання, тривалість яких є значно меншою за період обертання. В середині 1990-х років у роботі [13*] спостерігалася дивна поведінка інтерімпульсу (II) пульсара у Крабі зі зростанням частоти випромінювання (рис. 8). А саме, на частотах близько 3 ГГц II зникав і з'являвся знову на більш високих частотах, маючи фазовий зсув близько 7° . При набагато більш високих частотах було зафіксовано відсутність зміщеного II та відновлення II без фазового зсуву.

З часу виявлення цих незвичайних особливостей радіовипромінювання пульсара у Крабі не було запропоновано їх теоретичного пояснення. У даному розділі запропоновано новий механізм радіовипромінювання, який може бути відповідальним за зміщення II у даному пульсарі. В основі цього механізму лежить випромінювання позитронів, що прискорюються 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 пульсара та інтерферує з перехідним випромінюванням, що генерується при падінні позитронів на поверхню зірки. Для пояснення зміщення II висунуто припущення про існування невеликого нахилу магнітної осі зірки відносно нормалі до її поверхні. Показано, що даний механізм дає можливість пояснити появу зміщеного II при частоті ~ 5 ГГц. Зокрема, продемонстровано, що інтерференція випромінювання кривини позитронів із перехідним випромінюванням призводить до пригнічення випромінювання позитронів на низьких частотах, що відповідає даним спостережень про відсутність на низьких частотах зміщеного II.

У рамках запропонованої моделі отримано наступну оцінку для спектральної густини сумарного потоку когерентного випромінювання позитронів, що рухаються над полярною шапкою пульсара:

$$J(\omega) \sim \kappa^2 \lambda^{3-1/3} \gamma_{\max}^{9/2} \times 10^{-40} \text{ Вт/Гц}\cdot\text{м}^2, \quad (14)$$

де λ – довжина хвилі випромінювання, κ – деякий коефіцієнт, що визначає відмінність реальної густини частинок у зворотному потоці позитронів від густини Голдрайха-Джуліана $n_{GJ} \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$, а γ_{\max} представляє собою характерне значення Лоренц-фактора позитрона, при якому його випромінювання, відбите від поверхні зірки, перестає потрапляти в телескоп. При цілком природних значеннях цих параметрів ($\kappa \sim 0.1$, $\gamma_{\max} \sim 10^3$) отримане значення $J(\omega)$, а також характер його залежності від λ , досить добре узгоджуються з результатами спостережень. Для випадку коротших хвиль, коли $\lambda < L$ (де L – характерний просторовий розмір поздовжніх неоднорідностей у потоці позитронів), необхідно помножити вираз (14) на λ/L . Тоді спектр

випромінювання стає пропорційним до $\lambda^{4-1/3}$, що навіть краще відповідає результатам спостережень, ніж (14).

Показано, що в рамках розглянутої моделі передбачається зникнення зміщеного імпульсу на певній частоті ν_{\max} внаслідок зменшення області простору над полярною шапкою пульсара, де позитрони мають змогу випромінювати когерентно. Для цієї частоти отримано оцінку

$$\nu_{\max} \sim \frac{3cR_{PC}\gamma_{\max}^3}{8\pi R_*^2}, \quad (15)$$

де $R_* \sim 10^6$ см – радіус пульсара, а $R_{PC} \sim 10^4$ см – радіус його полярної шапки. Наприклад, при $\gamma_{\max} \sim 10^3$ отримуємо $\nu_{\max} \sim 40$ ГГц, що не суперечить даним, зображеним на рис. 8. Як видно з цього ж рисунку, наявних наразі даних ще недостатньо для точного визначення величини ν_{\max} , і для перевірки передбачення (15) потрібні подальші спостереження у відповідному діапазоні частот.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розвинуто теорію ряду електродинамічних процесів, що мають місце при взаємодії релятивістських частинок із речовиною, за умов суттєвого впливу на характеристики цих процесів з боку інтерференційних ефектів, пов'язаних із великими довжинами формування випромінювання та ультрамалими розмірами згустків заряджених частинок. Передбачено нові ефекти, спричинені таким впливом.

Основні результати, вперше отримані у даній дисертаційній роботі, полягають у наступному:

1. Розвинуто аналітичний опис просторової еволюції поля навколо електрона після його вильоту з речовини до вакууму для широкої області відстаней від речовини в межах довжини формування та узагальнено теорію перехідного випромінювання «напівголого» релятивістського електрона при його похилому падінні на металеву мішень на випадок низьких енергій частинки.

2. Побудовано кінематичну теорію когерентного рентгенівського випромінювання релятивістського «напівголого» електрона в ультратонкому кристалі. Досліджено модифікацію спектрально-кутового розподілу та інтегральної інтенсивності такого випромінювання внаслідок прояву зазначеного стану частинки.

3. Розвинуто аналітичний опис дифрагованого перехідного випромінювання у геометрії Бреґга при падінні «напівголого» електрона на

кристалічну мішень довільної товщини. Отримано вирази для кутового розподілу та інтегральної інтенсивності випромінювання в цьому випадку.

4. Теоретично досліджено проблему реєстрації перехідного випромінювання у ближній зоні за допомогою параболічного фокуруючого дзеркала довільного розміру. Отримано вирази для результатів вимірювання спектрально-кутового розподілу випромінювання в залежності від розміру та положення дзеркала.

5. Узагальнено теорію рентгенівського перехідного випромінювання електронів у багат шарових періодичних мішенях на випадок довільного аксіально симетричного поперечного розподілу частинок у пучку та обмеженого розміру активної області детектора випромінювання. Передбачено ефект значного посилення інтенсивності випромінювання для певних параметрів мішені при малому куті аксептансу детектора.

6. Розвинуто теорію процесу іонізації внутрішніх атомних оболонок високоенергетичними електронами в багат шарових періодичних мішенях. Передбачено ефект суттєвого збільшення перерізу іонізації та інтенсивності характеристичного рентгенівського випромінювання при певних оптимальних параметрах мішені.

7. Побудовано теорію іонізаційних втрат електрон-позитронної пари у тонкій мішені, яку вона перетинає після вильоту з іншої мішені, де вона народжується. Показано, що в даному випадку ефект пригнічення іонізаційних втрат пари має місце на значно більших відстанях від точки її народження, ніж у випадку іонізаційних втрат пари у тому самому середовищі, де вона народжується.

8. Передбачено інтерференційний ефект в іонізаційних втратах електрон-позитронної пари, подібний до такого, що має місце при дифракції Фраунгофера в оптиці, а також ефект, який є зворотним до ефекту Чудакова і полягає в перевищенні величиною іонізаційних втрат пари суми незалежних втрат електрона і позитрона.

9. Побудовано класичну і квантову теорії втрат енергії релятивістських електронних банчів на іонізацію та збудження атомних оболонок з урахуванням впливу інтерференційних ефектів на ці втрати. Показана можливість посилення цих втрат на декілька порядків величини внаслідок такого впливу при параметрах банчів, типових для рентгенівських лазерів на вільних електронах. Для пучків із періодичною модуляцією густини передбачено прояв резонансних ефектів у іонізаційних втратах.

10. Запропоновано та досліджено новий механізм радіовипромінювання частинками у магнітосфері пульсара, який може бути застосований для пояснення загадки зміщеного інтерімпульсу пульсара у Крабоподібній туманності. Передбачено частоту, при якій зміщений інтерімпульс зникає.

Продемонстровано роль інтерференційних ефектів для даного механізму випромінювання.

Таким чином, мету дисертаційної роботи досягнуто і усі поставлені завдання виконано.

Отримані результати дають змогу теоретично описувати характеристики розглянутих електродинамічних процесів за умов, коли на них суттєво впливають інтерференційні ефекти та добре відомі формули не можна застосовувати для такого опису. Ці результати можуть бути використані для розробки пропозицій відповідних експериментальних досліджень на прискорювачах частинок високих енергій. Результати щодо інтерференційних ефектів у іонізаційних втратах електронних ансамблів та у когерентному рентгенівському випромінюванні в кристалах можуть бути використані при розробці нових технологій для діагностики параметрів пучків на майбутніх колайдерах та на сучасних рентгенівських лазерах на вільних електронах. Результати, що стосуються характеристичного та перехідного рентгенівського випромінювання в багат шарових мішенях, можуть бути використані для створення нових джерел рентгенівських фотонів та для вдосконалення вже існуючих. Результати щодо розглянутого механізму випромінювання пульсарів є важливими для поглиблення розуміння процесів, що відбуваються в магнітосфері цих зірок, та фізики генерування ними радіоімпульсів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Trofymenko S. V. X-ray emission by a high-energy electron with a nonequilibrium field in an ultrathin crystal. *Phys. Rev. A*. 2018. Vol. 98. P. 023813.
2. Trofymenko S. V. Coherent X-ray radiation by an ultra-relativistic “half-bare” electron in thin crystal. 2018 IEEE Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. IEEE Xplore Digital Library, IEEE Conf. Publ., 2018. P. 314–317.
3. Trofymenko S. V., Shul’ga N. F., Shchagin A. V. Diffracted x-ray transition radiation by a “half-bare” electron. *Phys. Rev. Accel. Beams*. 2019. Vol. 22. P. 024501.
4. Shul’ga N. F., Trofymenko S. V., Barsuk S. Ya., Bezshyyko O. A. On transition radiation by a low-energy relativistic “half-bare” electron. *Eur. Phys. J. Plus*. 2019. Vol. 134. P. 343.
5. Trofymenko S. V., Shul’ga N. F., Delerue N. et al. Proposal to observe half-bare electrons on 45-MeV linac. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. Vol. 874. P. 012076.

6. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. Formation region effects in transition radiation, bremsstrahlung, and ionization loss of ultrarelativistic electrons. *Phys. Rev. Accel. Beams*. 2016. Vol. 19. P. 112801.
7. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. Effects of prewave zone and electron "half-bareness" in millimeter wavelength transition radiation. 2016 IEEE Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. IEEE Xplore Digital Library, IEEE Conf. Publ., 2016. P. 365–368.
8. Trofymenko S. V., Nazhmudinov R. M., Shchagin A. V. et al. Formation region effects in x-ray transition radiation from 1 to 6 GeV electrons in multilayer targets. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*. 2020. Vol. 476. P. 44–51.
9. Trofymenko S. V. K-shell ionization and characteristic x-ray radiation by high-energy electrons in multifoil targets. *Phys. Rev. A*. 2020. Vol. 102. P. 062804.
10. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. On ionization energy losses of high-energy electron-positron pair in thin targets. *Phys. Lett. A*. 2013. Vol. 377. P. 2265–2269.
11. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. The influence of non-parallelism of electron and positron velocities upon high-energy e^+e^- pair ionization loss in thin plate. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*. 2015. Vol. 355. P. 140–143.
12. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. Anomalous ionization loss of high-energy e^+e^- pairs in thin targets. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*. 2017. Vol. 402. P. 44–48.
13. Shul'ga N. F., Trofymenko S. V. Anti-Chudakov effect in high-energy electron-positron pair ionization loss in thin target. *Phys. Lett. A*. 2014. Vol. 378. P. 315–318.
14. Trofymenko S. V. On anti-Chudakov effect in ultrarelativistic electron-positron pair ionization loss in thin target. *Probl. At. Sci. Thech*. 2017. Vol. 109. P. 60–66.
15. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. Interference effect in the ionization loss of high-energy electron bunches. *Phys. Lett. A*. 2019. Vol. 383. P. 2561–2566.
16. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. Energy loss by relativistic electron ensembles due to coherent excitation and ionization of atoms. *Phys. Rev. Accel. Beams*. 2020. Vol. 23. P. 084501.
17. Kontorovich V. M., Trofymenko S. V. On the mystery of the interpulse shift in the Crab pulsar. *J. Phys. Sci. Appl*. 2017. Vol. 7, No. 4. P. 11–27.
18. Kontorovich V. M., Trofymenko S. V. Radiation reflection from star surface reveals the mystery of interpulse shift and appearance of high frequency components in the Crab pulsar. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. Vol. 932. P. 012020.

19. Kontorovich V. M., Trofymenko S. V. Reflection of positron radiation from star surface and shift of inter pulse position in Crab pulsar. *Adv. Astron. Space Phys.* 2017. Vol. 7. P. 30–35.
20. Trofymenko S. V., Kontorovich V. M. Half-bare positron in the inner gap of a pulsar. *Adv. Astron. Space Phys.* 2017. Vol. 7. P. 36–41.
21. Трофименко С. В., Шульга Н. Ф. Антиэффект Чудакова в ионизационных потерях высокоэнергетической электрон-позитронной пары в тонкой мишени. XII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: Книга тезисов (17–21 марта, 2014, Харьков, Украина). Харьков, 2014. С. 104.
22. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. Ionization effect from ultra relativistic electron-positron pair in thin plate. 6th International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena "Channeling-2014": Book of abstracts (October 5–10, 2014, Capri, Italy). Capri, 2014. P. 31.
23. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. The influence of transition radiation upon electron-positron pair ionization loss. 7th International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena "Channeling-2016": Book of abstracts (September 25–30, 2016, Sirmione-Desenzano del Garda, Italy). Sirmione, 2016. P. 133.
24. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. On the measurement of transition radiation characteristics in the prewave zone with the use of restricted parabolic mirror. 7th International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena "Channeling-2016": Book of abstracts (September 25–30, 2016, Sirmione-Desenzano del Garda, Italy). Sirmione, 2016. P. 34.
25. Трофименко С. В. Об особенностях ионизационных потерь электрон-позитронных пар в тонких слоях вещества. XV Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: Книга тезисов (21–24 марта, 2017, Харьков, Украина). Харьков, 2017. С. 110.
26. Kontorovich V. M., Trofymenko S. V. On the mystery of the interpulse shift in the Crab pulsar. International Conference "Physics of neutron stars 2017": Book of abstracts (July 10–14, 2017, Saint Petersburg, Russia). Saint Petersburg, 2017. P. 70.
27. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. Modification of Chudakov effect in e^+e^- pair ionization loss induced by transition radiation. XII International Symposium "Radiation from relativistic electrons in periodic structures" (RREPS-17): Book of abstracts (September 18–22, 2017, Hamburg, Germany). Hamburg, 2017. P. 71.
28. Kontorovich V. M., Trofymenko S. V. Energy spectrum and frequency range of coherent radiation by positrons forming shifted interpulse of Crab pulsar. IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering:

- Book of abstracts (October 17–20, 2017, Lviv, Ukraine). Lviv, 2017. P. 160–162.
29. Трофименко С. В., Шульга Н. Ф. Когерентное рентгеновское излучение электрона с неравновесным полем в ультратонком кристалле. XVI Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: Книга тезисов (20–23 марта, 2018, Харьков, Украина). Харьков, 2018. С. 105.
 30. Конторович В. М., Трофименко С. В. Излучение релятивистских позитронов как механизм формирования интеримпульса в пульсаре Краба. XVI Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: Книга тезисов (20–23 марта, 2018, Харьков, Украина). Харьков, 2018. С. 106–107.
 31. Трофименко С. В., Шульга Н. Ф. Интерференционные эффекты в параметрическом и дифрагированном переходном излучении электрона в ультратонком кристалле. XLVIII Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: Книга тезисов (29–31 мая, 2018, Москва, Россия). Москва, 2018. С. 75.
 32. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. X-ray emission by a high-energy “half-bare” electron in ultra-thin crystal. 8th International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena “Channeling-2018”: Book of abstracts (September 23–28, 2018, Ischia, Italy). Ischia, 2018. P. 21.
 33. Трофименко С. В., Шульга Н. Ф. О возможности когерентного усиления ионизационных потерь банча электронов высокой энергии. XVII Конференция по физике высоких энергий и ядерной физике: Книга тезисов (26–29 марта, 2019, Харьков, Украина). Харьков, 2019. С. 110.
 34. Нажмудинов Р. М., Трофименко С. В., Щагин А. В. и др. Эффекты длины формирования в рентгеновском переходном излучении электронов с энергией 1–6 ГэВ в многослойных мишенях различного периода. XVII Конференция по физике высоких энергий и ядерной физике: Книга тезисов (26–29 марта, 2019, Харьков, Украина). Харьков, 2019. С. 114.
 35. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. Coherent effect in the ionization energy loss of ultrarelativistic electron bunches. International Conference of Young Scientists and Post-graduates: Book of abstracts (May 21–24, Uzhgorod, Ukraine, 2019). Uzhgorod, 2019. P. 192–193.
 36. Трофименко С. В., Шульга Н. Ф. Когерентный эффект в ионизационных потерях банча электронов высокой энергии. XLIX Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: Книга тезисов (29–31 мая, 2019, Москва, Россия). Москва, 2019. С. 120.

37. Trofymenko S. V., Nazhmudinov R. M., Shchagin A. V. и др. Formation region effects in x-ray emission by 1-6 GeV electrons. XLIX Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: Книга тезисов (29–31 мая, 2019, Москва, Россия). Москва, 2019. С. 126.
38. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. Coherent effect in ionization loss of relativistic electron ensembles in ultrathin targets. XXXI International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions: Collection of abstracts (July 23–30, 2019, Deauville, France). J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1412. P. 202018.
39. Trofymenko S. V., Shul'ga N. F. Coherent effects in the ionization loss of high-energy electron bunches. XIII International Symposium “Radiation from relativistic electrons in periodic structures” (RREPS-19): Book of abstracts (September 16–20, 2019, Belgorod, Russia). Belgorod, 2019. P. 22.
40. Trofymenko S. V., Nazhmudinov R. M., Shchagin A. V. et al. Manifestation of the formation length effect for x-ray transition radiation by 1-6 GeV electrons in periodic multifoil radiators. XIII International Symposium “Radiation from relativistic electrons in periodic structures” (RREPS-19): Book of abstracts (September 16–20, 2019, Belgorod, Russia). Belgorod, 2019. P. 118.
41. Трофименко С. В. Квантовая теория ионизационных потерь электронных сгустков при наличии когерентных эффектов. XVIII Конференция по физике высоких энергий и ядерной физике: Книга тезисов (24–27 марта, 2020, Харьков, Украина). Харьков, 2020. С. 56–57.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1*. Feinberg E. L. High energy successive interactions. *Sov. Phys. JETP*. 1966. Vol. 23. P. 132–140.
- 2*. Shul'ga N. F., Trofymenko S. V. On ionization energy losses of ultra-relativistic half-bare electron. *Phys. Lett. A*. 2012. Vol. 376. P. 3572–3574.
- 3*. Baryshevsky V. G., Feranchuk I. D., Ulyanenkov A. P. Parametric x-ray radiation in crystals. Theory, experiments and applications. Berlin-Heidelberg: Springer, 2005. 172 p.
- 4*. Chaikovska I., Chehab R., Artru X., Shchagin A. V. Characteristic, parametric, and diffracted transition X-ray radiation for observation of accelerated particle beam profile. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*. 2017. Vol. 402. P. 75–78.
- 5*. Kalinin B. N., Naumenko G. A., Potylitsyn A. P. et al. Measurement of the angular characteristics of transition radiation in near and far zones. *JETP Lett*. 2006. Vol. 84. P. 110–114.

- 6*. Sørensen A. H. Atomic K-shell excitation at ultrarelativistic impact energies. *Phys. Rev. A*. 1987. Vol. 36. P. 3125–3137.
- 7*. Чудаков А. Е. Об одном ионизационном эффекте, связанном с наблюдением электронно-позитронных пар при очень большой энергии. *Изв. АН СССР. Сер. Физ.* 1955. Т. 19. С. 651–656.
- 8*. Ogata A., Kondoh T., Norizawa K. et al. Collective energy loss of attosecond electron bunches. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*. 2011. Vol. 637. P. S95–S98.
- 9*. Юдин Г. Л. Коллективный неупругий вынужденный тормозной эффект. *ЖТФ*. 1986. Т. 56, №2. С. 255–262.
- 10*. Schneidmiller E. A., Yurkov M. V. Baseline parameters of the European XFEL. Proc. FEL 2017 Conference. Santa Fe, NM, USA: JACoW Publishing, 2017. P. MOP033.
- 11*. Zhu J. Design study for generating sub-femtosecond to femtosecond electron bunches for advanced accelerator development at SINBAD: Ph. D. thesis / University of Hamburg. Hamburg, 2017. 171 p.
- 12*. Bak J. F., Burenkov A., Petersen J. B. B. et al. Large departures from Landau distributions for high-energy particles traversing thin Si and Ge targets. *Nucl. Phys. B*. 1987. Vol. 288. P. 681–716.
- 13*. Moffett D., Hankins T. Multifrequency radio observations of the Crab pulsar. *Astrophys. J*. 1996. Vol. 468. P. 779–783.
- 14*. Petrova S. A. Formation of the radio profile components of the Crab pulsar. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2009. Vol. 395. P. 1723–1732.
- 15*. Kontorovich V. M. Nonlinear reflection from the surface of neutron stars and features of radio emission from the pulsar in the Crab nebula. *Low Temperature Physics*. 2016. Vol. 42. P. 672–678.

АНОТАЦІЇ

Трофименко С. В. Інтерференційні ефекти в іонізаційних втратах, перехідному та когерентному рентгенівському випромінюванні релятивістських частинок. — На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 «Теоретична фізика» (104 – Фізика та астрономія). – Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків, 2021.

У дисертаційній роботі представлені результати досліджень інтерференційних ефектів у різноманітних видах електромагнітного випромінювання та іонізаційних втратах енергії релятивістських заряджених частинок в аморфних та кристалічних середовищах. Розглянуті ефекти

пов'язані з великими довжинами формування випромінювання та ультрамалими розмірами згустків заряджених частинок. Отримано спрощені аналітичні вирази, що описують просторову еволюцію електромагнітного поля навколо електрона після його вильоту з речовини до вакууму у широкій області відстаней від речовини в межах довжини формування. Узагальнено опис спектрально-кутового розподілу перехідного випромінювання «напівголого» релятивістського електрона при його похилому падінні на металеву мішень на випадок низьких енергій частинки. Отримано вирази для спектрально-кутових та кутових розподілів, а також інтегральної інтенсивності когерентного рентгенівського випромінювання «напівголого» електрона в ультратонкому та товстому кристалах. Отримано вирази для спектрально-кутового розподілу перехідного випромінювання у ближній зоні при його реєстрації за допомогою параболічного фокусуєчого дзеркала довільного розміру. Здобуто формули для спектрального розподілу рентгенівського перехідного випромінювання електронів у багат шарових періодичних мішенях для довільного аксіально симетричного поперечного розподілу частинок у пучку та обмеженого розміру активної області детектора випромінювання. Отримано умови для суттєвого посилення інтенсивності такого випромінювання при достатньо малому куті акцептансу детектора. Передбачено ефект суттєвого збільшення перерізу іонізації атомних К-оболонки та інтенсивності характеристичного рентгенівського випромінювання електронами при їх проходженні крізь багат шарові періодичні мішені. Показано, що на іонізаційні втрати електрон-позитронної пари у тонкій мішені, яку вона перетинає після вильоту з іншої мішені, де вона народжується, інтерференційні ефекти впливають на значно більших відстанях від точки народження пари, ніж на іонізаційні втрати пари у тій самій мішені, де вона народжується. Передбачено інтерференційний ефект в іонізаційних втратах електрон-позитронної пари, подібний до такого, що має місце у дифракції Фраунгофера в оптиці. Для іонізаційних втрат пари у тонкій мішені виявлено ефект, що є зворотним до ефекту Чудакова і полягає в перевищенні величиною іонізаційних втрат пари суми незалежних втрат електрона і позитрона. Отримано класичні та квантові вирази для втрат енергії релятивістського електронного банча ультрамалого розміру на іонізацію та збудження атомних оболонок речовини через його форм-фактори в умовах прояву когерентних ефектів у цих втратах. Для електронних ансамблів із періодичною модуляцією густини передбачено резонансний ефект в іонізаційних втратах. Запропоновано новий механізм радіовипромінювання частинок у магнітосфері пульсара, який дає можливість пояснити загадку зміщеного інтерімпульсу для пульсара у Крабоподібній туманності. Передбачено частоту, при якій зміщений інтерімпульс має зникати.

Ключові слова: релятивістський електрон, електрон-позитронна пара, перехідне випромінювання, параметричне рентгенівське випромінювання, дифраговане перехідне випромінювання, характеристичне випромінювання,

іонізаційні втрати енергії, ефект Чудакова, ефект густини, довжина формування, «напівголий» електрон, пульсар, інтерімпульс, рівняння Максвелла, теорія збурень.

Трофименко С. В. Интерференционные эффекты в ионизационных потерях, переходном и когерентном рентгеновском излучении релятивистских частиц. — На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 «Теоретическая физика» (104 – Физика и астрономия). — Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков, 2021.

В диссертационной работе представлены результаты исследований интерференционных эффектов в различных видах электромагнитного излучения и ионизационных потерях энергии релятивистских заряженных частиц в аморфных и кристаллических средах. Данные эффекты связаны с большими длинами формирования излучения и ультрамалыми размерами сгустков заряженных частиц. Получены упрощенные аналитические выражения, описывающие пространственную эволюцию электромагнитного поля вокруг электрона после его вылета из вещества в вакуум в широкой области расстояний от вещества в пределах длины формирования. Обобщено описание спектрально-углового распределения переходного излучения «полуголого» релятивистского электрона при его наклонном падении на металлическую мишень на случай низких энергий частицы. Получены выражения для спектрально-угловых и угловых распределений, а также интегральной интенсивности когерентного рентгеновского излучения «полуголого» электрона в ультратонком и толстом кристаллах. Получены выражения для спектрально-углового распределения переходного излучения в ближней зоне при его регистрации с помощью параболического фокусирующего зеркала произвольного размера. Получены формулы для спектрального распределения рентгеновского переходного излучения электронов в многослойных периодических мишенях для произвольного аксиально симметричного поперечного распределения частиц в пучке и ограниченного размера активной области детектора излучения. Получены условия для существенного усиления интенсивности такого излучения при достаточно малом угле акцептанса детектора. Предсказан эффект существенного увеличения сечения ионизации атомных К-оболочек и интенсивности характеристического рентгеновского излучения электронами при их прохождении через многослойные периодические мишени. Показано, что на ионизационные потери электрон-позитронной пары в тонкой мишени, которую она пересекает после вылета из другой мишени, где она рождается, интерференционные эффекты влияют на значительно больших расстояниях от точки рождения пары, чем на ионизационные потери пары в той же мишени,

где она рождается. Предсказан интерференционный эффект в ионизационных потерях электрон-позитронной пары, подобный эффекту, имеющему место при дифракции Фраунгофера в оптике. Для ионизационных потерь пары в тонкой мишени обнаружен эффект, который является обратным эффекту Чудакова и заключается в превышении величиной ионизационных потерь пары суммы независимых потерь электрона и позитрона. Получены классические и квантовые выражения для потерь энергии релятивистского электронного банча ультрамалого размера на ионизацию и возбуждение атомных оболочек вещества через его форм-факторы в условиях проявления когерентных эффектов в этих потерях. Для электронных ансамблей с периодической модуляцией плотности предсказан резонансный эффект в ионизационных потерях. Предложен новый механизм радиоизлучения частиц в магнитосфере пульсара, который дает возможность объяснить загадку смещенного интеримпульса для пульсара в Крабовидной туманности. Предсказано частоту, при которой смещенный интеримпульс должен исчезать.

Ключевые слова: релятивистский электрон, электрон-позитронная пара, переходное излучение, параметрическое рентгеновское излучение, дифрагированное переходное излучение, характеристическое излучение, ионизационные потери энергии, эффект Чудакова, эффект плотности, длина формирования, «полуголый» электрон, пульсар, интеримпульс, уравнения Максвелла, теория возмущений.

Trofymenko S. V. Interference effects in the ionization loss, transition and coherent x-ray radiation by relativistic particles. — Manuscript copyright.

Thesis for a Doctoral Degree in Physics and Mathematics: Specialty 01.04.02 “Theoretical physics” (104 – Physics and Astronomy). – National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology” NAS of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The Doctoral Thesis presents the results of studies of interference effects in various types of electromagnetic radiation and ionization energy loss of relativistic charged particles in amorphous and crystalline media. These effects are associated with large radiation formation lengths and ultrasmall size of charged particle bunches. Simplified analytical expressions describing the spatial evolution of electromagnetic field around the electron after its exit from matter into vacuum in a wide range of distances from the matter within the formation length are obtained. The description of spectral-angular distribution of the transition radiation by a “half-bare” relativistic electron at its oblique incidence on a metal target is generalized for the case of low particle energies. Expressions for the spectral-angular and angular distributions, as well as the integral intensity of coherent x-ray radiation by a “half-bare” electron in ultrathin and thick crystals are obtained. Expressions for the spectral-angular distribution of transition radiation in the near-field zone registered with the use of a parabolic focusing mirror of arbitrary size are derived. Formulas for the spectral distribution of x-ray transition radiation by electrons in multifoil periodic

targets for an arbitrary axially symmetric transversal particle distribution in the beam and a limited size of the radiation detector active region are obtained. The conditions for a significant increase in the intensity of such radiation for a sufficiently small detector acceptance angle are derived. The effect of significant increase in the atomic K-shell ionization cross section and intensity of characteristic x-ray radiation by electrons in multifoil periodic targets is predicted. It is shown that the ionization loss of an electron-positron pair in a thin target, which it crosses after escaping from another target, where it is created, is influenced by interference effects on much larger distances from the pair creation point than the pair ionization loss in the same target, where it is created. The interference effect in the ionization loss of an electron-positron pair, similar to the one which occurs in the Fraunhofer diffraction in optics, is predicted. For the pair ionization loss in a thin target, the effect, opposite to the Chudakov effect and being the exceeding by the pair ionization loss of the sum of independent electron and positron losses, is revealed. Classical and quantum expressions for the energy loss due to ionization and excitation of atomic shells of matter by an ultrasmall relativistic electron bunch via its form factors under conditions of manifestation of coherent effects in this loss are obtained. For electron ensembles with periodic density modulation, the resonance effect in the ionization loss is predicted. A new mechanism of radio emission by particles in a pulsar magnetosphere is proposed, which makes it possible to explain the mystery of shifted interpulse for the pulsar in the Crab Nebula. The frequency at which the shifted interpulse should disappear is predicted.

Key words: relativistic electron, electron-positron pair, transition radiation, parametric x-ray radiation, diffracted transition radiation, characteristic radiation, ionization energy loss, Chudakov effect, density effect, formation length, “half-bare” electron, pulsar, interpulse, Maxwell’s equations, perturbation theory.