

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису



СИЩЕНКО Владислав В'ячеславович

Когерентні ефекти при взаємодії частинок
високих енергій з речовиною

01.04.16 - фізика ядра і елементарних частинок

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико - математичних наук

АВ 32.945

Дисертація є рукопис.

Робота виконана в Харківському державному університеті.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук

Шульга Микола Федорович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук

Лазурик Валентин Тимофійович

(ХДУ, м. Харків)

доктор фізико-математичних наук

Сознік Олександр Петрович

(Харківське Вище Військове Училище

Національної Гвардії України, м. Харків)

Провідна установа: Інститут теоретичної фізики

ім. М.М. Боголюбова НАН України, м. Київ

Захист відбудеться "25" лютого 1995 року о 17.00

годині на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 02.02.12

при Харківському державному університеті

(310108, Харків - 108, пр. Курчатова, 31, ауд. 301).

З дисертацією можна ознайомитись у центральній науковій

бібліотеці університету (310077, Харків-77, м. Свободи, 4)

ДНБ ім. В. Стефаника
АН України

Автореферат розісланий "5" березня 1995 року.

Учений секретар спеціалізованої Вченої ради

доктор фізико-математичних наук

М.О. Азаренков

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00754974 (-)

Загальна характеристика роботи.

Актуальність проблеми. Протягом багатьох років дослідження електромагнітних явищ, які мають місце при взаємодії частинок високих енергій з кристалами, привертаять велику увагу теоретиків та експериментаторів у багатьох лабораторіях світу. Така увага до цієї галузі фізики обумовлена тим, що під час проходження частинок великих енергій крізь кристал можуть виявлятися різні когерентні та інтерференційні явища у взаємодії частинок з атомами решітки, завдяки яким ймовірності електромагнітних процесів у кристалах можуть значно перевершувати відповідні ймовірності в аморфному середовищі. На ці явища було звернено увагу в 50-тих роках в роботах Феретті, Тер-Мікаеляна та Юбералла при визченні випромінювання релятивістських електронів в орієнтованих кристалах у першому борнівському наближенні квантової електродинаміки.

В 70-тих роках було знайдено, що умови застосовності борнівського наближення швидко порушуються при зростанні енергії і зменшенні кутів падіння частинок на кристал відносно кристалографічних вісей та площин. Виконані згодом дослідження електромагнітних процесів в умовах інтенсивної взаємодії частинок з кристалом привели до передбачення низки ефектів, що вказують на нові можливості керування параметрами пучків частинок великих енергій та одержання інтенсивних, вузькоспрямованих, монохроматичних і поляризованих пучків γ -квантів, що потрібні в ряді галузей фізики. Разом з цим, аналіз процесів взаємодії частинок високих енергій з кристалами поза область застосовності борнівської теорії збурень показав, що і в межах борнівської теорії когерентного випро-

мінювання релятивістських частинок у кристалі далеко не всі питання були досліджені. Суттєвим при цьому виявилось те, що деякі закономірності, такі як наближення неперервних ланцюжків або площин, котрі використовують під час аналізу процесів в умовах інтенсивної взаємодії частинок з решіткою, природним чином виявляються при розгляданні аналогічних процесів у борнівських наближеннях. Це дозволяє виявити загальні закономірності при розгляді процесів взаємодії частинок з кристалом на основі борнівських наближень та поза межами застосовності борнівської теорії збурень. Цим проблемам присвячена дисертаційна робота.

Мета роботи. Метою цієї роботи є дослідження когерентних явищ при розсіянні та випромінюванні частинок високих енергій в кристалі з урахуванням вкладу другого борнівського наближення квантової теорії збурень і дослідження когерентних явищ в іонізаційних втратах енергії швидких кластерів у речовині.

В дисертації розв'язуються такі головні задачі.

1. Дослідження механізму когерентного випромінювання при ультрависоких енергіях електронів.
2. Розвиток методу обчислення внеску до перерізів процесів розсіяння та випромінювання релятивістських частинок у зовнішньому полі другого борнівського наближення та аналіз внеску цього наближення до процесів когерентного розсіяння та випромінювання частинок у кристалах.
3. Оцінка поляризації некогерентного випромінювання релятивістських частинок у кристалі.
4. Дослідження когерентних явищ у процесі іонізаційних втрат

енергії високоенергетичних кластерів, що складаються з двох частинок, які утворюються у речовині.

Теоретична та практична цінність і новизна роботи. В теорії когерентного випромінювання релятивістських електронів у кристалі розглядалися випадки, коли частинка рухається під малим кутом або до однієї з щільно упакованих атомами кристаліграфічних вісей, або до однієї з щільно заповнених атомами кристаліграфічних площин. При цьому когерентні ефекти мають місце при взаємодії електронів або з ланцюжками атомів кристала, що розташовані паралельно кристаліграфічній вісі, або з атомами, що утворюють паралельні одна від одної кристаліграфічні площини. Проте при ультрависоких енергіях частинок можуть бути виконані умови, коли одночасно з ефектами, що означені вище, значний вклад у випромінювання вносять кристаліграфічні площини більш високих порядків ("слабкі" площини). Дослідження механізмів когерентного випромінювання релятивістських електронів у кристалах в таких умовах проводиться вперше. Практична цінність даного дослідження обумовлена можливістю використання випромінювання частинок у кристалі для створення джерел гама-випромінювання високої монохроматичності, необхідних для проведення експериментів у фізиці елементарних частинок.

Вперше одержана у загальному вигляді поправка до перерізу пружного розсіяння і випромінювання релятивістських частинок у зовнішніх полях довільної конфігурації, що пов'язана з другим борнівським наближенням.

Іонізаційні втрати енергії високоенергетичних електронно-позитронних пар (ефект Чудакова) й швидких молекул у речови-

ні досліджено в багатьох роботах, проте загальні риси та відмітні особливості цих двох явищ розглянуто вперше. Показано можливість практичного застосування ефекту когерентного гальмовного випромінювання електронів ультрависоких енергій в кристалі для детального дослідження ефекту Чудакова на сучасних прискорювачах.

Апробація результатів роботи і публікації. Матеріали дисертації доповідались на Міжнародних нарадах з фізики взаємодії заряджених частинок з кристалами, Москва, 1992, 1993, 1994, 1995, міжнародній конференції 15th International Conference on Atomic Collisions in Solids, 1993, London, Ontario, Canada, на семінарах ННЦ ХФТІ, та опубліковано в 11 друкованих роботах.

Особистий внесок здобувача. Здобувачом виконана головна частина розрахунків диференціальних перерізів, зроблено числовий розрахунок спектрів когерентного випромінювання електронів у кристалах, виконано оцінки ступеня поляризації некогерентного випромінювання електронів у кристалі, проведено порівняльний аналіз ефекту Чудакова й процесу іонізаційних втрат енергії швидких молекул в речовині.

Основні положення, які винесено на захист.

1. Розроблена теорія пружного розсіяння електронів та позитронів високих енергій у зовнішньому полі на малі кути з урахуванням внеску другого борнівського наближення до перерізу розсіяння. Висновок про те, що наближення неперервних ланцюжків та площин є застосовним не тільки для опису проце-

са каналювання частинок у кристалі, але й для опису малокутового розсіювання на атомних ланцюжках і площинах в борнівських наближеннях.

2. Передбачення появи додаткового максимуму в спектрі когерентного випромінювання електронів ультрависоких енергій в кристалі з високою інтенсивністю, монохроматичністю та поляризацією.

3. Розроблена теорія гальмовного випромінювання електронів та позитронів у зовнішньому полі в борнівському наближенні з урахуванням внеску другої борнівської поправки та ефекту віддачі при випромінюванні до перерізу процесу.

4. Передбачення існування лінійної поляризації при некогерентному випромінюванні релятивістських електронів та позитронів у кристалі.

5. Результати дослідження загальних закономірностей і відмітних особливостей процесів іонізаційних втрат енергії високоенергетичних електронно-позитронних пар та швидких двоатомних молекул у речовині. Висновок про можливість експериментального дослідження ефекту Чудакова на сучасних прискорювачах.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох глав основного тексту, закінчення та списку літератури. Загальний обсяг дисертації (з рисунками та списком літератури) становить 128 сторінок машинописного тексту. Дисертація містить 9 рисунків та список літератури - 97 назв.

Зміст роботи.

У вступі обґрунтується актуальність дослідження, ставиться мета роботи, формулюються основні результати дисертації.

Перша глава присвячена дослідженню пружного розсіяння заряджених частинок високих енергій у речовині з урахуванням внеску до перерізу розсіяння другого борнівського наближення. Головну увагу при цьому звернено на випадок малокутового розсіяння частинок в полі сукупності атомів, що являє собою кристалічну решітку. Одержано загальний вираз для перерізу розсіяння на малі кути у довільному зовнішньому полі з урахуванням внеску, що обумовлений другим борнівським наближенням. Отримані результати використано для випадків малокутового розсіяння електронів та позитронів на періодичному ланцюжці атомів й атомній площині. Показано, що в цих випадках розсіяння визначається, головним чином, неперервними потенціалами ланцюжка й площини. Докладно розглянуто процес розсіяння релятивістських частинок на ланцюжці атомів кристалу при падінні пучка на ланцюжок під малим кутом ϕ до вісі Z ланцюжка. Показано, що переріз розсіяння в цьому випадку з урахуванням внеску другого борнівського наближення визначається формулою

$$d\sigma = N \frac{8\pi Z^2 e^4}{a\phi(g_y^2 + R^{-2})^2} \left[1 + \frac{e}{|e|} \frac{\phi_c^2}{\phi^2} \eta(Rg_y) \right], \quad (1)$$

де $\eta \sim 1$, R - радіус екранування потенціалу атома, a - відстань між атомами ланцюжка, вісь Y перпендикулярна площині (p, Z) . Формула (1) показує, що відносний внесок до перерізу другої борнівської поправки пропорційний квадрату відношення

критичного кута аксіального каналування до кута падіння частинки на ланцюжок. Цей внесок у переріз розсіяння швидко зростає при зменшенні ϕ й залежить від знака заряду частинки.

Розглянуто також розсіяння на неперервному потенціалі атомної площини.

Друга глава присвячена розгляду когерентних та інтерференційних ефектів у процесі гальмовного випромінювання релятивістських електронів й позитронів у кристалі. Надано класифікацію когерентних ефектів у випромінюванні частинок у кристалах.

В розділі 2.3 розглянуто процес когерентного випромінювання в кристалі електронів ультрависоких енергій (порядку 100 ГеВ) у випадку, коли частинка рухається в кристалі під малим кутом ϕ до одної з кристалографічних вісей (вісі Z) та, крім того, коли рух відбувається під малим кутом θ до щільно упакованої атомами кристалографічної площини. Показано, що головний максимум спектру когерентного випромінювання у цьому випадку розташований в області енергій γ -квантів, що близька до енергії самого електрона. Цей максимум обумовлений інтерференцією випромінювання електрона від атомів, що створюють щільно упаковані кристалографічні площини. Виявлено, що при деяких значеннях кутів α між такою щільно упакованою атомами площиною та проекцією імпульсу електрона на площину, перпендикулярну вісі Z, поряд з цим когерентним максимумом може з'являтися додатковий максимум у спектрі випромінювання в області менших частот. Показано, що величина інтенсивності випромінювання в цьому максимумі та поляризація випромінювання можуть бути однією величини з інтенсив-

ністю та поляризацією випромінювання в головному максимумі когерентного випромінювання.

Аналіз умов виникнення додаткового максимуму в спектрі когерентного випромінювання показав, що цей максимум може бути виявлений експериментально на пучках електронів з енергією порядку 100 ГеВ.

В розділі 2.4 одержано вираз для перерізу гальмовного випромінювання електронів і позитронів у зовнішньому полі з урахуванням внеску другого борнівського наближення. Показано, що для малих частот фотонів переріз випромінювання розбивається на добуток ймовірності випромінювання та перерізу пружного розсіяння:

$$d\sigma = d\omega(g_1) d\sigma_0(g_1), \quad (2)$$

де ймовірність випромінювання

$$d\omega(g_1) = \frac{2e^2}{3\pi} \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \frac{g_1^2}{m^2} \frac{d\omega}{\omega}, \quad (3)$$

g_1^2 - компонента імпульсу, переданого зовнішньому полю, яка перпендикулярна імпульсу початкової частинки, $d\sigma_0(g_1)$ - переріз пружного розсіяння у відповідному зовнішньому полі. У випадку довільних частот таке розбиття неможливе через наявність другої борнівської поправки, якщо ми цікавимося членами порядку ε^{-1} .

Отримані результати застосовані в розділі 2.5 до задач про випромінювання електронів та позитронів у неперервних потенціалах атомного ланцюжка та площини.

В третій главі розглянуто поляризацію некогерентного гальмовного випромінювання в кристалах. З'явлення некогерентної частини у випромінюванні заряджених частинок у кристалі обумовлене наявністю термодинамічних флуктуацій

відносно рівноважних положень атомів у кристаличній решітці. Показано, що врахування відхилення траекторії частинки в кристалі від прямолінійної приводить до появи відмінної від нульової лінійної поляризації некогерентної частини випромінювання. Для випадку падіння частинок на окрему атомну площину під малим кутом θ , який набагато перевищує критичний кут площинного каналювання, коли відхилення траекторії частинки від прямолінійної можна вважати малим, одержано оцінку поляризації

$$P \sim \frac{1}{30} \frac{\theta^2}{\theta_c^2}. \quad (4)$$

Крім того поляризація випромінювання залежить від знака заряду частинок, що падають: випромінювання позитронів поляризовано в площині, що містить атоми середовища, а випромінювання електронів - перпендикулярно до цієї площини.

В розділах 3.3, 3.4 досліджено ситуацію, коли відхилення траекторії частинки в кристалі від прямолінійної неможна вважати малим. Виявлено, що для каналюваних електронів некогерентне випромінювання на більшій частині інтервалу кутів падіння $0 < \theta < \theta_c$ поляризовано у площині, яка містить атоми середовища, причому ступінь поляризації може складати порядку 10%.

Четверта глава присвячена питанням, пов'язаним з іонізаційними втратами енергії кластерів заряджених частинок у речовині. Розглянуто загальні риси та відмітні особливості процесів іонізаційних втрат енергії високоенергетичної електронно-позитронної пари, що утворюється в речовині (ефект Чудакова), й швидкодіючої двоатомної молекули, що розпадається у речовині. Під час утворення в речовині високоенергетичної

електронно-позитронної пари обидві частинки протягом тривалого часу з моменту утворення пари знаходяться на близьких відстанях один від одного. При цьому сумарне електромагнітне поле на великих відстанях від кластера виявляється меншим, ніж поля окремих (ізольованих) частинок пари, в результаті чого відбувається зменшення іонізаційних втрат енергії кластера, утвореного електроном та позитроном порівняно з випадком, коли частинки пари рознесені далеко одна від одної. Аналогічний, але зворотній ефект має місце у випадку проходження крізь тонкий шар речовини швидкої молекули, що складається, наприклад, з двох протонів. В розділі 4.1 також показано, що використання розглянутого у другій главі ефекту когерентного випромінювання електронів ультрависоких енергій (~ 100 GeV) для утворення пучків фотонів високих енергій з високим ступенем монохроматичності дозволяє проводити дослідження ефекту Чудакова на сучасних прискорювачах.

В розділі 4.3 розглянуто іонізаційні втрати енергії "напівоголеного" (тобто позбавленого свого звичайного кулонівського поля) електрона поблизу точки його утворення. Показано, що іонізаційні втрати енергії частинки, що народжується в речовині, швидко досягають свого звичайного значення, незважаючи на можливість тривалого існування частинки в "напівоголеному" стані.

У закінченні стисло сформульовано основні результати, отримані в дисертаційній роботі.

Основні результати роботи.

1. Одержано формули для перерізу пружного розсіяння на

малі кути електронів та позитронів у зовнішньому полі, в полі атомного ланцюжка й атомної площини з урахуванням другого борнівського наближення. Доведено, що врахування другої борнівської поправки приводить до появи залежності перерізу розсіяння від знаку заряду частинок, які налітають. Виявлено, що під час руху частинок у кристалі поблизу кристалографічної осі (площини), щільно заповані атомами, внесок другого борнівського наближення в переріз розсіяння швидко зростає при зменшенні кута падіння на кристалографічну вісь (площину).

2. Виявлено, що в спектрі когерентного випромінювання електронів ультрависоких енергій в кристалі поруч з максимумами, обумовленими інтерференцією випромінювання при взаємодії з окремими атомами, окремими ланцюжками атомів й щільно запованими атомами кристалографічними площинами, можлива поява додаткових піків з високою інтенсивністю і поляризацією випромінювання в них. Поява цих піків обумовлена інтерференцією випромінювання, народженого під час взаємодії електронів з кристалографічними площинами більш високих порядків.

3. Отримано вирази для перерізу гальмовного випромінювання електронів та позитронів у довільному неоднорідному зовнішньому полі з урахуванням другого борнівського наближення. Одержані результати застосовано до розгляду процесів випромінювання частинок в полях, створених неперервними потенціалами атомного ланцюжка та атомної площини.

4. Одержано оцінки для поляризації некогерентної частини гальмовного випромінювання електронів та позитронів в кристалі під час руху під малим кутом до однієї з кристалогра-

фічних площин. Показано, що поява поляризації некогерентного випромінювання пов'язана з впливом на некогерентне випромінювання неперервного потенціалу площини.

5. Розглянуто загальні риси та особливості ефекту Чудакова і процесу іонізаційних втрат енергії швидких молекул у речовині. Показана можливість дослідження ефекту Чудакова на сучасних прискорювачах з використанням ефекта когерентного гальмовного випромінювання електронів у кристалах для створення пучків фотонів з енергією $\varepsilon \sim 100$ GeV.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Шульга Н.Ф., Сыщенко В.В. Поляризация некогерентного излучения релятивистских электронов и позитронов в кристалле // Письма в ЖЭТФ. - 1991. - т. 54, № 9. - с. 525-527.
2. Shul'ga N.F., Syshchenko V.V. Ionization losses of energy of fast clusters being produced during a Coulomb explosion of a molecule and electron-positron pair production in matter // Phys. Lett. - 1992. - V. 165A. - p. 175-178.
3. Сыщенко В.В., Шульга Н.Ф. Об ионизационных потерях энергии быстрых кластеров в веществе // Укр.фіз.журн. - 1993. - т. 38, № 3. - с. 349 - 354.
4. Shul'ga N.F., Syshchenko V.V., Truten' V.I. Ionization energy losses of clusters formed by Coulomb explosion of fast molecules and generation of high energy electron-positron pairs in matter // Nucl. Instr. and Meth. - 1994. - V. 90B. - p. 76 - 79.
5. Shul'ga N.F., Truten' V.I., Syshchenko V.V. Fine structure of the coherent radiation spectrum of ultrahigh energy electrons in a crystal // Phys. Lett. - 1994.

- V. 327B. - p. 306 - 308.

6. Сыщенко В.В., Шульга М.Ф. Пружне розсіяння заряджених часток високої енергії у зовнішньому полі у другому борнівському наближенні // Укр. фіз. журн. - 1995. - т. 40, № 1,2. - с. 15 - 21.
7. Сыщенко В.В., Шульга Н.Ф. О поляризации некогерентного излучения релятивистских электронов и позитронов в кристалле // Тезисы докл. XXII совещ. по физ. взаимодействия заряж. частиц с кристаллами. - М., МГУ. - 1992. - с. 58.
8. Сыщенко В.В., Шульга Н.Ф. Ионизационные потери энергии кластеров, образующихся при кулоновском взрыве быстрой молекулы и образовании в веществе высокоэнергетической электронно-позитронной пары // Там же. - с. 32.
9. Шульга Н.Ф., Трутень В.И., Сыщенко В.В. Когерентное излучение при ультравысоких энергиях // Тезисы докл. XXIII Межнац. совещ. по физ. взаимодействия заряж. частиц с кристаллами. - М., МГУ. - 1993. - с. 56.
10. Shul'ga N.F., Syshchenko V.V., Truten' V.I. Interference Phenomena in Ionization Energy Losses of Clusters Being Formed in the Process of Coulomb Explosion of Fast Molecules and of Production of a High Energy Electron - Positron Pairs in Matter // Abstracts of the 15-th Intern. Conf. on Atomic Collisions in Solids, London, Ontario, Canada. - 1993. - p. B 10.
11. Шульга Н.Ф., Трутень В.И., Сыщенко В.В. Тонкая структура спектра когерентного излучения электронов с энергией ~ 100 ГэВ в кристаллах // Тезисы докл. XXIV Межнац. совещ. по физ. взаимодействия заряж. частиц с кристаллами. - М., МГУ. - 1994. - с. 42.

Сыщенко В.В. Когерентные эффекты при взаимодействии частиц высоких энергий с веществом.

Диссертация (рукопись) на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук по специальности 01.04.16 - физика ядра и элементарных частиц, Харьковский государственный университет, Харьков, 1995.

Защищается 11 научных работ, содержащих теоретические исследования когерентных и интерференционных явлений, происходящих при прохождении частиц высоких энергий через вещество. Получены формулы для сечений рассеяния и излучения электронов и позитронов в кристаллах с учетом второго борновского приближения. Предсказана поляризация некогерентного излучения быстрых электронов в кристалле.

Syshchenko V.V. Coherent Effects During Interaction of High Energy Particles with Substance.

Competitor's dissertation (manuscript) scientific grade of candidate of physics and mathematics speciality 01.04.16 - physics of nucleus and elementary particles, Kharkov State University, Kharkov, 1995.

11 scientific papers containing theoretical researches of coherent and interference phenomena occurring in the process of passage of high energy particles through substance are presented. The formulas for cross sections of scattering and radiation of electrons and positrons in crystals taking into account the second Born approximation are obtained. The polarization of incoherent radiation of fast electrons in a crystal is predicted.

Ключові слова: пружне розсіяння, гальмівне випромінювання, кристал, іонізаційні втрати енергії.

ЛІБ ім. В. Стефаника
АН України

Підписано до друку 06.07.95. Формат 60x84/16. Офсетний друк.
Умовних друкованих аркушів 1,0. Тираж 100. Замовлення 104.

Харків-108, ротاپронт ННЦ ХФТІ

454511

AB 32.945

AB 32.945