

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертацію

ЛЕБЕДЯ Олександра Анатолійовича

Нелінійні ефекти в процесах квантової електродинаміки в сильному імпульсному полі лазера

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

Дослідження процесів, що описуються квантовою електродинамікою (КЕД) у різноманітних екстремальних зовнішніх умовах займає одне із центральних місць в сучасній фізиці високих енергій. Це стосується надпотужних магнітних полів у ранньому всесвіті, пульсарів, полів лазерного випромінювання, яке все більше входить у практичне використання в різних галузях науки і техніки. Історично першим досягненням було відкриття явища поляризації вакууму електромагнітним полем у працях Гейзенберга, Сйлера, Швінгера, які заклали методи таких досліджень і передбачили принципово нові прояви присутності полів. Зовсім недавно ці результати були підтверджені експериментально у магнітних полях пульсарів. В теперішній час плануються проведення перевірки КЕД у потужних лазерних пучках, зокрема, процесу Швінгера – народження електрон-позитронних пар у полі лазерів. При менших енергіях лазерних пучків, коли робота поля на довжині комптонівської хвилі недостатня для народження пари, значна увага приділяється впливу полів на різноманітні процеси, які відбуваються і самостійно, без присутності поля. Наприклад, розпад радіоактивних ядер, випромінювання у полях важких ядер і таке інше. Ці дослідження відповідають практично важливій області напруженості полів, коли можна не враховувати явища поляризації вакууму і обмежитися борнівським наближенням (скелетними діаграмами) при обчисленні процесів розсіювання у присутності поля. Останнє враховується точно через розв'язки рівнянь Дірака у заданому класичному полі. У такому наближенні виконана величезна кількість теоретичних досліджень.

Наприкінці минулого сторіччя методи КЕД були застосовані для моделювання лазерного випромінювання за допомогою монохроматичної плоскої хвилі. На сьогодні підвищення інтенсивності лазерного поля досягається за рахунок механізму підсилення «чірпованих» імпульсів, що передбачає генерацію випромінювання в імпульсному режимі. Тому виникла потреба в розвитку теорії процесів випромінювання та розсіювання частинок в лазерному полі в рамках моделі, що враховує імпульсний режим лазерного поля. Ці питання не були раніше доступні для експериментальної фізики. В інтенсивних полях проведені експерименти з релятивістською плазмою; продемонстрована можливість ініціювання ядерних реакцій; розробляються системи лазерного охолодження та лазерного прискорення пучків заряджених частинок та багато іншого. Отже, дослідження різних аспектів впливу електромагнітного поля на фізичні процеси є важливим питанням сучасної фізики. Слід також підкреслити, що експериментальна перевірка нелінійних

ефектів в процесах КЕД в лазерних полях увійшла в наукові програми ряду міжнародних проектів з фундаментальних досліджень.

Дисертаційна робота Лебеда О.А. присвячена вивченню нелінійних ефектів, що проявляються в процесах квантової електродинаміки в імпульсних лазерних полях за особливих кінематичних умов: за резонансних умов; при кореляції випромінювання та поглинання фотонів лазерного поля; при розсіюванні швидких частинок на малі кути; при поглинанні або випромінюванні енергії поля, що одного порядку за величиною з початковою кінетичною енергією. Робота виконана відповідно до плану наукових досліджень Інституту прикладної фізики НАН України у рамках низки фундаментальних науково-дослідних робіт. Таким чином, можна стверджувати, що дисертаційна робота Лебеда О.А. представляє науковий та практичний інтерес, а її тема актуальна.

Дисертація складається зі Вступу, п'яти розділів основного тексту, висновків, 4 додатків, списку використаної літератури із 314 джерела, 42 рисунків, таблиці, обсяг дисертації 302 сторінки.

У ВСТУПІ відображені актуальність, мета і задачі дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими програмами, структура та зміст дисертації, а також внесок здобувача в отриманні результати.

ПЕРШИЙ розділ має оглядовий характер. У ньому висвітлена проблематика та етапи розвитку досліджень зі споріднених до теми дисертації питань. Виділено низку відкритих питань. Таким чином фіксується коло завдань, які будуть розв'язуватися в дисертації та основні підходи до їх дослідження.

Представлено класичний потенціал, який приймається як модель імпульсного лазерного випромінювання і використовується в дисертації. Уведені параметри та характеристики хвилі.

У ДРУГОМУ розділі досліджується розсіювання електрона в полі ядра та імпульсного лазерного поля. У якості фонового поля вибрано поле імпульсного лазерного випромінювання, побудовані відповідні функції Волкова. Останнє є важливим результатом роботи.

У підрозділі 2.1 проведено дослідження процесу розсіювання на різні, зокрема малі, кути розсіювання, розроблено відповідну методику обчислень. У цілому це відповідає побудові повної теорії даного процесу і становить важливий результат роботи. Проведено порівняння з випадком відсутності поля лазерної хвилі.

У підрозділі 2.2 проведено дослідження процесу розсіювання електрона на ядрі в полі двох імпульсних хвиль, які поширюються в одному напрямку. Зовнішнє поле лазерної хвилі вибирається як суперпозиція немонахроматичних плоских хвиль помірної інтенсивності. Переріз розсіювання подано у вигляді суми за парціальними компонентами. Проаналізовано результати для різних умов поляризації хвиль для різних кінематичних областей. Проаналізовано вплив інтерференції та області Бункіна-Федорова.

ТРЕТІЙ та ЧЕТВЕРТИЙ розділи присвячено дослідженню процесу спонтанного гальмівного випромінювання (СГВ) електрона при розсіюванні на ядрі в полі двох імпульсних лазерних хвиль та фотонародження електрон-позитронних пар на ядрі в полі імпульсного лазера. Зовнішнє імпульсне поле задається як суперпозиція двох плоских монохроматичних хвиль, які поширюються вздовж одного напрямку в просторі. Методика обчислень, розроблена в попередньому розділі, була узагальнена на процеси другого порядку за сталою тонкої структури. Амплітуда та переріз розсіювання було представлено у вигляді суми за парціальними внесками.

Досліджено прояви параметричного інтерференційного ефекту для випадку двох імпульсних хвиль. Розглянуті процеси, як процеси другого порядку за постійною тонкої структури, можуть протікати резонансним чином. Це пов'язано з можливістю виходу частинок в проміжному стані на масову поверхню. В третьому розділі також запропоновано аналітичний підхід до розрахунку спектральної ширини рентгенівського випромінювання для джерел, що базуються на ефекті зворотного розсіювання Комптона.

Знайдені кінематичні області, які відповідають різним випадкам інтерференції, визначені енергетичні умови протікання процесів для нерелятивістських та релятивістських електронів, умови поглинання та випромінювання фотонів із різних хвиль. Вивчено кінематику в інтерференційній області.

У підрозділі 3.2 вивчається процес резонансного СГВ електрона при розсіюванні на ядрі в полі двох імпульсних хвиль. Показано, що в цьому випадку можна виділити резонансну кінематику, яка обумовлена виходом електрона в проміжному стані на масову поверхню. Знайдені відповідні кінематичні та енергетичні умови протікання даного процесу. Виявлено інтерференційні властивості спонтанного випромінювання фотонів у порівнянні з випадком окремих хвиль.

У випадку народження пари електрон-позитрон полем фотона на ядрі знайдено, зокрема, умови, коли пара поглинає з поля максимальну енергію. Показано, що в цьому випадку підсумований за парціальними процесами нерезонансний переріз вдвічі перевищує відповідний переріз за відсутності лазерного поля. Детально досліджено кінематику процесів, що розглядаються. Показано, що при певних умовах переріз в інтерференційній області може на два порядки перевищувати переріз в інших кінематичних умовах.

У П'ЯТОМУ РОЗДІЛІ досліджено процес резонансного розсіювання ультра релятивістського електрона на електроні в лазерному полі. Розглянуто випадок сильних полів, а кількісні розрахунки проведено для параметрів сучасних джерел лазерного випромінювання. Показано, що резонанс спостерігається, коли чотири-імпульс проміжного фотона знаходиться поблизу масової оболонки. Також показано, що величина резонансного перерізу залежить істотним чином від поляризації зовнішнього поля. Проведено порівняння резонансного та нерезонансного перерізів.

Значна частина роботи це дослідження процесів, що можуть протікати і коли зовнішнє поле відсутнє. Тому в роботі наводиться порівняльний аналіз перерізів за присутності та відсутності лазерного поля. Крім цього, майже всі

результати порівнюються для моделей монохроматичної та квазі-монохроматичної хвилі. За розглянутих в роботі кінематичних умов диференціальні перерізи процесів в імпульсному лазерному полі можуть суттєво зростати (до кількох порядків величини) у порівнянні з перерізами процесів за відсутності лазерного поля, що можна вважати основним науковим результатом роботи.

Такими є основні отримані в дисертації результати. Вони представляють собою істотний внесок у розвиток КЕД в полі імпульсних лазерних хвиль. Також вони стимулюють експериментальну перевірку та очікувано мають практичне використання.

З точки зору розвитку теорії, як на мій погляд, заслуговую уваги представлення у вигляді квазімонохроматичної хвилі та отримання рівняння Дірака у такому класичному зовнішньому полі. Такі розв'язки істотно відрізняються від представлень у вигляді монохроматичних плоских хвиль, які використовувалися при аналізі впливів лазерного випромінювання на різноманітні процеси. Другим важливим моментом є представлення амплітуд та перерізів у вигляді парціальних внесків окремих мод. Воно дозволяє подальші узагальнення та є зручним. У цілому, можна стверджувати, що розвинені процедури роблять аналітичні методи обчислень конкурентними і перспективними, порівняно з широко використовуваними чисельними обчисленнями різного характеру.

З точки зору можливих застосувань результатів, цікавою є перевірка результатів та проведення досліджень інших процесів у резонансних полях лазерів. Зокрема, виникає технічна можливість проведення розрахунків для процесів, обумовлених виключно лазерними пучками різної інтенсивності. Найбільш цікавим тут є врахування впливу вакууму, наприклад, за допомогою рівняння Швінгера-Дайсона. У такий спосіб можливо було б визначити ефективні маси електронів та фотонів у присутності поля потужного лазера. Взагалі, це відкриває перспективи для подальшої роботи.

Нажаль, робота не вільна від певних недоліків. Це відноситься як до самої дисертації, так і до автореферату.

Перш за все впадає в око велика кількість русизмів, які призводять до нерозуміння, якщо читати «виключно українською мовою». Типовим є «інтегрування по...» замість «інтегрування за ...», «кінцеві вирази», «слідuje (замість «випливає»)», «звернемося (замість «звернімося»)».

Також присутня невдала термінологія та вільне користування поняттями класичної і квантової фізики, фактично, жаргоном. Так постійно згадуються «фотони класичної хвилі». Але відомо, що існує співвідношення невизначеностей число частинок – фаза. Якщо є інтерференція, то фаза існує і число частинок не визначено зовсім. Це є класична хвиля, яка є розв'язком класичних рівнянь Максвелла. Якщо йде мова про фотони хвилі, то фаза є невизначеною, інтерференція відсутня. У квантовій теорії, звичайно, присутні і фотони, і поля, що випромінюються. Хотілося, щоб термінологія була більш точною, адекватною фізиці явищ, оскільки мова йде про докторську дисертацію.

До інших зауважень хочу віднести відсутність врахування (хоча б у загальному вигляді) вакуумних ефектів у присутності поля. Це може вплинути на числові результати у різних областях імпульсних полів. Справа в тому, що в роботі проводяться розрахунки за параметром тонкої структури, яка розглядається як задане число. Але добре відомо для радіаційних поправок в КЕД, що насправді у вищих порядках теорії збурень (Нарожний, Нікішов, Рітус) виникають ефективні параметри пропорційні добуткам напруженості поля на імпульс електрона в полі в різних степенях на параметр тонкої структури. Формально їх можна підставляють у остаточні отримані формули замість константи у вакуумі. Формально таке можливо робити, оскільки поле хвилі можна наблизити поперечними електричним магнітним полями однакової напруженості. Таке наближення достатньо часто використовується в літературі.

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

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

Доктор фіз.-мат. наук, професор

 В.В. Скалозуб

