

на дисертацію ХОЛОДОВА Романа Івановича

«Резонансні і поляризаційні ефекти в процесах
електродинаміки в сильному магнітному полі»

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

Квантова електродинаміка є найбільш розробленою частиною квантової теорії поля. Вона пояснює і з високою точністю описує такі фундаментальні явища, як випромінювання та поглинання фотонів атомами, гальмівне випромінювання, комптонівське розсіювання, народження електрон-позитронних пар та ін. Проте, залишається відкритим питання про експериментальну перевірку квантової електродинаміки в сильних електромагнітних полях, порівнянних з критичним швінгерівським значенням $\sim 10^{13}$ Гс. Зокрема, така перевірка запланована в проєкті FAIR у Німеччині. Саме тому теоретичне вивчення процесів квантової електродинаміки в магнітному полі величиною, близькою до наведеного значення, є актуальним.

Головною особливістю таких процесів є циклотронні резонанси. Для електронів і позитронів на низьких рівнях Ландау у магнітному полі, що складає частку швінгерівського, важливим є пошук резонансів, їх аналіз з врахуванням у ймовірностях процесів квадратичних за магнітним полем доданків. Подібні дослідження раніше не виконувались.

Також слід вказати, що у дисертаційній роботі Холодова Р.І. детально аналізуються передбачені в роботі спін-поляризаційні ефекти в таких елементарних процесах квантової електродинаміки з магнітним полем, як синхротронне випромінювання, однофотонне народження електрон-позитронної пари, розсіювання фотона на електроні, двофотонне синхротронне випромінювання, двофотонне народження електрон-позитронної пари, однофотонне народження електрон-позитронної пари з випромінюванням фотона, народження електрон-позитронної пари електроном, каскадне народження електрон-позитронної пари фотоном з подальшою анігіляцією в один фотон. Такі процеси безумовно відбуваються, наприклад, в магнітосфері нейтронних зірок, що відображається на властивостях рентгенівського випромінювання з цих зірок. Важливе значення також має розробка нових адекватних методів досліджень у магнітному полі з урахуванням поляризації частинок. Тема дисертації є безумовно актуальною, оскільки розкриває низку нових закономірностей та узагальнює відомі раніше результати.

Дисертаційна робота Холодова Р.І. присвячена теоретичному опису електромагнітних процесів, що відбуваються у сильних магнітних полях близьких до критичного. Характерною рисою роботи є трактування просторово-часових аспектів процесів, що розглядаються, з єдиної точки зору методами квантової електродинаміки в зовнішніх полях.

Дисертація складається зі Вступу, огляду літератури, восьми розділів основного тексту, висновків, додатку та списку літератури із 372 джерел, 65 рисунків, 1 таблиці, загальний обсяг становить 361 сторінку.

у ВСТУПІ відображені актуальність, мета і задачі дисертаційної роботи, а також внесок здобувача в отриманні результати. За своєї структури кожен розділ роботи починається зі Вступу, в якому визначаються задачі розділу та методи досліджень.

ПЕРШИЙ розділ має оглядовий характер. У ньому висвітлена проблематика та етапи розвитку досліджень з низки споріднених до теми дисертації питань. Фактично, у такий спосіб визначається коло завдань, які будуть розв'язуватися в дисертації. Відмічається актуальність обраної теми досліджень для міжнародного проекту FAIR, експериментів у SLAC. Цей розділ демонструє глибоку обізнаність автора у предметі досліджень.

ДРУГИЙ розділ присвячено розробці методики вивчення спінових та поляризаційних ефектів в процесах КЕД в сильному магнітному полі. У процесах випромінювання фотоном електроном і народження електрон-позитронної пари фотоном в сильному магнітному полі вперше досліджено спін-поляризаційні ефекти. Показано, що поляризація випромінювання збігається з поляризацією, яка спостерігається в класичній електродинаміці, якщо електрон не змінює напрямку спіну і знаходиться в основному або інверсному спіновому станах. Показано також, що ступінь поляризації синхротронного випромінювання в площині орбіти електронів у випадку, якщо енергії електронів $> 10\text{TeV}$ в магнітному полі 10^6Гс а) монотонно падає з ростом енергії електрона, якщо спочатку спіни електронів направлені проти поля, б) суттєво немонотонна і може буди рівною нулю, якщо спіни спрямовані за полем. Змінюючи лінійну поляризацію початкового фотона можна отримувати і позитрони, починаючи з неполяризованих до інверсно поляризованих станів.

у ТРЕТЬОМУ розділі вивчено спін-поляризаційні ефекти в процесі розсіювання фотона на електроні (РФЕ) в магнітному полі в резонансних умовах. Вивчено роль і вплив поляризації початкових фотонів на поляризацію

випромінювання. Аналіз процесів проведено в ультра квантовому наближенні. Показано, що поляризація фотона не впливає на умови виникнення резонансів. Результати з аналізу впливу спінових станів електрона на поляризацію кінцевих фотонів збігаються з аналогічними в процесі випромінювання фотона електроном. Запропоновано лабораторну схему для поляризатора електронного пучка на базі проведених розрахунків. Також досліджено процес випромінювання двох фотонів електроном. Умови резонансного перебігу процесу збігаються з резонансними умовами для процесу розсіювання фотона електроном. Досліджено спін-фліп процесів.

Отримані у розділі результати мають класичний характер, оскільки отримані вперше для досліджених умов процесів розсіювання.

у ЧЕТВЕРТОМУ розділі вивчено процес двофотонного народження електрон-позитронної пари з урахуванням спінів частинок і поляризації фотонів в області резонансу. Проведено порівняння процесів ОНП і ДНП в магнітному полі $H \sim 10^{12}$ Гс, що відповідає магнітосфері рентгенівських пульсарів. Побудована теорія резонансних процесів КЕД другого порядку з поляризованими частинками на низьких рівнях Ландау і поляризованими фотонами в сильному магнітному полі. Вона застосована для врахування поля циклотронних фотонів на процес формування електрон-позитронної плазми в магнітосфері рентгенівського пульсара, що показало домінуючу роль резонансів в магнітному полі 10^{12} Гс при характерній концентрації фотонів, що спростовує загальноприйняту точку зору про домінуючу роль процесу однофотонного народження пари у формуванні електрон-позитронної плазми. Також показано, що врахування спінової заселеності електронів і позитронів в процесі генерації електрон-позитронної плазми магнітосфери пульсара приводить до змінення спектру синхротронного випромінювання, збільшує низькочастотну частину спектру і зменшує високочастотну. Ці принципово нові результати важливі як з загально теоретичної, так і з практичної точки зору. Вони становлять одне з центральних місць дисертації.

у П'ЯТОМУ розділі вивчається процес народження електрон-позитронної пари з подальшим випромінюванням кінцевого фотона в сильному магнітному полі як єдиний процес другого порядку. Проведене вперше детальне обчислення всього комплексу відповідних характеристик та умов процесу з урахуванням спін-поляризаційних ефектів. Отримані результати мають велике значення для розуміння складного процесу. Вони роблять істотний внесок у теорію квантовоелектродинамічних процесів у критичних магнітних полях.

у ШОСТОМУ розділі вперше вивчається процес поширення фотона в сильному магнітному полі, що супроводжується каскадним народженням електрон-позитронної пари з подальшою анігіляцією пари. Обчислення виконані стандартними методами квантової теорії поля у зовнішніх умовах. Вивчається вплив поляризації початкового фотона на поляризацію кінцевого стану. Аналізується вакуумне подвійне променезаломлення у цих умовах. Отримані оцінки залежності характерних параметрів процесу від величини напруженості магнітного поля. Зокрема, показано, що ступінь поляризації фотона експоненціально залежить від напруженості. В резонансних умовах в полях порядку $H \sim 10^{13}$ Гс фотони повністю поляризуються після проходження відстані $L = 1$ мкм.

у СЬОМОМУ розділі досліджується процес народження електрон-позитронної пари поблизу порога в резонансних умовах. Проведено розрахунки ймовірності процесу в резонансному випадку та проаналізовано вплив орієнтації спіна початкового електрона на процес. Проведене, на базі розробленої теорії, розрахунки числа подій в експериментах SLAC. Отримано, що результати обчислень задовільно узгоджуються з експериментальними даними.

у ВОСЬМОМУ розділі вивчається рух важкої зарядженої частинки в електронному газі в сильному зовнішньому магнітному полі при наявності анізотропії температури. Задача має велике значення для електронного охолодження пучків важких заряджених частинок. Врахування анізотропії температури електронного газу здійснюється за допомогою анізотропізації розподілу електронного газу за швидкостями. Отримані аналітичні формули для діелектричної сприйнятливості електронного газу та для втрат енергії зарядженої частинки при низьких температурах в слабкому і сильному магнітному полі.

Зокрема, із розробленої в дисертації теорії руху зарядженої частинки випливає, що збільшення зовнішнього магнітного поля вище за величину $\sim 10^6$ Гс в електронному газі з параметрами, що є характерними для методу електронного охолодження, приводить до квантового ефекту: режиму повного пригнічення поперечного руху, коли протон, що рухається в електронному газі, не змінює поперечних полів квантових параметрів електронів газу. Проаналізовано вплив анізотропії температури на сили тертя при різних температурах. Останню має велике значення для електронного охолодження пучків.

У задачі розсіювання заряджених частинок на електроні в гранично сильному магнітному полі у рамках класичної теорії знайдено солітонний розв'язок. Наявність таких станів призводить до залежності переданої енергії від знаку заряду частинки.

Також, побудовано теорію руху заряджених частинок в електронному газі з урахуванням другого борнівського наближення. Із отриманих результатів, зокрема, впливає, що втрати енергії антипротона більші, ніж втрати протона. Знайдена залежність різниці втрат енергії від температури.

Такі основні результати дисертаційної роботи Холодова Р.І. У цілому, вони становлять істотний внесок у теорію електродинамічних процесів у сильних магнітних полях з урахуванням поляризаційних ефектів. Зокрема, розглянуто нові резонансні явища, парні резонанси.

Переходячи до оцінок зазначимо, що результати роботи ґрунтуються на фізично розумних та загальноприйнятих наближеннях, таких як врахування нижніх рівнів Ландау у спектрах електронів в сильних магнітних полях, використання стандартних методів квантової теорії поля у зовнішніх умовах, послідовне оцінювання та аналіз отриманих результатів, порівняння, де це можливо, зі здобутками інших авторів, порівняння з експериментом.

Таким чином, результати дисертації є достовірними, фізично обґрунтованими і мають вагоме теоретичне і практичне значення. Низка з них за своєю новизною заслуговує назви «піонерські».

Основні положення та висновки роботи

Дисертаційна робота Холодова Р.І. присвячена аналізу квантово-електродинамічних процесів з частинками на самих низьких рівнях Ландау, що доречно в сильних магнітних полях, близьких до швінгерівського значення. Проте в роботі використовується наближення, коли відстань між рівнями Ландау менша за енергію спокою, що дало змогу дисертанту знайти прості аналітичні вирази для ймовірностей процесів, що розглядаються.

В дисертаційній роботі в ймовірностях враховано поляризаційні характеристик всіх частинок: напрямки спінів електрона і позитрона та поляризації фотонів, як у початковому, так і у кінцевому станах і вперше проведено аналіз впливу початкових поляризаційних характеристик на кінцеві, а також вплив спін-фліп процесу на поляризацію випромінювання. Значну частину досліджень роботи приділено резонансному перебігу процесів, коли проміжна частинка виходить на масову оболонку. В дисертації показано, що ймовірність резонансного процесу на декілька порядків перевищує ймовірність в нерезонансному випадку. Вузькі резонанси, ширина яких визначається як радіаційна ширина, потребують для аналізу резонансних умов в обраних дисертантом значеннях магнітних полів і енергій частинок враховувати більш високі степені малих параметрів задачі, зокрема, квадратичні за магнітним

полем доданки. Це призводить до появи тонкої структури циклотронних резонансів, вперше передбачених парних резонансів.

Квантово-польовий підхід (метод функцій Гріна) застосовано в роботі для задачі руху важкої зарядженої частинки в електронному газі з суттєво неізотропним розподілом за швидкостями в магнітному полі. Такий розподіл є природним в методі електронного охолодження заряджених частинок. Вихід за перше борнівське наближення дозволив знайти залежність втрат енергії важкої частинки від знаку її заряду. До найбільш важливих нових результатів слід віднести такі:

- Вперше розроблено метод аналізу спіно-поляризаційних ефектів в процесах КЕД в сильному магнітному полі. Показано, що ступінь поляризації синхротронного випромінювання в площині орбіти електронів у випадку, якщо енергії електронів $> 10\text{TeV}$ в магнітному полі 10^6Гс а) монотонно падає з ростом енергії електрона, якщо спочатку спіни електронів направлені проти поля, б) суттєво немонотонна і може буди рівною нулю, якщо спіни спрямовані за полем.

- Вперше побудована теорія резонансних процесів КЕД другого порядку з поляризованими частинками на низьких рівнях Ландау і поляризованими фотонами в сильному меншому за швінгерівське магнітному полі. Теорію було застосовано для врахування поля циклотронних фотонів на процес формування електрон-позитронної плазми в магнітосфері рентгенівського пульсара. Це показало домінуючу роль резонансів в магнітному полі 10^{12}Гс при характерній концентрації фотонів. Останнє спростовує загальноприйняту точку зору про домінуючу роль процесу однофотонного народження пари у формуванні електрон-позитронної плазми. Також показано, що врахування спінової заселеності електронів і позитронів в процесі генерації електрон-позитронної плазми магнітосфери пульсара приводить до зміни спектру синхротронного випромінювання, збільшує низькочастотну частину спектру і зменшує високочастотну.

- З побудованої в роботі теорії руху зарядженої частинки в електронному газі з анізотропної температурою в магнітному полі випливає, що збільшення напруженості зовнішнього магнітного поля вище за величину $H \sim 10^6\text{ Гс}$ в електронному газі з параметрами, що є характерними для методу електронного охолодження, призводить до квантового ефекту: режиму повного пригнічення поперечного руху, коли протон, що рухається в електронному газі, не змінює поперечних полю квантових параметрів електронів газу.

Значимість роботи для науки і практики

визначається тим, що результати дисертаційної роботи більш широко розкривають природу резонансів та поляризаційних ефектів в елементарних процесах з електронами і фотонами в сильному зовнішньому магнітному полі. Вони можуть бути використані, зокрема, для створення поляризатора електронів, де напрямки спінів електронів змінюються в процесі комптонівського розсіяння в магнітному полі пропорційно зміні поляризації лінійно поляризованої електромагнітної хвилі. Дано рекомендації з спостереження процесів КЕД в експериментах з сильними магнітних полях, зокрема в експериментах з зіткнення важких іонів.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в Інституті прикладної фізики НАН України, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, в міжнародному мегапроєкті FAIR в дослідницькому центрі важких іонів (GSI, Darmstadt, Germany), в національній прискорювальній лабораторії SLAC (США) та інших наукових центрах, діяльність яких пов'язана з фізикою елементарних частинок і високих енергій в присутності сильних зовнішніх електромагнітних полів.

Повнота викладення результатів в опублікованих працях.

Основні результати дисертації викладено в 55 наукових працях, 25 з яких опубліковано у вітчизняних і міжнародних спеціалізованих наукових журналах, 8 статей опубліковані в матеріалах конференцій, 22 праці – тези доповідей. Аналіз представлених публікацій дає підставу стверджувати, що всі основні положення дисертації в повній мірі опубліковано й апробовано на вітчизняних і міжнародних конференціях. Зміст автореферату повністю відповідає основним положенням дисертації.

Зауваження щодо змісту дисертації

Разом з тим дисертація містить ряд недоліків різного порядку.

Перш за все, це відноситься до стилю подання матеріалу в тексті роботи. Мається на увазі наступне. Зазначимо, що бібліографічні посилання на основні праці з проблематики дисертації наведені достатньо повно і відображають стан та розвиток досліджень. Але в тексті роботи значна кількість необхідних посилань просто відсутня. Це ускладнює аналіз отриманих нових результатів, можливість їх порівняння з іншими роботами. Приходиться звертатись до відповідних статей безпосередньо. Це відноситься практично до всіх розділів дисертації. Так, наприклад, при врахуванні радіаційних внесків до поширення фотонів у 6 розділі дисертації. Але в літературі протягом багатьох років ці питання вивчалися в різних підходах і наближеннях. З тексту ж дисертації може скластися враження, що обчислення взагалі виконуються вперше.

Також, на мій погляд, практично відсутня інформація про роль радіаційних внесків у фотонні та електронні стани в присутності сильного магнітного поля. Не наводяться дисперсійні рівняння Швінгера-Дайсона, які описують нормальні моди, що виникають у сильних магнітних полях при нульовій та ненульовій температурі. Автор обмежується дисперсійним рівнянням для вільного фотона. Але це завідомо не вірно, коли ми маємо ненульову температуру, та сильні поля. Ці питання слід було б обговорити, а можливо й врахувати, додатково.

Відповідність встановленим вимогам до докторських дисертацій.

Однак, зроблені зауваження не впливають на отримані важливі результати. Вона справляє позитивне враження і робить істотний внесок у розвиток квантової електродинаміки інтенсивного магнітного поля.

В дисертації створено послідовну теорію процесів з поляризованими частинками в сильному магнітному полі в околі критичного швінгерівського значення, що є важливою науковою задачею. Структура дисертації в повній мірі відповідає вимогам, які пред'являються до докторських дисертаційних робіт. Мова та стиль подання матеріалу академічний і зрозумілий. Робота написана гарною українською мовою. Зміст дисертації послідовно відображає

постановку теоретичних задач, методи їх розв'язання та інтерпретацію отриманих результатів. Таким чином, дисертація є цілісною завершеною роботою.

На підставі вище викладеного вважаю, що робота Холодова Р.І. «Резонансні і поляризаційні ефекти в процесах квантової електродинаміки в сильному магнітному полі» за актуальністю, ступеню новизни, значимістю для науки і практики, а також за структурою і об'ємом відповідає усім вимогам щодо докторських дисертацій та свідчить про високий науковий рівень автора, який заслуговує присвоєння йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент -
доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри теоретичної фізики
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара МОН України



В.В. Скалозуб

