ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу Холодова Романа Івановича
"Резонансні і поляризаційні ефекти в процесах квантової електродинаміки в сильному магнітному полі",
яка подана на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Актуальність обраної теми. Дисертаційна робота Холодова Р.І. присвячена теоретичному дослідженню елементарних процесів квантової електродинаміки (КЕД) в першому і другому порядку теорії збурень за квантованим полем, але в присутності зовнішнього сильного магнітного поля. Особлива увага приділена таким процесам, як синхротронне випромінювання, однофотонне народження електрон-позитронної пари, розсіяння 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 в сильному магнітному полі з поляризованими частинками і фотонами, а також процесу руху зарядженої частинки в сильно замагніченому електронному газі.

Синхротронне випромінювання – добре вивчене явище і зараз воно має велике застосування: це джерела рентгенівського синхротронного випромінювання для рентгеноскопії, радіаційне охолодження лептонів, отримання поляризованих пучків електронів (позитронів) та ін. Збільшення частоти синхротронного випромінювання за рентгенівський діапазон через збільшення енергії електронів і магнітного поля дозволило б вивчати процеси з розмірами менших за ядерних масштабів. Тому, виявлення нових властивостей синхротронного випромінювання з більш інтенсивними параметрами, представлених у дисертації Холодова Р.І., є актуальним і важливим завданням теоретичної фізики.

Іншим об'єктом досліджень квантової електродинаміки з сильним магнітним полем є нейтронні зірки. Магнітосфера нейтронної зірки є унікальною лабораторією для перебігу процесів КЕД в сильних, порядку критичного швінгерівського $\sim 10^{13}$Гс, магнітних полях. Тематика вивчення рентгенівських пульсарів, яка включає як астрономічні спостереження, так і теоретичні розрахунки, залишається актуальною донині, оскільки єдина теорія випромінювання рентгенівського пульсара відсутня.

Тема дисертаційної роботи є актуальною, також, тому, що у міжнародному мегапроекті FAIR, що будується у Німеччині, плануються дослідження квантово-електродинамічних явищ в екстремально сильних електромагнітних полях, зокрема, в експериментах з зіткнення важких швидких іонів, де в області між ядрами створюється магнітне поле порядку швінгерівського.

Основні положення та висновки роботи, їх новизна, обґрунтованість та достовірність. В дисертаційній роботі Холодова Р.І. побудована квантова релятивістська теорія елементарних процесів квантової електродинаміки з електронами та позитронами на низьких рівнях Ландау в сильному магнітному полі, яке є близьким, але меншим за швінгерівське з врахуванням спінів частинок і поляризацій фотонів, а також побудовано єдиний підхід аналізу цих процесів з вивченням спінових, поляризаційних і резонансних ефектів. Основною спрямованістю досліджень є пошук резонансів у згаданих квантово-електродинамічних процесах другого порядку з аналізом резонансних умов і здобуттям простих аналітичних виразів для імовірностей процесів з врахуванням квадратичних за магнітним полем доданків та аналіз спін-поляризаційних ефектів, тобто вплив поляризації початкових фотонів на напрямок спінів кінцевих частинок і навпаки вплив спінів початкових частинок на поляризацію кінцевих фотонів. Ці ефекти вперше передбачаються в дисертаційній роботі.

Дисертація складається з вступу, восьми розділів, висновків та списку використаних джерел. У вступі обговорюється актуальність теми дисертаційної роботи, мета і задачі дослідження, методи дослідження, зв'язок з науковими програмами і темами, наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробація результатів дисертації. В першому розділі подано огляд літератури і проаналізовано сучасний стан досліджень процесів КЕД в сильному магнітному полі.

Розділи 2 – 8 є оригінальними. До найбільш значних та нових результатів дисертаційної роботи слід віднести такі.

1. Вперше вивчено спін-поляризаційні ефекти у процесах випромінювання фотона електроном і народження електрон-позитронної пари фотоном в сильному зовнішньому магнітному полі. Показано, що процес з переворотом спіна (спін-фліп) при синхротронну випромінюванні електронів змінює лінійну поляризацію випромінювання з нормальної (площина поляризації перпендикулярна напрямку поля) на аномальну (вектор напруженості магнітного поля лежить в площині поляризації), а в процесі однофотонного народження електрон-позитронної пари зміна поляризації початкового фотона від нормальної лінійної до аномальної приводить до переходу від народження неполяризованих електронів та позитронів до народження частинок в повністю поляризованому стані. Зокрема ці ефекти приводять до того, що синхротронне випромінювання електронів з певними енергіями більше за ТеВ-ні значення в магнітному полі понад 50 тесла є повністю неполяризоване (розділ 2).

2. Досліджено процес розсіювання фотона на електроні в магнітному полі в резонансних умовах в ультраквантовому наближенні з урахуванням поляризації всіх частинок. Виявлено, що резонансний перебіг процесів має місце, якщо проміжна частинка виходить на фіксовані рівні Ландау, що відповідає циклотронним резонансам. Поляризація фотонів не впливає на резонансні умови. Врахування квадратичних за полем доданків приводить до появи парних резонансів, що є наслідком двох фейнманівських діаграм в

амплітуді імовірності процесів другого порядку. Показано, що перерізи процесів в резонансі факторизуються і представляються у вигляді формули Брейта-Вігнера в разі чистих спінових станів проміжних частинок (розділ 3).

3.Вперше процес народження електрон-позитронної пари двома поляризованими фотонами в сильному зовнішньому магнітному полі вивчено з урахуванням спіна частинок в резонансних умовах у випадку, якщо один фотон (жорсткий) народжує пару, а другий (м'який) виводить процес на резонанс. Показано, що резонанс можливий поблизу порога, якщо частота жорсткого фотона перевищує суму енергій пари, а частота м'якого фотона кратна циклотронній. Поблизу порогу процесу має місце інтерференція двох резонансів, якщо обидва фотони спрямовані перпендикулярно полю і виконується спеціальне співвідношення для рівнів Ландау кінцевих і проміжних частинок. Найбільший переріз процесу відповідає народженню частинок в основні спінові стани. Встановлено домінуючу роль резонансів в полі $H=10^{12}Гс$ при врахуванні поля циклотронних фотонів на процес формування e+e плазми в магнітосфері рентгенівського пульсара. (розділ 4).

4. Досліджено народження e+e пари фотоном з подальшим випромінюванням кінцевого фотона в сильному магнітному полі, проаналізована кінематика процесу і умови виникнення резонансів. Розраховано ймовірності процесу в резонансному і нерезонансному випадках з урахуванням поляризації частинок в ультраквантовому наближенні, вивчені спін-поляризаційні ефекти (розділ 5). Побудована теорія процесу каскадного однофотонного народження електрон-позитронної пари з подальшою анігіляцією пари в фотон з урахуванням поляризації фотонів в резонансних і нерезонансних умовах (розділ 6), і пораховано процес народження e+e пари електроном (розділ 7).

5. Побудована також теорія руху зарядженої частинки в електронному газі з анізотропної температурою в магнітному полі, з якої випливає, що втрати енергії зарядженої частинки в електронному газі з урахуванням другого борнівського наближення є більшими для від'ємно заряджених частинок, ніж для позитивно заряджених (розділ 8).

Усе вище сказане свідчить про те, що в дисертаційній роботі було розв'язано важливі задачі в галузі сучасної теоретичної фізики елементарних частинок і високих енергій в сильних зовнішніх електромагнітних полях.

Висновки та наукові положення дисертаційної роботи випливають з досліджень, які виконані із застосуванням адекватних теоретичних моделей, які використовують загальноприйняті методи теоретичних досліджень: стандартні правила КЕД для знаходження ймовірностей процесів, діаграмна техніка в рамках картини Фаррі. Також у граничних випадках нові результати співпадають з раніш відомими. Усе це дає підставу вважати результати дисертаційної роботи достовірними та обґрунтованими.

Значущість роботи для науки і практики результатів дисертації полягає у тому, що розвинена в ній теорія дозволяє поглибити уявлення про перебіг процесів квантової електродинаміки в зовнішньому магнітному полі та передбачити ряд нових фізичних ефектів: спін-поляризаційні ефекти, парні

резонанси, резонансне вакуумне променезаломлення. Зокрема, можливим практичним застосуванням здобутих в дисертації результатів може бути запропонована схема поляризатора пучка електронів, де напрямки спінів електронів змінюються в процесі комптонівського розсіювання фотонів на електронах в магнітному полі пропорційно зміні поляризації лінійно поляризованої електромагнітної хвилі.

Ймовірність народження електрон-позитронних пар ультрарелятивістським електроном в магнітному полі застосована дисертантом для оцінки виходу позитронів в експерименті SLAC з зіткнення пучка ультрарелятивістських електронів з лазерним променем і дає задовільну згоду з експериментальними результатами.

Зауваження щодо змісту дисертації.

1. Функція (2.37) відіграє важливу роль у всіх подальших обчисленнях різних процесів. Її отримання містить інтегрування добутку поліномів Ерміта, тому варто дати посилання на відповідну формулу у довіднику.
2. Деякі формули містять небажані помилки, наприклад, у формулі (6.1) відсутні гама матриці і слід за спінорними індексами; в формулах (6.3) маса під коренем стоїть чомусь у першому ступені.
3. Регуляризація розбіжного інтегралу (6.2) проводиться за допомогою введення додаткового члена в (6.6) з масою M, яка спрямовується до нескінченності в кінцевих виразах. Але цей доданок вибраний залежним також від магнітного поля, що не відповідає змісту усунення ультрафіолетових розбіжностей, які не залежать від таких фізичних величин як температура, хімічний потенціал, магнітне поле. Треба перевірити, чи не вносить такий спосіб регуляризації небажану додаткову залежність від магнітного поля.
4. Не всі скорочення внесені в список на сторінці 28.
5. Деякі терміни, наприклад "комптонізація", вживаються раніше ніж наводяться їх пояснення.
6. Не надто уважно вичитаний текст дисертації, тому зустрічаються орфографічні помилки і не зовсім зрозумілі фрази.
7. Недостатню увагу приділено порівнянню результатів дисертації з експериментальними даними там де такі дані є.

Однак, зазначені зауваження ні в якому разі не є принциповими, вони не мають впливу на головні результати дисертаційної роботи і не зменшують наукового та практичного значення результатів дисертації.

Відповідність встановленим вимогам до докторських дисертацій.

Дисертаційна робота Холодова Романа Івановича є закінченим, самостійним дослідженням, яке виконане на високому науковому рівні, містить вирішення важливої наукової задачі зі створення теорії процесів квантової електродинаміки з поляризованими частинками в сильному магнітному полі. Результати дисертаційної роботи достатньо повно відображені в публікаціях. За темою дисертації опубліковано 25 статей у провідних наукових журналах, як вітчизняних так і міжнародних (наприклад, таких як Phys. Rev. D, Modern Phys. Lett. A, ЖЭТФ). Її апробація представлена на міжнародних

конференціях у вигляді 30 праць конференцій та тез доповідей. Отримані результати добре відомі спеціалістам, використовуються експериментаторами, і добре цитуються, що підтверджує достовірність результатів і висновків дисертаційної роботи. Зміст автореферату повністю відображує сутність дисертаційної роботи.

Таким чином, дисертаційна робота Холодова Р.І. за актуальністю, новизною, практичним значенням, об'ємом і завершеністю виконаних досліджень повністю відповідає паспорту спеціальності. Враховуючи актуальність теми дисертації, новизну і важливість результатів, рівень і кількість публікацій, вважаю, що дисертаційна робота Холодова Романа Івановича "Резонансні і поляризаційні ефекти в процесах квантової електродинаміки в сильному магнітному полі" відповідає всім вимогам до докторських дисертацій «порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р., а її автор, Холодов Роман Іванович безумовно заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Завідувач відділу Астрофізики і елементарних
частинок Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України,
член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор В.П. Гусинін

Підпис В.П. Гусиніна засвідчую:
Вчений секретар Інституту теоретичної
фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України С.М. Перепелиця

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ
ІМ. М.М. БОГОЛЮБОВА
Ідентифікаційний код
05417124
М. КИЇВ