

ВІДГУК

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. Інтерес до квантової електродинаміки (КЕД) у магнітному полі виник в середині минулого століття для пояснення синхротронного випромінювання, яке має широке застосування, зокрема, в фізиці високих енергій як механізм охолодження пучків на електрон-позитронних колайдерах, що суттєво при створенні С і В-фабрик, а також для отримання пучків поляризованих частинок. Тому і зараз дослідження синхротронного випромінювання в різноманітних умовах є актуальним напрямком теоретичних досліджень

Відкриття періодичного випромінювання з нейтронних зірок, (рентгенівських пульсарів,) призвело до розуміння того, що у магнітосфері нейтронної зірки відбуваються усі елементарні процеси КЕД в присутності сильного зовнішнього магнітного поля величиною 10^{11} - 10^{13} Гс і вище. Всі вони впливають на випромінювання пульсара, а також на формування самої магнітосфери, і тому їх доскональне вивчення, особливо з урахуванням поляризаційних і резонансних ефектів, є край важливим.

Європейський міжнародний проект фундаментальних досліджень з екстремально сильними електромагнітними полями ELI (Extrime Light Infrastructure) планує у Чехії створення надпотужного лазера з рекордною інтенсивністю 10^{24} Вт/см². Зокрема, планується повторення SLAC експериментів з народження електрон-позитронної пари при взаємодії ультрарелятивістського електрона із полем потужного лазерного променя, проте зі значно більшими інтенсивностями. Оскільки для ультрарелятивістськи рухомих частинок, вплив зовнішніх лазерного і магнітного полів однаковий, вивчення цього процесу в сильному магнітному полі є задачею вчасною і актуальною.

Дослідження процесів КЕД плануються в рамках мегапроекту FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) з метою перевірки квантової електродинаміки в екстремально сильних електромагнітних полях, зокрема, в процесах зіткнення швидких важких іонів, при зіткненні котрих в зоні малих значень прицільних параметрів виникають сильні магнітні поля. Іншою особливістю цього проекту є застосування методу електронного охолодження для створення релятивістських пучків антипротонів з рекордно малими розбіжностями за імпульсами. Квантові ефекти у сильному магнітному полі є суттєвими у механізмі електронного охолодження важких заряджених частинок. Важливою задачею є створення відсутньої на сьогодні теорії руху важкої зарядженої частинки в сильному магнітному полі з урахуванням знаку її заряду.

Рецензована дисертаційна робота Холодова Р.І. як раз і присвячена вирішенню вищезгаданих актуальних задач. В роботі основну увагу приділено

теоретичному дослідженню ефектів, щодо процесів КЕД у сильному магнітному полі, які неможливі у відсутності поля, з урахуванням резонансної структури відповідних амплітуд і поляризаційних станів усіх частинок.

Дисертаційна робота Холодова Р.І. виконана у рамках багатьох фундаментальних наукових тем, відповідно до плану наукових досліджень Інституту прикладної фізики НАН України згідно з державними науковими програмами, пріоритетними напрямками розвитку науки й техніки. Це підкреслює її важність і актуальність.

Основні положення та висновки роботи, їх новизна, обґрунтованість та достовірність. В дисертаційній роботі Холодова Р.І. побудована квантова релятивістська теорія елементарних процесів КЕД в сильному магнітному полі меншому, проте близькому за критичне, з поляризованими частинками. Перший розділ має оглядовий характер і може бути корисним для поглибленої обізнаності із фізикою заряджених частинок в магнітному полі, хронологією експериментальних та теоретичних досліджень і невирішеними проблемами і задачами в цій галузі. Сім розділів роботи (з другого по восьмий) є розділами оригінальних досліджень.

У другому розділі розроблено метод аналізу спіно-поляризаційних ефектів, тобто ефектів впливу поляризації початкових фотонів на спіни кінцевих частинок і навпаки впливу спінів початкових частинок на поляризацію кінцевих фотонів. Ці ефекти вперше передбачено у дисертації. Метод детально розібрано і застосовано на прикладі двох простіших процесів першого порядку: синхротронне випромінювання та утворення електрон-позитронної пари фотоном. Ймовірності цих процесів добре відомі, але внесок окремих спінових ставищ частинок в ці ймовірності в повній мірі досі ніколи не досліджувався. Для детального аналізу обрано два протилежних наближення: ультраквантове (коли заряджені частинки знаходяться на низьких рівнях Ландау) та ультрарелятивістське (коли реалізуються дуже високі рівні Ландау) і здобуто нові результати. Зокрема, цікавим є суттєва залежність поляризації синхротронного випромінювання від енергії електронів зі спінами напрямленими за полем, у випадку великих енергій більших за TeV -ні значення.

У третьому, четвертому і п'ятому розділах вивчаються такі процеси: розсіяння фотона на електроні, двофотонне синхротронне випромінювання, народження електрон-позитронної пари вдома фотонами та народження електрон-позитронної пари з випромінюванням фотона. Ці процеси пов'язані крос симетрією, тобто амплітуди кожного з них описуються топологічно еквівалентними діаграмами Фейнмана і отримуються одна із іншої відповідними замінами 4-імпульсів частинок. Діаграми містять одну проміжну віртуальну частинку (електрон або позитрон), яка описується електронною функцією Гріна в магнітному полі. Для детального аналізу обрано ультраквантове наближення. Суттєвою особливістю цих процесів є їх резонансний перебіг у випадку, коли проміжні віртуальні частинки у відповідних діаграмах Фейнмана виходять на масову поверхню, завдяки їх

взаємодії із магнітним полем. При цьому амплітуди відповідних процесів мають ставати нескінченними, і щоб уникнути нескінченних ймовірностей та перерізів, функції Гріна модифікуються подібно до Брейт-Вігнерівського резонансу за рахунок уявного доданку, який, у свою чергу, являє собою ймовірність випромінювання електрона у магнітному полі за одиницю часу. Для цих процесів здійснено аналіз спін-поляризаційних ефектів із застосуванням розробленого у другому розділі методу. В процесах розсіяння фотона на електроні і народження електрон-позитронної пари було виявлено ефект зміни орієнтації спінів кінцевих електронів (позитронів) пропорційно зміні лінійної поляризації початкового фотона.

У шостому розділі проведено дослідження розповсюдження фотона, енергія котрого трохи перевищує поріг народження пари, в магнітному полі із урахуванням поляризації вакууму. Відповідний внесок розраховано, використовуючи ті самі функції Гріна, що і в розділах 3-5. В розглянутих умовах проміжні частинки у діаграмі Фейнмана можуть бути реальними, що дозволяє процес руху фотону тлумачити як каскадний, коли спочатку фотон утворює електрон-позитронну пару, а потім ця пара анігілює у фотон. Ймовірність такого каскадного процесу розрахована як в резонансних, так і в нерезонансних умовах. Прийнято вважати, що в точці резонансу область з магнітним полем перестає бути прозорим середовищем. Розглянутий дисертантом процес спростовує цю точку зору. Аналізується ефект вакуумного подвійного променезаломлення в сильному магнітному полі в резонансних умовах.

Сьомий розділ дисертації присвячено процесу народження електрон-позитронної пари електроном в магнітному полі поблизу порогу в резонансних умовах для проміжного фотона. Для реалізації цього процесу початкові електрони мають мати ультрарелятивістські швидкості. Як зазначено вище, в такій ситуації вплив зовнішнього магнітного поля на поведінку електрона подібний впливу зовнішнього лазерного поля. Це дозволяє здобути в дисертації ймовірності застосувати для пояснення результатів експерименту SLAC з народження електрон-позитронної пари при взаємодії ультрарелятивістського електрона з лазерним променем і отримати добре узгодження з ними.

У восьмому розділі створено теорію руху важкої зарядженої частинки в електронному газі з суто анізотропним розподілом за швидкостями (анізотропною температурою) в сильному магнітному полі. Ця теорія застосовується для задачі електронного охолодження пучків важких частинок з врахуванням знаку їх заряду. З простих аналітичних формул для втрат енергії в низькотемпературному (лінійному за анізотропною температурою) наближенні слідує відомий з експериментів ефект швидкого електронного охолодження, коли головну роль в процесі втрат енергії відіграє поздовжня температура. Поперечний рух частинок «вморожується» магнітним полем і не бере участі в процесі охолодження. Проте завдяки теоремі Ліувілля про збереження фазового об'єму поздовжня температура електронного пучка на кілька порядків нижче за поперечну. Чисельні розрахунки сили тертя з параметрами характерними для

електронного охолодження у відсутності магнітного поля дозволили провести аналіз впливу поздовжньої і поперечної температур на процес. Використання квантової теорії поля з урахування другого борнівського наближення дозволило дисертанту враховувати знак зарядженої частинки.

Результати, здобуті в дисертації, приведені у вигляді аналітичних формул та проілюстровані численним графічним матеріалом. До найбільш суттєвих і нових результатів можна віднести такі:

- Показано, що в процесі синхротронного випромінювання переверот спіну електрона в основний спіновий стан змінює лінійну поляризацію випромінювання з нормальною (площина поляризації перпендикулярна напрямку поля) на аномальну. Ступінь поляризації синхротронного випромінювання в площині орбіти електронів в разі, коли енергії електронів більша 10TeV в магнітному полі 10^6Гс) а) монотонно падає з ростом енергії електрона, якщо спочатку спіни електронів направлені проти поля, б) суттєво немонотонна, якщо спіни спрямовані за полем.

- Показано, що перерізи квантово-електродинамічних процесів другого порядку в резонансі факторизуються і представляються у вигляді формули Брейта-Вігнера, де в якості ширини процесів виступає радіаційна ширина, в разі чистих спінових станів проміжних частинок. Передбачено наявність парних резонансів в процесі народження електрон-позитронної пари фотоном з випромінюванням фотона. В області між резонансами імовірність процесу залежить від різниці азимутальних кутів початкового і кінцевого фотонів.

- Показано, що фотони, що проходять область з магнітним полем, як без взаємодії, так і за участю в каскадному процесі народження електрон-позитронної пари з подальшою анігіляцією в фотон, складають два променя вакуумного подвійного променезаломлення. Спочатку неполяризований промінь фотонів після проходження області з магнітним полем набуває часткову аномальну лінійну поляризацію. У резонансних умовах в магнітному полі $H=10^{13}\text{Гс}$ фотони з енергією $2m$ повністю поляризуються після проходження області розміром $L=1\text{мкм}$.

- Знайдений вираз для втрат енергії зарядженої частинки в електронному газі з урахуванням другого борнівського наближення показує більші втрати для від'ємно заряджених частинок, ніж для додатньо заряджених, що узгоджується з експериментом. У наближенні великих швидкостей частинки друга борнівська поправка до втрат енергії є малою величиною, яка росте з ростом температури.

Достовірність та обґрунтованість наукових результатів та положень, які виносяться на захист, не викликають сумнівів, оскільки всі вони базуються на визнаних теоретичних методах для опису процесів квантової електродинаміки в сильних електромагнітних полях, які відповідають загальним положенням квантової теорії поля і сучасній теоретичній фізики елементарних частинок і високих енергій. Дослідження, здійснені в дисертації, базуються на точних рішеннях рівняння Дірака для електрона в магнітному полі. При цьому взаємодія із квантовим полем випромінювання враховується в рамках теорії

збурень на основі техніки діаграм Фейнмана. Електронна функція Гріна отримана за допомогою підсумовування білінійної комбінації точних рішень рівняння Дірака у постійному магнітному полі, а в аналізі поляризаційних ефектів використано формалізм, схожий на формалізм спіральних амплітуд. У граничних випадках нові результати співпадають з раніш відомими. Основні результати роботи доповідалися здобувачем і обговорювалися на міжнародних наукових конференціях і нарадах, а також на семінарах провідних наукових центрів, зокрема, ННЦ ХФТІ НАН України, Інституту важких іонів (ГСІ, м. Дармштадт, Німеччина), Інституту ядерної фізики Юліхського дослідного центру (м. Юліх, Німеччина).

Цінність результатів роботи для науки і практики. Здобуті в дисертаційній роботі результати дають фундаментальні уявлення про взаємодію електронів, позитронів і фотонів в присутності сильних зовнішніх полів. Можливим практичним застосуванням є запропонована схема поляризатора пучка електронів, де напрямки спінів електронів змінюються в процесі розсіяння фотонів на електронах в магнітному полі пропорційно зміні поляризації електромагнітної хвилі. В роботі дано рекомендації з спостереження процесів квантової електродинаміки в експериментах з сильними магнітними полями, зокрема в експериментах з зіткнення важких іонів. Створену в роботі теорію народження електрон-позитронної пари електроном в магнітному полі з використанням властивості еквівалентності зовнішніх полів для ультрарелятивістських процесів застосовано для пояснення результатів експерименту SLAC з народження електрон-позитронної пари при взаємодії ультрарелятивістського електрона з лазерним променем. Одержане в дисертації значення 80 пар на сьогодні є кращим теоретичним результатом у світі, який добре узгоджується з експериментальними результатами (106 ± 14 подій).

Зауваження щодо змісту дисертації. На жаль дисертація не лишена деяких недоліків:

1) Хочу звернути увагу на формулу (2.164). Вона помилкова, бо параметри Стокса уявляють собою квадратичні функції напруженості електричного поля. Тому виводи, отримані за її наслідком, потребують відповідної корекції.

2) Не можу погодитися із поглядом Холодова Р.І. що до розбіжності на порозі народження електрон-позитронної пари фотоном. Вона має кореневий характер та, як на мене, не може бути пов'язана з інфрачервоною розбіжністю, яка притаманна квантовій електродинаміці, і навіть урахування випромінювання м'якого фотона не може її компенсувати.

3) Є описки в формулах, наприклад, у правій частини (3.7) доданки мають різну розмірність; із формул (4.119), (4.120) та (4.122) випливає, що відношення R не може бути більш за одиницю, і це суперечить його значенню на Рис.4.7.

4) Права частина в (5.96) при випромінюванні вздовж магнітного поля дорівнює 2, а не 4 (див. стор. 217).

5) Я також помітив неточності в формулах (3.87), (6.7), (7.15) та у тексті на сторінках 81, 95, 166.

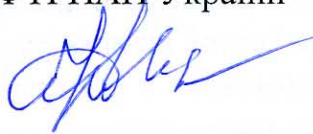
Зазначені зауваження, тим не менш, не зменшують наукового та практичного значення результатів дисертації.

Відповідність встановленим вимогам до докторських дисертацій.

Дисертаційна робота Холодова Р.І., яка присвячена вирішенню важливої наукової проблеми - створенню єдиної теорії процесів квантової електродинаміки в сильному магнітному полі з аналізом спін-поляризаційних і резонансних ефектів, є завершеною науковою роботою. Основні результати дисертації достатньо повно відображено в 25 статтях у фахових наукових журналах. Апробація роботи перед науковою спільнотою проведена на міжнародних конференціях і відображена у 30 тез доповідей і статтях, надрукованих у матеріалах конференцій. Автореферат дисертації повністю відповідає її змісту. Наукові положення і результати наукових досліджень, за якими здобувач, а також його співавтори Новак О.П., Дяченко М.М., Хелемеля О.В. (у котрих Холодов Р.І. був науковим керівником) захистили кандидатські дисертації, не внесені до докторської дисертації. Дисертаційна робота в повній мірі відповідає вимогам, які пред'являються до докторських дисертаційних робіт. Зміст дисертації послідовно відображає постановку теоретичних задач, методи їх вирішення та інтерпретацію здобутих результатів.

На підставі вище викладеного можна стверджувати, що робота Холодова Р.І. "Резонансні і поляризаційні ефекти в процесах квантової електродинаміки в сильному магнітному полі" за актуальністю, ступенем новизни, значимістю для науки і практики, а також за структурою і об'ємом відповідає вимогам до докторських дисертацій п.п. 9, 10, 12, 13 «порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, які внесені згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р., № 567 від 27.07.2016) та свідчить про високий науковий рівень автора, який заслуговує присвоєння йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник Інституту теоретичної фізики
імені О.І. Ахієзера ННЦ ХФТІ НАН України



М.П. Меренков

Підпис офіційного опонента доктора фізико-математичних наук
М.П. Меренкова засвідчую

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 64.845.02
канд. фіз.-мат. наук



А.І. Кірдін