НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Генеральний директор
_____ Микола ШУЛЬГА
«30» ____11____ 2022 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА
навчальної дисципліни
КВАНТОВОЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ЕФЕКТИ У ВИЩИХ ПОРЯДКАХ ТЕОРІЇ ЗБУРЕНЬ
Назва навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Доктор філософії
галузь знань	10 Природничі науки
спеціальність	104 фізика та астрономія
освітня програма	освітньо-професійна програма «Фізика та астрономія»
спеціалізація	«Теоретична фізика»
вид дисципліни	обов'язкова за вибором ННЦ ХФТІ
Інститут	Інститут теоретичної фізики ім. О.І.Ахієзера ННЦ ХФТІ

2022/ 2023 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження
Науково-технічною радою ННЦ ХФТІ

Від "29" 11 2022 року, протокол № 6

РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ:
д.ф.-м.н., старший науковий співробітник, МИКОЛА МЕРЕНКОВ

Програму схвалено на засіданні Вченої ради Інституту теоретичної фізики ім. О.І.Ахієзера ННЦ ХФТІ

від "19" 09. 2022 року, протокол № 4

ТВО директора Інституту теоретичної фізики ім. О.І.Ахієзера ННЦ ХФТІ

_____ Леонід ДАВИДОВ
(підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньо-професійної програми «Фізика та астрономія»
назва освітньої програми

Гарант освітньо-професійної програми «Фізика та астрономія»

_____ Віктор ТКАЧЕНКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

ВСТУП

Дисципліна «Квантовоелектродинамічні ефекти у вищих порядках теорії збурень» є частиною професійної підготовки аспірантів за вибором ННЦ ХФТІ за напрямом 10 Природничі науки, за спеціальністю – 104 фізика і астрономія, яка викладається протягом третього року навчання.

1. Опис навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни "Квантовоелектродинамічні ефекти у вищих порядках теорії збурень" є: формування в аспірантів знань про обчислення ефектів квантової електродинаміки з урахуванням радіаційних поправок, фізичних вимог для усунення ультрафіолетових розбіжностей та перенормування заряду і маси електрона, методи підсумовування провідних внесків до перерізів процесів; підготовка фахівців за спеціалізацією 01.04.02 – «Теоретична фізика» за напрямком вивчення й застосування цих знань для прецизійного опису експериментів на сучасних електронних прискорювачах і електрон-позитронних колайдерах.

1.1. **Основними завданнями** вивчення дисципліни «Квантово-електродинамічні ефекти у вищих порядках теорії збурень» є

а) загальні позиції

(1) здобуття глибинних знань із теоретичної фізики, за якою аспірант проводить дослідження;

(2) набуття універсальних навичок дослідника, необхідних для успішної наукової, науково-організаційної і педагогічної діяльності, комунікації з науковою спільнотою в галузі фізики та астрономії (зокрема - теоретичної фізики), а також урядовими і громадськими організаціями;

(3) сприяння здобуттю рівня мовних можливостей, достатніх для представлення та обговорення результатів своєї наукової роботи іноземною мовою (англійською) в усній та письмовій формі, а також для повного розуміння іншомовних наукових текстів зі спеціальності «Фізика та астрономія»;

б) вузькопрофесійні завдання

(1) систематизація знань в галузі квантової електродинаміки, необхідних для опису процесів в експериментах на електронних прискорювачах і колайдерах;

(2) засвоєння аспірантами базових знань і методології, пов’язаних із описом квантовоелектродинамічних процесів в рамках теорії збурень на основі діаграм Фейнмана.

1.2.1. Формування інтегральних компетентностей

Здатність продукувати нові ідеї, розв’язувати комплексні проблеми науково-дослідницької та інноваційної діяльності у сфері фізики, застосовувати методологію науково-дослідницької та педагогічної діяльності, а також проводити власне наукове дослідження, результати якого мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення і застосування.

1.2.2 Формування наступних загальних компетентностей

ЗК01. Здатність генерувати нові ідеї (креативність).

ЗК02. Здатність працювати в міжнародному контексті.

ЗК03. Здатність розв'язувати комплексні наукові проблеми на основі системного наукового світогляду та загального культурного кругозору із дотриманням професійної етики та академічної доброчесності.

1.2.3 Формування наступних спеціальних (фахових) компетентностей

СК01. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру в сфері квантової електродинаміки та електродинаміки адронів, інтегрувати знання з різних галузей фізики високих енергій, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень.

СК02. Здатність відстежувати тенденції розвитку теоретичного опису ефектів квантової електродинаміки у вищих порядках теорії збурень, пов'язані із інтерпретацією сучасних експериментів за участю лептонів та адронів, вміння критично переосмислювати наявні знання і методи фундаментальних та прикладних наукових досліджень.

СК03. Здатність представляти та обговорювати результати своєї науково-дослідницької роботи державною мовою, а також англійською мовою чи одною з офіційних мов Європейсько Союзу, в усній та у письмовій формі, опрацьовувати наукову літературу з квантової електродинаміці і ефективно використовувати нову інформацію з різних джерел.

СК04. Здатність організовувати та здійснювати науково-педагогічну діяльність у сфері квантової електродинаміки.

СК06. Здатність застосовувати сучасні методи квантової електродинаміки для обчислення радіаційних поправок у високоточних сучасних експериментах в галузі фізики елементарних частинок.

СК27 Компетенція у сфері квантовоелектродинамічних ефектів у вищих порядках теорії збурень.

1.3. Кількість кредитів – 2.

1.4. Загальна кількість годин – 60.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни:

Галузь знань, напрям підготовки, спеціальність, освітньо-кваліфікаційний рівень	
Галузь знань	10 – Природничі науки
напрям підготовки	104 – фізика та астрономія
спеціальність	
освітньо-кваліфікаційний рівень	Доктор філософії
Мова навчання	Українська
Характеристика навчальної дисципліни	
Вид	Обов'язкова за вибором ННЦ ХФТІ
Загальна кількість годин	60

Кількість кредитів ECTS	2
Форма контролю	залік
Показники навчальної дисципліни	
Рік підготовки	III
Лекційні заняття	18
Практичні заняття	6
Самостійна робота	34
Консультації	2

Опис навчальної дисципліни «Методи статистичної фізики в теорії нерівноважних процесів»

1.6 Передумови для вивчення дисципліни.

Передумовою для вивчення дисципліни «Квантово-електродинамічні ефекти у вищих порядках теорії збурень» є наявність фундаментальних знань з теоретичної механіки, квантової механіки, класичної електродинаміки, а також знайомство з основами теорії поля та алгеброю матриць Дірака.

1.7. Очікувані результати навчання

Згідно з вимогами освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки аспіранти повинні досягти таких результатів навчання:

РН01. Мати сучасні концептуальні та методологічні знання з квантової електродинаміки вищих наближень та дотичних до них міждисциплінарних напрямів, а також необхідні навички, достатні для проведення фундаментальних і прикладних наукових досліджень з метою отримання нових знань та/або здійснення розробок та інновацій.

РН02. Аналізувати та оцінювати стан і перспективи розвитку квантової електродинаміки вищих наближень, а також дотичних міждисциплінарних напрямів.

РН03. Вільно презентувати та обговорювати державною мовою, а також англійською мовою чи одною з офіційних мов Європейського Союзу, результати наукових досліджень, фундаментальні та прикладні проблеми квантової електродинаміки у вищих порядках теорії збурень, публікувати результати наукових досліджень у наукових виданнях, що індексуються у базах Scopus та WoS Core Collection.

РН04. Формулювати і перевіряти гіпотези; використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичних і експериментальних досліджень, математичного моделювання, комп’ютерного експерименту, а також наявні літературні дані.

РН06. Планувати і виконувати прикладні та/або фундаментальні дослідження з квантової електродинаміки вищих наближень та дотичних міждисциплінарних напрямів з використанням сучасних методів з дотриманням норм академічної етики, критично аналізувати результати наукових досліджень у контексті усього комплексу сучасних знань щодо досліджуваної проблеми; готувати проектні пропозиції щодо фінансування наукових досліджень та/або розробницьких і інноваційних проектів.

РН35 Знати: основні методи розрахунків багаточасткових процесів квантової електродинаміки у вакуумі та в полі лазера. Уміти розраховувати перетині процесів з випромінюванням додаткових фотонів і електронно-позитронних пар методами еквівалентних фотонів і електронних структурних функцій і описувати квантово-електродинамічні ефекти в полі лазера

Після вивчення курсу здобувач повинен знати:

- історичні аспекти розвитку квантової електродинаміки від рівняння Дірака до діаграмної техніки Фейнмана;
- методи розрахунку деревних діаграм та діаграм із замкнутими петлями;
- які фізичні процеси дають внесок до радіаційних поправок в тих чи інших умовах експерименту;
- як враховувати нелінійні ефекти в полі плоскої електромагнітної хвилі із лінійною або круговою поляризацією;
- процедури перенормування заряду та маси електрона і скорочення інфрачервоної розбіжності.
- методи досліджень процесів квантової електродинаміки, котрі використовуються для калібрування світності сучасних електрон-позитронних колайдерів з урахуванням особливостей конкретних установок, правил відбору подій у широкому діапазоні енергій; процесів із зарядженими лептонами та адронами, які вивчаються в експериментах на сучасних прискорювачах з ціллю виявити відхилення від Стандартної Моделі і які супроводжуються випромінюванням реальних і віртуальних фотонів та електрон-позитронних пар.

В результаті вивчення дисципліни аспірант повинен вміти:

- обчислювати диференційні та повні перерізи процесів квантової електродинаміки із урахуванням радіаційних поправок, обумовлених випромінюванням реальних та віртуальних фотонів;
- підсумовувати ефекти радіаційних поправок до перерізів процесів у вищих порядках теорії збурень за допомогою метода електронних структурних функцій;
- обчислювати диференційні та повні перерізи багаточасткових процесів квантової електродинаміки за допомогою метода еквівалентних фотонів.
- обчислювати імовірності випромінювання та народження електрон-позитронної пари електроном в полі інтенсивного лазера;
- використовувати на належному рівні; розшукувати, опрацьовувати, аналізувати та синтезувати отриману інформацію, пов’язану з обчисленням радіаційних поправок і нелінійними ефектами в квантовій електродинаміці, застосовувати здобуті знання для аналізу, пояснення та опису прецизійних експериментів, зокрема пружного та глибоко непружного розсіяння електронів на протонах та ядрах, анігіляції електронів і позитронів в адрони, вимірювання аномального магнітного моменту мюона та інших.

2. ЗМІСТ ТА СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. Метод функцій Гріна. Матриця розсіяння

Тема 1.

1.1. Інтегральні рівняння для хвильової функції і функції Гріна у нерелятивістській квантовій механіці. «Траєкторія» руху частинки при її багаторазової взаємодії з потенціальним полем. Метод підсумування по різним «траєкторіям». Задача розсіяння.

1.2. Інтегральне зображення тета-функції Хевісайда. Функція Гріна рівняння Шредінгера в координатному та імпульсному зображеннях.

1.3. Функція Гріна рівняння Дірака. Функція Гріна ідеального Ферми газупри кінцевої температурі. Матриця розсіяння діраковських частинок.

Тема 2.

1.4. Діаграмна техніка і правила Фейнмана. Фазовий об'єм кінцевих частинок. Інваріантний потік начальних частинок. Інтерпретація квадрату 4-х мірної дельта-функції Дірака. Правила для обчислення повністю диференційногоперерізу.

Розділ 2. Основні процеси квантової електродинаміки і процеси за участю заряджених лептонів та адронів

Тема 3.

2.1. Розсіяння поляризованих електронів в полі ядра. Формалізм спіральних амплітуд. Розсіяння та анігіляція електронів і мюонів. Електрон-електронне та електрон-позитронне розсіяння. Комптонівське розсіяння та процеси, пов'язані з ним перехресною симетрією.

2.2. Випромінювання м'ягких та колінеарних фотонів. Метод Т'оофта і Вельтмана. Наближення еквівалентних фотонів. Випромінювання фотона та утворення електрон-позитронної пари електроном в полі інтенсивної плоскої електромагнітної хвилі.

Тема 4.

2.3. Пружне та глибоко непружне розсіяння електронів на протонах. Анігіляція електрона і позитрона в адрони. Партонна модель.

Розділ 3. Радіаційні поправки

Тема 5.

3.1. Особливості діаграм зі замкнутими петлями. Обчислення інтегралів по 4-х мірному об'єму. Метод розмірної регуляризації розбіжних інтегралів.

3.2. Поляризація вакууму. Умова калібрувальної інваріантності. Перенормування заряду електрона. Модифікація закону Кулона. Рухлива та ефективна константи зв'язку в квантовій електродинаміці. Теорема Фаррі.

3.3. Масовий оператор. Фізична умова перенормування маси електрона. Модифікація електронного пропагатора. Перенормування маси Вершинна функція. Аномальний магнітний момент електрона. Лембовський зсув.

Тема 6.

3.4. Радіаційні поправки до повного перерізу анігіляції електрона та позитрона в адрони. Електронні структурні функції в першому та другому порядках теорії збурень.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів	*Кількість годин*				
	денна форма				
	усього	*у тому числі*			
		л	*п*	*конс*	*с.р.*
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Розділ 1. Метод функцій	16	6	2		8
Розділ 2. Основні процеси квантової електродинаміки і процеси за участю заряджених лептонів та адронів	20	6	2		10
Розділ 3. Радіаційні поправки					
Усього годин	24	6	2	2	10

4. Теми лекцій

1.	Інтегральні рівняння для хвильової функції та функції Гріна у нерелятивістській квантовій механікі. Задача розсіяння. Функція Гріна рівняння Шредінгера в координатному та імпульсному зображеннях.	2
2.	Функція Гріна рівняння Дірака. Матриця розсіяння діраковських частинок. Функція Гріна ідеального Фермі газу при кінцевої температурі.	2
3.	Діаграмна техніка і правила Фейнмана. Фазовий об'єм кінцевих частинок. Інваріантний потік начальних частинок. Правила для обчислення повністю диференційного перерізу	2
4	Розсіяння поляризованих електронів в полі ядра. Формалізм спіральних амплітуд. Розсіяння та анігіляція електронів і мюонів. Інтерпретація квадрату 4-х мірної дельта-функції Дірака. Правила обчислення перерізів двочасткових процесів.	2
5.	Електрон-електронне та електрон-позитронне розсіяння. Комптонівське розсіяння та процеси, пов'язані з ним перехресною симетрією	2

6.	Випромінювання м’ягких та колінеарних фотонів в процесах розсіяння та анігіляції заряджених частинок. Метод еквівалентних фотонів. Зміні Судакова.	2
7	Електрон в полі плоскої електромагнітної хвилі. Випромінювання фотона електроном та перетворення фотона в електрон-позитронну пару в полі лінійно поляризованої лазерної хвилі.	2
8.	Аналіз діаграм зі замкнутими петлями. Обчислення інтегралів по 4-мірному об’єму. Поляризація вакууму. Процедура усунення ультрафіолетової розбіжності. Перенормування заряду електрона. Модифікація закону Кулона	2
9.	Масовий оператор. Фізична умова перенормування маси	2
	електрона. Перенормування маси Вершинна функція. Аномальний магнітний момент електрона. Радіаційні поправки до повного перерізу анігіляції електрона та позитрона в адрони. Електронні структурні функції в першому та другому порядках теорії збурень.	

5. Теми практичних занять

1.	Розділ I. Квантова механіка релятивістського електрона. Властивості добутків матриць Дірака та обчислення їх слідів.	2
2.	Розділ II. Метод спіральних амплітуд. Поляризаційні явища в процесах розсіяння електронів та мюонів. Метод інваріантного інтегрування. Випромінювання фотона електроном та перетворення фотона в електрон-позитронну пару в полі циркулярно поляризованої лазерної хвилі.	2
3.	Розділ III. Розмірна регуляризація розбіжних інтегралів. Модифікація фотонного та електронного пропагаторів. Тотожність Уорда. Радіаційні поправки до повного перерізу перетворення електрон-позитронної пари в адрони.	2
	Усього	6

6. Завдання для самостійної роботи

1.	Побудова рішень рівняння Дірака з довільними імпульсом та поляризацією. Співвідношення ортогональності і повноти. Проекційні оператори.	2
2.	Хвильові пакети. Розпливчастість пакетів, локалізованих в кінцевої області. Операції зарядового спряження, просторового відбиття та інверсії часу.	4
3	Комптонівське розсіяння та процеси, пов’язані з ним перехресною симетрією.	4

4	Випромінювання м’ягких фотонів по методу Т’оофта і Вельтмана.	4
5.	Народженя електрон-позитронної пари електроном при розсіянні електрона мюоном. Перерізи двоструменевих процесів .	4
6.	Рухлива та ефективна константи зв’язку в квантовій електродинаміці. Теорема Фаррі.	2
7.	Усунення інфрачервоної розбіжності в радіаційних поправках. Константи перенормування в квантовій електродинаміці.	4
8.	Обчислення радіаційних поправок к перерізу глибоко	4
	непружного розсіяння електронів на протонах за допомогою метода електронних структурних функцій.	
	Усього	28

7. Методи контролю

Система рейтингових балів та критерії оцінювання:

1..Експрес-контроль (загальний ваговий бал - 40) проводиться з метою перевірки якості роботи аспіранта на лекційних або практичних заняттях в аудиторії. Тривалість експрес-контролю 5 – 10 хвилин. Кожний експрес – контроль містить два простих завдання, за кожну правильну відповідь аспірант отримує 2 бали. Відсутність аспіранта на занятті або невиконання експрес – контролю приносить аспіранту 0 балів.

Модульний контроль (загальний ваговий бал – 24) проводиться у вигляді двох модульних контрольних робіт тривалістю 2 академічних години кожна. Кожна модульна контрольна робота складається з 2 задач різної складності, які оцінюються у 4 та 8 балів. Максимальна кількість балів за модульні контрольні роботи $2 \times 12 = 24$ балів.

Критерії оцінювання:

a) Повністю правильно виконане завдання оцінюється в 4 або 5 (у залежності від складності) бали;

b) Завдання, виконане з несуттєвими помилками, оцінюється в 3 або 4 (у залежності від складності) бали (незначні помилки в розрахунках);

c) Часткове виконання завдання оцінюється в 2 або 3 (у залежності від складності) бали (правильно обрана логіка розв’язку проблеми за присутності грубих помилок в розрахунках);

d) Часткове виконання завдання оцінюється в 1 бал (правильно обрана логіка розв’язку проблеми за відсутності розрахунків);

e) Неправильне виконання завдання оцінюється в 0 балів.

Якщо аспірант отримав оцінку 4 балів за модульну контрольну роботу, то він зобов’язаний переписати цю роботу, але не більше двох разів.

1. Залік (ваговий бал - 40). Небхідною умовою допуску аспіранта до заліку з дисципліни є позитивний рейтинг з усіх форм семестрової атестації

(позитивний рейтинг з модульної контрольної роботи та експрес - контролю), але не менше 30 балів.

Екзаменаційний білет містить два теоретичних завдання з різних розділів навчальної дисципліни.

Критерії оцінювання.

- Повністю правильно виконане завдання оцінюється в 20 балів;
- Завдання, виконане з несуттєвими помилками, оцінюється в 15 балів (незначні помилки в розрахунках);
- Часткове виконання завдання оцінюється в 10 балів (правильно обрана логіка розв'язку проблеми за присутності грубих помилок в розрахунках);
- Часткове виконання завдання оцінюється в 5 балів (правильно обрана логіка розв'язку проблеми за відсутності розрахунків);
- Неправильне виконання завдання оцінюється в 0 балів.

Форма підсумкового контролю знань – залік.

8. Схема нарахування балів

			Поточний контроль, самостійна робота													
Розділ 1		Розділ 2		Розділ 3							Контрольні роботи	Разом		залік	Сума
Т1	Т2	Т3	Т4	Т5	Т6						Кр1	Кр2				
6	6	6	6	6	6						12	12	60		40	100

9. Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка	
	для чотирирівневої шкали оцінювання	для дворівневої шкали оцінювання
90 - 100	відмінно	зараховано
70 - 89	добре	
50 - 69	задовільно	
1 - 49	незадовільно	не зараховано

10. Рекомендована література.

Основна

1. Akhiezer A.I. and Berestetskii V.B., Quantum Electrodynamics, Wiley Interscience, New York, 1965.
2. Akhiezer A.I. and Peletminsky S.V., Fields and Fundamental Interactions, Taylor & Francis, London and New York, 2002
3. Berestetskii V.B., Lifshitz E.M., and Pitaevskiĭ L.P., Course of Theoretical Physics, vol 4, Quantum Electrodynamics, Elsevier, 2012.
4. James D. Bjorken and Sidney D Drell, Relativistic Quantum Mechanics,

McGrow Hill Book Company, 1964.
5. Lewis H. Ryder, Quantum Field Theory, Cambridge University Press, 1985.
6. John C. Collins, Renormalization, Cambridge University Press, 1984
7. R.P. Feynman, Quantum Electrodynamics, W.A. Benjamin, Inc. New York 1961.
8. W. Greiner, J. Reinhart, Quantum Electrodynamics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Third Edition, 2003.

Додаткова

9. : A. B. Arbuzov, V. S. Fadin, E. A. Kuraev, L. N. Lipatov, N. P. Merenkov, L. G. Trentadue, Small-Angle Electron-Positron Scattering with a Per Mille Accuracy, Nucl.Phys. B485 (1997) p.457-502; arXiv:hep-ph/9509405 .
10. A.B. Arbuzov, G.I. Gakh, V. Yu. Gonchar, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov and L. Trentadue, Small-Angle Bhabha Scattering at LEP1. Analytical Results for Wide-Narrow Angular Acceptance, Phys. Lett. B399 (1997); arXiv:hep-ph/9612201.
11. H. Anlauf, A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov QED Corrections to Deep Inelastic Scattering with Tagged Photons at HERA, Phys. Rev. D59 (1999) 014003; arXiv:hep-ph/9711333.
12. V.A. Khoze, M.I. Konchatnij, N.P. Merenkov, G.Pancheri, L.Trentadue, O.N. Schekhovzova, Radiative Corrections to the Hadronic Cross-Section Measurement at DAPHNE, Eur.Phys.J.,C18:481-490,2001; arXiv:hep-ph/0003313.
13. A. Afanasev, I. Akushevich, N. P. Merenkov, Model independent radiative corrections in processes of polarized electron-nucleon elastic scattering Phys.Rev., D64: 113009, 2001; arXiv:hep-ph/0102086.
14. A. Afanasev, I. Akushevich, N. P. Merenkov, Radiative Correction to the Transferred Polarization in Elastic Electron-Proton Scattering, Phys.Rev., D65: 013006, 2002; arXiv:hep-ph/0009273.
15. A.B. Arbuzov, E.A. Kuraev, N.P. Merenkov, L. Trentadue, Hadronic Cross Sections in Electron-Positron Annihilation with Tagged Photon, JHEP, 9812:009, 1998; arXiv:hep-ph/9804430.
16. G. t'Hooft and M. Veltman, Scalar one-loop integrals, Nucl. Phys. B135, 365, 1979.