

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра фізики ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з науково-педагогічної роботи

Олександр ГОЛОВКО

_____ 2022р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Квантова електродинаміка

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти	перший (бакалавр)
галузь знань	10 – “Природничі науки”
спеціальність	105 – “Прикладна фізика та наноматеріали”
освітня програма	«Прикладна фізика»
спеціалізація	
вид дисципліни	за вибором
факультет	ННІ «Фізико-технічний факультет»

2022/2023 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою факультету (інституту, центру)
 “26” серпня 2022 року, протокол №8

Розробники програми: (вказати авторів, їхні наукові ступені, вчені звання та посади)
 професор кафедри фізики ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера
 д.ф.-м.н., с.н.с., Микола БОНДАРЕНКО
 доцент кафедри фізики ядра та високих енергій імені О. І. Ахієзера,
 к.ф.-м.н. Пилип КУЗНЕЦОВ
 професор кафедри фізики ядра та високих енергій імені О.І. Ахієзера
 д.ф.-м.н., с.н.с., Олексій НУРМАГАМБЕТОВ
 Програму схвалено на засіданні кафедри фізики ядра та високих енергій імені О. І.
 Ахієзера

Протокол від “26” серпня 2022 року, протокол № 13

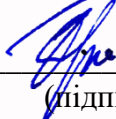
Завідувач кафедри фізики ядра та високих енергій імені О. І. Ахієзера



_____ Микола ШУЛЬГА
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньо-професійної програми Прикладна фізика
 (назва освітньої програми)

Гарант освітньої (професійної) програми



_____ Ігор ГІРКА
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією ННІ «Фізико-технічний факультет»
 (назва факультету, для здобувачів вищої освіти якого викладається навчальна дисципліна)

Протокол від “30” серпня 2022 року, протокол №11

Голова методичної комісії фізико-технічного факультету



ЮНАКОВ

_____ Микола
 (підпис) (прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програму навчальної дисципліни “Квантова електродинаміка” складено відповідно до освітньо-професійної програми підготовки першого рівня вищої освіти (бакалавр). Галузь знань: 10 – “Природничі науки”. Спеціальність: 105 – “Прикладна фізика та наноматеріали”. Освітня програма: «Прикладна фізика». При розробці Програми враховані вимоги Стандарту вищої освіти першого (бакалаврського) рівня, галузі знань 10 – «Природничі науки», спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали», затвердженого наказом МОН України № 804 від 16.06.2020 р.

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Квантова електродинаміка (КЕД) є природним релятивістським узагальненням квантової механіки і є основою і фундаментальною складовою сучасної квантової теорії поля. Оскільки математичний апарат квантової електродинаміки є найбільш розвиненим в порівнянні з описом квантових теорій інших фундаментальних взаємодій його вивчення є базисом для розуміння основних процесів фізики елементарних частинок, ядерної фізики, квантової оптики, фізики твердого тіла і конденсованого стану, фізики плазми. Без знань квантової електродинаміки неможливо сформуванати науковий світогляд фахівця в фізиці в цілому, і теоретичної фізики зокрема.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

Основні завдання полягають у тому, щоб сформуванати у студентів знання фізичних і математичних основ КЕД, допомогти отриманню навичок застосування її математичного апарату до вирішення конкретних фізичних задач, підготувати фахівців з сучасної фізики, які спроможні розв’язувати різноманітні задачі релятивістської квантової механіки, фізики твердого тіла, фізики елементарних частинок та інших розділів сучасної фізики.

Загальні компетентності, які мають бути засвоєні внаслідок вивчення КЕД:

- знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності; **(ЗК-2)**

Фахові компетентності, які мають бути засвоєні внаслідок вивчення КЕД:

- здатність самостійно проводити наукові дослідження, складати план дослідження та одержувати нові наукові й прикладні результати; **(ФК-1)**
- здатність використовувати методи аналітичної обробки результатів дослідження та математичного моделювання; **(ФК-4)**
- здатність використовувати отримані знання для розробки та забезпечення працездатності сучасних дослідницьких та технологічних фізичних систем ядерної та альтернативної енергетики, вакуумно-плазмових та енергетичних пристроїв із дотриманням нормативних заходів безпеки їх експлуатації; **(ФК-5)**

1.3. Кількість кредитів

7

1.4. Загальна кількість годин

210

1.5. Характеристика навчальної дисципліни

Обов'язкова / <u>за вибором</u>		
Денна форма навчання		Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки		
4-й		
Семестр		
7-й	8-й	
Лекції		
64год.	42год.	
Практичні, семінарські заняття		
Лабораторні заняття		
Самостійна робота		
62год.	42 год.	
у тому числі індивідуальні завдання		
1+2	1+1	

1.6. Заплановані результати навчання

Заплановані результати навчання полягають у тому, що внаслідок опанування курсу квантової електродинаміки студенти мають засвоїти загальні положення фізичних і математичних основ КЕД, релятивістську квантову механіку частинок електронів і фотонів, метод функції Гріна для опису амплітуд процесів КЕД, діаграмну техніку (правила Фейнмана) написання матричних елементів, правила розрахунку перерізів та поляризаційних спостережних, теорію перенормування маси і заряду електрона, а також використовувати теоретичні основні КЕД для розрахунку перерізів та аналізу поляризаційних явищ у процесах КЕД в рамках теорії збурень з врахуванням петльових поправок першого порядку.

Згідно з освітньо-професійною програмою «Прикладна фізика» спеціальність 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» студенти мають досягти таких результатів навчання:

- здатність продемонструвати знання і розуміння наукових і математичних принципів, необхідних для розв'язування інженерних задач та виконання досліджень в галузі теоретичної та прикладної фізики, ядерної та термоядерної енергетики, тощо; **(Зн-1)**
- здатність продемонструвати поглиблені знання у вибраній спеціалізації; **(Зн-3)**
- застосовувати знання і розуміння для розв'язування задач синтезу та аналізу елементів та систем, характерних обраній спеціалізації; **(Ум-4)**
- здійснювати пошук, аналізувати і критично оцінювати інформацію з різних джерел; **(Ум-5)**
- критично проаналізувати основні показники функціонування системи та оцінити використані технічні рішення та обладнання; **(Ум-9)**
- аргументувати вибір методів розв'язування спеціалізованої задачі, критично оцінювати отримані результати та захищати прийняті рішення; **(Ум-11)**
- уміння представляти та обговорювати отримані результати та здійснювати трансфер набутих знань; **(Ком-2)**
- здатність усвідомлювати необхідність навчання впродовж усього життя з метою поглиблення набутих та здобуття нових фахових знань; **(АіВ-2)**
- здатність відповідально ставитись до виконуваної роботи та досягати поставленої мети з дотриманням вимог професійної етики; **(АіВ-3)**
- здатність демонструвати розуміння засад охорони праці, електробезпеки та їх застосування; **(АіВ-4)**

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Вступ.

Коротка історія становлення квантової електродинаміки. Коло задач, якими опікується квантова електродинаміка, місце дисципліни в сучасному фізичному світогляді. Математичний апарат та наукові абстракції, які використовуються в даному курсі. Структура курсу квантової електродинаміки та огляд основних складових курсу.

Розділ 1.

Релятивістська квантова механіка та квантова оптика. Основні процеси квантової електродинаміки у деревному наближенні.

Тема 1. Релятивістська квантова механіка електрона.

Експерименти, що свідчать про існування спіну електрона. Рівняння Дірака. Властивості релятивістських спінорів. Рівняння Паулі. Гамільтоніан тонкої структури. Тонка структура атома водню. Спін-орбітальна взаємодія в твердих тілах. Квазікласичне наближення, рух спіну електрона в зовнішньому полі. Поляризовані пучки і детектори поляризації. Діраківські пласкі хвилі. Стани з від'ємною енергією. Хвильові пакети. Парадокс Клейна (відбиття електрона від потенціальної «сходинки»). Рух електрона в однорідних електричному та магнітному полях. Розсіяння електрона в зовнішньому полі. Ряд теорії збурень, функція Гріна вільного електрона. Ейкональне наближення при високій енергії. Позитрони. Обернення часу, зарядове спряження, СРТ-теорема.

Тема 2. Фотон. Елементи квантової оптики.

Експерименти, що демонструють корпускулярні властивості світла. Квантування потоку електромагнітного випромінювання від класичного струму. Пласко-хвильова функція фотона. Спін фотона. Канонічне квантування електромагнітного поля в резонаторі. Алгебра операторів народження та знищення. Спонтанне та індукване випромінювання. Коефіцієнти Ейнштейна. Просторове загасання інтенсивного пучка світла, просвітлення середовища. Трьохрівневий оптичний підсилювач. Лазер. Тиск інтенсивного пучка світла. Спонтанне випромінювання – дипольне наближення, правила відбору. Поглинання випромінювання. Дворівнева система в зовнішньому полі. Дворівнева система в полі монохроматичної хвилі. Наближення хвилі, що обертається. Осциляції Рабі, динамічний ефект Штарка. Флуоресцентна мікроскопія на основі пригнічення спонтанного випромінювання. Радіаційне загасання. Квантові стрибки. Радіаційна ширина лінії. Загасання поза рамками борнівського наближення (матриця щільності). Оптичні рівняння Блоха. Декогерентність для широкополосного випромінювання. Когерентні стани.

Тема 3. Поглинання та випромінювання гама-променів. Релятивістська теорія.

Фотоефект. Диференціальний переріз фотоіонізації в борнівському наближенні. Фотоефект поблизу порогу, поза рамками теорії збурень. Фотоелектронна спектроскопія. Розсіяння світла. Теорія збурень 2-го порядку (формула Крамерса-Гайзенберга). Розсіяння Релея при низьких частотах. Розсіяння при високих частотах, формула Томсона. Релятивістське Комптон розсіяння. Експериментальна перевірка. Комптон спектроскопія (розсіювання на зв'язаних електронах). Поляризаційні властивості Комптон розсіяння. Метод еквівалентних фотонів. Гальмівне випромінювання – кутовий розподіл, поляризація та спектр. Радіаційна довжина. Випромінювання м'яких фотонів, інфрачервона катастрофа. Квантове синхротронне випромінювання. Радіаційна поляризація в накопичувачах. Недипольне випромінювання при багаторазовому розсіюванні, пригнічення випромінювання в речовині.

Тема 4. Жорсткі процеси за участі електронів та позитронів. Народження

нових частинок.

Розсіяння електрона на атомному ядрі на великий кут (формула Мотта). ee та e^+e^- розсіяння, передача поляризації. Фотонний пропагатор. Гамільтоніан надтонкої взаємодії. Народження мюонної пари $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$. Електрон-позитронні колайдери. Народження електрон-позитронних пар фотонам в полі ядра. Електромагнітні каскади.

Розділ 2.**Процеси КЕД у вищих наближеннях.****Тема 5. Правила Фейнмана. Методи квантової теорії поля.**

Квантування електрон-позитронного поля. Теорема Паулі про зв'язок спіну зі статистикою. Матриця розсіяння у КЕД. Умова унітарності. Теорема Віка. Повний набір правил Фейнмана. Особливості діаграм Фейнмана із замкнутими петлями. Розрахунок інтегралів по 4-вимірному фазовому об'єму. Квантова електродинаміка при високих енергіях. Партона інтерпретація амплітуд. Ультрафіолетова розбіжність петель з малою кількістю вершин.

Тема 6. Радіаційні поправки.

Фізичні основи перенормування. Перенормування заряду електрона. Перенормування маси електрона. Масовий оператор. Вершинна функція. Зсув Лемба рівнів атомних електронів та модифікація закону Кулона. Ресумування послідовностей діаграм. Ренормгрупа. Біжна константа зв'язку. Судаковські формфактори. Ефекти реджезації у жорстких процесах.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин					
	денна форма					
	усього	у тому числі				
л		п	лаб.	інд.	с. р.	
1	2	3	4	5	6	7
Розділ 1. Релятивістська квантова механіка та квантова оптика. Основні процеси квантової електродинаміки у деревному наближенні.						
Тема 1. Релятивістська квантова механіка електрона.	45	28			•	17
Тема 2. Фотон. Елементи квантової оптики.	45	28			•	17
Тема 3. Поглинання та випромінювання гамма-променів. Релятивістська теорія.	45	28			•	17
Тема 4. Жорсткі процеси за участі електронів та позитронів. Народження нових частинок.	45	28			•	17
Разом за розділом 1	180	112				68
Розділ 2. Процеси КЕД у вищих наближеннях.						
Тема 4. Правила Фейнмана. Методи квантової теорії поля.	75	28			•	47
Тема 5. Радіаційні поправки.	75	28			•	47
Разом за розділом 2	150	56				94
Усього годин	330	168				162

4. Теми практичних занять

Практичні заняття за дисципліною КЕД не передбачені.

5. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин	Форма контролю
Розділ 1. Релятивістська квантова механіка та квантова оптика. Основні процеси квантової електродинаміки у деревному наближенні.			
1	Релятивістська квантова механіка електрона.	17	Перевірка домашнього завдання, опитування
2	Фотон. Елементи квантової оптики.	17	
3	Поглинання та випромінювання гама-променів. Релятивістська теорія.	17	
4	Жорсткі процеси за участі електронів та позитронів. Народження нових частинок.	17	
	Разом за Розділом 1	68	
Розділ 2. Процеси КЕД у вищих наближеннях.			
4	Процеси КЕД у деревному наближенні.	47	Перевірка домашнього завдання, опитування
5	Радіаційні поправки.	47	
	Разом за Розділом 2	94	
	Разом	162	

6. Індивідуальні завдання

РГР №1 проводиться за Темою 1 «Парадокс Клейна» (чисельне моделювання відбиття хвильового пакету від потенціалу у вигляді «сходинки»).

РГР №2 за Темами 2 та 3 проводиться з чисельного розв'язання оптичних рівнянь Блоха або обчислення спектрів гальмівного випромінювання при високій енергії електрона шляхом чисельного інтегрування за кутами вильоту електронів та фотонів, і підсумовуванням за поляризаціями.

МКР за Розділом 1 проводиться після завершення Тем 2 і складається з 1 теоретичного питання і 1 задачі.

РГР №3 за Темою 5 проводиться для чисельного і аналітичного обчислення інтегралів, що визначають формфактори електрона, та визначення їх асимптотичної поведінки.

МКР по Розділу 2 проводиться після завершення Тем 5 і складається з 1 теоретичного питання і 1 задачі.

7. Методи навчання

При викладанні КЕД використовують словесні, наочні, практичні та дискусійні методи навчання. На лекціях використовують найчастіше словесний, наочний та дискусійний методи.

8. Методи контролю

Навчальним планом передбачені наступні методи контролю:

- Поточний експрес-контроль передбачає перевірку якості роботи студента на заняттях в аудиторії.
- Модульний контроль – це дві модульних контрольних роботи в першому та другому семестрі.
- Захист розрахунково-графічних робіт (дві в першому семестрі та одна в другому).
- Підсумковий семестровий контроль – це іспит у комбінованій формі.

Критерії оцінювання навчальних досягнень

Система рейтингових балів та критерії оцінювання:

1. **Експрес-контроль** (загальний ваговий бал - 20) проводиться з метою перевірки якості засвоєння студентом лекційного матеріалу. Тривалість експрес-контролю 5-10 хвилин. Кожен експрес-контроль включає 2 запитання, за кожен правильну відповідь студент отримує 1 бал. Відсутність студента на занятті або невиконання експрес-контролю оцінюється в 0 балів.

2. **Модульний контроль** (загальний ваговий бал - 20) проводиться у вигляді двох модульних контрольних робіт в першому та другому семестрах тривалістю 2 академічні години кожна. Кожна МКР складається з 4 завдань, які оцінюються по 5 балів.

Критерії оцінювання МКР:

а) Повністю правильно виконане завдання оцінюється в 5 балів; Завдання виконане з несуттєвими помилками оцінюється в 4 бали (незначні помилки в формулах та твердженнях);

б) Часткове виконане завдання оцінюється в 2-3 бали (правильно обрана логіка рішення але наявні грубі помилки);

с) Часткове виконане завдання оцінюється в 1 бал (правильно обрана логіка, зовсім відсутні пояснення);

д) Неправильно виконане або відсутнє завдання оцінюється в 0 балів.

Якщо студент отримав оцінку менше 10 балів за МКР, він має право переписати цю роботу, але лише один раз.

3. **Розрахунково-графічна робота** (загальний ваговий бал – $2 \cdot 10 = 20$ в першому семестрі, загальний ваговий бал – 20 в другому семестрі) задається студентами не менше ніж за 2 тижні до дати її захисту. Захист РГР проходить у вигляді окремої доповіді студента за обраними темами.

4. **Екзаменаційна робота** (ваговий бал - 40). Необхідною умовою допуску студента до екзамену з дисципліни є позитивний рейтинг з усіх форм семестрової атестації (позитивний рейтинг з МКР, РГР та експрес-контролю), але не менше 10 балів.

Білет містить два теоретичних питання і одну задачу.

Критерії оцінювання екзаменаційної роботи:

- Теоретичні питання оцінюються в 15 балів кожне, при неповній або частково помилковій відповіді – 5 балів, при відсутності відповіді – 0 балів.

- Повністю розв'язана задача оцінюється в 10 балів;

- Задача розв'язана з несуттєвими помилками оцінюється в 5 балів (незначні помилки в арифметичних розрахунках);

- Частково розв'язана задача оцінюється в 3 бали (правильно обрана логіка рішення та формули але грубі помилки в розрахунках);

- Частково розв'язана задача оцінюється в 1 бал (правильно обрана логіка рішення, зовсім відсутні розрахунки);

- Нерозв'язана задача оцінюється в 0 балів.

Число балів, які студент отримав на екзамені, є сумою балів, що були отримані за кожне завдання з екзаменаційного білету за наступною.

Кінцева оцінка виставляється за сумою балів поточного та підсумкового контролю в кожному семестрі за шкалою що наведена нижче.

Шкала оцінювання

Тип контролю	I семестр	II семестр
Експрес контроль	20	20
Модульний контроль	20	20
Розрахунково-графічна робота	2*10=20	20
Екзаменаційна робота	40	40
Загалом за семестр	100	100

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка	
	для екзамену	для заліку
90 – 100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
1-49	незадовільно	не зараховано

9. Питання до екзамену

I семестр

1. Показати, що для рівняння Дірака у зовнішньому полі 4-дивергенція 4-вектору струму дорівнює нулю.
2. Записати рівняння Паулі для електрона в зовнішньому електромагнітному полі. Вивести відповідний вираз для струма, що зберігається, з урахуванням спіна електрона.
3. Привести спінову та імпульсну частини гамільтоніану Паулі для електрона з нормальним магнітним моментом до вигляду добутку двох множників. Чи є цей вираз явно калібрувально-інваріантним?
4. В гамільтоніані Дарвіна для електрона в електростатичному полі пояснити фізичний сенс усіх трьох релятивістських поправок до гамільтоніана Шредінгера.
5. Енергія рівнів атома водню з урахуванням релятивістської поправки (тонке розщеплення) дорівнює

$$E_{nj} = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2} \left[1 + \frac{\alpha^2}{n} \left(\frac{1}{j+1/2} - \frac{3}{4n} \right) \right], \quad \alpha = \frac{1}{137},$$

де n – головне квантове число, j – момент імпульсу в одиницях \hbar . На скільки під-рівнів розщеплюється рівень $n=2$? Чому дорівнює відносна величина розщеплення – порівняно з відстанню між рівнями $n=1$ та $n=2$?

6. Показати, що в квазікласичному наближенні (коли стала Планка формально прямує до нуля) розв'язок рівняння Дірака в зовнішньому полі набуває вигляду експоненти, показник якої пропорційний до класичної дії (яка задовольняє рівнянню Гамільтона-Якобі в даному полі).
7. Записати систему рівнянь для надбар'єрного проходження електрона Дірака крізь потенціал у формі сходинок. Пояснити вибір знаку хвильового вектору електрона, що зайшов на сходинку, якщо його енергія за вирахуванням потенціалу сходинок менша від маси електрона зі знаком мінус (парадокс Клейна).
8. Вивести кватроване рівняння Дірака для електрона в зовнішньому електромагнітному полі. Показати, що у випадку стаціонарного однорідного електричного або магнітного поля воно зводиться до квантового рівняння гармонічного осцилятора.
9. Припустимо, що існує однорідне електростатичне поле з напруженістю $\mathcal{E} = 1$ кв/Ангстрем – порядку тої, що існує у атомах важких елементів. Оцінити для такого поля ймовірність

$$\exp\left(-\pi \frac{m^2 c^3}{\hbar |e\mathcal{E}|}\right)$$

тунелювання електрона зі стану з додатньою в стан з від'ємною частотою. $\hbar c = 1.97$ кев* Ангстрем. Маса електрона $m=0.5$ Мев/ c^2 .

10. Чисельно оцінити мінімальну квантовомеханічну невизначеність

$$\Delta r = \sqrt{\frac{\hbar c}{|eH|}}$$

радіусу траєкторії електрона в магнітному полі Землі, напруженість якого $H \sim 0.5$ Гс. Порівняти її з відомими просторовими масштабами. Відношення фундаментальних констант $\hbar c/|e| = 6.6 * 10^{-8}$ Гс * см².

II семестр

1. Для якої частоти фотонів середнє число заповнення для розподілу Планка

$$n = \frac{1}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}$$

дорівнює одиниці при кімнатній температурі. До якого частотного діапазону належить ця частота? Відношення сталих Больцмана та Планка $k/\hbar = 1.3 * 10^{11}$ Гц/К.

Частотні діапазони:

середньохвильовий інфрачервоний 37 – 100 ТГц;

довгохвильовий інфрачервоний 20 – 37 ТГц;

дальній інфрачервоний 300 ГГц – 20 ТГц;

мікрохвильовий 300 МГц – 300 ГГц.

2. Вивести формулу для хвильової функції фотона з умови рівності його енергії $\hbar\omega$ енергії відповідного класичного електромагнітного поля в об'ємі нормування. Скільки можливих спіральних станів має реальних фотон?

3. Довести, що гамільтоніан

$$H = a^+ a,$$

де оператори пониження та підвищення a, a^+ задовольняють співвідношенню комутації

$$[a, a^+] = 1,$$

має послідовність власних станів $|0\rangle, |1\rangle, |2\rangle, \dots$ таких, що $H|n\rangle = n|n\rangle$.

4. Записати кінетичні рівняння для двоохривневого атома в полі випромінювання в термінах коефіцієнтів Ейнштейна. Отримати рівноважний розв'язок рівнянь.

5. Записати співвідношення між коефіцієнтами Ейнштейна для ймовірностей радіаційних процесів. Вивести величину насичення для просторово-спектральної густини енергії електромагнітного поля.

6. Записати гамільтоніан взаємодії двоохривневого атома з класичною монохроматичною електромагнітною хвилею. Перейти до наближення «хвилі, що обертається».

7. Виразити нерелятивістський струм переходу між атомними станами з визначеними енергіями через дипольний момент та частоту переходу.

8. Сформулювати правила відбору для дипольного випромінювання атома та пояснити фізичні причини, з яких вони витікають.

9. До яких величин прямують середні заселеності рівнів двоохривневого атома в полі випромінювання коли час необмежено зростає? (а) для широкополосного світла (рівняння Ейнштейна). (б) для монохроматичної хвилі, з урахуванням природної ширини атомної лінії. Як можна з результату для випадку (б) отримати результат для випадку (а)?

10. Вивести формулу

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_{-T/2}^{T/2} dt e^{i\omega t} \right|^2 = 2\pi \delta(\omega),$$

важливу в квантовій теорії переходів під дією періодичного збурення.

10. Рекомендована література

Основна література

1. V. B. Berestetskii, E. M. Lifshitz, L. P. Pitaevskii, Quantum electrodynamics, 2nd ed. Oxford, Elsevier. 2012.
2. N. N. Bogoliubov, D. V. Shirkov. Quantum fields. NY, Benjamin Cummings, 1983.
3. J. D. Bjorken, S. Drell, Relativistic quantum mechanics, Dover, New York, 2012.
4. J. D. Bjorken, S. Drell, Relativistic quantum fields, Dover, New York, 2012.
5. R.P. Feynman. The theory of fundamental processes. Benjamin, NY, 1961.
6. S. Weinberg. The Quantum Theory of Fields. V. 1. Foundations. Cambridge, Univ. Press, 1999.
7. C. Itzykson, J.-B. Zuber, Quantum field theory, Dover, New York, 1980.
8. M. E. Peskin, D. V. Schroeder, An introduction to quantum field theory, Westview Press, Boulder, 1995.
9. W. Greiner. Relativistic quantum mechanics. Wave equations. Springer, 2000.
10. W. Greiner, B. Mueller, J. Rafelski. Quantum electrodynamics of strong fields. Springer, 1985.
11. W. Greiner, J. Reinhardt. Quantum electrodynamics. Springer, 2003.
12. T. Lancaster, S. J. Blundell. Quantum field theory for the gifted amateur. Oxford, Univ. Press, 2014.
13. R. Loudon. The Quantum Theory of Light. Oxford, Univ. Press, 2000.

Допоміжна література

1. J. Kessler. Polarized Electrons. Springer, 1985.
2. V. G. Bagrov, D. Gitman. The Dirac equation and its solutions. Berlin, De Gruyter, 2010.
3. H. Cheng, T. T. Wu. Expanding protons: Scattering at high energies. MIT Press, 1987.
4. V. A. Smirnov. Analytic tools for Feynman integrals. Berlin, Springer, 2012.

Інформаційні ресурси

1. Веб-ресурси кафедри, мережа інтернет.
2. Бібліотека ХНУ імені В.Н. Каразіна.
3. Kumericki K. Feynman Diagrams for Beginners, arXiv:1602.04182:
<https://arxiv.org/abs/1602.04182>
4. Tong D. Lectures on Quantum Field Theory:
<https://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/qft.html>