

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Заступник директора з наукової роботи

В. В. Давидовський
« 5 » 2023 р.



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛІНИ
КВАНТОВА ХРОМОДИНАМІКА ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ

Освітньо-кваліфікаційний рівень: *доктор філософії*

Галузь знань: *10 - Природничі науки*

Спеціальність : *104 – Фізика та астрономія*

Освітня програма: *Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу.*

Статус курсу: *фаховий (вибірковий)*

Київ 2023

Квантова хромодинаміка та її застосування: Навчально-методичний комплекс дисципліни. – Київ: ІЯД НАНУ, 2023 . - 24 с.

Укладач: Давидовський В.В., доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

Ухвалено на засіданні Вченої ради Інституту ядерних досліджень НАН України

протокол № 6 від “ 5 ” липня 2023 р.

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ
КВАНТОВА ХРОМОДИНАМІКА ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ

Освітньо-кваліфікаційний рівень: *доктор філософії*

Галузь знань: *10 - Природничі науки*

Спеціальність : *104 – Фізика та астрономія*

Освітня програма: *Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу.*

Статус курсу: *фаховий (вибірковий)*

I. ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

Програма з курсу «**Квантова хромодинаміка та її застосування**» відповідає навчальному плану підготовки аспірантів за спеціальністю **104 – Фізика та астрономія** (галузь знань: **10 - Природничі науки**), що здобувають освітньо-кваліфікаційний рівень доктора філософії на відповідній освітній програмі ІЯД НАН України.

Курс «**Квантова хромодинаміка та її застосування**» є складовою вибіркової навчальної дисципліни циклу професійної та практичної підготовки докторів філософії за спеціальністю **104 – Фізика та астрономія**, напрям підготовки: Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу.

Він дає можливість ознайомити аспірантів з понятійним апаратом квантової хромодинаміки, основними її рівняннями, та її застосуванням до опису типових явищ за участю елементарних частинок та розрахунку вимірюваних величин.

Курс «**Квантова хромодинаміка та її застосування**» викладається на 2 або 3 році навчання в осінньому або весняному семестрі та розрахований на 12 навчальних тижнів (по 2 ауд. год. щотижня; перший тиждень занять – лекційний). Вивчення курсу передбачає аудиторну (лекції – 16 год.; практичні заняття – 8 год.; консультація – 2 год.) і самостійну роботу (34 год.). Загальна кількість годин, відведених на опанування дисципліни – 60 (2 кредити ЄКТС).

Мета дисципліни – ознайомлення аспірантів з понятійним апаратом квантової хромодинаміки, основними її рівняннями, та її застосуванням до опису типових явищ за участю елементарних частинок та розрахунку вимірюваних величин.

Завдання – сформулювати у аспірантів базові знання про основи квантової хромодинаміки, її математичний апарат, діаграмну техніку, методи усунення розбіжностей; навчити розраховувати в рамках теорії збурень амплітуди та відповідні перерізи різноманітних процесів, що відбуваються при високих енергіях.

Структура курсу

У результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен:

Знати: основні положення і властивості квантової хромодинаміки як калібрувальної теорії квантових полів; принципи будови адронів та їх взаємодій при високих енергіях; поняття асимптотичної свободи, конфайнмента та їхніх проявів в жорстких адронних процесах; діаграмну техніку для теорії збурень в квантовій хромодинаміці; рівняння еволюції для партонних розподілів; основні положення теорії багатократних розсіянь частинок на ядрах при високих енергіях.

Вміти: володіти фейнманівською діаграмною технікою теорії збурень, а також методами усунення розбіжностей та методами обрахунку радіаційних

поправок; вміти обраховувати амплітуди та перерізи процесів, а також ймовірності розпадів в рамках пертурбативної квантової хромодинаміки; вміти обраховувати перерізи глибоко-непружних процесів за участю адронів; вміти записувати амплітуду взаємодії адронів з ядрами при високих енергіях.

Місце дисципліни (в структурно-логічній схемі підготовки фахівців відповідного напрямку). Вибіркова навчальна дисципліна «**Квантова хромодинаміка та її застосування**» є складовою циклу професійної підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «доктор філософії». Система знань, отримана при вивченні даного курсу, є необхідною для вільного ознайомлення з науковою літературою та при виконанні відповідних кваліфікаційних робіт.

Зв'язок з іншими дисциплінами. При вивченні дисципліни «**Квантова хромодинаміка та її застосування**» використовуються знання та вміння, набуті аспірантами під час вивчення курсів загальної фізики, електродинаміки, атомної фізики, статистичної фізики, квантової механіки, теорії ядерних реакцій.

II. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ДИСЦИПЛІНИ

№	Назва теми	Кількість годин				
		Всього	Лекцій	Практичних занять	Самостійна та індиві- дуальна робота	Консуль- тації
	Розділ (змістовний модуль) 1. Квантова хромодинаміка	-	-	-	-	-
	Тема 1. Вступ та релятивістичні хвильові рівняння	7	2	1	4	-
	Тема 2. Квантова електродинаміка	7	2	1	4	-
	Тема 3. Перерізи та швидкості розпаду	7	2	1	4	-
	Тема 4. Найпростіші процеси у КЕД	10	2	2	6	-
	Тема 5. КХД як квантова теорія поля	6	2	-	4	-
	Тема 6. Найпростіші процеси у КХД	7	2	1	4	-
	Тема 7. Перенормування в КЕД та КХД	7	2	1	4	-
	Тема 8. КХД і експерименти при високих енергіях	7	2	1	4	-
	Всього по розділу 1	58	16	8	34	-
	Іспит	-	-	-	-	2
	Всього	60	16	8	34	2

ЗМІСТ КУРСУ

Розділ (змістовний модуль) 1. Квантова хромодинаміка

ТЕМА 1. Вступ та релятивістичні хвильові рівняння.

Опис дисципліни. Мета і завдання курсу.

Огляд теорії відносності. Рівняння Клейна-Гордона. Рівняння Дірака. Розв'язки рівняння Дірака. Ортогональність та повнота. Спін. Лоренцевська коваріантність. Парність, зарядове спряження та обернення часу. Білінійні коваріанти. Безмасові (ультра-релятивістичні) ферміони.

ТЕМА 2. Квантова електродинаміка.

Класичний електромагнетизм. Рівняння Дірака в електромагнітному полі. Гіромагнітне відношення для електрона. Взаємодії у теорії збурень.

ТЕМА 3. Перерізи та швидкості розпаду.

Внутрішні ферміонні та зовнішні фотонні лінії. Правила Фейнмана для КЕД. Перерізи та швидкості розпаду. Змінні Мандельстама.

ТЕМА 4. Найпростіші процеси у КЕД.

Електрон-мюонне розсіяння. Електрон-електронне розсіяння. Електрон-позитронна анігіляція. Комптонівське розсіяння.

ТЕМА 5. КХД як квантова теорія поля.

Основи КХД. Поля Янга-Міллса. Лагранжіан КХД. Правила Фейнмана для КХД.

ТЕМА 6. Найпростіші процеси у КХД.

Кварк-кваркове та кварк-антикваркове розсіяння. Обчислення кольорових множників. Група $SU(3)_c$. Характер взаємодії між кварками та між кварком та антикварком на малих відстанях.

ТЕМА 7. Перенормування в КЕД та КХД.

Ультрафіолетові сингулярності. Інфрачервоні сингулярності. Перенормування. Регуляризація.

ТЕМА 8. КХД і експерименти при високих енергіях.

КХД у електрон-електронних зіткненнях при високих енергіях. КХД і структура нуклона при високих енергіях. Глибоко-непружне розсіяння на нуклонах та ядрах.

Література

Основна

1. J. D. Bjorken and S. D. Drell «Relativistic Quantum Mechanics». – McGraw-Hill, 1964; Дж. Д. Бьеркен, С. Д. Дрелл «Релятивистская квантовая теория» в 2-х томах. – М.: Наука, 1978. – 408 с.
2. F. Halzen and A. D. Martin «Quarks and Leptons». – Wiley, 1984; Ф. Хелзен, А. Мартин. «Кварки и Лептоны (Введение в физику частиц)». – М.: Мир, 1987. – 456 с.
3. F. Mandl and G. Shaw «Quantum Field Theory». – Wiley, 1984.
4. I. J. R. Aitchison and A. J. G. Hey «Gauge theories in particle physics», 4th edition. – CRC Press, 2013. – 960 p.
5. M. E. Peskin and D. V. Schroeder «An Introduction to Quantum Field Theory». – Addison Wesley, 1995.
6. B. Hateld «Quantum Field Theory of Point Particles and Strings». – Addison Wesley, 1992.
7. L. H. Ryder «Quantum Field Theory». – Cambridge University Press, 1985; Л. Райдер «Квантовая теория поля». – Платон, 1998.– 509 с.
8. С. Itzykson and J.-B. Zuber «Quantum Field Theory». – McGraw-Hill, 1987; К. Ициксон, Ж.-Б. Зюбер. «Квантовая теория поля». – М.:Мир, 1984. – 448 с. – Т.1; 400 с. – Т.2.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. «Теоретическая физика»:Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т. IV/В. Б. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский «Квантовая электродинамика». – 4-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 720 с.
- 10.Ф. Индурайн «Квантовая хромодинамика». – М.:Мир, 1986. – 288 с.

Додаткова

1. А. И. Ахиезер, В. Б. Берестецкий «Квантовая электродинамика». – Изд. 4, перераб. – М., Наука, 1981. — 428 с.
2. R. P. Feynman «Photon-Hadron Interactions». – W.A. Benjamin, NY, 1972.
3. V. L. Ioffe, V. A. Khoze and L. N. Lipatov «Hard Processes». – North Holland, 1984.
4. T. Muta «Foundations of QCD». – World Scientific, 1987.
5. V. Barger and R.J.N. Phillips «Collider Physics». – Addison Wesley, 1987.
6. R. Field «Applications of Perturbative QCD». – Addison Wesley, 1989.
7. Yu. L. Dokshitzer, V. A. Khoze, A. H. Mueller and S. I. Troyan, «Basics of Perturbative QCD». – Editions Frontieres, 1991.
8. R. K. Ellis, W. J. Stirling and B. R. Webber «QCD and Collider Physics». – Cambridge University Press, 1996.
9. G. Altarelli «Partons in quantum chromodynamics» // Phys. Rep. – 1982. – Vol. 81. – P. 1-129.
- 10.А.Н. Mueller «Perturbative QCD at high energies» // Phys. Rep. – 1981. – Vol. 73. – P. 237-368.
11. Yu.L. Dokshitzer, D.I. Dyakonov and S.I. Trojan «Hard processes in quantum chromodynamics» // Phys. Rep. – 1980. – Vol. 58. – P. 269-395.

12. A. Bassetto, M. Ciafaloni and G. Marchesini «Jet structure and infrared sensitive quantities in perturbative QCD» // Phys. Rep. – 1983. Vol. 100. – P. 201-272.
13. M.L. Mangano and S.J. Parke «Multi-parton amplitudes in gauge theories» // Phys. Rep. – 1991. – Vol. 200. – 301-367.

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

КВАНТОВА ХРОМОДИНАМІКА ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ

Галузь знань, спеціальність, освітня програма, освітньо- кваліфікаційний рівень	Організаційно-методична характеристика навчальної дисципліни	
	Академічна характеристика	Структура
10 – Природничі науки 104 – Фізика та астрономія Освітня програма – Фізика (Теоретична фізика) Доктор філософії	Рік навчання: 2 або 3 Семестр: 1 або 2 * Кількість годин на тиждень: 2 Статус курсу: <i>фаховий (вибірковий)</i> Кількість ECTS кредитів: 2 * дисципліна може викладатися на 2 або 3 році навчання в осінньому або весняному семестрі	Кількість годин: Загальна: 60 Лекції: 16 Практичні заняття: 8 Консультація 2 Самостійна робота: 34 Вид підсумкового контролю: іспит

Робоча програма складена для докторів філософії – Освітня програма Фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і ядерного синтезу.

Укладач: Давидовський В.В., доктор фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник

III. ПЛАН ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ

МЕТА ТА МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ЛЕКЦІЙ

Проведення лекційних занять націлено на донесення загальних знань та побудову теоретичних методів по дисципліні, на сприяння розвитку у аспірантів розумової діяльності і розширення світогляду.

Розділ (змістовний модуль) 1. Квантова хромодинаміка

Заняття 1. Тема 1. Вступ та релятивістичні хвильові рівняння.

План.

1. Мета, завдання та структура курсу.
2. Огляд теорії відносності.
3. Рівняння Клейна-Гордона.
4. Рівняння Дірака. Розв'язки рівняння Дірака.
5. Ортогональність та повнота.
6. Спін.
7. Лоренцевська коваріантність
8. Парність, зарядове спряження та обернення часу
9. Білінійні коваріанти
10. Безмасові (ультра-релятивістичні) ферміони

Література

1. [1, с. 9-11]
2. [2, с. 38-43]
3. [4, с. 55-61]

Заняття 2. Тема 2. Квантова електродинаміка

План.

1. Класичний електромагнетизм.
2. Рівняння Дірака в електромагнітному полі.
3. Гіромагнітне відношення для електрона.
4. Взаємодії у теорії збурень.

Література

1. [3, с. 83-87, 94-99]
2. [7, с. 43-59]
3. [Д2, с. 497-501]

Заняття 3. Тема 3. Перерізи та швидкості розпаду

План.

1. Внутрішні ферміонні та зовнішні фотонні лінії.
2. Правила Фейнмана для КЕД.

3. Перерізи та швидкості розпаду.
4. Змінні Мандельстама.

Література

1. [3, с. 83-87, 94-99]
2. [7, с. 43-59]
3. [Д2, с. 497-501]

Заняття 4. Тема 4. Найпростіші процеси у КЕД

План.

1. Електрон-мюонне розсіяння.
2. Електрон-електронне розсіяння.
3. Електрон-позитронна анігіляція.
4. Комптонівське розсіяння.

Література

1. [1, с. 46-54]
2. [4, с. 73-86]

Заняття 5. Тема 5. КХД як квантова теорія поля.

План.

1. Основи КХД.
2. Поля Янга-Міллса.
3. Лагранжіан КХД.
4. Правила Фейнмана для КХД.

Література

1. [1, с. 113-134]
2. [2, с. 58-66]

Заняття 6. Тема 6. Найпростіші процеси у КХД

План.

1. Кварк-кваркове та кварк-антикваркове розсіяння.
2. Обчислення кольорових множників.
3. Група $SU(3)_c$.
4. Характер взаємодії між кварками та між кварком та антикварком на малих відстанях.

Література

1. [1, с. 46-54]
2. [4, с. 73-86]

Заняття 7. Тема 7. Перенормування в КЕД та КХД

План.

1. Ультрафіолетові сингулярності.
2. Інфрачервоні сингулярності.
3. Перенормування.
4. Регуляризація.

Література

1. [1, с. 113-134]
2. [2, с. 58-66]

Заняття 8. Тема 8. КХД і експерименти при високих енергіях

План.

1. КХД у електрон-електронних зіткненнях при високих енергіях.
2. КХД і структура нуклона при високих енергіях.
3. Глибоко-непружне розсіяння на нуклонах та ядрах.

Література

1. [1, с. 160-171]
2. [ДЗ, с. 18-24]
3. [7, с. 101-107]
4. [ДЗ, с. 30-45]

IV. ПЛАН ТА МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

МЕТА ТА ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Практичні заняття є сполучною ланкою між лекційними заняттями та самостійною роботою і мають на меті поглиблене засвоєння теоретичних понять, термінів і моделей з дисципліни та набуття практичних навиків розв'язання задач.

В процесі практичних занять з'ясовується ступінь засвоєння понятійно-термінологічного апарату та основних положень предмету, вміння розкривати конкретну тему, аналізувати і узагальнювати ключові питання курсу, робити числові оцінки, розв'язувати задачі.

Одним з важливих завдань проведення занять є отримання аспірантами навиків публічних виступів і дискусій.

ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Передбачаються такі види аудиторної роботи:

- розгляд і обговорення теоретичного матеріалу за переліком контрольних питань по відповідних темах лекційних занять та питань для самостійного опрацювання;

- проведення семінарів з публічними виступами та доповідями по рефератах, підготовлених студентами самостійно за рекомендованою тематикою;
- розв'язання задач аналітичного характеру;
- розв'язання задач обчислювального характеру;
- проведення колоквіумів по засвоєнню теоретичного матеріалу;
- виконання контрольних робіт за індивідуальним завданням;
- перевірка практичних завдань, виконаних студентами під час самостійної роботи;
- проведення консультацій з дисципліни;

Практичне заняття 1. Тема 1. Вступ та релятивістичні хвильові рівняння.

Контрольні питання:

1. Метрика простору Мінковського. Перетворення Лоренца.
2. Рівняння Клейна-Гордона. Розв'язки рівняння Клейна-Гордона.
3. Рівняння Дірака. Розв'язки рівняння Дірака.
4. Ортогональність та повнота.
5. Спін.
6. Лоренцевська коваріантність
7. Парність, зарядове спряження та обернення часу
8. Білінійні коваріанти
9. Безмасові (ультра-релятивістичні) ферміони. Спіральність частинки.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Виникнення квантової хромодинаміки.
2. Розсіяння електрона (позитрона) в кулоновому полі.

Література:

Основна: [3,6]

Додаткова: [1,2]

Практичне заняття 2. Тема 2. Квантова електродинаміка.

Контрольні питання:

1. Класичний електромагнетизм.
2. Рівняння Дірака в електромагнітному полі.
3. Гіромагнітне відношення для електрона.
4. Взаємодії у теорії збурень.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Метод функцій Гріна та обчислення пропагатора електрона.
2. Пропагатори масивних векторних частинок (W^\pm , Z^0).

Література:

Основна: [5,7]

Практичне заняття 3. Тема 3. Перерізи та швидкості розпаду.

Контрольні питання:

1. Внутрішні ферміонні та зовнішні фотонні лінії.
2. Правила Фейнмана для КЕД.
3. Перерізи та швидкості розпаду.
4. Змінні Мандельстама.

Література:

Основна: [5,7]

Практичне заняття 4. Тема 4. Найпростіші процеси у КЕД.

Контрольні питання:

1. Електрон-мюонне розсіяння.
2. Електрон-електронне розсіяння.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Поправки вищого порядку.

Література:

Основна: [3,6]

Додаткова: [3]

Практичне заняття 5. Тема 4. Найпростіші процеси у КЕД.

Контрольні питання:

1. Електрон-позитронна анігіляція.
2. Комптонівське розсіяння.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Лембівський зсув.

Література:

Основна: [3,6]

Додаткова: [3]

Практичне заняття 6. Тема 6. Найпростіші процеси у КХД.

Контрольні питання:

1. Правила Фейнмана для КХД.
2. Кварк-кваркове та кварк-антикваркове розсіяння
3. Деякі результати алгебри кольору. Обчислення кольорових множників.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Додаткові петлі та аномальний магнітний момент.

Література:

Основна: [3,6]

Додаткова: [3]

Практичне заняття 7. Тема 7. Перенормування в КЕД та КХД.

Контрольні питання:

1. Ультрафіолетові сингулярності.
2. Інфрачервоні сингулярності.
3. Перенормування.
4. Регуляризація.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Порівняння біжучих констант зв'язку в КЕД та КХД.
2. Схема мінімального віднімання.

Література:

Основна: [1,4]

Додаткова: [2]

Практичне заняття 8. Тема 8. КХД і експерименти при високих енергіях.

Контрольні питання:

1. КХД у електрон-електронних зіткненнях при високих енергіях.
2. КХД і структура нуклона при високих енергіях.
3. Глибоко-непружне розсіяння на нуклонах та ядрах.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Рівняння Алтареллі-Парізі.
2. Загальні властивості структурних функцій у КХД.
3. Маса адронів.

Література:

Основна: [1,2,7]

Додаткова: [1]

V. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

МЕТА І ЗАВДАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Головна мета проведення самостійної роботи полягає у необхідності більш широкого огляду тематики курсу з використанням матеріалів підручників, періодичних видань, наукових праць, монографій з окремих питань дисципліни.

Важливою складовою самостійної роботи студентів є виконання індивідуальних робіт.

Виконання індивідуальних робіт має на меті:

- закріплення знань теоретичного курсу;
- набуття навичок опрацювання наукової літератури (монографій, наукових статей);
- напрацювання вмінь та навичок розв'язування фізичних задач;
- навчання ефективному використанню фізико-математичних довідників, енциклопедій (включно з on-line інформацією) і т. ін.

ЗМІСТ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

№ теми	Завдання	Література	Форма контролю
1	Виникнення квантової хромодинаміки. Розсіяння електрона (позитрона) в кулоновому полі.	3-5	Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .

2	<p>Метод функцій Гріна та обчислення пропагатора електрона.</p> <p>Пропагатори масивних векторних частинок (W^\pm, Z^0).</p>	3-5	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
4	<p>Поправки вищого порядку.</p> <p>Лембівський зсув.</p> <p>Додаткові петлі та аномальний магнітний момент.</p>	1-3; Д1	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
7	<p>Порівняння біжучих констант зв'язку в КЕД та КХД.</p> <p>Схема мінімального віднімання.</p>	1,2; Д2,Д3	<p>Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

8	Рівняння Алтареллі-Парізі. Загальні властивості структурних функцій у КХД. Маси адронів.	1,2; Д2,Д3	Опитування, перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .
---	--	---------------	---

ОБСЯГ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

№	Назва теми	Кількість годин
1.	Підготовка до поточних практичних занять	5
2.	Виконання поточних практичних завдань	10
3.	Опанування матеріалів лекцій та додаткових питань із застосування основної та додаткової літератури	15
4.	Індивідуальні консультації з викладачем	4
	ВСЬОГО	34

Завдання (задачі, вправи) для самостійної роботи

1. Вивести $\Lambda^T g \Lambda = g \Rightarrow g \Lambda^T g = \Lambda^{-1}$, виходячи з інваріантності скалярного добутку.
2. Використовуючи, що в системі СІ E має розмірність $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$, c має розмірність $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ та має розмірність $\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, якою буде маса 1 ГеВ у кг та переріз 1 ГеВ⁻² у мікробарнах?
3. Вивести рівняння неперервності $\partial_\mu J^\mu = 0$.
4. Розглянемо хвилю, яка падає на потенціальну сходинку. Показати, що, якщо висота сходинки $V > m + E_p$, де $E_p = \sqrt{\vec{p}^2 + m^2}$, то не можна уникнути використання від'ємного квадратного кореня $\vec{k} = -\sqrt{(E_p - V)^2 + m^2}$, що призводить до від'ємних токів та густин.
5. Доведіть, що будь-які матриці $\vec{\alpha}$ та β , які задовольняють стандартним антикомутаційним співвідношенням, є безслідними із власними значеннями ± 1 . Далі, доведіть, що вони повинні мати парну розмірність.

6. Довести, що, якщо оператор певної величини комутує з Гамільтоніаном системи, то ця величина зберігається, тобто не залежить від часу.
7. Перевірити, що рівняння $\sigma^{\mu\nu} = \frac{i}{2}[\gamma^\mu, \gamma^\nu]$ справедливе.
8. Виведіть трансформаційні перетворення білінійних форм при С, Р, Т та СРТ перетвореннях.
9. Перевірити, що \vec{E} і \vec{B} є інваріантами відносно калібрувального перетворення.
10. Вивести правила Фейнмана для розсіяння двох частинок, що описуються рівнянням Клейна-Гордона, у ведучому порядку за e .
11. Довести основні співвідношення з гама-матрицями та формули обрахунку слідів від комбінацій гама-матриць.

Теми для рефератів та доповідей

1. Виникнення квантової хромодинаміки.
2. Розсіяння електрона (позитрона) в кулоновому полі.
3. Метод функцій Гріна та обчислення пропагатора електрона.
4. Пропагатори масивних векторних частинок (W^\pm, Z^0).
5. Поправки вищого порядку.
6. Лембівський зсув.
7. Додаткові петлі та аномальний магнітний момент.
8. Порівняння біжучих констант зв'язку в КЕД та КХД.
9. Схема мінімального віднімання.
10. Калібрувальна інваріантність.
11. Ренормалізаційна група.
12. Рівняння Алтареллі-Парізі.
13. Загальні властивості структурних функцій у КХД.
14. Маса адронів.

VI. ФОРМИ ТА МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

МЕТА І ФОРМИ ПОТОЧНОГО КОНТРОЛЮ

Мета поточного контролю – оцінити ступінь засвоєння теоретичного і практичного матеріалу та рівень знань студентів з відповідних розділів дисципліни.

Рівень поточних знань оцінюється в балах по кожному із передбачених видів практичних завдань окремо:

- володіння теоретичним матеріалом;
- розуміння сутності фізичних явищ;
- вміння робити оцінки за порядком величин;
- розв’язання задач аналітичного характеру;
- розв’язання задач обчислювального характеру.

Згідно до методики рейтингової оцінки поточний рейтинг аспіранта розраховується як сума балів за всіма видами практичних завдань, колоквиуму та контрольної роботи (плюс показники відвідування лекційних та практичних занять) і нараховується протягом семестру.

Аспіранти, поточні знання яких оцінені на “незадовільно” (0-29 балів), вважаються не атестованими і до іспиту з дисципліни не допускаються. Аспіранти, які за роботу в семестрі та на іспиті набрали 30-59 балів мають право на перескладання.

МЕТА І ФОРМИ ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ

Підсумковий контроль знань здійснюється наприкінці семестру шляхом складання іспиту.

До іспиту допускаються аспіранти, які мають необхідний рівень поточних знань.

Іспит проводиться в змішаній формі, по завданнях які складені на основі програми курсу та мають однаковий рівень складності. На підготовку відводиться 2 академічні години. Під час проведення іспиту дозволяється користуватися конспектом.

ПИТАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ІСПИТУ

1. Основи спеціальної теорії відносності.
2. Рівняння Клейна-Гордона.
3. Рівняння Дірака. Розв’язки рівняння Дірака.
4. Ортогональність та повнота.
5. Спін.
6. Лоренцевська коваріантність

7. Парність, зарядове спряження та обернення часу
8. Білінійні коваріанти
9. Безмасові (ультра-релятивістичні) ферміони
10. Класичний електромагнетизм.
11. Рівняння Дірака в електромагнітному полі.
12. Гіромагнітне відношення для електрона.
13. Взаємодії у теорії збурень.
14. Внутрішні ферміонні та зовнішні фотонні лінії.
15. Правила Фейнмана для КЕД.
16. Перерізи та швидкості розпаду.
17. Змінні Мандельстама.
18. Електрон-мюонне розсіяння.
19. Електрон-електронне розсіяння.
20. Електрон-позитронна анігіляція.
21. Комптонівське розсіяння.
22. Процеси в КХД.
23. Правила Фейнмана для КХД.
24. Деякі результати алгебри кольору.
25. Ультрафіолетові сингулярності.
26. Інфрачервоні сингулярності.
27. Перенормування.
28. Регуляризація.
29. Квантування поля Дірака.
30. Квантування електромагнітного поля.
31. КХД у електрон-електронних зіткненнях при високих енергіях.
32. КХД і структура нуклона при високих енергіях.
33. Глибоко-непружне розсіяння на нуклонах та ядрах.

VII. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ І ВМІНЬ СТУДЕНТІВ, УМОВИ ВИЗНАЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО РЕЙТИНГУ

Рівень поточних знань студентів оцінюється відповідно до методики рейтингової оцінки. Сутність методики полягає у визначенні поточного рейтингу студента, що розраховується як сума балів за всіма видами практичних завдань та результатами самостійної роботи і наращується протягом семестру.

<i>Вид роботи</i>	<i>Обсяг за семестр</i>	<i>Максимальна кількість балів за виконану роботу</i>
<i>Теоретичне питання (просте)</i>	<i>4</i>	<i>Кожна правильна і змістовна відповідь - 1 бал. Всього за семестр – 4 бали.</i>
<i>Теоретичне питання (ускладнене)</i>	<i>4</i>	<i>Кожна правильна і змістовна відповідь - 2 бали. Всього за семестр – 8 балів</i>
<i>Розв'язування задач</i>	<i>2</i>	<i>Кожне правильне розв'язання – 5 балів. Всього за семестр – 10 балів</i>
<i>Проведення колоквиуму та контрольної роботи</i>	<i>1</i>	<i>Кожне правильне розв'язання завдання – 5 балів. Всього за колоквиум та контрольну роботу – 10 балів</i>
<i>Відвідування лекцій</i>	<i>16</i>	<i>Кожна відвідана лекція – 1 бал. Всього за семестр – 16 балів</i>
<i>Відвідування семінарів</i>	<i>14</i>	<i>Кожний відвіданий семінар – 1 бал. Всього за семестр – 14 балів</i>
<i>Сукупний рейтинг</i>	<i>-</i>	<i>60 балів</i>

КРИТЕРІЇ СКЛАДАННЯ ІСПИТУ (ЗАЛІКУ)

Кожне завдання для проведення іспиту (заліку) має бути однакової складності. Зміст питань та завдань має бути розрахований на письмову підготовку аспіранта протягом двох академічних годин.

Максимальна кількість балів на проведення підсумкового контролю – 40.
Критерії оцінки підсумкових знань при складанні іспиту наведені в таблиці .

Критерії складання іспиту (заліку)

<i>Характеристика відповіді по варіанту</i>	<i>Максимальна кількість балів</i>
<i>Зміст 2-х теоретичних питань розкрито повністю і в розгорнутому вигляді</i>	<i>30</i>
<i>Вірні відповіді на тести /додаткові питання чи розв'язок задач</i>	<i>10</i>
<i>ВСЬОГО</i>	<i>40 балів</i>

За результатами складання іспиту (заліку) якість підсумкових знань аспіранта оцінюється за рейтинговою системою та трансформується в національну шкалу та шкалу ECTS

Таблиця

Порядок перерахунку рейтингових показників нормованої 100-бальної університетської шкали оцінювання в національну 4-бальну шкалу та шкалу ECTS.

За шкалою університету	За національною шкалою		За шкалою ECTS
	Іспит	Залік	
91 – 100	5 (відмінно)	Зараховано	A (відмінно)
81 – 90	4 (добре)		B (дуже добре)
71 – 80			C (добре)
66 – 70	3 (задовільно)		D (задовільно)
60 – 65			E (достатньо)
30 – 59	2 (незадовільно)	Не зараховано	FX (незадовільно – з можливістю повторного складання)
1 – 29			F (незадовільно – з обов'язковим повторним курсом)