

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор

Микола ШУЛЬГА

« 30 »

2022 р.



РОБОЧА ПРОГРАМА

навчальної дисципліни

Методи квантової теорії поля у фізиці частинок

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

вид дисципліни

обов'язкова професійна підготовка

Інститут

Інститут теоретичної фізики ННЦ
«Харківський фізико-технічний інститут»

2022 / 20223 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження
Науково-технічною радою ННЦ ХФТІ

Від "29" 11 2022 року, протокол № 6

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

д.ф.-м.н., завідувач відділу, Олександр Корчин

Програму схвалено на засіданні Вченої ради Інституту теоретичної
фізики ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»

від "19" 09 2022 року, протокол № 4

т.в.о. директора Інституту теоретичної фізики ННЦ «Харківський
фізико-технічний інститут»

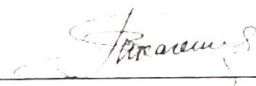

(підпис)

Леонід ДАВИДОВ
(прізвище та ініціали)

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

назва освітньої програми

Гарант освітньо-професійної програми «Фізика та астрономія»


(підпис)

Віктор ТКАЧЕНКО
(прізвище та ініціали)

Вступ

Дисципліна «Методи квантової теорії поля у фізиці частинок» є частиною професійної підготовки аспірантів за вибором ННЦ ХФТІ за напрямом 10 Природничі науки, за спеціальністю – 104 фізика і астрономія, яка викладається протягом другого року навчання.

1. ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Метою викладання навчальної дисципліни є фахова підготовка аспірантів в сфері квантової теорії поля і фізики елементарних частинок. Предметом вивчення дисципліни є методи квантової теорії поля, закономірності взаємодії елементарних частинок, їх властивості та основні фізичні процеси за участю частинок.

1.1. Основними завданнями вивчення дисципліни «Методи квантової теорії поля у фізиці частинок» є

а) загальні позиції:

здобуття глибинних знань із спеціальності, за якою аспірант проводить дослідження;

оволодіння загальнонауковими (філософськими) компетенціями спрямованими на формування системного наукового світогляду, професійної етики та загального культурного кругозору;

набуття універсальних навичок дослідника необхідних для успішної наукової, науково-організаційної і педагогічної діяльності, комунікації з науковою спільнотою, урядовими і громадськими організаціями;

оволодіння мовними компетенціями, достатніми 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:

полягають в тому, щоб допомогти аспірантам засвоїти поширені та поглиблені знання квантової теорії поля, елементарних частинок та їх властивостей, розуміти механізми їх взаємодії та симетрій;

засвоїти теоретичні методи та здобути практичні навички обчислення ймовірностей деяких важливих фізичних процесів; сформувати знання про сучасну теорію елементарних частинок та їх взаємодії – Стандартну модель;

зацікавити аспірантів самостійно працювати з літературою в області фізики елементарних частинок.

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.

1.2.2. Формування наступних загальних компетентностей

ЗК01. Здатність генерувати нові ідеї (креативність).

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 фізики та/або астрономії, інтегрувати знання з різних галузей, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень.

СК02. Здатність відстежувати тенденції розвитку фізики та/або астрономії, їх прикладних застосувань, критично переосмислювати наявні знання та методи фундаментальних та прикладних наукових досліджень.

СК06. Здатність застосовувати сучасні методи, методики, технології, інструменти та обладнання для проведення прикладних та фундаментальних наукових досліджень у галузі фізики та/або астрономії.

СК12. Компетентність у сфері методів квантової теорії поля у фізиці частинок.

1.3. Кількість кредитів – 4.

1.4. Загальна кількість годин – 120.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни:

Опис навчальної дисципліни «Методи квантової теорії поля у фізиці частинок»

Галузь знань, напрям підготовки, спеціальність, освітньо-кваліфікаційний рівень	
Галузь знань	10 – Природничі науки
напрямок підготовки	
спеціальність	104 – фізика та астрономія
освітньо-кваліфікаційний рівень	Доктор філософії
Мова навчання	Українська
Характеристика навчальної дисципліни	
Вид	Вибір ННЦ ХФТІ
Загальна кількість годин	120
Кількість кредитів ECTS	4
Кількість змістових модулів	2
Форма контролю	екзамен
Показники навчальної дисципліни	
Рік підготовки	II
Лекційні заняття	32
Практичні заняття	16
Самостійна робота	70
Консультації	2

1.6. Заплановані результати навчання

Згідно з вимогами освітньо-професійної (освітньо-наукової) програми підготовки аспіранти повинні:

РН01. Мати сучасні концептуальні та методологічні знання з фізики та/або астрономії 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.

РН04. Розробляти та досліджувати концептуальні, математичні і комп'ютерні моделі процесів і систем, ефективно використовувати їх для отримання нових знань та/або створення інноваційних продуктів у фізиці (астрономії) та дотичних міждисциплінарних напрямах.

РН05. Планувати і виконувати експериментальні та/або теоретичні дослідження з фізики та дотичних міждисциплінарних напрямів з використанням сучасних інструментів, критично аналізувати результати власних досліджень і результати інших дослідників у контексті усього комплексу сучасних знань щодо досліджуваної проблеми.

РН13. Уміти аналізувати фізичні процеси за участю елементарних частинок на основі діаграм Фейнмана і симетрій взаємодій, обчислювати перерізи реакцій і ширини розпадів частинок.

Після вивчення курсу здобувач повинен знати:

- методи наукових досліджень та вміння їх використовувати на належному рівні;
- вміння розшукувати, опрацьовувати, аналізувати та синтезувати отриману інформацію; основи квантової теорії поля, використання квантової теорії поля для опису скалярних, векторних і ферміонних полів;
- Стандартну модель у фізиці елементарних частинок;
- основні принципи побудови цієї теорії, в тому числі локальну калібрувальну симетрію, спонтанне порушення симетрії та механізм Хіггса;
- дискретні симетрії, такі як просторова парність, зарядова симетрія, інверсія часу;
- походження CP симетрії та її зв'язок з фундаментальною проблемою асиметрії матерії і антиматерії у Всесвіті.

У результаті вивчення дисципліни здобувач повинен вміти:

- формулювати мету власного наукового дослідження в контексті світового наукового процесу, усвідомлювати його актуальність і значення для розвитку сучасної теорії елементарних частинок і Стандартної моделі, інших галузей науки, загального розвитку суспільства;
- застосовувати здобуті знання для аналізу, пояснення та опису різноманітних фізичних процесів за участю елементарних частинок, симетрій фізичних теорій та їх наслідків.

Контроль знань аспіранта здійснюється за модульно-рейтинговою системою. Змістовий модуль 1 включає теми 1–4, змістовий модуль 2 – теми 4–7.

2. ЗМІСТ ТА СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Зміст навчальної дисципліни

Модуль 1. Квантова теорія поля та симетрії у фізиці елементарних частинок.

ТЕМА 1. Бозонні поля в квантовій теорії поля. (12 год.)
Лоренцівська симетрія. Скалярні поля. Рівняння Клейна-Гордона. Квантування полів. Векторні поля, масивні векторні поля та їх квантування. Рівняння Максвелла. Квантування електромагнітного поля. Лагранжіани і дія. Рівняння Ейлера-Лагранжа. Симетрії та струми, що зберігаються.

ТЕМА 2. Ферміонні поля в квантовій теорії поля. (12 год.)
Релятивістське рівняння Дірака. Властивості рівняння Дірака. Спінори Дірака, нормовані спінори, співвідношення повноти. Квантування поля Дірака. Спіральність ферміона. Лагранжіан для вільної частинки Дірака. Спін і статистика. Ферміони з нульовою масою. Рівняння Вейля.

ТЕМА 3. Симетрії у фізиці елементарних частинок. (20 год.)
Загальні відомості про симетрії. Симетрії та теорія груп. Основні групи у фізиці елементарних частинок. Лоренц-інваріантність та її важливі наслідки для фізики елементарних частинок. Лоренц-інваріанти, коваріантні та контраваріантні величини. Орбітальний кутовий момент і спін. Спін мезонів, побудованих з кварків: скалярні та векторні мезони, спін баріонів. Ізотопічний спін. Ізоспін нуклонів, мезонів, баріонних резонансів. Формула Гелл-Манна-Нішиджими. Збереження (або незбереження) ізоспіна і його проекції в сильній, електромагнітній та слабкій взаємодіях. SU(3) симетрія, супермультиплети частинок. Порушення просторової парності (P) в слабкій взаємодії: розпад ядра ^{60}Co . Спіральність нейтрино та антинейтрино. Просторова парність частинок і античастинок. Правила відбору за парністю в сильних та електромагнітних процесах.

ТЕМА 4. Симетрії у фізиці елементарних частинок та їх порушення. (20 год.) Симетрія відносно зарядового спряження. C-парність мезонів, фотона. G-парність, симетрія відносно G-парності у процесах сильної взаємодії. Симетрія фізичних законів відносно інверсії часу. Зв'язок перерізів прямого та зворотного процесів, принцип детального балансу. СРТ-теорема Людерса-Паулі у квантовій теорії поля. CP-симетрія. Осциляція нейтральних K-мезонів, довгоживучі і короткоживучі каони. Залежність від часу процесу осциляції каонів. Осциляція інших нейтральних мезонів. Експериментальне виявлення порушення CP-симетрії. Пошук електричних дипольних моментів елементарних частинок. Порушення CP-симетрії та її зв'язок з баріонною асиметрією Всесвіту, критерії А.Д. Сахарова.

**Модуль 2. Електромагнітна, слабка та сильна взаємодії частинок.
Стандартна модель у фізиці елементарних частинок.**

ТЕМА 5. Електродинаміка кварків і адронів. (20 год.) Правила Фейнмана для квантової електродинаміки. Розсіяння електрона на мюоні. Анігіляція електрона і позитрона в пару мюонів при високих енергіях. Розсіяння тотожних частинок. Народження адронів у електрон-позитронній анігіляції. Утворення «струменів» адронів, 2-х і 3-х струменеві процеси. Доказ наявності трьох кольорів кварків. Пружне розсіяння електронів на нуклоні. Електричні та магнітні формфактори протона і нейтрона, та їх залежність від переданого імпульсу. Непружне розсіяння електронів і нейтрино на нуклоні. Структурні функції. Глибоко непружне розсіяння і скейлінг Бьоркена. Партона модель і пояснення скейлінга. Функції розподілу кварків в нуклоні за бьоркенівською змінною. Валентні та морські кварки. Порухення бьоркенівського скейлінга. Фрагментація (адронізація) кварків в адрони.

ТЕМА 6. Слабка взаємодія лептонів і кварків. (20 год.) Слабка взаємодія і частинки, які в ній приймають участь. Слабка взаємодія лептонів. Слабка та електромагнітна взаємодія W- і Z-бозонів. Заряджені і нейтральні струми. “V-A” структура зарядженої слабкої взаємодії. Розпад мюону, його час життя та стала Фермі. β -розпад нейтрона, обчислення часу його життя. Збереження векторного струму та часткове збереження аксіально-векторного струму. Слабкі розпади заряджених пі-мезонів. Заряджені взаємодії кварків. Розпад $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ та існування чарівного кварка. Матриця Кабіббо-Кобаяші-Маскави, параметри матриці та порушення CP симетрії. Нейтральні слабкі струми та Z-бозон. Електрон-позитронна анігіляція в пару ферміонів при високих енергіях Інтерференція слабого та електромагнітного механізмів в електрон-позитронній анігіляції $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

ТЕМА 7. Стандартна модель у фізиці елементарних частинок. Фізика за межами Стандартної моделі. (14 год.) Принципи об’єднаної теорії слабкої і електромагнітної взаємодій. Локальна калібрувальна інваріантність. Спонтанне порушення симетрії. Механізм Хіггса. Виникнення маси калібрувальних бозонів і ферміонів. Ширина розпаду Z-бозона. Фізика топ кварка. Механізми утворення бозона Хіггса на Великому адронному колайдері в ЦЕРН. Розпади бозона Хіггса. Теоретичні моделі за межами Стандартної Моделі: велике об’єднання взаємодій і розпад протона, суперсиметрія, додаткові розмірності простору.

Структура навчальної дисципліни

Назва лекції			
	Лекції	Практичні/семінарські заняття	Самостійна робота
Змістовний модуль 1. Квантова теорія поля та симетрії у фізиці елементарних частинок.			
Тема 1. Бозонні поля в квантовій теорії поля.	4	2	6

Тема 2. Ферміонні поля в квантовій теорії поля.	4	2	6
Тема 3. Симетрії у фізиці елементарних частинок.	4	4	12
Тема 4. Симетрії у фізиці елементарних частинок та їх порушення.	6	2	12
Разом за змістовний модуль 1	18	10	36
Змістовний модуль 2. Електромагнітна, слабка та сильна взаємодії частинок. Стандартна модель у фізиці елементарних частинок.			
Тема 5. Електродинаміка кварків і адронів.	4	2	14
Тема 6. Слабка взаємодія лептонів і кварків.	6	2	12
Тема 7. Стандартна модель у фізиці елементарних частинок. Фізика за межами Стандартної моделі.	4	2	8
Разом за змістовний модуль 2	14	6	34
Всього	32	16	70

Загальний обсяг: 120 год., зокрема: лекцій – 32 год.; практичних/семінарів – 16 год., самостійної роботи – 70 год., консультацій – 2 год.

4. Тематичний план практичних та семінарських занять

№ з/п	Тема	Години
1	Процеси Дрелла-Яна в партонній моделі. Перерізи народження пари мюонів у зіткненнях нуклонів і ядер.	4
2	Феноменологія адронів. Феноменологічні моделі сильної взаємодії адронів.	4
3	Спін-спінова взаємодія кварків і обчислення маси псевдоскалярних і векторних мезонів.	4
4	Знаходження маси баріонів, що належать октету і декаплету. Магнітні моменти баріонів у кварковій моделі.	4
	Всього	16

5. Самостійна робота

№ з/п	Тема	Години
-------	------	--------

1	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами змістовного модуля 1.	36
2	Самостійне опрацювання навчально-методичних посібників та вивчення матеріалу за темами змістовного модуля 2.	34
	Всього	70

Запитання для самоперевірки

1. Що таке квантова теорія поля і які основні принципи лежать в її основі?
2. Які типи полів існують у квантовій теорії поля та як вони взаємодіють між собою?
3. Що таке бозонні поля і які властивості вони мають?
4. Яке рівняння описує скалярні поля і що воно означає?
5. Які поля відповідають векторним бозонам і яким рівнянням вони задовольняють?
6. Які принципи лежать в основі квантування полів?
7. Які поля відповідають ферміонам і як вони відрізняються від бозонів?
8. Які рівняння описують ферміонні поля і що ці рівняння означають?
9. Що таке релятивістське рівняння Дірака і як воно описує ферміонні поля?
10. Які властивості мають спінори Дірака?
11. Які симетрії відображаються у фізиці елементарних частинок?
12. Які принципи лежать в основі симетрії Лоренца та їх наслідки?
13. Що таке орбітальний кутовий момент і спін, і як вони пов'язані зі симетріями?
14. Які симетрії відповідають групі $SU(3)$ та як вона застосовується у фізиці елементарних частинок?
15. Що таке порушення симетрії в фізиці елементарних частинок і які наслідки воно має?
16. Які симетрії відповідають зарядовому спряженню C і G -парності?
17. Що таке CP -симетрія і які наслідки вона має в фізиці елементарних частинок?
18. Які симетрії відповідають групі $SU(2) \times U(1)$ і як вони застосовуються у Стандартній моделі частинок?
19. Які фізичні процеси описуються слабкою та електромагнітною взаємодіями?
20. Що таке ієрархія мас частинок і які підходи існують для її пояснення?

Запитання до екзамену

1. Скалярні, векторні та ферміонні поля в квантовій теорії поля. Лагранжіани та рівняння стану вільних частинок зі спінами 0, 1 та $\frac{1}{2}$.
2. Симетрії у фізиці елементарних частинок, безперервні та дискретні. Зв'язок симетрій з теорією груп. Основні групи у фізиці елементарних частинок.

3. CP-симетрія. Осциляція нейтральних K-мезонів, довгоживучі і короткоживучі каони.
4. Порушення CP-симетрії. Матриця Кабіббо-Кобаяші-Маскави та порушення CP симетрії.
5. CPT теорема. Пошук електричних дипольних моментів (ЕДМ) елементарних частинок. Сучасний експериментальний стан ЕДМ для різних частинок.
6. Народження адронів у електрон-позитронній анігіляції. Утворення «струменів» адронів, прояв глюонів і доказ наявності трьох кольорів кварків.
7. Глибоко непружне розсіяння електронів на нуклоні та скейлінг Бьоркена. Партонна модель адронів.
8. Функції розподілу кварків в нуклоні. Валентні та морські кварки. Порушення бьоркенівського скейлінга. Фрагментація (адронізація) кварків.
9. Заряджена слабка взаємодія лептонів і кварків. Слабка та електромагнітна взаємодія W- і Z-бозонів.
10. Електрон-позитронна анігіляція в пару ферміон-антиферміон при високих енергіях. Інтерференція електромагнітного та слабого механізмів.
11. Локальна калібрувальна інваріантність у квантовій електродинаміці. Взаємодія фотонів із зарядженими ферміонами, безмасовість фотона.
12. Локальна калібрувальна інваріантність у квантовій хромодинаміці. Взаємодія кварків з глюонами та самодія глюонів.
13. Спонтанне порушення глобальних симетрій. Випадки дискретних та неперервних абелевої і неабелевої симетрій.
14. Спонтанне порушення локальної безперервної симетрії та механізм Хіггса в електрослабкій $SU(2)_L \times U(1)_Y$ теорії. Виникнення маси калібрувальних бозонів W- і Z, та ферміонів.

6. Методи контролю

Поточний контроль проводиться у вигляді експрес-контролю та на основі оцінювання практичних робіт здобувачів під час проведення занять, а також самостійних робіт. Підсумковий контроль проводиться у вигляді екзамену.

7. Схема нарахування балів

Матеріал курсу «Деякі питання електродинаміки високих енергій у речовині та високопродуктивні обчислення у теоретичній фізиці» згідно навчальної програми містить 7 тем. Темі розподілені по модулях відповідно: I модуль – 4 теми (від 1 до 4), II модуль – 3 теми (від 5 до 7). Оцінка роботи здобувачів проводиться за модульно-рейтинговою системою і включає такі види роботи над курсом: практичні роботи, засвоєння теоретичного матеріалу та самостійні роботи.

Теми за курсом			Разом
Модуль 1	Модуль 2	Екзамен	100
T1-T4	T5-T7		

30	30	40	
----	----	----	--

Т1, Т2 ... – теми розділів.

Оцінка за модуль складається з оцінки за практикум, поточний контроль засвоєння теоретичного матеріалу та виконання самостійних робіт. За ці види робіт здобувач може набрати 60 балів.

Для допуску до підсумкового семестрового контролю здобувач в сумі за два модулі має набрати не менше 30-ти балів з 60-ти можливих, тобто не менше 50% від максимального можливого.

На екзамені здобувач може одержати від 20 до 40 балів. Між 0 та 20 балами оцінка не виставляється, екзамен вважається не зданим. Бали, одержані на екзамені від 20 до 40 додаються до балів, одержаних у семестрі (30-60 балів). За цією сумою згідно таблиці шкали оцінювання виставляється підсумкова оцінка до залікової книжки.

8. Шкала оцінювання

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

Критерії оцінювання

питань екзаменаційного білету (контрольної роботи)

Екзаменаційний білет (контрольна робота) містить кілька завдань (теоретичні питання або задачі). Кожне завдання має свій ваговий бал (вказується у дужках біля питання) та оцінюється окремо. Сумарно за всі відповіді на екзаменаційні питання можна отримати максимальну 40 балів. Сумарний бал за контрольну роботу вказується в тексті відповідної роботи.

№	Характеристика відповіді на кожне з питань екзаменаційного білету (контрольної роботи)	% від max балу за відповідь на питання
1	Повна та вірна відповідь на питання або у повному обсязі правильно вирішена практична задача білету	100 %
2	Повна відповідь з незначними помилками (або незначні помилки у розрахунках практичних завдань за наявності вірної розрахункової формули);	80-95 %
3	Неповна, але вірна відповідь (або значні помилки у розрахунках практичних завдань за наявності вірної розрахункової формули для розв'язання практичних завдань);	50-80 %

4	Відповідь повна, але містить грубі помилки (або вирішення практичних завдань білету містить грубі помилки, розрахункові формули для розв'язання практичних завдань містять помилки)	30-50 %
5	Неповна відповідь з суттєвими помилками	5-30 %
6	Невірна відповідь	0-5 %
7	Відсутня відповідь на теоретичне питання (або відсутнє вирішення практичних завдань білету)	0 %

9. Рекомендована література

Основна література

1. D.H. Perkins. Introduction to High Energy Physics. 4th ed. – Cambridge University Press, 2000, 426 p.
2. Francis Halzen, Alan D. Martin. Quarks and leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics. – John Wiley & Sons, Inc., 1984, 396 p.
3. V.B. Berestetskii, E.M. Lifshitz, and L.P. Pitaevskii. Quantum Electrodynamics, volume 4 of Course of Theoretical Physics - Pergamon Press, Oxford, 1982, 667 p.
4. Ta-Pei Cheng, Ling-Fong Li. Gauge theory of elementary particle physics. Clarendon Press Oxford, 1982, 536 p.

Допоміжна література

1. Michael E. Peskin, Daniel V. Schroeder. An Introduction to Quantum Field Theory. -- Addison-Wesley Publishing Company, 1995, 842 p.
2. I.J.R. Aitchison, A.J.G. Hey. Gauge Theories in Particle Physics. 3^d ed. A Practical Introduction. Volume 1. From Relativistic Quantum Mechanics to QED – IoP, Bristol & Philadelphia, 2003, 406 p.
3. I.J.R. Aitchison, A.J.G. Hey. Gauge Theories in Particle Physics. A Practical Introduction. 3^d ed. Volume 2. Non-Abelian Gauge Theories: QCD and the Electroweak Theory – IoP, Bristol & Philadelphia, 2004, 450 p.
4. Quang Ho-Kim, Xuan-Yem Pham. Elementary particles and their interactions. – Springer-Verlag, Berlin Heidelberg GmbH, 1998, 662 p.

Посилання на інформаційні ресурси в Інтернеті, відео-лекції, інше методичне забезпечення

1. Ресурс містить детальну інформацію про властивості всіх відомих на теперішній час елементарних частинок, основні фізичні закони в стислому вигляді, одиниці виміру, значення фундаментальних констант: <http://pdg.lbl.gov/>
2. Архів електронних препринтів в області фізики: <https://arxiv.org/>
3. База опублікованих статей і препринтів з фізики елементарних частинок, високих енергій і ядерної фізики: <http://inspirehep.net/>