

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Заступник директора з наукової роботи

В. В. Давидовський
« 5 » 2023 р.



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛІНИ
Експериментальні методи дослідження рідкісних ядерних процесів

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

**Експериментальні методи дослідження рідкісних ядерних процесів:
Навчально-методичний комплекс дисципліни. – Київ: ІЯД НАНУ , 2023 .
- 41 с.**

Укладач: Даневич Ф.А., доктор фізико-математичних наук, професор

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

Експериментальні методи дослідження рідкісних ядерних процесів

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 «Експериментальні методи дослідження рідкісних ядерних процесів» 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 «Експериментальні методи дослідження рідкісних ядерних процесів» є необхідною складовою є складовою вибіркових навчальних дисциплін 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. Курс дає можливість ознайомити аспірантів з задачами, які вирішує неперискорювальна фізика елементарних частинок (*astroparticle physics*), особливостями експериментальних методів, які застосовуються для дослідження рідкісних ядерних та суб-ядерних процесів, методами аналізу даних низькофонових експериментів, сучасним станом досліджень в галузі фізики нейтрино, пошуків темної матерії, різноманітних гіпотетичних процесів та частинок, досліджень рідкісних бета- та альфа-розпадів.

Курс «Експериментальні методи дослідження рідкісних ядерних процесів» викладається на 2 або 3 році навчання в осінньому або весняному семестрі та розрахований на 12 навчальних тижнів (по 4 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 основними положеннями неперискорювальної фізики елементарних частинок, задачами і можливостями цієї галузі фізики у фундаментальних дослідженнях, зв'язком з астрофізикою та космологією, специфікою експериментальних методів досліджень, засвоєння методів аналізу даних з низькою і дуже низькою статистикою.

Завдання – сформувати у аспірантів базові знання про предмет, задачі і перспективи неперискорювальної фізики елементарних частинок, основні досягнення і невирішені проблеми, про специфіку експериментальних методів наднизькофонові ядерної спектрометрії, розробки та аналітичних методів контролю надчистих у радіоактивному відношенні матеріалів, сформувати вміння аналізувати дані з низькою статистикою, шукати дані про радіоактивну забрудненість матеріалів.

Структура курсу

У результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен:

Знати: Основні поняття неперискорювальної фізики елементарних частинок, відмінність цієї галузі фізики від ядерної фізики та фізики високих енергій, про можливість досліджень дуже високих енергій, недоступних для

фізики високих енергій, завдання та перспективи розвитку фізики елементарних частинок без застосування прискорювачів, основні результати у цій галузі досліджень за останні 10-15 років, задачі та перспективи експериментів наступного покоління, особливості методів наднизькофонових експериментів та електронних систем реєстрації даних, методи Монте-Карло моделювання процесів розповсюдження ядерних випромінювань та сцинтиляційних фотонів у детекторних системах, сучасні методи низькофонові ядерної спектрометрії та реєстрації подій, різні типи детекторів, які застосовуються у низькофонових експериментах, рекомендації та підходи до оцінок граничних значень параметрів у випадку неспостереження процесів, методи розробки та контролю надчистих у радіоактивному відношенні матеріалів, джерела інформації про рівні радіоактивної забрудненості матеріалів, основи хімії надчистих матеріалів та методів глибокого очищення матеріалів, внесок України у неприскорювальну фізику елементарних частинок, специфіку роботи у великих колабораціях, вимоги до молодих вчених, етапи підготовки і просування проєктів, перспективи участі у експериментах у цій галузі.

Вміти: Користуватися базами даних про властивості ядер, характеристики детекторів ядерних випромінювань, радіоактивну забрудненість матеріалів. Оцінювати граничні значення ефекту в даних з дуже низькою статистикою. Орієнтуватися у доборі спеціальної сучасної наукової літератури в галузі неприскорювальної фізики елементарних частинок та методів низькофонові ядерної спектрометрії самостійно працювати з нею.

Місце дисципліни (в структурно-логічній схемі підготовки фахівців відповідного напрямку). Вибіркова навчальна дисципліна «Експериментальні методи дослідження рідкісних ядерних процесів» 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 «Експериментальні методи дослідження рідкісних ядерних процесів» використовуються знання та вміння, набуті аспірантами під час вивчення курсів загальної фізики, ядерної фізики, фізики елементарних частинок, статистичної фізики, радіоелектроніки.

II. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ДИСЦИПЛІНИ

№	Назва теми	Кількість годин				
		Всього	Лекцій	Практичних занять	Самостійна та індивідуальна робота	Консультації
	Розділ (змістовний модуль) 1. Детектори у неперискорювальну фізиці елементарних частинок.	-	-	-	-	-
	Тема 1. Вступ. Поняття про неперискорювальну фізику елементарних частинок.	2	1	-	1	-
	Тема 2. Вимоги до експериментів з низьким фоном у дослідженнях нейтрино, пошуках темної матерії, дослідженнях подвійного бета-розпаду, рідкісних альфа- та бета-розпадів, пошуках гіпотетичних ядерних процесів та перевірки фундаментальних законів природи.	3	1	-	2	-
	Тема 3. Радіоактивність, види радіоактивності, з якими стикаються низькофонові експерименти	3	1	-	2	-
	Тема 4. Природа та джерела радіоактивності: природний, радон та його дочірні, антропогенна радіоактивність, космогенні та нейтронно-індуковані радіонукліди, нейтринний фон, шуми різного походження, збої систем реєстрації, накладання сигналів.	4	1	1	2	-
	Тема 5. Детектори для експериментів з низьким фоном. Сцинтиляційні детектори.	4	1	1	2	-
	Тема 6. Черенковські лічильники, напівпровідникові детектори.	3	1	-	2	-
	Тема 7. Кріогенні болометри, лічильники Гейгера, пропорційні та часово-проекційні камери.	4	1	1	2	-
	Тема 8. Двофазні часово-проекційні камери, пухиркові камери, трекові фольги, емульсії, особливості детектування нейтронів, реєстрація нейтрино надвисоких енергій.	4	1	1	2	-
	Всього по розділу 1	29	8	4	17	-
	Розділ (змістовний модуль) 2. Сучасний стан експериментальних методів у низькофонових					

	експериментах.					
	Тема 9. Методи зниження фону детекторів ядерних випромінювань.	2	1	-	1	-
	Тема 10. Радіоактивне забруднення сцинтиляторів, моделювання фону методом Монте-Карло.	3	1	-	2	
	Тема 11. Розробка експериментальних методик: підземні лабораторії.	4	1	1	2	
	Тема 12. Вимірювання низьких рівнів радіоактивності, глибоке очищення матеріалів, виробництво кристалічних сцинтиляторів із збагачених ізотопів, пошук нових детекторів.	4	1	1	2	
	Тема 13. Часово-амплітудний аналіз даних.	3	1	-	2	
	Тема 14. Аналіз форми імпульсів, відкидання шумів різного походження.	3	1	-	2	
	Тема 15. Аналіз даних експериментів з низьким фоном: різний сценарій низьких статистичних даних, випадок нульового фону, негативний ефект.	4	1	1	2	
	Тема 16. Вплив енергетичної та роздільної здатності, модель фону, оцінка невизначеностей для дуже низького статистичного ефекту.	4	1	1	2	
	Всього по розділу 2	29	8	4	17	-
	Іспит	-	-	-	-	2
	Всього	60	16	8	34	2

ЗМІСТ КУРСУ

Розділ (змістовний модуль) 1. Детектори у неперискорювальну фізиці елементарних частинок.

ТЕМА 1. Вступ. Поняття про неперискорювальну фізику елементарних частинок.

Опис дисципліни. Мета і завдання курсу.

Необхідність нових підходів до досліджень елементарних частинок і взаємодій. Стандартна модель елементарних частинок і взаємодій, її обмеження і необхідність розширення. Експериментальні свідчення недосконалості Стандартної моделі. Осциляції нейтрино. Космологія і астрофізика, їх зв'язок з фізикою елементарних частинок і взаємодій. Темна матерія і темна енергія. Обмеження фізики високих енергій. Можливості дослідження ефектів і енергій недоступних для фізики високих енергій. Необхідність перевірки фундаментальних законів природи, пошуки гіпотетичних процесів. Супутні ядро-фізичні дослідження у неперискорювальній фізиці елементарних частинок: рідкісні альфа- і бета-розпади, рідкісні канали розпадів, пошуки надважких елементів, надщільного стану ядерної матерії, гіпотетичних каналів розпаду.

ТЕМА 2. Вимоги до експериментів з низьким фоном у дослідженнях нейтрино, пошуках темної матерії, дослідженнях подвійного бета-розпаду, рідкісних альфа- та бета-розпадів, пошуках гіпотетичних ядерних процесів та перевірки фундаментальних законів природи.

Основи фізики нейтрино. Взаємодія нейтрино з речовиною. Астрономічні, космологічні аргументи на користь існування темної матерії та темної енергії у Всесвіті. Основи теоретичних моделей, які передбачають взаємодію гіпотетичних частинок темної матерії з ядрами. Аксіони. Теоретичні аргументи на користь існування та різні моделі аксіонів. Стерильні нейтрино. Осциляції нейтрино і маса нейтрино. Властивості нейтрино. Подвійний бета-розпад. Рідкісні альфа- і бета-розпади. Гіпотетичні ядерні розпади. Порушення закону збереження баріонного заряду. Перевірка принципу Паулі. Перевірка закону збереження електричного заряду.

ТЕМА 3. Радіоактивність, види радіоактивності, з якими стикаються низькофонові експерименти.

Природна радіоактивність. Альфа-, бета-, види бета-активності, подвійний бета-розпад, ізомерні радіонукліди, спонтанний поділ, кластерна активність, фон від нейтрино.

ТЕМА 4. Природа та джерела радіоактивності: природний, радон та його дочірні, антропогенна радіоактивність, космогенні та нейтронно-індуковані радіонукліди, нейтринний фон, шуми різного походження, збої

систем реєстрації, накладання сигналів.

Особливості природного фону, хімія радіоактивних елементів. Радіоактивні елементи у природі. Види радону, дочірні радону, фізико-хімічні особливості проникнення і розповсюдження радону і його дочірніх. Антропогенна радіоактивність. Результати аварій ядерних реакторів, результати випробувань ядерної зброї, необережне поводження з радіоактивними джерелами. Космогенні радіонукліди. Космогенна активація на поверхні Землі, особливості транспортування матеріалів. Нейтронно-індуковані радіонукліди. Фон від нейтрино різного походження. Фон від шумів різного походження. Шуми детектора. Шуми електроніки. Збої систем реєстрації. Накладання сигналів. Накладання сигналів у болометричних детекторах.

ТЕМА 5. Детектори для експериментів з низьким фоном. Сцинтиляційні детектори.

Принцип роботи сцинтиляційного детектора. Загальна характеристика сцинтиляційних детекторів. Фотоелектронні помножувачі. Силіконові фотодетектори. Рідкі сцинтилятори. Пластмасові сцинтилятори. Органічні кристали. Газові сцинтилятори. Неорганічні сцинтилятори. Сцинтиляційні кристали. Керамічні сцинтилятори. Порівняння параметрів сцинтиляційних детекторів. Енергетична роздільна здатність. Часові характеристики. Об'єм, оптичні характеристики, хімічний склад, особливості виробництва.

ТЕМА 6. Черенковські лічильники, напівпровідникові детектори.

Ефект Черенкова. Основи теорії явища. Характеристики для практичного використання. Кутова роздільна здатність. Залежність від коефіцієнта рефракції. Густина матеріалу детектора. Приклади великих черенковських детекторів з водою як робочою речовиною. Приклади великих черенковських детекторів з повітрям як робочою речовиною. Детектор SNO з важкою водою для досліджень сонячних нейтрино. Детектор IceCube у Антарктиді. Водяні детектори і плани спорудження Hyper-Kamiokande. Застосування черенковських лічильників для реєстрації космічних мюонів. Черенковське випромінювання як джерело шумів. Принцип дії напівпровідникових детекторів. Детектори з германію. Детектори з кремнію. Детектори з телуриду кадмію та інших напівпровідникових матеріалів.

ТЕМА 7. Кріогенні болометри, лічильники Гейгера, пропорційні та часово-проекційні камери.

Принцип дії низькотемпературних болометрів. Різні сенсори для зйому теплових сигналів. Германій трансмутований нейтронами. Метал-магнітні калориметри. Плівки з надпровідних матеріалів. Енергетична роздільна здатність. Часова роздільна здатність. Розміри детекторів. Сполуки, які можна використовувати як болометричні детектори. Сцинтиляційні болометри. Експерименти CUORE, EDELWEISS, CRESST, AMoRE, CUPID-0, CUPID-Mo, CUPID. Перспективи детектування когерентного розсіяння нейтрино.

Дослідження рідкісних альфа-розпадів. Газові детектори. Лічильник Гейгера (експеримент NEMO-3, SuperNEMO). Пропорційні камери. Часово-проекційні камери. Часово-проекційні камери із реєстрацією сцинтиляційних сигналів. Експерименти з пошуку подвійного бета-розпаду ECHO, NEXT.

ТЕМА 8. Двофазні часово-проекційні камери, пузиркові камери, трекові фольги, емульсії, особливості детектування нейтронів, реєстрація нейтрино надвисоких енергій.

Двофазні часово-проекційні камери. Експерименти з пошуку темної матерії LUX, XENON, Panda-X. Бульбашкові камери. Теркові фольги. Трекові емульсії. Детектування нейтронів. Сцинтиляційні детектори нейтронів. Газові лічильники. БолOMETричні детектори нейтронів. Нейтрино надвисоких енергій. Радіо-детектори нейтрино у Антарктиді. Порівняння різних типів детекторів за основними характеристиками.

Розділ (змістовний модуль) 2. Сучасний стан експериментальних методів у низькофононих експериментах.

ТЕМА 9. Методи зниження фону детекторів ядерних випромінювань.

Пасивний захист. Матеріали для пасивного захисту. Захист від нейтронів. Активний захист. Різні типи лічильників активного захисту. Вибір параметрів активного захисту. Мульти-детектор як активний захист. Методи зниження фону від радону. Методи аналізу даних для зниження фону детектора on-line та off-line. Радіоактивне забруднення детекторів. Об'ємне забруднення детекторів. Поверхневе забруднення детекторів. Забруднення конструкційних та будівельних матеріалів.

ТЕМА 10. Радіоактивне забруднення сцинтиляторів, моделювання фону методом Монте-Карло.

Радіоактивне забруднення сцинтиляційних матеріалів. Методи вимірювань радіоактивного забруднення сцинтиляторів. Вплив хімічного складу сцинтиляторів на радіоактивну забрудненість. Залежність фону від енергетичної роздільної здатності. Залежність фону від часової роздільної здатності. Час прольоту як спосіб зниження фону. Двонейтринний подвійний бета-розпад як джерело фону у експериментах з пошуку безнейтринного подвійного-бета-розпаду. Моделювання фону методом Монте-Карло. Різні пакети програм для моделювання процесів у низькофононих експериментах. Пакети програм GEANT4, EGS, FLUKA. MCNPТM.

ТЕМА 11. Розробка експериментальних методик: підземні лабораторії.

Космічні промені. Адронна компонента космічних променів. М'яка електромагнітна компонента космічних променів. Мюонна компонента космічних променів. Проникна здатність різних компонент космічних променів. Проникна здатність мюонів в залежності від глибини. Підземні

лабораторії у світі. Різні типи підземних лабораторій. Підземні лабораторії у тунелях. Підземні лабораторії у шахтах. Європейські підземні лабораторії. Підземні лабораторії на малій глибині. Критерії за якими порівнюють підземні лабораторії.

ТЕМА 12. Вимірювання низьких рівнів радіоактивності, глибоке очищення матеріалів, виробництво кристалічних сцинтиляторів із збагачених ізотопів, пошук нових детекторів.

Хімічна чистота матеріалів. Рівні чистоти матеріалів. Зв'язок між хімічною чистотою і радіоактивною забрудненістю. Хімічні властивості і радіоактивна чистота матеріалів. Методи вимірювань низьких рівнів радіоактивності. Чутливість детектора до активності радіонуклідів у зразку. Мінімальна детектована активність. Рентген флуоресцентний аналіз. Атомно-абсорбційний аналіз. Масс-спектрометрія. Масс-спектрометрія із зв'язаною плазмою. Нейтрон-активаційний аналіз. Аналіз форми енергетичних спектрів. Гамма-, бета- альфа-спектрометрія. Трекові емульсії. Методи вимірювання радону. Методи очищення матеріалів. Хімічні методи. Кристалізація. Перекристалізація у розчинах. Фізичні методи. Дистиляція. Зонна плавка. Перекристалізація. Сублімація. Відбір зразків в залежності від походження мінеральної сировини. Розробка кристалічних сцинтиляторів із збагачених ізотопів. Розробка нових детекторів.

ТЕМА 13. Часово-амплітудний аналіз даних.

Радіоактивні ряди. Ряди урану 238 і 235. Ряд торію 232. Ланцюжки швидких розпадів у рядах торію та урану. Часово-амплітудний аналіз із застосуванням запису часу приходу сигналів. Часово-амплітудний аналіз із застосуванням аналізу форми сигналів детекторів. Вірогідності випадкових збігів. Ефективність відбору подій розпадів у ланцюжках розпадів по енергії та у часовому вікні. Приклади застосування часово-амплітудний аналізу даних у різних детекторах. Оцінки чутливості методу часово-амплітудний аналізу.

ТЕМА 14. Аналіз форми імпульсів, відкидання шумів різного походження.

Залежність форми сигналів від типу часинок. Залежність форми сигналів від енергії частинок. Залежність форми сигналів від напрямку руху частинок відносно кристалографічних осей кристалічних детекторів. Сцинтиляційні детектори. Рідкі сцинтилятори. Пластмасові сцинтилятори. Неорганічні кристалічні сцинтилятори. Органічні кристалічні сцинтилятори. Форма сигналів у напівпровідникових детекторах. Аналіз форми сигналів у часово-проекційних камерах. Методи порівняння компонент сигналу. Метод середнього часу. Метод оптимального фільтру. Параметри для оцінки ефективності дискримінації частинок за формою сигналів. Шуми фотоелектронних помножувачів. Тепловий шум. Шум від космічних мюонів. Післяімпульси різного походження. Відкидання швидких ланцюжків розпадів шляхом аналізу форми сигналів.

ТЕМА 15. Аналіз даних експериментів з низьким фоном: різний сценарій низьких статистичних даних, випадок нульового фону, негативний ефект.

Проблеми інтерпретації даних з низькою статистикою. Приклади: експеримент Heidelberg-Moscow. Експеримент CUORE. Різні сценарії у даних з низькою статистикою. Прийнятний рівень статистичної достовірності сигналу. Низька статистична забезпеченість сигналу на рівні менше «3 сігма». Негативна площа піку. Дуже низька статистка даних. «Нульовий» ефект. Аналіз даних у випадку одного відліку. Достовірно від'ємний ефект (на прикладі експериментів з вимірювання маси нейтрино у бета-розпаді тритію). Можливі підходи для аналізу даних з дуже низькою статистикою.

ТЕМА 16. Вплив енергетичної та роздільної здатності, модель фону, оцінка невизначеностей для дуже низького статистичного ефекту.

Вплив енергетичної роздільної здатності на оцінку ефекту з низькою статистикою. Модель фону у випадку низької статистики. Оцінка невизначеностей для дуже низького статистичного ефекту. Аналіз фону з метою оцінки граничного ефекту. Значення коректного опису моделі фону для оцінки систематичних ефектів. Вибір оптимального розміру енергетичного каналу у енергетичних спектрах з низькою статистикою. Сучасні стандарти і термінологія для оцінок невизначеностей даних експериментів. Стандарт GUM, JCGM 100:2008. Зміщення результату вимірювань. Невизначеність типу А. Невизначеність типу В. Комбінована невизначеність.

Література

Основна

1. Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1983.
2. Клапдор-Клайнротхаус Г.В., Штаудт А. Неускорительная физика элементарных частиц. М.: Наука, 1997.
3. F.A.Danevich, V.V.Kobychev, V.I.Tretyak Search for effects beyond the Standard Model of particles in low counting experiments. Chapter 7 in book: "Dark Energy and Dark Matter in the Universe" (ed. by V.Shulga), vol. 3: "Observational Manifestation and Experimental Searches", Kyiv, Akadempriodyka, 2015, 375 p. (pp. 245-335).
4. P. Belli et al., Experimental searches for rare alpha and beta decays, Eur. Phys. J. A 55 (2019) 140.

5. Particle Data Group, Review of Particle Physics, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2020, Issue 8, August 2020, 083C01, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa104>
6. G. Heusser, LOW-RADIOACTIVITY BACKGROUNd TECHNIQUES, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 45 (1995) 543-90.
7. Susana Cebrian, Cosmogenic activation of materials, International Journal of Modern Physics A 32 (2017) 1743006 (30 pages).
8. F. A. Danevich and V. I. Tretyak, Radioactive contamination of scintillators, International Journal of Modern Physics A 33 (2018) 1843007 (42 pages).
9. Denys Poda and Andrea Giuliani, Low background techniques in bolometers for double-beta decay search, International Journal of Modern Physics A 32 (2017) 1743012 (35 pages).
10. H.J. Hilke, Time projection chambers, Rep. Prog. Phys. 73 (2010) 116201.
11. Joseph A. Formaggio, C.J. Martoff, BACKGROUNDS TO SENSITIVE EXPERIMENTS UNDERGROUND, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 54 (2004) 361–412.
12. S. Agostinelli et al., GEANT4—a simulation toolkit, Nucl. Instrum. Methods A 506 (2003) 250.
13. Siegfried Niese, Underground laboratories for low-level radioactivity measurements, Radioactivity in the Environment 11 (2008) 209-239.
14. G. Heusser, M. Laubenstein, H. Neder, Low-level germanium gamma-ray spectrometry at the $\mu\text{Bq/kg}$ level and future developments towards higher sensitivity, Radioactivity in the Environment 8 (2006) 495-510.
15. S. Nisi et al., ICP-MS measurement of natural radioactivity at LNGS, International Journal of Modern Physics A 32 (2017) 1743003 (23 pages).
16. Gary J. Feldman, Robert D. Cousins, Unified approach to the classical statistical analysis of small signals, Phys. Rev. D 57 (1998) 3873
17. A. Caldwell et al., "BAT - The Bayesian analysis toolkit", Comput. Phys. Comm. 180 (2009) 2197.
18. Joint Committee for Guides 475 in Metrology (JCGM) 100:2008, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf

Додаткова

19. D. S. Akerib et al., Discrimination of electronic recoils from nuclear recoils in two-phase xenon time projection chambers, Phys. Rev. D 102 (2020) 112002.

20. Lino Miramonti, Low background techniques in liquid scintillator detectors, *International Journal of Modern Physics A* 32 (2017) 1743010 (10 pages).
21. Matthias Laubenstein, Screening of materials with high purity germanium detectors at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso, *International Journal of Modern Physics A* 32, No. 30 (2017) 1743002 (13 pages).
22. G. Heusser et al., GIOVE: a new detector setup for high sensitivity germanium spectroscopy at shallow depth, *Eur. Phys. J. C* 75 (2015) 531.
23. C.J. Martoff, P.D. Lewin, COSMO-a program to estimate spallation radioactivity produced in a pure substance by exposure to cosmic radiation on the earth, *Comput. Phys. Commun.* 72, 96 (1992).
24. <https://www.radiopurity.org/>
25. <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>
26. <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>
27. L.A. Currie, "Limits for qualitative detection and quantitative determination", *Analytical Chemistry* 40 (1968) 586.
28. O. Helene, "Upper limit of peak area", *Nucl. Instrum. Meth.* 212 (1983) 319.
29. H.B. Prosper, "The distribution of the difference of two Poisson variates and its application to interval estimation in experiments with low statistics", *Nucl. Instrum. Meth. A* 238 (1985) 500.
30. O. Helene, "Determination of the upper limit of a peak area", *Nucl. Instrum. Meth. A* 300 (1991) 132.
31. Зрелов В. П., Черенковские детекторы и их применение в науке и технике, Сб., М., 1990.

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

Експериментальні методи дослідження рідкісних ядерних процесів

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: 4 Статус курсу: <i>фаховий (вибірковий)</i> Кількість ECTS кредитів: 4 * дисципліна може викладатися на 2 або 3 році навчання в осінньому або весняному семестрі	Кількість годин: Загальна: 140 Лекції: 32 Практичні заняття: 16 Консультація 2 Самостійна робота: 90 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: Даневич Ф.А., доктор фіз.-мат. наук, професор

III. ПЛАН ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ

МЕТА ТА МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ЛЕКЦІЙ

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

Розділ (змістовний модуль) 1. Детектори у неперискорювальну фізиці елементарних частинок.

Заняття 1. Тема 1. Вступ. Поняття про неперискорювальну фізику елементарних частинок.

План.

1. Мета, завдання та структура курсу.
2. Опис дисципліни «Неперискорювальна фізиці елементарних частинок»
3. Стандартна модель елементарних частинок і необхідність її розширення.
4. Які проблеми Стандартної моделі вирішуються у низькофонових експериментах.
5. Необхідність перевірки фундаментальних законів фізики.

Література

1. [1]
2. [2]
3. [3, с. 245-246]

Заняття 2. Тема 2. Вимоги до експериментів з низьким фоном у дослідженнях нейтрино, пошуках темної матерії, дослідженнях подвійного бета-розпаду, рідкісних альфа- та бета-розпадів, пошуках гіпотетичних ядерних процесів та перевірки фундаментальних законів природи.

План.

1. Фізика нейтрино як предмет неперискорювальної фізики частинок.
2. Пошуки гіпотетичних частинок (аксіони, стерильні нейтрино).
3. Подвійний бета-розпад.
4. Рідкісні альфа- і бета-розпади.

Література

1. [1]
2. [2]
3. [4]
4. [5]

Заняття 3. Тема 3. Радіоактивність, види радіоактивності, з якими стикаються низькофонові експерименти.

План.

1. Поняття фону у ядернофізичному експерименті.
2. Джерела фону.
3. Специфічні джерела фону у низькофонових експериментах.

Література

1. [6]
2. [19]

Заняття 4. Тема 4. Природа та джерела радіоактивності: природний, радон та його дочірні, антропогенна радіоактивність, космогенні та нейтронно-індуковані радіонукліди, нейтринний фон, шуми різного походження, збої систем реєстрації, накладання сигналів.

План.

1. Природна радіоактивність.
2. Поняття про хімію радіоактивних елементів.
3. Радон і його властивості.
4. Космогенна активація матеріалів.
5. Шуми різного походження.

Література

1. [6, с. 546-552]
2. [7]
3. [24]
4. [25]
5. [26]

Заняття 5. Тема 5. Детектори для експериментів з низьким фоном. Сцинтиляційні детектори.

План.

1. Типи детекторів ядерних випромінювань.
2. Сцинтиляційні детектори.
3. Застосування сцинтиляційних детекторів у неприскорювальній фізиці частинок.
3. Порівняльні характеристики сцинтиляційних детекторів.

Література

1. [5, с. 589-610]
2. [3, с. 297-312]
3. [8, с.2-7]

Заняття 6. Тема 6. Черенковські лічильники, напівпровідникові детектори.

План.

1. Черенковські детектори.
2. Характеристики черенковських детекторів.
3. Застосування черенковських детекторів для дослідження рідкісних ядерних процесів.
4. Напівпровідникові детектори.
5. Застосування напівпровідникових детекторів у неприскорювальній фізиці частинок.

Література

1. [5. 589-610]
2. [11]
3. [17]

Заняття 7. Тема 7. Кріогенні болометри, лічильники Гейгера, пропорційні та часово-проекційні камери.

План.

1. Низькотемпературні болометри.
2. Методи реєстрації теплових сигналів.
3. Сцинтиляційні болометри.
4. Приклади застосування низькотемпературних болометрів для низькофонових експериментів.
5. Газові детектори.
6. Часово-проекційні камери.

Література

1. [9]
2. [3, с. 297-312]
3. [10]

Заняття 8. Тема 8. Двофазні часово-проекційні камери, пухиркові камери, трекові фольги, емульсії, особливості детектування нейтронів, реєстрація нейтрино надвисоких енергій.

План.

1. Двофазні часово-проекційні камери, приклади застосування.
2. Детектування нейтронів.
3. Болометричні детектори нейтронів.
4. Нейтрино надвисоких енергій.
5. Порівняння різних типів детекторів за основними характеристиками.

Література

1. [3, с. 297-312]
2. [17]

Розділ (змістовний модуль) 2. Сучасний стан експериментальних методів у низькофонових експериментах.

Заняття 9. Тема 9. Методи зниження фону детекторів ядерних випромінювань.

План.

1. Пасивний захист.
2. Активний захист.
3. Особливості зниження фону від радону.
4. Мульти-кристальні детектори.
5. Вплив радіоактивного забруднення детектора.

Література

1. [6, с. 564-568]
2. [20]
3. [11]

Заняття 10. Тема 10. Радіоактивне забруднення сцинтиляторів, моделювання фону методом Монте-Карло.

План.

1. Радіоактивне забруднення сцинтиляційних матеріалів.
2. Методи вимірювань радіоактивного забруднення сцинтиляторів.
3. Моделювання фону методом Монте-Карло.
4. Загальна характеристика пакетів програм для моделювання.

Література

1. [8, с. 19-34]
2. [8, с. 7-18]
3. [12]

Заняття 11. Тема 11. Розробка експериментальних методик: підземні лабораторії.

План.

1. Космічні промені та їх компоненти.
2. Проникна здатність різних компонент космічних променів.
3. Підземні лабораторії.
4. Порівняння підземних лабораторій.

Література

1. [11]
2. [13]

Заняття 12. Тема 12. Вимірювання низьких рівнів радіоактивності, глибоке очищення матеріалів, виробництво кристалічних сцинтиляторів із збагачених ізотопів, пошук нових детекторів.

План.

1. Рівні чистоти матеріалів, зв'язок із радіоактивним забрудненням.
2. Методи вимірювань низьких рівнів радіоактивності..
3. Методи елементного аналізу.
4. Масс-спектрометричні методи.
5. Методи ядерної спектрометрії.
6. Розробка радіоактивно чистих матеріалів

Література

1. [6, с. 570-583]
2. [8, с. 7-18]
3. [14]
4. [15]

Заняття 13. Тема 13. Часово-амплітудний аналіз даних.

План.

1. Радіоактивні ряди і ланцюжки швидких розпадів у них.
2. Метод часово-амплітудного аналізу.
3. Розрахунки ефективності відбору подій по енергії та часу.
4. Оцінки чутливості методу часово-амплітудний аналізу в залежності від фонових умов.

Література

1. [6, с. 547-562]
2. [8, с. 12-14]

Заняття 14. Тема 14. Аналіз форми імпульсів, відкидання шумів різного походження.

План.

1. Залежність форми сигналів від типу часинок у різних детекторах.
2. Розділення за формою у сцинтиляційних детекторах.
3. Порівняння методів аналізу форми сигналів.
4. Метод оптимального фільтру.
5. Відкидання шумів різного походження.

Література

1. [8, с. 12-14]
2. [4]

Заняття 15. Тема 15. Аналіз даних експериментів з низьким фоном: різний сценарій низьких статистичних даних, випадок нульового фону, негативний ефект.

План.

1. Різні підходи до інтерпретації даних з низькою статистикою.
2. Дуже низький фон.
3. Випадок нульового фону.
4. Випадок від'ємної кількості подій.
5. Рекомендації до аналізу даних з дуже низькою статистикою.

Література

1. [16]
2. [26]
3. [27]
4. [28]
5. [29]

Заняття 16. Тема 16. Вплив енергетичної та роздільної здатності, модель фону, оцінка невизначеностей для дуже низького статистичного ефекту.

План.

1. Вплив енергетичної роздільної здатності на оцінку ефекту з низькою статистикою.
2. Побудова моделі фону у даних з низькою статистикою.
3. Сучасні стандарти і термінологія для оцінок невизначеностей даних експериментів.
4. Невизначеність типу А.
5. Невизначеність типу В.
6. Комбінована невизначеність.

Література

1. [16]
2. [17]
3. [18]

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 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, шукати сучасну літературу по темі, 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 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 обчислювального характеру;
- проведення колоквиумів по засвоєнню матеріалу;
- виконання контрольних робіт за індивідуальним завданням;
- перевірка практичних завдань, виконаних студентами під час самостійної роботи;
- проведення консультацій з дисципліни;

Практичне заняття 1. Тема 3. Радіоактивність, види радіоактивності, з якими стикаються низькофонові експерименти.

Контрольні питання:

1. Види радіоактивності.
2. Основні характеристики радіонукліду.
3. Період напіврозпаду, канал розпаду, питома активність.
4. Оцінка можливих (поки-що не спостережених) каналів розпаду.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Основні характеристики альфа-розпаду.
2. Різні підходи до теоретичного визначення періоду напіврозпаду альфа-активних ядер.
3. Розрахунки періодів напіврозпаду конкретних ядер за допомогою напівемпіричних формул.

4. Визначення типу бета-розпаду ядра, оцінка форми бета-спектру, періоду напіврозпаду.
5. Оцінка фону від нейтрино детектора з певним хімічним складом.

Література:

Основна: [4]

Додаткова: [25]

Практичне заняття 2. Тема 4. Природа та джерела радіоактивності: природний, радон та його дочірні, антропогенна радіоактивність, космогенні та нейтронно-індуковані радіонукліди, нейтринний фон, шуми різного походження, збої систем реєстрації, накладання сигналів.

Контрольні питання:

1. Радіоактивні елементи у природі.
2. Радон, особливості його розповсюдження, методи запобігання фону від радону.
3. Антропогенна радіоактивність.
4. Космогенна радіоактивність, методи запобігання фону від космогенної активації.
5. Нейтронно-індуковані радіонукліди.
6. Шуми різного походження ядерних детекторів.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Оцінити фон від певного радіонукліду детектора без і з пасивним захистом.
2. Запропонувати метод зниження фону від радону для конкретного детектора.
3. Оцінити фон альфа-, бета- та гамма-детектора із зразками, взятими із зони відчуження ЧАЕС.
4. Оцінити активність космогенних ізотопів у зразку матеріалу з певним хімічним складом після перебування на поверхні Землі, після транспортування літаком.
5. Оцінити склад радіонуклідів, утворених після опромінення зразка нейтронами.
6. Проаналізувати фон сцинтиляційного, напівпровідникового детектора при низьких енергіях, вказати шляхи його пониження.

Література:

Основна: [6, 7, 8]

Додаткова: [23, 26]

Практичне заняття 3. ТЕМА 5. Детектори для експериментів з низьким фоном. Сцинтиляційні детектори.

Контрольні питання:

1. Відгук сцинтиляційного детектора в різних умовах пасивного та активного захисту.

2. Неорганічні сцинтилятори, основні сполуки, характеристики.
3. Порівняння параметрів сцинтиляційних детекторів для низькофонових експериментів.
4. Зв'язок між спектрометричними та фоновими характеристиками сцинтиляційних детекторів.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Описати спектр сцинтиляційного детектора в різних умовах пасивного та активного захисту, на різній глибині від поверхні.
2. Обрати вид сцинтилятора для вирішення конкретної задачі вимірювання рідкісного альфа-, бета-, гамма-переходу.
3. Обрати сцинтилятор певного хімічного складу для вирішення задачі пошуку певного процесу розпаду з огляду на спектрометричні характеристики детектора.
4. Запропонувати геометрію детектора для низькофонового експерименту з пошуку певного процесу розпаду.

Література:

Основна: [6, 8]

Додаткова: [20, 24]

Практичне заняття 4. Тема 6. Черенковські лічильники, напівпровідникові детектори.

Контрольні питання:

1. Робоча речовина черенковського детектора.
2. Інформація про частинку, яку можна отримати за допомогою черенковського детектора.
3. Залежність кутової та енергетичної роздільної здатності від матеріалу черенковського детектора.
4. Принцип дії напівпровідникових детекторів.
5. Характеристики детекторів з надчистого германію.
6. Порівняння характеристик напівпровідникових детекторів в залежності від матеріалу детектора.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Вибір робочого матеріалу детектора для реєстрації певного процесу.
2. Вибір геометрії черенковського детектора для реєстрації частинок з певними енергіями, зарядом.
3. Описати функцію відгуку детектора з надчистого германію в залежності від його об'єму.
4. Профіль спектрального піку сцинтиляційного і напівпровідникового детектора.
5. Вибрати напівпровідниковий детектор для пошуку певного процесу розпаду.

Література:

Основна: [5, 6, 14]

Додаткова: [21, 22, 31]

Практичне заняття 5. Тема 11. Розробка експериментальних методик: підземні лабораторії.

Контрольні питання:

1. Типи космічних променів.
2. Проникна здатність мюонів в залежності від глибини.
3. Підземні лабораторії, основні характеристики.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Оцінити фон певного детектора від електромагнітної компоненти космічних променів.
2. Оцінити фон певного детектора від адронної компоненти космічних променів.
3. Оцінити фон певного детектора від мюонів.
4. Оцінити фон від нейтронів у підземній лабораторії певної глибини.
5. Оцінити космогенну активність у зразку певного хімічного складу через певний час після його розміщення у підземній лабораторії із заданою глибиною.

Література:

Основна: [6, 11, 13]

Додаткова: [23]

Практичне заняття 6. Тема 12. Вимірювання низьких рівнів радіоактивності, глибоке очищення матеріалів, виробництво кристалічних сцинтиляторів із збагачених ізотопів, пошук нових детекторів.

Контрольні питання:

1. Чутливість до певних видів радіоактивності в залежності від рівня фону детектора.
2. Атомні та ядерні методи вимірювання радіоактивності.
3. Масс-спектрометрія, її переваги і недоліки у вимірюваннях радіоактивної забрудненості.
4. Методи ядерної спектрометрії для вимірювань радіоактивних домішок у зразках матеріалів, детекторах.
5. Основні методи очищення матеріалів від домішок радіоактивних елементів.
6. Обмеження технологій в отримання радіоактивно чистих матеріалів.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Запропонуйте метод вимірювання певного виду радіоактивності у конкретному зразку матеріалу, сцинтилятора.
2. Оцініть мінімальну питому активність певного зразка, яка може бути спостережена певним детектором із відомим рівнем фону.

3. Оцініть, наскільки треба знизити фон детектора для вимірювання (встановлення межі) очікуваної радіоактивності у конкретному зразку матеріалу.
4. Оберіть метод вимірювання радіоактивності заданих радіонуклідів у зразку певної маси, певного хімічного складу, з урахуванням вимог до швидкості отримання результатів.
5. Запропонуйте метод очищення зразка матеріалу певного складу від радіонуклідів з урахуванням необхідного виходу матеріалу і допустимих втрат.
6. Запропонуйте формулу для сцинтиляційного матеріалу для дослідження певного рідкісного процесу.

Література:

Основна: [6, 8, 14, 15]

Додаткова: [21, 22, 24, 27]

Практичне заняття 7. Тема 15. Аналіз форми імпульсів, відкидання шумів різного походження.

Контрольні питання:

1. Причини залежності форми сигналів від типу часинок.
2. Залежність форми сигналів у сцинтиляційних детекторах від напрямку руху та енергії часинок.
3. Форма сигналів у напівпровідникових детекторах.
4. Компоненти шуму детектора (сцинтиляційного, напівпровідникового, газового, емульсії).
5. Можливості відкидання фонових подій від швидких ланцюжків розпадів радіонуклідів у рядах урану і торію.

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Для яких заряджених частинок форма сигналів залежить від напрямку їх руху відносно кристалічних осей сцинтиляційного кристалу?
2. Оберіть підхід до аналізу частинки в залежності від форми сигналів виходячи із матеріалу сцинтилятора.
3. Оберіть матеріал сцинтилятора для забезпечення розділення частинок (гамма-квантів) за формою.
4. Запропонуйте спосіб зниження фону певного детектора в області порогових енергій.
5. Запропонуйте шляхи зниження фону детектора від випадкових накладань сигналів.

Література:

Основна: [6, 8]

Додаткова: [19, 20]

Практичне заняття 8. Тема 15. Аналіз даних експериментів з низьким

фоном: різний сценарій низьких статистичних даних, випадок нульового фону, негативний ефект.

Контрольні питання:

1. Інтерпретація даних з низькою статистикою, основні проблеми і шляхи вирішення.
2. Вибір прийняттого рівня статистичної достовірності сигналу.
3. Негативна площа піку.
4. Оцінка ефекту у випадку його відсутності в залежності від рівня фону (наявний фон, нульовий фон).
5. Оцінки ефекту за його відсутності (при оціненому рівні фону, при відсутності даних про очікуваний рівень фону).

Питання для самостійного поглибленого вивчення (теми доповідей):

1. Інтерпретуйте результати експерименту за допомогою напівпровідникового детектора за наявності певного фону.
2. Інтерпретуйте результати експерименту за допомогою сцинтиляційного детектора за наявності певного фону.
3. Інтерпретуйте результати експерименту з нульовим фоном в залежності від ефективності реєстрації ефекту.
4. Запропонуйте схему експерименту за умови обмеженого часу вимірювань для реєстрації певної радіоактивності у зразку.
5. Запропонуйте інтерпретацію результатів експерименту з від'ємною площею піку.
6. Запропонуйте інтерпретацію результатів експерименту за умови відсутності відліків.

Література:

Основна: [16, 17, 18]

Додаткова: [28, 30]

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 курсу;
- набуття навичок опрацювання наукової літератури (монографій, наукових статей);
- напрацювання вмінь та навичок розв'язування 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	<p>Проблеми Стандартної моделі елементарних частинок і взаємодій.</p> <p>Необхідність нових підходів до експериментальних досліджень елементарних частинок і взаємодій.</p> <p>Явище осциляцій нейтрино і маса нейтрино</p> <p>Можливості досліджень рідкісних бета- і альфа-розпадів, малоймовірних переходів.</p> <p>Гіпотетичні процеси та частинки.</p>	1, 2, 3	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

2	<p>Основні поняття фізики нейтрино, механізми взаємодії нейтрино з речовиною.</p> <p>Аксіони.</p> <p>Стерильні нейтрино: основи теорій і експериментальні пошуки.</p> <p>Подвійний бета-розпад, канали розпаду і зв'язок з фізикою нейтрино і слабкої взаємодії.</p> <p>Перевірка принципу Паулі.</p> <p>Перевірка законів збереження баріонного числа та електричного заряду.</p>	1, 2, 4, 5	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
3	<p>Природна радіоактивність.</p> <p>Радіоактивні ряди.</p> <p>Альфа- і бета-розпад.</p> <p>Електронне поглинання.</p> <p>Бета-розпад з випромінюванням позитронів.</p> <p>Ізомерний розпад.</p> <p>Спонтанний поділ ядер.</p> <p>Кластерна активність.</p>	6, 16	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
4	<p>Джерела фону детекторів ядерних випромінювань.</p> <p>Радон, джерела, фізичні та хімічні властивості.</p> <p>Антропогенна радіоактивність.</p> <p>Космогенні радіонукліди.</p> <p>Нейтронно-індуковані радіонукліди.</p> <p>Фон від нейтрино.</p> <p>Фон від шумів різного походження.</p> <p>Накладання сигналів у болометричних детекторах.</p>	6, 7, 24, 25, 26	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

5	<p>Принцип роботи сцинтиляційного детектора, загальна характеристика.</p> <p>Фотоелектронні помножувачі, силіконові фотодетектори.</p> <p>Різні типи сцинтиляторів.</p> <p>Органічні сцинтилятори.</p> <p>Неорганічні сцинтилятори.</p> <p>Порівняння параметрів сцинтиляційних детекторів.</p>	3, 5, 8	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
6	<p>Ефект Черенкова, основи теорії і практичне застосування.</p> <p>Залежність характеристик черенковських детекторів від матеріалу детектора.</p> <p>Застосування у фізиці нейтрино та як мюонне вето.</p> <p>Великі водяні та льодяні детектори.</p> <p>Принцип дії напівпровідникових детекторів.</p> <p>Застосування детекторів з надчистого германію.</p>	5, 11, 17	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
7	<p>Принцип дії низькотемпературних болометрів.</p> <p>Енергетична та часова роздільна здатність болометричних детекторів.</p> <p>Сцинтиляційні болометри.</p> <p>Приклади застосування болометричних детекторів.</p> <p>Перспективи детектування когерентного розсіяння нейтрино.</p> <p>Газові детектори: лічильник Гейгера, пропорційні камери.</p> <p>Часово-проекційні камери.</p>	3, 9, 10	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

8	<p>Двофазні часово-проекційні камери.</p> <p>Приклади застосування для пошуку темної матерії.</p> <p>Бульбашкові камери.</p> <p>Теркові фольги та емульсії у низькофонових експериментах.</p> <p>Особливості детектування нейтронів.</p> <p>Реєстрація нейтрино надвисоких енергій.</p> <p>Порівняння різних типів детекторів за основними характеристиками.</p>	3, 17	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач ..</p>
9	<p>Пасивний захист.</p> <p>Активний захист.</p> <p>Мульти-детектор як активний захист.</p> <p>Методи зниження фону від радону.</p> <p>Об'ємне і поверхневе забруднення детекторів.</p>	6, 11, 20	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач ..</p>
10	<p>Радіоактивне забруднення сцинтиляційних матеріалів.</p> <p>Методи вимірювань радіоактивного забруднення сцинтиляторів.</p> <p>Залежність радіоактивної забрудненості від хімічного складу сцинтиляторів на.</p> <p>Залежність фону від енергетичної та часової роздільної здатності.</p> <p>Моделювання фону методом Монте-Карло.</p> <p>Порівняння пакетів програм для моделювання процесів у низькофонових експериментах.</p>	8, 12	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

11	<p>Космічні промені.</p> <p>Компоненти космічних променів.</p> <p>Проникна здатність різних компонент космічних променів.</p> <p>Проникна здатність мюонів в залежності від глибини.</p> <p>Підземні лабораторії, різні типи підземних лабораторій.</p> <p>Європейські підземні лабораторії.</p> <p>Підземні лабораторії на малій глибині.</p> <p>Критерії за якими порівнюють підземні лабораторії.</p>	11, 13	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач ..</p>
12	<p>Хімічна чистота матеріалів.</p> <p>Зв'язок між хімічною чистотою і радіоактивною забрудненістю.</p> <p>Методи вимірювань низьких рівнів радіоактивності.</p> <p>Чутливість детекторів ядерних випромінювань до активності радіонуклідів у зразку, мінімальна детектована активність.</p> <p>Атомно-фізичні методи аналіз.</p> <p>Масс-спектрометрія із зв'язаною плазмою.</p> <p>Нейтрон-активаційний аналіз.</p> <p>Аналіз форми енергетичних спектрів.</p> <p>Методи вимірювання радону.</p> <p>Методи очищення матеріалів.</p>	6, 8, 14, 15	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

13	<p>Радіоактивні ряди урану 238, 235, торію 232.</p> <p>Ланцюжки швидких розпадів у рядах торію та урану.</p> <p>Часово-амплітудний аналіз із застосуванням запису часу приходу сигналів.</p> <p>Часово-амплітудний аналіз із застосуванням аналізу форми сигналів детекторів.</p> <p>Вірогідності випадкових збігів, ефективність відбору подій розпадів.</p> <p>Оцінки чутливості методу часово-амплітудний аналізу в залежності від рівня фону.</p>	6, 8, 24 25	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
14	<p>Залежність форми сигналів від типу та енергії частинок, напрямку руху частинок відносно кристалографічних осей.</p> <p>Дискримінація частинок у сцинтиляційних детекторах.</p> <p>Форма сигналів у напівпровідникових детекторах.</p> <p>Аналіз форми сигналів у часово-проекційних камерах.</p> <p>Метод оптимального фільтру.</p> <p>Шуми фотоелектронних помножувачів.</p>	4, 8	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

15	<p>Проблеми інтерпретації даних з низькою статистикою.</p> <p>Різні сценарії у даних з низькою статистикою.</p> <p>Прийнятний рівень статистичної достовірності сигналу.</p> <p>Негативна площа піку.</p> <p>«Нульовий» ефект.</p> <p>Рекомендації для аналізу даних з дуже низькою статистикою.</p>	16, 26-29	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>
16	<p>Вплив енергетичної роздільної здатності на оцінку ефекту з низькою статистикою.</p> <p>Модель фону у випадку низької статистики.</p> <p>Значення коректного опису моделі фону для оцінки систематичних ефектів.</p> <p>Вибір оптимального розміру енергетичного каналу у енергетичних спектрах з низькою статистикою.</p> <p>Сучасні стандарти і термінологія для оцінок невизначеностей даних експериментів.</p> <p>Стандарт GUM, JCGM 100:2008. Невизначеність типу A і B, комбінована невизначеність.</p>	16-18	<p>Опитування , перевірка конспекту, виступи в аудиторії, розв'язання задач в аудиторії, перевірка самостійного розв'язання задач .</p>

ОБСЯГ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

№	Назва теми	Кількість годин
1.	Підготовка до поточних практичних занять	20
2.	Виконання поточних практичних завдань	20
3.	Опанування матеріалів лекцій та додаткових питань із застосування основної та додаткової літератури	40
4.	Індивідуальні консультації з викладачем	10
	ВСЬОГО	90

Завдання (задачі, вправи) для самостійної роботи

1. Оцінити чутливість експерименту до період напіврозпаду відносно безнейтринного подвійного бета-розпаду якщо фон детектора буде визначатися лише поглинанням нейтрино від Сонця.
2. Визначити канал які радіонукліди присутні у зразку, якщо напівпровідниковий детектор з надчистого германію зареєстрував піки з енергіями 583.4(3) кеВ, 1461.0(4) кеV, 1764.6(5) кеV і 2614.4(4) кеВ?
3. Розрахувати за допомогою програми COSMO питому активність радіонукліду ^{110m}Ag у зразку кадмію з природним складом ізотопів, якщо він був отриманий в результаті очищення 14 місяців тому і через 10 місяців після процесу очищення був поміщений у підземну лабораторію глибиною 1.4 км. Опроміненням у підземній лабораторії можна знехтувати.
4. Оцінити кількість накладань подій за 1 рік вимірювань від двонейтринної моди подвійного бета-розпаду ядра ^{100}Mo у болометричному детекторі з кристалом молібдату літію (Li_2MoO_4) масою 200 грамів із збагаченого ізотопу молібдену 100, якщо події з різницею у часі 1 нс не можуть бути розділені як окремі події.
5. Оцінити енергетичну роздільну здатність сцинтиляційного детектора на енергії 300 кеВ якщо світловий вихід сцинтиляційного матеріалу становить 10 тисяч фотонів на 1 МеВ поглинутої енергії у сцинтиляторі.
6. Запропонуйте схему черенковського детектора для реєстрації електронів з енергією 5-10 МеВ, якщо необхідно визначити напрямок і енергію електронів з точністю принаймні 20% - 30%.
7. Оцінити граничну енергетичну роздільну здатність напівпровідникового детектора з германію на енергії 2 МеВ якщо ширина забороненої зони у германії становить 0.66 еВ.
8. Оцінити необхідну глибину підземної лабораторії, щоб знизити фон від космічних мюонів у 1000 разів.
9. Пояснити залежність форми сцинтиляційних сигналів від енергії альфа-частинок.
10. Оцінити граничну величину ефекту, якщо в експерименті виміряна площа шуканого піку становить 12 ± 6 відліків. Скористатися рекомендаціями з роботи [16].

Теми для рефератів та доповідей

1. Осциляції нейтрино від різних джерел.
2. Експериментальні пошуки аксіонів.
3. Експерименти з пошуку стерильних нейтрино від ядерних реакторів.
4. Шляхи визначення маси нейтрино.

5. Магнітний момент нейтрино.
6. Радіоактивні елементи космогенного походження у природі.
7. Розповсюдженість ^{137}Cs в результаті випробувань ядерної зброї.
8. Масс-спектрометрія із індуктивно-зв'язаною плазмою.
9. Атмосферні черенковські детектори.
10. Застосування кріогенних детекторів для пошуків темної матерії.
11. Пошук темної матерії за допомогою детекторів на основі інертних газів.
12. Методи очищення повітря від радону.
13. Низькофонові лабораторії малої глибини (до 100 м водяного еквіваленту).
14. Нейтрон-активаційний аналіз урану і торію.
15. Експерименти з реєстрацією дуже малої кількості подій (одна – декілька).
16. Застосування болометричних детекторів для пошуку подвійного бета-розпаду.

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 ЗНАТЬ

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. Проблеми Стандартної моделі елементарних частинок і взаємодій.
2. Напрямки досліджень у неприскорювальній фізиці елементарних частинок.
3. Осциляції нейтрино.
4. Маса і властивості нейтрино.
5. Пошук ефектів за рамками Стандартної моделі.
6. Дослідження рідкісних альфа- і бета-розпадів.

7. Темна матерія: спостережувані ефекти та лабораторні експерименти з пошуку взаємодій з речовиною.
8. Аксіони: теоретичні обґрунтування і експериментальні пошуки
9. Перевірка фундаментальних законів: принцип Паулі, збереження баріонного та лептонного чисел, електричного заряду
10. Природна радіоактивність.
11. Альфа-, бета-радіоактивність.
12. Спонтанний поділ.
13. Ряди урану і торію.
14. Космічні промені, основні компоненти.
15. Проникаюча здатність космічних променів.
16. Принцип роботи сцинтиляційних детекторів.
17. Різні типи сцинтиляційних матеріалів.
18. Природа шумів сцинтиляційних детекторів.
19. Енергетична роздільна здатність та часові характеристики сцинтиляційних детекторів.
20. Космогенна активація матеріалів.
21. Антропогенна радіоактивність.
22. Ефект Черенкова.
23. Черенковські детектори у неприскорювальній фізиці елементарних частинок.
24. Характеристики черенковських детекторів.
25. Кутова та енергетична роздільна здатність.
26. Застосування черенковських лічильників для реєстрації космічних мюонів.
27. Принцип дії напівпровідникових детекторів.
28. Детектори з надчистого германію.
29. Принцип дії низькотемпературних болометрів.
30. Енергетична та часова роздільна здатність низькотемпературних болометрів.
31. Застосування низькотемпературних болометрів для дослідження рідкісних ядерних розпадів.
32. Сцинтиляційні болометри.
33. Застосування низькотемпературних болометрів для пошуку темної матерії.
34. Газові детектори у низькофонових експериментах.
35. Часово-проекційні камери.
36. Застосування часово-проекційних камер у низькофонових експериментах.
37. Двофазні часово-проекційні камери.
38. Методи детектування нейтронів.
39. Методи детектування нейтрино надвисоких енергій.
40. Пасивний захист.
41. Матеріали для пасивного захисту.
42. Захист від нейтронів.

43. Активний захист.
44. Методи зниження фону від радону.
45. Радіоактивне забруднення детекторів.
46. Об'ємне забруднення детекторів.
47. Радіоактивне забруднення сцинтиляційних матеріалів.
48. Моделювання фону методом Монте-Карло.
49. Пакети програм для моделювання низькофонових.
50. Проникна здатність мюонів в залежності від глибини.
51. Підземні лабораторії у світі.
52. Різні типи підземних лабораторій.
53. Підземні лабораторії у Європі і світі.
54. Критерії за якими порівнюють підземні лабораторії.
55. Хімічна чистота матеріалів.
56. Хімічні властивості і радіоактивна чистота матеріалів.
57. Атомно фізичні методи вимірювань радіоактивної забрудненості.
58. Ядерно фізичні методи вимірювань радіоактивної забрудненості.
59. Методи очищення матеріалів.
60. Часово-амплітудний аналіз для.
61. Оцінки чутливості методу часово-амплітудний аналізу.
62. Залежність форми сигналів від типу часинок.
63. Методи порівняння компонент сигналів.
64. Метод середнього часу.
65. Метод оптимального фільтру.
66. Шуми фотоелектронних помножувачів.
67. Інтерпретація даних з низькою статистикою.
68. Можливі підходи для аналізу даних з дуже низькою статистикою.
69. Сучасні стандарти і термінологія для оцінок невизначеностей даних експериментів.
70. Стандарт GUM, JCGM 100:2008.
71. Невизначеність типу А та В.
72. Комбінована невизначеність.

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 задачі</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)