

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

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

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної роботи
Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна

Анто́н І. АНТЕЛЕЙМОНОВ

2021 р.



Робоча програма навчальної дисципліни

Сучасна ядерна фізика та фізика високих енергій (прикладні аспекти, теорія та експеримент)

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти третій (освітньо-науковий) рівень - доктор філософії
галузь знань 10 Природничі науки
(шифр і назва)
спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали
(шифр і назва)
освітня програма 105 Прикладна фізика та наноматеріали
(шифр і назва)
спеціалізація експериментальна ядерна фізика та фізика плазми:
(шифр і назва)
вид дисципліни за вибором
(обов'язкова / за вибором)
ННІ »фізико-технічний факультет»

2021 / 2022 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою ННІ «фізико-технічний факультет»

“ 16 ” червня 2021 року, протокол № 7

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

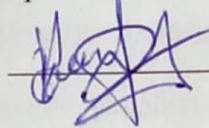
ШУЛЬГА Микола, доктор фізико-математичних наук, професор, академік НАН України, завідувач кафедри фізики ядра та високих енергій імені Олександра АХІЄЗЕРА,
БЕРЕЖНОЙ Юрій, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики атомного ядра та високих енергій імені Олександра АХІЄЗЕРА,
КОРЧИН Олександр, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики атомного ядра та високих енергій імені Олександра АХІЄЗЕРА;

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики ядра та високих енергій імені О.І.Ахієзера

Протокол від “ 10 ” червня 2021 року № 12

Завідувач кафедри фізики ядра та високих енергій імені Олександра АХІЄЗЕРА

(підпис)



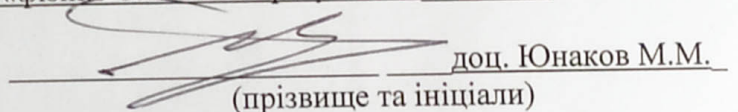
_____ Микола ШУЛЬГА
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено методичною комісією _____ ННІ «фізико-технічний факультет»

Протокол від “ 15 ” червня 2021 року № 10

Голова методичної комісії _____ ННІ «фізико-технічний факультет»

(підпис)



_____ доц. Юнаков М.М.
(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Сучасна ядерна фізика та фізика високих енергій (прикладні аспекти, теорія та експеримент)» складена відповідно до освітньо-наукової програми підготовки третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти (доктор філософії). Галузь знань: 10 – “Природничі науки”. Спеціальність: 105 – “Прикладна фізика та наноматеріали”. Освітньо-наукова програма: “Прикладна фізика та наноматеріали”. Спеціалізація: експериментальна ядерна фізика та фізика плазми.

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни – надати здобувачам вищої освіти третього рівня поглиблених знань з ядерної фізики, фізики елементарних частинок та високих енергій.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни полягають у тому, аби допомогти аспірантам засвоїти поглиблені уявлення про структуру атомних ядер та елементарних частинок; допомогти застосовувати здобуті теоретичні знання для практичного використання їх у сучасному ядерно-фізичному експерименті; продовжити формування загальної та предметної компетентностей.

Загальні компетентності:

- здатність самостійного проведення досліджень з дотриманням належної академічної доброчесності (ЗК-2);
- здатність використання академічної української мови у професійній діяльності та дослідженнях (ЗК-3);
- здатність спілкуватися з представниками інших професійних груп різного рівня (ЗК-6);
- здатність бути критичним і самокритичним (ЗК-8);
- здатність до практичного застосування знань (ЗК-9);
- вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми (ЗК-10);
- здатність діяти соціально відповідально та свідомо (ЗК-11);
- здатність генерувати нові ідеї (креативність) (ЗК-12).

1.3. Кількість кредитів **12**.

1.4. Загальна кількість годин **360**.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
Нормативна / <u>за вибором</u>	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
2-й	-й
Семестр	
3, 4-й	-й
Лекції	
48 год.	год.
Практичні, семінарські заняття	
24 год.	Год.

Лабораторні заняття	
год.	Год.
Самостійна робота	
288 год.	Год.
у тому числі індивідуальні завдання	
год.	

1.6. Заплановані результати навчання

Згідно з освітньо-науковою програмою «Прикладна фізика та наноматеріали» спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» аспіранти мають досягти таких результатів навчання:

- знання сучасного стану, тенденцій розвитку і найвагоміших нових наукових досягнень в галузі прикладної фізики та наноматеріалів, а також у суміжних галузях (ФК-1);
- поглиблені систематичні знання та розуміння сучасних фізичних теорій і методів, спроможність до їхнього аналізу та ефективного застосовувати в практичній виробничій діяльності та при проведенні досліджень (ФК-2);
- здатність та навички ефективного практичного застосовування методів аналізу та математичного моделювання з використанням комп'ютерних технологій у практичній роботі та дослідженнях (ФК-3);
- здатність до формулювання наукових задач та планування стратегій їхнього розв'язання з можливістю інтеграції знань з різних наукових сфер та застосуванням системного підходу в практичній діяльності (ФК-4);
- здатність адаптуватись та використовувати наукову методологію при розв'язанні незнаних задач, розробці та реалізації проектів, які дають можливість переосмислювати наявні знання чи створювати нові цілісні знання (ФК-5);
- навички підготовки та виконання науково-дослідних проектів та робіт, планування, проектування та виконання експериментів (ФК-6);
- здатність засвоювати та об'єктивно оцінювати наукові результати, вміння готувати оприлюднення наукових результатів у вигляді друкованої статті, усної доповіді, презентації (ФК-7);
- здатність критично оцінювати та захищати прийняті рішення як при індивідуальній роботі, так і при роботі в групі чи керуванні колективом у сфері своєї професійної діяльності (ФК-8);
- здатність використовувати здобуті знання та навички для розробки та забезпечення працездатності сучасних систем в різноманітних конкретних сферах прикладної фізики та фізики наноматеріалів (ФК-9);
- здатність інтегрувати знання з інших дисциплін, застосовувати системний підхід та враховувати нетехнічні аспекти при розв'язанні інженерних задач та проведенні досліджень (ФК-10);
- здобуття поглиблених знань і розуміння у прикладній фізиці та споріднених областях, включаючи методики проведення експериментів та наукових досліджень (ПРН-1.1);
- здатність продемонструвати поглиблені знання у вибраній спеціалізації (ПРН-1.2);
- здатність ясно та ефективно описувати результати наукової роботи (ПРН-1.3);
- здатність вести спеціалізовані наукові семінари та публікувати наукові статті у вітчизняних та закордонних наукових журналах (ПРН-1.4);
- здатність робити огляд та пошук інформації в спеціалізованій літературі, використовуючи різноманітні ресурси: журнали, бази даних, он-лайн ресурси (ПРН-1.5);
- здатність підготувати та успішно захистити дисертаційну роботу на основі індивідуальних досліджень (ПРН-1.6);

- досягнення відповідних знань, розуміння та здатностей використання методів аналізу даних та статистики на найбільш сучасному рівні (ПРН-1.7).
- здійснювати пошук, аналізувати і критично оцінювати інформацію з різних джерел (ПРН-2.1);
- самостійно планувати та виконувати експерименти, оцінювати здобуті результати (ПРН-2.2);
- обирати методи і моделювати явища та процеси різної складності при розв'язуванні задач прикладної фізики та у наноматеріалах (ПРН-2.3);
- поєднувати теорію і практику, а також приймати рішення та виробляти стратегію діяльності для розв'язування завдань спеціалізації з урахуванням загальнолюдських цінностей, суспільних, державних та виробничих інтересів (ПРН-2.4);
- застосовувати знання і розуміння для розв'язування задач синтезу та аналізу елементів та систем, характерних обраній спеціалізації (ПРН-2.5);
- ефективно працювати як індивідуально, так і у складі команди (ПРН-2.6);
- застосовувати системний підхід, інтегруючи знання з інших дисциплін та враховуючи нетехнічні аспекти, під час розв'язання інженерних задач обраної спеціалізації та проведення досліджень (ПРН-2.7);
- аргументувати вибір методів розв'язування спеціалізованої задачі, критично оцінювати здобуті результати та захищати прийняті рішення (ПРН-2.8);
- підготувати запит на отримання фінансування, звітну документацію (ПРН-2.9).
- ефективно спілкуватись на професійному та соціальному рівнях, включаючи усну та письмову комунікацію іноземною мовою (ПРН-3.1);
- кваліфіковано подавати та обговорювати здобуті результати та здійснювати трансфер набутих знань (ПРН-3.2).
- здатність адаптуватись до нових умов та самостійно приймати рішення (ПРН-4.1);
- здатність усвідомлювати необхідність навчання впродовж усього життя з метою поглиблення набутих та здобуття нових фахових знань (ПРН-4.2);
- здатність відповідально ставитись до виконуваної роботи та досягати поставленої мети з дотриманням вимог професійної етики (ПРН-4.3);
- здатність самовдосконалюватися, нести відповідальність за новизну наукових досліджень та прийняття експертних рішень (ПРН-4.4);
- здатність демонструвати розуміння засад охорони праці, електробезпеки та їх застосування (ПРН-4.5).

Для цього аспіранти мають досягти наступних результатів.

Знати: фундаментальні положення, методи дослідження та рівняння теорії, які описують основні фізичні механізми, що відбуваються в ядерній фізиці та фізиці високих енергій.

Вміти: застосовувати здобуті знання у сучасних дослідженнях.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Структура атомних ядер. Механізми ядерних реакцій.

Тема 1. Властивості складених ядер і резонансні ядерні процеси

Складені ядра. Утворення та розпад складеного ядра. Резонансні явища та формула Брейта – Вігнера. Парціальні ширини рівнів. Статистичні властивості ядерних рівнів.

Тема 2. Механізми ядерних реакцій з утворенням складених ядер.

Усереднені перерізи та флуктуації перерізів. Формула Хаузера – Фешбаха. Поділ ядер під дією нейтронів. Механізм поділу ядра. Реакції утворення штучних елементів.

Тема 3. Прямі ядерні реакції.

Оптична модель ядерного розсіяння. Непружне розсіяння як прямий процес. Реакція передачі нуклонів у ядерних зіткненнях. Метод сильного зв'язку каналів. Багатоканальне розсіяння у наближенні ейконалу.

Тема 4. Дифракційні ядерні процеси.

Дифракційне розсіяння нейтронів ядрами. Дифракційне розсіяння заряджених частинок. Ближня та дальня амплітуди розсіяння. Дифракція Френеля при розсіянні важких заряджених частинок ядрами. Райдужне розсіяння в ядерних зіткненнях. Непружні дифракційні процеси. Багаторазове дифракційне розсіяння.

Розділ 2. Елементарні частинки та слабка взаємодія.

Тема 5. Кваркова модель. Покоління кварків і лептонів

.Кварки, їх електричні заряди, дивність. Властивості антикварків. Кварковий склад мезонів та баріонів. Відсутність вільних кварків та конфайнмент. Принцип Паулі для кварків та колір кварків. Баріонне число та його збереження. Народження дивних частинок. Експериментальне відкриття J/ψ частинки. Відкриття b -кварка та боттомонію. Покоління лептонів і кварків в Стандартній Моделі.

Тема 6. Взаємодії елементарних частинок

Слабка взаємодія і частинки, що приймають у ній участь. «Заряджені» вершини, слабкий розпад мюону. Слабка взаємодія кварків та полуплептонні слабкі процеси. Бета-розпад нейтрону. Нейтральні слабкі процеси та Z -бозон. Теорія Кабіббо «повернені» покоління кварків. Електромагнітні та слабкі взаємодії W - та Z -бозонів.

Розділ 3. Симетрії у фізиці елементарних частинок. Стандартна модель.

Тема 7. Просторова парність елементарних частинок

Порушення просторової парності в слабкій взаємодії: розпад ядра ^{60}Co . Спіральність довільної частинки, спіральність нейтрино та антинейтрино. Просторова парність частинки і античастинки для ферміонів та бозонів. Парність складової системи. Збереження парності в сильній і електромагнітній взаємодіях. Правила відбору по парності в сильних та електромагнітних процесах.

Тема 8. Зарядова парність, інверсія часу і CP-симетрія

Зарядове спряження (C). Зарядова парність частинок. Збереження або незбереження зарядової парності в сильній, електромагнітній та слабкій взаємодіях. Інверсія часу та принцип детального балансу. CP-симетрія. Осциляція нейтральних K^0 -мезонів, довгоживучі короткоживучі каони. Залежність від часу процесу осциляції нейтральних каонів. Експериментальне виявлення порушення CP-симетрії в слабкій взаємодії. Порушення CP-симетрії і баріонна асиметрія Всесвіту.

Тема 9. Стандартна Модель у фізиці елементарних частинок.

Принципи об'єднаної теорії слабкої і електромагнітної взаємодій. Локальна калібрувальна інваріантність. Спонтанне порушення симетрії. Механізм Хігса. Ширина розпаду Z -бозона. Фізика топ-кварка. Механізми утворення бозона Хігса на Великому адронному коллайдері в ЦЕРН.

Тема 10. Електромагнітні моменти елементарних частинок

Магнітний дипольний момент (МДМ) електрона, мюона, кварків. Теорія і експеримент. Короткоживучі баріони. СРТ-теорема та пошук електричних дипольних моментів (ЕДМ) елементарних частинок. Порушення симетрії відносно інверсії часу та CP-симетрія. МДМ і ЕДМ барионів в кваркової моделі. Прецесія спіну релятивістського ферміона в сильному полівигнутих кристалів і можливість вимірювання МДМ і ЕДМ короткоживучих баріонів на прискорювачах в ЦЕРН.

Розділ 4. Класична та квантова теорія розсіяння

Тема 11. Рух швидких заряджених частинок у зовнішніх полях.

Рівняння руху. Рух у магнітному та електричному полях. Рух у кристалі та явище каналювання. Наближення безперервних ланцюжків атомів та атомних площин. Критичний кут каналювання. Стійкість руху у зовнішньому полі. Проблема динамічного хаосу.

Тема 12. Хвильова функція швидкої зарядженої частинки у зовнішньому полі.

Рівняння Дірака. Плоскі хвилі. Квазікласичне наближення. Розпливання релятивістського хвильового пакета. Борнівське наближення. Ейкональне наближення. Перехід від рівняння Дірака до рівняння Паулі.

Тема 13. Пружне розсіяння.

Розсіяння у центральному полі та поворот пучка зігнутим кристалом. Функція відхилення та переріз розсіяння. Явища закручування та глорії. Амплітуда та переріз розсіяння. Ейкональне наближення. Борнівське наближення та метод стаціонарної фази. Райдужне розсіяння.

Розділ 5. Теорія випромінювання частинками великої енергії.

Тема 14. Класична теорія випромінювання.

Поле електрона що рухається та інтенсивність випромінювання. Спектрально-кутова щільність випромінювання та вплив поляризації середовища на випромінювання. Випромінювання Вавілова-Черенкова. Довжина когерентності процесу випромінювання.

Дипольне наближення та ондуляторне випромінювання. Синхротронне випромінювання. Когерентне випромінювання на ланцюжку атомів. Гальмівне випромінювання у розрідженому середовищі. Вплив поляризації середовища на випромінювання. Перехідне випромінювання. Ефект пригнічення гальмівного випромінювання у тонкому шарі речовини. Ефект Ландау-Померанчука-Мігдала пригнічення гальмівного випромінювання.

Тема 15. Квантова теорія випромінювання частинками великої енергії.

Імовірність та переріз випромінювання. Закони збереження та фазовий об'єм. Борнівське наближення. Калібрувальна інваріантність. Підсумування по поляризаціям частинок. Переріз Бете та Гайтлера. Довжина когерентності в квантовій теорії випромінювання. Переріз випромінювання в ейкональному наближенні. Переріз народження електрон-позитронної пари

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин					
	денна форма					
	усього	у тому числі				
		л	п	лаб	інд	с.р
1	2	3	4	5	6	7
3-й семестр						
Розділ 1. Структура атомних ядер. Механізми ядерних реакцій.						
Тема 1. Властивості складених ядер і резонансні ядерні процеси	29	3	2			24
Тема 2. Механізми ядерних реакцій з утворенням складених ядер.	29	3	2			24
Тема 3. Прямі ядерні реакції.	29	3	2			24
Тема 4. Дифракційні ядерні процеси.	27	3				24
Разом за розділом 1	114	12	6			96
Розділ 2. Елементарні частинки та слабка взаємодія.						
Тема 5. Кваркова модель. Покоління кварків і лептонів	33	6	3			24
Тема 6. Взаємодія елементарних частинок	33	6	3			24
Разом за розділом 2	66	12	6			48
Разом за семестром	180	24	12			144
4-й семестр						
Розділ 3. Симетрії у фізиці елементарних частинок. Стандартна модель.						
Тема 7. Просторова парність елементарних частинок	12	2	1			9
Тема 8 Зарядова парність, інверсія часу і CP-симетрія	12	2	1			9
Тема 9. Зарядова парність, інверсія часу і CP-симетрія	12	2	1			9
Тема 10. Електромагнітні моменти елементарних частинок	12	2	1			9
Разом за розділом 3	48	8	4			36
Розділ 4. Класична та квантова теорія розсіяння						

Тема 11. Рух швидких заряджених частинок у зовнішніх полях.	16	3	1			12
Тема 12. Хвильова функція швидкої зарядженої частинки у зовнішньому полі.	16	3	1			12
Тема 13. Пружне розсіяння.	16	2	2			12
Разом за розділом 4	48	8	4			36
Розділ 5. Теорія випромінювання частинками великої енергії.						
Тема 14. Класична теорія випромінювання.	24	4	2			18
Тема 15. Квантова теорія випромінювання частинками великої енергії.	24	4	2			18
Разом за розділом 5	48	8	4			36
Разом за семестром	180	24	12			144
Усього годин	360	48	24			288

4. Теми семінарських (практичних, лабораторних) занять

3 семестр

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1.		2
2.		2
3.		2
4.		2
5.		2
6.		2
	Разом	12

4 семестр

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1.		2
2.		2
3.		2
4.		2
5.		2
6.		2
	Разом	12

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Тема 1. <i>Властивості складених ядер і резонансні ядерні процеси</i>	24

2	Тема 2. <i>Механізми ядерних реакцій з утворенням складених ядер.</i>	24
3	Тема 3. <i>Прямі ядерні реакції.</i>	24
4	Тема 4. <i>Дифракційні ядерні процеси.</i>	24
5	Тема 5. <i>Кваркова модель. Покоління кварків і лептонів</i>	16
6	Тема 6. <i>Взаємодії елементарних частинок</i>	16
7	Тема 7. <i>Просторова парність елементарних частинок</i>	16
8	Тема 8. <i>Зарядова парність, інверсія часу і CP-симетрія</i>	16
9	Тема 9. <i>Стандартна Модель у фізиці елементарних частинок.</i>	16
10	Тема 10. <i>Електромагнітні моменти елементарних частинок</i>	16
11	Тема 11. <i>Рух швидких заряджених частинок у зовнішніх полях.</i>	16
12	Тема 12. <i>Хвильова функція швидкої зарядженої частинки у зовнішньому полі.</i>	16
13	Тема 13. <i>Пружне розсіяння.</i>	16
14	Тема 14. <i>Класична теорія випромінювання.</i>	24
15	Тема 15. <i>Квантова теорія випромінювання частинками великої енергії.</i>	24
	Разом	288

6. Індивідуальні завдання

Не передбачено

7. Методи навчання

При викладанні дисципліни використовуються словесні методи навчання, наочні методи навчання. Головним словесним методом навчання є лекція. Під час проведення лекцій використовуються наступні методи навчання: пояснювально-ілюстративний метод або інформаційно-рецептивний; репродуктивний метод (репродукція - відтворення); метод проблемного викладу; частково-пошуковий, або евристичний метод. Під час семінарських занять використовуються наступні методи навчання частково-пошуковий, або евристичний метод; дискусійний метод. Під час самостійної роботи використовуються наступні методи навчання: дослідницький метод.

8. Методи контролю

Навчальним планом передбачені наступні методи контролю:

- поточного контролю під час проведення занять;
- підсумкові семестрові контролю:
 - 3-й семестр – запис у письмовій формі;
 - 4-й семестр – іспит у письмовій формі

9. Схема нарахування балів

3-й семестр

Поточний контроль, самостійна робота						Разом	Залікова робота	Сума
Розділ 1			Розділ 2					
T1	T2	T3	T4	T5	T6			
7	7	7	7	6	6	40	60	100

T1, T2 ... – теми розділів.

4-й семестр

Поточний контроль, самостійна робота										Екзамен	Сума
Розділ 3				Розділ 4			Розділ 5		Разом		
T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15			
5	5	5	5	4	4	4	4	4	40	60	100

T7, T8 ... – теми розділів.

Критерії оцінювання навчальних досягнень

3-й семестр.

Підсумковий семестровий контроль (залік) проводиться у письмовій формі. Білет містить три теоретичних питання, кожне з яких оцінюється окремо за 30 бальною шкалою.

Критерії оцінювання теоретичного питання:

- повна розгорнута відповідь – 30 балів;
- повна, але не розгорнута відповідь – 25 балів;
- повна, але не розгорнута відповідь, яка містить незначну помилку чи суперечність – 23 бали, за кожен наступну незначну помилку чи суперечність знімається 1 бал;
- неповна відповідь, яка не містить критичних помилок чи суперечностей – 20 балів, за кожен наступну незначну помилку чи суперечність знімається 1 бал;
- відповідь, що містить критичну помилку, або відсутність відповіді оцінюється в 0 балів.

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

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

4-й семестр.

Підсумковий семестровий контроль (екзамен) проводиться у письмовій формі. Екзаменаційний білет містить три теоретичних питання, кожне з яких оцінюється окремо за 20 бальною шкалою.

Критерії оцінювання теоретичного питання:

- повна розгорнута відповідь – 20 балів;
- повна, але не розгорнута відповідь – 18 балів;
- повна, але не розгорнута відповідь, яка містить незначну помилку чи суперечність – 15 балів, за кожен наступну незначну помилку чи суперечність знімається 1 бал;
- неповна відповідь, яка не містить критичних помилок чи суперечностей – 13 балів, за кожен наступну незначну помилку чи суперечність знімається 1 бал;

- відповідь, що містить критичну помилку, або відсутність відповіді оцінюється в 0 балів.

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

Кінцева оцінка виставляється за сумою балів поточного та підсумкового контролю за шкалою, що наведена нижче.

Шкала оцінювання

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

10. Рекомендована література

Основна література

1. Ахієзер О.І., Бережной Ю.А. Теорія ядра. Київ, Вища школа, 1995, 256 с.
2. Ахієзер О.І., Бережной Ю.А. Теорія ядерних реакцій.- ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2013, 132 с.
3. Бережной Ю.А., Онищенко Г.М. Структура атомных ядер. . –Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2013, 184 с.
4. Тартаковський В.К. Субатомна фізика. –К.: Київський університет, 2006, 320 с.
5. Комминс Ю., Буксбаум Ф. Слабые взаимодействия лептонов и кварков. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1987, 437 с.
6. Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. Москва, «Наука». Издание 3-е, 2005, 352 с.
7. Perkins D. H. Introduction to high energy physics. 4th edition, Cambridge University Press, 2000, 426 p.
8. Шульга Н.Ф. Некоторые вопросы теории рассеяния быстрых частиц в веществе и во внешних полях. К.: Наукова думка, 2010, 197 с.
9. Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф. Электродинамика высоких энергий в веществе. – М.: Наука, 1993. – 344 с.

Допоміжна література

1. Ситенко А.Г. Теория ядерных реакций М., Энергоатомиздат, 1983, 352 с.
2. Немец О.Ф., Теренецкий К.О.. Ядерные реакции. К.: Вища школа, 1977, 243 с.
3. Nussenzveig H.M. Diffraction effects in semiclassical scattering. Cambridge, Cambridge University Press, 1992, 226 p.
4. Хелзен Ф., Мартин А. Кварки и лептоны. Введение в физику частиц. Пер. с англ. М.: «Мир», 1987, 456 с.
5. Валантэн Л. Субатомная физика: ядра и частицы. Т. 1-2. Пер. с фр. М.: Мир, 1986.
6. Базылев В.А., Жеваго Н.К. Излучение быстрых частиц в веществе и во внешних полях. – М.: Наука, 1987. – 272 с.

7. Тер-Микаелян М.Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. – Ереван.: Изд-во Арм. ССР, 1969. – 459 с.