Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кафедра загальної фізики

ТЕОРЕТИЧНА ФІЗИКА-2. КВАНТОВА МЕХАНІКА 2 КВАНТОВА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни	
Рівень вищої освіти	**Перший (бакалаврський)**
Галузь знань	10 Природничі науки
Спеціальність	104 Фізика та астрономія
Освітня програма	Комп'ютерне моделювання фізичних процесів
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	очна(денна)
Рік підготовки, семестр	4 курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	105 годин (36 годин – лекції, 18 годин – практичні)
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Залік/МКР/ДКР
Розклад занять	http://rozklad.kpi.ua/Schedules/ScheduleGroupSelection.aspx
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: професор Бродин Олександр Михайлович, alex.brodin@gmail.com, моб. +38(097)368-19-18 Практичні: професор Бродин Олександр Михайлович, alex.brodin@gmail.com, моб. +38(097)368-19-18
Розміщення курсу	https://campus.kpi.ua

Програма навчальної дисципліни

1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчання та результати навчання

Опис дисципліни. Дисципліна квантова механіка відіграє роль фундаментальної фізико-математичної бази, без якої неможлива успішна діяльність фахівця з фізики. Під час навчання студенти отримають теоретичну підготовку в області фізики, набудуть навичок правильного розуміння меж застосування фізичних понять, законів та теорій, що дозволить у майбутньому орієнтуватись в потоці наукової і технічної інформації. На практичних заняттях навчаться розв'язувати практичні задачі, зокрема застосовувати математичний апарат для вирішення певних фізичних задач. На лабораторних заняттях студенти оволодіють навичками роботи з електричними приладами, апаратурою та вимірювальною технікою. Передбачено контроль якості отриманих знань у вигляді модульної контрольної роботи та домашньої контрольної роботи.

Предмет навчальної дисципліни: Квантова електродинаміка.

Міждисциплінарні зв'язки. Дисципліна Квантова електродинаміка є невід'ємною складовою курсу теоретичної фізики для студентів фізичної спеціальності.

Мета навчальної дисципліни. Метою навчальної дисципліни є формування у студентів здатностей використовувати фундаментальні фізичні поняття, основні принципи і закони для опису стану мікроскопічних систем електромагнітного поля та взаємодії мі ними, оперувати фундаментальними фізичними поняттями та законами при вирішенні певних фізичних задач, оволодіти базовим матеріалом для подальшого вивчення дисциплін циклу професійно-практичної підготовки.

Основні завдання навчальної дисципліни

Знання:

- змісту основних положень квантової механіки та квантової електродинаміки;
- основних характеристик стану квантових систем та їх взаємодії з полем;
- основних підходів до релятивістської квантової теорії;

Уміння:

- застосовувати закони квантової механіки та квантової електродинаміки для аналізу мікросистем та їх взаємодії з полем;
- розраховувати стани квантових систем та електромагнітного поля;
- виконувати необхідні розрахунки в професійній діяльності;

Досвід:

- розв'язання задач з квантової механіки та квантової електродинаміки;
- правильного використання загальнонаукової та спеціальної термінології;
- самостійного здобування знань, використовуючи традиційні і сучасні освітні та інформаційні технології;
- підходу до вирішення задач, що постають в процесі професійної діяльності, обираючи методи дослідження на основі наукового світогляду

Програмні результати навчання

Компетентності:

ЗК1.Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

ЗК3.Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.

ЗК4.Здатність бути критичним і самокритичним.

ФК1.Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії.

ФК9.Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації.

ФК12.Усвідомлення професійних етичних аспектів фізичних та астрономічних досліджень.

ФК15.Дотримання принципів академічної доброчесності разом з професійною гнучкістю.

ФК18. Здатність захищати інтелектуальну власність, зокрема вміти патентувати корисні моделі та винаходи.

ПРН1. Знати, розуміти та вміти застосовувати на базовому рівні основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та/або астрономії.

ПРН17.Вміти розуміти історію та закономірності розвитку фізики та астрономії

ПРН19.Вміти розповісти та пояснити місце фізики та астрономії у загальній системі знань про природу і суспільство та у розвитку суспільства, техніки та технологій.

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Вивчення даного кредитного модуля базується на дисциплінах «Загальна фізика. Механіка», «Теоретична фізика. Класична механіка», «Математичний аналіз», «Основи векторного та тензорного аналізу», «Аналітична геометрія та лінійна алгебра», «Теорія функцій комплексних змінних», «Теоретична фізика. Теорія поля» «Диференціальні та інтегральні рівняння», «Теоретична фізика. Квантова механіка». Знання, отримані студентами з курсу квантової механіки, використовуються в курсах «Теоретична фізика. Квантова електродинаміка», «Фізика твердого тіла» та ін.

3. Зміст навчальної дисципліни

Лекційні заняття

Розділ 1. Заряджена частинка в електромагнітному полі

1.1 Заряджена частинка в однорідному електричному полі

1.2 Заряджена частинка в однорідному магнітному полі

Розділ 2. Магнітний дипольний момент

2.1. Орбітальний магнітний дипольний момент

2.2. Спіновий магнітний дипольний момент

2.3. Магнітний диполь в неоднорідному магнітному полі

2.4. Рівняння Паулі

Розділ 3. Наближені методи

3.1. Стаціонарна теорія збурень

3.2. Теорія збурень для вироджених станів

3.3. Лінійний ефект Штарка

3.4. Варіаційний принцип

3.5. Теорія збурень, залежних від часу

Розділ 4. Взаємодія з електромагнітним випромінюванням

4.1. Дипольні переходи.

4.2. Правила відбору для дипольних переходів

Розділ 5. Багаточастинкові системи

5.1 Орбітальний момент
5.2 Симетричні та антисиметричні стани
5.3 Бозони. Ферміони
5.4 Принцип виключення Паулі
5.5 Обмінна взаємодія
Розділ 6. Атоми
6.1 Періодична система елементів.
6.2 Електронні орбіталі, оболонки.
6.3 Електронна структура атомів
6.4 Спектральні терми
Розділ 7. Одновимірні фонони
7.1 Класичний аналіз.
7.2 Квантово-механічне описання.
Розділ 8. Елементи квантової електродинаміки
8.1 Квантування вільного електромагнітного поля.
8.2 Гамільтоніан поля .
8.3 Спін та імпульс фотонів.
Розділ 9. Теорія взаємодії поля з квантово-механічною системою
9.1 Гамільтоніан системи атом+поле.
9.2 Частота квантових переходів .
9.3 Електричні дипольні переходи.
Розділ 10. Елементи релятивістської квантової механіки
10.1 Рівняння Кляйна-Гордона-Фока
10.2 Релятивістське рівняння Дірака.

Практичні заняття

1. Заряджена частинка в стаціонарному електромагнітному полі. Скалярний та векторний потенціали, оператор Гамільтона. Частинка в електростатичному полі. Функція Ейрі. Частинка в стаціонарному магнітному полі.
2. Магнітний дипольний момент: орбітальний, спіновий. Гіромагнітне співвідношення. g-фактор Ланде. Магнетон Бора. Магнітний момент електрона (орбітальний, спіновий), протона, нейтрона. Магнітний диполь в магнітному полі: прецесія Лармора. Магнітний диполь в неоднорідному магнітному полі.
3. Стаціонарна теорія збурень. Надтонке розщеплення основного стану в атомі водню. Енергія основного стану атому гелію. Лінійний ефект Штарка.
4. Теорія збурень, залежних від часу. Представлення (зображення) взаємодії Дірака. Квантові переходи під дією періодичного збурення.
5. Взаємодія з електромагнітним випромінюванням. Дипольні переходи. Правила відбору для дипольних переходів в системах зі сферично симетричним гамільтоніаном.
6. Атоми. Періодична система елементів. Електронні орбіталі, оболонки. Електронна структура атомів. Спектральні терми.
7. Багаточастинкові системи. Ідентичні частинки. Бозони. Ферміони.
8. Елементи квантової електродинаміки (квантової теорії поля). Спін та імпульс фотонів.
9. Взаємодія поля з квантово-механічною системою. Частота квантових переходів.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література

1. І.О.Вакарчук. Квантова механіка. Львів: ЛДУ ім І.Франка, 1988.
2. О.С.Давидов.Квантова механіка. К.: Електронне видання, 2013.

Допоміжна література

3. David J. Griffiths, Introduction to Quantum Mechanics (2nd Edition), Pearson Education, 2005.
4. П.А.Дирак. Принципы квантовой механики. М: Физматгиз. 1960.
5. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Квантовая механика. М: Физматгиз, 1963.
6. Д.И.Блохинцев. Основы квантовой механики. М.: Высшая школа, 1961

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	**Лекція 1.** Заряджена частинка в електромагнітному полі. Частинка в електростатичному полі. Функція Ейрі. Література: [1], 4.27.
2	**Лекція 2.** Заряджена частинка в електромагнітному полі. Частинка в стаціонарному магнітному полі. Рівні Ландау. Література: [1], 4.27.
3	**Лекція 3.** Магнітний дипольний момент. Орбітальний, спіновий моменти. Гіромагнітне співвідношення. g-фактор Ланде. Магнетон Бора. Магнітний момент електрона (орбітальний, спіновий), протона, нейтрона. Магнітний диполь в магнітному полі: прецесія Лармора. Магнітний диполь в неоднорідному магнітному полі. Література: [3], 6.4.
4	**Лекція 3.** Наближені методи. Стаціонарна теорія збурень (невироджений випадок) до другого порядку включно. Література: [1], 8.46.
5	**Лекція 4.** Наближені методи. Теорія збурень для вироджених станів (перший порядок). Лінійний ефект Штарка. Варіаційний метод. Література: [1], 8.51 – 8.54.
6	**Лекція 5.** Варіаційний принцип.. Варіаційний метод наближеного знаходження енергії основного стану. Література: [1], 8.51 – 8.54.

7	**Лекція 7.** Наближені методи. Теорія збурень, залежних від часу. Представлення (зображення) взаємодії Дірака. Література: [1], 8.56.
8	**Лекція 8.** Взаємодія з електромагнітним випромінюванням. Напівкласичний аналіз (поле описується класично). Дипольні переходи. Дипольний момент переходу. Література: [3], 9.2.
9	**Лекція 9.** Правила відбору. Правила відбору для дипольних переходів в системах зі сферично симетричним гамільтоніаном, де стани характеризуються $\left\|nlm\right\rangle$. Література: [3], 9.3.
10	**Лекція 8.** Багаточастинкові системи. Ідентичні частинки. Оператор перестановки, його власні значення. Симетричні та антисиметричні стани. Бозони. Ферміони. Принцип виключення Паулі для ферміонів. Обмінна взаємодія. Література: [2], 9.71 – 9.79.
11	**Лекція 11.** Атоми.. Атоми. Періодична система елементів. Електронні орбіталі, оболонки. Електронна структура атомів. Спектральні терми. Література: [3], 5.2.
12	**Лекція 10.** Фонони. Одновимірні фонони. Класичний аналіз: граничні умови, незалежні гармонічні нормальні моди. Дисперсійне співвідношення. Квантово-механічне описання. Узагальнені координата та імпульс. Оператори породження та знищення фононів. Література: [2], 10.82.
13	**Лекція 13.** Елементи квантової електродинаміки. Квантування вільного електромагнітного поля. Розклад векторного потенціалу поля на незалежні гармонічні осцилятори. Література: [1], 9.60.
14	**Лекція 14.** Елементи квантової електродинаміки. Енергія поля. Узагальнені координата та імпульс. Гамільтоніан поля в термінах узагальнених координат та імпульсів. Література: [1], 9.60.
15	**Лекція 15.** Елементи квантової електродинаміки. Оператори породження та знищення квантів поля (фотонів). Гамільтоніан поля в зображенні вторинного квантування, числа заповнення. Квантово-механічні оператори векторного потенціалу, електричного та магнітного полів. Спін та імпульс фотонів. Література: [1], 9.60.

16	**Лекція 16.** Теорія взаємодії поля з квантово-механічною системою. Гамільтоніан системи атом+поле. Гамільтоніани атома, поля, та оператор взаємодії. Частота квантових переходів в термінах теорії збурень: золоте правило Фермі. Матричний елемент переходу: електричне дипольне наближення та наближення вищих порядків. Електричні дипольні переходи. Література: [1], 9.62 – 9.65.
17	**Лекція 17.** Елементи релятивістської квантової механіки. Рівняння Кляйна-Гордона-Фока, його недоліки. Релятивістське рівняння Дірака, його властивості. Густина та потік ймовірності. Момент кількості руху та спін. Література: [1], 10.68 – 10.76.
18	**Лекція 18.** Залікове заняття.

Практичні заняття

№ з/п	Назва практичного заняття	Кількість ауд. годин
1	Заряджена частинка в стаціонарному електромагнітному полі. Скалярний та векторний потенціали, оператор Гамільтона. Частинка в електростатичному полі. Функція Ейрі. Частинка в стаціонарному магнітному полі.	2
2	Магнітний дипольний момент: орбітальний, спіновий. Гіромагнітне співвідношення. g-фактор Ланде. Магнетон Бора. Магнітний момент електрона (орбітальний, спіновий), протона, нейтрона. Магнітний диполь в магнітному полі: прецесія Лармора. Магнітний диполь в неоднорідному магнітному полі.	2
3	Стаціонарна теорія збурень. Надтонке розщеплення основного стану в атомі водню. Енергія основного стану атому гелію. Лінійний ефект Штарка.	2
4	Теорія збурень, залежних від часу. Представлення (зображення) взаємодії Дірака. Квантові переходи під дією періодичного збурення.	2
5	Взаємодія з електромагнітним випромінюванням. Дипольні переходи. Правила відбору для дипольних переходів в системах зі сферично симетричним гамільтоніаном.	2
6	Атоми. Періодична система елементів. Електронні орбіталі, оболонки. Електронна структура атомів. Спектральні терми.	2
7	Багаточастинкові системи. Ідентичні частинки. Бозони. Ферміони.	2
8	Елементи квантової електродинаміки (квантової теорії поля). Спін та імпульс фотонів.	2
9	Взаємодія поля з квантово-механічною системою. Частота квантових переходів.	2
10	Заряджена частинка в стаціонарному електромагнітному полі. Скалярний та векторний потенціали, оператор Гамільтона. Частинка в електростатичному полі. Функція Ейрі. Частинка в	2

	стаціонарному магнітному полі.	
11	Магнітний дипольний момент: орбітальний, спіновий. Гіромагнітне співвідношення. g-фактор Ланде. Магнетон Бора. Магнітний момент електрона (орбітальний, спіновий), протона, нейтрона. Магнітний диполь в магнітному полі: прецесія Лармора. Магнітний диполь в неоднорідному магнітному полі.	2
12	Стаціонарна теорія збурень. Надтонке розщеплення основного стану в атомі водню. Енергія основного стану атому гелію. Лінійний ефект Штарка.	2
13	Теорія збурень, залежних від часу. Представлення (зображення) взаємодії Дірака. Квантові переходи під дією періодичного збурення.	2
14	Взаємодія з електромагнітним випромінюванням. Дипольні переходи. Правила відбору для дипольних переходів в системах зі сферично симетричним гамільтоніаном.	2
15	Атоми. Періодична система елементів. Електронні орбіталі, оболонки. Електронна структура атомів. Спектральні терми.	2
16	Багаточастинкові системи. Ідентичні частинки. Бозони. Ферміони.	2
17	Елементи квантової електродинаміки (квантової теорії поля). Спін та імпульс фотонів.	2
18	Взаємодія поля з квантово-механічною системою. Частота квантових переходів.	2

6. Самостійна робота студента

Самостійна робота студента є основним засобом засвоєння навчального матеріалу у вільний від навчальних занять час і включає:

№ з/п	Вид самостійної роботи	Кількість годин СРС
1	Підготовка до аудиторних занять	26
2	Підготовка до МКР	6
3	Підготовка до заліку	20

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які ставляться перед студентом:

- відвідування лекційних та практичних занять є обов'язковою складовою вивчення матеріалу;
- на лекції викладач користується власним презентаційним матеріалом; використовує зум та гугл-міт для викладання матеріалу лекційних, практичних та лабораторних занять, розв'язки практичних завдань та модульних контрольних робіт завантажуються студентами в гугл-клас;
- питання на лекції задаються у відведений для цього час;
- для захисту практичної або розрахункової роботи необхідно розв'язати відповідні задачі, завантажити розв'язок в гугл-клас та відповісти на запитання;

- модульні контрольні роботи пишуться без застосування допоміжних засобів (мобільні телефони, планшети та ін.); результат завантажується до гугл-класу;
- заохочувальні бали виставляються за: активну роботу на практичних заняттях; участь у факультетських та інститутських олімпіадах з фізики, участь в університетських конференціях з доповіддю, яка стосується сучасних досягнень з фізики у технологічному світі. Кількість заохочуваних балів не більше 10.

8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (РСО)

Рейтинг студента денної форми навчання складається з балів, що він отримує за:

1) виконання домашніх завдань;
2) 4 експрес-контролі;
3) модульну контрольну роботу;
4) домашню контрольну роботу.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання

Виконання домашніх завдань:

Протягом семестру випадковим чином перевіряється 2 виконаних домашніх завдання. Максимальна оцінка за одне виконане домашнє завдання – 10 балів.

Експрес-контролі:

Протягом семестру на практичних занять проводяться експрес-контролі (5 хвилин), в яких міститься одне коротке завдання за змістом поточного матеріалу.

Повна правильна відповідь – 5 балів.

Неповна відповідь або відповідь з незначними помилками – 3-4 бали.

Відповідь з грубими помилками – 1-2 бали.

Відсутність відповіді – 0 балів.

Про проведення експрес-контролю викладач повідомляє заздалегідь. Кількість проведених експрес-контролів – 4. Таким чином максимально студент може набрати протягом семестру 20 балів.

Крім того, проявляючи активність на практичних заняттях у вигляді численних вірних відповідей з місця або численних добрих відповідей при розв'язуванні задач біля дошки, студент може набрати до 6 заохочувальних балів.

Модульна контрольна робота:

Модульна контрольна робота складається з 4-х задач, кожна з яких оцінюється у 10 балів. За модульну контрольну студент максимально може отримати 40 балів. Мінімальна кількість балів, за умови якої контрольна вважається зданою – 20. Бали за виконання завдань нараховуються таким чином:

- повністю правильний розв'язок задачі (правильне оформлення заданих величин з переводом до системи СІ і сформульоване запитання, чіткий схематичний рисунок з позначенням напрямків векторних величин, якщо потрібно, правильний фізичний розв'язок задачі, розрахунок невідомої величини без помилок, записані одиниці вимірювання для всіх фізичних величин) – 10 балів;
- розв'язок задачі виконаний з помилками на рівні математичного обчислення невідомої величини та помилкового вживання розмірності – 7-8 балів;
- розв'язок задачі виконаний частково: основні формули і закони записані вірно, але помилки виникли у перетворенні формул і через це фізичний розв'язок вийшов невірний –6-7 балів;
- розв'язку задачі немає, але записані основні формули і закони, які потрібні для нього – 4-5 балів;
- розв'язку задачі немає, фізичні формули відсутні, але виконано правильне оформлення заданих величин з переводом до системи СІ і сформульоване запитання, а також зроблено чіткий схематичний рисунок з позначенням напрямків векторних величин – 3 балів;
- розв'язку задачі немає, фізичні формули та схематичний рисунок відсутні, але виконано правильне оформлення заданих величин з переводом до системи СІ і сформульоване запитання – 1-2 бали;

відсутність будь-яких записів щодо завдання та розв'язку чи помилки у записі заданих величин – 0 балів.

Домашня контрольна робота:

Домашня контрольна робота складається з 4-х задач, кожна з яких оцінюється у 5 балів. За модульну контрольну студент максимально може отримати 20 балів. Мінімальна кількість балів, за умови якої контрольна вважається зданою – 10. Бали за виконання завдань нараховуються таким чином:

- повністю правильний розв'язок задачі (правильне оформлення заданих величин з переводом до системи СІ і сформульоване запитання, чіткий схематичний рисунок з позначенням напрямків векторних величин, якщо потрібно, правильний фізичний розв'язок задачі, розрахунок невідомої величини без помилок, записані одиниці вимірювання для всіх фізичних величин) – 4 бали;
- розв'язок задачі виконаний з помилками на рівні математичного обчислення невідомої величини та помилкового вживання розмірності – 3 бали;
- розв'язок задачі виконаний частково: основні формули і закони записані вірно, але помилки виникли у перетворенні формул і через це фізичний розв'язок вийшов невірний –2 бали;

- розв’язку задачі немає, але записані основні формули і закони, які потрібні для нього – 1 бал;

відсутність будь-яких записів щодо завдання та розв’язку чи помилки у записі заданих величин – 0 балів.

Міжсесійна атестація

За результатами навчальної роботи за перші 7 тижнів максимально можлива кількість балів – 20 балів (2 експрес-контролі, 1 перевірене домашнє завдання). На першій атестації (8-й тиждень) студент отримує «зараховано», якщо його поточний рейтинг не менший ніж 10 балів (у разі якщо студент ще не здавав домашнє завдання на перевірку, то не менше ніж 5 балів).

За результатами 13 тижнів навчання максимально можлива кількість балів – 60 балів (2 експрес-контролі, МКР, одне перевірене домашнє завдання у всіх студентів). На другій атестації (14-й тиждень) студент отримує «зараховано», якщо його поточний рейтинг не менший ніж 30 балів.

Максимальна сума вагових балів контрольних заходів протягом семестру складає:
$RD = 4*r_{експ.к.}+2*r_{д.з.}+1*r_{мкр}.+1*r_{дкр} = 4*5+2*10+1*40+1*20 =100,$

де $r_{експ.к.}$ – бал за експрес-контроль (0…5);
$r_{д.з.}$ – бал за виконане домашнє завдання (0…10);
$r_{мкр}$ – бал за написання МКР (0…40);
$r_{дкр}$ – бал за написання МКР (0…20);

Додатково до рейтингу додаються заохочувальні бали у разі їх отримання.

Таблиця 1 — Переведення рейтингових балів до оцінок за університетською шкалою

Кількість балів	Оцінка
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Робочу програму навчальної дисципліни (Силабус):

Складено професор Бродин Олександр Михайлович

Ухвалено кафедрою загальної фізики ФМФ (протокол засідання кафедри № 6 від 06.06.2023 р.).

Погоджено Методичною комісією фізико-математичного факультету (протокол № 10 від 27.06.2023 р.)