



МАКРОСКОПІЧНІ КВАНТОВІ ЯВИЩА

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни	
Рівень вищої освіти	Другий (магістерський)
Галузь знань	Е Природничі науки, математика та статистика
Спеціальність	Е5 Фізика та астрономія
Освітня програма	Моделювання фізичних процесів
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	1 курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	6 кредитів: 180 годин (денна: 40 годин – лекції, 12 годин – практичні заняття, 128 години – СРС)
Семестровий контроль/контрольні заходи	Екзамен/МКР
Розклад занять	http://education.kpi.ua
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: старший викладач Гусева Юлія Ігорівна yuleva-fmf@l11.kpi.ua
Розміщення курсу	https://campus.kpi.ua , Google Classroom, код курсу: hnb4xal

Програма навчальної дисципліни

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

Опис дисципліни. Програму навчальної дисципліни «Макроскопічні квантові явища» складено відповідно до освітньої програми «Моделювання фізичних процесів» підготовки магістрів спеціальності Е5 Фізика та астрономія. Курс «Макроскопічні квантові явища» разом із курсами «Квантова механіка», «Фізика твердого тіла», «Фізика магнітних явищ» відіграє роль фундаментальної фізико-математичної бази, без якої неможлива успішна діяльність фахівця в будь-якій галузі природничих наук або техніки. Дана програма відображає сучасний стан викладання фізики у вищих технічних навчальних закладах та враховує західний досвід. Вона передбачає природне сполучення макроскопічного та мікроскопічного підходів і розкриття внутрішніх логічних зв'язків між різними напрямками фізичної науки.

Студенти ФМФ, окрім курсу «Макроскопічні квантові явища», вивчають багато спеціальних розділів фізики та спецкурсів фізичного спрямування. Тому в даному лекційному курсі головна увага приділяється фундаментальним питанням, без перевантаження викладу деталями технічного та технологічного характеру, а також використання найпростіших прикладів. З огляду на невеликий обсяг дисципліни, відповідні питання повинні додатково розбиратися самостійно, оскільки ідеї і методи фізики надпровідності проникли у багато розділів фізики і тепер складають основу сучасного фізичного фундаменту. При цьому кількість і рівень складності пропонованих студентам завдань для домашньої роботи мають відповідати їх можливостям та сприяти максимальному засвоєнню теоретичного матеріалу.

Треба мати на увазі, що знання понять та явищ з цієї дисципліни суттєво підвищує загальний рівень студентів не тільки на випадок їхнього подальшого розвитку як професіоналів, але й є елементами загальної наукової культури та наукового світогляду.

Мета навчальної дисципліни. Метою навчальної дисципліни є формування у студентів здатностей використовувати фундаментальні фізичні поняття, основні принципи і закони класичної та сучасної фізики у галузі фізики надпровідності при вирішенні певних фізичних задач.

Предмет навчальної дисципліни: явище надпровідності та методи і фізичні моделі, що його описують.

Програмні результати навчання:

Компетентності:

(ЗК01) Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

(ЗК02) Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.

(ЗК03) Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

(ФК05) Здатність сприймати ново здобуті знання в області фізики та астрономії та інтегрувати їх із уже наявними.

(ФК08) Здатність формулювати нові гіпотези та наукові задачі в області фізики та астрономії, вибирати відповідні методи для їх розв'язання, беручи до уваги наявні ресурси.

Уміння:

ПРН08. Презентувати результати досліджень у формі доповідей на семінарах, конференціях тощо, здійснювати професійний письмовий опис наукового дослідження, враховуючи вимоги, мету та цільову аудиторію.

ПРН12. Розробляти та застосовувати ефективні алгоритми та спеціалізоване програмне забезпечення для дослідження моделей фізичних та/або астрономічних об'єктів і процесів, обробки результатів експериментів і спостережень.

ПРН13. Створювати фізичні, математичні і комп'ютерні моделі природних об'єктів та явищ, перевіряти їх адекватність, досліджувати їх для отримання нових висновків та поглиблення розуміння природи, аналізувати обмеження.

ПРН16. Брати продуктивну участь у виконанні експериментальних та/або теоретичних досліджень в області фізики та астрономії.

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

Пререквізити. Для успішного засвоєння курсу «Макроскопічні квантові явища» студент має опанувати наступні дисципліни: «Аналітична геометрія та лінійна алгебра», всі розділи дисципліни «Математичний аналіз», «Диференціальні та інтегральні рівняння», «Спеціальні розділи математичного аналізу», всі розділи дисципліни «Методи математичної фізики», всі розділи дисциплін «Загальна фізика» та «Теоретична фізика».

Постреквізити. Навчальна дисципліна «Макроскопічні квантові явища» є основою для подальшого вивчення наступних предметів: «Фізика та техніка низьких температур», «Сучасні технології у фізиці твердого тіла», «Фізика наноструктур», а також дисциплін з курсу підготовки докторів філософії за освітньою програмою «Фізика».

3. Зміст навчальної дисципліни

Дисципліну структурно розділено на 11 тем:

Тема 1. Історія та основні факти.

Тема 2. Феноменологічні теорії.

Тема 3. Квантове узагальнення.

Тема 4. Основні параметри.

Тема 5. Границя між нормальною і надпровідною фазами. Надпровідники II роду.

Тема 6. Слабка надпровідність.

Тема 7. Вихори Абрикосова.

- Тема 8. Основи мікроскопічної теорії.
Тема 9. Феномен Купера. Надпровідна щілина.
Тема 10. Квазічастинкові стани.
Тема 11 Нерівноважні ефекти.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література.

1. В.М. Локтєв. Лекції з фізики надпровідності. Київ: Вид-во ІТФ НАН України, 2011.
2. Я. Довгий. Чарівне явище надпровідність. Київ: “Євросвіт”, 2000.
3. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Electrodynamics of Continuous Media. Course of Theoretical Physics.* Butterworth-Heinemann, 1984.
4. Tinkham Michael. *Introduction to Superconductivity (2nd ed.).* New York: Dover Books, 2004.
5. Gallop John C. *SQUIDS, the Josephson Effects and Superconducting Electronics.* CRC Press, 1990.

Допоміжна література.

6. Orlando Terry, Delin Kevin. *Foundations of Applied Superconductivity.* Prentice Hall, 1991.
7. В.М. Локтєв. Надпровідність – від гелієвих до кімнатних температур. *Світогляд*, № 2, 2011.
8. Crisan, Adrian (ed.) *Vortices and Nanostructured Superconductors.* Springer Series in Materials Science, vol. 261. Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN: 978-3-319-59353-1 (hardcover), 978-3-319-59355-5 (eBook). DOI: 10.1007/978-3-319-59355-5

Інформаційні ресурси.

1. Науково-технічна бібліотека КПІ ім. Ігоря Сікорського <http://library.kpi.ua>.
2. Національна бібліотека України імені В.І. Вернадського: <http://www.nbuv.gov.ua/>
3. Науковий журнал «Український фізичний журнал», який входить до наукометричної бази Scopus: <https://ujp.bitp.kiev.ua/index.php/ujp>

4. Науковий журнал «Condensed Matter Physics», який входить до наукометричної бази Scopus: <http://www.icmp.lviv.ua/journal/>
5. Науковий журнал «Журнал фізичних досліджень», який входить до наукометричної бази Scopus: https://physics.lnu.edu.ua/jps/index_ua.html
6. Електронний кампус КПІ ім. Ігоря Сікорського, методичне забезпечення до кредитного модуля «Вибрані розділи теоретичної фізики» <http://login.kpi.ua>
7. Платформа дистанційного навчання "Сікорський", платформа MOODLE, методичне забезпечення до кредитного модуля «Вибрані розділи теоретичної фізики» <https://do.ipk.kpi.ua/user/index.php?id=677>

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	<p>Лекція 1. Основні експериментальні факти.</p> <p>Вступ. Історична довідка. Критична температура і критичне поле. Квантування магнітного потоку. Заморожений момент. Основні прояви слабкої надпровідності.</p> <p>Література: [1], [6].</p> <p>Завдання на СРС.</p> <p>Методи фізичного дослідження: експеримент, гіпотеза, теорія. Експеримент як критерій істинності теорії. Фізичні моделі. Математика й фізика. Роль фізики в розвитку техніки й вплив техніки на розвиток фізики.</p> <p>Література: [7].</p>
2	<p>Лекція 2. Ефект Мейснера-Оксенфельда. Магнітні властивості надпровідників.</p> <p>Ефект Мейснера-Оксенфельда. Різниця між ідеальним провідником і надпровідником. Деякі відомості про високотемпературну надпровідність. Надпровідники I-го і II-го родів. Магнітні властивості НП-I. Проміжний стан. Фактор розмагнічування. Перше і друге критичні поля.</p> <p>Література: [1], [3], [4], [5].</p> <p>Завдання для СРС. Високотемпературна надпровідність. Магнітні властивості НП-II.</p> <p>Література: [6].</p>

3	<p>Лекція 3. Термодинаміка надпровідників. Критичне поле масивного зразка. Вільна енергія нормального і надпровідного станів. Теплоємність надпровідника. Скачок теплоємності в критичній точці. Вільна енергія Гіббса. Література: [1], [2], [4]. Завдання для СРС. Ентропія надпровідника. Використання теореми Нернста. Література: [6], [7], [5].</p>
4	<p>Лекція 4. Деякі підходи до опису надпровідного стану. Якому з'єднанню провідників відповідає надпровідник в околі критичної точки. Поняття про параметр порядку і когерентну поведінку частинок. Література: [1], [3], [4]. Завдання для СРС. Ретроспективний огляд. Дворідинна модель. Література: [7].</p>
5	<p>Лекція 5. Перше рівняння Лондонів. Ізотонічний ефект. Пари та парний конденсат. Умова надплинності. Перше рівняння Лондонів. Література: [1], [3], [4]. Завдання для СРС. Поняття про нормальні і надпровідні носії. Література: [7].</p>
6	<p>Лекція 6. Друге рівняння Лондонів. Кінетична енергія надпровідних частинок та модифікація рівнянь Максвелла. Мінімізація вільної енергії. Глибина проникнення. Література: [1], [2], [5]. Завдання для СРС. Нелокальна електродинаміка надпровідників, піппардівська глибина проникнення. Література: [6].</p>

7	<p>Лекція 7. Квантове узагальнення рівнянь Лондонів.</p> <p>Рівняння квантової динаміки. Квантування магнітного потоку. Розподіл поля і струму в зразках прямокутної форми, пластини з полем та струмом. Магнітопольовий конденсатор. Література: [1], [2], [3].</p> <p>Завдання для СРС.</p> <p>Особливі випадки квантування магнітного потоку. Література: [7].</p>
8	<p>Лекція 8. Рівняння квантової динаміки.</p> <p>Рівняння квантової динаміки. Квантування магнітного потоку. Розподіл поля і струму в зразках прямокутної форми, пластини з полем та струмом. Магнітопольовий конденсатор. Література: [1], [2], [3].</p> <p>Завдання для СРС.</p> <p>Особливі випадки квантування магнітного потоку. Література: [7].</p>
9	<p>Лекція 9. Комплексна провідність надпровідника.</p> <p>Рівняння нестационарного стану. Скін-ефект. Поверхневий імпеданс. Література: [1], [2], [5].</p> <p>Завдання для СРС.</p> <p>Особливості нестационарного стану. Література: [12].</p>
10	<p>Лекція 10. Глибина проникнення.</p> <p>Температурна поведінка глибини проникнення та концентрації надпровідних носіїв. Література: [1], [2], [5].</p> <p>Завдання для СРС.</p> <p>Особливості нестационарного стану. Література: [7].</p>
11	<p>Лекція 11. Теорія Гінзбурга-Ландау.</p> <p>Вступ. Відомості про параметр порядку та основні засади теорії фазових перетворень II-го роду. Хвильова функція як параметр порядку. Вільна енергія та рівняння теорії Гінзбурга-Ландау. Література: [1], [4], [5].</p> <p>Завдання для СРС.</p> <p>Поняття про критичну поведінку. Література: [7].</p>
12	<p>Лекція 12. Теорія Гінзбурга-Ландау (продовження).</p> <p>Проникнення магнітного поля у надпровідник. Градієнтна інваріантність. Характерні просторові параметри теорії та їх фізичний зміст. Параметр Гінзбурга-Ландау та його фундаментальне значення.</p>

	<p>Література: [1], [2], [5].</p> <p>Завдання для СРС.</p> <p>Ефект близькості. Граничні умови.</p> <p>Література: [7].</p>
13	<p>Лекція 13. Енергія границі між нормальною та надпровідною фазами.</p> <p>Допоміжні співвідношення. Граничні значення вільної енергії Гельмгольца та Гіббса. Значення стаціонарних величин. Граничні випадки.</p> <p>Література: [1], [3], [6].</p> <p>Завдання для СРС.</p> <p>Фізичний зміст поділу надпровідників на два роди.</p> <p>Література: [5].</p>
14	<p>Лекція 14. Слабка надпровідність.</p> <p>Деякі приклади слабого зв'язку. Хвильова функція конденсату та її фаза.</p> <p>Умови Джозефсона.</p> <p>Література: [1], [3], [6].</p> <p>Завдання для СРС.</p> <p>Особливості слабого зв'язку.</p>
15	<p>Лекція 15. Слабка надпровідність.</p> <p>Перший, або стаціонарний ефект Джозефсона. Протікання надструму між берегами контактів.</p> <p>Література: [1], [3], [6].</p> <p>Завдання для СРС.</p> <p>Особливості протікання надструму.</p>
16	<p>Лекція 16. Слабка надпровідність (продовження).</p> <p>Другий, або нестаціонарний ефект Джозефсона. Розв'язок рівняння Джозефсона. Джозефсонівська генерація.</p> <p>Література: [1], [2], [5].</p> <p>Завдання для СРС.</p> <p>Особливості ефекту Джозефсона.</p>
17	<p>Лекція 17. Відгук джозефсонівського контакту на зовнішнє магнітне поле.</p> <p>Рівняння Феррела-Прейнджа. Джозефсонівські вихори, або солітони.</p> <p>Література: [1], [2], [5].</p> <p>Завдання для СРС.</p>

	Солітонна модель.
18	<p>Лекція 18. Максимальний бездисипативний струм у джозефсонівському контакті.</p> <p>Струмові стани у контактах. Випадок сильного поля. Поняття про сквіди.</p> <p>Література: [1], [2], [5].</p> <p>Завдання для СРС.</p> <p>Фізичні основи роботи сквідів.</p> <p>Література: [5].</p>
19	<p>Лекція 19. Надпровідники II-го роду.</p> <p>Поле поодинокого вихору. Розрахунок першого критичного поля. Взаємодія вихорів. Друге критичне поле.</p> <p>Література: [1], [4], [6].</p> <p>Завдання для СРС.</p> <p>Мейснерівський стан.</p> <p>Література: [8].</p>
20	<p>Лекція 20. Мікроскопічна теорія надпровідності.</p> <p>Вступ. Електрон-фононна взаємодія. Природа протягування та причини порушення закону Кулона. Теорія Бардіна-Купера-Шріффера. Надпровідна щілина. Струм розпарювання.</p> <p>Література: [1], [2], [3], [4], [5].</p> <p>Завдання для СРС.</p> <p>Отримання оператора електрон-фононної взаємодії методом канонічних перетворень. Особливості теорії Бардіна-Купера-Шріффера.</p>

Практичні заняття.

№	Назва практичного заняття
1	Термодинаміка надпровідників.
2	Рівняння Лондонів. Лондонська глибина проникнення. Розподіл поля і струму в зразках прямокутної форми, пластини з полем та струмом.
3	Скін-ефект. Поверхневий імпеданс.
4	Рівняння теорії Гінзбурга-Ландау. Проникнення магнітного поля у надпровідник.
5	Енергія границі між нормальною та надпровідною фазами.
6	Стаціонарний та нестаціонарний ефект Джозефсона.

6. Самостійна робота студента

З метою чіткої організації самостійної роботи студентів і задля підвищення якості засвоєння навчального матеріалу та вироблення ґрунтовних навичок наукової діяльності пропонуються індивідуальні завдання у формі самостійної підготовки реферату із вибраних тем. 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	58
2	Підготовка до МКР	36
3	Підготовка до екзамену	34

Зважаючи на те, що значна частина загального часу вивчення дисципліни відведена на самостійну роботу, студенти, готуючись до лекційних занять та доповідей, в першу чергу повинні ознайомитися з темою відповідного розділу, опрацювати матеріал за допомогою конспекту та підручників, список яких наведений у розділі 4.

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед студентом:

- правила відвідування занять: відповідно до Наказу 1-273 від 14.09.2020 р. заборонено оцінювати присутність або відсутність студента на аудиторному занятті, в тому числі нараховувати заохочувальні або штрафні бали. Відповідно до РСО даної дисципліни бали нараховують за відповідні види навчальної активності на лекційних та практичних заняттях.
- правила поведінки на заняттях: студент має можливість отримувати бали за відповідні види навчальної активності на лекційних заняттях, передбачені РСО дисципліни. Використання засобів зв'язку для пошуку інформації на гугл-диску викладача, в інтернеті, в дистанційному курсі на платформі Сікорський здійснюється за умови вказівки викладача;
- політика дедлайнів та перескладань: якщо студент не проходив або не з'явився на МКР (без поважної причини), його результат оцінюється у 0 балів. Перескладання МКР здійснюється за узгодженням з викладачем;

- політика щодо академічної доброчесності: Кодекс честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» <https://kpi.ua/files/honorcode.pdf> встановлює загальні моральні принципи, правила етичної поведінки осіб та передбачає політику академічної доброчесності для осіб, що працюють і навчаються в університеті, якими вони мають керуватись у своїй діяльності, в тому числі при вивченні та складанні контрольних заходів з дисципліни «Макроскопічні квантові явища»;
- при використанні цифрових засобів зв'язку з викладачем (мобільний зв'язок, електронна пошта, переписка на форумах та у соцмережах тощо) необхідно дотримуватись загальноприйнятих етичних норм, зокрема бути ввічливим та обмежувати спілкування робочим часом викладача.

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

На першому занятті студенти ознайомлюються із рейтинговою системою оцінювання (PCO) дисципліни, яка побудована на основі «Положення про систему оцінювання результатів навчання», https://document.kpi.ua/files/2020_1-273.pdf

Поточний контроль: робота на практичних заняттях, експрес-опитування, мкр.

Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестровий контроль: екзамен.

Умови допуску до семестрового контролю: поточний рейтинг не менше 18 балів.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання.

Рейтинг студента з дисципліни складається з балів, які він отримує:

- 1) за МКР(2 контрольні роботи);
- 2) за роботу на практичних заняттях
- 3) за експрес-опитування;
- 4) за відповідь на екзамену.

МКР.

Виконання контрольних робіт:

Ваговий бал – 20 балів. Максимальна кількість балів за всі контрольні роботи дорівнює $20 \text{ балів} \times 2 = 40 \text{ балів}$. Критерії оцінювання:

творча робота	18-20 балів
роботу виконано з незначними недоліками	15-17 балів
роботу виконано з певними помилками	12-14 балів

роботу не зараховано (завдання не виконане або є грубі помилки) - 0 балів.

Практичні заняття

Активна робота на практичних заняттях оцінюється в 1 бал. Максимальна кількість балів за практичні заняття 4 бали.

Експрес-опитування.

Експрес-опитування складаються із тестових завдань та запитань із короткою відповіддю за матеріалами лекції. Ваговий коефіцієнт одного опитування дорівнює 4. Максимальна кількість балів за експрес-опитування становить $4 \times 4 = 16$ балів.

Нарахування балів за відповідь в опитуванні:

- всі відповіді правильні 3,8-4 бали;
- відповіді містять незначні недоліки 3-3,6 балів;
- неповні відповіді або відповіді містять певні помилки 2,4-2,9 балів;
- більше половини невірних відповідей 0.

Екзамен.

Критерії оцінювання. Завдання містить два теоретичні питання, кожне з яких оцінюється у 20 балів. Всього $2 \times 20 = 40$ балів.

Нарахування балів за відповідь на заліку:

- повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) 36-40 балів;
- достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації) 30-35 балів;
- неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації) 24-29 балів;
- незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) 0.

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)

До системи методичного забезпечення дисципліни належить програма курсу, робоча програма навчальної дисципліни, тексти лекцій, перелік теоретичних завдань для екзамену.

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль:

- Історична довідка. Критична температура і критичне поле. Квантування магнітного потоку. Заморожений момент. Основні прояви слабкої надпровідності.
- Ефект Мейснера-Оксенфельда. Різниця між ідеальним провідником і надпровідником. Деякі відомості про високотемпературну надпровідність.
- Надпровідники I-го і II-го родів. Магнітні властивості НП-I. Проміжний стан. Фактор розмагнічування. Магнітні властивості НП-II. Перше і друге критичні поля.
- Критичне поле масивного зразка. Вільна енергія нормального і надпровідного станів. Ентропія надпровідника. Використання теореми Нернста. Теплоємність надпровідника. Скачок теплоємності в критичній точці. Вільна енергія Гіббса.
- Ретроспективний огляд. Дворідинна модель. Поняття про нормальні і надпровідні носії. Якому з'єднанню нормальних провідників відповідає надпровідник в околі критичної точки. Поняття про параметр порядку та когерентну поведінку частинок. Ізотопічний ефект. Пари та парний конденсат. Умова надплинності. Перше рівняння Лондонів.
- Кінетична енергія надпровідних частинок та модифікація рівнянь Максвелла. Мінімізація вільної енергії. Глибина проникнення. Нелокальна електродинаміка надпровідників, піппардівська глибина проникнення.
- Рівняння квантової динаміки. Квантування магнітного потоку. Особливі випадки квантування магнітного потоку. Розподіл поля і струму в зразках прямокутної форми, пластини з полем та струмом. Магніто-польовий конденсатор.
- Рівняння нестационарного стану. Скін-ефект. Поверхневий імпеданс. Температурна поведінка глибини проникнення та концентрації надпровідних носіїв.
- Відомості про параметр порядку та основні засади теорії фазових перетворень II-го роду. Поняття про критичну поведінку. Хвильова функція як параметр порядку. Вільна енергія та рівняння теорії Гінзбурга-Ландау.
- Проникнення магнітного поля у надпровідник. Градієнтна інваріантність. Характерні просторові параметри теорії та їх фізичний зміст. Параметр Гінзбурга-Ландау та його фундаментальне значення. Ефект близькості. Граничні умови.
- Допоміжні співвідношення, що випливають з термодинамічного потенціалу у формі Гінзбурга-Ландау. Граничні значення вільної енергії Гельмгольца та Гіббса. Значення стаціонарних величин. Граничні випадки. Фізичний зміст поділу надпровідників на два роди.
- Деякі приклади слабого зв'язку. Хвильова функція конденсату та її фаза. Умови Джозефсона. Перший, або стаціонарний, ефект Джозефсона. Протікання надструму між берегами контактів.
- Другий, або нестационарний, ефект Джозефсона. Розв'язок рівняння Джозефсона. Джозефсонівська генерація.
- Рівняння Феррела-Прейнджа. Джозефсонівські вихори, або солітони.
- Струмові стани у контактах. Випадок сильного поля. Поняття про сквіди.

- Поле поодинокого вихору. Розрахунок першого критичного поля. Мейснерівський стан. Взаємодія вихорів. Друге критичне поле.
- Природа магнетизму надпровідників II-го роду. Третє критичне поле. Критичний струм. Центри пінінгу та критична густина струму. Резистивний стан. речовини.
- Електрон-фононна взаємодія. Природа протягування та причини порушення закону Кулона. Отримання оператора електрон-фононної взаємодії методом канонічних перетворень.
- Теорія Бардіна-Купера-Шріффера. Надпровідна щілина. Струм розпарювання.

Робочу програму навчальної дисципліни (Силабус):

Складено: старший викладач кафедри загальної фізики, доктор філософії з фізики та астрономії Гусєва Ю. І.

Ухвалено: кафедрою загальної фізики (протокол № 6 від 26.06.2025 р.).

Погоджено Методичною комісією фізико-математичного факультету (протокол № 10 від 27.06.2025 р.)