

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Львівський національний університет імені Івана Франка**  
**Фізичний факультет**  
**Кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука**

**Затверджено**

На засіданні кафедри теоретичної фізики  
імені професора Івана Вакарчука  
фізичного факультету  
Львівського національного університету  
імені Івана Франка  
(протокол № 1 від 31.08.2023 р.)

Завідувач кафедри  Володимир ТКАЧУК

**Силабус**

**з навчальної дисципліни «Актуальні проблеми квантової механіки»,  
що викладається в межах  
ОНП «Квантові комп'ютери та квантове програмування»  
другого (магістерського) рівня вищої освіти  
для здобувачів з спеціальності 104 Фізика та астрономія**

**Львів 2023**

<b>Назва дисципліни</b>	Актуальні проблеми квантової механіки
<b>Адреса викладання дисципліни</b>	вул. Драгоманова, 19, 79005, м. Львів
<b>Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна</b>	фізичний факультет, кафедра теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука
<b>Галузь знань, шифр та назва спеціальності</b>	Галузь знань – 10 Природничі науки Спеціальність – 104 Фізика та астрономія
<b>Викладач дисципліни</b>	Стецько Микола Миколайович, доцент кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, к. ф.-м.н.
<b>Контактна інформація викладача</b>	mykola.stetsko@lnu.edu.ua; mstetsko@gmail.com
<b>Консультації з курсу відбуваються</b>	Консультації в день проведення лекцій та лабораторних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі консультації через електронну пошту або он-лайн засобами Microsoft Teams, Telegram.
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://physics.lnu.edu.ua/course/aktualni-problemy-kvantovoi-mekhaniky-104-fizyka-ta-astronomiia-op-kvantovi-komp-iutery-ta-kvantove-prohramuvannia">https://physics.lnu.edu.ua/course/aktualni-problemy-kvantovoi-mekhaniky-104-fizyka-ta-astronomiia-op-kvantovi-komp-iutery-ta-kvantove-prohramuvannia</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Актуальні проблеми квантової механіки» є нормативною дисципліною для підготовки магістра за спеціальністю 104 Фізика та астрономія, яка викладається в III семестрі в обсязі 5 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	Дисципліна «Актуальні проблеми квантової механіки» присвячена вивченню деяких топологічних ефектів у фізиці квантової матерії.
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	Метою даної дисципліни є одержання студентами базових знань про топологічні фази конденсованого стану. Завданням курсу є формування в студентів базових знань про квабіти і логічні операції на основі топологічних станів квантових систем.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<p><b>Базова:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. P. Marra, Majorana nanowires for topological quantum computation: A tutorial. ArXiv:2206.14828.</li> <li>2. A. Kitaev, Annals of Physics 303, 2-30 (2003).</li> <li>3. A. Kitaev, Annals of Physics 321, 2-111 (2006).</li> <li>4. F.D.M. Haldane, Physical Review Letters 61, 2015-2018 (1988).</li> <li>5. C.L. Kane and E.J. Mele, Physical Review Letters 95, 226801-1-4 (2005).</li> </ol> <p><b>Допоміжна:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>6. K. Chhajed, From Ising model to Kitaev chain. An introduction to topological phase transitions. ArXiv:2009.01078.</li> <li>7. J.Alicea et al., Non-Abelian statistics and topological quantum information processing in 1D wire networks. Nature Physics 7, 412-417 (2011).</li> <li>8. P. Fulde, Electron Correlations in Molecules and Solids (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1995).</li> </ol> <p>Додаткові матеріали також буде запропоновано для кожної теми окремо.</p> <p><b>Інформаційні ресурси:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>9. <a href="https://arxiv.org">https://arxiv.org</a></li> </ol>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр
<b>Обсяг курсу</b>	150 годин, з яких 48 годин аудиторних занять, з них 16 годин лекцій,

	32 години лабораторних занять, та 102 годин самостійної роботи.
<b>Очікувані результати навчання</b>	<p>В результаті вивчення даного курсу студенти повинні <b>знати:</b> теорію трьох моделей Кітаєва і моделей Галдейна та Кейне-Меле;</p> <p><b>вміти:</b> застосовувати освоєні техніки до інших задач.</p> <p><i>Загальні компетентності</i></p> <p><b>ЗК01.</b> Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.</p> <p><b>ЗК06.</b> Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми.</p> <p><b>ЗК07.</b> Здатність проведення досліджень на відповідному рівні.</p> <p><i>Спеціальні компетентності</i></p> <p><b>СК03.</b> Здатність презентувати результати проведених досліджень, а також сучасні концепції у фізиці та/або астрономії фахівцям і нефахівцям.</p> <p><b>СК04.</b> Здатність комунікувати із колегами усно і письмово державною та англійською мовами щодо наукових досягнень та результатів досліджень у галузі фізики та/або астрономії.</p> <p><i>Програмні результати навчання (ПРН), на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</i></p> <p><b>РН01.</b> Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної та експериментальної фізики та/або астрономії для розв'язання складних задач і практичних проблем.</p> <p><b>РН04.</b> Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних фізичних та/або астрономічних досліджень і оцінювання їх достовірності.</p> <p><b>РН05.</b> Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об'єктів і процесів.</p> <p><b>РН10.</b> Відшукувати інформацію і дані, необхідні розв'язання складних задач фізики та/або астрономії, використовуючи різні джерела, зокрема, наукові видання, наукові бази даних тощо, оцінювати та критично аналізувати отриману інформацію та дані.</p> <p><b>РН16.</b> Брати продуктивну участь у виконанні експериментальних та/або теоретичних досліджень у галузі фізики та астрономії.</p>
<b>Ключові слова</b>	Ланцюжок Кітаєва, торовий код, модель Кітаєва на шестикутній ґратці, топологічний квабіт, топологічні квантові обчислення, квантовий ефект Гола, графен
<b>Формат курсу</b>	Очний
	проведення лекцій, лабораторних занять і консультації для кращого розуміння тем
<b>Теми</b>	Наведено у таблиці 1
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	Підсумковий контроль: залік в кінці семестру. Форма: усна.
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення курсу студенти потребують базових знань квантової механіки, методів математичної фізики, квантової статистичної механіки.
<b>Навчальні методи та техніки, які буде використано під час викладання курсу</b>	Презентації, лекції, робота за комп'ютером.
<b>Необхідне обладнання</b>	персональний комп'ютер, проектор

<p><b>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)</b></p>	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за таким співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• робота на лабораторних заняттях під час семестру: 20% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 20 відповідно до такої шкали: <ul style="list-style-type: none"> <li>16–20 — активна участь у 7–8 заняттях;</li> <li>11–15 — активна участь у 5–6 заняттях;</li> <li>6–10 — активна участь у 3–4 заняттях;</li> <li>1–5 — активна участь у 1–2 заняттях;</li> <li>0 — жодної активної участі в лабораторних заняттях;</li> </ul> </li> <li>• підсумкове тестування за двома змістовими модулями (по 25 балів): 50% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 50;</li> <li>• розширена доповідь (або декілька доповідей) на лабораторних заняттях за тематикою курсу (усереднена оцінка): 30% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 30 відповідно до такої шкали: <ul style="list-style-type: none"> <li>24–30 — студент повністю володіє матеріалом;</li> <li>18–23 — рівень володіння матеріалом достатній;</li> <li>12–17 — рівень володіння матеріалом частковий;</li> <li>1–11 — студент майже не володіє матеріалом;</li> <li>0 — доповіді не було.</li> </ul> </li> </ul> <p>Максимальна семестрова кількість балів — 100. Додаткові бали (до 10 включно) можна отримати: написання тез, статті, участь у міжнародних, всеукраїнських та/або інших заходах або конкурсах за тематикою навчальної дисципліни.</p> <p>Підсумкова максимальна кількість балів — 100.</p>
<p><b>Питання на залік (чи питання на контрольні роботи)</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ланцюжок Кітаєва.</li> <li>2. Топологічні інваріанти.</li> <li>3. Зв'язаний стан майоранів на границях ланцюжка Кітаєва.</li> <li>4. Статистика майоранових мод. Заплітання.</li> <li>5. Топологічні квабіти.</li> <li>6. Торівий код.</li> <li>7. Модель Кітаєва на шестикутній гратці. Представлення спінів через майорани. Квадратичні гамільтоніани.</li> <li>8. Спектр ферміонів і фазова діаграма.</li> <li>9. Фаза зі щільною у спектрі. Торівий код.</li> <li>10. Квантовий ефект Гола у моделі Галдейна.</li> <li>11. Квантовий спіновий ефект Гола у графені.</li> </ol>
<p><b>Опитування</b></p>	<p>Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.</p>

Таблиця 1

Схема курсу «Актуальні проблеми квантової механіки»

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1–2	<p><b>Тема 1.</b> Ланцюжок Кітаєва. Топологічні інваріанти. <b>Література:</b> Б2, Б3, Д6.</p>	<p>Лекції — 2 год. лабораторні — 4 год. самостійна робота — 13 год.</p>	2 тижні
3–4	<p><b>Тема 2.</b> Зв'язаний стан майоранів на границях ла-</p>	<p>Лекції — 2 год.</p>	2 тижні

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
	нцюжка Кітаєва. Статистика майоранових мод. Заплітання  <b>Література:</b> Б2, Б3.	лабораторні — 4 год. самостійна робота — 13 год.	
5–6	<b>Тема 3.</b> Топологічні квабіти. <b>Література:</b> Б1, Д6, Д7.	Лекції — 2 год. лабораторні — 4 год. самостійна робота — 13 год.	2 тижні
7–8	<b>Тема 4.</b> Торівий код. <b>Література:</b> Б2, Б3.	Лекції — 2 год. лабораторні — 4 год. самостійна робота — 13 год.	2 тижні
9–10	<b>Тема 5.</b> Модель Кітаєва на шестикутній гратці. Представлення спінів через майорани. Квадратичні гамільтоніани. Спектр ферміонів і фазова діаграма. <b>Література:</b> Б2, Б3, Д6, Д7.	Лекції — 2 год. лабораторні — 4 год. самостійна робота — 13 год.	2 тижні
11–12	<b>Тема 6.</b> Модель Кітаєва на шестикутній гратці: фаза зі щілиною у спектрі. Торівий код. <b>Література:</b> Б2, Б3, Д6, Д7	Лекції — 2 год. лабораторні — 4 год. самостійна робота — 13 год.	2 тижні
13–14	<b>Тема 7.</b> Квантовий ефект Гола у моделі Галдейна. <b>Література:</b> Б4, Б5, Д8.	Лекції — 2 год. лабораторні — 4 год., самостійна робота — 13 год.	2 тижні
15–16	<b>Тема 8.</b> Квантовий спіновий ефект Гола у графені.  <b>Література:</b> Б4, Б5, Д8.	Лекції — 2 год. лабораторні — 4 год. самостійна робота — 11 год.	2 тижні