

**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 «Квантова теорія поля (Quantum Field Theory)»,**  
**що викладається в межах**  
**ОНП «Теоретична фізика та астрофізика»**  
**другого (магістерського) рівня вищої освіти**  
**для здобувачів зі спеціальності 104 Фізика та астрономія**

**Львів 2023**

<b>Назва курсу</b>	Квантова теорія поля (Quantum Field Theory)
<b>Адреса викладання дисципліни</b>	вул. Драгоманова, 12, 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>	доцент кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука, канд.ф.-м.н. Пастухов Володимир Степанович
<b>Контактна інформація викладача</b>	<a href="mailto:volodymyr.pastukhov@lnu.edu.ua">volodymyr.pastukhov@lnu.edu.ua</a> ; <a href="mailto:volodyapastukhov@gmail.com">volodyapastukhov@gmail.com</a> <a href="https://physics.lnu.edu.ua/employee/pastukhov-v-s">https://physics.lnu.edu.ua/employee/pastukhov-v-s</a>
<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 Zoom, Microsoft Teams, Skype.
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://physics.lnu.edu.ua/course/kvantova-teoriya-polya-fizyka">https://physics.lnu.edu.ua/course/kvantova-teoriya-polya-fizyka</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Квантова теорія поля (Quantum Field Theory)» належить до обов'язкового компонента освітньо-наукової програми «Теоретична фізика та астрофізика» спеціальності 104 Фізика та астрономія другого (магістерського) рівня вищої освіти. Її викладають у II семестрі в обсязі 5 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	У курсі коротко розглянуто основи квантової теорії поля, як теорії, що описує фізику високих енергій та елементарних частинок.
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	Метою і завданням навчальної дисципліни «Квантова теорія поля (Quantum Field Theory)» є ознайомлення студентів основами історично сформованого підходу до фізики високих енергій та елементарних частинок: вироблення уявлення про поля різної структури, формування зв'язку симетрій із законами збереження, формулювання процедур канонічного квантування полів і за допомогою інтегралів за траєкторіями, ознайомлення з ренормгруповою процедурою, тощо.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<b>Базова:</b> 1. L.H. Ryder, <i>Quantum Field Theory</i> . Cambridge University Press, 1985. 2. N. Bogolyubov, D. Shirkov, <i>Quantum Fields</i> . Benjamin Cummings, 1982. 3. M. Peskin, D. Schroeder, <i>An Introduction to Quantum Field Theory</i> . Perseus Books, Cambridge, Massachusetts, 1995. 4. S. Weinberg, <i>The Quantum Theory of Fields</i> . Vol. 1. Cambridge University Press, 1995. 5. C. Itzykson, J.-B. Zuber, <i>Quantum Field Theory</i> . McGraw-Hill, 1980. 6. A. Zee, <i>Quantum Field Theory in a Nutshell</i> (2nd ed.). Princeton University Press, 2010. <b>Допоміжна:</b> 1. H. Kleinert, V. Schulte-Frohlinde, <i>Critical Properties of <math>\phi^4</math>-Theories</i> . World Scientific, 2001. 2. S. Weinberg, <i>The Quantum Theory of Fields</i> . Vol. 2. Cambridge University Press, 1995.

	<p><b>Інформаційні ресурси:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Quantum Field Theory</i> by P. J. Mulders</li> <li>2. Н. Kleinert, <i>Multivalued Fields in Condensed Matter, Electrodynamics, and Gravitation</i>. World Scientific, 2008.</li> </ol>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр
<b>Обсяг курсу</b>	150 годин, з яких 48 годин аудиторних занять, з них 16 години лекцій, 32 годин лабораторних занять, та 102 години самостійної роботи.
<b>Очікувані результати навчання</b>	<p>Курс формує такі загальні (ЗК) та спеціальні компетентності (СК):</p> <p><i>Загальні компетентності:</i></p> <p>ЗК01. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.</p> <p>ЗК02. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.</p> <p>ЗК04. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.</p> <p><i>Спеціальні компетентності:</i></p> <p>СК01. Здатність використовувати закони та принципи фізики та/або астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ.</p> <p>СК02. Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем у галузі фізики та/або астрономії.</p> <p>СК04. Здатність комунікувати з колегами усно і письмово державною та англійською мовами щодо наукових досягнень та результатів досліджень у галузі фізики та/або астрономії.</p> <p>СК05. Здатність сприймати новоздобуті знання у галузі фізики та астрономії та інтегрувати їх з уже наявними, а також самостійно опановувати знання та навички, необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних галузях фізики та/або астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях.</p> <p><i>Програмні результати навчання (РН), на досягнення яких спрямоване вивчення курсу:</i></p> <p>РН01. 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>РН02. Проводити експериментальні та/або теоретичні дослідження з фізики та астрономії, аналізувати отримані результати в контексті існуючих теорій, робити аргументовані висновки (включаючи оцінювання ступеня невизначеності) та пропозиції щодо подальших досліджень.</p> <p>РН05. Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об'єктів і процесів.</p> <p>РН06. Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та/або інновацій у галузі фізики та/або астрономії.</p> <p>РН09. Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємокорисно спілкуючись із колегами.</p>

	PH13. 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
<b>Ключові слова</b>	path integral; Noether theorem; gauge fields; canonical quantisation; Feynman's diagram; renormalization group / інтеграл за траєкторіями; теореми Нетер; калібрувальні поля; канонічне квантування; діаграма Файнмана; ренормалізаційна група
<b>Формат курсу</b>	Очний
<b>Теми</b>	Див. Схема курсу
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	Іспит в кінці II семестру. Форма: письмово-усний
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення курсу студенти потребують знань із таких дисциплін: теоретична механіка, квантова механіка, квантова статистика, фізика бозе-систем.
<b>Навчальні методи та техніки, які буде використано під час викладання курсу</b>	Презентація, лекції, дискусія, розв'язування задач. Передбачено ілюстрування лекційного матеріалу схемами та рисунками.
<b>Необхідне обладнання</b>	персональний комп'ютер, загальнонавчальні комп'ютерні програми й операційні системи, проєктор
<b>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)</b>	<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: 10% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 10 відповідно до такої шкали: <ul style="list-style-type: none"> <li>9–10 — активна участь у 14–16 заняттях;</li> <li>7–8 — активна участь у 10–12 заняттях;</li> <li>5–6 — активна участь у 6–8 заняттях;</li> <li>1–4 — активна участь у 1–4 заняттях;</li> <li>0 — жодної активної участі в лабораторних заняттях;</li> </ul> </li> <li>захист чотирьох лабораторних робіт (по 10 балів): 40% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 40 відповідно до такої шкали: <ul style="list-style-type: none"> <li>35–40 — студент повністю виконав всі лабораторні роботи і володіє відповідним матеріалом;</li> <li>25–30 — рівень володіння матеріалом достатній (або виконано три лабораторні роботи);</li> <li>15–20 — рівень володіння матеріалом частковий (або виконано дві лабораторні роботи);</li> <li>1–10 — студент майже не володіє матеріалом (або виконано одну лабораторну роботу);</li> <li>0 — студент не виконав жодної лабораторної роботи.</li> </ul> </li> </ul> <p>Максимальна семестрова кількість балів — 50.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>іспит: 50% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 50: два розширених завдання по 25 балів кожне відповідно до такої шкали: <ul style="list-style-type: none"> <li>21–25 — студент повністю володіє матеріалом;</li> </ul> </li> </ul>

	<p>16–20 — рівень володіння матеріалом достатній;  11–15 — рівень володіння матеріалом частковий;  1–10 — студент майже не володіє матеріалом;  0 — відповідь відсутня.</p> <p>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>Письмові роботи:</b> Очікується, що студенти виконають два види письмових робіт (лабораторні роботи протягом семестру, іспит).</p> <p><b>Академічна доброчесність:</b> Очікується, що роботи студентів будуть їх оригінальними дослідженнями чи міркуваннями. Відсутність посилань на використані джерела, фабрикування джерел, списування, втручання в роботу інших студентів становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної недоброчесності. Виявлення ознак академічної недоброчесності в письмовій роботі студента є підставою для її незарахування викладачем, незалежно від масштабів плагіату чи обману.</p> <p><b>Відвідання занять</b> є важливою складовою навчання. Очікується, що всі студенти відвідають усі лекції і лабораторні заняття курсу. Студенти мають інформувати викладача про неможливість відвідати заняття. У будь-якому випадку студенти зобов'язані дотримуватися усіх строків, визначених для виконання усіх видів письмових робіт, передбачених курсом.</p> <p><b>Література.</b> Усю літературу, яку студенти не зможуть знайти самостійно, буде надано викладачами виключно в освітніх цілях без права її передавання третім особам. Студенти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих.</p> <p><b>Політика виставлення балів.</b> Враховуються бали, набрані на лабораторних заняттях. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студента під час заняття; недопустимість пропусків та запізнь на заняття; користування мобільним телефоном, планшетом чи іншими мобільними пристроями під час заняття в цілях, не пов'язаних із навчанням; списування та плагіат; несвоєчасне виконання поставленого завдання і т. ін.</p> <p><b>Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.</b></p>
<p><b>Перелік питань на іспит</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Variational principle for real scalar field. The Klein–Gordon equation. [Варіаційний принцип для дійсного скалярного поля. Рівняння Кляйна–Гордона.]</li> <li>2. The Noether theorem. Energy-momentum, 4d angular momentum conservation laws as a consequence of invariance under the 4d translations and rotations. [Теорема Нетер. Закони збереження енергії, імпульсу, моменту імпульсу як наслідки інваріантності просторово-часових трансляцій і обертань.]</li> </ol>

	<ol style="list-style-type: none"> <li>3. Complex scalar field. Global gauge transformations and charge conservation law. [Комплексне скалярне поле. Глобальні калібрувальні перетворення і закон збереження заряду.]</li> <li>4. Local U(1) gauge transformations and field Lagrangian. [Локальні U(1)-калібрувальні перетворення і польовий лагранжіан]</li> <li>5. Non-abelian gauge transformations. SU(2) symmetry [Неабелеві калібрувальні поля. Симетрія SU(2).]</li> <li>6. Yang–Mills field. [Поле Янга–Міллса.]</li> <li>7. Feynman’s formulation of quantum mechanics in terms of path integrals. [Файнманове формулювання квантової механіки на основі функціональних інтегралів]</li> <li>8. Perturbation theory in Feynman’s formulation. [Теорія збурень у файнманівському формулюванні]</li> <li>9. The generating functional for scalar fields. The generating functional for the Green function of free particles. [Твірний функціонал для скалярних полів. Твірний функціонал для функцій Гріна вільних частинок.]</li> <li>10. The <math>n</math>-point Green function. Wick’s theorem. [<math>n</math>-часткові функції Гріна. Теорема Віка.]</li> <li>11. The <math>\phi^4</math> theory. The Feynman diagrams. [Теорія <math>\phi^4</math>. Діаграми Файнмана.]</li> <li>12. The generating functional for spinor field. The Grassmann algebra. [Твірний функціонал для спінового поля. Алгебра Грассмана.]</li> <li>13. Feynman’s rules for scalar and spinor fields. [Правила Файнмана для скалярних і спінових полів.]</li> <li>14. The U(1) spontaneous symmetry breaking. The Goldstone boson. [Спонтанне порушення U(1) симетрії. Голдстоунів бозон.]</li> <li>15. The spontaneous symmetry breaking of gauge fields. The Higgs phenomenon. [Спонтанне порушення калібрувальних симетрій. Явища Хіггса.]</li> <li>16. Renormalisation. Divergences in <math>\phi^4</math> theory. Dimensional regularization. [Перенормування. Розбіжності в теорії <math>\phi^4</math>. Розмірна регуляризація теорії.]</li> </ol>
<b>Опитування</b>	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

## Схема курсу «Квантова теорія поля (Quantum Field Theory)»\*

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1–2	<p><b>1. Lagrange formalism.</b> Variational principle. Real scalar field. The Klein–Gordon equation. The Noether theorem. Energy-momentum, 4d angular momentum conservation laws as a consequence of invariance under the 4d translations and rotations. [Лагранжевий формалізм. Варіаційний принцип. Дійсне скалярне поле. Рівняння Кляйна–Гордона. Теорема Нетер. Закони збереження енергії, імпульсу, моменту імпульсу як наслідки інваріантності просторово-часових трансляцій і обертань.]</p> <p><b>Література:</b> Б1, Б2</p>	Лекції — 2 год, лабораторні — 4 год, самостійна робота — 12 год	2 тижні
3–4	<p><b>2. Gauge transformations.</b> Complex scalar field. Global gauge transformations. Charge conservation law. Local U(1) gauge transformations. [Калібрувальні перетворення. Комплексне скалярне поле. Глобальні калібрувальні перетворення. Закон збереження заряду. Локальні U(1)-калібрувальні перетворення]</p> <p><b>Література:</b> Б1, Б2</p>	Лекції — 2 год, лабораторні — 4 год, самостійна робота — 12 год	2 тижні
5–6	<p><b>3. Gauge transformations.</b> Non-abelian gauge transformations. SU(2) symmetry. Yang–Mills field. [Калібрувальні перетворення. Неабелеві калібрувальні поля. Симетрія SU(2). Поле Янга–Міллса ]</p> <p><b>Література:</b> Б3, Б4, Б5</p>	Лекції — 2 год, лабораторні — 4 год, самостійна робота — 12 год	2 тижні

\* Поклики на літературу подано відповідно до переліку базової (Б) та допоміжної (Д) літератури.

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
7–8	<p><b>4. Generating functionals.</b> Feynman's formulation of quantum mechanics in terms of path integrals. Perturbation theory. The S-matrix. The vacuum-vacuum transition amplitude with the source field. The generating functional for scalar fields. The generating functional for the Green function of free particles. The n-point Green function. Wick's theorem. [Твірні функціонали. Файнманове формулювання квантової механіки на основі функціональних інтегралів. Теорія збурень. S-матриця. Амплітуда переходу вакуум-вакуум у присутності джерела. Вакуумні середні хронологічних добутків операторів як функціональні похідні. Твірний функціонал для скалярних полів. Твірний функціонал для функцій Гріна вільних частинок. n-часткові функції Гріна. Теорема Віка.]</p> <p><b>Література:</b> Б1, Б4, Б5, Б6</p>	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, контрольна робота — 2 год, самостійна робота — 12 год	2 тижні
9–10	<p><b>5. Interacting fields.</b> The generating functional for interacting fields. The <math>\phi^4</math> theory. The Feynman diagram. The generating functional for spinor field. The Grassmann algebra. Feynman's rules for scalar and spinor fields. [Взаємодіючі поля. Твірний функціонал для взаємодіючих полів. Теорія <math>\phi^4</math>. Діаграми Файнмана. Твірний функціонал для спінового поля. Алгебра Грассмана. Правила Файнмана для скалярних і спінових полів.]</p> <p><b>Література:</b> Б4, Б5, Б6, Д1</p>	Лекції — 2 год, лабораторні — 4 год, самостійна робота — 12 год	2 тижні
11–12	<p><b>6. Spontaneous symmetry breaking.</b> The U(1) spontaneous symmetry breaking. The Goldstone boson. The O(3) spontaneous symmetry breaking. The spontaneous symmetry breaking of gauge fields. The Higgs phenomenon. [Спонтанне порушення симетрії. Спонтанне порушення U(1) симетрії. Голдстоунів бозон. Спонтанне порушення O(3)-симетрії. Спонтанне порушення калібрувальних симетрій. Явища Хіггса.]</p> <p><b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Б4</p>	Лекції — 2 год, лабораторні — 4 год, самостійна робота — 14 год	2 тижні



Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
13–14	<p><b>7. Spontaneous symmetry breaking.</b> The Weinberg–Salam model for electroweak interaction. [Спонтанне порушення симетрії. Єдина модель слабкої і електромагнітної взаємодії Вайнберга–Салама.]</p> <p><b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Д2</p>	<p>Лекції — 2 год, лабораторні — 4 год, самостійна робота — 14 год</p>	2 тижні
15–16	<p><b>8. Spontaneous symmetry breaking.</b> Renormalisation. Divergences in <math>\varphi^4</math> theory. Dimensional regularization. Renormalisation group. Asymptotic freedom. [Спонтанне порушення симетрії. Перенормування. Розбіжності в теорії <math>\varphi^4</math>. Розмірна регуляризація теорії. Ренормалізаційна група. Асимптотична свобода.]</p> <p><b>Література:</b> Б3, Б5, Б6</p>	<p>Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, контрольна робота — 2 год, самостійна робота — 14 год</p>	2 тижні