

**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 «Вибрані питання теорії гравітації»,**  
**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 дисципліни</b>	Вибрані питання теорії гравітації
<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, к.ф.-м.н., доц. Стецко Микола Миколайович
<b>Контактна інформація викладача</b>	<a href="mailto:mykola.stetsko@lnu.edu.ua">mykola.stetsko@lnu.edu.ua</a> ; <a href="mailto:mstetsko@gmail.com">mstetsko@gmail.com</a> <a href="https://physics.lnu.edu.ua/employee/stetsko-m-m">https://physics.lnu.edu.ua/employee/stetsko-m-m</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 інтернет-платформи Zoom, Microsoft Teams, Skype.
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://physics.lnu.edu.ua/course/vybrani-pytannya-teoriji-gravitatsiji">https://physics.lnu.edu.ua/course/vybrani-pytannya-teoriji-gravitatsiji</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Вибрані питання теорії гравітації» належить до дослідницького (наукового) компонента освітньо-наукової програми «Теоретична фізика та астрофізика» спеціальності 104 Фізика та астрономія другого (магістерського) рівня вищої освіти. Її викладають у I семестрі в обсязі 4 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	У курсі розглядаються різні підходи до формулювання теорії гравітації. Окрім айнштайнівської загальної теорії відносності висвітлюються альтернативні підходи, в рамках яких пояснюються існуючі проблеми сучасної космології та фізики компактних астрофізичних об'єктів. Значна увага приділяється застосуванню розвинених підходів та методів до деяких модельних задач фізики чорних дір та космології. Також у курсі робиться огляд квантових підходів у теорії гравітації.
<b>Мета та цілі дисципліни</b>	Метою і завданням навчальної дисципліни «Вибрані питання теорії гравітації» є ознайомлення студентів із основними підходами до теорії гравітації, значна увага приділяється варіаційним формулюванням, що встановлює зв'язок теорії гравітації з класичною теорією поля, зокрема з теорією калібрувальних полів. Окрім загальної теорії відносності розглядаються і альтернативні підходи, зокрема скалярно-тензорні теорії, а також теорії з крученням та неметричністю. Висвітлюються їхні проблеми та перспективи. Розвинені методи застосовуються до модельних задач фізики чорних дір та космології, зокрема значна увага приділяється класичним розв'язкам таким як чорні діри Райснера–Нордстрьома та Керра, а також моделі Фрідмана–Леметра–Робертсона–Вокера у космології. Також робиться огляд проблем, які виникають в класичній гравітації та висвітлюються основні підходи до квантування гравітації.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<b>Базова:</b> 1. R. M. Wald, <i>General Relativity</i> , University of Chicago Press, 1984. 2. N. Straumann, <i>General Relativity</i> , 2nd ed., Springer Verlag, 2013. 3. T. Padmanabhan, <i>Gravitation: Foundations and Frontiers</i> , Cambridge University Press, 2012. 4. L. Heisenberg, “A systematic approach to generalisations of General

	<p>Relativity and their cosmological implications,” <i>Phys. Reports</i>, <b>796</b>, 1–113, 2019.</p> <p>5. T. Clifton, P. G. Ferreira, A. Padilla, C. Skordis, “Modified gravity and cosmology,” <i>Phys. Reports</i>, <b>513</b>, 1–189, 2012.</p> <p>6. C. Kiefer, <i>Quantum Gravity</i>, 3-rd ed., Oxford University Press, 2012.</p> <p><b>Допоміжна:</b></p> <p>1. S. M. Carroll, <i>Spacetime and Geometry: An introduction to General Relativity</i>, Cambridge University Press, 2019.</p> <p>2. M. P. Hobson, G. P. Efstathiou, A. N. Lasenby, <i>General Relativity: An introduction for physicists</i>, Cambridge University Press, 2006.</p> <p>3. E. Poisson, <i>A Relativist’s Toolkit: Mathematics of Black Hole Mechanics</i>, Cambridge University Press, 2004.</p> <p>4. G. Compere, <i>Advanced Lectures on General Relativity</i>, Springer Verlag, 2019 (arXiv:1801.07064).</p> <p>5. J. Natario, <i>An Introduction to Mathematical Relativity</i>, Springer Verlag, 2021.</p> <p>6. S. Capozziello, M. De Laurentis, “Extended Theories of Gravity,” <i>Phys. Reports</i>, <b>509</b>, 167–321, 2011.</p> <p>7. T. P. Sotiriou, V. Faraoni, “<math>f(R)</math> theories of gravity,” <i>Rev. Mod. Phys.</i>, <b>82</b>, 451, 2010.</p> <p><b>Інформаційні ресурси:</b></p> <p>1. General Relativity (MIT open course).  <a href="#">8.962 S2020 Lecture Guide   General Relativity   Physics   MIT OpenCourseWare</a></p> <p>2. Wolfram MathWorld. <a href="http://mathworld.wolfram.com">http://mathworld.wolfram.com</a></p>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр
<b>Обсяг курсу</b>	120 годин, з яких 32 годин аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 16 годин лабораторних занять, та 88 годин 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>СК05. Здатність сприймати щойно здобуті 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 (ПРН), 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>РН10. 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>РН11. Застосовувати теорії, принципи і методи фізики та/або астрономії для розв'язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач.</p> <p>РН13. 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.</p> <p>РН18. Розв'язувати задачі про рух природних та штучних об'єктів у гравітаційних полях та задачі про внутрішню будову зір.</p>
<b>Ключові слова</b>	Варіаційний принцип, підхід Палатіні, тетрадний формалізм, скалярно-тензорні теорії, телепаралельне формулювання, кручення та неметричність, чорна діра Райснера–Нордстрьома, розв'язок Керра, горизонт подій, ергосфера, гола сингулярність, аналітичне розширення метрики, спінори в загальній теорії відносності, формалізм Ньюмана–Пенроуза, метрика ФЛРВ, канонічне формулювання, рівняння Вілера–де Віта, змінні Аштекара.
<b>Формат курсу</b>	Очний
<b>Теми</b>	Див. Табл. 1 Схема курсу
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	Залік у I семестрі
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення курсу студенти потребують знань із таких дисциплін: тензорний аналіз, основи загальної теорії відносності, класична механіка, методи математичної фізики, електродинаміка, квантова механіка.
<b>Навчальні методи та техніки, які буде використано під час викладання курсу</b>	Презентація, лекції, дискусія, підготовка доповідей, розв'язування задач. Передбачено ілюстрування лекційного матеріалу схемами та рисунками.
<b>Необхідне обладнання</b>	персональний комп'ютер, загальноновживані комп'ютерні програми й операційні системи, проєктор
<b>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної</b>	Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за таким співвідношенням: <ul style="list-style-type: none"> <li>• робота на лабораторних заняттях під час семестру: 20% сумарної</li> </ul>

<p><b>діяльності)</b></p>	<p>оцінки; максимальна кількість балів — 20 відповідно до такої шкали:  16–20 — активна участь у 7–8 заняттях;  11–15 — активна участь у 5–6 заняттях;  6–10 — активна участь у 3–4 заняттях;  1–5 — активна участь у 1–2 заняттях;  0 — жодної активної участі в лабораторних заняттях;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• підсумкове тестування за двома змістовими модулями (по 25 балів, проводиться на під час лабораторних занять): 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:  24–30 — студент повністю володіє матеріалом;  18–23 — рівень володіння матеріалом достатній;  12–17 — рівень володіння матеріалом частковий;  1–11 — студент майже не володіє матеріалом;  0 — доповіді не було.</li> </ul> <p>Максимальна семестрова кількість балів — 100.</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 декілька видів письмових робіт (підсумкові тестування за двома змістовими модулями протягом семестру).</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 та підсумкових тестуваннях за двома змістовими модулями. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студента під час заняття; недопустимість пропусків та запізнь на заняття; користування мобільним телефоном,</p>
---------------------------	--

	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. <b>Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.</b>
<b>Опитування</b>	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

Схема курсу «Вибрані питання теорії гравітації»\*

Тижні	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
<b>Змістовий модуль 1. Загальна теорія відносності (ЗТВ) та альтернативні підходи</b>			
1–2	<b>1. Вступ. Варіаційне формулювання в ЗТВ.</b> Фізичні основи загальної теорії відносності. Варіаційний принцип в загальній теорії відносності. Формулювання Палатіні та підхід другого порядку. Еквівалентність підходів в рамках ЗТВ. <b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Д1, Д2	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 10 год	2 тижні
3–4	<b>2. Альтернативні теорії гравітації.</b> Сучасна космологія та труднощі ЗТВ, необхідність альтернативних підходів. Скалярно-тензорні теорії гравітації, теорія Бранса–Діке та $f(R)$ теорії. Теорія типу Горндескі, теорії вищого порядку. <b>Література:</b> Б4, Б5, Д6, Д7	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 12 год	2 тижні
5–6	<b>3. Альтернативні підходи (продовження). Варіаційна задача з граничними доданками.</b> Теорії гравітації з крученням та неметричністю, телепаралелізм. Варіаційне формулювання у задачах з граничними доданками, доданок типу Гіббонса–Хокінга-Йорка (ГХЙ). Аналоги внесків типу ГХЙ в альтернативних підходах. <b>Література:</b> Б3, Б4, Б5, Д6, Д7	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 10 год	2 тижні
7–8	<b>4. Симетрії в ЗТВ.</b> Симетрії в ЗТВ. Вектори та тензори Кіллінга. Збережені величини, нетерівський підхід. Симетрії просторово-часових геометрій та їх класифікація. Симетрії метрики ФЛРВ. <b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Д1, Д2, Д3, Д4, Д5	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 10 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
<b>Змістовий модуль 2. Модельні задачі в рамках ЗТВ та інших підходів, подальші узагальнення</b>			
9–10	<b>5. Чорні діри в рамках ЗТВ та альтернативних підходів.</b> Поняття про чорні діри. Горизонти чорної діри. Теореми про сингулярність. Гола сингулярність, принцип космічної цензури. Найпростіші розв'язки. Метрика Райснера–Нордстрьома (РН), різні координати для метрики Райснера–Нордстрьома. <b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Д1, Д2, Д3, Д5	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 14 год	2 тижні
11–12	<b>6. Розв'язок Керра.</b> Чорна діра Керра. Властивості просторово-часової метрики, горизонти, ергосфера, критична чорна діра. Аналітичне розширення метрики. Діаграми Пенроуза. <b>Література:</b> Б1, Б2, Б3, Д1, Д2, Д3, Д5	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 10 год	2 тижні
13–14	<b>7. Формалізм Ньюмана-Пенроуза.</b> Спінори в ЗТВ. Ізотропні тетради. Тетрада Ньюмана–Пенроуза (НП). Скаляри Річі та Вейля в змінних Ньюмана–Пенроуза. Хвильові рівняння у формалізмі НП. <b>Література:</b> Б1, Б2, Д5	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 10 год	2 тижні
15–16	<b>8. Канонічний формалізм в ЗТВ. Квантові підходи.</b> Канонічне формулювання в ЗТВ, підхід АДМ. Труднощі класичної гравітації. Канонічне квантування, рівняння Вілера–де Віта. Аштекарівське формулювання. <b>Література:</b> Б2, Б6, Д3, Д5	Лекції — 2 год, лабораторні — 2 год, самостійна робота — 12 год	2 тижні