

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Львівський національний університет імені Івана Франка
Фізичний факультет
Кафедра астрофізики

Затверджено

На засіданні кафедри астрофізики
фізичного факультету ЛНУ імені Івана Франка
(протокол № 1 від 30 серпня 2023 р.)

Завідувач кафедри  Богдан МЕЛЕХ

Силабус з навчальної дисципліни
«Небесна механіка та астродинаміка»,
що викладається в межах ОНП «Теоретична фізика та астрофізика»
другого (магістерського) рівня вищої освіти
для здобувачів зі спеціальності 104 Фізика та астрономія

Львів 2023

Назва дисципліни	Небесна механіка та астродинаміка
Адреса викладання дисципліни	вул. Кирила і Мефодія 8, 79005, м. Львів
Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна	фізичний факультет, кафедра астрофізики
Галузь знань, шифр та назва спеціальності	Галузь знань — 10 Природничі науки, Спеціальність — 104 Фізика та астрономія
Викладачі дисципліни	Лектор: Ваврух М. В., професор кафедри астрофізики, докт. ф.-м. н.; лабораторні заняття проводить: проф. Ваврух М.В.
Контактна інформація викладачів	markiyan.vavruk@lnu.edu.ua https://physics.lnu.edu.ua/employee/vavruk-markiyan-vasylovych
Консультації з курсу відбуваються	Консультації в день проведення лекцій та лабораторних занять (за попередньою домовленістю). Також консультації перед складанням студентами іспиту.
Сторінка курсу	https://physics.lnu.edu.ua/course/nebesna-mehanika-ta-astrodynamika
Інформація про дисципліну	Дисципліна «Небесна механіка та астродинаміка» є нормативною дисципліною в галузі знань 10 Природничі науки зі спеціальності <i>104 Фізика та астрономія</i> для підготовки магістрів за ОНП «Теоретична фізика та астрофізика», яка викладається в 3 семестрі в обсязі 3 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	Дисципліну «Небесна механіка та астродинаміка» розроблено таким чином, щоб ознайомити студентів з методами розрахунку гравітаційних потенціалів небесних тіл та опису руху небесних тіл; з основними методами опису поступального та поступально-обертального руху небесних тіл; із загальною задачею багатьох тіл; із теорією наближеного розрахунку орбіт у задачі трьох тіл; з особливостями задач астродинаміки, зокрема розрахунку орбіт космічних апаратів у їхніх гравітаційних полях.
Мета та цілі дисципліни	Мета дисципліни — дати студентам поглиблені знання про основні проблеми небесної механіки та астродинаміки, методи розрахунку гравітаційних потенціалів, про розрахунки орбіт небесних тіл, штучних супутників Землі та космічних апаратів для дослідження ближнього космосу. Завдання дисципліни — оволодіння студентами методами розрахунку потенціалів всередині та зовні гравітуючих тіл, зокрема тіл з осьовим обертанням; методами розв'язку диференціальних задач про рух небесних тіл, а також проведення розрахунку орбіт космічних апаратів при перельотах між планетами Сонячної системи.
Література для вивчення дисципліни	Базова література: 1. Александров Ю. В. <i>Небесна механіка</i> . Харків: Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, 2004. 2. Herrick S. <i>Astrodynamics</i> . Van Nostrand Reinhold Co., 1971. 3. Smart W. M. <i>Celestial Mechanics</i> . Literary Licensing, LLC., 2013. 4. Moulton F. R. <i>An Introduction to Celestial Mechanics</i> . The Classics.us. 2013. Допоміжна література: 1. Іро Г. <i>Класична механіка</i> . Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 1999. 2. Gurfil P., Seidelmann P. K. <i>Celestial Mechanics and Astrodynamics: Theory and Practice</i> . Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. 3. Vavruk M., Dzikovskyi D. “Analytical images of Kepler’s equation

	<p>solutions and its analogues.” <i>Contrib. Astron. Obs. Skaln. Pleso</i>. 2023. Vol. 53, No. 1. P. 58–66.</p> <p>Інформаційні ресурси: 1. https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy_Cosmology/Celestial_Mechanics_(Tatum)</p>
Тривалість курсу	один семестр
Обсяг курсу	90 годин, з яких 32 години аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 16 годин лабораторних занять та 58 годин самостійної роботи.
Очікувані результати навчання	<p>У результаті вивчення даного курсу студент повинен мати такі ЗК та СК:</p> <p>ЗК01. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях. ЗК03. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел. ЗК06. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми. СК01. Здатність використовувати закони та принципи фізики та/або астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ. СК02. Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем у галузі фізики та/або астрономії. 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. СК08. Здатність формулювати нові гіпотези та наукові задачі у галузі фізики та астрономії, вибирати відповідні методи для їх розв’язання, беручи до уваги наявні ресурси.</p> <p>та досягнути таких програмних <i>результатів навчання</i> (РН):</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. 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. РН04. Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних фізичних та/або астрономічних досліджень і оцінювання їх достовірності. РН05. Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об’єктів і процесів. РН11. Застосовувати теорії, принципи і методи фізики та/або астрономії для розв’язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач. 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>

	РН18. Розв'язувати задачі про рух природних та штучних об'єктів у гравітаційних полях та задачі про внутрішню будову зір.
Ключові слова	Гравітаційний потенціал, моделі небесних тіл, закон всевітнього тяжіння, мультипольні розклади потенціалів, перицентр, еліпсоїди обертання, рівняння поступального руху, рівняння поступально-обертального руху ексцентрична аномалія.
Формат курсу	очний
Теми	Наведено у табл.1
Підсумковий контроль, форма	Підсумковий контроль: іспит в кінці семестру. Усний.
Пререквізити	Для вивчення дисципліни студенти потребують знань з дисциплін «Вибрані питання теорії гравітації», «Астрофізика компактних об'єктів».
Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу	Презентації, лекції, дискусія, лабораторні роботи.
Необхідне обладнання	персональний комп'ютер, відкриті спеціальні комп'ютерні програми для моделювання, діагностики та візуалізації даних.
Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)	<p>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за таким співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> • робота на лабораторних заняттях під час семестру: 30% сумарної оцінки; максимальна кількість балів для різних лабораторних — різна, відповідно до об'єму роботи, яку необхідно виконати (1 л/р — 8 балів, 2 л/р — 10 балів, 3 л/р — 12 балів). Розподіл балів подаємо у відсотках від максимальної кількості балів, які можна отримати за відповідну лабораторну роботу: <ul style="list-style-type: none"> 91–100% — робота виконана повністю правильно (90%) + макс. 10% за акуратність оформлення звіту; 51–90% — здійснення програмної реалізації алгоритму методу, або ж налаштування вхідного файлу для розрахунку за допомогою наявного програмного забезпечення (50%) + макс. 40% за здійснення розрахунків та аналіз отриманих результатів; 1–50% — здійснення програмної реалізації алгоритму методу, або ж налаштування вхідного файлу для розрахунку за допомогою наявного програмного забезпечення; 0% — робота не виконана, або виконана повністю неправильно; • контрольні роботи (модулі): 20% семестрової оцінки; загалом — дві роботи, оцінка кожної — максимум 10 балів; кожна контрольна містить два теоретичних питання, кожне з яких оцінюється за 5-бальною шкалою, відповідно до таких критеріїв: <ul style="list-style-type: none"> 5 — питання викладено правильно і повністю; 3–4 — повнота викладення недостатня; 1–2 — рівень володіння матеріалом дуже низький, або ж низький; 0 — студент повністю неправильно виклав питання, або ж зовсім не надав на нього відповіді. • іспит: 50% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 50: два розширені теоретичні завдання (макс. 10 балів кожне), одне розширене практичне завдання (макс. 20 балів) та 10 тестових запитань (макс. 10 балів); теоретичні питання оцінюються за такою шкалою: <ul style="list-style-type: none"> 10 — питання викладено правильно і повністю, 6–8 — повнота викладення недостатня,

	<p>3–5 — рівень володіння матеріалом частковий, 1–2 — рівень володіння матеріалом дуже низький, або низький, 0 — студент повністю неправильно виклав питання, або ж зовсім не надав на нього відповіді;</p> <p>розширене практичне завдання оцінюються за такою шкалою: 18–20 — робота виконана правильно та задовільно, добре, або гарно оформлена, 11–17 — робота виконувалася спочатку правильно, але на якомусь етапі аналізу отриманих результатів виникла помилка, 1–10 — програма для реалізації завдання, або ж формування потоку вхідних даних для наявного програмного забезпечення, містить помилки, якщо бал менший 10, 0 — завдання невиконане, або виконане повністю неправильно.</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>Академічна доброчесність здобувачами вищої освіти передбачає самостійне виконання навчальних завдань, завдань поточного та підсумкового контролю результатів навчання. Списування, втручання в роботу інших студентів становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної недоброчесності. Виявлення ознак академічної недоброчесності в письмовій чи усній роботі студента є підставою для її незарахування викладачем, незалежно від масштабів обману.</p> <p>Відвідання занять 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 робіт, передбачених курсом.</p> <p>Література. 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>Політика виставлення балів. Враховуються бали, набрані на лабораторних заняттях та контрольних роботах. 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>Жодні форми академічної недоброчесності не толеруються.</p>
<p>Питання до екзамену</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Розрахунки гравітаційних потенціалів простих моделей. 2. Знаходження гравітаційних потенціалів всередині і зовні однорідних тіл простої форми за допомогою рівнянь Пуассона і Лапласа. 3. Властивості поліномів Лежандра. 4. Формула додавання сферичних функцій. 5. Мультипольні розклади для гравітаційного потенціалу тіла довільної форми із заданим розподілом густини.

	6. Потенціал однорідного еліпсоїда обертання всередині і за його поверхнею. Сфероїди Макларена. 7. Осьове обертання небесних тіл. Потенціал неоднорідного еліпсоїда обертання. 8. Метод Гамільтона–Якобі. Диференціальні рівняння поступального руху небесних тіл. 9. Основна задача небесної механіки. 10. Задача небесних тіл у небесній механіці. 11. Поступально-обертальний рух небесних тіл. Канонічні рівняння руху. 12. Основні типи і формули незбуреного кеплерівського руху. Розклади за степенями ексцентриситету. 13. Теорія збуреного руху. Метод варіації сталих. 14. Загальна задача трьох тіл. 15. Задача двох нерухомих центрів. 16. Особливості задач про міжпланетні перельоти. 17. Розрахунки орбіт космічних апаратів при перельотах між тілами Сонячної системи. 18. Вибір оптимальних орбіт. 19. Прискорення космічних апаратів у гравітаційних полях планет. 20. Розрахунок часу перельоту між планетами по різних орбітах. 21. Часткові випадки руху N тіл по стійких траєкторіях (коло, вісімкоподібна траєкторія, ланцюжки, ...).
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано після завершення курсу.

Таблиця 1

Схема дисципліни «Небесна механіка та астродинаміка»*

Тиж-день	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
Змістовий модуль 1			
1–4	Основні поняття теорії потенціалу. Властивості гравітаційного потенціалу. Література: Б1–Б4, Д2	Лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год, самостійна робота — 14 год.	4 тижні
5–8	Сферичні та еліпсоїдальні функції. Рівняння Лагранжа і Гамільтона. Література: Б1–Б4, Д1, Д2о	Лекції — 4 год, лаб. заняття — 3 год, контрольна робота — 1 год, самостійна робота — 14 год.	4 тижні
Змістовий модуль 2			
9–12	Диференціальні рівняння поступального руху небесних тіл. Теорія незбуреного руху. Розв'язки рівняння Кеплера та його аналогів. Література: Б1–Б3, Д2, Д3	Лекції — 4 год, лаб. заняття — 4 год, самостійна робота — 15 год.	4 тижні
13–16	Основні задачі астродинаміки. Принципи вибору і розрахунку орбіт. Рух космічних апаратів у гравітаційних полях планет. Література: Б2, Д2	Лекції — 4 год, лаб. заняття — 3 год, контрольна робота — 1 год, самостійна робота — 15 год.	4 тижні

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