

**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 Мелех Богдан МЕЛЕХ

**Силабус з навчальної дисципліни**  
**«Космічна магнетогідродинаміка»,**  
**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>	Космічна магнетогідродинаміка
<b>Адреса викладання курсу</b>	вул. Кирила і Мефодія 8, 79005 Львів
<b>Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна</b>	фізичний факультет, кафедра астрофізики
<b>Галузь знань, шифр та назва спеціальності</b>	10 Природничі науки, 104 Фізика та астрономія
<b>Викладачі курсу</b>	К.ф.-м.н., доц. Гаврилова Наталія Вікторівна
<b>Контактна інформація викладачів</b>	<a href="mailto:nataliia.havrylova@lnu.edu.ua">nataliia.havrylova@lnu.edu.ua</a> , <a href="mailto:nvgavrylova@gmail.com">nvgavrylova@gmail.com</a> <a href="https://physics.lnu.edu.ua/employee/havrylova-n-v">https://physics.lnu.edu.ua/employee/havrylova-n-v</a>
<b>Консультації по курсу відбуваються</b>	Консультації в день проведення лекцій та практичних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі он-лайн консультації через електронну пошту.
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://physics.lnu.edu.ua/course/kosmichna-mahnetohidrodynamika">https://physics.lnu.edu.ua/course/kosmichna-mahnetohidrodynamika</a>
<b>Інформація про курс</b>	Дисципліна «Космічна магнетогідродинаміка» є вибірковою дисципліною для підготовки магістрів за спеціальністю 104 Фізика та астрономія, яка викладається в II семестрі в обсязі 3 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Коротка анотація курсу</b>	Курс покликаний дати фундаментальні знання основ сучасної магнетогідродинаміки здобувачам другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 104 «Фізика та астрономія» та зробити поглиблений огляд сучасних методів моделювання магнетогідродинамічних астрофізичних процесів. У результаті вивчення цього курсу студент повинен освоїти виведення базових рівнянь МГД та рівнянь МГД в рамках СТВ; вміти використовувати умову магнетогідростатичної рівноваги у відповідних задачах МГД, оперувати рівняннями стійкої МГД, застосовувати умови МГД нестійкостей у астрофізичних задачах, оперувати базовими рівняннями для опису стаціонарних потоків у рамках ЗТВ, будувати МГД моделі різноманітних астрофізичних об'єктів.
<b>Мета та цілі курсу</b>	Дати студентам фундаментальні знання з основ сучасної космічної магнетогідродинаміки (МГД) як у нерелятивістському, так і в релятивістських (спеціальної та загальної теорії відносності) випадках, дати огляд сучасних методів побудови магнетогідродинамічних моделей таких астрофізичних об'єктів як зорі що обертаються, міжзоряний іонізований газ, акреційні диски навколо зір, релятивістських компактних об'єктів та надмасивних чорних дір (ядра активних галактик: диск та формування джетів).
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<b>Базова література:</b> 1. <i>Accretion Discs, Jets and High Energy Phenomena in Astrophysics</i> . Edited by V.Beskin, G.Henri, F.Menard, G. Pelletier and J. Dalibard. NATO Advanced Study Institute, Euro Summer School, Session LXXVIII, 29 July – 23 August 2002, EDP Sciences; Springer-Verlag 2003. 2. Shoji Kato, Jun Fukue, <i>Fundamentals of Astrophysical Fluid Dynamics: Hydrodynamics, Magnetohydrodynamics and Radiation Hydrodynamics</i> . Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020; <a href="https://doi.org/10.1007/978-981-15-4174-2">https://doi.org/10.1007/978-981-15-4174-2</a> .

	<p>3. J. Heyvaerts, in <i>Late Stages of Stellar Evolution</i>, edited by C. de Loore, Ecole EADN de Ponte de Lima. Springer Verlag, 1991. P. 313. (Lect. Notes Phys.)/  4. J. Heyvaerts, in <i>Transport and Energy Conversion in the Heliosphere</i>, edited by J. P. Rozelot, L. Klein and J. C. Vial. Springer Verlag, 2000. P. 1. (Lect. Notes Phys.).</p> <p><b>Інформаційні ресурси:</b>  1. Wikipedia. <a href="http://www.wikipedia.org">http://www.wikipedia.org</a></p>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр
<b>Обсяг курсу</b>	90 годин, з яких 32 години аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 16 годин практичних занять та 58 години самостійної роботи
<b>Очікувані результати навчання</b>	<p>Після завершення цього курсу студент буде:</p> <p><b>знати:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• основні рівняння для побудови МГД моделей,</li> <li>• основи МГД у рамках СТВ,</li> <li>• рівняння Града–Шафранова,</li> <li>• основи еволюції магнетного поля «вмороженого» в плазму,</li> <li>• основи опису простих стаціонарних потоків у МГД,</li> <li>• основи опису вітрів та джетів у рамках ідеальної МГД,</li> <li>• асимптотичні задачі ідеальної МГД вітрів та джетів,</li> <li>• основи МГД при малих рухах,</li> <li>• види нестійкостей у МГД і причини їх виникнення,</li> <li>• основи опису стаціонарних потоків у рамках ЗТВ,</li> <li>• основи МГД моделей магнітної активності фотосфер зір,</li> <li>• основи побудови моделей акреції речовини у тісних подвійних системах,</li> <li>• основи врахування магнітного поля при побудові моделей міжзоряного середовища,</li> <li>• основи моделей акреції речовини на чорні діри різної маси і їх роль в інтерпретації спостережень ядер активних галактик та систем типу Лебідь X-1,</li> <li>• рівняння МГД з випромінюванням,</li> <li>• спостережувані дані по астрофізичних об'єктах, у інтерпретації яких підходи МГД відіграють ключову роль,</li> </ul> <p><b>вміти:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• виводити базові рівняння МГД,</li> <li>• виводити рівняння МГД в рамках СТВ,</li> <li>• використовувати умову магнетогідростатичної рівноваги у відповідних задачах МГД,</li> <li>• описувати еволюцію магнетного поля «вмороженого» у плазму,</li> <li>• будувати моделі стаціонарних простих потоків у МГД,</li> <li>• будувати моделі вітрів та джетів у рамках ідеальної МГД,</li> <li>• будувати моделі асимптотичних задач ідеальної МГД,</li> <li>• лінеаризувати рівняння динаміки у МГД у випадку малих рухів,</li> <li>• оперувати рівняннями стійкої МГД,</li> <li>• застосовувати умови МГД нестійкостей у астрофізичних задачах,</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• оперувати базовими рівняннями для опису стаціонарних потоків у рамках ЗТВ,</li> <li>• переходити від рівняння Ейлера до рівняння Града–Шафранова,</li> <li>• будувати МГД моделі різноманітних астрофізичних об'єктів (від зір, що обертаються до ядер активних галактик).</li> </ul>
<b>Ключові слова</b>	МГД моделі, міжзоряне середовище, зорі, акреційні диски, чорні діри, мікроквасари, квазари, рентгенівські пульсари, планетарні туманності.
<b>Формат курсу</b>	Очний
<b>Теми</b>	Наведено у табл.1
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	залік у кінці семестру
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення даного курсу студентам необхідні знання з основ векторного аналізу, диференційного числення, тензорного аналізу, а також з таких курсів фізики як механіка, молекулярна фізика та термодинаміка, електромагнетизм, статистична фізика та фізика космічної плазми, загальна астрофізика, релятивістська астрофізика.
<b>Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу</b>	Презентація, лекції, дискусія, розв'язування задач, підготовка доповідей.
<b>Необхідне обладнання</b>	персональний комп'ютер, 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 практичних заняттях під час семестру: 40% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 40 відповідно до такої шкали: 33–40 — активна участь у 7–8 заняттях; 25–32 — активна участь у 5–6 заняттях; 17–24 — активна участь у 3–4 заняттях; 1–16 — активна участь у 1–2 заняттях; 0 — жодної активної участі в лабораторних заняттях;</li> <li>• підсумкове тестування за змістовним модулем 1 (40 балів): 40% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 40;</li> <li>• підсумкове тестування за змістовним модулем 2 (20 балів): 20% сумарної оцінки; максимальна кількість балів — 20.</li> </ul> <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>Академічна доброчесність</b> 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><b>Відвідання занять</b> є важливою складовою навчання. Очікується, що всі студенти відвідають усі лекції і лабораторні заняття курсу. Студенти</p>

	<p>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><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 практичних заняттях та підсумкових тестуваннях. 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 академічної недоброчесності не толеруються.</b></p>
<p><b>Питання до підсумкових тестувань</b></p>	<p><b>Змістовний модуль 1.</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Основи побудови МГД моделей.</li> <li>2) Нерелятивістська МГД. Нестискувана рідина та рівняння Нав'є–Стокса. Альфвенівська швидкість.</li> <li>3) МГД спеціальної теорії відносності.</li> <li>4) Магнетогідростатична рівновага. Рівняння Града–Шафранова.</li> <li>5) Еволюція магнетного поля. Ідеальна МГД.</li> <li>6) Проблема динамо. Теореми антидинамо. Кінематичне турбулентне динамо.</li> <li>7) Прості стаціонарні потоки. МГД потік Куетта.</li> <li>8) Аксісиметричні, ті, що обертаються і стаціонарні вітри та джети ідеальної МГД. Ізоротаційний закон Ферраро. Узагальнене рівняння Града–Шафранова. Еліптичність та гіперболічність системи Бернуллі–Трансфілда.</li> <li>9) Асимптотика ідеальної МГД вітрів та джетів. Асимптотичне узагальнене рівняння Града–Шафранова.</li> <li>10) Повільний рух. Стійкість. Нестійкості.</li> <li>11) Аксісиметричний стаціонарний потік у рамках ЗТВ. Найпростіший шлях переходу від рівняння Ейлера до рівняння Града–Шафранова.</li> </ol> <p><b>Змістовний модуль 2.</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Магнетогідродинаміка міжзоряного середовища. Вибух Наднової з точки зору МГД.</li> <li>2) Магнетогідродинаміка зір.</li> <li>3) Зорі, що обертаються та тісні подвійні системи. Нестационарна конвекція і енергетична нестійкість компонент тісних подвійних систем.</li> <li>4) Акреційні диски, що випромінюють навколо чорних дір. Моделі Шакури–Сюняєва. Аналіз ролі випромінювання у МГД описі акреційного диску.</li> <li>5) Молекулярні витоки з молодих зоряних об'єктів (МЗО). Роль джетів і акреційних дисків у формуванні зір.</li> <li>6) Мікроквасари, квазари та рентгенівські пульсари. Дані спостережень. Інтерпретація.</li> </ol>

	7) Планетарні туманності. Оцінка ролі МГД процесів у формуванні планетарних туманностей. 8) Теоретичні МГД моделі. 9) Чисельні МГД симуляції.
<b>Опитування</b>	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1. Схема курсу «Космічна магнетогідродинаміка»

Тиж-день	Тема занять (перелік питань)	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
<b>Змістовний модуль 1</b>			
1–2	Вступ. Основи побудови МГД моделей. Нерелятивістська МГД. МГД спеціальної теорії відносності. Магнетогідростатична рівновага. <b>Література:</b> 1, 2	Лекції — 2 год, практ. заняття — 2 год, самостійна робота — 6 год	2 тижні
3–4	Еволюція магнетного поля. Проблема динамо. Прості стаціонарні потоки. <b>Література:</b> 1, 2	Лекції — 2 год, практ. заняття — 2 год, самостійна робота — 6 год	2 тижні
5–6	Аксисиметричні, ті, що обертаються і стаціонарні вітри та джети ідеальної МГД. Асимптотика ідеальної МГД вітрів та джетів. <b>Література:</b> 1, 2	Лекції — 2 год, практ. заняття — 2 год, самостійна робота — 6 год	2 тижні
7–8	Повільний рух. Стійкість. Нестійкості. <b>Література:</b> 1, 2	Лекції — 2 год, практ. заняття — 1 год, тестування — 1 год, самостійна робота — 6 год	2 тижні
<b>Змістовний модуль 2</b>			
9–10	Аксисиметричний стаціонарний потік у рамках ЗТВ. <b>Література:</b> 1, 2	Лекції — 2 год, практ. заняття — 2 год, самостійна робота — 6 год	2 тижні
11–12	Магнетогідродинаміка міжзоряного середовища. Магнетогідродинаміка зір. <b>Література:</b> 1, 2	Лекції — 2 год, практ. заняття — 2 год, самостійна робота — 8 год	2 тижні
13–14	Зорі, що обертаються та тісні подвійні системи. Акреційні диски, що випромінюють навколо чорних дір. <b>Література:</b> 1, 2	Лекції — 2 год, практ. заняття — 2 год, самостійна робота — 10 год	2 тижні
15–16	Молекулярні витоки з молодих зоряних об'єктів. Мікроквасари, квазари та рентгенівські пульсари. Планетарні туманності. Теоретичні МГД моделі. Чисельні МГД симуляції. <b>Література:</b> 1–4	Лекції — 2 год, практ. заняття — 1 год, тестування — 1 год, самостійна робота — 10 год	2 тижні