

**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**  
**«Основи фізичної космології»,**  
**що викладається в межах ОНП «Теоретична фізика та астрофізика»,**  
**ОНП «Експериментальна фізика»**  
**другого (магістерського) рівня вищої освіти**  
**для здобувачів зі спеціальності 104 Фізика та астрономія**

**Львів 2023**

<b>Назва дисципліни</b>	Основи фізичної космології
<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>	Галузь знань — 10 Природничі науки, Спеціальність — 104 Фізика та астрономія
<b>Викладачі курсу</b>	Лектор: Кулініч Юрій Анатолійович, доцент кафедри астрофізики, к.ф.-м.н., старший дослідник. Лабораторні заняття проводить канд. фіз.-мат. наук, доц. Кошмак Ігор Олександрович.
<b>Контактна інформація викладачів</b>	<a href="mailto:yuriy.kulinich@lnu.edu.ua">yuriy.kulinich@lnu.edu.ua</a> <a href="https://physics.lnu.edu.ua/employee/kulinich-yuriy-anatoliyovych">https://physics.lnu.edu.ua/employee/kulinich-yuriy-anatoliyovych</a> <a href="mailto:ihor.koshmak@lnu.edu.ua">ihor.koshmak@lnu.edu.ua</a> <a href="https://physics.lnu.edu.ua/employee/koshmak-ihor-oleksandrovyh">https://physics.lnu.edu.ua/employee/koshmak-ihor-oleksandrovyh</a>
<b>Консультації по курсу відбуваються</b>	Консультації в день проведення лекцій та лабораторних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі он-лайн консультації з використанням засобів <i>Microsoft Teams</i> .
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://physics.lnu.edu.ua/course/osnovy-fizychnoi-kosmolozii">https://physics.lnu.edu.ua/course/osnovy-fizychnoi-kosmolozii</a> <a href="https://teams.microsoft.com/l/channel/19%3aIbQIDILcLjLFzPybBYiDkSdy27igpn3kOKKaGrQBS3Y1%40thread.tacv2/%25D0%2597%25D0%25B0%25D0%25B3%25D0%25B0%25D0%25BB%25D1%258C%25D0%25BD%25D0%25B5?groupId=66f8d5cc-5fd7-45ce-848a-e20ef2292f3c&amp;tenantId=70a28522-969b-451f-bdb2-abfea3aaa5bf">https://teams.microsoft.com/l/channel/19%3aIbQIDILcLjLFzPybBYiDkSdy27igpn3kOKKaGrQBS3Y1%40thread.tacv2/%25D0%2597%25D0%25B0%25D0%25B3%25D0%25B0%25D0%25BB%25D1%258C%25D0%25BD%25D0%25B5?groupId=66f8d5cc-5fd7-45ce-848a-e20ef2292f3c&amp;tenantId=70a28522-969b-451f-bdb2-abfea3aaa5bf</a> (команда «Основи фізичної космології" у <i>Microsoft Teams</i> )
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Основи фізичної космології» є вибірковою 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>	Цей курс зосереджений на вивченні сучасної фізичної космології, науки про будову та еволюцію Всесвіту. У ньому студенти ознайомляться із спостережними та теоретичними її аспектами — космологічними моделями, ключовими стадіями розширення Всесвіту, формуванням великомасштабної структури із первинних збурень, анізотропією температури і поляризації реліктового випромінювання, тощо. Після завершення курсу здобувачі отримають підготовку для роботи в астрономічних установах та дослідницьких програмах з вивчення Всесвіту..
<b>Мета та цілі курсу</b>	<b>Мета:</b> 1. Ознайомитися з предметом сучасної космології. 2. Представити основні теоретичні основи космології. 3. Ознайомитись із спостережуваною базою космології. 4. Порівняти останні спостереження Всесвіту з теоретичними прогнозами. 5. Ознайомитись із проблеми сучасної космології та перспективами розвитку знань про Всесвіт. <b>Завдання:</b> 1. Сформувати у здобувачів цілісну наукову картину Всесвіту на основі сукупності спостережуваних даних та перевірених фізичних теорій.

	<ol style="list-style-type: none"> <li>2. Навчити студентів застосовувати рівняння загальної теорії відносності (рівняння Айнштейна) та їх розв'язків до опису однорідного ізотропного Всесвіту.</li> <li>3. Дати студентам основи знань про теорію скалярних, векторних та тензорних збурень.</li> <li>4. Надати студентам знання про генерацію та еволюцію збурень, формування галактик і великомасштабної структури Всесвіту.</li> <li>5. Ознайомити студентів із сучасними проблемами космології і ймовірними шляхами їх вирішення.</li> </ol>
<p><b>Література для вивчення дисципліни</b></p>	<p><b>Базова:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Новосядлий Б. С. <i>Структура й еволюція Всесвіту</i>. Навчальний посібник. Львів, ЛНУ імені Івана Франка, 2019. <a href="https://astro.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/10/sev.pdf">https://astro.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/10/sev.pdf</a></li> <li>2. Александров Ю. В. <i>Основи релятивістської космології</i>. Підручник. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2004. <a href="https://ekhnuir.karazin.ua/server/api/core/bitstreams/6fa2c448-d254-46d7-ba15-75e9f80166a6/content">https://ekhnuir.karazin.ua/server/api/core/bitstreams/6fa2c448-d254-46d7-ba15-75e9f80166a6/content</a></li> <li>3. Жданов В. І. <i>Вступ до теорії відносності</i>: навч. посіб. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2008.</li> <li>4. Novosyadlyj B., Pelykh V., Shtanov Yu., Zhuk A. <i>Dark Energy: Observational Evidence and Theoretical Models</i>. Vol. 1 of <i>Dark Energy and Dark Matter in the Universe</i>, edited by V. M. Shulga. Kyiv: Akadempriodyka, 2013. <a href="https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?Dark_Matter-1">https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?Dark_Matter-1</a></li> <li>5. Weinberg S. <i>Cosmology</i>. New York: Oxford University Press Inc., 2008.</li> </ol> <p><b>Допоміжна:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вавилова І. Б. <i>Великомасштабна структура Всесвіту: спостереження і методи дослідження</i>: навч. посіб. Київ: РВЦ Київський університет, 1998. <a href="https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?Vavilova-Large-Scale-Structure-Universe">https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?Vavilova-Large-Scale-Structure-Universe</a></li> <li>2. Кудря Ю. М., Вавилова І. Б. <i>Позагалактична астрономія</i>. Книга 1. Галактики: основні фізичні властивості: навч. посіб. Київ: Наукова думка, 2016. <a href="https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?pzastr">https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?pzastr</a></li> <li>3. Вавилова І. Б., Кудря Ю. М., Василенко А. А., Бабик Ю. В. <i>Позагалактична астрономія</i>. Книга 2. Галактики: багатохвильові властивості: навч. посіб. Київ: Наукова думка, 2023. <a href="https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?ExtragalaxyAstronomy-book2-2023">https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?ExtragalaxyAstronomy-book2-2023</a></li> <li>4. Климишин І. А. <i>Основи космології</i>. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2014. <a href="https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?klimishin_ia_osnovi_kosmologiyi">https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?klimishin_ia_osnovi_kosmologiyi</a></li> <li>5. Климишин І. А. <i>Фрагменти космології</i>. Видання друге, доповнене, Івано-Франківськ, Видавець Третяк І. Я., 2012. <a href="https://www.calameo.com/read/0028207913031f55a2a52">https://www.calameo.com/read/0028207913031f55a2a52</a></li> <li>6. Парновський С., Парновський О. <i>Як влаштовано Всесвіт. Вступ до сучасної космології</i>. Львів: Видавництво Старого Лева, 2018.</li> </ol> <p><b>Інформаційні ресурси:</b></p> <p><a href="https://ui.adsabs.harvard.edu/classic-form">https://ui.adsabs.harvard.edu/classic-form</a>  <a href="https://arxiv.org/list/astro-ph.CO/recent">https://arxiv.org/list/astro-ph.CO/recent</a>  <a href="https://astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html">https://astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html</a>  <a href="http://www.bo.astro.it/~cappi/cosmotools">http://www.bo.astro.it/~cappi/cosmotools</a>  <a href="https://hubblesite.org/home">https://hubblesite.org/home</a></p>

	<a href="https://webb.nasa.gov/">https://webb.nasa.gov/</a> <a href="https://asa.alma.cl/SensitivityCalculator/">https://asa.alma.cl/SensitivityCalculator/</a>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр
<b>Обсяг курсу</b>	150 годин, з яких 48 годин аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 32 годин лабораторних занять; 102 годин самостійної роботи.
<b>Очікувані результати навчання</b>	<p>У результаті вивчення даного курсу студент повинен</p> <p><b>знати:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– основні властивості і характеристики спостережуваного Всесвіту;</li> <li>– основні етапи еволюції Всесвіту (період, фізичні процеси, спостережувані прояви);</li> <li>– основні космологічні моделі Всесвіту (Айнштайна, де Сіттера, Фрідмана, Леметра, стандартна <math>\Lambda</math>CDM);</li> <li>– закон Габбла–Леметра, його передбачення і відкриття, виведення в космологічних моделях;</li> <li>– походження і властивості реліктового випромінювання;</li> <li>– спостережувані підстави існування темної матерії та її властивості;</li> <li>– спостережувані підстави існування темної енергії та її типи;</li> <li>– сценарій формування галактик та великомасштабної структури Всесвіту;</li> </ul> <p><b>вміти:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– описати складові Всесвіту.</li> <li>– описати його еволюцію від Великого вибуху до наших днів.</li> <li>– виводити, аналізувати та розв’язувати рівняння Фрідмана для однорідного ізотропного Всесвіту;</li> <li>– описувати поширення сигналів (випромінювання) у Всесвіті, який розширюється, та пов’язувати спостережувані на Землі величини із відповідними величинами у системі відліку спостережуваного об’єкта (світність, частота електромагнітного випромінювання, лінійні та кутові розміри, тощо) за допомогою космологічного червоного зміщення;</li> <li>– виводити, аналізувати та розв’язувати рівняння для еволюції малих за амплітудою скалярних збурень метрики простору часу та густини і швидкості матерії у Всесвіті, що розширюється, та застосовувати розв’язки для пояснення формування галактик, скупчень галактик і великих порожнин у їх розподілі;</li> <li>– описувати генерацію початкових збурень метрики простору-часу та маси-енергії на інфляційній стадії еволюції Всесвіту, а також формування спектра потужності флюктуацій густини матерії;</li> <li>– описувати властивості реліктового випромінювання та зв’язок просторових флюктуацій температури і поляризації на сфері останнього розсіювання із спостережуваною великомасштабною структурою Всесвіту;</li> </ul>
<b>Ключові слова</b>	Космологія — Великий Вибух — Великомасштабна структура Всесвіту — Космологічне червоне зміщення — Закон Габбла–Леметра — Реліктове випромінювання — Темна матерія — Темна енергія
<b>Формат курсу</b>	Очний
<b>Теми</b>	Наведено у табл.1
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	залік в кінці семестру
<b>Пререквізити</b>	загальна теорія відносності, термодинаміка, електродинаміка, атомна і ядерна фізика

<p><b>Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу</b></p>	<p>Презентації, лекції, лабораторні заняття, опитування самостійно опрацьованого матеріалу.</p>
<p><b>Необхідне обладнання</b></p>	<p>Персональний комп'ютер, проєктор.</p>
<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>• контрольні роботи (модулі): 20% семестрової оцінки; загалом — дві роботи, оцінка кожної — максимум 10 балів; кожна контрольна містить два практичних завдання, кожне з яких оцінюється за 5-бальною шкалою, відповідно до таких критеріїв:       <ul style="list-style-type: none"> <li>5 — питання викладено правильно і повністю;</li> <li>3–4 — повнота викладення недостатня;</li> <li>1–2 — рівень володіння матеріалом дуже низький, або ж низький;</li> <li>0 — студент повністю неправильно виклав питання, або ж зовсім не надав на нього відповіді.</li> </ul> </li> <li>• робота на лабораторних заняттях під час семестру: 32% сумарної оцінки; 8 лабораторних (макс. 4 бали за лабораторну роботу):       <ul style="list-style-type: none"> <li>4 — робота виконана повністю правильно;</li> <li>3 — робота виконана повністю, але містить незначну помилку;</li> <li>2 — робота виконана не повністю або містить помилки;</li> <li>1 — робота виконана не повністю та містить помилки;</li> <li>0 — робота не виконана або виконана повністю неправильно;</li> </ul> </li> <li>• поточне оцінювання: письмова та усна частина разом 48% семестрової оцінки; два розширені теоретичні завдання (макс. 10 балів кожне), одне розширене практичне завдання (макс. 20 балів) та 8 базових тестових запитань (макс. 8 балів);       <p>теоретичні питання оцінюються за такою шкалою:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>10 — питання викладено правильно і повністю,</li> <li>6–8 — повнота викладення недостатня,</li> <li>3–5 — рівень володіння матеріалом частковий,</li> <li>1–2 — рівень володіння матеріалом дуже низький або низький,</li> <li>0 — студент повністю неправильно виклав питання, або ж зовсім не надав на нього відповіді;</li> </ul> </li> <li>• розширене практичне завдання оцінюються за наступною шкалою:       <ul style="list-style-type: none"> <li>18–20 — робота виконана правильно та задовільно, добре, або гарно оформлена,</li> <li>11–17 — робота виконувалася спочатку правильно, але на якомусь етапі аналізу отриманих результатів виникла помилка,</li> <li>1–10 — виконання завдання неповне і містить помилки,</li> <li>0 — завдання невиконане, або виконане повністю неправильно.</li> </ul> <p>Тестові запитання оцінюються за такою шкалою:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1 — правильна відповідь</li> <li>0 — неправильна відповідь</li> </ul> </li> </ul> <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>Відвідування 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 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 поточному тестуванні. 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 для контрольних робіт та теми для рефератів</b></p>	<p><b>Космологічна модель однорідного та ізотропного Всесвіту</b></p> <p>Всесвіт, що розширюється, і його вміст  Парадокс Ольберса  Червоне зміщення  Проблема кривизни простору-часу  Проблема горизонту  Прискорене розширення Всесвіту і темна енергія  Темна матерія  Космологічні спостереження  Космічний мікрохвильовий фон  Огляди червоного зсуву  Обсерваторії гравітаційних хвиль  Спостереження нейтрино  Пошук темної матерії  Відкриті проблеми космології  Космологічна стала і темна енергія  Ньютонівська космологія  Релятивістська космологія  Метрика Фрідмана–Лематра–Робертсона–Уокера  Конформний час  Структура світлового конуса простору FLRW  Символи Крістоффеля та геодезичні  Рівняння Фрідмана</p>

Постійна Габбла та параметр прискорення  
Критична густина і параметри густини  
Рівняння збереження енергії  
Модель  $\Lambda$ CDM  
Розв'язки рівнянь Фрідмана  
Статичний Всесвіт Айнштайна  
Всесвіт де Сіттера  
Радіаційно-домінований Всесвіт  
Всесвіт, де домінує пилоподібна матерія  
Всесвіт з радіаційною та пилоподібною компонентою  
Відстані в космології  
Супутня відстань  
Відстані та горизонти  
Відстань за світністю  
Відстань за кутовим діаметром  
Космологічна драбина відстаней

### **Теплова історія Всесвіту**

Теплова рівновага і рівняння Больцмана  
Короткий опис теплової історії Всесвіту  
Густина ентропії  
Рівняння Больцмана в загальній теорії відносності та космології  
Рівняння Саха  
Нуклеосинтез Великого вибуху  
Відношення баріонів до фотонів  
Рекомбінація  
Ефективне число релятивістських ступенів свободи  
Реліктове походження темної матерії і “WIMP miracle”

### **Космологічні збурення**

Від збурень метрики FLRW до лінеаризованого тензора Айнштайна  
Збурені символи Крістофеля  
Збурений тензор Річчі та тензор Айнштайна  
Збурення тензора енергії-імпульсу  
Калібрувальні перетворення  
Координати та калібрувальні перетворення  
Декомпозиція скаляр-вектор-тензор  
Рівняння Айнштайна для скалярних збурень  
Релятивістське рівняння Пуассона  
Рівняння для анізотропного тензора напруження  
Рівняння для швидкості  
Рівняння для збурення тиску  
Рівняння Айнштайна для тензорних збурень  
Рівняння Айнштайна для векторних збурень

### **Анізотропія космічного мікрохвильового фону**

Довжина вільного пробігу  
Анізотропія у великих масштабах

	<p>Тісна взаємодія і акустичні коливання  Акустичні піки  Дифузійне загасання  Оптична глибина  Ефект кінцевої товщини та реіонізація  Тензорний внесок в кореляцію ГТ  Внесок скалярних збурень у поляризацію  Внесок тензорних збурень у поляризацію</p> <p><b>Великомасштабна структура Всесвіту</b></p> <p>Великомасштабна структура.  Розподіл матерії у Всесвіті.  Зміна розподілу матерії з часом.  Як ми можемо «виміряти» та кількісно визначити розподіл речовини в об'ємі.  Інформація, яку ми можемо отримати, вивчаючи розподіл речовини.  Еволюція галактик.</p>
<b>Опитування</b>	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

Схема курсу «Структура та еволюція Всесвіту»\*

Тиж- день	Назва теми	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
<i><b>Змістовий модуль 1</b></i>			
1–2	<b>Тема 1.</b> Вступ. Основні етапи еволюції Всесвіту (період, фізичні процеси, спостережувані прояви). <b>Література:</b> Б1–Б5, Д1–Д6	Лекції — 2 год. Лабораторні — 4 год. Самостійна робота — 12 год.	2 тижні
3–4	<b>Тема 2.</b> Космологічні моделі однорідного та ізотропного Всесвіту (Айнштайна, де Сіттера, Фрідмана, Леметра, стандартна $\Lambda$ CDM). <b>Література:</b> Б1–Б5, Д1–Д6	Лекції — 2 год. Лабораторні — 4 год. Самостійна робота — 12 год.	2 тижні
5–6	<b>Тема 3.</b> Закон Габбла-Леметра, його передбачення і відкриття. Рівняння поширення сигналів у нестационарному Всесвіті. Космологічне червоне зміщення. Співвідношення супутня відстань — червоне зміщення, відстань за світністю — червоне зміщення, відстань за кутовими розмірами — червоне зміщення. <b>Література:</b> Б1–Б5, Д1–Д6	Лекції — 2 год. Лабораторні — 4 год. Самостійна робота — 13 год.	2 тижні
7–8	<b>Тема 4.</b> Походження і властивості реліктового випромінювання. <b>Література:</b> Б1–Б5, Д1–Д6	Лекції — 2 год. Лабораторні — 4 год. Самостійна робота — 13 год.	2 тижні

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



Тиж- день	Назва теми	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
<i><b>Змістовий модуль 2</b></i>			
9–10	<b>Тема 5.</b> Спостережувані підстави існування темної матерії та її властивості. <b>Література:</b> Б1–Б5, Д1–Д6	Лекції — 2 год. Лабораторні — 4 год. Самостійна робота — 13 год.	2 тижні
11–12	<b>Тема 6.</b> Спостережувані підстави існування темної енергії та її типи. <b>Література:</b> Б1–Б5, Д1–Д6	Лекції — 2 год. Лабораторні — 4 год. Самостійна робота — 13 год.	2 тижні
13–14	<b>Тема 7.</b> Гравітаційна нестійкість. Типи, генерація та еволюція космологічних збурень. <b>Література:</b> Б1–Б5, Д1–Д6	Лекції — 2 год. Лабораторні — 4 год. Самостійна робота — 13 год.	2 тижні
15–16	<b>Тема 8.</b> Сценарій формування галактик та великомасштабної структури Всесвіту. <b>Література:</b> Б1–Б5, Д1–Д6	Лекції — 2 год. Лабораторні — 4 год. Самостійна робота — 13 год.	2 тижні