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 «Структура та еволюція Всесвіту», 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

Назва дисципліни	Структура та еволюція Всесвіту
Адреса викладання курсу	вул. Кирила і Мефодія 8, 79005, 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 курсу	Лектор: Новосядлий Богдан Степанович, директор Астрономічної обсерваторії, професор кафедри астрофізики, докт. фіз.-мат. наук, чл.-кор. НАН України. Лабораторні заняття веде канд. фіз.-мат. наук, доц. Кошмак Ігор Олександрович.
Контактна інформація викладачів	bohdan.novosyadlyj@lnu.edu.ua https://physics.lnu.edu.ua/employee/novosyadlyj-bohdan-stepanovych ihor.koshmak@lnu.edu.ua https://physics.lnu.edu.ua/employee/koshmak-ihor-oleksandrovych
Консультації по курсу відбуваються	Консультації в день проведення лекцій та лабораторних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі он-лайн консультації з використанням засобів *Microsoft Teams*.
Сторінка курсу	https://physics.lnu.edu.ua/course/struktura-ta-evolyutsiya-vsesvitu https://teams.microsoft.com/_#/school/conversations/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B5?threadId=19:826kDgTGFhSU4ocFZsOivP0_ILIz5PmiJrY491TynI41@thread.tacv2&ctx=channel (команда “Структура і еволюція Всесвіту, лекції” у *Microsoft Teams*)
Інформація про дисципліну	Дисципліна «Структура і еволюція Всесвіту» 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).
Коротка анотація дисципліни	Курс покликаний викласти студентам основи сучасної космології, знання про будову та еволюцію Всесвіту як цілого, формування його великомасштабної структури. Ці знання є основою сучасної фізичної картини світу, яка ґрунтується на сукупності усіх спостережуваних даних щодо складу та структури матерії від найменших масштабів до астрофізичних та космологічних, а також на фізичних теоріях фундаментальних взаємодій та загальній теорії відносності. У програмі курсу передбачено вивчення спостережних та теоретичних основ сучасної космології. Вона включає вивчення космологічних моделей однорідного ізотропного Всесвіту, який розширюється і заповнений звичайною матерією, темною матерією, темною енергією, реліктовим випромінюванням і реліктовими нейтрино, генерацію флюктуацій метрики простору-часу у ранньому Всесвіті, які приводять до формування його структури (галактик, скупчень галактик, великих порожнин у просторовому розподілі галактик, стінок, волокон). Студенти знайомляться зі спостережуваними доказами існування темної матерії і темної енергії, пошуками шляхів встановлення їхньої фізичної природи. Магістри, які вивчали даний курс, після отримання диплому магістра можуть працювати в астрономічних установах та університетських кафедрах в Україні та в

	світі. Тому вивчення цього курсу є надзвичайно корисним для працевлаштування магістрів спеціальності 104 Фізика та астрономія, які хочуть продовжити свою роботу в астрономічних обсерваторіях та інших установах, діяльність яких пов'язана з передовими дослідженнями Всесвіту, природи та походження його складових.
Мета та цілі курсу	**Головна мета курсу:** • Дати студентам огляд основних знань про спостережні та теоретичні основи сучасної космології. • Застосувати рівняння загальної теорії відносності до опису еволюції однорідного ізотропного Всесвіту. Ознайомити з космологічними моделями Айнштайна, де Сіттера, Фрідмана, Леметра та стандартною ΛCDM моделлю. • Ознайомити студентів з просторово-часовими співвідношеннями нестаціонарного однорідного ізотропного Всесвіту з нульовою, додатною та від'ємною кривиною 3-простору. • Вивести рівняння поширення сигналів у нестаціонарному Всесвіті, вираз для космологічного червоного зміщення та співвідношення супутня відстань — червоне зміщення, відстань за світністю — червоне зміщення, відстань за кутовими розмірами — червоне зміщення. • Ознайомити студентів з теорією гарячого Всесвіту, передбаченням існування і відкриття реліктового випромінювання, проблемами стандартної теорії Великого Вибуху, інфляційними сценаріями раннього Всесвіту. • Ознайомити студентів із спостережуваними підставами існування темної матерії, її властивостями та гіпотезами щодо її фізичної природи. • Ознайомити студентів із спостережуваними підставами існування темної енергії, її властивостями та моделями, а також сценаріями майбутнього розширення Всесвіту у різних моделях темної енергії. • Ознайомити студентів з теорією гравітаційної нестійкості, типами, генерацією та еволюцією космологічних збурень, основами теорії формування структури Всесвіту та її елементів — галактик, скупчень галактик, великих порожнин і т.д. • Дати студентам якісний і кількісний опис усіх етапів еволюції Всесвіту від квантової флюктуації до сучасної епохи та прогнозів його далекого майбутнього. **Основні завдання курсу:** • Навчити студентів застосовувати рівняння загальної теорії відносності (рівняння Айнштайна) та їх розв'язки для опису однорідного ізотропного Всесвіту. • Навчити студентів розуміти вплив різних фізичних складових і характеристик Всесвіту (матерії, випромінювання, темної енергії, кривини 3-простору) на динаміку його розширення. • Навчити студентів виводити просторово-часові співвідношення у нестаціонарному Всесвіті та пов'язувати їх із космологічним червоним зміщенням. • Дати студентам основи знань про гравітаційну нестійкість у нестаціонарному Всесвіті, генерацію та еволюцію збурень, формування галактик і великомасштабної структури Всесвіту. • Сформувати у студентів наукову картину Всесвіту на основі сукупності спостережуваних даних та перевірених фізичних теорій.

Література для вивчення дисципліни	**Базова:** 1. Новосядлий Б. С. *Структура й еволюція Всесвіту*. Навчальний посібник. Львів, ЛНУ імені Івана Франка, 2019. Джерело: https://astro.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/10/sev.pdf 2. Александров Ю. В. *Основи релятивістської космології*. Підручник. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2004. Джерело: http://dspace.univer.kharkov.ua/bitstream/123456789/60/1/cosmol.pdf 3. Жданов В. І. *Вступ до теорії відносності*. Навчальний посібник рекомендовано МОН України. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2008. Джерело: https://chtyvo.org.ua/authors/Zhdanov_Valerii/Vstup_do_teorii_vidnosnosti/ 4. Novosyadlyj B., Pelykh V., Shtanov Yu., Zhuk A. *Dark Energy: Observational Evidence and Theoretical Models*. Vol. 1. of the three-volume monography "Dark Energy and Dark Matter in the Universe", Ed. V.M. Shulga. Kyiv: Akademperiodyka, 2013, 380 pp. ISBN: 978-966-360-240-0 Джерело: https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?Dark_Matter-1 5. Weinberg S. Cosmology. Oxford University Press Inc., New York, 2008. **Допоміжна:** 1. Вавілова І. Б. *Великомасштабна структура Всесвіту: спостереження і методи дослідження*. Навчальний посібник до спецкурсу «Позагалактична астрономія». Київ: РВЦ Київський університет, 1998. Джерело: https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?Vavilova-Large-Scale-Structure-Universe 2. Кудря Ю. М., Вавилова І. Б. *Позагалактична астрономія*. Книга 1. Галактики: основні фізичні властивості. Навчальний посібник. К.: Наукова думка, 2016. Джерело: https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?pzastr 3. Вавилова І. Б., Кудря Ю. М., Василенко А. А., Бабик Ю. В. *Позагалактична астрономія*. Книга 2. Галактики: багатохвильові властивості. Навчальний посібник. Київ: Наукова думка, 2023. Джерело: https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?ExtragalaxyAstronomy-book2-2023 4. Климишин І. А. *Основи космології*. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2014. Джерело: https://mao.kiev.ua/index.php/ua/pdf-opener?klimishin_ia_osnovi_kosmologiyi 5. Климишин І. А. *Фрагменти космології*. Видання друге, доповнене, Івано-Франківськ, Видавець Третяк І. Я., 2012. Джерело: https://www.calameo.com/read/0028207913031f55a2a52 6. Парновський С., Парновський О. *Як влаштовано Всесвіт. Вступ до сучасної космології*. Львів: Видавництво Старого Лева, 2018. **Інформаційні ресурси:** https://ui.adsabs.harvard.edu/classic-form https://arxiv.org/list/astro-ph.CO/recent https://astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html http://www.bo.astro.it/~cappi/cosmotools https://hubblesite.org/home https://webb.nasa.gov/ https://asa.alma.cl/SensitivityCalculator/

Тривалість курсу	один семестр
Обсяг курсу	150 годин, з яких 48 годин аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 32 годин лабораторних занять; 102 годин самостійної роботи.
Очікувані результати навчання	У результаті вивчення даного курсу студент повинен **знати:** • основні етапи еволюції Всесвіту (період, фізичні процеси, спостережувані прояви); • основні космологічні моделі Всесвіту (Айнштайна, де Сіттера, Фрідмана, Леметра, стандартна ΛCDM); • закон Габбла–Леметра, його передбачення і відкриття, виведення в космологічних моделях; • походження і властивості реліктового випромінювання; • спостережувані підстави існування темної матерії та її властивості; • спостережувані підстави існування темної енергії та її типи; • сценарій формування галактик та великомасштабної структури Всесвіту; **вміти:** • виводити, аналізувати та розв'язувати рівняння Фрідмана для однорідного ізотропного Всесвіту; • 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; • 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; • описувати генерацію початкових збурень метрики простору-часу та маси-енергії на інфляційній стадії еволюції Всесвіту, а також формування спектра потужності флюктуацій густини матерії; • описувати властивості реліктового випромінювання та зв'язок просторових флюктуацій температури і поляризації на сфері останнього розсіювання із спостережуваною великомасштабною структурою Всесвіту; • пояснити необхідність введення до складу матеріальної компоненти Всесвіту темної матерії у формі масивних беззіткнювальних частинок; • пояснити необхідність введення до складу енергетичної компоненти Всесвіту темної енергії та її динамічні особливості у різних моделях темної енергії (космологічна стала, квінтесенційна темна енергія, фантомна темна енергія).
Ключові слова	Космологія — Великий Вибух — Великомасштабна структура Всесвіту — Космологічне червоне зміщення — Закон Габбла–Леметра — Реліктове випромінювання — Темна матерія — Темна енергія
Формат курсу	Очний
Теми	Наведено у табл.1
Підсумковий контроль, форма	залік в кінці семестру

Пререквізити	Дисципліни бакалаврського рівня з атомної та ядерної фізики, класичної електродинаміки, термодинаміки, загальної теорії відносності
Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу	Презентації, лекції, лабораторні заняття, опитування самостійно опрацьованого матеріалу.
Необхідне обладнання	Персональний комп'ютер, проєктор.
Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)	Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за таким співвідношенням: • робота на лабораторних заняттях під час семестру: 40 балів, які можна отримати за виконання 4-х домашніх завдань і їх пояснень на лабораторних заняттях (20 балів), а також за розв'язання задач на дошці під час лабораторних занять (20 балів); кожне завдання оцінюється максимально 5 балами: 5 — завдання виконане повністю правильно; 3–4 — хід виконання завдання правильний, але рівень завершеності складає 61%–80%; 1–2 — хід виконання завдання правильний, але рівень завершеності складає 20%–60%; 0 — завдання не виконано, або виконано частково (<20%), або виконано повністю неправильно; • контрольні роботи з трьох ЗМ: 20 (ЗМ 1) + 20 (ЗМ 2) + 20 (ЗМ 3) = 60 балів. Кожна контрольна містить два теоретичних питання, два практичні, кожне з яких оцінюється за 5-бальною шкалою, відповідно до таких критеріїв: 5 — питання викладено правильно і повністю, практичне завдання виконане повністю; 3–4 — повнота викладення недостатня, практичне завдання (задача) виконане частково, на 61%–80%; 1–2 — рівень володіння матеріалом дуже низький, або ж низький, практичне завдання виконане на 20%–60%; 0 — студент повністю неправильно виклав теоретичне питання, або ж зовсім не надав на нього відповіді, практичне завдання без відповіді, або цілком неправильний підхід до розв'язання. Підсумкова максимальна кількість балів — 100. **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 незарахуванння викладачем, незалежно від масштабів обману. **Відвідування 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.

	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. **Політика виставлення балів.** Враховуються бали, набрані на поточному контролі і лекційна активність в режимі запитання-відповідь. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студента під час заняття; недопустимість пропусків та запізнень 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. Незадовільну оцінку (0 балів) студент отримує за відсутність на лекціях без поважних причин, невірні або відсутні відповіді на контрольних опитуваннях чи у письмових контрольних роботах. **Жодні форми академічної недоброчесності не толеруються.**
Питання для контрольних робіт та теми для рефератів	1. Назвіть 12 фундаментальних властивостей нашого Всесвіту, які є основою сучасної космології. 2. Якими є головні ознаки сучасних космологічних моделей? 3. Сформулюйте слабкий космологічний принцип. Хто і коли сформулював його вперше? 4. Сформулюйте сильний космологічний принцип. Які спостережувані факти є в його основі? 5. Які експерименти та спостереження необхідні, щоб заперечити сильний космологічний принцип? 6. Хто є засновником позагалактичної астрономії? 7. Коли, ким і як було доведено, що наш Всесвіт розширюється? 8. Який учений теоретично передбачив нестаціонарність однорідного ізотропного світу? 9. Хто і коли передбачив існування реліктового випромінювання? 10. Коли, хто і як відкрив реліктове випромінювання? 11. Чому такий великий інтервал часу між передбаченням і відкриттям реліктового випромінювання? 12. Космологія як фізична наука виникла лише після створення загальної теорії відносності. Чому? 13. Етапи еволюції Всесвіту у стандартній моделі Великого вибуху. 14. Назвіть сім проблем стандартної моделі Великого вибуху. 15. Що таке інфляційна стадія? Як з її уведенням вирішують проблеми стандартної моделі Великого вибуху? 16. Кого вважають автором інфляційного сценарію розвитку Всесвіту? 17. Анізотропія реліктового випромінювання: як виявляється? хто виявив уперше? 18. Існування структури Всесвіту та анізотропія реліктового випромінювання: проблема узгодження. У чому її суть? 19. Які спостережувані підстави існування темної матерії? 20. Що виявила реалізація тесту видима зоряна величина — червоне зміщення для наднових Ia? 21. Перечисліть ключові відкриття в космології. 22. Коли, кому і за які відкриття в космології присуджено Нобелівську премію?

	23. Запишіть метрику g_{ik} простору–часу однорідного ізотропного світу (час конформний) з довільною кривиною 3-простору? Хто і коли її увів? 24. Розрахуйте всі компоненти символів Крістофеля Γ^{i}_{kl} в метриці ФЛРВ. 25. За допомогою символів Крістофеля в метриці ФЛРВ розрахуйте всі компоненти тензора Річчі R_{ki}. 26. Запишіть компоненти тензора енергії–імпульсу ідеальної рідини з баротропним рівнянням стану $p = wc^2\rho$ в супутній системі відліку. 27. Запишіть диференціальне рівняння збереження (нерозривності) кількості речовини з рівнянням стану $p=wc^2\rho$ (w=const) в однорідному Всесвіті з метрикою ФЛРВ. 28. Запишіть залежність густини випромінювання (w=1/3), густини матерії (w=0), енергії вакууму (w=−1), темної енергії (w=const) від масштабного множника (радіуса кривини 3-простору) a. 29. Розв'яжіть рівняння Фрідмана для випадку w=0 і нульової кривини 3-простору. 30. Розв'яжіть рівняння Фрідмана для випадку w=0 і додатної кривини 3-простору. 31. Розв'яжіть рівняння Фрідмана для випадку w=0 і від'ємної кривини 3-простору. 32. Розв'яжіть рівняння Фрідмана для випадку w=1/3 і нульової кривини 3-простору. 33. Розв'яжіть рівняння Фрідмана для випадку w=1/3 і додатної кривини 3-простору. 34. Розв'яжіть рівняння Фрідмана для випадку w=1/3 і від'ємної кривини 3-простору. 35. Розв'яжіть рівняння Фрідмана для випадку w=−1 і нульової, додатної та від'ємної кривини 3-простору. Як називають цю космологічну модель? 36. З використанням розв'язків, отриманих у пунктах 35, 32 і 29, опишіть динаміку розширення Всесвіту $a(t)$ на різних етапах його еволюції. 37. Розрахуйте збурені компоненти символів Крістофеля $\delta\Gamma^{i}_{kl}$ у збуреній метриці ФЛРВ у лінійному наближенні. 38. Розрахуйте збурені компоненти тензора Річчі δR_{ki} у збуреній метриці ФЛРВ у лінійному наближенні. 39. Розпишіть покомпонентно збурену частину тензора енергії–імпульсу ідеальної рідини з баротропним рівнянням стану $p=wc^2\rho$ (w=const) у конформно-ньютонівському калібруванні в лінійному наближенні. 40. Запишіть систему рівнянь для еволюції скалярних збурень у конформно-ньютонівському калібруванні в лінійному наближенні. 41. Знайдіть розв'язок системи рівнянь еволюції скалярних збурень у конформно-ньютонівському калібруванні для пилоподібного середовища. 42. Знайдіть розв'язок системи рівнянь еволюції скалярних збурень у конформно-ньютонівському калібруванні для середовища з ультрарелятивістським рівнянням стану. 43. За допомогою розв'язків із пунктів 41 та 42 побудуйте якісну картину формування елементів структури Всесвіту (галактик, скупчень галактик, надскупчень, порожнин тощо) від раннього Всесвіту з домінуванням ультрарелятивістської плазми до пізньої епохи з домінуванням матерії. 44. Якими є параметр Габбла H і параметр сповільнення q у моделях де Сіттера?

	45. Якими є параметр Габбла H і параметр сповільнення q у моделях Айнштайна–де Сіттера? 46. Якими є параметр Габбла H і параметр сповільнення q у моделях з пилоподібною матерією і космологічною сталою? 47. Як зростає амплітуда скалярної моди збурень густини пилоподібної матерії в моделі Всесвіту з космологічною сталою? Порівняйте з її зростанням у моделі Айнштайна–де Сіттера. 48. Темна матерія: означення та властивості. 49. Спостережувані підстави існування темної матерії. 50. Імовірні кандидати на темну матерію. 51. Стратегії та методи пошуку частинок темної матерії. 52. Прояви темної матерії в астрофізичних масштабах. 53. Прояви темної матерії в космологічних масштабах. 54. Вплив темної матерії на формування структури Всесвіту. 55. Вплив темної матерії на формування анізотропії температури реліктового випромінювання. 56. Астрофізичні методи пошуку частинок темної матерії. 57. Сучасні експерименти та результати пошуку частинок темної матерії. 58. Темна енергія: означення, властивості, імовірні кандидати. 59. Спостережувані підстави існування темної енергії. 60. Моделі темної енергії.
Опитування	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
Змістовий модуль 1			
1–2	**Тема 1.** Спостережні та теоретичні основи сучасної космології. **Література:** Б1, Б2, Б5, Д1, Д2, Д3, Д6	Лекція — 2 год, лабор. робота — 4 год, самостійна робота — 12 год.	2 тижні
3–4	**Тема 2.** Рівняння Фрідмана. Космологічні моделі Айнштайна, де Сіттера, Фрідмана, Леметра та стандартна ΛCDM модель. **Література:** Б1–Б3, Б5, Д4, Д5, Д6	Лекція — 2 год, лабор. робота — 4 год, самостійна робота — 13 год.	2 тижні
5–6	**Тема 3.** Просторово-часові співвідношення нестаціонарного однорідного ізотропного Всесвіту з нульовою, додатною та від'ємною кривиною 3-простору. **Література:** Б1–Б3, Б5, Д4	Лекція — 1 год., контр. робота — 1 год, лабор. робота — 2 год, самостійна робота — 12 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
Змістовий модуль 2			
7–8	**Тема 4.** Рівняння поширення сигналів у нестаціонарному Всесвіті. Космологічне червоне зміщення. Співвідношення супутня відстань — червоне зміщення, відстань за світністю — червоне зміщення, відстань за кутовими розмірами — червоне зміщення. **Література:** Б1, Б2, Б5, Д4	Лекція — 2 год, лабор. робота — 4 год, самостійна робота — 13 год.	2 тижні
9–10	**Тема 5.** Теорія гарячого Всесвіту. Реліктове випромінювання. Проблеми стандартної моделі Великого Вибуху. Інфляційні сценарії раннього Всесвіту. **Література:** Б1, Б2, Б4, Б5, Д4, Д6	Лекція — 1 год., контр. робота — 1 год, лабор. робота — 2 год, самостійна робота — 13 год.	2 тижні
Змістовий модуль 3			
11–12	**Тема 6.** Спостережувані підстави існування темної матерії, її властивості та гіпотези щодо фізичної природи. Спостережувані підставами існування темної енергії, її властивості та моделі. **Література:** Б1, Б4, Б5, Д6	Лекція — 2 год, лабор. робота — 4 год, самостійна робота — 13 год.	2 тижні
13–14	**Тема 7.** Основи теорії гравітаційної нестійкості, генерація та еволюція космологічних збурень. Основні сценарії формування структури Всесвіту та її елементів — галактик, скупчень галактик і великих порожнин. **Література:** Б1, Б5, Д1	Лекція — 2 год, лабор. робота — 4 год, самостійна робота — 13 год.	2 тижні
15–16	**Тема 8.** Етапи еволюції Всесвіту від квантової флюктуації до сучасної епохи та прогнози його далекого майбутнього у різних космологічних моделях з різним типом темної енергії. **Література:** Б1, Б4, Б5, Д6	Лекція — 1 год., контр. робота — 1 год, лабор. робота — 4 год, самостійна робота — 13 год.	2 тижні