

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І.І.МЕЧНИКОВА
Кафедра фізики та астрономії



“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Проректор з науково-педагогічної роботи
Олександр ЗАПОРОЖЧЕНКО
” Васиш 2022 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

ОК 7 «Релятивістська астрофізика і космологія»

Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	10 – Природничі науки
Спеціальність	104 - Фізика та астрономія
Освітньо-професійна програма	Фізика та астрономія

ОНУ
Одеса


Робоча програма навчальної дисципліни «Релятивістська астрофізика і космологія». – Одеса: ОНУ, 2022. – 19 с.

Розробник: Панько Олена Олексіївна, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики та астрономії

Робоча програма затверджена на засіданні кафедри фізики та астрономії ФМФІТ

Протокол № 1 від «5» вересня 2022 р.

Завідувач кафедри _____  Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ

Погоджено із гарантом ОПП «Фізика та астрономія»  Вадим АДАМЯН

Схвалено навчально-методичною комісією (НМК) факультету математики, фізики та інформаційних технологій

Протокол № 1 від «6» вересня 2022 р.

Голова НМК _____  Наталя МАСЛІЄВА

Переглянуто та затверджено на засіданні кафедри фізики та астрономії

Протокол № ___ від «___» _____ 20__ р.

Завідувач кафедри _____ (_____)

Переглянуто та затверджено на засіданні кафедри фізики та астрономії

Протокол № ___ від «___» _____ 20__ р.

Завідувач кафедри _____ (_____)

1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, Спеціальність, спеціалізація, рівень вищої освіти	Характеристика навчальної дисципліни
		Денна (очна) форма навчання
Загальна кількість кредитів – 5 годин – 150 змістовних модулів - 1	Галузь знань 10 – Природничі науки Спеціальність: 104 – Фізика та астрономія Рівень вищої освіти: <u>Другий (магістерський)</u>	Обов'язкова дисципліна
		Рік підготовки:
		1-й
		Семестр
		2-й
		Лекції
		30 год.
		Практичні
		20 год.
		Лабораторні
		0 год.
		Самостійна робота
		100 год.
Форма підсумкового контролю: іспит		

2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни «Релятивістська астрофізика і космологія» є підготовка фахівців, що мають сформовану сучасну картину Всесвіту, спроможних вільно оперувати поняттями, що пов'язані із межами використання класичного та релятивістського наближення при опису фізики явищ та об'єктів, від білих карликів, нейтронних зір до чорних дір, їхньої будови та еволюційного статусу; розумітися на особливостях отримання їх фізичних параметрів зі спостережень (пасивний експеримент); розглядати Всесвіт як релятивістській об'єкт, спираючись на ЗТВ при вивченні його

походження, еволюції, та його майбутнього. Майбутні фізики повинні вільно володіти відомостями та математичним апаратом, що описує стан космічних об'єктів у релятивістському випадку, вміти аналізувати фізичні процеси, що протікають в умовах, що недосяжні в земних лабораторіях. Ці знання необхідні для майбутньої професійної діяльності як для фізиків, так й для астрофізиків.

Завдання: сформувані у студентів стійкі знання про особливості використання релятивістського підходу до вивчення фізичних властивостей різних класів об'єктів, процесів, що протікають в умовах гравітаційного викривлення часу-простору, методи опису метрики в околицях чорних дір, а також вміння використовувати набуті знання у дослідженнях.

В результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен знати:

- умови використання класичного та релятивістського методів при вивченні астрономічних об'єктів;
- типи релятивістських об'єктів;
- статистики Бозе – Ейнштейна та Фермі – Дірака, частинки бозони та ферміоні;
- виродженій електронний/нейтронний газ, тиск виродженого газу;
- енергія Фермі, імпульс Фермі
- білі карлики: властивості, будова, залежність маса – радіус, межа Чандрасекхара;
- білі карлики у подвійних системах, акреція на білі карлики та її наслідки;
- нейтронні зорі: властивості, будова, залежність маса – радіус, межа Волкова – Опpegеймера, проблема точного значення цієї межі;
- магнітні поля нейтронних зір, величина і еволюція магнітного поля;
- нейтронні зорі у подвійних системах, акреція у таких системах та її наслідки;

- чорні діри, центрально-симетричне гравітаційне поле. Метрика Шварцшильда. Метрика Керра, Вивільнення енергії з чорної діри;
- чорні діри у центрах галактик, спостережні прояви.
- злиття релятивістських об'єктів зоряних мас, гравітаційні хвилі;
- Всесвіт як релятивістський об'єкт,
- астрофізичний аспект ЗТВ; принцип еквівалентності, Принцип відносності. Поняття інтервалу. Постійність швидкості світла.
- Рівняння Ейнштейна та його наслідки;
- спостережні основи космології, еволюція Всесвіту;
- альтернативні космології; майбутнє Всесвіту.

Вміти:

- використовувати математичний апарат та поняття релятивістської астрофізики для опису відповідних об'єктів та явищ;
- визначати розміри білих карликів та нейтронних зір за їх масою;
- розраховувати гравітаційне червоне зміщення;
- визначати значимість ефектів ЗТВ за параметром компактності;
- оцінювати характерний час існування подвійної системи з нейтронних зір від моменту спостереження до майбутнього злиття;
- визначати видимий радіус нейтронної зорі з урахуванням параметру компактності;
- пояснити ефект різкої зміни періоду пульсара;
- визначати відстані на космологічних масштабах.

Процес вивчення дисципліни спрямований на формування елементів наступних **компетентностей**.

Інтегральна компетентність

ІК. Здатність розв'язувати складні задачі і проблеми дослідницького та/або інноваційного характеру у фізиці та астрономії.

Загальні компетентності

ЗК 02. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.

ЗК 04. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

ЗК 05. Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології.

Спеціальні (фахові) компетентності

СК 01. Здатність використовувати закони та принципи фізики та/або астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ.

СК 05. Здатність сприймати новоздобуті знання в області фізики та астрономії та інтегрувати їх із уже наявними, а також самостійно опанувати знання і навички, необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних областях фізики та/або астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях.

СК 08. Здатність формулювати нові гіпотези та наукові задачі в області фізики та астрономії, вибирати відповідні методи для їх розв'язання, беручи до уваги наявні ресурси.

Що дозволяє досягти наступних результатів навчання:

РН01. Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної і 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.

РН03. Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних

РН05. Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та/або інновацій в області фізики та/або астрономії.

РН12. 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.

PH14. Брати продуктивну участь у виконанні експериментальних та/або теоретичних досліджень в області фізики та астрономії.

1. Зміст навчальної дисципліни

Змістовий модуль 1. Компактні релятивістські об'єкти.

Тема 1. Умови використання класичного та релятивістського методів при вивченні астрономічних об'єктів. Формування релятивістського підходу до опису фізичних явищ.

Тема 2. Спеціальна теорія відносності і її астрофізичний аспект. Принцип відносності. Поняття інтервалу. Постійність швидкості світла. Простір Мінковського. Перетворення Лоренца. Принцип еквівалентності. Криволінійний простір.

Тема 3. Бозони та ферміони. Енергія Фермі, імпульс Фермі. Умова виродженості. Тиск виродженого електронного газу. Тиск виродженого нейтронного газу.

Тема 4. Білі карлики. Історія відкриття. Фізичні властивості білих карликів. Рівняння стану при великих густинах та температурах. Чандрасекхарівська межа. Залежність маса-радіус. Особливості будови, спектрів та класифікація білих карликів. Походження білих карликів. Аккреція на білі карлики в подвійних системах.

Тема 5. Нейтронні зорі, основні відомості, формування уявлень. Нейтронні зорі як релятивістські об'єкти. Будова нейтронної зорі. Рівняння стану та межа Оппенгеймера-Волкова. Спостережні прояви нейтронних зір. Залежність маса-радіус. Походження нейтронних зір. Канонічна нейтрона зоря, її будова. Кваркові зорі.

Тема 6. Магнітні поля нейтронних зір. Величина і еволюція магнітного поля. Квантування Ландау. Атоми та іони в магнітних атмосферах. Остигання і теплове випромінювання нейтронних зір. Стадії охолодження. Перебудова зовнішньої корі.

Тема 7. Нейтронні зорі у подвійних системах. Акреція на нейтронні зорі. Пульсари. Пульсар Халса-Тейлора. Подвійний пульсар J0737-3039. Перевірка ЗТВ. Злиття нейтронних зір.

Тема 8. Центральнo-симетричне гравітаційне поле. Метрика Шварцшильда. Гравітаційний радіус та горизонт подій. Чорна діра, що обертається. Метрика Керра. Ергосфера. Вивільнення енергії з чорної діри.

Тема 9. Чорні діри зоряних мас. Надмасивні чорні діри. Акреція на чорні діри. Чорні діри у подвійних системах. Злиття чорних дір. Гравітаційні хвилі.

Змістовий модуль 2. Всесвіт. Основи космології.

Тема 1. Спостережні основи космології. Космологічний принцип. Прискорене розширення Всесвіту. Реліктове випромінювання та співвідношення баріонної та темної матерії. Темна енергія.

Тема 2. Теорія гравітаційного поля. Метричний тензор. Відстані і проміжки часу. Гравітаційне поле. Тензор кривини. Рівняння Ейнштейна. Стаціонарне рішення та Всесвіт, що поширюється. Космологічні моделі: Ізотропні космологічні моделі Фрідмана - Леметра - Робертсона - Уолкера. . Стаціонарні космологічні моделі. Модель де Ситтера. Анізотропні космологічні моделі. Модель Казнера. Модель з магнітним полем.

Тема 3. Еволюція ізотропного Всесвіту (фізичні аспекти). Термодинамічна рівновага і кінетичні процеси в розширення Всесвіту. Канонічна теорія Гарячої Всесвіту, температурна історія та основні періоди розширення.

Тема 4. Теорія Ранньою Всесвіту. Інфляційна стадія. Реліктове випромінювання. Ери випромінювання та речовини. Нуклеосинтез в гарячій моделі Всесвіту. Парадокси релятивістської космології. Космологічні тести.

Тема 5. Гравітаційна нестійкість і структуроутворення у Всесвіті. Еволюція первинних збурень скалярного, векторного і тензорного типів. Основні залежності від часу середньої густини і температури Всесвіту. Маса

Джинса первинних баріонних фрагментів в епоху рекомбінації атомів водню. Утворення первинних зір і перших протогалактик. Великомасштабна структура Всесвіту. Теорії утворення галактик і їх скупчень.

Тема 6. Прискорене розширення Всесвіту на сучасному етапі: спостережні дані і класифікація теоретичних моделей. Проблема темної енергії. Темна матерія і проблема лінзування. Альтернативні космології. Майбутнє Всесвіту.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	Очна форма					
	усього	У тому числі				
Л		Пр.з.	СРС	інд	Лаб.	
1	2	3	4	5	6	7
Змістовий модуль 1. Компактні релятивістські об'єкти						
Тема 1. Умови використання класичного та релятивістського методів при вивченні астрономічних об'єктів.	8	2		6		
Тема 2. Спеціальна теорія відносності і її астрофізичний аспект.	10	2	2	6		
Тема 3. Бозони та ферміони. Енергія Фермі, імпульс Фермі. Умова виродженості.	12	2	2	8		
Тема 4. Білі карлики.	12	2	2	8		
Тема 5. Нейтронні зорі.	10	2	2	6		
Тема 6. Магнітні поля нейтронних зір.	8	2		6		
Тема 7. Нейтронні зорі у подвійних системах.	12	2	2	8		
Тема 8. Центральньо-симетричне гравітаційне поле.	10	2	2	6		
Тема 9. Чорні діри.	8	2		6		
Разом за змістовим модулем 1	90	18	12	60		
Змістовий модуль 2. Всесвіт. Основи космології.						
Тема 1. Спостережні основи космології.	8	2		6		
Тема 2. Теорія гравітаційного поля. Рівняння Ейнштейна.	12	2	2	8		
Тема 3. Еволюція ізотропного Всесвіту.	12	2	2	8		
Тема 4. Теорія Ранньою Всесвіту.	10	2	2	6		
Тема 5. Гравітаційна нестійкість і	10	2	2	6		

структурування у Всесвіті.						
Тема 6. Прискорене розширення Всесвіту на сучасному етапі: спостережні дані і класифікація теоретичних моделей. Альтернативні космології. Майбутнє Всесвіту.	8	2		6		
Разом за змістовим модулем 2	60	12	8	40		
Усього годин	150	30	20	100		

5. Теми семінарських занять

Семінарські заняття не передбачені навчальним планом.

6. Теми практичних занять

№	Назва теми	Кількість годин
1	Поняття інтервалу. Постійність швидкості світла. Простір Мінковського. Перетворення Лоренца. Принцип еквівалентності. Криволінійний простір.	2
2	Енергія Фермі, імпульс Фермі. Умова виродженості. Тиск виродженого електронного газу. Тиск виродженого нейтронного газу.	2
3	Рівняння стану при великих густинах та температурах. Чандрасекхарівська межа. Залежність маса-радіус для білих карликів	2
4	Нейтронні зорі як релятивістські об'єкти. Будова нейтронної зорі. Рівняння стану та межа Оппенгеймера-Волкова.	2
5	Нейтронні зорі у подвійних системах. Акреція на нейтронні зорі. Пульсари. Пульсар Халса-Тейлора. Подвійний пульсар J0737-3039. Перевірка ЗТВ. Злиття нейтронних зір. Гравітаційні хвилі.	2
6	Метрика Шварцшильда. Гравітаційний радіус та горизонт подій. Чорна діра, що обертається. Метрика Керра. Ергосфера. Вивільнення енергії з чорної діри.	2
7	Теорія гравітаційного поля. Метричний тензор. Відстані і проміжки часу. Гравітаційне поле. Тензор кривини. Рівняння Ейнштейна. Стаціонарне рішення та Всесвіт, що поширюється. Космологічні моделі.	2
8	Еволюція ізотропного Всесвіту (фізичні аспекти). Термодинамічна рівновага і кінетичні процеси в розширення Всесвіту. Канонічна теорія Гарячої Всесвіту, температурна історія та основні періоди розширення.	2
9	Теорія Ранняю Всесвіту. Інфляційна стадія. Реліктове випромінювання. Ери випромінювання та речовини. Нуклеосинтез в гарячій моделі Всесвіту. Парадокси релятивістської космології. Космологічні тести.	2

10	Гравітаційна нестійкість і структуроутворення у Всесвіті. Еволюція первинних збурень скалярного, векторного і тензорного типів. Основні залежності від часу середньої густини і температури Всесвіту. Маса Джинса первинних баріонних фрагментів в епоху рекомбінації атомів водню. Утворення первинних зір і перших протогалактик. Великомасштабна структура Всесвіту. Теорії утворення галактик і їх скупчень.	2
Разом		20

7. Теми лабораторних робіт

Лабораторні роботи не передбачені навчальним планом.

8. Самостійна робота

№	Назва теми	Кількість годин
1	Умови використання класичного та релятивістського методів при вивченні астрономічних об'єктів. Формування релятивістського підходу до опису фізичних явищ.	6
2	Спеціальна теорія відносності і її астрофізичний аспект. Принцип відносності. Поняття інтервалу. Постійність швидкості світла. Простір Мінковського. Перетворення Лоренца. Принцип еквівалентності. Криволінійний простір.	6
3	Бозони та ферміони. Енергія Фермі, імпульс Фермі. Умова виродженості. Тиск виродженого електронного газу. Тиск виродженого нейтронного газу.	8
4	Фізичні властивості білих карликів. Рівняння стану при великих густинах та температурах. Чандрасекхарівська межа. Залежність маса-радіус. Особливості будови, спектрів та класифікація білих карликів. Походження білих карликів. Акреція на білі карлики в подвійних системах.	8
5	Нейтронні зорі як релятивістські об'єкти. Будова нейтронної зорі. Рівняння стану та межа Оппенгеймера-Волкова. Спостережні прояви нейтронних зір. Залежність маса-радіус. Походження нейтронних зір. Канонічна нейтрона зоря, її будова. Кваркові зорі.	6
6	Магнітні поля нейтронних зір. Величина і еволюція магнітного поля. Квантування Ландау. Остигання і теплове випромінювання нейтронних зір. Стадії охолодження. Перебудова зовнішньої корі.	6
7	Нейтронні зорі у подвійних системах. Акреція на нейтронні зорі. Пульсари. Пульсар Халса-Тейлора. Подвійний пульсар J0737-3039. Перевірка ЗТВ. Злиття нейтронних зір.	8
8	Центрально-симетричне гравітаційне поле. Метрика Шварцшильда. Гравітаційний радіус та горизонт подій.	6

	Чорна діра, що обертається. Метрика Керра. Ергосфера. Вивільнення енергії з чорної діри.	
9	Чорні діри зоряних мас. Надмасивні чорні діри. Акреція на чорні діри. Чорні діри у подвійних системах. Злиття чорних дір.	6
10	Спостережні основи космології. Космологічний принцип. Прискорене розширення Всесвіту. Реліктове випромінювання та співвідношення баріонної та темної матерії. Темна енергія.	6
11	Рівняння Ейнштейна. Стаціонарне рішення та Всесвіт, що поширюється. Космологічні моделі: Ізотропні космологічні моделі Фрідмана - Леметра - Робертсона - Уолкера. . Стаціонарні космологічні моделі. Модель де Ситтера. Анізотропні космологічні моделі. Модель Казнера. Модель з магнітним полем.	8
12	Еволюція ізотропного Всесвіту (фізичні аспекти). Термодинамічна рівновага і кінетичні процеси в розширення Всесвіту. Канонічна теорія Гарячої Всесвіту, температурна історія та основні періоди розширення.	8
13	Теорія Ранняю Всесвіту. Інфляційна стадія. Реліктове випромінювання. Ери випромінювання та речовини. Нуклеосинтез в гарячій моделі Всесвіту. Парадокси релятивістської космології. Космологічні тести.	6
14	Гравітаційна нестійкість і структуроутворення у Всесвіті. Еволюція первинних збурень скалярного, векторного і тензорного типів. Основні залежності від часу середньої густини і температури Всесвіту. Маса Джинса первинних баріонних фрагментів в епоху рекомбінації атомів водню. Утворення первинних зір і перших протогалактик. Великомасштабна структура Всесвіту. Теорії утворення галактик і їх скупчень.	6
15	Тема 6. Прискорене розширення Всесвіту на сучасному етапі: спостережні дані і класифікація теоретичних моделей. Проблема темної енергії. Темна матерія і проблема лінзування. Альтернативні космології. Майбутнє Всесвіту.	6
	Разом	100

Критерії оцінювання виконання самостійної роботи

Результати підготовки теоретичного матеріалу до практичних занять оцінюються за усним опитуванням.

Результати самостійної роботи представляються у вигляді доповіді (7-10 хв.), що супроводжується презентацією (5-7 слайдів) або у вигляді рефератів (7-10 хвилин). Критеріями оцінювання є: повнота представленого матеріалу, якість доповіді та презентації, відповідей на запитання викладача та однокурсників.

9. Методи навчання

При викладанні дисципліни використовуються словесні методи навчання, наочні методи навчання. Головним словесним методом навчання є лекція. Під час проведення лекцій використовуються наступні методи навчання: пояснювально-ілюстративний метод або інформаційно-рецептивний; репродуктивний метод (репродукція – відтворення); метод проблемного викладу; частково-пошуковий, або евристичний метод. Під час практичних занять використовуються наступні методи навчання частково-пошуковий, або евристичний метод; дослідницький, при захисті лабораторних робіт використовується дискусійний метод. Під час самостійної роботи використовується дослідницький метод.

10. Форми контролю та методи оцінювання

Поточний контроль здійснюється за результатами виконання практичних завдань та самостійної роботи. Результати підготовки теоретичного матеріалу до практичних занять оцінюються за усним опитуванням.

Оцінюється також активність студента в процесі занять: усне опитування, написання звітів до лабораторних робіт, написанні звітів при виконанні практичних завдань, оцінювання доповідей, рефератів, розв'язання ситуаційних задач. Підсумковий семестровий контроль (іспит).

Критерії оцінювання виконання самостійної роботи

Результати індивідуального завдання представляються у вигляді доповіді (7-10 хв), що супроводжується презентацією (5-7 слайдів).

Критеріями оцінювання є: повнота представленого матеріалу, якість доповіді та презентації, відповідей на запитання викладача та однокурсників.

Критерії оцінювання виконання практичних завдань.

Студент повинен виконати всі практичні заняття. За виконання розрахунків та оформлення результатів нараховується до 4 балів за кожне заняття. За помилки в обчисленнях або у виведенні формул знімається до 3 балів. За більш об'ємні завдання 6-го семестру нараховується до 7 балів та відповідно знімається до 3 балів. При виставленні підсумкової оцінки за семестр береться сума всіх оцінок.

Критерії оцінювання підсумкового контролю

Підсумковий семестровий контроль (іспит) проводиться в усній формі. Екзаменаційний білет містить два теоретичних питання, кожне з яких оцінюється окремо за 15 бальною шкалою.

Критерії оцінювання екзаменаційного питання:

- повна розгорнута відповідь – 15 балів;
- повна, але не розгорнута відповідь – 12 балів;
- повна, але не розгорнута відповідь, яка містить незначну помилку чи суперечність – 10 балів, за кожну наступну незначну помилку чи суперечність знімається 1 бал;
- неповна відповідь, яка не містить критичних помилок чи суперечностей – 8 балів,
за кожну наступну незначну помилку чи суперечність знімається 1 бал;
- відповідь, що містить критичну помилку чи неточність, або відсутність відповіді оцінюється в 0 балів.

Кількість балів, що здобувач отримав на іспиті, є сумою балів, що були отримані за кожне теоретичне питання.

Кінцева оцінка виставляється за сумою балів поточного та підсумкового контролю за шкалою, що наведена нижче (п.12).

11. Питання для поточного та підсумкового контролю

1. Умови використання класичного та релятивістського методів при вивченні астрономічних об'єктів.
2. Спеціальна теорія відносності і її астрофізичний аспект. Принцип відносності. Поняття інтервалу. Постійність швидкості світла.
3. Простір Мінковського. Перетворення Лоренца. Принцип еквівалентності. Криволінійний простір.
4. Бозони та ферміони. Енергія Фермі, імпульс Фермі. Умова виродженості.
5. Білі карлики. Історія відкриття. Фізичні властивості білих карликів. Тиск виродженого електронного газу.
6. Рівняння стану при великих густинах та температурах. Чандрасекхарівська межа. Залежність маса-радіус.
7. Особливості будови, спектрів та класифікація білих карликів. Походження білих карликів.
8. Акреція на білі карлики в подвійних системах.
9. Нейтронні зорі, основні відомості, формування уявлень. Нейтронні зорі як релятивістські об'єкти. Тиск виродженого нейтронного газу.
10. Будова нейтронної зорі. Рівняння стану та межа Оппенгеймера-Волкова. Залежність маса-радіус.
11. Канонічна нейтрона зоря, її будова. Кваркові зорі.
12. Спостережні прояви нейтронних зір. Походження нейтронних зір.
13. Магнітні поля нейтронних зір. Величина і еволюція магнітного поля. Квантування Ландау.
14. Остигання і теплове випромінювання нейтронних зір. Стадії охолодження. Перебудова зовнішньої корі.
15. Нейтронні зорі у подвійних системах. Акреція на нейтронні зорі.
16. Пульсари. Пульсар Халса-Тейлора. Подвійний пульсар J0737-3039. Перевірка ЗТВ. Злиття нейтронних зір.

17. Центрально-симетричне гравітаційне поле. Метрика Шварцшильда. Гравітаційний радіус та горизонт подій.
18. Чорна діра, що обертається. Метрика Керра. Ергосфера. Вивільнення енергії з чорної діри.
19. Чорні діри зоряних мас. Надмасивні чорні діри.
20. Акреція на чорні діри. Чорні діри у подвійних системах. Злиття чорних дір. Гравітаційні хвилі.
21. Спостережні основи космології. Космологічний принцип. Прискорене розширення Всесвіту. Реліктове випромінювання та співвідношення баріонної та темної матерії. Темна енергія.
22. Теорія гравітаційного поля. Метричний тензор. Відстані і проміжки часу. Гравітаційне поле. Тензор кривини. Рівняння Ейнштейна.
23. Стаціонарне рішення та Всесвіт, що поширюється. Космологічні моделі: Ізотропні космологічні моделі Фрідмана - Леметра - Робертсона - Уолкера.
24. Стаціонарні космологічні моделі. Модель де Ситтера.
25. Анізотропні космологічні моделі. Модель Казнера. Модель з магнітним полем.
26. Еволюція ізотропного Всесвіту (фізичні аспекти). Термодинамічна рівновага і кінетичні процеси в розширення Всесвіту.
27. Канонічна теорія Гарячої Всесвіту, температурна історія та основні періоди розширення.
28. Теорія Ранньою Всесвіту. Інфляційна стадія. Реліктове випромінювання.
29. Ери випромінювання та речовини.
30. Нуклеосинтез в гарячій моделі Всесвіту.
31. Парадокси релятивістської космології. Космологічні тести.
32. Гравітаційна нестійкість і структуроутворення у Всесвіті. Еволюція первинних збурень скалярного, векторного і тензорного типів. Основні залежності від часу середньої густини і температури Всесвіту.

33. Маса Джинса первинних баріонних фрагментів в епоху рекомбінації атомів водню. Утворення первинних зір і перших протогалактик.
34. Великомасштабна структура Всесвіту. Теорії утворення галактик і їх скупчень.
35. Прискорене розширення Всесвіту на сучасному етапі: спостережні дані і класифікація теоретичних моделей. Проблема темної енергії.
36. Темна матерія і проблема лінзування. Альтернативні космології. Майбутнє Всесвіту.

12. Розподіл балів, які отримують студенти

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання					Підсумковий контроль (Іспит)	Сума балів						
Змістовний модуль 1 Поточний контроль на лекціях					Контрольна робота	Індивідуальні завдання	Виконання і захист лабораторних робіт	Практичне завдання	Разом	70	30	100
T1	T2	T3	T4	T5								
2	2	2	2	2								
T6	T7	T8	T9									
2	2	2	2									
Змістовний модуль 2 Поточний контроль на лекціях												
T1	T2	T3						16				
2	2	2										
T4	T5	T6										
2	2	2										

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		для екзамену, курсового проекту (роботи), практики	для заліку
90 – 100	A	відмінно	зараховано
82-89	B	добре	
74-81	C		
64-73	D	задовільно	
60-63	E		
35-59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано з можливістю повторного складання
0-34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

13. Навчально-методичне забезпечення

Навчально-методичне забезпечення: робоча програма навчальної дисципліни; силабус, конспекти лекцій; презентації; методичні вказівки до виконання лабораторних робіт, первинний інструктаж з техніки безпеки, порядок виконання лабораторної роботи.

14. Рекомендована література

Основна

1. Жданов В.І. Вступ до теорії відносності. Навчальний посібник рекомендовано МОН України. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2008. 287 с.
2. Жданов В.І. Вступ до релятивістської теорії тяжіння. Київ, Навчальний посібник. Київ: ІЗМН, 1996. 120 с.
3. Александров Ю.В. Основи релятивістської космології. Підручник. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2004. 133 с.
4. Новосядлий Б. С. Структура й еволюція Всесвіту. Навчальний посібник. Львів, ЛНУ імені Івана Франка, 2019. 159 с.
5. Вавілова І.Б. Великомасштабна структура Всесвіту: спостереження і методи дослідження. Навчальний посібник до спецкурсу «Позагалактична астрономія». Київ: РВЦ Київський університет, 1998. 107 с. Режим доступу <ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/irivav/Vavilova-Large-Scale-Structure-Universe.pdf>

Додаткова

1. Захожай В. А. Вступ до астрофізики та космології. – Харків, 2017.
2. Климишин І.А. Релятивістська астрономія. Івано-Франківськ: Гостинець, 2007 - 208 с.
3. Ваврух М.В., Скульський М.Ю., Смерчинський С.В. Моделі масивних вироджених карликів. Монографія. Львів: Растр-7, 2018. 293 с. Режим доступу https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/Vavrukh_book.pdf
4. Парновський С., Парновський О. Як влаштовано Всесвіт. Вступ до сучасної космології. Львів: Видавництво Старого Лева, 2018. 248 с.
5. Stuart L. Shapiro, Saul A. Teukolsky Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects. Wiley-VCH; 1st edition (May 6, 1983) 672 pages
6. Linde, Andrei (2014). "Inflationary cosmology after Planck 2013". [arXiv:1402.0526](https://arxiv.org/abs/1402.0526)
7. Fontaine, G.; Wesemael, F. (2001). "White dwarfs". In Murdin, P. (ed.). *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*. [IOP Publishing/Nature Publishing Group. ISBN 978-0-333-75088-9](http://iopscience.iop.org/book/978-0-333-75088-9).

15. Електронні інформаційні ресурси

1. <http://dspace.onu.edu.ua/>
2. phys.onu.edu.ua