

К. А. Лисий

В. В. Мартинюк

МОЖЛИВІСТЬ ІСНУВАННЯ ТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЧОРНИХ ДІР У РАМКАХ СУЧАСНОЇ АСТРОФІЗИКИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація.

Робота присвячена дослідженню чорних дір — екстремальних об'єктів Всесвіту, їхніх властивостей та способів спостереження. Розглядаються зоряні, проміжні та надмасивні чорні діри, акреційні диски та червоточини. Значну увагу приділено першому зображенню горизонту подій чорної діри M87 (Event Horizon Telescope, 2019) та сучасним методам спектроскопії й телескопічного аналізу, що дозволяють визначати масу, spin та енергетичні характеристики систем. Дослідження демонструє важливість чорних дір для перевірки загальної теорії відносності, розуміння еволюції галактик, аналізу гравітаційних хвиль та розвитку астрофізики.

Ключові слова: чорні діри; надмасивні чорні діри; зоряні чорні діри; проміжні чорні діри; червоточини; акреційний диск; гравітаційні хвилі; Event Horizon Telescope; горизонти подій; метрика Шварцшильда; метрика Керра; спектроскопія; астрофізика; космологія.

Abstract.

The work focuses on black holes — extreme cosmic objects, their characteristics, and observation techniques. Stellar, intermediate, and supermassive black holes, accretion disks, and wormholes are considered. Special attention is given to the first direct image of the M87 black hole event horizon (Event Horizon Telescope, 2019) and modern spectroscopy and telescopic methods for determining mass, spin, and energy characteristics. The study emphasizes the importance of black holes for testing general relativity, understanding galaxy evolution, analyzing gravitational waves, and advancing astrophysics.

Keywords: black holes; supermassive black holes; stellar black holes; intermediate black holes; wormholes; accretion disk; gravitational waves; Event Horizon Telescope; event horizon; Schwarzschild metric; Kerr metric; spectroscopy; astrophysics; cosmology.

Вступ

Чорні діри — це області простору-часу з настільки сильним гравітаційним полем, що навіть світло не може їх покинути. Вони відіграють ключову роль у сучасній астрофізиці та космології. Перші підтверджені спостереження чорних дір пов'язані з рентгенівськими бінарними системами та активними ядрами галактик. Зоряні чорні діри формуються в результаті колапсу масивних зірок, надмасивні — у центрах галактик, а проміжні можуть виникати внаслідок злиття зоряних чорних дір. Теоретично існують червоточини — тунелі у просторі-часі, що потенційно з'єднують віддалені регіони Всесвіту [3]. Вивчення цих об'єктів дозволяє перевіряти межі сучасної фізики та досліджувати фундаментальні властивості простору-часу. Також чорні діри впливають на навколишнє середовище через потужне гравітаційне притягання та випромінювання акреційних дисків, що супроводжується викидами релятивістських джетів. Ці процеси суттєво впливають на формування та еволюцію галактик, регулюючи розподіл речовини й енергії у космічному масштабі. Справжнім проривом у візуальному дослідженні цих об'єктів стало те, що у 2019 році проєкт Event Horizon Telescope отримав перше зображення горизонту подій чорної діри M87, що стало прямим підтвердженням передбачень загальної теорії відносності [1]. Перше зображення горизонту подій чорної діри M87 наведено на рис. 1.

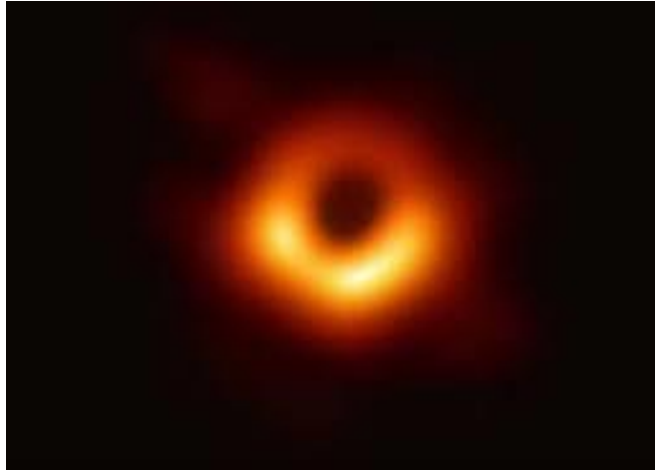


Рис. 1. Перше зображення горизонту подій чорної діри M87

Результати дослідження

Телескопічні та спостережувальні дані. Основним джерелом є телескопи у радіо-, рентгенівському та оптичному діапазонах. Дані ЕНТ дозволяють спостерігати світіння акреційного диска та тінь чорної діри, визначати масу та спін системи[1].

Математичне моделювання та теорія

Радіус Шварцшильда:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \quad (1)$$

де R_s – радіус Шварцшильда (радіус горизонту подій); G – гравітаційна стала; M – маса чорної діри; c – швидкість світла у вакуумі[2].

Метрика Шварцшильда:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \quad (2)$$

Де ds^2 – інтервал простору-часу; t – координатний час; r – радіальна координата; θ – полярний кут; ϕ – азимутальний кут; G – гравітаційна стала; M – маса чорної діри; c – швидкість світла у вакуумі.

Метрика Керра для обертових чорних дір, враховує спін та ергосферу[2].

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GMr}{c^2 \rho^2}\right) c^2 dt^2 - \frac{4GMar \sin^2 \theta}{c^3 \rho^2} dt d\phi + \frac{\rho^2}{\Delta} dr^2 + \rho^2 d\theta^2 + \left(r^2 + a^2 + \frac{2GMa^2 r \sin^2 \theta}{c^2 \rho^2}\right) \sin^2 \theta d\phi^2$$

$$\text{де } \rho^2 = r^2 + a^2 \cos^2 \theta, \quad \Delta = r^2 - \frac{2GMr}{c^2} + a^2 \quad (3)$$

Спостереження акреційних дисків. Світіння плазми навколо чорної діри аналізується спектроскопічно та через інтенсивність випромінювання, що дозволяє визначити масу, швидкість обертання та енергетичний розподіл.

Червоточини. Теоретично стабільні червоточини потребують екзотичної матерії з негативною енергетичною щільністю. Моделювання таких об'єктів допомагає перевіряти межі сучасної фізики та можливості міжзоряних подорожей.

Комп'ютерне моделювання та симуляції. Чисельне розв'язання рівнянь Ейнштейна дозволяє прогнозувати форму тіні чорної діри, розподіл плазми та інтенсивність випромінювання.

Перші спостереження. Зображення M87 показало тінь чорної діри та яскравий акреційний диск, що підтвердило передбачення загальної теорії відносності щодо горизонту подій [1].

Вимірювання параметрів. Маса M87 оцінюється в $\sim 6,5 \times 10^9 M_{\odot}$, спін системи високий, що узгоджується з моделями Керра. Акреційний диск демонструє асиметричне світіння, що підтверджує релятивістські ефекти.

Червоточини. Моделі показують, що стабільні червоточини потребують екзотичної матерії; на практиці поки що вони не виявлені, але дослідження важливі для розуміння структури простору-часу.

Висновки

Проведене дослідження чорних дір демонструє їхню надзвичайну значущість для сучасної астрофізики та космології. Спостереження першого зображення горизонту подій чорної діри M87 підтвердили передбачення загальної теорії відносності та дозволили визначити фізичні характеристики системи, зокрема масу та спін. Аналіз акреційних дисків і моделювання червоточин дозволяють краще розуміти процеси обертання, розподіл енергії та межі стабільності космічних об'єктів. Чорні діри слугують природними лабораторіями екстремальної гравітації, сприяють розвитку нових технологій спостережень і дозволяють перевіряти фундаментальні закони фізики. Їх вивчення допомагає пояснити еволюцію галактик, джерела гравітаційних хвиль та загалом розширює наше розуміння структури та динаміки Всесвіту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Event Horizon Telescope Collaboration. First Image of M87 Black Hole [Електронний ресурс] // NASA Science. – 2019.

2. Жданов В. І. Фізика чорних дір та гравітаційні моделі простору-часу [Електронний ресурс] / Жданов В. І., Александров О. М., Федорова О. В. // Український фізичний журнал. - 2021. - №10. - С. 112-118.

Лисий Костянтин Андрійович — студент групи 2ПІ-256, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: garoshh1818@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Lysyi Kostiantyn A. — Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email : garoshh1818@gmail.com

Supervisor: **Martyniuk Volodymyr V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia