

9. King J., Perry C. Smart buildings: Using smart technology to save energy in existing buildings. American Council for an Energy-Efficient Economy Washington, DC, USA, 2017.
10. Karimi R. et al. Smart Built Environment Including Smart Home, Smart Building and Smart City: Definitions and Applied Technologies // Advances and Technologies in Building Construction and Structural Analysis. IntechOpen, 2021.
11. The three types of smart building systems: the way forward for practitioners and vendors | by Joseph Aamidor | Medium. URL: <https://medium.com/@jaamidor/the-three-types-of-smart-building-systems-the-way-forward-for-practitioners-and-vendors-bccdf9d005f4> (дата звернення: 08.10.2022).
12. Batov E.I. The distinctive features of «smart» buildings // Procedia Eng. Elsevier Ltd, 2015. Вип. 111. С. 103–107.

***M. Lanovskyi. Implementation of Internet of Things to improve energy-saving technologies in buildings. – Article.***

***Summary.*** In this paper, the author defines the concept of the Internet of Things and specifies the structure, benefits, and examples of implementation of the smart building system. The usage of Internet of Things technologies to achieve energy efficiency and environmental protection was analyzed.

***Key words:*** energy efficiency, energy management, digitalization, automation, Internet of Things, smart building.

УДК (004.94+004.67)

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5682/2022/37/36>

***Т. Д. Чернова***

*студентка IV курсу спеціальності 123 – Комп'ютерна інженерія  
факультету кібербезпеки програмної інженерії та комп'ютерних наук  
Міжнародний гуманітарний університет  
м. Одеса, Україна*

***Д. І. Власенко***

*студент IV курсу спеціальності 123 – Комп'ютерна інженерія  
факультету кібербезпеки програмної інженерії та комп'ютерних наук  
Міжнародний гуманітарний університет  
Науковий керівник: ***В. І. Гура***  
кандидат технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри комп'ютерних наук та інноваційних технологій  
факультету кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук  
Міжнародний гуманітарний університет  
м. Одеса, Україна*

## **ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИВЧЕННІ ПРИРОДИ ЧОРНИХ ДІР**

***Анотація.*** Звернення до проблеми дослідження моделювання природи виникнення чорних дір зумовлене сучасними тенденціями у вивченні космології. Розглядаються питання про фізику чорних дір, а також можливість моделювання з використанням сучасних суперкомп'ютерних технологій. Ставляться завдання аналізувати можливості сучасних суперкомп'ютерів для вирішення завдань для пошуку первинних чорних дір. Увага сконцентрована на можливості отримання реальних фотографій чорних дір.

***Ключові слова:*** чорна діра, горизонт подій, суперкомп'ютери, гравітаційні хвилі, моделювання, симуляція.

**Актуальність теми.** Для вивчення природи чорних дір слід розібратися в їх структурі і поведінці, а також ознайомитися з моделюванням фізичних процесів, завдяки яким астрономи проводять ретельне моделювання на суперкомп'ютерах, яке допомагає розібратися в багатьох питаннях шляхом проведення симуляції.

**Метою** даної роботи є розгляд природи поведінки чорних дір, а також використання комп'ютерних технологій для передбачення їх місцезнаходження та фізичних процесів.

**Формулювання завдання.** Все що ми знаємо і розуміємо про простір та час і гравітацію – описується загальною теорією відносності (ЗТВ) Альберта Ейнштейна, і на відміну від спеціальної теорії відносності (СТВ) застосовується до всіх систем відліку, так само варто згадати, що ЗТВ додає четвертий вимір – час, до трьох просторових.

Ця теорія передбачає деякі ефекти: відхилення світла в гравітаційному полі, уповільнення ходу часу, червоне зміщення та багато іншого. Багато з цих ефектів вченим вдалося виявити експериментальним шляхом у земних умовах і при астрономічних спостереженнях, а також з численними випробуваннями, проведеними колаборацією Event Horizon Telescope. Після всіх проведених випробувань спростувати ЗТВ стало ще складніше, але є одна проблема, ЗТВ математично не сумісна з квантовою механікою, яка дає нам розуміння про субатомний світ.

Одним з важливих наслідків ЗТВ є існування чорних дір – область простору і часу з настільки великим гравітаційним притягненням, що залишити її межі не зможуть навіть об'єкти, що рухаються зі швидкістю світла. Сама чорна діра є результатом колапсу надмасивних зірок, які витратили все своє паливо і під дією гравітації їх ядра стиснулися, і зірка почала поглинати саму себе, перетворюючись на надзвичайно важкий об'єкт з сильним гравітаційним полем.

Усередині чорної діри не діятимуть звичні нам закони фізики. Зовнішня частина чорної діри називається горизонтом подій (ГП), це – сферична межа, за межами якої жоден об'єкт, навіть що володіє світловою швидкістю не зможе залишити межі чорної діри. ГП випромінює промені енергії і завдяки квантовим ефектам, на ньому виникатимуть потоки гарячих частинок, які випромінюватимуться у Всесвіт [1].



**Рис. 1.** Графічне пояснення радіусу Шварцшильда

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

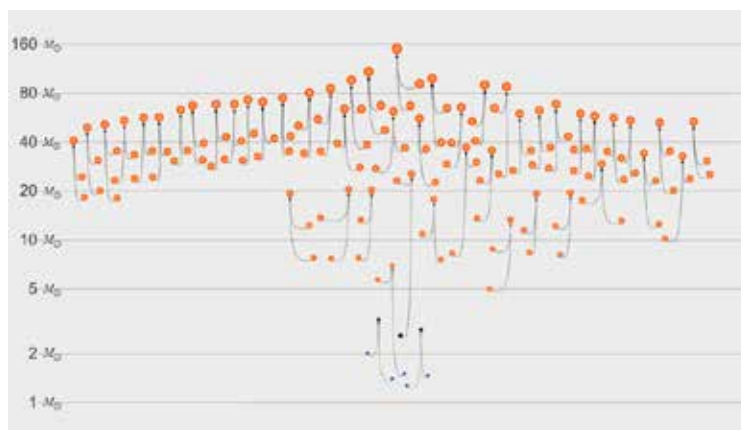
Сам ГП визначається радіусом Шварцшильда, де  $G$  – гравітаційна постійна,  $M$  – маса тіла,  $c$  – швидкість світла [1].

Ще одним з передбачень ЗТВ є гравітаційні хвилі (ГХ), які є обуренням гравітаційного поля, що нагадують «брижі» тканини простору і поширюються зі швидкістю світла. В ЗТВ та інших теоріях гравітації, ГХ виникають від зіткнень чорних дір, нейтронних зірок та інших масивних об'єктів. Вперше ГХ були безпосередньо виявлені у вересні 2015 року двома детекторами обсерваторії LIGO, які змогли зареєструвати ГХ, що виникли найімовірніше від злиття двох чорних дір, з утворенням однієї більш масивної діри, що обертається.

На даний момент вже зареєстровано більше 50 сплесків гравітаційних хвиль, більша частина яких була зафіксована в 2019 детектором LIGO в США і детектором VIRGO в Європі [2].

Група вчених з Національного центру супер комп'ютерних додатків (NCSA) використовує суперкомп'ютери для навчання нейронних мереж для розуміння гравітаційних хвиль за частку обчислювальних витрат, вони провели останні кілька років, використовуючи інноваційні методи для обробки величезної кількості даних, отриманих в результаті кожного з п'ятдесяти з лишком спостережень хвиль LIGO з 2015 року.

На малюнку 2 зображені маси для 50 подій. Помаранчевим вказані більш масивні чорні діри, а блакитним – менш масивні нейтронні зірки, але природа подій відзначених чорним, на даний момент не зрозуміла астрофізикам, в них беруть участь об'єкти з масами в діапазоні від двох до п'яти сонячних. З лівого боку вказана шкала сонячних мас [2].

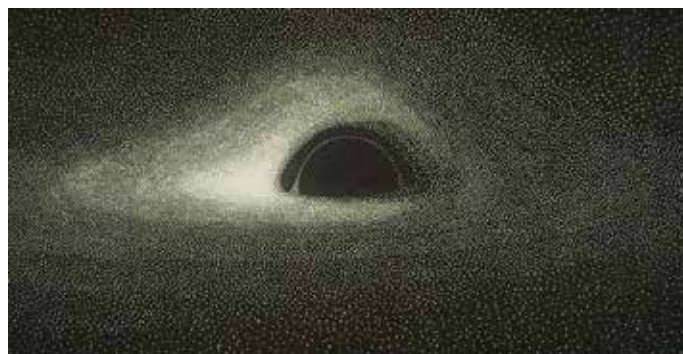


**Рис. 2. Отримані дані детекторів LIGO та VIRGO**

Зараз важко уявити якусь галузь людської діяльності без використання комп'ютерних технологій, в астрофізиці комп'ютерні обчислення відіграють велику роль і допомагають вченим передбачати місцезнаходження чорних дір та їхню подальшу долю. Завдяки комп'ютерним розрахункам, моделюванню та наявним математичним даним, вченим вдається створити симуляцію чорної діри, яка допомагає розгадати і передбачити багато загадок їх природи.

Для початку розглянемо першу симуляцію чорної діри, змодельовану за допомогою комп'ютера IBM 7040 в 1978 році, дане зображення отримав астрофізик Жан-П'єр Люміне на підставі математичних розрахунків, завдяки яким можна було побачити змодельоване уявлення контурів чорної діри [4].

На даний момент вчені роблять все можливе для того, щоб підвищити рівень деталізації своїх симуляцій і в цьому їм допомагають найпотужніші суперкомп'ютери світу як: Summit в Національній лабораторії Ок-Рідж в Теннесі, Longhorn в Техаському університеті в Остіні, Poreye Інституту Флетайрон, розташованому в Каліфорнійському університеті в Сан-Дієго, та Frontera у Техаському центрі передових обчислень (ТАСС) при Техаському університеті в Остіні [6-8].



**Рис. 3. Перше змодельоване зображення чорної діри**

Команда вчених використовувала суперкомп'ютери для створення найбільшої у світі бібліотеки моделювання чорних дір. Порівнюючи ці реалістичні моделі зі спостереженнями, дослідники змогли дослідити фізику цих екстремальних об'єктів більш повно, ніж за допомогою будь-якого з методів окремо.

Суперкомп'ютер Frontera запустив Техаський центр передових обчислень (ТАСС) при Техаському університеті в Остіні, який є самим продуктивним академічним суперкомп'ютером у світі. Створенням суперкомп'ютера займалася компанія Dell EMC за участю Intel, Mellanox, DataDirect Networks, NVIDIA, IBM, CoolIT і Green Revolution Cooling. Кластер Frontera складається з 8008 вузлів, кожен з яких містить по два 28-ядерні процесори Intel Xeon Platinum 8280, що в сумі дає близько півмільйона ядер. Піковий рівень продуктивності системи досягає 38,8 петафлопс, а реальний – 23,5 петафлопс [7].

Розглянемо суперкомп'ютер Summit, його вважають одним із найшвидших у світі. Цей обчислювальний комплекс створювала компанія IBM і лабораторія Oak Ridge National Laboratory (ORNL), що входить до міністерства енергетики США. Продуктивність Summit заявлена на рівні 200 петафлопс – 200 тис. трлн

обчислень в секунду, що значно випереджає китайський суперкомп'ютер SunwayTaihuLight, який до цього вважався одним з найпотужніших у світі, його показник дорівнює близько 93 петафлопс. Summit включає в себе 4608 серверів, кожен з яких використовується по два 22-ядерних процесора IBM Power9, а обсяг оперативної пам'яті досягає 10 Пбайт [5].

Longhorn – суперкомп'ютер TACC, створений у співпраці з IBM для підтримки робочих навантажень з прискоренням на GPU. Сила цієї системи полягає в наявності декількох графічних процесорів на вузлі які призначені для підтримки складних робочих навантажень, що вимагають високої щільності графічних процесорів. Longhorn підтримує робочі навантаження машинного навчання з подвійною точністю та глибокого навчання, які можна прискорити за допомогою фреймворків на базі графічного процесу [8].

Poreue – суперкомп'ютер, який розміщений у San Diego Supercomputer Center (SDSC) для дослідників Інституту Флетайрон. Poreue в даний час має 11 ЦП стійок з 41.472 ядрами Intel, які мають пікову швидкість 3,67 петафлопс/с, стійки для графічних процесорів з 1280 ядрами Intel і 128 ядрами NVIDIA V100, які мають загальну пікову швидкість 1.0 петафлопс /с.

Цей проект зайняв мільйони обчислювальних годин, результатом яких стало моделювання оточення чорної діри з найвищим розширенням з усіх коли-небудь створених, воно в 1000 разів перевищувало всі попередні спроби, що дозволило отримати повніше уявлення про процеси, що відбуваються під час спалаху чорної діри [6,7].

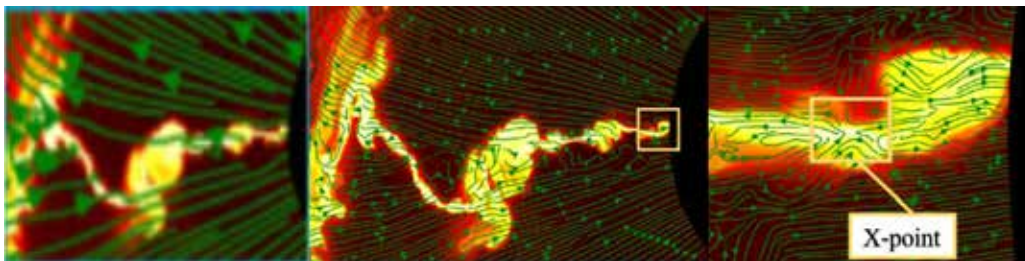


Рис. 4. Діаграма ліній магнітного поля

Знімок однієї із симуляцій чорної діри зроблене за допомогою 3D моделювання General Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations (GRMHD). Тут зображені зелені силові лінії магнітного поля, які накладені на карту гарячої плазми. Відразу після ГП чорної діри з'єднання силових ліній магнітного поля спрямовані у протилежних напрямках і утворюють точку X у місці їх перетину. Цей процес возз'єднання запускає одні частинки плазми в чорну діру, а інші – в космос, що є важливим кроком генерації спалахів чорної діри [6].

**Висновки.** Головна мета даної статті – спробувати доступно пояснити природу чорних дір, гравітаційних хвиль, а також розповісти про користь суперкомп'ютерів та комп'ютерної симуляції, яка допомагає вченим передбачити місцезнаходження, злиття чорних дір та багато іншого.

Завдяки комп'ютерним технологіям і обчислювальній потужності, що стрімко розвиваються, в майбутньому нас можуть очікувати ще більші дивовижні відкриття, які можуть змінити сприйняття світу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Хокінг С. Короткі відповіді на великі запитання. Litres, 2018. 144 с.
2. Black Holes Studied as a Population. URL: <https://physics.aps.org/articles/v14/67/> (дата звернення: 14.10.2022).
3. Физика изучение черных дыр как популяции. URL: <https://physics.aps.org/articles/v14/67> (дата звернення: 12.10.2022).
4. Первое фото черной дыры Messier-87. URL: <https://kantorskrip.ru/messier-87/> (дата звернення: 13.10.2022).
5. IBM Summit Суперкомпьютер. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:IBM\\_Summit\\_Суперкомпьютер/](https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:IBM_Summit_Суперкомпьютер/) (дата звернення: 12.10.2022).
6. Magnetic “Reconnection” Close to the Occasion Horizon – The Times Of Truth. URL: <https://www.thetimesoftruth.com/magnetic-reconnection-close-to-the-occasion-horizon/> (дата звернення: 9.10.2022).
7. В США запущен Frontera – самый мощный академический суперкомпьютер в мире. URL: <https://servernews.ru/993528/> (дата звернення 14.10.2022).
8. First image of the beastly black hole at the heart of our galaxy – Latest News Texas Advanced Computing Center. URL: <https://www.tacc.utexas.edu/-/first-image-of-the-beastly-black-hole-at-the-heart-of-our-galaxy/> (дата звернення 10.10.2022).

***T. Chernova, D. Vlasenko. The use of computer technology in the study of the nature of black holes. – Article.***

***Summary.*** Appeal to the problem of studying the modeling of the nature of the occurrence of black holes is due to modern trends in the study of cosmology. Questions about the physics of black holes are considered, as well as the possibility of modeling using modern supercomputer technologies. The task is to analyze the capabilities of modern supercomputers to solve problems for the search for primordial black holes. Attention is focused on the possibility of obtaining real photographs of black holes.

***Key words:*** black hole, event horizon, supercomputers, gravitational waves, modeling, simulation.