



ПАРНОВСЬКИЙ
Сергій Людомирович —
доктор фізико-математичних
наук, професор, провідний
науковий співробітник
Астрономічної обсерваторії
Київського національного
університету імені Тараса
Шевченка

ЧОРНІ ДІРИ У ФІЗИЦІ ТА ВСЕСВІТІ

Чорні діри — це загадкові просторово-часові конфігурації, які описуються розв'язками рівнянь загальної теорії відносності або деяких альтернативних теорій гравітації, і, можливо, це навіть певні астрономічні об'єкти, що спостерігаються у Всесвіті. І хоча більшість людей щось чули про них (принаймні поширений вислів «гроші зникли у чорній дірі економіки»), мало хто знає про їхні властивості, а ще менше тих, чий уявлення про чорні діри збігаються з науковими. Мета цієї статті — ознайомити читачів, чий дослідження чи наукові інтереси далекі від чорних дір, із загадковим світом цих екзотичних об'єктів.

Коротко про найважливіше. Чорна діра має просторово-часову сингулярність із нескінченною кривизною простору і нескінченно великими припливними силами, що знаходиться всередині замкнутого горизонту подій — (гіпер)поверхні, яку матерія (речовина, світло, випромінювання будь-якого роду) може подолати тільки рухаючись у напрямку до центру, наближаючись до сингулярності (рис. 1).

Матерія не може вийти назовні з області, оточеної горизонтом подій, яку зазвичай і називають *чорною дірою*. Така назва пов'язана з тим, що світло не може залишити її межі.

Потрапивши в чорну діру, будь-який об'єкт за скінченний інтервал власного часу досягає або сингулярності, або внутрішнього горизонту подій, якщо він існує. З наближенням об'єкта ззовні до горизонту швидкість його власного часу сповільнюється відносно швидкості часу за годинником віддаленого спостерігача, нерухомого відносно чорної діри.

Історія. До того, як Альберт Ейнштейн сформулював загальну теорію відносності (ЗТВ), в науці не розглядали об'єкти, подібні до чорних дір, і не було жодних аргументів на користь реальності їх існування. Джон Мічелл і П'єр-Симон Лаплас у 1784 р. та 1796 р. відповідно обговорювали можливість існування дуже масивних зір, які не спостерігаються через те, що необхідна для віддалення від них друга космічна швидкість перевищує швидкість світла. З сучасної точки зору такі гіпотетичні об'єкти не можна вважати чорними дірами. Подібність формул для радіуса чорної діри та радіуса гіпотетичної масивної зорі пояснюється тим, що з величин, які можуть до них входити

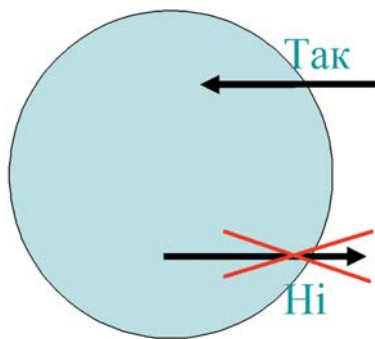


Рис. 1. Ви можете перетнути горизонт подій і впасти в чорну діру, але ви, як і будь-що інше, не можете перетнути горизонт зсередини. Навіть світло не може виконати цей маневр

(маса об'єкта і світові константи — швидкість світла і гравітаційна стала), отримати величину, яка має розмірність довжини, можна лише одним способом.

Перший розв'язок рівнянь ЗТВ, що описує чорну діру, було знайдено К. Шварцшильдом у 1916 р. [1]. У 1918 р. Ф. Коттлер отримав його аналог для рівнянь з космологічною сталою [2]. Цей розв'язок найчастіше називають метрикою Шварцшильда—де Сіттера (Schwarzschild—de Sitter). Узагальнення для випадку, коли чорна діра має електричний заряд, незалежно один від одного отримали Г. Райснер [3] і Г. Нордстрем [4].

Фізичний зміст цих метрик спочатку був не дуже зрозумілим. Сучасна інтерпретація цих розв'язків, що описують чорні діри без обертання, формувалася поступово, в міру дослідження їхніх властивостей і завершилася в 60-х роках ХХ ст.

У 1963 р. Р. Керр отримав розв'язок, який описує чорну діру, що обертається [5]. Це завершило етап формування первинних досліджень чорних дір. Пізніші доповнення наведено нижче в описі властивостей чорних дір у рамках ЗТВ.

Сам термін «чорна діра» став поширеним після популярної лекції Джона Вілера (John Archibald Wheeler) «Наш Всесвіт: відоме і невідоме» (Our Universe: the Known and Unknown), яку він прочитав 29 грудня 1967 р. Ця жартидлива назва перетворилася на загальнозживаний науковий термін і замінила попередні, такі як «колапсар» (collapsed star) або «застигла зоря» (frozen star).

Існування чорних дір можливе і в рамках деяких теорій гравітації, альтернативних ЗТВ, або в її узагальненнях.

Чорні діри в ЗТВ та класичній електродинаміці. Рівняння ЗТВ є нелінійними, складними і використовують систему координат, суть якої часто неочевидна. Саме тому на встановлення фізичного сенсу метрики Шварцшильда знадобилися десятиліття.

Ще більш складним завданням було знаходження точних розв'язків, що описують певний фізичний об'єкт, і відкидання тих з них, які формально задовольняють рівняння ЗТВ, але явно чи не зовсім містять структури або параметри, що є неможливими з точки зору фізики. Прикладами таких нефізичних величин є магнітний заряд або так званий параметр Ньюмена—Унті—Тамбуріно, які можна формально включити до метрики чорної діри.

Наведені нижче розв'язки містять лише допустимі сучасною фізикою параметри. Усі вони описують відокремлену чорну діру, що є єдиною в усьому просторі. Можливе існування космологічної сталої, але відсутня матерія у всіх видах, крім класичного електромагнітного поля, яке описується рівняннями Максвелла. Чорна діра може обертатися, але метрика її простору-часу є стаціонарною, тобто не змінюється в часі.

Невідомо жодного точного розв'язку рівнянь ЗТВ, що описує чорну діру в зовнішньому гравітаційному полі. Це одна з причин, чому сучасна фізика не може розв'язати в рамках цієї теорії проблему двох тіл, навіть у найпростіших варіантах.

Проте є розуміння того, що наведені нижче розв'язки задовільно, хоча й наближено, описують чорні діри в реальному Всесвіті. Коли здогадалися, що чорні діри можуть утворюватися при колапсі масивних об'єктів, наприклад зір, постало природне запитання: чи немає протиріччя в тому, що вихідна конфігурація може мати досить довільний набір мультипольних моментів маси та електричного заряду, а в чорній дірі всі вони визначаються лише трьома параметрами: її масою m , зарядом q і моментом імпульсу J .

Як виникає така жорстка залежність? Згідно із сучасними уявленнями, при колапсі випромінюються гравітаційні хвилі. Частина їх поширюється всередину крізь горизонт подій і залишається всередині чорної діри, частина йде від неї і несе з собою енергію, момент імпульсу, квадрупольний і більш високі мультипольні моменти маси і заряду. Як результат, чорна діра наближається до виду, що описується розв'язком для відокремленої чорної діри, нехай і трохи спотвореного впливом гравітаційного поля віддалених об'єктів (як саме спотвореного, нам поки що невідомо).

Це твердження під назвою «чорні діри не мають волосся» (black holes have no hair) набуло зараз статусу теореми. Ці не зовсім серйозні назву та формулювання запропонував Дж. Вілер, і в такому вигляді вихідна гіпотеза увійшла до наукової термінології. Теоремою вона стала після того, як Б. Картер довів її для незаряджених аксіально симетричних чорних дір, що не обертаються [6]. Важливий внесок у її підтвердження зробили В. Ізраель [7, 8] та С. Гокінг.

Звісно, з часом з'явилися статті, в яких розглядали й «волосаті чорні діри» у вигляді як уможливлених об'єктів, так і розв'язків для альтернативних теорій тяжіння або електромагнетизму.

Чорні діри, що не обертаються. Статична відокремлена чорна діра з масою m та електричним зарядом q у всесвіті з космологічною сталою Λ описується метрикою простору-часу Райснера—Нордстрема—де Сіттера

$$ds^2 = f(r)dt^2 - \frac{1}{f(r)}dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2), \quad (1)$$

$$f = 1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{r^2} - \frac{\Lambda}{3}r^2, \quad (2)$$

де

$$M = \frac{Gm}{c^2}, \quad Q^2 = \frac{q^2 G}{c^4}$$

у системі СГС або

$$Q^2 = \frac{q^2 G}{4\pi\epsilon_0 c^4}$$

у системі СІ.

Величини M і Q є масою та зарядом цієї чорної діри в системі одиниць, у якій гравітаційна стала G та швидкість світла у вакуумі c дорів-

нюють одиниці (у ній маса та заряд мають розмірність довжини). Електричне та гравітаційне поля центрально-симетричні і спрямовані радіально. Сингулярність простору-часу, де кривина прямує до нескінченності, знаходиться в центрі $r = 0$. Горизонти подій відповідають значенням координати r , за яких функція $f(r)$ дорівнює нулю. Інваріанти тензора кривини залишаються скінченними біля них, тобто горизонт не є сингулярністю.

Метрика Райснера—Нордстрема—де Сіттера (1, 2) є точним розв'язком рівнянь Ейнштейна—Максвелла для будь-яких значень незалежних параметрів M , Q та Λ . Однак не всі вони описують чорну діру. Окремі випадки цієї метрики мають власні назви.

Найбільш відомою є метрика Шварцшильда, яка описує об'єкт без електричного заряду ($Q = 0$) у всесвіті з нульовою космологічною сталою ($\Lambda = 0$). На великих відстанях r вона прямує до метрики плоского простору-часу Мінковського у сферичній системі координат (тобто (1) з $f = 1$). Координата t переходить у так званий космологічний час — це час за годинником нескінченно віддаленого нерухомого спостерігача. Швидкість плину часу для більш близьких нерухомих спостерігачів дорівнює $f(r)^{1/2}$. Це дозволяє визначити масу об'єкта $m = Mc^2/G$.

Якщо $M > 0$, то за $r = r_s = 2M > 0$ (r_s зветься шварцшильдівським радіусом) знаходиться горизонт подій з $f(r_s) = 0$. За $r > r_s$ координата r є просторовою, а t — часовою, а за $r < r_s$ навпаки, координата r є часовою, а t — просторовою. Вони, серед іншого, різняться тим, що будь-яке тіло може рухатися у тривимірному просторі в довільному напрямку (якщо не заважають перешкоди), але має рухатися у напрямку плину часу з минулого у майбутнє.

За $r < r_s$, тобто під горизонтом подій або всередині діри, часовою координатою є r і будь-яке тіло повинне рухатися в сталому напрямку зміни цієї координати. Якщо рух відбувається від поверхні до центру, тобто r зменшується, то ми говоримо про чорну діру. Якщо координата r збільшується, то це так звана біла діра. Вони описуються однією метрикою простору-часу

(1) і можуть бути певним чином поєднані після переходу до більш складної системи координат.

Обидві діри описуються метрикою, що не залежить від часу, тобто існують нескінченно довго в незмінному вигляді. Однак у реальному Всесвіті між ними є істотна відмінність. Будь-яка матерія не може вилетіти назовні чорної діри, перетнувши горизонт подій. Натомість у разі білої діри будь-яка матерія не може потрапити всередину, перетнувши горизонт подій ззовні. Тому біла діра не може утворитися при колапсі (стисканні) масивного об'єкта. Теоретично вона може утворитися разом із рештою Всесвіту під час Великого вибуху, однак в інфляційну епоху її буде винесено за межі космологічного горизонту на таку велику відстань від Землі, що її принципово неможливо спостерігати. Тобто з точки зору астрономічних спостережень білих дір у Всесвіті немає.

Натомість немає принципових перешкод для утворення чорних дір при колапсі. Зрозуміло, що метрика простору-часу, яка описує цей процес, відрізняється від метрики Шварцшильда і змінюється в часі, але, коли колапс закінчується і матерія припиняє потрапляти в чорну діру без обертання, метрика прямує до розв'язку (1, 2).

Горизонт подій такої чорної діри працює як напівпроникна мембрана, яка все пропускає всередину і нічого назовні. Під ним матерія і випромінювання можуть рухатися лише так, щоб зменшувати координату r . Відзначимо принципovu різницю між зорею Мічелла—Лапласа у класичній фізиці та чорною дірою. Простим аналогом зорі є ситуація, коли хтось кинув вгору камінь зі швидкістю, меншою за другу космічну, і камінь (у нашому прикладі світло) спочатку піднявся, а потім упав. Під горизонтом чорної діри цей камінь чи світло принципово може лише падати, але не підніматися вгору.

А що буде зі спостерігачем, який впаде всередину чорної діри? У ЗТВ точкове тіло, що вільно падає і на яке не діють негравітаційні сили, перебуває в стані спокою. Можна сказати, що в невагомості. Однак на неточкове тіло діють так звані припливні сили, що намагаються його деформувати. У випадку чорної діри вони нама-

гаються розтягти його вздовж радіуса та стиснути в кожному перпендикулярному радіусу напрямку. Інколи це називають стагетизацією.

Біля горизонту кривина простору-часу і з нею припливні сили є скінченними. Для спостерігача, який вільно падає у чорну діру, момент переходу через горизонт подій нічим не відрізняється від інших. Для надмасивної чорної діри припливні сили в цей момент можуть бути настільки слабкими, що людина переживе перехід і продовжить спостереження всередині чорної діри.

Проте для віддаленого спостерігача все виглядає інакше. Після того, як об'єкт, що падає у чорну діру, перетне горизонт, все випромінюване ним світло не може покинути межі чорної діри і досягти спостерігача. Але до цього моменту світло виходить, хоча з наближенням до горизонту частоти спостережуваного електромагнітного випромінювання будуть значно меншими, ніж у випромінюваного, через відмінність швидкостей плину часу. У разі вільного падіння джерела на чорну діру до все більшого гравітаційного червоного зміщення додасться ще й доплерівський червоний зсув, що зростатиме, адже швидкість падіння наближається до швидкості світла.

Розрахунок часу поширення світла від джерела, що падає, до віддаленого спостерігача показав, що він нескінченно зростає з наближенням джерела до горизонту чорної діри. В літературі, особливо художній та науково-популярній, трапляється твердження про те, що спостерігач постійно бачитиме цей предмет таким, ніби він застиг у момент перетину горизонту. Це не так. Насправді інтенсивність світла експоненційно падатиме. Характерний час згасання можна оцінити з теорії розмірності, поділивши єдиний параметр із розмірністю довжини, тобто шварцшильдівський радіус r_s , на швидкість світла. Це дає близько $5(m/m_{\text{Sun}})$ мкс, де m_{Sun} — маса Сонця. Тобто затухання відбуватиметься дуже швидко для чорної діри зоряної маси, але формально експонента ніколи не досягає нуля.

Якщо згадати, що світло це потік фотонів, то після того, як спостерігача досягне останній

фотон, випромінений джерелом до перетину горизонту чорної діри, він більше не бачитиме це джерело.

В літературі трапляється також хибне твердження про те, що в майбутньому завжди можна буде «врятувати» того, хто падає в чорну діру, за допомогою космічного корабля. Насправді для кожної віддаленої точки існує момент часу, після якого будь-який відправлений звідти корабель не зможе наздогнати предмет, що падає, до того, як він сам потрапить всередину чорної діри.

Яка подальша доля предмета, що потрапив у чорну діру? Через скінченний інтервал власного часу він досягне сингулярності в центрі чорної діри. Оцінка дає для нього такий самий вираз — $5(m/m_{\text{Sun}})$ мкс. Точний аналіз у рамках ЗТВ доводить, що навіть якщо предмет має надпотужний двигун і намагається загальмувати падіння, час до потрапляння в сингулярність може зрости не більш як у π разів. Але до того моменту припливні сили, що нескінченно зростають, спочатку роздеруть його на шматки, потім на дрібніші шматочки і так до елементарних частинок.

Формально можна розглянути простір-час, що описується метрикою Шварцшильда з від'ємним параметром M . Тоді горизонт подій буде відсутнім і ми матимемо справу з точковою голою сингулярністю, яка гравітаційно відштовхує матерію навколо неї. Про такий об'єкт, ще загадковіший, ніж чорна діра, йдеться далі.

Якщо центральна сингулярність має також електричний заряд, то простір-час описується метрикою Райснера—Нордстрема, отриманою у [3] і [4]. Якщо $M \geq |Q|$, то простір-час має принаймні один горизонт подій і ми говоримо про чорну діру. Для $M > |Q|$ існують два концентричні горизонти подій. Вони стають виродженими для $M = |Q|$, що відповідає так званій екстремальній чорній дірі. У цьому випадку два корені рівняння $f(r) = 0$ збігаються. Для $M < |Q|$ горизонту немає і простір-час містить голу сингулярність.

Присутність будь-якого електричного заряду принципово змінює структуру чорної діри,

що описано в [9]. Сингулярність у чорній дірі Шварцшильда є простороподібною, тобто такою, як і космологічна сингулярність на кшталт Великого вибуху. До неї наближаються вздовж координати r , яка під горизонтом є часом. У чорній дірі Райснера—Нордстрема є два горизонти, після перетину внутрішнього ця координата знову стає просторовою. Це свідчить, що її сингулярність $r = 0$, до якої наближаються вздовж просторової координати r , є часоподібною, як і будь-яка гола сингулярність.

Зміна типу координати r після перетину внутрішнього горизонту приводить до того, що теоретично космічний корабель всередині цього горизонту може увімкнути двигун, загальмувати падіння, повернути, пройти ще раз крізь внутрішній горизонт, потім обов'язково через зовнішній і вилетіти невідомо де й коли з білої діри. Однак це суто спекулятивні міркування, оскільки розміри внутрішнього горизонту настільки малі для будь-якої реальної чорної діри, що припливні сили роздеруть корабель ще до його перетину.

У найбільш загальному випадку з космологічною сталою Λ на великих відстанях від об'єкта простір-час переходить у простір-час де Сіттера. Тому за умови $\Lambda > 0$ у функції (2) за великих r з'являється додатковий корінь, який відповідає горизонту, що є специфічним для розв'язку де Сіттера. Властивості простору-часу поблизу чорної діри або голої сингулярності при цьому не змінюються.

Чорні діри, що обертаються. Стационарна відокремлена чорна діра, що обертається, описується метрикою Керра [6]. Якщо вона є джерелом електромагнітного поля, то слід використовувати розв'язок Керра—Ньюмена. Структура простору-часу є більш складною. Сферичний горизонт подій, який не випускає матерію та випромінювання назовні, оточує центральну сингулярність з непростюю структурою. Навколо нього, торкаючись горизонту в точках перетину з віссю обертання, є так звана межа стаціонарності у формі сплюсненого сфероїда. Між ними розташована ергосфера. Частишки в ергосфері мають обертатися в тому самому напрямку, що й чорна діра. Вони можуть

перетнути межу стаціонарності і віддалитися від чорної діри або провалитися в неї крізь горизонт. Деякі частинки можуть рухатися всередині ергосфери так, що їхня повна енергія, включно з енергією спокою, буде від'ємною.

Більш докладно про структуру простору-часу чорних дір з обертанням та без можна прочитати у науковому виданні «Великомасштабна структура простору-часу» (The Large Scale Structure of Space-Time) авторства Стівена Гокінга і Джорджа Елліса [9], яке стало вже класичним¹, або в науково-популярних книжках [10] та ін.².

Теорема Пенроуза про присутність сингулярності. Багато фізиків і математиків намагалися отримати точний або приблизний розв'язок рівнянь ЗТВ, що описує чорну діру, яка має горизонт подій, але не має сингулярностей. Вони вважали, що у сингулярностях, а може, і поблизу них перестають діяти закони фізики, тому їх бажано уникати. Спроби або виявилися марними, або потребували присутності дуже екзотичної матерії. У 1965 р. Роджер Пенроуз довів теорему, названу його ім'ям, у якій показав, що простір-час всередині чорної діри є геодезично неповним, якщо матерія задовольняє деякі прості умови [11]. Зокрема, її густина енергії не може бути від'ємною. Теоретично цю умову можуть порушувати невідомі квантові ефекти, але на дуже малих масштабах. У такому випадку точкова сингулярність класичної ЗТВ змінилася б на об'єкт розміром порядку планківської довжини, тобто близько 10^{-35} м. Формально це є принципово іншим об'єктом, але практично це дещо розмазана сингулярність.

Геодезична неповнота це неможливість нескінченно продовжити в майбутнє всі світові лінії частинок, включно з безмасовими, без їх перетинання або потрапляння в так звану сильну сингулярність, у якій розходиться кри-

вина. Це доводить, що чорна діра повинна мати слабку сингулярність. Теорема Пенроуза нічого не каже про тип сингулярності, але гарантує її існування. Немає жодного прикладу чорної діри з сингулярністю, яка не була б сильною.

Квантові ефекти біля чорних дір. Не існує квантової теорії гравітації. Однак фізики впродовж майже пів століття розглядають квантові ефекти у викривленому просторі-часі і їхній вплив на еволюцію об'єктів, що знаходяться у ньому, зокрема й чорних дір.

Теоретичні дослідження передбачають квантове випромінювання від горизонту чорної діри, що утворилася при колапсі, або так зване випромінювання Гокінга [12], та з ергосфери чорних дір, що обертаються. Останнє інколи називають надвипромінюванням. Обидва виникають через квантове народження пар частинок у сильному гравітаційному полі чорної діри. Надвипромінювання пов'язане з народженням пари в ергосфері. Одна з частинок має від'ємну повну енергію і залишається в ергосфері або падає через горизонт у діру, друга частинка з додатною енергією вилітає з ергосфери назовні. При випромінюванні Гокінга одна частинка в парі народжується під горизонтом чорної діри і падає на сингулярність, а друга — біля горизонту ззовні. Остання може досягти віддаленого спостерігача. Спектр випромінювання є тепловим з характерною температурою $6 \cdot 10^{-7} (m_{\text{Sun}}/m)$ К. Для чорної діри в космосі випромінювання такої низької температури неможливо спостерігати.

Яків Бекенштайн у 1972 р. знайшов аналогію між горизонтом чорної діри та законами термодинаміки [13, 14], яку було підтверджено подальшими дослідженнями, включно з [12]. Роль температури відіграє поверхнева гравітація, а з площею горизонту A пов'язана ентропія чорної діри S , яка дорівнює

$$S = \frac{k_B c^3 A}{4G\hbar},$$

де k_B — стала Больцмана, а $\hbar$ — зведена стала Планка. Якщо тіло падає в чорну діру, його ентропія не зникає, а переходить у додаткову ентропію чорної діри. Згідно з аналогом другого

¹ Переклад див.: Хокинг С., Елліс Дж. *Крупномасштабная структура пространства-времени*. Москва: Мир, 1977.

² Парновський С., Парновський О. *Як влаштовано Всесвіт. Вступ до сучасної космології*. Львів: Видавництво Старого Лева, 2019.

закону термодинаміки, площа горизонту подій чорної діри не може зменшуватися з часом за будь-якого класичного процесу. З цього випливає, що чорна діра не може розділитися на кілька чорних дір, але кілька чорних дір можуть злитися у єдину.

Докладніше про це можна прочитати в науковому огляді [15] та в науково-популярних книгах Стівена Гокінга³.

Чорні діри як астрономічні об'єкти. Астрономи спостерігають у Всесвіті чимало компактних масивних об'єктів, які можуть бути чорними дірами. В Галактиці ми можемо спостерігати кілька кандидатів у чорні діри, що мають зоряну масу, більшу за мінімальну, яка необхідна для колапсу, та надмасивну чорну діру Стрілець А* (Sagittarius A*) у центрі Чумацького Шляху. В інших галактиках є надмасивні чорні діри, до яких належать квазари та активні ядра галактик. У Вікіпедії є стаття «Список наймасивніших чорних дір» з їх переліком, який після опрацювання даних нових астрономічних спостережень постійно доповнюють та уточнюють.

Багато позагалактичних чорних дір є джерелами випромінювання. Точніше, не вони самі, а акреційні диски, що їх оточують, які утворює навколишня матерія, що падає на чорну діру і випромінює широкий спектр електромагнітних хвиль, обертаючись навколо неї. З часом матерія диска наближається до горизонту і падає в чорну діру. Гамма- та рентгенівське випромінювання спостерігають за допомогою спеціальних телескопів у космосі. За спектром можна визначити, що його випромінює акреційний диск.

³ Гокінг С. *Коротка історія часу*. Пер. з англ.: колективний. Київ: К.І.С., 2015;

Гокінг С. *Теорія всього*. Пер. з англ. Я. Лебеденко. Харків: КСД, 2019;

Гокінг С. *Чорні діри і молоді Всесвіти та інші лекції*. Пер. з англ. Я. Лебеденко. Харків: КСД, 2019;

Гокінг С. *Про Всесвіт коротко*. Пер. з англ. Я. Лебеденко. Харків: КСД, 2020;

Гокінг С. *На плечах гігантів. Величні прориви в фізиці та астрономії*. Пер. з англ. Я. Лебеденко. Харків: КСД, 2021.

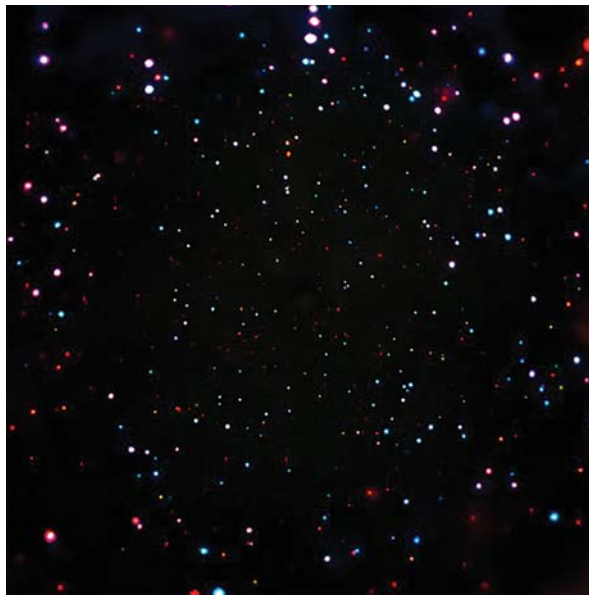


Рис. 2. Рентгенівський огляд Chandra Deep Field South, виконаний НАСА впродовж понад 7 млн секунд спостережень за допомогою супутника «Чандра», виявив найвищу з тих, що будь-коли бачили, концентрацію кандидатів у чорні діри, еквівалентну 5000, на ділянці неба, закритій повним Місяцем

При злитті чорних дір випромінюються гравітаційні хвилі, які формують специфічний сигнал. Такі події спостерігають гравітаційні обсерваторії на Землі.

Як виявити чорну діру у космосі? Є кілька можливостей, зокрема пошук акреційних дисків, спостереження за рухом навколишніх об'єктів у гравітаційному полі, виявлення характерних гамма-спалахів, рентгенівських променів або радіохвиль, а також детектування гравітаційних хвиль від злиття двох чорних дір або чорної діри з нейтронною зорею. І всі вони дають свій перелік об'єктів, які є кандидатами у чорні діри (рис. 2).

На рис. 3 наведено красиву картинку з кандидатами у чорні діри, яка має назву «космічна валентинка». Це пара галактик, що взаємодіють, відомих як Агр 147, розташованих на відстані близько 430 млн світлових років від Землі в сузір'ї Кита. Рожеві ділянки відповідають джерелам рентгенівського випромінювання, виявленим рентгенівською обсерваторією

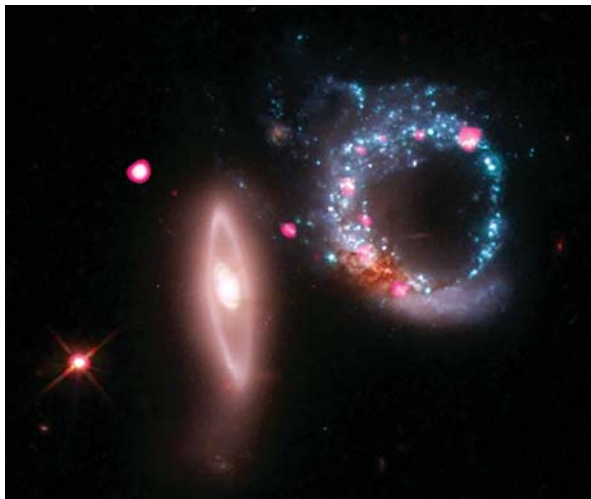


Рис. 3. У центрі еліптичної галактики є своя надмасивна чорна діра, але вона випромінює не так багато рентгену, бо на неї падає мало пилу. Інші об'єкти на зображенні — зоря на передньому плані (видно знизу ліворуч) та квазар на задньому плані (видно як джерело зверху та ліворуч від галактики зліва)

Чандра. Зображення, отримані у різних довжинах хвиль видимого світла космічним телескопом Хаббл, відповідають червоному, зеленому та синьому кольорам на комбінованій картині у штучних кольорах. Незвичайна конфігурація утворилася, коли спіральна галактика праворуч зіткнулася з еліптичною галактикою ліворуч, яка пройшла крізь спіральну, залишивши діру. Зіткнення привело до поширення хвилі зореутворення, яка тут виглядає як синє кільце. Вона утворила велику кількість масивних молодих зір, що випромінюють багато ультрафіолету. Ці зорі швидко еволюціонують впродовж кількох мільйонів років і вибухають як наднові, залишаючи після себе нейтронні зорі та чорні діри.

Отже, є багато свідчень існування компактних масивних об'єктів у Всесвіті. За найбільш поширеною думкою, це чорні діри, які утворилися при колапсі матерії. Проте є ймовірність, що це голі сингулярності або якісь інші об'єкти невідомої природи.

Голі сингулярності як альтернатива чорним дірам. Голі сингулярності — це гіпотетичні об'єкти, що описуються багатьма точ-

ними розв'язками рівнянь ЗТВ. Вони мають часоподібну сингулярність, при наближенні до якої кривизна простору-часу та припливні сили нескінченно зростають, але на відміну від чорних дір вони не оточені горизонтом подій. Тому голу сингулярність можна бачити, адже матерія і випромінювання можуть віддалитися від неї з довільної точки поблизу. Голі сингулярності є своєрідним порталом, через який матерія і випромінювання, що несуть енергію та інформацію, можуть потрапити у наш Всесвіт або покинути його. Тому існування навіть однієї голої сингулярності робить еволюцію Всесвіту непередбачуваною через можливість впливу з боку голої сингулярності.

Роджер Пенроуз запропонував гіпотезу, яка здобула назву Принцип космічної цензури [16] і згідно з якою кожна сингулярність простору-часу, що виникла при колапсі матерії, повинна бути оточеною горизонтом подій. Однак цю гіпотезу не доведено.

Невідомо, чи існують голі сингулярності і, якщо існують, то як змінюються в часі. Наприклад, чи можуть вони «одягтися» і перетворюватися на чорні діри. Квантові ефекти біля голої сингулярності (квантове народження пар у сильному гравітаційному полі, поляризація вакууму тощо) мають бути істотними, але про них мало що відомо. Є міркування, що після випаровування чорних дір шляхом квантового випромінювання Гокінга вони залишать голу сингулярність планківських розмірів, але воно цілком спекулятивне.

Типи голих сингулярностей значно більш різноманітні, ніж типи чорних дір. Зокрема, їхня часоподібна сингулярність може бути точковою, лінійною (але не поверхневою) або відповідати новому типу, який не має аналогів у просторі-часі зі скінченною кривизною. У загальному, хоча й наближеному коливальному розв'язку рівнянь ЗТВ в околі голої сингулярності простір-час має ще більш складний вигляд.

Огляд деяких властивостей голих сингулярностей можна знайти в роботі [17].

Яка ж практична користь від чорних дір? Немає жодної. Мені відома лише одна ідея

про використання чорної діри: наприкінці 1970-х років у радянській газеті «Комсомольская правда» було запропоновано удобрювати поля чорними дірами малих мас для збільшення врожаю.

Однак часто суто фундаментальні дослідження з часом або набувають практичної користі (прикладом цього є електродвигун або лазер), або допомагають прогресу в інших царинах.

REFERENCES

1. Schwarzschild K. Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*. 1916. 7: 189—196.
2. Kottler F. Über die physikalischen Grundlagen der Einsteinschen Relativitätstheorie. *Ann. der Physik*. 1918. **361**(14): 401—461. <https://doi.org/10.1002/andp.19183611402>
3. Reissner H. Über die Eigengravitation des elektrischen Feldes nach der Einsteinschen Theorie. *Ann. der Physik*. 1916. **355**(9): 106—120. <https://doi.org/10.1002/andp.19163550905>
4. Nordström G. On the Energy of the Gravitational Field in Einstein's Theory. *Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proceedings*. 1918. **20**: 1238—1245.
5. Kerr R.P. Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics. *Phys. Rev. Lett.* 1963. **11**(5): 237—238. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.11.237>
6. Carter B. Axisymmetric Black Hole Has Only Two Degrees of Freedom. *Phys. Rev. Lett.* 1971. **26**(6): 331—333. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.331>
7. Israel W. Event Horizons in Static Vacuum Space-Times. *Phys. Rev.* 1967. **164**(5): 1776—1779. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.164.1776>
8. Israel W. Event horizons in static electrovac space-times. *Commun. Math. Phys.* 1968. **8**(3): 245—260. <https://doi.org/10.1007/BF01645859>
9. Hawking S.W., Ellis G.F.R. *The Large Scale Structure of Space Time*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524646>
10. Parnovsky S. *About the Biggest, the Smallest, and Everything Else. Travelling Through the Universe with a Physicist Guide*. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2022. <https://doi.org/10.1142/12828>
11. Penrose R. Gravitational collapse and space-time singularities. *Phys. Rev. Lett.* 1965. **14**: 57—59. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.14.57>
12. Hawking S.W. Particle creation by black holes. *Commun. Math. Phys.* 1975. **43**(3): 199—220. <https://doi.org/10.1007/BF02345020>
13. Bekenstein J.D. Black Holes and Entropy. *Phys. Rev. D*. 1973. **7**: 2333—2346. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.7.2333>
14. Bekenstein J.D. Black holes and the second law. *Lettere al Nuovo Cimento*. 1972. **4**(15): 99—104. <https://doi.org/10.1007/BF02757029>
15. DeWitt B.S. Quantum field theory in curved spacetime. *Physics Reports*. 1975. **19**(6): 295—357. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(75\)90051-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(75)90051-4)
16. Penrose R. Gravitational collapse: The role of general relativity. *Riv. Nuovo Cim.* 1969. **1**: 253—276.
17. Parnovsky S.L. Time-like singularities in General Relativity. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomy*. 2012. **48**: 14—15. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1209.3499>

Serge L. Parnovsky

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1855-1404>

BLACK HOLES IN PHYSICS AND THE UNIVERSE

Black holes are mysterious space-time configurations described by solutions to the equations of general relativity or some alternative theories of gravity, and perhaps even some astronomical objects observed in the Universe. And although most people have heard of them (at least there is a common saying “money disappeared into the black hole of economy”), few people know about their properties, and even fewer are those whose ideas about black holes coincide with scientific ones. The purpose of this article is to introduce readers whose research or scientific interests are far from black holes to the mysterious world of these exotic objects.

Cite this article: Parnovsky S.L. Black holes in physics and the universe. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2025. (9): 3—12. <https://doi.org/10.15407/visn2025.09.003>