

**ЖИЛЯЄВ**

Борис Юхимович — кандидат фізико-математичних наук, завідувач лабораторії швидкоплинних процесів у зорях Головної астрономічної обсерваторії НАН України

РЕЛІКТОВІ ЧОРНІ ДІРИ (СИНГУЛЯРНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ)

В астрономії є химери, подібні до чудовиська грецької міфології, народженого Східною і Тифоном, тератоморфної істоти з трьома головами, що вивергають полум'я. Це реліктові чорні діри, первістки Всесвіту, що з'явилися на світ раніше, ніж атоми. Вони поєднують у собі маси в мільярди тонн і розмір електрона й підпорядковуються законам не класичної, а квантової фізики. На відміну від класичних чорних дір вони випромінюють, в екстремальних випадках, сотні мегават енергії. Їхні температури можуть сягати сотень мільярдів градусів. У Всесвіті їх може бути в мільйони разів більше, ніж зірок. «Може бути» — тому що вони, як і класичні чорні діри, з'явилися на світ на «кінчику пера» теоретиків. З тією лише відмінністю, що класичні чорні діри ми вже спостерігаємо, а квантові — ще ні.

Сьогодні вже нікого не здивуєш чорними дірами. Вони впевнено посіли своє місце у фантастичних фільмах та наукових буднях. Космічний телескоп Хаббла демонструє на своїх знімках сліди цих невидимок у далеких галактиках. А численні спостереження на найбільших наземних телескопах показують, як цілий рій зірок описує еліптичні орбіти навколо деякого невидимого об'єкта в центрі нашої Галактики. Нині навіть школяр може розрахувати, що цей невидимий об'єкт має масу приблизно в мільйон сонячних мас. Чорні діри в центрах галактик стали буденною річчю.

Проте інтрига не зникла. На горизонті з'явилися нові «монстри»: темна матерія і темна енергія. Спочатку їх передбачили, як колись у 30-ті роки передбачили чорні діри. Потім довели, що «монстри» існують, і в 2011 р. двом астрономам за це доведення навіть вручили Нобелівську премію. Однак ситуація з «монстрами» не прояснилася. А на другому плані, за лаштунками, продовжують ховатися інші загадки. Їх пов'язують з реліктами, залишками найдавніших епох, що утворилися в перші миті народження Всесвіту.

Теорії реліктових чорних дір

Як зауважив Артур Кларк, будь-яка досить розвинена теорія скидається на магію. Теоретичні медитації космологів, що ви-

вчають питання походження Всесвіту, якнайкраще підтверджують його слова.

Стівен Хокінг із Кембриджського університету в 1971 р. передбачив, що гравітаційно пов'язані об'єкти, які сформувалися в ранньому Всесвіті, могли б накопичуватися в центрі зірок, подібних до нашого Сонця. Ці гіпотетичні утвори, що нагадують за будовою чорні діри гранично малих мас, дістали назву *реліктових чорних дір*.

Хокінг не став розвивати свою ідею далі, інші космологи — Д. Лін, Б. Карр, Д. Пейдж, Дж. МакГіббон, Р. Чаплін, Н. Райт — продовжили роботу в цьому напрямі. Їхні дослідження показали, що реліктові чорні діри могли утворитися в часи радіаційної ери, коли вік Всесвіту не перевищував 10^{-4} с, а густина перевершувала густину атомних ядер. Група московських космологів (Зельдович, Новиков) ще в 70-ті роки припустили, що реліктові чорні діри могли утворюватися на ранній стадії Всесвіту поблизу космологічної сингулярності з флуктуацій метрики. Однак питання про маси реліктових чорних дір залишалося відкритим аж до сьогодні.

Знамените відкриття Хокінга процесу випаровування чорних дір обмежило їхню масу знизу на рівні приблизно 10^{15} г (один мільярд тонн). Це маса куба води розміром близько кілометра. Однак якщо його стиснути до розміру чорної діри, то він буде не більший за розмір електрона (10^{-13} см). Було показано, що чорні діри з масою, меншою за 10^{15} г, не можуть існувати через процес квантового випаровування. Наблизившись до цієї фатальної границі, вони вибухають. При цьому виділяється енергія, яку Сонце випромінює впродовж приблизно шести хвилин. Основна маса випромінювання складатиметься з гамма-квантів з енергією кілька десятків мільйонів електрон-вольтів.

Виникнення і загибель реліктових чорних дір — інтриги, народжені на «кінчику пера». Ці події ніхто ніколи не спостерігав, однак їх можна розрахувати й описати з вражаючою точністю.

Російські космологи Хлопов, Рубін, Сахаров у 2001 р. запропонували принципово новий

сценарій формування первинних структур у гарячому Всесвіті, який описує, зокрема, і картину виникнення реліктових чорних дір. Їхня модель передбачає фазові переходи в період грандіозного первинного розширення Всесвіту під час Великого вибуху (інфляції). При цьому утворилися особливі топологічні структури, так звані доменні стінки (*domain walls*). У фізиці домен — макроскопічна ділянка, спостережувана у феромагнітних кристалах та деяких інших речовинах, що мають спонтанний далекий порядок. Ділянки, що розділяють окремі домени, називають доменними стінками. У фізиці такі структури розглядають як дефекти, як порушення в регулярній будові кристала.

В астрономії, в міру того, як ми рухаємося вперед у часі від моменту Великого вибуху, Всесвіт ставав дедалі менш гарячим і менш щільним, доки в ньому не почали відбуватися фазові переходи, що змінювали його форму і властивості.

Фазові переходи ми спостерігаємо й у повсякденному житті. Наприклад, водяна пара, що міститься в атмосфері, зі зниженням температури перетворюється на воду, а потім і на лід. Ми наочно бачимо, що форми і властивості води в різних фазових станах істотно різняться. Щось подібне відбувалося і в нашому Всесвіті після Великого вибуху, коли він розширювався й охолоджувався. Тільки фазові переходи відбувалися не у водяній парі, а в матеріальному субстраті Всесвіту.

Фазові переходи зазвичай супроводжуються утворенням нових структур. У космологічному контексті процес формування нових структур відомий як *механізм Кіббла*.

Будь-які взаємодії у Всесвіті можуть поширюватися тільки зі швидкістю світла c . З огляду на причинно-наслідкові зв'язки це означає, що в момент часу t ділянки Всесвіту, віддалені на відстані, більші за $d = ct$, не могли нічого знати одна про одну. Під час фазових переходів різні ділянки Всесвіту прагнули набути станів з мінімальною енергією. Однак таких станів може бути декілька, і різні домени могли виявитися, врешті-решт, з різними значеннями мінімумів енергії з можливого набору станів. *Domain*

wall — межа доменів, що розділяє регіони двох можливих мінімумів потенційної енергії. Характерно, що доменні стінки мають енергію, більш того, вони можуть виявитися нестійкими й розпадатимуться. Їхній розпад (колапс) приводить до утворення скупчень реліктових чорних дір. Як показують числові розрахунки, умови існування доменних стінок виконуються для доменів з масами, що перевищують 10^{15} г. Максимум розподілу мас реліктових чорних дір припадає на 10^{25} г, що приблизно в 600 разів менше, ніж маса Землі, а розподіл мас простягається аж до 10^{35} г (приблизно 100 мас Сонця). Загальна маса реліктових чорних дір у теорії Хлопова, Рубіна, Сахарова становила ~1% від баріонної маси Всесвіту. Це означає, що первинних чорних дір може бути в мільйони разів більше, ніж зірок у Всесвіті.

Слід зазначити, що розмір реліктових чорних дір надзвичайно малий. Теорія відносності пов'язує розмір R і масу M чорної діри формулою $R = 2GM/c^2$, де G — гравітаційна стала, а c — швидкість світла. Реліктова чорна діра з критичною масою $M = 10^{15}$ г має розмір $1,5 \times 10^{-13}$ см — це вдвічі менше, ніж класичний радіус електрона, тобто така чорна діра порівнянна за розміром з елементарною частинкою. Варто нагадати, що при цьому вона важить мільярд тонн. А реліктові чорні діри з масою 10^{25} г мають розмір усього 15 мікрон.

Отже, теоретичні пошуки космологів підводять нас до думки, що помітна частка матеріальної частини Всесвіту може складатися з мікроскопічно малих за розміром чорних дір реліктового походження, залишків найдавніших епох, що утворилися в перші миті існування нашого Всесвіту. І самі собою напрошуються питання: де знаходяться ці реліктові творіння? Як вони можуть заявити про своє існування? Що нас може очікувати від зустрічі з ними?

Еволюція реліктових чорних дір

З деякими застереженнями можна стверджувати, що реліктові чорні діри практично вічні, як і атоми. Атом, взаємодіючи з іншими частинками, може трансформуватися, розділитися на

складові частини, зникнути як структурна одиниця. Чорна діра може зникнути лише в одному випадку: якщо вона наблизиться до фатальної границі маси — 10^{15} г, при цьому вона вибухне у процесі квантового випаровування. Чорні ж діри з більшими масами незнищенні й вічні.

Стівен Хокінг відкрив процес випаровування чорних дір. Він довів, що чорні діри мають хоч і мізерно малу, та все ж скінченну температуру і, відповідно до законів термодинаміки, вони повинні випромінювати як абсолютно чорне тіло. Випромінювання забирає енергію, а отже, і масу чорної діри, і якщо нічого не відбувається, то через мільярди мільярд років вона наблизиться до граничної маси 10^{15} г і вибухне. За винятком маргінального випадку — 10^{15} г у реальності цього не відбувається, оскільки простір навколо чорної діри не порожній, і вона набере з нього більше речовини, ніж втратить унаслідок випаровування.

Однак процес квантового випаровування потребує детального розгляду. Ясно, що коли чорна діра стає порівнянною за розміром з елементарною частинкою (в нашому випадку з електроном), класичний розгляд стає недоречним. Річ у тім, що у фізиці панує корпускулярно-хвильовий дуалізм. Це означає, що кожен частинку одночасно слід розглядати і як частинку, і як хвилю. У нашому випадку корпускулярно-хвильовий дуалізм стверджує, що властивості реліктових чорних дір з масою 10^{15} г повністю визначаються хвильовими процесами, тобто така чорна діра є вже не класичним, а квантовим об'єктом, її будова й еволюція повністю зумовлені законами квантової механіки.

Ми обмежимося випадком, коли квантові ефекти починають відігравати помітну, але не визначальну роль у будові чорної діри. Це означає, що ми дещо відійдемо від випадку маргінальної маси в 10^{15} г у бік великих мас і дослідимо проблему на якісному рівні.

Гравітаційне поле чорної діри поляризує вакуум. У результаті у вакуумі починають народжуватися пари частинка — античастинка. Їх анігіляція породжує випромінювання. Чорна діра з масою 10^{15} г випромінює гамма-кванти з енергією близько 50 МеВ.

Процес спонтанного народження відомий у фізиці як виникнення пар елементарних частинок з вакууму за наявності сильного електричного або магнітного поля. Вважають, що «порожній» фізичний вакуум заповнений віртуальними парами частинок різноманітних видів. Ці пари в результаті квантових флуктуацій спонтанно з'являються на короткий час у просторі, а потім знову зливаються і зникають. Якщо ж у просторі створити досить сильне електричне або магнітне поле, то частинки, що з'явилися, вже не можуть злитися знову і віддаляються одна від одної, рухаючись у полях у різних напрямках (наприклад, електрон і позитрон). Зовні це виглядатиме як народження матерії «з нічого». Насправді ж пари частинок породжує енергія поля, закон збереження енергії при цьому не порушується.

Поблизу чорної діри напруженість гравітаційного поля стає настільки сильною, що виниклі у вакуумі віртуальні пари частинок уже не можуть злитися знову, гравітаційне поле розділить їх. Одна з частинок пари впаде на чорну діру, друга зможе її покинути. У цьому й полягає процес випаровування чорних дір, відкритий Хокінгом.

Чим менший розмір чорної діри, тим більша поляризація вакууму, тим інтенсивніший процес випаровування, тим вища температура випромінювання. У чорній дірі з масою 10^{15} г температура сягає 100 мільярдів градусів, потужність випромінювання становить близько 300 МВт. У кінці цієї історії — «квантовий вибух».

Для фізиків було несподіванкою, що суб'єктами квантової теорії поля стали не лише елементарні частинки і вакуум, а й реліктові чорні діри з масою в мільярди тонн. Наша уява відмовляється розуміти, як можна поєднати величезну масу в мільярди тонн з розміром електрона, температурою в мільярди градусів і потужністю в сотні мегават. Проте оскільки жоден закон природи не порушено, з висновками теорії слід погодитися і визнати їхню реальність. Втіхою може бути афоризм Козьми Пруткова: «*Глядя на мир, нельзя не удивляться*».

Квантові чорні діри

Людині властиве прагнення зазирнути далі, ніж дозволяють логіка, здоровий глузд і наукове знання. Останнім часом чорні діри схвилювали уми у зв'язку із запуском гігантського прискорювача елементарних частинок — адронного колайдера. З'явилися панічні чутки, що колайдер може породити мікроскопічну чорну діру, яка потім поглине Землю. Виникла нагальна потреба розібратися з мікроскопічними чорними дірами, які так раптово увірвалися в наше життя.

Маргінальні чорні діри, що досягли межі маси в 10^{15} г, втрачають класичний образ і стають квантовим об'єктом.

Бернард Карр (Bernard Carr), професор Лондонського університету, і Стівен Гіддінгс (Steven Giddings), професор Каліфорнійського університету в Санта-Барбарі, — відомі фахівці з космології та квантової гравітації. Карр закінчив аспірантуру у Стівена Хокінга і одним із перших почав вивчати реліктові чорні діри. Гіддінгс останнім часом досліджував можливість створення чорних дір у прискорювачах частинок, зокрема на адронному колайдері. Значною мірою ці два теоретики сформулювали наші сучасні уявлення про фізику квантових чорних дір.

Карр показав, що реліктова чорна діра, випаровуючись, може нагріватися до температури $\sim 10^{12}$ К. Тіло, нагріте до такої температури, стає здатним випромінювати не лише безмасові частинки на зразок фотонів, а й практично всі типи частинок, що існують у природі.

Маса чорної діри, що випаровується, поступово зменшується, діра нагрівається ще більше і починає випромінювати дедалі енергійніші частинки. Процес набуває лавиноподібного характеру. Коли діра досягає маси близько тисячі тонн, вона вибухає, як мільйон мегатонних ядерних бомб. Це випадок повного перетворення маси на енергію.

Квантові чорні діри, як зазначають Бернард Карр і Стівен Гіддінгс, можуть мати зв'язок з додатковими просторовими вимірами, які недоступні для звичайних частинок. Гравітаційне

поле квантової чорної діри може простягатися в інші виміри. Такі чорні діри можуть ставати ланкою, що зв'язує нас із паралельними Всесвітами. Для нашого спостерігача чорна діра, що випаровується, виділятиме менше енергії, оскільки частина її переходитиме в інший, паралельний Всесвіт.

Слід підкреслити, що цей процес випаровування має суто квантовий характер, його неможливо описати в категоріях класичної фізики. У поведінці чорної діри, що випаровується, можливі несподіванки, оскільки у квантовій теорії все, що не заборонено, обов'язково відбувається. А те, що, можливо, і не заборонено, не завжди здатна вигадати наша уява.

Довге життя

На реліктові чорні діри, які з різних причин уникли квантового вибуху, наприклад тим, що поповнювали свою масу з міжзоряного середовища, чекає інша доля.

Англійські космологи Бекенстейн і Шама в 70-ті роки показали, що якщо помістити чорну діру в термостат, тобто в матеріальне середовище, вона працюватиме, як теплова машина з коефіцієнтом корисної дії $(2 - \sqrt{2}) = 0,59$. На відміну від твердого тіла чорна діра зазнає вкрай малого опору під час руху в матеріальному середовищі. Чорна діра проникає крізь будь-яку речовину — чи то планету, чи зірку — вільно, як крізь вакуум. Таким чином, чорну діру практично неможливо зупинити. Втім, злегка сповільнити її рух здатна речовина нейтронних зірок, що має густину атомних ядер.

«Гола» чорна діра критичної маси близько 10^{15} г світить як тіло, нагріте до 100 мільярдів градусів, і випромінює потужність близько 300 МВт. Якщо помістити таку чорну діру в матеріальне середовище, вона почне акумулювати речовину з навколишнього простору. Такий процес в астрономії називають акрецією. Причому світність такої чорної діри зросте і становитиме близько 5 млн МВт (енергія, що виділяється під час вибуху 1 тис. т тротилу або повної конверсії в енергію близько 50 мг маси). Акреція є саморегульованим процесом.

Залежно від обертання чорна діра акумулює від 6 до 42% падаючої речовини, решта переробляється переважно на потужне гамма-випромінювання і випромінюється назовні. Тиск випромінювання на падаючу речовину перешкоджає катастрофічному процесу нарощування маси. У 1926 р. англійський астрофізик Еддінгтон обчислив критичну границю світності небесного тіла, регульовану тиском випромінювання (границя Еддінгтона). Формули, отримані Еддінгтоном, і дають змогу обчислити світність чорної діри під час акреції речовини. Дивовижно, але процес зростання маси одиночної чорної діри завдяки акреції виявляється надзвичайно повільним. Чорна діра в термостаті збільшує свою масу вдвічі внаслідок акреції приблизно за один мільярд років.

Що буде, якщо така чорна діра критичної маси 10^{15} г зіткнеться із Землею? Швидкість її руху — десятки кілометрів на секунду. Вона промайне перед зором спостерігача за кілька секунд. Спостерігач побачить фаєрбол (вогняну кулю) розміром у кількасот метрів. Вона безперешкодно увійде в Землю, пронизає її наскрізь, вийде з неї і попрямує в космос. На кожному метрі траєкторії її руху виділиться енергія, еквівалентна енергії вибуху 25 кг тринітротолуолу.

Як старожили космосу, реліктові чорні діри, могли опинитися в надрах зірок або планетних тіл? Таке могло статися в результаті захоплення реліктової чорної діри у процесі формування зірки або планети з міжзоряних хмар. Це може бути справедливим і щодо нашого Сонця і, ймовірно, Юпітера й Сатурна. Наявність навіть дуже маломасивного релятивістського гравітаційного реактора може спричинити істотні зміни в еволюційному сценарії небесного тіла впродовж його життя.

Якщо маса реліктової чорної діри виявиться більшою від 10^{-5} маси Сонця, основний внесок у світність зірки надходитиме від релятивістського гравітаційного реактора, а не внаслідок термоядерної реакції перетворення водню на гелій. У цьому разі світність зірки еволюціонуватиме в напрямі границі Еддінгтона. Це має привести, врешті-решт, до зна-

чного розширення зірки і втрати глобальної стійкості.

Важливий натяк на можливе «інфікування» планет реліктовими чорними дірами можна знайти в Сонячній системі. Зокрема, Юпітер і Сатурн випромінюють енергії більше, ніж отримують від Сонця. Надлишковий тепловий потік у масштабі $\sim 200\%$ становить $\sim 4,8 \cdot 10^{11}$ і $\sim 8,6 \cdot 10^{10}$ МВт відповідно. Вимірювання теплового потоку від інших планет Сонячної системи показують надлишок у кілька відсотків.

Для виробництва надлишкового теплового потоку Юпітером і Сатурном досить припустити, що маси реліктових чорних дір, захопле-

них ними, становлять $4 \cdot 10^{19}$ і $7 \cdot 10^{18}$ г відповідно. Ці мікроскопічні об'єкти порівнянні за розміром з атомом водню ($\sim 10^{-8}$ см). Можна припустити, що не поодинокі чорні діри, а ціла зграя менш масивних чорних дір вільно обертаються в надрах цих планет.

Можна навіть уявити собі деяку планету з релятивістським гравітаційним реактором у вигляді реліктової чорної діри всередині, яка діє як самодостатнє джерело тепла. Така планета може зовсім не потребувати Сонця для підтримання життя на її поверхні. Це може тривати вічність. Джерело енергії у вигляді реліктової чорної діри ніколи не вичерпається і не може зникнути.

Б.Е. Жиляев

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного, 27, Киев, 03680, Украина

РЕЛИКТОВЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ (СИНГУЛЯРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ)

В астрономии есть химеры, подобные чудовищу греческой мифологии, рожденному Ехидной и Тифоном, тератоморфному существу с тремя головами, извергающими пламя. Это реликтовые черные дыры, первенцы Вселенной, появившиеся на свет раньше, чем атомы. Они объединяют в себе массы в миллиарды тонн и размер электрона и подчиняются законам не классической, а квантовой физики. В отличие от классических черных дыр они излучают, в экстремальных случаях, сотни мегаватт энергии. Их температуры могут достигать сотен миллиардов градусов. Во Вселенной их может быть в миллионы раз больше, чем звезд. «Может быть» — потому что они, как и классические черные дыры, появились на свет на «кончике пера» теоретиков. С тем лишь отличием, что классические черные дыры мы уже наблюдаем, а квантовые — еще нет.

B.E. Zhilyaev

Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine
27 Acad. Zabolotnogo St., Kyiv, 03680, Ukraine

RELIC BLACK HOLES (SINGULAR SOURCES OF ENERGY)

There are chimeras in astronomy alike the monster of Greek mythology born by Typhon and Echidna, teratomorphic creature having three fire-breathing heads. That is relic black holes, firstlings of Universe that came into the world earlier than atoms. They have masses of milliards of tonnes and the size of electron and submit to the laws not classical but quantum physics. In contrast with classical black holes they radiate, in extremal cases, hundreds of megawatts of energy. Their temperatures may reach hundreds of milliards degrees. In Universe, there may be millions times more of them than of stars. "May be" — because they like classical black holes came into existence on the tips of theorists' pens. With that difference only that classical black holes we have observed whereas quantum ones — not yet.