

С. Г. Кузьменков

Херсонський державний університет
e-mail: ksg@ksu.ks.ua**МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ ТЕМИ: «ЧОРНІ ДІРИ»
В ПРОЦЕСІ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ УЧИТЕЛІВ ФІЗИКИ ТА АСТРОНОМІЇ
(ВІД УТВОРЕННЯ ЧОРНИХ ДІР ДО ЇХ ВИПАРОВУВАННЯ)**

У статті запропоновано методичні рекомендації щодо вивчення чорних дір в процесі підготовки майбутніх фізиків або вчителів фізики та астрономії. Рекомендації сформульовано з погляду фундаменталізації освіти, що передбачає зосередження уваги на засвоєнні найбільш істотних, фундаментальних, системних, інваріантних знань, які лежать в основі цілісного сприйняття сучасної наукової картини світу. Акцентовано увагу на тих проблемних методичних і методологічних моментах, які виникають під час вивчення походження чорних дір, визначення їх еволюційного статусу, з'ясування змісту історичного висловлювання «чорні діри не мають волосся», обчислення ентропії чорної діри, застосування другого закону термодинаміки до цих об'єктів. У статті розглянуті також важливі методологічні аспекти, пов'язані з випаровуванням і виявленням чорних дір.

Ключові слова: підготовка вчителя фізики та астрономії, фундаменталізація освіти, чорна діра, кінцеві стадії еволюції зір, границя Оппенгеймера-Волкова, «безволосся» чорних дір, ентропія чорної діри, другий закон термодинаміки, випаровування чорних дір, виявлення чорних дір.

– Поглянь-но на дорогу! Кого ти там бачиш?
– Нікого, – сказала Аліса.
– Мені б такий зір!
– зазначив Король із заздрістю,
– Побачити Нікого!
Та ще й на такій відстані

Л. Керррол. Аліса у задзеркаллі

«Чорні діри» є однією з найскладніших тем загально-го курсу астрономії і загального курсу астрофізики. Справа в тому, що повноцінний, аргументований виклад цієї теми можливий тільки на основі загальної теорії відносності, яку в переважній більшості університетів не вивчають. З іншого боку, серед науковців – фізиків, астрономів насправді немає повної одностайності щодо існування чорних дір. Це спричинено тим, що сучасна фізика не спроможна описати внутрішність чорної діри. Якщо гравітацію вже ніщо не може зупинити, то зоря, з якої утворюється чорна діра, має стиснутися в точку. Має виникати стан з нескінченною густиною (так звана сингулярність), що заборонено сучасною фізикою.

Тому викладення цієї теми в існуючих підручниках з астрономії є надзвичайно обмеженим і обережним. Водночас важливість цього матеріалу для майбутнього фізика або викладача фізики та астрономії важко переоцінити, адже в ньому в концентрованому вигляді представлений розвиток наших уявлень про гравітацію (і не тільки) впродовж останніх ста років. Історія досліджень, пов'язаних з чорними дірами, це дійсно драма ідей у пізнанні природи.

Отже, зупинимось на методологічних та методичних особливостях вивчення чорних дір у загальному курсі астрономії для майбутніх вчителів або у курсі «Астрофізика», який є обов'язковим на напрямі підготовки «Фізика». При цьому вивчення цієї теми, на нашу думку, слід проводити, керуючись принципом фундаменталізації освіти, що передбачає зосередження уваги на засвоєнні найбільш істотних, фундаментальних, системних, інваріантних знань, які лежать в основі цілісного сприйняття сучасної наукової картини світу.

У попередній статті [2] було розглянуто історію проблеми, дано означення поняття «чорна діра», еволюцію фізичного змісту цього поняття, починаючи з поглядів Дж. Мітчелла і П. Лапласа, і закінчуючи сучасними уявленнями, еволюцію уявлень про сингулярність, яку пов'язують із чорними дірами. Проте поза увагою залишилось кілька питань, відповіді на які ми спробуємо надати тут.

Еволюційний статус. Чорні діри є однією з кінцевих стадій еволюції зір разом з білими карликами і нейтронними зорями. Йосип Шкловський у своїй книзі «Зорі: їх народження, життя і смерть» писав: «... Історія існування будь-якої зорі – це воістину титанічна боротьба між силою гравітації, що намагається її необмежено стиснути, і силою газового тиску, що намагається її «розпорозити», розсіяти в оточуючому міжзоряному просторі. Багато мільйонів і мільярдів років триває ця «боротьба». Впродовж цих страшенно величезних термінів сили дорівнюють одна одній. Проте в решті

решт, перемога буде за гравітацією. Такою є драма еволюції будь-якої зорі» [7].

На сьогодні прийнято [1], що зорі, маси яких не перевищують приблизно $10-12M_{\odot}$ (M_{\odot} – маса Сонця), закінчують своє життя білим карликом, проходячи стадію червоного гіганта. Зорі, маси яких перебувають в діапазоні $10-12M_{\odot} < M < 30-40M_{\odot}$, проходячи стадію червоного надгіганта, після гравітаційного колапсу, що супроводжується спалахом наднової типу II, перетворюються на нейтронні зорі. Зорі з масами $M > 30-40M_{\odot}$ за сучасними уявленнями колапсують з утворенням чорної діри з масою близько $10M_{\odot}$ [1] (рис. 1). Досі немає надійних теоретичних розрахунків цього процесу, проте результати астрономічних спостережень, що свідчать про існування чорних дір, виглядають переконливими. І досі не ясно, чи супроводжується утворення чорної діри спалахом наднової. Вважають, що утворення чорних дір можливо також внаслідок акреційно-індукованого колапсу нейтронної зорі в тісній подвійній системі.

Верхньою межею маси білого карлика є так звана *границя Чандрасекара* $\approx 1,4M_{\odot}$ (С. Чандрасекар, 1930 р.) [1; 5]. Як відомо, рівновага білого карлика забезпечується крім звичайного кінетичного тиску ще й тиском виродженого електронного газу. Існування граничної маси Чандрасекара спричинено тим (і на цьому потрібно акцентувати увагу студентів), що електрони фактично не можуть досягти швидкості світла. Це фундаментальне обмеження нашого Всесвіту.

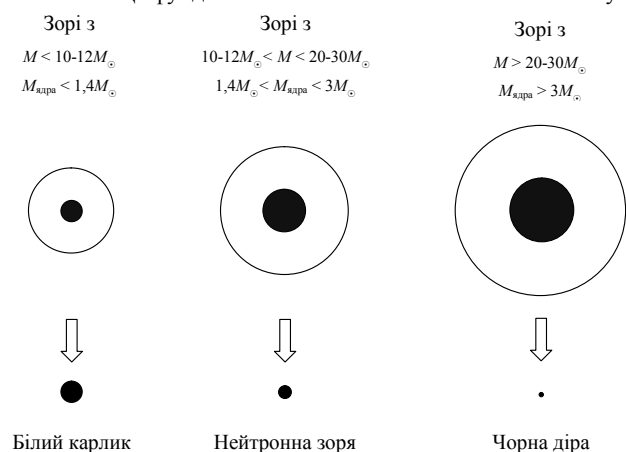


Рис. 1. Кінцеві стадії еволюції зір різних мас

За більших мас тиск виродженого електронного газу уже не в змозі утримати зорю (точніше ядро червоного гіганта) в рівновазі. Масивніша зоря може стати білим карликом лише у випадку, якщо вона в процесі еволюції позбудеться якимось чином (наприклад, скиданням оболонки) надлишку своєї маси.

Під час утворення нейтронної зорі тиск тепер уже виродженого нейтронного газу може відновити рівновагу зорі, якщо її маса не перевищує $(2-3)M_{\odot}$. Така невизначеність верхньої межі маси для нейтронних зір має своє пояснення. Справа в тому, що хоча за своєю формою рівняння стану

релятивістськи виродженого нейтронного газу виглядає так само, як і рівняння стану релятивістськи виродженого електронного газу (яке є точним), через істотний вплив сильної взаємодії нейтронів ця залежність має лише якісний зміст. Отже, маса нейтронної зорі не може бути більша за $(2-3)M_{\odot}$ – це так звана *межа Оппенгеймера–Волкова* (Р. Оппенгеймер, Г. Волков, 1939 р.) [5].

«**Чорні діри не мають волосся**». Усі чорні діри однакової маси, враховуючи існування горизонту подій – поверхні, з під якої не може вирватися жодна інформація, є точними копіями одна одної. Така «безликість» чорних дір дала привід відомому американському фізику-теоретику Дж. Уілеру сформулювати відому тепер усьому світу фразу, що «чорні діри не мають волосся» (натяк на новобранців в армії – коли вони підстрижені наголо, то виглядають однаково). Під «волоссям» мався на увазі будь-який прояв чорної діри, що видавав би її походження. Можна навести такий приклад «концепції безволосся». В результаті схлопування намагніченої зорі утворюється чорна діра, у якої магнітне поле відсутнє. Після того, як ядро надгіганта під час гравітаційного колапсу перетинає горизонт подій, зв'язок між магнітним полем і електричними струмами всередині цього ядра, які породили і підтримували його, розривається. Магнітне поле перетворюється на електромагнітне випромінювання, частина якого поглинається чорною дірою, а частина розсіюється від неї і діра стає ненамагніченою.

Чи існують все ж таки якісь параметри, завдяки яким чорні діри можна відрізнити одна від одної?

Насправді, згідно з Дж. Уілером стаціонарна чорна діра, яка утворюється в результаті колапсу нейтральної речовини, описується геометрією (метрикою), що містить тільки два параметри: масу M та момент імпульсу J . І якщо для сферично-симетричної чорної діри простір-час зовні горизонту подій в межах загальної теорії відносності описується розв'язком К. Шварцшильда [2], то для чорної діри з відмінним від нуля моментом імпульсу – розв'язком У. Керра [4].

Якщо речовина, яка колапсує, мала електричний заряд, то стаціонарна метрика, що виникає при цьому однозначно визначається завданням трьох параметрів: M , J та електричного заряду Q . У цьому разі простір-час зовні горизонту подій описується розв'язком Керра-Ньюмана [1].

Тому образне висловлювання Уйлера, насправді еквівалентне твердженню, що незалежно від обставин колапсу, будови і властивостей космічного тіла, що колапсує, стаціонарна чорна діра, що при цьому утворюється, однозначно описується тільки трьома параметрами M , J та Q .

Звідси випливає два висновки:

1. Можна вважати, що якість «обличчя» у чорної діри все ж таки є.

2. Чорна діра описується значно меншою кількістю параметрів, ніж звичайна невироджена (наприклад, зоря головної послідовності) або вироджена зоря (білий карлик, нейтронна зоря), тобто для зовнішнього спостерігача чорна діра є найпростішим об'єктом зоряного світу.

Ентропія чорної діри. Дж. Уілер, мабуть, першим звернув увагу на те, що у межах класичної теорії тяжіння вже сам факт існування чорної діри вступає в суперечність із законом зростання ентропії [4]. Дійсно, уявимо собі, що чорна діра поглинає гаряче тіло, яке має певну ентропію. Тоді зовнішній спостерігач побачить зменшення повної ентропії у частині Всесвіту, що доступна його спостереженню. Адже внаслідок ефекту, так би мовити, «випадіння волосся» чорна діра повністю «забуває» такі «деталі», як будова тіла, що впало, та його ентропію. Тому будь-які спроби зовнішнього спостерігача визначити величину ентропії, яка була «поглинута» чорною дірою разом із гарячим тілом, приречені на невдачу. Як же можна зняти цей парадокс?

У відповіді на це питання будемо спиратися на міркування І.Д. Новикова і В.П. Фролова [4]. Якщо не відмовлятися від закону зростання ентропії тільки через те, що у Всесвітідесь утворюються чорні діри, потрібно зробити висновок, що кожна чорна діра сама по собі має певну ентропію. Навіть здоровий глузд підказує, що оскільки чорна

діра є простішим об'єктом, то процес утворення чорної діри має супроводжуватись зростанням ентропії. І гаряче тіло в процесі свого поглинання чорною дірою передає їй не тільки масу M , момент імпульсу J і електричний заряд Q , але й свою ентропію S , так, що ентропія чорної діри зростає на величину не менше, ніж S .

Дж. Бекенштейн ще у 1973 р. звернув увагу на те, що властивості однієї з характеристик чорної діри – площі її поверхні (площі горизонту) σ – нагадує властивості ентропії. Дійсно, під час будь-яких неквантових процесів площа σ не зменшується (теорема Хокінга), тобто веде себе так само, як ентропія.

Як і будь-яка термодинамічна система, довільна чорна діра після релаксаційних процесів опиняється у рівноважному (стаціонарному) стані, в якому вона повністю описується параметрами: M , J та Q . Площа горизонту σ стаціонарної чорної діри у загальному випадку є функцією цих параметрів: $\sigma = \sigma(M, J, Q)$ Згідно з термодинамічною аналогією ентропію чорної діри можна визначити так [4]:

$$S = k \frac{\sigma}{4l_{\text{Pl}}^2}, \quad (1)$$

де $l_{\text{Pl}} = \sqrt{G\hbar/c^3} = 1,6 \cdot 10^{-35}$ м – планківська довжина, k – стала Больцмана.

Неважко оцінити питому ентропію (тобто в розрахунок на один баріон) незарядженої чорної діри масою $10M_{\odot}$, що не обертається. У цьому разі гравітаційний радіус у десять разів більший за сонячний і становить $R_g \approx 30$ км, $\sigma = 4\pi R_g^2$, а кількість баріонів $N \approx 10^{58}$ [3]. Тоді дістаємо

$$s = \frac{S}{N} \approx 10^{21} k. \quad (2)$$

На відміну від процесу утворення зір, який супроводжується локальним зменшенням ентропії [3], процес утворення чорних дір веде до величезного збільшення ентропії у Всесвіті.

Для чорних дір можна сформулювати закон, аналогічний другому закону термодинаміки, а саме, для будь-яких неквантових процесів площа горизонту чорної діри, і, отже, її ентропія S не зменшується: $dS \geq 0$.

Слід зазначити, що як у термодинаміці, так і у фізиці чорних дір закон зростання ентропії означає властивість системи в цілому незворотність і виділяє тим самим спрямованість часу.

Випаровування чорних дір. У 1975 р. видатний англійський теоретик Стивен Хоукінг показав, що чорні діри можуть з часом випаровуватись [5]. На перший погляд, це суперечить нашим уявленням про чорні діри. Проте згідно з поглядами сучасної фізики вакуум являє собою не абсолютну пустоту. Насправді вакуум наповнений різноманітними, так званими віртуальними частинками і античастинками. Вони постійно народжуються парами і зникають (анігілюють). За відсутності зовнішніх впливів (наприклад, полів) ці віртуальні частинки не «матеріалізуються», їх нібито немає. Потужне гравітаційне поле поблизу чорної діри спричиняє перетворення віртуальних частинок у матеріальні (поляризація вакууму). Одна з частинок пари, що виникає, може перетнути горизонт подій, а інша – покинути околиці чорної діри. За рахунок цього ефекту чорні діри втрачають масу.

На перший погляд така втрата маси призводить до зменшення площі горизонту чорної діри і, отже, її ентропії, тобто квантові ефекти порушують умови застосування теореми Хокінга. Проте випромінювання чорної діри має у цьому випадку тепловий характер і супроводжується зростанням ентропії у навколишньому просторі [4].

Темп, що передбачається теорією квантового (хоукінського) випаровування, обернено пропорційний квадрату маси чорної діри і для дір зоряних мас є нехтовно малим. За час існування Всесвіту можуть випаруватись лише чорні діри з початковою масою, що менше 10^{12} кг (це маса великої гори на Землі) [1]. Чорні діри з малою масою можуть існувати, але їх походження не може бути пов'язане з еволюцією зір.

Виявлення чорних дір. Прямим детектуванням виявити чорні діри неможливо (див. епіграф). Існує кілька непрямих методів. По-перше, чорну діру можна виявити у тісній подвійній системі. Компонент, який спостерігається

в оптичному діапазоні, внаслідок еволюції може заповнити свою порожнину Роша, (наприклад, перетворившись на червоного гіганта або надгіганта). В результаті через точку Лагранжа розпочнеться перетікання речовини з «оптичного» компонента на чорну діру. Оскільки потік газу несе з собою великий обертальний момент, то навколо чорної діри утворюється акреційний диск, речовина якого розігрівається до високих температур і може спостерігатися як яскраве рентгенівське джерело (рис. 2). Велика маса (більше $3M_{\odot}$), яку можна визначити за допомогою третього узагальненого закону Кеплера, та швидка іррегулярність ($\Delta t \sim R_g/c \approx 10^{-3} - 10^{-4}$ с) потужного ($\sim 10^{29} - 10^{32}$ Дж/с [6]) рентгенівського випромінювання – ось ті ознаки, за якими можна ідентифікувати чорну діру у рентгенівських подвійних системах (і відрізати, у тому числі від рентгенівського пульсара). На сьогодні методами рентгенівської астрономії виявлено десятки таких кандидатів у чорні діри [6].

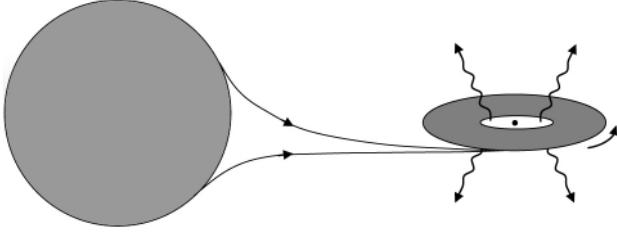


Рис. 2. Утворення акреційного диску навколо чорної діри в тісній подвійній системі

По-друге, достатньо масивну чорну діру можливо також виявити через ефект гравітаційної лінзи (так зване мікролінзування), коли чорна діра опиниться на промені зору між будь-якою зорею і спостерігачем.

Найімовірнішим кандидатом у чорні діри вважають невидимий компонент подвійної системи – потужне джерело рентгенівського випромінювання Лебідь X-1. Видимий компонент системи – це блакитний надгігант спектрально-го класу В0 з потужним зоряним вітром. Середня відстань між компонентами системи $\approx 0,2$ а.о. Результатом останніх визначень маси невидимого об'єкта є значення $14,8 \pm 1M_{\odot}$, що набагато перевищує граничні значення Чандрасекара та Оппенгеймера–Волкова. Таке значення маси разом із іррегулярним рентгенівським випромінюванням переконливо свідчать про наявність чорної діри в цій системі.

Ще два приклади – подвійні системи V404 Лебедя і V616 Одророга. За оцінками маса невидимого компонента V404 Лебедя перевищує $10M_{\odot}$, а для компонента V616 Одророга вона ймовірно перебуває у межах від $3M_{\odot}$ до $5M_{\odot}$.

Вважають, що надмасивні чорні діри (з масою у мільйони мас Сонця) можуть формуватися у центральних частинах галактик і кулястих зоряних скупчень, як результат злиття багатьох зір у ділянках їх високої просторової концентрації.

Отже, історія дослідження чорних дір демонструє зміну поглядів наукової спільноти про гравітацію, простір і час, будову і еволюцію зір різних мас, кінцеві стадії цієї еволюції. Ця зміна поглядів відображає еволюцію методології фізики і астрономії, становлення наукового світогляду, формування нової фізичної і астрономічної картин світу. Акцентування уваги майбутніх учителів фізики та астрономії на цих методологічних і світоглядних моментах сприятиме формуванню у майбутніх фахівців сучасної цілісної астрофізичної картини світу.

Методичного та методологічного аналізу з погляду фундаменталізації освіти потребує також процес вивчення інших кінцевих стадій еволюції зір: білих карликів і нейтронних зір.

Список використаних джерел:

1. Засов А.В. Общая астрофизика / А.В. Засов, К.А. Постнов. – Фрязино, 2006. – 496 с.
2. Кузьменков С.Г. Методичні особливості вивчення теми: «Чорні діри» в процесі підготовки майбутніх учителів фізики та астрономії / С.Г. Кузьменков // Вісник Чернігівського на-

ціонального педагогічного університету імені Т.Г. Шевченка / Чернігівський національний педагогічний університет імені Т.Г. Шевченка ; гол. ред. Носко М.О. – Чернігів : ЧНПУ, 2015. – Вип. 127. – С. 90-94. – (Серія: Педагогічні науки).

3. Кузьменков С.Г. Зорі: Астрофізичні задачі з розв'язаннями : навч. посіб. / С.Г. Кузьменков. – К. : Освіта України, 2010. – 206 с.
4. Новиков И.Д. Физика черных дыр / И.Д. Новиков, В.П. Фролов. – М. : Наука, 1986. – 328 с.
5. Торн К.С. Черные дыры и складки времени: Дерзкое наследие Эйнштейна / Кип С. Торн ; пер. с англ. ; под ред. чл.-корр. РАН В.Б. Брагинского. – М. : Издательство физико-математической литературы, 2007. – 616 с.
6. Черепашук А.М. Поиски черных дыр / А.М. Черепашук // Вестник Российской Академии наук. – 2004. – Т. 74. – С. 488-506.
7. Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть / И.С. Шкловский. – 3-е изд., перераб. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 384 с.

С. Г. Кузьменков

Херсонский государственный университет

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ: «ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ» В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ БУДУЩИХ УЧИТЕЛЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ (ОТ ОБРАЗОВАНИЯ ЧЕРНЫХ ДЫР ДО ИХ ИСПАРЕНИЯ)

В статье предложены методические рекомендации к изучению черных дыр в процессе подготовки будущих специалистов-физиков или учителей физики и астрономии. Рекомендации сформулированы в контексте фундаментализации образования, предполагающей концентрацию внимания на усвоении наиболее существенных, фундаментальных, системных, инвариантных знаний, которые лежат в основе целостного восприятия современной научной картины мира. Акцентировано внимание на тех проблемных методических и методологических моментах, которые возникают при изучении происхождения черных дыр, определения их эволюционного статуса, выяснения содержания исторического высказывания «черные дыры не имеют волос», вычисления энтропии черной дыры, применения второго закона термодинамики к этим объектам. В статье рассмотрены также важные методологические аспекты, связанные с испарением и обнаружением черных дыр.

Ключевые слова: подготовка учителя физики и астрономии, фундаментализация образования, черная дыра, конечные стадии эволюции звезд, граница Оппенгеймера–Волкова, «безволосие» черных дыр, энтропия черной дыры, второй закон термодинамики, испарение черных дыр, обнаружение черных дыр.

S. G. Kuzmenkov

Kherson State University

METHODOLOGICAL FEATURES OF BLACK HOLES STUDYING IN THE PROCESS OF FUTURE TEACHERS OF PHYSICS AND ASTRONOMY TRAINING. FROM THEIR ORIGIN TO EVAPORATION

This article offers a set of methodological recommendations on the subject of black holes study in the training process of young researchers, teachers of physics and astronomy. These recommendations are formed due to a nowadays tendency of fundamentalization of education. This principle emphasizes the most significant, fundamental, systemic, invariant knowledge, which is vital for holistic perception of the modern scientific world view. The attention is focused on methodical and methodological issues, which arise during the study of the of black holes such as: the study of their origin, determination of their evolutionary status, clarifying the content of the historical statement “black holes have no hair”, calculating black hole entropy, application of the second law of thermodynamics to these objects. Methodological aspects, related to evaporation and the discovery of black holes, are also revealed in this article.

Key words: teachers of physics and astronomy training, fundamentalization of education, black hole, final stages of the evolution of stars, Oppenheimer-Volkoff limit, «baldness» of black holes, black holes entropy, the second law of thermodynamics, evaporation of black holes, detection of black holes.

Отримано: 3.07.2015