

МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ ТЕМИ: "ЧОРНІ ДІРИ" В ПРОЦЕСІ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ УЧИТЕЛІВ ФІЗИКИ ТА АСТРОНОМІЇ

У статті запропоновано методичні поради щодо вивчення чорних дір у процесі підготовки майбутніх учителів фізики та астрономії. Акцентовано увагу на тих проблемних методичних і методологічних моментах, які виникають при вивченні історії досліджень цих об'єктів, визначення поняття "чорна діра", еволюції цього поняття, з'ясування природи сингулярності, пов'язаної з чорними дірами.

Ключові слова: "темні зорі", "застиглі зорі", чорні діри, гравітаційний радіус, горизонт подій, сфера Шварцшильда, сингулярність, підготовка вчителя фізики та астрономії.

"Чорні діри" є однією з найскладніших тем загального курсу астрономії. Справа в тому, що повноцінний, аргументований виклад цієї теми можливий тільки на основі загальної теорії відносності, яка в переважній більшості університетів не вивчається. 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.

Яскраве висловлювання належить одному з найвідоміших фізиків-теоретиків, який багато років присвятив дослідженню чорних дір, – Кіпу Торну: "З усіх вигадок людського розуму, від єдиногогорів та химер до водневої бомби, мабуть, найфантастичніше – це образ *чорної діри*, відокремленої від зовнішнього простору певною межею, яку ніщо не може перетнути; діри, яка має таке сильне гравітаційне поле, що навіть світло затримується його мертвою хваткою; діри, що викривляє простір і гальмує час. Подібно до єдиногогорів і химер чорна діра здається більш прийнятною у фантастичних романах або міфах давнини, ніж у реальному Всесвіті. І тим не менше закони сучасної фізики фактично вимагають їх існування" [8].

Історія. Довгий час вважалося, що ідея "чорної діри" належить П'єру Лапласу. "Зоря, що світиться, з густиною, що дорівнює густині Землі, і діаметром у 250 разів більше, ніж діаметр Сонця, не дає жодному світловому променю досягати нас через своє тяжіння; тому, можливо, що найяскравіші небесні тіла у Всесвіті виявляються з цієї причини невидимими" (П. Лаплас, 1796 р., [4]).

Проте, як з'ясувалося з часом, ідея існування "невидимих зір" належить учню Г. Кавендіша британському натурфілософу Джону Мітчеллу (1783 р.) [8]. Мітчелл, поєднавши корпускулярну модель світла із законом тяжіння Ньютона, показав, як мають виглядати надзвичайно компактні зорі. Він використав поняття швидкості відриву (нині ми називаємо її також другою космічною швидкістю) для зорі:

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}, \quad (1)$$

де M та R відповідно маса та радіус зорі. Мітчелл припустив, що має існувати *критичний розмір*, за якого швидкість відриву дорівнює швидкості світла. Якщо світлові корпускули притягуються зорею так само, як і усі інші частинки, то світло не зможе покинути зорю, розмір якої менше критичного. Будучи випроміненими з поверхні зі звичайною швидкістю світла, ці корпускули будуть гальмуватися притяганням зорі, в решті решт зупиняться, а потім впадуть назад на поверхню.

Мітчелл навіть розрахував критичний діаметр для зорі, маса якої дорівнює сонячній – він виявився таким, що приблизно дорівнює 6 км. З погляду фізики XVIII століття, існування таких зір нічому не суперечило. Тому Мітчелл припустив, що у Всесвіті може існувати величезна кількість таких темних зір, які залишаються невидимими для земного спостерігача. Ці "темні зорі" можна вважати "чорними дірами XVIII сторіччя".

Як зазначає Кіп Торн, Мітчелл, який був ректором університету Торнхілл в англійському місті Йоркшир, доповів про існування темних зір на засіданні Лондонського Королівського товариства 27 листопада 1783 р., і ця доповідь стала сенсацією серед британських вчених [8]. Тільки через 13 років П'єр Лаплас надрукував аналогічне передбачення в першому виданні своєї знаменитої праці "Викладення системи світу" (без посилання на Мітчелла).

Слід відзначити цікавий світоглядний аспект, пов'язаний з цією історією. Це передбачення було присутнім і другому виданні "Системи світу" (1799 р.), проте незадовго до виходу в світ третього видання (1808 р.) Томас Юнг відкрив явище інтерференції світла, що примусило вчених того часу відмовитись від корпускулярної моделі світла на користь хвильової, розробленої Християном Гюйгенсом. Стало незрозуміло, як притягання зорі, що описувалось законами Ньютона, діє на світлові хвилі. Мабуть, саме з цієї причини Лаплас прибрав концепцію темних зір із третього та наступних видань своєї книги [8].

Означення поняття "чорна діра". Чорною дірою називають область простору-часу, в якій гравітаційне поле настільки сильне, що не дає змоги навіть світлу покинути цю область і розповсюдитись на нескінченність [3].

Фізично чорна діра має *горизонт подій* – умовну поверхню, з-під якої жодна інформація не може передаватися назовні. Горизонт подій аналогічний односторонній мембрані, яка пропускає все в одному напрямку і нічого – в зворотному. Горизонт подій чорної діри, що не обертається, перебуває на так званому *гравітаційному радіусі*.

Формально на гравітаційному радіусі друга космічна швидкість дорівнює швидкості світла: $v_{II} = c$. Із цієї рівності отримуємо вираз для гравітаційного радіуса:

$$R_g = \frac{2GM}{c^2}. \quad (2)$$

Неважко переконатись, що для Сонця гравітаційний радіус становить 3 км. Якщо Сонце стиснути до таких розмірів, то воно невідворотно стане чорною дірою. Проте така доля Сонце ніколи не спіткає.

Еволюція поняття "чорна діра". Можна прослідкувати кілька етапів становлення сучасного терміну "чорна діра". Причому різні назви, які існували в свій час, відображають відповідні уявлення щодо природи таких об'єктів:

Первісно ці об'єкти, як вже згадувалось, називали "темні зорі", що відповідає фізичним уявленням Дж. Мітчелла і П. Лапласа кінця XVIII століття, які базувались на уявленнях І. Ньютона про те, що простір і час абсолютні, а швидкість світла відносна.

Умовно кажучи, в період з 1916 р. по 1950 р. з об'єктами, які ми нині називаємо чорними дірами, асоціювали так звану "сингулярність Шварцшильда" або "критичне коло". Така назва була пов'язана з особливостями розв'язку Карлом Шварцшильдом головного рівняння загальної теорії відносності Альберта Ейнштейна.

Розглянемо властивості простору-часу поблизу матеріальної точки масою M . Розмістимо початок сферичної системи координат r, θ, ϕ у цій точці. Очевидно, що в околицях цієї точкової маси реалізується статичний центральнo-симетричний простір-час. На нескінченності ($r \rightarrow \infty$) квадрат інтервалу між подіями (квадрат відстані між двома світовими точками) має відповідати простору-часу Мінковського [6] і тому в сферичних координатах має вигляд:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - [dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)], \quad (3)$$

де у квадратних дужках записаний квадрат відстані між двома близькими точками тривимірного простору.

Розв'язуючи рівняння Ейнштейна, К. Шварцшильд у 1916 р. отримав вираз для інтервалу ds^2 в околиці гравітуючої маси M :

$$ds^2 = \left(1 - \frac{R_g}{r}\right) c^2 dt^2 - \left[\frac{dr^2}{1 - R_g/r} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right], \quad (4)$$

де R_g – введений нами раніше гравітаційний радіус. Сферу радіуса R_g , описану навколо точкової маси як центра, прийнято називати сферою Шварцшильда. Фактично вираз (4) описує простір-час зовні горизонту подій сферично-симетричної чорної діри, що не обертається. У цій шварцшильдівській геометрії світло завжди розповсюджується з однією й тією ж швидкістю і не може уповільнюватись (швидкість світла абсолютна, а простір і час відносні).

У 1950 р. було введено нове поняття – "горизонт подій". Поступово фізикам того часу приходило усвідомлення, що зоря, яка схлопується, продовжує існувати після того, як поринає у сингулярність

Шварцшильда, точно так само, як і Сонце продовжує існувати після того, як воно на Землі ховається за горизонт. Ця аналогія і послугувала мотивом фізику з Корнельського університету Вольфгангу Риндлеру надати сингулярності Шварцшильда (критичному колу) нову назву, яка з того часу міцно затвердилась, – *горизонт* [8].

Проте питання залишалося, як іменувати об'єкт, що утворюється в результаті схлопування зорі. З 1958 по 1968 рр. на Сході і на Заході використовували різні назви: радянські фізики віддавали перевагу терміну "застиглі зорі", на Заході – "колапсару". Тобто перші використовували назву, яка звертала увагу на те, як виглядає схлопування для зовнішнього і віддаленого спостерігача, а інші – акцентували увагу на точці зору спостерігача, що перебуває на поверхні зорі, що колапсує, і рухається разом з нею через горизонт всередину.

Вираз для інтервала (4) встановлює співвідношення між власним часом τ (часом, який вимірюють годинником, що вільно падає в гравітаційному полі, – як і сама речовина зорі під час гравітаційного колапсу) і так званим координатним часом t (часом, який вимірює віддалений спостерігач):

$$dt = \frac{d\tau}{\sqrt{1 - \frac{R_g}{r}}} \quad (5)$$

Очевидно, якщо $r \gg R_g$, то $dt = d\tau$, але якщо $r \rightarrow R_g$, то для будь-якого інтервалу власного часу $d\tau$, отримуємо $dt \rightarrow \infty$.

На мал. 1 [7] показана тривалість падіння тіла у чорну діру за годинниками спостерігачів, відповідно, що вільно падає (1) і що є нерухомим (2).

Отже, для віддаленого спостерігача поверхня зорі (ядра надгіганта) під час гравітаційного колапсу дійсно лише за нескінченно довгий час наближається до сфери Шварцшильда, начебто застигаючи на цій сфері.

Проте існують два ефекти, які унеможливають спостереження "застиглих" зір (тому, мабуть, від цієї назви згодом відмовились). Це ефект гравітаційного червоного зміщення і ефект Доплера.

Відносна зміна частоти внаслідок гравітаційного червоного зміщення дорівнює

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} \approx \frac{GM}{rc^2} = \frac{R_g}{2r} \quad (6)$$

Згідно з ефектом Доплера в релятивістському випадку для зміни частоти маємо

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = 1 - \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

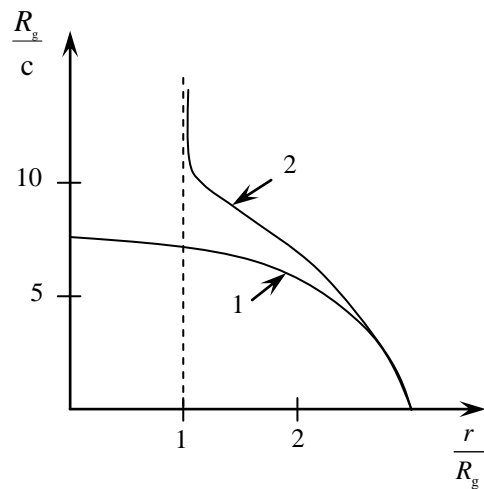
де v – проекція швидкості речовини, що вільно падає, на промінь зору зовнішнього спостерігача.

Тоді на гравітаційному радіусі границя відношення $(\Delta\nu)_g / (\Delta\nu)_D$ за $v = c$ становить 1/2 [5].

Отже, почервоніння світла, що випромінюється речовиною під час гравітаційного колапсу завжди лишається сильнішим внаслідок ефекту Доплера, ніж внаслідок гравітаційного червоного зміщення, хоча біля сфери Шварцшильда ці ефекти за порядком величини однакові.

Сумісна дія цих ефектів призводить до того, що з наближенням поверхні зорі до горизонту подій, віддалений спостерігач буде бачити світло все більш червоним та все меншої інтенсивності – чорна діра стає невидимою. При цьому погасання для віддаленого спостерігача відбувається практично миттєво.

У 1967 р. видатний американський фізик-теоретик Джон Арчибальд Уїлер запропонував термін "чорна діра". Кіп Торн так описує цю подію: "У типовому для Уїлера стилі він не побіг до своїх колег зі словами: "Я знайшов приголомшливу нову назву, давайте віднині будемо називати це та-та-та-та". Зовсім ні, він просто почав застосовувати його так, нібито жодної іншої назви раніше ніколи не існувало, нібито усі вже погодилися, що це якраз найпідходяща назва".



Мал. 1

Уілер апробував цей термін на конференції по пульсарам у Нью-Йорку восени 1967 р. і потім невимушено застосував його на лекції у грудні 1967 р. в Американській асоціації успіхів науки, що мала назву "Наш Всесвіт – відоме й невідоме". Зафіксований фрагмент його виступу виглядає так: "Внаслідок все більш і більш швидкого падіння [поверхня зорі, що схлопується] утікає від [віддаленого] спостерігача все швидше й швидше. Світло зсувається в червону область. Воно з кожною мілісекундою стає все блідіше й блідіше і менше ніж за секунду стає занадто темним, щоб його можна було бачити... [Зоря], як Чеширський кіт, поступово зникає. Кіт залишає після себе посмішку, а зоря – тільки гравітаційне притягання. Гравітаційне притягання залишається, а світло – ні. Те ж і з частинками. Більше того, світло й частинки, спрямовані зовні до *чорної діри* (курсив наш), лише додаються до її маси, збільшуючи її гравітаційне притягання" [8].

Впродовж всього одного місяця термін "чорна діра" був з ентузіазмом сприйнятий фізиками, астрономами і широкою публікою як на Заході, так і на Сході.

Проблема сингулярності. Фізики двадцятих, тридцятих, сорокових і навіть п'ятидесятих років ХХ століття задавалися одним й тим самим питанням: чи допускають закони фізики можливість існування чорних дір? І відповідь була неоднозначною: на перший погляд, так, допускають, проте, з іншого боку, А.Ейнштейн, А.Еддінгтон і деякі інші наводили (помилкові) доводи на користь того, що такого не може бути.

Наприклад, у 1939 р. Ейнштейн надрукував результати обчислень, основаних на загальній теорії відносності, які він інтерпретував як ілюстрацію того, чому чорні діри не можуть існувати. Ці розрахунки стосувалися поведінки ідеалізованого об'єкту, з якого згодом могла б утворитися чорна діра. Цей об'єкт являв собою скупчення частинок, що притягуються одна до одної силою гравітації, рухаються коловими орбітами, і сукупність яких утворює сферу. Ейнштейн припустив, що таке скупчення стає все менше й менше, і спробував розрахувати, що буде відбуватися, з наближенням його радіуса до радіуса критичного кола. Розрахунки показали, що чим компактніше стає скупчення, тим сильніше стає гравітація і тим швидше мають рухатись частинки по поверхні сфери, щоб не впасти всередину. Оскільки ніщо не може рухатись зі швидкістю, більшою за швидкість світла, то таке скупчення не може мати радіус менший за півтора критичних. "Важливим результатом цього дослідження, – писав Ейнштейн, – є пояснення того чому "шварцшильдівські сингулярності" не існують у фізичній реальності" [1].

Ще раніше видатний англійський астроном Артур Еддінгтон (1934 р.) стверджував: "Має існувати якийсь закон природи, що не дозволяє зорям поводити себе настільки абсурдним чином" [8].

У п'ятидесяті роки, коли ці доводи були остаточно відхилені, багато фізиків стало схилитися до точки зору, що хоча існування чорних дір і не суперечить законам фізики, воно настільки малоймовірно, що на практиці вони ніде не трапляються. Наочним і добре відомим прикладом є випадкове відновлення розбитого яйця. Закони фізики не заперечують, щоб це дійсно відбулося, крок за кроком у зворотному порядку. Проте цього ніколи не трапляється, оскільки ймовірність такої сумарної події надзвичайно мала.

Як справедливо зазначає Кіп Торн [8], можливо, ніщо так не заважало фізикам в період з 1939 по 1958 рр. зрозуміти явище гравітаційного колапсу, як назва, яку вони використовували для позначення критичного кола: "сингулярність Шварцшильда" (див. вираз (4)). Відбувалося акцентування уваги на самій сфері Шварцшильда, слово "сингулярність" викликало образ області, де гравітація стає нескінченно великою, що руйнувало відомі закони фізики.

Те, наскільки *несингулярна* у дійсності сингулярність Шварцшильда не було зрозуміло до тих пір, поки молодий американський фізик Девід Фінкельштейн не відкрив у 1958 р. свою нову систему координат. Система відліку Фінкельштейна на відміну від локальних лабораторних систем відліку була великою і включала одночасно області простору-часу, далекі від зорі, області поблизу неї і всі проміжні області. Причому різні частини цієї системи координат можуть рухатися одна відносно одної. Частини, розташовані далеко від зорі залишаються статичними, тоді як частини поблизу зорі падають всередину разом з її поверхнею. Це так звана "супутня система координат", яка може деформуватися і рухатись разом з речовиною. Отже, система відліку Фінкельштейна могла бути використана для одночасного опису схлопування зорі як з погляду віддаленого нерухомого спостерігача, так і з погляду спостерігача, що падає всередину разом з речовиною зорі.

Фінкельштейн показав, що сингулярність Шварцшильда є ніщо інше, ніж місце, у яке все провалюється, але звідки нічого не може вийти, і в яке ми зовні ніколи не зможемо зазирнути.

Згодом прийшло усвідомлення, що термін "сингулярність" є справедливим лише для центра чорної діри, але аж ніяк не до критичного кола.

І все ж таки, великий спротив чорним дірам у ХХ столітті, особливо до 60-х років, у тому числі з боку таких авторитетів як Ейнштейн і Еддінгтон, полягає, на думку фізика Вернера Ізраеля, який глибоко вивчав всю цю історію, у наступному. Все, що провалюється крізь горизонт подій (критичне коло, сферу Шварцшильда), ніколи не повертається назад, воно зникає з нашого Всесвіту, і самий факт цього зникнення кидає виклик уявленню фізиків про закони збереження матерії і енергії [2].

Отже, історія дослідження чорних дір демонструє еволюцію уявлень наукової спільноти про гравітацію, простір і час, природу світла, починаючи з кінця ХVІІІ століття. Ця еволюція 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 в майбутніх фахівців сучасної цілісної астрофізичної картини світу.

Історія чорних дір не обмежується розглянутими проблемами. Не меншої уваги під час вивчення чорних дір потребують різноманітні явища, з ними пов'язані: від їх утворення до випаровування. Про це – у наступній статті.

Використані джерела

1. Einstein A. On a Stationary System with Spherical Symmetry Consisting of Many Gravitating Masses / A. Einstein // *Annals of Mathematics*. – 1939. – V. 40. – P. 922–936.
2. Israel W. Dark Stars: The Evolution of an Idea / W/Israel / 300 Years of Gravitation, edited by S.W. Hawking and W. Israel. – Cambridge University Press, Cambridge, England, 1987. – 199 p.
3. Засов А.В. Общая астрофизика / А.В. Засов, К.А. Постнов. – Фрязино, 2006. – 496 с.
4. Климишин І.А. Історія астрономії / І.А. Климишин. – Івано-Франківськ, вид-во ІФТКДІ, 2000. – 652 с.
5. Кузьменков С.Г. Зорі: Астрофізичні задачі з розв'язаннями: навч. посіб. / С.Г. Кузьменков. – К.: Освіта України, 2010. – 206 с.
6. Ландау Л.Д. Теория поля (Серия "Теоретическая физика, том II) / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – М.: Наука, 1973. – 504 с.
7. Новиков И.Д. Черные дыры во Вселенной / И.Д. Новиков. – М.: Знание, 1977. – 64 с.
8. 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.

Kuzmenkov S.

METHODOLOGICAL FEATURES OF BLACK HOLES STUDYING IN THE PROCESS OF FUTURE TEACHERS OF PHYSICS AND ASTRONOMY TRAINING

The study of black holes is considered to be one of the most difficult topics of General Astronomy course. For a complete reasoned exposition of this subject is possible only on the basis of Einstein's Theory of General Relativity, which is not studied in most of the universities. On the other hand, scientists in different spheres (physicists, astronomers) can not actually find a complete consensus on the existence of black holes. The reason of this is that modern physics is unable to describe the inside of a black hole. If nothing can stop gravity the star, from which a black hole has to shrink, should be minimized in dot size. There the state of infinite density (the so-called singularity) has to emerge, which contradicts the law of physics.

Therefore, the presentation of this topic in existing textbooks on astronomy is extremely limited and cautious. At the same time the importance of this material for future physics and astronomy teacher can hardly be overestimated because the history of black holes studying shows the evolution of the scientific community ideas about gravity, space and time, the nature of light since the end of the 18th century. This tendency reflects the evolution of the methodology of physics and astronomy, the formation of a scientific outlook, the formation of new physical and astronomical picture of the world. Focusing future physics and astronomy teachers at these methodological and philosophical points will help future professionals to form their holistic modern astrophysical world view.

The article offers some methodological advice on studying the black holes in preparation of future physics and astronomy teachers. The attention is drawn to the problem of methodical and methodological points arising in the historical research of these objects, in the definition of "black hole" concept, the evolution of this concept and in clarifying the nature of the singularity associated with black holes.

Key words: "dark stars", "frozen stars", black holes, gravitational radius, the event horizon, the Schwarzschild sphere, training of physics and astronomy teachers.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2015