

# СУЧАСНА КОСМОЛОГІЯ

Частина 2.

## Гравітаційні лінзи



**Михайло Сажин**  
доктор фіз.-мат. наук,  
пров. наук. співр.  
Державного астроно-  
мічного інституту  
ім. П.К. Штернберга  
Московського  
державного  
університету  
ім. М.В. Ломоносова,  
м. Москва,  
Росія



**Ольга Сажина**  
канд. фіз.-мат. наук,  
наук. співр.  
Державного астроно-  
мічного інституту  
ім. П.К. Штернберга  
Московського  
державного  
університету  
ім. М.В. Ломоносова,  
м. Москва,  
Росія

Нарешті ми підійшли до останнього сюжету нашої розповіді — про *гравітаційні лінзи*. Дослідження гравітаційних лінз не є прерогативою однієї лише космології, ним займається і космологія, і позагалактична астрономія. Хоча більшу частину результатів дослідження гравітаційних лінз астрономи використовують для вивчення галактик, вплив цих досліджень для космології досить великий. Про це ми коротко уже згадали в попередній частині нашої статті. Нагадаємо також, що одна з наукових цілей супутника SNAP — вивчення гравітаційних лінз.

Дослідження прихованої маси нашого Всесвіту, можливість виміру основних глобальних параметрів, що визначають його геометрію, — ось неповний перелік питань, на які можна знайти відповідь при вивченні гравітаційних лінз. Комбінація даних про гравітаційні лінзи з даними про анізотропію реліктового випромінювання і кінематичні властивості Всесвіту дає можливість вимірювати їх з набагато більшою точністю, ніж при вимірюванні одним методом.

Важливе питання сучасної космології, яке може бути висвітлене при вивченні гравітаційних лінз, — це природа прихованої ма-

### Гравітаційні лінзи

си і її розподіл у Всесвіті. Спочатку слід сказати кілька слів про те, що ж таке "*прихована маса*", або "*темна матерія*" і чим вона відрізняється від "*темної енергії*", про яку мова йшла в попередньому розділі, а також необхідно визначити, що таке "*звичайна*" матерія.

На звичайному "життєвому" рівні *звичайна матерія* не має строгого визначення, скоріш вона визначена інтуїтивно. Астрономи ж під цим терміном розуміють *речовину, що є стабільною або квазістабільною на космологічних проміжках часу і яка бере участь в електромагнітних взаємодіях*. "Звичайна" матерія — це все те, що доступне нашому сприйняттю. Як відомо, сприйняття зовнішнього світу людиною здійснюється через фізичні взаємодії. Дотичні, слухові і зорові відчуття у своїй основі мають електромагнітну взаємодію.

Відповідно, терміном "*темна матерія*" визначаються стабільні чи квазістабільні частинки, які не беруть участі в електромагнітних взаємодіях. Як бачимо, два типи матерії розрізняються за їх "реакцією" на електромагнітну взаємодію. Вона є однією з чотирьох відомих типів взаємодій у нашому світі і найдужчою у нашому світі. Інші три — *сильна* (або ядерна), *слабка* (за участю нейтрино) і *гравітаційна* взаємодії. Люди не можуть безпосередньо відчувати сильні чи слабкі взаємодії. Явище радіоактивності, хоча і не відчувається безпосередньо, дає явно видимі відчуття, коли радіоактивне випромінювання діє на організм людини протягом певного часу. Слабка взаємодія може детектуватися тільки спеціальними фізичними приладами. Нарешті, найбільш слабкою, але водночас найбільш універсальною взаємодією є гравітація, що діє на все, що має масу (або енергію). Гравітація домінує над усіма іншими силами взаємодії на космологічних масштабах, тому часто її називають "силою, що рухає світами". На мікромасштабах гравітація нехтовно мала, хоча, звичайно, і не зникає, і тоді на перший план виходять електромагнітні, сильні і слабкі взаємодії. Можливо, існують ще й такі взаємодії, які наразі не відомі фізикам. Вони невідомі, оскільки немає приладів, що можуть їх зафіксувати і, отже, ми "не бачимо" їх.

\* Продовження. Початок див. у № 3 за 2007 р.

Заслуга відкриття "темної матерії" належить спостерігачам. Важливо відзначити, що це не теоретична гіпотеза, а реальний факт, установлений за допомогою спостережень!

Ми звикли до розмаїтості матерії навколо нас. Але це всього лиш розмаїтість форми, а не змісту, оскільки з погляду фізики вся речовина, з якою людина має справу в повсякденному житті, складається з баріонів, лептонів і фотонів — трьох типів стабільних частинок, що і є "звичайною" матерією. В процесі розвитку астрономії і космології стало зрозумілим, що однією тільки "звичайною", або "видимою", матерією вся розмаїтість речовини не обмежується.

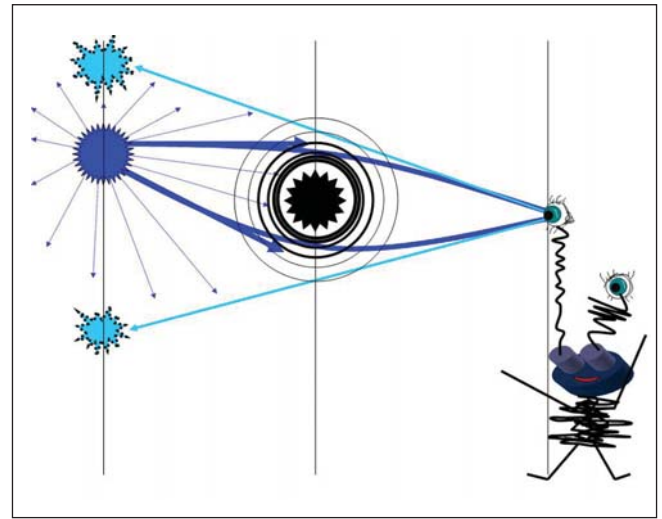
У 30-ті роки ХХ ст. астрономи, досліджуючи інші галактики, відкрили новий вид матерії — *"темну матерію"*. Це визначення означало, що її "не видно" у телескопи. Не реагуючи на електромагнітні взаємодії, вона, проте, взаємодіє гравітаційно з навколишньою, "звичайною", речовиною тому, що має універсальну характеристику матерії — масу. До того ж, крім такої екзотичної матерії, про яку ми поки що знаємо, що вона є, але не можемо точно вказати, з чого саме вона "побудована", у Всесвіті існує принципово інший вид матерії, котру і матерією-то вже не можна назвати...

Наприкінці ХХ ст. астрономи відкрили новий вид матерії, яку сьогодні називають *"темна енергія"*, про неї мова йшла в попередніх розділах. Важливо ще раз підкреслити принципове фізичне розходження "темної матерії" і "темної енергії". "Темну матерію" у майбутньому, цілком імовірно, можна буде дослідити в лабораторних умовах і визначити її склад — це можуть бути які-небудь важкі частинки або, наприклад, залишки так званих первинних чорних дір. А *"темну енергію"* досліджувати в лабораторних умовах принципово неможливо, тому що неможливо створити її контраст, іншими словами, неможливо виділити в просторі замкнутий об'єм скінченої величини (скажімо, з трилітрової банку), усередині якого ця енергія є, а поза неї — немає. Контраст "темної енергії" миттєво породить нестійкість, і наша трилітрова банка почне розширюватися зі швидкістю світла, руйнуючи зовнішній простір.

Перейдемо до розповіді про *гравітаційні лінзи* і способи вивчення розподілу "темної матерії".

Ефект гравітаційного лінзування можна зримо уявити собі таким чином. Припустимо, що між спостерігачем і далекою фоновою галактикою міститься який-небудь важкий об'єкт (зазвичай це інша галактика чи навіть скупчення галактик); розглядається гравітаційне лінзування і на зорях, і взагалі на будь-яких об'єктах, що мають масу, але ми не будемо зараз вдаватися в детальну класифікацію типів усіх, придатних на цю роль об'єктів. Тоді траєкторії променів світла, що приходять від фонової галактики, будуть перекручені гравітацій-

ним полем цього масивного об'єкта. Спостерігач замість однієї реальної галактики буде бачити два її віртуальні зображення (чи навіть більше, у залежності від розподілу мас у масивному об'єкті-лінзі) (рис. 8).



**Рис. 8. Схематичне пояснення ефекту гравітаційної лінзи. Темне тіло — гравітаційна лінза, за яку може бути зоря, галактика чи будь-яке інше небесне тіло, що має масу. Синя зоря ліворуч — справжнє положення джерела світла. Сині лінії — схематичне зображення траєкторії променів світла в гравітаційному полі лінзи; блакитні лінії — уявні траєкторії променів світла, блакитні зірочки — видиме положення двох зображень одного джерела світла**

Відповідно до прийнятої термінології, групу зображень, що вийшли в результаті такого ефекту, будемо надалі називати *"гравітаційною лінзою"*. Природно, що для виникнення двох зображень кутова відстань між галактикою-лінзою і фоновою галактикою повинна бути невеликою. Величина цієї відстані не повинна бути більшою за розмір т. зв. *конуса Айнштайна*. Квадрат розміру конуса Айнштайна пропорційний масі лінзи, поділеної на відстань між спостерігачем і лінзою. Для характерної галактики-лінзи цей розмір складає кілька кутових секунд. Інакше кажучи, **для того, щоб виник ефект гравітаційної лінзи, галактика-лінза і фонова галактика повинні бути на кутовій відстані в кілька кутових секунд одна від другої**. Це малоімовірна подія, тому позагалактичних лінз небагато: на сьогодні **загальна кількість кандидатів на цю роль наблизилася до 50. Найбільш вірогідно відомі 24 гравітаційні лінзи**. Кутові відстані між компонентами в різних лінзах змінюються і становлять від 0,77" до 6", але існують об'єкти з відстанями й у десятки кутових секунд. Вони виникають, коли роль масивного об'єкта, що відхиляє промені світла, відіграє скупчення галактик.

Однакові червоне зміщення й ідентичні спектри зображень є необхідною, але іноді недостатньою характеристикою для зарахування об'єкта до



**Рис.9. Знімок отриманий за допомогою телескопа Габбла. Зображено область скупчення галактик Abell 1689. Довгі ледь закруглені тонкі лінії (т. зв. дуги чи арки і арклетети), розташовані перпендикулярно до напрямку на центр скупчення, — проявлення ефекту слабого гравітаційного лінзування далеких галактик скупченням Abell 1689 (рисунок взято із сайту HST)**

списку гравітаційних лінз. Серед гравітаційних лінз є цікаві об'єкти з погляду космології. Існують лінзи, які мають кілька точкових розділених зображень, лінзи у вигляді майже замкнених дуг, т. зв. "кільця Айнштейна", лінзи у вигляді коротких дуг, т.зв. арки й арклетети (рис. 9).

Розповімо про найцікавіші гравітаційні лінзи і про факти, що були виявлені при їхньому вивченні.

Вперше ефект гравітаційної лінзи був відкритий на позагалактичних об'єктах. **Перша і тепер найбільш досліджена гравітаційна лінза — квазар QSO 0957+561 A,B** (двома буквами зазначена наявність двох зображень одного реального квазара). У цьому об'єкті випромінювання квазара досліджене практично у всьому радіо- і оптичному діапазоні.

Тривалі виміри блиску квазара QSO 0957+561 A,B дали можливість визначити сталу Габбла у новий спосіб.

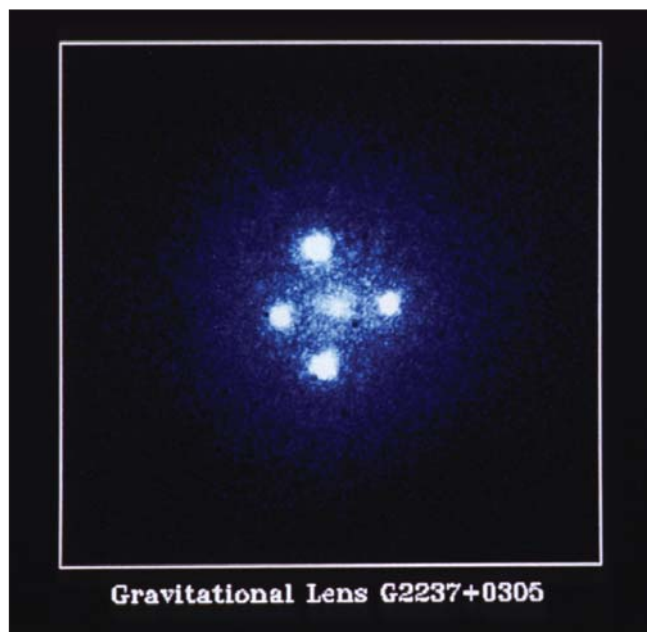
Цей спосіб ґрунтується на тому простому факті, що оптичні шляхи, які формують два зображення, різні. Отже, світло різними шляхами буде йти різний час. Якщо в квазарі відбудеться спалах, він дійде до спостерігача спочатку найкоротшим шляхом, а потім довшим, тобто повториться в другому зображенні.

Таким чином, вимірюючи різницю моментів приходу сигналу, можна визначити різницю оптичних шляхів, що в сукупності з відомою кутовою відстанню між зображеннями дає можливість вимірити відстань до квазара і масивного об'єкта-лінзи.

Порівнюючи цю відстань з червоним зміщенням об'єктів, можна обчислити сталу Габбла.

Багато вчених, включаючи групу астрономів зі Спеціальної астрофізичної обсерваторії РАН на Північному Кавказі, вимірювали блиск двох компонентів А і В упродовж 10 років. Останні оцінки сталої Габбла на підставі цих спостережень дають можливість понизити верхню межу її значення до 70 км/с Мпк. Ця точність порівнянна з точністю вимірювання іншими методами, але на відміну від традиційних методів позагалактичної астрономії, не має систематичних похибок.

Інший цікавий об'єкт — **квазар QSO 2237+030** — зветься "хрест Айнштейна" (рис. 10). Таку назву він одержав тому, що в результаті гравітаційно-лінзового ефекту формуються відразу чотири зображення цього квазара, що за формою свого розташування нагадує хрест. У вивченні цього об'єкта зробили помітний внесок російські астрономи (група ДАІШ МДУ під керівництвом М. Сажи-на і Б. Артамонова), а також українські астрономи з Харкова під керівництвом В. Дудінова.



**Рис.10. Знімок гравітаційної лінзи "хрест Айнштейна". Знімок отриманий за допомогою Космічного телескопа Габбла (взято із сайту HST)**

Необхідно зазначити, що явище гравітаційної лінзи — це предмет особливої гордості астрономів-теоретиків, тому що воно — одне з небагатьох явищ у класичній астрономії, передбачених теоретиками задовго до відкриття. Тут варто згадати наших співвітчизників, що зробили внесок у теоретичне вивчення явища гравітаційних лінз. Задовго до того, як А. Айнштейн написав першу статтю, присвячену ефекту гравітаційного лінзування, саме явище було вже докладно описане в статтях О. Хвольсона, Г. Тихова й інших радянських астрономів (нагадаємо читачам, що тоді Росія й Україна входили до складу єдиної держави — СРСР). Гравітаційні лінзи стали джерелом важливої інформації про космологію, про геометрію

Всесвіту, про швидкість його розширення, про густину і розподіл "темної матерії" як у Всесвіті в цілому, так і в окремих об'єктах зокрема, наприклад у скупченнях галактик і в галактиках.

Крім позагалактичних лінз відкрито також важливе **явище мікролінзування** — лінзування як позагалактичних, так і приналежних Галактиці об'єктів на зорях чи на інших масивних тілах, що належать тільки Галактиці. Маса зорі значно менша, ніж маса цілої галактики, тому розмір конуса Айнштейна в цьому випадку складає усього трохи мкс дуги. У зв'язку з цим явище гравітаційного лінзування на зорях і отримало назву мікролінзування.

В 1986 р. *Б. Пачинський* на підставі аналізу кривої обертання нашої Галактики висловив гіпотезу, що її сферична підсистема може бути заповнена невидимими (несвітловими) тілами — *нейтронними зорями*; карликовими зорями, що слабо світяться (*коричневими карликами*), аж до тіл з масою Юпітера ("*юпітерами*") — і визначив ймовірність ефекту мікролінзування на таких тілах. Ця ймовірність виявилася досить великою, щоб спостерігати ефект. Але загалом була показана *можливість спостереження гравітаційного поля окремих темних тіл гало і взагалі вивчення їхнього просторового розподілу*.

Пошуку "темної матерії" у формі невидимих тіл, що заповнюють гало нашої Галактики, були присвячені кілька програм спостережень. Наприкінці 1993 р. дві групи дослідників повідомили результати пошуку масивних невидимих тіл у гало нашої Галактики за ефектом мікролінзування, тобто за ефектом зміни блиску фонових зір. Американсько-австралійська група MACHO (*MASSive Compact Halo Objects*) шукала ефект мікролінзування на фоні Великої Магеланової Хмари (ВМХ), спостерігаючи 1,8 млн. зір упродовж одного року. Французькі астрономи групи EROS (*Experience de Recherches d'Objects Sombres*) спостерігали 3 млн. зір у ВМХ протягом трьох років. Обидві ці групи повідомляли про виявлення подій мікролінзування. Третьою групою, що сповістила про спостереження мікролінзових подій, але не в напрямку ВМХ, у напрямку на балдж (центральне скупчення) нашої Галактики, була польська група OGLE. **Наразі відомо, принаймні, про сотню мікролінзових подій. Більшість цих подій спостерігали в напрямку на балдж нашої Галактики.** Дослідження мікролінзування дали можливість визначити щільність темних тіл у нашій Галактиці. Пошук цих тіл за допомогою космічного телескопа Габбла (HST) виявився неуспішним. Природа цих тіл у нашій Галактиці дотепер є загадкою.

Ми так докладно зупинилися на питанні мікролінзування тому, що ця тематика знаходить активне застосування вже в суто прикладних завданнях, таких, наприклад, як складання астромет-

ричних каталогів і побудова систем відліку з метою космічної навігації, а також при одержанні принципів обмежень точності астрометричних експериментів, пов'язаних з нестаціонарністю нашого простору-часу. Актуальність цієї задачі для астрометрії була усвідомлена після робіт групи російських астрономів (співробітників ДАІШ МДУ *М. Сажина, В. Жарова, Т. Калініної, О. Хованської*), а також групи українських астрономів (співробітників Астрономічної обсерваторії Національного університету ім. Т. Шевченка під керівництвом *В. Жданова*).

Пояснимо, як явище мікролінзування може впливати на координати зір або на побудову інерціальної системи координат (відліку).

В астрономії система відліку реалізується деякою кількістю астрономічних об'єктів, узятих за основні (реперні), і фіксацією фізичних моментів спостережень в обраній системі виміру часу.

У сучасній системі відліку як реперні об'єкти обрані *квасари* — найдальші об'єкти, поперечні (*трансверсальні*) швидкості яких є малими, а отже, поворот системи координат у просторі також є малим.

Світло від зір рухається по скривленій траєкторії, визначуваній гравітаційними полями тіл нашої Галактики. Зорі з гравітаційним полем також рухаються. Їхній рух складається з регулярного руху навколо центра нашої Галактики і власного (пекулярного) руху. Очевидно, картина гравітаційних полів є нестаціонарною.

Відповідно нестаціонарною є і траєкторія променя світла від певної зорі до спостерігача. Нестационарність цієї траєкторії призводить до того, що положення зорі на небі змінюється, і середньоквадратична величина таких відхилень (флуктуацій) є деякою принциповою межею для визначення положення зорі і побудови небесної системи відліку.

Для того щоб підкреслити важливість ефекту мікролінзування для задач астрометрії, охарактеризуємо його вплив у цифрах.

Гравітаційне поле масивного тіла-лінзи, що міститься між джерелом світла і спостерігачем, має нескінченний радіус дії. Отже, воно діє на промені світла, що поширюються, і далеко від нього. Дія гравітаційного поля на фотони фонового джерела полягає в тому, що вона викривляє траєкторію фотона, відхиляючи його від прямої лінії. Зокрема тіло з масою  $M$  відхиляє фотон, що має прицільний параметр  $p$  на кут  $2M/p$  від прямої траєкторії. Таким чином, спостерігач побачить кутове відхилення від стаціонарного положення зорі. Воно становить величину приблизно 4 мікросекунди (мкс) дуги. Зазначимо відразу, що це мінімальна оцінка: реальні величини, як показує комп'ютерне моделювання, виходять у десятки разів більші.

Аналогічної точності вже досягнуто в багаторічних РНДБ-спостереженнях. Встановлено реперні джерела для РНДБ, які є найбільш стабільними

і мають мінімальні похибки визначення координат (прямого сходження і схилення): ці похибки становлять 10 мкс дуги, що за порядком величини збігається з наведеною вище теоретичною оцінкою. Звичайно, спостерігачі інтерпретують таку похибку визначення положення джерела на небі як таку, що викликана власними рухами випромінюючої плазми усередині джерела чи наявністю речовини на шляху поширення радіохвиль від позагалактичних джерел до спостерігача. Однак можлива і принципово інша інтерпретація — поширення світла у нестационарному просторі-часі теж спотворює видиме положення джерела і призводить до похибки при визначенні видимого положення джерела на небі.

Окрім власне практичних потреб, пов'язаних з дослідженням космічного простору і навігації, питання про граничну точність позиційних вимірів пов'язане також з одним із фундаментальних фізичних понять — можливістю введення *інерціальної системи відліку*. Дотепер нестационарність (чи квазіінерціальність) системи координат спричинялася зміною напрямку надходження променів світла (чи радіопроменів) на телескопи від далекого реперного джерела. Існують дві основні причини цього явища. Перша полягає в тому, що ділянки випромінювання в джерелах є нестационарними. Наприклад, рух хмар випромінюючої плазми в позагалактичних джерелах призводить до видимого руху центра яскравості, а отже, до перемінного положення реперного джерела на небі. Друга причина полягає в тім, що в просторі промінь у загальному випадку рухається не по прямій лінії. Відхилення від прямої лінії виникають, коли промені світла проходять через середовище, відмінне від одиниці показником заломлення. Це може бути пов'язане з наявністю речовини на промені зору тощо. І лише недавно була виявлена ще одна причина, що перешкоджає проходженню променя світла по прямій лінії — нестационарність простору-часу.

Зупинимось більш докладно на понятті "*система координат*". У сучасній фізиці воно тісно пов'язане з іменами видатних фізиків Галілео Галілея й Альберта Айнштейна. Можна сказати, що сучасна фізика почалася з поняття механічної відносності, введенного *Г. Галілеєм*, а сучасна фізика з поняття спеціальної відносності — теорії правильного опису фізичних процесів у системах координат, що рухаються з релятивістськими швидкостями.

Поняття системи координат з'явилося вже в першій статті Айнштейна з теорії відносності "*До питання електродинаміки тіл, що рухаються*". У ній було постульовано, що всі системи координат, які рівномірно рухаються, рівноправні. Ідея такої рівноправності, а також постулат про сталість швидкості світла спричинили перегляд фундаментальних принципів механіки Ньютона і принципу

відносності Галілея і стали основою спеціальної теорії відносності. Пізніше принцип відносності був узагальнений Айнштайном на системи координат, що рухаються з прискоренням, — так народилася *загальна теорія відносності*, що дала можливість поєднати воедино простір і матерію.

Виявлення глибокого зв'язку між нашим чотирьохвимірним простором-часом і гравітаційними полями привело до прориву в розумінні законів світобудови. Якщо у фізиці Ньютона простір був лише сценою, на якій розігрувалися події, то в релятивістській фізиці сама сцена перебудувалася залежно від присутності "акторів" — масивних тіл будь-якої природи. Простір-час був позбавлений своєї абсолютності. Зайве нагадувати читачеві, що і спеціальна, і загальна теорії відносності перевірені експериментально з найвищою точністю й активно використовуються в технології, виробництві та навіть у повсякденному житті (*див. зокрема, — Я.Яцків, О.Александров, І.Вавилова, В.Жданов, Ю.Кудря, С.Парновський, О.Федорова, С.Хміль. "Загальна теорія відносності: випробування часом", Київ: Академперіодика, 2005. — Ред.*).

Таким чином, *задача про таку необхідну у прикладних завданнях побудову реперної системи відліку стає нелінійною — адже відповідно до загальної теорії відносності саму систему відліку необхідно вибирати залежно від розглянутих у ній матеріальних об'єктів.*

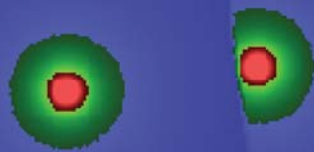
Змикання таких на перший погляд далеких тем, як астрометрія і космологія, насправді є знаменням нашого часу — часу нових астрономічних відкриттів, коли астрономічні спостереження окреслюють нові обрії знань загальнолюдського рівня.

## Екзотичні гравітаційні лінзи

Під *екзотичними лінзами* будемо вважати об'єкти, які існують поки що тільки в теорії, що називається, "*на кінчику пера*". До них можна, наприклад, віднести *космічні струни, кротячі нори і тіла з властивостями антигравітації*.

*Кротова нора* (або *червоточина*, як прийнято в англійській літературі) — це структура, аналогічна *чорній дірі*. Тільки на відміну від останньої, нора "працює" як на "вхід", так і на "вихід", з'єднуючи горловиною дві ділянки простору. З поняттям "кротової нори" пов'язана одна з можливих реалізацій машини часу, оскільки "нора" може з'єднувати надзвичайно віддалені точки простору і рухатися з релятивістськими швидкостями.

*Космічні струни* (рис. 11а) — це ниткоподібні (лінійні) топологічні дефекти простору, релікти раннього Всесвіту, що дожили до наших днів. Їхня основна властивість — формувати глобальну кінчну геометрію простору-часу. Кілька космічних струн перетворюють наш, у середньому, тривимірно плоский Всесвіт у деякий складний



**Рис. 11а. Моделювання процесу гравітаційної лінзи, де лінзою є космічна струна, фоновою галактикою — еліптична галактика.**

*Справа зображено чіткий зріз, що виникає в результаті лінзування космічною струною. Подібна картинка повинна спостерігатися в джерелі CSL-1 (масштаб зрізу збільшений для наочного уявлення)*

конгломерат пересічних конусів. "Кротові нори" належно відносити до об'єктів "темної матерії". Космічні струни, як це не дивно може здаватися на перший погляд, — до об'єктів "темної енергії", точніше, до реліктів "темної енергії", що заповнювала ранній Всесвіт відразу після епохи інфляції.

Зупинимось докладніше на *космічних струнах*. Авторам статті належить одне з найповніших досліджень кандидата в космічні струни за допомогою гравітаційно-лінзового ефекту. Дослідження не призвели до успіху, але методологія пошуку буде, без сумніву, корисною в процесі подальших досліджень.

Всі об'єкти нашого Всесвіту під дією закону тяжіння мають структури, близькі до сферично-симетричних і, отже, мають неоднорідне гравітаційне поле. У результаті гравітаційного лінзування на таких об'єктах, траєкторії променів світла викривляються; в результаті зображення фонових об'єктів виходять сильно перекрученими. Вони мають характерну дугоподібну структуру. У випадку ж лінзування фонового об'єкта на космічній струні це відбувається по-іншому. Навіть при проходженні поблизу струни траєкторії фотонів не викривляються! Фотони рухаються в евклідовому просторі, огинаючи з різних боків вершину конуса і формуючи зображення фонового джерела.

Уперше про космічні струни з погляду реальних спостережень астрономи заговорили після того, як англійський фізик, проф. *Т. Кіббл* передбачив їхнє існування й обґрунтував природну появу таких об'єктів у моделях раннього Всесвіту.

Сьогодні практично всі прийнятні моделі раннього Всесвіту і Великого Вибуху, включаючи і

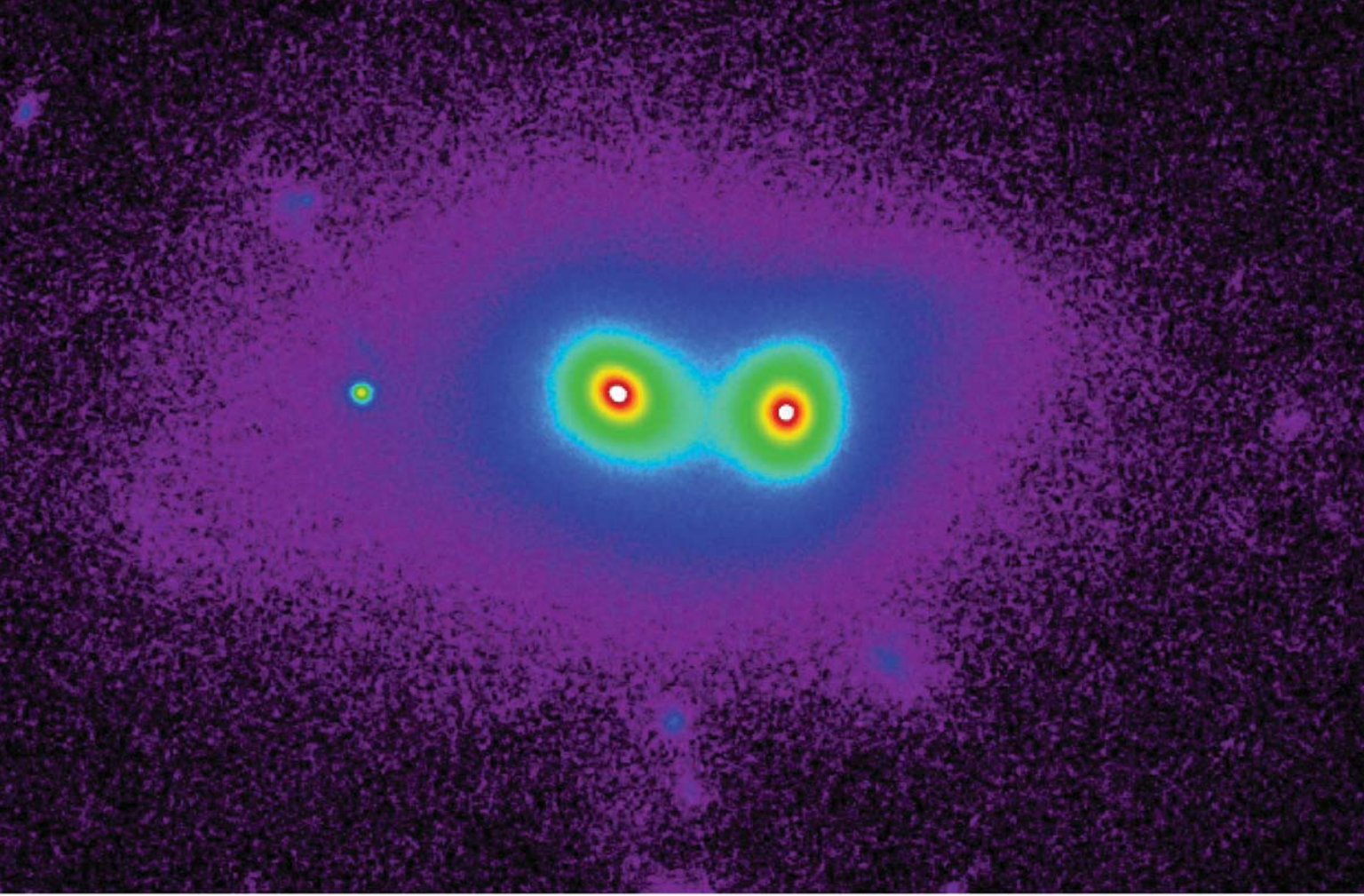
теорію суперструн, пророкують народження космічних струн.

У прямої космічної струни немає гравітаційного поля, — це відбувається через те, що маса струни в точності компенсується силами натягу, через що, зокрема, така струна повинна рухатися з релятивістськими швидкостями.

Космічна струна — це дуже важкий об'єкт: шматок довжиною в *одну астрономічну одиницю* (дорівнює відстані Землі від Сонця, 1 а.од. =  $150 \cdot 10^6$  км, 1 парсек =  $2,0627 \cdot 10^5$  а. од.) важить стільки ж, скільки наше Сонце, а довжина струни може досягати декількох гігапарсек (Гпк).

Струна тягнеться через весь Всесвіт, "протикаючи" космологічну фотосферу й идучи в ділянку, недосяжну для наших спостережень. **При такій довжині поперечні розміри струни значно менші від розмірів атомного ядра. Таким чином, струна є суттєво одномірною структурою, а її вплив на фонові об'єкти в результаті гравітаційно-лінзового ефекту мають властивості дельта-функції.** Гравітаційне лінзування — один із небагатьох методів пошуку струн.

Наприкінці ХХ ст. *Л. Кові* зі співавторами відкрив поле подвійних галактик в області небесної сфери з координатами  $\alpha = 02^h 49^m$ ,  $\delta = -18^\circ$ . На відміну від інших ділянок небесної сфери, де галактики також не рідкісні, на цій ділянці галактики розташовуються парами. На площадці розмірами  $45'' \times 45''$  знайдено п'ять пар галактик з однаковими властивостями. Таку картину може дати саме гравітаційна лінза — космічна струна. На жаль, подальші дослідження поки що не підтвердили це відкриття.



**Рис. 11б. Об'єкт CSL-1. Знімок отримано за допомогою Космічного телескопа Габбла.**

*Відсутні зрізи, характерні для космічної струни (рис. 11а), але чітко видно сліди слабкої припливної взаємодії*

У 2003 р. російсько-італійська група опублікувала перші дослідження незвичайного об'єкта, названого CSL-1. Цей об'єкт є системою двох гігантських еліптичних галактик, що знаходяться на відстані 1196,7 мегапарсек від Землі, що дає шкалу 5,806 кілопарсек (кпк) на одну кутову секунду (мається на увазі т. зв. *кутова відстань* у космології). Проекційна відстань між галактиками складала всього 10 кпк. Така мала відстань у сукупності з відсутністю видимих приливних перекручувань і ідентичних спектрів та відсутність значимої різниці променевих швидкостей двох галактик дало підстави нашій групі зробити висновок, що це може бути явище гравітаційної лінзи. Видимі розміри галактик були значно більшими, ніж розділення телескопа, причому обидві галактики мали майже круглі ізофоти.

Уся сукупність спостережуваних факторів указувала на те, що у випадку лінзування фонові галактики лінза повинна бути дуже незвичайною. Як лінза найкраще підходила саме космічна струна. Протягом трьох років цей об'єкт був найімовірнішим кандидатом на роль лінзування фонові галактики космічною струною. Справа в тому, що у випадку лінзування галактики космічною струною в одного із зображень повинні були спостерігатися зрізи, як у головки сиру, шматочок від якої відрізав продавець (рис. 11а). Зрізи повинні явно проглядатися при роздільній силі в кілька десятків мікроросекунд дуги. Таке розділення має тільки космічний телескоп. У січні 2006 р. такі спостереження були проведені на Космічному телескопі Габбла (рис. 11б) [керівниками проекту від Росії були автори статті; від Італії — М. Капаччіолі і Дж. Лонго (Університет м. Неаполя)].

**На знімку, одержаному з Космічного телескопа Габбла (рис. 11б), було явно видно слабкі приливні перекручування — це подвійна система взаємодіючих галактик з ідентичними спектрами і у фазі, що відповідає проекційній відстані 10 кпк!**

**У Всесвіті може існувати одна-дві такі системи.**

Інший приклад дивного джерела віднайшли американські й українські астрономи, — Р. Шільд, (Кембридж, США) та І. Масняк, Б. Гнатик, В. Жданов (Астрономічна обсерваторія Київського національного університету ім. Т.Шевченка). Відомий квазар-лінза показав корельовану зміну блиску в двох компонентах. *Найкоректніше пояснення такого явища — присутність на траєкторії променів космічної струни, згорнутої в гігантське кільце. Так це чи ні? Майбутні дослідження покажуть!*

Якщо в даному випадку дійсно спостерігається космічна струна, то астрономи одержують можливість досліджувати стан матерії при енергіях, близьких до  $10^{15}$  ГэВ, тобто при енергіях на 12 порядків більших, ніж у наймогутніших прискорювачів.

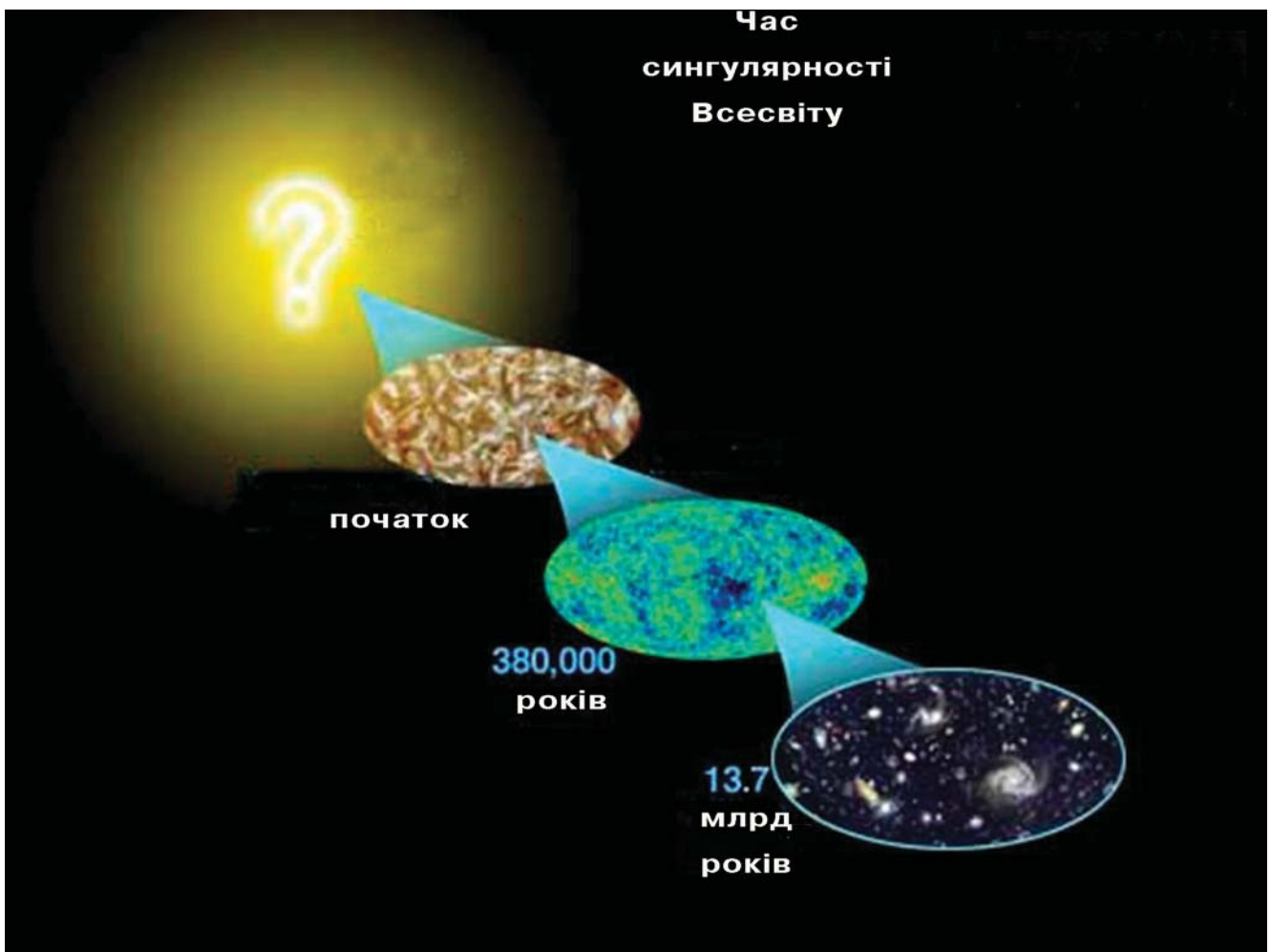
**Отже, на наших очах народжується нова галузь досліджень, котру можна було б умовно назвати "гравітаційно-оптична астрономія". Нове покоління оптичних, радіо- і рентгенівських телескопів з великою чутливістю і великим кутовим розділенням дасть можливість в подальшому одержувати ще більш дивні результати.**

*Кілька слів замість висновку*

Сьогодні космологія активно розвивається. Використовуючи ідеї і методи багатьох розділів фізики й астрономії, таких, як (у першу чергу) фізика елементарних частинок та теоретична фізика, космологія розробляє свій власний шлях. Показником того, що космологія стала самостійною дисципліною, є наявність фундаментальних відкриттів цією наукою, частину з яких ми обговорили в цій статті.

Вони стали підґрунтям для вивчення нашого Всесвіту, послужили відправною точкою перевірки й узгодження розрізаних теоретичних концепцій. За останні кілька десятиліть пройдено величезний шлях у розумінні устрою й еволюції нашого Всесвіту. За гранню нашого пізнання лежить тільки область, що безпосередньо примикає до моменту **Великого Вибуху**: не існує жодного спостережуваного свідчення про фізичні процеси, які відбувалися в момент народження Всесвіту. Не знаємо ми і того, що було до Великого Вибуху і наскільки коректне це питання (рис. 12).

Можливо, наші молоді читачі зможуть проникнути в таємниці виникнення й еволюції Мультивсесвіту.



**Рис. 12.** Сучасне уявлення про різні стадії розвитку Всесвіту.

*Першої є стадія сингулярності, про яку космологи поки нічого не знають.*

*Потім настає стадія інфляції, що на рисунку названа "початком".*

*Про цю стадію існують спостережувані дані (поки, на жаль, не дуже велика), отримані в процесі вивчення анізотропії реліктового випромінювання.*

*Далі зображена стадія, яка відповідає народженню поверхні останнього розсіювання, на ній — картина розподілу температури, отримана в результаті експерименту WMAP.*

*Нарешті, остання картинка показує наш час — Всесвіт, наповнений звичними для нас об'єктами (зорями, галактиками і їхніми скупченнями).*

*Малюнок взятو із сайту WMAP і адаптовано до змісту статті.*