



Сергій Назаров

мол. наук. співр.

НДІ "Кримська астрофізична
обсерваторія" МОНМС України,
снт. Науковий, АР Крим



АКТИВНІ ГАЛАКТИКИ

Передмова

Мета моїх нотаток — максимально доступно і зрозуміло розповісти, чим є за сучасними уявленнями знамениті квазари, радіоґалактики, блазари і ласертиди. Ви дізнаєтесь, яку роль відіграють у їхньому дивовижному житті надмасивні чорні діри, як їх вивчають, і чому це так важливо для людства. Спробую також окреслити вклад вітчизняних астрономів у розвиток сучасних позаґалактичних досліджень.

Вступ

Майже кожен любитель астрономії знає, що ґалактики за своїм зовнішнім виглядом поділяються на різні типи: спіральні, еліптичні й неправильні. Але в середині ХХ століття було введено ще один метод розрізнення ґалактик — за кількістю і якістю енергії, яку вони виділяють. Як наслідок, тепер усі ґалактики можна віднести чи до активних, чи до спокійних. Чому ґалактики бувають активними, і що це значить?

Визначення

Активні ґалактики — одні з найцікавіших і найзагадковіших об'єктів нашого Всесвіту. Основна їх відмінність від звичайних ґалактик полягає у тому, що ядра таких ґалактик виробляють таку велику кількість енергії, яку неможливо пояснити стандартними джерелами — енергією зоряного населення. Ядра активних ґалактик — це об'єкти з найвищою світимістю у Всесвіті, яка змінюється у широкому діапазоні довжин хвиль: від ґама-випромінювання до радіохвиль.

Нині найбільш визнаною є гіпотеза про наявність у центрі активної ґалактики надмасивної чорної діри. У такому разі більша частина енергії може виділятися при падінні на неї навколишньої речовини (процес акреції).

Історія відкриття

Першу активну ґалактику М77 (NGC1068) у сузір'ї Кита відкрив француз *П'єр Мешен* ще в 1780 році. Але ознаки її активності були помічені тільки в 1908 році співробітником Лікської обсерваторії *Едвардом Фетом* під час вивчення її спектра. І лише в 1926 році знаменитий учений *Едвін Габбл* виявив ще два таких об'єкти NGC4051 і NGC4151. До 1943 року таких ґалактик було відомо вже 12, і *Карл Сейферт* виокремив їх в особливий клас, докладно описавши відмінності між звичайними й активними ґалактиками і розділивши активні ґалактики на два типи (першого Sy1 і другого Sy2, рис. 3).

У 1946 році була відкрита перша ґалактика, активна в радіодіапазоні — "радіоґалактика Лебідь А", а в 1959 році відкрито перше квазізоряне радіоджерело 3С48 ("кварзар"). Протягом декількох років після відкриття квазари не вдалось відрізнити від зір в оптичному діапазоні через їх надмалий кутівий розмір; існувала навіть назва "радіозорі", яка не прижилась. У 1963 році голландський астроном *Мартен Шмідт* довів, що лінії в спектрах квазарів сильно зміщені в червоний бік. Подальші дослідження показали, що природа цього червоного зміщення космологічна. Таким чином, вперше з'ясувалось, що відстані до квазарів величезні, позаґалактичні, відповідно енергії вони випромінюють також велетенські, не порівнянні з випромінюванням зір.

Цей факт загнав астрономів у глухий кут — цілком зореподібні (в основному) об'єкти випромінюють у багато мільярдів разів більшу кількість енергії, ніж звичайні зорі. Чому? Вивчення квазарів поступово набирало обертів...

У 1965 році *Сендидж* показав, що існують об'єкти, ідентичні квазарам, але які не виявляють себе в радіодіапазоні, тому квазари були розділені на "радіотихі" і "радіогучні". Радіотихі квазари отримали назву "квазагі", що не стала загальноживаною. Причому сьогодні вважається, що звичайних, "гучних" квазарів лише 10% від загальної кількості, а решту 90% зараховують до "тихих".

У 1968 році *Мартен Шмідт* ідентифікував об'єкт BL Ящірки (BL Lac), як

змінне радіоджерело в центрі еліптичної галактики. Усі такі об'єкти отримали назву "блазари" чи "лацертиди". Блазари відрізняються від інших активних галактик відсутністю емісійних ліній у спектрі і тим, що ці об'єкти не бувають радіотихими. Випромінювання лацертід дуже поляризоване, що свідчить про наявність потужного магнітного поля.

У 1990-ті роки спостереження за допомогою космічного телескопа "Габбл" показали, що квазари найчастіше містяться у центрах величезних еліптичних галактик. Таким чином, було остаточно встановлено спорідненість сейфертів, радіогалактик, квазарів і блазарів: в основному, квазар — це час "юності" сейфертовської чи радіогалактики.

У 1998 році запідозрили існування квазара в центрі галактики Mrk231, який міститься у 4 рази ближче (всього 500 млн. св. років), ніж знаменитий квазар 3C273.

Оскільки активність виявляють саме ядра всіх вищезазначених типів галактик, то останнім часом усе частіше вживається збиральний термін "активні ядра галактик" (АЯГ). Цікаво, що багато активних ядер галактик були відкриті ще до встановлення їхньої позагалактичної природи і занесені до каталогів змінних зір (наприклад, змінна зоря BW Тау, яка виявилась сейфертівською галактикою 3C120).

Ознаки активності ядер галактик

1. Спектр електромагнітного випромінювання активної галактики займає ширший діапазон, ніж спектри звичайних галактик: від радіодіапазону до жорсткого гама-випромінювання.

2. Спостерігається швидка зміна блиску — зміна "потужності" джерела випромінювання з періодом від 10 хвилин у рентгенівському діапазоні і до приблизно 10 років в оптичному і радіодіапазонах.

3. Доведено переміщення великих мас сильно розігрітого газу з величезними швидкостями в різних напрямках.

4. Видимі морфологічні ознаки (зокрема викиди ("джекти") і "гарячі плями").

5. Загальна потужність випромінювання значно перевищує потужність звичайних галактик, причому основна кількість енергії виділяється з компактного центру (ядра).

Дослідження активних ядер галактик

Перший у світі спектrophотометричний моніторинг низки вибраних активних ядер галактик було розпочато в Кримській астрофізичній обсерваторії (КрАО) в 1970-х роках. Незабаром з'ясувалось, що газ, випромінювання якого створює широкі спектральні лінії, має високу концентрацію $n > 10^6 \text{ см}^{-3}$ і великі швидкості ($> 5000 \text{ км/сек}$). Усі наступні дослідження спектрів АЯГ зводились до з'ясування структури і природи цього газу.

У наш час моніторинг активних ядер галактик проводять декілька наземних обсерваторій (у тому числі і КрАО, рис. 1) за підтримки космічних телескопів. Зокрема, космічні спостереження допомагають детальніше вивчити поведінку цих галактик у рентгенівському і гама-діапазоні, в яких випромінювання сильно поглинається земною атмосферою. Особливу увагу зараз приділяють виявленню взаємозв'язку між рентгенівським і оптичним випромінюванням. Спостереження показують, що у більшості АЯГ змінність оптичного випромінювання є наслідком змінності рентгенівського.

Важливими є і космічні спостереження в оптичному діапазоні, які дозволяють визначити швидкості руху окремих зір і їхні відстані відносно центральної чорної діри. Маючи ці дані та використавши уточнений третій закон Кеплера, можна обчислити масу чорної діри і порівняти її з масою, розрахованою за методом ехо-відлунювання (опис методу див. нижче).



Рис. 1. Одна зі спостережуваних у КрАО галактик з активним ядром NGC 6814. Знімок отримано на телескопі АЗТ-8

Джерело енергії активних галактик

Найпереконливіша гіпотеза описує ядро активної галактики таким чином: у центрі міститься надмасивна чорна діра, на яку з величезною швидкістю падає розігрітий до високих температур газ. При цьому виділяється величезна кількість енергії, в основному, в рентгенівському і гама-діапазоні. Ця енергія розігріває навколишній газ до температур у мільйони і мільярди градусів, примушуючи його випромінювати різноманітні спектральні лінії. Емісійні лінії, які спостерігаються у спектрах активних галактик, народжуються саме в цій області, а значить, вивчаючи ці лінії, можна дізнаватись про властивості матерії поблизу центральної чорної діри і навіть спробувати дослідити її саму.

Гігантська світлимість активних ядер галактик указує на наявність у центральній області дуже великої маси, оскільки для компенсації сили тиску світла на навколишній газ необхідне сильне гравітаційне поле. Якби цього поля не було, навколишня речовина швидко б розлетілась у простір через надзвичайно високий тиск світла. А отже, оскільки сила гравітації об'єкта обернено пропорційна квадрату його розміру, він має бути дуже маленьким. Що підтверджується швидкими коливаннями яскравості в рентгенівському діапазоні. Цим критеріям найкраще відповідає саме надмасивна чорна діра (рис. 3).

На сьогодні єдиний достовірний спосіб відрізнити чорну діру від об'єкта другого типу полягає у тому, щоб виміряти масу і розміри об'єкта і порівняти його радіус із гравітаційним радіусом. Але роздільна здатність телескопів недостатня для того, щоб розрізнити області простору розміром порядку гравітаційного радіуса чорної діри. Тому в ідентифікації центральних об'єктів ядер галактик, таких як чорні діри, є певна міра припущення. Вважають, що встановлена верхня межа розмірів цих об'єктів занадто мала, щоб розглядати їх як скупчення білих чи коричневих карликів, нейтронних зір, чорних дір зі звичайною масою. До того ж, імовірність присутності груп таких об'єктів (з необхідною чисельністю у тисячі штук) у невеликій області простору зовсім незначна, а також відсутні гіпотези, які б описували виникнення таких груп. Таким чином, єдиними вірогідними претендентами на місце джерела енергії АЯГ на сьогодні є надмасивні чорні діри.

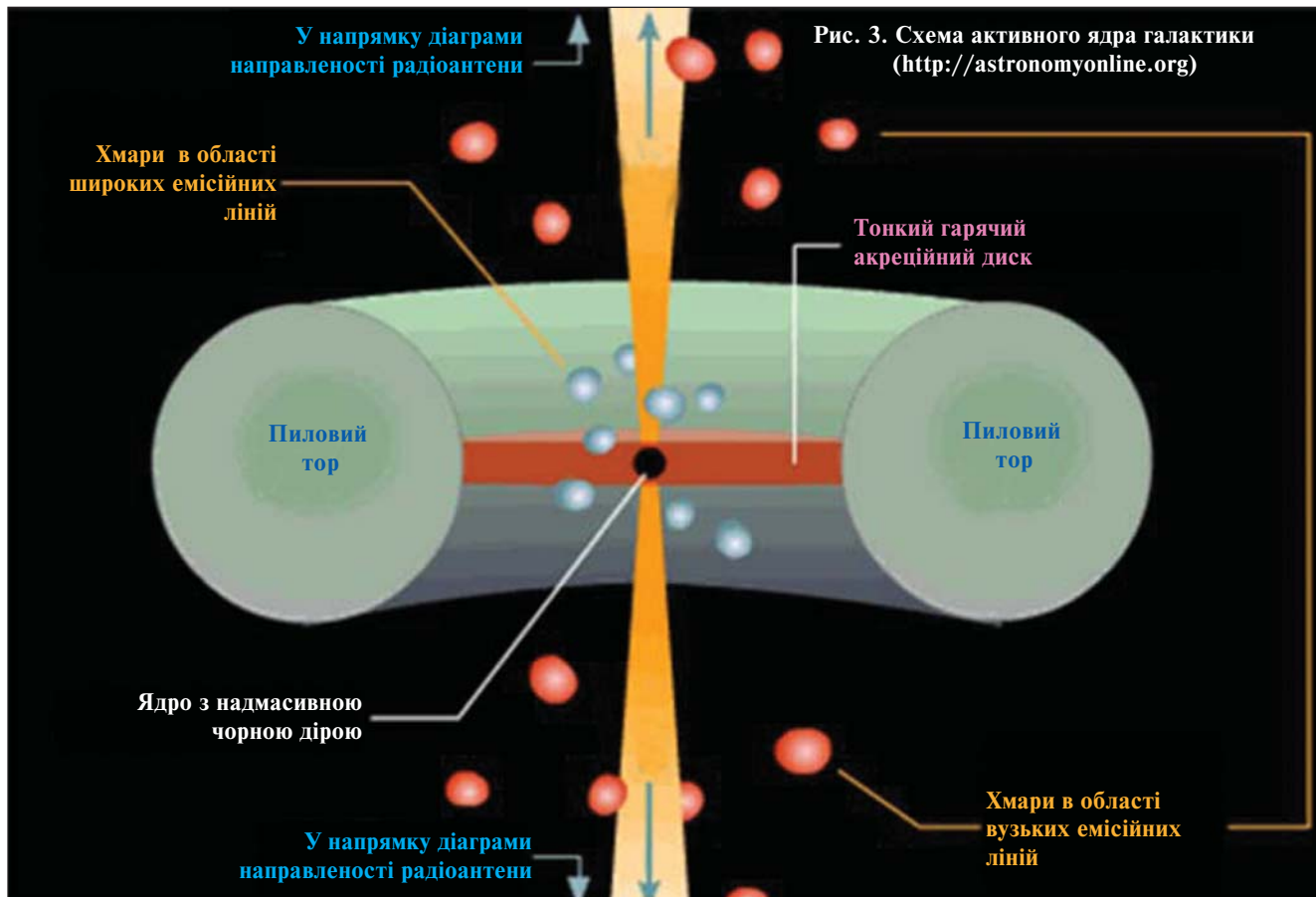


Рис. 3. Схема активного ядра галактики (<http://astronomyonline.org>)

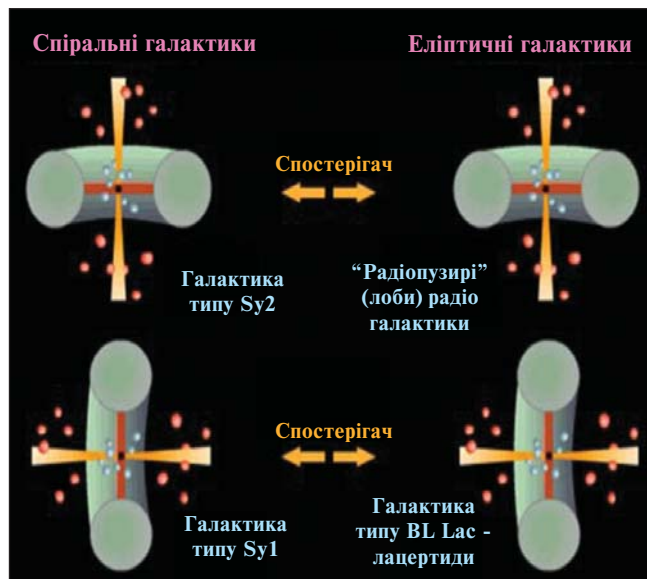
Аккреція газу на чорну діру

У 1964 році астрофізики **Яків Зельдович** та **Ігор Новиков** і незалежно — **Едвін Залпетер** першими припустили, що спостережуване синхротронне випромінювання активних ядер виникає завдяки падінню (акреції) речовини у вигляді плазми на центральний об'єкт — чорну діру. Аккреція буває двох видів: дисковою (коли падаюча речовина утворює диск) і сферичною (коли падаюча речовина порівняно рівномірно заповнює окіл чорної діри). У першому випадку речовина диска рухається по спіральних траєкторіях і в результаті взаємодії з магнітним полем вона емітує т. зв. синхротронне випромінювання. Ця гіпотеза повністю підтвердилась. Щоправда, природа магнітного поля залишається невивченою і до сьогодні. У другому випадку речовина падає до центру, не обертаючись. Припускають, що в більшості АЯГ присутні обидва типи акреції (стиснений диск і розріджена корона), але основну частину енергії виділяє саме перший тип (Рис. 2).

Викиди з АЯГ — джети

Джет (чи релятивістський струмінь) — потік плазми, яка утворюється у результаті акреції речовини на чорну діру. Точних математичних моделей цих об'єктів немає, і багато деталей їх утворення залишаються загадовими. Зокрема, вважають, що в формуванні джетів бере участь не тільки гравітація, а й магнітне поле. Як саме? Це ще потрібно з'ясувати.

Часто в об'єкта спостерігаються два джети, спрямовані у протилежні сторони. Очевидно, виникнення джетів пов'язано з центральним об'єктом, який обертається навколо осі. Спостереження свідчать, що джети не є прерогативою лише тільки надмасивних чорних дір — вони можуть утворюватися і в чорних дірах із зоряною масою, а також у нейтронних зорях. Можливо, завжди утворюється саме два джети, просто один інколи гірше видно.



Одна з гіпотез утворення джетів така: центральний об'єкт відзначається ретроградним (оберненим) рухом відносно акреційного диска. Гравітація діри, яка обертається, "розштовхує" внутрішні шари матерії акреційного диска. У результаті утворюється "провал" між диском і дірою, який дозволяє магнітному полю (яке виникає при обертанні зарядженої діри) збиратися у потужні лінії, вздовж яких джети і викидаються.

За деяких умов може скластися враження, що джети рухаються з надсвітловими швидкостями. Це суто спостережний ефект, перше обґрунтування якого дав ще *Martin Pic* у 1966 році. Велика протяжність джетів, яка досягає у випадку АЯГ десятків і сотень тисяч світлових років, пояснюється синхротронним випромінюванням високоенер-

гетичних протонів і електронів, прискорених центральною чорною дірою, які рухаються у магнітному полі.

Найвідоміші приклади об'єктів із джетями: еліптична галактика M87, найяскравіший квазар 3C 273, радіогалактика 3C 120, радіогалактика Центавр-А (NGC5128).

Вивчення структури АЯГ методом ехо-відлунування

Піонерські роботи в цьому напрямі виконані в 1972-1973 роках **Лютим** і **Черепашуком**. Основою методу є спостереження ліній у спектрах АЯГ. Лінія H β світиться у т. зв. області широких емісійних ліній (ШЕЛ), а континуум — у більш компактній області поблизу чорної діри. Аналіз методом крос-кореляції показує, що зміна яскравості лінії H β запізнюється відносно континууму на декілька днів через ефект світлової луни, аналогічної звуковій луни (яка використовується, наприклад, в ехолотах).

Наприклад, для галактики NGC5548 розмір області світіння лінії H β становить близько 20 світлових днів чи 500 млрд. км. Цей розмір мізерний порівняно з типовим розміром галактик, тому структуру ШЕЛ не можна розглядати за допомогою наземних телескопів і навіть з космосу. Проте "побачити" ШЕЛ можна за допомогою математичного аналізу цієї "луни". В КраО тривають інтенсивні роботи у цьому напрямі: для двох АЯГ розмір ШЕЛ був визначений кримськими астрономами вперше, для ще декількох — незалежно, і ще декількох — у рамках міжнародної кооперації. Визначення розмірів ШЕЛ має першочергове значення для визначення маси центральної чорної діри, особливо, за відсутності достовірних даних про зоряну динаміку поблизу центрального об'єкта.

Методи визначення маси центральної чорної діри

Про наявність будь-якої чорної діри може свідчити динаміка речовини, що її оточує. Безпосередні методи визначення мас надмасивних чорних дір в ядрах галактик ґрунтуються на дослідженні динаміки зір в області гравітаційного впливу чорної діри. Було встановлено, що маси чорних дір корелюють з дисперсією швидкостей зір у балджі галактики. У цьому разі на перший план виходять космічні спостереження в оптичному діапазоні, які дозволяють виміряти швидкості руху окремих зір і їхні відстані відносно центральної чорної діри. Маючи ці дані, можна легко обчислити масу чорної діри, тому що в області гравітаційного домінування чорної діри орбіти найближчих зір є практично кеплеровими.

Для багатьох АЯГ дані про зоряну динаміку, в основному, ненадійні, тому що сильне випромінювання центрального джерела пригнічує слабке випромінювання зір навколо чорної діри. Проте, масу центральної чорної діри можна обчислити, використовуючи розміри області широких ліній в АЯГ (які розраховуються за методом світлової луни чи ехо-картографування) і типову швидкість руху газу в цій області (яка визначається за шириною ліній у спектрі).

Таким способом кримські астрономи визначили маси понад 30 чорних дір в ядрах галактик, розкид значень яких становив від декількох мільйонів до мільярда мас Сонця. Астрономи КраО незалежно визначили маси ще декількох чорних дір. Також вдалося з'ясувати, що АЯГ типу т.зв. NLS1 мають найвищі (при даній масі чорної діри) темпи акреції газу, а об'єкти з широкими двогорбими профілями ліній — найнижчі (ці роботи проводяться в КраО групою науковців на чолі з доктором фіз.-мат. наук **С.Г. Сергєєвим**, зокрема у міжнародній співпраці).

Висновки

Галактики з активними ядрами є дуже незвичайними об'єктами з різноманітними й абсолютно екстремальними властивостями. Можливо, вони виявляються одним із ключиків до розуміння найбільш ранніх етапів розвитку нашого Всесвіту — того часу, коли ще не було ні галактик, ні зір, а надмасивні чорні діри вже могли існувати. Не виключено, що ці об'єкти стали своєрідними центрами конденсації, навколо яких поступово "наросли" галактики.

Надмасивні чорні діри, можливо, є однією з причин виникнення загадкових гама-збурень — дуже потужних вибухів, які відбуваються на космологічних відстанях від нашої галактики. Ці явища привертають увагу, адже якщо такий спалах відбудеться у сусідній галактиці, то доля людства може опинитись під загрозою.

Цікаво і те, що останнім часом почали з'являтися передові дослідження, які вказують на залежність між масою темної речовини галактики і масою надмасивної чорної діри. Припускають, що темне гало впливає на розвиток чорної діри. А згідно зі ще однією гіпотезою, з чорними дірами пов'язані так звані "кротові нори" — просторово-часові тунелі, які дозволяють за короткий час переміститись на величезну відстань, і таким чином прокладають людству шлях до подорожей у неймовірно далекі світи. Зараз це виглядає абсолютно нереальним, але хто знає, до чого призведе вивчення чорних дір через декілька десятків років?

Рис. 3. Галактики з активними ядрами різних типів. Seyfert 1 (Sy1) — в спектрах наявні область широких емісійних ліній (ШЕЛ) і область вузьких емісійних ліній, характеризуються потужним випромінюванням в УФ- і рентгенівському діапазонах.

Seyfert 2 (Sy2) — в спектрах наявна область вузьких емісійних ліній, характеризуються слабким випромінюванням в УФ- і рентгенівському та потужним в ІЧ- діапазонах.
Зображення взято з бази NED

CGCG 243-024

UGC 10120

Sy1n

IC 2227

CGCG 179-005

UGC 06398

UGC 06769

Sy2