

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Василенко Анатолій Андрійович

УДК 524.7+52-735

**Особливості спектрів рентгенівського випромінювання активних
ядер галактик в діапазоні енергій 0.5 – 250 кеВ**

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Жданов Валерій Іванович,
Астрономічна обсерваторія Київського національного
університету імені Тараса Шевченка МОН України,
завідувач відділу астрофізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Новосядлий Богдан Степанович,
Астрономічна обсерваторія Львівського національного
університету імені Івана Франка МОН України,
провідний науковий співробітник;

кандидат фізико-математичних наук
Якубовський Дмитро Анатолійович,
Інститут теоретичної фізики імені М.М. Боголюбова
НАН України,
старший науковий співробітник
відділу астрофізики та елементарних частинок.

Захист відбудеться « 6 » листопада 2015 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, м. Київ, 03860 МСП.
Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ГАО НАН України за адресою: ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, м. Київ, 03860 МСП.

Автореферат розіслано « 17 » вересня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

І.Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження активних ядер галактик (АЯГ), їх будови та складних фізичних процесів, що обумовлюють спостережні прояви активності у всьому діапазоні електромагнітних хвиль, вже декілька десятиліть залишається одним з найактуальніших напрямів досліджень в астрофізиці. Науковий інтерес становить питання падіння речовини на центральні області АЯГ, що містять надмасивні чорні діри; саме цей процес забезпечує енергію на потужне випромінювання, яке спостерігають у різних ділянках довжин хвиль.

Рентгенівське випромінювання в діапазоні від одиниць до сотень кілоелектронвольт є важливим джерелом інформації про фізичні процеси у самому центрі АЯГ, адже воно генерується акреційним диском та його короною у безпосередній близькості від надмасивної чорної діри. Для дослідження цих процесів природно використовувати рентгенівські спостереження супутників XMM-Newton та INTEGRAL, які мають найвищу чутливість з усіх інших доступних інструментів цього діапазону.

Випромінювання від центра активного ядра галактики має нетеплову природу, хоча у ранніх моделях акреційного диска, наприклад Шакури–Сюняєва, розглядалася суперпозиція теплових спектрів з різними температурами від різних частин диска. Альтернативний механізм народження рентгенівського випромінювання пов'язаний з оберненим комптонівським розсіюванням низькоенергетичних фотонів акреційного диска на релятивістських електронах корони. Цей механізм породжує відмінну від теплового форму та особливості рентгенівського континууму. Одночасно, спостережні прояви цього механізму є чутливими до зміни фізичних умов середовища, наприклад структури корони чи темпу акреції, та присутності додаткових структур. Тому актуальним є вивчення спектральних параметрів та їх змін для різних галактик з активними ядрами.

Окрім континууму, у рентгенівському спектрі з енергією вище 2 кеВ існує низка емісійних особливостей, найважливішою з яких є емісійна лінія від атомів заліза з енергією 6.4 кеВ. Хоча загальна фізична картина її народження відома, існує дуже багато випадків, коли форма лінії є більш складною, аніж звичайний гаусівський профіль. Наприклад, це може бути релятивістський профіль лінії, обумовлений релятивістськими рухами речовини, що випромінює. Важливо, що форма цього профілю є чутливою до наступних двох параметрів. Перший, це величина діаметра останньої стабільної орбіти навколо надмасивної чорної діри; другий, це значення її спіну, тобто параметра, що характеризує обертання. Таким чином, дослідження емісійної лінії заліза дає ключ до визначення характеристик надмасивної чорної діри. З іншого боку, спостереження сильного поглинання дозволяють оцінювати властивості і інколи навіть геометрію середовища, що оточує «центральну машину», що випромінює.

Зараз широко обговорюються питання щодо уніфікованої схеми АЯГ, згідно з якою відмінність спостережуваних даних для різних типів АЯГ пов'язано в основному з просторовою орієнтацією акреційного диска і газопилового тора навколо надмасивної чорної діри відносно променя зору [45, 48]. Разом із тим велика увага приділяється індивідуальним особливостям АЯГ (наприклад [29, 53]),

які хоча і не заперечують уніфіковану схему, але вносять окремі корективи і, можливо, вимагають розробки більш детальної класифікації АЯГ в залежності від фізичних та геометричних параметрів їх складових. Це потребує систематичного дослідження досить великої кількості АЯГ.

Дослідження найкращих за якістю рентгенівських спектрів для великої кількості галактик дозволяє виявляти як загальні, систематичні відмінності та особливості випромінювання, так й індивідуальні. При цьому дослідження в широкому діапазоні енергій надають можливість врахувати вплив параметрів один на одного та зменшити невизначеність їх значень, якщо вона залежить від ширини досліджуваного діапазону (наприклад значення енергії обрізання та параметра відбиття).

У зв'язку з цим, в дисертаційній роботі були досліджені спектральні особливості рентгенівського випромінювання оригінальної вибірки 95 активних ядер галактик у широкому діапазоні 0.5–250 кеВ, проведено статистичний аналіз головних спектральних параметрів та дослідження їх взаємних залежностей. У роботах інших авторів виконувались подібні огляди або з гіршою якістю даних та вузьким діапазоном енергій, або з меншою кількістю об'єктів, наприклад [36, 39]. Також зазначимо важливість підбору спектральних моделей для кожної галактики окремо, а не підгонки однотипною моделлю усіх об'єктів вибірки (як це зроблено, наприклад, у [36, 54]), оскільки це дає змогу врахувати власні особливості спектру кожної окремої галактики. Окрім цього, в нашій роботі більш детально досліджено особливості структури активних ядер двох галактик: NGC 3281 та NGC 1194, які не були виявлені раніше.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась під час навчання в аспірантурі фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка та роботи в Головній астрономічній обсерваторії НАН України. Основна частина роботи відповідає темам «Характеристики розподілу матерії у Всесвіті та властивості об'єктів, розташованих на космологічних відстанях» (№ державної реєстрації 0111U006170) та «Фундаментальні властивості обраних об'єктів Всесвіту: теоретичні та спостережні аспекти» (№ державної реєстрації 0112U001007). В останній темі автор брав участь як виконавець.

Мета та задачі дослідження. Метою цієї роботи є дослідження активних ядер галактик за властивостями їх випромінювання в діапазоні 0.5–250 кеВ.

Задачі дослідження:

- Створити вибірку даних для галактик з активними ядрами на основі 22-місячного огляду всього неба супутником Swift/BAT, отримати рентгенівські спектри цих галактик за даними спостережень супутників XMM-Newton та INTEGRAL у діапазоні 0.5–250 кеВ.
- Виконати аналіз цих спектрів, визначивши спектральні моделі, значення спектральних параметрів та їх взаємні кореляції.
- На основі спектрів галактик NGC 3281 та NGC 1194 проаналізувати особливості структури їх активних ядер.

Об'єктом дослідження у роботі є рентгенівське випромінювання від активних ядер галактик з даної вибірки у діапазоні 0.5–250 кеВ.

Предмет дослідження – спостережні параметри рентгенівських спектрів випромінювання активних ядер галактик у діапазоні 0.5–250 кеВ.

Методи досліджень. Для опрацювання спостережних спектрів рентгенівського випромінювання активних ядер галактик у діапазоні 0.5–250 кеВ було використано відомі моделі для опису випромінювання цього діапазону, що входять у стандартні пакети програмного забезпечення для роботи з даними КА XMM-Newton та INTEGRAL; статистичний аналіз, націлений на пошук та побудову залежностей між основними спектральними параметрами.

Наукова новизна отриманих результатів. На захист виносяться такі наукові результати.

- Вперше виявлено систематично вище значення параметра відбиття R при малих фотонних індексах Γ для галактик типу Сейферт 2 у порівнянні з типом Сейферт 1; вперше показано, що радіо-гучні галактики характеризуються меншим значенням еквівалентної ширини лінії Fe K_{α} при даному значенні відносного відбиття у порівнянні з радіо-тихими галактиками.
- Вперше у рентгенівському спектрі галактики NGC 1194 виявлено додаткову лінію в околі відомої раніше лінії заліза Fe K_{α} ; запропоновано її інтерпретацію та оцінено її параметри.
- Вперше показано, що рентгенівський спектр галактики NGC 3281 узгоджується з моделлю, яка характеризує газопиловий тор навколо її ядра як структуру з окремих хмаринок.
- Створено оригінальну вибірку даних для 95 галактик з активними ядрами на основі огляду всього неба супутником Swift/BAT. Побудовано та проаналізовано рентгенівські спектри цих галактик у діапазоні 0.5–250 кеВ за даними спостережень супутників XMM-Newton та INTEGRAL/IBIS; отримано значення відповідних спектральних параметрів.

Практичне значення одержаних результатів. В цілому отримані дані можуть слугувати для поповнення та уточнення уявлень про структуру та властивості активних ядер галактик. Отримані результати аналізу вибірки 95 галактик з активним ядрами можуть бути використані при спільному аналізі у інших діапазонах електромагнітного спектру, що дозволить отримати більш якісну фізичну картину АЯГ різних типів. Результати щодо комковатості газопилового тора відкривають можливості дослідження його геометрії на основі рентгенівських спостережень у високоенергетичному діапазоні.

Достовірність та обґрунтованість результатів досліджень та їх висновків підтверджуються використанням загальноприйнятих спектральних моделей, перевіркою достовірності, правильністю результатів їх застосування шляхом порівняння результатів аналізу рентгенівських спектрів активних ядер галактик з висновками робіт інших авторів. Дисертація базується на спостереженнях орбітальних рентгенівських обсерваторій XMM-Newton, INTEGRAL та

загальноприйнятих методах їх опрацювання і аналізу. Всі розрахунки статистичних аналізів супроводжуються відповідними похибками. Отримані результати опубліковано в рецензованих фахових виданнях та апробовано на тематичних конференціях.

Особистий внесок здобувача. Основні результати досліджень в межах дисертації опубліковано у статтях [1–6], у матеріалах [7,10] та тезах конференцій [8,9,11–20]. Робота [1] виконана автором одноосібно; у роботі [4] автор брав безпосередню участь у постановці задачі; самостійно отримав та проаналізував спектральні дані; автором самостійно висунуто та досліджено ідею про структуру газопилового тора з окремих хмаринок; автор також брав активну участь в обговоренні та формулюванні отриманих результатів і написанні тексту статті; у роботах [3, 5, 6] автор брав безпосередню участь у постановці задачі, аналізі отриманих результатів, самостійно виконав спектральний аналіз спостережних даних; у роботі [2] автору належить частина обробки спостережних даних супутника XMM-Newton, також автор брав безпосередню участь у аналізі отриманих результатів.

Автором самостійно було побудовано рентгенівські спектри, отримано значення та проаналізовано їх параметри для усіх 95 галактик оригінальної вибірки; отримано взаємні залежності та проведено статистичний аналіз значень спектральних параметрів. Автором самостійно висунуто та досліджено гіпотезу про наявність нової релятивістської лінії Fe K_{α} у спектрі NGC 1194; самостійно отримано результат щодо структури газопилового тора у ядрі галактики NGC 3281.

Апробація результатів дисертації. Результати доповідалися та обговорювалися на таких міжнародних наукових конференціях, як:

- Наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених», 2013 р., Біла Церква; 2012 р., Кам'янець-Подільський; 2011 р., Чернігів;
- На 19th, 20th, 21th Open Young Scientists' Conference of Astronomy and Space Physics, 2012, 2013, 2014 pp., Київ;
- Міжнародна конференція «Астрономія та фізика космосу в Київському університеті», 2012, 2013, 2014 pp., Київ;
- Всеросійська конференція «Астрофізика високих енергій сьогодні и завтра», 2012 р., Москва, Росія;
- 13th Odessa International Astronomical Gamov Conference-School, 2013 р., Одеса;
- 13-та українська конференція з космічних досліджень, 2013 р., Євпаторія;
- Сьома міжнародна наукова конференція пам'яті Б.Т. Бабія «Вибрані питання астрономії та астрофізики», 2014 р., Львів,

а також на семінарах відділу астрофізики Астрономічної обсерваторії КНУ імені Тараса Шевченка та на семінарах у Головній астрономічній обсерваторії НАН України.

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 6 статтях у фахових виданнях [1–6] та в 14 матеріалах та збірниках тез конференцій [7–20].

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, 4-ох розділів, висновків і 1 додатку. Обсяг роботи становить 138 сторінок. Текст роботи містить 7 таблиць, 26 рисунків та 180 найменувань у списку використаних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Подано загальну характеристику роботи. Сформульовано актуальність проблеми, мету та задачі досліджень, визначено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів.

Розділ 1 «Активні ядра галактик та основні особливості їх випромінювання в рентгенівському діапазоні» є оглядовим. Після короткої вступної частини (п.1.1) у ньому подано огляд літератури, де висвітлено сучасні уявлення щодо природи та загальних властивостей АЯГ (п. 1.2), їх внутрішньої структури та фізичних процесів, які в них відбуваються (пп. 1.3, 1.4); особливу увагу приділено механізму народження рентгенівського випромінювання, його поглинання та відбиття. Розглянуто основні компоненти центра активного ядра, які є об'єктом вивчення у дисертаційній роботі. Детально охарактеризовано та описано компоненти спостережного рентгенівського спектру активних ядер галактик та сформульовано його найбільш проблематичні та актуальні для сучасних досліджень компоненти. Окрема увага приділена найяскравішій лінії рентгенівського спектру – емісійній лінії заліза Fe K_α.

Оригінальні результати подано в розділах 2–4.

Головною метою **розділу 2 «Взаємозалежності рентгенівських спектральних параметрів для 95 галактик з активними ядрами з каталогу Swift/BAT AGNs»** є аналіз значень та взаємних залежностей головних спектральних параметрів рентгенівських спектрів для оригінальної вибірки 95 галактик з активними ядрами.

В розділі проаналізовано дані спостережень супутників XMM-Newton та INTEGRAL у рентгенівському діапазоні енергій 0.5–12 keV та 20–250 keV для однорідної вибірки з 95 галактик з активними ядрами, яка утворена на основі каталогу 22-місячного огляду неба супутником Swift/BAT.

У п.2.2 описано методику, за якою сформовано оригінальну вибірку, та приведено опис обробки рентгенівських даних спостережень галактик цієї вибірки. У вибірку було включено ті об'єкти, для яких була можливість проведення достатньо повного і коректного аналізу спектрів одночасно як за даними XMM-Newton, так і за даними INTEGRAL. Для цих галактик були отримані спостережні спектри, які, у свою чергу, також були проаналізовані, в результаті чого отримано відповідні значення спектральних параметрів. Надалі, для вивчення фізичної картини, яка присутня у ядрах активних галактик, було використано показники таких основних параметрів спектру, як фотонний індекс Γ , відносне відбиття R , енергія обрізання $E_{\text{cut-off}}$, величина стовпчикової густини (поглинання) N_{H} , внутрішня світність L_{corr} та еквівалентна ширина лінії – $EW \text{ Fe K}_{\alpha}$.

У п.2.3 проведено аналіз та пошук кореляцій основних спектральних параметрів рентгенівського випромінювання активних галактик, значення яких вдалось одночасно визначити для поточного об'єкта. Для отриманих параметрів рентгенівських спектрів галактик були побудовані та досліджені на наявність ймовірного зв'язку залежності «фотонний індекс Γ — параметр відносного відбиття R », «фотонний індекс Γ — енергія обрізання $E_{\text{cut-off}}$ », «параметр відносного відбиття R — еквівалентна ширина лінії Fe K_{α} », «еквівалентна ширина лінії Fe K_{α} — внутрішня світність L_{corr} » (ефект Балдвіна), та «величина поглинання N_{H} — еквівалентна ширина лінії $EW \text{ Fe } K_{\alpha}$ ».

При аналізі залежності « Γ – $E_{\text{cut-off}}$ » ми використали дані для 57 галактик, 15 з яких є радіо-гучними. Для шуканої залежності встановлено відсутність значної кореляції – значення коефіцієнтів кореляції Спірмена становить $r = 0.32 \pm 0.14$ для усієї вибірки, для радіо-гучних галактик $r = 0.44 \pm 0.24$. При порівняльному аналізі значень $E_{\text{cut-off}}$ при поділі за радіо-гучністю суттєвої різниці не виявлено, що обумовлюється, насамперед, такими двома факторами, як великі похибки для значень $E_{\text{cut-off}}$ та невеликий об'єм вибірки. Такий результат узгоджується із попередніми роботами [36]. Зазначимо, що основною проблемою для цієї залежності є великі похибки внаслідок низької якості спектру та його протяжності лише до 250 кеВ.

Залежність між параметром фотонного індексу Γ та відносного відбиття R була вперше виявлена та описана в роботі [58], де висловлена думка про те, що ця залежність є притаманною для АЯГ у зв'язку із послідовними змінами характеристик середовища корони акреційного диска. Цій залежності присвячено багато робіт, тому що вона є важливою для розуміння найближчого оточення надмасивної чорної діри [25, 36, 39]. У дисертації цю залежність розглянуто для 78 сейфертівських галактик. При цьому, для перевірки можливої залежності лише для одного типу галактик, в дисертації розділено вибірку на типи Сейферт 2 (включають Сейферти 2 та 1.9) – 31 галактика, Сейферт 1 (включають Сейферти 1, 1.2, 1.5) – 47, радіо-тихі (61) та радіо-гучні (17). Дослідження залежності « R – Γ » проведено двома шляхами. Перший – отримано коефіцієнти кореляції Спірмена для всієї вибірки, який становить $r = 0.36 \pm 0.10$, для підвибірки типу Сейферт 2 отримано $r = 0.22 \pm 0.20$ та для типу Сейферт 1 – $r = 0.47 \pm 0.11$. Отримані значення вказують на наявність певного зв'язку між параметрами, але кореляція при цьому не є значною. Дійсно, як видно з рис. 1, для значень $\Gamma > 2$ присутня тенденція до одночасного збільшення фотонного індексу разом із величиною R . Це – певний натяк на існування залежності між параметрами Γ та R . Тому ми застосували інший підхід для дослідження залежності « Γ – R », а саме: було розглянуто апроксимацію цієї залежності за моделлю Белобородова [23], яка враховує деякі особливості руху матеріалу корони. В дисертації подано криві описаної моделі для нашої вибірки (світло- та темно-сіра лінії для Сейфертів 1 та Сейфертів 2 на рис. 1 відповідно). Чітко видно, що при значеннях $\Gamma < 1.6$ вона передбачає менше R , ніж спостережене. Отримана експериментальна поведінка залежності « R – Γ », таким чином, не описується простими моделями корони, а примушує розглядати сукупність одразу декількох факторів. Насамперед, це збільшення N_{H} чи збільшення R внаслідок впливу ефекту віддаленості та/чи комковатості матерії середовища, що відповідає за

відбивання випромінювання (яке може бути як акреційним диском, так і газопиловим тором) [33, 51], або ж внаслідок складної форми корони [25, 40]. Зазначимо, що у роботі [40] також пропонується, що велике значення R ототожнюється з великим потоком УФ-фотонів у корону.

У дисертації зазначено, що при аналізі рентгенівських даних можливий внесок від відбиття газопиловим тором зазвичай не розглядають. Дані інтерпретують в межах відбиття в безпосередній близькості від джерела жорсткого рентгену, тобто корони. Тому, при спектральній підгонці, компонента відбиття обчислюється в припущенні «лампа над плоскою нескінченною плитою» (наприклад в моделі *regraw*). Нормалізація відбитого спектру налаштована таким чином, щоб відповідати спостережуваному спектру. Результатом цієї підгонки є коефіцієнт відбиття R , який нормують так, що значення $R = 1$ відповідає випадку ізотропного джерела над нескінченною площиною. У геометричному наближенні $R = \Omega/2\pi$, де Ω – тілесний кут, під яким видно відбивач з положення опромінювача. При цьому очевидно, що внесок від будь-якої віддаленої структури може привести до переоцінки коефіцієнта відбиття від диска в бік збільшення R . Це може пояснити дуже великі коефіцієнти R , виміряні у деяких сейфертівських галактик. Однією з таких віддалених структур може виступати газопиловий тор.

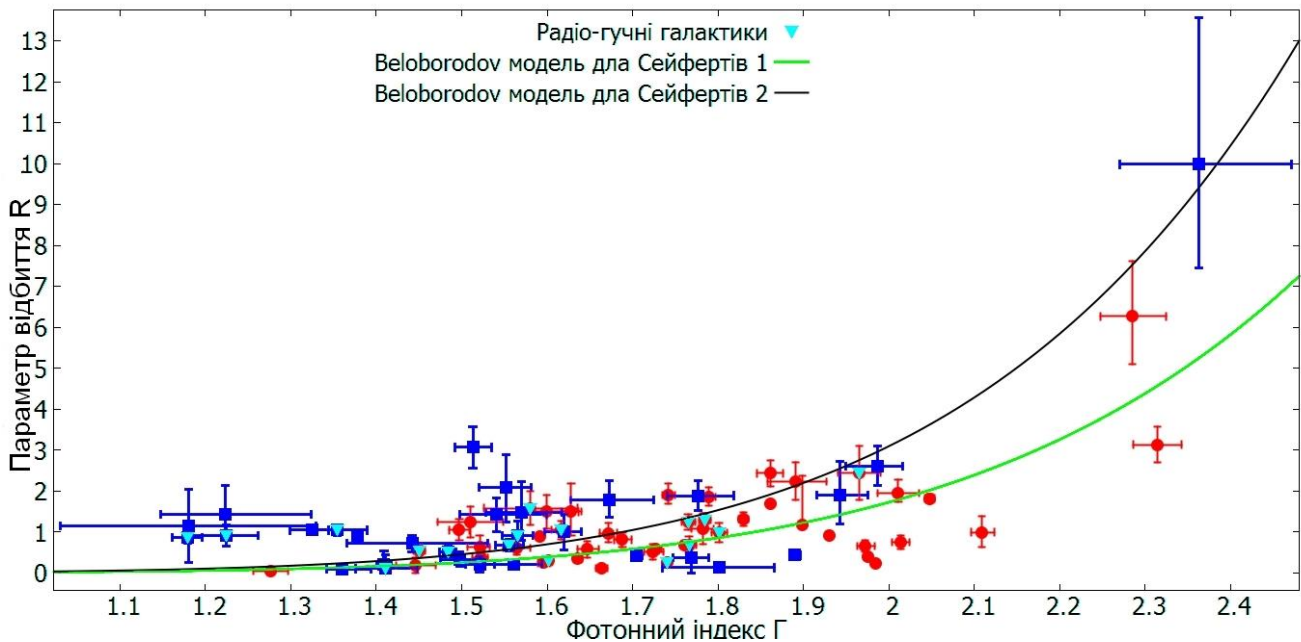


Рис. 1. Залежність фотонного індексу Γ від коефіцієнта відносного відбиття R . Кружечками позначено дані для галактик типу Сейферт 1, квадратами – Сейферт 2.

Залежність показника відносного відбиття R від еквівалентної ширини EW_{FeK} лінії Fe K_α є показником зв'язку між фізичними характеристиками потоку та джерелом випромінювання лінії Fe K_α . Дослідження зв'язку між параметрами EW_{FeK} та R для різних радіо-типів галактик дає певні вказівки на фізичні стани активного ядра у цих об'єктах. Зазвичай область формування лінії Fe K_α асоціюють з оптично-товстим середовищем, у першу чергу, з акреційним диском. Відповідно, у спектрі випромінювання, за наявності ознак відбиття, природно очікувати ознаки зв'язку R з

EW_{FeK} . У дисертації проаналізовано цей зв'язок для 75 галактик, для яких вдалось визначити параметри R та EW_{FeK} одночасно, з яких – 58 радіо-тихих галактик та 17 – радіо-гучних. Величина коефіцієнта кореляції Спірмена варіює у межах 0.16 – 0.21 для всіх 75 галактик або окремо при поділі на радіо-гучні чи -тихі галактики. Це означає присутність слабкої монотонної залежності між R та EW_{FeK} . Ця залежність є предметом сучасних дискусій, і наш результат є як відмінним [30], так і співпадає з результатами інших робіт [36, 39].

Стосовно усієї вибірки, 65 значень показника відбиття лежать у межах 0–2, при цьому 66 галактик мають еквівалентну ширину EW_{FeK} менше 200 еВ. Тобто ми маємо загальну тенденцію завищеного значення R при малій величині EW_{FeK} . Для радіо-тихих галактик середні значення R та EW_{FeK} становлять 1.49 та 135 еВ відповідно, для радіо-гучних – 0.77 та 103 еВ. При цьому, якщо ми візьмемо умовну межу $EW_{\text{FeK}} = 100$ еВ, тоді 56% радіо-гучних і 59% радіо-тихих галактик будуть мати подібну або меншу EW_{FeK} . Схожому поділу за значенням $R \leq 1$ відповідає 53% радіо-тихих і 82% радіо-гучних галактик. Тобто можна стверджувати, що величина відбиття та EW_{FeK} для радіо-гучних галактик у середньому нижча, аніж для радіо-тихих галактик. Цей висновок узгоджується з раніше виявленими тенденціями взаємної поведінки R та EW_{FeK} у роботах [30, 35, 36, 39]. У дисертації вперше статистично підтверджено наявність меншого відбиття у радіо-гучних галактиках на значно більшій вибірці. На рис. 2 чітко видно, що радіо-гучні галактики мають тенденцію до систематично меншого відбиття у порівнянні з радіо-тихими. Окрім цього, розкид точок для радіо-тихих галактик є значно більшим.

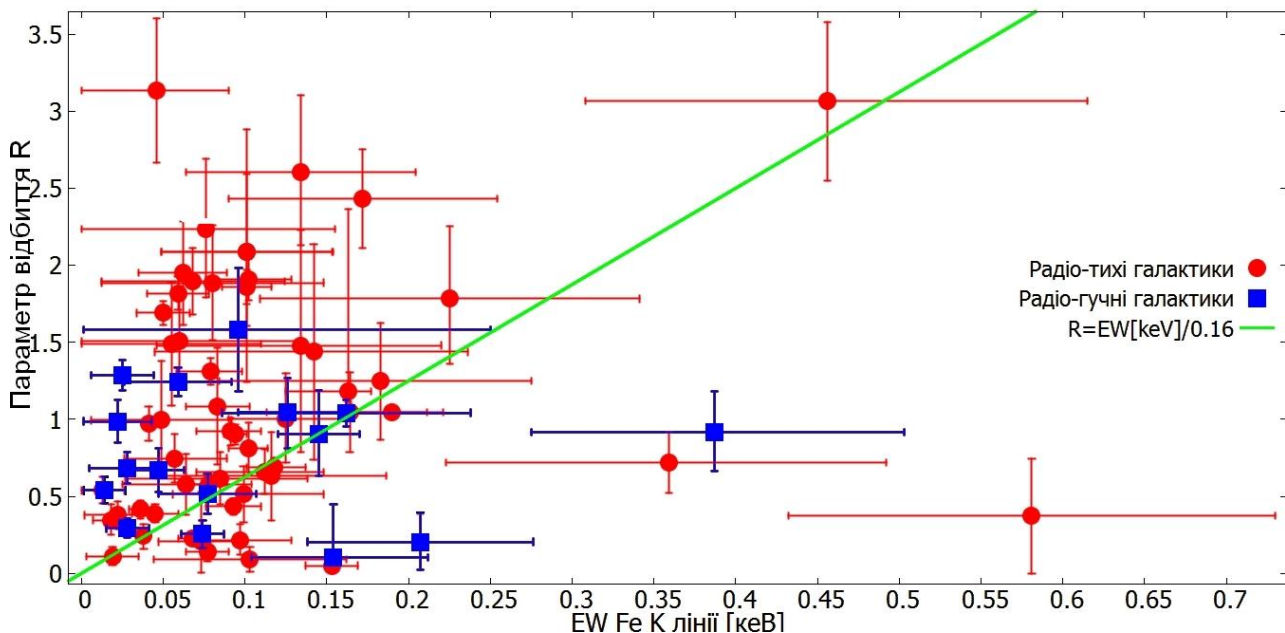


Рис. 2. Значення коефіцієнта відбиття як функція еквівалентної ширини емісійної лінії Fe K_{α} . Кружечки – радіо-тихі галактик, квадратики – радіо-гучні.

Для пояснення таких результатів прийнятні декілька сценаріїв. Перший і основний пов'язаний з геометрією чи станом акреційного потоку. Найбільш реалістичною тут є гіпотеза про наявність у радіо-галактиках сильно іонізованого акреційного диска (частковий випадок – наявність «іонізованого тора» в

центральної частині [44]) або акреційного диска зі станом ефективно не випромінювальної адвекції у центральних частинах [38]. У такому випадку, ми матимемо дуже слабку лінію заліза або її відсутність при малому значенні відбиття. Альтернативним джерелом випромінювання в лінії тоді є далекі зовнішні області акреційного диска, які можуть бути менш іонізовані. Дві інші гіпотези вказують на можливу анізотропії опромінювання поверхні акреційного диска, тобто складну геометрію корони [35] або варіацію вмісту заліза у сторону зменшення [34]. Деякі автори вказують на існування зламу при $\Gamma = 2$, до якого значення EW_{FeK} збільшується, а після – зменшується (наприклад [39]), тому, враховуючи, що певна залежність між Γ та R існує, сумарний ефект може давати неоднозначні результати.

Залежність « $N_{\text{H}} - EW_{\text{FeK}}$ » найчастіше використовують для часткового визначення області утворення емісійної лінії Fe K_{α} (наприклад [25, 26, 54]). При цьому існує можливість розділити внесок випромінювання від акреційного диска та газопилового тора шляхом аналізу поведінки еквівалентної ширини від величини поглинання. У дисертації було використано дані для 68 галактик, в основному типу Сейферт 2. При дослідженні цієї залежності виявлено, що до значення поглинання $N_{\text{H}} = 10^{23.5} \text{ см}^{-2}$, EW_{FeK} значуще не змінюється, її середнє значення $EW_{\text{FeK}} = 92.6 \pm 7.3 \text{ еВ}$. Підгонка залежності функцією $EW(N_{\text{H}}) = EW_0 \exp(\sigma_{\text{Fe}} N_{\text{H}})$ виявила задовільний опис експериментальних даних – збільшення еквівалентної ширини зі зростанням поглинання. Ця крива описує випадок, коли лінія Fe K_{α} утворюється внаслідок відбиття або від стінок газопилового тора, або від хмаринок області широких ліній за наявності поглиначя, який не перетинає промінь зору, але при цьому він поглинає частину випромінювання в континуумі. Не дивлячись на те, що отримана картина з ототожненням областей генерації лінії Fe K_{α} загалом самоузгоджена, існують спостережні та фізичні фактори, які вказуються на те, що область широких ліній, якщо і є одним із джерел емісії лінії, то лише в окремих випадках. Про це потрібно пам'ятати при детальному вивченні індивідуальних джерел. Результат аналізу залежності « $N_{\text{H}} - EW_{\text{FeK}}$ » узгоджується з загальноприйнятими уявленнями, що в галактиках із сильним поглинанням $N_{\text{H}} > 10^{23.5} \text{ см}^{-2}$ лінія Fe K_{α} може випромінюватися відбиттям від газопилового тора. При малій величині поглинання $N_{\text{H}} < 10^{23.5} \text{ см}^{-2}$ переважна більшість ліній Fe K_{α} утворюється у середовищі, ближчому до чорної діри, наприклад області широких ліній, акреційному диску, газопиловому торі, який не перетинає лінію променя зору, або ж далеко від ядра, у міжзор'яному середовищі.

У цьому розділі ми також дослідили актуальну та одночасно суперечливу можливу антикореляцію між внутрішньою (виправленою за поглинання) світністю та EW_{FeK} для радіо-тихих галактик типу Сейферт 1 (т.зв. ефект Балдвіна [21]). Пошук рентгенівського ефекту Балдвіна виконувався для двох енергетичних відрізків – 2–10 кеВ та 20–100 кеВ. У нашій вибірці, яка містить 41 галактику, ефект не є абсолютно підтверджений, але й не можна стверджувати про його повну відсутність. При перевірці ефекту для енергетичного діапазону 2–10 кеВ лінійна залежність має вигляд $\log(EW) = (-0.18 \pm 0.05) \cdot \log(L_{\text{corr}}) + (9.81 \pm 2.38)$. Коефіцієнт кореляції має значення $r = -0.55 \pm 0.12$, тобто антикореляція є, хоча вона й не дуже значна. Для енергетичного діапазону 20–100 кеВ лінійна залежність має вигляд

$\log(EW) = (-0.14 \pm 0.06) \cdot \log(L_{corr}) + (8.08 \pm 2.54)$, коефіцієнт кореляції має значення $r = -0.40 \pm 0.15$, тобто антикореляція для жорсткого рентгенівського діапазону слабкіша. Зауважимо, що наша вибірка охоплює не дуже широкий діапазон світностей. Також зазначимо, що галактики з великим поглинанням важче реєструються, хоча насправді їх ядро може бути яскравим. Ці ефекти селекції сильно впливають на реєстрацію ефекту Балдвіна.

У п.2.4 перевірено відповідність розподілів отриманих значень спектральних параметрів та їх середніх значень уніфікованій схемі ядра активної галактики.

Уніфікована схема активних ядер передбачає наявність у кожному активному ядрі надмасивної чорної діри, акреційного диска та таких структур навколо них, як газопиловий тор та області широких і вузьких ліній. У стандартному формулюванні ця схема приводить до низки спостережних передбачень (наприклад [25, 45, 48]), які можна перевірити і, відповідно, за допомогою даних від рентгенівських обсерваторій надати відповідь на питання, чи є ця схема повністю правильною. Завдяки великій кількості та відносно високій якості даних, у дисертації перевірено декілька таких передбачень, а саме: передбачення про зміну поглинання, однаковість фотонного індексу та енергії обрізання, збільшення значення R від Сейфертів типу 2 до 1. У дисертації також вивчено зміну значення еквівалентної ширини лінії Fe K $_{\alpha}$. Для цього ми дослідили показники гістограм для кожного параметра за сейфертівськими типами та застосували до відповідних вибірок статистичний тест за критерієм Колмогорова–Смірнова для двох вибірок.

Таблиця 1

Результати тесту за критерієм Колмогорова–Смірнова двох вибірок для їх статистичного порівняння. D – максимальна різниця між розподілами вибірок, p – ймовірність нульової гіпотези, тобто того, що вибірки мають однаковий розподіл.

Параметр	Медіанне значення		D	p
	Сейферт 1	Сейферт 2		
Γ	1.76	1.55	0.44	$1.2 \cdot 10^{-4}$
R	0.97	0.9	0.12	0.86
$E_{\text{cut-off}}$	108	101	0.13	0.96
EW_{FeK}	71	129	0.42	$8.6 \cdot 10^{-4}$
$N_{\text{H}} (10^{22} \text{ см}^{-2})$	0.42	12.59	0.57	$1.7 \cdot 10^{-5}$

Як виявилось, стандартна уніфікована модель не описує весь спостережний діапазон змін величин параметрів. Значення фотонного індексу систематично нижче для типу Сейферт 2, а значення відносного відбиття R , – навпаки, систематично вище для цього типу. Одночасно у дисертації показано, що енергії обрізання для Сейфертів 1 та 2 справді порівнянні, на відміну від більш ранніх робіт [27].

Відмітимо, що для повноти розгляду у дисертації наведено приклади індивідуальних характеристик низки об'єктів, які демонструють, що узагальнені уявлення для всіх АЯГ можна використовувати з обережністю і приймати лише як середні значення характеристик активних ядер.

Результати даного розділу опубліковано в роботах [2, 5, 7].

Головною метою розділу 3 «Особливості рентгенівського спектру активного ядра галактики NGC 1194 типу Сейферт 2. Можливість наявності в ядрі подвійної надмасивної чорної діри» є обробка та фізична інтерпретація спектру рентгенівського випромінювання активного ядра галактики NGC 1194 типу Сейферт 2 в області емісійних ліній заліза 5.5–7 кеВ.

В розділі аналізуються рентгенівські дані спостережень супутників XMM–Newton та INTEGRAL у діапазонах енергій 2.5–12 кеВ та 20–250 кеВ відповідно.

У п.3.2 наведено основні відомості про галактику NGC 1194, її спостережні особливості, які були виявлені різними авторами у різних діапазонах хвиль. У п.3.3 описано методику первинної обробки рентгенівського спостереження для отримання спектру галактики NGC 1194.

У п.3.4 наводиться опис аналізу рентгенівського спектру та його результатів.

Апроксимацію континууму рентгенівського спектру NGC 1194 було виконано за допомогою моделі, в якій враховується наявність комптонівського відбиття від акреційного диска, – *regraw* [32]. Детально досліджено діапазон емісійних ліній 5.5–7.0 кеВ, при цьому особлива увага приділяється перевірці наявності релятивістської лінії з енергією ~ 6.51 кеВ. Згідно результатів цього дослідження, висунено можливі варіанти пояснення присутності останньої, серед яких запропоновано гіпотезу про наявність подвійної надмасивної чорної діри (далі – НМЧД) в ядрі галактики NGC 1194 як найбільш ймовірну.

Для аналізу рентгенівського випромінювання галактики NGC 1194 нами було опрацьовано дані спостереження супутника XMM-Newton від 19 лютого 2006 року з тривалістю 14202 с (ID 0307000701). А саме, опрацьовано дані з трьох камер EPIC на борту супутника – PN, MOS1 та MOS2. Ефективна експозиція склала 12 534 с для камери PN, 15 634 с для MOS1 та 15 629 с для MOS2. Ми також використали всі опубліковані дані спостережень (станом на липень 2012 року) супутника INTEGRAL інструмента IBIS/ISGRI галактики NGC 1194, що становить 208 «вікон» (Science Window – *scw*), сумарною тривалістю 1.559 млн с. Ефективна тривалість експозиції спостереження склала 475 456 с.

Спектральний аналіз проводився у діапазоні 2.5–12 кеВ для даних XMM-Newton та 15–250 кеВ для даних супутника INTEGRAL. Для підвищення якості даних XMM-Newton було використано скрипт М. Гунацці (М. Guainazzi) для комбінування спектрів з трьох камер EPIC в один¹. Таким чином, отримано спектр з ефективною експозицією 437 98 сек. з 1533 відліками.

При моделюванні континууму застосовано модель *regraw* з врахуванням додаткового поглинання. Визначена величина поглинання в галактиці NGC 1194 $N_H = 1.08 \cdot 10^{24}$ см⁻² узгоджується з величиною у інших авторів [29]. Також визначено енергію обрізання $E_{\text{cut-off}} \approx 99$ кеВ, яку ще не визначали для цієї галактики.

Далі в дисертації проведено моделювання емісійного комплексу ліній в ділянці 5.0–8.0 кеВ. Ці емісії ототожнено з дублетом ліній Fe K_α (область 6–6.5 кеВ) та лінією ~ 7.0 кеВ, яку ми ототожнюємо з Fe K_β . Остання описується гаусівським профілем з енергією центра 7.008 ± 0.046 кеВ. Профілі ж двох ліній Fe K_α мають виражене зміщення «крил» у червону область (особливо чітко це видно для першої

¹ http://xmm.esac.esa.int/sas/current/documentation/threads/epic_merging.shtml

лінії (лівої на рис. 3)), тобто релятивістський профіль, тому до них була застосована модель *diskline* [28], яка відповідає профілю емісійної лінії в полі шварцшильдівської чорної діри. Ця модель містить такі вільні параметри: енергію лінії, степеневий показник β в залежності поверхневої випромінювальної здатності диска від радіуса $\varepsilon(r) \propto r^{-\beta}$, внутрішній радіус акреційного диска R_{in} (зовнішній радіус R_{out} зафіксовано на величині 400 гравітаційних радіусів) та кут нахилу акреційного диска до променя зору θ . У дисертації визначено енергії та кут нахилу для лінії Fe K_{α} (а) 6.376 ± 0.041 кеВ, $5.76^{\circ} \pm 3.46^{\circ}$ та для Fe K_{α} (б) 6.514 ± 0.047 кеВ і $19.84^{\circ} \pm 3.67^{\circ}$.

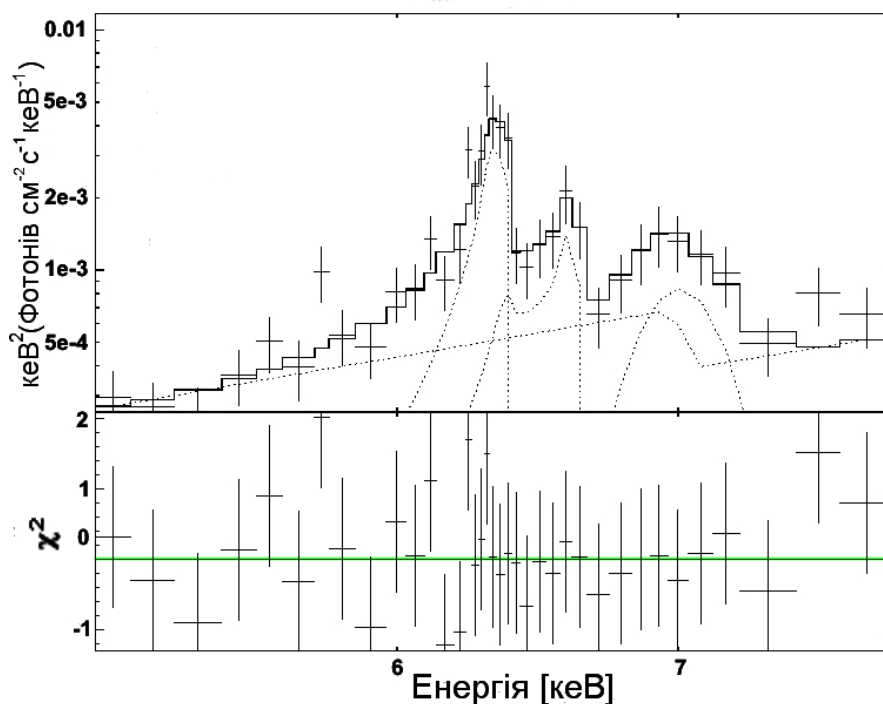


Рис. 3. Комплекс емісійних ліній заліза (зліва направо): дві релятивістські лінії Fe K_{α} та лінія з гаусівським профілем Fe K_{β} . Діапазон енергій 5–8 кеВ.

Основним новим елементом у цьому розділі дисертації є наявність другої релятивістської лінії Fe K_{α} (б) 6.514 ± 0.047 та те, що лінія Fe K_{α} (а) 6.376 ± 0.041 кеВ також описується релятивістським профілем, але з відмінними параметрами.

Для перевірки того, чи релятивістський профіль краще описує профіль лінії Fe K_{α} (а), аніж гаусівський, ми скористались тестом Фішера, який показав значення параметра $F \approx 19$ або ймовірність $\ll 0.01\%$ для наявності гаусіани. Тобто релятивістський профіль лінії є суттєво більш адекватним у порівнянні з гаусівським профілем. Друга лінія Fe K_{α} (б) значно слабша, і тому у дисертації перевірено ймовірність існування цієї лінії. Було проведено два тести. По-перше, виконано підгонку спостережуваних даних без лінії Fe K_{α} (б) 6.51 кеВ (нульова гіпотеза) та з нею. У першому випадку значення критерію хі-квадрат склало $\chi^2 = 62.8$. У другому випадку – $\chi^2 = 41.8$ і $\Delta\chi^2_{\text{exper}} = 62.8 - 41.8 = 21$. Тест Фішера дає при цьому ймовірність присутності лінії 6.51 кеВ 99.99%. Але, як відмічено у роботах [42, 43], даний тест є ефективним лише у випадку, коли відомо точне положення лінії, інакше ймовірність буде значно завищеною. Тому в дисертації виконано

другий тест на присутність лінії, подібно до робіт [41, 42], з використанням симуляції Монте-Карло. Як нульова гіпотеза був обраний спектр, який описується параметрами підгонки реальних даних без включення компоненти лінії 6.51 кеВ. У межах тесту за методикою робіт [41, 42] значущість додаткової лінії складає 80%.

У п.3.5 аналізуються можливі пояснення ефекту присутності двох релятивістських профілей ліній Fe K_{α} .

Наявність двох ліній з релятивістськими профілями в області 6 кеВ природно пояснити присутністю двох акреційних дисків навколо відповідних чорних дір, які утворюють подвійну систему в центрі АЯГ NGC 1194. За результатами нашої апроксимації лінії Fe K_{α} (а) 6.37 кеВ має $EW = 561$ еВ, а Fe K_{α} (б) 6.51 кеВ – 459 еВ. Це відповідає типовим проявам подвійної системи чорних дір [54], а саме: дві емісійні лінії мають енергію відповідно трохи більшу та меншу, аніж власна енергія випромінювання нейтрального заліза Fe K_{α} 6.40 кеВ, до того ж лінія з меншою енергією випромінювання має більшу еквівалентну ширину, аніж та, що зміщена в синю область. Враховуючи це, ми розглядаємо гіпотезу про існування у ядрі галактики NGC 1194 подвійної надмасивної чорної діри як найбільш узгоджену з присутністю у спектрі двох релятивістських ліній Fe K_{α} .

Зазначимо також менш ймовірні альтернативні варіанти. Перший – можна припустити, що лінія 6.38 кеВ є насправді розсіяним випромінюванням лінії 6.51 кеВ. Матеріал розсіювача може бути представлений середовищем області хмар широких ліній чи вітром від акреційного диска. Ці сценарії були розглянуті у роботах [50, 53]. Другий варіант – одна з ліній заліза утворюється внаслідок відбиття випромінювання іншої від внутрішніх викривлених частин акреційного диска. Найбільш відомі причини викривлення є гравімагнітно спричинений ефект Бардена–Петерсона (внутрішня частина акреційного диска лежить в екваторіальній площині чорної діри, а зовнішня – ні), описаний в роботі [22]. Ці варіанти можливі, але вони вимагають «тонкого налаштування» параметрів. Наприклад, при розсіянні чи відбитті випромінювання форма вторинної лінії може бути сильно розширеною внаслідок дисперсії швидкостей розсіюючого матеріалу. На противагу цим варіантам випадки, для пояснення яких необхідно звертатись саме до моделі з двома чорними дірами, не поодинокі, наприклад [24, 31].

Результати даного розділу опубліковано в роботах [1, 6].

Головною метою розділу 4 «Дослідження рентгенівського спектру активного ядра галактики NGC 3281 типу Сейферт 2 в широкому діапазоні 0.2–150 кеВ» є аналіз та фізична інтерпретація рентгенівського спектру галактики з активним ядром типу Сейферт 2 NGC 3281.

В розділі проаналізовано рентгенівські дані спостережень супутників XMM-Newton та INTEGRAL у діапазонах енергій 0.2–12 кеВ та 20–150 кеВ відповідно.

У п. 4.2 наведено основні відомості про NGC 3281, її спостережні особливості, які були виявлені різними авторами у різних енергетичних діапазонах. Також наведено основні труднощі, які виникають при трактуванні особливостей рентгенівського випромінювання цієї галактики.

У п. 4.3 описано методику первинної обробки рентгенівського спостереження для отримання спектру галактики.

У п. 4.4 наведено спектральний аналіз рентгенівського випромінювання галактики NGC 3281 та його результати.

NGC 3281 є близькою спіральною галактикою з невеликим червоним зміщенням $z \approx 0.0107$ і має класифікацію активного типу Сейферт 2. Зі спостережень супутників ASCA [47], ВерроSAX [52], наземних телескопів, таких як Gemini-South [46], зроблено висновки, що галактика NGC 3281 має не суцільний пиловий тор, а комковату структуру з хмаринок, зосереджених на екваторі і розташованих у великому за розміром, але низькому за густиною матеріалі. Безпосередньо ці результати зі спектрального аналізу у рентгенівському діапазоні раніше не підтверджувалися; у дисертації це зроблено вперше.

Для вивчення рентгенівського випромінювання галактики NGC 3281 ми використали спостереження від 1 травня 2011 року супутника XMM-Newton (ID 0650591001), виконане Л. Базані (L. Bassani), із загальним часом експозиції 23 715 с. Було використано скрипт М. Гунацці (M. Guainazzi) для комбінування спектрів з трьох камер EPIC в один для отримання максимально можливого значення відношення сигнал-шум в енергетичному діапазоні 0.2–12.0 кеВ. Ефективна експозиція склала 21 848 с. Також в дисертації було опрацьовано усі 186 опублікованих спостережних «вікон» (станом на 02.2012 року) інструмента IBIS/ISGRI супутника INTEGRAL з сумарною експозицією 341 тис. с. Спектральний аналіз проводився у діапазоні 0.2–12 кеВ для супутника XMM-Newton та 15–150 кеВ для INTEGRAL.

Для аналізу рентгенівського спектру NGC 3281 у дисертації використано дві різні моделі відтворення континууму: (А) – «стандартна» модель відбиття від диска рехгав [32] та (Б) – нова модель MYTorus [37], яка описує відбиття від газопилового тора та має можливість визначати його основні геометричні параметри. Також наведено та проаналізовано 70-місячну рентгенівську криву блиску галактики, отриману супутником Swift/BAT.

Сумарна Модель А, окрім компоненти континууму рехгав [32] як степеневого закону з експоненційним завалом на високих енергіях та комптонівського «відбиття» від холодного диска, включає у себе також Галактичне поглинання, внутрішнє поглинання з фактором перекриття, теплове випромінювання у «м'якому» рентгені, емісійну лінію з гаусівським профілем (Fe K_α).

За результатами апроксимації Модель А показала гарний рівень $\chi^2/\text{d.o.f.} = 1.08$. Визначено величину поглинання $N_{\text{H}} = 5.38 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$, що означає, що галактика, ймовірно, належить до типу «злегка» закритою поглиначем [45], але не до типу Сейферт 2 з сильним поглинанням. Отримане значення параметра відносного відбиття $R \approx 166$ у моделі рехгав є не фізичним, якщо він визначається з геометричних міркувань як відношення $R = \Omega/2\pi$. Одне з головних пояснень великого значення R полягає у тому, що частина випромінювання джерела блокується матеріалом, який частково перебиває джерело з ефективністю пропускання $\sim 1/R$ [51]. Така картина може реалізовуватися у випадку відбиття від окремих хмаринок газопилового тора.

В рентгенівському спектрі NGC 3281 виявлено дві емісійні лінії, кожна з яких описується гаусіаною з енергіями 6.39 кеВ та 7.45 кеВ, і які можуть бути інтерпретовані як лінії випромінювання нейтральних Fe K_α та Ni K_α відповідно. З

огляду на значення $FWHM$ для $Fe K_{\alpha} \sim 5500$ км/с та $Ni K_{\alpha} \sim 11000$ км/с та значення EW для $Fe K_{\alpha} = 526 \pm 4$ еВ та $Ni K_{\alpha} = 251 \pm 130$ еВ можна було б припустити, що $Fe K_{\alpha}$ утворюється далеко від центральної НМЧД, найімовірніше всередині газопилового тора, а $Ni K_{\alpha}$ – на його внутрішній межі. Але еквівалентна ширина лінії $Ni K_{\alpha}$ у цьому випадку є занадто великою для такої інтерпретації.

Область спектру в діапазоні < 2 кеВ може бути описана моделлю *mekal* – тепловим випромінюванням від гарячого дифузного газу з $kT = 590$ еВ, та теплим поглиначем (модель *wndabs*).

Друга модель – Модель Б – використовує як континуум модель *MYTorus* [37]. Склад додаткових компонент, у порівнянні з Моделлю А, дещо інший – для опису внутрішнього поглинання в NGC 3281 використовується проста модель, без фактору перекриття.

MYTorus включає компоненту внутрішнього випромінювання (від акреційного диска) – компонента «нульового порядку» (zero-order (intrinsic) continuum) – та дві компоненти для комптонівськи розсіяного випромінювання. Суть останніх є спектр відбиття від задньої внутрішньої межі газопилового тора без подальшого поглинання ($0^{\circ}MYTS$) та спектр випромінювання, яке розсіюється чи перевипромінюється на матеріалі тора, ближчого до спостерігача ($90^{\circ}MYTS$). Для опису випромінювання від акреційного диска, використано модель *compTT* [49], яка характеризується температурою та оптичною товщею комптонізуючої плазми (kT та τ відповідно).

Як результат, у цьому розділі дисертації отримано величину поглинання на промені зору $N_H = 2.08 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-2}$, що означає належність галактики NGC 3281 до т.зв. комптон-товстих джерел. Якщо рентгенівське джерело опромінює тор ізотропно, тоді N_H у термінах томпсонівської оптичної товщі $\tau_T = (11/9) N_H \cdot \sigma_T \approx 1.7$ на промені зору. Значення поглинання для компонентів $0^{\circ}MYTS$ та $90^{\circ}MYTS$ $N_H = 5.73 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ та $N_H = 5.99 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$ відповідно, тобто N_H для першої є меншим, аніж для другої. Цей результат означає, що випромінювання, відбите від дальньої стінки тора, пройшло через зону пониженої густини. Або, іншими словами, через «дірки» у густому матеріалі тора. Цей результат отримано у рентгенівському діапазоні для NGC 3281 вперше.

Модель *compTT* дозволила нам визначити значення температури плазми та оптичну товщу середовища випромінювання континууму – $kT = 40$ кеВ та $\tau \approx 2.5$ відповідно.

У Моделі Б параметри емісійних ліній дещо відрізняються від значень, отриманих у Моделі А (нормування, EW та $FWHM$). Для лінії $Fe K_{\alpha}$ значення $EW = 589 \pm 54$ еВ є дещо більшим, аніж для Моделі А. Значення ж $FWHM \approx 4600$ км/с є, навпаки, меншим. У лінії $Ni K_{\alpha}$ зменшилось значення нормування та еквівалентна ширина $EW = 176 \pm 73$ еВ. Важливо, що отримані менші величини EW повністю узгоджуються з результатами чисельного моделювання утворення обох ліній для отриманого N_H на промені зору [37, 56].

Для перевірки інтерпретації рентгенівського спектру галактики NGC 3281 ми провели порівняльний аналіз спектру для галактики Сейферт 1.9 Mrk 1498 використовуючи дані супутників XMM-Newton та Swift/BAT у діапазоні 0.2–150 кеВ. Підгонка спектру з використанням моделі континууму *reghav* виявила

значно менше значення параметра відбиття $R = 1.43$. При застосуванні моделі *MYTorus* виявилось, що для опису спектру достатньо компоненти *MYTorusZ* (внутрішній континуум як степеневий закон) та лише однієї компоненти відбитого випромінювання *MYTorusS* з фіксованим кутом нахилу 90° . Останнє означає розташування поглинаючого середовища ребром до променя зору. Величини поглинання для кожної з цих компонент відрізняються. Такі особливості моделі *MYTorus* означають наявність навколо активного ядра галактики Mrk 1498 тонкого газопилового тора у вигляді суцільного кільця («бублика») (згідно [55]), який відповідає за поглинання на промені зору $N_H = 1.41 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$ та для відбитого випромінювання $N_H = 7.03 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$. Присутнє також додаткове середовище, яке є більш віддалене та менш густе $N_H = 3.87 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Отриманий результат означає, що очікуваними є різні рентгенівські криві блиску NGC 3281 та Mrk 1498 на довгому проміжку часу, – наявність довгоперіодичних змін для NGC 3281 та їх відсутність для Mrk 1498. Це припущення повністю підтверджується спільним аналізом кривих блиску обох галактик, отриманих під час 70-місячного огляду всього неба супутником Swift/BAT в діапазоні 14–195 кеВ.

Потік від NGC 3281 є сильно змінним на масштабах від місяців до років, показуючи динамічний діапазон з множителем ~ 5 між найменшим та найбільшим значенням. Останнє чітко свідчить про періодичне зменшення-збільшення внеску комптон-розсіяного континууму в рентгенівський спектр на енергіях вище ~ 10 кеВ, що узгоджується з нашими результатами. Навпаки, на кривій блиску галактики Mrk 1498 потік фактично постійний (~ 0.0015 в одиницях Крабоподібної туманності). Таким чином, графік потоку від Mrk 1498 повністю узгоджується з результатами нашого спектрального аналізу, згідно якого її ядро має газопиловий тор у вигляді тонкого суцільного «бублика» без ознак окремих хмар, які можуть час від часу перекривати випромінювання від ядра і сильно змінювати блиск.

У цьому розділі дисертації показано, що Модель А не враховує коректно відбиття від газопилового тора для галактик Сейферт 2, тобто модель *regraw* у таких випадках є досить грубим наближенням і показує нефізичні значення спектральних параметрів. Модель Б, навпаки, задовільно описує різні перетворення випромінювання внаслідок взаємодії з газопиловим тором. Але одночасно Модель Б дещо гірше описує поведінку спектру на енергіях вище ~ 60 – 70 кеВ, ніж Модель А. Це може бути зумовлене домінуванням спектру відбиття *від диска* на цих енергіях над спектром відбиття від тора. Модель *compTT* не включає у себе першу компоненту, а додаткове її включення у вигляді ще деякої моделі призводить до виродження параметрів. Тому, не зважаючи на те, що *MYTorus* більш реалістично описує відбите випромінювання від тора, ніж *regraw*, відсутність у її складі компоненти відбиття від акреційного диска може призвести до виникнення труднощів при описі спектру на енергіях десятків кеВ і більше.

Результати даного розділу опубліковані в роботах [3, 4].

У додатку А наведено таблиці, які містять: основні характеристики вибірки 95 галактик, такі як відстань, координати, сейфертівський тип та параметри спостережень супутниками XMM-Newton та INTEGRAL/IBIS; результати спектрального аналізу рентгенівського випромінювання галактик вибірки з поділом на типи Сейферт 1 та 2.

ВИСНОВКИ

Основні результати дисертаційної роботи такі:

1. Створено оригінальну вибірку даних для 95 галактик з активними ядрами на основі огляду всього неба супутником Swift/BAT. Специфікою вибірки є можливість одночасної побудови та аналізу рентгенівських спектрів у діапазоні 0.5–250 кеВ за даними спостережень супутників XMM-Newton та INTEGRAL у діапазоні 0.5–250 кеВ, що й було зроблено у дисертації. Отримано значення відповідних спектральних параметрів та оцінено їх кореляції.

2. Підтверджено, що величини енергії експоненційного обрізання, стовпчикowego поглинання та еквівалентної ширини лінії Fe K_{α} для обох типів Сейфертів 1 та 2 в цілому відповідають уніфікованій схемі АЯГ. Разом із тим, значення параметрів фотонного індексу Γ та відносного відбиття R свідчать про індивідуальну специфіку конкретних АЯГ. На матеріалі даної вибірки виявлено тенденції систематично вищого значення параметра відбиття R при малих фотонних індексах Γ для галактик типу Сейферт 2 у порівнянні з типом Сейферт 1. Також для параметра відбиття R виявлено тенденцію зміщення в бік менших значень у радіогучних галактиках у порівнянні з радіо-тихими, до того ж радіо-гучні галактики характеризуються меншим значенням еквівалентної ширини лінії Fe K_{α} при даному значенні R .

3. У рентгенівському спектрі NGC 1194 вперше, з ймовірністю 80%, розділено лінію в інтервалі 6.3–6.5 кеВ на дві компоненти з енергіями 6.38 ± 0.04 кеВ та 6.51 ± 0.05 кеВ, які можна описати релятивістськими профілями. На цій основі висунуто гіпотезу, що у центрі ядра галактики NGC 1194 міститься подвійна надмасивна чорна діра з окремими акреційними дисками.

4. Вперше зазначено, що форма рентгенівського спектру галактики NGC 3281 узгоджується з моделлю газопилового тора як структури, що містить окремі хмаринки; отримано оцінки його фізичних та геометричних параметрів. Знайдені значення еквівалентної ширини ліній Fe K_{α} та Ni K_{α} узгоджуються зі сценарієм їх формування у газопиловому торі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

у журналах, що входять до списку ДАК України:

1. Василенко А. Визначення параметрів ядра активної галактики NGC 1194 / Василенко А. // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія «Астрономія». – 2012. – В. 49. – С. 28–31.
2. Тугай А.В. Рентгенівські спектри АЯГ з сильними емісійними лініями / Тугай А.В., Василенко А.А., Заєць Т.А. // Вісник астрономічної школи. – 2012. – Т. 8, №2. – С. 160–165.
3. Василенко А.А. Особливості рентгенівського спектру активного ядра галактики Mrk 1498 / Василенко А.А., Федорова О.В., Жданов В.І. // Вісник астрономічної школи. – 2013. – Т. 9, №1. – С. 80–84.

4. Vasylenko A. A. Observations of Sy2 galaxy NGC 3281 by XMM-Newton and INTEGRAL satellites / Vasylenko A. A., Fedorova E., Zhdanov V. I. // AASP. – 2013. – Vol. 3, Iss.2. – P. 120–125.
5. Василенко А. Рентгенівські спектральні параметри для 65 галактик за даними каталогу Swift/BAT AGNs / Василенко А., Федорова О., Жданов В. // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія «Астрономія». – 2014. – В. 51. – С. 22–31.
6. Василенко А.А. Признаки двойной черной дыры в активном ядре NGC 1194? / Василенко А.А., Федорова Е.В., Гнатык Б.И., Жданов В.И. // Кинематика и физика небесных тел. – 2015. – Т. 31, №1. – С. 22–31.

в електронних виданнях, матеріалах та тезах конференцій:

7. Vasylenko A.A. X-ray spectral parameters for a sample of 95 Active Galactic Nuclei / Vasylenko, V.I. Zhdanov, E.V. Fedorova // 2015. – Режим доступу до журналу <http://arXiv.org/abs/1501.04555>. – 18 с.
8. Vasylenko A. A. Signatures of a double black hole in active galactic nucleus NGC 1194 / Vasylenko A.A., Fedorova E.V., Hnatyk B.I., Zhdanov V.I. // Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology and gravitation, cosmomicrophysics, radio-astronomy and astrobiology (Odessa. 19-25 August 2013). Book of Abstracts. – P. 32.
9. Vasylenko A. Determination of parameters of the active nucleus in NGC 1194 galaxy / Vasylenko A. // 19th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, 23-28 April 2012). Book of Abstracts. – P.32.
10. Vasylenko A. Studying the X-ray properties of Seyfert 1.9 galaxy NGC 1194 with XMM-Newton and INTEGRAL observational data / Vasylenko A., Fedorova E., Zhdanov V. I. // Матеріали наради за результатами виконання цільової комплексної програми фундаментальних досліджень Національної академії наук України «Астрофізичні і космологічні проблеми прихованої маси і темної енергії Всесвіту (Космомікрофізика-2)». – 2012. – С. 58–61.
11. Vasylenko A. Observations of AGN in Sy2 galaxy NGC 3281 by XMM-Newton and INTEGRAL satellites / Vasylenko A.A., E.V. Fedorova, V.I. Zhdanov // 20th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, 22-27 April 2013). Book of Abstracts. – P. 44.
12. Vasylenko A. Dependencies of X-ray spectral parameters for a sample of BAT AGN's / Vasylenko A. // 21th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, 28 April-03 May 2014). Book of Abstracts. – P. 31.
13. Тугай А.В. Рентгенівське випромінювання активних ядер галактик з сильними емісійними лініями / Тугай А.В., Василенко А.А., Заєць Т.А. // Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених» (Кам'янець-Подільський, 15-17 травня 2012 р.). Тези – С. 61.
14. Василенко А.А. Особливості газопилової тороподібної структури активних галактик типу Сейферт 2 NGC 3281 та Mrk 1498 за рентгенівським випромінюванням / Василенко А.А., Федорова О.В., Жданов В.І. // Міжнародна

- наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених» (Біла Церква, 15-17 травня 2013 р.). Тези. – С. 6.
15. Василенко А.А. Двойная черна дыра в активном ядре галактики NGC 1194? / Василенко А.А., Федорова Е.В., Гнатык Б.И., Жданов В.И. // Ukrainian conference of space research (Eupatoria, 2-6 September 2013). Book of abstracts. – P. 100.
 16. Василенко А. Особенности сейфертовской галактики NGC1194: две рентгеновские линии Fe-K-альфа? / Василенко А. // «Всероссийская конференция Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва 24-27 декабря 2012 г.). Аннотации докладов. – С. 35–36.
 17. Vasylenko A.A. The X-ray study of parameters of the supermassive black hole in active nuclei galaxy NGC 1194 / Vasylenko A.A., Zhdanov V.I., Fedorova E.V. // Міжнародна конференція, присвячена пам'яті А.В. Манджоса «Астрономія та фізика космосу в Київському університеті» (Київ, 22-25 травня 2012 р.). Тези. – С. 33.
 18. Vasylenko A.A. Observations of AGNs in Sy 1.9 Mrk 1498 and Sy2 NGC 3281 galaxies with XMM-Newton and INTEGRAL / Vasylenko A.A., Zhdanov V.I., Fedorova E.V. // Міжнародна конференція «Астрономія та фізика космосу в Київському університеті» (Київ, 21-24 травня 2013 р.). Тези. – С. 33.
 19. Vasylenko A.A. X-ray spectral parameters for a sample of 61 AGNs / Vasylenko A.A., Zhdanov V.I., Fedorova E.V. // Міжнародна конференція «Астрономія та фізика космосу в Київському університеті» (Київ, 27-30 травня 2014 р.). Тези. – С. 41.
 20. Василенко А.А. Залежності головних рентгенівських спектральних параметрів 95 АЯГ каталогу SWIFT/BAT AGNs // Василенко А.А., Жданов В.І. / Сьома міжнародна наукова конференція пам'яті Б.Т.Бабія (Львів 7-10 жовтня 2014 р.). Тези. – С. 37.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

21. Baldwin J. A. Luminosity indicators in the spectra of quasi-stellar objects / Baldwin J.A. // *Astrophys. J.* – 1977. – Vol. 214. – P. 679–684.
22. Bardeen J. M. The Lense-Thirring effect and accretion disks around Kerr black holes / Bardeen J. M., Petterson J. A. // *Astrophys. J. Lett.* – 1975. – Vol. 195. – P. 65–67.
23. Beloborodov A. M. Plasma ejection from magnetic flares and the x-ray spectrum of Cygnus X-1 / Beloborodov A. M. // *Astrophys. J.* – 1999. – Vol. 510. – P. 123–126.
24. Bon E. The first spectroscopically resolved sub-parsec orbit of a supermassive binary black hole / Bon E., Jovanovic P., Marziani P., et al. // *Astrophys. J.* – 2012. – Vol. 759, Iss. 2. – P. 118–126.
25. Dadina M. Seyfert galaxies in the local Universe ($z \leq 0.1$): the average X-ray spectrum as seen by BeppoSAX / Dadina M. // *Astron. and Astrophys.* – 2008. – Vol. 485. – P. 417–424.
26. De Rosa A. Broad-band study of hard X-ray-selected absorbed active galactic nuclei / De Rosa A., Panessa F., Bassani L., et al. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2012. – Vol. 420. – P. 2087–2101.

27. Deluit S. The intrinsic emission of Seyfert galaxies observed with BeppoSAX/PDS / Deluit S., Courvoisier T. J.-L. // *Astron. and Astrophys.* – 2003. – Vol. 399. – P. 77–90.
28. Fabian A. C. X-ray fluorescence from the inner disc in Cygnus X-1 / Fabian A. C., Rees M. J., Stella L., et al. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 1989. – Vol. 238. – P. 729–736.
29. Greenhill L. J. Relevance of high X-ray obscuring columns among AGNs that host H₂O masers / Greenhill L. J., Tilak A., Madejski G. // *Astrophys. J.* – 2008. – Vol. 686, Iss.1. – P. 13–16.
30. Guainazzi M. On the driver of relativistic effect strength in Seyfert galaxies / Guainazzi M., Bianchi S., de la Calle Perez I., et al. // *Astron. and Astrophys.* – 2011. – Vol. 531. – P. 131–144.
31. Iguchi S. A very close binary black hole in a giant elliptical galaxy 3C 66B and its black hole merger / Iguchi S., Okuda T., Sudou H. // *Astrophys. J. Lett.* – 2010. – Vol. 724. – P.166–170.
32. Magdziarz P. Angle-dependent Compton reflection of X-rays and gamma-rays /Magdziarz P., Zdziarski A. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 1995. – Vol. 273. – P.837–848.
33. Malzac J. Reflection at large distance from the central engine in Seyferts / Malzac J., Petrucci P.O. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2002. – Vol. 336,Iss. 4. – P. 1209–1216.
34. Matt G. Geometrical and chemical dependence of K-shell X-ray features / Matt G., Fabian A.C., Reynolds C.S. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 1997. – Vol. 289,Iss. 1. – P. 175–184.
35. Molina M. A broad-band spectral analysis of eight radio-loud type 1 active galactic nuclei selected in the hard X-ray band / Molina M., Bassani L., Malizia A., et al.// *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2008. – Vol. 390. – P. 1217–1228.
36. Molina M. The INTEGRAL complete sample of type 1 AGN / Molina M., Bassani L., Malizia A., et al. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2009. – Vol. 399. – P. 1293–1306.
37. Murphy K.D. An X-ray spectral model for Compton-thick toroidal reprocessors / Murphy K.D., Yaqoob T. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2009. – Vol. 397 – P. 1549–1562.
38. Narayan R. Advection-dominated accretion: a self-similar solution / Narayan R., Yi I.// *Astrophys. J.* – 1994. – Vol. 428. – P. 13–16.
39. Perola G. C. Compton reflection and iron fluorescence in BeppoSAX observations of Seyfert type 1 galaxies / Perola G. C., Matt G., Cappi M., et al. // *Astron. and Astrophys.* – 2002. – Vol. 389. – P. 802–811.
40. Petrucci P.O. Testing Comptonization Models Using BeppoSAX Observations of Seyfert 1 Galaxies / Petrucci P.O., Haardt F., Maraschi L. // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 556, Iss. 2. – P. 716–726.
41. Porquet D. An XMM-Newton view of the X-ray flat radio-quiet quasar PG1416-129 / Porquet D., Reebes J. N., Markowitz A., et al. // *Astron. and Astrophys.* – 2007. – Vol. 466, Iss.1. – P.23–30.

42. Porquet D. XMM-Newton observation of the Seyfert 1.8 ESO113-G010: Discovery of a highly redshifted iron line at 5.4 keV / Porquet D., Rees J. N., Uttley P., et al. // *Astron. and Astrophys.* – 2004. – Vol. 427. – P. 101–105.
43. Protassov R. Statistics, handle with care: detecting multiple model components with the likelihood ratio test / Protassov R., David A., Connors A., et al. // *Astrophys. J.* – 2002. – Vol. 571, Is.1. – P.545–559.
44. Rees M. J. Ion-supported tori and the origin of radio jets / Rees M. J., Begelman M. C., Blandford R.D., et al. // *Nature.* – 1982. – Vol. 295. – P. 17–21.
45. Ricci. C. Reflection in Seyfert galaxies and the unified model of AGN / Ricci. C., Walter R., Courvoisier T. J.-L., et al. // *Astron. and Astrophys.* – 2011. – Vol. 532. – P.102–122.
46. Sales D.A. The Compton-thick Seyfert 2 nucleus of NGC 3281: Torus constraints from the 9.7 μm silicate absorption / Sales D.A., Pastoriza M.G., Riffel R., et al.// *Astrophys. J.* – 2011. – Vol. 738 – P. 109–116.
47. Simpson C. Near infrared and X-ray obscuration to the nucleus of the Seyfert 2 galaxy NGC 3281 / Simpson C. // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 509 – P. 653–660.
48. Singh V. X-ray spectral properties of Seyfert galaxies and the unification scheme / Singh V., Shastri P., Risaliti G. // *Astron. and Astrophys.* – 2011. – Vol. 532. – P. 84–99.
49. Titarchuk L. Generalized Comptonization models and application to the recent high-energy observations / Titarchuk L. // *Astrophys. J.* – 1994. – Vol. 434, № 2. – P. 570–586.
50. Turner T. J. ASCA observations of type 2 Seyfert galaxies. III. Orientation and X-ray absorption / Turner T. J., George I. M., Nandra K., et al. // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 493. – P. 91–101.
51. Ueda Y. Suzaku observations of Active Galactic Nuclei detected in the Swift BAT survey: Discovery of a “New Type” of buried supermassive black holes / Ueda Y., Eguchi S., Terashima Y., et al. // *Astrophys. J.* – 2007. – Vol. 664, Is. 2. – P. 79–82.
52. Vignali C. Disclosing the true nature of the Sy 2 galaxy NGC 3281: One more Compton-thick source / Vignali C., Comastri A. // *Astron. and Astrophys.* – 2002. – Vol. 381 – P. 834–840.
53. Wang J. The broad Fe K-Line profile in NGC 4151 / Wang J., You-Yuan Z., Ting-Guiet W. // *Astrophys. J.* – 1999. – Vol. 523. – P. 129–132.
54. Winter L. M. X-ray spectral properties of the BAT AGN sample / Winter L. M., Mushotzky R. F., Reynold C. S., et al. // *Astrophys. J.* - 2009. – Vol. 690. – P. 1322–1349.
55. Yaqoob T. The nature of the Compton-thick X-ray reprocessor in NGC 4945 / Yaqoob T. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2012. – Vol. 423, Is. 4. – P. 3360–3396.
56. Yaqoob T. Monte Carlo simulations of the nickel K_{α} fluorescent emission line in a toroidal geometry / Yaqoob T., Murphy K.D. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* - 2011. – Vol. 412 – P. 1765–1770.
57. Yu Q. Fe K_{α} line: A tool to probe massive binary black holes in Active Galactic Nuclei? / Yu Q., Lu Y. // *Astron. and Astrophys.* – 2001. – Vol. 377. – P. 17–22.

58. Zdziarski A. A. Correlation between compton reflection and X-ray slope in Seyferts and X-ray binaries / Zdziarski A. A., Lubinski P., Smith D. A. // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1999. – Vol. 303. – P. 11–15.

АНОТАЦІЯ

Василенко А.А. Особливості спектрів рентгенівського випромінювання активних ядер галактик в діапазоні енергій 0.5–250 кеВ. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія. – Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2015.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню рентгенівських спектрів активних ядер галактик (АЯГ) у діапазоні енергій 0.5–250 кеВ на основі вибірки з 95 об'єктів. Для галактик вибірки отримано параметри рентгенівських спектрів за даними супутників XMM-Newton та INTEGRAL/IBIS, побудовані взаємні залежності фотонного індексу Γ , параметра відносного відбиття R , енергії експоненційного обрізання $E_{\text{cut-off}}$, еквівалентної ширини лінії $EW \text{ Fe } K_{\alpha}$ та стовпчикової густини N_{H} . Проведено кореляційний аналіз як для усієї вибірки, так і окремо у залежності від радіо-гучності галактик та від сейфертівських типів АЯГ. Вперше виявлено тенденцію про систематично вище значення параметра R за малих Γ для Сейфертів 2 у порівнянні з Сейфертами 1. Показано, що R має менші значення у радіо-гучних галактиках у порівнянні з радіо-тихими, а $EW \text{ Fe } K_{\alpha}$ у радіо-гучних галактиках при фіксованому значенні R менші, аніж у радіо-тихих. У цілому проведений аналіз свідчить про індивідуальну специфіку АЯГ, яка виходить за рамки уніфікованої схеми Антонуччі – Міллера.

У рентгенівському спектрі галактики NGC 1194 вперше розділено лінію в інтервалі енергій 6.3–6.5 кеВ на дві компоненти з енергіями 6.38 ± 0.04 кеВ та 6.51 ± 0.05 кеВ, які можна описати релятивістськими профілями для випадку шварцшильдівської чорної діри. Запропоновано гіпотезу, згідно якої у центрі ядра галактики NGC 1194 міститься подвійна надмасивна чорна діра з окремими акреційними дисками.

Вперше виявлено, що форма рентгенівського спектру галактики NGC 3281 узгоджується з моделлю газопилового тора як структури з окремих хмаринок; отримано оцінки його фізичних та геометричних параметрів. Отримано еквівалентну ширину емісійних ліній нікелю $\text{Ni } K_{\alpha}$ та заліза $\text{Fe } K_{\alpha}$ і показано, що її значення відповідає зазначеній моделі.

Ключові слова: активні ядра галактик, акреційний диск, газопиловий тор, спектр рентгенівського випромінювання, лінія $\text{Fe } K_{\alpha}$.

АННОТАЦИЯ

Василенко А.А. Особенности спектров рентгеновского излучения активных ядер галактик в диапазоне энергий 0.5–250 кэВ. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия. – Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2015.

Работа посвящена исследованию рентгеновских спектров активных ядер галактик (АЯГ) в диапазоне энергий 0.5–250 кэВ на основе выборки из 95 объектов. Для галактик выборки определены параметры рентгеновских спектров по данным спутников XMM-Newton и INTEGRAL/IBIS, построены взаимные зависимости фотонного индекса Γ , относительного отражения R , энергии экспоненциального обрезания $E_{\text{cut-off}}$, эквивалентной ширины линии $EW \text{ Fe } K_{\alpha}$ и столбцовой плотности N_{H} на луче зрения. Проведен корреляционный анализ для всей выборки и отдельно для Сейфертов 1 и 2, радио-тихих и радио-громких объектов. Впервые выявлена тенденция систематически большего значения R при небольших Γ для Сейфертов 2 по сравнению с Сейфертами 1. Показано, что R имеет меньшие значения для радио-громких галактик по сравнению с радио-тихими, а $EW \text{ Fe } K_{\alpha}$ в радио-громких галактиках при фиксированном R меньше, чем в радио-тихих. В целом проведенный анализ указывает на индивидуальную специфику АЯГ, которая выходит за рамки унифицированной схемы Антонуччи – Миллера.

В рентгеновском спектре галактики NGC 1194 впервые разделена линия в интервале энергий 6.3–6.5 кэВ на две компоненты с энергиями 6.38 ± 0.04 кэВ и 6.51 ± 0.05 кэВ, которые можно описать релятивистскими профилями для случая шварцшильдовской черной дыры. Предложена гипотеза, согласно которой в центре ядра галактики NGC 1194 находится двойная сверхмассивная черная дыра с отдельными аккреционными дисками.

Впервые обнаружено, что форма рентгеновского спектра галактики NGC 3281 согласуется с моделью газопылевого тора, как структуры из отдельных облаков; получены оценки его физических и геометрических параметров. Определены эквивалентные ширины эмиссионных линий никеля $\text{Ni } K_{\alpha}$ и железа $\text{Fe } K_{\alpha}$ и показано, что их значения соответствуют указанной модели.

Ключевые слова: активные ядра галактик, аккреционный диск, газопылевой тор, спектр рентгеновского излучения, линия $\text{Fe } K_{\alpha}$.

ANNOTATION

Vasylenko A.A. The X-ray spectral features of active galactic nuclei in 0.5–250 keV energy range. – Manuscript.

Candidate's thesis in Physics and Mathematics, speciality 01.03.02 – astrophysics, radioastronomy. – Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2015.

The work is devoted a study of the observed X-ray spectral features of active galactic nuclei in the 0.5–250 keV energy range and to the analysis of values of the spectral parameters and its changes. Based on the data of the 22-month Swift-BAT All-

Sky Hard X-ray Survey catalogue the sample of 95 galaxies with active nuclei was formed as well as their X-ray spectral parameters were determined and analyzed.

This final sample contains 54 Seyfert 1s (1–1.5) and 41 Seyfert 2s (1.8–2). The sample includes 25 radio-loud galaxies and 70 radio-quiet ones (identified as the galaxies with the active nuclei) according to NED and literary sources of this database. For each of galaxies of this sample we analyzed the X-ray observations from INTEGRAL/IBIS and XMM-Newton satellites. This allowed us to work within 0.5–250 keV energy range. The X-ray data for the sample were processed using the standard software packages XMM SAS ver. 11.0 (Science Analysis Software) and standard procedures of OSA 9.0 (Offline Standard Analysis Software). The XMM-Newton and INTEGRAL/IBIS X-ray spectra were analyzed together using XSpec ver. 12.6 software.

Interdependencies of the main spectral parameters, such as the photon index Γ , relative reflection R , exponential cut-off energy, equivalent width of Fe K_α line and the absorption column density were constructed and analyzed. The separation of galaxies with active nuclei by Seyfert types and by radio loudness were taken into account in these dependencies. It allowed us for the first time to find a tendency of systematically larger values of the reflection for $\Gamma \leq 1.5$ for Seyfert 2s as compared with Seyfert 1s. We found that parameter R is less important for radio loud galaxies as compared with radio-quiet ones. We also obtained that the equivalent widths of Fe K_α line in radio-loud galaxies for the given values of reflection have smaller values than in radio-quiet galaxies. The dependence of the EW of the Fe K_α line on column density was investigated in detail.

We found that the photon index, relative reflection, column density and Fe K_α equivalent line width for different Seyfert types are statistically different unlike the cut-off energy. On the whole, it was found that the distributions of the relative reflection and photon indexes do not correspond to the generally accepted Unified Scheme of active galactic nucleus and requires that individual features of AGN be taken into account.

We have analyzed the broad-band 0.2 – 150 keV spectrum of Seyfert 2 galaxy NGC 3281. We found that the hydrogen column density on the line of sight is $N_H = 2.08 \cdot 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ and this confirms the Compton-thick nature of NGC 3281 galaxy. We show that fitting the X-ray spectrum of this galaxy with models based on the reflection from the disk with infinite column density yields non-physical results. A more appropriate fit takes into account both transmitted and reflected emission, passing through a gas-dusty torus-like structure. In this view, to model the inhomogeneous clumpy torus, we used the MYTorus model. Hence, we propose for the first time that the torus of NGC 3281 is not continuous structure, but it consists from separate clouds.

For the X-ray spectrum of Seyfert 2 NGC 1194 galaxy, we found for the first time that the line in the energy range 6.3–6.5 keV consists of two components with energies of $6.38 \pm 0.04 \text{ keV}$ and $6.51 \pm 0.05 \text{ keV}$, which may be described by relativistic profile for a Schwarzschild black hole. We considered several interpretations of these emission features, and put forward an explanation, according to which a double supermassive black hole with individual accretion disks, which have different inclination angles and sizes of inner stable orbit, is located in the centre of NGC 1194 nucleus.

Key words: active galactic nucleus, accretion disk, gas/dust torus, x-ray emission spectrum, Fe K_α line.