

Шифр роботи:

"Тихо"

Назва роботи:

"Еволюція структури залишку наднової
Тихо за даними спостережень в
рентгенівському діапазоні"

Анотація

В наш час дослідження наднових зір пов'язані не лише із задачами астрофізики. Вони широко використовуються у космології, фізиці космічних променів та фізиці нейтрино, а їх залишки відіграють важливу роль у фізиці високих енергій. Також вони виконують основну роль у збагаченні міжзоряного середовища важкими хімічними елементами. Проте найдивовижнішим є той факт, що завдяки залишкам наднових вчені можуть реконструювати минуле зір.

У роботі проводиться аналіз даних спостережень залишку надрової Тихо Браге (SN 1572), отриманих космічною обсерваторією Chandra. Використовуючи спеціальний програмний пакет для аналізу даних рентгенівського телескопа Chandra CIAO-4.11, створено мапи залишку для певного енергетичного діапазону, отримано і проаналізовано спектри електромагнітного та синхротронного випромінювання з малих регіонів біля ударної хвилі. Отримані спектри профітовано з використанням відповідних спектральних моделей xsvnei та xssrcut. Актуальність таких досліджень зумовлена необхідністю вивчення структури й спектру залишків наднових, шляхом визначення найкращого фіту, що найбільш точно описує спостережуваний спектр. Завдяки цьому можна оцінити часові зміни в емісійних лініях, швидкість руху ударної хвилі, а також еволюцію максимальної енергії релятивістських електронів. Метою роботи є вивчення спектру залишку, отриманого з областей теплового та нетеплового випромінювання, а також вивчення зміни структури залишку в часі. Для досягнення мети роботи поставлено наступні завдання: обробити дані спостережень залишку SN 1572 телескопа Chandra в рентгенівському діапазоні; порівняти загальний та локальні спектри; дослідити еволюцію карт залишку, а також еволюцію спектрів з регіонів, в яких домінує теплове та нетеплове випромінювання; визначити властивості залишку за даними спостережень.

Робота складається зі вступу, двох розділів та висновків. Обсяг роботи 26 сторінок разом із списком літератури, який містить 20 посилань.

Зміст

1. Вступ	4
1.1. Наднові та їх залишки	4
1.2. Наднові типу Ia	5
1.3. Наднова 1572 (Тихо Браге)	7
2. Залишок Тихо та його еволюція	9
2.1. Обробка даних рентгенівських спостережень	10
2.2. Порівняння загального та локальних спектрів	12
2.3. Еволюція карт залишку наднової	14
3. Визначення властивостей залишку за спостереженнями	17
3.1. Швидкість ударної хвилі	17
3.2. Еволюція спектрів залишку наднової 1572	18
4. Висновки	24

1. Вступ

1.1. Наднові та їх залишки

Назву ‘наднова’ трактують як появу нової зорі на небі, яскравість якої різко зростає, а потім спадає протягом деякого часу (кількох місяців). Проте наднова фактично не є новою зорею. Це зоря, яка вибухає, завершуючи свою еволюцію. Спалах наднової відбувається на завершальній стадії життя зорі, руйнування якої супроводжується потужним вибухом, а її світність досягає $10^8 - 10^{10}$ світностей Сонця за короткий проміжок часу. Якщо маса білого карлика внаслідок якогось процесу починає перевищувати 1,4 маси Сонця, починають відбуватися інтенсивні термоядерні реакції і зоря-карлик вибухає. Якщо масивна зоря (з масою більше 8 сонячних мас) з часом втрачає рівновагу між гравітаційним стиском та світловим тиском, то вона вже не в змозі зберігати свій стабільний стан [19]. Як наслідок, це призводить до гравітаційного колапсу й до вибуху зорі [1]. Спалахи наднових - це досить рідкісна подія: в нашій галактиці може зустрітись раз чи два за століття.

Вибух наднової супроводжується потужними потоками оптичного випромінювання, а також ультрафіолетових та рентгенівських променів, і космічними променями з великими енергіями. Під час спалаху, за короткий проміжок часу радіаційна потужність зорі значно зростає, і в результаті збільшується її яскравість. Отож ми можемо зафіксувати спалах наднової, навіть неозброєним оком, як це вже було в історії [17]. Подібна катастрофа може викинути більшу частину речовини зорі, яка в свою чергу досягає швидкості близько 30 000 км/с або 0.1 швидкості світла. Це призводить до виникнення сильної ударної хвилі, що рухається в міжзоряному середовищі, збільшуючи оболонку з пилу та газу, яку спостерігають як залишок наднової. Наднові виробляють, переробляють і викидають основну частину хімічних елементів, створених під час нуклеосинтезу.

Виділяють два типи наднових - Тип I та Тип II [8]. Характерною ознакою Типу II є наявність ліній водню у спектрі, в той час, як в Типу I лінії водню у максимумі блиску відсутні [13]. Не менш важливими характеристиками, окрім спектру є криві блиску, за якими наднові поділяють на підтипи: наднові I типу - Ia, Ib, Ic, Id; наднові II типу - IIP, IIL, IIn, IIb.

1.2. Наднові типу Ia

Спалах наднової типу Ia відбувається в подвійній системі, яка складається з білого карлика та його компаньйона - іншого білого карлика або червоного гіганта [16]. В даному випадку вироджений білий карлик накопичує необхідну кількість речовини шляхом акреції з компаньйона чи злиття з ним. Тому температура його ядра зростає й розпочинаються термоядерні реакції.

Розглянемо взаємодію тісної подвійної системи, в якій речовина переноситься від однієї зорі до іншої. Їх гравітаційні поля зв'язані між собою. Разом з обертанням такої системи вони визначають розміри області гантелеподібної форми навколо пари зір, так звану порожнину Роша. Розміри цієї порожнини залежать від маси зір і від відстані між ними. Границю цієї області називають поверхнею Роша. Гравітація кожного компаньйона контролює рух речовини всередині своєї порожнини. Проте, певна частина маси зорі-гіганта може перетнути поверхню даної області і перетекти на білий карлик, або ж покинути систему зовсім. Існують певні місця на орбітальній площині - точки Лагранжа, в яких частина речовини має додаткову стабільність. Особливою є внутрішня точка Лагранжа (L_1), в якій обидві порожнини Роша перетинаються. І якщо деяка частка речовини перетікає саме через цю точку, то вона легко потрапляє на зорю-компаньйон. Отож, внутрішня точка Лагранжа - це точка з'єднання, через яку зорі можуть обмінюватися речовиною. Існує лише два способи, коли речовина може відділитися від зорі і потрапити у внутрішню точку Лагранжа. Перший - коли зоря має сильний зоряний вітер, то частина газу, що вивітрюється з неї, може пройти через L_1 і в такому випадку він потрапляє на іншу зорю. Інший спосіб - зоря, яка розвивається, розширюється доти, поки не заповнить свою порожнину Роша, - може виникнути, коли зорі розташовані близько одна до одної, а їх порожнини Роша є досить малими. Внаслідок перетікання речовини з червоного гіганта маса карлика збільшується, і як тільки вона переходить за межу Чандрасекара (1,4 маси Сонця), температура ядра починає різко зростати аж до температури горіння карбону. Саме в цей момент розпочинаються термоядерні реакції, які призводять до подальшого руйнування небесного світила [1], [18].

Інший результат еволюції, що призводить до спалаху наднової типу Ia - це злиття системи із двох білих карликів в одну масивну зорю, яка вибухає. Під час спалаху виділяється велика кількість енергії, і таким чином яскравість

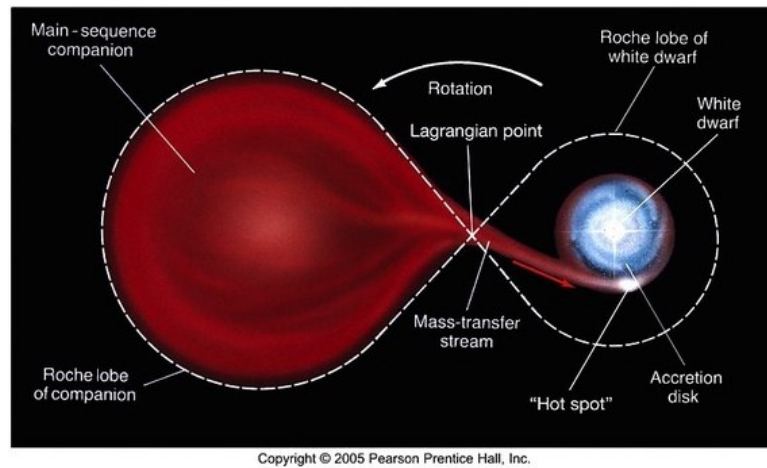


Рис. 1. Пара зір у тісній подвійній системі, що контролює область простору, розташовану всередині гантелеподібної порожнини Роша. Точки Лагранжа - це місця гравітаційної стабільності. Через внутрішню точку Лагранжа відбувається перетікання речовини з однієї зорі на іншу

зорі збільшується в сотні разів за короткий проміжок часу. Внаслідок такого руйнування велика частина речовини викидується у навколишній простір і може досягати швидкості 0.1 швидкості світла. У свою чергу це призводить до виникнення ударної хвилі, яка швидко розширюється у міжзоряному середовищі і нагрібає речовину. Так формується залишок наднової.

Важливими характеристиками, які дають змогу відрізнити тип Ia від інших - це криві блиску та спектр. Крива блиску демонструє залежність світності наднової від часу після спалаху. Свого максимального значення вона досягає в околі чотирьох мільярдів світностей Сонця і одразу ж різко зменшується. Подальший її спад відбувається поступово. Наднові Ia характеризуються типовим піком світності завдяки рівномірно розподіленій масі в білому карлику, який вибухає. Вважається, що основною причиною даного піку є радіоактивний розпад нікелю 56 [1].

Наднові типу Ia мають досить стабільне значення енергії спалаху (близько 10^{51} ерг), тому їх використовують як стандартні джерела для дослідження властивостей розширення Всесвіту. Оскільки видима зоряна величина наднової залежить від відстані до неї, то завдяки відомій енергії спалаху можна визначити відстань до віддалених галактик, що робить наднові Ia типу 'стандартними свічками'.

У спектрі даного типу наднових відсутні лінії гідрогену, на відміну від наднових типу II. Це пояснюється тим, що гідроген є лише в невеликій кількості

у зовнішніх шарах білого карлика. Характерними для спектру наднової типу Ia є лінії заліза та кремнію.

Отож, як бачимо, наднові типу Ia є надзвичайно важливими для сучасної астрономії і посідають чільне місце в ряді важливих питань, пов'язаних із дослідженнями розвитку Всесвіту та вирішенні задач космології, астрофізики нейтрино й астрофізики високих енергій. Одним із прикладів наднових типу Ia є наднова Тихо (SN 1572).

1.3. Наднова 1572 (Тихо Браге)

Наднова 1572 спалахнула в сузір'ї Кассіопеї в листопаді 1572 року, в галактиці Чумацький Шлях на відстані близько 10 тис. світлових років від Землі [6]. Названа в честь данського астронома Тихо Браге. Хоч вчений не був першим, хто спостерігав спалах наднової, але саме він детально вивчав це явище і описав його у трактаті. Він також провів систематичні спостереження щодо положення наднової відносно інших зір та описав зміни її блиску. Наднову 1572 вперше спостерігали в Китаї та Кореї, пізніше її помітили і в Європі. Найбільше значення видимої зоряної величини становило -4, а відтак подію можна було спостерігати неозброєним оком [3], [20].

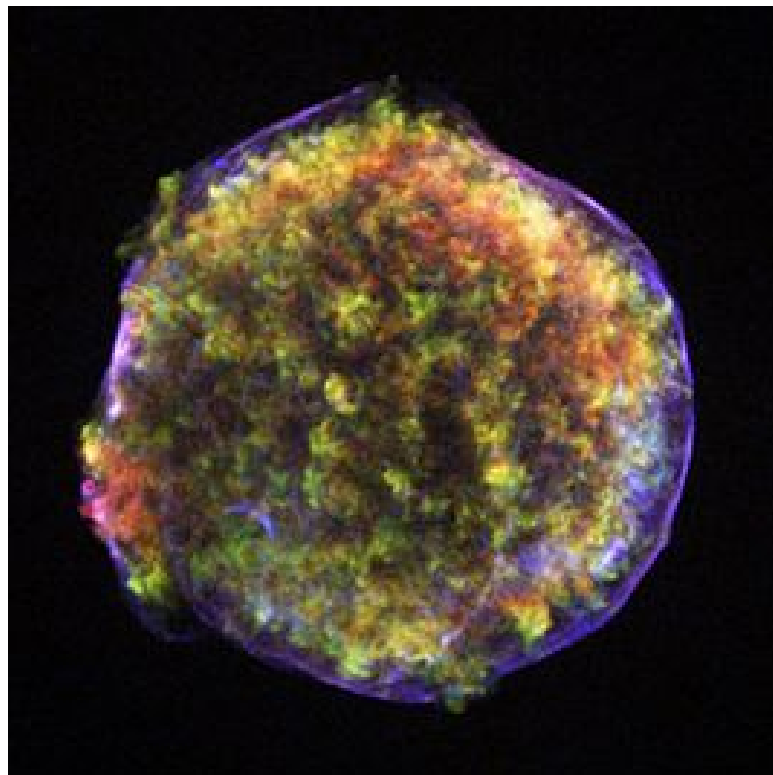


Рис. 2. SN 1572

Щодо спостереження наднової в Китаї та Кореї, в літописах Китаю збереглося п'ять записів про появу “зорі-гості”, а в корейських - два. В Китаї її вперше помітили поблизу сузір'я Гедао (частина зір, що належать до сузір'я Кассіопеї) 8 листопада 1572 року. Нову зорю можна було спостерігати неозброєним оком перед заходом Сонця і навіть вдень. Її яскравість поступово почала спадати лише через рік, а весною 1574 р. вона зникла. Згідно з корейськими записами, “зорю-гостю” спостерігали 6 листопада 1572 р. поряд із зорею Цексінг. Варто підкреслити той факт, що вона була яскравішою, ніж Венера. Отож, з текстів літописів можна зробити висновок про яскравість і період видимості нової зорі [2].

Поява “зорі-гості” у Європі мала важливе філософське значення, адже в той час вважалось, що всі зорі є незмінні і непорушні, а ця подія ставила під сумнів таку теорію. Спалах наднової мали змогу побачити кілька європейських вчених, проте найбільший внесок у її дослідження зробив саме Тихо Браге. Він помітив надзвичайно яскраву зорю в сузір'ї Кассіопеї 11 листопада 1572 року, оскільки до цього часу погодні умови були несприятливі для подібних спостережень. Вчений виготовив новий інструмент - секстант, за допомогою якого вимірював розташування “зорі-гості” відносно головних зір у сузір'ї Кассіопеї, для того, щоб визначити її паралакс. За допомогою цього приладу астроном вів свої спостереження впродовж 1572-1574 років. Він зауважив, що коли вперше помітив зорю, її яскравість була такою ж як і у Венери. Згодом яскравість почала поступово зменшуватись і вже у березні 1574 року зоря стала невидимою для неозброєного ока. Окрім того, Браге видав книгу, в якій детально описував власні спостереження та припущення про розміри, природу і відстань до нової зорі, а також подав результати досліджень інших спостерігачів, які на той час публікували праці про подію.

Наднову Тихо вважали звичайною зорею аж до моменту, коли у 1938 році Вальтер Бааде завдяки спектральним спостереженням показав, що вона є надновою. А провівши аналіз кривої блиску на основі даних Тихо Браге, він відніс її до наднової типу Ia. Дані спектральних спостережень залишку показали наявність у спектрі наднової 1572 ліній магнію, силіцію, сульфур, кальцію і заліза, що є характерною ознакою типу Ia, тобто підтвердило висновки Бааде [2], [7].

Отож, наднова 1572 - один із прикладів типу Ia, що виникла внаслідок термоядерного вибуху білого карлика, який отримав чимало речовини від

компаньйона-гіганта для досягнення межі Чандрасекара. Внаслідок нуклеосинтезу утворились радіоактивні елементи, які розпались під час вибуху на вторинні продукти. Різке зростання світності зумовлена розпадом $\text{Ni } 56$. А відтак є можливість спостерігати лінії в гамма-діапазоні, яке напряду пов'язане із періодом піврозпаду радіоактивних елементів $\text{Ni } 56$, пізніше $\text{Co } 56$ і $\text{Ti } 44$ [15]. На початкових стадіях еволюції молодого залишку викинутої речовини, швидкість якої сягає десятки тисяч км на секунду, взаємодіє з навколишнім середовищем, породжуючи основну ударну хвилю. При цьому також виникає й зворотня ударна хвиля, яка розповсюджується в протилежну сторону в об'ємі викинутої речовини, що розширюється. Така подвійна структура ударних хвиль демонструє фізичні процеси викиду матеріалу та подальший розиток оболонки [14]. Радіоспостереження показують наявність у залишку оболонки, формування якої пов'язане із викинутою речовиною та матеріалом, нагребеним із міжзоряного середовища.

Еволюцію саме цього залишку ми будемо досліджувати надалі.

2. Залишок Тихо та його еволюція

Завдяки високій кутовій роздільній здатності дзеркал Chandra чутлива до джерел рентгенівського випромінювання, які є в 100 разів слабшими, аніж будь-який попередній рентгенівський телескоп. Земна атмосфера поглинає переважну більшість рентгенівського випромінювання і тому надземними телескопами їх зареєструвати неможливо. Саме тому такими спостереженнями займаються космічні телескопи.

У роботі використовуються дані спостережень, які здійснювались за допомогою інструменту ACIS, що працює в діапазоні енергій 0.2-10keV. Складається зі 100 CDD чіпів і відтворює зображення спостережуваного так само добре, як і спектральний аналіз.

Для обробки даних з Chandra, використовується спеціальне програмне забезпечення **CIAO-4.11**, а також відповідний пакет **Sherpa**, призначений для моделювання та фітування спектрів. Він дає змогу користувачеві побудувати складні моделі з простих визначень та профітувати їх до заданих, використовуючи різні статистичні та оптимізаційні методи [9], [12]. Програма **DS9** дозволяє працювати з астрономічними зображеннями і візуалізувати дані. Вона підтримує зображення формату fits, дозволяє маніпулювати вибраними

регіонами, містить різні алгоритми масштабування та багатоколірні мапи.

2.1. Обробка даних рентгенівських спостережень

1. Створення мапи залишку для певного енергетичного діапазону.

Для того, щоб почати обробку даних спостережень, перш за все необхідно обрати регіон (а саме ділянку зображення), який необхідно обробити.

Після цього створюється мапа залишку (відповідного id спостереження, в даному випадку 10095) для відповідного діапазону енергій (тут 4.0-6.0 keV), використовуючи наступний скрипт **'dmcopy.sh'**:

```
#!/bin/bash
for OBSID in 10095
do
    evt2=$(ls $OBSID/repro/*evt2.fits)
    echo "OBSID = $OBSID"
    echo "evt2 = $evt2"
    dmcopy "$evt2[sky=region(box.reg)][energy=4000:6000] \
    [bin x>::1, y>::1]" ${OBSID}_4.0-6.0_evt2.fits
    clobber=yes
done
```

2. Спектр з обраного регіону.

Щоб отримати спектр з обраного регіону (наприклад теплового чи нетеплового), необхідно обрати ділянку залишку з якої потрібно отримати спектр, а також врахувати фон. Ця процедура реалізовується за допомогою наступного скрипта **'runspecextract.sh'**:

```
#!/bin/bash
regname=src2009_1
for OBSID in 10095
do
    evt2=$(ls $OBSID/repro/*evt2.fits)
    echo "OBSID = $OBSID"
    echo "evt2 = $evt2"
    punlearn specextract
```

```

specextract \
infile="$evt2[sky=region(${regname}.reg)]" \
bkgfile="$evt2[sky=region(${regname}_bg.reg)]" \
outroot="${OBSID}_${regname}" \
verbose=2
clobber=yes
done

```

3. Фітування спектрів.

Нетепловий спектр.

Для фітування нетеплового спектру було обрано модель `xssrcut` і використано наступний скрипт, написаний мовою `python`:

```

import numpy as np
fname = "10095_src1_grp.pi"
load_pha(fname)
group_snr(3)
subtract()
notice(0.3, 7.0)
set_source(xsphabs.abs1 * xssrcut.src)
freeze(src.alpha)
freeze(src.norm)
show_model()
#plot_data()
#x = get_data_plot().x
#y = get_data_plot().y
#save_arrays("10095_nonthermal_spectra.dat", [x,y], ascii=True)
fit()
plot_fit_delchi()

```

Тепловий спектр.

Для фітування спектру з теплового регіону обрано модель `xsvnei`:

```

import numpy as np
fname = "10095_src2_grp.pi"

```

```

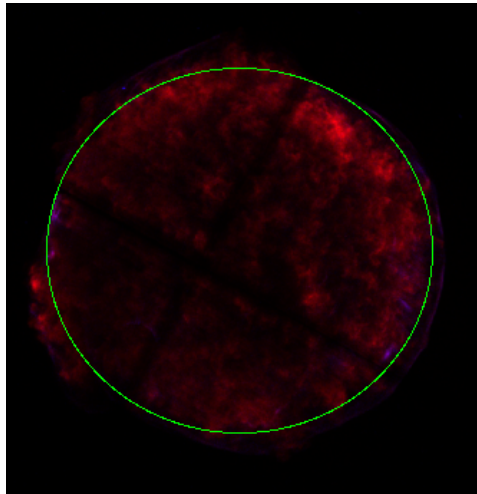
load_pha(fname)
group_snr(3)
subtract()
notice(0.3, 7.0)
set_source(xsphabs.abs1 * xsvnei.src)
#abundances for vnei model
thaw(src.H)
thaw(src.He)
thaw(src.C)
thaw(src.N)
thaw(src.O)
thaw(src.Ne)
thaw(src.Mg)
thaw(src.Si)
thaw(src.S)
thaw(src.Ar)
thaw(src.Ca)
thaw(src.Fe)
thaw(src.Ni)
show_model()
#plot_data()
#x = get_data_plot().x
#y = get_data_plot().y
#save_arrays("10095_thermal_spectra.dat",[x,y],ascii=True)
fit()
plot_fit_delchi()

```

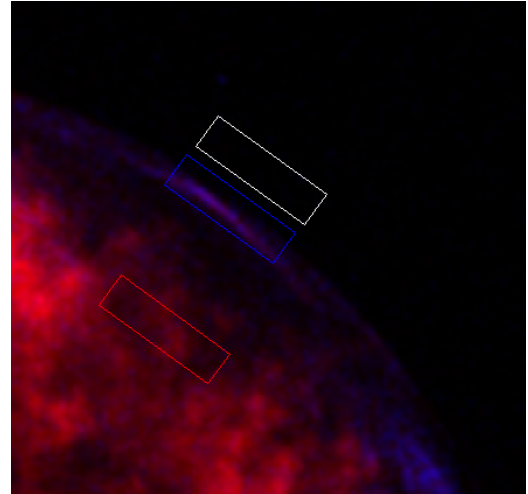
2.2. Порівняння загального та локальних спектрів

В ході досліджень отримано дані спостережень залишку наднової Тихо за 2003, 2007, 2009 та 2015 роки. Проте, для аналізу в цьому розділі оберемо спостереження за 2009 рік (obsID 10095), оскільки в нього найдовша експозиція.

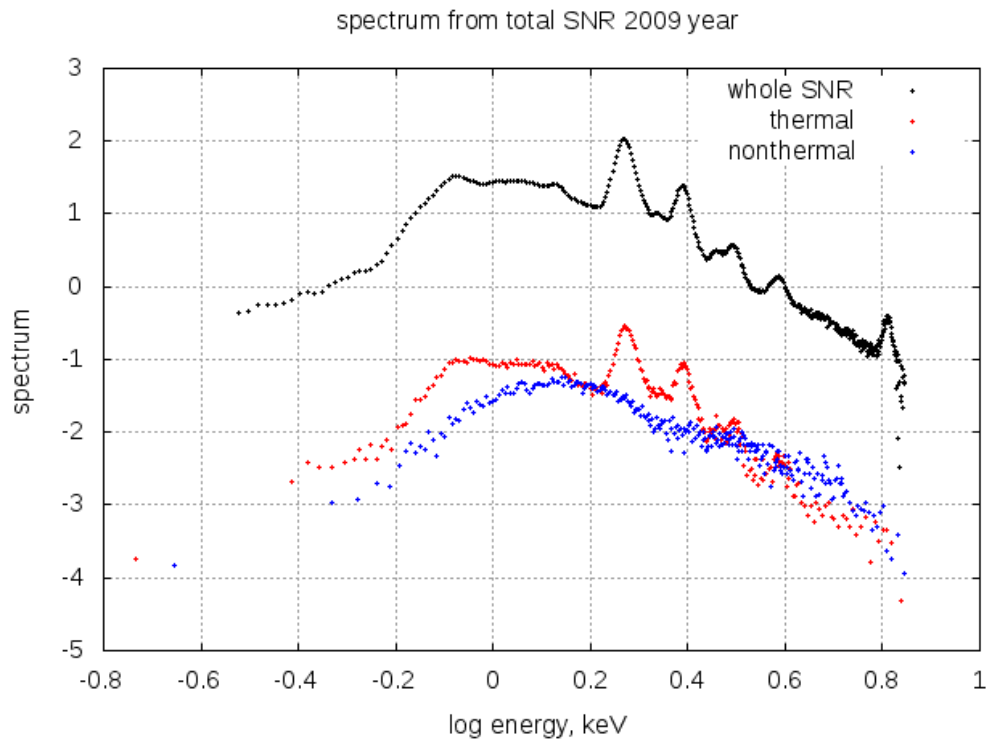
Проаналізуємо спектри даного спостереження для різних областей, а саме цілого залишку (область в зеленому контурі, Рис. 3а), та регіонів, де помітно домінує випромінювання теплової (червоний контур, Рис. 3б) та нетеплової



(а) Мапа залишку в діапазоні енергій 0.1-8 кеВ.



(б) Мапа залишку (тепловий(червоний 0.6-2.15кеВ) та нетепловий(синій 4-6кеВ) регіони)



(в) Спектр з виділених регіонів. Чорний спектр відповідає зеленому регіону (рис. а); тепловий - червоному, нетепловий - синьому

Рис. 3. obsID 10095 (2009 рік)

(синій контур, Рис. 3б) емісій. У спектрі з теплового регіону та цілого залишку добре помітні емісійні лінії (Рис. 3в), в той час, як у нетепловому регіоні їх не спостерігається. Це якраз і є свідченням теплового випромінювання (випромінювання плазми, нагрітої до певної температури). Нетеплове випромінювання (синхротронне випромінювання релятивістських електронів) не містить ліній.

2.3. Еволюція карт залишку наднової

На Рис. 4 подано мапу залишку, створену за даними спостережень 2009 року для двох діапазонів енергій, де власне домінують відповідні механізми випромінювання. Для того, щоб прослідкувати еволюцію оболонки в часі, оберемо два регіони, де добре помітним є теплове (червоний відтінок) та нетеплове (синій відтінок) випромінювання. Зафіксуємо ці регіони на карті 2003 року. Порівнюючи створені нами карти для різних років з нерухомими регіонами (Рис. 5), добре помітне розширення у нетепловій (синій) області. Як бачимо, у 2003 році оболонка залишку знаходиться на початку обраного регіону, проте вже у 2015 році досягає кінця його розмірів. Це свідчить про рух ударної хвилі в залишку.

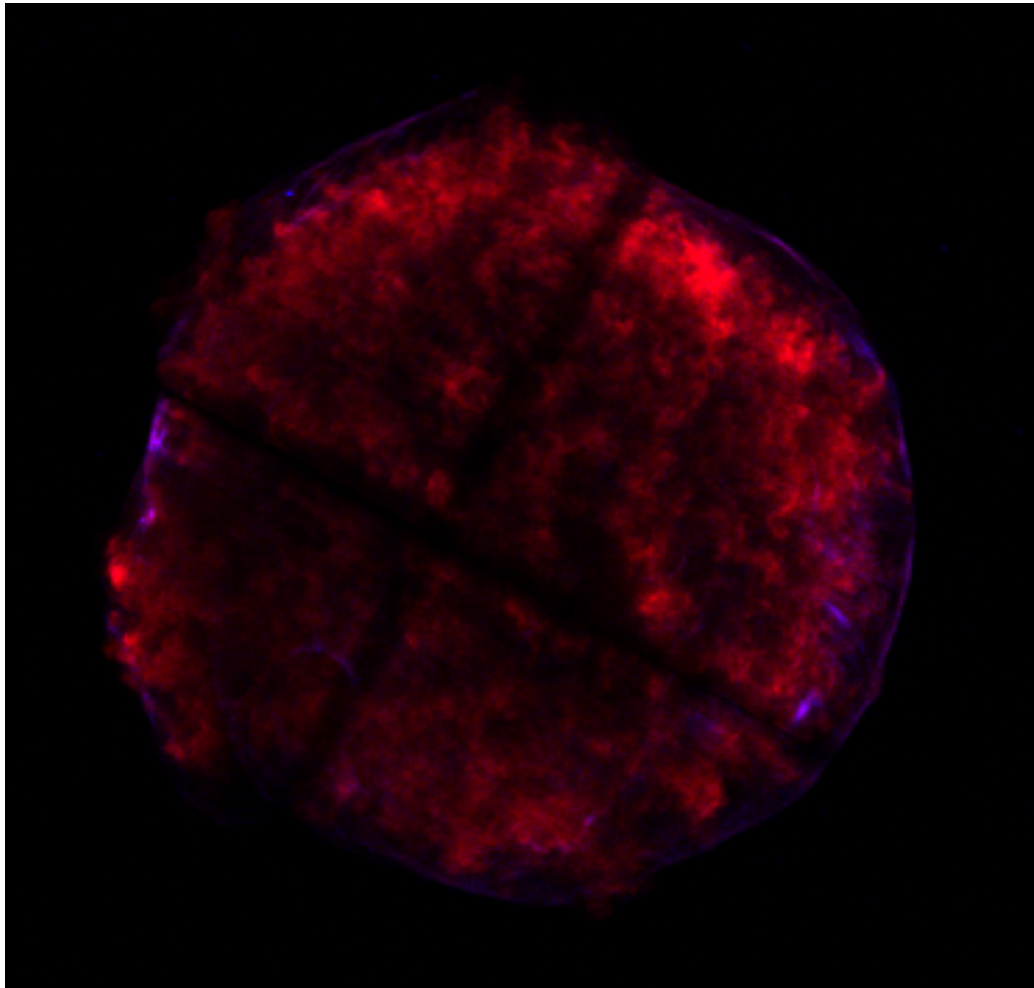


Рис. 4. obsID 10095 (2009 рік). Червоний (теплове випромінювання) - 0.6-2.15 кеВ; синій (нетеплове випромінювання) - 4-6 кеВ

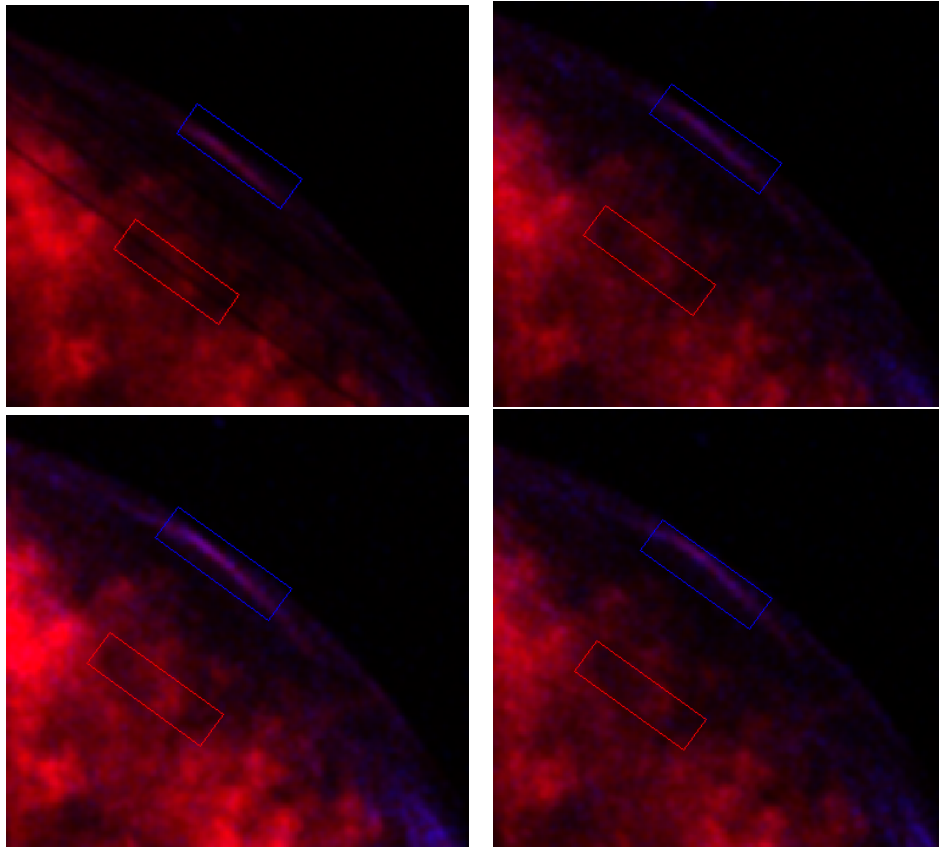


Рис. 5. Еволюція залишку наднової Тихо: червоний (теплове випромінювання) - 0.6-2.15 keV; синій (нетеплове випромінювання) - 4-6 keV.

Можна також прослідкувати еволюцію залишку й в емісійних лініях. Створено мапи для ліній Силіцію та Сульфуру, які є найбільш помітними лініями у спостережуваному тепловому спектрі (Рис. 6).

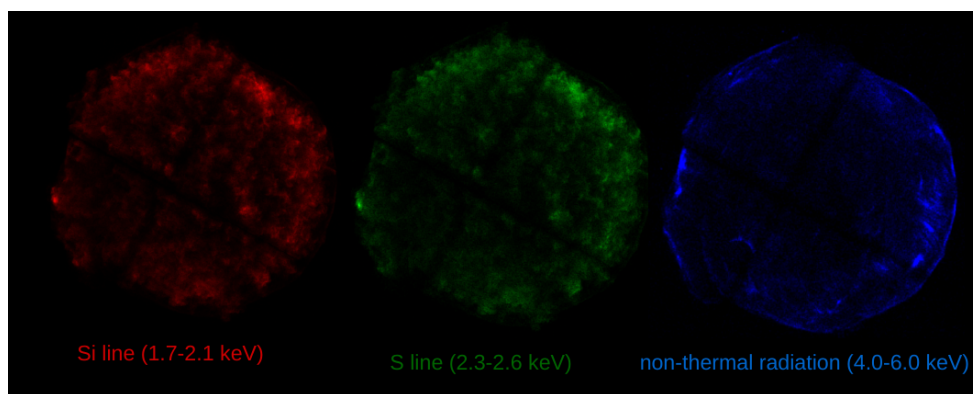


Рис. 6. obsID 10095 (2009 рік). Червоний (1.7-2.1 keV - лінія Si), зелений (2.3-2.6 keV - лінія S), синій (4.0-6.0 keV - синхротронне випромінювання).

Зображення на Рис. 7 є композитною мапою трьох попередніх. Воно дозволяє побачити кореляцію розподілу різних хімічних елементів у залишку наднової.

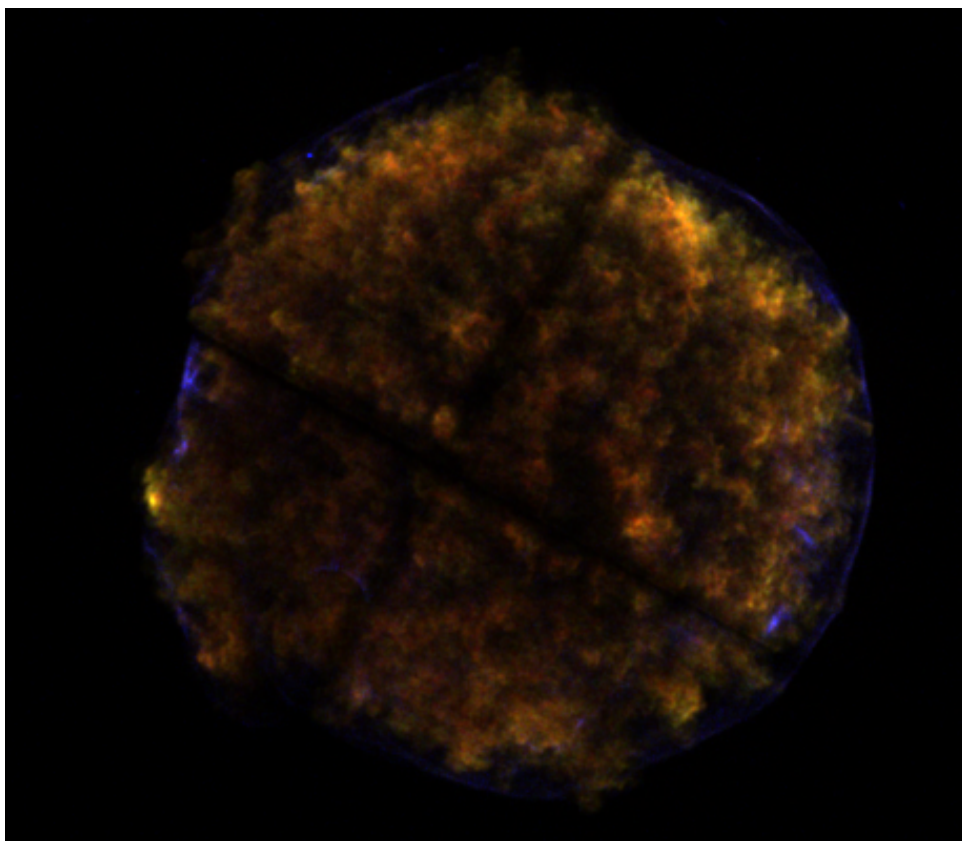


Рис. 7. obsID 10095 (2009 рік). Червоний (1.7-2.1 keV - лінія Si), зелений (2.3-2.6 keV - лінія S), синій (4.0-6.0 keV - синхротронне випромінювання).

Еволюцію розподілу елементів показано на Рис. 8. Варто зазначити, що в цьому випадку регіони вже зміщені в напрямку руху ударної хвилі. Видно, що немає помітних змін в розподілі хімічних елементів всередині цих регіонів, що свідчить про те, що часовий масштаб таких змін є більшим за інтервал між спостереженнями (12 років).

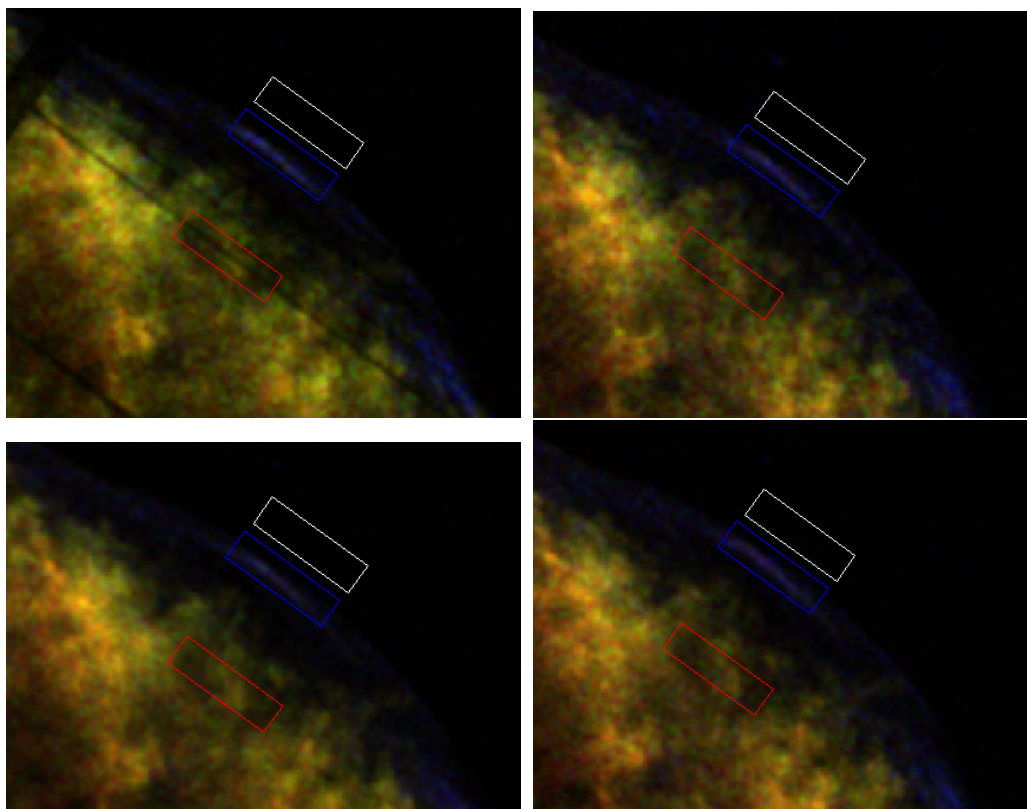


Рис. 8. Еволюція залишку. Тепловий регіон (жовта область): червоний (1.7-2.1 кеВ - лінія Si), зелений (2.3-2.6 кеВ - лінія S); нетепловий регіон (сині область): синій (4-6 кеВ - синхротронне випромінювання).

3. Визначення властивостей залишку за спостереженнями

3.1. Швидкість ударної хвилі

Оскільки нам відома відстань до залишку та розміри обраного регіону, можна оцінити швидкість руху ударної хвилі.

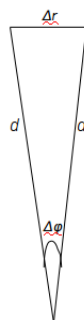


Рис. 9. d - відстань до залишку, Δr - розмір вибраного регіону

$$v = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{d \cdot \sin \Delta \phi}{\Delta t} \simeq \frac{d \cdot \sin \Delta \phi_{rad}}{\Delta t} \quad (1)$$

$$v = \left(\frac{1.19''}{206265} \right) \left(\frac{d_{kpc} 3.0857 \cdot 10^{16} \frac{km}{kpc}}{3.1557 \cdot 10^7 \frac{s}{yr}} = d_{kpc} 5.64 \cdot 10^3 \frac{km}{s} \right) \quad (2)$$

Отже, швидкість руху ударної хвилі, що залежить від відстані до залишку, можна обчислити за допомогою наступної формули:

$$v = 5640 \cdot d_{kpc} \frac{km}{s} \quad (3)$$

Загальноприйнятою відстанню до залишку Тихо вважається 2,4 кпс, тому швидкість ударної хвилі є близькою до 13,5 тис км/с.

3.2. Еволюція спектрів залишку наднової 1572

1. Нетеплове випромінювання

Синхротронне випромінювання, що з'являється внаслідок спірального руху заряджених частинок навколо ліній магнітного поля при релятивістських швидкостях, є нетепловим, оскільки являє собою цілком інший механізм випромінювання порівняно з тепловим.

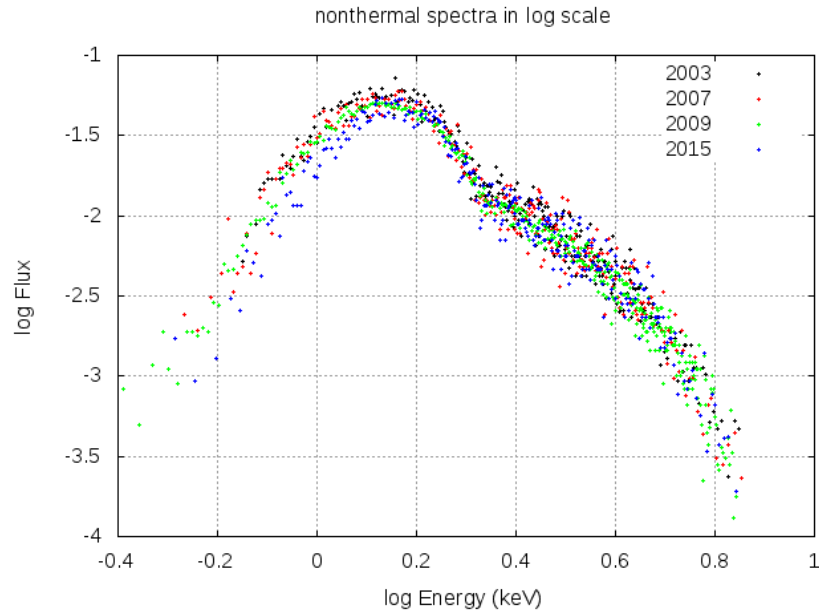


Рис. 10. Спектр із нетеплових регіонів для 2003, 2007, 2009 та 2015 років відповідно

З обраного регіону, де помітно домінує нетеплова емісія (Рис. 5), отримано спостережувані спектри для різних років: 2003, 2007, 2009 та 2015. Їх часову еволюцію можна побачити на Рис. 10.

Щоб побачити зміни впродовж періоду 12 років, профітуємо ці спектри. Для фітування було використано нетеплову модель `srcut`.

Модель `xssrcut`.

`xssrcut` - модель, що описує спектр від синхротронного випромінювання, який має степеневий характер з 'обривом' (cutoff power law) в області найвищих енергій. Параметри моделі подано в табл. 1.

Табл. 1. Параметри моделі `xssrcut`

alpha	радіо-спектральний індекс
break	частота падіння (частота, на якій потік зменшився в 10 разів відносно степеневого закону)
norm	потік на частоті 1 Гц в J_ν

Результати фітування

Для фітування спектру нетеплового випромінювання було використано модель `xssrcut`. На Рис.11 подано фітування спектру для спостережень 2009 року. За допомогою моделі було визначено параметри `nH`, `alpha`, `norm` та `break`. Оскільки не очікується змін у поглинанні за період 12 років, а також за даними радіоспостережень радіопотік за цей період часу не змінився, ми можемо зафіксувати поглинання і нормування й на інші роки.

З фітування спектру 2009 року ми отримали такі значення величин поглинання і нормування: $nH = 0.561039$, $norm = 0.0839941$.

Як показано на графіку на Рис. 11, обраний фіт добре відтворює спостережуваний спектр. Часові зміни параметрів `alpha` і `break` подано в таблиці. Оскільки ці параметри зменшуються з часом, то ймовірно, що причиною цього є те, що втрати енергії електронів на випромінювання є більшими, ніж зростання енергії завдяки прискоренню (принаймні в цьому регіоні).

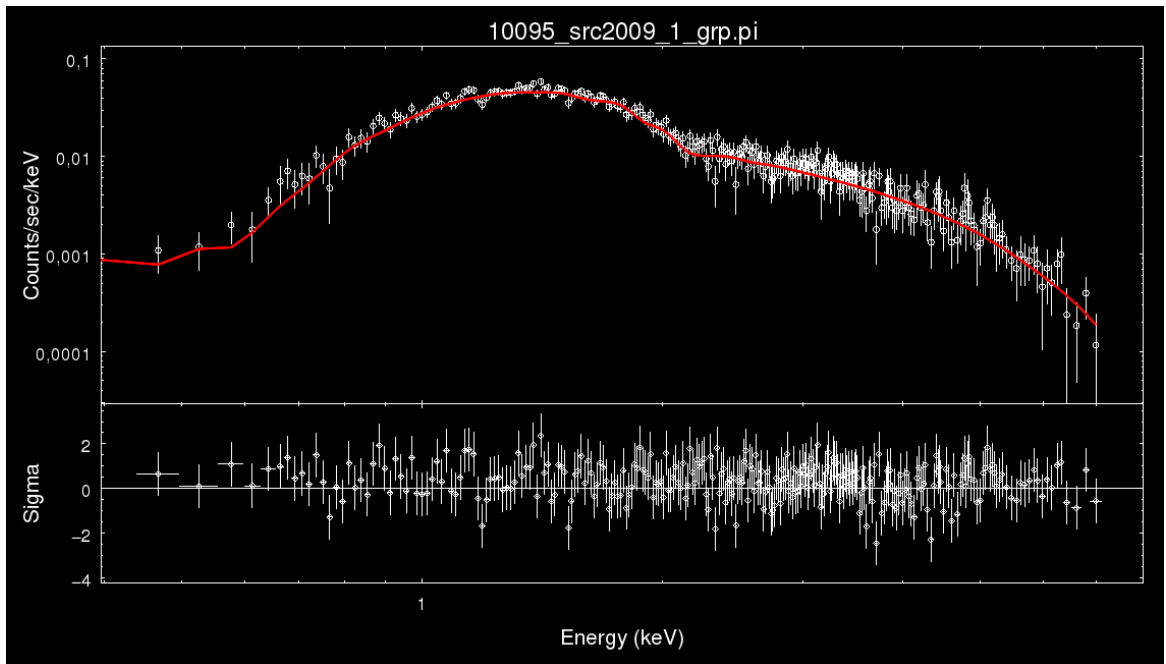


Рис. 11. Фітування спектру нетеплового випромінювання моделлю xssrcut

Табл. 2. Параметри моделі для різних років при фіксованих $nH = 0.561039$ та $norm = 0.0839941$

Рік	alpha	break
2003	0.55573	$9.28166 \cdot 10^{16}$
2007	0.535509	$7.33422 \cdot 10^{16}$
2009	0.531657	$6.54483 \cdot 10^{16}$
2015	0.520439	$5.53707 \cdot 10^{16}$

2. Теплове випромінювання

Тепловим випромінюванням називають електромагнітне випромінювання, характеристики якого залежать від температури джерела випромінювання. Спектр такого випромінювання складається з неперервного випромінювання (континуум) та випромінювання в лініях, все це залежить від температури об'єкта і концентрації середовища.

Спостережувані спектри з теплових регіонів (Рис. 5) для 2003, 2007, 2009 і 2015 років подані на Рис.12.

Для фітування спектрів теплового випромінювання було використано те-

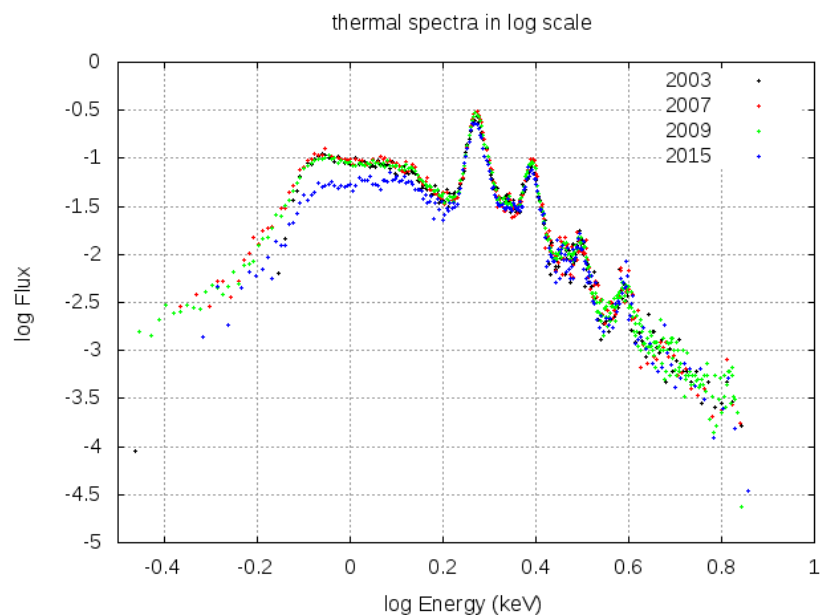


Рис. 12. Спектр із теплових регіонів для 2003, 2007, 2009 та 2015 років відповідно

плову модель xsvnei.

Модель xsvnei.

xsvnei - модель, яка описує випромінювання нерівноважної плазми зі сталою температурою і містить параметри, вказані в Табл.3.

Табл. 3. Параметри моделі xsvnei

kT	температура плазми у кеВ
H	вміст Гідрогену
He, C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Fe, Ni	хімічний вміст елементів відносно Сонячного вмісту
Tau	час іонізації в одиницях $\text{с}/\text{см}^3$
redshift	червоне зміщення плазми
norm	нормалізація моделі
abs (nH)	поглинання, еквівалентне вмісту гідрогену ($10^{22} \frac{\text{atoms}}{\text{cm}^2}$)

Результати фітування

Дослідимо, як параметри моделі впливають на фіт. Для прикладу розглянемо спектр теплового випромінювання зі спостереження 2009 року (obsID 10095). Значення для поглинання візьмемо з фітування нетеплового спектру ($nH = 0.561039$).

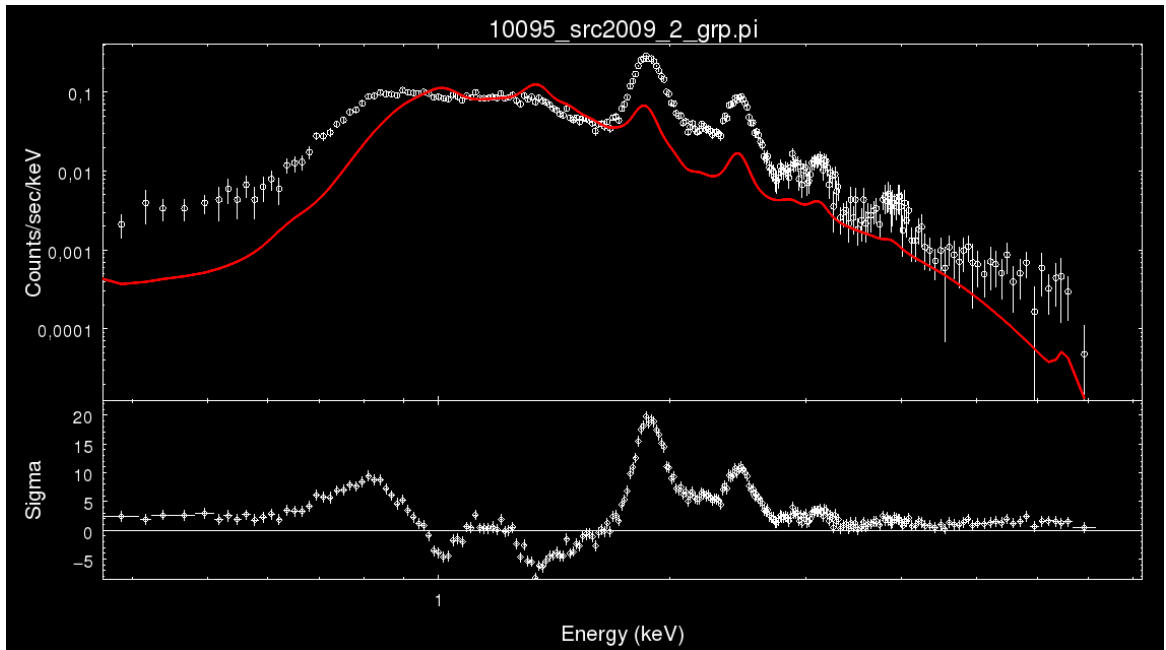


Рис. 13. Фіксований хімічний вміст (на Сонячний)

Зафіксуємо весь хімічний вміст на Сонячний. В такому випадку фіт погано повторює спостережуваний спектр (Рис. 13).

Розглянемо ще один варіант підбору параметрів. Заморозимо наступні хімічні елементи (на Сонячні): He, C, N, O, Ne, Ca, Ni, а іншим дозволимо змінюватися. В такому випадку фіт став помітно кращим (Рис. 14), ніж в попередньому.

Якщо зробити вільним весь хімічний вміст (випадок, коли модель сама підбирає значення параметрів), то фіт стає кращим (Рис. 15), за винятком частини спектру на вищих енергіях (понад 4 keV). Такий результат найбільш ймовірно зумовлений тим, що для цих енергій фотонів слід також брати до уваги і нетеплове випромінювання навіть для цього теплового регіону.

Рис.12 демонструє, що не спостерігається помітних часових змін в емісійних лініях.

Згідно з результатами детальних фітів, наведених у таблиці 4, спостерігається незначне зменшення температури плазми з часом.

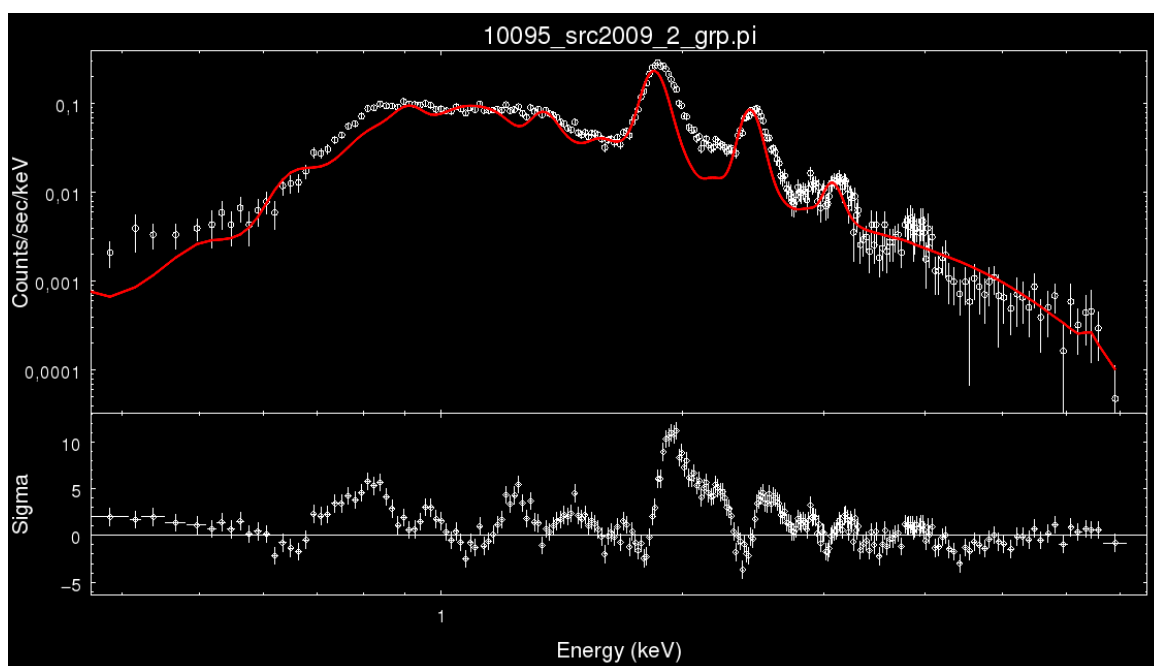


Рис. 14. Фіксовані елементи He, C, N, O, Ne, Ca, Ni

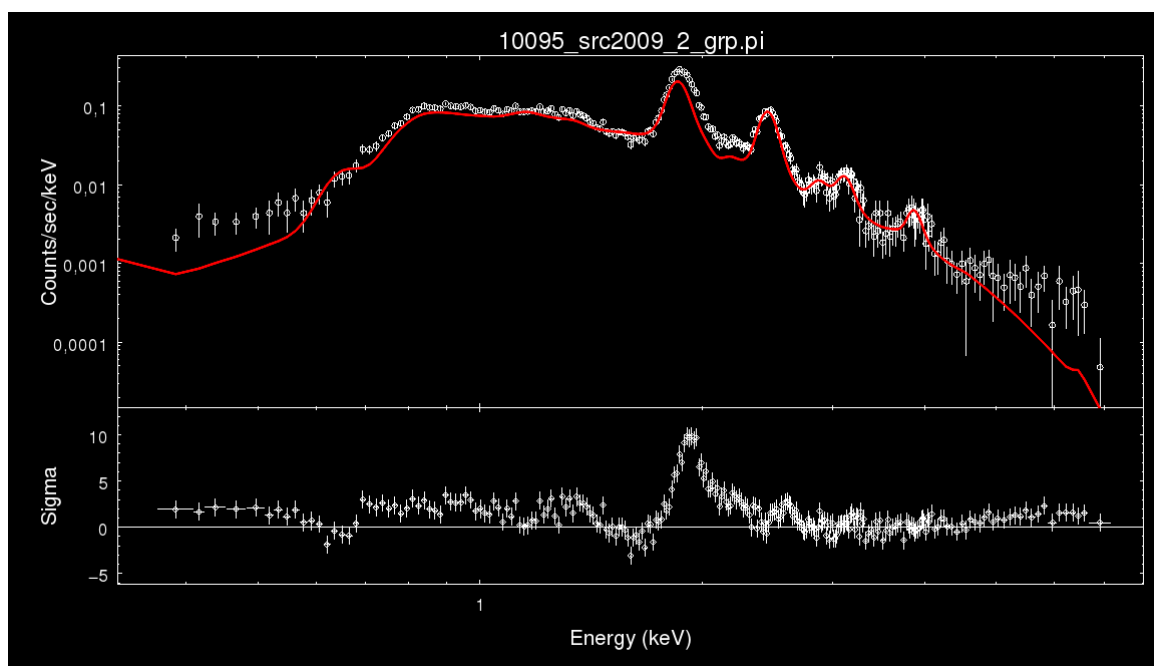


Рис. 15. Вільний хімічний вміст

Табл. 4. Часова залежність температури випромінювання теплової емісії

Рік	kT (температура плазми у кеВ)
2003	1.31980
2007	1.23593
2009	1.13737
2015	1.16894

4. Висновки

У роботі проаналізовано дані спостережень залишку наднової Тихо Браге (SN 1572), які отримано космічною обсерваторією Chandra. За даними спостережень створено мапи залишку для різних діапазонів енергій, зокрема для нетеплового (4.0-6.0 кеВ) і теплового (лінія Si 1.7-2.1 кеВ та лінія S 2.3-2.6 кеВ) випромінювання, в різні роки спостережень.

Отримано та проаналізовано спектри теплового (електромагнітне випромінювання, характеристики якого залежать від температури джерела випромінювання) та нетеплового (синхротронне випромінювання, що з'являється внаслідок спірального руху електронів навколо ліній магнітного поля при релятивістських швидкостях) випромінювання з малих регіонів біля ударної хвилі. Ці спектри профітовано з використанням відповідних спектральних моделей xsvnei та xssrcut.

З виміряного переміщення на картах ударної хвилі оцінено її швидкість руху. Вона залежить від відстані до залишку і становить $v = 5640 \cdot d_{kpc} \frac{km}{s}$.

З результатів аналізу видно, що не спостерігається часових змін в емісійних лініях. Виявлено еволюцію максимальної енергії релятивістських електронів. Спостерігається помітний внесок нетеплових рентгенівських електронів на високих енергіях фотонів навіть у теплових областях.

Література

- [1] Foundations of Astronomy, 13th ed. - 2016
- [2] Василь Бешлей, Тарас Кузьо, "Історичні наднові типу Ia та їх залишки". - 2014
- [3] Athem W. Alsabti and Paul Murdin, "Handbook of Supernovae". - 2017
- [4] Бабик Ю. В., Вовк Є. Ю., "Віртуальна рентгенівська і гамма-обсерваторія. Обробка даних космічних обсерваторій 'Чандра' та 'Фермі' ". - Київ, 2012
- [5] "Chandra Specifications". NASA/Harvard. Retrieved September 3, 2015.
- [6] Dreyer J.L.E. Tycho Brahe: A Picture Of The Scientific Life And Work In The Sixteenth Century. - Edinburgh: Adam and Charles Black, 1890. 210p.
- [7] Baade W. ApJ. 1945. 102. 309-318
- [8] da Silva, L. A. L. (1993). "The Classification of Supernovae". Astrophysics and Space Science. 202 (2): 215–236.
- [9] Developing Sherpa with Python (ADS) S. Doe, et al. "Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI 376, 543
- [10] Keith Arnaud, Randall Smith, Aneta Siemiginowska "Handbook of X-ray Astronomy Cambridge University Press, 2011
- [11] A. Fruscione et al., Chandra News 14, 36 (2007).
- [12] P. Freeman, S. Doe, A. Siemiginowska, Proc. SPIE, 4477, 76 (2001). <https://doi.org/10.1117/12.447161>
- [13] Zanzardo G, Staveley-Smith L, Indebetouw R, Chevalier RA, Matsuura M, Gaensler BM, Barlow MJ, Fransson C, Manchester RN, Baes M, Kamenetzky JR, Lakićević M, Lundqvist P, Marcaide JM, Marti-Vidal I, Meixner M, Ng CY, Park S, Sonneborn G, Spyromilio J, van Loon JT (2014) Astrophys J 796(2):82

- [14] Andrews JEE, Gallagher JS, Clayton GC, Sugerman BEK, Chatelain JP, Clem J, Welch DL, Barlow MJ, Ercolano B, Fabbri J, Wesson R, Meixner M (2010) *Astrophys J* 715(1):541
- [15] Dwek E (1998) *Astrophys J* 501:643
- [16] H. L. Gomez, C. J. R. Clark, T. Nozawa, O. Krause, E. L. Gomez, M. Matsuura, M. J. Barlow, M.-A. Besel, L. Dunne, W. K. Gear, P. Hargrave, Th. Henning, R. J. Ivison, B. Sibthorpe, B. M. Swinyard⁵, and R. 'Wesson Dust in historical Galactic Type Ia supernova remnants with Herschel', (2012) *Astron. Soc.* 420, 3557–3573
- [17] Williams BJ, Borkowski KJ, Reynolds SP, Ghavamian P, Raymond JC, Long KS, Blair WP, Sankrit R, Smith RC, Points S, Winkler PF, Hendrick SP (2011) *Astrophys J* 729(1):65
- [18] Szalai T, Vinkó J, Balog Z, Gáspár A, Block M, Kiss LL (2011) *Astron Astrophys* 527:A61
- [19] Heger A, Fryer CL, Woosley SE, Langer N, Hartmann DH (2003) How Massive Single Stars End Their Life. *The Astrophysical Journal* v.591, No.1, pp. 288–300
- [20] Rest A, Welch DL, Suntzeff NB, Oaster L, Lanning H, Olsen K, Smith RC, Becker AC, Bergmann M, Challis P, Clocchiatti A, Cook KH, Damke G, Garg A, Huber ME, Matheson T, Minniti D, Prieto JL, Wood-Vasey WM (2008) Scattered-light echoes from the historical Galactic supernovae Cassiopeia A and Tycho (SN 1572). *Astrophys J* 681:L81–L84