

Львівський національний університет імені Івана Франка  
Фізичний факультет  
Кафедра астрофізики

УДК 524.354

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

"Доплерографія залишку наднової Тихо Браге"

Виконала студентка ФзФм-61  
спеціальності "Фізика та астрономія"  
Патрій М. В.

Керівники  
докт. ф.-м. н. Петрук О. Л.  
докт. ф.-м. н. Ваврух М. В.

Рецензент  
докт. ф.-м. н. Новосядлий Б. С.

м. Львів - 2021 р.

## Анотація

В наш час дослідження наднових зір пов'язані не лише з вивченням цих об'єктів. Вони широко використовуються у космології, фізиці космічних променів та фізиці нейтрино, а залишки наднових відіграють важливу роль у фізиці високих енергій. У роботі проведено аналіз даних спостережень залишку наднової Тихо Браге (SN 1572), отриманих космічною обсерваторією Chandra. Використовуючи спеціальний програмний пакет для аналізу даних рентгенівського телескопа Chandra CIAO-4.12, створено мапи залишку для певних енергетичних діапазонів, а саме двох найяскравіших ліній: кремнію і сірки. Отримано і проаналізовано спектри теплового та синхротронного випромінювання з малих регіонів по всій поверхні об'єкта. Використовуючи відповідні спектральні моделі `xbremss` та `gauss1d`, профітовано та одержано основні характеристики ліній. За результатами досліджень отримано 2D розподіл швидкості руху вздовж променя зору кремнію та сірки в зоряному викиді з урахуванням ефекту Доплера.

## Abstract

Supernovae play a significant role in the modern astronomy. Their remnants have a key role in the number of important questions in cosmology, neutrino astrophysics and high-energy astrophysics. The observational data of the Tycho Brahe supernova remnant (SN 1572) obtained by the Chandra Space Observatory are analyzed in present work. Using a special software package for data analysis of the Chandra X-ray telescope CIAO-4.12, images of the remnant have been produced for a number of photon energy ranges. Namely, for the two brightest lines of Silicon and Sulfur. The spectra of thermal and synchrotron radiation from small regions over the whole SNR surface were extracted and analyzed. Using respective spectral models `xbremss` та `gauss1d` the spectra were fitted and main characteristics of the lines were obtained. According to the results of research, and taking into account the Doppler effect, a 2D distribution of the velocity along the line of sight of Si and S in stellar ejecta was obtained.

# Зміст

Вступ	4
<b>1 Огляд літератури</b>	<b>5</b>
1.1 Залишок наднової 1572 (Тихо Браге) . . . . .	5
<b>2 Методи обробки даних залишку наднової Тихо, отриманих зі спостережень космічного рентгенівського телескопу Chandra</b>	<b>8</b>
2.1 Обробка даних рентгенівських спостережень . . . . .	8
2.2 Ефект Доплера . . . . .	9
2.3 Застосування ефекту Доплера до локальних комірок по всій поверхні залишку наднової Тихо . . . . .	10
<b>3 Результати досліджень</b>	<b>16</b>
3.1 Фіти спектрів ліній кремнію та сірки . . . . .	16
3.2 Мали основних параметрів ліній Si та S . . . . .	19
<b>Висновки</b>	<b>27</b>
<b>Література</b>	<b>28</b>
• Додаток А	30
• Додаток В	32
• Додаток С	35

## Вступ

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 [1]. Як наслідок, це призводить до гравітаційного колапсу й до вибуху зорі [2]. 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 радіовипромінювання та рентгенівських променів. 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 [3]. Подібна катастрофа викидає речовину зорі, яка розлітається зі швидкістю 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 значну частину хімічних елементів, аж до Рубідію [4].

Виділяють два типи наднових - Тип I та Тип II [5]. Характерною ознакою Типу II є наявність ліній водню у спектрі, в той час, як в Типу I лінії водню у максимумі блиску відсутні [6]. 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. Огляд літератури

## 1.1. Залишок наднової 1572 (Тихо Браге)

Наднава 1572 спалахнула в сузір'ї Кассіопеї в листопаді 1572 року, в галактиці Чумацький Шлях на відстані близько 10 тис. світлових років від Землі [7]. 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 Китаї та Кореї, пізніше її помітили і в Європі. Найбільше значення видимої зоряної величини становило  $-4$ , а відтак подію можна було спостерігати неозброєним оком. [8], [9].

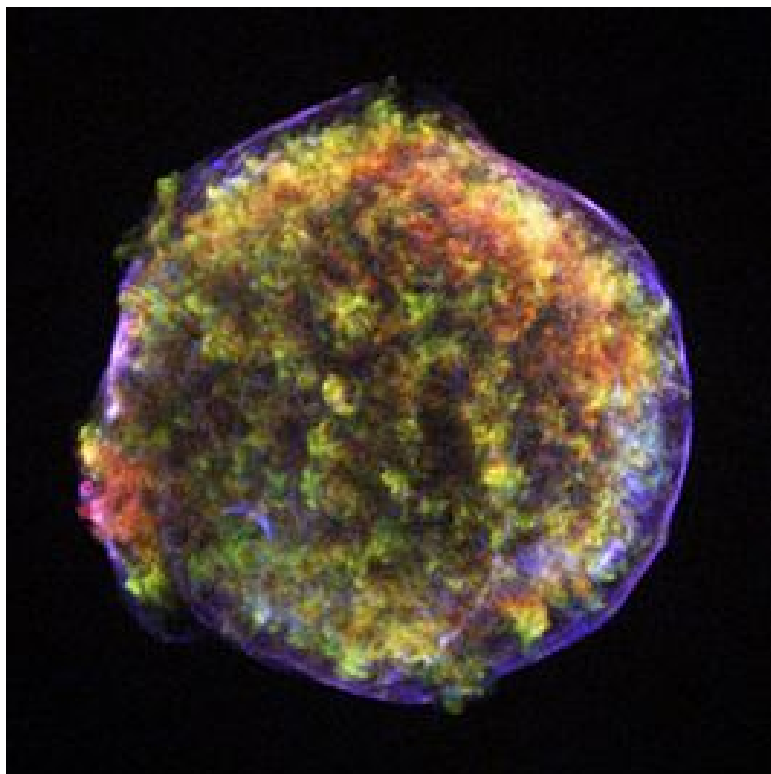


Рис. 1. Зображення залишка наднової 1572 у рентгенівському діапазоні, отримане Рентгенівською обсерваторією Chandra [10].

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 спадади 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 наднової зорі [11].

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. 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 надною. А провівши аналіз кривої блиску на основі даних Тихо Браге, він відніс її до наднової типу Ia. Дані спектральних спостережень залишка показали наявність у спектрі наднової 1572 ліній магнію, силіцію, сульфур, кальцію і заліза, що є характерною ознакою типу Ia, тобто підтвердило висновки Бааде [11], [12]. Незважаючи на це, дискусії про точну класифікацію залишку продовжувались, аж до моменту поки виявлення оптичного спектру поблизу максимуму розсіяного світлового відлуння в 2008 році не дало остаточного підтвердження того, що це тип Ia [13].

Отож, наднова 1572 - один із прикладів типу Ia, що виникла внаслідок термоядерного вибуху білого карлика, який отримав чимало речовини від компаньйона-гіганта та досяг межі Чандрасекара. Внаслідок нуклеосинтезу утворились радіоактивні елементи, які розпались під час вибуху на вторинні продукти. Різке зростання світності зумовлене розпадом Ni 56. А відтак

є можливість спостерігати лінії в гамма-діапазоні, яке напряду пов'язане із періодом піврозпаду радіоактивних елементів Ni 56, пізніше Co 56 і Ti 44. На початкових стадіях еволюції молодого залишку викинута речовина, швидкість якої сягає десятки тисяч кілометрів 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 викинutoї речовини, що розширюється. Така подвійна структура ударних хвиль демонструє фізичні процеси викиду матеріалу та подальший розіток оболонки. Радіоспостереження показують наявність у залишку оболонки, формування якої пов'язане із викинutoю речовиною та матеріалом, нагребеним із міжзоряного середовища.

В наш час чимало астрофізичних досліджень спрямовані на вивчення цього небесного об'єкта. Можливою зорею-компаньйоном білого карлика в тісній подвійній системі був запропонований червоний субгігант [14]. На сьогодні колишнім супутником вибухаючого білого карлика вважають зорю G, яка розташована поблизу центру залишку наднової SN 1572 і є зорею-попередником, подібною на періодичну нову [15].

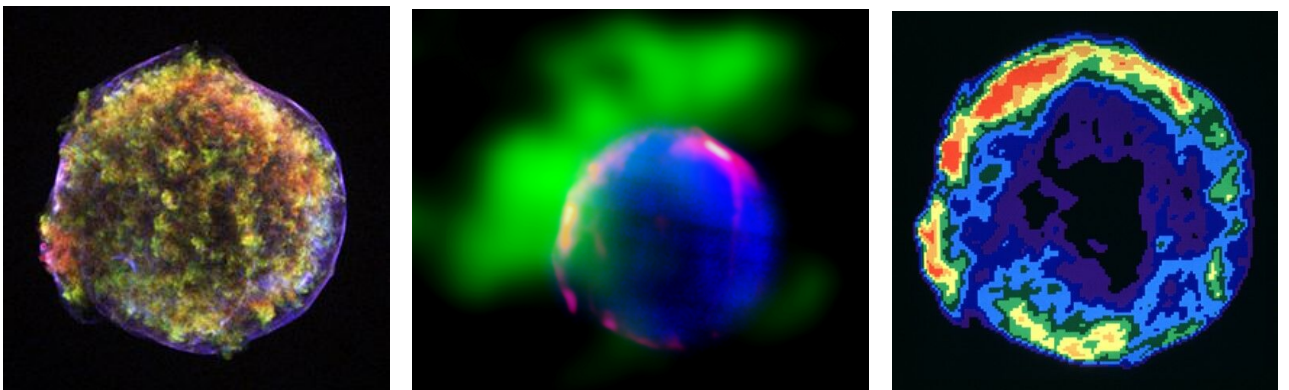


Рис. 2. Залишок SN 1572 у рентгенівському (Chandra) [10], інфрачервоному [16] та радіо (VLA) [10] діапазонах відповідно.

Залишок наднової Тихо випромінює у різних діапазонах довжин хвиль. Хоча його і спостерігають в оптичному діапазоні, вперше він був виявлений на довжинах радіохвиль. Саме завдяки радіо, оптичним, рентгенівським та гамма спостереженням накладено обмеження на відстань до залишку, яка варіюється від 2 до 5 кпк [17], [18], [19], [20], [21]. На даний час загальноприйнятим є значенням у 2.4 кпк. Розмір ж самого об'єкту у діаметрі сягає значення 8 аркмінут.

Отож, властивості саме цього залишку ми будемо досліджувати надалі.

## 2. Методи обробки даних залишку наднової Тихо, отриманих зі спостережень космічного рентгенівського телескопу Chandra

### 2.1. Обробка даних рентгенівських спостережень

Вже впродовж тривалого часу залишок наднової Тихо Браге викликає велику цікавість у астрономів. На сьогоднішній день налічується чимала кількість спостережень та досліджень цього небесного об'єкта. Хоча він вже досить добре вивчений, проте його 3D структура практично невідома, оскільки досліджується лише його 2D проекція на небесну сферу.

Отож, основна ідея цієї роботи полягає в тому, щоб зробити крок до можливості відтворення 3D структури залишку SN 1572, а відтак здійснити вагомий внесок у його дослідження. Варто зауважити, що під час аналізу нами до уваги береться ефект Доплера, який дає змогу оцінити загальну картину руху речовини в оболонці залишку. Досліджуються дві найбільш помітні у спостережуваному рентгенівському спектрі лінії кремнію та сірки.

Для наших досліджень використовуються дані спостережень космічної обсерваторії Chandra, яка проводить спостереження в рентгенівському діапазоні [22]. Завдяки високій кутовій роздільній здатності дзеркал телескоп Chandra чутливий до джерел рентгенівського випромінювання, які є в 100 разів слабшими, аніж будь-який попередній рентгенівський телескоп. Його роздільна здатність становить  $0.5''$ . Земна атмосфера поглинає переважну більшість рентгенівського випромінювання і тому наземними 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 0.2-10 кеВ. Він складається зі 100 CDD чіпів і створює як якісні карти так і якісні спектри [23].

Для обробки даних з Chandra [23], використовується спеціальне програмне забезпечення *CIAO-4.12*, а також відповідний пакет *Sherpa*, призначений для моделювання та фітування спектрів. Він дає змогу користувачеві побудувати складні моделі та профітувати їх до заданих, використовуючи різні статистичні та оптимізаційні методи [24], [25]. Програма *DS9* дозво-



ляє працювати з астрономічними зображеннями і візуалізувати дані. Вона підтримує зображення формату fits, дозволяє маніпулювати вибраними регіонами, містить різні алгоритми масштабування та можливості створення багатоколірних мап.

## 2.2. Ефект Доплера

*Ефект Доплера* - це явище, що полягає у зміні довжини хвилі або ж частоти сигналу, яку реєструє приймач, і зумовлене рухом джерела чи приймача. Його виявив австрійський фізик Крістіан Доплер у 1803 році.

Це відкриття надалі відіграло ключову роль в науці і техніці. Не винятком є й астрономія, оскільки завдяки ефекту Доплера можна визначити швидкості космічних об'єктів відносно спостерігача. Відомо, що темні лінії у спектрах космічних об'єктів спочатку завжди розташовані в строго фіксованому місці. Це місце відповідає довжині хвилі поглинання того чи іншого хімічного елемента. В об'єкта, що наближається чи віддаляється всі смуги змінюють своє положення в синю або ж червону область спектру відповідно. Порівнюючи спектральні лінії земних хімічних елементів з аналогічними лініями на спектрах зір, можна оцінити з якою швидкістю наближається чи віддаляється від нас об'єкт.

В загальному випадку, у класичній фізиці, коли швидкості джерела та приймача відносно середовища є меншими, ніж швидкості хвиль в середовищі, взаємозв'язок між спостережуваною частотою  $f$  та частотою випромінювання  $f_0$  має наступний вигляд:

$$f = \left( \frac{c \pm v_r}{c \mp v_s} \right) f_0$$

тут  $c$  - швидкість поширення хвиль у середовищі;

$v_r$  - швидкість приймача відносно середовища (додається, якщо приймач рухається до джерела, віднімається, якщо приймач віддаляється від джерела);

$v_s$  - швидкість джерела відносно середовища (додається, якщо джерело віддаляється від приймача, віднімається, якщо джерело рухається до приймача).

Для нерухомого спостерігача ( $v_r = 0$ )

$$f = \frac{c}{c - v} f_0, \quad \text{або ж} \quad \frac{f}{f_0} = \frac{1}{1 - \frac{v}{c}},$$

де  $v$  - швидкість джерела відносно спостерігача (додатня, якщо джерело наближається). Коли  $v \ll c$ , то, розкладаючи в ряд, отримаємо

$$\frac{f}{f_0} = 1 + \frac{v}{c}$$

Нас цікавитиме визначення швидкості  $v$  за спостереженнями зсуву частоти  $f - f_0$ , тому перепишемо цю формулу у такому вигляді:

$$v = c \frac{f - f_0}{f_0} \quad (1)$$

В рамках дослідження завдяки доплерівському зсуву можна отримати інформацію щодо зміщення ліній у спектрі в бік вищих або нижчих енергій, а відтак оцінити локальні швидкості руху речовини вздовж променя зору, що в свою чергу може дати змогу відтворити реальну картину 3D структури залишку.

### 2.3. Застосування ефекту Доплера до локальних комірок по всій поверхні залишку наднової Тихо

#### Спостережуваний спектр рентгенівського випромінювання

Нами отримано дані спостережень залишку наднової Тихо за 2003, 2007, 2009 та 2015 роки.

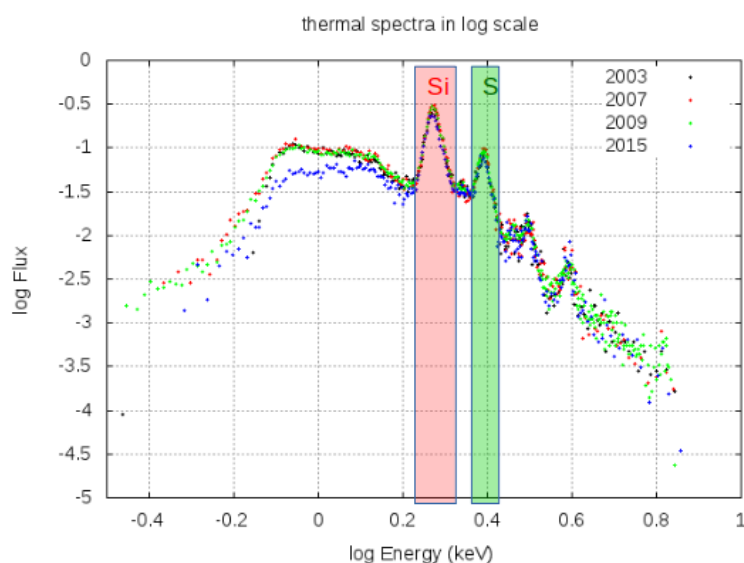


Рис. 3. Спектр рентгенівського випромінювання залишку Тихо для 2003, 2007, 2009 та 2015 років відповідно.

Для наочності на Рис. 3. подано спостережуваний спектр рентгенівського випромінювання за кожен окремий рік та позначено найпомітніші лінії кремнію і сірки. Саме ці дві лінії досліджуються у роботі.

### Сітка для аналізу спектрів

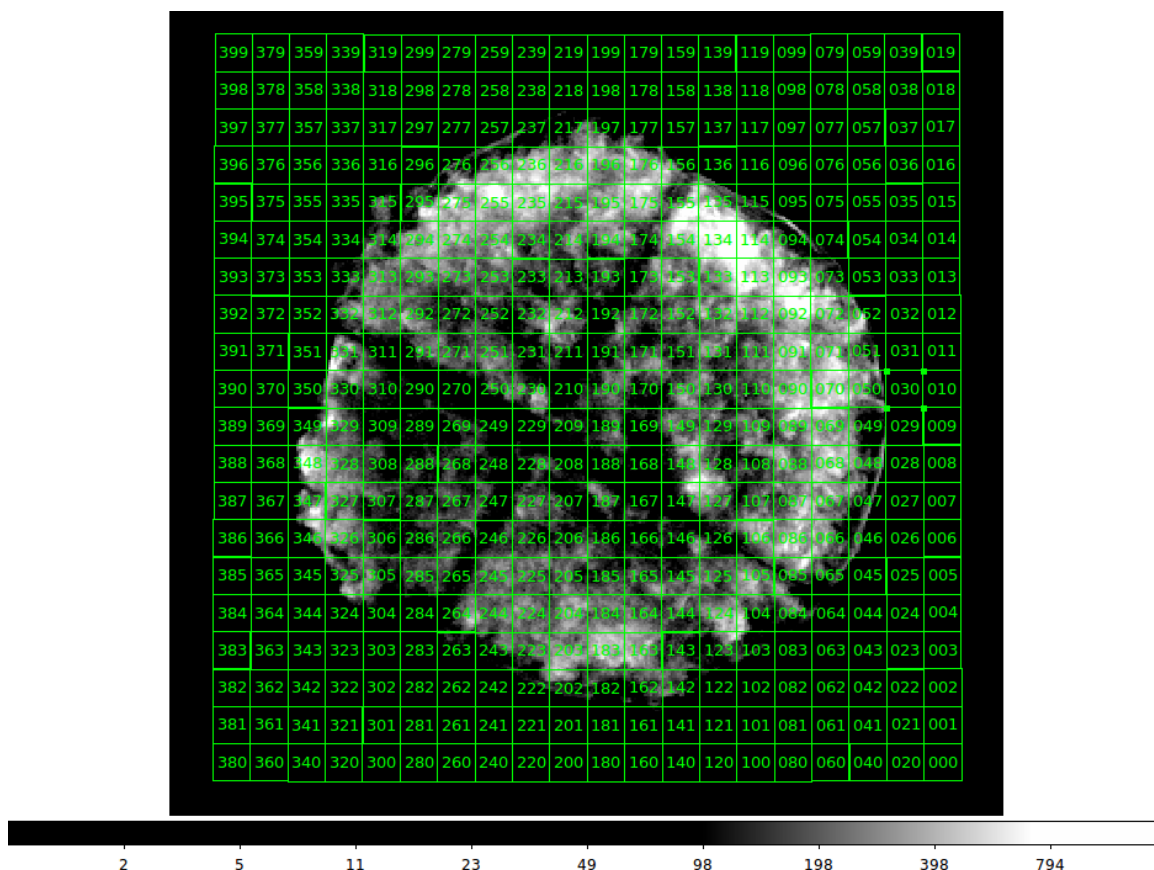


Рис. 4. Сітка розміром 20x20 комірок, яка покриває усю область спостережень, які аналізувалися в роботі. В комірках вказано їх номери.

Нашим завданням є 'доплерографія' залишку, тобто побудова карти зсувів частот (та швидкостей) по його поверхні.

Щоб отримати локальні спектри у відповідних лініях було розроблено сітку по всій поверхні залишку розміром 20x20 комірок (Рис. 4.) та фільтр-маска (Рис. 5), щоб вилучити комірки, які розташовані за межами залишку. А також була проведена корекція зображення до всесвітньої системи координат (wcs - the world coordinate system).

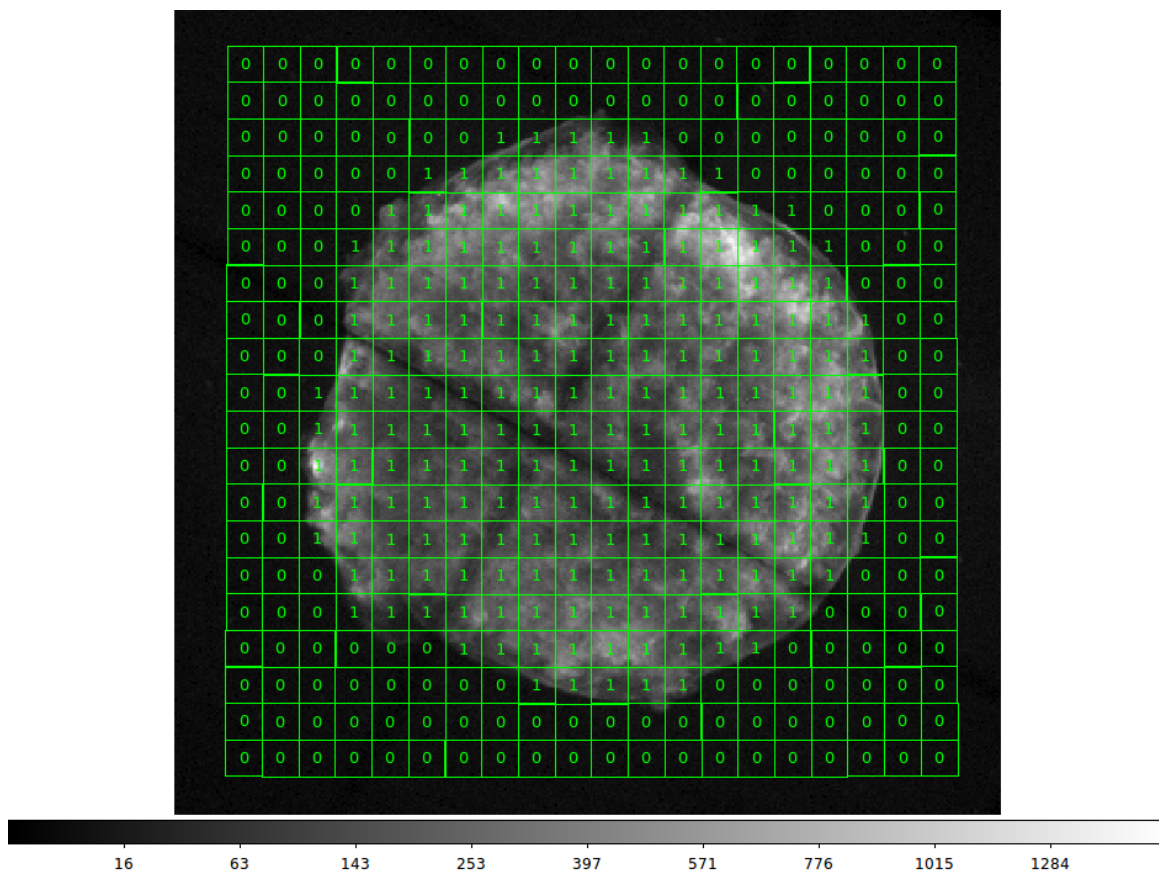


Рис. 5. Фільтр для вилучення комірок, що знаходяться поза межами залишку. Комірки зі значенням 0 вилучаються з нашого аналізу.

### Спектри з локальних комірок

Табл. 1. Тривалості експозицій для кожного obsID 2009 року (дані взяті з архіву Chandra X-ray Center [26]).

obsID	Right Ascension $^{\circ}$ ', Longitude of the position $^h$	Declination $^{\circ}$ ', Latitude of the position $^h$	Start Date	Event count, L2	Exposure time, ks
10093	00 25 19.00	+64 08 10.00	2009-04-13	8030133	118.35

10094	00 25 19.00	+64 08 10.00	2009-04-18	6111096	89.97
10095	00 25 19.00	+64 08 10.00	2009-04-23	11769046	173.37
10096	00 25 19.00	+64 08 10.00	2009-04-27	7183469	105.72
10097	00 25 19.00	+64 08 10.00	2009-04-11	7288373	107.43
10902	00 25 19.00	+64 08 10.00	2009-04-15	2682840	39.53
10903	00 25 19.00	+64 08 10.00	2009-04-17	1622641	23.92
10904	00 25 19.00	+64 08 10.00	2009-04-13	2353240	34.7
10906	00 25 19.00	+64 08 10.00	2009-05-03	2790082	41.12

Для аналізу обрано дані спостережень рентгенівського телескопу Chandra за 2009 рік. оскільки за цей період часу є найбільш тривале локалізоване в часі (впродовж кількох місяців) спостереження. obsID з найдовшими експозиціями вказано в Табл. 1.

Нами було проаналізовано спектри з кожної комірки зі значенням фільтру, рівним 1 (Рис. 5.). Для отримання спектрів кожної комірки сітки створено код для *СІАО*, наведений в Додатку А.

### Фітування спектрів

Щоб проаналізувати отримані спектри двох хімічних елементів необхідно виконати наступні кроки для кожної комірки.

Загальний потік випромінювання в рентгенівській лінії складається з потоку неперервного спектру в діапазоні лінії (континуум) та власне фотонів, які формують лінію.

Тому перш за все потрібно профітувати континуум на високих енергіях у діапазоні 4.1-6.0 кеВ (в цьому діапазоні немає ліній) та отримати значення параметрів моделі континууму (зокрема, температуру та амплітуду). Надалі ці значення фіксуються для кожної комірки і використовуються вже при фітуванні теплового спектру випромінювання в діапазоні, де містяться лінії, а саме лінія кремнію (1.6-2.1 кеВ) та сірки (2.3-2.6 кеВ). Слід зазначити, що кожна лінія фітується окремо, використовуючи гаусіани, які накладаються на континуум. Після усіх цих кроків потрібно проаналізувати якість отриманих фітів, і якщо для якоїсь із комірок він виявиться не достатньо добрим, то вже вручну покращувати фіт для даної комірки. Це можна зробити за допомогою декількох варіантів: зменшити діапазон енергій так, щоб у фіт потрапляла лише сама лінія без залишків континууму; вручну для гаусівської моделі задавати значення параметрів (положення максимум лінії  $pos$ , амплітуду  $ampl$ , повну ширину на половині амплітуди  $fwhm$ ). Коли вдалось покращити фіт від окремих 'поганих' комірок, використовуючи всі наявні дані, потрібно створити мапи кожного із параметрів моделі, щоб побачити загальну картину та коректність виконаного завдання.

Розглянемо детальніше алгоритм для роботи зі спектрами. Як зазначалось раніше, спочатку потрібно профітувати континуум на високих енергіях. Для цього було використано відповідну спектральну модель *xsbremss*, що описує теплове гальмівне випромінювання. Параметри цієї моделі подано у Табл. 2 [27].

Табл. 2. Параметри моделі *xsbremss*

кТ	температура плазми у кеВ
norm	нормування моделі $\frac{3.02 \times 10^{-15}}{4\pi D^2} \int n_e n_I dV,$ $D$ - відстань до джерела (см), $n_e, n_I$ - електронна та іонна концентрації відповідно (см <sup>-3</sup> )

Для фітування континууму використано код, який наведено в Додатку В.

Щоб профітувати двох окремих ліній обрано модель *gauss1d* з одновимірною функцією Гаусса форма якої для точок задається наступним чином:

$$f(x) = \text{ampl} \times e^{-\frac{4\log(2)(x - \text{pos})^2}{\text{fwhm}^2}}$$

Параметри цієї моделі наведені у Табл. 3 [28]. Для фітування спектру, а саме окремої лінії, використано код, наведений в Додатку С.

Власне, об'єктом нашого зацікавлення є параметр моделі *pos*, який вказує на положення лінії. За зміною цього параметра ми зможемо провести 'доплерографію' залишка. Інші параметри будуть використані для контролю правильності розрахованої моделі лінії.

Табл. 3. Параметри моделі *gauss1d*

fwhm	повна ширина на половині максимуму гаусіана. Вона пов'язана зі значенням сигми наступним чином: $FWHM = \sigma \sqrt{8\lg(2)}$
pos	положення центру гаусіана
ampl	амплітуда, значення якої характеризує максимальне значення в моделі лінії

## 3. Результати досліджень

### 3.1. Фіти спектрів ліній кремнію та сірки

Для аналізу обрано усі дані за 2009 рік, оскільки за цей час наявна найбільша кількість спостережень (obsID: 10093, 10094, 10095, 10096, 10097, 10902, 10903, 10904, 10906) із тривалими експозиціями. Щоб отримати максимальну експозицію, проведено процедуру накладення даних з усіх obsID (Рис. 6).

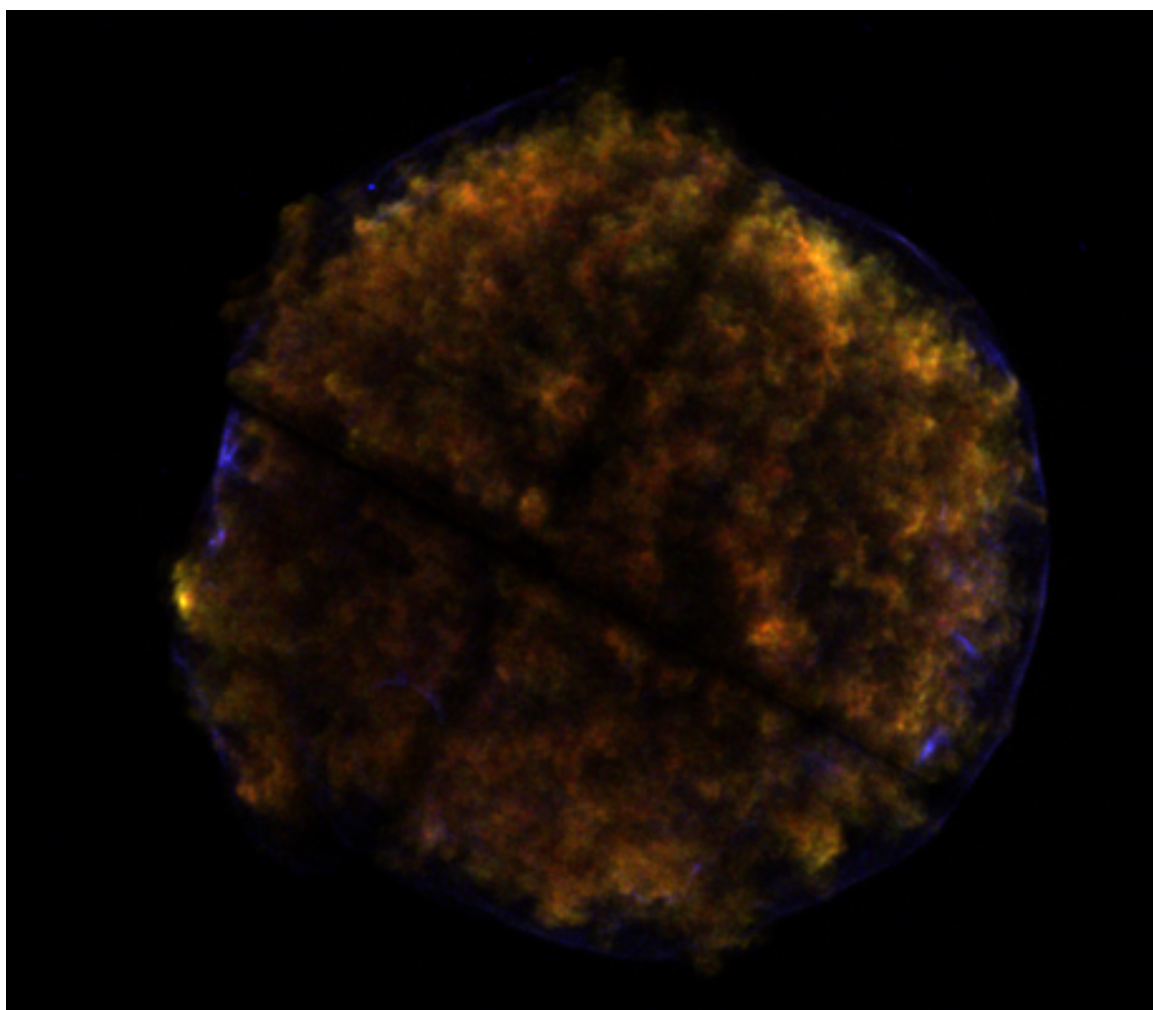


Рис. 6. Композитне зображення з телескопу Chandra у 'фальшивих' кольорах: у червоному кольорі (1.6-2.1 кеВ - лінія Si), зеленому (2.3-2.6 кеВ - лінія S), синьому (4.1-6.0 кеВ - неперервний спектр), створене нами за даними усіх спостережень 2009 року.

Розглянемо більш детально фітування кожної з ліній для окремих комірок.



## Лінія кремнію (1.6-2.1 кеВ)

На графіках (Рис. 7) подано фіти лінії Si. Видно, що крива добре відтворює спостережувані дані і більшість похибок лежать в околі нуля, за винятком кількох точок, які не впливають на загальну картину, а саме, не змінюють параметр  $pos$  (положення лінії).

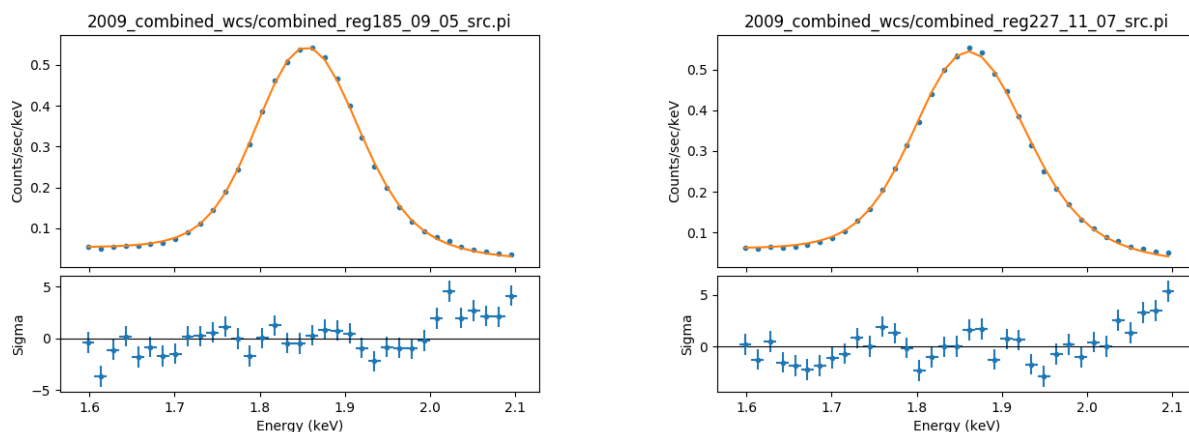


Рис. 7. Фітування лінії Si із локальних комірок 185 ( $rstat = 3.316$ ) і 227 ( $rstat = 3.544$ ) моделлю гаусіан+континуум.

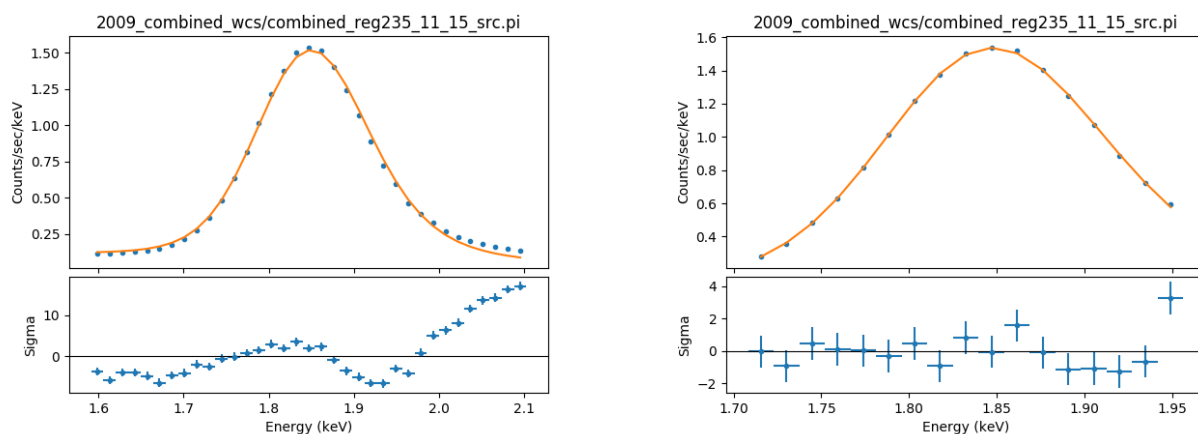


Рис. 8. Приклад 'поганого' фіту (ліворуч  $rstat = 51.421$ ) та його відкорегований варіант (праворуч  $rstat = 1.713$ )

Розглянемо приклад не зовсім точного фіту (Рис. 8). Як видно на графіку зліва, гаусівська крива досить точно відтворює спостережувану форму лінії, проте погано описує хвости лінії. Щодо похибок, вони також помітно збільшуються в околі правого хвоста лінії (що видно на нижній частині графіка). Отож, для подібних комірок необхідно певними маніпуляціями вручну покращити фіт. В даному випадку застосовано ручний підбір параметрів мо-

делі, таких як положення максимуму лінії  $\text{ros}$ , амплітуди  $\text{ampl}$ , повної ширини на половині амплітуди  $\text{fwhm}$ . А також зменшення енергетичного діапазону для фітування так, щоб в нього потрапляла лише сама лінія, без 'хвостів'.

### Лінія сірки (2.3-2.6 кеВ)

Аналогічно, отримано графіки фітування лінії S. Як і в попередньому випадку бачимо, що гаусіан досить точно описує спостережуваний спектр і розкид похибок є незначним.

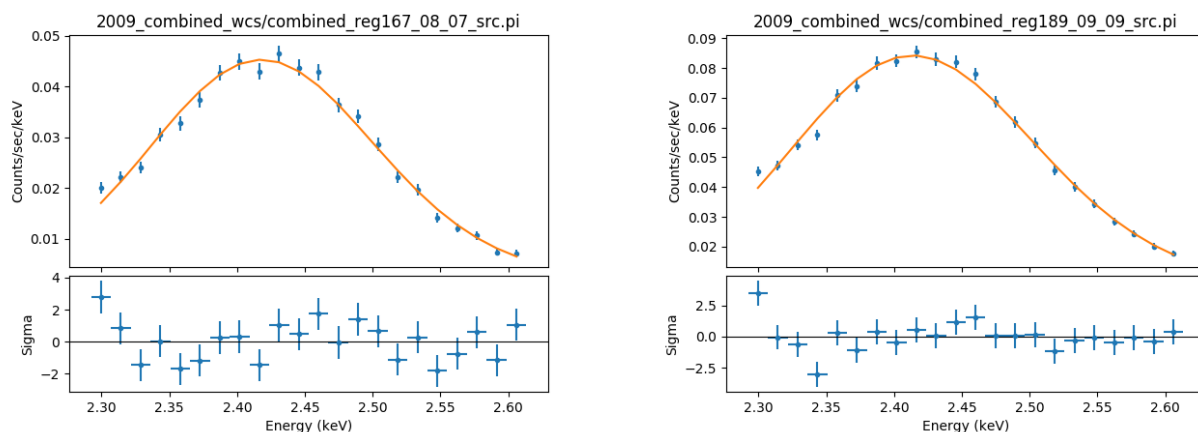


Рис. 9. Фітування лінії S із локальних комірок 167 ( $rstat = 1.757$ ) і 189 ( $rstat = 1.623$ ) гаусіаном

За аналогією до лінії Si, для покращення фіту з окремої комірки проведено підгонку параметрів моделі та обрано вужчий енергетичний діапазон.

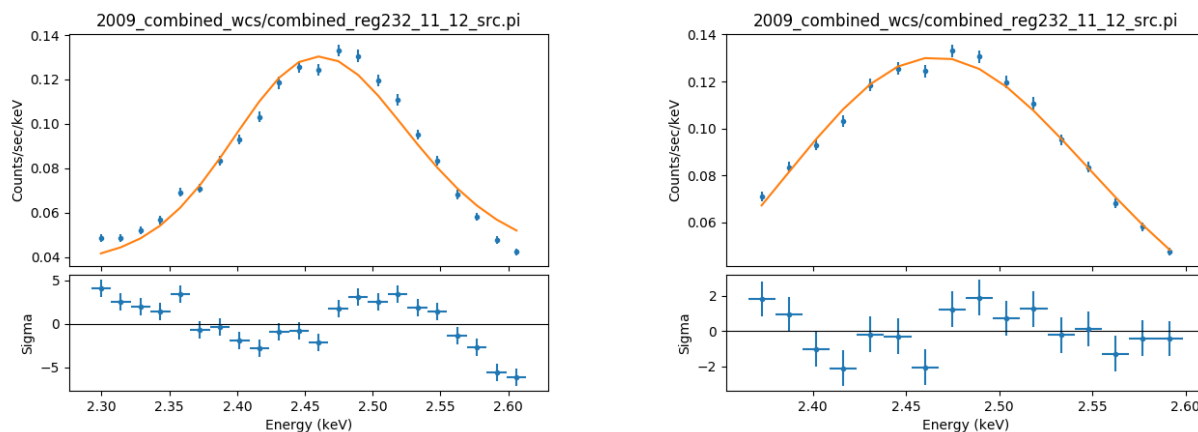


Рис. 10. Приклад 'поганого' фіту (ліворуч  $rstat = 9.6425$ ) та його корекція (праворуч  $rstat = 1.221$ ).

## 3.2. Мапи основних параметрів ліній Si та S

### Статистика (*rstat*)

Параметр *rstat* (reduced statistic) - це статистична характеристика якості фіту, значення якої ділиться на кількість ступенів вільності.

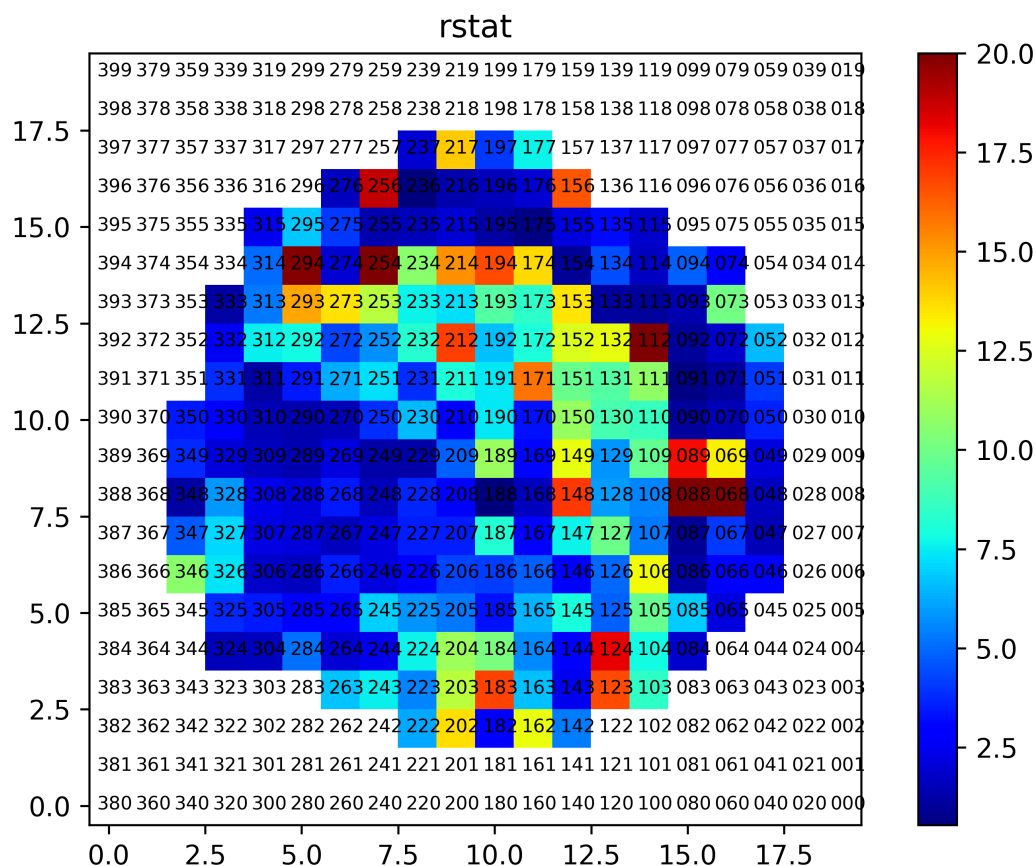


Рис. 11. Карта розподілу значень *rstat* для лінії Si

Слід зазначити, що фіт вважається майже 'ідеальним', якщо значення цієї величини не перевищує 3. Проте, через велику кількість ступенів вільності для реальних спостережень, воно є завжди більшим. Для всіх комірок *rstat* показано на Рис. 11 і Рис. 12. До прикладу, значення *rstat* вказані під Рис. 7-10. На наведених картах розподілу *rstat* вдалось досягнути значень, не більших, ніж 20, що говорить про коректність фіту.

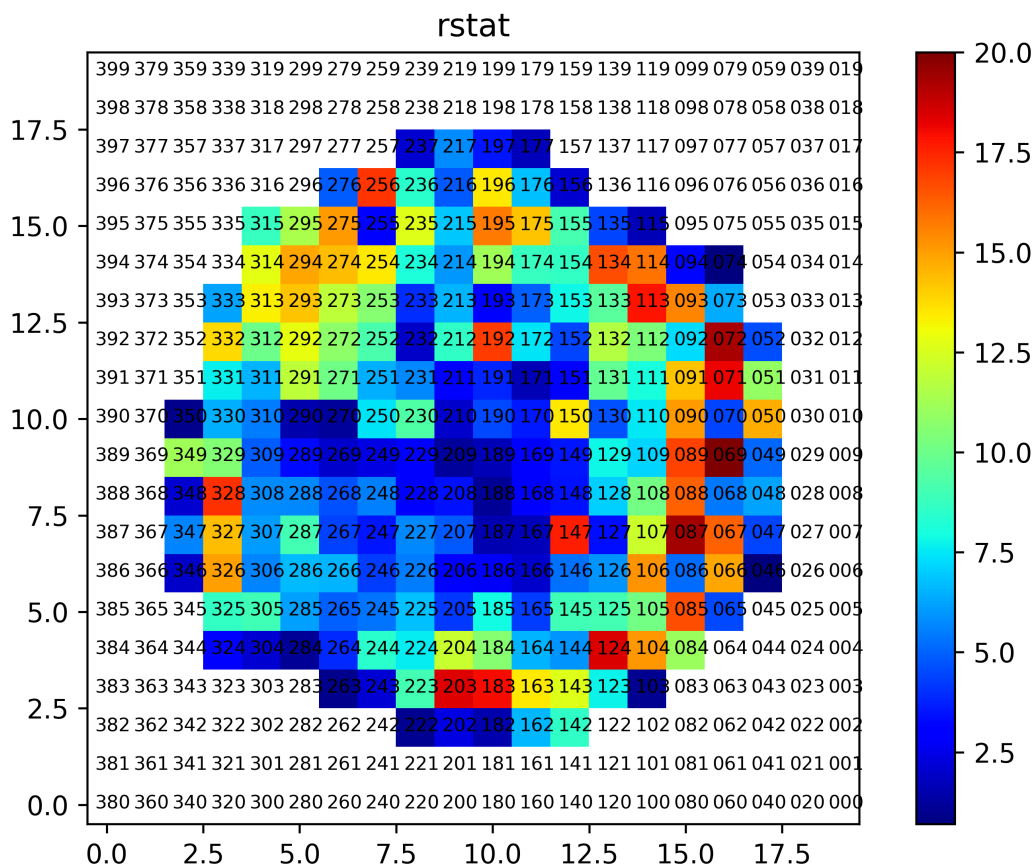


Рис. 12. Карта розподілу значень rstat для лінії S

## Амплітуда (ampl)

Амплітуда характеризує максимальний пік лінії. Тобто, завдяки розподілу цієї величини можна оцінити області, в яких найяскравіше світить той чи інший хімічний елемент. Порівнюючи отримані карти амплітуд з детальними спостереженнями, бачимо, що вони добре відтворюють найбільш яскраві ділянки оболонки залишку (Рис.13, Рис.14).

Аналізуючи карти двох ліній видно, що лінія кремнію в кілька разів яскравіша, ніж лінія сірки.

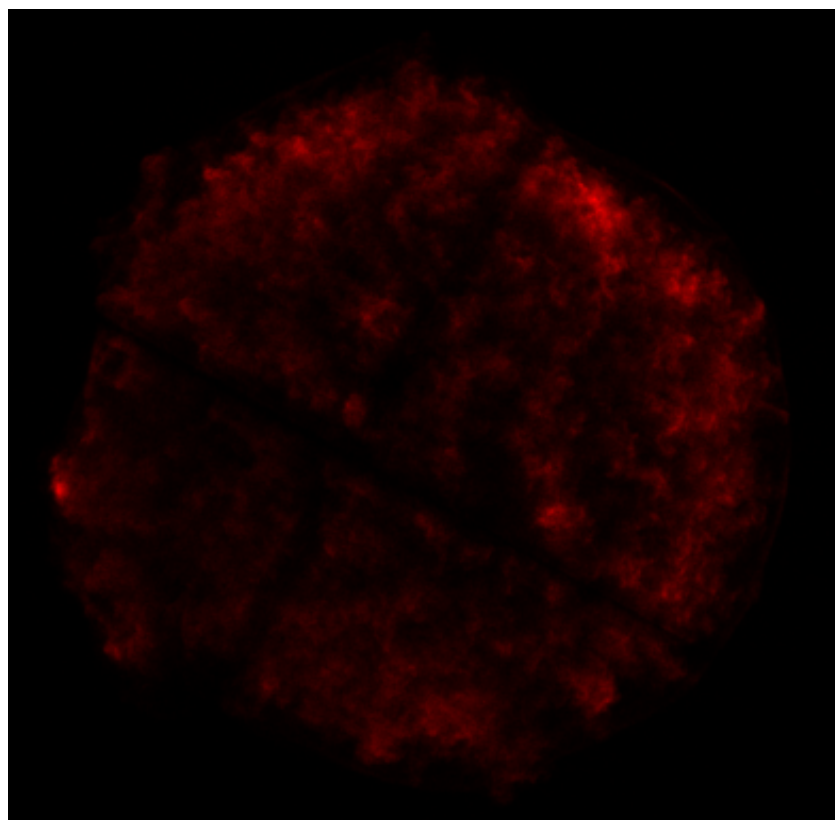
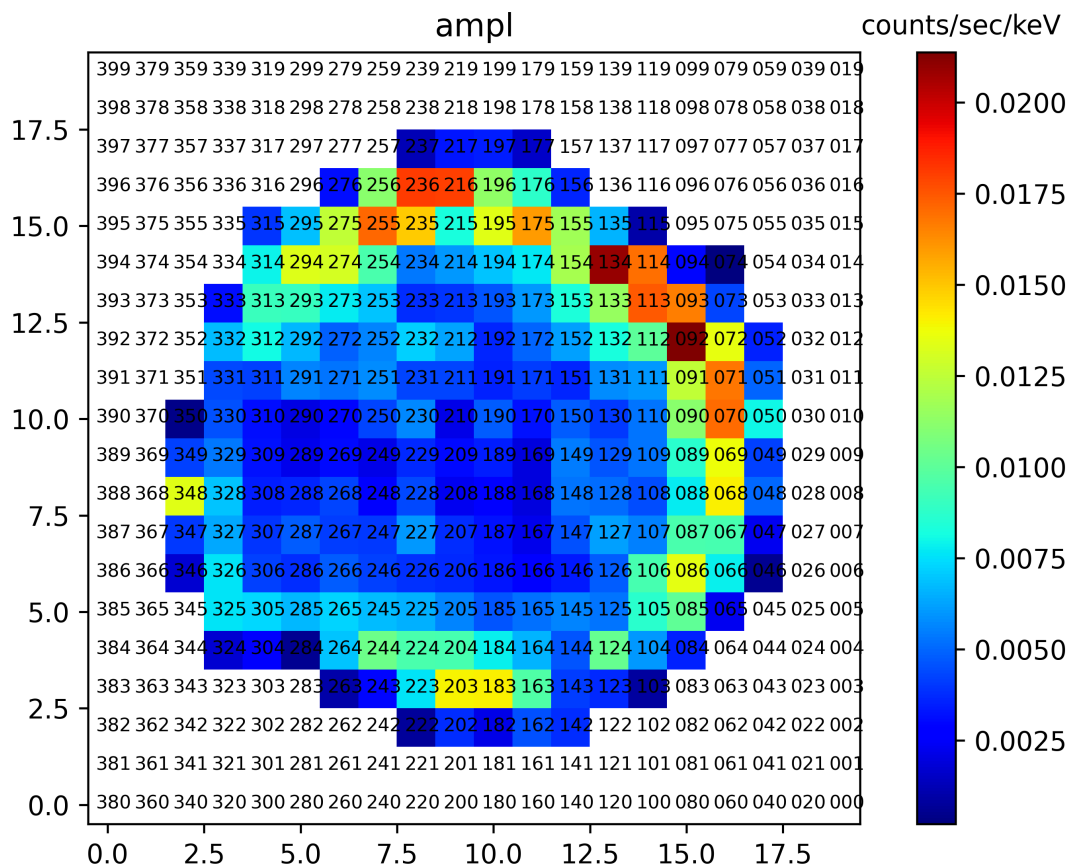


Рис. 13. Карта розподілу значень *ampl* для Si та карта яскравості залишка в діапазоні 1.6-2.1 кеВ.

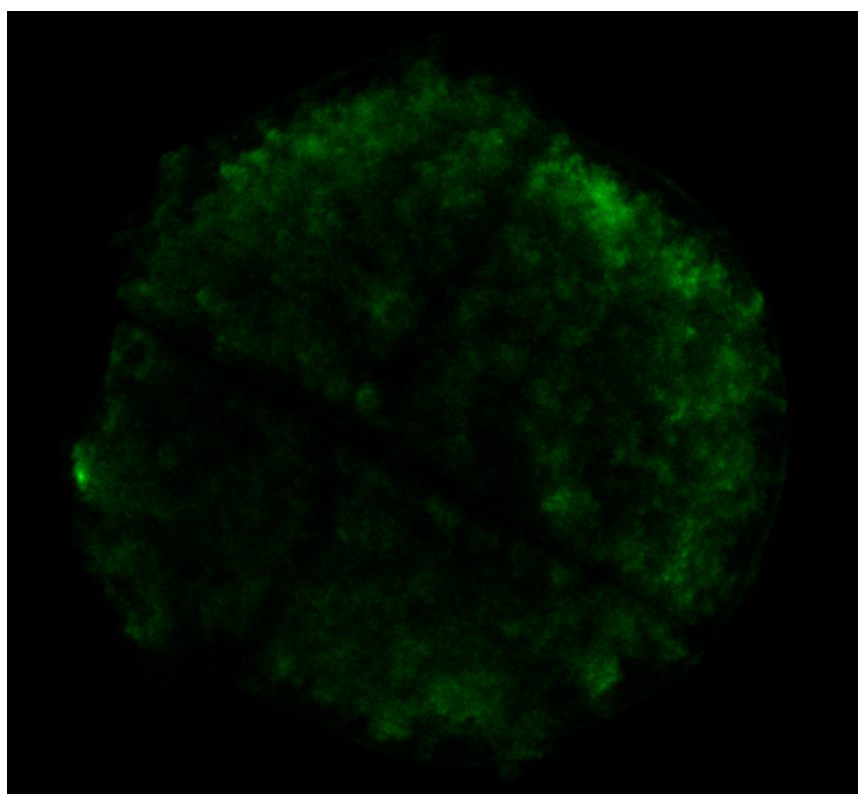
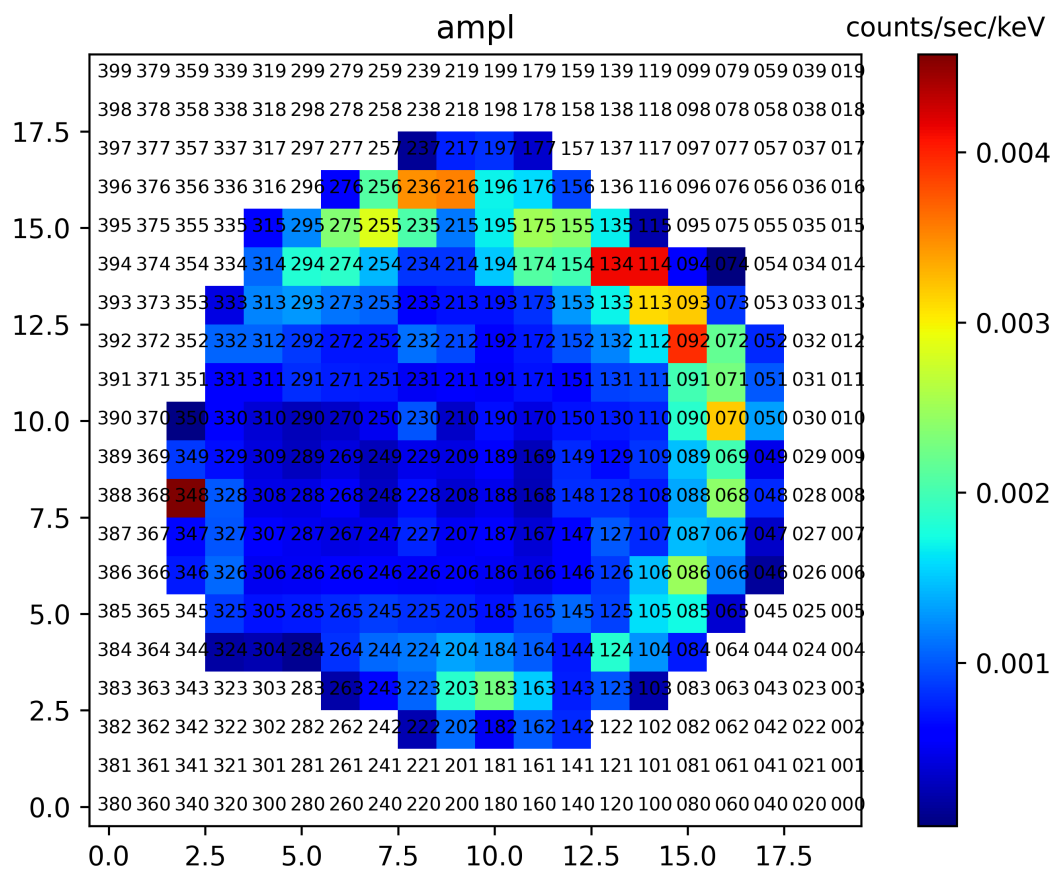


Рис. 14. Карта розподілу значень *ampl* для S та карта яскравості залишка в діапазоні 2.3-2.6 кеВ.

## Повна ширина на половині амплітуди (fwhm)

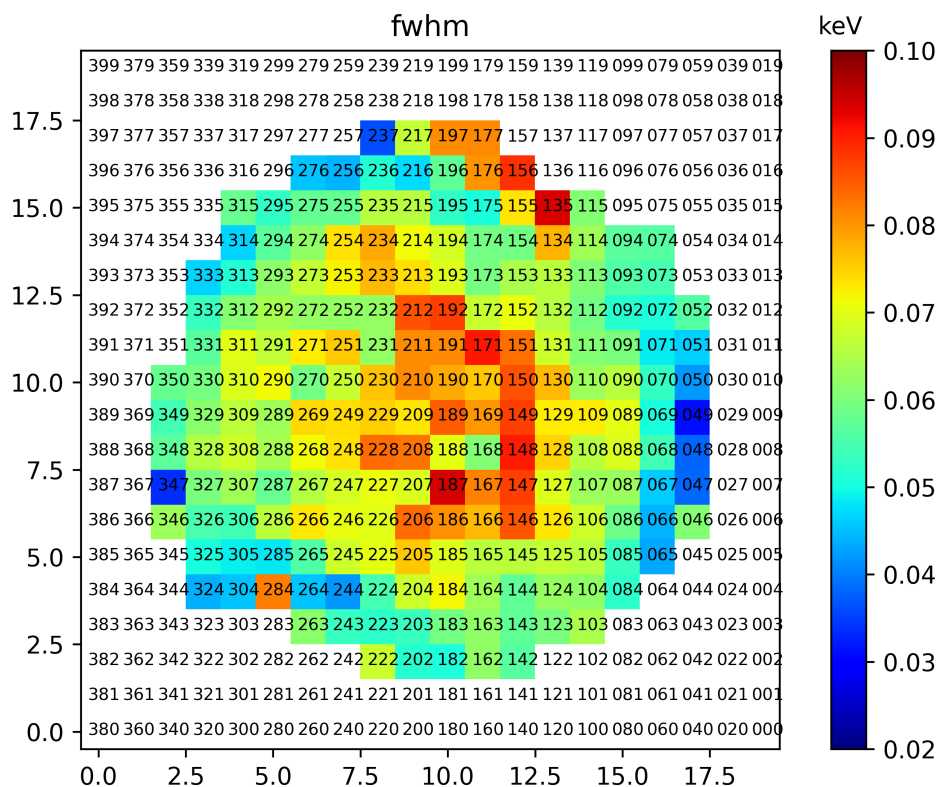


Рис. 15. Карта розподілу значень fwhm для лінії Si.

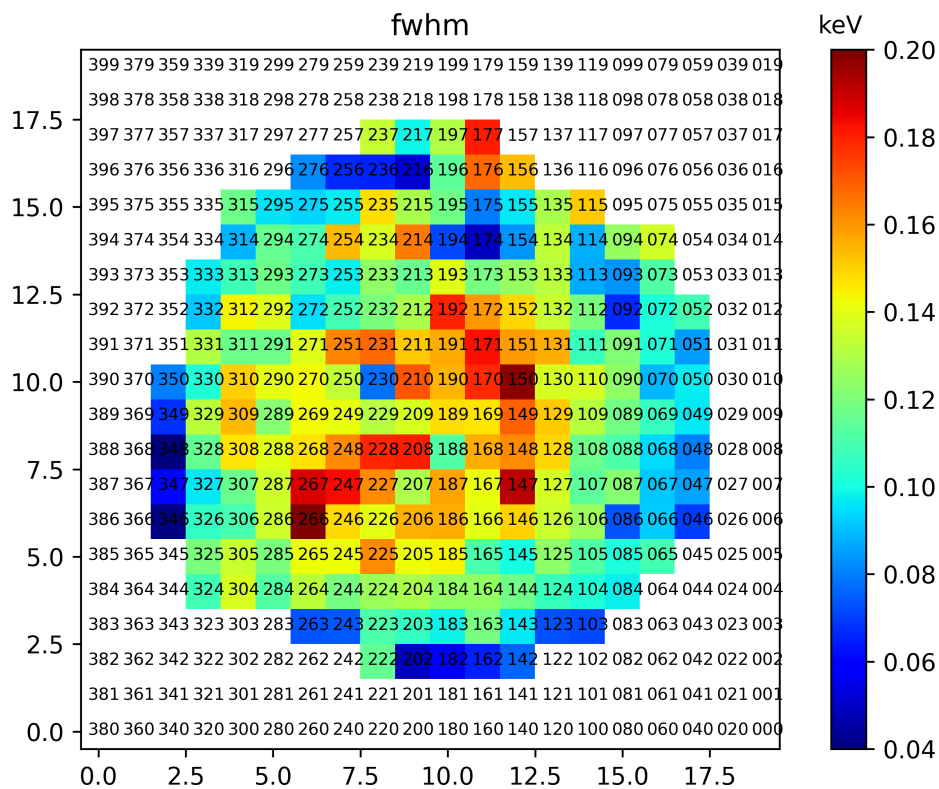


Рис. 16. Карта розподілу значень fwhm для лінії S.

Значення повної ширини на половині амплітуди (fwhm) характеризує хаотичні рухи викинутої речовини.

З наведених карт (Рис.15 та 16) можна дійти висновку про те, що найбільше хаотичних рухів спостерігається вздовж променів зору, які знаходяться поблизу центру залишку.

### Положення центру гаусіана (pos)

Ключовим результатом наших досліджень є отримані значення положення центрів гаусіанів ліній Si та S. В даному випадку значення *pos* відповідають спостережуваній частоті випромінювання  $f = \epsilon/h$ , де  $\epsilon$  - виміряна нами енергія фотону центрального положення гаусіана,  $h$  - стала Планка. Це означає, що маючи ці спостережувані величини  $f$ , а також відомі лабораторні значення частоти випромінювання  $f_0$  нерухомого джерела для ліній Si та S, використовуючи ефект Доплера, можна знайти зміщення в червону чи синю область спектру конкретних ліній. Відповідно будемо знати на нас чи від нас рухається певна локальна частина залишку.

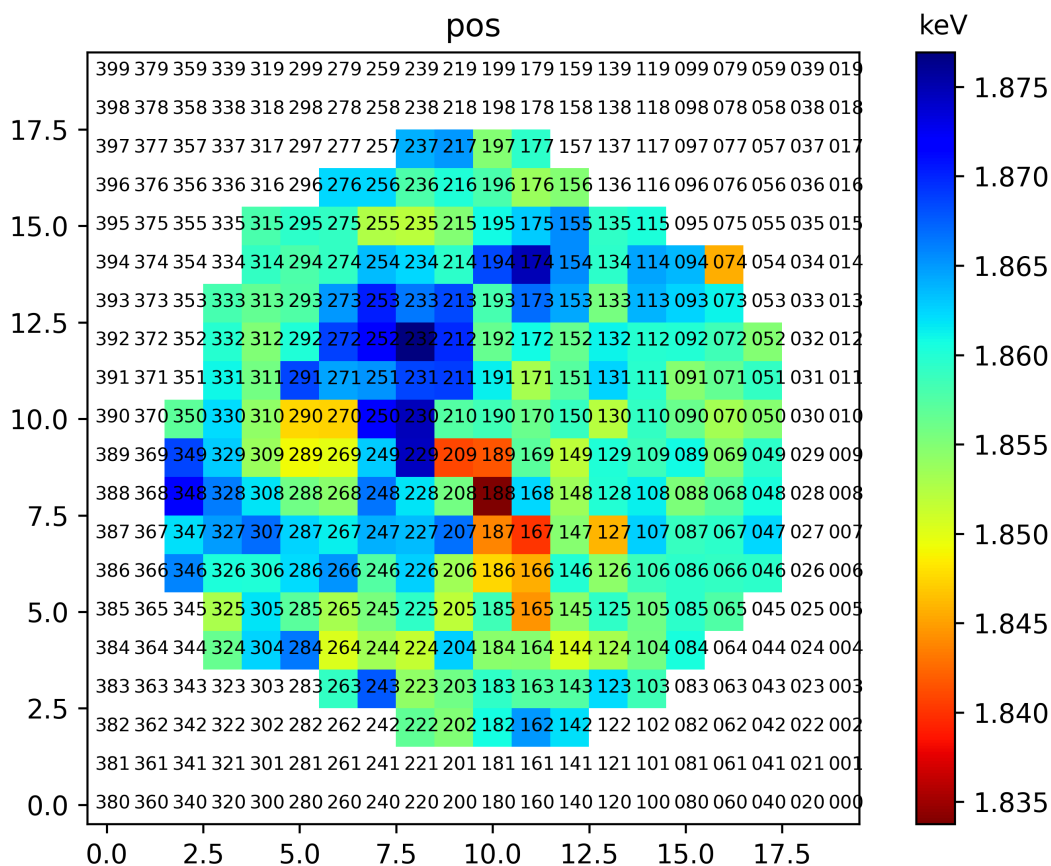


Рис. 17. Карта розподілу значень *pos* для лінії Si.



На Рис.17-18 подано карти значень параметру  $\rho_{os}$  по всій поверхні залишку Тихо.

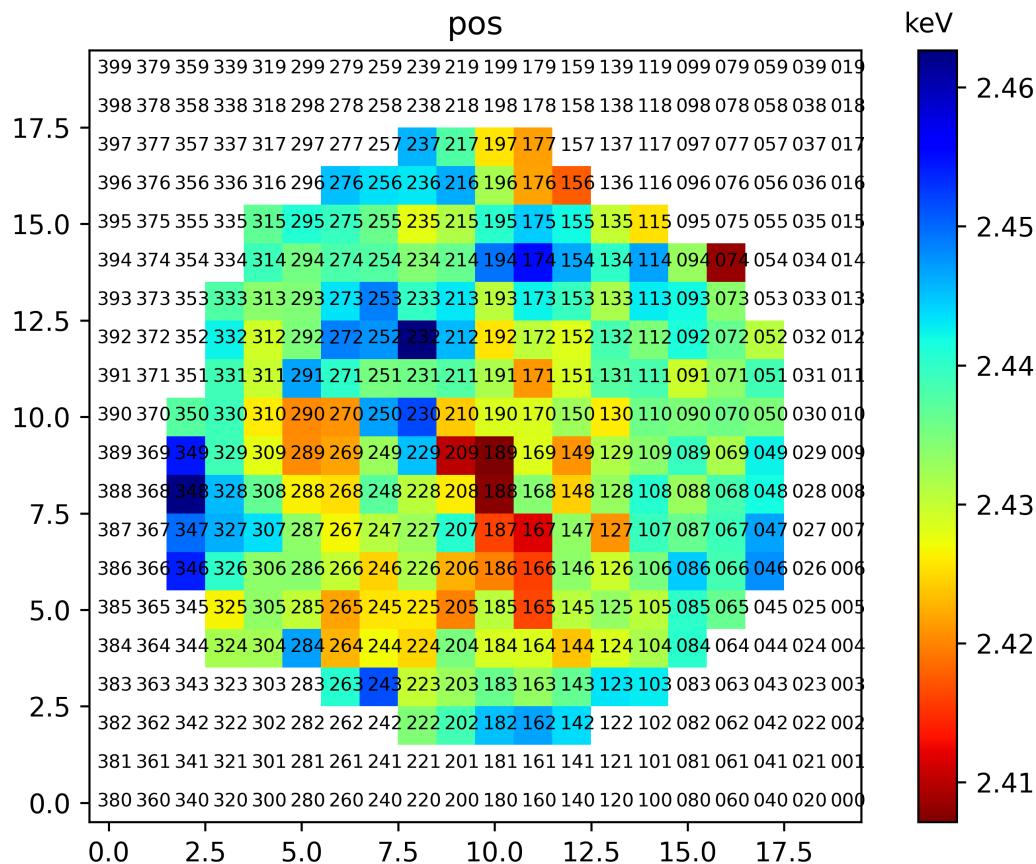


Рис. 18. Карта розподілу значень  $\rho_{os}$  для лінії S.

### Доплерографія залишку (карти швидкостей)

Щоб розрахувати доплерівський зсув для ліній кремнію та сірки у швидкостях, ми використали такі лабораторні значення частоти випромінювання: Si  $f_0 = 1.856$ , S  $f_0 = 2.451$ . Ці величини є зваженим середнім трьох переходів, які формують лінію, та враховують відносні інтенсивності випромінювання кожного з трьох переходів досліджуваних ліній [29].

За використання формули (1) нами розраховано карти швидкостей у двох лініях. На Рис.19-20 подано отримані карти. Чітко видно, що лівова частина викинутої речовини кремнію рухається до нас (синій зсув), хоча й присутні області, де речовина рухається від нас (червоний зсув). Що стосується сірки, то в цьому випадку спостерігається червоний зсув ледь не по всій поверхні залишку. Отже, ця речовина переважно рухається від спостерігача. Така несиметричність свідчить про можливий асиметричний спалах

наднової.

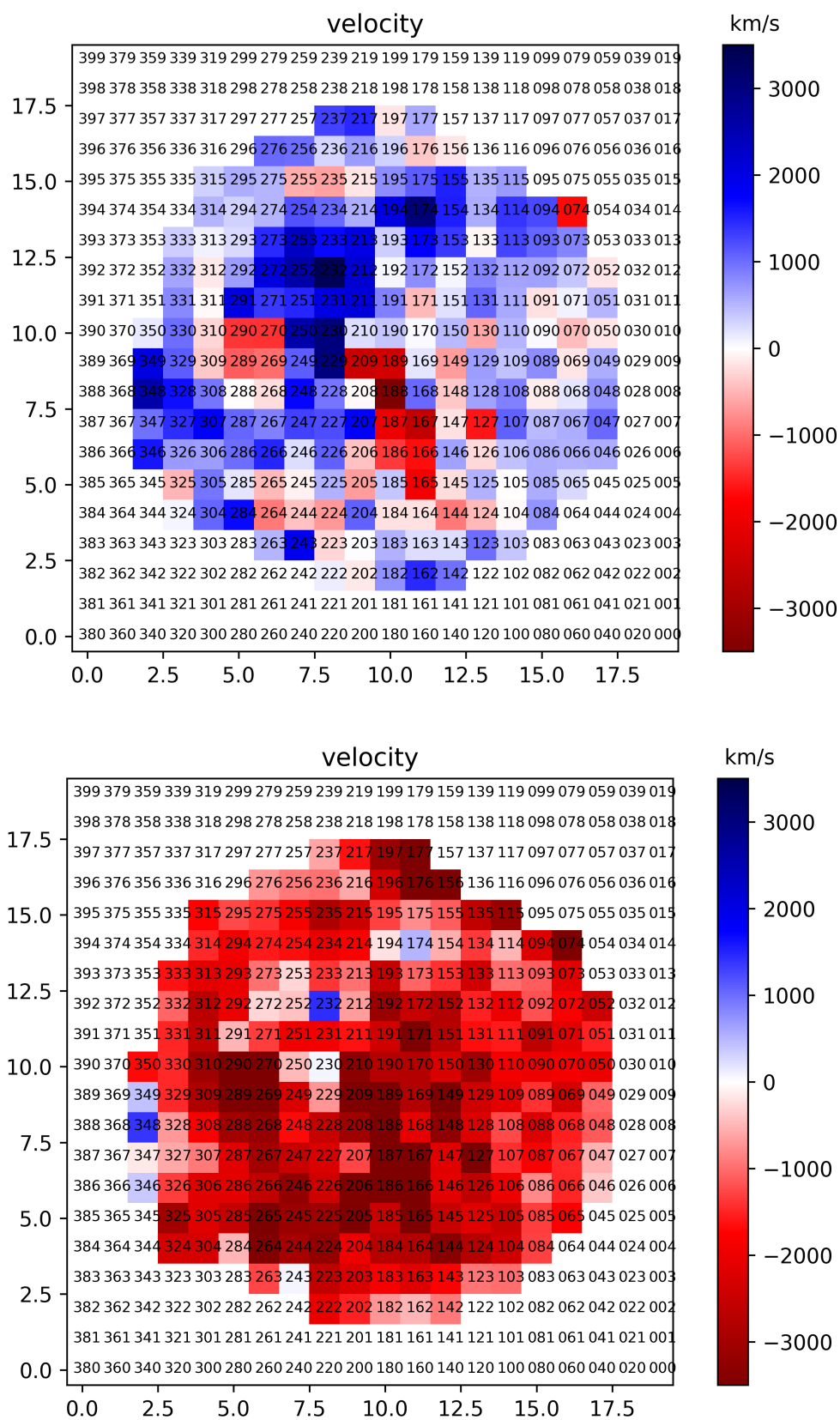


Рис. 19. Доплерографія залишку в лінях Si  $f_0 = 1.856$  (вверху),  
S  $f_0 = 2.451$  (внизу)

## Висновки

В ході роботи проаналізовано дані спостережень залишку наднової Тихо Браге (SN 1572), які отримано космічною рентгенівською обсерваторією Chandra. За даними спостережень створено мапи залишку для різних діапазонів енергій фотонів, зокрема для теплового континууму (4.1-6.0 кеВ) і ліній Si (1.6-2.1 кеВ) та S (2.3-2.6 кеВ).

Отримано та проаналізовано спектри теплового рентгенівського випромінювання в найбільш яскравих лініях кремнію та сірки з малих локальних регіонів, використовуючи сітку розміром  $20 \times 20$ . Ці спектри профітовано з використанням відповідних спектральних моделей `xsbremss` та `gauss1d`. Отримано параметри моделей, що описують основні властивості ліній, а саме: амплітуду, що характеризує інтенсивність випромінювання того чи іншого хімічного елемента; повну ширину на половині максимуму, що є мірою хаотичних рухів на промені зору; положення максимуму ліній, яке власне ми використовуємо для доплерографії.

Маючи значення положення максимуму ліній у спектрі в локальних регіонах по всій поверхні залишка і враховуючи ефект Доплера, розраховано швидкості руху речовини вздовж променя зору в лініях кремнію та сірки. Тобто, можна чітко бачити, в яких об'єктах вони рухаються до нас, а в яких - від нас. Побудовані карти свідчать про суттєву асиметрію вибуху наднової: речовина зорі, яка складається з кремнію, рухається переважно до нас, а сірки - переважно від нас. Надалі, отримані результати наших досліджень можна буде використати, щоб відтворити в майбутньому 3D структуру залишку наднової Тихо Браге, чого ще не було зроблено раніше.

### **Подяка.**

Висловлюю подяку Астрономічній обсерваторії Ягеллонського університету за підтримку участі у літній студентській школі в цій обсерваторії та її працівнику Володимирі Марченку за поради та тренінги з методів аналізу даних рентгенівського телескопу Chandra.

Також висловлюю подяку науковим керівникам д-р. ф.-м. наук Петруку О. Л. та д-р. ф.-м. наук Вавруху М. В. за настанови під час виконання даної роботи.

## Література

- [1] 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.
- [2] *Foundations of Astronomy*, 13th ed. - 2016.
- [3] 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.
- [4] URL: <http://blog.sdss.org/2017/01/09/origin-of-the-elements-in-the-solar-system/>
- [5] da Silva, L. A. L. (1993). "The Classification of Supernovae". *Astrophysics and Space Science*. 202 (2): 215–236.
- [6] Zanardo 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.
- [7] 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.
- [8] Athem W. Alsabti and Paul Murdin, "Handbook of Supernovae". - 2017.
- [9] 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.
- [10] URL: <http://www.solstation.com>
- [11] Василь Бешлей, Тарас Кузьо, "Історичні наднові типу Ia та їх залишки". *Фізичний збірник НТШ*, т.9, 2014.
- [12] Baade W. *ApJ*. 1945. 102. 309-318.

- [13] Krause, O., Tanaka, M. Usuda, T. et al. 2008, Nature, 456, 617.
- [14] Ruiz-Lapuente, P., Comeron, F., Mendez, J. et al. 2004, Nature, 431, 1069.
- [15] Zhichao Xue and Bradley E. Schaefer 2015 ApJ 809 183.
- [16] D. Ishihara, H. Kaneda, A. Furuzaw, H. Kunieda, T. Suzuki, B.-C. Koo, H.-G. Lee, J.-J. Lee, T. Onaka. "Origin of the dust emission from Tycho's SNR". 2010, A&A, 521, L61.
- [17] Karzas & Latter (1961, ApJS 6, 167).
- [18] Hayato, A., Yamaguchi, H., Tamagawa, T. et al. 2010, ApJ, 725, 894.
- [19] Roberts, W.W. 1972, ApJ, 173, 259.
- [20] Albinson, J.S., Tuffs, R.J., Swinbank E. et al. 1986, MNRAS, 219, 427.
- [21] Schwarz, U.J., Goss, W.M., Kalberla, P.M., Benaglia, P. 1995, A&A, 299, 193.
- [22] Keith Arnaud, Randall Smith, Aneta Siemiginowska "Handbook of X-ray Astronomy Cambridge University Press, 2011
- [23] "Chandra Specifications". NASA/Harvard. Retrieved September 3, 2015.
- [24] Бабик Ю. В., Вовк Є. Ю., "Віртуальна рентгенівська і гамма-обсерваторія. Обробка даних космічних обсерваторій 'Чандра' та 'Фермі' ". - Київ, 2012.
- [25] Developing Sherpa with Python (ADS). S. Doe, et al. "Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI". 376, 543.
- [26] URL: <https://cda.harvard.edu/chaser>
- [27] URL: <https://cxc.cfa.harvard.edu/sherpa/ahelp/xsbremss>
- [28] URL: <https://cxc.cfa.harvard.edu/sherpa/ahelp/gauss1d>
- [29] URL: <http://www.atomdb.org>

## Додаток А

Код для програмного забезпечення *CIAO-4.12* для отримання спектрів з кожної комірки створеної сітки

```
#!/bin/bash
N_cell=20
cell_id=0 # set the ID for each cell
for i in {00..19}
do
  for j in {00..19}
  do
    cell_id_zeros=$(printf %03d ${cell_id})

    inroot=../*/grid${N_cell}_wcs/ \
    reg${cell_id_zeros}_${i}_${j}
    outroot=combined_reg${cell_id_zeros}_${i}_${j}

    echo "cell_id = ${cell_id_zeros}, i, j = $i, $j"
    echo "inroot = ${inroot}"

    # create names for PI, ARF and RMF files
    src_spectra=${outroot}_src_spectra.lis
    src_arfs=${outroot}_src_arfs.lis
    src_rmfs=${outroot}_src_rmfs.lis

    bkg_spectra=${outroot}_bkg_spectra.lis
    bkg_arfs=${outroot}_bkg_arfs.lis
    bkg_rmfs=${outroot}_bkg_rmfs.lis

    # create the lists of PI, ARF and RMF files
    ls -1 ${inroot}_grp.pi > ${src_spectra}
    ls -1 ${inroot}.arf > ${src_arfs}
    ls -1 ${inroot}.rmf > ${src_rmfs}

    ls -1 ${inroot}_bkg.pi > ${bkg_spectra}
```

```
ls -1 ${inroot}_bkg.arf > ${bkg_arfs}
ls -1 ${inroot}_bkg.rmf > ${bkg_rmfs}
```

```
punlearn combine_spectra
combine_spectra \
src_spectra=@${src_spectra} \
src_arfs=@${src_arfs} \
src_rmfs=@${src_rmfs} \
bkg_spectra=@${bkg_spectra} \
bkg_arfs=@${bkg_arfs} \
bkg_rmfs=@${bkg_rmfs} \
outroot=${outroot} \
clobber=yes
```

```
cell_id=$(( cell_id + 1 ))
```

```
done
```

```
done
```

## Додаток В

Код для фітування континууму з використанням відповідного пакету *Sherpa*

```

import numpy as np
import os
import pickle

dname_data = '../2009_combined_wcs_20'
# energy range to fit the con component
emin = 4.1
emax = 6.0
dname_fit = 'fit_SiS_con_{}-{}'.format(emin, emax)
if os.path.exists(dname_fit) == False:
    os.mkdir(dname_fit)

# =====
N_cell = 20
con_norm = np.zeros([N_cell, N_cell])
con_kT = np.zeros([N_cell, N_cell])
rstat = np.zeros([N_cell, N_cell])

flag = np.loadtxt('grid20_cell_flag.dat', dtype='int32')
   [:, 1]
cell_id_sigmarej = [104, 210]
cell_id_no_sigmarej = []

cell_id = 0
for i in range(N_cell):
    for j in range(N_cell):
        print('cell_id = {}, i, j = {}, {}'.format(
            cell_id, i, j))
        fname = '{}/combined_reg{:03d}_{:02d}_{:02d}_\
src.pi'.format(dname_data, cell_id, i, j)

clean

```



```

load_pha(fname)
group_snr(3)
# Choose energy range =====
notice(emin, emax) #
# =====
set_source(xsphabs.abs1*xsbremss.con)
guess(con)
abs1.nH = 0.845
freeze(abs1.nH)
show_model()
set_stat('chi2gehrels')
set_method('levmar')
fit()
plot_fit_delchi()
set_current_plot("plot1")
log_scale(Y_AXIS)

print_window("{} / combined_reg{:03d}_{:02d}_\
{:02d}.png".format(dname_fit, cell_id, i, j),
["format", "png", "clobber", "True"])
res = get_fit_results()
con_norm[i, j]=res.parvals[
    res.parnames.index('con.norm')]
con_kT[i, j]=res.parvals[
    res.parnames.index('con.kT')]
rstat[i, j]=res.rstat
np.savetxt("{} / combined_reg{:03d}_{:02d}_\
{:02d}.dat".format(dname_fit, cell_id, i, j),
res.parvals)
# save fit results to pickle file =====
fname = '{} / combined_reg{:03d}_{:02d}_\
{:02d}.pickle'.format(dname_fit, \
    cell_id, i, j)
pfile = open(fname, 'wb')
pickle.dump(res, pfile, protocol=2)
pfile.close()

```

```
# =====  
cell_id += 1  
  
np.savetxt('{} / combined_{}_con_norm.dat'.format(  
    dname_fit, N_cell), con_norm, fmt='%0.6e')  
np.savetxt('{} / combined_{}_con_kT.dat'.format(  
    dname_fit, N_cell), con_kT, fmt='%0.6e')  
np.savetxt('{} / combined_{}_rstat.dat'.format(  
    dname_fit, N_cell), rstat, fmt='%0.6e')
```

## Додаток С

Код для фітування спектру (а саме окремо лінії) з використанням відповідного пакету *Sherpa*

```
import numpy as np
import os
import pickle

dname_data = '2009_combined_wcs'
# energy range to fit the con component
emin = 4.1
emax = 6.0
dname_fit_con = 'fit_SiS_con_{}-{}'.format(emin, emax)
dname_fit = 'fit_S_{}-{}'.format(emin, emax)
line_str = 'S'

if os.path.exists(dname_fit) == False:
    os.mkdir(dname_fit)

# =====
#g1_pos0 = 1.865 #Si
g1_pos0 = 2.461 #S

N_cell = 20
g1_fwhm = np.zeros([N_cell, N_cell])
g1_pos = np.zeros([N_cell, N_cell])
g1_ampl = np.zeros([N_cell, N_cell])
con_norm = np.zeros([N_cell, N_cell])
rstat = np.zeros([N_cell, N_cell])

flag = np.loadtxt('grid20_cell_flag.dat',\
                 dtype='int32')[:, 1]

cell_id = 0
for i in range(N_cell):
    for j in range(N_cell):
```

```

print('cell_id = {}, i, j = {}, {}'.format(\
    cell_id, i, j))
fname = '{}/combined_reg{:03d}_{:02d}_{:02d}_src\
    .pi'.format(dname_data, cell_id, i, j)

clean
load_pha(fname)
group_snr(3)

# Choose energy range =====
# notice(1.6, 2.1) #Si
notice(2.3, 2.6) #S
# =====

set_source(xsphabs.abs1*(xsbremss.con \
    + gauss1d.g1))

# =====
# read parameters of con component from fit
# at 4-6 keV and freeze it
# =====
fname_con = '{}/combined_reg{:03d}_{:02d}_\
    {:02d}.pickle'.format(dname_fit_con, \
    cell_id, i, j)
res_con = pickle.load(open(fname_con, 'rb'))

con.kT = res_con.parvals[ \
    res_con.parnames.index('con.kT') ]
con.norm = res_con.parvals[ \
    res_con.parnames.index('con.norm') ]
freeze(con.kT)
# freeze(con.norm)
# =====
g1.ampl = 0.1
g1.fwhm = 0.07
g1.pos = 2.45

```

```

# g1.pos = 2.461
g1.pos.min = 2.2
g1.pos.max = 2.6

abs1.nH = 0.845
freeze(abs1.nH)
set_stat('chi2datavar')
set_method('levmar')
fit()
plot_fit_delchi()
plt.savefig("{}combined_reg{:03d}_{:02d}_\
{:02d}_{}.png".format(dname_fit, cell_id, \
i, j, line_str), format='png')

res = get_fit_results()
g1_fwhm[i, j] = res.parvals[ \
    res.parnames.index('g1.fwhm') ]
g1_pos[i, j] = res.parvals[ \
    res.parnames.index('g1.pos') ]
g1_ampl[i, j] = res.parvals[ \
    res.parnames.index('g1.ampl') ]
rstat[i, j] = res.rstat
np.savetxt("{}combined_reg{:03d}_{:02d}_\
{:02d}_{}.dat"
    .format(dname_fit, cell_id, i, j, line_str), \
    res.parvals)
# save fit results to pickle file =====
fname = "{}combined_reg{:03d}_{:02d}_{:02d}\
    .pickle".format(dname_fit, cell_id, i, j)
pfile = open(fname, 'wb')
pickle.dump(res, pfile, protocol=2)
pfile.close()
# =====
cell_id += 1

```

```

np.savetxt('{}combined_{}_{}_fwhm.dat'.format(\

```

```
    dname_fit, N_cell, line_str), g1_fwhm, fmt='%%.6e')
np.savetxt('{} / combined_{}_{}_pos.dat'.format(\
    dname_fit, N_cell, line_str), g1_pos, fmt='%%.6e')
np.savetxt('{} / combined_{}_{}_ampl.dat'.format(\
    dname_fit, N_cell, line_str), g1_ampl, fmt='%%.6e')
np.savetxt('{} / combined_{}_{}_con_norm.dat'.format(\
    dname_fit, N_cell, line_str), con_norm, fmt='%%.6e')
np.savetxt('{} / combined_{}_{}_rstat.dat'.format(\
    dname_fit, N_cell, line_str), rstat, fmt='%%.6e')
```