



ISSN 1607–2855

Том 7 • № 1 • 2011 С. 74 – 77

УДК 524.7

Пошук нетеплового рентгенівського випромінювання від найближчих скупчень галактик із великомасштабними спалахами активних ядер галактик

В.О. Маслюх¹, Б.І. Гнатик¹, М. Островські², Л. Ставаж^{2,3}

¹Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

²Астрономічна Обсерваторія Ягеллонського Університету, Краків, Польща

³Інститут Космосу та Астронавтичної Науки, Японська Агенція Аерокосмічних Досліджень, Канагава, Японія

Ми побудували із всіх наявних довготривалих архівних спостережень рентгенівської обсерваторії Chandra, з використанням адаптивного кутового бінювання, карти жорсткості рентгенівського свічення від скупчень галактик Hydra A, Hercules A та MS 0735.6+7421 та проаналізували їх на ознаки локальної присутності нетеплового випромінювання. Наше дослідження показало, що навіть збирання всіх спостережень у мозаїку та застосування адаптивного кутового бінювання не дозволило виявити нетеплове випромінювання у рентгені від цих об'єктів. Ми отримали верхню межу для кількості нетеплових фотонів у даних архівних спостереженнях.

ПОИСК НЕТЕПЛООВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ БЛИЖАЙШИХ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК С КРУПНОМАСШТАБНЫМИ ВСПЫШКАМИ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК, Маслюх В.О., Гнатик Б.И., Островски М., Ставаж Л. — Мы построили из всех имеющихся долговременных архивных наблюдений рентгеновской обсерватории Chandra, с использованием адаптивного углового бинирования карты жесткости рентгеновского свечения от скоплений галактик Hydra A, Hercules A и MS 0735.6+7421 и проанализировали их на признаки локального присутствия нетеплового излучения. Наше исследование показало, что даже сбор всех наблюдений в мозаику и применение адаптивного углового бинирования не позволило выявить нетепловое излучение в рентгене от этих объектов. Мы получили верхний предел для количества нетепловых фотонов в данных архивных наблюдениях.

SEARCHING OF NON-THERMAL X-RAY EMISSION FROM NEAREST GALAXY CLUSTERS WITH LARGE-SCALE OUTBURST OF ACTIVE GALACTIC NUCLEUS, by Maslyuh V.O., Hnatyk B.I., Ostrowski M., Stawarz L. — We built from all available long-term archival X-ray Observatory Chandra observations, using adaptive angular binning, hardness maps of X-rays from galaxy clusters Hydra A, Hercules A and MS 0735.6+7421 and analyzed them for signs of the presence of local non-thermal radiation. Our study showed that even collecting all the observations in the mosaic and the use of adaptive angular binning did not allow to distinguish non-thermal X-ray radiation from these objects. We have an upper limit for the number of non-thermal photons in that archival observations.

Ключевые слова: скопления галактик; активные ядра галактик; рентгеновское излучение.

Key words: galaxy clusters; active galaxy nucleus; X-ray radiation.

1. ВСТУП

Коли спостережні можливості космічних рентгенівських телескопів досягли необхідного рівня для детального визначення просторового розподілу температури міжгалактичного газу всередині скупчень галактик, виникла так звана “проблема потоків охолодження” (“cooling flow problem”) газу у скупченнях галактик. Вона полягає у існуванні певного, не зрозумілого до сих пір, механізму, який не дозволяє суттєвій кількості міжгалактичного газу поблизу центру мас скупчення охолотитися до температури, нижчої за одну третину вірйальної температури міжгалактичного газу цього скупчення, хоча його характерний час охолодження через рентгенівське випромінювання (вільно — вільні переходи) значно менший часу існування скупчення галактик (детальніше дивись, наприклад, [9]). Великомасштабні спалахи активного ядра у центральній *cD* галактиці скупчення розглядаються зараз як найбільш обґрунтована кандидатура “двигуна” цього механізму, хоча ще досі дискусивними є конкретні деталі дії механізму з таким “двигуном” [9].

Спостереження близьких скупчень галактик, виконані з високою роздільною здатністю сучасними орбітальними рентгенівськими обсерваторіями *Chandra* та *XMM-Newton*, виявили, що великомасштабні спалахи активного ядра центральної галактики призводять до утворення складних структур із великомасштабних радіо-струменів й ударних хвиль із малим числом Маха та бульбашок із дефіцитом рентгенівського випромінювання гарячого газу у так званому “ядрі охолодження” (“cooling core”) міжгалактичного газу скупчення (див., наприклад, [12]). Ударні хвилі та бульбашки у гарячому міжгалактичному газі дають змогу зробити незалежну від значення магнітного поля та частинкового складу

струменя від активного ядра галактики оцінку мінімального енерговиділення активним ядром центральної cD галактики скупчення. Бульбашки заповнені в основному магнітним полем та релятивістськими частинками із струменя активного ядра центральної cD галактики й мають дефіцит міжгалактичного газу порівняно із середовищем довкола них, а їх ентальпія на порядки величини перевищує енергію синхротронного випромінювання радіо-струменів. Ймовірно, що рух та розширення цих плавучих бульбашок є джерелом частини спостережуваних великомасштабних ударних хвиль із малим числом Маха (див., наприклад, [12]).

Все ще мало зрозуміло як саме відбувається нагрівання міжгалактичного газу у ядрі охолодження: чи завдяки проходженню через нього великомасштабних ударних хвиль із малим числом Маха, чи завдяки взаємодії у ньому гарячого рентгенівського міжгалактичного газу у із бульбашками, чи суттєві обидва процеси. Великомасштабні спалахи активного ядра центральної галактики, впливаючи на газ навколо неї, змінюють темп акреції на центральну чорну діру, що в свою чергу впливає на потужність спалаху. Однак деталі цієї петлі зворотнього зв'язку, відповідального у механізмі за баланс між процесами нагрівання та охолодження міжгалактичного газу в ядрі охолодження, до тепер є не з'ясованими (див., наприклад, [3]).

2. НЕТЕПЛОВЕ РЕНТГЕНІВСЬКЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ У СКУПЧЕННЯХ ГАЛАКТИК

Більшість знаних скупчень галактик із системою бульбашок у ядрі охолодження міжгалактичного газу мають у центрі радіоджерело типу Фанарофф–Райлі I. Найпотужніші великомасштабні спалахи активного ядра центральної cD галактики відомі зараз у скупченнях галактик MS 0735.6+7421 (червоне зміщення скупчення $z=0.22$, сумарна енергія спалаху активного ядра $\sim 6 \cdot 10^{61}$ ерг, вік спалаху $1.0 \cdot 10^8$ років, а радіус утвореної великомасштабної ударної хвилі ~ 240 кпк, число Маха ударної хвилі 1.5; основні результати вивчення спалаху у цьому об'єкті представлені у публікаціях [6] та [13]), Hercules A (червоне зміщення $z=0.154$, сумарна енергія спалаху $\sim 3 \cdot 10^{61}$ ерг, вік спалаху $0.6 \cdot 10^8$ років, а радіус ударної хвилі ~ 160 кпк, число Маха ударної хвилі ~ 1.65 ; публікації [4] та [7]) та Hydra A (червоне зміщення $z=0.0538$, сумарна енергія спалаху $\sim 0.6 \cdot 10^{61}$ ерг, вік спалаху $1.4 \cdot 10^8$ років, а радіус ударної хвилі ~ 210 кпк, число Маха ударної хвилі $\sim 1.1 \dots 1.3$; публікації [3], [5], [8] та [10] – [12]).

У багатьох потужних радіо-галактик типу Фанарофф–Райлі II знайдено нетеплове випромінювання (обернений комптонівський механізм) в рентгенівському діапазоні з областей “радіовух”. Вимірні властивості оберненого комптонівського випромінювання дозволяють, знаючи параметри синхротронного випромінювання з тих же областей в радіодіапазоні та теплового випромінювання в рентгені, зробити оцінки співвідношення між густиною енергії релятивістських електронів, магнітного поля та релятивістських протонів в областях генерації нетеплового випромінювання. Такі оцінки показують, що у радіовухах досліджених радіогалактик типу Фанарофф–Райлі II внесок релятивістських протонів у сумарну густину енергії є незначний порівняно із релятивістськими електронами та магнітним полем (див., наприклад, [4] та посилання там).

У роботі [4] було проведено пошук оберненого комптонівського випромінювання від скупчень галактик Cygnus A, Hercules A та Hydra A, використовуючи архівні спостереження рентгенівських обсерваторій *Chandra* та *XMM-Newton*, однак для нетеплового випромінювання в рентгенівському діапазоні від Hercules A та Hydra A було встановлено лише верхню межу. Метою нашої роботи був пошук нетеплового рентгенівського випромінювання від скупчень галактик Hydra A, Hercules A та MS 0735.6+7421, у центрі яких знаходяться радіогалактики типу Фанарофф–Райлі I (Hercules A є типу Фанарофф–Райлі I/II), з кутковою роздільною здатністю суттєво вищою ніж у [4], що б дозволило виявити можливі слабкі порівняно компактні джерела нетеплового випромінювання та покращити чутливість виявлення нетеплового рентгенівського випромінювання від цих об'єктів.

3. СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ДАНИХ

Нами були опрацьовані всі наявні для вибраних об'єктів спостереження з суттєвою тривалістю в Архіві Даних рентгенівської обсерваторії *Chandra* (Chandra Data Archive): для Hydra A спостереження ObsID4969 та ObsID4970 сумарною експозицією ~ 200 кілосекунд; для Hercules A — ObsID5796 та ObsID6257 сумарною експозицією ~ 100 кілосекунд; для MS 0735.6+7421 — ObsID4197, ObsID10468 – ObsID10470, ObsID10822, ObsID10918 та ObsID10922 сумарною експозицією ~ 500 кілосекунд; з використанням програмного забезпечення CIAO 4.3 та CALDB 4.4.3. Опрацювання містило повне первинне фільтрування даних спостережень за стандартною методикою, описаною у документації CIAO. Отримані зображення у кожному спостереженні потім склалися у мозаїку, що об'єднує усі спостереження кожного об'єкта.

Для досягнення максимальної куткової роздільної здатності пошуку нетеплового випромінювання ми застосували такий вид просторово-спектрального аналізу як побудова так званих “карт жорсткості” (“hardness map”) із використанням алгоритму бінування зважена теселяція Вороного (weighted Voronoi tessellation binning algorithm) розробленого у [1] та [2].

4. РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Великомасштабний спалах активного ядра центральної галактики у скупченні галактик Hydra A інтенсивно вивчався у різних роботах. Спалах у скупченні Hercules A вивчений, порівняно із попереднім, значно менше у силу своєї більшої віддаленості. Спалах у скупченні MS 0735.6+7421 був нещодавно (червень 2009 року) інтенсивно спостережуваний рентгенівською обсерваторією *Chandra*, однак результати аналізу цих спостережень ще до сих пір широко не опубліковані.

Ми отримали карти жорсткості із кращою роздільною здатністю, порівняно з існуючими в літературі, для скупчень галактик Hydra A та MS 0735.6+7421, а також вперше отримали карту жорсткості для скупчення галактик Hercules A. На рис. 2 показано побудовані нами карти жорсткості. Ні у скупченні галактик Hydra A, для якого завдяки тому, що воно найближче з досліджуваних нами, отримано найдетальнішу карту жорсткості з найбільшою, порівняно з іншими розглядуваними нами скупченнями, чутливістю до компактних нетеплових джерел випромінювання, ні у скупченні галактик Hercules A, яке містить великомасштабну ударну хвилю з найбільшим, порівняно із двома іншими скупченнями, числом Маха, ні у скупченні галактик MS 0735.6+7421, в якому великомасштабний спалах має найбіль-

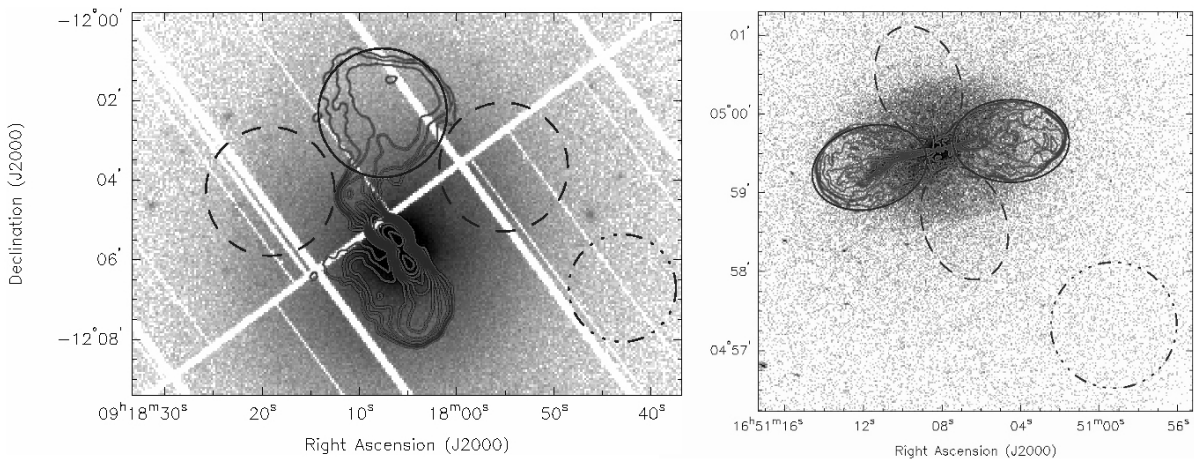


Рис. 1. Схема вибору областей для пошуку оберненого комптонівського випромінювання з [4]. Ліворуч: скупчення галактик Hydra A, праворуч: скупчення Hercules A. Сіре фонове растрове зображення є рентгенівським зображенням у смузі 0.5–5.0 кеВ, сірі лінії є логарифмічними ізопотами радіозображення на частотах 330 МГц (Hydra A) і 1.4 ГГц (Hercules A). Вибрані авторами [4] для аналізу області радіовух, поза радіовухами та фону обведені відповідно суцільними, штриховими та штрихпунктирними тонкими чорними лініями.

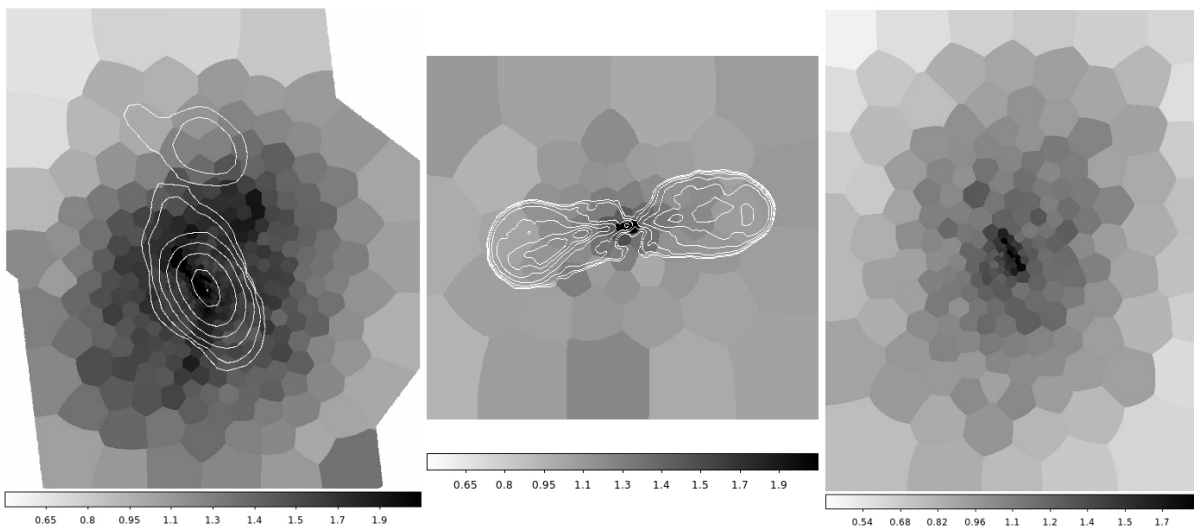


Рис. 2. Побудовані нами карти жорсткості із використанням алгоритму бінування зважена теселяція Вороного. Ліворуч: скупчення галактик Hydra A, у центрі: скупчення Hercules A, праворуч: скупчення MS 0735.6+7421. Карти жорсткості побудовані на відношенні за сумарний час всіх експозицій кількості фотонів у смузі 0.3–1.5 кеВ до кількості фотонів у смузі 1.5–7.5 кеВ з кутовим бінуванням у 900 фотонів в сумі з обидвох енергетичних смуг в один текстель (Hydra A), кількості фотонів у смузі 0.3–1.4 кеВ до кількості фотонів у смузі 1.4–7.5 кеВ з кутовим бінуванням у 400 фотонів в один текстель (Hercules A), кількості фотонів у смузі 0.3–1.6 кеВ до кількості фотонів у смузі 1.6–7.5 кеВ з кутовим бінуванням у 400 фотонів в один текстель (MS 0735.6+7421). Білі лінії є логарифмічними ізопотами радіозображення на частотах 330 МГц (Hydra A) і 1.4 ГГц (Hercules A).

шу сумарну енергію, ці карти жорсткості не показали жодних локальних відхилень понад статистичні флуктуації від просторового розподілу жорсткості, пов'язаного лише цілком з просторовим розподілом температури міжгалактичного газу (карти розподілу температури див., наприклад, [10]).

5. ВИСНОВКИ

Нетеплове обернене комптонівське випромінювання має бути присутнє у розглядуваних скупченнях галактик, так як воно є обов'язковим супутником синхротронного випромінювання, яке дуже добре задетектовано у радіодіапазоні від цих скупчень (див. [4]). Однак яскраве теплове рентгенівське випромінювання гарячого міжгалактичного газу маскує слабе нетеплове свічення від тих же областей у рентгенівському діапазоні. Наше дослідження показало, що, навіть, використання усіх наявних довготривалих архівних спостережень рентгенівської обсерваторії *Chandra* та застосування адаптивного кутового бінування для побудови карт жорсткості не дозволило виявити нетеплове випромінювання у рентгені від скупчень галактик Hydra A, Hercules A та MS 0735.7+7421. Ми отримали лише верхню межу для кількості нетеплових фотонів у цих архівних спостереженнях (що пропорційно величині статистичної флуктуації фотонів у сумарній мозаїці з всіх опрацьованих спостережень кожного скупчення): 42 фотони (Hydra A) та 28 фотонів (Hercules A та MS 0735.7+7421) у смузі 0.3–7.5 кеВ у кожному текселі карти жорсткості.

1. Cappellari M., Copin Y. Adaptive spatial binning of integral-field spectroscopic data using Voronoi tessellations // Month. Notic. of the Royal Astron. Soc. — 2003. — **342**, Is.2. — P.345–354.
2. Diehl S., Statler T. Adaptive binning of X-ray data with weighted Voronoi tessellations // Month. Notic. of the Royal Astron. Soc. — 2006. — **368**, Is.2. — P.497–510.
3. Gitti M., et al. A Chandra Study of the Large-scale Shock and Cool Filaments in Hydra A: Evidence for Substantial Gas Dredge-up by the Central Outburst // Astrophys. J. — 2011. — **732**, Is.1. — id.13.
4. Hardcastle M., Croston J. Searching for the inverse-Compton emission from bright cluster-centre radio galaxies // Month. Notic. of the Royal Astron. Soc. — 2010. — **404**, №4. — P.2018–2027.
5. Kirkpatrick C., et al. Direct Evidence for Outflow of Metal-Enriched Gas Along the Radio Jets of Hydra A // Astrophys. J. — 2009. — **707**, №1. — P.L69–L72.
6. McNamara B., et al. The heating of gas in a galaxy cluster by X-ray cavities and large-scale shock fronts // Nature. — 2005. — **433**, №7021. — P.45–47.
7. Nulsen P., et al. The Powerful Outburst in Hercules A // Astrophys. J. — 2005. — **625**, №1. — P.L9–L12.
8. Nulsen P., McNamara B., Wise M., David L. The Cluster-Scale AGN Outburst in Hydra A // Astrophys. J. — 2005. — **628**, №2. — P.629–636.
9. Peterson J., Fabian A. X-ray spectroscopy of cooling clusters // Phys. Rep. — 2006. — **427**, №1. — P.1–39.
10. Simionescu A., et al. Chemical enrichment in the cluster of galaxies Hydra A // Astron. and Astrophys. — 2009. — **493**, №2. — P.409–424.
11. Simionescu A., et al. The large-scale shock in the cluster of galaxies Hydra A // Astron. and Astrophys. — 2009. — **495**, №3. — P.721–732.
12. Wise M., et al. X-Ray Supercavities in the Hydra A Cluster and the Outburst History of the Central Galaxy's Active Nucleus // Astrophys. J. — 2007. — **659**, №2. — P.1153–1158.
13. Wise M., et al. A Map of Heating in MS0735.6+7421: Direct Evidence for ICM Heating in the Most Energetic AGN Outburst Known // 38th COSPAR Scien. Assembly. 18–15 July 2010, in Bremen, Germany — 2010. — P.8.

Надійшла до редакції 13.08.2011