

УДК 524.7

В. Маслох, асп., Б. Гнатик, д-р фіз.-мат. наук, проф.
Л. Ставаж, канд. фіз.-мат. наук, М. Островські, д-р фіз.-мат. наук

АНАЛІЗ МАП ЖОРСТКОСТІ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВІД КЛАСТЕРІВ ГАЛАКТИК HYDRA A, HERCULES A ТА MS 0735.6+7421

Найімовірнішим механізмом, що не допускає охолодження газу у кластерних потоках, є нагрівання активним ядром центральної галактики кластеру. Рентгенівські зображення з високою роздільною здатністю виявляють, що спалахи активного ядра галактики утворюють у остигаючому ядрі кластеру складну структуру великомасштабних ударних хвиль та порожнин. Ми проаналізували мапи жорсткості рентгенівського випромінювання від кластерів галактик Hydra A, Hercules A та MS 0735.6+7421, побудовані нами із архівних спостережень рентгенівської обсерваторії Chandra. Наш аналіз містить порівняння мап жорсткості із мапами радіоінтенсивності для цих кластерів. Ми знайшли та дослідили у цих об'єктах нові деталі взаємодії спалаху від активного ядра галактики та внутрішньокластерного середовища.

The most promising mechanism responsible for preventing gas from cooling in cluster flows is heating by a central AGN. High-resolution X-ray images reveal that AGN outbursts creates a complex structure of the large-scale shocks and cavities in the cooling core. We analyze the hardness maps of the X-ray emission from the Hydra A, Hercules A and MS 0735.6+7421 galaxy clusters obtained by us from the archival observations of the Chandra X-ray Observatory. Our analysis includes comparison of the hardness maps to the radio intensity maps of these clusters. We find out and investigate in these objects the new interaction details between the AGN outburst and the intracluster medium.

Вступ. На сьогодні активне ядро у центральній галактиці кластеру розглядається як найкраща кандидатура для вирішення так званої "проблеми потоків охолодження" ("cooling flow problem" у англійській літературі) у кластерах галактик, що полягає у існуванні певного, не зрозумілого до сих пір, механізму, який не дозволяє суттєвій кількості міжгалактичного газу поблизу центру мас кластеру охолотитися до температури, нижчої за одну третину віріальної температури міжгалактичного газу цього кластеру, хоча його характерний час охолодження через рентгенівське випромінювання (вільно - вільні переходи) значно менший часу існування кластеру галактик (детальніше дивись, наприклад, [9]). Рентгенівські спостереження відносно близьких кластерів галактик, виконані з високою роздільною здатністю сучасними орбітальними рентгенівськими обсерваторіями Chandra та XMM-Newton, виявили, що спалахи активного ядра центральної галактики кластеру призводять до утворення складних структур із великомасштабних ударних хвиль та порожнин і так званому "остигаючому ядрі" ("cooling core") кластеру [12].

Деталі петлі зворотнього зв'язку, відповідального за баланс між процесами нагрівання та охолодження газу у остигаючому ядрі, є до сих пір нез'ясованими.

Найпотужніші спалахи активного ядра центральної галактики кластерного масштабу є у MS 0735.6+7421 (червоне зміщення $z=0,22$; основні результати вивчення спалахів у цьому об'єкті представлені у публікаціях [6] та [13]), Hercules A ($z=0,154$; публікації [4] та [7]) та Hydra A ($z=0,0538$; публікації [3], [5], [8] та [10] – [12]) кластерах галактик.

Спостереження та аналіз даних. Нами були опрацьовані спостереження із архіву даних рентгенівської Обсерваторії Chandra (Chandra Data Archiv, <http://cxc.harvard.edu/cda/>) (спостереження Hydra A кластеру ObsID4969 та ObsID4970 сумарною експозицією ~ 200 кілосекунд; спостереження Hercules A кластеру ObsID5796 та ObsID6257 сумарною експозицією ~ 100 кілосекунд; спостереження MS 0735.6+7421 кластеру 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 інтернет-документації середовища CIAO (<http://cxc.harvard.edu/ciao/>). Отримані зображення потім склалися у мозаїку, що об'єднує усі спостереження кожного об'єкта. Мапи інтенсивності та жорсткості були побудовані із використанням алгоритму біннування зваженою теселяцією Вороного (weighted Voronoi tessellation binning algorithm) розробленим у [1] та [2].

Результати аналізу. Спалахи кластерного масштабу активного ядра центральної галактики у Hydra A кластері інтенсивно вивчався у різних роботах [3], [5], [8] та [10] – [12]), що оцінюють його сумарну енергію $\sim 0,6 \cdot 10^{61}$ ерг, вік $1,4 \cdot 10^8$ років, а діаметр утвореної великомасштабної ударної хвилі ~ 210 кпк [8], [12]. На рис. 1 показано побудовані нами мапи жорсткості остигаючого ядра Hydra A кластеру в порівнянні із різними мапами з інших робіт.

Спалах кластерного масштабу активного ядра центральної галактики у Hercules A кластері вивчений, порівняно із попереднім кластером, значно менше у силу своє більшої віддаленості, й було оцінено, що його сумарна енергія $\sim 3 \cdot 10^{61}$ ерг, вік $0,6 \cdot 10^8$ років, а діаметр утвореної великомасштабної ударної хвилі ~ 160 кпк [7]. На рис. 2 показано побудовані нами мапи жорсткості остигаючого ядра Hercules A кластеру в порівнянні із різними мапами з інших робіт.

Спалах кластерного масштабу активного ядра центральної галактики у MS 0735.6+7421 кластері був нещодавно інтенсивно спостережуваний орбітальною рентгенівською обсерваторією Chandra, оскільки він є найпотужнішим знаним на сьогодні спалахом кластерного масштабу, й було оцінено, що його сумарна енергія $\sim 6 \cdot 10^{61}$ ерг, вік $1,0 \cdot 10^8$ років, а діаметр утвореної великомасштабної ударної хвилі ~ 240 кпк [6]. На рис. 3 показано побудовані нами мапи жорсткості остигаючого ядра MS 0735.6+7421 кластеру в порівнянні із різними мапами з інших робіт.

4. Висновки. У цій роботі було вперше отримано мапи жорсткості для Hercules A кластеру, а також мапи жорсткості із високою роздільною здатністю для Hydra A та MS 0735.6+7421 кластерів у порівнянні з іншими роботами.

Виявлено тонку структуру потоків плазми у ядрі Hydra A кластеру. Подібні потоки побачено у MS 0735.6+7421 кластері.

На противагу до випадків Hydra A та MS 0735.6+7421 кластерів, у Hercules A кластері чітко видно ознаки надлишку жорсткого випромінювання з обмеженого ударною хвилею кластерного масштабу регіону, описаного у [7].

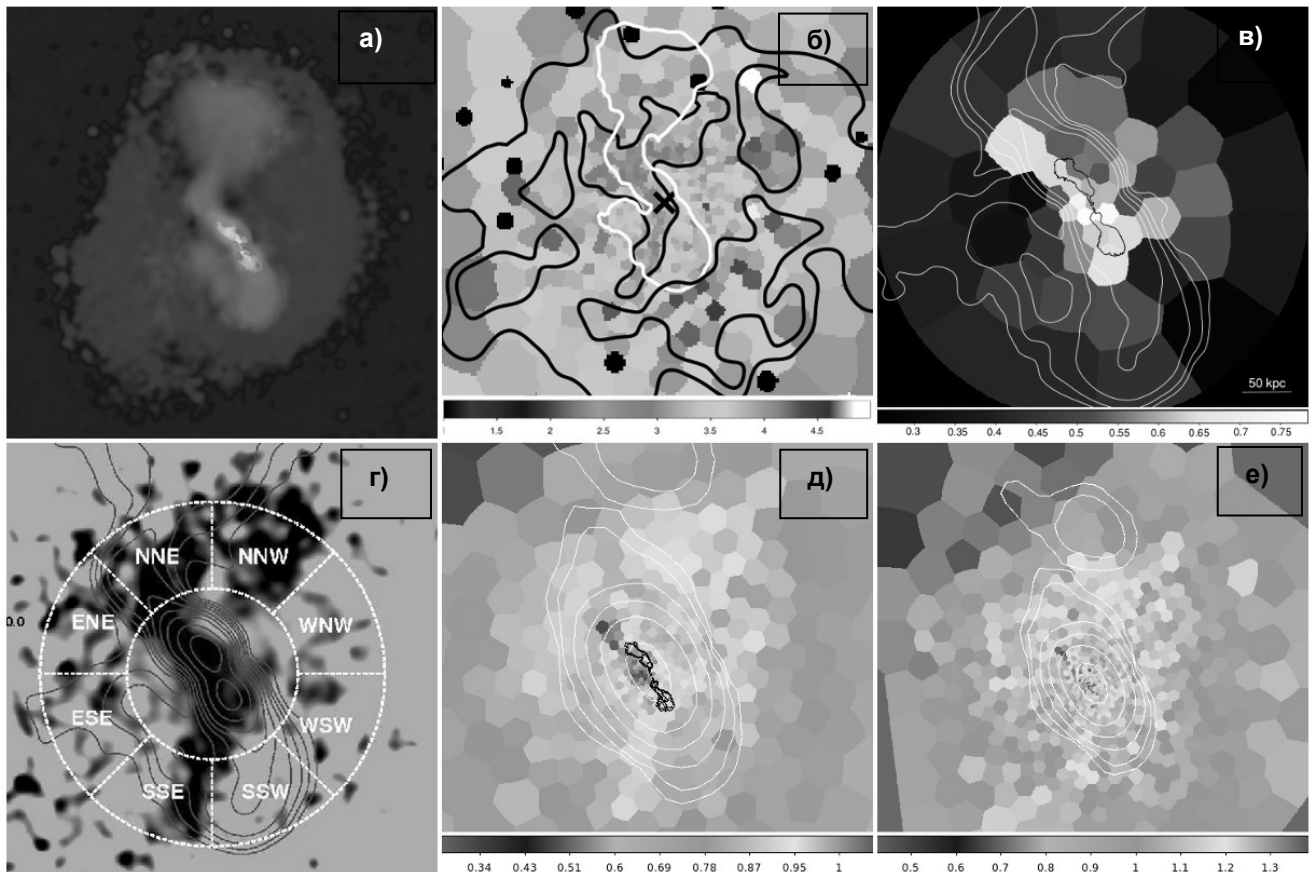


Рис. 1. Hydra A кластер галактик:

а) композитне зображення із [12] – залишкова мапа інтенсивності рентгенівського випромінювання показана темно-сірим кольором і мапа інтенсивності радіо випромінювання показана світло-сірим та білим кольорами; б) мапа температури з [10] створена з використанням адаптивного бінування у 2500 відліків на просторовий бін – одиницями шкали є кеВи, радіо контури білі, контури температури – чорні; в) мапа металічності із [5] створена з використанням адаптивного бінування у 22500 відліків на просторовий бін – одиницями шкали є dex, радіо контури білі та чорні; г) мапа жорсткості (1,5-7,5 кеВ до 0,3-1,5 кеВ) з [3] створена з використанням згладження з фіксованою шкалою – радіо контури темно-сірі; д) та е) мапи жорсткості (0,3-1,2 кеВ до 1,2-7,5 кеВ та 0,3-1,2 кеВ до 1,2-3,0 кеВ) отримані у цій роботі з використанням адаптивного бінування у 900 та 400 відліків на просторовий бін – радіо контури білі та чорні.

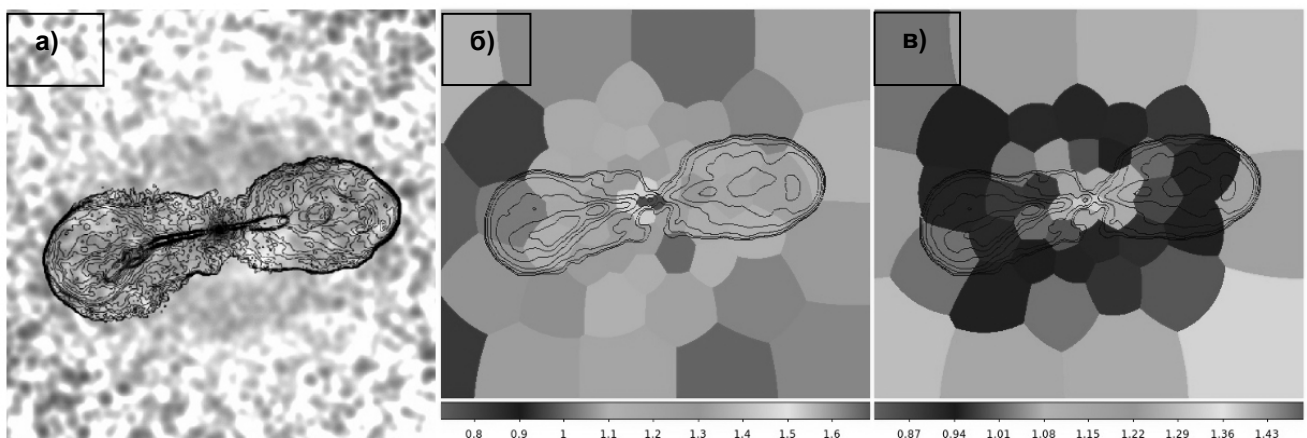


Рис. 2. Hercules A кластер галактик:

а) мапа інтенсивності рентгенівського випромінювання з [7] — радіо контури чорні; б) та в) мапи жорсткості (0,3-1,4 кеВ до 1,4-7,5 кеВ та 0,3-1,2 кеВ до 1,2-3,0 кеВ) отримані у цій роботі з використанням адаптивного бінування у 400 відліків на просторовий бін — радіо контури чорні.

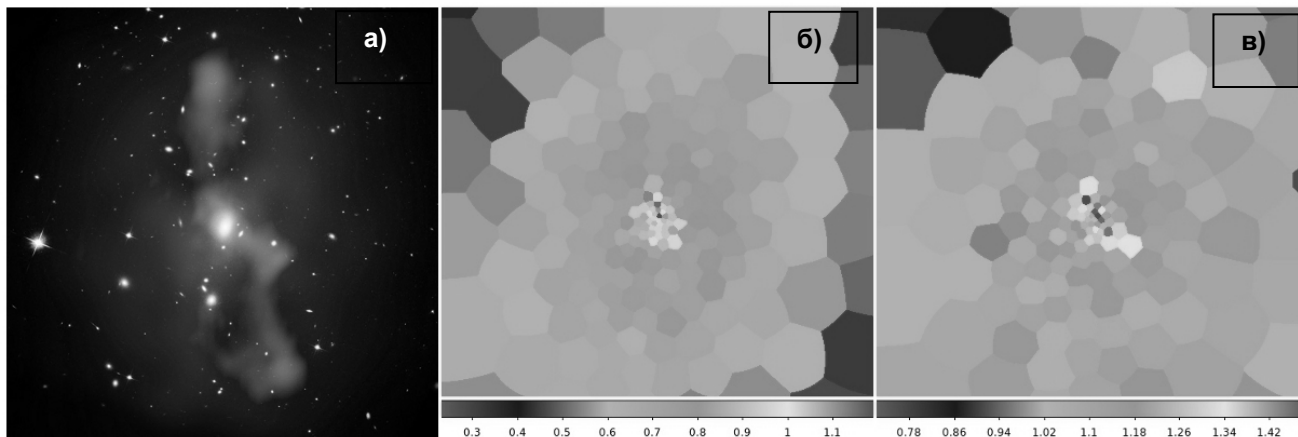


Рис. 3. MS 0735.6+7421 кластер галактик:

а) композитне зображення із [6] — мапа інтенсивності рентгенівського випромінювання показана темно-сірим кольором, мапа інтенсивності радіо випромінювання показана світло-сірим кольором та мапа оптичного зображення показана білим кольором; б) та в) мапи жорсткості (0,3-1,4 кеВ до 1,4-7,5 кеВ та 0,3-1,4 кеВ до 1,4-3,0 кеВ) отримані у цій роботі з використанням адаптивного бінування у 400 відліків на просторовий бін — масштаб той же, що і ліворуч.

1. Cappellari M., Copin Y. Adaptive spatial binning of integral-field spectroscopic data using Voronoi tessellations // *Month. Notic. of the Royal Astron. Soc.* – 2003. – Vol. 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. – Vol. 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. – Vol. 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. – Vol. 404, Is. 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. – Vol. 707, Is. 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. – Vol. 433, Is. 7021. – P. 45–47. 7. Nulsen P. et al. The Powerful Outburst in Hercules A // *Astrophys. J.* – 2005. – Vol. 625, Is. 1. – P. L9–L12. 8. Nulsen P., McNamara B., Wise M., David L. The Cluster-Scale AGN Outburst in Hydra A // *Astrophys. J.* – 2005. – Vol. 628, Is. 2. – P. 629–636. 9. Peterson J., Fabian A. X-ray spectroscopy of cooling clusters // *Phys. Rep.* – 2006. – Vol. 427, Is. 1. – P. 1–39. 10. Simionescu A. et al. Chemical enrichment in the cluster of galaxies Hydra A // *Astron. and Astrophys.* – 2009. – Vol. 493, Is. 2. – P. 409–424. 11. Simionescu A. et al. The large-scale shock in the cluster of galaxies Hydra A // *Astron. and Astrophys.* – 2009. – Vol. 495, Is. 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. – Vol. 659, Is. 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 редколегії 05.03.12