

Цикл работ по теме "Рентгеновское и радио излучение скоплений галактик"

- 1) Коллектив авторов: Н.С. Лыскова, Р.А. Сюняев, И.И. Хабибуллин, Е.М. Чуразов
- 2) "Рентгеновское и радио излучение скоплений галактик"
- 3) Публикации:
 - Lyskova, N., Churazov, E., Khabibullin, I., Bikmaev, I. F., Burenin, R. A., Forman, W. R., Khamitov, I. M., Rajpurohit, K., Sunyaev, R., Jones, C., Kraft, R., Zaznubin, I., Gorbachev, M. A., Suslikov, M. V., Gumerov, R. I., & Sakhibullin, N. A., "The massive galaxy cluster CL0238.3+2005 (the Peanut cluster) at $z = 0.42$: A merger just after pericenter passage?", *Astronomy and Astrophysics*, 693, A55., (2025), DOI:10.1051/0004-6361/202452212
 - Lyskova, N., Churazov, E., Khabibullin, I., Sunyaev, R., Gilfanov, M., and Sazonov, S., "X-ray flux - mass relation for $z > 0.7$ galaxy clusters", *Astronomy and Astrophysics*, принято в печать 05.08.2025, DOI:10.1051/0004-6361/202555952
 - Majumder, A., Simionescu, A., Plšek, T., Brienza, M., Churazov, E., Khabibullin, I., Gastaldello, F., Botteon, A., Röttgering, H., Brügger, M., Lyskova, N., Rajpurohit, K., Sunyaev, R. A., & Wise, M. W., "X-ray investigation of the remarkable galaxy group Nest200047", *Astronomy and Astrophysics*, 699, A375., (2025), DOI:10.1051/0004-6361/202554682
 - Brienza, M., Rajpurohit, K., Churazov, E., Heywood, I., Brügger, M., Hoeft, M., Vazza, F., Bonafede, A., Botteon, A., Brunetti, G., Gastaldello, F., Khabibullin, I., Lyskova, N., Majumder, A., Röttgering, H. J. A., Shimwell, T. W., Simionescu, A., & van Weeren, R. J., "Non-thermal filaments and AGN recurrent activity in the galaxy group Nest200047: A LOFAR, uGMRT, MeerKAT, and VLA radio spectral analysis", *Astronomy and Astrophysics*, 696, A239., (2025), DOI:10.1051/0004-6361/202553676
 - Di Gennaro, G., Brügger, M., Moravec, E., Di Mascolo, L., van Weeren, R. J., Brunetti, G., Cassano, R., Botteon, A., Churazov, E., Khabibullin, I., Lyskova, N., de Gasperin, F., Hardcastle, M. J., Röttgering, H. J. A., Shimwell, T., Sunyaev, R., & Stanford, A., "Limits and challenges of the detection of cluster-scale diffuse radio emission at high redshift: The Massive and Distant Clusters of WISE Survey (MaDCoWS) in LoTSS-DR2", *Astronomy and Astrophysics*, 695, A215., (2025), DOI:10.1051/0004-6361/202453203

4) Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность

Многоволновые наблюдения скоплений галактик (в рентгеновском, оптическом, миллиметровом и радио-диапазонах) являются важнейшим элементом исследования слабостолкновительной плазмы в этих объектах (например, процессы переноса и ускорения частиц), а также позволяют измерять такие свойства скоплений, как масса, температура газа, динамическое состояние. Это, в свою очередь, позволяет использовать скопления как инструмент для измерения космологических параметров Вселенной. Обе задачи являются предметом интенсивных исследований десятков научных групп в мире.

5) Конкретная решаемая в работе задача и ее значение

В двух статьях цикла рассматриваются вопросы о возможных подходах к поиску и простому и прозрачному методу оценок масс скоплений для построения различных выборок на основе радио и рентгеновских данных, и наблюдениях эффекта Сюняева-Зельдовича. В трех других обсуждаются физические процессы в плазме скоплений и ограничения на модели скоплений, которые можно получить из детальных наблюдений отдельных уникальных скоплений.

6) Используемый подход, его новизна и оригинальность

Прогресс в возможностях рентгеновских орбитальных обсерваторий и наземных радиотелескопов позволил находить новые уникальные объекты и проводить совместный анализ данных для скоплений галактик на разных красных смещениях.

7) Полученные результаты и их значимость

Массивные скопления галактик очень редки в наблюдаемой Вселенной. Еще реже наблюдаются слияния таких скоплений вблизи прохождения периферии. Измерения скоростей отдельных компонент позволяют получить важные космологические ограничения по наблюдению одного скопления. В данной работе рассмотрен именно такой случай: массивное $\sim 10^{15}$ масс Солнца и горячее кТ ~ 10 кэВ скопление CL0238.3+2005 на красном смещении $z=0.42$, которому мы дали имя “Арахис” (“Peanut”) в связи со схожестью морфологии скопления в рентгеновском диапазоне длин волн с плодом арахиса (см. Рис. 1). На основе рентгеновских данных SRG/eROSITA и Chandra, оптических изображений DESI и спектроскопии с телескопов ВТА и RTT-150 мы оценили скорость слияния подгало, расстояние между ними и вероятный диапазон углов, под которым мы наблюдаем систему. Имеющиеся наблюдательные данные, а также сравнение Peanut с такими известными скоплениями, как MACS0416 и Bullet, позволяют заключить, что CL0238 недавно (всего < 100 миллионов лет назад) претерпело практически лобовое слияние, и что эта система является очень редким случаем и перспективной мишенью для задач гравитационного линзирования, измерений кинематического эффекта Сюняева-Зельдовича, а также для получения ограничения на свойства темной материи (верхние пределы на сечение рассеяния почти бесстолкновительных частиц).

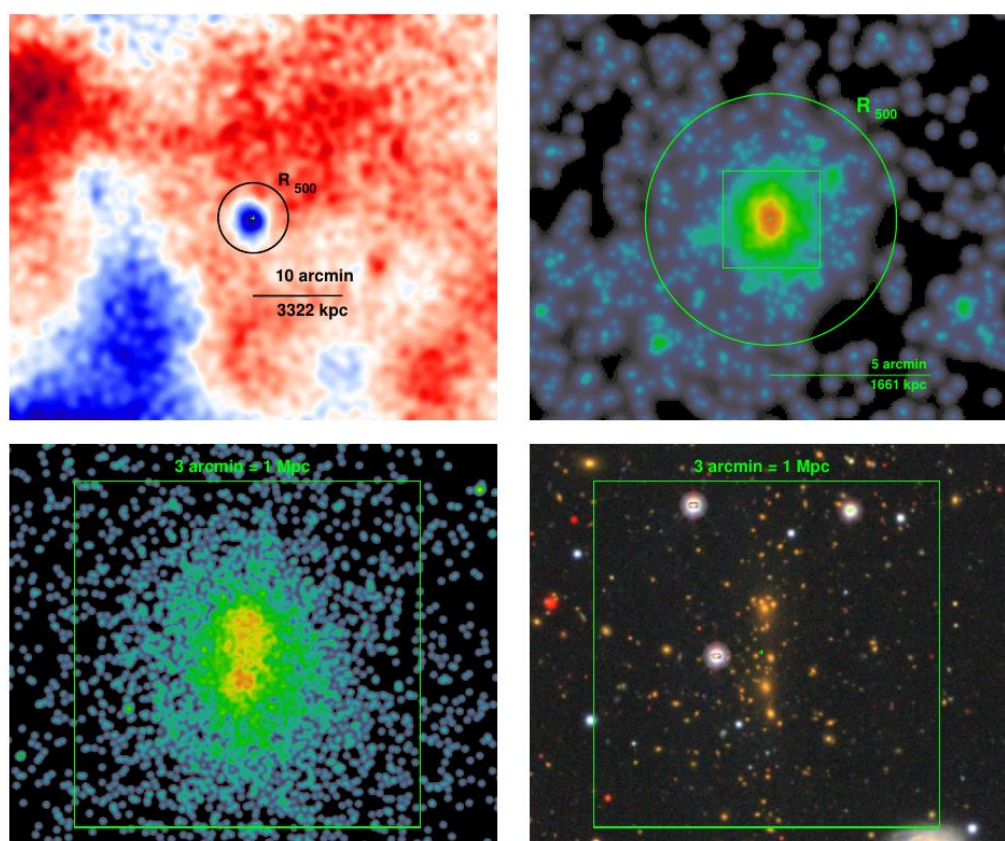


Рис. 1. Изображение скопления галактик “Арахис” на разных длинах волн. На левой верхней панели представлено изображение АСТ на частоте 90 ГГц, характерный размер скопления R_{500} показан кружочком. На левой правой панели - изображение eROSITA/CPG. На нижней панели слева показано изображение Chandra центральной области скопления, справа - оптическое изображение DESI.

Используя выборку далеких скоплений галактик, которые присутствуют в каталоге MaDCoWS (полученном на основе данных инфракрасного обзора WISE) и в то же время детектируются как источник Сюняева-Зельдовича в данных АСТ (Atacama Cosmology Telescope), мы проверили соотношение между наблюдаемым рентгеновским потоком F_x в диапазоне 0.5–2.0 кэВ и массой скопления M_{500} для гало при $z > 0.6-0.7$ и показали, что рентгеновский поток, являясь наиболее базовым наблюдаемым рентгеновским параметром, служит удобным и “недорогим” индикатором массы для далеких скоплений галактик с фотометрическими или даже отсутствующими красными смещениями при условии, что известно, что $z \gtrsim 0.6-0.7$. Оценка массы, полученная по измерению рентгеновского потока, например, по данным eROSITA/СПГ, в сочетании с оптическими/инфракрасными данными может использоваться для отбора наиболее массивных/интересных скоплений и составления более эффективной программы наблюдений.

Группа галактик Nest20047 известна своей пекулярной морфологией¹ в радиодиапазоне: по данным LOFAR в данной группе наблюдаются множественные радио пузыри, “надуваемые” центральной сверхмассивной черной дырой (активным галактическим ядром, АЯГ), и сложная система радио филаментов. Для дальнейшего изучения Nest20047 были проведены наблюдения при помощи радиоинтерферометров uGMRT, MeerKAT, VLA, а также рентгеновских обсерваторий Chandra и XMM-Newton. Был проведен морфологический и спектральный анализ группы галактик в широком диапазоне частот (53–1518 МГц). Показано, что вдоль радио филаментов спектральный индекс практически не меняется, что указывает на то, что частицы не охлаждаются вдоль волокон. Что, в свою очередь, свидетельствует о том, что эти частицы либо (повторно) ускорялись вместе и эволюционировали в схожем магнитном поле, либо движутся вдоль волокон со сверх альфвеновскими скоростями. Получены оценки возраста наблюдаемых радио пузырей: 130 млн лет, 160–170 млн лет и >220 млн лет, с периодами активности джетов от 50 до 100 млн лет и очень короткими периодами неактивности. Данные оценки подтверждает идею о почти непрерывном притоке энергии от сверхмассивной черной дыры/джетов, типичном для режима поддержания обратной связи АЯГ, особенно в группах галактик. На основе данных наблюдений в рентгеновском диапазоне длин волн обсерваторий Chandra и XMM-Newton были получены термодинамические профили горячего газа Nest20047. Получены оценки на полную массу группы галактик и на массу центральной черной дыры.

Изучение диффузного радиоизлучения в скоплениях галактик на больших красных смещениях ($z > 0.6$) необходимо для понимания эволюции крупномасштабных магнитных полей. На “заметных” красных смещениях рост плотности энергии реликтового излучения $(1+z)^4$ увеличивает потери излучения релятивистских электронов за счет обратного Комптоновского рассеяния. Эти электроны также производят синхротронное излучение в радиодиапазоне, интенсивность которого зависит от величины магнитного поля в газе. Это излучение может быть ослаблено, если потери на комптоновское рассеяние доминируют. Для массивных и далеких скоплений MaDCoWS внутри области покрытия обзора LoTSS-DR2 (56 скоплений) был произведен поиск диффузного радиоизлучения на частоте 144 МГц. Возможное присутствие диффузного радиоизлучения с наибольшими линейными размерами 350 - 500 кпк выявлено в пяти скоплениях (из 56). Если это радиоизлучение представляет собой радиогало, то обнаруженные источники согласуются с установленным ранее для близких скоплений соотношением между мощностью радиоизлучения и массой скопления, либо имеют большую мощность при заданной массе. Однако требуются более глубокие наблюдения для подтверждения полученного вывода в этом пилотном проекте.

¹ Пресс-релиз, посвященный первой публикации по группе галактик Nest20047, доступен по ссылке <https://iki.cosmos.ru/news/dvesti-millionov-let-aktivnosti-sverkhmassivnoy-chnoy-dyru-khroniki-zapisannye-v>