

НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫЕ КАНДИДАТЫ В СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК КАТАЛОГА РАСТ, НАЙДЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

С. А. Воскресенская^{1,2}, А. В. Мещеряков^{2,3}, Д. А. Матиенко¹, Н. С. Лыскова^{2,4}

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
²Институт космических исследований РАН, ³Московский государственный
университет им. М. В. Ломоносова, ⁴Астрокосмический центр ФИАН

Скопления галактик являются наиболее массивными гравитационно связанными объектами. Для уменьшения статистических ошибок в определении космологических параметров σ_8 и Ω_m необходимо увеличивать статистику скоплений. Мы применили методы глубокого обучения для нахождения скоплений галактик и в данной работе показываем наиболее вероятных кандидатов. Для кандидатов было измерено фотометрическое красное смещение с помощью zCluster. В итоге нами найдено восемь новых скоплений галактик с $z > 0.8$.

MOST PROBABLE CANDIDATES FOR GALAXY CLUSTERS IN THE PACT CATALOGUE FOUND USING DEEP LEARNING IN THE SUB-MILLIMETRE RANGE

S. A. Voskresenskaia^{1,2}, A. V. Meshcheryakov^{2,3}, D. A. Matienko¹, N. S. Lyskova^{2,4}

¹Higher School of Economics, ²Space Research Institute RAS, ³Lomonosov Moscow State University, ⁴Astro Space Center, Lebedev Physical Institute

Galaxy clusters are the most massive gravitationally-bound objects. To reduce statistical errors in the determination of the cosmological parameters σ_8 and Ω_m , it is necessary to increase the statistics of clusters. We have applied deep learning techniques to find galaxy clusters and in this paper we show the most likely candidates. Also, we measure the photometric redshift for the candidates by zCluster. As a result, we find 8 new galaxy clusters with $z > 0.8$.

Введение

Скопления галактик являются наиболее массивными гравитационно связанными объектами во Вселенной. Они состоят на 85 % из темной материи, на 12 % — из межгалактического газа и на 3 % — из звезд [1]. Их можно обнаружить в различных диапазонах длин волн: в оптике они видны как концентрации эллиптических галактик, в рентгене — благодаря излучению горячего газа, в микроволнах — за счет эффекта Сюняева — Зельдовича (СЗ) [2]. СЗ-эффект позволяет изучать скопления в (суб)миллиметровом диапазоне с преимуществами, такими как независимость от красного смещения и пропорциональность сигнала интегральному давлению газа, связанному с общей массой скопления.

В последние годы глубокое обучение демонстрирует хорошие результаты в анализе астрономических данных [3]. Подходы, основанные на глубоком обучении, были успешно применены к данным микроволнового диапазона. Бонжеан [4] предложил использовать модель с архитектурой U-Net (тип полносвязных сверточных сетей) для построения карты сегментации СЗ-сигнала из необработанных данных HFI-карт Планка и обнаружения на ней СЗ

источников. Верхованов и др. в 2021 [5] обучили модель классификации, основанной на сверточной архитектуре (СНС), для распознавания СЗ источников на картах интенсивности Планка. Лин и др. 2021 [6] продемонстрировали гибридную модель (DeepSZ), основанную на сочетании СНС и классического подхода многочастотной фильтрации, а также ее возможности в обнаружении СЗ источников по моделированным картам реликтового излучения.

Цель нашей работы — продемонстрировать новых кандидатов в скопления с высоким порогом вероятности, найденные с помощью глубокого обучения на микроволновых картах АКТ+Планк.

Метод

Мы использовали метод поиска скоплений галактик, описанный в статье Воскресенской и др. [7]. Была обучена нейронная сеть на данных каталогов Атакамского космологического телескопа для обнаружения скоплений галактик и применили ее ко всем направлениям на центры пикселей совмещенных карт АКТ + Планк. Далее ими была получена карта вероятности существования скопления в заданном направлении для всей области покрытия Атакамского космологического телескопа. Следующим шагом было создание карты сегментации с помощью установления минимального значения предсказанной вероятности нахождения скопления в направлении пикселя $p_{seg} = 0.3$. На полученные связанные группы были наложены дополнительные условия: (i) они не должны лежать около границы покрытия карты (минимум $16'$ от края), (ii) они должны лежать вне плоскости галактики ($|b| > 20^\circ$). В итоге был получен каталог РАСТ.

Далее мы рассмотрим часть этого каталога, у объектов которого есть пиксель с вероятностью выше $p_{max} > 0.996$, а также с площадью $S > 50$. Итоговый каталог имеет 1 190 объектов. Мы пересекли полученную выборку в 5-минутном радиусе с каталогами скоплений ACT DR5 [8], PSZ2 [9], SPT-SZ [10], PSZSPT [11], ComPRASS [12], MCXC [13] и убрали эти объекты из рассмотрения. В итоге осталось 198 объектов.

Далее с использованием алгоритма zCluster мы измерили фотометрические красные смещения объектов, лежащих в области обзора DES. В области покрытия лежат 1 028 объектов каталога (среди неотожествленных — 146). Далее мы будем рассматривать объекты со значимыми красными смещениями ($\delta > 0.2$).

Результаты

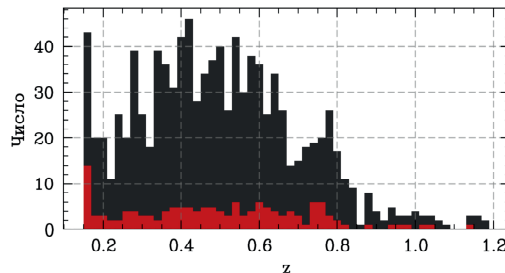


Рис. 1. Распределение по фотометрическому красному смещению. Черным показано распределение для всех скоплений с измеренными красными смещениями, красным — для 146 неотожествленных скоплений галактик, лежащих в области покрытия DES

На рис. 1 представлено распределение скоплений галактик по красным смещениям. Черным показано распределение для всех кандидатов, лежащих в полях DES, красным — неотожествленные скопления. Важно отметить, что восемь из неотожествленных имеют красное смещение выше 0.8. Один из объектов был ранее представлен в каталоге ComPACT [7].

На картах рис. 2 показано, как выглядят скопления на больших z , не отождествленные в микроволновых и рентгеновских каталогах. Левая панель — вырезка из карты интенсивности на 98 ГГц АСТ + Planck размером $16' \times 16'$, вторая слева — 150 ГГц, третья — 220 ГГц. Правая панель показывает предсказанные вероятности для пикселей карт. Видно, что все источники имеют СЗ-сигнал в картах.

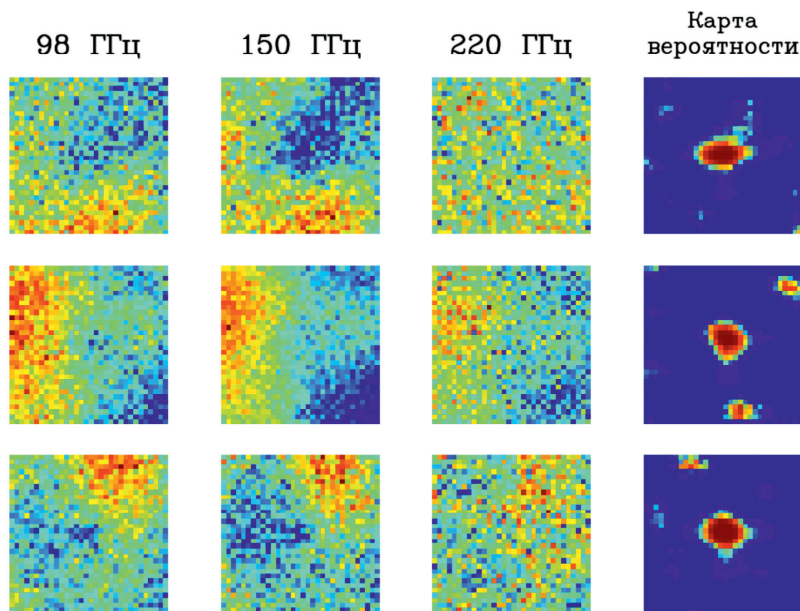


Рис. 2. Пример новых скоплений с высоким z . Первая строка — 0.81, вторая — 0.96, третья — 1.13. С первого по третий столбец показана вырезанная область неба размером $16' \times 16'$ на частотах 98, 150 и 220 ГГц карт АСТ + Planck. Правый столбец показывает карту вероятности для пикселей модели

Заключение

С помощью глубокого обучения был создан каталог скоплений галактик РАСТ, и в данной работе мы демонстрируем наиболее вероятные объекты. Нами найдено 198 новых кандидатов в скопления, из которых как минимум восемь имеет $z > 0.8$.

Библиографические ссылки

- [1] Allen S. W., Evrard A. E., Mantz A. B. Cosmological Parameters from Observations of Galaxy Clusters // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 2011. — Vol. 49, № 1. — P. 409–470. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102514>.

- [2] *Sunyaev R. A., Zeldovich Ya. B.* The interaction of matter and radiation in the hot model of the Universe, II // *Astrophys. Space. Sci.* — 1970. — Vol. 7, № 1. — P. 20–30.
- [3] *Smith M. J., Geach J. E.* *Astronomia ex machina: a history, primer, and outlook on neural networks in astronomy.* — 2023. 2211.03796.
- [4] *Bonjean V.* Deep learning for Sunyaev–Zel’dovich detection in Planck // *Astronomy & Astrophysics.* — 2020. — Vol. 634. — P. A81.
- [5] *Verkhodanov O. V., Topchieva A. P., Oronovskaya A. D. et al.* Search for Galaxy Cluster Candidates in the Cosmic Microwave Background Maps of the Planck Space Mission Using a Convolutional Neural Network Based on the Method of Tracing the Sunyaev-Zeldovich Effect // *Astrophysical Bulletin.* — 2021. — Vol. 76, № 2. — P. 123–131.
- [6] *Lin Z., Huang N., Avestruz C. et al.* DeepSZ: identification of Sunyaev-Zel’dovich galaxy clusters using deep learning // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2021. — Vol. 507, № 3. — P. 4149–4164. 2102.13123.
- [7] *Voskresenskaia S., Meshcheryakov A., Lyskova N.* ComPACT: ACT+Planck galaxy cluster catalogue. — 2023. 2309.17077.
- [8] *Hilton M. et al.* The Atacama Cosmology Telescope: A Catalog of >4000 Sunyaev–Zel’dovich Galaxy Clusters // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 2021. — Vol. 253, № 1. — P. 3.
- [9] *Planck Collaboration.* Planck 2015 results. XXVII. The second Planck catalogue of Sunyaev-Zeldovich sources // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 594. — P. A27. 1502.01598.
- [10] *Bocquet S. et al.* Cluster Cosmology Constraints from the 2500 deg² SPT-SZ Survey: Inclusion of Weak Gravitational Lensing Data from Magellan and the Hubble Space Telescope // *Astrophys. J.* — 2019. — Vol. 878, № 1. — P. 55. 1812.01679.
- [11] *Melin J.-B., Bartlett J. G., Tarrío P., Pratt G. W.* PSZSPT: A joint Planck and SPT-SZ cluster catalog // *A&A.* — 2021. — Vol. 647. — P. A106.
- [12] *Tarrío P., Melin J.-B., Arnaud M.* ComPRASS: a Combined Planck-RASS catalogue of X-ray-SZ clusters // *A&A.* — 2019. — Vol. 626. — P. A7.
- [13] *Piffaretti R., Arnaud M., Pratt G. W. et al.* The MCXC: a meta-catalogue of x-ray detected clusters of galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2011. — Vol. 534. — P. A109. 1007.1916.