



Измерение масс и красных смещений нейросетевого каталога скоплений галактик ComPACT

Воскресенская С.А.^{1, 2*}, Мещеряков А.В.², Лыскова Н.С.²



¹ Высшая школа экономики, Москва

² Институт космических исследований РАН, Москва

Скопления галактик, являясь наиболее массивными гравитационно-связанными структурами во Вселенной, служат лабораториями для изучения эволюции галактик и играют ключевую роль в космологических тестах. Мы проанализировали свойства нейросетевого каталога источников эффекта Сюняева–Зельдовича, созданного на основе карт ACT+Planck. С использованием фотометрических красных смещений по данным обзоров DECaLS DR9 и WISE, а также карт у-параметра ACT+Planck и Planck, было подтверждено 71.3 % кандидатов в скопления. Для 58.3 % скоплений были определены красные смещения в диапазоне $z \approx 0.007\text{--}1.7$, включая 111 новых измерений. Оценки масс получены для 52 % выборки, из которых 133 массы определены впервые. Диапазон масс составляет: $M_{500\text{C}} = (0.25\text{--}13.1) \times 10^{14} M_{\odot}$. Каталог также включает пять новых массивных скоплений на больших красных смещениях ($z > 0.8$, $M_{500\text{C}} > 5.3 \times 10^{14} M_{\odot}$), увеличивая известную популяцию таких объектов на 20 %.

Данные

Мы использовали каталог ComPACT, созданный при применении глубокого обучения к микроволновым картам ACT + Planck в направлениях каталога планковских кандидатов в скопления SZcat (Мещеряков+2022). Он содержит 2,962 кандидата в скопления галактик. В нем представлено 3 приоритета для кандидатов, с чистотой выборки от 74 до 84 %

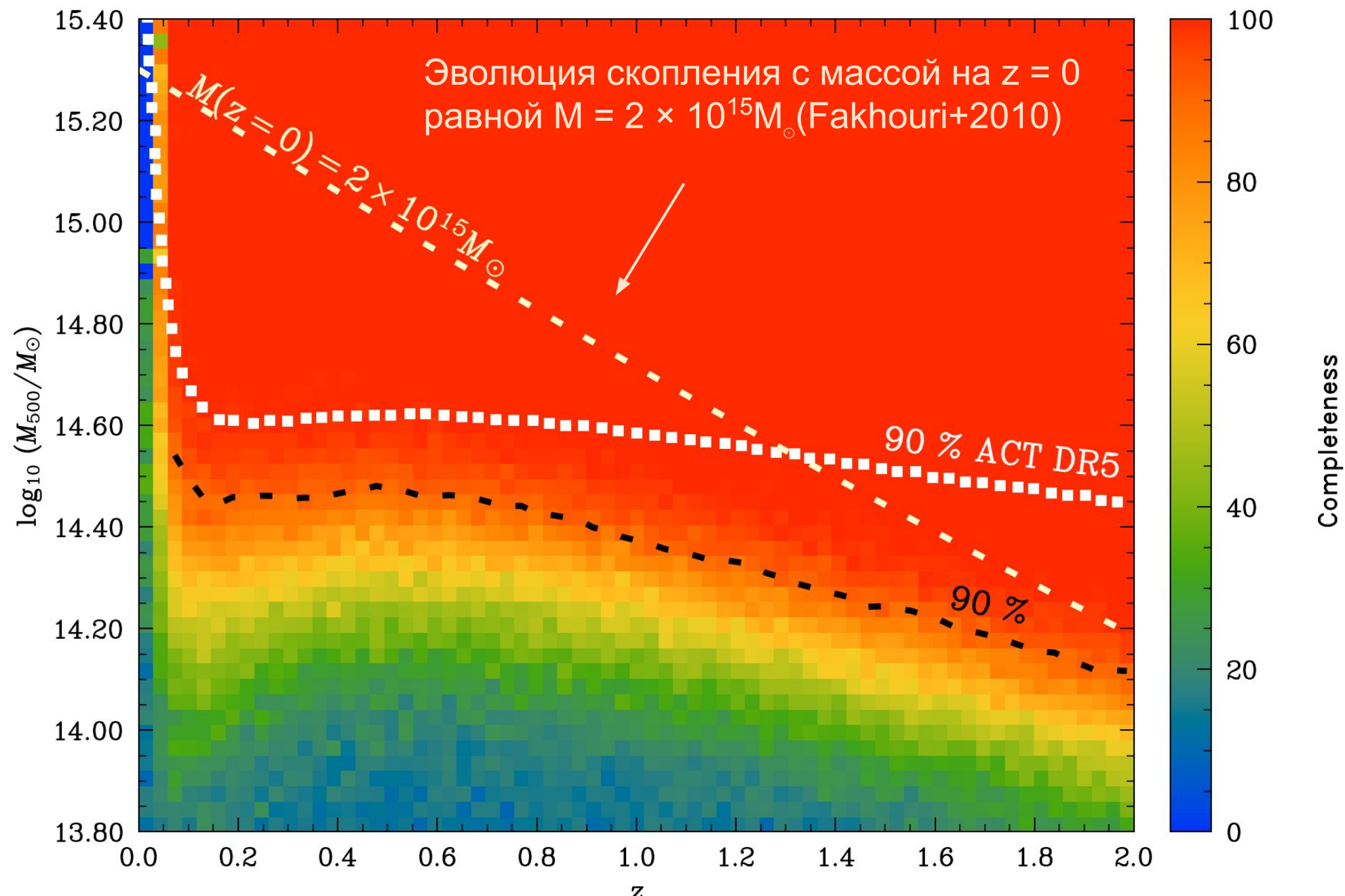


github.com/astromining/ComPACT

Полнота

Мы представляем оценку полноты, чтобы проиллюстрировать эффективность каталога в различных диапазонах масс и красных смещений. Полнота рассчитана путём внедрения моделированных скоплений в реальные карты ACT+Planck и последующего применения к ним алгоритма глубокого обучения. Параметры скоплений генерировались на равномерной сетке z от 0 до 2. Минимальная масса гало составляла $M_{500\text{C}} > 8 \times 10^{13}$ солнечных масс. В общей сложности было сгенерировано 1 миллион объектов.

Каталог демонстрирует высокую минимальную полноту по сравнению с ACT DR5, что отражает компромисс между увеличением полноты и контролем чистоты выборки. Полученные результаты показывают, что нейросетевой подход позволяет выявлять скопления с низким отношением сигнал/шум на больших красных смещениях



Отождествление

Измерение красных смещений

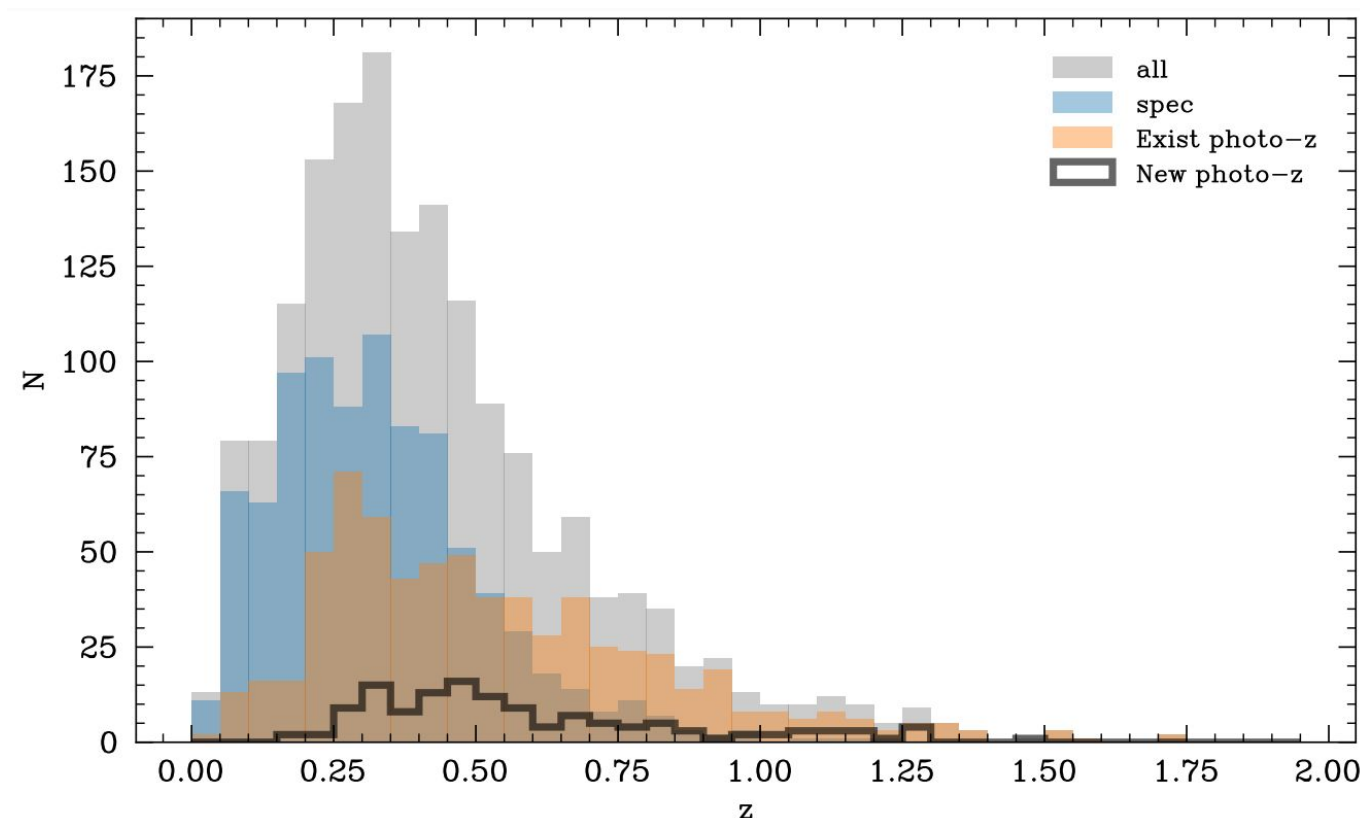
Пересечение

ACT DR5, PSZ2 и другие каталоги (SPT, ACT MCMF, XCSDR1, XCLASS, MCXC II, XXL-365, MaDCoWS (I, II), PSZSPT, ComPRASS, RXGCC, REDMAPPER-DES-SVA, REDMAPPER-DES-SDSS, MARD-Y3, CODEX)

ИК-яркость (Зазнобин+2023):

вблизи центра скопления вычисляется распределение инфракрасной светимости галактик из каталогов DESI LIS, Pan-STARRS1 и Zou+2022 по красному смещению с использованием данных принудительной фотометрии WISE. Пик этого распределения используется как оценка красного смещения скопления. Выбирается уровень достоверности выше порога 0.8, который соответствует уровню ~ 5 % доли ложных скоплений.

- zCluster (Hilton+2018, Hilton+2021)** по фотометрическим данным из DECaLS DR9 и спектральному шаблону измеряется z галактик. Красное смещение скопления определяется как максимум сглаженного распределения галактик. Для оценки значимости скопления алгоритм zCluster использует параметр контраста. Этот параметр отражает избыток галактик в радиусе 0.5 Мpc по сравнению с фоновым уровнем в кольце 3–4 Мpc. Порог, соответствующий 5 % доле ложных объектов, равен $\delta \geq 3.2$



Детекция в у-картах

- yPlanck (Chandran+2023):** В апертуре $R = 10'$ извлекается интегральное значение Y параметра. Порог детектирования, соответствующий 5 % доле ложных $\text{SNR} = 1.4$

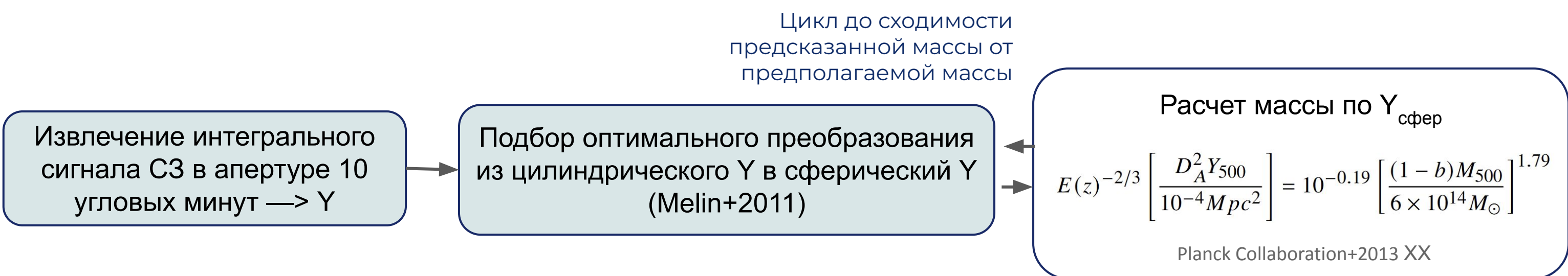
$$\text{SNR} = \frac{Y_{\text{cyl}}}{\sigma_{\text{bkg}}}$$

- yACT+Planck (Coulton+2024):** В апертуре $R = 10'$ извлекается максимальное значение y параметра. Порог, соответствующий 5 % доле ложных, $\text{SNR} = 2$

$$\text{SNR} = \frac{y_{\text{max}} - y_{\text{bkg}}}{\sigma_{\text{bkg}}}$$

Эмпирическая оценка чистоты каталога ComPACT составляет 71.3% и хорошо согласуется с оценкой, полученной ранее (74%) с помощью каталога SZcat+eROSITA

Измерение масс в у-картах Planck и ACT + Planck

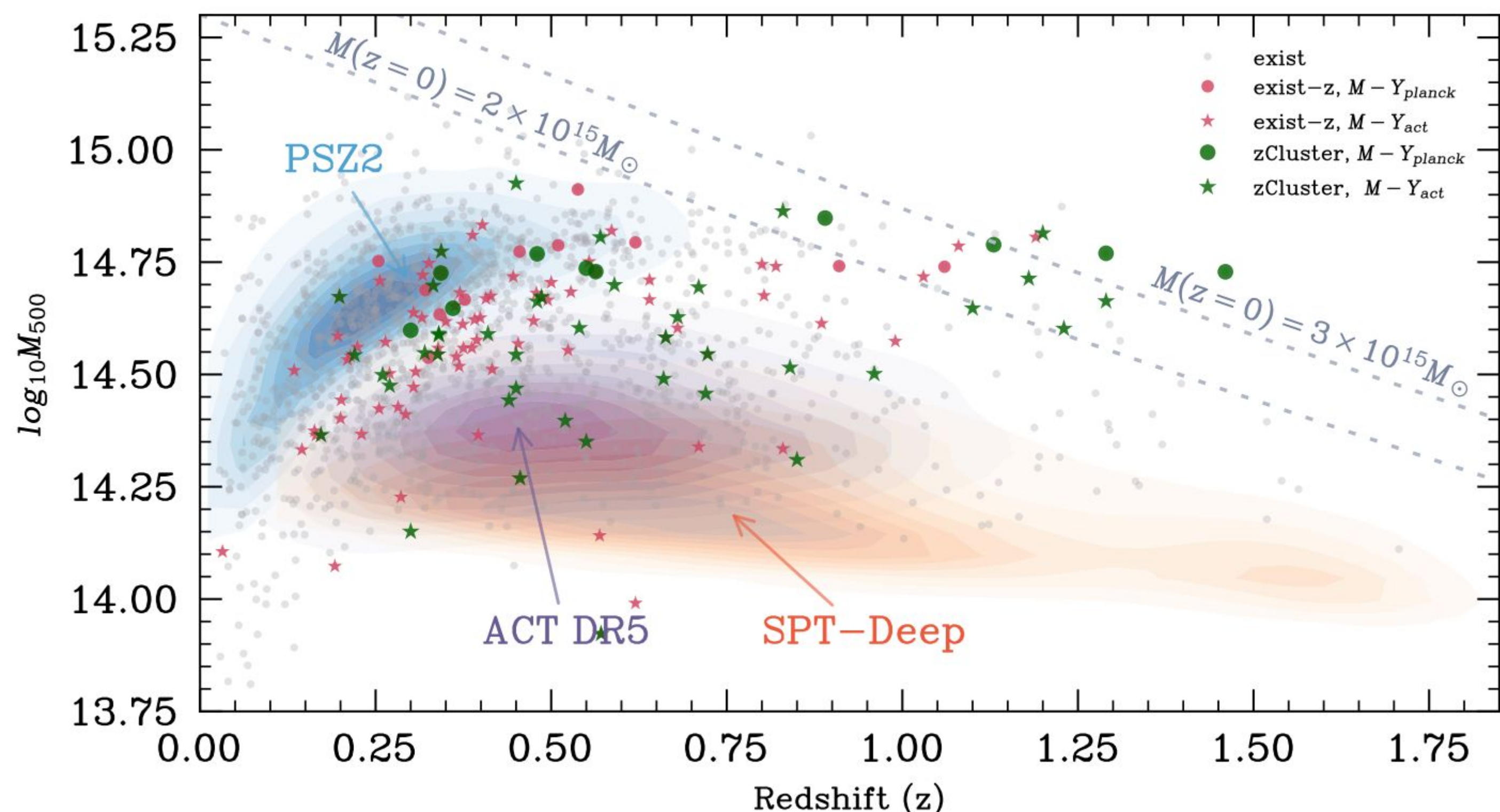


Измеренные массы имеют разброс (NMAD = 0.1 dex), сравнимый с предшествующими исследованиями

Скопления каталога на плоскости «М - z»

Распределение на плоскости масса-красное смещение объектов ComPACT.

Контурами ACT DR5 (фиолетовые контуры), PSZ2 (синие контуры) и SPT-deep (оранжевые контуры). Серыми точками отмечены скопления с измерениями из каталогов в ComPACT, пурпурными точками - с ранее неизвестными измерениями массы. Зеленым цветом отмечены скопления с новыми измерениями z и массы.



- Новые объекты ComPACT лежат в области выше распределения каталога ACT DR5 и ниже распределения каталога PSZ2
- Обнаружены новые далекие массивные скопления галактик с $z > 0.8$ и $M_{500} > 4 \times 10^{14} M_{\odot}$
- Увеличено на 20% (5 объектов) число известных наиболее массивных далеких скоплений галактик на $z > 0.8$

Выводы

Мы представляем массы и красные смещения скоплений галактик из каталога ComPACT. Выборка скоплений включает 2,962 объекта в диапазоне красных смещений $0.007 < z < 1.79$ и масс $M_{500\text{C}} = (0.25\text{--}13.1) \times 10^{14} M_{\odot}$.

Каталог расширяет общее количество опубликованных, оптически подтверждённых СЗ-скоплений галактик на 52 новых объекта. Основные результаты представлены ниже:

- Полнота выборки ComPACT на плоскости «масса–красное смещение» была оценена с помощью симуляций СЗ-скоплений на картах ACT+Planck. Показано, что ComPACT существенно расширяет существующую выборку скоплений в области массивных и удалённых объектов по сравнению с известными каталогами.
- Обнаружены новые скопления галактик, и получена эмпирическая оценка чистоты каталога ComPACT (с использованием известных СЗ-каталогов скоплений, оптических обзоров DESI LIS и у-карт): 71.3 %, что хорошо согласуется с ранее опубликованной оценкой 74 % (по данным SZcat+eROSITA).
- Оценки масс и красных смещений для скоплений в каталоге ComPACT получены путём объединения данных известных каталогов скоплений с оптической и инфракрасной фотометрией, а также опубликованных у-карт Planck и ACT+Planck. В результате отождествлено 2,121 объектов, из которых для 1,708 (58 %) определены красные смещения, а для 1,539 (52 %) — массы. Типичная масса скоплений в выборке составляет $M_{500} \sim 4 \times 10^{14} M_{\odot}$.
- Мы увеличили число наиболее массивных ($M_{500}(z=0) > 3 \times 10^{14} M_{\odot}$) и удалённых ($z > 0.8$) скоплений галактик на 20 % (на 5 объектов).

Список литературы

- Vokresenskaia, S., Meshcheryakov, A., & Lyskova, N. (2024). ComPACT: combined Atacama Cosmology Telescope + Planck galaxy cluster catalogue. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 531(1), 1998–2010. doi:10.1093/mnras/stae1269
- The Atacama Cosmology Telescope: A Catalog of >4000 Sunyaev-Zeldovich Galaxy Clusters. (2021). 253(1), 3. doi:10.3847/1538-4365/abd023
- Atacama Cosmology Telescope: High-resolution component-separated maps across one third of the sky. (2024)., 109(6), 063530. doi:10.1103/PhysRevD.109.063530
- <https://github.com/ACTCollaboration/zCluster>
- Zaznobiin I. A., et al., 2023, *Astronomy Letters*, 49, 431
- Fakhouri O., Ma C.-P., Boylan-Kolchin M., 2010, *MNRAS*, 406, 2267
- Zou H., et al., 2022, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 22, 065001
- Melin J. B., Bartlett J. G., Delabrouille J., Arnaud M., Piffaretti R., Pratt G. W., 2011, *A&A*, 525, A139