Draft version November 25, 2026年 使用 LaTeX 双栏样式排版，采用 AASTeX7.0.2

arXiv:2611.33142v1 [astro-ph.CO] 24 Nov 2026

# VENUS：60个星系团詹姆斯·韦布空间望远镜巡天中的强引力透镜普查

Joseph F. V. Allingham [1] Lukas J. Furtak [2 3] Miriam Golubchik [1] Ashish K. Meena [4] Adi Zitrin [1] John Chisholm [2 3] Seiji Fujimoto [5 6] Vasily Kokorev [2 3] Abdurro'uf [7] Franz E. Bauer [8] Maruša Bradač [9 10] Gabriel Brammer [11 12] Dan Coe [13 14 15] Jose M. Diego [16] Henry C. Ferguson [13] Steven L. Finkelstein [2] Tiger Yu-Yang Hsiao [2 3] Yolanda Jiménez-Teja [17 18] Jose M. Palencia [5] Gregor Rihtaršič [9] Chris Willott [19] Rogier A. Windhorst [20] Hollis B. Akins [3] Ricardo O. Amorín [17] Larry D. Bradley [13] Chloe M. Cheng [5] Christopher J. Conselice [21] David A. Coulter [22 13] Pratika Dayal [23 5 24] Guillaume Desprez [25] Miroslava Dessauges-Zavadsky [26] Andreas L. Faisst [27] Qinyue Fei [5] Brenda Frye [28] Yuichi Harikane [29] Jeyhan S. Kartaltepe [30] Tomokazu Kiyota [31 32] Conor Larison [13] Paulo A. A. Lopes [33] Ray A. Lucas [13] Georgios E. Magdis [11 34] Nicholas S. Martis [9] Masami Ouchi [32 35 36 37] Richard Pan [38] Casey Papovich [39 40] Massimo Pascale [41] Justin D. R. Pierel [13] Tom Resseguier [15 13] Johan Richard [42] Massimo Ricotti [43] Luke Robbins [38] William Sheu [41] Fengwu Sun [44] Felix Vecchi [45] Brian Welch [46] and Hiroto Yanagisawa [35,47]

[1] *Department of Physics, Ben-Gurion University of the Negev, P.O. Box 653, Be'er-Sheva 84105, Israel* [2] *Cosmic Frontier Center, The University of Texas at Austin, Austin, TX 78712, USA* [3] *Department of Astronomy, The University of Texas at Austin, Austin, TX 78712, USA* [4] *Department of Physics, Indian Institute of Science, Bengaluru 560012, India* [5] *David A. Dunlap Department of Astronomy and Astrophysics, University of Toronto, 50 St. George Street, Toronto, Ontario, M5S 3H4, Canada* [6] *Dunlap Institute for Astronomy and Astrophysics, 50 St. George Street, Toronto, Ontario, M5S 3H4, Canada* [7] *Department of Astronomy, Indiana University, 727 East Third Street, Bloomington, IN 47405, USA* [8] *Instituto de Alta Investigación, Universidad de Tarapacá, Casilla 7D, Arica, 1010069, Chile* [9] *University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, Jadranska ulica 19, SI-1000 Ljubljana, Slovenia* [10] *Department of Physics and Astronomy, University of California Davis, 1 Shields Avenue, Davis, CA 95616, USA* [11] *Cosmic Dawn Center (DAWN), Jagtvej 128, DK2200 Copenhagen N, Denmark* [12] *Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Jagtvej 128, 2200 Copenhagen N, Denmark* [13] *Space Telescope Science Institute, 3700 San Martin Drive, Baltimore, MD 21218, USA* [14] *Association of Universities for Research in Astronomy (AURA), Inc. for the European Space Agency (ESA)* [15] *Center for Astrophysical Sciences, Department of Physics and Astronomy, The Johns Hopkins University, 3400 N Charles St.Baltimore, MD 21218, USA* [16] *Instituto de Física de Cantabria,(CSIC-UC), Avda. Los Castros s/n. 39005, Santander, Spain* [17] *Instituto de Astrofísica de Andalucía–CSIC, Glorieta de la Astronomía s/n, E–18008 Granada, Spain* [18] *Observatório Nacional, Rua General José Cristino, 77 - Bairro Imperial de São Cristóvão, Rio de Janeiro, 20921-400, Brazil* [19] *NRC Herzberg, 5071 West Saanich Rd, Victoria, BC V9E 2E7, Canada* [20] *School of Earth and Space Exploration, Arizona State University, Tempe, AZ 85287-6004, USA* [21] *Jodrell Bank Centre for Astrophysics, Alan Turing Building, University of Manchester, Oxford Road, Manchester M13 9PL, UK* [22] *William H. Miller III Department of Physics and Astronomy, Johns Hopkins University, 3400 North Charles Street, Baltimore, MD21218, USA* [23] *Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, 60 St George St, University of Toronto, Toronto, ON M5S 3H8, Canada* [24] *Department of Physics, 60 St George St, University of Toronto, Toronto, ON M5S 3H8, Canada* [25] *Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, P.O. Box 800, 9700AV Groningen, The Netherlands* [26] *Department of Astronomy, University of Geneva, Chemin Pegasi 51, 1290 Versoix, Switzerland* [27] *IPAC, California Institute of Technology, 1200 E. California Blvd. Pasadena, CA 91125, USA*
[28] *Department of Astronomy/Steward Observatory, University of Arizona, 933 N. Cherry Ave, Tucson, AZ 85716*
[29] *Department of Astronomy, Graduate School of Science, Kyoto University, Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan*
[30] *Laboratory for Multiwavelength Astrophysics, School of Physics and Astronomy, Rochester Institute of Technology, 84 Lomb Memorial Drive, Rochester, NY 14623, USA* [31] *Astronomical Science Program, Graduate Institute for Advanced Studies, SOKENDAI, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan* [32] *National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*
[33] *Observatório do Valongo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ladeira do Pedro Antônio 43, Rio de Janeiro, RJ, 20080-090, Brazil*
[34] *DTU-Space, Technical University of Denmark, Elektrovej 327, 2800, Kgs. Lyngby, Denmark*

[35] *Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan*

通讯作者：Joseph Allingham allingha@post.bgu.ac.il

[36] Department of Astronomical Science, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588, Japan[37] Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba277-8583, Japan[38] Department of Physics and Astronomy, Tufts University, 574 Boston Avenue, Suite 304, Medford, MA 02155, USA[39] Department of Physics and Astronomy, Texas A&M University, College Station, TX, 77843-4242 USA
[40] George P. and Cynthia Woods Mitchell Institute for Fundamental Physics and Astronomy, Texas A&M University, College Station,TX, 77843-4242 USA[41] Department of Physics & Astronomy, University of California, Los Angeles, 430 Portola Plaza, Los Angeles, CA 90095, USA[42] Univ Lyon, Univ Lyon1, ENS de Lyon, CNRS, Centre de Recherche Astrophysique de Lyon UMR5574, 69230 Saint-Genis-Laval,France[43] Department of Astronomy, University of Maryland, College Park, 20742, USA
[44] Department of Astronomy, School of Science, Westlake University, Hangzhou, Zhejiang 310030, P. R. China
[45] Laboratoire d'Astrophysique, EPFL, Observatoire de Sauverny, 1290 Versoix, Switzerland[46] International Space Science Institute, Hallerstrasse 6, 3012 Bern, Switzerland[47] Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

摘要

我们展示了第4周期中观测到的57个星系团的强引力透镜模型；这些星系团属于詹姆斯·韦布空间望远镜「新生未探索源广域探测」（VENUS）计划选定的60个目标。其余三个星系团的模型将在完成观测后纳入。该数据集包含5013幅单幅图像，对应1733个多重成像系统，其中912个具有光谱红移测量值，另有227个为新识别的系统。借助这些丰富的新观测数据，我们使用AstroLensPy软件构建参数化透镜模型，以 $\Delta_{\rm RMS}$ 的平均像平面精度复现观测到的图像位置。VENUS的总成像面积为576平方角分$^2$, , 提供了迄今规模最大的均一星系团强引力透镜模型集。这些星系团合计产生191平方角分$^2$ 的放大面积，其对源 $z_s = 10$的放大倍数为 $|\mu| \geq 3$；例如，这使VENUS观测场成为开展高红移研究的首选巡天之一。在我们的样本中，MACS J0717.5+3745、RXC J0600.1-2007和PLCK G287.0+32.9的爱因斯坦半径最大（$\geq 60''$），且对源 $z_s = 10$的放大面积最大（$\mathcal{A}_{z_s=10}^{|\mu|\geq 3} \geq 9$ 平方角分$^2$），因此是迄今已知效力最强的引力望远镜。最后，利用该样本的统计优势，我们推导出各种引力透镜观测量（爱因斯坦半径、放大面积、投影质量）与由SZ/X射线推断的星系团质量之间的标度关系，$M_{500,\ c}$。

关键词：引力透镜：强；星系团：一般

## 1. 引言

星系团由重子物质和暗物质的引力坍缩形成于宇宙网的节点处（G. M. Voit 2005；A. V. Kravtsov & S. Borgani 2012年；R. Bower 2013年）。作为大质量天体，它们会使时空弯曲；当其质量密度足够高时，便会强烈透镜化其后方的背景源，从而产生多个可观测像。对于给定的强引力透镜（SL）星系团，这些像的分布使其质量建模成为可能，即绘制透镜中总物质分布的引力势图（J.-P. Kneib & P. Natarajan 2011年；P. Natarajan 等 2024年；A. Zitrin 2026年）。由于引力透镜对总投影质量敏感，而不论其性质如何，因此它是绘制不可见暗物质（DM）分布的绝佳手段。因此，强引力透镜为暗物质研究提供了重要信息（D. Clowe 等人 2006年；S. W. Randall 2008年；J. M. Diego 等人 2018a），无需假设暗物质晕（DMH）与星系团内介质（ICM）处于流体静力学平衡（M.Mu˜noz-Echeverr´ıa 等人 2024年）。特别是，对处于不同红移范围的大样本星系团进行强引力透镜观测，可为结构形成（M. Meneghetti 等人 2013年；P. Natarajan 等人 2017 年）和宇宙学（S. Refsdal 1964 年；E. Jullo 等人 2010年；V. Bonvin 等人 2017年；G. B. Caminha 等人 2022年）提供有价值的约束。

除了研究星系团透镜本身，透镜效应还能像放大透镜一样放大背景，从而观测到原本无法探测的暗弱而遥远的宇宙。这有助于观测从高红移星系（D. Coe等 2013；B. Salmon等 2020；T. Y.- Y. Hsiao等 2023；G. Roberts-Borsani等 2023）

恒星（P. L. Kelly等 2018a；B. Welch等 2022a；A. K. Meena等 2023；Y. Fudamoto等 2025；J. M. Palencia等 2026）、超新星（SNe，P. L. Kelly等 2015；S. A. Rodney等 2016；B. L. Frye等 2024；J. D. R. Pierel等 2024；S. H. Suyu等 2026；M. Pascale等 2025b）、星团（E. Vanzella等 2023a；Y. Fudamoto等 2024；A. Adamo等 2024）、活动星系核（AGN，L. J. Furtak等 2023a；K. Napier等 2023；A.P. Cloonan等 2025；J. F. V. Allingham等 2025）到小红点（LRDs，L. J. Furtak等 2023b）。

为了利用这些特性并研究星系团及其放大的背景源，研究人员利用哈勃空间望远镜（HST）开展了多项星系团引力透镜巡天，例如哈勃星系团引力透镜与超新星巡天（CLASH，M. Postman 等，2012年）、哈勃前沿场（HFF，J. M. Lotz 等，2017年）、再电离引力透镜星系团巡天（RELICS，D. Coe 等，2019）；此外，还利用詹姆斯·韦布空间望远镜开展了加拿大NIRISS无偏星系团巡天（CANUCS，G. T. E. Sarrouh 等，2026）、再电离时代前的超深度NIRSpec与NIRCam观测（UN-COVER，R. Bezanson 等，2024年）、再电离与引力透镜科学首要河外区域（PEARLS，R. A. Windhorst 等，2023）、GLIMPSE（H. Atek 等，2025年）以及强引力透镜与星系团演化（SLICE，C. Cerny 等，2026；Mahler 等，准备中）。

其中一个大型强引力透镜巡天项目是新生未探索源广域探测（VENUS，S. Fujimoto 等，2025年），目标是观测60个已知强引力透镜星系团。VENUS通过10个波段的近红外相机成像，提供了一项全面的詹姆斯·韦布空间望远镜强引力透镜星系团巡天——观测时间总计240小时，充分利用上述强引力透镜星系团的优势，并带来了诸多重要发现，从引力透镜放大的小红点（M. Golubchik 等，2026年；Z. Zhang 等，2025年；H. Yanagisawa 等，2026年）、引力透镜放大的超新星（D. A. Coulter 等，2026年；S. Fujimoto 等，2026年；C. Larison 等，2026年）到高红移星系和星团（M. Nakane 等，2026年；Abdurro'uf 等，2026年；Y. Asada 等，2026年；R. Pan 等，2026年）。在这一背景下，与以往的大型强引力透镜建模星系团计划（例如M. Oguri 等，2012年；A. Zitrin 等，2015）一样，对所有VENUS 星系团进行系统性引力透镜建模是必要的。随着第4周期结束，我们在此发布截至目前已观测的所有VENUS 星系团的首个强引力透镜模型目录，作为首个数据发布（DR1），共包含57个星系团模型。其中3个星系团尚未作为第4周期的一部分进行观测，已重新安排在第 5 周期观测。我们的DR1模型采用参数化方法`AstroLensPy`（J. F. V. Allingham 等，2026年）生成，该方法是`Python` 实现的 ZitrinAnalytic 方法（A. Zitrin 等，2015）；模型本身将在后续发布中向公众提供。一篇配套论文同样详细介绍了采用`glafic` （M. Oguri 等，2026）生成的 VENUS 星系团透镜模型。

在第2节介绍 VENUS 及其他档案观测后，第3节将描述引力透镜分析方法、先验和偏差。第4节将介绍具体的星系团模型和结果，随后在第5 节讨论基于透镜模型的统计推断及其对一般强引力透镜研究的影响。最后，本文将在第6节进行总结。本文采用标准的平直 $\Lambda$ CDM宇宙学模型，其中 $H_0 = 70\mathrm{kms}^{-1}\,\mathrm{Mpc}^{-1}$，$\Omega_\Lambda = 0.7$和 $\Omega_\mathrm{m} = 0.3$；星等采用 AB 星等系统（J. B. Oke 与 J. E. Gunn 1983），不确定性范围采用 $1\sigma$，除非另有说明。

## 2. 数据

### 2.1. *VENUS JWST NIRCam* 观测

JWST VENUS Treasury 项目（项目编号：6882-GO，首席研究员：Fujimoto，参见S. Fujimoto等 2025a）在第4周期对 60 个强引力透镜星系团进行观测，红移范围为 $z = 0.18$ 至 0.97，使用 10 个 NIRCam 波段；并在第 5 周期使用 2 个 NIRCam 滤光片对其中选定的 10 个星系团进行重复观测，以获取另一个观测历元，同时利用 NIRSpec 多目标光谱（微快门阵列，MSA）开展观测。对 576 平方角分$^2$ 的强引力透镜星系团进行巡天，主要旨在研究高红移恒星、星系和黑洞，以了解结构的形成与演化（Y. Harikane等 2023；E. Zackrisson等 2024年）。实现这些科学目标，需要准确理解引力透镜放大效应，因为在提取背景源的本征亮度时，它是最重要的系统误差。

在这篇 VENUS 强引力透镜 DR1 论文中，我们仅关注第4周期期间（2025年8月7日至2026年8月8日）获取的 VENUS 数据。目标星系团汇总于表 1。VENUS 首个观测阶段获取的 10 个 NIRCam 波段包括 7 个 NIRCam 宽带滤光片（短波通道中的 F090W、F115W、F150W 和 F200W，以及长波通道中的 F277W、F356W 和 F444W）和 3 个中波段（F210M、F300M 和 F410M），NIRCam 观测时间总计 239.8 小时，因此每个波段至少达到 28 AB 星等的深度，且具有 $5\sigma$确定性。由于 4 个星系团的观测延迟，第4周期结束时 NIRCam 观测时间总计为 224.7 小时，另有 3 个星系团尚未观测，1 个星系团尚未进行第二次观测。因此，在 60 个 VENUS 星系团中，本文将介绍 57 个星系团的强引力透镜模型。此外，

将阿贝尔2744星系团纳入 VENUS 属于档案数据收录，
因为 UNCOVER 的观测（R. Bezanson 等，2024年）
已满足 VENUS 对观测深度和多波段观测的要求。

**表1.** VENUS 60个星系团的观测、引力透镜约束和图像重现精度概要。各列依次为：(i) 星系团名称，按观测日期排序；(ii) 赤经（度，J2000）；(iii) 赤纬（度，J2000）；(iv) 星系团红移；(v) 观测日期；(vi) $M_{500,\ c}$值[a]，按优先级从高到低取自 ACT DR6（M. Aguena 等，2026年）、SPT-3G（最新数据发布，L. E. Bleem 等，2026年，以及所有 SPT 巡天）、eROSITA-DE（E. Bulbul 等，2024年）和 *Planck* DR2（普朗克合作组等，2016）；(vii) 多重成像系统（MIS）总数；(viii) 经光谱确认的系统总数；(ix) 透镜像总数；(x) 新鉴定系统总数；(xi) 像平面 $\Delta_{\rm RMS}$；(xii) 模型中的自由参数数量（包括自由红移）；(xiii) 强引力透镜 $\chi^2$。请注意，$\chi^2$ 是在所有像和星系团上采用名义统一的 $\sigma_{\rm pos} = 0.2''$ 误差得出的（见第3.3节）。此外请注意，在本表中，同一源星系的结以及来自不同星系的 MIS 均分别计为不同的 MIS 鉴定。不过，给已知 MIS 增添新的结不计作新系统。最后请注意，M. Oguri 等（2026年）首次鉴定的 MIS 在此不计作"新鉴定"，但我们将所有单独完成的鉴定均计入。

| 星系团名称 | $\alpha_c$ | $\delta_c$ | $z$ | 观测日期 | $M_{500,\ c}$ | $N_{\rm Sys}$ | $N_{\rm Spec}$ | $N_{\rm Im}$ | $N_{\rm New}$ | $\Delta_{\rm RMS}$ | $N_{\rm Free}$ | $\chi^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | [度，J2000] | [度，J2000] | | | $[10^{14} M_\odot]$ | | | | | [角秒] | | |
| 阿贝尔2744 | 3.5883333 | -30.3972500 | 0.31 | 2022年-11-05[b] | 15.25 | 65 | 59 | 186 | 0 | 0.37 | 55 | 632.8 |
| RXCJ0018.5+1626 | 4.6416667 | 16.4333333 | 0.55 | 2026年-07-03 | 11.89 | 18 | 3 | 47 | 3 | 0.37 | 38 | 160.9 |
| MACSJ0025.4-1222 | 6.3764850 | -12.3812301 | 0.58 | 2026年8月8日 | 8.32 | 10 | 2 | 30 | 4 | 0.16 | 28 | 18.3 |
| RXCJ0032.1+1808 | 8.0462500 | 18.1302778 | 0.40 | 2025年11月28日 | 11.01 | 55 | 4 | 162 | 0 | 0.66 | 80 | 1755.4 |
| MACSJ0035.4-2015 | 8.8625000 | -20.2611944 | 0.35 | 2025年11月14日 | 10.98 | 27 | 12 | 74 | 12 | 0.50 | 30 | 454.3 |
| Abell 68 | 9.2758333 | 9.1591667 | 0.26 | 2025年11月21日 | 9.92 | 18 | 7 | 49 | 4 | 0.35 | 39 | 152.6 |
| Abell 2813 | 10.8535511 | -20.6209901 | 0.29 | 2025年11月14日 | 11.68 | 18 | 2 | 58 | 2 | 0.63 | 33 | 574.6 |
| El Gordo | 15.7278497 | -49.2605321 | 0.87 | 2026年8月5日 | 17.28 | 76 | 44 | 207 | 0 | 0.97 | 60 | 4881.4 |
| Abell 209 | 22.9691667 | -13.6105556 | 0.21 | 2025年11月19日 | 9.82 | 3 | 0 | 7 | 0 | 0.30 | 7 | 16.1 |
| WHLJ013719.8-082841 | 24.3540956 | -8.4564151 | 0.57 | 2025年8月7日 | 9.89 | 11 | 7 | 30 | 2 | 0.89 | 16 | 589.5 |
| CLJ0152.7-1357 | 28.1776447 | -13.9591200 | 0.83 | 2025年9月3日 | 5.88 | 24 | 1 | 66 | 13 | 0.84 | 41 | 1158.8 |
| MACSJ0159.8-0849 | 29.9558333 | -8.8333333 | 0.41 | 2025年12月1日 | 10.46 | 15 | 0 | 33 | 6 | 0.27 | 24 | 58.9 |
| RXCJ0232.2-4420 | 38.0773899 | -44.3466885 | 0.28 | 2025年9月10日 | 13.32 | 18 | 1 | 68 | 12 | 0.47 | 34 | 370.7 |
| Abell 370 | 39.9696787 | -1.5719570 | 0.38 | 2026年1月9日 | 10.22 | 93 | 79 | 281 | 1 | 0.70 | 52 | 3421.2 |
| Abell S295 | 41.3790390 | -53.0403040 | 0.30 | 2025年11月2日 | 11.81 | 11 | 4 | 32 | 1 | 0.54 | 22 | 233.0 |
| Abell 383 | 42.0141300 | -3.5292300 | 0.19 | 2025年9月12日 | 5.84 | 14 | 8 | 47 | 3 | 0.73 | 18 | 632.0 |
| MACSJ0257.1-2325 | 44.2925000 | -23.4366111 | 0.51 | 2025年8月18日 | 9.89 | 10 | 3 | 29 | 4 | 0.30 | 19 | 63.5 |
| MACSJ0257.6-2209 | 44.4220833 | -22.1540000 | 0.32 | 2025年9月13日 | 9.28 | 25 | 25 | 85 | 0 | 0.71 | 25 | 1083.6 |
| MACSJ0308.9+2645 | 47.2320833 | 26.7602222 | 0.36 | 2025年8月23日 | 10.76 | 21 | 2 | 49 | 5 | 0.46 | 34 | 263.5 |
| PLCKG171.9-40.7 | 48.2370833 | 8.3720000 | 0.27 | 2025年9月13日 | 10.71 | 15 | 0 | 47 | 1 | 0.47 | 31 | 264.0 |
| MACSJ0329.7-0211 | 52.4237500 | -2.1965833 | 0.45 | 2025年8月19日 | 8.87 | 10 | 8 | 26 | 1 | 0.42 | 21 | 113.4 |
| Abell 3192 | 59.7201370 | -29.9298850 | 0.43 | 2025年9月12日 | 12.49 | 25 | 3 | 71 | 5 | 0.88 | 39 | 1387.2 |
| MACSJ0416.1-2403 | 64.0381013 | -24.0674860 | 0.40 | 2026年1月10日 | 11.26 | 138 | 127 | 379 | 0 | 0.53 | 36 | 2709.0 |
| MACSJ0417.5-1154 | 64.3904167 | -11.9062778 | 0.44 | 2025年10月6日 | 16.95 | 41 | 20 | 121 | 1 | 0.68 | 49 | 1390.1 |
| MACSJ0429.6-0253 | 67.4004167 | -2.8855556 | 0.40 | 2025年9月14日 | 5.48 | 6 | 3 | 21 | 2 | 0.22 | 14 | 26.2 |
| MACSJ0451.9+0006 | 72.9777280 | 0.1050335 | 0.43 | 2025年9月11日 | 8.51 | 34 | 25 | 92 | 4 | 0.75 | 26 | 1279.2 |
| Abell 521 | 73.5287500 | -10.2236056 | 0.25 | 2026年1月14日 | 7.07 | 16 | 15 | 38 | 0 | 0.11 | 12 | 11.9 |
| MACSJ0454.1-0300 | 73.5451620 | -3.0143231 | 0.55 | 2025年9月12日 | 12.50 | 29 | 14 | 76 | 8 | 0.40 | 29 | 304.4 |
| MACSJ0553.4-3342 | 88.3436859 | -33.7078056 | 0.41 | 2025-12-29 | 15.36 | 62 | 4 | 171 | 5 | 0.79 | 73 | 2639.9 |
| RXCJ0600.1-2007 | 90.0408333 | -20.1358056 | 0.46 | 2025-11-29 | 10.58 | 58 | 23 | 173 | 24 | 0.68 | 66 | 1982.6 |

**表 1** *continued*

**表 1** *(continued)*

| 星系团名称 | $\alpha_c$ [度，J2000] | $\delta_c$ [度，J2000] | $z$ | 观测日期 | $M_{500,c}$ [$10^{14} M_\odot$] | $N_{\rm Sys}$ | $N_{\rm Spec}$ | $N_{\rm Im}$ | $N_{\rm New}$ | $\Delta_{\rm RMS}$ [角秒] | $N_{\rm Free}$ | $\chi^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SPT-CLJ0615-5746 | 93.9656173 | -57.7801994 | 0.97 | 2026年-03-03 | 11.43 | 23 | 12 | 70 | 3 | 0.39 | 31 | 262.9 |
| 子弹 | 104.6118466 | -55.9480870 | 0.30 | 2026年-01-18 | 21.44 | 72 | 52 | 196 | 0 | 0.62 | 48 | 1908.9 |
| MACSJ0717.5+3745 | 109.3818750 | 37.7551389 | 0.55 | 2025年11月1日 | 15.30 | 81 | 7 | 237 | 0 | 1.04 | 118 | 6434.5 |
| SMACSJ0723.3-7327 | 110.8312500 | -73.4543333 | 0.39 | 2026-06-05 | 10.59 | 16 | 7 | 45 | 0 | 0.34 | 31 | 133.1 |
| RXCJ0911.1+1746 | 137.7975000 | 17.7759722 | 0.51 | 2026年5月1日 | 6.40 | 6 | 0 | 13 | 1 | 0.22 | 13 | 15.5 |
| MACSJ0940.9+0744 | 145.2237500 | 7.7403889 | 0.34 | 2026年5月11日 | 2.91 | 10 | 8 | 30 | 3 | 0.27 | 21 | 56.0 |
| RXCJ0949.8+1707 | 147.4620833 | 17.1209167 | 0.38 | – | 10.77 | – | – | – | – | – | – | – |
| MACSJ1115.8+0129 | 168.9670833 | 1.4990556 | 0.35 | 2026-06-05 | 10.38 | 7 | 1 | 22 | 1 | 0.85 | 25 | 400.2 |
| PLCKG165.7+67.0 | 171.8127695 | 42.4753151 | 0.35 | 2026-03-26 | 4.00[c] | 41 | 25 | 109 | 0 | 0.11 | 35 | 34.7 |
| MACSJ1149.5+2223 | 177.3987405 | 22.3985246 | 0.54 | 2026-06-05 | 10.89 | 93 | 82 | 269 | 0 | 0.86 | 41 | 5028.9 |
| PLCKG287.0+32.9 | 177.7116667 | -28.0811667 | 0.39 | 2026年6月8日 | 13.95 | 33 | 14 | 101 | 2 | 0.75 | 58 | 1421.4 |
| MACSJ1206.2-0847 | 181.5506024 | -8.8009455 | 0.44 | 2026年6月14日 | 12.34 | 44 | 40 | 131 | 7 | 0.48 | 27 | 744.4 |
| MACSJ1311.0-0310 | 197.7570833 | -3.1776389 | 0.49 | 2026年5月29日 | 5.59 | 4 | 1 | 13 | 0 | 0.23 | 19 | 17.3 |
| 阿贝尔1689 | 197.8748344 | -1.3434880 | 0.18 | 2026年6月11日 | 23.15 | 71 | 25 | 213 | 21 | 0.74 | 64 | 2911.7 |
| RXJ1347.5-1145 | 206.8775000 | -11.7528056 | 0.45 | – | 13.42 | – | – | – | – | – | – | – |
| 阿贝尔1835 | 210.2587500 | 2.8786667 | 0.25 | – | 17.02 | – | – | – | – | – | – | – |
| MACSJ1423.8+2404 | 215.9491667 | 24.0779167 | 0.55 | 2026年3月5日 | 5.10 | 9 | 7 | 32 | 1 | 0.41 | 26 | 137.4 |
| RXJ1532.9+3021 | 233.2240833 | 30.3496389 | 0.35 | 2026年5月17日 | 4.86 | 6 | 0 | 16 | 1 | 0.26 | 12 | 28.1 |
| PLCKG004.5-19.5 | 289.2687500 | -33.5245833 | 0.54 | 2025年10月4日 | 14.49 | 9 | 5 | 23 | 8 | 0.74 | 20 | 311.6 |
| MACSJ1931.8-2635 | 292.9570833 | -26.5761000 | 0.35 | 2025年9月1日 | 7.27 | 19 | 9 | 51 | 10 | 0.65 | 21 | 545.9 |
| SMACSJ2031-4036 | 307.9719583 | -40.6252056 | 0.34 | 2025年9月6日 | 10.94 | 20 | 17 | 68 | 1 | 0.32 | 25 | 175.3 |
| MACSJ2129.4-0741 | 322.3587949 | -7.6910441 | 0.59 | 2025年10月30日 | 10.96 | 21 | 13 | 65 | 1 | 0.83 | 26 | 1125.6 |
| RXJ2129.7+0005 | 322.4165324 | 0.0892660 | 0.23 | 2025年10月29日 | 7.49 | 14 | 11 | 38 | 0 | 0.18 | 15 | 30.7 |
| SMACSJ2131.1-4019 | 322.7704586 | -40.3225768 | 0.44 | 2025年10月29日 | 9.09 | 9 | 8 | 25 | 1 | 0.55 | 20 | 191.0 |
| MACSJ2137.3-2353 | 325.0632500 | -23.6613056 | 0.31 | 2025年10月30日 | 6.91 | 8 | 4 | 22 | 4 | 0.40 | 10 | 87.2 |
| RXCJ2211.7-0349 | 332.9412940 | -3.8289112 | 0.40 | 2025年10月16日 | 17.44 | 46 | 3 | 151 | 3 | 0.85 | 57 | 2723.1 |
| MACSJ2214.9-1359 | 333.7387175 | -14.0035406 | 0.50 | 2025年10月16日 | 11.42 | 23 | 18 | 67 | 5 | 0.62 | 29 | 639.8 |
| Abell S1063 | 342.1850000 | -44.5301389 | 0.35 | 2025年9月22日 | 22.58 | 34 | 31 | 91 | 0 | 0.52 | 26 | 620.8 |
| Abell 2537 | 347.0925000 | -2.1923333 | 0.30 | 2025年11月1日 | 9.92 | 15 | 1 | 57 | 7 | 0.65 | 33 | 606.2 |
| SPT-CL J2325-4111 | 351.3001190 | -41.1990680 | 0.36 | 2025年10月1日 | 9.01 | 33 | 6 | 103 | 24 | 0.65 | 50 | 1097.3 |
| 总计 | | | | | | 1733 | 912 | 5013 | 227 | | | |
| 平均值 | | | 0.42 | | | 30.4 | 16.0 | 87.9 | 4.0 | 0.54 | 34.2 | 988.0 |

[a] $M_{500,\ c}$ 表示半径为$R_{500,\ c}$的球体内所包含的质量；在该球体内，平均密度为临界密度的500倍 e
宇宙在星系团红移处的状态， $\rho_c$（$z$）。[b]UNCOVER和MegaScience观测分别于2022年11月2日至15日以及2023年11月11日至20日获取。

[c] $M_{500,\ c}$ PLCKG165 的引力透镜质量尽管名称如此，却并未被报告在 *Planck* 或任何其他目录中。我们结合 B. L. Frye 等 (2019年) 和 M. Pascale 等 (2022a) 的动力学质量与引力透镜质量来估计 $M_{500,\ c}$ 此处。

VENUS 样本通过筛选已充分鉴定出多重成像系统（MIS）的强引力透镜星系团而获得；这些星系团曾使用哈勃空间望远镜 ACS/F814W 和 F606W 或 F625W 观测，以探测$z \sim 6$掉队星系；具有 VLT/MUSE 覆盖，以最大限度地实现质量模型的光谱锚定；并且具有较大的放大面积。上述筛选标准有三个例外：星系团 MACS J0717.5+3745 和 PLCK G165.7+67.0，由于其位于北部，无法使用 MUSE 进行观测；以及尚未使用 MUSE 观测的星系团 SPT-CL J2325-4111。之所以对这些星系团作出例外安排，是因为它们具有相当大的高放大面积，并且有其他光谱覆盖。此外，在 VENUS 巡天第4周期中，有 7 项詹姆斯·韦布空间望远镜主任酌情分配时间（DDT）提案获批，共计 19.4 小时的望远镜观测时间（仅计入已执行的 DDT 观测）。

这种额外的近红外相机观测深度，以及光谱探测结果，进一步支持了透镜建模工作。

VENUS 数据处理将在未来的综述文章中介绍（Fujimoto等，准备中；Kokorev等，准备中），此处我们简要总结其处理流程。詹姆斯·韦布空间望远镜的产品由所有单独的单次曝光像组成，这些像已经通过 JWST管线的第1和第2阶段完成校准[48]（H. Bushouse 2022年），随后使用`grizli` 处理流程（G.Brammer 2023）进一步处理，处理方式与 DAWN JWST档案（DJA，F. Valentino 2023）所采用的方法一致[49]。随后对数据集进行了进一步后处理，包括额外的背景、$1/f$ 噪声和衍射尖峰扣除步骤；这些步骤既在每个滤光片的放大器层级上进行，也应用于最终的 drizzle拼接图（R. Endsley 2024年；V. Kokorev 2025）。最终的近红外相机拼接图通过 drizzle 投影到公共网格上，像素尺度为 0.03″像素$^{-1}$。

### 2.2. 档案*JWST*和*HST*成像

我们利用过去观测的档案HST和JWST成像补充JWST数据集。这些数据来自与VENUS星系团样本大部分重叠的过往大型巡天（如CLASH、RELICS、HFF、CANUCS、UNCOVER、PEARLS、GLIMPSE或SLICE），也包括其他针对性观测。我们强调，所有星系团均有HST/ACS/F606W或F625W以及F814W观测数据。此前的HST观测已作为星系演化完整哈勃档案计划（CHArGE）的一部分进行统一处理，详情见V. Kokorev等(2022年)，而已有的JWST数据也按照VENUS观测的方式进行了类似处理，从而建立了一个统一的成像数据集，可用于强透镜建模。这些马赛克图像将在未来的一篇论文中介绍（Kokorev等，准备中），并随VENUS DR1一同发布。

为补充用于锚定透镜模型的光谱红移，光度红移可为缺乏光谱探测的系统提供有用的先验信息。本文使用VENUS`eazy`(G. B. Brammer 等，2008 年光度红移目录的首个内部版本，该目录将在未来专门发布的 VENUS 数据中予以介绍（Fujimoto等，准备中）。这些光度测量利用了每个探测目标所有可用的、经过处理的哈勃空间望远镜和JWST成像波段，采用`Photutils`(L. Bradley等，2025年）。

### 2.3. 档案光谱观测

由于 VENUS 的筛选标准，60个星系团中有57个已由 VLT/MUSE 积分视场单元观测过（R. Bacon等，2010年）。文献中针对这些观测数据已有大量分析，尤其是存在大型 MUSE观测目录时，例如 MUSE 图谱（J. Richard等（2021））。尽管我们并未系统分析每一次观测，但在需要时检查了档案中的 MUSE数据，以确认新鉴定出的引力透镜系统的红移，或识别视线上的闯入者。此外，我们全面检索了相关文献，发现了大量地基（GMOS、MOS/FIRE等）和空间（NIRSpec）光谱观测数据，并在本文中加以利用。我们在纯文献汇编的基础上，还检索了 NED[50] 和 DJA[51] 中的光谱探测，用于星系团成员和多重像系统的鉴定。

### 2.4. 多重成像系统

鉴于 VENUS 巡天的筛选标准是已有经过确认的多重像目录，我们首先从文献和以往巡天的表格汇编中检索已有的多重像系统（MIS）。随后，我们根据 Gaia 天体测量（Gaia 合作组，2023），将多重像系统统一校准至詹姆斯·韦布空间望远镜参考系。每个星系团的相关信息，包括先前的模型和已发现的多重像系统，均列于第 4.2 节。

建立初步透镜模型后，我们利用 VENUS 巡天数据和辅助成像搜寻更多多重像，并综合考量其位置、几何形态和颜色，同时借助 VENUS 光度红移目录及辅助光谱红移目录。确认新的候选多重像系统与模型相符后，我们使用初步透镜模型检测可能存在的其他反像。随后将这些候选像纳入下一版模型，若其与模型吻合则予以保留。我们反复进行这一迭代过程，以便在最终确定透镜模型之前，尽可能编制出最完整的多重像系统目录。

## 3. 方法

### 3.1. 星系团成员星系的筛选

我们使用 VENUS 成像目录（按第2.2节所述进行处理）和光谱学（第 2.3节），在两个不同的空间中利用红序列，为每个星系团构建星系团成员星系目录

[48] https://github.com/spacetelescope/jwst[49] https://dawn-cph.github.io/dja/

[50] https://ned.ipac.caltech.edu[51] https://dawn-cph.github.io/dja/spectroscopy/nirspec/

(M. D. Gladders &H. K.C. Yee 2000)。我们使用近红外相机的 F090W-F150W 和 F356W-F444W 红序列，这些序列经验证效果出色，尤其是在丰富的光谱探测辅助下。对于某些特定星系团，如果上述滤光片之一未覆盖星团场等情况，我们会改用其他波段组合；每个星系团所用的红序列组合将在数据发布版随附的Readme文件中说明（将与 DR1 一同发布）。除非已通过光谱确认，否则 F150W星等 $> 23$ AB星等制的探测结果将予以剔除。

### 3.2. 透镜建模软件： *AstroLensPy*

在本研究中，我们使用参数化引力透镜软件 AstroLensPy，在薄透镜近似下对星系团的引力势进行建模。AstroLensPy 最初由 J. F. V. Allingham 等人（2026年）介绍，是 ZitrinAnalytic 引力透镜软件的 Python3 实现；而 ZitrinAnalytic 本身是 PIE MDeNFW 参数化方法的修订版本，该方法曾用于对 CLASH 星系团样本进行建模，详见 A. Zitrin 等人（2015）。为适应詹姆斯·韦布空间望远镜更高的分辨率，采用 MATLAB 编写的 ZitrinAnalytic 处理流程经过修订，以缩短运行时间，并支持任意更高的分辨率，使其不再受固定网格限制。此后，该方法成功应用于詹姆斯·韦布空间望远镜数据中的多个星系团，详见 M. Pascale 等人（2022b）；L. J. Furtak 等人（2023c）；A. K. Meena 等人（2023）；M. Golubchik 等人（2026）。AstroLensPy 保留了 ZitrinAnalytic 的这些主要特性，采用相同的架构，因此能够与两款软件流畅兼容。这里通过 Numba（S. K. Lam 等人，2025年）将 Python 函数编译为优化的机器码，从而确保快速计算。

该软件采用具有伪等温椭圆物质分布（PIEMD；W. Jaffe1983；C. R. Keeton 2001）径向密度剖面的 大尺度、平滑暗物质晕：

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + (r/a)^2} = \frac{\sigma_0^2}{2\pi G} \frac{1}{a^2 + r^2}, \tag{1}$$

其中 $\rho_0$ 是中心三维密度， $\sigma_0$ 是单维速度弥散， $a$ 是核心半径，而 $G$ 是牛顿万有引力常数。单个星系采用双重伪等温椭圆剖面（dPIE，或伪Jaffe模型；参见A. Kassiola 与 I. Kovner 1993； ´A. El´ıasd´ottir 等, 2007）建模，即结合两个 PIEMD 剖面，有效地截断密度剖面：

$$\begin{aligned} \rho(r) &= \frac{\rho_0}{\left[1 + (r/a)^2\right]\left[1 + (r/s)^2\right]} \\ &= \frac{\sigma_0^2}{2\pi G}\left[\left(a^2 + r^2\right)^{-1} - \left(s^2 + r^2\right)^{-1}\right], \end{aligned} \tag{2}$$

其中， $s$为截断半径。所有星系团成员的 位置参数（位置、椭圆率、位置角）均固定，而其密度参数（速度弥散、核心半径和截断半径）则根据红色椭圆星系的S. M. Faber 与 R. E. Jackson（1976年，FJ）关系共同缩放。对于一个$i$光度为 $L_i$的星系：

$$\begin{aligned} \sigma_{0,i} &= \sigma_{0,\star}\left(\frac{L_i}{L_\star}\right)^{\lambda}, \\ a_i &= a_\star\left(\frac{L_i}{L_\star}\right)^{\beta}, \\ s_i &= s_\star\left(\frac{L_i}{L_\star}\right)^{\alpha}, \end{aligned} \tag{3}$$

其中，枢轴尺度核心半径 $a_\star$ 通常固定，而参考 L* 星系的枢轴尺度截断半径 $s_\star$ 和速度弥散 $\sigma_\star$ 始终作为自由参数。FJ幂律指数通常固定为其默认值 $\lambda = 1/4$、$\beta = 1/2$ 和 $\alpha = 1/2$，但也可以作为优化参数。此外，对于一些精确建模至关重要的单个星系，我们允许光度 $L_i$ 自由变化，并赋予其权重 $w_i$，只需将其乘以 $L_i$，使得 $L_i \to w_i L_i$，从而有效地沿 FJ 缩放关系启用一个自由度。出于同样的原因，对于某些星系团成员，也可以对星系的核心半径进行优化。此外，缺乏光谱测量的多重像系统的红移可以设为自由参数。最后，还可以向透镜模型中添加剪切场。

为了计算源位置，AstroLensPy会考虑完整雅可比矩阵（例如，C. R. Keeton 2010年）。这实际上构成了像平面优化的牛顿—拉夫森（NR）近似，此方法此前也成功应用于例如M. Oguri（2010年）。具体如下：

$$\mathcal{A}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\partial \boldsymbol{\beta}}{\partial \boldsymbol{\theta}}, \tag{4}$$

放大矩阵，其中 $\boldsymbol{\theta}$ 是像位置¯， $\boldsymbol{\beta}$ 是源位置；重心化源 $i$相对于观测像 $j$ 的局部 $\boldsymbol{\delta\beta_{ij}} = \boldsymbol{\beta_{ij}} - \boldsymbol{\beta_i}$ 扰动距离，在像位置附近进行一阶泰勒展开后为：

$$\boldsymbol{\delta\beta} \simeq \mathcal{A} \cdot \boldsymbol{\delta\theta}, \tag{5}$$

从而可以将预测的像位置近似为：

$$\boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{ij}}^{\boldsymbol{p}} \simeq \boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{ij}} - \mathcal{A}_{ij}^{-1} \cdot \left(\boldsymbol{\beta}_{\boldsymbol{ij}} - \bar{\boldsymbol{\beta}}_{\boldsymbol{i}}\right), \tag{6}$$

其中，$\boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{ij}}^{\boldsymbol{p}}$ 是图像 $j$的预测位置，据此我们可以在伪像平面中计算 $\chi^2$：

$$\chi^2_{\mathrm{SL,imgNR}} = \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{Sys}}} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{\left(\boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{ij}} - \boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{ij}}^{\boldsymbol{p}}\right)^2}{\sigma_{ij}^2}, \tag{7}$$

其中，$N_{\mathrm{Sys}}$ 是多重像系统（MIS）的数量。请注意，在临界曲线附近（此处 $\det \mathcal{A} \to 0$），这种近似会失效，从而构成 NR 近似的局限。

为了最小化 $\chi^2$，`AstroLensPy` 可以使用两种不同的 MCMC采样器：一种是`ZitrinAnalyticMCMC` 算法（A. Zitrin 等，2015），这是一种基于 Metropolis-Hastings 算法并采用有效温度退火的方法；另一种是使用`emcee`（D. Foreman-Mackey 等，2024年）执行类似 MCMC 的算法，通过仿射不变集合采样步来探索参数空间（参见J. Goodman 与 J. Weare，2010年）。实际上，这里介绍的所有`AstroLensPy` 模型均使用`emcee`算法，该算法支持并行化（D. Foreman-Mackey 等，2013年）。

在像平面的 NR 近似中优化 $\chi^2$ 后，我们的透镜模型所给出的最终数值均在像平面中计算，例如最佳拟合的 $\chi^2$ 和 $\Delta_{\mathrm{RMS}}$，后者表示最终模型的平均位置误差：

$$\Delta_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\mathrm{img}}} \sum_{n=1}^{N_{\mathrm{img}}} \left\|\boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{n}} - \boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{n}}^{\boldsymbol{p}}\right\|^2}, \tag{8}$$

其中，$N_{\mathrm{img}}$ 是用于约束的多重引力透镜像总数，$\boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{n}}$ 是第 $n$ 个观测到的像位置，而 $\boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{n}}^{\boldsymbol{p}}$ 是模型预测的位置。我们指出，如果 MIS 的数量不够多（即少于 $\sim 5-10$ 个系统），较低的 $\Delta_{\mathrm{RMS}}$ 并不能有力地证明质量模型的质量。

### 3.3. 透镜建模

尽管应用于各个星系团的先验各不相同，我们在此总结常见的透镜建模假设。总势是由采用 PIEMD 剖面建模的暗物质晕、采用 dPIE 建模的星系团星系，以及可能存在的外部剪切共同构成的。默认情况下，每个暗物质晕有六个自由参数：速度弥散和核心半径，以及位置参数——中心坐标偏移、椭率和位置角；所有星系则通过三个 FJ参数关联：典型 L$^\star$ 星系的速度弥散和截断半径，而核心半径通常固定为 0.20 千秒差距（参照椭圆星系的典型取值和其他透镜建模研究，例如 J. Richard 等，2014），但也可以设为自由参数。FJ幂指数（见公式3）通常固定，但也可以设为自由参数，例如模型无法以其他方式令人信服地收敛时。

最亮星系团星系通常与其余主要 FJ 序列星系分布相分离，因此其作用尤为重要（例如，A. B. Newman 等，2013年a）。因此，我们会将一个（或多个）最亮星系团星系从主要 FJ 分布中单独优化，为其指定权重，并将核心半径设为自由参数。尽管也可以优化椭率参数，但在本分析中，我们将其固定为测量值。此外，对于作为约束条件的透镜像附近的星系，也会将其权重设为自由参数。在多平面引力透镜的情况下，由于我们的软件套件尚未集成这一功能，在必要时会将某个透镜体完全从模型中省略（例如，它位于前景且红移极低时）；但如有必要，也会将其纳入主要 FJ 序列，并为其指定自由权重。

红移固定为其光谱值，而其他系统的红移则在透镜模型中保持自由，并以光度红移作为先验。对于极少数完全缺乏光谱鉴定的模型，可固定高质量的光度红移（$\delta z < 0.05$ 置信度 $5\sigma$）。对于 $\chi^2$ 最小化，我们采用每个 $\sigma_{\mathrm{pos}} = 0.2''$ 像的位置误差。在采用这一名义误差的情况下，我们在表1中给出了最佳的像平面强引力透镜 $\chi^2$。为获得一致的统计误差，应针对各个星系团重新缩放位置误差，使约化 $\chi^2/N_{\mathrm{DoF}}$ 接近于 1。对于某些约束良好、其重现对于透镜建模至关重要的具体系统（通常是点源，例如暂现源、透镜放大的低红移尘埃星系等），我们会进一步缩小位置误差，以便在最小化过程中赋予其更高权重。

## 4. 结果

### 4.1. 可观测量

相关透镜建模结果汇总于表 2。临界面积 $\mathcal{A}_{z_s}^{\mathrm{crit}}$定义为给定源红移下，由最外侧（切向）临界线围成的累积面积 $z_s$ （C. Fox 等人 2022）。给定切向放大率 $\mu_t = (1-\kappa-\gamma)^{-1}$，其中 $\kappa$和 $\gamma$分别为透镜会聚和剪切；临界面积定义为满足 $1-\kappa-\gamma<0$ 或满足 $1-\kappa+\gamma<0$的面积。源红移 $z_s$ 下的有效爱因斯坦半径定义为 $\theta_{E,\ z_s} = \sqrt{\mathcal{A}_{z_s}^{\mathrm{crit}}/\pi}$。表 2 还给出了像平面上超过给定放大率阈值的累积放大面积 $\mathcal{A}_{z_s}^{|\mu|\geq\mu_T}$，$\mu_T$

$\in \{3, 10\}$ 此处，给定源红移时，$z_s \in \{2, 10\}$此处。最后，$M_{2D}$（$< R_T$）表示以星系团中心为圆心、半径为 $R_T$ 的范围内的投影质量（此处为 $= 200$ 千秒差距）。需要指出的是，对于后一观测量，星系团中心始终取主最亮星系团星系的位置，即位于主暗物质晕中心、质量最大的最亮星系团星系。尽管这种定义便于直接测量，但有时可能会忽略星系团质量中的很大一部分，尤其是在并合情况下，例如子弹星系团。

### 4.2. 星系团透镜模型

我们按赤经升序展示57个AstroLensPy透镜模型，并简要总结已知的星系团模型及显著特征（如有）。对于其中许多星系团，本文模型采用了迄今为止数量最多的MIS作为约束。大多数MIS鉴定是独立完成的，另有一部分采用了我们合作论文中的鉴定结果，M. Oguri等人（2026年），具体如下文所述。表 $\Delta_{\rm RMS}$1 汇总了各星系团的建模特征（MIS和像的数量、像平面）以及原始MIS鉴定结果。对于每个星系团，透镜模型（包括偏折图、放大率等）、星系团成员星系和MIS目录将在稍后公开发布于VENUS网站[52] 。**待剩余3个VENUS目标完成观测后，我们将更新本文结果，为全部60个星系团建立模型。**

**表2**。我们的 `AstroLensPy` 模型对 VENUS DR1 星系团的引力透镜观测量。各列分别为：(i) 星系团名称；(ii) 以中心（定义为最亮星系团星系）为中心、半径 200 kpc 范围内的柱状二维质量；(iii) 源位于$z_s = 2$时的有效爱因斯坦半径；(iv) 源位于 $z_s = 10$时的有效爱因斯坦半径；(v) 对于红移为 $\mathcal{A} = \pi\theta_E^2$ 的源，临界线所包围区域内的投影质量 $z_s = 2$；(vi) 对于红移为 $z_s = 10$ 的源，临界线所包围区域内的投影质量；(vii) 像平面中场域内放大率为 $|\mu| \geq 3$ 的区域面积，源红移为 $z_s = 2$；(viii) 像平面中场域内放大率为 $|\mu| \geq 3$ 的区域面积，源红移为 $z_s = 10$；(ix) 像平面中场域内放大率为 $|\mu| \geq 10$ 的区域面积，源红移为 $z_s = 2$；(x) 像平面中场域内放大率为 $|\mu| \geq 10$ 的区域面积，源红移为 $z_s = 10$。对于此处提供的所有统计量，系统误差均占主导地位，依据先前的研究（A. Zitrin 等，2015），我们将总误差预算设定为：爱因斯坦半径为 10%，临界区域包围质量为 15%，超过阈值的放大面积为 20%，积分柱状质量为 30%。

| 星系团名称 | $M_{2D}$（$<$ 200千秒差距） $[10^{14} M_\odot]$ | $\theta_E$ [″] | | $M_{2D}$（$\in \mathcal{A}$） $[10^{14} M_\odot]$ | | $\mathcal{A}$（$\|\mu\| \geq 3$） [角分$^2$] | | $\mathcal{A}$（$\|\mu\| \geq 10$） | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $z_s$ | | 2 | 10 | 2 | 10 | 2 | 10 | 2 | 10 |
| 阿贝尔2744 | 1.58 | 27.95 | 35.75 | 1.08 | 1.56 | 5.23 | 7.23 | 0.96 | 1.47 |
| RXCJ0018.5+1626 | 1.99 | 22.71 | 33.94 | 1.31 | 2.36 | 2.25 | 3.88 | 0.59 | 1.15 |
| MACSJ0025.4-1222 | 1.47 | 11.06 | 27.29 | 0.31 | 1.39 | 2.26 | 3.80 | 0.30 | 1.35 |
| RXCJ0032.1+1808 | 1.90 | 39.91 | 50.71 | 2.68 | 3.89 | 5.59 | 7.51 | 1.64 | 2.36 |
| MACSJ0035.4-2015 | 1.55 | 19.95 | 25.34 | 0.59 | 0.84 | 1.48 | 2.10 | 0.37 | 0.53 |
| Abell 68 | 1.66 | 20.04 | 26.47 | 0.43 | 0.67 | 2.45 | 3.10 | 0.71 | 0.96 |
| Abell 2813 | 1.95 | 26.19 | 31.27 | 0.95 | 1.23 | 2.42 | 2.95 | 0.77 | 1.02 |
| El Gordo | 1.90 | 16.68 | 45.45 | 1.04 | 5.37 | 2.17 | 3.98 | 0.58 | 1.34 |
| Abell 209 | 0.78 | 13.51 | 15.13 | 0.16 | 0.19 | 0.42 | 0.49 | 0.11 | 0.13 |
| WHLJ013719.8-082841 | 2.07 | 10.48 | 34.55 | 0.30 | 2.53 | 3.55 | 4.54 | 0.87 | 2.36 |
| CLJ0152.7-1357 | 1.33 | 13.10 | 25.36 | 0.63 | 1.56 | 0.61 | 1.62 | 0.13 | 0.46 |
| MACSJ0159.8-0849 | 1.92 | 24.62 | 31.49 | 1.19 | 1.62 | 1.70 | 2.37 | 0.47 | 0.63 |
| RXCJ0232.2-4420 | 2.17 | 25.81 | 32.08 | 0.91 | 1.26 | 3.56 | 4.49 | 0.98 | 1.41 |
| Abell 370 | 2.28 | 36.58 | 45.43 | 2.34 | 3.14 | 3.97 | 5.04 | 1.26 | 1.80 |
| Abell S295 | 1.29 | 25.99 | 36.35 | 0.82 | 1.35 | 3.57 | 4.81 | 0.85 | 1.35 |
| Abell 383 | 1.60 | 16.90 | 19.68 | 0.26 | 0.33 | 1.42 | 1.71 | 0.46 | 0.58 |
| MACSJ0257.1-2325 | 1.43 | 14.55 | 21.01 | 0.49 | 0.82 | 0.82 | 1.40 | 0.21 | 0.38 |
| MACSJ0257.6-2209 | 1.95 | 26.43 | 31.57 | 1.06 | 1.35 | 2.03 | 2.73 | 0.59 | 0.79 |
| MACSJ0308.9+2645 | 2.57 | 37.45 | 45.36 | 2.39 | 3.03 | 3.41 | 4.32 | 0.89 | 1.17 |

[52] https://jwst-venus.github.io

表2（续）

| 星系团名称 | $M_{2D}$（< 200千秒差距） $[10^{14}M_\odot]$ | $\theta_E$ [″] | | $M_{2D}$（$\in \mathcal{A}$） $[10^{14}M_\odot]$ | | $\mathcal{A}$（$\lvert\mu\rvert \geq 3$） [角分$^2$] | | $\mathcal{A}$（$\lvert\mu\rvert \geq 10$） | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $z_s$ | | 2 | 10 | 2 | 10 | 2 | 10 | 2 | 10 |
| PLCKG171.9-40.7 | 2.33 | 31.85 | 38.55 | 1.27 | 1.70 | 4.27 | 5.26 | 1.34 | 1.73 |
| MACSJ0329.7-0211 | 1.88 | 23.84 | 33.22 | 1.13 | 1.84 | 2.22 | 3.26 | 0.64 | 0.95 |
| Abell 3192 | 1.95 | 28.05 | 34.54 | 1.66 | 2.15 | 1.83 | 2.48 | 0.58 | 0.88 |
| MACSJ0416.1-2403 | 1.55 | 25.79 | 32.69 | 1.09 | 1.55 | 1.90 | 2.53 | 0.50 | 0.70 |
| MACSJ0417.5-1154 | 2.02 | 31.22 | 41.22 | 1.86 | 2.80 | 3.65 | 5.45 | 0.85 | 1.41 |
| MACSJ0429.6-0253 | 1.29 | 16.25 | 20.26 | 0.50 | 0.65 | 0.66 | 0.93 | 0.18 | 0.25 |
| MACSJ0451.9+0006 | 1.79 | 25.52 | 33.11 | 1.24 | 1.76 | 1.65 | 2.10 | 0.50 | 0.67 |
| Abell 521 | 0.75 | 8.23 | 9.74 | 0.07 | 0.10 | 0.26 | 0.33 | 0.07 | 0.09 |
| MACSJ0454.1-0300 | 1.87 | 21.81 | 30.96 | 1.19 | 1.94 | 1.61 | 2.61 | 0.44 | 0.81 |
| MACSJ0553.4-3342 | 1.78 | 35.75 | 45.06 | 2.16 | 3.00 | 3.15 | 3.96 | 0.87 | 1.21 |
| RXCJ0600.1-2007 | 2.05 | 46.33 | 63.70 | 3.86 | 6.30 | 7.46 | 9.65 | 2.54 | 3.37 |
| SPT-CLJ0615-5746 | 2.36 | 17.14 | 34.95 | 1.48 | 3.75 | 0.88 | 2.42 | 0.27 | 0.72 |
| 子弹 | 1.62 | 26.52 | 33.64 | 0.87 | 1.25 | 3.55 | 5.14 | 0.83 | 1.17 |
| MACSJ0717.5+3745 | 1.45 | 49.18 | 67.35 | 5.57 | 9.00 | 6.46 | 9.55 | 2.55 | 3.12 |
| SMACSJ0723.3-7327 | 1.71 | 18.46 | 25.76 | 0.58 | 0.99 | 1.87 | 2.70 | 0.51 | 0.81 |
| RXCJ0911.1+1746 | 1.16 | 16.87 | 23.28 | 0.61 | 0.91 | 0.62 | 0.95 | 0.19 | 0.22 |
| MACSJ0940.9+0744 | 0.95 | 11.27 | 13.44 | 0.20 | 0.26 | 0.36 | 0.51 | 0.09 | 0.13 |
| RXCJ0949.8+1707 | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| MACSJ1115.8+0129 | 1.24 | 21.92 | 25.55 | 0.81 | 0.95 | 0.74 | 0.91 | 0.19 | 0.26 |
| PLCKG165.7+67.0 | 0.91 | 12.79 | 15.69 | 0.24 | 0.32 | 0.46 | 0.61 | 0.14 | 0.16 |
| MACSJ1149.5+2223 | 1.78 | 22.41 | 32.96 | 1.15 | 2.06 | 1.97 | 3.20 | 0.54 | 0.91 |
| PLCKG287.0+32.9 | 2.67 | 45.40 | 60.52 | 3.64 | 5.50 | 6.89 | 9.01 | 2.45 | 3.30 |
| MACSJ1206.2-0847 | 2.08 | 27.19 | 36.28 | 1.50 | 2.24 | 2.41 | 3.44 | 0.67 | 1.00 |
| MACSJ1311.0-0310 | 1.41 | 15.53 | 22.16 | 0.57 | 0.89 | 0.77 | 1.22 | 0.19 | 0.35 |
| 阿贝尔1689 | 3.00 | 50.35 | 54.73 | 2.27 | 2.51 | 5.36 | 6.07 | 1.49 | 1.68 |
| RXJ1347.5-1145 | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| 阿贝尔1835 | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| MACSJ1423.8+2404 | 1.76 | 18.82 | 28.42 | 0.89 | 1.58 | 1.42 | 2.46 | 0.33 | 0.71 |
| RXJ1532.9+3021 | 1.24 | 15.30 | 18.78 | 0.37 | 0.49 | 0.70 | 0.97 | 0.18 | 0.25 |
| PLCKG004.5-19.5 | 2.51 | 38.24 | 50.88 | 3.86 | 5.56 | 3.66 | 5.18 | 1.15 | 1.78 |
| MACSJ1931.8-2635 | 1.60 | 22.35 | 26.74 | 0.79 | 1.00 | 1.29 | 1.57 | 0.34 | 0.46 |
| SMACSJ2031-4036 | 1.53 | 17.64 | 25.74 | 0.46 | 0.87 | 2.10 | 2.93 | 0.59 | 0.86 |
| MACSJ2129.4-0741 | 1.84 | 21.70 | 33.79 | 1.26 | 2.36 | 1.99 | 3.04 | 0.44 | 1.05 |
| RXJ2129.7+0005 | 1.20 | 13.94 | 16.61 | 0.20 | 0.26 | 0.82 | 1.04 | 0.20 | 0.27 |
| SMACSJ2131.1-4019 | 1.67 | 21.29 | 28.32 | 0.96 | 1.37 | 1.15 | 1.59 | 0.40 | 0.52 |
| MACSJ2137.3-2353 | 1.25 | 17.33 | 20.20 | 0.46 | 0.55 | 0.63 | 0.81 | 0.15 | 0.19 |
| RXCJ2211.7-0349 | 2.86 | 43.14 | 52.15 | 3.56 | 4.51 | 3.46 | 3.94 | 1.18 | 1.40 |
| MACSJ2214.9-1359 | 1.69 | 19.74 | 26.59 | 0.94 | 1.38 | 1.02 | 1.62 | 0.31 | 0.47 |
| Abell S1063 | 2.11 | 30.57 | 39.07 | 1.44 | 2.03 | 3.35 | 4.50 | 0.90 | 1.38 |
| Abell 2537 | 2.01 | 27.72 | 33.65 | 1.05 | 1.38 | 2.59 | 3.27 | 0.78 | 0.99 |
| SPT-CL J2325-4111 | 2.46 | 32.72 | 43.19 | 1.88 | 2.79 | 4.58 | 5.32 | 1.35 | 2.11 |
| 总计 | 100.74 | | | 72.57 | 115.05 | 138.70 | 190.61 | 39.66 | 59.58 |
| 平均值 | 1.77 | 24.56 | 33.12 | 1.27 | 2.02 | 2.43 | 3.34 | 0.70 | 1.05 |
| 标准差 | 0.48 | 10.11 | 12.28 | 1.08 | 1.69 | 1.71 | 2.22 | 0.57 | 0.76 |

4.2.1. *Abell 2744 (A2744)*阿贝尔2744（$z = 0.31$）或许是迄今研究最为深入的强透镜场。它被纳入HFF巡天使用哈勃空间望远镜观测，随后成为第二个被

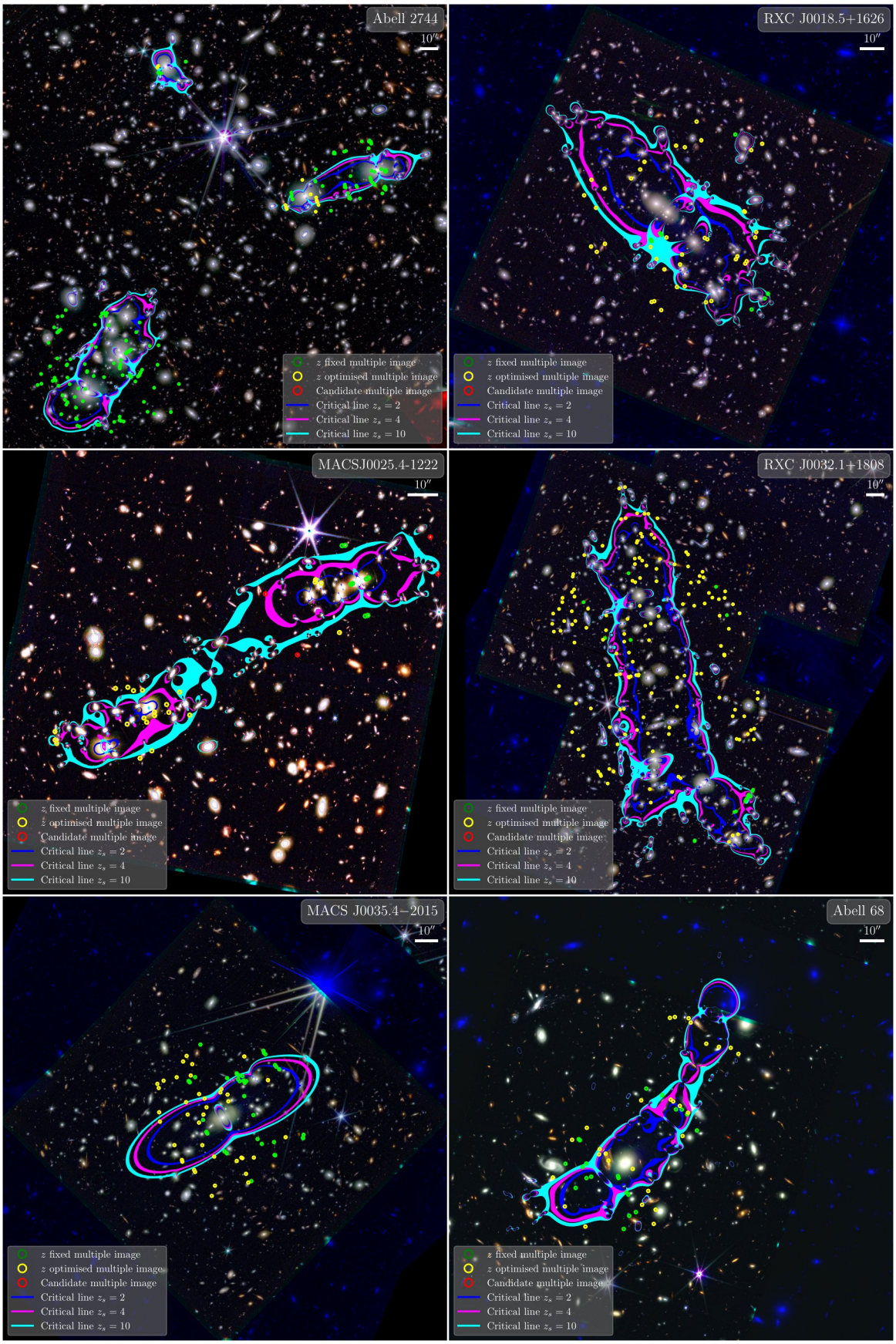



**图1.** 星系团 A2744、R0018、M0025、R0032、M0035 和 A68 的 RGB 伪彩色图像。RGB 图像主要通过以下波段叠加获得：蓝色：近红外相机/F090W+F115W+F150W；绿色：F200W+F210M+F277W；红色：F300M+F356W+F410M+F444W。在某些情况下，实际采用的组合可能有所不同（例如，A68 的蓝色波段使用 HST/ACS，以显示近红外相机视场外的结构）。 *Blue, magenta and cyan curves:* 不同源红移下的临界曲线，覆盖 $|\mu| \geq 100$ 区域。 *Green circles:* 固定-$z$ 多重像（光谱-$z$ 或精确的光度红移，见第3.3节）。*Golden circles:* 其他具有自由红移的多重像系统。 *Red circles:* 候选系统（如有），未纳入建模。

在 GLASS- JWST（T. Treu等 2022年）、UNCOVER、PEARLS 和 All the Little Things（ALT，R. P. Naidu等 2024年）计划以及随后各观测周期的众多 JWST 后续观测计划框架下观测。因此，A2744 的强引力透镜建模和分析历史格外悠久。关于该星系团的详细历史，请参阅近期专门研究 A2744 强引力透镜建模的论文，例如L. J. Furtak等(2023c)、P. Bergamini等(2023a或N. R. Patel等(2026年)。

虽然 VENUS 未对 A2744 进行新的观测，但由于 JWST 对其覆盖充分，足以开展与 VENUS 星系团类似的分析，因此仍将其纳入样本（参见 Fujimoto等，即将发表）。因此，我们在此不推导 A2744 的新强引力透镜模型，而是采用`ZitrinAnalytic` UNCOVER 模型，该模型由L. J. Furtak等(2023c) 和 S. H. Price等(2025年) 建立，并使用`AstroLensPy`进行了重新优化。该模型以 5 个暗物质晕对星系团进行参数化，并由 65 个源的 186 个多重像加以约束，其中 59 个源具有光谱红移（P. Bergamini等 2023a；G. Roberts-Borsani等 2023；L. J. Furtak等 2024a；R. P. Naidu等 2024；S. H. Price等 2025），最终透镜平面平均像重现误差为$\Delta_{\rm RMS} = 0.37''$。关于该模型的全部细节，请参阅S. H. Price等(2025年)。

#### 4.2.2. *RXC J0018.5+1626 (R0018)*

RXC J0018.5+1626 ($z = 0.55$)又称 MACS J0018.5+1626或 CL J0016+1609，是一个 X 射线光度极高的星系团，在 VENUS 之前已纳入 RELICS 和 SLICE 巡天。它最引人注目的是位于 $z = 3.218$ 的一个由蓝光主导、具有双峰特征的 Lyman-α 发射体的多重像（L. J. Fur- tak等，2022年），以及位于 $z = 3.34$ 的多重像超新星 SN Helios（S. Fujimoto等，2026年）。A. Zitrin等（2011a）最初使用光迹质量方法将该星系团确认为强引力透镜。L. J. Furtak等（2022年）在此模型基础上进行了改进，他们利用五组多重像系统（其中一组是 $z = 3.218$ Lyman-α 发射体）来完善 R0018 的 LTM 模型。现在，借助 VENUS的JWST数据，我们使用两个暗物质晕对该星系团进行建模。模型受 18 个源的 47 个多重像约束，其中 3 个源具有光谱红移（R. Mainali 2019；L. J. Furtak等，2022年），并取得了透镜平面 $\Delta_{\rm RMS} = 0.37''$。S. Fujimoto等（2026年）介绍了该模型，同时还介绍了另外四个基于 VENUS 和 SLICE、分别使用 ZitrinAnalytic、glafic、Lenstool 和 WSLAP+ 得出的强引力透镜模型，这些模型被用于约束 SN Helios。有关我们针对 R0018 的强引力透镜模型的更多详情，请参阅我们的专门论文 Furtak等（准备中）；该论文将进一步研究 $z = 3.218$ 被透镜放大的 Lyman-α 发射体。有关我们针对 R0018 的强引力透镜模型的更多详情，请参阅我们的专门论文。

#### 4.2.3. *MACS J0025.4-1222 (M0025)*

星系团 MACSJ0025.4-1222（$z = 0.58$）是一个大规模并合系统，其碰撞剖面中，星系团内介质峰值位于两个暗物质晕之间，因此堪称“子弹星系团式”星系团的典型范例（见第4.2.32节），并因此得名“小子弹”。该星系团最初由哈勃空间望远镜成像，其质量图由M. Brada˘c 等人（2008）；A. Zitrin 等人（2011a）建模，之后N. Cibirka 等人（2018）利用 RELICS 观测进行了建模。该星系团由两个彼此分离的暗物质晕组成，每个暗物质晕均由强引力透镜弧加以约束。只有西北晕存在经光谱确认的透镜源，而东南团块仅有光度红移约束（与 AS295 的情况类似，见第4.2.15节）。在此前报道的六个多重像系统（包括M. Oguri 等，2026的研究）基础上新增四个探测结果后，我们汇编出一份包含 10 个多重引力透镜星系的目录，用于约束透镜势。观测到的像经重建后，最终精度为 $\Delta_{\rm RMS}$，达到 $0.16''$。

#### 4.2.4. *RXC J0032.1+1808 (R0032)*

RXC J0032.1+1808 ($z = 0.40$) 是一个丰富的双模态大型并合星系团，在 VENUS 之前已纳入 RELICS 巡天。该星系团中有一个令人惊叹的、由 ALMA 探测到的六重像含尘恒星形成星系，位于 $z = 3.631$（M. Dessauges-Zavadsky 等，2017年、2023年），但除此之外，关键的光谱红移数据缺失。A. Acebron 等（2020）基于 RELICS 的 HST 数据对 R0032 进行了全面的强引力透镜研究，其中包括使用 LTM、PIEMDeNFW、Lenstool 和 glafic 构建的四个星系团强引力透镜模型；这些模型受到 5 个源的 18 个多重像约束，且均得出该星系团的爱因斯坦半径极大，对于位于 $z = 2$的源，半径为$\theta_{E,z_s=2} \sim 40''$。我们结合 SLICE 和 VENUS 数据，按照 A. Acebron 等（2020）的方法对 R0032 建模，采用三个暗物质晕。模型受到 55 个源的 162 个多重像约束，其中 4 个源具有光谱红移（M. Dessauges-Zavadsky 等，2017 年；A. Tsujita 等，2025年），最终透镜平面图像重现误差为 $\Delta_{\rm RMS} = 0.66''$。这一基于 JWST 的模型证实，该星系团的爱因斯坦半径很大，为$\theta_{E,z_s=2} = 39.9 \pm 4.0''$（见表 2）。

#### 4.2.5. *MACS J0035.4-2015 (M0035)*

星系团 MACS J0035.4-2015（$z = 0.35$）在 VENUS 项目使用 JWST 观测之前，曾由 HST 在 RELICS 项目中观测。该星系团中有一个罕见的$z = 2.06$多重成像活动星系核，可在 X 射线和阿塔卡马大型毫米/亚毫米阵列观测中探测到，并呈现出强烈的静止系紫外变异性（L.J.Furtak 等人

2023a）。C. Fox 等人（2022年）列出了两种公开可用的 M0035 RELICS 模型，分别使用glafic 和Lenstool构建；L. J. Furtak 等人（2023a）则在分析中使用了基于 HST 的 ZitrinAnalytic 模型。另一个 M0035 参数化强引力透镜模型由C. Somma 等人于2025年发表。对于 VENUS，我们基于 JWST/NIRCam 数据，使用AstroLensPy对星系团进行建模，并采用一个暗物质晕。该模型受到 27 个源的 74 个多重像约束，其中 12 个源具有光谱红移（L. J. Furtak 等人 2023a；C. Somma 等人 2025），最终在透镜平面上的像复现误差为 $\Delta_{\rm RMS} = 0.50''$。

#### 4.2.6. *Abell 68 (A68)*

Abell 68（$z = 0.25$）此前曾作为 SLICE 的一部分使用詹姆斯·韦布空间望远镜进行观测。我们利用档案哈勃成像（PID 11591）补充这些数据。A68 是一个具有X射线高光度（H. Ebeling 等，1996）、动力学上未弛豫且具有双峰质量分布的星系团（G. P. Smith 等，2005；J. Richard 等，2007；C. Cerny 等，2026年）的星系团。我们使用18个多重成像系统优化模型，共包含49个多重像。其中，14个系统此前已知（J. Richard 等，2007；C. Cerny 等，2026年），另有4个系统是在 VENUS 数据中新识别出的。7个系统（1、2、3、5和11，其中系统1和2均分为两个结）具有光谱红移（G. P. Smith 等，2005；J. Richard 等，2007）。质量分布由3个暗物质晕描述。

值得注意的是，系统 3 是一个引力透镜放大的低红移尘埃星系候选体，其伴有一颗蓝色伴星，位于 $z = 5.421$（J. F. W. Baggen 等人 2026年a中提及，且为独立发现），其三幅像的放大率均为 $\mu \sim 11$，相对于最先到达的像，预测的时间延迟分别为 0.40 年和 0.11 年。最终模型以 $\Delta_{\rm RMS}$ 的 $0.35''$精度重现了像的位置。

#### 4.2.7. *Abell 2813 (A2813)*

Abell 2813（$z = 0.29$）是一个大并合星系团，其透镜剖面最早由P. E.May（2013年）研究。他为巨弧系统2确定了一个光谱学探测结果，从而能够在透镜优化中固定其红移。该系统的红移随后由E. Jullo等（2026年）使用甚大望远镜/XShooter确认；他们还测量了另一个巨弧（系统1）的红移。该星系团被纳入RELICS巡天，从而得到一个相应但尚未发表的透镜模型。其复杂的剖面位于多个最亮星系团星系的交汇处，将两个星系放大成两条 $17''$ 长巨弧，这些巨弧由P. E.May （2013年）研究，此外还有一个新月状的MIS。基于文献中的强引力透镜模型以及M. Oguri等（2026年）的MIS鉴定，我们报告了两个新系统，总计共计18个MIS，约束两个暗物质晕，并得到最终的 $\Delta_{\rm RMS}$ 为 $0.63''$。

#### 4.2.8. *El Gordo (ACT-CL J0102.9-4915, ACTCL0102)*

星系团“El Gordo”（ACT-CL J0102.9-4915，$z = 0.87$）对于其红移而言质量异常巨大，正经历大规模并合，且形态高度延展。该星系团经 RELICS 和 PEARLS 巡天成像，并被光谱巡天广泛观测，目前已建立了大量强引力透镜模型（A. Zitrin 等人 2013a；C. Cerny 等人 2018；G. B. Caminha 等人 2023；J. M. Diego 等人 2020，2023）。尤其是 PEARLS 发现了大量新的多重成像系统星系，并对其进行了精细研究和源平面重建，例如“El Anzuelo”和“La Flaca”（B. L. Frye 等人 2023；J. M. Diego 等人 2023；A. Galan 等人 2024）。在透镜模型中，我们保留了这些透镜系统被划分为多个结的结构，总计包含 76 个透镜系统。位于 $z = 0.633$ 的前景星系群，其引力透镜作用的重要性已由G. B. Caminha 等人 （2023）强调；该星系群已纳入主星系目录，但这些星系的权重保持自由。通过三个质心可自由调整的暗物质晕，我们对星系团建模，像平面精度为 $\Delta_{\rm RMS} = 0.97''$。

#### 4.2.9. *Abell 209 (A209)*

Abell 209（$z = 0.21$）被纳入X射线选定的 CLASH样本，G. P. Smith等人（2005）将其分类为未弛豫星系团；Y. Jim´enez-Teja等人（2018）。迄今为止，A209唯一的强引力透镜模型由A. Zitrin等人（2015）提出，他们识别出了该星系团中的首个多重像，并报告了一个适中的有效爱因斯坦半径：$\theta_E \simeq 9 \pm 1''$ 对于位于 $z_s = 2$的源，两个系统的像围绕一位明亮的星系团成员形成，该成员位于 $\sim 18''$ 处，距离最亮星系团星系。我们采用与A. Zitrin等人（2015）相同的3个多重成像系统（7个像）。据我们所知，这些系统均没有光谱红移，因此我们将系统1的红移固定为其光度红移 $z_{\rm phot} = 1.13$，并优化其余系统的红移。单个暗物质晕能够重现图像位置，其 $\Delta_{\rm RMS}$为 $0.30''$。

#### 4.2.10. *WHL J013719.8-082841 (W0137)*

星系团 WHL J013719.8-082841（$z = 0.57$），最初由 RELICS 巡天观测，拥有 Sunrise 弧（系统 1–4），这是一个由三幅像组成、经高度放大的星系，可用于约束星系团质量（B. Welch 等 2022a，b）。这条弧中有 Earendel，它是一个曾被认为是单颗恒星、放大程度极高的源。之后的 NIRSpec 光谱学确定 Sunrise 星系的红移为 $z_{\rm spec} = 5.926 \pm 0.013$，而 Earendel 的光谱性质倾向于将其归类为

致密的贫金属恒星团，而非单颗恒星（Z. P. Scofield 等 2025；M. Pascale 等 2025a）。对星团场开展进一步的测光和光谱分析后，发现了一个可能由多幅像组成的$z_{\rm spec} = 8.22$星系（系统 10；L. D. Bradley 等 2023；A. Vikaeus 等 2024）。

通过查阅DJA NIRSpec档案补充文献（G. Brammer & F. Valentino 2025年），我们总共整理出11个多重像系统（其中7个具有光谱确认），其中两个是本文新发现的，另一个也由M. Oguri 等人（2026年）确认。使用无质心单晕模型描述该星系团的弛豫状态后，我们的模型收敛于 $\Delta_{\rm RMS}$ 的 0.89″。

#### 4.2.11. *CL J0152.7-1357 (ACTCL0152)*

星系团ACTCL0152（$z = 0.83$）被纳入RELICS和SLICE巡天，因此分别由A. Acebron 等人（2019年）和C. Cerny 等人（2026年）进行建模。由于只有一个光谱确认的红移，与VENUS的大多数目标相比，质量片简并更难打破。VENUS观测丰富的测光数据使我们探测到13个新系统，从而使已知系统总数增加一倍以上，达到24个。除了主暗物质晕（其围绕主最亮星系团星系，且已在以往模型中被确认）之外，我们还沿东北—西南轴识别出多重像，因此需要使用总共3个暗物质晕对该星系团进行建模；所有暗物质晕的中心均固定在与主最亮星系团星系重合的位置。尽管这些区域的约束仍然较弱，主要是由于缺乏光谱学数据，但我们使用最佳拟合的VENUS测光红移约束了自由红移，从而能够限制简并性。系统11，即位于$z_{\rm phot} = 5.18$ （R. Pan 2026年）的多重引力透镜VENUS-CLJ0152-QG1（VCQG1）静止星系，在本文中固定为其测光红移，这得益于其极佳的测光数据。此外，还利用探测到的该源三个像的流量来约束其放大率比。我们的`AstroLensPy` 优化方法（已用于R. Pan 等人（2026年））得到 $\Delta_{\rm RMS} = 0.84''$。该星系团显然处于大规模并合状态（X射线、弱引力透镜和星系团内光均支持这一点，见B. J. Maughan 等人 2003；M. J. Jee 等人 2005；Y. Jim´enez-Teja 等人 2024年），并且可能呈现子弹星系团式特征（见第4.2.32节），尽管有限的X射线和光谱观测尚不足以得出结论。

#### 4.2.12. *MACS J0159.8-0849 (M0159)*

MACS J0159.8-0849（$z = 0.41$）动力学弛豫，且拥有一个冷核（S. Giacintucci 等，2019年）。首个已发表的强引力透镜模型由N. Cibirka 等（2018年）作为 RELICS 项目的一部分提出，他们恢复出一个占主导地位的单一质量集中区，以及一个相对对称的分布，与系统整体未受扰动的状态相符。与其弛豫状态一致，单个暗物质晕足以描述其质量分布。我们的模型受到 15 个多重像系统（总计 33 个像）的约束，其中包括N. Cibirka 等（2018年）提出的 4 个系统，以及他们的候选体 c5 和 c6（现已通过 JWST成像确认），还有 6 个新识别的系统。根据 VENUS成像，我们还修订了N. Cibirka 等（2018年）所标识的像 1.3 和 2.3，并为这些反像采用了新的位置。候选体 c5（我们模型中的系统 2）是一条弧，我们使用 4 个不同的团块来约束临界曲线。该模型达到 $\Delta_{\rm RMS}$ 的 0.27″。

有趣的是，系统 1（N. Cibirka 等，2018年中的系统 3）是一名透镜放大的低红移尘埃星系候选体，其蓝色伴星位于$z_{\rm phot} = 3.47$。它的两个像被放大了 $\sim 3-5$ 倍，预计两者之间的时间延迟为 $\sim 60-70$年。我们还报告了第二个带有蓝色伴星的低红移尘埃星系候选体，它不是多重像，位于（$\alpha$， $\delta$） =（29.94966，-8.822161）（J2000），其 $z_{\rm phot} \sim 5$ 和 $\mu \sim 2.5$。

#### 4.2.13. *RXC J0232.2-4420 (SPTCL0232)*

星系团 RXC J0232.2-4420（$z = 0.28$，也编录为 SPT-CL J0232-4421）曾由 RELICS 和 SLICE 成像，随后分别由R. Mainali（2019年）；C. Cerny 等（2026年）建模，前者确认了该星系团中唯一的特$z$ 多重像系统。我们的 MUSE 研究未提供更多多重像红移；然而，出色的 VENUS 测光数据使我们能够对少数系统进行严格约束，从而可靠地约束质量分布。新增 12 个系统后，我们已知的多重像系统数量增加至原来的三倍，达到 18 个。对于两个最亮星系团星系分别设置一个暗物质晕，并允许质心自由演化，`AstroLensPy` 以最终的 $\Delta_{\rm RMS} = 0.47''$ 精度约束了透镜势，呈现出松弛的几何结构。在西部，系统 6 似乎是一个透镜放大的低红移尘埃星系，但事实证明很难准确重现其三个像。

另一个已确认的光谱-$z$ 系统（R. Mainali 2019）位于该星系团的东部，但被星系团背景中的一个星系群所透镜，大约在$z \in [0.6, 0.7]$附近。因此未将其纳入此处。

#### 4.2.14. *Abell 370 (A370)*

星系团 Abell 370（$z = 0.38$）是最早被确认的强引力透镜星系团，确认时间为 G. Soucail 等（1987）；B. Paczynski （1987）；G. Soucail 等（1988），其中包含巨大的、由 30″-延展的龙弧（$z = 0.7251$）。其众多透镜系统以及大面积的放大面积，使其一直是强引力透镜巡天（如 HFF、CANUCS 和 MAGNIF）的重点目标（GO-2883 F. Sun

等，2023）。后续的透镜模型包括 Lenstool（J. Richard 等，2010a、2014；D. J. Lagattuta 等，2017、2019；R. Gledhill 等，2024；M. Limousin 等，2025b）、WSLAP+（J. M. Diego 等，2018b、2025）、glafic（R. Kawamata 等，2018；S. K. Li 等，2024）和 GRALE（A. Ghosh 等，2021）。这个特殊的星系团还获得了大量光谱覆盖（L. Christensen 等，2012a；D. J. Lagattuta 等，2017、2019；J. Richard 等，2021；D. J. Lagattuta 等，2022；R. Gledhill 等，2024；G. T. E. Sarrouh 等，2026），从而得到精确的强透镜约束。

龙弧的高表面亮度和极端放大效应促成了这项发现：将 CANUCS 时期的观测与 GO-3538 等其他项目的观测进行比较后，发现了 100 多个 CCE，即红移为 $z = 0.7251$ (S. K. Li et al. 2024年;Y. Fudamoto et al. 2025年;J. M. Palencia et al. 2026年) 的单个透镜放大恒星。因此，詹姆斯·韦布空间望远镜会定期监测这个星系团（例如通过 Dragon巡天、GO-7345 和12583，首席研究员：Fudamoto），从而发现了多个瞬变源，例如星系-星系强引力透镜超新星 Typhon（Pierel 等人，准备中）以及非凡的星系团引力透镜超新星 Hydra（Larison 等人，准备中；另见哈勃空间望远镜时代的星系-星系强引力透镜超新星 W. Chen et al. 2022年）。龙弧中丰富的 CCE 也被用于约束暗物质模型（T. Broadhurst et al. 2025年;J. M. Palencia et al. 2026年）。

这里构建的模型沿用了此前引用模型中的相同光谱约束和多重像系统。我们将龙弧中的许多团块划分为11个多重像系统，并将其用作约束；总计有93个多重像系统，对应281个不同的像。我们的模型由4个暗物质晕组成——它们的质心均可自由移动，最终收敛至 $\Delta_{\rm RMS} = 0.70''$。考虑到星系团建模的难度，这是一个不错的拟合结果。

#### 4.2.15. *Abell S295 (AS295)*

Abell S295 星系团（$z = 0.30$）最初因其靠近最亮星系团星系的一条巨大 $23''$延展弧而受到关注，这一发现来自 ROSAT 巡天（A. C. Edge et al. 1994）。随后，RELICS 巡天的观测得到了首个透镜模型（N. Cibirka et al.2018）。尽管该星系团属于 SLICE 巡天，但迄今尚未利用詹姆斯·韦布空间望远镜建立新的模型。基于 VENUS 观测，我们在此报告一个新的多重像系统，据此建立的透镜模型共基于 11 个系统。我们的模型采用两个无质心约束暗物质晕来刻画该星系团的大并合几何结构。尽管最终的 $\Delta_{\rm RMS} = 0.54''$表现良好，但该目标中心和东南部区域的引力透镜约束仍然不足，因此无法得到强有力的约束。此外，4 个系统的光谱约束也都来自同一条巨弧——位于东北部的透镜星系。为限制西南部晕中的简并性，我们固定了两个测光质量极佳的系统的光度红移$z$。整个视场中有许多红点，但只有光谱学才能区分可能的引力透镜放大的小红点与褐矮星。结合对该星系团星系团内介质的更深入研究，对 AS295 开展光谱观测或许能揭示该星系团是否发生了子弹星系团式碰撞。

#### 4.2.16. *Abell 383 (A383)*

星系团 Abell 383（$z = 0.19$）是一个弛豫态冷核星系团，呈现出巨弧，其中最长的一条延伸$\sim 20''$。因此，它被纳入 CLASH，并从那时起便因其强引力透镜性质而受到研究（A. Zitrin 等，2011b；J. Richard 等，2011b；A. Zitrin 等，2015，M. J. Geller 等，2014中也讨论了透镜特征），但在 VENUS 之前还没有詹姆斯·韦布空间望远镜的观测为其补充数据。我们沿用这些模型的主要假设，采用一个质心可在最亮星系团星系周围自由移动的暗物质晕，以体现星系团的弛豫几何结构。首个 VENUS 模型发表于M. Golubchik 等 (2026年)，该模型展示了双重透镜低红移星系及其蓝色伴星，即“红遇见蓝”系统（系统5和15，$z = 6.03$）。我们在此更新该模型，使用14个多重像系统，得到 $\Delta_{\rm RMS} = 0.73''$。

#### 4.2.17. *MACS J0257.1-2325 (M0257)*

MACS J0257.1-2325（$z = 0.51$）是 $z > 0.5$（H. Ebeling 等，2001年、2007）所列十二个 MACS 星系团之一。其首个强引力透镜模型由 A. Zitrin 等 （2011a）提出；后续成像包括哈勃空间望远镜／RELICS（D. Coe 等，2019）以及公开的 JWST/NIRCam SLICE 成像。我们在此复现了 M. Nakane 等 （2026年）基于这些数据提出的模型。我们采用此前识别出的系统，其中内部结由 JWST 分辨并作为独立约束处理，同时加入在 SLICE 和 VENUS成像中识别出的其他系统。最值得注意的背景源是通过 VENUS成像识别为系统 12 的“ MISTY MOONS”，这是一个星系，位于$z_{\rm phot} \sim 11.3$。在透镜优化中，我们固定其红移，同时固定系统 1 的红移为 $z_{\rm spec} = 1.09$（该系统分为三个结），这一红移已由 MUSE 光谱观测确认。其余六个源红移则进行优化。质量模型在最亮星系团星系附近采用一个具有自由质心的星系团尺度晕，并在第二个最亮星系团星系上设置第二个质量显著较小的晕。我们的新 `AstroLensPy`模型以 $\Delta_{\rm RMS} = 0.30''$收敛。

我们更新后的透镜模型预测，$\mu \sim 37$ 以及 $\mu \sim 25$ 这两幅最明亮的Misty Moons像的放大率，从而使我们能够以 $\sim$ 10–70pc的物理分辨率解析恒星形成团块（与我们先前的`ZitrinAnalytic`模型预测一致，见M。

Nakane等（2026））。它本征上属于亚L* （$M_{\rm UV} \sim -18$），是已知的最暗星系之一，位于 $z > 10$，其团块占据了其恒星质量预算的主要部分。我们的模型预测出五个像：在VENUS成像中探测到一个候选的第三个像，而另外两个反像位于探测极限以下。预测的几何形态类似于双曲脐点构型（有关奇异引力透镜构型的综述，见G. Orban de Xivry & P. Marshall 2009；A. K.Meena & J. S. Bagla2023），这证实了对全部五个像的确认将对径向质量分布施加强约束。

#### 4.2.18. *MACS J0257.6-2209 (A402)*

MACS J0257.6-2209（$z = 0.32$），也被编入Abell 402目录，最初在Abell巡天和大质量星系团巡天（G. O. Abell等 1989年；H. Ebeling等 2001年；A.Repp & H. Ebeling 2018）中被发现。A. W.Mann & H. Ebeling （2012年）根据其X射线和光学形态，将该星系团归为弛豫系统，但其中心熵较高，且成员星系显示出强烈冲压剥离的迹象，这两点都表明它并非一个完全稳定的系统（K. Kolokythas等 2025年）。随后，SLICE巡天发现其最亮星系团星系中存在一个空腔，该空腔由超大质量黑洞活动造成（M. McDonald等 2026年）。J. Richard等（2021年）基于深度VLT/MUSE光谱观测建立了强引力透镜模型，该模型受到25个多重成像系统和85个多重像的约束，所有这些系统均经光谱确认，并且主要由MUSE揭示的暗弱莱曼-α发射体构成。我们采用J. Richard等（2021年）所给出的多重像系统和光谱红移，并利用VENUS成像重新优化该模型。按照他们的分析，质量分布由两个无质心星系团尺度晕描述，其范围达到 $\Delta_{\rm RMS}$的 0.71″。

#### 4.2.19. *MACS J0308.9+2645 (M0308)*

星系团 MACS J0308。9+2645（$z = 0.36$) 在 VENUS 之前，曾通过 RELICS巡天使用哈勃空间望远镜成像，也曾使用詹姆斯·韦布空间望远镜（GO-5293）成像。该星系团拥有“宇宙之矛”——一个经阿塔卡马大型毫米/亚毫米阵列观测到的多重成像[C II]158μm 星系，在詹姆斯·韦布空间望远镜成像中被剪切成多个团块（模型中的系统 6；Abdurro'uf et al.2026），以及多重成像的超新星Ares（系统 1，$z_{\rm spec} = 1.276$；C. Larison et al. 2026）。

基于 RELICS 的 M0308 首个强引力透镜模型由A. Acebron 等人 （2018）采用 LTM 方法建立，使用了 3 个多重像系统，但其中没有一个具有光谱红移。我们使用属于 21 个源的 49 个多重像对该星系团进行建模，其中两个源具有光谱红移（Y. Fudamoto 等人 2024年；C. Larison 等人 2026年，Resseguier 等人，准备中），这些红移在强引力透镜建模中被固定。该星系团采用一个平滑暗物质晕进行参数化，最终达到透镜平面 $\Delta_{\rm RMS} = 0.46''$。除 VENUS AstroLensPy 和 glafic 模型外，使用 VENUS 数据的 Lenstool模型将由 Resseguier 等人发表（准备中）。

#### 4.2.20. *PLCK G171.9-40.7 (PLCKG171)*

PLCK G171.9-40.7（$z = 0.27$）是一个丰富的、通过 SZ 选出的*Planck* 星系团，曾被纳入使用哈勃空间望远镜开展的 RELICS巡天；基于该巡天，A. Acebron 等人利用 3 个源的 11 个多重像，为 PLCKG171 建立了首个 LTM 强引力透镜模型（2018），但这些源均没有光谱红移。我们的 PLCKG171 强引力透镜模型使用一个星系团尺度的暗物质晕对该星系团进行参数化。我们使用近红外相机探测到的 15 个源的 47 个多重像作为约束，其中没有任何一个具有光谱红移。该模型实现了 $\Delta_{\rm RMS} = 0.47''$的平均像重现误差，但我们注意到，在完全缺乏任何多重像系统的光谱红移的情况下，该强引力透镜模型仍存在不确定性。

#### 4.2.21. *MACS J0329.7-0211 (M0329)*

MACS J0329.7-0211（$z = 0.45$）基于其钱德拉X射线形态（M. Post- man 等人，2012年），作为一个动力学弛豫的星系团被纳入 CLASH 巡天，并拥有一个带有射电微晕的冷核（S. Giacintucci 等人，2019年），这与弛豫状态相符，并得到星系团内光观测的证实；Jim´enez-Teja 等人，准备中）。其强引力透镜性质最初由A. Zitrin 等人（2012a）研究，他们识别出六个多重像系统及候选系统，其中包括一个四重成像星系，位于 $z \sim 6$，其中三个位像足够可靠，可用于约束质量模型。G. B. Caminha 等人（2019年）随后根据 MUSE 光谱观测汇编了九个经光谱确认的多重像系统，J. Richard 等人（2021年）则基于同一批 MUSE数据提出了一个模型，并加入两组成多重像的莱曼-α对作为约束。我们的模型由J. Richard 等人（2021年）的24个多重像（分属9个多重像系统）约束。对于有光谱红移数据的系统，我们采用其光谱红移；系统3和新识别的系统10的红移则留待模型优化。质量分布由两个平滑晕描述，其中第二个晕以星系团核西北侧的亮星系为中心；尽管该星系团被归类为动力学弛豫星系团，但这一晕的存在被视为可能正在发生并合的迹象。该模型达到 $\Delta_{\rm RMS}$ 为 0.42″。

#### 4.2.22. *Abell 3192 (A3192)*

星系团 Abell 3192 被识别为红移为 $z = 0.43$ 的星系团 RXC J0358.8-2955，位于背景中

某个 $z = 0.17$ 结构的V. Hamilton- Morris 等人（2012年）中提及的内容。 L.-Y. Hsu 等人（2013年）首次研究了复杂并合几何，并获取了更多光谱数据，但针对 A3192 构建的主要透镜模型是在 RELICS 和 SLICE 观测之后建立的（T. Okabe 等，2020；C. Cerny 等，2026年，分别）。汇总以往的模型（包括 M. Oguri 等，2026），我们发现了另外五个多重像系统，其中包括一条暗淡的巨弧，其几何形态可能为双曲脐点几何（系统25）。在允许三个暗物质晕围绕最亮星系团星系自由移动的情况下，我们的模型受到25个多重像系统的约束，并收敛至 $\Delta_{\rm RMS} = 0.88''$。该星系团表观的并合几何形态，或许只有通过对已确认光谱红移的三个多重像系统之外的天体进行额外光谱观测才能确认。尤其是，该星系团的“子弹性”，即其子弹星系团特征（具有明显穿越后特征及受激波作用的星系团内介质的大规模并合；参见第4.2.32节），仍有待确认。

#### 4.2.23. *MACS J0416.1-2403 (M0416)*

星系团 MACS J0416.1-2403（$z = 0.40$）是一个大规模并合星系团，主要由 CLASH、HFF、CANUCS 和 PEARLS 进行巡天观测，并由此开展了大量 SL 分析（A. Zitrin 等，2013b；M. Jauzac 等，2015；C. Grillo 等，2015；M. Bonamigo 等人，2017年；R. Kawamata 等，2018；M. Limousin 等，2022年；P. Bergamini 等，2023b；J. M. Diego 等，2024年；G. Rihtaršič 等，2025年；M. Limousin 等，2025a；S. Cha 和 M. J. Jee，2026；M. Oguri 等，2026）。J. Richard 等（2011a）；L. Christensen 等（2012a）；H. Ebeling 等（2014）；A. Hoag 等（2016）；S. A. Rodney 等（2018）还报告了其他未经建模的 MIS 或光谱学探测结果。通过 VENUS 观测，已识别的 MIS 数量增至 138 个，其中 127 个具有已确认的光谱观测，共计 379 个像。我们在此采用包含 4 个暗物质晕的经典 M0416 建模方案，其中一个（暗物质晕3）采用质心固定。我们的参考模型与 $\Delta_{\rm RMS} = 0.53''$收敛，而一个仅基于 3 个暗物质晕的替代模型达到$\Delta_{\rm RMS} = 0.68''$。

#### 4.2.24. *MACS J0417.5-1154 (M0417)*

星系团 MACS J0417.5-1154（$z = 0.44$）曾在 RELICS项目中由哈勃空间望远镜成像，随后在 VENUS 之前，CANUCS 使用詹姆斯·韦布空间望远镜对其进行了成像和宽视场无缝光谱（WFSS）观测。该星系团包含一个罕见的星系团引力透镜AGN，其红移为 $z$ =0.872，并表现出 X射线变异（M. B. Pandge et al. 2019年）；此外还包含一对被多重成像的相互作用合并螺旋星系，即著名的“问号双星系”（M. Jauzac et al.2019年；V. Estrada-Carpenter et al. 2024年）。VENUS 观测在其中发现了 SN Athena，其下一幅多重引力透镜成像预计将在 2027年初再次出现（Pascale等，准备中）。

M0417 的建模采用了 `Lenstool` ，使用了 M. Jauzac 等 （2019年）和G. Mahler 等 （2019年）的 RELICS 和 MUSE数据。一套采用詹姆斯·韦布空间望远镜/NIRISS 获得的大量新光谱红移的 CANUCS `Lenstool`模型（G. T. E. Sarrouh 等，2026）将由 Desprez 等（准备中）发表。在此，我们使用两个星系团尺度暗物质晕为 VENUS 对 M0417 进行建模。我们的模型受到来自 41 个源的 121 个多重像的约束，其中 20 个源具有光谱红移（M. Jauzac 等，2019年；G. Mahler 等，2019年；A. Tsu- jita 等，2025年；G. T. E. Sarrouh 等，2026），并实现了透镜平面平均像重现误差 $\Delta_{\rm RMS} = 0.68''$。

#### 4.2.25. *MACS J0429.6-0253 (M0429)*

巨大的X射线星系团 MACS J0429.6-0253（$z$ =0.40）在由 A. Zitrin 等，2015（2011a）完成建模后，被纳入使用哈勃空间望远镜的CLASH巡天。作为一个CLASH星系团，M0429拥有悠久的引力透镜分析历史：基于CLASH的强引力透镜`LTM`、`PIEMDeNFW` 和 `glafic` 模型包含两个已识别但没有光谱红移的多重像系统（A. Zitrin 等，2015；K. Umetsu 等，2016）。得益于数次MUSE指向观测，G. B. Caminha 等人（2019年）测量了三个多重像系统的红移，并利用这三个包含11个多重像的多重像系统，建立了基于哈勃空间望远镜和MUSE的M0429 `Lenstool` 强引力透镜模型。我们使用一个暗物质晕对M0429进行建模，并利用属于6个源的21个多重像对模型加以约束，其中3个源具有光谱红移（G. B. Caminha 等人，2019年）。我们的模型在透镜平面上的像复现误差为 $\Delta_{\rm RMS} = 0.22''$。

#### 4.2.26. *MACS J0451.9+0006 (M0451)*

星系团 MACS J0451。9+0006 (M0451， $z = 0.43$ 曾接受J. Richard 等(2011a)；D. Schaerer 等(2015)以及 MUSE 图谱（J. Richard等（2021）），后者汇编了唯一一份既有的透镜模型，该模型由`Lenstool`构建，基于25个光谱确认的多重像系统。这些论文汇编的经光谱确认的系统，以及M. Oguri 等(2026年)发现的新多重像，共计30个透镜系统；我们另外补充了4项新的多重像系统鉴定。新构建的模型包含两个暗物质晕，其中心位置设为自由参数。最终 $\Delta_{\rm RMS}$ 达到 $0.75''$，且几何结构弛豫。

#### 4.2.27. *Abell 521 (A521)*

Abell 521（$z = 0.25$）是一个动力学扰动的并合星系团，其中有一个位于 $z = 1.043$的壮观多重成像星系，该星系最早由J. Richard 等人

（2010b）通过光谱学确认。利用MUSE观测，V.Patrício 等人（2018）随后对其形态、恒星形成团块和透镜模型进行了研究并进一步完善；M. Messa 等人（2022年）结合阿塔卡马大型毫米/亚毫米阵列的额外观测约束（M. Dessauges- Zavadsky 等人 2023）。另一方面，该星系团的星系团内介质似乎受到激波作用，这是正在进行的并合所导致的（H. Bourdin 等人 2013年）。

根据文献，我们在被透镜放大的源星系中确认了15个结，并补充了在VENUS成像中发现的另一个系统。对更多多重像系统的全面搜寻未有收获，因此最终模型仅约束了最亮星系团星系周围的区域，即像平面$\Delta_{\rm RMS} = 0.11''$。我们注意到，受强引力透镜约束的有限区域未覆盖正在进行的并合，但我们将此归因于$\theta_{E,\ z_s=2}$ =8.2±0.8″的爱因斯坦半径有限；这是VENUS 星系团中最小的值。

#### 4.2.28. *MACS J0454.1-0300 (M0454)*

星系团 MACS J0454.1- 0300（$z = 0.55$，在文献中也被称为 MACS J0451.6-0305）的强透镜质量分布由 T. P. MacKenzie 等人（2014）建模；M. Jauzac 等人 （2021年），此前的光谱学鉴定包括 S. C. Chapman 等人（2002）。詹姆斯·韦布空间望远镜第三周期普通观测者计划5058（首席研究员：Furtak 和 Meena）在 $5\sigma$处达到29 AB星等制的深度，随后利用近红外相机的六个宽带滤光片加深了该星系团的强引力透镜模型，其动机是探索通过焦散穿越事件（CCEs）观测透镜放大的恒星的可能性。A. K. Meena 等人 （2026年）提出了一个与本文模型相近的强引力透镜模型，以研究系统10（$z_{\rm spec} = 2.91$）和19（$z_{\rm spec} = 6.70$）中罕见的燕尾形多重成像构型。

在我们的`AstroLensPy` 模型中，我们使用与A. K. Meena等（2026年）完全相同的29个多重像系统和星系目录，并将靠近透镜像的前景星系纳入星系目录，同时允许其权重自由变化。为对M0454建模，我们在最亮星系团星系的位置放置了一个暗物质晕，并允许其中心自由变化。最佳拟合模型呈现出 $\Delta_{\rm RMS}$ 为 $0.40''$。

#### 4.2.29. *MACS J0553.4-3342 (M0553)*

MACSJ0553.4-3342 ($z = 0.41$) 是一个大质量、碰撞后形成的双峰星系团并合体，其透镜模型最初由`Lenstool`根据H. Ebeling 等人(2017年) 的研究描述，利用哈勃空间望远镜的观测确认了10个多重像系统。该星系团展现出两条壮观的巨弧（系统1和3），两者延伸范围均超过 $\sim 24''$，因此为其质量分布提供了重要约束。相符的钱德拉 X射线观测发现，西侧暗物质晕与星系团内介质之间存在显著位移，从而支持西侧晕的冷核被完全剥离的并合情景。此后该星系团还接受了观测在 RELICS巡天中观测后，SLICE计划的詹姆斯·韦布空间望远镜观测将约束扩展至21个系统（C. Cerny 等, 2026）。基于这一成果，我们利用4个光谱确认系统，通过62个多重像系统中的171个透镜像（包括M. Oguri 等, 2026确认的系统）来约束双晕透镜模型，最终得到 $\Delta_{\rm RMS} = 0.79''$。

#### 4.2.30. *RXC J0600.1-2007 (R0600)*

RXC J0600.1-2007（$z = 0.43$，亦称MACS J0600.1-2007）是迄今观测到的最大星系团之一（L. J. Furtak等 2024b，$\theta_{E,\ z_s=2} = 49.7'' \pm 5.0$），规模可能可与M0717媲美（见第 4.2.33 节）。在VENUS之前，它已被纳入RELICS巡天，并拥有“宇宙葡萄”——一个由阿塔卡马大型毫米/亚毫米阵列探测到的团块状旋涡星系，位于 $z = 6.01$，具有五个透镜像（N. Laporte等 2021；S. Fujimoto等 2021，2025b）。N. Laporte等（2021）和 S. Fujimoto等（2021）最初使用Lenstool、glafic和 LTM，基于10个具有MUSE光谱红移的多重像系统对该星系团建模。然而，当时的模型难以在没有显著外部剪切分量的情况下重现多重像构型。利用专门开展的双子座望远镜/多目标光谱仪观测（项目编号 GN-2020B-Q-903，首席研究员：Zitrin），研究人员发现了星系团东侧的大质量延展结构；这些结构位于哈勃空间望远镜视场边缘之外，其质量可能超过RELICS观测到的R0600部分（L. J. Furtak等 2024b）。L. J. Furtak等（2024b）利用新的深度MUSE观测测得另外13个光谱红移，并结合S. Fujimoto等（2025b）对“宇宙葡萄”的早期 JWST/NIRCam观测，构建了一个新的R0600 ZitrinAnalytic强引力透镜模型，其中纳入了东侧结构，尽管当时这些结构尚无已确认的多重像系统。

如今，借助VENUS，我们在NIRCam成像中确认了R0600这些东部延展结构的强引力透镜特性，并在该星系团的这一部分发现了众多此前未知的亮弧（见图11）。我们基于L. J. Furtak等 （2024b）汇编的多重像和光谱红移，构建了R0600的新模型，并加入了星系团东部新的多重像。我们的R0600模型包含4个暗物质晕，东西两侧各2个，并由58个源的173个多重像加以约束，其中23个源具有光谱红移（L. J. Furtak等 2024b；S. Fujimoto等 2025b），达到透镜平面 $\Delta_{\rm RMS} = 0.68''$ 和 $\theta_{E,\ z_s=2}$ =46.3 ± 4.6″。该R0600模型将结合新的 JWST/NIRSpec光谱红移进一步完善，这些观测计划于

2027年2月进行（GO-6796），并将在一篇专门的论文中发表，Furtak等（准备中）。

#### 4.2.31. *SPT-CL J0615-5746 (SPTCL0615)*

星系团 SPT-CL J0615-5746（$z = 0.97$）是 VENUS 样本中距离最远的星系团。它最初由 HST RELICS巡天成像，随后 R. Paterno-Mahler 等人（2018）对其进行了建模。T. Connor 等人于 2019年开展的后续光谱观测表明，该星系团正处于弛豫阶段；然而，之后对星系团内光（ICL）和星系团内介质（ICM）的分析显示，它正处于并合过程中（Y. Jiménez-Teja 等人，2023）。B. Salmon 等人（2018）发现了“Cosmic Gems”弧（SPT0615-JD1，$z = 9.625$，本文中的系统 9–11），这是由五个年轻星团组成的群体；此后，B. Salmon 等人（2020）、B. Welch 等人（2023）、L. D. Bradley 等人（2025）、A. Adamo 等人（2024年）、M. Messa 等人（2026年）和 E. Vanzella 等人（2026年）对其作了进一步研究。

在纳入由M. Oguri 等 （2026年发现的新 VENUS 多重像系统以及由M. Messa 等 （2026年）开展的最新 JWST光谱学观测后，我们在已有的20个多重像系统基础上补充了3个新系统。使用2个中心位置自由的暗物质晕，我们的模型收敛到 $\Delta_{\rm RMS}$ 的0.39″。

#### 4.2.32. *Bullet (CL0658)*

子弹星系团（$z = 0.30$，也编录为 CL J0658-5657 或 1E 0657-55.8）最初由 W. H. Tucker 等人（1995年）作为延展X射线源发现。随后，钱德拉观测揭示了两个具有典型子弹形状的不同星系团内介质，见证了显著的弓形激波（M. Markevitch 等人 2002）。其构型表现为天空平面上两个具有明显特征的无碰撞成分（星系、暗物质）发生碰撞，而受激波作用的星系团内介质滞后于其后，这使其成为约束暗物质物理，尤其是自相互作用暗物质（SIDM）截面的理想实验室（M. Markevitch 等人 2004；D. Clowe 等人 2006；M. Bradač 等人 2006；S. W. Randall 等人 2008；F. Kahlhoefer 等人 2014；A. Robertson 等人 2017）。利用詹姆斯·韦布空间望远镜引力透镜数据，S. Cha 等人（2025年）给出了更强的限制 $\sigma/m_\chi < 0.2 \mathrm{cm}^2\,\mathrm{g}^{-1}$，但这类约束必然依赖于模型（F. Kahlhoefer 等人 2014；A. Robertson 等人 2017）。此外，我们注意到最近发现了 $z \sim 11$ ‘BulletArc-z11’，这是一个三重成像星系，使得人们能够以 $\sim 10$pc 的分辨率观测再电离时代的一个星系（M. Bradač 等人 2025）。过去用于对该星系团进行建模的强引力透镜模型、多重像识别和光谱学工作包括 D. Mehlert 等人（2001年）；M. Bradač 等人（2006）；M. Bradač 等人（2009）；A. H. Gonzalez 等人（2010年）；D. Paraficz 等人（2016）；J. Richard 等人（2021年）；S. Cha 等人（2025年）；G. Rihtaršič 等人（2026年）。

与其他过去已由詹姆斯·韦布空间望远镜深入巡天的星系团一样，我们仅汇编了规模最大的多重像系统目录，涵盖72个系统，其中52个经过光谱学确认。遵循例如 G. Rihtaršič 等人（2026年）的方法，我们采用了三个晕成分，以主要最亮星系团星系为中心，但将它们的位置设为自由参数。前景星系、位于 $z \sim 1$ 的背景星系群，以及星系团内介质的引力势，均未在我们的 `AstroLensPy` 优化中建模，这构成了我们模型的一项限制；该模型最终收敛至$\Delta_{\rm RMS} = 0.62''$。

#### 4.2.33. *MACS J0717.5+3745 (M0717)*

MACS J0717.5+3745 ($z = 0.55$)长期以来一直是已知质量最大的强引力透镜星系团，其爱因斯坦半径为$\theta_{E,\ z_s=2} = 55 \pm 3''$（例如 A. Zitrin 等，2009）。作为 CL ASH 和 HFF 巡天的一部分，它曾使用哈勃空间望远镜进行广泛而深入的观测，同时还利用凯克天文台开展了深度地面光谱学观测（例如 M. Limousin 等，2012、2016；H. Ebeling 等，2014）。M0717 是最后一个使用詹姆斯·韦布空间望远镜观测的 HFF 目标，观测属于 VENUS 巡天的一部分。作为一个 HFF 星系团，M0717 已经通过强引力透镜进行了广泛研究和建模，从最初的 LTM（A. Zitrin 等，2009）和 Lenstool（M. Limousin 等，2012；M. Jauzac 等，2012）模型，到结合地面光谱学的完整 CLASH 和 HFF 模型（例如 E. Medezinski 等，2013；J. Richard 等，2014；J. M. Diego 等，2015a；A. Zitrin 等，2015；R. Kawamata 等，2016；M. Limousin 等，2016；M. Jauzac 等，2018）。

借助 VENUS 对 M0717 的首次詹姆斯·韦布空间望远镜观测，我们在此使用六个星系团尺度的暗物质晕以及一个外部剪切分量对该星系团进行建模。我们利用 81 个源的 237 个多重像约束模型，其中 7 个源具有光谱红移（H. Ebeling 等，2014；M. Limousin 等，2016），透镜平面平均像重现误差为 $\Delta_{\rm RMS}$ =1.04″。我们发现 M0717 的爱因斯坦半径异常巨大，$\theta_{E,\ z_s=2} = 49.1'' \pm 4.9''$，与先前的测量结果一致；并且对于红移为 $\theta_E$ 的 $_{z_s=10} = 67.3'' \pm 6.7''$ 源，$z_s = 10$，因此它仍是迄今观测到的“最大”强引力透镜星系团（关于 $z_s \geq 3$，见图6）。

#### 4.2.34. *SMACS J0723.3-7327 (SM0723)*

SMACS J0723.3-7327（$z = 0.39$）是在大质量星系团巡天（A.Repp & H.Ebeling 2018）南部延伸区发现的一个大质量、X射线明亮系统（G. Mahler 等人 2023）。其延展的质量、X射线和星系分布，以及弥漫的射电辐射，使多项研究倾向于并合情景（G. Mahler 等人 2023；K. Finner 等人 2023），其中K. Finner 等人（2023）认为该星系团接近首次近心点通过。为提前做好观测准备

作为早期发布观测（ERO）的一部分，该星系团成为詹姆斯·韦布空间望远镜观测到的第一个强引力透镜。随后，M. Golubchik 等人（2022年）仅凭哈勃空间望远镜成像提出了首个已发表模型，之后又有基于 RELICS 的模型 K. Sharon 等人（2023）。首次 JWST 成像促成了多项独立分析（M. Pascale 等人 2022b；G. B. Caminha 等人 2022；G. Mahler 等人 2023），使已知的多重像系统数量增加到原来的四倍以上。对比这些早期发布观测数据与 VENUS 的 JWST 观测时期，发现了多重引力透镜超新星 Atalanta，Agrawal 等人（准备中）将对此作进一步描述。

我们的模型受到来自16个MIS的约束，这些MIS由M. Pascale等（2022b）确定，共包含45个多重像。我们在VENUS成像中重新识别了这些多重像，其依据是通过MUSE和NIRSpec观测获得的7个光谱红移（M. Golubchik等 2022；G. Mahler等 2023；G. Noirot等 2023）。质量分布需要两个晕，并达到 $\Delta_{\rm RMS}$ 的 0.34″。

#### 4.2.35. *RXC J0911.1+1746 (R0911)*

星系团RXC J0911。1+1746 （$z = 0.51$），也称为 MACS J0911。1+1746，由A. Zitrin等（2011a）发现为强引力透镜星系团；他们使用LTM，在没有任何光谱红移的情况下，利用3个MIS对其进行了建模。R0911后来被纳入RELICS哈勃空间望远镜巡天，但此后尚未发表该星系团的强引力透镜模型。如今，在VENUS中，我们使用AstroLensPy对R0911进行建模，以一个暗物质晕对其进行参数化，并使用来自6个源的13个多重像作为约束。我们的模型具有最终的透镜平面 $\Delta_{\rm RMS} = 0.22''$，但我们注意到，由于该视场中没有多重像的光谱红移，该模型仍存在不确定性。

#### 4.2.36. *MACS J0940.9+0744 (M0940)*

MACS J0940。9+0744 （$z = 0.34$）是另一个规模相对较小的星系团。在 VENUS 之前，它未曾纳入任何大型空间巡天，但被收录于J. Richard等（2021年）编制的 MUSE 图谱中。M0940 是一个多重成像莱曼α弧的宿主，其位于$z = 4.03$ （A. Claeyssens等，2019年）；在 VENUS 的 JWST成像中，它呈现为一串壮观的恒星形成小团块。N. Leethochawalit等所建立的（2016）是 M0940 的首个强引力透镜模型。随后建立的该星系团Lenstool 模型基于 7 个多重像系统（A. Claeyssens等，2019年；J. Richard等（2021））。我们使用 VENUS 的 JWST成像，以一个暗物质晕为该星系团建立模型。模型由 10 个源的 30 个多重像约束，其中 8 个源具有光谱红移，最终得到的透镜平面平均像重现误差为$\Delta_{\rm RMS} = 0.27''$。

#### 4.2.37. *RXC J0949.8+1707 (M0949)*

星系团 RXC J0949.8+1707（$z = 0.38$）尚未接受 VENUS 观测。我们将在未来的更新中介绍其透镜模型。

#### 4.2.38. *MACS J1115.8+0129 (M1115)*

MACS J1115 星系团。8+0129（$z = 0.35$）曾在 CLASH 项目的框架下由哈勃空间望远镜观测。该星系团主要因两个星系团成员形成的显著星系—星系引力透镜系统而闻名（W. G. Parry 等人 2016）。作为一个 CLASH星系团，M1115 由LTM 和PIEMDeNFW 模型进行建模，模型由 A. Zitrin 等人（2015）构建，其结果被 I.-N. Chiu 等人（2018）用于推导该星系团的三轴形状。与其他 CLASH星系团（例如 M0429 或 M1311，见第 4.2.25 和 4.2.43节）一样，G. B. Caminha 等人（2019年）利用 MUSE 获得了 M1115 中的光谱红移，并使用 3 个 MIS 对该星系团的 Lenstool 强引力透镜模型进行约束。借助 VENUS 数据，我们现在构建了一个新的 M1115 模型，以一个暗物质晕对星系团进行参数化，并使用 7 个源的 22 个像作为约束，其中一个源具有光谱红移（G. B. Caminha 等人 2019）。我们的模型最终得到的透镜平面平均像重现误差为 $\Delta_{\rm RMS} = 0.85''$。

#### 4.2.39. *PLCK G165+67.0 (PLCKG165)*

PLCK G165.7+67.0（$z = 0.35$）是一个大质量强引力透镜星系团，其双峰质量分布和显著的 $\sim 20''$-条长巨弧首次通过HST成像（B. L. Frye等2019年，随后由M. Pas- cale等2022a年利用新的光谱观测建立模型）。该星系团被纳入詹姆斯·韦布空间望远镜PEARLS巡天，并于2023发现了一颗三重透镜化的Ia型超新星SN H0pe（B. L. Frye等2024年）。随后，SN H0pe的红移经光谱确认，为 $z = 1.78$ （M. Polletta等2023）。结合后续一项用于测量该超新星时间延迟的主任自由支配时间提案，PEARLS数据通过比较多个相互独立的透镜模型，实现了首次 $H_0$ 基于多重成像Ia型超新星的测量。作为标准烛光，对其放大率的了解进一步有助于打破透镜模型简并（M. Pascale等2025b）。

将这些哈勃空间望远镜和詹姆斯·韦布空间望远镜的探测结果，与此前 R.Ca˜nameras 等人通过红外和光谱获得的探测结果（2015、2018）相结合后，我们整理出一个包含 41 个多重像系统的目录，其中 25 个得到了光谱确认。我们的模型允许两个暗物质晕的质心自由变化，并以 $\Delta_{\rm RMS} = 0.11''$ 收敛。

#### 4.2.40. *MACS J1149.5+2223 (M1149)*

MACS J1149.5+2223($z = 0.54$) 是一个质量巨大、动力学结构复杂的并合星系团。它是最

广受研究的引力透镜之一，这得益于其丰富的多重成像系统、广泛的光谱覆盖、多重引力透镜超新星以及对背景源的非凡放大率。因此，它成为众多强引力透镜巡天（CLASH、HFF、CANUCS）和质量重建研究的对象（A. Zitrin & T. Broadhurst 2009；G. P. Smith 等人 2009；A. Zitrin 等人 2011a；J. Richard 等人 2014；S. Rau 等人 2014；T. L. Johnson 等人 2014；M. Oguri 2015；K. Sharon & T. L. Johnson 2015；J. M. Diego 等人 2016b；M. Jauzac 等人 2016；R. Kawamata 等人 2016；E. Q. Finney 等人 2018；A. Zitrin 2021；S. Schuldt 等人 2024、2026）。其非凡的引力透镜构型包括首个观测到的多重成像超新星 SN Refsdal（$z = 1.4888$, S. Refsdal 1964年；P. L. Kelly 等人 2015），其五个像为像奇偶性、相对放大率和时间延迟提供了宝贵约束（S. A. Rodney 等人 2016；P. L. Kelly 等人 2023a）。广泛的光谱观测确定了众多多重像系统（H. Ebeling 等人 2014；T. Treu 等人 2016；C. Grillo 等人 2016；G. T. E. Sarrouh 等，2026年；Rihtaršič 等人，准备中）的红移，而 SN Refsdal 系统也推动了独立的宇宙学研究（P. L. Kelly 等人 2023b；C. Grillo 等人 2024年）。

利用这些丰富的文献资料，我们总共汇编了269个独立的多重像，分布于93个MIS中，其中82个已通过光谱鉴定。特别是，我们在此使用了CANUCS目录中的MIS和光谱鉴定结果（私人通信），相关内容将与新的`Lenstool`模型一同在Rihtaršič等人（准备中）中详细介绍。我们的模型还将P. L. Kelly等人（2023a）报告的流量比作为额外约束。采用三个晕且其质心均自由变化后，我们的最佳拟合模型收敛于 $\Delta_{\rm RMS} = 0.86''$。

#### 4.2.41. *PLCK G287.0+32.9 (PLCKG287)*

PLCK G287.0+32.9（$z = 0.39$，亦编入目录为 SPT-CL J1150-2805）是*Planck* 目录（Planck 合作组 2011年）中第二大的 SZ选星系团，也是迄今观测到的质量最大的强引力透镜星系团之一（A. Zitrin 等，2017年）。PLCKG287曾通过 RELICS项目使用哈勃空间望远镜观测，也曾通过 SLICE 和 VENUS 使用詹姆斯·韦布空间望远镜观测。首个 PLCKG287 强引力透镜模型由A. Zitrin 等（2017年）采用`LTM`方法推导得出，发现其爱因斯坦半径异常巨大，达到$\theta_{E,\ z_s=2} = 42 \pm 4''$ 对应的源位于 $z_s = 2$。随后，该星系团接受了三次 MUSE指向观测，使M. D' Addona 等（2024年）得以测量视场中的大量光谱红移，并基于 12 个源的 47 个多重像推导出一个`Lenstool` 模型，证实了A. Zitrin 等测得的巨大爱因斯坦半径。（2017年）。J. R. Betts 等（2026年）最近发表了一个模型，利用 SLICE 观测和钱德拉 X 射线数据对星系团及其星系团内介质进行建模，发现 $\theta_{E,\ z_s=2} = 42.41^{+0.05}_{-0.04}''$。

利用VENUS 数据，我们构建了一个新的`AstroLensPy`PLCKG287模型。我们的模型包含4个暗物质晕，并由33个源的101个多重像加以约束，其中14个源具有光谱红移（M. D'Addona等人，2024年）。我们的模型最终达到透镜平面平均像重现误差 $\Delta_{\rm RMS} = 0.75''$；我们发现，PLCKG287的爱因斯坦半径为$\theta_{E,\ z_s=2} = 45.4'' \pm 4.5''$ 位于 $z_s = 2$和$\theta_{E,\ z_s=10} = 60.5 \pm 6.1''$ 位于 $z_s = 10$，这使其成为迄今观测到的最大强引力透镜星系团之一，与M0717等并列（见第4.2.33节）。

#### 4.2.42. *MACS J1206.2-0847 (M1206)*

星系团 MACS J1206.2-0847 ($z = 0.44$) 被纳入 CLASH 和 SLICE 巡天，并在例如 A. Zitrin 等人 (2012b); G. B. Caminha 等人 (2017年); P. Bergamini 等人(2019年); J. Richard 等人 (2021年); M. Limousin 等人(2022年) 等人的研究中得到了深入建模；这些研究也提供了光谱观测结果。该星系团拥有著名的 Snake 弧，横跨 $15''$ 星系团西部视场，位于 $z = 1.037$ （见 H. Ebeling 等人 2009，此处的系统 2）。由于其放大面积很大，它对拥挤校正效应非常敏感，因此通过比较 VENUS 和 SLICE 成像，发现了一颗醒目的恒星 M1206-LS1。其亮度至少比 A370 龙形弧中发现的天体高 1 等（见第4.2.14节），随后利用詹姆斯·韦布空间望远镜 主任自由支配时间项目 12775进行了低分辨率光谱后续观测；合作团队将在后续论文中介绍这些结果。

我们整理了一个包含 37 个既有多重像系统的目录，其中一个具有双曲脐点几何。根据我们的透镜模型，我们怀疑 Snake弧以西的区域（$10 - 30''$）存在更多多重像系统，若能获得 MUSE 覆盖将有助于确认。由于这些系统尚未得到确认，因此未用于约束模型。我们的最终模型使用 44 个多重像系统来约束透镜势，并包含 3 个位置自由暗物质晕，得到 $\Delta_{\rm RMS} = 0.48''$。

#### 4.2.43. *MACS J1311.0-0310 (M1311)*

MACS J1311.0-0310（$z = 0.49$）是一个CLASH星系团，之前曾在`LTM` 和`PIEMDeNFW` 模型下由A. Zitrin 等人（2015年）基于两个光度学多重像系统进行透镜建模。随后，`Lenstool` 模型由G. B. Caminha 等人（2019年）利用新的MUSE数据建立，但在M1311中仅获得了一个源红移。我们的VENUS模型同样对该星系团进行建模，其中包含一个暗物质晕，并利用来自4个源的13个多重像加以约束，其中1个源具有光谱学

红移（G. B. Caminha 等人 2019年），最终达到透镜平面 $\Delta_{\rm RMS} = 0.23''$。

#### 4.2.44. *Abell 1689 (A1689)*

星系团阿贝尔1689（$z = 0.18$）是一个经典的强引力透镜星系团，具有非常大的爱因斯坦半径，并且在深度HST成像中确认了大量多重成像源（T.Broadhurstetal.2005；M.Limousin et al. 2007；D. Coe et al. 2010）。后续的自由形式重建进一步扩展了约束条件（J. M.Diego et al. 2015b；A. Alavi et al. 2016；A. Ghosh et al.2023），而MUSE 光谱观测则确认了多重成像源的红移（D. Bina et al. 2016）。我们在此指出，VENUS时期促成了宇宙学暂现事件的探测（Palencia et al. in prep.）。我们的文献综述得到了一份首个多重像系统目录，但其中必须清除虚假的光谱探测，最终得到50个多重像系统；随后又加入了21个新系统，总计213个像。在当前的AstroLensPy模型中，我们通过两个暗物质晕刻画了该松弛星系团的质量分布，两个暗物质晕的中心均为自由参数，从而得到 $\Delta_{\rm RMS} = 0.74''$ 精度，以及对于位于 $z_s = 2$的源，其爱因斯坦半径为$\theta_{E,\ z_s=2} = 50.4 \pm 5.0''$。

#### 4.2.45. *RX J1347.5-1145 (R1347)*

星系团 RX J1347.5-1145（$z = 0.45$）尚未接受 VENUS 观测。我们将在未来的更新中介绍其透镜模型。

#### 4.2.46. *Abell 1835 (A1835)*

星系团阿贝尔1835（$z = 0.25$）尚未接受 VENUS 观测。我们将在未来的更新中介绍其透镜模型。

#### 4.2.47. *MACS J1423.8+2404 (M1423)*

MACS J1423.8+2404 ($z = 0.55$) 是一个动力学弛豫的星系团，曾在 CLASH 项目中由哈勃空间望远镜观测，并在 CANUCS 项目中由詹姆斯·韦布空间望远镜观测。它因“Firefly Sparkle”而闻名，这是一条受到强烈剪切、由多个星团组成的 $z = 8.3$ 弧（L. Mowla 等，2024）；它还拥有一个极高放大率的低红移尘埃星系，其宿主星系可分辨，红移同为 $z$ =8.3（J. Judeˇz 等，2026）。该星系团首批基于哈勃空间望远镜观测的强引力透镜模型，是使用三个多重像系统，通过 Lenstool（M. Limousin 等，2010）和 LTM（A. Zitrin 等，2011a）构建的。M1423 也被纳入采用 LTM 和 PIEMDeNFW（A. Zitrin 等，2015）以及 glafic（K. Umetsu 等，2014）构建的 CLASH 全巡天样本强引力透镜模型研究中。迄今发表的最完整、基于哈勃空间望远镜观测的 M1423 强引力透镜模型由 N. R. Patel 等（2024）使用 Lenstool 构建，并结合了 KALEIDOSCOPE巡天的全新深度 MUSE 观测（项目编号 0104.A-0801；首席研究员：A. Edge）。Desprez 等（准备中）将发表一个基于 CANUCS 的 M1423 Lenstool模型。

在 VENUS 项目中，我们使用两个暗物质晕对 M1423 建模，并以 9 个源的 32 个多重像约束模型，其中 7 个源具有光谱红移（M. Limousin 等，2010；N. R. Patel 等，2024；G. T. E. Sarrouh 等，2026）。我们的模型最终在透镜平面上的平均像重建误差为 $\Delta_{\rm RMS}$ =0.41″。

#### 4.2.48. *RXC J1532.9+3021 (R1532)*

RXCJ1532.9+3021（$z = 0.35$) 是一个大质量、X射线高光度星系团，拥有异常寒冷的冷核，其中活动星系核反馈提供了足够的机械功率，以平衡辐射冷却（J. Hlavacek-Larrondo 等，2013）。该星系团的哈勃空间望远镜观测视场还包含 SN CLN12Did，这是一颗位于 $z = 0.85$ 的 Ia型超新星，由 CLASH巡天发现，其放大率为星系团质量图提供了早期的一致性检验（B. Patel 等，2014）。然而，作为引力透镜，R1532 的约束一直很弱：A. Zitrin 等(2015年) 仅识别出一个候选系统，并据此提出了相应的初步质量模型；随后，该星系团也被排除在CLASH引力透镜分析的弱引力透镜分量之外（K. Umetsu 等，2016）。

VENUS成像改变了这一图景。我们识别出5个新的多重像系统（MIS），再加上A. Zitrin 等人（2015年提出的候选系统（在我们的模型中为系统1），使系统总数达到6个、多重像达到16个，从而为该星系团提供了首个可靠的强引力透镜约束。系统2–5也在M. Oguri 等人（2026年）的研究中展示，系统6则在两项分析中被独立识别。所有系统均没有光谱红移；因此，我们采用VENUS星表中的光度红移作为先验，并在优化过程中将所有源红移设为自由参数。质量分布由单个暗物质晕描述，模型达到$\Delta_{\rm RMS}$ 的 0.26″。

#### 4.2.49. *PLCK G004.5-19.5 (PLCKG004)*

PLCKG004.5-19.5（$z = 0.54$) 是一个质量巨大的 SZ 选选出的*Planck* 星系团 (C. Sif´on 等，2014)。该星系团受到动力学扰动，同时拥有外围射电遗迹和中心射电晕，这与正在进行的并合相符 (C. Sif´on 等，2014；J. G. Albert 等，2017)。其强引力透镜潜力最早由C. Sif´on 等人(2014进行探索，他们的模型由位于 $z = 1.601$的一条巨弧约束，并得出了有效爱因斯坦半径$\theta_E = 30^{+1}_{-4}''$，对应 $z_s = 1.6$。随后，作为 RELICS 项目的一部分，哈勃空间望远镜对该星系团进行了成像 (D. Coe 等，2019)。我们还利用了该星系团核的 VLT/MUSE 存档观测数据，并据此测得 VENUS 成像中识别出的三个系统的新光谱红移：系统 1 位于 $z = 1.097$，系统 3 位于 $z = 1.484$，系统 4 位于

$z = 1.471$。第四个系统（系统 2）对应于C. Sif´on 等人(2014报道的弧，我们采用他们测得的光谱红移 $z = 1.601$。我们的`AstroLensPy` 模型由 9 个多重像系统（MIS）约束，其中两个是同一透镜星系中的不同团块，总计包含 23 个多重像。与星系团受到扰动的状态相符，需要两个暗物质晕来描述其质量分布。该模型达到$\Delta_{\rm RMS}$，数值为 0.74″。

其中两个受约束系统包含低红移星系。第一个（系统9）是一对嵌入透镜放大的恒星形成星系“Red Eyes”中的低红移星系，其放大倍数为 $\mu \sim 15-20$，且在 $\sim 70$ 源平面中仅相隔`ZitrinAnalytic`秒差距（与我们先前的模型一致，参见H. Yanagisawa 等人 2026年）。第二个（系统10）是另一个低红移星系系统，模型预言其存在第五个像，但该像位于近红外相机视场之外，因此无法确认。此后已测得这两个系统中 $z = 7.49$ 和 $z = 5.60$ 的光谱红移；不过，这些测量晚于本文所述模型的建立，因此未被用作约束条件。

#### 4.2.50. *MACS J1931.8-2635 (M1931)*

MACS J1931.8-2635（$z = 0.35$）同时拥有一个具有强烈扰动星系团内介质的冷核，以及最亮星系团星系中已知最活跃的活动星系核之一（S. Ehlert et al. 2011年；J. S. Santos etal. 2016）。这个处于松弛状态的CLASH星系团曾由A. Zitrin 等人（2015）；G. B. Caminha 等人（2019年）利用哈勃空间望远镜和MUSE探测结果进行建模，随后又由J. F. V. Allingham et al.（2026年）结合VENUS 观测进行建模，此前已发现SN Eos。这颗多重引力透镜超新星IIP促成了针对两个已观测像（系统101）的近红外光谱仪/棱镜（CLEAR）光谱观测（项目编号：9493-DDT，首席研究员：Coulter），每个像的曝光时间总计10,504秒。关于这颗超新星（系统101）的分析详见D. A. Coulter et al.（2026年）；本文仅使用近红外光谱仪确认的SN Eos光谱红移$z = 5.133$，这与MUSE在其宿主星系（系统100）中探测到的四个像一致；该宿主星系是 $M_{\rm UV} = -14.4 \pm 0.3$超暗（$Z < 0.01 Z_\odot$）、贫金属（Y. Asada etal.（2026年）所介绍的源。J. F. V. Allinghamet al.（2026年）还报告了 $z_{\rm phot} \simeq 3.5 \pm 0.2$ 三重透镜星系Charybdis（系统14），这是迄今观测到的距离最远的多重引力透镜大设计旋涡星系。

我们在此略微更新J. F. V. Allingham等人（2026年）的模型，采用一个无质心暗物质晕，并使最亮星系团星系的权重可非常自由地变化，达到 $\Delta_{\rm RMS} = 0.65''$。由此可推导Eos系统放大率的系统误差，我们更新后的模型给出 $\mu_{100} \simeq 15$ –两个星系像上均为16以及 $\mu_{101.1} \simeq 21$ 和 $\mu_{101.2} \simeq$ 观测到的Eos超新星像上为27。将这些数值与我们以往的模型进行比较，可推导出这些像放大率的系统误差（此处占主导）为20%，与J. F. V. Allingham等人（2026年）完全一致。

#### 4.2.51. *SMACS J2031.8-4036 (SM2031)*

SMACS J2031.8-4036（$z = 0.34$）此前曾在多个哈勃空间望远镜项目（GO-12166 和 GO-12884）以及詹姆斯·韦布空间望远镜 SLICE 项目中成像。该星系团包含一个著名的多重成像极端氮 IV]$\lambda$1486 Å A 和莱曼$\alpha$ 发射体，位于 $z = 3.5$ （L. Christensen 等，2012a，b；V.Patr´ıcio 等，2016；A. Claeyssens 等，2019年），R. Marques-Chaves 等人于 （2024年）最近重新研究了它，将其作为可能形成承载超大质量恒星的恒星团的候选天体。

该星系团已使用`Lenstool`进行了广泛建模，最初由L. Christensen 等 （2012a）利用一个多重像系统进行建模，随后使用13个经光谱确认的多重像系统改进了模型（J. Richard 等，2015，2021）。最新的`Lenstool` SM2031模型基于SLICE詹姆斯·韦布空间望远镜数据，并使用15个多重像系统作为约束，其中首次包括了位于该星系团西部延伸区的两个多重像系统（C. Cerny 等，2026年）。我们基于VENUS 数据，使用`AstroLensPy` 对SM2031进行建模，采用两个星系团尺度暗物质晕，并利用属于20个源的68个多重像进行约束，其中17个源具有光谱红移。我们的模型在透镜平面上达到 $\Delta_{\rm RMS} = 0.32''$。

#### 4.2.52. *MACS J2129.4-0741 (M2129)*

星系团 MACS J2129.4-0741（$z = 0.59$）最初由 A. Zitrin 等（2011a）建模，之后才开展 CLASH 和 SLICE 巡天观测，因此形成了 A. Zitrin 等（2015）；A. Monna 等（2017年）；G. B. Caminha 等（2019年）；M. Jauzac 等（2021年）；C. Cerny 等（2026）中的引力透镜质量模型，而其他光谱$z$ 鉴定则包括 L. Christensen 等（2012a）；T. Treu 等（2015）；K.-H. Huang 等（2016）。在以往模型（包括 M. Oguri 等，2026）的基础上，我们利用 21 个多重像系统约束星系团的势，其中 13 个经过光谱确认。与以往模型不同，我们在南部引入了第二个暗物质晕，那里分布着多个亮星系；此外还保留了以最亮星系团星系为中心的暗物质晕（与星系团内光一致，并呈现并合典型超额比例；Jim´enez-Teja 等，准备中）。尽管该区域不受强引力透镜约束，但加入这一暗物质晕，并将暗物质晕质心设为自由参数，使总体 $\Delta_{\rm RMS}$ 从 0.99″（1 个暗物质晕模型）降低至 0.83″。

#### 4.2.53. *RX J2129.7+0005 (R2129)*

星系团 RX J2129。7+0005 ($z = 0.23$) 最初由 J. Richard 等人 (2010b) 建模，之后又成像——

CLASH巡天对其进行了成像，进而建立了新的透镜模型（A. Zitrin 等，2015；G. B. Caminha 等人 2019年），并得到光谱鉴定的支持（S. Belli 等人 2013年，以及 $z = 9.4$ 由 H. Williams 等人 2023鉴定的系统 8）。2022年，哈勃空间望远镜快照观测（HST-SNAP）计划 GO-16729（第29周期，首席研究员 Kelly）发现了位于星系团 R2129 后方、经多重成像的 Ia 型透镜超新星 SN 2022riv（$z = 1.5220$，呈三重成像）。B. Dhanasingham 等人 (2026年) 总结了多种不同的透镜模型，其中包含 14 个多重像系统（MIS），并深入介绍了这一发现。本文采用相同的多重像系统（MIS），并使用一个暗物质晕（DMH）来模拟弛豫几何结构，从而达到 $\Delta_{\rm RMS} = 0.18''$。

#### 4.2.54. *SMACS J2131.1-4019 (SM2131)*

星系团 SMACS J2131.1-4019 ($z = 0.44$) 最初通过哈勃空间望远镜快照成像进行观测，并据此开展了首次质量重建 (A. Repp & H. Ebeling 2018)。J.Richard et al. (2021年) 利用哈勃空间望远镜成像与 MUSE 光谱观测的新组合，给出了新的详细`Lenstool` 质量模型，其爱因斯坦半径为 $\theta_{E,\ z_s=4} = 24.4''$ 对应于位于 $z_s = 4$的一个源。结合 A. Werleet al. (2022年) 的补充 MUSE 光谱观测（本文将其用于星系团成员鉴定），我们构建了一个包含新系统的新质量模型，使多重像系统总数达到 9 个，其中 8 个有光谱观测。我们在此剔除了 J. Richard et al. (2021年) 鉴定的一个系统，该系统显然与其他系统不相容，且缺乏光学或红外鉴定。模型包含两个质心不固定的暗物质晕，并采用加权双伪等温椭球势来表示出现在星系团中心附近的前景星系，从而得到最佳拟合 $\Delta_{\rm RMS}$，对应 $0.55''$。我们发现$\theta_{E,\ z_s=4} = 25.8\pm2.6''$，与J.Richardetal. (2021年) 的结果高度吻合。

#### 4.2.55. *MACS J2137.3–2353 (M2137)*

MACS J2137.3–2353（$z = 0.31$）是一个动力学上弛豫的 CLASH星系团（R. W. Schmidt 和 S. W. Allen，2007），也是一个研究充分的透镜，其核心有一条醒目的径向弧。其质量分布已得到广泛建模（例如，R. Gavazzi 等，2003；A. B. Newman 等，2013b；A. Zitrin 等，2015），最近一次建模由C. Cerny 等（2025年）完成。他们为模型中的全部 4 个多重像系统测得了光谱红移，其中一个系统此前仅通过测光确认。我们采用C. Cerny 等（2025年）确定的系统及其通过 MUSE 测得的光谱红移，并补充了 VENUS成像中发现的 4 个新系统。最终的 22 个多重像可由单个暗物质晕很好地再现，其 $\Delta_{\rm RMS}$ 为$0.40''$。

#### 4.2.56. *RXC J2211.7-0349 (R2211)*

强引力透镜星系团 RXC J2211.7-0349（$z = 0.40$）曾作为 RELICS 和 SLICE 巡天的一部分进行观测，因此由C. Cerny 等（2018、2026年）建立了模型。VENUS发现了两个多重透镜化的低红移尘埃星系候选体，它们构成两个爱因斯坦十字（Z. Zhang 等，2025a），预测的时间延迟最长可达 130 年。随后建立了多种模型（`glafic`、`Lenstool`、`WSLAP+`），其中包括本文介绍的`AstroLensPy`模型。模型采用两个暗物质晕，二者均以最亮星系团星系为中心，并设有自由质心；模型最终收敛到弛豫几何结构，精度为 $\Delta_{\rm RMS} = 0.85''$。更多详情请参见Z. Zhang 等（2025a）。

#### 4.2.57. *MACS J2214.9-1359 (M2214)*

星系团 MACS J2214.9-1359（$z = 0.50$）最初由 A. Zitrin 等 （2011a）建模，随后 MUSE 图谱大幅完善了该模型，其中包含 15 个具有光谱红移的系统（J. Richard等（2021）），此外 M. Oguri 等 （2026年）又增加了 3 个系统。我们在此汇编了总计 23 个多重像系统，其中包含 67 个多重像（包括 18 个具有光谱确认红移的系统）。这个看似动力学松弛的星系团采用了 3 个具有自由质心的暗物质晕进行建模，使典型的 $\Delta_{\rm RMS}$ 降低至 $0.62''$。

#### 4.2.58. Abell S1063(AS1063)

Abell S1063（$z = 0.35$），也称为 RXC J2248.7-4431 和 SPT-CL J2248-4431，是一个著名的大质量 X 射线星系团（例如 P. L. G´omez 等，2012），曾在 CLASH、HFF 和 Flashlights 巡天中使用哈勃空间望远镜进行广泛成像，最近又通过詹姆斯·韦布空间望远镜巡天 GO-1840 和 GLIMPSE 进行了观测。因此，AS1063 是迄今观测到的最深场，在近红外相机宽波段和哈勃空间望远镜超长通滤光片中达到了 31 等的深度。该星系团包含一个著名的五重成像天体 $z = 6.111$ （A. Monna 等，2014），詹姆斯·韦布空间望远镜最近重新观测了该天体，以研究其氮元素增强和沃尔夫–拉叶星特征（M. W. Topping 等，2024；D. A. Berg 等，2026）；此外，该星系团还包含众多透镜化的莱曼发射体（例如 α，G. B. Caminha 等人，2016a；W. Karman 等，2017年；P. Bergamini 等，2019年）、一个尤其明亮的低红移尘埃星系（$z = 3.501$，V. Kokorev 等，2026年），以及数颗极强透镜化恒星 $z = 1 - 4$（J. M. Diego 等，2026年；L. J. Furtak 等，2026年）。

作为 CLASH 和 HFF 星系团，AS1063 的强引力透镜质量建模历史悠久，已有众多模型（例如A. Monna 等人，2014；T. L. Johnson 等人，2014；J. Richard 等人，2014；A. Zitrin 等，2015；W. Karman 等人，2015），后来又结合深度地基光谱，确认了数十个多重像系统（例如G. B. Caminha 等人，2016b；J. M. Diego 等人，2016a；W. Karman 等人，2017；P. Bergamini 等人，2019；B.Beauch-

esne 等人，2024年）。迄今基于詹姆斯·韦布空间望远镜建立的 AS1063 模型包括J. M. Diego 等人(2026年)提出的自由形式模型，以及GLIMPSE的L. J. Furtak 等人(2026年)提出的 AstroLensPy 模型。由于 VENUS 的 AS1063 数据远不如此前获得的 GLIMPSE观测 深，因此我们没有为该星系团专门推导 VENUS 强引力透镜模型，而是在此采用 GLIMPSE`AstroLensPy` 模型。该模型包含两个暗物质晕，并由 34 个多重像系统中的 91 个多重像加以约束，其中 31 个系统具有来自 MUSE 和 JWST/NIRSpec 的光谱红移（L. J. Furtak 等人，2026年），其透镜平面 $\Delta_{\rm RMS} = 0.52''$。该模型发表于L. J. Furtak 等人(2026年)，有关该模型的更多详情，请读者参阅该研究。

#### 4.2.59. *Abell 2537 (A2537)*

Abell 2537（$z = 0.30$）是一个处于弛豫状态的X射线高光度星系团，被纳入RELICS和SLICE巡天。由A. B. Newman等人（2013b）开展的首次引力透镜分析结合了哈勃空间望远镜、凯克天文台和X射线观测。基于RELICS的 `Lenstool` 模型在A2537中识别出4个多重像系统，其中一个经过光谱确认（C. Cerny等人 2018）；随后，借助SLICE，通过加入使用詹姆斯·韦布空间望远镜探测到的7个新识别多重像系统，模型得到了改进（C. Cerny等人 2026年）。对于VENUS，我们使用一个暗物质晕对A2537进行建模，并利用15个源的57个多重像对模型加以约束，其中一个源具有光谱红移。我们的模型具有一个透镜平面$\Delta_{\rm RMS} = 0.65''$。

#### 4.2.60. *SPT-CL J2325-4111 (AS1121)*

星系团 SPT-CL J2325-4111（$z = 0.36$，又名 Abell S1121）最早由 G. Mahler 等人 (2025年基于哈勃空间望远镜（GO-15937）观测开展研究并建立强引力透镜模型。他们结合 GMOS 和 FIRE 光谱学，探测到 6 个系统，并纳入了 M. B. Bayliss 等人 (2016) 的早期探测结果。这些多重像系统中的两个（系统 1 和 2）是一个 $z = 1.579$、$18''$ 长巨弧上的结。该弧上还可辨认出许多其他结，对其进行监测或能发现宇宙学暂现事件，例如 Abell 370 的龙弧中发生的事件（见第4.2.14节）。由于该星团场缺乏积分视场光谱学观测，我们的研究新增了 24 个系统，但均未进行光谱探测。其中，两个系统（13 和 33-34）似乎是多重透镜成像的低红移尘埃星系，后者还伴有一颗蓝色伴星。我们注意到，一个 $z_{\rm phot} = 0.18$ 前景旋涡星系可能会为星团场增加引力透镜偏折。此外，该星系团似乎延伸到了近红外相机主模块之外，西侧至少还有一个最亮星系团星系（由 HST/ACS 观测到，红移尚未确认），那里也可能存在多重透镜像。这个引人注目的星系团似乎整体呈现弛豫几何结构，尽管以一个暗物质晕为中心的模型得到了良好的 $0.77''\Delta_{\rm RMS}$，最终的 AstroLensPy 模型则保留了两个质心不受约束的暗物质晕，得到了一个 $\Delta_{\rm RMS} = 0.65''$。

## 5. 讨论

### 5.1. 基于累积结果的统计推断

#### 5.1.1. *Uncertainties*

除了为每个星系团提供透镜模型，以便研究各个星系团及其被放大的背景外，编制这一引力透镜目录的一个关键动机，是对整个 VENUS星系团样本开展统计研究。此类分析需要评估推导出的引力透镜观测量（表 2）所关联的不确定性，这对于理解星系团之间变化的显著性以及本文探讨的标度关系中的散布至关重要。由于建模者和软件造成的系统偏差比统计误差高出一个数量级，我们将每项观测量的总不确定性视为仅由系统误差构成，并保守地假定爱因斯坦半径的不确定性为 10 %（$\theta_E$），爱因斯坦面积内包围质量的不确定性为 15 %（$M_{\rm 2D}(\in \mathcal{A})$），超过某一阈值的放大面积的不确定性为 20%（$\mathcal{A}(|\mu| \geq \mu_T)$），而积分圆柱质量的不确定性为 30%（$M_{\rm 2D}(< 200$千秒差距），依据以往研究（A. Zitrin 等，2015）。配套论文 M. Oguri 等 (2026年) 使用独立的 `glafic` 代码对这些星系团进行了类似建模。全面比较两项研究的结果，有助于量化这种跨管线系统误差；这将留待未来工作。下文将探讨 VENUS 样本中各项引力透镜观测量之间的经验相关性。与其他强引力透镜样本一样，我们注意到该样本受到其选择函数的偏倚（见第 2.1节）。

#### 5.1.2. 多重成像系统分布

鉴于人们长期以来一直关注由引力透镜探测到的源的红移分布（例如，参见M. B. Bayliss等（2011）；M. B. Bayliss（2012）；J. Richard等（2021）），我们在图2 左侧面板中展示了所有多重像系统按红移分布的情况，包括已进行和未进行光谱鉴定的系统。本文汇集了迄今规模最大的多重引力透镜源样本，因此，该图为此类源在典型的詹姆斯·韦布空间望远镜和哈勃空间望远镜观测中的情况提供了代表性视图。我们通过拟合对数正态似然函数，对57个星系团预期的红移分布进行了有效估计；拟合采用泊松-Cash最大似然估计：

$$N_{\rm Sys}(z) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}z}\exp\left[-\frac{(\ln z - M)^2}{2\sigma^2}\right], \qquad (9)$$

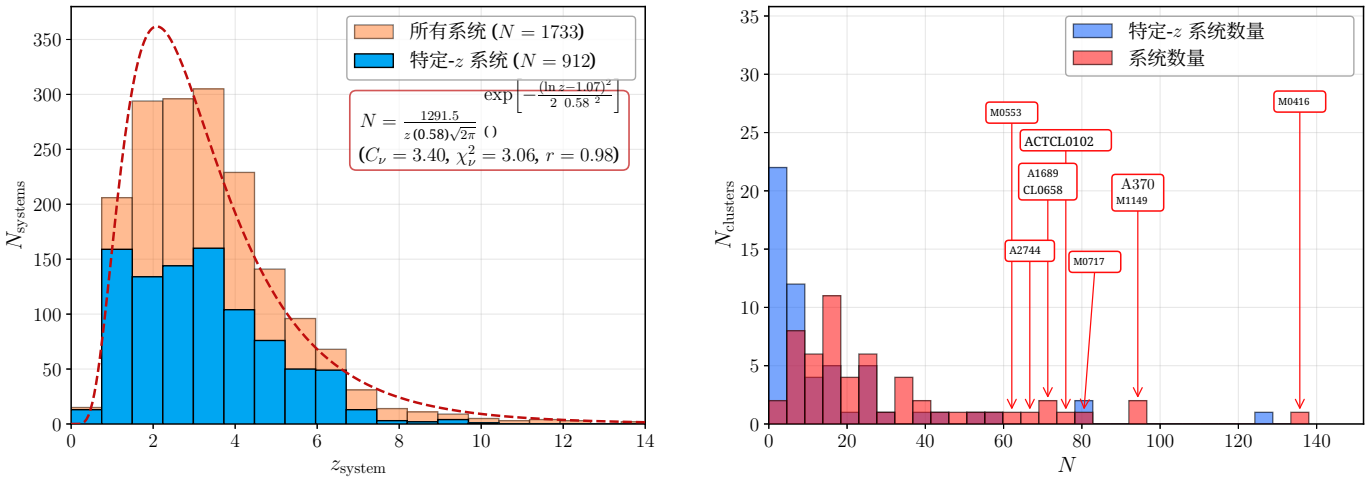



**图2。** *Left*：本研究所使用的多重成像星系的红移分布，包括光谱红移测量（蓝色）和所有系统（橙色）。后者的分布采用对数正态分布拟合，图中标出了最佳拟合公式。 *Right*：每个星系团的多重像系统总数以及光谱确认的多重像系统数量直方图。我们列出了所有已知多重像系统超过60个的星系团名称。除M0717外，最著名的HFF、UNCOVER、CANUCS和GLIMPSE目标，以及El Gordo和子弹星系团，其已确认的光谱-$z$ 多重像系统数量明显高于样本中的其他星系团。

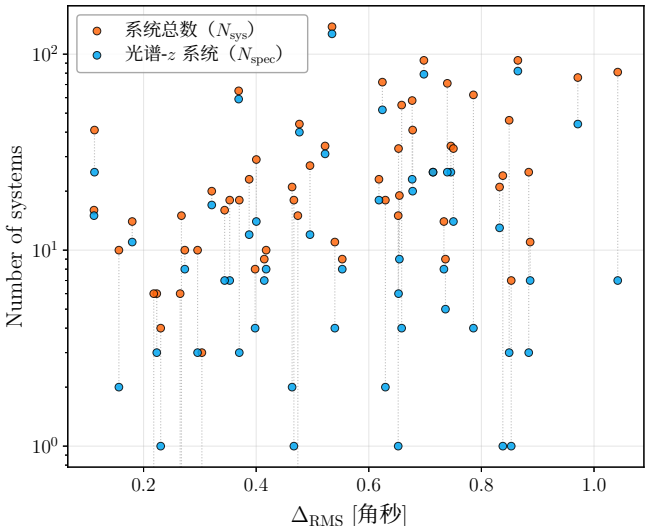



**图3。** $\Delta_{\rm RMS}$ 与系统数量（橙色为总计，蓝色为光谱确认的系统）的关系。随着系统数量增加或减少， $\Delta_{\rm RMS}$ 并未呈现出明显趋势，因为更多约束条件也能捕捉星系团中引力透镜的物理细节。

其中 $A = 1291.5 \pm 31.0$、 $\sigma = 0.58 \pm 0.01$ 和 $M = 1.07 \pm 0.01$，Cash统计量约化为 $C_\nu = 3.4$，拟合优度约化为 $\chi^2_\nu = 3.1$ ，皮尔逊相关系数为$r = 0.98$。需要指出的是，这是一个有效拟合，代表特定观测深度（此处为28 AB星等制星等）下的星系团强引力透镜样本。尽管如此，在此类情况下，它仍可为未来巡天提供一个先验粗略估计（*a priori*）。

图 2，右侧面板展示了各星系团中多重像系统（包括总数和已通过光谱确认的数量）的分布。

全部 1733 个多重像系统中，共有 53% 获得了光谱确认，不同目标星系团之间差异很大。一些值得关注的星系团脱颖而出，例如 M0553、R0600 和 M0717，它们是后续光谱观测的优先目标，例如使用 NIRSpec 或 NIRISS 进行观测。超过 20 个星系团拥有 $\leq 5$ 个经光谱确认的系统，这也表明，为了给大量星系团的透镜模型提供依据，仍有必要开展更多光谱观测和研究。

图 3 展示了我们针对全部 57 个星系团所建立模型的最终图像重现 $\Delta_{\rm RMS}$结果，并按照多重成像系统的数量（包括光谱系统$z$ 和总计）进行分布。我们得到的平均值 $\Delta_{\rm RMS}$ 为 0.54″，标准差为 0.24″，中位数为 0.54″。我们注意到，较多的光谱系统通常应能产生质量更高的模型；然而，这并不一定会体现在 $\Delta_{\rm RMS}$上。事实上，更多的多重像系统约束可能反映出底层质量分布的复杂性（例如子结构、多平面引力透镜等）。即使额外约束能够带来更准确且更具物理代表性的模型，这些复杂特性也可能增加像平面 $\Delta_{\rm RMS}$ 。相反，较低程度的约束（$\lesssim 5$ 多重像系统）有时会产生极低的 $\Delta_{\rm RMS}$，原因有时在于过拟合。

### 5.1.3. 标度关系：透镜和星系团内介质

图4 展示了各种透镜观测量与星系团内介质推断质量之间的有效标度关系$M_{500,\ c}$。具体而言，面板 (i) 展示了红移为 $z_s = 10$ 时的放大面积 $\mathcal{A}_{z_s=10}(|\mu| \geq \mu_T)$ 与高于不同 $\mu_T$ 阈值的可观测量之间的相关性，以及

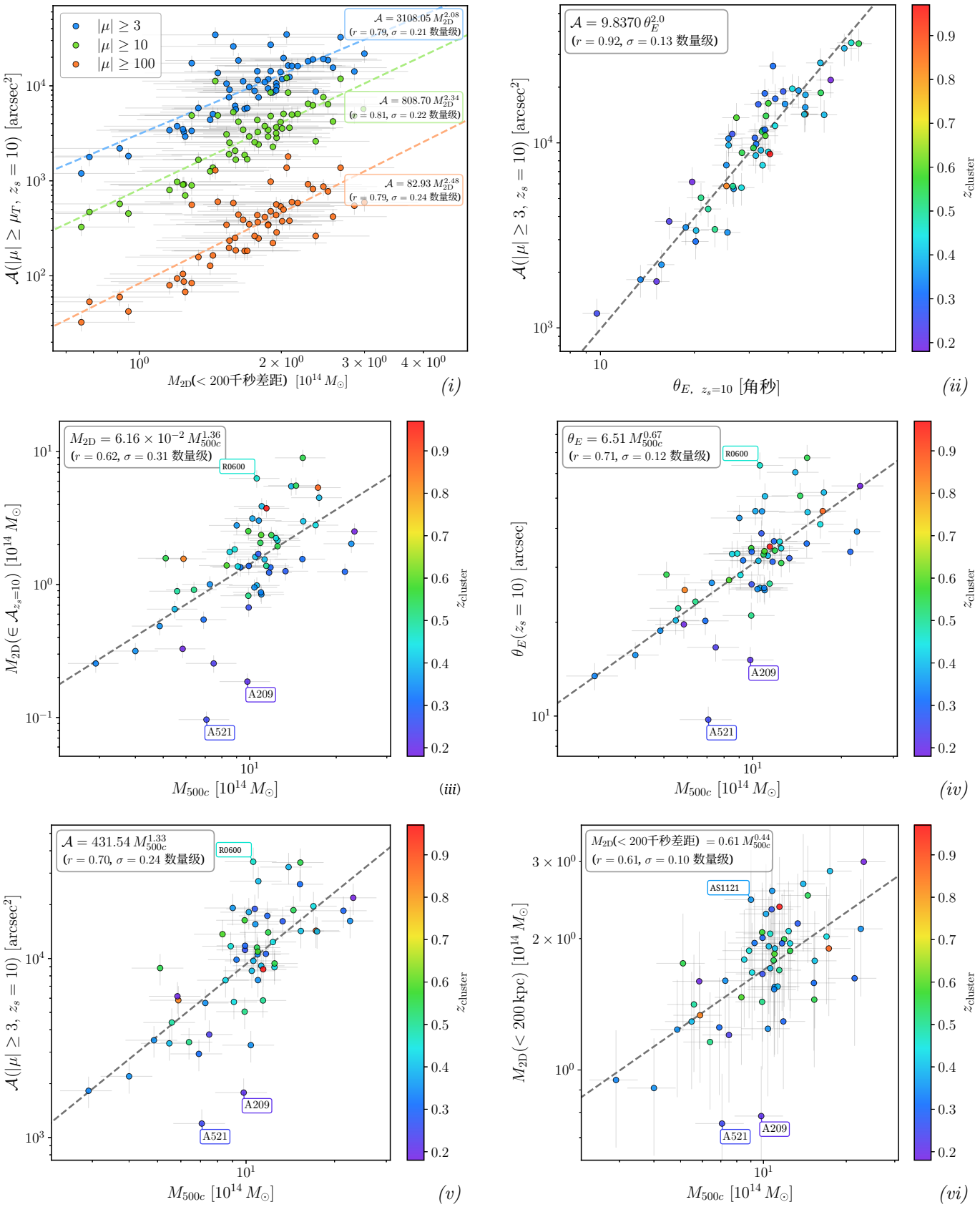



**图4. 标度关系：** （i）超过放大率阈值的放大面积 $\mu_T$ 与 $M$（< 200千秒差距）。 （ii）对于位于 $\mathcal{A}_{z_s=10}$（$|\mu| \geq 3$）处的源，超过阈值的放大面积 $z_s = 10$与爱因斯坦半径的关系。 （iii）爱因斯坦半径内包含的质量与 $M_{500,\ c}$的关系。 （iv）爱因斯坦半径与 $M_{500,\ c}$的关系。 （v）放大面积 $|\mu| \geq 3$ 在 $z_s = 10$ 处与 $M_{500,\ c}$的关系。 （vi）200千秒差距内的圆柱质量与 $M_{500,\ c}$的关系。对于面板（iii）—（vi），我们注意到存在异常值，其中最显著的是星系团 A521，其引力透镜约束仅适用于星系团核，因此得到的引力透镜统计量非常小（见第 4.2.27节）。

200 千秒差距范围内的二维质量：

$$\begin{aligned}\mathcal{A}^{|\mu|\geq 3}_{z_s=10} &= 3108 \times M^{2.08}_{\mathrm{2D},<200\,\mathrm{kpc}}\ (r=0.79;\sigma=0.21\ \mathrm{dex}),\\ \mathcal{A}^{|\mu|\geq 10}_{z_s=10} &= 809 \times M^{2.34}_{\mathrm{2D},<200\,\mathrm{kpc}}\ (r=0.81;\sigma=0.22\ \mathrm{dex}),\\ \mathcal{A}^{|\mu|\geq 100}_{z_s=10} &= 82.9 \times M^{2.48}_{\mathrm{2D},<200\,\mathrm{kpc}}\ (r=0.79;\sigma=0.24\ \mathrm{dex}),\end{aligned} \tag{10}$$

其中 $r$ 是皮尔逊相关系数， $\sigma$ 是散布，面积单位为角秒$^2$ ，质量单位为$10^{14}M_\odot$。已知测量$M_{\mathrm{2D}}(<$ 200（千秒差距）时的偏差，即以最亮星系团星系为中心进行测量，两个观测量之间的强相关性十分显著。特别是，随着放大率阈值增大，斜率也随之增大，这表明高放大率区域对质量集中区格外敏感。 C. Fox 等人(2022年) 对 HFF、RELICS 和 SGAS 星系团的透镜模型也得出了相同的定性结论：投影核心质量是 $|\mu|\geq 3$ 面积的良好预测指标。

图4 的面板（ii）展示了放大面积 $\mathcal{A}_{z_s}(|\mu|\geq 3)$ 与爱因斯坦半径之间的相关性，其中 $z_s\in\{2,5,10\}$ 。我们首先在双对数平面中对这一关系进行线性拟合，从而得到一个总体估计：

$$\begin{aligned}\mathcal{A}^{|\mu|\geq 3}_{z_s=2} &= 49.6 \times \theta^{1.57}_{E,z_s=2}\ (r=0.81;\sigma=0.20\ \mathrm{dex}),\\ \mathcal{A}^{|\mu|\geq 3}_{z_s=5} &= 18.3 \times \theta^{1.83}_{E,z_s=5}\ (r=0.91;\sigma=0.14\ \mathrm{dex}),\\ \mathcal{A}^{|\mu|\geq 3}_{z_s=10} &= 17.4 \times \theta^{1.83}_{E,z_s=10}\ (r=0.92;\sigma=0.13\ \mathrm{dex}),\end{aligned} \tag{11}$$

其中面积单位为角秒$^2$ ，爱因斯坦半径单位也为角秒。较高的源红移对应于更优的拟合质量，以及更接近 2 的幂指数，这与 C. Fox 等人 (2022年) 的研究结果一致。该平方幂律对应于放大面积与有效爱因斯坦面积之间的相关性，与 J. Vega-Ferrero 等人 (2019年) 针对 HFF 星系团提出的预期关系一致；并且似乎与 C. Cerny 等人(2026年) 图 7 所展示的趋势相吻合。事实上，假设透镜势剖面具有同源性，则星团场中的放大面积（$\mathcal{A}_{z_s}(|\mu|)$）与爱因斯坦临界面积具有自相似性。鉴于这种自然相关性，我们还拟合了相同的关系，同时将爱因斯坦半径幂指数保持为常数，并得到以下结果（见图 4 的面板 (ii)）：

$$\begin{aligned}\mathcal{A}^{|\mu|\geq 3}_{z_s=2} &= 13.0 \times \theta^{2}_{E,z_s=2}\ (r=0.81;\sigma=0.21\ \mathrm{dex}),\\ \mathcal{A}^{|\mu|\geq 3}_{z_s=5} &= 10.5 \times \theta^{2}_{E,z_s=5}\ (r=0.91;\sigma=0.14\ \mathrm{dex}),\\ \mathcal{A}^{|\mu|\geq 3}_{z_s=10} &= 9.8 \times \theta^{2}_{E,z_s=10}\ (r=0.92;\sigma=0.13\ \mathrm{dex}),\end{aligned} \tag{12}$$

这不会降低拟合质量或增加散布，同时具有充分的物理依据，从而证实了上述模式。

图4的面板（iii）展示了透镜平面内、在 $z_s=10$ ( $M_{\mathrm{2D}}(\in\mathcal{A}_{z_s=10})$) 处爱因斯坦半径所包围的二维质量与星系团内介质推断质量 $M_{500,\ c}$ 之间的一般关系，而面板（iv）展示了爱因斯坦半径本身与 $M_{500,\ c}$ 之间的关系。我们注意到，按照定义，这两种关系并非相互独立。我们在双对数平面中对这些关系进行线性拟合，得到了一般估计式：

$$\begin{aligned}M_{\mathrm{2D}}(\in\mathcal{A}_{z_s=2}) &= 4.4\times10^{-2}M^{1.31}_{500,c}\\ &\quad (r=0.62;\sigma=0.30\ \mathrm{dex}),\\ M_{\mathrm{2D}}(\in\mathcal{A}_{z_s=5}) &= 5.6\times10^{-2}M^{1.36}_{500,c}\\ &\quad (r=0.63;\sigma=0.30\ \mathrm{dex}),\\ M_{\mathrm{2D}}(\in\mathcal{A}_{z_s=10}) &= 6.2\times10^{-2}M^{1.36}_{500,c}\\ &\quad (r=0.62;\sigma=0.31\ \mathrm{dex}),\\ \theta_{E,z_s=2} &= 5.0\times M^{0.65}_{500,c}\ (r=0.65;\sigma=0.14\ \mathrm{dex}),\\ \theta_{E,z_s=5} &= 6.1\times M^{0.68}_{500,c}\ (r=0.71;\sigma=0.12\ \mathrm{dex}),\\ \theta_{E,z_s=10} &= 6.5\times M^{0.67}_{500,c}\ (r=0.71;\sigma=0.12\ \mathrm{dex}),\end{aligned} \tag{13}$$

其中，质量的单位为 $10^{14}M_\odot$ ，爱因斯坦半径的单位为弧秒。两种关系中相对较大的散布表明，$M_{500,\ c}$ 对强引力透镜区域的预测并不完美。鉴于 $M_{500,\ c}$ 是对质量的三维测量，涵盖了星系团的总质量，而爱因斯坦半径本质上是引力透镜效应相关的、因而也是一种投影观测量，探测的是星系团最致密的中心区域，因此这一结果并不意外。此外，$M_{500,\ c}$ 由星系团内介质测量得到，因此对重子过程敏感，进一步增大了可能的散布。这些结果与先前的研究一致，均显示出爱因斯坦半径—星系团质量关系存在显著散布（例如 M. Killedar 等（2018））。我们注意到，利用我们的透镜模型对星系团动力学状态进行快速检查，并未显示出明显趋势，不过，更深入的分析将留待未来研究。尽管存在显著散布，这类关系仍可用于估计内部引力透镜区域相对于星系团内介质推断 $M_{500,\ c}$ 的范围和质量，例如在根据星系团内介质推断数据设计强引力透镜巡天时。然而，这类关系应谨慎使用。事实上，VENUS 星系团是根据较大的放大面积选取的，因此该样本偏向于引力透镜效率较高的星系团。

同样，对于图4中的图版（v），我们展示了放大面积超过某一

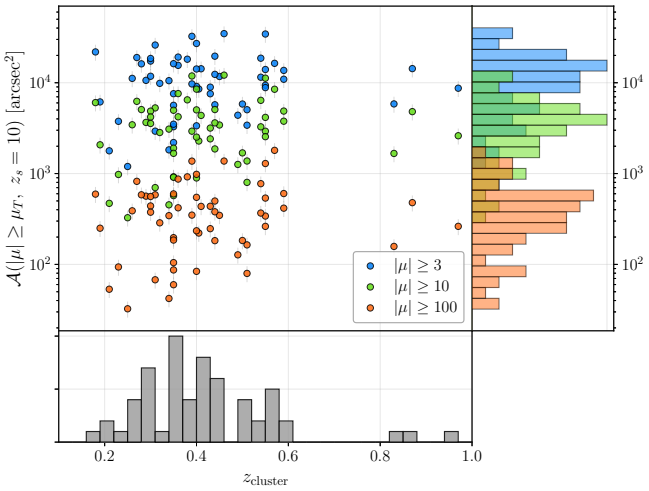



**图5。** 在 $z_s = 10$ 高于放大率阈值 $\mu_T \in \{3, 10, 100\}$ 时的放大面积与星系团红移的关系。

阈值（$\mathcal{A}_{z_s}^{|\mu|\geq\mu_T}$）时与$M_{500,\ c}$之间的关系，拟合为：

$$\begin{aligned}
\mathcal{A}_{z_s=2}^{|\mu|\geq3} &= 278 \times M_{500,c}^{1.38}\ (r = 0.70; \sigma = 0.25\ \text{dex}),\\
\mathcal{A}_{z_s=5}^{|\mu|\geq3} &= 389 \times M_{500,c}^{1.35}\ (r = 0.71; \sigma = 0.24\ \text{dex}),\\
\mathcal{A}_{z_s=10}^{|\mu|\geq3} &= 432 \times M_{500,c}^{1.33}\ (r = 0.70; \sigma = 0.24\ \text{dex}),
\end{aligned} \tag{14}$$

其中面积单位为角秒$^2$，质量单位为 $10^{14} M_\odot$。与公式13具有相当的散布，该关系定量评估了透镜效率随总质量的变化，与先前研究（T. L. Johnson 等人 2014；C. Fox等，2022）一致。尽管这里发现的相关性仍呈现出显著散布，但皮尔逊系数（$r \simeq 0.70$）显示出比C. Fox 等人（2022年）[53]中发现的相关性强得多。

图4 中的面板（vi）显示了半径为 200 千秒差距（$M_{\rm 2D}$（$< 200$千秒差距））内的圆柱质量随$M_{500,\ c}$的变化，并拟合为：

$$\begin{aligned}
M_{\rm 2D}(< 200\,\text{kpc}) = 0.61 \times M_{500,c}^{0.44}\\
(r = 0.61; \sigma = 0.10\ \text{dex}),
\end{aligned} \tag{15}$$

其中质量的单位为 $10^{14} M_\odot$。这一相关性有限的关系可作为定性指标，用于衡量固定$M_{500,\ c}$下中心质量集中度的变化。位于这条最佳拟合关系线上方（下方）的星系团，其投影中心质量高于（低于）通常预期。不过，鉴于透镜样本的偏差以及 $M_{\rm 2D}(<$ 200千秒差距)的注意事项，对此类解释必须持谨慎态度

[53] 然而，我们注意到，如果使用 $\mathcal{A}_{0.5}^{|\mu|\geq3}$，$z_s$ C. Fox 等人所采用的可观测量(2022年，公式 2)进行拟合，所得回归的相关性（$r < 0.63$）远低于公式14。

测量。例如，这些星系团呈长椭球形，且可能与视线方向对齐。尽管文献中尚未发现等效关系，M. Bonamigo 等人（2018）；G. B. Caminha 等人（2019年）给出了 $M_{\rm 2D}(< 0.1 R_{200,\ c})/M_{200,\ c} \simeq 0.13$之间的关系，散布相对较小（分别针对 3 个和 8 个星系团为 $\simeq$ 5%），即低于本文所得结果，尽管采用的可观测量不同。

### 5.1.4. *Cosmic evolution*

图5 展示了不同阈值$z_s = 10$、 $\mathcal{A}_{z_s=10}(|\mu| \geq \mu_T)$以上的放大面积分布 $\mu_T$与星系团红移的关系。我们未发现任何红移演化，这与例如C. Fox 等人(2022年）图 1 中的结果一致。这与对高$z$ 红移星系团的预期相矛盾：它们更年轻，平均质量预计也更低，因此作为引力透镜的效率也较低。尽管如此，由于星系团数量有限，VENUS 样本无法得出任何具有统计显著性的结论；此外，样本选择偏差也偏向引力透镜效应最强的星系团。未来对更高红移星系团引力透镜进行的巡天，或许能更有效地探测这种红移演化。

图 6 的面板 (i) 比较了不同 $z_s = 10$爱因斯坦半径，$\theta_{E,\ z_s=10}$对应于不同的纳瓦罗–弗伦克–怀特（NFW，J. F. Navarro 等，1996）球形晕$M_{500,\ c}$ 质量（根据A. R. Duffy 等，2008给出的质量-浓度关系进行缩放）。这里预测的典型爱因斯坦半径并非用于约束 $\Lambda$CDM 宇宙学，而是用于考察哪些星系团相对于其质量而言具有异常高的引力透镜效率，例如 A1689、PLCKG287、R0600 或 M0717。总体而言，VENUS 星系团中的绝大多数都超过了预期的透镜效率（基于NFW晕预测），鉴于样本选择偏向于强透镜、透镜的椭圆率、可能的并合态以及视线方向对齐，这并不令人意外。这些效应共同使我们的星系团样本具有更高的透镜效率（M. Meneghetti 等，2007）。这一结果与观测到的爱因斯坦半径明显大于根据 SZ推断质量所预测的结果一致（M. B. Gralla 等，2011年）。

图 6(ii) 面板显示了 以下对象的爱因斯坦半径：$z_s \in [1, 20]$，所有 DR1 VENUS 透镜模型。其中，$\theta_{E\text{最大的}z_s=1} = 44.6 \pm 4.5''$ 是A1689（洋红色曲线），而 $\theta_E$ 最高的 $z_s > 3$对应的是 M0717（绿色曲线）。ΛCDM 的 95% 排除限值是依据M. Oguri 与 R. D. Blandford (2009的方法计算得出的，并根据最新的 ACT DR6 宇宙学参数进行了调整，参见 T. Louis 等，2025），从而可以与我们的配套论文M. Oguri 等 (2026年)进行比较。我们计算出的所有爱因斯坦半径

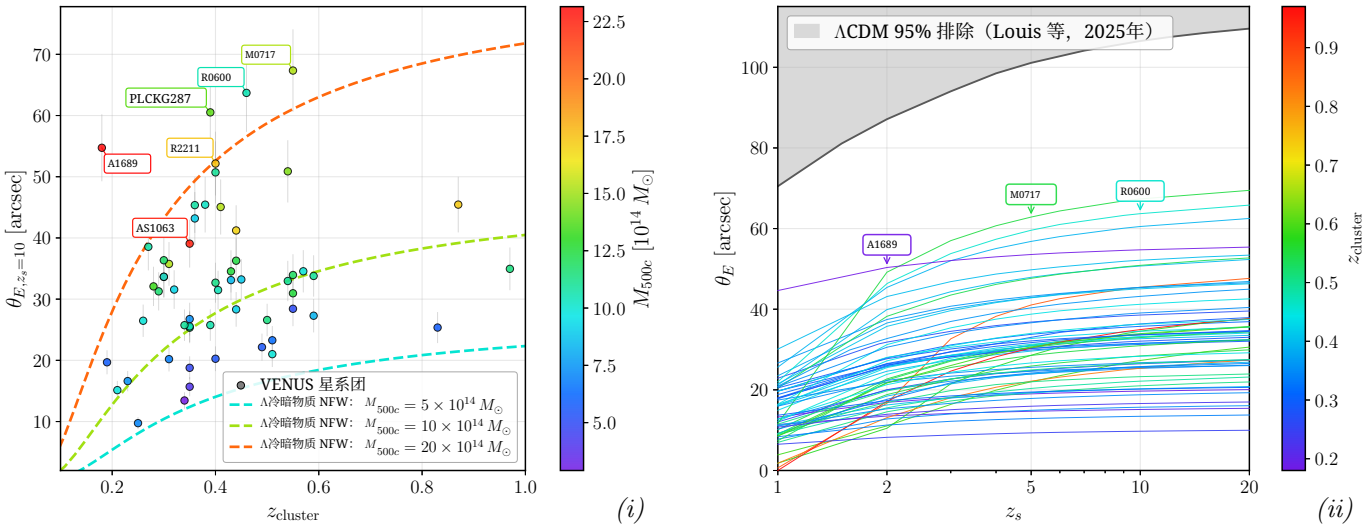



**图6**。（i）源为 $z_s = 10$ 时，星系团爱因斯坦半径与$M_{500,\ c}$的星系团红移关系；标记颜色表示$\theta_{E,\ z_s=10}$（$z_{\rm cluster}$）的预期演化。该演化基于不同J. F. Navarro 等，1996的 NFW 球对称势，取不同$M_{500,\ c}$ 值（使用A. R. Duffy 等，2008给出的质量-浓度关系进行缩放）。(ii) 所有57个已建模 VENUS 星系团的爱因斯坦半径随源红移的演化。 ΛCDM 极限采用M. Oguri & R. D. Blandford （2009）计算，宇宙学参数取自T. Louis 等（2025年）。

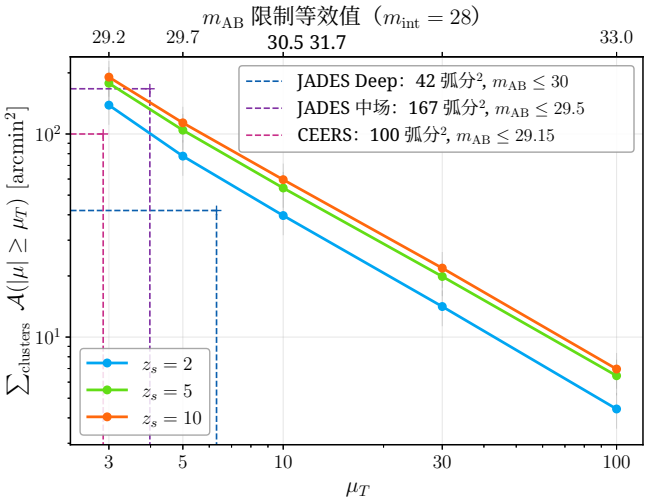



**图7**。不同源红移下，高于给定阈值 $\mu_T$ 的累积总放大面积，并与 JADES 和 CEERS 空白场进行对比。顶部 $x$轴给出了放大率对应的星等。

都远在 ΛCDM 预测的排除限值范围内，因此并不与标准宇宙学范式相矛盾。

#### 5.1.5. *Survey breadth and depth*

最后，图7 展示了本次 DR1 中全部 57 个 VENUS 星系团在不同放大率阈值以上的总像平面放大面积。 $\mu_T = 1$ 对应的放大率代表 VENUS 28 AB 星等的名义下限 $5\sigma$ 。例如，$\sum_{\text{星系团}} \mathcal{A}_{z_s=10}(|\mu| \geq 3) = 190.6$角分$^2$，以及 $\mathcal{A}_{z_s=10}(|\mu| \geq 10) = 59.6$角分$^2$，，对应的 AB 深度分别为 29.2 和 30.5。在空白场的背景下，这些数值分别超过了 CEERS 的面积（∼100角分$^2$，，S. L. Finkelstein 等，2025年）和 JADES Deep 的面积（42 角分$^2$,$m_{\rm AB} \lesssim 30$，D. J. Eisenstein 等，2026年；B. D. Johnson 等，2026年）。至于 JADES 中场，其探测面积（167 角分$^2$）与等效深度下 VENUS 的像平面面积相当（$m_{\rm AB} \leq 29.5$）。

### 5.2. 观测机会

对于特定的科学目标而言，单独依据爱因斯坦半径或放大面积，都无法对星系团进行完美排序。强引力透镜星系团的价值在于引力透镜面积与高放大倍数的结合，以及由更多光谱确认系统带来的模型精度，还有辅助数据的可用性。我们着重介绍模型判定为 VENUS 主要科学案例最有希望的目标星系团，不过更全面的排序将留待 Furtak等（准备中）完成。

*Dark-matter assembly and constraints.*—分离性并合中，碰撞性的星系团内介质在空间上与无碰撞星系和暗物质分离，为暗物质物理提供了理想的实验室，可利用引力透镜质量与X射线探测峰值之间的偏移。虽然CL0658（子弹星系团）是研究自相互作用约束的自然目标（D. Cloweetal.2006），但星系团AS295、ACTCL0102、M0025、A3192、ACTCL0152和SPTCL0615展现了不同并合阶段和红移下的多种并合

构型。尽管其中一些星系团的“子弹性”尚未通过X射线得到证实，但大规模强引力透镜巡天能够对“子弹星系团式”星系团开展更深入的研究，从而限制三维并合几何、碰撞速度和并合态等退化因素。虽然詹姆斯·韦布空间望远镜已经通过CANUCS巡天建立了详细的子弹星系团强引力透镜模型（G. Rihtarˇsiˇc et al. 2026年），VENUS将这类约束扩展到一类相似的星系团。

*Interplay with the intracluster medium.*—将引力透镜质量图与X射线、SZE和射电数据联合研究，是理解“子弹星系团式”星系团的必要步骤；更广泛地说，这也有助于探测星系团内介质相对于暗物质的动力学状态，从而检验流体静力学质量偏差（D. Nagai et al. 2007；E. Ra-sia et al.2012）。反过来，将星系团内介质研究与强引力透镜结合，可以更好地分离各个组分（恒星、星系团内介质和暗物质），并更好地理解星系团中心区域的势（B. Beauchesneet al. 2024）以及外围区域的势（J. F.V. Allingham et al. 2024）。整个VENUS样本都适合进行此类系统比较，因为其中包含处于各种并合状态的目标，例如R1347，其中包含已知X射线光度最高的星系团（M. Gitti et al.2007，VENUS尚未对其进行观测），以及M1931最亮星系团星系极端的活动星系核反馈（S. Ehlertetal. 2011），后者导致了冷核的破坏。VENUS数据集可以按照并合状态进行划分，并对每一类（动力学弛豫、小规模或大规模并合、子弹星系团式）的星系团内介质和强引力透镜性质（质心偏移、推断质量等）进行系统比较。此外，这还将进一步深化我们对引力透镜推断的可观测量与星系团内介质推断的$M_{500,\ c}$（图4 中的（iii）—（vi）面板）的比较。一个探测星系团内介质并提供相关可观测量的X射线巡天（$M_{500,\ c}$、星系团内介质温度、动力学状态等）可以是*XMM*-牛顿巡天 CHEX-MATE合作组 et al.（2021年），其与VENUS在24个星系团上存在重叠。在此基础上进一步加入弱引力透镜、星系团内光和恒星动力学，将构成对任何星系团样本最深入的多探针理解，并提升透镜质量图在子晕尺度上的精度。

*Multiply-lensed little red dots.*—在 VENUS 之前，人们只知道一个由多个透镜成像的低红移尘埃星系系统（L. J. Fur-taketal.2023b）。这项巡天揭示了此类源正在不断增多，其中包括带有蓝色伴星的双像 A383-LRD1（$z = 6.03$，M. Golubchik et al. 2026年；J. F. W. Baggen et al. 2026年b）、R2211 后方的两个爱因斯坦十字 LRD 候选体（$z_{\rm phot} \simeq 4.3$，Z.Zhang et al. 2025a），以及由 PLCKG004 透镜放大的近距离“Red Eyes”双体（$z = 7.49$，H. Yanagisawa et al. 2026年）。这些强引力透镜放大的 LRD 发现，使人们能够精确重建源属性，例如内禀光度、LRD 与其蓝色伴星之间的距离，并计算时间延迟预测值（R2211 系统的预测时间延迟最高可达 $\sim 130$ 年）。这类时间延迟为研究 LRD 变异性提供了独特机会，有助于深入了解其中心引擎的性质及其发射区的结构。进一步完善 VENUS 透镜模型，并结合 VENUS 第五周期和其他光谱后续观测（例如GO-10075），将有助于更好地约束它们的内禀属性。

*Giant arcs and caustic-crossing events.*—具有极高放大率的巨弧是观测单颗恒星宇宙学暂现事件（CCE）的理想场所（P. L.Kelly et al.2018b；B. Welchet al.2022b；A.K. Meenaetal. 2023）。这类事件的发生及其属性由多种因素共同决定，包括延展透镜源与临界曲线之间的偶然对齐，以及透镜星系团的属性（集中度、椭率、视线方向对齐）；子结构和并合则会带来更高的放大率。A370中的龙弧已产生逾百例此类事件（S. K. Li et al. 2024；Y. Fudamoto et al.2025；J. M. Palencia et al.2026），这些事件也能约束暗物质模型（T. Broadhurst et al. 2025；J. M. Palenciaet al. 2026）。结合SLICE与VENUS成像，研究人员在Snake弧中探测到透镜放大的恒星M1206-LS1（位于M1206中），其亮度比A370中探测到的恒星高 $\geq 1$星等（相关论文正在准备中）。更多巨弧，例如长达 18″的AS1121弧，位于 $z = 1.579$（G.Mahleret al. 2025），以及位于A2813、A383、M0553和PLCKG165等星系团中的更多弧，都提供了这类宇宙学暂现事件的观测机会，并可在未来观测时期持续监测。

*First stars and first galaxies.*—借助强引力透镜，高放大率区域揭示了原本无法观测到的最遥远、贫金属恒星族群。M1931呈现了SN Eos这一实例：它是一颗位于 $z = 5.13$ 的贫金属IIP型超新星，综合放大率为 $\mu \simeq 55$，发生在一个暗弱星系中（D. A. Coulter等（2026）；Y. Asada等（2026））。此外，Misty Moons是位于M0257背景、红移为 $z_{\rm phot} \sim 11$–12的多重透镜放大的可分辨星系（M. Nakane等（2026））；VCQG-1则是一个位于 $z_{\rm phot} \sim 5.18$的多重透镜放大的大质量淬火星系。这两者均由VENUS发现（R. Pan等（2026））。VENUS还对其他强透镜星系进行了再次观测，分别包括星系团CL0658、M1423、M0308和SPTCL0615中的子弹弧——宇宙黎明时期的一个高放大率星系（$z \sim 11.1$；M. Bradaˇc等（2025年））；Firefly Sparkle——一个处于早期组装阶段的旋涡星系

（$z \sim 8.3$；L. Mowla等（2024年））；宇宙之矛——一个多重成像星系（$z \sim 6$；Y. Fudamoto等（2024年））；以及Cosmic Gems——年轻星团（$z \sim 10$；B. Salmon等（2018）；A. Adamo等（2024年））。目前已知贫金属程度最高的两个星系——高放大率的LAP 1（E. Vanzella等（2023b））和AMORE-6（T. Morishita等（2025年））——也属于VENUS样本，分别受到M0416和A2744的引力透镜作用。这些探测有助于研究早期结构形成和星际介质；更新后的透镜模型如今能以前所未有的精度，约束本征光度测量中的误差。在高源红移下拥有最大放大面积的星系团（$\mathcal{A}^{|\mu|\geq 10}_{z_s=10}$，其探测高红移天体的概率也更高），例如R0600（3.4平方角分$^2$）、PLCKG287（3.3平方角分$^2$）、M0717（3.1平方角分$^2$）、R0032（2.4平方角分$^2$）和W0137（2.4平方角分$^2$），是探测此类高放大率源的最佳目标，其红移为 $z \gtrsim 10$。

*The faint end of the UV luminosity function.*—对于紫外光度函数统计，采用相同的评估指标，即放大面积，但阈值较低（$\mu_T = 3$），此外还需要可靠的放大率图（例如H. Atek等 2025年），并以大量光谱鉴定的多重像系统为依据。A2744、ACTCL0102、A370、M0416、CL0658、M1149、M1206、AS1063将 $\gtrsim 30$ 光谱系统与放大面积结合，后者为 $\mathcal{A}_{z_s=10}(|\mu| \geq 3) \geq 2.5$平方角分$^2$，，因此是可靠的候选者。我们注意到，由于缺乏光谱鉴定，透镜面积最大的四个星系团——R0600、M0717、PLCKG287和R0032——尽管其放大面积达到 $\mathcal{A}_{z_s=10}(|\mu| \geq 3)$ $\geq$7.5 平方角分$^2$，，仍被排除在这一筛选标准之外，因此是后续开展 MUSE、KCWI、NIRSpec 或其他光谱观测的优先目标。引力透镜超新星将探测范围扩展至远低于空场极限的暂现源宿主星系，其中 SN Eos 的宿主位于 $M_{\rm UV} = -14.4$ （Y. Asada等 2026年），SN Helios 的宿主位于 $M_{\rm UV} \gtrsim -13$ （S. Fujimoto等 2026年）。

*Time-delay cosmography.*—VENUS已发现多个多重成像超新星（Ares、Eos、Athena、Ata- lanta、Helios、Hydra、Typhon），它们再次出现（例如M0417中的SN Athena，预计于2027年初出现；Pascale等，准备中）不仅将进一步检验透镜模型，还有助于约束宇宙学（例如J. D. R. Pierel等（2026））。对预测的再次出现进行高频率监测将减小时间延迟测量的不确定性，而时间延迟宇宙学的主要系统误差来源是透镜模型误差。只有结合采用不同软件和先验的多种透镜模型，并以大量经光谱确认的多重像系统为锚点，才可能降低模型系统误差。这项工作与我们的配套论文M. Oguri等（2026年）以及即将开展的第 5 周期后续观测相结合，为推进精确的星系团时间延迟宇宙学提供了足够深度的样本和多样化的模型。反过来，时间延迟测量本身也能为透镜模型提供重要约束，因此，在同一个星系团中发现多个多重透镜超新星（例如PLCKG165）构成了难得的宇宙学研究机会。

## 6. 总结

我们为截至目前观测到的57个 VENUS 星系团分别建立了透镜模型，这些观测属于 JWST第4周期（待所有观测完成后将更新为60个星系团），由此构建了迄今规模最大的均一星系团透镜模型观测样本，并获得了詹姆斯·韦布空间望远镜时代最先进的强透镜约束。本工作与我们的配套论文M. Oguriet al.(2026年）同时开展；该论文将有助于推导稳健的系统误差，而系统误差在透镜模型的误差预算中占主导地位。本文主要结果总结如下：

- 结合 VENUS 巡天新获取的 JWST/NIRCam 观测数据、巡天期间获批的与 VENUS 相关的 DDT观测、此前巡天获取的辅助哈勃空间望远镜和 JWST 成像数据，以及来自 MUSE、NIRSpec、NIRISS 和其他天文台的光谱数据，我们共汇编了**1733个多重透镜系统，涵盖5013个透镜成像**，其中包括**227个新发现的系统**以及**总计912个经光谱确认的系统**，分布于**57个强引力透镜星系团**中。

- 利用这些丰富的约束条件，我们使用 AstroLensPy 软件构建了星系团透镜模型，从而得出观测结果与模型之间的平均值$0.54''$ $\Delta_{\rm RMS}$，体现了重建的质量。VENUS DR1 将于日后在合作组织网站上发布这些透镜模型。

- MACS J0717.5+3745、RXCJ0600.1-2007 和 PLCKG287.0+32.9 星系团尤为突出，它们具有最大的爱因斯坦半径（ $z_s$ =10），$\theta_{E,\ z_s=10} \geq 60''$ 以及最大的放大面积（$\mathcal{A}^{|\mu|\geq 3}_{z_s=10} \geq$ 9平方角分$^2$），因此可视为观测高红移宇宙的优先目标。

- 利用为一项独特巡天汇编的最大规模星系团强引力透镜模型集，我们推导出不同引力透镜可观测量之间的经验标度关系，以及它们对由星系团内介质测得的$M_{500,\ c}$ （图4），并拟合了

多重成像源的红移分布（图2）。尽管巡天存在固有偏差，我们预期这些经验关系将为未来星系团透镜项目的目标选择提供参考。

•得益于星系团强引力透镜带来的放大效应，VENUS 巡天在比主要空白场 CEERS 和 JADES 更暗的深度上覆盖了更大的像平面面积（见图 7），例如，这展示了星系团强引力透镜巡天的观测能力。

作为 VENUS DR1 更广泛科学影响的前瞻，这里展示的透镜模型将为学界提供全面的资源，用于对该巡天进行统计利用，并支持广泛的未来研究。这些结果展示了 VENUS 在约束高红移紫外光度函数、为未来巡天的设计提供参考，以及为进一步研究宇宙中最暗和最遥远天体铺平道路方面的巨大潜力，研究对象涵盖早期恒星和星系、瞬变源、低红移星系及活动星系核。

## 作者贡献

JA、LF、MG 和 AM 在 AZ 的指导下构建了本文展示的 57 个透镜模型。AZ 开发了 ZitrinAnalytic，这是 JA 开发 AstroLensPy 所依据的核心算法。SF 是 VENUS 的首席研究员。GB 和 VK 处理了近红外相机的 VENUS 数据，以及档案 HST 和 JWST 成像。VK 提供了 eazy 测光目录。

## 致谢

作者谨向 SLICE 合作组的 Guillaume Mahler、David Lagattuta、Keren Sharon、Catherine Cerny、Benjamin Beauchesne 和 Mathilde Jauzac 致谢，感谢他们提供的宝贵讨论和建议。

本研究得到以色列科学基金会第864/23号资助。LJF感谢德克萨斯大学奥斯汀分校宇宙前沿中心的支持。SF感谢邓拉普研究所的支持；该研究所的经费来自由David Dunlap家族和多伦多大学设立的捐赠基金，以及NSERC发现基金（RGPIN-2026-07931；DGECR-2026-00232）。CJC感谢欧洲研究委员会（ERC）EPOCHS高级研究员基金（788113）的支持。CMC获得多伦多大学文理学院研究卓越博士后奖学金的支持，该奖学金由天文学与天体物理学系共同资助。FEB感谢ANID-Chile BASAL CATA FB210003和FONDECYT常规项目1241005的支持。PAAL感谢CNPq提供的资助，项目编号为310260/2025-6和404160/2025-5。GEM感谢维伦基金会研究资助项目13160“从气体到恒星，从恒星到尘埃：追踪宇宙时间尺度上的恒星形成”、项目37440“隐藏的宇宙”，以及由丹麦国家研究基金会第140号资助的宇宙黎明卓越中心。MB、GR和NM感谢ERC FIRST-LIGHT项目（#101053208）以及斯洛文尼亚国家研究机构ARIS通过项目N1-0238和P1-0188提供的支持。我们感谢加拿大航天局（CSA） [25JWGO4A18]的支持。MO感谢世界顶尖国际研究中心倡议（WPI Initiative）、日本文部科学省、宇宙线研究所（ICRR）与东京大学联合研究项目，以及日本学术振兴会（JSPS）通过科学研究费助成事业（KAKENHI）（25H00674）提供的支持。PD衷心感谢NSERC发现基金（RGPIN-2025-06182）的支持。RAW感谢美国国家航空航天局通过戈达德太空飞行中心（GSFC）提供的JWST跨学科科学家资助项目NAG5-12460、NNX14AN10G和80NSSC18K0200的支持。TK感谢日本学术振兴会（JSPS）通过科学研究费助成事业（KAKENHI）（26KJ1232）提供的支持。YJ-T感谢西班牙科学、创新与大学部国家研究署通过授予安达卢西亚天体物理研究所塞韦罗·奥乔亚卓越中心称号所提供的资助（CEX2021-001131-S，该资助由MCIN/AEI/10.13039/501100011033提供），并感谢由MCIN/AEI/10.13039/501100011033资助的项目PID2022-136598NB-C32“Estallidos8”，以及由欧盟下一代欧盟计划资助的项目编号AST22-00001-Subp-15。RA感谢由MICIU/AEI/10.13039/501100011033及欧洲区域发展基金/欧盟资助的项目PID2023-147386NB-I00，以及授予安达卢西亚天体物理研究所（IAA-CSIC）塞韦罗·奥乔亚卓越中心称号的资助CEX2021-001131-S和项目PID2022-136598NB-C32“Estallidos8”的支持。

作者感谢加拿大天文学数据中心（CADC）和加拿大数字研究联盟（DRAC）运营的加拿大天文学高级研究网络（CANFAR）科学平台，并感谢加拿大国家研究委员会（NRC）、加拿大航天局（CSA）、CANARIE和加拿大创新基金会（CFI）提供的支持。本研究基于NASA/ESA/CSA 詹姆斯·韦布太空望远镜的观测数据。数据取自空间望远镜科学研究所（STScI）的空间望远镜科学研究所 （STScI）米库尔斯基空间望远镜档案馆（MAST）；该研究所由天文学研究型大学协会（AURA）运营，并获加拿大国家研究委员会（NRC）支持。

天文学研究协会（Astronomy, Inc.）依据 NASA 合同 NAS 5-03127 为 JWST 提供服务。相关观测隶属于项目 # 6882（VENUS）。VENUS 的 JWST 观测数据可通过 doi: 10.17909/6myr-m048获取。NASA 通过空间望远镜科学研究所提供的资助支持项目 # 6882；该研究所由天文学研究型大学协会（Astronomy, Inc.）依据 NASA 合同 NAS 5-03127 运营。本文所用部分数据取自宇宙黎明中心档案（DJA）。DJA 是宇宙黎明中心（DAWN）的一项计划，其经费由丹麦国家研究基金会通过拨款 DNRF140 提供。

我们感谢使用生成式人工智能工具来润色本文中的文字、图表和代码。所有图表及引用的数值均由作者重新制作并核实。

本研究使用了以下软件包：Astropy（Astropy 合作组等, 2013、2022年）、Matplotlib（J. D. Hunter，2007）、NumPy（C. R. Harris 等，2020）、pandas（Wes McKinney，2010；T. pandas 开发团队，2025年）、Python（G. Van Rossum 和 F. L. Drake，2009）、SciPy（P. Virtanen 等，2020；R. Gommers 等，2025年）、Photutils（L. Bradley 等，2025年）、Cython（S. Behnel 等，2011年）、emcee（D. Foreman-Mackey 等, 2013；D. Foreman-Mackey 等，2024年）、Numba（S. K. Lam 等，2015；S. K. Lam 等，2025年）、h5py（A. Collette，2013；A. Collette 等，2023）以及适用于 MATLAB 的 MAAT天文学与天体物理学工具（E. O. Ofek, 2014）。软件引文信息由软件引用站（T. Wagg 和 F. S. Broekgaarden，2024年）汇总。

## 参考文献

Abdurro'uf, Coe, D., Resseguier, T., 等 2026年，《天体物理学杂志》，1011，167，doi：10.3847/1538-4357/aeab99Abell, G. O., Corwin, Jr., H. G., & Olowin, R. P. 1989年，《天体物理学杂志增刊》，70，1，doi：10.1086/191333Acebron, A., Cibirka, N., Zitrin, A., 等 2018，《天体物理学杂志》，858，42，doi：10.3847/1538-4357/aabe29Acebron, A., Alon, M., Zitrin, A., 等 2019年，《天体物理学杂志》，874，132，doi：10.3847/1538-4357/ab0adfAcebron, A., Zitrin, A., Coe, D., 等 2020，《天体物理学杂志》，898，6，doi：10.3847/1538-4357/ab929dAdamo, A., Bradley, L. D., Vanzella, E., 等 2024年，《自然》，632，513，doi：10.1038/s41586-024-07703-7Aguena, M., Aiola, S., Allam, S., 等 2026年，《开放天体物理学期刊》，9，55863，doi：10.33232/001c.155863Alavi, A., Siana, B., Richard, J., 等 2016，《天体物理学杂志》，832，56，doi：10.3847/0004-637X/832/1/56Albert, J. G., Sif´on, C., Stroe, A., 等 2017年，《天文学与天体物理学》，607，A4，doi：10.1051/0004-6361/201730496Allingham, J. F. V., Bœhm, C., Eckert, D., 等 2024年，《皇家天文学会月刊》，528，1711，doi：10.1093/mnras/stae107Allingham, J. F. V., Zitrin, A., Golubchik, M., 等 2025年，《天体物理学杂志快报》，990，L25，doi：10.3847/2041-8213/adfa85Allingham, J. F. V., Zitrin, A., Kokorev, V., 等 2026年，《天体物理学杂志》，1005，215，doi：10.3847/1538-4357/ae7a59Asada, Y., Fujimoto, S., Allingham, J. F. V., 等 2026年，arXiv预印本，arXiv:2607.14355，doi：10.48550/arXiv.2607.14355Astropy 合作组, Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., 等 2013年，《天文学与天体物理学》，558，A33，doi：10.1051/0004-6361/201322068 Astropy 合作组, Price-Whelan, A. M., Lim, P. L., 等. 2022年，《天体物理学杂志》, 935,167,doi：10.3847/1538-4357/ac7c74Atek, H., Chisholm, J., Kokorev, V., 等. 2025年, arXiv预印本, arXiv:2511.07542, doi: 10.48550/arXiv.2511.07542Bacon, R., Accardo, M., Adjali, L., 等. 2010年, 收录于国际光学工程学会（SPIE）会议系列，第7735卷，《第三届地面与机载天文仪器会议》，编者 I. S. McLean, S. K. Ramsay, & H. Takami, 773508, doi: 10.1117/12.856027Baggen, J. F. W., Scoggins, M. T., van Dokkum, P., 等. 2026年a, 《天体物理学杂志快报》, 1002, L4, doi: 10.3847/2041-8213/ae58a5Baggen, J. F. W., van Dokkum,P., Labb´e, I., & Brammer, G. 2026年b, 《天体物理学杂志快报》, 1006, L14, doi: 10.3847/2041-8213/ae82feBayliss, M. B. 2012年, 《天体物理学杂志》, 744, 156, doi: 10.1088/0004-637X/744/2/156Bayliss, M. B., Gladders, M. D., Oguri, M., 等. 2011年, 《天体物理学杂志快报》, 727, L26, doi:10.1088/2041-8205/727/1/L26Bayliss, M. B., Ruel, J., Stubbs, C. W., 等. 2016, 《天体物理学杂志增刊》, 227, 3, doi: 10.3847/0067-0049/227/1/3Beauchesne, B., Cl´ement, B., Hibon, P., 等. 2024年, 《皇家天文学会月刊》, 527, 3246, doi:10.1093/mnras/stad3308Behnel, S., Bradshaw, R., Citro, C., 等. 2011年, 《科学与工程计算》, 13, 31, doi: 10.1109/MCSE.2010.118Belli, S., Jones, T., Ellis, R. S., & Richard, J. 2013, 《天体物理学杂志》, 772, 141, doi: 10.1088/0004-637X/772/2/141Berg, D. A., Naidu, R. P., Chisholm, J., 等. 2026年, 《天体物理学杂志》, 1003, 112, doi: 10.3847/1538-4357/ae5e4c

Bergamini, P., Rosati, P., Mercurio, A., 等. 2019年, 《天文学与天体物理学》, 631, A130, doi: 10.1051/0004-6361/201935974 Bergamini, P., Acebron, A., Grillo, C., 等. 2023a, 《天文学与天体物理学》, 670, A60, doi: 10.1051/0004-6361/202244575 Bergamini, P., Grillo, C., Rosati, P., 等. 2023b, 《天文学与天体物理学》, 674, A79, doi: 10.1051/0004-6361/202244834 Betts, J. R., Beauchesne, B., Jauzac, M., 等. 2026年, arXiv预印本, arXiv:2609.31944, doi: 10.48550/arXiv.2609.31944 Bezanson, R., Labbe, I., Whitaker, K. E., 等. 2024年, 《天体物理学杂志》, 974, 92, doi: 10.3847/1538-4357/ad66cf Bina, D., Pell´o, R., Richard, J.,等. 2016, 《天文学与天体物理学》, 590, A14, doi: 10.1051/0004-6361/201527913 Bleem, L. E., Klein, M., Kornoelje, K., 等. 2026年, arXiv预印本, arXiv:2607.01175, doi: 10.48550/arXiv.2607.01175 Bonamigo, M., Grillo, C., Ettori, S., 等. 2017年, 《天体物理学杂志》, 842, 132, doi: 10.3847/1538-4357/aa75cc Bonamigo, M., Grillo, C., Ettori, S., 等. 2018, 《天体物理学杂志》, 864, 98, doi: 10.3847/1538-4357/aad4a7 Bonvin, V., Courbin, F., Suyu, S. H., 等. 2017年, 《皇家天文学会月刊》, 465, 4914, doi: 10.1093/mnras/stw3006 Bourdin, H., Mazzotta, P., Markevitch, M., Giacintucci, S., & Brunetti, G. 2013, 《天体物理学杂志》, 764, 82, doi: 10.1088/0004-637X/764/1/82 Bower, R. 2013, 收录于《行星、恒星与恒星系统》第6卷：河外天文学与宇宙学，编者 T. D. Oswalt & W. C. Keel，第6卷（施普林格）， 265, doi: 10.1007/978-94-007-5609-0 6 Bradaˇc, M., Clowe, D., Gonzalez, A. H., 等. 2006, 《天体物理学杂志》, 652, 937, doi: 10.1086/508601 Bradaˇc, M.,-Allen, S. W., Treu, T., 等. 2008, 《天体物理学杂志》 , 687, 959, doi: 10.1086/591246 Bradaˇc, M., Treu, T., Applegate, D., 等. 2009, 《天体物理学杂志》, 706, 1201, doi: 10.1088/0004-637X/706/2/1201 Bradaˇc, M., Judeˇz, J., Willott, C., 等. 2025年, 《天体物理学杂志快报》, 995, L74, doi: 10.3847/2041-8213/ae27d2 Bradley, L., Sip˝ocz, B., Robitaille, T., 等. 2025年, astropy/photutils: 2.2.0, 2.2.0 Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.14889440 Bradley, L. D., Coe, D., Brammer, G., 等. 2023, 《天体物理学杂志》, 955, 13, doi: 10.3847/1538-4357/acecfe Bradley, L. D., Adamo, A., Vanzella, E., 等. 2025年, 《天体物理学杂志》, 991, 32, doi: 10.3847/1538-4357/adf638 Brammer, G. 2023, grizli, 1.9.11 Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.1146904 Brammer, G., & Valentino, F. 2025年, DAWN JWST档案：公开NIRSpec光谱汇编, 4.4 Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.15472354 Brammer, G. B., van Dokkum, P. G., & Coppi, P.2008, 《天体物理学杂志》, 686, 1503, doi: 10.1086/591786 Broadhurst, T., Ben´ıtez, N., Coe, D. 等, 2005, 《天体物理学杂志》, 621, 53, doi: 10.1086/426494 Broadhurst, T., Li,S. K., Alfred, A. 等, 2025, 《天体物理学杂志快报》, 978, L5, doi: 10.3847/2041-8213/ad9aa8 Bulbul, E.,Liu, A., Kluge, M. 等, 2024, 《天文学与天体物理学》, 685, A106, doi: 10.1051/0004-6361/202348264 Bushouse, H., Eisenhamer, J., Dencheva, N. 等, 2022, 詹姆斯·韦布空间望远镜校准流水线, 1.8.2 Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.7325378 Ca˜nameras, R., Nesvadba, N. P. H., Guery, D. 等, 2015, 《天文学与天体物理学》, 581, A105, doi: 10.1051/0004-6361/201425128 Ca˜nameras, R., Nesvadba, N. P. H., Limousin, M. 等, 2018, 《天文学与天体物理学》, 620, A60, doi: 10.1051/0004-6361/201833679 Caminha, G. B., Suyu,S. H.,Grillo, C.,& Rosati, P.2022, 《天文学与天体物理学》, 657, A83, doi: 10.1051/0004-6361/202141994 Caminha, G. B., Karman, W., Rosati,P. 等, 2016a, 《天文学与天体物理学》, 595, A100, doi: 10.1051/0004-6361/201527995 Caminha, G. B., Grillo, C., Rosati, P.等, 2016b, 《天文学与天体物理学》, 587, A80, doi: 10.1051/0004-6361/201527670 Caminha, G. B., Grillo, C., Rosati, P.等, 2017, 《天文学与天体物理学》, 607, A93, doi: 10.1051/0004-6361/201731498 Caminha, G. B., Rosati, P., Grillo, C.等, 2019, 《天文学与天体物理学》, 632, A36, doi: 10.1051/0004-6361/201935454 Caminha, G. B., Grillo, C., Rosati, P.等, 2023, 《天文学与天体物理学》, 678, A3, doi: 10.1051/0004-6361/202244897 Cerny, C., Jauzac, M., Lagattuta, D. 等, 2025, 《皇家天文学会月刊》, 541, 2341, doi: 10.1093/mnras/staf1076 Cerny, C., Sharon, K., Andrade-Santos, F. 等, 2018, 《天体物理学杂志》, 859, 159, doi: 10.3847/1538-4357/aabe7b Cerny, C., Mahler, G., Sharon, K. 等, 2026, 《天体物理学杂志》, 1001, 60, doi: 10.3847/1538-4357/ae41b0 Cha, S., Cho, B. Y., Joo, H.等, 2025, 《天体物理学杂志快报》, 987, L15, doi: 10.3847/2041-8213/add2f0 Cha, S., & Jee, M. J. 2026, 《天体物理学杂志》, 997, 18, doi: 10.3847/1538-4357/ae2258 Chapman, S. C., Smail, I., I vison, R. J., & Blain, A. W. 2002, 《皇家天文学会月刊》, 335, L17, doi: 10.1046/j.1365-8711.2002.05760.x Chen, W., Kelly, P. L., Oguri, M. 等, 2022, 《自然》, 611, 256, doi: 10.1038/s41586-022-05252-5 CHEX-MATE合作组, Arnaud, M., Ettori,S. 等, 2021, 《天文学与天体物理学》, 650, A104, doi: 10.1051/0004-6361/202039632 Chiu, I.-N., Umetsu, K., Sereno, M.等, 2018, 《天体物理学杂志》, 860, 126, doi: 10.3847/1538-4357/aac4a0 Christensen, L., Richard, J., Hjorth, J. 等, 2012a, 《皇家天文学会月刊》, 427, 1953, doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.22006.x

Christensen, L., Laursen, P.,Richard, J. 等，2012b，《皇家天文学会月刊》，427, 1973，doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.22007.x Cibirka, N., Acebron, A., Zitrin, A. 等，2018，《天体物理学杂志》，863, 145，doi: 10.3847/1538-4357/aad2d3 Claeyssens, A., Richard, J., Blaizot, J. 等，2019，《皇家天文学会月刊》，489, 5022, doi: 10.1093/mnras/stz2492 Cloonan, A. P.,Khullar, G., Napier, K. A. 等，2025，《天体物理学杂志》，987, 194, doi: 10.3847/1538-4357/addabf Clowe, D., Bradaˇc, M.,Gonzalez, A. H. 等，2006，《天体物理学杂志快报》，648, L109，doi: 10.1086/508162 Coe, D., Ben´ıtez, N., Broadhurst, T., & Moustakas, L. A. 2010，《天体物理学杂志》，723, 1678，doi: 10.1088/0004-637X/723/2/1678 Coe, D., Zitrin,A., Carrasco, M. 等，2013，《天体物理学杂志》，762, 32，doi: 10.1088/0004-637X/762/1/32 Coe, D., Sal mon, B., Bradaˇc,M. 等，2019，《天体物理学杂志》，884, 85，doi: 10.3847/1538-4357/ab412b Collette, A. 2013, Python与HDF5（O'Reilly）Collette, A., Kluyver, T., Caswell, T. A. 等，2023，h5py/h5py：3.8.0，3.8.0 Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.7560547 Connor, T., Kelson, D.D., Blanc, G. A., & Boutsia, K. 2019，《天体物理学杂志》，878, 66，doi: 10.3847/1538-4357/ab1f7a Coulter, D. A., Larison, C., Pierel, J. D. R. 等，2026，arXiv预印本，arXiv:2601.04156，doi: 10.48550/arXiv.2601.04156 D' Addona, M., Mercurio, A., Rosati, P. 等，2024，《天文学与天体物理学》，686, A4，doi: 10.1051/0004-6361/202349060 Dessauges-Zavadsky, M.,Zamojski, M., Rujopakarn, W. 等，2017，《天文学与天体物理学》，605, A81，doi: 10.1051/0004-6361/201628513 Dessauges-Zavadsky, M.,Richard, J., Combes, F. 等，2023，《皇家天文学会月刊》，519, 6222，doi: 10.1093/mnras/stad113 Dhanasingham, B., Kelly, P. L., Chen, W. 等，2026，《天体物理学杂志》，1008, 230，doi: 10.3847/1538-4357/ae9606 Diego, J. M., Broadhurst, T.,Wong, J. 等，2016a，《皇家天文学会月刊》，459, 3447, doi: 10.1093/mnras/stw865 Diego, J. M., Broadhurst, T.,Zitrin, A. 等，2015a，《皇家天文学会月刊》，451, 3920, doi: 10.1093/mnras/stv1168 Diego, J. M., Broadhurst, T.,Benitez, N. 等，2015b，《皇家天文学会月刊》，446, 683, doi: 10.1093/mnras/stu2064 Diego, J. M., Broadhurst, T.,Chen, C. 等，2016b，《皇家天文学会月刊》，456, 356, doi: 10.1093/mnras/stv2638 Diego, J. M., Kaiser,N., Broadhurst, T. 等，2018a，《天体物理学杂志》，857, 25, doi: 10.3847/1538-4357/aab617 Diego, J. M., Schmidt, K.B., Broadhurst, T. 等，2018b，《皇家天文学会月刊》，473, 4279，doi: 10.1093/mnras/stx2609 Diego, J. M., Molnar, S. M., Cerny, C. 等，2020，《天体物理学杂志》，904, 106, doi: 10.3847/1538-4357/abbf56 Diego, J. M., Meena, A. K., Adams, N. J., 等，2023，《天文学与天体物理学》672，A3，doi: 10.1051/0004-6361/202245238 Diego, J. M., Li, S. K., Meena, A. K., 等，2024，《天文学与天体物理学》681, A124，doi: 10.1051/0004-6361/202346761 Diego, J. M., Sun, F., Palencia, J. M., 等，2025，《天文学与天体物理学》703, A207，doi: 10.1051/0004-6361/202556062 Diego, J. M., Palencia, J. M., Goolsby, C., 等，2026，arXiv预印本，arXiv:2601.11704，doi: 10.48550/arXiv.2601.11704 Duffy, A. R., Schaye, J., Kay, S. T., & Dalla Vecchia, C. 2008，《皇家天文学会月刊》390，L64，doi: 10.1111/j.1745-3933.2008.00537.x Ebeling, H., Barrett, E., Donovan, D., 等，2007，《天体物理学杂志快报》661，L33, doi: 10.1086/518603 Ebeling, H., Edge, A. C., & Henry, J. P. 2001，《天体物理学杂志》553，668，doi: 10.1086/320958 Ebeling, H., Ma, C.-J., & Barrett, E. 2014，《天体物理学杂志增刊》211，21，doi: 10.1088/0067-0049/211/2/21 Ebeling, H., Ma, C. J., Kneib, J., 等，2009，《皇家天文学会月刊》395, 1213，doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.14502.x Ebeling, H., Qi, J., & Richard, J. 2017，《皇家天文学会月刊》471，3305, doi: 10.1093/mnras/stx1636 Ebeling, H., Voges, W., Bohringer,H., 等，1996，《皇家天文学会月刊》281，799, doi: 10.1093/mnras/281.3.799 Edge, A. C., Boehringer, H., Guzzo, L., 等，1994，《天文学与天体物理学》289，L34, doi: 10.48550/arXiv.astro-ph/9407078 Ehlert, S., Allen, S. W., von der Linden, A., 等，2011，《皇家天文学会月刊》411，1641，doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17801.x Eisenstein, D. J., Willott, C., Alberts, S., 等，2026，《天体物理学杂志增刊》283，6，doi: 10.3847/1538-4365/ae3163 El´ ıasd´ottir, ´A., Limousin, M., Richard, J., 等，2007，arXiv预印本，arXiv:0710.5636. https://arxiv.org/abs/0710.5636 Endsley, R., Stark, D. P., Whitler, L., 等，2024，《皇家天文学会月刊》533，1111，doi: 10.1093/mnras/stae1857 Estrada-Carpenter, V., Sawicki, M., Brammer, G., 等，2024，《皇家天文学会月刊》532，577，doi: 10.1093/mnras/stae1368 Faber, S. M., & Jackson, R. E. 1976，《天体物理学杂志》204，668，doi: 10.1086/154215 Finkelstein, S. L., Bagley, M. B., Arrabal Haro, P., 等，2025，《天体物理学杂志快报》983，L4，doi: 10.3847/2041-8213/adbbd3 Finner, K., Faisst, A., Chary, R.-R., & Jee, M. J. 2023，《天体物理学杂志》953，102，doi: 10.3847/1538-4357/ace1e6 Finney, E. Q., Bradaˇc, M., Huang, K.-H., 等，2018，《天体物理学杂志》859，58，doi: 10.3847/1538-4357/aabf97 Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D., & Goodman, J. 2013，《太平洋天文学会出版物》125，306，doi: 10.1086/670067

Foreman-Mackey, D., Farr, W. M., Archibald, A., 等, 2024, dfm/emcee: v3.1.6, v3.1.6 Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.10996751 Fox, C., Mahler, G., Sharon, K., & Remolina Gonz´alez, J. D. 2022, 《天体物理学杂志》928, 87, doi: 10.3847/1538-4357/ac5024 Frye, B. L., Pascale, M., Qin, Y., 等, 2019, 《天体物理学杂志》871, 51, doi: 10.3847/1538-4357/aaeff7 Frye, B. L., Pascale, M., Foo, N., 等, 2023, 《天体物理学杂志》952, 81, doi: 10.3847/1538-4357/acd929 Frye, B. L., Pascale, M., Pierel, J., 等, 2024, 《天体物理学杂志》961, 171, doi: 10.3847/1538-4357/ad1034 Fudamoto, Y., Inoue, A. K., Coe, D., 等, 2024, 《天体物理学杂志》961, 71, doi: 10.3847/1538-4357/ad0f95 Fudamoto, Y., Sun, F., Diego, J. M., 等, 2025, 《自然·天文学》9, 428, doi: 10.1038/s41550-024-02432-3 Fujimoto, S., Oguri, M., Brammer, G., 等, 2021, 《天体物理学杂志》911, 99, doi: 10.3847/1538-4357/abd7ec Fujimoto, S., Coe, D., Abdurro'uf, A., 等, 2025a, 新生未探索源广域探测（VENUS）：詹姆斯·韦布空间望远镜提案。第4周期，编号6882, Fujimoto, S., Ouchi, M., Kohno, K., 等, 2025b, 《自然·天文学》9, 1553, doi: 10.1038/s41550-025-02592-w Fujimoto, S., Larison,C., Pierel, J.D. R., etal. 2026, arXiv预印本, arXiv:2609.30440, doi: 10.48550/arXiv.2609.30440 Furtak, L. J., Plat, A., Zitrin, A., 等, 2022, 《皇家天文学会月刊》516, 1373, doi: 10.1093/mnras/stac2169 Furtak, L. J., Mainali, R., Zitrin, A., 等, 2023a, 《皇家天文学会月刊》522, 5142, doi: 10.1093/mnras/stad1321 Furtak, L. J., Zitrin, A., Plat, A., 等, 2023b, 《天体物理学杂志》952, 142, doi: 10.3847/1538-4357/acdc9d Furtak, L. J., Zitrin, A., Weaver, J. R., 等, 2023c, 《皇家天文学会月刊》523, 4568, doi: 10.1093/mnras/stad1627 Furtak, L. J., Labb´e, I., Zitrin, A., 等, 2024a, 《自然》628, 57, doi: 10.1038/s41586-024-07184-8 Furtak, L. J., Zitrin, A., Richard, J., 等, 2024b, 《皇家天文学会月刊》533, 2242, doi: 10.1093/mnras/stae1943 Furtak, L. J., Zitrin, A., Zackrisson, E., 等, 2026, arXiv预印本, arXiv:2604.18696, doi: 10.48550/arXiv.2604.18696 盖亚合作组, Vallenari, A., Brown, A. G. A., 等, 2023, 《天文学与天体物理学》674, A1, doi: 10.1051/0004-6361/202243940 Galan, A., Caminha, G. B., Knollm¨uller, J., Roth, J., & Suyu, S. H. 2024, 《天文学与天体物理学》689, A304, doi: 10.1051/0004-6361/202449876 Gavazzi, R., Fort, B., Mellier, Y., Pell´o, R., & Dantel-Fort, M. 2003, 《天文学与天体物理学》403, 11, doi: 10.1051/0004-6361:20030306 Geller, M. J., Hwang, H. S., Diaferio, A., 等, 2014, 《天体物理学杂志》783, 52, doi: 10.1088/0004-637X/783/1/52 Ghosh, A., Adams, D., Williams, L. L. R., 等. 2023, 《皇家天文学会月刊》, 525, 2519, doi: 10.1093/mnras/stad2418 Ghosh, A., Williams, L. L. R., Liesenborgs, J., 等. 2021, 《皇家天文学会月刊》, 506, 6144, doi: 10.1093/mnras/stab1196 Giacintucci, S., Markevitch, M., Cassano, R., 等. 2019, 《天体物理学杂志》, 880, 70, doi: 10.3847/1538-4357/ab29f1 Gitti, M., Piffaretti, R., & Schindler, S. 2007, 《天文学与天体物理学》, 472, 383, doi: 10.1051/0004-6361:20077580 Gladders, M. D., & Yee, H. K. C. 2000, 《天文学杂志》, 120, 2148, doi: 10.1086/301557 Gledhill, R., Strait, V., Desprez, G., 等. 2024, 《天体物理学杂志》, 973, 77, doi: 10.3847/1538-4357/ad684a Golubchik, M., Furtak, L. J., Meena, A. K., & Zitrin, A. 2022, 《天体物理学杂志》, 938, 14, doi: 10.3847/1538-4357/ac8ff1 Golubchik, M., Furtak, L. J., Allingham, J. F. V., 等. 2026, 《天文学与天体物理学》, 710, A226, doi: 10.1051/0004-6361/202558407 G´omez, P. L., Valkonen, L. E., Romer, A. K., 等. 2012, 《天文学杂志》, 144, 79, doi: 10.1088/0004-6256/144/3/79 Gommers, R., Virtanen, P., Haberland, M., 等. 2025, scipy/scipy: SciPy 1.16.3, v1.16.3 Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.17467817 Gonzalez, A. H., Papovich, C., Brada˘c, M., & Jones, C. 2010, 《天体物理学杂志》, 720, 245, doi: 10.1088/0004-637X/720/1/245 Goodman, J., & Weare, J. 2010, 应用数学与计算科学通讯, 5, 65, doi: 10.2140/camcos.2010.5.65 Gralla, M. B., Sharon, K., Gladders, M. D., 等. 2011, 《天体物理学杂志》, 737, 74, doi: 10.1088/0004-637X/737/2/74 Grillo, C., Pagano, L., Rosati, P., & Suyu, S. H. 2024, 《天文学与天体物理学》, 684, L23, doi: 10.1051/0004-6361/202449278 Grillo, C., Suyu, S. H., Rosati, P., 等. 2015, 《天体物理学杂志》, 800, 38, doi: 10.1088/0004-637X/800/1/38 Grillo, C., Karman, W., Suyu, S. H., 等. 2016, 《天体物理学杂志》, 822, 78, doi: 10.3847/0004-637X/822/2/78 Hamilton-Morris,V., Smith, G. P.,Edge, A. C., 等. 2012, 《天体物理学杂志快报》, 748, L23, doi: 10.1088/2041-8205/748/2/L23 Harikane, Y., Ouchi, M., Oguri, M., 等. 2023, 《天体物理学杂志增刊》, 265, 5, doi: 10.3847/1538-4365/acaaa9 Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., 等. 2020, 《自然》, 585, 357, doi: 10.1038/s41586-020-2649-2 Hlavacek-Larrondo, J., Allen, S. W., Taylor, G. B., 等. 2013, 《天体物理学杂志》, 777, 163, doi: 10.1088/0004-637X/777/2/163 Hoag, A., Huang, K.-H., Treu, T., 等. 2016, 《天体物理学杂志》, 831, 182, doi: 10.3847/0004-637X/831/2/182 Hsiao, T. Y.-Y., Coe, D., Abdurro'uf, 等. 2023, 《天体物理学杂志快报》, 949, L34, doi: 10.3847/2041-8213/acc94b Hsu, L.-Y., Ebeling, H., & Richard, J. 2013, 《皇家天文学会月刊》, 429, 833, doi: 10.1093/mnras/sts379

Huang, K.-H., Lemaux, B. C., Schmidt, K. B., 等. 2016, 《天体物理学杂志快报》, 823, L14, doi: 10.3847/2041-8205/823/1/L14 Hunter, J. D.2007, Computing inScience &Engineering, 9, 90, doi: 10.1109/MCSE.2007.55 Jaffe, W. 1983, 《皇家天文学会月刊》, 202, 995, doi: 10.1093/mnras/202.4.995 Jauzac, M., Klein, B., Kneib, J.-P., 等. 2021, 《皇家天文学会月刊》, 508, 1206, doi: 10.1093/mnras/stab2270 Jauzac, M., Jullo, E., Kneib, J.-P., 等. 2012, 《皇家天文学会月刊》, 426, 3369, doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21966.x Ja uzac, M., Jullo, E., Eckert, D., 等. 2015, 《皇家天文学会月刊》, 446, 4132, doi: 10.1093/mnras/stu2425 Jauzac, M., Richard, J., Limousin, M., 等. 2016, 《皇家天文学会月刊》, 457, 2029, doi: 10.1093/mnras/stw069 Jauzac, M., Eckert, D., Schaller, M., 等. 2018, 《皇家天文学会月刊》, 481, 2901, doi: 10.1093/mnras/sty2366 Jauzac, M., Mahler, G., Edge, A. C., 等. 2019, 《皇家天文学会月刊》, 483, 3082, doi: 10.1093/mnras/sty3312 Jee, M. J., White, R. L., Ben´ıtez, N., 等. 2005, 《天体物理学杂志》, 618, 46, doi: 10.1086/425912 Jim´enez-Teja, Y., Dupke, R. A., Lopes, P. A. A., & Dimauro, P. 2024, 《天体物理学杂志快报》, 960, L7, doi: 10.3847/2041-8213/ad181a Jim´enez-Teja, Y., Dupke, R. A., Lopes, P. A. A., & V´ılchez, J. M. 2023, 《天文学与天体物理学》, 676, A39, doi: 10.1051/0004-6361/202346580 Jim´enez-Teja, Y., Dupke, R., Ben´ıtez, N., 等. 2018, 《天体物理学杂志》, 857, 79, doi: 10.3847/1538-4357/aab70f Johnson, B. D., Robertson, B. E., Eisenstein, D. J., 等. 2026, arXiv预印本, arXiv:2601.15954, doi: 10.48550/arXiv.2601.15954 Johnson, T. L., Sharon, K., Bayliss, M. B., 等. 2014, 《天体物理学杂志》, 797, 48, doi: 10.1088/0004-637X/797/1/48 Jude˘z, J., Tripodi, R., Martis, N. S., 等. 2026, arXiv预印本, arXiv:2611.00202, doi: 10.48550/arXiv.2611.00202 Jullo, E., Natarajan, P., Kneib, J., 等. 2010, 《科学》, 329, 924, doi: 10.1126/science.1185759 Jullo, E., Boghossian, C., Chapel, L., 等. 2026, arXiv预印本, arXiv:2607.08562, doi: 10.48550/arXiv.2607.08562 Kahlhoefer, F., Schmidt-Hoberg, K., Frandsen, M. T., & Sarkar, S. 2014, 《皇家天文学会月刊》, 437, 2865, doi: 10.1093/mnras/stt2097 Karman, W., Caputi, K. I., Grillo, C., 等. 2015, 《天文学与天体物理学》, 574, A11, doi: 10.1051/0004-6361/201424962 Karman, W., Caputi, K. I., Caminha, G. B., 等. 2017, 《天文学与天体物理学》, 599, A28, doi: 10.1051/0004-6361/201629055 Kassiola, A., & Kovner, I. 1993, 《天体物理学杂志》, 417, 450, doi: 10.1086/173325 Kawamata, R., Ishigaki, M., Shimasaku, K. 等, 2018年, 《天体物理学杂志》, 855, 4, doi: 10.3847/1538-4357/aaa6cf Kawamata, R., Oguri, M., Ishigaki, M., Shimasaku, K. 与 Ouchi, M., 2016年, 《天体物理学杂志》, 819, 114, doi: 10.3847/0004-637X/819/2/114 Keeton, C. R., 2001年, ArXiv天体物理学电子预印本 Keeton, C. R., 2010年, 《广义相对论与引力》, 42, 2151, doi: 10.1007/s10714-010-1041-1 Kelly, P. L., Rodney, S. A., Treu, T. 等, 2015年, 《科学》, 347, 1123, doi: 10.1126/science.aaa3350 Kelly, P. L., Diego, J. M., Rodney, S. 等, 2018a, 《自然·天文学》, 2, 334, doi: 10.1038/s41550-018-0430-3 Kelly, P. L., Diego, J. M., Rodney, S. 等, 2018b, 《自然·天文学》, 2, 334, doi: 10.1038/s41550-018-0430-3 Kelly, P. L., Rodney, S., Treu, T. 等, 2023a, 《天体物理学杂志》, 948, 93, doi: 10.3847/1538-4357/ac4ccb Kelly, P. L., Rodney, S., Treu, T. 等, 2023b, 《科学》, 380, abh1322, doi: 10.1126/science.abh1322 Killedar, M., Borgani, S., Fabjan, D. 等, 2018年, 《皇家天文学会月刊》, 473, 1736, doi: 10.1093/mnras/stx2262 Kneib, J.-P. 与 Natarajan, P., 2011年, 《天文学与天体物理学评论》, 19, 47, doi: 10.1007/s00159-011-0047-3 Kokorev, V., Brammer, G., Fujimoto, S. 等, 2022年, 《天体物理学杂志增刊》, 263, 38, doi: 10.3847/1538-4365/ac9909 Kokorev, V., Atek, H., Chisholm,J. 等, 2025年, 《天体物理学杂志快报》, 983, L22, doi: 10.3847/2041-8213/adc458 Kokorev, V., Chisholm, J., Naidu, R. P. 等, 2026年, 《天体物理学杂志》, 1004, 153, doi: 10.3847/1538-4357/ae4ed7 Kolokythas, K., Venturi, T., Knowles, K. 等, 2025年, 《皇家天文学会月刊》, 543, 1638, doi: 10.1093/mnras/staf1499 Kravtsov, A. V. 与 Borgani, S., 2012年, 《天文学与天体物理学年评》, 50, 353, doi: 10.1146/annurev-astro-081811-125502 Lagattuta, D. J., Richard, J., Cl´ement, B. 等, 2017年, 《皇家天文学会月刊》, 469, 3946, doi: 10.1093/mnras/stx1079 Lagattuta, D. J., Richard, J., Bauer, F. E. 等, 2019年, 《皇家天文学会月刊》, 485, 3738, doi: 10.1093/mnras/stz620 Lagattuta, D. J., Richard, J., Bauer, F. E. 等, 2022年, 《皇家天文学会月刊》, 514, 497, doi: 10.1093/mnras/stac418 Lam, S. K., Pitrou, A. 与 Seibert, S., 2015年, 载于《第二届高性能计算中LLVM编译器基础设施研讨会》论文集, 1–6, doi: 10.1145/2833157.2833162 Lam, S. K., stuartarchibald, Pitrou, A. 等, 2025年, numba/numba：0.63.1, 0.63.1, Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.17874185 Laporte, N., Zitrin, A., Ellis, R. S. 等, 2021年, 《皇家天文学会月刊》, 505, 4838, doi: 10.1093/mnras/stab191 Larison, C., Pierel, J. D. R., Siebert, M. 等, 2026年, arXiv预印本, arXiv:2610.33161, doi: 10.48550/arXiv.2610.33161

Leethochawalit, N., Jones, T. A., Ellis, R. S. 等，2016年，《天体物理学杂志》，820，84，doi: 10.3847/0004-637X/820/2/84 Li, S. K., Diego, J. M., Kelly, P. L. 等，2024年，arXiv预印本，arXiv:2404.08571，doi: 10.48550/arXiv.2404.08571 Limousin, M., Beauchesne, B. 与 Jullo, E.，2022年，《天文学与天体物理学》，664，A90，doi: 10.1051/0004-6361/202243278 Limousin, M., Perera, D., Rihtarˇsiˇc, G., Williams, L. L. R. 与 Liesenborgs, J.，2025a，《天文学与天体物理学》，703，A10，doi: 10.1051/0004-6361/202556007 Limousin, M., Richard, J., Jullo, E. 等，2007年，《天体物理学杂志》，668，643，doi: 10.1086/521293 Limousin, M., Ebeling, H., Ma, C.-J. 等，2010年，《皇家天文学会月刊》，405，777，doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16518.x Limousin, M., Ebeling, H., Richard, J. 等，2012年，《天文学与天体物理学》，544，A71，doi: 10.1051/0004-6361/201117921 Limousin, M., Richard, J., Jullo, E. 等，2016年，《天文学与天体物理学》，588，A99，doi: 10.1051/0004-6361/201527638 Limousin, M., Beauchesne, B., Niemiec, A. 等，2025b，《天文学与天体物理学》，693，A33，doi: 10.1051/0004-6361/202451969 Lotz, J. M., Koekemoer, A., Coe, D. 等，2017年，《天体物理学杂志》，837，97，doi: 10.3847/1538-4357/837/1/97 Louis, T., La Posta, A., Atkins, Z. 等，2025年，《宇宙学与天体粒子物理学杂志》，2025，062，doi: 10.1088/1475-7516/2025/11/062 MacKenzie, T. P., Scott,D.,Smail, I.,etal. 2014，《皇家天文学会月刊》，445，201，doi: 10.1093/mnras/stu1623 Mahler, G., Sharon, K., Fox, C. 等，2019年，《天体物理学杂志》，873，96，doi: 10.3847/1538-4357/ab042b Mahler, G., Jauzac, M., Richard, J. 等，2023，《天体物理学杂志》，945，49，doi: 10.3847/1538-4357/acaea9 Mahler, G., Sharon, K., Bayliss, M. 等，2025年，《天体物理学杂志》，980，48，doi: 10.3847/1538-4357/ad9aa5 Mainali, R.，2019年，博士论文，亚利桑那大学。http://hdl.handle.net/10150/634279 Mann, A. W. 与 Ebeling, H.，2012年，《皇家天文学会月刊》，420，2120，doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.20170.x Markevitch, M., Gonzalez, A. H., Clowe, D. 等，2004年，《天体物理学杂志》，606，819，doi: 10.1086/383178 Markevitch, M., Gonzalez, A. H., David, L. 等，2002年，《天体物理学杂志快报》，567，L27，doi: 10.1086/339619 Marques-Chaves, R., Schaerer, D., Kuruvanthodi, A. 等，2024年，《天文学与天体物理学》，681，A30，doi: 10.1051/0004-6361/202347411 Maughan, B. J., Jones, L. R., Ebeling, H. 等，2003年，《天体物理学杂志》，587，589，doi: 10.1086/368151 May, P. E.，2013年，博士论文，伯明翰大学。http://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/4248 McDonald, M., Khullar, G., Lagattuta, D. 等，2026年，arXiv预印本，arXiv:2603.10104，doi: 10.48550/arXiv.2603.10104 Medezinski, E., Umetsu, K., Nonino, M. 等，2013年，《天体物理学杂志》，777，43，doi: 10.1088/0004-637X/777/1/43 Meena, A. K., & Bagla, J. S. 2023，《皇家天文学会月刊》，526，3902，doi: 10.1093/mnras/stad2978 Meena, A. K., Zitrin, A., Jim´enez-Teja, Y. 等，2023，《天体物理学杂志快报》，944，L6，doi: 10.3847/2041-8213/acb645 Meena, A. K., Chen, W., Furtak, L. J. 等，2026年，arXiv预印本，arXiv:2601.10097，doi: 10.48550/arXiv.2601.10097 Mehlert, D., Seitz, S., Saglia, R. P. 等，2001年，《天文学与天体物理学》，379，96，doi: 10.1051/0004-6361:20011286 Meneghetti, M., Argazzi, R., Pace, F. 等，2007，《天文学与天体物理学》，461，25，doi: 10.1051/0004-6361:20065722 Meneghetti, M., Bartelmann, M., Dahle, H., & Limousin, M. 2013，《空间科学评论》，177，31，doi: 10.1007/s11214-013-9981-x Messa, M., Dessauges-Zavadsky, M., Richard, J. 等，2022年，《皇家天文学会月刊》，516，2420，doi: 10.1093/mnras/stac2189 Messa, M., Vanzella, E., Loiacono, F. 等，2026年，《天文学与天体物理学》，705，A173，doi: 10.1051/0004-6361/202556574 Monna, A., Seitz, S., Greisel, N. 等，2014，《皇家天文学会月刊》，438，1417，doi: 10.1093/mnras/stt2284 Monna, A., Seitz, S., Balestra, I. 等，2017年，《皇家天文学会月刊》，466，4094，doi: 10.1093/mnras/stx015 Morishita, T., Liu, Z., Stiavelli, M. 等，2025年，arXiv预印本，arXiv:2507.10521，doi: 10.48550/arXiv.2507.10521 Mowla, L., Iyer, K., Asada, Y. 等，2024年，《自然》，636，332，doi: 10.1038/s41586-024-08293-0 Mu˜noz-Echeverr´ıa, M., Mac´ıas-P´erez, J. F., Pratt, G. W. 等，2024年，《天文学与天体物理学》，682，A147，doi: 10.1051/0004-6361/202347584 Nagai, D., Kravtsov, A.V., & Vikhlinin,A. 2007，《天体物理学杂志》，668，1，doi: 10.1086/521328 Naidu, R. P., Matthee, J., Kramarenko, I. 等，2024年，arXiv预印本，arXiv:2410.01874，doi: 10.48550/arXiv.2410.01874 Nakane, M., Kokorev, V., Fujimoto, S. 等，2026年，《天体物理学杂志》，1010，237，doi: 10.3847/1538-4357/ae8d09 Napier, K., Gladders, M. D., Sharon, K. 等，2023，《天体物理学杂志快报》，954，L38，doi: 10.3847/2041-8213/acf132 Natarajan, P., Williams, L. L. R., Bradaˇc, M. 等，2024年，《空间科学评论》，220，19，doi: 10.1007/s11214-024-01051-8 Natarajan, P., Chadayammuri, U., Jauzac, M. 等，2017年，《皇家天文学会月刊》，468，1962，doi: 10.1093/mnras/stw3385 Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1996，《天体物理学杂志》，462，563，doi: 10.1086/177173 Newman, A. B., Treu, T., Ellis, R. S. 等，2013a，《天体物理学杂志》，765，24，doi: 10.1088/0004-637X/765/1/24 Newman, A. B., Treu, T., Ellis, R. S. 等，2013b，《天体物理学杂志》，765，24，doi: 10.1088/0004-637X/765/1/24

Noirot, G., Desprez, G., Asada, Y. 等，2023，《皇家天文学会月刊》，525，1867，doi: 10.1093/mnras/stad1019 Ofek, E. O. 2014，MAAT：MATLAB天文学与天体物理学工具箱，天体物理学源代码库，记录号 ascl:1407.005 http://ascl.net/1407.005 Oguri, M. 2010，日本天文学会刊行物，62，1017，doi: 10.1093/pasj/62.4.1017 Oguri, M. 2015，《皇家天文学会月刊》，449，L86，doi: 10.1093/mnrasl/slv025 Oguri, M., Bayliss, M. B., Dahle, H. 等，2012年，《皇家天文学会月刊》，420，3213，doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.20248.x Oguri, M., & Blandford, R. D. 2009，《皇家天文学会月刊》，392，930，doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.14154.x Oguri, M., Kokorev, V., Nishida, S. 等，2026年，arXiv预印本，arXiv:2611.08630，doi: 10.48550/arXiv.2611.08630 Okabe, T., Oguri, M., Peirani, S. 等，2020，《皇家天文学会月刊》，496，2591，doi: 10.1093/mnras/staa1479 Oke, J. B., & Gunn, J. E. 1983，《天体物理学杂志》，266，713，doi: 10.1086/160817 Orban de Xivry, G., & Marshall, P. 2009，《皇家天文学会月刊》，399，2，doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.14925.x Paczynski, B. 1987，《自然》，325，572，doi:10.1038/325572a0 Palencia, J. M., Sun, F., Diego, J. M. 等，2026年，《天文学与天体物理学》，714，A22，doi: 10.1051/0004-6361/202660640 Pan, R., Marchesini, D., Allingham, J. F. V. 等，2026年，arXiv预印本，arXiv:2609.28474，doi: 10.48550/arXiv.2609.28474 pandas 开发团队，T. 2025，pandas-dev/pandas：Pandas，v2.3.3，Zenodo，doi: 10.5281/zenodo.17229934 Pandge, M. B., Monteiro-Oliveira, R., Bagchi, J. 等，2019年，《皇家天文学会月刊》，482，5093，doi: 10.1093/mnras/sty2937 Paraficz, D., Kneib, J.-P., Richard, J. 等，2016，《天文学与天体物理学》，594，A121，doi: 10.1051/0004-6361/201527959 Parry, W. G., Grillo, C., Mercurio, A. 等，2016，《皇家天文学会月刊》，458，1493，doi: 10.1093/mnras/stw298 Pascale, M., Dai, L., Frye, B. L., & Beverage, A. G. 2025a，《天体物理学杂志快报》，988，L76，doi: 10.3847/2041-8213/aded93 Pascale, M., Frye, B. L., Dai, L. 等，2022a，《天体物理学杂志》，932，85，doi: 10.3847/1538-4357/ac6ce9 Pascale, M., Frye, B. L., Diego, J. 等，2022b，《天体物理学杂志快报》，938，L6，doi: 10.3847/2041-8213/ac9316 Pascale, M., Frye, B. L., Pierel, J. D. R. 等，2025b，《天体物理学杂志》，979，13，doi: 10.3847/1538-4357/ad9928 Patel, B., McCully, C., Jha, S. W. 等，2014，《天体物理学杂志》，786，9，doi: 10.1088/0004-637X/786/1/9 Patel, N. R., Jauzac, M., Niemiec, A. 等，2024年，《皇家天文学会月刊》，533，4500，doi: 10.1093/mnras/stae2069 Patel, N. R., Jauzac, M., Niemiec, A. 等，2026年，《皇家天文学会月刊》，553，stag1849，doi: 10.1093/mnras/stag1849 Paterno-Mahler, R., Sharon, K., Coe, D., 等. 2018，《天体物理学杂志》, 863, 154, doi: 10.3847/1538-4357/aad239 Patr´ıcio, V., Richard, J., Verhamme, A., 等. 2016，《皇家天文学会月刊》, 456, 4191, doi: 10.1093/mnras/stv2859 Patr´ıcio, V., Richard, J., Carton, D., 等. 2018，《皇家天文学会月刊》, 477, 18, doi: 10.1093/mnras/sty555 Pierel, J. D. R., Newman, A. B., Dhawan, S., 等. 2024，《天体物理学杂志快报》, 967, L37, doi: 10.3847/2041-8213/ad4648 Pierel, J. D. R., Hayes, E. E., Millon, M., 等. 2026年，《天体物理学杂志》, 998, 219, doi: 10.3847/1538-4357/ae3159 普朗克合作组, Ade, P. A. R., Aghanim, N., 等. 2011年，《天文学与天体物理学》, 536, A8, doi: 10.1051/0004-6361/201116459 普朗克合作组, Ade, P. A. R., Aghanim, N., 等. 2016，《天文学与天体物理学》, 594, A27, doi: 10.1051/0004-6361/201525823 Polletta, M., Nonino, M., Frye, B., 等. 2023，《天文学与天体物理学》, 675, L4, doi: 10.1051/0004-6361/202346964 Postman, M., Coe, D., Ben´ıtez, N., 等. 2012年，《天体物理学杂志增刊》, 199, 25, doi: 10.1088/0067-0049/199/2/25 Price, S. H., Bezanson, R., Labbe, I., 等. 2025年，《天体物理学杂志》, 982, 51, doi: 10.3847/1538-4357/adaec1 Randall, S. W., Markevitch, M., Clowe, D., Gonzalez,A.H., & Brada˘c, M. 2008，《天体物理学杂志》, 679, 1173, doi: 10.1086/587859 Rasia, E., Meneghetti, M., Martino, R., 等. 2012, New Journal of Physics, 14, 055018, doi: 10.1088/1367-2630/14/5/055018 Rau, S., Vegetti, S., & White, S. D. M. 2014，《皇家天文学会月刊》, 443, 957, doi: 10.1093/mnras/stu1189 Refsdal, S. 1964年，《皇家天文学会月刊》, 128, 307 Repp, A., & Ebeling, H. 2018，《皇家天文学会月刊》, 479, 844, doi: 10.1093/mnras/sty1489 Richard, J., Jones, T., Ellis, R., 等. 2011a，《皇家天文学会月刊》, 413, 643, doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.18161.x Richard, J., Kneib, J.-P., Ebeling, H., 等. 2011b，《皇家天文学会月刊》, 414, L31, doi: 10.1111/j.1745-3933.2011.01050.x Richard, J., Kneib, J.-P., Limousin, M., Edge, A., & Jullo, E. 2010a，《皇家天文学会月刊》, 402, L44, doi: 10.1111/j.1745-3933.2009.00796.x Richard, J., Kneib, J.-P., Jullo, E., 等. 2007年，《天体物理学杂志》, 662, 781, doi: 10.1086/517875 Richard, J., Smith, G. P., Kneib, J.-P., 等. 2010b，《皇家天文学会月刊》, 404, 325, doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.16274.x Richard, J., Jauzac, M., Limousin, M., 等. 2014，《皇家天文学会月刊》, 444, 268, doi: 10.1093/mnras/stu1395 Richard, J., Patricio, V., Martinez, J., 等. 2015，《皇家天文学会月刊》, 446, L16, doi: 10.1093/mnrasl/slu150 Richard, J., Claeyssens, A., Lagattuta, D., 等. 2021年，《天文学与天体物理学》, 646, A83, doi: 10.1051/0004-6361/202039462 Rihtar˘si˘c, G., Brada˘c, M., Desprez, G., 等. 2025年，《天文学与天体物理学》, 696, A15, doi: 10.1051/0004-6361/202451117

Rihtarˇsiˇc, G., Bradaˇc, M., Desprez, G., 等. 2026年, 《天文学与天体物理学》, 710, A207, doi: 10.1051/0004-6361/202659214 Roberts-Borsani, G., Treu, T., Chen, W., 等. 2023, 《自然》, 618, 480, doi: 10.1038/s41586-023-05994-w Robertson, A., Massey, R., & Eke, V. 2017年, 《皇家天文学会月刊》, 465, 569, doi: 10.1093/mnras/stw2670 Rodney, S. A., Strolger, L.-G., Kelly, P. L., 等. 2016, 《天体物理学杂志》, 820, 50, doi: 10.3847/0004-637X/820/1/50 Rodney, S. A., Balestra, I., Bradac, M., 等. 2018, 《自然·天文学》, 2, 324, doi: 10.1038/s41550-018-0405-4 Salmon, B., Coe, D., Bradley, L., 等. 2018, 《天体物理学杂志快报》, 864, L22, doi: 10.3847/2041-8213/aadc10 Salmon, B., Coe, D., Bradley, L., 等. 2020, 《天体物理学杂志》, 889, 189, doi: 10.3847/1538-4357/ab5a8b Santos, J. S., Balestra, I., Tozzi, P., 等. 2016, 《皇家天文学会月刊》, 456, L99, doi: 10.1093/mnrasl/slv179 Sarrouh, G. T. E., Asada, Y., Martis, N. S., 等. 2026年, 《天体物理学杂志增刊》, 282, 3, doi: 10.3847/1538-4365/ae1611 Schaerer, D., Boone, F., Jones, T., 等. 2015, 《天文学与天体物理学》, 576, L2, doi: 10.1051/0004-6361/201425542 Schmidt, R. W., & Allen, S. W. 2007年, 《皇家天文学会月刊》, 379, 209, doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.11928.x Schuldt, S., Grillo, C., Acebron, A., 等. 2026年, 《天文学与天体物理学》, 707, A370, doi: 10.1051/0004-6361/202557680 Schuldt, S., Grillo, C., Caminha, G. B., 等. 2024年, 《天文学与天体物理学》, 689, A42, doi: 10.1051/0004-6361/202449528 Scofield, Z. P., Jee, M. J., Cha, S., & Park, H. 2025年, 《天体物理学杂志》, 993, 226, doi: 10.3847/1538-4357/ae07da Sharon, K., Chen, M. C., Mahler, G., Coe, D., & RELICS：再电离引力透镜星系团巡天. 2023, 《天体物理学杂志增刊》, 264, 15, doi: 10.3847/1538-4365/aca7c3 Sharon, K., & Johnson, T. L. 2015, 《天体物理学杂志快报》, 800, L26, doi: 10.1088/2041-8205/800/2/L26 Sif´on, C., Menanteau, F., Hughes, J. P., Carrasco, M., & Barrientos, L. F. 2014, 《天文学与天体物理学》, 562, A43, doi: 10.1051/0004-6361/201321638 Smith, G. P., Kneib,J., Smail, I., 等.2005, 《皇家天文学会月刊》, 359, 417, doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.08911.x Smith, G. P., Ebeling, H., Limousin, M., 等. 2009, 《天体物理学杂志快报》, 707, L163, doi: 10.1088/0004-637X/707/2/L163 Somma, C., Caminha, G. B., & Suyu, S. H. 2025年, 《天文学与天体物理学》, 698, A161, doi: 10.1051/0004-6361/202450857 Soucail, G., Fort, B., Mellier, Y., & Picat, J. P. 1987, 《天文学与天体物理学》, 172, L14 Soucail, G., Mellier, Y., Fort, B., Mathez, G., & Cailloux, M. 1988, 《天文学与天体物理学》, 191, L19 Sun, F., Bauer, F., Bian, F., 等. 2023, MAGNIF：前沿场中利用近红外相机棱镜开展的中波段天体物理学, , JWST Proposal. 第2周期, 编号：#2883 Suyu, S. H., Acebron, A., Grillo, C., 等。2026, 《天文学与天体物理学》, 708, A291, doi: 10.1051/0004-6361/202557235 Topping, M. W., Stark, D. P., Senchyna, P., 等。2024, 《皇家天文学会月刊》, 529, 3301, doi: 10.1093/mnras/stae682 Treu, T., Schmidt, K. B., Brammer, G. B., 等。2015, 《天体物理学杂志》, 812, 114, doi: 10.1088/0004-637X/812/2/114 Treu, T., Brammer, G., Diego, J. M., 等。2016, 《天体物理学杂志》, 817, 60, doi: 10.3847/0004-637X/817/1/60 Treu, T., Roberts-Borsani, G., Bradac, M., 等。2022, 《天体物理学杂志》, 935, 110, doi: 10.3847/1538-4357/ac8158 Tsujita, A., Kohno, K., Huang, S., 等。2025年, 《天体物理学杂志》, 989, 115, doi: 10.3847/1538-4357/adb41d Tucker, W. H., Tananbaum, H., & Remillard, R. A. 1995, 《天体物理学杂志》, 444, 532, doi: 10.1086/175627 Umetsu, K., Zitrin, A., Gruen, D., 等。2016, 《天体物理学杂志》, 821, 116, doi: 10.3847/0004-637X/821/2/116 Umetsu, K., Medezinski, E., Nonino, M., 等。2014, 《天体物理学杂志》, 795, 163, doi: 10.1088/0004-637X/795/2/163 Valentino, F., Brammer, G., Gould, K. M. L., 等。2023, 《天体物理学杂志》, 947, 20, doi: 10.3847/1538-4357/acbefa Van Rossum, G., & Drake, F. L. 2009, Python 3 参考手册（加利福尼亚州斯科茨谷：CreateSpace） Vanzella, E., Claeyssens, A., Welch, B., 等。2023a, 《天体物理学杂志》, 945, 53, doi: 10.3847/1538-4357/acb59a Vanzella, E., Loiacono, F., Bergamini, P., 等。2023b, 《天文学与天体物理学》, 678, A173, doi: 10.1051/0004-6361/202346981 Vanzella, E., Messa, M., Adamo, A., 等。2026年, 《天文学与天体物理学》, 705, A171, doi: 10.1051/0004-6361/202556570 Vega-Ferrero, J., Diego, J. M., & Bernstein, G. M. 2019年, 《皇家天文学会月刊》, 486, 5414, doi: 10.1093/mnras/stz1217 Vikaeus, A., Zackrisson, E., Wilkins, S., 等。2024年, 《皇家天文学会月刊》, 529, 1299, doi: 10.1093/mnras/stae323 Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., 等。2020, 《自然—方法》, 17, 261, doi: 10.1038/s41592-019-0686-2 Voit, G. M. 2005, 《现代物理学评论》, 77, 207, doi: 10.1103/RevModPhys.77.207 Wagg, T., & Broekgaarden, F. S. 2024年, arXiv预印本, arXiv:2406.04405。https://arxiv.org/abs/2406.04405 Welch, B., Coe, D., Diego, J. M., 等。2022a, 《自然》, 603, 815, doi: 10.1038/s41586-022-04449-y Welch, B., Coe, D., Zackrisson, E., 等。2022b, 《天体物理学杂志快报》, 940, L1, doi: 10.3847/2041-8213/ac9d39 Welch, B., Coe, D., Zitrin, A., 等。2023, 《天体物理学杂志》, 943, 2, doi: 10.3847/1538-4357/aca8a8 Werle, A., Poggianti, B., Moretti, A., 等。2022, 《天体物理学杂志》, 930, 43, doi: 10.3847/1538-4357/ac5f06 Wes McKinney。2010, 载于《第9届 Python 科学会议论文集》, 编者 St´efan van der Walt & Jarrod Millman, 56 – 61, doi: 10.25080/Majora-92bf1922-00a

Williams, H., Kelly, P. L., Chen, W., 等。2023, 《科学》, 380, 416, doi: 10.1126/science.adf5307Windhorst, R. A., Cohen, S. H., Jansen, R. A., 等。2023, 《天文学杂志》, 165, 13, doi:10.3847/1538-3881/aca163Yanagisawa, H.,Ouchi,M., Golubchik, M., 等。2026, arXiv预印本, arXiv:2601.06015, doi: 10.48550/arXiv.2601.06015Zackrisson, E., Hultquist, A., Kordt, A., 等。2024年, 《皇家天文学会月刊》, 533, 2727, doi: 10.1093/mnras/stae1881Zhang, Z., Li, M., Oguri, M., 等。2025a, arXiv预印本, arXiv:2512.05180, doi: 10.48550/arXiv.2512.05180Zitrin, A. 2021, 《天体物理学杂志》, 919, 54, doi: 10.3847/1538-4357/ac0e32Zitrin, A. 2026年, arXiv预印本, arXiv:2605.15189, doi: 10.48550/arXiv.2605.15189Zitrin, A., & Broadhurst, T. 2009, 《天体物理学杂志快报》, 703, L132, doi: 10.1088/0004-637X/703/2/L132 Zitrin, A.,Broadhurst, T., Barkana, R., Rephaeli, Y., &Benítez, N. 2011a, 《皇家天文学会月刊》, 410, 1939, doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17574.xZitrin, A., Broadhurst, T., Rephaeli, Y., & Sadeh, S.2009, 《天体物理学杂志快报》, 707, L102, doi: 10.1088/0004-637X/707/1/L102Zitrin, A., Menanteau, F., Hughes, J. P., 等。2013a, 《天体物理学杂志快报》, 770, L15, doi: 10.1088/2041-8205/770/1/L15Zitrin, A., Broadhurst, T., Coe, D.,等。2011b, 《天体物理学杂志》, 742, 117, doi: 10.1088/0004-637X/742/2/117Zitrin, A., Moustakas,J., Bradley, L., 等。2012a, 《天体物理学杂志快报》, 747, L9, doi: 10.1088/2041-8205/747/1/L9Zitrin, A., Rosati, P., Nonino, M., 等。2012b, 《天体物理学杂志》, 749, 97, doi: 10.1088/0004-637X/749/2/97Zitrin, A., Meneghetti, M., Umetsu, K., 等。2013b, 《天体物理学杂志快报》, 762, L30, doi: 10.1088/2041-8205/762/2/L30Zitrin, A., Fabris, A., Merten, J., 等。2015, 《天体物理学杂志》, 801, 44, doi: 10.1088/0004-637X/801/1/44Zitrin, A., Seitz, S., Monna, A., 等。2017年, 《天体物理学杂志快报》, 839, L11, doi: 10.3847/2041-8213/aa69be

附录

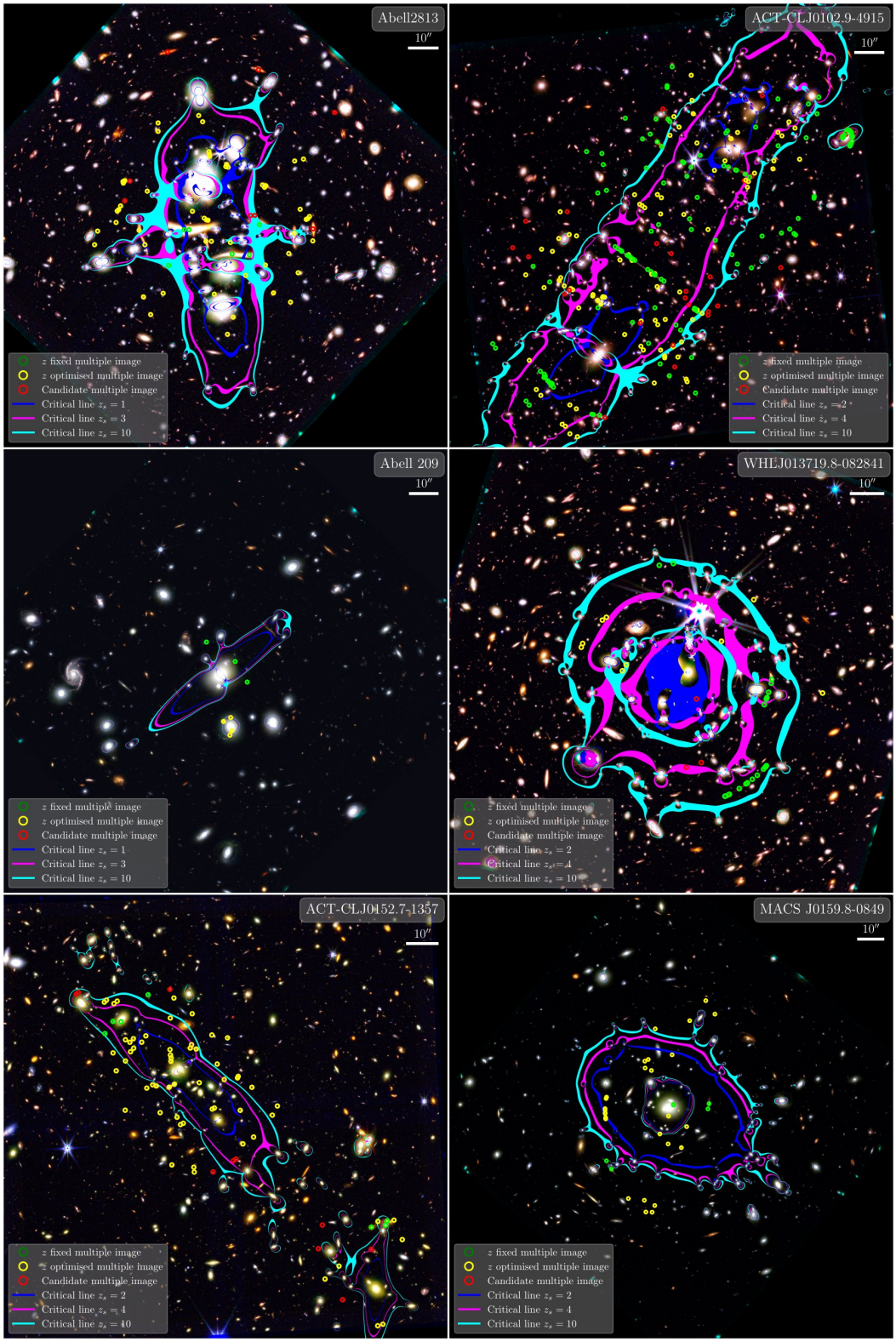



**图8**。 与图1类似。 星系团 A2813、ACTCL0102（El Gordo）、A209、W0137、ACTCL0152、M0159，以临界曲线和多重像系统表示。对于 W0137，临界线表示的是 $|\mu| \geq 300$，而其他星系团为 100。

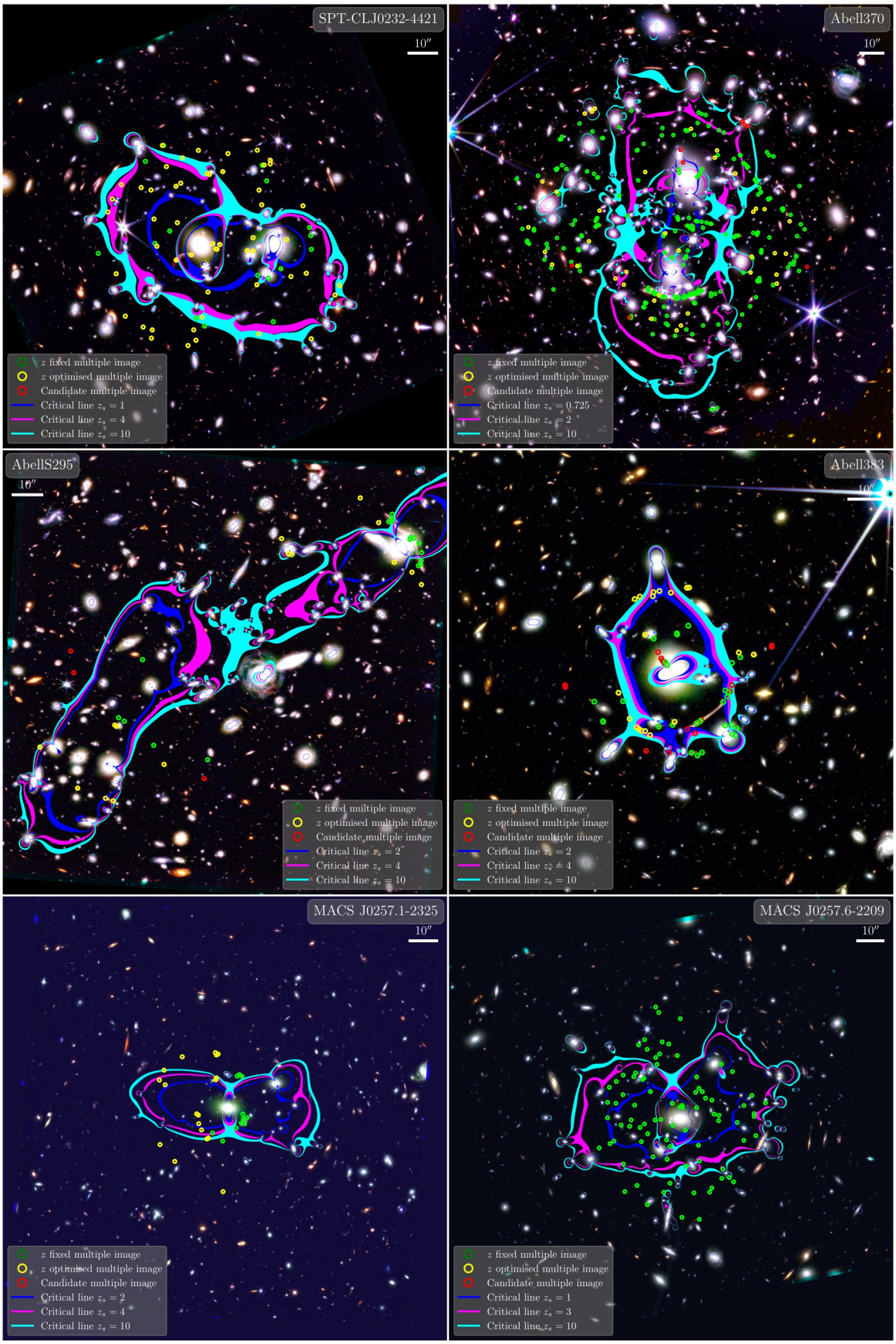



**图 9**。星系团 SPTCL0232、A370、AS295、A383、M0257、A402，标示了临界曲线和多重像系统。

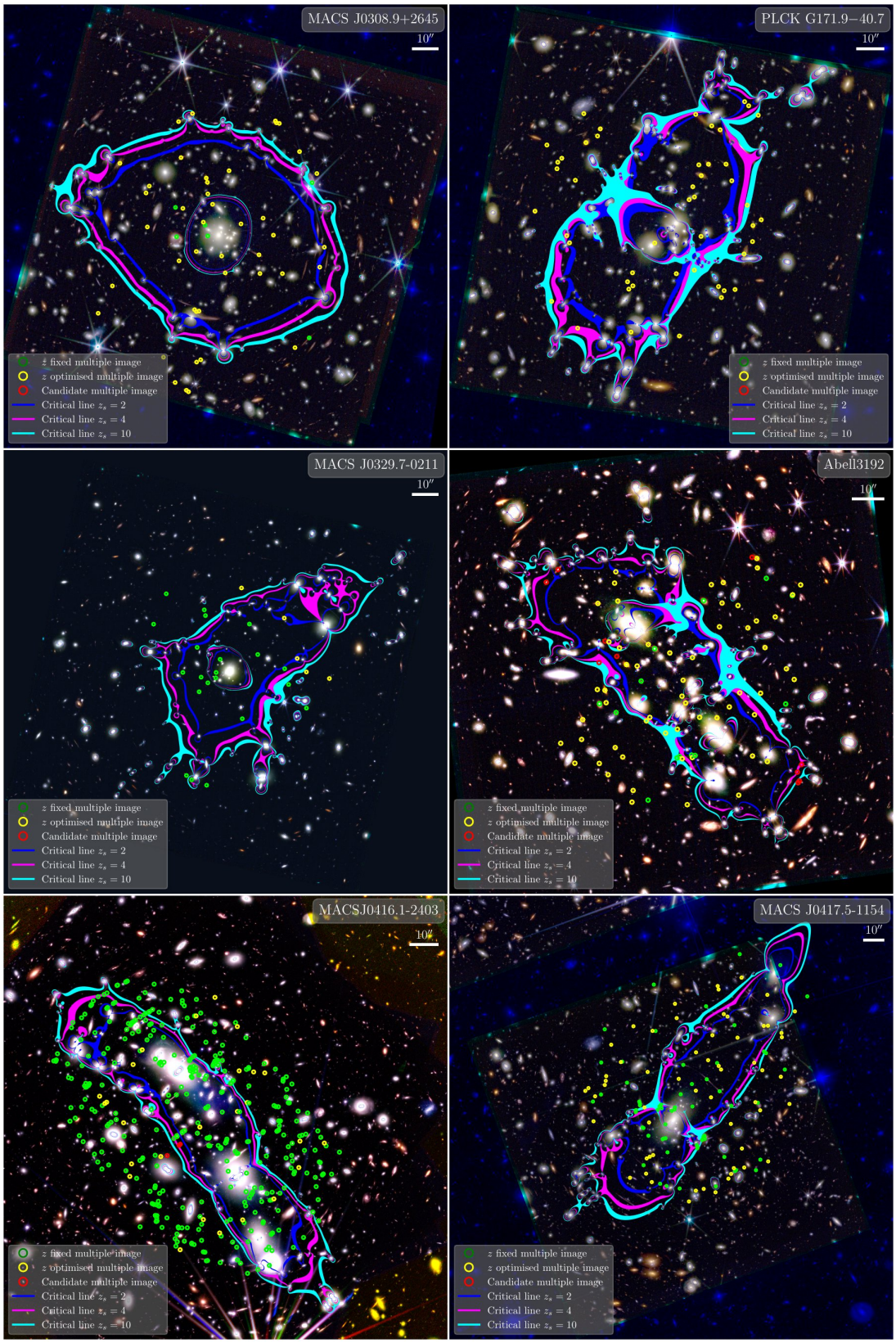



**图10**。 星系团 M0308、PLCKG171、M0329、A3192、M0416、M0417，以临界曲线和多重像系统表示 .

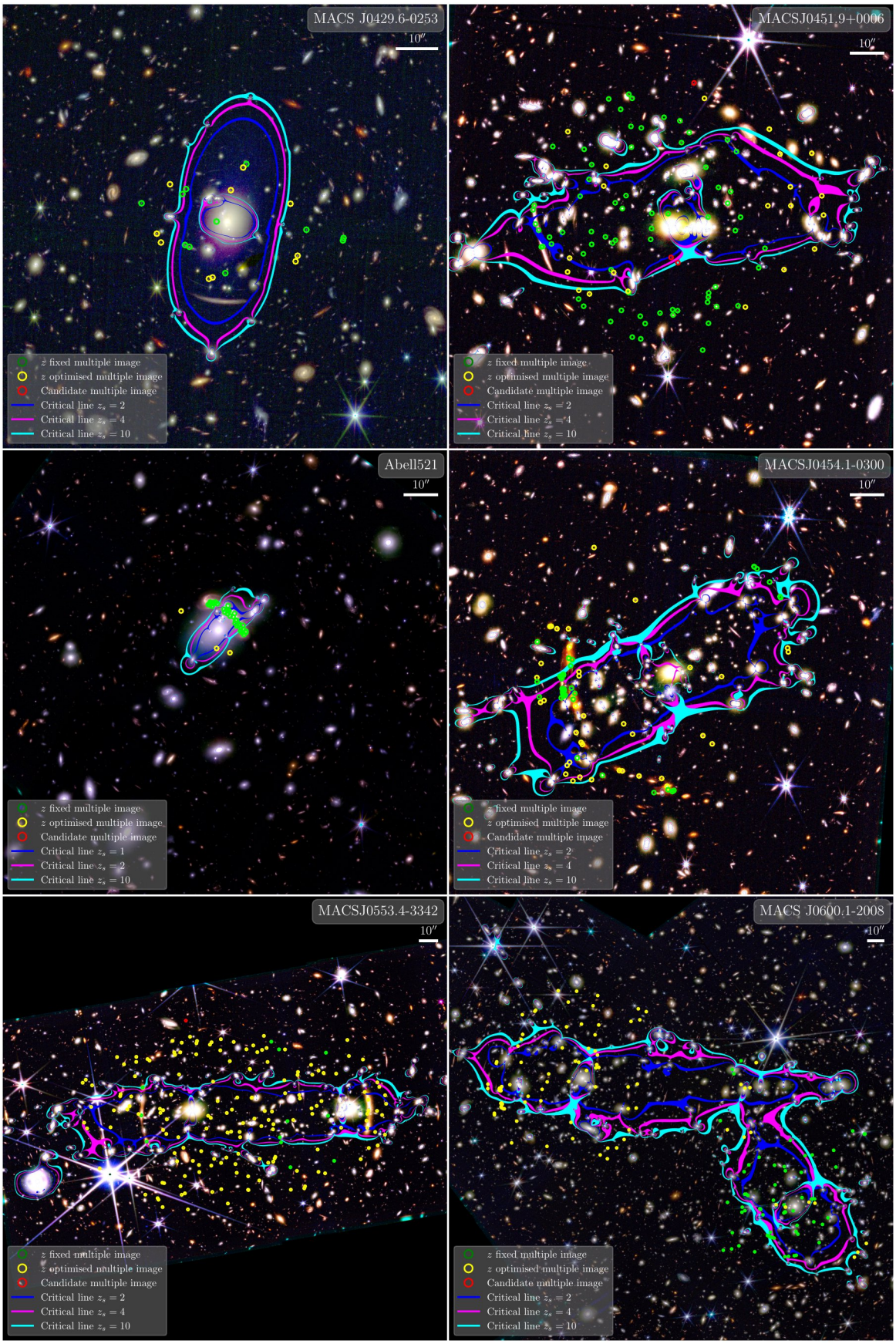



**图11**。星系团 M0429、M0451、A521、M0454、M0553、R0600，以临界曲线和多重像系统表示。

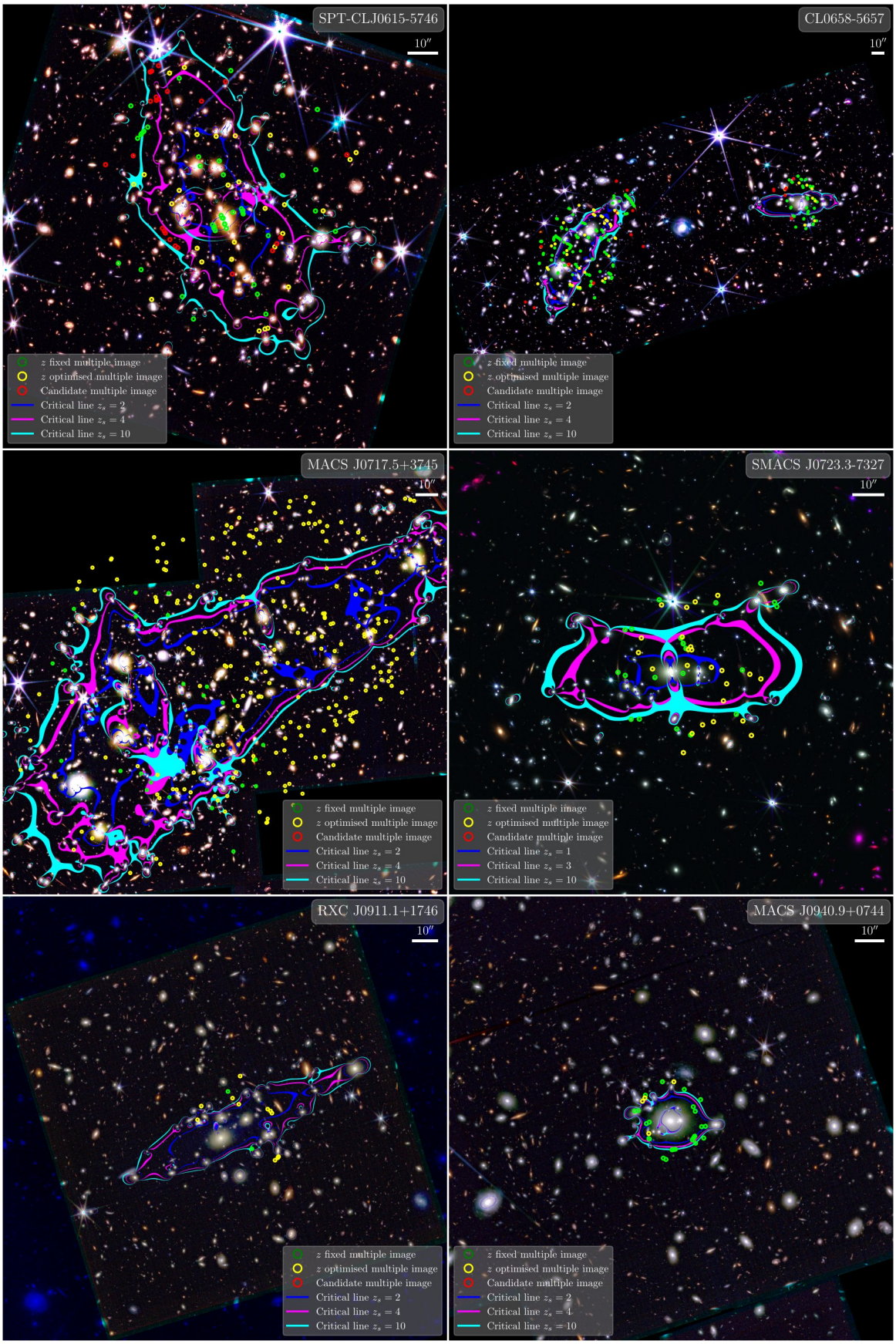



**图12.** 星系团 SPTCL0615、CL0658（子弹星系团）、M0717、SM0723、R0911 和 M0940，以临界曲线和多重像系统表示。

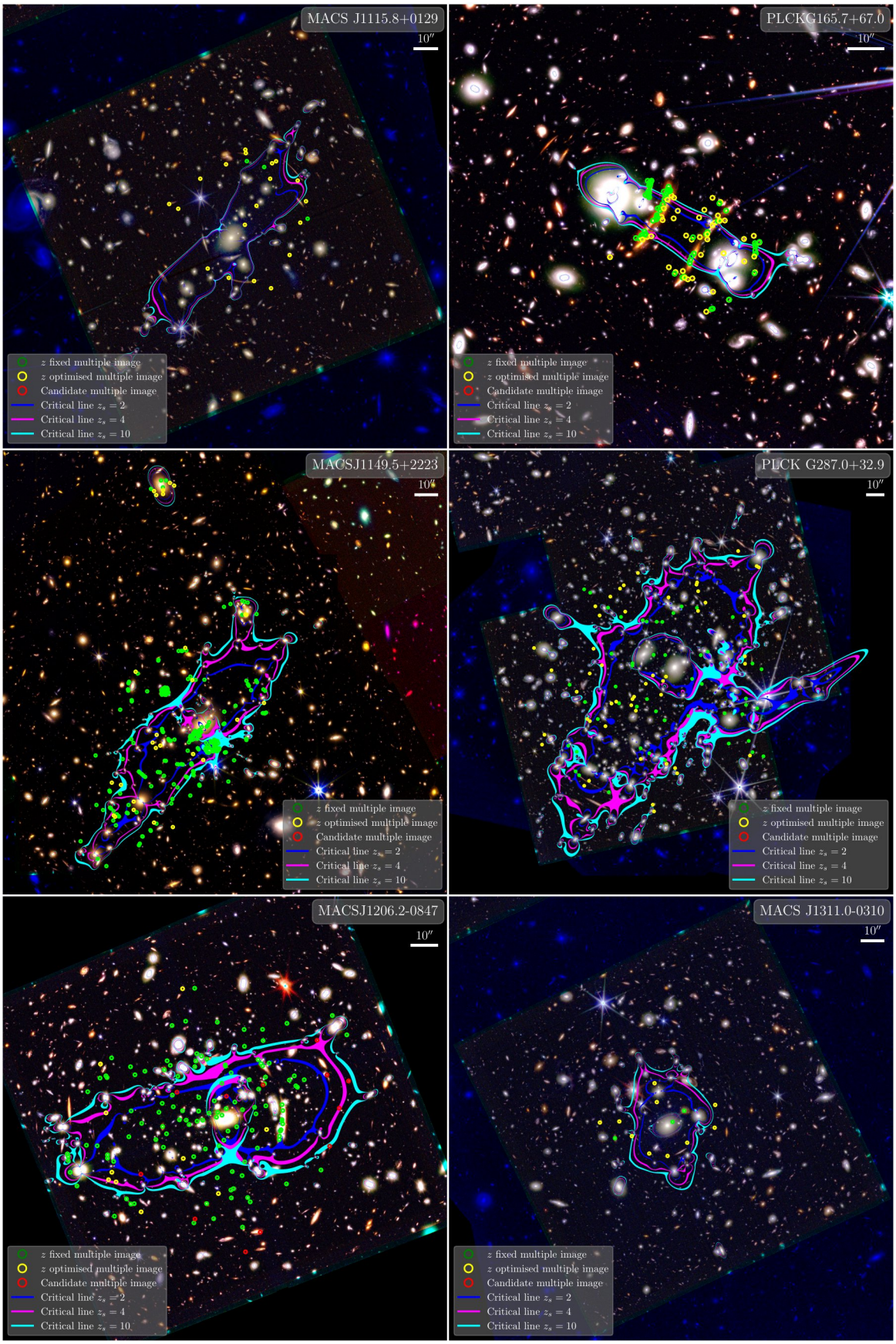



**图13**。 星系团 M1115、PLCKG165、M1149、PLCKG287、M1206、M1311，以临界曲线和多重像系统表示。

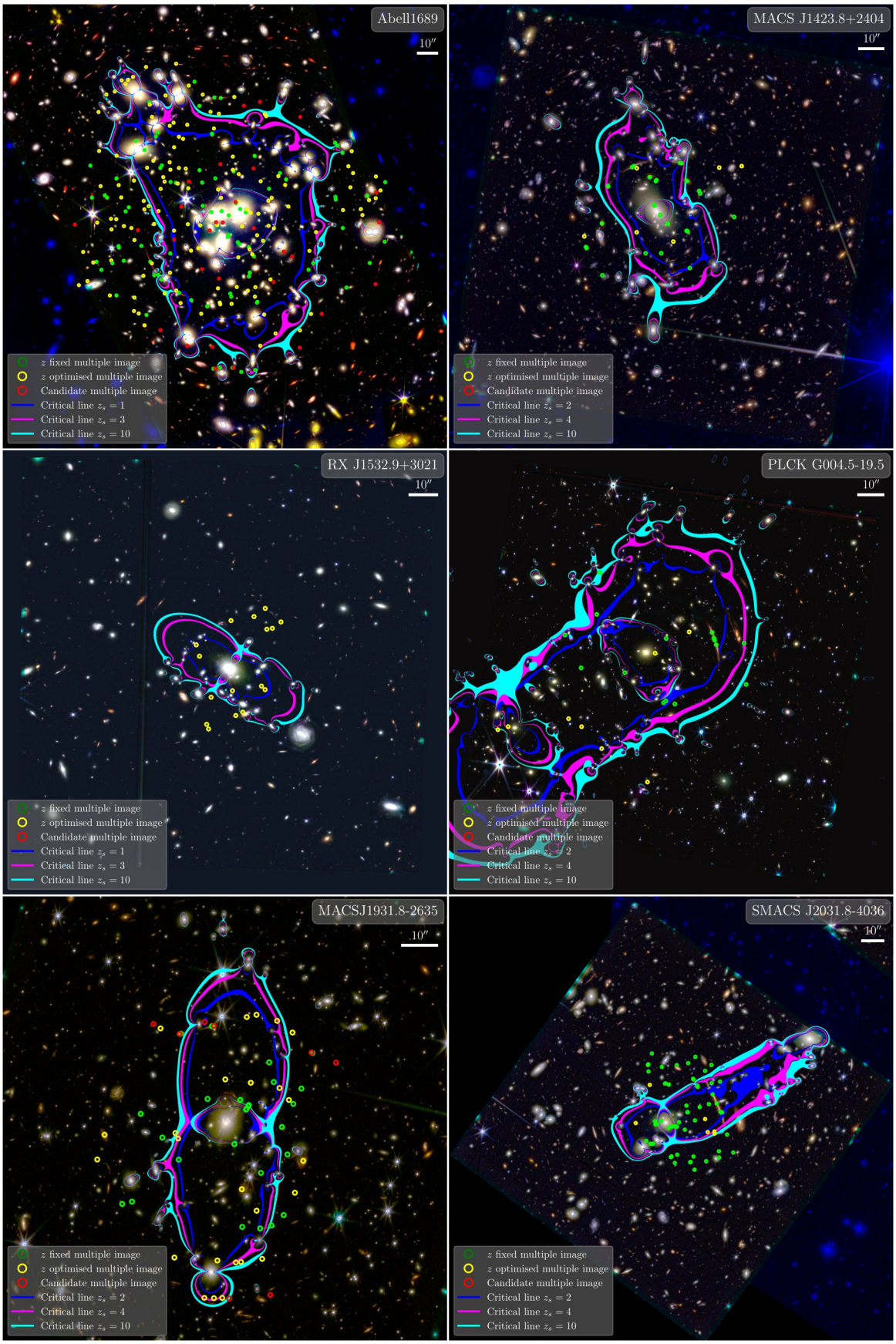



**图14.** 星系团 A1689、M1423、R1532、PLCKG004、M1931、SM2031，以临界曲线和多重像系统表示。

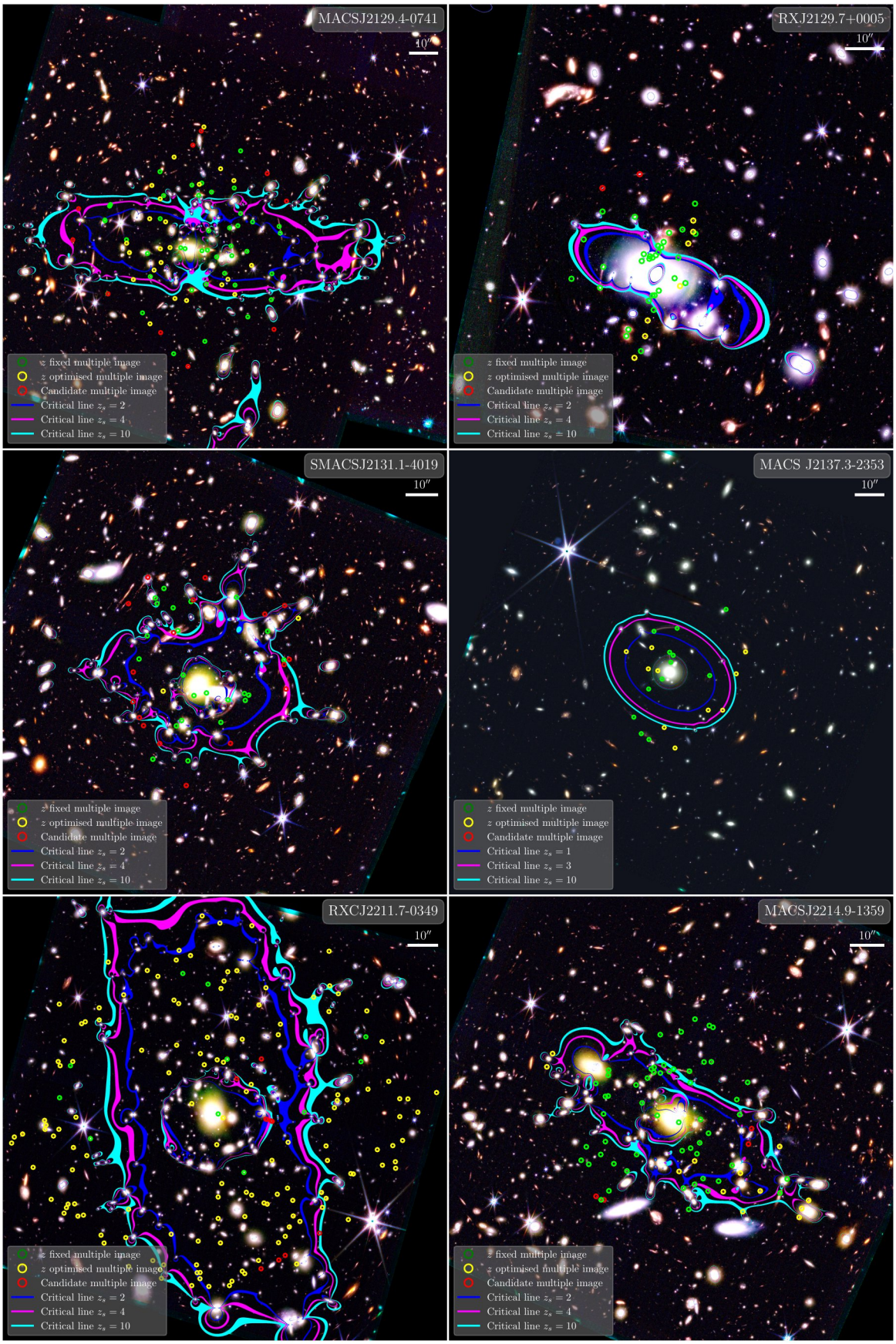



**图15**。 星系团 M2129、R2129、SM2131、M2137、R2211、M2214，以临界曲线和多重像系统表示。

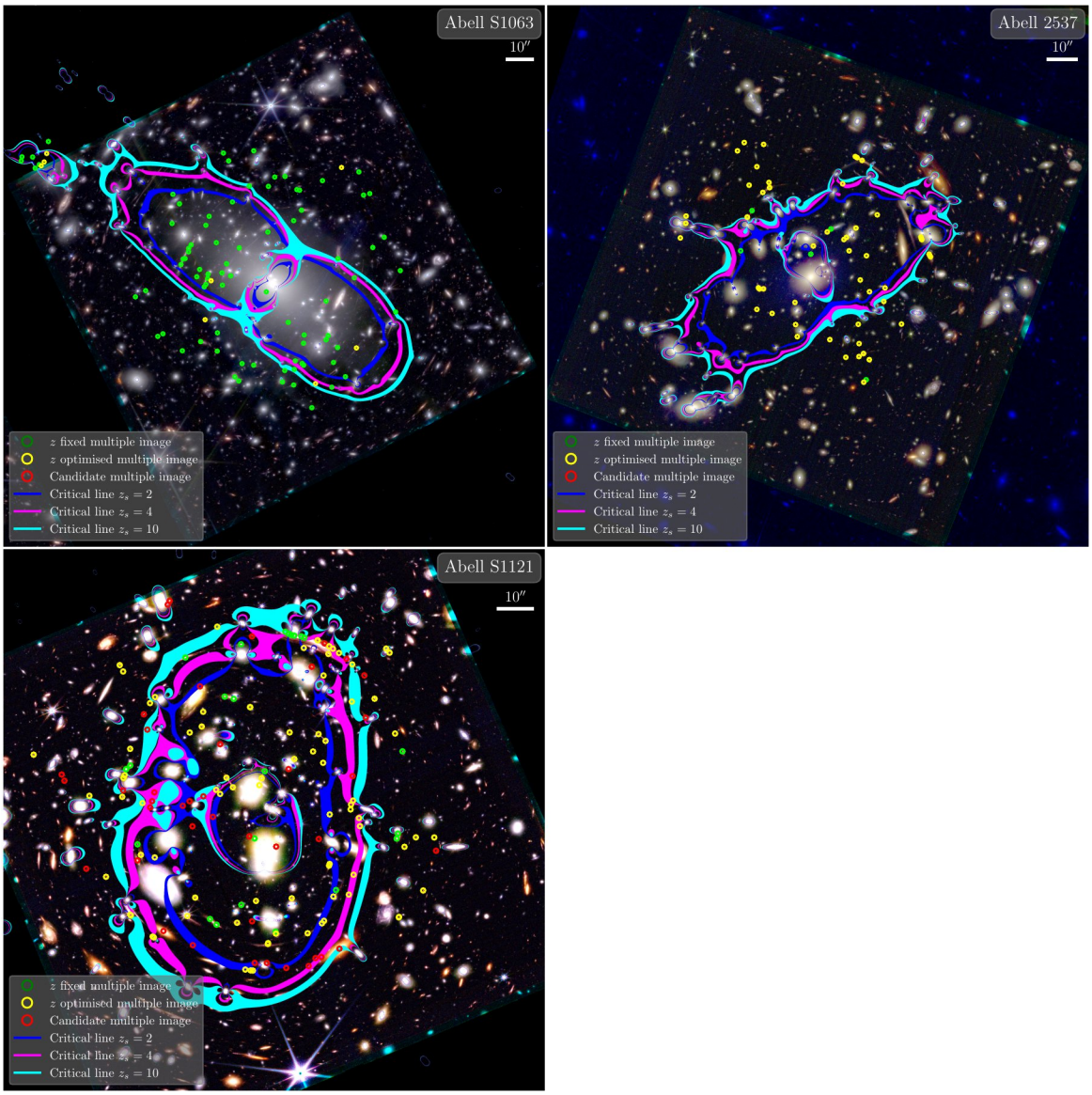



**图16**。 星系团 AS1063、A2537、AS1121，以临界曲线和多重像系统表示。