



Subject Areas:

physics, astrophysics, galaxies,
cosmology, observational
astronomy

Keywords:

引力透镜效应, 引力波, 伽马射线暴, 千新星, 超新星, 射电瞬变源

Author for correspondence:

Luka Vujeva

e-mail: luka.vujeva@nbi.ku.dk

lenscat 一个公共和社区 贡献的已知强引力透镜 目录

L. Vujeva, R. K. L. Lo, J. M. Ezquiaga,
J. C. L. Chan

Center of Gravity, Niels Bohr Institute,
Blegdamsvej 17, 2100 Copenhagen, Denmark

我们介绍了 **lenscat**, 一个由公众和社区贡献的通过电磁调查发现的强大引力透镜公共目录。**lenscat** 的主要目标是编纂一个简单且易于访问的目录, 可用于各种透镜研究, 例如促进寻找候选强引力透镜瞬变事件宿主星系的工作。我们还提供了一个 python 包来与社区常用工具进行交互。这允许最终用户无论是否具备透镜专业知识都能在给定搜索区域内获取已知的强大透镜列表, 并根据各自的搜索概率对它们进行排序。在这里, 我们通过交叉匹配一对有趣事件 GW170104-GW170814 的引力波联合天区定位区域来说明这一点。还包括与其他短伽马射线暴进行交叉匹配的其他示例。得益于 **lenscat** 开放且简单的基础设施, 透镜社区成员可以直接添加他们自己研究中新发现的透镜以帮助创建尽可能详尽和易于访问的持久目录。

1. 介绍

引力透镜在电磁 (EM) 光谱中有着悠久的历史，并为我们提供了关于星系和星系团暗物质晕结构的 [1] 重大见解，以及宇宙的大尺度结构。这些观测大多对应于静态或可变源，如星系或类星体，它们发出的光线被诸如星系或星系团这样的宇宙结构所透镜化。到目前为止，我们积累了数千次这样的观测。然而，我们刚刚开始探测强引力透镜化的瞬态现象（即 8 个超新星 [2–10]），并且尚未观察到任何透镜化的多信使事件。发现透镜化的瞬变现象是引力透镜学的下一个前沿领域，而一个强烈的透镜化多信使事件将是对广义相对论和宇宙学 [1,11–14] 极为宝贵的探测工具。鉴于强引力透镜现象 [15–17] 的稀有性以及当前探测器灵敏度（例如，对于引力波 (GW) 探测器，请参见 [18–20]）的限制，找到一个强烈透镜化的多信使瞬变体将不会是易事。

成功识别强引力透镜瞬变事件的宿主星系在很大程度上取决于拥有一个完整且公开可用的所有已知强引力透镜目录，以确保考虑所有可能的透镜候选者。鉴于观测时间有限，**lenscat** 可用于优先进行大范围 $10 - 10^4$ 平方度天空定位区域内潜在候选者的深度观测，这通常是双黑洞并合事件 [21] 的特征。这还将有助于更快地识别宿主星系并跟进被透镜化的瞬变事件，例如双中子星，并使科研人员能够在并合后尽快对事件进行详细的光谱分析。

尽管有一些数据库包含了许多透镜，如 Master¹ [22]，大多数透镜目录要么是在合作内部私有的，要么没有被积极维护。**lenscat** 目录是一个将在此文中介绍的完全公开的目录，创建它的目的是为了存储已知强引力透镜星系和星团的简单列表，并且也提供一个易于使用的平台，未来使用宽视场望远镜如 Vera Rubin 天文台 (VRO) [23] 和 Euclid [24] 的调查可以用来存储新发现的透镜以供社区其他成员使用。此外，鉴于我们将在不久的将来观察到的瞬变数量激增（例如， $\sim 10^7$ 在十年的调查中 [25] 和每年 $\sim 10^3$ 与当前引力波探测器在其设计灵敏度下（[21]）），验证已知透镜目录中的候选者将更加重要。

论文组织如下：第 2 节将描述目录及其特点，第 3 节将展示一个目录使用的示例，第 4 节将讨论 **lenscat** 将促进的未来科学目标。

2. **lenscat** 目录

lenscat 目录是对现有公开的强透镜目录 [26–40] 的汇编。我们的目录仅保留与每个透镜相关的必要量，它们列在表 1 中。一个值得注意的例外是排除了与每个透镜系统相关联的源红移，因为目录中的条目只有很小一部分具有源红移的测量值。此外，诸如星系团透镜等系统可能单个透镜就有许多源红移。为了进一步获取信息，每个透镜相关的参考文献被提供给用户，以便对更详细分析感兴趣的用户可以轻松访问所有信息。²

¹<https://test.masterlens.org/index.php>

²完整的镜头来源研究列表可以在项目 GitHub 页面 <https://github.com/lenscat/lenscat?tab=readme-ov-file> 上找到。该列表会随着新镜头添加到目录中而不断更新。

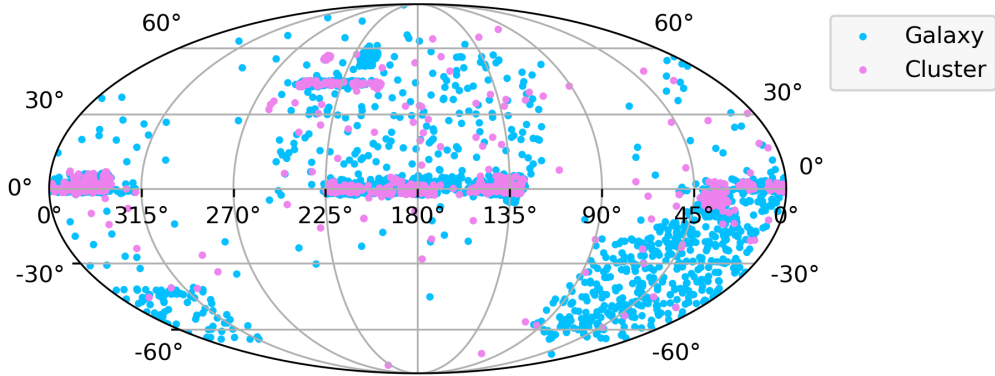


图 1. 透镜星系（蓝色）和星系团（粉色）在 *lenscat* 中的空间分布。目前，我们的目录中包含了 4587 个已知的透镜。未发现的透镜主要对应于银河平面，这主要是由于调查数据质量不足。

表 1. 描述目录中每个镜头的参数列表。

Column Name	Description
名称	Names of galaxies/galaxy clusters
RA [度]	Right ascension in degrees
DEC [度]	Declination in degrees
透镜	Lens redshift (if known)
类型	Type of lens (i.e. galaxy or galaxy cluster)
分级	Grading whether it is a "confident" lens or a "probable" lens (see following section for explanation of the grading scheme)
参考	Reference to the corresponding catalog or study

任何镜头目录中的一个重要变量是分配给每个镜头的分级。然而，这些在不同调查中通常是大不相同的。为了最小化这种差异，本目录所采用的镜头分级是一个简单的惯例，由贡献者研究的命名法决定。例如，在社区的一些成员只会认为那些与系统相关的多图谱已被光谱确认的镜头是“有信心”的，而基于机器学习的研究则会将这一区别给予其研究中被评为最高等级的镜头。由于缺乏统一定义，“*lenscat*”中的分级仅作为用户的快速参考，并不能视为系统的绝对真实情况。个体贡献者创建的深入镜头分级系统可以在与目录中每个镜头链接的参考资料中看到，这些信息应该为需要进一步信息的最终用户提供附加信息。“镜头分类”目录将“有信心”的镜头定义为具有光谱确认多图谱或位于展示镜头的研究中的最高分级。如果社区不同意某个镜头的分类，鼓励提交拉取请求到 GitHub 存储库以更改该镜头的分类。

有三种主要方式来使用 `lenscat`。第一种是通过 python 包³，该包包含目录以及一套旨在促进目录常见用例的工具（将在第 3 节中进一步讨论）。三个主要功能基本搜索与 `.search()`、使用 `.crossmatch()` 与天空图进行交叉匹配，以及使用 `.plot()` 进行可视化。请注意，这些函数将返回一个 `Catalog` 对象，因此它们可以组合在一起（例如，`.crossmatch().search()`）。为了快速搜索，可以使用网络界面⁴，它包含了 Python 包中的许多功能，但以一种初学者友好的方式呈现，并且无需编写任何代码。最后，目录也作为纯 csv 文件提供给希望用自己首选编程语言编写的用户。

3. 交叉匹配

`lenscat` 的核心功能之一是交叉匹配，这将有助于验证和找到透镜瞬变的主星系、星系群或星系团。交叉匹配对于寻找候选透镜瞬变的多信使对应物也将至关重要。这对于被透镜化的引力波及其潜在电磁信号尤其相关。利用给定天空可信区域内每个透镜的可用信息，可以对多个图像的电磁光度学/光谱学图像属性与引力波观测值（如时间延迟和相对放大因子 [41–44]）进行额外的一致性检查。这将使电磁后续观测能够优先观察最符合这些一致性检查的透镜系统。

在 python 包中有多种选项允许用户自定义搜索。在本节中，我们展示了一个示例，即假设两个引力波事件是同一来源的两个强透镜化图像，并找到位于给定置信区域内的已知强透镜。此功能实现为 `.crossmatch()`。该函数只是 `ligo` 天图⁵ 中交叉匹配 () 函数的一个包装器，用于将 GW 天图与来自透镜目录的给定坐标列表进行交叉匹配。

作为一个简单的研究案例，我们现在考虑一对有趣的引力波事件 GW170104-GW170814，它们的天空定位区域重叠 [45]，如图 2 左侧所示。尽管这两个事件被认为不太可能是真实的透镜成像对 [16,17,41,45,46]，我们只是用它们来展示镜头分类的能力。例如，为了将 GW170814 的联合引力波天图 [47] 和 GW170104 的 [48] 与仅在 `lenscat` 中的高置信度星系透镜进行交叉匹配，只需运行 `lenscat.catalog` 搜索（镜头类型=

"星系")。交叉匹配 ("联合_天空图.fits.gz")。结果绘制在图 2 的右侧。

这返回了在给定可信区域内找到的透镜目录。这样的搜索（截断）输出显示如下：

```
<CrossmatchResult length=4587>
      name      RA      DEC      zlens  type  grading  searched probability  searched area
      str20    float64  float64  str15   str7   str9      float64      float64
-----
DESJ0303-4626    45.9507 -46.44066    1.37 galaxy probable  0.2704101345085984  1.4195865170954403
DESJ0310-4647    47.63526 -46.78398    0.71 galaxy probable  0.504649447144695   3.258819856796524
```

³<https://pypi.org/project/lenscat/>

⁴<https://lenscat.streamlit.app/>

⁵<https://git.ligo.org/lscsoft/ligo.skymap>

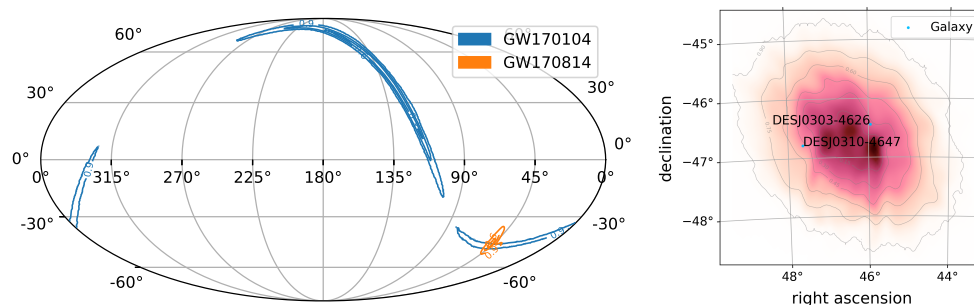


图 2. GW170104 和 GW170814 的天空地图 (左), 以及与镜头分类关联的联合天空地图 (右)。

在这种情况下, 可以看到只有 2 个星系透镜位于 95% 可信区域内。请注意, 由于目录不完整, 显示在天图中的两个透镜不能保证是该区域内的唯一透镜, 也不能保证它们就是与相应透镜事件相关的宿主星系。

重要的是要强调, **lenscat** 不仅是用于透镜引力波的工具, 而且几乎与任何瞬态天图兼容 (即伽马射线暴 (GRB)、快速射电暴 (FRB) 等)。例如, 可以通过下载 “GRB 240229A” 的天图到 FITS 文件格式⁶ 并运行镜头目录。交叉匹配 (“grbskymap.fits”) 来交叉匹配该天图, 其中 **grbskymap.fits** 是与 “GRB 240229A” 相关的天图名称。在这种情况下, 在 70% 置信区域内会找到 5 个透镜。

4. 未来展望

lenscat 的主要目的是促进对透镜瞬变的后续搜索。如前面部分所述, 这可以应用于各种瞬变现象, 例如引力波、伽马射线暴和快速射电暴。有了足够完整的透镜目录, 后续观测就可以优先覆盖其搜索区域内的透镜视线, 从而加快发现透镜电磁对应体的过程。这将进一步得益于 **lenscat** 的易用性, 这将使该领域的专家和新手都能尽快从目录中获取所需信息, 从而缩短后续响应时间。

然而, 识别强引力透镜引力波宿主星系的成功将在很大程度上取决于电磁目录的完整性。因此, **lenscat** 是一个由社区贡献和维护的目录, 意味着透镜领域的任何成员都可以提交新的透镜, 或用更新的信息替换当前透镜的相关信息。此过程完全通过 GitHub 拉取请求完成, 并将由管理员批准。使这一流程尽可能顺畅是这类目录成功的关键, 因为向目录提交新透镜越容易, 社区成员就越有可能做出贡献。社区成员还可以通过审核新透镜的提交或更改现有已知透镜的相关信息来为项目贡献力量。

目前, 聚类尺度的透镜被定义为基于其质心是否位于指定的可信区域内而落入该区域。然而, 集群的强引力透镜区域可能延伸, 这意味着感兴趣的某些部分可能会超出可信区域范围。代码的未来版本可以根据其质量或爱因斯坦半径来增加一个

⁶ 公共星图可以在以下位置找到 https://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/fermi/data/gbm/triggers/2024/bn240229588/quicklook/glg_healpix_all_bn240229588.fit

集群被视为属于天空图中可信区域的部分，以确保那些略高于可信区域之外的聚类仍然被认为是已知透镜的一部分。

社区贡献的透镜目录将特别重要，因为即将推出的广域望远镜（如 Vera Rubin 天文台或 Euclid）将会发现大量新的透镜。这些望远镜所发现的透镜将是建立完整目录的关键，因为它们结合了深度、宽搜索区域和高频率（这将允许发现更多的透镜瞬变）。将所有新发现的透镜集中在一个开放访问的目录中对于天文和天体物理学界充分利用数据至关重要。将所有已知的透镜集中在一个目录中也将促进对透镜群体以及被透镜图像群体的研究，这将了解宇宙中的暗物质晕分布及其属性提供见解。

Acknowledgements. 作者感谢 Anupreeta More 和 Masamune Oguri 提供的有益评论和见解。重力中心是由丹麦国家研究基金会资助的卓越中心，基金号为 184。该项目得到了 Villum 基金会的研究资助 VIL37766 和 VIL53101 的支持，以及丹麦国家研究基金会 DNRF 主席项目资助 DNRF162。该项目获得了欧盟地平线 2020 研究与创新计划下的 Marie Skłodowska-Curie 资助协议 No 101131233 的资金支持。JME 还得到了 Marie Skłodowska-Curie 资助协议 No. 847523 INTERACTIONS 的支持。该项目使用了哥本哈根大学 SCIENCE HPC 中心托管的 Tycho 超级计算机。该材料基于 NSF 的 LIGO 实验室的工作，LIGO 实验室是由国家科学基金会全额资助的主要设施。LV 还感谢 Samsung DeX 为撰写本文稿提供的便利。

参考文献

1. Bartelmann, M., *TOPICAL REVIEW Gravitational lensing, Classical and Quantum Gravity*, vol. 27, no. 23, IOP, 2010. [10.1088/0264-9381/27/23/233001](https://doi.org/10.1088/0264-9381/27/23/233001)
2. Arendse, N., *Detecting strongly-lensed type Ia supernovae with LSST*, *arXiv e-prints*, 2023. [10.48550/arXiv.2312.04621](https://arxiv.org/abs/10.48550/arXiv.2312.04621)
3. Kelly, P. L., *Multiple images of a highly magnified supernova formed by an early-type cluster galaxy lens*, *Science*, vol. 347, no. 6226, pp. 1123 – 1126, 2015. [10.1126/science.aaa3350](https://doi.org/10.1126/science.aaa3350)
4. Kelly, P., *Strongly Lensed SN in MACS 2129 Galaxy-Cluster Field*, TNSAN.169, 2022
5. Rodney, S. A., *A gravitationally lensed supernova with an observable two-decade time delay*, *Nature Astronomy*, vol. 5, pp. 1118 – 1125, 2021. [10.1038/s41550-021-01450-9](https://doi.org/10.1038/s41550-021-01450-9)
6. Chen, W., *Shock cooling of a red-supergiant supernova at redshift 3 in lensed images*, *Nature*, vol. 611, no. 7935, pp. 256 – 259, 2022. [10.1038/s41586-022-05252-5](https://doi.org/10.1038/s41586-022-05252-5)
7. Frye, B. L., *The JWST Discovery of the Triply Imaged Type Ia “Supernova H0pe” and Observations of the Galaxy Cluster PLCK G165.7+67.0*, *The Astrophysical Journal*, vol. 961, no. 2, IOP, 2024. [10.3847/1538-4357/ad1034](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad1034)
8. Pierel, J., *Lensed Supernova Encore at $z=2$! The First Galaxy to Host Two Multiply-Imaged Supernovae*, *JWST Proposal. Cycle 2*, p. 6549, 2023
9. Goobar, A., *iPTF16geu: A multiply imaged, gravitationally lensed type Ia supernova*, *Science*, vol. 356, no. 6335, pp. 291 – 295, 2017. [10.1126/science.aal2729](https://doi.org/10.1126/science.aal2729)
10. Goobar, A., *Uncovering a population of gravitational lens galaxies with magnified standard candle SN Zwicky*, *Nature Astronomy*, vol. 7, pp. 1098 – 1107, 2023. [10.1038/s41550-023-01981-3](https://doi.org/10.1038/s41550-023-01981-3)
11. Blandford, R. D. and Narayan, R., *Cosmological applications of gravitational lensing.*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 30, pp. 311 – 358, 1992. [10.1146/annurev.astro.30.1.311](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.30.1.311)

12. Oguri, M., *Strong gravitational lensing of explosive transients*, *Reports on Progress in Physics*, vol. 82, no. 12, IOP, 2019. [10.1088/1361-6633/ab4fc5](https://doi.org/10.1088/1361-6633/ab4fc5)
13. Liao, K., Biesiada, M., and Zhu, Z.-H., *Strongly Lensed Transient Sources: A Review*, *Chinese Physics Letters*, vol. 39, no. 11, IOP, 2022. [10.1088/0256-307X/39/11/119801](https://doi.org/10.1088/0256-307X/39/11/119801)
14. Saha, P., Sluse, D., Wagner, J., and Williams, L. L. R., *Essentials of Strong Gravitational Lensing*, *Space Science Reviews*, vol. 220, no. 1, 2024. [10.1007/s11214-024-01041-w](https://doi.org/10.1007/s11214-024-01041-w)
15. Robertson, A., *What does strong gravitational lensing? The mass and redshift distribution of high-magnification lenses*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 495, no. 4, OUP, pp. 3727 – 3739, 2020. [10.1093/mnras/staa1429](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1429)
16. Dai, L., Zackay, B., Venumadhav, T., Roulet, J., and Zaldarriaga, M., *Search for Lensed Gravitational Waves Including Morse Phase Information: An Intriguing Candidate in O2*, *arXiv e-prints*, 2020. [10.48550/arXiv.2007.12709](https://arxiv.org/abs/2007.12709)
17. Abbott, R., *Search for Lensing Signatures in the Gravitational-Wave Observations from the First Half of LIGO-Virgo's Third Observing Run*, *The Astrophysical Journal*, vol. 923, no. 1, IOP, 2021. [10.3847/1538-4357/ac23db](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac23db)
18. LIGO Scientific Collaboration, *Advanced LIGO*, *Classical and Quantum Gravity*, vol. 32, no. 7, IOP, 2015. [10.1088/0264-9381/32/7/074001](https://doi.org/10.1088/0264-9381/32/7/074001)
19. Acernese, F., *Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector*, *Classical and Quantum Gravity*, vol. 32, no. 2, IOP, 2015. [10.1088/0264-9381/32/2/024001](https://doi.org/10.1088/0264-9381/32/2/024001)
20. Akutsu, T., *Overview of KAGRA: Detector design and construction history*, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, vol. 2021, no. 5, OUP, 2021. doi:10.1093/ptep/ptaa125
21. Abbott, B. P., *Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA*, *Living Reviews in Relativity*, vol. 21, no. 1, 2018. [10.1007/s41114-018-0012-9](https://doi.org/10.1007/s41114-018-0012-9)
22. Moustakas, L., *The Master Lens Database and The Orphan Lenses Project*, *HST Proposal*, p. 12833, 2012
23. Ivezić, Ž., *LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products*, *The Astrophysical Journal*, vol. 873, no. 2, IOP, 2019. [10.3847/1538-4357/ab042c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab042c)
24. Euclid Collaboration, *Euclid preparation. I. The Euclid Wide Survey*, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 662, 2022. [10.1051/0004-6361/202141938](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141938)
25. LSST Science Collaboration, *LSST Science Book, Version 2.0*, *arXiv e-prints*, 2009. [10.48550/arXiv.0912.0201](https://arxiv.org/abs/0912.0201)
26. Sharon, K., *Strong Lens Models for 37 Clusters of Galaxies from the SDSS Giant Arcs Survey*, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 247, no. 1, IOP, 2020. [10.3847/1538-4365/ab5f13](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab5f13)
27. Jacobs, C., *An Extended Catalog of Galaxy-Galaxy Strong Gravitational Lenses Discovered in DES Using Convolutional Neural Networks*, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 243, no. 1, IOP, 2019. [10.3847/1538-4365/ab26b6](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab26b6)
28. Tran, K.-V. H., *The AGEL Survey: Spectroscopic Confirmation of Strong Gravitational Lenses in the DES and DECaLS Fields Selected Using Convolutional Neural Networks*, *The Astronomical Journal*, vol. 164, no. 4, IOP, 2022. [10.3847/1538-3881/ac7da2](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac7da2)
29. Pourrahmani M., *LensFlow: A Convolutional Neural Network in Search of Strong Gravitational Lenses* *The Astrophysical Journal* Vol. 856, no. 1, IOP, 2018. [10.3847/1538-4357/aaae6a](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaae6a)

30. Shu, Y., *VizieR Online Data Catalog: SLACS. XIII. Galaxy-scale strong lens candidates (Shu+, 2017)*, *VizieR Online Data Catalog*, vol. 185, 2019
31. Gavazzi, R., Marshall, P. J., Treu, T., and Sonnenfeld, A., *RINGFINDER: Automated Detection of Galaxy-scale Gravitational Lenses in Ground-based Multi-filter Imaging Data*, *The Astrophysical Journal*, vol. 785, no. 2, IOP, 2014. [10.1088/0004-637X/785/2/144](https://doi.org/10.1088/0004-637X/785/2/144)
32. Petrillo, C. E., *LinKS: discovering galaxy-scale strong lenses in the Kilo-Degree Survey using convolutional neural networks*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 484, no. 3, OUP, pp. 3879 – 3896, 2019. [10.1093/mnras/stz189](https://doi.org/10.1093/mnras/stz189)
33. Li, R., *New High-quality Strong Lens Candidates with Deep Learning in the Kilo-Degree Survey*, *The Astrophysical Journal*, vol. 899, no. 1, IOP, 2020. [10.3847/1538-4357/ab9dfa](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab9dfa)
34. Li, R., *High-quality Strong Lens Candidates in the Final Kilo-Degree Survey Footprint*, *The Astrophysical Journal*, vol. 923, no. 1, IOP, 2021. [10.3847/1538-4357/ac2df0](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac2df0)
35. <https://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~oguri/sugohi/>
36. <https://research.ast.cam.ac.uk/lensedquasars/index.html>
37. <https://archive.stsci.edu/prepds/clash/>
38. https://cral-perso.univ-lyon1.fr/labo/perso/johan.richard/MUSE_data_release/
39. <https://relics.stsci.edu/clusters.html>
40. <https://web.physics.ucsb.edu/~tt/LSD/>
41. Hannuksela, O. A., Collett, T. E., Çalıřkan, M., and Li, T. G. F., *Localizing merging black holes with sub-arcsecond precision using gravitational-wave lensing*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 498, no. 3, OUP, pp. 3395 – 3402, 2020. [10.1093/mnras/staa2577](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2577)
42. Janquart, J., *Follow-up analyses to the O3 LIGO-Virgo-KAGRA lensing searches*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 526, no. 3, OUP, pp. 3832 – 3860, 2023. [10.1093/mnras/stad2909](https://doi.org/10.1093/mnras/stad2909)
43. Wempe, E., Koopmans, L. V. E., Wierda, A. R. A. C., Hannuksela, O. A., and Van Den Broeck, C., *On the detection and precise localization of merging black holes events through strong gravitational lensing*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 530, no. 3, OUP, pp. 3368 – 3390, 2024. [10.1093/mnras/stae1023](https://doi.org/10.1093/mnras/stae1023)
44. Magare, S., Kapadia, S. J., More, A., Singh, M. K., Ajith, P., and Ramprakash, A. N., *Gear Up for the Action Replay: Leveraging Lensing for Enhanced Gravitational-wave Early Warning*, *The Astrophysical Journal*, vol. 955, no. 2, IOP, 2023. [10.3847/2041-8213/acf668](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acf668)
45. Lo, R. K. L. and Magana Hernandez, I., *Bayesian statistical framework for identifying strongly lensed gravitational-wave signals*, *Physical Review D*, vol. 107, no. 12, APS 2023. [10.1103/PhysRevD.107.123015](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.107.123015)
46. Liu, X., Magaña Hernandez, I., and Creighton, J., *Identifying Strong Gravitational-wave Lensing during the Second Observing Run of Advanced LIGO and Advanced Virgo*, *The Astrophysical Journal*, vol. 908, no. 1, IOP, 2021. [10.3847/1538-4357/abd7eb](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abd7eb)
47. Abbott, B. P., *GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence*, *Physical Review Letters*, vol. 119, no. 14, APS, 2017. [10.1103/PhysRevLett.119.141101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.141101)
48. Abbott, B. P., *GW170104: Observation of a 50-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence at Redshift 0.2*, *Physical Review Letters*, vol. 118, no. 22, APS, 2017. [10.1103/PhysRevLett.118.221101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.221101)