

文章编号: 1000-8349(2009)03-0220-09



爱因斯坦环及其星系团环境

涂 泓¹, 朱炯明¹, 束成钢^{1,2}

(1. 上海师范大学 数理信息学院, 上海 200234; 2. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 该文研究了以星系作为透镜体产生的切向弧 (即“爱因斯坦环”) 的强引力透镜现象, 并对该领域近年来的观测和研究作了总结。对形成这些强引力透镜“环”的星系所进行的研究表明, 其附近存在的质量所产生的会聚和剪切对透镜的质量分布模型非常敏感。在大视场巡天中找到的这种爱因斯坦环的数目相当多, 大约是每平方度 10 个, 其中“强引力透镜巡天” (Strong Lensing Legacy Survey, SL2S) 提供了大量处于星系团视场中的由椭圆星系产生的爱因斯坦环样本。系统地研究星系团外围存在的爱因斯坦环, 一方面可以理解星系团环境对爱因斯坦环的影响, 另一方面可以利用它们来探测星系团的物质分布, 并进而对冷暗物质宇宙学提供新的探测方法。

关键词: 引力透镜; 星系; 星系团; 爱因斯坦环; 暗物质

中图分类号: P157, O412.1 **文献标识码:** A

1 简 介

爱因斯坦环是指一种特殊的星系 - 星系强引力透镜现象。当透镜星系质量非常大, 源的位置又靠近透镜时, 一个源会产生多重像。当由星系充当透镜时常会产生切向弧, 即所谓的“爱因斯坦环”。相对来说, 孤立的引力环是比较简单的天体物理现象, 低红移处的孤立爱因斯坦环的总体性质, 已经得到了比较充分的研究^[1,8,17], 而处于星系群或星系团中的爱因斯坦环则要复杂得多, 它会受到周围环境的影响, 需要考虑多种成分的贡献, 因此需要更多引力透镜像来提供必要的约束。例如, 若在距离星系团中心几倍爱因斯坦半径以外有一个成员椭圆星系, 其周围形成了一个爱因斯坦环, 那么这个爱因斯坦环不能看成是一个独立的观测事件, 而必须考虑星系团对其产生的影响。

收稿日期: 2008-05-28; **修回日期:** 2008-08-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10333020, 10528307, 10778725); 973 计划 (2007CB815402); 上海市科委项目资助基金 (07 dz 22020, DZL 805, 08240514100); 上海师范大学一般项目 (DKL 932)

2 观测现状

天空中爱因斯坦环的数量非常多, 解析计算的结果表明^[12,16], 在每平方度天区中应该有 10~20 个爱因斯坦环, 有 1~2 个星系群形成的透镜, 约 0.4 个星系团形成的透镜。

COSMOS(Cosmological Evolution Survey)¹ 的强引力透镜观测在光学上证实了爱因斯坦环的面密度大约是每平方度 10 个, 平均爱因斯坦半径大约为 $0.8'' \sim 1.5''$ ^[4]。随着大型巡天计划的发展, 如斯隆数字化巡天 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS)² 及近期的 CFHTLS 巡天 (Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey), 目前已发现了数百个这样的环系统^[1,2,17], 其中的大部分样本都是背景星系在大质量椭圆星系周围形成的多重像, 且早型星系作为透镜的现象占了大部分。这些在大范围光学巡天中寻找到的透镜现象可以分别进行细致的和统计的研究, 并进一步进行后续的哈勃太空望远镜 (HST) 光学观测。未来的空间巡天 (如 JDWM/SNAP) 将会找到更多这样的透镜, 预计可能达到数以万计^[11]。

2.1 斯隆透镜 ACS 巡天

对大样本由星系产生的强引力透镜现象进行深入研究, 就有可能对星系结构给出正确的描述, 并理解介于星系中心可见物质主导区域与星系外缘暗物质主导的暗晕之间的过渡区间。在有关的研究中比较重要的是斯隆透镜 ACS 巡天计划 (Sloan Lens ACS Survey³, SLACS)^[8,17]。SLACS 目前已找到 28 个强透镜候选者, 预计可能达到 100 个 (SLACS 巡天中找到的爱因斯坦环样本可见 <http://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/hubble-20051117.html>)。这将对低红移场星系产生的透镜现象给出一个系统的描述。但是由于光谱仪光纤孔径的限制, SLACS 研究的强引力透镜仅限于低红移 ($z_{\max}(\text{lens}) < 0.5$, $z_{\max}(\text{source}) < 0.8$) 的小型爱因斯坦环 ($R_{\text{arc}} < 3''$)。如能将透镜红移扩展到约 0.5, 源的红移扩展到 1 以上, 将使样本数量大大增加进而使得研究更为深入。

2.2 CFHTLS-SL2S 巡天

加拿大 - 法国 - 夏威夷望远镜 (Canada-France-Hawaii Telescope, CFHT) 是位于夏威夷莫纳克亚山的一架 3.6 m 光学望远镜。在 5 年时间里, 用这架望远镜所进行的加拿大 - 法国 - 夏威夷望远镜巡天 (Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey, CFHTLS)⁴ 观测时间超过了 450 d, 包括大范围 (Wide)、超大范围 (Very Wide) 和深度 (Deep) 3 个不同科学目标的巡天项目 (CFHTLS 大范围巡天 (W1~W4) 和深度巡天 (D1~D4) 在天空中的分布情况可见 <http://terapix.iap.fr/cplt/oldSite/Descart/cfhtlscshearprogtarget.html>)。

CFHTLS 中的子项目 —— 强引力透镜巡天 (Strong Lensing Legacy Survey, SL2S) 的主要目标是寻找天空中的强引力透镜现象, 并希望能够提供迄今最大的强引力透镜样本, 从而在这些样本中选出适合不同科学目标的透镜进行研究。对于一些具有合适研究目标的最佳候选者, 还将申请哈勃望远镜等其他设备作进一步细致的观测。

¹ <http://cosmos.astro.caltech.edu/>

² <http://www.sdss.org/>

³ <http://www.slacs.org/>

⁴ <http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHLS/>

CFHTLS 使用的照相机是 MegaPrime，是有史以来巡天中使用的最大的天文照相机，视场可以覆盖 1 平方度的天区，相当于 5 个满月的大小。它具有 5 个波段，成像质量好，巡天范围涵盖了 170 平方度，预计可在每平方度里观测到 3.8×10^6 个星系。其 5 个波段的传输函数曲线与 SDSS 滤光系统的比较见图 1。根据数值模拟的结果，SL2S 的预期目标是发现 1 000 多个爱因斯坦环、100 多个由星系群产生的强透镜现象以及 50 多个由星系团产生的强透镜现象。

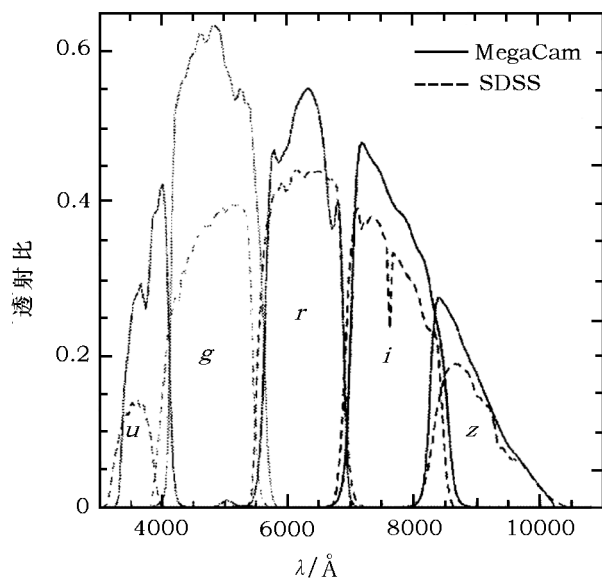


图 1 CFHT 的 MegaCam 滤光器与 SDSS 的 *ugriz* 滤光系统 5 个波段的传输函数曲线

可以看出 MegaCam 的 *u* 和 *g* 波段比 SDSS 的相应波段稍红 (引自: <http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHLS/>)

到目前为止，SL2S 已观测到 100 多个具有多重像的强引力透镜现象，其中大多数为中等质量透镜，数据释放已进行到第 3 轮。图 2 是其第 2 轮释放的数据的有关参数分布图。从红移分布图可以看出，样本的红移分布相当宽，可达到 $z \approx 1$ 。图中可以看到两个峰值，其中一个在 $z \approx 0.3$ ，是产生强引力透镜现象最可能的透镜红移值；另一个在 $z \approx 0.6$ ，这可能是由于统计涨落，也可能是由于 CFHTLS 大范围巡天中样本的红移峰值在 ≥ 0.6 处。图 2 还给出了弧到透镜中心的半径和透镜星系 *i'* 波段视星等的松散关系，这说明 CFHTLS 并没有对某个质量区域有强烈的偏倚，而是对整个参数空间较敏感。

虽然现在样本还不完全，但是已经可以根据弧到透镜中心的距离 (下文简称“弧半径”，表征透镜体的质量)，把它们大致分为以下 3 类：

(1) 主要由场星系形成的爱因斯坦环候选者，见图 3 中的最下一行。环的半径 $< 3''$ ，作为透镜体的是质量 $< 10^{12} M_{\odot}$ 的星系，其质量组成中的重子物质比例较大，与暗物质相当。由于其爱因斯坦环半径较小，且靠近中心的透镜体，因此辨认这类透镜比较困难。

(2) 最显著的一类透镜，其巨弧到中心的距离 $> 7''$ ，其透镜体是质量大于 $10^{14} M_{\odot}$ 的星系团，其质量组成以暗物质为主。在 170 平方度的 CFHTLS 观测天区中，这类透镜应该有 15~20 个。图 3 中的第 1 行给出了 4 个弧半径 $> 7''$ 的巨弧。而能够产生这种巨弧的大质量星系团常

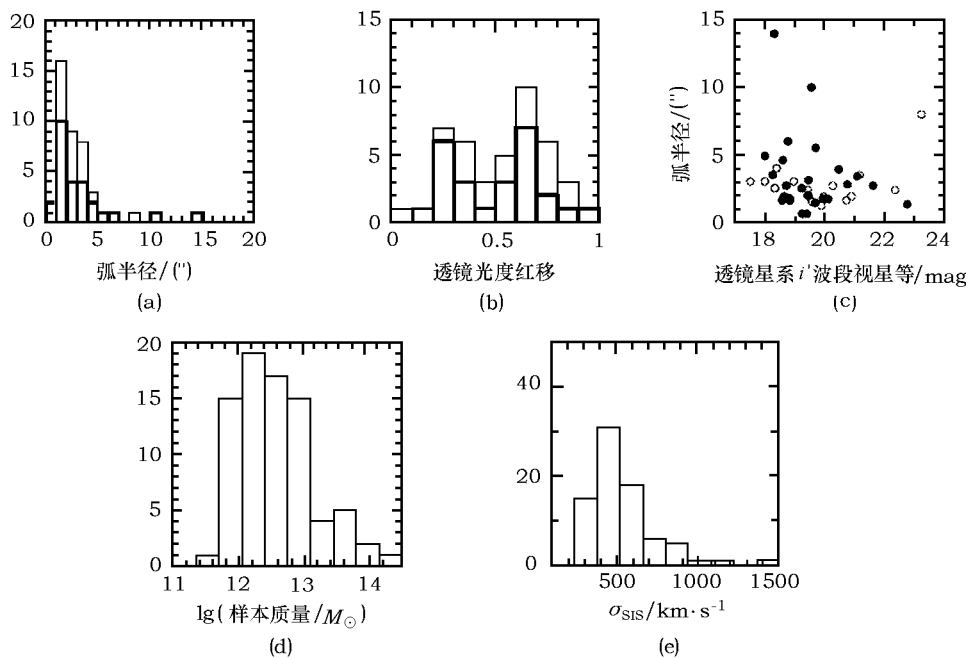


图 2 SL2S 项目第 2 轮释放的数据的一些参数分布

(a) 弧半径分布直方图; (b) 透镜测光红移分布直方图; (c) 弧半径与中心星系 i' 星等的关系, 图中的细线表示所有样本, 粗线则表示最确定无疑的样本; (d) 样本质量分布; (e) 样本速度弥散度分布, 图中计数峰值处对应星系群尺度 (引自: <http://www-sl2s.iap.fr/>)

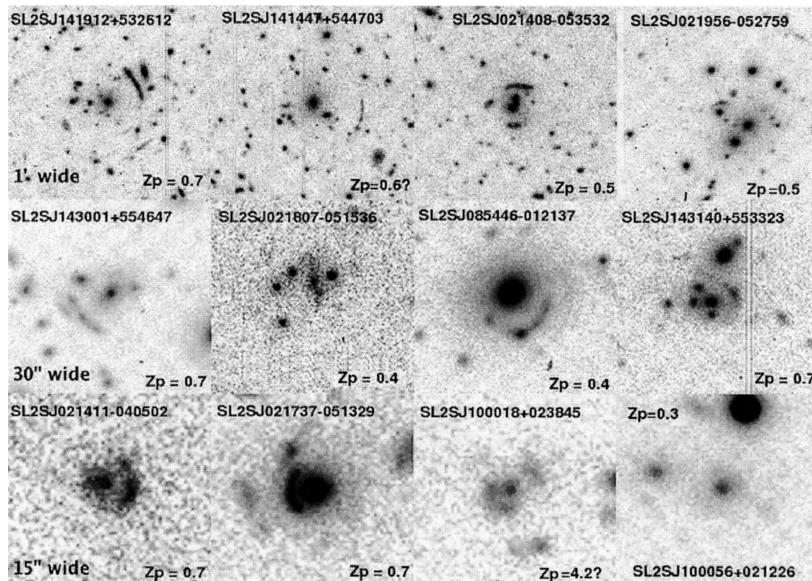


图 3 SL2S 项目中找到的强引力透镜样本

上行为星系团透镜, 中行为星系群透镜, 下行为爱因斯坦环 (引自: <http://www-sl2s.iap.fr/>)

常与强 X 射线辐射相联系。

(3) 主要是中等质量透镜，观测到的弧半径范围为 $3'' \sim 7''$ ，这是 CFHTLS-SL2S 中最大的一种样本(见图 2 下面一排)。其透镜体是质量为 $10^{12} \sim 10^{14} M_{\odot}$ 的星系群。由于大部分星系处在星系群中，而星系群又构成了更大的星系团，因此这些星系群产生的强引力透镜现象是研究暗物质和重子物质相互关系的最佳候选者。图 3 中的第 2 行给出了一些中等质量候选者。由于这类星系群尚未达到动力学弛豫，因此对它们的模型拟合比星系团更为复杂。

更加细致的分类需要更多数据才能得到，如透镜和源的光谱红移、高分辨率图像及精确的透镜拟合等。需要强调的是，SL2S 的平均透镜红移在 $z = 0.5$ 左右，超过了 SLACS。

确认了强引力透镜候选者后，就要对这些透镜进行进一步的分析和拟合研究。其中的一些科学目标，则需要观测得到高分辨率的 HST 图像。2007 年 1 月已经获得第 1 批共 5 个 HST-ACS⁵ 图像，并获得了初步的拟合结果。但是由于哈勃望远镜系统中分辨率最高、使用最多的设备 ACS 当月因故障停机，至今还未修复。因此目前正在进行的第 2 批数据的 HST 观测转由 WFC 完成，因而获得的图像分辨率相对较低，且只有一个波段。

HST 的图像分辨率高，但视场比较小，而 CFHT 的图像分辨率低，视场却非常大，并具有 5 个波段(见图 4)。因此在分析拟合这些强引力透镜现象时，通常需要将这两种图像结合，通过 HST 图像来辨认弧的对应点，而由 CFHT 图像来判断周围环境对它的影响，并估测测光红移。除了 HST 的图像外，为了得到更精确的研究结果，可能还需要借助 Keck、VLT 等望远镜获得光谱红移及其它波段的图像等更多数据。

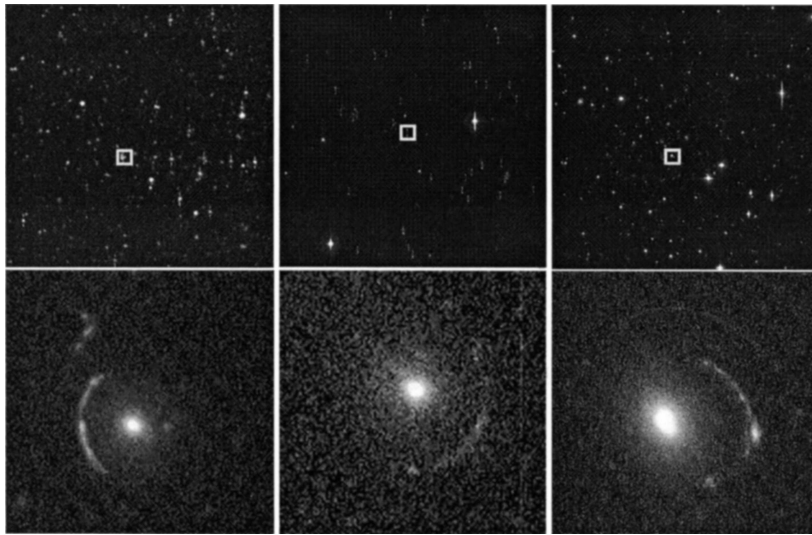


图 4 SL2S 项目中的爱因斯坦环样本

上为 CFHT 的大视场图像，下为相应的 HST-ACS 高分辨率后续观测图像，范围相当于上面图像中的方框。从左到右依次是 SL2SJ021737-051329、SL2SJ085446-012136 和 SL2SJ021411-040502 (引自：<http://www-sl2s.iap.fr/>)

⁵ <http://www-sl2s.iap.fr/>

3 研究现状

根据 SLACS 巡天中探测到的这些由椭圆星系所产生的引力透镜现象的研究, 已经获得了它们的一些结构上的性质 [3,8,17]。

3.1 质量密度分布

这些由星系所产生的多重像系统的物理尺度普遍比较小(大约为几角秒, 或 10 kpc 左右量级), 而与此相比较的星系团产生的多重像系统的物理尺度则要大得多。Treu 等人 [17] 对 SLACS 巡天中 15 个早型星系产生的透镜现象利用高分辨率 HST-ACS 图像进行了透镜和恒星动力学分析, 并将这些星系中心的恒星速度弥散度 (σ) 与用透镜等温球模型拟合给出的速度弥散度 (σ_{SIE}) 作比较, 发现 $\langle f_{\text{SIE}} \rangle \equiv \langle \sigma / \sigma_{\text{SIE}} \rangle = 1.01 \pm 0.02$, 因此得出的结论是, 在爱因斯坦半径 R_e 内, SLACS 透镜非常符合等温球分布, 并且在爱因斯坦半径以内是发光物质主导。Gavazzi 等人 [5] 又进一步利用 SLACS 巡天中的 22 个星系产生的透镜现象, 进行了强引力透镜和弱引力透镜综合分析, 从而将研究的质量分布半径扩展到 1~100 倍有效半径的范围。他们对这些透镜采用双成分拟合(即用 de Vaucouleurs 模型拟合恒星成分, 用 NFW 模型拟合暗物质成分)。两者结合的结果是, 对于速度弥散度 $\sigma_v \approx 250 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的星系形成的透镜现象, 在 $0.5R_{\text{eff}} \leq R \leq 100R_{\text{eff}}$ 的范围内, 总质量的分布为 $\rho \propto r^{-2 \pm 0.13}$, 非常接近等温球模型(见图 5)。

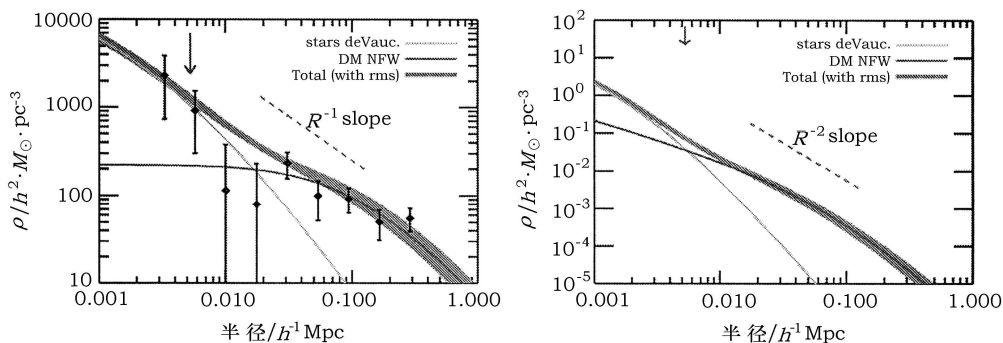


图 5 SLACS 双成分最佳拟合的质量面密度分布 [5]

左图: 双成分最佳拟合的质量面密度分布, 较浅和较深的细线分别表示恒星和暗物质, 粗线表示总质量。粗线的宽度表示 1σ 的不确定度。右图: 双成分最佳拟合三维密度分布, 各曲线的意义同左图, 总质量分布接近等温球模型。箭头表示发光物质主导和暗物质主导的过渡点, 接近有效半径处。

3.2 暗物质与发光物质分布关系

暗物质与发光物质(即恒星)的分布关系也是理解暗物质的关键问题。尽管重子物质只占总质量的很小一部分, 但是由于重子物质在空间分布上比暗物质更集中, 因此在几十 kpc 的尺度上具有至关重要的作用。理解重子物质的物理性质及它们与暗物质的相互作用, 对于人们理解星系形成、检验宇宙学模型都是必不可少的。从观测的角度来看, 测量恒星、气体和暗物质的相对分布, 将有助于理解它们的物理机制, 并对不同的模型给出定量的检验。

Koopmans 等人 [8] 对 49 个 SLACS 早型星系透镜体的发光部分质量分布和总质量分布

(假设为等温球模型) 进行了比较, 包括分布位置角 θ 和椭率 $e = b/a$ 两方面, 得出重子和总质量分布的位置角差别 $\langle \Delta\theta \rangle = 0^\circ \pm 3^\circ$, 其椭率的比值 $\langle q_{\text{SIE}}/q_* \rangle = 0.99$, 因此两者不仅位置角几乎一致, 而且在椭率上也保持一致。

4 环境的影响

以上对爱因斯坦环的讨论中, 作为透镜的椭圆星系都是场星系。如果这些椭圆星系处于星系团中, 它们的一些性质将会发生变化。

4.1 暗物质的剥离

根据数值模拟的结果^[10], 对于靠近星系团中心的星系, 恒星在总质量中所占的比重比较大。这是由于当星系靠近星系团中心时, 由于潮汐力的作用, 暗物质晕被从星系中剥离出来, 其结果是星系暗物质晕的直径并不比可见部分的直径大多少。通过星系 - 星系引力透镜, 可以研究这种暗晕的剥离现象。尽管星系尺度的质量引起的光线弯折非常小, 但是在许多星系团的引力透镜研究中都有确切的证据表明, 在较高的物质密度环境中, 星系的暗物质晕外缘被截断了^[6,9,13~15]。在星系团中心处的星系半质量半径为 40 kpc 左右, 而同等光度的场星系半质量半径要大于 200 kpc。因此在星系团中产生爱因斯坦环的椭圆星系里的暗物质质量与恒星质量可能为相同量级。

4.2 爱因斯坦环截面的增大

在星系团环境中, 单位面积的爱因斯坦环个数 (称为爱因斯坦环截面) 将会增加。理论计算发现^[7], 在靠近星系团的范围内, 爱因斯坦环截面为 $3\gamma_{\text{cluster}} + \kappa_{\text{cluster}}$, 这里的 κ_{cluster} 和 γ_{cluster} 分别表示星系团产生的会聚和剪切。如果假设星系团的质量分布为等温球模型, 靠近星系团临界曲线, 即 $|\gamma_{\text{cluster}}| = \kappa_{\text{cluster}}$ 时, 爱因斯坦环截面将会增加 2~3 倍, 也就是说, 与没有星系团影响的情况相比, 在星系团视场中出现爱因斯坦环的概率将增加 2~3 倍。

4.3 爱因斯坦环几何形状的变化

最后, 当爱因斯坦环靠近星系团时, 会受到星系团质量的影响。考虑这种影响的经典近似方法是将星系团在爱因斯坦环处增加的质量看作一个无限大质量平面^[19], 因此只增大了爱因斯坦环处的会聚。但是实际上由于星系团质量从内到外具有衰减的过程, 因此会对爱因斯坦环的大小和形状都发生影响。比较精确的做法应该是同时考虑星系团质量给爱因斯坦环带来的会聚 κ_{cluster} 和剪切 γ_{cluster} 。在这种情况下, 爱因斯坦环将携带星系团质量分布的信息, 因此可以用来作为探测星系团质量分布的工具。Tu 等人^[18] 利用星系团 Abell 1689 视场发现的三个爱因斯坦环作为工具, 探测了星系团质量分布在这些爱因斯坦环所在位置的斜率。研究结果进一步肯定了这个星系团中存在两个团块, 并倾向于认为其暗物质分布在距中心大约 300 kpc 处的斜率大于等温球模型的斜率。

5 结束语

暗物质的存在正在被越来越多的观测和理论所证实, 但是对暗物质在宇宙中的分布情况,

以及暗物质的物理本质, 人们仍然所知甚少。在星系团中, 引力环出现的可能性将大大提高, 这些爱因斯坦环受到星系团的干扰, 因而携带着星系团暗物质分布的信息, 可以用它们来作为探测星系团物质分布模型在较大半径处的斜率。另一方面, 对于这些爱因斯坦环的研究, 也不能局限于对它们本身的研究, 而必须考虑周围环境的影响。

参考文献:

- [1] Bolton A S, Burles S, Koopmans L V E *et al.* ApJ, 2006, 638: 703
- [2] Cabanac R A, Alard C, Dantel-Fort M *et al.* A&A, 2007, 461: 813
- [3] Dobke B M, King L J. A&A, 2006, 460: 647
- [4] Faure C, Kneib J P, Covone G *et al.* ApJ, 2007, 176: 19
- [5] Gavazzi R, Treu T, Rhodes J D *et al.* ApJ, 2007, 667: 176
- [6] Geiger B, Schneider P. MNRAS, 1999, 302: 118
- [7] King L J. MNRAS, 2007, 382: 308
- [8] Koopmans L V E, Treu T, Bolton A S *et al.* ApJ, 2006, 649: 599
- [9] Limousin M, Kneib J P, Bardeau S *et al.* ApJ, 2007, 461: 881
- [10] Limousin M, Sommer-Larsen J, Natarajan P *et al.* arXiv: 0706. 3149
- [11] Marshall P, Blandford R, Sako M. New Astronomy Review, 2005, 49: 387
- [12] Mo H J, White D M. MNRAS, 2002, 336: 112
- [13] Natarajan P, Kneib J P, Smail I. ApJ, 2002, 580: L11
- [14] Natarajan P, Kneib J P, Smail I *et al.* ApJ, 1998, 499: 600
- [15] Natarajan P, Loeb A, Kneib J P *et al.* ApJ, 2002, 580: L17
- [16] Oguri M. MNRAS, 2006, 367: 1241
- [17] Treu T, Koopmans L V, Bolton A S *et al.* ApJ, 2006, 640: 662
- [18] Tu H, Limousin M, Fort B *et al.* MNRAS, 2008, 386: 1169
- [19] Turner E L, Ostriker J P, Gott III J R. ApJ, 1984, 284: 1

Gravitational Rings and Their Cluster Environment

TU Hong¹, ZHU Jiong-ming¹, SHU Cheng-gang^{1,2}

(1. Mathematics and Science College, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: Gravitational lensing, light from the background sources bended by foreground massive objects predicted by the General Relativity, has been adopted as an efficient tool to study the mass distribution in the universe. “Rings” in the present paper are the results of galaxy-galaxy strong lensing, which have been found widely in individual surveys.

It can be estimated theoretically that there should be about 10 gravitational rings observed per square degree in the current surveys. While isolated “rings” appearing in the field are relatively easy to study, they can be considered to constrain the slope of the density profiles of clusters if they appear in the cluster environment since the conditions of “rings” formation are sensitive to the external shear and convergence produced by nearby mass condensations.

In the present paper, the current observational projects and the relative studies on “rings” are briefly introduced for both SLACS (Sloan Lens ACS) survey and SL2S (Strong lensing legacy survey) in CFHTLS (Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey). The current conclusions from SLACS are as follows. (i) The slope of density profiles of the massive elliptical galaxies produced “rings” seems to be in consistence with the isothermal profile (with $\rho \propto r^{-2\pm 0.13}$); (ii) The distributions of both position angles and ellipticities of baryonic matter trace their host dark matter halo well (with position angle difference between light and total mass $\langle \Delta\theta \rangle = 0^\circ \pm 3^\circ$ degrees and ellipticity ratio $\langle q_{\text{SIE}}/q_* \rangle = 0.99$).

The studies of “rings” occur in cluster environment are also summarized including simulations and the applications of “rings” to constrain the slope of mass profile of a clusters, and the conclusions are positive. Comparing to the “rings” in field, the “rings” in cluster environments show some special features. (i) As galaxies are crossing the higher density region of the cluster, the DM halo component is tidally stripped. (ii) The ring cross-section is considerably increased near critical lines. (iii) The geometry of the “rings” in cluster is different from that of the “rings” in field. Since the SL2S is providing a large sub-sample of gravitational rings around massive distant elliptical galaxies in the outskirts of galaxy clusters. The systematic study of gravitational rings around cluster members can provide new tests on the Λ CDM cosmology at galaxy scales.

Key words: Gravitational lensing; Galaxies; Clusters; Gravitational ring; Dark Matter