



引力透镜时间延迟研究进展

廖恺

武汉大学物理科学与技术学院, 武汉 430072

E-mail: liaokai@whu.edu.cn

2023-04-18 收稿, 2023-07-17 修回, 2023-07-17 接受, 2023-07-18 网络版发表

国家自然科学基金(12222302, 11973034)资助

摘要 引力透镜效应是天文学研究经常用到的重要工具. 这个效应中一个有趣的现象是同一天体源在某些情形下能够产生多个像. 这些像依次到达地球并被人们观测到. 它们之间的到达时间差称为时间延迟, 携带着丰富的天文学信息. 针对不同的天体源, 人们发展出特定的观测策略和算法来测量时间延迟. 传统的时间延迟观测源为透镜化的类星体. 它们的时间延迟是通过对比光变曲线来测量的. 在韦布望远镜时代, 类星体时间延迟将给出准确的哈勃常数测量值, 以期解决当前“哈勃常数争论”. 同时, 随着时域天文学时代的开启, 透镜化的瞬变源, 例如各类型的超新星、伽马射线暴及其余辉、快速射电暴和引力波也将被人们大量观测到. 对于这些源, 时间延迟测量有可能变得更加容易和准确. 瞬变源透镜系统将带给我们更多关于引力本性、暗物质性质以及宇宙膨胀的信息. 本文基于国内外在时间延迟领域的最新研究进展, 介绍了时间延迟的测量方法、测量现状以及它在检验基础物理、研究天体物理和宇宙学方面的应用.

关键词 引力透镜, 时间延迟, 类星体, 瞬变源, 宇宙学

根据爱因斯坦的广义相对论, 光沿零测地线传播. 因此, 当物质分布导致时空弯曲时, 光线会发生偏折. 特别地, 当一个有质量的天体处于发光天体和观测者中间时, 它可以当成透镜体. 类比于几何光学透镜, 天文学上把这类现象称为引力透镜^[1]. 引力透镜的研究历史可以追溯到1919年: 天文学家爱丁顿为了验证广义相对论, 在日全食期间测量了太阳对星光的偏折, 偏折角大小为经典力学预言的两倍. 现代宇宙学中, 一个典型的引力透镜例子是遥远的类星体被前景的星系或星系团透镜化成多个像, 像依次到达地球, 同时寄主星系被透镜化成巨大的光弧. 多像之间的到达时间差称为时间延迟. 透镜化的类星体系统被人们用来研究各种天体物理和宇宙学问题, 例如透镜星系中暗物质的分布、结构和宇宙时空几何、组分等^[2].

类星体是引力透镜时间延迟研究的主要对象. 这

是因为类星体在宇宙中分布广泛且明亮, 能够在很远的地方被人们观测到. 它们恒定发光, 但幸运的是, 亮度会随时间发生变化. 这些特点让我们很容易对被星系和星系团透镜化的类星体进行观测、认证、监测以及分析. 已经有超过200个强透镜化类星体-椭圆星系系统被人们发现. 然而, 目前只有少数的类星体透镜被很好地分析研究. 更多的透镜正待被发现. 例如, 即将运行的光学巡天项目Legacy Survey of Space and Time (LSST) in Vera Rubin Observatory将观测到数以万计的类星体透镜^[3]. 长久以来, 人们利用类星体透镜来研究三类问题^[2]: (1) 研究在千秒差距及更小空间尺度上的质量分布. 这些尺度上重子物质与暗物质相互作用, 形成了我们看到的星系. (2) 决定宇宙整体的时空几何、运动学以及组分, 例如暗能量和暗物质. (3) 探测那些对当前望远镜而言暗弱的遥远天体. 当前, 受到“哈勃

引用格式: 廖恺. 引力透镜时间延迟研究进展. 科学通报, 2024, 69: 80–95

Liao K. Research progress on gravitational lensing time delays (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 80–95, doi: 10.1360/TB-2023-0358

常数(H_0 争论”的影响,即早期微波背景辐射推测的哈勃常数值和利用距离阶梯测量的值不一致,人们广泛关注的一个应用是时间延迟宇宙学^[4,5]:类星体中心区域明亮的部分,即活动星系核多像之间的时间延迟,是由比对光变曲线对在时间上的平移来测量的.时间延迟反比于宇宙当前的膨胀速率,即哈勃常数.透镜势由其他观测得到,例如对透镜化的光弧进行仔细分析.利用这两方面的测量,哈勃常数可以独立于距离阶梯方法而被直接测量.

在类星体透镜取得巨大成就的同时,第一例被透镜化成多像的超新星SN Refsdal(为了致敬Refsdal于1964年研究了强透镜化的超新星,并提出利用此系统的时间延迟来测量哈勃常数)开启了天体物理和宇宙学研究的新窗口^[6].瞬变源透镜^[7~9]的概念逐渐进入人们的视野.感谢时域天文学时代的到来,除了超新星透镜,其他透镜化的瞬变源如伽马射线暴、快速射电暴以及引力波,也正在吸引人们的研究兴趣.随着当前大型巡天项目/设备的启动,如光学/红外波段Gaia(盖亚望远镜)^[10]、Dark Energy Survey(暗能量巡天)^[11]、Subaru Hyper Suprime-Cam Survey(斯巴鲁望远镜巡天)^[12]、射电波段Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment(CHIME,加拿大氢强度测绘实验)^[13]和Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope(FAST,500米口径球面射电望远镜)^[14]、引力波LIGO-Virgo-KAGRA网络^[15],以及即将到来的LSST^[3]、Square Kilometre Array(SKA,平方千米阵)^[16]和Einstein Telescope(ET,爱因斯坦望远镜)^[17],超过数十万的瞬变源信号将被探测.其中的一小部分将被星系、星系团以及各种星系尺度以下的成团结构所影响,形成引力透镜.探测这些瞬变源透镜十分有趣和重要,它们将带我们进入新的研究领域,带来更多的发现^[7,8].首先,瞬变源辐射的波长可能较长且一致辐射,有时我们需要用波动光学而不是传统的几何光学来描述.这对于检验基础物理,特别是引力波的波动本性有很大的帮助.其次,与类星体透镜相比,瞬变源在研究天体物理问题和宇宙学时有着自身的优势,例如有些瞬变源可以给出更加精确的时间延迟测量,从而有利于得到哈勃常数值.最后,引力透镜的放大效应有利于研究高红移的瞬变源分布.

本文基于国内外近些年的相关文献,对引力透镜时间延迟这一领域的研究进展进行介绍.首先介绍引力透镜时间延迟的基本原理,接着针对传统类星体透

镜和各类型瞬变源透镜系统,介绍时间延迟的测量方法以及当前的测量现状,然后介绍时间延迟观测在基础物理、天体物理和宇宙学领域中的应用,最后给出总结和展望.

1 时间延迟基本原理

当辐射天体、透镜体和地球几乎在一条直线上时,强引力透镜效应可以产生多像/信号,依次到达地球.本文所提及的“强透镜”概念指的是单个透镜体存在的情形,相比于“弱透镜”的概念:指的是统计上一系列天体扭曲像形状的情形.基于透镜体质量量级,文献中通常把强透镜细分为:狭义的“强透镜”,如星系/星系团尺度透镜体;“毫透镜”,如暗物质子晕尺度透镜体;“微透镜”,如恒星尺度透镜体等.值得注意的是,依赖于波长和源的大小相对于透镜体尺度以及是否一致性辐射,引力透镜效应由几何光学或者波动光学(如由地面探测器探测到的恒星量级透镜体对双星并合引力波的影响)来描述.简单起见,本文主要涉及几何光学的内容.

在介绍时间延迟之前,需要对透镜体产生的引力场做两个假设:“薄透镜”和“弱场”.“薄透镜”指的是透镜本身的尺度远远小于源、透镜体和地球两两之间的距离.这样,我们可以只考虑透镜体的二维积分质量分布.“弱场”指的是牛顿势足够小: $U/c^2 \ll 1$.对于大部分天体物理情形,这两个假设都近似成立.对于几何光学描述,引力透镜可以看成是在透镜平面二维坐标和源平面二维坐标之间的转化.给定源的角位置 β ,相对于没有透镜体存在的情形,超出的时间延迟是像的角位置 θ 的函数:

$$t = \frac{D_{\text{ds}} D_{\text{s}}}{c D_{\text{ds}}} \left[\frac{1}{2} |\theta - \beta|^2 - \psi(\theta) \right], \quad (1)$$

其中, D 表示角直径距离,其下标d和s分别代表透镜体和辐射源.需要注意,在一般弯曲时空情形下, $D_{\text{ds}} \neq D_{\text{s}} - D_{\text{d}}$.超出的时间延迟包含两项:第一项由几何路径改变引起;第二项称为“Shapiro延迟”,由引力场导致.原理是在引力场中的光速 c' 比没有引力场存在时的光速 c 小.因此,对于弱引力场,人们类比于几何光学中的折射率,定义出透镜体的有效“折射率” $n = c/c'$. ψ 称为二维透镜势,由泊松方程 $\nabla^2 \psi = 2\kappa$ 决定,其中 κ 是以宇宙临界密度 $\sum_c = c^2 D_{\text{s}} / (4\pi G D_{\text{d}} D_{\text{ds}})$ 为单位的透镜体表面质量密度.给定源位置,式(1)实际上在透镜平面上给出了一个超出时间的延迟面.实际中,无法测量

单个像的超出时间延迟 t ，能测得的是多像之间的时间延迟 Δt 。

基于这个思路，引力场中传播的光线遵循费马原理：真实的像只会出现在超出时间延迟面的极值点。数学上求极值点，可以导出透镜方程：

$$\beta = \theta - \alpha, \quad (2)$$

其中，相对于折射角 α ， $\alpha = \nabla \psi = D_{\text{ds}} \bar{\alpha} / D_s$ 为约化折射角。图1给出了透镜几何展示。需要注意，多个极值点可能同时存在，并且分为3类：极小值、极大值和马鞍点。当系统严格轴对称，即 $\beta = 0$ 时，源会以爱因斯坦环的形式出现，对应的角大小称为爱因斯坦半径。

数学上，引力透镜效应可以看成是源平面到像平面的一种特殊对应。两个平面的转变由雅可比矩阵描述：

$$A = \frac{\partial \beta}{\partial \theta} = \delta_{ij} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta_i \partial \theta_j} = \begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma_1 & -\gamma_2 \\ -\gamma_2 & 1 - \kappa + \gamma_1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中， γ_1 、 γ_2 、 κ 依赖于透镜势的二阶导数。在透镜平面上定义伪矢量 $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2)$ ，称之为剪切，决定了雅可比矩阵无迹部分，衡量像的形变。 κ 决定的雅可比矩阵各向同性部分称为汇聚。放大率由雅可比矩阵行列式的逆决定：

$$\mu = \frac{1}{\det A} = \frac{1}{(1 - \kappa)^2 - \gamma^2}. \quad (4)$$

$\mu = \infty$ 在透镜平面对应的曲线称为临界曲线，源平面为焦散曲线。当源穿越焦散曲线时，像的个数增加2。

源离中心很远时，只有一个像，所以引力透镜产生多像的数目一定是奇数，如3、5、7等。然而，由于最靠近中心像的放大率通常远远小于1，并且被透镜星系中心的光影响，通常看到的像个数是偶数。注意，对于真实有限大小的源，在计算其放大率时，需要进行卷积来求得总的放大率。

引力透镜存在很多简并效应，主要与mass-sheet简并效应有关：给定透镜模型 $\kappa(\theta)$ 和源的位置 β ，产生多像的位置和放大比，总可以找到另一组透镜模型和源的位置，使得多像位置和放大比不变，而给出不同的时间延迟，即

$$\kappa_\lambda = (1 - \lambda) + \lambda \kappa; \beta_\lambda = \frac{\beta}{\lambda}, \quad (5)$$

使得

$$\Delta t_\lambda = \lambda \Delta t; \mu_\lambda = \frac{\mu}{\lambda^2}. \quad (6)$$

2 时间延迟的测量

2.1 类星体

类星体透镜的时间延迟测量通过多像光变曲线在时间上的平移来实现^[18-20]。对于椭圆星系作为透镜体的情形，通常测量到的时间延迟大致范围在几天到一年。图2给出了典型的类星体透镜系统示意图：遥远的类星体被前景椭圆星系透镜化，由空间望远镜观测到。活动星系核(active galactic nucleus, AGN)部分分裂成4个像，形成“爱因斯坦十字”，同时寄主星系被透镜化成

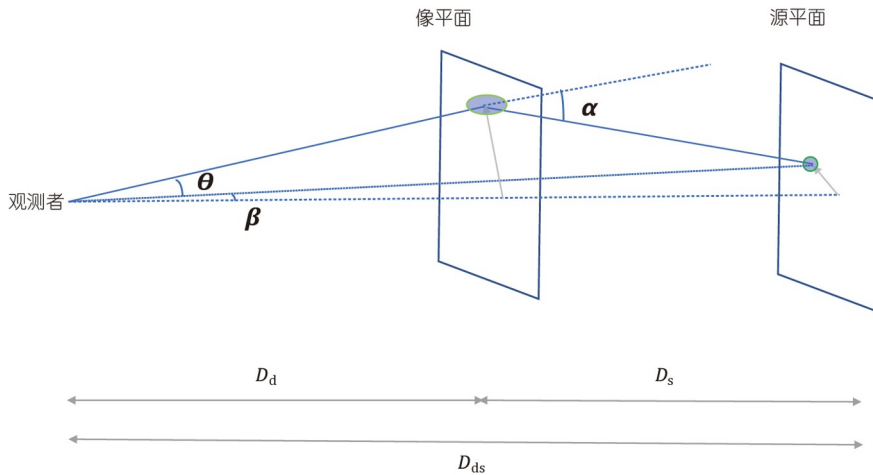


图1 (网络版彩色)强引力透镜几何光学描述示意图

Figure 1 (Color online) Schematic picture of the strong gravitational lensing system with geometric optics description

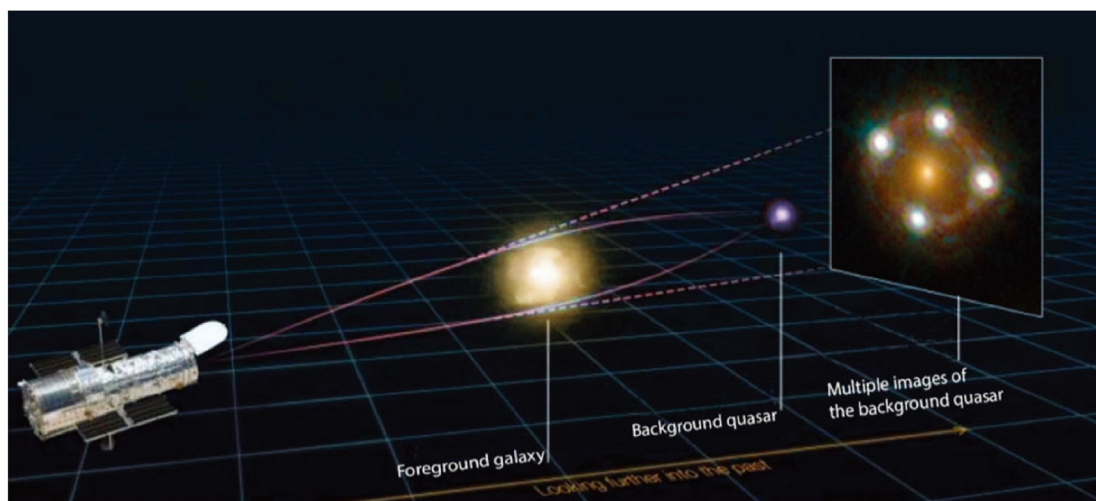


图2 (网络版彩色)透镜类星体示意图^[5]

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of the lensed quasar^[5]

巨大的光弧。每个AGN的像在后阶段被地面望远镜监测, 得到其光变曲线, 如图3所示。测量时间延迟包含两个方面的内容: 首先要对源进行多年的监测, 得到多像对应的光变曲线, 然后要从光变(对)中利用成熟的算法推测出时间延迟值。

AGN在各个时间尺度上展示出其固有光变, 变化幅度随时间尺度增加。以年为单位长期规律的光学/射电监测项目能够建立高的统计显著, 这是因为更多的光变曲线特征能够被利用。然而, 这样的观测计划在实际大型望远镜项目中较难实现, 需要长期稳定地对多个类星体进行采样。现实中大型望远镜通常被许多人

和项目占用。当前, 最高精度的测量来自针对性的小望远镜联合监测项目。

20世纪末, Fassnacht等人^[21]利用Very Large Array望远镜对CLASS项目中的透镜B1608+656进行射电波段监测, 使得时间延迟测量得以突破。在首个观测季, 这个项目给出四像系统的3个时间延迟测量, 其精度为6%~10%^[22]。随着后面两季源的光变起伏增强, 误差降低到2%~5%^[21]。这样的精确度来自每季8个月的观测时间, 平均采样频率为3 d。在当时, 已经有10个其他透镜系统的时间延迟测量, 而B1608+656是首个有四像系统所有时间延迟测量的源。更重要的是, 时间延迟测量误差首次降低到透镜模型误差水平, 使得人们必须重新重视透镜模型的测量精度^[23]。

虽然B1608+656不是唯一的射电透镜系统, 多种因素(如射电系统受限于“radio-loud”AGN)的结合导致观测重点转向光学波段。随着已知的亮透镜类星体样本尺寸不断增加, 1~2米级光学望远镜网络开始运行。这些系统的光学波段光变在某种程度上更可靠。同时, 人们获取此类数据的限制较少。尽管如此, 透镜星系中恒星带来的二级微引力透镜效应(源相对恒星场的移动导致)和图像分辨率问题也带来了新的观测挑战。图4显示的是透镜星系中恒星产生的二级放大图。源相对恒星的本动在此图上产生一条轨迹, 对应额外的微透镜光变曲线。微透镜效应带来的影响被证明是可以控制的, 同时, 逆卷积技术的发展使得小分离角系统也可以得到多像各自很好的光变。近些年, Courbin等人领导的

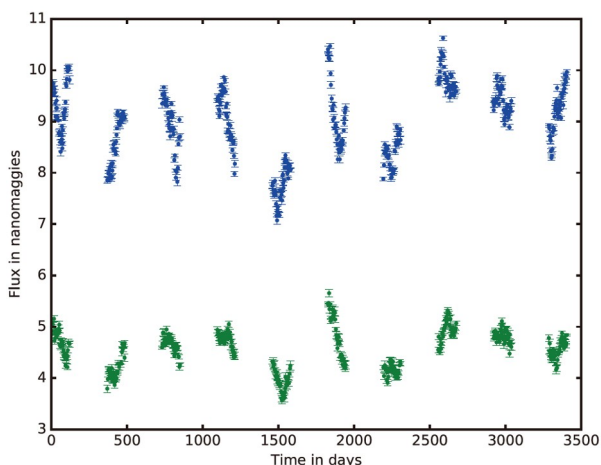


图3 (网络版彩色)透镜化类星体光变曲线对的采样观测

Figure 3 (Color online) Sampling observation of the light curve pair of the lensed quasar

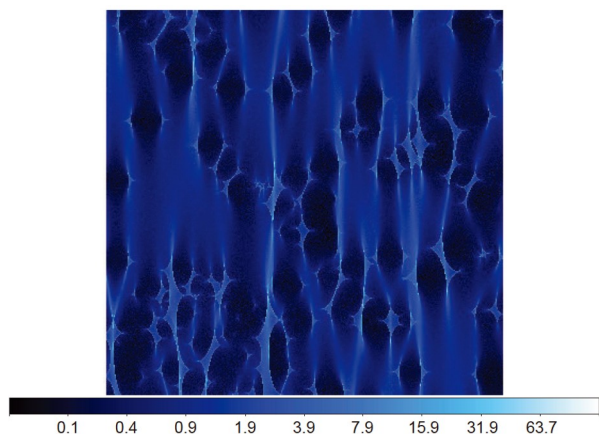


图4 (网络版彩色)透镜星系中的恒星产生的微透镜放大图
Figure 4 (Color online) Microlensing magnification map generated by stars in the lens galaxy

COSMOGRAIL就是此类观测中最典型、最成功的项目(www.cosmograil.org)。这个项目通常能够给出的时间延迟测量精度为百分之几。目前,有准确时间延迟测量的系统已经达到约20~30个^[24]。

时间延迟如何从光变曲线数据中提取?这个问题涉及算法,从20世纪90年代开始就被人们关注。Fassnacht等人^[21]采用了“dispersion method”^[25]。这项技术的核心是通过移动多像其中的一条光变曲线,包括在时间上和亮度上,降低临近数据点的弥散来实现。假设最小弥散对应的时间延迟和放大比是真实的,利用蒙特卡洛方法来评估误差。为了考虑变化缓慢的微引力透镜光变带来的影响,COSMOGRAIL项目^[19,20]进一步发展了3种技术:自由样条、高斯过程和“python curve-shifting”(PyCS)。这3种技术在光变足够长时结果一致。这些算法被证明是准确的^[26]。利用这些算法,他们给出多个类星体透镜的时间延迟测量值。例如,WFI J2033-4723为3.8%^[27],HE 0435-1223为5.6%^[28],SDSS J1206+4332为2.7%^[29],RXJ1131-1231为1.5%^[20],以及SDSS J1001+5027为2.8%^[30]等。除了COSMOGRAIL团队,其他团队也发展了许多各自有效的时间延迟测量算法。例如,Aghamousa和Shafieloo^[31]、Kumar等人^[32]也用到类似的曲线移动方法:他们设计出光滑化曲线和交叉相关的算法,这些算法被证明是快速且可靠的。Tak等人^[33]利用吉布斯采样来推测那些描述高斯过程、AGN光变以及微透镜的超参数。Hojjati和Linder^[34]对AGN和微透镜同时用到了高斯过程,只关注时间延迟,同时积分掉所有的超参数。

类星体时间延迟的测量历史可以分成3个阶段。第

一阶段中,所有的测量工作都围绕第一例透镜系统Q0957+561^[35]展开。由于这个系统的光变相对平滑,起伏不大,同时时间延迟很大(意味着需要更多的观测数据来保证两条光变曲线重叠部分足够多来进行比对),给测量工作带来很大的挑战。当时,这个系统的时间延迟值是很大,还是很小,引起了国际天文学界的争论^[36,37],直到光变出现了一个很大的起伏作为特征量,才彻底解决了这个争论^[38,39]。第二个阶段始于20世纪90年代中期^[40]。当时已经有几十个已知的类星体透镜系统,小口径针对性的透镜监测项目也已开展^[41]。时间延迟在10~150 d的系统最容易被观测。进一步,图像处理技术也得到了发展,特别是逆卷积方法的应用^[42]。光学和射电波段的监测项目都给出了准确的时间延迟测量^[43,44]。第3个阶段始于21世纪初,这时已有很多大的1~2米口径的观测项目,例如SMARTS项目^[45]和COSMOGRAIL项目。第4个阶段已经开始了,大型时域巡天项目如LSST、PanSTARRS、CSST等将发现和监测成千上万个类星体系统。LSST将对18000平方度的近半个天区重复性观测10年,将发现和监测几千个时间延迟透镜系统^[3]。

为了迎接LSST大量的光变曲线数据,人们有必要对当前时间延迟算法进行系统研究。这样的调研主要有两个目标。第一个目标是了解当前算法能否处理下一个阶段的数据,使得测量达到足够的精确度和准确度。认识到当前算法的局限性以及失败模式对于发展下一代算法是很有必要的一步。第二个目标是测试不同观测策略对结果的影响。例如,什么样的采样频率、观测总时间和灵敏度才能给出精确并且准确的时间延迟?LSST的观测策略能够满足时间延迟宇宙学的要求吗?怎样的调整能够使其满足要求?

为了实现这两个目标,Liao等人^[18]领导的一项名为时间延迟挑战(Time Delay Challenge, TDC)的项目于2013~2015年展开。项目中,一方面,模拟团队产生大量的光变曲线对,模拟过程考虑了所有已知的物理效应和观测效应;另一方面,邀请世界上各个相关专家团队从这些光变曲线中提取时间延迟。这个过程是盲分析,即专家完全不知道模拟团队是怎样产生数据的。

模拟透镜化类星体的光变曲线至少包含以下4个步骤:(1)给定某个光学波段,类星体固有光变曲线在AGN中心黑洞的吸积盘上产生。(2)前景透镜星系引起多像的产生,给出2或4条透镜化的光变曲线。相对于固有光变,它们(彼此)在幅度上和时间上有整体平移。(3)

由透镜星系中恒星作为二级透镜体导致的微引力透镜效应, 独立地给出每个光变曲线时间依赖的幅度调制, 即微透镜光变直接加在原有光变上. (4) 时间延迟、微透镜化的光变曲线对被稀疏且同时地在各个观测时间内采样, 并且考虑测量噪声.

通过对比专家团队返回的测量值和模拟用到的真实值, 可以对算法进行评估. 为了衡量算法的好坏, 4个指标被采用.

(1) 成功率:

$$f \equiv \frac{N_{\text{submitted}}}{N}, \quad (7)$$

其中, $N_{\text{submitted}}$ 是提交的测量数, N 是模拟总数目.

(2) χ^2 值:

$$\chi^2 = \frac{1}{fN} \sum_i \left(\frac{\Delta t_{i,m} - \Delta t_i}{\delta_i} \right)^2 < 1.5, \quad (8)$$

其中, Δt_i 是真实值(模拟输入值), $\Delta t_{i,m}$ 是各个团队的测量值.

(3) 精确度:

$$P = \frac{1}{fN} \sum_i \left(\frac{\delta_i}{\Delta t_i} \right) < 0.03, \quad (9)$$

其中, δ_i 是时间延迟测量误差.

(4) 准确度:

$$A = \frac{1}{fN} \sum_i \left(\frac{\Delta t_{i,m} - \Delta t_i}{\Delta t_i} \right), |A| < 0.03. \quad (10)$$

项目分为两个阶段, TDC0^[46]是测试阶段, 通过的团队可以进入TDC1^[18]. 最终有7个团队进入TDC1阶段. 10种算法被用于TDC1的测试. 结果发现几种算法非常优秀, 能实现对20%~40%系统的准确测量, 具体数目依赖于观测策略. 总的来说, LSST将会得到400个准确的时间延迟测量: $P < 0.03$, $|A| < 0.01$. 项目还给出了观测策略对指标的影响, 发现 A 和 f 主要依赖于每年观测季的长度, 而 P 主要依赖于采用频率和总的观测年.

尽管类星体时间延迟的测量方法被COSMOG-RAIL项目广泛应用, Tie和Kochanek^[47]提出微引力透镜的存在会使得光变曲线在时间上发生整体性平移. 由于不同像的微透镜放大模式是独立的, 多像的光变曲线平移量不同, 带来额外的时间延迟测量误差. Liao^[48]提出不同波段测量到的时间延迟是不同的. 为了准确测量时间延迟, Liao^[49]提出短波长波段和长光变曲线有助于提高时间延迟测量的准确度.

2.2 瞬变源

瞬变源透镜通常也是通过对比多段光变曲线/波形来测量时间延迟^[7]. 然而, 对于星系尺度的强引力透镜系统, 瞬变源如伽马暴(gamma ray burst, GRB)、快速射电暴(fast radio burst, FRB)和地面探测器探测到的引力波, 其信号本身持续时间(约ms~s)远远小于时间延迟(约10~100 d), 因此可以将它们的时间延迟测量得非常准确^[50]. 也就是说, 对于这样的系统, 时间延迟测量几乎没有误差. 本节重点介绍超新星, 特别是Ia型超新星透镜的时间延迟测量.

原则上, 超新星透镜测量时间延迟的方法与类星体透镜一样, 都是通过光变曲线. 相较于类星体较为复杂、无规律的光变, 超新星有着很好的多波段光变模板, 例如Ia型超新星显著的光变升高和降低可能使得测量它们的时间延迟变得更容易. 然而, 研究者需要详细地考虑微引力透镜对超新星光变的影响. 对于Ia型超新星, 相对于透镜星系中典型恒星对应的爱因斯坦半径, 爆炸物质有一个有限的大小, 同时还在随时间变化. 我们需要一个可靠的光球演化模型来描述这个过程. 与类星体一样, 微引力透镜可能会影响光变, 从而干扰测量. 一个可能更好的方案是利用颜色曲线, 即两个波段的差随时间的变化, 而不是光变曲线. 因为颜色曲线在一定时间内不受微透镜的影响. Goldstein等人^[51]研究了如何从不同颜色的微透镜像中得到精确的时间延迟. 他们用LSST模拟的数据作为例子来研究微透镜效应对时间延迟的影响, 得到一个有趣的结论: 在超新星爆炸后的3周内, 微透镜效应不影响颜色曲线, 或者说微透镜对每个波段的影响一样, 它们的差就扣除了微透镜效应. 这意味着早期颜色曲线能够成为不受微透镜影响的测量时间延迟工具. 利用超新星W7光球演化模型和光谱模板, 他们通过模拟证明光变曲线得到的测量误差是4%, 而颜色曲线得到的是1%. 在LSST观测策略下, 70%的透镜超新星可以在早期被发现. 如果迅速的多波段跟踪监测能够实现, 时间延迟测量将可以非常准确.

HOLISMOKES项目^[52]的目标之一是研究透镜化的超新星. 他们假设了4种光球演化模型以及各种微透镜放大模式来研究Ia型透镜超新星颜色无关的阶段^[53]. 这些放大模式依赖像的局部环境, 例如汇聚、剪切和恒星密度. 类似地, 他们发现, 平均而言, 颜色无关的阶段会持续3周或更长, 但是各个微透镜模式差别较大. 在一些情形下, 这个阶段可以短至几天. 对较平滑的微

透镜放大模式而言,颜色无关的阶段持续时间更长.除此之外,HOLISMOKES团队^[53]还研究了II型超新星的情形,发现II超新星同样可以用于时间延迟宇宙学的应用中.关于超新星的强透镜和微透镜,读者可以参考文献^[54].

当前,有几例透镜化的超新星被观测到:(1) PS1-10afx是第一例透镜化的超新星^[55],属于Ia型.然而,它的分离角太小,使得无法看到多像,只能通过放大和光谱来认证.(2) SN Refsdal是第一例有着多像和时间延迟测量的透镜化超新星^[6].它是与1987A一样的II型超新星,首先被星系团MACS J1149.6-2223(一级透镜)透镜化成3个像,其中一个像又被星系团中的一个椭圆星系(二级透镜)分裂成4个像.然而,受限于观测数据质量,时间延迟测量误差较大.(3) iPTF16geu是首个有多像的Ia型超新星^[56],多像之间的时间延迟被测量,大约为1 d.(4) AT 2016jka是星系团透镜^[57].(5) SN Zwicky是最近发现的透镜化Ia超新星^[58],分离角非常小.

对于星系尺度的GRB透镜,只需要测量到达时间就可以准确地知道时间延迟.然而,受限于GRB观测特点,这种系统在现实中较难被观测到.更多的情况是小尺度透镜体对GRB信号产生影响.例如,对于由中等质量黑洞导致的透镜,时间延迟与信号本身可比,可以在各个能段信号中看到两个形状相似的峰.自相关等方法被用来认证和测量时间延迟.目前有几个GRB透镜候选体:GRB 950830^[59]、200716C^[60,61]、081126A、090717A^[62]和210812A^[63].它们的时间延迟测量值在各个能段都一致,大小约在0.1~1s量级,对应的透镜体质量约为 $10^4 \sim 10^5$ 太阳质量.研究者推测,这样的透镜体很可能是中等质量的黑洞.FRB的情况也类似,需要分析动力学谱的自相关性^[64].然而,目前没有任何透镜化的FRB被探测到^[64-67].对于引力波,由于其长波和一致发射的特点,有时需要考虑衍射和干涉效应来认证透镜化的波形以及测量时间延迟.目前也没有任何透镜引力波信号被探测到^[68-70].

3 时间延迟的应用

本节分别介绍时间延迟在基础物理检验、天体物理和宇宙学3个方面的应用.

3.1 检验基础物理

3.1.1 引力波传播速度

在广义相对论(general relativity, GR)框架内,引力

波沿着零测地线以光速传播.对于一些修改引力理论,这个结论可以不成立.当前探测到的引力波信号与GR理论模板的一致性对强引力场有很强的限制.在一些修改引力中,对GR明显的偏离可以存在于弱场.例如,引力波速度可以与光速不一致 $c_{GW} \neq c_{\gamma}$.这个情形本质上等价于非零质量引力子的存在.没有探测到引力波信号中的弥散给了引力子质量很强的限制.The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO)/Virgo Interferometer(Virgo)合作组^[71]基于包含在GWTC-1目录中的第一轮和第二轮引力波事件的分析,给出引力子质量上限 $m_g \leq 4.7 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$.探测引力波速度与光子速度的差异可以用于检验修改引力理论.测量引力波和电磁对应体辐射光波的到达时间是一个显而易见的办法.然而,只有假设它们同时发射才可行.为了避免这个强假设,Collet和Bacon^[72]以及Fan等人^[73]提出利用强透镜系统来进行检验.概念上,这个方法不需要依赖任何有质量的引力子或修改理论.强透镜多像/路径的特点,即测量不同种类辐射时间延迟的差别,使得这个方法独立于透镜模型细节和固有发射时间差.

3.1.2 引力波极化检验

引力波是张量扰动,因此它们的极化本性值得被检验.Hou等人^[74]讨论了在引力波透镜系统里极化平面的转动问题,发现由于是小角度偏折角,对于大部分情况,极化变化可以忽略.在GR预言只有两个极化的同时,一些修改引力可以允许多达6个极化的存在.为了提取所有的极化模式,至少需要相对应数量的探测器.因此,探测器网络允许我们研究引力波的极化本性.当前,这个方法受限于独立的探测器个数.强透镜引力波系统能够产生多像,由于时间延迟,到达地球的时间不同,在此期间,地球发生自转,探测器位置发生变化,等价于增加了探测器数量^[75].

3.1.3 洛伦兹不变性破缺

洛伦兹不变性是狭义相对论的基本假定,即在非加速坐标系中系统作洛伦兹变换(旋转和平移),物理规律不变.但是,在一些试图统一广义相对论和量子力学的量子引力(quantum gravity, QG)模型中,这个假定在普朗克能标或尺度上需要被打破.短距离上的时空泡沫导致洛伦兹不变性破缺(Lorentz invariance violation, LIV)^[76-78].许多QG理论预言,LIV可以在接近普朗克能量的高能处被揭示.特别是,LIV可以通过对标准相对

论色散关系能量依赖的修改来显示. 在这个情形下, 真空中光子速度依赖自身能量使得高能光子和低能光子速度不同. 通过在不同波段对同一个源辐射不同能量光子的到达时间比较, 可以给出LIV能标限制.

GRB是宇宙学距离上的高能爆炸事件, 被提出用来测试LIV^[78]. 研究人员可以观测GRB不同能段光子到达时间差异. 然而, 假设这个到达时间的差异能够用来测试LIV, 必须忽略或假设不同能段固有时间延迟^[79,80]. 另一方面, GRB的辐射机制还没有完全被了解, 特别是长暴. 因此, 没有理由认为低能光子和高能光子同时辐射, 当探测到到达时间差异时, 我们不清楚哪个先发射.

Biesiada和Piorkowska^[81]提出利用引力透镜时间延迟来检验LIV, 这个方法可以不受固有时间延迟影响. 在经典GR中, 时间延迟与波段无关, 即不依赖于光子能量. 因此, 研究LIV导致的时间延迟成为可能. 就是说, 可以通过对比不同能段信号的时间延迟差异来揭示LIV的影响, 例如光学波段或低能段和TeV高能量的光子. 这个测试将完全不受固有时间差影响, 因为它们在这个系统中消掉了. 原始文献^[81]考虑了星系透镜. 受到当前探测到的透镜化GRB事件的影响, 中等质量黑洞的点透镜情形也被Lan等人^[82]详细地研究. 他们通过对GRB 950830和200716C的分析, 给出了LIV能量尺度的限制.

类似测试基础物理的工作在Baker和Trodden^[83]的研究中被讨论. 他们给出一个一般性的关于多信使引力透镜时间延迟的讨论, 例如, 无质量/有质量的光子、引力子、中微子和轴子. 如果它们来自同一个源, 可以用来检验对应的理论或模型.

3.2 天体物理应用

3.2.1 暗物质(子)结构

冷暗物质等级模型成功解释了大尺度结构的形成以及星系及其以上尺度的组成. 通过模拟, 部分暗物质晕幸免于潮汐瓦解的过程, 应该以成千上万子晕的形式存在. 这些子晕可能以矮星系卫星的形式出现^[84]. 然而, 在银河系及邻近星系中只观测到少数这样的卫星^[85-87]. 这个问题被称为“卫星缺失疑难”. 各种机制被提出用来解决这个问题. 探测遥远星系的子结构对这个问题以及暗物质本性研究至关重要.

强引力透镜提供了在宇宙学距离处探测暗物质子结构这样一种可能性. 给定透镜星系整体上的光滑模

型, 强透镜预言了多像的放大顺序. 测量与预测不一致的放大比称为流量比异常. 利用透镜类星体的流量比异常可以探测子结构: 光滑透镜模型可以预测像的位置, 子结构的存在会给出流量比异常. 然而, 对微透镜效应需要特别小心, 它通常不容易被处理^[88]. 实际中会选取特殊的波段, 使得对应源的大小远远大于恒星尺度, 将微透镜影响降到最低.

除此之外, Keeton和Moustakas^[89]提出利用时间延迟异常来探测子结构. 子结构对时间延迟的扰动通常小于1 d. 为了探测到这样的时间延迟异常, 需要特别精确的时间延迟测量. 然而, 对于透镜类星体, 时间延迟由光变曲线测量, 其误差通常大于1 d, 限制了这项技术. 进一步, Tie和Kochanek^[47]指出, 时间延迟测量可能受到微透镜的影响, 其原理是基于吸积盘有限大小和温度涨落模型. 因此, 类星体透镜无法用于探测暗物质子结构.

Liao等人^[90]提出, 透镜引力波信号由于其瞬变源特性, 可以给出非常精确的时间延迟测量. 另外, 引力波的长波特点可以使其不受微透镜的影响. 通过详细的模拟, 他们证明了透镜引力波可以用来探测暗物质子结构. 这项技术同样可以用于透镜FRB、GRB等. 进一步, Pearson等人^[91]提出, FRB精确的时间延迟可以用来探测引力波. 值得注意的是, 传统流量比异常主要对引力势能的二阶导数敏感, 而时间延迟异常主要依赖引力势本身的扰动. 因此, 这个方法作为流量比方法的补充, 可以从不同角度探测暗物质子结构.

3.2.2 致密暗物质、原初黑洞、中等质量黑洞

人们猜测, 暗物质(或至少其中一部分)由致密天体(compact object, CO)组成, 如大质量致密晕、原初黑洞(primordial black hole, PBH)、轴子团等. 在这些候选体中, 质量范围在10~100个太阳质量的原初黑洞^[92]受到广泛的关注, 部分原因归于LIGO探测到的双黑洞系统质量几乎都在这个范围. 人们认为, 纯天体物理过程不太可能导致这样的质量. 传统探测CO主要通过恒星的微透镜效应^[93], 它可以限制低质量CO(小于10个太阳质量)^[94]. 各类透镜瞬变源的时间延迟在近些年被提出用来探测和限制CO.

(1) 透镜GRB. 当质量大于10太阳质量时, CO作为透镜体, 可以在GRB信号中产生可以区分的回声. 如果透镜质量不是很大, 第二个像的光变可能会与第一个像重叠. 通过自相关分析, 我们可以认证这类信号. 时间延迟测量可以给出CO质量范围. Ji等人^[95]的研究表

明,当前Fermi和Swift数据的噪声太大,无法给出CO参数空间一个好的限制.他们通过模拟得到能对CO进行有效限制对应的信号需要达到的精度.他们发现,未来观测可以给出很好的限制.同时,通过对光变曲线的分析,时间延迟和放大比可以被测量,用来探测中等质量黑洞.

(2) 透镜FRB. FRB有着更加精细的时域结构.它们被提出用来限制致密暗物质.由10~100太阳质量的CO导致的时间延迟量级与FRB本身信号宽度可比,因此可以较容易区分出透镜后的两个信号.反过来,如果一系列样本中没有一个这样的分裂信号,那么这样的探测结果可以用来给出CO的上限,排除参数空间的一些区域. Liao等人^[64]首次利用110个FRB信号给出了CO质量和比例的限制,结果与wide binaries方法可比.他们同样对CHIME进行预测,并提出利用动力学谱进行认证透镜化FRB事件.在最新的研究结果中, Zhou等人^[66]利用593个CHIME数据给出了限制. Leung等人^[96]采用新颖的干涉方法来搜寻透镜FRB,其时间分辨率达到1.25 ns,对应于非常小的透镜体.他们分析了172个信号,没有发现透镜事件. Laha^[97]讨论了利用FRB透镜探测小尺度结构.

(3) 透镜引力波. Jung和Shin^[98]基于第二代探测器提出由于衍射和干涉效应, CO作为透镜体可以改变引力波的波形,因此变形的波形可以反过来用于探测CO.相比于电磁波,引力波有着更长的波长并且是一致的.对于地面探测器,当透镜质量在 $1\sim 10^{-5}$ 太阳质量时,由于波长和透镜尺寸可比,会发生衍射效应. Liao等人^[99]研究发现,第三代探测器如ET能够很好地限制CO的参数空间.如果ET在一年中没有探测到一例透镜事件,在质量为10~100太阳质量范围内, CO密度比例将不会超出 $10^{-2}\sim 10^{-5}$.

3.2.3 超新星爆发早期阶段

强透镜产生多像,提供了从一开始就观测后面到达像的可能性.这个机会被Oguri^[100]首次提及.超新星早期光变曲线的观测对限制其前身星的性质至关重要.激波过程仅仅持续数秒到几十分钟.在通常的观测计划中,人们非常容易错过这个阶段.在强透镜的情形下,我们可以预测后来像的到达时间和位置.2018年, Suwa^[101]发现,利用前3个像的信息可以预测第4个像的时间和位置. Foxley-Marrable等人^[102]研究了利用强透镜观测超新星爆发的早期阶段.假设一个合理的发现策略,他们预测LSST和ZTF将分别发现110和1个透镜

化Ia型超新星系统,这些系统中最后的像还没到达.这些系统将在最后的像到达的 $11.7_{-9.3}^{+29.8}$ d之前被发现,留下足够的时间进行后续跟踪.进一步,他们还研究了IIP和Ia型超新星的情况.

3.3 宇宙学

哈勃常数 H_0 代表了当前宇宙的膨胀速度,它可以用来给宇宙绝对尺度定标.目前,对于 H_0 值存在较大争议^[103].基于造父变星定标的方法,在邻近宇宙上用Ia型超新星测量的 H_0 值和早期微波背景辐射(cosmic microwave background, CMB)进行观测,假定宇宙由平坦的 Λ CDM模型描述得到的值在几个误差水平上不兼容. Planck卫星的CMB观测^[104]给出 $H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.结合CMB温度和来自Atacama Cosmology Telescope的各向异性极化测量以及来自WMAP的大尺度信息, Aiola等人^[105]给出 $H_0 = 67.4 \pm 1.1 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$,与Planck卫星一致.超新星SH0ES团队^[106]利用由造父变星和三角视差校准过的Ia型超新星得到 $H_0 = 74.03 \pm 1.42 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$,与Planck卫星的结果在4.4个误差水平上不一致. SH0ES团队^[107]最新的研究结果给出 $H_0 = 73.04 \pm 1.04 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$,在5个误差水平上显示不一致.这样的不一致表明,观测中存在未知的系统误差或者宇宙学标准模型有问题,无法同时解释宇宙早期观测和晚期观测.多个独立且准确的测量有助于给出这个问题的答案.

强引力透镜提供了一步到位直接测量绝对距离的方法^[45,108].多像之间的时间延迟测量可以用来给出哈勃常数:

$$\Delta t_{ij} = \frac{D_{\Delta t}}{c} \Delta \phi_{ij}, \quad (11)$$

其中, i, j 对应两个像. $D_{\Delta t} = D_d D_s (1 + z_d) / D_{ds}$ 由3个角直径距离组合而成,称为“时间延迟距离”,具有距离的量纲,反比于 H_0 . $\Delta \phi_{ij}$ 是两个像对应的费马势的差,由高分辨率的寄主星系像以及透镜星系中心光谱得到.除此之外,透镜星系距离 D_d 可以通过恒星运动学信息得到.简单来说,引力透镜时间延迟测量及透镜光弧和透镜运动学测量可以给出 $(D_{\Delta t}, D_d)$ 的后验分布,用来限制宇宙学参数,特别是 H_0 .

传统的源是被椭圆星系透镜化的类星体.时间延迟由多年的光变曲线测量.为了推测 H_0 ,需要3方面的测量: (1) 时间延迟; (2) 两个像之间的费马势差; (3) 视

线方向质量密度起伏. 第3方面针对mass-sheet简并效应. 这是因为视线方向的物质分布会等价于带给透镜体额外的汇聚 κ_{ext} , 改变时间延迟, 从而影响 H_0 的测量. 对当前的透镜类星体, 每个方面带来的误差精度都是百分之几的水平. 然而, 挑战仍然存在, 如透镜星系暗物质分布不确定性带来固有的mass-sheet简并^[5]、模型选择带来的系统误差^[109]以及吸积盘有限大小和辐射特点使得微透镜带来的时间延迟影响. 这些都可能使结果不准确. 尽管如此, 国际最前沿的强透镜团队TDCOSMO已经开始解决这些问题了. 随着韦布望远镜的运行, 高精度的数据将有助于解决这些误差来源.

透镜类星体时间延迟宇宙学已经取得了很多进展, 特别是这些项目: H0LiCOW^[110]、COSMOGRAIL^[111]、STRIDES^[112]、SHARP. 目前, 它们都整合到TDCOSMO^[113]项目中. H0LiCOW项目利用6个透镜系统测量 H_0 , 结果达到了2.4%的精度^[114]. 假设透镜质量满足幂律分布, 项目给出哈勃常数为 $H_0 = 74.2 \pm 1.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. 对于复合模型: 符合NFW(Navarro-Frenk-White)分布的暗物质晕+通过测量光度和假设质光比得到的恒星质量分布, 项目给出 $H_0 = 74.0 \pm 1.7 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. 之后, 考虑由暗物质导致的透镜星系内部mass-sheet简并带来的不确定性, TDCOSMO团队^[115]用7个透镜给出 $H_0 = 74.5^{+5.6}_{-6.1} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. 假设所用TDCOSMO透镜与SLACS巡天分布一致, TDCOSMO团队^[115]给出 $H_0 = 67.4^{+4.1}_{-3.2} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

除了传统的类星体透镜, 瞬变源透镜正受到人们的关注. 在宇宙学方面, 瞬变源透镜具有这些优势^[7]: (1) 时间延迟测量会很精确. 例如, 超新星光变比较规律, 有利于时间延迟的测量. 其他种类瞬变源由于信号持续时间短, 时间延迟测量基本没有误差. (2) 透镜模型可以测量得更精确. 类星体AGN的光挡住了寄主星系的光弧, 不利于透镜模型的重构. 对于瞬变源透镜, 可以在其爆发前后测量到完整的光弧, 使得透镜模型的建立更加准确^[116]. 另一方面, Ia型超新星的标准烛光特点使得每个像的绝对放大率能够被测量, 这将有利于打破透镜模型重构中的简并效应^[117-119]. 当前, 已有几例星系及星系团强透镜超新星被发现, 部分系统多像之间的时间延迟被测量, 可以利用它们给出 H_0 的限制. 然而这些系统的透镜体要么是星系团(相较椭圆星系, 星系团透镜势不确定性大), 要么是小的星系(其对应的时间延迟太小, 测量误差大), 难以给出宇宙学参数很好的限制. 例如, 几年前就利用SN Refsdal测量到

的时间延迟给出 H_0 的限制, 其结果为 $H_0 = 69.8^{+5.3}_{-4.1} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ^[120]及 $H_0 = 64^{+9}_{-11} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ^[121]. 然而, 其中存在的系统误差需要被细致地考虑^[122,123]. 目前制约透镜超新星时间延迟宇宙学的主要因素是观测的样本数太少了, 没有干净的椭圆星系透镜系统, 同时没有多波段完整的光变曲线用于测量准确的时间延迟. Refsdal团队^[124]基于更加细致的分析^[125]给出 H_0 的限制结果为: $H_0 = 64.8^{+4.4}_{-4.3} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (考虑了8个星系团模型)以及 $H_0 = 66.6^{+4.1}_{-3.3} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (只考虑其中两个最佳星系团透镜模型), 具有相对较高的可靠性.

4 总结及展望

引力透镜效应产生多像, 多像之间存在时间延迟. 本文简单介绍了时间延迟的基本原理、测量方法以及当前的现状. 时间延迟的测量对基础物理、天体物理和宇宙学的研究非常重要.

由于类星体数目多、亮度大、恒定发光等特点, 目前探测到的, 特别是有时间延迟测量的透镜系统主要为类星体透镜. 利用它们可以很好地对哈勃常数进行独立测量, 从而有可能解决当前的哈勃常数问题. 随着LSST等我国光学巡天望远镜的运行, 数千个时间延迟透镜类星体系统将会被很好地测量, 并应用到探测暗物质分布、组成以及宇宙学参数的研究中. TDCOSMO这样的国际透镜团队正在开发相对应的分析软件, 并考虑到更多的误差来源, 例如mass-sheet简并、微透镜对时间延迟测量的影响等. 韦布望远镜时代下, 数据质量将得到显著提升, 使这一领域得到极大的发展.

另一方面, 随着时域天文学时代的来临, 越来越多的瞬变源, 如伽马暴及其各波段光学余辉、快速射电暴和引力波, 将会被大量探测, 保证了足够数量透镜事件的探测和认证. 本文已经介绍了瞬变源透镜的时间延迟在多方面的应用前景. 一些专业团队如HOLIS-MOKES、LIGO-Virgo透镜组等正在组建并有效运行. 这个领域较新, 有许多开放性问题值得研究. 例如, 如何处理透镜超新星中的微引力透镜效应? 如何在真实观测中认证透镜化的FRB? 如何在真实引力波搜寻中考虑透镜效应? 相关的文章在近几年快速增长. 随着更多的数据被获取, 这些系统带来的益处将变得更加明显, 吸引更多的关注. 我们相信透镜化的瞬变源在不久的将来会加深我们对宇宙以及瞬变源自身的理解.

致谢 感谢武汉大学范锡龙和北京师范大学李正祥对本文草稿的阅读以及给出的宝贵意见。感谢武汉大学侯文林对稿件格式的修改。

参考文献

- 1 Schneider P, Ehlers J, Falco E E. Gravitational Lenses. Berlin: Springer, 1992
- 2 Treu T. Strong lensing by galaxies. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2010, 48: 87–125
- 3 Oguri M, Marshall P J. Gravitationally lensed quasars and supernovae in future wide-field optical imaging surveys. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2010, 405: 2579–2593
- 4 Treu T, Marshall P J. Time delay cosmography. *Astron Astrophys Rev*, 2016, 24: 11
- 5 Treu T, Suyu S H, Marshall P J. Strong lensing time-delay cosmography in the 2020s. *Astron Astrophys Rev*, 2022, 30: 8
- 6 Kelly P L, Rodney S A, Treu T, et al. Multiple images of a highly magnified supernova formed by an early-type cluster galaxy lens. *Science*, 2015, 347: 1123–1126
- 7 Liao K, Biesiada M, Zhu Z H. Strongly lensed transient sources: A review. *Chin Phys Lett*, 2022, 39: 119801
- 8 Oguri M. Strong gravitational lensing of explosive transients. *Rep Prog Phys*, 2019, 82: 126901
- 9 Fan X L. Lensed gravitational waves: Scattering and applications (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 2516–2528 [范锡龙. 透镜化引力波的散射问题及其应用. 科学通报, 2021, 66: 2516–2528]
- 10 Brown A G A, Vallenari A, Prusti T, et al. Gaia Data Release 1 Summary of the astrometric, photometric, and survey properties. *Astron Astrophys*, 2016, 595: A2
- 11 Diehl H T, Buckley-Geer E J, Lindgren K A, et al. The DES bright arcs survey: Hundreds of candidate strongly lensed galaxy systems from the Dark Energy Survey science verification and year 1 observations. *Astrophys J Suppl Ser*, 2017, 232: 15
- 12 Sonnenfeld A, Verma A, More A, et al. Survey of Gravitationally-lensed Objects in HSC Imaging (SuGOHI) VI. Crowdsourced lens finding with Space Warps. *Astron Astrophys*, 2020, 642: A148
- 13 Amiri M, Andersen B C, Bandura K, et al. The first CHIME/FRB fast radio burst catalog. *Astrophys J Suppl Ser*, 2021, 257: 59
- 14 Niu C H, Aggarwal K, Li D, et al. A repeating fast radio burst associated with a persistent radio source. *Nature*, 2022, 606: 873–877
- 15 The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, the KAGRA Collaboration. GWTC-3: Compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the second part of the third observing run. 2021, arXiv: 2111.03606
- 16 Dewdney P E, Hall P J, Schilizzi R T, et al. The square kilometre array. *Proc IEEE*, 2009, 97: 1482–1496
- 17 Regimbau T, Dent T, Pozzo W D, et al. Mock data challenge for the Einstein Gravitational-Wave Telescope. *Phys Rev D*, 2012, 86: 122001
- 18 Liao K, Treu T, Marshall P, et al. Strong lens time delay challenge. II. Results of TDC1. *Astrophys J*, 2015, 800: 11
- 19 Tewes M, Courbin F, Meylan G, et al. COSMOGRAIL: The COSmological MONitoring of GRAVitational Lenses XI. Techniques for time delay measurement in presence of microlensing. *Astron Astrophys*, 2013, 553: A120
- 20 Tewes M, Courbin F, Meylan G, et al. COSMOGRAIL: The COSmological MONitoring of GRAVitational Lenses XIII. Time delays and 9-yr optical monitoring of the lensed quasar RX J1131–1231. *Astron Astrophys*, 2013, 556: A22
- 21 Fassnacht C D, Xanthopoulos E, Koopmans L V E, et al. A determination of H_0 with the CLASS gravitational lens B1608+656. III. A significant improvement in the precision of the time delay measurements. *Astrophys J*, 2002, 581: 823–835
- 22 Fassnacht C D, Pearson T J, Readhead A C S, et al. A determination of H_0 with the CLASS gravitational lens B1608+656. I. Time delay measurements with the VLA. *Astrophys J*, 1999, 527: 498–512
- 23 Koopmans L V E, Fassnacht C D. A determination of H_0 with the CLASS gravitational lens B1608+656. II. Mass models and the Hubble constant from lensing. *Astrophys J*, 1999, 527: 513–524
- 24 Millon M, Courbin F, Bonvin V, et al. COSMOGRAIL. XIX. Time delays in 18 strongly lensed quasars from 15 years of optical monitoring. *Astron Astrophys*, 2020, 640: A105
- 25 Pelt J, Kayser R, Refsdal S, et al. The light curve and the time delay of QSO 0957+561. *Astron Astrophys*, 1996, 305: 97–106
- 26 Bonvin V, Tewes M, Courbin F, et al. COSMOGRAIL: The COSmological MONitoring of GRAVitational Lenses XV. Assessing the achievability and precision of time-delay measurements. *Astron Astrophys*, 2016, 585: A88
- 27 Vuissoz C, Courbin F, Sluse D, et al. COSMOGRAIL: The COSmological MONitoring of GRAVitational Lenses VII. Time delays and the Hubble constant from WFI J2033–4723. *Astron Astrophys*, 2008, 488: 481–490
- 28 Courbin F, Chantry V, Revaz Y, et al. COSMOGRAIL: The COSmological MONitoring of GRAVitational Lenses IX. Time delays, lens dynamics and baryonic fraction in HE 0435-1223. *Astron Astrophys*, 2011, 536: A53

- 29 Eulaers E, Tewes M, Magain P, et al. COSMOGRAIL: The COSmological MONitoring of GRAVItational Lenses XII. Time delays of the doubly lensed quasars SDSS J1206+4332 and HS 2209+1914. *Astron Astrophys*, 2013, 553: A121
- 30 Kumar S R, Tewes M, Stalin C S, et al. COSMOGRAIL: The COSmological MONitoring of GRAVItational Lenses XIV. Time delay of the doubly lensed quasar SDSS J1001+5027. *Astron Astrophys*, 2013, 557: A44
- 31 Aghamousa A, Shafieloo A. Fast and reliable time delay estimation of strong lens systems using the smoothing and cross-correlation methods. *Astrophys J*, 2015, 804: 39
- 32 Kumar S R, Stalin C S, Prabhu T P. H_0 from ten well-measured time delay lenses. *Astron Astrophys*, 2015, 580: A38
- 33 Tak H, Mandel K, van Dyk D A, et al. Bayesian estimates of astronomical time delays between gravitationally lensed stochastic light curves. *Ann Appl Stat*, 2017, 11: 1309–1348
- 34 Hojjati A, Linder E V. Next generation strong lensing time delay estimation with Gaussian processes. *Phys Rev D*, 2014, 90: 123501
- 35 Walsh D, Carswell R F, Weymann R J. 0957+561 A, B: Twin quasistellar objects or gravitational lens? *Nature*, 1979, 279: 381–384
- 36 Press W H, Rybicki G B, Hewitt J N. The time delay of gravitational lens 0957+561. I—Methodology and analysis of optical photometric data. II—Analysis of radio data and combined optical-radio analysis. *Astrophys J*, 1992, 385: 404
- 37 Press W H, Rybicki G B, Hewitt J N. The time delay of gravitational lens 0957+561. II. Analysis of radio data and combined optical-radio analysis. *Astrophys J*, 1992, 385: 416
- 38 Kundić T, Colley W N, Gott III J R, et al. An event in the light curve of 0957+561A and prediction of the 1996 image B light curve. *Astrophys J*, 1995, 455: L5
- 39 Kundić T, Turner E L, Colley W N, et al. A robust determination of the time delay in 0957+561A, B and a measurement of the global value of Hubble’s constant. *Astrophys J*, 1997, 482: 75–82
- 40 Schechter P L, Bailyn C D, Barr R, et al. The quadruple gravitational lens PG 1115+080: Time delays and models. *Astrophys J*, 1997, 475: L85–L88
- 41 Burud I, Courbin F, Magain P, et al. An optical time-delay for the lensed BAL quasar HE 2149-2745. *Astron Astrophys*, 2002, 383: 71–81
- 42 Magain P, Courbin F, Sohy S. Deconvolution with correct sampling. *Astrophys J*, 1998, 494: 472–477
- 43 Lovell J E J, Jauncey D L, Reynolds J E, et al. The time delay in the gravitational lens PKS 1830–211. *Astrophys J Lett*, 1998, 508: L51
- 44 Burud I, Hjorth J, Courbin F, et al. Time delay and lens redshift for the doubly imaged BAL quasar SBS 1520+530. *Astron Astrophys*, 2002, 391: 481–486
- 45 Kochanek C S, Morgan N D, Falco E E, et al. The time delays of gravitational lens HE 0435–1223: An early-type galaxy with a rising rotation curve. *Astrophys J*, 2006, 640: 47–61
- 46 Dobler G, Fassnacht C D, Treu T, et al. Strong lens time delay challenge. I. Experimental design. *Astrophys J*, 2015, 799: 168
- 47 Tie S S, Kochanek C S. Microlensing makes lensed quasar time delays significantly time variable. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 473: 80–90
- 48 Liao K. Chromatic microlensing time delays. *Astrophys J*, 2020, 899: L33
- 49 Liao K. Impact of microlensing on observational strategies for gravitational time-delay measurements. *Astrophys J*, 2021, 906: 26
- 50 Liao K, Fan X L, Ding X, et al. Precision cosmology from future lensed gravitational wave and electromagnetic signals. *Nat Commun*, 2017, 8: 1148
- 51 Goldstein D A, Nugent P E, Kasen D N, et al. Precise time delays from strongly gravitationally lensed type Ia supernovae with chromatically microlensed images. *Astrophys J*, 2018, 855: 22
- 52 Suyu S H, Huber S, Cañameras R C, et al. HOLISMOKES I. Highly optimised lensing investigations of supernovae, microlensing objects, and kinematics of ellipticals and spirals. *Astron Astrophys*, 2020, 644: A162
- 53 Huber S, Suyu S H, Noebauer U M, et al. HOLISMOKES III. Achromatic phase of strongly lensed type Ia supernovae. *Astron Astrophys*, 2021, 646: A110
- 54 Suyu S H, Goobar A, Collett T, et al. Strong gravitational lensing and microlensing of supernovae. 2023, arXiv: [2301.07729](https://arxiv.org/abs/2301.07729)
- 55 Quimby R M, Oguri M, More A, et al. Detection of the gravitational lens magnifying a type Ia supernova. *Science*, 2014, 344: 396–399
- 56 Goobar A, Amanullah R, Kulkarni S R, et al. iPTF16geu: A multiply imaged, gravitationally lensed type Ia supernova. *Science*, 2017, 356: 291–295
- 57 Rodney S A, Brammer G B, Pierel J D R, et al. A gravitationally lensed supernova with an observable two-decade time delay. *Nat Astron*, 2021, 5: 1118–1125
- 58 Goobar A, Johansson J, Schulze S, et al. SN Zwicky: Uncovering a population of gravitational lens galaxies with magnified “standard candles”. 2022, arXiv: [2211.00656](https://arxiv.org/abs/2211.00656)
- 59 Paynter J, Webster R, Thrane E. Evidence for an intermediate-mass black hole from a gravitationally lensed gamma-ray burst. *Nat Astron*, 2021, 5: 560–568
- 60 Wang Y, Jiang L Y, Li C K, et al. GRB 200716C: Evidence for a short burst being lensed. *Astrophys J Lett*, 2021, 918: L34

- 61 Yang X, Lü H J, Yuan H Y, et al. Evidence for gravitational lensing of GRB 200716C. *Astrophys J Lett*, 2021, 921: L29
- 62 Lin S J, Li A, Gao H, et al. A search for millilensing gamma-ray bursts in the observations of fermi GBM. *Astrophys J*, 2022, 931: 4
- 63 Veres P, Bhat N, Fraija N, et al. Fermi-GBM observations of GRB 210812A: Signatures of a million solar mass gravitational lens. *Astrophys J Lett*, 2021, 921: L30
- 64 Liao K, Zhang S B, Li Z, et al. Constraints on compact dark matter with fast radio burst observations. *Astrophys J Lett*, 2020, 896: L11
- 65 Zhou H, Li Z, Huang Z, et al. Constraints on the abundance of primordial black holes with different mass distributions from lensing of fast radio bursts. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2022, 511: 1141–1152
- 66 Zhou H, Li Z, Liao K, et al. Search for lensing signatures from the latest fast radio burst observations and constraints on the abundance of primordial black holes. *Astrophys J*, 2022, 928: 124
- 67 Ho S C C, Hashimoto T, Goto T, et al. Future constraints on dark matter with gravitationally lensed fast radio bursts detected by BURST. *Astrophys J*, 2023, 950: 53
- 68 Hannuksela O A, Haris K, Ng K K Y, et al. Search for gravitational lensing signatures in LIGO-Virgo binary black hole events. *Astrophys J*, 2019, 874: L2
- 69 Abbott R, Abbott T D, Abraham S, et al. Search for lensing signatures in the gravitational-wave observations from the first half of LIGO-Virgo's third observing run. *Astrophys J*, 2021, 923: 14
- 70 Kim K, Lee J, Hannuksela O A, et al. Deep learning-based search for microlensing signature from binary black hole events in GWTC-1 and -2. *Astrophys J*, 2022, 938: 157
- 71 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Tests of general relativity with the binary black hole signals from the LIGO-Virgo catalog GWTC-1. *Phys Rev D*, 2019, 100: 104036
- 72 Collett T E, Bacon D. Testing the speed of gravitational waves over cosmological distances with strong gravitational lensing. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 091101
- 73 Fan X L, Liao K, Biesiada M, et al. Speed of gravitational waves from strongly lensed gravitational waves and electromagnetic signals. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 091102
- 74 Hou S, Fan X L, Zhu Z H. Gravitational lensing of gravitational waves: Rotation of polarization plane. *Phys Rev D*, 2019, 100: 064028
- 75 Goyal S, Haris K, Mehta A K, et al. Testing the nature of gravitational-wave polarizations using strongly lensed signals. *Phys Rev D*, 2021, 103: 024038
- 76 Addazi A, Alvarez-Muniz J, Batista R A, et al. Quantum gravity phenomenology at the dawn of the multi-messenger era—A review. *Prog Part Nucl Phys*, 2022, 125: 103948
- 77 Amelino-Camelia G. Quantum-spacetime phenomenology. *Living Rev Relativ*, 2013, 16: 5
- 78 Amelino-Camelia G, Ellis J, Mavromatos N E, et al. Tests of quantum gravity from observations of γ -ray bursts. *Nature*, 1998, 395: 525
- 79 Pan Y, Qi J, Cao S, et al. Model-independent constraints on Lorentz invariance violation: Implication from updated gamma-ray burst observations. *Astrophys J*, 2020, 890: 169
- 80 Agrawal R, Singirikonda H, Desai S. Search for Lorentz invariance violation from stacked gamma-ray burst spectral lag data. *J Cosmol Astropart Phys*, 2021, 2021: 029
- 81 Biesiada M, Piórkowska A. Gravitational lensing time delays as a tool for testing Lorentz-invariance violation. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2009, 396: 946–950
- 82 Lan L, Piórkowska-Kurpas A, Wen X, et al. Lorentz invariance violation test from time delays measured with gravitationally lensed GRB candidates 950830 and 200716C. *Astrophys J*, 2022, 937: 62
- 83 Baker T, Trodden M. Multimessenger time delays from lensed gravitational waves. *Phys Rev D*, 2017, 95: 063512
- 84 Diemand J, Kuhlen M, Madau P, et al. Clumps and streams in the local dark matter distribution. *Nature*, 2008, 454: 735–738
- 85 Klypin A, Kravtsov A V, Valenzuela O, et al. Where are the missing galactic satellites? *Astrophys J*, 1999, 522: 82–92
- 86 Drlica-Wagner A, Bechtol K, Rykoff E S, et al. Eight ultra-faint galaxy candidates discovered in year two of the dark energy survey. *Astrophys J*, 2015, 813: 109
- 87 Cerny W, Martínez-Vázquez C E, Drlica-Wagner A, et al. Six more ultra-faint Milky Way companions discovered in the DECam local volume exploration survey. 2022, arXiv: 2209.12422
- 88 Schechter P L, Wambsganss J. Quasar microlensing at high magnification and the role of dark matter: Enhanced fluctuations and suppressed saddle points. *Astrophys J*, 2002, 580: 685–695
- 89 Keeton C R, Moustakas L A. A new channel for detecting dark matter substructure in galaxies: Gravitational lens time delays. *Astrophys J*, 2009, 699: 1720–1731
- 90 Liao K, Ding X, Biesiada M, et al. Anomalies in time delays of lensed gravitational waves and dark matter substructures. *Astrophys J*, 2018, 867: 69

- 91 Pearson N, Trendafilova C, Meyers J. Searching for gravitational waves with strongly lensed repeating fast radio bursts. *Phys Rev D*, 2021, 103: 063017
- 92 Green A M, Kavanagh B J. Primordial black holes as a dark matter candidate. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2021, 48: 043001
- 93 Tisserand P, Guillou L L, Afonso C, et al. Limits on the Macho content of the Galactic halo from the EROS-2 Survey of the Magellanic clouds. *Astron Astrophys*, 2007, 469: 387–404
- 94 Niikura H, Takada M, Yasuda N, et al. Microlensing constraints on primordial black holes with Subaru/HSC Andromeda observations. *Nat Astron*, 2019, 3: 524–534
- 95 Ji L, Kovetz E D, Kamionkowski M. Strong lensing of gamma ray bursts as a probe of compact dark matter. *Phys Rev D*, 2018, 98: 123523
- 96 Leung C, Kader Z, Masui K W, et al. Constraining primordial black holes using fast radio burst gravitational-lens interferometry with CHIME/FRB. *Phys Rev D*, 2022, 106: 043017
- 97 Laha R. Lensing of fast radio bursts: Future constraints on primordial black hole density with an extended mass function and a new probe of exotic compact fermion and boson stars. *Phys Rev D*, 2020, 102: 023016
- 98 Jung S, Shin C S. Gravitational-wave fringes at LIGO: Detecting compact dark matter by gravitational lensing. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 041103
- 99 Liao K, Tian S, Ding X. Probing compact dark matter with gravitational wave fringes detected by the Einstein Telescope. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2020, 495: 2002–2006
- 100 Oguri M, Suto Y, Turner E L. Gravitational lensing magnification and time delay statistics for distant supernovae. *Astrophys J*, 2003, 583: 584–593
- 101 Suwa Y. Supernova forecast with strong lensing. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 474: 2612–2616
- 102 Foxley-Marrable M, Collett T E, Frohmaier C, et al. Observing the earliest moments of supernovae using strong gravitational lenses. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2020, 495: 4622–4637
- 103 Verde L, Treu T, Riess A G. Tensions between the early and late Universe. *Nat Astron*, 2019, 3: 891–895
- 104 Collaboration P. Planck 2018 results VI. Cosmological parameters. *Astron Astrophys*, 2020, 641: A6
- 105 Aiola S, Calabrese E, Maurin L, et al. The Atacama Cosmology Telescope: DR4 maps and cosmological parameters. *J Cosmol Astropart Phys*, 2020, 2020(12): 047
- 106 Riess A G, Casertano S, Yuan W, et al. Large Magellanic Cloud Cepheid standards provide a 1% foundation for the determination of the Hubble constant and stronger evidence for physics beyond Λ CDM. *Astrophys J*, 2019, 876: 85
- 107 Riess A G, Yuan W, Macri L M, et al. A comprehensive measurement of the local value of the Hubble constant with $1 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team. *Astrophys J Lett*, 2022, 934: L7
- 108 Refsdal S. On the possibility of determining Hubble's parameter and the masses of galaxies from the gravitational lens effect. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1964, 128: 307–310
- 109 Cao X, Li R, Nightingale J W, et al. Systematic errors induced by the elliptical power-law model in galaxy-galaxy strong lens modeling. *Res Astron Astrophys*, 2022, 22: 025014
- 110 Suyu S H, Bonvin V, Courbin F, et al. H0LiCOW—I. H0 Lenses in COSMOGRAIL's Wellspring: Program overview. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2017, 468: 2590–2604
- 111 Eigenbrod A, Courbin F, Vuissoz C, et al. COSMOGRAIL: The COSmological MONitoring of GRAVItational Lenses I. How to sample the light curves of gravitationally lensed quasars to measure accurate time delays. *Astron Astrophys*, 2005, 436: 25–35
- 112 Treu T, Agnello A, Baumer M A, et al. The STRong lensing Insights into the Dark Energy Survey (STRIDES) 2016 follow-up campaign—I. Overview and classification of candidates selected by two techniques. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 481: 1041–1054
- 113 Millon M, Galan A, Courbin F, et al. TDCOSMO I. An exploration of systematic uncertainties in the inference of H_0 from time-delay cosmography. *Astron Astrophys*, 2020, 639: A101
- 114 Wong K C, Suyu S H, Chen G C F, et al. H0LiCOW—XIII. A 2.4 per cent measurement of H_0 from lensed quasars: 5.3σ tension between early- and late-Universe probes. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2020, 498: 1420–1439
- 115 Birrer S, Shajib A J, Galan A, et al. TDCOSMO IV. Hierarchical time-delay cosmography-joint inference of the Hubble constant and galaxy density profiles. *Astron Astrophys*, 2020, 643: A165
- 116 Ding X, Liao K, Birrer S, et al. Improved time-delay lens modelling and H_0 inference with transient sources. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2021, 504: 5621–5628
- 117 Holz D E. Seeing double: Strong gravitational lensing of high-redshift supernovae. *Astrophys J*, 2001, 556: L71–L74
- 118 Oguri M, Kawano Y. Gravitational lens time delays for distant supernovae: Breaking the degeneracy between radial mass profiles and the Hubble constant. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2003, 338: L25–L29
- 119 Birrer S, Dhawan S, Shajib A J. The Hubble constant from strongly lensed supernovae with standardizable magnifications. *Astrophys J*, 2022, 924: 2

- 120 Grillo C, Rosati P, Suyu S H, et al. Measuring the value of the Hubble constant “à la Refsdal”. [Astrophys J](#), 2018, 860: 94
- 121 Vega-Ferrero J, Diego J M, Miranda V, et al. The Hubble constant from SN Refsdal. [Astrophys J](#), 2018, 853: L31
- 122 Williams L L R, Liesenborgs J. The role of multiple images and model priors in measuring H_0 from supernova Refsdal in galaxy cluster MACS J1149.5+2223. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 482: 5666
- 123 Grillo C, Rosati P, Suyu S H, et al. On the accuracy of time-delay cosmography in the frontier fields cluster MACS J1149.5+2223 with supernova Refsdal. [Astrophys J](#), 2020, 898: 87
- 124 Kelly P L, Rodney S, Treu T, et al. Constraints on the Hubble constant from supernova Refsdal’s reappearance. [Science](#), 2023, 380: eabh1322
- 125 Kelly P L, Rodney S, Treu T, et al. The magnificent five images of supernova Refsdal: Time delay and magnification measurements. [Astrophys J](#), 2023, 948: 93

Summary for “引力透镜时间延迟研究进展”

Research progress on gravitational lensing time delays

Kai Liao

School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China

E-mail: liaokai@whu.edu.cn

According to Einstein's general relativity (GR), light travels along a null geodesic. Therefore, when the inhomogeneous distribution of matter leads to the curvature of time and space, light rays will deflect as the light deflects in the optical lens. This phenomenon is called “gravitational lensing”. The gravitational lensing effect is an important tool used in astronomical research. The history of gravitational lensing dates back to the observation of starlight deflection by the Sun during the solar eclipse in 1919 as strong evidences in favor of GR. A more interesting phenomenon in this effect is that the same celestial source can generate multiple images under certain circumstances. These images arrive on Earth in sequence and are observed by people. The difference in arrival time between them is called “time delay” and carries rich astronomical information. Specific observation strategies and algorithms have been developed to measure time delays for different celestial sources. In modern cosmology, the traditional time delay observation object is a distant bright quasar strongly lensed by the foreground galaxy or galaxy cluster, forming multiple magnified images of the point-like bright nucleus while the lensed dimmer parts of the host galaxy appear in the form of stretched arcs. Such lensed quasar systems have been attracting great attention as they are useful for efficient studies of either the nature of lens galaxies and quasars or the geometry of the Universe. Their time delay is measured by comparing the light variation curves. In the era of Webb telescope, the time delay of quasars will give accurate measurements of Hubble constant, in order to solve the current “Hubble constant issue”. Meanwhile, with the opening of the era of time-domain astronomy, lensed transient sources such as various types of supernovae, gamma ray bursts (GRBs) and their afterglow, rapid radio bursts (FRBs), and gravitational waves (GWs) will also be widely observed. For these sources, time delay measurement may become easier and more accurate. The transient source lens system will bring us more information about the nature of gravity, the properties of dark matter, and the expansion of the Universe. Detecting and verifying these lensed transient signals are interesting and significant because they would take us to a new research field and bring more discoveries. Firstly, while lensing of traditional sources assumes the description of geometric optics by default, lensed transient signals should sometimes take into account wave optics due to long wavelengths, small source size or coherent emission. Secondly, compared to the traditional targets, lensed transients have many advantages in studying the Universe. For example, due to the well-known light curve template of type Ia supernovae, strong lens time delay measurements may become easier and more accurate with shorter monitoring time, which benefits Hubble constant inference. This advantage becomes much more obvious for lensed FRBs, GRBs and GWs due to their transient nature (signal durations are much smaller than time delays themselves). Finally, studying the lensing effect may also shed light on the nature of transients themselves, especially at high redshifts where the magnification effect becomes non-negligible. This review is based on the latest research progress in the field of time delay both domestically and internationally. It introduces the measurement methods of time delay, the current status of measurement, and its applications in testing basic physics, researching astrophysics, and cosmology.

gravitational lensing, time delays, quasars, transient sources, cosmology

doi: [10.1360/TB-2023-0358](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0358)