

透镜星系的非距离红移

陈军利

西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年9月28日; 录用日期: 2024年10月21日; 发布日期: 2024年10月29日

摘要

本文分析了引力透镜中光线弯曲的康普顿效应, 从而推断出光线弯曲会产生非距离红移, 说明透镜星系的红移大于哈勃红移, 应用红移计算透镜星系中源天体的距离时, 应该减掉透镜星系的非距离红移, 另外, 本文用实例说明了透镜星系中心都存在高亮度星系(星系), 从而说明了光线弯曲是由可见光从大质量发光星球旁边经过时, 可见光与中心星系发出的电磁波连续作用的结果。

关键词

引力透镜, 康普顿效应, 哈勃红移, 星系距离

Non-Distance Redshift of Lenticular Galaxies

Junli Chen

School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi

Received: Sep. 28th, 2024; accepted: Oct. 21st, 2024; published: Oct. 29th, 2024

Abstract

This article analyzes the Compton effect of light bending in gravitational lensing, and infers that light bending will produce non-distance redshift, indicating that the redshift of lens galaxies is greater than the Hubble redshift. When applying the redshift to calculate the distance of the source object in the lens galaxy, the non-distance redshift of the lens galaxy should be subtracted. In addition, this article uses examples to illustrate that there are high-brightness galaxies (galaxies) in the centers of lens galaxies, thus illustrating that light bending is the result of the continuous interaction between visible light and electromagnetic waves emitted by the central galaxy when a massively luminous star passes by.

Keywords

Gravitational Lensing, Compton Effect, Hubble Redshift, Galaxy Distances

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 光线弯曲和引力透镜现象

1.1. 光线弯曲

1704年，牛顿提出了大质量物体可能会使光线发生弯曲。后来法国天体力学家拉普拉斯也提出了类似的看法。1804年德国索德纳把光微粒当做有质量的粒子，预言了光线经过太阳边缘时会发生0.875角秒的偏折。1916年，爱因斯坦在广义相对论框架里计算太阳对光线的弯曲，其偏折度为1.74角秒[1]，如图1。1919年日全食期间，由爱丁顿等人率领的两支观测队分赴西非几内亚湾的普林西比岛和巴西的索布腊儿尔两地观测，观测结果分别为1.61"和1.98"。这个偏角与爱因斯坦广义相对论的预期基本相符。

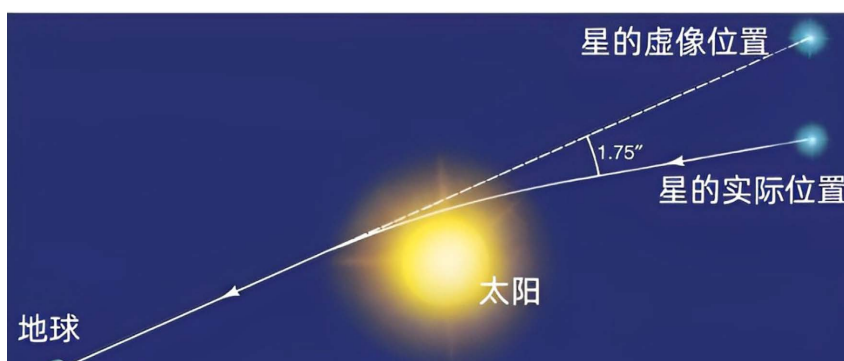


Figure 1. Schematic diagram of light bending

图1. 光线弯曲示意图

1.2. 引力透镜

广义相对论预言了光线经过大质量天体附近时会发生弯曲。如果在观测者到光源的直线上有一个大质量的天体(前置天体)，则观测者会看到由于光线弯曲而形成的一个或多个像，这种现象称之为引力透镜现象[2]。图2是类星体的引力透镜的几何示意图。

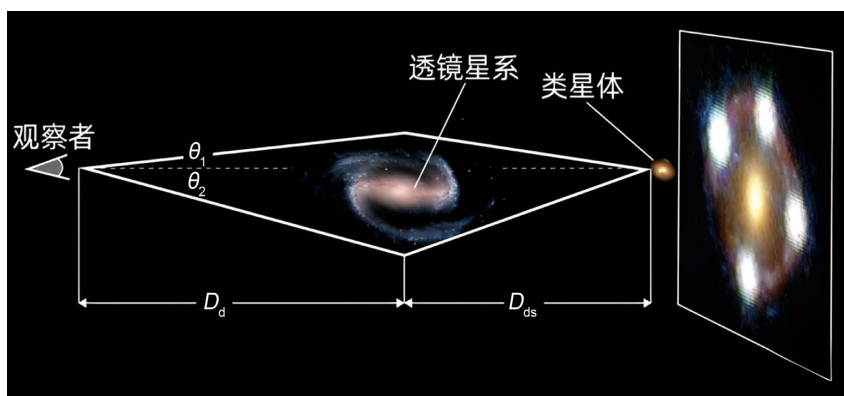


Figure 2. Schematic diagram of gravitational lens

图2. 引力透镜示意图

1.3. 光线弯曲的同频互扰解释

光线弯曲的同频互扰解释[3]主要论点如下：1916年爱因斯坦发表了广义相对论，这一理论认为引力弯曲了时空，光线经过大质量星球旁边时会弯曲形成“引力透镜”现象。

对于遥远碰撞星系的观测表明：1) 星系碰撞对可观测大质量发光星球基本没有影响，2) 星系碰撞中都有大量不发光的炙热气体，3) 星系碰撞中存在暗物质的星系都使用了“引力透镜”原理反演星系质量，4) 通过“引力透镜”原理反演的星系质量与不发光的炙热气体分布分离，5) 通过“引力透镜”原理反演的物质质量远远大于发光星球的质量。

这些现象反映广义相对论中的引力透镜原理存在如下问题：1) 微观作用机理无法解释：大家知道，引力是由引力子传播的，光是由光子传播的，引力子和光子基本上不发生作用，因此引力弯曲光线从微观机理上无法解释。2) 爱因斯坦发表广义相对论时并未对时空结构做详细的描述，更未对引力怎样弯曲时空作详细描述。近年来对时空结构研究比较深入的是圈量子理论[4]，在此理论下，时空被描述成呈背景独立，由关系性循环织成的自旋网络铺成的时空几何。网络中每条边及每个节点分别为一普朗克长度及普朗克体积。在普朗克尺度下，时空几何充满随机的量子涨落。圈量子理论认为时空是离散的，但是圈量子理论一直不是很成功。3) 如果引力弯曲了时空，那么星系碰撞中，作为主要质量来源的不发光炙热气体也应该对弯曲时空作出贡献，但观测事实是通过“引力透镜”原理反推的星系质量与不发光炙热气体分布分离，说明“引力透镜”原理反推的星系质量未反映不发光炙热气体的质量，直白的说大量不发光的气体(前置天体)并没有弯曲时空。合理的解释是：引力弯曲了物体的运动方向，光线从大质量发光星球旁边经过时，与大质量发光星球发出的电磁波连续作用，弯曲了光线。这样大量不发光的气体未弯曲光线才是合理地。4) 大大缩小了远距离高亮度星球对光线弯曲的弯曲程度。天文观测显示：一般碰撞星系距离地球都比较远，我们之所以能观察到这些星系，是因为这些星系中的星球发光亮度比太阳的亮度大得多，对部分星球的统计显示：远距离星球的亮度/质量比是太阳亮度/质量比的上万倍。这样从这些星球旁边经过的光线弯曲程度由光线互扰解释就相当于用“引力透镜”解释大了上万倍，由弯曲光线反演的物质，光线互扰解释比用“引力透镜”解释少了上万倍，这样在碰撞星系中就不存在由“引力透镜”原理反推出来的暗物质。远距离星系碰撞观测中光线互扰解释不会反演出暗物质，这符合天文观测的实际。

光线弯曲的同频互扰解释认为：光线从大质量发光星球旁边经过时，其光线弯曲程度与星球发光亮度成正比，与该光线距离星球中心的距离成反比。星系碰撞中的暗物质是“引力透镜”对星球弯曲光线的弯曲程度计算不足形成的。星系碰撞中不存在暗物质。

引力弯曲光线的偏转角为：

$$\gamma = \frac{4GM}{Rc^2} \quad (1)$$

其中， G 是引力常数， M 是星球的质量， R 是光线与星球中心的距离， c 是光速。把上式中的星球质量换成星球亮度，把万有引力常数，光速 c 等常数换成一个常数 k ，就可以得到同频互扰解释中光线的偏转角为：

$$\gamma(\lambda) = \frac{k(\lambda)E(\lambda)}{R} \quad (2)$$

式中 γ 为光线偏转角，单位：弧度； E 为星球的亮度， R 为光线从星球旁边经过时，可见光与星球中心的最短距离，对于透镜星系中的爱因斯坦环， R 为环的半径，对于透镜星系中的弧，半环，分别为弧和半环的半径， k 为常数， γ 、 k 、 E 都与可见光的波长有关。

太阳的总辐射量(光度)约为 3.845×10^{26} 瓦(W)。亮度为单一方向的辐射量, 亮度 $E =$ 光度 L /球面积 $4\pi R^2$ 。太阳辐射能量在从宇宙线、X 射线到无限电波的整个电磁波谱区内, 99%以上在波长 0.15~4.0 微米之间。大约 50%的太阳辐射能量在可见光谱区(波长 0.4~0.76 微米), 7%在紫外光谱区(波长 <0.4 微米), 43%在红外光谱区(波长 >0.76 微米), 最大能量在波长 0.475 微米处。太阳的半径为 6.955×10^5 km(就光球层言), 考虑到可见光与太阳的距离, R 取 697,000 km, 1919 年日全食期间, 由爱丁顿等人率领的两支观测队观测结果分别为 1.61" 和 1.98" 取平均值为 1.795"。1 瓦特 = 1 焦耳/秒 = 1 牛顿·米/秒, 把太阳看成一个质点, 亮度折合到质点处, 由此可见光的系数为:

$$k(\lambda) = \frac{\gamma(\lambda)R}{E(\lambda)} = \frac{1.795 \times 6.97 \times 10^8}{\frac{3.845 \times 10^{26}}{4 \times 3.14} \times 50\%} = 8.178 \times 10^{-17} \text{ ("} \text{m/W)} \quad (3)$$

对于地球上观察到的星球亮度, 需要根据普森公式[5]换算:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \lg \left(\frac{E_1/d_1^2}{E_2/d_2^2} \right) \quad (4)$$

式中 m_1 、 m_2 为地面上测到星球的星等, E_1 、 E_2 为星球的亮度, d_1 、 d_2 为星球的距离, 参考星球可以取太阳。

大多数情况下, 星球的亮度都是给出星球相对于太阳的亮度, 此时星球对光线的偏转量为:

$$\gamma_2 = \frac{kE_2}{R_2} \gamma_1 = \frac{E_2}{E_1} \frac{R_1}{R_2} \gamma_1 = \frac{E_2}{E_1} \frac{6.97 \times 10^8 \text{ (m)}}{R_2} \times 1.795'' \quad (5)$$

上式中, E_2/E_1 为星球相对于太阳的亮度, R_2 为光线距离星球中心的距离。

2. 康普顿效应和光子 - 光子散射的红移

1923 年, 美国物理学家康普顿在研究 x 射线通过实物物质发生散射的实验时, 发现了一个新的现象, 即散射光中除了有原波长 λ_0 的 x 光外, 还产生了波长 $\lambda \geq \lambda_0$ 的 x 光, 其波长的增量随散射角的不同而变化。这种现象称为康普顿效应[6]。康普顿借助于爱因斯坦的光子理论, 根据能量守恒和动量守恒, 从光子与电子碰撞的角度对此实验现象进行了圆满地解释。

图 3 是可见光经过大质量发光星球旁, 光线的弯曲分析示意图。图中 Q_0Q_1 是在宇宙中传播的一条光线, S_0 是光线传播过程中遇到的一个星球, S_0 会向四面八方发出光线, S_0 发出的光线会有许多条光线与 Q_0Q_1 相交, 这些相交光线对 Q_0Q_1 都会产生影响, 但是影响最大的是与 Q_0Q_1 垂直的 S_0S_1 , 我们用 S_0S_1 对 Q_0Q_1 的影响代表整个星球 S_0 对光线 Q_0Q_1 的影响。 Q_0Q_1 与 S_0S_1 相交前, Q_0Q_1 受 S_0 影响, 实际沿 Q_0Q_2 传播, Q_0Q_2 与 Q_0Q_1 偏转角为 α_q , S_0S_1 与 Q_0Q_1 相交前, S_0S_1 受 Q_0 影响, 实际沿 S_0S_2 传播, S_0S_2 与 S_0S_1 偏转角为 α_s , Q_0Q_2 与 S_0S_2 相交后, Q_0Q_2 受 S_0 影响, 实际沿 O_1Q_3 传播, O_1Q_3 与 Q_0Q_2 偏转角为 β_q , S_0S_2 与 Q_0Q_2 相交后, S_0S_2 受 Q_0 影响, 实际沿 O_1S_3 传播, O_1S_2 与 O_1S_3 偏转角为 β_s 。

把图 3 中光线的弯曲作为一个整体, 由图 4 中中间方盒表示, 我们不讨论光线具体的弯曲过程, 只讨论光线相交前的入射光和光线相交后的出射光变化情况, 图 4 是光子 - 光子散射分析图, 图中 δ_0 为两入射光之间的入射角, δ_1 为两出射光之间的出射角, 对于光线传播的单独光子来说, 参考康普顿效应, 碰撞过程中动量应该是守恒的。这里由 $E = mc^2$ 得到, 光子的动量为 $p = mc = E/c = hv/c$, 因为波长 $\lambda = c/v$, 所以动量也可以写作 $p = h/\lambda$:

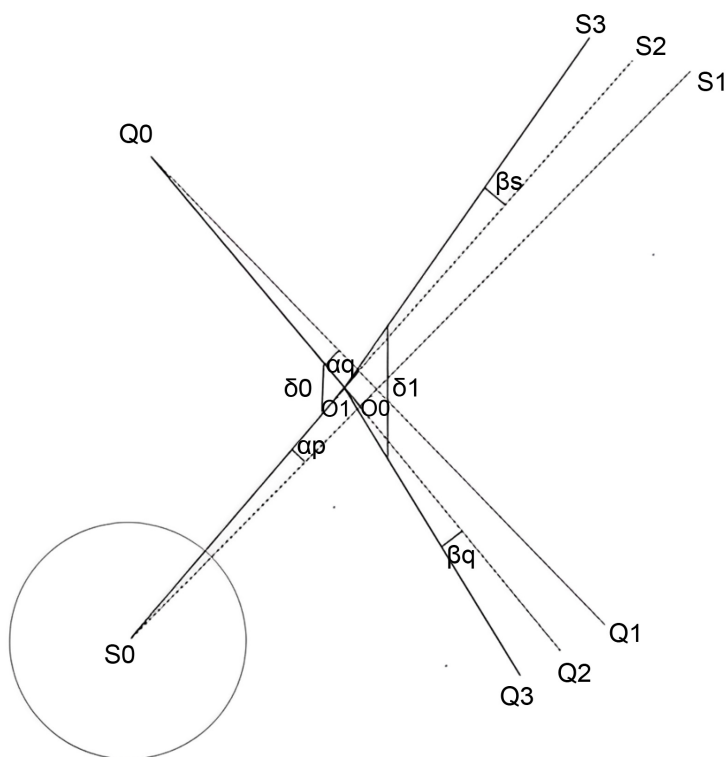


Figure 3. Schematic diagram of light bending analysis
图 3. 光线的弯曲分析示意图

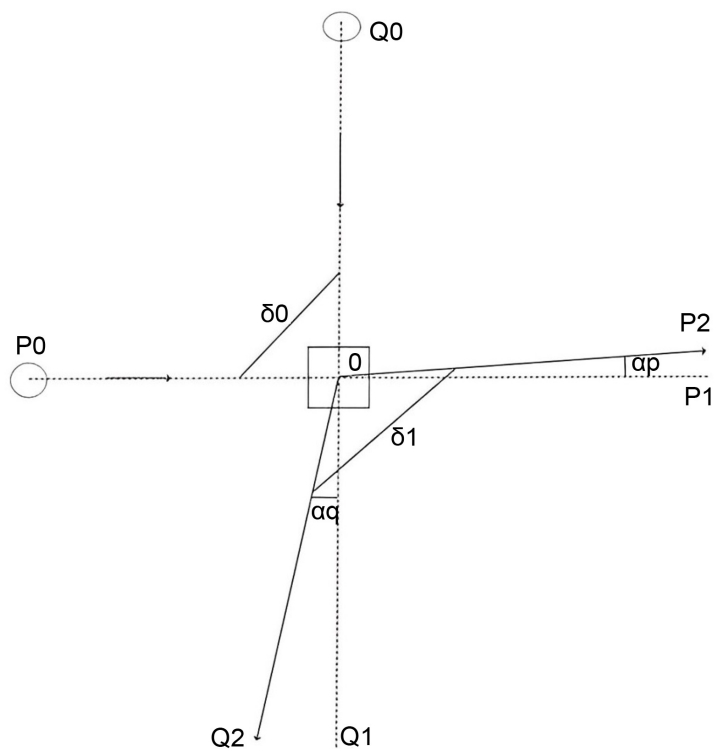


Figure 4. Photon-photon scattering diagram
图 4. 光子 - 光子散射图

$$\left(\frac{h}{\lambda_{00}}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda_{10}}\right)^2 - 2\left(\frac{h}{\lambda_{00}}\right)\left(\frac{h}{\lambda_{10}}\right)\cos\delta_0 = \left(\frac{h}{\lambda_{01}}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda_{11}}\right)^2 - 2\left(\frac{h}{\lambda_{01}}\right)\left(\frac{h}{\lambda_{11}}\right)\cos\delta_1 \quad (6)$$

这里 h 为普朗克常数, $\lambda_{00}, \lambda_{10}$ 为两入射波波长, $\lambda_{01}, \lambda_{11}$ 为两出射波波长, 由光线的同频干扰知道, 当两束光线频率相同时, 两束光线互相产生的影响最大, 对于光线 Q_0Q_1 , 星球 S_0 发出的光线总有与其波长一样的分量, 设 $\lambda_{10} = \lambda_{00} = \lambda_0$, $\lambda_{11} = \lambda_{01} = \lambda_1$, 上式简化为

$$\left(\frac{h}{\lambda_0}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda_0}\right)^2 - 2\left(\frac{h}{\lambda_0}\right)\left(\frac{h}{\lambda_0}\right)\cos\delta_0 = \left(\frac{h}{\lambda_1}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda_1}\right)^2 - 2\left(\frac{h}{\lambda_1}\right)\left(\frac{h}{\lambda_1}\right)\cos\delta_1 \quad (7)$$

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)^2 = \frac{1 - \cos\delta_1}{1 - \cos\delta_0} = \frac{2\sin^2\frac{\delta_1}{2}}{2\sin^2\frac{\delta_0}{2}} \quad (8)$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_0} = \frac{\sin\frac{\delta_1}{2}}{\sin\frac{\delta_0}{2}} \quad (9)$$

图 2 中:

$$\delta_0 = \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

$$\delta_1 = \frac{\pi}{2} + \alpha_q + \alpha_p \quad (11)$$

所以:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_1}{\lambda_0} &= \frac{\sin\frac{\frac{\pi}{2} + \alpha_q + \alpha_p}{2}}{\sin\frac{\pi}{4}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha_0 + \alpha_1}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)} \\ &= \frac{\sin\frac{\pi}{4}\cos\left(\frac{\alpha_q + \alpha_p}{2}\right) + \cos\frac{\pi}{4}\sin\left(\frac{\alpha_q + \alpha_p}{2}\right)}{\sin\frac{\pi}{4}} \\ &= \cos\left(\frac{\alpha_q + \alpha_p}{2}\right) + \sin\left(\frac{\alpha_q + \alpha_p}{2}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

一般情况下, α_p, α_q 都很小, 且光线 Q 对 S 的影响远远小于光线 S 对 Q 的影响, 因此

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_0} \approx 1 + \frac{\alpha_q + \alpha_p}{2} \approx 1 + \frac{\alpha_q}{2} \quad (13)$$

光线受到星球弯曲产生的红移为:

$$z = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\lambda_0 + \frac{\alpha_q}{2}\lambda_0 - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{1}{2}\alpha_q \quad (14)$$

$$z = \frac{1}{2}\alpha_q = \frac{k(\lambda)E(\lambda)r}{2R} \quad (15)$$

太阳弯曲可见光形成的红移为：

$$z = \frac{1}{2} \alpha_q = \frac{1.795}{2 \times 3600} = 0.000249 \quad (16)$$

天文上，一般可以根据哈勃红移推算天体的距离。对于透镜星系，在通过红移计算星系的距离时，应该减掉光线弯曲的非距离红移。

3. 常见透镜星系的红移[7]

3.1. SDSSJ0946 + 1006 星系团

SDSSJ0946 + 1006 星系团，是个双爱因斯坦环。SDSSJ0946 + 1006 由三个星系组成，距离地球分别为 30, 60, 110 亿光年。主透镜位于红移 $z=0.222$ ，内环位于红移 $z=0.609$ ，透镜星系也被称为 SDSSJ0946 + 1006 L1 (距地球 30 亿光年)，更近的透镜星系为 SDSSJ0946 + 1006 S1 (距地球 60 亿光年)，以及更远的透镜星系 SDSSJ0946 + 1006 S2 (距地球 110 亿光年)。由图 5 可见：星系中央存在一个高亮度星球，另外由于非距离红移的存在，透镜星系 SDSSJ0946 + 1006 S1 距地球应该小于 60 亿光年，透镜星系 SDSSJ0946 + 1006 S2 距地球应该小于 110 亿光年。

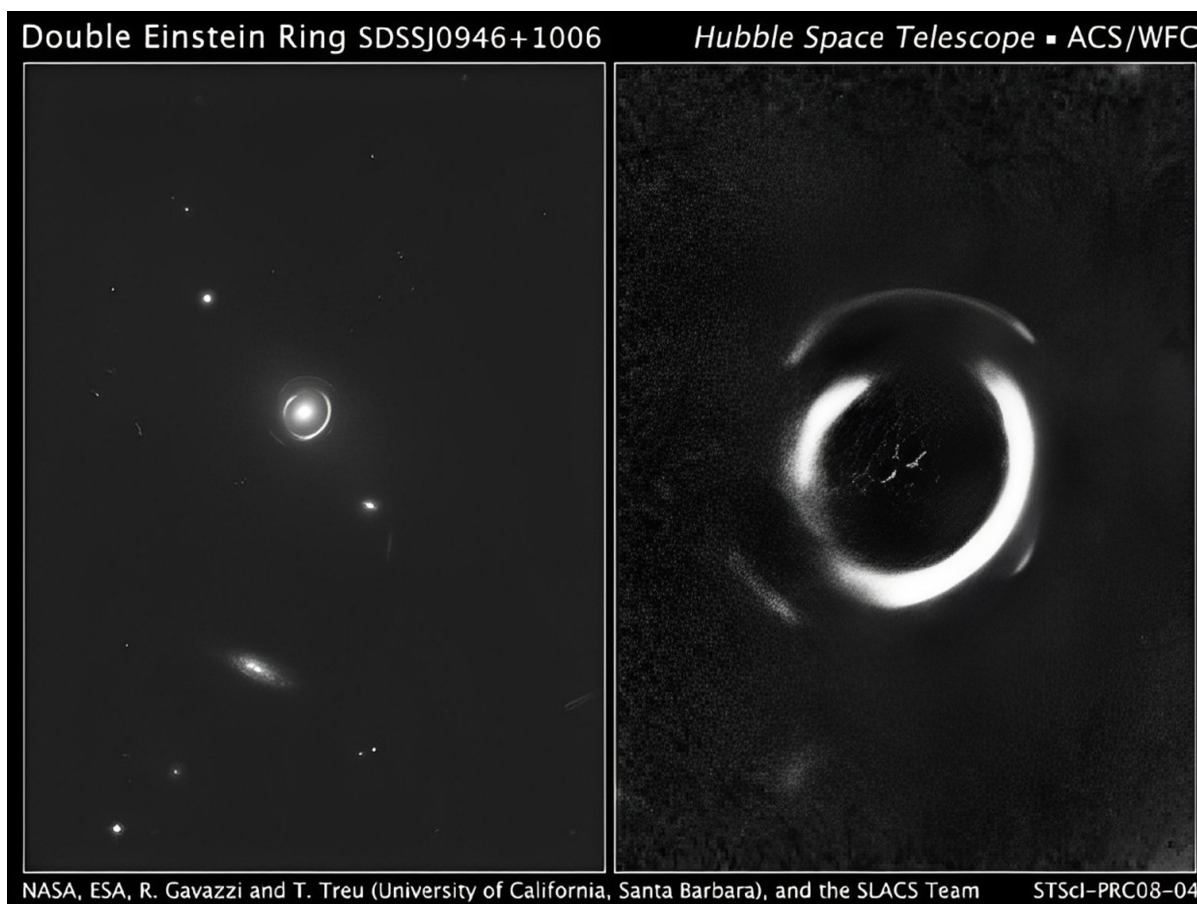


Figure 5. SDSSJ0946 + 1006 星系团
图 5. SDSSJ0946 + 1006 galaxy cluster

图 6 是 S₁、S₂、L₁ 星系形成透镜的示意图。图中

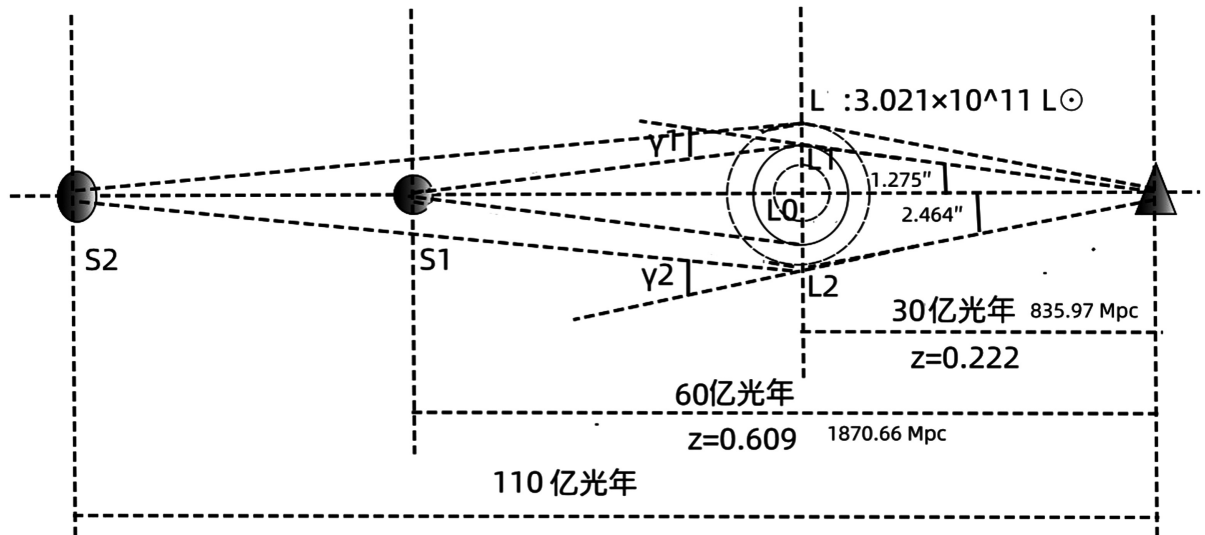


Figure 6. Schematic diagram of the SDSSJ0946 + 1006 galaxy cluster lens

图 6. SDSSJ0946 + 1006 星系团透镜示意图

$$L_0 L_1 = 1.275 \times 835.97 (\text{Mpc}) \quad (17)$$

由于光线偏转形成的偏转角很小，形成的红移量也就很小，我们可以以传统的方法计算出光线偏转的红移量，然后加以修正。

$$\angle L_1 S_1 L_0 = \frac{1.275 \times 835.97}{1870.66 - 835.97} = 1.030'' \quad (18)$$

$$\gamma_1 = 1.275 + 1.030 = 2.305'' \quad (19)$$

由于光线偏转形成的内环所对应星系形成的红移量为：

$$z_{\gamma_1} = \frac{1}{2} \gamma_1 = \frac{1}{2} \times \frac{2.305}{3600} = 0.00032 \quad (20)$$

S_1 星系的实际红移为：

$$z_1 = 0.222 - 0.00032 = 0.22168 \quad (21)$$

对于爱因斯坦环，星系的距离与红移的关系为：

$$d \approx \left(\frac{c}{H_0} \right) \left[\frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} \right] \quad (22)$$

对于 S_2 星系

$$L_0 L_2 = 2.464 \times 30 (\text{亿光年}) \quad (23)$$

$$\angle L_0 S_2 L_2 = \frac{2.464 \times 30}{110 - 30} = 0.924 \quad (24)$$

透镜形成的偏转角为：

$$\gamma_2 = 2.464 + 0.924 = 3.388'' \quad (25)$$

光线偏转形成的红移为：

$$z_{\gamma_2} = \frac{1}{2}\gamma_2 = \frac{1}{2} \times \frac{3.388}{3600} = 0.00047 \quad (26)$$

星系 S₂ 实际的距离红移为:

$$z_2 = 0.609 - 0.00047 = 0.60853 \quad (27)$$

由这个实例可以看出光线偏转形成的红移相对来说比较小, 但对于宇宙中星系的距离这个红移的影响不能忽略。

3.2. LRG 3-757 星系

图 7 LRG 3-757 星系团完整的爱因斯坦环。传统的观点认为: 发光的红色星系(LRG)的引力使得来自更遥远的蓝色星系的光被引力扭曲, 并由它能够确定前景星系透镜的质量和暗物质含量。光线弯曲的同频互扰解释认为: 引起蓝色星系的光被扭曲的原因是爱因斯坦环中心的发光星球发出的光线, 而且可以根据中心星球的发光亮度大小和爱因斯坦环的大小, 计算出透镜星系的非距离红移。

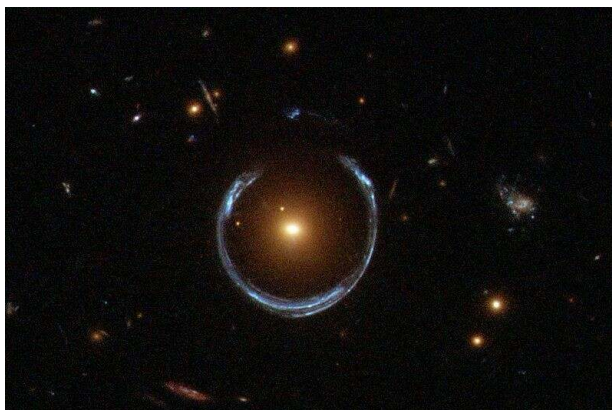


Figure 7. LRG 3-757 galaxy
图 7. LRG 3-757 星系

3.3. 引力透镜星系团 SDP.81

引力透镜 SDP.81 星系团, 形成一个近乎完美的爱因斯坦环, 中间的图像显示了爱因斯坦环的清晰 ALMA 图像。由图 8 可见, 星系中央存在高亮度发光星球。

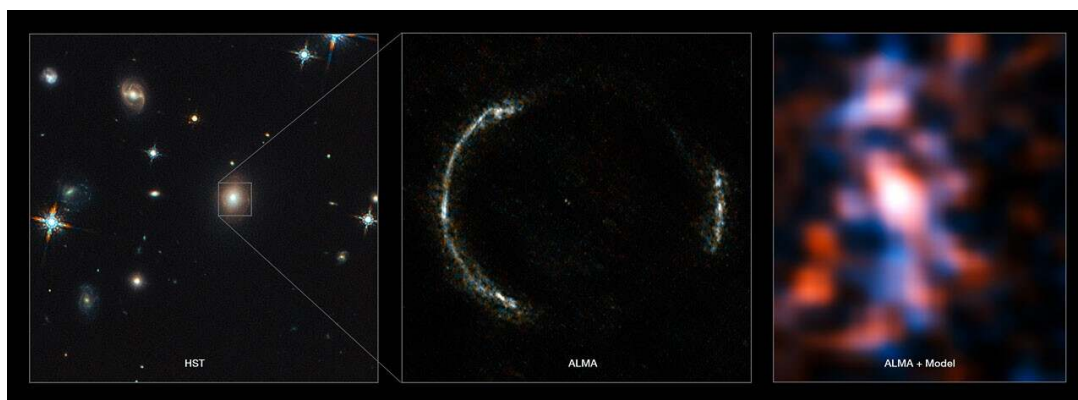


Figure 8. SDP.81 galaxy cluster
图 8. SDP.81 星系团

3.4. 星系团 SDSS J1038 + 4849

星系团 SDSS J1038 + 4849，它是具有引力透镜效应和爱因斯坦环。从图 9 中看到，在爱因斯坦环中间有两个高亮度天体共同构成透镜星球。

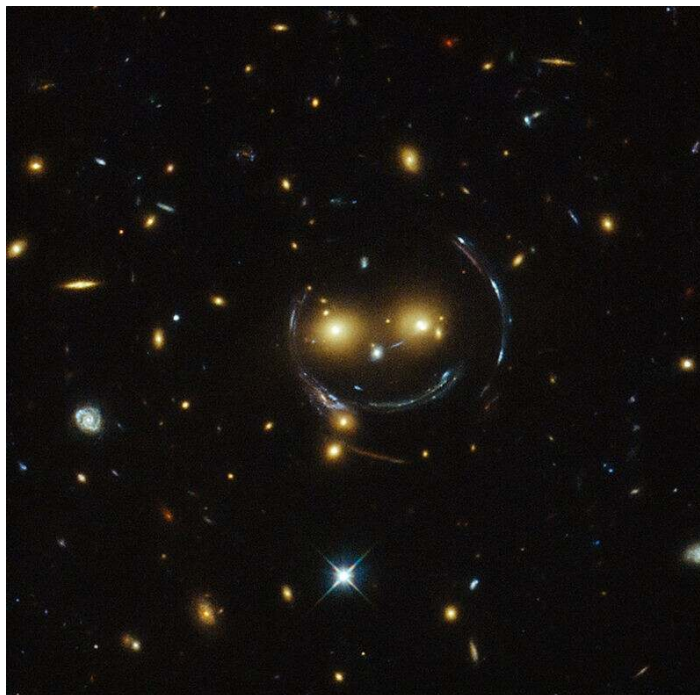


Figure 9. Galaxy cluster SDSS J1038 + 4849
图 9. 星系团 SDSS J1038 + 4849

3.5. SDSSJ0146-0929 星系团

SDSSJ0146-0929 星系团周围的优美弧线是爱因斯坦环。从图 10 中看出，爱因斯坦环中间有多个高亮度天体构成引力透镜天体。

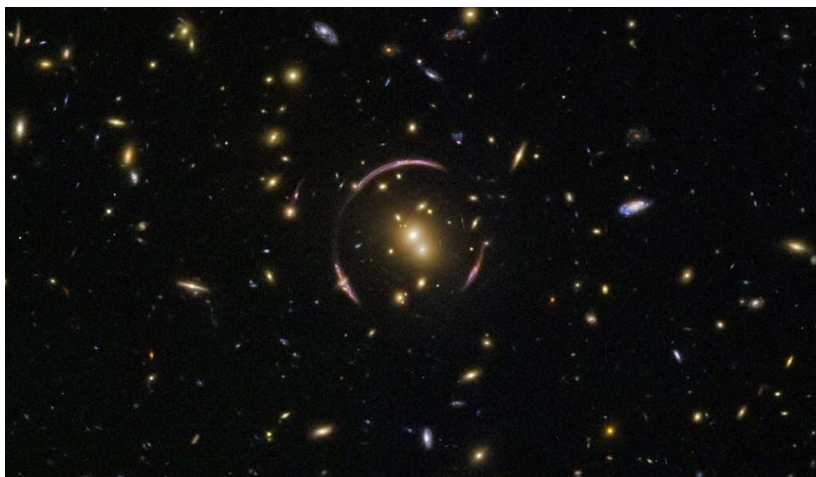


Figure 10. SDSSJ0146-0929 galaxy cluster
图 10. SDSSJ0146-0929 星系团

3.6. SDSS J120540.43 491029.3 星系团

SDSS J120540.43 491029.3 星系团形成爱因斯坦环，由图 11 看到，环中央存在高亮度天体。

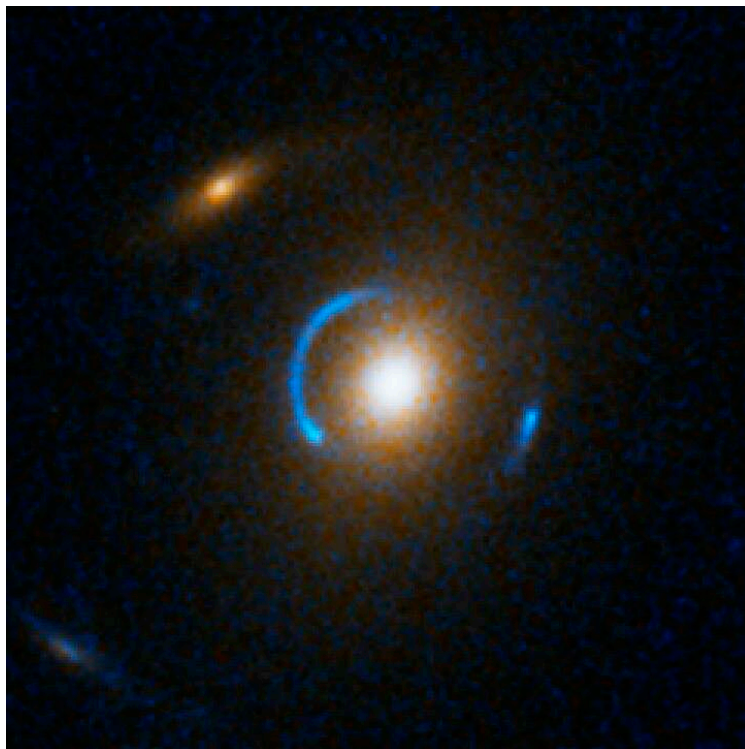


Figure 11. SDSS J120540.43 491029.3 galaxy cluster
图 11. SDSS J120540.43 491029.3 星系团

3.7. 星系 ESO 325-G004

星系 ESO 325-G004 形成爱因斯坦环，由图 12 看到，环中央存在高亮度天体。

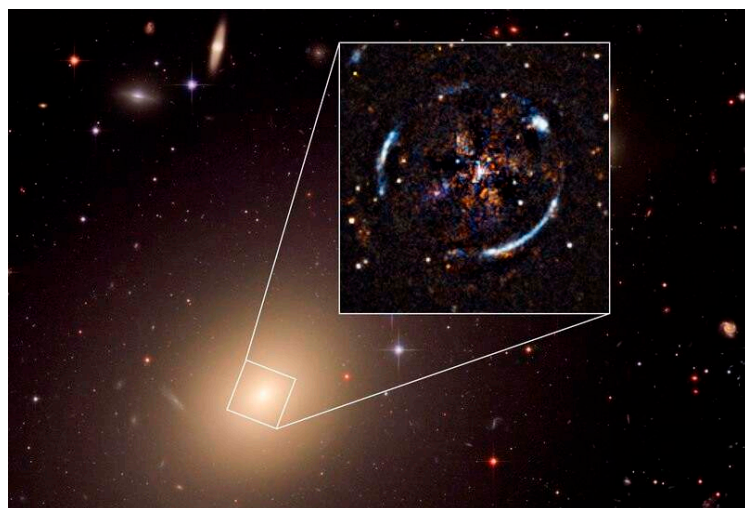


Figure 12. Galaxy ESO 325-G004
图 12. 星系 ESO 325-G004

3.8. 超新星 iPTF16geu

引力透镜效应发现型 Ia 超新星 iPTF16geu (见图 13)。

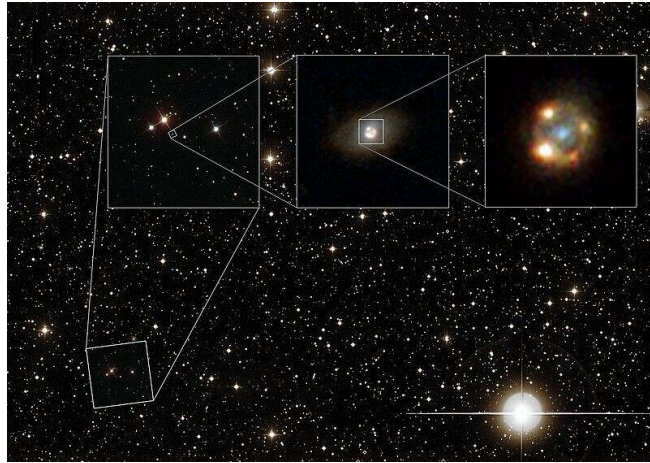


Figure 13. Supernova iPTF16geu
图 13. 超新星 iPTF16geu

3.9. Abell S740 星系团

图 14 是阿贝尔 S740 星系团(Abell S740), 距离地球超过 4.5 亿光年。ESO 325-G004, 简称为 ESO 325-4, 距离地球约 4.65 亿光年。它是星系团 Abell S0740 的主导星系。围绕星系 ESO 325-G004 轨道飞行的数千个球状星团。

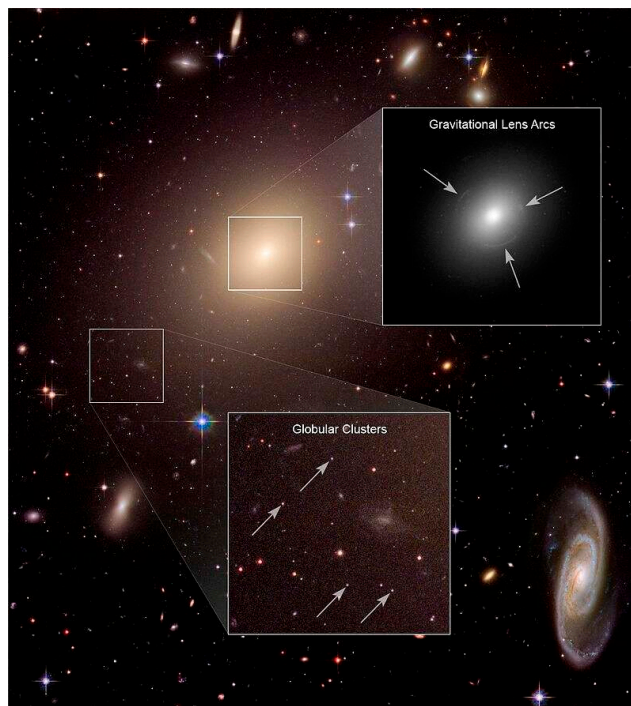


Figure 14. Abell S740 galaxy cluster
图 14. Abell S740 星系团

3.10. Abell S1063 星系团

Abell S1063 星系团(见图 15), 距地球约 37 亿光年。对阿贝尔 S1063 的观察, 确定了几个遥远星系, 包括 A-S1063 ID11, 红移 = 3.12 (116.42 亿光年)。

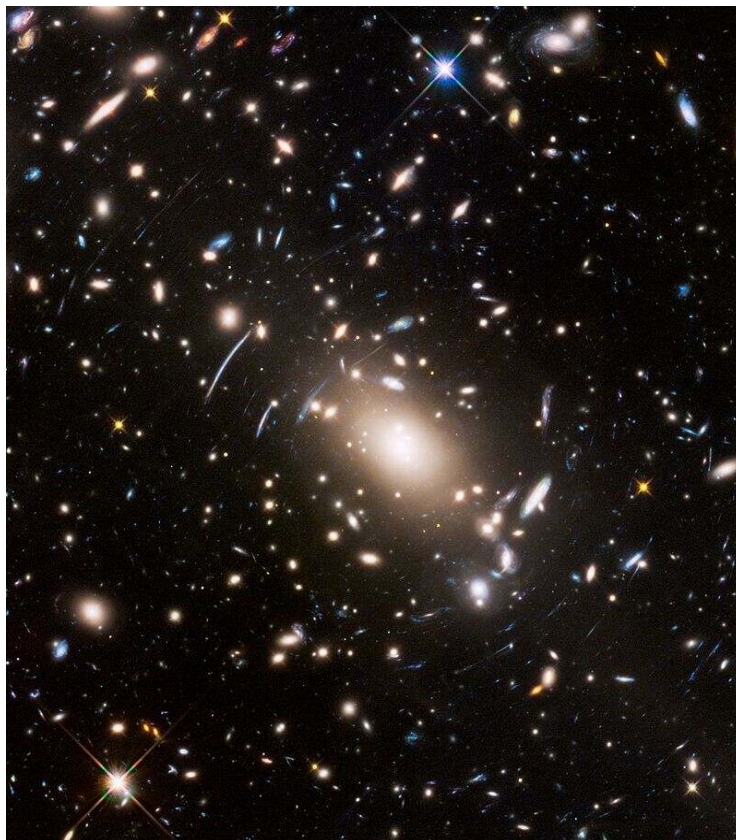


Figure 15. Abell S1063 galaxy cluster
图 15. Abell S1063 星系团

3.11. Abell 2667 星系团

彗星星系(Comet Galaxy), 距离地球 32 亿光年, 位于星系团 Abell 2667 中(见图 16)。

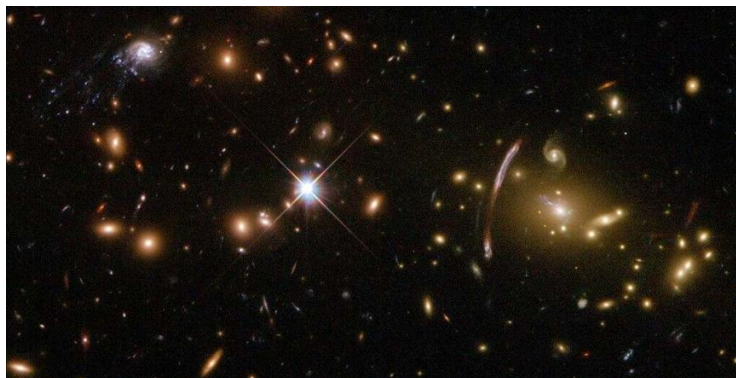


Figure 16. Abell 2667 galaxy cluster
图 16. Abell 2667 星系团

3.12. SDSS J1152 + 3313 星系群

图 17 是 SDSS J1152 + 3313 星系群观测图。

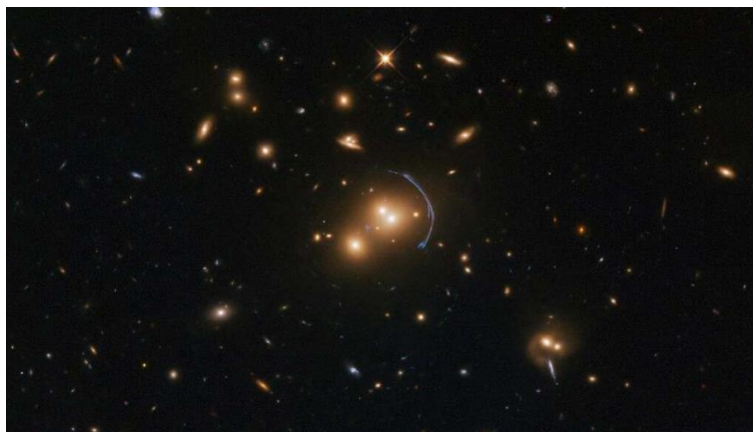


Figure 17. SDSS J1152 + 3313 galaxy group

图 17. SDSS J1152 + 3313 星系群

3.13. 小结

从这些照片可以看出，引力透镜中心都有一个高亮度星球或者星系，从实际图例说明了光线弯曲是由光线从大质量发光星球旁边经过时，可见光与中心星系发出的电磁波连续作用的结果。

4. 结论

我们知道，可见光从太阳旁边经过时，会形成弯曲，光源与观测者中间存在大质量发光星球时，会出现引力透镜现象，根据能量和动量守恒的康普顿效应，弯曲光线会出现红移，这样对于宇宙中具有透镜现象的源天体，它除了具有与距离成比例的哈勃红移外，还具有弯曲光线的非距离红移，因此使用红移计算透镜星系源天体的距离时，应注意先减去光线弯曲的非距离红移。另外，本文用实例说明了透镜星系中心都存在高亮度星系(星系)，从而说明了光线弯曲是由可见光从大质量发光星球旁边经过时，可见光与中心星系发出的电磁波连续作用的结果。

参考文献

- [1] 钮卫星. 从光线弯曲的验证历史看广义相对论的正确性问题[J]. 上海交通大学学报: 哲学社会科学版, 2003, 11(5): 36-40.
- [2] 傅莉萍, 束成钢. 引力透镜的基本原理及最新研究进展[J]. 天文学进展, 2005, 23(1): 56-69.
- [3] 陈军利. 光线弯曲的同频互扰解释——碰撞星系团中不存在“引力透镜”推演出的暗物质[J]. 天文与天体物理, 2024, 12(3): 44-55. <https://doi.org/10.12677/aas.2024.123005>
- [4] 许霖. 环圈量子引力简介[J]. 物理通报, 2007(3): 53-55.
- [5] 张景伦. 恒星距离的计算方法[J]. 汉斯预印本, 2017, 2(1): 1-7. <https://doi.org/10.12677/HANSPrePrints.2017.21020>
- [6] 代波. 康普顿效应的进一步讨论[J]. 大学物理, 2010, 29(9): 30-32.
- [7] 宇宙中的具有引力透镜的星系[EB/OL]. http://www.360doc.com/content/19/0302/17/19062466_818620318.shtml, 2024-08-12.