

图 1:引力透镜示意图。[图片来源:NASA,ESA and L.Calçada]

# 引力透镜

## ——再领科学潮

□撰文 北京大学科维里天体物理研究所 何锐思 (Richard de Grijs)  
翻译 程思淼

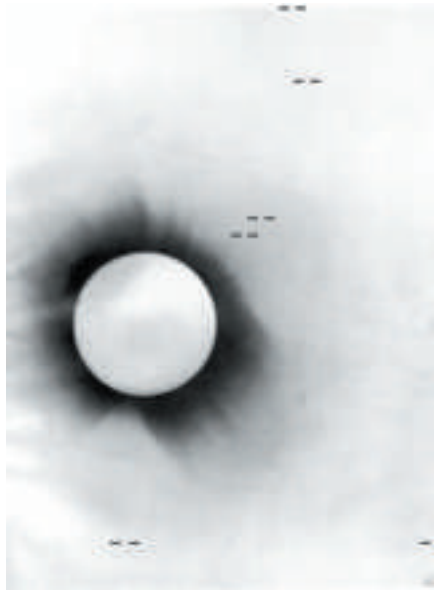


■ 本文作者  
Richard de Grijs(何锐思)教授

先来思考一个问题:光总是沿着直线传播的,对吗?……现在,让我们跟随天才的阿尔伯特·爱因斯坦的脚步,来想想这个问题!根据爱因斯坦著名的广义相对论,从遥远的光源发出的光线,会在途经的大质量天体附近“弯折”。对我们生活中常见的那些大小和质量的物体来说,这种效应小得难以想象,但是在宇宙的尺度上,光的这种性质就成为我们研究遥远天体时有用工具。利用这种工具,我们已经获得了很多最遥远的星系的令人震惊的细节。光在经过前景恒星、星系或者星

系团附近时,它们的传播方向会发生偏折——这往往使得背景上的一个星系看上去好像分裂成为好几个,而且大小较原来相比也会有所放大。这种大质量天体对附近经过的光线的影响,与一个玻璃镜头对光线的作用是类似的,因此我们现在经常称这种现象为“引力透镜”。

“引力透镜”的想法首先是由俄国物理学家奥列斯特·奇沃尔松(Orest Chwolson)在1924年提出的,但直到1936年,在爱因斯坦发表了进一步的研究之后,它才逐渐被人们所注意。当然,早在



■ 图2:爱丁顿爵士率领的远征队在1919年日全食时拍摄的负片。此行动为了证实爱因斯坦关于太阳会偏折从附近经过的星光的预言。[来源:F.W.Dyson,A.S.Eddington,and C.Davidson,"A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29,1919" Philosophical Transactions of the Royal Society of London A(1920):291 ~ 333.]

1919年5月29日日全食的时候,由爱丁顿(Arthur Stanley Eddington)率领的远征队就已经证实了引力对光线的偏折效应。如图2所示,他们比较了日全食和其他时候在南大西洋的普林西比岛上拍摄的同一天区的照片,并发现在两组照片中,那些接近太阳的恒星的位置略有不同。这表明它们发出的光线在经过太阳附近时被稍微地偏折了。他们以此证明了广义相对论的正确性。

尽管瑞士传奇的天文学家茨维基(Fritz Zwicky)早在1937年就预言了单个星系的引力透镜效应,但人们直到40年之后才偶然地发现,在更大的尺度上,星系团也能够改变背景天体发出的光的传播方向。与当时相比,我们的研究已经大有进展。现在,我们利用引力透镜的技术研究现代天体物理学的各种问题,如研究前景“透镜”星系团中谜一般的暗物质的总量和分布;而由于经过的光线被聚焦和放大,通过引力透镜,在目前的设备条件下,研究那些非常遥远的星系和类星体的性质也成为可能。我们现在一般把引

力透镜分为两类:那些对光线造成显著扭曲和放大效应的称为“强引力透镜”,而另外那些微弱得多的、只有在对大量的星系图像进行细致的统计分析之后才能显现出来的效应,称为“弱引力透镜”。引力透镜效应通常都包含了很多前景天体(星系或恒星)引力的共同作用。

弱引力透镜现象非常普遍,科学家常用它们来探索宇宙中的物质,尤其是其中占主导的暗物质在空间中的分布。例如,对2007年进行的COSMOS巡天(哈勃空间望远镜宇宙演化巡天,这是哈勃望远镜迄今为止承担的最大的一项巡天计划)数据进行分析后,一个国际天文学家小组得到了宇宙学研究中最重要的成果之一:一幅宇宙中暗物质的“三维地图”(详见本刊上期“天文视点”);它第一次向人们呈现了暗物质大尺度分布的网状结构。这一结果与研究宇宙结构形成的标准理论模型所描述的几乎一模一样。

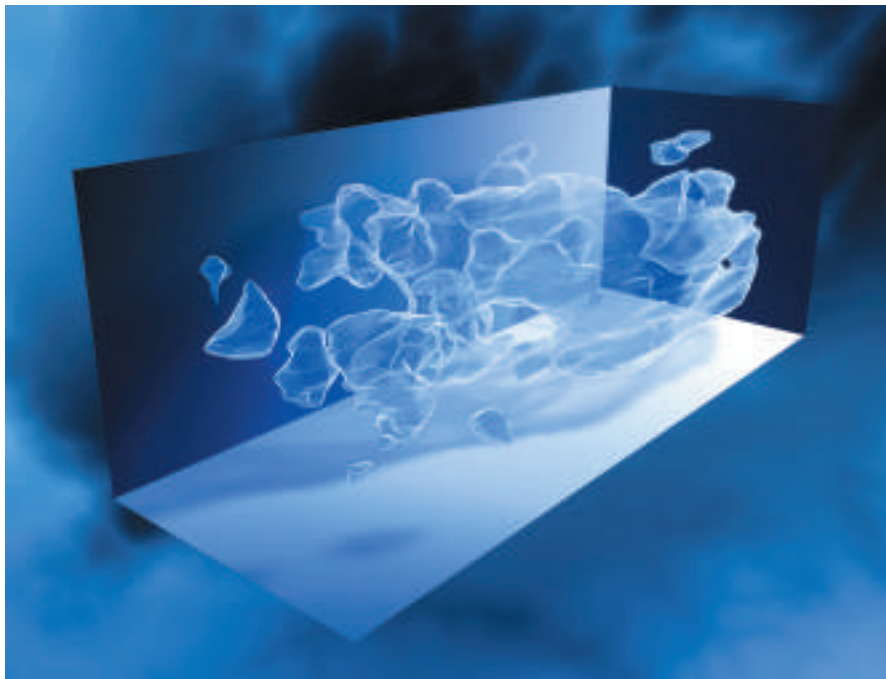
这幅可以追溯到宇宙处在现在一半年龄时(即在空间上延伸到宇宙视界的一半距离处)的地图也为我们揭示出暗物质在强大的引力造成的收缩中,是如何越来越快地聚集成团的。宇宙演化的标准理论向我们描述了,通过引力的作用,宇宙

中是如何形成结构,从几乎完全均匀的状态演化出由长长的细丝组成的海绵状结构的。这次的观测结果与理论非常吻合。

“为了得到这样的结果,我们扩展了引力透镜的技术:以前我们通过引力透镜研究星系团中的暗物质分布,而现在我们把它应用到COSMOS拍摄的天区上,就得到了宇宙中暗物质的三维分布。”法国马赛天文台的让·保罗·柯内(Jean-Paul Kneib)说。他的合作研究者,美国加州理工学院的理查德·艾里斯(Richard Ellis)表示:“尽管这项技术人们以前就在用了,但COSMOS图像的深度和极高的分辨率让我们能够做出一幅更精确、更细致的地图来,并且覆盖了更大的范围,让人们能够更清楚地看到其中的细丝状结构。”

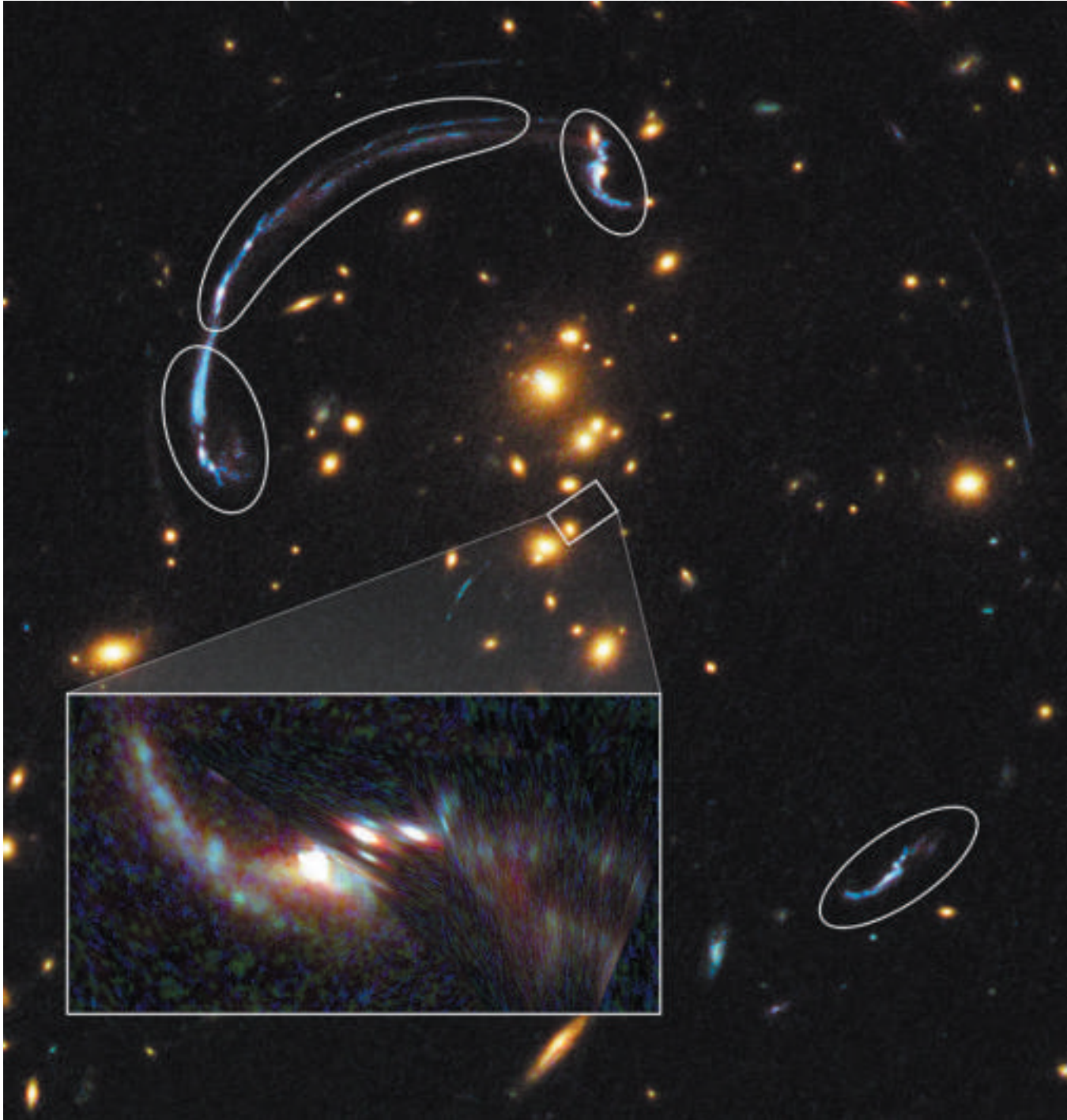
2012年2月,借助这个宇宙中天然的“望远镜”,美国的一个研究小组用哈勃空间望远镜为目前为止发现的最亮的引力透镜星系拍摄了“特写”。我们观测到的实际上是它在宇宙年龄只有现在的三分之一时的图像,这就为科学家们研究活跃地形成新恒星时星系的物理性质提供了极大的帮助。

科学家们把哈勃空间望远镜指向了星系团RCS2 032727-132623。在这个星



■ 图3:这幅三维地图展示了暗物质在大尺度上的网状分布。它揭示了随着宇宙的演化,松散的暗物质网状结构在引力的作用下逐渐塌缩成一个个团块的过程。三条坐标轴对应着天空中的不同方向,从左到右对应于与地球的距离增加。请注意,从右向左看,也就是从宇宙早期到现在的演化过程中,暗物质的团块结构是如何变得愈发明显的。[来源:NASA,ESA and R. assey,California Institute of Technology]





■ 图4: 这幅图像显示了对一个被前景星系团的引力扭曲了的明亮星系的图像的复原。图中央的小矩形给出的是, 如果没有夹在中间的星系团, 这个星系在天空中原本的位置。圆圈标出的是被前方星系团巨大的质量扭曲、分裂并放大的背景星系的像。图中左下部的矩形框内, 是基于由扭曲的星系像得到的“透镜”星系团的质量分布模型, 科学家重建的背景星系原来的样子。[来源: NASA, ESA, J. Rigby, K. Sharon, M. Gladders and E. Wuyts]

系团里有一个弯曲接近 $90^\circ$ 的弧形光像, 它也因此成为最著名的引力透镜星系之一。借助前景的引力透镜, 哈勃望远镜拍摄的背景星系的图像比在那个遥远距离上原本应该看到的要清晰得多。引力透镜帮助我们揭示了100亿年以来, 星系是怎样演化成今天的样子。距我们较近

的星系已经进入比较成熟的阶段, 它们形成新恒星的过程都已接近尾声; 而遥远的星系则可以告诉我们那些在宇宙刚诞生不久的年代里发生的事情。在宇宙早期事件中发出的光子, 它们现在才刚刚到达地球。遥远的星系不仅很暗, 而且它们在天空中看上去也很小。天文学家希望能

够看到新恒星是怎样在这些星系的内部形成的, 但如果没有前景中引力透镜提供的放大效应, 要用哈勃望远镜直接看到这些细节是不可能的。2006年, 一个研究小组使用位于智利的甚大望远镜 (Very Large Telescope, VLT) 测量了这个被扭曲成弧形的星系的距离, 并且计算出它比以

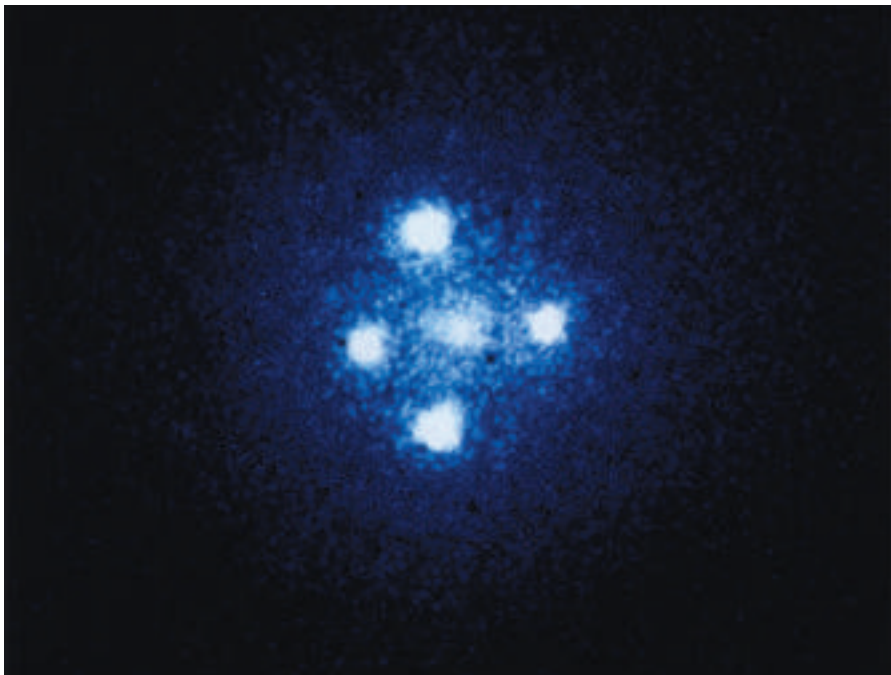
前发现的那些引力透镜星系至少亮上3倍。2011年,天文学家用哈勃空间望远镜新安装的3号宽视场照相机对这个星系进行了成像和分析。

在典型的引力透镜星系中,背景星系的像会被扭曲,并分裂成好几个出现在前景星系团中。重建出星系本来的模样,这是天文学家不得不面临的一大挑战。哈勃望远镜锐利的图像使天文学家矫正扭曲的图像、复原星系原本面貌的工作成为可能。复原后的图像显示,那些正在形成恒星的区域看上去就像一个个明亮的光点。它们比我们在银河系中找到的任何一处恒星形成区都要亮得多。这些区域为什么能形成如此大量的新恒星?通过光谱观测,也就是把光线按组成它的不同波长的成分展开的方法,天文学家正打算把这些区域从头到脚地研究一遍,以期找到这个问题的答案。

把引力透镜当作望远镜来使用,这样做主要有两方面的好处。首先,“这为我们提供了一个机会,能够清楚、逼真地看到非常遥远的天体,而这用别的办法都做不到。”美国芝加哥大学的迈克尔·格拉德斯(Michael Gladders)说。另一方面,这也为我们研究产生引力透镜的那些物质,主要是暗物质,提供了难得的机会。“这的确是能够‘看’到暗物质的一个方法。”

利用前景星系团复原扭曲的背景星系的图像,这是十分困难的。因为引力透镜产生的效果对背景星系、前景星系团和地球三者的相对位置,以及前景星系团中质量分布的细微结构都是非常敏感的。虽然科学家们对这些效应的研究已经有了巨大的进展,但仍有很多工作需要去做。图5和图6显示了前景、背景天体和地球处在一条直线上而形成的“干净”的引力透镜的图像。当然,能有这样完美的相对位置完全是凑巧。

现在,天文学家已经计算出了具有一个超大质量黑洞的星系单独所产生的引力透镜效应,结果显示,一个位于星系中心的超大质量黑洞确实可以扭曲更远处的星系的成像。由于大多数(如果说不是全部的话)星系的中心都有一个超大质量的黑洞,因此它们所引起的复杂的引力透镜像可能相当普遍。它们在原来的像上产生了一些新的“结”(次级结构)。当然,



■ 图5:爱因斯坦十字。遥远的类星体G2237+0305的四重像。[来源:NASA,ESA,STScI]

这些结构通常非常暗弱,使用现在的设备,我们很可能根本观测不到它们。不过,这个研究小组指出,新的设备,尤其是在射电波段,将有能力探测到它们;这样,一旦我们找到了这种特殊的引力透镜星系的形状,我们就能够确认它的前景星系的中心有一个超大质量的黑洞。

随着我们对科学的理解的进步,我们

也越来越希望揭示出自然的更多秘密:但科学家从来没有机会因为解决了所研究的领域的主要问题而感到满足。自然的奥秘是无穷无尽的,我们现在仍然——并且以后也将继续——被自然的复杂精妙不断困扰着。但这也许是件好事:人类的好奇永远不会停止,而自然也会不断给我们带来新的惊喜! ■

(责任编辑 李鉴)



■ 图6:一幅引力透镜效应的光学图像:一个遥远的星系发出的光在经过另一个较近的星系后被扭曲了,形成了“爱因斯坦环”。[来源:ESA/NASA]