

宇宙中的巨型光弧

武向平

(中国科学院北京天文台)

提 要

宇宙中的巨型光弧是近两年来发现的一种新颖的天象。本文简述了已有的四个观测事例,给出了可能的产生机制,特别就引力透镜的成因进行了仔细的讨论。

一、引 言

1987年1月,在美国第169届天文学年会上,Lynds和 Petrosian^[1]报告了一种奇特的天象,从而引起了与会者的极大兴趣。在社会上亦产生了不小的影响。当时的会议报告如下:

我们宣告,在两个最为熟知的样本中,发现了一种前所未有的处于河外星系尺度上的结构,其共同特点是:位于星系团内、窄弧状、巨大的长度、弯曲中心均指向一个 cD星系和星系团的视引力中心。光弧长度超过 100kpc,亮度可与巨型 E 星系相比拟,但比 E 星系更蓝,且其中一个事例尤为如此。

这里所指的两个星系团分别为 Abell 370 和 2242-02。不久之后,第三个事例在 Abell1963 中被发现^[2]:这是一个成对光弧,分别位于星系团中心的两侧,具有与前述两例基本相同的特征。当人们还在猜测光弧的成因之时,更令人激动的事情出现了:在射电波段发现一个完整的圆环弧^[3]。从单一的弧,到成对的弧,直至完整的圆环,在这不足两年间,一类完全新颖的天象,遵循着事物发展的规律呈现在我们面前,它们所带给我们的理论思考远比它们本身的发现意义要深远得多。

二、观 测 事 例

1. Abell 370

位于 Abell 370 中的光弧首先由 Soucail 等^[4]发现,随后又有两次较仔细的光谱观测^[5,6]。CCD 照片所呈现的光弧外貌特征是(见图 1):光弧很窄,宽度约 8kpc($H_0=50\text{km/s/Mpc}$),以星系团中心为基准的弧张角为 60° ,直径 170kpc,弧长超过 150kpc,在此长度上,弧光度基本相同。多色测光表明,光弧比任何 A370 中的星系都蓝,且其能谱平稳,与星系能谱有明显差异(图 3)。但是,它的光谱中并不显示出任何与类星体相似的强发射线特征,因而给光弧谱线的证认带来了极大的困难。Soucail 等曾把属于光弧最东端的一个光斑 A 作为光弧本身的成份,从其光谱特征与一个旋涡星系类似的特点,认为光弧光谱中的 635nm 谱线可能



图 1 A370与其内光弧的 CCD照片

仅属投影效应呢？

2. 2244-02

Lynds和Petrosian^[1]报告了在星系团2244-02中的巨型光弧(图2),其外貌与光谱都与A370中所发现的光弧特征相似。Miller和Goodrich^[6]对其所做的分光观测表明,在4400-7200 Å 的范围内,其光谱无任何明显特征,具有与A370中光弧一样的平性(图3),而属于2244-02中的几个星系(它们是典型的椭圆星系)却具有基本类似的光谱,与光弧光谱显著不同。至今仍无光弧光谱的红移值,所在星系团本身的红移是0.328。

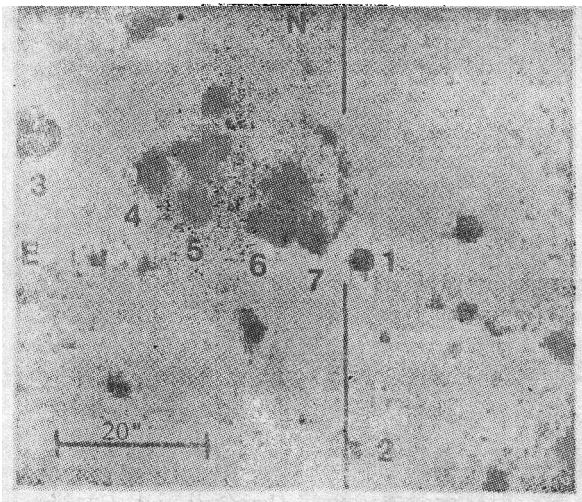


图 2 2244-02与其内光弧的 CCD照片

就是原旋涡星系的400nm线,从而得到红移0.59。但这一物体是否属于光弧及测量是否正确都很值得怀疑^[2]。他们的另一组结果声称在光弧中认证出了一条发射线[O II]λ3727和一条吸收线Mg II λ2800,于是得到0.724的红移^[7]。Miller和Goodrich^[6]亦得到类似的值 0.733 ± 0.003 。我们知道,A370的红移为0.373,如果以上测量结果可靠,那么,从A370与其内光弧的光谱及红移的完全不同,是否可以说它们并非是物理成协的实体而

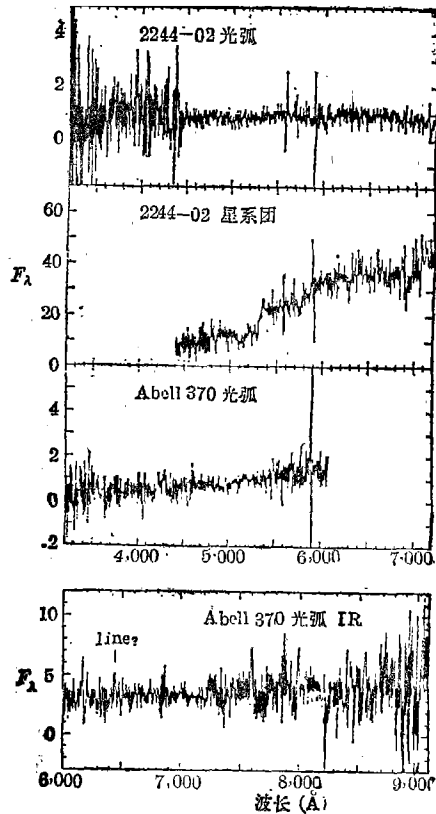


图 3 星系团2244-02与其内光弧及 A370中光弧的光谱

3. Abell 963

它有一对长度不等的光弧, 处于其中心cD星系的两侧(图4), 由Lavery和Henry^[2]于最近发现。其外观特征为: 两光弧均以cD星系为圆心, 各弧上的光度分布不均匀。较大的光弧在cD星系南方距cD星系中心 $18''.5$, 张角 70° , 若取A963的红移0.206为光弧的真位置, 并取 $H_0=100\text{km/s/Mpc}$, 则相应弧半径40kpc, 弧长49kpc。较小的光弧处于cD星系的北方, 半径 $12''$ 即26kpc, 张角 30° 即长度14kpc。两光弧在 $1''$ 时是不可分辨的。由于两光弧都位于cD星系的包层中, 精确地测定光度是困难的。初步结果表明, 两光弧很蓝, 其颜色可能比所有A963中的星系都蓝。另一有趣的事情是, 两光弧几乎对称地分布在cD星系主轴两侧。迄今, 仍然没有取得光弧的光谱。

4. MG 1131 + 0456

MG1131 + 0456是一个射电源。Hewitt等^[5]的射电观测首先描绘出这是一个具有较低面亮度的椭圆环(图5), 内外边缘清晰, 主轴轴分别为 $2''.2$ 和 $1''.6$ 。之后, 他们找到了一个亮度 $m_R=22$ 的光学对应体, 在 $1''.1$ 的分辨下, 其光学轮廓呈椭圆高斯分布, 主轴轴为 $2''.5$ 和 $2''.1$ 。分光观测表明, 这是一颗前所未有的红外天体, 可见光波段具有连续谱但没有发现发射线, 因而无法确定红移。由于它处于高银纬带 $b^{\text{II}}=60^\circ$, 可能是一个河外天体。尽管在超新星遗迹、H II区及星际星云中都曾发现过环状结构, 但MG1131 + 0456与其他天体的光学和红外性质均有所不同, 特别是射电谱指数为 0.9 ± 0.02 , 这说明其辐射机制是非热的。所有这些都意味着它可能是一个射电星系。值得注意的是, 除了环之外, 另有两个致密源重叠在环的南北方向上, 且它们都有可以再分解的内部结构。在环外西南方附近有一个低亮度的源也清晰可见。

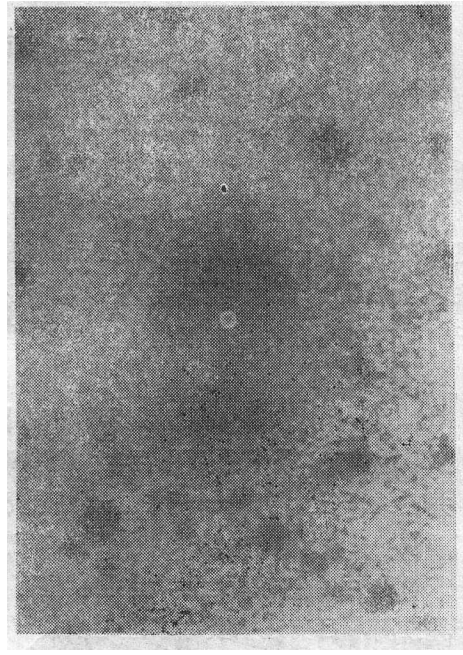


图4 A963中的cD星系与其内两光弧的B像

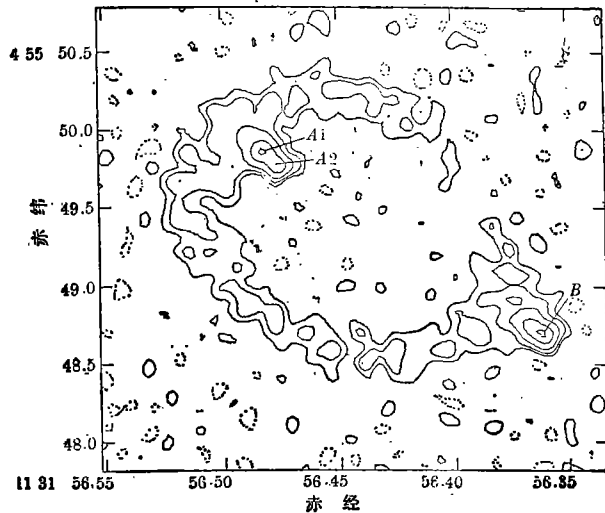


图5 15GHz的MG1131+0456射电图像

三、可能的机理

近来,已出现了对光弧成因的各种猜测,概括起来可分为两大类:一种观点认为它们是实在的天体,与各自所在的星系团有着物理上的联系,这类观点包括爆炸模型、同步辐射机制以及认为光弧是由潮汐力从星系团中的星系上剥落下来的一条由恒星组成的长弧等;第二种观点认为这是一种与所在星系团无物理联系的背景光源的“像”,包括光的回波和引力透镜现象等。由于同步辐射机制与潮汐模型仅为推测而缺少理论上的计算,因此,以下我们只描述三种主要的模型:爆炸模型、光回波模型及引力透镜模型。

1. 爆炸模型

Ostriker^[8]建议,如果星系团的中心星系在很早以前有一个活动核,并且释放出 10^{61} — 10^{62} 尔格的能量,若星系团中存在大量的冷气体,那么中心爆炸所产生的冲击波就会向外传播,并在约100kpc处冷却下来。一旦球壳冷却下来,它就变成了引力不稳定体系,大量的年轻恒星便会形成。因观测到的光弧并非完整的圆,这可归结为气体在星系团中的分布本来就不是球对称的。从直观上看,这种模型可以解释光弧的形状及其光谱的偏蓝,但该模型纯粹为一种推测,目前还需要寻求理论依据^[9]。

2. 光回波模型

Katz提出了光弧的光回波解释^[10,11],Milgrom^[12]对之作进一步的发展^[12]。其主要思想是,如果背景光源为一点源,在点源与观测者之间有一层薄的散射物质,取光源与观测者的连线为z轴且正向指向观测者,当点光源发出一短暂的脉冲之后,在t时到达散射体,经散射之后0时到达观测者。那么,散射光束满足如下抛物面方程

$$t^2 + 2tz = x^2 + y^2 \quad (1)$$

(x, y)为天空平面,设散射体可用一平面表示,则有

$$ax + by + cz = d \quad (2)$$

以上两方程之交线给出观测者看到的光束在天球上的投影

$$t^2 \left[1 + \frac{a^2}{c^2} + \frac{b^2}{c^2} \right] + \frac{2d}{c}t = \left[x + \frac{at}{c} \right]^2 + \left[y + \frac{bt}{c} \right]^2 \quad (3)$$

显然,这是一个圆环。

点源很自然地被认为是类星体,它所发出的短暂脉冲将是类星体上的一次爆发。那么,为什么所观测到的有些是光弧而不是圆环呢?有两种解释:Katz认为散发体本身并不是充满整个平面的,仅有一部分散射物质对光产生作用;Milgrom则提出类星体的爆发可能是一束脉冲而并非各向同性的辐射,因而仅有部份散射体接收到了辐射。至于散射体本身,则应是一个延伸到100kpc以上的超星系(supergalaxy),它具有低光度的扁平盘,由很小的尘埃组成(这自然解释了光弧的偏蓝)。从目前21cm观测来讲,这样的超星系是可以存在的。

光弧的宽度是一个重要的参数,一方面它近似指示了类星体爆发的驰豫时间 Δt ,从A37^①与2244-02中的两个光弧(宽度约10kpc)估计 $\Delta t \sim 10^{12}$ 秒。因此,光弧的结构记录了类星体的固有性质。另一方面,弧宽也与散射体的厚度相联系,借此参数可以研究散射体的视向

厚度。另外, 由于在 A370 与 2244-02 中的光弧视宽度基本保持不变, 这一点支持了光弧宽度可能主要受散射层厚度影响的设想。

既然认定背景光源为类星体, 则光弧应具有类星体的光谱, 并指示出与星系团的红移不同。Katz 引用了在 A370 的光弧中观测到 0.59 的红移值作为支持光回波模型的证据, 但这一点还有待进一步证实。

该模型可以预言: 光弧会强烈地偏振, 电场矢量应该垂直于视向, 且发射线与连续谱均有等量的偏振。可是, Miller 和 Goodrich^[6] 的观测却给出了零偏振的结果。例如, 2244-02 中的光弧的偏振上限是 $\sim 4\%$ 。这似乎给了光回波模型致命的一击。

3. 引力透镜模型

Paczynski^[8] 在获悉光弧的消息后, 就立即把它们与引力透镜现象联系了起来。他指出, 只要背景星系与前方星系团和观测者成一线, 则星系团的引力透镜作用可使背景星系出现光环像, 通常称之为 Einstein 环^[9]。此后, 更多的工作越来越支持这一思想。一个有力的证据是, 光弧的光谱与所在星系团的光谱有相当大的区别, 如果在 Abell370 中的光弧测得的 0.724 或 0.733 的红移是可信的, 则无疑排除了光弧与其所在星系团在物理上有联系的所有设想, 而在光弧中没有发现偏振现象则又基本上否定了光回波的假设。因此, 我们要么把光弧视为一类完全新型的天体, 要么接受引力透镜的观点。目前看来, 人们更乐意承认后者。我们将在下一节专门讨论光弧的引力透镜成因。

四、引力透镜现象

1. 基本理论

如图 6, 若有一点光源发出的光经过中介天体 \bar{D} 后到达观测者 O , 则此光线将受到 α 角的偏折。依小角度近似的几何关系, 有

$$\alpha = \frac{D_s}{D_{ds}}(\theta - \theta_0) = \frac{D_s}{D_{ds}D_d}(b - l) \quad (4)$$

其中 b 为碰撞参数, D_s, D_d, D_{ds} 分别为相应的角直径距离, 并且一般 $D_{ds} \approx D_s - D_d$ 。

当 \bar{D} 为质量 M 的球状天体时, $\alpha = \frac{4GM}{c^2 b}$, 于是

$$\left. \begin{aligned} b &= l + \frac{DM}{b} \\ D &= \frac{4G}{c^2} \frac{D_d D_{ds}}{D_s} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

上式解为

$$b_{\pm} = \frac{1}{2} [\sqrt{l^2 + 4DM} \pm l] \quad (6)$$

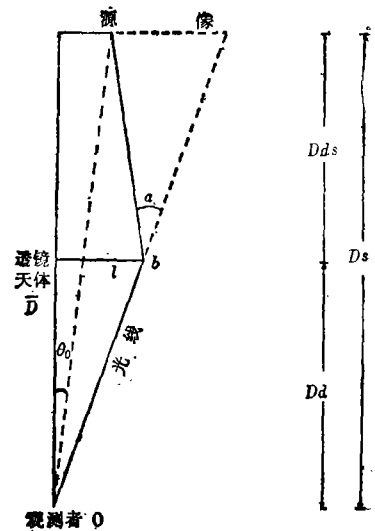


图 6 引力透镜几何

即背景光源为双重像，分别位于 b_+ 、 b_- 的位置上。当 $l=0$ ，即光源、偏折天体、观测者位于同一直线上时

$$b_+ = b_- = \sqrt{DM} \equiv a_{er} \quad (7)$$

此时光源的像为一半径 a_{er} 的圆环，即Einstein环。

对于有一定质量分布的体系如星系，我们常用所谓等温球模型作近似计算^[14,15]，其密度与质量分别为

$$\left. \begin{aligned} \rho(r) &= \frac{\sigma_1^2}{2\pi G} \frac{1}{r} \\ M(r) &= \frac{2\sigma_1^2}{G} r \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

这里 σ_1 为弥散速度。此时(4)式的解为

$$b_{\pm} = \frac{\pi\sigma_1^2}{G} D \pm l \quad (9)$$

背景光源一般仍为双像。当 $l=0$ 时

$$b_+ = b_- = \frac{\pi\sigma_1^2}{G} D \equiv a_{er} \quad (10)$$

光源呈一圆环状的像。

图7(a)绘出了一个球对称偏折天体对于背景三个不同位置光源所呈现的像。其显著的特点是，除了光环像外，任何弧状的像都是成对出现的。事实上，任何偏折天体，如星系、星系团等，不可能是完全球对称的，只要它有一点不对称性，就可导致不同情形的像。例如若

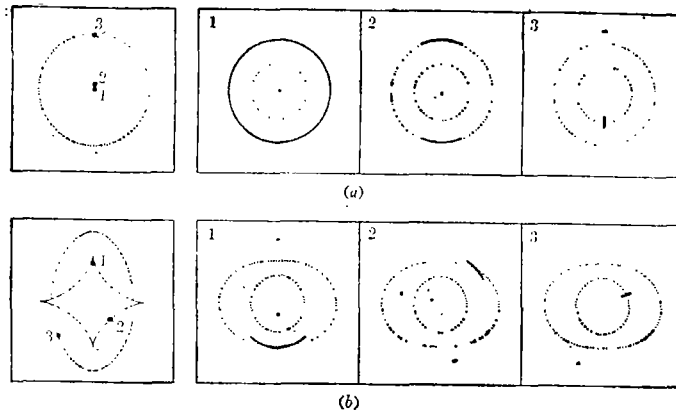


图 7 球对称(a)与包括四极矩项(b)的透镜天体(位于中心)的成像规律

给球状引力势加入一个四极矩势^[16]： $\phi(r, \theta) = \epsilon\pi\sigma_1^2 D_M r^2 2\theta / (r + r_c)$ ， r_c 是核半径， $\epsilon = 0.1$ 为四极矩的强度，则会出现图 7 (b) 所示的像。原来的成对光弧现在变成了单弧。至此，我们已经看到，完整的、成对的以及单一的光弧，在引力透镜理论中都是极其自然的产物，这原则上说明了已经观测到的四个光弧事例。

2. 单个光弧

在 Abell 370与2244-02中的光弧均为单个的弧。如上所述, 透镜天体球对称性的偏离可以造成这种现象。由于光弧大体上以星系团的中心为圆心, 自然星系团就被认为是透镜天体。Grossman和 Narayan^[16]对星系团选用了球对称与四极矩乃至八极矩相结合的引力势, 其内成员由星系核以及按Schechter光度函数^[17]分布的星系组成, 背景光源亦服从此关系。置星系团在0.35红移处, 这近似于两个事例中星系团的位置, 把所有在0.5—1.5红移区间满足光度 $L > 1.5 \times 10^9 L_0$ 的星系的像全部予以考虑, 挑出大于某一特定长度的全部像。他们模拟了303个随机分布的星系团对其后星系的透镜行为, 结果共出现了37个长度大于10"的像与5个长度大于20"的像, 最长的可达31"。因此, 所观测到的巨型光弧的确可以出现。另一重要的结论是, 多重像甚少, 只有17个背景星系有大于4"的两重或多重像, 而长度在4"以上的单像星系却有201个。但是, 多重像出现的几率随像长而增加, 例如, 五个长度在20"之上的像中有两个是同一星系产生。同时, 长的光弧像不再伴随同一星系的较短的弧像。

我们看到, 星系团可以产生出巨大的光弧, 但同时也有两个未能解决的问题。首先, 光弧的出现频度与星系团的核半径密切相关, 较大的核半径将会明显降低光弧的出现频度。Grossman和 Narayan 采用的核半径 $\lesssim 0.1 \text{Mpc}$, 实际上观测到的值比此值大2—4倍。如果使用实际值, 则可能根本不会出现巨型光弧。再之, 模拟结果表明, 对观测到的长度在20"之上的每一弧, 应伴有约5个长度在10"—20"之间的中型光弧出现, 但目前的情形与其矛盾。当然, 这也可认为是选择效应所致, 即长的光弧更易被发现。

3. 成对光弧

Abell 963 中所发现的是一对光弧。只要背景光源稍微偏离观测者至透镜天体的视线, 则球对称的透镜天体就可产生一对光弧像, 图7(b)中的第二种情形就是如此。由于在光弧所在星系团中有一中心 cD 星系, 我们这样构成透镜天体模型: 星系团以一层均匀的介质层描述, cD星系以等温球构成并置其于介质层中。这样, 投影面质量密度为

$$\Sigma(r) = \Sigma_c + \frac{\sigma_1^2}{2G_r} \quad (11)$$

光线通过该天体后的引力偏传角是

$$\alpha(r) = \frac{4\pi G \Sigma_c b}{c^2} + \frac{4\pi \sigma_1^2}{c^2} \quad (12)$$

代入透镜方程(4)可得成像的两个位置

$$b_{\pm} = \left[\frac{4\pi \sigma_1^2}{c^2} - \frac{D_d D_{ds}}{D_s} \pm l \right] / \left[1 - \frac{\Sigma_c}{\Sigma_{\text{crit}}} \right] \quad (13)$$

其中

$$\Sigma_{\text{crit}} = \frac{c^2 D_s}{4\pi G D_d D_{ds}} \quad (14)$$

为介质层的临界质量密度, 如果仅有一层介质, 则只有当其临界密度超过 Σ_{crit} 后方可产生透镜效应^[15, 18]。比较(9)式与(13)式可知, 星系团的作用仅使像间的距离增大了 $[1 - \Sigma_c / \Sigma_{\text{crit}}]^{-1}$ 倍。由于 $D_d D_{ds} / D_s$ 对光源的距离不敏感, 现不妨取光源红移为1, 使用星系团核半径 $r_c = 27'' \pm 12''$ ^[19], 并采用 $\Sigma_c / \Sigma_{\text{crit}} = 0.7$, $\sigma_1 = 1100 \text{km/s}$ ^[20], 可计算出光源真实位置位于 cD 星系

南 $2''$ ，源半径 $0.8''$ （由弧长决定），这意味着源的尺度为 4.75kpc ，与 LMC（大麦哲仑云）的大小 9.3kpc 一致。同时，利用两弧的位置参数还可得到 cD 星系的质量为 $5.8 \times 10^{12} M_{\odot}$ 。

该模型有一些预言有待观测的证实。首先，最有说服力的检验是观测两光弧的光谱，如果它们有一致的且大于星系团的红移，则无疑它们是一对引力透镜的像。其次，该模型预言两光弧亮度比为 2.4 ，目前的观测给出 3.3 。再之，光弧的最宽部分应为 $1''$ ，现有观测表明，在分辨率小于 $1''$ 时，光弧是不可分解的。鉴于模型的简单化与观测上的困难，星系团的引力透镜行为，基本上圆满解释了成对光弧的出现。

4. 环状弧

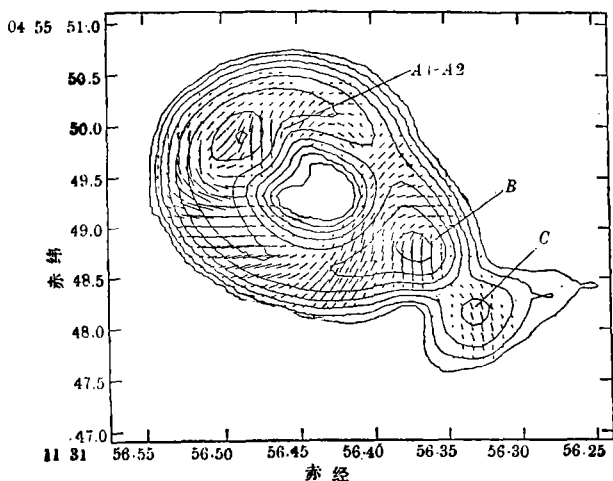


图8 MG1131+0456 的5GHz射电图像。此图与图5同时得到，短线表示了线性极化的强度与位置角

MG1131+0456 可能是一个很普通的射电源，由一个致密核与两个射电瓣组成。由于一个射电瓣正好落在一个透镜天体的后面，它形成了一个环，致密核稍微偏离了透镜天体的中心，但仍接近于它，故它呈现出两个像 A_1 — A_2 与 B ，而第二个射电瓣离透镜天体甚远，其第二个透镜像已很暗弱，只呈现第一个像 C （见图8）。虽然目前没有进行 Farady 旋转效应的观测，但偏振角的测量证实了上述推测是完全合理的。

显然，观测到的环并非是一个完整的圆。这意味着引起透镜作用的天体至少应有四极矩，我们可以用一个二维椭圆引力势去描述它^[21]

$$\psi(x,y) = \frac{A}{2\beta} \left\{ \left[1 + (1-\epsilon) \left(\frac{x}{s} \right)^2 + (1+\epsilon) \left(\frac{y}{s} \right)^2 \right]^\beta - 1 \right\} \quad (15)$$

其中 β 为势的“硬度”， $0 \leq \beta \leq 1/2$ ， A 是势的深度，以弥散速度 σ_1 表示， ϵ 是偏心率， s 是核半径。例如， $\epsilon=0$ 与 $\beta=1/2$ 即是等温球模型； $\beta=0$ 为点质量模型。取典型值，透镜天体在红移 0.5 处，光源于红移 1 处，只要选择 $\sigma_1=290/\text{kms}$ ， $\epsilon=0.31$ ， $s=0.1\text{kpc}$ 和 $\beta=1/2$ ，该模型就可产生出已观测到的环状结构，即使是环中右上方的缺口，也只要将光源略加偏离透镜天体中心便可容易地产生出来。

5. 宇宙弦的作用

宇宙弦有两类形态：直线弦和圈弦。直线弦的透镜行为可使其后的光源产生等亮度的双像^[22,23]，而圈弦的透镜行为则比较复杂，我们只考虑一种简单的情形^[24]。设圈弦为密度 μ 、半径 a 的圆，与观测者到光源的连线垂直，以小角度近似容易得到光线通过圈弦后的偏转角

$$a = \begin{cases} 0 & b < a \\ 8\pi\mu a/b & b > a \end{cases} \quad (16)$$

即光线通过圈弦内时不发生偏折, 而通过圈外后, 其透镜效果与一同样质量的点源位于圈弦中心时的作用相同, 这时透镜方程给出两个解

$$b_{\pm} = [\sqrt{l^2 + 4D_0} \pm l]/2 \quad (17)$$

其中 $D_0 = 8\pi\mu a D_s D_{s'}/D_s$ 。由于 $b_{\pm} > a$, 故当 $l < -a(1 - D_0/a^2)$ 时, 上式成立有两个像; 当 $l > a(1 - D_0/a^2)$ 时, $b_- < a$, $b_+ > a$, 故仅有单像。当然, 若上述条件均不满足, 则光源只有原来的像。在光源、圈弦中心与观测者处于同一线上时, 若 $D_0/a^2 > 1$ 则有一圆环像, 否则仅有一个位于圈弦中心的光源像。

由于圈弦内部不产生透镜现象, 任何背景光源的透镜像均处于圈外, 这样, 像将被沿径向拉伸, 一个接近于中心的面光源就会出现如图9所示的弧状像, 弧长 $L = 2b_0 \sin^{-1}(R/l_0)$, b_0 是弧的平均半径, $b_0 = [\sqrt{l_0^2 - R^2} + \sqrt{l_0^2 - R^2 + 4D_0}]/2$ 。使用Abell 370中光弧的诸参数还可以求得圈弦的线密度 $4 \times 10^{-6} < \mu < 6 \times 10^{-6}$, 这与目前宇宙弦的星系形成理论及微波背景辐射的各向同性测量结果符合得很好。

现在我们可以看到, 圈弦在一定条件下也会产生单个光弧、成对光弧以及圆环的像, 故也是光弧的成因之一。

五、结束语

目前已知的四个巨型光弧事例中, 仅有A370中的光弧证认出了几条谱线, 这使我们很难明确判定光弧的成因。尽管引力透镜模型给出了最为满意的解释, 但要排除其他的可能性, 证据仍然不足, 甚至, 它们完全可能是一类我们前所未知的新型天体。

假若我们接受引力透镜的解释, 那么一个有趣的事情是, 在过去的近十年间, 我们只发现了七对引力透镜类星体事例^[25], 而现在的两年间, 却有了四个引力透镜的光弧事例, 这可能是由于光弧的巨大尺度较易发现和以星系作为背景光源的透镜化几率较大之故。因此, 系统地进行搜索, 可能要比已经进行着的引力透镜类星体对的巡天收获大得多。

如果说人们曾经把引力透镜类星体对作为探测星系、星系团结构的有力工具的话, 那么, 由于光弧的容易发现, 则会更加提高这项工作的效益。例如, 利用A963中的光弧, 我们估计出该星系团核心质量约为 $10^{15} M_{\odot}$ 。这提供了一种独立决定质量的方法, 从而可与由Virial定理和质光比关系定出的质量做比较。另外, 通过光弧本身的大小也可推测背景星系的尺度, 如A963中的光弧可能就是由一个发光区域为5kpc左右的星系产生的。

迄今, 在已有的四个光弧事例中, 除了一个为射电弧外, 其余三个都是非常蓝的弧, 那么, 是否存在红的光弧? 从统计上讲应该是有的, 只不过它太弱而未能被观测到而已。例如, 位于红移1处E/S₀星系的B带K改正为3星等, 若一个“红”星系被像A963这样的星系团透镜化, 除非它极其明亮, 否则它的光弧是不可检测的。

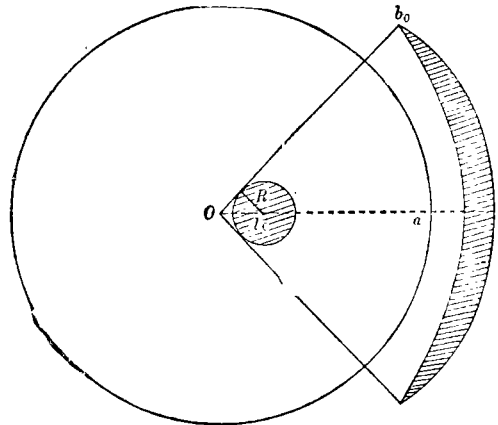


图9 半径a的圈弦将使其后的面光源(半径R)出现弧状像

我们面对着的是一类完全新颖的现象。尽管光弧的引力透镜解释看起来是完美的,但进一步的深入观测特别是光谱观测则是问题得以解决的关键,亦是发现更多样品的手段。我们相信,在今后几年间,光弧的发现与研究将会取得更大的进展。

致谢:本文光弧照片是由光弧的发现者Soucail、Lavery与Hewitt博士所提供;在本文写作中,得到了梁彧同志,李竞和邹振隆老师的帮助,作者一并致谢。

(责任编辑 林一梅)

参 考 文 献

- [1] Lynds, R. & Petrosian, V., *Bull. Am. Astr. Soc.*, **18** (1986), 1014.
- [2] Lavery, R. J. & Henry, J. P., *Ap. J. Letters*, **329** (1988), L21.
- [3] Hewitt, J. N., Turner, E. L., Schneider, P., Burker, B. F., Langston, G. I., & Lawrence, C. R. *Nature*, **333** (1988), 537.
- [4] Soucail, G., Fort, B., Mellier, Y. & Pirat, J. P., *Astron. Astrophys.*, **172** (1987), L14.
- [5] Soucail, G., Mellier, Y., Fort, B., Hammer, F. & Mathez, G., *Astron. Astrophys.*, **184** (1987), L7.
- [6] Miller, J. S. & Goodrich, R. W., *Nature*, **331** (1988), 685.
- [7] Soucail, G., Mellier, Y., Fort, B. and Mathez, G., *et al.*, *IAU Circ.*, No.4482, (1987).
- [8] Paczyński, B., *Nature*, **325** (1987), 572.
- [9] Begeelman, M. C. & Blandford, R. D., *Nature*, **330** (1987), 46.
- [10] Katz, J. I., *Astron. Astrophys.*, **182** (1987), L19.
- [11] Katz, J. I. & Jackson, S., *Astron. Astrophys.*, **197** (1988), 29.
- [12] Milgrom, M., *Astron. Astrophys.*, **182** (1987), L21.
- [13] Einstein, A., *Science*, **84** (1936), 506.
- [14] Gott, J. R. and Gunn, J. E., *Ap. J. Letters* **190** (1974), L105.
- [15] Turner, E. L., Ostriker, J. P. & Gott, J. R., *Ap. J.*, **284** (1984), L.
- [16] Grossman, S. A. & Narayan, R., *Ap. J. Letters*, **324** (1988), L37.
- [17] Schechter, P. *Ap. J.*, **203** (1976), 297.
- [18] Leibes, S., *Phys. Rev.*, **B133** (1964), 835.
- [19] Thompson, L. A., *Ap. J.*, **306** (1986), 384.
- [20] Lavery, R. J. & Henry, J. P., *Ap. J. Letters*, **304** (1986), L5.
- [21] Blandford, R. D. and Kochanek, C. S., *Ap. J.*, **321** (1987), 658.
- [22] Gott, J. R., *Ap. J.*, **288** (1985), 422.
- [23] 武向平, *科学通报*, **33** (1988), 1642.
- [24] Wu, X. P., in *Gravitational Lenses*, ed. by J. Moman et al., Springer Verlag, p.140, (1989).
- [25] Turner, E. L., in *Dark Matter in the Universe*, ed. by J. Kormendy and G. Knapp, p.227, *Dordrecht: Reidel*, (1986).

(责任编辑 林一梅)

本文完成之后,在星系团A2218与C10500-24中又发现了两个光弧事例。特别是Langston等十位天文学家最近观测到了一个类星体被透镜作用而形成的Einstein环。——作者

Giant Luminous Arcs in the Universe

Wu Xiangping

(*Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica*)

Abstract

Giant luminous arcs, the hitherto unknown types of structures in the Universe, were discovered over past two years. In this review paper, the four cases of the arcs known so far are listed and the various conjectures, especially the gravitational lensing model, about these unusual features are discussed.