

暗物质的引力透镜测绘

何 常

现已取得初步成功.

二、引力的透镜作用

爱丁顿著名的 1919 年日蚀考察是第一次用一个天体来测量引力的透镜作用, 据以证明广义相对论预测的正确性, 爱因斯坦从此成了家喻户晓的名字. 当遥远星系发出的光子紧挨着太阳或其它任何足够厚重的前景系统(看得见和看不见的)通过时, 其路径的引力弯曲使源呈现在改变了的位置上. 弯曲角正好是厚重天体的 Schwarzschild 半径的两倍除以碰撞参量(两碰撞质点之间不再起相互作用时的距离). 这样, 前景中的这一团块暗物质就充当了引力透镜; 它使更为遥远的背景星系(源)产生有规则的畸变象.

一、宇宙质量和引力

两千多年前, 庄子就提出: “天其运乎? 地其处乎? 日月其争于所乎? 孰主张是? 孰维纲是? 孰居无事而推行是?” 换句话说, 到底是什么主宰着宇宙的演变? 现代物理学的回答是: 那是质量引发的长程力——引力. 对巨大引力束缚系统(如星系和星团)内部运动的研究证明: 这些系统的质量中占绝对优势的是这样的物质形态: 它不以从射电波到 X 射线中的任何波长发光. 这种物质形态叫做“暗物质”. 当前宇宙学的中心问题之一就是暗物质所扮演的角色.

到了最近, 已有充分证据说明, 暗物质的总质量超过明亮物质(恒星、气体和尘埃)的质量至少 10 倍. 星系团内的暗物质相加足够使其总量达到临界密度 ρ_c 的 20%. 只要现在的宇宙平均质量密度不超过 ρ_c , 哈勃膨胀就将永远继续下去. 现行宇宙学假设, 大爆炸开头瞬间的暴胀所给出的几乎恰好是临界密度.

暗物质支配着庞大天体系统的质量, 其证据来自动力学观察. 所谓动力学观察, 是指对在星团内部运动的星系和在星系内部绕轨道运行的恒星的视线速度的红移测量. 把能量守恒定律和维里定理(它假设已达到统计平衡)应用到这样的引力束缚系统, 可以得到从星系中心到任何距离内所具有的总质量, 这叫动力学质量. 如果计算可见的星系团中各星系恒星和气体云的光度 I_i , 再由 I_i 计算星系质量 M_i , 求出星系团总质量 $M = \sum M_i$, 这样的质量叫光度学质量. 对相同的星系, 前者的结果比后者要大得很多. 从星系和星团中所观察到的速度对于其平均值的偏离量与赋予它们每太阳光度-太阳质量的期望速度相比差额是如此之大, 以致人们产生错觉以为这些系统并不是引力束缚的. 在这样的情况下, 必须引入看不见物质来为我们所看到的高速内部运动提供引力束缚.

红移测量提供暗物质存在的强有力证据是从星系到星系团尺度的, 但是我们不仅要知道暗物质的存在, 而且力求知道它的具体分布和组成. 因此, 近几年来应运而发展起来一种应用引力透镜探测暗物质的独立的新技术. 它不象动力学测量那样要依赖于星体和星系轨道假设; 它的预期作用不只是动力学测量的补充,

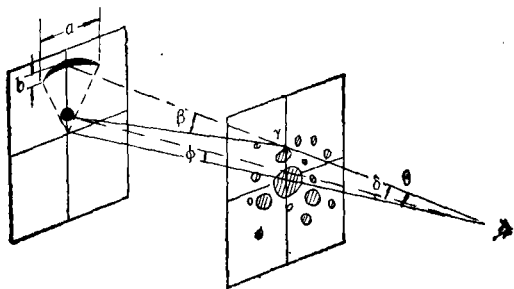


图 1 引力透镜示意图

如图 1 所示, 一遥远星系发出的光从离一致密的前景质量聚合物中心最近距离 r 处(碰撞参量)通过, 星团平面会产生引力弯曲, 弯曲角为 $\beta = 4GM(r)/rc^2$. 式中 $M(r)$ 是投射半径 r 内的总质量. 宽度足够大的背景星系的象除了要产生引力位移还要产生严重的引力畸变. 一个角度为 1 弧秒的星系通过前景星团会被拉长成一个有许多个弧秒长的圆弧. 因此, 我们看到它从 ϕ 角经过 δ 角的位移, 它的实际角距离为从星团质心张开到较大的角 θ . 由于它有明确的宽度, 象也畸变成与星团同心的圆弧, 长 a , 宽 b .

如果用来作透镜的前景质量是一星系团, 我们就要设法用测量背景星系畸变象的办法把这个星系团中的暗物质成分描绘出来. 由于一个光学通过前景星团的时间比典型的星系团轨道周期要短得多, 所以用这样的办法实际上等于拍摄一张快照. 这个办法不需要象在动力学研究中那样非得假设这个星团是一个平衡束缚态, 也不象以 X 射线通量图为基础的质量计算那

样需要依赖热气体状态的假设；这种技术甚至不需要对被测量系统的辐射进行观察。引力的透镜作用可以直接用来发现完全黑暗的质量富集物。

至于上面提到的背景星系，河外天空呈现各种不同亮度、不同形状和不同距离的星系。在照相观察能见度内，人们发现每平方度有 18,000 个暗淡星系。用现代电偶装置(CCD)，还能观察得更远。在过去 10 年里，波长 0.3—1 微米范围内的超深度 CCD 图象已揭示了出奇密集且处处存在的淡蓝星系群。从曝光的 CCD 中发现天空每平方度中有多于 300,000 个这样的淡蓝背景星系，这是我们用来研究前景暗物质的天幕。

三、最早的引力透镜

大而重的前景物体会使背景星系象产生不容忽视的畸变，这是一个老观念。1937 年，杰威基就提出论证：星系可以充当引力透镜来畸变和放大背景物体。光的折射与透镜中的质量成正比。典型的星系折射角为 2 弧秒左右，以后的探测证明了这些论证的正确性。

如图 1 所示，遥远星系和前景星团的质心之间的真实角距离为 ϕ 。由于经星团边沿通过的光被弯曲，发光的背景源呈现在我们面前的是较大的角距离 θ 。透镜的位移 $\delta = \theta - \phi$ 与引力弯曲角 β 有关：

$$\delta = (D_{LS}/D_S)\beta$$

这里 D_{LS} 和 D_S 分别是镜—源和观察者—源的距离。在薄透镜近似法中，我们把星团看作二维系统，把射线的投射碰撞参量标志成二维矢量 \mathbf{r} 。然后用投射二维质量密度分布 σ 来表示弯曲角 β ：

$$\beta(\mathbf{r}) = \frac{4G}{c^2} \int \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}') d^2 r' \sigma(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2}$$

由于我们并不知道背景源星系未经透镜作用时的真实位置，我们无法测量 β 。但是它的切变——即引力弯曲的梯度却是观察得到的。对于大多数前景质量分布，我们可以简化上面的积分公式。如果前景星团的投射密度分布 $\sigma(\mathbf{r})$ 可以表述为一圆对称分量的和，则角矢量可约化为角标量。在前景为点质量的简单情况下， $\beta = 4GM/rc^2$ 。这里 $2GM/c^2$ 是质量 M 的 Schwarzschild 半径。

一个恰好在这个点质量后面的源星系表现为此半径的“爱因斯坦环”象：

$$\theta_E = \sqrt{(M/10^{11}M_\odot)(D_{LS} \times 10^9 \text{pc}/D_{LS}D_S)} \text{ 弧秒}$$

这里 M_\odot 是太阳质量。如果透镜质量是椭圆或者别的不是圆对称的形状，这种环对称就被打破了。所以天空很少有完全圆形的爱因斯坦环。如果源角 ϕ 少于 θ_E ，人们看见的是约 2 个相隔 $2\theta_E$ 的源象。

这些效应有多大呢？如果充当引力镜的单个星系有大约 10^{11} 个太阳质量就会产生间隔大约是 3 弧秒的多重象。质量为 $10^{14}M_\odot$ 的星系团透镜能产生间隔大到 1 弧分的多重象。对于一个引力束缚的群集明亮

物体，用维里定理从观察速度可推出可见物和不可见物的总质量。这个定理说明系统的束缚能等于它的内动能，由此可得 $\langle \Delta v^2 \rangle$ 等于 $GM(r)/r$ ； $\langle \Delta v^2 \rangle$ 是在距中心 r 范围内可观察成分的速度偏离量。对于一引力束缚质量的平衡等温分布，引力弯曲角 β 正好是 $4\pi \langle \Delta v^2 \rangle / c^2$ 。（等温性意味着质量密度降落接近 r^{-2} ）速度偏离量还给出爱因斯坦环的大小：

$$\theta_E = \frac{29(D_{LS}/D_S)\langle \Delta v^2 \rangle}{(10^3 \text{kmsec}^{-1})^2} \text{ 弧秒}$$

已经测得许多星系团的速度偏离量大体为 10^3km/sec 。我们可以用适当的投射密度 $\sigma(\mathbf{r})$ 代入而得到 $\beta(\mathbf{r})$ 的积分式，即可为相当真实的质量分布（例如半流动软核等温天体）计算出引力弯曲。在象畸变和象破裂的情况下，象与象之间的间隔一般只取决于碰撞参量 r 范围内的质量分布。

1973 年美国加州理工学院的普赖斯和格恩指出，宇宙学上意义重大的巨大前景物体的密度会使背景星系的象畸变和破裂，其后 6 年发现了第一面引力镜：一遥远的类星体被前景星系的引力至少撕裂成两个象。

从首次发现（1979 年）后的 13 年中，检查研究了 4,000 多个类星体，只发现 8 个较为明显的类星体破裂象。在这些宇宙景象中有一些看起来已经清晰地起着引力透镜作用，那是由暗物质所支配的孤立的前景星系的作为。这些被映摄的类星体象非常稀少，这与类星体和前景星系的已知丰度是一致的。前景透镜星系的有效质量 M 和半径 R 可以从类星体象的畸变中推导出来，发现 M 的数量级为 $10^{12}M_\odot$ ， M/R 约为 $3 \times 10^{16}M_\odot/\text{KPC}$ 。这与有关浓密星系的典型的维里定理结果相符。另外，还计算出暗物质大约占 M 的 90%。

由于能映摄的类星体象太少，所以无法得到很多有关透镜中质量分布的知识。这些背景类星体的典型红移量 z 大体是 $z \approx \Delta\lambda/\lambda$ 。在这样的红移量下，倒能够看到比类星体多得多的其它星系。因此，要想尽可能多地摸清前景中有关暗物质的情况，就必须利用丰度极大的背景星系而不是利用偶尔可得的类星体。

四、近期用星系团作引力透镜

近几年来，贝尔实验室的物理学家泰森与一大批天文学家合作在早期引力透镜知识的基础上研究创立了用引力透镜探测暗物质的独立的新方法。刚跨进研究门槛时，他们发现若是用个别星系作透镜，则每逢源和镜的间隔大于几个弧秒时，象的畸变就极小。1981 年，有报告说在照相底片上捕捉到 Abell 370 星团中靠近一明亮星系的一条独特蓝弧。到了 1986 年，就得到更多有关蓝弧的报告。一条大的圆弧意味着一遥远星系的天空位置非常接近于被前景透镜所无限放大的一个点。这在光学上叫散焦投射。这是一个有益的发现。

如果镜的中心和源的位置间的夹角 ϕ 大于 θ_E ，

那就得不到多重象。但是不管宽度多大，可分辨的源不仅畸变而且会位移。 淡蓝背景星系尽管距离极远，由于它巨大而精致，前景星系会把它延伸成为同心弧。与稠密星系团相联系的巨大质量影响着在它后面的广大天空区域的背景星系象。这些质量使暗淡背景星系的畸变显现在几个弧分之内。红移量从 0.2 到 0.5，视线速度偏离量超过 700km/sec 的前景星系团，它的质量密度很高，足以使背景星系作重大的畸变(背景星系的距离至少是前景星系的两倍)。

对稠密星团中畸变的背景象进行探查的办法是应用非常灵敏的 CCD 检测器，在望远镜上进行深层多频带摄像。在厚重星系团中发现几个畸变背景象，它围绕透镜前景星团成有规则的同心圆，非常清晰。现在在大型望远镜中作 3 小时深层 CCD 曝光，观察到各处都是每平方弧分有 30 个到 300 个背景星系。这样的背景数对于拍摄天空中任何处所的前景星团中的暗物质都是恰如其分的。

高红移量的背景星系出现在致密前景星系团的中心平方弧分内都可以被拍摄下来，且图象鲜明。比较典型的情况是被畸变成 30 弧秒长的暗淡圆弧。这不像用单个星系作透镜时要发现弥散排列是那样不可多得。每一背景星系在广阔的前景星团周围沿着中心在透镜上的一个圆铺设开来。检测器揭示，暗淡背景星系的密度普遍很高，这就给了我们足够的统计数据来绘制一幅前景透镜系统中暗物质的近似分布图。

测绘暗物质还必须两种技术：

一是计算机模拟。这是指通过描绘各种不同的前景星团的半径去模拟背景星系的引力畸变。然后把实际观察的结果去同各种星团的亮物质与暗物质的模拟分布比较对照，这样就可以使难以捉摸的暗物质参量空间的描述精密化。

为了模拟，就要对背景星系区域进行综合，使之同深层探测中看到的形状和强度的统计公布相同。然后赋予支配模拟透镜星团的暗物质的不同速度偏离量以不同的半流动核质量分布。在用模拟星团计算出背景引力畸变之后，再计入大气斑损、泊松干扰，将结果输入接收器，以便 CCD 析像。根据维里定理，星团总质量与它的可见成分的 Δv^2 成比例。因此可以用均方根速度偏离量来标示质量。

椭圆形规则排列的背景象是一个强引力信号。测量出两个正交方向上的长度参量来表征伸展状况。一个参量是从透镜中心出发沿着半径的强度已测的畸变象的惯性矩；另一个参量是与半径垂直方向的惯性矩，分别用 a 和 b 表示。对所有星系的这些长度(对于一给定的设想中心)进行平均，再按下式组成一无量纲量，它与椭圆率相似，叫做切向补偿或透镜畸变，用 T 标志。用关于象平面中任一参考点 (x, y) 的转矩 $a(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 来定义 T ：

$$T(x, y) = \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2}$$

一个位置和取向都是无序的且无透镜作用的星系聚合物，象平面中任一点 (x, y) 的净畸变均为零，而起透镜作用的星系聚合物会在相应于真实透镜中心的点产生正值。要由引力透镜作用建立起一幅近似的质量分布图，得计算一系列候选透镜中心的畸变参量 $T(x, y)$ 。在实际透镜的有效中心， $T(x, y)$ 出现最大值。

二是解逆题技术。给定透镜质量分布和暗淡星系背景，要计算背景畸变已有简捷的方法。然而我们的任务正好相反，是要求解透镜近似质量分布这个逆题。它的困难要大得多。目前只有对某种简单的前景质量分布才办得到。

为了从畸变背景推得前景暗物质图象，泰森等人建立了一个被相当复杂的前景暗物质所畸变的背景区域计算机模拟。这个透镜结构是三个互成等边三角形的等温质量球，呈球对称。对模拟图形进行逆运算即推得前景质量分布。结果证明，通过模拟和逆运算能够真实地恢复原来的复杂质量分布。但是对于速度偏离量小于 500km/sec 左右的前景质量成分，这种方法就不能奏效。因为在如此贫乏的透镜质量下，相干畸变信号就被背景星系的无序椭圆率所淹没了。

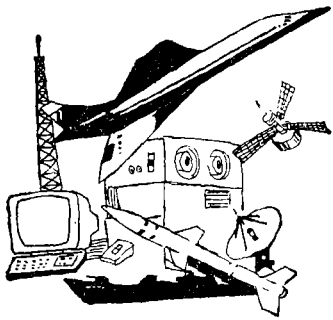
一旦找到了透镜中心，就可以利用更直接的方法来解出暗物质的质量 M 和核半径 R_c 。如果一圆对称透镜，它有一简洁的可参量化的径向质量分布，就可以用最可几计算确定 M 和 R_c 。切向畸变函数 $T(x, y)$ 确定了透镜质量的位置和它在天空的结构形态。

取红移范围为 0.5—1.5 的淡蓝弧粒为引力透镜背景星系，得到了一种似真的透镜模型的最可几解。这些解提供的星团总质量与从观察速度偏离量推得的总质量十分一致，它们至少提供了暗物质分布核半径的上限。

应用模拟和解逆题技术，Abell 1689 星团透镜测绘结果同这样的假设相符：集中在星系内部的暗物质初生时是重子物质。它可能是为数众多的棕矮星。但是重子物质(质子和中子组成的普通物质)不能自始至终带来临界密度。因为初始核合成的标准情景说明，重子所占比例不能高于临界密度 ρ_c 的 7%。

这一星团透镜研究结果也说明它与非重子暗物质相符，这种暗物质是由静止质量为 $10eV$ 量级的残留中微子组成的。不过看起来不象是这样的中微子在暗物质中起支配作用。人们认为它只存在于个别星系周围的晕圈之中。

在对这一星团的许多引力切畸变研究中测量了径向质量函数 $M(r)$ ，即在离星团中心距离 r 内的质量，结果同对星团的动力学测量一致。因此迄今的引力透镜结果已使研究者增强信心：应用维里定理得出的假设对于致密星团一般是有效的。



超导体的军用前景

陈心中 徐润君

(解放军汽车管理学院,安徽蚌埠,233011)

巨大的变革。

一、超导体在杀伤手段聚能化方面的应用

从目前的研究情况来看,超导技术的应用基本上可分为两类:一是用超导材料制作磁性极强的超导磁铁,用于磁约束核聚变研究和制造大容量储能装置、高能加速器、超导发电机等,以解决人类未来的能源问题;二是用超导材料薄片制作约瑟夫逊器件,用于制造高速电子计算机和灵敏度极高的电磁探测设备。

军事家们历来就是科学技术新成果的酷爱者,科学技术发展的最新成果往往首先被应用于军事。

由于超导体具有优异的物理特性,所以它在军事方面具有广阔的应用前景,它必将对军事领域产生极为深远的影响,它将使武器装备和军队作战样式发生

我们知道,热兵器的杀伤能量主要来自炸药的化学能,核武器的杀伤能量则主要是来自原子核能。热兵器和核武器是利用能量的球形扩散(如空中爆炸)或半球形扩散(如地面爆炸),或一定方向的扩散(如枪弹),来对目标进行杀伤的。聚能武器(如激光武器、粒子束武器、微波波束武器等)则不同,它是把能量汇聚成极细的能束,沿着精确的方向,以接近或等于光速的速度发射出去,对目标进行杀伤。因此,聚能武器也常被称为定向能武器。

美国的“星球大战”计划已把定向能武器的研制摆在突出的地位。但是,目前研制定向能武器的各种方案几乎都遇到能源的难题,即如何在瞬间向定向能武器提供大量的电能,这就需要改革现有的储能设备和

如果宇宙的平均质量密度非常接近于 ρ_c , 暗物质一定充斥宇宙,在没有恒星构造的地方很可能找到它。研究者们相信,联系着星系和星团内部区域的暗物质数量总共占 ρ_c 的 10—20%, 所以迫切需要研究星团外部边界和似乎是空洞的区域,那里大概躲藏着其余暗物质。

事实证明引力透镜是检测和描绘暗物质积聚物的有效方法。把透镜映象技术应用到更大的尺度将最终带到与它们的星系或星系团无关的暗物质团块上去,比如,宇宙学家的“冷暗物质”模型预示了前景暗物质团块的存在,这种暗物质很大,足以使背景星系产生透镜畸变,所占的天空区域大到 1° 。

早期参照底片的研究已经建立了大尺度切畸变的上限。这种切畸变是千兆秒差距甚至宇宙整体的旋转所引起的。对几度宽的暗淡背景星系进行超深层像的研究,可能会发现各种理论描述所期望的庞大的无恒星暗物质团块。CCD 大区域感光镶嵌幕使大尺度研究显得特别景色迷人。

五、追寻暗物质的来踪去迹

如果知道了宇宙演变过程中任一时期的暗物质,就可以计算出它在另一个时期的分布,并确定它的物理含义。现在驻留在星系团内的暗物质是与星系同时被装配在一起的,还是先期就存在着暗物质团块,再由

它去帮助播种星系和星系团的构造?

在执行这种播种任务上有些暗物质候选者比另一些有效得多。因为有些模型中的暗物质粒子的热运动是相对论性的,因而不能产生 1 万秒差距(1 秒差距约 3 光年)尺度的具有星系特征的结构。另一些暗物质模型中的粒子太冷,它能产生的兆秒差距尺度的星系团结构又太多。比如说,如果由质量不过几个电子伏的相对论性中微子支配质量密度,这样小的质量,其引力就无法去聚集那样大尺度的星系;自由流动的轻中微子妨碍着星系的成长。

引力透镜的初步研究证实了稠密星系团内的巨大暗质量;一个星系团内的暗物质分布看起来很象是许多星系在星系团内的平滑分布;在迄今已研究过的星系团中,有证据证明暗物质分布中有一个其半径大到 7 万秒差距的半流动软核,核外的密度降落还不清楚。所以目前要估算出与稠密星团相关的暗物质总量是困难的。比如,要是密度按 r^{-2} 降落而无外部截止点,则质量积分将是发散的!然而,由于星团质量为暗物质所支配,其中质量的详细分布情况对检验我们对暗物质本质的推测是必不可少的。我们想知道,它是在何种距离、什么时标下团聚起的?它的空间分布与星系亮物质分布有着什么联系?

这些问题的求解是在动力学测量的基础上创立和发展引力透镜技术的目的。