

* 成果与应用 *

利用引力透镜效应探测宇宙中的物质分布

武向平*

(北京天文台 北京 100080)

现代天体物理学的主要任务之一是研究宇宙中的物质分布。其观测手段可以分为两类:(1)直接测量法;(2)间接测量法。直接测量法利用现代观测设备测量天体的视位置(二维)和红移(一维),从而给出可视天体在宇宙中的分布。其特点是它的直观性和易行性。但是,这种测量方法只能给出有电磁辐射天体的分布,而这种可视天体的分布很可能并不代表物质在宇宙中的真实分布。值得注意的是宇宙中有 90% 以上的物质是不可视物质,因此,直接测量法可能会导致人类对宇宙中物质分布认识的片面性。与之相反,间接测量法是利用物质的引力效应来测量天体的总质量,既包括发光物质,也包括暗物质,从而更能准确地描绘出宇宙中的物质分布。引力透镜效应就是这种间接测量方法中最为有效的一类。

现代宇宙学是以所谓“宇宙学原理”而奠基的:宇宙是均匀各向同性的,即宇宙中的所有位置是等价平权的。然而,当我们观测这个真实的宇宙,它充满了各种不均匀的物质聚集体系——恒星、星系、星系团、大尺度结构等,所有这些天体都会通过自身的引力场而影响光线的传播,而光是我们目前认识宇宙的唯一“信使”。如果我们对光在非均匀宇宙中的传播不做修正,则会导致人类认识宇宙的错觉。

广义相对论预言,一束光通过均匀和不均匀介质将会产生不同的效果。处于一个大质量天体后方的光源,其亮度和形态都会受到放大和变形。这种“引力透镜效应”具有两个基本的特征:一是它的放大作用,使得宇宙深处较暗天体得以增亮进入我们的观测限,起类似“望远镜”的作用;二是它的变形作用,使得原来背景光源“面目全非”,若不进行“复原”,则会带给我们错误的信息。引力透镜在当今天体物理最为有效的作用,则是它的“质量测量”作用。引起引力透镜效应的是透镜天体的引力质量,它在概念上不同于动力学质量,同时它既包括发光物质的贡献,也包括不可视物质的贡献。通过引力透镜质量与发光物质质量的比较,可以直接给出暗物质的分布特性及质量。

自 1979 年第一对引力透镜类星体发现以来,各种引力透镜现象迅速增加,这些现象包括引力透镜类星体多重像、巨型光弧和小型弧状像、射电环、微型透镜事例等,事例总数已近一百。特别是空间望远镜的使用和专职引力透镜望远镜的投入,为寻找和发现新的现象创造了良好的条件。预计今后几年内引力透镜现象将会巨增,一些重大的宇宙学课题将会由引力透镜效应的研究而得出结论。

北京天文台关于引力透镜效应的研究工作开始于 1986 年,由于当时国内尚无可以用于引

• 第二届(1994 年)中国青年科学家奖获得者。

力透镜现象观测的大型天文望远镜,我们的研究主要是理论上的探讨。自 1989 年以来,我们在国际一级刊物上发表了 15 篇高水平的研究论文(A&A, ApJ, MNRAS),有十多篇论文在国际会议上交流,其中一些成果已被国际同行大量引用。我们的主要贡献是:

一、发现星系团中心存在暗物质核

1990,在欧洲共同体的支持下,我们与法国巴黎天文台合作,首次完成了“星系团-光弧”的引力透镜理论统计工作,这一重要成果发表在英国皇家天文学会的月刊上,已有 30 多位国际同行引用其中的结论。这一工作的最主要贡献是:我们首次从统计引力透镜中独立地确认了星系团中心存在一个致密的暗物质核,“暗”物质与“亮”物质在星系中不遵从相同的分布。这一发现向传统的猜想提出了挑战。而最近从 X 射线观测资料的分析中,亦表明星系团中心的确有暗的致密核,这对研究星系团动力学及星系团形成将产生极为重要的影响。

二、预言射电光弧的存在

光弧是引力透镜最成功的标志之一,但光弧仅在光学和红外波段可见,是否存在射电光弧便不为人知。经过对射电源统计资料的分析 and 星系团引力透镜特征的研究,我们首次成功地预言了巨型的射电光弧。引力透镜专家 R. Narayan 曾于 1993 年宣称,发现射电光弧将是今后引力透镜研究的重要方向之一。

三、提出引力透镜“负成协”概念

由于星系的引力场可以增强背景类星体的亮度,从而造成背景上的类星体与前方星系“成协”。这一主张已有数十年之久,观测统计结果约有 10 个,但这些现象是否由引力透镜所致,一直争执未决。1993 年,我们通过对引力透镜成协机制的研究,首次提出了“负成协”概念。这一概念的引入,成功地解释了目前所有的观测事例,并提出引力透镜成协机制的最终验证办法是寻找“负成协”事例,从而为解决 20 年来争执的“成协”问题指出了方向。这篇论文刚一完成,即被第 31 届 Liege 国际会议的权威报告所引用。

四、提出星系-星系团引力透镜导致的成协理论

我们与法国的天文学家合作,首次提出了“星系-星系团”非物理成协的理论,即引力透镜导致的成协,并指出在 K 和射电波段可以确认这种成协的存在。最近,我们利用射电类星体和 Abell 团从统计上发现了这种成协。与此同时,国际上两个小组也进行着类似的工作并证实了类星体-星系团成协的存在。这一结论对研究星系团中的物质分布及宇宙大尺度结构有着重要的意义。

五、对微波背景辐射起伏的局部引力场进行修正

近年天文及天体物理学的重大发现,莫过于 1992 年美国 COBE 天文卫星所观测到的微波背景辐射的各向异性,它是 30 年中人们致力于寻找的形成今日大尺度结构的“种子”,目前所有研究大尺度结构及星系形成的理论均以此做为归一化条件。然而,我们与美国亚利桑纳大学天体物理学家们一同工作发现,COBE 观测到的结果有很大一部分可能来自于局部引力场,因为 COBE 采用了狭义相对论的运动修正来消除局部引力场的贡献,而真正的引力场修正并未被考虑。故 COBE 的这一重大发现仍有待于深入研究。只有进行了局部引力场修正,COBE 的结果才会有宇宙学的意义。特别是,目前的天文观测表明,我们的局部本动速度场可以大到几亿光年,它对微波背景辐射的非运动学影响应该是一个不可忽视的量。

六、暗物质寻找实验的新解释

星系的晕是由暗物质组成的,关于这些暗物质的实质是现代天文学及物理学的一大疑难。事实上,它关系到整个物理学的基础问题。1993 年,三个国际小组同时宣称的在大麦哲伦云及银河系中心观测到了由致密天体引起的微引力透镜现象,引起了天文及物理界的极大关注。这些实验导致的结论是,组成银河晕或盘上的暗物质已经找到,它是普通的重子致密天体而不是什么奇异粒子。而我们发表在美国天体物理杂志(ApJ)的论文中,先于西班牙的天文学家提出了这些现象并不全是起源于银河系的重子致密天体。事实上,它是大麦哲伦云中自身的恒星导致其后另一恒星的“微引力透镜”效应,即星系晕中的暗物质并未被检测到。这一重要推测已被另外两位国际同行的工作所肯定。特别是从事银河中心微引力透镜实验小组的最新发现,他们的几十个事例可能是由恒星所引起而并不是由暗物质造成。同时,哈勃空间望远镜对银河系晕的观测并没有发现由微引力透镜实验推测的亚太阳质量暗物质天体的存在。于是银河系晕中暗物质的寻找实验很可能给出负结果。在最近的天文重大发现 D/H 测定之后,我们的工作将会对否定存在重子暗物质起重要作用。

七、解决了星系团的重子物质超出问题

星系团的重子物质超出问题使标准宇宙模型面临严重困难:由 X 射线估计出的物质是标准宇宙学核合成理论给出的几十倍。这一“灾难”引起了多种理论相继出现,试图解释这一现象。1994 年 6 月,我们完成了极为重要的一篇论文(ApJ Lett),以简单明确的方法,利用在星系团中观测到的引力光弧,计算出由传统维里平衡方法给出的星系团质量比真正的引力质量(引力透镜方法)低好几倍,从而发现重子物质比重过去被人们大大夸大了。利用引力透镜方法给出的星系团总质量,可以使得重子物质比重与标准宇宙学的要求完全符合。我们首次大胆地提出,人们延用了几十年的维里平衡方法在星系团中是失效的,即星系团并未达到维里平衡。一位国际权威人士称这一结果将会对宇宙学的各个领域产生重大影响。

目前,我们关于引力透镜效应的研究已涉及从小尺度的致密暗天体到宇宙的大尺度结构,我们希望利用引力透镜这架“廉价”而又巨大的“望远镜”来描绘出宇宙各个层次的真实物质分布,特别是暗物质的分布。我们的研究项目已得到了国家自然科学基金委员会的大力支持,并且与法国巴黎天文台和美国亚利桑纳大学建立了长期合作关系。我们相信,北京天文台关于引力透镜效应的研究,始终会站在国际这一领域的前列。