

引力透镜效应研究的历史与现状

须重明
(复旦大学物理系)

吴智仁
(上海科技出版社)

在七十年代末,有文章报道说^[1],在宇宙空间发现了一对极为相象的“孪生类星体”,发现者们认为,这极可能是六十多年来人们所谈论的“引力透镜效应”。

一、什么是引力透镜效应?

引力场能偏转光线传播的方向.在广义相对论中,有引力场存在的空间不再是平直空间,而是弯曲空间.光线在引力场中传播时偏转的角 $\alpha=4GM/c^2b$. 式中, G 是引力常数, M 是引力场源的质量, c 是光速, b 是光线离引力源最短的距离. 对于掠过太阳表面的光线来讲, $\alpha=1.75$ 角秒. 从 1919 年以来,这个数值已多次为观测所证实. 由此,引力场有可能使远处光源射来的光线会聚起来,起类似光学透镜的作用,这个现象叫“引力透镜效应”,这个引力场就叫做“引力透镜”。

二、历史回顾

几乎与广义相对论预言引力偏转效应得到证实的同时,就有人考虑引力场能否起类似透镜的作用. 1919 年洛奇在《引力和光》一文中指出^[2],引力场能使光线产生爱因斯坦偏转,但太阳的引力场却未必能起类似透镜的作用,因为它没有固定的焦距(图 1). 从太阳表面掠过的光被太阳引力场偏转,会聚于 A 点;但稍远离太阳表面,一个与太阳中心等距离的圆环中的光将会聚于 B 点;其结果是,所有光线会聚成一

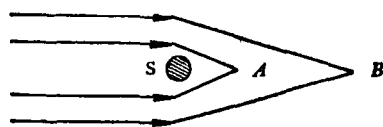


图 1

条明亮的直线 AB . 这与光学会聚透镜不一样,对后者来讲,近轴光线应会聚于一点上.

产生这种差别的原因在于,对点源引力场来说,离源越远的光线偏转角越小;而对光学透镜来说,离主光轴越远的光线偏转角越大. 实际上,引力场的透镜作用和一个玻璃酒杯底状的透镜作用相似(图 2).

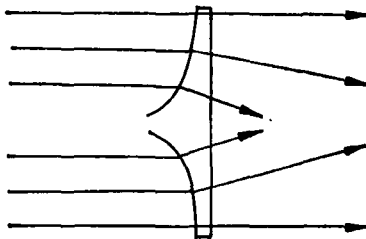


图 2

1920 年爱丁顿在介绍广义相对论的著作^[3]中提出,引力场会聚光线成像可作为广义相对论正确与否的一种检验. 如果有两颗恒星 A 、 B , 它们在视线方向相距 1 角秒, A 在 B 后面很远距离上,这时,我们不仅能看到从 A 发出的、受 B 引力场偏转不大的直线光束①,还可在 B 的另一侧看到被 B 引力场偏转较大角度的光束②(图 3). 于是,观测者 O' 可能看到 A 的两个像 A_1 、 A_2 . 不过,爱丁顿认为,两颗星在视线方向接近到能产生透镜作用的机会很小;而且

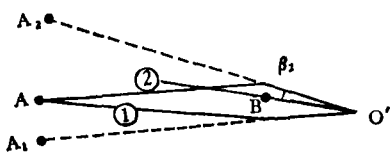


图 3

恒星 B 与像 A_2 角距离 β_2 又小得使两者难以区分开来, 所以难以用这种方法来检验广义相对论。

1936 年, 应捷克电气工程师曼德尔 (R. W. Mandl) 的要求, 爱因斯坦公布了他对引力透镜所作的计算结果^[4]。如图 4 所示, 来自恒星 A

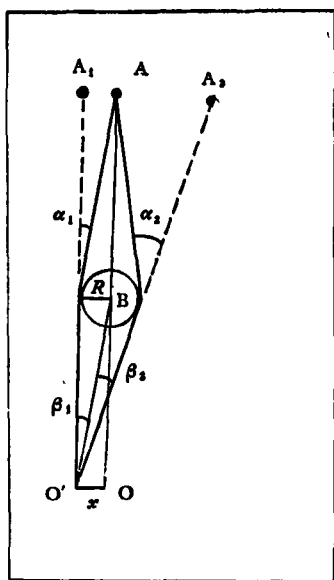


图 4

的光线通过另一恒星 B 的引力场, 在 \overline{AB} 延长线很远一点 O 附近有一观测者 O' , $\overline{OO'} = x$ 。如果恒星 B 的半径为 R , 根据广义相对论, 掠过 B 表面的光线要偏转角度 α 。假定 $\overline{AB} \gg \overline{BO} \gg x$, 当 $x \neq 0$ 时, 观测者将看到恒星 A 的两个像 A_1 和 A_2 ; 当 $x = 0$ 时, 他将看到一个以 B 为圆心、角径为 β 的圆环:

$$\beta = \sqrt{\alpha R/D},$$

式中, $D = \overline{BO}$ 。

A 像的亮度将放大 q 倍:

$$q = (l/x) \{ [1 + (x^2/2l^2)] / \sqrt{1 + (x^2/4l^2)} \}.$$

式中, $l = \sqrt{\alpha R D}$ 。因 $\alpha R = 4GM/c^2$ 是个常

数, 所以 $l \sim \sqrt{D}$ 。由于 $D \gg x$, x^2/l^2 可忽略, 于是

$$q = l/x.$$

在作了这些计算后, 爱因斯坦悲观地认为, 没有希望直接观测到成亮环的现象。因为, 首先我们处于两颗恒星连线上的几率是很小的; 其次, 观测仪器的分辨率达不到分辨 β 的要求。至于观测到两个像的机会估计也不大。爱因斯坦称这是非常稀有的效应。

在访问爱因斯坦的同时, 曼德尔还把自己的想法告诉兹沃赖金 (V. K. Zworykin), 后者又转告兹维基, 这位瑞士著名的天文学家对此进行了计算。计算表明^[5], 河外星系产生引力透镜效应的几率要比恒星的大得多。其理由是, 一些大质量、高密度的星云可能偏转光线达半弧分之大; 与恒星相比, 星系还有清晰的视面积。兹维基得到的放大率 q 可高达 100, 相当于视星等增加 5 等。

在三十年代, 确定河外星系质量问题正陷于困境, 一方面, 根据星系的光度和质光比求得其光度质量在 $10^9 M_{\odot}$ 量级; 另一方面, 根据维里定律求得星系的动力学质量在 $10^{11} M_{\odot}$ 量级。兹维基指出, 引力透镜效应提供一个测定河外星系真实质量的可靠途径, 所以星系起引力透镜作用更令人感兴趣。他还指出, 在恒星中, 中子星这种质量大、半径小的天体更易起透镜作用。

苏联科学院院士基霍夫对这个问题也很感兴趣。1935 年夏他开始收集这方面的文献资料, 发现还没有作过定量的计算。于是, 他独自进行了计算。1936 年 1 月在普尔柯夫 (Пулково) 会议上作了专题报告, 随后在苏联科学院通报上发表了她的计算结果。

美国天文学会会长、普林斯顿大学天文系主任兼天文台台长拉塞尔 (H. N. Russell) 1937 年对掩星的相对论效应进行了讨论: 在食分较大时, 出现较远恒星的两个像, 全食时出现环形象。

由于没有找到观测证据以及受战争的影响, 在四十年代, 对这个问题的研究兴趣逐渐淡

漠了下来。到五十年代，又有一些学者对此进行研究。

在六十年代，对点源引力场的透镜作用研究得比较成熟。1964年里弗斯代尔^[6]和利伯斯^[7]详细讨论了引力透镜的成像规律，他们的工作在以后的研究中被经常引用。

1963年人们发现了类星体，这是一种距离我们十分遥远的天体，它们的体积很小，辐射的能量却很大，在解释它们的产能机制时人们碰到了困难。1965年有人首次把类星体与引力透镜效应联系起来。在美国天文学会第119次年会上，伊利诺斯大学的巴诺西（Barnothy）报告说，类星体并不是什么宇宙中特殊的成员，而是比较亮的致密天体，它们的光受到引力透镜的作用而会聚成像，从而增加了亮度。

巴诺西等人的观点^[8]得到斯密特（M. Schmidt）的支持，他是类星体的发现人之一；但也遭到不少人反对。席尔瓦（L.N.K. De Silva）在1970年指出，如果认为类星体是赛弗特星系核通过引力透镜成的像，那么，对任一给定的赛弗特星系，根据目前可能的中介天体数目，最多只能有 3.3×10^{-7} 个赛弗南星系成像，即成为我们目前观测到的类星体。而根据伏库勒（Vaucouleurs）估计，类星体与赛弗特星系数目之比却有 10^{-4} ，这是目前所公认的估计。萨尼特（N. Sanitt）1971年也发表文章，用各种宇宙模型计算了引力透镜的空间密度随红移的变化，结果表明，除非宇宙中大部分质量以暗的致密天体形式存在，否则有许多类星体必定不是引力透镜的像。

1972年，巴诺西等指出，应考虑起透镜作用的物质有许多是隐匿质量，那么席尔瓦等人的计算就有问题。

在七十年代，引力透镜的研究更加深入。

1973年布拉萨等人讨论了球状透明引力源的引力透镜效应^[9]。在这种情况下，从遥远天体射来的光线，不仅有通过球状天体近旁偏转成像的，还有穿过这个天体成像的。这种透镜的成像情况要比点状透镜复杂，成的像也不止两个。显然，这比点源引力场要更接近宇宙

物理

中天体的实际情况。1975年，布拉萨等人对一般形状的透明透镜成像规律作了进一步讨论。布拉萨等计算了椭圆星系和旋涡星系的透明引力透镜，得到放大率高达 10^3 量级，成的像也不止两个^[11]。

图5可简要地说明为什么透明透镜可成两

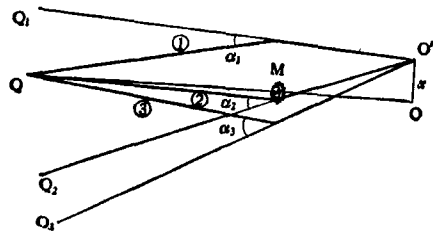


图 5

个以上的像，光束②穿过透镜，受到两侧星系质量的吸引，偏转角 α_2 小一点；光束③在星系外掠过，受整个星系质量的吸引，偏转角 α_3 可能大一些；连同光束①共成三个像。如考虑到透镜的不均匀性，可以形成更多的像。

三、观测证据

1979年3月29日，英国焦德雷尔班克射电天文台的沃尔什（Walsh）等人，利用美国基特峰国立天文台的2.1米光学望远镜，在赤经9时57分、赤纬 $+56^\circ 1'$ 的位置上发现了一对相距5.7角秒的类星体 0957 + 561A、B^[12]，它们的亮度差不多，星等都是17等，光谱中有相同的发射线系，谱线的宽度和强度相同，发射线红移都是1.41，吸收线红移也非常接近，约1.39。

如果它们谱线的红移确是宇宙学效应的話，就说明这两个类星体的退行速度将达到光速的70.7%，即 $v = 21$ 万公里/秒。若采用标准宇宙模型，离我们远达百亿光年，据它们之间的角距离可知，它们彼此相距几十万光年。

当时发现的类星体约1500颗，按全天空平均分布计，约每30平方度中只有1颗。然而，居然有这么两颗类星体，它们相距仅5.7角秒，它们不仅离开我们的距离相同，而且以同样巨

大的速度一起离我们而去;从谱线的特点可知,它们有相近的物理化学环境,因此,它们不会是毫无关系的两颗类星体偶然碰到一起。

这里有两种可能,(1)它们是双类星体系统;(2)它们是一个类星体的两个像,即它们就是我们寻找已久的引力透镜效应。

已知银河系中的恒星约有 1/3 以上是双星或聚星系统,因此,在沃尔什等人发现这对类星体后,有人认为,这可能是一个双类星体系统,它们有相同的起源和演化过程,所以它们物理化学环境相近就不足为奇了。

给这种观点以致命打击的是,这对类星体吸收线红移非常接近。美国霍普金斯山天文台的小查菲(Chaffee)指出,如果这是一个双类星体系统的话,它们的发射光谱相似是可以理解的,但它们吸收线红移却不可能如此接近。

产生类星体吸收线的原因是,从类星体发出的光被它与观测者之间温度较低的气体云吸收所致,而冷气云的情况一般认为存在下述三种情况:(1)由类星体爆发时所抛出的物质形成的;(2)宇宙大爆炸后残留下来的弥漫物质;(3)包围该类星体的星系周围的气体包层。

对于由类星体抛出的物质所形成的冷气体云来说,如果它是由双类星体系统中一个 A 抛出来的,那么,如图 6 所示,所抛出的物质将以

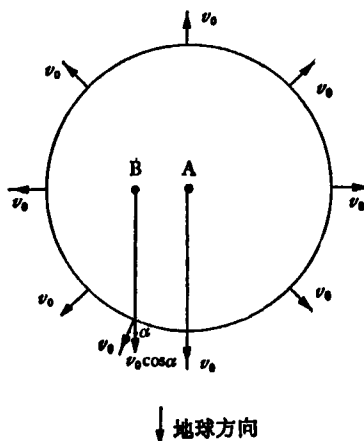


图 6

A 为球心对称地向四周膨胀,形成一个球面气壳。设气壳的膨胀速度为 v_0 ,从地球上观测到 A 的吸收线红移对应的速度为 $v - v_0$ (v 是类

星体发射线红移对应的退行速度);观测到 B 的吸收线红移对应的速度为 $v - v_0 \cos \alpha$ 。因 $v_0 \cos \alpha < v_0$,所以 B 的吸收线红移应大于 A 的吸收线红移值。除非抛出的气云质量非常多,球面半径非常大,以至球面已近似为平面了,才使两者的红移值相近。沃尔什等人当时测得 A 和 B 的吸收线红移的差值约对应 150 公里/秒,这个速度要求类星体抛出 10^{12} 个太阳质量,须花费 10^{61} 尔格能量才行。以后测得 $v_0 \cos \alpha - v_0 = 15$ 公里/秒,则要求 A 抛出的质量更多,花费的能量更大。所以认为冷气体云是一个类星体抛出来的说法就更站不住脚了。

那么,会不会是其中一个类星体恰巧向地球方向抛出一块小的气体云呢?从两颗类星体射来的光均穿过这块气体云,从而产生相同红移的吸收线。问题是这块气体云决不会只有直线运动,而没有转动等复杂运动。如果有其他运动,由于它离开双类星体系统很近,相距几十万光年的两点运动情况就不会完全一样,得到的吸收线红移就不同。显然,要求射向类星体 A、B 视线和这块小云相交的两点的运动速度完全一样是太难得又太巧了。

如果在类星体和地球之间是大爆炸残留的弥漫气体,它的运动也将不是非常简单的,情况和上述差不多。

综上所述,认为这是由两个类星体组成的双类星体系统的说法难以成立了。于是还有一种可能:这两个类星体是某一个类星体通过引力透镜成的两个像而已。

要证明这是引力透镜效应的判据有几条:(1)如果能分辨其形状和结构,它们应相象;(2)两个类星体的谱不仅在光学波段相同,在其他波段也应相同;(3)它们在各个波段的辐射流量比、即辐射相对强弱程度应相同;(4)它们的光变情况应相关;(5)在类星体和观测者之间如能找到一个起透镜作用的天体,将是有力的证据。

从引力透镜的成像原理可知,如果这两个类星体亮度相同,那么 x (图 4) 应接近零。故最初人们在这两个类星体连线中间方向去寻找起透镜作用的天体,但没有找到。后来,加州理

工学院的杨等人^[10]，在偏离 A、B 连线中点靠近 B 像处发现一个椭圆星系，在它周围还有一些亮度较弱的星系，组成一个星系团。这个椭圆星系的发射线红移约 0.39，离我们约几十亿光年，正在离 0957 + 561A、B 的一半距离。这个星系和 B 像靠得非常近，甚至有一部分有重叠。对于这个星系，我们不再能简单地用点状引力透镜公式，而要用透明透镜的计算。所成的像也不再是两个，而可能是多个。

对于第一、二两点，除最初的论文报道说它们的光谱相同外，亚利桑那大学的韦曼 (Weymann) 等人的工作也证实了这点，至于它们的形状和结构，光学波段分辨不出。在射电波段，英国卡文迪许实验室的普利 (Pooley) 等人，在剑桥用 5 千米综合孔径射电望远镜得到了频率为 5 兆赫的射电图，分辨出它们的射电结构，发现有四个子源，其中两个子源位置和 A、B 光学位置重合。美国麻省理工学院的格林菲尔德等^[11]人，用美国国立射电天文台的甚大阵射电望远镜，得到波长为 6 厘米的射电图，发现它们有五个射电子源 (图 7)，北边一个子源 A 和南边一个子源 B 的形状相似，位置也与光学像重合。但子源 A 有一个延伸结构，达 12 角秒长，可分辨出 C、D、E 三个子源；南边的子源 B 却没有相应的延伸结构。用点状引力透镜当然无法解释这个发现，而如用透明透镜效应来考虑，则问题就不难解决。原来，在视线方向，真实类星体中与 A 对应的部分，离这个椭圆星系比较近，所以有两个像 A、B，而与 C、D、E 对应部分，离这个椭圆星系比较远，超出透镜作用范围，所以不产生两个像。A 的延伸结构 C、D、E 可认为是几乎受到偏转的射电辐射斑。

对第三点，在可见光和射电波段，已观测到它们明暗、强弱程度是大致相同的。对紫外辐射，靠地面难以得到正确的观测结果，因为大气层的吸收作用很厉害。英国卢瑟福实验室的冈德哈莱克等人^[12]，利用在大气层外的人造卫星观测资料证明，两者在紫外波段的流量比与可见光区域相同，紫外谱也大致相同。在红外波段，最初发现，B 的红外辐射要比 A 像强。由于

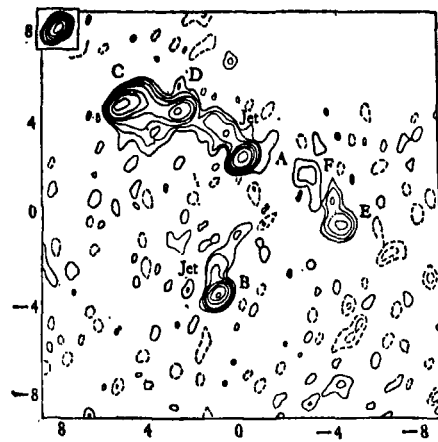


图 7

透镜星系一部分与 B 像重叠，所以 B 像的红外辐射包括了星系的一部分贡献，计算表明，把星系的贡献扣除，两像红外部分的流量比与其他部分就一样了。

这里要说明一下，星系比类星体暗，温度低，所以红外辐射强，红外部分的贡献远大于可见光与紫外部分。

还有个问题，既然星系偏离 A、B 连线中心，A、B 亮度就不应该一样亮，B 应比 A 暗。原来，类星体的光线通过这个透明透镜，光学部分分成三个像，北边是一个，南边是两个，由于这两个像靠得很近，望远镜分辨不出来，所以这两个弱像的总亮度就与北边的 A 像相同了。

关于第四点，由于两个像是同一类星体产生的，那么类星体的光度变化时，两个像的光度应有相应的变化，可是观测发现它们光变并不同位相。戈特研究指出，两个像的光变是关联的，只是因为两个像的光传到地球上几光月或几光年的程差，所以不同步。有人提出，通过长期的光变可测出相关系数 D ，如两个像是同一源产生的，则理论上 D 应为 1。

至此，可以认为类星体 0957 + 561A、B 确是引力透镜效应的成像结果。

四、研究进展

在第一个宇宙引力透镜发现之后，天文学

家们除继续深入观测研究这个实例,了解到其透镜星系是由一些小质量的恒星 ($4 \times 10^{-4} \sim 0.1 M_{\odot}$) 所组成的外,还注意寻找新的实例. 韦曼 (R.J. Weymann) 等人用霍普金斯山的 2.3 米望远镜寻找一些相距很近,光谱相似的类星体,在赤经 11 时 15 分,赤纬 $+08^{\circ}$ 发现三个靠得很近的类星体,定名为 PG1115 + 08A、B、C,它们的红移都是 1.722,视星等都是 15.8 等,光谱也相似. 经研究,他们认为这是一个引力透镜产生的 3 个像. 以后,他们用了一种新的方法对这三个孪生类星体进行研究,发现了 5 个像,即这是个五重类星体.

1981 年美国宾夕法尼亚州立大学的威德门 (Weedman) 又发现了两个靠得很近的类星体,它们红移分别为 2.15 ± 0.005 和 2.147 ± 0.005 ,视星等分别为 19.5 等和 21 等,它们被证认为第三个引力透镜效应.

用引力透镜效应解释类星体的本原也是研究的一个重点. 统计研究表明,一直到红移 $z = 2$ 附近,类星体的数密度是随着距离的增加而增加. 以前把这解释为演化效应,即类星体是宇宙早期的“产品”(红移大的类星体多). 如从引力透镜效应来解释,越远的类星体成像几率越大,且透镜效应使类星体的亮度放大了,所以某一绝对星等的类星体数密度随 z 增大而增加. 此外,观测发现,类星体和星系成协现象之多,远远超出随机分布的几率,如采纳巴诺西的观点,类星体是赛弗特星系被引力透镜(星系)成的像^[13],那么类星体与星系成协就不奇怪了.

当然,用引力透镜来解释类星体也还存在不少问题:(1) 已发现的类星体超过 2000 颗,但找到中介星系的只有三个;(2) 即使考虑类星体的演化效应,保守些估计,起透镜作用的天体数目也很大,如果假定它们是暗天体,那么,宇宙中的隐匿质量又将多得使天文学家为难;(3) 引力透镜的放大率只有特殊情况下才达几百倍,通常只有几倍,这对类星体产能问题不利;(4) 透明透镜可成两个以上的像,可是绝大多数类星体是单独存在的.

有人考虑,起透镜作用的可能并不是中介

星系,而是包围星系核的透明晕,如鲁滨在进行 21 厘米高分辨率的观测中发现,星系大部分质量以晕的形式存在^[14]. 至于中微子晕的存在也可从恒星谱线的频移得到证实. 在有实验表明中微子具有不为零的静止质量后,不少学者认为,有可能存在中微子天体^[15-17],它们或者由简并中微子组成,或是早期宇宙中形成的塌缩中微子团. 中微子天体收缩时可夹带通常物质,于是在透明的中微子天体中可能有活动星系核^[18],中微子天体对其中的活动星系核起透镜作用. 计算表明,在简并中微子度规下,在个别位置上,中微子天体内部的光源亮度可放大 800 倍以上,且有较大红移^[19]. 最近,有人讨论了透明球内光源运动情况,发现像的速度正比于放大倍数,于是在放大率大的位置上,有可能看到像超光速运动的现象,这可能是解释近年来观测到类星体 3C273、3C279 等射电子源超光速分离的一条途径.

在文献调研过程中,得到上海天文台曹恒兴同志的帮助,谨致谢意!

参 考 文 献

- [1] D. Walsh et al., *Nature*, 279(1979), 381.
- [2] O. J. Lodge, *Nature*, 104(1919), 354.
- [3] A. S. Eddington, *Space Time and Gravitation*, Cambridge University Press, (1920), 134.
- [4] A. Einstein, *Science*, 84(1936), 506.
- [5] F. Zwicky, *Physical Review*, 51(1937), 290.
- [6] S. Refsdal, *Monthly Notices Roy. Astro. Soc.*, 128(1964), 295.
- [7] S. Leibes, *Physical Review*, 133(1964), 835.
- [8] M. F. Barnothy, J. M. Barnothy, *The Astronomical Journal*, 71(1966), 155.
- [9] R. R. Bourassa et al., *The Astrophysical Journal*, 185(1973), 747; 195(1975), 13.
- [10] P. Young et al., *The Astrophysical Journal*, 241(1980), 507.
- [11] P. E. Greenfield et al., *Science*, 208(1979), 716.
- [12] P. M. Gondhaleker et al., *Nature*, 285(1980), 461.
- [13] C. R. Canizares, *Nature*, 291(1981), 620.
- [14] V. C. Rubin et al., *The Astrophysical Journal*, 242(1980), L135.
- [15] F. Reines et al., *Phys. Rev. Lett.*, 45(1980), 1309.
- [16] 高建功, R. Ruffini, 天体物理学报, 1(1981), 19.
- [17] 庆承瑞等, *Commun. Theor. Phys.*, 1(1982), 221.
- [18] 陆焱, 方励之, 物理学进展, 2(1982), 67.
- [19] 须重明等, *Astro. Astrophys.*, (1983) (预印本).