

宇宙中的引力透镜现象

武向平*

(中国科学院北京天文台)

提 要

本文评述了近十年来所发现的引力透镜事例及其理论解释,讨论了利用引力透镜现象研究宇宙大尺度结构、星系结构、类星体性质、暗物质性质及宇宙弦特性等一系列问题,展示了引力透镜效应这一活跃研究领域之全貌。

一、引 言

自1979年第一对引力透镜类星体的发现以来已经有近10年时间了。其间,大约共出现了近30个涉及引力透镜的事件(见表1),包括最近两年发现的五个光弧事例与两个Einstein环。到目前,可以确定的引力透镜类星体系统为四个,另有六个为候选者,其余为有争议的系统。关于引力透镜理论,其发展要比事例发现本身迅速得多,我们目前已经具有了一套比较完整的涉及各种透镜天体的成像规律。除了建立出各个透镜系统的合理模型外,还从引力透镜的事件中,获得了有关宇宙学的重要信息,例如, H_0 、 Ω 的确定**、暗物质的构成、微波背景辐射的各向同性、宇宙弦的性质等等,它给我们开辟了一条一般探测手段所不及的研究宇宙的新途径。甚至,有人把它喻为最理想的天文望远镜。有时,它的分辨率会比任何人造望远镜高出许多量级^[1],也许,只有靠它,才可能最终研究类星体的结构^[2]。

近几年间,专门讨论引力透镜现象的国际会议召开过两次:Quasars and Gravitational Lenses (1983)和Gravitational Lenses (1988),而在许多其他会议中,引力透镜现象亦占有相当大的比重,例如,IAU Symposium 117、119、124, 13th Texas Symposium等等,这些都足以说明引力透镜现象的重要性。可以预料,今后的十年,引力透镜理论将会取得巨大的发展,新的透镜事例会大量出现,借助于它来探测宇宙已成为一种必备的研究手段。

二、观测事例分析

目前已有的引力透镜观测事例可以分为四类。第一类即满足所谓引力透镜系统的判断标

* 中国科学院理论物理研究所博士后。

1988年12月20日收到。

1989年7月13日收到修改稿。

** H_0 、 Ω 分别为Hubble常数及宇宙质量密度因子。

准：多重像、各像有完全相同的光谱特征、证认出可以做为中介天体的透镜物体，现仅有 4 个引力透镜类星体系统符合这一标准，它们是(见表 1)0957+561、2016+112、1115+080 与 2237+0305。第二类为引力透镜类星体候选系统。它们有的尚未发现偏折天体，如 0023+171、1429-0053，有的尚不能确认偏折天体，如 1635+267、2345+007，有的观测波段尚非常有限或者没有建立出合理的透镜模型，这一类引力透镜类星体候选系统共 6 对。因此，乐观地说，我们现在共观测到引力透镜类星体系统 10 个。从表 1(a)中可见，它们具有以下共同特征^[8]：(1) 大的分离角从 $1''.8-7''.3$ ；(2) 大部分为偶数个像；(3) 几乎有一半没有发现透镜天体。第三类为有争议的系统，我们将逐一进行简要介绍。第四类为光弧系统，作者曾作了专题报道^[4]，这里仅概括它们于表 1(b)中，此处不再赘述。值得一提的是，最近，已经观测到了一个类星体的光环像^[5] MG 1654+1346，这是目前唯一已知光源与透镜天体距离的光弧透镜系统。

下面，我们就其他几个有争议的系统做一简单介绍。

1146+111 B、C 是已知分离最大的一对引力透镜类星体候选者，分离 $157''$ ，最早由 Hazard 等^[6,7]发现，1986 年被 Paczynski^[8]列为宇宙弦的透镜效应所产生的类星体对，Turner 等^[9]的观测又继续肯定了这一想法，Gott^[10]则从此事例中估计出宇宙弦的线质量密度 $\mu \geq 3 \times 10^{-5}$ 。有趣的是，Paczynski^[11]随后又推测产生这一大分离事件的是一个质量在 $10^{16}M$ 左右的黑洞。因为没有观测到偏折天体，出现各种推测是很自然的事，星系团作为中介天体也就有人做了考查^[12,13]。所有这些讨论都由于在 B、C 两像中最后观测到了红外和紫外谱的不同而受到冲击^[14,15]，因而，它们也许是一对物理双星而非同一类星体的双像^[16,17]。但是，B、C 两物体毕竟是在相当大的光谱范围内具有完全一致的谱线特征，且两物体光程差达 10^9 年之上，有谁能确信在这样大的时间尺度上类星体不发生小小的变化呢？^[18]这样，B、C 两像呈现小小的差异也就不足为奇了。看来，真正确定 1146+111B、C 是否是一对引力透镜类星体还有许多工作要做(参见评述文章^[19])。

3C324 是第一个被怀疑是星系与星系的透镜事件^[20]。由于在射电星系 3C324 ($Z=1.206$) 的光谱中证认出了另一些谱线，如 Ca II 的 H、K 吸收线， H_{α} 吸收线和 [O II] 发射线，它们的红移值为 0.845，因此，这些谱线可能是位于 3C324 前方与视线接近的星系所产生。因为前方星系作为透镜天体之增亮作用，使得在它背后位于红移 1.206 处的星系 3C324 被观测到。

1042+178 由 Hewitt 等^[21]列出为一个透镜候选天体，它是一个位于红移 0.921 处的射电源，由 4 个子源近似组成平行四边形，其间分离约 $1''$ ，也许，这是一个由单个星系产生的透镜现象。表 1(a)中的射电源 MG0414+0534 亦与此情形类似。

0846+51WI 被报告是一个 BL Lac 天体^[22]，但它同时又是一颗巨变星，曾经观测到它在一月内亮度突然增亮 4 等，随后在两天内减弱一个多星等。当它最亮时具有 BL Lac 天体的光谱，而它最暗时又像类星体，从其谱线证认给出 $Z=1.86$ ，在它 $12''$ 处有一红移为 0.072 的旋涡星系。这一现象被 Nottale^[23]解释为前方星系中恒星的引力透镜行为所致。

0107-025A、B 是一对位置相当接近的类星体，分离 $77''$ ，最初由 Surdej 等^[24]将其作为透镜天体的候选者。但是，随后的分光观测又表明^[25]，类星体 A 的红移是 0.956，而 B

的红移是 0.952，它们具有明显的红移差 $\Delta Z = 0.004$ ，依据引力透镜类星体判据，这又不像是同一类星体的双像。

除了列在表 1(a) 中的事例外，还有五重星系组 VV172^[26]，由 Hammer 和 Nottale^[27] 利用引力透镜效应给予解释。VV 172 由一个红移相同的四重星系(速度 $15765\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$) 与另一个红移不同的星系(速度 $36880\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$) 组成，如果前方的四重星系可做为引力透镜天体，则会使其后的星系增亮并使其视面积增大，从而使它与前方的四重星系一起被发现。

Keel^[28] 也报告了一个可能是引力透镜的现象。在对所有北天区类星体-星系对的长期监测分析中，处于 NGC 1073 的一个类星体 B301 具有显著的光变，这可以归因于星系中 1—10M_⊙ 质量的天体由于其与类星体和观测者的相对运动所致(见以下微透镜的讨论)。

概括起来，截止 1988 年底，据不完全统计，我们共涉及了近 30 个可能的引力透镜现象。当然，若我们把一些射电源的视超光速现象也归结为引力透镜所致的话，则引力透镜事例会更多。

表 1(a) 引力透镜天体(1979—1988)

名称 (发现时间)	像数	发现偏折天体	光源红移	透镜天体 红移	像间最大 分离角	主辅像 强度比	透镜证据	理论模型	引力透镜 可靠性	参考文献
0957+561 (1979)	2	已发现	1.405	0.36	6".1	1.4	光谱、射电、 时间差	已建立	强	[29-40]
1115+080 (1980)	4(5?)	发现(?)	1.722	(0.305)	2".7	<1.2	光谱	未建立	强	[35,41-46]
2237+0305 (1984)	4	已发现	1.695	0.0394	1".8	1.1	光谱	已建立	强	[54-58]
2016+112 (1983)	3	已发现	3.273	1.010	3".4	1.1—1.6	光谱、射电	已建立	强	[49-53]
1635+267 (1983)	2	发现(?)	1.961	(0.57)	3".8	4.4	光谱	(建立)	可能	[47,48]
2345+007 (1981)	2	(发现?)	2.152	(1.5)	7".3	3.7	光谱	未建立	可能	[35,59-63]
0023+171 (1987)	2	未发现	0.946	-	4".8	2.5	光谱	未建立	可能	[64]
0142-100 (1987)	2	已发现	2.719	0.49	2".2	7.6	光谱	未建立	可能	[65]
1120+019 (1988)	2	已发现	1.465	~0.6	6".5	$\Delta m_r = 4.42$	光谱	未建立	可能	[66]
1429-0053 (1988)	2	未发现	2.07	-	6".1	$\Delta m_r = 2.9$	光谱	未建立	可能	[67]
0107-025 (1985)	2	发现(?)	0.956	≥ 0.5	77"	$\Delta m = 0.6$	光谱	未建立	可疑	[23,24]
1146+111 (1986)	2	未发现	1.012	-	157"	~1	光谱	未建立	可疑	[5-8] [15,16]
3C324 (1986)	>2	已发现	1.206	0.845	~3"	1.7	光谱	未建立	可能	[19]
1042+178 (1986)	>2	未发现	0.921	-	~1"	-	射电	未建立	可疑	[20]
0846+51W1 (1986)	1	已发现	1.86	0.072	-	-	巨变天体	已建立	可疑	[21,22]
A00235+164 (1988)	1	已发现	0.94	0.52	-	-	流量巨变天体	未建立	可疑	[68]
PKS0537-441 (1988)	1	已发现	0.894	0.186	-	-	流量巨变天体	未建立	可疑	[69]
MG0414+0534 (1988)	3(4?)	未发现	-	-	-	~5	射电	已建立	可疑	[70]

表 1 (b) 巨型光弧系统

名称(发现时间)	像数	发现偏折天体	光源红移	透镜天体红移	弧长	弧半径	理论模型	注 释	参考文献
Abell 370 (1987)	1	已发现	(0.724)	0.373	150kpc	85kpc	已建立	$H_0=100\text{km/s/Mpc}$	[71-76]
2244-02 (1987)	1	已发现	-	0.328	~100kpc	~50kpc	已建立	$H_0=100\text{km/s/Mpc}$	[71,75-77]
Abell 963 (1988)	2	已发现	-	0.206	49kpc 14kpc	40kpc 26kpc	已建立	$H_0=50\text{km/s/Mpc}$	[79,80]
MG1131+0456 (1988)	1	-	-	-	-	-	已建立	Einstein环	[70,80]
CI2244-02	1	已发现	-	0.316	37-43kpc	70-80kpc	已建立	$H_0=100\text{km/s/Mpc}$	[77,82,83]
A2218 (1988)	≥ 2	已发现	-	0.171	70kpc 160kpc	130kpc 100kpc	未建立	$H_0=50\text{km/s/Mpc}$ 复杂系统	[84]
CI 0500-24 (1988)	1	已发现	-	0.316	43kpc	80kpc	已建立	$H_0=100\text{km/s/Mpc}$	[85]
MG 1654+1346	1	已发现	1.74	0.254	16kpc	2.6kpc	未建立	Einstein环	[5]

三、引力透镜几何

可以引起透镜现象的天体主要有五种类型：(1) 点状体或球体(硬模型)，如恒星、黑洞等；(2) 具有一定质量分布的透明体系(软模型)；(3) 硬、软模型的混合体系，如星系既有介质又有恒星；(4) 直线宇宙弦；(5) 圈弦。我们概括这五种透镜天体的成像位形及光强放大率于表 2 中，并以图 1 绘出典型的点状体与直线宇宙弦的引力透镜成像几何。尽管它们均产生双像，但所不同的是，点状透镜天体所产生的背景光源的双像其亮度与形状均不相同^[86,87]，而直线弦则产生视亮度与形状完全相同的双像^[88,89]。另外，在这五种类型的透镜天体中，除了直线宇宙弦外，其他四种类型的天体都会使背景源产生圆环状的像，即 Einstein 环(可参见作者的另一评述报告^[4])。

表 2 引力透镜模型

模 型	点状(硬)	扩展体(软)	硬+软	直 线 弦	圈 弦
弯 曲 角	$4GM/c^2b$	$4\pi(\sigma_{11}/c)^2$	$h+s$	$8\pi\mu$	$8\pi\mu a/b$
像 数	2	奇数(~3)	任意	2	1-3
放 大 率	$A_+ - A_- = 1$	$A_+ > A_-$	$A_+ > A_-$	$A_+ = A_- = 1$	$A_+ > A_-$
像 形 状					

四、引力透镜类星体的解释

1. 大分离角问题

如果我们把所有透镜天体的质量归算为一个球体，则由于其产生的引力偏转角为 $4GM/$

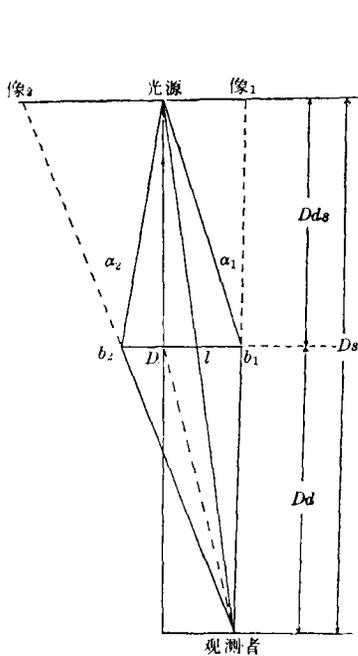


图 1(a) 点透镜的光路图

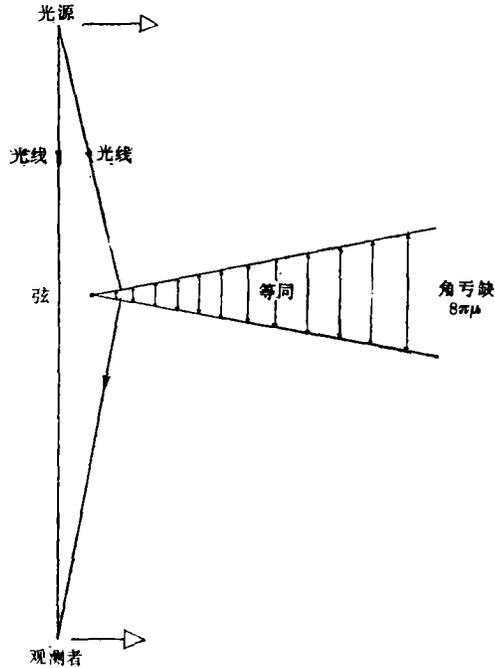


图 1(b) 直线宇宙弦的透镜几何

c^2b (M 为点透镜的质量, b 为碰撞参数或瞄准距离), 于是, 大的分离角首先意味着大质量透镜天体的存在。例如, 对于 $7''.3$ 这样的大分离事件, 透镜天体的质量应该大于 $10^{13}M_{\odot}$ 。^[83,80] 若我们以等温球模型描述星系, 那么大的分离角也意味着大的弥散速度 σ_{\parallel} 。从表 2 可见此时偏折角是 $4\pi(\sigma_{\parallel}/c)^2$, 因而, 要产生 $5''$ 的分离事件, 需要 $\sigma_{\parallel} \geq 800 \text{ km/s}$ 。^[90,91] 但对通常的亮星系, $\sigma_{\parallel} = 200 \text{ km/s}$ 。再之, 如果是几个星系组成的星系群或由星系团参与而组成的透镜天体, 也许会为解决大分离提供线索。然而, 星系团作为透镜天体的效率是非常低的, 也许它根本不可能成像^[9,13,92]。

事实上, 所有以上推测都暗示, 应该存在大质量的暗物质体系与星系相联系, 它们的贡献可能要比目前星系的光度质量高出一、二个量级。因此, 大分离事件实际上提供了暗物质存在的又一证据。

2. 奇数像问题

Burke^[83] 证明, 任何透明的引力透镜天体(中心质量密度有限)只能产生奇数个像, 可是, 目前的观测中仅有一、二例可见奇数像。可能的原因是: (1) 第三像要么接近星系中心而未能分辨出, 要么远离其他像而未被发现^[84]; (2) 由于星系中恒星可以作为微透镜, 其作用可使第三像亮度减弱以致未能观测到^[95-97]; (3) 目前较为满意的解释是, 如果星系的中心存在核, 例如在 50 pc 尺度内有 $10^{10}M_{\odot}$ 的核, 则可使第三像亮度减弱 10^3-10^4 倍^[88]。统计分析表明, 星系核不仅可以增大双像分离角^[89], 为大分离事件提供解释, 而且可使第三像亮度减弱, 使得在目前的几个引力透镜事例中只有一半左右可见其多重像^[100,101]。

3. 透镜天体问题

在10个引力透镜类星体事例中,观测到透镜天体的正好为一半。例如,对于 0957+561,我们可以清楚地看到前方的一组星系,它们无疑是一类星体对的偏折天体。可是,对于其他一半没有发现偏折天体的系统,即使在深度的 CCD 底片上,也难于发现任何可作为中介天体的星系。例如,对于 2345+007,在星等 $J=25.5$ 时,仍然难于见到处于两像间的任何星系,目前虽然在更深的搜寻中发现了一个 $Z=1.5$ 的星系,但无法确定它是否就是我们所寻找的天体^[88]。按照统计理论,对于 $Z>1$ 的引力透镜类星体系统,其透镜天体应该位于 $Z=0.5$ 左右^[102],若这期间存在较亮的星系,使用目前的设备是应该可以发现的。因此,我们现在除了用“暗物质”一词去描述不可见的透镜天体外,很难再有另外的推测。

五、引力透镜效应在宇宙学中的地位

1. Hubble 常数的测定

在宇宙尺度上的引力透镜现象中,其距离中包含有参数 H_0 ,于是,这可能会提供一种独立的确定 H_0 的方法。对于背景光源所产生的双像,由于其光束传播路径的不同^[88,103,104]和在透镜天体的引力势场中所受作用的不同^[105],两像光束到达观测者有一个时间差。

$$\Delta t = \Delta t_{\text{geom}} + \Delta t_{\text{grav}}$$

这里, Δt_{geom} 为几何光路产生的时差, Δt_{grav} 为引力势产生的时差。对于宇宙学距离上分离 $\Delta\theta$ 的双像,一般有^[93,106]

$$\Delta t \sim 1\text{yr}(\Delta\theta/3'')^2(50/H_0)$$

0957+561A、B 是研究得最为仔细的一对引力透镜类星体,对于合理的透镜天体模型, $\Delta t H_0$ 的表达式会表示得更加精确,表 3 是三组作者对于 $H_0 \Delta t$ 的估计,他们得到了基本相同的结果。有人曾报告^[110],0957+561A 曾经增亮了 0.3 等,过了 1.6 年,B 像也观测到了同样的变化。如果这次增亮能够归结为原来类星体本身的一次固有变化的话,那么利用 Bergest 和 Refsdal 的结果有

$$H_0 \lesssim 125 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$$

最可几值

$$H_0 \approx 75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$$

看起来,这与目前采用的 H_0 值完全相符。随后, Schild^[111]、Lehar 等^[112]及 Vanderrest 等^[113]在长达几年的光学及射电监测后,通过两像亮度的相关性分析给出, A、B 两像时间延迟 $\Delta t \approx 1.2-1.9$ 年。但是,目前的这些结论还只是非常粗糙的估计,特别是引力透镜事例如此稀少,加之透镜天体准确模拟的困难即透镜模型的唯一性问题, H_0 可否真的能够由这种方法精确定出来还值得怀疑^[114]。

2. 星系结构的探测

一般认为,引力透镜类星体对的产生者最可能为星系,宇宙学距离上质量 M 的天体可使背景类星体产生^[115]

$$\Delta\theta \sim 4''(M/10^{12}M_\odot)^{1/2}$$

的分离,目前的观测事例为 $2''-7''$,这意味着星系有很大的质量($\sim 10^{12}M_\odot$)。因而,引力

表 3 Hubble 常数的确定

作者(年)	模 型	结 果 $H\Delta t$
Dyer 和 Roeder (1980) ^[107]	星系团+星系(以点质量表示)	$= (0.03-1.7\text{yr}) \times (100\text{km} \cdot \text{s}^{-1}\text{Mpc}^{-1})$
Bergeest 和 Refsdal (1984) ^[108]	星系团+King 星系	$\leq 200\text{km} \cdot \text{s}^{-1}\text{Mpc}^{-1} \cdot \text{yr}$ $= 1.2\text{yr} \times 100\text{km} \cdot \text{s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ (最佳估计)
Falco 等 (1985) ^[109]	星系团+星系(等温球表示)	$0 \leq H\Delta t \leq (98 \pm 3)\text{km} \cdot \text{s}^{-1}\text{Mpc}^{-1} \cdot \text{yr}$

透镜类星体对可提供决定中介星系质量的一种独立方法。

若以等温球描写星系，则其作为透镜天体可使背景光源产生的双像分离角为^[104,115]

$$\Delta\theta = 8\pi(\sigma_{\parallel}/c)^2 \sim 0''.6(v_{\text{cir}}/200\text{km} \cdot \text{s}^{-1})^2$$

这里， v_{cir} 为圆周运动速度。由于 $\Delta\theta = 2''-7''$ ，这亦意味着星系中有很大的弥散速度或圆周运动速度。当然，这同时也暗示星系质量的超常。

另外，如前所述，由于在引力透镜类星体系统中很少观测到奇数像，这表明在星系中心很可能存在着核。利用已观测到的几个引力透镜类星体对的像间分离角分布关系，可以决定出星系核半径平均为(1) 0.1—0.2kpc(等温球+核模型)^[100]、(2) 1.5kpc($H_0 = 100\text{km/s/Mpc}$)(King 模型)^[101]。

3. 宇宙弦线质量密度的确定

直线宇宙弦可以产生等亮度的双像，其间分离为

$$\Delta\theta = 8\pi\mu \left[\cos\alpha - \frac{1 - (1 + Z_d)^{-1/2}}{1 - (1 + Z_s)^{-1/2}} \right]$$

其中 α 为弦与天球的交角， Z_d 为弦的红移， Z_s 为光源的红移($Z_s > Z_d$)。考查表1中所有引力透镜候选天体，分离最大的是1146+111B、C， $\Delta\theta = 157''$ 。由于没有发现中介透镜天体，且B、C亮度相近，故Gott^[10]把它们解释为直线宇宙弦的透镜现象，并由此得出欲产生157''的分离， $\mu \geq 3 \times 10^{-6}$ ， μ 为宇宙弦的线质量密度。

圈弦的透镜行为极其复杂，对于一种特殊情况——圈弦圆面垂直于视线，可以得出如下结论^[116]：(1) 圈内不产生透镜效应；(2) 圈外透镜行为与等质量质点于中心时效果相同。这两个特点导致了圈弦一般将产生弧状的像。如果Abell 370中发现的光弧^[73]是由圈弦产生，则可得出 $4 \times 10^{-6} \leq \mu \leq 6 \times 10^{-6}$ 。

如果宇宙弦是早期星系的胚胎，则要求 $\mu > 10^{-6}$ ^[117]，而微波背景的各向同性则限制了 $\mu < 10^{-6}$ ^[88,118]，由以上两例定出的 μ 值在观测上和理论上都是合理的。

4. 微型透镜

1979年，Chang和Refsdal^[119]考虑了组成星系的恒星对于由星系产生的引力透镜效应所带来的影响。尽管恒星的引力偏转极小，仅为星系的 10^{-6} ($M_{\text{star}}/M_{\text{galaxy}} \sim 10^{-12}$)，但观测者所接收到的光流量并不直接与偏折角有关，而是它相对于透镜平面坐标的导数，这个导数可能与星系产生的效应具有相同的量级。我们目前常称星系为宏观透镜或大透镜(macrolens)，而把其中的恒星、黑洞等称为微型透镜或小透镜(microlens, minilens)。

由于恒星在星系中的运动而导致的背景光源亮度变化可做为一个重要的引力透镜效应的特征。如果以临近星系(如 LMC、SMC、M31 和 M33)中的恒星为点光源,并把银河系做为引力透镜天体,则一颗处于 10kpc 距离上以 200km/s 绕银心旋转的恒星所引起的光源波动时标为^[97]

$$t_0 \approx 0.2 \text{yr} (M/M_\odot)^{1/2}$$

如果组成晕的暗物质质量为 $10^{-10}M_\odot$,则像 M31 或 M33 中的恒星会出现短到 1 分钟的光强闪烁。一个太阳质量的小透镜会使光强有两个月左右的变化。平均发生一次小透镜事件的时间间隔为

$$\langle \Delta t \rangle \approx \frac{1.5 \times 10^9}{N} t$$

其中, N 为监测的恒星数。若观测到了这种光源的亮度波动时间间隔,则可探测组成银晕的暗物质质量。

对于宇宙尺度上的引力透镜事件, Chang 和 Refsdal^[119]估计出小透镜的扰动 ($M = 1M_\odot$, $v_r = 1000\text{km/s}$, v_r 为星系中小透镜(如恒星)的运动速度)将引起背景光源亮度波动时标为

$$\Delta t \approx 30 \text{yr}$$

Gott^[120]使用等温星系模型和 0957 + 561 A, B 的参数得到

$$\Delta t \approx 44 \text{yr} \left(\frac{M_s}{M_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{430 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}}{\sigma_{II}} \right) \left(\frac{50}{H_0} \right)^{1/2}$$

例如,对于 $4 \times 10^{-4}M_\odot < M_s < 0.1M_\odot$ 的小质量透镜天体,在 1—14 年内会引起类星体亮度改变一倍。Canizares^[121]利用点透镜放大率概率分布函数得到

$$\Delta t = 35 \text{yr} \left(\frac{M_s}{M_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{300 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}}{v} \right) \left(\frac{100}{H_0} \right)^{1/2} g_t(Z) f(\mu_p)$$

其中 $g_t(Z)$ 对于 $Z = 0.5 - 3.5$ 取值 0.7—1.3, $f(\mu_p) = [2\mu_p(\mu_p^2 - 1)^{1/2} - 2(\mu_p^2 - 1)]^{-1/2}$, μ_p 为

放大率, v 为星系中小透镜(如恒星)的弥散速度。例如,对于 $0.01M_\odot < M_s < 10M_\odot$ 的小透镜事件,在 1—20 年间,类星体的亮度会改变一个星等。由 Δt 的表达式可见。

$$\Delta t \propto (M/M_\odot)^{1/2}$$

故质量越小的透镜更易被检测到。

图 2 是一个典型的星系作为透镜天体时,其内恒星运动 ($\sigma_{II} = 200\text{km/s}$) 造成的背景光源(以 2237 + 0305 为例)光强的变化曲线^[122]。我们可以看到,光源会由于微透镜的运动而引起非常大的视亮度无规波动。

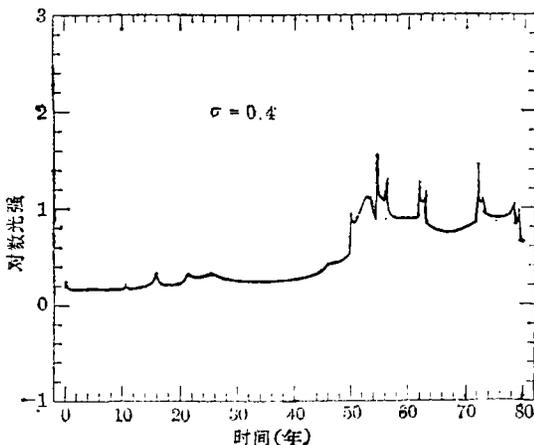


图 2 微型透镜扰动造成的背景光源视亮度变化的一条典型曲线

5. Ω 的确定

Ω 的引力透镜确定有两种方法:多重像方

法与光变方法。由于引力透镜效应, 宇宙学距离上的光源(类星体)将会产生双像与光变, 其分离角与光变时间为^[119,120,123]

$$\left. \begin{aligned} \Delta\theta &\sim 10^{-3''} (M/10^5 M_\odot)^{1/2} \\ \Delta t &\sim 1.4 \text{yr} (M/M_{\text{Jupiter}})^{1/2} \\ \tau(\text{几率}) &\sim 0.3 \Omega_{\text{lens}} \end{aligned} \right\}$$

对于大质量天体, 如 $M > 10^9 M_\odot$, 我们可以通过观测亚角秒级以上的背景光源多重像来确定 Ω 。如果我们有一个完备的类星体重重像巡天样本, 那么便可确定透镜几率 τ , 从而依据分离角 $\Delta\theta$ 给出某一质量范围的天体对宇宙总质量的贡献 Ω_{lens} 。但对于较小质量的天体, 它们所产生的双像分离角太小, 利用现有设备是无法分辨的。若注意到上节的讨论, 质量愈小, 更易引起背景光源的迅速光变。那么, 如果我们长期监测一批类星体的视亮度变化, 就可给出 Δt 和 Ω_{lens} 。表 4 列出了两种方法确定的 M 与 Ω 的范围。需要指出, 在用光变方法确定 Ω 时, 能够使用点状透镜天体模型的范围与背景光源的半径密切相关。一般, 一切质量 M 满足下式的天体均可起透镜作用, 即可用点状模型描写^[97,127]

$$M \geq \frac{c^2}{16G} R_s^2 \frac{D_a}{D_s D_z}$$

其中 R_s 为背景源的半径, D_a 、 D_s 、 D_z 分别为观测者到透镜天体、观测者到光源以及透镜天体到光源的角直径距离。对于 $R_s \sim 10^{-3} \text{pc}$ 的源(类星体连续辐射区), $M > 10^{-2} M_\odot$, 这即是利用引力透镜效应在宇宙学距离上目前所能涉及的最小下限质量。

表 4 宇宙密度因子 Ω 的限制

Ω	M_L/M_\odot	方法	文献
< 0.4	$10^{11}-10^{12}$	甚大阵巡天(角秒或亚角秒级透镜像)	Hewitt(1986) et al [124]
< 1.0	$0.01-200$	类星体连续(放大)	Canizares (1982, 1983)
< 0.1	$200-10^5$		[121, 125]
< 0.3	$10^{10}-10^{13}$	引力透镜类星体像间距离统计	Wu(武向平)(1988)[100, 101]
< 0.3	-	高准直射电源的寻找	Lonsdale (1989)[126]

从表 4 可见, 在 $0.1-10^5 M_\odot$, $10^{10}-10^{13} M_\odot$ 质量范围内, Ω 均不可能使宇宙封闭, 进一步的工作可使 Ω 定得更精确。因此, 欲探测下落不明的暗物质, 可选择的质量范围还有, $M < 10^{-1} M_\odot$, $10^5-10^{10} M_\odot$, $> 10^{13} M_\odot$ 。而 $3 \times 10^4 M_\odot \lesssim M \lesssim 3 \times 10^7 M_\odot$ 。很可能成为最佳选择区域^[128]。

六、引力透镜的宇宙学效应

1. 类星体的光度函数或类星体的计数会受到宇宙中各种天体的引力透镜效应的影响^[127,129-136], 特别是那些高亮度的类星体很可能是由引力透镜效应造成的, 因为即使是很小的质量体系($\sim 0.01 M_\odot$), 也足以放大 10^{15}cm 的背景致密光源。一种极端的猜测是, 所有类星体都是 Seyfert 星系核的引力透镜结果^[137-140]。当然, 这种观点目前看来并非完全正确,

至少所有类星体不可能全部是 Seyfert 星系核的像^[141-144]。

2. 某些类星体的光变和活动星系核的光变可以归结为宇宙中微型透镜天体、或光源、或观测者的运动所致。

3. 由于星系可以做为透镜天体加亮其附近背景上的光源,因此,某些星系周围类星体面密度超常可归结为星系的引力透镜行为所致^[106,121,132,145]。

4. Hubble 图上最亮的星系团也许是由前方星系团的透镜效应增亮所致^[146],某些遥远射电星系的超常亮度也可归为此因^[147],如表 1(a) 中的 3C324。

5. 宇宙早期微波背景辐射的微小涨落会由于微型透镜的作用而使其振幅减弱,以致呈现更加均匀与各向同性^[148]。因此,即使我们目前观测上发现微波背景辐射的各向异性小于 10^{-6} ,或将来发现比此值更低,并不能说明原初涨落甚小,这一点有利于宇宙的星系形成理论。

6. BL Lac 天体可能是某些类星体受到引力透镜作用而呈现出的另一形态^[149,150],表 1(a)中的 0846 + 51W1 即是典型的代表。

7. γ 射线的多重爆发及其完全相似的结构,可以归结为一次 γ 射线爆发的引力透镜多重像^[151,162]。例如 B1900 + 14, 于 1979 年 3 月 24 日、25 日和 27 日在几乎相同的位置上记录到了结构完全相同的三次爆发,如果在 γ 射线的路径上有一透镜天体,则不难造成这种现象。

顺便提及,更有甚者^[158]把超新星 1987A 爆发时设在日本的探测器所记录到的 11 个中微子事例分为两组,一组为 9 个到达时间在 1 秒之内,另一组为 3 个到达时间约为 10 秒。假如在中微子的路途上有一个 $10^6 M_{\odot}$ 质量的天体,则第二组事件就可能是由中介天体的透镜效应使原始爆发发生偏折,从而造成了达到时间上的延迟。

以上可见,引力透镜可以引起许多有趣的天体物理现象,其中大部分问题尚在探讨之中,但它的研究前景是很广阔的,它们涉及到很多重大的天文学事件,很难说引力透镜研究中不会出现“冷门”。

七、关于引力透镜现象的慎重考虑

1987 年 1 月,观测到一对分离几角秒的类星体对 1145-071A、B^[154],其可见光波段的光谱如图 3。做为一个从事引力透镜研究的工作者,只要看到这张光谱,也许立即会为又一个引力透镜类星体对的发现而兴奋。可是,射电观测表明,这两个类星体在厘米波段的强度之比至少为几百,而它们的光学波段强度比是 2.5。如果它们是同一类星体的双像,则在任何波段其强度比均应相同。于是,更合理的推测是,它们是一个物理双类星体系统而并非一个类星体的双像。

这一事例的发现提醒人们,我们在过去几年间所认可的几个引力透镜类星体对难道真是透镜效应所致吗?为什么不认为它们是真实的物理双层星呢?^[155]只要我们对比一下图 4 给出的 6 对被认作是引力透镜类星体对的光谱与图 3 中的情形,我们就会发现问题的严重性。的确,仅仅根据光谱,我们如何才能区分引力透镜的双像与物理上的双类星体系统呢?

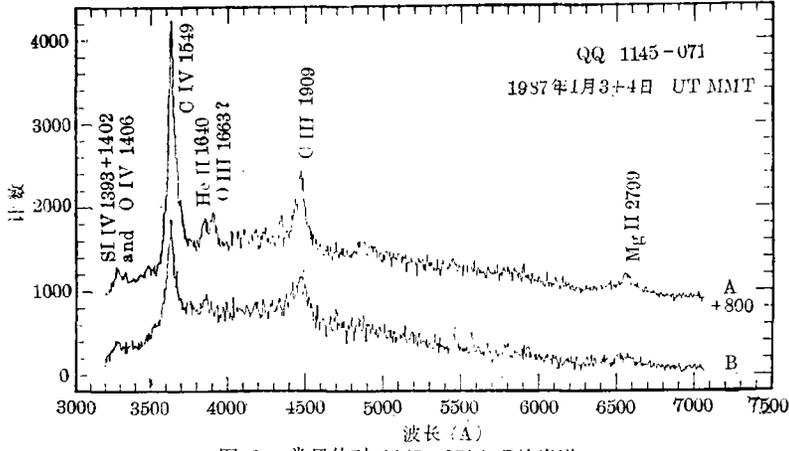


图 3 类星体对 1145-071A、B的光谱

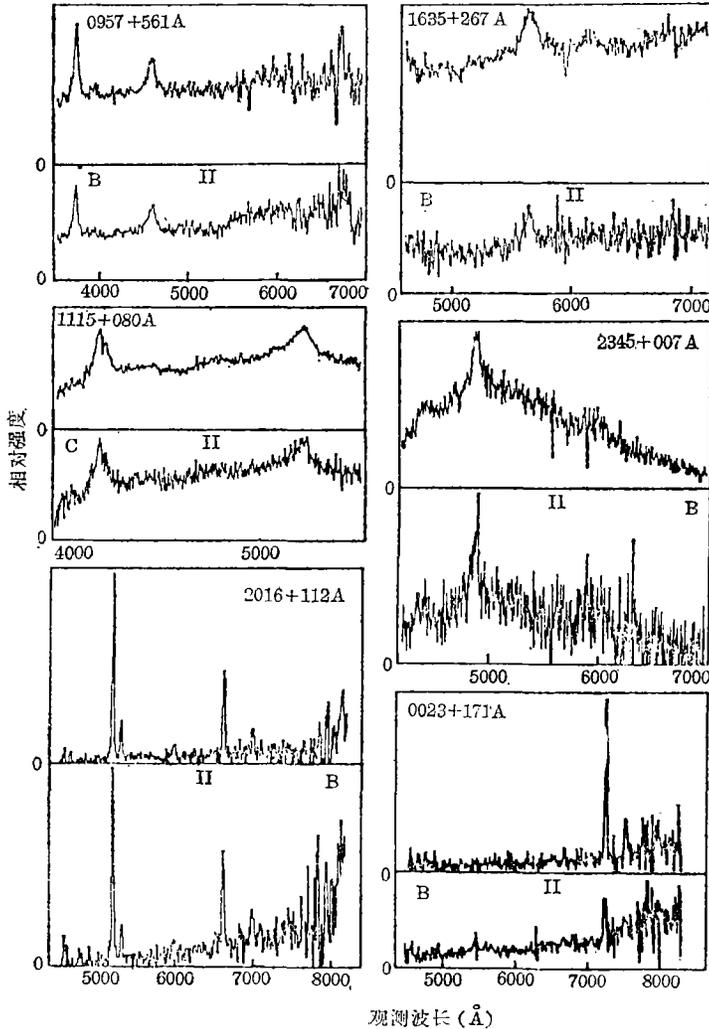


图 4 6 对引力透镜类星体的光谱

Turner 等人^[148]的工作很好地回答了这一个问题。图 5 是 1635 + 267 A、B 在 5000 Å — 9000 Å 的光谱。如果 A、B 是由同一类星体产生的双像,这时尽管 A、B 两像经历的光强放大率不同,但对 A(或 B)像任一波长上经历的放大率却是一样的。因此,只要把 B 像光谱乘一放大率因子后应与 A 像的光谱完全吻合。他们选择了 2.83 的因子去乘 B 的光谱,结果惊奇地发现两像光谱强度在所有观测到的波段内很吻合,图 6 是其中一个波段的拟合情况。如果 A、B 是一个双星系统,则 A、B 两类星体在这样宽的波段上光谱完全吻合是几乎不能的。这表明,1635 + 267 A、B 的确是一对引力透镜类星体。因而,确实存在着引力透镜类星体对。但是我们在表 1 中没有把 1635 + 267 A、B 列为引力透镜事例而仅把它作为了候选者,这是

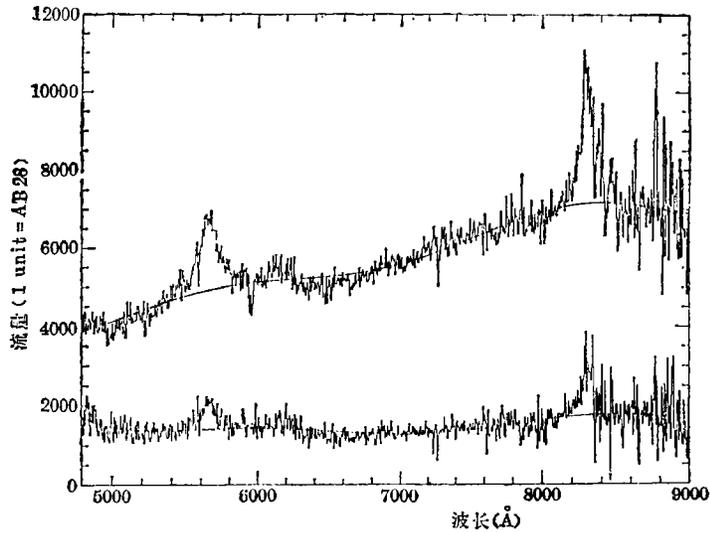


图 5 1635 + 267 A、B 的光谱

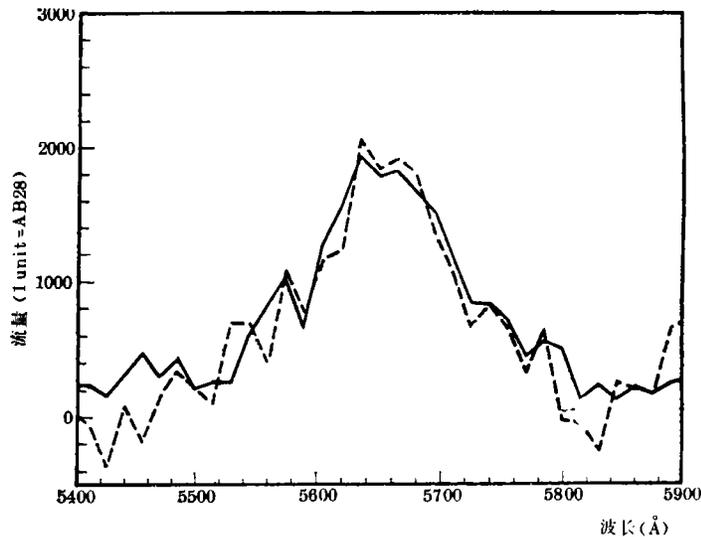


图 6 1635 + 267 A(实线)、B(虚线)强度拟合(B像强度乘以 2.83)

因为我们目前还没有能够最后确认它的偏折星系。

八、结 束 语

虽然从 Einstein 提出引力透镜效应至今已有半个世纪，但真正从实验上发现第一对引力透镜类星体事例仅仅才十年的历史。这十年间理论与观测的进展都是极其巨大的，我们已在引力透镜效应的研究上取得了很大成绩，可是我们又看到，迄今几乎没有取得确定的结论，甚至我们对于是否真正发现了透镜事例还持怀疑态度。因此，引力透镜效应是一个尚不成熟、正在起步、有待发展并富有前景的研究领域，它直接关系到迄今天体物理中一些重大课题的解决，如 H_0 的测定、宇宙大尺度结构的研究、星系与星系团结构的探测、微波背景辐射的各向异性的幅度、类星体的性质等等，特别是它开辟了为一般探测手段所不及的研究暗物质的新途径。

以下是有关引力透镜效应的主要研究课题与今后将要开展的工作：

- * 引力透镜的自动巡天，以发现更多的透镜事例；
- * 引力透镜系统的 VLBI 观测，以揭示其精细结构；
- * 对巨型光弧的寻找与解释；
- * 寻找透镜天体并确定暗物质的性质；
- * 在各种宇宙模式下建立合理的引力透镜成像理论；
- * 解释已观测到的引力透镜类星体的特性；
- * 长期监测已有透镜系统以确定双像时差决定 H_0 ；
- * 利用合理的透镜天体模型结合透镜事例决定星系质量；
- * 监测类星体光变决定致密天体质量与星晕成份；
- * 测定 Ω ；
- * 研究微型透镜对微波背景起伏的影响；
- * 利用类星体穿越微型透镜的临界曲线研究类星体结构；
- * 寻找与区分宇宙弦的双像决定 μ 及其数目；
- * 解释射电子源的视超光速现象；
- * 研究致密透镜天体对光绕射的可能性；
- * 研究两个引力透镜像间干涉的可能性；
- * 大光深的大量微型透镜天体透镜特性的模拟；
- * 一组星系透镜特性的模拟；
- * 非均匀宇宙中几何光学研究；
- * 解释 QSO、AGN 与 BL Lac[†] 天体的光变；
- * 解释星系与类星体成协；
- * 解释某些遥远射电源的超常亮度。

最后，让我们引用两位天体物理学家关于引力透镜效应的两句话来作为本文的结束吧：天文学家使用一束光去探测暗物质体系，正像核物理学家使用一束电子去研究原子核的

结构一样。

——Blandford, R. and Kochanek, C. S.^[16a]

星系的引力透镜能够作为最终的天文望远镜。

——McBreen, B. and Metcalfe, L.^[11]

愿更多的人都来投身于其中, 共同建造世界上最终的天文望远镜!

参 考 文 献

- [1] McBreen, B. and Metcalfe, L., *Nature*, 330 (1987), 348.
- [2] Grieger, B., Kayser, R. and Refsdal, S., *Astron. Astrophys.*, 194 (1988), 54.
- [3] Burke, B. F., in *Quasars*, ed. by G. Swarup and V. K. Kapahi, p. 517, (1986).
- [4] 武向平, *天文学进展*, 7 (1989), 107.
- [5] Langston, G. L. et al, Max-Planck-Institut Fur Radioastronomie, Preprint Series, No. 346, (1989).
- [6] Hazard, C., Arp, H. and Morton, D. C., *Nature*, 282 (1979), 271.
- [7] Arp, H. and Hazard, C., *Ap. J.*, 240 (1980), 726.
- [8] Paczynski, B., *Nature*, 319 (1986), 567.
- [9] Turner, E. L. et al., *Nature*, 321 (1986), 142.
- [10] Gott, J. R., *Nature*, 321 (1986), 420.
- [11] Paczynski, B., *Nature*, 321 (1986), 419.
- [12] Crawford, C. S., Fabian, A. C. and Rees, M. J., *Nature*, 323 (1986), 514.
- [13] Blandford, R. D. and Phinney, E. S., *Ap. J.*, 313 (1987), 28.
- [14] Shaver, P. A. and Cristiani, S., *Nature*, 321 (1986), 585.
- [15] Hucha, J. P., *Nature*, 323 (1986), 784.
- [16] Phinney, E. S. and Blandford, R. D., *Nature*, 321 (1986), 569.
- [17] Bahcall, J. N., Bahcall, N. A. and Schneider, D. P., *Nature*, 321 (1986), 515.
- [18] Canizares, C. R., in *Observational Cosmology*, ed. by A. Hewitt, G. Burbidge and L. Z. Fang, p. 729, (1987).
- [19] Turner, E. L., *ibid*, 755.
- [20] Hammer, F., Fevre, O. L. and Nottale, L., *ibid*, 751.
- [21] Hewitt, J. N. et al., *ibid*, 747.
- [22] Arp, H. et al, *Ap. J.*, 230 (1979), 68.
- [23] Nottale, L., *Astron. Astrophys.*, 157 (1986), 383.
- [24] Surdej, J. et al., in *Quasars and Gravitational Lenses*, ed. by J. P. Swings, p. 355, (1993).
- [25] Surdej, J. et al., *Astron. Astrophys.*, 161 (1986), 209.
- [26] Sargent, W. L. W., *Ap. J. Lett.*, 153 (1968), L135.
- [27] Hammer, F. and Nottale, L., *Astron. Astrophys.*, 155 (1986), 420.
- [28] Keel, W. C., in *Quasars and Gravitational Lenses*, ed. by J. P. Swings, p. 199, (1983).
- [29] Walsh, D., Carswell, R. F. and Weymann, R. J., *Nature*, 279 (1979), 381.
- [30] Adams, M. T. and Boroson, T. A., *Nature*, 282 (1979), 183.
- [31] Young, P. et al., *Ap. J.*, 241 (1980), 507.
- [32] Stockton, A., *Ap. J. Lett.*, 242 (1980), L141.
- [33] Young, P. et al., *Ap. J.*, 244 (1981), 736.
- [34] Young, P., *Ap. J.*, 244 (1981), 756.
- [35] Walsh, D., in *Quasars and Gravitational Lenses*, ed. by J. P. Swings, p. 106, (1983).
- [36] Florentin-Nielsen, R. Augustesen, K., *ibid*, 172.
- [37] Gorenstein, M. V. et al, *ibid*, 178.
- [38] Burke, B. F. et al., *ibid*, 203.
- [39] Roberts, D. H. et al, *Ap. J.*, 293 (1985), 356.
- [40] Greenfield, P. E., Roberts, D. H. and Burkey, B. F., *Ap. J.*, 293 (1985), 370.
- [41] Weymann, R. J. et al., *Nature*, 285 (1980), 641.
- [42] Young, P. et al., *Ap. J.*, 244 (1981), 723.
- [43] Vanderrriest, C. et al., in *Quasars and Gravitational Lenses*, ed. by J. P. Swings, p. 182, (1983).

- [44] Foy, R., Bonneau, D. and Blazit, A., *Astron. Astrophys.*, 149 (1985), L13.
- [45] Shaklan, S. B. and Hege, E. K., *Ap. J.*, 303 (1986), 605.
- [46] Henry, J. P. and Heasley, J. N., *Nature*, 321 (1986), 139.
- [47] Djorgovski, S. and Spinrad, H., *Ap. J. Lett.*, 282 (1984), L1.
- [48] Turner, E. L. et al, *Ap. J.*, (Preprint).
- [49] Lawrence, C. R. et al., *Science*, 223 (1984), 46.
- [50] Schneider, D. P. et al., *Ap. J.*, 294 (1985), 66.
- [51] Schneider, D. P. et al., *A. J.*, 91 (1986), 991.
- [52] Narasimha, D., Subramanian, K. and Chitre, S. M., *Ap. J.*, 315 (1987), 434.
- [53] Schneider, D. P. et al., *A. J.* 94 (1987), 12.
- [54] Huchra, J. et al., *A. J.*, 90 (1985), 691.
- [55] Tyson, J. A., in *Observational Cosmology*, ed. by A. Hewitt, G. Burbidge and L. Z. Fang, p. 551, (1987).
- [56] Yee, H. K. C., *A. J.*, 95 (1988), 1331.
- [57] Robertis, M. M. De and Yee, H. K. C., *Ap. J. Lett.*, 332 (1988), L49.
- [58] Schneider, D. P. et al., *A. J.*, 95 (1988), 1619.
- [59] Weedman, D. W. et al., *Ap. J. Lett.*, 255 (1982), L5.
- [60] Subramanian, K. et al., in *Quasars and Gravitational Lenses*, ed. by J. P. Swings, p. 78, (1983).
- [61] Sol, H. et al., *ibid*, 192.
- [62] Keel, W. C., *ibid*, 199.
- [63] Tyson, J. A. et al., *A. J.*, 91 (1986), 1274.
- [64] Hewitt, J. N. et al., *Ap. J.*, 321 (1987), 706.
- [65] Surdej, J. et al., *Nature*, 329 (1987), 695.
- [66] Meglan, G., and Djorgovski, S., *Ap. J.*, 338 (1989), L1.
- [67] Webster, R. L., and Hewitt, P. C., in *Gravitational Lenses, Lecture Notes in Physics*, ed. by J. M. Monan, J. N. Hewitt and K. Y. Lo, 330 (1989), 157.
- [68] Stickel, M., Fried, J. W. and Kuhr, H., *Astron. Astrophys.*, 198 (1988), L13.
- [69] Stickel, M., Fried, J. W. and Kuhr, H., *Astron. Astrophys.*, 206 (1988), L30.
- [70] Hewitt, J. N. et al., in *Gravitational Lenses, Lecture Notes in Physics*, ed. by J. M. Monan, J. N. Hewitt and K. Y. Lo, 330 (1989), 147.
- [71] Lynds, R., and Petrosian, V., *Bull. Am. astr. Soc.*, 18 (1986), 1014.
- [72] Soucail, G. et al., *Astron. Astrophys.*, 172 (1987), L14.
- [73] Soucail, G. et al., *Astron. Astrophys.*, 184 (1987), L7.
- [74] Soucail, G. et al., *IAU Circ.*, No 4482, (1987).
- [75] Miller, J. S. and Goodrich, R. W., *Nature*, 331 (1988), 685.
- [76] Lynds, R. and Petrosian, V., *Ap. J.*, 336 (1989), 1.
- [77] Petrosian, V., in *Gravitational Lenses, Lecture Notes in Physics*, ed. by J. M. Monan, J. N. Hewitt and K. Y. Lo, 330 (1989), 109.
- [78] Soucail, G., *ibid*, p. 127.
- [79] Lavery, R. J. and Henry, J. P., *Ap. J. Lett.*, 329 (1988), L21.
- [80] Lavery, R. J., in *Gravitational Lenses, Lecture Notes in Physics*, ed. by J. M. Monan, J. N. Hewitt and K. Y. Lo, 330 (1989), 134.
- [81] Hewitt, J. N. et al., *Nature*, 333 (1988), 537.
- [82] Giraud, E., *Ap. J. Lett.*, 334 (1988), L69.
- [83] Hammer, F. et al., *Astron. Astrophys.*, 208 (1989), L7.
- [84] Pello-Descayre, R. et al, *Astron. Astrophys.*, 190 (1988), L11.
- [85] Wambsganss, J. et al., *Ap. J. Lett.*, 337 (1989), L73.
- [86] Refsdal, S., *M. N. R. A. S.* 128 (1964), 295.
- [87] Liebes, S., *Phys. Rev.*, 133 (1964), B 835.
- [88] Gott, J. R., *Ap. J.*, 288 (1985), 422.
- [89] 武向平, 科学通报, 33 (1988), 1642.
- [90] Turner, E. L., in *Dark Matter in the Universe*, ed. by J. Kormendy and G. Knapp, p. 227, (1986).
- [91] Dekel, A. and Piran, T., *Ap. J. Lett.*, 315 (1987), L83.
- [92] Anderson, N. and Alcock, C., *Ap. J.*, 300 (1986), 56.
- [93] Burke, W. L., *Ap. J. Lett.*, 244 (1981), L1.
- [94] Narayan, R., Blandford, R. and Nityananda, R., *Nature*, 310 (1984), 112.

- [95] Chang, K. and Refsdal, S., *Astron. Astrophys.*, 132 (1984), 168.
- [96] Subramanian, K., Chitre, S. M. and Narasimha, D., *Ap. J.*, 289 (1985), 37.
- [97] Paczynski, B., *Ap. J.*, 304 (1986), 1.
- [98] Narasimha, D., Subramanian, K. and Chitre, S. M., *Nature*, 321 (1986), 45. also in *Quasars*, ed. by G. Swarup and V. K. Kapahi, p. 541, (1986).
- [99] Hinshaw, G. and Krauss, L. M., *Ap. J.*, 320 (1987), 468.
- [100] Wu, X. P. (武向平), *Astron. Astrophys.*, 214 (1989), 43.
- [101] 武向平, 天体物理学报, 9 (1989), 224.
- [102] Turner, E. L., Ostriker, J. P. Gott, and J. R., *Ap. J.*, 284 (1984), 1.
- [103] Refsdal, S., *M. N. R. A. S.*, 128 (1964), 307.
- [104] Borgeest, U. et al, in *Quasars and Gravitational Lenses*, ed. by J. P. Swings, p. 149, (1983).
- [105] Cooke, J. H. and Kantowski, R., *Ap. J. Lett.*, 195 (1975), L11.
- [106] Gott, J. R. and Gunn, J. E., *Ap. J. Lett.*, 190 (1974), L105.
- [107] Dyer, C. C. and Roeder, R. C., *Ap. J. Lett.*, 241 (1980), L133.
- [108] Borgeest, U. and Refsdal, S., *Astron. Astrophys.*, 141 (1984), 318.
- [109] Falco, E. E., Gorenstein, M. V. and Shapiro, I. I., *Ap. J. Lett.*, 289 (1985), L1.
- [110] Florentin-Nielsen, R. and Augustesen, K., *IAU. Circ.* № 3945.
- [111] Schild, R., in *Quasars*, ed. by G. Swarup and V. K. Kapahi p. 549, (1986).
- [112] Lehar, J. et al, in *Gravitational Lenses, Lecture Notes in Physics*, ed. by J. M. Monan, J. N. Hewitt and K. Y. Lo, 330 (1989), p. 84.
- [113] Vanderriest, C. et al, in *Gravitational Lenses, Lecture Notes in Physics* ed. by J. M. Monan, J. N. Hewitt and K. Y. Lo, 330 (1989), p. 90.
- [114] Alock, C. and Anderson, N., *Ap. J. Lett.*, 291 (1985), L29.
- [115] Gott, J. R., in *Dark Matter in the Universe*, ed. by J. Kormendy and G. Knapp, p. 219, (1986).
- [116] Wu, X. P. (武向平), in *Gravitational Lenses, Lecture Notes in Physics*, ed. by J. M. Monan, J. N. Hewitt and K. Y. Lo, 330 (1989), 140.
- [117] Vilenkin, A., *Phys. Rev. Lett.*, 46 (1981), 1169.
- [118] Kaiser, N. and Stebbins, A., *Nature*, 310 (1984), 391.
- [119] Chang, K. and Refsdal, S., *Nature*, 282 (1979), 561.
- [120] Gott, J. R., *Ap. J.*, 243 (1981), 140.
- [121] Canizares, C. R., *Ap. J.*, 263 (1982), 508.
- [122] Paczynski, B., *Ap. J.*, 301 (1986), 503.
- [123] Press, W. H. and Gunn, J. E., *Ap. J.*, 185 (1973), 397.
- [124] Hewitt, J. N. et al, in *Observational Cosmology*, ed. by A. Hewitt, G. Burbidge and L. Z. Fang, p. 747, (Reidel, Dordrecht) (1987).
- [125] Canizares, C. R., in *Quasars and Gravitational Lenses*, ed. by J. P. Swings, 126, (1983).
- [126] Lonsdale, C. J., in *Gravitational Lenses, Lecture Notes in Physics*, edited by J. M. Monan, J. N. Hewitt and K. Y. Lo, 330 (1989), 188.
- [127] Peacock, J. A., *M. N. R. A. S.*, 199 (1982), 987.
- [128] Subramanian, K. and Chitre, S. M., *Ap. J.*, 313 (1987), 13.
- [129] Turner, E. L., *Ap. J. Lett.*, 242 (1980), L135.
- [130] Tyson, J. A., *Ap. J. Lett.*, 248 (1981), L89.
- [131] Avni, Y., *Ap. J. Lett.*, 248 (1981), L95.
- [132] Vietri, M. and Ostriker, J. P., *Ap. J.*, 267 (1983), 488.
- [133] Vietri, M., *Ap. J.*, 293 (1983), 343.
- [134] Ostriker, J. P. and Vietri, M., *Ap. J.*, 300 (1986), 68.
- [135] Schneider, P., *Ap. J. Lett.*, 316 (1987), L7.
- [136] Schneider, P., *Astron. Astrophys.*, 183 (1983), 189.
- [137] Barnothy, J. M., *A. J.*, 70 (1965), 666.
- [138] Barnothy, J. and Barnothy, M. F., *Science*, 162 (1968), 348.
- [139] Barnothy, J. and Barnothy, M. F., *Bull. Amer. Astron. Soc.*, 3 (1971), 472.
- [140] Barnothy, J. and Barnothy, M. F., *Ap. J.*, 174 (1972), 477.
- [141] DE Silva, L. N. K., *Nature*, 228 (1970), 1180.
- [142] DE Silva, L. N. K., *Ap. J.*, 189 (1974), 177.
- [143] Setti, G. and Zamorani, G., *Astron. Astrophys.*, 118 (1983), L1.

- [144] Kayser, R. and Refsdal, S., *Astron. Astrophys.*, 197 (1988), 63.
[145] Schneider, P., *Ap. J. Lett.*, 300 (1986), L31.
[146] Hammer, F. and Nottale, L., *Astron. Astrophys.*, 167 (1986), 1.
[147] Hammer, F., Nottale, L. and Le fevre, O., *Astron. Astrophys.*, 169 (1986), L1.
[148] Kashlinsky, A., *Ap. J. Lett.*, 331 (1988), L1.
[149] Ostriker, J. P. and Vietri, M., *Nature*, 318 (1985), 446.
[150] Schneider, P. and Weiss, A., *Astron. Astrophys.*, 171 (1987), 49.
[151] Paczynski B., *Ap. J. Lett.*, 308 (1986), L43.
[152] Paczynski, B., *Ap. J. Lett.*, 317 (1987), L51.
[153] Barrow, J. D. and Subramanian, K., *Nature*, 327 (1987), 375.
[154] Djorgovski, S. et al, *Ap. J. Lett.*, 321 (1987), L17.
[155] Shaver, P. A., Wampler, E. J. and Cristiani, S., *Nature*, 327 (1987), 40.
[156] Blandford, R. D. and Kochanek, C. S., *Ap. J.*, 321 (1987), 658.

(责任编辑 刘金铭)

Gravitational Lenses in the Universe

Wu Xiangping

(Beijing Astronomical Observatory, Academia Sinica)

Abstract

Gravitational Lens systems or candidates discovered over past ten years were reviewed in present paper. The possibilities of using gravitational lensing effects to study large scale structure, galaxies, quasars, dark matter, cosmic string, etc. were discussed. It has been pointed out that gravitational lensing effect would play an important role in the detection of universe in the future.