

BL Lac 天体 Mark 421 中心黑洞质量的研究^{*}

张 雄¹⁾³⁾ 谢光中²⁾ 赵 刚¹⁾ 马 力³⁾ 白金明²⁾

¹⁾ 中国科学院北京天文台, 北京 100080)

²⁾ 中国科学院云南天文台, 昆明 650011)

³⁾ 云南师范大学物理系, 昆明 650092)

(1999 年 3 月 10 日收到, 1999 年 7 月 26 日收到修改稿)

观测到了 BL Lac 天体 Mark 421 在光学波段的短时标爆发. 在 26 min 的爆发期间内, Mark 421 从 $B = 15.76\text{mag}$ 到 $B = 14.32\text{mag}$ 迅速变化了 1.34mag . 更为有趣的是观测结果与 1996 年由 Gaidos 等观测到的 TeV γ 射线爆发的结果非常相似. 特别是在时标变化和光变曲线等方面两者有相同之处. 由上述观测数据结果可以得出, 爆发产生于相同的发射区域, 这个区域为 $R = 5.9 \times 10^{11}\text{m}$, 并由此推导出 Mark 421 中心黑洞质量为 $M = 3 \times 10^6 M_{\odot}$, 这对目前的 γ 辐射理论模型提出了新的挑战, 可以认为 Mark 421 的 TeV γ 射线来自于同步的康普顿辐射.

PACC: 9760L; 0420

1 引 言

快而振幅大的光变是 BL Lac 天体特有的性质, 显然这个性质是十分重要的, 因为根据光变特性, 可以对 BL Lac 天体的非热源的物理本质做出重要推断. 在 BL Lac 天体中, Mark 421 特别引人注目, 长期以来, 人们从可见光、红外到射电等波段对其进行监测, 资料非常丰富, 在光变研究方面观测资料更多, 由此我们用 Jurkevich 方法获得了其长周期光变为 22.4 a 的重要结果^[1]. 在短时标光变方面, 1983 年以前仅观测到时标为一年到几天的各种光变时标, 而小时量级的一直没有发现^[2]. 自 1983 年以来, 我们研究小组对 Mark 421 进行了长期监测, 将该项目研究工作向前推进了一大步, 先后发现了 1560 s 至几天量级的短时标光变结果^[3]. 近几年来, 随着观测技术手段的日益提高, 在 X 射线波段和 TeV γ 射线波段的观测资料也丰富起来. 并且 Mark 421 在 TeV γ 射线波段的短时标变化已经观测到^[4], 它的爆发时间大约为 3000 s, 爆发期间辐射流量变化大约增加了 20—25 倍. 这对 Mark 421 而言在 TeV 波段是目前观测到的最短时标的变化了. 根据这个结果 Gaidos 等提出在 Mark 421 中心有一个大质量黑洞, 它必然吸积周围的物质, 被吸积的物质先形成一

个绕黑洞旋转的吸积盘, 然后再逐渐落入黑洞, 为了检验黑洞模型, 探索激发源 Mark 421 的结构和物理过程, 研究在其他波段内相同或相似的短时标爆发及它们的相关性, 就显得十分重要. 我们研究了 X 射线、红外、射电等波段的历史光变资料. 相应的短时标爆发没有记录, 但在光学波段, 我们 1986 年 1 月 13 日用云南天文台一米望远镜加 CCD 系统的观测中, 获得的 Mark 421 在 $9 \times 10^3\text{s}$ 内有大振幅光变^[3]. 更为有趣的是我们获得的短时标大振幅光变曲线与 Gaidos 等 1996 年观测获得的 TeV γ 射线波段短时标辐射流量变化极为相似. 本文中我们讨论了这两个波段的短时标光变曲线, 给出了光学 B 波段的流量和 TeV γ 射线波段流量的短时标光变相关性分析, 用光学 B 波段的光变时标计算了辐射区域和中心黑洞质量, 由此获得了 Mark 421 TeV γ 射线的辐射机制.

2 Mark 421 的短时标光变及相关分析

1996 年 5 月 15 日, Gaidos 等获得了 TeV γ 射线的短时标爆发及流量变化曲线^[4], 1986 年 1 月 13 日我们用云南天文台 1 米望远镜获得了光学 B 波段的短时标光变^[3], 观测结果如表 1 所示, 光变曲线

^{*} 云南省自然科学基金(批准号: 97A017M)资助的课题.

如图 1 所示,在表 1 中光学 B 波段的爆发时间约为 2700 s, γ 射线波段爆发时间约为 3000 s(从相对流量的最小值变化至最大值).在实际观测中光学 B 波段每个相邻观测点的时间间隔为 300 至 540 s,TeV γ 射线波段每个相邻观测点的时间间隔为 480 至 540 s,由此,我们认为这两次爆发的短时标大小是相同的.

根据图 1 观测曲线,两者短时标光变的形状和振幅有些相似,我们作 TeV γ 射线流量和光学 B 星等的相关分析^[5],结果表明两者之间有较强的相关性,如图 2 所示.其相关系数 $R = -0.8578$,回归方

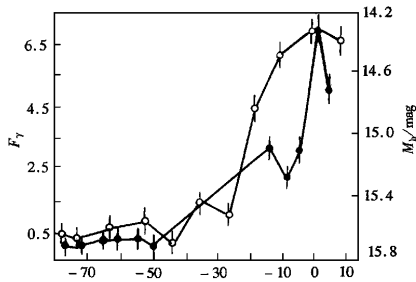


图 1 Mark 421 的光学和 TeV γ 射线流量光变曲线 空心圆圈表示光学波段数据,实心圆点表示 TeV γ 射线数据;左侧为 F_γ 流量,右侧为 B 星等;时间轴的原点取自光变曲线的最大值点

程为 $M_b = (15.569 \pm 0.12) - (0.207 \pm 0.04) F_\gamma$, 剩余方差为 $S = \pm 0.3$,显著性水平(chance probability) $P = 1.9 \times 10^{-4}$.

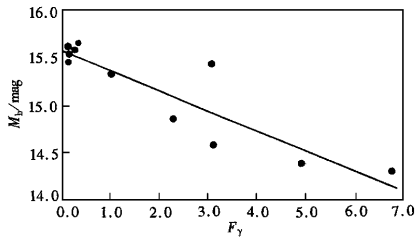


图 2 光学 B 星等与 TeV γ 射线流量之间的相关性

3 Mark 421 中心黑洞质量和中心核辐射区域的估算

3.1 Mark 421 中心黑洞质量的估算

设 Mark 421 的光度为 L ,寿命为 Δt ,在源内物质转换为辐射能的效率为 ϵ ,那么总质量 M 与 L , Δt 以及 ϵ 的关系为^[6]

$$M = L \Delta t / \epsilon c. \tag{1}$$

ϵ 可根据吸积盘理论来确定,如中心天体是非转动黑洞,其转换效率为^[7]

表 1 Mark 421 在光学 B 波段与 TeV γ 射线流量短时标光变观测结果

JD2446444 +	M_B/mag	R_{ms} 测量误差/%	UTC/h	$F_\gamma/(10^{-10} \text{ W/m}^2)$	R_{ms} 测量误差/%
0.382	15.55	0.06	3.79	0.1	0.2
0.388	15.56	0.10	3.86	0.05	0.2
0.395	15.58	0.01	3.95	0.22	0.3
0.402	15.53	0.05	4.02	0.2	0.3
0.408	15.69	0.06	4.10	0.3	0.3
0.414	15.41	0.02	4.19	0.05	0.2
0.421	15.55	0.05	4.80	3.1	0.8
0.426	15.81	0.07	4.89	2.2	0.7
0.432	14.49	0.02	4.95	3.0	0.8
0.439	14.32	0.12	5.03	6.7	1.6
0.445	14.39	0.12	5.12	4.8	1.4

注:JD为儒略日; M_b 为 B 星等值; R_{ms} 为对应 B 星等的测量误差;UTC为协调世界时; F_γ 为 γ 射线流量; R_{ms} 为对应 F_γ 的测量误差

$\epsilon = 0.05. \tag{2}$

若中心天体为一个转动的黑洞,其转换效率为

$$\epsilon = 0.3. \tag{3}$$

Δt 可以根据演化理论来确定,对于活动相的时间 Δt 按演化理论,不难理解为所有星系的演化都可

能要经过一个活动相.而统计结果表明,活动星系约占整个星系的百分之一左右,因此,我们有^[6]

$$\Delta t = 0.01 t_{gal} = 10^8 \text{ a}, \tag{4}$$

其中 t_{gal} 为一个星系的总寿命 $t_{gal} = 10^{10} \text{ a}$.

$$L = 4\pi d^2 \times 2.5 \times 10^{-16} \times 10^{-0.4m} \text{ W/m}^2, \tag{5}$$

式中的 $d = \frac{c}{H_0} \left[z + \frac{1}{2}(1-q)z^2 + \dots + \dots \right]$, (6)
 H_0 为哈勃常量, q 为减速因子, z 为红移. m 的取值通常为光变曲线中较为平稳部分的平均值.

根据近年来的观测及理论研究结果^[8], 我们认为, Mark 421 天体中心可能是大质量的转动黑洞, 由于吸积在周围形成了吸积盘, 并且沿着它的自转方向, 还有指向观察者的喷流. 因此我们取 $H_0 = 50 \text{ km} \cdot \text{s} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ (megaparsec), $q = 0.5$, $z = 0.308$, $m = 15.58 \text{ mag}$ (B 波段)^[3], $\Delta B = 1.4 \text{ mag}$, 转换系数 $\epsilon = 0.3$, 将这些值代入 (1) 式后, 得 Mark 421 的中心黑洞质量为: $M = 3.0 \times 10^6 M_\odot$. 这个结果与用 Jurkevich 方法寻找 BL Lac 天体近百年历史光变曲线长周期所获得的中心黑洞质量^[9] 及应用活动星系核 (AGN) 膨胀原理得到 Mark 421 中心黑洞质量 $M \cong 2 \times 10 M_\odot$ ^[1] 基本上是一致的.

3.2 Mark 421 中心核辐射区域的估算

按照天体物理的稳定性理论, 一个天体的振动频率和最大转动频率的量级都是^[10]

$$(GM/R)^{1/2}.$$

设天体的变化周期为 τ , 那有

$$(GM/R^3)^{1/2} = \frac{1}{\tau}. \tag{7}$$

经过简单的变换后, 有 $R = \frac{1}{\sqrt{2}} C \tau (2GM/C^2 R)^{1/2}$,
对于黑洞 $2GM/C^2 R = 1$, 但在黑洞附近, 物质不稳定, 按照吸积盘的理论, 一般取 $10R_s$ 为最内稳定半径 (其中 R_s 是星系核的 Schwarzschild 半径), 我们称为可观测半径, 因此,

$$2GM/C^2 R \leq 1/10. \tag{8}$$

由 (7) 式有 $R \leq 0.22 C \tau_{\min}$, 取我们观测到的 Mark 421 的 B 波段短时标光变^[3] $\tau_{\min} = 9 \times 10^3 \text{ s}$, 则中心核的辐射区域 $R = 5.9 \times 10^{11} \text{ m}$.

4 结 论

1. 观测结果表明, 光学 B 波段和 TeV γ 射线爆发流量均存在短时标光变, 并且爆发时标大小几乎相等, 而且观测点的时间间隔均在 480—600 s 之间.

2. 两者的短时标光变曲线形状相似 (见图 1 所示). 光学 B 波段和 TeV γ 射线流量有强相关性.

由此我们认为: 光学与 TeV γ 射线的发射区域相同, TeV γ 射线的辐射与光学波段的辐射有关, 而这一结论与 Lin 等^[11] 和 Dondi 等^[12] 提出的高能 γ 射线辐射模型是一致的. 而且这一结论与观测到的其他 BL Lac 天体 OJ 287 和 0836 + 716^[13—15] 高能 γ 射线辐射与光学波段辐射有关的结果也是一致的.

BL Lac 天体 γ 射线辐射机制是一个热门问题, 解释 γ 射线辐射的模型也很多^[16, 17], 本文利用观测到的光学波段的短时标光变及其他参量估算 Mark 421 的 M 和 R 值, 利用光学波段和 TeV γ 射线流量的相关性, 讨论 γ 射线辐射区域及辐射机制, 为 BL Lac 天体 γ 射线模型研究提供了一个观测上进行验证的实例.

[1] F. K. Liu, B. F. Liu, G. Z. Xie, *Astron. and Astrophys.*, **S123** (1997), 569.

[2] V. A. Gagen-Torn, S. G. Marchenko, R. I. Smekhaveva *et al.*, *Astrofizika*, **19** (1983), 111.

[3] G. Z. Xie, *Astron. and Astrophys.*, **S72** (1988), 163.

[4] J. A. Gaidos, C. W. Akerlof, S. Biller *et al.*, *Nature*, **383** (1996), 319.

[5] 李惕碚, 实验的数学处理 (科学出版社, 北京, 1980). [T. P. Li, Mathematical Analysis of Experimental (Science Press, Beijing, 1980) in Chinese].

[6] J. Frank, A. R. King, D. J. Raine, *Accretion Power in Astrophysics* (Cambridge University Press, 1985).

[7] K. S. Thorns, *Astrophys. J.*, **191** (1973), 507.

[8] G. Z. Xie, X. Zhang, J. M. Bai *et al.*, *Astrophys. J.*, **508** (1998), 180.

[9] M. R. Kidger, L. O. Takalo, *Astron. and Astrophys.*, **264** (1992), 32.

[10] S. Weiberg, *Gravitation and Cosmology* (Cornell University Press, New York, 1972), p. 324.

[11] Y. C. Lin, *Astrophys. J.*, **442** (1995), 96.

[12] L. Dondi, G. Ghisellini, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **273** (1995), 583.

[13] A. Sillanpaa, *Astron. and Astrophys.*, **305** (1996), 117.

[14] G. M. Hurst, *International Astronomical Union Circular*, **5471** (1992), 321.

[15] J. Schramm, *International Astronomical Union Circular*, **5453** (1992), 28.

[16] L. Maraschi, *Astrophys. J.*, **397** (1993), 15.

[17] C. D. Demder, *Astron. and Astrophys.*, **256** (1992), 127.

A STUDY OF THE MASSIVE BLACK HOLE IN THE CENTER OF THE BL LAC OBJECT MARK 421^{*}

ZHANG XIONG^{1,3)} XIE GUANG-ZHONG²⁾ ZHAO GANG¹⁾ MA LI³⁾ BAI JIN-MING²⁾

¹⁾ Beijing Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²⁾ Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

³⁾ Department of Physics, Yunnan Normal University, Kunming 650092)

(Received 10 March 1999 ; revised manuscript received 26 July 1999)

ABSTRACT

We report the observation of a dramatic outburst in the optical band from the BL Lac object Markarian 421 (Mark 421). During this outburst, the brightness of Mark 421 increased rapidly by 1.34 mag from $B = 5.67$ to $B = 14.32$ in 26 min. Another interesting fact is that this extremely rapid burst in the optical band is similar to the dramatic outburst of TeV photons which was obtained by Gaidos *et al.* (1996) in every essential respect, for example, the time scales on which they vary, and the shapes of the light curves. These data in the optical band and TeV γ -rays suggest that they are both produced in the same emission region and that the emission region is extremely small, $R = 1.23 \times 10^{12}$ m. With these results, we prove that there is a massive black hole with $M = 2 \times 10^6 M_{\odot}$ in the center of Mark 421. This could provide a new challenge for current theoretical model of such emissions. We prove that the origin of TeV γ -rays is by synchrotron self-Compton.

PACC : 9760L ; 0420

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Yunnan Province, China (Grant No. 97A017M).