

类星体样本光变研究进展

卞维豪 黄克谅

(南京师范大学物理系 南京 210097)

摘 要

光变是活动星系核 (AGN) 的共同特征, 光变规律的研究已成为人类探索活动星系核物理的有力手段。综述了类星体样本光变的研究现状, 对样本的光变比例, 光变类星体的平均光变幅, 光变时间尺度、光变幅与类星体物理参量的相关情况, 类星体样本光变和其它活动星系核样本的关系进行了详细评述。并评述了样本光变的星暴模型、微透镜模型、吸积盘模型三种理论模型。

关键词 类星体 —— 光变

分类号: P158

1 引 言

光变是活动星系核 (AGN) 的共同特征。由于望远镜观测时间的限制和长期光变研究的困难, 其研究并不充分, 但它却提供了一种潜在的有力手段去限定理论模型 (如黑洞吸积模型^[2]、星暴模型^[8]、微透镜模型^[4]等)。通过天体光变的时间尺度的分析, 可估计天体辐射区的大小和视温度。通过对 AGN 不同波段辐射变化的相关分析, 也可使人们对 AGN 的辐射机制有更好的整体理解。

光变研究有以下几方面: 对一特殊 AGN 或 AGN 样本进行长期监测; 寻求短时标的剧烈光变; 不同波段间的相关性监测。此外还有连续谱光变、宽线区和窄线区光变的研究, 发射线滞后效应的光变研究 (reverberation mapping), 短于一天的光变研究^[13]等。这些研究将会有助于理解 AGN 复杂的物理机制。但目前仅对那些比较亮、射电噪的源研究得较好。

类星体是一种典型的活性最强的 AGN。自类星体发现以来, 其光变的研究一直是研究热点, 并越来越受到人们的重视, 至 80 年代, 人们在类星体样本方面积累了丰富的观测资料, 为类星体样本光变的研究打下了坚实的基础。许多研究者研究了跨度在年、甚至 10 年以上的不同天区类星体样本的光变情况, 并对此进行了广泛的理论探讨。

2 分析方法

目前, 类星体样本光变信息是通过处理具有一定时间跨度的较完备类星体样本的数张底片获得的^[1,10,6~8,16,17]。类星体样本中, 一般来说大多数天体为射电宁静的, 具有变幅较小的光变。在研究类星体样本的光变时, 首先需确定光变判据。常用的光变判据主要有 χ^2 检验法, 通常取 $P(\chi^2) > 95\%$ 作为光变判据; 还有 Q 检验法, 取 $Q > 3$ 或 $Q > 5$, ($Q = \frac{\Delta m}{\sigma}$, $\frac{1}{\sigma^2} = \frac{1}{n} \sum (\frac{1}{\sigma_i^2})$, 其中 Δm 为天体视星等的光变, σ 为此天体星等测量的均方差。)由此分析样本中天体的光变比例及光变与天体的物理参量间的关系。但这种方法, 仅利用了光变幅的信息, 未充分利用光变时间间隔的信息, 为充分利用光变幅和光变时间间隔这两方面的信息, 现已提出一些有效的方法, 如结构函数方法^[12], 不等间距傅立叶变换功率谱方法^[20], 自相关函数方法^[4]等。目前在光变研究中常用结构函数方法和自相关函数方法。

2.1 结构函数方法

结构函数 SF(structure function) 的一般定义和其特征由 Simonetti 等人^[12] 给出。当时间序列的星等 $m(t_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 给定时, 一阶结构函数和自相关函数定义为:

$$V(\tau) = \frac{1}{N(\tau)} \sum_{t_i < t_j} [m(t_i) - m(t_j)]^2$$

$$C(\tau) = \frac{1}{N(\tau)} \sum_{t_i < t_j} m(t_i)m(t_j)$$

在观测者坐标系 (以下简称观测系), 对所有 $\tau = t_j - t_i$ 求和; 在相对于类星体静止的坐标系 (以下简称静止系), 对所有 $\tau = \frac{(t_j - t_i)}{(1+z)}$ 求和。 $N(\tau)$ 为组数。在静态随机的 $m(t_i)$ 变化过程中, $V(\tau)$ 和 $C(\tau)$ 的关系为:

$$V(\tau) = 2[C(0) - C(\tau)]$$

典型的结构函数一般由三部分构成^[1]: 第一部分: 在时间大于光变时间尺度时, 有一平台, 其值为光变大小的 2 倍。第二部分: 在时间间隔远小于光变时间尺度时, 也有一平台, 其值为测量误差的 2 倍。第三部分: 在上述两部分之间有一随时间指数律上升的部分, 对 SF 进行拟合, 就能得出光变幅及光变时间尺度等光变参量^[18]。与传统的傅立叶分析方法相比较, 结构函数分析方法在量化时间尺度等方面避免了傅立叶方法窗口折叠等困难。目前, 此方法已经被许多人用来研究天体的光变^[26,20,1,22]。除了用于被仔细观测的单个天体外, 在多次被观测的天体样本中, 此方法通常用于寻找样本的光变特性。

2.2 自相关函数 (ACF) 的方法

自相关函数 $A(t)$ 的定义为:

$$A(t) = \frac{\sum m(t_i)m(t_i+t)}{\sum m(t_i)m(t_i)}$$

其中 $m(t_i)$ 是某一天体第 i 次测量的视星等对测量此天体所得的平均星等的偏离, 并对所有天体求和。通过用 $y = b(\exp(-ax) - 1) + 1$ 对自相关函数 $A(t)$ 进行拟合, 求出参数 a , 即可

得出时标: $t = -\ln(0.5)/a$, 利用这一方法, Hawkins^[4] 对不同红移、光度范围的样本进行分析, 得出了光变时间尺度与红移、光度的相关性。

3 光变规律

人们利用 χ^2 检验和 Q 检验, 对许多类星体样本的光变比例进行了较为仔细的研究 (见表 1), 发现大多数样本都具有较大的光变比例。Huang 等人^[9] 关于极限 B 星等 $B = 17.6$ 的中等亮类星体样本 (MBQS) 光变的研究, 未发现样本的光变。这主要由于非常严格的光变判据 ($Q > 5$) 和较大的测光误差使然。若取 $Q > 3$ 为光变判据, 则此样本有约 1/3 的光变比例。光变已被证实是类星体的一个普遍特征, 既有 OVV 类星体等单个类星体的较大幅度光变、

表 1 类星体样本光变研究情况

研究者	年代	时间跨度 /yr	波段或 B/mag	类星体数	光变比例	样本情况
Netzer 和 Sheffer	1983	31	18		39%	
Usher 等人	1983	2		12	16%	
Pica 和 Smith	1983	13	19.0	121	78%	RHO 样本
Wampler 和 Ponz	1985	2	16	67	0%	
Hawkins	1987	6	20			
Koo 等人	1988	10	$J=21.5$		60%	SA57
Marano 等人	1988	1	$J=20.9$	45	30%	
O'Brien 等人	1988	几周	UV			IUE
Treverse 等人	1989	11	22.6		73%	SA57
Neugebauer 等人	1989	6	IR	108	50%	
Huang 等人	1990	2~4	17.6	32	0%	
Cristiani 等人	1990	7	20	90	33%	SA94
Giallongo 等人	1991					PG
Hook 等人	1991	15	21	300		SGP
Cimatti 等人	1993	2	U、J、F	45	50%	
Hawkins	1993	17	B	300		ESO/SERC F287
Treverse 等人	1994	15	22	35	97%	SA57
Paltani 和 Courvoisier	1994	13	UV	43	90%	巡天
Hook 等人	1994	16	22.5	283		SGP
Cristiani 等人	1996	10	B	486		SA94+SA57+SGP
Cristiani 等人	1996	16	R	149		SA94
Hawkins	1996	17	B、R	300		ESO/SERC F287
A.Di Clemente 等人	1996	3	$R=16.5$	30		PG,IUE,CCD; $\sigma = 0.035$
Cid Fernandes 等人	1996	16	22.5	283		SGP
Aretxage 等人	1997			300		SGP

单个类星体时标为年或短至天的小幅度光变、也有光变幅较小时标为年的类星体样本光变。利用结构函数和自相关函数的方法,人们探讨了光变幅光变时间尺度和类星体物理参量,如红移、光度、谱指数、波长等的关系,有了一些定量的结果,从而可与类星体的理论模型进行比较。

3.1 光变幅与光度

Pica 和 Smith^[11] 研究了 130 个类星体、BL Lac 天体和其它活动星系核的跨度为 13yr 的测光资料,用以上两种光变检验法研究了光变比例,并对光变幅与类星体物理参量的相关性作了探讨,发现光变幅与光度负相关。但由于此样本并不完备,结论不很可靠。近年来,关于完备类星体样本的光变幅与光变参量的研究也越来越多。Cristiani^[5] 讨论了天区 94(SA94) 跨度 7yr、7 个时段共 15 张底片的 90 颗类星体完备样本的光变,采用 2σ 置信度,得出了约 1/3 的类星体有光变。同时,统计了光变幅与光度的关系,发现两者为负相关。但由于此样本天体大多较暗,测光中有较大误差,结果的可靠性受到制约。Trevese 等人^[8] 研究了跨度为 15yr、11 个时段共 14 张底片的极限星等为 22.5 的 34 颗类星体样本,用结构函数的方法,按红移、光度把此样本分成四个子样本进行研究,发现光度小的类星体光变幅较大。该样本测光精度高,星等更暗,时段更多,所得结果较为可靠。Hook 等人^[6] 也有类似结论,发现光变幅与绝对星等强正相关,并发现即使在类星体静止系中,相关性也成立。Cristiani 等人^[1] 分析了由 SA94, SA57, SGP 三个天区组成共 486 颗类星体的一个大样本,该样本涉及更大的光度、红移空间,分析时把样本按光度红移空间分成更多的子样本,在静止系和观测系中,发现平均光度较小的子样本的结构函数呈现的光变幅较大;用光变参数 (IDX) 的方法也得出了同样的结论。

在其它波段也有样本光变的研究。Cristiani 等人^[1] 分析了 SA94 天区的 R 波段的样本光变,尽管光变幅小些,也有类似在 B 波段的结论。Paltani 等人^[7] 研究了 11 年 IUE 卫星观测到的 AGN 谱的紫外光变,93 个天体分成 4 个不同种类子样本,计算了各个天体的光变参数,发现其中的类星体子样本的光变与光度负相关,但这一结论是在观测系获得的。Paltani 等人^[16] 利用同样样本的谱信息,考虑静止系中 1250Å 处的光变,得出与观测系一致的结论。

Giallongo 等人^[30] 的分析显示光变大小与光度无关;Cimatti 等人^[10] 分析了跨度为 2yr 的极限星等为 22.5mag 的完备样本光变,以标准方差为变化指数,发现光变同光度在统计上相关并不明显。但这可能与样本的跨度较短、测光误差较大、样本中类星体数量较少有关。

目前,对类星体样本光变,一般认为光变幅与光度负相关,光度越小,光变越大,对此的理论解释见下文。

3.2 光变幅和红移波长的相关性

Cristiani 等人^[5] 发现了光变幅与红移负相关,Hook 等人^[6] 也发现在观测系中光变幅与红移有弱的负相关。但他们在分析光变与红移相关性时夹杂了光度与红移的相关性的影响,结论不可靠。Cristiani 等人^[1] 用光变参数作统计时,得出两者负相关的结论,但在部分相关分析时,除去星等与红移的相关后,得出了两者正相关的结论;他们还用结构函数的方法分析了静止系中的样本的光变,同样有正相关的结论,但在观测系中这两者之间的关系很弱。Giallongo 等人^[30], Trevese 等人^[8], Cid 等人^[29] 也有同样正相关的结论。Cristiani 等人^[1] 对 SA94 天区的分析在 R 波段有光变幅与红移正相关的结论。

目前认为,这两者正相关性可能体现为单个天体中光变大小随波长的增加而下降。在单个天体中的确观测到了辐射频率越高光变幅越大的图像。Cristiani等人^[1]研究了R、B两个波段的光变情况,发现波长长的R波段样本光变幅较小,与对单个天体的观测相一致。Paltani等人^[7]利用谱的信息研究了紫外光变,在观测系中也有这一规律;1997年他们再次研究在静止系中样本光变,也有同样的结论^[16]。由于类星体的大红移,使得在观测系中并不能很好地反映类星体的物理本质,在其静止系中可能更能反映其本质。在静止系中来研究光变,必须掌握类星体的各个波段的信息,目前正在进行的多波段监测计划(参见文献[21])将对光变幅与红移的关系作出进一步的确认。

3.3 光变时间尺度与类星体物理参量之间的关系

Hawkins^[4]利用自相关函数(ACF)的方法研究了跨度为17yr的300颗类星体的光变,发现光变时标与平均光度成正比,与红移负相关,光变时标并不随红移的增大而增大,即无红移的时间放大效应(time dilation),于是认为高红移类星体光变非其本身形成,而是外因的结果,并提出了引力微透镜模型。而Smith等人^[19]分析了经典类星体的光变,其结果虽有较大弥散,仍发现光变时间尺度和红移相关的趋向。Smith等人^[20]的另一研究由于样本类星体数较少,两者关系不明显。Cristiani等人^[1]采用结构函数的方法分析样本光变,对结构函数曲线进行拟合发现:在静止系中,时标可固定,也可随绝对星等呈线性增加;在观测系中,有固定时标5.5yr,与红移无关。

总之,到目前为止,对类星体样本光变时标的研究尚无定论,大致认为类星体样本(可以认为是射电宁静类星体)光变时标在年的量级,与类星体物理参量关系不明显。由于光变时标与类星体物理参量(如红移、光度)的关系将会对盘模型与微透镜模型作出判别,因此非常有必要对光变时标进行研究。

3.4 与其它天体样本光变的比较

类星体, Seyfert星系, BL Lac天体总称为活动星系核(AGN)。活动剧烈,红移大,非热辐射是其显著特征,但这些天体之间关于光变、谱线、偏振等有较为明显的差异,产生这些差异的原因至今还不十分清楚。在其统一模型中,它们是同一类天体不同演化阶段的体现,因而确定不同AGN天体的光变差异将有重要意义。

Smith等人^[19,20]讨论了25yr跨度的200多颗AGN的样本的光变,分析了类星体子样本、射电宁静类星体子样本、射电噪类星体子样本、BL lac天体子样本的光变时间尺度和光变幅。在静止系中,类星体样本的时标为5.0yr,射电宁静类星体稍长些,为6.5yr,而BL lac的为5.1yr,其它致密星系的为9.6yr。BL lac天体光变幅为0.89 mag,射电宁静类星体样本光变幅为0.69mag,其它致密星系约0.69mag。BL lac天体与类星体样本的光变时间尺度相近,为认识两者本质上的共同之处提供了启示。但由于各个子样本中天体数量较少,完备性不足,尚有必要进一步确认。

Paltani等人^[7]讨论了1978~1991年IUE卫星观测到的所有AGN的谱,并将其分为射电宁静类星体样本、射电噪类星体样本、BL lac天体样本、Seyfert星系样本,发现除BL lac天体有较高比例的大光变天体外,不同样本的光变差异很小,射电宁静和射电噪类星体样本的光变大小分布几乎无区别,且所有样本都显示出光变幅随波长的增加而减小的趋势。

4 理论解释

目前, 大多数天体物理学家相信类星体的高光度来源于大质量黑洞的吸积^[2]。这受到以下观测现象的支持: 星系核附近星的大速度弥散; 大量存在的短周期 X 射线光变; 铁的非对称宽荧光; 从光学到紫外的理论谱与观测谱大致相符等。人们也相信光学波段类星体样本的光变应与吸积盘有关。但从吸积盘理论求解光变曲线, 涉及到含有时间的非线性偏微分方程组的求解, 且光变的不稳定性或动力学机理, 目前尚无可与样本光变作比较的较好理论解释。Kawaguchi 等人^[22]利用标准盘被 X 射线辐照引发的不稳定性产生的耀斑事件和块(blob)来模拟光变曲线。通过结构函数, 比较了吸积盘模型和星暴模型的模拟结果, 得到吸积盘模型有利于解释样本光变的结论。但在求解盘模型的理论光变曲线时用了网格自动模拟法, 略去了盘的动力学效应。Terlevish 等人^[3]提出宽发射线宁静 AGN 物理机制是星暴, 而非黑洞吸积。能量由早期星系核内区的极猛烈的恒星形成而产生。AGN 的光变被认为与大质量恒星和超新星的演化相联系的一种暂现现象。基于此, 人们提出了子单元模型^[11]、离散事件模型^[16]。与盘模型相比, 以上模型为局部的, 可较方便地进行理论计算并与观测比较, 是目前类星体样本光变理论计算的热点。

4.1 星暴模型 (starburst model)

利用星暴模型可解释射电宁静 AGN 的一些特性, 如宽发射线、光学光变等^[3]。AGN 能量由 AGN 内区强烈的恒星形成活动而产生, 光变则被认为是与恒星、超新星 (SN) 的形成相联系的一种现象, 由超新星爆发 (SNe) 产生^[27]。

在星暴模型中, 此过程由以下四个量决定:

(1) 超新星产生率 ν_{SN}

(2) 每次超新星爆发 B 波段的流量 ϵ_{B}

(3) 每次超新星爆发的光变曲线为 $L_{\text{B}}^{\text{SN}}(t) + L_{\text{B}}^{\text{CSNR}}(t)$, 而超新星 (SN) 光变曲线 $L_{\text{B}}^{\text{SN}}(t)$ 、致密超新星遗迹 (CSNR) 光变曲线 $L_{\text{B}}^{\text{CSNR}}(t)$ 的表达式为:

$$L_{\text{B}}^{\text{SN}}(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 6 \times 10^9 (1 - \frac{t}{100}) [L_{\text{B}\odot}] & 0 \leq t \leq 110 \end{cases}$$

$$L_{\text{B}}^{\text{CSNR}}(t) = \begin{cases} 3 \times 10^{10} \frac{365\epsilon_{\text{B}}}{t_{\text{sg}}} (\frac{t-0.3t_{\text{sg}}}{0.7t_{\text{sg}}}) [L_{\text{B}\odot}] & 0.3t_{\text{sg}} \leq t \leq t_{\text{sg}} \\ 3 \times 10^{10} \frac{365\epsilon_{\text{B}}}{t_{\text{sg}}} (\frac{t}{t_{\text{sg}}})^{-11/7} [L_{\text{B}\odot}] & t_{\text{sg}} \leq t \end{cases}$$

其中, t_{sg} 为在 CSNR 演化中辐射致冷为主的时间。

(4) 无变化的背景强度, 此处为恒星 B 波段总光度 L_{B}^* 。

观测显示这四个量并不独立, 它们之间的关系如下:

SN 产生率 (ν_{SN}) 与来自恒星的光度 (L_{B}^*) 都与大质量恒星的数目有关, 两者关系由下式给出^[27],

$$\frac{\nu_{\text{SN}}}{L_{\text{B}}^*} \approx 2 \times 10^{-11} L_{\text{B}\odot}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$$

其次, ϵ_B 可由下式估计 [27],

$$\overline{W}_{H\beta} \approx 320 \text{ \AA} \frac{\epsilon_B}{1 + 0.17\epsilon_B}$$

$\overline{W}_{H\beta}$ 为 H β 线的等值宽度。观测显示 $\overline{W}_{H\beta} \approx 100 \text{ \AA}$ [32], 于是, $\epsilon_B \approx 0.5$ (单位: 10^{51} erg)

再次, t_{sg} 为 [3]

$$t_{sg} = 0.62 \epsilon_B^{1/8} n_7^{-3/4} \text{ yr}$$

其中, n_7 为超新星遗迹 (SNRs) 演化的环境密度, 以 10^7 cm^{-3} 为单位。

最后, ν_{SN} 与星系 B 波段平均总光度 \overline{L}_B 关系为:

$$\overline{L}_B = L_B^* + \epsilon_B \nu_{SN} \approx 5 \times 10^{10} \nu_{SN} (1 + \epsilon_B) [L_{B\odot}]$$

由此可求出 ν_{SN} , 从而得到 L_B^* 。

光变曲线 $L_B^* + L_B^{SN}(t) + L_B^{CSNR}(t)$ 仅与 ν_{SN} 和 t_{sg} 有关。确定 t_{sg} 、 ν_{SN} , 爆发时间由随机发生器产生, 考虑到环境密度和 B 波段能量的变化, 令 t_{sg} 、 ϵ_B 两者之值均按高斯分布变化, 即可模拟出星暴星系光变曲线 [27]。由此可计算结构函数并与观测比较。同时也能定量分析得出光变与光度的关系。

4.2 子单元模型 (sub-units model)

在这个模型中, 光变由多个相互独立的耀斑产生 [11]。假设类星体由 N 个随机爆发的子单元构成, 则信号正比于 N , 噪音正比于 \sqrt{N} , 于是, 信噪比正比于 \sqrt{N} (即 \sqrt{L} , L 为类星体光度), 则光度变化正比于 $L^{-0.5}$, 这意味着光变幅与光度负相关。这成功地解释了类星体样本光变中普遍存在的光变幅与光度负相关的观测事实。但随着两者之间相关性的量化后, 两者之间的相关指数 0.5 偏大。Cristiani 等人 [1] 对此进行了讨论, 认为若光变幅正比于 $L^{-0.5}$, 则结构函数 SF 正比于 L^{-1} , 若光度差 2mag, 则 SF 的比值应为 6.3, 而由观测数据得到的 SF 比值小于 2, 他们分析了许多使 SF 偏离 L^{-1} 使之变平的因素。他们认为背景光可使 SF 偏离 $L^{-0.5}$ 的规律, 在星暴模型中, 恒星背景光在 B 波段占了近一半; 在黑洞吸积盘模型中, 宁静态也会产生一些背景光, 使 $L^{-0.5}$ 变平; 光变幅与星等之间的相关性也会对 $L^{-0.5}$ 的变平做出贡献。

Paltani 等人 [16] 研究了静止系中光变和光度的关系, 得出光变大小与 $L^{-0.08}$ 成正比。他们拓宽了子单元模型, 提出了离散事件模型。此模型可作为吸积盘的块模型 (blob model) [23]、盘内激波模型 [24]、超新星暴模型 [3]、相对论星暴模型 [25] 的近似。此模型可简述为:

$$L(t) = C + \sum_i e_i(t - t_i)$$

$$\overline{L} = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} L(t) dt = \overline{N} \cdot \overline{E} + C$$

$$v(L) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} (L(t) - \overline{L})^2 dt$$

其中 C 为天体的静态光度, $e_i(t)$ 为第 i 个事件的光变, t_i 为第 i 个事件的发生时刻, \bar{N} 为事件发生率, \bar{E} 为所有事件的平均能量, $v(L)$ 表示 L 的光变。若事件的物理参数相同, 且各事件相互独立, 则可得出光变的 $L^{-0.5}$ 的规律。若各个事件不互相独立, 其物理参数 (能量、时标等) 依赖于天体的总光度, 则可使 $L^{-0.5}$ 降至 $L^{-0.08}$ 左右。若考虑事件的非泊松过程, 难以得出 $L^{-0.08}$ 的结果, 且非泊松物理过程出现的可能性很小。因此, 基于非独立事件的光变解释将是有可能的且必要的。

4.3 引力微透镜模型 (microlensing model)

Hawkins^[4] 通过对光变时标的分析, 认为光变与红移无关, 是外因而非内因所导致的, 于是提出了引力微透镜模型, 得出与观测相一致的光变时间尺度、光变幅, 并给出了粒子物理学、宇宙学中的一些物理参量, 得出了一些较为有趣的结论 (如透镜天体密度为宇宙临界密度的 0.1 倍; 宇宙的大部分质量为褐矮星 (brown-dwarf) 大小的重子物质, 而非理论物理学家为解决暗物质而提出的奇异粒子)。Hawkins^[31] 反驳了 Baganoff 等人^[15] 关于光变时标与波长的负相关可消除时间放大效应的论断, 指出薄盘不能成为解释类星体样本光变的基础。由于这一模型从本质上讲是单色的, 目前多波段观测显示的光变差异将使这一模型或多或少地缺少竞争力。

4.4 吸积盘模型 (accretion disk model)

作为 AGN 的标准模型, 吸积盘模型也被用来探讨类星体的长期小幅光变。人们一般认为类星体的光变应与大质量黑洞吸积盘的不稳定性有关。若类星体光变由随机吸积事件构成, 则根据子单元模型可求出每个事件 B 波段的能量、事件发生率、背景稳态光度, 再利用光变时标, 求出吸积流^[29]。对于标准 α 盘, 转动时标 t_ϕ 、流体静力学时标 t_z 、热时标 t_{th} 、粘滞时标 t_{visc} 这四种时标间的关系为: $t_\phi \approx t_z \approx \alpha t_{th} \approx \alpha (H/R)^{-2} t_{visc}$, 对类星体有 $t_\phi \approx t_z \approx \alpha t_{th} \approx 10 M_9^{-0.5} R_{17}^{1.5} \text{yr}$, $t_{visc} \approx 10^4 M_{0.1}^{-0.3} M_9^{0.25} R_{17}^{1.25} \text{yr}$, 其中 $\dot{M}_{0.1} = 0.1 M_\odot \text{yr}^{-1}$, $M_9 = 10^9 M_\odot$, $R_{17} = 10^{17} \text{cm}$, 若取 $\dot{M} \approx 0.1 M_\odot \text{yr}^{-1}$, $M \approx 10^9 M_\odot$, $R \approx 1000 r_g \approx 10^{17} \text{cm}$ (其中 r_g 为施瓦西半径), 则粘滞时标对年来说太大, 而热时标可以达到年的量级。Kawaguchi 等人^[22] 利用盘的自动网格法来模拟光变曲线, Baganoff 等人^[15] 认为光变时标为盘的热时标, 由动力学时标 τ_{dyn} ($\tau_{dyn} = 2\pi\omega_K^{-1}$, 其中 $\omega_K = (GM/r^3)^{1/2}$) 半定量地分析了光变时间尺度 τ 与波长 λ 的关系, 得出 $\tau \propto \lambda^2$ 的结论。根据公式 $r_\nu = 7.5 \times 10^{23} \epsilon^{-1/3} \nu^{-4/3} (M/M_\odot)^{-1/3} (L/L_{Edd})^{1/3} r_g$ (L_{Edd} 为爱丁顿光度, ν 为粘滞系数, ϵ 为一参数)^[15] 得出光学辐射来源于 $6r_g$ 处。为满足 Eddington 光度极限, 一般要求高光度类星体具有较大质量黑洞, 最内稳定轨道正比于 r_g , 从而与 M 成正比, 若光变时标正比于光线穿过盘的动力学时标, 则时标应随光度的增加而增大。若相同光度类星体有相同的光变时标, 则会由于宇宙膨胀效应引起的时间放大效应 (time dilation), 时标应随 $(1+z)$ 线性增加。但若考虑类星体的演化效应则会产生较复杂的图像。由于目前光变时标对波长、光度的依赖性不明显, 尚难以与盘模型比较, 因此需进行多波段的长期监测。

5 展 望

由于类星体样本光变的光变幅为 0.2mag 左右, 光变时间尺度为年, 因此其光变研究在很大程度上取决于样本的完备性、测光的精度、较长的时间尺度观测。目前 CCD 测光的精度已经达到 0.01mag, 通过几年的连续观测应该能得到相对可靠的结论。类星体光变与其物理参

量的关系目前虽有了一些结论,但目前所用样本的选择效应较大,需要我们构造物理参数分布(如红移、星等)均匀的新的的大样本。目前对光变参数的定义不统一,且由于类星体的红移效应,测量光度为类星体静止系中被红移的较短波长处的光度,从而在分析光变规律中具有较大不确定性。光变与红移的关系目前集中于光学紫外波段,这一波段的光变幅与红移的关系应该是可靠的,但由于类星体各波段的辐射机制的不同,将使光变规律依赖于波段。射电波段的辐射流变化情况应与光学波段的有很大区别。同时类星体多波段的研究也将会对究竟是内因还是外因导致光变作出判断。在今后几年,类星体多波段的监测及其光变研究将会促进对类星体多波段辐射机制的研究,揭开类星体物理机制之谜。由于目前样本中射电噪类星体所占比例较小,大多为射电宁静的,因此目前的类星体样本光变应是射电宁静类星体的一般特征。最近的低流量巡天射电源显示类星体中射电噪的和射电宁静的比例相差不多,含有较大比例射电噪的类星体样本的光变将会与以前类星体样本的样本光变有较大差异。

光变研究得出的一些结论(如时标为年、大小为0.2mag、光变幅与光度负相关、与红移正相关、与波长负相关)已经有了几种理论解释。黑洞+吸积盘模型是类星体中央机制的标准模型,应该利用这一模型对光变作出解释,但由于光变的时标长、光变幅太小,以及含时吸积盘方程求解的困难,目前还没有一个较好的对样本光变作出解释的吸积盘理论。

光变研究表明样本中有较大比例光变,光变已成为一搜索类星体候选者的判据。光变的研究将会有助于对这一判据的深入了解。

参 考 文 献

- 1 Crisiani S, Trentini S, La France F *et al.* *Astron. Asrtophys.*, 1996, 306: 395
- 2 Rees M J. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1984, 22: 471
- 3 Terlevich R, Tenorio-Tagle G, Franco J. *M.N.R.A.S.*, 1992, 255: 713
- 4 Hawkins M R S. *Nature*, 1993, 366: 242
- 5 Cristiani S, Vio R, Andreani P. A. J., 1990, 100: 56
- 6 Hook I M, MacMahon M G, Royle B J *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1994, 268: 305
- 7 Paltani S, Courvoisier T J-L. *Astron. Asrtophys.*, 1994, 291: 74
- 8 Trevese D, Kron R G, Majewski S R *et al.* *Ap. J.*, 1994, 433: 494
- 9 Huang K-L, Mitchell K J, Usher P D. *Ap. J.*, 1990, 362: 33
- 10 Cimatti A, Zamorani G, Marano B. *M.N.R.A.S.*, 1993, 263: 236
- 11 Pica A J, Smith A G. *Ap. J.*, 1983, 272: 11
- 12 Simonetti J H, Cordes J M, Heeschen D S. *Ap. J.*, 1985, 296: 46
- 13 Wagner S J, Witzel A. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1995, 33: 163
- 14 Aretxaga I *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1997, 286: 271
- 15 Baganoff F K, Matthew A M. *Ap. J.*, 1995, 444: L13
- 16 Paltani S, Courvoisier T J-L. *Astron. Asrtophys.*, 1997, 323: 717
- 17 Hawkins M R S. *M.N.R.A.S.*, 1996, 278: 787
- 18 Neugebauer G *et al.* *A. J.*, 1989, 97: 957
- 19 Smith A G *et al.* *A. J.*, 1993, 105: 437
- 20 Smith A G *et al.* *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1995, 107: 863
- 21 Kundic T *et al.* *Ap. J.*, 1997, 482: 75
- 22 Kawaguchi T *et al.* 1997, astro-ph/9712006
- 23 Haardt F *et al.* *Ap. J.*, 1994, 432: L95
- 24 Chakrabarti S K, Witta P J. *Ap. J.*, 1993, 411: 602
- 25 Courvoisier T J-L *et al.* *Astron. Asrtophys.*, 1996, 308: L17

