

耀变体 3C 273 在 2~10 keV 的光变特性研究*

吴 霄¹ 刘智敏² 闫大海¹ 包昆森¹ 戴本忠^{1†}

(1 云南大学物理科学技术学院 昆明 650091)
(2 云南省思茅师范高等专科学校 普洱 665000)

摘要 从 RXTE (Rossi X-ray timing explorer) 观测原始数据出发, 分析了耀变体 3C 273 在 X 射线波段 2~10 keV 从 1996 年 2 月 2 日 (MJD 50115) 到 2007 年 8 月 27 日 (MJD 54339) 的数据. 一共得到了 1 010 次观测数据的光子谱指数和相应的流量, 平均每次观测时间为 1 666.76 s. 通过分析 3C 273 在观测期间 2~10 keV 硬 X 射线的能谱变化及光变行为, 发现在 2000 年 2 月, 2003 年 3、4 月, 2004 年 2、3、7 月, 2006 年及 2007 年, 其光子谱指数 Γ 与流量 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 存在显著反相关. 在 1999 年和 2000~2007 年观测期间, Γ 与 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 月平均行为也同样存在显著反相关. 对整个观测期间的光变行为作定量的分析, 发现几次较大的光变, 并在部分光谱拟合中发现 Fe 发射线存在的证据, 其平均宽度为 $93.85 \pm 21.49 \text{ eV}$. 通过分析光变强度与 Fe 发射线特性, 发现 3C 273 同时具有耀变体与 Seyfert 星系的一些性质.

关键词 类星体: 个别, X 射线: 星系, 方法: 数据分析, 辐射机制: 非热
中图分类号: P 157; **文献标识码**: A

1 引言

耀变体是活动星系核的一个子类, 包括平谱射电类星体 (FSRQ) 和 BL Lac 天体. FSRQ 光谱具有较 BL Lac 天体更强的谱线特征. 耀变体通常具有高光度、高偏振、快速光变以及非热辐射谱等特征, 有相对论喷流存在, 是强 X 射线和 γ 射线源. 这些极端的性质可用相对论喷流模型得到较好的解释^[1].

3C 273 ($z=0.158$) 是离我们较近、非常亮的 FSRQ^[2], 在各个波段都有光变^[3], 观测到相对论性喷流存在^[4]. 3C 273 最早被 Bowyer 等^[5] 认证为 X 射线源, 由 COS-B 卫星观测认证为银河系外的 γ 射线源^[6], 后又被 CGRO/OSSE 在 0.05~10 MeV 波段^[7], CGRO/COMPTEL 在 0.75~30 MeV 波段^[8], CGRO/EGRET 在 100 MeV 以上波段等认证^[9]. 3C 273 的多波段能谱具有耀变体的普遍特征, 但又有典型的 Seyfert 星系宽发射线及大蓝包特征^[10]. 3C 273 的大蓝包发生在光学紫外到软 X 射线 (1 keV 以下) 能区^[11],

2009-08-24 收到原稿, 2010-01-11 收到修改稿

* 国家自然科学基金 (10778702) 和云南省自然科学基金 (2007A026M) 资助项目

† bzh dai@ynu.edu.cn

并具有宽 Fe 发射线^[12]. 在 X 射线波段辐射同时存在热成分和非热成分, 但现在两种辐射机制中哪种占主导还未知, 其多波段能谱可以用不同的理论模型来解释, 在 MeV 能区既可以用同步自康普顿模型解释, 也可以用考虑种子光子来自大蓝包的外康普顿模型解释, 同时质子引起的级联模型也能解释观测数据. 所以对这样一个具有特殊性质的耀变体, 其辐射模型的建立是非常重要的, 而光谱参数的相关性能够区分在一定能量范围内哪种辐射机制占主导^[13].

本文利用 RXTE 卫星十余年的观测数据, 研究 3C 273 的能谱变化及光变行为, 并希望通过分析 2~10 keV 内的光子谱指数和流量之间的相关性, 讨论该能量范围内的主要辐射机制, 通过光谱拟合研究 Fe 发射线存在的证据及特征. 全文分为 4 部分, 在第 2 部分中介绍了观测数据并进行了分析, 第 3 部分给出数据分析处理结果, 第 4 部分是总结和讨论.

2 数据处理

2.1 观测数据

RXTE 携带有 3 台观测设备: 对 2~60 keV 能量范围内光子灵敏的正比计数器阵列 (PCA, proportional counter array), 对 15~250 keV 能量范围内光子灵敏的高能 X 射线时变实验装置 (HEXTE, high energy X-ray timing experiment) 和对 2~12 keV 能量范围内光子灵敏的全天监视器 (ASM, all sky monitor). 其中, ASM 的观测范围仅分成 3 个波道 (1.3~3 keV, 3~5 keV, 5~12 keV), 这样的能量分辨率不足以完成光谱的细致研究. PCA 由 5 个氙气 - 甲烷正比计数单元 (PCUs, proportional counter units) 组成, 每个单元的采集面积约为 1 400 cm², 视场为 1°^[14-15]. 本文处理了 PCA 探测器对 3C 273 从 1996 年 2 月 2 日 (MJD 50115) 到 2007 年 8 月 27 日 (MJD 54339) 公开的观测数据, 总有效观测时间为 1 683 432 s. 使用科学矩阵型标准 2 模式数据进行时变和能谱分析, 此模式数据具有 129 个能道 (2~60 keV) 和 16 s 的时间分辨率.

本文只选择分析 PCA 在 2~10 keV 能区数据主要基于以下原因: (1) 3C 273 作为 γ 射线源, 研究其高能段或宽能段的能谱与时变性质更能体现耀变体的物理性质; (2) HEXTE 探测器使用的闪烁计数器灵敏度和分辨率不高, 数据信噪比差造成分析结果不准确^[16]; (3) 大部分的 X 射线数据处理的文章都给出 2~10 keV 的数据处理结果^[17], 所以为了便于对比我们也分析 2~10 keV 的数据处理结果.

2.2 观测数据分析

在观测期间, PCU1、PCU3 和 PCU4 大部分时间都处于关闭状态, 在 2000 年 5 月以后, PCU0 的丙烷层开始泄漏, 导致背景增加, 所以为了把探测器造成的误差降到最低, 本文选择了标定最好的 PCU2 的数据来分析. 在提取光谱和光变曲线时, 排除了卫星的地平高度小于 10° 及探测器指向偏离 3C 273 源大于 0.02° 的数据. 根据观测结果, 本文选择的背景模型为 GSFC/NASA (Goddard space flight center of the national aeronautics and space administration) 提供的暗源模型 (所选源的计数率 < 40 counts/s/PCU), 处理数

据所采用的是 GSFC/NASA 提供的 HEASoft v.6.2 软件包, 由命令 saextract 提取光谱和光变曲线, pccarsp 命令生成响应矩阵^[18]. 数据拟合的模型有很多种, 如 MCD 模型、Power Law 模型、Laor/Smearin 模型等^[19]. 表 1 列出了不同的 XSPEC (X-ray spectral-fitting program) 模型及相关参数^[20], 并计算了对同一组数据拟合后得出的 χ^2 和自由度, 当 $\chi^2 \sim$ 自由度时, 得出的拟合结果最佳. 从表 1 中可以看出, 考虑星际介质间吸收的幂律谱模型 phabs (powerlaw) 能得到最佳的拟合结果, 最终我们选择该模型来拟合 3C 273 的计数谱. 由于计数谱不能很好地限制 N_{H} 值, 所以将其固定在 $N_{\text{H}}=1.79 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ ^[21]. 在分析原始数据基础上, 计算了 3C 273 在 2~10 keV 的光变估计量 δ_{XS} 、光变幅度 S_{V} 和光变幅度误差 $\text{err}_{F_{\text{var}}}$, 计算方法参照 Nandra 等^[22] 和 Vaughan 等^[23] 的文章.

表 1 不同 XSPEC 模型拟合光谱结果的对比

Table 1 Comparison of spectral fittings with different XSPEC models

Model	XSPEC model	χ^2	DOF	$\Delta\chi^2$
Power Law	powerlaw	48.24	48	1.005
Power law + a photo-electric	phabs (powerlaw)	48.03	48	1.001
Power law + a photo-electric + gauss	phabs (powerlaw+ga)	40.94	45	0.910
Power law + a photo-electric + bremsstrahlung	phabs (powerlaw+br)	42.26	46	0.891
Power law + high energy exponential cutoff	cutoffpl	41.86	47	0.891

3 数据处理结果

根据 RXTE 对 3C 273 的观测, 共得到 1 010 组处理结果, 观测时间 32~12960 s 不等, 典型观测时间 2 000 s 左右, 光子谱指数 Γ 的变化范围为 1.45~1.90, 平均值为 1.68 ± 0.08 , 它的分布如图 1 所示, 可以看出 3C 273 的 Γ 分布基本集中在 1.6~1.8 范围内. 流量变化范围为 $53.81 \times 10^{-12} \sim 319.35 \times 10^{-12} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均值为 $115.61 \times 10^{-12} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 扣除背景后流量随时间变化如图 2 所示. 计数率变化范围为 6.14~32.04 counts/s, 平均计数率为 $12.05 \pm 3.39 \text{ counts/s}$. $\Delta\chi^2$ 的分布如表 2, 自由度为 48~52. 从表 2 中可以看出 $\Delta\chi^2$ 最大是 1.29, 拟合结果在目前的模型中较为理想^[24]. 部分数据因信噪比太差拟合得到了偏小的 $\Delta\chi^2$, 处理时根据观测时间, 把 $\Delta\chi^2 < 0.6$ 的数据与其前后一段时间的数据合并, 从而得到更好的拟合结果. 在数据拟合 phabs (powerlaw) 模型中, 加入高斯修正后发现 Fe 发射线存在的证据, 图 3 所示为 2002 年 3 月观测数据显示的 Fe 发射线存在证据, Fe 发射线存在于 $5.74 \pm 0.25 \text{ keV}$ 处, 线宽 $\text{EW} = 139.55 \text{ eV}$.

表 2 $\Delta\chi^2$ 的分布

Table 2 Distribution of $\Delta\chi^2$

$\Delta\chi^2$	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9	0.9~1.0	1.0~1.1	1.1~1.2	1.2~1.29
Number	262	255	227	158	73	32	3

Γ 与 $\lg F_{2 \sim 10 \text{ keV}}$ 的相关分析及光变参数在表 3 中给出, 其中 R 为相关系数; P 为偶然符合概率; δ_{XS} 作为是否存在光变的判断依据; S_{V} 的大小反映了光变的强弱; $\text{err}_{F_{\text{var}}}$ 为光变幅度误差.

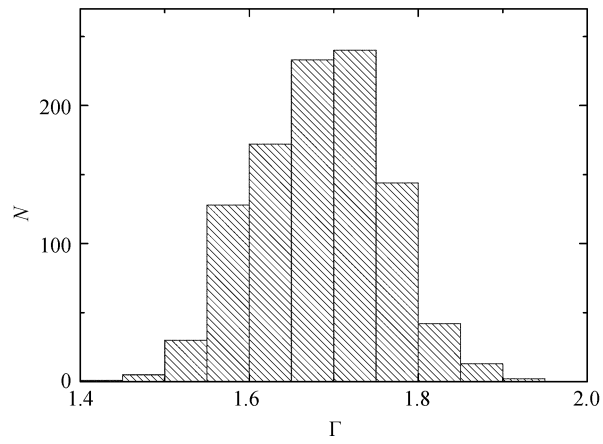


图 1 光子谱指数分布图

Fig. 1 Distribution of photon index

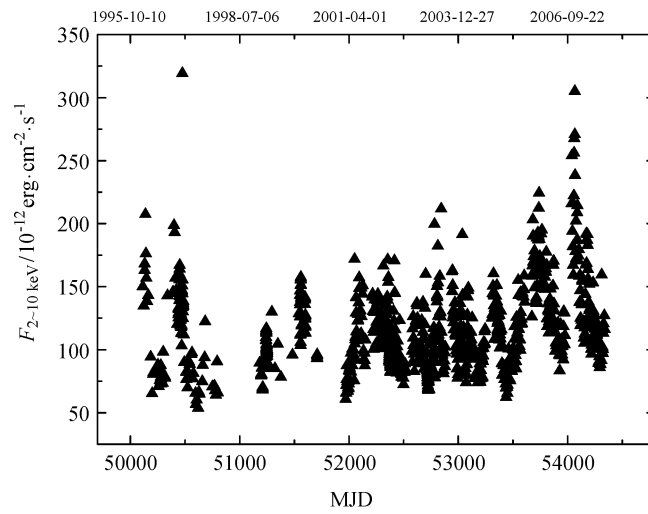


图 2 3C 273 在 2~10 keV 硬 X 射线能区的光变曲线

Fig. 2 The X-ray light curve of 3C 273 in 2~10 keV band

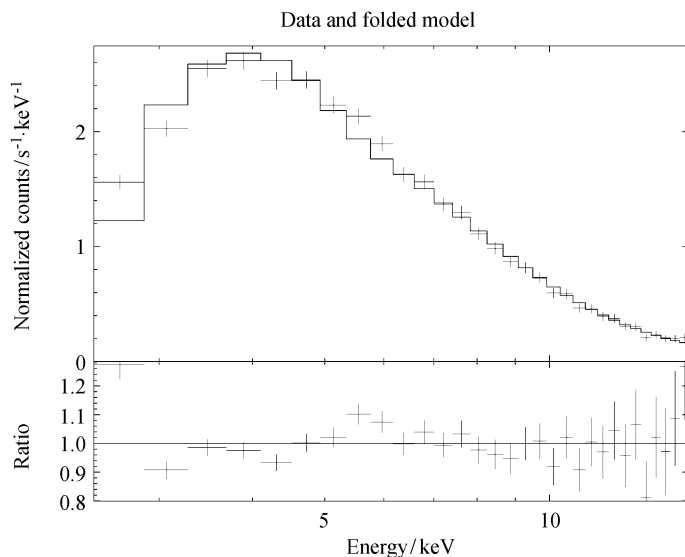


图 3 上图为 2002 年 3 月的光谱拟合图, 下图 5.7 keV 处有明显的 Fe 发射线

Fig. 3 The upper panel is the spectrum fitting diagram in March 2002. There are clear Fe emission lines at 5.7 keV shown in the lower panel

表 3 Γ 与 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 的相关系数及光变参数

Table 3 The correlation coefficient R and variability parameters between photon index Γ and flux $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$

Data observational time	R	P	δ_{XS}	S_V	$\text{err}_{F_{\text{var}}}$
Full time	-0.13	<0.0001	11.50	28.18%	0.01
February 2000	-0.64	0.0040	4.30	17.23%	0.03
March 2003	-0.56	0.0018	21.56	38.56%	0.05
April 2003	-0.76	0.0279	13.66	30.70%	0.06
February and March in 2004	-0.55	0.0078	9.34	25.38%	0.04
July 2004	-0.63	0.0159	13.49	30.48%	0.08
2006	-0.61	<0.0001	34.89	49.07%	0.03
2007	-0.55	<0.0001	9.02	24.96%	0.02

Γ 与 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 的关系如图 4 所示, 从中看出两者之间相关性较弱. 但是如果根据观测时间分段处理, 发现在部分观测时间段内, 两者存在显著的负相关, 如图 5.

从图 5 及表 3 中可以看出 Γ 与 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 在 2000 年 2 月, 2003 年 3、4 月, 2004 年 2、3、7 月, 2006 年及 2007 年里存在显著负相关, 表明在这些时间段内光子谱指数随着流量的增大而减小, 即流量增大谱变平. 而从右图的流量随时间的分布, 可以看出当 Γ 与 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 有较好的负相关时, 流量均有连续的变化, 并且大部分时间段里, 光变强度都比较大.

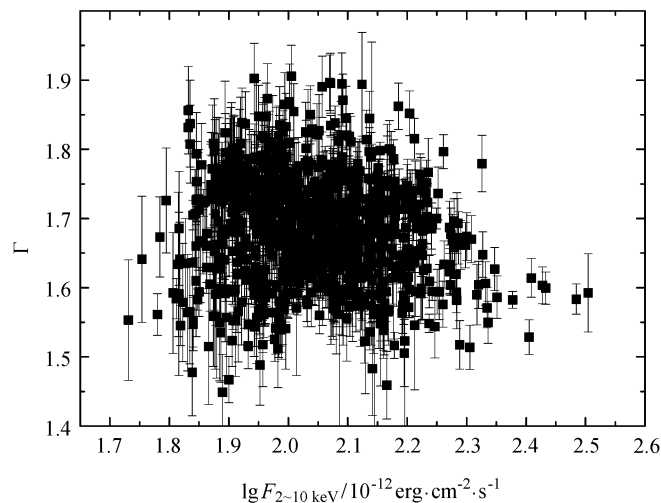


图 4 光子谱指数 Γ 与流量 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 的相关关系

Fig. 4 The correlation relation between photon index Γ and flux $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$

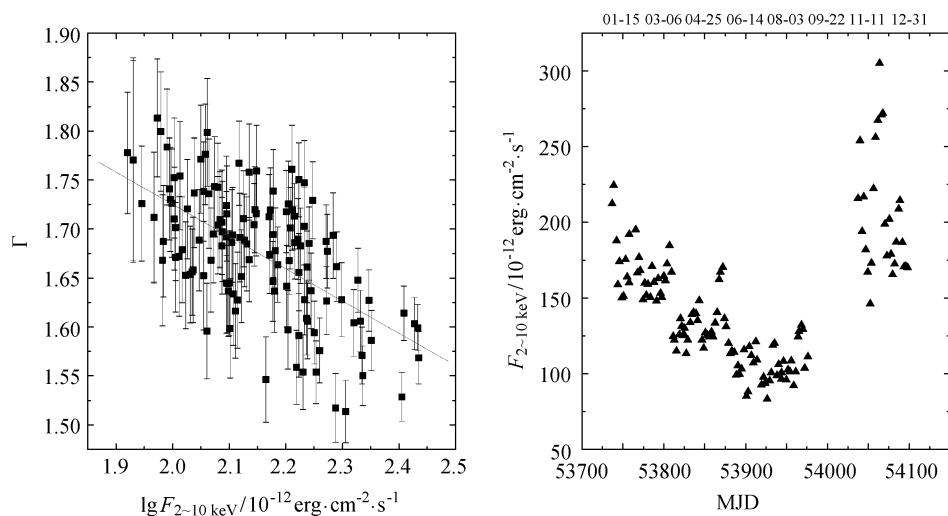


图 5 光变及能谱变化关系. 左图显示 2006 年 Γ 与 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 的相关性, 其中 $R=-0.61$, $P<0.0001$. 右图在此时间内流量随时间的变化, 其中 $\delta_{\text{XS}}=34.92$, $S_{\text{V}}=49.07\%$, $\text{err}_{F_{\text{var}}}=0.03$

Fig. 5 The relation between variability and spectral property. The left panel represents the correlation between Γ and $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ in 2006, $R=-0.61$, $P<0.0001$. The right one represents the temporal variation of flux in this period. $\delta_{\text{XS}}=34.92$, $S_{\text{V}}=49.07\%$, $\text{err}_{F_{\text{var}}}=0.03$

除了发现部分观测时间内光子谱指数与流量之间有显著的相关性外,我们还发现月平均光子谱指数和月平均流量也存在显著负相关,见图 6. 从中可以看出 2000~2007 年的数据作了月平均后 Γ 与 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 的相关性明显增强,而观测数据点较多的 1999 年在取每月平均后 Γ 与 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 的相关性也明显增强,其中 $R=-0.78$, $P=0.014$. 说明 1999 年及 2000~2007 年的观测月平均能谱随着流量的增大而变平.

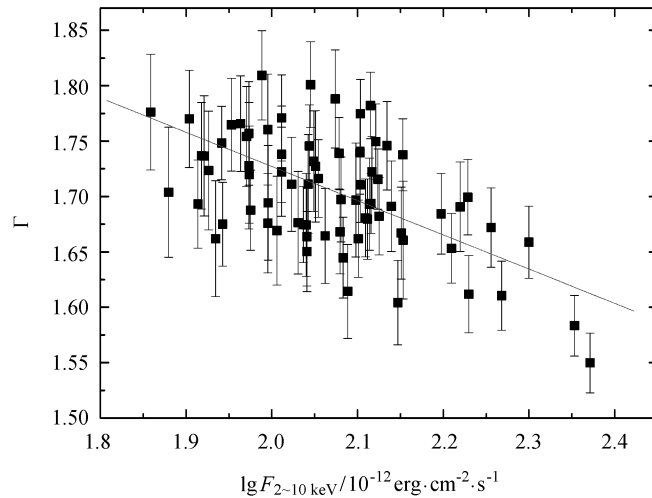


图 6 2000~2007 年的月平均 Γ 与 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 的相关性, 其中 $R=-0.62$, $P < 0.0001$

Fig. 6 The correlation between monthly average of Γ and $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ over 2000 to 2007, $R=-0.62$, $P < 0.0001$

4 结果与讨论

对 RXTE 在 X 射线能区 2~10 keV 对耀变体 3C 273 十多年的原始观测共 1 010 组数据作了详细分析, 我们得到光子谱指数和流量两个参数, 发现虽然总的光子谱指数 Γ 与流量 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 没有相关性, 但在有些时间段 Γ 与 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 具有显著的负相关. 在存在显著相关对应的时间段内, 3C 273 都具有强烈的光变. 对月平均数据分析后发现, Γ 与 $\lg F_{2\sim 10 \text{ keV}}$ 的相关性明显增强, 可以说在大部分的观测数据里, 谱是随着流量的增大而变平的. 流量与谱指数 Γ 的反相关是耀变体非热辐射的典型特征^[25], 它们的反相关表明 3C 273 在 2~10 keV 的 X 射线辐射主要是非热辐射. Deluit 等^[13] 利用 phabs (powerlaw) 模型分析处理了 XMM-Newton 和 BeppoSAX 从 1996 到 2004 年对此源的观测数据, 同样得出在 2~10 keV 内的光子谱指数和流量存在着负相关, 在部分观测中发现存在 Fe 线, 并计算出平均 Fe 线宽度 $EW=101 \text{ eV}$. Yaqoob 等^[12] 分析 ASCA 和 RXTE 从 1996 到 2000 年对此源的观测数据, 发现 3C 273 有与 Seyfert 1 相当宽度 ($EW=133 \text{ eV}$) 的 Fe 线. 我们分析得到 Fe 线平均宽度 $EW=93.85 \pm 21.49 \text{ eV}$, 这与 Deluit 等^[13] 得出的 $EW=101 \text{ eV}$ 相一致, 但比 Yaqoob 等^[12] 得出的要小得多. 对 2~10 keV 内

的能谱研究结果以及 Fe 线存在的特征表明 3C 273 具备耀变体的特征.

Chitnis 等^[26] 运用 RXTE/ASM 的数据, 计算得出 3C 273 在 1.5~12 keV 内的光变幅度 $S_V=34.7\%$, 与 Seyfert 1 的光变幅度相近. 本文得出的 3C 273 在 2~10 keV 内的光变幅度为 $S_V=28.18\%$, 远远小于 Chitnis 等^[26] 得出的耀变体的平均光变幅度 $S_V=57.3\%$, 而此结果与 Seyfert 星系的光变幅度相近. McHardy^[27] 研究了 3C 273 在 2~10 keV 的功率谱密度, 发现虽然 3C 273 的辐射聚束而 Seyfert 星系的辐射不聚束, 但 3C 273 和 Seyfert 的宽波段功率谱密度是一样的. 文献 [27] 认为在这两种源中产生光变的机制是一样的, 与本文得出的结果也一致. 总的来说, 3C 273 在 2~10 keV 同时具备耀变体与 Seyfert 星系的特点. 但由于结果仅仅基于 2~10 keV 的数据, 并不能说明 3C 273 在所有波段都同时具备耀变体与 Seyfert 星系的特点. 我们希望能分析更多数据的基础上, 进一步了解 3C 273 这个性质奇特的耀变体的基本光变行为和能谱变化特征.

致谢 本文数据经由 GSFC/NASA 的 FTP 服务器下载. 数据处理所采用的是 GSFC/NASA 提供的 HEASoft v.6.2 软件包.

参 考 文 献

- [1] Urry C M, Padovani P. *PASP*, 1995, 107: 803
- [2] Kataoka J, Tanihata C, Kawai N, et al. *MNRAS*, 2002, 336: 932
- [3] Soldi S, Türler M, Paltani S, et al. *A&A*, 2008, 486: 411
- [4] Courvoisier T J L. *A&ARv*, 1998, 9: 1
- [5] Bowyer C S, Lampton M, Mack J, et al. *ApJ*, 1970, 161: L1
- [6] Swanenburg B N, Hermsen W, Bennett K, et al. *Natur*, 1978, 275: 298
- [7] McNaron-Brown K, Johnson W N, Jung G V, et al. *ApJ*, 1995, 451: 575
- [8] Schönfelder V, Bennett K, Blom J J, et al. *A&AS*, 2000, 143: 145
- [9] Hartman R C, Bertsch D L, Bloom S D, et al. *ApJS*, 1999, 123: 79
- [10] Pacciani L, Donnarumma I, Vittorini V, et al. *A&A*, 2009, 494: 49
- [11] Paltani S, Courvoisier T J L, Walter R. *A&A*, 1998, 340: 47
- [12] Yaqoob T, Serlemitsos P. *ApJ*, 2000, 544: L95
- [13] Deluit S J, Stuhlinger M, Staubert R. *AdSpR*, 2006, 38: 1393
- [14] 陈尉, 屈进禄, 张澍, 等. *天文学报*, 2008, 49: 18
- [15] Chen W, Qu J L, Zhang S, et al. *ChA&A*, 2008, 32: 241
- [16] Gupta A C, Acharya B S, Bose D, et al. *ChJAA*, 2008, 8: 395
- [17] Ushio M, Tanaka T, Madejski G, et al. *ApJ*, 2009, 699: 1964
- [18] Miller J M, Homan J. *ApJ*, 2005, 618: L107
- [19] Miller J M, Raymond J, Fabian A C, et al. *ApJ*, 2004, 601: 450
- [20] Farrell S A, Sood R K, O'Neill P M, et al. *MNRAS*, 2008, 389: 608
- [21] Dickey J M, Lockman F J. *ARA&A*, 1990, 28: 215
- [22] Nandra K, George I M, Mushotzky R F, et al. *ApJ*, 1997, 476: 70
- [23] Vaughan S, Edelson R, Warwick R S, et al. *MNRAS*, 2003, 345: 1271
- [24] Munro M P, Morgan E H, Remillard R A, et al. *ApJ*, 1999, 527: 321
- [25] Mushotzky R F, Done C, Pounds K A. *ARA&A*, 1993, 31: 717
- [26] Chitnis V R, Pendharkar J K, Bose D, et al. *ApJ*, 2009, 698: 1207
- [27] McHardy I. *ASPC*, 2006, 350: 94

Study on X-ray Variability of Blazar 3C 273 in 2~10 keV

WU Xiao¹ LIU Zhi-min² YAN Da-hai¹ BAO Kun-sen¹ DAI Ben-zhong¹

(1 *Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091*)

(2 *Simao teacher's College, Pu'er 665000*)

ABSTRACT The X-ray raw data of blazar 3C 273 from RXTE observations are analyzed. The observational time is from Feb. 2nd 1996 to Aug. 27th 2007. The average time for each observation is 1666.76 s. Totally, the photon spectral indexes and corresponding fluxes of 1010 data are derived. The spectral properties of 3C 273 in 2~10 keV band are analyzed. It is found that there is a significant anti-correlation between the photon index and flux in February 2000, March and April 2003, February, March and July 2004, 2006 and 2007. The variability in entire observations has been investigated and some significant variations in 2~10 keV band are found. There is an evidence of Fe emission lines in some spectral fittings. Its average width is 93.85 ± 21.49 eV. By analyzing the intensity of X-ray variability and the properties of Fe emission lines, it is found that 3C 273 has both properties which belong to blazars and Seyfert galaxies.

Key words quasars: individual, X-rays: galaxies, methods: data analysis, radiation mechanisms: non-thermal