

文章编号: 1000-8349(2005)03-0239-09

基于 Chandra 的活动星系核观测

李丹丹, 王 竞, 陈 阳, 何香涛

(北京师范大学 天文系, 北京 100875)

摘要: 活动星系核 (AGN) 是宇宙中最奇特的天体之一。它是真正意义上的全波天体, 其中 X 射线波段的发射功率占到全波段功率的 50% 左右。AGN 的 X 射线辐射研究涉及天体物理中的最基本问题, 例如能量产生、辐射机制和宇宙论等, 而 Chandra X 射线卫星的高分辨率图像和光谱对这一研究有着重要作用。以 Chandra 卫星的部分观测结果为例, 简要介绍了几类不同类型 AGN 的 X 射线辐射研究进展: (1) 宽吸收线类星体 APM 08279+5255 ($z = 3.91$) 的 X 射线谱分析, 以及高红移类星体的观测概况; (2) Seyfert 星系 NGC 4151 延展 X 射线发射问题的解决, 及 NGC 1068 X 射线辐射与光学波段的高激发态发射线 ($[\text{OIII}]\lambda 5007$) 有很强相关性的发现; (3) 6 个 BL Lac 天体样本的 X 射线环境分析; (4) 射电星系 X 射线喷流的观测等。

关键词: 天体物理学; 活动星系核; 综述; Chandra; X 射线辐射
中图分类号: P172.2 **文献标识码:** A

1 引 言

1.1 活动星系核研究纪要

活动星系核 (AGN) 是宇宙中最亮的天体, 其总光度大约在 $10^{36} \sim 10^{41}$ J/s, 一般认为由中心黑洞和黑洞周围的吸积盘构成, 这也正是它能源机制所在。AGN 是真正意义上的全波天体, 往往在所有电磁波段上都有着极高的辐射, 并表现出典型的非热辐射谱型, 而其中 X 射线波段的发射功率在全波段功率中可占到 50% 左右。目前, X 射线观测仍是探测 AGN 的最强有力手段之一。研究 AGN 的 X 射线辐射有着重要的意义, 它对于理解 AGN 现象和其隐含的物理内容是必不可少的。比如, 对于明亮的幂律谱型硬 X 射线的观测、X 射线波段快速光变, 以及最近在铁的 K 线轮廓发现的相对论效应等证据充分显示, 在活动星系内部存在大质量的黑洞, 而进一步检验黑洞的辐射情况可以研究 AGN 的产能机制; AGN X 射线光度和红移关系的测量可以确定宇宙学参数 H_0 和 q_0 ; 通过 AGN 中低能 X 射线辐射在传输过程中会被星系际介质光电吸收这一性质, 可以研究星系际介质的分布和性质; 利用 X 射线光度的演化来研究 AGN 的演化, 也是宇宙学的重要内容。

收稿日期: 2004-06-14; 修回日期: 2005-03-05

由于大气的光电吸收,在各波段中天体的 X 射线辐射被大气吸收得最厉害,只有空间天文设备才能完成对天体 X 射线的观测。宇宙天体的 X 射线观测最早始于 1962 年,并在 1970 年进入 X 射线卫星探测时代,但对 AGN X 射线辐射的系统研究却是在爱因斯坦天文台^[1]升空之后。爱因斯坦天文台证实了 AGN 是强 X 射线发射天体,并发现了一批 X 射线 AGN,使 X 射线辐射研究成为深入探索 AGN 本质的关键。此后陆续发射的 X 射线卫星都对 AGN 研究有着重要贡献: HEAO-1 (High Energy Astronomy Observatories)^[2]得到了 AGN 在 2 keV 以上的中能谱的最重要特性;欧洲的 EXOSAT (European Space Agency's X-ray Observatory)^[3]确认了 AGN 软 X 射线过剩这一特性,并研究了 AGN X 射线流量变化的行为;Ginga^[4]卫星发现了 AGN 连续谱在 10 keV 以上有变平的行为,并首次发现 6 keV 铁的 X 射线谱线;ROSAT (Roentgen Satellite)^[5]卫星完成了低能 X 射线巡天,并发现相当数量的 AGN 有 X 射线辐射;ASCA (Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics)^[6]卫星发现了 AGN 的宽铁线,并探测到其中心附近区域的强引力。

上世纪 70 年代至 90 年代, X 射线卫星往往工作于低能 X 射线波段,而且能量分辨率较低,这就好比光学天文中多色测光阶段。天体物理学的发展使得光学天文研究从多色测光阶段进入光谱阶段。X 射线天文学必然也要走同样的发展道路。新一代 X 射线卫星正是为了满足光谱观测的需求。下面重点介绍一下最典型的 X 射线卫星——Chandra 卫星。

1.2 Chandra 卫星简介

Chandra 卫星是世界上第一台兼有高空间分辨率和高能量分辨率的 X 射线探测设备,它标志着 X 射线天文学从测光时代开始走向光谱时代,开创了 X 射线天文学的新纪元。Chandra

表 1 Chandra 卫星各探测器主要指标和参数^[9]

		ACIS back ¹⁾	ACIS front ¹⁾	HRC ²⁾	HETG ³⁾	LETG ⁴⁾
能段 /keV		0.1~10	0.4~10	0.1~10	0.6~10	0.1~6
有效面积 /cm ²	0.25 keV	30		150		25
	0.4 keV	120	35	50		12
	0.6 keV	345	70	65		25
	1.0 keV	615	385	215	10	55
	1.5 keV	500	525	162	45	105
	2.5 keV	320	320	65	20	50
	6.0 keV	205	235	45	25	20
	8.0 keV	45	60	10	7	4
能量分辨率 /eV	0.25 keV	130	37			0.4
	0.4 keV	120	42			0.8
	1.0 keV	100	56		1.0	5.4
	2.5 keV	120	82		5.2	34
	6.0 keV	170	130		29	
	8.0 keV	190	150		50	
角分辨率 /(")		1	1	< 0.5		
视场 /(') ²		17 × 17	17 × 17	31 × 31		

注: 1) ACIS (Advanced CCD Imaging Spectrometer), 即高新 CCD 成像频谱仪; 2) HRC (High Resolution Camera), 即高分辨率照相机; 3) HETG (High Energy Transmission Grating), 即高能透射光栅; 4) LETG (Low Energy Transmission Grating), 即低能透射光栅。

卫星具有以下特点^[7,8]: (1) 宽能段 (0.1~10 keV); (2) 高空间分辨率 (小于 1''), 角分辨本领已经超过地面天文的角分辨本领; (3) 高能量分辨率, 分辨本领已相当于地面光谱仪的能力; (4) 大接收面积; (5) 对 X 射线高能端灵敏。这些特点使得它可以观测更暗弱的源, 且既可成像, 又能得到高分辨率的光谱。Chandra 能够获得相当丰富的关于结构等细节的信息, 比如可以研究很多从前被认为是“点”源的类星体、AGN 的结构、喷流, 以及星系间发生的相互作用过程。表 1 列举了 Chandra 卫星各探测器的主要指标和参数^[9]。

2 基于 Chandra 的 AGN 观测

2.1 类星体

类星体是高光度的 AGN, 能用来探测宇宙最深处。尽管它早在 30 多年前就被发现了, 且天文学家做了大量的研究工作, 但是它的物理及宇宙学特性等仍有很多问题有待解决。类星体的 X 射线谱对于了解类星体的物理性质十分重要, 许多类星体都表现出很强的 X 射线辐射。X 射线起源于类星体核心附近, 可能的机制是: 来自冕区运动温度极高的非相对论电子对光子的逆康普顿散射。另外, 核区发生的韧致辐射可能导致软 X 射线辐射。

通过 X 射线波段观测的类星体中, 有一类性质很重要却又很罕见的类星体——宽吸收线 (BAL) 类星体。此类类星体表现出宽的紫外波段吸收线, 这些吸收线的特性能够提供很多类星体中各种独立成分的信息: 不同的速度、柱密度、电离状态等, 而这些都是研究外向流 (outflow) 的必要信息。一般认为, 观测到宽吸收线可能是空间取向造成的。宽吸收线类星体之所以罕见, 是因为通常情况下, 它们是 X 射线弱的。一种流行的解释认为, 这是强烈的过剩吸收所致。因此, 宽吸收线类星体的观测数据受低信噪比影响很严重, 探测到的典型 X 射线光子数为 50 到几百左右。目前获得的 X 射线谱信噪比普遍不理想, 最好也只能达到中等水平^[12~20]。

所幸的是, Chandra 卫星观测到了一颗宽吸收线类星体 APM 08279+5255 ($z = 3.91$) 信噪比较高的 X 射线谱 (见图 1)^[21]。由于受引力透镜效应影响, 该类星体的 X 射线波段流量被放大了约 100 倍^[22,23]。不过即便做过引力透镜改正后, 该类星体的亮度仍然很高。从 X 射线谱上可以看到两条明显的吸收线, 分别位于 8.1 keV 和 9.8 keV 处 (静止坐标系下), 用 F 检验确定两条谱线的置信水平在 99.9% 以上。通过分析发现, 造成 X 射线宽吸收线的吸收体存在的半径小于 2×10^{17} cm, 在紫外吸收体的预期范围之内。由此推断, X 射线气体可以阻碍紫外吸收体被中心 X 射线源完全电离^[24]。这些结论与流体动力学模拟的结果一致^[25]。估计造成此类星体 X 射线宽吸收线的外向流的质量流失率每年不会超过一个太阳质量。

还有一类类星体很值得一提, 那就是高红移类星体, 因为它们能够直接反映宇宙早期的各种信息。近期地面光学巡天 (如 SDSS^[26]、DPOSS^[27]、2df^[28]) 证认出了相当数量的高红移类星体, 目前已知 $z > 4$ 的类星体估计有 500 多颗。这些类星体大部分都适用于 X 射线辐射研究。

Chandra 就曾成功地探测到极高红移 SDSS 类星体的 X 射线辐射^[29~32]。另外, 它的深场巡天^[33]能够探测到流量更小且 $z > 4$ 的 AGN。ChaMP (Chandra Multi-wavelength Project)^[34]项目也将探测到较高红移的类星体。

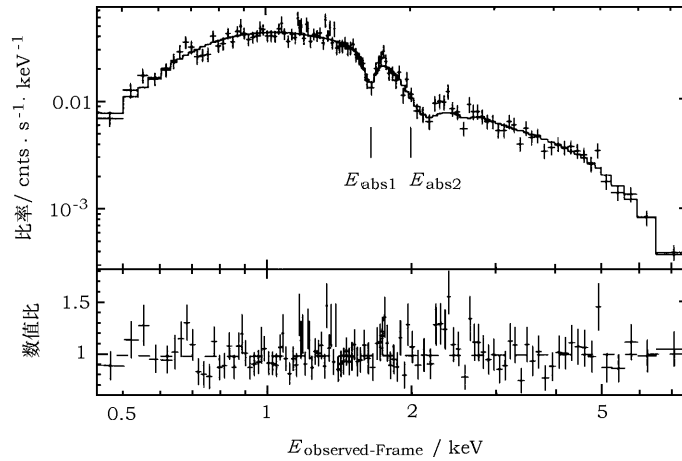


图 1 Chandra 卫星得到的类星体 APM 08279+5255 光谱^[21]

下图是数据与模型对应的数值比。

大多数高红移类星体的 X 射线辐射光度都过低，其原因到底是谱的演化效应，还是由于吸收，或是其他什么因素目前还在研究当中。有关类星体红移的本质至今仍是一个有争议的话题。高红移类星体是研究早期宇宙黑洞吸积的关键，因此它仍将是未来 X 射线研究的一个重要目标。

2.2 Seyfert 星系

Seyfert 星系的谱线强度和轮廓相当复杂。根据它光学谱线的宽度、发射线形状等，可细分为很多次型：Seyfert 1、Seyfert 2 以及 Seyfert 1.5、Seyfert 1.8、Seyfert 1.9 等^[35]。Seyfert 星系的 X 射线辐射是表明其星系核心存在活动性的强有力证据。

NGC 4151 属 Seyfert 1.5 型星系，是研究较充分的 AGN 之一，但它的很多细节仍然不清楚。Chandra 解决了它的延展 X 射线发射问题。图 2 是其高分辨 X 射线谱^[36]。该谱中窄发射线占主导；窄线区有多种成分，既有光致电离，也有碰撞电离的组分，这两种电离机制都很主要。X 射线发射线与光学发射线有相似的速度、宽度和空间延展度，表明它们来自同一个区域。窄线区的云中必然包括一系列电离态，只有这样才能解释光学和 X 射线的光致电离辐射。类似地，在其他 Seyfert 星系看到的窄 X 射线发射线也可能来自窄线区，可以沿用 NGC 4151 的某些观测特性来解释。

Chandra 最初公布的 AGN X 射线图像中包括一个 Seyfert 2 型活动星系 NGC 1068^[37]。该星系的核是一个很强的 X 射线源，很早就有人认为它的 X 射线辐射是延展的，Chandra 首次给出了它大量细节信息。从 Chandra 高分辨 ($< 1''$) X 射线图像上 (见图 3)，可以看到一个与射电和光学辐射成协的明亮致密的核，以及星系的模样和旋臂的 X 射线辐射；同时还有一定数量的点源。通过对比 X 射线与光学、射电辐射发现，X 射线辐射与光学波段的高激发态发射线 ($[OIII]\lambda 5007$) 有很强的相关性，且两个波段均与光致电离一致；核的射电瓣形态也与 X 射线辐射有关；星际间的气体有被射电喷出物挤压过的迹象。

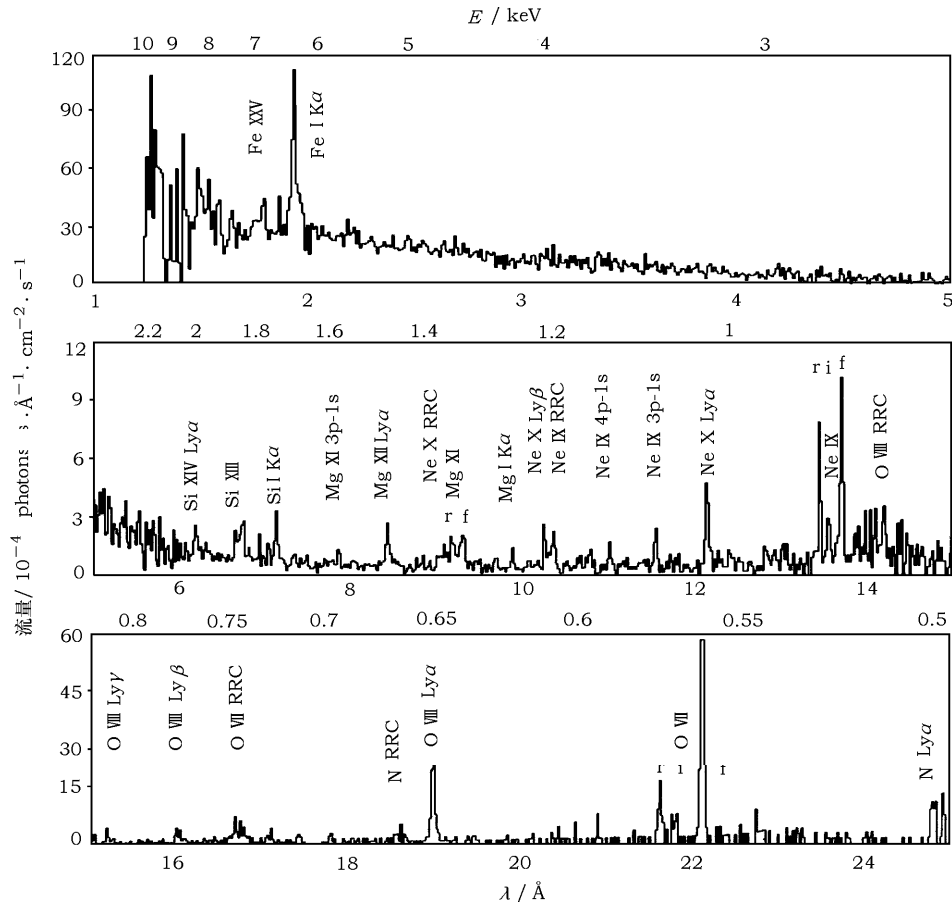


图 2 Chandra 得到的 NGC 4151 能谱图^[36]

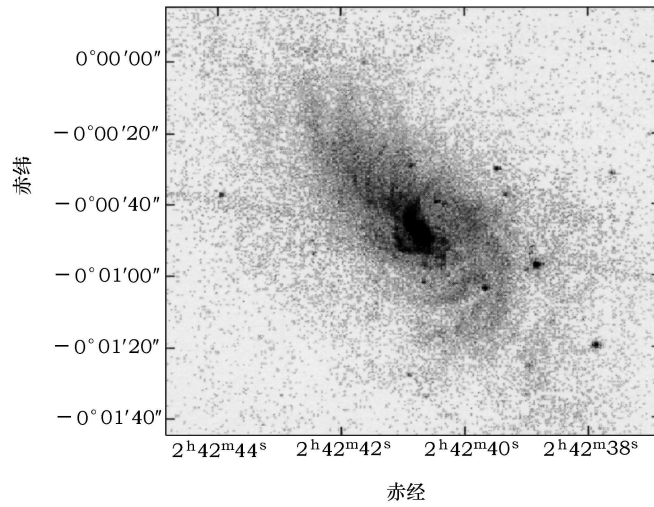


图 3 NGC 1068 的 Chandra X 射线图^[37]

其中波段为 0.25~7.50 keV。

2.3 BL Lac 天体

BL Lac 天体具有非常亮的星系核，短时间曝光可呈现出类似恒星的星象，有光变，且光变时标与波段有关，其实质是具有偏振的射电源的光学对应体。最初发现的 BL Lac 天体都是通过射电巡天得到的，后来发现，利用 X 射线巡天是寻找 BL Lac 天体的另一个重要途径。BL Lac 天体的 X 射线谱表现为非热型，需要用双幂律谱才能与观测拟合得更好。一般认为，BL Lac 天体双谱中的软 X 射线部分源于同步辐射，而硬 X 射线部分源于逆康普顿过程。

目前，由于 Chandra 卫星具有强大的空间分辨本领，能够将核区的 X 射线辐射与寄主星系或星系团的弥漫 X 射线辐射区分开来，这样就可以研究 BL Lac 天体的 X 射线环境。最近，对 6 个 BL Lac 天体样本的分析表明^[38]，其中 3 个源 (BL Lac、PKS 0548-322 和 PKS 2005-489) 的弥漫 X 射线辐射可以用 $\beta \approx 0.3 \sim 0.6$ 的 King 轮廓来拟合，核半径 $r_c \approx 15 \sim 28$ kpc；另 3 个源中，源 1ES 2344+514 和 1ES 2321+419 在 kpc 尺度上也呈现出弱的弥漫辐射，而 3C 371 的径向轮廓完全与某未知源一致。这几个源的核半径和弥漫 X 射线辐射的流量与 FR I 射电星系对应的观测值非常接近。这些发现对如今流行的强射电 AGN 统一模型^[39,40]提供了有力支持，即 BL Lac 天体和 FR I 射电星系本质是一样的，只是两者喷流的朝向不同，前者更接近于视向。

为了更好地研究弥漫气体的物理性质，给统一模型提供强有力的证据，仍需要更大样本的 BL Lac 天体的 X 射线观测。

2.4 射电星系喷流

部分活动星系会发射很强的射电连续辐射，而射电辐射较强的区域并不在星系核内而在星系核外。射电星系一般是具有双瓣射电喷流的巨或超巨椭圆星系。如果 AGN 的核心部分是由黑洞和吸积盘组成，那么，喷流的出现正好可以用来解释吸积盘中角动量的丢失问题。气体从星系核心部分被抛射出去，形成充满热等离子体的喷流。

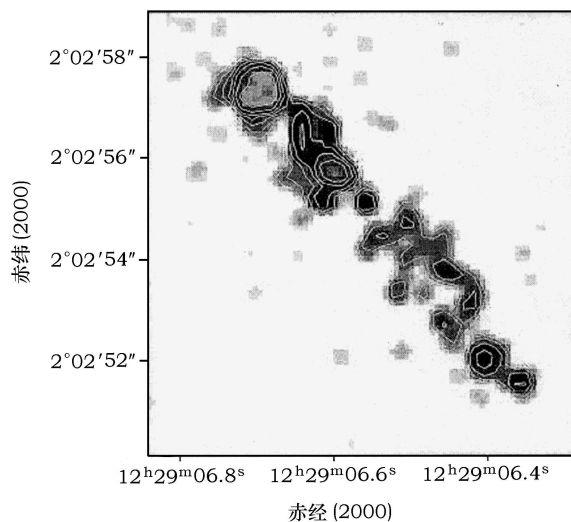


图 4 来自 Chandra ACIS-S 的 3C 273 喷流图^[41]

其中波段为 0.2~8 keV。

用 X 射线波段观测射电区域也许是研究喷流最有效的方法。近来, Chandra 观测到很多类星体表现出 X 射线喷流(如图 4)^[41], 喷流以非常快的速度传播到很远的地方。X 射线喷流的产生机制很可能是宇宙微波背景(CMB)的光子与喷流内的相对论性粒子发生逆康普顿散射所致^[42,43]。那些高红移强射电的类星体是 X 射线喷流的最佳候选体, 然而它们的数量相当少^[44]。Schwartz^[45]曾报告过一次极大红移类星体($z = 5.99$)的 X 射线喷流观测, 但这一类星体没有明显的射电对应体^[46]。高红移 X 射线喷流样本一方面能提供一种检验 CMB 随红移演化的方法, 而 CMB 正是标准大爆炸宇宙学的基本预言, 另一方面能据此修正 X 射线喷流模型。

3 结 语

AGN 的 X 射线辐射研究涉及天体物理学的最基本问题, 例如能量产生、辐射机制和宇宙论等。它从最初的发现和发展, 伴随观测技术的改进和提高, 到如今与相应理论的结合应用, 在天体物理学研究领域里日益占据重要地位, 对其本质及特性的研究是目前国际上最活跃、发展最迅速的前沿领域之一。未来, 一个有潜力的方向是对硬 X 射线辐射的研究。硬 X 射线波段从 10~250 keV, 以非热致辐射为主, 是研究致密天体特征辐射和决定发射区特征参数的关键所在, 其中包括 AGN 中巨型黑洞附近的硬 X 射线冕区的描述及其参数确定, 是研究 AGN 中心产能区吸积过程和粒子产能过程的最佳途径。另一项受关注的项目是 X 射线巡天(ROSAT 卫星已经完成了低能 X 射线巡天)。比之目标观测, 巡天研究更能发现新类型天体和未预料的天体物理现象, 同时有助于类型划分、统一模型和演化研究^[50]。

随着探测技术的巨大进步, 人们对不同层次、不同天体中热致和非热致的 X 射线发射起源、AGN 最内区动力学模型和演化性质等问题的研究都将有突破性进展。新设备的研制对天文研究有着重要意义。预计新一代 X 射线卫星项目, 比如日本的 Astro-E2^[47]、美国的 Constellation-X^[48] 以及欧洲的 XEUS (X-Ray Evolving Universe Spectroscopy)^[49], 都将探测到更多新的 X 射线源, 获得更丰富的源结构、光谱等信息, 对积累 AGN 样本、研究其 X 射线辐射和演化、探索其本质起到更重要的作用。

参考文献:

- [1] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/einstein/heao2.html>
- [2] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heao1/heao1.html>
- [3] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/exosat/exosat.html>
- [4] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/ginga/ginga.html>
- [5] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/rosat.html>
- [6] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/asca/asca.html>
- [7] Weisskopf M C, Brinkman B, Canizares C *et al.* PASP, 2002, 114: 1
- [8] van Speybroeck L P. Am. Astron. Soc., 1997, 190: 3403
- [9] http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xmm/about_why.html
- [10] Becker R H, Fan X H, White R L *et al.* AJ, 2001, 122: 2850
- [11] Pentericci L, Fan X H, Rix H-W *et al.* AJ, 2002, 123: 2151

- [12] Green P J, Schartel N, Anderson S *et al.* ApJ, 1995, 450: 51
- [13] Gallagher S C, Brandt W N, Sambruna R M *et al.* ApJ, 1999, 519: 549
- [14] Brinkmann W, Wang T, Matsuoka M *et al.* A&A, 1999, 345: 43
- [15] Brandt W N, Laor A, Wills B J. ApJ, 2000, 528: 637
- [16] Wang T G, Brinkmann W, Yuan W *et al.* ApJ, 2000, 545: 77
- [17] Chartas G, Dai X, Gallagher S C *et al.* ApJ, 2001, 558: 119
- [18] Gallagher S C, Brandt W N, Laor A *et al.* ApJ, 2001, 546: 795
- [19] Green P J, Aldcroft T L, Mathur S *et al.* ApJ, 2001, 558: 109
- [20] Oshima T, Mitsuda K, Fujimoto R *et al.* ApJ, 2001, 563: 103
- [21] Chartas G, Brandt W N, Gallagher S C *et al.* ApJ, 2002, 579: 169
- [22] Egami E, Neugebauer G, Soifer B T *et al.* ApJ, 2000, 535: 561
- [23] Muñoz J A, Kochanek C S, Keeton C R. ApJ, 2001, 558: 657
- [24] Murray N, Chiang J, Grossman S A *et al.* ApJ, 1995, 451: 498
- [25] Proga D, Stone J M, Kallman T R. ApJ, 2000, 543: 686
- [26] York D G, Adelman J, Anderson J E Jr *et al.* AJ, 2000, 120: 1579
- [27] Djorgovski S G, Gal R R, Odewahn S C *et al.* Am. Astron. Soc., 1998, 193: 1301
- [28] <http://www.aao.gov.au/local/www/2df/>
- [29] Brandt W N, Schneider D P, Fan X H *et al.* ApJ, 2002, 569: 5
- [30] Mathur S, Wilkes B J, Ghosh H. ApJ, 2002, 570: 5
- [31] Schwartz D A. ApJ, 2002, 571: 71
- [32] Bechtold J, Siemiginowska A, Shields J *et al.* ApJ, 2003, 588: 119
- [33] Alexander D M, Bauer F E, Brandt W N *et al.* AJ, 2003, 126: 539
- [34] Silverman J D, Green P J, Kim D-W *et al.* ApJ, 2002, 569: 1
- [35] Osterbrock D E. Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei, Knudsen: University Science Books, 1989: 312~313
- [36] Ogle P M, Marshall H L, Lee J C *et al.* ApJ, 2000, 545: 81
- [37] Young A J, Wilson A S, Shopbell P L. ApJ, 2001, 556: 6
- [38] Donato D, Gliozzi M, Sambruna R M *et al.* A&A, 2003, 407: 503D
- [39] Antonucci R. ARA&A, 1993, 31: 473
- [40] Urry C M, Padovani P. PASP, 1995, 107: 803
- [41] Sambruna R M, Urry C M, Tavecchio F *et al.* ApJ, 2001, 549: 161
- [42] Tavecchio F, Maraschi L, Sambruna R M *et al.* ApJ, 2000, 544: 23
- [43] Celotti A, Ghisellini G, Chiaberge M. MNRAS, 2001, 321: 1
- [44] Snellen I A G, McMahon R G, Dennett-Thorpe J *et al.* MNRAS, 2001, 325: 1167
- [45] Schwartz D A. ApJ, 2002, 571: 71
- [46] Petric A O, Carilli C L, Bertoldi F *et al.* AJ, 2003, 126: 15
- [47] <http://www.astro.isas.jaxa.jp/astroe/index.html.en>
- [48] <http://constellation.gsfc.nasa.gov>
- [49] Parmar A N, Hasinger G, Arnaud M *et al.* Proc. SPIE, 2003, 4851: 304
- [50] 王绶琯, 周又元编. X 射线天体物理学, 北京: 科学出版社, 1999: 485~486

The X-ray Emissions of AGNs Based on the Observations From Chandra

LI Dan-dan, WANG Jing, CHEN Yang, HE Xiang-tao

(Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Active Galactic Nuclei (AGNs) are among the most spectacular objects in the Universe. They produce prodigious emission over an extraordinary broad range in frequency, within which the fraction in X-ray is about 50%. Their research in X-ray is essential in many aspects of astrophysics, such as energy production, radiation mechanism and cosmology, etc. The X-ray spectra and X-ray images with high spatial resolution, which are provided by the X-ray observatory Chandra, allow us to further investigate AGNs, especially to understand the core regions and the physical processes in the center. We here briefly present the recent progress based on Chandra, including (1) the introduction of the X-ray observations of broad absorption line quasar (BAL QSO) APM 08279+5255 and the important role of X-ray observations of high-redshift QSOs; (2) for the Seyfert galaxy NGC 4151, the Chandra's X-ray spectra with high spectral resolution to explore its extended X-ray emission, and the X-ray images of NGC 1068 with high spatial resolution indicating that its X-ray emission is strongly related with high-ionization emission line ([OIII] λ 5007); (3) the analysis of X-ray environment of a sample of 6 BL Lac objects; (4) the X-ray jets identified by Chandra observations.

Key words: astrophysics; AGN; review; Chandra; X-ray