

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.01.08

窄线赛弗特 I 型星系中可能具有吸积盘 热辐射起源的软 X 射线超

李 晔^{1,2,3}

(1. 中国科学院 国家天文台/云南天文台, 昆明 650011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

摘要: 理论上, 低质量高吸积率活动星系核的标准吸积盘黑体热辐射有可能形成软 X 射线波段的超出。然而, 活动星系核的软 X 射线超温度为 0.1 keV 左右, 显著高于标准吸积盘理论预言的最高有效温度。只有 Yuan 等人在 2010 年报道的 RX J1633+4718 是一个例外, 其软超温度为 $32.5_{-6.0}^{+8.0}$ eV, 显著小于 0.1 keV, 并与吸积盘理论预言的温度相符; 此外, 其光度也符合吸积盘的理论预期。因此该软 X 射线超很可能起源于吸积盘的热辐射。这一类源对于吸积盘理论和软 X 射线超的研究都有重要意义。文中使用 ROSAT PSPC 数据, 在所有已知的窄线赛弗特 I 型星系 (Narrow Line Seyfert I galaxies, NLSIs) 中寻找类似于 RX J1633+4718 的源, 即软 X 射线超可能起源于吸积盘热辐射的源。分析了 150 个源的 245 条光谱, 其中 58 个源的 90 条光谱具有显著的软 X 射线超。样本中软 X 射线超温度分布的平均值 \bar{T}_{soft} 为 0.10 keV, 标准偏差为 0.03 keV。除了 RX J1633+4718 外, 只有 3 个源的软 X 射线超温度小于 60 eV, 而且温度接近吸积盘最高温度。这个结果表明, 类似于 RX J1633+4718 的具有低温软 X 射线超的源很稀少。最后, 在具有黑洞质量估计的 26 个源中, 软超温度与黑洞质量 M_{BH} 、爱丁顿比 L/L_{Edd} 及预期吸积盘最高温度 T_{max} 都没有明显的关联性, 与前人的结果一致。

关键词: 活动星系核; 吸积盘 X 射线热辐射; 软 X 射线超

中图分类号: P157.6 **文献标识码:** A

1 引 言

活动星系核中心存在超大质量黑洞, 物质落入中心黑洞的过程中形成吸积流, 并产生辐射^[1-3]。理论上, 明亮活动星系核的吸积流由光学厚几何薄的标准吸积盘主导^[1, 4]。光学厚的吸积盘上每一处产生的辐射都为黑体热辐射。由于吸积盘沿径向存在着温度分布, 标准盘产生的总辐射谱为多温黑体谱^[1]。在低能端由外盘的低温瑞利-金斯极限主导, 中能端由吸积

收稿日期: 2012-05-10; 修回日期: 2012-05-24

资助项目: 国家自然科学基金 (11033007); 973 项目 (2009CB824800)

盘上的温度分布决定, 在高端由最高温度 T_{\max} 的维恩极限主导^[5-7]。

与中心黑洞距离为 R 处的表面有效温度为^[8, 9]:

$$\begin{aligned} T_{\text{eff}}(R) &= \left[\frac{3GM_{\text{BH}}\dot{M}}{8\pi\sigma R^3} \left(1 - \sqrt{\frac{R_{\text{in}}}{R}} \right) \right]^{1/4} \\ &= 6.24 \times 10^5 \left(\frac{R}{R_s} \right)^{-3/4} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^8 M_{\odot}} \right)^{-1/4} \dot{m}^{1/4} \left(1 - \sqrt{\frac{R_{\text{in}}}{R}} \right)^{1/4} \text{ K} . \end{aligned} \quad (1)$$

其中 M_{BH} 为黑洞质量; \dot{M} 为质量吸积率, 表示单位时间黑洞吸积物质的质量。 $\dot{m} = \dot{M}/\dot{M}_{\text{Edd}}$ 是无量纲吸积率, 其中 \dot{M}_{Edd} 是爱丁顿吸积率; 假设能量转换效率 $\eta = 0.1$ 的情况下, $\dot{M}_{\text{Edd}} = L_{\text{Edd}}/(\eta c^2) = 1.39 \times 10^{18} (M/M_{\odot}) \text{ g/s}$, 其中爱丁顿光度 $L_{\text{Edd}} = 1.3 \times 10^{31} (M_{\text{BH}}/M_{\odot}) \text{ J/s}$ 。 R_{in} 为吸积盘内半径, 标准吸积盘中可以延伸到最内稳定轨道。 R_s 为史瓦西半径 (Schwarzschild radius)。对于自旋为零的史瓦西黑洞, $R_{\text{in}} = 3R_s$ 。标准吸积盘表面的有效温度在距离黑洞的半径为 $R_{\max} = (49/36)R_{\text{in}}$ 处达到最高, 为^[8, 9]

$$T_{\max} = 11.5 \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^8 M_{\odot}} \right)^{-1/4} \dot{m}^{1/4} \text{ eV} . \quad (2)$$

由公式 (2) 可以看到, 一个黑洞质量为 $10^8 M_{\odot}$, 吸积率为 $0.1\dot{M}_{\text{Edd}}$ 的典型活动星系核, 吸积盘的最高温度为 6.5 eV, 大部分能量都分布在远紫外 (far ultraviolet, FUV) 到极紫外 (extreme ultraviolet, EUV) 波段, 由于气体光电吸收而无法探测到。由于目前 X 射线探测器的低能探测窗口最低只能达到 0.1 keV, 普通活动星系核吸积盘对软 X 射线的贡献也比较难探测。但是, 其中低质量高吸积率的活动星系核, 如窄线赛弗特 I 型星系, 吸积盘最高温度可以达到 30 eV, 能够在软 X 射线波段形成显著的超出。

观测上, 软 X 射线的超出是活动星系核中 X 射线谱普遍而重要的特征。如果软超来自吸积盘直接的热辐射, 则根据上面盘温度的公式 (2), 其温度与黑洞质量反相关, 与吸积率正相关。但目前观测上发现, 用黑体谱拟合的软 X 射线超温度为 0.1 keV 左右, 显著高于吸积盘的预期, 并且与黑洞质量和吸积率都不相关^[10-13], 再加上软超成分的光度也与理论预言的不相符, 人们普遍认为, 软 X 射线超不是起源于吸积盘热辐射。现在的研究认为, 软 X 射线超有可能来源于康普顿化的软光子^[10, 14, 15]。软光子可能来源于吸积盘的辐射, 康普顿化软光子是光深约 20, 温度为 0.1 keV 左右的等离子体。考虑到加热和冷却平衡, Gierliński 和 Done^[10] 于 2004 年发现, 即使种子光子温度的变化高达 20 倍, 康普顿化软光子的等离子体温度变化也少于 3 倍。而一般情况下, 吸积盘温度的变化都没有那么大, 等离子体的温度变化将更小, 这也就解释了软 X 射线超温度变化不显著的现象。另一种经常讨论的机制是软 X 射线超的反射起源。在 X 射线被吸积盘反射的过程中, 由于 0.7~3 keV 的光电吸收比较强, 反射相对比较弱, 导致 0.7 keV 以下形成了一个相对于高能超的超出, 再加上相对论展宽的软 X 射线发射线, 就表现为 1~2 keV 以下的软 X 射线超^[12, 16-18]。由于反射起源认为, 软 X 射线超与原子物理过程相关, 因此软超的位置是不变的, 温度也就不会有很大变化。虽然康

普顿化起源和反射起源还有待解决的问题,同时吸收起源以及细致的吸积盘模型等也能够解释软 X 射线超温度变化不大的现象^[10, 19, 20],但是软 X 射线超的吸积盘热辐射起源已经基本被排除了。

虽然在大多数的源中,我们都没有观测到标准吸积盘的 X 射线热辐射,还是存在一个特例, RX J1633+4718 (SDSS J163323.58+471859.0)^[21]。它是一个射电噪 (radio loud) 的窄线赛弗特 I 型星系。光学光谱估计的黑洞质量 M_{BH} 约为 $3 \times 10^6 M_{\odot}$, 爱丁顿比 $L/L_{\text{Edd}} = 0.69_{-0.35}^{+0.73}$ 。其中,黑洞质量使用 $\text{H}\alpha$ 宽成分的光度和半高全宽 (Full Width Half Maximum, FWHM) 估计^[22],热光度 $L = 10\lambda L_{\lambda 5100}$ ^[23]。为了减少喷流、寄主星系等辐射的污染, $\lambda L_{\lambda 5100}$ 通过 $\text{H}\beta$ 宽成分的光度估计得到^[24]。Yuan 等人^[21]分析了它的 ROSAT 光谱,发现它的软超温度显著低于一般活动星系核的软超温度,为 $32.5_{-6.0}^{+8.0}$ eV。在假设吸积率 $\dot{m} = L/L_{\text{Edd}}$ 的情况下,正好与标准吸积盘中预言的最高温度相符合。而且用拟合光度 ($3.5_{-1.5}^{+3.3} \times 10^{37}$ J/s) 估计的辐射区半径是它的黑洞史瓦西半径的几倍,说明它的软超很可能来源于黑洞附近。进一步分析表明,吸积盘模型也能够很好地拟合它的软 X 射线超,通过拟合参数估计的黑洞质量和吸积率与光学光谱的估计值正好相符。RX J1633+4718 的软超很可能来源于吸积盘的 X 射线热辐射,为我们提供了一个研究吸积盘辐射的新方法。同时, RX J1633+4718 的软超与普通活动星系核的软超不同,有助于认识普通软 X 射线超的本质。因此,寻找类似于 RX J1633+4718 的,具有低温软 X 射线超的活动星系核是很有意义的。

在本文中,我们尝试着寻找更多这样的源。由于标准吸积盘的最高温度反比于 $M_{\text{BH}}^{1/4}$, 正比于 $\dot{m}^{1/4}$, 黑洞质量小吸积率高的窄线赛弗特 I 型星系具有比较高的吸积盘温度,落入 X 射线可探测波段的可能性比较大。RX J1633+4718 也正是一个窄线赛弗特 I 型星系,因此,我们将在窄线赛弗特 I 型星系中寻找类似于 RX J1633+4718 的天体。由于我们探测的是温度约为 30 eV 的黑体辐射,软 X 射线的低能截止窗口很重要。XMM-Newton 的 EPIC 探测器低能端只到 0.2~0.3 keV, Chandra ACIS 探测器低能端也只到 0.3 keV,因此,我们选用了低能端达到 0.1 keV 的 ROSAT PSPC 定点观测的数据。

我们将在第二章中给出我们所使用的样本,第三章中描述数据处理和分析过程,第四章给出我们的结果,第五章是总结和讨论。使用的宇宙学参数为 $H_0 = 70 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_{\Lambda} = 0.7$ 。如果没有特别申明,所给出的误差置信度为 1σ , 即 68%。

2 样本

我们的窄线赛弗特 I 型星系样本包括 Zhou 等人^[25]2006 年文章中的 2011 个源和第 13 版 Véron-Cetty & Véron 活动星系核样本中的 2034 个源^[26]。除去重复的源之后,共 2334 个窄线赛弗特 I 型星系。我们将这些源与 ROSAT PSPC 源表^①进行交叉相关认证,匹配半径为 40"。选择 40" 为匹配半径是出于对 PSPC 源表中源的位置精度的考虑。由于我们需要对光谱进行处理,因此只关心光子计数大于 150 的 ROSAT 源。首先,在 PSPC 源表中,列

^①<ftp://ftp.xray.mpe.mpg.de/rosat/catalogues/2rxp/pub/>

出了部分源的位置误差 (epos)^[27, 28], 其中大部分源的位置误差小于 12"; 这些源的偏轴角度 (off-axis, OAX) 均小于 22', 平均偏轴为 7.8'。第二, 源表中还存在大量没有位置精度, 偏轴大于 22' 的源, 这些源的平均偏轴为 37'。通过 ROSAT PSPC 的点扩展函数我们可以计算出, 偏轴为 37' 的源半高全宽为偏轴为 7.8' 的源的 3 倍^[29], 可以估计这些源的位置精度约为 36", 因此, 我们使用 40" 来进行匹配。

为了减少偶然符合产生的污染, 对于每一个窄线赛弗特 I 型星系, 我们查看与它匹配上的 ROSAT 源的观测序列号 (sequence ID)。如果同一观测序列号的两个源与同一个窄线赛弗特 I 型星系匹配上, 则只取其中与目标源最近的那一个源。共有 150 个窄线赛弗特 I 型星系的 245 次观测光子数大于 150。为了得到有效的光谱分析结果, 我们只对光子数大于 150 的这 245 次观测进行光谱处理和分析。

3 数据处理及分析

根据 ROSAT PSPC 源表中的观测序列号 (sequence ID), 我们下载了每一次观测的数据^①, 并使用 xselect(V2.4b) 和 FTOOLS, 以标准 ROSAT PSPC 处理过程^[30]进行数据处理。对于每一个目标源, 我们通过它的偏轴角度计算点扩展函数, 并得到包含 90% 能量的圆的半径, 用这个半径对目标源进行能谱抽取^[29]。背景谱通过以目标源为中心的圆环来抽取。圆环内半径为源的抽取半径的 1.5 倍, 外半径为源的抽取半径的 3 倍。偏轴源的探测器有效面积相对于轴心处源的有效面积有一个改正, 这个改正通过使用 pcarf 命令产生各偏轴源的 ARF 文件来进行。在进行光谱拟合之前, 我们对抽取的光谱进行重新分 bin, 要求每一个 bin 中的光子数大于 25; 并要求 bin 的个数大于 4, 因为需要拟合的模型中具有 4 个自由度。所有 245 次光子数大于 150 的观测都符合这个要求。

以上抽取的能谱使用 XSPEC 来进行拟合。首先使用的模型是, 银河中性氢吸收的经过红移的幂律谱, XSPEC 中使用 PHABS(ZPOWERLW) 来描述。吸收柱密度固定为银河中性氢柱密度, 红移固定为光学光谱所给的红移值。然后, 对于拟合得不好或者明显具有软 X 射线超成分的源, 增加一个红移了的黑体成分来描述软 X 射线超, 在 XSPEC 中描述为 PHABS (ZPOWERLW+ZBBODY)。拟合过程中, 红移和吸收柱密度均固定, 要求黑体的温度小于 1 keV, 光子指数 Γ 大于 0。基于两个模型的拟合结果, 我们使用 F 检验来考察黑体成分的显著性^[31]。当 F 检验的假设检验概率小于 0.05 时, 我们认为, 它存在显著的软 X 射线超。此外, 对于拟合得不好的光谱 (χ^2 检验假设检验概率小于 0.05), 我们对光谱进行重新分析; 重新分析还是在这个模型的基础上, 主要是尝试了不同的参数限制, 如允许中性氢柱密度在大于银河的中性氢柱密度的参数空间中进行拟合。

4 结 果

大多数的观测能够使用银河中性氢吸收的幂律谱加黑体谱模型比较好地拟合。使用 χ^2

^①ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/rosat/data/pspc/processed_data/

检验, 245 次观测中 228 次的拟合结果在 0.05 的置信水平下可以接受。图 1 中显示了一条拟合光谱, 这是 RX J16290+4007 观测序列号为 rp701507n00 的光谱, 使用的模型为银河吸收的幂律谱加黑体谱, 幂律谱和黑体谱经过了红移; 拟合出的光子谱指数 $\Gamma = 2.96_{-0.16}^{+0.13}$, 软 X 射线超温度 $T_{\text{soft}} = 25.2_{-8.2}^{+5.5}$ eV, $\chi^2/\text{d.o.f.} = 48.1/49$ 。245 条光谱中, 58 个源的 90 次观测展现出了显著的软 X 射线超, 比例为 37%, 这个比例与信噪比紧密相关。光子数大于 1000 的 92 次观测中, 66 次展现出了显著的软 X 射线超, 比例为 72%, 比例约为整个样本的比例的两倍。Winter 等人 2008 年的文章和 2012 年的文章中, XMM-Newton 光谱显示出显著的软 X 射线超的比例为 50% 左右^[13, 32], 高信噪比光谱中软 X 射线超的存在概率为 94%^[33]。也就是说, 软 X 射线超的显著比例与信噪比有关。考虑到 ROSAT 与 XMM-Newton 信噪比的差别, 比例也是相符的。

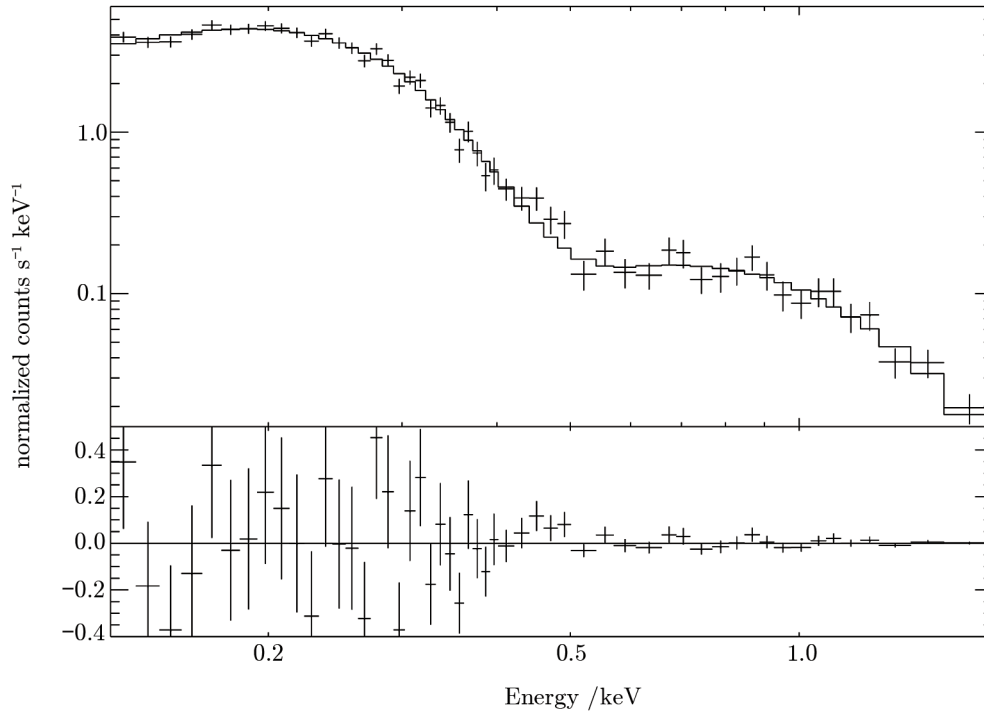


图 1 RX J16290+4007 拟合光谱的示意图

使用的模型为银河吸收的幂律谱加黑体谱。光子谱指数 $\Gamma = 2.96_{-0.16}^{+0.13}$, 拟合温度 $T_{\text{soft}} = 25.2_{-8.2}^{+5.5}$ eV, $\chi^2/\text{d.o.f.} = 48.1/49$ 。

对拟合得不好 (χ^2 假设检验概率小于 0.05) 的光谱, 我们进行了重新分析。没有拟合好的光谱主要出于以下几个原因:

(1) 存在除了银河吸收外的内禀吸收。允许中性氢在大于银河柱密度的参数空间内变化之后, 拟合结果明显变好。增加的柱密度都在 10^{20} cm^{-2} 量级, 可能是寄主星系的贡献。这些源包括, MARK 739E 的两次观测 (rp701033n00, rp700476n00)、MARK 766 的三次观测 (rp700970n00, rp701413n00, rp701056n00)。

(2) 信噪比很高, 光谱中的细节结构用简单的连续谱模型不能很好地描述。需要仔细地对待射线和吸收边进行分析才能够得到好的统计结果。比如, MARK 335 的模型中增加一个中心能量为 0.75 keV 的高斯成分, χ^2 从 208.6/170 减小到 187.5/167。虽然细节结构影响 χ^2 , 但对黑体温度的影响不大。我们主要关心黑体温度, 所以不在这里做具体的分析。这些源及其观测序列号为 MARK 335(rp700101n00)、NGC4051(rp701496n00, rp700557n00) 和 MARK 100(rp700262n00)。它们中大多数的自由度都大于 170。

(3) 高能谱很软, 无法限制光子谱指数。我们将它的光子谱指数固定在 2.0。这样的源包括 SDSS J09119+4253(rp700329a01)。

4.1 软 X 射线超的温度分布

图 2 展示了具有显著软 X 射线超的源的软超温度 T_{soft} 分布 (F 检验假设检验概率小于 0.05)。其中, 红线画出的是所有 90 条软超显著光谱的软 X 射线超温度分布, 平均值 $\bar{T}_{\text{soft}} = 0.10$ keV, 标准偏差为 0.03 keV; 蓝线画出的是这 58 个源的分布, 平均值 $\bar{T}_{\text{soft}} = 0.10$ keV, 标准偏差为 0.03 keV。当一个源具有多次观测的时候, 只取光子数最多的那个源。从图中可以看到, 大多数源的软 X 射线超温度都分布在 0.1 keV 附近, 与前人的结果是相符的^[10, 13, 33]。Gierliński 和 Done^[10] 使用康普顿化模型来拟合 XMM-Newton 的软 X 射线超, 得到的等离子体温度平均值 $\bar{T} = 0.12$ keV, 标准偏差为 0.02 keV。Winter 等人^[13, 33] 使用黑体谱来拟合 XMM-Newton 的软 X 射线超, 其中 I 型活动星系核的软 X 射线超温度平均值 $\bar{T}_{\text{soft}} = 0.11$ keV, 标准偏差为 0.04 keV。我们的结果与他们的在统计上都是相符的。由于我们使用的模型与 Winter 等人的相同, 所以我们主要和他们的结果进行比较。我们的结果比 Winter 等人的要小一些, 这主要是由于探测到的几个温度特别低的源导致的。如果我们除去温度小于 0.05 keV 的观测, 只考虑每个源信噪比最高的光谱作为各个源的光谱, 则平均值为 0.11 keV, 标准偏差 σ 为 0.03 keV。这个结果与 Winter 等人的相类似, 但弥散比较小。这正反映了 ROSAT 的数据在软 X 射线极软端的探测能力高于 XMM-Newton。不论是我们的结果还是 Winter 等人的结果, 弥散都要比 Gierliński 和 Done 大。从现在对软超起源的研究来看, 康普顿化的吸积盘模型更符合软超的本质, 或许正是因为这个原因, 弥散更小。同时我们也看到, 如果软 X 射线超真的是起源于软光子康普顿化的结果, 用黑体谱拟合得到的温度基本上也可以正确反映产生软超的等离子体的温度。

在具有显著软 X 射线超的 90 次观测中, 有 5 个源的 6 次观测小于 0.06 keV, 有可能与吸积盘最高温度相符。这 5 个源是 RXS J16333+4718, MARK 478, RXS J16290+4007, TON S180 和 SDSS J15103+5547, 它们的拟合结果见表 1: 第一列是天体名称, 来自于 Véron-Cetty & Véron 源表^[26] 或者 Zhou 等人的源表^[25]; 第二列是 ROSAT 的观测序列号 (sequence ID); 第三到六列是加了黑体的模型拟合参数, 分别为中性氢柱密度 N_{H} (单位为 10^{20} cm^{-2}), 光子谱指数 Γ , 黑体温度 T_{soft} (单位为 eV) 和拟合 χ^2 及自由度 (degree of freedom, d.o.f.); 第七列是将吸收固定为银河柱密度的情况下, 增加黑体成分的 F 检验假设检验概率。

其中 RXS J16333+4718 正是 Yuan 等人^[21] 所研究的 RX J163323.3+471857。他们得到的 $\Gamma = 1.37 \pm 0.49$, $T_{\text{soft}} = 32.5_{-6.0}^{+8.0}$ eV; 我们的 $\Gamma = 1.50_{-0.27}^{+0.26}$, $T_{\text{soft}} = 31.6_{-3.8}^{+4.7}$ eV。考虑到他们使用的是 90% 的误差, 而我们使用的是 68%, 两个结果是一致的。SDSS J15103+5547 只

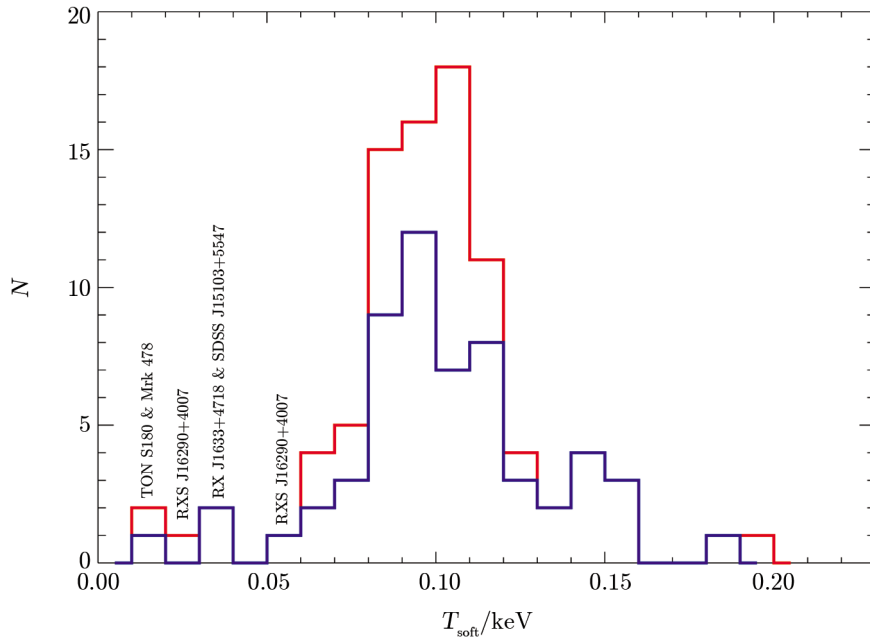


图 2 具有显著软 X 射线超 (F 检验假设检验概率 $P_{\text{Ftest}} \leq 0.05$) 的源的软 X 射线超温度分布, 包括了 58 个源的 90 条光谱。

红色代表 90 条光谱, 不区分是否同一个源。软 X 射线超温度的平均值 $\bar{T}_{\text{soft}} = 0.10$ keV, 标准偏差为 0.03 keV。蓝色代表 58 个目标源的温度分布, 对于有多次观测的源, 只取光子数最多的观测的结果。温度的平均值 $\bar{T}_{\text{soft}} = 0.10$ keV, 标准偏差为 0.03 keV。对于软超温度小于 0.06 keV 的源, 标出了它们的名称。

表 1 可能具有吸积盘热辐射起源的软 X 射线超

name	seq ID	$N_{\text{H}}/$ 10^{20} cm^{-2}	Γ	$T_{\text{soft}}/$ eV	$\chi^2/\text{d.o.f.}$	P_{Ftest}
RXS J16333+4718	rp701549n00	1.74	$1.51^{+0.26}_{-0.27}$	$31.6^{+4.7}_{-3.8}$	16.8/26	1.0e-07
TON S180	rp701451n00	1.36	$2.81^{+0.03}_{-0.04}$	$13.2^{+4.8}_{-4.7}$	102.9/102	4.2e-04
MARK 478	rp701533n00	1.05	$2.94^{+0.06}_{-0.08}$	$12.8^{+4.8}_{-4.6}$	46.8/42	6.1e-05
RXS J16290+4007	rp701507n00	0.98	$2.96^{+0.13}_{-0.16}$	$25.2^{+5.5}_{-8.2}$	48.1/49	1.0e-05
	rp800363n00	0.98	$2.41^{+0.26}_{-0.26}$	$56.9^{+4.7}_{-4.4}$	64.8/49	2.4e-03

有 19 个自由度, 软 X 射线超温度为 $T_{\text{soft}} = 38.2^{+31.4}_{-20.9}$ keV, 误差很大, 不能确定其软 X 射线超温度。另外 3 个源, MARK 478, RXS J16290+4007, TON S180, 有可能是具有吸积盘 X 射线热辐射起源的软超的候选体。我们将在 5.1 节中简单地分析这 3 个源的性质, 更具体的分析将在未来的工作中进行。

4.2 软 X 射线超的温度与估计的吸积盘最高温度、黑洞质量和吸积率的依赖关系

对于 Zhou 等人^[25]的源, 我们能够从光学光谱参数得到黑洞质量 M_{BH} 和爱丁顿比 L/L_{Edd} , 并估计出吸积盘最高有效温度 T_{max} 。因此, 我们使用 Zhou 等人的样本中具有显著

软 X 射线超的源分析软 X 射线超温度与参数的关系, 共 26 个源的 28 次观测。当存在 $H\alpha$ 发射线的参数时, 我们使用 $H\alpha$ 线宽成分的光度和半高全宽估计黑洞质量^[22]; 如果没有 $H\alpha$ 的参数, 则使用 $H\beta$ 的参数来进行估计^[24]。爱丁顿比 L/L_{Edd} 中的热光度 $L = k\lambda L_{\lambda 5100}$, k 取 $10^{[23]}$ 。为防止喷流等其他过程的污染, $\lambda L_{\lambda 5100}$ 使用 $H\beta$ 宽成分光度来估计^[21, 23, 24]。 $H\beta$ 发射线主要由吸积盘辐射所激发, 因此, 这里使用的爱丁顿比应接近于吸积盘辐射相对应的爱丁顿比。为了防止不同文献中处理方法的不同导致的偏差, 我们在这里只使用 Zhou 等人^[25] 给出的发射线和连续谱参数。图 3 是软 X 射线超的拟合温度 T_{soft} 与理论预言的吸积盘最高有效温度 T_{max} 的关系。其中, 蓝色的点代表各目标源光子数最多的那次观测, 平均值 0.10 keV , 标准偏差 σ 为 0.03 keV ; 红色点代表其它观测; 所有 28 次观测平均值 0.10 keV , 标准偏差 σ 为 0.03 keV ; 直线代表 $T_{\text{soft}} = T_{\text{max}}$ 。考虑电子散射可能造成的能谱硬化效应, 观测到的辐射温度比盘的有效温度稍高, 预期观测到的最高温度 $T'_{\text{max}} = \kappa T_{\text{max}}$, κ 为能谱硬化因子^[34-37]。一般认为, 黑洞 X 射线双星的 $\kappa = 1.7 \pm 0.2^{[38]}$, 活动星系核 $1 \leq \kappa \leq 2.5^{[35, 36]}$ 。我们取 $\kappa = 1.7$ 。为了表征 $\kappa = 1.7$ 时的情况, 我们画出了 $T_{\text{soft}} = 1.7 T_{\text{max}}$, 如图中点线所示。

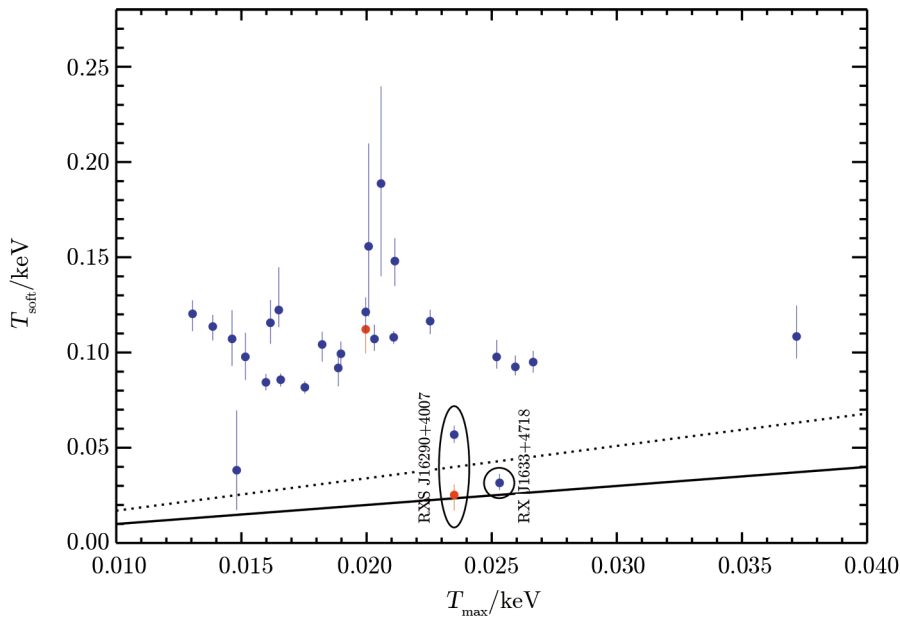


图 3 Zhou 等人^[25] 的窄线赛弗特 I 型星系样本中, 软 X 射线超的温度 T_{soft} 与预期的吸积盘最高温度 T_{max} 的关系。

T_{max} 是通过光学光谱得到的黑洞质量和吸积率估计的。蓝色点代表具有显著软 X 射线超的源光子数最多的观测的结果, 红色点代表非光子数最多的观测的结果; 黑色直线为 $T_{\text{soft}} = T_{\text{max}}$, 点线为 $T_{\text{soft}} = 1.7 T_{\text{max}}$ 。

从图中我们看到, 大多数源的软 X 射线超的温度 T_{soft} 比预期的吸积盘最高温度 T_{max} 高很多, 而且不相关。对其进行 Spearman 相关性检验, 假设检验概率 $P_{\text{null}} = 0.51$, 秩相关系数 $\rho = -0.13$, 说明 T_{soft} 与 T_{max} 不相关。可以见到, 软超温度可能与吸积盘温度相符的有 3 个源的 4 次观测: 从左到右为 SDSS J15103+5547, RX J16290+4007 的 rp701507n00(红色

点) 和 rp800363n00(蓝色点)2 次观测, RX J1633+4718(蓝色点)。其他的 24 次观测都很好地分布在 0.1 keV 附近。

图 4 和图 5 中给出了 Zhou 等人^[25]的样本中, 软超温度 T_{soft} 与黑洞质量 M_{BH} 及爱丁顿比 L/L_{Edd} 的关系。红色和蓝色点的意义同图 3。在这个窄线赛弗特 I 型星系的样本中, 软超温度 T_{soft} 与黑洞质量 M_{BH} 和爱丁顿比 L/L_{Edd} 都不相关。使用 Spearman 相关性检验, 假设检验概率为 $P_{\text{null}} = 0.64$, 软超温度 T_{soft} 与黑洞质量 M_{BH} 的秩相关性系数 $\rho = 0.09$; 假设检验概率为 $P_{\text{null}} = 0.39$, 软超温度 T_{soft} 与爱丁顿比 L/L_{Edd} 的秩相关性系数 $\rho = -0.017$; 都不存在相关性, 与前人的结果一致^[10, 13, 33, 39, 40], 能够使用软 X 射线超的康普顿起源、反射起源等来解释^[10, 12, 14-20]。

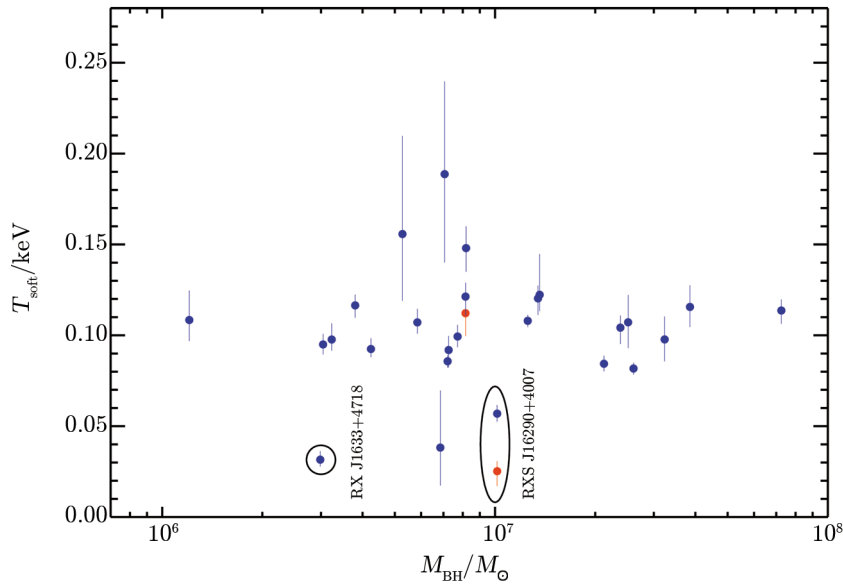


图 4 软 X 射线超温度 T_{soft} 与黑洞质量 M_{BH} 的关系。

蓝色点代表各目标源光子数最多的那次观测的性质, 红色点代表非最多光子的观测的性质。

5 总结和讨论

本文中, 我们使用 ROSAT PSPC 的观测数据, 在所有已知的窄线赛弗特 I 型星系中寻找软 X 射线超温度与标准吸积盘最高温度相符合的源。我们分析了 150 个源的 245 条 ROSAT 光谱, 有 58 个源的 90 次观测具有显著的软 X 射线超。其中大多数软 X 射线超的温度都分布在 0.1 keV 附近, 90 次观测的软 X 射线超温度平均值 $\bar{T}_{\text{soft}} = 0.10$ keV, 标准偏差为 0.03 keV, 与前人的结果一致^[10, 13, 33]。除了 Yuan 等人^[21] 2010 年报道的 RX J1633+4718 之外, 还发现了 3 个源的 4 次观测软 X 射线超温度显著小于 0.06 keV, 有可能起源于吸积盘热辐射。使用 Zhou 等人^[25]的光谱参数估计的黑洞质量和爱丁顿比, 我们证实了软 X 射线超温度 T_{soft} 与预期的吸积盘温度 T_{max} 、黑洞质量 M_{BH} 、爱丁顿比 L/L_{Edd} 都不相关^[10, 13, 33, 39, 40]。

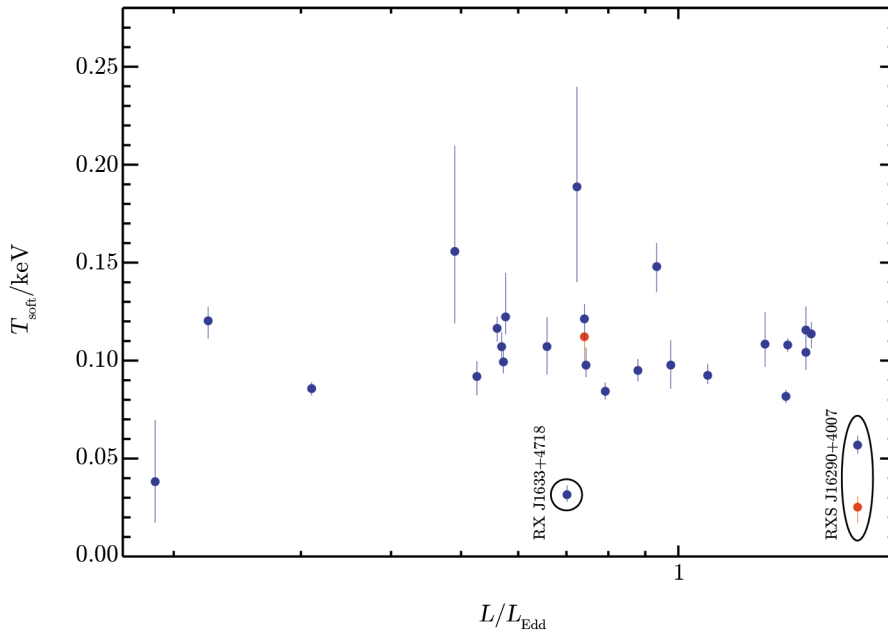


图 5 软 X 射线超温度 T_{soft} 与爱丁顿比 L/L_{Edd} 的关系。
这里的数据仅限于 Zhou 等人^[25] 样本中的源。红色和蓝色点的性质同图 3。

这说明大多数窄线赛弗特 I 型星系的软 X 射线超不是起源于吸积盘 X 射线热辐射。

相比其它的 CCD 类型的 X 射线探测器, ROSAT PSPC 探测的低能段可达 0.1keV, 对探测软 X 射线超, 尤其是温度较低的软 X 射线超是有优势的。但软超温度的测量在一定程度上依赖于连续谱(幂律谱)测量的精度, 后者由探测器能量带宽和光谱信噪比决定(对 ROSAT PSPC 观测, 由于仪器背景较低, 信噪比基本上取决于源的光子数)。对样本中每一个源, 我们通过光谱拟合的参数估计方法给出了温度的置信区间, 即温度的误差范围。该误差范围已经考虑了由于连续谱(幂律谱指数及归一化常数)在可能的参数空间里变化所带来的影响。在具有显著软 X 射线超且光子数大于 1000 的 66 次 ROSAT 观测中, 谱指数 Γ 的误差中值为 0.1, 软超温度误差的中值为 5.9 eV。因此, 对大多数源来说, 软超温度的测量是可靠的。尤其是表 1 中选出的低温软超候选体, 给出的谱指数和温度的不确定性相对都比较小(见表 1)。文献中给出了 Suzaku 观测到的 Ton S180 硬 X 射线谱指数 $\Gamma = 2.24 \pm 0.03^{[41]}$, 这一值与 PSPC 的测量值 $\Gamma = 2.81^{+0.03}_{-0.04}$ 显著不同, 表明该源的硬 X 射线谱在两次观测间发生了变化。作为一个测试, 我们在这个源的拟合中将 Γ 固定在 Suzaku 给出的值, 拟合结果不可接受 ($\chi^2/\text{def}=197/103$), 软超温度为 $T_{\text{soft}} = 34.8^{+2.2}_{-2.0}$ eV, 仍然显著偏低。

下面我们简单地分析一下这 3 个具有低温软超的源的性质。

5.1 具有低温软 X 射线超的活动星系核

除了 RX J1633+4718 外, 3 个具有低于 60 eV 的软 X 射线超的源中, 黑体成分最显著的是 RXS J16290+4007(SDSS J162901.1+400758), 而且, 两次 ROSAT 观测的软 X 射线超温

度都比较低。它的黑洞质量为 $1.02 \times 10^7 M_{\odot}$ ，爱丁顿比为 1.77。假设吸积率 $\dot{m} = L/L_{\text{Edd}}$ ，预期的吸积盘最高温度为 $T_{\text{max}} = 23.5$ eV，谱硬化改正后 (hardening correction) 的吸积盘温度为 40.0 eV^[22, 25]。2 次观测 rp701507n00 和 rp800363n00 的 F 检验概率为 10^{-5} 和 2.4×10^{-3} ，软 X 射线超温度 $T_{\text{soft}} = 25.2_{-8.2}^{+5.5}$ eV 和 $T_{\text{soft}} = 56.9_{-4.4}^{+4.7}$ eV。我们使用 $A = L_{\text{soft}}/\sigma T_{\text{soft}}^4$ (σ 为 Stefan-Boltzmann 常量) 来估计辐射区的面积，其中 L_{soft} 为用于拟合软 X 射线超的黑体成分的光度。假设辐射区为球形，可以估计辐射区的半径 R_{soft} 。RXS J 16290+4007 的 2 次观测， R_{soft} 分别为 4.6×10^{13} cm 和 4.19×10^{12} cm，即 $15R_s$ 和 $1.4R_s$ 。因此，SDSS J162901.1+400758 的软 X 射线超来自于一个致密的区域，有可能是起源于吸积盘 X 射线热辐射。但是 2 次观测的结果并不符合 $L \approx T^4$ 的关系，这个源将来还需要更多全面的分析。

TON S180 的黑洞质量为 $M_{\text{BH}} = 1.38 \times 10^7 M_{\odot}$ ，爱丁顿比 $L/L_{\text{Edd}} = 2.63$ ^[42, 43]；预期的吸积盘最高温度为 $T_{\text{max}} = 24$ eV，谱硬化改正后的黑体温度为 40.8 eV。它在 ROSAT 中有 3 条光谱具有显著的软 X 射线超。其中 rp701451n00 的软 X 射线超 F 检验假设检验概率为 4.2×10^{-4} ，拟合的软 X 射线超温度 $T_{\text{soft}} = 13.2_{-4.7}^{+4.8}$ eV，与预期值基本符合但稍低；根据拟合出的黑体成分光度和温度估算出的辐射区半径 $R_{\text{soft}} = 1.8 \times 10^{14}$ cm = $44 R_s$ 。MARK 478 黑洞质量 $M_{\text{BH}} = 2.14 \times 10^7 M_{\odot}$ ，爱丁顿比 $L/L_{\text{Edd}} = 1.13$ ^[44]；理论预期的吸积盘最高温度 $T_{\text{max}} = 17.7$ eV，谱硬化改正后的最高温度 $T'_{\text{max}} = 29.6$ eV。它的观测 rp701533n00 的 F 检验概率为 1.0×10^{-5} ，软 X 射线超温度为 $12.8_{-4.6}^{+4.8}$ eV，与理论预期相符合；估算出的辐射区半径 $R_{\text{soft}} = 3.7 \times 10^{14}$ cm = $58 R_s$ 。这样估计出来的 R_{soft} 与真实的辐射区半径有几倍的差别。再加上黑洞质量的估计至少存在 0.3 dex 的弥散，虽然两个源估计出的辐射区温度 R_{soft} 比 R_s 大了一个量级，我们也不能完全排除这两个源的软 X 射线超起源于吸积盘 X 射线热辐射的可能性。

这 3 个源的爱丁顿比 $L/L_{\text{Edd}} \geq 1$ 。在吸积率接近或超爱丁顿的情形下，光子的逃逸时标可能大于吸积时标，粘滞产生的能量将随着物质流入黑洞中；因此，严格来说需要仔细考虑细盘 (slim disk) 的效应^[2, 20, 45-47]。这主要包括三方面的影响：由于一部分能量流入黑洞中，吸积盘上的表面有效温度相对于标准盘的估计有所减小；对于显著超爱丁顿吸积的源，细盘的吸积盘会向内延伸；而且 $L/L_{\text{Edd}} \leq \dot{M}/\dot{M}_{\text{Edd}}$ ^[20]。因此，细盘中最高温度相对于标准盘情形的变化还需要具体的计算。例如，当 $L/L_{\text{Edd}} \geq 3$ 时，吸积盘最高温度增大，对于 $M_{\text{BH}} \approx 10^7 M_{\odot}$ ，最高温度 $T_{\text{max}} \approx 60$ eV^[20]。考虑到黑洞质量估计的不确定性很大，至少有 0.3 dex，这 3 个源是否超爱丁顿吸积并不确定；因此，严格来说，爱丁顿比 $L/L_{\text{Edd}} \geq 1$ 的源都需要具体地考虑吸积盘理论的结果，这将在我们未来的工作中进行。

5.2 出现低温软 X 射线超的可能原因

我们分析了 150 个源的 245 次观测，其中 58 个源的 90 次观测具有显著的软 X 射线超。除了 RX J1633+4718 外，我们只发现了 3 个源存在明显低于 0.1 keV 的软 X 射线超。问题是，为什么这几个源的软 X 射线超会显著低于其他源？我们在本节中对这个问题进行简单的讨论。

一个可能的原因是，这几个源的软 X 射线超起源于吸积盘热辐射。假设如此，在普通软 X 射线超的起源没有明确的情况下，还是很难回答为什么只有这几个源出现了低温的软 X

射线超。在这里,我们就不同的普通软 X 射线超起源分别进行讨论。

软 X 射线超的康普顿起源认为,软 X 射线超是软光子受到热等离子体康普顿化之后形成的^[10, 15, 48, 49]。产生软 X 射线超的等离子体温度比较低,为 0.1 keV 左右,光深约为 20。软光子可能由吸积盘的热辐射提供^[10]。如果普通的软 X 射线超起源于康普顿化的软光子,在 RX J1633+4718 以及另外 3 个候选体中,应该有什么机制导致了软光子的康普顿化受到抑制。RX J1633+4718 和 RX J16290+4007 都是射电源,因此一个可能的原因是它的喷流。有文章认为,产生软 X 射线超的等离子体是没有演化成功的喷流^[50, 51]。那么,在成功地产生喷流之后,原本存储在等离子体中的能量就成为喷流的能量,等离子体的温度下降甚至消失,康普顿化的过程就可能受到抑制。此外,MARK 478 也观测到了射电辐射,虽然比较弱^[52]。

软 X 射线超的反射起源理论认为,在 X 射线光子被吸积盘反射的过程中,由于 0.7~3 keV 的光子被光电吸收的概率比较大,反射谱中 0.7~3 keV 的光子就会比较少。因此,看起来低于 0.7 keV 的光谱就偏高了^[53, 54]。再加上相对论展宽的电离发射线的贡献,就产生了现在观测到的软 X 射线超。如果软 X 射线超起源于反射,就必须存在原初的 X 射线辐射,比如吸积盘上的冕产生的辐射;如果喷流的产生抑制了冕的形成,也可能导致正常的软 X 射线超没有出现,从而能够观测到吸积盘的热辐射。这种解释与 RX J1633+4718 和 RX J16290+4007 是射电源相支持的。但这个问题已经超出了本文的主要目的,更多的分析将在以后的工作中进行。

另一个可能的原因是,这几个源与普通软 X 射线超有类似的起源。假如这些源也是产生于康普顿化的软光子,低温的软 X 射线超说明其康普顿化软光子的等离子体温度也低于普通活动星系核。如前面所述,这也可能是由喷流的产生导致的。然而,反射起源无法解释这几个源,因为反射起源的理论中,软超温度由于粒子物理过程而固定在 0.1 keV,不应该因为环境的变化而导致软超温度的变化。因此,这几个源无法用反射起源进行解释。

致谢

感谢袁为民、艾艳丽对本工作的支持与帮助。感谢 ROSAT 和 GSFC 的数据支持。感谢两位匿名审稿人的意见和建议。

参考文献:

- [1] Shakura N I, Sunyaev R A. *A&A*, 1973, 24: 337
- [2] Abramowicz M A, Czerny B, Lasota J P, Szuszkiewicz E. *ApJ*, 1988, 332: 646
- [3] Narayan R, Yi I, *ApJ*, 1994, 428: L13
- [4] Novikov I D, Thorne K S. *Black Holes*. New York: Gordon and Breach, 1973: 343
- [5] Mitsuda K, Inoue H, Koyama K, et al. *PASJ*, 1984, 36: 741
- [6] Makishima K, Maejima Y, Mitsuda K, et al. *ApJ*, 1986, 308: 635
- [7] Peterson B M. *An Introduction to Active Galactic Nuclei*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997
- [8] Frank J, King A, Raine D. *Accretion power in astrophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992
- [9] Kato S, Fukue J, Mineshige S. *Black-Hole Accretion Disks: Towards a New Paradigm*. Kyoto: Kyoto

- University Press, 2008
- [10] Gierliński M, Done C, MNRAS, 2004, 349: L7
 - [11] Piconcelli E, Jimenez-Bailón E, Guainazzi M, et al. A&A, 2005, 432: 15
 - [12] Crummy J, Fabian A C, Gallo L, Ross R R. MNRAS, 2006, 365: 1067
 - [13] Winter L M, Mushotzky R F, Reynolds C S, Tueller J. ApJ, 2009, 690: 1322
 - [14] Pounds K A, Stanger V J, Turner T J, King A R, Czerny B. MNRAS, 1987, 224: 443
 - [15] Done C, Davis S W, Jin C, Blaes O, Ward M. MNRAS, 2012, 420: 1848
 - [16] Ross R R, Fabian A C. MNRAS, 1993, 261: 74
 - [17] Ballantyne D R, Ross R R, Fabian A C. MNRAS, 2001, 327: 10
 - [18] Miniutti G, Fabian A C. MNRAS, 2004, 349: 1435
 - [19] Middleton M, Done C, Gierliński M. MNRAS, 2007, 381: 1426
 - [20] Mineshige, S., Kawaguchi T, Takeuchi M, Hayashida K. PASJ, 2000, 52: 499
 - [21] Yuan W, Liu B F, Zhou H, Wang T G. ApJ, 2010, 723: 508
 - [22] Greene J E, Ho L C. ApJ, 2007, 670: 92
 - [23] Richards G T, Lacy M, Storrie-Lombardi L J, et al. ApJS, 2006, 166: 470
 - [24] Greene J E, Ho L C. ApJ, 2005, 630: 122
 - [25] Zhou H, Wang T, Yuan W, et al. ApJS, 2006, 166: 128
 - [26] Véron-Cetty M-P, Véron P. A&A, 2010, 518: A10
 - [27] Briel U G, Aschenbach B, Hasinger G, et al. ROSAT User's Handbook, <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/ruh/handbook/handbook.html>, 1996
 - [28] Kurster M, Hasinger G. Determination of Boresight Offsets for ROSAT Detectors, MPE Technical Note TN-ROS-ME-ZA00/28, 1992
 - [29] Boese F G. A&AS, 2000, 141: 507
 - [30] ROSAT data analysis using xselect and ftools, http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/ros_xselect_guide/xselect_ftools.html, 2012
 - [31] Bevington P R, Robinson D K. Data reduction and error analysis for the physical sciences, 3rd. McGraw: McGraw Hill Higher Education, 2002
 - [32] Winter L M, Mushotzky R F, Tueller J, Markwardt C. ApJ, 2008, 674: 686
 - [33] Winter L M, Veilleux S, McKernan B, Kallman T R. ApJ, 2012, 745: 107
 - [34] Wandel A, Petrosian V. ApJ, 1988, 329: L11
 - [35] Ross R R, Fabian A C, Mineshige S. MNRAS, 1992, 258: 189
 - [36] Shimura T, Takahara F. ApJ, 1995, 440: 610
 - [37] Czerny B, Elvis M. ApJ, 1987, 321: 305
 - [38] Shimura T, Takahara F. ApJ, 1995, 445: 780
 - [39] Mateos S, Barcons X, Carrera F J, et al. A&A, 2005, 444: 79
 - [40] Porquet D, Reeves J N, O'Brien P, Brinkmann W. A&A, 2004, 422: 85
 - [41] Takahashi H, Hayashida K, Anabuki N. PASJ, 2010, 62: 1483
 - [42] Ohta K, Aoki K, Kawaguchi T, Kiuchi G. ApJS, 2007, 169: 1
 - [43] Véron-Cetty M-P, Véron P, Gonçalves A C. A&A, 2001, 372: 730
 - [44] Shields G A, Gebhardt K, Salviander S, et al. ApJ, 2003, 583: 124
 - [45] Szuszkiewicz E, Malkan M A, Abramowicz M A. ApJ, 1996, 458: 474
 - [46] Watarai K-y, Fukue J. PASJ, 1999, 51: 725
 - [47] Wang J-M, Szuszkiewicz E, Lu F-J, Zhou Y-Y. ApJ, 1999, 522: 839
 - [48] Walter R, Fink H H. A&A, 1993, 274: 105
 - [49] Marshall H L, Carone T E, Peterson B M, et al. ApJ, 1997, 479: 222
 - [50] Henri G, Petrucci P O. A&A, 1997, 326: 87
 - [51] Ghisellini G, Haardt F, Matt G. A&A, 2004, 413: 535
 - [52] Komossa S, Voges W, Xu D, et al. AJ, 2006, 132: 531
 - [53] Czerny B, Zycki P T. ApJ, 1994, 431: L5

[54] Ross R R, Fabian A C. MNRAS, 2005, 358: 211

NLSIs with Soft X-ray Excess of Possible Disk Origin

LI Ye^{1,2,3}

(1. National Astronomical Observatories/Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, Yunnan, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: It is theoretically expected that the thermal radiation from accretion disks of Active Galactic Nuclei (AGNs) with low black hole mass would contribute to the soft X-ray band and result in an excess emission. However, the temperatures of the observed soft X-ray excess of AGNs are typically around 0.1 keV, significantly higher than those predicted by the standard disk model. There is only one exception found so far, RX J1633+4718, which has a significantly low soft excess temperature of $32.5_{-6.0}^{+8.0}$ eV, consistent with the maximum temperature as well as the luminosity of the predicted disk emission (Yuan et al. 2010).

In this paper, we search for RX J1633 like AGNs, whose soft X-ray excess temperature is close to the maximum temperature of accretion disk, in all known Narrow Line Seyfert I galaxies (NLSIs) observed with ROSAT PSPC in the archive. We analyzed the PSPC spectra of 150 NLSIs (245 observations) in total, 58 (90 observations) of which show significantly soft X-ray excess emission. In addition to RX J1633+4718, only 3 objects (4 observations) show soft X-ray excess temperatures less than 60 eV and close to the theoretical prediction of the disk emission. They form a sample of candidates for future follow-up studies. Our result indicates that RX J1633+4718 like objects are very rare. The correlations between the temperature of the soft X-ray excess and black hole mass as well as the Eddington ratio are also investigated, and no correlation is found. This confirms the previous results, and implies that the soft X-ray excess of most AGNs should originate from other mechanisms rather than the thermal emission of the accretion disk.

Key words: active galactic nuclei; narrow line Seyfert I; soft X-ray excess; accretion disk; thermal radiation

《天文学进展》征稿启事

一、本刊刊登反映国内外天文学研究的最新进展和作者见解的述评、研究论文、前沿介绍、专题讲座、研究快报。反映新思路、新手段、新成果的短评优先发表。

二、来稿须包括：题名、作者署名、作者单位及所在地与邮政编码、摘要、关键词、正文、参考文献、英文摘要、英文关键词等。

三、来稿应论点明确、叙述精练、条理清晰、深入浅出，以利非本分支学科的读者阅读。

四、摘要应简明扼要地概括正文中的主要信息。采用第三人称的写法，不用“本文”、“作者”等作主语。稿件如果以中文发表，英文摘要应有近一页的篇幅。

五、关键词请尽可能参照 ApJ、MNRAS 和 A&A 共同采用的关键词表选用，可适当扩充。

六、稿件中引用论点、公式、图、表均需注明参考文献（按文中出现顺序编码，在右上角用小方括号标出）。正文后则按编码次序依本刊要求的编排格式列出相应的参考文献。

七、审定稿后需提供清稿样的电子文本。本刊采用中西文 Latex 系统软件排版，采用其它排版软件者请将清稿样的 DOC 文件发送至我部。

八、图、表务求精、简、规范，以配合文字阐明观点。公式务求精约，杜绝公式推导过程。

九、请勿一稿两投。来稿请通过 E-mail 发送至 twxjz@shao.ac.cn。

《天文学进展》编辑部

2013年1月