

星系生态系统的软 X 射线光谱学

一个星系可以当作一个生态系统，即“生”物与环境共同作用构成的统一整体。这个系统中的“生”物是众多的恒星，偶尔还有活跃的星系核，它们有诞生有消亡，产生几乎所有从星系发出的可见光。星系中包括星际介质在内的其余部分，则构成它们的环境。这些“生”物对环境的反馈可以有多种方式，例如恒星风和超新星。而反馈最明显的表现形式，对环境影响最深的，是金属丰度得到增强的热星系晕，即星系中常见的 $10^6\text{-}10^7\text{ K}$ 的弥漫等离子体（图 1）。在星际介质中，这些热等离子体占据能量上的支配地位，驱动星系盘-晕的相互作用，以及它们的演化（图 2）。在如我们银河系这样一个相对较大质量的星系周围，星系晕可能会非常延展。这种延展的星系晕有时被称为热的星系周际介质，它可以是星系重子物质的主体部分。确定这种星系晕的基本性质是理解星系生态系统如何运作的必要一步。而这也是现代天体物理的一个巨大挑战。

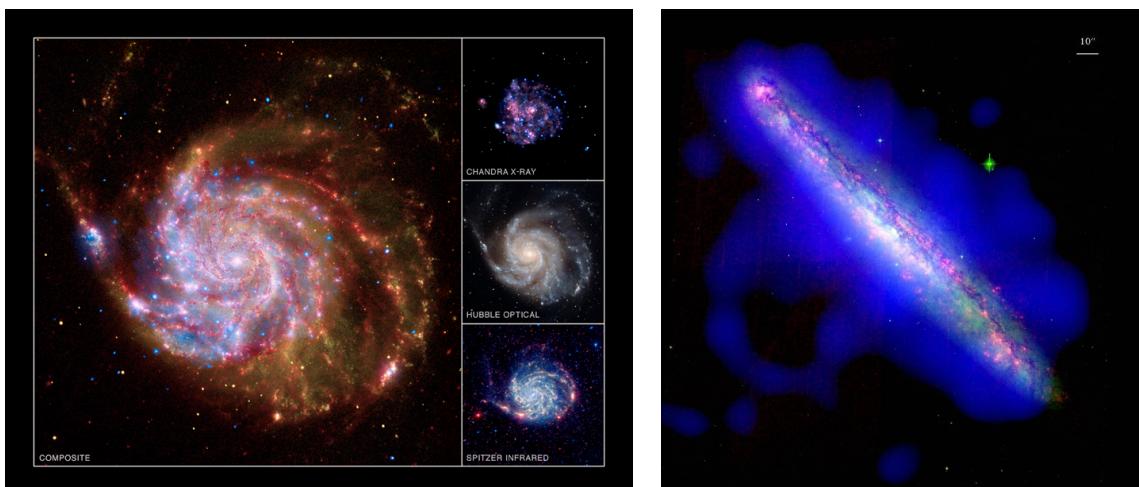


图 1. 两个近邻盘星系样例的多波段蒙太奇：左图 - 面向星系 M101（授权自：X 射线：NASA / CXC / JHU / K.Kuntz et al. ;光学：NASA / ESA / STScI / JHU / K. Kuntz et al.; 红外：NASA / JPL-Caltech / STScI / K. Gordon）；右图 - 侧向星系 NGC 5775：弥漫 X 射线强度（蓝色）、光学 R 波段（红色）、H α （绿色）图像（Li et al. 2008）。

DISK-HALO INTERACTION

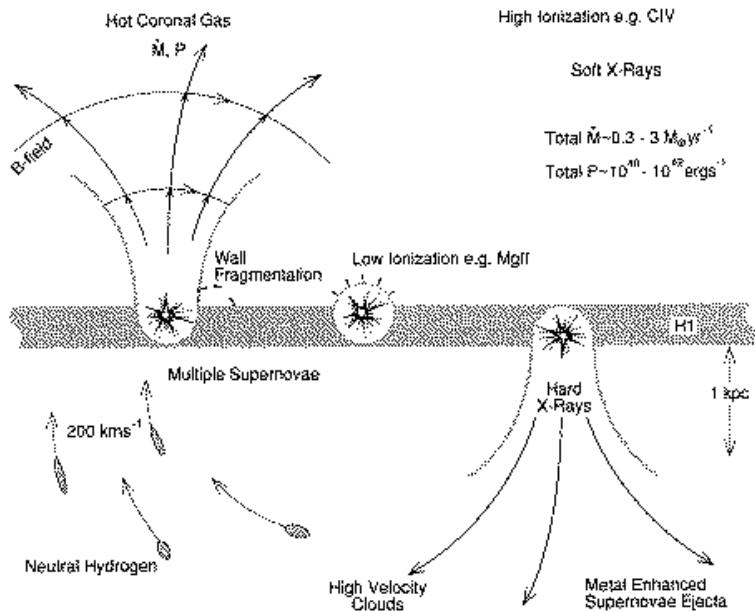


图 2. 盘/晕相互作用的示意图 (Norman & Ikeuchi 1989)。

研究星系晕等离子体的最有效的手段是 X 射线观测 (图 1)。特别是软 X 射线光谱观测，能真正让我们进入星系晕的“天体物理”研究。在预期的温度范围内，星系晕弥漫热等离子体在 0.2-1 keV 波段产生丰富的谱线，如类氢和类氦离子的 K 壳层跃迁的强发射线 (如 OVIII , OVII , NeX 和 NeIX)，以及 Fe 的 L 壳层跃迁谱线 (例如，图 3; Wang 2010; Porquet et al. 2010; Foster et al. 2012)。HUBS 将在此波段提供非常高质量的光谱观测。

HUBS 的观测能力不仅为处于碰撞电离平衡的热等离子体的研究提供极大的便利，并为知之甚少的非平衡过程提供必要的研究数据。后者预计会在星系生态系统的多种动态过程中发生，比如等离子体被近期的或正活跃的活动星系核给光致电离 (例如，图 3 ; Segers et al. 2017)，在冷气体接触面上离子和中性原子之间发生了电荷交换 (Liu et al. 2010, 2011; Zhang et al. 2014)，以及过热 (例如由于近期的激波加热) 或过冷的情形 (例如，快速绝热膨胀；如 Breitschwerdt & Schmutzler 1999)。通过研究我们自己银河系和近邻星系中的这些动态过程，我们可以从多个视角来理解星系晕是如何运作的。

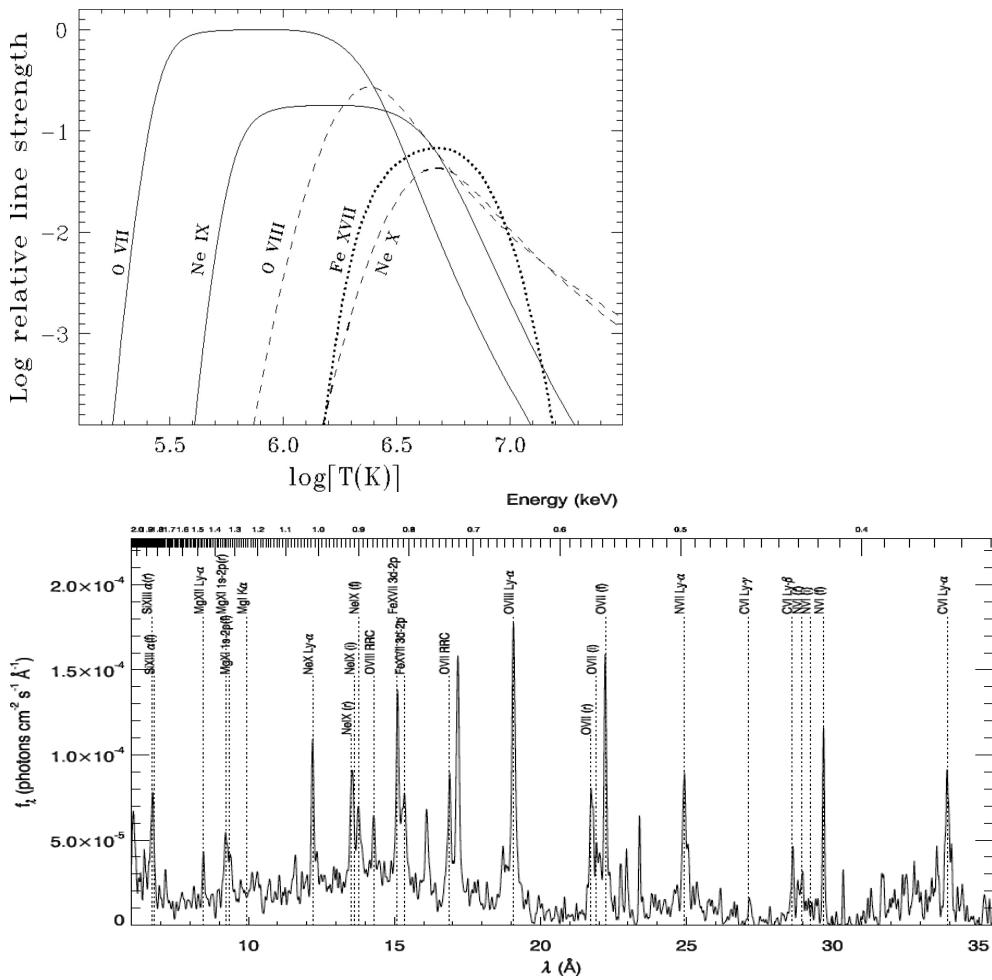


图 3. 左 (上) 图 - 示踪 CIE 等离子体中关键元素的 $\text{K}\alpha$ 谱线的相对谱线强度 (电离百分比乘以振子强度)。右 (下) 图 - NGC 1365 的 XMM-Newton 光栅光谱 , 显示强烈的 AGN 诱导的 X 射线线辐射 (Guainazzi et al. 2009) 。

利用 HUBS , 我们将有能力回答这样的问题 : 1) 哪些潜在的物理过程会对观测到的软 X 射线辐射产生影响 ? 2) 星系晕的基本结构、热学、化学和动力学状态 , 以及它们整体的物理延展度、能量、质量是什么样的 ? 3) 星系晕的状态与星系的其它属性有何关联 ? 4) 星系晕如何示踪星系的吸积和反馈 ?

从我们自己的银河系晕获得独特的内部视角

软 X 射线天空是明亮的 ! 例如 , 图 4 呈现的软 X 射线背景辐射大部分产生自银河系晕。人们早已认识到 , 太阳嵌在一个称之为本地泡的空洞中 , 那里没有致密的星际介质 , 而是充满着温度约为 10^6 K 的热等离子体。然而 , 等离子体确切的热学和化学性质 , 以及本地泡的大小和形状目前还都相当不确定 , 因

为它的 X 射线辐射与我们太阳系以及银河系晕其它部分的贡献相互混淆着。太阳系的 X 射线辐射主要是由日球中的中性原子与太阳风中的热离子发生电荷交换引起的。这种贡献的显著性最近已被火箭实验在光谱学上证实了 (Galeazzi et al. 2014)。在高银纬观测到的大部分 1/4 keV 背景辐射 (图 4) 产生于银河系晕遥远的部分。这是因为致密吸收云会使得较低能量的 X 射线背景辐射产生阴影，而观测到的部分辐射显然比已知距离的吸收云更为遥远。对于能量高一些的光子，星系的星际介质变得透明，遥远部分的贡献即使在吸收严重的较低银纬也变得重要。3/4 keV 和 1.5 keV 波段的背景辐射 (图 4) 清楚地显示了朝向银河系内部区域的整体增强。无论这种增强是一种局部特征 (例如，在大约 200 pc 的距离内由一群大质量恒星产生的超级泡)，抑或是与银河中心/核球中的充满能量的外流相关的一种现象，都是一个极其有趣的问题。尤其在相同区域发现伽玛射线增强即费米泡之后，这个问题变得更吸引人 (Su et al. 2010)。现有证据初步表明大部分的 X 射线增强体现着某种银河系中心的现象。收集这些证据中的重要一环是对弥漫热气体的 X 射线辐射和吸收进行比较分析，从而得以估计相关热等离子体的密度和路径长度 (Yao & Wang 2007; 另见 Fang & Jiang 2014)。然而，现有的 X 射线观测设备在光谱分辨率和灵敏度方面太受局限，不能够获得足够数量的视线方向进行这样的研究。

HUBS 将极大地提高我们获得银河系晕辐射和吸收的 X 射线光谱的能力。首先，HUBS 软 X 射线光谱的超高分辨率将允许测量关键诊断谱线特征里的每一根的发射线，比如类氦离子 $\text{K}\alpha$ 三重线里的共振线、半禁线和禁线。加上 HUBS 的成像能力，我们将能够研究这样关键的过程，如电荷交换 (例如，在超新星遗迹的激波锋面; Roberts & Wang 2015)，各种明亮发射谱线的共振散射 (例如图 5; Gu et al. 2016; Li & Bregman 2017; Zhang et al. 2018)，以及银河系晕的热学和化学性质。

同样重要的是 HUBS 针对吸收线的光谱能力。与对体积密度平方敏感的热 X 射线辐射不同，从吸收线如 O VII、O VIII、Ne IX 和 Fe XVII 等可直接探测到等离子体的柱密度 (图 3)，这与质量是成正比的。从吸收线的相对强度可以直接诊断出等离子体的热学、化学和/或动力学性质。从相对的线饱和度 (如 OVII $\text{K}\alpha$ vs. $\text{K}\beta$) 即可以推断出等离子体的速度弥散，甚至不用解析每根谱线的轮廓 (如 Wang et al. 2005)。每次沿着某个点源的视线方向进行吸收线观测时，还可以得到被同一量热计阵列覆盖的周围区域的发射光谱。HUBS 的这个独特的能力将特别适合同时获取发射和吸收线光谱。而 HUBS 的灵敏度将允

许我们获得足够数量（ ~ 100 ）的视线方向观测，使得银河系晕的3D X射线断层扫描成为可能。这个断层扫描将揭晓银河系晕的热学、化学和运动结构，以及它的整体尺寸、能量、质量和体积填充因子。我们还能够进一步探索某些特定结构与当地恒星和星际介质的性质的联系。这些在我们银河系中才能进行的详尽研究将有助于我们测试和校准相关理论模型，以便有信心将其应用于其它星系。

实际上，HUBS对吸引线的观测还有很多其他各种研究银河系生态系统的重要用途。例如，由于从碳元素到铁元素离子的K壳层跃迁全部在X射线范围内，通过吸收线光谱我们可以研究几乎处在所有状态（冷、温、热）和形态（原子、分子、尘埃颗粒）的星际介质（Yao & Wang 2006）。此外，吸收线的测量对冷星际介质($kT < 10^5$ K)的光电吸收过程或是对电荷交换过程都不敏感。因此，X射线吸收线光谱允许我们无偏地探索星际介质的整体，增强更全面和系统的了解。

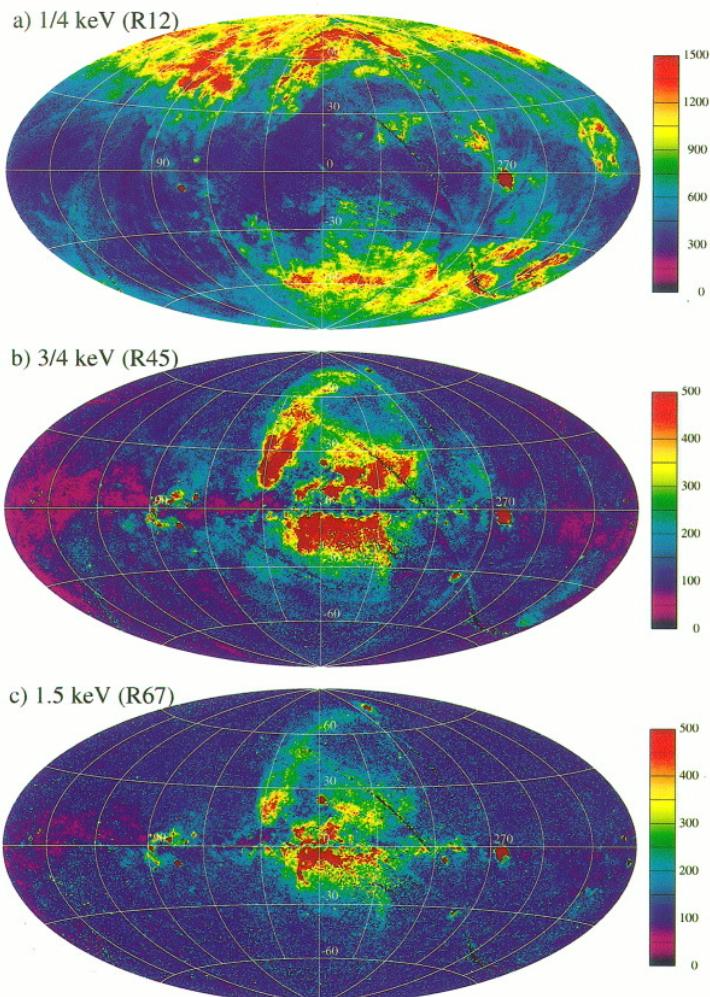


图 4. ROSAT 对三个能段的软 X 射线背景辐射的全天巡天。使用 Aitoff-Hammer 等面积投影，以银河系中心为中心，向左银经增加。彩色条图例旁边的值表示强度（来自 Snowden et al. 1997）。

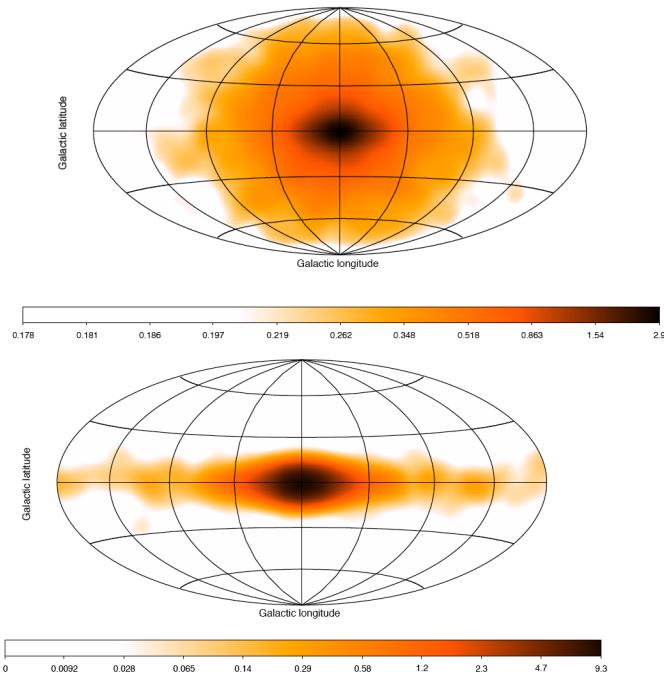


图 5. 蒙特卡洛模拟的银河系晕的软 X 射线线辐射，假定指数盘形态并考虑 RS 效应：一例强度分布图（左图）和用于诊断的 OVII Ka 三线的 G-ratio [= $(f + i)/r$, 禁线+半禁线 比上 共振线]（右图）；投影与图 4 中的相同。

探索多种多样的星系的星系晕

为了理解星系生态系统的运作模式，我们还需要研究其它的近邻星系，它们具有各种不同的质量、恒星形成速率和动力学状态。

正常的盘星系

对于那些与银河系和 M31 相似的“正常”星系，它们整体星系晕方面的观测已经有了长足的进展。特别是 Chandra 和 XMM-Newton 这两个 X 射线天文台，已经明确地在正常盘星系的内部及周围探测到弥漫热等离子体（例如，见 Wang 2010 的综述）。在这些星系中，等离子体的总 X 射线光度与恒星形成率密切相关。在那些面向星系的近期恒星形成区或旋臂上，软 X 射线被强烈增强了，但是相比示踪恒星形成的 H α 辐射却仅略微弥散些（例如，图 1；Tyler et al. 2003; Doane et al. 2004; Owen & Warwick 2009; Kuntz & Snowden 2010）。在 X 射线波段旋臂的这种狭长外观与星族合成模型的预期相违背：超新星的机械能输出率在一段时间内应该几乎保持不变，这段时间比大质量电离恒星的寿命长 10 倍。这意味着，在星际介质密度较低的旋臂间区域，超新星必须比在

旋臂内部产生更少的软 X 射线辐射。当以倾斜的角度观测盘星系时，软 X 射线辐射经常以羽流形式出现，极有可能代表着近期在大质量恒星形成区和星系球中被加热并被吹出的热等离子体（例如 Wang 2010）。对超出盘面的星系晕气体的最清晰透视图，是通过对侧向星系的观测获得的，如 NGC 4631（图 7；Wang et al. 2001）和 NGC 5775（图 1；Li et al. 2008）。观测到的弥漫 X 射线辐射通常不明显超出星系盘几个 kpc 远。来自 XMM-Newton 和 Suzaku 的补充观测给出了一致的结果，极深的观测进一步让我们看到星系周际热介质的一些迹象，以及提供了对热等离子体有用的光谱信息（例如 Wang 2010, Li et al 2018, 及其中的参考文献）。X 射线辐射的形态以及它与恒星形成率的关系，清楚地表明等离子体主要由恒星反馈来加热。然而，热等离子体的辐射冷却仅耗散了大质量恒星预期能量输入的一小部分（通常不超过百分之几；例如 Wang et al. 2016 和其中的参考文献）。其它的能量去了哪里？

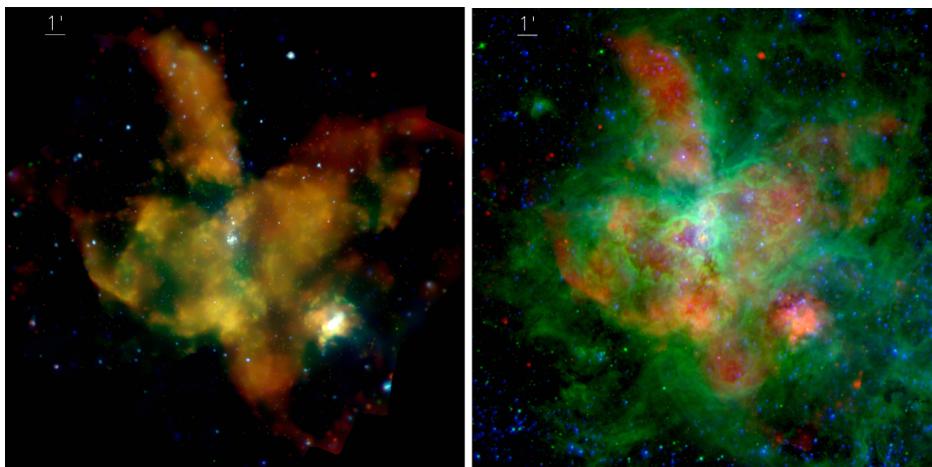


图 6. 左图 - 大麦哲伦星云的 30 Dor 恒星形成区域的 Chandra/ACIS-I 图像，其中 0.5-1 keV (红色) 、 1-2 keV (绿色) 、 2-8 keV (蓝色) 。右图 - 该区域的多 波段蒙太奇：弥漫软 X 射线辐射 (红色) 、 H α (绿色) 和 UV (蓝色) 。选自 Wang et al. (2018 年; 准备中) 。

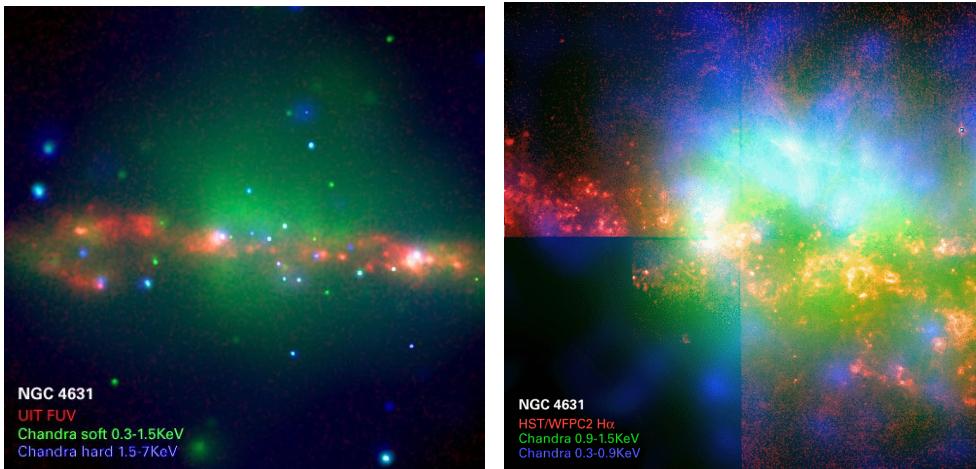


图 7. 侧向盘星系 NGC 4631 的多波段蒙太奇：右图显示了超出星系盘的温气体与该星系中心区域的弥漫热气体（左图）成协。细节请参阅 Wang et al. 2001。

HUBS 将首次为我们提供具有空间分辨率及软 X 射线优化的光谱观测的能力，这将大大促进对近邻盘星系的弥漫热等离子体的研究。我们将能够直接从发射线的相对强度推断出更可靠的温度分布，类似于在紫外和光学研究中（尽管仅针对较冷气体）常用的方式。我们还可以绘制出某根强发射线的空间分布，把和其它光谱成分的混淆降低到最小。因此，我们将有最大的灵敏度来探测纯粹的弥散等离子体，极大提高我们获取星系晕整体性质的能力。

星系核球和椭圆星系

目前我们对星系的恒星核球（或球体）中弥漫热等离子体还知之甚少，即使像 M31 这样邻近的星系。我们的确在它的核球中探测到一个明显的热等离子体外流（图 8; Li *et al.* & Wang 2007）。它的软 X 射线辐射呈双极向形态，表明外流可能受较强的垂直磁场的影响，与我们银河系中心区域观测到的相同。外流的辐射光谱可以用一个温度 $\sim 3 \times 10^6$ K 的光学薄热等离子体来表征。因为并没有证据表明 M31 中现在有活动星系核或者核球中有近期的大质量恒星形成活动，对热等离子体最直接的解释是由于演化后期的恒星通过恒星质量损失和 Ia 型超新星爆发所形成的。但弥漫的 X 射线光度最多只占 Ia 型超新星输入的机械能的百分之几。同时，反馈的物质也沒在核球中积累起来。在对其它中低质量星系的恒星球体的研究得到类似的结果。所以我们还得问，丢失的能量和反馈物质去了哪里？

另一个显著难题是，星系球体中弥漫热等离子体的金属丰度明显偏低。如果从 X 射线光谱的拟合结果来推断，X 射线光度 $\log(L_x) < 41$ 的中低质量星系的金属丰度通常是远低于太阳丰度的，而大质量星系的则与太阳丰度类似（例如，参考文献），这些都显著低于预期从 Ia 型超新星得到的金属增丰值。此外，一些星系往中心区域会显现出明显的铁丰度的下降，哪怕那里恒星的反馈应该是最强的。这种丰度下降的例子包括 M87、NGC 4472、NGC 5846 和 NGC 5044。这种下降和偏低的丰度，如果是内禀的，则表明 Ia 型超新星的发生率可能被明显高估了，和/或大部分增丰过的等离子体已经被赶到偏离中心较大的距离，甚或被推出了星系之外。从理论上则已经显示，这种外流在维持星系球体周围的大尺度热气体晕方面可以发挥重要作用（Tang et al. 2009）。

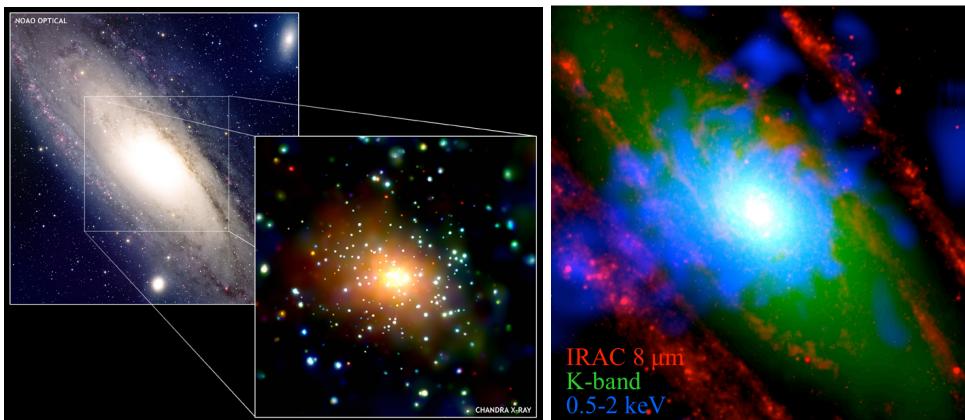


图 8. M31 核球的 Chandra/ACIS-I 图像 (Li & Wang 2007)：左图 - 辐射在 0.5-1 keV 波段（红色），1-2 keV 波段（绿色），和 2-8 keV 波段（蓝色）；右图 - 三色图，Spitzer/MIPS 24 μm 的辐射（红色），2MASS K 波段（绿色），和弥漫热等离子体的 Chandra/ACIS-I 0.5-2 keV 的辐射（蓝色），蓝色图中各种离散点源的贡献已被去除。

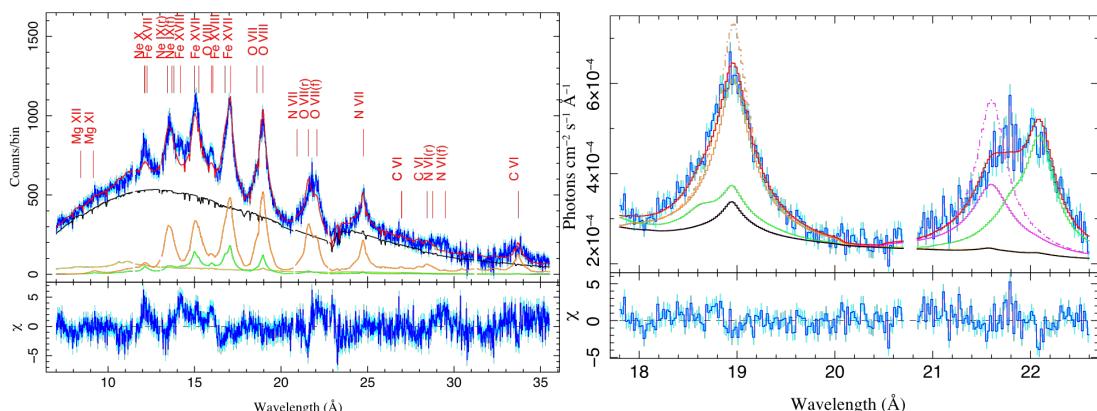


图 9. 左图 - M31 核球的合并的 RGS 光谱（蓝色）和最佳拟合的光学薄等离子体的 APEC 模型（红色）。黑色曲线表征亮点源，绿色和黄色曲线用于表征

未能分辨的活跃双星和灾变变星，橙色曲线则表征用单温度 APEC 模型描述的热气体。右图 - RS 光谱模型（红色实线）对 M31 核球的 RGS 光谱的 OVIII + OVII 谱线复合体的最佳拟合。单独的线或组合线被分别标示（详见 Chen et al. 2018）。为了比较，没有经过 RS 的对应的模型共振线也被标示出来（点划线）。黑线表示点源和热气体连续谱辐射的综合贡献。

软 X 射线光谱可以为星系球体中的弥漫热等离子体提供关键的诊断。这在最近关于 M31 核球的软 X 射线光谱分析中已被示范证明。但由于 XMM-Newton/RGS（反射光栅光谱仪）的无狭缝性质，所得到的数据在谱线解析上并不是很理想。尽管如此，对 OVII Ka 三重线进行仔细的贝叶斯分析，会发现禁线比共振线的空间分布显得更为紧致，这与预期共振散射会导致的空间分布相一致。图 9 进一步展示出了一个共振散射光谱测试模型对核球的 OVII 和 OVIII 发射线复合体的拟合。这个简单的模型对该复合体给出了一个比较满意的解释，表明共振散射确实可以解释大部分的谱线增宽（谱线的不透明度不同而导致增宽不同）和谱线相对强度（由于共振线光子在空间的重新分布会更多地溢出于 RGS 有效覆盖范围之外），并首次对等离子体湍动速度弥散提供了有用的限制。然而，这个基于等温球的测试模型显然过于简单，无法充分解释整个 RGS 光谱。诸如 CVI、NVII、FeXVII、NeIX 和 NeX 等不同离子谱线的强烈存在（图 9）似乎表明等离子体并不是等温的。深化对 M31 核球中的弥漫热等离子体的状态研究强力要求我们得到具有空间分辨能力的高质量光谱数据。

通过检查一系列不同质量的星系球体，我们还将可以了解活动星系核反馈，以及后期恒星反馈，各自如何影响并调整在星系核球和椭圆星系中弥漫热等离子体的状态。我们特别感兴趣的是，通过活动星系核对等离子体电离结构的影响来探测活动星系核的遗留痕迹。而这种痕迹被提出是在星系核区观测到弥漫 X 射线辐射超的原因（例如，Wang et al. 2010），以及是星系周际冷气体被过度电离的原因（例如，Rampadarath et al. 2010; Keel et al. 2017）。当活动星系核熄灭后，周围的弥漫等离子体需要很长时间才能达到新的电离平衡。例如，当等离子体的温度为 $\sim 1 - 3 \times 10^6$ K 时，氧离子达到 90% 碰撞电离平衡的时间尺度 $> 3 \times 10^5 / n_e$ 年（Smith & Hughes 2010），可以与一个星系的活动星系核事件之间的平均时间间隔相当甚或更长。多种可预期的光谱特征可以用作活动星系核遗迹的诊断。例如，在显著过电离的等离子体中，X 射线辐射是由复合过程主导的。类氦离子 Ka 线的 G-ratio 值通常会随着离核心距离增加而变大（与共振散射情况相反），因为复合时标会随密度降低而增加；并且 G-ratio 值与冷气体分布没有相关性（不同于电荷交换情况）。实际操作上，一

个简单的活动星系核遗迹的光谱模型，具有两个关键拟合参数即活动星系核在（突然）熄灭之前的光度和遗迹的年龄，似乎就可以给观测到的 M31 的 RGS 光谱一个最简单又合理的解释。但是，仅当拥有 HUBS 的光谱能力时，我们才可以对这个活动星系核遗迹模型进行严格的考验，并从光谱学上与其它情形区分开来。其中一个已知的有区分度的特征是，显著的活动星系核遗迹应该显示复合连续谱（或称为辐射限；例如 Guainazzi & Bianchi 2007；图 10），而例如电荷交换则不会有。有着比 RGS 远高的灵敏度，HUBS 观测将使我们能够检查许多星系的类似质量的核球 / 球体中及周边的弥漫热等离子体。我们将通过对活动星系核遗迹的建模和分析来限制近邻星系中活动星系核的发生频率。

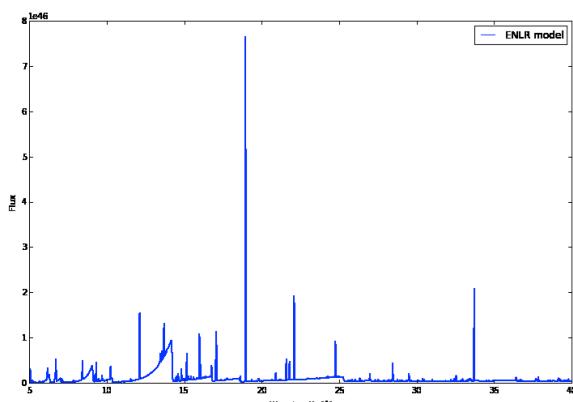


图 10 过电离（复合）等离子体的典型性光谱。

另外近邻的星系核球和中等质量椭圆星系（例如，图 11）也是研究的 Fe 的 L 壳层谱线复合体的最好目标。现在无论在理论上或观测上我们对这个复合体都还不甚了解，而 HUBS 观测将从光谱上分解出这个复合体中的许多谱线。在很大的参数范围内，该复合体可以为等离子体温度、共振散射、铁的丰度提供最佳诊断。结合许多 α 元素的离子发射线的观测，这些诊断可以用来估算 α 元素/铁的丰度比，从而直接地去了解等离子体的起源。



图 11 - 近邻椭圆星系的 Chandra 图像样例，显示被认为是由 AGN 爆发产生的子结构（授权：NASA/CXC/UFRGS/R.Nemmen et al.）。

星暴星系

恒星形成所驱动的反馈是当前星系形成和演化理论中的重要组成部分（例如，Li et al. 2017）。特别是核心星暴星系，产生所谓的超级风，理论上可以对星系生态系统甚至周围的星系际介质产生巨大影响。但这种反馈的有效性目前还很难通过观测来证实和量化。甚至对于观测到的来自星暴的弥漫软 X 射线辐射，是代表超级风自身或仅仅代表它与夹带的甚或正落进来的冷气体云团 / 丝状结构的交界面，仍然存在争议（例如，Strickland & Stevens 2000; Bauer et al. 2007; Wang et al. 2016）。事实上，当只用碰撞电离平衡等离子体模型来拟合星暴星系的弥漫 X 射线辐射（这是相当普遍的做法）所得到的温度和金属丰度常常和现有理论不符。观测到的超级风的软 X 射线辐射通常沿着这个星系的短轴具有拉长的形态，并且与超出星系盘面的 H α 辐射特征具有很好地相关（例如，图 12）。这示意着检测到的热等离子体来自超级风和冷气体之间的相互作用。事实上，RGS 的数据研究显示，星暴星系 M82 中的 O VII K α 三重线的 G-ratio 明显大于碰撞电离平衡等离子体的值（例如，图 13；Zhang et al. 2014；也见 Liu et al. 2014）。研究表明，电荷交换对 K α 三重线的禁线贡献可以大于 95%，从而提高 G-ratio（图 13）；这也会导致对等离子体的热学和化学性质的强烈偏估（Liu et al. 2011；Zhang et al. 2014）。通过考虑电荷交换的贡献，Zhang et al. (2014) 对这种偏估进行了校正，并首次对 M82 外流中冷热气体交界面的有效面积给出估算值。因此，对电荷交换的研究可以对知之甚少的交界面物理过程提供独特的限制，这对估算超级风的能量、质量加载和最终命运都至关重要，乃至理解其对星系演化和大尺度星系周际介质，甚或星系际介质的影响。

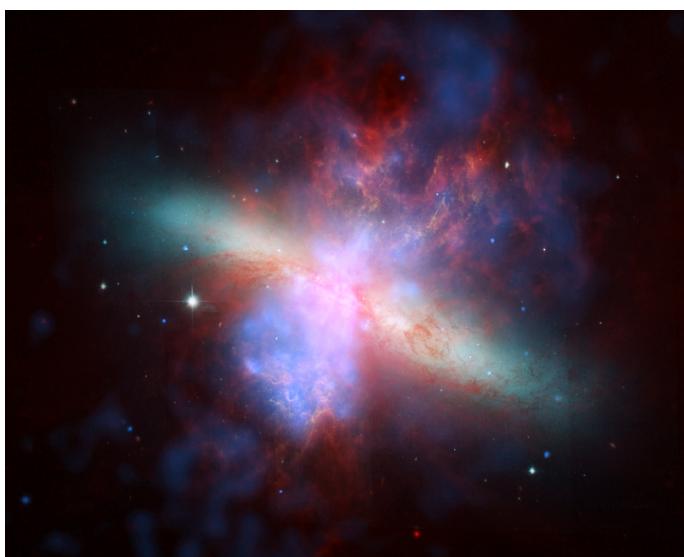


图 12. M82 的多波段蒙太奇。

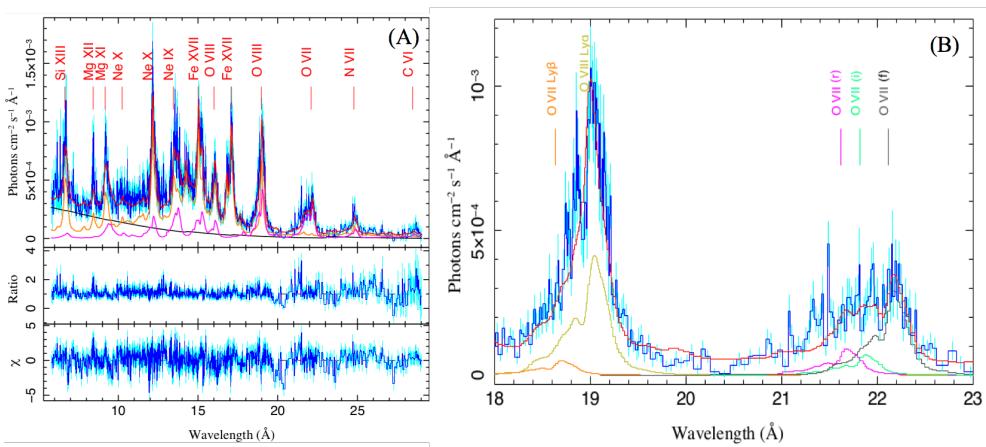


图 13. (A) M82 的 RGS 流量光谱和 APEC + CX 模型：总的模型辐射以红色显示，CX 贡献以紫色显示，CIE (APEC) 等离子体贡献以橙色显示，幂律背景辐射组分以黑色显示。下方图框则以两种方式显示残差。 (B) RGS 光谱中 OVII 和 OVIII 谱线复合体的特写。CX 对各条线的贡献分别显示，紫色，绿色和灰色曲线分别代表 OVII He 三线的共振线、半禁线和禁线成分。橙色和金色曲线代表对 OVII Ly- β 和 OVIII Ly- α 的贡献。来自 Zhang et al. (2014)。

在所有这些分析上 HUBS 可以做得好得多，并将开创新的可能性。例如，凭借其成像光谱能力，HUBS 观测可以直接用来测量视线方向上，超级风中热等离子体的整体运动和/或湍动速度。到目前为止这样的速度信息仅由观测被夹带的冷气体来提供，由紫外/光学发射线和/或吸收线测量得到其整体运动速度在 200 - 1000 公里每秒的范围内（例如，Martin 2005）。该速度预计远远低于超级风中富金属热等离子体的速度；但这两种速度之间的关系是非常不确定的（例如，Strickland & Stevens 2000）。因此，为了真正理解这种超级风的质量外流率、动力学和最终命运，我们必须直接测量热等离子体外流的速度。这种流体的速度可以导致 X 射线发射线的线心偏移和/或线宽增加。根据预期的 ~300 的光谱分辨率，HUBS 将能够绘制出等离子体的速度分布。我们特别对相干的速度结构感兴趣（例如，从具有一定倾角而非严格侧向如 M82 的星系出来的双极性外流）。HUBS 观测将提供具有足够高计数统计性的数据，我们就可以在几百公里每秒的量级上测量速度弥散，为超级风的湍动速度提供直接约束。

总之，现有的研究已经证明了软 X 射线光谱可以为星系晕中各种重要的物理过程提供关键诊断。这里面许多的研究都是由中国（年轻）天文学者主导的，

而 HUBS 将加强中国在这一重要天文研究领域的优势，给他们提供第一手资料。从获得的近邻星系的含有空间分辨率的软 X 射线光谱，我们可以了解物质和能量如何在星系内部及其周围循环周转，以及影响它们的生态系统和演化。

参考文献：

- Bauer, M., et al. 2007, A&A, 467, 979
Breitschwerdt, D. & Schmutzler, T. 1999, A&A, 347, 650
Chen, Y. et al. ApJ, 2018, in press
Doane, N E, et al. 2004, AJ, 128, 2712
Fang, T.-T. & Jiang, X. 2014, ApJL, 785, 24
Foster, A. R., Ji, L., Smith, R. K., & Brickhouse, N. S. 2012, ApJ, 756, 128
Galeazzi, M. et al. 2014, Nature, 512, 171
Gu, L. et al. 2016, A&A, 594, 78
Guainazzi, M. & Bianchi, S. 2007, MNRAS, 374, 1290
Guainazzi, M. et al. 2009, A&A, 505, 589
Hopkins, P. F. et al. 2014, MNRAS, 445, 581
Keel, W.C. et al. 2017, ApJ, 835, 256
Kuntz, K.D. & Snowden, S.L. 2010, ApJS, 188, 46
Li, J.-T. et al. 2008, MNRAS, 390, 59
Li, J.-T. et al. 2018, ApJ...855 , 24
Li, M., Bryan, G.L., Ostriker, J.P. 2017, ApJ, 841, 101
Li, Y. & Bregman, J. 2017, ApJ, 849, 105
Li, Z. & Wang, Q.D. 2007, ApJ, 668, L39
Li, Z., Wang, Q.D. & Wakker, B.P. 2009, MNRAS, 397, 148
Liu, J. et al. 2010, MNRAS, 404, 1879
Liu, J., Mao, S. & Wang, Q.D. 2011, MNRAS, 415, L64
Liu, J., Wang, Q.D. & Mao, S. 2012, MNRAS, 420, 3389
Liu, J., Gou, L., Yuan, W., & Mao, S. 2014, MNRAS, 437, L76
Martin, C.L. 2005, ApJ, 621, 227
McNamara, B.R. & Nulsen, P.E.J. 2007, ARAA, 45,117
Norman, C.A. & Ikeuchi, S. 1989, ApJ, 345, 372
Owen, R.A. & Warwick, R.S. 2009, MNRAS, 394, 1741
Porquet, D., Dubau, J., & Grosso, N. 2010, SSRv, 157, 103
Ranalli, P., et al. 2008, MNRAS, 386, 1464
Rampadarath, H. et al. 2010, A&A, 517, L8
Roberts, S.R. & Wang, Q.D. 2015, MNRAS, 449, 1340
Segers, M.C. et al. 2017, MNRAS, 471, 1026
Smith, R.K. & Hughes, J.P. 2010, ApJ, 718, 583
Snowden, S. L. et al. 1997, ApJ, 485, 125
Strickland, D.K. & Stevens, I.R. 2000, MNRAS, 314, 511
Su, M., Slatyer, T. R., & Finkbeiner, D. P. 2010, ApJ, 724, 1044
Tang, S., Wang, Q.D. et al. 2009, MNRAS, 392, 77

- Tang, S. & Wang, Q.D. 2010, MNRAS, 408, 1011
Tyler, K, et al. 2003, ApJ, 610, 213
Yao, Y, & Wang, Q. D. 2006, ApJ, 641, 930
Yao, Y, & Wang, Q. D. 2007, ApJ, 666, 242
Wang, J. et al. 2010, ApJL, 719, 208
Wang, Q.D. et al. 2001, ApJL, 555, L99
Wang, Q.D. et al. 2005, ApJ, 635, 386
Wang, Q.D. 2010, PNAS, 107, 7168
Wang, Q.D. et al. 2016, MNRAS, 457, 1385
Yang, C. Wang Q.D. et al. 2018, ApJ, accepted
Zhang, S. Wang Q.D. et al. 2014, ApJ, 794., 61
Zhang, G. et al. 2018, in preparation