

HUBS 科学白皮书

星系团和星系群

一、X 射线天空中的星系团和星系群

自 20 世纪初以来，星系团和星系群一直是星系和宇宙学领域内最受关注的研究对象之一。在目前已知的各类天体中，星系团是最大的仅靠其自身引力就能实现物质约束和动力学平衡的系统。根据可见光和红外波段图像，可知一个典型的星系团由成百上千个成员星系构成，总质量达到约 $10^{14-15} M_{\odot}$ ，跨越数个 Mpc。其缩小的版本，由数个至数十个星系构成，称作星系群。与光学波段给人的印象不同，星系团和星系群成员星系其实仅占其发光物质总量的约 10%。发光物质中的约 90% 是弥漫于整个星系团和星系群、温度高达约 1 千万至 1 亿度的极高温星系际介质，其辐射的绝大部分都集中在 X 射线波段上 (Sarazin 1988 年综述文)。事实上，即使计入星系际介质，发光物质也只占据了星系团和星系群总引力质量的大约 10-15%——大量不可见的引力质量即所谓暗物质。考虑到对暗物质进行研究必须借助于研究发光物质，而发光物质又由星系际介质主导，因此可得出结论：若要研究星系团和星系群的结构和演化，在 X 射线波段获取其物理和化学信息将是一个极重要渠道，针对这些天体开展 X 射线空间观测就显得十分必要了。

1966-1971 年间，研究者借助气球和探空火箭分别在 Virgo 星系团、Perseus 星系团和 Coma 星系团等星系团中探测到了来自星系际介质的 X 射线辐射。人类第一颗 X 射线天文卫星 Uhuru 于 1970 年发射后，对全天的亮 X 射线源进行了统计和分类，并在 1978 年发布了 4U 宇宙 X 射线源表 (Forman 等 1978 年)。在编入该表的 339 个宇宙 X 射线源中，星系团共有 54 个，占据总数的六分之一。

此时,也已知道星系团的 X 射线辐射亮度可以达到 $10^{43-45} \text{ erg s}^{-1}$ 量级,足以匹敌不少活动星系核,属 X 射线天空中的亮源。据当时的测算,星系团的空间尺度小则数百 kpc,大则数 Mpc。根据于 1977-1978 年发射的 HEAO-1 和 HEAO-2 (1978 年发射;即 Einstein 卫星)卫星的观测,研究者发现星系团和星系群的引力势场分布大致符合 King 模型、因而其 X 射线表面亮度和气体密度分布大致满足 β 模型(Arnaud 等 1992 年)。上世纪九十年代以来,美欧日诸国陆续发射了 ROSAT、ASCA、Chandra、XMM-Newton、Suzaku 等多个高性能 X 射线空间天文台,而对星系团和星系群的成像和/或光谱观测始终是这些空间天文台的重要任务之一。借助于这些天文台上所搭载的各类仪器,对星系团和星系群的了解已经进入完全崭新的阶段,许多图像和光谱上的特征(如 X 射线空洞、冷锋、激波、多相气体谱等)被发现并赋予合理或较合理的物理解释,对这些天体的结构和演化的理解也提升到了较高水平。事实上,对星系团和星系群的 X 射线研究不但从动力学、热力学和化学角度丰富了对这些天体自身结构和演化的了解,还为建立准确的星系、宇宙的形成和演化模型、以及在地球上不可企及的极端物理条件下研究原子物理和等离子体物理提供了巨大的帮助(Böhringer 和 Werner 2010 年)。

尽管在过去半个世纪中取得了巨大的进步,但在星系际介质的热力学过程、动力学过程以及化学增丰过程的研究中,仍然存留着一些关键问题有待解决。尤其是在活动星系核反馈和并合过程对星系团和星系群演化的影响等方面,以现有观测数据为基础的理论 and 模拟工作似乎已经发挥到了极点,亟需新的、更深入的观测证据作为前进的推动力。这些都对研发新型空间 X 射线观测平台提出了非常明确的需求,同时也是美日等空间 X 射线天文强国不懈追求的目标,

即在保障至少角分量级空间分辨率的前提下，实现极高能量分辨率以分辨处于各个电离态的金属离子线。

二、星系团和星系群 X 射线研究中待解决的科学问题

1、星系际介质的热力学演化历史

早期的理论研究即预言星系团和星系群密度较大的中央区域内将出现显著的、速率可达 $10^{2-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 的气体冷却现象，成为冷流 (Fabian 1994 年综述文)。根据 1990 年发射的 ROSAT 卫星研究，在相当一部分星系团和星系群中确实存在一个较亮的核心，这与标准冷流模型的预测大致是一致的。然而，标准冷流模型还预言冷却后的气体将处于较低和/或极低的温度，这又与光学、紫外、红外的观测不一致。对此，也可提出另一种解释，即由于某种原因星系际介质的冷却被抑制了，而星系团和星系群中央区域的辐射超出是由那里较深的引力势结构造成的 (Makishima 等 2001 年综述文)。1993 年兼有较好空间和能量分辨率的 ASCA 卫星发射后，研究者仍然没能找到冷流的行踪，反而在一系列针对富星系团 (如 Centaurus ; Fukazawa 等 1994 年) 和贫星系团 (如 Abell 1795 ; Xu 等 1998 年) 的观测中发现了中央几十 kpc 内冷热两相气体并存的证据。其中，热气体的温度与外围区域相似，而冷气体的温度则接近星系内星际气体的温度 (约 1-2 keV)。以质量衡量，后者仅占前者的几分之一。

1999 年 XMM-Newton 发射后，Tamura 等 (2001 年)、Peterson 等 (2001 年、2003 年)、Xu 等 (2002 年) 借助于特征谱线诊断法找到了在星系团和星系群和巨椭圆星系的 X 射线气体晕中不存在大量极冷气体的确凿证据。同时代的 Chandra、Suzaku 卫星观测也给出了接近的结果 (如 Gu 等 2012 年，以及 Fabian 2012 年、McNamara 和 Nulsen 2007 年两篇综述文)。事实上，平均而言星系团

和星系群中央几十至上百 kpc 内冷气体的数量比传统冷流模型的预言低至少一个数量级，在一些极端中冷气体甚至可被忽略。

目前，标准冷流模型的命运虽然大局已定，但涉及气体冷却这一过程的细节，仍有一些重要问题未得到解决。其中最重要的问题之一就是抑制星系际介质冷却的加热机制是如何工作的。研究者已普遍认同活动星系核就是阻止星系际介质冷却的能量提供者，并且很可能主要是通过所谓射电模式（又称动力学模式或喷流模式；Croton 等 2006 年）加热星系际介质的。此模式下，活动星系核光度和黑洞吸积率均较低，黑洞吸积处于热吸积流模式下，主要通过喷流和星系风向周围的星系际介质传递能量。在射电和 X 射线波段上观测到的射电瓣、激波、X 射线空洞等现象是支持此模型的有力证据（图 1）。然而，从理论上讲，大质量系统拥有更大的黑洞和更多的星系际介质，射电模式加热将更加有效。如此一来，低质量星系团和星系群里的气体加热又是如何进行的呢？尽管观测表明射电喷流所携带的能量足以有效抵消星系团和星系群中央区域的冷却，但这个动态热平衡的空间和时间细节尚不得而知。

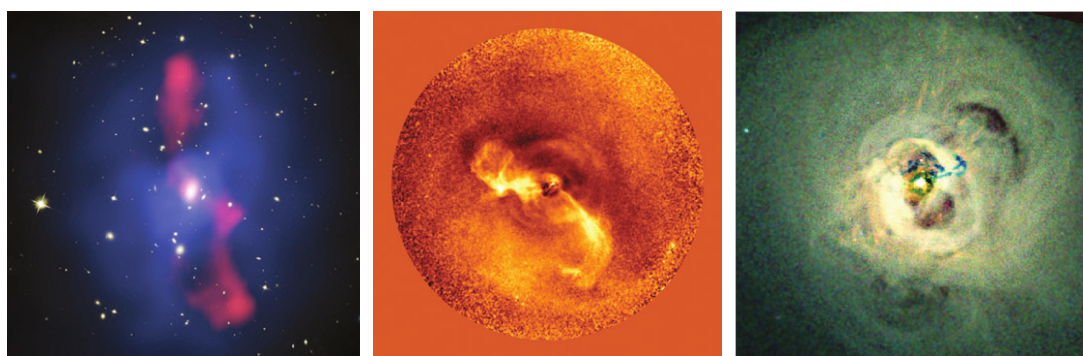


图 1：活动星系核与星系团内星系际介质发生复杂相互作用的三个例子（均为 Chandra X 射线图像）。（左）X 型 FR II 源 MS0735.6（McNamara 等 2009 年；蓝色为 VLA 327 MHz 图像）；（中）M87 中的弱激波结构（Forman 等 2007 年）；（右）Perseus 星系团中心区域的 X 射线空洞（Fabian 等 2006 年）。

除上面涉及活动星系核加热机制的疑问外，还有几个问题需要解答。比如，

星系际介质中冷成分的来源，究竟是百分之百源自高温星系际介质的有限冷却，还是像 Abell 1795 那样，至少有一部分是由星系内部溢出并被约束在主导星系外部磁环中(从而避免了被立即加热 ;Gu 等 2012 年)？是否存在相当数量更冷(温度为几十至几百 eV) 的气体？如果存在，它们与所谓的失踪重子物质有什么关联？等等。

显然，上述问题的答案将对我们构建星系和星系团和星系群形成演化理论产生极直接、重要的影响。要给予正确回答，就必须在星系团和星系群的极高温星系际介质中准确甄别出冷热各相气体成分并加以研究，就必须使用能量段至少可覆盖 0.3-1.5 keV、同时具有 eV 量级能量分辨率的仪器，以便能够完整获得并识别出氧、氖、镁、硅、硫、铁等元素各价态离子的数百条特征线，从而对星系际介质的物理状态给出准确诊断。预计基于 HUBS 的高分辨率谱观测将能第一次完成如下几项具有挑战性的工作，同时回答与之相关的几个重要问题：

- 借助谱线诊断法以极高精度测量星系际介质中多相气体的构成，得到各成分准确的温度、金属丰度和数量，以及大致的空间分布。特别是要借助 OVII、OVIII、NeIX 和 NeX 线探明在星系际空间中（尤其是主导星系附近）是否存在相当规模温度约为 0.1-0.5 keV 的气体（以目前的仪器无法对此温度下的气体进行有效探测）。如果存在，能否帮助解释重子物质失踪之谜？
- 基于高分辨率吸收谱特征定量描绘活动星系核所驱动的气体流，获得其规模、速度场等信息，从而为建立星系际介质加热模型提供直接的观测依据。
- 理解许多星系团中的明亮冷核与气体加热和冷却过程有何物理关联。
- 基于上述工作解释星系际介质中多相气体的来源，厘清加热和冷却这两个

物理过程的时空细节，从而回答它们之间如何达到动态平衡这一关键问题。

2、星系际介质的化学增丰历史

与宇宙中各处的情形一样，星系团和星系群中比氦重的所谓重元素，除少量经由恒星内部核聚变而形成外，绝大多数都是在超新星爆发过程中的氧燃烧和硅燃烧阶段形成。然而，上个世纪七十年代以来的 X 射线观测表明这些重元素的分布并未只局限于其产生地，而是向外部扩散到了 Mpc 的尺度上，并充满了星系际介质。针对此现象，一个可能解释就是早期增丰模型(Vigroux 1977 年)，即星系形成前第一代天体所演变成的超新星以及在红移约为 2-3 时(即宇宙形成约 20-30 亿年时) 恒星形成峰值期 (如 Romeo 等 2006 年) 的超新星贡献了大量的金属，这些金属已经借助于高速星系风等外流过程扩散至星系团和星系群尺度上。近期在 Perseus 星系团 (Werner 等 2013 年) 和 Virgo 星系团 (Simionescu 等 2015 年) 中远至维里半径、以及其它一些星系团和星系群中远至至少 1/2 维里半径处观测到的较平坦的金属丰度空间分布(Sasaki 等 2014 年、Urbán 等 2017 年) 进一步支持了这个模型 (图 2)。

然而上世纪九十年代以来就已在星系团和星系群中发现了中央区域的气体铁丰度向内升高的现象 (如 Sasaki 等 2014 年、Laganá 等 2015 年、Mernier 等 2015 年) 以及金属丰度空间分布存在子结构 (如 Sanders 和 Fabian 2007 年、Gu 等 2007 年、Laganá 等 2015 年)。这些现象说明除早期增丰之外，星系团和星系群内持续的金属增丰和扩散过程也对星系际介质中的金属分布产生了重大影响。与此相联系的物理机制包括并合过程和/或活动星系核反馈过程中的气体冲

压剥离、潮汐力、外流、加热等。这些机制不但都可能触发或抑制恒星形成，同时也都会对金属扩散产生直接影响（图 2）。由此可见，若要完整描绘星系团和星系群中金属元素的起源和传播，必须采用比早期增丰模型更加复杂的模型。

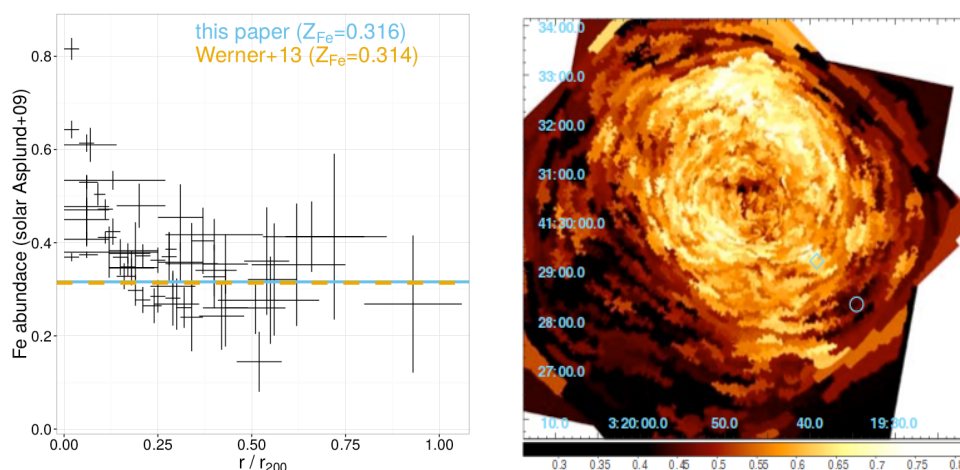


图 2：（左）9 个星系团中铁丰度角向平均值的分布（Urban 等 2017 年、Werner 等 2013 年）。当半径大于 $0.25r_{200}$ 时，铁丰度大体维持在一个恒定值；（右）Perseus 星系团中的金属丰度二维分布（Sanders 和 Fabian 2007 年）。并合过程使其金属分布呈漩涡状结构。

在这项研究中最大的挑战就是要精确地测定几种最重要金属（如铁、镍、镁、硅、硫、氧、氦，等）间的丰度比及其空间分布（对较近的大型星系团可做二维分布测量，其它情况下可测量角向平均值随半径的变化）。以目前的仪器，可以对铁-镍丰度进行比较精确的测量。然而，对于镁、硅、硫等元素，其测量要么因为仪器能量分辨率和响应方面的问题，要么由于低信噪比而不能很好地实现。至于对氧和氦的测量，由于仪器响应的标定问题以及有效面积在低能区的快速衰减，所获得的数据具有很大的不确定性。在关键的丰度和丰度比信息不完备的情况下，当前星系团和星系群化学增丰模型的可靠性很难得到实质性的提升。

此外，还有一个因素制约了星系团和星系群化学演化历史的研究。如上所述，现有天文 X 射线探测器的能量段和能量分辨率制约了对多相气体的甄别。

这就造成了光谱建模过程中气体温度和金属丰度的耦合现象。当各个具有不同温度的气体成分的数量不能很好地被确定时，其金属丰度的测量也将出现偏差，此即所谓 Fe-bias 现象（该名称有所误导。事实上此现象并不局限于铁）。唯有使用具有极高能量分辨率的仪器，方能克服这个问题。考虑到以 XMM-Newton 卫星所搭载的 RGS 探测器（能量分辨率约 10 eV）仍不能有效解决这个问题，使用能量分辨率约 1 eV 的探测器以分解更多谱线就显得十分必要了。

HUBS 项目将能为此方面的研究提供如下强有力的推动。

- 以约 1 eV 的分辨率研究至少数百条 X 射线特征谱线，从而以此前未有的极高精度测量较近较亮星系团和星系群中各类金属的含量和空间分布。
- 以上述观测为约束，研究早期增丰和持续增丰过程对星系际介质中金属含量和分布的不同影响，构建星系团和星系群完整的化学演化历史。
- 以所获得的铁、镁、硅、硫、氧等金属元素的丰度比，对现有超新星模型的一些不确定性（如 II 型超新星中氧的产出量）进行有效的观测约束。

3、星系际介质的宏观动力学状态

上世纪 50 年代末以来，已在相当一批星系团的星系际介质中探测到了由相对论性（洛伦兹因子 $\gamma \gg 10^3$ ）电子体系产生的射电同步辐射和（对宇宙微波背景辐射的）逆康普顿散射。这些弥漫展源的尺寸小则百 kpc 左右、大则达 Mpc 量级，形态各异，主要被分为射电晕、微射电晕、射电遗迹三大类（Feretti 等 2012 年综述文）。对其成因，目前的主流推测是：（1）早期活动星系核和/或恒星形成的活动给星系际介质贡献了大量初级相对论性电子，随后星系团/群并合过程中产生的 Mpc 尺度湍流引起共振或非共振碰撞（二阶费米加速），加速

初级电子进而形成射电晕或微射电晕；(2)或由并合中的低马赫数激波压缩气体磁场并使之更加整齐，初级电子、高能热电子得以在激波前后来回穿行（一阶费米加速），从而产生相对论电子，形成长形射电遗迹（Brunetti 和 Jones 2014 年综述文）。据推测，应能在 $1/3$ 以上的星系团中观测到此类展源，而星系群中的射电展源也因中低频（几十至几百 MHz）射电技术的发展正在被陆续发现。由此可以看到，无论是哪一种类型的星系际介质射电展源，无论是湍流加速机制还是激波加速机制，都涉及星系团和星系群的生长演化、黑洞对环境的反馈、磁场、超新星等重要前沿课题（图 3）。

显然，在研究星系团和星系群星系际介质射电展源的过程中，星系际介质的动力学过程发挥着至关重要的作用。其中，激波会在星系团和星系群中产生直接的 X 射线图像和光谱结构，可以直接借助 X 射线观测对其开展研究。而湍流会导致 X 射线谱线出现 eV 量级的特征展宽，有希望借助具有高能量分辨率的 X 射线光谱仪对其进行研究。事实上，几十年来美日等国一直致力于启动后一项研究，只是因为卫星或卫星装置方面的三度损失而一直未能如愿。因此，以 HUBS 卫星所搭载的仪器，将能在此方向上实现极具意义的零突破，并完成如下工作：

- 借助于对离子谱线轮廓 eV 量级的测量，准确测定星系团和星系群星系际介质中的速度场，对湍流的形式、能量来源、演化进行正确建模。
- 对星系团和星系群中的磁场强度和分布进行很强的观测约束。
- 结合 MWA、LOFAR、SKA 等中低频射电干涉阵列的研究，回答有关星系团和星系群射电展源的形成和演化这一关键问题。

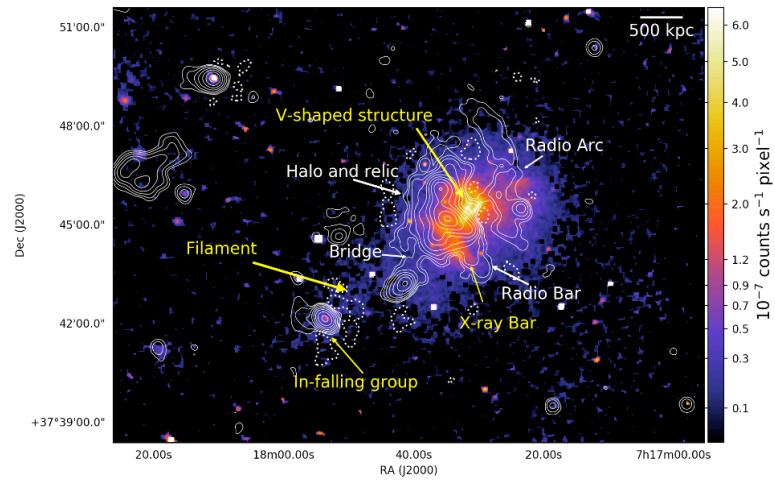


图 3 : 多重并合星系团 MACS J0717.5+3745 中 X 射线辐射 (彩色晕图) 和复杂的射电结构 (白色等强度线 ; Bonafede 等 2018 年) 。

【参考文献】

- [1] Arnaud, M., Rothenflug, R., Boulade, O., et al. 1992, *A&A*, 254, 49
- [2] Bonafede, A., Bruggen, M., Rafferty, D., et al. 2018, arXiv:1805.00473
- [3] Böhringer, H., & Werner, N. 2010, *A&ARv*, 18, 127
- [4] Brunetti, G., & Jones, T. W. 2014, *IJMPD*, 23, 1430007-98
- [5] Croton D J, Springel V, White S D M, et al. *MNRAS*, 2006, 365, 11
- [6] Fabian, A. C. 2012, *ARA&A*, 50, 455
- [7] Fabian, A. C., Sanders, J. S., Taylor, G. B., et al. 2006, *mnras*, 366, 417
- [8] Fabian, A. C., Arnaud, K. A., Bautz, M. W., et al. 1994, *ApJ*, 436, L63
- [9] Feretti L., Giovannini G., Govoniet F., et al. 2012, *AARev*, 20, 54
- [10] Forman, W., Jones, C., Churazov, E., et al. 2007, *ApJ*, 665, 1057
- [11] Forman, W., Jones, C., Cominsky, L., et al. 1978, *ApJS*, 38, 357
- [12] Fukazawa, Y., Ohashi, T., Fabian, A. C., et al. 1994, *PASJ*, 46, L55
- [13] Gu, J., Xu, H., Gu, L., et al. 2007, *ApJ*, 659, 275
- [14] Gu, L., Xu, H., Gu, J., Kawaharada, M., et al. 2012, *ApJ*, 749, 186
- [15] Laganá, T. F., Lovisari, L., Martins, L., et al. 2015, *A&A*, 573, A66
- [16] Makishima, K., Ezawa, H., Fukuzawa, Y., et al. 2001, *PASJ*, 53, 401
- [17] McNamara, B. R., Kazemzadeh, F., Rafferty, D. A., et al. 2009, *ApJ*, 698, 594
- [18] McNamara, B. R., & Nulsen, P. E. J. 2007, *ARA&A*, 45, 117
- [19] Mernier, F., de Plaa, J., Lovisari, L., et al. 2015, *A&A*, 575, A37
- [20] Peterson, J. R., Kahn, S. M., Paerels, F. B. S., et al. 2003, *ApJ*, 590, 207
- [21] Peterson, J. R., Paerels, F. B. S., Kaastra, J. S., et al. 2001, *A&A*, 365, L104
- [22] Romeo, A. D., Sommer-Larsen, J., Portinari, L., & Antonuccio-Delogu, V. 2006, *MNRAS*, 371, 548
- [23] Sanders, J. S., & Fabian, A. C. 2007, *MNRAS*, 381, 1381
- [24] Sarazin, C. L. 1988, *X-Ray Emission from Clusters of Galaxies* (Cambridge: Cambridge Univ. Press)
- [25] Sasaki, T., Matsushita, K., & Sato, K. 2014, *ApJ*, 781, 36
- [26] Simionescu, A., Werner, N., Urban, O., et al. 2015, *ApJL*, 811, L25
- [27] Tamura, T., Kaastra, J. S., Peterson, J. R., et al. 2001, *A&A*, 365, L87
- [28] Urban, O., Werner, N., Allen, S. W., Simionescu, A., & Mantz, A. 2017, *MNRAS*, 470, 4583
- [29] Vigroux, L. 1977, *A&A*, 56, 473
- [30] Werner, N., Urban, O., Simionescu, A., & Allen, S. W. 2013, *Nature*, 502, 656
- [31] Xu, H., Kahn, S. M., Peterson, J. R., et al. 2002, *ApJ*, 579, 600
- [32] Xu, H., Makishima, K., Fukazawa, Y., et al. 1998, *ApJ*, 500, 738