

X 射线弥漫背景辐射

1.1 简介

在非常宽的频段上（大概在 0.1keV 到 1 MeV）能探测到弥漫 X 射线背景。归因于其光谱的复杂性以及贡献源的各种各样的性质，通常在不同能段来研究 XRB。典型的，在 0.1-2.0keV 之间的宇宙 X 射线流量被称为软 X 射线背景（SXRБ）。

早在 1962 年，伴随着太阳以外的 X 射线源天蝎座 ScoX-1 的首次被探测，偶然发现了 XRB。这之后，作了很多尝试去解释它的起源、以及空间和光谱结构。X 射线观测的分析（比如，Field & Henry 1964; Henry et al. 1968）指出这个发射的河外起源。早期的迹象表明光谱可以用一个幂律谱的形式表示：

$$S(E) = A E^{-\Gamma} \quad (1.1)$$

这里， S 是光强，单位为 $\text{photons s}^{-1} \text{keV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ， A 是常数， E 是能量， Γ 被称为谱指数(Henry et al. 1968)。由相对论电子所导致的逆康普顿散射和同步辐射能够产生这样的光谱。然而，没有足够的证据支持当时解释所有观测到的 XRB 的那些类型的源（比如点源，类星体）的演化。这导致了一种揣测：绝大多数 XRB 也许是真正来自于弥漫源的发射机制，比如来自热弥漫气体的热韧致辐射能够说明大约在 0.25 keV 处(Henry et al. 1968)以及大于大约 1keV 处(Marshall et al. 1980) 的软的弥漫辐射。来自 HEAO-1 A-2 实验的分析显示在 3-50keV 波段的 X 射线光谱能够很好的被一个温度 $kT \sim 40\text{keV}$ 的光薄热韧致辐射模型所表示。然而，COBE FIRAS 仪器并没有探测到宇宙微波背景辐射（CMB）强的康普顿变形，来自这个仪器的光谱解释(Wright et al. 1994)表明：任何热得足以产生可观测的弥漫 X 射线背景的弥漫星系际介质的密度，比产生这个背景气体密度小两个量级。

利用探空火箭和卫星来对 X 射线天空的巡天已经为我们提供了产生 SXRБ 的很好的理解。探空火箭巡天（比如威斯康星空间巡天）和安装在卫星上的望远镜（比如 ROSAT）在不同的 X 射线能段成图，揭示了 SXRБ 的那些指向局部以及河外起源的不同的空间和光谱结构，因此给我们提供了宇宙小尺度以及大尺度结构的重要的线索。比如无所不在的弥漫软（1/4 keV）X 射线背景是 X 射线天文的最早发现之一。早年利用准直正比计数器的火箭可以比较容易的在一定频段范围内对软 X 射线进行探测和成图（McCammon & Sanders 1990）。弥漫射线光谱仪卫星（DXS）对软 X 射线背景进行了第一次高分辨率光谱的测量(Sanders et al. 2001)，期望能够验证热起源这个推测，并且能够对热气体特殊的产生机制问题能有启发。和预计的一样，光谱富含谱线，但是和已知的模型并不符合。这些模型不仅包括碰撞电离平衡模型，还有所用的非电离平衡模型（比如超新星遗迹 SNRs, Smith & Cox 2001）。接着宇宙热星际介质光谱仪(CHIPS, Huerwits et al. 2005) 巡天了几个月，获得了弥漫光谱的高分辨率极紫外（EUV）光谱，但是没有探测到任何所预计的强的谱线。

1.2 软 X 射线背景的起源和结构

利用不同天文台观测的许多变化的 X 射线目标已经表明 SXRБ 中存在几个不同的成分，每个具有其不同的起源。大致可以分为两类：银河系的和河外的。银河系起源包括在我们银河系中，起源于处在碰撞电离平衡下的热的光薄气体所在的星

际区域，还有来自在太阳风离子和星际中性粒子之间的电荷交换作用（SWCX）；河外起源由来自于银河系以外的未被分辨的点源所主导。它们通常有它们自己比较独特的起源和光谱结构。

1.3 SXR 的银河系源

尽管实验对于在 $\sim 1\text{keV}$ 以上的弥漫 X 射线背景（DXB）指向河外起源以及各向同性的性质，对于起源依然存在相当多的不确定性。Bowyer（1968）随后也认识到各向异性的银河系成分的存在。在 $1.5\text{--}8\text{keV}$ 之间的观测表明各向同性的背景在较低能段不成立，表明一个独立的起源(Henry et al. 1968)，当时被错误地归因于来自河外气体的自由-自由辐射。弥漫 X 射线源的全天巡天随后揭示了在低于 $\sim 1.2\text{keV}$ 的 DXB 是由来自于河内以及河外源的几个不同成分所组成。

1.3.1 局部热泡

在 1962 年发现 DXB 之后，实现了一系列专用 X 射线卫星来研究其结构和起源。威斯康星探空火箭巡天(McCammon et al. 1983)，开始于 1972 年在几个能段得到 X 射线天空的成图。在低能段 B($130\text{--}188\text{ eV}$) 和 C ($160\text{--}284\text{ eV}$) 的 X 射线成图表明光强和 H I 柱密度 ($N_{\text{H I}}$) 成负相关 (图 1.1)。这些成图表明 SXR 是各向异性的，指向银河系晕有强的发射，但只是银盘面的 30%。利用吸收模型，C 波段数据可以用下面的方程形式来拟合：

$$F = F_{\text{unabs}} + F_{\text{abs}} \exp(-N_{\text{H}} \sigma) \quad (1.2)$$

这里 F_{unabs} 是未被吸收的流量， F_{abs} 是被吸收过后的流量。因为有效吸收截面强烈依赖于能量 ($\sigma \propto E^{-3}$)，B 段和 C 段的流量是相关的（它们的比值接近常数 ~ 2.5 ），从方程 1.2 可以明显的得到在这两个频段的反相关不是依赖于整个能量的。而且，在银盘上有显著的发射，尽管平均自由程很短，观测到的强度随柱密度改变而变化，这比由 Brown & Gould (1970) 所预计的原子吸收截面要小得多。因此，我们得出结论，除了被吸收的银河系和河外流量，至少在低能段必须有弥漫源的局部源，可以产生相当部分的流量。

Roberson et al. (2003) 发现甚至扣除 SWCX 流量， $1/4\text{ keV}$ X 射线天空成图依然明亮。由于银河系盘的光深比较小，仅仅局部产生的软 X 射线和一小部分来自非常亮的非局部源的 X 射线将贡献这个频段的 X 射线强度。因此，低纬度的 X 射线几乎全部归因于局部起源，扣除 SWCX 的成图强度能用来说明来自称之为局部泡 (LB) 的热弥漫气体泡。

如果我们假定太阳系处于一个等离子体的泡中，上面这个反相关可以被解释。这样一个缺乏中性氢的空腔起初的证据是来自紫外的结果。这个空腔有一个被拉长的形状，处于一个椭圆形的银河系南北方向，并包含数百万温度的等离子体。在泡比较长的哪个方向，发射比较强，因此可以解释反相关。这个模型，首先是由 Sanders et al. (1977) 年所提出，被称之为“错位模型”，意思是泡极度缺乏中性材料并充满了高温气体。超新星爆发可以产生冲击波，在星际介质中 (ISM) 传播并把 ISM 加热成高温等离子体。这个推导出的空腔范围，称之为局部热泡 (LHB)，范围从银盘大约 70pc 到朝向较高纬度的大约 130pc 。光学 ISM 吸收研究和 $21\text{cm } N_{\text{H I}}$ 测量限制了平均中性氢柱密度：小于 $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ (Juda et al. 1991)。

1.3.2 银河系晕

ROSAT，发射于 1990 年，在三个波段——1/4 keV, 3/4 keV, 和 1.5 keV——以 $\sim 2^\circ$ 的角分辨率进行了巡天观测，覆盖了约 98% 的天区。这些观测显示了丰富清晰的空间结构，并且 1/4 keV 波段——对应 Wisconsin C 波段——明确地证实了在 Wisconsin B 波段和 C 波段的巡天图中所显示的与中性氢柱密度巡天图比较时“几乎无处不在的负相关性”（Snowden et al. 1995）。

得益于位置灵敏正比计数器（PSPC）带来的角分辨率提升，ROSAT 足以证认单个的云团，且遮蔽实验也成为可能。在遮蔽实验中，来自于云团方向的 X 射线（前景辐射）能够与来自偏离云团方向的 X 射线（背景辐射）区分开来。位于银盘上方约 200 pc 处的天龙座星云展示了明显的遮蔽的证据，预示着非当地辐射源的存在，如银河系晕以及河外辐射。在 ROSAT 的 1/4 keV 背景中发现的遮蔽云表明 $\sim 50\%$ 的 1/4 keV 辐射源自 LB 之外（Burrows & Mendenhall 1991; Snowden et al. 1991）。这种更遥远的辐射起源于银河系晕中，这里包含了温度在 10^6 – $10^{6.5}$ K 范围内的热气体（Snowden et al. 1998; Kuntz & Snowden 2000; Smith et al. 2007; Galeazzi et al. 2007）。因此，一个单组分的模型并不足以量化 SXRb。搭载在航天飞机上的弥散 X 射线光谱仪（DXS）以及微量能器实验已经证明 SXRb 是由充满谱线的光谱所主导的。该光谱可以用一个双温的热等离子体模型来拟合。然而，在更高的波段（ ~ 1 keV）存在来自点源的衰减的河外流量，这需要第三个组分，其形式为外推的幂律谱。在考虑到这些因素后，Snowden 等人（1998）提出了一个多组分的模型：一个用于表征 LHB 的热等离子体，一个用于解释晕辐射的经过吸收的更热的热组分，以及一个用于包括来自电源贡献的经过吸收的幂律谱。

1.3.3 太阳风电荷交换

当比较天空中同一位置的不同次观测的测量结果时，ROSAT 发现了一个随时间变化的背景成分，称作长期增长（LTE）（Snowden et al. 1994, 1995）。Cravens 等人（2001）证明了 LTE 与太阳风的流量相关，因此与所谓的太阳风电荷交换（SWCX）现象相联系。SWCX 发生在太阳风中高电离度离子与星际介质（ISM）中的中性原子相互作用（电荷交换）的时候。作用后的离子处于激发态且当其退激发时会释放一个软 X 射线或极紫外光子。因为太阳风在密度、速度、元素丰度以及电离度等方面随时间变化，故观测到的 SWCX 辐射亦随时间和观测几何结构而改变。

电荷交换的光谱与纯复合等离子体有着相同的跃迁，和几乎同等的强度，因此对天体物理中等离子体诊断所采用的谱线有大量的贡献。因为 SWCX 辐射并没有特别的光谱特征且在 X 射线仪器的市场里是光滑的，所以并不易于与其他弥漫组分区分开，如来自局部热泡（LHB）、银河系核球和晕，以及温热星系际介质的辐射。显著的 SWCX 发射线包括那些来自于 C VI、O VII、Ne IX 还有 Mg XI 的谱线，这些谱线也是天体物理等离子体中重要的诊断手段。因此，去除作为污染的 SWCX 变得十分困难，因为在缺乏对太阳风的充分详细的丰度和电离态信息使得对 SWCX 的建模存在问题（Kuntz et al. 2015）。

SWCX 主要以两种形式出现：日球层的和地冕的。日球层的 SWCX 辐射起源于太

阳风离子与 ISM 中包含 H 和 He 的中性粒子的碰撞，其强度依赖于时间和观测几何结构，在整个日球层中可观测到。日球层的 SWCX 还受到太阳活动的影响。地冕的（磁鞘）SWCX 是由太阳风与地球外大气层中的中性 H 相互作用所产生的，且在地球与太阳之间的区域（日下区域；Robertson & Cravens 2003）是最亮的。太阳风的流量变化会引起磁鞘中的密度涨落，因此地冕的 SWCX 同样随时间和观测方向变化。

Smith et al.(2014) 对 CX 过程发展了新的近似模型，其中包含了一套完整的离子及辐射过程，并能够和其他热模型结合在一起对 DXS 和 CHIPS 所观测的谱线进行拟合。尽管模型还有一定的限制，但他们的结果第一次表明，这些观测数据可以自洽的用和热辐射结合的日光层的 SWCX 模型来拟合，而且这两个成分的拟合参数和其他观测是相符合的。模型还预计了较强的 O 线，可以导致太阳风中的氧丰度到达观测的下限。

1.4 银河系外的 x 射线背景辐射

通过高空间分辨率的望远镜进行的观测证实，大部分的河外弥漫辐射来自不能被分辨的暗弱源。Chandra 的最高空间分辨率约为 1 角秒，这已经将约 90% 的河外弥散源分辨成了许多点源。这就使得最后仅有约 10% 的 DXB 为真正需要考虑的弥散背景。对背景的分布和光谱的细致分析表明，这种辐射成分可能来源于星系际和星系团之间的通常被称为温热星系际介质（WHIM）的热气体的非维里化的结构。

1.4.1 点源

由活动星系核（AGN）、正常星爆星系和星爆星系组成的点源贡献了绝大部分的能量高于 1keV 的 CXB。尽管强度取决于能带和星系的纬度，点源在能量低于 1 keV 波段也贡献了约 50% 的 x 射线流量。点源的光谱主要是由点源周围的磁场中的相对论电子的同步辐射形成的，并且是幂律型的。其产生的辐射光子谱，也是幂律谱。此外逆康普顿散射也产生幂律谱，与同步辐射引起的幂律谱无法区分。热电子可以将低能量光子散射加速到 X 射线波段，甚至伽马波段。对数坐标的强度与频率图给出了具有负斜率的直线，适用于表征点源光谱。

在 Chandra 目前的灵敏度极限下，AGN 对于河外辐射的贡献超过了 75%。然而，基于累计数量的预测表明，当望远镜的灵敏度进一步提高，那些无法被当前探测器探测的光度微弱的普通星系将被观测到，并进一步提高 AGN 对于河外辐射的贡献比。最近对 Chandra Deep Field South (CDFS) 的 Chandra 7 Ms 超深度巡天应该能够更多地了解这些超深源及其它们 X 射线辐射的贡献。

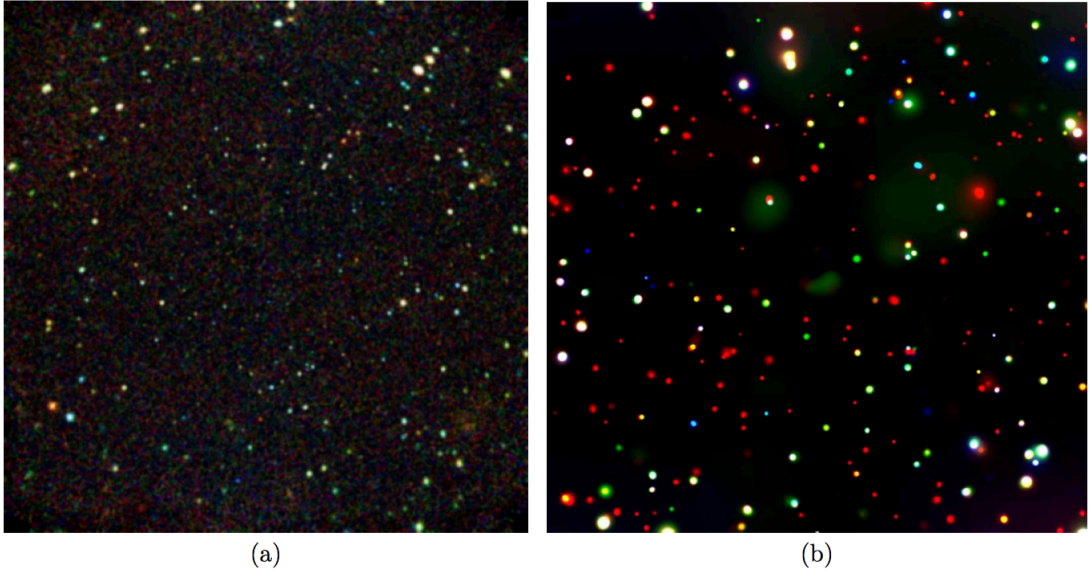


图 1.3: (a) The Chandra Deep Field South (CDFS) 4 Ms 巡天。(b) The CDFS 7 Ms 巡天。

1.4.2 星系际温热介质(WHIM)

宇宙学家已经注意到，在本地宇宙中实际观测到的重子密度（Fukugita, Hogan 和 Peebles, 1997）与根据 Lyman α 线丛吸收线分析预测的重子密度之间存在差异（Rauch et al.1998; Weinberg et al. 1997），并且和结合标准核合成理论的元素光谱比值所推断的重子密度也有差异。当今宇宙中缺失的重子量约为 75%。大规模宇宙学动力学模拟（Cen & Ostriker, 1999）提出的对于缺失重子的可能解释是，这些重子的很大一部分可能处于星系际中未被探测到的、被称为 WHIM 的温热（ $10^5 - 10^7 K$ ）稀薄气态，其微弱的辐射难以被探测到。然而，它的存在可以通过密度波动的角自相关分析来推断出来，该密度波动表征了星系和星系团中维里化结构之间的连接物质。

宇宙流体动力学模拟（例如，Cen & Ostriker 1999）一直被用于估计典型温度和密度状态下的重子的空间分布和演变。根据推测它们的温度范围处于 $10^5 - 10^7 K$ 之间，而这个温度会对重子的探测造成困难。它们的特征实际上与那些软的弥散成分几乎没有区别，比如 O_{VI} (1032, 1038)Å and O_{VII} (0.574 keV) 的吸收线， O_{VIII} (0.653 keV) 的发射线以及低红移的 Lyman alpha 线丛。

当原始密度扰动在 $z \approx 1000$ 解耦后变为非线性时，由重力坍缩产生的，并导致大尺度结构（比如星系群）的形成的冲击波，将环境气体加热到典型的 $10^5 - 10^7 K$ 温/热阶段。模拟结果表明随着红移的减少，WHIM 中热成分的质量比重渐渐增加。这个星系际介质维持在某个特定温度的机制非常复杂，并且它由暗物质之间的动态作用主导，暗物质被认为影响着维里结构、周围的气体以及不断形成的星系。COBE FIRAS 未检测到 CMB 光谱的强康普顿影响，这表明星系际介质 IGM 中没有大量高能电子，而 WHIM ($10^7 K$) 的热态的存在需与这一结果保持一致。人们不妨在由高红移类星体和 Lyman-break 星系产生所的吸收线中寻找光谱特征，其中 Lyman-break 星系被认为是 IGM 主要的电离源。

References:

- Bowyer, C. S., et al. 1968, *Nature*, 217, 32–34
- Burrows, D. N., Nousek, J. A., Traux, R. J., Garmire, G. P., & Singh, K. P. 1985, *Bull. Am. Astron. Soc.* 17:883
- Cen, R., & Ostriker, J. P. 1999, *ApJ*, 514, 1
- Field, George B., & Richard C. Henry, 1964, *ApJ*, 140, 1002
- Galeazzi, M., Gupta, A., Covey, K., & Ursino, E., et al. 2007, *ApJ*, 658, 1081
- Henry, R. C., et al. 1968, *ApJ*, 153L, 11
- Hurwitz, M., Sasseen, T.P. & Sirk, M.M., 2005, *ApJ*, 613, 911
- Kuntz, K. D., et al. 2001, *ApJ*, 548, L119
- McCammon, D., Burrows, D. N., Sanders, W. T., & Kraushaar, W. L. 1983, *ApJ*, 269, 107
- McCammon, D., & Sanders, W. T., 1990, *ARA&A*, 28, 657
- Marshall, F. J., & Clark, G. W. 1980, *BAAS*, 14R, 975M
- Rauch, M., et al. 1998, *ASSL*, 231, 291R
- Robertson, I. P., Cravens, T. E., & Snowden, S. L., American Geophysical Union, 2003, SH11C1126 (2003)
- Sanders, W. T., Kraushaar, W. L., Nousek, J. A., & Fried P. M., et al. 1977, *ApJ*, 217L, 875
- Sanders, W. T., Edgar, R.J, Kraushaar, W.L., McCammon, D., & Morgenthaler, J.P., 2001, *ApJ*, 554, 696
- Smith, R. K., et al. 2007, *PASJ*, 59, S141
- Smith, R.K., & Cox, D.P. 2001, *ApJS*, 134, 283
- Smith, R.K., Foster, A.F., Edgar, R.J., Brickhouse, N.S., 2014, *ApJ*, 787, 77
- Snowden, S. L., Mebold, U., Hirth, W., Herbstmeier, U., & Schmitt, J. H. M., et al. 1991, *Science*, 252, 1529S
- Snowden, S. L., McCammon, D., Burrows, D. N., & Mendenhall, J. A. 1994, *ApJ*, 424, 714
- Snowden, S. L.; Freyberg, M. J.; Plucinsky, P. P.; et al. 1995, *ApJ*, 454, 643
- Snowden, S. L., Egger, R., Finkbeiner, D. P., Freyberg, M. J., & Plucinsky, P. P. 1998, *ApJ*, 493, 715
- Weinberg, D. H., Miralda-Escude, J., Hernquist, L., & Katz, N. 1997, *ApJ*, 490, 564
- Wright et al. 1994, *ApJ*, 420, 450–456

