

基于 HUBS 的超新星遗迹研究

超新星是宇宙间一种剧烈的天体爆炸现象，主要包括大质量恒星演化晚期的核坍缩爆炸以及双星系统中吸积白矮星质量达到或接近钱德拉塞卡（Chandrasekhar）极限时的热核爆炸。超新星给星际空间送去了金属物质和能量，深刻影响着星系的生态。爆炸产生的激波在星际空间传播，加速相对论性粒子，目前一般认为是银河系内宇宙线的主要起源。Ia 型超新星由于具有较为稳定的最大光度和光变规律，被作为宇宙中的“标准烛光”，具有重要的宇宙学意义。基于 Ia 型超新星的研究揭示了宇宙的加速膨胀现象 (Perlmutter et al., 1998; Garnavich et al., 1998)，该工作获得了 2011 年诺贝尔物理学奖。超新星遗迹 (SNR) 作为超新星爆炸之后的残骸，一直是天体物理学领域的热点研究对象。其在各个波段的辐射，基本都来自于爆炸气体的动能向辐射能的转化，它们提供了有关超新星遗迹各种物理机制和过程的信息。通过对超新星遗迹的研究，我们也能进一步揭示有关其前身星爆发的相关物理，因而具有重要的研究价值和意义。HUBS 望远镜建成并服役，将有助于超新星遗迹如下若干问题的科学探索。

1. 超新星遗迹的物理性质及其前身星问题

超新星遗迹物理研究涉及的爆炸核合成、前身星性质、遗迹与星际环境之间的激波作用等问题的探讨，都可借助 HUBS 获得推进。

HUBS 的观测能段 0.1-1.5 keV 覆盖了超新星遗迹大部分的热辐射光子，其中包括了来自碳、氮、氧、氖、镁等高电离态离子的线辐射和~1keV 附近铁的 L 壳层辐射，以及热轫致辐射（电子的自由-自由跃迁）、复合连续区（电子的自由-束缚跃迁）、双光子辐射等连续谱辐射。利用 HUBS 极高的光谱分辨率，可以很好地确定超新星遗迹中

的气体中电子、离子的温度，电离状态，以及氧、氖、镁、铁等元素的丰度，从而为超新星遗迹前身星、超新星爆发机制、星周环境等问题的研究提供更加详细的观测依据。

超新星遗迹中高温气体作为剧烈演化中的动态等离子体，电子、离子一般处于不同的温度。某些离子的热温度可达几百 keV，远高于电子温度（例如 Vink et al., 2003）。这说明激波加热后气体的不同组分温度可能不同，并且各组分之间将在较长时间内偏离热平衡状态。电子温度可由热韧致辐射的谱型或者处于不同电离态离子谱线的流量比得到（假设处在碰撞电离平衡态），而气体中某一离子的温度可由离子发射线的热致宽确定。通过 HUBS 高分辨能谱精确地测定个组份温度，对等离子体物理研究具有基础性的意义。

超新星遗迹抛射物中的金属元素主要来自于超新星爆发时的核合成过程，不同种类的超新星由于其爆炸机制和环境的不同，核合成产物也会有所区别。核坍缩型超新星的产物以氧元素为主，重元素产率较低；而 Ia 型超新星则产生大量铁族元素和中等质量元素，氧元素产率较低（参见图 1）。因此在观测上，通常将遗迹中铁族元素以及硅、硫、钙等中等质量元素的超丰视作其 Ia 型超新星起源的关键证据（可参考 Vink, 2012）。1.5keV 以下能段具 O、Ne、Mg、Fe L 发射线，可以得出 O、Fe 丰度。一般而言，年轻 SNRs 中， $[O]/[Fe]$ 大，则来自大质量前身星核坍缩超新星爆炸； $[O]/[Fe]$ 小，则来自 Ia 型超新星爆炸。同时，遗迹中元素丰度和元素丰度比的空间分布也可以帮助我们区分出抛射物和星周介质。例如，对于 Ia 型超新星遗迹内部结构，较低的氧-铁丰度比 $[O]/[Fe]$ 标志着激波加热的抛射物，而较高的 $[O]/[Fe]$ 则意味着激波加热的星周介质（例如 Reynolds et al., 2007）。

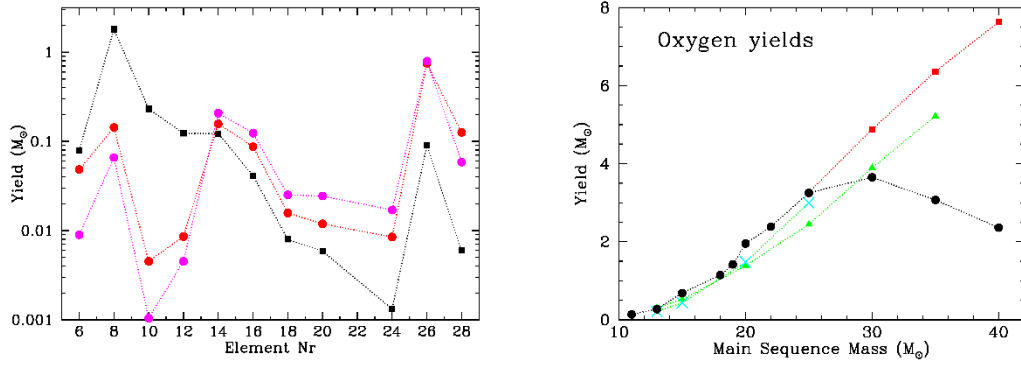


图 1 超新星核合成产率 (取自 Vink, 2012)。左图为理论模拟得到的不同类型超新星核合成产率随原子序数的变化, 其中黑色曲线为核坍缩型超新星, 两个彩色曲线为 Ia 型超新星 (红色为 W7 暴燃模型, 洋红色为 WDD2 延迟爆震模型)。可以看出, 核坍缩型超新星产物以氧元素为主, 重元素产率较低; 而 Ia 型超新星则产生大量的铁族元素和中等质量元素, 氧元素产率较低。右图为核坍缩型超新星氧元素产率随前身星质量的变化, 不同颜色曲线代表不同工作组得到的结果。以上两图说明, 通过测量和计算超新星遗迹中各元素的丰度及质量, 我们可以推知其爆发起源和前身星的性质。

2. 非平衡电离及过电离问题

超新星遗迹内剧烈动态演化的等离子体, 往往处于非平衡电离 (NEI) 状态, 这已经在很多超新星遗迹中被发现, 其中的大部分遗迹“电离温度” kT_z 小于实际电子温度 kT_e , 等离子体正在电离 (ionizing plasma, IP), 为激波加热所致。而近十年来, 人们在若干个遗迹中发现了处于过电离状态的等离子体 ($kT_z > kT_e$), 其中复合率超过了电离率, 因此又被称为复合等离子体 (recombining plasma, RP)。类似的超新星遗迹包括 IC 443 (Yamaguchi et al., 2009)、W49B (Ozawa et al., 2009)、W28 (Sawada et al., 2012) 等。过电离现象的发现说明激波加热的等离子体经历了额外的电离过程或较短时间内的电子冷却过程, 这与常规的超新星遗迹演化模型相违背, 从而给超新星遗迹演化理论的研究带来了新的挑战 (可参考 Zhou et al. 2011; Yamaguchi et al. 2012)。

超新星遗迹中过电离等离子体的认证和研究, 主要依赖于其 X 射线光谱的特征。过电离等离子体的光谱特征主要有以下两点:

1) 复合辐射特征:

具有比电离平衡气体相比更明显的复合辐射特征，主要包括复合线和辐射性复合连续谱 (radiative recombination continuum, RRC)。其中，复合线特征主要体现为类氢离子的禁线 (f) 与互组谱线 (i) 流量增强，其与共振线 (r) 流量的比值 $G \equiv (f + i)/r$ 显著提高。而 RRC 来自于电子的自由--束缚跃迁，是复合过程的主要特征。在低温假设下 ($kT_e \ll I_z$) RRC 的光谱形状分布正比于

$$T_e^{-1} \exp\left(-\frac{E - I_z}{kT_e}\right), \quad E \geq I_z$$

其中， T_e 为电子温度， I_z 为该离子的电离能。RRC 在低能端 ($E = I_z$ 处) 有一锐利的辐射限 (edge)，在高能端呈指数衰减，整体宽度 $\Delta E \sim kT_e$ ，并且其辐射在温度较低时更为显著。

2) 过电离特征:

具有普遍高于同温度下 CIE 离子的电离态，这在 X 射线光谱中表现为高电离态离子谱线（如类氢离子的 Ly α 、Ly β 线）与低电离态离子谱线流量之比显著提高。

由于当下 X 射线望远镜谱分辨率的限制，目前认证的过电离超新星遗迹主要依赖于对 ≥ 2 keV 能段的 RRC 以及 Ly 线的观测（主要涉及硅、硫、铁等离子）。HUBS 将有能力分辨出碳、氮、氧、氖、镁等元素的 RRC 和线辐射，特别是精细测量类氢离子 He α 三重线的流量比 (G 比率和 R 比率)，进而更加有效和精确地确定等离子体的电离状态，加深对于过电离现象的描述和理解。

【若限于篇幅，本段可删节】为了更好地说明 HUBS 的高分辨率光谱给超新星遗迹等离子体 X 射线诊断带来的巨大改善，我们利用与 HUBS 光谱分辨率同为 ~ 2 eV 量级的 Athena X-IFU 的响应文件进行了模拟观测实验。我们选取超新星遗迹 3C 400.2

作为实验源。在此之前，Broersen 等人利用 Chandra ACIS 的观测数据，在该遗迹光谱中发现了疑似氧、氖、镁的 RRC 辐射，从而认为其中存在过电离气体 (Broersen et al., 2015)。这些辐射特征在 0.5-2 keV 能段内，因此适用于 HUBS 的观测。模拟观测的结果显示，我们可以从 Athena 光谱中清楚地分解出氧、氖、镁的 RRC 辐射，并且能够确定过电离对于类氢离子 Ne IX、Mg XI 的 He α 三重线流量造成的影响，从而更加清晰地证认过电离气体的存在。

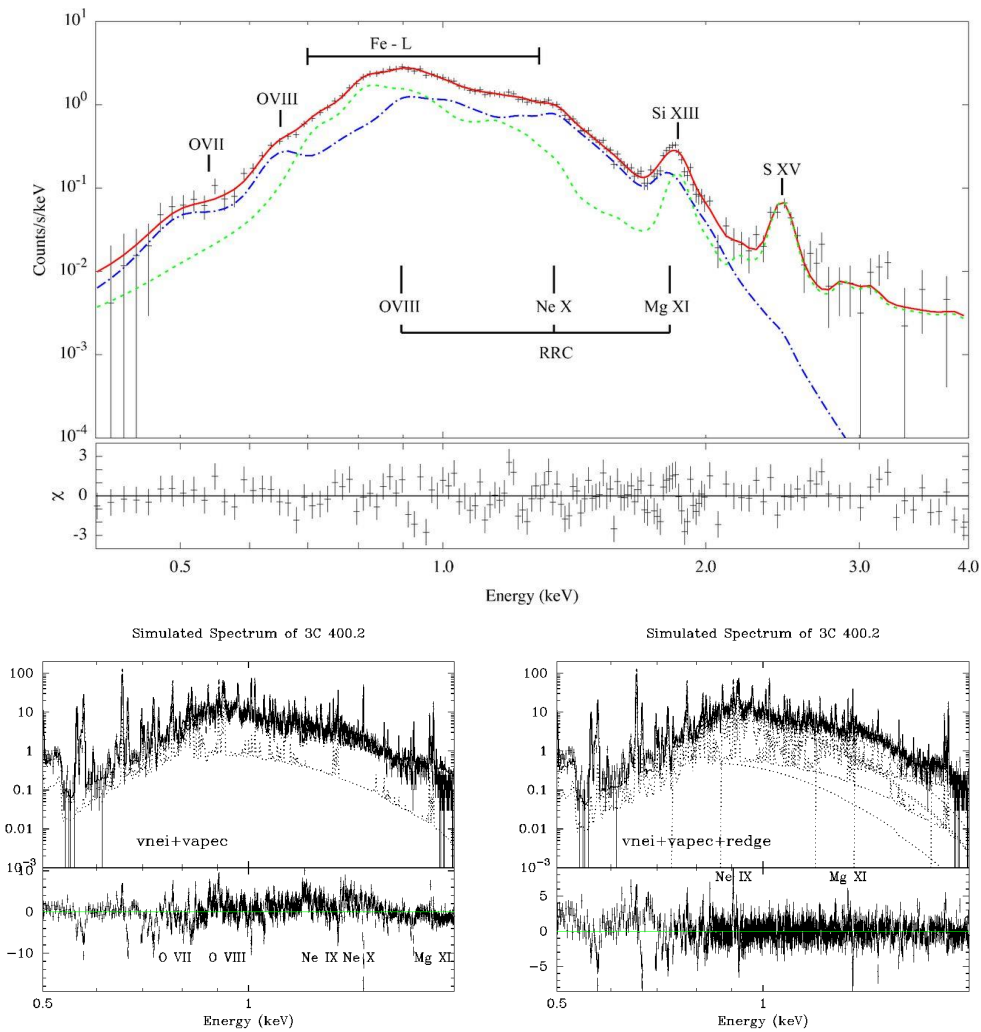


图 2 过电离超新星遗迹 3C 400.2 的 X 射线光谱对比图。上方图为 Chandra ACIS 实际观测数据 (光谱分辨率 ~ 100 eV)，其中红色实线为光谱模型拟合结果，模型中包括了一个欠电离成分 *vnei* (绿色点线) 以及一个过电离成分 *vrnei* (蓝色点划线)，O VIII、Ne X、Mg XI 的 RRC 隐约可见 (取自 Broersen et al., 2015)。下方左图为 Athena X-IFU 10k 秒曝光的模拟观测光谱 (光谱分辨率 ~ 2.5 eV)，光谱拟合模型包括了一个欠电离成分 *vnei* 以及一个电离平衡成分 *vpecc*，从拟合残差中可以清晰看出 O VII、O VIII、Ne IX、Ne X 以及 Mg XI 的 RRC 辐射。下方右图与左图相似，只是在拟合模型中加入了上述若干 RRC 成分 *redge*，残差中可见类氢离

子 Ne IX、Mg XI He α 谱线的流量偏差。以上对比充分说明了光谱分辨率的提高将使过电离等离子体的认证能力大大提升。

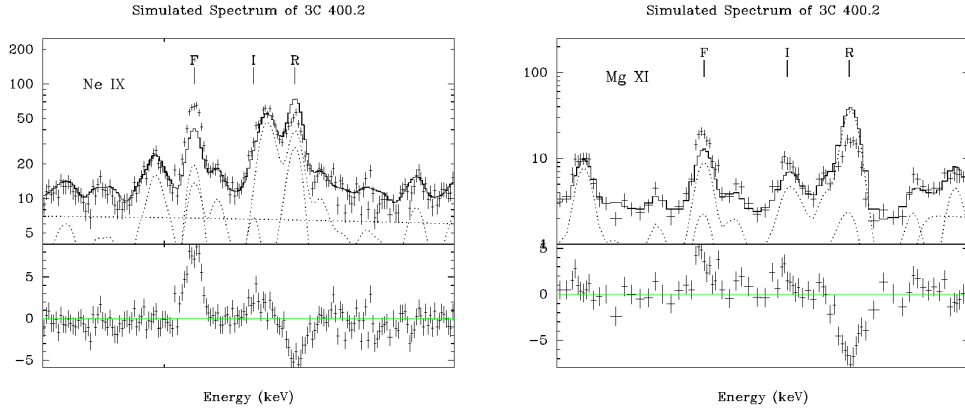


图 3 模拟观测得到的类氢离子 Ne IX、Mg XI 的 He α 三重线。残差显示出了过电离对禁线、互组谱线、共振线流量的影响（禁线与互组谱线流量增加，共振线流量减少）。此图进一步说明在 Athena X-IFU 和 HUBS ~ 2 eV 的光谱分辨率下，我们可以清楚地测量出类氢离子谱线的流量，从而更好地确定气体的电离状态。

3.超新星遗迹 X 射线辐射中电荷交换成分相关问题

在超新星遗迹中，当激波加热的高温等离子体与周围环境中的中性气体相互作用时，高能离子与中性原子相互碰撞，可能发生电荷交换（charge exchange, CX）。CX 是发生在原子或离子之间的一类电子转移过程，被离子俘获的电子处于高激发态，电子在跃迁回基态的过程中发出线辐射。最早在光学观测中被发现，近 20 年来 X 射线空间望远镜的观测，陆续在几个超新星遗迹的 X 射线辐射中发现了 CX 存在的迹象。这其中包括位于小麦哲伦星云的超新星遗迹 1E 0102.2-7219 (Rasmussen et al., 2001) 以及银河系内的 Cygnus Loop (Katsuda et al., 2011; Roberts et al., 2015) 和 Puppis A (Katsuda et al., 2012) 等。

在 X 射线光谱中分离并限制 CX 辐射组分一直以来是一个比较困难的课题。CX 产生的线辐射，与同时发生的碰撞激发或光致激发等线辐射常常难于分辨。但我们依然可以从某些谱线分辨的谱线特征中发掘 CX 存在的依据。对于类氢离子，CX 过程将导致其三重线中禁线 (f) 与互组谱线 (i) 的流量相对于共振线 (r) 大大增加，使得 f/i 比率

升高，同时也会导致高能级共振线流量有所增加 (Smith et al., 2012)。通过对这些特征谱线的流量进行精细测量，我们将有可能对辐射中的 CX 组分给出限制。

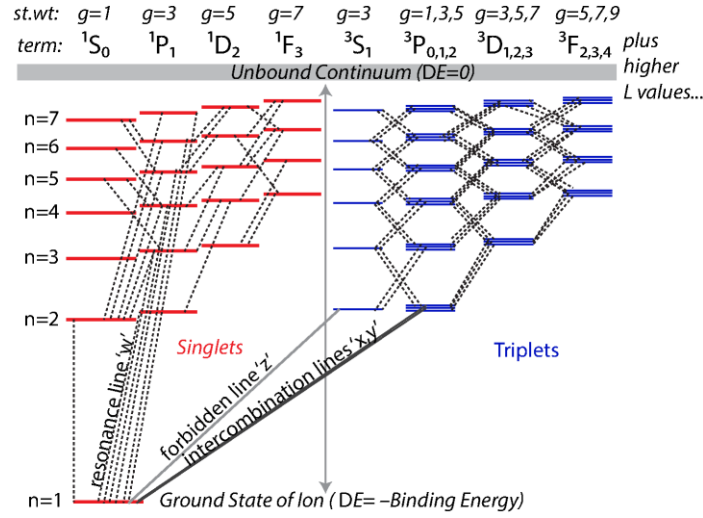


图 4 类氢离子能级图示 (取自 Smith et al., 2012)。图中红色及蓝色水平实线表示不同能级，连接不同能级的点线表示可能的跃迁途径。CX 过程将产生一个高电离态的离子，对于 OVII 来说 $n \approx 6$ 。由上图可以看出，CX 过程将提高禁线和互组谱线的流量，以及高能级共振线的流量。

在 X 射线波段最为常用的 CX 诊断谱线是类氢氧离子 (O VII) 的 He α 三重线 (禁线 $f \sim 0.561$ keV, 互组谱线 $i \sim 0.569$ keV, 共振线 $r \sim 0.574$ keV)。例如, Roberts 等人利用 Suzaku XIS 的数据研究了超新星遗迹 Cygnus Loop 边缘处 O VII He α 线心位置的移动情况 (Roberts et al., 2015)。这反映了 He α 三重线中禁线与共振线流量比的变化, 进而为遗迹边缘存在 CX 过程提供了依据。又如, Katsuda 等人利用 XMM-Newton RGS 的高分辨率光谱数据, 对超新星遗迹 Puppis A 边缘的几处激波-云块相互作用区进行了研究, 详细测量了 O VII 以及 N VI、Ne IX 的 He α 三重线流量, 通过流量比的计算给出了 CX 存在的证据 (Katsuda et al., 2012)。

HUBS 所能观测的能段范围为 0.1-1.5 keV, 这个能段恰好囊括了碳、氮、氧、氖等元素的类氢及类氢谱线, 并可清晰地分辨出类氢离子 He α 线的三重结构, 从而精确测量谱线的 G 比率和 R 比率, 这是认证 CX 过程的关键物理量, 因此可以为 CX 过程的研究

究提供丰富的观测资料。

附：HUBS 在超新星遗迹研究领域所具有的优势与缺陷【若限于篇幅，本段可删节】

HUBS 的主要技术参数决定了其在超新星遗迹研究领域将具有一定的优势，同时也会存在一些缺陷。下面将对此进行分析说明。

优势：

1) 视场

在 X 射线观测中，超新星遗迹一般表现为延展源，空间尺度在几到几十角秒不等，有些遗迹（如 Cygnus Loop 等）甚至横跨了若干度的天区范围。因此，超新星遗迹的观测对于望远镜视场的要求很高。HUBS 接近 1° 的视场可以完整地覆盖绝大部分超新星遗迹，这特别有利于我们对其整体性质的研究。

2) 有效面积

有效面积可以用来衡量一个 X 射线望远镜收集光子的能力,有效面积越大，望远镜收集光子的能力越强，对于暗弱源的探测也就越有利。超新星遗迹在 X 射线能段的亮度差别很大，对于一些年老的遗迹，其 X 射线辐射往往较为微弱，而即便是总体明亮的遗迹，也常常存在一些面亮度较低的暗弱结构。HUBS 所拥有的超过 1000 cm^2 的有效面积可以帮助我们更好地探测那些暗弱的超新星遗迹，同时更好地分辨遗迹中的暗弱结构。

3) 光谱分辨率

来自超新星遗迹的 X 射线光子携带了大量有关辐射等离子体物理性质的信息。其中最为重要的信息之一便是光子的能量分布，即辐射源的光谱。超新星遗迹

的 X 射线光谱通常由连续谱加发射线构成。其中，发射线产生于电子在离子不同能级间的跃迁。通过认证和测量谱线的来源和它们的强度、宽度等特征，我们可以获知等离子体的温度、电离状态、元素丰度等诸多物理性质，从而对超新星遗迹的产生与演化给出限制。HUBS 极高的光谱分辨能力 ($\Delta E = 1\text{-}2\text{ eV}$, $E/\Delta E \sim 1000$) 可以有效地分辨出软 X 射线光谱中密布丛生的各类谱线以及其他细微结构，将我们带入 X 射线光谱精细测量的时代。

4) 观测能段

HUBS 的能量探测范围集中在 $0.1\text{-}1.5\text{ keV}$ 的软 X 射线能段。在这一能段中，超新星遗迹的热辐射光谱由众多的发射线所主导，其中包括了来自碳、氮、氧、氖、镁等离子的线辐射以及铁的 L 壳层辐射。对于这一谱线密集的能段进行观测和研究，可以帮助我们更好地确定超新星遗迹中被激波加热的等离子体的各种性质。

缺陷:

1) 空间分辨率

HUBS 的空间分辨率相对较低，仅为 $1' - 2'$ ，分辨超新星遗迹 X 射线辐射的空间细致分布特征有难度。

2) 观测能段

超新星遗迹中的 X 射线辐射不仅包括了来自于被激波加热的等离子体的热辐射，还有激波加速的高能粒子产生的非热辐射（主要为非热电子的同步加速辐射）。其中热辐射主要集中在 $< 2\text{ keV}$ 的软能段，而非热辐射则在硬能段更为显著。因此 HUBS 的观测很难对遗迹中的非热辐射及其相关物理过程给出限制。另一方面， 1.5 keV 以下能段的 X 射线光谱受中性氢吸收以及软 X 射

线背景 (soft X-ray background, SXRb) 影响较大。由于 (河内) 超新星遗迹大多位于银盘附近, 前景中性氢柱密度一般在 10^{21} - 10^{22} cm⁻² 左右, 这对应于 1 keV 处光深 $\tau \approx 0.2$ -2, 可见大部分软光子将不可避免地严重受到中性氢吸收, 因而损失大量光谱信息。SXRb 的来源主要有: 本地泡 (local hot bubble)、银晕 (Galactic halo)、银脊 (Galactic ridge) 的热辐射, 以及太阳风电荷交换 (solar wind charge exchange, SWCX) 产生的线辐射。由于目前的研究尚未对以上各组分的辐射特征有很好的限制, 因此 SXRb 将给超新星遗迹低能 X 射线光谱的诊断带来一定不确定性。

参考文献

- [1]. Broersen, S., & Vink, J. 2015, MNRAS, 446, 3885
- [2]. Garnavich, P. M., Jha, S., Challis, P., et al. 1998, ApJ, 509, 74
- [3]. Katsuda, S., Tsunemi, H., Mori, K., et al. 2011, ApJ, 730, 24
- [4]. Katsuda, S., Tsunemi, H., Mori, K., et al. 2012, ApJ, 756, 49
- [5]. Ozawa, M., Koyama, K., Yamaguchi, H., Masai, K., & Tamagawa, T. 2009, ApJL, 706, L71
- [6]. Perlmutter, S., Aldering, G., della Valle, M., et al. 1998, Nature, 391, 51
- [7]. Rasmussen, A. P., Behar, E., Kahn, S. M., den Herder, J. W., & van der Heyden, K. 2001, A&A, 365, L231
- [8]. Reynolds, S. P., Borkowski, K. J., Hwang, U., et al. 2007, ApJL, 668, L135
- [9]. Roberts, S. R., & Wang, Q. D. 2015, MNRAS, 449, 1340
- [10]. Sawada, M., & Koyama, K. 2012, PASJ, 64, 81
- [11]. Smith, R. K., Foster, A. R., & Brickhouse, N. S. 2012, Astronomische Nachrichten, 333, 301
- [12]. Vink, J., & Laming, J. M. 2003, ApJ, 584, 758
- [13]. Vink, J. 2012, A&A Rv, 20, 49
- [14]. Yamaguchi, H., Ozawa, M., Koyama, K., et al. 2009, ApJL, 705, L6
- [15]. Yamaguchi, H., Ozawa, M., & Ohnishi, T. 2012, Advances in Space Research, 49, 451
- [16]. Zhou, X., Miceli, M., Bocchino, F., Orlando, S., & Chen, Y. 2011, MNRAS, 415, 244