

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.01.01

银河系年轻星团 NGC 3603 的 X 射线研究

王 倩^{1,2}, 孙 玮^{1,3}, 纪 丽^{1,3}

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 暗物质与空间天文重点实验室, 南京 210008)

摘要: NGC 3603 是位于银河系船底座旋臂上的一个致密年轻星团。星团中大质量恒星的星风向外输出机械能, 改变周围介质的性质, 在星系内恒星的形成以及星系的演化过程中起着重要的作用。大质量恒星形成区的 X 射线辐射来源于其中的前主序星、OB 星, 以及弥漫热气体等。上述 3 种来源的辐射机制在文中得到了综述; 并且, NGC 3603 中的点源和弥漫热气体的 X 射线辐射的性质在文中也得以介绍; 最后, 基于 Chandra 0.5 Ms 档案数据的研究工作被予以简要的展望。

关键词: 年轻星团; X 射线; NGC 3603; 前主序星; 非电离平衡

中图分类号: P154.1 **文献标识码:** A

1 引 言

星系盘中的大质量恒星形成区包含了成千上万的恒星, 其中大部分恒星来自大质量分子云的核心区域。在年轻的恒星系统中有很多温度在 keV 和 MeV 波段的等离子体。能产生 X 射线辐射的有大质量恒星的星风、小质量前主序星的磁耀斑, 以及 OB 型星和超新星的星风与环境介质的相互作用所产生的激波。这些热等离子体是星系演化的主要推动力, 它们通过星风、超新星爆发、“超泡”和星系晕的“烟囱结构”向星际介质中注入能量和增丰物质。然而, 大质量恒星形成区的 X 射线辐射应该是点源和弥漫热气体的混合体, 低分辨率的 X 射线望远镜很难分辨。从 Einstein 天文台投入使用到 ASCA 卫星的升空, 人们对小质量恒星、大质量 OB 型星, 以及超新星遗迹的 X 射线辐射的了解逐步深入^[1-3]; 而具有先进的 CCD 成像光谱仪的 Chandra X 射线天文台 (Chandra X-ray Observatory, CXO) 的升空开启了对大质量恒星形成区研究的新篇章, 它让我们可以高灵敏度、高空间分辨率地探测弥漫 X 射线

收稿日期: 2016-05-28; 修回日期: 2016-12-05

资助项目: 国家自然科学基金 (11250110059); 江苏省博士后科研资助 (1501049C); 中国科学院百人计划

通讯作者: 孙玮, sunwei@pmo.ac.cn

辐射, 并能将其与恒星形成区中的成千上万的 X 射线点源区分开来^[4]。

年轻大质量恒星通过星风向四周输出物质和能量^[5]。物质和能量从一团年轻星的星风中产生, 汇集而成星团风^[6], 在 X 射线中可见。从其光谱中所推导出的物质和能量的损失率及金属丰度有利于研究星团的性质和演化, 及其对星际物质的贡献和反馈。星团风以超声速向外扩散。在河外星系, 甚至有些星团风可能形成星系尺度的超风。年轻恒星团风是研究星系超风的雏形, 在星系内恒星的形成以及星系的演化过程中都扮演着重要的角色。X 射线波段的观测对于星团风的风速、质量损失率和元素丰度等研究具有重要意义。

NGC 3603 是银河系中最亮的巨 H II 区^[7] 和质量最大的年轻星团之一^[8]。它位于银河系船底座旋臂上, 距离地球 7.0 kpc, 经纬度为 (11°15′09.1″, -61°16′17″)。对其内部年轻恒星性质的研究表明 NGC 3603 的质量约为 $(1.0 \sim 1.6) \times 10^4 M_{\odot}$, 年龄约为 1 Ma^[9]。利用属于星团的恒星与周围星场的数密度可以确定 NGC 3603 的半径, 约为 4 pc^[10]; 但包括光谱认证的 38 颗 O 型星和 3 颗 WN 型沃尔夫 - 拉叶星在内的绝大多数恒星都位于中心 1 pc 的范围内^[11]。此外, 超泡红外辐射^[12]、中心消光较低^[10] 以及电离气体运动学分析的结果^[13] 均表明 NGC 3603 内存在强烈的星团风。再加上它的距离近、消光低 ($A_V \approx 4.5 \text{ mag}$) 等优点, NGC 3603 是在 X 射线领域中研究年轻星团风最典型的源。

在本文中, 我们首先综述了大质量恒星形成区的 X 射线辐射的来源, 然后对 NGC 3603 内的点源和弥漫物质的 X 射线辐射研究分别进行了综述, 最后对 NGC 3603 的 X 射线研究进行了总结和展望。

2 大质量恒星形成区内 X 射线辐射的来源

2.1 前主序星的 X 射线辐射

年轻恒星形成区中普遍存在前主序星。与小质量的主序星一样, 处于宁静态的小质量前主序星的 X 射线辐射来自其磁化的冕层; 前主序星具有普遍类似主序恒星的光变现象^[14] 这一事实可以间接证明这一点。根据与自转相关的内部发电机理论, 前主序星的特征 X 射线光度 L_X 应该与自转周期 P 有关:

$$\frac{L_X}{L_{\text{bol}}} \propto Ro^{-2} = (P/\tau_c)^{-2}, \quad (1)$$

其中 Ro 为 Rossby 数, L_{bol} 为热光度, τ_c 为对流翻转时标^[15]。这一关系在自转速率达到某一数值的时候达到饱和。对于前主序星, 饱和周期约 30 d, 长于几乎所有观测到的前主序星的自转周期, 因而它们的 L_X/L_{bol} 都处于约 $10^{-3.5}$ 的饱和值^[16, 17]。Preibisch 等人 2005 年的研究表明, 在恒星形成区内, 通过 X 射线选择的前主序星的样本几乎完备地覆盖了光学波段探测到的晚型恒星^[17]。这表明小质量的前主序星具有稳定的 X 射线辐射。

小质量前主序星的典型光谱包含一个温度约为 0.86 keV 的软 X 射线辐射成分和一个温度约为 2.6 keV 的硬 X 射线辐射成分, 后者的光度约为前者的两倍^[17]。这一低温成分的温度与大质量恒星形成区内恒星活动产生的热气体的温度相当。此外, 小质量前主序星的 X 射线

光度不高 ($L_X \lesssim 10^{23} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$), 而且在大质量恒星形成区内为数众多, 因而只有足够高空间分辨率的 X 射线望远镜 (譬如 CXO) 对临近恒星形成区的深度观测才能够将它们区分开来。因此, 这些前主序星很可能看上去类似于弥漫热气体。

2.2 OB 星的 X 射线辐射

在赫罗图上, 主序的顶端是光谱型为 O 型和早型 B 型的恒星。它们是年轻星族中表面温度最高 (大于 $2 \times 10^4 \text{ K}$), 质量最大 ($M > 10 M_\odot$) 和光度最高 ($L > 10^5 L_\odot$) 的天体。它们辐射的紫外光子触发了最具能量的星风^[18]。其物质损失率的特征值为 $10^{-6} M_\odot \cdot \text{a}^{-1}$, 星风的终止速度^[19] 约 $1400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

Feldmeier 等人 2003 年提出的模型是目前广为接受的 OB 恒星的 X 射线辐射的产生机制^[20]。他们认为, 在恒星半径的 10 倍范围内, 多重激波挤压产生致密的壳层-壳层之间的相互碰撞可以产生与观测相符的 X 射线辐射。近些年来高分辨率的光谱观测结果并不完全符合预期^[21], 但考虑引入共振散射^[22]、减少物质损失率^[23] 和引入多孔状星风^[24] 等因素, 可以减少观测与模型之间的差异。

总体而言, 除了磁化的 B 型星, 以及处于碰撞星风双星系统内的大质量恒星等特殊天体, OB 型矮星的 X 射线中等分辨率的能谱均可以用 0.3 keV 和 $0.7\sim 1.0 \text{ keV}$ 的双温等离子体模型很好地拟合。对于 $L_{\text{bol}} > 10^{31} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大质量恒星, 它们的 X 射线光度 L_X 与热光度 L_{bol} 之间大致满足 $L_X/L_{\text{bol}} \approx 10^{-7}$ 的经典关系。

2.3 大质量恒星形成区内弥漫热气体的 X 射线辐射

一般认为, 大质量恒星通过星风和超新星爆发输出的机械能驱动了与恒星形成活动相关的星系尺度的外流^[25, 26]; 并且, 相较于孤立超新星爆发低效的反馈结果, 只有来自密集分布的大质量恒星汇聚而成的星团风才足以触发星系尺度的外流^[27]。因此, 我们需要对诸如 NGC 3603 这样规模的大质量恒星形成区内星团风性质进行分析, 这是研究影响星系演化的恒星能量反馈的重要手段。

大质量恒星形成区内星风和超新星爆炸活动的研究有赖于对这些过程产生的热气体的 X 射线辐射进行细致分析, 然而, 这并不是是一件容易的事情。首先, 受观测能力的限制, 即使在银河系内的大质量恒星形成区内, 我们也很难分辨并探测出所有低光度的小质量前主序星的贡献。它们在星团/星协演化早期可能贡献了大部分的 X 射线辐射^[28]。事实上, 在很多大质量恒星形成区看到的弥漫 X 射线辐射很可能来自未分辨的点源的贡献, 而不是热气体存在的证据 (如 NGC 2244^[4], W40^[29])。其次, 诸多对星团风的观测结果并不符合理论模型的预期, 无论是模型参数的确定和模型本身都需要进一步的完善。最后, 热气体演化的时标一般短于离子达到碰撞电离平衡的时标。因而要分析热气体的 X 射线能谱, 需根据具体情况建立恰当的等离子体演化和辐射的模型^[30]。

2.3.1 弥漫 X 射线辐射中未分辨的前主序星的贡献

高温的大质量恒星产生的星风外流时会产生 X 射线。粗略来讲一个 OB 型星的热光度 $L_B \approx 10^{31} \sim 10^{32} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$, 星风的动能为 $L_w \approx 10^{29} \sim 10^{30} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$, 从 Güdel 2008 年的研究得知, 星风的 X 射线光度与其动能有近似 $\eta \approx 10^{-4}$ 的比例关系^[31], 因此弥漫物质的

X 射线光度 $L_{X,\text{diff}} \approx \eta L_w \approx 10^{25} \sim 10^{26} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对于一个含有 5~10 个 OB 型星的星云来说, 它内部弥漫气体的 X 射线光度 $L_{X,\text{diff}}$ 应该约有 $10^{26} \sim 10^{27} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$; 另一方面, 一个大质量恒星形成区包含几百甚至几千个紧密靠近的低质量恒星^[32-34], 它们的特征 X 射线光度 $L_X \approx 10^{22} \sim 10^{33} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$, 因而这些低质量恒星的总光度 $L_{X,\text{tot}}$ 大约有 $10^{25} \sim 10^{26} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$ 。因此, 对于区域内弥漫热气体的 X 射线光度来说, 低质量恒星的贡献是不可忽视的。

根据前人对于恒星形成区恒星 X 射线光度的大量研究 (譬如 Orion 星云^[17], 以及 Taurus 星云^[35]), 恒星形成区内的质量在 $0.1 \sim 3 M_\odot$ 范围内的小质量恒星, 其 X 射线光度与其质量有经验关系: $L_{X,\text{tot}} \approx M^{1.1} \sim M^{1.4}$ 。因此要估计小质量恒星的 X 射线光度的贡献, 只需估计其质量的贡献即可。在一个均匀分布的区域内, 如果已知低质量恒星的初始质量函数, 那么要计算未分辨点源的贡献只需在一定的质量范围内叠加所有恒星的光度。因此未分辨点源的贡献直接受观测分辨率和观测时间的影响。对于距离 0.4 kpc 的 Orion 星云, CXO 进行了长达 838 ks 的观测 (Chandra Orion Ultradeep Project^[36]), 这样规模的观测能分辨出最小质量为 $0.1 M_\odot$ 前主序星的 X 射线辐射; 对于曝光时间为 30~60 ks、或者目标天体的距离超过约 3 pc 的观测来说, 因为观测灵敏度和/或空间分辨率的限制, 最小可分辨的点源的质量大约为 $1 \sim 2 M_\odot$ ^[37]。对于目前已经深入研究的几个星云来说 (如 Orion、M17、Carina Nebula 等), 未分辨点源的 X 射线贡献的比例较小, 约为 10%; 但对于曝光时间为数十千秒的观测, 这一比例可达 40%^[38]。

2.3.2 描述星团风的理论模型

两类模型被用于量化大质量恒星形成区内热气体的 X 射线表现。第一类模型是 Castor 等人提出的星风泡模型^[39, 40]。1975 年 Castor 等人以薄层近似阐述了该模型的物理性质, 而 1977 年 Weaver 等人从流体力学方程组出发给出了星风泡各个演化阶段的性质。他们将球对称的星风泡从内到外分为了四个部分: (1) 星风自由膨胀的区域; (2) 被反向激波震激过的星风所在的区域; (3) 被正向激波震激过的星际介质所处的区域; (4) 未被震激的星际介质。四个区域分别以反向激波 R_1 、接触间断面 R_c 和正向激波 R_2 分开。热星的星风和超新星爆炸输出的能量被量化为均一的机械能输出功率 L_w 。引入向外的热传导, 并基于星风泡内部压力均一的近似, 根据自相似解的思路, 星风泡的大小为^[41]:

$$R_2 = 42 L_{30}^{1/5} n_0^{-1/5} t_6^{3/5} \text{ pc} \quad , \quad (2)$$

其中 L_{30} 为星风和超新星爆炸的平均机械能输出功率 (单位: $10^{30} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$), n_0 为周围介质的数密度 (单位: cm^{-3}), t_6 为星风泡的年龄 (单位: Ma)。并且在一系列的简化后, 星风泡结构的自相似解被近似为如下形式^[42]:

$$n(x) = n_c(1-x)^{-2/5} \quad , \quad T(x) = T_c(1-x)^{2/5} \quad , \quad (3)$$

其中 $x = r/R_2$ 是相对半径, n_c 和 T_c 分别为等效的中心数密度和中心温度:

$$n_c = 1.1 \times 10^{-2} L_{30}^{6/35} n_0^{19/35} t_6^{-22/35} \text{ cm}^{-3} \quad , \quad (4)$$

$$T_c = 0.27 L_{30}^{8/35} n_0^{2/35} t_6^{-6/35} \text{ keV} \quad . \quad (5)$$

这一近似结果可以描述靠近星风泡边界的具有最高辐射度的区域内热气体的性质。对以上密度和温度的分布结果进行积分, 可以得到星风泡模型预言的等离子体平均温度和 X 射线光度。

第二类模型是 Chevalier 和 Clegg 在 1985 年提出的星团风模型 (CC85)^[6]。该模型将热星的星风和可能存在的超新星爆炸的物质和能量输出简化为均一的跨音速流, 采用跨音速流的稳恒解作为星团内部星际介质的密度和温度分布。初始的模型并没有考虑周围介质的质量注入 (mass-loading)。与实际观测相比, 该模型倾向于高估等离子体的温度, 并且低估等离子体的 X 射线光度。随后对这一模型的改进通过引入冷气体注入率 \dot{M}_{cool} 引入了周围介质的影响^[43]。结合对热化效率 α 的修改 (星团风机械能转化成热气体内能的比率), Oskinova^[28] 得到了与观测相符的结果, 并且发现星团在演化至约 3×10^6 a 的时候, 热气体的 X 射线光度会陡然增大两个数量级。这是最大质量的恒星开始超新星爆炸, 大量输出物质和能量的结果。

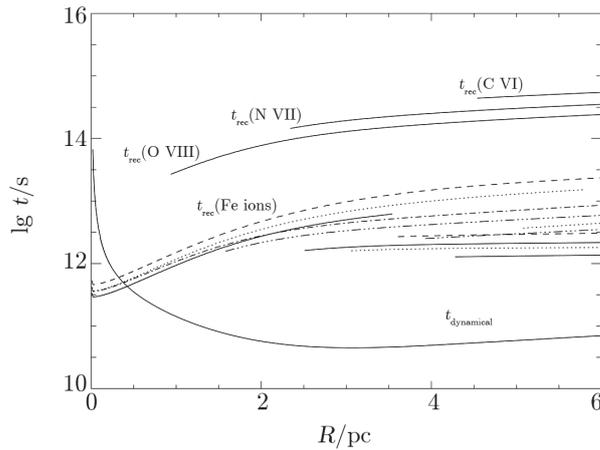
在与实际 X 射线观测结果比较时, 相较于星风泡模型倾向于预言过高的 X 射线光度 (如 M17^[44]) 并且高估星风泡膨胀速度 (例如船底星云^[45]), 星团风模型倾向于低估热气体的 X 射线光度^[28, 43, 45]。解决差异的方案包括: a. 抑制热传导过程^[44]; b. 减小星风的机械能输入功率^[46, 47], c. 引入碎片化的壳层, 使得热气体在星风泡膨胀过程中可以逃逸出去, 从而降低泡内压强^[45]。然而在一些年轻恒星活动区, 尤其是 X 射线亮的超泡中, 实际看到的 X 射线亮度高过了星风泡模型的预期, 对此有以下三种解释: a. 引入新近的超新星爆炸的能量输入^[48]; b. 考虑金属元素超丰^[49]; c. 计入被激波扫过的云团蒸发对热等离子体的影响^[50]。

2.3.3 星团风产生的热等离子体的非电离平衡状态

以上模型均假设等离子体完全处于碰撞电离平衡 (Collisional Ionization Equilibrium, CIE) 状态。然而, 星团风产生的热气体并不总是满足这一假设。图 1 给出了根据 NGC 3603 的情形建立的一维星团风模型中热气体的绝热膨胀时标 ($T/(dT/dt)$) 和若干离子复合至 CIE 所需时标的比较结果。我们可以看出, 在星团外围 ($r \gtrsim 1$ pc), 这些离子复合至 CIE 的速度赶不上由于绝热膨胀引起的温度变化; 因而星团风产生的热等离子体应该处于非电离平衡 (Non-Equilibrium Ionization, NEI) 的状态。在对大质量星团内热气体的 X 射线能谱的分析中, 我们需要充分考虑 NEI 造成的影响。

另一方面, 在大质量恒星能量反馈的研究中, 人们一般只能通过大质量恒星的光谱型、射电流量等性质得到当前的大质量恒星或者恒星集体的物质和能量的输出率。这一方法具有很大的不确定性, 而且并不能反映与星团风相关的机械能输出。此外, 当前的多波段观测也很难确定“质量注入”这一个星团风模型中至关重要的参数^[51]。然而, NEI 状态下的热等离子体的辐射具有独特的能谱特征, 让我们可以通过 X 射线能谱分析的方法得知等离子体的电离状态, 进而得到与之相关的包括“质量注入”在内的星团风的参数。

在过去的 20 年中, 处于非碰撞电离平衡状态的等离子体模型被用于描述多种演化状态下的热气体性质, 其中包括: (1) 等压状态下热气体的冷却^[52]; (2) 超新星遗迹中欠电离^[53]和过电离^[54]的热等离子体; (3) 星系风^[55]或本地泡^[56]过电离的能谱特征。由于非电离平



注：建立星团风模型参数如下：物质损失率 $\dot{M}_0 = 4.3 \times 10^{-4} M_\odot \cdot \text{a}^{-1}$ ，星风终端速度 $v_\infty = 1530 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ，以及跨音速半径 $r_s = 2.8 \text{ pc}$ 。

图 1 根据 NGC 3603 的情形建立的一维星团风模型中热气体动力学时标和若干离子的复合时标的对比^[30]

衡研究中原子数据及过程的匮乏，以及缺乏对非电离平衡过程中原子数据和过程的详尽研究，NEI 模型多数应用 CIE 的原子数据库 APED^[57]。更新的原子数据库^[58]使得我们可以对等离子体的 X 射线辐射做出更为准确的预测^[30]。

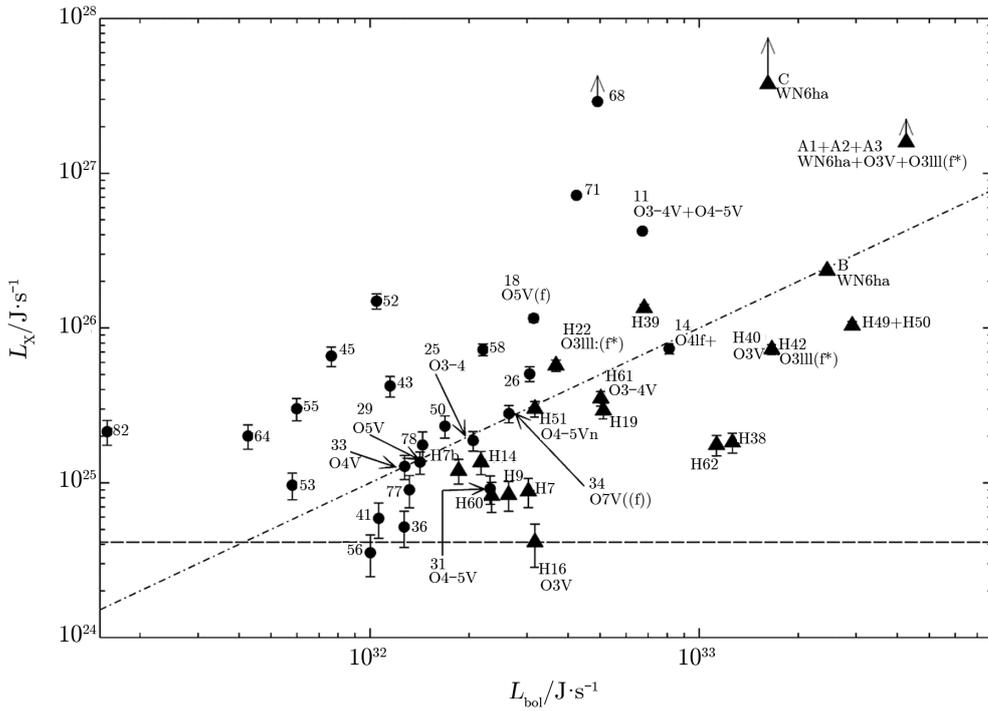
3 NGC 3603 内点源研究

3.1 大质量恒星的 X 射线辐射

2000 年 5 月，Chandra X 射线天文台第一次对 NGC 3603 所在区域进行时长为 50 ks 的观测 (观测 ID: 633)。Moffat 等人^[59]2002 年对观测数据进行处理，用修改后的 CELLDETECT 算法来探测点源，最终在整个区域中探测到 384 个点源。

Moffat 等人^[59]共统计了 43 个点源的 X 射线光度和热光度的关系，如图 2 所示。其中，存在光谱型认证的目标共 26 个，无光谱型认证的共 17 个。Melena 等人^[60]2008 年应用 Baade 6.5m 望远镜的光谱和哈勃望远镜的观测，共认证 38 个点源的光谱型，其中 21 个包含在 Moffat 的文中。Moffat 在 1994 年也认证出 2 个 O 型星^[7]，2002 年他与合作者又认证出了 4 个 O 型星 (其中 1 个与 Melena 等人 2008 年认证的 O 型星重合)。从另一方面来说，Melena 认证的 38 颗 O 型星，只有 21 颗在 X 射线波段有对应体，即使扣除 6 颗光谱型晚于 O8 的恒星，O 型星在 X 射线波段的重现率也只有 21/32 (约 66%)。2002 年 Moffat 等人在工作中采用观测的曝光时间只有 50 ks，这也可能是没有探测到所有 O 型星的 X 射线辐射的原因之一。在 2010 年和 2011 年，CXO 对 NGC3603 又增加了约 500 ks 的观测。有了更深入的观测之后，我们或许会在 X 射线波段看到更多的 O 型星。

此外，Moffat 等人将点源的 X 射线光度 L_X 与热光度 L_{Bol} 在图上展示出来，如图 2 所



注: 虚线对应的关系是 $L_X/L_{bol} = 10^{-7}$, 水平的虚线表示 ACIS 图像中 3σ 水平可以探测到的极限。

图 2 NGC 3603 中探测到的点源的 X 射线光度与热光度的关系^[59]。

示。图中包含的点源都高于 3σ 水平, 并且在亮度、颜色、光谱性等方面显示出其光谱型为 OB/W-R 型的恒星, 共 43 个。由图 2 中可以看出, 点源的 X 射线光度与热光度大致上成简单的正比关系 $L_X \approx 10^{-7}L_{bol}$, 但至少具有两个量级的弥散。

3.2 特殊的点源

从图 2 中可以看出, MTT 68 和 MTT 71 的相对 X 射线光度比较高, 另外两个恒星受到的消光 E_{B-V} 大概是 1.93, 高于星团中心的 $E_{B-V} \approx 1.44$, 这两颗恒星在 ROSAT 的 X 射线观测中也比较显眼。Moffat 等人抽出了点源 MTT 68 的光谱, 并应用单温度的热谱模型来拟合, 得到 X 射线温度 $kT \approx (2.1 \pm 0.7)$ keV, 比星团中心的 $kT \approx (3.1 \pm 0.3)$ keV 要低, 吸收柱密度 $N_H \approx 2.4 \times 10^{22}$ cm⁻², 高于星团中心的 $N_H \approx 0.7 \times 10^{22}$ cm⁻²。从位置上看 MTT 68 距离星团中心大约为 $84''$, 离星团中心较远, MTT 71 甚至更远。但是一般来说, 距离星团中心越近, 温度越高, X 射线波段的光度越高。

Moffat 等人猜测 MTT 68 和 MTT 71 出现反常的原因可能是这两颗星本身是双星系统, 强 X 射线辐射来自于强星风的碰撞。哈勃望远镜对 NGC 3603 的观测表明, MTT 68 实际上是一个双星系统^[61], 伴星之间相距 $0.38''$, 小于 CXO 的分辨极限 $0.49''$, 因此在 CXO 的观测中不能分辨出这个双星系统。MTT 68 的 X 射线光度与热光度的比值 $L_X/L_{Bol} \approx 1 \times 10^{-5}$, 比单星的典型比值 10^{-7} 高 2 个量级。Roman-Lopes 将 MTT 68 的 J、H 和 K 波段光谱与

WR25、WR20a 和双星系统 HD 93129 的近红外光谱比较, 可以非常清楚地看到 MTT 68 与 HD 93129 的光谱十分相似, Roman-Lopes 认为 MTT 68 也是 O2If* 型光谱。另外除了光谱的相似之外, MTT 68 在系统内两颗星的距离、两颗星的质量等方面与 HD 93129 都惊人地相似, 而 HD 93129 已经被证明实际上是一个三星系统, 因此 Roman-Lopes 猜测 MTT 68 可能还有一个未被发现的更近的伴星^[61]。

4 NGC 3063 内弥漫 X 射线辐射的分析结果

对 NGC 3063 内大质量恒星集体能量反馈的研究有赖于对 NGC 3063 内弥漫 X 射线辐射的分析。Moffat 等人^[59]首次分析了 NGC 3063 内弥漫辐射, 并与 30 Doradus、M82 等不同规模的星暴活动产生的热气体的性质做了比较; Towsley 等人^[62]分析了 NGC 3063 内热气体的电离状态, 认为其内部的等离子体主要由一个正在从 NEI 逐渐接近 CIE 的成分构成; Ji 等人^[30]首次根据星团风的电离状态和相应等离子体辐射特征的建模结果拟合 NGC 3063 内弥漫辐射 X 射线能谱, 得到了 NGC 3063 内与星团风相关的星风速度、物质损失率、“质量注入”等一系列参数。

此外, 如此前 2.3.1 节所述, 大质量恒星区内弥漫热气体的 X 射线辐射总是混杂着未分辨的低质量前主序星的辐射。在 NGC 3063 中, 这一情况尤为严重。因为 NGC 3063 内恒星的密集分布, 再加上较远的距离 ($d=7.0$ kpc), 使得即便使用空间分辨率最好的 Chandra X 射线天文台也很难区分各个低光度的点源; 另一方面缘于 CXO 的观测时间太短 (46 ks), 绝大多数前主序星的 X 射线光度 ($L_X \approx 10^{22} \sim 10^{24} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$) 均低于观测的探测极限。因而, 一方面我们此前综述的点源辐射的性质集中于大质量恒星的结果; 另一方面, 对弥漫 X 射线辐射的分析总是需要估计前主序星的贡献。

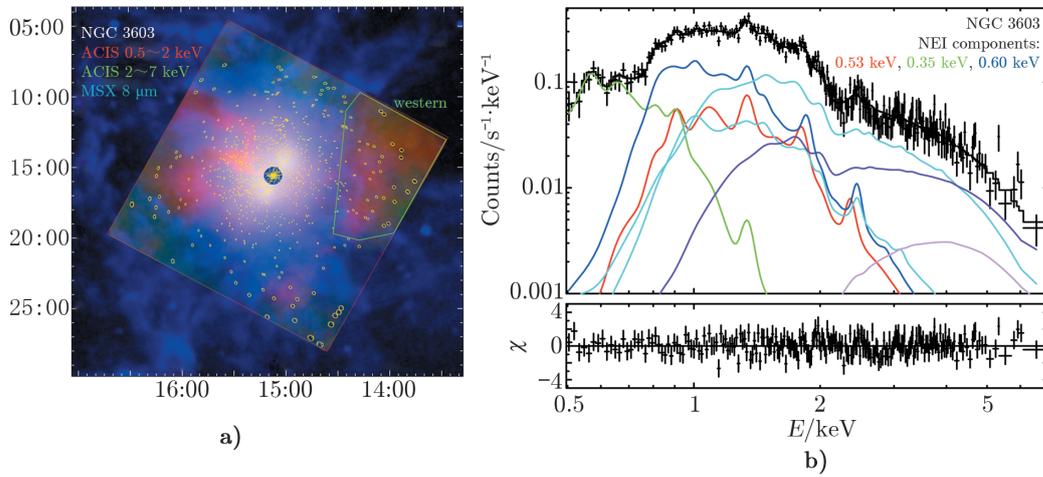
4.1 单温等离子体模型的拟合结果

Moffat 等人^[59]对 Chandra X 射线天文台 2002 年的观测数据进行处理, 得到弥漫辐射的光谱, 并应用单温度 CIE 的热谱模型来拟合^[63, 64]。他们推断出在距离核心区域 $2'$ 以内的、吸收改正后的弥漫 X 射线光度 L_X 大约为 $10^{27.3} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$, 大约为点源总光度的 20%。核心区域的 X 射线温度为 $kT = (3.1 \pm 0.3) \text{ keV}$, 吸收 N_H 约为 $7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ 。假设 NGC 3063 内弥漫热气体具有相同的能谱特征, 他们得到了热气体的本征 X 射线光度 $L_X \approx 10^{28} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$ 的结果, 其中未分辨点源的贡献不足 25% (见 4.4 节)。

与 30 Doradus (30Dor)、M82 等不同规模的星暴活动区域相比, 他们得到的热气体的 X 射线光度比 30Dor 小两个数量级 (10^{28} 对比 $10^{30} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$)。考虑到两者的 $H\alpha$ 也相差很远^[65], X 射线波段的差别并不奇怪; 同时, 他们得到了显著偏高热气体温度 (3 keV 对比 30Dor 内约 0.35 keV^[66], M82 内星系盘上约 1 keV 以及星系晕内约 0.4 keV^[67])。这可能是 NGC 3063 内热气体尚未膨胀冷却的结果。不过, 考虑到在 NGC 3063 内, 硬 X 射线能段 ($\gtrsim 1.5 \text{ keV}$) 的弥漫辐射主要由前主序星贡献 (参见 4.4 节), Moffat 等人采用单温模型拟合得到的结果很可能不能代表热气体真实的温度。

4.2 简单非电离平衡的激波模型的拟合结果

采用相同的曝光时间为 46 ks 的观测数据, 2011 年 Townsley 等人^[62] 细致考虑了前景和背景各个发射组分以及前主序星的能谱特征, 并且采用处于 NEI 状态不同温度的多个等离子体组分 (XSPEC 中平行板激波等离子体模型 *vpshock*) 对 NGC 3603 整体的弥漫 X 射线辐射的能谱做出拟合 (见图 3)。在所得的拟合结果中, 他们认为两个等离子体成分代表了热气体的辐射 (见图 3 b) 中红色和绿色曲线): 两者具有相近的温度 ($kT_1 = 0.53$ keV, $kT_2 = 0.60$ keV), 受到了相近且与 NGC 3603 消光结果 ($A_V = 4.5$ mag) 一致的吸收 ($N_{H,1} = 2.0 \times 10^{22}$ cm⁻², $N_{H,2} = 1.2 \times 10^{22}$ cm⁻²), 但具有全然不同的电离平衡时标 ($\tau_1 = 2.0 \times 10^{10}$ cm⁻³.s, $\tau_2 = 2.0 \times 10^{13}$ cm⁻³.s)。两个成分在 0.5~7 keV 能段内的光度分别为 2.2×10^{29} J·s⁻¹ 和 3.3×10^{28} J·s⁻¹。以上结果表明, NGC 3603 内热气体具有统一的温度, 并且正在逐步从 NEI 转化至 CIE 的状态。其中, 处于 NEI 状态的等离子体贡献了大部分的光度 (86%)。



注: a) 整个 CXO ACIS-I 视场 ($17' \times 17'$, 红色正方形) 内除星团中心 ($r \approx 36''$, 蓝色区域) 和西边外围区域 (绿色多边形) 内 NGC 3603 的弥漫 X 射线辐射, 其中同时移除了探测到的点源 (黄色椭圆形) 的辐射贡献。b) 红绿蓝三条曲线代表三个不同参数的等离子体的辐射 (*vpshock*, 其中绿色组分因吸收过低被认为是前景辐射), 两个青色组分代表前主序星的辐射 (分别约为 0.86 keV 和 2.6 keV), 紫色和粉色组分分别表示银河系脊 (Galactic Ridge) 和河外源的辐射贡献。

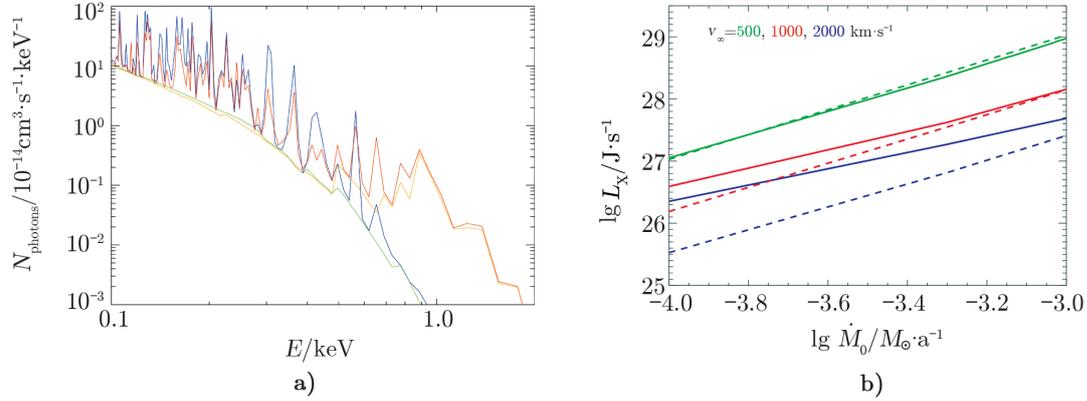
图 3 a) NGC 3603 的多波段三色图^[62]; b) 对 NGC 3603 内弥漫 X 射线辐射能谱的多组分拟合结果^[62]

此外, 在 NGC 3603 的弥漫 X 射线辐射能谱中, Townsley 等人没有发现超出热等离子体自身辐射的发射线成分。这一结果表明, 相比于其他大质量恒星形成区, 在 NGC 3603 中可能没有电荷交换过程, 即便 CXO 的视场范围覆盖到了热气体与巨分子云的交互面。不过这一结果也可能仅仅因为他们采用的观测曝光时间较短, 不足以捕获以上特征。

4.3 一维自洽的非电离平衡的星风模型

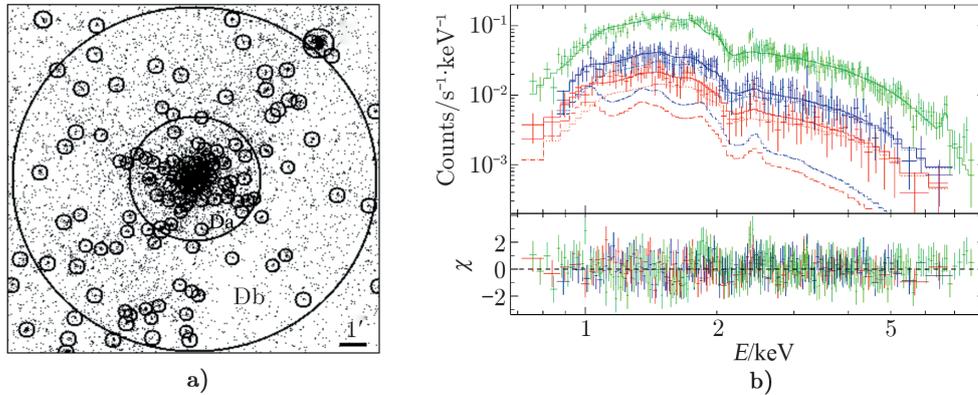
Ji 等人于 2006 年基于 CC85 的星团风模型开发了一套与星团风动力学演化相关联的非电离平衡的等离子体模型^[30]。他们根据一定参数 (星风终端速度 v_∞ , 物质损失率 \dot{M}_0) 的星团风的一维稳恒解 (参见 CC85), 计算了星团内等离子体从内向外运动时离子电离度的变化,

并且根据比较齐全的原子数据预言了不同位置处的等离子体应有的 X 射线辐射。他们发现这样计算得到的等离子体具有不同于 CIE 状态的能谱特征 (图 4 a)), 并且不同参数下星团风总体的 X 射线光度也与 CIE 状态的等离子体不同 (图 4 b))。他们采用这样的一维自洽非电离平衡的星风模型拟合了 NGC 3603 中心区域弥漫辐射的 X 射线能谱 (图 5), 并对相关的星团风参数给出比较好的限制 (表 1)。



注: a) X 射线能谱的对比, 其中红橙两色分别代表 NEI 模型的能谱 (总体: 红; 只有连续谱: 橙), 蓝绿两色分别代表 CIE 假设下相同物理状态下等离子体的能谱 (总体: 蓝; 只有连续谱: 绿)。b) 不同模型参数下 2~8 keV 能段的 X 射线光度。实线: NEI 情形; 划线: CIE 情形。

图 4 根据星团风动力学模型预言的等离子体的 X 射线辐射^[30]



注: a) NGC 3603 的 CXO ACIS-I 图像。弥漫 X 射线辐射从两个环形区域内抽取: $r_{\text{Da}} = 19'' \sim 30''$, $r_{\text{Db}} = 30'' \sim 83''$, 其中已扣除的点源各自以圆圈标出。b) 能谱拟合结果。其中, 红、蓝、绿三色分别代表从 Da、Db 以及所有的探测到的点源的区域内抽取的 X 射线能谱。红、蓝色点线分别表示 Da、Db 区域内相应点源的贡献, 划线分别表示星团风的辐射。

图 5 NGC 3603 内弥漫 X 射线辐射的能谱拟合结果^[30]

表 1 Ji 等人^[30] 对星团风模型参数的拟合结果

Parameter	Model
$N_{\text{H}} / 10^{22} \text{ cm}^{-2}$	$0.81^{+0.06}_{-0.05}$
$r_{\text{sc}} / \text{pc}$	0.68 (fixed)
Abundance / Z_{\odot}	$0.21^{+0.12}_{-0.11}$
$\lg \dot{M}_0 / M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$	$-3.37^{+0.42}_{-0.24}$
$v_{\infty} / 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	1.53 (大于 0.50)

注: 给出的参数误差标定了参数的 90% 置信区间。

4.4 未分辨的前主序星的辐射贡献

因为恒星密度高^[8]、距离较远 ($d = 7.0 \text{ kpc}$)、CXO 观测灵敏度不足以探测到单颗小质量前主序星的辐射等诸多因素, NGC 3603 内为数众多的小质量前主序星表现为弥漫的 X 射线辐射。因此, 此前对弥漫热气体的分析都需要对未分辨的前主序星的 X 射线辐射做出很好的限制。

Moffat 等人^[59] 2002 年用已经检测到的点源得到光度与点源数目的分布函数 $N(S)$, 然后将其延展到光度更小的区域 (这里假设数目随光度的分布是均匀的)。这种延展方法的精度在一个量级以内。否则, 原始图像分成更小区域的时候, 我们无法得到足够的统计量来构建一个合适的 $N - S$ 图。星团的中心区域由于点源的密度过大, 导致点源去除的不确定性增加, 因此在构建 $N(S)$ 时 Moffat 等人去除了中心区域。他们估计出弥漫物质中包含的未探测点源数目大约为 1.5×10^3 , 与这个区域中预测的活动前主序星的数目非常接近。但是这些年轻星只贡献大约 $10^{25.5} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 的辐射, 比背景辐射还低了几个量级。如果不是直接和前主序星相关, 这些暗的未分辨点源可能占弥漫辐射的 25%。

2011 年 Townsley 等人^[62] 根据 Preibisch 等人 2005 年^[17] 对 Orion Nebula Cluster 的研究结果, 在对 NGC 3603 的弥漫 X 射线辐射的能谱分析中采用了双温度成分的模型来限制前主序星的辐射贡献 (如图 3 b) 中青色曲线所示); 其中, 两个成分的温度分别为 0.86 keV 和 2.6 keV, 并且低温成分的归一化系数被限制为高温成分的一半^[17]。他们通过拟合得到了 $L_{\text{pre-MS}} = 3.1 \times 10^{27} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ (0.5~7 keV) 的结果, 此光度为 NGC 3603 弥漫 X 射线辐射总体光度的 11.8%。同时, 他们发现高于 1.5 keV 的 X 射线能谱中主要为前主序星的辐射。

Ji 等人^[30] 假设 NGC 3603 内未分辨点源与已探测到的点源具有相同的能谱特征, 通过联合拟合已分辨点源和弥漫 X 射线辐射的能谱, 确定未分辨点源的辐射贡献 (见图 5 b))。他们认为, 在 2~8 keV 能段内, 80% 的弥漫 X 射线辐射来自于未分辨的前主序星 ($L_{\text{X,wind}} = 2.5 \times 10^{26} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 对比 $L_{\text{X,pre-MS}} = 8.8 \times 10^{26} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$)。根据他们对未分辨点源的拟合结果: $N_{\text{H}} = 8.1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$, $kT = 3.8 \text{ keV}$, 相应的前主序星在 0.5~7 keV 能段内的光度为 $3.8 \times 10^{27} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 。考虑到他们选取的范围 ($r_{\text{Db}} = 83''$) 以外的弥漫 X 射线辐射可以忽略, 以上对未分辨点源辐射的估计与 Moffat 等人和 Townsley 等人的结论一致, 即 NGC 3603 内的小质量的前主序星贡献了 $(2.5 \sim 3.8) \times 10^{27} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 的弥漫 X 射线辐射。这部分辐射约占总体弥漫辐射的 10%, 并且在硬 X 射线能段 ($\geq 1.5 \text{ keV}$) 内, 弥漫辐射主要来自前主序星的贡献。

5 总结与展望

在本文中，我们先讨论了大质量恒星形成区中 X 射线的辐射来源，其中包括前主序星、OB 星，以及弥漫热气体的 X 射线辐射等。然后我们分别讨论了 NGC 3603 中的点源以及弥漫物质的 X 射线辐射。

在 NGC 3603 内，Moffat 等人分辨出 43 颗早型恒星的 X 射线辐射，它们的 X 射线光度与热光度的比值大致遵循 $L_X \approx 10^{-7} L_{\text{bol}}$ 的关系。其中，远离星团中心的点源 MTT 68 和 MTT 71 的 $L_X/L_{\text{bol}} \approx 10^{-5}$ ，比典型值大了两个量级^[59]。此外，Melena 等人 2008 年通过光学光谱认证的 38 颗早型恒星中^[60] 只有 21 颗在 X 射线被探测到。剩余的没有 X 射线对应体的点源值得我们后期继续研究。这些点源的观测有助于我们理解年轻星团 NGC 3603 的形成与演化。

NGC 3603 中，弥漫等离子体是处于非电离平衡态的^[62]。在核区 $2'$ 以内，弥漫热气体的辐射可以用一维自洽的非电离平衡的星团风模型来拟合^[30]；弥漫辐射中，未分辨的小质量前主序星贡献了约 10% 的光度 ($L_X = (2.5 \sim 3.8) \times 10^{27} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$)，并且，在硬 X 射线能段内，前主序星的辐射占主导。

前人对 NGC 3603 的研究都是基于最早 2000 年的 46 ks 的观测数据，迄今为止 Chandra X 射线天文台档案数据中已经累积了近 0.5 Ms 的 CCD 观测^[68]，也有了对这个区域首次 HETG 近 50 ks 的观测 (Canizares 2012, obsID: 13266)。更深的观测有助于对未分辨的小质量前主序星的辐射贡献做出更好的限制，也将更完备地覆盖 NGC 3603 内早型恒星的 X 射线辐射。其次，X 射线天文学用到的原子数据库 ATOMDB 已经更新至 3.0.6 版本^①。其中包含了更为完备的能级跃迁信息，并且各类原子在不同温度下的辐射度按照不同电离度的离子分别列出，而不是像以前版本中那样仅仅给出各类原子在不同温度下总的辐射度；这一特征为我们计算 NEI 状态下等离子体的能谱带来极大的便利。更为完备和易用的原子数据库将有助于我们完善一维自洽的非电离平衡状态等离子体星团风模型，进而对与星团风相关的大质量恒星的活动做出进一步的研究。

另外，年轻恒星团中很多关键的物理机制还不是很清楚，如具体气体的加热机制、星团风的起源、风之间的相互作用、物质加载等。在这一领域，数值模拟也是常用的研究工具。不超过 50 个 O 和 B 星的 3D 数值模拟曾被应用到年轻星团风的研究中，如 Arches 星团，LMC 超泡 (superbubble) N70 和 M17 星团。最新的模拟是针对 M17 星团^[69]。这些模拟在解决流体力学方程时都没有考虑传导项，其电离过程也仅仅是假设 CIE 情形。我们计划运用到具有 AMR (adaptive mesh refinement) 功能的天体物理流体力学计算平台 FLASH^[70] 开发一个 (可以公开的) NEI 模块，针对 NGC 3603 进行更真实的 3D 数值模拟，深入研究恒星团风的起源、物质和能量传输等问题。

^①<http://atomdb.org>

参考文献:

- [1] Ku W H M, Chanan G A. *ApJ*, 1979, 234: L59
- [2] Berghoefer T W, Schmitt J H M M, Danner R, et al. *A&A*, 1997, 322: 167
- [3] Hughes J P, Hayashi I, Koyama K. *ApJ*, 1998, 505: 732
- [4] Townsley L K, Feigelson E D, Montmerle T, et al. *ApJ*, 2003, 593: 874
- [5] Vink J S, de Koter A, Lamers H J G L M. *A&A*, 2001, 369: 574
- [6] Chevalier R A, Clegg A W. *Nature*, 1985, 317: 44
- [7] Moffat A F J, Drissen L, Shara M M. *ApJ*, 1994, 436: 183
- [8] Figer D F. *IAUS*, 2008, 250: 247
- [9] Rochau B, Brandner W, Stolte A, et al. *ApJ*, 2010, 716: L90
- [10] Sung H, Bessell M S. *AJ*, 2004, 127: 1014
- [11] Melena N W, Massey P, Morrell N I, et al. *AJ*, 2008, 135: 878
- [12] Wang J, Chen Y. *Science China Physics, Mechanics, and Astronomy*, 2010, 53: 271
- [13] Westmoquette M S, Dale J E, Ercolano B, et al. *MNRAS*, 2013, 435: 30
- [14] Stelzer B, Flaccomio E, Briggs K, et al. *A&A*, 2007, 468: 463
- [15] Pizzolato N, Maggio A, Micela G, et al. *A&A*, 2003, 397: 147
- [16] Flaccomio E, Damiani F, Micela G, et al. *ApJ*, 2003, 582: 398
- [17] Preibisch T, Kim Y C, Favata F, et al. *ApJS*, 2005, 160: 401
- [18] Lucy L B, Solomon P M. *ApJ*, 1970, 159: 879
- [19] Vink J S, de Koter A, Lamers H J G L M. *A&A*, 2001, 369: 574
- [20] Feldmeier A, Oskinova L, Hamann W R. *A&A*, 2003, 403: 217
- [21] Waldron W L, Cassinelli J P. *ApJ*, 2007, 668: 456
- [22] Imanishi K, Tsujimoto M, Koyama K. *ApJ*, 2001, 563: 361
- [23] Owocki S P, Cohen D H. *ApJ*, 2001, 559: 1108
- [24] Oskinova L M, Feldmeier A, Hamann W R. *MNRAS*, 2006, 372: 313
- [25] Leitherer C, Heckman T M. *ApJS*, 1995, 96: 9
- [26] Heckman T M. *ASPCS*, 2002, 254: 292
- [27] Sharma P, Roy A, Nath B B, et al. *MNRAS*, 2014, 443: 3463
- [28] Oskinova L M. *MNRAS*, 2005, 361: 679
- [29] Kuhn M A, Getman K V, Feigelson E D, et al. *ApJ*, 2010, 725: 2485
- [30] Ji L, Wang Q D, Kwan J. *MNRAS*, 2006, 372: 497
- [31] Güdel M, Briggs K R, Montmerle T, et al. *Science*, 2008, 319: 309
- [32] Feigelson E D, Montmerle T. *ARA&A*, 1999, 37: 363
- [33] Güdel M. *A&A Rev.*, 2004, 12: 71
- [34] Feigelson E D, Getman K, Townsley L, et al. *ApJS*, 2005, 160: 379
- [35] Telleschi A, Güdel M, Briggs K R, et al. *A&A*, 2007, 468: 425
- [36] Getman K V, Flaccomio E, Broos P S, et al. *ApJS*, 2005, 160: 319
- [37] Townsley L K, Broos P S, Garmire G P, et al. *ApJS*, 2014, 213: 1
- [38] Montmerle T, Townsley L K. *Astronomische Nachrichten*, 2012, 333: 355
- [39] Castor J, McCray R, Weaver R. *ApJ*, 1975, 200: L107
- [40] Weaver R, McCray R, Castor J, et al. *ApJ*, 1977, 218: 377
- [41] Chu Y H, Chang H W, Su Y L, et al. *ApJ*, 1995, 450: 157
- [42] Mac Low M M, McCray R. *ApJ*, 1988, 324: 776
- [43] Stevens I R, Hartwell J M. *MNRAS*, 2003, 339: 280
- [44] Dunne B C, Chu Y H, Chen C H R, et al. *ApJ*, 2003, 590: 306
- [45] Harper-Clark E, Murray N. *ApJ*, 2009, 693: 1696
- [46] Toalá J A, Guerrero M A, Chu Y H, et al. *ApJ*, 2012, 755: 77
- [47] Zhekov S A. *MNRAS*, 2014, 443: 12

- [48] Zhang N X, Chu Y H, Williams R M, et al. ApJ, 2014, 792: 58
- [49] Silich S A, Tenorio-Tagle G, Terlevich R, et al. MNRAS, 2001, 324: 191
- [50] Jaskot A E, Strickland D K, Oey M S, et al. ApJ, 2011, 729: 28
- [51] Kudritzki R P, Puls J. ARA&A, 2000, 38: 613
- [52] Sutherland R S, Dopita M A. ApJS, 1993, 88: 253
- [53] Borkowski K J, Lyerly W J, Reynolds S P. ApJ, 2001, 548: 820
- [54] Yamaguchi H, Ozawa M, Koyama K, et al. ApJ, 2009, 705: L6
- [55] Breitschwerdt D, Schmutzler T. A&A, 1999, 347: 650
- [56] Breitschwerdt D, Egger R, Freyberg M J, et al. Space Sci. Rev., 1996, 78: 183
- [57] Smith R K, Brickhouse N S, Liedahl D A, et al. ASPCS, 2001, 247: 161
- [58] Foster A R, Ji L, Smith R K, et al. ApJ, 2012, 756: 128
- [59] Moffat A F J, Corcoran M F, Stevens I R, et al. ApJ, 2002, 573: 191
- [60] Melena N W, Massey P, Morrell N I, et al. AJ, 2008, 135: 878
- [61] Roman-Lopes A. MNRAS, 2013, 435: L73
- [62] Townsley L K, Broos P S, Chu Y H, et al. ApJS, 2011, 194: 16
- [63] Mewe R, Gronenschild E H B M, van den Oord G H J. A&AS, 1985, 62: 197
- [64] Mewe R, Lemen J R, van den Oord G H J. A&AS, 1986, 65: 511
- [65] Kennicutt R C, JR. ApJ, 1984, 287: 116
- [66] Townsley L K, Broos P S, Feigelson E D, et al. AJ, 2006, 131: 2140
- [67] Strickland D K, Ponman T J, Stevens I R. A&A, 1997, 320: 378
- [68] Townsley L K, Broos P S, Garmire G P, et al. ApJS, 2014, 213: 1
- [69] Velázquez P F, Rodríguez-González A, Esquivel A, et al. ApJ, 2013, 767: 69
- [70] Fryxell B, Olson K, Ricker P, et al. ApJS, 2000, 131: 273

Current Investigations on Young Star Cluster NGC 3603 in X-ray

WANG Qian^{1,2}, SUN Wei^{1,3}, JI Li^{1,3}

(1. Purple Mountain observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: NGC 3603 is a dense young cluster located in the Carina spiral arm of the Milky Way. The mechanical energy released by the winds from massive stars alters the property of the ambient medium, and has very important influences on the star formation and the galaxy evolution process. The X-ray emission in massive star formation region is produced by the pre-main sequence star, OB star, and diffuse hot gas etc. In this paper, we reviewed the X-ray radiation mechanisms of those three kinds of sources and presented the X-ray radiation of point sources and diffuse hot gas in NGC 3603, respectively. For the point sources, Moffat et al. (2002) detected the X-rays from 43 early-type sources, and found that they follow the canonical relationship between the X-ray luminosity and the bolometric

luminosity: $L_X/L_{\text{bol}} \sim 10^{-7}$. They also found that MTT 68 and MTT 71, two O stars far away from the core region, have enhanced X-ray emission: $L_X/L_{\text{bol}} \sim 10^{-5}$. For the diffuse emission, Townsley et al. (2011) found that the diffuse plasma in NGC 3603 is in non-equilibrium state. Ji et al. (2006) fitted the diffuse X-rays in the central annulus region with the 1-D self-consistent non-equilibrium ionization cluster wind model, and determined related stellar wind parameters. Besides that, they both found that the X-rays from un-resolved pre-main sequence stars contribute $\sim 10\%$ in total X-ray luminosity. The prospect of X-ray research on NGC 3603 based on the archival 0.5 Ms Chandra observation is also discussed in the end.

Key words: Young star cluster; X-ray; NGC 3603; pre-main sequence star; non-equilibrium ionization