

氏名	福島 碧都
所属	理学研究科 物理学専攻
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理学博 第49号
学位授与の日付	令和5年3月25日
課程・論文の別	学位規則第4条第1項該当
学位論文題名	Investigation of Diffuse X-ray Emission from the Massive Star-Forming Region RCW 38 大質量星形成領域 RCW 38 の広がった X 線放射の研究 (英文)
論文審査委員	主査 准教授 江副 祐一郎 委員 教授 藤田 裕 委員 准教授 石崎 欣尚

【論文の内容の要旨】

太陽の 8 倍から百数十倍程度の質量を持つ「大質量星」は巨大な分子雲中で誕生し、星風と呼ばれる高速のガス流出や強力な紫外線、終末期の超新星爆発などにより周囲に絶大な影響を与える重要天体として知られる。多くの星・惑星が大質量星の影響を受けながら誕生するため、その形成過程や周辺環境の理解は広く銀河の進化を知る上で欠かせない。しかし、高密度の分子雲に覆われて観測が難しく、若い大質量星周辺でどのような物理現象を生じているか、その重要性に反してよく理解されていない。透過力の高い X 線はこうした大質量星の形成環境を探る貴重な手段となる。2000 年代に入り、高い空間分解能を誇る *Chandra* 衛星は大質量星形成領域の数百から数千の X 線源を明確に分離した一方で、星からの放射で説明できない奇妙な「広がった放射」の存在を明らかにした。放射スペクトルは数百 eV から数 keV に加熱されたプラズマからの熱的放射モデルで再現でき、冷たい分子雲中での大質量星に付随する熱い現象の存在を示唆する (Townesley *et al.*, *ApJ*, 2003, Ezoë *et al.*, *ApJ*, 2006a, Hyodo *et al.*, *PASJ*, 2008 など)。一方で RCW 38 や NGC 6334、NGC 2024 といった大質量星形成領域からは、より高エネルギーな広がった放射が報告された (Wolk *et al.*, *ApJ*, 2002, Ezoë *et al.*, *ApJ*, 2006a, Ezoë *et al.*, *ApJ*, 2006b)。スペクトル形状はのっぺりとしたべき関数 (光子指数 $\Gamma = 0.4\text{--}2.8$) が支配的である。こうした特徴は熱的放射とは異なり、超高エネルギーに加速された粒子からの非熱的な放射を示唆する。しかし、熱的解釈と比べて観測証拠の少なさもあり、そうした非熱的な放射機構は存在も含めて未だ議論中である。このように大質量星周囲の広がった X 線は若い大質量星形成領域を探る手がかりとして期待されているものの、その放射の起源や普遍性、非熱的放射の

有無やプラズマ温度の決定要因など未だ多くの点で理解の途上にある。

そこで私は日本の「すざく」衛星を用いて RCW 38 で示唆された広がった硬 X 線放射の解明を目的として研究を行った。「すざく」は広がった放射に優れた感度を持ち、点源分解の得意な *Chandra* の観測と相補的である。とりわけ先行研究では分光能力と光子統計の不足から十分に検証できなかつた熱的・非熱的の区分を詳しく検証できる。本解析では領域を星団中心からの距離に応じて内側（半径<2 分角の円）領域と、外側（半径 2.0–5.5 分角の円環）領域に分けてスペクトル解析を実施した。大質量星形成領域の広がった放射は、(1) 前景・背景放射源からの一様放射、(2) 視野内の星や背景銀河などの点状放射に混ざっており、単独で広がった成分を抽出することは困難である。そこで前者は近傍の RX J0852.0-4622 NW オフセット観測、後者は RCW 38 の *Chandra* 観測からそれぞれスペクトルを表すモデルを作成した。得られた最適値を「すざく」で取得した RCW 38 全体のスペクトルに導入すると、1–8 keV 帯域において内側領域では前景・背景放射が全体の約 1%、点状放射が約 70%の光度を占め、外側領域では前景・背景放射が約 10%、点状放射が約 50%の光度を占めていた。残りの放射は広がった成分であると考えられ、光度関数から見積もられる検出限界以下の点源の寄与を考慮してもなお、真に広がった放射が存在している可能性が高い。

次に広がった放射のモデルフィットを行った。まずは先行研究と同じく星間吸収を受けた非熱的モデルに低温の熱的プラズマを加えたモデルを試した。その結果、内側領域では吸収を表す水素柱密度は $N_{\text{H}} = (1.8 \pm 0.1) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ で、非熱的成分を表す光子指数 $\Gamma = 1.9 \pm 0.2$ のべき関数と温度 $kT = 0.93 \pm 0.06 \text{ keV}$ の熱的モデルで放射を再現できた。続いて外側領域でも $N_{\text{H}} = (1.4 \pm 0.1) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 、 $\Gamma = 1.8 \pm 0.1$ 、 $kT = 1.1 \pm 0.2 \text{ keV}$ という結果を得た。これらは先行研究と矛盾しない。しかし、外側領域では 6–7 keV で見られる高階電離した鉄由来と思われる輝線放射が再現できず、より高温の熱的モデルが必要であると考えられる。そこで両領域に高温の熱的成分を与えたモデルを試したところ、内側では $5.3^{+1.2}_{-0.9} \text{ keV}$ 、外側では $4.9 \pm 0.6 \text{ keV}$ を単にべき関数と入れ替えることで放射をよく再現することが分かった。 χ^2 検定から適合度は内側では変化ないが、外側では改善され、モデルとデータ間に目立った残差は見られなくなった。すなわち、少なくとも外側領域の広がった放射は熱的モデルが優位である。

この新たな高温成分は「すざく」で観測された他の大質量星形成領域のものよりも明らかに高い。そこで熱的プラズマの起源として最も有力な星風の衝撃波モデルで、与えられた結果を実現しうるか検討した。ランキン・ユゴニオ条件から、典型的な大質量星の風速 2000 km s^{-1} を仮定すると、星風が周囲の物質と衝突して生じる温度は 5 keV 程度まで可能である。複数の大質量星を考慮するとこの上限はさらに緩くなる。さらにエネルギー供給の面から考えると、星風のわずか 0.1%程度が広がった放射の光度に変換されれば与えられた結果を説明しうる。つまり、RCW 38 の広がった放射が仮に熱的であったとしても、予測される衝撃波モデルで矛盾がない。ただし、何がプラズマ温度を決定するのは自明

ではない。そこで過去の観測を基に周囲の星間物質との関連を調査した。衝撃が生むプラズマの温度は、衝突物質の密度が大きいほど高くなると考えられる。星間物質の密度はおよそ星間吸収の値 N_{H} で表現されると仮定し、本結果とこれまでに報告のあった広がった放射の吸収 N_{H} と温度 kT の関係をプロットすると、実際に良い正の相関が得られた。これは広がったプラズマの特性がそれを囲む星間物質の圧力に強く依存することを示唆している。

このように本研究では、代表的な非熱的な広がった放射源である RCW 38 に熱的解釈が適用できることを新たに示した。さらにプラズマ温度が他領域と並んで周囲の物質密度と良い相関があり、広がった X 線放射の起源としての衝撃波説を支持するという結果を得た。これは RCW 38 の広がった硬 X 線は単純な非熱的放射のみならず、高温の熱的放射が含まれる可能性を示唆する。電波観測から RCW 38 では分子雲が星団中心を囲うよう存在することが知られている。ここから星団中心で大質量星が形成されると、若く活発な大質量星からの高速の星風、あるいは短寿命のため生じた超新星残骸が周囲の濃い星間物質へと撒き散らされて衝突し、運動エネルギーを非熱的粒子および高温プラズマに転換するという描像が考えられる。これらは大質量星形成領域における広がった放射の統一的な理解を進める上で大きな手がかりとなる。今後、非熱的成分と熱的成分のより正確な切り分けには輝線を用いた精密分光観測が有効であり、XRISM 衛星等を用いることで放射機構をより精査できると考えられる。