

【学位論文審査の要旨】

1. 研究の目的

太陽の8倍以上の質量を持つ大質量星は、星風と呼ばれる高速のプラズマ流や紫外線、超新星爆発により周囲に多大な影響を及ぼす。そのため銀河の化学的・力学的進化を知る上で不可欠な天体である。しかし、大質量星の進化と周辺環境は、誕生する場所である分子雲の吸収が大きいこと、中小質量星に対して数が少ないこと、さらに短寿命であることから、その理解は途上である。透過力の高いX線はこうした吸収の大きな分子雲中での高エネルギー現象を捉えるのに適しており、1970年代に入り大質量星形成領域から広がったX線が検出されてきた。一方で、当時の観測衛星の角度分解能や感度の制約から、これらが若い星の集合なのかそれとも真に広がった放射があるのかは未解決であった。

2000年代に入って角度分解能に優れた米Chandra衛星によって、大質量星形成領域の研究が進み、M17, Carina nebula, RCW38, NGC6334等の多くの領域で点源では説明が付かない広がった放射が存在することが明らかになってきた。その多くは数keV以下の熱的プラズマ放射で再現できるが、一部には非熱的な巾関数でより良く再現できるものがあり、加速粒子からの制動放射、シンクロトロン放射が示唆される。しかし、Chandra衛星は角度分解能に優れる一方で広がった放射への感度は高くないため、成因として星風の衝撃波によるプラズマ加熱及び粒子加速が示唆されているものの、その成因や非熱的成分については未解明である。

そこで申請者は広がった放射に優れた感度を持つ「すざく」衛星を用いて、代表的な非熱的な広がった放射が観測された領域であるRCW38について解析を行った。Chandra衛星のデータも使用し、点源成分を押さえた上で、残る広がった放射の有無やそのスペクトルについて初めて詳細に調べた。

2. 研究の方法と結果

申請者の研究手法は以下の通りである。まず「すざく」衛星の画像を取得し、広がった放射の領域を星団中心に近い内側領域(半径2分角の円)と外側領域(半径2-5.5分角の円環)に分けた。次にX線背景放射などのバックグラウンドを定量化するため、近傍で明るい点源のいないオフセット領域の観測データを解析してモデル化した。さらに点源成分を押さえるためChandra衛星のデータから点源を抽出し、点源合計のスペクトルをフィットしてモデル化した。最後に、「すざく」データから得た内側・外側領域のスペクトルそれぞれに対して、バックグラウンドと点源成分をモデルとして考慮した上で、広がった放射の有無を検証した。1-8 keV帯域におけるバックグラウンドと点源の寄与は内側領域でそれぞれ1%と85%であり、外側領域ではそれぞれ13%と34%であった。すなわち内側領域の大半は点源で説明が付くが、外側領域では真に広がった放射が存在する可能性が高い。

広がった放射のスペクトルモデルでは、先行研究として RCW38 の中心部で報告のあった星間吸収を受けた非熱的巾関数+熱的プラズマのモデルをまず試した。その結果、内側領域では吸収を表す水素柱密度は $N_H = (1.8 \pm 0.1) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ で、非熱的成分を表す光子指数 $\Gamma = 1.9 \pm 0.2$ の巾関数と温度 $kT = 0.93 \pm 0.06 \text{ keV}$ の熱的モデルで放射を再現できた。続いて外側領域でも $N_H = (1.4 \pm 0.1) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 、 $\Gamma = 1.8 \pm 0.1$ 、 $kT = 1.1 \pm 0.2 \text{ keV}$ 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 $4.9 \pm 0.6 \text{ keV}$ のプラズマ成分を巾関数成分と入れ替えることで放射をより良く再現することが分かった。

さらに申請者は未検出の点源の個数と光度を代表的な近傍の大質量星形成領域であるオリオン星雲の文献値から見積もり、また点源のスペクトルフィットの誤差、「すざく」と Chandra の衛星同士の較正誤差も加味して、内側領域は広がった放射が有意にあるとは言えないが、外側領域は真に広がった放射があると結論づけた。後者は先行研究でも報告がなく、新たな発見である。

以上の結果を踏まえ、申請者はこの広がった放射を星風の衝撃波モデルで説明することができるかを検証した。X線光度は複数の大質量星からの星風の運動エネルギーの 0.1%程度であり十分説明可能である。プラズマ温度も星風の強い衝撃波で予想される温度が 5 keV であり、説明できる。さらに表面輝度と星間吸収の間の関係をこれまでの広がった放射の報告された領域も含めて比較すると、正の相関関係が示唆された。これは広がった放射のプラズマ圧力が周辺物質の圧力と拮抗しているであることを仮定して求めた関係式と大まかに一致する。くわえて吸収柱密度に対して広がった放射の高温成分を過去文献も含めてプロットすると、高い吸収柱密度を示す領域ほど高温であった。これは星風の衝撃波の強さが周囲の星間物質の吸収柱密度によって決まり、それによって温度が変わるという描像と一致する。

3. 審査の結果

本研究は 1970 年代から示唆されて、2000 年代に観測が進展した大質量星形成領域における広がった放射の研究の一環として、最初に Chandra 衛星で非熱的な広がった放射が示唆された RCW38 領域の放射の有無と成因に迫るものである。結果として、星団の中心部では点源が支配的であり、必ずしも広がった放射があるとは言えないが、外側領域において本研究で初めて 5 keV 程度の温度の成分が確認された。これは新たな発見であり、従来熱的な広がった放射として多く見られてきた 1 keV 以下の成分とは違うため、大質量星形成領域の広がった放射のプラズマ温度が広い幅を持つことを示唆する。申請者が主張する、星風の衝撃波の強さが吸収柱密度によって決まり、温度が変化するという描像は、先行研究で示唆されていたものの、最近の研究までカバーして示し

た今回の結果から、より信憑性を増したと言える。本研究の契機となった、TeV 電子のシンクロトロン放射として示唆された非熱的放射の確たる証拠が見つからなかったのはやや残念ではあるが、丁寧な解析結果と物理的な考察に基づく研究成果は評価できる。本学も中心的役割を果たしている XRISM 衛星の高精度分光による発展も期待できる。

4. 最終試験の結果

本学の学位規定に従って、最終試験を行った。公開の席上で論文内容の発表を行い、物理学専攻教員による質疑応答を行った。また、論文審査委員による本論文および関連分野の試問を行った。これらの結果を総合的に審査した結果、合格と判定した。