

(論文内容の要旨)

星風とは主系列や巨星段階で起こる、恒星からの定常的な物質放出現象である。恒星を構成していた物質は星風や超新星爆発を介して星間空間へ還元される。超新星爆発は非常に派手な現象であるため、これまで理論的にも観測的にもよく研究されてきた。星風は物質放出において超新星と同等の寄与をすることが指摘されているが、これまで特に観測的な研究が遅れていた。

大質量星においては星風の主要な駆動力は光球から放射される紫外光子である。紫外光子を星の大気が吸収すると外向きの運動量の獲得し、加速される。理論計算によるとこの時、最終的には約 **2000 km/s** の速度に達する。このような超音速の流れが何らかの機構によって衝撃波を形成するとちょうど **X 線** を放射する温度になる。星風が星間物質と衝突して衝撃波を起こした時に形成される”星風バブル”構造の解析的な計算によると星風は後退衝撃波によって加熱され、例えば **O8** 型の星は **100** 万年かけて **20 pc** 程度の星風バブルを形成する。この星風バブルの候補は **ROSAT** 衛星と **Chandra** 衛星によって電離水素領域 **M17** において発見された。約 **10 pc** 広がった軟 **X 線** 放射を検出されたが、エネルギー分解能と統計の不足によって放射機構の解明には到らなかった。

日本が **2005** 年に打ち上げた **X 線** 天文衛星すざくは大有効面積、低バックグラウンド、高いエネルギー分解能という性能を併せ持ち、表面輝度の低い広がった放射のよいスペクトルを取得するのに最適である。著者はすざくを用いて銀河系内にある近傍の大質量星団(**M17**、カリーナ星雲、アーチーズ星団、銀河中心領域)を観測・解析し、系統的な研究を行った。

M17 の広がった放射からは初めて高階電離した酸素、ネオン、マグネシウム、鉄の輝線が検出され、この放射の起源が希薄な高温プラズマであることが明らかになった。重元素組成比は太陽組成に近く、まさに星の外層が吹き飛んだものであると考えられる。温度(約 **300** 万度)と重元素組成は空間的に一様であり、よく緩和されている系である一方、放射領域はシャープな境界を持ち、熱伝導によって制限されていることを示唆する。これらは解析的モデルともよく一致し、星風バブルの構造を初めて観測的に明らかにしたものである。

カリーナ星雲も **Einstein** 衛星の観測によって広がった放射の存在が指摘されている領域である。しかし、すざくによる観測の結果、その放射の大部分は星間吸収が小さいため、カリーナ星雲とは物理的に関係がなく、たまたま視線上に存在する近傍の天体であると考えられることが分かった。一部 **WR25** の近くの広がった放射はこの星雲に典型的な星間吸収を受けており、**M17** に似た高温プラズマのスペクトルを持つため、星風バブルであると考えられる。

また、著者は個々の星における点状の放射についてもスペクトル解析を行い、**9** つの天体のうち、**8** つが鉄 **K** 輝線を伴う硬い放射スペクトルを持つことを明らかにした。このうち **WR25** は連星運動の位相に同期して強度が変動することを見出し、**X 線** 放射が星風-星風衝突である確実な証拠をつかんだ。それ以外の天体についても似たスペクトルを持つことから同様の放射機構を持つことを提唱した。

(論文審査の結果の要旨)

大質量星からの星風は銀河の力学的・化学的進化に大きな影響を及ぼすが、これまで観測的な研究が遅れていた。著者は X 線衛星すざく的能力を最大限に生かし銀河系内の主要な大質量星団を観測し、星風バブルの先駆的な研究を行った。具体的な成果は以下のとおりである。

(1) M17(オメガ星雲)の広がった放射から高階電離した種々の元素の K 輝線、L 輝線を初めて検出した。つまりこれまで謎であった X 線放射の起源が高温プラズマからのものであることを明らかにした。また、酸素と鉄の組成比は超新星残骸とは異なる、などの星風バブルの特徴も初めて明らかにした。全体の構造を Weaver モデルと定量的に比較・議論することにより、三次元非対称性と年齢が X 線放射の形態に大きく影響することなど、先駆的な指摘をした。これまで表面輝度の議論しかされていなかった星風バブルに対して、初めて重要な物理パラメータ(星間吸収、温度、重元素組成)を観測的に明らかにしたことの意義は極めて大きい。今後他の領域に対しても行われるであろう同様の観測・議論において常に参照される「古典的な値」となると考えられる。

(2) カリーナ星雲の放射スペクトルは場所によって異なり、 η カリーナの南部の構造はカリーナ星雲よりも近傍にあり、西側の放射はカリーナ星雲に付随していることを初めて明らかにした。カリーナ星雲に付随している放射は M17 同様、酸素、鉄、ネオンなどの輝線を伴う光学的に薄い高温プラズマからの放射で温度や重元素組成比も似ていることから星風バブルであると考えられる。この結果は放射領域の中に混入している点源や η カリーナからのアウトオブタイムイベントを丁寧に引いて初めて得られた結果である。通り一遍の、隣接した領域からバックグラウンドを構築する方法では誤った答えを導いてしまっただろう。

(3) さらに著者は個々の天体に付随したコンパクトな放射についても興味深い発見をした。カリーナ星雲の WR25 は軌道運動に伴って連星間の距離が大きくなるほど X 線の強度が増大することを初めて明らかにした。これは WR25 の X 線放射の起源が連星を構成する 2 つの恒星からの星風が衝突して形成される衝撃波であることの直接的な証拠である。このような放射はこれまで 2 例ほどしか知られておらず極めて貴重なサンプルである。一方、HD93205 は大質量星同士の連星であるにも関わらず星風-星風衝突起源の X 線放射の兆候が見られない。これは連星間の距離が小さすぎることが原因である可能性を初めて指摘した。星風-星風衝突による衝撃波が形成されるためには距離に下限があることを観測的に示したのは初めてのことである。他の 8 天体からも十分な信号雑音比で鉄 K 輝線を検出し、これらの天体が熱的放射をしていることを示すとともに初めて信頼できる温度を得ることに成功した。

以上の結果は著者が流体力学、原子物理学、天体物理学を深く理解していることを裏付けている。またデータ処理も観測装置の特性に基づいた非常に丁寧なものであり、極めて信頼度が高い。星風によって星の構成物質が宇宙空間に還元される現場を初めて観測的に明らかにしたことは周辺分野のみならず天体物理学一般に大きなインパクトを与えることは間違いない。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。