

# X線分光による大質量星起源の高温プラズマの研究

X-ray spectroscopic study of hot plasma from massive stars

物理学専攻 菅原 泰晴

Sugawara Yasuharu

## 1. 研究の背景・目的

大質量星は、自身のガスが、そこから出る光の輻射圧によって吹き飛ばされる質量放出現象、「星風」を有する。今回、主に大質量星の進化の末期段階にある Wolf-Rayet 星 (WR 星) からの X 線について、研究を行った。

WR 星は、特殊な可視光スペクトルを持つ天体で、1867年にフランスのシャルル・ウォルフとジョルジュ・ライエによって、初めて発見されて以降、現在のところ、銀河系内で 296 天体が確認されている (van der Hucht, 2006)。また、可視光スペクトルを用いて、以下のように、窒素の輝線の強度が強い WN 型と炭素の輝線の強度が強い WC 型、WC 型の中で酸素の含有量が高い WO 型というように進化段階ごとに分類されている。

(O 型星) ⇒ WN 型星 ⇒ WC 型星 ⇒ WO 型星

WR 星の多くは主系列 O 型星との連星系を成している (van der Hucht, 2001, 2006)。

過去の X 線観測において、星風同士の相互作用を見るために、WR 星と O 型星の連星系の観測が精力的に行われてきた。現在では、WR 連星系では、星風衝突由来の高エネルギー成分と連星周期に依存しない低エネルギー成分があることが分かっている (e.g., Maeda et al. 1999)。低エネルギー成分の起源に関しては、WR 星や O 型星自身に由来するという考えや星風衝突に由来する成分が広範囲に広がっているという考えもあるが、未だ決着していない。

私は、特に大質量星同士の連星系で起きているとされる星風衝突現象に注目した。過去の X 線観測では、検出器のエネルギー分解能の悪さなどのため、元素由来の輝線が分離できず、より詳細な物理パラメータの取得が困難であった。現在、分光器を搭載した Chandra 衛星や XMM-Newton 衛星の登場により、得られる情報は格段に広がったといえる。本研究では、主に XMM-Newton 衛星により大質量星からの X 線を観測し、O 型星、WN 型 WR 星、WC 型 WR 星と系統立てて扱い、大質量星では、こういったところから X 線が出ているかについて、X 線のスペクトル解析や時間解析により、さらに明らかにしていくことを目標としている。

## 2. 解析結果

分光器を搭載した XMM-Newton 衛星を主に用いて、大質量星からの X 線を観測し、O 型星、WN 型 WR 星、WC 型 WR 星と系統立てて扱い、大質量星では、こういったところから X 線が出ているかについて、X 線のスペクトル解析や時間解析による調査を実施した。

主系列 O 型星連星系 –HD57060 の観測と解析結果–

HD57060(UW CMa) は、O 型星同士の連星系であり、距離 1.5kpc に位置し、約 4.4 日の連星周期を有する (Stickland, 1989)。HD57060 は、2004 年 10 月 22 日 (21 ksec) と 24 日 (19 ksec) の計 2 回、約 40ksec にわたって XMM-Newton 衛星により観測が行われた。

観測日ごとに得られたスペクトルから、少なくとも X 線放射領域は 0.6keV 以下の定常成分と 0.6keV 以上の変動成分の 2 成分から成ることが分かり、低エネルギー成分 (0.3–0.6 keV) と高エネルギー成分 (0.6–8.0 keV) に分けて、光度曲線を作成した (Fig. 1)。その結果、2004 年 10 月 22 日の観測中に高エネルギー成分の明らかな減光が確認できた。次に、この結果を元に、Fig. 1 の A, B, C の時間帯に分けて、スペクトル解析を行った。定常成分と変動成分の少なくとも 2 成分の存在が考えられ、解析では 3 温度の熱平衡プラズマモデルでフィッティングを行った。フィッティングの際、2 温度フィッティングの結果を用いて、0.1keV と 0.5keV の熱平衡プラズマを定常成分として考え、その温度を固定し、最高温度成分のみを求めた。Fig. 2 は、各時間帯ごとのスペクトルフィッティング結果得られたパラメータである。上から最高温度、高温成分のエミッションメジャー、X 線光度 (0.5–10.0keV) を表している。温

度はエラーの範囲で一致しているが、エミッションメジャーと X 線光度の低下が確認できる。これは、高温成分の寄与が時間とともに低下していることを示しており、このことから、最高温度成分は大きく星風衝突に関係していると考えられる。さらなる検証には、連星位相の特定を含めた連星系のジオメトリと X 線時間変動との同期性の確認が待たれる。

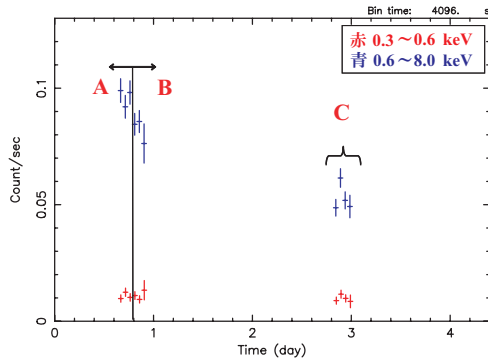


Fig. 1: HD57060 の X 線光度曲線

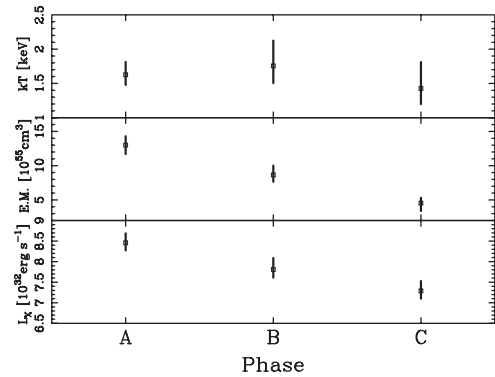


Fig. 2: 各 Phase のフィッティング結果

### WN 型 W-R 連星系 – WR141 の観測と解析結果 –

WR141(HD193928) は、WN 型 WR 星と O 型星の連星系であり、距離 1.26kpc に位置し、21.6895 日の連星周期を有する (van der Hucht, 2001; Marchenko et al., 1998)。可視光観測から連星周期に依らない Intrinsic な変動が確認されており、これは、輝線成分ではなく連続成分の変動であるとされているが、詳細はよく分かっていない (Khalack, 1996)。X 線帯域においてもそのような変動が確認されるかどうか、非常に興味深い天体である。WR141 は、2006 年 5 月 21 日 (34.4 ksec) に XMM-Newton 衛星により観測が行われた。

光度曲線から、連星周期 (約 21 日) よりはるかに短い、約 5 時間にわたる時間変動を確認した (Fig. 3)。変動のピークは定常時の約 3 倍の強度であった。この時間変動の起源を調査するため、定常時 (A)、ピークの前 (B)、ピークの後 (C) の 3 つの時間帯にわけてスペクトル解析を行った。吸収を受けた一温度の熱平衡プラズマモデルを仮定し、フィッティングを行った結果、プラズマ温度は、全時間でエラーの範囲で一致し、有意な変動は得られなかった。しかし、吸収値とプラズマの規模を示すエミッションメジャーに違いが見られた (Fig. 4)。これは、ピーク前後における、プラズマの規模が変化したことを示している。これは Feldmeier et al. (1997) で予測されていた星風の密度変化であると考えられ、プラズマ温度が変化せず、エミッションメジャー ( $\propto \int n_i n_e dV$ ) が変化していることから、この可能性は高いといえる。また、連星間距離 (58 太陽半径 ~ 約 4000 万 km) と星風の終端速度 ( $1700 \text{ km s}^{-1}$  を仮定) から得られる星風の時間スケールは、約 6 時間半であり、変動の時間スケール (約 5 時間) も十分説明可能である。

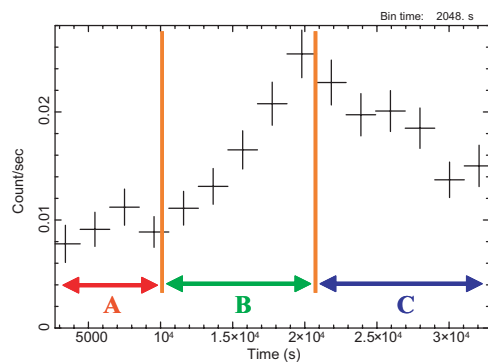


Fig. 3: WR141 の X 線光度曲線 (2.0–8.0 keV)

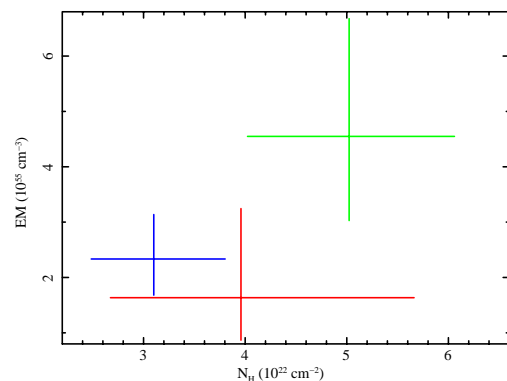


Fig. 4:  $N_H$  vs. E.M. (時系列は赤、緑、青の順)

## WN 型 W-R 星 –他の W-R 星の観測と解析結果–

現在までに、WC 型 WR 星の単独星は Chandra 衛星や XMM-Newton 衛星などにより 8 天体について観測がおこなわれたが、有意な X 線は検出されていない (e.g., Oskinova et al. 2003)。これは、星風中で発生した X 線が自身の星風中で吸収されている (自己吸収) ためであると現在では考えられている。そこで今回、WC 型星の前進化段階である WN 型星について、X 線帯域でどのような傾向を示すかを統計的に調査を行った。

解析では、Chandra 衛星、XMM-Newton 衛星の公開データを用いた。17 天体 (単独星:連星系=7:10) の観測データを解析し、吸収を受けた一温度成分の熱平衡プラズマモデルを採用した。一温度で再現できない天体では、さらにもう一温度の成分を加え、二温度成分でフィッティングを行った。結果、前節で解析した WR141 以外からは、観測時間内に有意な X 線時間変動は観測されなかった。すでに報告されている WN 型星の観測結果も加えて、統計的な調査を行った。絶対光度と X 線光度との相関を調査した。Fig. 5 は、赤を WN 型単独星、緑を WN 型連星系としてプロットしている。早期型星 (OB 型星) では X 線光度  $\sim 10^{-7} \times$  絶対光度の関係があることが知られている。しかし、WN 型星では、その相関は得られなかった。連星系に関しては、右上がりのある相関が期待できそうであるが、プロット数が足りないため、相関を得るに至らなかった。

また、解析を行った単独星 7 天体中、3 天体から 2keV 以上の高温成分が確認された (報告されている天体でもいくつか確認されている)。この 3 天体が連星系であるならば、星風衝突で、この成分を説明することができる。現在のところ、これら 3 天体は、伴星の存在が確認されておらず、新たな観測による伴星の有無の確認が期待される。今回の調査から、WR 星の X 線観測によって、その連星性を見つけ出せる可能性が出てきたといえる。これらの単独星が連星系であるとすると、WN 型単独星は、 $2 \sim 3 \times 10^{31}(\text{ergs s}^{-1})$  の X 線上限光度をもつ、もしくは、WN 型星からの X 線は WC 型星で考えられているように、自身の星風による吸収をかなり受けている可能性がある。

## WC 型 W-R 連星系 –はえ座 $\theta$ 星の観測と解析結果–

はえ座  $\theta$  星 (WR48, HD113904) は、WC 型星と O 型星の分光連星で、連星周期 19.1375 日 (Hill et al., 2002)、距離 2.27kpc (van der Hucht, 2001) であることが分かっている。はえ座  $\theta$  星は 2004 年 7 月 20 日から 21 日まで約 1.3 日 (112.7 ksec) にわたって、XMM-Newton 衛星により観測された。観測時のジオメトリーから、星風衝突の青方偏移がスペクトルで確認できると考えられる。

得られたスペクトルから様々な元素からの輝線が確認できた (Fig. 6: それぞれの色は搭載検出器を示している)。また、輝線同定から、様々な元素からの He-like 輝線 (電離され、電子が 2 個しかない状態の元素から放出される輝線) を確認できた。He-like 輝線は、各元素ごとにプラズマ温度が制限されている。今回のような様々な元素からの He-like 輝線はプラズマが多温度にわたっている証拠である。そこで、多温度の熱平衡プラズマモデルを採用し、フィッティングを行った。Fig. 6 における実線は、各検出器の Best-fit に対応している。

スペクトル解析の結果、0.49keV 付近、0.87keV 付近にそれぞれ、モデルとの残差を確認した。0.49keV 付近の残差は 5 階電離した炭素 (C VI) の RRC (Radiative Recombination Continuum 放射性再結合) であり、0.87keV 付近の残差は 7 階電離した酸素 (O VIII) の RRC に対応している (WR 星で初めて、酸素の RRC を確認した)。また、RRC 構造をモデルフィッティングした結果、プラズマ温度が、約 5 万度 (エラーの範囲で、36000–68000 度であった) となり、はるかに低温なプラズマの存在を示唆していた。

次に、十分統計がある 6 本の輝線のズレを調査した。その結果、予想とは異なり、全体で  $640_{-20}^{+40} \text{ km s}^{-1}$  の赤方偏移を示した。これは、観測時のジオメトリーから予想された青方偏移と矛盾している。また、RRC 構造も約  $730 \text{ km s}^{-1}$  の赤方偏移を示していた。

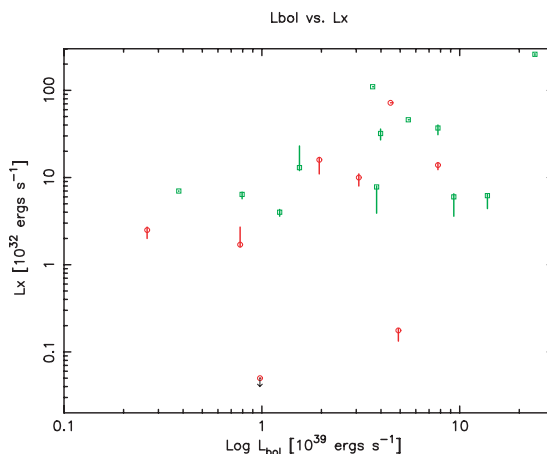


Fig. 5: 絶対光度と X 線光度

今回ののはえ座  $\theta$  星の X 線観測から、高速のプラズマによる赤方偏移を低温成分でも確認した。この観測事実から、高温成分だけでなく、低温成分も星風衝突に由来する可能性が高まったと考えられる。さらに各元素からの輝線だけでなく、低温成分 (RRC 構造) も同じくらいの速度で遠ざかっていたことは、低温成分が星風衝突領域に近いところで生じている可能性を示している。赤方偏移に関しては、可視光観測の結果から示唆されているはえ座  $\theta$  星三重連星説から説明できる。

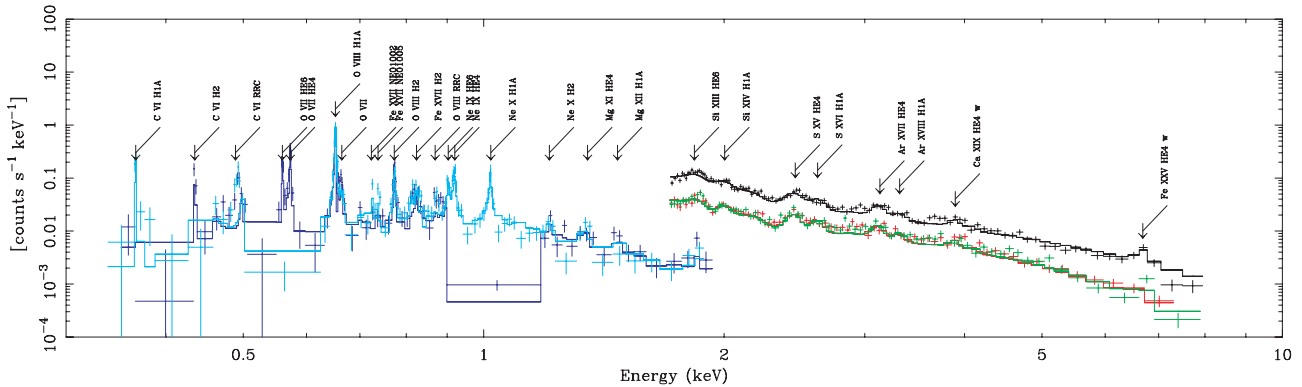


Fig. 6: はえ座  $\theta$  星の X 線スペクトル

### 3. 結論

本研究では、主に X 線天文衛星 XMM-Newton による観測データを用いて、大質量星の解析を行い、以下の結果が得られた。

#### 1. 大質量星における X 線の光度変動の起源

主系列 O 型連星系 HD57060 の観測から、大質量連星系における X 線光度の周期依存性が、最高温度成分のみ寄与していることを確認した。これは、いくつかの天体で確認されていた星風同士の衝突が X 線光度の周期依存性に深く関係しているという観測事実をさらに支持する結果であった。一方、WN 型 WR 連星系 WR141 の観測では、WR 星連星周期より短い有意な光度変動を確認した。スペクトル解析の結果、エミッションメジャーの変動をしており、温度が誤差の範囲で一致していたことから、これは、星風中の密度変化によって生じたと考えられる。

#### 2. WN 型星の連星性

WN 型 WR 星の統計的な調査からは、X 線光度と他の物理パラメータとの強い相関は得られなかったが、解析を行った単独星 7 天体中 3 天体から星風衝突の可能性を示す高温成分 ( $>2\text{keV}$ ) が確認された。これにより、WR 星の X 線観測からその連星性を得る、新たな可能性を得ることができた。

#### 3. はえ座 $\theta$ 星の高温プラズマの起源

WC 型 WR 連星系はえ座  $\theta$  星の詳細なスペクトル解析を行い、様々な元素由来の He-like 輝線から 3000 万度に及ぶ高温成分の存在、RRC 構造から約 5 万度の低温成分の存在をそれぞれ確認した。高温成分が全体で、約  $640\text{ km s}^{-1}$  の赤方偏移をしており、低温成分も約  $740\text{ km s}^{-1}$  で赤方偏移していることが分かった。この偏移は、観測時の WR 星と O 型星のジオメトリーでは説明できなかった。私は、この解釈として、可視光観測により得られた「はえ座  $\theta$  星が 100AU 離れた O 型超巨星との三重連星である」という報告を元に、X 線放射領域を再度検討し、星間距離が数 AU である他の WR 連星系よりはるかに大規模な、100AU 以上離れた天体との星風衝突によると結論づけた。さらに、高温成分と低温成分がどちらも同様の速度で赤方偏移していたことから、これらの成分は星風衝突領域から出ていると考えられ、はえ座  $\theta$  星からの X 線は高温成分から低温成分にかけて星風衝突が支配していることが新たに分かった。

#### 参考文献

Feldmeier, A. et al. 1997, A&A, 320, 899  
 Hill, G. M. et al. 2002, MNRAS, 335, 1069  
 van der Hucht, K. A. 2006, A&A, 458, 453  
 van der Hucht, K. A. 2001, NewAR, 45, 135  
 Khalack, V. 1996, LIACo., 33, 239

Maeda, Y. et al. 1999, ApJ, 510, 967  
 Marchenko, S. V. et al. 1998, PASP, 110, 1416  
 Oskinova, L. M. et al. 2003, A&A, 402, 755  
 Stickland, D. J. 1989, The Observatory, 109, 74