

令和元年6月13日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17667

研究課題名(和文) X線分光を用いた大質量星の星風測定

研究課題名(英文) Stellar wind measurements for Colliding Wind Binaries using X-ray spectra

研究代表者

菅原 泰晴 (Sugawara, Yasuharu)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・招聘研究員

研究者番号：80611425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、恒星進化モデルの鍵となる「大質量星の質量放出率」を求めするため、星風衝突を起こしている楕円軌道の連星系のX線分光モニタリングを行った。星風衝突領域が非常に強いX線を放つため、連星間距離の違いにより豊富なプラズマサンプルを得ることができ、X線吸収量の変化を追うことで、従来の手法に比べて2倍以上精密に質量放出率を求めることができた。連星周期が30日から10年以上に至る様々な星風衝突連星に適用させ、おのおのの質量放出率を求めることに成功した。新たな星風測定手法が様々な周期の天体へ適用できることが示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

初期宇宙で星は大質量星として誕生すると考えられており、大質量星の進化モデルは初期宇宙の研究にも大きな影響を与える。しかしながら、質量放出率の不定性などにより、大質量星の進化は完全には理解できていない。本研究で得られる不定性の少ない大質量星のパラメータは、大質量星の進化モデルに対して制限を与える可能性があり、銀河の化学的・力学的進化理論へのフィードバックが期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to measure "the mass-loss rate of massive star" which is a key of stellar evolution model, X-ray spectroscopic monitoring of elliptical-orbit colliding wind binaries was performed. Since the plasma in the wind-wind collision region emits very strong X-rays, various plasma samples can be obtained by changing the binary separation. By measuring the change in the amount of X-ray absorption, it was possible to calculate mass-loss rate more than twice as accurately as the conventional method. We applied this method to various Colliding wind binaries from 30 days to 10 years of orbital period and succeeded in measuring each mass-loss rate. This study has shown that the new stellar wind measurement method can be applied to the massive binary with various orbital periods.

研究分野：X線天文学

キーワード：宇宙物理 大質量星 X線天文学 質量放出 恒星進化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大質量星は、エディントン限界で光り続けている為、星風により星表面は吹き飛ばされている。現在のところ、太陽の60倍以上の重さを持つ大質量星は、内部の核融合反応(CNOサイクルによる水素燃焼、ヘリウム燃焼、炭素燃焼、酸素燃焼)に応じて、

0 star Of/WNH LBV WN WC SN Ibc

と進化すると考えられており(例えば、Groh et al. 2014 A&A, 564, 30)、その星風中には、核融合反応によって生成された多種の元素が含まれている。つまり、大質量星では進化段階から最後の超新星爆発のすべての過程で、星風や爆風で大きな運動量および核融合反応の生成物(重元素や金属)を大量に供給する。よって、大質量星の進化を理解することは、銀河、ひいては宇宙の進化そのものの解明に直結するため、天文学の最重要命題の一つである。

現在、大質量星進化モデルと観測結果の不一致が報告されており(Sander et al. 2012 A&A, 540, 144)、大質量星の進化は完全には理解できていない。大質量星の進化モデルでは、内部の核融合反応を反映する元素組成比と、進化のタイムスケールに影響する質量放出率が重要なパラメータとなっている。これまでに、可視近赤外線の分光観測によって、ヘリウム、炭素、窒素、酸素までの元素組成比が得られている。それに対して、質量放出率の不定性が大質量星進化の理解を妨げている。

観測的に質量放出率を求める際は、電波観測で星風が作り出すダストの熱的放射量を測定している。しかし、星風中には粗密(Clumping)があるため、放射量から求めた質量放出率には3倍以上の不定性が生じる(例えば、Smith 2014 ARA&A, 52, 487)。この問題に加えて、質量が大きくなるにつれ、連星を形成しやすくなり、大質量星の80%が連星系を成していることが、観測的に分かってきた(Duchêne and Kraus, 2013 ARA&A, 51, 269)。連星系の場合、主星や伴星の光球からの放射だけでなく、それらの星風が衝突してできる星風衝突領域や、星風衝突の残骸として形成される大量のダストが放射源となるため、電波・可視近赤外の波長では、これらの成分の切り分けが非常に困難である。

2. 研究の目的

60太陽質量以上の初期質量を持つ大質量星をターゲットとし、我々が開拓したX線観測の手法を適用する。特徴的な軌道を持つ大質量連星系に対してX線分光観測を実施し、X線吸収量と光度の変化から、質量放出率を求め、まず手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

大質量星の星風は、その表面では速度が0であるが、光圧により加速されて行き、最終的には $v = 1000 \sim 3000$ km/sにも達する高速風になる。この加速の効率の良さは \dot{M} を用いて、

$$v(r) = v_{\infty} \times (1 - R_{WR,0}/r)$$

として記述される。 $R_{WR,0}$ はそれぞれの星の半径で、 $v(r)$ は星の中心から半径 r 離れた場所の星風速度である。 \dot{M} が大きいと星の加速は遅く、小さいと速いことを意味する。WR星とO型星の連星系の場合、星の質量放出率の低いO型星では星が十分加速されないうちに星風どうしの衝突がおこることを意味する。長周期楕円軌道の連星系の場合、近星点に近づくにつれてO型星の近く、つまり星風が加速しきれないところで衝突が起こり、ますますO型星側で衝突が起こるようになる。

先行研究として、我々は7.9年周期連星系WR140の近星点通過時にモニター観測をすざく衛星で行った。その結果、X線光度が星風衝突の理論どおり、近星点近傍フェーズから減り始めていることを確認した。さらにこの減光は、主星と伴星の質量放出率の比(星風どうしの運動量平衡点)がある値の時に再現できることがわかった。X線を放射するプラズマ(星風衝突領域)の位置がわかると、そこから出るX線が受ける吸収量から質量放出率を求めることができる。(Sugawara et al. 2015 PASJ, 67, 121)。この手法をいくつかの大質量連星系のX線観測データへ適用する。

4. 研究成果

本研究では、数日から10年以上に及ぶ連星周期をもつ大質量連星系に対して、X線分光観測を行い、得られたスペクトルから質量放出率を求めることができた。以下に、各天体の研究成果を挙げる。

WR21a(周期31.673日)は、連星軌道が精密に求められている数が少ない大質量連星系であり、X線モニタリングを用いることで、星風衝突研究の良い実験場となることが期待されている。我々は、集光力の大きいXMM-Newton衛星によって2013年6月から7月に実施された、近星点

と遠星点付近を含む観測のデータ(4 観測、計 93 ksec)及び、2013 年 10 月以降に実施した Swift 衛星によるモニタリング観測で、全観測データ(75 観測、計 166 ksec)を用いて、WR21a の吸収量及び X 線光度の変動を調査した。解析の結果、近星点付近の急激な X 線光度の減光および、X 線吸収量が遠星点から近星点にかけて約 2 倍増加したことを確認した。吸収量の変動は、一様な球対称星風を仮定することで、WR 星風による吸収の変化として説明でき、質量放出率を今までにない精度で測定することができた。

WR25(連星周期~208 日)は、X 線帯域で最も明るい WR 星であり、X 線観測データが非常に豊富なターゲットである。多くの観測データの中から、集光力があり質の高いスペクトルが得られる XMM-Newton 衛星のデータを採用し、スペクトル解析を行い、X 線吸収量が連星位相に伴って変動していることを確認した。WR 星からの球対称な星風による吸収を仮定した結果、WR 星の質量放出率が 5×10^{-5} 太陽質量/年 であると求めることができた。また、観測された X 線吸収量の変化が軌道傾斜角 10 度以下で再現され、連星の軌道傾斜角を制限することに初めて成功し、本研究手法によって連星軌道情報の測定にも有効であることを示した。

WR19 は、近年、軌道要素が判明した長周期連星(周期 10.1 年)であり、ダストによる周期的な赤外線光度変動を起こすことが知られている(Williams et al. 2009 MNRAS, 395, 2221)。2017 年 5 月に近星点を迎えると予想されており、急激な連星間距離の変動に伴う X 線吸収量や X 線光度の増加が期待されていた。そこで、我々は 2016 年 5 月から 2017 年 5 月にかけて Swift 衛星及び XMM-Newton 衛星を用いて、計 11 回の X 線観測を実施した。近星点を含む約 1 年の観測データを解析した結果、WR19 から初めて X 線スペクトルを取得することに成功した。各連星位相のスペクトルは、一温度熱放射モデルで再現され、連星位相に伴う X 線変動を捉えることに成功した。X 線光度は、近星点付近で最大光度となったが、連星間距離に反比例して変動する理論予測(e.g., Usov 1992 ApJ, 389, 635)より暗い光度であった。これは、連星間距離の減少にともない、伴星の星風運動量が小さくなり、その結果、星風衝突領域の形状が変化したと解釈できる。また、WR 星の質量放出率が 5×10^{-5} 太陽質量/年 であると初めて求めることができた。

WR125 は、過去に一度だけダストによる赤外線増光が報告されている天体(Williams et al. 1994 MNRAS266, 247)である。星風衝突連星系における赤外線増光は、楕円軌道を持つ長周期連星系で報告されており、WR125 はその中でも非常に長周期(20 年以上)である可能性が指摘されている。さらに、WR125 は非熱的電波放射も確認されており(Cappa et al. 2004 AJ, 127, 2885)、星風衝突連星系の粒子加速実験場としても非常に興味深い天体である。我々は、2016 年 12 月から 2017 年 5 月にかけて、Swift 衛星及び XMM-Newton 衛星を用いて、4 回の即応観測を実施し(計 33 ksec)、WR125 から初めて X 線スペクトルを取得することに成功した。得られた X 線スペクトルは一温度熱放射モデルで再現され、X 線光度は他の WR+0 型の星風衝突連星系と同程度であった。4 観測間で光度の違いが確認されなかったことから、少なくとも、観測期間中は急激な光度変動が期待される近星点付近ではなく、WR125 は 25 年以上の長周期連星である可能性が高いことが分かった。一方、得られた X 線吸収量は星間吸収量に比べやや大きく、X 線放射領域が WR 星風による吸収を受けていると解釈できた。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

Midooka, Takuya; [Sugawara, Yasuharu](#); Ebisawa, Ken, Long-term X-ray variation of the colliding-wind Wolf-Rayet binary WR 125, 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 484, Issue 2, p.2229-2233

DOI: 10.1093/mnras/sty3488

[Sugawara, Yasuharu](#); Maeda, Yoshitomo; Tsuboi, Yohko, Stellar wind measurements for Colliding Wind Binaries using X-ray observations, 2017, IAUS, 査読無, Volume 329, pp. 448-448

DOI:10.1017/S1743921317003325

[Sugawara, Yasuharu](#); Maeda, Yoshitomo; Hamaguchi, Kenji; Tsuboi, Yohko, X-ray spectral variability of the colliding wind binary WR140 - the origin of the cool plasma component, 2017, 7 years of MAXI: monitoring X-ray Transients, 査読無, p.193 <http://maxi.riken.jp/conf/sevenyears/pdf/toc.html>

[学会発表](計 8 件)

菅原泰晴、X 線分光を用いた Wolf Rayet 連星系 WR 25 の星風測定、日本天文学会 2018 年秋季年会、2018

御堂岡拓哉, 菅原泰晴, 海老沢研、星風衝突 Wolf Rayet 連星系 WR 125 の X 線光度変動、日本天文学会 2018 年秋季年会、2018

Yasuharu Sugawara, An X-ray study of Wolf-Rayet binaries, IAUS 346: High-mass X-ray binaries: illuminating the passage from massive binaries to merging compact objects, 2018

菅原泰晴, 前田良知, 坪井陽子、Swift/XMM Newton による Wolf Rayet 連星系 WR 125 の X 線観測、日本天文学会 2018 年春季年会、2018

菅原泰晴, 前田良知, 坪井陽子、長周期 Wolf Rayet 連星系 WR 19 の X 線モニタリング観測 II、日本天文学会 2017 年秋季年会、2017

Yasuharu Sugawara, X-ray variation in colliding wind binaries, Variable Galactic Gamma-Ray Sources (IV), 2017

Yasuharu Sugawara, Yoshitomo Maeda, Yohko Tsuboi, The X-ray monitoring of the long-period colliding wind binaries, The X-ray Universe 2017, 2017

菅原泰晴, 前田良知, 坪井陽子、長周期 Wolf Rayet 連星系 WR19 の X 線モニタリング観測 I、日本天文学会 2017 年春季年会、2017

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。