

降着型パルサーの「鉄輝線」の精密 X 線分光で垣間見る原子物理

概要

永井 悠太郎 京都大学 理学研究科博士課程学生、榎戸 輝揚 同准教授、辻本 匡弘 JAXA/ISAS 准教授、山口 弘悦 JAXA/ISAS 教授ら XRISM コラボレーションの Cen X-3 解析チーム、Xiao-Min Tong 筑波大学准教授ほかの研究チームは、X 線分光撮像衛星 XRISM を用いた降着型パルサー「ケンタウルス座 X-3」の観測データから、従来、中性の鉄原子起源と考えられていた約 6.4 keV の Fe K α 輝線が、実際には電子が 5 個程度失われた「低電離状態」の鉄イオンに由来することを初めて明らかにしました。このような低電離状態の鉄は、地上実験では安定して生成・保持することが困難です。本研究では、マクロで極限的な天体現象を宇宙の実験場として活用し、原子内の電子状態のミクロな物理過程の違いを診断する新手法を提示しました。これは、XRISM がエクストラサクセスのひとつに掲げた「新しいプラズマ物理学の研究に資する観測データの取得」に沿った成果となります。

本研究成果は、2026 年 4 月 8 日に学術誌「*Publications of the Astronomical Society of Japan*」に掲載されました。

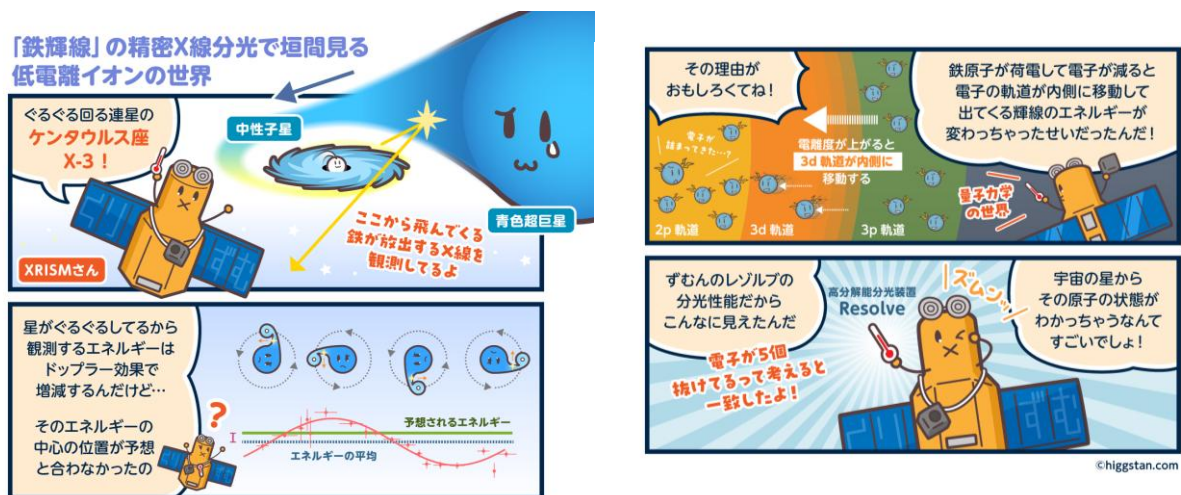


図 1：本研究の概要

1. 研究の背景

鉄はその原子核の安定性から宇宙に豊富に存在しており、励起された際に蛍光輝線を出しやすい物質です。そのため、X線天文学において、Fe K α 輝線（2p 軌道から 1s 軌道に電子が遷移する際に生じる約 6.4 keV の蛍光輝線）は、X線源の周囲に存在する物質の状態を調べるための重要な手がかりとして、さまざまな天体で広く用いられてきました。その際に、鉄の電離度（電子がどの程度剥ぎ取られたか）は重要な要素の一つです。

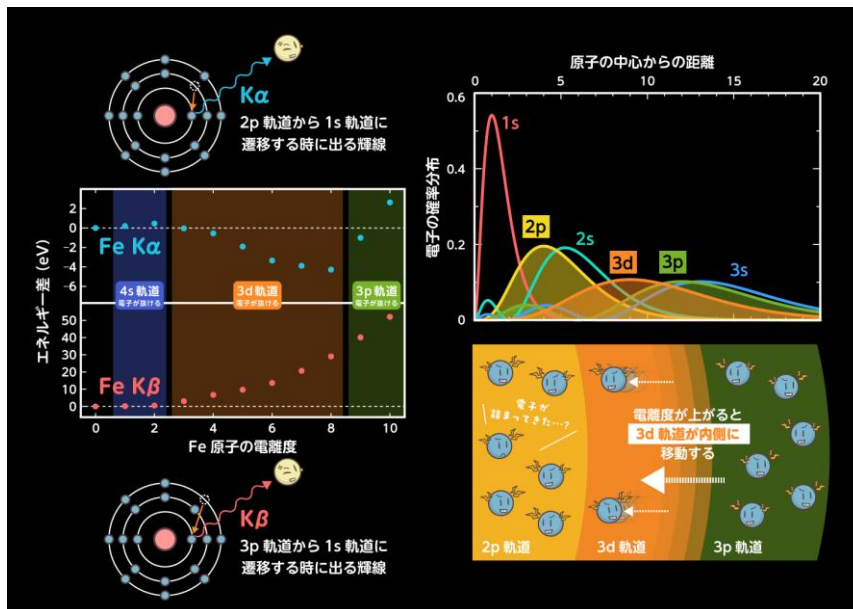


図2 左：電離度に対する中性輝線からのエネルギー差の変化と輝線放射の模式図。3d 軌道から電子が抜けていく際に、Fe K α 輝線のエネルギーが下がっていることが分かります。右上：各電子軌道の下率密度分布。右下：電離度の上昇に伴う 3d 軌道の収縮についての模式図。

輝線のエネルギーは、鉄の電離度に依存します。単純に考えると、電離が進むにつれて電子一つあたりが受ける原子核からの電気的引力は大きくなり、K α 輝線のエネルギーは高くなると考えられます。しかし、図2左に示すように、鉄輝線では低電離状態にある場合に限り、エネルギーが僅かに低下する電離状態があることが理論的に知られています。この現象を鉄原子の電子構造に基づいて説明します。基底状態の中性鉄の電子配置は $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$ (右肩の数字がそれぞれの軌道にある電子の個数を意味します) です。鉄では電離が進むにつれて、外側の軌道から順に、4s 軌道（電子の個数：2 個）、3d 軌道（6 個）、3p 軌道（6 個）の順で電子が失われていきます。このうち、3d 軌道の電子が失われる過程では、3d 軌道内での電子間反発が弱まり、結果として 3d 軌道が原子核側へ収縮していきます(図2右下)。Fe K α 輝線は 2p \rightarrow 1s 遷移、Fe K β 輝線は 3p \rightarrow 1s 遷移に対応しており、それぞれの電子の確率密度のピーク位置は、原子核からの距離で $1s < 2p < 3d < 3p$ の順になっています(図2右上)。そのため、3d 軌道の収縮により 2p 軌道の内側にある電子密度が増加し、電子による遮蔽効果が強まることで、鉄 K α 輝線の遷移エネルギーは Fe 原子の電離度が 3～8 の範囲で低下します(図2左)。一方で、3p 軌道も 3d 軌道からは遠ざかりますが、3p 軌道は 3d 軌道の外側に位置するため、その影響は、電子を失った際に生じる一電子あたりのポテンシャルの変化と比べると小さく、遷移エネルギーは電離が進むにつれ、ほぼ単調に増加します。

このような低電離状態の鉄を地上実験で安定して生成・保持することは難しく、さらに天体観測においても、従来の X 線衛星に搭載されていた CCD 検出器ではエネルギー分解能（約 150 eV）が不足していたため、中性鉄由来の輝線と比較して数 eV 程度しか離れていないエネルギー差を検出することは事実上不可能でした。XRISM 衛星に搭載された高分解能分光装置 X 線マイクロカロリメータ（※1）「Resolve」は、約 6.4 keV 付近

で史上最高水準のエネルギー分解能（約 4.5 eV@6 keV）とエネルギー決定精度（約 0.1 eV@6 keV）を達成し、鉄輝線のエネルギーから中性と低電離状態の区別が初めて可能となったのです。

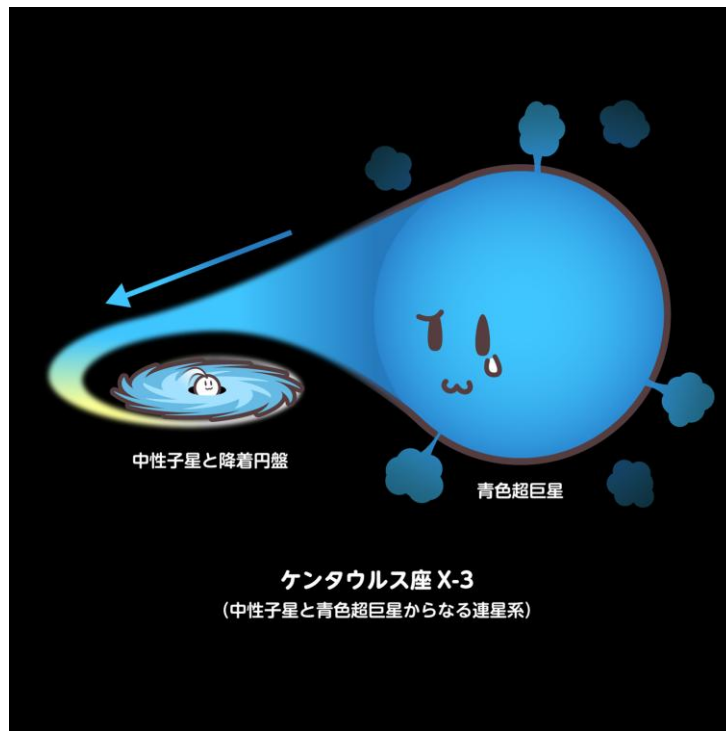


図 3：降着型パルサー「ケンタウルス座 X-3」の模式図

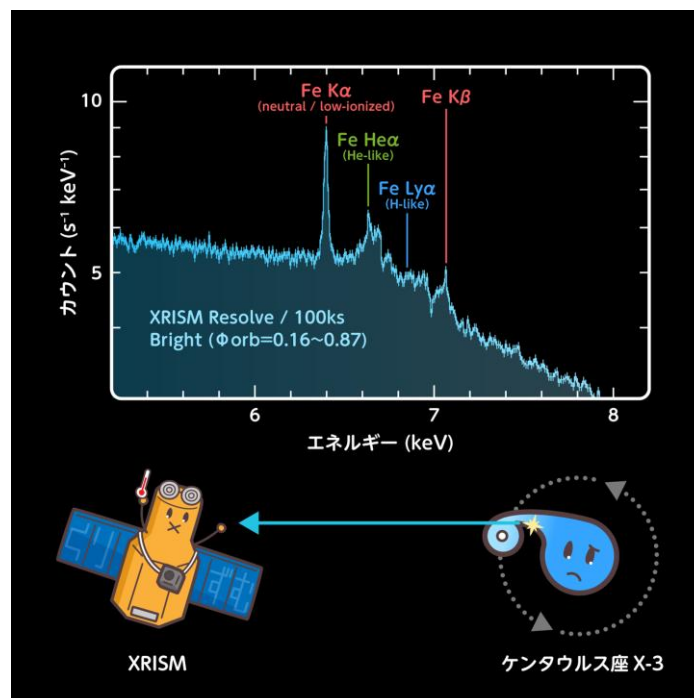


図 4：上：ケンタウルス座 X-3 の Resolve スペクトル。低電離した Fe K α 輝線、Fe K β 輝線に加えて、高階電離した Fe He α 輝線、Fe Ly α 輝線が確認できます。下：XRISM 観測の模式図。低電離した鉄輝線は、恒星から中性子星に向かう物質の流れからの放射であると考えられています。

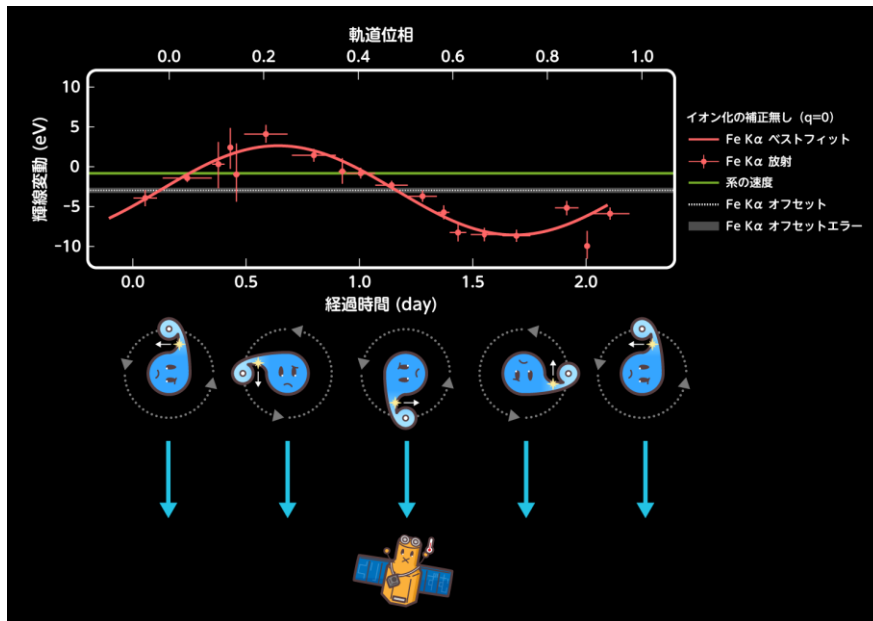


図5 上：中性鉄を仮定し、イオン化の補正しなかった場合の連星運動による Fe K α 輝線の変動。系の速度と Fe K α のオフセットは一致するのが自然ですが、この場合には数 eV 程度の誤差があることが確認できます。下：XRISM から見たケンタウルス座 X-3 の連星運動。この運動のドップラー効果によって正弦関数状の輝線変動が生じます。

2. 研究手法・成果

XRISM 衛星は、青色超巨星と中性子星からなる降着型 X 線パルサー（※2）「ケンタウルス座 X-3」（図 3）を、その連星周期（約 2 日）をカバーするように観測しました。本衛星に搭載の Resolve 検出器により、この天体に由来する中心エネルギーが約 6.4 keV の Fe K α 輝線、約 7.1 keV の Fe K β 輝線などが検出され（図 4）、Fe K α 輝線のエネルギーが中性子星の公転運動に対応した正弦関数状のドップラーシフトを示していることが報告されています[1]（図 5）。この報告では、Fe K α 輝線は、中性子星から放射された強い X 線が青色超巨星の表面付近に照射された際に生じる再放射であると推定されました。一方で、輝線変動の中心値（オフセット）は、光学観測から求められているこの連星系の速度と比較して、大きく赤方偏移しているという結果が得られました。しかし、この先行研究では鉄輝線を中性鉄由来と仮定していたため、電離度の影響が考慮されていませんでした。そこで本研究では、鉄輝線のエネルギーシフトに寄与する主要因であるドップラーシフトと電離度の効果を分離し、鉄の電離度を定量的に求めることを試みました。そのために、本研究では Fe K α 輝線に加えて Fe K β 輝線にも着目しました。一般に、Fe K α 線と Fe K β 線は同一の領域から放射されていると考えられ、そのドップラーシフトはほぼ等しいと考えられます（厳密には、Fe K α 輝線と K β 輝線のエネルギー差により、本研究の場合ではドップラーシフトに 0.6 eV 以下のずれが生じますが、これは結果には影響を与えないほど十分に小さい値です）。そのため、K α 輝線と K β 輝線のエネルギー差は電離度のみに依存する量となり、このエネルギー差から、鉄の平均的な電離度は約 5 であることが求められました。さらに、この電離度を用いてドップラーシフトの解析を補正した結果、Fe K α 輝線の変動のオフセットは、連星系の速度によるエネルギーシフトと 1 シグマ誤差の範囲で一致することが確認され、両者のずれについての問題を解決することができました。

3. 波及効果、今後の予定

XRISM は、エクストラサクセスのひとつに「新しいプラズマ物理学の研究に資する観測データの取得」という目標を掲げていました。今回の成果は、この目標を明確に達成したことを意味します。

今回注目した低電離の鉄輝線は、X線連星の他にも、白色矮星やブラックホール、超新星残骸など、さまざまな天体で観測されています。本研究で提案する手法は、これら多様な天体に適用可能であり、強磁場・強重力場といった極限環境の物理を明らかにするとともに、精密 X 線分光時代における基盤的な診断法となることが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、独立行政法人日本学術振興会 (JSPS) の「研究拠点形成事業」(課題番号: JPJSCCA20220002) の助成を得ています。これに加えて、JSPS 科研費(課題番号 22H00158、22K03493、23H01211、JP25KJ0923)、科学技術振興機構 (JST) の SPRING プログラム (課題番号 JPMJSP2108、JPMJSP2110)、JST 創発的研究 JPMJFR2020 (sohatsu)、核融合科学研究所 (NIFS) 共同研究プログラム (NIFS25KRCQ001)、イスラエル科学財団 (課題番号 2617/25)、NASA (課題番号 80NSSC18K0978、80NSSC20K0883、80NSSC25K7064) によっても支援されています。また、米国エネルギー省の管轄のもと、ローレンス・リバモア国立研究所において契約番号 DE-AC52-07NA27344 に基づき実施されました。

5. 参考文献

[1] Mochizuki et al., 2024, Astrophysical Journal Letters, 977, L21

<用語解説>

※1 X線マイクロカロリメータ: 受け取った X線光子による微小な温度上昇によってエネルギーを測定する検出器

※2 降着型 X線パルサー: 主に中性子星と大質量星 (10 太陽質量以上の恒星) からなる近接連星系。このような連星では、大質量星から吹き出している星風などの物質が中性子星に質量降着することにより重力エネルギーを解放し、X線で明るく輝いています。

<研究者のコメント>

- X線のような高エネルギー放射をする天体である降着型パルサーが引き起こす大規模でダイナミックな天体現象から、原子レベルのミクロな物理過程を垣間見ることができるというのは驚くべきことです。今後は、そこで得られた原子物理の情報を手がかりとして、逆に大規模な天体現象の物理機構に迫っていくことが期待されます。(永井悠太郎)
- 世界中の X線天文学の先輩方が、長年にわたって開発を続けてこられた検出器と X線天文台を最大限に活用して、これからも新しい宇宙像を開拓できるように頑張ります。(榎戸輝揚)

<論文タイトルと著者>

タイトル: Energy shift of Fe-K fluorescence lines due to low ionization demonstrated with XRISM in Centaurus X-3 (XRISM によって示された、ケンタウルス座 X-3 における低電離を原因とする Fe-K 蛍光輝線のエネルギーシフト)

著 者: Yutaro Nagai, Teruaki Enoto, Masahiro Tsujimoto, Hiroya Yamaguchi, Yuto Mochizuki, Ehud Behar,
Lia Corrales, Paul A. Draghis, Ken Ebisawa, Natalie Hell, Timothy R. Kallman, Richard L. Kelley,
Pragati Pradhan, Shinya Yamada, Toshiyuki Azuma, Xiao-Min Tong

掲 載 誌: *Publications of the Astronomical Society of Japan*

DOI: <https://doi.org/10.1093/pasj/psag015>