



Title	Observational Studies of Ultraluminous X-ray Sources in Supercritical Accretion
Author(s)	善本, 真梨那
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101935
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (善 本 真 梨 那)	
論文題名	Observational Studies of Ultraluminous X-ray Sources in Supercritical Accretion (超臨界降着状態における超大光度X線源の観測的研究)
論文内容の要旨	
<p>本研究では、X線光度 $> 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ (0.3-10 keV) を持つ超大光度X線源 (Ultraluminous X-ray Source; ULX) の観測的性質の獲得を目的とする。ULX の正体としては、Eddington 限界を超えた超臨界降着状態のブラックホール (BH) もしくは中性子星 (NS)、亜臨界降着する中間質量ブラックホール BH (IMBH) が有力である。初期宇宙環境における超大質量ブラックホール (SMBH) の形成には、超臨界降着と重い BH が大きく寄与したと理論的に示唆されている。</p> <p>① 初期宇宙に似た低重元素量環境では、比較的重い BH が形成されやすいとされる。そこで、本研究では最も重元素量の低い環境下に存在する I Zw 18 ULX の正体に着目した。先行研究のデータに加えて、2014 年観測の Suzaku 衛星のX線公開データと、2024 年に新たに獲得した XMM-Newton 衛星の観測データ (PI:善本) を合わせ、スペクトルの長期変動を調査した。スペクトルモデリングの結果、2024 年までにスペクトル形状が円盤放射型からべき関数型に変化したことを発見した。また、円盤放射型の可能性のあるデータについて光度 L と内縁温度 T_{in} の関係は、$L \propto T_{\text{in}}^{2.1 \pm 0.4}$ と標準円盤 ($L \propto T_{\text{in}}^4$) から外れ、超臨界降着円盤を示唆していた。従って、I Zw 18 ULX の正体は、超臨界降着する恒星質量コンパクト天体であると考えられる。最も重元素量の低い環境に存在する ULX の正体は IMBH ではないと示した。</p> <p>② 自転に伴う周期的な光度変動 (パルス) を示す ULX パルサーは、超臨界降着状態の NS とされる。本研究ではX線観測の豊富な ULX パルサー NGC7793 P13 に着目し、2011 年から 2023 年に実施された 45 観測の公開データを用いて、光度と自転周期の長期的変化を調査した。その結果、3-10 keV 帯域のX線光度が、2021 年までに $\sim 10^{37} \text{ erg s}^{-1}$ まで減少したのちに 2022 年以降に再増光し、2023 年後半までに $\sim 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$ に到達したことがわかった。また、2020 年までに一定の自転周期変化率 ($\dot{P} = -3.9 \times 10^{-11} \text{ s s}^{-1}$) を示したパルスは、2020年から 2021 年に検出されず、2022 年の増光時に再検出された。このときの自転周期変化率は 2020 年以前の約 2 倍 ($\dot{P} = -6.8 \times 10^{-11} \text{ s s}^{-1}$) の値で一定であることを発見した。これは、約 10 年に及ぶ長期的な光度変動と、自転周期すなわち角運動量輸送量の関係を示唆する。さらに位相分解スペクトル解析の結果、2017 年からの減光時に off-pulse のハードネスに光度との相関が見られた一方で、on-pulse は一定であった。本結果は、降着流のジオメトリの変化を反映したものと考えられる。</p> <p>③ X線天文衛星 XRISM プロジェクトでは、軟X線撮像装置 Xtend の高感度・広視野を活用したX線突発現象の探索・速報の枠組み「XRISM/Xtend Transient Search (XTS)」を立ち上げた。これは、ポインティング観測を主目的としたX線天文衛星による新しい突発現象探索の形である。本研究では XTS のシステムを開発し、JAXA サーバー内に実装した。そして、2024 年 3 月から 9 月までの Performance Verification 期において、17 つのX線突発現象を速報した。これらの内訳は、主に恒星フレア・大質量X線連星 NS の増光現象で、ULX の検出は今後に期待される。高感度X線観測による突発現象の素早い検出・速報により多波長・マルチメッセンジャー連携観測を促進し、観測的性質の統一的理解を強力に推進する。</p> <p>本結果により、初期宇宙環境に似た低重元素量環境においても超臨界降着が駆動することを観測的に明らかにした。また、角運動量輸送の観点から、超臨界降着メカニズムについての新たな手がかりを得た。これにより、超臨界降着状態における質量輸送と角運動量輸送の関係についての理論研究の進展が期待される。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (善本 真梨那)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主 査	教授 松本 浩典
	副 査	教授 寺田 健太郎
	副 査	准教授 井上 芳幸
	副 査	准教授 小高 裕和
	副 査	准教授 増田 賢人
論文審査の結果の要旨		
<p>超大光度 X 線天体 (Ultra-Luminous X-ray source; ULX) は、銀河中心の巨大ブラックホール (BH) とは異なる点状 X 線天体で、その光度が中性子星のエディントン限界の 10 倍である $10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ を超えるものである。その正体としては、1) 通常の質量降着を起こしている 100 倍太陽質量を超える中質量 BH、2) 超臨界降着を起こしている恒星質量 BH、が考えられている。多くの場合どちらなのかは不明である。中質量 BH、超臨界降着のどちらも銀河中心巨大 BH の形成過程と密接に関連しており、その観点からも ULX は興味深い。</p> <p>まず善本氏は、極端に金属量の少ない矮小銀河 I Zw 18 中に存在する ULX に着目した。金属量の少ない銀河では大質量星が誕生しやすく、大質量星は寿命の最後に重力崩壊して中質量 BH を形成する可能性がある。実際、過去の X 線観測を使って、この ULX は中質量 BH であると結論されていた。善本氏は、自ら観測提案を行った新しい X 線観測データに加え、過去 10 年におよぶ X 線観測アーカイブデータを系統的に解析した。X 線スペクトルを多温度黒体放射モデルで解析した結果、温度—光度関係は、超臨界降着のものに近いことを見出した。また、時間変動を調査し、中性子星を示唆する周期変動はないことを示した。これらの結果から善本氏は、I Zw 18 中の ULX は、従来示唆されていた中質量 BH ではなく、超臨界降着を起こしている恒星質量 BH である可能性が高いと結論した。金属量の低い環境でも中質量 BH は簡単には形成されないことを示唆しており、金属量の少なかった宇宙誕生直後に出来たとされる巨大 BH の種の正体に対して制限を与える成果である。</p> <p>次に善本氏は、ULX NGC7793 P13 に着目した。この ULX は、周期的時間変動 (パルス) を示すことから、正体が超臨界降着を起こしている中性子星であることが判明している。そして NGC7793 P13 は、ULX パルサーの中で、もっとも数多く X 線観測が行われたものである。そのため、超臨界降着の物理を観測的に解明する上で、もっとも適した天体である。善本氏は、2011 年から 2023 年にわたる過去の X 線観測アーカイブデータを系統的に解析し、この ULX は 2011 年から 2017 年にかけて徐々に増光し、そして 2021 年に向けて徐々に減光してパルスが消え、そして再び増光して 2023 年には過去最高光度に達することを見出した。さらに 2011 年から 2021 年まではパルス周期の変化率が一定であったが、2021 年に変化率が突然 2 倍変化し、その後再び一定の変化率を示すことを発見した。通常、X 線光度は質量降着量と正の相関があると考えられており、そのため X 線光度は中性子星の角運動量変化率とも関係すると考えられている。善本氏の発見は、この標準的な描像とは全くかけ離れたものである。また、パルス周期の位相ごとの X 線スペクトルの変化も調査し、パルスピーク位相とパルスオフ位相では振る舞いが違うことも発見した。これらは、従来の超臨界降着モデルでは説明できない挙動であり、超臨界降着の物理に対して全く新たな知見を与える成果である。</p> <p>また善本氏は、XRISM 衛星の X 線 CCD 観測データを使って、ULX のような時間変動天体を高感度で検出する試みである XRISM Xtend Transient Search (XTS) 計画に大きく貢献し、数多くの成果を出した。まだ ULX の検出には成功していないものの、将来に期待が持てる成果である。</p> <p>よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分価値あるものと認める。</p>		