

## 論文審査の結果の要旨

氏名 小林 翔悟

本論文は 7 章からなる。第 1 章はイントロダクションとして、ブラックホールを含む連星系や超高輝度 X 線源(ULX)の発見の歴史とその観測的特徴が紹介されている。第 2 章では続いて、X 線による観測をもとにした ULX のスペクトル分類や放射機構を論じる。ULX の中心にはブラックホールあるいは中性子星といったコンパクト天体が存在し、周辺ガスが降着円盤を通して中心天体に降り積もることによりガスの持つ重力エネルギーが解放され、明るく輝くと考えられている。ULX のスペクトル概形は大きく 2 つに分類され、それぞれベキ則型と円盤型と呼ばれる。X 線光度とスペクトル型の変動の相関を解析することにより、降着円盤と高温コロナガスからの X 線放射機構や中心ブラックホールの質量を推定するという本研究の目標がここで提起される。

第 3 章では本研究の観測に用いた X 線観測衛星とその観測装置について解説している。三つの X 線衛星 Suzaku, XMM-Newton, NuSTAR について、その観測装置を紹介し、対象とするエネルギー帯域、分光解像度などの諸元をまとめている。検出器の実効面積を光子エネルギーの関数として表し、また計測された機器バックグラウンドレベルを明らかにし、本研究の解析に適していることを確認している。

第 4 章では合計 10 個の ULX 天体を選び出し、その選択基準を明らかにするとともに、母銀河の特徴をまとめている。本研究では X 線分光データの詳細な解析が必要となるため、近傍銀河にある明るい ULX を選び出した。それぞれの ULX と母銀河について、電波や赤外線など他波長帯での観測データも参考にし、天体周辺環境や、電波ローブの存在についても考察する。各観測衛星について観測時期や衛星軌道等を加味した詳細な解析を行い、背景雑音を除去した正確な分光データを得る。

第 5 章では、本研究で観測対象とした ULX の一つ一つについて、得られた X 線スペクトルとその時間変動を詳細に示し、スペクトルフィッティングを行うことによりコロナ電子温度や円盤内縁温度、さらには周辺ガスの中性水素柱密度を推定している。次に、高統計の分光データを得た 3 天体に対して、X 線連星系で見られるような、数千電子ボルト付近での鉄イオンとニッケルイオンに

よる線構造を探索する。対象とした ULX の X 線スペクトルは滑らかな連続光成分のみで記述可能であり、結果として対象天体のスペクトルには微細構造は見つからず、線等価幅 EW に換算して数十電子ボルト以下という制限を得る。

第 6 章では、コロナ電子温度と円盤内縁温度の比を表す無次元量  $Q$  を導入し、ULX の X 線光度と  $Q$  の変動の相関によって、ULX を特徴づけている。いくつかの ULX では、ある X 線光度を境に  $Q$  の値が増加から現象に転じることが判明する。さらに、この臨界光度は天体によって 1 桁ほどの差があることが見出された。次に、標準的な降着円盤モデルを仮定することにより、円盤内縁温度と X 線光度から中心ブラックホールの質量を推定し、その質量が天体によって 1 桁ほども異なることを導いた。最後に、第 5 章で得た線等価幅 EW に対する上限と中性水素柱密度  $N$  の両方を考察する。ULX は X 線連星系よりも EW が小さく、また中性子星を含む大質量 X 線連星系よりも EW,  $N$  ともに小さいことが判明した。この事実から、ULX の周辺ガス状態は X 線連星系のものとは異なると結論する。

第 7 章では、前章までに得られた結果をもとに、ULX 天体の中心天体と周辺ガスについて考察している。推定した中心ブラックホール質量が、最大のものが数百太陽質量を超えることと、スペクトルに顕著な線構造が見られないことから、ULX は、中間質量ブラックホールが濃い星間ガスを通過する際に引き起こす質量降着により輝いている可能性があるかと結論する。

なお、本論文第 5 章と第 6 章、ULX スペクトル解析に関する部分は牧島和夫氏、中澤知洋氏との共同研究をもとにしているが、X 線スペクトルからコロナ温度や円盤内縁温度を求め、その比から ULX を特徴づけるという着想は論文提出者本人が得たものである。Suzaku 衛星の観測データを提案者として取得、さらにその他のアーカイブデータの取得と解析は論文提出者が行った。スペクトル成分分解や、輝線および吸収線探索に関する結果は全て論文提出者が計算し、考察を与えたもので論文提出者のオリジナルな成果である。

超高輝度 X 線源(ULX)の正体は宇宙物理学に残る大きな謎の一つである。本論文は X 線スペクトルの変動に着目し、複数回にわたる分光観測により特徴を明らかにした。ULX の放射機構と中心天体の正体に迫る重要な研究成果であり、現在稼働中および将来の X 線望遠鏡を用いた観測に大きな示唆を与える。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。