

令和 5 年 6 月 2 2 日現在

機関番号：3 2 6 6 0

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2022

課題番号：1 8 H 0 5 8 7 3・1 9 K 2 1 0 5 4

研究課題名（和文）多波長で探る中間質量ブラックホールとその放射機構

研究課題名（英文）Unraveling the accretion mechanism of intermediate-mass black holes with multi-wavelength observations

研究代表者

小林 翔悟（Shogo, Kobayashi）

東京理科大学・理学部第一部物理学科・講師

研究者番号：8 0 8 2 2 9 9 9

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：太陽の100-1000倍程度の質量を持つ中間質量ブラックホール候補天体である超高光度X線源（ULX）の観測データに、新たな解析手法を取り入れることで、その放射メカニズムと中心天体の正体の解明を試みた。新手法により、ULXのX線スペクトルを構成する放射成分の形状の特定に成功し、中心天体の周りには、内縁半径が数百kmの降着円盤が形成されていることが示唆された。また、研究期間中に一部中心天体の正体がブラックホールではなく、作業仮説の1/100程度の質量である中性子星であることが判明したが、今回取り入れた解析手法によって、これら中性子星を物差しにし、他天体の質量を決定できる可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河中心には太陽の10万倍から10億倍の質量をもつ超巨大ブラックホールが存在する。これらは、銀河と互いに影響を与えながら成長していると考えられているため、その成長過程を解き明かすことは、我々の銀河系の形成過程を解き明かすことにもつながる学術的意義の高い研究であり、本研究はその一翼を担っている。

研究成果の概要（英文）：To unravel the emission mechanism and the true nature of an intermediate-mass black hole candidate, Ultra-Luminous X-ray source (ULX), a new analysis method is applied to their observational data sets. The new method has newly suggested that accretion disks with inner-disk radii of few hundreds of km are formed around the central object of ULXs. Although some ULXs have been identified as accreting neutron stars, which have masses as small as 1/100 times the working hypothesis in the present study, the new method has opened a new possibility that these neutron star ULXs can be utilized as calibration sources to estimate the mass of the reset whose central sources are still unidentified.

研究分野：X線宇宙物理

キーワード：X線 超高光度X線源 ブラックホール 中性子星

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙には、銀河の中心に存在する太陽の 10 万倍から 10 億倍の質量を持つ巨大質量ブラックホールと、太陽の数倍から 10 倍程度の恒星質量ブラックホールが存在する。後者が合体を繰り返すか、周辺のガスを降着することで、前者へと成長したとすると、これらの中間にあたる質量をもつブラックホール(中間質量ブラックホール)が存在すると考えるのが自然である。重力波の観測によって、太陽質量の 60 から 100 倍程度のブラックホールが形成されることは確認されているが、中間質量ブラックホールの光学対応天体は複数の候補があるのみで未発見である。

中間質量ブラックホール候補天体のひとつに、超高光度 X 線源(ULX)が挙げられる。ULX は、渦巻銀河の腕や不規則矮小銀河など、星形成が活発な領域に散見される X 線で異常に明るい天体で、その光度は  $10^{38-41}$  erg/s と恒星質量ブラックホールと、巨大質量ブラックホールの中間に位置する。中心にある天体にガスなどの質量が降着すると、その質量が持つポテンシャルエネルギーは、熱エネルギーに変換され、最終的に放射エネルギーとして系から放出される。この時の光度は、単位時間あたりの質量降着率と中心天体の質量に比例する。加えて、ガスが球対称に降着した場合、降着物質に働く重力と中心からの放射圧が釣り合い、それ以上明るくならない光度が出現する。これをエディントン限界光度と呼び、多くのブラックホールはこの限界光度以下で輝いていることが知られている。このため、ULX の質量降着率が他のブラックホールと大きく変わらないのであれば、ULX は質量降着して X 線で輝く中間質量ブラックホールと解釈することができる(e.g., Makishima et al. 2000)。一方で、エディントン限界光度は球対称放射を仮定しており、降着円盤を形成するブラックホールなどのコンパクト天体では、これを破る超臨界降着流ができていても不自然ではない。よって質量降着率が他のブラックホールと比べて 2 桁以上大きい場合、ULX は超臨界降着によって超エディントンで輝く恒星質量ブラックホールと解釈することもでき(e.g., Mineshige et al. 2007)、この 2 つの仮説は 20 年以上にわたり対立してきた。

## 2. 研究の目的

ULX は X 線で最も明るいため、X 線スペクトルがいかなる物理モデルで再現されるかを調べるスペクトル解析研究が主となる。これまで多くの先行研究で、X 線スペクトル解析が行われてきたが、ULX の放射メカニズムを含めた降着描像は未知な部分が多い。その大きな理由の一つが、ULX のスペクトルの特徴にある。ULX の X 線スペクトルは、特性 X 線や吸収線など、周辺環境の指標となる構造が乏しく、連続成分が支配的である。このため使用する物理モデルに含まれるパラメータの数が、スペクトルの特徴的な構造の数を上回ってしまうため、複数のモデルが同じ X 線スペクトルを再現できてしまう。よってこの縮退を解くためには、X 線スペクトル解析における全く新しい解析アプローチが必要となる。本研究課題では、ULX の X 線スペクトル解析に、他天体で用いられていた新しい解析手法を導入し、X 線スペクトルのモデル縮退を解くことを目的とする。また同じ理由から、X 線の観測データのみでは、ULX の周辺環境を探ることは困難である。よって周辺の分子雲の密度などがわかる電波帯域など、他波長の観測データの解析を行い、ULX の周辺環境を探る。

## 3. 研究の方法

本研究課題では、中間質量ブラックホール候補天体である ULX の X 線観測データに、活動銀河核で用いられていた C3PO 法(Noda et al. 2011)と呼ばれる解析手法を新たに取り入れる。この解析手法は、X 線強度が時間変動する天体のデータの、様々なエネルギーバンドの X 線計数率の相関を評価することで、その中の時間とともに変動する放射成分と変動しない成分の寄与を推定し、それぞれのスペクトル形状を物理モデルに依存すること無く決定できるものである。この手法を、様々な ULX に適用することで、X 線スペクトルを構成する放射成分を決定し、ULX の放射メカニズム、および中心天体を解明する。

上記に加えて、ALMA 電波望遠鏡による ULX が付随する近傍銀河のアーカイブデータを解析する。具体的には、CO 分子が放射する J=1-0 回転遷移の輝線帯域の観測データを用い、ULX と分子雲の天空上での位置の相関関係を調べることで、ULX の周辺環境を明らかにする。

## 4. 研究成果

図 1 は、ULX である NGC 300 ULX-1 の X 線スペクトルに本研究によって新たに C3PO 法を適用した結果を示している。これまでは、黒色の X 線スペクトルデータのみを物理モデルで再現することで、その放射描像を議論していたため、様々なモデルが同じスペクトルを説明でき、解釈が縮退していたが、今回新たに C3PO を導入することで、青と赤で示した、時間とともに変動する成分と、不変な成分のスペクトルを抽出することに成功している。これにより、ULX の X 線スペクトルの低エネルギー(< 2 keV)には、変動と相関しない、内縁半径が数百 km 程度の降着円盤(赤色)が形成されていることが、新たに示唆された(Kobayashi et al. 2023 投稿中)。

本研究を行っている過程で、解析対象天体であった NGC 1313 X-2 と呼ばれる天体の中心天体がエディントン限界を超えて超臨界降着する中性子星であることが判明した。これにより、「解析対象としている ULX のすべてが中心にブラックホールをもつ」という作業仮説が崩れてしまい、本研究において想定外の事態であった。しかし、代表者はこれを逆手に取り、本研究対象を右図で示した中性子星 ULX にまで拡張し、質量太陽の 1.4-2 倍程度と精度良くわかっている ULX の結果を未だに正体不明な ULX に外挿することで、これらの中心天体の質量を推定できる可能性を見出した。中性子星 ULX においては、上述した降着円盤よりも内縁に、超臨界降着流状態にある円盤が出現していると考えられる。この「通常の降着円盤」から「超臨界降着円盤」に遷移する半径は、中心天体の質量と質量降着率に比例すると理論的に予想されている (e.g., Poutanen et al. 2007)。よって、上記で得られ円盤の内縁半径は、まさにこの降着流が遷移する半径と考えられ、また観測された円盤の光度から質量降着率も計算できるため、ここから中心天体の質量を計算できる。この理論的に予想されている関係式が正しいかは、観測的に検証されていなかったが、中心天体がわかっている中性子星 ULX で、検証することが可能である。

そこで最も統計の良い図 1 に示した NGC 300 ULX-1 に C3PO 法を適用したところ、降着円盤 (赤) の他に、中性子星の自転とともに変化する成分 (青) が抽出された。これは、ある半径で中性子星の双極磁場による磁気圧が降着円盤内の動圧を上回るため、降着円盤からが途中で磁力線に拘束され中性子星とともに自転する降着流を形成しており、青色の放射成分を放射していると解釈される。この拘束半径から、NGC 300 ULX-1 は、 $(2-7) \times 10^{12}$  G の強磁場を持つ中性子星であることが推定された (Kobayashi et al. 2023 投稿中)。また様々な同天体の X 線スペクトルは、先行研究によって様々なモデルで解釈されていたが、今回この赤と青で示されたスペクトルが新たに追加されたことによって、図 1 の下段の (a) および (b) に示したように、これらの一部を棄却することができた。このような新たな成果を得ることができた一方で、解析した ULX に形成されている降着円盤は、超臨界降着円盤へと遷移する前に、磁場によって拘束されているということが今回判明したため、上述した理論予測を検証するには不适当であることがわかった。今後は、超臨界降着円盤を形成していると考えられている NGC 7793 P-13 や NGC 1313 X-2 などに焦点を絞り、同様の解析を継続する予定である。

上記の X 線観測データに加えて、ALMA 電波望遠鏡のアーカイブデータを解析した。図 2 は、M83 渦巻銀河に付随する分子雲 (赤； ALMA による CO 分子からの J=1-0 輝線の観測) および HI 領域 (青； VLA による観測) の分布に X 線の画像を重ねたものである。M83 には白で示した 2 つの ULX が存在する。X 線の角度分解能が不足しているため、不定性は大きいですが、ULX-1 は、分子雲と明確に相関しているようには見えず、むしろ分子雲の「空洞」部分に存在しているように見える。これは ULX の強力な X 線が、分子雲に対して何らかの影響を与えていると考えられるが、ALMA 望遠鏡のノイズによる構造の可能性も否定できない。現在、電波天文学の専門家に協力を依頼し、解析を進めている。また、ALMA による他銀河の観測データが蓄積されつつあるので、他の銀河についても解析を進める予定である。

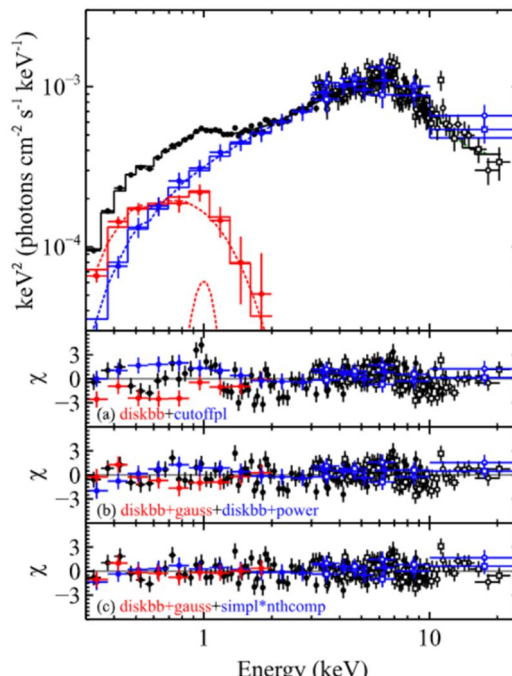


図 1: NGC 300 ULX-1 の X 線スペクトル (最上段) と様々な物理モデルで再現した際のデータとモデルとの残差 (下 3 段)。黒、赤、青はそれぞれ生の観測データ、C3PO 法を用いて抽出した変動しない成分と中性子星の自転と同期して変動する成分である。Kobayashi et al. 2023 (投稿中) より抜粋。

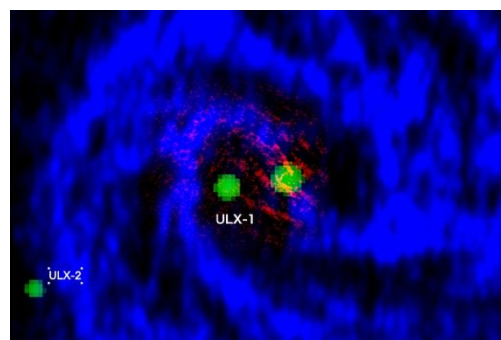


図 2: M83 渦巻銀河の ALMA による CO 分子の J=1-0 回転遷移輝線の画像 (赤) に XMM-Newton による X 線 (緑) と VLA (青) の画像を重ねたもの。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 S. B. Kobayashi	4. 巻 489
2. 論文標題 A new possible accretion scenario for ultra-luminous X-ray sources	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 366-384
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stz2139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 小林翔悟
2. 発表標題 広帯域・高精度分光観測で探る超高光度X線源（ULX）の降着描像と現状
3. 学会等名 相対論的現象で探る宇宙進化III（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林翔悟
2. 発表標題 広帯域X線観測で探る高エディントン比での降着描像
3. 学会等名 多波長・時間軸天文学の時代のFORCE（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. B. Kobayashi
2. 発表標題 Nature of ULX Sources
3. 学会等名 FORCE US collaboration workshop（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shogo B. Kobayashi
2. 発表標題 Decomposing the Suzaku spectrum of Ultra-Luminous X-ray source NGC 1313 X-1
3. 学会等名 17th Meeting High Energy Astrophysics Division (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林翔悟
2. 発表標題 X線光度の時間変動を用いた超高光度X線源 (ULX) における降着描像の研究
3. 学会等名 高感度・広帯域X線観測で探るブラックホール降着現象の物理 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

#### 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

#### 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

#### 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------