

論文内容の要旨

Studies of astro-physical properties of Ultra Luminous X-ray sources

(超高光度 X 線源の X 線スペクトルの研究)

氏名 小林翔悟

Ultra Luminous X-ray sources (ULXs)は、渦巻銀河の腕、不規則矮小銀河など、星形成の活発な領域に付随する大光度の X 線点源である。その光度は $10^{39.5-41}$ erg sec⁻¹ と、恒星質量($\sim 10 M_{\odot}$)ブラックホール(BH)のエディントン限界光度 $L_{\text{edd}} = 1.2 \times 10^{39}$ erg sec⁻¹ を大きく超える。 L_{edd} は中心天体の質量に比例するため、ULX はその大光度ゆえに、銀河中心に存在する超巨大質量($10^{6-9} M_{\odot}$)BH と恒星質量 BH とをつなぐミッシングリンクである、中間質量($10^{2-3} M_{\odot}$)BH の有力候補となった(Makishima et al. 2000)。しかし中間質量 BH の生成過程が不明であることから、ULX は超臨界降着によって、 L_{edd} を超える光度で輝いている恒星質量 BH であるとする説(Mineshige 2007)も浮上した。2015 年 9 月 14 日に米国の Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory によって検出された、初の重力波イベント GW150914 では、 $29 M_{\odot}$ と $36 M_{\odot}$ の BH が合体し、恒星質量よりも重い $62 M_{\odot}$ の BH が形成され(Abbot et al. 2016)、前者の仮説が強化されたものの、ULX の発見から 20 年以上たつ現在でも、両仮説の優劣は依然として未決着である。

Makishima et al.(2000)以後の観測により、BH 連星の場合と同様、ULX のスペクトルもいくつか異なる代表的な形をもち、光度に応じ、それら異なる状態の間を遷移することがわかってきた。一つは上に凸で明るい Disk 型スペクトル状態、もう一つはべき乗型に 10 keV まで延びる

PL 型スペクトル状態である。これら 2 タイプのスペクトルは形が異なるものの、ともに、降着円盤からの多温度黒体放射(MCD)と、その熱的逆コンプトン散乱(THC)を組み合わせた、MCD+THC モデルで再現されることがわかってきた

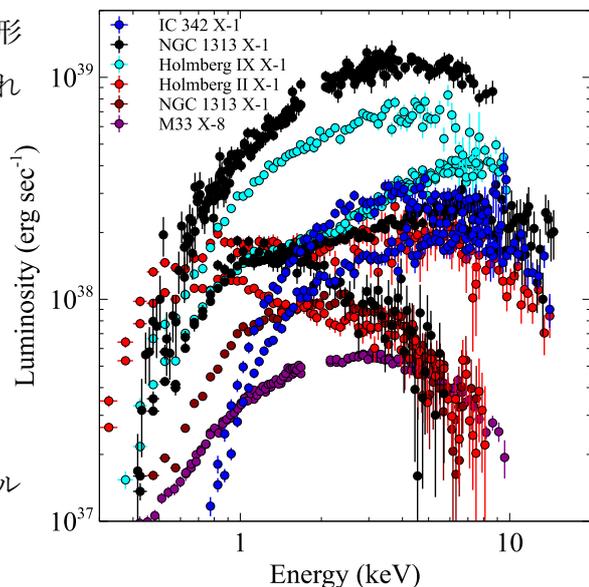


図 1: 本研究で解析した ULXs のうち、代表的な 6 天体(色で区別)の νF_{ν} スペクトル。銀河系およびホスト銀河の吸収は除去していない。

(Gladstone et al. 2009)。これは BH 連星で標準的なスペクトル構成である。

以上を受けて本論文では、日本の「すざく」、欧州の *XMM-Newton*、米国の *NuSTAR* という 3 機の衛星により蓄積された公開データを用い、上記の状態変化も含め、統一的な ULX の X 線スペクトルの解釈を探索した。広帯域・高統計なスペクトルを得るため、6 Mpc 以内の近傍銀河に付随し、最大光度が $3 \times 10^{39} \text{ erg sec}^{-1}$ を超える、明るく代表的な ULX に限定した。またスペクトルの変動にも着目するため、そのうち 3 衛星あわせて 2 回以上の観測が行われているものに絞り、最終的に 10 天体の全 60 個のスペクトルを解析した。図 1 はそのうち代表的なものを示しており、光度が増えると PL 型から Disk 型へと遷移するが、その臨界光度は天体間でばらつくことがわかる。

図 1 ではスペクトル状態によらず、 $< 2 \text{ keV}$ に降着円盤からの MCD 成分が見られ、 $> 2 \text{ keV}$ ではその光子がコンプトン散乱された THC 成分が卓越すると解釈できる。この立場で統一的な解析を行った結果、扱った ULX スペクトルはその形状変化も含め、すべて MCD+THC モデルのみで再現された。統計が悪く下限値しか得られない場合を除き、THC 成分を作り出すコンプトン電子温度はいずれの場合も $T_e = 1\text{-}3 \text{ keV}$ 、光学的厚みは $\tau > 10$ となり、BH 連星の低光度の場合 ($T_e \sim 100 \text{ keV}$, $\tau \sim 1$) とは異なり、「低温で厚い」コロナの存在が示唆された。また ULX が低光度でスペクトルが PL 型なときは、MCD 成分として得られる降着円盤の最内縁温度は $T_{in} = 0.1\text{-}0.3 \text{ keV}$ と低温だが、光度が上昇しスペクトルが上に凸な Disk 型へ遷移すると、 $T_{in} = 0.5\text{-}0.9 \text{ keV}$ と高温になる傾向が観測された。

このスペクトル状態遷移を定量化するため、 $Q \equiv T_e/T_{in}$ という新しい無次元のパラメタを導入した。これは降着流中のイオンによる加熱と、表面からの放射による冷却の釣り合いを示すものである。全サンプルスペクトルをこの Q と光度 L の 2 次元平面に表示したものが図 2 である。天体に共通して、暗い PL 状態で $Q \sim 5$ だったものが、光度とともに Q が次第に上昇して > 10 となった後、ある光度で $Q \sim 3$ という小さな値に落ち込むことがわかった。これは PL 型では T_{in} が低く T_e が高いため、両者の比 Q が大きいものに対して、Disk 型へと遷移するに伴い、2 つの温度差が縮まり、 Q が小さくなる様子を反映している。

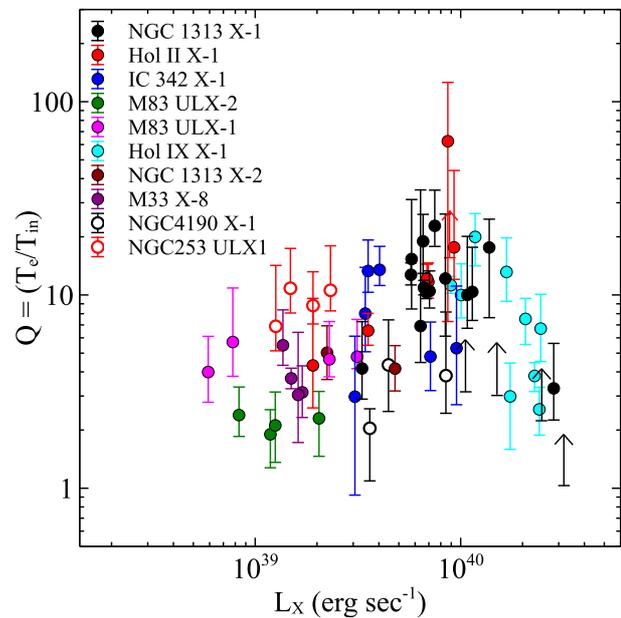


図 2: 0.1-10 keV の光度 L と温度比 Q の相関。

以上のように、 Q はスペクトルの形状の違いを表す良いパラメタと判明したので、その値からスペクトル状態を区別し、天体ごとに、PL型からDisk型へと状態遷移する臨界光度 L_c を求めた。今回のサンプル中、最大の臨界光度はNGC 1313 X-1の $L_c \sim 10^{40}$ erg sec $^{-1}$ であり、一方でPL型を一度も示していないM33 X-8では $L_c < 10^{39}$ erg sec $^{-1}$ と考えられる。このように今回のサンプルでは L_c が ~ 1 桁ほどばらつくことがわかった。恒星質量BHは一般に光度に応じて、Low/Hard状態、High/Soft状態、Very High状態、そしてSlim Disk状態という4つのスペクトル状態をとること知られており(Kubota and Makishima 2004)、状態間の遷移は天体によらず、ほぼエディントン光度に対する光度の比で決まる。例えばLow/Hard状態からHigh/Soft状態へは $\sim 0.1L_{\text{Edd}}$ 、そこからVery High状態へは $\sim 0.3L_{\text{Edd}}$ で遷移する。ULXのスペクトル状態遷移が、これと同様なものと仮定すると、天体間の L_c の違いはそれらの L_{Edd} の違い、すなわち質量の違いと解釈できる。よって今回のサンプルULXの質量には、 L_c と同様にほぼ1桁のばらつきがあることが示唆され、例えば L_c が最も小さいM33 X-8が恒星質量BHで $\sim 10 M_{\odot}$ の質量を持つと仮定しても、最大の L_c を持つNGC 1313 X-1は、その約10倍の $\sim 100 M_{\odot}$ をもつ中間質量BHとなる。この議論は、天体の放射が超エディントンか否かによらないので、中間質量BH仮説をより強固にする結果である。

一般的にBH連星などの降着天体のスペクトルにはしばしば、降着物質や、質量を供給する主星の大気に含まれる重元素により、蛍光輝線、共鳴吸収線、光電吸収エッジなどが観測される。特に、宇宙で最も豊富な重元素である鉄の $K\alpha$ 由来の構造は、ほとんど例外なく検出されている。ULXが同様な降着系であれば、必然的にこのような局所的な構造が期待されるが、各観測の平均スペクトルは上述のように連続成分のみで、そのような構造は要求されなかった。そこでいくつかの天体ごとに、最も観測数が多く総露光時間が長いXMM-Newtonのデータを全て足し合わせた高統計スペクトルを作成した。それを連続成分と、4-9 keVの範囲に仮定した様々なエネルギーの輝線・吸収線モデルでフィットし、要求される局所構造の統計的な有意度を調べた。その結果、どの天体のスペクトルも輝線や吸収線構造を有意に要求せず、その等価幅は中性(6.4 keV)から水素状(6.9 keV)の鉄で30-50 eV以下という制限が得られた。

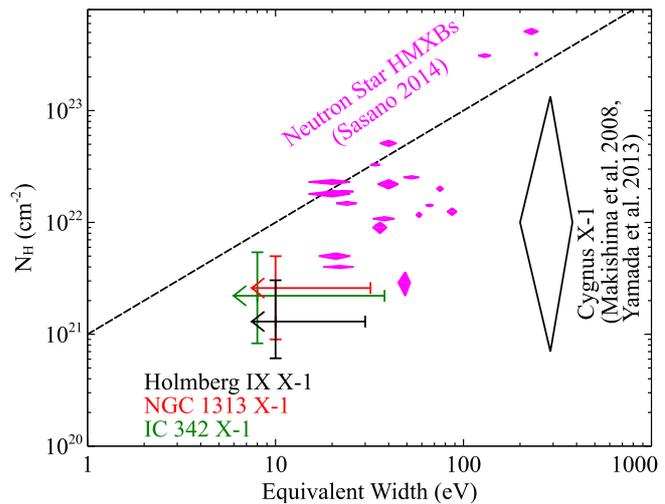


図 3: 輝線の等価幅と光電吸収柱密度の相関。

図 3 は、低エネルギー側を吸収する光電吸収の柱密度 N_H と、鉄 $K\alpha$ 輝線の等価幅の相関を示したもので、今回解析した ULX と、大質量の主星をもつ X 線連星系とを比較している。一般的に、大質量星は強力な星風を宇宙空間に放出するため、大質量連星系の X 線スペクトルはしば

しば $N_{\text{H}} \sim 10^{22-24} \text{ cm}^{-2}$ に達する強い光電吸収を受け、その値は、軌道運動や星風の放出量により大きく変動する。またこの星風は、鉄の $K\alpha$ 蛍光輝線の放出源でもあり、X線スペクトルには強力な輝線構造が出現する。ULXはその巨大な光度を安定して保持するため、しばしば大質量連星系であると考えられているが、図3に見るように、その N_{H} の値や変化幅、および鉄輝線の等価幅は、他の大質量連星系に比べて非常に乏しいことが判明した。

この観測事実を説明するひとつの可能性は、ULXの大光度によって、周辺物質が完全電離しているという説明である。しかしながら、質量降着率が大になるほど、降着流で解放された重力ポテンシャルエネルギーは、放射に転換される前に、より多くブラックホールに飲み込まれてしまうため、周辺物質の電離に寄与できる割合が少なくなり、降着流は完全電離しにくくなると考えられる (Kobayashi et al. 2016)。よって今回の観測事実は、通常の亜臨界降着する大質量連星系で説明が難しいだけでなく、超臨界降着を考えると、さらに説明が難しくなると考えられる。したがって、ULXが大質量の主星から質量供給を受けているという従来の通説を離れ、周辺にスペクトル構造を担う物質が実際に乏しい中で降着が起きている可能性を考える必要が生じた。

GW150914の検出から、恒星質量より大きな質量を持つBH（たとえばPopulation IIIの星から形成される）の存在が証明され、それらが宇宙空間を多く漂っている可能性が示唆された。ここから着想を得て、Mii and Totani (2005) にならい、ULXが濃いガスに突入してBondi-Hoyle降着で輝く単独の中間質量BHである可能性を考察した。このときの光度は質量の2乗に比例し、例えば $100 M_{\odot}$ のBHが密度 $\sim 100 \text{ cm}^{-3}$ のガス雲に速度 $v \sim 1 \text{ km sec}^{-1}$ で突入すると (Nakamura et al. 2016)、その光度はULXと同等の $10^{40} \text{ erg sec}^{-1}$ に達する。また星間ガスの濃い領域の典型的なサイズとして数pcを仮定すると、その間での吸収は $N_{\text{H}} \sim 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ 程度となり、ULXの観測で得られている値と一致する。また単独であるため、輝線の発生源となる主星が必要なく、周辺ガス密度は星風に比べて非常に薄いため、そこから期待される輝線も数eV程度と微弱で、観測事実と矛盾しない。近年、分子雲中の速度分散の観測から、 $10^5 M_{\odot}$ の中間質量BHが通過したことによる擾乱の痕跡が示唆されており (Oka et al. 2016)、この仮説を強化している。

以上のX線スペクトル解析からULXは、およそ1桁の質量のばらつきを持つ中間質量BHが、星間ガスの濃い部分に突入してBondi-Hoyle降着で輝いている可能性が示唆された。