

論文内容の要旨

論文題名 : X-ray Spectral Study of a Large Sample of Luminous Compact X-ray Sources in Nearby Galaxies

(近傍銀河における大光度コンパクト X 線源の X 線分光を用いた研究)

氏名 杉保 昌彦

1 はじめに

1980 年代に *Einstein* 衛星により、はじめて X 線で高分解能・高感度の撮像観測が可能になり、近傍の渦巻銀河には中心核以外に、X 線での光度が $10^{39} \sim 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$ にも達するコンパクト天体が存在することが知られるようになった。中性子星の質量 ($1.4M_{\odot}$; 太陽質量) に対する Eddington 限界光度

$$L_E = 1.5 \times 10^{38} \frac{M}{M_{\odot}} \text{ erg s}^{-1} .$$

が $2 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ であるのに対して、これらの天体の光度は最大でその 100 倍以上、銀河系内の良く知られた $10M_{\odot}$ 程度のブラックホール (BH) 連星の光度と比べても 10 倍にもなるため、大光度 X 線源 (ULX, Ultra Luminous compact X-ray sources; Makishima et al. 2000) と呼ばれている。ULX はしばしば時間変動を示すことから、コンパクト天体であることは示唆されていたが、その光度を説明するためには、 $100 M_{\odot}$ もの質量の BH が必要となり、さらに、多波長での同定がなされていないこと、X 線での十分な分光観測が可能でなかったことから、発見以来の謎となっていた。

この論文では、次に述べる「あすか」衛星で得られた ULX に対する初めての知見を、1999 年に打ち上げられた最新の *Chandra* および *XMM-Newton* 衛星を用いて、さらに推し進め、疑いのないものとするを目的としている。

2 「あすか」衛星による成果

1993 年に打ち上げられた日本の 4 番目の宇宙 X 線観測衛星「あすか」により初めて、ULX に対して広帯域・高分解能・高感度の X 線分光観測が可能になり、次のような画期的な成果が得られた。

10 個程度の ULX が調べられ、そのスペクトルが一般的に高エネルギー側で折れ曲がった形をもち、光学的に厚い標準降着円盤 (Shakura & Sunyaev 1973) からの多温度黒体輻射モデル (MCD) でよく記述され、残りは、光子指数 1.4~1.8 程度のべき型 (PL; Power-law) で表されることがわかった (Makishima et al. 2000)。これらはそれぞれ、いままでに良く知られている、ソフト状態およびハード状態の BH 連星からのスペクトルとよく一致した結果である。さらに、全部で 4 つの ULX は、2 つのスペクトル状態間を遷移していることがわかり (Kubota et al. 2001a, Mizuno 2000, La Parola et al. 2001)、ULX が BH 連星であることが有力となった。しかしながら、これらは一方で次のような 3 つの問題点を含んでいる。1 つ目は、MCD 型のスペクトルの硬さから得られる物理量としての円盤内縁温度 T_{in} が、1~2 keV と高すぎる (Makishima et al. 2000)、2 つ目は、ULX が時間変動を示す際に円盤の内縁半径 R_{in} が一定ではなく、ほぼ T_{in}^{-1} に比例して変動すること (Mizuno et al. 2001)、3 つ目は、状態遷移が起こる光度が、 $\sim 10^{39}$ erg s $^{-1}$ と高すぎることである (Kubota et al. 2002)。

T_{in} が高すぎるという問題は、光度に比べて R_{in} が小さすぎることを意味する。系内の通常の BH 連星では、 R_{in} がシュバルツシルト BH における最も内側の安定軌道 (\propto BH の質量) により一致をみせ、明るさが一桁以上変化しても R_{in} が一定に保たれることから、標準降着円盤が成り立っていると理解されてきた。よって ULX では、 R_{in} が最終安定軌道を表しているとする、物理的ではない状態に陥る。

3 スペクトルの解析

「あすか」で得られた ULX に対する結果は、限られたサンプルから導かれたもので、じっさい最近の *Chandra* および *XMM-Newton* 衛星の観測からは、PL 型の ULX が多数 (~ 10 個) 報告されており、「あすか」衛星とはやや異なった結果が得られていた。そこで我々は、これらの衛星のアーカイブデータを用いて、スペクトルの解析を行なった。*Chandra* および *XMM-Newton* 衛星のアーカイブデータのうち、5 ksec 以上の観測時間をもつ距離 2~30 Mpc の NGC/IC 銀河を、合わせて 100 個ほど選び、 D_{25} ellipse 以内に存在する、中心核以外の光度 2×10^{38} erg s $^{-1}$ 以上の天体を洗い出した。その総数はおよそ 800 個に及ぶ。さらにその中から、超新星残骸と同定されているものを除き、また、スペクトルの形が判定できる程度の光子統計を持つ天体として、全部で 50 天体ほどのスペクトル用サンプルが得られた。

このスペクトル用サンプルの中から、10 個程度のとくに統計のよい天体のスペクトルを調べた。図 1 に示すように、基本的に MCD もしくは PL が良くそのスペクトルを再現することが確認された。同一の天体が異なる衛星で観測された場合、強度が $\sim 20\%$ 以内で同じであれば、観測に用いた衛星に寄らず、ほぼ同じ結果が得られた。このことは、*Chandra* と *XMM-Newton* の間では 2 天体、*Chandra* と「あすか」の間で 1 天体、そして *XMM-Newton* と「あすか」の間で 4 天体について成り立っている。このように、「あすか」衛星で得られた結果が正しいことが確認された。これら以外の天体もほとんど、MCD モデルもしくは、PL モデルのどちらかで記述され、図 2 に示すように、その数は同程度となった。図 3 のように、MCD 型のもので、とくに 5×10^{38} erg s $^{-1}$ 以上では有意な光度の頻度分布の違いは見られなかった。MCD 型のものでは、光度と T_{in} にやや弱い相関が見られ、「あすか」で得られていたように、 10^{39} erg s $^{-1}$ 以上のものでは、温度が 1~2 keV と大きい傾向が見られた。

この 2 種類のスペクトルは、いくつかの ULX で状態遷移を見せることから、同種の天体の異なった状態であることは疑いない。それらの共通の特徴として、見かけ上 Eddington 限界光度を越す ($\eta > 1$; η は、実際の温度と光度から見積もられる R_{in} に対応する質量の、Eddington 限界光度に対する比) MCD 型のもので、その数分の 1 程度の光度をもつ PL 型との間で起こることがあげられる。図 5 のように、状

態遷移を起こした天体の MCD 状態と PL 状態に光度の比をみると、どの天体も、ほぼ共通の $R_{\text{in}} \propto T_{\text{in}}^{-1}$ という関係にしたがって数倍程度の変動を見せること、そして状態遷移が円盤温度 1.0 ~ 1.2 keV で起きることがわかった。

サンプルの中で、最も統計の良い M81 X-6 と X-9 という天体のスペクトルは、わずかではあるが有意に MCD モデルとは異なった形を持ち、MCD モデルにおける温度の半径方向の傾き (標準降着円盤では、 $p = 0.75$) を自由パラメータとすると (p -free disk)、 $p \sim 0.62 \pm 0.03$ となった。図 4 にも示されているとおり、これらは、 $\eta \gtrsim 2$ に位置し、 R_{in} が T_{in}^{-1} にしたがって変動している。

一方、 $\eta < 1$ に位置する、NGC 253 Source 1 という天体は、図 4 にあるとおり、ほぼ R_{in} 一定に近い変動をしていることがわかった。このことは標準降着円盤が成り立っていることを示している。

4 3 種類の分類と BH 連星との比較

これらの観測事実から、典型的な ULXs ($> 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$) を含む近傍銀河の大光度 X 線源は、次のような 3 種類に分けられることがわかった。

1. $\eta < 1 \sim 2$ の MCD 型 (典型的に $< 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$, $T_{\text{in}} = 0.5 \sim 1.5 \text{ keV}$)。

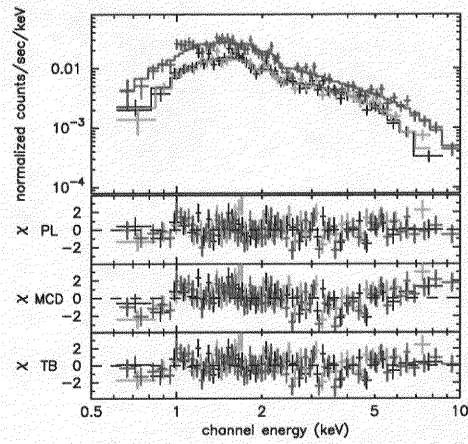
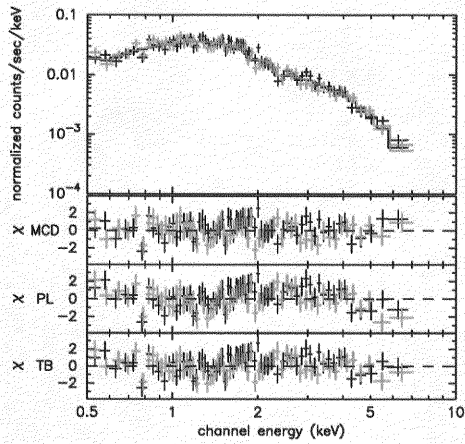
R_{in} がほぼ一定で、標準降着円盤が成り立つ。

2. $\eta > 1 \sim 2$ の MCD 型 (典型的に $> 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$, $T_{\text{in}} = 1 \sim 2 \text{ keV}$)。

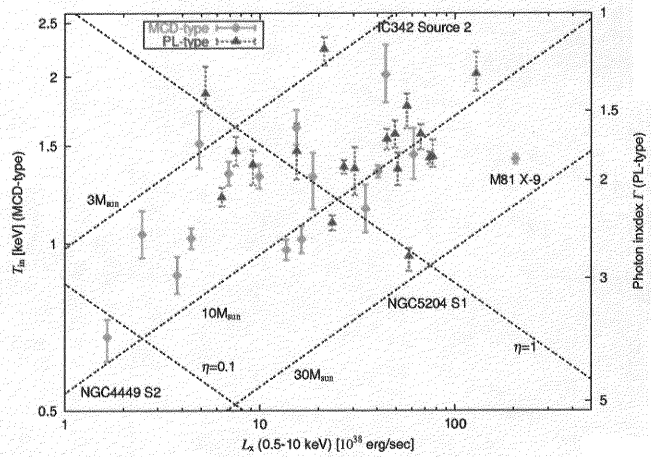
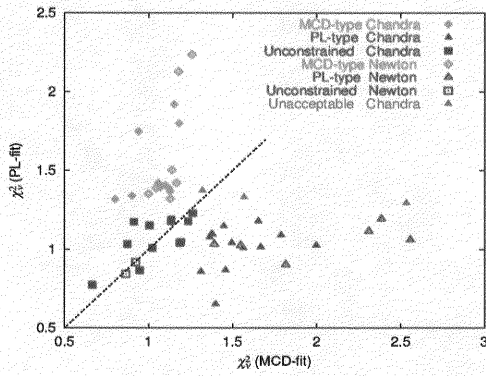
$p \sim 0.6$ で近似され、 $R_{\text{in}} \sim T_{\text{in}}^{-1}$ で変動する。

3. PL 型 ($\eta = 1 \sim 2$ 程度に相当)。ただしスペクトルは、単純な PL では表されない場合がある。

この結果は、銀河系内の BH 連星に対し、Kubota (2000), Kubota et al. (2001b) らによって得られた最新の結果に非常に良い対応関係を示す。このことから、典型的な ULX である 2. は非常に降着率の高い “slim disk” 状態 (Abramowicz et al. 1988, Mineshige et al. 2000) であり、1. は標準降着円盤が成り立つソフト状態、3. は今まで良く知られたハード状態ではなく、強いコンプトン状態である、という猫像が強く示唆される。これらは、ULX が降着率の高い BH 連星であることを証拠づけるもので、典型的な質量は、数十 ($20 \sim 50$) M_{\odot} 程度の BH となるはずである。

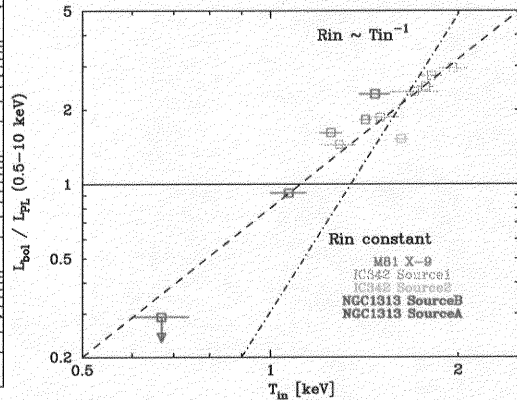
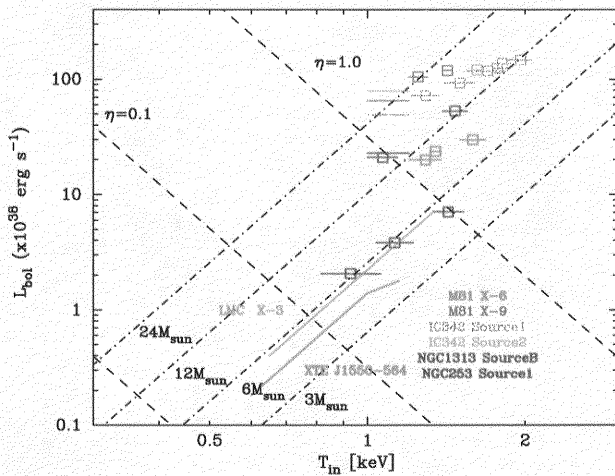


(図 1) NGC 253 Source 1 と NGC3628 Center-Source の XMM-Newton で観測されたスペクトル。MCD, PL, 熱的制動放射モデルによるフィッティングの残差も示した (左右で順序が異なる)。



(図 2, 左) 個々の天体に対する、PL モデルと MCD モデルのフィッティングによる χ^2 の比較。

(図 3, 右) X 線光度に対する、スペクトルの硬さ; MCD 型の T_{in} および PL 型の光子指数 Γ (PL-type)。



(図 4, 左) 時間変動を示した天体の、光度と T_{in} の関係。銀河系内の BH 連星についても合わせて示した。状態遷移を起こした天体については、図 5 から得られた温度に対して PL 状態の光度も示した。ある質量に対する R_{in} 一定の線と、Eddington 限界に対する光度比 (η) の線が記されている。

(図 5, 右) 状態遷移を起こした天体の、MCD 状態と PL 状態の光度の比と T_{in} の関係。