

発見50年を経た Sco X-1 の仲間の活躍

松岡 勝 ・ 浅井 和美

〈理化学研究所 〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1〉

e-mail: matsuoka.masaru@riken.jp

2012年は、X線を強烈に放射するX線源Sco X-1が発見されて50年になる。この発見により、当時予想もしなかった高温・高エネルギー領域が超重力場の下で安定して実現していることがわかった。これが契機となって、中性子星やブラックホールの観測的研究が急速に発展し、活動銀河核、銀河団、超新星の爆発後の進化などの研究でX線天文学はあらゆる宇宙物理学の分野で欠かせない情報を提供している。最初に発見された Sco X-1 とその仲間たちに関しては、その後ブラックホール等の研究に押されて地道な研究が続いていた。ところが、この仲間が最近、ミリ秒ガンマ線パルサーや電波パルサーへの進化のシナリオで脚光を浴びている。本稿では Sco X-1 とその仲間たちについての最新像を紹介し、これらの天体がもつ磁場の強度を新しく決める手法について解説する。

1. X線天体の発見

当時予想もしなかったほぼX線でのみ輝いている天体、さそり座にある Sco X-1 の発見は1962年12月に発表された¹⁾(図1)。発見されたX線天体はその後よく調べていくと中性子星と太陽よりも軽くて暗い晩期型星との近接連星系であった。そして、X線は中性子星に相手の星から流入したガスが、強い重力場で1,000万度を超える高温ガスになって放出されていることがわかった。

Sco X-1 の発見を契機にX線パルスを出す中性子星、太陽質量を超えるブラックホール、100万度から数千万度で輝く超新星の残骸、さらに数千万度から1億度にもなるガスで満ちている銀河団、超高温度のX線や超高エネルギー粒子を多量に放射する活動銀河核など、どの範疇の天体もX線をだしていることがわかってきた。惑星²⁾や彗星すらX線観測の観測対象になり、X線天文学は今や欠かせない重要な分野になっている。このような発展により宇宙物理学への影響を与えたこ

とで、最初のX線天体 Sco X-1 の発見とその後のX線天文学に多大の寄与をした R. Giacconi 博士に2002年のノーベル物理学賞が授与されたことはよく知られている(天文月報2003年5月号に

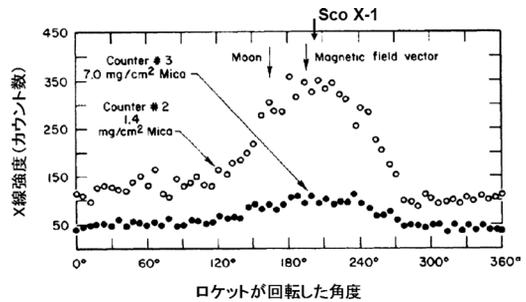


図1 初めて発見された太陽系外のX線源、さそり座X線源Sco X-1の観測データ¹⁾。横軸はロケットの1回転で天空を走査したことを意味する。縦軸はX線のカウント数。走査方向の視野は約90°のため点源は広がっているが、横軸203°方向にカウント数のピークがある。この方向に Sco X-1 からのX線を検出した。X線の吸収を知るため、マイカ(雲母)の窓厚の違った2種類(Counter #2と#3)の検出器が使われた。

特集記事).

ところで、Sco X-1は多くのX線天体の研究に先行して発展したこともあり、始めのうちは脚光を浴びた。しかしその後、ブラックホール天体に注目が集まりSco X-1の仲間は地道な研究対象になっていった。この仲間は10億年を超える老いた晩期型星と中性子星の連星系をなしているもので、今では100個ほど見つかった。以下ではこの仲間のX線星をNS-LMXB (Neutron StarをもったLow Mass X-ray Binary) と記述する。NS-LMXBはX線パルスを示す早期型星との連星系とは違った性質を示す。X線パルサーや電波パルサーの中性子星の磁場はかなりの精度でわかっているが、Sco X-1とその仲間はX線放射が複雑で、50年にわたる研究にもかかわらずいまだに磁場さえも決定されていなかった。

ところが最近、磁場の論理的な算出方法が提案され³⁾、その仲間の磁場が従来に比べ精度良く算出された。さらに、この仲間が進化したと考えられるフェルミ衛星が見つけた未知のガンマ線天体の中にミリ秒ガンマ線パルサーが見つかり、NS-LMXBの進化のシナリオが見えてきた^{4), 5)}。こうして、年老いた中性子星が晩期型星と一緒に強いX線を出していた時期から、さらに年をとると、ガンマ線のミリ秒パルサーを経由してミリ秒電波パルサーへと進化するリサイクルパルサーの道筋が見え^{6), 7)}、NS-LMXBが最近注目されるようになったのである。

2. 中性子星の磁場

中性子星の研究は電波パルサーが先行して中性子星の発見がなされたが⁸⁾、X線天体もX線パルサーの発見で4年ほど遅れて中性子星が膨大なエネルギーの放出源として確認された⁹⁾。単独の中性子星は、生まれて間もないかに星雲の中にある中性子星から、10万年とか100万年を経た電波パルサーまでそのパルス周期は回転の減速度を測定して早くから磁場が算出されている。それらは

$(2-5) \times 10^{12}$ ガウスと膨大なものである¹⁰⁾。一方、X線パルサーはX線放射が磁極付近で出ることや、電子が磁力線に巻き付いているためサイクロトロン吸収線が観測されている。この発見も1978年にはなされた¹¹⁾。このため、いくつかのX線パルサーでサイクロトロン吸収線が見つかり、「ぎんが衛星」時代に多くのX線パルサーの磁場の算出が精度良く得られた¹²⁾。そして、X線パルサーを形成する中性子星と電波パルサーは形態や進化に違いがあるものの、得られた磁場の強さはそれほどの違いがないことがわかっている¹³⁾。

一方、磁場がX線パルサーに比べ2桁を超えるほど強いと考えられる中性子星がマグネターまたは異常X線パルサーとして発見され、この方面の研究が盛んである¹⁰⁾。このため、中性子星の起源と磁場の進化の両面から研究がなされている。ところで、通常電波パルサーとX線パルサーは生まれてほぼ1,000万年を下回る若い中性子星と考えられる。一方、数十億年と年老いたNS-LMXBの中性子星は、Sco X-1発見後50年経っても、特に磁場の信頼できる検出方法が確立されてこなかった。ところが最近ようやくその確かな手がかりを与える論文が発表された³⁾。この小文はこの紹介をすることが一つの目的である。まず、この論文で得られたNS-LMXBの最新像についてまとめておこう。

3. NS-LMXBの研究経緯

3.1 X線スペクトル観測の進展

Sco X-1とその仲間の中性子星は、数十億年かけて進化した星と連星系を組んでいるため、それ相当に年老いたものと想像できる。これらのNS-LMXBはX線で観測すると実に多様である。X線強度がエディントン (Eddington) 光度にまで達するもの、1桁を下回る光度にとどまって輝いているもの、数カ月から数年ごとにアウトバーストを繰り返すものなどがある (図2)。さらに、新しいNS-LMXBが今も毎年1-2個のペースで発見

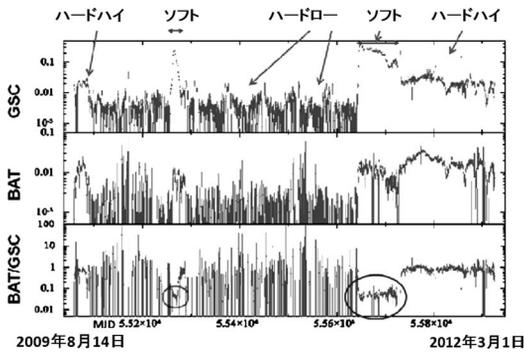


図2 MAXI-GSC と Swift-BAT (NASAの人工衛星 Swiftに搭載されたBurst Alert Telescopeで、ガンマ線バーストの位置と硬X線スペクトルを検出して世界に速報するガンマ線望遠鏡.コード化マスクと半導体検出器から構成されている。) で得られた NS-LMXB 4U 1608-52のX線強度曲線の例. GSCはMAXIのエネルギー2-20 keVに感度をもつガスX線検出器による強度. BATは15-200 keVに感度のある半導体検出器による強度. BAT/GSCは両者の検出器の強度比. ○印はソフト状態の様子を示す. データは2009年8月14日から2012年3月1日までの毎日の強度. ソフト, ハードハイ, ハードローについては4.2節で説明する.

されている (MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image: 国際宇宙ステーションに2009年7月に搭載され運用されている全天X線監視装置)サイエンスニュース¹⁴⁾). NS-LMXBのX線スペクトルは、発見から1984年ころまでは数千万度の高温プラズマのスペクトルとされていた. しかし、このモデルでは、高温ガスをどのように閉じ込めておくかという点で、説明困難な時期が続いていた.

NS-LMXBのX線スペクトルのモデルにブレークスルーをもたらしたのは1983-4年に活躍した日本の「てんま衛星」である. 観測データの精度が上がってSco X-1のX線データを詳しく解析すると、黒体放射が少なくとも2種類あって、この足し合わせで説明できるというものである^{15), 16)}. このモデルで、中性子星の表面に形成される黒体放射と降着円盤の内縁に高温の黒体放射が導入された. こうして、中性子星表面には約2,000万度

の黒体放射領域が形成され、その周りの降着円盤の内縁は約1,000万度の高温の黒体放射領域から始まり外に向って低くなる多温度の降着円盤のモデルが開発された. この多温度円盤 (multi-color disc; MCD) モデルは、中性子星、ブラックホール天体等の高密度天体から超巨大ブラックホールをもつ活動銀河核の研究まで適応されている.

その後、NS-LMXBのX線スペクトルは状態が変わると100 keVを超える高エネルギーのX線まで延びていることが発見された¹⁷⁾. この非熱的な硬X線スペクトルは、逆コンプトン効果によるX線の高エネルギー化機構によるものである. 中性子星の周りは比較的薄い高温ガスで覆われているため、このガス中の高エネルギー電子 (数keV~数十keV) が先に述べた黒体放射の光子を種に逆コンプトン散乱を起こすというモデルである. 満田らによるモデル (Eastern modelと呼ばれている)^{15), 16)} も欧州で生まれたモデル (Western modelと呼ばれる)¹⁸⁾ も種光子と逆コンプトン散乱をするガスの構成は同じものの、どこにそれがあるかの違いがある.

3.2 状態の分類

NS-LMXBのX線スペクトルは、近似的には二つの温度の黒体放射でほぼ合わせられる状態と、非熱的なスペクトル (主に逆コンプトン効果による) が強い状態がある. これを分類してソフト状態とハード状態と呼ばれている. NS-LMXBは、ソフト状態にとどまっているもの、ハード状態にとどまっているもの、さらに、数カ月とか数年ごとにアウトバーストを起こしてソフトとハードを行き来するものなどがある. そのうえ、ソフトともハードとも区別がつきにくいソースもある. このため、NS-LMXBのモデルは複雑になり、同じデータで五つも六つもモデルが提案され、どれも統計的には合うという複雑な状況になっている¹⁹⁾. これは、ソフト状態でもハード状態でもX線スペクトルは滑らかで特別な構造がないため、いろいろなモデルに合ってしまうためだ.

この複雑なスペクトルを現象的に分類する方法が1989年に提案されたCCD (Color-Color Diagram) とか、HID (Hardness-Intensity Diagram)^{20), 21)} というものである。前者は比例計数管で観測された1-20 keV領域のX線を四つのバンドに分け、2バンドの強度比であるハードネス (カラー) を二つずつ作って2次元にプロットする方法である。このカラー・カラーダイアグラム (CCD) で、その形がZの形をするからZソースと称し、その形が環状珊瑚島に似るからAtollソースと称し、NS-LMXBが分類された。しかし、これらの分類方法の物理的イメージは明確ではない。もう一つのNS-LMXBの現象として、強度が強いX線を周期解析をすると数百Hzとか数十Hzに準周期的な変動 (QPO) が見つかり²⁰⁾、これを説明するための研究もなされてきた。QPOの研究はNS-LMXBだけでなくブラックホール天体でも標準的な研究手法になっている。

3.3 困難な磁場の算出

このような状況の下で、NS-LMXBの磁場の正確な決定はあまりなされてこなかった。ただ、Aql X-1と4U 1608-52の二つのNS-LMXBで磁場が求められてきた。これらのアウトバーストの減衰時期に強度が急に変わり、スペクトルもソフトからハードに変わることを見だし、これが磁場によるプロペラ効果が起きたとして磁場を求めたのである²²⁾⁻²⁴⁾。ここでプロペラ効果とは、降着ガスが少なくなると、中性子星の磁気圧がガス圧を超えるため、回転する中性子星がプロペラのように落ち込むガスを吹き飛ばすことである。ところが、先に述べた筆者らのプロペラ効果の解釈は、X線がソフトからハードになって起こる降着円盤の遷移の光度変化とプロペラ効果がそれに近い光度で起こったため混同したものであった³⁾。論理は正確ではなかったが、たまたま得られた磁場が 10^9 G (ガウス) とか 10^8 Gとかの値だったため、年老いた中性子星の磁場と矛盾しなかったこともあり、批判されてこなかった。

このような混乱を整理するため最近、MAXIの連続するデータからヒントを得てNS-LMXBの簡単な描像が提案された³⁾。この描像から、磁場の算出方法も論理的に得られた。具体的な天体として、数カ月とか1-2年ごとにアウトバーストを起こすAql X-1と4U 1608-52の光度曲線や、これまでのスペクトルの観測結果を整理して、これらの簡単な描像と磁場が得られた。二つの天体から出発して整理したとはいえ、NS-LMXB全般の描像に適応できるものである。またこの描像では、NS-LMXBのスペクトルの複雑さに輪を掛けるものに降着円盤を見る角度の違いでX線スペクトルが変わる現象についても説明が試みられている。降着円盤を見る角度が大きくなると、X線の吸収 (ディップ) だけでなく、一般にX線がソフトになる現象である³⁾。以下ではまず、NS-LMXBの簡単な描像の説明を行う。

4. NS-LMXBの簡単な描像

4.1 状態と状態遷移

これまで述べたようにNS-LMXBには一般にソフトなスペクトルを示すソフト状態と数十keVから200 keVに及ぶハードなスペクトルを示すハード状態の二つがあることはよく知られている。NS-LMXBがアウトバーストを起こしたとき、一般にソフトなスペクトルで現れるため、ソフトランジェントと呼ばれ、ハードなスペクトルで始まるX線パルサーやブラックホールランジェントと識別されている。ソフトなスペクトルは先にも述べたように複数の黒体放射で表現される状態である。強度が弱いと非熱的成分が強くなり、スペクトルはカットオフのある冪関数で表され、物理モデルとしては温度1-2 keVの黒体放射が種光子となって、逆コンプトン散乱を受けたスペクトルと考えられている。そしてこの二つの状態を行き来する状態遷移が見られる。

Aql X-1と4U 1608-52について状態と状態遷移を調べた結果、少なくとも三つの状態と三つの

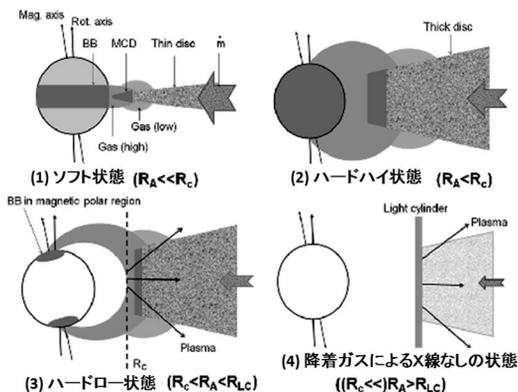


図3 中性子星低質量連星系の簡単な描像³⁾。降着円盤をもつ中性子星を円盤の横断面から見た図で中性子星近くしか描いてない。Rot. axis: 中性子星の回転軸, Mag. axis: 中性子星のもつダイポール磁場の軸, BB: 黒体放射領域, MCD: 多温度をもつ降着円盤, Thin disc: 幾何学的に薄い降着円盤, Thick disc: 幾何学的に厚い降着円盤, Gas (high or low): 温度の高いガスと低い温度のガス。状態(1)-(4)については4章で説明。

状態変化があることが指摘された³⁾。つまり、状態には、(1) ソフト状態 (Soft state), (2) ハードハイ状態 (Hard-high state), (3) ハードロー状態 (Hard-low state) の三つである。そして状態変化は、(i) ハードハイからソフトへの状態の遷移, (ii) ソフトからハードハイ状態への遷移, (iii) ハードハイからハードロー状態への遷移, またはこの逆の遷移の三つである。

さらにもう一つの状態と遷移があると考えられ、それは (iv) ハードロー状態から中性子星へ降着ガスが起こらない状態への遷移である。この降着ガスのない状態 ((4) 中性子星に降着が起こらない状態) は後述するようにリサイクル・ミリ秒パルサーと密接に関係する。これら四つの状態を図3に示す³⁾。

4.2 状態と状態遷移の物理的定義

前節で整理した状態と状態遷移は次のような物理状態と対応することができる。その前に三つの重要な物理パラメーターを説明する。

- (1) 回転する中性子星では回転するガスへの遠心力が重力と釣り合う半径が定義できる。これをCo-rotation radius R_c と称する。
- (2) NS-LMXBの中性子星の磁気圧と降着してくるガスの圧力が釣り合う半径、これを一般にアルフヴェーン (Alfvén) 半径 R_A と呼んでいる。
- (3) 回転する中性子星の外側で回転速度が光速になる半径。光速円筒 (Light cylinder) 半径で R_{LC} と呼ばれる。

ここで定義した R_c と R_{LC} はそれぞれ中性子星で固有の大きさになるが、 R_A は相手の星から流入するガスの量に依存する^{25), 26)}。そこでこれらの半径の大小が重要になり、4.1節で定義した状態と状態遷移は次のように対応する (図3参照)。

- (1) ソフト状態 $R_A \ll R_c$, すなわち、 R_A が R_c より十分に小さい。
- (2) ハードハイ状態 $R_A < R_c$
- (3) ハードロー状態 $R_c < R_A < R_{LC}$
- (4) 降着ガスによるX線のない状態 $R_{LC} < R_A$

状態遷移については (i) ハードハイからソフトへの遷移とソフトからハードハイへの遷移は降着円盤の不安定性による状態変化による。幾何学的に厚い円盤から薄い円盤に遷移、またはその逆の遷移である²⁷⁾。特にハードハイからソフトへの遷移では遷移する前にどれだけ円盤が加熱されるかによって遷移が遅れる^{28), 29)}。ソフト状態になるにはあるレベル以上にガスが円盤に蓄積される必要がある。アウトバースト以前にほとんど照射を受けていない円盤にガスがどんどん蓄積されると短時間にソフトの状態に遷移する。しかし、アウトバースト前からチョロチョロとX線照射を受けていると (つまり円盤が加熱される), ハード状態の円盤にガスの流入が増えてもソフトになるまでの時間がかかり遅延効果が発生する。

一方、(ii) ソフトからハードハイの遷移は幾何学的に薄い円盤から厚い円盤に遷移する不安定性

効果があるものの、ガスの流入量が減り、エディントンレベルの1-4%に達すると起こる^{29), 30)}。次に (iii) ハードハイからハードローの遷移の境界は $R_A=R_c$ が実現されるときで、このときの降着ガスの量がわかれば磁場が算出できる。この遷移は従来のハード状態を二つの状態に分けることができるとする新しい指摘であるため、観測的証拠も入れてさらに議論しよう。

4.3 プロペラ効果が起こる状態

ソフト状態では円盤が幾何学的に薄くなるため、降着するガスが接する磁気圏の磁気圧よりもガス圧がずっと高くなりガスは中性子星に落下しやすい。つまり、赤道付近に帯状に落下するため、ソフト状態では赤道上に帯状の高温の黒体放射地帯ができる^{15), 16)}。

次に、円盤内のガスの量がしだいに減ると、降着円盤の遷移が起こり薄い円盤から厚い円盤に変わる²⁷⁾。このとき、しばらくのあいだ落下ガスの圧力は磁気圧よりも高いと考えられ、中性子星表面の全面にわたってガスが落下する。ところが、落下ガスがさらに減りガス圧が下がると磁気圧が凌駕して全面にガスが落ちられなくなる。落下するガスにある程度の広がりがあれば、一部のガスは両磁極の周りに落ち込むことになる。これはX線パルサーで見られる状況と似てごく付近が輝くことになる³⁾。ところが、このとき磁極に落ち込めなくなったガスの多くは R_c の外側でも磁気圧が優勢であれば、図3の(3)で示すように高速に回転する中性子星はガスを跳ね飛ばす。つまり、プロペラ効果が起こる。

R_A が R_c より小さい場合プロペラ効果は起きないため、降着円盤からの落下ガス量により $R_A=R_c$ のところで、プロペラ効果が起こるか起こらないかの境界となる。この境界を観測的に見つけるため、二つの方法が考えられる。一つはアウトバーストが減光するとき、急速に強度が落ちる点を見つけることである。もう一つはほとんど輝いていなかったNS-LMXBが急激に輝くときハード

ハイを経由してソフトになる点を見つけることである。このため、何時起こるかわからない状態遷移を常にモニターする全天X線観測装置の長時間データが必要になる。

MAXIの全天X線監視装置³¹⁾はNASAのRXTE³²⁾(宇宙物理学者B. Rossiにちなんで名付けられたX線強度の変動を探索したNASAの衛星で、1996年から2012年初頭まで活躍した。この衛星には全天X線監視装置が搭載されていた)が長年(16年余)活躍し2012年1月に使命を終えた後も多くのX線源を監視している。全天X線監視装置は多くのX線源を広い視野で見えるため、各X線源の感度はそれほどよくない。例えば図2に示すように、NS-LMXB, Aql X-1と4U 1608-52のハードハイ状態は観測できるがハードローのすべてのレベルの観測は困難である。この条件を認め、MAXIの公開データ³³⁾のX線強度曲線の強度の頻度分布を図4にプロットした。上記の状態遷移のタイムスケールは1日程度のため、X線強度曲線を1日ごとの強度とした。

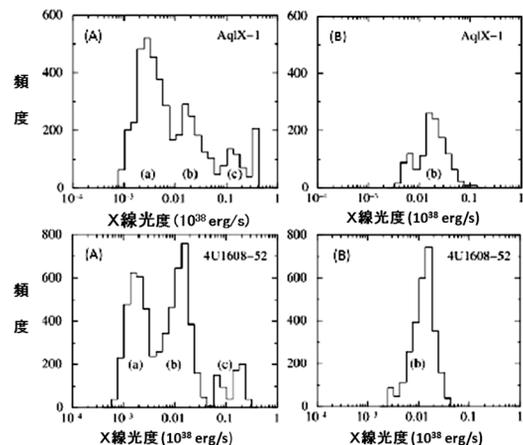


図4 Aql X-1と4U 1608-52のX線強度の頻度分布³⁾。(A)パネルは、MAXI公開の強度曲線の1σ以上の1日毎の強度に変換して作った。(B)パネルはAパネルのデータから4σ以上のものを選別し、かつソフト状態を除いたヒストグラム³⁾。この頻度分布の元となるデータの一部が図2のMAXI-GSCで、この強度を一般化のためX線強度(erg s⁻¹)に変換した。

図4のAパネルにあるように、まず、素直に見ると状態が三つあることがわかる。これをa, b, cの3グループに分ける。それにグループaとbの間とbとcの間に谷がある。これはaからbに、またbからcに何らかの早い遷移があることを物語っている。これまでのいくつかの論文の分析からグループcはソフト状態であることがわかる²⁹⁾。グループcとグループbの間の谷はハードからソフトへ、またはソフトからハードへの遷移の光度に合うことがわかった。ここまではよく知られた光度のヒストグラムである。ところがaとbの山はこれまでの結果や論文では予想していなかったものである。これこそ、ハードハイとハードローの状態とその間はハードハイからハードローへの遷移またはハードローからハードハイへの遷移と解釈すれば解決する³⁾。

その前にaグループはバックグラウンドが混じっているため、興味あるAql X-1と4U 1608-52の本来のX線を抽出するため 4σ 以上をプロットすることにする。さらにハード状態が二つに分けられるという描像を確かめるため、すでに知られているソフト状態も除いてプロットをしたのが図4のBパネルである。こうして得られたbグループの分布はバックグラウンドもソフト状態もほとんど含まないハード状態のデータの分布ということになる。この分布が低い光度に向かって急に減るところに注目する（特に、4U 1608-52の場合）。ここではプロペラ効果で光度分布がどんどん減るところであると解釈できる。この変化の出発点（分布bのピーク）が $R_A=R_c$ と見るのが自然であろう。これについては次節で再び述べる。

なお、bの低光度への分布を磁場が引き起こすプロペラ効果と解釈したが、降着円盤の何らかの不安定性があることも完全に否定できないかもしれない。しかし、中性子星の磁場が極めて弱くガス（プラズマ）の落下が自由に起こるとき、降着円盤の不安定性がある光度（ $\sim 10^{36}$ erg s⁻¹）か

ら急に止るというメカニズムが必要である。ガスが落ち込めないことは流入するガスが中性子星の外にいくか、とどまるかしなければならない。降着円盤の不安定性はソフト状態とハードハイ状態の遷移では説明されているが²⁹⁾、さらにこの低いレベルでは説明できる理論はなさそうである。

これまで述べたAql X-1と4U 1608-52のアウトバーストの減光時には、ソフト状態からハードハイ状態は降着円盤の遷移が起こり、ハードハイからハードロー状態ではプロペラ効果が起こったことが、その後の解析でも証明された³⁴⁾。しかし、ここで注意すべきは $R_A=R_c$ の点は磁場が少し強いとハード状態で起こらずソフト状態で起こることもある。この状況は2006-2007年に強いアウトバーストを起したXTE J1701-462³⁵⁾で最近見つかった^{34), 36)}。したがってプロペラ効果はソフト状態でもハード状態でも起こることが一般的であろう^{34), 37)}。

4.4 NS-LMXBの磁場の決定

$R_A > R_c$ の条件では、ガスは磁気圧に負けるためそれよりも強い磁場の領域にガスは落ち込めない。磁場をもって回転する中性子星はプロペラのような役割をはたして、落ち込んでくるガスを跳ね飛ばす。このような中性子星での磁気圧とガス圧の理論的な振る舞いは、X線パルサーの振る舞いを説明するため、1970年代の終り頃にP. Ghosh, F. K. Lamb, R. F. Elsnerらによりなされた^{25), 26)}。ダイポール磁場を仮定してガスが落ち込んできたとき、磁力線を歪ませる効果や強い重力の効果も入れた理論が構築された。

中性子星がもつ本来のダイポール磁場のまま一様なガスの落下によるガス圧と磁気圧が釣り合う半径をAlfvén半径 R_{A0} とする。実際のプラズマは磁力線に巻き付き本来の磁場強度を変え、ガス圧は磁場とバランスをとりながら、磁力線を歪ませる。このような効果を考えて実際のAlfvén半径 R_A を η を導入して $R_A = \eta R_{A0}$ で表す。いろんな条件で $\eta = 0.5 - 1$ の範囲にある。そこで $R_A = R_c$ の

関係式から磁場が降着ガスの全光度 (L) の関数として次のように与えられる^{3),34)}.

$$B = 2.6 \times 10^7 \eta^{-7/4} (P/1 \text{ ms})^{7/6} \\ \times (L/10^{36} \text{ erg s}^{-1})^{1/2} (M/1.4M_{\odot})^{1/3} \\ \times (R_{\text{ns}}/10^6 \text{ cm})^{-5/2} \text{ G}$$

ここで、 P は中性子星の自転周期、 L はガス圧に相当する全光度、 M と R_{ns} は中性子星の質量と半径である。この式に図4で得られた $R_A=R_c$ に相当する光度 $L \sim 1.6 \times 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ を入れると、Aql X-1と4U 1608-52の磁場が求まる。実はこの値はこれら二つのNS-LMXBで偶然にほぼ一致した。こうしてそれぞれの中性子星の観測で得られている回転周期 (Aql X-1では1.6 ms, 4U 1608-52では1.8 ms) を使うとAql X-1は $\sim 1.4 \times 10^8 \text{ G}$, 4U 1608-52では $\sim 1.2 \times 10^8 \text{ G}$ を得る。ここで不確定性は主としてGhosh, Lamb, Elsnerの近似式とモデルによる。 $R_A=R_c$ で得られる光度は図4のBパネルの低光度がプロペラ効果であるという前提が崩れない限り、それほど不確定性が入らない。ただ、彼らは磁場の強い中性子星を想定しているため、前記の η の値の不確定性を将来NS-LMXB用に見直す必要はある。こうして、理論の不確定性は多少残るものの、今回新しくNS-LMXBの磁場が物理的論理性をもって初めて求まったのである。

4.5 活動静止状態とは？

最近、低光度になったAql X-1やその仲間の観測が、しばしばなされているが、X線光度は $10^{33-34} \text{ erg s}^{-1}$ のレベルである³⁸⁾⁻⁴⁰⁾。これは強度が極めて弱く活動がほぼ静止した状態ということでQuiescent state ([活動] 静止状態)と呼ぶ論文が多いが、弱いながらも変動していて今回の分類ではハードロー状態と考えられる。つまり、 $10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ と $10^{33-34} \text{ erg s}^{-1}$ の間の光度は分布の谷間になっているようである。この状況は降着円盤がある程度形成されていて、中性子星に落ち込もうとするガスは $R_A > R_c$ のため、磁場によるプロペ

ラ効果で跳ね飛ばされて、ほとんど中性子星に落ち込めない状況と考えられる。

つまり、 $R_A=R_c$ を境に高い光度をハードハイ、低い光度をハードローと分類することができる。ハードローの状態は $R_A=R_c$ から低いほうに急に減る部分はあるが、そこを通り越すとプロペラ効果で跳ね飛ばされるため、X線として輝く状態が極端に少なくなるということである。Aql X-1と4U 1608-52では光度が $10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ を過ぎると一気に $10^{33-34} \text{ erg s}^{-1}$ になる傾向が見られる^{39), 40)}。プロペラで跳ね飛ばされる量が観測できていないため推測になるがハードロー状態であるレベルを通過して弱くなると1%とかそれ以下しかガスは中性子星に落ち込めず99%以上がプロペラ効果で跳ね飛ばされるようである。以上は光度の低いNS-LMXBにほぼ共通するものと考えられる³⁾。

実はここで述べた活動静止状態 (Quiescent state) は、ハードローよりもガス降着率が少なくなる4.2節の(4)の降着ガスによるX線がない状態でも同様の性質があるようだ³⁾。強度が弱いこともあってこの状態の系統的な観測と統一描像の整理には今後の研究が必要である。また、この状況のNS-LMXBの研究こそが次節で述べるガンマ線および、電波ミリ秒パルサーへの進化と関連してホットな話題となっている。

5. NS-LMXBからガンマ線および電波ミリ秒パルサーへの進化

実は、100個ほど見つかっているNS-LMXBで中性子星の回転が見つかっているものが20個ほどある⁴¹⁾。長時間コヒーレントなミリ秒パルサーが見つかることは珍しく、たまたま短い時間にX線パルサーとして見つかったものが多い。例えば、NS-LMXBはX線バーストを放出するが、これを詳細に解析してコヒーレントなX線パルサーが見つかるときがある。中性子星の表面に形成される黒体放射領域に強度のムラができると短時間ながらコヒーレントなパルサーが見つかる。

また、強度が弱いハードな状態で推移しているトランジェントのNS-LMXBでもコヒーレントなパルサーが見つかった^{42), 43)}。これは4.3節で指摘したX線パルサーが観測されたものと考えられる³⁾。これら中性子星の回転周期の見つかったNS-LMXBの周期はどれも数ミリ秒である。数十億年という長年かかって相手の星から落ち込んでくるガスから角運動量もらって高速に回転するようになったと考えられる。

一方、Fermi衛星が上がってガンマ線源の観測が大きく進展した。この中で銀河系内にこれまで知られていなかった方向に多くの弱いガンマ線源が見つかった。現在100個余り見つかった。弱いX線源が対応するものも多く、ミリ秒ガンマ線パルスを放出するものもある^{4), 5)}。電波のミリ秒パルサーと対応するものもある⁴⁴⁾。どうやら、Fermiが見つけた銀河系内の弱いガンマ線源はNS-LMXBのより進化したもの、つまり、X線をほとんど放出できなくなった古いNS-LMXBと解釈できる。ガンマ線のミリ秒パルサーは光速円筒が存在し、X線も静止状態と同様に弱く放出されている。そこでNS-LMXBの統一描像を考えると、 $R_A > R_{LC}$ の条件が整っていると考えるのが自然である。

しかし、4.5節で述べた、ハードロー状態でもX線が弱くなると $R_A > R_c$ を超えて $R_A > R_{LC}$ になってしまうことも否定できない。つまり、これまでの観測では $R_A = R_{LC}$ の確かな点を決められていないため、正確なことは今後の観測や理論研究が必要である。そして、このような状態でのX線スペクトルを観測すると、数10-100 eVの黒体放射のスペクトルとべき関数の非熱的X線スペクトルの複合のスペクトルが検出されている^{39), 40)}。前者は中性子星全体から放出されていて、後者の起源はよくわかっていない。両者の光度がほぼ同程度のことから、多分後者は、中性子星の磁極付近に落ち込むガスが出す、非熱的X線の可能性がある。もし、ガスの落下がなければ、光速円筒の

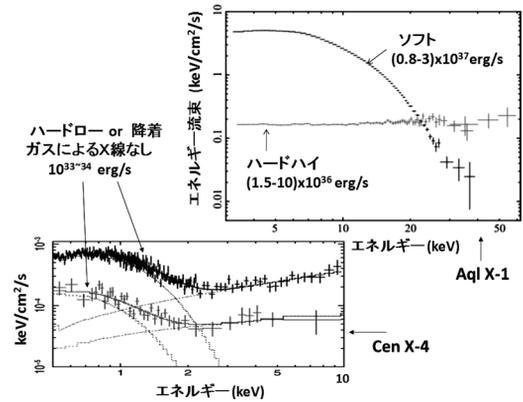


図5 NS-LMXBの状態によるX線スペクトル。右上図はすざぐ衛星で得られたAql X-1の典型的なソフトとハードのスペクトル⁴⁵⁾。左下図はAql X-1と同様にアウトバースを起こしたNS-LMXB Cen X-4のハードロー状態のたいへん強度が弱くなったX線スペクトル二つ⁴⁰⁾。この状態では100万度またはこれを下回る黒体放射と非熱放射のべき関数の複合スペクトルをもつことが一般的である。縦軸のエネルギー流束のスケールからわかるように、右上図と左下図がほぼ比較できるように互いにずらせて示した。

境界領域で光るX線成分の可能性も考えられる。以上述べたNS-LMXBのX線スペクトルを広いエネルギー範囲で示すと図5になる。NS-LMXBの状態によって大きく違ったスペクトルを示している。

6. 最後に

NS-LMXBは年老いた中性子星が晩期型星と近接連星系を形成しているが、晩期型星からのガスの放出が少なくなると降着円盤が形成されなくなり、光速円筒より外側でプロペラ効果が起こることになる。ここで跳ね飛ばされたガスが相手の晩期型星を削り取り細っていく。こうしてNS-LMXBの最後はいわゆる、黒家蜘蛛(Blackwidow)⁵⁾となり中性子星だけのミリ秒パルサーとなる。つまり、ガス放出率は少なくなると光速円筒より外ではむしろ粒子の加速が可能ほどに薄くなり、まず硬X線やガンマ線が出るようにな

り、次に電波をシンクロトロンで出す高エネルギー電子が生成されるようになる。この解釈はまだ観測的に細かく確認されていないリンクもあるが、今回算出された磁場がミリ秒パルサーで算出されている磁場とほぼ一致していることからミリサイクルパルサー説はさらに一步確かなものになったと言える。こうしてNS-LMXBはFermi衛星の時代になり、ガンマ線や電波のミリ秒パルサーとして復活したと言える。さそり座X線源Sco X-1の発見から50年ほど経って再びこの仲間が脚光を浴びている。

謝 辞

本報告の多くは、MAXIチームが3年を超えて取得した多くの変動するX線源の連続データを見ていて思いついたものである。MAXIチームの日頃の地道な運用と科学的議論に深く謝意を表す。

参考文献

- 1) Giacconi R. et al., 1962, Phys. Rev. Lett. 9, 439
- 2) 江副祐一郎, 2010, 天文月報 103, 616
- 3) Matsuoka M., Asai K., PASJ 65, 26
<http://arxiv.org/abs/1210.2586>
- 4) Kerr M., et al., 2012, ApJ 748, L2
- 5) Kong A. K. H., et al., 2012, ApJ 747, L3
- 6) Stella L., et al., 1994, ApJ 423, L47
- 7) Ho W. C. G., et al., 2011, ApJ 730, L36
- 8) Hewish A., et al., 1968, Nature 217, 709
- 9) Giacconi R., et al., 1971, ApJ 167, L67
- 10) 榎戸輝揚, 2012, 天文月報 105, 431
- 11) Truemper J., et al., 1978, ApJ 219, L105
- 12) Makishima K., et al., 1999, ApJ 525, 978
- 13) Mihara T., 1995, Ph.D. Thesis, Dept. of Phys., Univ. of Tokyo.
- 14) <http://iss.jaxa.jp/kiboexp/ef/maxi/news.html>
- 15) Mitsuda K. et al., 1984, PASJ 36, 741
- 16) Mitsuda K., et al., 1989, PASJ 41, 97
- 17) Barret D., 2001, Adv. Space Res. 28, 307
- 18) White N., et al., 1988, ApJ 324, 363
- 19) Lin D., et al., 2007, ApJ 667, 1073
- 20) Hasinger G., van der Flis M., 1989, A&A 225, 79
- 21) Schulz N., et al., 1989, A&A 225, 48
- 22) Zhang W., et al., 1998, ApJ 495, L9
- 23) Campana S., et al., 1998, ApJ 499, L65
- 24) Chen X., et al., 2006, ApJ 650, 299
- 25) Ghosh P., Lamb F. K., Pethick, C. J., 1977, ApJ 217, 578; 1979, ibid. 232, 259; ibid. 234, 296
- 26) Elsner R. F., Lamb F. K., 1977, ApJ 215, 897
- 27) Mineshige S., Wheeler J. C. 1989, ApJ 343, 241
- 28) Kim S. W., et. al., 1999, PASJ 51, 393
- 29) Asai K., et al., 2012, PASJ 64, 128
- 30) Maccarone T. J., 2003, A&A 409, 697
- 31) Matsuoka M., et al., 2009, PASJ 61, 999
- 32) Levine A. M., et al., 1996, ApJ 469, L33
- 33) MAXIデータの公開: <http://maxi.riken.jp/top/>
- 34) Asai K., et al., 2013, submitted to ApJ
- 35) Liu D., et al., 2009, ApJ 696, 1257
- 36) Fridriksson et al., 2010, ApJ 714, 270
- 37) Rappaport S. A., 2004, ApJ 606, 436.
- 38) Asai K., 1998, PASJ 50, 611
- 39) Cackett E. M., et al., 2011, MNRAS 414, 3006
- 40) Cackett E. M., et al., 2010, ApJ 720, 1325
- 41) Lin Q. Z., van Paradijs J., van den Heuvel E. P. J., 2007, A&A 469, 807
- 42) Galloway D. K., et al., 2002, ApJ 576, L137
- 43) Galloway D. K., et al., 2005, ApJ 622, L45
- 44) Guillemot L., et al., 2012, MNRAS 422, 1294
- 45) Sakurai S., et al., 2012, PASJ 64, 72

Sco X-1 and Its Evolved Objects Getting into the Limelight in 50th Anniversary

Masaru MATSUOKA and Kazumi ASAI

RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: The X-ray object, Sco X-1, was discovered 50 +1 years ago. Since this discovery the X-ray astronomy has progressed to extend to all the fields of astronomy and astrophysics. On the other hand Sco X-1 and its category (NS-LMXBs) have provided still unresolved problems such as state transitions and strength of magnetic fields, because they behave complicated in spectral intensity. Now, Matsuoka and Asai (2013) have proposed a simplified picture of NS-LMXB and determined the strength of magnetic fields of two NS-LMXBs (Aql X-1 and 4U 1608–52) by a new method. The result is that these are comparable to the magnetic fields of old millisecond radio pulsars. This result suggests that the NS-LMXB connects to the scenario of recycled millisecond pulsars. Furthermore, Fermi satellite has discovered the considerable millisecond gamma-ray pulsars which are considered to indicate a link between NS-LMXBs and millisecond radio pulsars. Thus, this link will be solved by further multi-wavelength studies of NS-LMXBs.