

X線で見える星座

宮崎大学准教授 森 浩二

1. 星座とX線と私

私は宇宙物理学を専攻しています。理論ではなく、観測が専門です——。このように自己紹介すると、「では、やっぱり、星座なんかには詳しいんでしょうねえ」とつつこまれることがある。こういう場合、星座に対する知識が常人並かそれ以下であると自覚している私は、ただただ笑ってお茶を濁すようにしている。「いや、実は、ほとんど知らないですよ」と返してもよいとは思いますが、私の不見識で宇宙に関わる研究者のイメージを失墜せしめてはなるまいという思いのほうが強くでる。おそらく自意識過剰に違いないが、この苦手意識はなかなか根が深い。元を正せば、子供のころに星座が教えられたような形で私の目に映らなかったことに端を発しており、それ以来、星座や星にはなるべく関わらないようにしてきた。

そんな私も宇宙や宇宙でおこる物理現象には興味があり、気がつけばこの分野に飛びこんで10年になる。観測を行っていると言頭で述べたが、具体的には私の専門分野はX線天文学といい、天体から放射されるX線を観測してそこで起こっている物理現象を研究する分野である。古来、人類は目に見える可視光線という、波長でいえば400～800nm程度、エネルギーでいえば1.5～3.5eV程度の帯域の電磁波で宇宙を眺めてきた。現在、人類は可視光のみならず、 10^{-7} eV以下の電波から 10^{12} eV以上のガンマ線まで、およそ20桁に及ぶエネルギー帯域の電

磁波を使って宇宙を観測している。明確な定義はないが、X線天文学では0.1keVから数100keV(keVは 10^3 eV)の3桁のエネルギー帯域にわたる電磁波を扱っている。その3/20桁を受け持つX線天文学の担当は、多少の誤解を恐れずに言えば、“熱い宇宙”になろう。熱平衡に達している物体の温度と、そこから放射される電磁波のエネルギー¹は比例関係にある。数eVのエネルギーの可視光線は表面の温度が約6,000度の太陽から放射されるので、数keVのエネルギーのX線は1,000万度程度の温度の物質から放射されることになる。つまり、X線で見えるのは数百万度から数億度に及ぶ熱い宇宙であり、可視光とはまた違う宇宙の側面を見ることになる。

図1は、はくちょう座を含む40度四方の天空領域を可視光(左)とX線(右)で見たときの画像である。可視光画像では、図で右下の方向へ、天の川に沿って優雅に舞うはくちょうの様子が見てとれる。一方でX線画像では、はくちょう座を形成する星は見えず、円で囲った3つの領域に明るいX線天体が見える。可視光画像にも同じ領域に円を重ねたが、対応する天体がないことがわかる(1つの円の内部には、はくちょう座の首にあたる星があるが、中心はずれている!!)。円で囲った3つのX線天体は、いずれも“星が爆発した後の化石”である。以下、具体的に星がどのように爆発し、どういった“化石”を残し、我々がそれをどのように見ているのか、という点を順に説明していきたい。その結果として、読者の方々

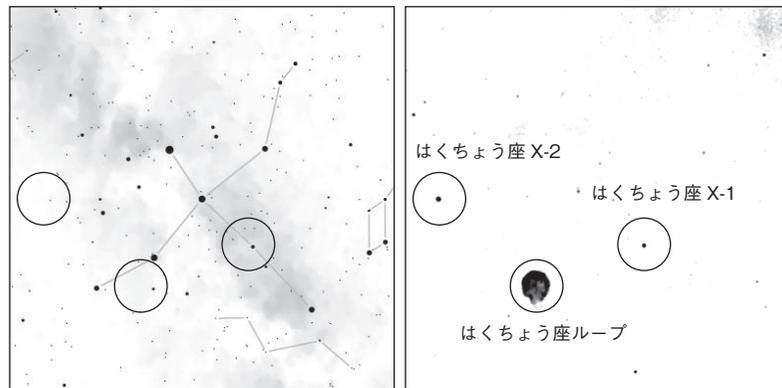


図1 可視光(左)とX線(右)で見た、はくちょう座を含む40度四方の領域の画像。左図中心付近の十字を描く星座線が、はくちょう座を表す(はくちょうは図の右下方向へ翼を広げて飛んでいる)。
左図は、PP3ソフトウェア(<http://pp3.sourceforge.net/>)を用いて作成した星図で、目視可能な6等級以下の星のみ描画している。
右図は、独自のX線天文衛星であるROSATにより取得された画像。両図中の3つの円は、X線天体の位置を示す。

※1 正確には、エネルギーフラックスが最大となる電磁波のエネルギー

に、私なりの星座の見方を多少なりとも楽しんでいただければ幸いです。

2. 星の終末

“星が爆発した後の化石”と書いた。つまり、星は爆発するということだが、ここでいう星とは核融合のエネルギーで輝く恒星のことを指す。また、全ての恒星が爆発するわけではなく、太陽の約10倍以上の質量を持った恒星のみが爆発すると考えられている²。ここでは、そのような大質量の星の終末を概観してみる。

星はできたてのころは、ほとんど水素でできている。これが核融合の火の中で、より原子番号が大きく重い元素へと合成されていく。その火の源は原子核の束縛エネルギーの差額であり、最も束縛エネルギー(化学でいえば結合エネルギー)が大きい鉄へと燃え尽きたところで火は消える。星は、縮もうとする重力を核融合の光と熱のエネルギーが支えている構造物である。よって、核融合の火が消えた瞬間、支えを無くした星は自重により自らの中心に向かって落ちてゆく。このときの落下=重力収縮のタイムスケールは密度の平方根に比例する。星は核融合が進行した段階においては、高密度のコアと希薄な外層部の複合構造になっているため、コア中心部は外層部に比して圧倒的な速さで収縮する。その間ザッと0.01秒!このコア中心部の重力収縮には終着点があり、それはこの世で最も硬い物質である原子核程度にまで密度が上昇した時点である。この巨大原子核ともいべき超高密度星は、質量はおおよそ太陽程度で半径が約10kmである。普通の原子核は陽子と中性子からできているが、このような極端状況下では陽子が電子をとりこんで全ての核子が中性子化している。よって、中性子星と呼ばれる。この中性子星の硬い表面に後から降ってきたモノが衝突し跳ね返され、外向きの衝撃波が発生する。そして、この衝撃波が外層部を吹き飛ばし星が爆発する——。これが超新星爆発と呼ばれる大質量星の終末におこる現象である。

星の質量が太陽の約30倍を越えるような大々質量の星の場合は、後から落ちてくるモノの重みに耐えられず、中性子星も押し潰されると考えられている。原子核の密度を越えた究極の天体—ブラックホール—の誕生である。実際には、最後の中性子星・

※2 白色矮星という恒星とは違ったタイプの星も爆発をおこす。ただし、爆発機構はここで触れる恒星のそれとは異なる。

ブラックホール形成から星の爆発にかけての話は最新の理論研究でもよくわかっていない部分が多い。だが、次にみるように、星が爆発した後の化石は実際に観測されており、その大まかなストーリーは確かであろうと考えられている。

最後に、この超新星爆発のエネルギーを簡単に見積もってみる。質量 M の物質が半径 R の球に重力収縮する際に開放される重力エネルギーは、 GM^2/R で概算される。エネルギーの源はほとんどコア部の重力収縮によるものであるから、 M に中性子星質量 \cong 太陽質量、 R に中性子星半径 \cong 10kmを代入すると、 3×10^{46} J程度になる。理論計算によると、このうちの99%は物質とほとんど相互作用をしないニュートリノが持ち去り、残りの1%が爆発のエネルギーに転嫁されるようである。それでも、その1%のエネルギーは太陽がその100億年という一生をかけて放つ放射エネルギーと同等であるという。まさに想像を絶する巨大爆発だが、「重力に引っぱられて落ちたものが、硬い床にぶつかって跳ね返ってくる」というのは日常よく目にする現象である。どちらも原理は同じだが、超新星爆発の場合、桁違いという言葉では足りないぐらい桁違いのエネルギースケールで起こっているのである。

3. はくちょう座にあるX線天体

ここまで、駆け足で星の終末の話をしてきた。太陽の約10倍以上の質量を持つ星は、最後には超新星爆発を引き起こす。その際、爆発の衝撃波は星を吹きとばし、中心には中性子星が残る。さらに約30倍太陽質量以上の非常に重い星では、ブラックホールが残る。図1のX線天体はまさにそういった星の“化石”である。3つの天体の中で唯一大きく広がっている天体は“はくちょう座ループ”と呼ばれる天体で、爆発により吹き飛ばされた星の痕跡である。残りの2つは図で右手が“はくちょう座X-1”、左手が“はくちょう座X-2”と呼ばれる天体で、それぞれブラックホールと中性子星と考えられている。これらの化石は、考古学よろしく、その元となった親星の活動を探る上でも重要ではあるが、それ自身が地球上では達成不可能な極端環境下にある物理的存在として非常に面白い振舞いを見せる。ここでは具体的に、それら、はくちょう座にある個々のX線天体の素性を見ていく。

3.1 はくちょう座ループ

はくちょう座ループは爆発により吹き飛ばされた星の痕跡であるが、まず、その星の爆発の痕跡がX線でよく見える理由を簡単に示そう。爆発エネルギー E により、質量 M の物質が膨張速度 V で吹き飛ばされたとすると、

$$V = \sqrt{\frac{2E}{M}} \quad (1)$$

が成り立つ。 E に前述の爆発に使われるエネルギー $3 \times 10^{44} \text{J}$ 、 M に 10 倍の太陽質量を代入すると、 V は約 $6,000 \text{km/s}$ になる。これは爆発初期の速度であり、ある程度の広がりを持つところには $1,000 \text{km/s}$ 程度になる。このような音速以上の速度で星の周囲にある物質と衝突すると、その衝撃により熱せられる。このときの温度を T とすると、ここは天下り的になるが、

$$T = \frac{3mV^2}{32k} \quad (2)$$

となる。ここで、 m は水素原子の質量、 k はボルツマン定数である。これに上記の $V = 1,000 \text{km/s}$ をいれ、 $T \cong 1 \times 10^7 \text{K}$ 、つまり吹き飛ばされた物質は 1 千万度程度の超高温プラズマとして存在していることになる。始めに述べたように、これは大体 X 線観測の守備範囲の温度域であり、図 1 の可視光画像でその姿が見えない理由でもある³。

図 2 は、はくちょう座ループの X 線画像である(図

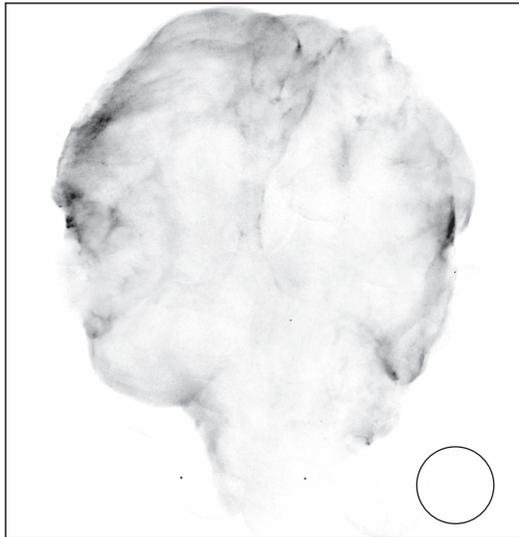


図 2 はくちょう座ループの X 線画像。図右下の円は、満月の見かけの大きさ(直径約 0.5 度)を表す。

※ 3 きっと詳しい方がいらっしやるであろうから触れておくと、はくちょう座ループは可視光でも見ることができ「網状星雲」の名で有名である(肉眼ではムリ)。これは(2)式からもわかるように、膨張速度が非常に遅く温度が低い領域にあたる。ただし、X 線のようにその構造の全ては見えず、とぎれとぎれである。

1 の拡大版)。超新星爆発により吹き飛ばされた星の外層は、周囲の物質を掃き集めながら広がっていく。そのため外部の密度が濃く、放射強度が強くなり、見た目が輪(ループ)ようになる。図 2 はまさにその様子を示している。図の右下の円は、満月の見かけの大きさ(直径約 0.5 度)を表している。はくちょう座ループが如何に巨大な構造であるかが、わかっていただけと思う。実際、はくちょう座ループはこの手の天体の中で、見掛けの大きさが最大クラスである。見掛けの巨大さは、比較的近傍に位置していること(と、いっても約 1,800 光年)と、爆発してから十分時間が経過していること(約 10,000 年前と推定されている)に起因している。現在見積られている距離に大間違いがないとすると、実半径は約 45 光年となる。これは、爆発前の星がバスケットボールぐらいだったとすると、ほぼ地球ぐらいの大きさにまで広がったことに相当する。宇宙空間の希薄さと爆発の規模が伺い知れよう。

図 3 は、日本のすざく衛星で取得した、はくちょう座ループの X 線スペクトルである。ある特定のエネルギーのところ、強度が高くなっている様子がわかる。これらはラベルした元素からの固有 X 線であり、それらの元素が高温プラズマに豊富に含まれていることを示す。プラズマの状態によって同一元素から複数の固有 X 線が見えることがあり、この場合でも半数の元素でその様子が見てとれる。また、基本的にエネルギーの低い側から順にその起源となる元素の原子番号が上がっているが、鉄が酸素とネオンの間に来リズムを乱しているように見える。これはその他の固有 X 線が K 殻への電子遷移に起因するものであるのに対し、鉄の固有 X 線だけがポテンシャルの浅い L 殻への電子遷移に起因しているからである。こうして X 線スペクトルからは、爆発前の星内部で合成された元素が、超新星爆発によって宇宙空間に放出されている様子を知ることができる。人体を構成する元素もこのようなプロセスを辿り今に至っている事実を認識すれば、我々も宇宙の一部であるという思いを感じずにはいられない。

3.2 はくちょう座 X-1 と X-2

はくちょう座 X-1, X-2(以下、Cyg X-1, X-2)は、

いずれも X 線天文学の黎明期に発見された非常に明るい X 線天体である。特に全天体の中でもブラックホールであることが最も確実視される Cyg X-1 は、これまで最もよく観測されてきた X 線天体の一つである。X-1, X-2 ともに普通の恒星とペアを組んでおり、その星と自分自身の重心をグルグル回る連星系を成している。この相方である恒星からのガスがコンパクト星(ブラックホールや中性子星などをまとめてこう呼ぶ)の深い重力ポテンシャルに落ちこんでくる際の重力エネルギーの開放により、これら X 線連星系は X 線で明るく輝くのである。中性子星の第二宇宙速度=無限遠方からモノが落ちこんできたときの速度は $\sqrt{2GM/R} \cong 1.6 \times 10^8 \text{m/s}$ で、光速の半分にも達する。これらの一部が熱エネルギーにかわれば、数千万度ものプラズマが発生し X 線でギラギラに輝くということが想像されよう。より重力ポテンシャルの深いブラックホールでは、なおさらである。

恒星から降ってきたガスはそのままダイレクトにはコンパクト星に落下せず、風呂場の水と同じ様に、渦を巻きながら落ちていく。この渦を降着円盤という。できるものならこの降着円盤の画像をお見せしたい私も見たいが、現在の観測技術では不可能である。Cyg X-1 を例にとると、ブラックホールと恒星の実距離は太陽と水星の実距離よりも近いようである。また、地球から Cyg X-1 までが約 8,000 光年ほども離れていることを考えると、直接撮像の困難さは想像に難くない。

綺麗な画像がないかわりに、図 4 に、日本のすざく衛星で取得した Cyg X-1 の X 線スペクトルを示

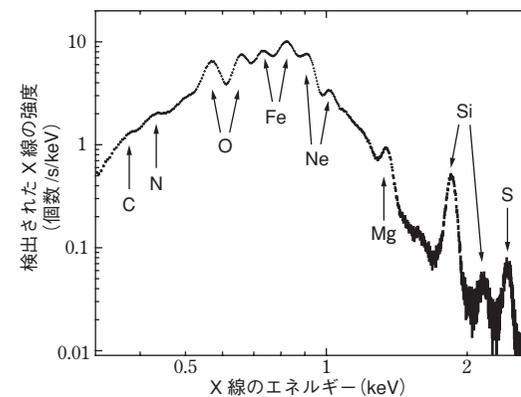


図 3 日本のすざく衛星で取得した、はくちょう座ループの X 線スペクトル。両対数グラフになっていることに注意。

す。先程のはくちょう座ループのスペクトルのエネルギー範囲をグレーで示した。如何に Cyg X-1 のスペクトルが広帯域に広がっているかがわかる。実際にはさらにこれ以上のエネルギーにまでスペクトルは伸びている。ブラックホール連星における膨大なエネルギーの開放を示す、壮大なスペクトルである。

4. 私の星座の楽しみ方

この分野で研究する機会を得てから、超新星爆発やブラックホールなどの熱い宇宙の存在を初めて認識した。それは文字として知っている以上の認識であり、そこから発せられる X 線という生の声を直接見聞きすることで得た認識である。しかし、それは私の研究生活の上でのものであり、その場を離れた日常生活においては私の中に在るものではなかった。それが、「自分が研究している天体は、今この夜空のどこにあるのだろうか?」という疑問から図 1 を作成したことで、私の目にうつる夜空とその先の熱い宇宙がリンクした。私にとって星座は熱い宇宙の天体を探す道標であり、お目当ての星座を見つけては「おお、こんなところにブラックホールが!」などと一人悦に入っている。今では、「この記事が記載される冊子の発刊は 11 月だから、はくちょう座ではなくて冬の星座のほうがよかったな」ぐらいは思えるようになった(大分、書いてから気がついたので、変更できませんでした)。また、機会があれば、別の星座についてお話ししましょう。

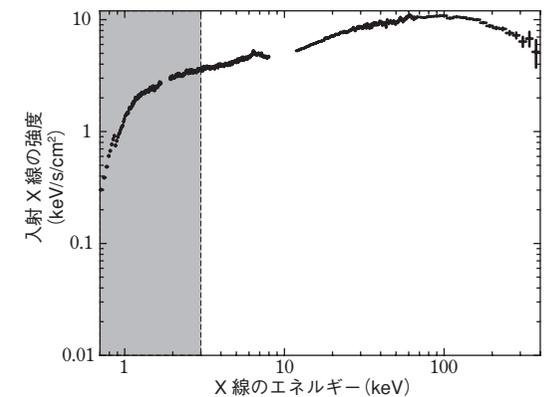


図 4 日本のすざく衛星で取得した、はくちょう座 X-1 の X 線スペクトル。両対数グラフになっていることに注意。