

## X線バースト源の最大光度と分布

戎 崎 俊 一\*

X線バーストは、X線連星の明るさが数時間から1日に1回の割合で約10秒間太陽の一万倍の明るさで輝く現象である。この現象については、天文月報誌上で何度も紹介されている(天文月報1977年12月号, 80年2, 4, 7, 11月号)ので一般的な話はそちらを参照してもらいたい。今回は、X線バースト源の最大光度を使ってバースト源の距離を決める方法と、これによって得たバースト源の分布にテーマを絞ろうと思う。

### 1. X線バーストはどこまで明るくなれるか

X線バーストは次のように起こると普通考えられている。中性子星と普通の恒星が連星系をなしている。なんらかの理由(たとえば恒星の進化による膨張など)で恒星から中性子星へガスが流れ込み中性子星表面に降り積もっている。このようにして降り積もった水素に富む層の底では、水素がヘリウムに変わる核融合反応が進んでいる。このために、ほとんど純粋のヘリウムが水素に富む層の下にたまっていく。ある程度ヘリウムがたまると、ヘリウム燃焼が爆走して核爆発が生ずる。これがX線バーストとして見えるのだ。このようなモデルは、X線バーストの基本的な性質(全エネルギー、時間尺度の長さ、放射領域の大きさなど)をうまく説明できるので、一般に信じられている。

このモデルに従って数値シミュレーションをしてみると、バーストの最大光度近くでは、中性子星の光度がエディントン光度に達するために、光圧勾配が重力を上まわって質量放出が起こることがわかった。バーストで解放される核エネルギーは重力エネルギーの100分の1程度と小さいが、電子散乱の吸収係数が温度によって変化するために、表面のほんの少量のガスにエネルギーが集中して質量放出が可能になる(この事情は天文月報1983年11月号の花輪氏の記事に詳しいので参照してもらいたい)。このとき、エディントン光度を上まわった余分の光度は質量放出に使われてしまうので、最終的な中性子星の光度はほとんどエディントン光度に等しくなってしまう。つまり、X線バーストはちょうど中性子星のエディントン光度まで明るくなれる。

### 2. 質量放出の証拠

理論から言うと上記のような結論となるが、一方では

\* 東大理 Toshikazu Ebisuzaki: Maximum Luminosities and Distribution of X-ray Burst Sources

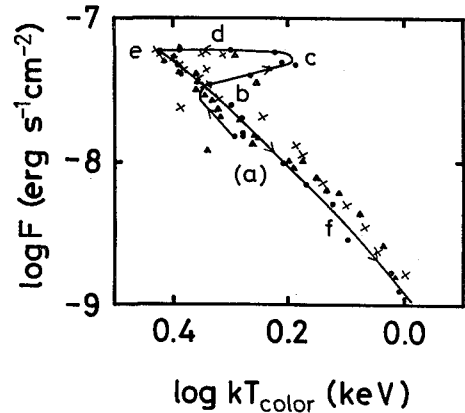


図1 X線バースト源 1636-53 の H-R 図 (本文参照)

光学観測から決めた距離を根拠にX線バーストが中性子星のエディントン光度より明るくなっているという主張がなされてきた。しかし、日本のX線天文衛星「天馬」はX線バースト源 1636-53 で起きた12個のバーストを観測し、前節で述べた質量放出のモデルを強く支持し、これまでの趨勢をくつがえす重要な結論を得た。

図1は観測された中で比較的大きな3つのバーストの各瞬間におけるX線強度(縦軸)とX線カラー温度(横軸)を示している。つまり、X線バーストのヘルツシュプルング・ラッセル図である。3つの違う種類の記号はそれぞれ3つの違うバーストをあらわしている。時間の経過は実線につけた矢印で示している。この図は次のように解釈できる。水素に富む層の吸収係数はヘリウム層より1.7倍大きい(宇宙組成)ので、この層のエディントン光度は、1.7倍小さい。したがって、核爆発が進むにつれて、光度がまず水素に富む層のエディントン光度に達する。このため、ヘリウム層の上にある水素に富む層で質量放出が始まり、半径が急激に増大する。つまり、図1で右方に移動する(b)。ところが水素に富む層は、バーストのごく初期に発生する対流により非常に薄くされてしまうので、簡単に吹き飛ばされてしまい下のヘリウム層がすぐむき出しになる(b→c)。次に光度がヘリウム層のエディントン光度に達し、ヘリウム層の質量放出が始まる(c→d→e)。その結果、最大光度はどのバーストでもヘリウムのエディントン光度になる。実際、図1を見るとわかるように、この3つのバーストの最大X線強度は驚くほど一致している。その後バーストは衰退期に入り、質量放出も終って半径一定のままゆっ

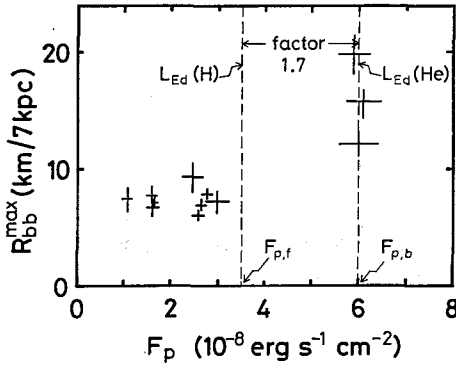


図 2 半径の増大と最大 X 線強度の関係

くり冷えてゆく (e → f)。

ところが、比較的弱い残り 9 個のバーストにはこのような半径増大はみられない。図 2 は横軸に最大 X 線強度、縦軸にバーストの衰退期以前における最大の黒体半径を取って、個々のバーストをプロットしたものである。これを見るとわかるように、これらの最大 X 線強度は比較的強い 3 つのバーストの共通の最大 X 線強度  $F_{p,b}$  (ヘリウムのエディントン光度に対応している) の 1.7 分の 1 ( $F_{p,f}$ ; 水素に富む層のエディントン光度に対応している) よりさらに弱い。したがって、これらのバーストでは光度が水素に富む層のエディントン光度にさえ到達しなかったので、質量放出が起らず半径も増大しなかったと考えられる。

もし、何らかの理由で X 線バーストの最大光度がエディントン光度を越えるのであれば、次のような困難な疑問が生ずる。例えばエディントン光度の 3 倍のレベルに 3 つの独立なバーストの最大光度を調節するメカニズムは何なのか。また、膨張のためのエネルギーが絶対的に不足している状況の中で、全エネルギーが 1 桁も違わないバーストの一方が激しい膨張を示し、他方はほとんど膨張しないという違いを作るのはいったい何なのか。一方、吸収係数の温度変化による質量放出のモデルは、上記のように、これらの難問を無理なく説明できる。

このように、この「天馬」の観測は、X 線バーストではエディントン光度が重要な役割を果たしていること、また、X 線バーストの最大光度は水素に富む層ではなく、ヘリウムのエディントン光度になることを観測的に示した。

### 3. X 線バースト源の分布

今まで述べてきたように、X 線バーストが実現できる最大光度は、中性子星の表面をヘリウムがおおっていると考えたエディントン光度である。中性子星の標準的なモデル (質量が  $1.4 M_{\odot}$ 、半径が 10 km) を使い、一般

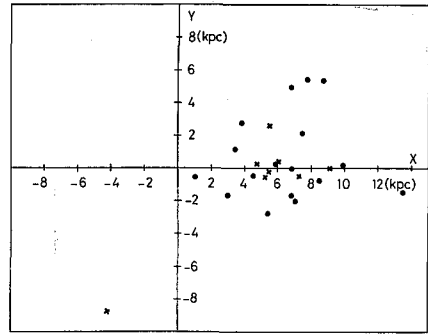


図 3 銀河面に投影した X 線バースト源の分布

相対論を考慮すると、この値は  $2.7 \times 10^{31} \text{ w}$  となる。この値とバースト源で観測された最大の X 線強度  $F_{\text{max}}$  を使うと、バーストの距離が  $d = (L_{\text{Ed}}(\text{He}) / 4\pi F_{\text{max}})^{1/2} = 15 \cdot (F_{\text{max}} / 10^{-11} \text{ w/cm}^2)^{-1/2} \text{ kpc}$  で与えられる。このようにして 25 個のバースト源までの距離を求め、銀河内での位置を決めた。座標系としては、太陽の位置を原点とし、銀河中心方向に  $x$  軸、銀河北極方向に  $z$  軸にとった直交座標系を用いた。

まず図 3 を見てもらいたい。この図は X 線バースト源の位置を  $x-y$  平面 (銀河面) に投影してプロットした図である。×印は球状星団中にあることがわかっているバースト源、●印はそうでないバースト源をあらわす。これを見るとわかるように、X 線バースト源は銀河中心方向 6 kpc の点を中心として分布している。この点をはっきりさせるために、銀河中心からの角度が 20 度以下のバースト源を選び、それらの距離に対する分布を図 4 にプロットしてみた。斜線部に球状星団中にあるバースト源の数をあらわす。やはり 4~8 kpc あたりに分布するバースト源の数が最大となる。また X 線バーストの銀経分布を示した図 5 (斜線部の意味は図 4 と同様) を見ると偶然とは思えないほど銀河中心方向 ( $l=0$ ) に集中している。これらのことを総合すると、太陽から 4 kpc から 8 kpc の間、おそらく 6 kpc の地点に銀河中心が

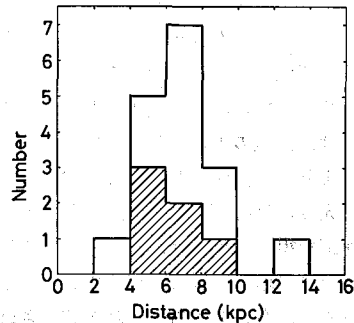


図 4 銀河中心方向の X 線バースト源の距離分布

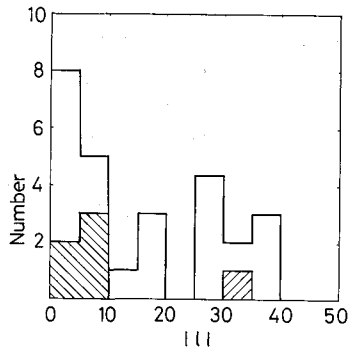


図5 X線バースト源の銀経分布

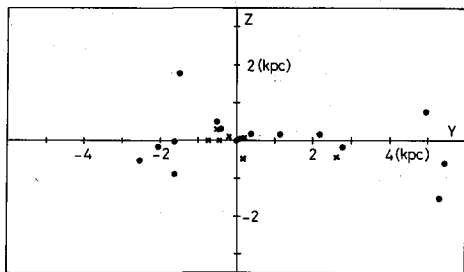


図6  $y-z$  平面に投影したX線バースト源の分布 (座標系については本文参照)

存在している可能性が高い。

次に図6を見てもらいたい。この図はX線バースト源の位置を  $y-z$  平面に投影してプロットした図である。●と×の意味は図3と同じである。一見してわかることはX線バースト源が銀河面に沿って薄く分布していることだ。このスケールハイトは約400 pcである。これは球状星団のスケールハイト3 kpcよりかなり小さい。一方、X線バースト源内かなりの数(27個中7個)は、球状星団にあって、球状星団の中にはバースト源が存在する確率がかなり高いのも事実だ。分布の違いの解釈は2つある。① X線バースト源の一部は球状星団とは何の関係もなく、銀河面内に薄く分布している。② 球状星団の中のスケールハイトが小さい特定のグループにだけX線バースト源が存在している。バースト源の数が少ないのでこれ以上は何とも言えないが、図6はX線バースト源の起源に関係した重要な問題を提起している。

最後に注意したいのは、今回求めたバースト源までの距離の中には、距離の上限でしかないものもあるということだ。つまり、今回使った最大X線強度が、実際にエディントン光度に対応している保証がないものもあるのだ。この保証を得るためには、X線バースト源1636-53のように、半径が増大し質量放出していることを確認する必要がある。現在のところ、これが確認されているX線バースト源はまだ少ない。この点は今後の課題である。

#### 4. 中性子星の質量は大きくできない

前節で述べたように、質量  $1.4 M_{\odot}$ 、半径10 kmの中性子星の標準的なモデルを使って距離を決めると、銀河中心の距離が従来言われてきた10 kpcよりずっと小さく6 kpcになる。これを矛盾と考えて、中性子星の質量を  $3 M_{\odot}$  程度にすることによりエディントン光度の値を大きくし、解決できないかという議論がよくなされるが、これは別の困難にぶつかる。

X線バースト時のスペクトルは黒体スペクトルで近似される。その温度がX線カラー温度だ。バーストで観測されるバースト源の最大X線カラー温度は、ほぼどのバースト源でも同じでほしい  $kT_{\max} = 2.8 \text{ keV}$  ( $3.2 \times 10^7 \text{ K}$  に対応する)である。ところが、中性子星の質量を  $3 M_{\odot}$  とすると、この2.8 keVのX線カラー温度が実現できないのだ。質量  $M$ 、半径  $R$  の黒体球があるとしよう。これがエディントン光度で輝いているとする。ふつう、半径が小さくなるほど黒体の温度は高くなる。ところが半径がシュワルツシルド半径の4分の7より小さくなると、重力赤方偏移でかえって無限遠点でみた黒体の温度は低くなってしまふ。その最大値は  $kT_{\max} = 2.1 \text{ keV} / (M/M_{\odot})^{1/4}$  となる。つまり質量が増えるほど  $kT_{\max}$  は減少するのだ。したがって、観測値  $kT_{\max} = 2.8 \text{ keV}$  を代入すると、X線バースト源の質量の上限が得られる。実際には、中性子星表面はコンプトン散乱が効いているため完全な黒体ではなく、黒体だと考えたときより高温の光子を放射できる。これを考慮に入れると少し制限が弱くなるが、せいぜい上限値は  $1.5 M_{\odot}$  だ。

以上のように、観測されたX線カラー温度を可能にするためにはX線バースト源の質量は  $1.5 M_{\odot}$  以下である必要がある。

#### 5. まとめ

本稿で述べたX線バーストを使う距離決定の方法を他と比べてみよう。例えば、球状星団の水平分枝の明るさから決める方法は次のような欠点を持つ。① 色々な量の微妙なバランスで決まる水平分枝の明るさを基礎にしている。② 化学組成、特に金属元素量の影響を受けるかどうかについて、今だに議論が続いている。③ 可視光は星間吸収を強く受ける。これに対して、X線バーストを用いる方法には次のような長所がある。① エディントン光度という極めて単純な概念に基礎を置いている。② 化学組成の影響は受けない(質量放出で自動的に表面が純粋のヘリウムになってしまふ。金属元素量はエディントン光度に関係しない)。③ X線は星間吸収をほとんど受けない。このように、X線バーストを使った方法が、従来方法より劣っているとは、私にはとても

思えない。少なくとも今までのものとは独立の新しい距離尺度が生まれたことは確かである。

天馬のデータを提供していただいた田中靖郎教授を始めとする天馬チームの人々に感謝する。ここで用いたデ

ータは和気泉さん（現在、日立中央研究所勤務）が解析したものである。さらに、啓発的な議論を続けてくださった指導教官の杉本大一郎教授や花輪知幸さんなど、野本ゼミのメンバーに感謝したい。

## PASJ から外国誌への論文流出についてのアピール

最近 PASJ への投稿者の一人の方より我国の天文学研究論文で PASJ 以外の外国誌等に流出するものが増えて居るという御指摘がありました。この方はその原因として (i) PASJ の掲載料が高いから？ (ii) PASJ のサーキュレーションが悪いから？ (iii) 外国誌に投稿する人は PASJ を二流誌と見做しているから？ 等の可能性を挙げ、この傾向が増加すれば我々の論文発表の media としての PASJ はどうなるかと危惧を表明しておられました。

この方の指摘されたように我国の天文学研究論文が、従来はほとんどが PASJ に出されていたのに、特にここ数年 *Astrophysical Journal* 誌や *Astronomy and Astrophysics* 誌に流出するもの数が増えているというのは事実だと思います。これは実は編集部としましても気がついて居りまして、今迄にも数回この様な傾向について意見交換を行ないました。

PASJ が *Ap. J.* 等に比べてサーキュレーションが悪いのは事実で、最近、諸外国の研究所等で予算節減等のあおりを受けて購読がむしろカットされ兼ねない雲行きにあること、*Ap. J.*, *Astron. & Ap.*, *MN* 等の雑誌の volume が急増して外国の研究者自体がそれらに目を通すのがやっとなという感じで、それ以外はあまり読んでもらえないようになって来ていること、等の複合効果で、一時より少しサーキュレーションが落ちているのが事実かも知れません。編集部での意見交換は、この様な傾向に対して PASJ はどう対処すべきかという事でありました。

これに関して、編集部の分析では我国の研究者で *Ap. J.* 等に投稿する人が増えているのは上の (i)~(iii) のうちでは (ii) が最大の原因となっていると考えています。最大の流出先である *Ap. J.* についてはその掲載料は PASJ よりぐっと高いので、(i) だけが論文流出の原因でない事は明らかです。むしろ、これはと思う論文をサーキュレーションの良い外国誌に投稿するために出費がかさみ、その結果それ以外の論文を出したい PASJ の掲載料がもっと安ければ良いのにと感じるグループが多くなっていることの様です。又、外国誌に投稿した人も、決して PASJ が論文を出すに値しないなどと考えたからでは

なく、むしろ (iii) とは逆に PASJ は質的には既に十分 *Ap. J.* などと比肩出来ると感じつつも、よりサーキュレーションのよい外国誌に研究結果を出版したいと考えたものようです。やはり原因をたどると (ii) が問題の根だった様です。

編集部の論議は、従って、どうしたら他の主要誌の volume 増大、外国研究所図書室等の予算節減に伴う講読減少、等の影響に対抗して PASJ のサーキュレーションを上げて行く事が出来るかという点に集中致しました。サーキュレーションが良くなれば PASJ を二流誌であると考えているのでは決してない我国からの外国誌投稿者達は進んで PASJ に戻るでしょうし、そうすれば出版関係費用が苦しいという感じを持つ所は大幅に減るのが現実ではないだろうかと思うのです。

### 編集部の提案

編集部としては、論文著者が外国誌等に投稿する事は著者の基本的自由<sup>\*</sup>に属する事ですので、それをやめる様に提案する等の事は出来ません。これに関しては PASJ という我々の発表基本メディアを隆盛に保つ事は我々日本の天文学者自身の利益であるという事をお互いに認識し直す事を強くアピールしておきたいと思えます。そして PASJ のサーキュレーションを良くする具体的方策として、既に励行して居られる方も勿論あると思えますが以下の提案をしたいと思えます。

PASJ 論文のリプリントを最大限に活用すること。著者はその論文に興味を持つ筈の国内国外の研究者を徹底的に調べ、それらの人々にリプリントを送ること。漫然と送っている場合（例えば単に自分が refer した人に送るなどの場合）と違って、こうする事により関心の対象の近い研究者には、PASJ に目の届いていない人にも、その論文の存在を確実に知ってもらう事が出来る。意味ある論文であれば多くの場合引用される筈です。この様にして PASJ からの引用が増えれば、外国の研究者も PASJ を読まざるを得ず、外国研究所の図書室等も PA

\* 小グループ、個人等で PASJ の掲載料が現実に論文を投稿する事を妨げているケースがありましたら、編集部にて御相談下さい。