

X線バーストしている中性子星の X線スペクトルと大気構造

戎 崎 俊 一*

1. Introduction

X線バーストは宇宙の一角からやってくるX線が爆発的に増加し、数十秒位の間にゆっくり減っていく現象で、中性子星表面で発生する核爆発であると思われる。その燃料となる水素やヘリウムはその中性子星と連星系をなしている普通の星から流れ込んできたものである。これらの燃料がある一定以上たると、核融合反応が暴走して核爆発となりX線バーストが発生する。この現象については、日本のX線天文衛星“白鳥”や“天馬”でよく研究されていて本月報でも何度か紹介されている(天文月報1977年12月号, 80年2, 4, 7, 11月号, 84年11月号)。一般的な話はそちらを見ていただきたい。本稿ではバースト中の中性子星大気モデルとそれが放射するX線スペクトルについて書きたい。また、これをもとにして作った理論的な色温度-光度図と、“天馬”の観測によって作られた観測的な色温度-光度図を比較して推定される中性子星の質量, 半径, 距離についても書く。

2. 中性子星の定常静水圧大気モデル

バーストしている中性子星は磁場や回転が無視できる程小さく、完全に球対称だとする。バーストの間、光度は数秒位で変化するが、大気の熱的、力学的な時間尺度はそれよりずっと短いので、大気は定常で、静水圧平衡、ふく射平衡にあると考えて良い。また、大気の厚さは中性子星の半径に比べて十分薄いので平行平板である。バーストしている大気では、光子スペクトルは、電子によるコンプトン散乱で強く変形される。これをカンパニエーツ方程式で記述した。温度が 10^7 K程度で電子は非相対論的なので、カンパニエーツ方程式を使うことができる。一方、空間的な光子の流れは、flux-limited近似を使って記述した。この近似は光学的に薄い極限と厚い極限で正確なので、その間でもまずまず正しいと考えられる。不透明度は電子散乱と自由-自由遷移の不透明度だけを考え、束縛-自由遷移の不透明度は無視する。London, Taam, Howard (1985)によれば、重元素量が太陽と同程度である限り、束縛-自由遷移の不透明度は無視できる。

初期に質量放出が起こり、一番外側の水素に富む層が完全に放出され、この下のヘリウム層がむき出しになっ

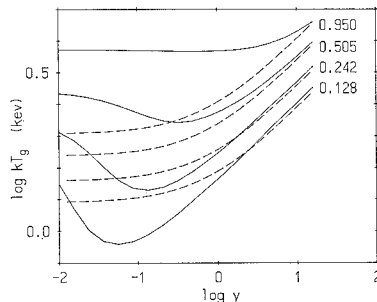


図1 中性子星大気的气体温度分布
(数字はエディントン光度を単位とした中性子星の光度)

ているらしいバーストが幾つか観測されている(天文月報1984年11月号)。これらのバーストは、その最大光度が中性子星のエディントン光度に対応していることが理論的にわかっているので特に重要である。そこで、ヘリウム大気モデル計算をまづすることにした。

以上の仮定のもとに光子の輸送方程式、ふく射平衡式、静水圧平衡式を同時に解き、温度、密度分布とともに、放射されるX線スペクトルを得た。まず、質量が太陽の1.4倍、半径が10kmの中性子星の大気的气体温度分布が図1に電子散乱に対する光学的厚さ、 y に対して示されている。この大気では電子散乱の不透明度が吸収的な不透明度に対して卓越しているので、 y は光学的厚さと考えてさしつかえない。また、電子散乱の不透明度は定数なので、 y は表面から積分したコラム密度に比例する。数字は、エディントン光度を単位とした中性子星の光度である。比較のためにエディントン大気モデルの温度分布が破線で描かれている。大気の中の方はガスとふく射が熱平衡に達しているためガス温度はエディントン大気モデルの温度と一致する。しかし、表面近くでは、コンプトン過熱のためにガス温度がふく射の色温度に近づこうとする。このため、温度分布の逆転(外に向かうほど高温になる)が見られる。このような大気が放射するX線のスペクトルが図2の実線で描かれている。これは中性子星がエディントン光度の95%で輝いている時のものである。このような明るい中性子星の大気ではコンプトン散乱でふく射とガスが熱平衡になる。したがって、コンプトン-ハンプが7keV辺りに見られる。この大気の有効温度(1.8keV)に対する黒体スペクトルが比較のために破線で表されている。計算されたスペクトルはこれよりも硬い(高いエネルギーのX線が多

* 東大教養 Toshikazu Ebisuzaki: X-Ray Spectra and Atmospheric Structures of Bursting Neutron Stars

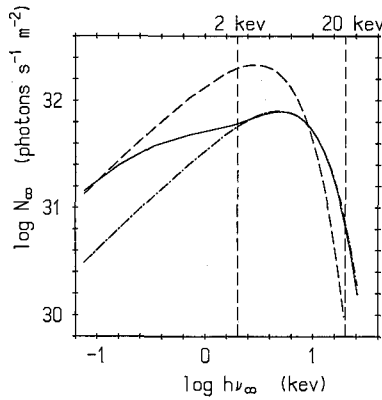


図2 X線バーストのX線スペクトル

(実線が計算結果, 破線が有効温度に対する黒体スペクトル, 一点鎖線が2-20 keVの範囲で計算スペクトルに最もよく合う黒体スペクトルをあらわす.)

い) これは, 表面近くでは光子がガスと熱平衡になるほど十分な回数の散乱が起こらないので, 内部で形成された高温のスペクトルがそのまま放射されるからである. 一点鎖線は計算されたスペクトルに2-20 keVの範囲でもっともよく合う黒体スペクトルである. 両者は2 keV以下では全く合わないがそれ以上では良く合う. したがって, 2 keV以上のスペクトルが黒体スペクトルに合うと言う観測結果がうまく説明できる.

3. 中性子星の色温度-光度図

観測と比較するために色温度 T_c と黒体光度 L_f を求める. 色温度は2-20 keVの範囲でX線スペクトルに最も良く一致する黒体スペクトルの温度とする. また黒体光度は, その黒体スペクトルを全エネルギーについて積分して求める. これらを色々な光度について計算して色温度-光度図を作る. 図3は, このようにして求めた, 質量が太陽の1.4倍, 半径が10 kmの中性子星の色温度-光度図である. 比較のために, 有効温度を破線で表している. 色温度は全てのモデルについて有効温度より高い.

まったく同様の手続きで, バーストの観測から色温度と黒体光度を求め, 観測的な色温度-光度図を作る. 図4にX線バースト源MXB 1636-536から天馬が観測した3つのバーストの色温度-光度図が丸, 四角, 三角で表されている. バースト源はバーストの進行にしたがってこの図の上を進化して行く(天文月報1984年11月号参照). また, この3つのバーストの進化はお互いに極めてよく似ている. この進化は次のように解釈できる. まず, 水素に富む層の質量放出が始まり, 中性子星大気は膨脹する(a-b). 水素に富む層は非常にうすいので簡単に全部吹き飛んでしまいその下のヘリウム層がむきだしになる. 引き続きヘリウムの質量放出が起こる. この間

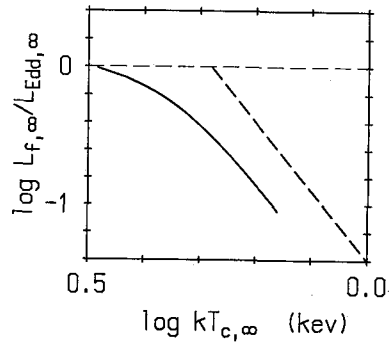


図3 中性子星の色温度-光度図
(破線は有効温度をあらわす.)

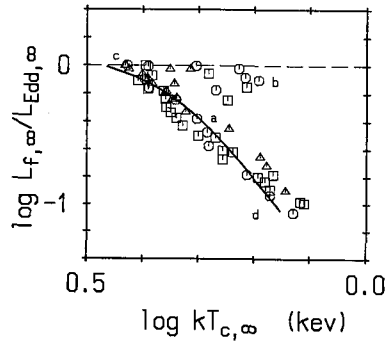


図4 理論と観測の比較
(理論は減衰期の観測とよく合う.)

明るさはヘリウムのエディントン光度に等しくなるよう調節される(b-c). したがって,

$$L_{Edd, \infty} = (4\pi cGM/\kappa_0)(1 - 2GM/Rc^2)^{1/2} = 4\pi d^2 F_p \quad (1)$$

ここで, M, R, d はそれぞれ中性子星の半径, 質量, 距離である. また, F_p は観測された最大のX線強度で, b-c間のX線強度に等しい. これらのバースト源の場合 $6.5 \times 10^{-11} \text{ Wm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である. 式(1)は, d を与えた時に1つの M と R の関係を与える. これが図5に $d=5 \text{ kpc}, 6 \text{ kpc}, 7 \text{ kpc}$ について破線で表されている. 質量放出が終わった後は, 半径一定のまま静かに冷却して行く(c-d). この時, 中性子星の大気はヘリウムからできているはずである. この減衰期の色温度-光度図を, 私が計算した理論的な色温度-光度図と比較した. その結果, 両者が一致するためには, 中性子星がエディントン光度で輝いている時の無限遠点からみた有効温度 $T_{Edd, \infty}$ が $1.79 \pm 0.02 \text{ keV}$ でなければならない. つまり,

$$T_{Edd, \infty} = [(c/\sigma)(GM/R^2)(1 - 2GM/Rc^2)^{3/8}] = 1.79 \pm 0.02 \text{ keV} \quad (2)$$

この時, 両者は非常に良く一致する(図4). 式2はもう1つの M と R についての関係を与える. これは図5に実線で表されている. 図5を見れば分かるように, 式1

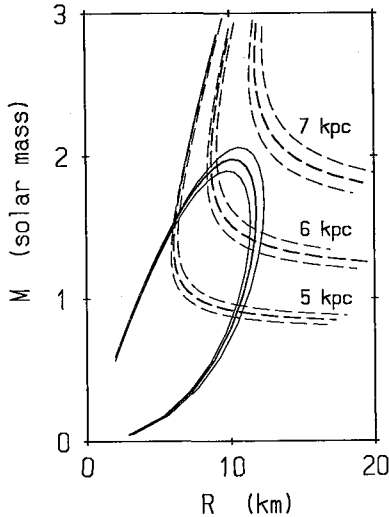


図 5 色温度 - 光度図からつけられた中性子星の質量半径への制限

と式 2 は M , R , d についての上限を $M_{\max}=2.0\pm 0.1 M_{\odot}$, $R_{\max}=11.8\pm 0.5$ km, $d_{\max}=6.5\pm 0.2$ kpc と与える。

4. 議 論

以上の議論により、中性子星の半径、質量、距離の 3 つのパラメーターについて、2 つの関係式が得られた。だからあと 1 つ独立な情報が得られれば 3 つのパラメーターが全て決定できる。今、これに使うことができる情報が 3 種類ある。残念ながらこれらはどれも不確定性が大きく単独では第三の関係式とは成り得ないが、3 つを全部合わせると、かなりのことがいえる。

まず第 1 が、MXB 1636-536 のバースト中の X 線スペクトルに発見された 4.1 keV の吸収線だ (和気ら天馬グループ 1984)。4.1 keV には適当な線がないので、中性子星表面で形成された元々もっと高いエネルギーの吸収線が中性子星の強い重力による赤方偏移を受けていると考えられる。これを使うと、次のような原子のイオンの K_{α} 線が 4.1 keV の吸収線である場合次のように赤方偏移度が求められる。

$$(1-2GM/Rc^2)^{1/2}=0.61\pm 0.02 \text{ for Fe}_{XXV} \quad (3-a)$$

$$=0.72\pm 0.02 \text{ for Cr}_{XXIII} \quad (3-b)$$

$$=0.86\pm 0.02 \text{ for Ti}_{XXI} \quad (3-c)$$

これらの式と式 2 を同時に満たす領域が図 6 に斜線で表されている。

次は、中性子星の理論的なモデルの質量半径関係である。色々な状態方程式について計算された理論的な質量半径関係が図 6 の実線で表されている (MF: 平均場理論による状態方程式, TI: テンソル相互作用モデルによ

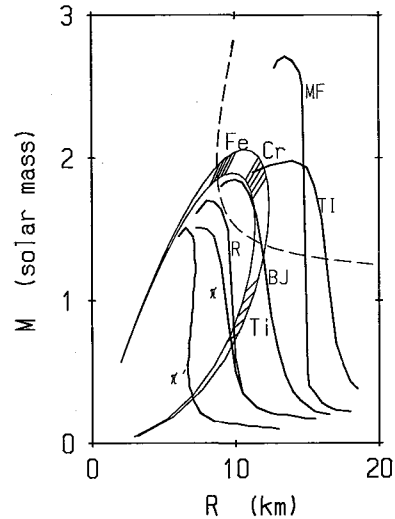


図 6 他の情報との比較

る状態方程式, BJ : Bethe と Johnson の状態方程式, R : Reid ポテンシャルを持った純粋の中性子の状態方程式, π : 普通の強さの荷電したパイオンの凝縮で変形された Reid 状態方程式, π' : 強いパイオン凝縮を仮定した状態方程式; Baym and Pethick (1979) による). MF は式 2 と交点を持たない。また, TI は不安定な領域で式 2 と交わっているのでこの 2 つはこの比較から不適当だと分かる。また, 4.1 keV 吸収線を鉄の K_{α} 線に同定する解 (3-a) は、どの理論とも矛盾するので不適当である。

最後に、銀河中心までの距離がある。銀河中心方向に集中しているバースト源についてそれぞれの観測された最大 X 線強度の平均 $\langle F_p \rangle$ は $6.2 \times 10^{-11} \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で MXB 1636-536 の最大 X 線強度とほとんど同じである。これらのバースト源は観測された最高の色温度が MXB 1636-536 と同じでほぼ 3 keV なので、これらは MXB 1636-536 と同じ質量と半径を持ち MXB 1636-536 と同じように最大 X 線強度がエディントン光度に対応していると考えられる。つまり、MXB 1636-536 までの距離は銀河中心距離とほぼ同じである。銀河中心距離は測定法によってかなりばらつきがあるが 6 kpc より小さいことはないと思われる。事実、これまでに提案された最も小さな銀河中心距離, d_{GC} は Frenk と White (1983) による 6.7 kpc である。つまり MXB 1636-536 はたぶん 6 kpc より遠い。 $d=6$ kpc に対して式 2 が与える関係が図 6 にも破線で書かれている。MXB 1636-536 はこの線より右上になければならない。4.1 keV 吸収線をチタンの線に同定する解 (3-c) はこの線の下にあるので不適当だと思われる。

結局、これらの MXB 1636-536 についての 3 つの情

報に矛盾しないのは次のような組み合わせである。

4.1 keV 吸収線	Cr _{XXIII}
赤方偏移度	0.72±0.02
質量	太陽の1.7倍から2倍
半径	11から12 km
距離	6.3から6.7 kpc
(銀河中心もほぼ同じ距離にある)	
状態方程式	Bethe と Johnson の状態方程式など上の質量、半径と矛盾しないもの

この結果は銀河中心が太陽から7 kpc 程度にあることを強く示唆している。これは Frenk と White (1983) が球状星団の分布から求めた $d_{GC}=6.7$ kpc や Downs (1985) らが銀河中心に近い星の生成領域、いて座 B2 の水メーザーの固有運動から求めた 7.1 ± 1.6 kpc などの値と良く一致している。またクロムは、X線バーストの原因となる核発で大量にできることが元素合成の計算からわかっている。これが対流によって表面近くに運ばれ質量放出によってむきだしになり、吸収線をつくることは、十分ありえることである。

良質のデータを供給してくれた宇宙科学研究所の松岡助教授など天馬グループのみなさんに感謝したい。本稿で使ったデータのうち特にことわらなかったものは宇宙

科学研究所の中村さんが解析したものである。また、私のうるさい議論に付き合ってくれた杉本教授をはじめとする野本ゼミのみなさんにも感謝したい。最後に、私は東京大学学生学術研究奨励金の援助を受けて昨年6月にデンマークのコペンハーゲンで開かれた IAU コロキウム No. 89 “Radiation Hydrodynamics in Stars and Compact Objects” に参加した。海外の色々な研究者と交流し強い刺激と学問的なインスピレーションを受けた。大変有意義な旅行であった。この奨励金制度に強く感謝する。また、この制度が一層拡充されることを希望する。

「星図星表めぐり」の訂正と追加

天文月報第67巻(1974年)第6号189頁右欄下から17行目及び日本天文学会編「星図星表めぐり」(誠文堂新光社, 1977年)第24頁下から8行目の“山本(1936)のカタログ”を、“山本 進(A. S. Yamamoto, 1936)のカタログ”とし、「星図星表めぐり」第106頁右欄，“山本一清の一覧表(カタログ)……24, 26, 28”を，“不確実な彗星の暫定一覧表……24, 26”とし、その次に“山本 進の彗星のカタログ……24, 26, 27”を挿入する。
(筆者より依頼)

天体観測雑誌

天文ガイド

5月号 定価420円 4月5日発売

最新情報を満載/詳しく紹介します
ハレー彗星観測ガイド

製造工程や技術などを解説
日本で初めてのハニカム鏡

15年ぶり/観測ガイド
火星が大接近!

富田先生の詳しい観測法
夏に打ち上げ 測地衛星

アメリカの天文事情
パロマー山の天文ファン

●新しい望遠鏡光学系 ● 5月の星空
●天文学とコンピュータ…など情報満載

天文ガイド別冊

号外 PHOTO ハレー彗星



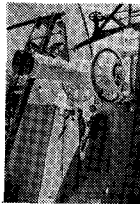
- これでハレー彗星が見える
- 情報を待つ巨大パラボラ
- 木曾の御岳山からハレーを追う
- 尾の変化日々刻々
- 胸高なるその姿
- たかがハレー、されどハレーほか

絶賛発売中! 定価300円

STAR WATCHING

天文ガイド4月号臨時増刊

- 特別企画! ハレー彗星
- 火星7月に大接近
- オーロラを見にアラスカへ
- M天体Photo Album
- オーストラリアの巨大望遠鏡群
- 天体写真の特殊技術……ほか



好評発売中! 定価580円