

# “はくちょう”で観測した X 線パルサー I

—Vela X-1—

長 瀬 文 昭\*

## 1. はじめに

X線天文衛星“はくちょう”は1979年2月に打上げられて以来今日まで3年近くの間順調に観測を続けており、“アインシュタイン”衛星がその使命を終えた現在では本格的なX線観測のできる唯一の衛星といっても過言でない。“はくちょう”は主にX線バースターの観測にその威力を発揮し、数々の成果をおさめていることは皆様御承知の通りであり、そのいくつかはこの天文月報でもすでに紹介された。しかし“はくちょう”はX線バースターのみでなくいくつかのX線パルサー(Vela X-1, Cen X-3, A0535+26)の観測を行ない、いくつかの重要な成果を得ている。そこで本稿ではこれらのX線パルサーのうち Vela X-1 の観測により“はくちょう”があばきだしたX線パルサーの新しい様相を紹介したいと思う。

ウフル衛星によりX線星の観測が始まって以来多くのX線連星が発見され、これらは極端に半径の小さいX線星(白色矮星, 中性子星, ブラックホール)をその構成員とする近接連星系から成り、その主星から放出されるガスがX線星へ降着する際その重力加熱により高温プラ

ズマとなりX線を放射するものと考えられている。このようなX線連星のうちのあるもの(Her X-1, Cen X-3, SMC X-1, Vela X-1 など)は1秒~数100秒の周期でX線強度が脈動していることが発見され、これらはX線パルサーと呼ばれている。現在銀河系内には20個近いX線パルサーが見つかっているが、このX線星は強い磁場( $\sim 10^{12}$  ガウス)を伴い高速で自転している中性子星と考えられている。代表的な10個のX線パルサーを選び、そのパルス周期の短い順に並べて表1に示した。これらのX線パルサーはdisk-fed型, wind-fed型, 再帰新星型などいくつかに分類できるが、“はくちょう”で観測したCen X-3, Vela X-1, A0535+26はそれぞれの代表選手とも云えるX線パルサーである。

近接連星系においてX線パルサーが観測されるためには、(1) X線星(中性子星)が強い磁場を伴って高速回転していること、(2) 主星からX線星に多量の物質の流入があること、の2つの条件が必要である。このようなX線連星パルサーには2つの形態が考えられる。1つは主星の放出する超音速の星風がX線星の周辺に衝撃波面を構成し、この領域を通るガスが減速されX線星にとり込まれるタイプ(wind-fed型, 図1A=表紙)である。

表1 代表的な10個のX線パルサー(パルス周期の順に並べた)

X線パルサー の名前	パルス周期 $P$ (秒)	(注1)	X線強度 $L_x$ ( $\times 10^{37}$ エルグ/秒)	公転周期 Porb (日)	X線星質量 $M_x$ ( $M_\odot$ )	質量関数 $f(M)$ ( $M_\odot$ )	軌道離心率 $e$	主星のスペ クトル型	(注2)
		その変化率 $-\dot{P}/P$ (/年)							その他
SMC X-1	0.71	$7.7 \times 10^{-4}$	50	3.9	0.75-1.6	10.8	<0.0007	B0I	EB
Her X-1	1.24	$3 \times 10^{-6}$	1	1.7	0.6 -2.0	0.85	<0.002	A-F	EB
4U0115+63	3.60	$3 \times 10^{-5}$	3	24.3	—	5.0	0.34	Be	TR
Cen X-3	4.84	$2.8 \times 10^{-4}$	4	2.1	0.35-1.8	15.5	0.0008	06.5 II-III (uv)	EB⊙
4U1626-67	7.68	$2 \times 10^{-4}$	—	—	—	—	—	Be	LM
A0535+26	104	$3.5 \times 10^{-2}$	4	>30	—	—	—	Be	TR⊙
GX1+4	122	$2 \times 10^{-2}$	4	—	—	—	—	M6IV+Hot	—
Vela X-1	283	$1 \times 10^{-4}$	0.1	9.0	1.5 -2.6	19.3	0.09	B0Ie	EB⊙
GX301-2	696	$8 \times 10^{-3}$	0.3	35.0	—	25	0.44	B1.5Ia	—
X Per	836	$2 \times 10^{-4}$	0.001	—	—	—	—	Be	—

(注1) ここに挙げたパルス周期の変化率は1977年以前の観測を基にラバポートとジョス(S. Rappaport and P. C. Joss, Nature, 266, 683, 1977)によりまとめられたもので、現在では改訂の必要なものが多いが一応の目安として示す。

(注2) EB; eclipsing binary, TR; transient source, LM; low mass binary  
⊙; これまでに“はくちょう”で観測したX線パルサー。

もう1つのタイプは主星がその進化に伴いロッシュ限界まで膨張し、その重力境界の接点(ラグランジュ点)を通して質量放出を行ない伴星の周りにケプラー運動による降着円板を構成し、その内側部分がX線星に落ち込む型(disk-fed型, 図1 B=表紙)である。ここでX線星にとり込まれたガスは磁極に沿って降着する際の重力加速の運動エネルギーを中性子星表面への衝突により熱エネルギーに変換して高温プラズマとなり、強いX線放射を伴う。Cen X-3はHer X-1, SMC X-1などと共にdisk-fed型の代表例と考えられる。これに対してVela X-1はGX301-2などと共にwind-fed型に属するものと考えられ、これらは比較的長いパルス周期(～数100秒)を持ちその連星軌道が楕円であるものが多い。A0535+26のような再帰新星型のX線パルサーは特に偏平率の大きな楕円軌道をなすwind-fed型と考えられる。

X線パルサーの観測においては、(1)多様なパルス形状およびこのエネルギー依存性や時間変化、(2)X線強度の連星周期に伴う変化、特に星食現象、(3)X線星の公転に伴うパルス周期のドップラー変化、(4)その公転ドップラー効果を差引いたX線星本来のパルス周期

(中性子星の自転速度)の時間変化、およびこれとX線光度との関連、など豊富な情報が得られる。さらに光学観測によりその主星の物理量や連星系周囲のガス分布などが把握できる。したがってX線パルサーはX線放射機構のモデルや中性子星の内部構造などの検証には最も適したX線星といえる。この中で最近2年間に“はくちょう”衛星によって行なわれたVela X-1, Cen X-3, A0535+26の観測はX線パルサーに関するこれまでの描像を書き替えるほど目覚ましい成果をもたらしつつある。以下の章ではこのうちVela X-1の観測から得られた結果について述べる。

## 2. パルスプロファイル

X線パルサーのパルス形状は電波パルサーのそれと異なり、一般に波形が広がっておりさらに複雑な構造を持っている。さらにその形状はパルサー毎に千差万別であり、パルス形状を調べることによりX線星への物質の降着、X線発生領域、その自転軸と磁極の傾き、X線星周辺のガスによるX線吸収の様子などがわかる。Vela X-1はX線パルサーの中でも最も複雑なパルスプロファイルを示し、そのエネルギー依存性も顕著である。

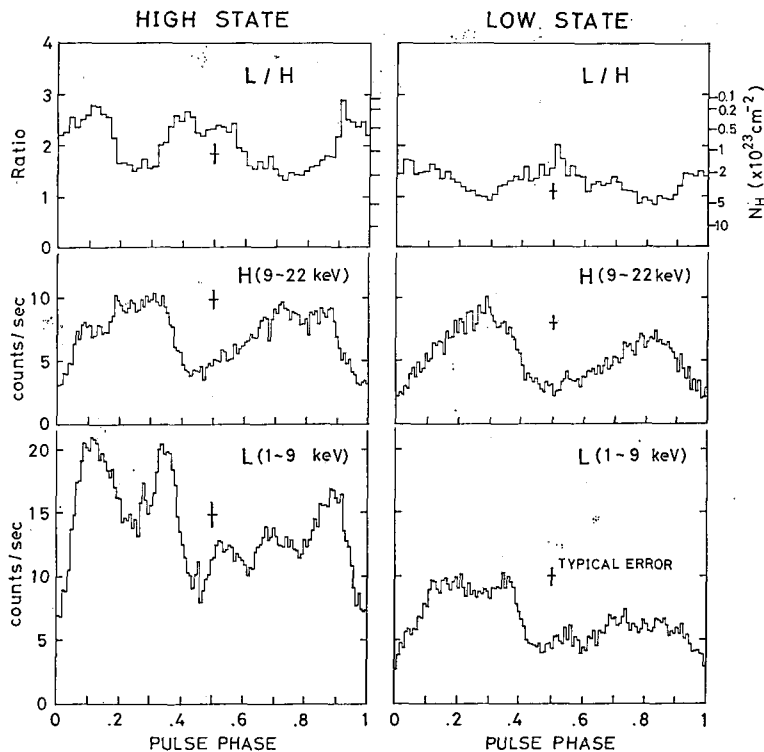


図2 X線パルサー Vela X-1 のパルスプロファイル。左はX線光度の大きい (High State) とき、右はX線光度の小さい (Low State) とき。また図は下から L-バンド、(1-9 keV)、H-バンド (9-22 keV) およびその比 (L/H) である。これらの図はそれぞれ 25 個のパルスをその周期 282.8 秒で重ね合せたものである。

図2は1980年3月の観測で得た Vela X-1 の X線パルスプロファイルである。図2の左側はX線光度の大きいとき (High State), 右側はそれの小さいとき (Low State) のプロファイルである。それぞれについて 25 個のパルスを 232.8 秒周期で重ね合せた平均的なパルスプロファイルを示している。また図は下からエネルギー領域 1~9 keV (L-バンド), 9~22 keV (H-バンド) の強度およびその比 (L/H) を示す。図から明らかなように Vela X-1 のパルスプロファイルは H-バンドでは比較的単純な 2 つのピークを持ちその強度も X線星光度によらず一定であるが, L-バンドではその構造は複雑である。特に High State のときの L-バンド X線強度は増大しており, さらに特徴的なことは 5 つの比較的鋭いピークが現われることである。これら 5 つのピークは図2に見られるように Low State のときに弱くなるばかりでなく, そのピークの相互の強度比はパルス毎に変化する。この X線パルスプロファイルの時間変化は星風の強さ, 速度の変化に関連するものと思われる。

このように L-バンド X線パルスの形状は複雑にみえるが, 見方を変えれば H-バンドパルスプロファイルの

ピークに対応する位相部分がくぼんでいるものと考えることができる。図2の L/H 比を見るとこの部分が極小になっていることがわかる。ここで L/H 比は一般的には X線放射領域での X線エネルギースペクトルと, これが地球に到達するまでに受ける星間吸収との両者に依存して決まる。Vela X-1 の場合はそのエネルギースペクトルの解析から主に吸収によりこの L/H 比が変化することがわかったので, その吸収ガス層の厚さの目安を図2の L/H 比の右側縦軸に示した。X線源 Vela X-1 までの星間ガスの量は多くても  $6 \times 10^{21}$  H-atom  $\text{cm}^{-2}$  と推定されるので, 図に示された量  $(3 \sim 50) \times 10^{22}$  H-atom  $\text{cm}^{-2}$  は大部分が中性子星周辺での吸収と考えられる。今 H-バンドプロファイルのピークが中性子星の磁極に対応するものと思えば, L-バンドプロファイルにおけるへこみは図4 A に模式的に示すように中性子星表面での X線放射が磁極方向では降着ガスそのものにより吸収されるものと考えれば説明できる。なお Vela X-1 の場合その X線光度が比較的小さい (wind-fed 型の特徴) ことから, その X線放射領域は磁極に沿って円柱状に伸びているのではなく, 中性子星表面の比較的薄い円板状部分

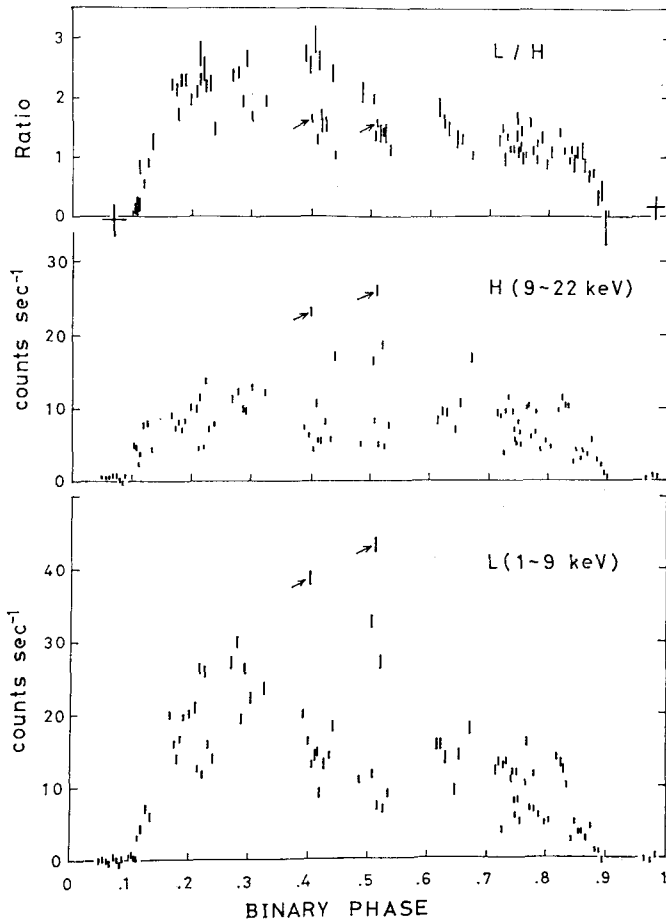


図3 Vela X-1 の X線光度曲線。図は 1980 年 3 月に観測されたデータを Vela X-1 の連星周期 8.96 日で重ね合せ X線の星食の中心を原点として示したものである。

であろうと考えられる。

### 3. 連星周期に伴う X線強度の変化

Vela X-1 は 1970 年代初期のウフル衛星による観測以来, Her X-1, Cen X-3 などと共に X線食連星として知られている。その連星周期は約 8.96 日ででありまた星食期間は約 1.7 日である。図 3 は星食の中心を位相原点として 1980 年 3 月に観測された約 2 公転周期分のデータを重ね合わせた Vela X-1 の X線強度変化である。この観測で得られた X線星食中心の元期は

$$T_e = 2,444,315.07 \pm 0.05 \quad (\text{ユリウス日}) \quad (1)$$

である。この観測を含め過去に報告されている全ての星食中心元期のデータを用い最小 2 乗法で求めた公転軌道周期は

$$P_{orb} = 8.9641 \pm 0.0001 \quad (\text{日}) \quad (2)$$

となる。さらにこの公転周期は過去 8 年間にわたって極めて安定していることがわかる。すなわち公転周期の変化率は毎年  $7 \times 10^{-5}$  日以下 ( $2\sigma$  上限値) であることが解析から明らかとなった。

次に X線星の星食期間の長さであるが、これまで観測毎にまちまちの報告がされていたが、今回の“はくちょう”による観測からこの星食期間の長さにはエネルギー依存性があることが明らかとなった。図 3 を注意深く見るとわかるように X線星は軟 X線領域 (L-バンド) では早く没し, 硬 X線領域 (H-バンド) では長く見えている。それぞれの星食期間  $\Delta T_e$  を数値で示せば,

$$\left. \begin{aligned} \text{L-バンド; } \Delta T_e &= 1.85 \pm 0.005 \text{ 日 } (\theta_e = 37^\circ \pm 1^\circ) \\ \text{H-バンド; } \Delta T_e &= 1.60 \pm 0.005 \text{ 日 } (\theta_e = 32^\circ \pm 1^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

となる (ここに  $\theta_e$  は星食半角)。両者の差は主星の周りの大気吸収によるものと考えられる。この星食半角は質量関数と共に連星系の軌道傾斜角を求める上で重要な物理量であるが、観測データを引用する場合上記のようなエネルギー依存性のあることに留意する必要がある。

最後に図 3 の全体の様子を見ると、H-バンドでは個々の観測点により X線強度が変化するものの、軌道位相による系統的な変化はみられない (突発的に起るフレア現象 [図 3 中の矢印] は除外する)。これに対して L-バンドでは一般的に位相  $\phi = 0.1 \sim 0.4$  のとき X線強度が大きく、 $\phi = 0.5 \sim 0.9$  のとき X線強度が小さい。この傾向は連星系周りのガスの分布が図 4 B のようになっていて、L-バンド X線はこのガスによる吸収の影響を強く受けるものとすれば理解できる。実際に連星系周りのガス分布が図 4 B のようになっていることはその主星の光学観測からも確かめられている (M. S. Bessell et al., *Astrophys. J. Letters*, **195**, L117, 1975)。

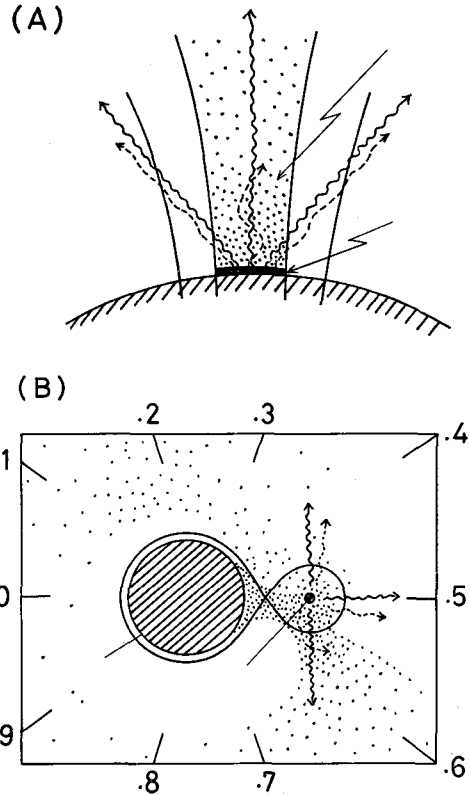


図 4 Vela X-1 の X線放射および吸収の様子を示すモデル。[A] 中性子星の磁極附近におけるガス降着および X線の放射吸収の様子。[B] 連星系周辺におけるガス分布とこれによる X線の吸収。

### 4. パルスタイミング解析

“はくちょう”衛星で X線源の観測をする場合データレコーダーの制限や、X線源が地球の影に入って見えなくなったり衛星が放射線帯に入ってバックグラウンドが増加したりすることを考慮すると、通常連続的に良質のデータが取得できる時間は衛星 1 周回 (約 100 分) につき 30 分前後である。Vela X-1 はパルス周期が約 283 秒であるのでこの間に 5 個程度のパルス列が観測される。図 5 は FMC-2 カウンターで観測した生データの 1 例であるが、X線強度が約 283 秒周期で変化している様子がわかる。Vela X-1 の場合図 5 からわかるように X線強度やパルス形状は刻々変化する。しかし L-バンドに幅の狭い X線強度の極小が常にみられるので、われわれの解析ではこの位置を X線パルスの先頭とし、この極小の観測された時刻を X線パルスの到達時刻と定義する。このようにして  $n$  番目のパルスの到達時刻  $t'_n$  を次々測定することによりこの時刻でのパルス周期  $P'_n = (t'_{n+i} - t'_n)/i$  が得られる。実際のデータ処理においては周期をパラメ

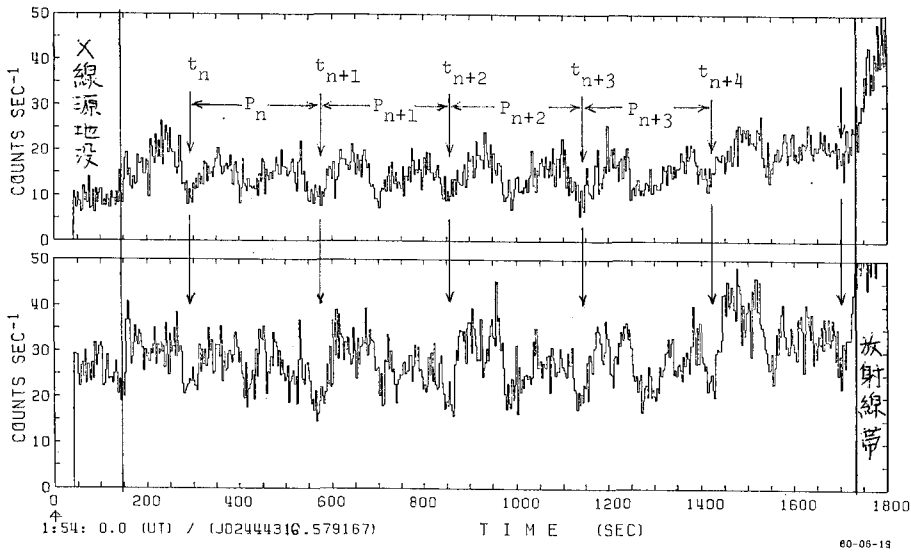


図5 “はくちょう”のFMC-2カウンターによりVela X-1を観測した生データ(下はL-バンド, 上はH-バンド). 283秒周期のバルス列がどのように見えるかを示す.

ーターとして一連のバルスを重ね合せ解析することにより、一層精度の良い1組のバルス到達時刻  $t'_n$  とバルス周期  $P'_n$  を得る。

ここで得られた  $P'_n$  はX線星の公転運動によるドップラー効果のみでなく地球の公転に伴うドップラー効果の影響を受けるのでこれを式、

$$P_n = P'_n \left\{ 1 + \frac{V_E}{c} \cos \beta_* \sin(\lambda_* - \lambda_\odot) \right\}^{-1} \quad (4)$$

により補正する。ここで  $V_E$  は地球の公転速度、 $\beta_*$  はX線星の黄径、 $\lambda_*$ 、 $\lambda_\odot$  はX線星および太陽の黄緯である。一般には衛星の運動などの補正も必要であるが、Vela X-1のようなバルス周期の遅いX線パルサーでは地球の公転のみ補正すれば十分である。こうして衛星1周回毎に得られたバルス周期の連星周期に伴う変化を見ればX線星の公転運動のドップラー効果の様子がわかり、軌道要素が求められる。

しかしX線パルサーのドップラー解析を行なう場合このバルス周期のデータ群を直接取扱より、バルス到達時刻のデータ群に対するドップラー解析をする方が精度が良くなる場合が多いので、通常バルス番号のわかった一群のバルス到達時刻のデータを解析に使用する。この場合も地球公転の影響は次式

$$t_n = t'_n - \frac{R}{c} \cos \beta_* \cos(\lambda_* - \lambda_\odot) \quad (5)$$

で補正し(ここに  $R$  は地球公転の動径ベクトルの長さ)、太陽系中心で見たバルス到達時刻  $t_n$  に換算した値でドップラー解析を行なう。すなわちこのようにして得られた  $n$  番目のバルスの到達時刻  $t_n$  はもしX線パルサーの本来のバルス周期が一定  $P_0$  であれば、X線星の公転運

動により

$$t_n = t_0 + P_0 \cdot n + f,$$

$$f = a_x \sin i (1 - e^2) \frac{\sin(v + w)}{1 + e \cos v} \quad (6)$$

なる関係式に従うはずである。ここに  $t_0$  は一連の観測の元期でありまた  $f$  はX線星の公転運動の動径ベクトルの視線方向射影である。また  $a_x \sin i$  はX線星の軌道半長軸の視線方向射影、 $e$  は軌道離心率、 $w$  は近星点経度、 $v$  は直近点離角を表わす。

上記の関係式(6)を用いて一群のバルス到達時刻の観測データに対する  $\chi^2$ -fitting を行なえばバルス周期と軌道要素が求められる。ただし実際の解析において関数  $f$  内の変数である真近点離角は観測から求める量である平均近点離角  $M$  で書き換える必要がある。ここに

$$M = 2\pi(t - \tau) / P_{orb} \quad (7)$$

であり  $\tau$  は近星点通過時刻、 $P_{orb}$  は公転周期である。しかし式(6)の関数  $f$  を  $v$  の代りに  $M$  の関数に書き換えることはけっこうやっかいである。もし  $e \ll 1$  の条件が成立つならば簡単に

$$f \approx a_x \sin i \left\{ \sin(M + w) + \frac{1}{2} e \sin(2M + w) - \frac{3}{2} e \sin w \right\} \quad (8)$$

なる近似式が得られる。

### 5. Vela X-1 のバルス周期の変動

多少解析の手続きに深入りしすぎたのでここで1つの解析例を示そう。図6(a)は1980年3月に約20日間にわたる連続的な観測から得られた115点のバルス到達時刻のデータに対して式(6),(7),(8)で規定される関数

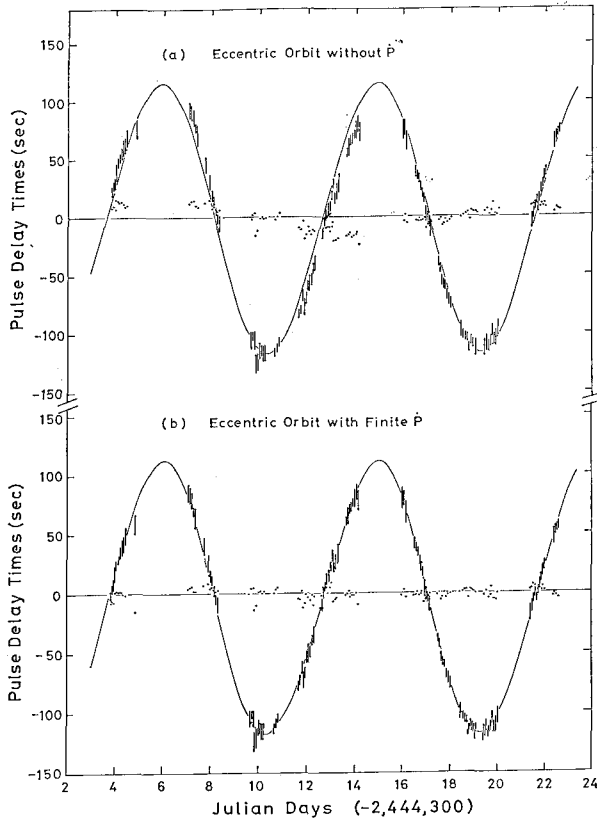


図6 1980年3月の観測で得られた一連のパルス到達時刻の解析から得られたドップラー曲線。(a)はパルス周期の変動を考慮しない(本文中(6)式による)解析の結果で残差(図中の点)に系統的な変動がみられる。(b)はパルス周期の変動も考慮に入れた(本文中(9)式による)解析の結果で残差はゼロの周りに一様に分布している。

系で  $\chi^2$ -fitting を行なった最適解である。図6(a)の残差を見るとこれがゼロの周りに分布しないで系統的にずれていることがわかる。すなわち諸々のパラメーター  $t_0, P_0, a_x \sin i, e, w, \tau$  ( $P_{orb}$  は(2)式の値に固定)をどのように変えても(6)式では観測結果を説明できない。

今もし観測期間中にパルサー周期が変化している可能性を考えるならば(6)式の代りにパルス周期の変化率  $\dot{P}$  を含む式

$$t_n = t_0 + P_0 \cdot n + \frac{1}{2} \cdot P_0 \cdot \dot{P} \cdot n^2 + f(a_x \sin i, e, w, \tau) \quad (9)$$

で  $\chi^2$ -fitting を行なえばよい。実際に(9)式を用いて  $\chi^2$ -fitting を行なった結果は図6(b)に示すように大変うまく観測結果を説明できる。ここで得られた  $P_0, \dot{P}$  は表2の中に示されている(他のパラメーターの最適値を知りたい方は F. Nagase et al., Nature, 290, 572, 1981 を参照されたい)。

この解析から2つの重要な結果が示唆される。その1つは1979年3月から1980年3月の間にパルス周期の増大すなわち中性子星の自転速度の減少(スピンドアウン)が起ったことである。1980年3月のパルス周期は  $P = 282.788 \pm 0.001$  秒であり、図7に示すように過去の長期

にわたるスピニアップの傾向から推定されたパルス周期に比べ約0.4ミリピリオドほどスピンドアウンしたことになる。このスピンドアウンが図7中1975年末頃に観測されたような一時的なものでまたもとのスピニアップ傾向にもどるかどうか今後の動向が注目されることになった。

もう1つの成果は1回の観測期間中にパルス周期の変化する様子を知ることができた点で、これは20日間の長期にわたって同一のX線源に居座り観測をするような衛星運用を可能にした小型衛星の柔軟性と、運用関係者の英断に感謝しなければならぬ。ここで得られたパルス周期の変化率は  $\dot{P} = (2.28 \pm 0.12) \times 10^{-8}$  すなわち1年当り2.6ミリピリオドのスピンドアウンに相当し、過去5年間の平均のスピニアップ率(0.15ミリピリオド/年)に比べその極性が反対であるだけでなく絶対値が1桁以上大きい。このままの割合でスピンドアウンが続くとすると大変奇妙なことになりそのようなことは考え難いことである。

こうして Vela X-1 のパルス周期のその後の動向は多くの関係者の注目を集めることになった。“はくちょう”はその後1980年12月から1981年3月にかけてこのX線パルサーを追いつけることになった(観測の経過を表2の(a)に示す)。これら個々の観測期間毎のパルス到

表2 Vela X-1 の観測経過および解析結果のまとめ

(a) “はくちょう” による観測の経過

No.	Observation (UT)	Span (days)	No. of epochs
1	8.1-21.8 March 1979	13.7	35
2a	5.2-15.0 March 1980	9.8	56
2b	15.1-24.0 March 1980	8.9	59
3	16.5-26.2 Dec. 1981	9.7	49
4a	7.8-18.9 Jan. 1981	11.1	54
4b	19.0-30.7 Jan. 1981	11.7	55
5	2.7-15.0 March 1981	12.3	68
Sum		77.2	376

(b) ドップラー解析の結果

◎ Orbital elements;	(SAS-3, 1975/1978)*
$a_x \sin i = 113.9 \pm 0.6$ (1t-s)	(113.0 ± 0.8)
$e = 0.079 \pm 0.007$	(0.092 ± 0.005)
$\omega = 155^\circ 3 \pm 2^\circ 5$	(154° ± 5°)
$\tau = 4,307.57 \pm 0.07$ (JD-2,440,000)	(3,823.40 ± 0.13)

◎ Pulsation periods;

No.	Each single span fitting		Combined fitting	
	$P_0$ (sec)	$\dot{P}$ ( $\times 10^{-9}$ )	$P_{0k}$ (sec)	$\dot{P}_k$ ( $\times 10^{-9}$ )
1	282.746 ± 0.006	-25 ± 10	282.745 ± 0.004	-19.1 ± 6.1
2a	282.7874 ± 0.0014	23.0 ± 1.8	282.792 ± 0.003	13.9 ± 5.9
2b			282.806 ± 0.003	30.6 ± 6.7
3	282.876 ± 0.005	-14 ± 12	282.882 ± 0.003	-27.1 ± 6.2
4a	282.8507 ± 0.0006	24.8 ± 1.8	282.843 ± 0.002	37.4 ± 3.8
4b			282.885 ± 0.003	3.6 ± 4.2
5	282.905 ± 0.002	11.5 ± 3.3	282.903 ± 0.002	10.7 ± 3.1

\* Rappaport, S., Joss, P. C. and Stothers, R., 1980, Ap. J., **235**, 570.

連時刻のデータに対して (9) 式によるドップラー解析を行なった結果を表2 (b) の左半分に示す. この結果驚くべきことに1975年-1978年のスピニアップ傾向とは裏腹に1979年-1981年の2年間は長期にわたってスピンドアウン傾向にあることが明らかになった.

これら一連の解析の中に示されるもう1つの傾向すなわちパルス周期の短期間内のジグザグ変動の様子をより明確にするためもう一步解析を進める. すなわち全データを~1公転周期毎の7個のデータ区分に分けたうえ、これら全体に対して (9) 式の代りに次式

$$t_{nk} = t_{0k} \cdot n + \frac{1}{2} \cdot P_{0k} \cdot \dot{P}_k \cdot n^2 + f(a_x \sin i, e, w, \tau) \quad (10)$$

を適用したドップラー解析を行なう. ここに  $t_{nk}$  は  $k$  番目のデータ区分の  $n$  番目のパルス到達時刻等に添字  $k$  は  $k$  番目のデータ区分に属することを示す. (10) 式はパルス周期  $P_{0k}$  およびその変化率  $\dot{P}_k$  はデータ区分毎に

独立のパラメーターと考えるが、連星軌道要素は2年の間には変化せず全データに共通のパラメーターとすることを意味している.

(10) 式を全データに適用して  $\chi^2$ -fitting を行なった結果得られた軌道要素およびデータ区分毎のパルス周期およびその変化率を表2 (b) に示す. 軌道要素はラポポートたち (S. Rappaport et al., *Astrophys. J.*, **235**, 570, 1980) が SAS-3 衛星の1975年と1978年の観測データを結合して求めた結果と良い一致を示しており、これらが Vela X-1 に関して現在得られる最も精度のよい軌道要素である. 特に両者の解析で近星点経度  $w$  が誤差の範囲内で一致しており、ここ数年間に変化した様子がないことは注目に値する. この解析の結果表2 (b) の右端に示すようにパルス周期は1公転周期程度の時間尺度で激しく変化していることが明らかになった. 今回の解析で得られた長期的なスピンドアウンおよびこれに重畳してみられる短期的なパルス周期の変動の様子を過去の全観

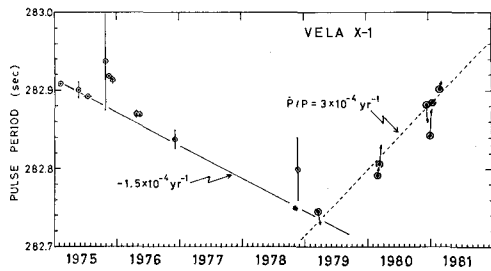


図 7 1975 年から 1981 年までの Vela X-1 のパルス周期の変動の様子を示す。矢印の付けられた大きい 2 重丸が“はくちょう”の観測結果で、矢印はパルス周期が Vela X-1 の 1 公転周期 (8.96 日) の間に变化した割合を示す。実線、破線は長期間平均したスピニアップ、スピンドアウンの割合を示す。

測結果と共に図 7 に示す (“はくちょう” 以前のデータに関する文献は前出の Nagase et al., 1981 中の引用を参照されたい)。

図 7 に示されるような X 線パルサーのパルス周期の長期的なスピンドアウン傾向が観測されたのは GX301-2 (R. Kelley et al., *Astrophys. J.*, **238**, 699, 1980) に次いで Vela X-1 が 2 個目である。こうして今や数年前まで X 線パルサーの基本的描像と考えられていた “X 線パルサーはその主星から流入する降着物質の角運動量を得るので長期的には全てスピニアップ傾向を示す” という描像は捨て去らねばならない。それではどのようなモデルが考えられるであろうか。パルス周期の変化を論ずる際しばしば X 線光度  $L_x$  ( $\propto$  物質の降着する割合  $\dot{M}_x$ ) との関係で説明する試みが行なわれるが、この 2 年間に Vela X-1 の平均的な X 線光度に変化はなく (短時間の X 線強度の変動は激しく、例えば数時間の時間尺度で通常の 10 倍以上に X 線強度が増加することもある; H. Tsunemi et al., *Publ. Astron. Soc. Japan*, **33**, 205, 1981), またその値は過去の観測ともほぼ一致していることを付け加えておく。はくちょうチームの 1 人は図 7 のパルス周期の履歴の解釈として “Vela X-1 連星系がさらに巨大ブラックホールと高次の連星系を構成しており、図 7 に示されるパルス周期の長期変動はそのドップラー効果の反映である” とする画期的なモデルを提案している。このモデルが立証されるためにはさらに今後パルス周期の変動の観測を続けると共に光学観測 (例えば視線速度の長期的な周期変動) からの裏付けが必要であろう。またこのようなパルス周期の長期的なスピンドアウン現象がいわゆる wind-fed 型の X 線パルサーにのみ見られる点にこの現象を理解する鍵があるかもしれない。

今回得られたもう 1 つの重要な点は Vela X-1 のパルス周期はその長期的なスピニアップ/スピンドアウン傾向

とは別に短期的 ( $\leq 10$  日) な時間尺度で変動している事実である。1978 年以前のデータはこのような短期的なパルス周期の変化率までは求めるに至っていないが、例えば 1975 年末のスピンドアウン現象などはこの時期にも短期変動があったことを推測させる。この短期的なパルス周期の変動が、主星から流入し中性子星へ降着するガスの量の変化など中性子星の外部の現象に起因するものか、中性子星の外殻と超流動内核との相互作用など中性子星の内部構造に起因するものか、あるいはまた前出の Tsunemi et al. に示されるようなフレアー現象と何か因果関係があるものかどうかなど今のところ解明されていない。常識的な解釈としては、“外部”の原因 (例えば降着ガス量の変化) に刺激されて中性子星外殻の回転速度に変化 (= スピン周期の変化) が生じ、これに対してより慣性モーメントの大きな超流動内核がブレーキの役割を果たす、つまり “外部” と “内部” の複合作用によって上記のスピンドアウン傾向が生ずるものと考えるのが妥当であろう。しかしいずれにしても観測されたパルス周期の短期的変動の様子は中性子星内部構造を知る 1 つの手がかりを与えるものと思われる。

## 6. おわりに

以上紹介したように “はくちょう” による Vela X-1 の観測はこの X 線パルサーの全く新しい側面をあばき出した。最近 2 年間にわたる Vela X-1 のパルス周期のスピンドアウン傾向を理解するためには X 線パルサーの基本的な描像をもう一度見直す必要があると思われる。またパルス周期の時間変動のパワースペクトルを求めることが中性子星を理解する上で重要と考えられているが、今回得られた Vela X-1 のパルス周期の短期的変動はその第 1 歩ともいえるだろう。また Vela X-1 は楕円軌道を有する近接連星系でかつ長い観測の歴史を持つ唯一の X 線パルサーであり、今後の観測でその近星点経度の移動が測られる可能性があり、その主星の内部構造を知るプローブとしても有望である。

ここに紹介した X 線パルサー Vela X-1 の観測は “はくちょう” の主要テーマの 1 つとしてはくちょうチームが一丸となって行なってきたものである。その解析結果はできたてのホヤホヤでまだ湯気の立つようなもので、その解釈などについてはまだ十分にそしゃくされてはいない。読者の皆様の中でもよいアイデアが浮かびましたら是非名乗り出て下さい。最後にこの X 線パルサーの観測がさらに “はくちょう” や次期衛星によって引き継がれ、近い将来にその全貌が明らかとなることを期待して本稿を終えたい。次の機会には “はくちょう” によって観測された他の 2 つの X 線パルサー (Cen X-3 と A0535+26) について述べたいと思う。