

X 射线脉冲双星的观测特性

李向东 汪珍如

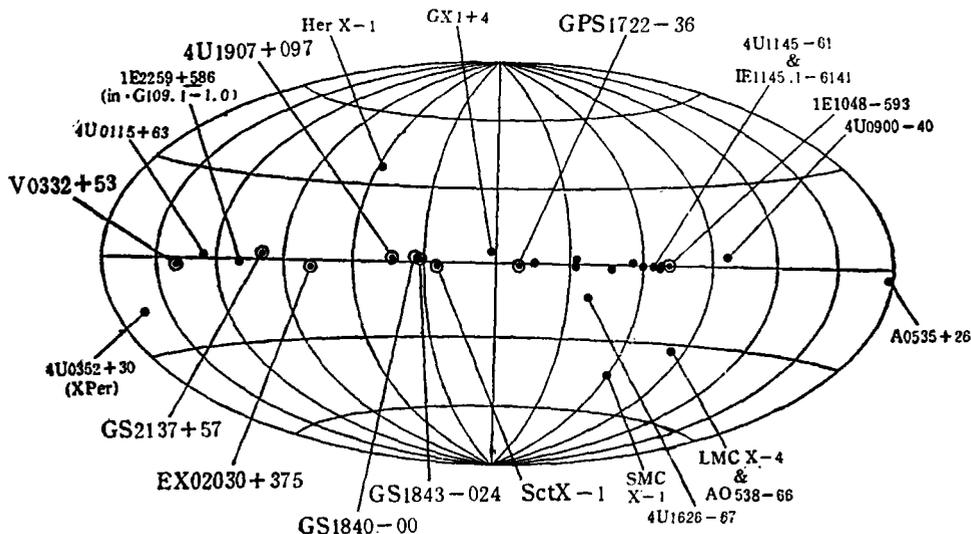
(南京大学天文系, 南京 210008)

提 要

本文综述了近年来 X 射线脉冲双星观测中的一些基本特性, 包括脉冲轮廓、能谱、双星系统参量、周期变化和 QPO 现象等。

一、引 言

1971 年 Uhuru 卫星首次发现了 X 射线脉冲双星^[1,2,3], 它和 1967 年射电脉冲星的发现一起为中子星的存在提供了肯定的证据。X 射线脉冲双星发现后不久, 人们很快就认识到它的 X 射线能量来自转动磁中子星的物质吸积^[4,5,6]。在双星系统中, 物质从伴星传送并被吸积到中子星上, 在这个过程中, 被吸积物质的引力势能得到释放从而产生了 X 射线脉冲双星的巨大光度(典型值超过 1000 太阳光度)。到目前为止, 已发现的 X 射线脉冲星的数目已超过 30 个^[7,8]。图 1 显示了它们在天球上的位置分布。通过对双星系统运动的精确测量可以得到双星系统的轨道参数, 加上对伴星的光学观测, 还可以得到很有价值的恒星参数, 从观测上确定脉冲星的质量, 同时也肯定了它是中子星^[9]。

图 1 X 射线脉冲星在天球上的位置分布^[7]

1992年6月8日收到。

1993年1月10日收到修改稿。

X射线脉冲星的发现为中子星的研究开辟了一个新的领域, 人们很自然地要把它们和射电脉冲星进行比较。尽管脉冲发射源都是中子星, 但它们的观测特性有着很大的差别。从脉冲周期来说, 射电脉冲集中在毫秒到几秒, 即没有长周期的射电脉冲, 这个结果在 70 年代就已得到^[10], 迄今仍未改变^[11]; X射线脉冲可以延伸到几百秒(见图 2)。另外, 所有的单星射电脉冲星都在自转减慢, 以磁偶极辐射或发射高能粒子的形式消耗自身的转动动能和角动量; 早期的X射线脉冲星的观测表明, 中子星存在普遍的自转加速现象, 被解释为吸积物质的角动量传输到中子星上的结果。

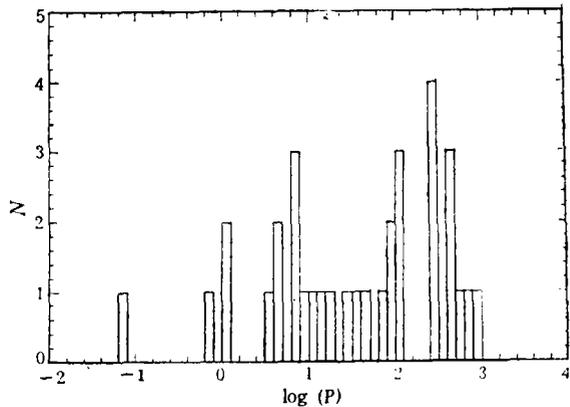


图 2 X射线脉冲星的周期分布

根据伴星性质的不同, X射线脉冲双星可以分为三类^[12]:

(1) 具有早型大质量伴星的双星系统, 如SMC X-1, Cen X-3, LMC X-4, OAO 1657-41, Vela X-1, 1E1145-614, 4U1907+097, 4U1538-522, GX301-2等。它们又可以分为两个次型: (i) 短周期强X射线系统(SMC X-1, Cen X-3, LMC X-4)和(ii) 长周期中等X射线光度系统(Vela X-1, GX301-2, 4U1538-52, 4U1907+09)。

(2) 具有Be型伴星的双星系统, 如4U0115+63, V0331+530, 1E1048-593, 2S1553-542, EXO2030+375, A0535+26, GX304-1, 4U1145-619, A1118-616, X Per等。

(3) 具有低质量伴星的双星系统, 如Her X-1, 4U1626-67, GX1+4等。

一般认为(1-i)型和(3)型脉冲星通过洛希瓣溢流吸积, (1-ii)型和(2)型脉冲星则通过星风吸积。

二、观测特性

1. 脉冲轮廓和能谱

观测到的X射线的脉冲轮廓按形态可以分为下面几种:

(1) 与能量无明显关系的, 又可分为:

(i) 单峰, 有正弦状的, 如X Per、GX304-1、X1722-36、GS1843-02等, 也有不对称的单峰, 如Cen X-3等。

(ii) 双峰, 如4U1538-52, GX301-2等, 双峰的强度通常不相等。

(2) 与能量范围有密切关系的分为:

(i) 在 高能范围为单峰(如OAO1653-40)或双峰(如SMC X-1), 在低能范围峰高显著下降。

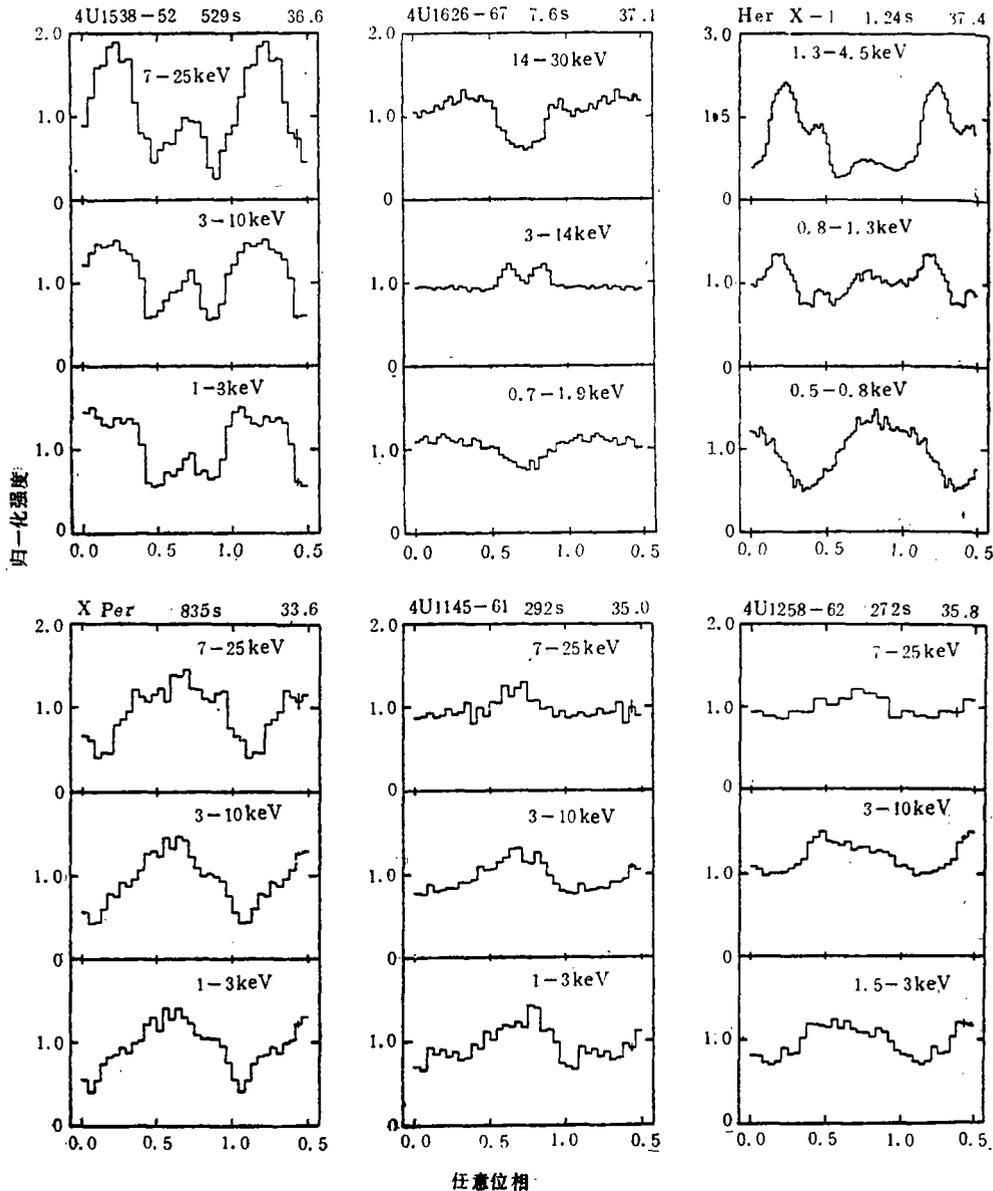
(ii) 在 高能范围为单峰, 在中等能量范围为密近双峰, 如Her X-1, 4U1626-67等。

(iii) 在 高能范围为双峰, 在低能范围发生位相反转(如EXO2030+375)或变成复杂的

五峰(如 Vela X-1)或单峰(如 GS1840+00)。

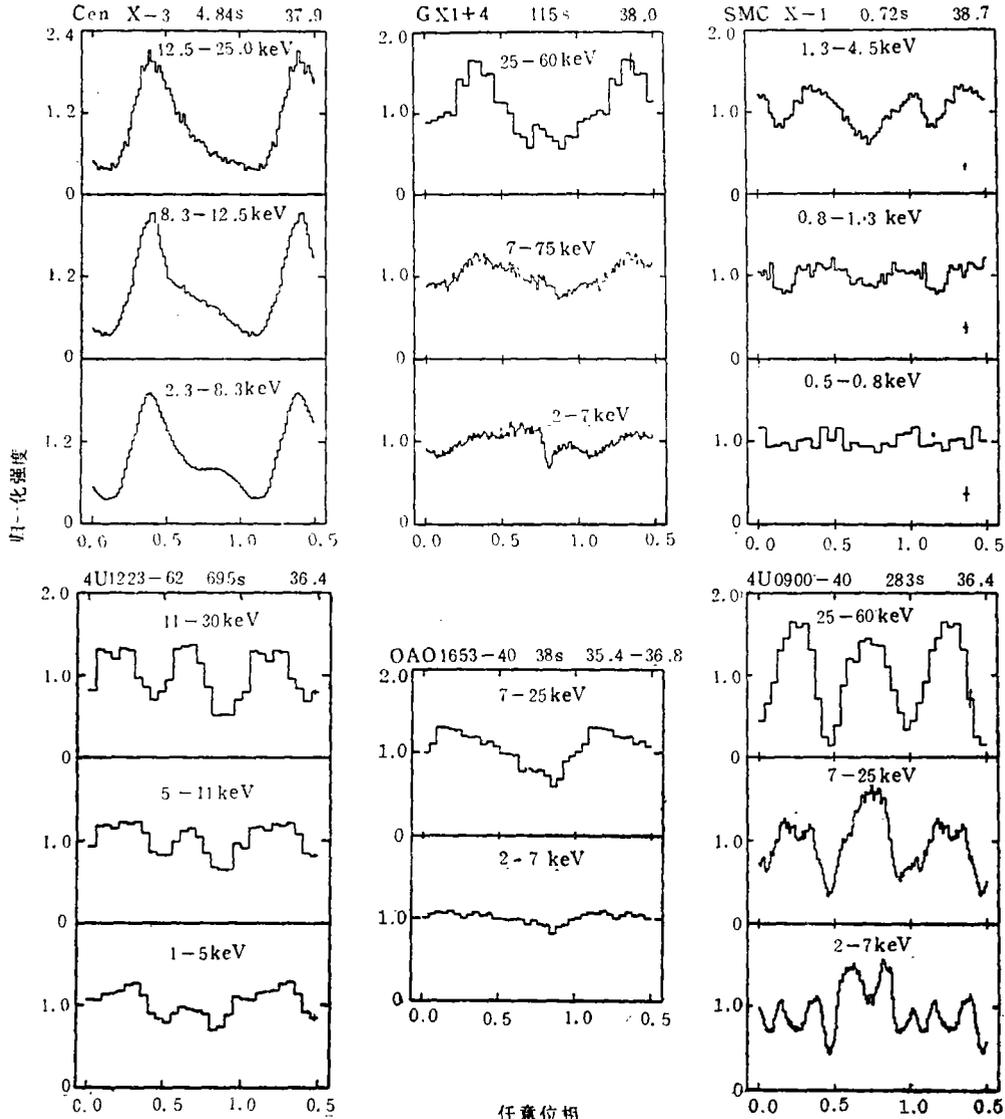
此外, GX1+4 的高、低态的脉冲轮廓在形态和变化方面有显著的差别, 要进行单独研究。图 3 给出了 12 颗 X 射线脉冲星的脉冲轮廓^[13]。

从脉冲轮廓中可以得到关于中子星的信息。由于脉冲星具有强磁场, 通常认为 X 射线脉冲由磁中子星的灯塔效应产生, 脉冲轮廓的差别是由于中子星转动轴、磁轴和观测者视线之间的不同几何关系造成的。通过建立理论模型来拟合观测脉冲轮廓可以得到脉冲星的一些参



图中右上方数字表示各源 $\text{Log } L_x(0.5-60 \text{ keV})$

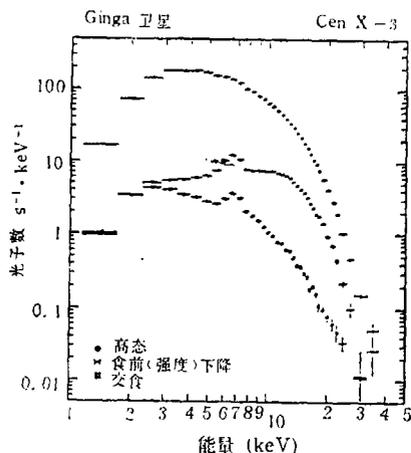
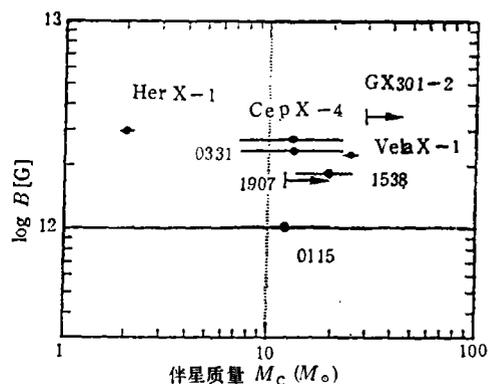
图 3 12 颗 X 射线脉冲星的脉冲轮廓^[13]



任意位相
图 3 续

量。Wang 和 Welter 曾对 14 颗 X 射线脉冲星的脉冲轮廓进行了研究^[14]。最近, Leahy 在极冠发射模型的基础上, 分别对 15 颗和 20 颗 X 射线脉冲星的脉冲轮廓进行了理论拟合, 得到磁倾角和极冠大小等一些物理量^[15,16]。

X 射线脉冲星的能谱通常可以表示成有高能截断的幂律谱, 见图 4。在能谱中 6.4 keV 的铁发射线是个比较明显的特征, 它被证认为脉冲星周围冷介质中弱电离铁的荧光辐射, 因而对能谱中铁线的研究可以提供密近双星系统中星周物质的信息。铁线一般具有这样的性质: 它的半峰全宽在 6.4 keV 处为 0.5 keV; 等值宽度对 Vela X-1 和 GX301-2 大质量双星系统约为 100—1 000 eV, 并且是高度变化的; 对低质量双星(如 Her X-1、4U1626-67 等)和

图 4 Cen X-3在非交食、食前和食中的能谱^[18]图 5 X射线脉冲星磁场及伴星质量^[21]

Be 型伴星的双星(如 A0535 + 26)等值宽度通常小于 200 eV。观测还发现, 铁线能量因源而异, 但它们和高于 7.1keV 的连续谱能量大致成正比^[17], 这个关系证明了铁线确实是星周冷物质对高能 X 射线光子的荧光效应。

最近 Ginga 卫星发现一些 X 射线脉冲星如 Cen X-3、Her X-1 和 Vela X-1 在低态的能谱和铁线明显不同于在高态的能谱和铁线, 参见图 4^[18]。对它们拟合的结果, 发现星周物质的温度分布和电离结构十分复杂。

在许多 X 射线能谱中还探测到回旋辐射谱线。利用回旋线的频率可以确定中子星的磁场^[19,20], 因为电子回旋共振能量与磁场密切相关,

$$E_0 = \frac{\hbar\omega_B}{1+Z_s}$$

$$= 10\left(\frac{B}{10^{12}\text{G}}\right)\left(\frac{1+Z_s}{1.2}\right)^{-1} \text{keV}$$

其中 \hbar 是普朗克常数, ω_B 是电子回旋频率, B 和 Z_s 是中子星表面磁场和引力红移。Ginga 卫星的发射上天, 使探测到回旋线的脉冲星数目由两个增加到八个, 源 1E2259 + 586 也是个可能的候选者^[21]。观测到的 X 射线脉冲星的回旋共振能量在 7—40keV 之间, 得到中子星磁场为 $(1-4) \times 10^{12}\text{G}$ (图 5)。

Tanaka^[22]认为 X 射线连续谱的高能截断就是由脉冲星强磁场中的电子回旋共振引起的, Makishima 等利用 Tenma 和 Ginga 资料证实了这一观点。他们发现 X 射线连续谱的截断能量 E_0 ^[18]和回旋共振能量有很好的线性关系^[21]。其重要结果是, 也许不必由回旋线的观测而直接从 X 射线连续谱的截断情况就可得知中子星表面磁场大小。

2. 双星系统参量

观测到的 X 射线脉冲星的到达时间受到脉冲星轨道运动和自转运动两个因素的影响。在双星质心参考系中第 n 个脉冲的到达时间可以表示成:

$$t_n = T_0 + \sum_n P_n + \frac{a_X \sin i (1-e^2) \sin(v+\omega)}{c(1+e \cos u)}$$

右式中 T_0 是历元初值, P_n 是第 n 个脉冲的周期, 第三项代表脉冲星作偏心轨道运动引起的

脉冲到达时间的改正。其中, $a_x \sin i$ 是脉冲星的投影半长轴(a_x : 脉冲星轨道半长轴, i : 双星轨道平面与天球切面的夹角), e 和 ω 分别是轨道偏心率和脉冲星在近星点的经度, c 是光速。变量 v 由下式确定:

$$\tan \frac{v}{2} = \left(\frac{1+e}{1-e} \right)^{1/2} \tan \frac{E}{2}, \quad E - e \sin E = \frac{2\pi}{P_{orb}} (t - \tau)$$

式中 P_{orb} 和 τ 分别为脉冲星轨道周期和经近星点的时间。如果 P 发生变化, 可以对 $\sum_n P_n$ 项作泰勒级数展开:

$$\sum_n P_n = P_0 n + \frac{1}{2} P_0 \dot{P} n^2 + \frac{1}{6} P_0^2 \ddot{P} n^3 + \dots$$

其中 P_0 是在 T_0 时的脉冲周期, \dot{P} 、 \ddot{P} 分别是 P 随时间变化的一阶、二阶导数。通过拟合脉冲到达时间序列, 可以得到 P_0 、 P 、 \dot{P} 、 \ddot{P} 等以及轨道参量(如上面提到的 P_{orb} 、 $a_x \sin i$ 、 e 和 ω)。目前已有 11 颗 X 射线脉冲星的轨道参量已精确测定, 图 6 给出了它们的 $a_x \sin i$ 和 P_{orb} 分布情况。

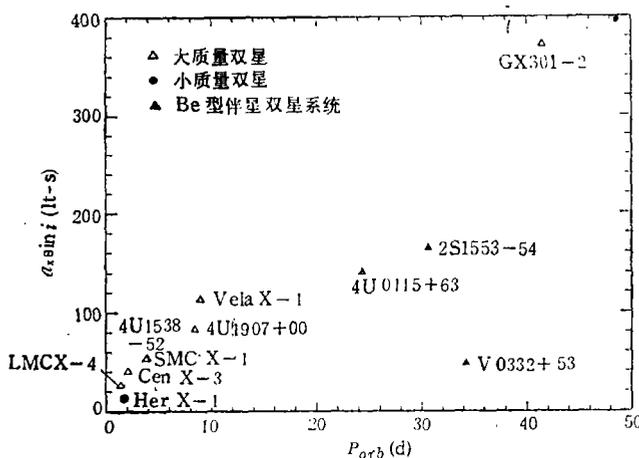


图 6 11 颗 X 射线脉冲星的 $a_x \sin i - P_{orb}$ 图

在实际工作中, 要确定双星系统中脉冲星的质量必须观测到三个基本现象:

(1) 光时效应——脉冲星的周期随轨道运动的变化。由此得到的轨道参量可以确定双星系统的质量函数:

$$f(M) = \frac{M_c^3 \sin^3 i}{(M + M_c)^2} = \frac{4\pi^2 (a_x \sin i)^3}{G P_{orb}^2}$$

其中 M 、 M_c 和 G 分别为脉冲星质量、伴星质量和引力常数。

(2) 伴星的视向速度曲线。由曲线振幅 K_c 可以得到脉冲星与伴星的质量比:

$$q \equiv \frac{M}{M_c} = \frac{K_c P_{orb} (1 - e^2)^{1/2}}{2\pi a_x \sin i}$$

(3) X 射线交食。由此可以定出双星轨道平面倾角 i :

$$\sin i = \left[1 - \left(\frac{R_c}{R_L} \right)^2 \left(\frac{R_L}{a_x + a_c} \right)^2 \right]^{1/2} / \cos \Theta$$

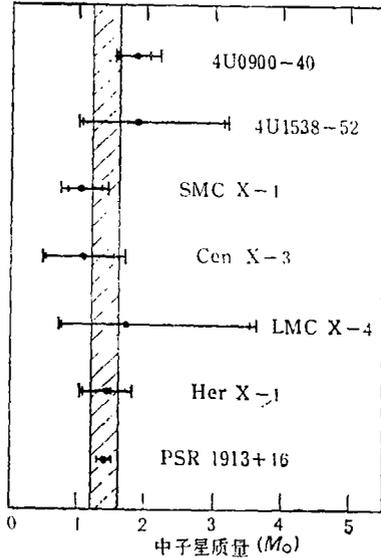


图 7 X射线脉冲星的质量分布^[23]

这里 R_C 、 R_L 分别是伴星半径和洛希瓣半径, a_x 、 a_C 分别是脉冲星和伴星偏心轨道的半长轴, 食半角 $\Theta = \pi\Delta\tau/P_{orb}$, $\Delta\tau$ 是脉冲星被掩食的时间。

由 $f(M)$ 、 q 和 i 的值就可以估计脉冲星和伴星的质量, 这仅对大质量的双星系统比较容易完成, 所以实际工作中要确定脉冲星的质量是很困难的。图 7 给出了 6 颗 X 射线脉冲星的质量分布, 并与射电脉冲星 PSR 1913+16 作了比较。从图中可以看出, 脉冲星质量在 $1-1.8M_\odot$ 之间。

3. 周期变化

脉冲周期的变化是 X 射线脉冲星的一个显著的观测特征, 它为研究中子星壳层转动率提供了信息。在 70 年代, 观测到的 X 射线脉冲星存在着普遍的自转加速现象, 这可以用吸积物质的加速矩来解释。在双星系统中, 如果中子星具有很强的磁场并且吸积物质形成了稳定的吸积盘, 脉冲周期的变化可以表示成^[23]:

$$\frac{\dot{P}}{P} \approx -3 \times 10^{-5} f PL_{37}^{6/7} \cdot \text{yr}^{-1}$$

这里 L_{37} 是以 $10^{37} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 为单位的 X 射线光度, f 对中子星而言是近于 1 的因子。

图 8 中实、虚线分别代表中子星、白矮星的理论关系, 观测数据更接近于实践, 比虚线两个量级, 这有力地支持了 X 射线脉冲星是主要中子星的假设。

16 颗 X 射线脉冲星的周期变化史见图 9。根据脉冲周期不同的变化趋势, 可以分成下面几类:

(1) 稳定的自转加速。如 SMC X-1、4U1626-67、LMC X-4 等, 自转加速率在 $10^{-4}-10^{-3} \text{yr}^{-1}$ 之间。

(2) 自转减速。如 1E1048-597、4U1538-52 等。Einstein 和 EXOSAT 的观测发现 1E1048-597 处于自转减速状态, 最近 Corbet 和 Day 利用 Ginga 卫星证实了这一点, 并且得到自转减速率为 $8 \times 10^{-5} \text{yr}^{-1}$ ^[24]。4U1538-52 在 70 年代中期周期出现快速增长, 目前的自转减速较为平缓。

(3) 在自转加速和自转减速两种状态下变换。GX1+4 是个典型的从自转加速到自转减速变化的源。由于卫星与气球观测结果的不一致, 周期变化的转折点仍在争论中^[25]。但可以

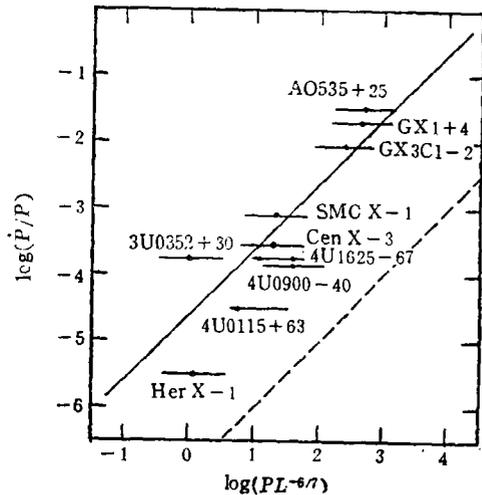


图 8 $-\frac{\dot{P}}{P} \sim PL_X^{6/7}$ 理论曲线与实测数据^[23] P 、 \dot{P} 、 L_X 的单位分别是 s、 $\text{s} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、 $10^{37} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$

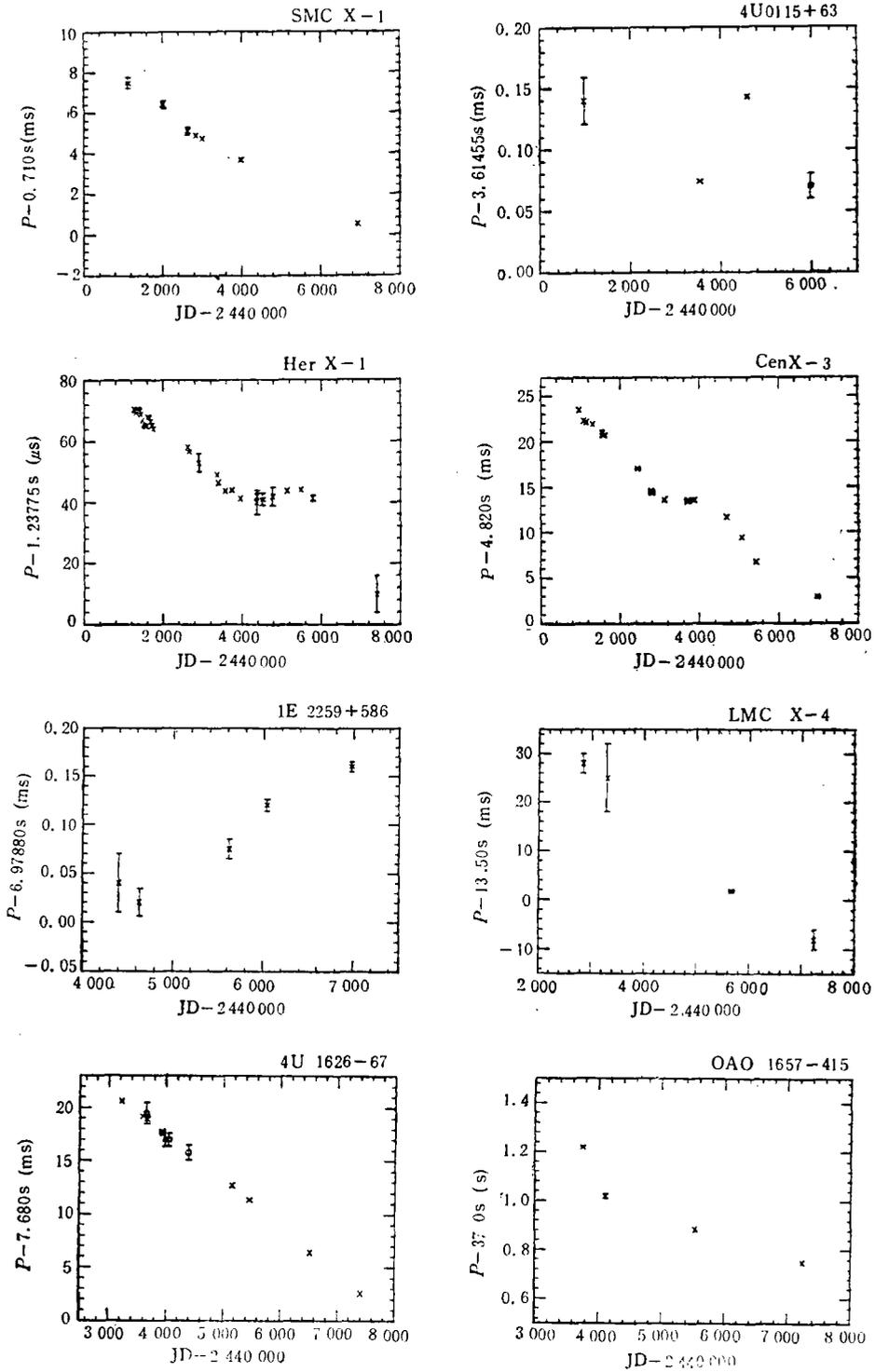


图 9 16颗X射线脉冲星的周期变化史^[7]

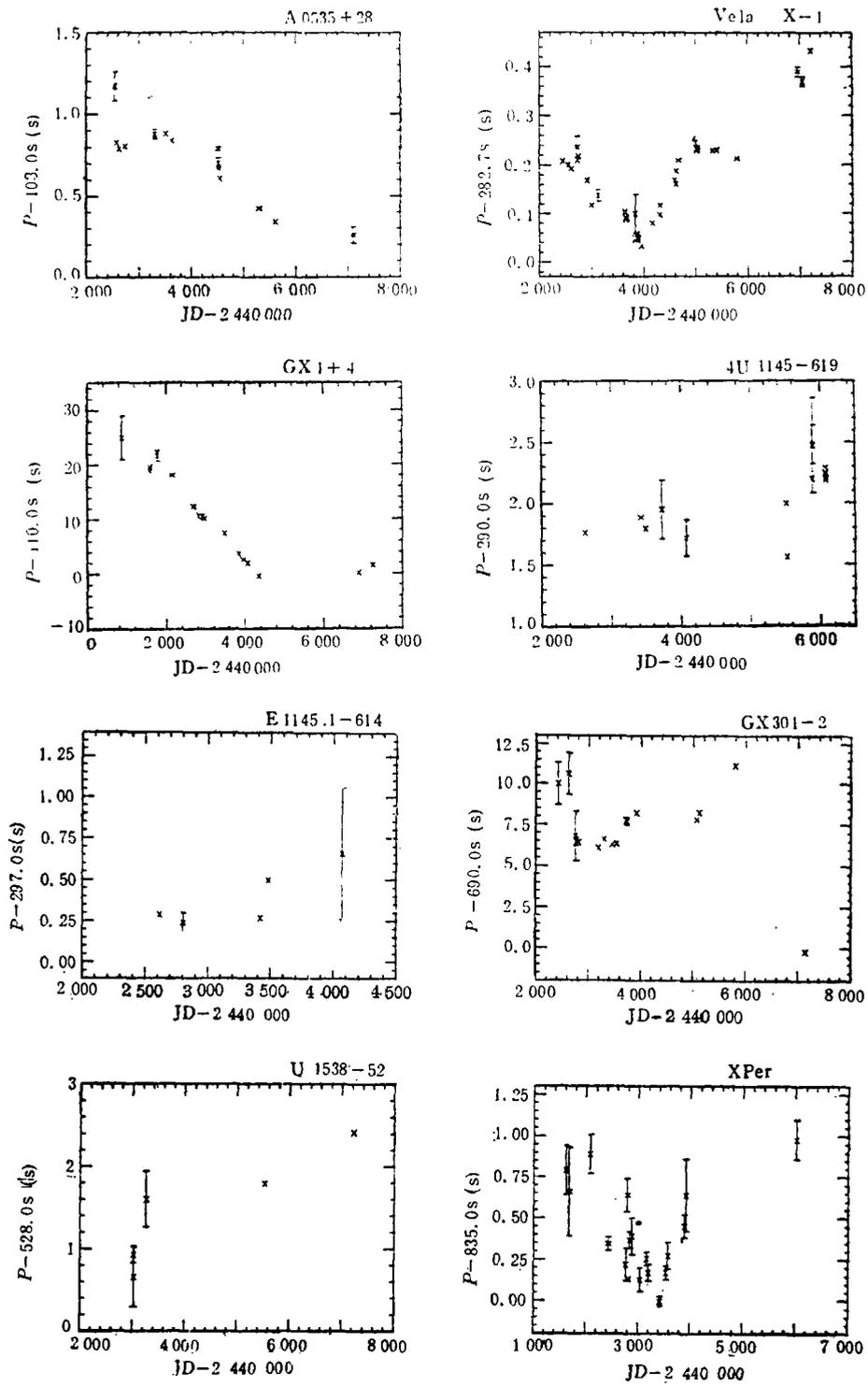


图 9 (续)

肯定的是, 从 1987 年到 1989 年它确实在自转减速^[26]。1E2259 + 586 经过 80 年代初短暂的自转加速后就一直在自转减速^[27]; OAO1657-415 则是经过长期的自转加速转向自转减速^[28]。变化更复杂的源有 Her X-1、Cen X-3 和 Vela X-1。前两个源有加速—减速—加速的现象, 而且减速率非常小。Vela X-1 开始处于自转加速, 从 70 年代末开始自转减速, 经过 1982—1984 年一段周期近乎不变的历史后继续自转减速^[7]。

另外, 一些具有 Be 型伴星的 X 射线脉冲星如 A0535 + 26、4U1145-619 等在爆发期间常出现快速的自转加速, 而在更长的时间尺度内周期基本不变或缓慢增加^[29,30]。

(4) 无规则的周期起伏。具有这种特征的脉冲星周期较长, 具有早型伴星, 如 GX301-2、X Per 等。

需要指出的是, X 射线脉冲星除了脉冲周期外, 轨道周期也在变化^[31], 有的在增加, 也有的减小。

4. QPO 现象

目前已在 3 颗 X 射线脉冲星 CenX-3、4U1626-67、EXO2030 + 375 中观测到准周期振荡(QPO)现象, 它们的 QPO 频率分别为 0.035Hz、0.041Hz、0.19Hz^[8], 远低于小质量 X 射线双星的 QPO 频率。这 3 颗脉冲星伴星的性质截然不同, 分别是 O 型星、小质量星和 Be 型星, 说明 QPO 可能普遍存在于 X 射线脉冲双星系统中。目前对 X 射线脉冲星的 QPO 现象的来源尚无定论, 只能引用前人提出的关于小质量 X 射线双星的 QPO 的理论模型试图加以解释。由于 X 射线脉冲星的自转频率已经确定, 对这些理论倒是个很好的检验。从比较的结果来看, 差频模型可以较好地解释这一现象。

以上我们总结了 X 射线脉冲星在观测方面的一些主要特征, 有不少现象在理论上已经得到很好的解释, 但也有一些, 如 $\frac{\dot{P}}{P}$ 的复杂变化现象仍需进一步的理论探讨, 我们将在下一篇文章中介绍 X 射线脉冲星的吸积矩理论, 并集中讨论脉冲周期的复杂变化。

参 考 文 献

- [1] Giacconi, R. et al., *Ap. J. Lett.*, 167 (1971), L67.
- [2] Schreier, E. et al., *Ap. J. Lett.*, 172 (1972), L79.
- [3] Tananbaum, H. et al., *Ap. J. Lett.*, 174 (1972), L143.
- [4] Pringle, J. E. and Rees, M. J., *Astron. Astrophys.*, 21 (1972), 1.
- [5] Davidson, K. and Ostriker, J. P., *Ap. J.*, 179 (1973), 585.
- [6] Lamb, F. K. and Pethick, C. J., *Ap. J.*, 184 (1973), 271.
- [7] Nagase, F., *Publ. Astron. Soc. Japan*, 41 (1989), 1.
- [8] Nagase, F., in *Proc. 23rd ESLAB Symp. on Two Topics in X-Ray Astronomy*, p. 45, Italy, (1989).
- [9] Joss, P. C. and Rappaport, S. A., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 22 (1984), 537.
- [10] 曲钦岳, 汪珍如等, *科学通报*, 21 (1976), 176.
- [11] Bhattacharya, D. and van den Heuvel, E. P. J., *Phys. Rep.*, 203 (1991), 1.
- [12] Blair, D. G. and Candy, B. N., *M. N. R. A. S.*, 212 (1985), 219.
- [13] White, N. E. et al., *Ap. J.*, 270 (1983), 711.
- [14] Wang, Y. M. and Welter, G. L., *Astron. Astrophys.*, 102 (1981), 97.
- [15] Leahy, D. A., *M. N. R. A. S.*, 242 (1990), 188.
- [16] Leahy, D. A., *M. N. R. A. S.*, 251 (1991), 203.
- [17] Leahy, D. A., *M. N. R. A. S.*, 237 (1989), 269.
- [18] Nagase, F., *Proceeding of the Workshop on Iron Line Diagnostics in X-ray Sources*, Varenna, Italy, (1990).
- [19] Trumper, J. et al., *Ap. J. Lett.*, 219 (1978), L105.

- [20] Qu, Q. Y. and Wang, Z. R. et al., *Chinese Astronomy*, 5 (1981), 128.
[21] Makishima, K. et al., in *Frontiers of X-Ray Astronomy*, ed. by Y. Tanaka and K. Koyama, p. 23, (1992).
[22] Tanaka, Y., in *Radiation Hydrodynamics in Stars and Compact Objects*, ed. by D. Mihalas, and K. H. Winkler, p. 198.
[23] Joss, P. C. and Rappaport, S. A., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 22 (1984), 537.
[24] Corbet, R. H. D. and Day, C. S. R., *M. N. R. A. S.*, 243 (1990), 553.
[25] Greenhill, J. G. et al., *Astron. Astrophys.*, 208 (1989), L1.
[26] Sakao, T. et al, *M. N. R. A. S.*, 246 (1990), 11.
[27] Terasawa, K. et al., in *Frontiers of X-ray Astronomy*, ed. by Y. Tanaka and K. Koyama, p. 49. (1992).
[28] Mereghetti, S. et al., *Ap. J. Lett.*, 366 (1991), L23.
[29] Nagase, F. et al., *Ap. J.*, 263 (1982), 814.
[30] Cook, M. C. and Warwick, R. S., *M. N. R. A. S.*, 225 (1987), 369.
[31] Nagase, F., in *Frontiers of X-ray Astronomy*, ed. by Y. Tanaka and K. Koyama, p. 79, (1992).
[32] Alpar, M. A. and Shaham, J., *Nature*, 316 (1985), 239.

(责任编辑 刘金铭)

The Observational Characteristics of X-Ray Pulsars

Li Xiangdong Wang Zhenru

(Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210008)

Abstract

In this paper, the basic observational characteristics of X-ray binary pulsars are reviewed, including pulse profiles, energy spectra, physical parameters of binaries, variation of pulse periods and QPO phenomena. From these, we can learn more about the physics of neutron stars, the accretion process of magnetic neutron stars and the evolution of binary stars. Also, there are some puzzles, especially the composite changes of \dot{P}/P , need to be resolved.