

《脉冲星天文学》

暑期讲习班

PA12. Accretion-powered neutron stars

讲授：徐仁新

北京大学物理学院天文学系

脉冲星类天体的多种表现

转动供能 (rotation-powered)

- 射电脉冲星 = 正常PSR + 毫秒PSR

X射线脉冲星

γ 射线脉冲星

吸积供能 (accretion-powered)

- X射线脉冲星

- X射线爆

? 供能

- 软 γ 射线重复爆: 磁能?

- 反常X射线脉冲星: 磁能?

- 中心致密天体: 热能?

- 暗热“中子”星: 热能?!

本次课程

明天上午
乔国俊教授
的演讲

0, 中子星吸积辐射高能光子

致密天体吸积能够高效地释放能量:

•引力能释放效率依赖于 M/R 值

$$\eta_g = G \frac{M}{c^2 R} \approx 0.15 \times \frac{M / M_{\text{sun}}}{R / (10^6 \text{ cm})}$$

- 白矮星: $R \sim 10^9 \text{ cm}$, $\eta_g \ll \eta_{\text{nucl}}$
- 中子星: $R \sim 10^6 \text{ cm}$, $\eta_g \sim 0.15$
- 黑洞? 若最小稳定圆轨道半径 r_{ms} 以内不能向外辐射,
Schwarzschild黑洞: $\eta_g \sim 0.06$
极端Kerr黑洞: $\eta_g \sim 0.45$

0, 中子星吸积辐射高能光子

NS或BH吸积产生高能辐射 (X或 γ):

- 若引力能只转化为一个光子 (完全不热化)

$$\varepsilon_1 \approx \frac{GMm_p}{R} = 137\text{MeV} \frac{M}{M_{\text{sun}}} \frac{10\text{km}}{R}$$

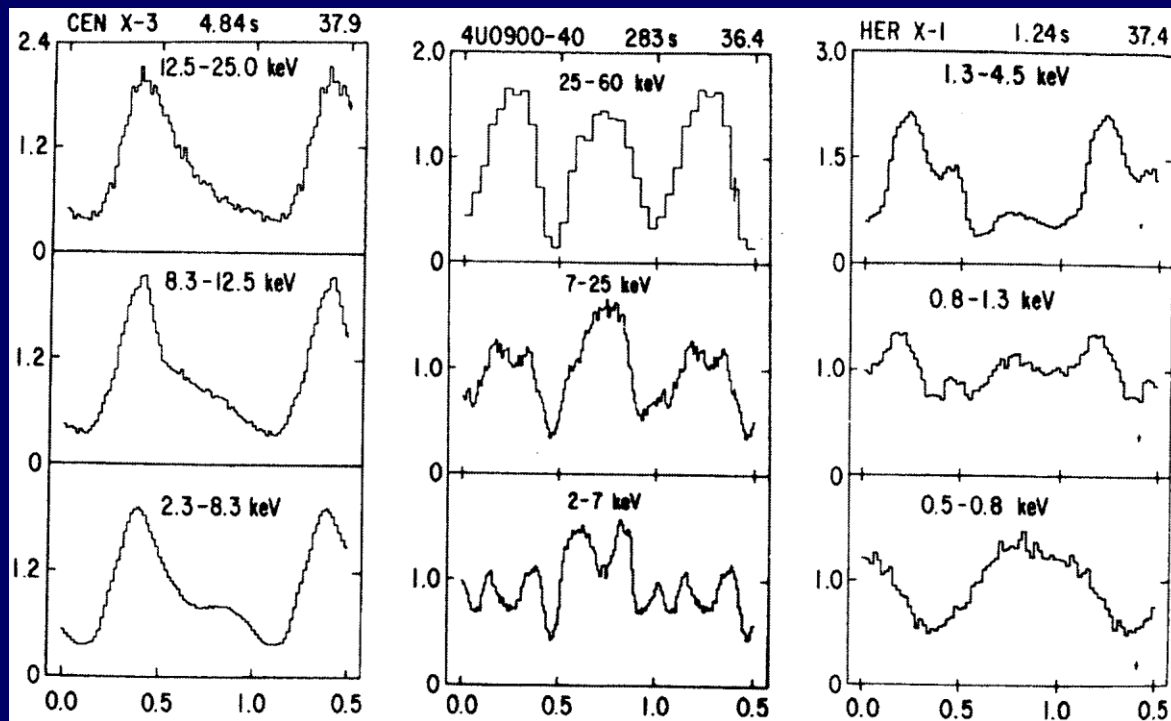
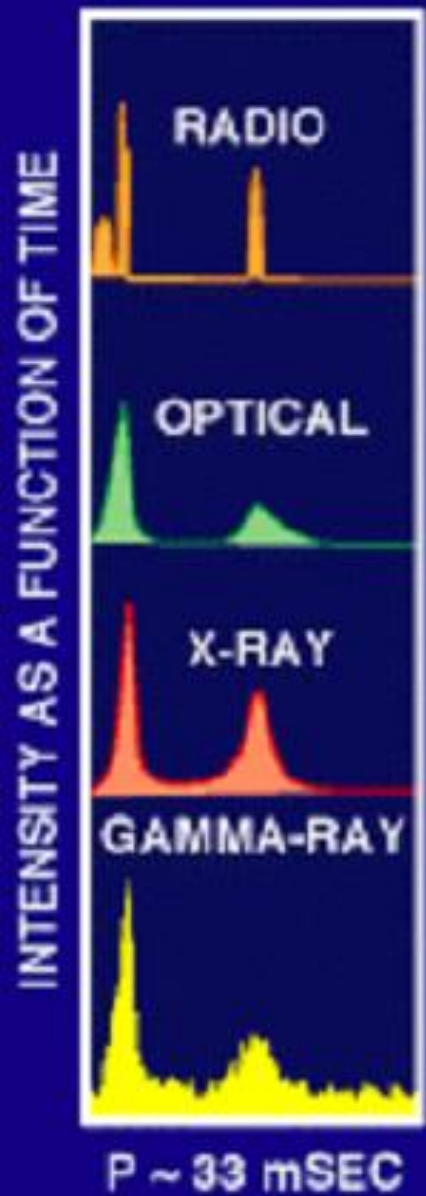
- 若引力能以接近黑体的热辐射形式释放 (完全热化)

$$\varepsilon_2 \approx k \left(\frac{L}{4\pi\sigma R^2} \right)^{1/4} \approx 1.67\text{keV} \left(\frac{L}{L_{\text{Edd}}} \right)^{1/4} \sqrt{\frac{10\text{km}}{R}}$$

- 实际情况下, 吸积粒子是不充分的热化的:

$$\varepsilon_2 < h\nu < \varepsilon_1$$

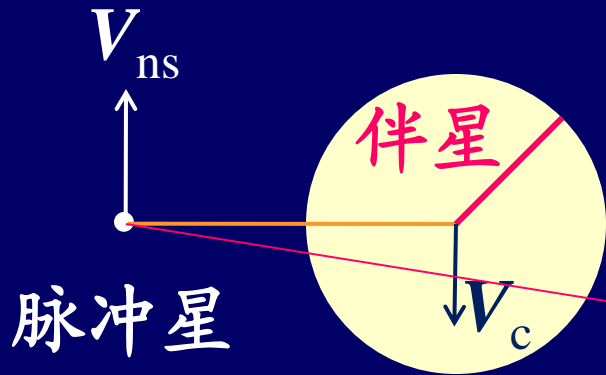
1, X射线双星光变曲线



- 光变随光子能量变化较大
- 低能光变比高能光变复杂

-
- 光变起源于热斑（星体或盘）
 - 低能光子中热成分较高

2, 轨道与伴星质量



动量守恒 $\Rightarrow R \equiv \frac{M_c}{M_{ns}} = \frac{V_{ns}}{V_c} = \frac{V_{ns} \sin i}{V_c \sin i}$

$$f_{psr} = \frac{(M_c \sin i)^3}{(M_{psr} + M_c)^2}$$

掩蚀 $\Rightarrow i$

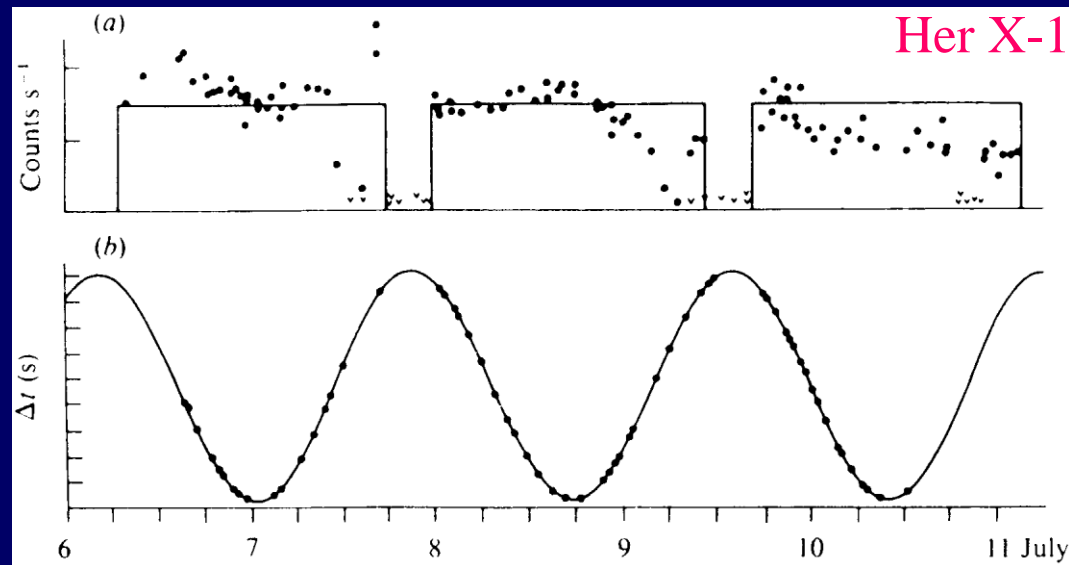
例如: 4U0900-40

$$M_{ns} = 1.9 M_{sun}$$

$$M_c = 24 M_{sun} \Rightarrow \text{HMXB}$$

$$M_c = (0.2 \sim 0.4) M_{sun}$$

$$\Rightarrow \text{LMXB}$$



2, 轨道与伴星质量

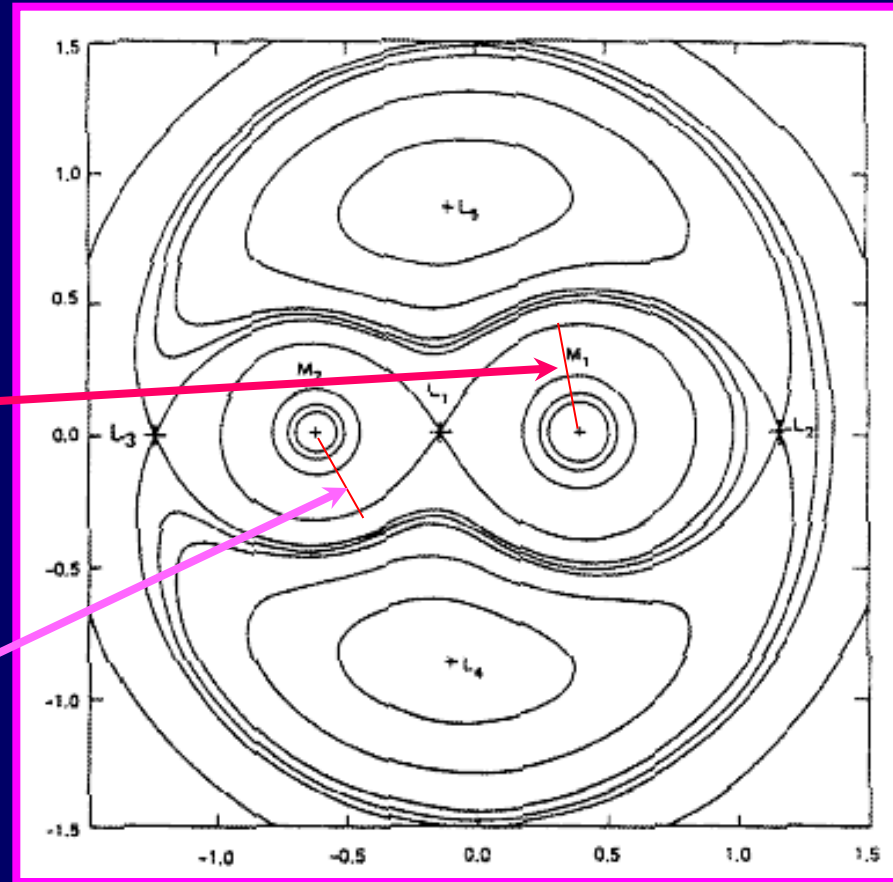
确定*i*需要知道Roche瓣的大小

- 公转轨道平面内的等势线
 - 第一Lagrange点L₁ (鞍点)
 - 临界Roche面

$$R_1 = \frac{0.49(M_1/M_2)^{2/3}}{0.6(M_1/M_2)^{2/3} + \ln[1 + (M_1/M_2)^{1/3}]} a$$

$$R_2 = \frac{0.49(M_2/M_1)^{2/3}}{0.6(M_2/M_1)^{2/3} + \ln[1 + (M_2/M_1)^{1/3}]} a$$

在无吸积情形也可以由恒星的光度及温度确定伴星半径



2, 轨道与伴星质量

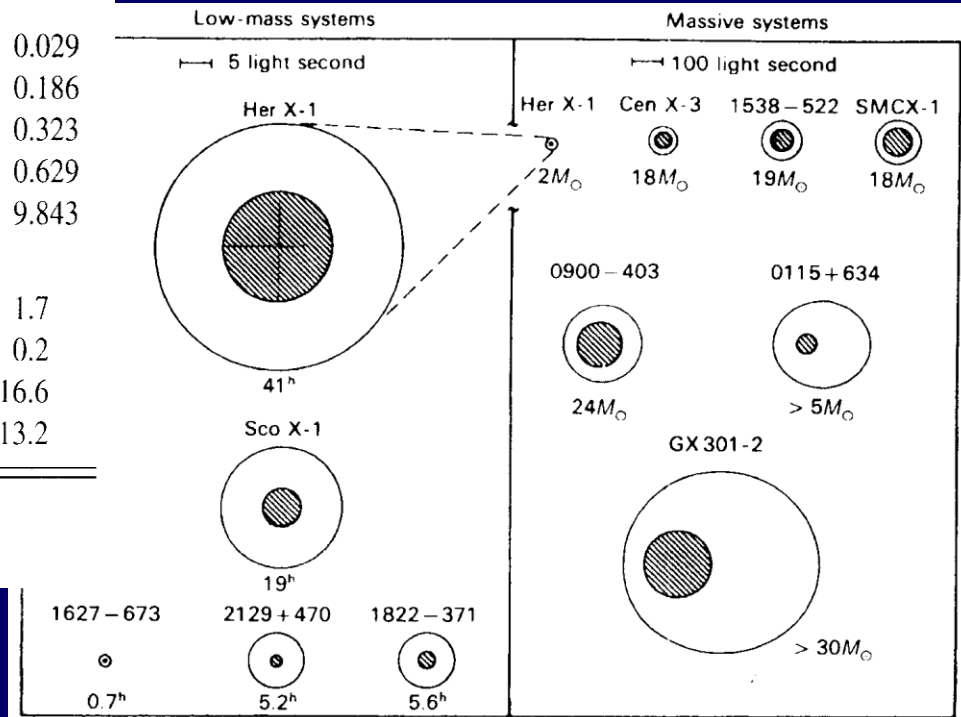
X射线双星系统

	Companion type	P (s)	P_b (days)
Massive systems $M_c \geq 20M_\odot$			
LMC X-4	O7	14	1.4
Cen X-3	O6.5	4.8	2.1
SMC X-1	B0	0.7	3.9
Cyg X-1 (BH ^a)			5.6
Vela X-1	B0.5	283	9.0
V725 Tau	Be	104	111
Low-mass systems $M_c \leq M_\odot$			
KZ TrA		7.7	0.029
V4134 Sgr			0.186
V616 Mon ^b (BH ^a)			0.323
Cen X-4 ^b			0.629
Cyg X-2			9.843
Peculiar systems			
HerX-1 ($M_c \sim 2.35M_\odot$)	A9	1.2	1.7
Cyg X-1	WR		0.2
Cir X-1 ^b			16.6
SS 433			13.2

^aThe compact object is believed to be a black hole.

^bThe binary system is transient.

两类X射线双星系统尺度

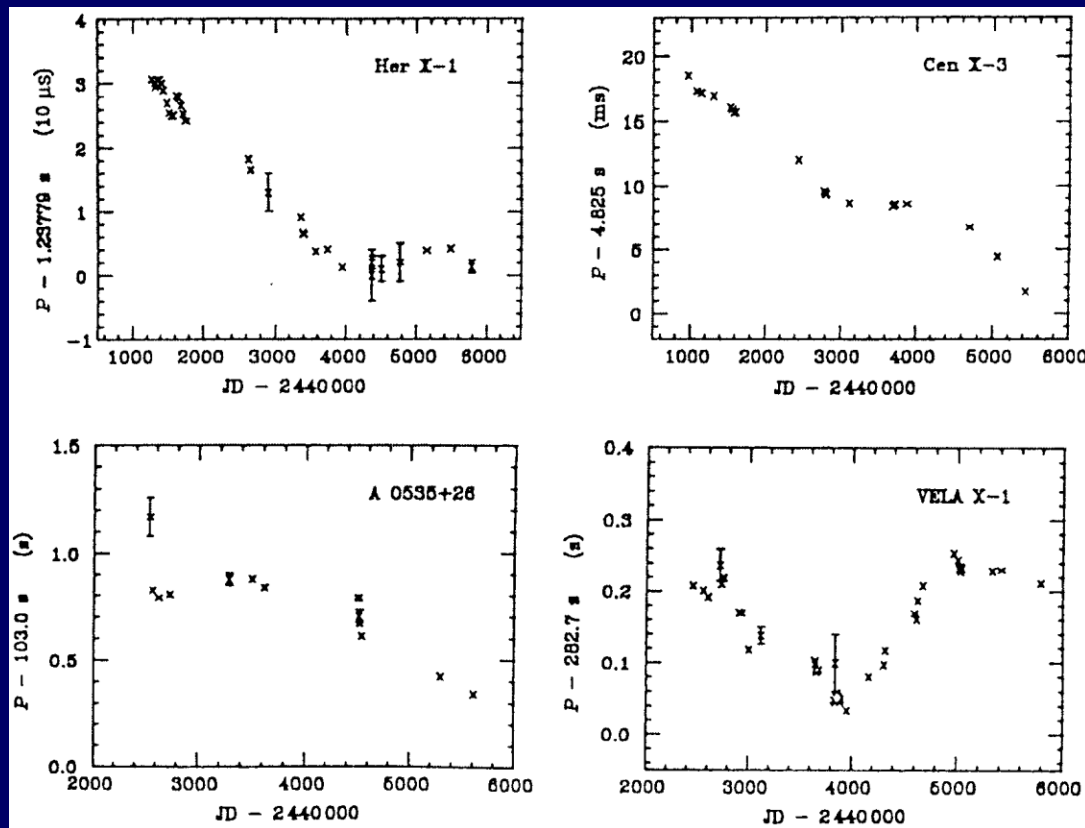


3, 大质量X射线双星HMXB

- 大质量X射线双星系统比较年轻，磁场衰减弱，吸积流集中于极冠区，一般表现为**X射线PSRs**。

- 中子星自转周期随时间的演化：
加速或减速

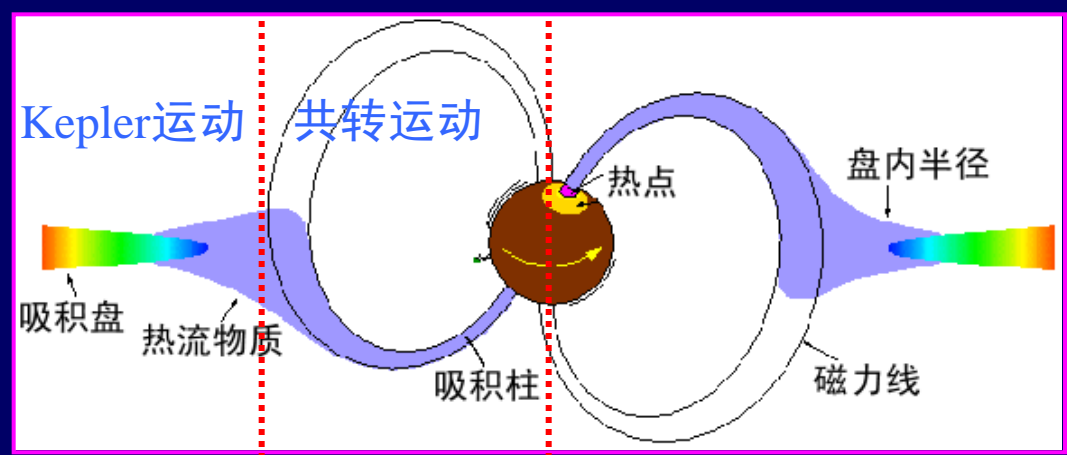
为什么？



4, 自转加速与减速

磁中子星吸积的特殊性:

- 中子星一般具有**强偶极磁场** (极冠区 $\sim 10^8\text{G}-10^{12}\text{G}$)
- **远离中子星处**, 可**忽略磁场**对吸积物质的**作用**
- **接近中子星处**, 因**磁冻结**, 吸积磁流体具有与该星**共转趋势**
- 磁层半径: 吸积流明显受 **B** 作用处 (由 $\rho_{\text{particle}} \sim \rho_B$ 定, 习题1)



吸积流存在:

- ◆ Kepler运动
- ◆ 共转运动

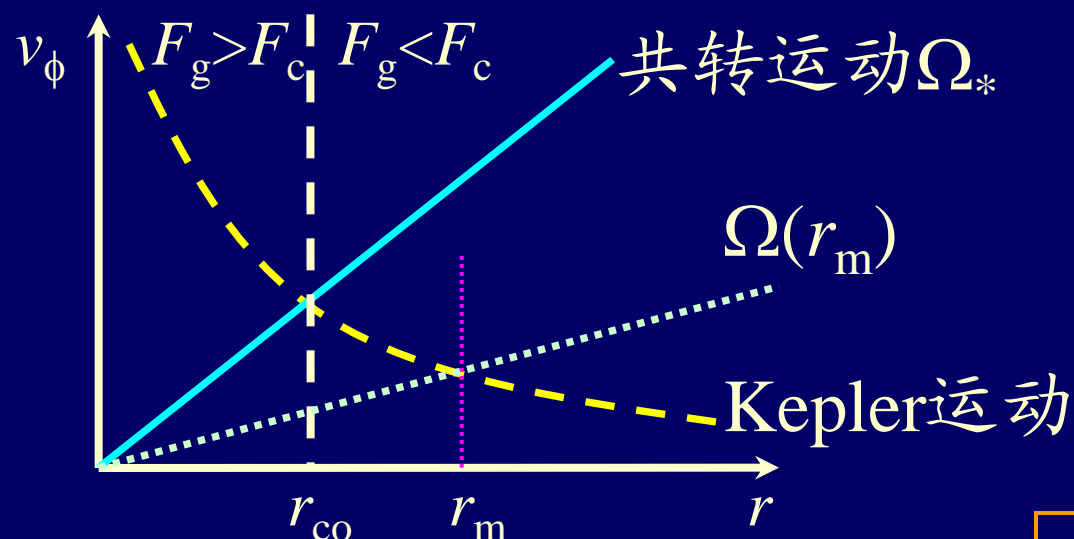
$$r_m = \left(\frac{R^6 B^2}{\dot{M} \sqrt{2GM}} \right)^{2/7} \approx 3.2 \times 10^{10} B_{12}^{4/7} R_6^{12/7} M_1^{-1/7} \dot{M}_{10}^{-2/7} \text{ cm}$$

磁层半径 r_m

4, 自转加速与减速

吸积流能否一定落至磁中子星表面?

- 共转流体不仅受引力 F_g 作用, 而且还受离心力 F_c 作用!



- 描述星体自转相对快慢的物理量: **快度**

$$\omega_s \equiv \frac{\Omega_*}{\Omega_k(r = r_m)}$$

$$\omega_s = 1 \Leftrightarrow r_m = r_{co}$$

- 是否 $\omega_s < 1$ 时吸积流一定落至中子星表面?

4, 自转加速与减速

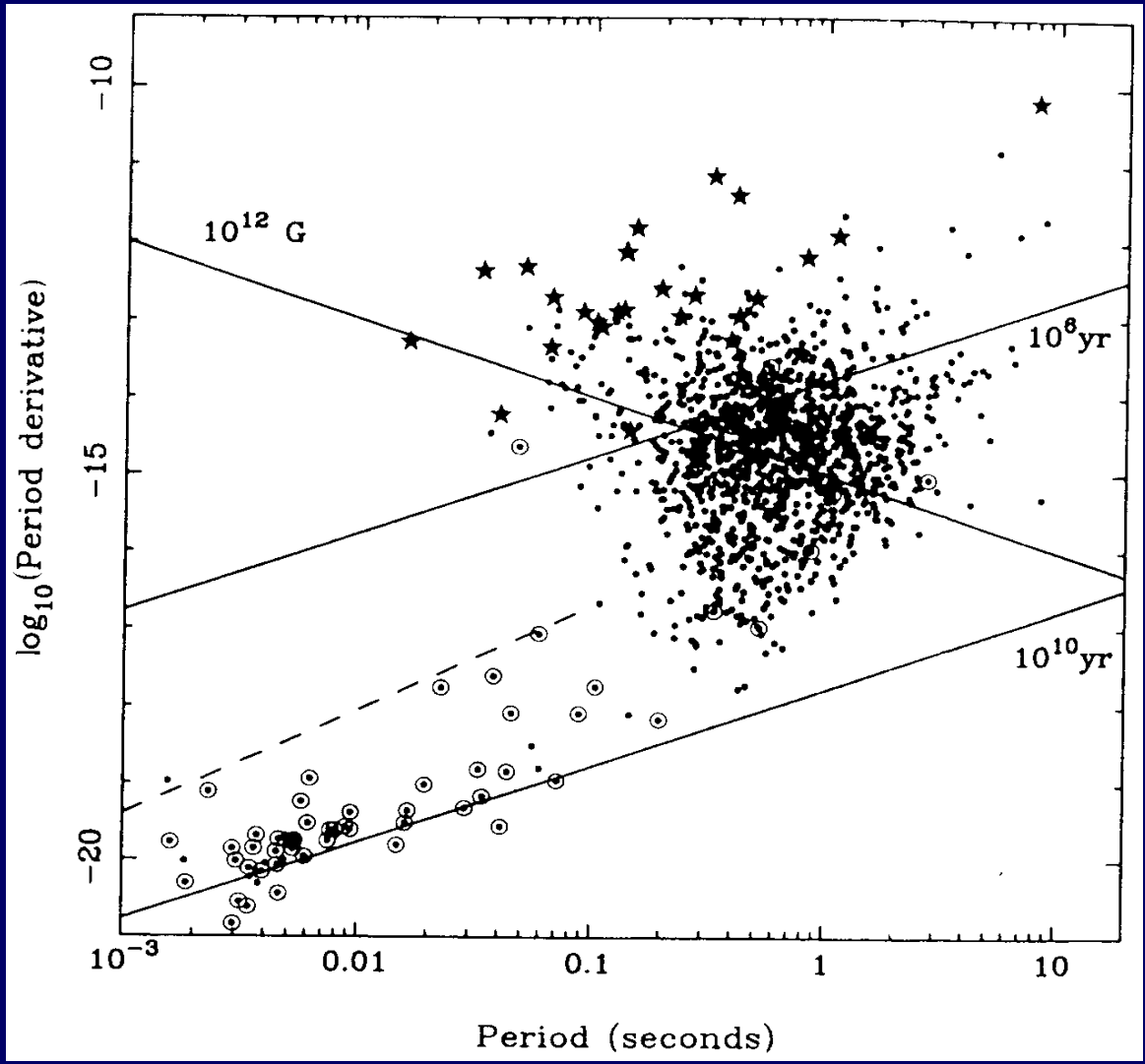
• Spin-up line

$\omega_s = 1$ 时确定的直线

$$\Leftrightarrow r_m(B, M) = r_{co}(P, M)$$



$$P_{\text{lim}} = 1.9\text{ms } B_9^{6/7} \frac{\dot{M}}{\dot{M}_{\text{Edd}}}$$



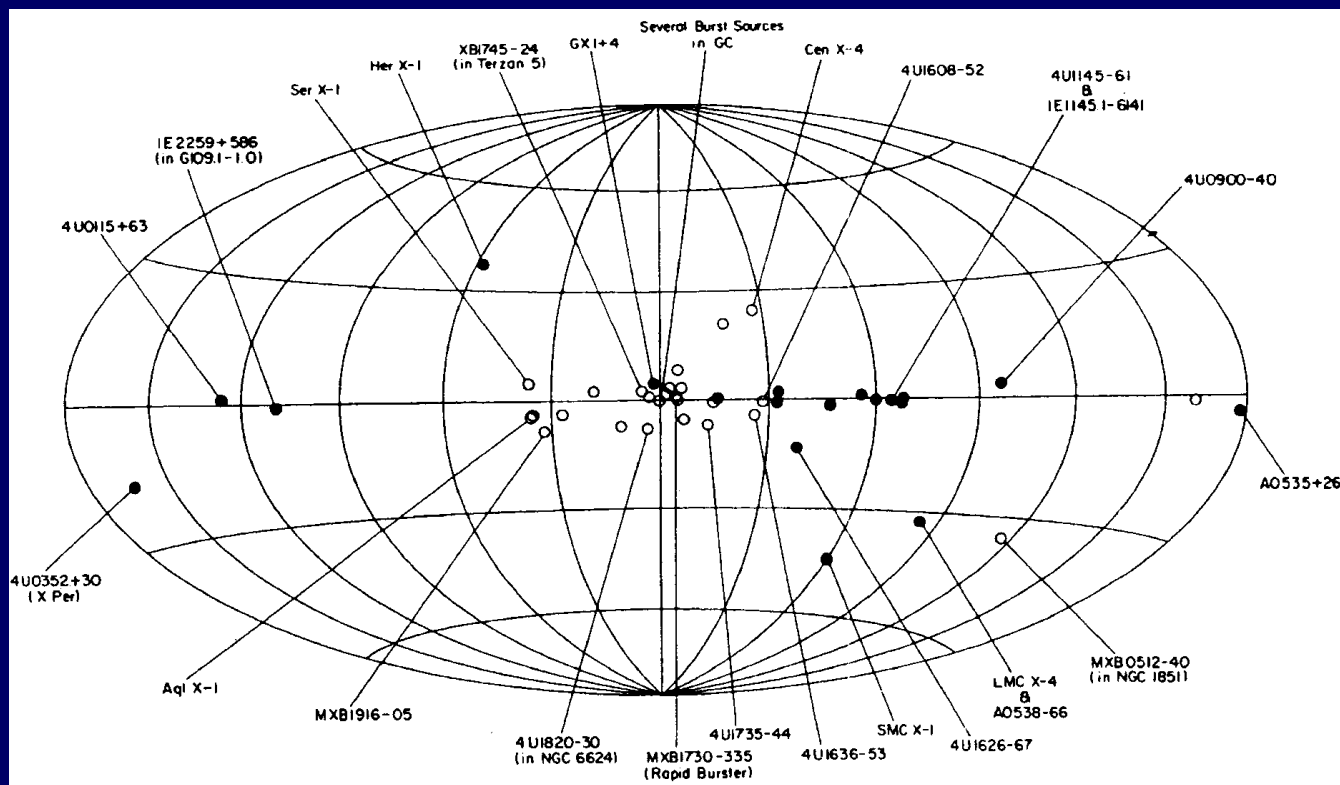
5, 小质量X射线双星LMXB

• 小质量X射线双星系统比较年老，磁场衰减强，吸积流在NS近乎均匀分布，一般表现为**X射线爆**。

• 两类双星在银河系中的分布

• **X射线脉冲星**

• **X射线爆**



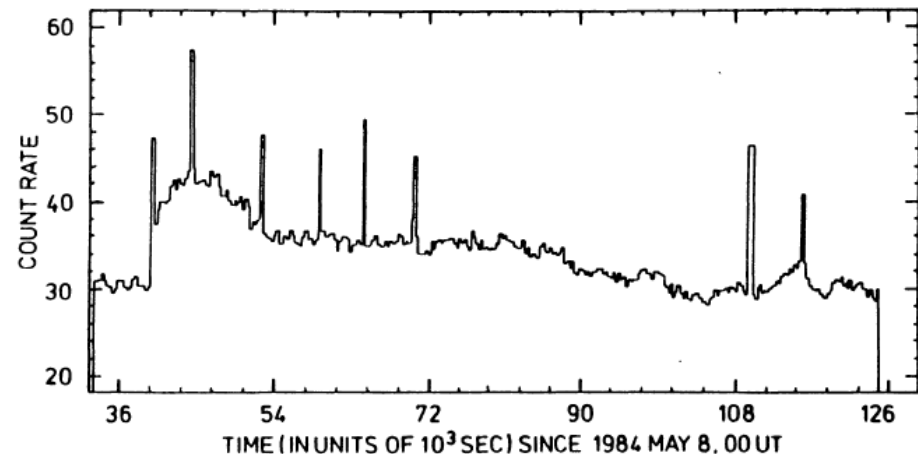
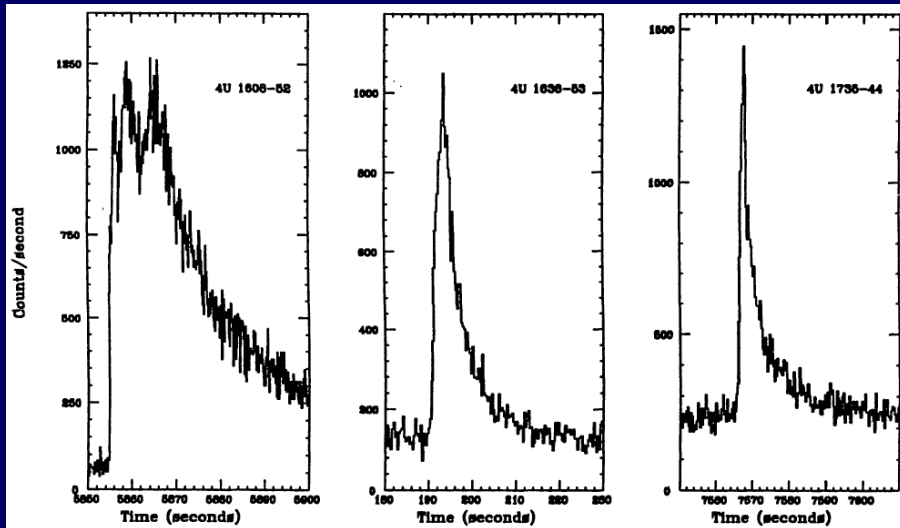
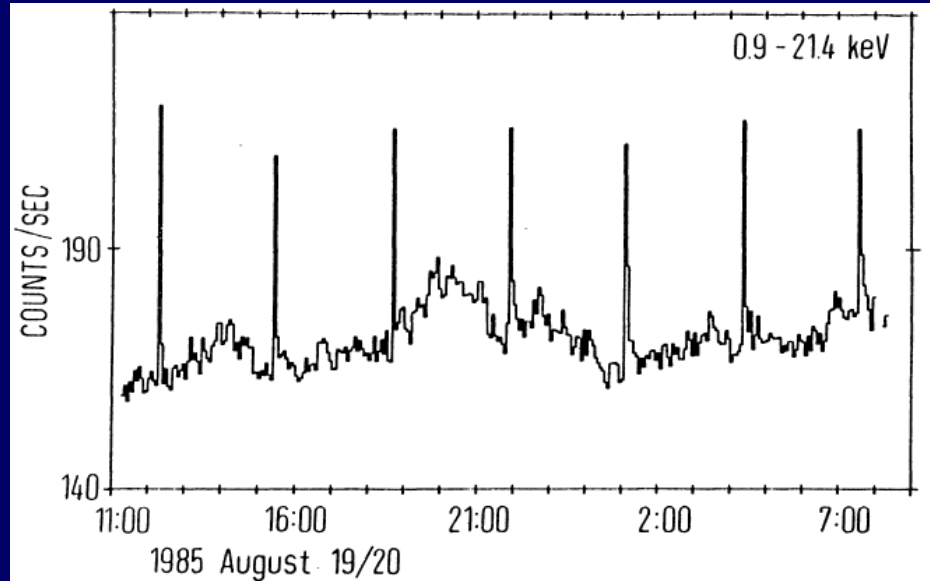
6, X射线爆

• 爆发现象 (Type I)

$$\frac{\text{爆发总流量}}{\text{持续总流量}} \sim 20$$

平均

为什么?



几例爆发剖面

Lewin et al. (1993)

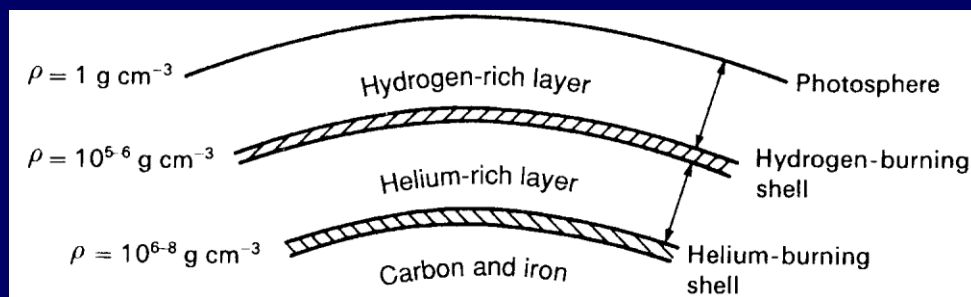
爆发长期特征

6, X射线爆

• 爆发机制 (Type I)

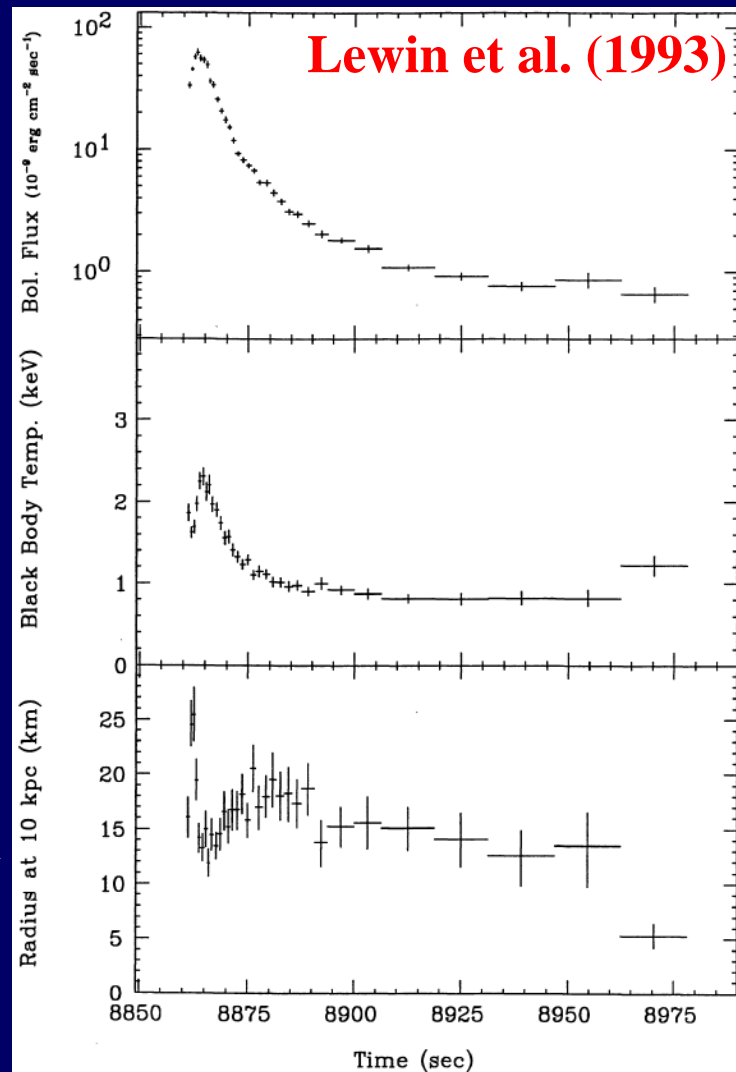
从伴星吸积至中子星表面的物质发生不稳定的核燃烧。

氢燃烧层与氦燃烧层



爆发过程中中子星体积变化 \longrightarrow

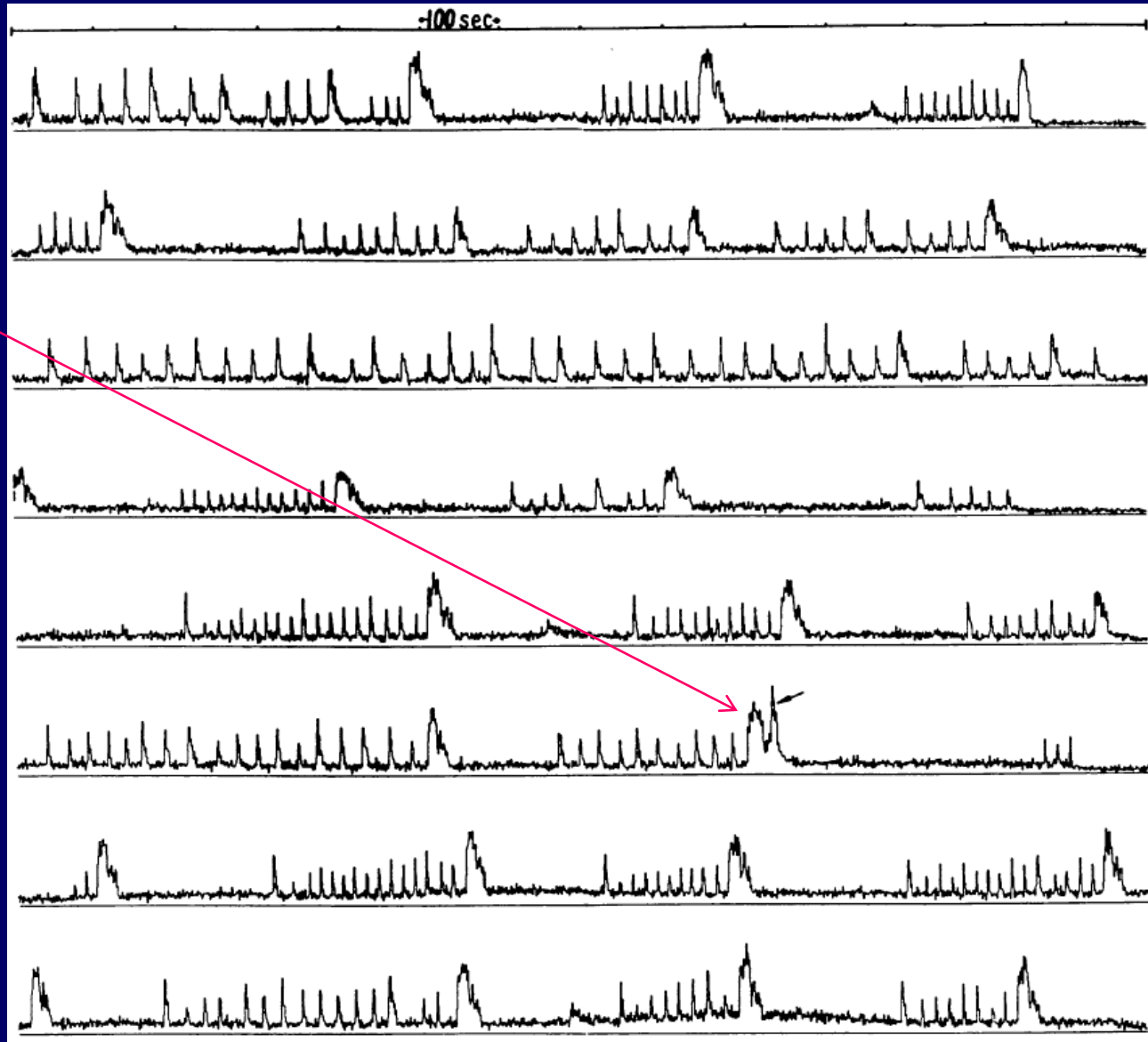
Cottam (2002): $z = 0.35?$



6, X射线爆

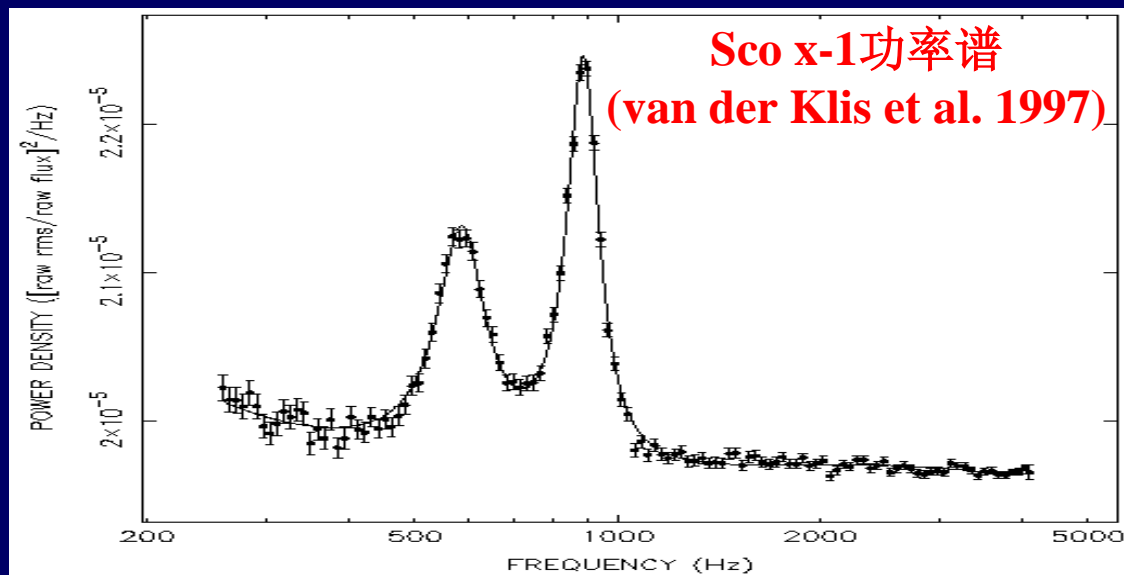
- 快爆源
(Type I + II)

II型爆可能起源于吸积流的不稳定性



7, 准周期震荡QPO现象

• 观测现象

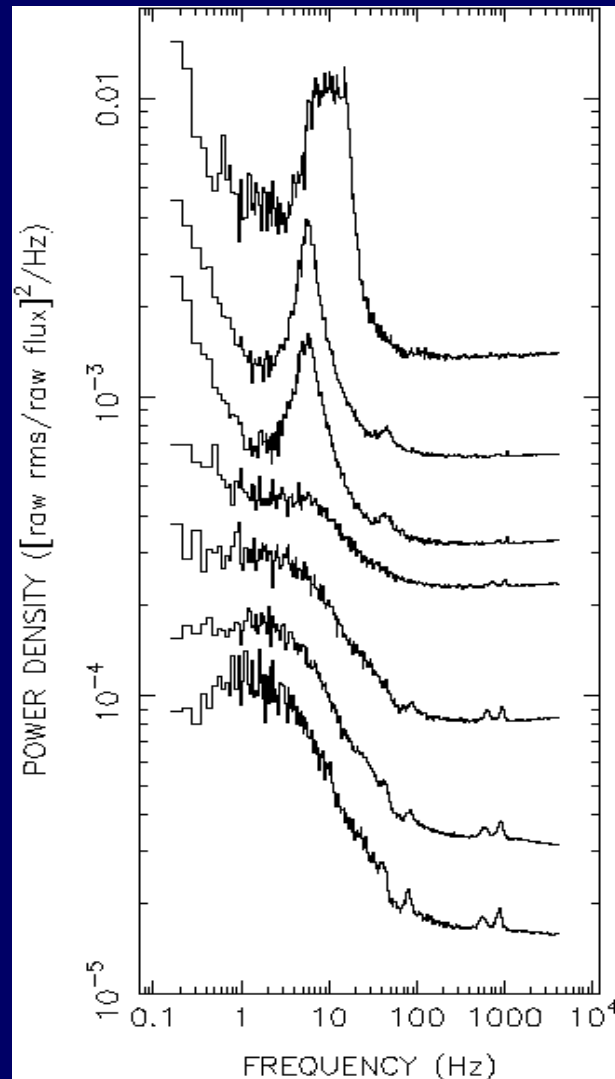


• 起源:

轨道运动?

低于自转频率的周期性爆发?

X射线爆期间自转周期的调制?

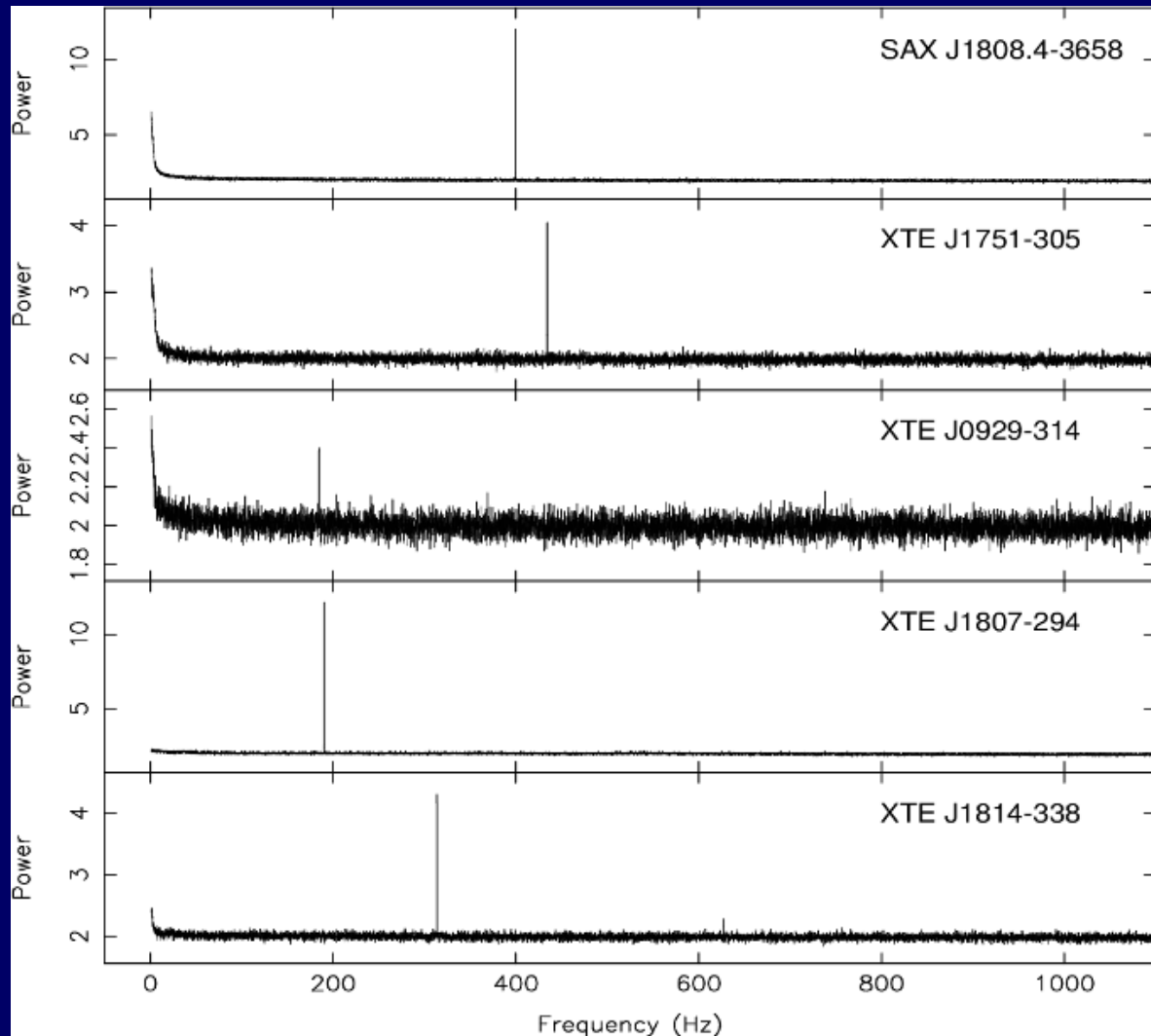


QPO轮廓随吸积率改变

7, 准周期震荡QPO现象

• 吸积X射线毫秒脉冲星:

“再加速” 图像的证据?



总 结

在双星系统中的中子星，特别是有物质交流的情况下，表现出非常丰富的高能天体物理现象；包括X射线脉冲星，X射线爆，（自转加速与减速，QPO），等等。无疑这些现象必然反映中子星的本质——物态！

但它们是如何反映物态的？