

# 低质量 X 射线双星中的准周期振荡 (QPO) 现象\*

乔国俊

(中国高等科学技术中心[世界实验室], 天文和天体物理分中心)  
(北京大学地球物理系)

## 提 要

本文系统地介绍了低质量 X 射线双星(LMXB)中的准周期振荡现象的主要观测事实。对建立理论模型起过主要作用的观测事实, 以研究得较为仔细的三个源(GX5-1, CygX-2, ScoX-1)为例, 做了比较详细的介绍。新近在 QPO 和低频噪声中发现, 不同能量的光子到达地球的时间有差别, 称为延时效应。本文对此做了概括的介绍。

## 一、概 述

在低质量 X 射线双星中发现的准周期振荡(QPO), 是在老年而快速自转的射电脉冲双星的启示下, 经多年努力找到的。下面介绍有关背景和 QPO 概况。

### 1. 低质量 X 射线双星

银河系内的高光度 X 射线源是一种密近双星系统, 其中一个子源为致密天体, 它吸积由伴星传输过来的物质。绝大多数情况下, 致密天体是中子星, 有的可能是黑洞。这些 X 射线源可以分成两类: 高质量 X 射线双星(HMXB)和低质量 X 射线双星(LMXB)。

大多数高质量 X 射线双星是 X 射线脉冲星, 其致密源是具有强磁场的中子星。光学子星是年轻的( $\leq 10^7$  年)、大质量的( $\geq 10M_{\odot}$ )早型(O, B 型)星。许多高质量 X 射线双星能观测到 X 射线的掩食以及因轨道运动产生的光学和 X 射线脉冲的 Doppler 效应, 因而可以定出两个子星的质量及轨道参数。这是从实测上为我们提供中子星质量、大小等物理参数的重要来源。我们知道, 射电脉冲星是转动减速的。但 X 射线脉冲星是转动加速的。吸积物质的角动量输运被认为是中子星转动加速的原因。

低质量 X 射线双星由晚型低质量光学子星( $M \lesssim 1M_{\odot}$ )和一个中子星(少数可能是黑洞)组成<sup>[1]</sup>。这类双星有: X 射线爆发源, 球状星团 X 射线源, 高光度银河核球源及软 X 射线瞬变源等。其中 X 射线爆发源约占一半。它们绝大部分是银河核球源和星族 II 源。这是一类相当老的( $\sim 10^9$  年)天体<sup>[2]</sup>。已知约 20 个高光度低质量 X 射线双星的轨道周期从 11 分(4U1820-30)到 9.8 天(CygX-2)覆盖了一个很大的范围\*。这意味着光学子星可以是白矮星、晚型主序

1989 年 6 月 7 日收到。

\* 国家自然科学基金资助项目。

星或主序后的低质量巨星，通过不同的演化方式而形成。其中有三个源观测到了X射线的脉动。

## 2. 射电毫秒脉冲星的启示

射电脉冲双星 PSR 1913+16 具有较弱的磁场( $10^{10}$ G)和较大的年龄( $10^8$ 年)，但有快速的自转周期(59ms)。通常的射电脉冲星，只有年轻的、磁场强的才有快速的自转周期，随年龄的增长，转会愈来愈小。那么为什么会出现上述情况呢？

Smarr 和 Blandford<sup>[3]</sup> 提出一个历史性的概念，他们认为上述脉冲双星曾经经历过一个中子星的吸积过程，因转动加速使中子星转速变快的。这一概念预言低质量X射线双星中的中子星可能因转动加速而达到 ms 的量级。

与高质量X射线脉冲星一样，低质量X射线双星的X射线光度也是由中子星吸积伴星的物质而提供的。通常认为，由伴星过来的物质在中子星周围会形成吸积盘。吸积盘以 Kepler 轨道速度转动。

有证据表明，中子星的磁场在其诞生时可高达  $10^{13}$ G，随年龄的增长而衰减<sup>[4]</sup>。当年龄较大时，磁场变弱，吸积盘靠近中子星，中子星因吸积而转动加速，其自转速度越来越快。如果中子星的磁场非常弱(如  $\leq 10^7$ G)，它的转动周期可达 1ms。弱磁场时，吸积盘靠近中子星的表面，其 Kepler 速度可与中子星的自转速度相当。

原则上说，在低质量X射线双星中，中子星的转动是能够被测量到的，不过只能是相干的X射线脉动(因周围等离子体的自由-自由吸收不可能在射电波段上观测到)，正如在高质量X射线双星中观测的X射线脉冲那样：吸积物质通过磁场形成的“漏斗”落入磁极冠区，当中子星的自转轴与磁轴不重合时，可观测到脉动。

自然，如果中子星的磁场很弱，就不可能形成“漏斗”，也不可能产生X射线脉动，我们不可能看到如上所述 ms 级的脉动。但如果磁场足够强，例如  $10^9$ — $10^{10}$ G，那么我们就观测到X射线的脉动。脉动的周期，仍在 ms 量级的范围内。

## 3. 低质量X射线双星中QPO现象的发现

在上述概念的启迪下，三个科研组分别利用 SAS-3 和 HEAO 卫星观测资料，独立地在低质量X射线双星中进行 ms 级X射线脉动的搜寻，但均未成功。Boriakoff et al.<sup>[5]</sup> 发现了周期为 6.13ms 的射电脉冲双星 PSR 1953+29。这一发现，更激发了在低质量X射线双星中对 ms 级脉动的寻找。

美国麻省理工学院的 Walter Lewin 建议他的欧洲同事，利用欧洲的X射线卫星 EXOSAT 再一次在低质量X射线双星中进行 ms 级脉动的探测<sup>[6]</sup>。GX 5-1 和 GX349-2 是 1984 年上半年申请观测的 10 个高光度低质量X射线双星中的两个。1984 年秋进行了观测分析，在 Van der Klis 和研究生 F. Jansen 对 GX5-1 为期五周的观测资料的分析中，未发现相干的X射线脉动，但发现了一种准周期振荡(QPO)。

事实上有关低质量X射线双星中的QPO现象的发现，可追溯到1971年。Angel et al.<sup>[7]</sup> 报道了 Sco X-1 的X射线流量有 1—10Hz 的振荡。Tawara et al.(1982)<sup>[8]</sup> 发现了快速爆发源

\*\* Cir X-1 的轨道周期可能为 16.6 天。

(Rapid Burster)有2Hz的脉动。但这些发现未引起重视。这是因为快速爆发源是一个很特殊的源,2Hz的脉动无非是它的“另一个”特殊现象而已。而GX5-1则是一个亮的银河核球源的典型。另外GX5-1较高频率的QPO(20—36Hz)则与致密天体密切相关,使之与射电毫秒脉冲星发生了联系,因而它的发现,立刻引起全世界天文学家的关注。

#### 4. QPO现象简述

对于具有精确周期(频率 $\nu_0$ )的辐射,在其功率谱图(功率—频率图)上于频率 $\nu_0$ 处可以看到一个很窄的脉冲。然而对于一个频率为 $\nu_0$ 的、在有限时间 $\tau$ 内的正弦波串,则产生中心频率为 $\nu_0$ 而全峰半宽为 $\Delta\nu \approx \frac{1}{\pi\tau}$ 的功率谱图。 $\tau$ 愈小 $\Delta\nu$ 愈宽。如果上述正弦波串的 $\nu_0$ 和 $\tau$ 都在变化,就会看到 $\nu_0$ 和 $\Delta\nu$ 都在改变的功率谱图。这种现象,不具有准确的周期,称为准周期振荡(QPO)。

低质量X射线双星中没有检测到精确的周期(相干的X射线辐射),但测量到一种周期并不固定的准周期振荡。其功率谱如图1所示,其特点如下(见例如陆焱,1987<sup>[1]</sup>, Lewin et al. 1988<sup>[2]</sup>);

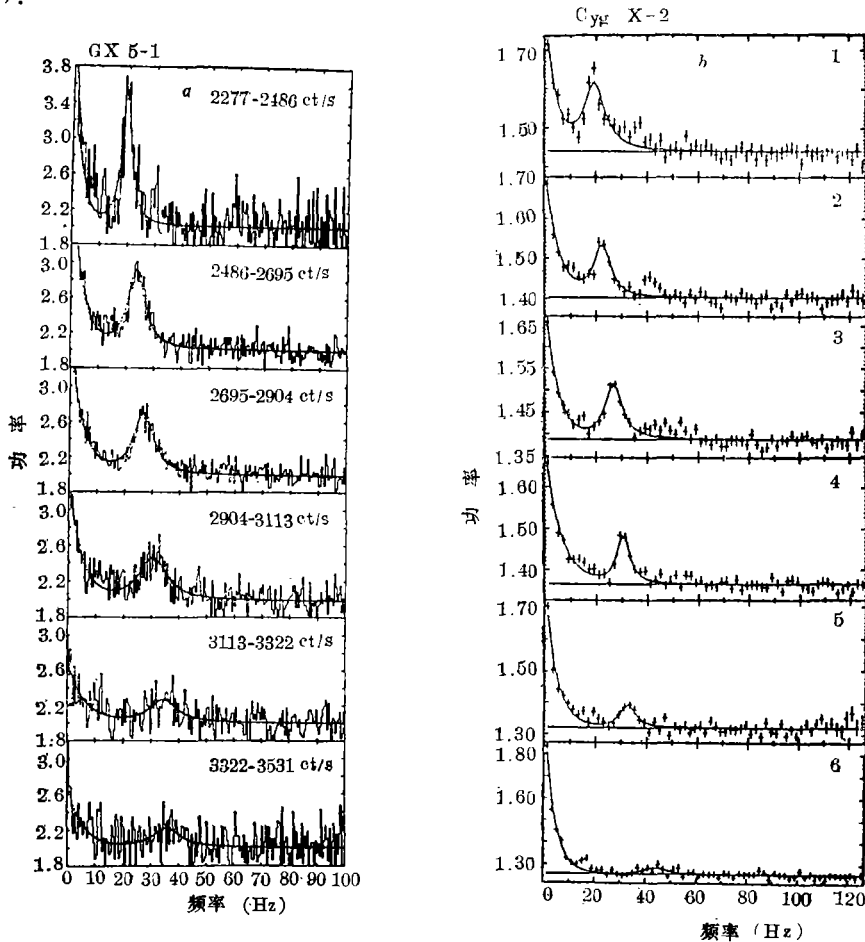


图 1 对应不同光子计数率时的GX5-1(a)和Cyg X-2(b)的谱功率密度—频率图

- (1) 振荡的中心频率  $\nu_0$  不固定, 随辐射强度(正比于光子计数率)的增大而增加;
- (2) 在中心频率  $\nu_0$  附近有一个颇大的带宽  $\Delta\nu$ , 且  $\Delta\nu$  随辐射强度增大而加宽;
- (3) 伴随有低频( $\nu \lesssim 10\text{Hz}$ )和甚低频( $\nu \lesssim 0.1\text{Hz}$ )噪声, 且随辐射强度而变化。

事实上 QPO 现象是十分丰富的, 总体上说有低频 QPO(周期  $2-10^3$  秒)和高频 QPO(频率  $> 2\text{Hz}$ )之分。关于前者将在结语中介绍, 这里重点介绍后者。以下提到的 QPO 都是指高频 QPO(即使有时用了“低频”一词)。

QPO 的特性与辐射的频谱状态(见第三节)密切相关。粗略地说可以分成三类, 其中多数源(10 个中的 6—7 个)具有前两类 QPO, 而第三类典型的只有一个源。这三类是

(1) 水平支谱态(记做 HB)的 QPO, 特点是

- a. QPO 频率  $\nu_0$  在 16—55Hz 之间;
- b. QPO 与低频噪声有强相关关系;
- c. 伴随有甚低频噪声;
- d.  $\nu_0$  与观测到的辐射强度  $I$  强相关。

(2) 正常支谱态(记做 NB)的 QPO, 特点是

- a. QPO 频率  $\nu_0$  在 5—8Hz 之间;
- b. 无低频噪声;
- c. 但伴随有甚低频噪声。

(3) 耀变谱态(记做 FB), 特点是

- a. QPO 频率  $\nu_0$  在 2—25Hz 之间;
- b. QPO 的强度与辐射强度  $I$  强相关;
- c. 无低频噪声;
- d. 该谱态只出现在 Sco X-1 的辐射中(偶尔在 Cyg X-2 的辐射中也能看到)。

快速爆发源(1730-335)是一个很特殊的源, 其 QPO 的行为也非同一般, 十分繁复。

## 二、有关 QPO 源的两点说明

### 1. QPO 源的一般情况

在约 50 个亮的低质量 X 射线双星中, 有约 20 个最亮的高光度源。在这 20 个源中, 有 10 个检测到 QPO。表 1 列出了这些 QPO 源的部分特性, 以 QPO 频率的高低为序。表中列出了 X 射线光度的最大值。大多数为高光度的持续 X 射线源, 主要分布在银河核球和球状星团内, 大部分未观测到光学对应体。Sco X-1 和 Cyg X-2 的伴星是主序后的低质量恒星, 而 1820-30 的轨道周期仅 11 分钟, 伴星可能是一个低质量的(约  $0.05M_{\odot}$ )简并矮星。

目前研究得较为仔细的源是 GX5-1, Cyg X-2 和 Sco X-1。它们的观测资料对模型的建立起过重要作用。

### 2. GX5-1, Cyg X-2 和 Sco X-1 的概况

GX5-1 是我们银河中心区最亮的一个源, 未发现其光学对应体(可能因星际消光所致,  $A_v > 10$  星等)。该源可能与弱的射电变源相联系。X 射线流量有秒到天的时标上的变化, 但

表 1 已知 QPO 源的主要特性

源	谱态	$\nu_0(\text{Hz})$	$\log L_x$	注
Cir X-1 (1516-56)	? ? ?	138—195 5.7—18 1.42	38.9	Bu, Tr, RV
Cyg X-2 (2142+380)	HB NB	18—55 5.6	38.1	PB, GHP
GX5-1 (1758-250)	HB NB	20—36 5.6	38.6	PB, GB
GX 17-2 (1813-140)	HB NB	23.7—28.1 7.2±0.5 2.4±0.4	38.4	PB, BU, GB
4U 1820-30 (1820-303)	HB? NB?	16.1—28.2 7.8±0.9	37.9	PB, BU, GC
Sco X-1 (1617-155)	NB FB IF	5.9—7.9 1.8—25 6.9—17.7	37.9	PB
GX349+2 (1702-363)	NB? NB?	11±1.5? 5.3±0.4	38.5	PB, GB
GX3+1 (1744-265)	NB	8±1	38.2	PB, BU, GB
GX340-0 (1642-45)	NB	5.6±0.3		GB
Rapid Burster (1730-335)	? ? ? ?	2 2.2-5 2-4 0.4-1	37.0	Bu, GC

PB: 持续亮源      Tr: 瞬变源      HB: 水平支谱态  
 Bu: X射线爆发源      RV: 快速变源      NB: 正常支谱态  
 GC: 球状星团中的源      GB: 银核球中的源      FB: 耀变支谱态  
 GHP: 银河晕星族中的源      IF: 耀变间的谱态

注: 该表由 M. Van der Klis (1986)<sup>[10]</sup> 和 W.H.G. Lewin et al. (1988)<sup>[2]</sup> 的表简化而成, 个别源的部分谱态未详细列出。

未观测到周期性(有报道说有两天时标上的 QPO)。X射线的频谱型态的变化通常与小时到天的时标上的辐射强度的变化有关。有时源的强度改变, 但并不引起谱型的改变。

Cyg X-2 属银河系晕星族, 距离 8kpc, 光学子星是主序后的小质量恒星, 轨道周期 9.8 天。有少见的耀变事件, 是一个射电源。

Sco X-1 是太阳系外发现的第一个 X 射线源。光学子星可能是主序后的低质量恒星, 光学波段也有光变。轨道周期 0.787 天。相应的射电源由三部分组成: 中心部分与 X 射线源重合, 是个射电变源; 离中心约 1' 的相对位置上有两个射电瓣。X 射线的光变时标为小时到天, 交替出现活动态和宁静态。在活动态期间有偶发耀变, 也有 10—30 分钟时标上的强度减弱, 有时能达到宁静水平。

### 三、主要观测事实

对建立模型起主要作用的观测事实是

- (1)  $\nu_Q$  与辐射强度  $I$  间的关系;
- (2) QPO 与低频噪声间的关系;
- (3) 不同的频谱型态以及相应的 QPO 和低频噪声的行为。

新近观测到对于 QPO 和低频噪声, 不同能量的 X 射线光子到达地球的时间不同, 称为延时效应, 这种效应可能将对模型的发展起重要的作用。下面将着重介绍这几方面的观测事实。

#### 1. 频谱类型及它与红噪声的关系

##### (1) 硬度—强度图及谱型

硬度—强度图: 若观测到的 X 射线能量范围内(如 3—10keV) 的总光子计数率(正比于强度)做为横坐标, 而将该范围内的硬光子成份与软光子成份的计数率之比(如 6—10keV/3—6keV, 称做“硬度比率”)做纵坐标, 所做的图形称硬度—强度图。辐射在硬度—强度图上呈现出不同形态谱型。不同的谱型, QPO 的行为不同(见第一节), 辐射有时为这一谱型, 有

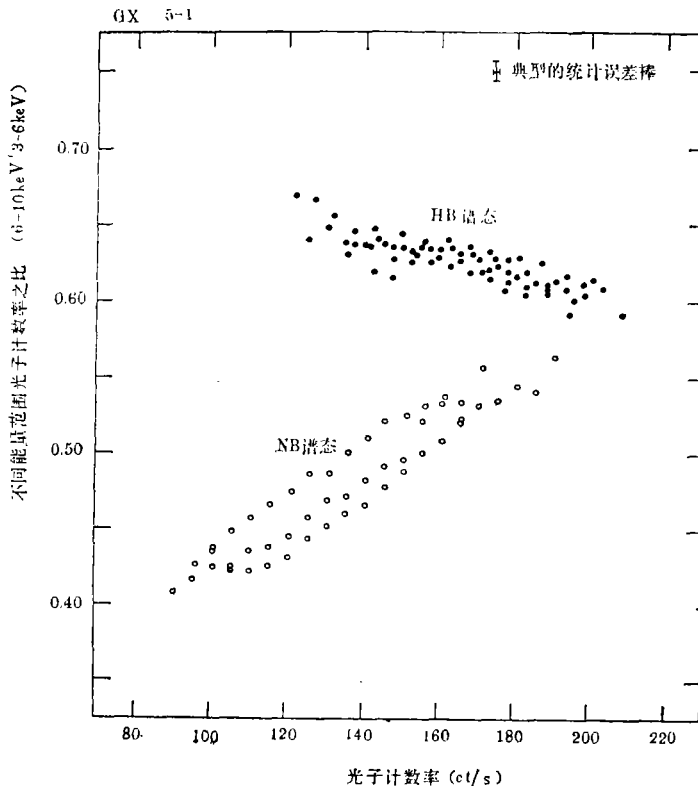


图 2 (a) GX5-1 硬度比(6—10keV/3—6keV)—强度(总光子计数率 ct/s)图。黑点表示 HB 谱态, 观测到~20—40Hz 的 QPO。圆点表示 NB 谱态。无明显 QPO(见图 5)。

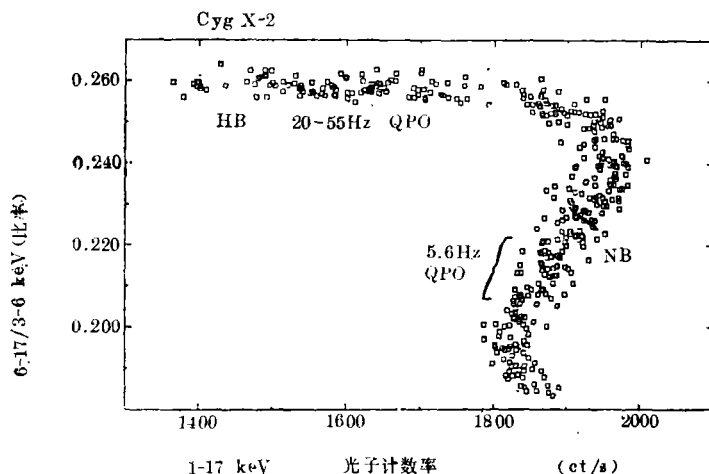


图 2 (b) Cyg X-2 的硬度比(6—17keV/3—6keV)—强度(总光子计数率 ct/s)图。HB 谱态观测到 20—50Hz 的高频 QPO。NB 谱态仅在确定部位上观测到 6Hz 的 QPO

时为另一谱型。不同的源，变化的时标不同。

水平支谱态(HB)：X射线谱随辐射强度的增加稍稍变软。

正常支谱态(NB)：X射线谱随强度增加而变硬(该谱态有时译为垂直支谱态)。

上述两种谱型为大多数源所具有。GX5-1 和 Cyg X-2 的硬度—强度图示于图 2。

耀变谱态(FB)：Sco X-1 处于宁静态和活动态时，分别对应于两种不同的谱型。宁静态时对应正常支谱态，活动态时对应耀变谱态，两种谱型平滑过渡，由耀变间谱态(IF)相联系。不同谱型的 QPO 频率不同(见表 1 与图 3)。

### (2) 谱型与红噪声间的关系

低频噪声( $\lesssim 10\text{Hz}$ )和甚低频噪声( $\lesssim 0.1\text{Hz}$ )泛称红噪声。不同的源，不同的谱型红噪声的行为很不相同。

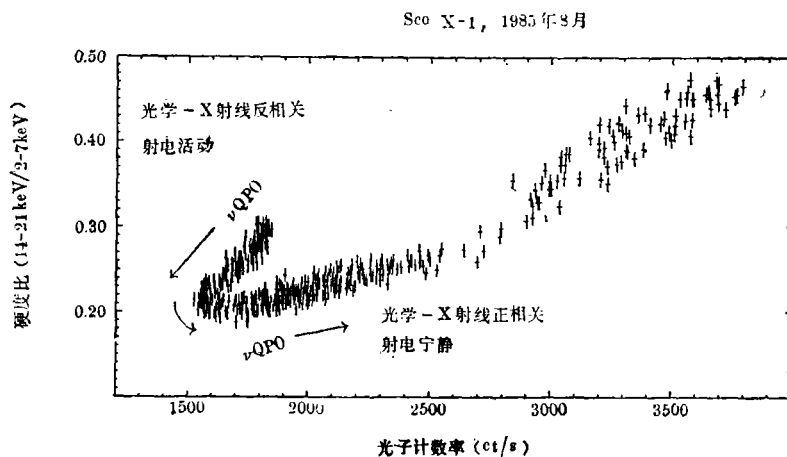


图 3 Sco X-1 硬度比(14—21keV/2—7keV)—强度(低时间分辨率的火花放电正比计数率, ct/s)图。图上给出活动态和宁静态时 QPO 频率随强度的变化(详见图10)

GX5-1:

水平支谱态——在约 30Hz 附近有 QPO, 同时存在低频和甚低频噪声(见图 4)。

正常支谱态——没有(或很弱)QPO, 也没有低频噪声, 只有低于 $\sim 0.3\text{Hz}$ 的甚低频噪声。

Cyg X-2:

水平支谱态——在约 40Hz 处有 QPO, 同时有低频噪声和甚低频噪声(见图 5)。

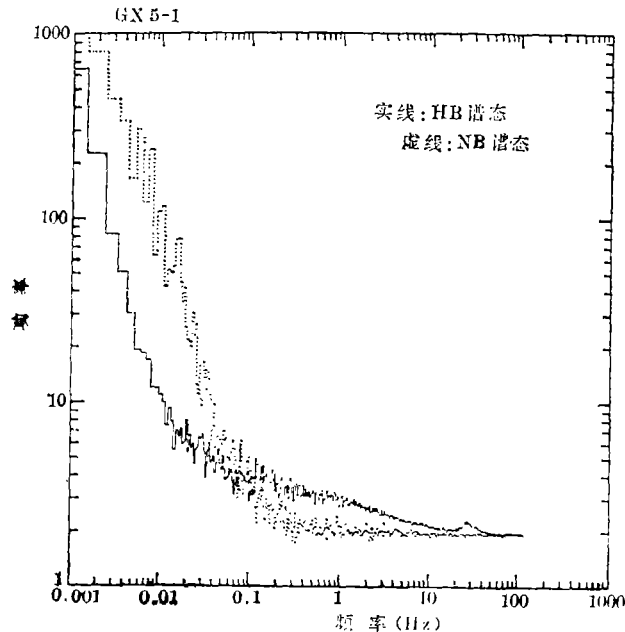


图 4 GX5-1 两个频谱态的谱功率密度。HB 谱态有 QPO( $\sim 30\text{Hz}$ )、LFN 和 VLFN。NB 谱态无 QPO 和 LFN, 但有 VLFN(低于 $\sim 0.3\text{Hz}$ )

正常支谱态——有约 6Hz 的 QPO 和甚低频噪声, 但无低频噪声。

Sco X-1:

红噪声很弱, 只有甚低频(0.016—1.0Hz)噪声, 未见低频噪声(见图 6)。

## 2. QPO 频率 $\nu_Q$ 与 X 射线强度间的关系

(1) 水平支谱态(GX5-1 和 Cyg X-2)

GX5-1: 随 X 射线强度的增加,  $\nu_Q$  从 $\sim 20\text{Hz}$  变到  $36\text{Hz}$ , 相应的  $\Delta\nu_Q$  由 $\sim 4\text{Hz}$  ( $\Delta\nu_Q/\nu_Q \sim 20\%$ ) 变到 $\sim 12\text{Hz}$  ( $\Delta\nu_Q/\nu_Q \sim 33\%$ )。QPO 强度则由 4.2% rms(即频谱中均方根值的百分数)变到 6.5% rms。在  $\nu_Q$ —强度( $I$ )图上呈强的正相关。 $\nu_Q \propto I^\alpha$ ,  $\alpha \approx 2$ (见图 7(a))。

Cyg X-2: 随辐射强度的增加,  $\nu_Q$  由 $\sim 18\text{Hz}$  变到 $\sim 55\text{Hz}$ ,  $\Delta\nu_Q$  则由 $\sim 12\text{Hz}$  ( $\Delta\nu_Q/\nu_Q \sim 67\%$ ) 变到 $\sim 20\text{Hz}$  ( $\Delta\nu_Q/\nu_Q \sim 36\%$ )。QPO 的强度由 2.9% rms 变到 5% rms,  $\nu_Q$  与  $I$  强相关,  $\nu_Q \propto I^\alpha$ ,  $\alpha \approx 1.7$ (见图 7(b))。

(2) 正常支谱态(GX5-1 和 Cyg X-2)

GX5-1 和 Cyg X-2 都在 5Hz 附近有一个弱的 QPO (见图 8)。对于 Cyg X-2, QPO



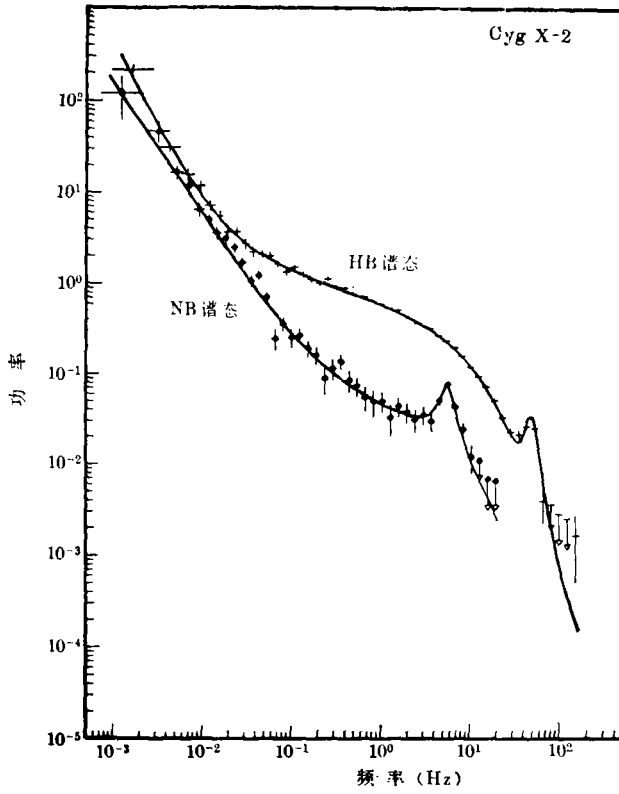


图 5 Cyg X-2 的谱功率密度。上边的曲线是 HB 谱态，下边的曲线是 NB 谱态。HB 谱态有高频 QPO (~40Hz)，LFN 和 VLFN。NB 谱态有 ~6Hz 的 QPO 和 VLFN，但无 LFN

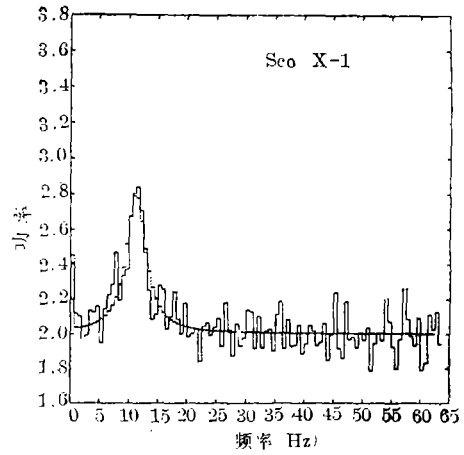


图 6 典型的 ScoX-1 的 QPO 谱功率密度图，与图 1 相比无 LFN，但有 VLFN(很弱)

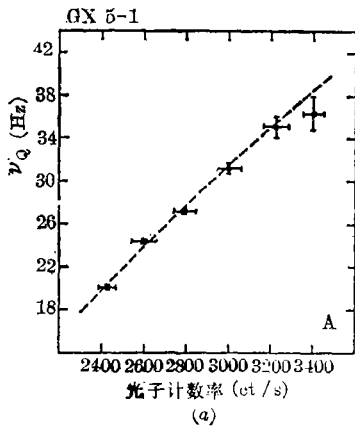


图 7 (a) GX5-1 的  $\nu_Q-I$  图

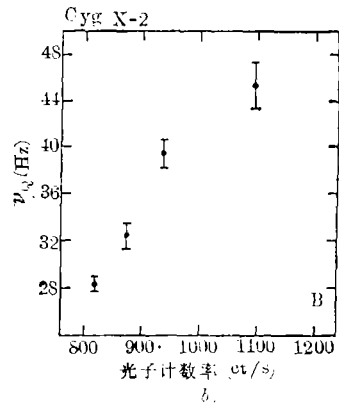


图 7 (b) CygX-2 的  $\nu_Q-I$  图

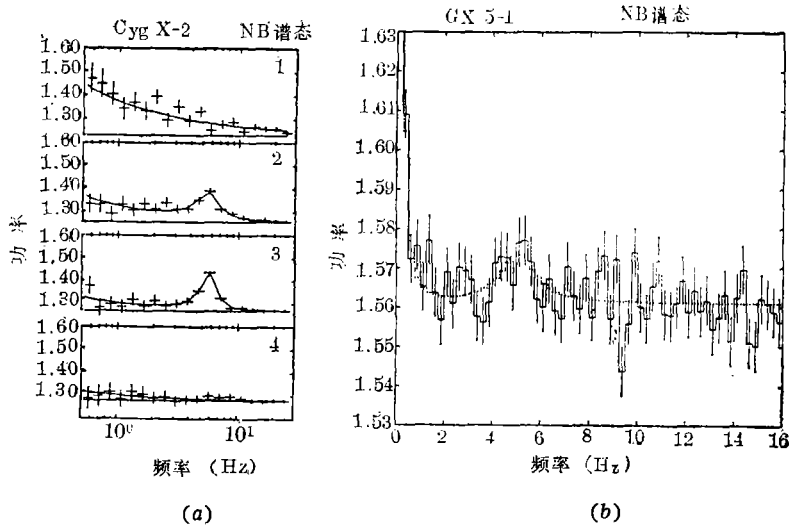


图 8 (a)CygX-2 的 NB 谱态的 5.6Hz 的 QPO, 在不同光子计数率下的图形;  
(b)GX5-1 的 NB 谱态的 5Hz 附近的可能的 QPO

只出现在正常支谱态的中间部分(见图 2), 且不随源的强度变化。

### (3) 耀变谱态(Sco X-1)

Sco X-1 处于活动态和宁静态时  $\nu_Q \propto I^\alpha$  的关系很不相同: 活动态时, 有很好的正相关关系,  $\alpha \approx +3$ ; 宁静态时, 则为弱的负相关,  $\alpha \approx -0.6$ (见图 9(a)(c)); 处于上述两谱态之间时, 呈时标为分量级的快速变化, 在  $\nu_Q-I$  图上呈环状, 如图 9(b)所示。图中绘出随时间变化的标志(顺、逆时针方向的转动都观测到过)。

### 3. QPO 和红噪声的强度与辐射强度的关系

GX5-1, 水平支谱态: QPO、低频噪声、甚低频噪声随辐射强度  $I$  的变化示于图 10。随  $I$  的增加, QPO 和低频噪声(LFN)的强度线性减少, 而甚低频噪声(VLFN)则无明显变化。QPO, 低频噪声和甚低频噪声随 X 射线光子能量的变化示于图 11。VLFN 几乎不随光子能量的改变而变化。

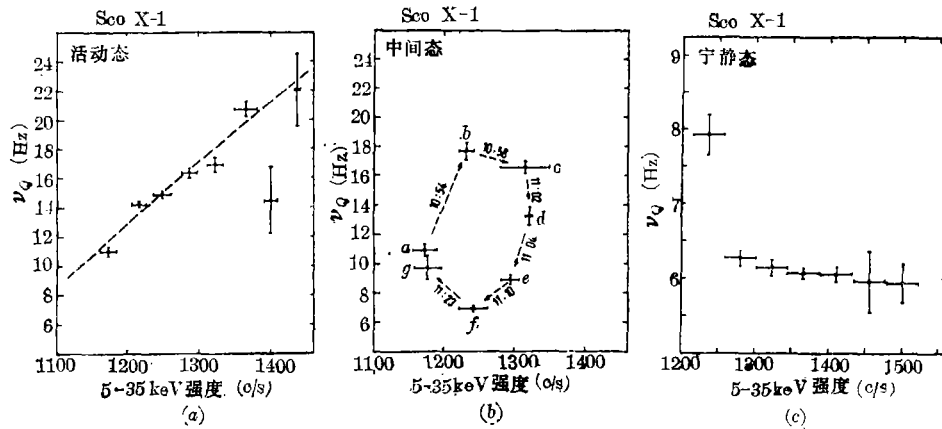
Cyg X-2, 水平支谱态: QPO 和低频噪声的强度随  $I$  的变化示于图 12。QPO 与  $I$  负相关, 低频噪声与  $I$  正相关。

Sco X-1: 处于活动态时, 辐射强度  $I$  增加, QPO 消失, 而甚低频噪声则变强(图 13)。宁静态时, 甚低频噪声的强度总比 QPO 的强度低(图 14)。

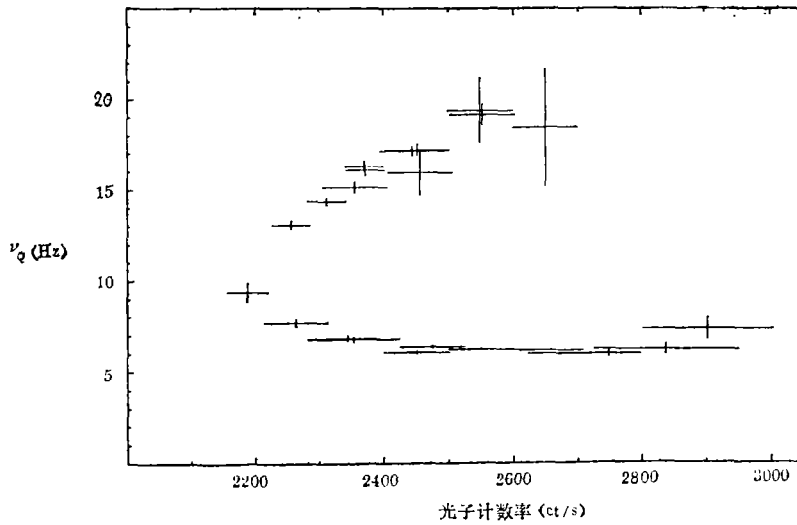
### 4. QPO 和低频噪声(LFN)的延时效应

随着观测设备的改进, 有可能测得不同能量的 X 射线到达地球时间上的差别。高能光子相对低能光子到达时间推迟, 称为硬延迟; 相反称软延迟。高频( $>5\text{Hz}$ )QPO 观测到的是硬延迟, 而在低频噪声中观测到的是软延迟。

在 Cyg X-2 处于水平支谱态时, 1—4.5keV 的光子和 4.5—17keV 光子相比, 硬延迟达



Sco X-1 频率特性



(d)

图 9 ScoX-1 的  $\nu_Q - I$  图

- (a) 活动态;  
 (b) 中间态, 图中箭头表示  $\nu_Q$  随时间的变化;  
 (c) 宁静态;  
 (d)  $\nu_Q - I$  (8—20keV 范围, ct/s) 图。上边的那个分支相应于活动态耀变相(HB),  $\nu_Q - I$  正相关; 下边的分支相应于宁静态(NB 谱态),  $\nu_Q - I$  负相关

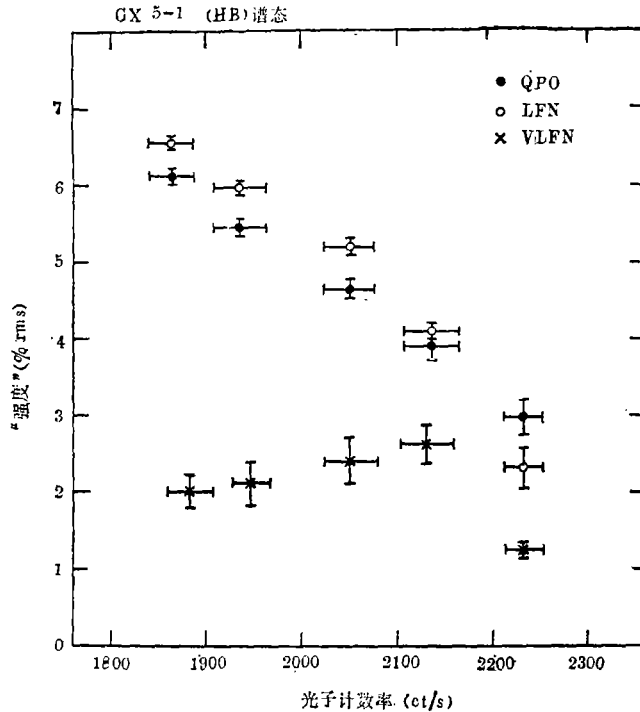


图 10 GX5-1 的 QPO( $\sim 20\text{Hz}$ — $40\text{Hz}$ )、LFN 和 VLFN 的“强度”—光子计数率 (ct/s) 图。QPO 和 LFN 随  $I$  增大而减少, 而 VLFN 几乎未变

3.91ms。延时与  $\nu_Q$  有关, 当  $\nu_Q$  在 20—50Hz 范围内时, 延时在  $\sim 4\text{ms}$  到小于 1ms 之间, 与  $\nu_Q$  负相关。GX5-1 的延时比 Cyg X-2 小, 平均值为 0.44ms, 并未表现出随  $\nu_Q$  明显变化的倾向。

在 Cyg X-2 处于正常支谱态时, 对 5.6Hz 的 QPO, 在 0.7—2.9keV 和 2.9—4.5keV 之间, 有  $(6.2 \pm 2.7)\text{ms}$  的硬延时。

日本 Ginga 卫星对 Cyg X-2 和 GX5-1 观测时, 在处于正常支谱态。对 5Hz 附近的 QPO, 在能量范围 7.9—12.3keV 和 1—2.9keV 之间的分析表明, Cyg X-2 在 1keV 和 5keV 之间无明显延时, 然而高于 5keV 时延时增加, 在 15keV 时可达  $(70 \pm 10)\text{ms}$ , GX5-1 达  $(80 \pm 30)\text{ms}$ 。

在处于水平支谱态时, 低于  $\sim 10\text{Hz}$  频率范围的低频噪声, 发现了软延时。在  $\sim 2\text{Hz}$  附近, Cyg X-2 平均延时为  $\sim 15\text{ms}$ , 而 GX5-1 则为  $\sim 6\text{ms}$ 。有迹象表明, 这种软延时(在 1—10Hz 的平均)随  $\nu_Q$  而变化。Cyg X-2 在不到 6ms 至 12ms 之间变化, 而 GX5-1 在  $< 2\text{ms}$  到  $\sim 4\text{ms}$  之间变化<sup>[2]</sup>。

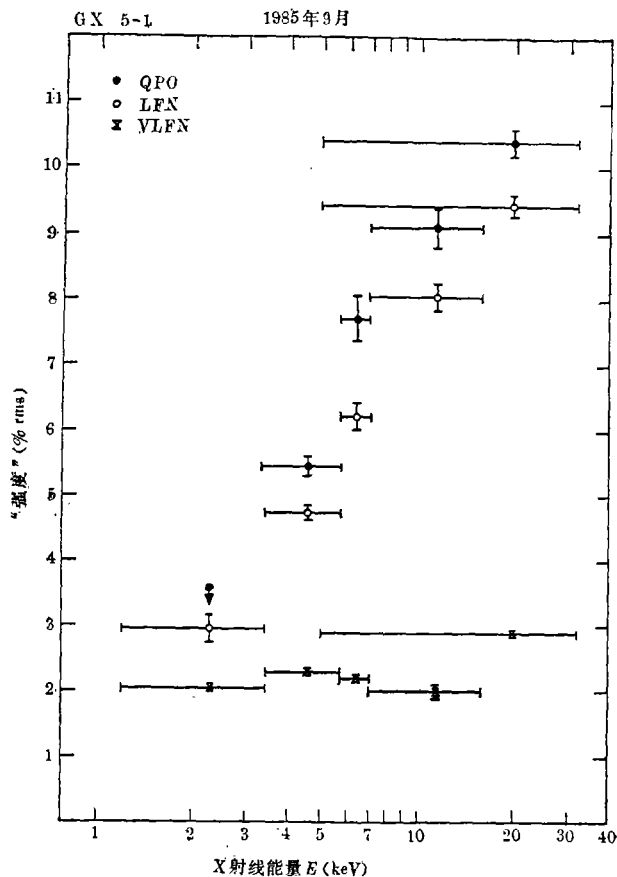


图 11 GX5-1 在 HB 谱态上的 QPO( $\sim 20-40$ Hz)、LFN 和 VLFN 的“强度”随 X 射线能量的变化关系。VLFN 几乎不变

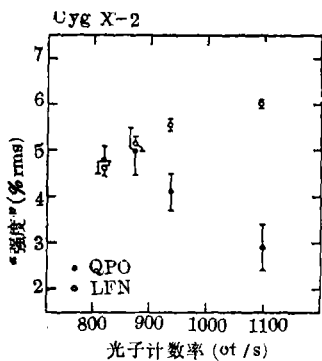


图 12 Cyg X-2 的 HB 谱态的 QPO 和 LFN 的“强度” $-I$  的变化关系

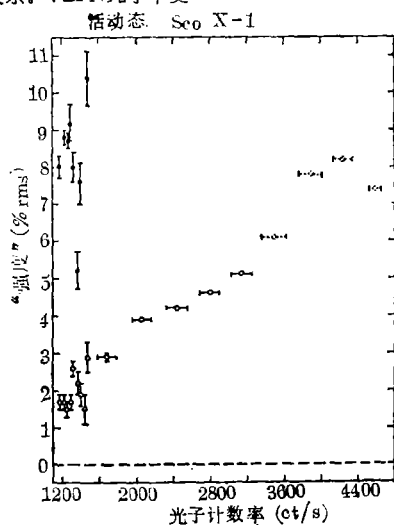


图 13 Sco X-1 活动态的 QPO( $\bullet$ ) 和 VLFN ( $\circ$ ) 的“强度”随光子计数率(5-35keV上, ct/s)的变化

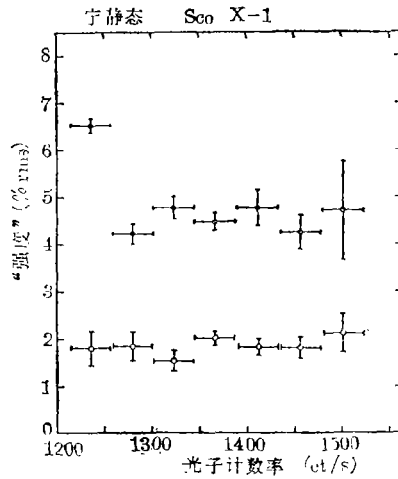


图 14 ScoX-1 宁静态的 QPO (·) 和 VLFN (○) 的“强度”随光子计数率的变化(5—35keV 范围内, ct/s)

#### 四、结 语

1. 低质量 X 射线双星的 QPO 现象呈现多样而纷繁的特征, 为研究致密天体、密近双星之间的作用开辟了一个广阔的天地。

2. 已检测出 QPO 现象的源都是最亮的源(见表 1)。在较弱源中做过一些高灵敏度的检测, 均未发现 QPO, 这可能是选择效应引起的。因为 QPO 强度只占源的一小部分, 对于弱源需更长的时间去检测。但 QPO 的出现及其特征是高度变化的, 因而即使存在 QPO 也不容易检测到(“抹”掉或漏掉)。现有模型并不以高光度为产生 QPO 的先决条件, 但不排除只有在高光度源中存在 QPO 的可能性。

3. 几个低质量 X 射双星(包括 GX5-1, GX349+2 等)都观测到低频 QPO (周期 10— $5 \times 10^3$ s)。QPO 强度的典型值为流量的 50%, 多是暂变现象, 持续时间在几十个周期之内。这种低频 QPO 可能与我们讨论过的高频 QPO 有不同的产生机制。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] McClintock, J. E. and Pappaport, S. A., in *Cataclysmic Variables and LMXB*, ed. by D. Q. Lamb and J. Patterson, p. 61. (1983).
- [ 2 ] Lewin, W. H. G. et al., *Space Sci. Reviews*, 46 (1988), 273.
- [ 3 ] Smarr, L. L. and Blandford, R. D., *Ap. J.*, 207 (1976), 574.
- [ 4 ] Lyne, A. G. et al., *M. N. R. A. S.*, 213 (1983), 613.
- [ 5 ] Boriakoff, V. et al., *Nature*, 304 (1983), 417.
- [ 6 ] Lewin, W. H. G. and Van der Klis, M., *Comments Astrophys.*, 11 (1986), 127.
- [ 7 ] Angel, J. R. P. et al., *Ap. J.*, 169 (1971), L57.
- [ 8 ] Tawara, Y. et al., *Nature*, 299 (1982), 38.
- [ 9 ] 陆垓, 科学, 39 (1987), 261.
- [ 10 ] Van der Klis, M., in *The Physics of Accretion onto Compact Objects*, ed. by K. O. Mason, M. C. Watson and N. E. White, *Lecture Notes in Physics*, 266 (1986), 157.

(责任编辑 刘金铭)

## The Observational Phenomena of Quasi-periodic Oscillation in Low-mass X-ray Binaries

Qiao Guojun

*(Center of Astronomy and Astrophysics, CCAST [World Laboratory])*

*(Department of Geophysics, Beijing University)*

### Abstract

The basic observational data of Quasi-periodic Oscillations (QPO) in Low-mass X-ray Binaries (LMXB) are described systematically in this paper. It is emphasized that the data have been of particular importance for the development of QPO theory, we mainly concern with three best-studied QPO sources, GX 5-1, Cyg X-2 and Sco X-1. The time lags in QPO and low-frequency noise (LFN) were detected two years ago, which may be important for further understanding the phenomena of QPO and are mentioned briefly.