

# 長期監測低質量 X-Ray 雙星 4U 1820-30 之軌道週期演化及運行機制

楊盛智、周 翊

國立中央大學天文研究所

## 摘要

本篇使用 1998–2002 年 RXTE(X-ray 波段望遠鏡)長時間之監測的觀測數據，針對座落於球狀星團 NGC 6624 中心附近的低質量 X-ray 雙星(low mass X-ray binary) 4U 1820-30，之軌道光變加以分析，並尋找可能存在的運行機制。在 1998–1999 年的數據中，我們發現明顯的相位偏移(phase shift =  $-0.20 \sim -0.31$ )及相位跳動(phase jitter = 0.034) 結合前人自 1976 年以來觀測的結果，我們發現這個系統的軌道週期變化有明顯的二次微分項( $\ddot{P}$ )，並從三次擬合的結果得出  $\ddot{P} = (1.87 \pm 0.96) \times 10^{-13} \text{ yr}$ ，由於這個系統的軌道週期有二次微分項的，以致前人可能低估了 4U 1820-30 的軌道變化。此外，我們應用一維的 CLEAN 演算法(one-dimensional CLEAN algorithm)，來尋找可能因階級式三星系統或吸積盤進動造成在傅氏空間(Fourier space)中的差拍頻率的現象，但是在 RXTE 1998-2000 年的觀測資料中，我們並未發現這個現象。

## The Long Term Monitoring of Orbital Modulation for Low Mass X-Ray Binary 4U 1820-30

Yang Sheng-Zhi, Chou Yi

Institute of Astronomy, National Central University

## Abstract

We report our analysis results of the orbital modulation for the ultra-compact low mass X-ray binary 4U 1820-30 in globular cluster NGC 6624 monitored by the Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE) from 1998 to 2002. Clear phase drift from  $-0.20$  to  $-0.31$  as well as phase jitter of 0.034 are detected during the 1998-2000 observation period. Combined with the observation results since 1976, the orbital phase evolution is in fact better described as a cubic function rather than the quadratic model proposed by the historical reports. The cubic fitting yields the first discovered  $\ddot{P} = (1.87 \pm 0.96) \times 10^{-13}$  per year. We conclude that the previous period derivatives were probably underestimated due to the significant  $\ddot{P}$ . On the other hand, the CLEAN algorithm was also applied to search the possible side bands made by a hierarchical third star (triple model) or the tidally driven modulations of the accretion disk (superhump). However, no significant ( $2\sigma$  upper limit) sideband was detected in our data sets.

關鍵字 (Key words) : 低質量 X 射線雙星 (Low Mass X-Ray Binary)、階級式的三星系統 (hierarchical triple system)、superhump

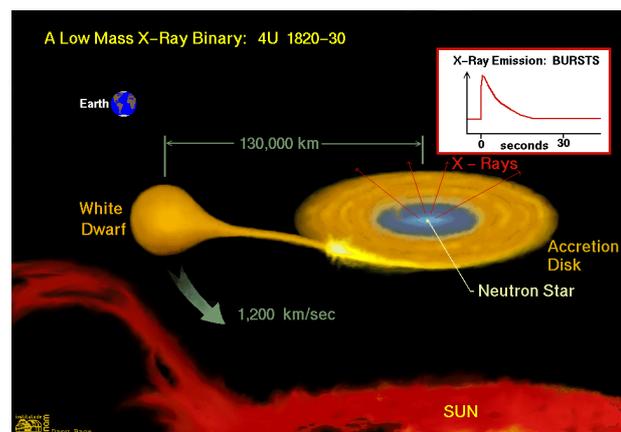
## 1. 引言

4U 1820-30 是個位在球狀星團 NGC 6624 中心附近的 X-ray 雙星系統(Grindlay et al., 1984),也是第一個在球狀星團裡被找到的 X 射線源(X-ray source)。Grindlay (1976)發現 4U 1820-30 有第一型 X 射線爆發(Type I X-ray burst)的現象,因此可以得知主星是一顆低磁場(約  $10^8$  高斯)的中子星(Lewin & Joss, 1981)。Stella、Priedhorsky 和 White (1987a)利用 EXOSAT (此為一 X 射線觀測衛星)在 1984-1985 年的觀測數據中,首先發現 4U 1820-30 具有 11 分鐘左右(685.0118 秒)的軌道週期,此後 Rappaport 等人(1987)計算出 4U 1820-30 的伴星是顆約 20% 呈簡併態質量約  $0.058-0.078 M_{\odot}$  的白矮星。Kuulkers 等人(2003)根據艾丁吞極限(Eddington limit)及發生 X 射線爆發時光球半徑擴張(photospheric radius expansion)具有標準燭光(standard candle)的特性與觀測值做比較,進而測出 NGC 6624 (4U 1820-30)距離地球約  $7.6 \pm 0.4$  kpc。此外, QPO 的現象也在 4U 1820-30 中被觀測到(Stella et al., 1987b; Hasinger & van der Klis, 1989)。除了強烈的 X 射線輻射外,4U 1820-30 的短軌道週期現象也使其成為一強烈的重力波的輻射源,因而被未來的 Laser Interferometer Space Antenna (LISA, 此為太空望遠鏡之名)(Cutler et al., 2003)列為早期的重力波主要觀測源之一。圖一是藝術家筆下的 4U 1820-30。

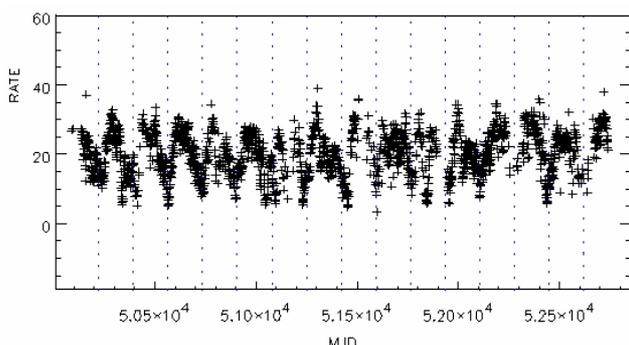
值得注意的是,根據前人的研究,4U 1820-30 的軌道週期會隨時間遞減(Tan et al., 1991; van der Klis et al., 1993a,b; Chou & Grindlay, 2001),這與 Rappaport 等人(1987)由理論推算出來的結果並不符合(Rappaport 算得  $\dot{P} > 8.8 \times 10^{-8} \text{ yr}^{-1}$ ),為了解釋這個結果,Tan 等人(1991)提出:4U 1820-30 受到球狀星團 NGC

6624 中心的強重力場吸引,朝著地球的方向做加速度運動,根據都卜勒效應(Doppler effect)觀測者將接收到比原頻率更快的訊號,且訊號頻率會愈來愈快(因為朝著觀測者做加速度運動),藉此用來解釋實際測得的  $\dot{P}$  會變成負值。在 2001 年前,這種星團重力加速模型尚能解釋理論與觀測的差異(Chou & Grindlay, 2001)。

除了 685 秒的軌道週期之外,4U 1820-30 還具有約 171 天的長週期 X 射線光變現象(long-term modulation)(Canizares et al., 1975; Priedhorsky et al., 1984; Chou & Grindlay, 2001)(參見圖二),Grindlay (1986)曾提出,這可能是第三顆星對此雙星系統造成的影響(即階級式的三星系統, hierarchical triple system),並預測第三顆星會有約 1.1 天之繞行雙星的公轉週期,但 4U 1820-30 是否為三星系統仍需被驗證。另一方面,Haswell 等人(2001)也曾提出:由於吸積盤進動(precession)而產生的 superhump 現象,應該普遍地存在於軌道週期少於 4.2 小時以中子星為主星的低質量 X 射線雙星系統中。無獨有偶地,Anderson 等人(1997)曾使用哈伯望遠鏡在紫外波段觀測到  $687.6 \pm 2.4$



圖一: 藝術家筆下的 4U 1820-30。從 685 秒的軌道週期得知此雙星系統的主、伴星非常地靠近,屬於極緊密的雙星系統(ultra-compact binary)。左上角的地球、下方的太陽及左下角的日珥(prominence)均為比例尺以幫助了解主、伴星間的距離。右上角的插圖,是第一型 X 射線爆發的光變曲線。圖片出處:  
<http://www.astroscu.unam.mx/neutrones/NS-Picture/1820-30/1820-30.htm>



圖二：4U 1820-30 之 171 天長週期波動現象的光變曲線(取自 RXTE-All Sky Monitor)。虛線位置為預測的光變曲線最低點處，虛線間隔為 171.033 天(Chou & Grindlay, 2001)。

秒的週期現象，這正符合 superhump 週期略大於軌道週期(685s)的特性，只是它的誤差值高達 2.4 秒，使得軌道週期剛好落在此誤差範圍附近，因此還不能確定 Anderson 等人使用 UV 波段觀測到的週期是否真為 superhump 週期。

## 2. 觀測資料

本文使用的數據取自1998年4月~2002年8月之Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE) 觀測衛星的 Proportional Counter Array(PCA)-Standard 2資料型態，這些觀測數據可以在High Energy Astrophysics Science Archive Research Center (HEASARC) 網站下載完成<sup>1</sup>。Standard 2 是合併過的資料型態(binning mode)，以16秒為間距，把原本訊號分存於256個頻道 (channel) 的資料合併成129個(可以把每個channel視為某特定能量範圍)。加上Standard 2的數據在每一次觀測中均可獲得，換句話說只要RXTE有觀測 4U 1820-30就會有這一型態的數據，因此十分適合於本文的研究課題。

## 3. 數據分析

### 3.1 軌道週期的演化

為了更有效率地完成大量的觀測數據，因而制定出一套數據處理程序(script)以求得觀測

源之光變曲線，之後再對時間做太陽質心的修正(barycentric correction)及準直的校正(collimator correction)。為了消除 171 天長週期波動所帶來的影響，每段光變曲線均扣除 DC term(即平均值)，經過此程序而產生的光變曲線見於圖三。為了檢驗所有經過數據處理而產生的光變曲線是否還保有 4U1820-30 約 685 秒的軌道週期特性，於是執行 HEASOFT 中搜尋週期的

程式-*efsearch*，檢查在 685 秒附近是否出現高峰，圖四是經 *efsearch* 搜尋週期後的結果，每幅圖中均有明顯的峰值(peak)出現，其中心部分約落在 685 秒軌道週期的附近，在 peak 兩旁的小凸起則是觀測間隔 (observation gap) 所造成的現象。接著使用 HEASOFT / *efold* 程式以獲得疊合光變曲線 (folded light curve)，並根據前人的研究，假設 4U 1820-30 的軌道週期特性是以正弦波的方式呈現，故擬合一個正弦波以求得正弦波之波峰所對應的相位值 (Tan et al., 1991; van der Klis, et al., 1993a, b; Chou & Grindlay, 2001)。補充一提，為了方便與前人所做的相位演化做比較，統一採用了 Tan 等人所制定的線性星曆表 (linear ephemeris) (Tan et al., 1991) 來獲得上述的疊合光變曲線：

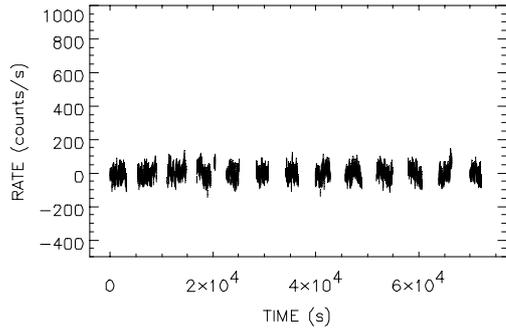
$$T_N^{Max} = HJD \ 2,442,803.63544 + \left(\frac{685.0118}{86,400}\right) \cdot N$$

$T_N^{Max}$  : 第 N 個週期的 peak 所在時間

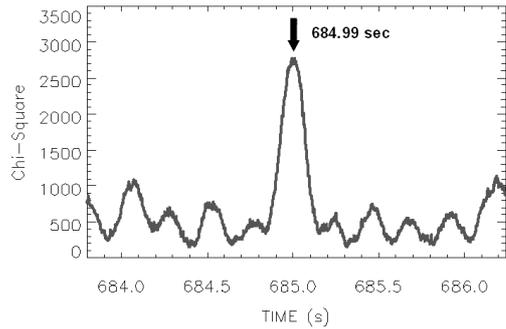
phase zero epoch : HJD 2,442,803.63544

值得注意的是，在某些觀測數據中軌道光變並不明顯。為了把疊合光變曲線(folded light curve)之軌道光變的明顯程度定量化，因而採用 AoV (Analysis of Variance)原理(Schwarzenberg-Czerny, 1989) 來建立篩選機制，並剔除訊噪比小於 3 的光變曲線。

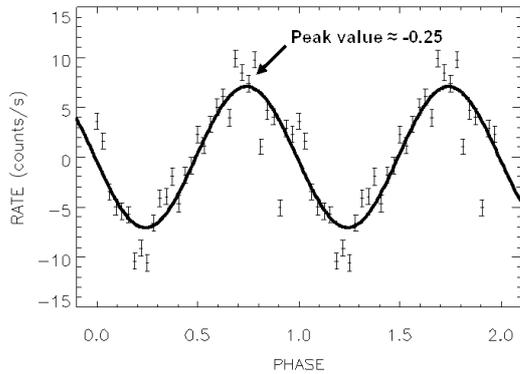
<sup>1</sup> <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/>



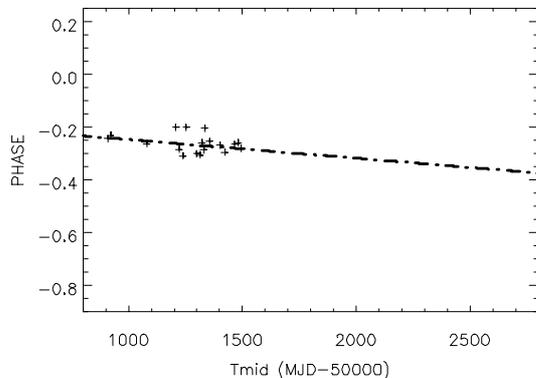
圖三：1998年4月17日的觀測數據，經過一連串的数据處理過程並扣掉DC term後的光變曲線。



圖四：1998年9月23-24日之觀測數據經efsearch的結果。高峰均位於685秒左右， $\chi^2$ 值會因為觀測時間的長短而有所不同，一般而言曝光時間愈長 $\chi^2$ 值愈大。



圖五：1999年8月10日之觀測數據擁有軌道光變較明顯的folded light curve。清楚可見正弦波的波峰大約位在0.75(或-0.25)。F.A.P.(False Alarm Probability)  $\approx 0$ 。



圖六：1998-1999年之相位演化的線性擬合圖形(phase jitter)。上述各點均通過AoV的剔除機制，並求出相位跳動(phase jitter) = 0.034。

從圖五可以清楚地看見，時間從零相位基準時(phase zero epoch)到觀測時段約有-0.25的相位偏移，這是因為4U 1820-30的軌道週期會改變( $\dot{P} < 0$ )所導致的結果。此外 ROSAT (van der Klis et al., 1993a)和 RXTE (Chou & Grindlay, 2001)的觀測結果顯示，4U 1820-30會發生相位跳動(phase jitter)的現象，這是因為吸積物質流(accretion stream)撞擊吸積盤所形成的隆起結構不穩定所致，為了把相位跳動的影響考慮在內，所以在1998-2002年的相位圖上做線性擬合並以線性擬合結果的方均根(root mean square)值做為1998-2002年觀測結果的相位跳動，但是經過上述的AoV剔除機制，使得2001、2002年的觀測點數不足，因此只採用1998-1999年的觀測數據做線性擬合，而求得1998-1999年的相位跳動(phase jitter) = 0.034(參見圖六)。

本文利用相位演化曲線上的多項式擬合結果來求得軌道週期的演化並獲得4U1820-30最新的星曆表(預測天體發生週期性現象的數學式)。首先將1998-1999年的觀測數據利用加權的方式分成三個代表點(1998年、1999年前後半年)，至於這三個代表點的時間(mean arrival time)則根據(Chou & Grindlay, 2001)公式：

$$T_{mean} = T_0 + P_{fold} \cdot (N_{mid} + \phi_{ave})$$

$T_{mean}$  : mean arrival time

$T_0$  : phase zero epoch = HJD 2,442,803.63544

$P_{fold}$  : 685.0118 s

$N_{mid}$  : cycle number closest to the middle time of the data set

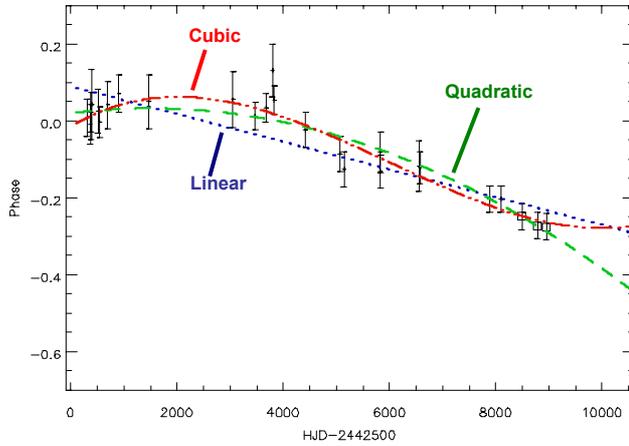
$\phi_{ave}$  : weighted-average phase for 1998、first and second halves of 1999

為了更新4U 1820-30的星曆表得再考慮相位跳動所帶來的影響，因此1976-1999年各個代表點的新誤差更改成：

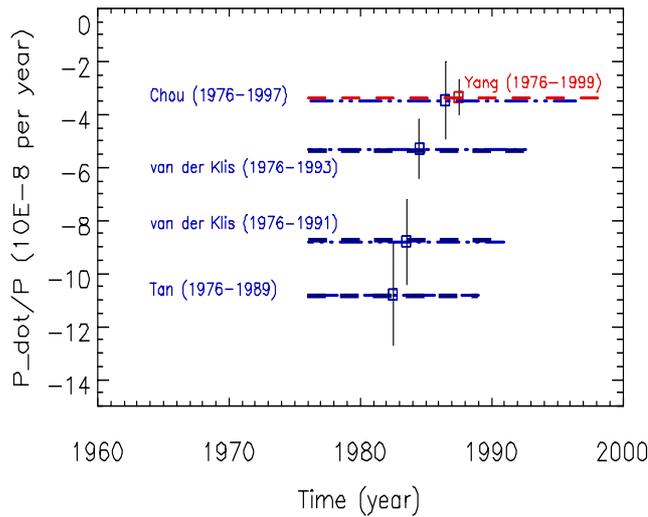
$$\sigma_{new}^2 = \sigma_{jitter}^2 + \sigma_{weighted}^2$$

$\sigma_{jitter}^2$  : phase jitter (1998–1999)

$\sigma_{weighted}^2$  : weighted-average phase error



圖七：1976-1999 年之相位演化擬合一次、二次、三次曲線的圖形。



圖八： $P/P$  與時間之關係圖。Tan、van der Klis 及 Chou 等人，對相位演化曲線做二次擬合的研究結果(這些研究均是從 1976 年開始)。水平藍線：相位演化所涵蓋的時間範圍；垂直黑線： $\dot{P}/P$  的大小；紅線：本文作二次擬合所求得之值。

表一：1976–1999 年相位演化擬合一次、二次、三次曲線及正弦波之結果。

Model	Parameter	Covariance	$\chi^2$	d.o.f.
Linear	0th term (a) : $(7.97 \pm 1.59) \times 10^{-2}$	Cov(a,b) = $2.52 \times 10^{-4}$	38.47	24
	1st term (b) : $(-3.61 \pm 0.29) \times 10^{-5}$			
Quadratic	0th term (a) : $(2.49 \pm 1.94) \times 10^{-2}$	Cov(a,b) = $-1.52 \times 10^{-7}$ Cov(a,c) = $1.32 \times 10^{-11}$ Cov(b,c) = $-1.20 \times 10^{-14}$	14.39	23
	1st term (b) : $(1.39 \pm 1.06) \times 10^{-5}$			
	2nd term (c) : $(-5.78 \pm 1.18) \times 10^{-9}$			
Cubic	0th term (a) : $(8.51 \pm 21.2) \times 10^{-3}$	Cov(a,b) = $-3.84 \times 10^{-7}$ Cov(a,c) = $8.81 \times 10^{-11}$ Cov(a,d) = $-5.84 \times 10^{-15}$ Cov(b,c) = $-2.57 \times 10^{-13}$ Cov(b,d) = $1.91 \times 10^{-17}$ Cov(c,d) = $-6.18 \times 10^{-21}$	10.58	22
	1st term (b) : $(6.77 \pm 2.95) \times 10^{-4}$			
	2nd term (c) : $(-2.32 \pm 0.90) \times 10^{-8}$			
	3rd term (d) : $(1.35 \pm 0.69) \times 10^{-12}$			
Sin	DC term : $-0.11 \pm 0.03$ Amplitude : $0.17 \pm 0.02$ (phase) Period : $42.89 \pm 8.95$ (yr)		11.09	22

## I、一次擬合 (Linear Fitting) :

首先在相位演化曲線上做線性擬合 (參見

圖七與表一) 得到： $\chi_v^2$  (reduced chi square)

=1.60、24 個自由度。這個結果顯示線性擬合並不理想(因為  $\chi_v^2 > 1$ )，這與文獻上的結果相符合 (Tan et al., 1991)，因為軌道週期並不是個常數，所以改採二次擬合。

## II、二次擬合 (Quadratic Fitting) :

二次擬合的結果(參見圖七與表

一)： $\chi_v^2=0.63$ 、d.o.f.=23，此結果表示二次的擬合程度不錯(因為  $\chi_v^2 < 1$ )。根據二階近似的相位演化公式：

$$\phi = \phi_0 + \left( \frac{P_0 - P_{fold}}{P_{fold}^2} \right) \cdot t + \frac{1}{2} \frac{\dot{P}}{P_{fold}^2} t^2$$

$P_{fold}$  : 685.0118 second

再配合表一中二次擬合所得的參數

值，可得到  $\dot{P} = (-7.27 \pm 1.48) \times 10^{-13} \text{ s}$

$\text{s}^{-1}$ 、 $\dot{P}/P = (-3.35 \pm 0.68) \times 10^{-8} \text{ yr}^{-1}$ ，這

個結果與前人的結果相似(van der Klis,

1993a, b ; Chou & Grindlay, 2001)。

再將上述結果再代入二階近似的星曆表公

式：

$$T_N = T_0 + P_0 N + \frac{1}{2} \dot{P} P_0 N^2$$

得出

$$T_N = HJD\ 2,442,803.63556 \pm 1.54 \times 10^{-4} \\ + \left( \frac{685.012 \pm 1.575 \times 10^{-4}}{86,400} \right) N \\ + (-2.88 \pm 0.59) \times 10^{-15} N$$

採用二階近似之星曆表的前提就是假設  $\dot{P}$  等於常數，其實這與事實並不符合。如果把此處之二次擬合所求得的  $\dot{P}$  值，對照文獻中由二次擬合而獲得的  $\dot{P}$  值(Tan et al., 1991; van der Klis et al., 1993a, b; Chou & Grindlay, 2001)，由圖八可以明顯地看出，這些  $\dot{P}$  值並不一致，甚至相差到  $2\sigma$  以上，而且  $\dot{P}$  的絕對值會隨著新觀測資料所跨越的時距增加而逐漸減小，因此可以合理地推論： $\dot{P}$  值可能存在(因為  $\dot{P}$  不為常數)，也就是說相位演化曲線或許符合更高階項的擬合。

### III、三次擬合 (Cubic Fitting)：

三次擬合的結果 (參見圖七與表一)： $\chi^2_v = 0.48$ 、d.o.f.=22，此擬合程度也很合理。為了進一步比較二次與三次擬合程度的優劣，本篇論文採用 F-test 運算機制(Bevington, 1992)得出  $F = 7.92$ ，這意謂著：三次擬合程度優於二次擬合的可信度(confidence level)高達~ 99%。根據三階近似的相位演化公式：

$$\phi = \phi_0 + \left( \frac{P_0 - P_{fold}}{P_0 \cdot P_{fold}} \right) t + \frac{1}{2} \frac{\dot{P}_0}{P_0^2} t^2 + \left( \frac{1}{6} \frac{\ddot{P}}{P_0^2} - \frac{1}{3} \frac{\dot{P}_0^2}{P_0^3} \right) t^3$$

$$P_{fold} : 685.0118 \text{ second}$$

再配合表一中，三次擬合所得的參數值，可得到  $\ddot{P} = (1.87 \pm 0.96) \times 10^{-13} \text{ yr}^{-1}$ 、 $\dot{P}/P = (-1.34 \pm 0.52) \times 10^{-7} \text{ yr}^{-1}$ 。再將上述結果代入三階近似的星曆表公式：

$$T_N = T_0 + P_0 N + \frac{1}{2} \dot{P}_0 P_0 N^2 + \frac{1}{6} (\ddot{P} P_0^2 + \dot{P}_0^2 P_0) N^3$$

得出

$$T_N = HJD2,442,803.63550 \pm 1.68 \times 10^{-4} \\ + \left( \frac{685.012 \pm 1.603 \times 10^{-4}}{86400} \right) N \\ + (-1.15 \pm 0.45) \times 10^{-14} N^2 + (5.35 \pm 2.74) \times 10^{-21} N^3$$

### 3.2 軌道週期附近的差拍頻率

#### (Beat Sidebands)

若 171 天長週期波動現象真是由階級式的三星系統 (hierarchical triple system) 所引起，根據理論公式 (Mazeh & Shaham, 1979)：

$$P_{long} = K P_{outer}^2 / P_{inner}$$

$P_{long}$  : long-term modulation period (171 days)

$P_{outer}$  : orbital period of the third star

$P_{inner}$  : binary period (685.012 sec)

$K$  : constant of order unity (depend on relative inclinations and mass ratios)

儘管  $K$  值會因第三顆星的軌道傾角(inclination)不同、主星和伴星間的質量比率(mass ratio)而有所改變，大致而言可以預測出第三顆星會有約 1.1 天的公轉軌道週期(將  $K \sim 1$  代入)。總而言之如果第三顆星真的存在，在傅氏空間(Fourier space)下應該於軌道頻率附近出現一個或數個差拍頻率。

另一方面，假設 Anderson 等人(1997)使用哈伯望遠鏡觀測到的真是吸積盤進動而產生的 superhump，根據差拍頻率公式：

$$1/P_{orb} - 1/P_{sh} = 1/P_{pre}$$

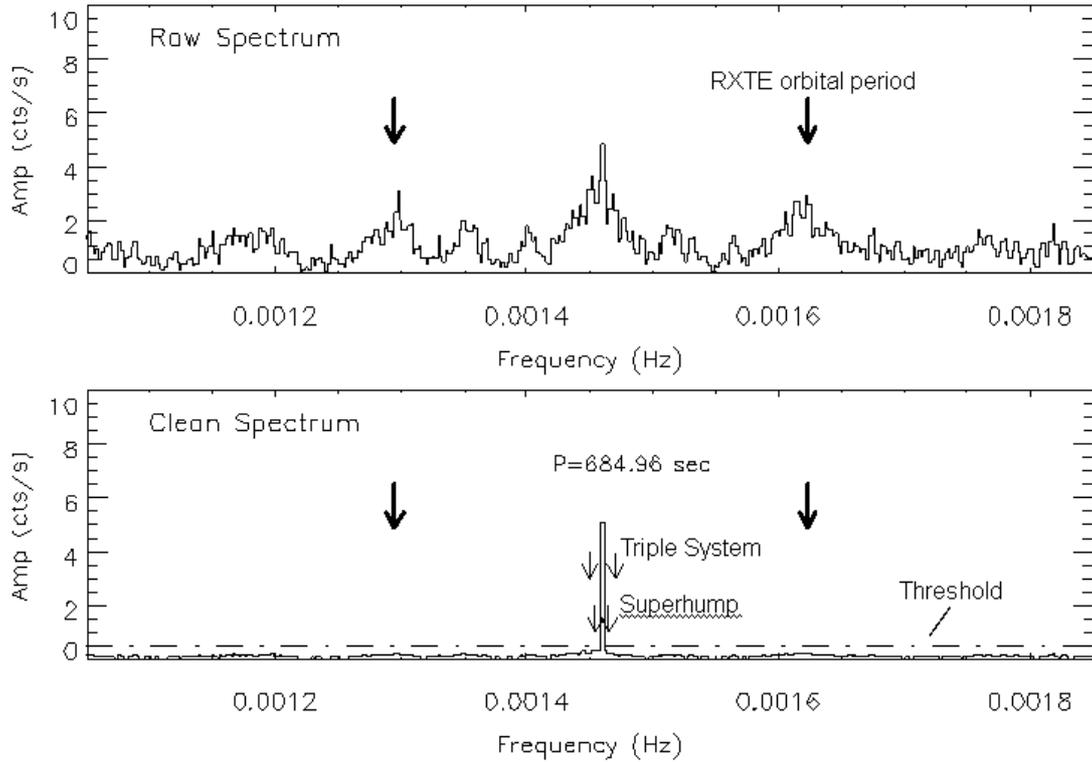
$P_{orb}$  : orbital period

$P_{sh}$  : superhump period

$P_{pre}$  : precession period of disk

可算得吸積盤進動週期約 2.1 天。相似的情形也曾在 X1916-053 中發現，不同的是 X1916-053 的 superhump 週期是由可見光波段測得 (Chou, Grindlay & Bloser, 2001)，可能的原因是 4U 1820-30 屬於極緊密的雙星系統，所以吸積盤進動而產生的 superhump 現象可能會以比可見光更短的波段呈現(或許是紫外波段)。假如 superhump 現象真的存在於 4U 1820-30，那麼在傅氏空間下亦會於軌道頻率附近形成差拍頻率。

圖九：99/08/27-09/01 的數據。上方是未經 CLEAN 演算法處理過的 spectrum (Raw Spectrum)；下方則為 CLEAN 處理後的 spectrum (CLEAN Spectrum)；Threshold = 0.50 cts/s ( $2\sigma$ )。圖中的粗黑箭頭：RXTE 繞行地球的週期 (90-100 分鐘) 所造成之影響。下圖中央的細箭頭：分別為 triple system 及 superhump 預計發生的頻率。



為了驗證上述二種模型是否存在於 4U 1820-30，因此採用一維的 CLEAN 演算法 (one-dimensional CLEAN algorithm) (Roberts et al., 1987)，來大幅降低觀測間隔在傅氏空間中所帶來的影響。首先挑選套用於 CLEAN 的數據必需跨越足夠長的時距 (至少 1.1 天)，以提供夠高的頻率解析度進而能將差拍頻率顯示出來，此外，觀測的曝光時間最好也要夠長以增加訊噪比。因為 Standard2 數據的時間解析度為 16 秒，在執行 CLEAN 前會先適度地調整 bin 的個數，使得 time span 接近 685 秒軌道週期的整數倍，以符合傅氏分析之正交特性 (防止軌道頻率的訊號在頻譜中發生洩漏 (leakage) 的現象而有效地消除觀測間隔 (observation gap) 所帶來的影響，且有利於側波瓣的找尋。根據理論的預測階級式三星系統和 superhump 所形成的差拍頻率會落在距離  $1.46 \times 10^{-3}$  Hz 軌道頻率的不遠處，故我們隨意地選取一段頻率搜尋範

圍： $1.05 \times 10^{-3}$  Hz ( $P = 953.4$  s) –  $1.85 \times 10^{-3}$  Hz ( $P = 540.5$  s)，並設定高於雜訊在傅氏空間中平均振幅的二倍 ( $2\sigma_{\text{amp}}$ ) 為停止搜尋的條件 (threshold)。

圖九經 CLEAN 演算法處理前與處理後的頻譜 (spectrum)。總覽 1998–2002 年 11 張 CLEAN 頻譜 (CLEAN spectrum) 可以明顯地發現，CLEAN 演算法確實能大大地降低由觀測間隔所帶來的影響，如 RXTE 因繞地球運行而造成週期性的遮擋 (週期約 90-100 分鐘)。但在這些 CLEAN 頻譜中高於  $2\sigma_{\text{amp}}$  的情況下，並沒有發現任何明顯的差拍頻率。

## 4. 討論

### 4.1 相位演化之討論

#### 4.1.1 $\dot{P}$ 為常數的模型

潤秒、時間對太陽系質心修正與太陽質心修正所造成的影響，對二次擬合結果之一次方

項的誤差( $1.575 \times 10^{-4}$  s)都要來得小,故可以忽略不計。Tan 等人(1991)曾提出:4U 1820-30 受到球狀星團 NGC 6624 中心的強重力場吸引,朝著地球的方向做加速度運動,根據都卜勒效應(Doppler effect),假設 4U 1820-30 與觀測者位在相同的視線平面,且不考慮理論值  $\dot{P} > 0$  帶來的影響;加速度  $a$  的方向:朝著觀測者為正,

$$\frac{\dot{P}}{P} = \frac{a}{c}$$

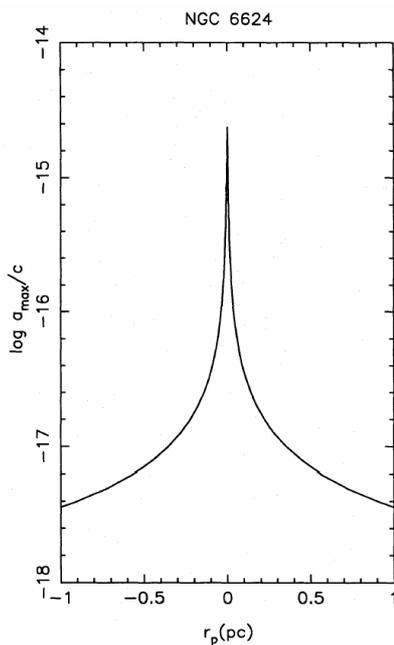
因此,朝著觀測者做加速度運動的觀測源,將使得觀測者接收到隨時間遞減的週期(即  $\dot{P} < 0$ )。

另一方面 King 等人(1993)曾使用哈伯望遠鏡(HST)測量出 4U 1820-30 距離 NGC 6624 的中心約 0.66 秒弧(arcsecond),加上 NGC 6624 之前認為距離地球約 6.4 kpc (Vacca et al., 1986; Haberl & Titarchuk, 1995),即可求得 4U 1820-30 距離 NGC 6624 中心的等效投影距離約 0.02 pc,最後再根據 van der Klis 等人(1993a)推算的

NGC 6624 重力加速模型(參見圖十,此模型純考慮重力場的影響),可以得知模型的最大值即可代表 4U 1820-30 所受到的加速度。從二次擬合結果  $\dot{P}/P = (-3.35 \pm 0.68) \times 10^{-8} \text{ yr}^{-1}$ ,以及理論上  $\dot{P}/P > 8.8 \times 10^{-8} \text{ yr}^{-1}$  (Rappaport et al., 1987) 從正值變成負值的差異,推算出  $a/c \approx 3.85 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ ,此值約大於模型估計值 54%。

雖然觀測值與模型估計值略有出入,但是 54%的差異極有可能因為最新測得 NGC 6624 距離地球約 7.6 kpc (Kuulkers et al. 2003)而有所改變(比如:球狀星團中心的模型重力加速度會因此而增大,並與觀測值相符合),所以 van der Klis 等人的重力加速模型仍需要被修正。再者,球狀星團 NGC 6624 的中心密度仍未被精確地測得 (Verbunt & Lewin, 2004),目前也只能依據間接的觀測結果推得估計值。因此二次擬合的結果,球狀星團重力加速理論 (Tan et al. 1991) 仍可以合理地解釋為什麼  $\dot{P}/P$  的觀測值會與理論值有所差異。

圖十: van der Klis 等人(1993a)提出的 NGC 6624 重力加速模型(純考慮重力場的影響)。描述重力加速度與距離球狀星團中心的關係,在球狀星團中心處最大值達  $a/c \approx 2.5 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ 。(圖片出處: van der Klis et al. 1993a, Figure 5)

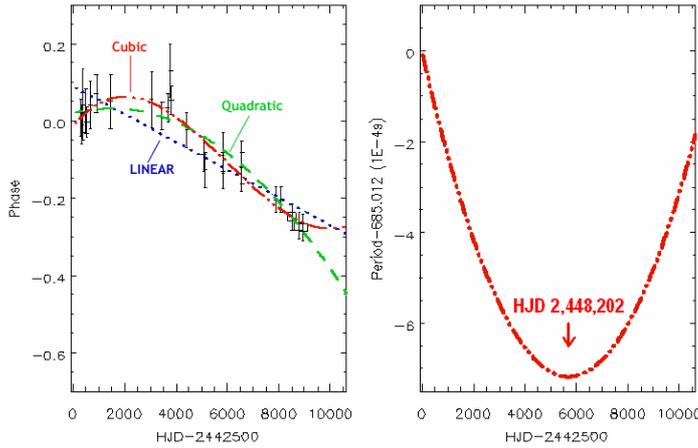


#### 4.1.2 $\dot{P}$ 為常數的模型

潤秒、時間對太陽系質心修正與太陽質心修正所造成的影響,對三次擬合結果之一次方項的誤差 ( $1.603 \times 10^{-4}$  s) 都要來得小,故也可忽略不計。由於三次擬合是基於  $\dot{P}$  不等於常數所做的三階近似星曆表,根據三次擬合的結果,可以得出軌道週期隨時間變化的情形(參見圖十一),明顯可見  $\dot{P}$  (參見圖十一(右)),曲線的斜率在 1990 年 11 月 6 日 (HJD 2,448,202) 從負號變成正號。再求得實際觀測之  $\dot{P}$  與理論值的一階近似關係:(假設加速度  $a$  的方向:朝著觀測者為正)

$$\frac{\dot{P}_{in}}{P_0} - \frac{a(t)}{c} = \frac{\dot{P}_{obs}(t)}{P_0}$$

$$(\because \dot{P}_{obs}(t) \approx \dot{P}_0 + \ddot{P}t)$$



圖十一(左)：相位演化擬合之結果。(紅色)三次、(綠色)二次、(藍色)一次擬合；(右)：利用三次擬合結果，得出的軌道週期演化曲線。紅色箭頭所指，即斜率  $\dot{P}$  從負號變成正號的時間(1990年11月6日)。

$$\Rightarrow \frac{a(t)}{c} = \frac{\dot{P}_{in} - \dot{P}_0 - \ddot{P}t}{P_0}$$

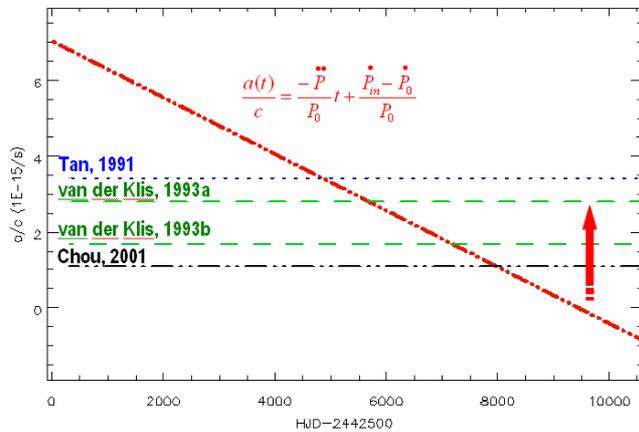
$\dot{P}_{in}$  =intrinsic period derivative (i.e.理論值 (Rappaport et al., 1987)  $\dot{P}/P > 8.8 \times 10^{-8} \text{ yr}^{-1}$ )

$\dot{P}_{obs}$  =observable period derivative

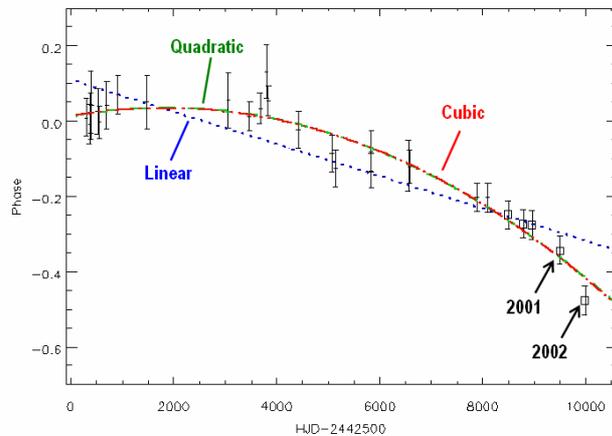
$P_0$ 、 $\dot{P}_0$ 、 $\ddot{P}$  = parameters of cubic fitting

代入上述係數，可得三次擬合結果的加速度演化關係(參見圖十二)。由於  $\dot{P}_{in}$  是理論的最小估計值，所以圖十二的關係式(紅色斜線)可能平行上移。

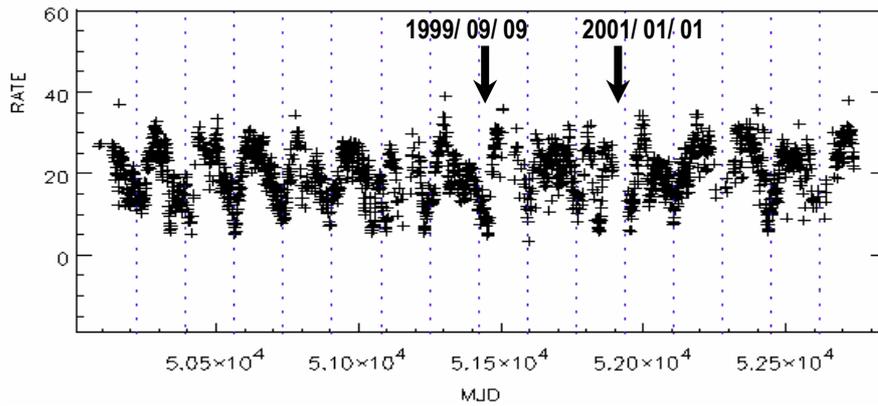
將三次擬合的結果與 Tan 等人(1991)的球狀星團重力加速理論及 van der Klis 等人(1993a)的重力加速模型做比較。根據圖十二認定加速度的方向朝著觀測者(因為  $a/c > 0$ )，因此球狀星團必需介於觀測者與 4U 1820-30 之間方能成立。假設雙星系統除了受到 NGC 6624 的中心重力場吸引外本身還具備徑向速度(radial velocity)，且徑向速度與重力加速度的方向相同，按照 Tan 等人(1991)的理論及 van der Klis 等人(1993a)的模型，當 4U 1820-30 朝球狀星團的中心前進時， $a$  值應該要愈大，但是圖十二卻顯示  $a$  值愈來愈小，這明顯與理論不符合。



圖十二： $a/c$  隨時間演化的趨勢圖。紅色斜線： $a/c$  隨著時間遞減(因為斜線可平行上移，因此  $a/c$  的值可能恆為正)；其它顏色的水平線：從文獻中二次擬合求得的  $a/c$  值。



圖十三：1976-2002 年之相位演化擬合一次、二次、三次曲線的圖形。二次與三次的擬合曲線幾乎是重疊在一起，且三次優於二次擬合的可信度，經 F-test 計算後只有~9.5%。



圖十四：配合 171 天長週期波動現象的 ASM 光變曲線。箭頭所指，分別為 superburst 發生 (1999/09/09)，及長週期波動現象恢復週期性的時間。

外， $\ddot{P}$  也可能是由自身軌道演化的因素所造成，從圖八中可以明顯地看出  $\dot{P}/P$  的絕對值會隨著時間而遞減，這已經透露出  $\dot{P}$  不等於常數，再以天鵝座 X-3 (Cygnus X-3) 為例，它並不座落於球狀星團裡卻也明顯地觀測到  $\ddot{P}$ ，因此不排除  $\ddot{P}$  是 4U 1820-30 自身軌道演化的因素而非外在的動力學因素(如：受到星團重力場、或其它星體影響)所造成。如果  $\ddot{P}$  項真的存在，那麼 Tan 等人(1991)的球狀星團重力加速理論勢必要做修正，甚至是更換另一個全新的理論模型，方能合理地解釋為什麼  $\dot{P} < 0$  與理論值不相吻合。

為了進一步探討上述的三次擬合是否存在，一併將原本觀測點數不足的 2001、2002 年觀測數據加進相位的分析，從圖十三可以清楚地看到，二次與三次的擬合曲線幾乎是重疊在一起，採用 F-test (Bevington, 1992) 得知三次優於二次擬合的可信度只有 ~9.5%，所以 1976–2002 年的 phase evolution 除了二次擬合外並不符合更高階項的擬合。但是這些經過篩選過後的 2001–2002 年觀測數據相較於 1998–1999 年明顯過少、加上相位之陡峭的下降趨勢，是否由動力學因素( $\dot{P}$ 、 $\ddot{P}$  等)或是由難以預測的相位跳動(phase jitter)現象所產生目前仍無法確定，因此二次優於三次擬合的結果仍有待商榷。除此之外，Strohmayer 和 Brown (2002) 指出，4U1820-30 曾在 1999 年發生

Superburst，在那之後約 171 天的長週期波動現象曾一度變得不明顯，直到 2001 年才恢復(參見圖十四)，這是不是意味著 Superburst 也是造成上述 2001、2002 年觀測點相位值迅速下降的原因之一？其實此類狀況也發生在天鵝座 X-3 (Cygnus X-3) 的相位演化 (Kitamoto et al., 1995)， $\ddot{P}$  項的效應隨著觀測 time span(觀測數據所跨越的時距)的增長而趨於不明顯。如果要進一步地驗證 4U 1820-30 的相位演化曲線，是否存在著明顯的三次項效應(即具有  $\ddot{P}$  項)，則需要更多的觀測數據，以獲得為期更長的相位演化曲線來增加可信度。

#### 4.2 4U 1820-30 的可能運行機制

在 11 幅 CLEAN 頻譜 (CLEAN spectrum) 中，雖然沒有發現任何明顯的側波瓣 (sideband)，這個結果與 Chou 和 Grindlay 的研究(2001)類似，這並不表示階級式三星系統或 superhump 現象不存在。11 幅 CLEAN 頻譜中均沒發現差拍頻率的主要原因是：每段觀測數據中儘管觀測數據所跨越的時距夠長但曝光時間(exposure time)卻不足，導致訊噪比太小而無法在 CLEAN 頻譜中顯現出側波瓣來。未來的觀測策略如果能做下列的調整，將能更進一步地確定它為階級式的三星系統或 superhump 是否存在：

- (1) 不只增加觀測的觀測數據所跨越的

時距以提高傅氏空間頻率解析度，連曝光時間都要延長以提升訊噪比 ( $S/N \propto \sqrt{T_{\text{exp}}}$ ， $T_{\text{exp}}$  = 曝光時間)。

- (2) 或許側波瓣本身相當微弱，日後可使用敏銳度更高的儀器來做觀測。
- (3) 在 4U 1820-30 之 X 射線波段的光變曲線中，有 3% 的軌道週期波動現象 (由於吸積盤邊緣不均勻所造成的 X 射線吸收及散射現象)，然而 Anderson 等人(1997)使用 HST 的 UV 波段，卻觀測到 16% peak to peak 更明顯的週期波動，這或許意謂著 UV 波段的觀測數據隱含較多的訊息，因而能增加發現差拍頻率的機率。此外，Anderson 等人(1997)觀測到略大於軌道週期的另一個週期現象，只是誤差範圍落在軌道週期附近，因此仍未被證實是 superhump 的週期，如果能擁有更多 UV 波段的觀測數據，或許就能直接驗證 4U 1820-30 是否存在 superhump 現象。

補充一提，雖然在執行 CLEAN 前，會先適度地調整光變曲線的資料點數，使得觀測數據所跨越的時距接近 685 秒軌道週期的整數倍，以符合傅氏分析之正交特性而有效地消除觀測間隔造成的影響，且有利於差拍頻率的找尋，但差拍頻率的值卻只能靠理論預測而無法確切得知，因此無從判定側波瓣在傅氏空間上是否也會發生洩漏 (power leakage) 的現象，導致差拍頻率不易被察覺。

## 5. 總結

本文的主要工作概分成：相位演化的擬合、4U 1820-30 的可能運行機制。以下是各項

工作的結論：

### I、相位演化的擬合：

- (1) 1976–1999 年的相位演化，二次擬合的結果顯示，球狀星團重力加速理論仍可合理地解釋  $\dot{P}$  之實際觀測值與理論值不符合的原因。但此系統可能存在著  $\ddot{P}$  (三次擬合優於二次的可信度高達 99%)，如果單純地以球狀星團重力加速理論似乎難以解釋這個現象，因此不排除  $\ddot{P}$  是由於 4U 1820-30 自身軌道演化的因素，而非外在的動力學因素所造成。
- (2) 1976–2002 年的相位演化，雖然  $\dot{P}$  項已不再明顯，但是 2001、2002 年的相位值仍有待商榷，因此需要更多的觀測數據來做進一步的驗證。

綜合上述相位演化的擬合結果，如果  $\dot{P}$  項真的存在，那麼球狀星團重力加速理論勢必要做修正，甚至是更換另一個全新的理論模型，方能合理地解釋為什麼  $\dot{P} < 0$  與理論值不相吻合。除此之外，相位演化的擬合仍需要更多的觀測數據，才能獲得為期更長的相位演化曲線，以增加擬合的可信度。

### II、4U 1820-30 的可能運行機制：

儘管 RXTE 1998–2002 年的觀測數據擁有 11 組頻率解析度夠高的觀測時段(歷時 1.4–11.8 天)，但在 CLEAN 頻譜(CLEAN spectrum)中仍未發現任何明顯的差拍頻率，針對這個結果本文也提出了諸點可供改善日後觀測的建議：如增加曝光時間以提高訊噪比、使用靈敏度更高的儀器、及利用更多紫外(UV)波段的觀測數據。

## 誌謝

最後，感謝楊庭彰、陳慧真、葉文豪、胡欽評和李姿蓉在研究期間的幫助，以及提供 RXTE 觀測數據的高能天文物理科學資料研究中心 (High Energy Astrophysics Science Archive Research Center, HEASARC)。本工作是由國科會計劃 NSC 92-2112-M-008-024 所贊助完成。

## 參考文獻

- Anderson, S. F. et al., 1997, *ApJ*, 482, L69.
- Bevington, P. R., 1992, *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, New York: McGraw-Hill
- Canizares, C. R. & Neighbours, J. E., 1975, *ApJL*, 199, 97.
- Chou, Y., Grindlay, J. E. & Bloser, P. F., 2001, *ApJ*, 549, 1135.
- Chou, Y. & Grindlay, J. E., 2001, *ApJ*, 563, 934.
- Cutler, C., Hiscock, W. A. & Larson, S. L., 2003, *PhysRev*, D.67, 024015.
- Grindlay, J. E. et al., 1976, *ApJL*, 205, 127.
- Grindlay, J. E. et al., 1984, *ApJL*, 282, 13.
- Grindlay, J. E., 1986, in *the Evolution of Galactic X-ray Binaries*, ed. J. Trümper, W. Lewin & W. Brinkman (NATO/ASI Ser. C, 167; Dordrecht: Kluwer), 25.
- Haberl, F. & Titarchuk, L., 1995, *A&A*, 299, 414.
- Hasinger, G. & van der Klis, M., 1989, *A&A*, 225, 79.
- Haswell, C. A. et al., 2001, *MNRAS*, 321, 475.
- King, I. R. et al., 1993, *ApJL*, 413, 117.
- Kitamoto, S. et al., 1995, *PASJ*, 47, 233.
- Kuulkers, E. et al., 2003, *A&A*, 399, 663.
- Lewin, W. H. G. & Joss, P. C., 1981, *Space Sci. Rev.*, 28, 3.
- Mazeh, T. & Shaham, J., 1979, *A&A*, 77, 145.
- Priedhorsky, W. & Terrell, J., 1984, *ApJL*, 284, 17.
- Rappaport, S. et al., 1987, *ApJ*, 322, 842.
- Roberts, D. H. et al., 1987, *AJ*, 93, 968.
- Schwarzenberg-Czerny, A., 1989, *MNRAS*, 241, 153.
- Stella, L. et al., 1987a, *ApJL*, 312, 17.
- Stella, L. et al., 1987b, *ApJL*, 315, 49.
- Strohmayer, T., Brown, E. F., 2002, *ApJ*, 566, 1045
- Tan, J. et al., 1991, *ApJ*, 374, 291.
- Vacca, W. D. et al., 1986, *MNRAS*, 220, 339.
- van der Klis, M. et al., 1993a, *MNRAS*, 260, 686.
- van der Klis, M. et al., 1993b, *A&AL*, 279, 21.
- Verbunt, F. & Lewin, W. H. G., 2004, *Clobular Cluster X-ray Sources* (to appear as Chapter 8 in “Compact Stellar X-ray Sources”, Cambridge University Press