

利用參數化的方法研究 X 光雙星系統 X 1916-053 的 X 光光陷之性質

胡欽評、周翊

國立中央大學天文研究所

摘要

X 1916-053 是一個由中子星和白矮星所組成的極緊密低質量 X 光雙星系統 (ultra-compact Low Mass X-ray Binary)。它的 X 光「光陷 (dip) *」的週期和可見光波段的光變週期只有 1% 的差距。我們利用了新的方法定義出光陷的一些參數，以利於對光陷的性質做有系統性的研究。在 1998 年 RXTE 的觀測之中，光陷的寬度有明顯的 4.87 天的週期性變化，這個變化極可能便是吸積盤的盤面進動 (nodal precession) 週期。由「負起駝峰」的模型加上吸積盤半徑為 1:3 共振半徑的假設，我們可以估計出雙星質量比約為 $q=0.045$ 。此外，結合了 24 年多的觀測數據，我們發現了這個系統的軌道週期有明顯的變化，變化率為： $\dot{P}_{orb}/P_{orb}=(1.62\pm 0.34)\times 10^{-7} yr^{-1}$ ，並為 X 光光陷建立一個二階星曆表。由我們觀測到的軌道週期變化量與雙星軌道演化的典型模型所推導出來的結果不吻合。而由「輻射驅動 (Radiation Driven)」模型則或許可以解釋這個量。最後，利用光陷的相位統計，我們得知主光陷明顯地比次光陷還要穩定，這代表了造成主光陷的吸積盤隆起結構是在吸積盤的外緣，而不是在中間的環狀結構上。

Parameterization Studies of the Properties of the X-ray Dip for Low Mass X-ray Binary X 1916-053

Hu Chin-Pin, Chou Yi

Institute of Astronomy, National Central University

Abstract

X 1916-053 is an ultra-compact Low Mass X-ray Binary (LMXB) composed of a neutron star and a white dwarf. The period of recurrent X-ray dips and optical modulations are slightly and significantly different with each other.

We have developed new methods to parameterize the dip to systematically study its variation to further understand the binary and accretion disk behavior. A 4.87 days periodic variation of the dip width, probably due to the nodal precession of the accretion disk, is clearly seen in the RXTE 1998 observations. The signal of the beat frequency of disk nodal precession and the orbital period is marginally detected in the RXTE 1996 data with epoch folding period search method. From the negative

*本文作者曾搜尋兩岸天文學名詞，無法查出對本文中 dip 的中文翻譯，故暫用「光陷」二字代替

superhump model, the mass ratio can be estimated of $q=0.045$ with 1:3 resonance disk radius, which is larger than the mass ratio predicted by the superhump model or Roche-lobe filling secondary but in the same order.

Combined with more than 24 years' historical data, we found an orbital period derivative $\dot{P}_{orb} / P_{orb} = (1.62 \pm 0.34) \times 10^{-7} \text{ yr}^{-1}$ and established a quadratic ephemeris for the X-ray dips. The period derivative seems inconsistent with the prediction of standard model of orbital evolution. On the other hand, the radiation driven model may be proper to interpret the period derivative although the large mass outflow predicted by this model has never been observed in this system.

From the statistic of dip phase of primary and secondary dips, we concluded that the primary dips are more stable than the secondary dips, which implies that the bulge which cause the primary dips should be on the outer edge of accretion disk instead of in the 1/2 ring.

關鍵字 (Key words) : X 光雙星 (X-ray binary) 、緊密雙星 (close binary) 、吸積盤 (accretion disk) 、超駝峰 (superhump) 、負超駝峰 (negative superhump) 、光陷 (dip)

1 緒論

X 1916-053 是一個低質量 X 光雙星系統，主星是一顆中子星，伴星是一個處於完全簡併或是半簡併態的白矮星。這個系統的軌道週期可以由週期性的「光陷」現象測得，週期為 $(3000.6508 \pm 0.0009 \text{ s})$ (Chou et al., 2001)。這是一種由中子星附近所發出來的 X 光被吸積盤上一個隆起的結構 (bulge) 吸收所造成的週期性現象。除了每 3000 秒的光陷 (稱主光陷, primary dip) 外，在二個主光陷間，偶爾也有光陷出現，稱之為次光陷 (secondary dip)。此外，它在可見光波段也有光變現象，其週期比 X 光光陷的週期明顯地長了 1% ($3027.551 \pm 0.0052 \text{ s}$) (Chou et al., 2001)。雖然如此，在可見光波段也有偵測到 X 光光陷的訊號，而在 X 光波段也有看到可見光波段週期的邊帶訊號 (sidebands)。由此結果，Chou

et al. (2001) 認為這個系統應該會存在一個週期為 3.9 天的吸積盤進動週期。

Chou et al. (2001) 認為 X 光光陷的週期是雙星的軌道週期，而可見光波段的週期則是由軌道週期和吸積盤的進動週期 (3.9 天) 耦合而成。這種現象先在 SU UMa 型矮新星系統中發現，稱為「超駝峰 (superhump)」現象。另一方面，Homeret al. (2001) 利用 1998 年 RXTE 的觀測資料，發現了 X 光光陷的相位有 4.74 天的週期性變化。除此之外，Retteret al. (2002) 也在 1996 年的光變曲線中，發現了 2979 秒的「負超駝峰 (negative superhump)」訊號，這個訊號甚至把光陷從光變曲線中移除掉之後仍然存在。

早在 Ginga 的觀測資料中，人們就已經注意到 X 光光陷的外型會隨時間而變化

(Yoshida et al., 1995)。由於光陷是吸積盤的一種吸收現象，藉由觀測光陷的變化，我們也可以瞭解吸積盤的一些特性。但是人們從來沒有定量、客觀地定義有關光陷的形狀的一些資訊，因此本篇研究便是要定義出光陷的各項參數以利於研究雙星軌道和吸積盤的性質。

2 觀測與資料處理

自從 X 光光陷的現象被發現之後，X 1916-053 已陸續被不同的 X 光望遠鏡觀測。從 1978 年 OSO-8 到 2002 年 XMM-Newton，總共有九個衛星的觀測資料已經做過初步的處理並且公佈在 HEASARC 的網站上。在經過太陽系質心修正 (barycenter correction) 之後，我們可對光變曲線進行更進一步的分析。

3 資料分析

3.1 光陷參數

我們定義光陷的各項參數的方法，類似於「重心」的定義。首先，我們先對光變曲線中光陷旁邊的恆定態 (persistent state) 做線性擬合，來預測在光陷發生的時間裡，如果沒有吸積盤外圍隆起結構吸收掉中心所發出的 X 光

的光子時的計數值 (I_0)。接著，取一時段包含了特定的光陷，將其計數值 (I_i) 與恆定態時計數值的差當權重，對時間 (t_i) 來做加權平均 (見圖一)。加權平均的結果，我們可以視為一個光陷的時間 (或相位) 的中心 (dip center time) :

$$t_c = \frac{\sum_{i=0}^N (I_0 - I_i) \cdot t_i}{\sum_{i=0}^N (I_0 - I_i)} \quad (1)$$

由這樣的定義方法，只要計算的上下限是在恆定態中，我們如何去選擇上下限並不會對我們計算出來的光陷中心時間有太大的影響。利用同樣的方法，我們可以定義出光陷的「二次矩」(或稱「dispersion」):

$$W^2 = \frac{\sum_{i=0}^N (I_0 - I_i) \cdot (t_i - t_c)^2}{\sum_{i=0}^N (I_0 - I_i)} \quad (2)$$

這個量可以代表光陷的寬度。同樣地，它也不太會受到計算上下限的選擇所影響。

最後，利用光譜分析中，定義譜線的「等效寬度 (Equivalent Width)」的方法，我們也可以定義出一個光陷的等效寬度:

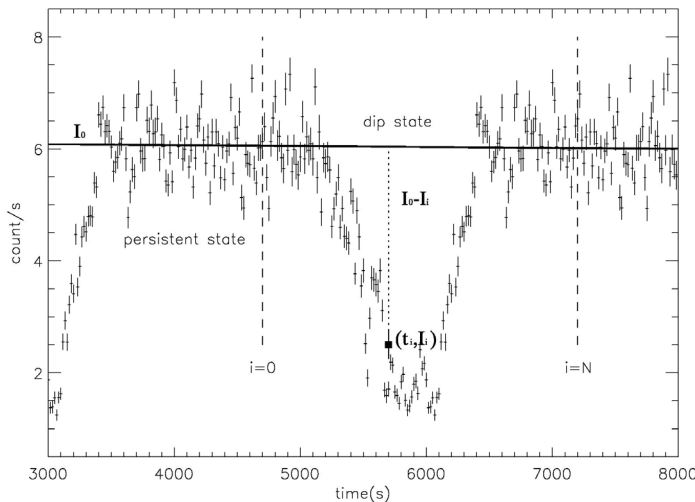
$$EW = \sum_{i=0}^N \frac{I_0 - I_i}{I_0} \cdot \Delta t \quad (3)$$

其中 Δt 是每一個觀測點之間的時間間隔。

這個量和光陷真正的寬度和深度有關，可以視為吸積盤隆起的「平均吸收率」。

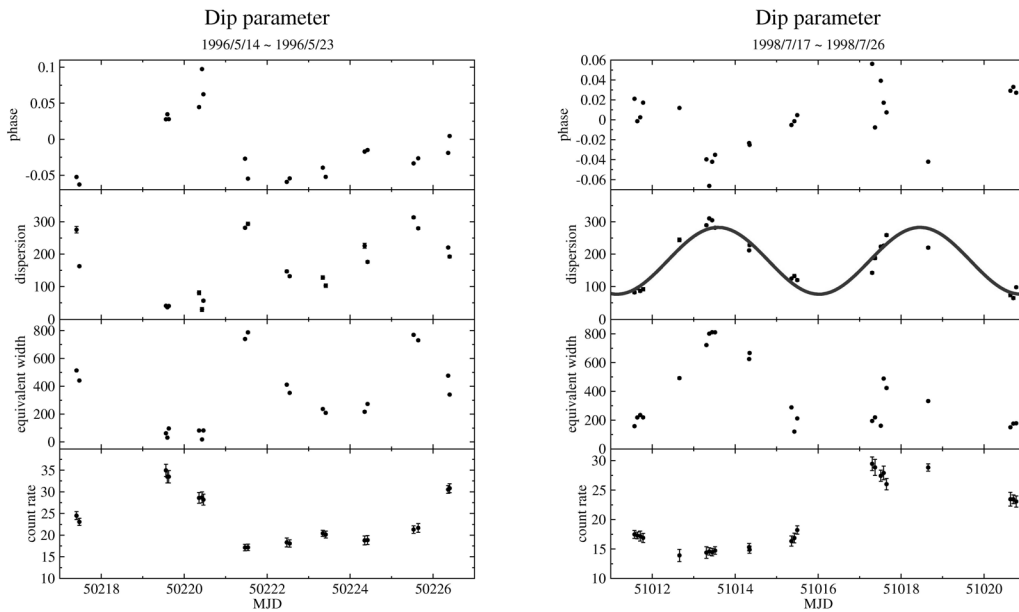
3.2 光陷參數的週期性

在所有的觀測之中，最值得注意的是 RXTE 在 1996 年和 1998 年兩次連續十天的觀測。藉由這兩次的觀測，我們希望能

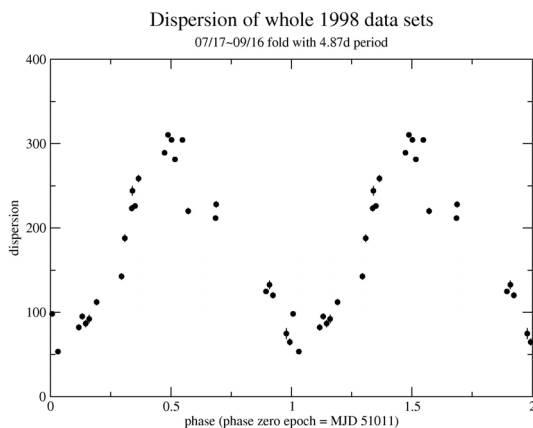


圖一：光陷的定義方法。 I_0 (紅線) 是經由線性擬合所預測的穩定態計數值， i_0 和 t_i 是光陷態的計數值以及時間。

圖二：1996 年（左圖）和 1998 年（右圖）RXTE 連續十天的觀測。很明顯地，光陷的寬度有 4.87 天的週期性，紅色的曲線是正弦擬合的結果。



圖三：1998 年所有觀測資料的光陷寬度以 4.87 天的週期疊合起來的結果。週期性非常明顯，相位零點設定為 MJD 51011。



找出光陷的參數是否有數天的週期性現象。圖二是這兩次的觀測中，所有的光陷參數與時間的關係。我們可以看到，所有的參數都會隨時間變化，但是週期性最明顯的是 1998 年光陷寬度的變化。經由正弦波的擬合，我們可以估計出它的週期性為 (4.87 ± 0.14) 天。這個週期性和 Homer et al. (2001) 提出來的 4.74 天的週期是吻合的，但寬度的變化比 Homer et al. (2001) 提出之光陷中心的變化還要明顯。雖然 Chou et al. (2001) 提出在 1996 年的觀測中，光陷的形狀有約 4 天的週期性變化，但是在此看來，週期性並不明顯。除了七月的觀

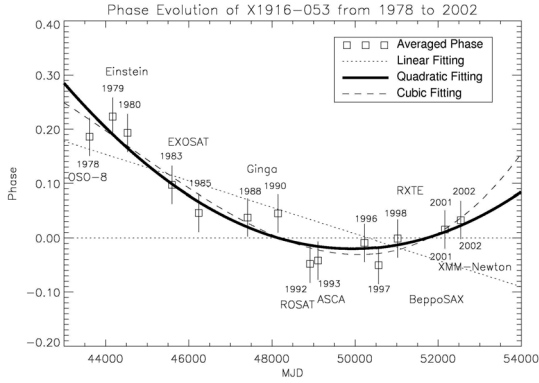
測之外，我們把六月、八月、九月的資料也一併分析，圖三是將 1998 年所有觀測資料的光陷寬度以 4.87 天的週期疊合 (fold) 起來的結果，我們可以看到週期訊號非常強。這結果告訴我們不只七月的連續十天觀測有 4.87 天的週期性，而是整個 1998 年的觀測中這個週期性都存在。

3.3 X光光陷的長時間相位演化分析

既然我們有了很客觀的定義光陷中心時間的方法，觀測的數據又累積了有 24 年，我們可以利用它們來重新建立一個更準確的光陷星曆表 (ephemeris)。首先，我們要把所有光陷的中心時間，利用 Chou et al. (2001) 提出的一階星曆表轉換成相位：

$$T_{dipcenter} = 50123.00944 \pm 1.4 \times 10^{-4} + \frac{3000.6508 \pm 0.0009}{86400} \times N \quad (4)$$

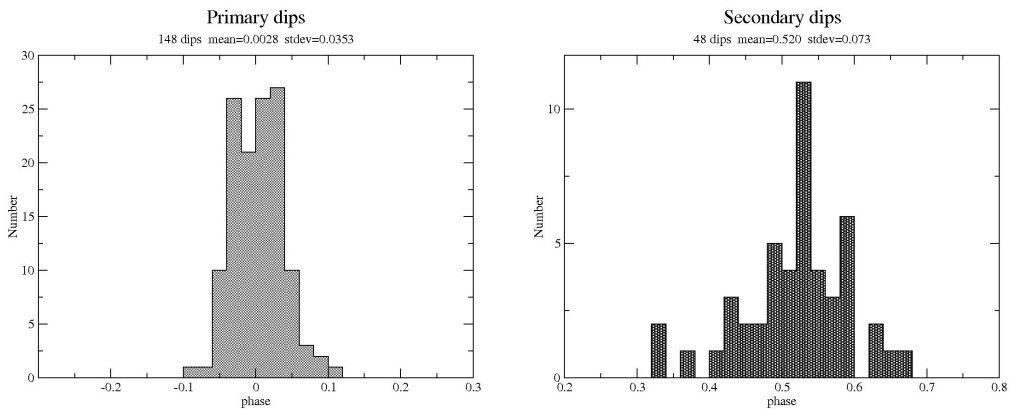
我們把每一年的資料點平均成一個點，並給予一個 0.035 的相位誤差（這個值將在後面會討論到），可以畫出 24 年來的相位演化圖（圖四）。



圖四：1978-2002 年的光陷相位演化圖，粗紅線是二階擬合的結果。經由二階擬合，我們發現了 X 1916-053 的軌道週期改變量並且建立了一個二階星曆表。

很明顯地，由 Chou et al. (2001) 提出的星曆表已不足以在這樣的長時間尺度下描述相位的演化。因此我們用了二階擬合，經由 F-test 的測式，發現二階擬合的結果比一階擬合好（超過了 99% 信心水準）。為了做更進一步的檢驗，我們也試了三階擬合。然而三階擬合比二階擬合好的信心水準只有 74%，因此我們最後是採用二階擬合的結果。這樣的結果表示著 X 1916-053 的雙星軌道週期會隨著時間而改變。經由二階擬合，我們建立了一個二階的星曆表：

$$T_N = MJD50123.00873 \pm 0.0004 + \frac{3000.6511 \pm 0.0007}{86400} \times N + (2.67 \pm 0.56) \times 10^{-14} \times N^2 \quad (5)$$



圖五：所有觀測到的主光陷和次光陷的相位統計。藉由觀察它們的標準差，我們得知主明顯地比次光陷還穩定。

由擬合的結果，我們也導出了一個週期的變化率：

$$\dot{P}_{orb} / P_{orb} = (1.62 \pm 0.34) \times 10^{-7} \text{ yr}^{-1} \quad (6)$$

我們可以注意到，這個量是正的，表示軌道週期是隨著時間而慢慢地在變長。X 1916-053 是第七個被發現有軌道週期改變量的低質量 X 光雙星系統。

3.4 X 光光陷的穩定性

Frank et al. (1987) 提出一個說法認為吸積盤上有兩個隆起的結構。其中一個在吸積物質流和吸積盤的交會區，大約在軌道相位 0.8-1.0 的地方。另一個則是處於吸積盤中間的一個環狀結構上，大約處於軌道相位 0.3-0.8 位置的冷分子雲。這個模型已經能成功地解釋 EXO 0748-676 的光陷和食 (eclipse) 的關係。但是對 X 1916-053 而言，它並不像 EXO 0748-676 一樣有「食」的現象可供我們當軌道相位的參考點。我們只能利用主光陷和次光陷的穩定性去辨別造成這些光陷的隆起結構是位在吸積盤的位置。

為了分辨造成主光陷以及次光陷的隆起結構在吸積盤的位置，我們對光陷相位的分佈做了統計。經由我們前一節做出來的星曆表，我們發現 148 個主光陷分佈的標準差 (standard

deviation) 是 0.0353，48 個次光陷分佈的標準差則是 0.073。利用 F-test 的方法，我們得知主光陷的標準差明顯地比次光陷小，它虛無假設的機率 (null-hypothesis probability) 可達 6.3×10^{-11} (圖五)。

此外，主光陷相位的標準差也提供了我們在前一節做相位演化時套用在每一年光陷的相位跳動量 (phase jitter)，也就是誤差量。

4 討論

4.1 吸積盤盤面進動和負超駝峰

在前一節，我們已經確認光陷的寬度在 1998 年 RXTE 的觀測中有 4.87 天的週期性變化。為了做更進一步的檢驗，我們拿 1996 年和 1998 年觀測資料的光變曲線，利用 HEASoft 裡的程式 efsearch 來進行「Epoch Folding Period Search」。經由這種週期的搜尋方法，我們可以明顯地看到在 1996 年的 χ^2 譜上，有很明顯的軌道週期訊號以及由 3.9 天吸積盤進動週期所造成的邊帶訊號。除了這些之外，還有一些小小的峰值，對應到 4.87 天的邊帶訊號，這個結果和 Retter 等人在 2002 年做的結果吻合。但是 Retter et al. (2002) 所找到的負超駝峰週期卻在把光陷從光變曲線中移除的情況下也偵測得到，因此造成這個週期性的源由應是由穩定態的變化而不是光陷寬度的變化。

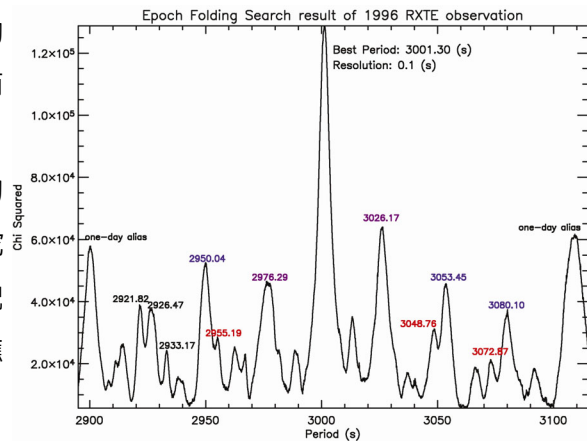
由負超駝峰的 SPH 模擬結果顯示，光陷寬度的週期性變化可以用吸積盤法線向量對觀測者的變化來解釋 (Wood et al., 2000)。而 Homer et al. (2001) 提出週期為 4.74 天的光陷相位的變化則可能是因為隆起結構的不對稱性而由光陷寬度的變化所引發的。

利用超駝峰模型或是經由假設伴星是充滿洛希瓣的冷白矮星，我們可以求得 X

1916-053 的雙星質量比是 0.022 或是 0.011 (Chou et al., 2001)。對負超駝峰模型而言，吸積盤的盤面進動頻率 (ω_n) 與吸積盤外緣物質的克卜勒頻率 ($\Omega(R)$) 的關係可表示為：

$$\frac{\omega_n}{\Omega(R)} = -\frac{15}{32} q r^3 \cos \delta \quad (7)$$

其中 r 是吸積盤大小和雙星軌道半徑的比例， δ 是吸積盤和雙星軌道面的傾角 (Larwood et al., 1996)。假設 $\Omega(R) = 3\omega_n$ (1:3 共振半徑假設) 以及 $\delta \ll 1$ ，雙星系統的質量比約為： $q \leq 0.045$ 。和由超駝峰模型 ($q = 0.022$) 或伴星是充滿洛希瓣的白矮星 ($q = 0.011$) 所導出的結果相比，這個值是稍微大了一點。雖然由不同模型推導出來的結果不盡然相同，但都滿足伴星質量 $M_2 \leq 0.08 M_\odot$ ，亦即伴星不可能是一個正常主序星的條件。這和以往人們認為這個系統的伴星是白矮星的觀點相符，也間接說明了我們找到的吸積盤盤面進動的週期是個合理的值。



圖六：利用 Epoch Folding Period Search 來尋找 1996 年的光變曲線中的軌道週期以及邊帶訊號。藍色的是 3.9 天吸積盤進動造成的邊帶訊號，紅色的則是由 4.87 天吸積盤盤面進動所造成的邊帶訊號。

4.2 軌道週期的改變

在這篇研究之前，人們共探測到有六顆低質量 X 光雙星系統具有軌道週期的改變量：EXO 0748-676、4U 1820-30、X 1822-371、Cyg

X-3 以及 X 2127+119。這六顆和 X 1916-053 的軌道性質列在表一。

在這些具有軌道週期改變量的低質量 X 光雙星系統中，人們已經確認有四顆 (EXO 0748-676、4U 1820-30、X1822-371 和 Cyg X-3) 的軌道週期改變量 \dot{P}_{orb}/P_{orb} 和典型的雙星軌道演化理論所推出來的結果不符合 (Tavani et al., 1991)。

所謂的典型模型，是指基於假設雙星間的質量轉換以及軌道週期改變都是由重力波輻射而引起的模型。該模型預測了以白矮星為伴星的低質量 X 光雙星系統，軌道週期對時間的一階微分量應該要是正值。但以 4U 1820-30 為例，Rappaport et al. (1987) 經過計算，得到它的軌道週期變化率的理論值： $\dot{P}_{orb}/P_{orb}=1.3\times 10^{-7}\text{yr}^{-1}$ ，該預測值和觀測值相比是明顯地不同。而我們的目標 X 1916-053 是一個和 4U 1820-30 相當類似的系統，均是由中子星和白矮星所構成。經由理論所計算出來的軌道週期變化率為 $\dot{P}_{orb}/P_{orb}=5.96\times 10^{-10}\text{yr}^{-1}$ ，足足比觀測值小了兩至三個數量級。

Tavani et al. (1991) 提出了另外一個假設雙星的質量轉換是藉由輻射來驅動的模型來解釋觀測到的軌道週期變化率。他們認為由主星附近所發出來的強烈輻會照亮伴星，使得伴星的大氣產生蒸發的現象，進而有質量流失。

在這樣的假設之下，伴星並不一定需要充滿洛希瓣也能有質量流失。

對一個平均的伴星質量流失率而言， $-\dot{m}_2 \approx 10^{-8}M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ ，比經由重力波輻射所導致的質量損失大了不少。我們所觀測到 X 1916-053 的軌道週期變化率可以由這個模型來解釋，唯從伴星損失的質量之中有 60-90% 的質量必需離開這個系統。但是，這樣龐大的質量損失 ($6-9\times 10^{-9}M_{\odot}\text{yr}^{-1}$) 尚未有觀測上的證據。由這個模型所預測到的 X 光亮度約為 $1-4\times 10^{37}\text{erg/s}$ ，和觀測值 ($0.5-1.44\times 10^{37}\text{erg/s}$ ，Bloser et al., 2000) 差距不大。

5 結論

在本次的研究中，我們利用了加權平均的概念定義出光陷的各項參數並在 X 1916-053 上應用得相當成功。未來我們也希望能利用這種方法來對其他光陷或是食的雙星做系統性的研究。

本次研究中，第一個重要的成果便是在 1998 年 RXTE 的觀測資料中，我們發現光陷的寬度有非常明顯 4.87 天週期性的變化。這個週期性和 Homer et al. (2001) 所找到的 4.74 天的週期性吻合，但是我們的證據卻更強而有力。這個週期性也和 Retter et al. (2002) 提出的負超駝峰訊號及軌道週期的拍頻相吻合。經

表一：目前人們已經偵測到有軌道週期改變量的低質量 X 光雙星系統

Object Name	modulation*	$P_{orb}(\text{hr})$	$\dot{P}_{orb}/P_{orb}(\text{yr}^{-1})$	Reference
4U 1820-30	M	0.19	-3.74×10^{-8}	Chou & Grindlay (2001)
X 1916-053	D	0.83	1.62×10^{-7}	this research
EXO 0748-676 ¹	D,E	3.82	2.7×10^{-8}	Wolff et al. (2002)
Cyg X-3 ²	M	4.82	1.05×10^{-6}	Singh et al. (2002)
X 1822-371	PE,D	5.57	3.4×10^{-7}	Hellier et al. (1990)
X 2127+119	M	17.1	9×10^{-7}	Homer & Charles (1998)
Her X-1	E	40.8	-1.32×10^{-8}	Deeter et al. (1991)

* E：全食，PE：偏食，D：週期性的光陷，M：其他的變化

¹ EXO 0748-676 的相位演化相當怪異，這裡的軌道週期改變量是由 EXOSAT (1985) 到 RXTE (1996) 的觀測用二階擬合所得到的結果。

² 由於 Cyg X-3 的伴星已經被確認為一顆具有強烈恆星風的 Wolf-Rayet 型的氦星，因此已經被分類為高質量 X 光雙星系統。

由負超駝峰模型的計算，我們也計算出雙星的質量比為 $q=0.045$ 。

另一個重大發現則是軌道週期的改變。經由分析超過 24 年的長時間 X 光觀測資料，我們為 X 1916-053 的光陷建立了一個二階的星曆表，並發現了一個明顯的軌道週期改變量 $\dot{P}_{orb} / P_{orb} = (1.62 \pm 0.34) \times 10^{-7} \text{yr}^{-1}$ 。這個量無法用雙星軌道演化的典型模型來解釋，但是由輻射驅動的模型卻似乎可以解釋這個現象。

最後，藉由主光陷和次光陷的相位統計，我們發現在過去的 24 年來，主光陷比次光陷還要穩定。因此我們認為造成主光陷的吸積盤隆起結構應該是存在於吸積盤的外緣而非在中間的環狀結構上。

REFERENCE

- Bloser, P. F.; Grindlay, J. E.; Barret, D.; Boirin, L., 2000, *ApJ*, 542, 989
- Chou, Y.; Grindlay, J. E.; Bloser, P. F., 2001, *ApJ*, 549, 1135
- Chou, Y.; Grindlay, J. E., 2001, *ApJ*, 563, 934
- Deeter, J. E. et. al., 1991, *ApJ*, 383, 324
- Frank, J.; King, A. R.; Lasota, J.-P., 1987, *A&A*, 178, 137
- Hellier, Coel; Mason, Keith O.; Smale, Alan P.; Kilkenny, David, 1990, *MNRAS*, 244, 39
- Homer, L. et. al., 2001, *MNRAS*, 322, 827
- Homer, L. & Charles, P. A. 1998, *New Astronomy*, 3, 435
- Larwood, J. D.; Nelson, R. P.; Papaloizou, J. C. B.; Terquem, C., 1996, *MNRAS*, 282, 597
- Rappaport, S.; Ma, C. P.; Joss, P. C.; Nelson, L. A., 1987, *ApJ*, 322, 842
- Retter, A.; Chou, Y.; Bedding, T. R.; Naylor, T., 2002, *MNRAS*, 330L, 37R
- Singh, N. S. et. al., 2002, *A&A*, 392, 161
- Tavani, M. 1991, *Nature*, 351, 39
- Wolff, M. T. et. al., 2002, *ApJ*, 575, 384
- Wood, M. A.; Montgomery, M. M.; Simpson, J. C., 2000, *ApJ*, 535, L39
- Yoshida, K. et. al., 1995, *PASJ*, 47, 141