

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 地球科學科

040503

以散斑干涉觀測雙星的行蹤

學校名稱：國立臺灣師範大學附屬高級中學

作者： 高二 楊元瀚 高二 張學仁 高二 陳冠宇	指導老師： 王靖華 洪逸文
---	-----------------------------

關鍵詞：雙星、散斑、傅立葉轉換

以散斑干涉觀測雙星的行蹤

摘要

大氣擾動會使得我們觀測到的雙星影像產生變形，造成許多雙星無法藉由光學攝影得知，而是間接由光譜位移得知是否為雙星。然而透過散斑天文干涉技術，我們可以測量出雙星系統的角距和方向角。本研究中使用的CCD，為商用等級的DMK 31AF03，並架設於口徑十四英吋（C-14）的望遠鏡進行觀測。

目前總共觀測了七個雙星系統，而其中有六個雙星系統被本系統分辨出來。這些雙星的角距介在0.54到2.05角秒之間，主星的亮度介在2.43星等到3.74星等之間。本觀測結果顯示商業等級之CCD可以用來進行散斑觀測，達到小型或中型望遠鏡的繞射極限。

然後，利用 Hipparcos 衛星以視差法測得的距離，以雙星互繞的軌道周期和半軸長的訊息估計出雙星系統的總和質量，似乎都略大於光譜測量的質量。而從 O-C 圖還可以發現，累積 1970 年代迄今的天文干涉觀測數據後，足夠修正早期以傳統光學觀測所求出的軌道參數，應可提高質量的估算。

壹、前言

大氣層隔絕了來自太陽的紫外線或者是高能的宇宙射線，保護人類於安然的環境下生存。可是，當人類將望遠鏡指向天空，這層大氣反而成爲妨礙。大氣層不僅阻擋部分光線進入地表造成消光效應；大氣本身的擾動也限制了望遠鏡的解析力，無法分辨距離比1角秒還小的兩星。

直到 1970 年代以後，由於天文光學干涉技術的進展，突破了地球大氣擾動的限制，使望遠鏡能達到理論應有的解析度，例如口徑十公尺的望遠鏡應該可以解析相距 0.01" 的兩顆星，但由於地球大氣的擾動使星點晃動而呈現直徑約 1" 的盤面，祇能看一大團圓盤而不能看出其中的細節。天文光學干涉技術克服了這方面的困難，例如利用極短時間曝光、瞬間凍結影像之散斑干涉技術，或採用相隔數十公尺的兩具望遠鏡同時觀測同一雙星系統等。目前已被廣泛的用來觀測雙星間的距離，以及一些近太陽系巨大星體的直徑。

雙星是天文學中相當重要的研究領域，因爲目前只有藉著觀測雙星運動，才能獲得精確的恆星質量；其它他方法都只能概略的估計。恆星質量又是非常重要的參數，直接與恆星的結構與演化有關。

研究雙星的互繞軌道，再加上雙星的實際距離，那麼利用克卜勒第三運動定律，便可推得雙星的總和質量。特別是，雙星的週期和質量提供了該系統的總角動量。若依循物理學上的守恆律，雙星提供給我們恆星形成時期條件的重要線索。

多數雙星互繞的週期很長，通常都超過數百年，因此多數雙星都沒有觀測到完整的互繞情形。兩星距離越近，則互繞的週期越短；但是兩星距離越近，也越難觀測，常常無法分辨兩星。散斑天文干涉技術是分辨這類雙星的利器，早期是以四公尺大口徑的望遠鏡進行觀測，但隨著CCD越來越高敏感度且越來越便宜的趨勢下，小口徑望遠鏡也可以進行雙星的散斑觀測。

我們便想藉由要商業用且便宜的CCD加上小口徑望遠鏡進行散斑干涉觀測，分析雙星在軌道上的位置，並結合與比對過去的觀測資料，相信這樣對於確認雙星軌道有相當大的幫助。

本實驗的目的有：

- 一、利用散斑干涉的觀測技術獲得雙星影像
- 二、藉由傅立葉轉換將多幅的散斑影像重疊後，找出主星與伴星間的軌道位置
- 三、利用雙星軌道參數，畫出 O-C 圖，驗證觀測的準確度與確認軌道參數。

貳、文獻探討

雙星依據觀察的方法，可以分爲四大類：1. 光學雙星，可以直接用肉眼透過望遠鏡觀察到雙星，或在拍攝的影像上能直接看到分開的兩顆星。2. 天文幾何雙星，無法看見兩星，而是由一顆恆星的運動路徑呈現波動而透露它實際上有另一顆看不見的伴星，如天狼星的自行

並不是直線，而呈現波動。3.食雙星，星與伴星發生遮掩的現象，造成整體光度的下降，此類雙星稱為食雙星，如英仙座的大陵五。4.光譜雙星，如北斗七星中的開陽是第一顆被確認的光譜雙星。

到了目前，依據最完整的美國海軍天文台所負責蒐錄的華盛頓雙星目錄（Washington Double Catalog），登錄的雙星系統已經超過十萬個，超過 71 萬次的測量。其中以天文干涉法觀測雙星的第四版目錄（Fourth Interferometric Catalogue）顯示到 2010/1/15 日止總共有 75,237 個雙星系統以此法進行觀測，其中 22,549 是以此方法新發現的雙星，且平均的角距是 0.93 角秒。

由圖 2-1 可知 1970 年代後，散斑干涉是觀測雙星的主要方法，而由圖 2-2 可知天文干涉法觀測的方法比掩星，甚至是人造衛星（Hipparcos）可以分辨更小的角距。

從1977年一直到1998年間，由美國州立喬治亞大學的CHARA (The Center for High Angular Resolution Astronomy)利用在阿利桑納州和智利的4m望遠鏡，以散斑干涉方法累積最多的觀測個數 (ex. McAlister et al., 1989; McAlister, 1993, Hartkopf et al., 1997, Bagnuolo et al., 2006)

大約到了2000年，有更高敏感度、高解析度，且價格便宜的CCD開發後，進行散斑觀測的望遠鏡口徑降到比2m還小，一樣能分辨小角距的雙星。例如美國海軍天文台(U.S. Naval Observatory, USNO)使用 0.66m口徑的望遠鏡(Germain et al., 1994; Mason et. al., 2006)，西班牙使用1.52m的望遠鏡(Calar Alto

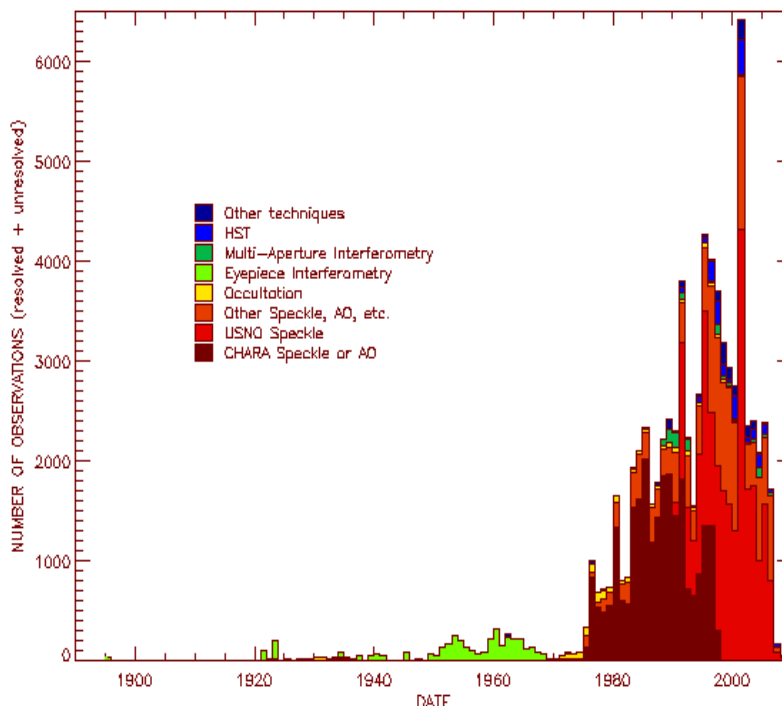


圖 2-1 WDS 網站統計各團隊觀測雙星的逐年累積個數 (截至 2010 年 1 月 15 日前)。

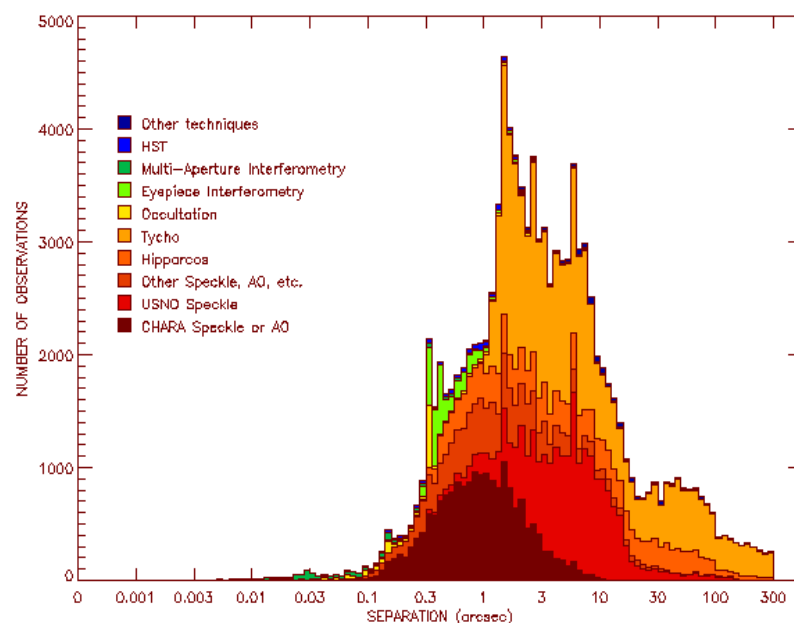


圖 2-2 WDS 網站統計各團隊所觀測之雙星的角距與個數(截至 2010 年 1 月 15 日前)。

observatory, Docobo et al., 2007)，或者是0.5m 的望遠鏡 (Rutkowski, 2005)等。

由於大氣擾動，使得地面的天文望遠鏡成像受到嚴重影響，當使用傳統的長曝光天體攝影術時，其解析度取決於大氣視寧度 (seeing)，而與望遠鏡口徑無關。即使在良好大氣視寧度條件下，對應的解析度僅為 1 角秒，看不到任何小於角秒的細節。散斑干涉的技術一般應用在角距離小於 3 角秒的密近雙星，而且兩星亮度差不可以大於 3~4 星等(Labeyrie, 1970, McAlister, 1976, Hartkopf, W. I., 1991, etc.) 。

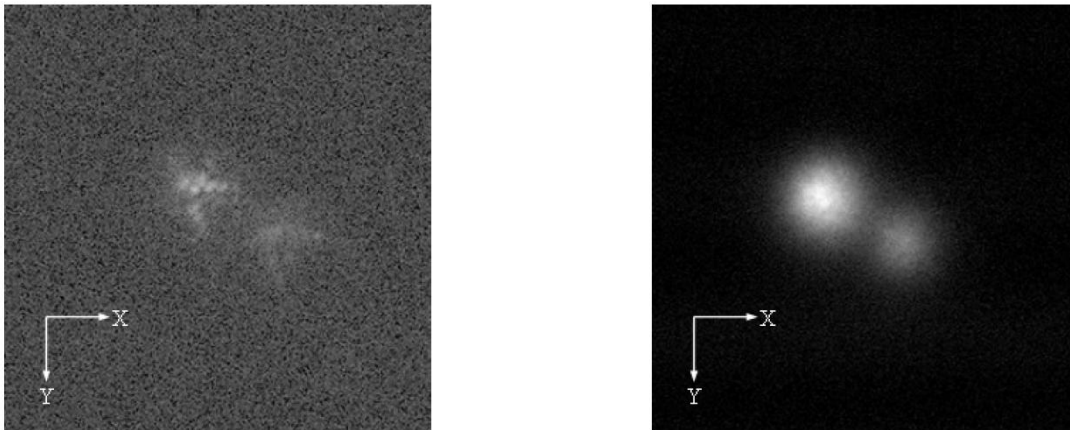
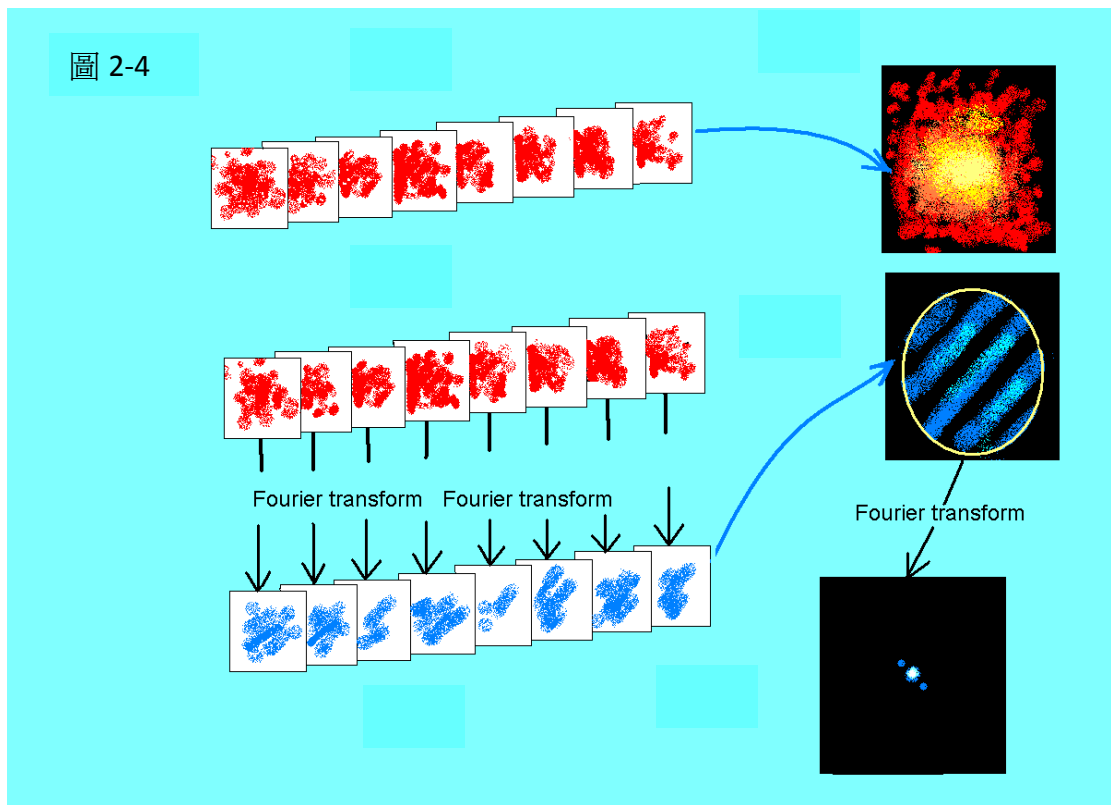


圖 2-3 左圖為曝光 1/60 秒的雙星影像，呈現散斑圖樣，而右圖為曝光累積 4 秒的影像。

為光波長)，口徑越大則解析度越高，當 $\lambda=550 \text{ nm}$ 時，口徑為 1 m 和 10 m 望遠鏡的 α 分別為 0.14 角秒和 0.01 角秒。例如一個 5 米直徑望遠鏡的繞射極限約 0.02 角秒，而在長曝光時間下受到大氣擾動的解析度只有 1 角秒。

為了克服地球大氣擾動對天文觀測的嚴重影響，充分發揮地面大口徑望遠鏡的高分辨成像功能，法國的 Labeyrie 1970 年提出了散斑干涉術。如果在短曝光時間下（約 0.01 秒），發現在星體的影像上有類似散斑的結構。散斑的大小與望遠鏡的艾里斑 (Airy disk) 的大小同數量級。以雙星為例，每顆星都產生相同的散斑圖樣，由於雙星之間角距離，會使兩個完全相同的散斑圖樣在空間有一小位移，從而出現類似於楊氏干涉的週期條紋。疊加這種條紋資訊進行傅立葉轉換則可求得雙星的角距離 (ρ) 與方位角 (θ)，見圖 2-4。



參、研究方法或過程

一、器材

口徑 14 英吋望遠鏡 (C14)、DMK 31AF03 CCD (可以短時間曝光)、IC capture 擷取影像、The sky 軟體控制望遠鏡、VirtualDub 將 avi 檔拆成單幅影像、與分析使用之軟體 IDL

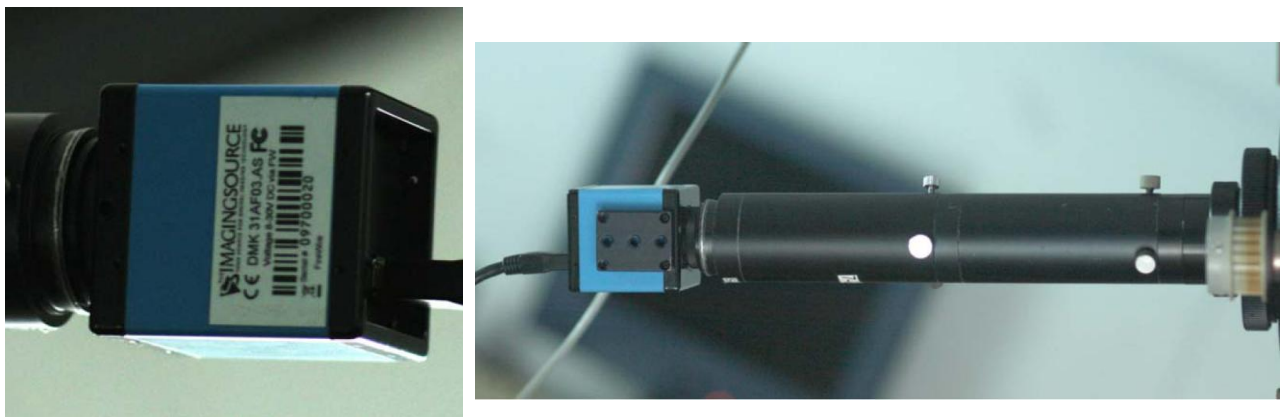


圖 3-1 望遠鏡接上 CCD (DMK 31AF03)

二、篩選出觀測目標

以可見光 $\lambda=550 \text{ nm}$ 估計本實驗所使用的 14 英吋(35.6 公分)望遠鏡的繞射極限約為 0.39 角秒，若加上主星與伴星亮度差異大時，暗星無法成像等因素，因此對於目標星的選擇有以下的條件：

- (一) 雙星軌道半長軸須大於 0.4 角秒：受限於望遠鏡的繞射極限，若雙星距離太近，望遠鏡則無法分辨。
- (二) 兩星星等最好比 6 星等亮：由於短時間曝光，所以太暗的星無法成像。
- (三) 兩星星等差須小於 3~4 星等：兩星亮度差距太大，使得伴星埋沒在主星明亮的光芒中，或是太暗了而無法看見。
- (四) 天球座標：以雙星座標確定是觀測日能觀測到的範圍。

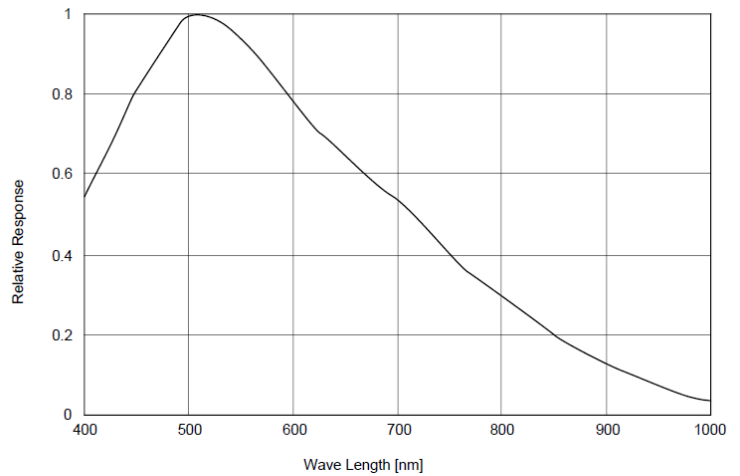


圖 3-2 CCD (DMK 31AF03)之特徵曲線，最大效能落在 510 奈米。

二、進行雙星觀測

每一雙星須有三種觀測影像，一是散斑(speckle)，二是透過雙狹縫所拍得的影像(double slit)，三是取消追蹤功能的軌跡影像(trace)。分述如下：

- (一) 散斑圖樣：這數據讓我們可以分析雙星在軌道的相對位置，也須依照觀測雙星的亮度改變曝光時間，大約控制在數十分之一秒左右。
- (二) 干涉條紋：由於 C14 的主鏡會隨著望遠鏡移動時而變動，所以拍攝不同的雙星時的焦距會改變，所以利用鏡前裝置雙狹縫拍攝干涉條紋，來算出照片的比例尺。
- (三) 軌跡：影像中的 xy 軸不一定是方位的東西或者南北向，停止追蹤功能讓散斑影像脫線，利用移動的軌跡線，可以確認東西方位。

三、利用 IDL 軟體進行傅立葉轉換(2D-FFT)

- (一) 錄製短時間曝光之 speckle 影像，並以免費軟體 VirtualDub 拆解為單幅影像。

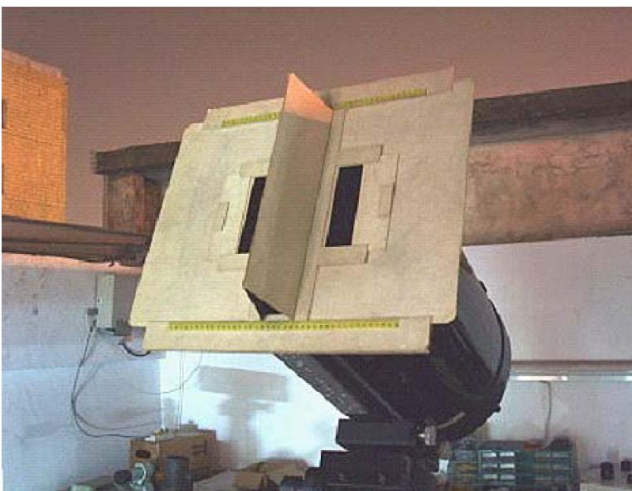


圖 3-3 望遠鏡前裝置雙狹縫



圖 3-4 觀測現場

- (二) 將單幅影像分別做傅立葉轉換後，重疊這些影像，並做第二次傅立葉還原，確認此系統下是否觀測到雙星。
- (三) 利用雙狹縫影像找出照片中的比例尺。
- (四) 利用軌跡縫影像者確認影像中的方位。
- (五) 找出雙星軌道參數，畫出 O-C 圖，驗證觀測的準確度與確認軌道參數。

表一 於 2010 年 8 月 28~29 日夜間進行觀測之雙星

中名	WDS	ADS	HIP	RA	DEC	主星亮度 V1	伴星亮度 V2	半長軸 a (角秒)
奎宿五 (del And)	00393+3052	548	3092	3919.6	305140.4	3.25	12.44	0.62
武仙座 Zeta (STF2084)	16413+3136	10157	81693	164117.48	313606.8	2.81	5.49	1.33
Sabic (BU 1118AB)	17104-1544	10374	84012	171022.66	-154330.5	2.43	2.94	1.519
輦道增七 (MCA 55Aac)	19307+2758	12540	95947	193043.69	275734.9	3.05	5.17	0.586
天津二 (STF2579AB)	19450+4508	12880	97165	194458.44	450750.5	2.86	6.59	3
天津六 (AGC 13AB)	21148+3803	14787	104887	211447.35	380239.6	3.74	6.63	0.913
墳墓一 (STF2909)	22288-0001	15971	110960	222849.8	-112.2	3.65	3.85	3.847

肆、研究結果與討論

一、散斑(speckle)影像分析

散斑觀測的資料經過傅立葉轉換後，可知觀測的 7 個雙星系統中共可分辨出 4 個系統，Hip81693、Hip84012、Hip104887 以及 Hip11960，並接續進行分析其軌道位置。

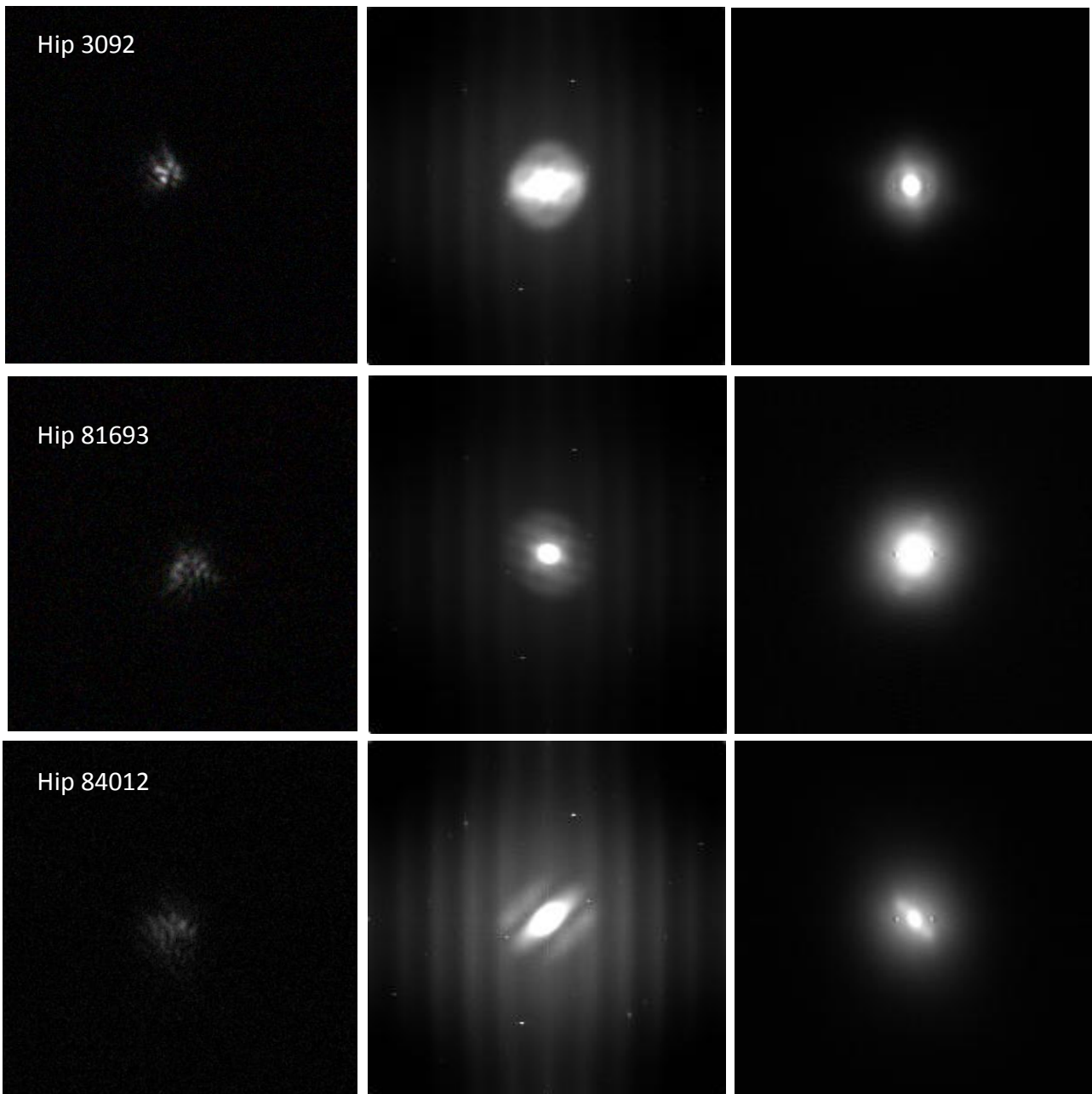


圖 4-1-1 雙星觀測結果，由左而右依序為單幅原始拍攝的 speckle 影像、傅立葉轉換處理並重疊後影像、經兩次傅立葉轉換還原的影像。

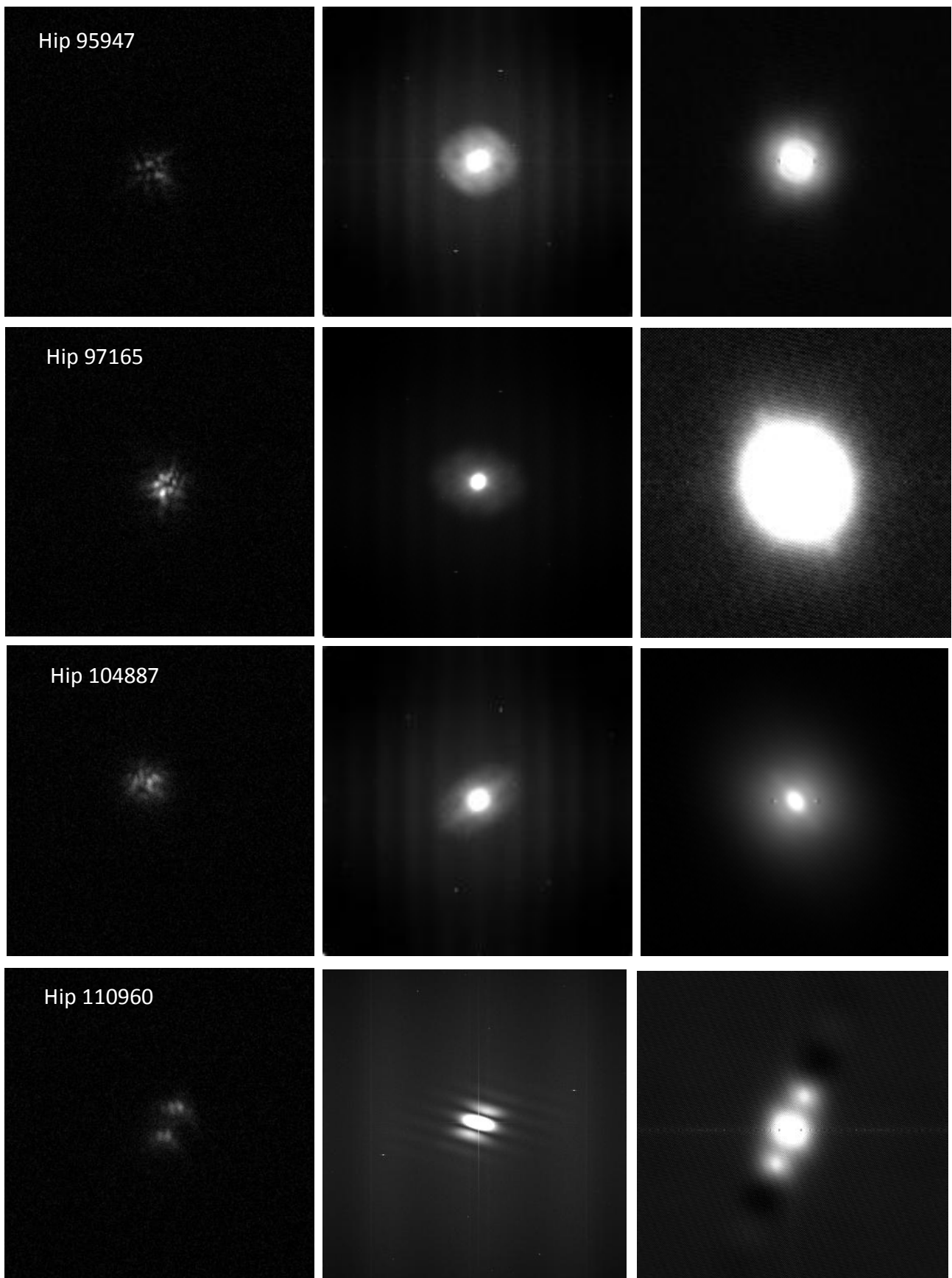
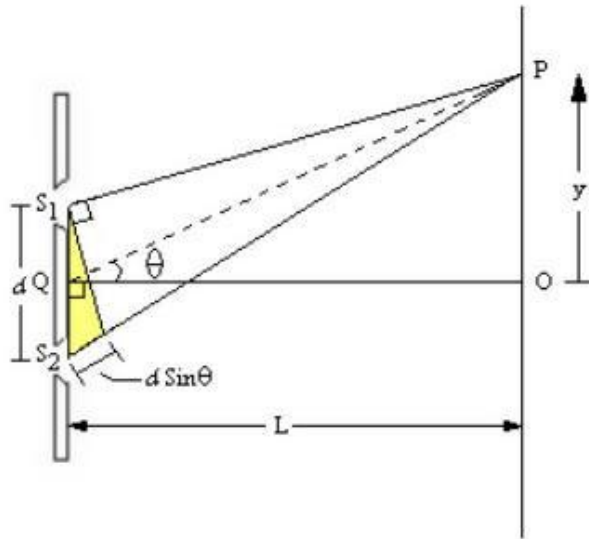


圖 4-1-2 雙星觀測結果，由左而右依序為單幅原始拍攝的 speckle 影像、傅立葉轉換處理並重疊後影像、經兩次傅立葉轉換還原的影像。

二、雙狹縫影像分析

(一) 找出影像的比例尺

利用主鏡前架上雙狹縫遮罩(圖 3-3)，就如同在鏡前如下圖有兩個光源，便會形成在 CCD 上出現干涉紋，再根據雙狹縫公式 $d \sin \theta = n \lambda$4.1

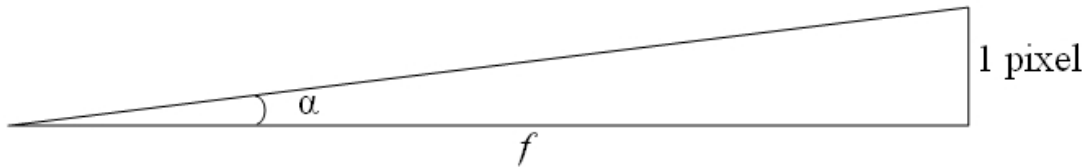


透過焦距 f 之望遠鏡成像後，干涉條紋中第一亮紋與第二亮紋的距離為 Δy ，

$$\text{且符合 } \tan \theta = \frac{\Delta y}{f} \dots\dots\dots 4.2$$

$$\text{根據 4.1 式和 4.2 式，則 } d = \frac{f \times \lambda}{\Delta y} \text{ (in mm)} \dots\dots\dots 4.3$$

那麼影像比例尺 α 如下：



$$\tan \alpha \approx \alpha = \frac{1}{f} = \frac{\lambda(\text{mm})}{d(\text{mm}) \cdot \Delta y(\text{pixel})} \text{ (radian/pixel)}$$

$$\alpha = \frac{180 \times 60 \times 60}{\pi} \frac{\lambda(\text{mm})}{d(\text{mm}) \cdot \Delta y(\text{pixel})} = 206265 \frac{\lambda}{d \Delta y} \text{ ('' /pixel)}$$

本實驗的雙狹縫距離 $d=198\text{mm}$ ，且 CCD 最敏感的波長 $\lambda=510\text{nm}$ ，所以只要測量雙狹縫影像中的 Δy 就可以找出比例尺，結果如表二。

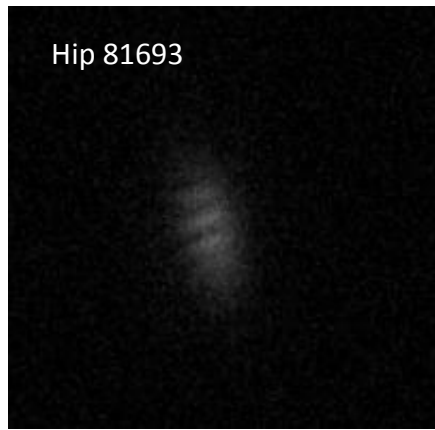
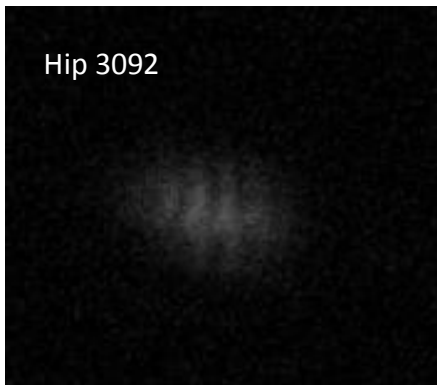


圖 4-2 單幅之雙星狹縫干涉影像

(二) 計算出雙星角距

利用圖 4.1 中經歷兩次傅立葉轉換後的疊加影像，找出主星與伴星的影像上距離，再乘上比例尺即是兩星的角距，結果如表二。

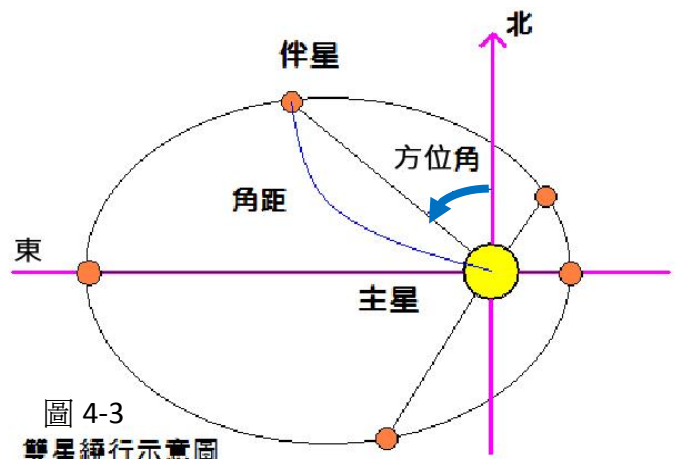


圖 4-3 雙星繞行示意圖

表二 2010/8/28 觀測結果

中名	WDS	HIP	角距 ρ (")	方位角 θ (°)	比例尺 ("/pixel)	備註
奎宿五 (del And)	00393+3052	3092	X	X	0.050	無法分辨
武仙座 Zeta (STF2084)	16413+3136	81693	0.99	172.8	0.049	可分辨
Sabic (BU 1118AB)	17104-1544	84012	0.54	53.20	0.048	可分辨
輦道增七 (MCA 55Aac)	19307+2758	95947	X	X	0.052	無法分辨
天津二 (STF2579AB)	19450+4508	97165	X	X	0.055	無法分辨
天津六 (AGC 13AB)	21148+3803	104887	0.82	230.7	0.057	可分辨
墳墓一 (STF2909)	22288-0001	110960	2.04	169.2	0.053	可分辨，但沒有狹縫影像 以平均值為比例尺

三、軌跡影像分析

利用軌跡影像找出影像中的東西向，便可推知主星與伴星間的方位角，結果如表二。

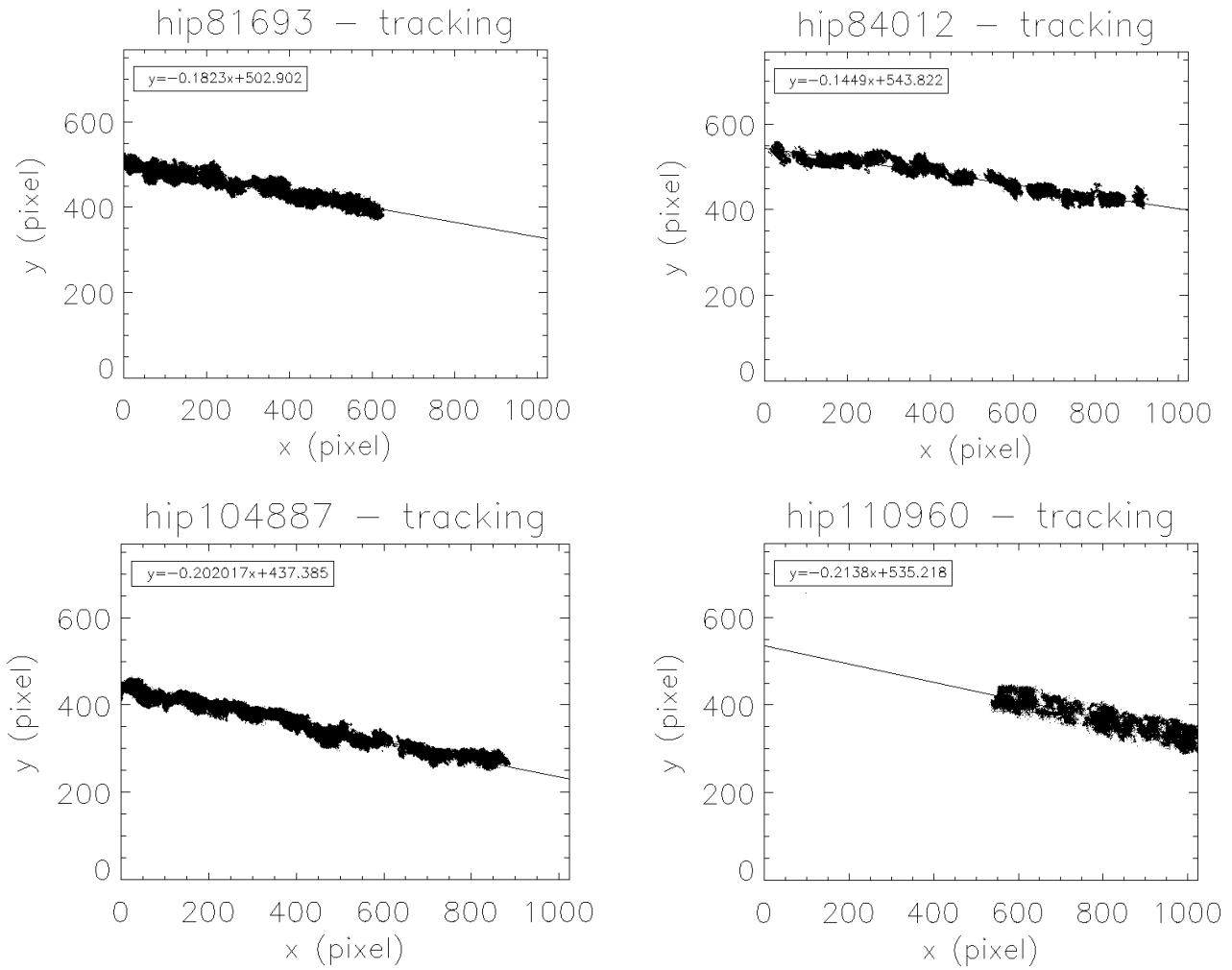


圖 4-4 觀測後能分辨的 4 個雙星各別的軌跡方程

四、繪製雙星 O-C 圖

找出過去傳統光學或者天文干涉所求出的七個軌道參數(表三)，繪製理論軌道。然後，將前人各種觀測（綠點）、散斑的觀測（藍點）和本次散斑觀測的結果（紅點）一併繪於軌道圖上，並以直線表示實際觀測值與理論值間的差距。

表三 2010/8/28~29 夜間觀測之雙星的軌道參數									
WDS	HIP	P(年)	a(")	i(°)	Ω (°)	T(UT)	e	ω (°)	資料來源
16413+3136	81693	34.450	1.330	131.00	50.00	1967.700	0.460	111.00	Sod1999
17104-1544	84012	87.580	1.396	95.20	38.90	2024.68	0.950	274.80	Docobo2007
		± 1.00	± 0.01	± 2.00	± 1.00	± 0.50	± 0.02	± 2.00	
21148+3803	104887	49.630	0.913	134.44	339.75	1989.036	0.239	298.77	Mut2010e
		± 7.70	± 0.0013	± 0.15	± 0.13	± 17.00	± 0.0012	± 0.19	
22288-0001	110960	486.700	3.380	141.70	133.20	1982.730	0.343	273.00	Sca2010c
		± 40.00	± 0.023	± 1.00	± 3.40	± 4.20	± 0.029	± 9.40	

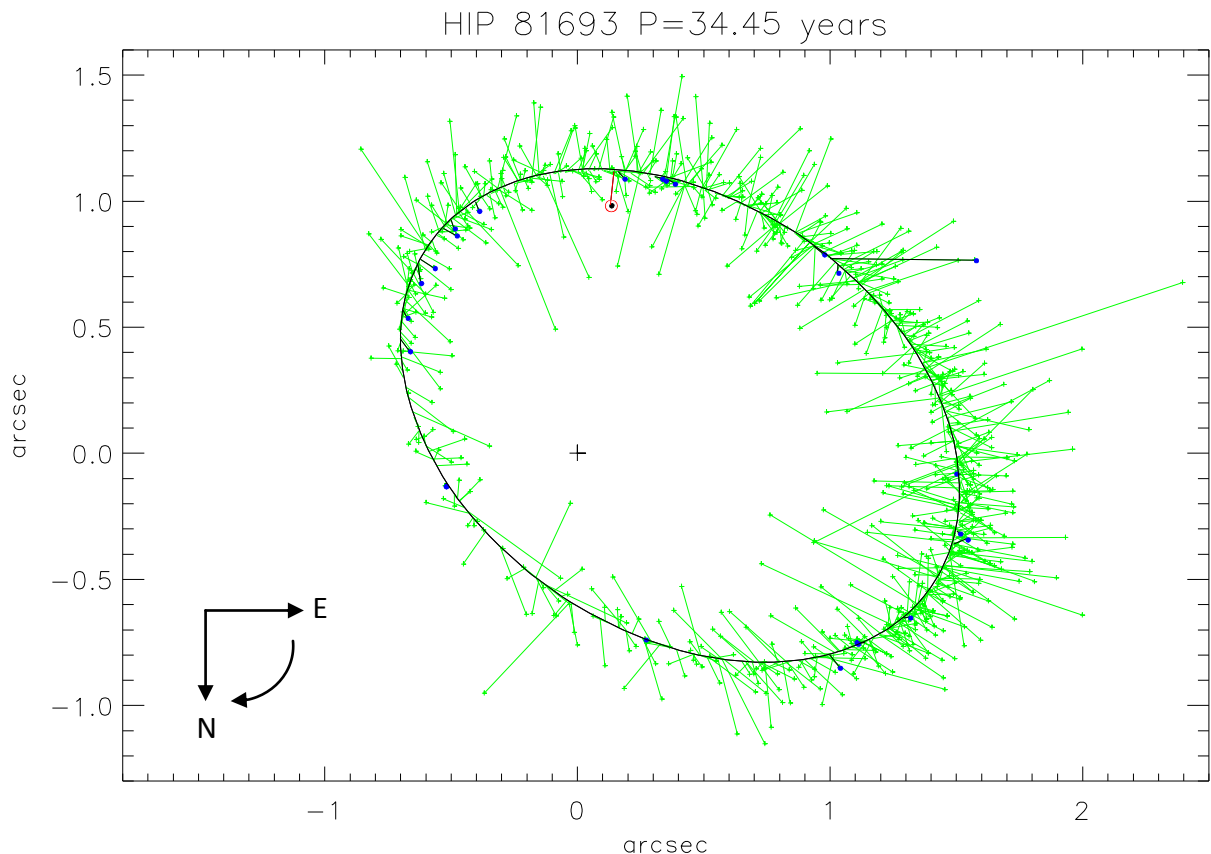


圖 4-5.1a Hip81693 的 O-C 圖，紅色顯示本次觀測值，藍色為散斑觀測結果。

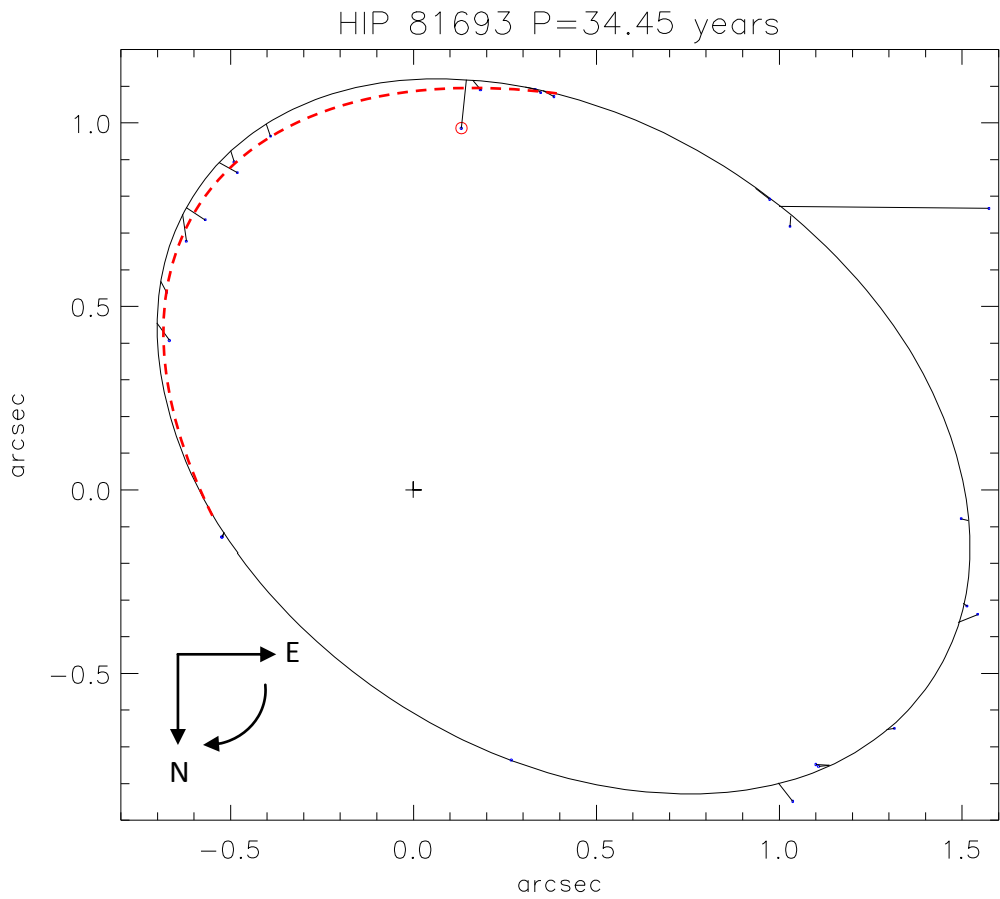


圖 4-5.1b Hip81693 的 O-C 圖，紅色虛線顯示依散斑觀測值修正後的軌道。

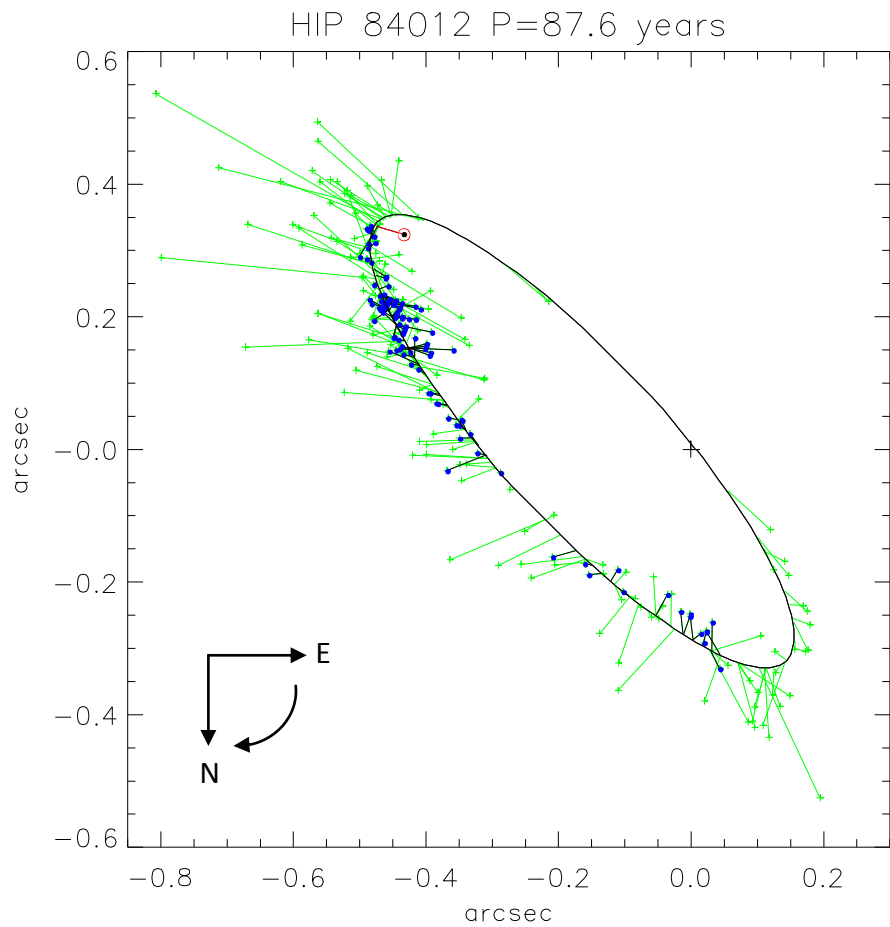


圖 4-5.2a Hip84012 的 O-C 圖

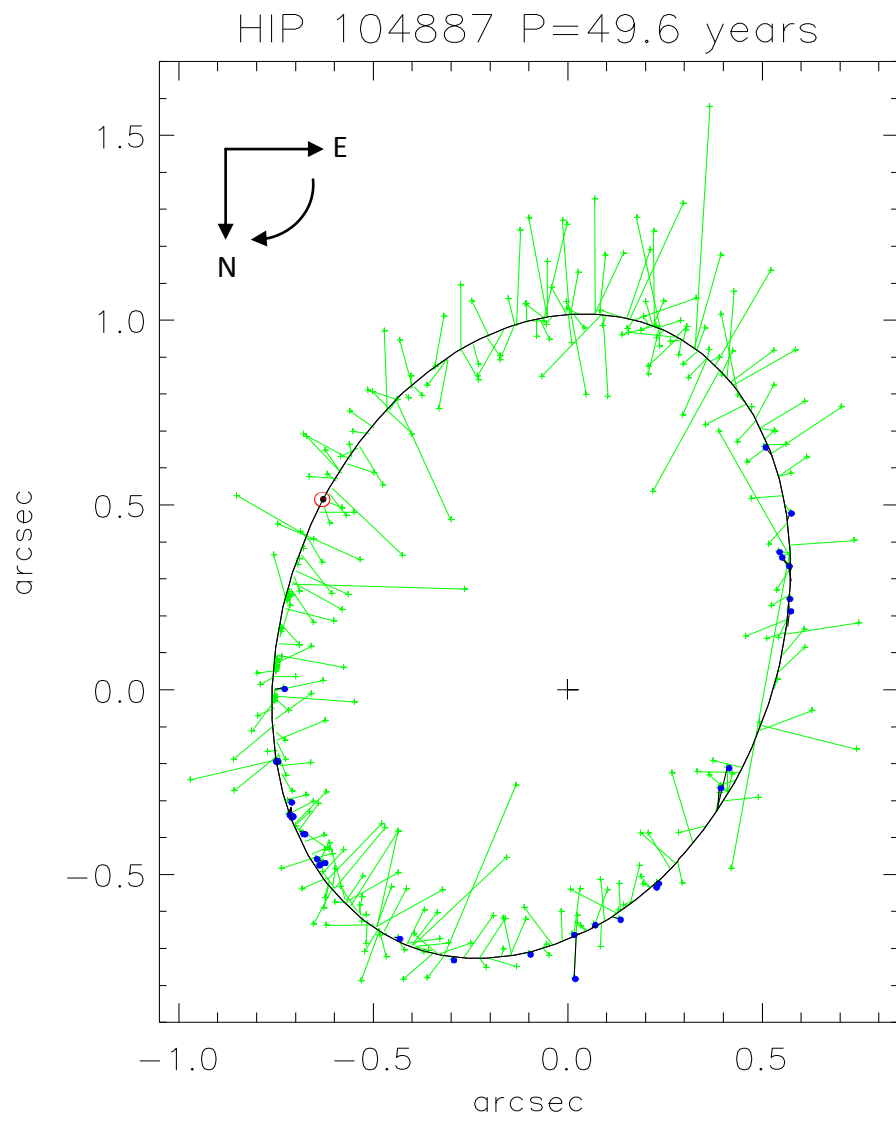


圖 4-5.3 Hip104887 的 O-C 圖

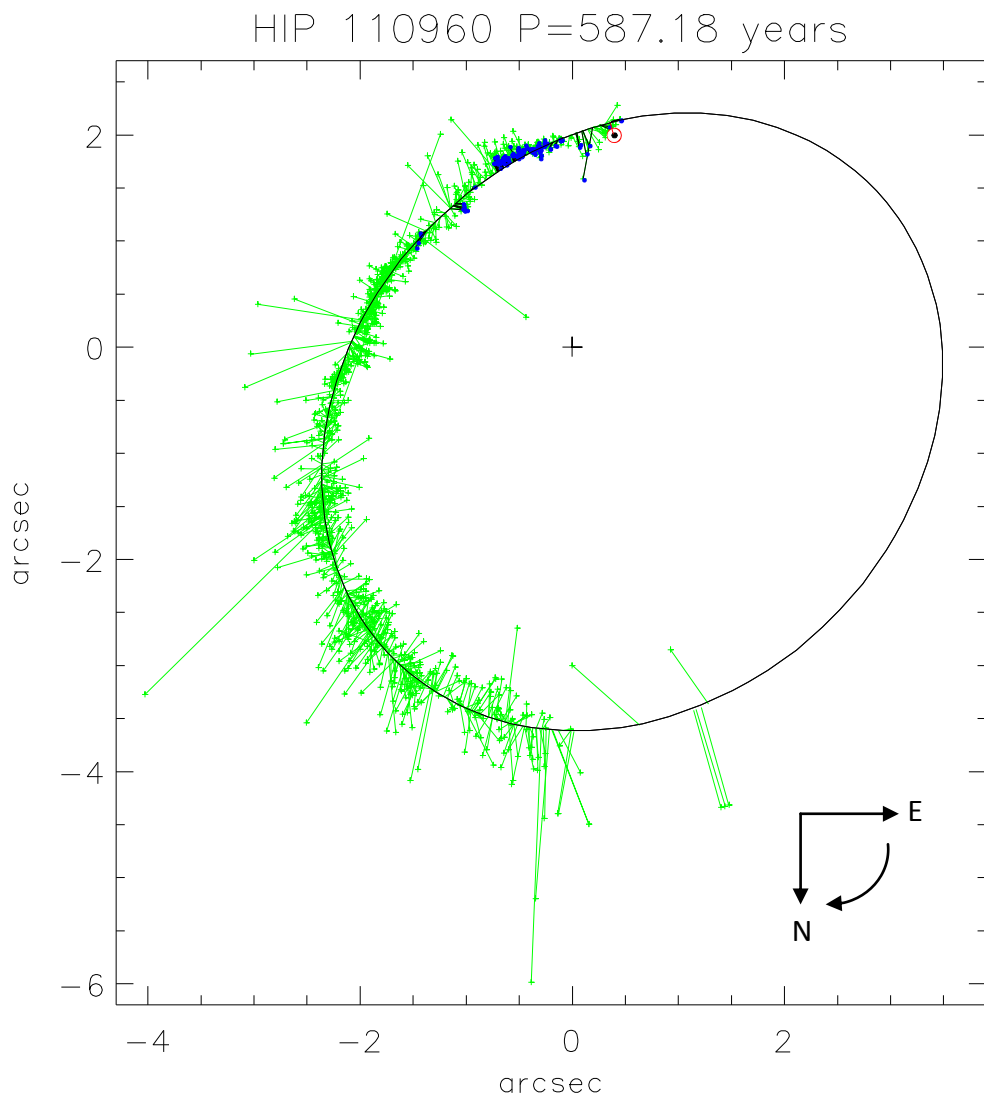
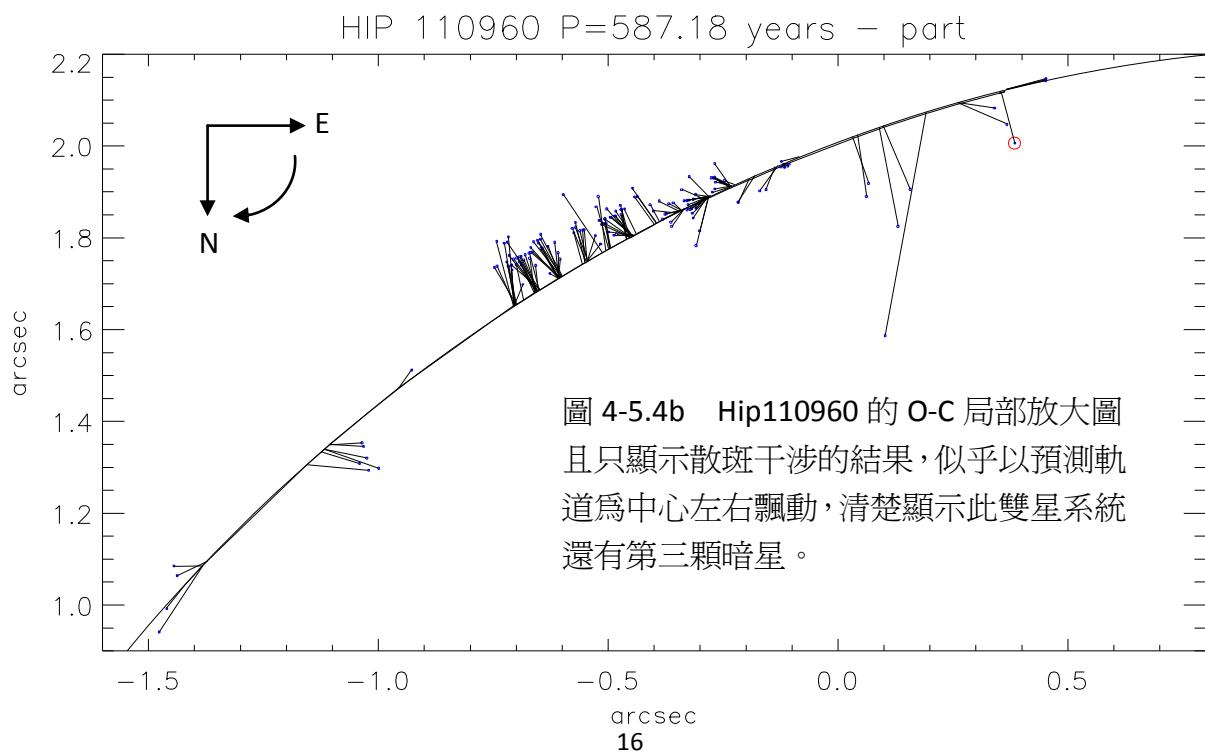


圖 4-5.4a Hip11960 的 O-C 圖



本次的觀測結果與最新的理論軌道在角距 $\Delta \rho$ (O-C)的誤差值為為 0.014~0.134 角秒，而方位角 $\Delta \theta$ (O-C)的誤差則為 0.2~1.5 度。 $\Delta \theta$ 差距達到 1.5 度的 Hip84012，若相較於 Docobo 等人 (2007)

WDS	HIP	ρ (")	$\Delta\rho$ (")	θ (°)	$\Delta\theta$ (°)	理論軌道參考來源
16413+3136	81693	0.994	0.134	172.8	0.2	Sod1999
17104-1544	84012	0.543	0.039	53.2	1.5	Doc2007
21148+3803	104887	0.819	0.014	230.7	0.6	Mut2010e
22288-0001	110960	2.043	0.106	169.16	1.4	Sca2010c

針對 1990~2006 年間的觀測資料進行的統計， $\Delta \rho = 0.070$ 角秒， $\Delta \theta = 4.8$ 度，我們的結果還算不錯。此雙星的軌道傾角很大($i=95.2$)且相當橢圓($e=0.95$)，所以在 O-C 圖(圖 4-5.2)上可見主星偏向一側，而且在近星點附近的觀測資料較少，這會影響軌道參數的準確性。顯然需要更多的近星點附近的資料去確認軌道參數的準確性，而我們的觀測時間往近星點方向往前推一些。

而 $\Delta \rho$ 與 $\Delta \theta$ 差值都比較大的 Hip 110960，是一顆相當有趣的雙星。自 1777 年發現以來，截至 2010 年為止，已經有超過 1212 筆的觀測，圖 4-5.4b 放大的 O-C 圖很清楚看見雙星觀測點以理論軌道為中心飄動，表示有第三顆星干擾，主要是 B 星還又另一顆伴星 b，所以它的 $\Delta \rho$ 與 $\Delta \theta$ 會比較大。根據 Scardia 等人於 2010 年的論文中顯示包含第三星的軌道應該如圖 4-6。

而 Hip 104887 的雙星系統被歸類為主星是一顆早期的 F 型次巨星以及一顆 G 型的白矮星，而且主星可能是一顆 δ Scuti 和 γ Doradus 型的變星，但還沒定論。在 Muterspaugh 等人在 2010 年 12 月發表的論文中更發表以帕洛瑪長基線的天文干涉儀觀測此雙星系統，推測這裡存在一個大質量的行星或者棕矮星。而且 WDS 上最近的一筆觀測是在 2008.77 年進行，我們的觀測是 2010 年 8 月底進行，結果相當符合最新的軌道參數(Muterspaugh, 2010)。

Hip 81693 自 1782 年觀測以來，已經互繞完成多個周期($p=34.45$ 年)，但是若以 1976.2963 年第一次的散斑觀測算起，目前即將完成一個周期，在 WDS 上將此系統的 O-C 圖(圖 4-5.1a)歸類為 grade1，表是相當

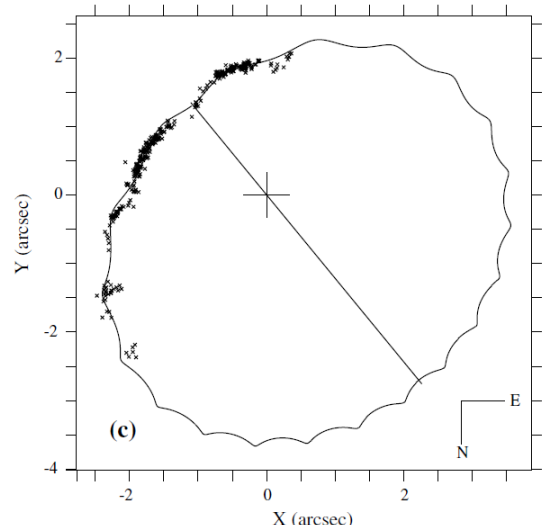


圖 4-6 Hip 110960 三星軌道(A、B、Bb)
取自 Scardia2010。

Orbit Model for HD 202444

Parameter	Value	Uncertainty
P_{A-B} (days)	18125.4	7.7
T_{A-B} (MHJD)	47553	17
e_{A-B}	0.2392	0.0012
a_{A-B} (arcsec)	0.9130	0.0013
i_{A-B} (deg)	134.44	0.15
ω_{A-B} (deg)	298.77	0.19
Ω_{A-B} (deg)	339.75	0.13
P_{Ba-Bb} (days)	810	18
T_{Ba-Bb} (MHJD)	53139	48
e_{Ba-Bb}	0.43	0.17
a_{COL} (μ as)	796	149
i_{Ba-Bb} (deg)	92.6	1.9
ω_{Ba-Bb} (deg)	90	19
$\Omega_{Ba-Bb,1}$ (deg)	78.7	2.5
χ^2 and dof	744.7	636

Note. Best-fit orbital elements in the Campbell basis for HD 202444, with 1σ uncertainties. 圖 4-7 取自 Muterspaugh 等人(2010)論文。

了解它的軌道參數 Soderhjelm(1999)。然而，若是如圖 4-5.1b 只以準確度較高的散斑干涉觀測來探討理論軌道，顯示要如紅虛線的軌道會更符合。

五、找出系統總和質量

研究雙星軌道最重要的應用是在求恆星質量。由足夠的雙星觀測數據應可以推算出它的軌道參數：四個動力參數 (P, T, e, a) 與三個幾何參數 (i, ω, Ω)，其中軌道周期與軌道半長軸，可以用來推算兩星的總合質量。

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2} (m_1 + m_2) \dots\dots\dots 5.1$$

如果 a 的單位為 AU，P 的單位為年，則質量的單位為太陽質量 M_{\odot} ，那麼上式可為：

$$\frac{a^3}{P^2} = (m_1 + m_2) M_{\odot} \dots\dots\dots 5.2$$

若要獲得兩星的各別質量，就要知道兩星對其質心的軌道半徑比，也就是 $\frac{a_1}{a_2}$ ，而

$a_1 + a_2 = a$ ，所以 $m_1 a_1 = m_2 a_2$ ，推得 $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$ ，就可分別計算兩星的質量。不然就須由其他觀測得知，例如它是光學雙星又是食雙星，可由光變曲線得知軌道半徑比，或者它又是同時是光譜雙星也可知道半徑比。

我們利用 Hipparcos 衛星所測得的視差角 π 推出距離，代入 5.2 式計算出總和質量如表五。以 Hip81693 的 O-C 圖中 (圖 4-5.1) 的紅色虛線可以知道如果符合觀測數據修正後的半長軸 a 應該比較小，也代表總和質量會比目前軌道參數算出來的 $2.5 M_{\odot}$ 小 (表五)。

表五 由軌道參數計算出總和質量

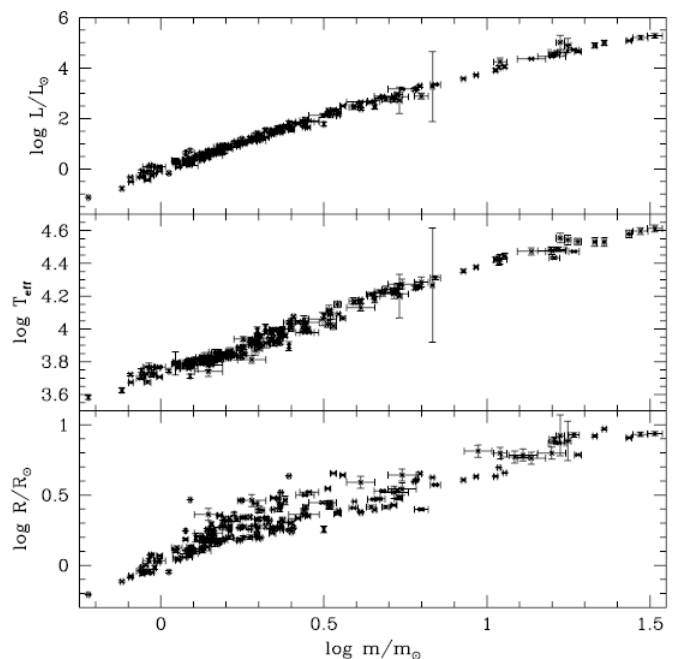
WDS	HIP	光譜 (A)	光譜 (B)	視差角 π (mas) (Hipparcos)	總和質量 M_{\odot}	相關資料
16413+3136	81693	G1 IV		92.64±0.60	2.5	2.45±0.098 M_{\odot} (Sod1999) 軌道參數參考 Sod1999
17104-1544	84012	A1 IV	A1 IV	38.77±0.86	6.09±0.30	6.09±0.45 M_{\odot} (Doc2007) 4.81±3.32(Sod1999) 軌道參數參考 Doc2007
21148+3803	104887	F3 I V	G0 V	47.80±0.61	2.83±0.89	2.71±0.11 M_{\odot} (TtB2000) 軌道參數參考 Mut2010
22288-0001	110960	F3 V	F6 IV	35.68±1.24	3.59±0.67	3.6±1.0 M_{\odot} (Sca2010) 軌道參數參考 Sca2010

伍、結論與應用

本次所使用的C14望遠鏡的口徑為35公分，在不受大氣擾動的影響下，其繞射極限約為0.39角秒。利用本系統進行散斑觀測，可分辨4顆雙星的主星亮度介在2.43星等到3.65星等之間，其角距介在0.54到2.04角秒之間。0.52角秒已經相當接近望遠鏡的繞射極限，當天有很薄的雲，應該有一些影響。本觀測結果顯示商業等級之CCD可以用來進行散斑觀測，達到小型或中型望遠鏡的繞射極限。

從 O-C 圖還可以發現，累積 1970 年代迄今，較精準的天文干涉觀測數據後，可以修正早期以傳統光學觀測所求出的軌道參數。例如 Hip81693 (圖 4-5.1) 可以看出若將軌道修正為紅色虛線，更符合散斑的觀測資料。不過目前我們並不會推算軌道參數，所以此紅色虛線乃是目視標出。預計下個階段能根據散斑干涉的觀測數據修正軌道參數。

而獲得總和質量後，下一步須再求出個別質量，並結合光度訊息，找出質光關係。對於孤伶伶的單星便可利用質光關係，間接獲得其質量。Soderhjelm(1999)與 Brummelaar(2000)便利用雙星的視星等差、色指數和距離訊息，找出個別質量。而 WDS 也列有第三版的雙星星等差的星表，但由於各觀測沒有一致性的濾光系統，使得視星等差值的準確度有待考證，比如 Hip81693 的兩星視星等差為 1.76~2.8 之間波動。準確的視星等差值直接影響個別質量的推估，因此我們預計接續的研究能根據散斑干涉的觀測數據修正軌道參數，獲得準確度高的總和質量，再利用兩星的視星等差值，求出個別質量，甚至是找出不同質量的質光關係。



中質量 1.5~30 M_{\odot} 的質光關係(Malkov,2007)

陸、參考文獻

1. Docobo& Ling,2007, AJ, 133:1209Y1216.
2. Hartkopf, W.I. & Mason, B.D. 2003, Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars, available at <http://ad.usno.navy.mil/wds/orb6.html>.
3. Hartkopf, W.I., Mason, B.D., Wycoff, G.L., and McAlister, H.A., the 2006.5 version Fourth Catalog of Interferometric Measurements of Binary Stars, available at <http://ad.usno.navy.mil/wds/int4.html>.
4. Labeyrie, 1970, A&A, 6, 85.
5. Malkov,2007, MNRAS. 382, 1073–1086

6. McAlister, 1976, PASP, 88, 317.
7. Muterspaugh et al., 2010, AJ, 140, 1657M.
8. Hartkopf, W. I., McAlister, H. A., 1991, Astrophysics and Space Science, 177, no. 1-2, 161.
9. Rutkowski, Artur, Waniak, Waclaw, 2005, PASP, 117, 1362.
10. Soderhjelm, 1999, Astron. Astrophys. 341, 121–140.
11. Scardia et al., 2010, AN 331, No. 3, 286 – 299.
12. SIMBAD天文資料庫 <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=HD+183912>
13. Brummelaar et al., 2000, AJ, 119:2403-2414.
14. 光學學報 ACTA OPTICA SINICA, 1999年, 第19卷, 第2期
<http://222.87.106.4:90/~kjqk/gxxb/gxxb99/gxxb9902/990202.htm>
15. 維基百科-聯星 <http://zh.wikipedia.org/zh/%E8%81%AF%E6%98%9F>

附錄一：何謂雙星 O-C 軌道圖

雙星軌道主要由七項參數決定，分別為

(一)康貝爾(Campbell)幾何參數:

1. i 雙星軌道面之視線夾角
2. ω 節線與近星點之夾角
3. Ω 節線之方位角

(二)雙星軌道之動力參數(dynamical elements)

1. P 雙星互繞週期(以年為單位)
2. T 伴星於近星點時刻
3. e 橢圓軌道離心率
4. a 橢圓軌道半長軸

除此七項參數外，另外定義 Thiele-Innes 要素 A 、 B 、 F 、 G 用以決定真實軌道平面之幾何參數，其關係式如下:

$$\begin{aligned} A &= a(\cos \omega \cos \Omega - \sin \omega \sin \Omega \cos i) \\ B &= a(\cos \omega \sin \Omega + \sin \omega \cos \Omega \cos i) \\ F &= a(-\sin \omega \cos \Omega - \cos \omega \sin \Omega \cos i) \\ G &= a(-\sin \omega \sin \Omega + \cos \omega \cos \Omega \cos i) \end{aligned}$$

另外將 P 、 T 、 e 、 a 分別帶入下列式子求出定義 E :

$$E - e \sin E = 360(t - T)/P$$

其中 t 為觀測時間，而 $(360)/P$ 實際上為 $360^\circ/P$ ，是伴星繞主星的平均移動角速率，常用 N 代表；即 $360^\circ/P = N^\circ/\text{年}$ 。再由 E 計算 X 、 Y :

$$X = \cos E - e$$

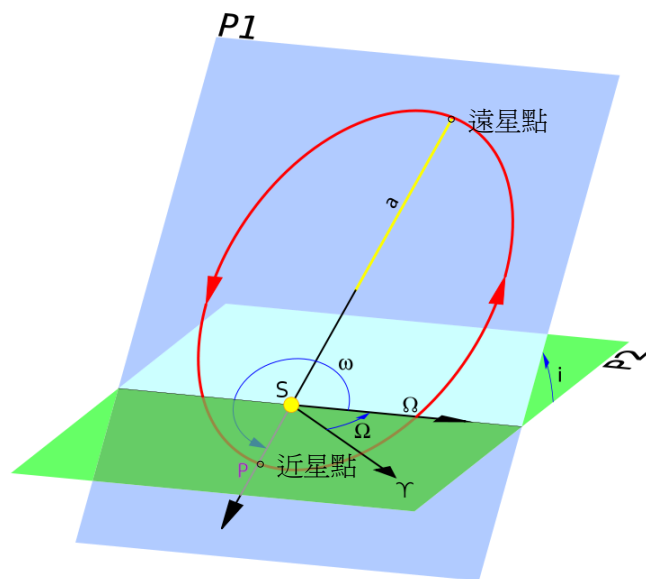
$$Y = (1 - e^2)^{1/2} \sin E$$

則觀測座標 (x, y) 與 (X, Y) 、Thiele-Innes 要素 A 、 B 、 F 、 G 之關係如下:

$$x = AX + FY$$

$$y = BX + GY$$

將不同時間各點連起來即為雙星之軌道，而藉由雙星軌道導出之伴星相對於主星之座標 (x, y) ，稱為理論算出之座標 (x_c, y_c) 可以與實際觀測之座標比對，檢驗雙星軌道參數之品質。



附錄二：IDL 的程式碼

(1)快速傅立葉轉換

```
pro FFTproject
```

```
;利用快速傅立葉轉換分析出兩顆星的相對位置與圖片上的距離
```

```
ERASE
```

```
img0=fltarr(200,200)
```

```
img0=0
```

```
sum=img0
```

```
;----- fft all -----
```

```
for nn=1,161 do begin
```

```
ni=string(nn)
```

```
figPath='D:\speckle\dark\hip97165-1\'
```

```
if nn le 9 and nn ge 0 then name = strcompress('HIP97165_60_' +ni+'.bmp',  
/REMOVE_ALL)
```

```
if nn le 99 and nn ge 10 then name = strcompress('HIP97165_60_' +ni+'.bmp',  
/REMOVE_ALL)
```

```
if ni le 999 and ni ge 100 then name = strcompress('HIP97165_60_' +ni+'.bmp',  
/REMOVE_ALL)
```

```
file = figPath + name
```

```
z = READ_BMP(file,R,G,B,ihdr,/RGB)
```

```
img=fltarr(200,200)
```

```
for i=0,199 do begin
```

```
for j=0,199 do begin
```

```
ix=400 + i
```

```
iy=250 + j
```

```
imag=z(ix,iy)
```

```
img(i,j)=z(ix,iy)
```

```
endfor
```

```
endfor
```

```

f = shift(FFT(img),100,100)
ff=ABS(f)
sum= ff(*,*) + sum

endfor
;----- fft inverse -----
fsum = shift( FFT(sum) ,100,100)
afsum = ABS (fsum)
;----- write fit -----
figPath01 = 'D:\speckle\dark\hip97165-1\'
writefits,figPath01 + 'hip97165_s_sum.fits' , sum ; sum of all pic fft
writefits,figPath01 + 'hip97165_s_result.fits' , afsum ; final

print, '-----ok-----'
end

```


(2)tracking 疊圖

pro combine_plus_tracking

ERASE

```
z=fltarr(1024,768)
z=0
;----- + all -----
for nn=16,105 do begin
  ni=string(nn)
  figPath='D:\speckle\dark\hip95947_t\'

  if nn le 9 and nn ge 0 then name = strcompress('HIP95947_t'+ni+'.bmp',
/REMOVE_ALL)
  if nn le 99 and nn ge 10 then name = strcompress('HIP95947_t'+ni+'.bmp',
/REMOVE_ALL)
  if nn le 999 and nn ge 100 then name = strcompress('HIP95947_t'+ni+'.bmp',
/REMOVE_ALL)

  file = figPath + name
  v = READ_BMP(file,R,G,B,ihdr,/RGB)

  r=fltarr(1024,768)
  r=v
  for i=0,1023 do begin
    for j=0,767 do begin

      ix=0 + i
      iy=0 + j

      if r(ix,iy) le 30 then r(ix,iy)=0

    endfor
  endfor

  z=z+r

endfor
```

```

print, '-----combine-ok-----'

nox=1024
noy=768
image=fltarr(nox, noy)
image=z

ims=60

in=0
for i=0, nox-1 do begin
for j=0, noy-1 do begin
if image(i, j) gt ims then in=in+1
endfor
endfor

x=fltarr(in)
y=fltarr(in)

im=0
for i=0, nox-1 do begin
  for j=0, noy-1 do begin
    if image(i, j) gt ims then begin
      x(im)=i
      y(im)=j
      im=im+1
    endif
  endfor
endfor
Xx=TRANSPOSE(x)
result = REGRESS(Xx , y , SIGMA=sigma, CONST=const, MEASURE_ERRORS=measure_errors)

xc=fltarr(2)
yc=fltarr(2)

xc(0)=0
yc(0)=result*xc(0) + const
xc(1)=nox-1
yc(1)=result*xc(1) + const

```

```

print, result
print, const
print, sigma

set_plot, 'ps'
device, filename='D:\speckle\dark\hip95947_t\tracking_hip95947.ps', /color

plot, x, y, xrange=[0, nox], yrange=[0, noy], psym=3, /isotropic, xstyle=1, ystyle=1, $
title='hip95947 - tracking', xtitle='pixel', ytitle='pixel', charsize=2
oplot, xc, yc, linestyle=0
legend, ['y=-0.2043x+498.645'], charsize=1, /left

print, '-----ok-----'
device, /close
end

```

(3)雙星軌道作圖

pro orbit_OC_hip97165

```
; This program plot the orbit of a binary known the elements of the orbit, and (O-C)
; Campbell geometric elements
; i inclination
; Omega position angle of the node
; omega angle between the node and periastron
; Dynamical elements
; P the period in years
; N mean motion in degree/year, 360°/P
; T time of periastron passage
; e eccentricity
; a semi-major axis
; E eccentric anomaly

; From WDS
; Castor i=151.04, Omega=91.36, omega =120.21
; P=780.27,T=1880.00, e=0.467,a=3.00

close,1

radeg = !pi/180.

i_orbit = radeg*151.04d ; inclination
ome_big = radeg*91.36d ; osition angle of the node
ome_lit = radeg*120.21d ; angle between the node and periastron
P =780.27d ; period in years
; N = ; mean motion in degree/year, 360degree/P
T =1880.00d ; time of periastron passage in years
ecc =0.467d ; eccentricity
a =3.00d ; semi-major axis in arc of seconds

Aa= a*( cos(ome_lit)*cos(ome_big) - sin(ome_lit)*sin(ome_big)*cos(i_orbit))

Bb= a*( cos(ome_lit)*sin(ome_big) + sin(ome_lit)*cos(ome_big)*cos(i_orbit))

Ff= a*(-sin(ome_lit)*cos(ome_big) - cos(ome_lit)*sin(ome_big)*cos(i_orbit))
```

```

Gg= a*(-sin(ome_lit)*sin(ome_big) + cos(ome_lit)*cos(ome_big)*cos(i_orbit))

openr,1,"C:\Documents and Settings\hsnu\桌面\hip97165-inter4rd-3.txt"

ab=" "
readf,1,format= '(a1000)',ab

time=0.0
theta=0.0
rho=0.0

xCastor=dblarr(12)
yCastor=dblarr(12)
xC=dblarr(12)
yC=dblarr(12)

xour=dblarr(1)
your=dblarr(1)

in = 0

WHILE (not eof(1)) DO BEGIN
  readf,1,format=' (2x,f9.4,3x,f5.1,12x,f5.3)',time,theta,rho

  xCastor(in)=rho*cos(radeg*theta)
  yCastor(in)=rho*sin(radeg*theta)

  if in eq 11 then begin
    xour(0)=xCastor(in)
    your(0)=yCastor(in)
  endif

; calculate the theoretic position for observational time
  ke=2.*!pi*(time-T)/P
  ee=!pi/2

for ie=0, 10 do begin

```

```

N= ee-ecc*sin(ee)

if N ge ke then begin
    ee=ee-!pi/2.^(ie+1)
endif else begin
    ee=ee+!pi/2.^(ie+1)
endelse
endfor
Xxc=cos(ee)-ecc
Yyc=sqrt(1.0-ecc^2)*sin(ee)
xc(in) = Aa*Xxc + Ff*Yyc
yc(in) = Bb*Xxc + Gg*Yyc
in=in+1
endwhile
E_anomal=fltarr(361)
Xx=fltarr(361)
Yy=fltarr(361)
x=fltarr(361)
y=fltarr(361)
For i = 0, 360 do begin
    E_anomal(i)=(0.+i)*radeg
    Xx(i) = cos(E_anomal(i))-ecc
    Yy(i) = sqrt(1.0-ecc*ecc)*sin(E_anomal(i))
    x(i) = Aa*Xx(i) + Ff*Yy(i)
    y(i) = Bb*Xx(i) + Gg*Yy(i)
endfor
x0=fltarr(1)
y0=fltarr(1)
x0(0)=0.0
y0(0)=0.0

; plot the orbit of binary

!p.multi=[0,1,1]

set_plot, 'ps'
device, filename='C:\Documents and Settings\hsnu\桌面\orbit_hip97165.ps', /color

TVLCT, [0,255,0,0], [0,0,255,0], [0,0,0,255] ; black, blue(or red), green, red(or

```

blue)

B = FINDGEN(17) * (!PI*2/16.) ;Make a vector of 16 points, $B[i] = 2\pi/16$.
USERSYM, COS(B), SIN(B), /fill ;Define the symbol to be a unit circle with 16 points.
Set the filled flag.

plot,x,y,noclip=0,linestyle=0,title="The orbit of HIP
97165",xtitle="x",ytitle="y",xrange=[-4,2],/xstyle,yrange=[-2.5,3.5],
/ystyle,/isotropic, color=0
oplot,x0,y0,psym=1,symsize=1, color=0

oplot,xc, yc,psym=8,symsize=0.2, color=0
oplot,xCastor,yCastor,psym=8,symsize=0.1, color=3
oplot,xour,your,psym=8,symsize=0.3, color=1

for i=0, 11 do begin
 oplot,[xc(i),xCastor(i)], [yc(i),yCastor(i)]
endfor

; plot enlarge orbit of Castor

plot,x,y,noclip=0,linestyle=0,title="The orbit of HIP 97165 -
part",xtitle="x",ytitle="y",xrange=[-2.2,-1.5],/xstyle,yrange=[-2,-1.5],
/ystyle,/isotropic, color=0

oplot,xc, yc,psym=8,symsize=0.2, color=0
oplot,xCastor,yCastor,psym=8,symsize=0.5, color=3
oplot,xour,your,psym=8,symsize=0.8, color=1

for i=0, 11 do begin
 oplot,[xc(i),xCastor(i)], [yc(i),yCastor(i)]
endfor

print," ok"
device,/close
close,1
end

【評語】 040503

能利用簡單的儀器，運用散斑干涉的原理，觀測雙星的行蹤。但設計研究流程應注重其正確性及清楚了解原理，且有參考資料或引用照片，須標示出處或列入參考資料。