

「中美掩星計畫」的掩星偵測和星場選擇

黃裕仁、陳文屏、張智威

國立中央大學天文研究所

摘要

中美掩星計畫 (Taiwan-America Occultation Survey; 簡稱 TAOS) 的目的在統計古柏帶天體的數量與空間分佈。TAOS 並不對古柏帶天體進行直接成像觀測，而是利用它們遮掩遠方背景恆星時，造成背景恆星光度衰減，藉此原理以統計方法來估計古柏帶天體的數量。

TAOS 之電子相機利用特殊讀取方式，可以取得達數赫茲的快速光度資料，並藉由多台望遠鏡觀測提高事件偵測可信度。本研究以 TAOS 影像參數，利用 MATLAB 套裝程式撰寫影像模擬程式。一方面幫助瞭解 TAOS 特殊取樣影像的特性，有助於開發光度分析程式；另一方面藉由模擬掩星事件，評估利用無母數排序統計方法來偵測掩星事件的可行性。模擬程式的另個應用，在於估計星體光度受到鄰近星干擾的程度。我們引入「掩星偵測值」參數，量化某星體被排序法偵測到掩星的機率。藉由比較各星場中整體「掩星偵測值」的大小，便可以評估適合 TAOS 監測的星場，提高掩星事件的偵測率。

Occultation Detection and Field Selection for the TAOS Project

Huang Yu-Jen, Chen Wen-Ping, Zhang Zhi-Wei

Institute of Astronomy, National Central University

Abstract

The Taiwan-America Occultation Survey (TAOS) aims to conduct a census of the Kuiper-belt objects (KBOs). Rather than direct imaging, the TAOS project monitors stellar light curves for chance stellar occultation by KBOs.

Stellar occultation events by KBOs are expected to be extremely rare and each event would last in less than a second. The TAOS project makes use of a special CCD readout scheme to achieve stellar photometry sampled at a few hertz, and requires coincidence detection by multiple telescopes to accredit an event. We report our effort to develop an image acquisition simulator program, written with MATLAB, which provides useful guidance for photometry pipelines, and for analysis of multiple-telescope data by nonparametric rank statistics. A specific application of our simulator is target field selection. We parameterize for each star field a "detectability" --- the likelihood number of occultation events detectable given the stellar distribution in a field --- with which one target field can be prioritized against another.

關鍵字 (Keyword)：太陽系 (Solar System)、古柏帶天體 (Kuiper-belt Objects)、觀測技術 (Observational Technique)、統計分析 (Statistical Analysis)

1. 古柏帶天體

1950 年代古柏 (Kuiper) 以及艾吉沃斯 (Edgeworth) 經由對短週期彗星的軌道觀測，及研究太陽系從木星到海王星之外的質量分佈 (圖 1)，認為在海王星的之外或許有呈盤狀分佈的小天體存在。這些小天體在太陽系剛形成時即存在該處，且有可能在受到其他天體 (如恆星，行星等) 掠過時所產生的引力擾動影響，改變了軌道方向，而使這些小天體進入太陽系內部。當這些小天體接近太陽時，其表面的物質受到了太陽輻射及帶電粒子的作用，便形成彗星。這樣一個類似彗星儲存庫的區域我們稱之為古柏帶 (Kuiper Belt; 圖 2)，而存在此儲存庫中的天體，我們就稱之為古柏帶天體 (Kuiper-belt Object) 或簡稱 KBO。這幾年古柏帶天體成為熱門研究課題，因為這些原始的小型天體如化石般保留了太陽系形成與早期演化的紀錄 (Jewitt 1999; Lu & Jewitt 2002)。

2. 中美掩星計畫

由於 KBO 距離太陽遙遠、且體積小、反射率低，因而光度黯淡，故欲藉由直接觀測古柏帶天體，來統計它們的數量實屬困難。目前發現近千個 KBO 皆屬體積較大者，直徑超過數十公里 (EKBO Newsletter)。至於直徑更小者，雖然各種理論皆認為數量較多，但即使以目前最大的望遠鏡也無法觀測到它們微弱的反光。中美掩星計畫 (Taiwan-America Occultation Survey; TAOS) 利用 KBO 遮蔽遠方背景恆星時所產生的光度變化，而非直接觀測的原理來估計古柏帶天體的數量 (Alcock et al. 2002)。

參與 TAOS 計畫的單位包括國內中央大學、中央研究院以及美國利物摩國家實驗室、賓州大學、哈佛史密松天文

物理中心、NASA、柏克萊大學和韓國延世大學等，使用總共四座直徑 50 公分，有效視野三平方度的廣視野望遠鏡，監測視野中約 2000-3000 顆星體 (King 2001)，利用遠方天體掩過背景恆星時，背景星光度發生衰減的原理 (圖 3)，來偵測小至數公里大小的古柏帶天

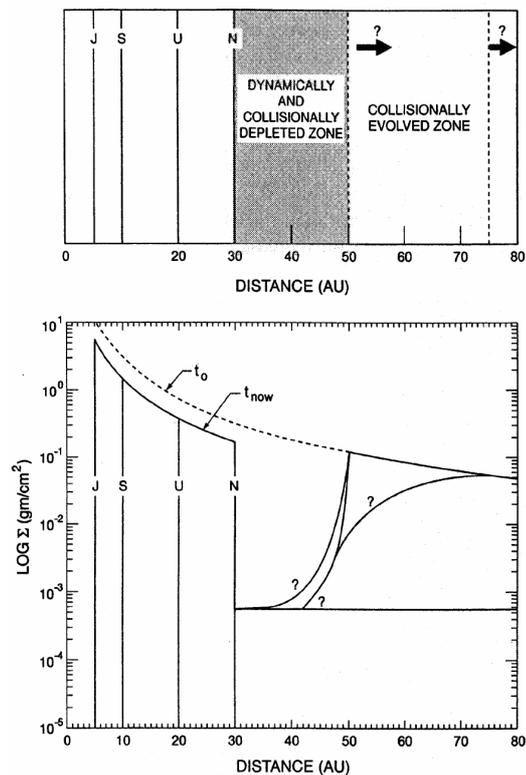


圖 1：太陽系的質量密度分佈 (Stern 1996)。橫軸為與太陽的距離，縱軸為對數尺度的質量柱密度。可以看出密度隨著距離增加而遞減。J、S、U、N 分別標示木星、土星、天王星，以及海王星。問號所標示的區域受到海王星擾動，質量大幅減少，但是不同理論模型對質量密度的變化有不同估計。

圖 2：古柏帶相對位置及分佈示意圖。據估計古柏帶天體的分佈自海王星軌道 (30 個天文單位) 起，可能延伸至 1000 個天文單位 (Stern 2003)。

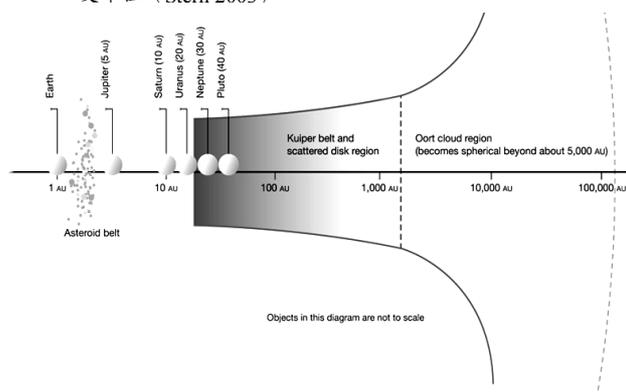
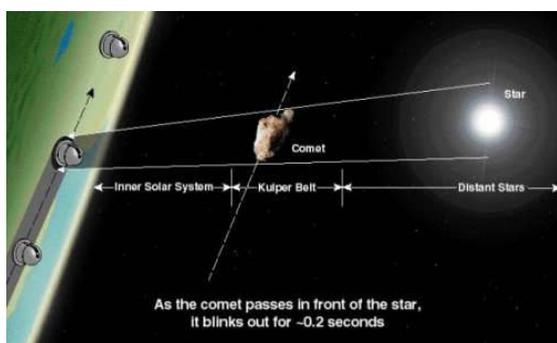


圖 3：當古柏帶天體遮掩遠方背景恆星時，望遠鏡記錄到背景恆星亮度衰減。這些掩星事件發生的機率可以讓我們估計古柏帶天體的數量 (<http://www.astro.ncu.edu.tw/contents/research/taos>)。



體，並統計其數量 (Chen et al. 2003)。

TAOS 採用美國 Torus 公司所製造的望遠鏡，主鏡口徑 50 公分，焦比 2，配備 Spectral Instruments 公司製造的 CCD 相機 SI-800，量子效率為 85% (Alock 2002)。截至 2004 年 6 月為止，TAOS 計畫目前已成功在中央大學鹿林天文台完成了四座遮罩的設置，以及完成安裝三台望遠鏡 (圖 4)。

3. 拉鍊模式影像及影像模擬程式

數公里大小的古柏帶天體通過遠方背景恆

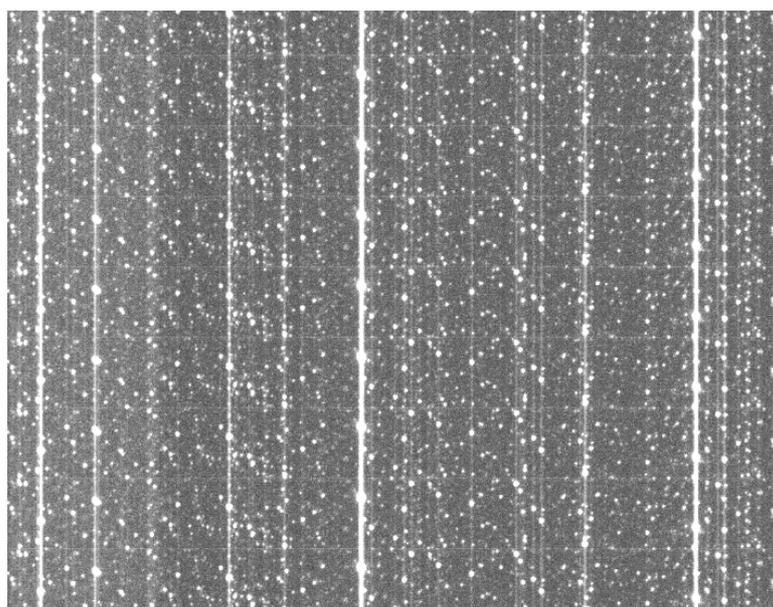


圖 5：拉鍊模式影像。藉由不斷的停留-位移-讀出程序，快速讀取影像資料。由於在過程中，快門都是開啓的，因此星體產生了如拉鍊般、由亮紋連接的成串亮點，所以稱此影像為拉鍊模式影像。這也造成在天空中位置並非相鄰的星體，卻因為拉鍊成像模式成為相鄰的影像。



圖 4：TAOS 一號、二號望遠鏡遮罩(上)，以及架設中的 TAOS 四號遮罩 (下)。

星小於 0.5 秒 (Liang et al. 2002)。為了能夠記錄下掩星事件所發生的光度衰減，光度資料取樣的速度也起碼必須這麼快。為了快速讀取

CCD 測光資料，TAOS 捨棄了讀取影像時需耗費大量時間的注視模式 (stare-mode)，而改採能夠快速收集光度資料的拉鍊模式 (zipper-mode) 來拍攝影像資料。一般影像拍攝乃將快門打開收集光子，而當曝光結束後一次將電子訊號讀出，曝光期間由於望遠鏡維持追蹤，故星體保持點狀。TAOS 取樣的方式則並非一次讀出全部電子，而採取一次只讀出幾行像元，而每次讀出之間則停止一段相當於曝光

的時間，依此持續「停留」、「位移」、「讀出」。由於快門一直維持開啓，即使在快速位移、讀出時仍持續曝光，因此每顆星體呈現串狀星點，以條狀亮紋連接，有如拉鍊般，故以名之，如圖 5 所示。目前 TAOS 的 CCD 相機控制可達小於 0.2 秒的取樣時間，也就是可以偵測到大小只有 1~2 公里的古柏帶天體所造成的掩星事件。

為了對偵測掩星事件以及星場選擇作更多的分析和估計，我們採用 TAOS 影像的相關參數產生模擬影像（如背景雜訊、影像飄移等，陳睿甫 2002），藉以配合實地拍攝的影像，有效探討拉鍊模式影像中，星體之間幾何分佈、光度變化，以及鄰近星干擾所造成的影響，並且模擬不同光度衰減量的掩星事件，以評估不同恆星發生不同程度掩星事件的可偵測率。

4. 以排序法偵測掩星

在只有一台望遠鏡觀測的情況之下，若是光度衰減時間持續很久，縱使其光度衰減量不大，我們也可以很清楚的指證其確實是個掩星事件。如圖 6 所示即為 TAOS 成功觀測到小行星 Nemausa 於 2004 年 2 月 21 日發生的掩星事件。圖中橫軸代表時間，縱軸則為儀器星等(向

上亮度增加)。可以看出背景恆星的亮度從 8 等降至約 11.5 等（只剩小行星的亮度），然後約 6.5 秒後，掩星結束，亮度再度恢復。

由於 TAOS 相機的取樣時間約等於 KBO 天體通過背景恆星發生光度衰減事件的最短時間，因此若有 KBO 掩星事件發生，只會在光度資料中出現單一個數值點的衰減。若只有一台望遠鏡的資料，我們無法確認此光度衰減來自於該星體，或是大氣、儀器等其他未知因素。故此 TAOS 計畫利用多台望遠鏡來記錄掩星事件。藉由不同望遠鏡監測相同星場，若同時偵測到某掩星事件，便能增加偵測的可信度。

為了檢測掩星事件，我們採用無母數排序統計法來分析光度資料，並判斷掩星事件（Siegel & Castellin 1988; Rice 1995）。利用排序法，我們不必求得非常準確的光度資料數值，而只需求得各數值點在該光度資料中的排序大小，因此大幅提高資料分析的效率（Liang et al., 2002）。假設四台望遠鏡皆同時觀測到了某光度衰減事件，則任一望遠鏡資料皆應有比其他資料點更低的排序值（將光度資料由小至大排列順序，越小的數值得到越小的排序值）。若光度衰減夠大（排序值越小），四組排序值相乘的結果會遠小於其它資料的排序乘積值。若此排序

乘積值所發生的機率小於某個設定的門檻標準，則我們便可以說其為可能之掩星事件。

由於真實光度資料有可能因為氣候、儀器，或天光背景（例如月光）的因素，導致光度緩慢變化而影響到排序結果，因此我們不以全部資料來排序，而只取某個範圍內的資料點作排序，在此特定範圍內的數值不會受到外在因素而緩慢改變的影響。我

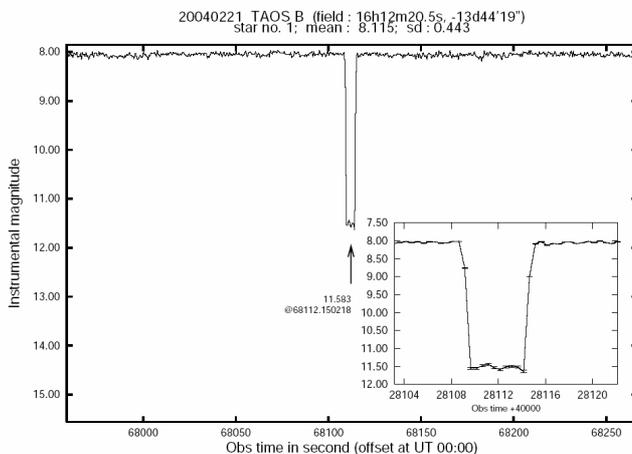


圖 6：2004 年 2 月 21 日，由 TAOS 一號望遠鏡記錄下 Nemausa 小行星通過遠方恆星前方所產生的光度衰減。因為光度衰減事件持續時間夠長，我們可以很清楚確定其為掩星事件（陳文屏 等 2005）。

們稱這樣的排序方法為飄移視窗 (running window) 排序法。表一舉例說明以飄移視窗法進行排序統計。

表 1: 在一組共六個點的光度序列中 (A、B、...F)，若將數值從小到大作排序，則其排序值如 Rank 列中所示。若我們選取 3 個光度資料點作為排序範圍，也就是第一個「視窗」(Window 1) 僅對編號第 A~C 的光度資料作排序，並選取 A 的排序值(網底所示)當排序資料，接著在下一個過程中，「視窗」移動了一個光度資料點的距離，對編號 B~D 的光度資料作排序，並選取 B 的排序值(網底所示)當排序資料...以此類推至「視窗」皆對光度資料中的數值分析過為止。這樣的一個排序方法我們稱之為「飄移視窗排序法」。

	A	B	C	D	E	F
Overall Ranking	6	5	2	4	3	1
Window 1	3	2	1			
Window 2		3	1	2		
Window 3			1	3	2	
Window 4				3	2	1

我們利用統計量 Z_w 來表示四組「飄移視窗」所收集的排序資料：

$$Z_w = \log_{10}(S^4) - \log_{10}\left(\prod_{i=1}^4 W_i\right) \quad (1)$$

式 (1) 中 W 為第 i 個「視窗」所收集排序值， S 則為「視窗」大小。藉由迦瑪機率分佈計算式 (1) 中的統計量，即可知道「飄移視窗排序法」不同排序乘積值隨機發生的機率。

4.1 門檻機率

由於 TAOS 星場中有約 3000 顆恆星可供監測，且每 0.2 秒產生一筆光度資料。若一年當中有 10% 的時間可供觀測，那麼一年約可產生 $(3,000 \text{ stars}) \times (10\% \times 3 \times 10^7 \text{ sec}) / (0.2 \text{ sec}) \approx 10^{11}$ 個光度資料點 (King 2001)。在這些光度資料點中，假設可以觀測到約 400 次的 KBO 掩星事件 (King 2001)，因此對每個光度資料點而言，偵測到 KBO 掩星事件的機率約是 4×10^{-9} 。實作時，我們可以設定某個門檻機率 (例如 10^{-11})，若在排序乘積分佈曲線中，出現了低於門檻機率的事件，則我們便有較高信賴水準相信此排序乘積值是因為掩星事件所產生。

4.2 排序法的應用

我們利用影像模擬程式產生如圖 7 的四組光度資料，並在此光度資料中人為產生一個 4 倍標準差的光度衰減(掩星)事件(三角形標示之處，由於訊噪比不夠，從光度變化無法明顯看出掩星事件)。

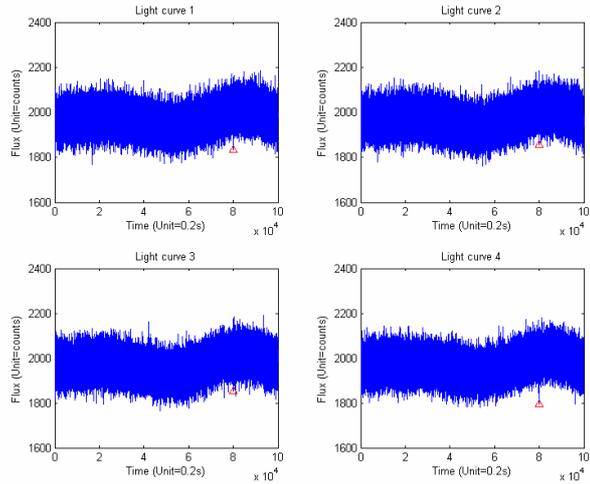


圖 7：模擬四組 100,000 筆平均光度有上下起伏的光度資料，在每組資料的第 80,000 個時間點皆產生一個 4 倍標準差(移除光度起伏後的光度變化標準差)的光度衰減事件(三角形標示之處)。

我們選擇「視窗」大小為 1000 的飄移視窗排序法，對圖 7 的光度資料作排序分析。1000 個光度資料點相當於 200 秒內所產生的光度資料。在此「視窗」中隨機排序，各點皆排到 1 (最小值) 的機率為 10^{-12} ，已經小於門檻機率，只要有任意 Z_w 值出現的機率落在 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 之間，我們皆可懷疑其可能為掩星事件。如果掩

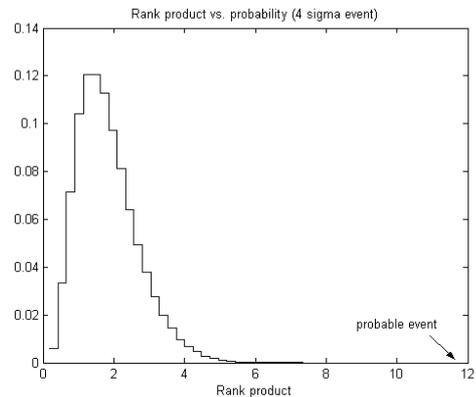


圖 8：利用「飄移視窗」排序方法偵測掩星所繪出的排序乘積機率分佈圖。圖中最右側的事件發生的機率約為 3×10^{-12} 。

星事件發生的機率為 3×10^{-12} (如圖 8)，已經接近我們定義的門檻值，所以判定其為可能的掩星事件。

我們對「飄移視窗」排序法作掩星事件可偵測率的模擬分析，發現在約 2.7 倍標準差的光度衰減時，掩星的可偵測率接近 100% (圖 9)。這表示某顆星若其亮度為背景擾動 (包含天空及鄰近星) 2.7 倍以上，該星便適於 TAOS 監測的目標星。

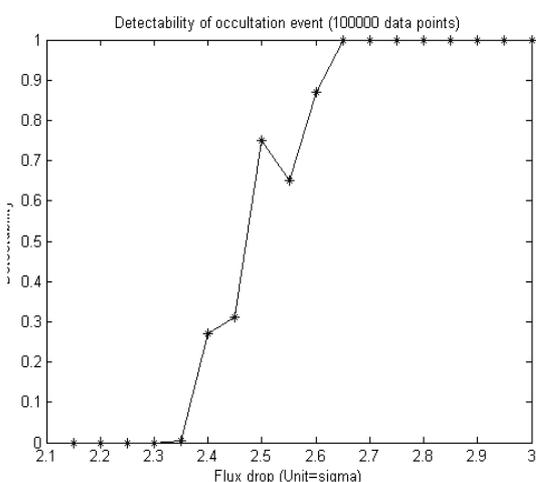


圖 9：模擬 10 萬筆光度資料，並產生從 2.1 倍標準差到 3 倍標準差的光度衰減，並對其作「飄移視窗」法排序分析的結果，發現若是光度衰減在 2.7 倍標準差以上時，可偵測率已接近 100%。模擬時增加 0.05 倍的光度變化便產生 30 次光度資料，利用每 4×10^9 當作門檻機率來檢測掩星事件的可偵測率。

5. TAOS 的星場選擇

由於 TAOS 是個統計實驗，因此選擇有效的樣本——也就是適當的星場來監測掩星事件——極為重要。因為每顆星發生掩星的機率相同，故監測的星場中有越多可供觀測的星體，偵測到掩星的機率越高。不過相反的，過於擁擠的星場卻也因為鄰近星的干擾，增加了星體光度雜訊，反而降低了掩星被偵測的機會。值得注意的是，由於 TAOS 特殊資料讀取方式 (請參見第 3 節)，鄰近星可能來自天空不同部分，

在不同時間曝光，卻由於拉鍊模式而造成影像相鄰。我們結合模擬程式以及光度排序法，來判斷影像中可用來有效偵測掩星的星球個數多寡，依此作為星場選擇的依據。

假設掩星事件發生時，星體光度衰減至零，則此顆星的最大衰減量即為該顆星在未受到假鄰近星干擾下的平均光度 F 。受到了 (假) 鄰近星干擾後，該星所量測的光度 F' ，除了來自該星體本身外，還有來自於鄰近星所貢獻的光度，後者並不會因該星發生掩星而有衰減。依此觀念，我們把星體在同樣曝光時間下，注視模式的平均光度 F 除以星體在拉鍊模式下，受到鄰近星干擾後的光度變化標準差 σ' 來表示該顆星的「掩星偵測值」 (Detectability; D)，也就是

$$\text{掩星偵測值 } D = \frac{F}{\sigma'} \quad (2)$$

前面提到利用「飄移視窗排序法」，能偵測到星體發生了 2.7 倍標準差以上的光度衰減。也就是說，若 $D > 2.7$ ，則該星體發生了掩星事件便可被偵測到；反之，若 $D < 2.7$ ，則縱使該顆星光度衰減至 0 (完全掩星)，我們仍無法有把握偵測到該掩星事件。在 TAOS 望遠鏡三平方度的視野內 $D > 2.7$ 的星體總個數，便是判斷該星場作為 TAOS 星場的有效指標。

依此原理，我們選取不同星場來分析其總掩星偵測率。此處以 C33 (圖 10) 和 C52 (圖 11) 兩星場為例，在拉鍊模式、曝光時間 0.12 秒的情況下，C33 的星場中共有 1,179 顆星亮於 13.8 等，C52 星場則有 1,527 顆。利用影像模擬程式求得兩個星場中每顆星在 TAOS 拉鍊影像中的「掩星偵測值」 (圖 12、圖 13)。結果 C33 有 492 顆星，C52 則有 541 顆星其「掩星偵測值」大於 2.7，故 C52 星場比較適合作為 TAOS 監測星場。C52 星場的總星體個數雖然比 C33

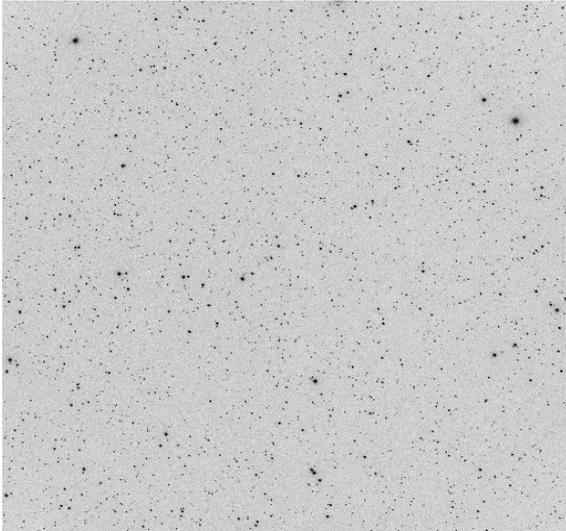


圖 10：C33 星場注視模式影像。(左)

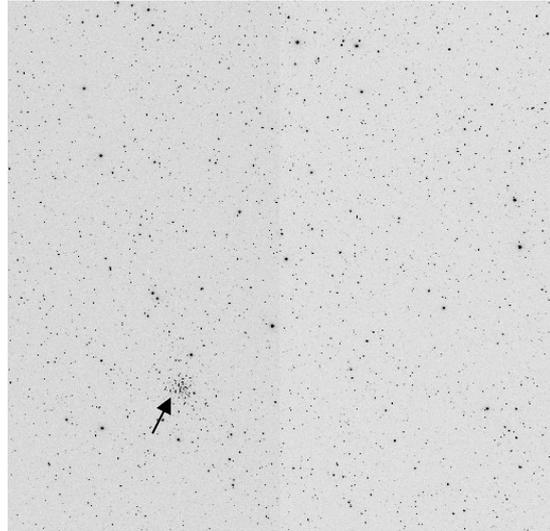


圖 11：C52 星場注視模式影像。箭頭所指處為一個星團。(右)

多了近 30%，但是滿足掩星偵測門檻值的星體個數卻只多了 10%，這是因為 C52 星場中有個星團（圖 11），增加了鄰近星干擾的效應。

6. 結論

TAOS 計畫提供了目前唯一偵測及統計數公里大小等級的古柏帶天體的方法。其所發展出來特殊之拉鍊成像方式雖然能快速讀出影像資料，並利於對影像資料作即時分析以偵測掩星事件，不過也造成天空背景過高，以及很多鄰近星干擾，並導致掩星偵測率降低。我們開發出 TAOS 影像模擬程式，以便評估利用排序法偵測掩星事件的可行性，得出在四台望遠鏡同步觀測的狀況下，利用「飄移視窗排序法」，可以有效檢測出大於 2.7 倍標準差的光度衰減。另外我們提出「掩星偵測值」的概念，計算每顆星在 TAOS 資料中，受到程度不等的鄰近星干擾後，仍然能夠被排序法偵測到掩星的條件。依此原理，我們可以量化某星場是否適合作為 TAOS 監測星場。一般來說，星場中滿足「掩星偵測值」的總星體數量越多，該星場越容易偵測到掩星事件。

TAOS 計畫預計於 2004 年 9 月以 3 台望遠

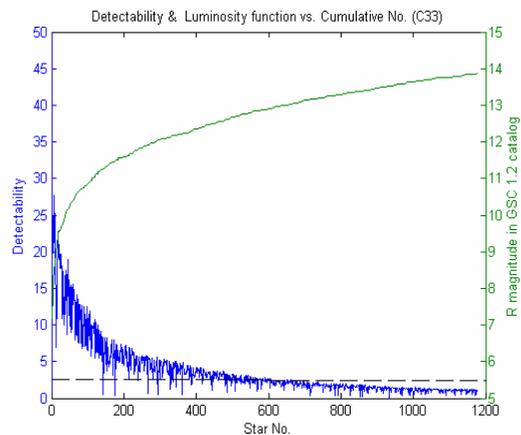


圖 12：C33 星場掩星偵測值和光度函數關係圖。X 軸為由亮至暗排列之星體編號，Y1 軸（左）為掩星偵測值 (D)，Y2 軸（右）為 GSC 1.2 星表中的紅星等。平滑實線表示光度函數，折線為每顆星「掩星偵測值」的大小。虛線則標示出 $D=2.7$ 。此星場中共有 492 顆星 $D>2.7$ ，也就是這些星可被排序法有效偵測到掩星事件。

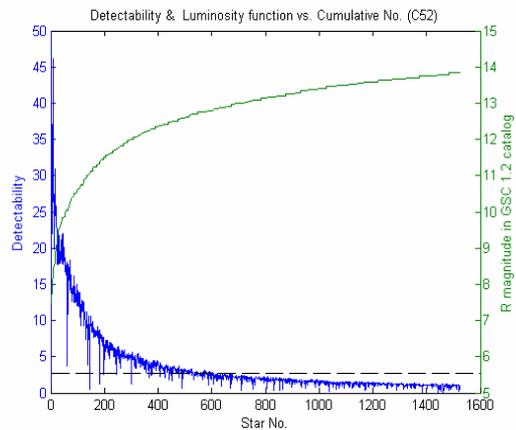


圖 13：同圖 12，在 C52 星場有 541 顆星體 $D>2.7$ 。

鏡同步觀測，並進一步在半年內完成第 4 台望遠鏡架設，開始統計古柏帶天體的數量。除了初期對黃道面附近星場當作觀測目標外，我們並將對黃道面上、下範圍內的星場進行觀測，以期在數量以外，還獲得古柏帶天體空間的分佈。本研究所提供的模擬程式與掩星偵測方法將能實際應用在星場的選擇。

參考文獻

陳睿甫, 2002, *中美掩星計畫的光度資料分析*, 中央大學碩士論文

陳文屏 等, 1999, *科學發展*, 27, 38

陳文屏 等, 2005, *科學發展*, 編印中

Alcock, C., et al., 2002, *AAS*, 201, 4508

Chen, W. P., Zhang, Z. W., et al., 2003, *Baltic Astronomy*, 12, 568

Edgeworth-Kuiper Belt Objects (EKBO) Electronic Newsletter
(<http://www.boulder.swri.edu/eknonews/>)

Jewitt, D. C., 1999, *Ann. Rev. Earth Plant. Sci.*, 27, 287

King, S. K., 2001, in *Small-Telescope Astronomy on Global Scales*, ed. W. P. Chen, C. Lemme, & B. Paczyński, ASP Conf Series, 246, 253

Luu, J. X. & Jewitt, D. C., 2002, *A&A*, 63, 101

Liang, C. L., Rice, J. A., et al., 2002, *ApJ*, 0209509

Rice, J. A., 1995, *Mathematical Statistics and Data Analysis*, Second Edition, Wadsworth Publishing Company

Siegel, S. & Castellan, N. J. Jr., 1988, *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences* (McGraw-Hill)

Stern, S. A., 1996, *AJ*, 112, 1203

Stern, S. A., 2003, *Nature*, 424, 639, 642