

小行星觀測

主講、審校/ 陳文屏教授
整理/ 蔡穎仁

小行星是什麼？如何觀測小行星？有那些研究可以做？這裡介紹如何利用掩星估計小行星的大小，監測小行星亮度變化可以獲得哪些資訊。

何謂小行星？

小行星分佈在整個太陽系當中(圖1)，其中絕大多數集中在火星與木星軌道之間，這個區域稱為「小行星帶」。有些特殊小行星與木星軌道相同，位於木星前後與太陽成60度夾角之處，位在所謂的拉格朗基點上，這些稱為「特洛伊小行星」。最大的小行星為「穀神星」，直徑略小於一千公里，被歸類於「矮行星」。目前偵測到最小的行星為軌道行經地球附近的「近地小行星」，大小只有幾百公尺。除了軌道以外，小行星也可以光譜來分類，例如C（碳）、S（矽）與M（金屬）類型。目前已知小行星超過幾十萬顆，分佈在上述寬廣的空間中，全部加起來的質量只有月球的百分之四；事實上小行星的分佈很稀疏，所以外行星探測太空船能順利通過小行星帶。

小行星帶中存在「柯克伍德縫隙」(圖2)，在這些區域的天體其軌道周期與木星軌道周期成簡單整數比，受到木星引力持續影響而成為橢圓軌道，或是遠離黃道面，容易受到進一步擾動而被散射掉，造成該區域缺乏小行星。可以把小行星想像成是沒有成形的行星，一般相信是因為受到木星引力的影響。有些則是小行星彼此撞擊而散開。小行星的公轉方向大都與八大行星及矮行星相同，這符合太陽系形成的星雲學說，認為太陽系天體皆源於一團旋轉的分子雲。

觀測天體時，天體之張角 θ 大小，與天體實際大小（直徑） d ，以及觀測者與天體之間的距離 r 有關： $\theta = d/r$ ，這裡的張角單位是弧度 (radian)。由於投影面積愈小，視角愈小，所以某天體離觀測者愈遠，其視角愈小。天文觀測常用的角度單位為角度、角分、角秒。一角秒為一度的3600分之一，是個很小的張角，在三角形中，一角秒的對邊只有邊長的約20萬分之一，相當於在五公里之外，一個十元硬幣的張角。太陽系天體之視直徑，太陽為32'、月球約30'，兩者都約半度，也就是伸直手臂，大約半根食指的寬度。行星就小得多，例如金星約0.56'、木星0.68'、土星0.3'，火星則差不多是0.17'。

小行星當中，體積最大，也是第一個發現的小行星為「穀神星」(Ceres)，於1801年發現，直徑為960公里，已於2006年8月24日升級為矮行星，與冥王星及閼神星 (Eris) 成為同類；而體積小的小

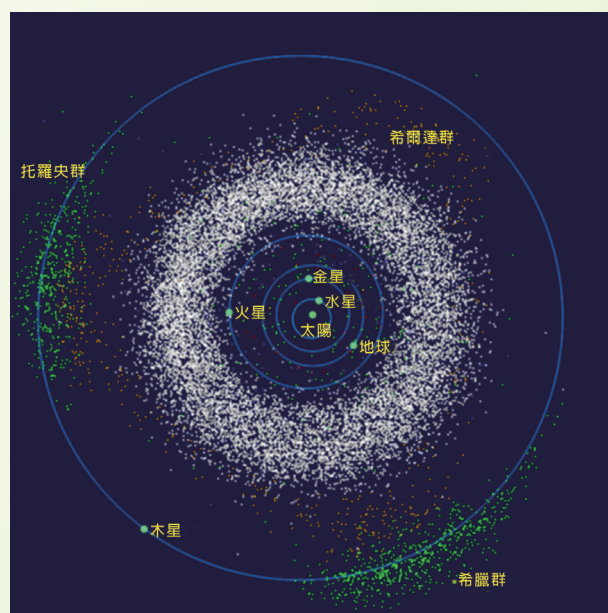


圖1. 小行星分佈示意圖。絕大多數小行星集中於小行星帶中。本圖取自 <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/InnerSolarSystem-en.png>

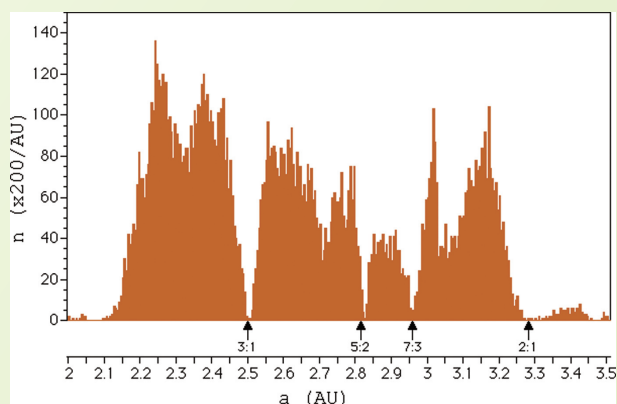


圖2. 小行星帶中有些區域明顯缺乏小行星，稱為「柯克伍德縫隙」。圖中所示為小行星個數密度隨離太陽距離的分佈。縫隙所在處為與木星軌道共振的區域，該區域的軌道週期與木星軌道週期成簡單整數比，如圖中標示之3：1, 5：2等。

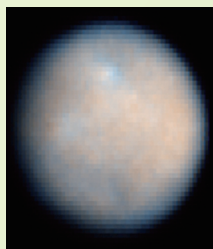
行星，例如 1991BA，只有6公尺寬。圖3為幾個大型小行星的影像，附表則為它們的部分參數。小行星的數量大約與其直徑的3到4次方成反比，也就是愈小的小行星數量愈多得多。

有一種小行星研究，是找出軌道在地球軌道附近，可能撞擊而危害地球的「近地小行星」，對於這類小行星，我們希望盡量把它們全部辨識出來，然後精確預測其軌道——這很不容易，因為它們很容易受到其他天體引力影響——以提供防範措施，這攸關整個地球文

明，是件很重要的工作。當然，如何減少小行星撞擊所造成的災害，甚至能夠排除撞擊，是更關鍵的課題。

以科學課題來說，我們探討小行星的數量、大小與空間分佈，或是它們的組成等等。小行星體積小，不像地球有地熱，造成火山、板塊運動等活動，因此地球已經不再是當初形成時候的情形，然而小行星有如化石，記錄了太陽系誕生以及撞擊的過程。小行星的大小是基本的物理參數之一，下面我們討論怎麼測量小行星的直徑。

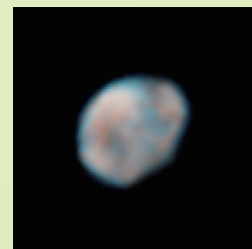
圖3



穀神星
經過色調加強後的影像
(HST)



智神星
影像顯示其非正圓的形狀
(HST)



灶神星
(HST)

編號	名稱	發現年份	發現者	長軸(km)	自轉周期(hr)	反光率	平均日距(AU)	軌道週期(年)	軌道橢圓率	軌道傾角(度)
1	穀神星(Ceres)	1801	G. Piazzi	960	9.08	0.1	2.767	4.61	0.097	10.61
2	智神星(Pallas)	1802	H. Olbers	570	7.81	0.14	2.771	4.61	0.18	34.81
4	灶神星(Vesta)	1807	H. Olbers	578	5.34	0.38	2.362	3.63	0.097	7.14

如何測量小行星直徑

估計小行星直徑有以下幾種方法：(1) 測量小行星的反光與發光能力；(2) 利用無線電波雷達取得影像；(3) 太空船飛到附近直接測量；(4) 利用掩星事件。

小行星的亮度來自反射陽光，這與小行星與太陽的距離，以及小行星與地球的距離有關。另外影響反射光強度的，是小行星本身大小與反射率。另一方面，小行星除了反光，也吸收陽光而本身發出熱量，這也與小行星大小及反射率有關。所以我們可以在可見光波段測量小行星反射強度，另外在長波（遠紅外或微波波段）測量其熱輻射強度，便能求得小行星的大小及反射率。由於來自小行星的熱輻射非常微弱，因此非得需要大型電波望遠鏡與專業儀器不可。只有少數情況，能夠在可見光直接解析出表面大小，例如圖4是哈伯太空望遠鏡觀測觀測 9 Metis 的小行星影像，經過特殊影像還原處理，所得到的結果，小行星明顯不為圓形，其大小為 235 公里 x 165 公里。

順帶一提，以上這篇研究論文發表在 Icarus 期刊，專門登載研究行星科學的學術論文。Icarus 源於希臘神話人物，以蠟製翅膀飛行，因為太接近太陽，翅膀融化而墜海。Icarus 也是顆小行星的名字，編號1566。

直接以雷達可以取得小行星的影像，以估計其大小。例如圖5是2001年3月4日利用波多黎各的電波望遠鏡取得之編號 1950DA 小行星的影像，當時

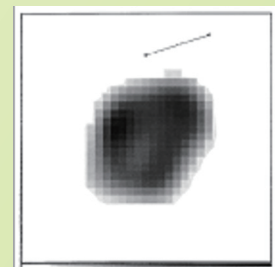


圖4. 小行星 9 Metis 由哈伯太空望遠鏡拍攝，經過處理後的影像。Storrs (1999) Icarus, 137, 260,

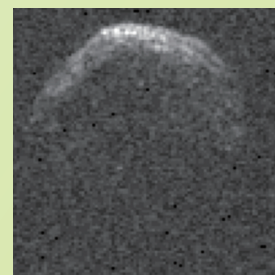


圖5. 1950 DA 的雷達反射影像，本圖取自 <http://www.planetary.org/html/news/articlearchive/headlines/2002/1950DA.htm> (S. Ostro, JPL)，動畫檔可見 http://neo.jpl.nasa.gov/1950da/radar_movie.html

這顆小行星距離我們約地月距離的22倍，算是對地球具潛在威脅的小行星 (Potentially Hazardous Asteroids, PHAs) 之一。1950DA 小行星直徑約一公里，據估計在西元2880年有三分之一的機會撞擊到地球。

在太空船測量方面，圖6是 Gaspra 小行星，編號 951，其三軸尺寸為19x12x11 公里，首先於1991年被「伽利略號」太空船近距離觀測，可以看到這顆約20公里大小之小行星，表面有許多撞擊痕跡，是被更小的太空碎片撞擊的結果。伽利略號快速經過 Gaspra 小行星後，繼續飛往木星。

另外一提，我們看到小行星的形狀不規則。為什麼大型天體，例如太陽、地球，甚至月球都成球型，而小型天體總是形狀不規則呢？這個現象，居然和烤肉時把煤炭打碎才容易點燃的原理類似！這是因為東西打碎了，相同的體積便有了更大的表面積。因此，體積大的天體，熱容量大，受到撞擊加熱，之後由於表面積相對小，冷卻速率慢，因此引力能夠將天體



圖6.小行星 Gaspra 的影像（伽利略號拍攝）

拉縮成最穩定狀態的球型。相反的，直徑小於約 200~300 公里的小天體，例如小行星、彗星核等，形狀多不規則。

以下介紹如何藉由小行星掩過背景恆星，以掩星的時間估計小行星的大小。

利用掩星估計小行星大小與形狀

發生小行星掩星時，小行星的影子投影在地球上(圖7)，如果觀測者記錄下恆星消失與復出的時間，由於我們知道小行星的軌道，便可以由影子的速度來估算小行星的大小。當然，個別觀測者看到的只是某個影子當中的一個截切線段，要是能結合不同位置的觀測者，組成觀測網，整合他們記錄的時間，便能繪製出小行星的大小與形狀。圖8是小行星掩星時(1) 不同觀測者各自測量掩星時間與長短，便能 (2) 繪出小行星的形狀與大小，左邊 a是地面歐洲南方天文臺8米望遠鏡取得的影像，中央 b 是掩星

觀測的結果，右邊 c 則是太空船前往小行星附近所拍的照片。可以看出掩星觀測不需要大型昂貴設備，但藉由有組織的紀錄，一堆小兵也可以立大功！

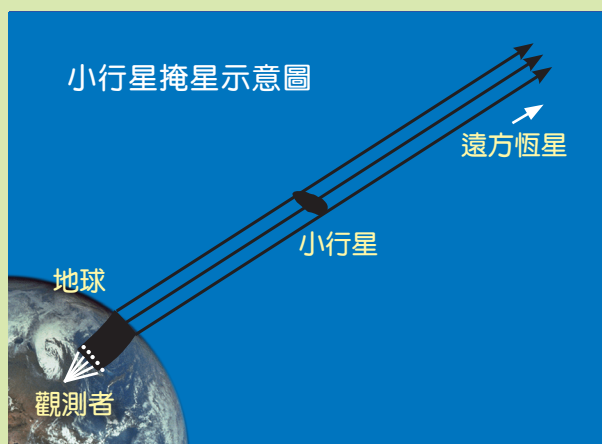


圖7.小行星遮掩遙遠恆星時，小行星的陰影投影在地表

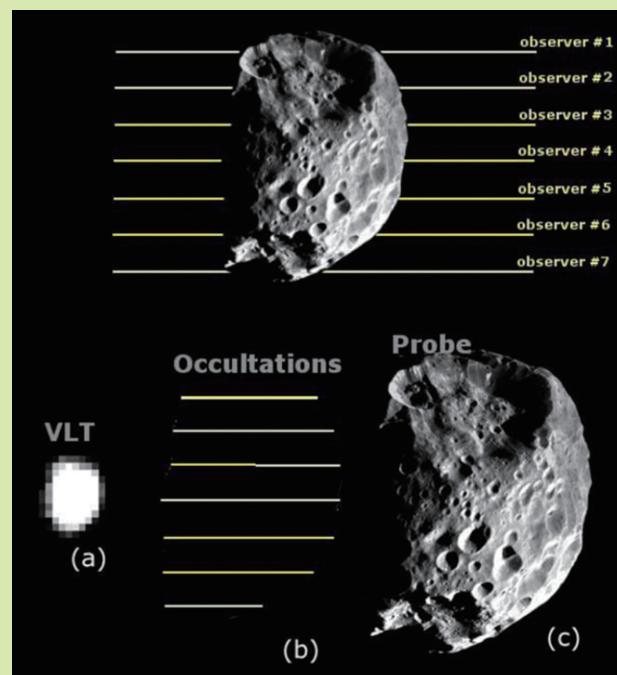


圖8. (上圖) 分佈各地的觀測者觀察到陰影不同部分的截切線段，其記錄到的掩星開始、結束時間不同，掩星期間長短也不同。(下圖) a 是超大望遠鏡 (Very Large Telescope) 取得的小行星影像； b 是利用上圖掩星觀測網所估計出來的小行星大小與形狀； c 是太空船前往小行星附近所取得的影像。<http://www.occultations.net/occultations-asteroids.htm>

觀測小行星掩星由於我們監測的是恆星的亮度變化，因此重點在於能看到恆星，但是並不需要看得到小行星，這表示即使小望遠鏡也可以進行觀測。較為關鍵的是計時，但是這在臺灣也不是問題。國際的掩星組織 IOTA (International Occultation Timing Association) 宣稱，即使只有簡單望遠鏡、沒有數位相機，只要能計時，就能從事掩星觀測。圖9,10是Richard Nugent 先生網站介紹他的設備，包括望遠鏡、數位相機等一共只有大約10公斤而已，架設簡單。國內的觀測者，例如科博館林志隆博士也開發出適合觀測掩星的設備，值得參考。

在臺灣能觀測到的小行星掩星事件，可以參閱 <http://asteroidoccultation.com/> 這個網站的預報，內容包括日期、時間、小行星編號、背景恆星編號及可觀察地點等。

舉例而言，在2007年12月12日國際時間 17:21 UT，會有一顆12.0等的恆星被一顆12.6等的小行星遮掩(圖11)，這是小行星暗，背景星亮的例子，而每一星等相差2.51倍，臺灣本地時間要把UT 加上8小時。對於這個事件，小行星已知直徑61公里，它在太空就會形成一個61公里為直徑的柱



圖9. Richard Nugent 的可攜式掩星觀測裝備，包括望遠鏡、錄影機、收音機（對時），以及電池組。國內對時可以使用手機報時，裝備更精簡。 <http://www.lunar-occultations.com/iota/video/rnvideosetup.htm>



圖10. 圖9的輕簡裝備可以架設在後車廂上方，方便操作。

狀陰影，投影在地球表面，依照預測陰影會經過臺灣南端(圖12)，所以墾丁就適合觀測。要注意這樣的預測只提供參考，因為小行星越大其陰影軌跡就預測得愈準，而較小的行星預測得較不準，但這些小天體不容易用其他方法測量，反而是掩星觀測發揮功效之處。但是要布置全臺觀測網，來觀測只有幾十公里的小行星掩星，其預測誤差可能超過全臺灣範圍，困難可見，不過要是觀測成功，科學回報卻非常可觀。

<http://asteroidoccultation.com/>

Asteroid Occultation Updates
Updated: 2007 Dec 07, 04:57 UT
HELP/FAQ
All Events

Upcoming Events:
December 2007

Event Date/Time	Rank	Asteroid	Star	Visibility	DM B.A.	Details
06 Dec 10:46 UT	86	(1086) Nona mag 13.7	ZUCAC 4341831 mag 12.0	N Canada, Alaska, E Russia, China	1.9m 5:45:59*	[Dec 21 21:03]
06 Dec 12:23 UT	14	(1508) Komi mag 16.6	TYC 5249-01402-1 mag 10.3	Russia	6.3m 1:06:70*	[Dec 21 21:03]
06 Dec 12:50 UT	47	(1833) Chinyu mag 16.0	TYC 0280-00269-1 mag 9.4	N USA, W Canada	6.6m 1:45:54*	[Dec 21 21:03]
06 Dec 14:02 UT	37	(807) Cerndia mag 14.9	TYC 0057-01115-1 mag 10.0	Australia	4.9m 2:56:66*	[Dec 21 21:03]
06 Dec 15:07 UT	59	(1404) Ajax mag 16.8	ZUCAC 24740231 mag 10.8	Russia	6.0m 2:29:50*	[Dec 21 21:03]
06 Dec 17:21 UT	78	(351) Ynn	ZUCAC 238395180	Taiwan, Hong Kong	1.0m	[Dec 21 21:03]
12 Dec 08:20 UT	21	(1660) Wood mag 14.8	ZUCAC 31799116 mag 10.7	Canada, W USA	4.1m 3:16:77*	[Dec 06 02:13]
12 Dec 09:11 UT	21	(1665) Galy mag 15.7	TYC 5265-00775-1 mag 10.0	Russia	5.7m 1:15:40*	[Dec 06 02:13]
12 Dec 10:40 UT	70	(1240) Cretania mag 14.7	TYC 5789-00004-1 mag 11.3	Indonesia	3.4m 1:29:51*	[Dec 06 02:14]
12 Dec 11:48 UT	65	(729) Watanota mag 13.8	TYC 0802-00017-1 mag 10.0	near New Zealand	3.8m 7:35:47*	[Dec 06 02:15]
12 Dec 14:06 UT	59	(73) Klytia mag 14.3	ZUCAC 27586954 mag 11.2	Russia, SW Asia	3.1m 1:06:103*	[Dec 07 03:14]
12 Dec 17:21 UT	79	(82) Alkanne mag 12.6	ZUCAC 33576196 mag 12.0	Taiwan, Hong Kong	1.1m 2:29:89*	[Dec 06 02:17]
12 Dec 19:52 UT	89	(690) Wautslavia mag 14.7	TYC 6165-01100-1 mag 10.9	W Australia	3.8m 3:56:53*	[Dec 06 02:17]
12 Dec 21:47 UT	16	(1462) SAF mag 14.8	TYC 1294-01627-1 mag 10.8	Russia, SW Asia, Africa, NE Brazil	4.0m 1:39:80*	[Dec 06 02:17]
13 Dec 01:51 UT	17	(592) Osama mag 16.2	JHP 20146 mag 8.5	N Africa, Venezuela, Colombia	7.7m 1:38:87*	[Dec 06 02:17]
13 Dec 02:58 UT	13	(6823) 1988 ED1 mag 13.8	TYC 1878-00150-1 mag 10.9	W Africa, USA, Canada	3.0m 1:39:87*	[Dec 06 02:17]
13 Dec 04:06 UT	94	(25) Phocaea mag 12.7	TYC 6843-01423-1 mag 10.7	Canada, E USA	2.2m 5:58:197*	[Dec 07 03:13]
13 Dec 04:37 UT	94	(585) Bilka mag 13.6	TYC 0765-00554-1 mag 13.5	N Brazil, Peru	1.7m 11:36:13*	[Dec 06 02:17]

圖 11

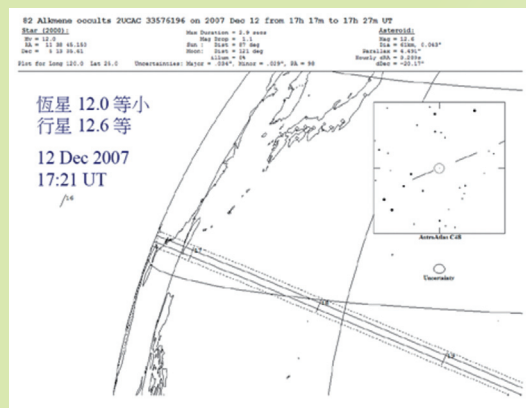


圖 12

NEAR太空船於1996年2月17日從美國佛羅里達州發射，在1999年2月遭遇到 433 Eros 小行星，當時距離1800公里。由於受到其他天體的引力干擾，小行星的自轉常不規則(圖13)。



圖13. 小行星 Eris 自轉後我們看到不同面向。其動畫可參見 http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/image/eros_movie_20000208.gif，在此網站可以看到 Eros 的動畫影像。

接著我們再看一個有趣的小行星。小行星 243 Ida 本身只有50幾公里，卻有個小月亮 Dactyl，大小只有 1.4 公里，彼此互繞(圖14)。藉由軌道半徑及周期，可以計算出小行星的質量。如同太陽質量可由地球軌道半徑及周期求得，而地球質量可由月球軌道求得，月球質量則要靠人造天體軌道求得。

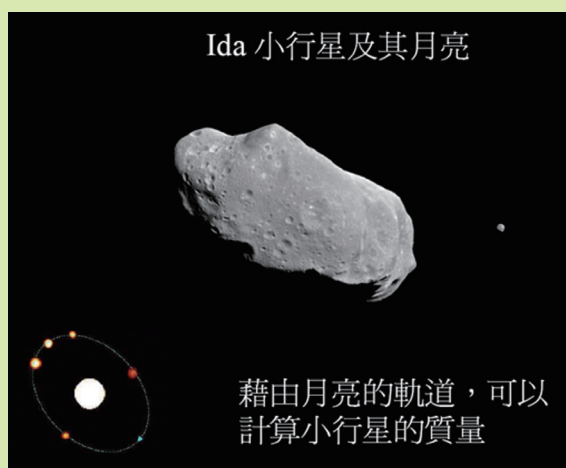


圖14. Ida 小行星及其衛星 Dactyl

小行星 87 Sylvia 就更有意思了。這顆小行星於2001年由夏威夷 Keck II 口徑十公尺的望遠鏡發現第一個月亮 Romulus，直徑18km，2005年歐洲南方天文臺發現第二個月亮 Remus，直徑7km，成為第一個已知擁有兩個小月亮的小行星。由質量、體積可以求出密度，發現 87 Sylvia 的密度為1.2g/cm³，結構鬆散，像個「石頭堆」(rubble pile)。距推論這類小行星曾遭受劇烈撞擊，碎散之後又因為自身引力而重新聚集。

87 Sylvia 於2006年12月18日遮掩 BD +29 1748 號恆星。當時中美掩星計劃 TAOS 的其中兩座望遠鏡，TAOS-A, TAOS-B 測得大約20秒的掩星(圖15)。同樣位於鹿林天文臺的40 cm 望遠鏡觀測同樣事件，也測得大約20秒的掩星持續時間(圖16)。但是從距離鹿林天文臺40公里外，位於臺中的林志隆博士用望遠鏡及DV 拍攝，卻測得兩次掩星事件，持續時間分別為23.9秒及10.8秒(圖17)。經過分析，發現 BD +29 1748 原來是顆緊密相距0.1" 的雙星，之前不知道，但是經由這次掩星事件，居然用簡單的儀器，得到了一般大型望遠鏡都沒有的解析力。我們雖然沒有多學到有關於小行星的知識，但卻學到背景恆星的知識！

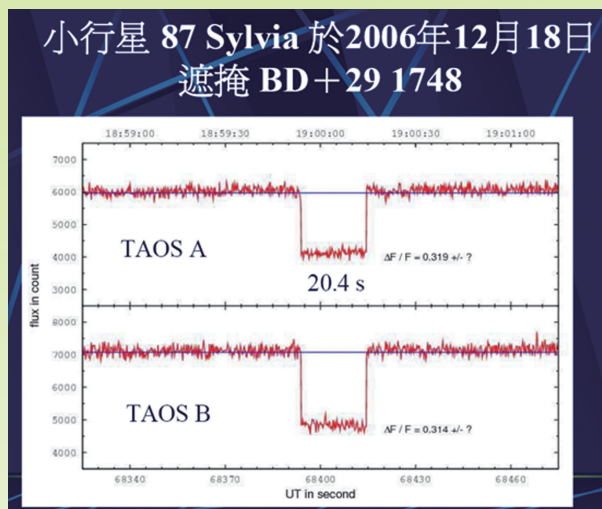


圖15. 小行星87 Sylvia 於2006年12月18日掩過恆星 BD+29 1748，鹿林天文台兩台 TAOS 望遠鏡成功記錄到該次掩星事件。

Lulin 40 cm 所觀測同樣事件

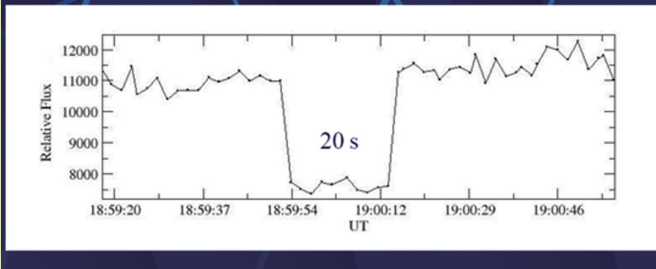


圖16. 與圖15相同的掩星事件，同樣位於鹿林天文台的40公分望遠鏡也記錄到約20秒的掩星事件。

同樣事件從台中所拍攝 (距離鹿林天文台40公里)

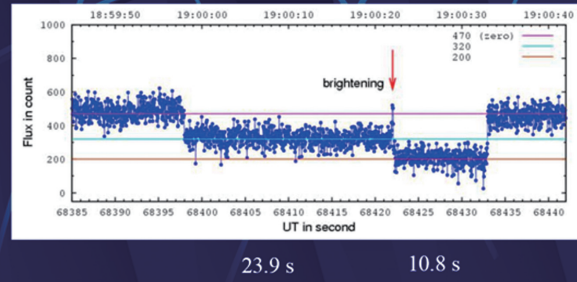


圖17. 與圖15、16相同的掩星事件，在台中市觀測，卻看到不一樣的光變曲線，顯示發生了兩次掩星，分別長達23.9秒與10.8秒。

業餘天文學家除了觀測掩星，以估計小行星大小，另外還可以監測小行星亮度變化。小行星的亮度變化源於其不規則形狀以及表面不均勻的成分。當小行星自轉時，不同面向反射陽光到地球，亮度變化周期等於小行星自轉週期。有些小行星的亮度變化起因於表面成分不同，這些會造成顏色也有同樣週期變化(圖18)。一般小行星亮度變化週期約4到12小時。

光變曲線 (lightcurve) 是亮度隨時間的變化，例如食雙星是兩顆星互繞 (圖19)，或是超新星因星球爆炸而突然變亮 (圖20)，都有明顯容易辨認的光變曲線。

結論

即使只用簡單的設備，甚至沒有望遠鏡、電子相機，也可以進行有用的天文觀測。小行星

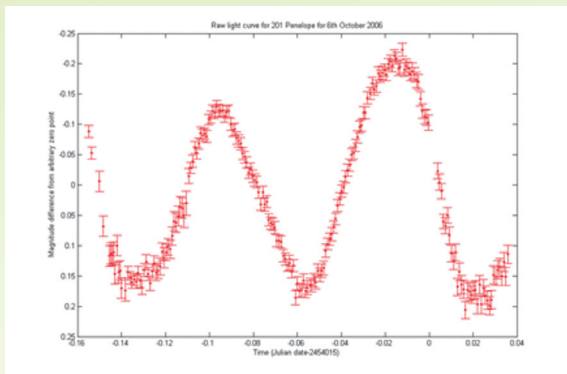


圖18. 小行星亮度變化來自於自轉以及表面的反射物質不均

掩星或月掩星觀測門檻低，適合一般業餘同好從事。若是能有組織規劃，建立局部，甚至大規模觀測網，可以取得具影響力的科學成果。

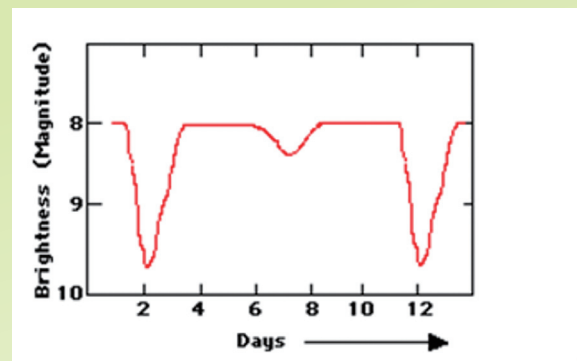


圖19. 食雙星光變曲線一例

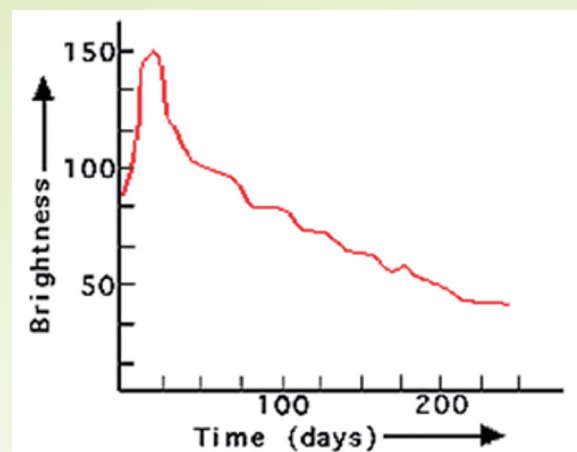


圖20. 超新星光變曲線一例

陳文屏教授：任教於國立中央大學天文所
蔡穎仁：任職於臺北市立天文科學教育館