



# 太陽系 Solar System

太陽系指的是所有以太陽為中心、受太陽重力約束的天體集合。系內共有8顆行星、至少165顆衛星、5顆已知矮行星，和數以億計的小天體。這些小天體包括小行星、古柏帶天體、彗星和星際塵埃。

廣義的太陽系內部區域，由內而外可劃分為：太陽、4顆類似地球的内行星、許多小岩石組成的小行星帶、4顆充滿氣體的巨大外行星，以及被稱為古柏帶、滿是冰凍小岩石的第二個小天體區。古柏帶外圍還有相信存在但尚待證實的歐特雲。

## 古柏帶 Kuiper Belt

古柏帶是一個位於黃道面的扁平帶狀盤面，距離太陽約35至100天文單位，分佈了大小、軌道、特性不同的天體。一般相信此區域是短週期彗星的發源地。自1992年第一個位於此區域的天體被David Jewitt和Jane Luu發現後，經過近二十年的研究，才逐漸描繪出目前古柏帶帶狀盤面的樣貌。

※右上方插繪的是太陽系外圍的古柏帶。

## 歐特雲 Oort Cloud

歐特雲是由數以千億約一公里大小的天體所組成，根據推測其距離太陽約50萬天文單位，成球狀均勻分佈。歐特雲是藉由統計長週期彗星進行軌道觀察資料而構想出來的，一般相信此區域是長週期彗星的發源地。

※右圖的假想圖中，由外向內分別是球狀分佈的歐特雲、中間呈盤狀分佈的古柏帶；中央區域的外圍是土星軌道、最內圈是地球軌道，距離比例尺以10天文單位的立方呈現。

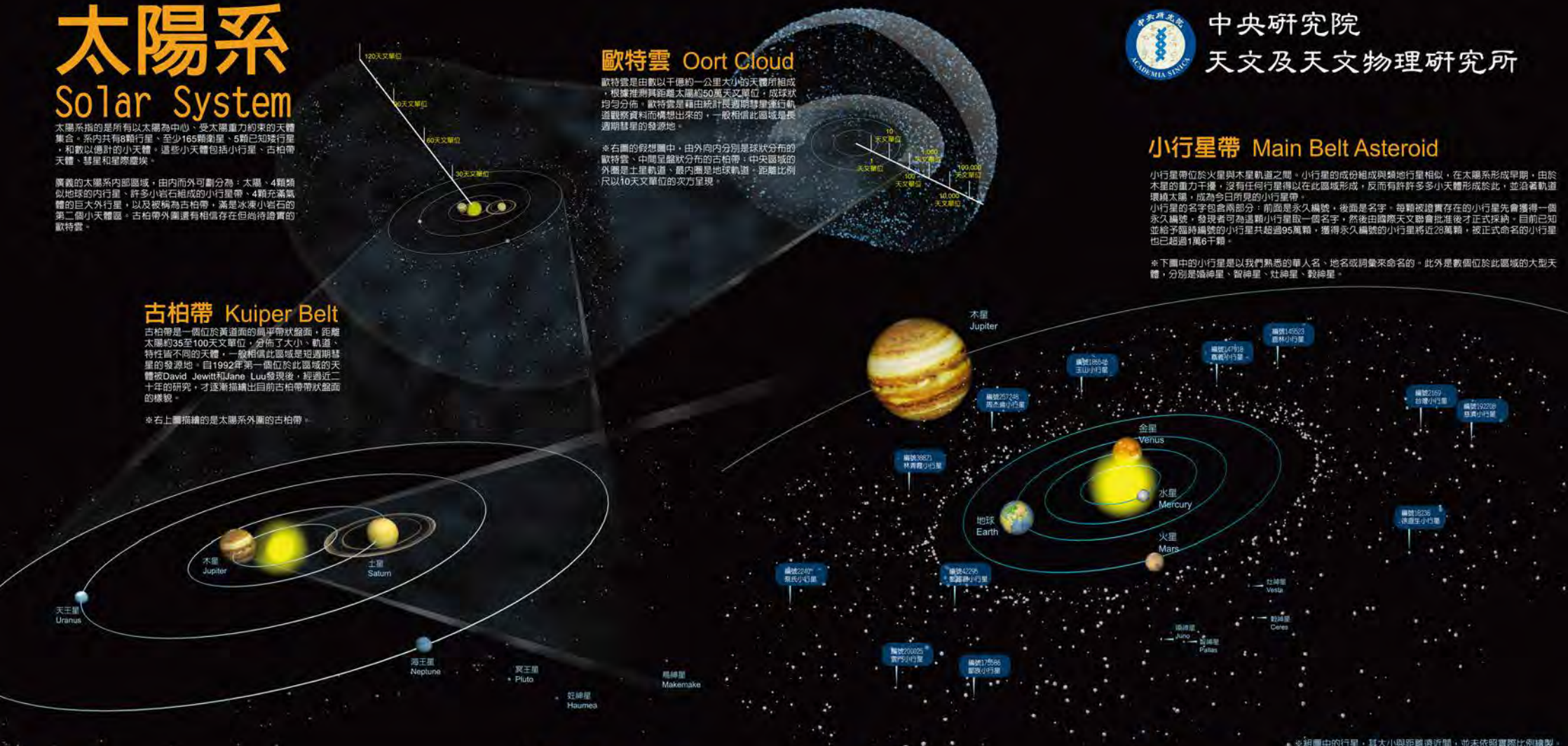


中央研究院  
天文及天文物理研究所

## 小行星帶 Main Belt Asteroid

小行星帶位於火星與木星軌道之間。小行星的成份組成與類地行星相似，在太陽系形成早期，由於木星的重力干擾，沒有任何行星得以在此區域形成，反而有許多小天體形成於此，並沿著軌道環繞太陽，成為今日所見的小行星帶。小行星的名字包含兩部分：前面是永久編號，後面是名字。每顆被證實存在的小行星先會獲得一個永久編號，發現者可為這顆小行星取一個名字，然後由國際天文聯合會批准後才正式採納。目前已知並給予臨時編號的小行星共超過95萬顆，獲得永久編號的小行星將近28萬顆，被正式命名的小行星也已超過1萬6千顆。

※下圖中的小行星是以我們熟悉的華人名、地名或詞彙來命名的，此外是數個位於此區域的大型天體，分別是婚神星、智神星、灶神星、穀神星。

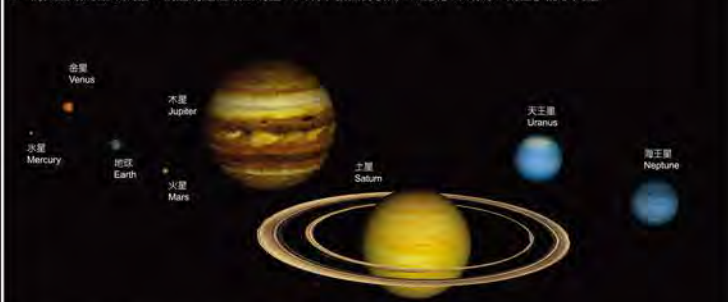


※組圖中的行星，其大小與距離遠近圖，並未依照實際比例繪製。

## 行星 Planet

2006年8月24日國際天文聯會表決並公布了行星的新定義。以下三個條件必須同時符合，才能被稱為行星：

- 1、圍繞恆星公轉。
- 2、質量夠大，形狀近於球形，亦即自身的重力大到可將本身形狀修正為球體。
- 3、為該區域內最大天體，軌道附近區域已清空，只剩下被自身引力「吸引」來成為「衛星」的小天體。



※本圖依照大小比例，標出符合新定義的太陽系八大行星。

## 矮行星 Dwarf Planet

矮行星是2006年8月24日國際天文聯會對太陽系天體分類後新增的一組獨立天體。簡單來說，矮行星的大小介於行星與太陽系小天體這兩類之間，但會後天文學家對此類天體的定義仍有爭論。

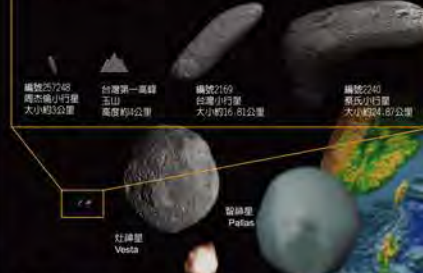
※本圖依照相對於地球的比例大小，標示太陽系內的大型矮行星。



## 小行星 Asteroid

小行星類似行星，環繞著太陽運動，但體積和質量比行星小得多。根據估計，小行星的數目應該有數百萬個。

※放大圖為藝術家繪製的假想圖，圖中依照相對於臺灣玉山的比例大小，標示出名稱與臺灣有關的三個小行星。



※本圖依照相對於地球的比例大小，標示出小行星。

## 衛星 Satellite

衛星是環繞行星做週期性運行的天體。太陽系內較大的衛星，包括月球、木星的四大衛星、土星的土衛六、以及海王星的海衛一。

※本圖依照相對於地球的比例大小，標示出太陽系內的大型衛星。放大圖內則是與月球大小做比較的火衛一、火衛二。



月球與火星衛星之大小比較圖

## 【探索 人類視界未及之秘境】TAOS 掩星觀測計畫

太陽系的邊陲，冷峻的太空中，存在著一群緩慢繞著太陽的小天體，他們被稱為海王星外天體—

### Trans-Neptunian Objects

(TNO)，也常簡稱為海外天體。已知的 TNO，主要分布在 30 天文單位(海王星的所在)至 100 天文單位的星際之間，這個區域又名古柏帶 (Kuiper Belt)，位在其中最著名的天體，是從太陽系行星名單被除名的冥王星

(Pluto)。此區域內已知最大的兩顆矮行星分別是冥王星和閼神星 (Eris)，而最小的 TNO 直徑約為 20 公里 (視

星等約 28 星等，由哈柏太空望遠鏡發現)。至於更小的天體，受限於距離的遙遠及尺寸大小，天體所反射的太陽光亮度皆無法被目前的大型地面望遠鏡或太空望遠鏡直接觀測到。因此，對於直徑比 10 公里還小的 TNO，其數量、大小和分布，始終仍是個謎團。

於是，TAOS (Taiwanese-American Occultation Survey) 掩星觀測計畫誕生了。此計畫利用 TNO 掩住遙遠背景恆星的方式，來偵測這些約一公里大的小天體，進一步了解古柏帶天體的大小、數量與位置分佈的關係。而藉由研究 TNO 的大小及數量，也可讓我們了解早期太陽系形成的過程以及 TNO 在組成上的物理性質。此外，利用掩星觀測推估小天體的空間分布，還可以了解太陽系各大大小小行星在動力學上的演化關係。

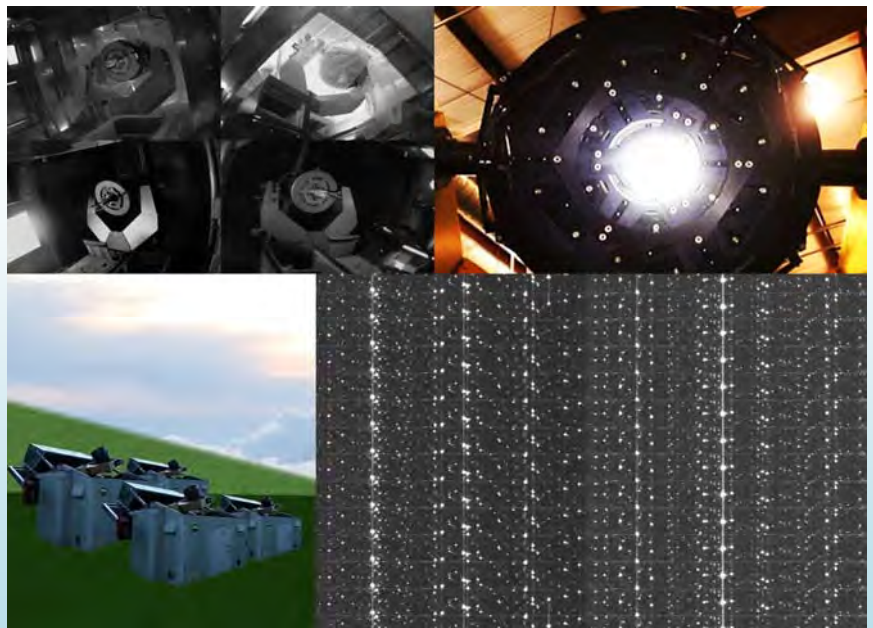
海王星外天體在天文學家近二十年的觀測及研究，逐漸揭開了外太陽系形成的面紗。然而隨著觀測儀器的進步，更多難解的問題也一一浮現。包括本所、中央大學、美國史密松哈佛天文物理中心、美國賓州大學、韓國延世大學在內的 TAOS 掩星計畫團隊，利用設置在鹿林天文台的多台小型望遠鏡協力觀測，試圖補上太陽系形成歷史中這頁遺失的篇章。(張智威 特稿)



圖說：鹿林天文台，標高 2880 公尺，位於玉山國家公園。圖中右下角為中大一米望遠鏡 (LOT) 及控制中心，TAOS 及其他計畫的望遠鏡皆散佈於此山頭。左上角為 TAOS 陣列中的其中一台五十公分望遠鏡。@中研院天文所

## 【全自動與高速測光的極限挑戰】建構掩星觀測系統

建構 TAOS 系統最大的挑戰在於如何實現全自動且高速測光的望遠鏡系統。為了偵測一閃即逝的掩星現象，必須利用三到四台望遠鏡自動觀測同一片星空，以每秒至少五次的速度量測視野中星星的亮度。這在一般的天文觀測中是很少見的。TAOS 的控制軟體，是達成此一目標的重要系統。為了達成全自動的目標，TAOS 系統中利用許多偵測元件得知望遠鏡以及天候的狀況，控制軟體就是利用這些資訊來決定望遠鏡的動作。



圖說：左上為在網路攝影機同時監看四台望遠鏡的截圖畫面。右上為望遠鏡主鏡支撐機構。下方是以特殊「拉鏈模式」讀取所獲得的影像，圖中由星星拖拉出來的亮線看起來就如同拉鍊般。  
@中研院天文所

每天日落前，控制系統會依據 TAOS 氣象儀器的資料決定是否自動開啟系統以及遮罩，讓系統一切就緒。再利用已排定的星場，依據月亮的位置決定觀測的天區。當天空餘光完全黯淡，系統會進行自動對焦，對焦結束後，便開始每秒五次的影像輸出。在每一個天區，這個每秒五次的速率會持續進行觀測 1.5 個小時，之後再移動至下一個目標天區。每個晴朗的晚上，TAOS 會產生超過 100GB 的資料。

一般天文觀測通常要求的是長時間曝光，影像讀取時間需要好幾秒鐘。對於 TAOS 的快速系統，我們使用特別的讀取模式，每一次只讀取一小部分影像，以降低影像讀取時間。利用這種方式雖然可以達成 5 赫茲的取樣速度，但是會造成星星影像重疊以及高背景亮度的問題。針對這個問題，我們利用影像處理的程式來解決。

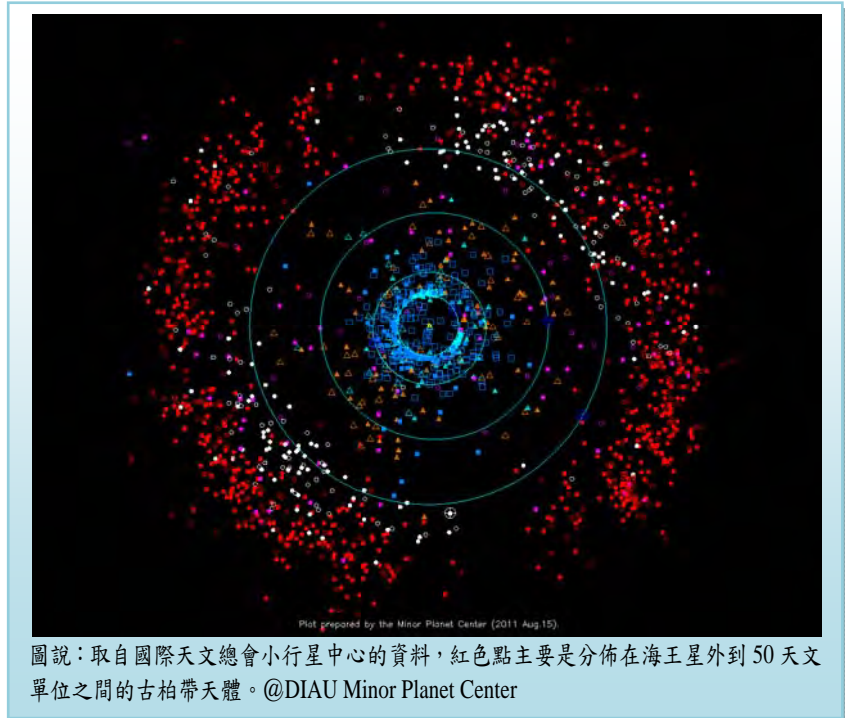
TAOS 系統的開發，包含了許多不同的工程問題，包括光學、機械、電子、軟體以及資料儲存等。這些寶貴的經驗使我們對於正在建造中的 TAOS 二代 (TAOS-2) 計畫充滿信心。利用更大的望遠鏡與更快的取樣速度，將可以告訴我們更多太陽系形成歷史的奧秘。(王祥宇 特稿)

## 【古柏帶】太陽系的「西伯利亞」

古柏帶 (Kuiper Belt) 通常是指太陽系內海王星軌道外的冰凍小天體所組成類似小行星帶的結構，盤狀分布在比地球到太陽的距離還遠 35 倍到 1000 倍左右的地方。古柏帶的概念最早是在 1950 年代由艾基渥斯 (Kenneth Edgeworth) 與古柏 (Gerard Kuiper) 兩人分別提出，希望能解釋太陽系的行星質量分布，在海王星外遽減的現象，因此有時也稱為艾基渥斯 - 古柏帶 (Edgeworth-Kuiper Belt)。

盤狀分布的古柏帶和距離更遠並呈球狀分布的彗星雲，也就是歐特雲 (Oort Cloud) 有所不同。兩者都屬於「海外天體」。在 1980 年代，透過電腦模擬，葉永烜等人陸續提出需要有一個盤狀分布的彗星帶存在，才能解釋軌道周期約兩百年以下短周期彗星的起源。葉永烜教授解釋，「古柏」原是高齡的參天古木，在此則意謂著，這些天體極可能保存了太陽系誕生初期所形成的最原始物質。

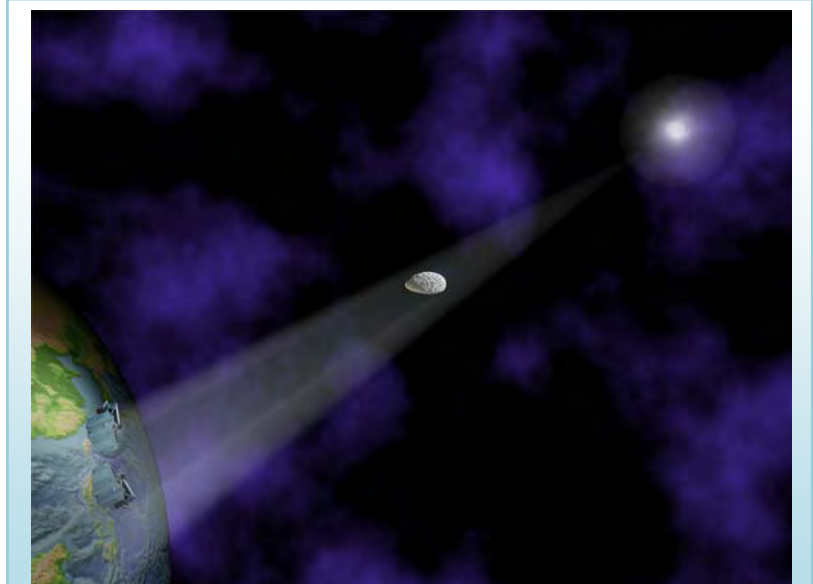
1992 年 David Jewitt 和 Jane Luu 兩人發現了冥王星家族之外的第一個古柏帶天體—1992QB1。迄今，已經發現一千多個這類的天體，估計直徑在一百公里以上的總數應該有好幾萬。古柏帶天體依照公轉軌道的特性大致可以分為數種不同的族群，例如：軌道周期與海王星軌道周期有簡單整數比關係的冥王星 (Pluto) 和小冥王 (Plutino) 等等。太陽系以外的其他系外行星系統也可能有類似古柏帶的結構。(金升光 特稿)



## 【掩星】星際魅影

當某天體被另外一個「視直徑」通常較大天體的全部或部分遮掩時，就可稱為掩星（Occultation）。

嚴格來說，日食應該算是一種標準的掩星。而月食成因是月球被地球的影子遮蔽，所以只能算是「食（Eclipse）」，與掩星並不相同。內行星（水星、金星）遮掩太陽一小部分、行星衛星通過行星盤面和系外行星部分遮掩其母恆星等現象一般皆稱為「凌（Transit）」。不過，以上三者間的界線有時候並不是那麼清楚，當然這可能也因為摻雜了些許歷史的因素，例如：食雙星。還有一種「掠掩（Grazing Occultation）」是指月掩星時，沿著月球盤面邊緣不規則的山峰依次遮掩背景星的特殊現象，和日全食時候的倍里珠（Baily's Beads）有異曲同工之妙。



圖說：本圖為小行星掩住背景恆星的假想圖。圖中可見小行星影子落在地球上，如果影子正巧通過觀測站，這個掩星事件就可被偵測到。@中研院天文所

除了日食，月掩星可以算是最容易觀察的掩星現象之一。在馬王堆漢墓出土的帛書之一《天文氣象雜占》就記載有「月食星」的占象，實際上的觀測可能史前時代就存在了。近代掩星觀測不僅可以研究遮掩天體的細節，例如：月球的山脈山谷、行星的大氣與環、小行星大小形狀等等；也可以研究被遮掩天體的特性，例如：背景星球直徑、是否有其他伴星等等。在天文干涉儀被廣泛應用以前，掩星觀測是從事這類高角解析度天文學研究的重要方法；觀測的波段也不僅限於可見光。例如，著名的活躍星系核 3C 273 的大小，最初就是透過無線電波段的月掩星觀測來提供線索的。（金升光 特稿）

## 【ALMA 原型天線 本所成功接收】「黑洞獵人」即將誕生

本所主導的國際合作團隊，前不久從三個競爭隊伍中脫穎而出，爭取到一座 12 米原型天線。這座天線原本是「阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列（簡稱 ALMA）」的原型天線。ALMA 是目前正在智利興建的巨型電波天文臺計畫，本所是透過日本和美國等合作夥伴，代表臺灣加入這個計畫的。

這支原型天線將會結合跨越洲際的「特長基線干涉儀（Very Long Baseline

Interferometry 簡稱 VLBI）」，與另外兩個天文計畫——分別是位於夏威夷的「次毫米波陣列」(SMA)，以及位於智利的 ALMA——連結成「鐵三角」，在次毫米波段進行更精確、更高解析度的天文觀測。屆時將可提供高達「20 微角秒」的解析度（1 微角秒=1/3,600,000,000 度），相當於從地球可以看到月球上的一枚 10 元硬幣，這也是目前天文學家所能取得最高的角解析度。

實際上，人類過去從未真正從望遠鏡看到黑洞過，尤其是星系中心的超大質量黑洞。未來透過次毫米波 VLBI 鐵三角，天文學家不但可以為黑洞拍攝照片，取得存在的直接證據，還可以觀測到黑洞的強重力透鏡效應，對廣義相對論中的「強重力場」進行驗證。此外也能對超大質量黑洞的噴流做進一步研究。這座原型天線本身還可以當作單碟天線使用，能在波長很短的次毫米波或者太赫茲（THz，GHz 的一千倍）波段進行很多觀測，研究宇宙中更豐富多樣的課題，包括低溫的星際氣體雲、塵埃密佈的恆星形成區，以及巨大橢圓星系核等。

可讓這個 VLBI 鐵三角觀測計畫發揮最大效能的最適位址，通常是寒冷、乾燥、高海拔、少光害的地區。本所目前已先於加拿大北部的尤瑞加展開基本測試，接下來打算今夏在鄰近的格陵蘭島「峰頂站臺」基地進行儀器測試。同時，我們也已開始為這支原型天線進行性能升級。（編輯稿）



圖說：本所主導的 VLBI 團隊成功取得美國國家科學基金會授權免費使用 ALMA 原型天線。該座天線仍須略加改造，使性能更能適應觀測地點的寒冷氣候。

圖右三胸前掛著相機的是本所特聘研究員井上允 (Makoto Inoue)；圖右一一是本所法喬電子工程師馬柏翔 (Pierre Martin-Cocher)；圖左一一是本所博士後研究人員淺田圭一 (Keiichi Asada)。@中研院天文所

## 【暑期學生計畫 火熱上路】學生心得精選

原本認為這個暑假會是漫長且辛苦的，但進入暑期學生計畫，在許多課程、討論、資料處理中，不知不覺地時間就渡過一半了。在天文所裡認識了很多新朋友，包括來自英國、法國、日本等地的學生。每次跟他們討論事情或聊天，就又學到新的文化與思考模式。

除了新朋友帶來新的思維，我還從每個禮拜二、四的課程中獲得很多新知識。這種主題式的課程真的讓我受益良多，而且有不清楚的問題馬上可以詢問教授們。

並且，我還能跟我的指導教授討論科學、請教問題，教授也常常利用問問題的方式引領我思考，把我錯誤的地方指出來，並刺激我繼續發現那些我從來不知道的事情。除此之外，還有許多善良的學長姐願意幫助我，帶領我探索天文這個未知的領域。

在天文所的這一個月，我發現每個人都很認真地在探討科學，發掘科學。記得第一次參加的小組討論中，有教授跟我們說：不論什麼領域，如果我們想要知道更多的事情，就應該要自己去發掘、尋找，這個尋求知識的過程叫 Research。另一位教授也說了同樣的話，他認為應該要自己去尋找問題，並解決問題，在 Research 的過程中找尋快樂和成就感。我自己在這裡的 Research，雖然大部分的時候是感到挫折的，但只要有一點小進展，就會覺得總算邁出一小步，又接近自己的目標一點了。

或許這個暑期學生計畫只有短短兩個月，但我認為帶給我的影響遠超過自己摸索兩年。不論是資料的處理、團體的討論、課堂中的學習、老師的引領，我認為這些對我都非常有幫助。  
(暑期學生 陳姿穎)



圖說：2011 暑期學生活動師生大合照，攝於中研院天文所。@中研院天文所



## 【宇宙探險幫】航向天際 探索無垠

有那個幫會敢把暗物質、暗能量、黑洞、白洞、蟲洞等超級秘境全部搬來，找大家一起去探險嗎？有！那就是本所的「宇宙探險幫」。

儘管報紙新聞標題開玩笑：「中研院搞幫派！」。不過「宇宙探險幫」其實是最天真、最浪漫、最上進的團體活動。天文和物理學家除了會以科學方法來驗證未知事物，看來好像也很喜歡嘗試「撞撞看」的實驗。譬如說：「基本粒子的最小單位到底是什麼」？為了好奇，56個國家用了80億美元去～「撞粒子」。彗星的真面目？不知道？撞看看啊！於是美國NASA發射了「深度撞擊號」太空船去～「撞彗星」。同樣的，為了介紹「天文該怎麼玩」，本所廣邀全國高中以上學子來和我們的天文學家「頭好撞撞」，腦力激盪一下吧。



圖說：與天文學家對談能增進同學們對科學知識的理解,激發追求卓越的企圖。@中研院天文所

有機會就來和我們的天文學者互動看看。本所四海一家，有50位來自12國的外籍學者在同一屋簷下工作，而與大家一起探險宇宙的學者中不乏重量級人士，包括本所所長賀曾樸院士、特聘研究員井上允、本院年輕研究員獎得主梅津敬一等人，族繁不及備載。這些學者最熱愛的事之一就是和學生互動。與他們聊過天的同學，都對他們深入淺出的聊天介紹景仰不已。

截至目前已有各方百餘位同學參加過「宇宙探險幫」活動。想組團來宇宙探險幫「頭好撞撞」一下嗎？請上網搜索「宇宙探險幫」報名資訊，本幫與你相約宇宙大世界。

（黃珞文 特稿）

## 【紮根本土 放眼世界】王祥宇博士 談 臺灣的天文儀器研發訓練

### ～播種～ 從無到有

身為中研院副研究員，本所副所長王祥宇博士是很少數純粹由臺灣本土教育訓練出來，卻站上世界舞台的天文儀器研發學者。王博士在天文所從儀器研發的「一人單位」開始，10年來，他參與的光學或紅外線天文儀器跨國研發計畫，除了加法夏望遠鏡計畫（CFHT，請見100年春季號天聞季報）外，還有昴望遠鏡計畫（包括即將完成的Hyper SuprimeCam計畫與接下來的Prime Focus Spectrometer）、與第一及第二代的TAOS掩星觀測計畫。藉由國際合作，累積經驗、慢慢學習成長，之後把臺灣這邊的實驗室與研發團隊也建立起來了。



圖說：王祥宇博士近照，攝於TAOS-2預定地—墨西哥的Sierra de San Pedro Mártir 國家公園。@中研院天文所

### ～耕耘～ 好，還要更好

誰來研發天文儀器？天文儀器領域的特別之處是涉及很廣，所以做天文儀器的人，人人背景不一、各有所長；縱然如此，大家對儀器一般概念和各設計部位卻仍得全盤認識才行。然而要做這行，即便在外國也沒有標準的訓練流程，那麼在這個領域該如何裝備自己呢？首先得要充滿好奇心，就是教導自己「別把每件事都當作理所當然」，同時「不要怕學習新的東西，不要怕提問題」。會主動去想問題，勇於問問題，這樣才能很快地學到更多。

天文研究很重視想像力，天文儀器的開發還需要創新的能力，所以除了充實知識外，王博士表示「動手作的經驗和獨立建構思考能力的培養」也很重要。畢竟有些東西書裡頭不見得會提，或是僅僅以一句話帶過，等實際遇到、做了，才知道原來那句話其實很重要。透過有經驗的人來口頭傳授雖然比較容易上手，但是總是自己重複試誤、思考過後，才能有深刻的印象和經驗。

此外，天文儀器開發的目標是穩定可靠、不會壞，做出來的儀器不會拿去量產，卻會不斷地做修改，所以天文儀器成品要出來之前，都要花很長的時間在解決瑣碎問題。不過王博士認為，做好的東西最後會用在天文研究上，成就感其實是這樣來的。所以他在面試用人時，都會問應徵者是否對天文有興趣，有「興趣」，在這個領域工作才會愉快。再來就是「心態」積不積極的問題了，對自我發展與表現是否有所期許，對工作歸屬是否有認同感和熱情，這些都是在天文儀器領域堅持下去的原動力。（陳筱琪 採寫）

## 【掩星計畫的推手】李太楓院士專訪節錄

李太楓院士專長天文及地球科學同位素研究，曾任本所籌備處主任並獲頒多項國際研究獎項與榮譽頭銜。本所掩星計畫，無論是一代 (TAOS-1) 或二代 (TAOS-2)，他都是重要的推手。

### 掩星計畫的緣起

李：掩星計畫最初是 Charles Alcock 博士提出的 (註)，目的是要觀測太陽系外圍的古柏帶天體 (KBO)。然而，觀測很困難，因為掩星過程的光度不是變亮，而是變暗；而且 KBO 很小，掩星過程很短，平均只有 0.2 秒。也因為掩星現象稍縱即逝，無法請其他天文臺幫忙重複驗證，所以同一地點估計至少得擺三台 50 公分望遠鏡同步監測以減低誤判機率。

三台望遠鏡，美國勞倫斯利福摩爾國家實驗室率先贊助其一，為了其它兩台，Alcock 來到台灣找當時本所籌備處主任魯國鏞籌措經費。臺灣受限於天候條件，重要大型的天文觀測計畫都無法在此地進行，掩星計畫算是比較可行的題目。於是藉此機會，我們要求將望遠鏡蓋在臺灣。本所與中央大學各認領一台，後來韓國延世大學加入行列，認領了第四台。

### 掩星計畫的困難

TAOS-1 觀測成果未如預期，儀器極限和臺灣天候限制是主要因素。

李：望遠鏡原本計畫放在海拔高、較不受天候或光害干擾的玉山北峰。然而北峰無路可達，搬運儀器有實際上的困難，於是改置中央大學的鹿林前山天文臺。然而當地氣候影響果然很大，鹿林常位處雲層中，溫度很接近霧點，是全臺霧氣最大的地方之一。而 TAOS 望遠鏡的廣角鏡面一旦水氣凝結便無法進行觀測，相對濕度一達 85、90% 就得關閉遮罩，一年下來可觀測時間只剩 2~3 個月。此外嘉義那邊來的光害和空氣污染，也提高了觀測的背景雜訊。美方簽約廠商的望遠鏡設計也有瑕疵，聚焦能力不夠，成像銳利度達不到規格，即使我們已經想盡辦法補強，成像效果還是差了將近 10 倍。

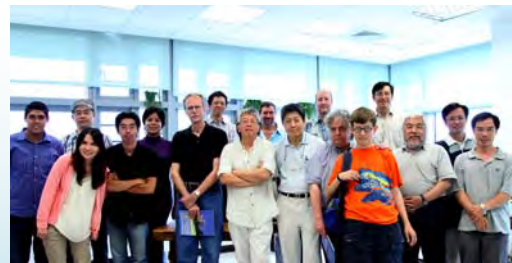
### 二代掩星計畫

掩星觀測還是很重要，針對問題進行修正後，二代掩星計畫 (TAOS-2) 即將上路。

李：TAOS-2 是臺灣獨資主導的計畫，新的望遠鏡成像效果將提升 200 倍。由於臺灣不適合觀測，所以本次地點選在墨西哥大學天文臺。順利的話，三台 TAOS-2 望遠鏡一年之後便可就定位。而我對 TAOS-2 主要、也是最後的貢獻就是去和墨西哥人「談判」，之後的研究和分析就交棒給其它後進了。(陳筱琪 採寫)



圖說：利用流籠吊運 TAOS 望遠鏡至鹿林天文台，在當時無路可及的情況下，大部份設備皆由人力搬運。@中研院天文所



圖說：TAOS 成員合照，由右至左，張書豪、溫志懿、陳文屏、王祥宇、Andy Szentgyorgyi 之子、Andy Szentgyorgyi、Matt Lehner、李太楓、Tim Norton、賀曾樸、金升光、Charles Alcock、Paula Granados、張智威、嚴葦玲、汪仁鴻、Santiago Torres。@中研院天文所

註：Charles Alcock 現任哈佛史密松天文物理中心主任

## 【紮根本土 放眼世界】王祥宇博士專訪網路全文版

### 【王祥宇小檔案】

1994 台大物理系畢業  
1999 交大電子工程所博士（半導體研究）  
1999-2000 中研院原分所博士後研究  
2000-2007 中研院天文所助研究員  
2007-迄今 中研院天文所副研究員  
2007-迄今 副所長

### 【本土紮根的天文儀器學者 如何進軍國際】

身為中研院副研究員，本所副所長王祥宇博士是很少數純粹由臺灣本土教育訓練出來，卻站上世界舞台的天文儀器研發學者。



圖說：王祥宇博士近照，攝於 TAOS-2 預定地—墨西哥的 Sierra de San Pedro Mártir 國家公園。@中研院天文所

不過王博士認為自己的例子並不「典型」，因為從「天文學術研究」和「天文儀器研發」的角度來看臺灣本土訓練，是很不一樣的。在天文學術領域，國內和外國訓練出來的程度目前仍有差距；但在工程界，臺灣與先進國家相比差距較小。出不出國唸書，對工程背景的人來說，比較大的差異主要是在英文能力上；當然有留過洋的人，國際學術界的人脈多少也會比較好，對研究比較有幫助。王博士說他當年進入天文界「純屬巧合」。2001 年天文所徵人，計畫要與加法夏望遠鏡聯合機構（CFHT，請見 100 年春季號天聞季報）合作開發廣域紅外線相機（WIRCAM）；剛好他也想把之前所做的紅外線偵測器放進相機裡，所以一拍即合。王博士一進入本所，就常常派駐外國工作，每次一去就是 3 個月。加上當時本所幾乎都是英語環境，對英文能力的提升很有幫助，語言漸漸就不是問題了。

王博士回憶，直到來本所正式上班時他才發現進的原來是個「一人單位」。當時的「天文儀器研發部門」前無古人、後尚無來者，沒有任何人可以提供或分享經驗。沒多久，年紀輕輕，僅有一次出國經驗（參加學術會議）的他就被送到夏威夷的 CFHT 去。當時之所以沒有被嚇到走人，純粹因為這個工作很有趣，同時覺得既然接了工作，就要好好把工作做好，這是興趣和心態的問題。雖然王博士在大學物理系修過天文學，但畢業後就改念工程。縱使物理背景讓他研究所選擇偏向基礎科學的研究，但畢竟和天文差異還是很大。不過即使知道有差異，他還是對自己有信心，決定盡可能地去學習。於是就自己進修知識，找資料找書看，在外國觀摩旁人，遇到問題就問；藉由國際合作，累積經驗、慢慢學習成長，之後把臺灣這邊的實驗室與研發團隊也建立起來了。

10 年來，王博士所參與負責的光學或紅外線天文儀器國際合作研發計畫，除了 WIRCAM 外，還有昴望遠鏡計畫（包括即將完成的 Hyper Suprime-Cam 與接下來的 Prime Focus Spectrometer 計畫）、與第一及第二代的中美掩星計畫（TAOS 與 TAOS-2）。

### 【誰來研發天文儀器？】

天文儀器領域的特別之處是涉及很廣，所以做天文儀器的人，各個背景都不一樣。王博士表示，學校的教學訓練不可能涵蓋所有東西，念電機、光學、機械、電子的，雖然都各有所長，有些人可能對光學較強、有人對偵測器較在行，但在這裡，對儀器一般概念和各設計部位都

得全盤認識才行。然而要做這行，即便在外國也沒有什麼標準的訓練流程，主要就是透過去問、去想、去找資料、去看人家如何做。在這個領域該如何裝備自己？首先得讓自己充滿好奇心和疑問。王博士特別強調好奇心其實是可以後天訓練的，就是「別把每件事都當作理所當然」。好比每個設計的細節裡都藏有很多的考量，其實都可以問出一大堆問題來。會主動去想問題，這樣才能很快地學到更多。你也可以有自己的猜測或推論，當不確定時，就要去問清楚，因為有時候設計的人或其他人的想法未必和你一樣。問問題也不能無厘頭，得要先下一些基本功夫，看資料、想過、嘗試瞭解過，再去問。「有好奇心、對看到的東西產生疑問，然後不要怕學習新的東西，不要怕提問題」這是給將來對有志於這領域的人的建議。

由於天文研究很重視想像力，天文儀器的開發還需要創新的能力，所以除了充實知識外，王博士表示「動手作的經驗和獨立建構思考能力的培養」也很重要。畢竟有些東西書上不見得會提，或是書裡頭僅僅一句話帶過的內容，等實際遇到、做了，才知道原來那句話其實很重要。透過有經驗的人來口頭傳授雖然比較容易上手，但是總是自己重複試誤、思考過後，才能有深刻的印象和經驗。美國有些大學的天文學門有專門作儀器的老師，學生因此有機會選擇跟這些老師動手做。日本在這幾年來的天文訓練，則是強調每個學生除了天文學術研究外，還要會儀器開發，所以訓練出來的人對儀器上的瞭解就會比其他國家來得強。相對的，臺灣學校的天文教育在動手作的訓練上就比較不足，學習過程中實際設計、動手做的經驗很少。訓練出來的人，對儀器開發可說毫無概念。有些工程人則是學術上的思緒比較不清楚，或許有動手做的經驗，卻在邏輯分析或獨立思考的能力上比較不夠，得靠主管一步一步告知，不然就轉不通，卡住動彈不得。這些點，是本土儀器工程訓練需要加強的地方。

此外，「興趣」與「心態」是在天文儀器領域堅持下去的原動力。本所天文儀器方面常常徵人，除了研究計畫的用人需要，也有找來的人才待不住的因素。有些人是因為公家機關薪水不夠高，也有人是不適應這裡工作的高度挑戰性，因為在這裡除了需要知道設計的前因後果，還要能獨立構思和解決問題。還有些工程人以為在學術界設計儀器「目標不是很明確」，覺得很難熬，成就感不大，挫折感很深，所以待不下去。不像業界是要求很快就設計出一樣東西，然後量產上市；天文儀器開發因為目標是可靠、能重複用不會壞，做出來的儀器不會去量產，卻會不斷地做修改。所以一個成品要出來之前，為了要讓儀器發揮最大的效能及穩定運作，需要很長的時間解決瑣碎的問題。不過，做好的東西最後會用在天文研究上，王博士認為做天文儀器的成就感其實是這樣來的。所以他在面試用人時，都會問應徵者是否對天文有興趣，有興趣，在這個領域工作才會愉快。再來就是心態積不積極的問題了，對自我發展與表現是否有所期許，對工作歸屬是否有認同感和熱情，這些都會影響在這行工作的續航力。

### 【臺灣天文儀器研發訓練的瓶頸】

臺灣天文儀器研發人才難找，和本地的教育文化也有關連。王博士感覺臺灣教育出來的人，大致可區分為兩種類型。一種人比較消極，念了什麼科系，大家都找什麼工作，自己就跟著這麼做，對自己的未來和興趣並沒有太多想法或從來不想，也沒有特別的規劃。工作對他們而言只是一份謀生的方法，一切發展都是碰機運。另一種人比較功利，任何決定的背後總是考量很多利益因素，像「前途」或「錢途」。很少人像歐美國家那樣，書唸一半，發現興趣不合時會轉科系，或是會為了嘗試不同工作而改行。現在臺灣的碩士滿街都是，和歐美比起來，真的因為有興趣而去念的恐怕不多，有些人是抱著混個學位的心態，也有人只是為了延長在學校的時間而繼續唸書。所以要找到對自我發展與表現有所期許，對工作有興趣、有認同感又熱情的天文儀器研發人才不容易。

此外，要訓練臺灣學生「動手作」也有實際上的困難。目前臺灣本土培養出來的天文博士基本上是不碰儀器的。這是因為這裡博士要畢業，強調得有 SCI 等級的學術論文發表。然而儀器研究很花時間，發表出來的論文通常都是在工程或天文技術性的刊物上，未必都有機會成為 SCI 等級的文章。如果要求博士生研發天文儀器，通常會影響他們畢業。連日本天文學者來到臺灣任職收學生，或許礙於體制關係，學生也不碰儀器了。王博士說，雖然本所也曾想過利用所內的儀器資源讓學生練習動手作，但因為學生都是跟國內大學合收的，如果要求學生去做儀器，怕會因為增加額外負擔，而讓學生卻步。雖然也有想過要和大學合開國際研究生學程，但因為幾個有天文科系的大學都已經有自己的研究所和制度了，所以要找大學來合作也不容易。因為種種因素，所以這個想法就耽擱下來了。目前中央大學也開始想讓學生碰儀器，希望其它臺灣的大學也能瞭解到儀器開發的重要，開始訓練學生。

王博士還指出在臺灣本土做天文儀器訓練一個難以克服的瓶頸：臺灣的天氣狀況並不很適合天文觀測，因此不會選擇在本地蓋先進的天文望遠鏡。目前除了中央大學有自己的望遠鏡基地在鹿林山，其他臺灣開發的天文儀器都是國際合作，而且都放在外國基地，也因此無法提供學生練習儀器製作，這對臺灣本土天文儀器開發的訓練和發展相對造成限制。目前我們只能用和國外合作的方式，先做儀器的一小部分，吸取經驗，然後看能不能應用學到的技術，從頭到尾完成一個儀器，在臺灣本地做組裝，然後再送到國外的望遠鏡基地運作。等 TAOS-2 在墨西哥開始運作後就要退役的鹿林山 TAOS 望遠鏡，TAOS 團隊也考慮過利用它來訓練臺灣本地的學生。不過要維持鹿林山天文臺的運作和教學，得要仔細考慮人力和經費的問題，未來該如何好好來使用退役後的 TAOS，目前還在思考規劃中。

但是像這樣在臺灣本地做儀器組裝，然後再送到國外的望遠鏡基地運作的方式，剛開始有一些反對的聲音，但慢慢地大家就瞭解這才是最有效的方法。蓋了一個望遠鏡放在臺灣卻無法有效利用（觀測環境、支援人力、及運轉維護經費等問題），不如花一樣的錢，然後把望遠鏡送到外國適當的地點做觀測研究，才可以很快收集資料，產出科學成果。畢竟做天文儀器最終目的還是希望能很快有科學成果出來，所以現在反對的聲音比較少了。

另一個推展臺灣天文儀器研發的瓶頸是計畫規模和經費的問題。臺灣天文界的規模小，今後全球的天文儀器計畫卻是越來越大。比如說一個天文儀器計畫從前只需要 1 千萬美金就搞定，但以後面對的卻是 1 億美金或更大的計畫規模。然而臺灣能爭取到的天文儀器計畫經費很有限，所以就算我們有能力獨立設計做出整套的天文儀器，也會礙於經費，而沒辦法做到那麼大的規模。只有像 TAOS-2 那樣的規模我們才負擔得起，其他大型計畫，像夏威夷毛納基峰要蓋的 30 米大型望遠鏡國際計畫，我們尚未積極去爭取，原因就是仍未找到能凸顯臺灣重要性的工作定位。目前我們都是在經費許可範圍內，努力在國際合作中插一腳，像阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列計畫（ALMA）計畫那樣，我們放了 1 千萬美金，當個小小的合作成員。但是別小看這樣，即便如此，我們還是得小兵立大功，讓外國承認臺灣的加入是有助益的，人家才會讓我們加入。目前本所在天文儀器方面，無線電觀測仍是發展主力，可見光和紅外線方面能取得的資源還是比較少一些，可能還需要一段時間去成長，這方面才有辦法在國際的大型計畫中作出關鍵性的貢獻。

### 【臺灣的紅外線天文觀測儀器研發】

王博士學生時代專攻紅外線偵測器的低溫半導體研究，2001 年進入本所後旋即加入 WIRCAM 開發計畫，這個計畫是為了取代 CFHT 將退役的舊紅外線相機。新相機換了更大、

視野更寬廣的鏡片，同時搭配更靈敏的紅外線偵測器（將4片4百萬像素的紅外線陣列組成一個1千6百萬像素的紅外線相機，搭配8個濾鏡），效率比原來好很多，可用來觀測波長涵蓋0.9~2.5 $\mu\text{m}$ ，宇宙中較低溫的天體，或是偵測宇宙早期遙遠星系的訊號。本所與CFHT除了談科學合作外，也希望藉由儀器開發，提供臺灣天文儀器工程人員訓練和發展的機會。

王博士提到，美國政府紅外線儀器技術的開發是政策性的，如NASA等單位有大型儀器計畫要執行時就會開出系統需求，然後儀器公司就會研發儀器去競標。這些紅外線儀器公司很多都是美國軍方的供應商，所以很多技術是軍方的技術，只是轉做天文用途，也因此美國的紅外線儀器輸出是有管制的。臺灣要自己來做紅外線儀器其實也是可以，只是我們並沒有花很多資源在研發紅外線技術，所以國內做出來的儀器和美國是沒辦法比的。天文儀器又比較特別，我們也不可能向國家要錢特別去開發天文紅外線偵測器，所以要做這方面的研究，還是會從美國輸入偵測儀器。

研發紅外線觀測儀器會面臨的一大挑戰，在「如何解決輻射干擾無所不在的問題」。王博士解釋，所有東西隨時都在輻射電磁波，溫度越高，輻射的電磁波越長。太陽的溫度很高，所以輻射的電磁波落在可見光範圍。而地球的溫度一般是在0 $^{\circ}\text{C}$ 到50、60 $^{\circ}\text{C}$ 間，幾乎所有東西輻射出來的電磁波都是落在紅外線的範圍。用紅外線望遠鏡一看出去，在有溫度的地方看到的全是光，溫度越高，紅外線的輻射量越多。如果想看到天空（外面宇宙）的紅外線光源，首先就得先抗衡地面的紅外線輻射干擾。避免干擾的方法就是把本身的溫度降低，冷到很低溫時，本身環境輻射的波長就跑出紅外線的範圍外。這樣，把自己的輻射降低到比天空的少，就能測到天空來的紅外線了。目前天文儀器製造低溫的方式有兩種，一種是利用液態氮，另一種用液態氦。前者的溫度是77 $^{\circ}\text{K}$ ，很接近-200 $^{\circ}\text{C}$ 。液態氦更低溫，約到4 $^{\circ}\text{K}$ 左右，是做無線電接收器時才需要的，因為他們要偵測的無線電波長更長。波長越長，所帶的光子能量越小，就得把系統本身的溫度降得更低，這樣才能避免干擾。紅外線觀測當然也可以降到那麼低溫，不過-200 $^{\circ}\text{C}$ 其實就很夠了，畢竟降溫是要花時間的，儀器越大，降溫要花的時間越久，像WIRCAM光降溫就要花2天的時間，所以目前儀器都是隨時保持運轉狀態，不然常常重複升降溫，儀器很容易因為熱漲冷縮而損壞。也因為這樣，天文望遠鏡通常都有所謂的觀測時程登記。像CFHT因為可以搭配更換光學系統以及紅外線系統，排程時就會把使用類似觀測儀器的案子放在一起，過一陣子再換成條件不同的另一批。每年3月底及11月底科學家們就要把所有未來半年的觀測企畫送去CFHT審核，5月和11月時就會分別公布8月到來年1月、以及2月到來年7月的觀測計畫。

現在專業的天文望遠鏡都有專門的工作人員在支援、維護和負責更換儀器，這些人也必須對儀器很熟悉才行。臺灣之所以目前無法設置像CFHT這類先進的天文望遠鏡，一來是沒有足夠的儀器專業人才，二來要維持這類先進望遠鏡的運轉需要龐大的經費。像CFHT一年就需要600萬美金（大約需要1億8千萬台幣），就算接單做觀測有收費，也只是平衡成本而已。因此我們臺灣的發展重點目前是放在研發先進儀器上面。

### 【王博士看中美掩星計畫】

王博士進入本所後也投入了1998年就開始規劃的中美掩星計畫（TAOS）。TAOS監測的是背景恆星的亮度，然後透過亮度變化的計算來確認是否有古柏帶小天體所造成的掩星事件。第一代的TAOS從2005年初開始運轉後已經收集到很多的觀測資料，但至今尚未發現任何掩星事件。為什麼？王博士歸納了三個原因：第一、臺灣天氣適合觀測的時間太少。第二是系統靈敏度表現沒有預期好，光這兩個原因就會讓我們所能得到的觀測資料總數比預期的少。

第三、古柏帶小天體的實際數目的確比當初的理論推估少，這些年來很多相關的天文觀測結果也都傾向支持這個看法。

從數年前就開始規劃的第二代 TAOS-2，將針對觀測時間、靈敏度和偵測速度做改進。首先是改進觀測時間受限於氣候的問題。原訂 2008 年在夏威夷建置的 TAOS-2，因為協調取地的問題，現決定改建在墨西哥境內北邊緊鄰美國加州下方的下加利福尼亞州半島上。那裡一年的可觀測時間達 300 天左右，和目前鹿林山 TAOS 的一年約 500 個小時（每晚觀測 8 個小時的話，一年只有 60 天左右）比起來，資料收取量可增加到 5 倍之多。其次，TAOS-2 將採用光圈更大的望遠鏡與更靈敏的相機系統。要找到更多的古柏帶小天體，就得監測到更多更暗的背景星點（因為星星本來就一直在那裡，只不過有的很暗看不見而已）。靈敏度提高之後，相對能偵測到的小天體數目可望增加 10 倍。第三，增快偵測速度。若能察覺更短暫的掩星事件，便可找到更小的古柏帶天體。TAOS 目前每秒可以測量 5 次，TAOS-2 新系統的速度打算提高到 4 倍，每秒量 20 次。矛盾的地方是，要看到更暗的星就得把望遠鏡的光圈變大。但為了提高偵測速度，曝光時間又必須縮短，這麼一來，又無法看到那麼暗的星了。所以王博士強調，在計畫的初期就必須先決定好目標，將各種因素都考慮進去。比如說：觀測時間增為 5 倍、背景星點監測數量變成 10 倍、偵測速度提高為 4 倍，再用這些參數回頭計算需要採用多大的望遠鏡。當然這些參數也不是都同時一起來考慮，而是有前後順序的。TAOS-2 改進這些缺點後，屆時可偵測到的資料就會比 TAOS 多出至少 200 倍。

（陳筱琪 採寫）



## 【掩星計畫的推手】李太楓院士專訪網路全文版

### 李太楓院士專訪

李太楓院士曾是本所籌備處時期的主任，也曾出任本院地球科學所所長。李院士學經歷豐富，專長天文及地球科學同位素研究，曾獲頒多種研究獎項和榮譽頭銜；不僅國際學術成就，在國內天文學與地球科學的發展和教育上，他尤其貢獻良多。本期季報主題—掩星觀測計畫，他就是重要推手，因此我們再度專訪李院士。除了掩星計畫與同位素研究，他也和我們分享了珍貴的人生經驗。

### \*推動臺灣天文發展\*

李院士是推動臺灣天文學發展的幾位重要人士之一。

李：中研院天文所的成立經歷了一番波折。剛開始臺灣天文方面的學者不超過 5 人，就是徐遐生、魯國鏞、賀曾樸、袁旂和我。最早徐院士找來了魯、賀二人回台發展天文，加上當時已經往來臺美的袁旂，我稱他們為「四人幫」，這四位就輪流回臺協助這裡的天文發展；那時我也已經回臺從事天文研究。當時中研院院長吳大猷對發展天文也有興趣，但發展天文需要大筆經費，而南港位處「偏僻」，交通不方便，為吸引人才歸國及方便學術交流，天文所因此選擇設在臺灣大學。然而那時中研院經費比較短少，便由李崇道副院長負責籌措經費與交涉設置地點，幾經波折後才底定。

### \*掩星計畫的推手\*

#### 【緣起】

1998 年開始籌備，2005 年起正式運作至今的第一代掩星計畫 (TAOS)，以及接下來由臺灣獨資，將在墨西哥上路的第二代掩星計畫 (TAOSII)，李院士都是重要推手。

Q：掩星計畫這個想法是美國天文學家 Charles Alcock (現任哈佛史密松天文物理中心主任，曾是李院士在 Caltech 加州理工學院研究時的同學) 所提出。但掩星計畫是怎樣開始的？TAOS 合作計畫的地點又為何會選在臺灣？

李：Alcock 最初使用掩星法，其實是為了觀測暗物質。那時對暗物質的說法有兩派，一派認為暗物質是由許許多多交互作用很微弱、幾乎沒有質量的粒子受到重力影響而集中在一起，被稱為「WIMPY 派 (軟弱無力之意)」，是 Weakly Interacting Massive Particles 大質量弱相互作用粒子的簡稱。另一派是「MACHO」派，這個很陽剛的名稱，是 Massive Compact Halo Objects 暈族大質量緻密天體的簡稱，本派認為暗物質是大塊頭天體，只是發光很微弱 (如：白矮星)。為了研究這個，Alcock 參與的 MACHO 計畫，想到要利用鄰近我們銀河系只有 18 萬光年的麥哲倫星雲，這個星雲裡有塊區域聚集了很多很大又很亮的年輕星球，星球密度很高，從我們這裡的角度望去就有約百萬顆以上。Alcock 將這個區域的亮星球當作背景光源，來研究那些在我們和背景光源中間通過的暗物質。不過暗物質造成的掩星現象與彗星和小天體造成的掩星現象其實不太一樣，暗物質通過背景光源前方時，會因為重力透鏡效應聚焦光線，而產生愛因斯坦環的現象，我們觀測到的背景光源亮度會突然增加，然後再掉下來。Alcock 他們一次可以觀察約 100 萬顆背景星球，後來共觀測到 13、14 次掩星現象，證明的確有暗物質存在。這些觀察結果中至少有百分之九到百分之十後來證實真的為暗物質所造成。配合合理的參數計算後，估計銀河系大約有 2/3 的質量都落在這些看不見的物質上。Alcock 他們後來想看看掩星觀測還可以應用在什麼地方，於是就想到去觀測 KBO。

TAOS 掩星計畫主要是希望進一步瞭解海王星外圍 (30 天文單位之外) 所謂太陽系邊疆

的情況。位於這片廣闊邊疆的天體亮度都很黯淡，包括我們最感興趣的古柏帶天體（KBO）。光度和距離平方成反比（ $r^{-2}$ ），光發射出去碰到 KBO 再反射回來，亮度只剩下  $r^{-4}$ 。光度之所以黯淡也和光線的反射率有關。像彗星的反射率就很低，通常小於 20%，哈雷彗星只有 5%。至今曾出現在地球附近，我們能觀察到的彗星最大只有 30 公里，更小的天體幾乎是看不見，這些小天體就得用掩星法才觀測得到。

用掩星方法觀測 KBO 比觀測暗物質要困難得多。暗物質會造成背景光源的光度變亮，而且光度變亮的訊號，平均大約可維持一週，所以較容易觀測，這一週期間還可通知全球天文臺一起來驗證。然而 KBO 造成的光度變化，不是變亮，而是變暗，同時因為天體直徑都很小，掩星現象過程非常短暫，平均只有 0.2 秒（每秒至少得做 5 次監測才行），所以很不容易觀測。也因此，著名的「自然 Nature」學術期刊稱掩星觀測者為「Shadow Chaser（影捕者）」。

此外，掩星現象稍縱即逝，一轉眼就結束，沒辦法找其他人幫忙重複驗證，所以很容易誤判。為了減低誤判機率，Alcock 估計最少需三台 50 公分望遠鏡同步監測  $10^9$  次才行。這樣的條件下，理論上一年大約可觀測到 10 次 KBO 所造成的掩星事件（也就是一個月不到 1 次）。

掩星計畫的三台望遠鏡，美國勞倫斯利福摩爾國家實驗室（Lawrence Livermore National Laboratory）率先贊助其一，為了其它兩台，Alcock 來到台灣找當時本所籌備處主任魯國鏞籌措經費。臺灣受限於天候條件，重要大型的天文觀測計畫都無法在此地進行，掩星計畫算是比較可行的題目。同時因為當時本所已經開始進行位於夏威夷的次毫米波望遠鏡計畫，掩星計畫望遠鏡除非蓋在臺灣，否則臺灣提供經費的機會不大。也因此，TAOS 計畫才定案在臺灣中部玉山山脈的鹿林前山。臺灣方面有中研院天文所和中央大學天文所各認領一台望遠鏡，後來韓國延世大學的第四台也加入陣營。

## 【困難】

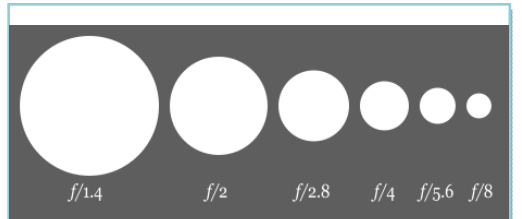
TAOS 計畫的執行並不如想像中順利，最主要的問題出在超廣角望遠鏡的設計製作、以及鹿林山天候濕度太大這兩方面。

李：原本大家的野心很大，想將望遠鏡設在比鹿林山更高、更無天候條件或光害干擾的玉山北峰；望遠鏡和天文台的圓頂還因此設計成可拆解成 50 公分以下的小塊以方便人力背負上山。然而要人力搬運那麼多又重的貴重儀器與零件到無路可達的北峰有執行上的困難，才決定改放在鹿林前山。後來才發現氣候不好、雲層位置不好的影響太大；天空不清澈以及嘉義那邊來的光害和空氣污染，也讓觀測的背景雜訊變得很高。

TAOS 最初規劃在鹿林山時，大家對在臺灣進掩星觀測的天候條件原本比較樂觀，那時曾參考過中央大學在鹿林山天文臺設置的望遠鏡。不過後來發現中大望遠鏡可進行觀測的時間是我們的兩倍；這和我們彼此望遠鏡的「焦比」有關。望遠鏡有所謂的焦比（F-ratio），就是焦距除以口徑（光圈直徑大小）的比值，焦比值越大，能進入成像的光線越少，視野越窄。中大的 1 米望遠鏡主要是為了看一顆一顆星星用的，景深長、焦比大，看到的天空視野很狹窄一塊，只能看到周圍 15 角分左右的角度。TAOS 的 0.5 米望遠鏡



圖說：利用流籠吊運 TAOS 望遠鏡至鹿林天文台，在當時無路可及的情況下，大部份設備皆由人力搬運。@中研院天文所



圖說：望遠鏡有所謂的焦比（Focal ratio），就是焦距除以口徑（光圈直徑大小）的比值，焦比值越小，能進入成像的光線越多，視野越廣。焦距是光圈直徑的 4 倍時，焦比值即為  $f/4$ 。焦比值為  $f/4$  時，鏡片焦距若為 100 毫米，需配合直徑 25 毫米的光圈，鏡片焦距為 200 毫米時，則需配合直徑 50 毫米的光圈。圖片來源：Wikipedia

與中央大學不同，是「廣角」的，視野有 1.7 度（1 度=60 角分）；我們要做的是大範圍觀測，焦比小。然而玉山鹿林那裡溫度接近霧點，容易凝結水氣，廣角主鏡面一旦結水便不能做觀測，所以當地相對濕度只要一達 85、90% 就得關閉遮罩。現在全球暖化，情況更差。鹿林山天文臺剛好在雲層的過渡區域，以前雲層高度多在天文臺下面一點點，現在雲層壓不太下去，天文臺變成常常位處雲層中，甚至在雲層之下，是全臺灣霧氣最大的地方之一，濕氣很重；特別是冬天天氣通常不好，更難以觀測。一年的可觀測時間只剩下 2~3 個月。

除了天候問題，望遠鏡本身的設計也有瑕疵。望遠鏡是美國那邊簽約廠商做的，在我們加入計畫之前合約就已經訂下。廠商的製作遙控的能力還不錯，機械和光學能力就不太行。首先是望遠鏡聚焦能力不夠，成像銳利度達不到規格。TAOS 望遠鏡需要的焦比小、景深短，廠商送來的鏡子卻定位不合，結果只能對中間區域清楚聚焦，外圍區域都模糊不清。我們的人員想盡辦法補強很久卻還是不行，觀測極限仍然差了至少一個星等：比如說原來可集中光線到 1 角秒的，後來變成 2 角秒，這樣能測到的光度就差了 4 倍。再來是主鏡、副鏡鏡面的排列（alignment）也不好。中央校正鏡（由三面鏡子膠合組成）對準主軸的排列理論上應該要很正確（誤差要在  $25\mu$  以內），稍微不對就會影響觀測。

## 【掩星計畫 II】

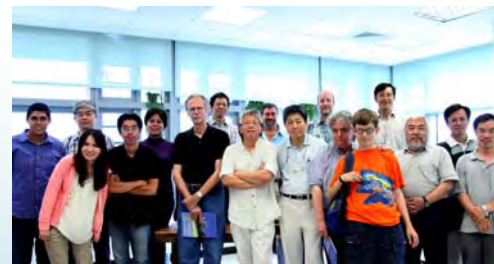
TAOS 因為儀器極限和臺灣天候限制而無法得到預期的觀測成果，針對這些問題進行修正的第二代掩星計畫（TAOSII）因此誕生。

李：TAOSII 是臺灣獨立執行的，連經費也是。廣角視野 1.5 度，能將成像效果提升 200 倍的 TAOSII 望遠鏡原型（prototype），新廠商基本上已經完成。目前第一台望遠鏡正運往墨西哥，順利的話，三台 TAOSII 望遠鏡三年內便可陸續就位，正式上工。

TAOSII 我們是和墨西哥天文臺合作，望遠鏡就設在墨西哥天文臺，他們那邊大約有一百個工作人員，不少人都可以來配合，對方也希望藉這個機會向臺灣學習一些研究和做事的方法。TAOSII 最初的首選地點其實是夏威夷，但因為土地使用問題而沒有談成。第二選擇是智利 CTIO 天文臺，不過對方除了費用收取，對其它科學研究方面似乎興趣不高。墨西哥是最積極努力配合的，加上當地天候條件佳，從臺灣到 TAOSII 預定地—墨西哥的 Sierra de San Pedro Mártir 國家公園，也只需飛 12 小時到聖地牙哥再開 5 小時車就到了，與前往智利 CTIO 天文臺的 30 小時行程相較，方便許多，因此中選。

我對 TAOSII 主要和最後的貢獻就是去和墨西哥人「談判」。當時正好有一個「第三世界科學院院士」會議在墨西哥舉辦，本院院士包括我有數人被選中，因為說要頒院士證書，不好意思不去，所以就參加了那個會議。藉此機會，我順道和墨西哥國立大學天文臺談 TAOSII 的案子。臺長親自來談，後來他們也很有意願合作。能和墨西哥大學天文臺合作，主要也是有所賀曾樸所長所熟識，優秀、有經驗也有些影響力的學者從中牽線，努力促成的。墨西哥大學天文臺一直發展得很不錯，因為受西班牙航海國家統治的影響，墨西哥天文天象研究開始得很早，一直以來他們也有和美國加州合作天文研究的傳統。

## 【TAOS 掩星觀測 Q&A】



圖說：TAOS 成員合照，由右至左，張書豪、溫志懿、陳文屏、王祥宇、Andy Szentgyorgyi 之子、Andy Szentgyorgyi、Matt Lehner、李太楓、Tim Norton、賀曾樸、金升光、Charles Alcock、Paula Granados、張智威、嚴華玲、汪仁鴻、Santiago Torres。@中研院天文所

Q：TAOS 望遠鏡都是三、四台擺在同一個地點進行觀測，為何不是像「甚長基線干涉技術（VLBI）」那樣，在地球上找三個點（三角點）來觀測收集資料？

李：其實一台望遠鏡就可以做掩星觀測了，只是這樣誤判的機會大很多，假訊號很多，所以才多設幾台望遠鏡同步觀測。至於為什麼在一個定點就可以觀測，這是因為掩星的範圍都很小，時間也很短，和日蝕或月蝕不一樣。因為地球自轉的關係，掩星事件這裡看得到，離得遠一點有可能就看不到了，所以在臺灣才會設計剛好在「正東西」方向上放幾台望遠鏡來先後進行觀測，稍微錯過一點都不行。不過在墨西哥我們便不用這個方法來設計，因為太困難。現在的方法是去判別並減低假訊號的干擾，以前在鹿林是假設每個月測到一、兩次訊號，墨西哥那邊天候好很多，每個月或許能夠測到 10 次訊號；然後就要想辦法將假訊號的干擾機率降低到  $1/10^6$ ；我們現在已經可以降低到  $1/10^{12}$ ，統計上來說，這樣的誤差比較可以接受。

Q：觀測到的掩星事件，應該無法分辨該事件是不是由「同一顆」小行星所造成的，也就是看到的數次掩星事件會不會其實都是同一顆小行星所造成的？

李：是有可能。所以需要收集一段時間的觀測結果，經由統計分析和電腦模擬來推論小行星的數目、狀態、並假設其分布和運行情形，再用其它方法看看是否能驗證望遠鏡的觀測結果。統計方法很複雜，這個後段的分析部分我就沒有參與。我對 TAOSII 主要、也是最後的貢獻就是去和墨西哥人「談判」，之後的研究和分析就交棒給其它後進了。

### \* 人生經驗 \*

李院士除了學術研究，也很有藝術與哲學涵養，這和他家世充滿書畫香有關。父親是人文氣息濃厚的知名畫家李德，母親是北一女中的圖書館員，學生時代的李院士曾經創辦以發展哲學藝術興趣為宗旨的清大「觀瀾社」。聰明資質加上努力與好機運，李院士的研究之路走得相當得心應手。這些成就光環，數年前雖因帕金森氏症影響稍稍減采，但不減的是他對研究與教育的興趣、和對健康人生的堅持。本次專訪原本希望從李院士這個人生「轉折點」切入，但是李院士最初的回應是：「病痛的問題也許就不要講。因為病痛的人會同病相憐，沒病痛的人對這個沒有興趣…」，然而，能面對長期病痛、克服困難挫折、跌倒再爬起來的經驗和哲學，或許才正是曾經因病受挫的許多人，甚至是曾人生受挫的一般人最想要的激勵與參考呢。於是，李院士以輕描淡寫的方式與大家分享他其實不平凡的經歷。

#### 【跌倒、爬起來、繼續往前】

李：現在的我其實只是提前老化而已，沒有什麼；倒是以前唸書時曾把胃切掉一半…年輕時我得過幽門桿菌胃潰瘍，在美國唸完博士那年要前往芝加哥途中，胃突然大量出血，因為接近動脈，無法止血，嚴重到搭救護噴射機去大醫院。當時唯一辦法就是開刀，把一些促進胃酸分泌的神經切掉，胃割掉一半，休息了一年才恢復元氣。

現在這個帕金森氏症就是提前老化，沒辦法治癒，得靠吃藥；沒吃藥，就會像老先生一樣彎腰駝背的，身上肌肉不太聽話。藥物副作用就是低血壓、精神不好，走路容易摔倒。現在我每週三次去健身，加強神經傳導，讓肌肉不要萎縮。帕金森氏症因為神經傳導會變得比較差，要服用多巴胺，但有抗藥性，久了藥效也會越來越不好。…我倒沒有因為這個病特別沮喪，只打定主意，第一優先就是把身體調養好，保持規律運動是最重要的事，不管有什麼其他事都不能打斷。既然無法對抗這個病，想辦法維持健康狀態是唯一能做的，運動是最好的辦法。再來就是該退休的時候就退休，退休後想去做一些科學教育方面的事，比如編寫教科書、或者是一些其他科學教育或和推動天文發展經驗有關的書籍。

#### 【科學、藝術與哲學】

Q：您父親李德老師是知名畫家和美術教育家，您小時候也學音樂，大學還創辦哲學藝術社團「觀瀾社」。雖然您因圖書館員母親的影響，從小有機會接觸許多天文科學方面的書籍，但興趣與未來職業發展還是不同。當初選擇朝天文、地質研究發展，而非走上藝術的路，是順其自然的嗎？

李：當初我選擇科系完全是興趣考量，基本上我只有考慮歷史系和物理系（當時還沒有天文系）。選擇物理系是因為看起來未來比較容易找出路，比較有飯吃，尤其那時候楊振寧、李政道、丁肇中很出名，是很多人的學習典範。臺灣當時也在推動科學發展，男生都喜歡進甲組（理工科），所以也有受當時風氣和制度影響。可惜不能跨組，如果可以跨組，我就跨組了。

藝術方面我是覺得自己不是那麼有才能，小提琴也拉不好，鋼琴也彈不好（編註：老師很謙虛～），學琴其實也不是因為特別喜歡，是被父母親架去學的。父親不太管我，但希望我去學個琴，於是母親就叫我去學琴，很積極地找了像廖年賦、司徒興城等這樣的名師來幫我上課。我父親後來自己也說要去學琴，買了個大提琴，拉沒兩次便覺得夠了；他就跟中國文人一樣的哲學，覺得「意思到了」就可以了。叫我去學琴主要也是因為希望培養我一些音樂的興趣，還有希望我從小能接受一些音樂方面的訓練，我呢，只是去「執行」而已。父母親也不會逼我練琴，不過會讓我自己去買票聽古典音樂會。那時候也沒什麼音樂會場地，大概就是國際學舍，很像是在「貨倉」裡面開音樂會，音樂演奏到一半有時還會傳入飛機從上空飛過的噪音，演奏的外國音樂家臉都綠了，很不可思議的時代。後來的國家音樂廳，對聽音樂的人來說，真是偉大的進步。

Q：您父親常常講一些藝術哲學的話來勉勵學生，他也會跟您說這些嗎？對您有過什麼影響呢？

李：18歲之前父親其實不太跟我講話的，大概他覺得和小孩子沒什麼東西可討論，是傳統型的父親，講話都很短幾句而已。直到我當研究生一、兩年後才能夠和他「平等」講話。我記得那時曾經跟他寫過一段話，大致上是：「這世界上有很多人，有的既有天資又很努力，可是沒有成功，最後能夠成功有成就的人，歸因於『運氣好』；但是既無天資又不努力的，是根本不會有運氣讓你從無中生成功來的。」他覺得我講的蠻有道理的，大概因為這樣，覺得我頭腦變得比較清楚，之後就可以和他平起平坐談話了，他對我跟他提的有關天文的事也都蠻有興趣的。後來我出國，就很少有機會和他講話，從那時開始，每次我回國，他都會安排和我去旅行，必去的兩個地方是故宮博物院和溪頭。就跟我現在差不多，我兒子偶爾回國一次，我都會帶他們去玩，把握相聚的時間。

### 【勉勵】

Q：您對臺灣未來想從事天文研究的學子，或天文方面的新進，有什麼勉勵的話或建議嗎？

李：我都跟我的學生說現在國內學天文比我們當年容易很多，因為師資、教育和研究的資源都比以前多很多。我當年的臺灣沒有教天文的老師，只能在美國新聞處的圖書館找資料，把美國標準的天文教科書從頭看到尾。不過大學其實也沒有必要一定得進天文系，主要是物理，要能理解，物理能夠理解的話，就72變也跳不出你的手掌心，這樣再來念天文就沒問題。

天文沒有想像中的難，不過就是把物理應用在星球和太空的研究上而已；星球的研究其實就是核子物理及流體力學的應用。同樣的這兩門科學，也可應用在核能發電與核彈設計上，放在天文的恆星研究上時，就好比在研究一座利用核融合產生能量的巨型「機器」。

還有就是天文儀器，天文在儀器技術方面要求非常高，對動手做有興趣的人可以來試試。天文儀器都是不計成本在推進前瞻技術，要求的規格多是「不可能」的規格，都是

很多錢堆出來、很多精力研發出來的成果。研發儀器要花很多很多的經費，一般業界公司是不會自願去做這些事的。基本上天文的挑戰性很高，如能看到自己所參與的天文儀器做出來了，全世界就這一台呀，還能操作運轉，感覺很自豪的，這就是很大的推動力。

(專訪文 陳筱琪)