



中央研究院
天文及天文物理研究所

【次毫米波陣列】揭露宇宙演化奧秘的利器

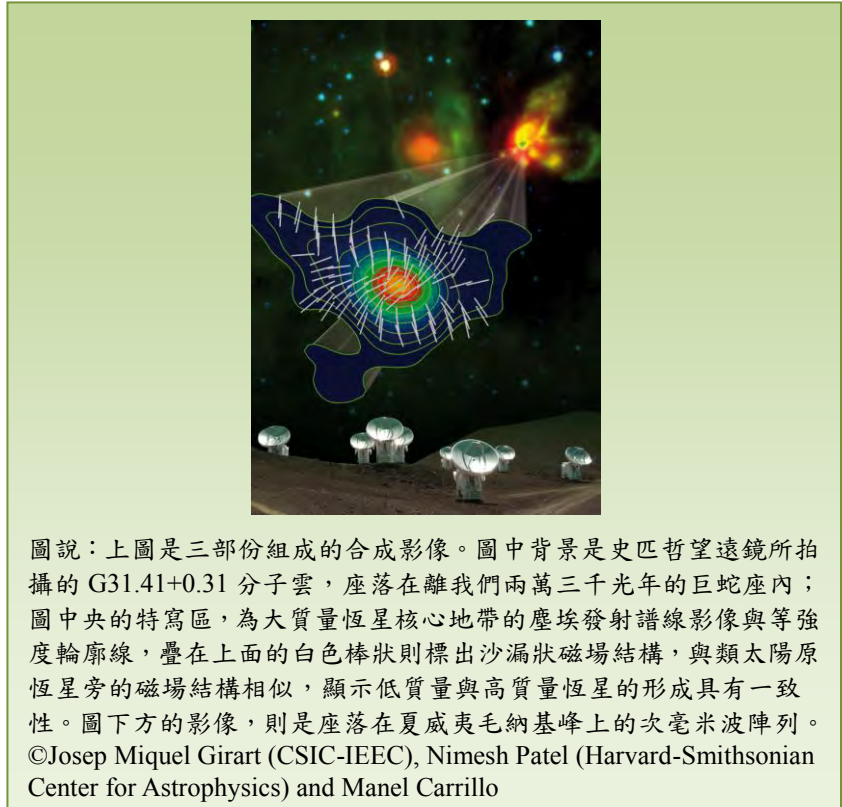
次毫米波陣列(Submillimeter Array 簡稱 SMA)，矗立於夏威夷大島毛納基峰(Mauna Kea)上，穿透山頂上全球數一數二穩定而乾燥的大氣，觀測太空中天體所發出的毫米與次毫米波。SMA 屬於通用型望遠鏡，從太陽系內鄰近我們的行星、銀河系內的各種天體、乃至於銀河系外的其他星系、甚至是宇宙形成之初的原始星系，都在 SMA 研究的範疇之內。

星際間的分子雲乃是孕育恆星及其伴隨行星系統的搖籃。分子雲內部在可見光波段進行觀察時，因為消光作用無法直接看到，因此 SMA 成為研究恆星與行星形成的最佳利器。(次)毫米波段對應到眾多分子的轉動或震動譜線帶，並且不受消光作用影響，因而能夠直接用來偵測分子雲氣的內部，進一步提供原恆星與行星系統形成過程中未能被詳細了解的重要物理與化學參數。

迄今，天文觀測在星際與拱星物質中已發現了至少 115 種分子！耳熟能詳的好比一氧化碳(煤氣)、二氧化

碳(汽水成分)、甲烷(天然瓦斯)、甲醇(工業酒精)、乙醇(酒精)、乙醚(常用麻醉劑)、乙酸(醋酸)，甚至更複雜的醣類分子及含氮有機分子。SMA 的強項是它廣頻寬與高頻譜的解析度，以及八座可以變換排列組態的 6 米天線陣列所提供的高角解析度。這些特性使我們得以同時對數種甚或數十種分子進行譜線觀測，針對形成恆星的分子雲核心，或是環繞原恆星的原行星盤內緻密氣體之化學成份、分布與演化獲得更多資訊，甚至進而找到存在星際空間但以往無法被偵測到的化學成份。同時，SMA 也針對彗星或是太陽系行星及其衛星大氣的組成與變化進行研究，好比火星上的一氧化碳、土星泰坦衛星大氣中的一氧化碳與含氮的短鏈或長鏈有機分子，像是氰化氫(HCN)與氰基乙炔(HC₃N)。這些從地球進行的遠端觀測，與太空探測任務的實地測量相輔相成，將可揭露太陽系形成之初及其演化過程的奧秘。

比較星際物質與太陽系的研究結果，天文學家持續不斷地探討星際空間中化學成份的複雜度、以及生命必備元素在星際空間中的主要儲藏地。循著 SMA 的腳步，正在南美洲智利興建的阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列望遠鏡(ALMA)在不久的未來將提供更靈敏、更精細的觀測；這一類的研究對於地球、甚至廣大宇宙中生命的起源及分布或可提供極重要的線索。有一天，我們或許就能夠回答「早期彗星撞擊是否真的曾為地球帶來過大量的有機物，並進一步成為孕育地球生命的泉源」這類的問題。(呂聖元 特稿)

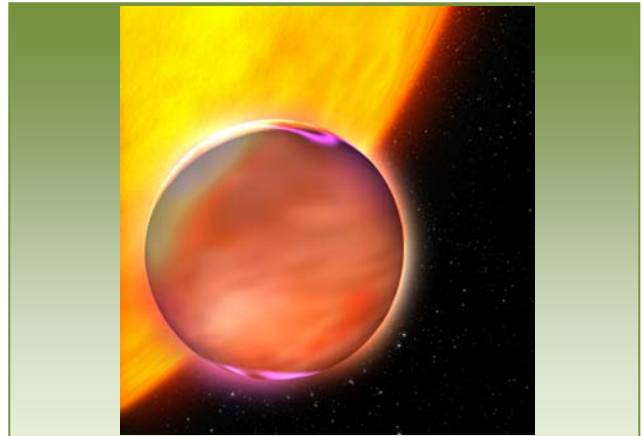


圖說：上圖是三部份組成的合成影像。圖中背景是史匹哲望遠鏡所拍攝的 G31.41+0.31 分子雲，座落在離我們兩萬三千光年的巨蛇座內；圖中央的特寫區，為大質量恆星核心地帶的塵埃發射譜線影像與等強度輪廓線，疊在上面的白色棒狀則標出沙漏狀磁場結構，與類太陽原恆星旁的磁場結構相似，顯示低質量與高質量恆星的形成具有一致性。圖下方的影像，則是座落在夏威夷毛納基峰上的次毫米波陣列。
©Josep Miquel Girart (CSIC-IEEC), Nimesh Patel (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) and Manel Carrillo

【本季最夯話題】尋找外星人，先從系外行星著眼

尋找外星人是大家最感興趣的話題之一，但也是非常艱鉅的大工程，光是尋找外星人居住的行星就不簡單。從遠處遙望恆星系統內的行星，就好比在探照燈光下搜尋螢火蟲一樣；因此尋找系外行星得靠物理學和高科技。

行星繞恆星公轉而自成一個系統，它們都繞著共同的質量中心運轉，且質量中心會靠近質量比較大的恆星，甚至可能在恆星的內部，因此恆星會產生晃來晃去的運動，並有徑向速度的變化。行星不易看到，但察看恆星的晃動卻容易的多；這在恆星觀測上提供了一個尋找行星的機會。1998年起，美國天文學家便利用五米望遠鏡進行長期觀測，11年後，終於在紅矮星 VB10 系統找到了一顆類似木星的行星—VB 10b。



圖說：藝術家筆下的系外行星。背景是系外行星的母星。©NASA Jet Propulsion Laboratory

即便測不出恆星的晃動，天文學家仍可以透過星光的都卜勒效應，量出恆星繞質量中心運轉的速度變化。1995年10月，美國天文學家 Michel Mayor 和 Didier Queloz 首次量到恆星飛馬座 51 的徑向速度變化，推測出一顆 150 倍於地球質量的行星—飛馬座 51b，並由 Geoff Marcy 和 Paul Butler 証實其速度為每秒 50 公尺，公轉周期為 4.2 天。

然而測量恆星公轉速度時，會有大約每秒 1 公尺的極限，這樣是無法量到質量更小的岩質行星的。以地球為例，造成太陽都卜勒效應的速度只有每秒 10 公分，若要找尋太陽系外的岩質行星，就得另謀新技術。

當行星正好遮掩到恆星時，會使星光短暫地變暗，就像太陽系的水星凌日。如果長期監看這種凌掩現象，也有機會找到行星。1999年，天文學家首次利用此法找到了一顆 200 倍於地球質量的行星—HD209458b，它的公轉周期只有 3.5 天。未來美國國家航空太空總署發射 Terrestrial Planet Finder 後，便可直接察看岩質行星，這將是尋找外星生命的一大利器。

另一種有效的觀測技術是利用愛因斯坦廣義相對論的微重力透鏡法。當行星進入遙遠背景星的視線上，萬有引力會造成透鏡聚焦的效果，讓背景星光變亮。2005年，天文學家首次利用這個方法在天蠍座的一顆恆星附近，找到 5 倍於地球質量的系外行星。

天文學是一門須要各種科學理論的高度精確觀測科學，唯有不斷努力學習研究，才可以在宇宙方寸之間的地球上，認真了解我們的宇宙。(曾耀寰 編輯稿)

【加法夏望遠鏡】瞭望宇宙的巨眼

加法夏望遠鏡(CFHT)，是加拿大、法國、夏威夷望遠鏡聯合機構的簡稱，英文全名為 Canada France Hawaii Telescope Corporation，是一個非營利機構。望遠鏡座落於海拔 4200 公尺的毛納基峰上，是毛納基峰天文台的成員之一，總部設立在美国夏威夷大島的威米亞鎮 (Waimea)，工作人員大約五十多名，大多為負責望遠鏡日常運作的機械工程師、電子工程師和程式設計師等；其中九名是天文學家。望遠鏡主要經費來自加拿大國家研究委員會、法國國家科學研究中心及夏威夷大學，這就是加法夏望遠鏡名稱的由來。

加法夏望遠鏡是一個口徑 3.6 公尺的光學望遠鏡，如果更換偵測儀器，也可以在紅外線波段觀測。目前加法夏望遠鏡主要的儀器有光學相機 (MagaCam)、廣角紅外線相機 (WIRCam)，以及高解析度光譜儀 (ESPaDOnS)。透過科學合作的方式，加法夏望遠鏡和本所也建立起長期的夥伴關係，包括儀器的研製、軟體的開發以及觀測的協助。同時，所有在臺灣的天文學家，都可以申請望遠鏡的觀測時間。

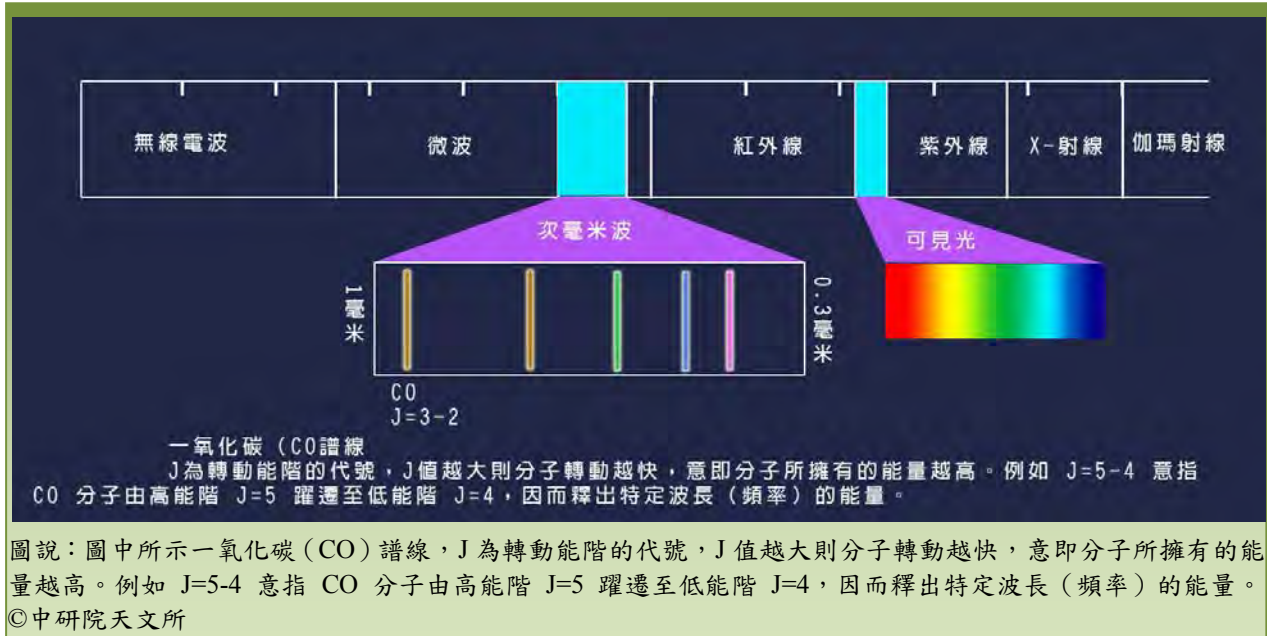


圖說：毛納基峰上的加法夏望遠鏡。©Jean-Charles Cuillandre

2010 年 11 月，本所主辦了「加法夏望遠鏡使用者研討會」，這是該研討會第一次在亞洲地區舉辦；因此，對法國、加拿大與美國（特別是夏威夷大學）的與會者而言，可以說是一次非常不同的經驗。會中除了由天文學家及工程師報告各項天文台運作的現況、儀器的研發進度之外，也有許多學者報告各項科學成果—從恆星的形成，到最遙遠的星系。雖然加法夏望遠鏡的口徑並不是世界之最，但是豐碩的科學成果，使其成為世界上一流的天文台。（顏吉鴻 編輯稿）

【光譜】次毫米波下的天文學

光譜，是電磁波強度依其對應的波長長短（亦即頻率低高）所排列出來的連續分布圖。電磁波的波長最短的是伽瑪射線，最長的是無線電波，次毫米波則位於微波與紅外線之間（如圖）。從地球進行次毫米波段的觀測，因為受到大氣層內水氣吸收的影響，即便是夏威夷海拔 4205 公尺處乾燥的毛納基峰天文台，有時也只有半數的電磁波能夠順利抵達。



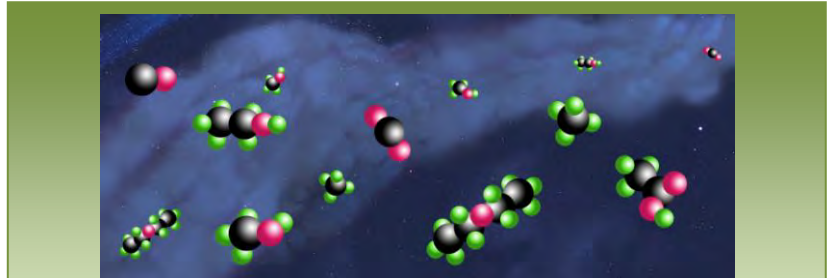
光譜中存在許多好比「指紋」般可以用來認定並研究宇宙中分子的譜線，其中次毫米波段的譜線對應到的是「轉動的分子」。處於氣態的分子可自由轉動，轉動的快慢對應到分子擁有能量的多寡。每一種分子，因為結構不同而具備其特有的稱之為「能階」的能量狀態階梯，也就是分子只能存在于特有的能量系列中，或在其間做類似上下階梯的跳躍。分子轉動的快慢可以透過與其他分子碰撞，或經由吸收或放射光線（電磁波）而改變。特別對於其中電子分布不對稱的分子而言，當轉動時，分子自身會像「手機」可以撥接電話一樣，能夠發出或吸收電磁波，並改變自身轉動的快慢。由於能階的限制，分子只在特定的能階間跳躍而釋放或吸收特定的能量，釋出或吸收的光線因此會對應於光譜上特定的波長（頻率），此即為譜線。附圖中列出了幾條一氧化碳分子在轉動的能階間跳躍時，所產生的光譜線供讀者參考。

在天文學中，藉由觀測譜線可以間接推敲出分子所處的物理與化學環境，如溫度、密度、磁場以及分子成分等。尤其在次毫米波段的譜線很適合用來研究溫度較高的氣體—例如恆星形成區周圍的雲氣。所以在很多天文研究中，次毫米波段的譜線觀測是不可或缺的重要方法！（楊淳惠、謝佩穎 特稿）

【星際介質】誰說落花無情物·化作春泥更護花

廣互星際的空間並非一片虛無，而是分佈著各式各樣的星際介質(Interstellar Medium)。我們熟知的反射星雲、黑暗星雲、以及行星狀星雲，都是星際介質。用比較物理的方式來陳述，星際介質是分布於星際間的氣體與塵埃。如同宇宙的元素組成，星際介質的主要成份是氫與氦，也含有少量的重元素。這些物質可以是氣態的原子（如氫原子雲）、離子（如電離氫區）、或分子（如分子雲）、甚至是固態的塵埃。

分子雲是孕育新生恆星的溫床。巨大分子雲的尺寸可達到一百光年，質量約為太陽的百萬倍（也就是說，平均密度只有每立方公分裏數百個分子！）。在我們的銀河系裏，就有著上千個巨大分子雲，大抵都分布於銀河盤面上。然而，分子雲內的氣體並非均勻的分布，「緻密



圖說：藝術家筆下的星際介質。各種氣體、塵埃、分子充斥於星際空間。©中研院天文所

核 (Dense Core)」是分子雲裏密度較高的地方，較強的重力場讓這些雲氣較有機會塌縮而形成恆星。著名的獵戶座大星雲，就是我們鄰近的獵戶座巨大分子雲中最活躍的恆星形成區之一。

其他的星際介質，也與恆星的生老病死息息相關！例如：初生的大質量恆星輻射強烈的紫外線，將周遭尚未全然散去的氣體游離而形成電離氫區。又如：年邁的小質量恆星，結構上並不穩定—恆星外層的氣體不斷被向外拋擲，造就了行星狀星雲。而大質量恆星的死亡—超新星爆炸—也為星際介質補注了新員。星際介質給宇宙的生生不息下了最好的註解！（蘇裕農 特稿）

【2010 年底最受矚目的天文生物學新聞】「砷磷」裡的那個「它」

2010 年 12 月，許多 UFO 迷以為 NASA 要發佈天文生物大發現的新聞，結果卻是關於一株來自美國東加州墨諾湖 (Mono Lake) 的細菌。雖然讓 UFO 迷失望，但是這株細菌卻佔盡全球科學新聞版面，這株命名為 GFAJ-1 的細菌能夠利用砷取代磷元素來生長。這個觀察因為顛覆了過去「六大基本生命元素 (氫、碳、氮、氧、硫、磷) 無可取代」的認知而備受矚目，引發各界不同角度的討論；但這裡我們先用客觀的立場來看看這個研究的內容。

這個研究由美國國家航空太空總署天文生物研究院 Felisa Wolfe-Simon 主導的團隊所完成。研究方法是利用含有高濃度砷離子(5 毫莫耳濃度)的人工合成培養基連續培養墨諾湖的細菌樣本後，篩出了一株耐砷性極高的細菌 (GFAJ-1)，在分類學上是一種耐鹽菌 (屬於桿狀鹽單胞菌科)。



圖說:上圖是兩部份組成的合成影像。圖中背景部份是美國東加州鹼性高鹽墨諾湖石灰華形成的塔狀地形©2009 Octagon；瓜子狀的東西為自加州含砷量高的湖中分離出的菌©2010 Science/AACS。

實驗中，作者發現在此含有高量砷酸根 (AsO_4^{3-}) 成分的培養基 (其中仍有極微磷含量) 可以讓 GFAJ-1 這個菌株繼續存活。相對地，在僅含極微量磷酸根與砷酸根的培養基對照組中，細菌幾乎沒有生長。作者又更進一步利用同位素 $^{73}\text{AsO}_4^{3-}$ 追蹤，確認砷離子進入菌體後確實可以成為菌體內化學成份的一部份，此因在蛋白質、脂質代謝物和核酸等重要成份中皆可偵測到同位素追蹤信號。作者還利用高解析度的二次離子質譜儀進行分析，證實砷在此菌株中可以取代磷成為 DNA 組成的一部份。最後再證實這些砷大多以五價離子的方式在菌體內和其他分子結合；由於這樣的特性和磷是一致的，藉此作者推測砷也可以進行與磷相關的生化功能，但並未進一步提供相關實驗的直接證據。

儘管目前對此實驗結果仍存在許多爭議；但綜言之，這個研究最重要的貢獻在提醒學界：當尋找其他星球生命形式時，不應再被「六大基本元素為唯一生命條件」的認知所侷限。(本院生物多樣性中心湯森林 特稿)

【2010 星空饗宴】觀星嘉年華

每年秋冬之交，上千名愛好天文的民眾齊聚海拔 2400 公尺的高山上享受星空、談天說地。

這是由台中市天文學會主辦的「星空饗宴(Star Party)」活動。此一活動已有超過十年的歷史，2010 年為第 13 屆，於 12 月 4、5 兩日



圖說:上圖是四部份組成的合成影像。右一：本所王為豪博士演講現場©台中天文學會；右二：天文愛好者聆聽本所同仁演講©台中天文學會；左一：係本所攤位海報©台中天文學會；左二：會場人氣鼎沸的光景©林志隆。

在合歡山翠峰舉辦。此次活動粗估有近兩千名參加者，除了提供天文望遠鏡給所有人分享的業餘天文愛好者，也有來自各大學與高中的天文社團或師生、愛好天文的家庭、以及民間的天文學會與廠商。現場有上百台各式天文望遠鏡，最大的口徑甚至達 0.5 公尺，是一場全國性、超大規模的觀星嘉年華。

今年的星空饗宴與往年最大的不同是本所的參與。為了讓愛好天文的民眾能深入瞭解本所在尖端天文領域的耕耘，我們成為協辦單位。除了提供獎品給參加的民眾，也推出「天文教室」，由本所蘇裕農、王為豪、辜品高、顏吉鴻等四位專家，為民眾介紹生動有趣的天文知識，以及本所正在進行的研究計劃。除了靜態演講，我們也推出觀星動手作活動，以高性能天文望遠鏡，讓民眾透過自己的數位相機，拍攝獵戶座大星雲，親自體驗最基礎的天文觀測。最後雖然天空不時有雲飄過，大部份參加者還是拍到了不錯的照片。(王為豪 編輯稿)

張書豪的天文狂想曲（季報版）

一次在同好家中的私人天文台觀星，因為望遠鏡上的一張貼紙，心頭一陣悸動…上頭寫著：「兒時的夢…」

…天上的星星是上帝留給人間的珠寶…

從小我就愛看星星，也愛看傳記，居禮夫人傳是我很喜歡的一本書，小時候作文「我的志願」寫的就是科學家，因為那時還不知道有「天文學家」這個很酷的名稱。長大後因著興趣加入天文協會，認識了不少觀星的同好。20年前，省吃儉用地，我終於買了第一架天文望遠鏡。…剛起步時，筭路藍縷，山上連棧道都沒有，只有泥濘小路和一個臨時架起的鐵皮屋…

原本我在業界工作，後來因緣際會進入本所參與剛起步的SMA(次毫米波陣列)與TAOS(中美掩星)，還有後來的AMiBA(李遠哲陣列望遠鏡)等計畫。自2001年第一次為了SMA去夏威夷出差，至今陸陸續續已去過約20次。SMA在夏威夷海拔約4200公尺處的毛納基峰頂，AMiBA則在3400公尺處的毛納羅峰；白天我的主要工作是負責測試、新增及維護望遠鏡相關電力與控制訊號設備，要提供很穩定的直/交流電源給儀器。晚上的天文觀測站則交給天文學家或研究人員，有時下班後我會假裝留下來幫忙，順便看看他們的觀測研究。

至於TAOS，為了這個臺美合作的掩星計畫，我們在中部海拔2800公尺的鹿林前山設置四座廣角光學望遠鏡。2002年剛起步時，筭路藍縷，鹿林山當時只有一個臨時架起的鐵皮屋和泥濘的小山路，上山工作得背著所有家當和設備上去，天氣冷或下雨天時就更辛苦了。之後慢慢才有了臨時索道和流籠，也有了觀測站，從最初到可以開始運作觀測，花了數年的辛苦時光。

…當不成兒時夢想的天文學家，那就當個天文玩家，但玩也要玩出個成績來…

我曾想當個天文學家，也因此選擇數理科，可惜當年夢想並未成真。天文路雖然曲折，但從業餘天文愛好者，到後來得以在天文所工作，藉由公務之便到夏威夷、到鹿林山去，接近天文、看天文望遠鏡，想想這是多少天文愛好者的夢，當然很開心。

回首來時路，無論甘苦，現在都變成很有趣的、講不完的話題。建議有興趣走天文路的人，不論從事科學研究或是技術支援，都得先充實專業知識和技能，單靠興趣未必能夠勝任工作。最好能夠「學以致用」，又能「學以致趣」，工作和興趣相結合是最完美的。

有一句話，忘了是誰說的，好像是「星星是上帝留給人間的珠寶」，未來即使年紀大了，只要體力、眼力都還許可，我還是會繼續看星星…（陳筱琪 採寫）

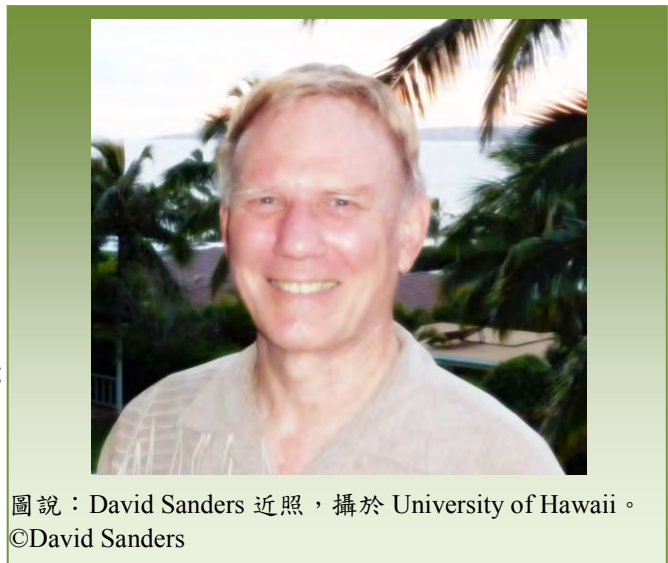


圖說：張書豪近照。©中研院天文所/嚴華玲。

藉著去年 11 月本所主辦的「加法夏望遠鏡使用者研討會」之便，我們訪問了專題研討會議主持人之一的 David B. Sanders 博士。初次見面的他，有點冷冷的外表下，其實很風趣健談。近兩小時專訪談的是他的人生與開創新研究領域的歷程；他同時以一位電波天文學者的角度，暢談毫米波與次毫米波天文學發展風起雲湧的時代。隨著他充滿熱情的談話，腦中浮現的是一部精彩的電波天文近代史...

... You make your choice based on what you think, you want and you do. Then you are just constantly driven by „you want to do the best you can on whatever you are doing“ , but you cannot control it. One day when you look back your life, then you see “you have to have the drive, but where you ended up is “luck”” ...

David Sanders 在美國國家航空太空總署附近的華盛頓特區長大，父親是工人，母親是老師。他從小受母親影響很大，因為母親鼓勵小孩讀書，要他們從小立定目標努力向上。1960 年代末，航太總署將太空人送上太空後，天文科學研究進入風起雲湧的時代。當時人們認為最艱深的科學要算是物理，所以最聰明的人都去念物理；因為想當最聰明的人，所以 Sanders 就進大學念了物理。他的碩士在康乃爾大學就讀，本來是主攻固態物理，而且是和 David M. Lee、Robert C. Richardson 及



圖說：David Sanders 近照，攝於 University of Hawaii。
©David Sanders

Douglas D. Osheroff 在同一間實驗室做同一個研究題目。然而受到天文選修課老師一提出 Drake Equation 的電波天文學家 Frank Drake 和天文生物學的 Carl Sagan 影響，加上個人因素，他中輟了低溫固態物理的研究，而在碩二時轉到天文實驗室改做紅外線天文研究。婚後 Sanders 因為妻子工作關係，選擇紐約州立大學石溪分校攻讀天文物理博士；但陰錯陽差地原本想要跟的紅外線天文大師剛好離職，加上基特峰毫米波段天文望遠鏡的啟用以及一氧化碳星際分子和分子雲的發現，於是他進了推動以上研究的 Solomon 實驗室，利用毫米波望遠鏡進行分子雲巡天觀測及利用一氧化碳分子譜線分析分子氣體，革命性地發現銀河系巨大分子雲，擠入了毫米波天文學研究的「先驅」行列。

以上幾個關鍵性轉折：從物理轉到天文，讓他和 1996 年的諾貝爾物理獎擦身而過，Lee、Richardson 和 Osheroff 因為那年暑假的低溫超導體研究而獲獎。而從康乃爾大學畢業後轉到紐約州立大學石溪分校唸博士，讓他和天文生物學擦身而過，Frank Drake、Carl Sagan 及同時期在康乃爾大學部就讀的 Jill Tarter 等人後來都成為 SETI（搜尋地外文明計畫）的創始人物；Jill Tarter 還成為前陣子「接觸未來（Contact）」電影的女主角原型。

... Take opportunity at right time, face the challenging and make good decision...

『選擇做論文題目或研究，都要找一個充滿機會及新挑戰的地方。雖然不是每個人都有此機會，但若有選擇，就要找機會當「第一個」使用新興設備或儀器、或「第一個」嘗試或觀察新現象的先鋒。』、『選擇未來工作的原則，應該試著去找有最多可能性的工作，才

有發展機會。』Sanders 如此建議青年學子。好比他的博士論文題目選擇當時剛出爐的巨大分子雲議題。而 1970 年代，在 25 米毫米波天文望遠鏡計畫停擺後，他決定進入加州理工學院從事博士後研究的對象是紅外線天文衛星 (IRAS) 團隊剛發現的一群銀河系外天體。當他再次回到紅外線天文領域後，發現超亮紅外線天體中心皆有分子雲，並提出超亮紅外線天體、星系合併、氣體碰撞和類星體起源關係的革命性新觀點，這帶來了他個人研究生涯的第一個高峰。1990 年代，為了進行多波段觀測，Sanders 到了夏威夷大學，然後藉由新的紅外線、毫米波或多波段太空望遠鏡的觀測，發表了他第二波關於「超亮紅外線恆星暴增星系」、星系演化、與類星體形成的一系列研究成果。直到今天他還時常至世界各地演講，積極推動星系演化、恆星與類星體演化研究以及次毫米陣列與大型毫米波天線陣列的建置。

發展中的研究領域，隨時都在接收來自全世界的各種新資料，人人說著不同的研究、提供你不同的論點和看法，該如何從其中做出正確的判斷和選擇並不容易，Sanders 說他自己就常陷於抉擇兩難之間。但是多看、多聽、多想、多試就可以增加經驗，幫助做出正確的抉擇。

Sanders 歸納了他一路上曾面臨抉擇的關鍵點。比如說，當初是因為興趣而走入天文研究這個領域；沒有繼續留在麻州的五學院天文台而選擇轉到加州理工學院的多波段紅外線天文衛星研究團隊，是為了可和不同領域的天文學者討論交換意見；1988 年的超亮紅外線星系論文他決定親自撰寫沒有讓給他人，同時在論文中決定盡其可能提供可用的巡天觀測資料。所有和研究方向相關的重大抉擇在轉任夏威夷大學之前大致都已底定，接下來的就是研究經費申請與選擇適合的學生及門下研究員等等小抉擇。

...Multi-way of approach: discuss and meet different groups and people; think and form ideas; go and do whatever it takes....

當時多數不同領域的人，或許因為「門戶之見」都不太互相交流，但 Sanders 認為自己很幸運，在他所到之處都能遇到貴人，學到很多寶貴經驗。在康乃爾大學，他有機會接觸到紅外線天文學。在紐約州立大學石溪分校時，他得知毫米波觀測對未來天文研究的重要性，同時學得劃時代的測量方法，能利用一氧化碳星際分子追蹤氫分子雲；也瞭解到寫出內容精確、好品質論文的重要性。在加州理工學院時，除了 IRAS 團隊同事外，他也常與不同領域的學者溝通討論；他習得該如何選擇研究觀測的目標，並非毫無目的地，而是精確、不帶偏見地進行天體資料的收集；同時還能夠對資料及結果作重點分析及討論。這些經歷對他都大有幫助。

專訪最後，Sanders 總結了他這一路走來的感想。他覺得自己雖然是不經意踏入了紅外線天文學領域，但他一路走來都很幸運，在適當的時機遇到了適當的人，面臨各種機會時做了適當的抉擇。然而每個學者在其人生及研究的任何一個階段，都可能有感到迷失或失落的時候，像是對所選的人生或研究領域不是覺得那麼感興趣，或者中途遇到一些無法預期的情況與干擾，或者面臨是否該轉向的抉擇。好比他自己，早期有可能跑去做天文生物學，也有可能在中期轉去做行星或是恆星周圍塵埃盤的研究，只不過因為對超亮紅外線星系的興趣，讓他堅持在這條研究路繼續走下去。

Sanders 舉了自己的這些例子來勉勵學子或年輕學者，生活不會總是事事平順，機會處處都有，只不過需要動力及堅持才能一路走下去。對他來說，繼續另一個 20 年的天文路應該不是問題。（陳筱琪 採寫）

一次在同好家中的私人天文台觀星，因為望遠鏡上的一張貼紙，心頭一陣悸動…上頭寫著：「兒時的夢…」

一、天上的星星是上帝留給人間的珠寶

…緣起…

從小我就愛看星星，小學一、二年級家附近稻田很多，當時很習慣也喜歡接近大自然，常和同年紀的小孩在田野間一直玩到天上星星出來。小一的老師常常介紹地球科學的事給我們，像是極光，有高層、低層的極光等等，印象很深刻，從此我對天空上面的事就很感興趣。我也喜歡看傳記，居禮夫人傳是我很喜歡的一本書。還記得小時候作文「我的志願」寫的就是科學家，因為那時還不知道有「天文學家」這個很酷的名稱。

雖然喜歡天文，但我後來並沒有機會去唸天文。專科就讀計算機工程科系時（當時學校計算機課程學的仍是 PS2...），白天工作，晚上念夜間部。雖然那時有加入學校天文社團，但社團並沒有什麼活動。後來進入社會工作，因著興趣常常去旁聽台北市天文協會的天文講座和讀書會，之後加入協會，認識了不少同好，慢慢接觸到觀星活動。後來師大傳學海副教授還引領我進入台北市天文協會核心，接觸更多人並協助更多天文科普的活動。



圖說：張書豪近照。©中研院天文所/嚴華玲。

…觀星…

20年前，我用省吃儉用下來的私房錢買了第一架光學天文望遠鏡，手調式的，當時市價約 8000 元。兩年後又買了另一架，近 5 萬元，那時候一台全新野狼 125 機車只要 1 萬 5 千元。現在台灣自家有天文望遠鏡及小小私人天文台的人就很多了。有一回在天文同好者家中的私人天文台觀星，天文望遠鏡上有一張貼紙，看到上頭寫著：「兒時的夢…」，讓我好感動。

我對攝影本來就有興趣，觀星時就會想要把看到的拍攝下來。原本在台北自家公寓頂樓有做觀星攝影，但因為光害嚴重，拍出來的照片多半不覺滿意。尤其底片相機時代更辛苦，除了攝影條件之外，有時辛苦拍到的照片拿去給人沖洗後也有可能沖壞，底片一旦被沖洗壞，就很難救了。現在有數位相機就好很多，只不過好的數位相機也很貴，要投資不少金錢。

至於天文攝影和一般攝影是有不同，我想主要是天文攝影需要更多的天時地利人和等條件。例如時間要對，因為觀星攝影多半在夜晚，白天天氣好，夜晚未必。攝影時天空要盡量無雲，透明度要好，濕度也不能太高，不然鏡頭可能會結霧。地點要選在沒有光害的地方，像是高山地區；然後機器條件及狀況也都要能順利配合才行。

現在台灣有不少天文協會還有親子觀星會，近年來發展也蠻蓬勃的，常辦各種活動或講座，像台北市天文協會每年都會辦一次國內或國外的天文旅遊或特別的觀星活動，好比中秋節賞月、觀流星雨和日蝕等等。另外業餘天文同好有時也會約了一起開車上山去觀星。不過現在我已經很少去拍攝星空了，因為光害，效果不好，現在若有去的話，主要都是觀星而已。

台灣對天文有興趣的人口也越來越多，雖然其中好奇看熱鬧的還是比較多，但總是有想要來接近天文就好。近幾年，學校高中大學也有不少天文社團，這歸功於越來越多的學校老師願意出來帶領教導這些社團的學生。不像早年很多愛好者都是像我那樣自己看書或和同好一起摸索，會遇到很多挫折。觀星不容易，有很多人無法克服挫折就會陣亡，心灰意冷後就乾脆轉移興趣到其他方面去了。

二、進入天文所

...剛起步時，筆路藍縷，山上連棧道都沒有，只有泥濘小山路和一個臨時架起的鐵皮屋...

原本我在業界工作，待久了，工作內容千篇一律覺得有點膩；就在那時，中研院天文所的 SMA（次毫米波陣列望遠鏡）與 TAOS（中美掩星）兩個跨國計畫剛剛起步，正在徵求具電子電路工程專業技能與相關經驗的技術人員。當時我想，既然喜歡天文，那就去天文所摸摸望遠鏡吧，於是就應徵，結果進來後不只是「摸」望遠鏡而且要「蓋」望遠鏡，像 TAOS 是蓋光學望遠鏡，SMA 是蓋電波望遠鏡。電波望遠鏡我是進入天文所後才開始接觸，藉由多請教專家及同事，邊做邊學、累積經驗之後，才慢慢熟悉上手的。我在天文所的工作主要是負責天文望遠鏡的電力設備，像是提供很穩定的直流或交流電源給儀器和控制信號的電源設備，還有負責測試與維護。之後的流程像是頻率測量、處理雜訊值等等則是其他人來負責，所以我的工作比較像是「上游/或前期」的部分。

目前在天文所我有參與的計畫包括 TAOS、SMA 及 AMiBA。

...SMA 及 AMiBA...

SMA 是我們與夏威夷史密松天文台合作的跨國計畫，李遠哲院長、袁旂教授等多位前輩為了吸取國外經驗、提升台灣天文研究實力而大力支持加入此計畫。原本夏威夷 SMA 只有 6 部天線陣列，中研院加入後建置另兩部，自此陣列望遠鏡觀測效果 6 加 2 大於 8（設備能力提升了 30%）。加入 SMA 之初，台灣電波望遠鏡研究才剛起步，而中研院是先驅。SMA 的完成讓中研院及台灣的天文研究層級大大提升，增加了國際間能見度。實力備受肯定後，又陸續參加或開啟後來的 AMiBA（李遠哲微波背景輻射陣列望遠鏡）及 ALMA（阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列）等多國合作計畫。其中 AMiBA 是國人自己開發設計的天文陣列望遠鏡，這個合作計畫的實現更是台灣電波望遠鏡研究的重大里程碑。

我 2001 年第一次去夏威夷出差是為了 SMA。至今陸陸續續已經去過約 20 次了。每次通常 2、3 個同事一起去，一趟約待 1、2 個月。SMA 在夏威夷海拔約 4200 公尺處的毛納基峰頂，AMiBA 則在 3400 公尺處的毛納羅峰，我們就在那裡每天上山下山工作。早期的「墾拓期」資源很缺乏，當時的確曾經一度懷疑過自己「怎麼會在這裡」？但是後來就甘之如飴了。近年來，白天主要工作是負責維護及改善望遠鏡相關設備，晚上的天文觀測站則交給天文學家或研究人員做研究用；有時晚上我會假裝留下來幫忙，順便看看他們的觀測研究。夏威夷的海灘、花園、草裙舞和雞尾酒？去夏威夷都 20 次，早就不會好奇了，放假也沒有特別去哪裡逛，在那裡主要就是工作。去久了，也就沒有特別想家，尤其現在電話、網路、skype 都很方便，家人對我田野出差也很習慣了，人出門去就當作是丟掉了（哈哈）。

在夏威夷工作比較大的挑戰是遇到突發狀況需要處理時，島上卻找不到適當的材料和物資可解決，那時只能想盡辦法克難地解決，真的沒辦法，就只好等待物資送來。像有一次，待在夏威夷的 2 個月都沒事，偏偏在回國前兩天，AMiBA 意外地出了找不到原因的臨時狀況。就很緊急，但後來還是想辦法把困難給解決了。

...TAOS...

至於 TAOS 是臺美合作的掩星計畫，台灣為此計畫在中部玉山國家公園海拔 2800 公尺的鹿林山建造四座 50 公分口徑的廣角光學望遠鏡。2002 年剛起步時，筆路藍縷蠻艱辛的。當時的鹿林山沒有任何設備，初期只有一個臨時架起的鐵皮屋。山上連棧道都沒有，只有泥濘的小山路，上山工作

得要背著所有家當和設備上去，下雨天就更辛苦了。天氣很冷時，也沒辦法帶著手套工作，掛著鼻水，用凍到沒知覺的手鎖螺絲是常有的事。之後中央大學加入合作，慢慢就比較有規模，有了臨時索道和流籠，也有了觀測站。山上的四座天文望遠鏡和遮罩都是一個一個依次架設起來的，從開始、到有可用來觀測的工作站、到測試、到可以開始運作觀測，花了數年不算短的時間。在鹿林山遇過最大的挑戰，應是資源缺乏東西弄不起來時，得靠自己找東西、搬東西，解決問題所花的時間比起在平地時要多很多。

...終究是放不下對天文的喜愛，寧可回來領死薪水也甘願...

我在天文所服務期間，曾經台灣的行動大哥大市場正在蓬勃發展，所以就有人找我再出去業界做。但是外面業界薪水雖然多，相對壓力也很大，每天晚上回家後都沒時間、甚至沒力氣抬起頭好好地看一眼天上的星星，望遠鏡只是擺在房間當裝飾品罷了。出走8個月後，終究還是放不下對天文的喜愛，決定寧可回公家研究機構領死薪水也沒關係，至少我可以藉出差之便在台灣2800公尺的高山、在夏威夷3、4000公尺的峰頂看看美麗的星空，凍到手指發紫也甘願。所以我很感謝陳明堂副所長當時讓我回來天文所。

三、回首來時路

...王老五的一生是為天文所誤嗎？...

可能多少有吧（哈哈），但是也還好啦，雖然常常寧願花時間去聽講座或半夜上山觀星，卻沒時間陪女友逛街，可能真的是比較不容易找到願意配合的戀愛或婚姻對象，但是我個人是不覺得我的天文興趣有影響到婚姻多少啦。不過的確有些天文同好，婚前女友喜歡很浪漫地跟著去看星星，婚後現實考量下，老婆突然變成老媽，然後就被入山管制了，哈哈，不過有些病入膏肓的同好婚後雖然會稍稍安分些，卻仍不會放棄，好天氣時還是會繼續參與重要的天文活動。

...當不成兒時夢想的天文學家，那就當個天文玩家，一樣可以接近天文，但玩也要玩出個成績來...

我曾經很想當天文學家，也因此選擇數理科，但或許資質不夠所以最後並沒有當成，因為天文學家真的需要很好的資質。不過雖然曲曲折折地，最後卻也是走上了天文之路，至少目前從事的工作是和天文有關，也是我的興趣，此外，業餘時間我仍然繼續和同好一起從事天文活動。

這一路走來，有苦有甘，現在再回頭看，無論甘苦都變成很有趣的講不完的話題（就像年輕時的當兵經驗一樣），都是很有意思的經歷。建議將來有興趣想從事天文工作的人，不論是科學研究或是技術支援，都要先充實自己的專業知識和技能，有時只靠興趣不見得能夠勝任工作。同時也要清楚去了解自己想要做什麼，以及能努力到什麼地步。假若能夠「學以致用」，又能「學以致趣」，工作和興趣相結合是最完美的。薪水多固然重要，但是如果茫茫地忙，賺了很多錢卻沒時間也沒精力花用，倒不如選擇「學以致趣」比較實在。像我，原本是個業餘天文愛好者，後來能在天文所工作，藉由公務之便可以到夏威夷去，接近天文、看天文望遠鏡，想想這是多少天文愛好者的夢啊，當然很開心。

有一句話，忘了是誰說的，好像是「星星是上帝留給人間的珠寶」，未來即使年紀大了，只要體力、眼力都還許可，我還是會繼續看星星...（陳筱琪 採寫）

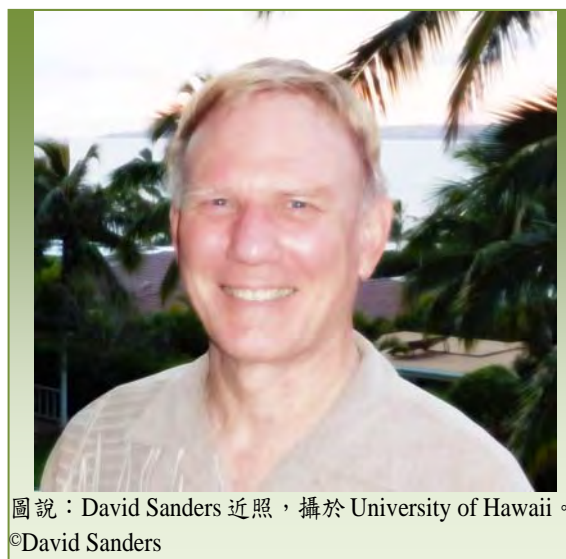
藉著去年 11 月本所主辦的「加法夏望遠鏡使用者研討會」之便，我們訪問了專題研討會議主持人之一的 David B. Sanders 博士。初次見面的他，有點冷冷的外表下，其實很風趣健談。近兩小時專訪談的是他的人生與開創新研究領域的歷程；他同時以一位電波天文學者的角度，暢談毫米波與次毫米波天文學發展風起雲湧的時代。隨著他充滿熱情的談話，腦中浮現的是一部精彩的電波天文近代史...

... You make your choice based on what you think, you want and you do. Then you are just constantly driven by 'you want to do the best you can on whatever you are doing', but you cannot control it. One day when you look back your life, then you see 'you have to have the drive, but where you ended up is "luck" ...

一、求學過程

Sanders 求學小檔案

- 1968-1970 維吉尼亞大學書卷獎學金 (University Scholar Fellowship, University of Virginia)
- 1970 取得維吉尼亞大學物理學學士學位
- 1971 美國國防部獎學金 (Academic Fellowship, U.S. Department of Defense)
- 1972 取得康乃爾大學物理學碩士學位
- 1972-1975 美國國家科學基金會獎學金 (Presidential Fellow, National Science Foundation)
- 1976-1981 攻讀紐約州立大學石溪分校 (State University of New York at Stony Brook ; SUNY at Stony Brook) 博士學位
- 1982 取得紐約州立大學石溪分校天文物理學博士學位



圖說：David Sanders 近照，攝於 University of Hawaii。
©David Sanders

David Sanders 在美國國家航空太空總署附近的華盛頓特區長大，父親是工人，母親是老師。他從小受母親影響很大，因為母親鼓勵小孩讀書，要他們從小立定目標努力向上。1960 年代末，航太總署將太空人送上太空後，天文科學研究進入風起雲湧的時代。

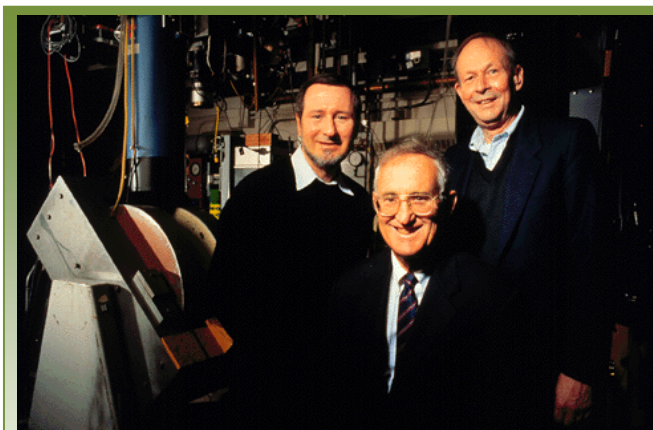
Sanders 高中時便決定依自己性向選擇走科學的路。當時人們認為最艱深的科學要算是物理，最聰明的人都去念物理，因此沒有多想，Sanders 就進了維吉尼亞大學念物理。大學最後一年的研究論文，Sanders 跟著名教授做低溫固態半導體偵測/接收器 (low-temperature semi-conductor detector) 研究，他當時並不知道這個後來會被應用在天文研究上。

Sanders 碩士在康乃爾大學物理所就讀，選擇那裡是因為有獲得諾貝爾物理獎的名人加持該所；二來是該校校風自由開放，鼓勵學生選擇自己想走的路；三來他有一位青梅竹馬的女性好友也在那裡就讀，因為該校當時收受男女學生並主張校園中男女平等。

碩士第一年，由於學校鼓勵學生跨領域修課，所以除了物理學課程外，Sanders 也修了一些天文學課程。在物理研究方面，Sanders 進了「低溫固態物理」實驗室，利用極低溫冷卻物質後觀察其狀態變化。那個實驗室相當奇特，除了題目很有趣外，進行這個研究題目的幾個研究人員和學生也很特異，包括一位高高瘦瘦呆頭鵝又狀況外的 David M Lee、一天三包煙的大煙槍 Robert C Richardson、和從加州理工學院 (Caltech) 來的狂熱型研究生 Douglas D Osheroff。

同一年，Sanders 接連修了兩門天文學課程而對天文產生興趣。第一堂天文課是提出德雷克公式 (Drake Equation) 的 Frank Drake 傳授的電波天文學 (Radio Astronomy)。第二堂課是 Carl Sagan 授課的太空智慧生物 (Intelligence of Universe)。當時康乃爾大學在波多黎各有一個 El Sibel Telescope 天文望遠鏡，天文生物學 (Astrobiology) 與搜尋地外文明計畫 (SETI; Search for Extra-Terrestrial Intelligence) 也正在成形發展中，Frank Drake、Carl Sagan 及當時在康乃爾就讀大學部的 Jill Tarter 等人後來都是 SETI 的創始人物，其中 Jill Tarter 還成為前陣子「接觸未來 (Contact)」電影的女主角原型。

碩一暑假，Sanders 因為領取國防部獎學金之故，必須去上助教師資課程及打工，中斷了他在物理實驗室的研究工作。加上當時受到 Frank Drake 及 Carl Sagan 影響，又聽了魯國鏞 (Fred Kwok Yung Lo) 在康乃爾大學給的演講，開啟了他對天文學的興趣，於是碩二那年他決定轉入天文學研究室。然而，從物理轉到天文這樣的一個轉折，讓 Sanders 和諾貝爾物理獎擦身而過。低溫固態物理實驗室那三位怪咖同門 Lee、Richardson 和 Osheroff，因為 Sanders 缺席那年夏天的 Superfluidity in Helium-3 超流體 (低溫超導體) 研究，於 1996 年獲頒諾貝爾獎。



圖說：因 1972 年低溫超導體研究而獲得 1996 年諾貝爾物理獎的三位得主，由左至右為 Douglas Osheroff、David M. Lee 以及 Robert C. Richardson，攝於康乃爾大學原子與固態物理實驗室。© Cornell University

相對地，放棄諾貝爾獎級的「低溫固態物理」研究之後，Sanders 碩二期間在天文研究室也產出了兩篇和固態物理有關的遠紅外線天文偵測儀期刊論文。

接下來三年因為越戰之故，Sanders 中斷學術進入海軍服役，領取美國國家科學基金會獎學金，從事與天文完全無關的通訊工作。服役的最後一年，他考慮重回天文或地質研究領域，曾到約翰霍普金斯大學在職進修，然而原本談好要跟的指導教授突然離職轉到科羅拉多一個國家研究機構當所長去了。命運捉弄下，Sanders 的人生又被迫轉向。

戰後，1975 年，Sanders 決定重返校園，同一時期他也結了婚。考量妻子工作機會後決定在大城市落腳。麻省理工學院、斯克里普斯研究所 (Scripps)、柏克萊大學、加州大學洛杉磯分校等地質或海洋學等研究所都接受了他的博士研究申請，但基於對天文的興趣，Sanders 選擇進入當時還算是新興學校的紐約州立大學石溪分校先當助理。選擇那裡原本是想跟著 Stephen Strom (有名的紅外線天文學家) 或徐遐生從事研究，可惜 Sanders 入校時，兩位大師皆已先後於 1974 年前離職，石溪分校請來接任的是 Philip Solomon。

Solomon 是資深的星際分子理論與觀測天文學家，也是 1960 年代後期、1970 年代初期發現一氧化碳 (CO) 星際分子與推動毫米波天文學的重要人物。他與紐澤西貝爾實驗室的 Arno Allan Penzias 與 Robert Woodrow Wilson (這兩位 1965 年於貝爾實驗室發現「宇宙背景輻射」，1978 因為這個發現獲得諾貝爾物理學獎) 都是好朋友，三人還一起成功開發了毫米波接收器。【附帶一提，Philip Solomon 在 1964 年的博士論文中提出了星際輕分子理論，之後他在數個名校擔任博士後研究及講師。Solomon 在哥倫比亞大學時 Nick Scoville 是他的學生，那時譚遠培 (Ronald Taam; 現任中研院天文所副所長) 也在哥大就讀研究所。數年後 Solomon 帶著學生 Scoville 輾轉明尼蘇達及普林斯頓等大學研究機構任職，然後在 Stephen Strom 與徐遐生離開石溪分校後，Solomon 於 1974 年受邀聘接任。Scoville 則與 Solomon 分道揚鑣，到麻州大學任職於五學院天文台 (FCRAO)。】

Sanders 在石溪分校擔任助理期間，發現剛起步的毫米波天文學很有意思，加上他之前的遠紅外線天文偵測儀研究背景，於是成功申請進入該校博士班，在 Solomon 門下從事毫米波天文學研究，並因為 Solomon 與 Scoville 的關係，得以去麻州五學院天文台（Five College Radio Astronomical Observatory；FCRAO）使用那裡的 14 米天文望遠鏡做觀測及研究。

Sanders 當初在康乃爾大學念碩士的主修原本是物理，卻因緣際會地接觸了天文生物學及電波天文學。之後去紐約州立大學石溪分校，原是想跟著 Stephen Strom 或徐遐生主攻紅外線或電波天文，結果又陰錯陽差因為師事 Philip Solomon 而進入毫米波研究的殿堂。然後因為 Solomon 實驗室與 Robert Wilson 所在貝爾實驗室的地利之便，在兩個實驗室通力合作推動下，30 年後，次毫米波天文學誕生了。

二、天文學研究風起雲湧的時代：

1、毫米波天文學的濫觴—CO 星際分子與巨大分子雲的發現

1957 年，美國物理學家 Charles H Townes 指出宇宙空間可能存在的 17 種星際分子，並提出探測它們的方法。那個年代的偵測儀/接收器都是貝爾實驗室製作的，而 Robert Wilson 當時在貝爾實驗室也製作出了世界最好的毫米波接收器，貝爾實驗室因此考慮進一步建置能利用這些接收器的電波望遠鏡。另一方面，在 1960 年代星際分子如一氧化碳（CO）等陸續被發現後，當時是紅外線天文學家的魯國鏞也對毫米波天文學產生了興趣。於是魯國鏞說服已在新墨西哥州擁有為探測外星生物訊息而設的厘米波超級大陣列（VLA；Very Large Array）的美國國家電波天文台（National Radio Astronomy Observatory；NRAO），請他們在亞歷桑那州的基特峰（Kitt Peak）又蓋了一座新的 12 米電波天文望遠鏡。在 12 米天線剛落成但



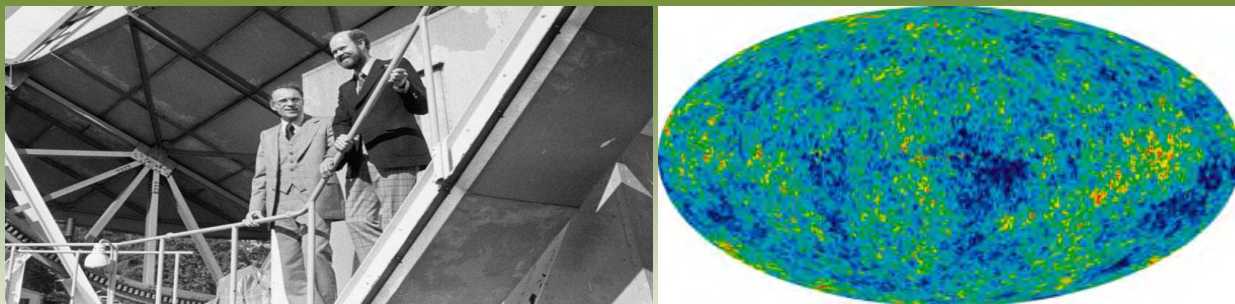
圖說：本圖是 2009 年 ATLASGAL 次毫米波巡天觀測計畫所拍攝到的影像。我們銀河系的中央有個質量約太陽 4 百萬倍大的超大質量黑洞，附近充滿了由許多星際分子所形成的緻密分子雲。其中人馬座 B2（Sgr B2）這個由氣體和塵埃組成的巨大分子雲（如圖中央靠左處的橘紅色光亮區域所示）是我們銀河系最大型的分子雲之一，質量相當於 3 百萬個太陽的總合，分子雲區域跨越的大小約有 45 秒差距，平均密度大約是每立方公分 3 千個氫原子，這是典型分子雲密度的 20 至 40 倍。它位於銀河系核心附近，距中心約 120 秒差距而已，和地球距離約為 2 萬 5 千光年。© ESO/APEX & MSX/IPAC/NASA

尚未裝設接收器時，當時提出分子雲形成理論的 Solomon 立刻向 Wilson 解說星際輕分子如何形成分子雲內較緻密區的理論，並建議 Wilson 南下說服國家電波天文台於 12 米天線上裝設貝爾實驗室的毫米波接收器，以利星際分子及分子雲的進一步觀測。當時 Nick Scoville 還在 Solomon 門下進行厘米級電波望遠鏡觀測的碩士論文研究。1967 年 12 米天線毫米波段天文望遠鏡的啟用，讓 Scoville 藉此意外偵測到一氧化碳（CO）星際分子的輻射譜線。接著於 1971 年，Philip Solomon、Keith Jefferts、Arno Penzias 與 Robert Wilson 共同在期刊上發表了發現 CO 星際分子的重量級論文。這個研究從事實際觀測的人是 Solomon 和 Scoville（Scoville 也因此於 1972 年取得博士學位），背後的理論則是 Solomon 所架構。自此之後，諸如「分子雲內部星際物質」此類天文研究報告便如雨後春筍般陸續出現，天文界並開始了銀河盤面分子雲的巡天觀測以及分子雲與恆星形成關係的研究。而此時的 Sanders 尚在海軍服役中。

1975 年在 Sanders 遇到 Solomon 和 Scoville 時，以上事件皆已發生。Sanders 閱讀這些相關研究論文後，突然發現此與他之前所接觸、所學的東西都有聯結。例如，毫米波雖然不是紅外線，但波段相當接近。還有，星際分子讓人聯想到 Carl Sagan 他們講的太空生命，雖然當初大家想像的是水星或火星上的太空生物與行星大氣等概念，但毫米波天文學、分子雲的發現、以及太空中真的找到了生命相關分子的事實，讓他備感興奮。當他發現 Scoville 探討 CO 星

際分子的博士論文其中一小部份有提到分子雲研究時，便決定選擇 Solomon 實驗室攻讀博士，繼續 Scoville 的研究，並擴大分子雲的勘測範圍。

當時全世界最大的 14 米毫米波天線已於五學院天文台啟用，同時基特峰的 12 米天線也提供 Solomon 實驗室繼續銀河盤面巡天觀測的研究，於是 Sanders 的博士論文便得以利用這兩座當時最先進的毫米波望遠鏡進行巡天觀測，然後利用一氧化碳輻射譜線分析分子氣體，革命性地發現了銀河系的巨大分子雲（GMC；Giant Molecular Clouds in the Milky Way），擠進了毫米波天文學研究的「先驅」行列。



圖說：左圖是 1978 年因為發現宇宙背景輻射而獲頒諾貝爾物理獎的兩位得主，由左至右分別是 Arno Penzias 與 Robert Wilson，背景是他們用來測得宇宙背景微波輻射的接收器「Holmdel horn antenna」© Physics Today Collection/AIP/SPL。右圖是宇宙背景輻射理論示意圖。

2、從紅外線到毫米波，再回到紅外線—銀河系外巡天勘測與超亮紅外線星系

Sanders 博士後研究小檔案

1982-1983 任職麻州五學院天文台（Five College Radio Astronomical Observatory；FCRAO）/博士後研究

1984-1988 任職加州理工學院/研究員、資深研究員

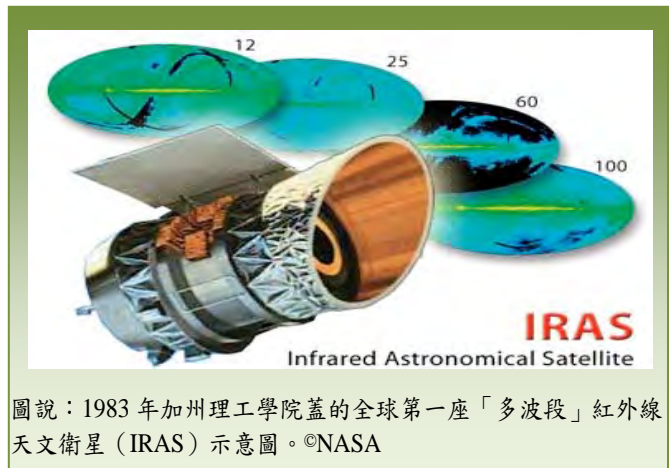
1987 IBM/特聘講師

1971 年 Robert Wilson 與 Philip Solomon 等人的 CO 星際分子研究發表後，Wilson 打鐵趁熱推動美國國家電波天文台發展更先進的毫米波望遠鏡；那時包括還在當研究生的 Sanders，大家都期待在夏威夷毛納基峰蓋解析度更高的 25 米毫米波天線計畫能實現。然而，據說因為政府經費和學術政治考量，這個計畫最後並沒有實現。這一來間接侷限了當時的毫米波天文新進學者像 Nick Scoville 及 David Sanders 等人畢業之後進入美國國家天文單位發展的機會。

Sanders 取得博士學位時，哈柏太空望遠鏡尚未啟用，沒有天文研究人員職缺；美國國家電波天文台也沒有適合的博士後研究職位給他。當時 Sanders 曾應徵過麻省理工學院，有趣的是，同一時間，現任中研院天文所所長的賀曾樸也去申請同一個工作，兩人都進入了最後一輪面試，但結果麻省理工卻沒有錄取任何人。之後賀曾樸去了哈佛大學的史密松天文物理中心（The Harvard Smithsonian Center for Astrophysics；CFA），而 Sanders 則去了學校單位—麻州大學的五學院天文台，繼續他的巨大分子雲巡天勘測，並發表了一系列相關學術報告。

同一時期，加州理工學院在歐文斯谷電波天文台（Owens Valley Radio Observatory；OVRO）剛蓋好毫米波陣列天線。魯國鏞那時離開加州理工學院轉任伊利諾大學負責執行厘米波超級大陣列（VLA）計畫，而 Nick Scoville 應聘至加州理工學院接手拓展毫米波天文研究。到了 1983 年，加州理工學院又蓋了全球第一座「多波段」紅外線天文衛星（Infrared Astronomical Satellite；IRAS），於是 Scoville 找來同時擁有紅外線及毫米波段天文研究經驗的同門師弟 Sanders 加入 IRAS 團隊。直到後來，Sanders 才發現自己進入的地方原來正是催生「銀河系外紅外線電波天文學（extragalactic infrared astronomy）」的核心所在。IRAS 團隊不久之後收集到、並發表了全世界第一個巡天分佈圖。

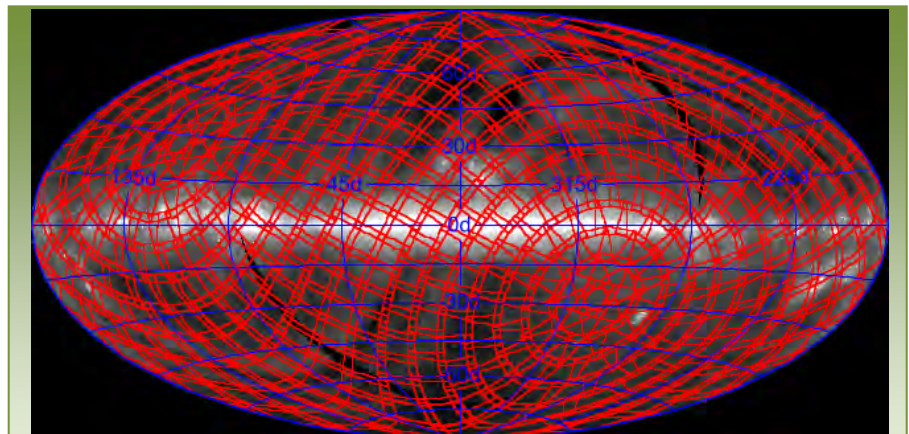
『選擇做論文題目或研究的地方，要找一個充滿機會及新挑戰的地方。雖然不是每個人都有此機會，但若有可能做選擇，就要找機會當「第一個」使用新興設備或儀器、或「第一個」嘗試觀察新現象的先鋒。』Sanders 如此建議青年學子。好比他的博士論文題目選擇的是當時很新奇的分子雲議題，結果發現了巨大分子雲。而 1970 年代，在 25 米毫米波天線計畫停擺後，他決定進入加州理工學院從事博士後研究，研究目標是 IRAS 團隊 Gerald Neugebauer 和 Tom Soifer 等人剛發現的一群銀河系外天體。這



群銀河系外天體中最亮的一個是名為 Arp 220 的超亮天體—該天體在巨蛇座內，是 1960 年代 Halton Arp 特殊星系圖集 (Atlas of peculiar galaxies) 中所列舉結構奇特、懷疑有星系間交互作用存在的星系之一，其被測得的能量影像有 99% 是紅外線影像，只有 1% 是可見光影像。

加州理工學院的 Scoville 和 Tom Soifer 找來 Sanders，希望他能在這個全新銀河系外領域進行巡天勘測、收集資料和撰寫期刊論文。當時在加州理工學院附近還有卡內基科學研究院 (Carnegie Institution for Science)，而有名的發現類星體的天文學家 Maarten Schmidt 就在隔壁研究大樓，Sanders 因此

覺得加州理工學院地點很不錯，是個可以與其他領域的天文、物理研究學者互相交流討論的好地方，便接下了這個博士後研究任務。期間，他除了加州理工學院的歐文斯谷電波天文台，還往返於基特峰天文台和五學院天文台之間，利用毫米波天線勘測 Arp 220，看看是否能在其中找到更多分子氣體。



圖說：本圖為 IRAS 自 1983 年 1 月起到 11 月期間所拍攝的巡天分佈圖，拍攝範圍涵蓋天際的 98%，所接收的輻射波長有四個頻率區段，分別是 12, 25, 60 與 100 μm 。©NASA/IPAC

後來在一次國際會議中，研究類星體和超亮天體的厘米波天文學者 Felix Mirabel 主動來找有紅外線和毫米波段觀測經驗的 Sanders 交換心得。對方提到美國國家電波天文台電波巡天勘測任務中，Jim Condon 發表的首例「超級恆星暴增星系 (Super starburst)」勘測圖裡有一個非類星體的銀河系外天體。從電波觀測影像看來，該天體質量相當大而且非常亮，因此推測它的中心可能是很大的恆星形成區域。Jim Condon 在他所編製的「無線電波星系目錄」中，這個天體被命名為「ic4553」，而這個天體其實就是加州理工學院 IRAS 團隊所發現的那個超亮紅外線天體 Arp 220。因為 Sanders 利用一氧化碳輻射譜線分析，剛好也偵測到 Arp 220 內部含有巨大分子氣體，他們兩位討論後認為該天體的分

子氣體含量必與被測得的紅外線高放射量有關，這個研究於是變得非常地有趣了。

由於 Sanders 是當時唯一做過銀河系巨大分子雲巡天勘測的人，他立刻拿銀河系外的 Arp 220 和銀河系巨大分子雲的氣體成分進行比較，發現 Arp 220 的分子氣體含量是本銀河的 5 倍，但光度竟是本銀河的 100 倍之多；也就是說 Arp 220 雖然距離我們遙遠，測得的光度卻很亮。在更早之前，Alar Toomre 曾提出有關星系合併的模擬研究理論，他認為當星系間發生相互碰

撞，旋臂和磁場作用會造成原子氣體被長距離拉開，形成長長的潮汐尾巴，此時若有大量分子氣體存在其中，這些星際氣體會因碰撞後的重力作用而被捲入合併體中心區域。Sanders 和 Mirabel 立刻聯想到 Arp 220 這個超亮紅外線天體有可能是相鄰兩個星系碰撞之後形成的合併體。於是 Sanders 列出他們巡天觀測得到的所有光源，然後用紅外線望遠鏡比對出觀測到的輻射光源位置，再去圖書館取得帕洛馬山天文台巡天勘測照片（Palomar Sky Survey photographic prints）作了約 500 個光源的影像重疊比對，結果發現很多光源就位處於某些特殊星系上；當下 Sanders 認為星系合併或許真的和區域所測得的高光度紅外線輻射有關聯。經由紅移和距離比對，除了 Arp 220 外，Sanders 他們還發現了一些其他未曾被發現的一般星系或特殊星系，並順便給予命名。

Sanders 在加州理工學院的 5 年期間，魯國鏞的伊利諾大學團隊加入開發小型毫米波陣列望遠鏡「柏克萊-伊利諾-馬里蘭大學聯合陣列（Berkeley-Illinois-Maryland Association Array；BIMA）」的計畫，這是毫米波天文學研究合併陣列 CARMA（Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy）的前身。同時期，Sanders 接觸了很多天文及物理學界的人，也開始嘗試接觸很多不同的光譜和毫米波陣列等各種技術和儀器，但因為毛納基峰 25 米毫米波望遠鏡計畫中止之故，當時尚無任何儀器和技術的靈敏度足以支援他想進一步做的銀河系外星系勘測。所以那時的 Sanders 只能繼續扮演紅外線天文學家的角色，但其實他從未放棄過其他波段的天文觀測；除了到歐文斯谷天文台及帕洛馬山天文台收集 IRAS 的紅外線觀測資料和巡天勘測照片外，他也持續在基特峰天文台和五學院天文台收集一氧化碳星際分子的毫米波勘測資料，靜待毫米波天文學時機的成熟。

另一方面，因為毛納基峰 25 米天線計畫停擺，美國國家電波天文台來自日本和歐洲的外籍博士後軍團紛紛出走，回去他們母國設置自己的毫米波天文台。像日本的搜尋地外文明計畫（SETI）先鋒 Masaki Morimoto 便將 25 米天線的概念帶回日本，在野邊山（Nobeyama）電波天文台設了一個 45 米天線；而歐洲那邊則在西班牙的伊拉姆峰（IRAM）蓋了一座 30 米天線。於是 Felix Mirabel 和 Sanders 趁機提出了一個合作計畫，成為第一個到日本野邊山電波天文台進行觀測的跨國團隊，他們也是第一個進行銀河系外紅外線星系勘測的團隊。

1987 年有兩項紅外線天文發現的新焦點，一是 Anneila Sargent 等人發現恆星周圍的塵埃盤（原行星盤），另一個就是 Sanders 等人的超亮紅外線星系。同一年稍後在加州理工學院舉辦了一場 IRAS 國際會議，與會人士不乏當時國際知名的紅外線與毫米波天文學者，包括 Alar Toomre。Sanders 在那裡發表了他有史以來第一場重大國際學術演講，獲得肯定。這是繼可見光天文學界發現類星體後，久無重大突破的紅外線天文學界的一大研究進展，也是 IRAS 紅外線巡天勘測任務中，第一個成功正確定位出銀河系外天體的研究發表。這個成果對 Sanders 尤其意義；原因在於當年 Sanders 初到加州理工學院時，研究團隊裡很少人知道什麼是分子氣體，也不知道星系間交互作用有何重要意義，但是當時仍是「新人」的 Sanders 積極不懈地推動這方面的研究。從開始尋找銀河系外最亮的紅外線光源，測量其紅移和光度及測量其星際一氧化碳的含量，還輾轉各地天文台用不同大小望遠鏡做觀測比對；小望遠鏡觀測不到分子氣體的，換成大望遠鏡就觀測到了。遇到星系照片影像不夠深的，他就去帕洛馬山天文台用同時具備光學和紅外線陣列影像系統的 5 米天文望遠鏡—海爾天文望遠鏡（Hale telescope）作觀測。那時帕洛馬山天文台還擁有當時首架被送上太空的天文照相機同款原型機，Sanders 便利用來進行長曝光攝影，經過不斷的嘗試，取得了許多星系團的深空影像。透過深空影像分析，他發現這些很亮的紅外線光源都含有高比例的分氣體成分，同時也都帶有潮汐尾巴（Tidal tail）。經過三年的觀測比對，終於證實每一個他們所觀測到的天體都有分子氣體存在其中。

回到 1987 年的 IRAS 國際會議，Sanders 演講之後，反應熱烈，連 Alar Toomre 會後都特地造訪他，兩人在辦公室針對這個研究討論了三個多小時，當下他們就已經感覺到 Arp 220 應是

前所未見的巨大星系合併體。於是在各方要求發表的壓力下，Sanders 決定不假他人之手，親自將研究成果投稿到期刊上。問題是發表的主旨究竟該強調什麼重點才不會讓這篇文章流於形式？

當時的天文界對類星體是什麼很感興趣，剛好又有數篇期刊論文開始在探討類星體的潮汐變化特性。為此，Sanders 跑到隔壁和 Maarten Schmidt 的類星體研究團隊討論；最讓 Sanders 印象深刻的是，經過多波段研究資料比對，他們所發現的這些超亮紅外線天體的光度竟然與類星體的光度相同。Sanders 根據他的多波段天文研究經驗，認為這兩者彼此間應該有所關聯；事實上，他懷疑超亮紅外線天體、星系合併和分子氣體或許就與類星體的形成有關，只是當時他尚不知道這些分子氣體是否真如 Alar Toomre 理論所言是位於這些超亮天體的中心。於是 Sanders 又到有毫米波陣列天線的歐文斯谷天文台去測量當時紅外線星系目錄中最亮的兩個合併天體—巨蛇座的 Arp220、和西佛星系團的 Markarian 231，結果發現所有分子氣體真的都聚集在天體的中心；雖然當時仍有些猶疑是否是校準問題造成的誤判，但因為校準誤差影響很小，所以他還是大膽判定分子氣體的確是聚集在天體中心。

Sanders 接著又從整個巡天觀測資料中選出 10 到 20 個超亮紅外線天體，一個一個仔細檢測比對，發現全都有光度和類星體光度等同的特性。這個證據給了 Sanders 很大的信心，於是他鼓起勇氣將論文聚焦在超亮紅外線星系，並朝著「超亮紅外線天體、氣體碰撞和類星體起源的關係」這個革命性新觀點進行探討。這篇論文成為他個人在天文研究上繼巨大分子雲之後的另一個代表作。當時 Solomon 的一位博士生也是後來魯國鏞伊利諾大學團隊的博士後研究員高煜（現任中國科學院紫金山天文台首席研究員）以及另一位學生 Leslie J Sage（現任「自然 Nature」期刊資深編輯委員），因為對此研究結果感到興趣，便承接這個主題繼續研究發揚光大。

3、從毫米波到次毫米波—次毫米陣列望遠鏡的開發

Sanders 教職小檔案

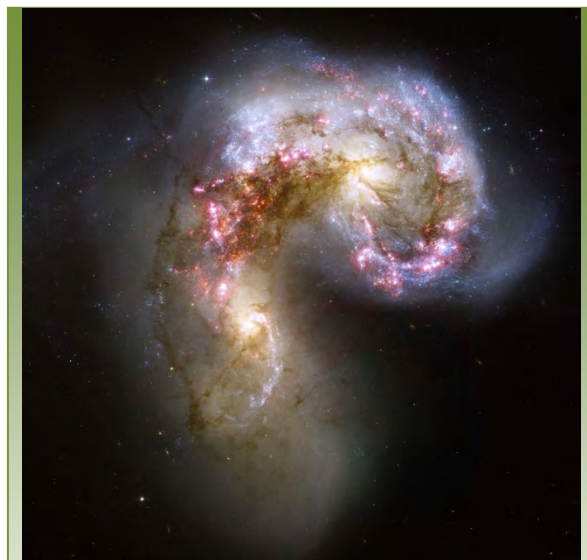
- 1989-迄今 夏威夷大學天文與物理學系 (Department of Physics and Astronomy, University of Hawaii) / 助教授、副教授、教授
 - 1989-迄今 夏威夷大學天文研究所 (Institute for Astronomy, University of Hawaii) / 助理天文學家、副天文學家、天文學家
 - 1997-2000 夏威夷大學天文研究所 (Institute for Astronomy, University of Hawaii) / 主席研究員 (Faculty Chair)
 - 2000-2002 德國馬克斯-普朗克地外物理研究所/宏博講座教授 (Humboldt Professor, Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics)
 - 2000-2002 獲頒德國宏博基金會/資深科學家獎 (Senior Award, Alexander von Humboldt Foundation)
-

1985 到 1990 是 Sanders 從毫米波轉回紅外線天文研究後個人研究生涯的第一個高峰；期間他發表了 60 篇學術論文，產量很大。他也受邀至世界各國參加學術會議和演講，他在紅外線天文學的這塊領域當時已小有名氣。同時因為國際合作，他還接觸了法語、德語和日語，並在各地天文學界建立了很多連結和合作關係，於是他開始尋找下一個發展機會。

那時的 Sanders 儼然已被「標定」為紅外線天文學家；加上除了歐洲和日本外，無法再利用美國其他的毫米波天文台，所以他原本以為自己再沒機會回到毫米波研究領域了。1988 年 Sanders 和妻子討論後，決定放棄加州理工學院提供的教職機會，轉至夏威夷大學任教。一來這是妻子的期望，二來他聽說歐洲太空總署 (The European Space Agency; ESA) 的紅外線太空觀測站 (Infrared Space Observatory; ISO) 即將升空，而史匹哲紅外線太空望遠鏡 (Spitzer Space Telescope) 計畫也正在進行，紅外線天文學正熱烈發展中，前途無量。夏威夷的 25 米

毫米波天線計畫雖然中止，卻仍有不少紅外線及其他波段的天文望遠鏡可利用，也有紅外線天文照相機，所以選擇到夏威夷，他可以在那裡進行紅外線及多波段天文觀測研究。

在一次 Green Bank 美國國家電波天文台會議中，當時在哈佛-史密松天文物理中心的賀曾樸與 Sanders 等人一起討論恢復 25 米天線計畫的事，這後來促成了於夏威夷高海拔毛納基峰建立毫米波陣列望遠鏡的決定。這個新毫米波望遠鏡不再是單一天線，而是類似厘米波超級大陣列（VLA）那樣，是體積較小、解析度更高更靈敏的，由數個毫米波干涉儀組成的陣列天線。因為歐文斯谷天文台、日本野邊山（Nobeyama）天文台和西班牙伊拉姆峰（IRAM）天文台毫米波陣列的成功運作，美國國家電波天文台終於下定決心開發新型毫米波天文望遠鏡，並找來對此有興趣的 Paul A. Vanden Bout 當所長。同時間，哈佛-史密松天文物理中心也表示對開發陣列天線的興趣，於是賀曾樸開始積極推動「次毫米陣列望遠鏡（Submillimeter Array；SMA）」的建置。原本大家並不看好這個技術難度很高的大型陣列天線計畫，但是哈佛-史密松天文物理中心最終還是實現了理想。



圖說：位於巨蛇座內的 Arp220 是距離地球最近的超亮紅外線天體。它所釋出的超高能量據信是星系碰撞或合併引發後續內部恆星暴增的結果。在 IRAS 首次發表 Arp220 後，由於次毫米波觀測技術的發展成熟，類似的超亮紅外線天體如雨後春筍般地被發現。©NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration

後來臺灣在籌備中研院天文所時，徐遐生找來魯國鏞及賀曾樸加入，並決定合作發展次毫米波天文學。中研院天文所也因此得以與世界級的毫米波陣列「柏克萊-伊利諾-馬里蘭大學聯合陣列（BIMA）」接軌，簽訂了使用合約；並與哈佛-史密松天文物理中心開始次毫米陣列的開發合作關係。此時的 Sanders 一面進行他的紅外線天文研究，一方面持續關注這個次毫米陣列計畫，希望毛納基峰次毫米波陣列天線能成功開發，以便進一步助他準確定位超亮紅外線星系中的分子雲。

4、大型毫米波及次毫米陣列計畫—阿塔卡瑪大型毫米波及次毫米陣列計畫

為了進行多波段觀測，Sanders 到了夏威夷大學。然後藉由新的紅外線、毫米波或多波段太空望遠鏡的觀測，Sanders 於 1990 年代後期發表第二波關於「超亮紅外線恆星暴增星系」、星系演化、與類星體形成的一系列研究成果。他分析在紅外線太空觀測站（ISO）所取得的巡天勘測深空影像，發現更多的超亮紅外線星系，並懷疑這些紅外線光度很高的星系位於距離地球非常遙遠的宇宙。雖然這些星系非常地亮，但因發出的可見光幾乎全被大量塵埃吸收，必須透過遠紅外線或次毫米波，才能觀測到塵埃被加熱後所放出的熱輻射。因為這些超亮紅外線星系的發現，天文學界發覺進一步開發毫米波陣列的重要性；尤其是發展「大型」的陣列天線，將可大大提升觀測收集的範圍和精準度。美國國家電波天文台的 Paul A. Vanden Bout 及與柏克萊大學有合作關係的伊利諾大學魯國鏞等人也都承認這很重要且大力推動，但是大型陣列很花錢，美國方面無法獨立出資，於是便促成了多國合資的跨國計畫。陣列則選擇蓋在南美洲智利阿塔卡瑪沙漠附近海拔 5,059 米的高原上，這就是後來的阿塔卡瑪大型毫米波及次毫米陣列計畫（Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array project；ALMA）。

這個 ALMA 計畫涵括兩部分，一是由多座直徑 12 米干涉儀天線所組成的「12 米陣列（12-m Array）」，一是由 4 座 12 米天線與 12 座 7 米天線所組成的「阿塔卡瑪密集陣列（Atacama Compact Array）」。計畫中的「12 米陣列」是由及美國國家電波天文台（NRAO）所領導的

北美團隊—包括美國大學聯合會(Associated Universities, Inc.; AUI)、美國國家科學基金會(U.S. National Science Foundation; NSF)、加拿大國家科學研究委員會(National Research Council of Canada; NRC), 以及歐洲南天天文台(European Southern Observatory; ESO)所領導的歐洲團隊共同負責興建。而「阿塔卡瑪密集陣列」的建造, 則是由日本國立天文台(National Astronomical Observatory of Japan; NAOJ)所帶領的東亞團隊負責—包括日本國立自然科學研究所 National Institutes of Natural Sciences Japan; NINSJ)。臺灣的中研院天文所團隊於 2005 年加入了 ALMA 東亞計畫, 並因表現優異, 於 2009 年更進一步參與執行 ALMA 北美計畫。在這期間, 由於臺灣中研院天文所在次毫米陣列(SMA)計畫中負責的接收器開發任務非常成功, 以及臺灣加入 ALMA 計畫, 魯國鏞在 Paul A. Vanden Bout 卸任美國國家電波天文台台長之後, 受邀接任, 直到今天。

在次毫米波天文這個科學的驅動下, 天文界各領域的學者們齊聚加入研究陣營, 包括徐遐生、魯國鏞、賀曾樸、還有 Sanders 等人, 如果次毫米波段的觀測不重要、不有趣, 就不會有人在意這個領域了。隨著超亮紅外線星系這種特殊星系陸續被發現, 除了更突顯出開發次毫米波陣列的重要性, 也再度引起大家對超亮星系觀測、星系形成與演化、以及早期宇宙演化的興趣。Sanders 本人也到世界各地演講, 不斷推動星系演化的研究, 到 1990 年代結束前, 天文界大概沒有人不了解這個研究領域的重要性了。

當英國在夏威夷啟用麥克斯威爾單碟天文望遠鏡(James Clerk Maxwell Telescope; JCMT), 專門觀測低溫宇宙如星際氣體、塵埃和遙遠星系, 安裝在望遠鏡上面的 SCUBA(次毫米通用輻射熱測定計陣列)攝影機在次毫米波段下清楚拍攝到這些「特殊星系」, 當時觀測者尚不知道那是什麼。但 Sanders 比較過天體數目、密度等觀測資料後, 符合他對本星系群演化的觀察, 知道這就是他在本星系群所發現的「超亮紅外線星系」。天文界為這個 SCUBA 所觀測到的特殊天體發明了一個新的分類名詞叫做「次毫米星系」, 因為這是距離地球十分遙遠的超大星系, 其光芒常被深厚的宇宙塵埃阻隔, 不易被一般可見光天文望遠鏡觀測到, 所以又叫做「多塵埃星系(Dusty galaxy)」; 但是 Sanders 堅持這其實就是他看到的, 紅移值很大卻仍超亮的「紅外線星系」, 這個有趣的爭議至今仍然存在。另一個有趣的值得探討的爭議是, Sanders 認為這些其實是「超亮紅外線星系」的「次毫米星系」, 其內部「恆星暴增」正在發生, 而這些超亮天體最終將會形成類星體; 但持次毫米觀點的人則堅持「次毫米星系」內的恆星暴增只會產生恆星, 不會產生類星體。

後來史匹哲紅外線太空望遠鏡(Spitzer)也觀測到了這些被星際塵埃遮蔽, 原本難以偵測到的超亮天體, 天文學家因而得以算出這些星系的位置。然後歐洲太空總署(ESA)針對勘測低溫、多塵埃太空而設計, 可同時進行遠紅外線及次毫米波段觀測的赫雪爾太空望遠鏡(Herschel Space Observatory)升空, 天文學家才得以算出超亮天體確切的紅外線光度值。這些紅外線和次毫米波太空望遠鏡的加入, 大大提升了恆星形成及星系演化研究的精確度。

另一方面, 次毫米陣列在這方面的研究也大有進展, 比如說: 哈佛-史密松天文物理中心的坂本和(Kazushi Sakamoto; 現任中研院天文所副研究員)在次毫米波段對 Arp220 星系合併體所做的小尺度結構觀測就很重要。所以藉由觀測紅移值很大的星系可以幫助瞭解星系及宇宙的演化, 但是為了進一步研究, Sanders 認為阿塔卡瑪大型毫米波及次毫米陣列(ALMA)的加入是很重要的, 當然假若未來能發展出紅外線干涉陣列太空觀測站就更加理想了。

三、給學子的話

1、Take opportunity at right time、face the challenging and make good decision

正在發展中的研究領域, 隨時都在接收來自全世界的各種新資料, 人人說著不同的研究、提供你不同的論點和看法, 該如何從其中做出正確的判斷和選擇並不容易, Sanders 說他自己就常陷於抉擇兩難之間。但是多看、多聽、多想、多試就可以增加經驗, 幫助做出正確的抉擇。

Sanders 歸納了他一路上曾面臨抉擇的關鍵點。比如說，當初是因為興趣所以選擇走入天文研究這個領域；選擇離開麻州五學院天文台轉到加州理工學院的多波段紅外線天文衛星研究團隊 IRAS，和不同領域的天文學者討論交換意見；1988 年的超亮紅外線星系論文決定親自撰寫沒有讓渡他人，同時在論文中決定盡可能提供可用的勘測資料。所有此類和研究方向相關的重大抉擇在轉任夏威夷大學之前大致都已底定，之後就是研究經費的申請與選擇適合的學生及門下研究員等相關的小抉擇。

2、Multi-way of approach: discuss and meet different groups and people; think and form ideas; go and do whatever it takes

當時多數不同領域的人，或許因為「門戶之見」都很少互相交流，但 Sanders 認為自己很幸運，在他所到過的每處，都能遇到貴人，學到很多寶貴經驗。在康乃爾大學，他有機會接觸到紅外線天文學。在紐約州立大學石溪分校時，他得知毫米波觀測對未來天文研究的重要性，同時學得劃時代的測量方法，能利用一氧化碳星際分子追蹤氫分子雲，也瞭解到寫出內容精確、好品質論文的重要性。在加州理工學院時，除了 IRAS 團隊同事外，他也常與不同領域的學者如 Maarten Schmidt、Felix Mirabel、Alar Toomre 等人溝通討論，他知道該如何選擇研究觀測的目標，並非毫無目的的，而是精確地、不帶偏見地進行天體資料的收集；同時還能夠對資料及結果作重點分析及討論。這些訓練和經歷對他都大有幫助。

而 Sanders 所遇到的人也對他的研究態度帶來影響，好比同處於研究領域快速發展與轉變時期的 Philip Solomon 和 Nick Scoville 兩人。Solomon 是個很有主見的人，當年他直接跑到美國國家電波天文台告訴對方繼續興建更大的 50 米、100 米厘米波天線是不合時宜的作法；到了紐約州立大學石溪分校，Solomon 也大刀闊斧地「去舊布新」，推動他認為即將成為明日之星的毫米波研究，因此惹來不少厘米波天文學者的不滿。至於 Scoville，原本研究原子氣體的他在寫一氧化碳星際分子及分子雲論文時，也惹毛了不少人。當時很多人還不知道分子雲，那時期，作巡天觀測的人多數認為恆星形成是發生在中性氫原子雲的中心，但 Scoville 卻明明白白指出 10 年前的說法是錯誤的，昭告大家中性氫原子會轉變成氫分子形成分子雲，而恆星形成則是發生在分子雲的中心。所以說，正在發展成形中的革命性研究常常會招來不少嚴厲批判，但 Sanders 卻覺得很刺激，只是要克服這些批判聲浪並不容易。他第一次在會議中發表博士論文的觀測研究時，也招來很多不滿和反對的聲音。不過因為 Sanders 瞭解指導他的前輩們的實力，也對自己紅外線天文學的底子很有自信；加上他所做的研究對象，如紅外線星系等確確實實就存在宇宙某個角落，為他提供最好的證據，所以他可以繼續堅持、勇往直前。過去的分雲研究沒有多少人知道，但今天在多數相關領域的重要國際會議中都會將巨大分子雲納入討論議題。

專訪最後，Sanders 總結了他這一路走來的感想。他覺得自己雖是不經意踏入了紅外線天文學領域，但他一路走來都很幸運，在適當的時機遇到適當的人，面臨各種機會時做了適當的抉擇。然而每個學者在其人生及研究的任何一個階段，都可能感到迷失或失落的時候，像是對所選的人生或研究領域不是覺得那麼感興趣，或者中途遇到一些無法預期的情況與干擾，或者面臨是否該轉向的抉擇。好比他自己，早期有可能跑去做天文生物學，也有可能在中期轉去做行星或是恆星周圍塵埃盤的研究，只不過因為對超亮紅外線星系的興趣，讓他堅持在這條研究路繼續走下去。Sanders 舉了自己的這些例子來勉勵學子或年輕學者，生活不會總是事事平順，機會處處都有，只不過需要動力及堅持才能一路走下去。對他來說，繼續另一個 20 年的天文路應該不是問題。（採訪 陳筱琪、謝佩穎；撰文 陳筱琪）