

分子雲裡行天文路(下)

整理.撰文/ 陳筱琪

採訪/ 陳筱琪、謝佩穎



...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

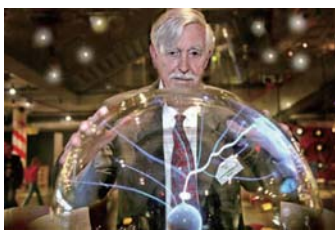
天文學研究風起雲湧的時代

2、從紅外線到毫米波，再回到紅外線 —星系巡天勘測與超亮紅外星系

(接續~臺北星空56期《分子雲裡行天文路(上)》)

『選擇做論文題目或研究的地方，要找一個

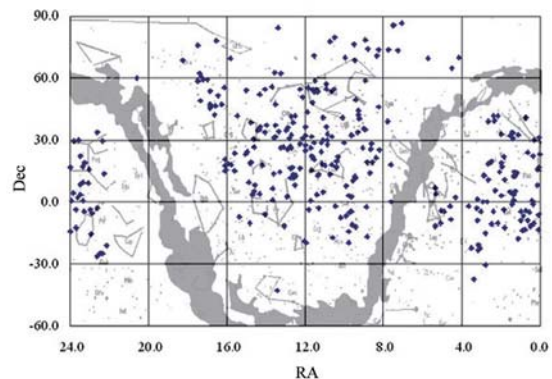
充滿機會及新挑戰的地方。雖然不是每個人都有此機會，但若有可能做選擇，就要找機會當「第一個」使用新興設備或儀器、或「第一個」嘗試觀察新現象的先鋒。』Sanders如此建議青年學子。好比他的博士論文題目選擇的是當時很新奇的分子雲議題，結果發現了巨大分子雲。而1970年代，在25米毫米波天線計畫停擺後，他決定進入加州理工學院從事博士後研究，研究目標是



1960年代Halton Arp編製《特殊星系圖集Atlas of peculiar galaxies》於1966年由加州理工學院出版，收錄了當時觀測到的338個奇形怪狀與結構的星系，星系間被認為存在著各種交互作用。圖集出版之初對不同形狀星系形成的過程仍所知不多，因此星系是依照它們的外觀做排列，分為5大類。第一類（編號1-102）是明顯外型奇特或有各式各樣旋臂的特殊螺旋星系。第二類（編號102-145）橢圓或類橢圓星系，與特殊螺旋星系雷同，但旋臂伴隨著橢圓星系或受到橢圓星系的影響，皆觀察到潮汐尾的現象。第三類（編號146-268）既非螺旋星系、亦非橢圓星系，且其特殊之處亦無法歸類至前述一、二類，是非典型的特殊星系；多是相互作用的星系或是兩個較小星系碰撞合併後的遺跡。第四類（編號269-332）為雙星系，但其中其實還包括星系群和星系鏈等次分類，主要考慮的是整個星系群和星系鏈的特性。無法明確歸類至上述任一類型的6個，

則獨立成第五類（編號333-338）。圖集中多數天體早有其他著名的名稱或標示，但仍有少數是以Arp的編號著名的，例如Arp220。今日大家對特殊星系形成的過程已比當年了解更多，於是我們知道這樣的星系有許多都是「交互作用星系」，如：Arp85、Arp220、以及NGC 4038/NGC 4039（Arp244）一類的觸鬚星系。其它少數則是沒有足夠質量的「矮星系」，如：Arp210，或是像M87（Arp152）和半人馬座A（Arp153）一類的電波星系。©Halton Arp

Location of the Arp Peculiar Galaxies



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Arp220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是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），而著名的發現類星體的天文學家Maarten Schmidt就在隔壁研究大樓，因此Sanders覺得加州理工學院地點很不錯，是個可以與其他領域天文、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臺，還往返於基特峰天文臺和五學院天文臺之間，利用毫米波天線勘測Arp220，看看是否能在其中找到更多分子氣體。

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臺電波巡天勘測任務中，由Jim Condon發表的首例「超星濠增星系（Super starburst）」勘測圖出現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

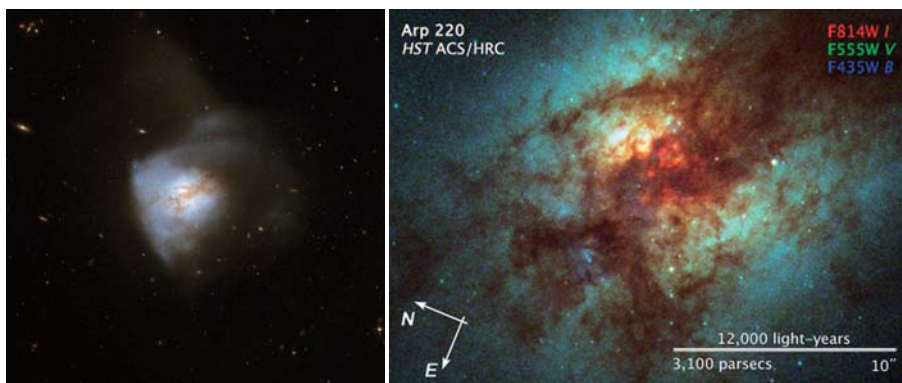
量相當大而且非常亮，因此推測其中心可能是很大的恆星形成區域。該天體在Jim Condon編製的「無線電波星系目錄」中被命名為「IC 4553」—後來知道它其實就是加州理工學院IRAS團隊所發現的那個超亮紅外線天體Arp220。又，Sanders透過一氧化碳輻射譜線分析，剛好也偵測到Arp220內部含有巨大分子氣體。與Mirabel討論後，兩人皆認為Arp220的分子氣體含量與被測得的紅外線高放射量應該有關。於是，這個研究變得非常地有趣了。



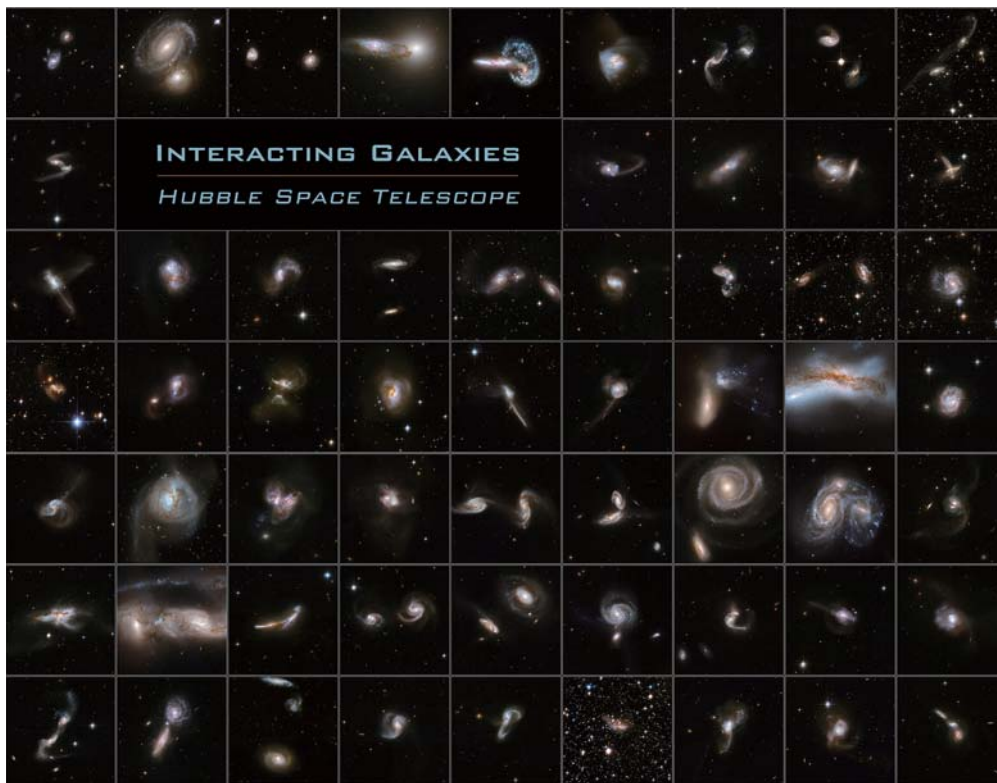
Felix Mirabel
©Felix Mirabel/ESO, Chile

由於Sanders是當時唯一做過本銀河系巨大分子雲巡天勘測的人，他立刻拿銀河系外的Arp220和本銀河系巨大分子雲的氣體成分進行比較，發現Arp220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Arp220雖然距離我們遙遠，測得的光度卻很亮。加上更早之前Alar Toomre的星系合併模擬研究理論中提到，星系間發生相互碰撞時，在旋臂和磁場的強大重力衝擊下，星系外圍發散雲中大量的原子氣體被長距離甩出至星際中，形成長長的潮汐尾（Tidal tail）。而存在星系之間的原子或分子氣體，則在星系碰撞後的重力作用下，被壓縮成分子氣體，並被捲入合併體的中心。據此，Sanders和Mirabel聯想到Arp220這個超亮紅外線天體很有可能是相鄰兩個星系碰撞之後形成的合併體。

以上兩個圖為哈柏太空望遠鏡拍攝到的，距離地球約2億5千萬光年之遙、位於巨蛇座內的「交互作用星系」—Arp220。Arp220是距離地球最近的超亮紅外線天體之一。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。



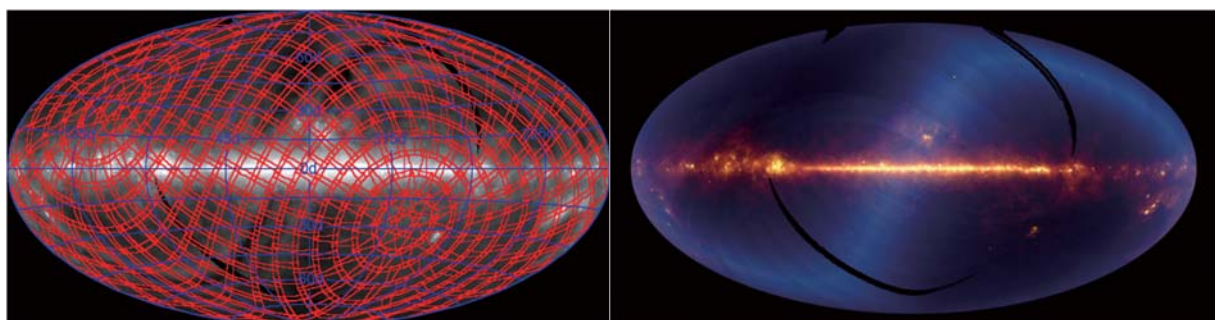
圖片來源：左圖 ©NASA, ESA, the Hubble Heritage-ESA/Hubble Collaboration, and A. Evans (University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University), 2008；右圖 ©NASA, ESA, and C. Wilson (McMaster University), 2002



圖為哈柏太空望遠鏡於2008年公布所拍攝到的各種交互作用星系。©ESA/Hubble

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臺巡天勘測照片（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於某些特殊星系上；當下Sanders認為星系合併或許真的和該區域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Arp220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了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。然而因為毛納基峰25米毫米波望遠鏡

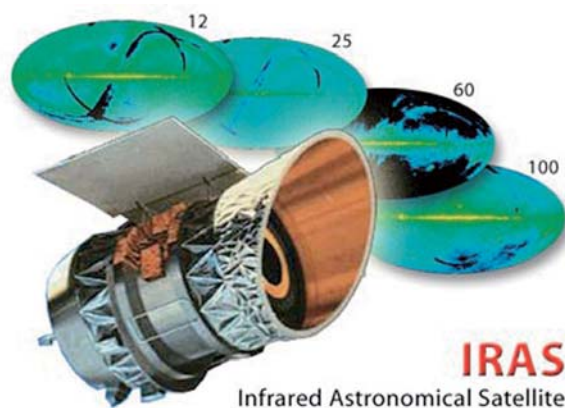


—左圖為IRAS自1983年1月起到11月期間所拍攝的巡天分佈圖（ISSA），拍攝範圍涵蓋天際的98%，所接收的輻射波長有四個頻率區段，分別是12, 25, 60 與 100 μm 。©NASA/IPAC
 —右圖是根據巡天資料描繪出的天空。溫度偏高的天體所表現的顏色為藍或白色（12 μm ），溫度偏低的天體顯示的是紅色（100 μm ），黃至綠代表中間溫度區域（60 μm ）。水平光亮處為本銀河盘面，圖片中央即是銀河系中央。盘面下方中央偏右的獨立亮點是一個巨大分子雲區域。Courtesy NASA/JPL-Caltech

計畫突然中止之故，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。那時的Sanders因此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臺及帕洛馬山天文臺收集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臺和五學院天文臺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，美國國家電波天文臺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臺。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）電波天文臺設了一個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臺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。



全球第一座「多波段」紅外線天文衛星（IRAS）於1983年1月25日發射升空。IRAS是太空中的天文台，負責執行紅外線巡天任務。該計畫由美國 NASA、荷蘭 NIVR與英國 SERC聯合執行，前後共10個月。IRAS收集到的資料，研究人員花了20年才完成分析。©NASA

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尤具意義，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，還輾轉各地天文臺用不同大小望遠鏡做觀測比對。遇到星系照片影像不夠深的，他就去帕洛馬山天文臺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



毛納基峰25米天線計畫停擺後，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回母國設置自己的毫米波天文台。例如：左圖日本野邊山電波天文台的45米天線©NRO/NAOJ，及右圖西班牙伊拉姆峰的30米天線© AIfA。

馬山天文臺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Alar Toomre理論中提到的潮汐尾。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Arp220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跑到隔壁大樓和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，他甚至懷疑超亮紅外線天體、星系合併和分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又去了一趟有毫米波陣列天線的歐文斯谷天文臺，測量Arp220以及西佛星系團的Markarian 231這兩個當時紅外線星系目錄中最亮的合併天體，結果發現所有分氣體真的都聚集在天體的中心。雖然當時仍有些疑慮，擔心是否係校準問題造成的誤判，但因為校準誤差影響很小，最後他還是大膽判定「分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



帕洛馬山天文台©Caltech



Sanders當年常常與Maarten Schmidt的類星體研究團隊一起討論。Maarten Schmidt是1959年提出星系動力與質量分布理論的學者。他認為星際間氣體的密度高低，與氣體區域內恆星形成的速率快慢有關，該理論便是今日所知的「Schmidt law」

©Maarten Schmidt/Caltech。



當年和Scoville一同力邀Sanders加入IRAS的Tom Soifer，現為史匹哲科學中心主任，主要學術領域在研究多塵埃亮紅外線星系在恆星形成演化中所扮演的角色。

©Tom Soifer/Caltech



1987年IRAS國際會議之後與Sanders閉門討論Arp220的Alar Toomre。Alar與Jüri Toomre兩兄弟是第一個利用電腦模擬星系碰撞的天文學家，其時為1970年代。

©Alar Toomre/MIT

—左圖為藝術家筆下的史匹哲（Spitzer）紅外線太空望遠鏡，由NASA於2003年發射，以取代先前的紅外線天文衛星（IRAS）。史匹哲望遠鏡的觀測波長在3至180 μm 之間。©NASA

—右圖為藝術家筆下的紅外線太空觀測站（Infrared Space Observatory；ISO），由歐洲太空總署於1995年發射，觀測波段在2.5~240 μm 之間，一直工作到所攜帶的氦在1998年5月耗盡為止，比預期多工作了8個月之久。圖中紅色代表光線進入望遠鏡的路線。©ESA



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臺首席研究員）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一次毫米陣列望遠鏡的開發

『選擇未來工作的原則，應該試著去找可帶來最多可能性的工作，才有發展機會。』Sanders如此建議青年學子。

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許多連結和合作關係，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，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，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供使用，也有紅外線天文照相機。選擇到夏威夷的話，不只紅外線，還可進行其他波段的天文觀測研究。

在一次Green Bank美國國家電波天文臺會議中，Sanders有機會和當時在哈佛-史密松天文物理中心的賀曾樸等人一起討論恢復25米天線計畫的事，這促成後來了於夏威夷毛納基峰建置毫米波陣列的決定。而這個新的毫米波陣列不再是單一天線，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。因為歐文斯谷天文臺、日本野邊山（Nobeyama）天文臺和西班牙伊拉姆峰（IRAM）天文臺毫米波陣列的成功運作，美國國家電波天文臺總算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擔任臺長。同時間，哈佛-史密松天文物理中心也表示了對開發陣列天線的興趣，賀曾樸於是積極推動「次毫米陣列（Submillimeter Array；SMA）」的建置。起初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。

後來臺灣在籌備中研院天文所時，徐遐生找到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



圖為2008年拍攝的次毫米陣列SMA。SMA具備各式光譜儀器，是通用型望遠鏡，從太陽系內鄰近我們的行星、銀河系內各種天體，乃至銀河系外其他星系，甚至宇宙形成之初的原始星系，都包含在SMA觀測研究的範疇。SMA尤其適合觀測冷星際物質，可分析緊鄰年輕或老年恆星的低溫雲氣、形成恆星或行星的吸積盤、以及外星系中的恆星劇增區。©CfA

（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則一面進行自己的紅外線天文研究，一方面持續關注這個次毫米陣列計畫的發展，期盼毛納基峰的SMA能成功開發，以便進一步幫助他準確定位超亮紅外星系中的分子雲。

4、大型毫米波及次毫米陣列計畫

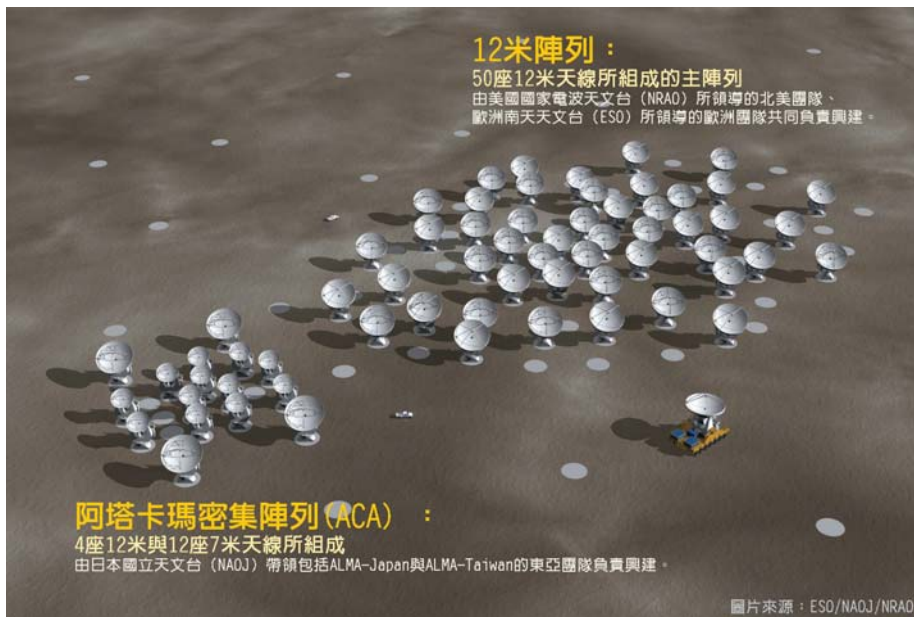
—阿塔卡瑪大型毫米波及次毫米陣列

為了進行多波段觀測，Sanders到了夏威夷大學。藉由新型紅外線、毫米波或多波段太空望遠鏡的觀測，Sanders於1990年代後期發表了第二波關於「超亮紅外星邊增星系」、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星系，並懷疑這些紅外線光度很高的星系，其實位於距離地球非常遙遠的宇宙。雖然這些星系非常地亮，但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。美國國家電波天文臺的Paul A. Vanden Bout及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，於是便推動形成了跨國合資的計畫。陣列選擇蓋在南美洲智利阿

塔卡瑪沙漠附近海拔5千多米的高原上，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50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」是由美國國家電波天文臺（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），以及歐洲南天天文臺（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臺（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），及2005年加入的臺灣中研院天文所團隊。臺灣團隊因表現優異，更於2007年進一步參與執行ALMA北美計畫。在這期間帶領臺灣團隊在SMA計畫中成功完成接收機系統開發任務並正式加入ALMA計畫的魯國鏞，受邀繼Paul A. Vanden Bout之後，接任美國國家電波天文臺臺長之職至今。

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。而超亮紅外星系這種特殊星系陸續被發現，除了更顯出開發SMA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；在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。



此為藝術家繪製的阿塔卡瑪大型毫米波及次毫米波陣列ALMA假想圖，呈現出完工後所有的66座ALMA天線，以最緊密的方式集結排列的情景。ALMA建設工程始於2005年，預計2013年竣工，是全球規模最大的地面望遠鏡興設計畫。高原的稀薄空氣與沙漠的乾燥環境成就了一個絕佳的次毫米波觀測環境。ALMA觀測波段界於0.3毫米與9.6毫米之間，特別適合探測太空的低溫物質，藉由其極佳的靈敏度與空間解析力，小至太陽系中的行星、衛星、彗星，本銀河系的恆星形成，大至星系及宇宙起源等重要天文課題，預期都將有突破性的進展。©ALMA (ESO, NAOJ, NRAO)

英國主導的麥克斯威爾單碟天文望遠鏡（James Clerk Maxwell Telescope；JCMT）在夏威夷啓用後，專門觀測星際氣體、塵埃和遙遠星系類的低溫宇宙，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也清楚拍攝到這些「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，符合他對本銀河星系群演化的觀察，知道這些「特殊星系」就是他在本星系群所發現的「超亮紅外星系」。天文界為SCUBA所觀測到的特殊天體發明了新的分類名詞叫做「次毫米星系」；又由於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，所以又叫做「多塵埃星系（Dusty galaxy）」。但是Sanders堅持這些其實就是他看到的，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存在。另一個有趣的值得探討的爭議是，Sanders認為這些其實就是「超亮紅外星系」的「次毫米星系」，其內部正在發生「恆星暴增」，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也觀測到這些被星際塵埃遮蔽、原本難以偵測到的超亮天



智利ALMA總部前廣場上，臺灣國旗飄揚在會員國的旗海中。圖中人物，左邊是中研院天文所所長賀曾樸，右邊是ALMA聯合觀測站主任Thijs de Graauw。©中研院天文所

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，天文學家終於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，SMA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；曾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。

以上無庸置疑，藉由觀測紅移值很大的星系可以幫助我們瞭解星系及宇宙的演化，但是為了

進一步研究，Sanders認為ALMA的加入是很重要的。未來假若還能發展出紅外線干涉陣列太空觀測站的話，就更加理想了。

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)
-

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，人人談論著不同的研究、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臺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。諸如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，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，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。

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:任職於中研院天文所天文教育推廣小組，現任中研院天文所天聞季報主編。

謝佩穎:中央大學天文所博士班學生。