

Spitzer 太空望遠鏡是屬於 NASA 的 Great Observatory 計畫中的紅外線部分。與二十年前的第一個紅外線天文衛星 IRAS 相比較，Spitzer 的體積並沒有太大的差異，主鏡的直徑也只是從 0.57 公尺增加到 0.85 公尺，但是其觀測能力卻有天壤之別。Spitzer 雖然主鏡面積只大了 2.5 倍，但是其靈敏度與解析度卻高出好幾個數量級，這主要原因在於偵測器技術的進步，Spitzer 使用的偵測器的暗電流降低了超過 100 倍，同時量子效率更是在 50% 以上。IRAS 所配備的是單一的感光元件，而 Spitzer 攜帶的全部都是二維陣列的系統，這使得觀測所需時間大幅縮短。這些在紅外線技術上的進展，有效地增加了天文學家的觀測效率，更使得以往無法被偵測到的天體以及微弱訊號無所遁形。另外 Spitzer 使用繞行太陽的軌道，並拉開與地球的距離，降低了地球造成的背景訊號，提升了系統的臨界星等，也能夠到達比較低溫的環境。而藉由 Spitzer 發展出來的被動冷卻技術也減少了冷煤的消耗速度。紅外線衛星的壽命決定於其冷煤的使用速度，當冷煤消耗殆盡時，衛星上的科學儀器就無法工作。Spitzer 整個酬載的重量不到 1000 公斤，只有上一個紅外線衛星 ISO (Infrared Space Observatory) 的三分之一，但是壽命卻可能是 ISO 的兩倍。很明顯的，技術的進步對於天文儀器的能力有決定性的影響，而天文觀測的需求也是促使科技進步的關鍵。

在 NASA 發展 Spitzer 的過程中，也確定了 Spitzer 的四大科學目標：

1. 尋找棕矮星及超行星：這些質量大於木星的星體其質量並不足以產生核融合反應，這些星體被認為是黑暗物質的一部分，Spitzer 將提供有關這些星體的數目統計以及物理特性的資料。
2. 發現以及研究鄰近恆星的碎片盤：Spitzer 將分析環繞在鄰近恆星周圍的塵埃與氣體的結構與成分。這些大部分氣體已經消散的圓形星盤或是碎片盤，被認為是形成行星系統的指標，Spitzer 將會觀測在不同年齡的原行星盤，了解這些雲氣與塵埃形成完整行星系統的過程。
3. 研究超高亮度紅外線星系與活躍星系核：許多的星系有很強的紅外線輻射，這超高亮度紅外線星系，可能是由於相互碰撞的星系引發大量恆星形成，或是被塵埃所包圍的活躍星系核，Spitzer 將會研究這些星系的起源以及演化。
4. 早期宇宙的研究：宇宙的膨脹造成天體輻射的紅位移，對於早期恆星或是星系產生的紫外光或可見光訊號會紅移到紅外線的區域，Spitzer 將會提供第一代恆星與星系形成的時間與過程的重要線索。

在觀測時間上，除了一般的觀測計畫時間之外，Spitzer 有約五分之一的觀測時間將執行巡天觀測以及儀器研發團隊的保留時間，針對特定的區域與天體建立完整的紅外線影像與目錄。憑藉著 Spitzer 先進的儀器以及獨特性，在短短幾個月內，已經有超過 70 篇的科學論文已經或即將發表。這個驚人的數字也代表紅外線觀測的重要性。



圖二：左圖為 Spitzer 觀測到的新生恆星 HH 46/47 的影像²，HH 46/47 是一個典型的低質量原恆星，具有向外射出的噴流。由於被厚實的雲氣所包圍，在右圖所示可見光波段無法被觀測。利用 Spitzer 的光譜儀，科學家也確認在這些包圍的雲氣中存在有冰、固態二氧化碳以及甲烷、甲醇等有機分子。(NASA/JPL-Caltech)

台灣的紅外線天文學

雖然紅外線與可見光天文學是天文研究最大的部分，但是台灣的天文研究在這個波段僅限於個人的小型研究，與無線電天文學相較，有很大的落差。因此發展可見光與紅外線天文學是很重要的一個目標。我們希望採取與發展無線電天文學相同的模式，在發展天文研究的同時，建立可見光與紅外線天文儀器的能力。這個模式可以在發展科學時，掌握天文觀測的尖端技術，而使研究保持在世界水準。藉由教育部的追求卓越計畫 CosPA，我們取得足夠的經費與位於夏威夷大島的加法夏天文台(Canada-France Hawaii Telescope, CFHT, 見圖三) 合作進行廣角紅外線相

機系統 (WIRCam, Wide-field Infrared Camera) 的研發，並取得望遠鏡的觀測時間。這是台灣天文界第一次取得世界級可見光紅外線望遠鏡的長期使用時間。CFHT 是目前世界上最好的四米級望遠鏡之一，利用此望遠鏡發表的論文數目與八米級望遠鏡相比毫不遜色。它具有相當完整的使用者介面以及先進的觀測儀器，尤其是調制光學 (adaptive optics) 系統以及廣角影像設備。而其在毛納基峰 (Mauna Kea) 所在的位置，佔據了山脊的前端，不會受到其他望遠鏡造成的大氣擾動，因此具有最佳的視相，可說是最佳的觀測位置。在八米級望遠鏡時間取得困難的狀況下，是我們最佳的合作對象。



圖三：夏威夷毛那基峰的山頂，圓圈所示即是 CFHT。

這個計畫的主要目標是藉由所取得的觀測時間，吸引一流的天文學家到台灣，並培養新一代的天文學家，同時建立天文儀器研發能力，使得天文學家與儀器發展的能量可以同時並進。這些取得的觀測時間是開放給台灣的天文學家，就是將其視為是台灣天文界的共同設備，而配合整個卓越計畫，其中一個科學目標為宇宙學的研究，以星系團的統計為主，利用巡天觀測尋找星系團並建立其紅位移資料，以與其他子計畫之觀測及理論結果整合，縮小宇宙論之參數範圍。我們的觀測時間由 2003 年下半年開始，目前已

經有五個計畫開始觀測並取回資料。

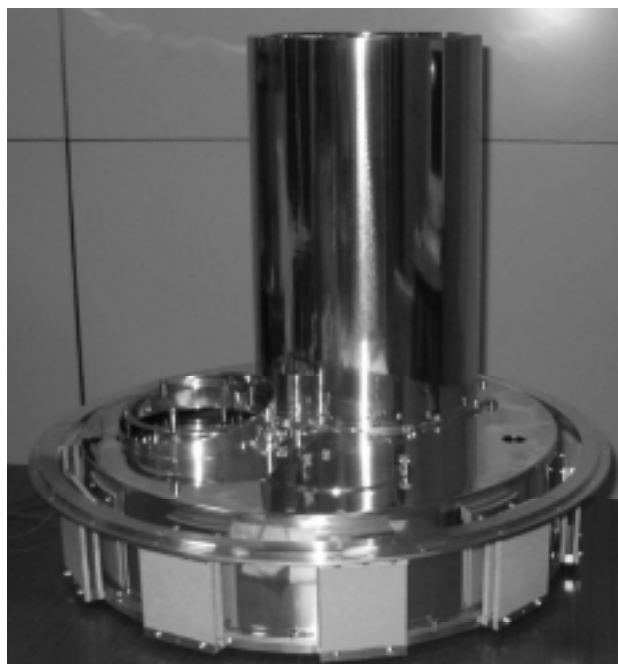
WIRCam 計畫

提升大視野之影像能力，是 CFHT 在 8 米級望遠鏡時代中，與大型望遠鏡競爭的主要方向。利用較大的視野彌補集光面積的不足。在完成了目前世界最大的可見光相機 (MegaCam)³ 之後，建造一個廣角的紅外線相機就成了 CFHT 主要的天文儀器計畫。其主要的科學目標包括尋找高紅位移天體、本銀河系之棕

矮星研究、恆星形成過程之研究以及搭配 MegaCam 將 photometric redshift 應用在高紅移天體等等。這個計畫於 2001 年十月開始進行，系統設計於 2003 年初完成，整個計畫包括加拿大、法國、美國、台灣的團隊進行研發。WIRCam 將裝置在望遠鏡的主鏡焦點上，焦平面包含 4 片 4 百萬像素的紅外線陣列。為了上述的科學目標，WIRCam 的設計，在視野的大小與像素的解析度上必須有所妥協，我們選擇能涵蓋夠大的視野的方式，稍微犧牲了 CFHT 可以提供的視相，將系統的像素解析度設計為 0.3 角秒，以使得有效視野到達為 20.5×20.5 平方角分，提供高解析度之廣角近紅外線影像，縮短巡天觀測的時間，對於需要高解析度的影像則在觀測時搭配次像素的觀測增加解析度。

WIRCam 的光學系統分成 collimator 與 camera 兩個部分組成，主要的功能在於消除主鏡產生的彗星相差。中間有 Lyot stop 以及兩個濾鏡盤。Lyot stop 位於 collimator pupil 成像的位置，可以擋住主鏡以外的輻射，並且讓超過 98% 以上的主鏡訊號進入偵測器中。每個濾鏡盤可以裝置五個濾鏡，不過每個濾鏡盤必須預留一空位，讓兩個濾鏡盤的濾鏡可以交互使用，因此整個系統可以容納八個不同的濾鏡。為了達到在 30 分的視野中，有良好的成像效果，光學系統一共使用了由 Fused Silica、CaF、BaF、ZnSe 構成的八個球面透鏡。設計的影像品質可以在視野內提供大於 50% 的光點能量於直徑 0.3 角秒的區域中。對於這些直徑超過 15 公分的透鏡，設計上使用較易加工的球面透鏡，以降低製造的難度也可以降低其價格。為了降低鏡片所產生的熱輻射，所有的鏡片都裝置在真空冷凍系統中，使鏡片溫度降低至 100K 以下。每一個鏡面也搭配了不同的抗反射鍍膜，減少訊號的反射，每一個抗反射膜的反射率在工作波段中（0.9~2.3 微米）皆低於 2%，以確保整個光學鏡頭的穿透率在 70% 以上。由於系統的視野很大，對於鏡片位置以及平行度的要求很高（ <0.1 角秒），這對於必須在低溫工作的系統是一大挑戰。所有的鏡片的固定方式，採用可以補償鏡片與鋁合金間熱膨脹差異的 T 型尼龍

墊固定而保持其垂直度，卻不至於產生過大的應力於鏡片上。在降溫的過程中，尼龍墊也可以使鏡片與鋁合金間保持良好的熱傳導，鏡片的位置則是由 BeCu 製成的彈性葉片提供支撐，使鏡片在不同角度時仍然能夠保持其位置。目前所有的鏡片與抗反射膜都已經完成，光學系統進入組裝階段，將與年底前完成測試⁴。

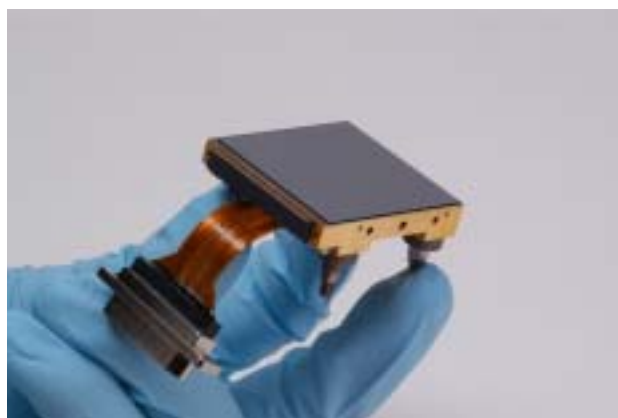


圖四：WIRCam 內部的低溫腔體，在底部四周有 G12 的絕緣支撐。

對於這麼大型的系統，我們採取了密閉循環式的冷卻系統，以避免傳統的液態氮降溫方式冷媒補充的問題。我們使用一個 CTI 1050 冷凍機，搭配一阻尼器，降低密閉循環系統所產生的震動。系統中偵測器的溫度約在 85K，以使陣列的暗電流小於背景熱輻射造成的背景值。而整個鏡片組的工作溫度由靠近主鏡部分熱端的 160K，降至靠近偵測器部分的 100K 左右。對於像 CaF 等質地脆弱的材料而言，在降溫過程中，必須將鏡片中心與邊緣的溫差控制在一固定範圍之內，以避免過大的內應力造成鏡片破裂。因此整個系統降溫的速度不可太快，從室溫至 80k 約費時 36 小時，而從低溫回到室溫也需要約 24 小時⁵。利用一

測試鏡片，我們確認了這個降溫的速度不會對鏡片產生影響。為了使系統的壽命延長，以及避免升降溫過程的失誤，每次系統降溫將至少維持一個月的時間，減少系統熱循環的次數。整個低溫腔以 G12 玻璃纖維片與室溫的真空腔壁連接，以提供穩定的支撐並降低與外界熱傳導。在系統中唯一可動的部分是濾鏡盤。為了減少系統內部產生的熱以及簡化維修的次數，馬達裝置於真空腔外，濾鏡盤的軸承使用藍寶石轉珠以增加濾鏡盤之降溫速度，濾鏡位置則是利用彈簧系統與定位器 position sensor 加以控制。目前整個低溫與真空系統已經完成測試，濾鏡盤也已經完成，等待光學系統完成之後進行整合。

WIRCam 採用最先進的紅外線陣列：由 Rockwell 生產的 HAWAII-2RG 陣列（圖五）。這是 Rockwell 為下一代太空望遠鏡 JWST 所設計的近紅外線陣列，其偵測波長介於 0.9 到 2.5 微米之間。其中由分子束磊晶方式形成的銻鎘汞（HgCdTe）磊晶層，具有較高的量子效率（>75%），以及極低的暗電流（ $< 0.1e/s @ 77K$ ）並且不會有以往以液相磊晶法感光層常見的殘留電子（residual image）。而其搭配的多工器除了具有 32 個輸出點，以及高速的讀取功能（最高速度 5MHz），更有特殊設計的參考像素，以及小區域讀取的視窗模式（window mode）。這個視窗模式可以取代傳統系統中的導星系統，並且可以使用與影像相同的紅外線導星。而在整個多工器電路上方也特別形成一金屬層，用來隔絕由多工器所造成的輻射，因此即使是以每秒十次以上的高讀出速率操作，也不會使輸出電晶體的熱輻射污染影像。另外，這個偵測器與之前的陣列最大的不同，在於其輸出端點全部集中在一邊，所以可以像 CCD 陣列一樣將數個陣列緊密排列，形成一個更大的陣列，在 WIRCam 中每個陣列之間只有 2.2mm 的間距，這個間距可以在觀測中輕易的彌補，這個特徵與視窗模式簡化了 WIRCam 的系統與設計，也是新一代紅外線陣列的特徵。在本計畫中，除了在相機內部的四個科學級陣列之外，Rockwell 也將提供一個多工器與兩個工程級陣列作為系統測試使用。



圖五：WIRCam 使用的 Hawaii-2RG 紅外線陣列。

陣列的控制電路之目標在於能夠達到在 1.5 秒內完成 CDS (correlated double sampling) 的讀取，也就是 0.7 秒內讀取一個完整的畫面，其資料量高達 42Mb/s。

為了降低讀出雜訊，必須使用最多的輸出端點，也就是一共 128 個輸出端。這麼龐大的輸出系統，除了需要複雜的電路系統外，也會產生大量的熱並且成本極高。對於傳統的控制系統是一大挑戰。為了解決這個問題，Rockwell 研發了最新的控制晶片 Sidecar⁶，它能提供陣列所需要的時序脈波以及穩定的偏壓源，更有 34 個輸出通道，進行訊號放大及類比數位轉換，提供低雜訊且高速的影像讀取。利用積體電路晶片取代傳統的系統，除了解決上述的問題之外，更重要的是可以減少晶片與陣列之間的距離，資料的數位化都在低溫腔中完成，減少外界雜訊干擾的機會。對 WIRCam 而言 Sidecar 是最好的控制器選擇，但是這個晶片仍然處於測試階段，由於第一代的晶片設計上出現瑕疵，無法在 WIRCam 正式運轉前完成。在目前的狀況下，我們仍然使用傳統的控制器（Leach controller）進行測試，由於控制器速度的限制，我們無法以 0.7 秒的速率進行讀取，因此主要的測試在於熟悉陣列控制、訊號處理軟體測試、降低系統雜訊為主，尤其是新增加的視窗模式功能中，視窗訊號與陣列訊號之間的影响，對於影像的控制與輸出處理十分重要。利用 Rockwell 提供的多工器與工程

級陣列，控制器系統可以正常的讀取完整的陣列訊號，並且可以將視窗訊號與陣列訊號同時讀出與處理，等到科學級陣列送達之後便可進行最後測試，同時我們也正尋求其他的控制器結構及選擇，以使用傳統的控制器達成讀取速率小於 0.7 秒的目標。

WIRCam 的另一特別的特徵，在於其搭配有一個影像穩定系統。這個系統包含一個可以在兩個軸上作傾斜調整的 fused silica 平板，用來修正影像在積分過程中的移動。影像的修正訊號是由從事先選取的導星以 50Hz 的速度擷取影像，經過軟體的計算，提供給影像穩定系統進行 5Hz 的修正。這個系統主要是用來修正望遠鏡追蹤系統的誤差，以及因為風所造成的望遠鏡移動。這個系統雖然無法像調制光學系統修正影像的高階相差，但是足以修正影像的一階相差，使系統提供穩定的影像品質。平板裝置有四個電容感應器，其調整精度可以在傾斜角 ± 55.5 角分的調整範圍中達到 0.015 角分的準確度，而使對應到的影像穩定度在 0.005 角秒之內，這個系統也已經通過測試，等待與其他的系統組合。

除了上述的子系統之外，其他與望遠鏡相關的配合工程與修改作業也在夏威夷進行，目標使能夠在明年夏天讓系統在望遠鏡上開始運轉，台灣的團隊在這個計畫的初期就參與了相機的設計的工作，並且在陣列的測試以及陣列控制器的發展投入相當的人力，並且參與導星控制軟體與資料傳輸軟體的編寫，同時參與其他部分的討論與會議，以增加紅外線天文儀器的經驗。

結語

由 Spitzer 的例子我們很清楚的知道技術對於紅外線天文學的影響，這些技術的進步也影響未來計畫的設計與能力，就如同 Spitzer 的被動冷卻技術以及軌道的選取，已經提供了 JWST 以及其他紅外線衛星的基礎。對於台灣的天文界而言，我們也藉由與 CFHT 的合作 WIRCam 的發展，建立自我研發的能力。在 WIRCam 之後，我們也開始評估未來的計畫如

SALT、SOFIA、以及小型衛星計畫等，以使台灣的紅外線天文學研究能持續進步與發展。

參考資料

1. <http://www.spitzer.caltech.edu/>
2. Noriega-Crespo, A., Morris, P., Marleau, F., Carey, S., Boogert, A., van Dishoeck, E., Evans, N., Keene, J., Muzerolle, J., Stapelfeldt, K., Pontoppidan, K., Lowrance, P., Allen, L., Bourke, T., "A New Look at Stellar Outflows: Spitzer Observations of the Herbig-Haro 46/47 System", 2004, ApJS, in press
3. O. Boulade et al., "Megacam: the new Canada-France-Hawaii Telescope wide-field imaging camera.", *proceedings of SPIE Vol. 4841*, pp. 72-81, (2003).
4. R. Doyon, P. Vallée, S. Thibault, M. Poirier and M. Beaulieu, 2004, "Optics Integration of the CFHT Wide-Field Infrared Camera (WIRCam)", [5492-116], *proceedings of SPIE Vol. 5492*, Ground Based Instrumentation for Astronomy, SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation.
5. P. Feautrier, E. Stadler and P. Puget 2004, "Interest of thermal and mechanical modeling for cooled astronomical instruments: the example of WIRCam", [5497-15], *proceedings of SPIE Vol. 5497*, Ground Based Instrumentation for Astronomy, SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation.
6. M. Loose et al. 2003, "SIDECAR Low-power control ASIC for focal plane arrays including A/D conversion and bias generation.", *proceedings of SPIE Vol. 484*.

作者簡介

王祥宇，國立交通大學電子研究所博士。目前為中央研究院天文與天文物理研究所之助研究員。研究方向為可見光與紅外線天文儀器，紅外線影像系統，半導體量子結構紅外線偵測器等。

<mailto:sywang@asiaa.sinica.edu.tw>