

# 大型紅外線天文學相機的發展

## The Development of Large Format Infrared Astronomical Cameras

王祥宇

Shiang-Yu Wang

現代的天文研究與科技的發展有著密不可分的關係，尤其是固態電子偵測器技術的成熟，使得天文研究進入一個準確量化的時代，大幅加速了天文學的發展。藉著天文對影像品質的要求，更多更先進的大面積偵測器陣列也陸續被開發出來。本文將介紹台灣參與的先進紅外線相機計畫，以此為例介紹天文相機的特性與要求，並且說明其與一般數位相機的差異。

Modern astronomical research is closely connected to the technical development of the instrumentation. Especially, the introduction of the solid state detector dramatically changed the astronomical research and leads to the precise quantitative analysis. Furthermore, with the more and more requests for better astronomical images, advanced sensor arrays were developed in the last decade. In this paper, we will introduce the large infrared camera project Taiwan participates. With the projects, the detailed of the astronomical camera will be presented and the requirements and features of the astronomical camera will be compared with the digital cameras for normal applications.

### 一、前言

天文觀測最重要的目的之一，在於獲取天體所發出的輻射強度與相對位置。高解析度的準確測光儀器，可以說是最基本的需求。隨著半導體電子工業的發展，天文觀測突破了以往照相底片的限制，並且在近二十年前正式進入大面積光子化的階段，對於收集到的訊號可以準確的量測到十個電子以下的誤差。近年來隨著觀測計畫的需要，對於視野的要求也越來越大，大型可見光與近紅外線天文相機計畫不斷的被提出，宛如一場無止境的競賽。其最大目的就是在於提升觀測的效率、縮短觀測的時間。在發展相關天文研究的同時，建立天文儀器的

能力，是提升研究成果一個相當重要的關鍵。由於每個望遠鏡的光學設計不同，其相機系統無法像一般相機量產或是有一個公認的標準規範。必須掌握天文儀器的尖端技術，才能使研究保持在世界水準。特別是針對大型可見光紅外線望遠鏡所設計的廣角相機，往往需要超過十人甚至到五十人以上的團隊才能完成，而其研發的時程也超過三年以上。天文儀器的製作已經成為一個特別的研究領域。

與一般數位相機相比較，天文相機具有以下幾項特點：低溫操作、大型之焦平面與鏡頭、低亮度觀測、高解析度、曝光時間長等，這些特點皆與天文觀測的要求有關。天文相機的基本要求在於提供最高的解析力，因此通常考慮的是像素解析度

(pixel scale)，而非整體的視野大小 (field of view)。由於相素解析度較高，天文相機的視野較一般相機小了很多，且往往是受限於經費以及相機可容許的尺寸。而其鏡頭的設計要求，也是基於上述的解析度而定。

由於天文物體大部分為點光源，在鏡頭設計上注重的是點瀰散函數 (point spread function) 以及光點能量集中 (enclosed energy) 範圍的表現。天文之相機系統觀測物體皆為極低亮度的物體，曝光時間可達小時以上，與科學光譜儀使用之相機相似，對於偵測器的效率與暗電流、外界輻射的干擾以及系統的雜訊要求很高。因此天文使用的感光元件通常具有較小的滿井位能 (full well capacity)，以及很低的讀出雜訊，搭配 16 位元的數位訊號，以免在數位化時損失訊號的解析度。而為了降低元件的暗電流，天文相機一般採取較低的元件工作溫度。尤其是對紅外線相機而言，經常是在液態氮溫度下操作，因此系統必須增加低溫與真空的環境，這也是造成天文相機製作上較為複雜的重要原因。在接下來的章節將以我們參與的廣角紅外線相機系統 (wide field infrared camera, WIRCam) 為例，介紹天文紅外線相機的設計與細節。

## 二、WIRCam 計畫

位於夏威夷大島的加法夏望遠鏡 (Canada France Hawaii Telescope, CFHT，請見圖 1) 是世界

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。

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，以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)<sup>(1)</sup> 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。藉由教育部的追求卓越計畫 CosPA，中央研究院天文及天文物理研究所取得足夠的經費與 CFHT 合作進行 WIRCam 的研發，並取得望遠鏡的觀測時間供台灣的天文學家使用。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，經過四年的開發於 2005 年底完成，整個研發計畫由加拿大、法國、美國及台灣的團隊合作進行。

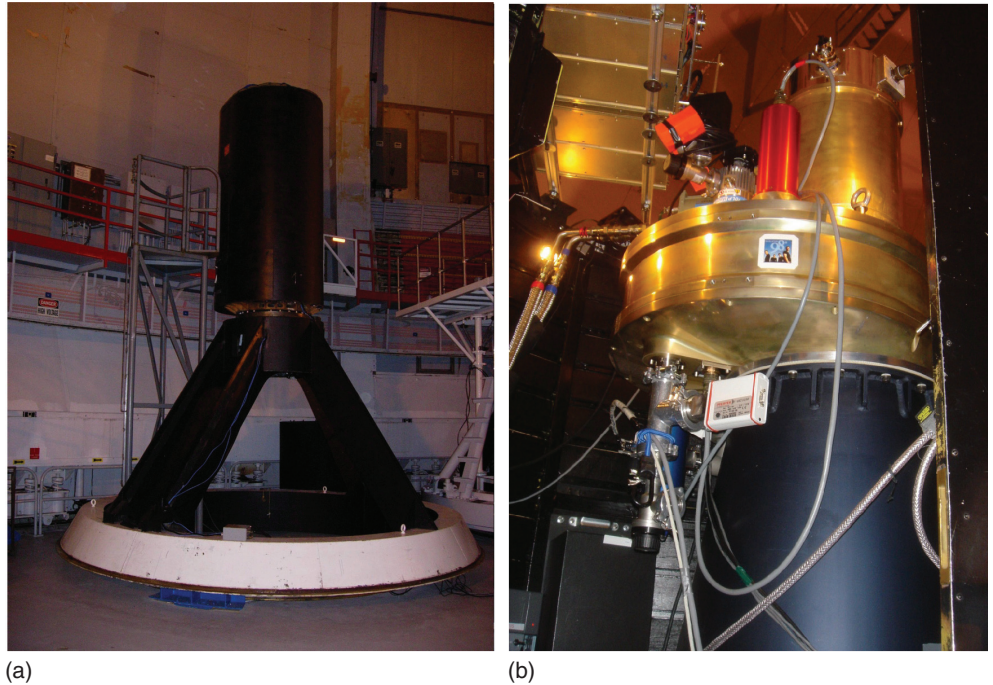
由於大氣吸收與地表溫度的影響，地面望遠鏡在紅外線波段的觀測主要範圍為 1–2.5 微米。WIRCam 裝置在望遠鏡的主鏡焦點上，焦平面包含 4 片 4 百萬像素的紅外線陣列，這是目前具有相似解析度而像素最多的天文紅外線相機。一般而



圖 1.  
夏威夷毛那基峰的山頂，圓圈所示即是 CFHT。(圖片由 CFHT 提供。)

圖 2.

(a) CFHT 的主焦點接環，WIRCam 裝置於上方的黑圓筒中。(b) WIRCam 的本體。



言，對於地面望遠鏡的觀測，在可見光與紅外線波段會由於大氣擾動的關係，限制望遠鏡可以提供的角分辨率。對於良好的天文台址，在近紅外線波段的角解析度大約是在 0.4 角秒左右，要能夠在這個視相下提供完整的解析度，其像素解析度必須小於 0.2 角秒。但是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，我們選擇能涵蓋較大視野的方式，降低觀測所需的時間，而稍微犧牲了 CFHT 可以提供的視相。系統的像素解析度設計為 0.3 角秒，以使得有效視野到達  $20.5 \times 20.5$  平方角分。同時可提供高解析度與廣角的近紅外線影像，並縮短巡天觀測的時間。為了彌補犧牲的解析度，對於需要高解析度的影像，系統提供了次像素位移的功能，可在觀測時增加解析度。

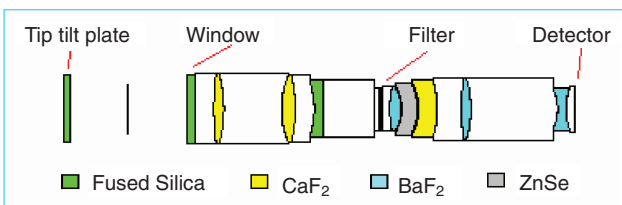


圖 3. WIRCam 的光學系統設計圖。

WIRCam 的光學系統除了原本需要的鏡頭之外，另外增加了一組準直光鏡組 (collimator)，這也是天文上的特殊考量。對於紅外線觀測，在波長較長的區域 (2 微米以上)，會受到望遠鏡與其周遭環境產生的熱輻射影響。對於暗淡的天體，這些熱輻射會大幅增加觀測的時間，並且限制系統的極限星等，所以必須加以限制。在 WIRCam 的光學設計中，有兩個抑制熱輻射的特別設計。首先，利用 collimator 將望遠鏡的匯聚光線形成準直光，再利用位於 collimator pupil 成像位置的 Lyot stop，擋住主鏡集光範圍以外的輻射，並且讓超過 98% 以上的主鏡訊號進入偵測器中。這個準直光束形成的位置也提供了濾鏡放置的空間，有助於減少濾鏡片對於成像品質的影響。此外，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 100 K 左右，大幅減少鏡片本身的熱輻射。

而鏡頭部分的主要功能在於消除主鏡產生的彗星像差。為了達到在 30 分的視野中，可以在 1—2.5 微米波段有良好的成像效果，光學系統一共使用了由 fused silica、CaF、BaF 及 ZnSe 構成的八個球面透鏡。設計的影像品質可以在視野內於直徑 0.3 角秒的區域中提供大於 50% 的光點能量。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。每一個鏡面也搭配了不同的抗反射鍍膜，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，鏡頭組裝時鏡片位置以及平行度的容許度很小 ( $< 50$  微米,  $0.3$  角分)，這對於必須在低溫工作的系統是一大挑戰。所有鏡片的固定方式，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定位，不致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<sup>(2)</sup>。完成的鏡片組在室溫下利用電腦全像片進行組裝測試，之後與系統整合，其成像品質符合設計規範，觀測的影像品質可達  $0.4$  角秒。

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涉及的冷媒補充問題。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。由於長時間曝光的需求，系統的工作溫度是由偵測器的暗電流大小來決定。WIRCam 中偵測器的溫度約為  $85$  K，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  $160$  K，降至靠近偵測器部分的  $100$  K 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很慢，從室溫至  $80$  K 約費時 36 小時，而從低溫回到室溫也需要約 24 小時<sup>(3)</sup>。為了使系統的壽命延長，以及避免升降溫過程的失誤，除了不可抗力的因素外，整個系統每年只安排兩次的升降溫，用來進行濾鏡更換以及其他系統維護的工作。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，並降低與外界的熱傳導。在系統中唯一可動的部分是濾鏡盤，系統總共有兩個濾鏡盤，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。為了減少系統內部產生的熱能，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位置感應器 (position sensor) 加以控制。

WIRCam 採用最先進的紅外線陣列：由 Rockwell (現已被 Teledyne 併購) 生產的 Hawaii-2RG 陣列 (圖 5)，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  $0.9$  至  $2.5$  微米之間，其中由分子束磊晶方式形成的銻鏷汞 (HgCdTe) 磊晶層，具有較高的量子效率 ( $> 75\%$ )，以及極低的暗電流 ( $< 0.1$  e/s @77K)，並且不會有以往以液相磊晶法形成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  $5$  MHz)，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相機中的導星系統，並且可以使用與觀測波段相同的紅外線導星。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

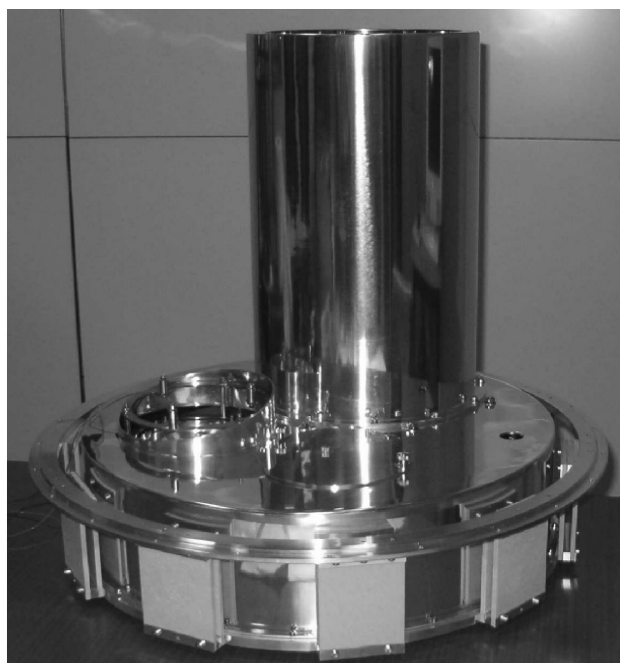


圖 4. WIRCam 內部的低溫腔體，在底部四周有 G12 的絕緣支撐。(圖片由 CFHT 提供。)

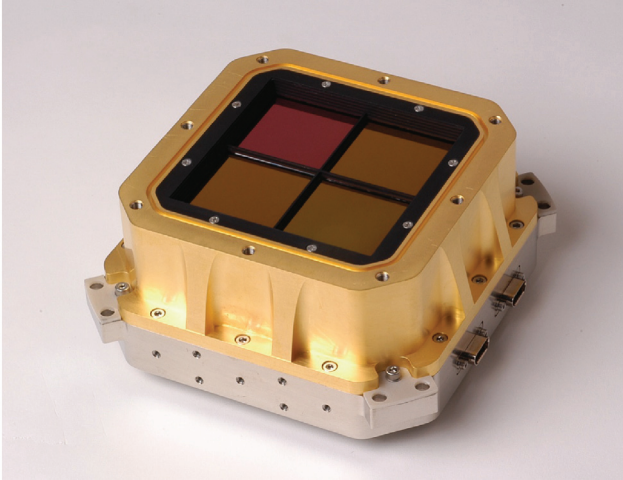


圖 5. WIRCam 使用的 Hawaii-2RG 紅外線陣列。  
(圖片由 CFHT 提供。)

射，因此即使是以最高讀出速率操作，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，在於其輸出線路全部集中在晶片的一側，所以可以將數個陣列緊密排列，形成一個更大的 mosaic 陣列。在 WIRCam 中每個陣列之間只有 2.2 mm 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 的系統大小與設計，也是新一代紅外線陣列的特徵。

紅外線天文觀測由於受到較高背景輻射的影響，其積分時間通常在三分鐘之內，長時間的曝光必須由影像處理將多次的短曝光相疊。為了減少讀出時間對觀測時間的浪費，讀出時間必須有效的減少。WIRCam 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 42 Mb/s。為了降低讀出雜訊，必須使用最多的輸出端點，降低每一個輸出點的讀出速率，整個陣列一共有 128 個輸出端點。這麼龐大的輸出系統，需要複雜的電路系統，對於傳統的控制系統是一大挑戰。WIRCam 讀出系統分成兩個核心，一個核心包含前述的 128 個平行輸出端點，另外一個核心用來處理導星的訊號。

WIRCam 是世界上第一個使用導星模式的相機，因此必須進行許多測試，主要的測試在於熟悉

陣列控制、訊號處理軟體測試與降低系統雜訊為主，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響，對於影像的控制與輸出處理十分重要。利用 SDSUIII 的陣列控制系統，WIRCam 的讀出雜訊約在 20 個電子左右。

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事先選取的導星以 50 Hz 的速度擷取影像，經過軟體計算四個導星平均的移動量，提供給影像穩定系統進行 5 Hz 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振動，該系統雖然無法像調制光學系統修正影像的高階像差，但是足以修正影像的一階像差，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  $\pm 55.5$  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。除了提供影像穩定的功能之外，這個系統也提供了次像素的影像移動功能，對於需要高解析度的觀測，可以提供次像素位移觀測，增加觀測的解析度。

WIRCam 於 2005 年底正式運轉，系統在運轉之後進行了幾次微調，於 2007 年進入穩定的工作狀態，到目前已經執行超過 300 個夜晚的觀測，而搭配的影像處理系統也在 2006 年完成。天文影像非常注重測光的準確度，讀出的影像並不會經過任何的電路額外處理，一般而言，讀出的原始影像(請見圖 6) 會包含各電路的增益、像素間量子效率、暗電流、天空背景等在不同位置的差異，之後的影像處理必須借助許多的參考影像才能完成。經由一系列的處理以及最後的影像疊合，才可以用來進行天文的研究。這些動作必須要藉由了解相機本身的特性，才能得到最佳的結果。

### 三、結語

中央研究院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，也參與導星控制軟體

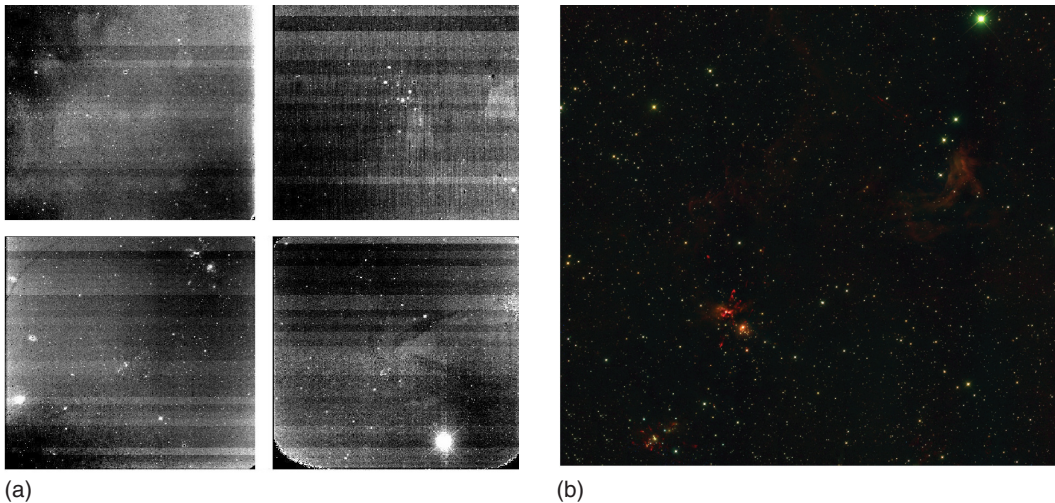


圖 6.  
 (a) WIRCam 觀測的原始影像之一。  
 (b) 經過影像處理於疊合後的影像。其中藍色、綠色、紅色分別代表 1.3、1.7 與 2.2 微米的訊號。

與資料處理軟體的編寫，這個計畫奠定了台灣在天文可見光與紅外線儀器的基礎。在 WIRCam 之後，越來越多的大型天文相機計畫也陸續啟動，更大與更高效率的偵測器陣列也在研發當中，同時天文專用的陣列控制晶片也開始被採用<sup>(4)</sup>。在明(2009)年將有六千四百萬像素的天文紅外線相機開始運轉，我們也在最近加入了新的廣角可見光相機的計畫，與日本八米級的 Subaru 望遠鏡合作開發超過九億畫素的大型天文相機，以使台灣的天文學研究能持續使用最新的儀器而不斷進步。

### 參考文獻

1. O. Boulade, *et al.*, *Proceedings of SPIE*, **4841**, 72 (2003).
2. R. Doyon., P. Vallée, S. Thibault, M. Poirier, and M. Beaulieu,

*Proceedings of SPIE*, **5492**, Ground Based Instrumentation for Astronomy, SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation (2004).

3. P. Feautrier, E. Stadler, and P. Puget, [5497-15], *Proceedings of SPIE*, 5497, Ground Based Instrumentation for Astronomy, SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation (2004).
4. M. Loose, *et al.*, *Proceedings of SPIE*, **484** (2003).

- 
- 王祥宇先生為國立交通大學電子工程博士，現任中央研究院天文及天文物理研究所副研究員。
  - Shinag-Yu Wang received his Ph.D. in electrical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an associated research fellow in the Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica.