

天文觀測的新挑戰—談泛星計畫

Frontier Challenges in Astronomical Observations- The Pan-STARRS Project

陳文屏

Wen-Ping Chen

天文觀測儀器發展日新月異—望遠鏡口徑變大，偵測器靈敏度提升，焦平面覆蓋面積增加。本文介紹我國與美、德、英等國共同參與之「泛星計畫」(Pan-STARRS)，其利用超廣角望遠鏡與新技術開發具備 14 億個像元之大面積對角轉移 CCD 電子相機，每週對全天域進行掃描一次，有效研究位置或亮度有變化的宇宙天體，為可見光觀測天文開創新紀元。

Advance in instrumentation in observational astronomy has been leaping—ever increase in the telescope aperture, improved sensitivity and larger focal-plane coverage in the detector technology. This article describes the hardware and software development of Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System), a telescope facility for which Taiwan is involved in the scientific operations, together with an elite group from the US, Germany and the UK, to patrol the entire visible sky several times per month by employing wide-field optics, and a CCD camera with 1.4 gigapixels that makes use of an innovative orthogonal transfer technology. Pan-STARRS will be a powerful tool to identify celestial objects variable in position or in brightness, and will revolutionize optical observations in time-domain astrophysics.

一、天文儀器的挑戰

天文學是一門以觀測為主的科學，藉由分析天體發出的訊號，透過理論解讀與統整，以瞭解天體的性質、來源與變化。除了觀測與理論外，有時候也利用實驗室模擬太空環境，觀察物質的物理與化學變化。除了隕石，以及少數機會送出太空船就近研究諸如月球、行星、衛星、彗星等天體，我們對於宇宙的瞭解，絕大多數來自於天文觀測。

天體發出的訊號以電磁波為主，這些訊號經過了遙遠距離，受到星際物質的吸收與散射，最後經

過地球大氣層，被望遠鏡與偵測器接收。天體訊號通常極其微弱，因此天文觀測的挑戰一直以來主要在於提高靈敏度與解析度。以靈敏度而言，一方面增加望遠鏡口徑，另一方面提高偵測器效率。以解析度而言，諸如開發新技術克服大氣干擾，例如雷射導星、自適應光學，甚至把望遠鏡放在太空、以獲得清晰影像。另外還有改良光學技術、提高光譜分光的色散程度等。總而言之，觀測儀器之技術及資料分析方法的發展，在於追求「看得遠、看得清楚」。距離遙遠的天體，其電磁波經過很長時間才抵達地球，因此提高觀測靈敏度，便能記錄到極

為遙遠的天體，也就能研究宇宙早年的情形。

為了追求更高靈敏度與更佳解析度，天文觀測設備不斷挑戰最新技術。在無線電波波段，新一代的設備 Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)⁽¹⁾ 由美國、歐洲與日本合作，在南美洲智利北部沙漠安地斯山海拔 5000 公尺 Chajnantor 高原建造數十座 12 公尺直徑之天線陣列，干涉儀基線從 150 公尺到 18 公里，解析度可以達到 0.005 角秒，比哈伯太空望遠鏡還好了十倍。在可見光與紅外線方面，歐美已經在規劃口徑 20 到 30 公尺的望遠鏡⁽²⁾，太空中則有接替哈伯望遠鏡的 James Webb Space Telescope (JWST)，都是研究宇宙極有威力的工具。

二、研究宇宙的新領域—時變現象

泛星計畫 (Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System, Pan-STARRS) 是因應新思維而開展的計畫⁽³⁾。除了靈敏度與解析度，泛星計畫的特色在探索宇宙天體隨時間的變化現象。1994 年彗星撞木星事件，讓人們體會到天體撞擊地球可能帶來的大規模災難，因此 2005 年美國布希總統簽署法案，要求 NASA 在一年內提出可行性規劃，指認出軌道可能與地球相交的「近地小行星」，並提出避免撞擊之解決方案與估計所需經費。泛星計畫應運而生，由美國國務院透過美國空軍斥資六千萬美金，建造超廣角望遠鏡進行巡天監測，由夏威夷大學執行，建造由四座口徑 1.8 公尺的望遠鏡構成觀測陣列 (PS4)，各自配備最先進且具備 14 億個像元之電子數位相機。整個望遠鏡與相機組成的光學系統視野達到七平方度，每夜將巡天 6000

平方度，其深度可達 24 星等，每月掃描全天空數次，能夠有效辨識並研究位置 (例如小行星、彗星) 或亮度 (例如超新星) 產生變化的天體。

巡天觀測在取得大天區影像資料。評估巡天效率 (survey power) 的一項指標為 $SP = A\Omega/\theta^2$ 。其中 $A [m^2]$ 是望遠鏡主鏡的集光面積， $\Omega [deg^2]$ 為成像的立體角，由於集光面積越大相當於能夠看到距離越遠的天體， $A\Omega$ 的乘積相當於觀測所能涵蓋的空間體積。 $\theta [arcsec]$ 則是望遠鏡點光源成像的半高全寬 (full-width at half maximum)，也就是一般說的「視相度」或大氣寧靜度 (seeing)。在視相度好的觀測地點，星光能量比較集中，靈敏度也就越好。表 1 列出數項巡天計畫的比較⁽⁴⁾，可以看出以巡天效率指標而言，泛星計畫要比口徑大得多的 CFHT 或是 Subaru 望遠鏡優越得多，也比現有搜尋小行星的望遠鏡，例如 Linear 或 Spacewatch，好了二到三個數量級。美國正在規劃的 Large Synoptic Survey Telescope (LSST) 也是廣視野、高效率的巡天，其效率要比泛星計畫好得多，但是其經費昂貴且仍在設計階段。相比之下，泛星計畫已經落實，即將開始取得資料。

三、泛星計畫的軟硬體設計

泛星計畫在軟、硬體方面有多項革命性研發，以下針對望遠鏡、偵測器、天文台地點、資料分析、觀測策略以及主要科學目標等簡單介紹。

1. 望遠鏡

泛星計畫採取超廣角 Ritchey-Chretien 光學設計，由快焦比之主、次鏡加上修正透鏡，構成 f/4

表 1.
望遠鏡的巡天能力 (取自 Jewitt 2003)。

望遠鏡	口徑 [m]	集光面積 [m ²]	$\Omega [deg^2]$	$\theta [角秒]$	SP	狀態
Linear	1.0	0.8	2	2.5	0.2	進行中
Spacewatch	0.9	0.6	3	1.5	0.8	進行中
Palomar/QUEST	1.2	1.1	16.6	2	4.6	進行中
CFHT/Megacam	3.6	10	1.00	0.6	28	進行中
Subaru/Suprimecam	8.0	45	0.25	0.6	35	進行中
Pan-STARRS	3.6	10	7	0.5	280	2008+
LSST	8.3	54	7	0.6	1050	2012?

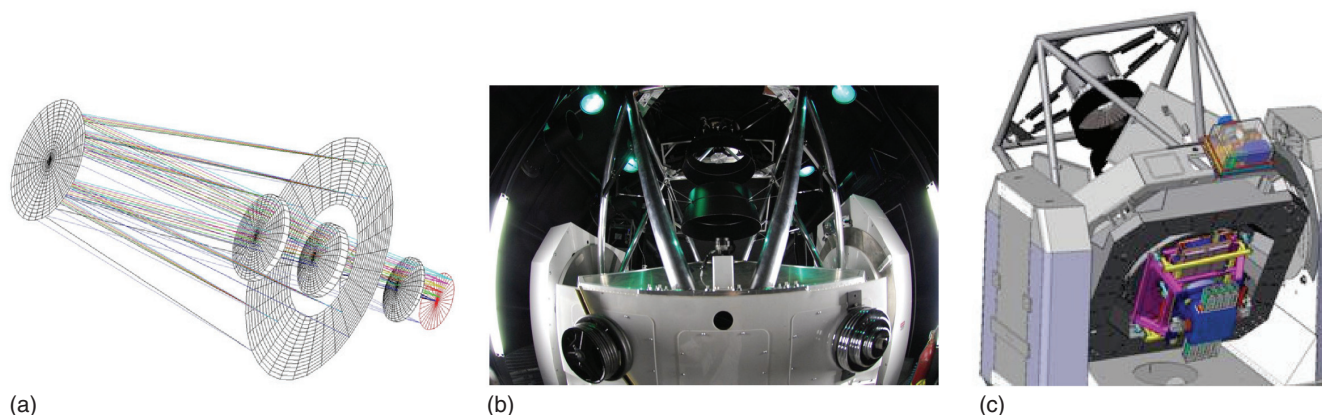


圖 1.(a) Pan-STARRS 望遠鏡光路圖，最大的元件代表 1.8 公尺口徑之主鏡，其反射光線到左方次鏡，之後經過三個修正鏡。最右方的紅色圓盤代表望遠鏡之卡賽格蘭焦平面。(b) 望遠鏡照片，可以看到次鏡與修正鏡。(c) 望遠鏡卡賽格蘭焦點儀器配掛示意圖。

之卡賽格蘭成像系統 (圖 1)。完整的泛星計畫將建造四台這樣的望遠鏡 (PS4)，有可能放在同樣架台 (mount) 上。目前先導計畫已經建造一台 (PS1)，第二台望遠鏡也正在製作當中。

對於巡天計畫，超廣角視野為觀測效率之關鍵因素。天文學界使用最廣泛的全天照片大概算是

Digital Sky Survey (DSS)。其起源是位於美國加州帕羅馬山 (Mount Palomar) 的 48 吋史密特望遠鏡之巡天觀測 (Palomar Observatory Sky Survey, POSS)，於 1948 年起使用藍光敏感 (Kodak 103a-O) 與紅光敏感 (Kodak 103a-E) 之照相玻璃底片作為偵測器，這些底片利用化學反應感光，量子效應只有百分之幾，優點是視野寬廣，每張底片視野達 6.6 度平方，極限星等達 20—22 星等 (大約等於人類視覺靈敏度之百萬倍)。第一代 POSS 進行到約 1958 年，也就是整個巡天花了十年時間，共取得近千張底片。之後陸續有不同延伸或補充觀測，包括位於澳洲之 U.K. 史密特望遠鏡，於 1970 年代進行南半球巡天，完成全天空照片。這些底片經過掃描後便是 DSS 資料庫，乃天文研究必備的工具。觀測人員需要查詢天空某塊天區、或是在其他波段觀測之前，必定先檢視 DSS 的影像。

泛星計畫同樣進行巡天觀測，雖然視野沒有 DSS 寬廣，但是由於使用電子相機，利用光電效應感光，量子效應達到 70% 以上，與底片每張動輒小時的曝光時間相比，電子相機曝光 30 秒鐘，便達到約 23.5 星等之靈敏度。注意 POSS 之所以成功，在於史密特望遠鏡的廣大視野，CCD 等電子偵測器除非尺寸能大幅增加，否則巡天效率受到很大限制，因此泛星計畫成功的技術關鍵在於偵測器部分。

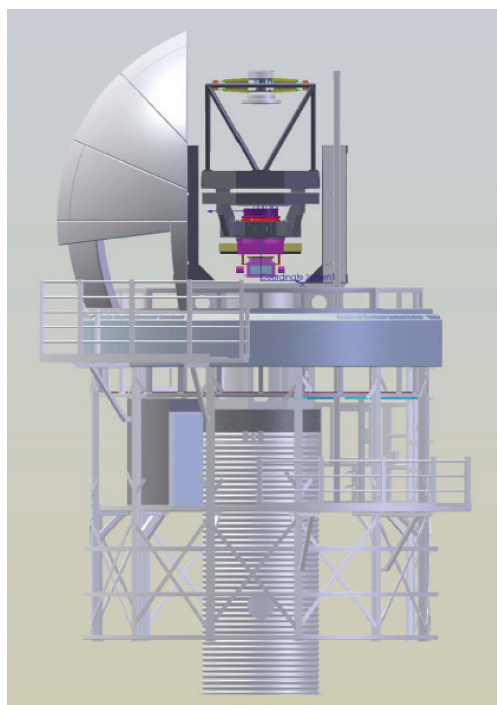


圖 2. 望遠鏡遮罩與建築整合示意圖。

2. 電子相機

泛星計畫採用拼接 CCD (charge-coupled device) 感光晶片作為偵測器。整個電子相機由林肯實驗室 (Lincoln Laboratory) 與夏威夷大學共同研發，乃是整個泛星計畫在硬體技術方面最特殊的部分⁽⁵⁻⁷⁾。

為了提高巡天效率，泛星計畫對於偵測器的設計包括以下幾項要求：(1) 晶片尺度大，以增加視野，但仍有良好分辨力。泛星計畫目前的相機達 45 公分，一共有 14 億個像元 (pixel)，每個像元張角約 0.26 角秒。此相機稱為 gigapixel camera (GPC)。(2) 讀取快速，整個 GPC 讀出不超過兩秒鐘。(3) 增加晶片製程良率 (yield rate)，因而節省經費。(4) 能夠 on-chip guiding，也就是利用晶片本身進行導星。(5) 減少亮星效應。(6) 抵銷部分大氣擾動造成的影像飄移效應。這當中 (2) 至 (5) 需要嶄

新的「陣列」(array) 偵測器概念，而第 (6) 項則必須採用「對角轉移」(orthogonal transfer, OT) 技術。

一般 CCD 晶片的原理是入射光子藉由光電效應，使得半導體 (一般是矽) 產生成對之電子與空穴。這些電子受到電力偏壓束縛，累積在位能井 (potential well) 當中，最後改變電壓，依序將電荷讀出。通常同一列的像元，它們個別的電子沿著該列方向，順序讀出。有些相機為了加快讀出速度，使用不只一個讀出電極。

GPC 之設計在接合傳統大面積 CCD 晶片組成陣列，而各個單格 (cell) 可以獨立讀取 (independently addressable)。每 64 個單格安置於單一矽晶片上，組成一個 orthogonal transfer array (OTA)，邊長約五公分 (圖 3)。整個相機共有 60 個 OTA (去除了離光軸距離遠之正方形四個角落)。

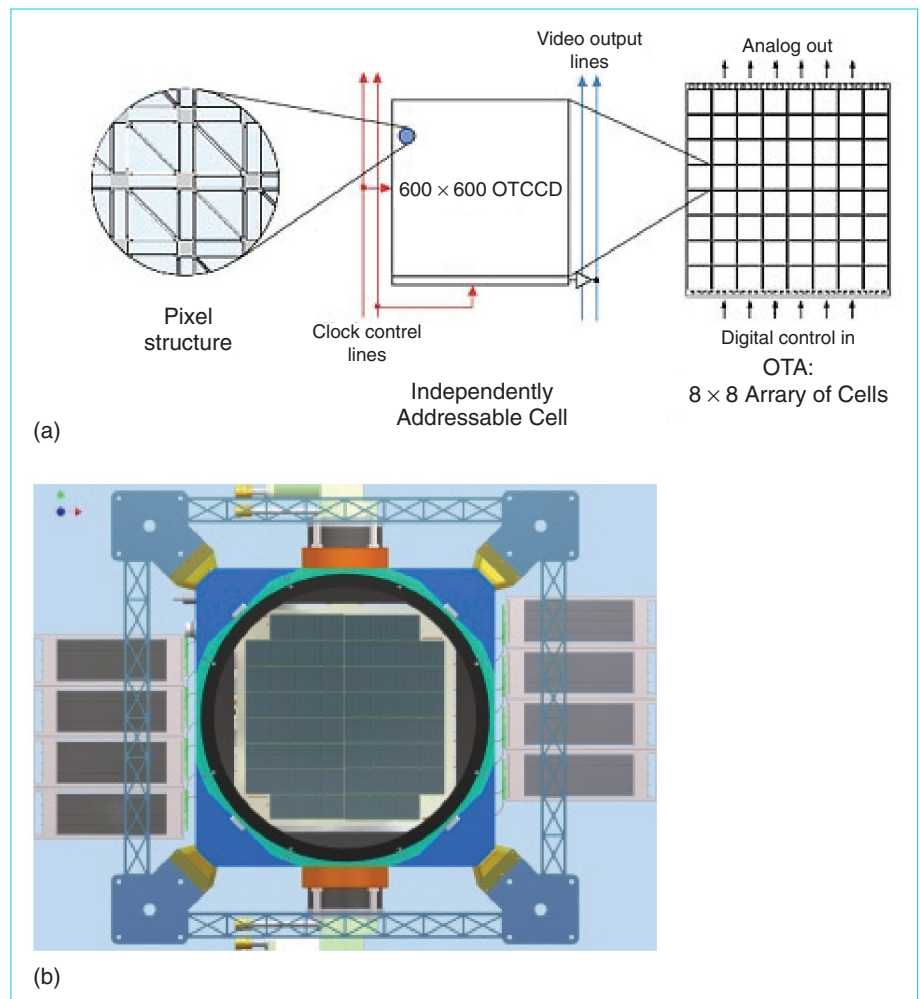


圖 3.

(a) 單格晶片配置圖，每個 OTA 由 64 個 OTCCD 組成，而每個 OTCCD 則有 600×600 個像元。(b) GPC 相機共有 60 個 OTA。

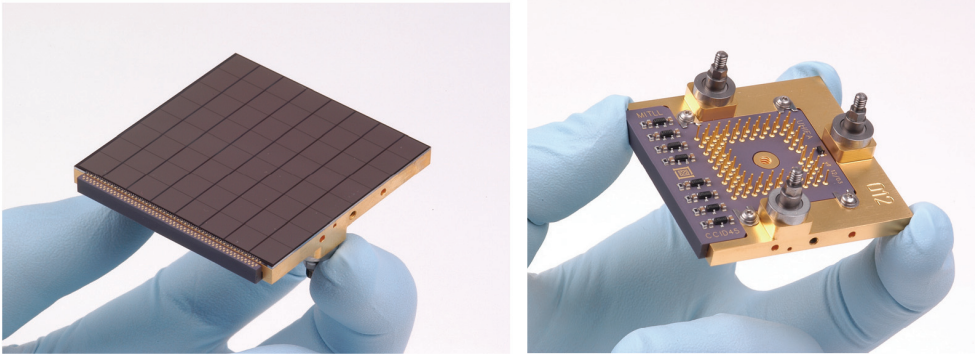


圖 4.
OTA 之正面與背面，每個 OTA 由 8×8 個單個組成，可以各自控制與讀出。GPC 一共有 60 個 OTA。

採取獨立單格設計，可以大幅提高製程之成功率，例如一般 $2K \times 4K$ 15-微米像元的 CCD 晶片成功率只有約 25%，而 GPC 每 8×8 構成的 OTA 可以允許 2—3 個單元有瑕疵，而不致因為局部短路、放大器故障等瑕疵而報銷整個晶片 (圖 4)。由於每個單格有各自讀出電路，讀取速度也大為提升。獨立單格也解決了亮星的問題，某個單格裡的亮星造成飽和，可以用較快速度讀出來當作導星之用，而不致影響其他單格中的暗星 (圖 5)，大幅提高訊號的動態範圍 (dynamical range)。

一般相機快門打開後，由於大氣擾動，星點影

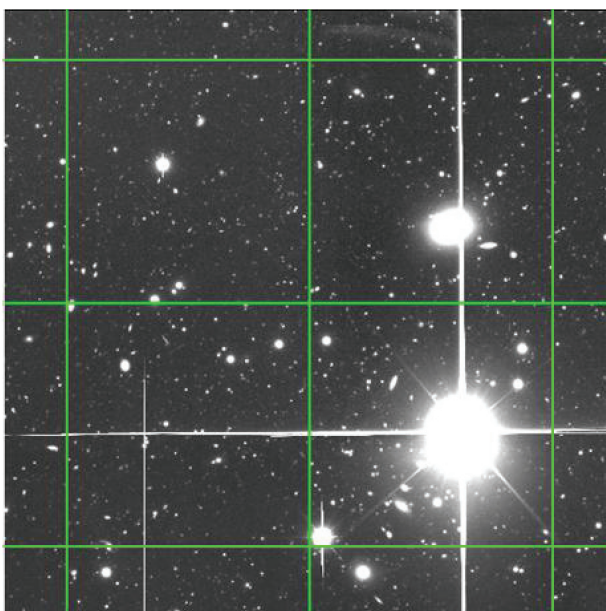
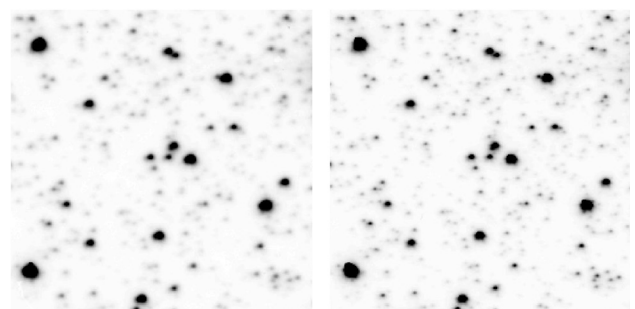


圖 5. 利用 OT 技術，個別單格之內的亮星雖然飽和，但是電荷不會滿溢而影響其他單格。綠色格線表示 OTA 單格的範圍。圖中最亮的星為九等星。

像模糊，一般偵測器保持相同狀態收集光線，因此輸出影像便受到影響。利用自適應光學 (adaptive optics)，可以偵測並計算大氣所造成影像模糊，快速調整光路 (例如一面小反射鏡) 變形，以抵銷變形。OT 則是利用在晶片上移動電荷的技術，達到類似的效果。

3. 天文台地點

泛星計畫的四座望遠鏡預計將安置在美國夏威夷群島之「大島」(Big Island，也稱為夏威夷島) 的基亞峰 (Mauna Kea)，該處為公認世界上最佳天文觀測地點之一，已經有多座國際級大型天文台。至於目前已經建置之 PS1，包括整套望遠鏡、GPC 與資料處理系統，作為先導計畫，安置於「毛伊」(Maui) 島之「哈里阿卡拉」(Haleakala) 山頂 (圖 7)。在此地點已經有太陽觀測站及美國空軍之人造天體監測站，雖然無論晴天率或視相度都不如基亞峰，但使用取得比較容易 (圖 8)。由於夏威夷之低



(a) 沒有抵銷影像運動的影像，以及 (b) 利用 OT 技術取得之影像，可以看到暗星的訊號比較清晰。

美國夏威夷群島

Mauna Kea, Hawaii

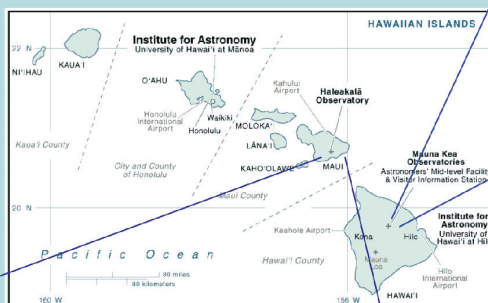


圖 7.

泛星計畫望遠鏡所在，位於美國夏威夷。PS1 安裝於 Haleakala 天文台，日後 PS4 預計放置在 Mauna Kea。



緯度地理位置 (與台灣緯度相當)，全年可見全天球約四分之三的範圍 (也就是約 3π steradian 立體角)。

4. 資料分析

每幅 GPC 影像大小為 2 gigabytes。在巡天模式下，一般每幅曝光時間為 30 秒，所以一個晚上所累積的資料量達數 terabytes，如此大量資料，無論是處理、分析、儲存與分配等都是資訊工程上極大的挑戰。

以往天文觀測著重在望遠鏡，自然希望口徑越大越好。到了廿世紀中期，製作大口徑望遠鏡的技術受到重量限制，達到口徑五公尺之瓶頸。之後的技術發展朝向偵測器，從底片到單元探測器 (例如光電倍增管)，再到高效能 CCD，量子效應在某些波段可達 90% 以上。廿世紀末期望遠鏡製造技術有了突破，採用組合式鏡片，或以望遠鏡陣列組成干涉儀，同時提高靈敏度與解析力。偵測器的發展，除了減少噪音，則主要朝大尺寸發展。泛星計畫的 GPC 為個中翹楚，有多項嶄新技術，也是目前全世界最大的數位相機。

泛星計畫的資料流程如圖 9 所示，來自望遠鏡的光子經過相機記錄，原始檔案首先經過 image processing pipeline (IPP) 處理，分析影像，將點光源 (星球) 與延展光源 (星系) 分開，並分析其位置與亮度，進而產生天體目錄，提供不同科學群組所使用。比對不同時期所拍攝的影像，便挑選出有變化的天體，其中位置產生變化者，由 moving object processing system (MOPS) 流程處理，例如與已知太陽系天體相比對、計算軌道等。將「變化」的天體去除後，「不變」的夜空影像則可以長期疊加，相當於長時間曝光的全天空影像，除了提供未來天文學家普遍使用外，也是諸如 Google Sky 等軟體的良好資料庫。泛星計畫的資料最後建成資料庫，將透過 published science product subsystem (PSPS) 介面提供給使用者，可以說天文觀測望遠鏡與偵測器之後，隨著資料量暴增，尤其類似泛星計畫這樣研究時變現象，下一個革命就是資料庫。執行科學計畫不能僅止於開始的硬體建設，還應該把軟體開發、日後營運，以及資料後續使用等經費，都包括在規劃內。



圖 8.
毛伊島之哈里阿
卡拉山頂已有多
座天文台，此為
從 PS1 天文台所
見之景觀。

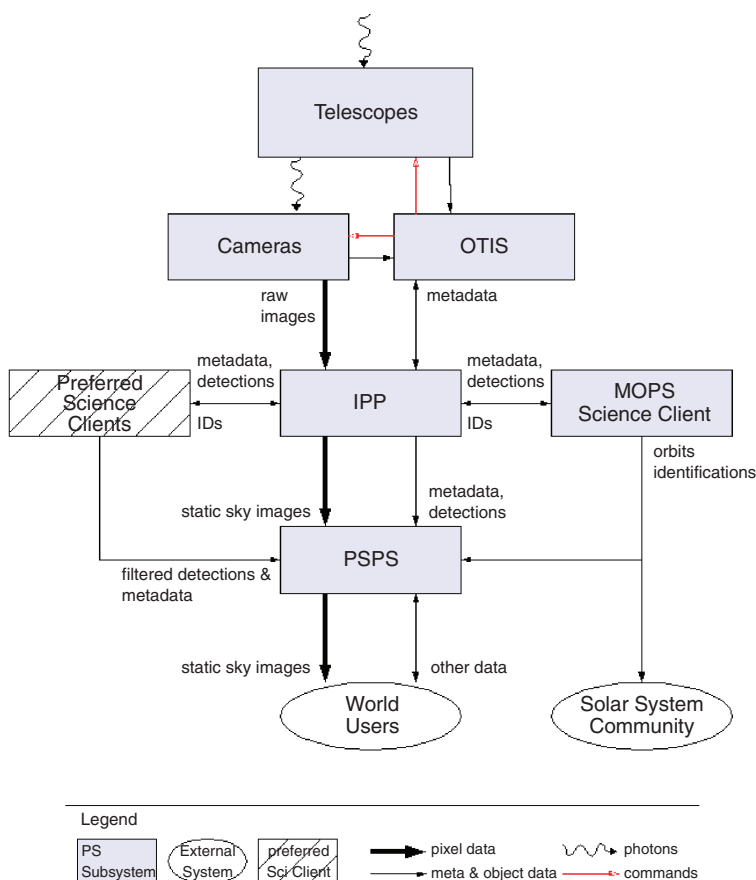


圖 9. 泛星計畫資料流程。

5. 主要科學目標

泛星計畫的英文直譯為「全天域觀測望遠鏡及快速反應系統」，顧名思義，基本上是個觀測設備。PS1 預期將進行三年半，產生史無前例的大量資料，可以提供極多科學課題使用。圖 10 為巡天所使用的濾光片，藉由觀測天體在不同波段的亮度，可研究其性質。

在太陽系中，從地球周圍的近地小行星、各式小型天體，到外圍的古伯帶天體 (Kuiper-belt object)，甚至尚未發現的行星，都是研究的好課題。例如現在發現上千個近地小行星，PS1 預期可以找到上萬個，對於保衛地球文明做出具體貢獻。在銀河系尺度，泛星計畫的數據提供全天星體的亮度、距離與運動速度等，除了推敲銀河系結構以及形成與演化，也可以挑選出無偏差之特殊星體樣本，例如光度極弱之天體，加以研究。在更大尺度，還可以研究相互碰撞的星系，或是成團的星系等宇宙大尺度結構。

在亮度變化方面，除了無以計數的變星，還有恆星死亡時產生的超新星爆發，或是至今仍然神秘的伽瑪射線爆發的光學對應源等。泛星計畫的每個像元對應不到 0.3 角秒，而預計視相度可以達到

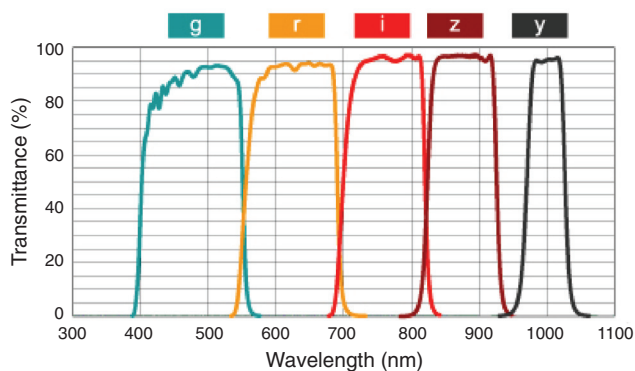


圖 10. 泛星計畫所使用之濾光片 (Asahi公司設計、製作)，最長波長達 1 微米。

0.7 角秒左右，這樣良好的影像品質，對於「不變」的宇宙，例如研究物質分布所造成的空間微小變形等，也將提供極珍貴的資料。

四、計畫進度及結語

夏威夷大學所獲得的經費僅限於建造，營運部分則組成「科學委員會」(Science Council)，負責巡天之經費籌措、操作模式，以及計畫管理等。望遠鏡、GPC 於 2007 年底取得初步影像 (圖 11)，目

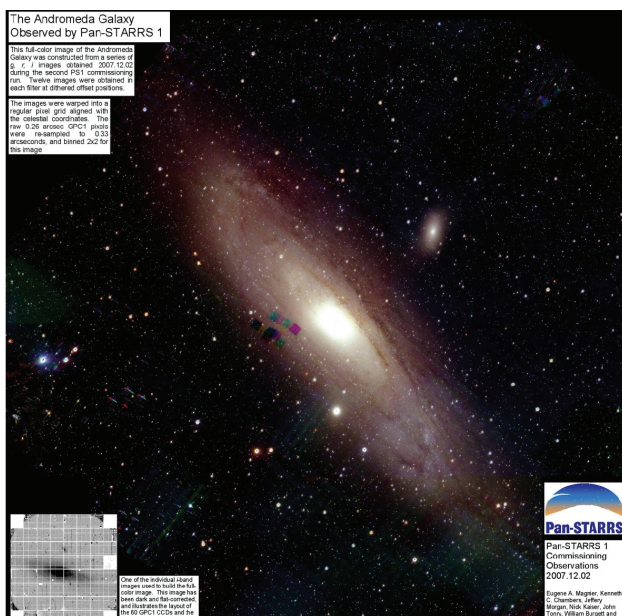


圖 11. PS1 於 2007 年 12 月 2 日取得第一張影像。超廣角視野可以將仙女座星系 M31 完全攝入。



圖 12. 泛星計畫所拍攝之 M51 螺旋星系及其衛星星系，經過光學調整，影像品質明顯改良。

前複雜的光學系統仍繼續調整當中 (圖 12)，預計 2009 年初開始正式科學觀測。

科學團隊除了夏威夷大學外，還包括德國 Max Planck Institute for Astronomy in Heidelberg 與 Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics in Garching，美國 Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics/the Las Cumbres Observatory、Johns Hopkins University、英國 Durham University/University of Edinburgh/Queen's University Belfast，以及台灣。我國團隊成員共有約 30 位教授與研究生，來自中央大學、清華大學、台灣大學、成功大學及中央研究院等，除了天文學家，還包括資訊工程學者加入資料庫技術、分散式計算等課題，為我國光學天文學較具規模之國際合作計畫。泛星計畫預期將引發出大量新發現，甚至在時間尺度方面發現前所未有的現象。中央大學目前正在鹿林天文台建造兩公尺口徑望遠鏡，由於我們與夏威夷有 5、6 小時時差，廣大太平洋缺乏其他天文台，完成後將在經度上取得優勢，於第一時間追蹤觀測泛星的可疑結果，第一手驗證這些發現。且讓我們摩拳擦掌，拭目以待泛星計畫正式開展，揭開研究時變宇宙的新紀元！

參考文獻

1. <http://www.alma.cl/>
2. <http://www.tmt.org/>
3. N. Kaiser, *et al.*, *Proceedings of SPIE*, **4836**, 154 (2002).
4. D. Jewitt, *Earth, Moon, and Planets*, **92**, 465 (2003).
5. J. L. Tonry, B. E. Burke, and P. L. Schechter, *Pub. of the Astronomical Society of the Pacific*, **109**, 1154 (1997).
6. J. L. Tonry, G. A. Luppino, N. Kaiser, B. Burke, and G. H. Jacoby, *Proceedings of the SPIE*, **4836**, 206 (2002).
7. J. L. Tonry, B. Burke, P. M. Onaka, G. A. Luppino, and M. J. Cooper, *Astrophysics and Space Science Library*, **336**, 281 Kluwer (2006).

-
- 陳文屏先生為美國紐約州立大學石溪分校天文博士，現任國立中央大學天文研究所暨物理系教授。
 - Wen-Ping Chen received his Ph.D. in astronomy from the State University of New York at Stony Brook, USA. He is currently a professor of the Institute of Astronomy at National Central University.