

# 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

紐約州立大學石溪分校天文博士  
現任 中央大學天文所、物理系教授

Wen-Ping Chen

PhD in Astronomy, State University of New York at  
Stony Brook

Current Position Professor of Graduate Institute of  
Astronomy, National Central University

### 摘要

天文觀測儀器發展日新月異——望遠鏡口徑增變大，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」(Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System; Pan-STARRS)，利用超廣角望遠鏡，新技術開發具備 14 億個像元之大面積對角轉移 (orthogonal transfer) CCD 電子相機，每週對全天域進行掃瞄一次，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。

### ABSTRACT

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 once a week 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.

## 1. 天文儀器的挑戰

天文學是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，受到星際物質吸收、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，技術以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)<sup>1</sup>，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、紅外線方面，歐美已經在規劃口徑 20 到 30 公尺的望遠鏡<sup>2</sup>，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。

## 2. 研究宇宙的新領域——時變現象

泛星計畫 (Pan-STARRS, Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System) 是因應新思維而開展的計畫<sup>1</sup>。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。一九九四年彗星撞木星事件，讓人們體會到天體撞擊地球可能帶來的大規模災難，因此二〇〇五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」，

---

<sup>1</sup> <http://www.alma.cl/>

<sup>2</sup> <http://www.tmt.org/>

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 6 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 (PS 4)，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，每月掃瞄全天空數次，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。表一列出數項巡天計畫的比較<sup>2</sup>，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 好了兩到三個數量級。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。

表一、望遠鏡的巡天能力（取自 Jewitt 2003）

望遠鏡	口徑 [m]	集光面積 [m <sup>2</sup> ]	$\Omega$ [deg <sup>2</sup> ]	$\theta$ [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?

### 3. 泛星計畫的軟硬體設計

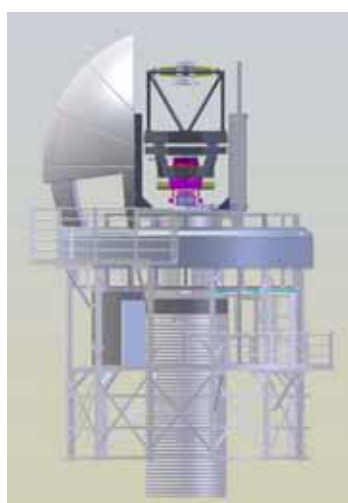
泛星計畫在軟、硬體方面有多項革命性研發，以下針對望遠鏡、偵測器、天文台地點、資料分析、觀測策略，以及主要科學目標等，簡單介紹。

### 3.1 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  $f/4$  之卡賽格蘭成像系統（圖一）。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。



圖一：(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，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點平面。(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。



圖二：望遠鏡遮罩、建築整合示意圖。

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) 之照相玻璃底片做為偵測器，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。這些底片經過掃瞄後便是 DSS 資料庫，乃天文研究必備工具。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偵測器部分。

### 3.2 電子相機

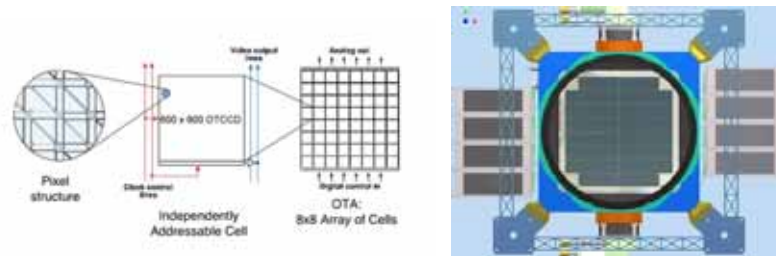
泛星計畫採用拼接 CCD (charge-coupled device) 感光晶片做為偵測器。整個電子相機由林肯實驗室 (Lincoln Laboratory) 與夏威夷大學共同研發，乃是整個泛星計畫在硬體技術方面最特殊的部分<sup>3,4,5</sup>。

爲了提高巡天效率，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。此相機稱爲 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）到（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。

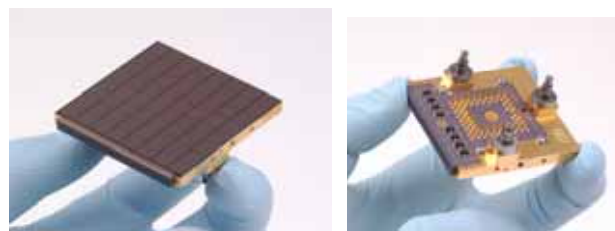
一般 CCD 晶片的原理，是入射光子藉由光電效應，使得半導體（一般是矽）產生成對之電子與空洞。這些電子受到電力偏壓束縛，累積在位能井 (potential well) 當中，最後改變電壓，依序將電荷讀出。通常同一列的像元，它們個別的電子沿著該列方向，順序讀出。有些相機爲了加快讀出速度，使用不只一個讀出電極。

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上，組成一個 Orthogonal Transfer Array (OTA)，邊長約五公分（圖三）。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）。

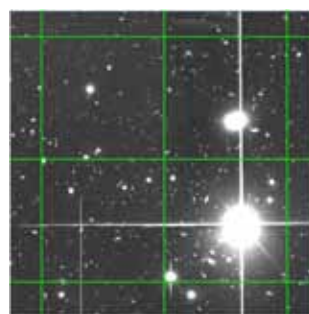
採取獨立單格設計，可以大為提供製程成功率，例如一般 2K x 4K 15-微米像元的 CCD 晶片成功率只有約 25%，而 GPC 每 8 x 8 構成的 OTA 可以允許 2-3 個單元有瑕疵，而不致因為局部短路、放大器故障等瑕疵而報銷整個晶片。而由於每個單格有各自讀出電路，讀取速度也大為提升。獨立單格也解決了亮星的問題，某個單格的亮星造成飽和，可以用較快速度讀出，用來當作導星之用，而不致影響其他單格中的暗星（圖五），大為提高訊號的動態範圍 (dynamical range)。



圖三：(a) 單格晶片配置圖，每個 OTA 由 64 個 OTCCD 組成，而每個 OTCCD 則有 600 x 600 個像元。  
(b) GPC 相機共有 60 個 OTA。

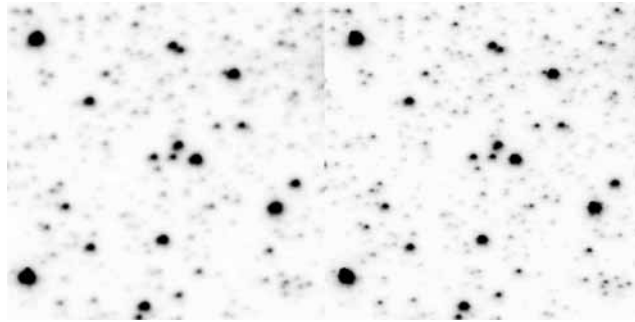


圖四：OTA 之正面與背面。每個 OTA 由 8 x 8 個單個組成，可以各自控制與讀出。GPC 一共有 60 個 OTA。



圖五：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，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。

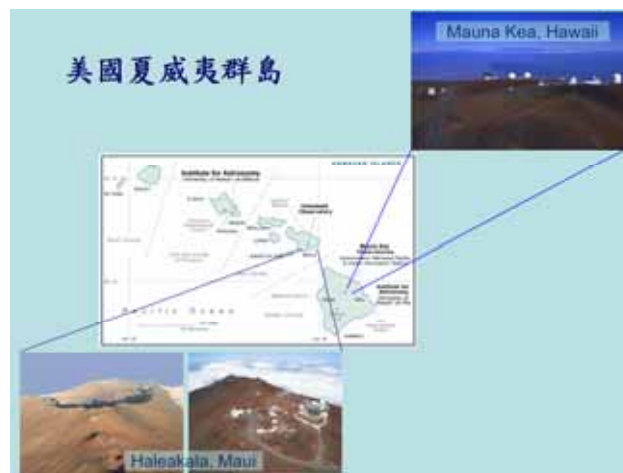
一般相機快門打開後，由於大氣擾動，星點影像模糊，一般偵測器保持相同狀態收集光線，因此輸出影像便受到影響。利用自適應光學 (adaptive optics)，可以偵測並計算大氣所造成影像模糊，快速調整光路（例如一面小反射鏡）變形，以抵銷變形。OT 則是利用在晶片上移動電荷的技術，達到類似的效果。



圖六：（左）沒有抵銷影像運動的影像，以及（右）利用 OT 技術取得之影像，可以看到暗星的訊號比較清晰。

### 3.3 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，也稱夏威夷島)之基亞峰 (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，做為先導計畫，安置於「毛伊」(Maui) 島之「哈里阿卡拉」(Haleakala) 山頂（圖七）。此址已經有太陽觀測站，以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（圖八）。由於夏威夷之低緯度地理位置（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  $3\pi$  steradian 立體角）。



圖七：泛星計畫望遠鏡所在，為於美國夏威夷。PS1 安裝於 Haleakala 天文台，日後 PS4 預計放置在 Mauna Kea。



圖八：毛伊島之哈里阿卡拉山頂已有多座天文台，此為從 PSI 天文台所見之景觀。

### 3.4 資料分析

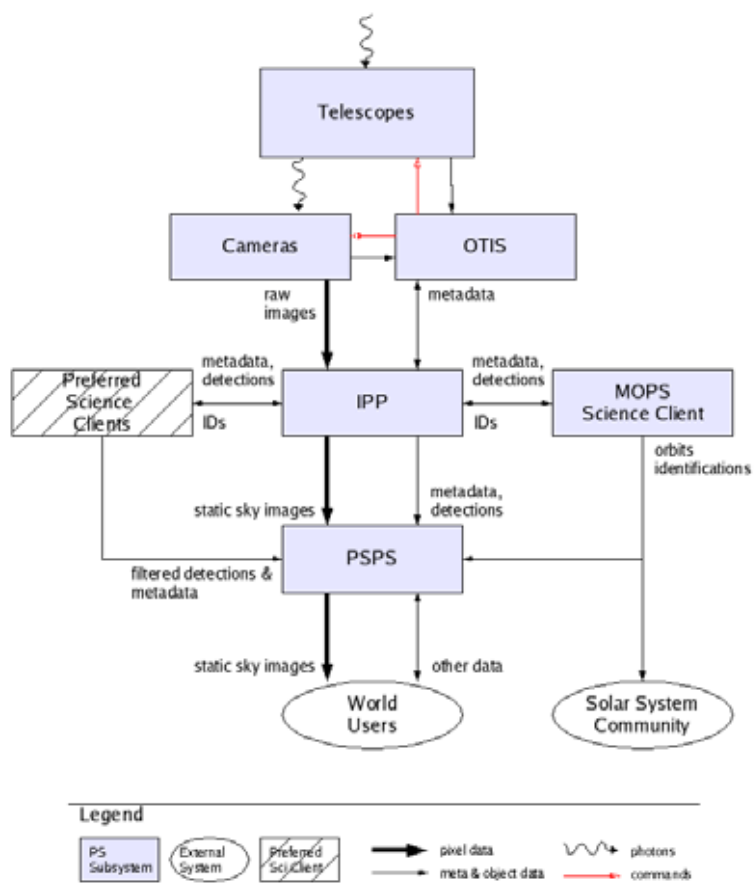
每幅 GPC 影像大小為 2 Gigabytes。在巡天模式下，一般每幅曝光時間為 30 秒，所以一個晚上所累積的資料量達數 Terabytes，如此大量資料，無論是處理、分析、儲存、分配等，都是資訊工程上極大挑戰。

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 為箇中翹楚，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九。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）與沿展光源（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。可以說天文觀測繼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



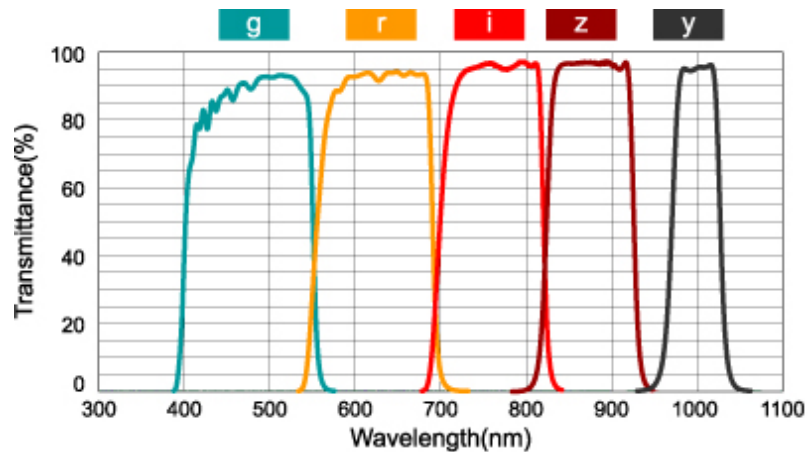
樣研究時變現象，下一個革命就是資料庫。執行科學計畫不能僅止於開始的硬體建設，還應該把軟體開發、日後營運，以及資料後續使用等經費，都包括在規劃內。



圖九：泛星計畫資料流程。

### 3.5 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。圖十為巡天所使用的濾光片，藉由觀測天體在不同波段的亮度，來研究其性質。



圖十：泛星計畫所使用之濾光片 (Asahi 公司設計、製作)，最長波達 1 微米。

在太陽系中，從地球周圍的近地小行星、各式小型天體，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、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。

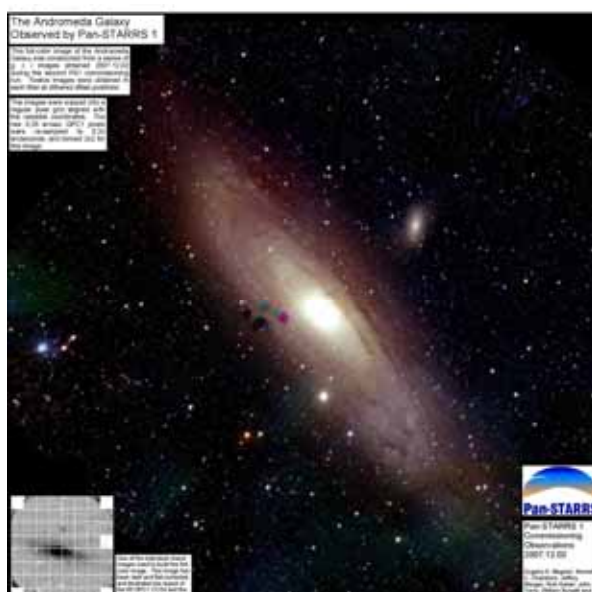
在亮度變化方面，除了無以數計的變星，還有恆星死亡時產生的超新星爆發，或是至今仍然神秘的伽瑪射線爆發的光學對應源等。泛星計畫的每個像元對應不到 0.3 角秒，而預計視相度可以達到 0.7 角秒左右，這樣良好的影像品質，對於至於「不變」的宇宙，例如研究物質分佈所造成的空間微小變形等，也將提供極珍貴的資料。

#### 4. 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 (圖十一)，目前複雜的光學系統仍繼續調整當中 (圖十二)，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, 以及 Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics in Garching, 美國 Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics/ the Las Cumbres Observatory、Johns Hopkins University 約翰霍普金斯大學、英國 Durham University/University of

Edinburgh/Queen's University Belfast，以及台灣。我國團隊成員共有約 20、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、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！



圖十一：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。



圖十一：泛星計畫所拍攝之 M51 螺旋星系及其衛星星系，影經過光學調整，影像品質明顯改良。

## 參考資料

1. N. Kaiser, et al. “*Pan-STARRS --- A Large Synoptic Survey Telescope Array*”, in “*Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries*”, Ed. J. Anthony Tyson, Sidney Wolf, Proceedings of SPIE, **4836**, 154 (2002)
2. D. Jewitt, “*Project Pan-STARRS and the Outer Solar System*”, Earth, Moon, and Planets, **92**, 465 (2003)
3. J. L. Tonry, Burke, B. E., & P. L. Schechter, “*The Orthogonal Transfer CCD*”, Pub. of the Astronomical Society of the Pacific, **109**, 1154 (1997)
4. J. L. Tonry, G. A. Luppino, N. Kaiser, B. Burke, & G. H. Jacoby , “*Rubber Focal Plane for Sky Surveys*”, Proceedings of the SPIE, **4836**, 206 (2002)
5. J. L. Tonry, B. Burke, P. M. Onaka, G. A. Luppino, & M. J. Cooper, “*Orthogonal Transfer Array*”, in “*Scientific Detectors for Astronomy 2005*”, Astrophysics and Space Science Library, **336**, 281 Kluwer (2006)