

泛星計畫介紹

文 / 黃崇源、陳文屏、周翊

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)。泛星計畫是由美國國務院提出，透過美國空軍委託夏威夷大學在夏威夷建置望遠鏡，用來搜尋太空中任何可能撞擊地球的天體，以便及早做好因應對策。此計畫由美國夏威夷大學建構獨特的廣角觀測系統，由四座 1.8 公尺望遠鏡組成，各自配備最新型、具備 14 億個像元之 CCD 偵測相機，視野達 7 平方度。泛星計畫每晚將可巡天約 6000 平方度，深度達 24 星等，每月可對全天空巡天數次。除了對於星系、恆星，以及太陽系天體史無前例的深度曝光與天空廣度覆蓋以外，泛星計畫特別適合探測「變化」(包括亮度與位置變化)的天體。泛星計畫的首要目標在標認出可能撞擊地球的小行星，其後果攸關人類文明的延續。同時泛星計畫也將產生極大資料量，涵蓋天空深度、廣度以及時間覆蓋面，這些資料將對觀測天文學，特別是在古柏帶天體、變星、系外行星、超新星，以及伽瑪射線爆等研究領域產生革命性影響。

地球危機

近年來因人類對自然環境過度損耗，而引起了像是全球暖化等許多環境變遷及生態的改變。這些變化因為可能對未來人類生命財產造成重大影響，因此受到了全球各國的重視，也紛紛投下許多資源，期待能降低人類對自然環境所造成的傷害。但真正影響人類是否能永續發展的關鍵危機，可能不是簡單地改變個人生活型態，做一些節能減碳的工作就能避免的。因為影響人類或生物物種存亡的最大的變數其實是來自外太空。我們知道地球一直都受到一些小隕石與塵埃的撞擊，地球每天從太空中累積的小隕石或塵埃量約 300 噸。不過這些小隕石與塵埃量雖多卻對人類的安全不會構成重大威脅。對地球及人類安全真有威脅的是一些相對數目較少但體積較大的小行星。如果小行星的直徑超過五十公尺，就可能對地球人類造成重大的安全威脅。地球表面上約有二百個隕石坑，這些都是五億年內受到小行星撞擊所遺下來的，較老的隕石坑則因地殼變動而早已消失了。表示地球在過去也一直受到一些重大的撞擊。著名的例子包括在六千五百萬年前的一顆約十公里的小行星撞擊在現在的墨西

哥的猶加敦半島地區，釋放出相當於 50 億顆廣島原子彈爆炸的能量，造成當時地球上包括恐龍在內百分之七十的生物完全滅絕；另外位於美國亞利桑那州北部沙漠中的巴林傑隕石坑 (Barringer Meteor Crater)，則是由五萬年前一顆直徑約五十公尺的鐵隕石所造成，其放出的能量相當於二千萬噸 TNT 炸藥，約等於 1,000 顆廣島原子彈。最近的一次的重大撞擊則是發生在一百年前的通古斯事件，俄羅斯西伯利亞中部通古斯河地區在 1908 年 6 月 30 日當地時間早上 7 點 14 分時，因一顆約八十公尺的小行星在地表上空爆炸而夷為平地。事實上，地球歷史上許多重大的生物大滅絕事件，可能都跟小行星或彗星撞擊地球事件有關。

試思考一個有趣的推理，就是一個人被隕石打死的機率究竟有多高呢？類似通古斯那種大於五十公尺的小行星撞擊地球事件，每一千年約有二至三起。而造成恐龍滅絕的那種十公里直徑的小行星則平均約數千萬年到一億年會撞擊地球一次。如果現在發生一次類似的撞擊，可能會造成數十億人的喪生。所以即使一億年才發生一次，平均下來，就算不計其他較小的撞擊事件，隕石或小行星也會造成“平均”每年數十人的喪生。算起來可能不比因飛機失事造成的平均傷亡少，但卻沒有人會去投保小行星撞擊險。因為在這

黃崇源*、陳文屏、周翊

中央大學天文研究所

*E-mail: hwangcy@astro.ncu.edu.tw

種末日事件上，我們唯一需要的是事前的預防而非事後的理賠。

泛星計畫

一九九四年彗星撞木星事件，讓更多人感受到天體撞擊地球可能性。二十世紀末的幾部科幻電影，如世界末日(Armageddon)及彗星撞地球(Deep Impact)更讓許多一般人深刻體會到天體撞擊地球所帶來的大規模災難。因此二零零五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」，並提出避免撞擊之解決方案與估計所需經費。泛星計畫 (Pan-STARRS, Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System) 便是因應這種新思維而開展的計畫。美國國務院透過美國空軍斥資六千萬美金，由夏威夷大學執行，建造超廣角望遠鏡進行巡天監測。計畫主要目的就是在尋找高危險性的小行星，預計在夏威夷大島的基峰(Mauna Kea, 海拔 4,205 公尺)建造四座 1.8 米口徑之望遠鏡，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，巡天的範圍可達 3/4 的全天區。每幅影像曝光時間 30 秒，每 4-7 天就能再次觀測同一天區(與巡天模式有關)。就靈敏度而言，單一幅影像可達 24 星等，數年之疊加影像更高達 29.4 星等，位置準確度達 0.07 角秒，測光準確度可到 0.01 星等。

世界上已有許多口徑更大，集光力更強的大型望遠鏡，為何泛星計畫卻要使用 1.8 米口徑的小望遠鏡呢？事實上，巡天觀測的目的在取得大天區的影像資料。評估巡天計畫的效率可用可用 SP(Survey Power) = $A\Omega/\theta^2$ 來做定量的指標。其中 $A [m^2]$ 是望遠鏡主鏡的集光面積， $\Omega [deg^2]$ 為望遠鏡視野的立體角。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，也稱之為集光率 (Etendue)。 $\theta [arcsec]$ 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，也就能辨識出更多的天體。表一列出數項巡天計畫的比較，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，泛星計畫的先導計畫已經落實，即將在 2009 年的年中開始正式的巡天計畫與資料分析。

表一、望遠鏡的巡天能力

望遠鏡	口徑 [m]	集光面積 [m ²]	$\Omega [deg^2]$	θ 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	2009+
LSST	8.3	54	7	0.6	1050	2012?

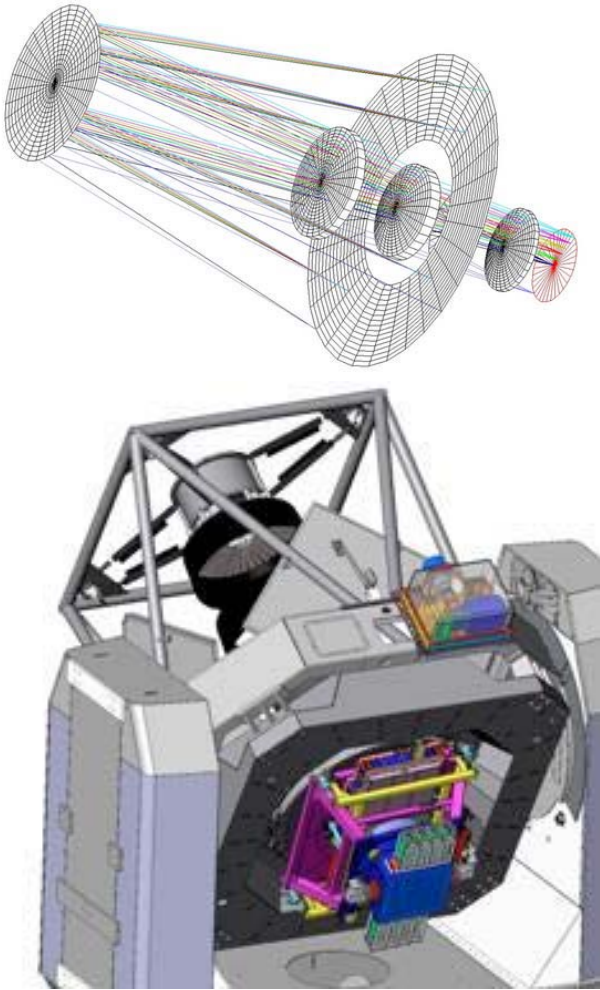
取自 D. Jewitt, "Project Pan-STARRS and the Outer Solar System", Earth, Moon, and Planets, **92**, 465 (2003)

泛星計畫的軟硬體設計

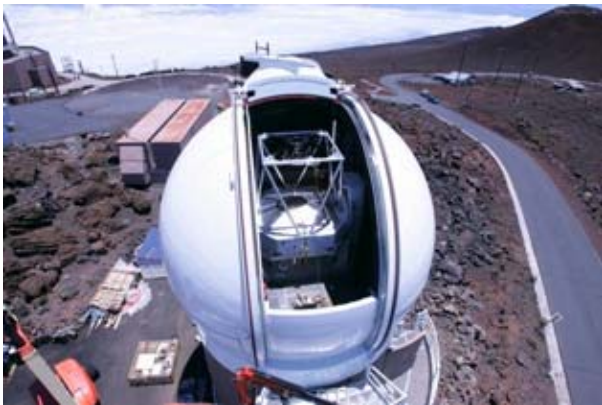
泛星計畫在軟、硬體方面有多項革命性研發，以下針對望遠鏡、數位照相機、資料分析，以及主要科學目標等，簡單介紹。

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 之蓋賽格林成像系統。完整的泛星計畫將建造四台這樣的望遠鏡 (PS4)。目前先導計畫已經建造一台 (PS1) 安置位於毛伊島 (Maui) 之哈里阿卡拉 (Haleakala) 山頂，第二台望遠鏡也正在製作當中。



圖一：(a) Pan-STARRS 望遠鏡光路圖。(b) PS1 望遠鏡示意圖。



圖二：位於毛伊島(Maui)之哈里阿卡拉(Haleakala)山頂的 PS1 天文台。

電子相機

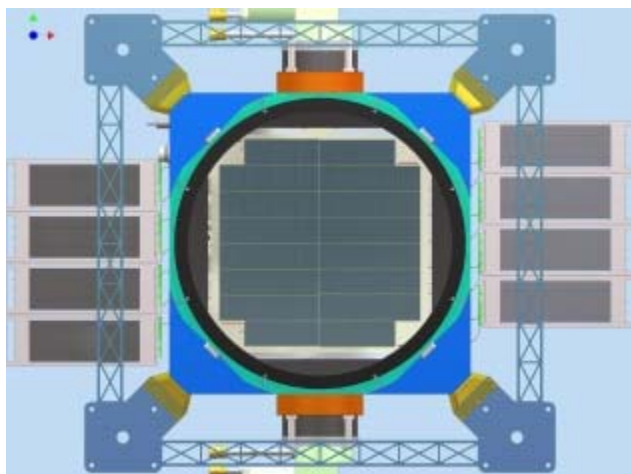
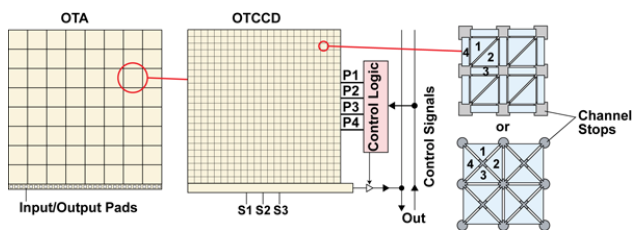
泛星計畫視野達七平方度，如果使用一般的 CCD 相機，如 $4K \times 4K$ 像素的 CCD 相機，要觀測這麼大的

視野，每單位像素對應之天區將相當大，換句話說，影像解析度將十分差。而要達到設定的科學目標所需的良好解析度，CCD 相機的像素總數及體積將十分龐大。

泛星計畫採用拼接 CCD (charge-coupled device) 感光晶片做為偵測器。是由麻省理工學院林肯實驗室 (Lincoln Laboratory) 與夏威夷大學共同研發。整個相機包含 14 億個像元 (pixel)，因此稱之為 GigaPixel Camera (GPC)。GPC 是目前世界上最大的數位相機，其中含有數項嶄新技術，是整個泛星計畫在硬體方面最特殊的部分。

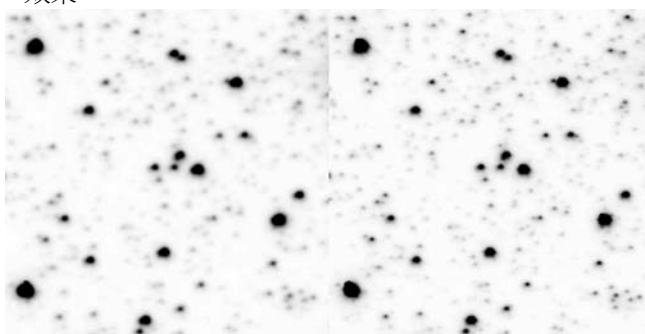
GPC 之設計在接合傳統大面積 CCD 晶片，組成陣列 (圖三)。總共包含 60 個 Orthogonal Transfer Arrays (OTAs)，排成 8×8 的陣列，但去除了離光軸距離遠之正方形四個角落四個邊角。每個 OTA 由 64 (8×8) 個單元 (cell) CCD 構成，這些單元 CCD 稱為 OTCCD (Orthogonal Transfer CCD)，每個單元 OTCCD 有 600×600 像素，每像素大小 $10 \mu\text{m}$ ，對應天區 0.3 角秒。由上述數據計算得知，每個 OTA，邊長約五公分 (圖四)。而整個像機將有 14 億像素，實體面積超過 $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ 。

GPC 的一個特色是每個 600×600 像素的 OTCCD 的數據都可以獨立讀取 (independently addressable)。採取獨立單元設計，可以大為提供製程成功率。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 每個 8×8 構成的 OTA 可以允許 2-3 個單元 OTCCD 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。而由於每個單元有各自讀出電路，讀取速度也大為提升。獨立單元也解決了亮星的問題。例如，如果有某個 OTCCD 裏的亮星造成飽和，則該單元可以用較快速度讀取，用來當作導星之用，而不致影響其他 OTCCD 中的暗星，大為提高訊號的動態範圍 (dynamical range)。

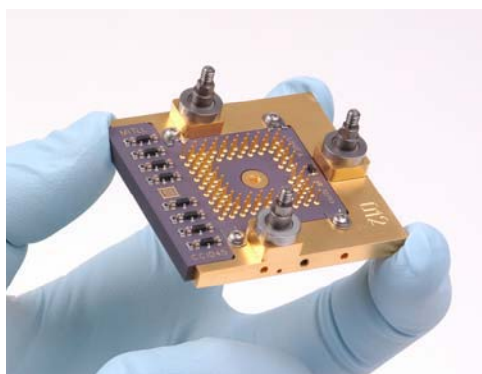
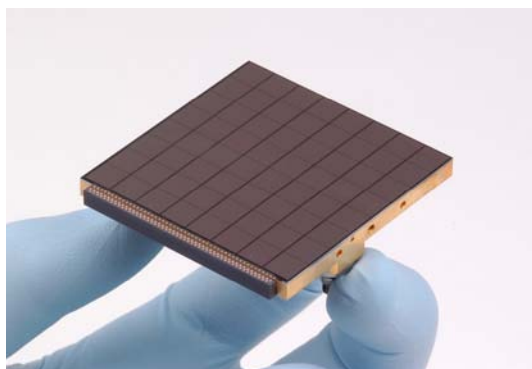


圖三：(a) 單元晶片配置圖，每個 OTA 由 64 個 OTCCD 組成，而每個單元 OTCCD 則有 600 x 600 個像元。(b) GPC 相機共有 60 個 OTA。

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。一般可以利用自適應光學 (adaptive optics)，來偵測並計算大氣所造成影像模糊，快速調整光路 (例如改變一面小反射鏡的偏斜方向)，以抵銷影像的變形。但 GPC 則是採用「對角轉移」(orthogonal transfer, OT) 技術來抵銷大氣擾動造成的影響。OT 技術是利用監測亮星的影像變化而在 OTCCD 上快速調整電荷分佈，以達到類似自適應光學快速調整光路的效果。



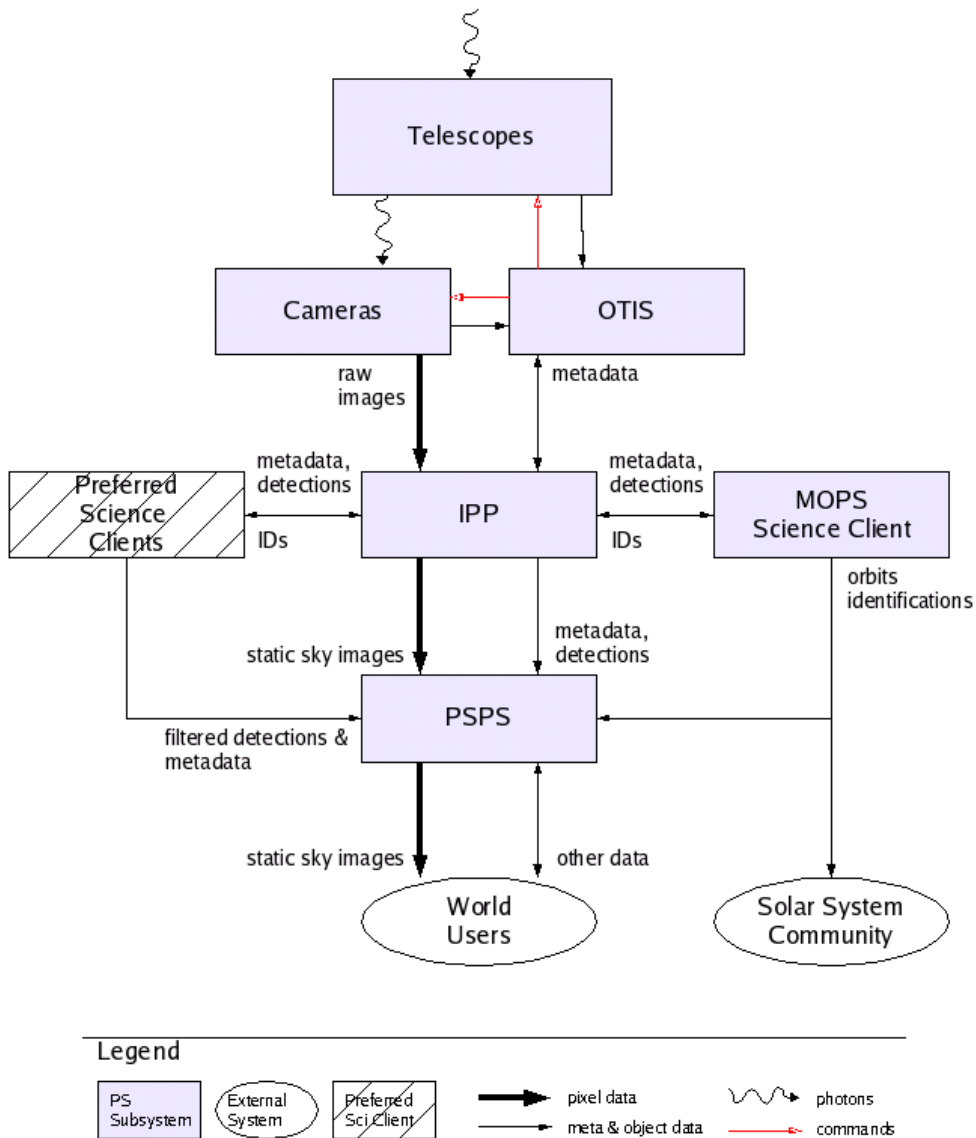
圖六：(左) 沒有抵銷影像運動的影像，以及 (右) 利用 OT 技術取得之影像，可以看到暗星的訊號比較清晰。



圖四：OTA 之正面與背面。每個 OTA 由 8x8 個 OTCCD 單元組成，每個 OTCCD 都可以各自控制與讀出。GPC 一共有 60 個 OTA。

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。泛星計畫的資料流程如圖七。來自望遠鏡的光子，經過相機記錄，原始檔案首先去除人造衛星等機密資訊後，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



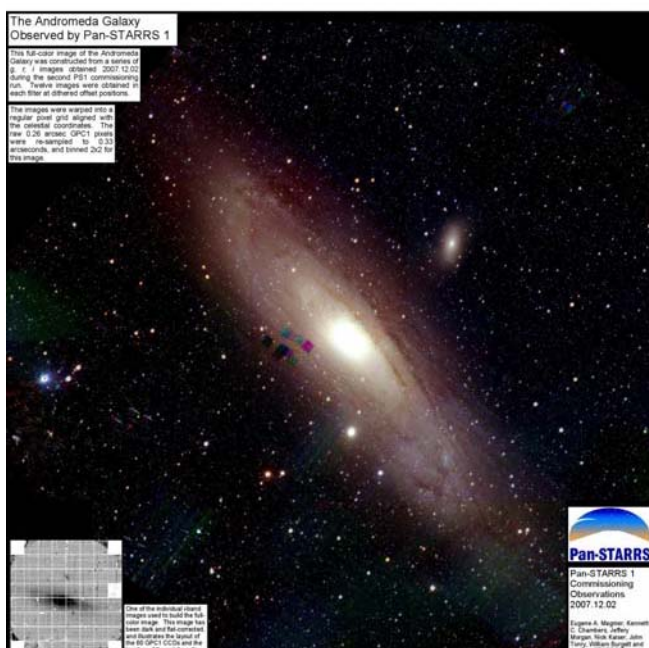
圖九：泛星計畫資料流程。

Published Science Product Subsystem (PSPS) 介面，提供給使用者。

科學目標

泛星計畫除了主要目的在找出可能危害地球的小行星，對於保衛地球文明做出具體貢獻外。同時也會產生史無前例的大量資料，可以提供極多科學課題使用。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。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，可以用來尋找太陽系外行星，研究無以數計的變星及雙星，推敲銀河系結構，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。在星系的尺度，可以研究超新星的爆發，相互碰撞的星系，星系物質含量，星劇增星系的演化，活躍星系核的變化與週期等。在更大的尺度，則可以用來研究星系團等宇宙大尺度結構，黑暗物質和黑暗能量的分佈，或是神秘的伽瑪射線爆的光學對應源等。圖十顯示泛星計畫所拍到的仙女座星雲影像，是 PS1 計畫於 2007 年 12 月 2 日取得第一張影像。



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。

參與泛星計畫的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。

泛星計畫預期將產生大量新發現，甚至在時間尺度方面發現前所未知的現象。但泛星計畫的巡天觀測時間間隔約為一週，所以極需要和其他天文台聯線，以便能針對一些變化時間尺度短暫的天體做密集測量。中央大學目前正在鹿林天文台建造兩公尺口徑望遠鏡，因為地理位置的關係，鹿林天文台是世界上第一個能追蹤泛星計畫中各種瞬變天體的天文台。若能充分利用泛星計畫的觀測結果，作為各種新發現的追蹤及後續觀察，鹿林二米望遠鏡將能產出大量的第一手重要科學結果，同時也對泛星計畫的科學成果有決定性的影響。

過去數十億年來，地球上的生物每數千萬年便會因為彗星或小行星的撞擊而發生大滅絕。但現在的地球卻是站在這種天擇命運的分水嶺上。目前的人類是數十億年來，唯一可能有能力防護地球避免這種大滅絕再次發生的生物。而泛星計畫與鹿林兩米望遠鏡計畫正是守護地球安全最前線的哨兵！