

杞人憂天？ 泛星計畫

Pan-STARRS

文/周翊

杞人憂天

杞國有人憂天地崩墜，身亡所寄，廢寢食者。又有憂彼之所憂者，因往曉之，曰：「天積氣耳，亡處亡氣，若屈伸呼吸，終日在天中行止，奈何憂崩墜乎？」其人曰：「天果積氣，日月星宿不當墜邪？」。曉之者曰：「日月星宿，亦積氣中之有光耀者，只使墜亦不能有所中傷。」 --列子天瑞--

上述文字為「杞人憂天」這則成語的來源，往往我們會用這則成語去形容一個人去擔心一件沒有必要擔心的事。但我們以現代的觀點再次評斷這段文字，杞國人擔憂的事是否毫無道理？而曉之者說的都是對的？特別是曉之者說的最後一句，日月的確不會下墜，但星辰呢？古人早已觀測到流星的現象，通常隱含著某一重要人物去世(如三國演義第一百零四回「隕大星漢丞相歸天」)。但這些下墜的流星真能如列子天瑞篇所述「只使墜亦不能有所中傷」？

隕石坑—隕石撞擊的證據

當我們小時後第一次拿起望遠鏡仰望星空時，通常第一個看的大概就是月亮，很明顯的，它的表面坑坑疤疤的，不如目視來得皎潔。我們現在都已知道月球表面的坑洞大多是隕石坑，由於月球無大氣層的保護，隕石將直接撞月球表面而造成坑洞。而地球呢？由於它有厚度數百公里的大氣層的保護，下墜的隕石會在大氣中燃燒，但它是否能在墜地前燃燒殆盡，由它的大小所決定，一旦未燃燒完全，它就會撞擊地面。



圖一:這是筆者在美國亞利桑那州參觀巴林傑隕石坑時所拍下的照片，由於隕石坑直徑太大，以致無法拍得全貌，但可見隕石坑中央留有當年研究鑽探的痕跡。

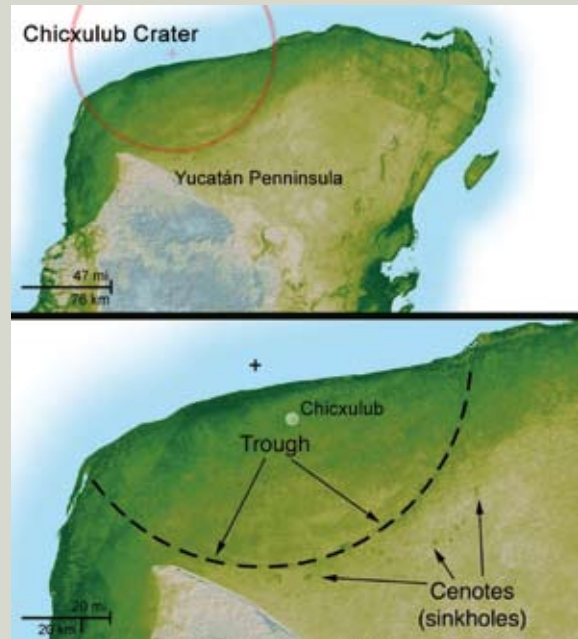
但一顆隕石能造成多大的傷害？看看圖一這個隕石坑吧，它不是在月球上，而是實實在在地在地球上的一個隕石坑，這就是著名的巴林傑隕石坑（Barringer Meteor Crater），它位於美國亞利桑那州北部的沙漠中，直徑長達1200公尺，深度173公尺，邊緣高度36至61公尺。科學家深入研究後發現，這個隕石撞擊事件發生在約五萬年前，一顆直徑僅約五十公尺，質量約在2.72-3.63億公噸間的一顆隕石，以五萬六千公里的時速撞擊地球，其撞擊強度相當於二千萬噸TNT，約等於1,000顆廣島原子彈，所激起的塵土超過一億七千五百萬噸，分佈超過2公里。很明顯的，它所釋放的能量足以使一個城鎮完全毀滅。

白堊紀-第三紀大滅絕事件

古生物學家已證實，大約在6,500萬年前，地球上的生物曾經歷一次大浩劫，使得當時地球上的霸主—恐龍的完全絕種。許多證據顯示：隕石是這次大滅絕元兇。六千五百萬年前，一顆直徑約10-20公里的小行

星落到地球，造成大火，大海嘯，大地震與大風暴，大量的灰燼拋入大氣中，造成黑暗，低溫與酸雨，灰燼滿佈在大氣長達數年，陽光被遮擋，形成核子冬天，食物鏈遭破壞，百分之七十的物種因而滅絕，稱之白堊紀-第三紀大滅絕事件。

地質學家可能已找到造成這次滅絕事件的證據：一個被埋在墨西哥的猶加敦半島地區(Yucatán Peninsula) 地下的隕石坑，稱之為希克蘇魯伯(Chicxulub) 隕石坑(圖二)。它形成的時間正好就在白堊紀大滅絕事件前後，坑洞直徑超過180公里，估計落下的隕石直徑約10公里，釋放能量約 4×10^{30} 耳格，相當於 10^{14} 公噸TNT (或50億顆廣島原子彈)。近來陸續發現許多與希克蘇魯伯隕石坑同時形成的隕石坑：如在北海的銀坑(Silverpit)隕石坑與烏克蘭的柏泰士(Boltys)隕石坑，大致分布於北緯70度至20度間，所以造成白堊紀-第三紀大滅絕事件可能為多次撞擊事件。



圖二：被埋在墨西哥的猶加敦半島地區地下的希克蘇魯隕石坑區域示意圖。
(圖片來源：NASA/JPL-Caltech)

Do something before too late

大約十年前有一個非常賣座的科幻電影—「世界末日(Armageddon)」，描述一群鑽油工人成為拯救世界的救世主。下面一段文字翻譯自這部電影的預告片：

「正當太空人在外工作時，亞特蘭提斯號太空梭受到一連串的小隕石擊中後爆炸焚毀。接著，從芬蘭到美國東南部都遭受流星的撞擊，紐約市的一些地標與摩天大樓也被撞毀。美國太空總署發現這些小隕石後面跟隨著一個大小相當於德州的小行星，正衝向地球而來，將造成地球上的生命完全滅絕，而時間只剩18天……」

在這部電影中，我們可以見到一群慌慌張張的天文學家，要在非常急迫的時間內解決此一危機，結局當然由這一群鑽油工人在最後一刻爆破了這一顆小行星。

撇開電影中其他情節不談，單就這電影中危機的來源：小行星或大型隕石撞擊地球，難道只是電影情節？還是真的有可能發生？從上述二個隕石坑及其他證據看來，似乎並非絕對不可能，但如果我們只能在它撞擊地球前18天才能警覺到它

的危險性，只怕我們未必能如電影情節中如此幸運地度過此一危機。因此，如果能及早發現對地球有威脅性的小行星，我們就有足夠的時間應付此一危機。

尋找高危險性的小行星

如眾所知，太陽系除了八大行星外，還有許許多多的小天體，如小行星、彗星、古柏帶天體等。雖然小行星主要集中於小行星帶，軌道為圓形或離心率很低的橢圓，對地球無害。但仍可能有極少數小行星，走的是一個離心率較高的橢圓軌道，而其軌道與地球軌道相交，這種小行星對地球就可能有高度的危險性。此外，我們也不能排除下面的可能性，有些小行星目前雖對地球無害，但它可能因與其它小行星碰撞，或受其他星體(如彗星)的牽引而改變軌道，變成高危險性的小行星。還有就是那三不五時造訪的彗星，有強烈的證據顯示，有些彗星的軌道與地球軌道相交，它們運行時殘留的物質，成為流星雨的主要來源。這些小天體對地球都有一定程度以上的威脅性。而一個大小五十公尺的小行星就足以毀滅一個城市，一個10公里直徑的小行星就可造成物種的大滅絕。因此，尋找近地小行

星(Near Earth Objects, NEOs)或又稱高危險性的小行星 (Potential Hazardous Asteroids, PHAs)實為天文學家的重要任務。

但要如何尋找這些高危險性的小行星?由於撞擊地球的小行星體積不需要太大(直徑數十公尺至數十公里)，而小行星本身又不發光，我們只能藉著它反射太陽光來觀測它，所以，只有它距離地球較近時，才能捕捉到它的身影。用天文觀測的語言來說，它不但是個移動天體，而且是個暫現象。因此我們必須做經常性、重複性、快速及一定深度以上之巡天。對於所有觀測到的天體，先判定是否為移動天體，若為移動天體，則計算其軌道，判定是否為高危險性的小行星，由於精確軌道的要求，必須有一定程度以上的影像解析度。此外，由於能觀測到這些高危險性的小行星時，它們與地球已相當接近，我們不能排除它可能有立即的危險性，因此，上述的資料處理與軌道計算必須在短時間內完成。

泛星計畫 (Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System; Pan-STARRS)

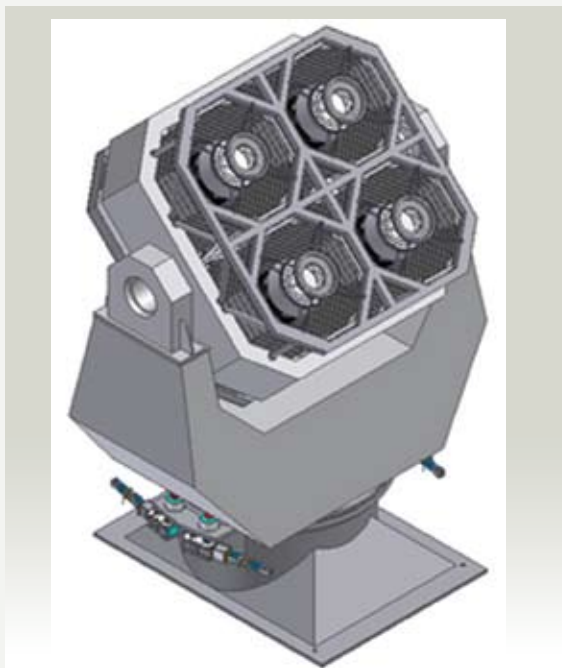
基於高危險性的小行星可能對地球造成毀滅性的傷害，美國國會通過泛星計畫的預算，經美國空軍交付夏威夷大學執行。計畫主要目的就是在尋找高危險性的小行星，預計在夏威夷島的毛納基(Mauna Kea，海拔4,205 公尺)建造四座1.8米口徑之望遠鏡(圖三)，視野高達3度(直徑)或7平方度，巡天的範圍可達3/4的全天區。每幅影像曝光時間30秒，每4-7天就能再次觀測同一天區(與巡天模式有關)，就靈敏度而言，單一幅影像可達24星等，數年之疊加影像更可高達29.4 星等，位置準確度達0.07 角秒，測光準確度可到0.01 星等。

要達到有效尋找高危險性的小行星的目的，必須滿足如前所述的條件。我們首先看看巡天能力，巡天能力的指標稱之為 E_{endue} ，它是望遠鏡集光面積(A)與視野(Ω ，以平方度為單位)的乘積，面積越大，在一定時間的曝光下，能看到比較暗的天體，或者從另一觀點來看，在一定的

觀測深度下，面積較大的望遠鏡所須曝光時間較短。當然，視野越大，掃過全天區的曝光次數就越少。因此，這二個因素決定了望遠鏡快速巡天的能力。表一列出了泛星計畫與其他望遠鏡巡天能力之比較，可知，Pan-STARRS的巡天能力的確高人一等。

巡天利器： 泛星計畫的Gigapixel相機

當然，我們對於Pan-STARRS的要求還不止於此，我們如果使用一般的CCD相機，如1K×1K或4K×4K像素的CCD相機，要觀測如Pan-STARRS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。



圖三：Pan-STARRS望遠鏡的藝術家想像圖，這只是數個可能的設計之一，最終的設計尚待決定。(圖片來源：<http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/design-features/PS4-small.htm>)

望遠鏡	口徑	Ω (deg ²)	$A\Omega$
<i>USAF Linear</i>	1.0	2.0	1.6
<i>SDSS</i>	2.5	3.9	19
<i>CFHT (Megacam)</i>	3.6	1	10
<i>SUBARU (SuprimeCam)</i>	8.1	0.2	10
<i>Pan-STARRS</i>	3.6 ^{註1}	7	70

表一：泛星計畫與其他望遠鏡巡天能力之比較。

註1：四座1.8米直徑的望遠鏡相當於一座直徑3.6米的望遠鏡。

而我們對Pan-STARRS的要求是要能夠算出精確軌道，因此我們不能犧牲解析度而遷就視野。因此，要滿足雙方的要求下，CCD相機的像素總數將十分龐大，在CCD像素大小($\sim 10 \mu\text{m}$)無法降低的情況下，相機的實體大小也將十分可觀。

Pan-STARRS所使用的Gigapixel相機(圖四)是由麻省理工學院林肯實驗室所研發製造，包含60個 Orthogonal Transfer Arrays (OTAs)，排成 8×8 的陣列，但四個邊角無OTA，以符合Pan-STARRS的視野。每個OTA有64 (8×8)單元，每單元有 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，整個像機將有14億像素，實體面積超過 $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ ，比起一般CCD相機的CCD只有拇指般大小，實有天差地別的差距。

不只相機的大小，相機本身的功能與後端的電子設備也必須遠比傳統CCD相機先進，在Pan-STARRS巡天時，預設每幅影像曝光時間為30秒，可以想像CCD的讀出時間必須遠小於30秒，否則將大大降低巡天的效率，而要在這麼短的時間讀出14億像素，其在技術上的挑戰可想而知。事實上，Pan-STARRS的Gigapixel相機能在二秒內完成整個14億像素的讀出動作。此外，OTA還有修正影像的能力，眾所皆知，影像的清晰程度與視相度(seeing)的相關，有些先進的望遠鏡能以調適光學的方法降低視相度造成的影響，而Pan-STARRS的OTA則是利用電荷在像素間傳遞以達到與調適光學相同的效果(圖五)。

驚人的資料處理能力

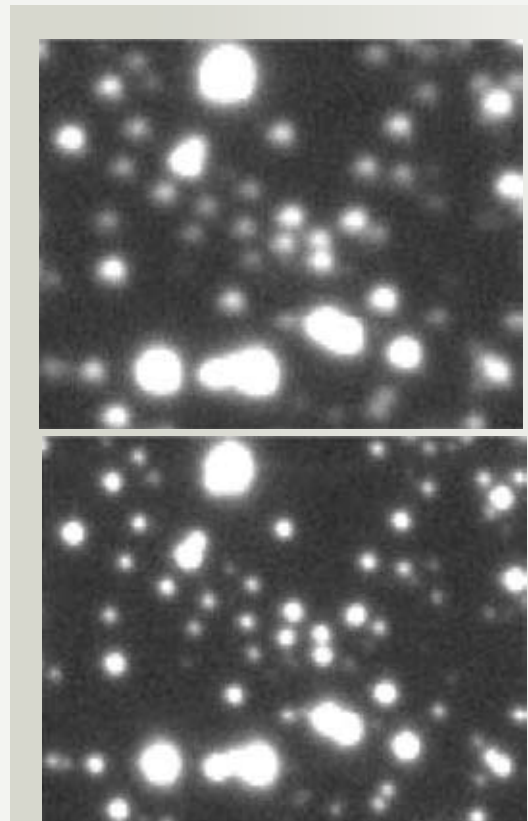
我們再次解析泛星計畫之英文原文，如果直譯其文，應為「全面性的巡天望遠鏡與快速反應系統」，



圖四：Pan-STARRS的Gigapixel相機。
(圖片來源：<http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/design-features/camera-small.htm>)

除了上面所介紹的巡天望遠鏡，它的另一個特性就是它的「快速反應系統」，也就是說，它必須在很短的時間內完成資料的分析，特別是找到與算出高危險性的小行星的軌道，估算它是否對地球產生立即的危險性(我們不希望像「世界末日」電影般只有18天的反應時間)。而我們計算下一幅Pan-STARRS影像的大小，通常我們以2bytes儲存一個像素的資料，以Pan-STARRS的14億像素的相機，每幅影像的大小高達2.8GB。如以每晚8小時的有效曝光時間，每次曝光30秒，四座望遠鏡每晚資料量高達10TB左右，更遑論在資料處理時將產生數倍的影像，光是這些資料存取就是一大挑戰。因此，Pan-STARRS的快速資料處理的能力在天文界也是空前的創舉。

雖然泛星計畫的主要目的在尋找高危險性的小行星，但其每晚大量的巡天資



圖五：Gigapixel相機的影像修正能力。
上：一般導星(星點FWHM=0.73角秒)；
下：OTA導星(星點FWHM=0.5角秒)。
(圖片來源：http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/design-features/image_quality.htm)

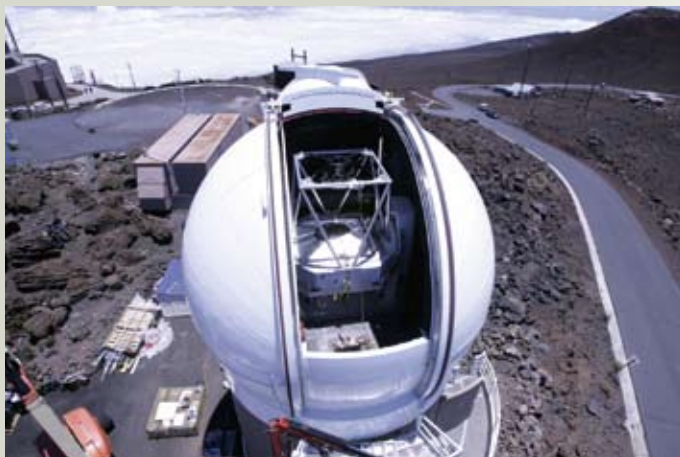
料，將對天文研究產生革命性的影響，特別是對暫現天體(如伽瑪射線爆、新星或超新星爆發)、移動天體(如小行星、古柏帶天體)與時變現象等方面之研究。基於它巡天的特性，有人形容Pan-STARRS是對宇宙拍一部十年的電影。此外，Pan-STARRS的資料處理系統會將每晚觀測的影像中，剔除了暫現與移動天體後，將所謂之「靜態影像」不斷與前次的靜態影像疊加，最終會形成一幅深度極深的「靜態天空」。這對於許多天文研究都極重要。

Pan-STARRS的原型機：PS1

與一般的大型計畫相同，在主要儀器建造前，都會先製造一個原型機(prototype)，用以測試及修正其儀器設計，通常這種原型機只包含儀器之最重要部分。但Pan-STARRS的原型機PS1事實上就是一座完整的1.8米望遠鏡(1/4的Pan-STARRS，見圖六)，整個系統與未來的Pan-STARRS完全一樣。望遠鏡位於夏威夷Maui島上的Haleakala天文台，預計計畫執行3.5年，將對於泛星計畫所發展出的技術作一實體測試，觀測之資料可供泛星計畫校正與比對。由於它與Pan-STARRS如此相似，絕大部分Pan-STARRS的科學目的都可在PS1達成。

由於美國政府對PS1僅提供建造經費，而不提供營運經費，因此由夏威夷大學招集，集合了來自美國、德國、英國與我國的天文研究機構，共同出資營運，共享觀測資料。由參與國家的天文學家共同商議後，定義出PS1的主要科學項目：

- * 內太陽系
- * 外太陽系(木星之外)
- * 小質量恆星、棕矮星與年輕星體
- * 用掩食法尋找系外行星
- * 本銀河系結構與本星系群
- * M31之深度巡天
- * 大質量恆星與超新星源
- * 以變星與爆發性的暫現源研究宇宙論
- * 星系性質



圖六：PS1：Pan-STARRS的原型機。

(圖片來源：<http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/project-status/gallery-dome.htm>)

- * 活躍星系核與高紅移似星體
- * 宇宙尺度級之重力透鏡
- * 大尺度結構

而我國的天文學家對其中多項科學主題都有參與。

台灣的優勢

我國是世界上最早參與泛星計畫的國家。而泛星計畫是偵測暫現天體與移動天體之利器，而要深入研究這二類天體，還是必須有賴於後續觀測，特別是早期後續觀測資料十分珍貴。台灣的地理條件是我們在泛星計畫中的最大優勢，台灣的緯度與夏威夷的緯度相當，也就是說，夏威夷能看到的天區台灣也都看得到，而台灣の時區落後於夏威夷六小時(雖然早一天)，也就是說，任何暫現現象被Pan-STARRS偵測到後，或許經過其快速反應系統短暫處理確定後，台灣將能在第一時間利用本地的望遠鏡，如鹿林一米望遠鏡或未來的二米望遠鏡，做早期的後續觀測，而取得世界上獨一無二的資料，將可以此與世界先進國家相匹敵。

結語

PS1預計於今(2008)年底開始觀測，屆時大量的觀測資料可將天文研究帶到一個新的境界。人類憑藉著科技進步，在我們的太陽系中清點近地小行星，或許可以使地球上的人類躲過滅絕的危機。我想如果二千多年前的列子看到今天的泛星計畫，當他在撰寫“杞人憂天”這一段時，只怕要三思吧。

周翊：國立中央大學天文所助理教授