

從潛在威脅到安全軌跡的科學解密

當我們仰望星空，總會想像宇宙中是否潛伏著威脅地球的「不速之客」。好萊塢電影常描繪小行星撞擊地球的末日場景，而6,600萬年前，一顆巨型小行星可能讓恐龍從地球上消失。這些故事都讓人不寒而慄，也讓天文學家們一刻不敢鬆懈地監測天空。2024年12月，一顆名為「2024 YR4」的小行星被發現，且估算它的軌道未來竟然將穿越地球的行進路徑，2025年2月時估計這顆小行星在2032年撞擊地球的可能性高達3%，一度讓人擔心它是否會帶來危險。然而經過大量的觀測與研究後，天文學家在2025年3月宣布：這顆小行星對地球無害。

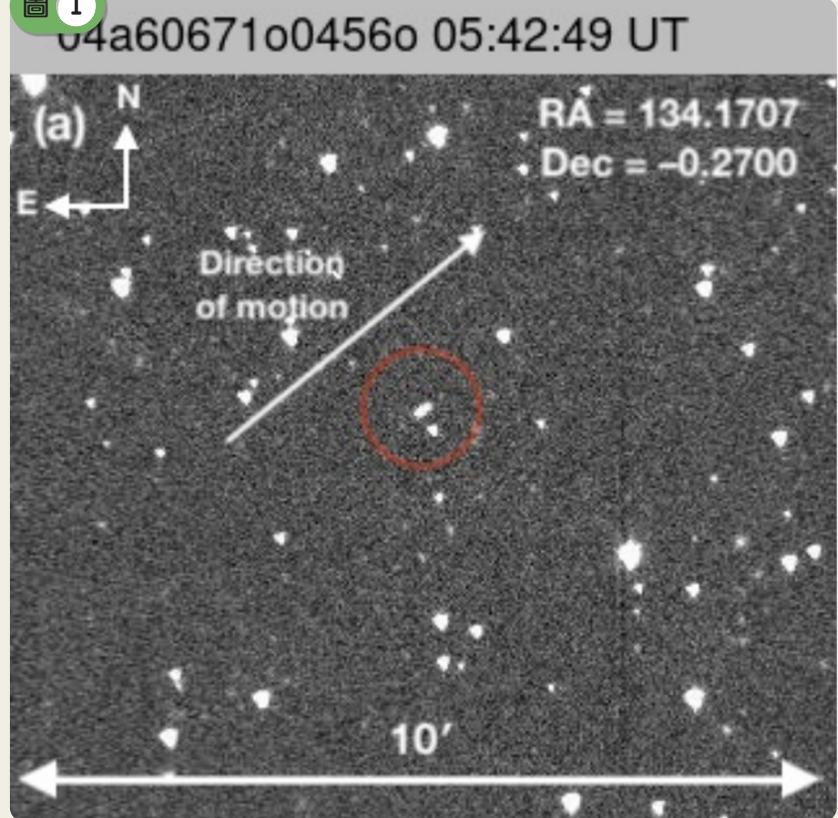
文／林建爭



在此示意圖中，小行星2024 YR4的軌道以紅色標示，估計它將於2032年12月22日以近距掠過地球，由來自歐洲南方天文臺甚大望遠鏡（Very Large Telescope，簡稱VLT）的最新數據顯示，撞擊地球的可能性微乎其微。而為了能清楚標示出行星位置，示意圖中的行星大小並未按實際比例繪製。圖片來源：ESO

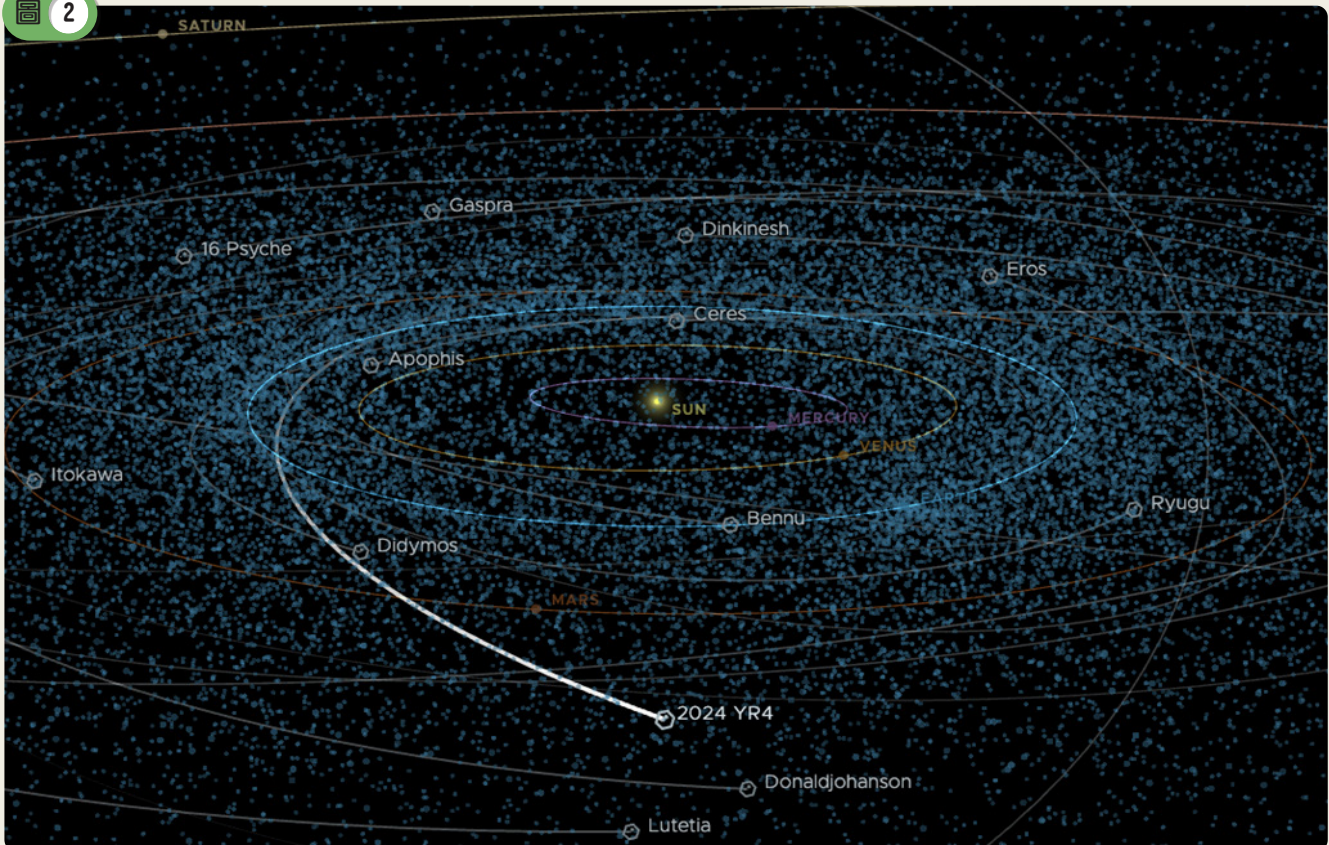
2024年12月27日，由美國夏威夷大學主導的「小行星陸地撞擊持續報警系統」（Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System，簡稱為 ATLAS）在智利站的夜空中捕捉到一顆新天體，隨後命名為2024 YR4，如圖1。這套系統宛如地球的「天眼」，專門搜尋可能靠近我們的太空岩石。2024 YR4是一顆「近地小行星」（Near-Earth Asteroid），意思是它的軌道離地球很近，甚至會穿越地球繞太陽的軌道，如圖2所示。天文學中有兩類小行星的運行軌道會與地球繞日軌道交會，平均軌道半徑大於日地軌道的稱為「阿波羅型（Apollo）小行星」，而小於日地軌道的類型稱為「阿登型（Aten）小行星」，2024 YR4屬於前一類型。

圖 1



ATLAS智利站的望遠鏡於2024年12月27日，台灣時間13時42分49秒時，捕捉到2024 YR4的影像。影像來源：<https://arxiv.org/abs/2503.05694>

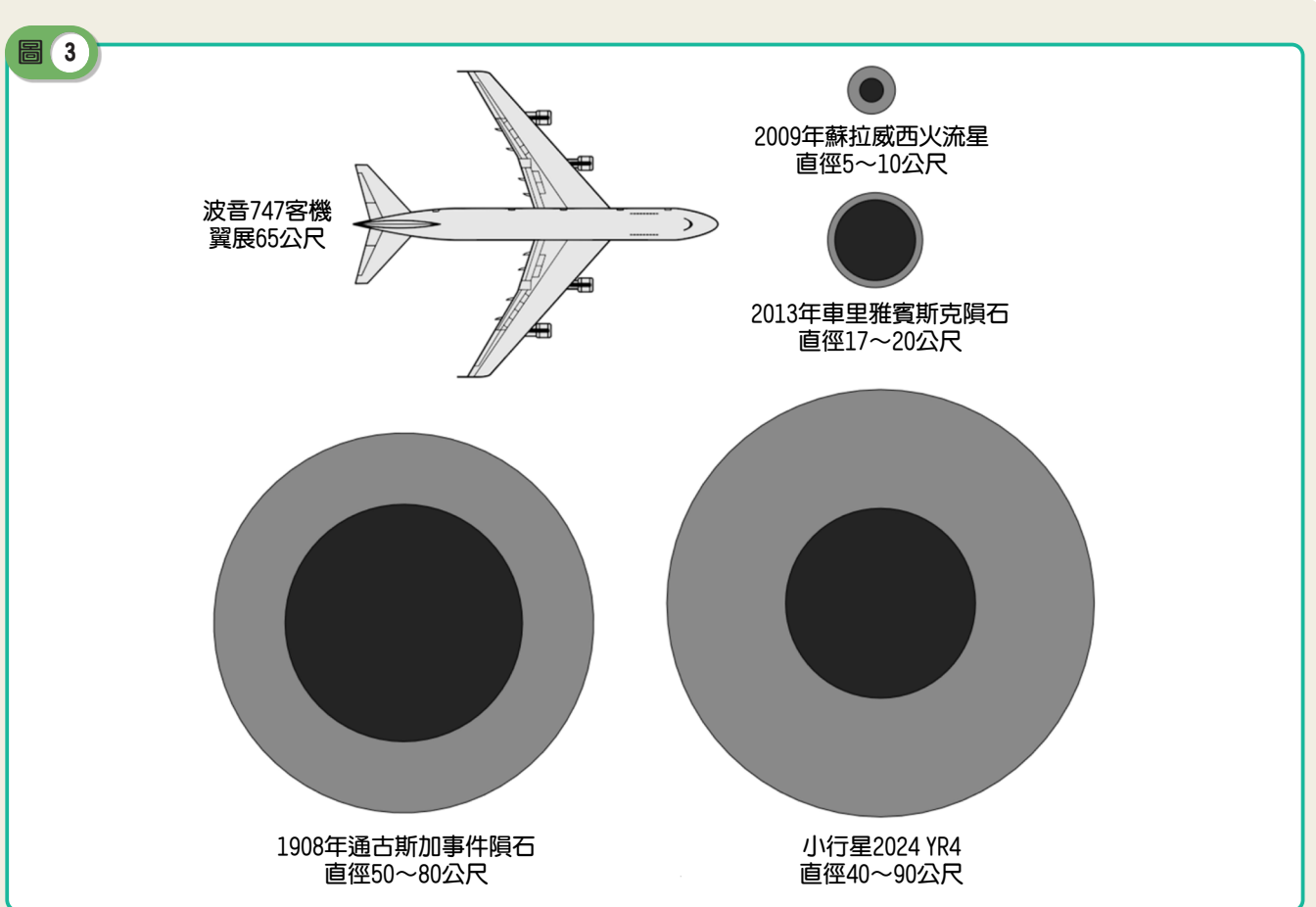
圖 2



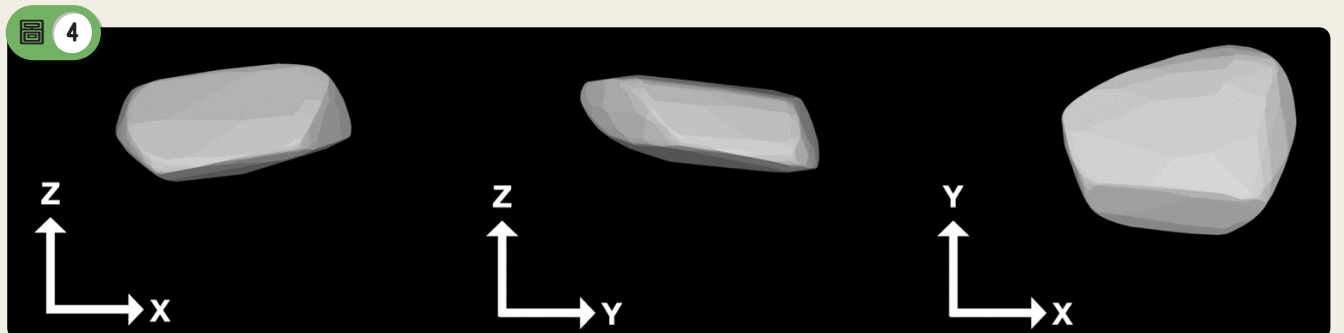
小行星2024 YR4軌道示意圖。圖片來源：NASA

天文學家假設小行星2024 YR4的反射率在0.15到0.4之間，在觀測其亮度後，初步推算出2024 YR4的直徑約在40到90公尺之間，如圖3所示，相當於一架波音747的大小。雖然它的大小遠不及導致恐龍滅絕的那顆直徑約10公里的小行星，但若撞擊地球，依然可能摧毀一座小城市。更令人緊張的是，它與地球軌道的「最小交會距離（Minimum orbit intersection distance，簡稱為MOID）」僅有0.003天文單位，約42萬公里，促使天文學家立即將它列入潛在危險小行星名單，並展開深入研究。

2025年2月7日，天文學家利用位於南美的南雙子座望遠鏡（Gemini South）拍下了它不同波段的影像及光譜。這些資料與其表面成分息息相關，如同小行星的「指紋」一般。分析結果顯示，2024 YR4的光譜特徵與「R型」和「Sa型」小行星最為相似，這類小行星通常富含矽酸鹽礦物，可能來自太陽系內側的主小行星帶。此外，他們發現2024 YR4的亮度每隔大約19.5分鐘會變化0.4個星等，顯示它的外形可能是不規則的。進一步分析後發現它的形狀扁平，長寬比約為3:1，類似一顆拉長的橄欖球，如圖4。



以波音747大小為比例尺，小行星2024 YR4與2009年蘇拉威西火流星、2013年車里雅賓斯克隕石和1908年通古斯加事件隕石的比較圖。圖片來源：維基百科



小行星2024 YR4不同視角的形態模擬圖。圖片來源：<https://arxiv.org/abs/2503.05694>

2024 YR4的軌道，是判斷它是否危險的關鍵。天文學家測量出它的軌道參數：平均軌道半徑為2.52天文單位（1天文單位約1.5億公里），離心率（軌道扁平程度）為0.66，傾角（與地球軌道平面的夾角）為3.41度。離心率如此大的橢圓形軌道讓它時而靠近太陽，時而遠離，並多次穿越地球軌道。最初由於觀測時間較短，天文學家只能粗略估計它的路徑，結果顯示它可能在未來幾年接近地球，甚至估計有超過3%的機率會發生撞擊事件。這種不確定性就像預測天氣：採用的數據越少，誤差範圍越大。但隨著2024年12月到2025年2月進行連續觀測後，累積的資料越來越豐富，軌道預測也越來越精確。天文學家發現，它與地球的最近距離在數十萬公里以上，因此將撞擊機率下修至0.001%，遠低於危險範圍。

此外，天文學家還考慮了其他影響因素，例如木星的引力對小行星的擾動，但計算結果顯示，木星的影響微乎其微。另外「亞爾科夫斯基效應（Yarkovsky effect）」也是一項考量因素——當小

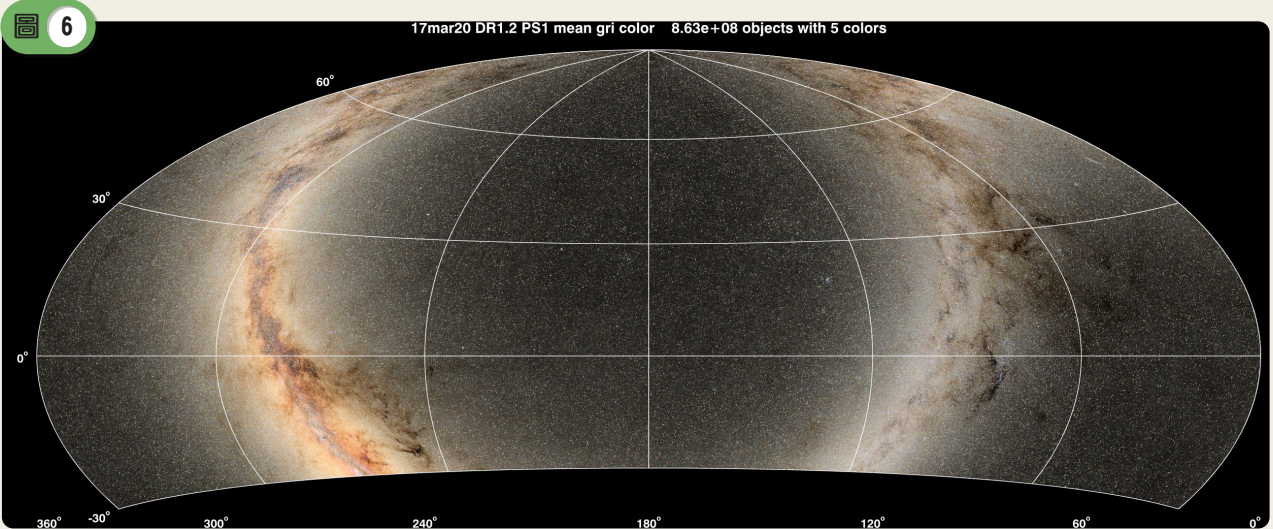
行星吸收陽光後散熱不均，會像微型火箭一樣推動自己改變軌道。幸運的是，研究表明2024 YR4的漂移量不足以讓它靠近地球。最終，2025年3月，天文學家正式將2024 YR4從潛在危險小行星名單中移除。

2024 YR4的故事展現了人類監測小行星強大能力的縮影。全球有許多類似ATLAS的「太空哨兵」守護著地球，例如美國的泛星計畫（Pan-STARRS），如圖5、圖6，和歐洲的近地天體動態系統（NEODyS），藉由每日掃描天空已發現數千顆近地天體，並用電腦模擬它們的軌跡，標定其中具有潛在威脅的小行星。未來薇拉·魯賓天文台（Vera C. Rubin Observatory），如圖7、圖8，於2025年底啓用後，強大的巡天觀測能力將能發現更多隱藏的小行星，讓我們的防禦網更密實。此外，普通人也能參與這場「太空守護戰」。每年6月30日的「國際小行星日」提醒我們關注這些天外來客。你還可以加入相關科學項目，幫忙分析望遠鏡資料，成為地球的「業餘哨兵」。

圖 5



泛星計畫天文臺是一座1.8公尺的望遠鏡，位於夏威夷茂宜島哈雷阿卡拉山頂。從2010年5月開始的4年時間，泛星計畫進行了多波段、多次的巡天觀測，搜尋了夏威夷可見四分之三天空的範圍。觀測目的之一是尋找黯淡的移動天體、高速移動天體和瞬變天文現象，還有可能威脅地球的小行星。圖片來源：PS1SC



泛星計畫所搜尋的天空範圍，包括赤緯北緯90度～南緯30度之間的所有天區。圖片來源：PS1SC



薇拉·魯賓天文臺擁有目前全球最先進的8.4公尺口徑巡天望遠鏡，其鏡片設計、相機靈敏度、望遠鏡移動速度及運算基礎設施，對於天文研究來說都是全新的等級。尤其搭配了天文觀測史上以來最大的數位相機：LSST相機，將在啟用後的10年間，拍攝南半球天空的精細影像，每隔幾個晚上的搜尋就可以覆蓋整個天空，並製造出超寬視野、超高解析度的縮時影像記錄—就像有史以來最大型的天文電影。這部獨特的電影將把夜空帶入生活，且預計可在其中發現大量的小行星、彗星、脈動變星及超新星爆發等。圖片來源：Rubin Observatory/NSF/AURA/B. Quint

圖 8



在薇拉·魯賓天文臺中進行安裝工程的LSST數位相機，此相機是目前全球大型天文臺中最大的相機，將提供超高靈敏度、解析度，以及寬廣視野的觀測影像。圖片來源：Rubin Observatory/NSF/AURA/B. Quint

若有發現真正威脅地球的小行星，天文學家已經具備防禦手段。2022年，NASA 的 DART 任務成功撞擊了一顆小行星的衛星，證明人類有能力改變天體軌道。天文學家還可能用核爆炸或「引力拖曳」（用太空船的引力慢慢拉動小行星）來偏轉威脅。這些技術聽起來像科幻電影，但正在一步步實現。從2024年12月的首次發現，到2025年3月的安全結論，對於2024 YR4的研究過程中展現了科學的力量。這顆穿越地球軌道的小行星曾讓我們十分緊張，但最終成為人類智慧的試金石。

林建爭：美國夏威夷大學天文研所泛星計畫博士後研究員

王品方校稿：美國夏威夷專案文物修復師

參考資料：

<https://arxiv.org/abs/2503.05694>

https://www.esa.int/Space_Safety/Planetary_Defence/Asteroid_2024_YR4_no_longer_poses_significant_impact_risk

https://en.wikipedia.org/wiki/2024_YR4

<https://asteroidday.org/>

YouTube 相關影片：

How asteroids go from threat to no sweat

https://www.youtube.com/watch?v=3_6Ff_2eBAk

What is... a near-Earth asteroid ?

<https://www.youtube.com/watch?v=daGtsOjrK0M>

NASA Expert Answers Your Questions About Asteroid 2024 YR4

<https://www.youtube.com/watch?v=UWhj4qJdYWw>

2024 YR4即時資訊

https://eyes.nasa.gov/apps/asteroids/#/2024_yr4