

# 探空火箭的 科學實驗

陳炳志

第二次世界大戰的破壞與殘酷令人不勝唏噓，但留給世人一個影響重大的發明——火箭。尤其是移除了具有高度破壞力的火藥彈頭後，火箭更是變身為今日科學家探索地球高空的重要利器。

二次大戰末期，德國納粹發展的 V-2 火箭呼嘯飛越英倫海峽轟炸倫敦，對於英國的實質損害雖然不大，但因無法攔截，因此對當時英國的社會人心造成了莫大的影響，也成了盟軍的噩夢。還好在納粹德軍尚未大量生產前，戰爭就結束了。

二戰結束後，盟軍占領德國，由沃納·馮·布勞恩（Wernher von Braun）所帶領的 V-2 科學家與工程師團隊被美國、蘇聯與其他歐洲國家所分持，成了這些國家尤其是美國在戰後火箭科技蓬勃發展的基礎。在冷戰時期，火箭的發展仍集中在軍事應用上，另結合了原子彈與氫彈，火箭便成了美俄互相制衡的武器。但是科學家也思索著這項恐怖的武器是否可用以探索地球，作和平用途的研究？

美國於 1945 年 9 月 26 日發射了第一枚和平用途的探空火箭——女伍長號（WAC Corporal）火箭，飛行高度達到 72 公里，酬載重量約 11 公斤。在

1947 年以前，美國及歐洲雖然會有一些 V-2 火箭進行高層大氣特性的探索與近地軌道的研究，但大都仍與軍事目的有關。





火箭成為太空科學研究中不可或缺的利器（圖片來源：種子發）

直到 1957 年，以英國的雪梨·查普曼（Sidney Chapman）與美國的詹姆斯·范艾倫（James Van Allen）為首的科學家推動了「國際地球物理學年」（International Geophysical Year, IGY）大型的國際科學合作計畫，由來自全球 67 個國家（包含台灣）的科學家在 1957 年 7 月到 1958 年年底共 18 個月的時間，也就是在第 19 太陽周期的極大期之時，進行全面性的地球大氣觀測。

這個計畫是冷戰時期以來，東西方科學家的首次合作，也是火箭科技應用於和平科學用途之始。這計畫除了在 1956 年 2 月 23 日觀測到大型的太陽閃焰（solar flare）之外，並且發現這事件在地球北極極區（地磁緯度高於 60 度）使 VHF 頻段無線電波被大量吸收。

這是科學家第一次觀測到這種現象，隨後的觀測也顯示大型太陽閃焰後，都會伴隨著無線電波的吸收與極光的發生，科學家推測這樣的現象是由太陽的質子和電子爆發所引起的。因此需要使用火箭攜帶儀器至電離層，進行質子通量與能譜以及電子密度的現地量測，以證實這樣的想法。

IGY 委員會很快地在全球規劃了近 200 次的火箭發射，這些火箭有的是直接使用軍事火箭，有的則是修改軍事火箭但給予不同的名稱，性能上也有很大的差異，分別可攜帶數公斤到 200 公斤不等的儀器進行實驗。由於這些火箭的觀測，讓太空科學在 IGY 期間獲得了許多珍貴的資料，火箭也成為太空科學研究中不可或缺的利器。其後，科學用途的火箭任務成長快速，從 1960 年代到

1970 年代早期，每年大約有 90 次的火箭發射。在 1970 年的全盛時期，甚至達到每年約有 500 次的火箭實驗進行著！

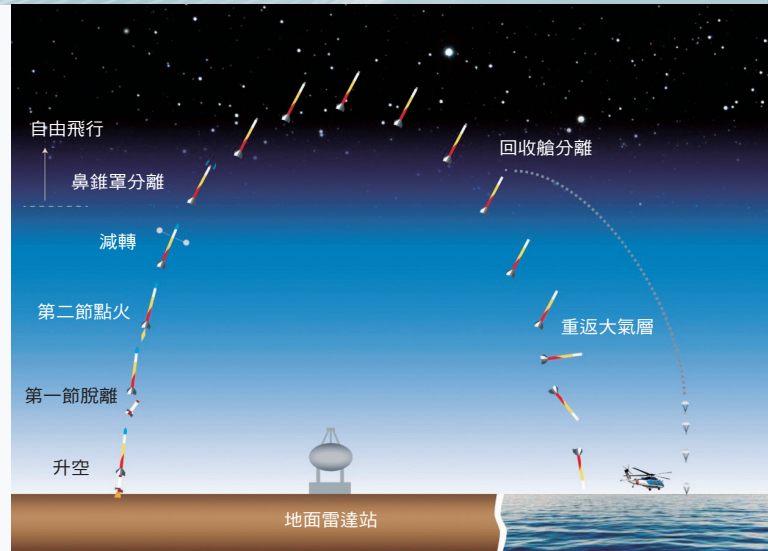
但是這樣的局面在蘇聯史普尼克 1 號（Sputnik-1）人造衛星的升空後，隨著美蘇太空競賽下，人造衛星的快速發展讓探空火箭在科學研究的角色上逐漸產生了變化。因為人造衛星的出現標示著太空時代的開始，在科學研究上，人造衛星對於電離層頂與磁層的研究比火箭更有效率，且能夠進行長時間全球性的觀測，因此在 1970 年後探空火箭科學實驗的次數開始降低。

有人認為既然有了人造衛星，探空火箭應該就沒有價值了，但是在太空與大氣科學的研究中，目前有 4 種主要的飛行載具，分別是：飛機（高度約 15 公里高，可停留數小時）、氣球（高度約 30 ~ 40 公里，目前最高達 50 公里，可停留數小時到數十天）、火箭（實驗高度約在 40 ~ 1,000 公里，滯空時間通常在 1 小時內）與人造衛星（通常在 400 公里以上，可停留數周到數年）等，隨著實驗高度與滯空時間的不同，彼此有很高的不可替代性。

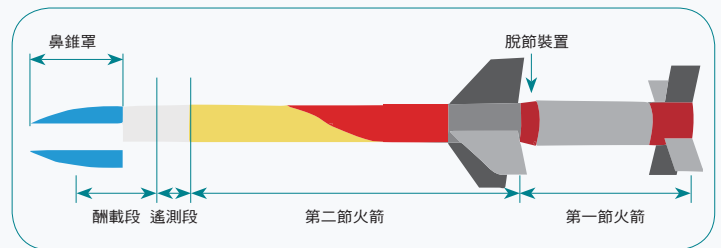
因此，即使到現在，美國太空總署仍提供 16 種不同類型的火箭，每年維持 20 ~ 30 次的火箭發射，以進行科學與技術的和平實驗。

探空火箭（Sounding rocket）名稱來自於航海術語「探測」（to sound），指的是攜帶有測試或量測儀器，一般稱為酬載，而不是致命性彈頭的火箭。視性能的不同，探空火箭發射後，可以在 40 ~ 1,000 公里的高度進行科學或工程實驗。

目前有 4 種主要的飛行載具，分別是：飛機、氣球、火箭與人造衛星，隨著實驗高度與滯空時間的不同，彼此有很高的不可替代性。



探空火箭的實驗過程示意圖。在鼻錐罩開啟後，開始實驗。如果實驗內容需要回收，則待回收艙或第二節全段返回地表或海面後進行回收。整個探空火箭的實驗時間，從點火升空到返回通常不會超過 20 分鐘。



多節式探空火箭的構造。鼻錐罩內是實驗酬載，鼻錐罩會視酬載的需要在一定高度開啟。遙測段包含了火箭的減轉裝置與航電系統。航電系統內包含了電力、火箭環境與姿態感測器及通訊單元。一般來說，酬載的電力供應與即時資料下傳都由遙測段支持。如果第二節火箭需回收，則還會包含降落傘。

不同於人造衛星的發射，探空火箭的實驗通常不會進入繞地軌道，而是在到達遠地點後，就以拋物線路徑重新進入大氣層墜回地面或海面，因此也稱為次軌道飛行載具。由發射到重返（指的是重返大氣層的過程）最後墜地或落海的過程，隨遠

許多大氣與電離層現象的研究需要垂直剖面上的量測，探空火箭是絕佳的利器，至今仍無法由其他飛行載具取代。

地點高度的不同會有些差異，滯空時間通常在 5 ~ 20 分鐘左右。探空火箭上進行的科學實驗，大致可分為兩大類：

**太空科學與天文學研究** 許多大氣與電離層現象的研究需要垂直剖面上的量測，探空火箭是絕佳的利器，而且火箭可以在 40 公里（一般高空氣球實驗的上限高度）到 200 公里之間（穩定人造衛星軌道高度的下限）進行量測，這個高度涵蓋了中氣層的上半部與電離層中的 D、E、F 層，探空火箭攜帶儀器在上述區域的現地量測，至今仍無法由其他飛行載具取代。

此外，探空火箭也為使用於衛星觀測的儀器，提供早期性能檢驗與構想驗證的重要測試平台。探空火箭也是短時間瞬變科學現象的探索利器，如極光、太陽閃焰或爆發後低地球軌道上的輻射與磁場特性、低緯度地區電離層不規則體與電漿泡的發生等。

一般來說，探空火箭最適合在 40 到 200 公里之間的高度進行以下兩項現地量測研究：上層大氣特徵，如風場、壓力、溫度、中性化學成分、反照率、行星輻射等；電離層特徵，如電流、電子和離子的密度及能譜、無線電波的傳播、電場與磁場擾動等。

近年來，學界對於使用探空火箭進行電離層主流研究的目標，隨著儀器與理論的發展不斷演進。在 1957 ~ 1970 年期間，主要的課題是電離 D 層和 E 層的中性與帶電離子的交互作用，以及極光的發光機制。隨後，測量入射粒子與極光在可見光與 X 光波段的能量耗散，也開始使用探空火箭為主要量測平台。科學家透過探空火箭實驗評估能量耗散的影響，

以了解低能量電漿的離子化學和能量分布。進一步的研究還包括與磁層有關的問題，如極光與電離層的耦合、極光弧的物理、極光次原子和極光粒子的加速及沉降等。

在 1971 ~ 1990 年期間，因為對於極光已經有了比較清楚的了解，探空火箭實驗開始集中於高層電離層（F 層）的研究，因此需要更大的探空火箭以達到更高的高度，同時攜帶更複雜的科學儀器測量電場和波動，以了解能量的傳遞過程。在 1980 年左右，部分探空火箭研究的課題更轉向中性大氣與電離層電漿的耦合研究，並且進行了一系列的聯合觀測，除了探空火箭之外，還包含了地面的雷達與光達（LiDAR）一同進行著。

1991 年至今，大氣重力波和湍流研究也成了探空火箭的重要課題。此外，探空火箭也對中氣層頂（約 80 ~ 90 公里）區域進行了深入的研究。在這高度，夏天溫度會降至約 100 K，使得這區域成為地球大氣中最冷的區域。與溫度下降相關的現象，有夜光雲和極地中層夏季回波的發生，後者在 VHF 和 UHF 頻帶中有很強的雷達回波，對於脈動極光和磁層 / 電離層相互作用的進一步研究，仍然是現代探空火箭觀測的重要項目。

除了太空科學的觀測外，天文物理與天文學觀測也是早期探空火箭的重要課題。由於地球大氣的吸收，除了可見光和部分紅外線與電波波段外，其他的電磁輻射都無法穿過大氣到達地表，因此如太陽和恆星的 X 光、紫外線與大部分紅外線波段的量測，只能透過探空火箭攜帶儀器到高層大氣中進行。早期科學家也使用探空火箭測量太陽粒子輻射、星系輻射與地球的范艾倫帶（Van Allen Belt）。

### 在微重力狀態下的材料科學與生命科學

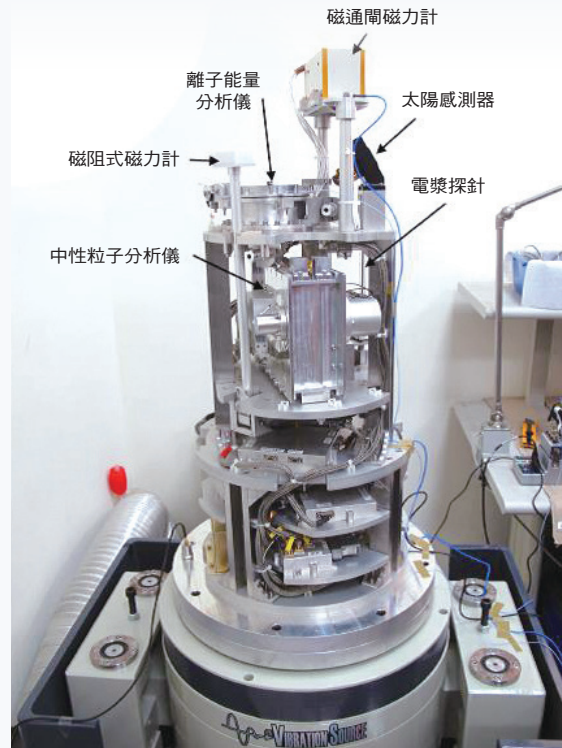
**研究** 探空火箭在爬升的過程中必須承受強大的 G 力，起飛期間最大加速度可以達到 12 G。在上升階段，探空火箭靠著縱軸線的自旋而穩定飛行，在發動機分離與減轉（de-spin）後，約在 80 ~ 100 公里高度達到微重力階段，也就是不靠自身推進系統的自由飛行。在這階段可以形成低於 1 / 10,000 G 的微重力狀態，利用這個短暫的實驗窗時間，就可以進行材料科學、流體物理學（包含燃燒）與生命科學方面的實驗。

如果以遠地點高度 800 公里估計，在自由落體階段最多可以持續達 12 分鐘左右。當火箭重返大氣後，空氣阻力逐漸增加，不再是自由落體，降落傘約在海平面 5 公里高度打開，確保酬載不會受到損害，可以成功地回收，以進行後續的實驗室檢驗。

在探空火箭的自由落體過程中，由探空火箭所提供的微重力環境與入軌載具（如衛星和國際太空站）的微重力條件相當，探空火箭的微重力環境主要由 100 公里以上殘餘大氣的阻力決定。雖然實驗窗的時間短暫，但是相較於衛星等其他飛行載具的花費，加上回收的便利性，探空火箭的微重力實驗仍有相當的價值。例如歐洲自 1977 年起開始利用探空火箭進行微重力研究，目前仍持續執行相關的實驗。

物理與材料的探空火箭實驗不僅可做為太空實驗室和國際太空站實驗的前導實驗，也可用於驗證在低重力條件下，相關技術設計的正確性。此外，低重力條件下的燃燒行為以及各種流體科學領域和金屬熔體凝固的情況，也是使用探空火箭微重力實驗的重要項目。

在生命科學的研究上，除了基礎研究，如觀察細胞或纖毛蟲、草履蟲等低等生物在微重力狀態下的行為，或經過微重力過程後，生物的生長或受精卵孵化的過程。



進行振動測試中的國家太空中心探空火箭十號計畫科學酬載，上方共計有 6 項量測儀器，下方是電子系統。振動測試是利用震動機模擬火箭發射過程中所產生的各種主要振動模式，以驗證酬載承受這振動後仍能正常運作，是整個環境測試中的重要項目。（圖片來源：方惠寬）

另一個很重要的研究標的就是利用探空火箭了解對於載人太空載具的安全性探索，例如安全輻射劑量與各類防護設計的驗證。

截至目前為止，全世界已發射了上萬次探空火箭實驗。除了國家型的探空火箭計畫外，一些大學也擁有自己的發射基地，可以自行發射探空火箭，例如：美國阿拉斯加大學的波克弗萊特研究中心（Poker Flat Research Range），就是使用探空火箭進行極光研究的重鎮。

由於政治與軍事上的考量，探空火箭實驗不可能擅自到別國領空進行，否則會造成國際間的緊張，因此絕大多數只會在自己國家上空執行任務。目前在低緯度區的探空火箭實驗較為稀少，而台灣位於低緯度且在電

台灣在太空科學領域的研究已有相當的基礎，由於具有地理位置的獨特性，過去幾年我們的探空火箭實驗也善用了這地緣優勢積極發展。

離層赤道異常區下方，因此使用探空火箭進行電離層研究，如電漿不規則體、大氣輝光，以及電離層與增溫層的耦合過程等現象的探索實驗，是其他中高緯度區探空火箭實驗所無法取代的。這也使得台灣的探空火箭實驗具有太空科學地緣上的獨特性。

台灣探空火箭研發計畫自 1997 年由國家太空中心統籌負責，由中山科學研究院支援探空火箭技術，並由大學團隊進行實驗的規畫與酬載製作，至 2003 年為止共發射 3 枚探空火箭。在第二期國家太空科技發展長程計畫中成立了「次軌道科學實驗計畫」，透過公開徵求方式執行，同時鼓勵國內學術研究單位提出長程的科學研究及酬載儀器研製計畫，進而提升整個太空應用的層次。在 2004 年至 2014 年期間，共計在台灣上空進行了 7 次探空火箭實驗。

在這 10 次探空火箭實驗中，除了第一次是測試飛行，沒有攜帶酬載，僅蒐集溫度與震動資料外，其餘 9 次都有相關實驗的進行。台灣探空火箭的遠地點高度約在 200 ~ 300 公里，採大於 75 度以上仰角發射，可以攜帶大於 50 公斤的酬載，但從發射至墜海的實驗時間全程不超過 10 分鐘。

這 10 次探空火箭的實驗主要分為兩大類型：太空科學研究，包含了大氣中性風場量測（探二、探三）、大氣輝光光度量測（探四）、電離層電漿環境與不規則體量測（探五、探七、探九、探十）；工程技術開發與驗證，聯胺單基推進系統（探六）、回收艙實驗（探六、探八）、過氧化氫單基推進系統（探八）、微機電姿態量測儀與單軸光纖陀螺儀（探九）、火箭減轉實驗（探十）。

這些探空火箭的科學與工程實驗除了大幅提升了台灣在太空科學研究與酬載開發製

作的實力外，更成為衛星科學儀器與相關工程技術的前導實驗與驗證，對於台灣在和平太空實力的躍升扮演了重要的角色。

太空是人類的終極邊疆，也是目前世界各國在科學與工程領域中競逐的重要場域。經過數十年的努力，台灣在太空科學領域的研究已有相當的基礎；台灣的探空火箭由於具有地理位置的獨特性，過去幾年我們的探空火箭實驗也善用了這地緣優勢積極發展。除此之外，台灣在相關的電子、機械與材料領域都有不錯的基礎，自 1997 年起的探空火箭任務也培養了一批本土具有實作能力與國際競爭力的年輕科學家，繼續接棒前進。

探空火箭的酬載發展並不是一件簡單的工作，從科學任務構想開始，到點火升空需要耗時 2 ~ 4 年，這麼長時間的努力，只是為了 10 分鐘左右的飛行實驗。而任何微小的失誤都可能讓許多人長時間的努力付諸流水，因此探空火箭科學任務雖然實驗時間較短，但是在可靠度的要求上完全不會低於衛星任務，不只是科學，也是工程與管理上的挑戰。

在即將展開的第三期國家太空科技發展長程計畫中，可以預期會持續有探空火箭與科學相關的研究項目。太空科學與技術的發展一向都建立在「追夢」的基礎上，透過夢想落實而成就一頁頁的動人紀錄。希望台灣有更多具有太空夢想的年輕人加入這個領域！與火箭一起把台灣 launch to a higher altitude !

陳炳志  
成功大學太空與電漿科學研究所