



太空站——整裝——再出發

隨著國際太空站即將走入歷史，
民間企業紛紛想要接手布局，常駐低地球軌道。

撰文／布朗（David W. Brown） 翻譯／連育德

1993年6月23日，華府那天悶濕炎熱，但沒有人汗流的比太空總署署長高丁（Daniel Goldin）還多。他站在眾議院議事廳外頭，神經緊繃地看著電子記票板的投票情況。太空站看來過關無望了。美國當時已經斥資逾110億美元在籌備工作，相關文件數也數不清，但就缺硬體設施的經費。太空站究竟蓋不蓋得成，此刻只差議事廳裡的一張票。

太空站在當時彷彿是去留難料的政壇孤兒。這項歷時9年的計畫起於雷根執政時期，在小布希任內擴編，被視為是重返月球、甚至前進火星的計畫核心。後來柯林頓總統新科上任，高丁說服他保住太空

站，說不妨把這項計畫當成是後蘇聯時代的重建工程之一。蘇聯人擅長建造太空站，能夠幫太空總署省下高額研發經費，而太空總署取得資金後，也能讓俄羅斯籍的火箭科學家保住工作，不易被敵對國外勢力網羅。儘管如此，美國兩黨都對太空總署不滿，大家似乎覺得它的體制臃腫僵化。印地安納州的民主黨籍眾議員羅莫（Tim Roemer）希望大刀闊斧改制，於是提出太空總署授權法案的修正案，希望一舉砍掉太空站計畫。

投票前的這一天半，高丁已經打了上百通電話，希望說服議員支持，因為他認為太空站能夠發揮關鍵作用，有助於打造完全不同於地球的微重力

環境，研究生物醫學、電機學、材料工程與人體。來到外太空，物質小至分子會有截然不同的表現，而在太空梭進行試驗一次只能為期一週，得不到太多資訊。要做到實質研究，必須常駐太空，也就是要有太空站。

支持者在投票前覺得勝券在握，可能小贏個20票，但隨著投票時間拉長，雙方差距愈來愈小，只要有一方多了一票領先，就會開始鼓掌叫好。新科議員高達110人，沒有人曾對太空站相關法案投票表決過，如今看來不如預期值得信任。

投票到最後，215票對215票，剩下一票未投，那個人正是民權傳奇人物、代表喬治亞州的路易斯（John Lewis）。高丁的立法助理勞倫斯（Jeff Lawrence）在走廊看到路易斯走向議事廳，隨即要高丁趨前攀談，勢必要贏得他的支持。見路易斯走過眼前，高登只有一、兩秒的時間說話，於是直白以告：「路易斯議員，太空船計畫的未來握在您手上。」他又說：「國家就靠您了，您會怎麼投？」

路易斯邊走邊露出微笑，說：「我才不會告訴你哩！」

憑著他這一票，216對215票，這個後來稱為國際太空站（International Space Station）的計畫得以敗部復活。5年後，俄羅斯從哈薩克發射第一個模組；自2000年11月以來，外太空沒有一天無人駐守。

在太空總署設計下的國際太空站足以飛行20年，如今已超過年限6年，不過逐漸浮現老舊跡象，太空總署目前正在研究，如何在2030年前後安全破壞這座太空實驗室。過程必須出動一艘「離軌飛行器」，與面積如足球場大小（包括末端區）的國際太空站對接，以及發射數艘推進器，讓太空站在每秒環繞地球5哩的情況下，能夠正好墜落在太平洋中心，避免著陸或造成死傷。

然而，儘管太空站的燒焦殘骸沉入海底，美國的低地球軌道願景仍舊不減。對某些人而言，國際太空站當初並未如預期規畫，成為人類在太陽系拓展足跡的跳板，但它確實促進了材料與醫藥的基礎研究，也有助於我們瞭解太空對人體的影響。為了

接續相關研究，太空總署與民間企業合作，正在研發新的商用太空站，供研究、製造與旅遊之用。倘若研究成功，這些企業可望揭開太空探索的新頁，將民營火箭發射到私人目的地，也能向各界展示一種新的合作模式，亦即由太空總署打造基礎建設後，民營企業接手經營，讓前者得以進一步深入太空探險，而且這個過程可以不斷複製。雙方已經計畫以這個模式繞行月球，未來有機會輪到火星。

自太空時代開始以來，太空站便被視為是離開地球的關鍵設施。

1952年，身為美國太空計畫的主要策劃人布勞恩（Wernher von Braun），稱太空站「如旭日東升一樣可以預見」，還說太空站攸關探索計畫能否長期發展，可以降低成本與複雜性。他更提議在推動月球或火星計畫前先建立太空站，讓探險行動有個後勤中途站能夠補給和加油。

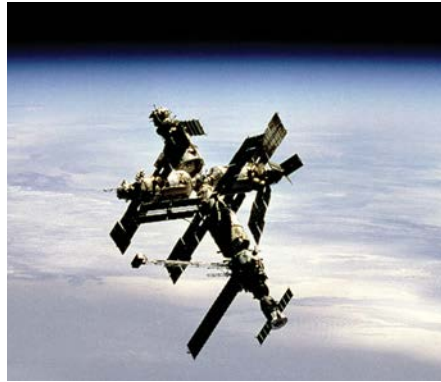
「進到1960年代，各界凝聚出共識和動力，認為太空探險會分成3個階段。」與人合著《太空家園：天空實驗室的故事》（Homesteading Space: The Skylab Story；暫譯）一書的歷史學家席特（David Hitt）說。第一步是運輸；先要設法離開地球，也就是興建基礎設施，打造與發射安全的火箭。第二步是住處；一旦到了太空，需要有安身之處，這個據點一方面是科學實驗室，一方面要當成地球與其他星體的後勤航點。「有了運輸與住處之後，」他說：「就可以採取下一步，也就是探索。」

這個觀念後來變了，因為蘇聯超前美國進入地球軌道，首先是1957年的史波尼克一號衛星（Sputnik I），1961年加加林（Yuri Gagarin）又成為前進太空的第一人。甘迺迪總統傾全國之力，誓言要在「這10年結束前」將人類送上月球，並安全返回地球。這樣的目標高得離譜，畢竟，太空總署才在三週前首度發射載人火箭。「動作只好加快，原本太空計畫有3個步驟，必須跳過第二步。」席特說：「事實證明，跳過住處那一步是可行的，美國登陸月球成功，但也因此無法奠定好基礎，建立起可以長期發展的太空計畫。」



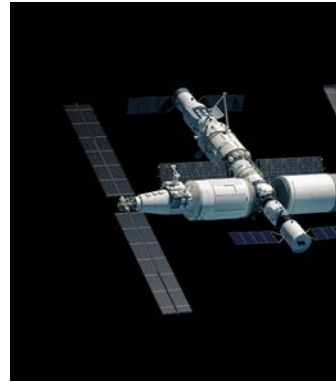
1973年

天空實驗室是美國首座太空站，由太空總署在農神五號火箭的末代飛行發射升空，時間是1973年5月14日。在天空實驗室之前，蘇聯已在1971年發射實驗性質的太空站，一直運作至1974年2月，期間陸續有3名太空人進駐。



1986年

1986年到2001年，和平號太空站由蘇聯與後來的俄羅斯運作。它歷時約10年在軌道上組裝完成，期間不僅曾有美國太空人進駐，亦寫下長時間太空飛行的紀錄，太空人停留時間長達數百天。



2021年

跟和平號一樣，中國的天宮號太空站亦在太空組裝完成，第一個模組在2021年4月發射升空，第三也是最後一個模組在2022年11月對接完成。中國無法參與國際太空站，因此選擇在低地球軌道單打獨鬥。



要做到這點，美國還在努力當中。最後一次阿波羅任務結束後兩年，太空總署發射美國第一座太空站「天空實驗室」（Skylab）。它由農神五號（Saturn V）的衛星火箭第二階段改造而成，規模龐大，長達99呎（30公尺），成為當時最重量級的太空載具。太空總署最終發動3次任務，每次有3名太空人前往，進行了逾百次實驗。

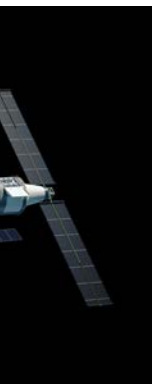
「真要說起來，天空實驗室才是美國的第一次太空任務。」席特說：「在那之前，我們執行的都是登月任務。即使追溯到水星計畫，還是始終以月球為目標。天空實驗室是第一個把太空當成目的地的計畫。」它的目標為後來的太空探索奠下基礎。「天空實驗室讓我們學到寶貴的一件事，就是人類確實能在太空環境中長時間生活和工作。如果我們真的考慮前進火星，花在太空的時間可能比停留在火星表面的時間多出很多。」

天空實驗室至今仍是唯一一個由美國建造與發射的太空站。1986年，蘇聯發射了和平號（Mir）太空站的第一個模組，準備像樂高積木一樣，一塊一塊組成太空站。太空總署當時已停用農神五號火箭，只好同樣採行模組化太空站的模式，最終與俄

羅斯等幾個國家合作打造國際太空站。它如今與中國的常駐太空站天宮號共享天際，天宮號的第一個模組在2021年發射升空。兩者都並非如布勞恩當初所設想，作為前進月球或火星的中途站；為此，美國太空總署正在規畫一個繞行月球的太空站，名為「門戶」（Gateway），最快在明年發射第一個模組。

儘管未能成為交通樞紐，但過去幾個太空站都促進重要研究，讓人瞭解長期處在太空對人體的影響。（俄羅斯太空人波利亞科夫（Valeri Polyakov）曾在和平號飛行長達437天，成為史上連續太空飛行時間最長的紀錄保持人。對於人體在太空的反應，研究人員仍舊所知不多。）30萬年以來，地球曾經存在過1千多億人，大家有著共同經驗，但人體仍舊是一個謎團。我們為什麼會打哈欠？應該吃什麼？過去63年，到過太空的人不到1千人，而這類研究只能在常駐太空站進行。

「在太空梭計畫的階段，我們研究了維持幾週的短期太空飛行對人體的影響。」太空總署人類研究計畫（Human Research Program）首席科學家普拉茲（Steven Platts）說。其中一個問題是「姿態性低血壓」，亦即人體無法調節血壓。組員返回地球後，約



2025年 (規劃中)

為了搭配重返月球的計畫，太空總署正與國際夥伴合作，打造繞行月球軌道的「門戶」太空站，未來將供研究之用，並支援在月球表面與更遠星體的探索行動，最快將在2025年開始發射模組進行組裝。



有四分之一的人會出現這個症狀。太空總署和俄羅斯啟動國際太空站後，飛行時間從幾星期拉長到幾個月，患者比重激增到8成。「我們花了很多時間瞭解這個機制，最後找出解決措施，現在已經認定沒有這個風險。」他說。

其他問題還包括太空飛行相關神經性眼症候群（spaceflight-associated neuro-ocular syndrome），也就是眼睛的結構與功能出現變化，研究人員約在10年前首度發現這個情況。「之前在太空梭上不會這樣，但隨著太空站任務愈來愈多，問題開始浮現。」普拉茲說。他們還發現大腦結構出現細微變化，只是不知道長期有何影響：「這是相對較新的風險，我們在太空站任務前並沒有發現。」

他說，整體來看，人體在太空自我調節機能的能力「很驚人」。他的小組正在研究太空探索對人類的約30種風險，以顏色編碼，綠色代表問題控制得宜，黃色代表中等風險，紅色代表必須在任務有可行性之前解決。「低地球軌道目前沒有紅色風險，全都是黃色和綠色。我們對問題有相當瞭解，也有解決方法。但換成月球相關計畫，就出現更多黃色和一些紅色。火星計畫的紅色更多。」普拉茲說：「我們現在已經

「即使追溯到水星計畫，目標還是在月球。天空實驗室是第一個把太空當成目的地的計畫。」

預見問題，正在從研究或工程的角度努力解決。」

有些問題只有在進一步深入太空後才能研究，例如火星塵埃對人體的長期影響。有些問題可以在接近地球的地方研究，例如無預警出現精神疾病。

太空總署等機構正在國際太空站研究這些問題，待太空站退役後，相關研究仍有必要持續下去。正因如此，必須有其他機構組織發射下一個太空站，而且事不宜遲。為此，太空總署繼2006年到2011年與SpaceX合作後，陸續小幅注資幾家企業，承諾在未來的太空站向企業租借空間。現階段最有機會率先發射的企業，位於德州一處購物中心內、曾是傅萊氏電器城（Fry's Electronics）零售店面的據點，而且面積還在拓展當中。

1月某天早晨，天空陰暗，下著毛毛雨，我來到位於休士頓的「太空站發展設施」（Space Station Development Facility），在入口處與艾翔太空（Axiom Space，暫譯）的技術長貝恩（Michael Baine）見面。貝恩的第一份工作就在同一條路上的太空總署強森太空中心（Johnson Space Center），在裡頭負責過太空梭、太空站、實驗性月球登陸器等，什麼都做過。他後來離開太空總署，轉戰到直覺機器公司（Intuitive Machines）擔任首席工程師。今年2月，該公司的Nova-C太空船奧德賽號（Odyssey）成功登陸月球，成為1972年阿波羅計畫結束後第一艘登月的美國太空船，直觀機器也成了第一家成功登陸任何星體的民營企業。貝恩自2016年起任職於艾翔太空，這家新創企業的長期目標是建立第一座民營商業太空站，目前已成功籌組與完成3趟前往國際太空站的企業內部任務，旨在第一手研究人類在太空如何工作和生活，藉此設計更人性化的產品。

有意發射民營太空站的企業，並非只有艾翔一家。其中最受關注的是，藍源（Blue Origin）



在2021年宣布與航太公司「內華達山脈」(Sierra Nevada)合作，計畫興建有如「多用途商業園區」的軌道礁(Orbital Reef)，能夠在低地球軌道同時支援高達10個人工作。1月時，內華達山脈針對住宿模組的三分之一比例測試樣品進行壓力測試，希望在2027年透過藍源的新格倫火箭(New Glenn)，將太空站發射到軌道。其他企業如洛克希德馬丁(Lockheed Martin)，也已經進軍這塊市場，但進展仍是未知數。

貝恩帶我走進廠房時說，艾翔計畫以截然不同的方式建造軌道設施。往上一看，天花板懸掛著幾個龐大的低擬真太空船模型，其中一個仿製太空站組員的實驗性緊急返回載具，稱為X-38，另一個則仿製Zvezda，這是國際太空站的俄羅斯區塊，實體如今已經老舊而布滿裂痕，導致漏水，組員載具已不再與它對接。

「要打造一個完整又自給自足的太空站，然後一次發射到太空，是很高難度的事。」貝恩邊說，邊帶我走過天花板模型下的開放式辦公空間，約有500名男男女女正在設計太空站，計畫取代Zvezda與國際太空站的其他區塊。「應該是要在太空一件一件組裝。最簡單的方法就是從既有的東西下手。」

那個「東西」就是國際太空站本身。貝恩預計在2026年發射艾翔哈伯一號(Axiom Hab One)，這是一個圓柱形模組，有組員住宿區也有生產能力，將與國際太空站的一個開放端口對接。艾翔未來還計畫發射哈伯二號，拓展居住、科學與製造服務，後續希望發射一個研究和製造設施，配備空間寬敞、完全以玻璃覆蓋的圓頂，讓艾翔的太空人與太空站訪客有絕佳視野，看到地球全景與太空站總長。最後，該公司計畫發射一個「功率熱模組」，上頭配備有大型太陽能板、加強版維生系統與酬載能力。

每個區塊經設計可以連接到前一個區塊，但如此規劃並

非有特別的目標，而是期限在即的實務考量。除非國際太空站迴光反照，否則每個環節必須在2030年前發射組裝完成。一旦太空總署正式宣布國際太空站任務結束，宛如樂高積木的艾翔太空站將會從國際太空站拆離，獨立運作且完全自給自足。離軌飛行器接著執行任務，將國際太空站推進大海。

「能夠把國際太空站當成站點，逐一打造我們的太空站，大大降低了風險。」貝恩解釋道。這項計畫同時也蘊藏龐大商機。國際太空站已經有來自全球的使用者，有企業也有研究人員，會把任務送到太空站執行。「如果商業太空站的位置就在國際太空站，要說服使用者搬過來就容易多了。」他說。無論是技術介面或艾翔太空站處理材料釋氣的方法，都會與國際太空站的現行硬體相容。「我們必須符合太空總署的標準。」

許多人看好低地球軌道存在著龐大商機，因此艾翔太空站不會花到美國納稅人的錢。儘管太空總署未來打算租用哈伯一號的空間，也已經投入數千萬美元啟動初期開發階段，但這座商業太空站的建造資金仍舊來自民間投資，金額高達幾億美元。艾翔正在推動太空站的商業研究與產能，這點正是太空總署在高丁擔任署長時的初衷。

「我們希望把太空梭、太空站這些設施的鑰匙交給民間企業。」前太空總署副署長、著有《逃離地心引力》(Escaping Gravity；暫譯)的賈佛(Lori Garver)說：「高丁覺得，如果能將低地球軌道的基礎設施轉交出去，太空總署就能進一步深入太空探索，我相當認同這點。」賈佛後來首創商業太空飛行模式，帶動SpaceX等企業接手發射服務，不僅為太空總署省下數十億美元，同時也加快發射頻率，這套模式後來更催生出艾翔的太空站計畫。



← 艾翔太空公司的執行長貝恩，他的第一份工作就在太空總署強森太空中心。



← 哈伯一號的實體模型，未來會建有組員住宿區與產能區。



← 模組內部模型。

「我們在1998年發射第一個模組後，便宣布太空開放商業使用。」賈佛說。第一個接洽的人是莊臣（S.C. Johnson & Son）公司的強生（Fisk Johnson），他希望與太空總署合作研發生物反應器，在微重力環境中研發肝病新藥。「我跟他太空總署合作了3年左右。」賈佛說：「但不幸的是，他們飛行的哥倫比亞號發生慘劇，那次實驗無疾而終。」

往後幾十年，商業研發活動持續增加，但不無限制。太空總署、俄羅斯和其他合作國家當初設計國際太空站時，本意不在於建造大型的研發與製造設施。至今也沒有企業願意買下太空站，因為重新整修的工程複雜，成本又高，還不如像艾翔一樣打造全新太空站，或在新太空站租用空間。

來到建築物最末端，眼前是等比例的哈伯一號模型，相當壯觀。我問貝恩，有太空總署現行的技術方案為基礎（例如環境系統的運作方式），艾翔太空站的建造工程是否更容易。

「照理應該如此。」他回說：「但建造標準非常嚴苛，需要高度注重細節。」為了符合國際太空站的介面要求，必須進行大量測試和分析，很花工夫，「但最終的結構或零組件相當可靠，發生失誤而導致組員傷亡的可能性非常低。」

看到模型，我才意識到這個飛行器的龐大。它最寬處達15呎（4.6公尺），長36呎。重達30噸的哈伯一號，可容納4名太空人，未來一旦與國際太空站對接，將成為太空站最長的艙段。

「我們希望把太空梭、太空站這些設施的鑰匙交給民間企業。」

在太空站發展設施裡，整個模型全由CNC車床加工木製，雖然還在「模型階段」，但模組工程其實已有相當進度，壓力艙（亦即模組主體，能在太空的真空環境中保存空氣，並維持類似地球的壓力環境）與艙門都已大致完工，很快將由義大利一家承包商運回，國際太空站有許多模組先前也出自同一家承包商之手。我跟著貝恩走過一處分區，裡頭正在研發艾翔太空站的航空電子、推進系統、維生系統、通信和其他子系統。這裡畢竟以前是傅萊氏電器城，眼前各項系統頗有自製的感覺，其中不少系統都散落擺在桌上，由電線、線管、電路板、晶片所組成，錯綜複雜。太空站將採Linux運作系統。

艾翔建造這個模型，是希望克服一個極為根本的問題，類似工程都會面臨這樣的考驗：把壓力艙和無數個子系統與零部件打造成安全的太空飛行器。壓力艙不能鑽洞，就跟氣球被戳了洞就無法保持形狀一樣，所以艾翔必須從模組的裡頭和周圍興建。「這個問題好比製作瓶中船一樣。」貝恩說：「必須從一個50吋的艙口把所有系統放進去，再組合起來。」他說這是最難的考驗之一，因為不只要在休斯頓把各個系統組裝到壓力艙裡，還要設想到太空站上了軌道是否容易維修，以防到時出現技術問題。



民間太空飛行發展至今，最為人知的用途可能當屬旅遊與研究，但艾翔對太空站的功能還有其他想法，包括協助其他國家首度將人類送上太空。該公司去年宣布推出艾翔太空訪問計畫（Axiom Space Access Program），營收長巴帝亞（Tejpal Bhatia）說這是為全球各國設計的「套裝版太空計畫」。艾翔表示，這項計畫還在調整變動當中，但讓太空參與成了可能。亞塞拜然是第一個加入的國家。

但短期來看，最有潛在商機的一個領域是製造業。低地球軌道的環境尤其有利於3個製造領域，包括製藥、冶金和光學。微重力消除了製程中可能干



↑ 上：艾翔的研發設施座落於德州一處購物中心以前的零售店面，面積還在拓展當中，這裡的前身是傅萊氏電器城。

下：透過艾翔太空站地球觀測模組，太空人將享有360度視野。

「這個問題好比製作瓶中船一樣，必須從一個50吋的艙口把所有系統放進去，再組合起來。」

擾敏感步驟的多種物理現象，讓材料的性能和結構能夠更為一致。艾翔與藍源認為，現代太空站的興建取經於國際太空站這幾十年的經驗（但又非承襲1980與1990年代的技術），未來可望帶來豐富收穫。

為了鼓勵企業打造太空站，太空總署承諾，只要這些太空站符合總署針對載人太空飛行設下的嚴格要求，未來將願意租用空間。正如大型購物中心一樣，有個「重量級租戶」有助於財務穩定，也能招來更多租戶。為了增加企業動機，位於佛州墨爾本（Melbourne）的一處國家實驗室鎖定非航太企業，專門資助和扶植可能受惠於微重力研究的公司。

生物醫學可能是研究成效最佳、最快發揮影響力的領域。由分子生物學家瓦格娜（Nicole Wagner）與伯格（Robert Birge）在2009年成立的藍達視界（LambdaVision，暫譯）是最好的例證，它雖然讓人窺見低地球軌道的前景，卻不是一家航太公司，而是傳統生技公司，研究一種稱為菌視紫蛋白（bacteriorhodopsin）的蛋白質與它恢復神經功能的潛力。菌視紫蛋白是一種「質子泵」，功能如其名，能將這個細胞的質子抽送到另一個細胞。

他們聚焦在色素性視網膜炎與黃斑部病變的問題。在健康的眼睛中，感光細胞（桿狀細胞與錐狀細胞）吸收光線，轉化成訊號，傳送到雙極細胞與神經節細胞，最後到達視神經。如果患有這兩種疾病，桿狀細胞與錐狀細胞開始死亡，一旦全部消失，就沒有細胞能夠接收光線，再轉換為發送到大腦的訊號。影響全球約150萬人的色素性視網膜炎，首先會影響周邊視力，接著往內惡化，導致嚴重的隧道視力，最終完全失明。黃斑部病變剛好相反，先是影響中央視力，然後向外擴散；全球約有3千萬名患者。這兩種眼疾目前都能治療，但即使是最好的療法，也只能減緩病程，最終還是會導致失明，屆時便無法治療。

「我從沒想過可以在太空做什麼事，我不知道怎麼上太空或或在太空怎麼運作，以前只覺得是科幻小說情節。」

藍達視界想出一個可能的解方。他們研發出一個簡單有彈性的植入物，大小約為打孔機打出的圓圈，厚度與美工紙一樣，植入後可望取代受損的感光細胞，進而恢復完整視力。原則上，醫生可以將它植入在眼睛後方，就跟治療視網膜脫落一樣，甚至不必再接受專業訓練。

問題在於這個人工視網膜的製造。植入物需要使用支架，亦即編織緊密、類似紗布的多孔材料，再結合一個聚合物。有了這個基底，研究人員開始交替放上一層接一層的菌視紫蛋白與聚合物。累積一定層次後，蛋白質能夠吸收足夠光線，把質子（尤其是氫離子）送往雙極細胞與神經節細胞，再由它們負責恢復清晰視力。

為了達到多層塗層，科學家必須準備許多裝有溶液的燒杯，將支架浸在一個燒杯的溶液後，再移到下一個，不斷重複這個過程。問題是，溶液無法保持完美狀態，會有東西漂浮、沉澱、形成沉積物、蒸發，會有對流現象，表面張力也會變化，只要一個變化與瑕疵，都可能導致那一層出現缺陷。

植入物如果需要200層，第50層出現瑕疵，最終只會把錯誤愈來愈放大。這樣的製程顯然沒有效率，而且充滿不規則的蛋白沉積。初期試驗顯示，這個問題會影響人工視網膜的功能。

藍達視界當初加入波士頓的「大挑戰」（MassChallenge）企業育成計畫，正是希望解決這個難題。2017年某天，瓦格娜正在這裡的共同工作空間中工作，又是開放式格局，放眼又是人才濟濟，讓她覺得有股置身Google的感覺。她坐在分配到的辦公桌前，突然有人過來說，國際太空站國家實驗室（International Space Station National Laboratory）正在旁邊會議室舉辦午餐簡報，有免費披薩可吃。

瓦格娜心想有何不可，聽聽太空總署專家聊月球和火星，應該很有趣。怎知到了會場，她才發現演

講內容非她所想，太空科學促進中心（CASIS；經營國家實驗室的非營利組織）的專家講的是：如何利用微重力幫助地球的人類。

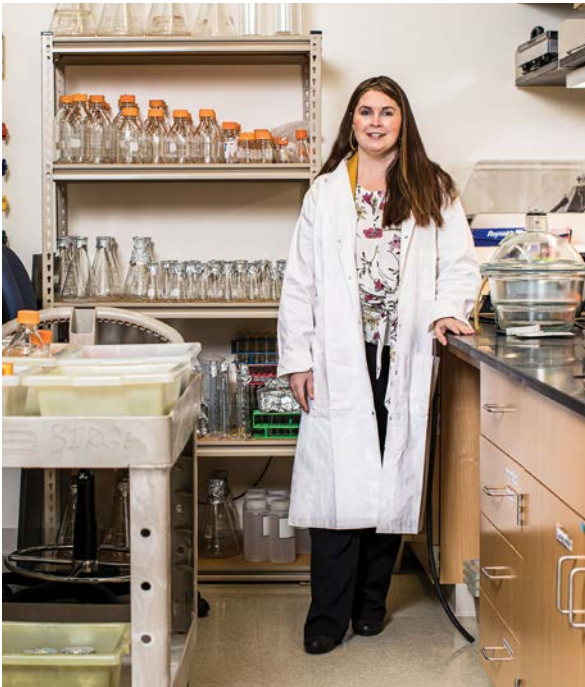
國際太空站的美國艙段好比洛色拉莫士（Los Alamos）、橡樹嶺（Oak Ridge）、布魯克赫文（Brookhaven）等單位，同樣是致力於科學與技術研究的國家實驗室，只是窗外視野更好。在美國艙段進行的科學研究，約有半數由位於佛州的國際太空站國家實驗室負責，其餘由太空總署監管。資源如此分配，有利於在太空進行多元化的科學研究。太空總署的研究通常側重探索、太空技術與基礎科學，以期推廣未來的深太空任務；國際太空站國家實驗室的目標則是打造可永續發展的低地球軌道經濟，範圍涵蓋材料科學、生物學、製藥研究與技術發展等領域。

國際太空站目前正在研究冶金與光纖。鎳鈦合金這類的合金能夠承受溫度大幅變動，也極具彈性，在醫療設備、航太與機器人領域的應用潛力龐大，人工肌肉即是一例。問題是，在地球製造鎳鈦合金的難度很高，因為材料會沉澱，而且製程的高溫可能分布不均，導致產品品質不穩定。在地球製造光纖也有同樣問題，會降低光纖品質。

要解決兩者的問題就是上太空：在微重力的環境中，熱能分布更平均，也不會有沉澱現象。晶化是晶體形成與生長的過程，長距離也能保持品質一致，劣化程度極小，因此光纖訊號經過很長的距離也能完好如初。但拉大格局，太空晶體學幾乎在電子與生物醫學每個領域都能找到用途。

正如瓦格娜所發現，研究人員如今在太空站已看到許多立刻可見的成效，例如研發更有效的疫苗（地心引力會破壞抗原與佐劑的交互作用）、更高等級的藥物配製、奈米粒子懸浮液（nanoparticle suspension）等。大鵬藥品（Taiho Pharmaceutical）便以這個方式研發出一款新藥，用於治療肌肉萎縮症，目前已進入最後階段試驗。

「他們當時探討的是在軌道上進行生物列印這些議題，未來又有何任務規畫。」瓦格娜說：「我立刻覺得很適合我們，可以利用微重力來製造人工視網膜。我從沒想過可以在太空做什麼事，我不知道怎



↑ 瓦格娜是藍達視界的共同創辦人。這家生技新創企業正在低地球軌道研發人工視網膜。

麼上太空或在太空怎麼運作，以前只覺得這是科幻小說情節。」

聽完演講後，她隨即打電話給團隊。「我覺得我們有機會贏到獎金。」她說。她指的大獎是太空科學促進中心與波音合辦的太空技術獎（Technology in Space Prize），旨在資助可能受惠於太空站資源的研究。「我們一定要申請。」

她的團隊一聽，心中立刻打上問號，但她自己其實也有疑慮。她的公司是小型新創企業，要如何成立小型的自動化科學實驗室？如何裝置在國際太空站？如何與地球溝通？又如何負擔得起？她打開網路瀏覽器，打入「樹莓派」（raspberry pi；一種單板電腦）與「太空站通訊」，想一探究竟。

「我當初對太空的看法就是這麼單純。」她說。她不久便發現，她的公司正是所謂的「太空附屬」（space adjacent）企業，亦即並非直接隸屬於航太產業，但業務在太空可能受惠，甚至做得更好。

她發現公司不必成立自己的任務控制中心與太空基礎設施，鬆了一口氣。這些設施都已經存在，也有夥伴企業專攻太空附屬業務。藍達視界與聚焦

在太空打造健康與科技產品的太空探戈公司（Space Tango）合作，研發相關硬體。兩者成功將開放式燒杯系統壓縮在一個自動化實驗裝置，只有鞋盒大小。而且她有件事一開始就說對了：他們最後拿到大獎。

2018年底，藍達視界的第一次任務升空，成果讓人看到後續潛力。公司後續幾年又獲得額外資金，先後9度前進國際太空站，最近一次是在今年1月30日。隨著每次任務的完成，他們也逐步改善製造硬體、系統自動化與成像技術、軌道製程等。「在微重力的環境中，薄膜更均勻了，我們也克服了重力環境下的其他挑戰。」瓦格娜說：「減少了很多浪費。」

這套系統能夠自主運行，不必太空人出手協助。簡單來說，藍達視界團隊把它組裝在小盒子中，由太空人在國際太空站插入電源，製造出一片又一片的人工視網膜後，太空人再拔除電源，寄回地球。

「我們起初只是想知道在太空是否可行。」瓦格娜說：「現在已經沒有這個煩惱，我們努力在想的是怎麼擴大規模。初期臨床試驗不需要數百個人工視網膜，只需要幾百個或幾千個就好，所以有時間思考如何擴大規模，因為未來要逐漸從公共的國際太空站轉到在地低地球軌道的民營商業太空站。」

現階段而言，藍達視界已經在老鼠進行小型動物研究，也在豬隻進行大型動物研究，成功植入人工視網膜，證實耐受性佳。該公司正在持續進行臨床前開發，例如測試人工視網膜的效用與安全性，為臨床試驗做準備，目標最快在2027年初開始人體試驗。



↑ 藍達視界的人造視網膜（右）可在小盒子（左）裡製造，不需太空人動手協助。



← 太空總署「居住後勤前哨站」模組的實體模型，這是門戶太空站計畫的第一個艙段。

現在想到上太空執行任務和相關成本與效率時，我覺得跟別人說要前進中國或加州沒有兩樣。」瓦格娜說：「太空站其實更近，離地面只有250哩，但加州在3千哩以外的地方。」

如果藍達視界研發成功，光是這點幾乎就值得眾議員路易斯在31年前投下那張表決票；能治癒幾百萬名的失明人，是多麼深遠的成就。然而，有機會翻轉眾人的生活固然是好事，但如果國際太空站能真正拿出實績，可能才是它最重大的成就之一。

在太空站研發成功的主要藥品，目前尚無一款上市。低地球軌道尚未催生出能夠量產的技術。相關研究以迭代為主，太空製造也仍處於初期階段。歐瑞利亞研究所（Aurelia Institute）是一家致力於研究太空建築「關鍵路徑」基礎設施的非營利太空研究中心，其執行長艾布蘿（Ariel Ekblaw）有不同看法，認為太空總署在國際太空站打下深厚基礎，讓下一代的產品導向工作得以成真。

「高丁可能走在時代尖端，認為這類研究可以在人類第一座大型國際太空站的服役期間完成。」她說：「我們現在看到的不只是基礎科學，還有生技公司這樣的機構從太空總署與國家實驗室過去20多年的經驗取經，冀望在太空量產產品或基礎設施。」

如果低地球軌道成功從太空總署交付給民間企業，可能讓人一窺月球經濟的未來，前景值得期待。與低地球軌道一樣，太空總署正按部就班在月球建立基礎設施，針對月球探索解決根本問題。未來將會繞行月球的門戶太空站，是一項由太空總署主導的國際計畫，目前正處於積極研發階段，預訂最快明年

發射「居住後勤前哨站」（Habitation and Logistics Outpost）模組。門戶太空站代表長期月球計畫的「第二步」，亦即阿波羅計畫在60年前捨棄的那個環節。透過太空站，太空總署希望能常駐月球表面。

倘若低地球軌道的運作模式證實可行，太空總署有一天可能將月球任務交給民間企業，轉而放眼火星。光是在月球取水，就有可能帶來龐大商機，更別說開採製造業需要的稀土元素了。

說來諷刺，空間是太空相關工作進展的一大限制。「情況好的時候，國際太空站與天宮號合計可容納11人。」艾布蘿說。民營太空站的時代將帶來徹底改變，原因之一在於空間更大，得以容納更多研究人員。

艾翔公司希望每5年將太空基礎設施增加一倍，包括在軌道的人員、託管酬載、產能等。

「在2、3年內，我能預見艾翔把研究生送上太空。」艾布蘿說：「籌資時需要發揮一點想像力，但我認為有很多可能性。」她說，以前要是有博士研究員能把實驗搭上一次升空任務，就已經無比幸運，但現在連研究生也能進行太空實驗，而且連續數次，全是因為商業太空飛行帶來更多機會。展望未來，科學家不必再依賴太空總署太空人代勞，讓太空人專心在自己的無數任務，以及當自己的小白鼠，科學家可望自己前進太空，自行從事研究工作。

「這樣的未來離我們已經很近。」她說。■

布朗是住在紐奧良的作者，他的新書《局外貓》（The Outside Cats；暫譯）講述他與極地探險隊共闖南極洲的故事，將由Mariner Books出版社發行。

Copyright©2024, Technology Review. All Rights Reserved.