

# 想飛——航向太空

每當我們仰望天空，羨慕鳥兒能在天空飛翔，由於受到地球重力的影響，我們只能在地面上活動，但我們始終沒有放棄飛行的夢想，經由數代人的努力，不但實現了飛行的夢想，還飛向月球及其他星球，飛行所包含的主要科學原理涵蓋牛頓力學、流體力學、天文學等領域，接下來就簡要為大家介紹一下相關的科學原理。

## 氣球為什麼會上升—阿基米德原理

我們都知道地球有大氣層，大氣層的氣體分子有質量，依據牛頓萬有引力定律，氣體分子受到地球重力影響而形成大氣層，因此就有大氣壓力，然而物體離地球表面越遠，所受到地球的重力影響就越低，所以越高的地方，空氣就越稀薄，那麼大氣層與太空的邊界在哪裡？一般說來，海拔100公里以外的地方就可稱為太空，而大氣層與太空的邊界稱為卡門線。

現在我們想想，如何克服地球重力，離開地面呢？由於空氣會流動，沒



圖1. 阿基米德原理。圖片參考資料來源：維基百科及大英百科

有一定的形態，流動速度快時會產生渦流、擾流，所以流體力學是研究飛行的力學基礎。流體力學的一個基本原理是「浮力原理」，又稱「阿基米德原理」，阿基米德指出物體在流體中所受到的浮力，其大小與物體所排開流體的重力相等，所以我們只要找到一種比空氣輕的氣體，並將該氣體封在密閉氣球裡，氣球就會升空離開地表。雖然氫氣、氦氣都比空氣輕，但氫氣活性高，用氫氣做的飛行船有相當的危險性，1937年興登堡號飛船爆炸就是極為著名的案例。而氦氣是惰性氣體，所以升空氣球主要是氦氣球，但氦氣價格昂貴。氦的發現與天文觀測有關，科學家於1868年在觀測日全食時發現一條未知的黃色光譜，推測這條光譜來自一種新元素，並以希臘神話太陽神赫利奧斯（Helios）的名字來命名此元素，後來我們從地球瀝青鈾礦中分離出氦，宇宙中氦是除氫原子外第二輕且含量第二高的元素。

充滿氫氣的氣球能上升多高呢？氣球飛行的高度受限於氣球材質和阿基米德原理，所以，我們不可能乘坐氫氣球到太空。那麼，有沒有其他方法可以得到升力呢？有的，那就是利用白努利定律，飛機就是利用白努利定律而使機翼得到升力。



圖3. 氦光譜線。圖片來源：NASA

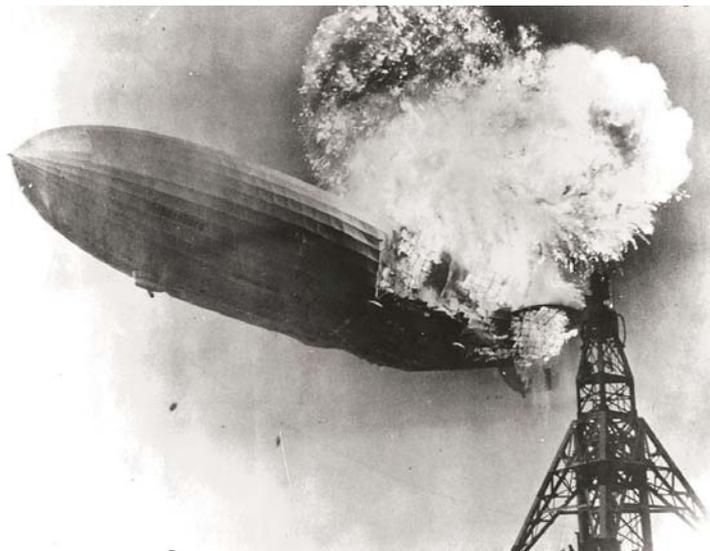


圖2. 1937年興登堡號飛船爆炸。圖片來源：維基百科

## 飛機為什麼會飛起來 — 白努利定律

科學家白努利在研究穩定、非黏性、不可壓縮流體的流線行為時發現「白努利原理」，白努利定律指出，流體的速度如果越快，則其壓力也就越低，反之亦然。依據白努利定律，可說明飛機的升力是機翼上、下半部所受到的壓力差所產生的，然而，白努利定律一般應用於流體速度不高的情況，但實際上空氣並非是無黏性、不可壓縮的流體，當空氣流動的速度在垂直流速的方向上有變化時，就要考量空氣分子間的黏滯力及空氣的壓縮性，所以

### 白努利定律於飛機升力應用

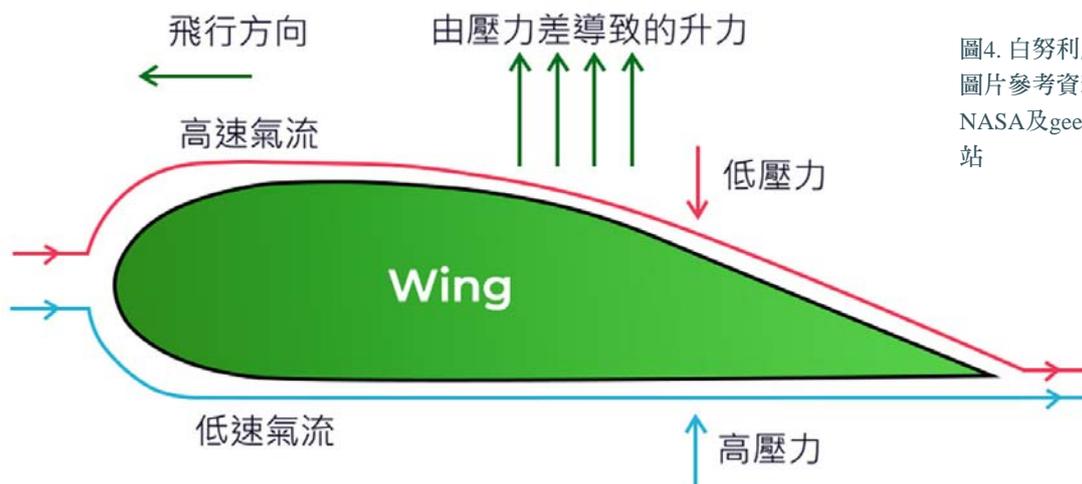


圖4. 白努利原理。  
圖片參考資料來源：  
NASA及geeksforgEEKS網站

在不同狀況下空氣的密度是不同的。接下來，我們將介紹與高速飛行有關的馬赫數。

## 馬赫數與音速

由於聲音在空氣中的傳播速度與當地的大氣溫度和密度等因素有關，科學家馬赫（Ernst Mach）將物體在空氣（流場）中的速度與該點音速的比值稱為馬赫數（ $M$ ），馬赫數大於1表示物體的速度大於音速，一般描述飛機、火箭等飛行器速度都會用到馬赫數，馬赫數是衡量空氣壓縮性的重要的參數，當馬赫數約小於0.3時，空氣所受的壓力不足以壓縮空氣，空氣會流動且空氣密度一般不隨壓力而改變，但如果物體在空氣中以接近音速或大於音速的速度運動時，空氣密度會隨壓力而改變，並產生震波、氣動加熱、甚至氣體電離等，這些都與太空船的設計息息相關。

在航空動力學的研究中，馬赫數與飛行器的噴嘴設計及音障等有關，為了超過音速，飛行器的噴嘴設計是否要越來越窄呢？實際上並非如此。

## 德拉瓦噴嘴

1888年，瑞典德拉瓦（Gustaf de Laval）設計一個中間收縮、不對稱沙漏狀的噴嘴，可將通過它的熱壓縮氣體加速到超音速，氣體在截面積最小處的速度恰好達到音速，稱為德拉瓦噴嘴，流體速度在低於音速的情況下（ $M < 1$ ），管路變窄的噴嘴設計可使流過的氣體加速，但流體的速度若要超過音速（ $M > 1$ ），只有管路逐漸變寬的噴嘴設計才可使流過的氣體加速，德拉瓦噴嘴中間喉部部分，流體速度等於音速（ $M = 1$ ）。

羅伯特·戈達德設計的火箭發動機就用到該噴嘴設計，現今大多數使用高溫燃燒氣體的超音速噴氣發動機及現代火箭發動機都使用德拉瓦噴嘴，類似的流動性質研究亦可應用於天體物理學中的噴射流。

## 震波

當物體移動的速度超過聲音的速度時，物體產生的聲波波前將會疊加累積，形成空氣壓力、溫

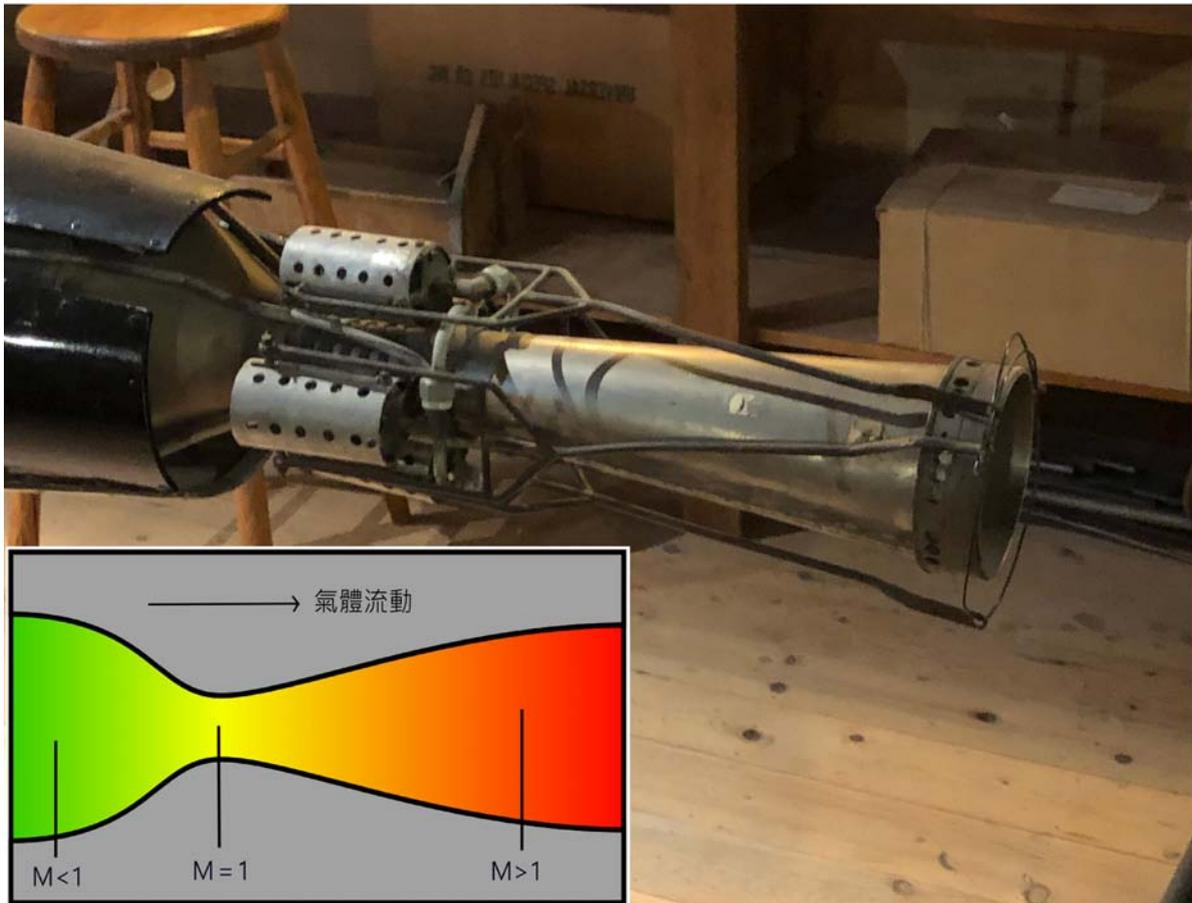


圖5. 德拉瓦噴嘴。圖片參考資料來源：維基百科



圖6. 普朗特-格勞爾凝結雲及震波示意圖。圖片參考資料來源：U.S. Navy及維基百科

度、密度等發生急遽的變化的震波面，該震波面將增加空氣對飛行器的阻力，俗稱音障。除此之外，隨著突破音速，超音速飛行還常伴隨出現音爆及普朗特-格勞爾凝結雲（Prandtl-Glauert condensation clouds）的現象。

由於爆炸或高速飛行產生的震波會對生物或電子設備造成損害，所以火箭點火升空時「保護與降噪系統」會噴出大量的水用來冷卻發射臺溫度及吸收火箭起飛時產生的震波，火箭發射時所看到瞬間湧出的白煙是這些水被蒸發成的水蒸氣，千萬不要把那些白煙誤當成火箭排出的廢氣。

以上所談的飛行原理皆與空氣有關，但是離地越高，空氣越稀薄，想想如果到了沒有空氣的太空，太空船要如何飛行呢？這時就要應用牛頓第三運動定律。

## 火箭飛行原理 -作用力與反作用力定律

牛頓第三運動定律表示，當兩個物體有交互作用時，彼此施加於對方的力，其大小相等、方向相反。一般我們會先用巨型火箭將太空船推送至太空，將燃料燃燒後的廢氣高速向後拋射可使火箭向前飛行。化學燃料火箭的燃料和氧化劑可以是固態、液態或混合式，燃料



圖7. 火箭起飛時使用大量的水來降噪。圖片來源：NASA

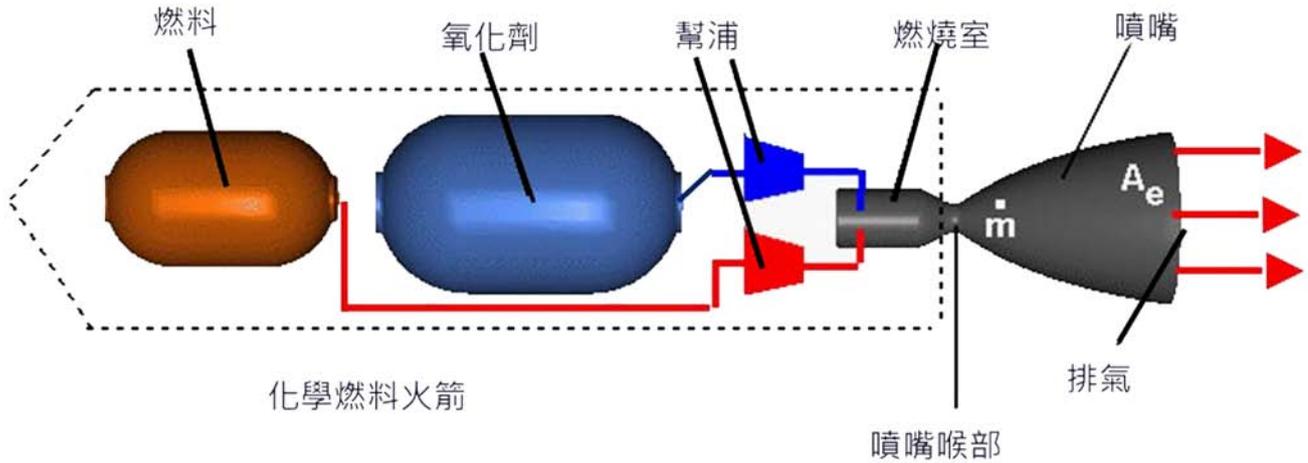


圖8. 化學燃料火箭。圖片來源：NASA

噴射速度越快，噴射前後火箭總質量差距越大，火箭所產生的速度變化也就越大，目前大推力的火箭仍是以化學燃料火箭為主。

然而在太空中，離子引擎比化學燃料火箭更有效率（火箭的里程與燃料比），常見的燃料是氫氣，運行在穀神星軌道上的曙光號（Dawn）正是使用離子引擎。離子火箭雖然效率高，但其推力很低，所以必須靠長時間的加速來達到高速，目前的離子火

箭有氫離子火箭及碘動力離子火箭，碘動力火箭系統還可能影響小型衛星的设计理念。

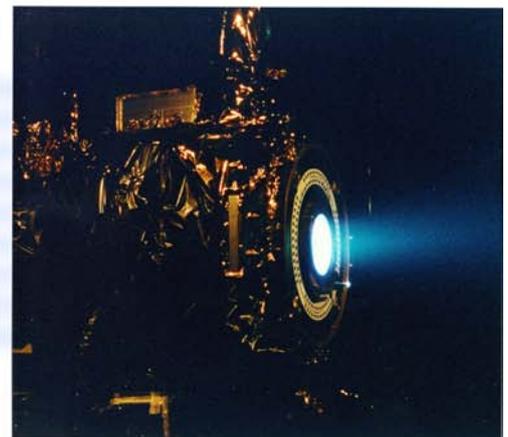
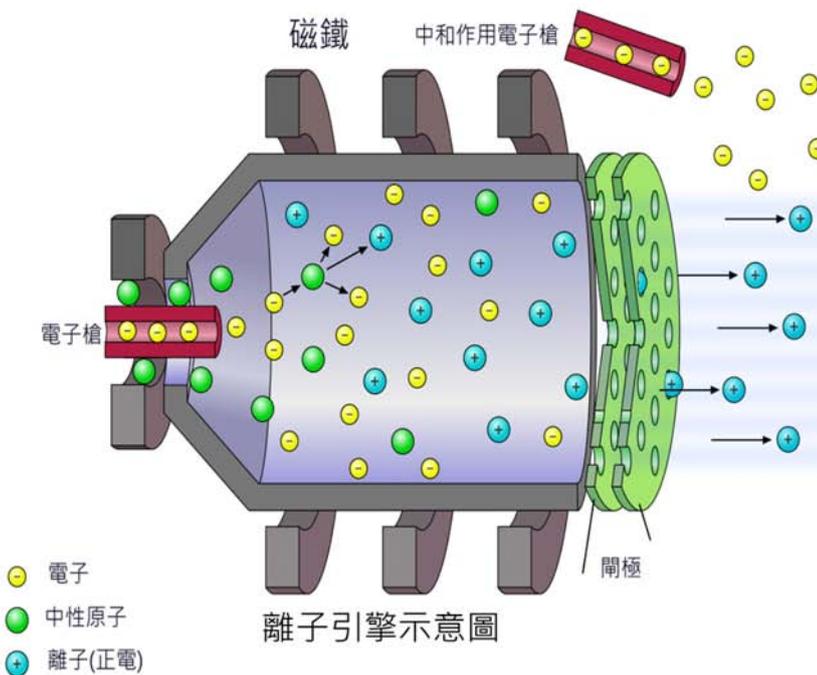
### 宇宙速度

想要太空旅行，就必須根據任務需要，計算從地面發射的太空船需要達到多大的速度才能克服星球重力，當物體的速度達到7.9公里/秒（第一宇宙速度）以上時物體就能繞地球作圓周運動飛行而不落回

地面（人造衛星）；當物體速度約為11.2公里/秒（第二宇宙速度）以上就能脫離地球重力；當物體速度達到16.7公里/秒（第三宇宙速度）時就能離開太陽系。

### 克卜勒定律與霍曼轉移軌道

1969年人類首次踏上月球（地月距離約38萬公里），但如果我們打算登陸距離地球約7,800萬公里



NASA深空一號探測器的離子引擎

圖9. 離子引擎。圖片參考資料來源：NASA

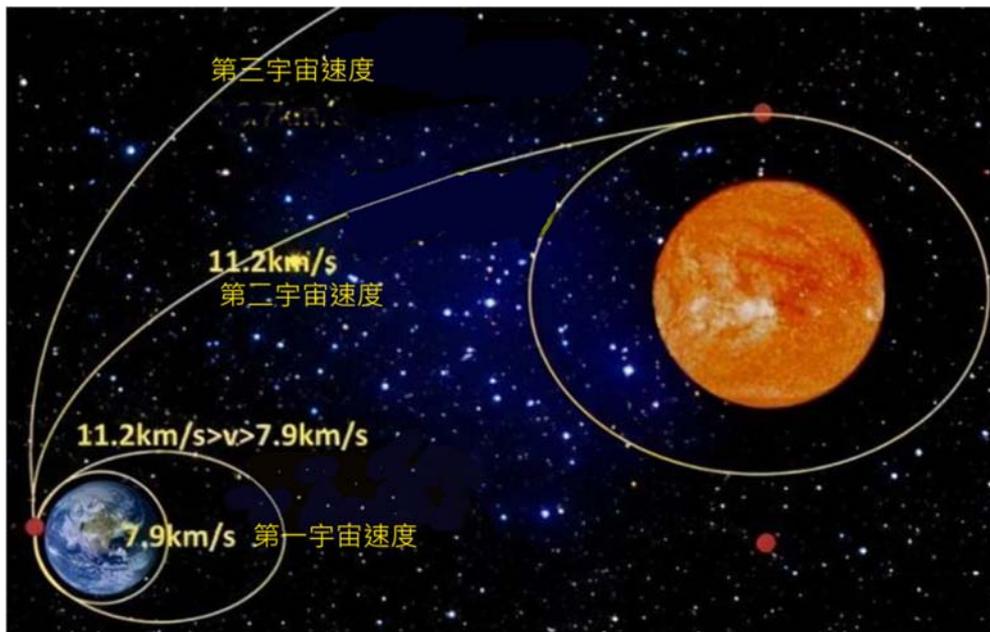


圖10. 宇宙速度。圖片參考資料來源：新浪網

的火星，太空船便需要變換軌道才有辦法抵達，要如何變換軌道呢？關鍵就在克卜勒定律。克卜勒指出行星的軌道是橢圓形，行星於軌道上公轉的速度並不是定值，而且在不同軌道的行星其公轉速度及週期也不同，德國科學家霍曼利用克卜

勒定律提出一種節省燃料的變軌方法，只需兩次啟動火箭推進，就可將太空船從一個圓形軌道轉移到另一個同平面的圓形軌道，稱為霍曼轉移軌道。霍曼轉移軌道是橢圓形，其開始一端與地球相切，另一端與目標行星相切。以火星為例，

其霍曼轉移軌道長5.9億公里，太空船約需耗時約260天才能到達火星。根據計算，當地球落後火星44度時（約火星衝前100天），是前往火星的最佳時機，這段時間維持約1個月，稱為發射窗口，若錯過的話便要再等約780天。

## 重力助推

為節省太空船燃料，還可利用星球的重力助推效應（或稱為重力彈弓效應）來改變飛行器的軌道和速度，重力助推既可用於加速飛行器，也能用於降低飛行器速度。

飛往水星的水手10號以及信使號即是通過重力助推實現了減速，而飛往火星和金星的飛行器一般使用霍曼轉移軌道法，但如果想要前往外行星，就需使用重力助推加速，但因為行星並非總是在重力助推的理想位置上，故

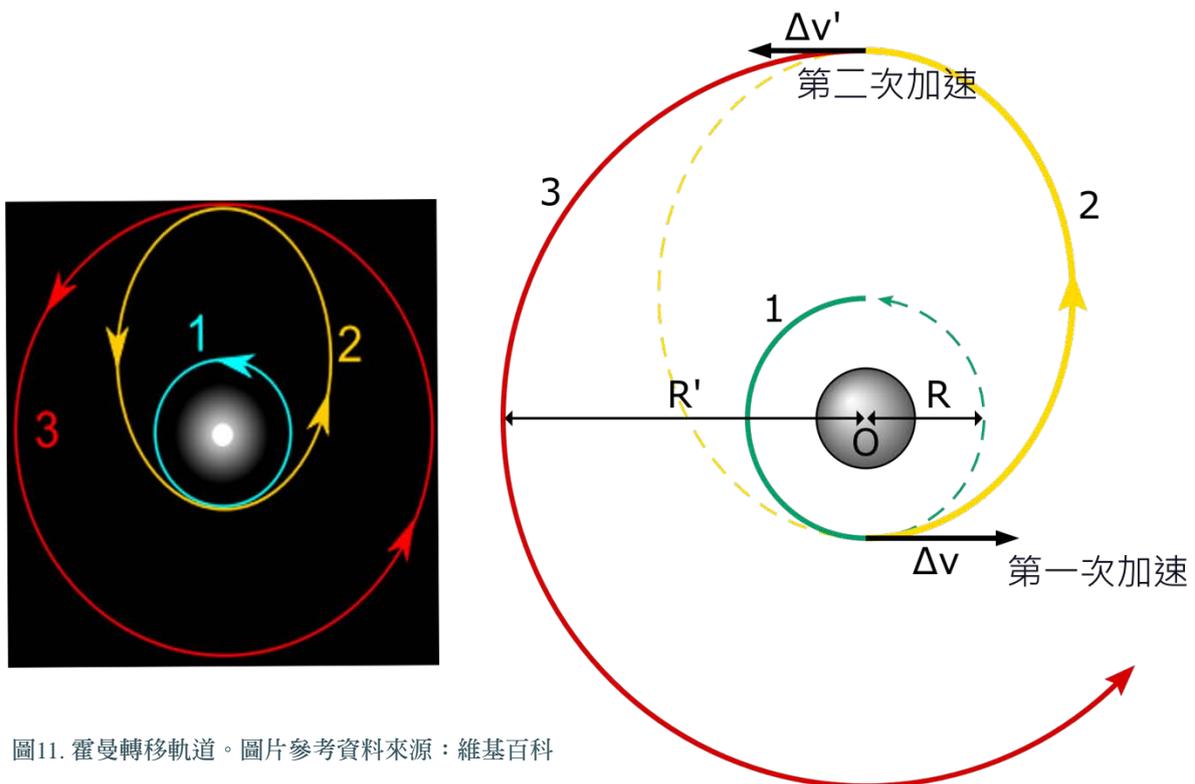


圖11. 霍曼轉移軌道。圖片參考資料來源：維基百科

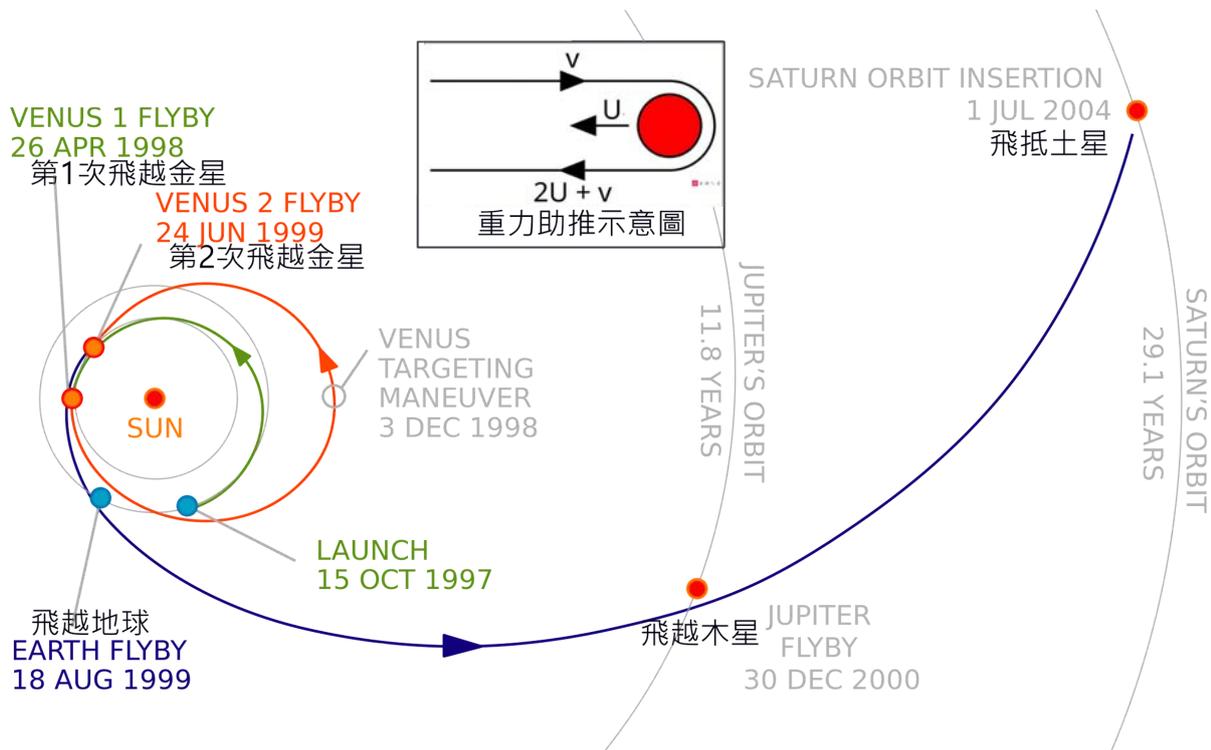


圖12. 卡西尼號的重力助推。圖片參考資料來源：NASA及維基百科

航海家號於1977年得以發射成行的一個重要原因，就是木星、土星、天王星和海王星均運行至重力助推的理想位置。另外，1997年10月從地球發射升空卡西尼號也運用幾次重力助推來解決燃料問題，卡西尼號1998年4月第1次飛越金星、1999年7月二度飛越金星、2000年12月飛越木星，2004

年7月卡西尼號抵達土星。

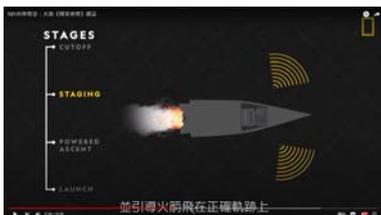
### 結語

我國的火箭發展，除國家中山科學研究院外，還有陽明交通大學前瞻火箭研究中心（ARRC）等，我們起步雖晚，但仍是朝著太空探索的目標前進，天文館展

示場展有太空科技相關展項，宇宙劇場現也正放映與飛行相關的科學動畫片「倉鼠的宇宙冒險」，有興趣航向太空的伙伴們，不妨來天文館逛展場、看影片，週末夜間還可參觀圓頂觀測室，體驗宇宙蒼穹之美。

石中達：臺北市立天文科學教育館

### YouTube相關影片：



101科學教室：火箭《國家地理》雜誌  
[https://www.youtube.com/watch?v=Ya10SN\\_Y3aA&t=65s](https://www.youtube.com/watch?v=Ya10SN_Y3aA&t=65s)



How We Are Going to the Moon - 4K  
<https://www.youtube.com/watch?v=T8cn2J13-4>



See Two Spacecraft Journey to Outer Reaches of Solar System | National Geographic  
<https://www.youtube.com/watch?v=r11gtC6kuPg>