



2 行星的呼拉圈： 行星環

文／葉永烜

在太陽系裡的 4 個外行星——木星、土星、天王星和海王星，它們都有環系統，其中又以土星環最為龐大壯觀。這些環系統的特點在於它們的物質分布，離行星中心都不超過一個**洛希 (Roche) 半徑**。

洛希半徑的意義是什麼呢？如果有些物體只利用彼此的重力相互吸引並連結在一起，當它們的軌道愈靠近行星，所受到的潮汐力¹愈大。從數學式可以推導得知，當這些以重力連結在一起的物體與行星之間的距離達到洛希半徑時，潮汐力會大於這些物體彼此吸引的重力，這時連結在一起的物體會被扯裂，恢復成不相連結的個體。換句話說，在洛希半徑的範圍之內，兩個小物體在低速碰撞後會立即分離，不能連結彼此成為更大的物體。因為這個物理條件，各個行星環系統基本上都是由許多小型物體和粒子組成。大致上，行星環可依其組成來源歸納為兩種。

1. 潮汐力：是一種拉長物體的假想力，因為物體兩端受到的重力強度差異所導致。以地球為例，遠離月球的一端所受重力較小，靠近月球的一端所受重力較大，兩端的重力差會拉伸地球的海水，此重力差即為潮汐力。

(1)土星環：

土星環非常廣大，表面都是水冰。它所含的物質總量可如一個半徑約 100 公里的衛星，推測可能是有某個繞土星運行的衛星在土星的洛希半徑附近分裂，由這個衛星分裂出來的碎片所組成；但也可能是因為有某個從外太陽系飛來的大型彗星，剛好在飛越土星時進入其洛希半徑，受到潮汐作用而分裂成碎片，形成土星環系統。

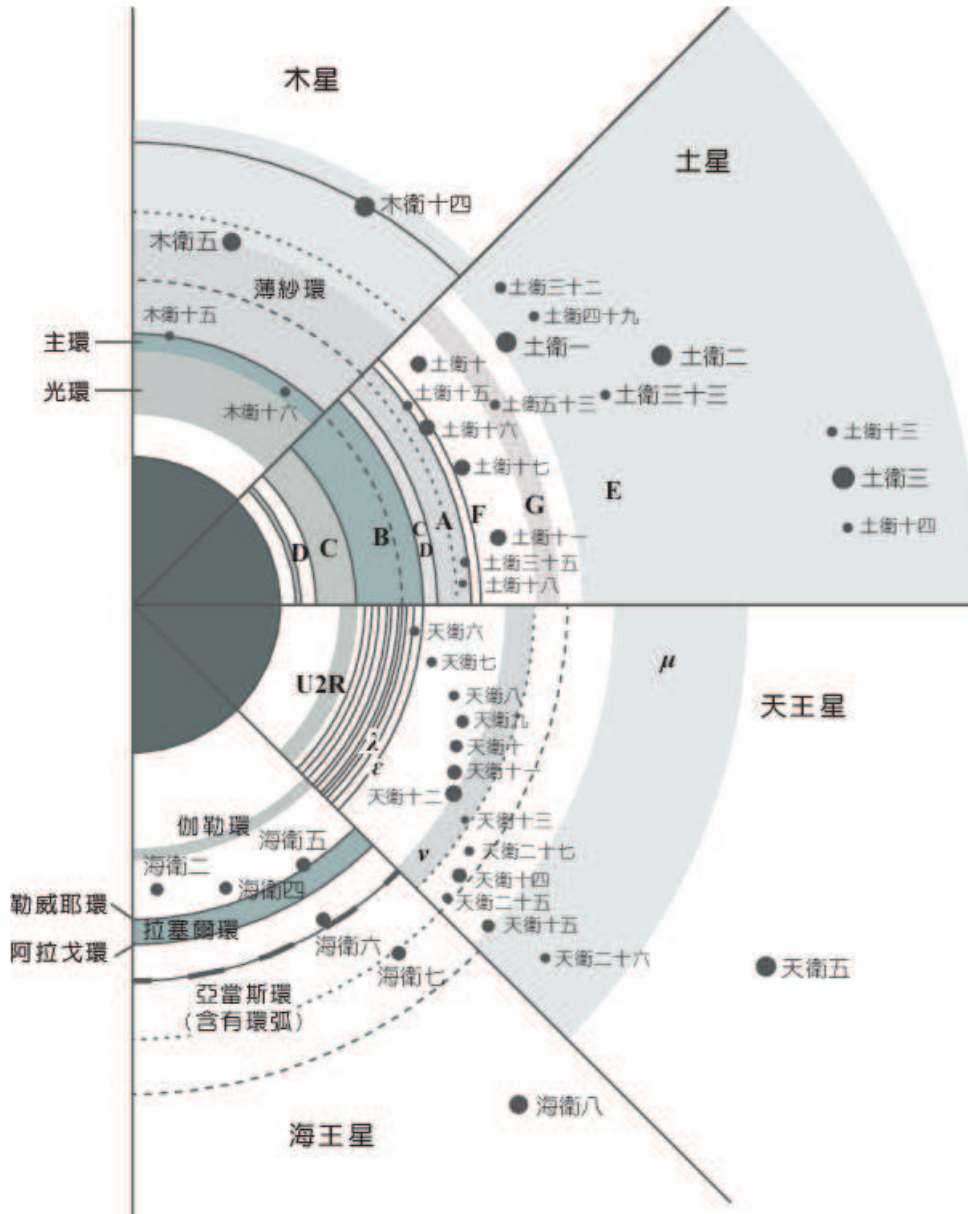
(2)木星、天王星和海王星的環：

這三個環系統的物質大多是公分或毫米大小的細粒，從光譜測量得知其成分為矽質。這些環的寬度至多只有幾十公里，每個環的總質量最多等同一個大小約 10 公里左右的物體。這些環的來源可能是環繞行星的小衛星受到宇宙塵粒高速碰撞所濺射出來的碎片，也可能是由某個小衛星碎裂而成。

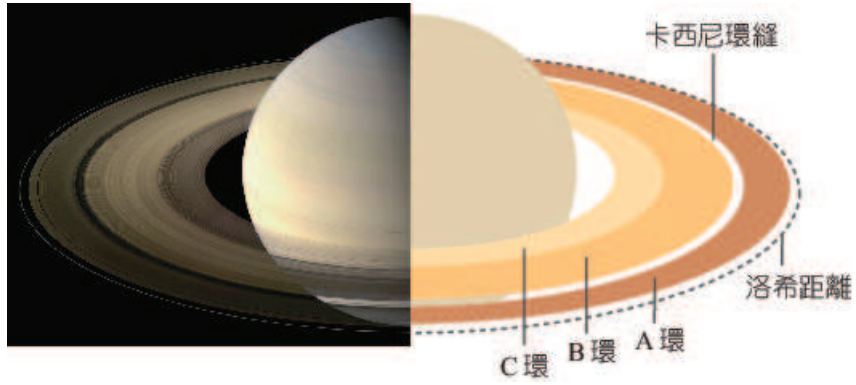
太陽系中最顯眼的行星環：土星環

行星環的形成，除了有洛希半徑這個因素，還有其他重要的力學作用參與其中。首先，繞著行星進行克卜勒運動的小型物體互相碰撞時會消耗能量，並遵守角動量守恆，因此它們的軌道會逐漸集中到一個扁盤，並且向內、外側擴散。由此可見，一定要有外力作用才能保持其結構的穩定性。

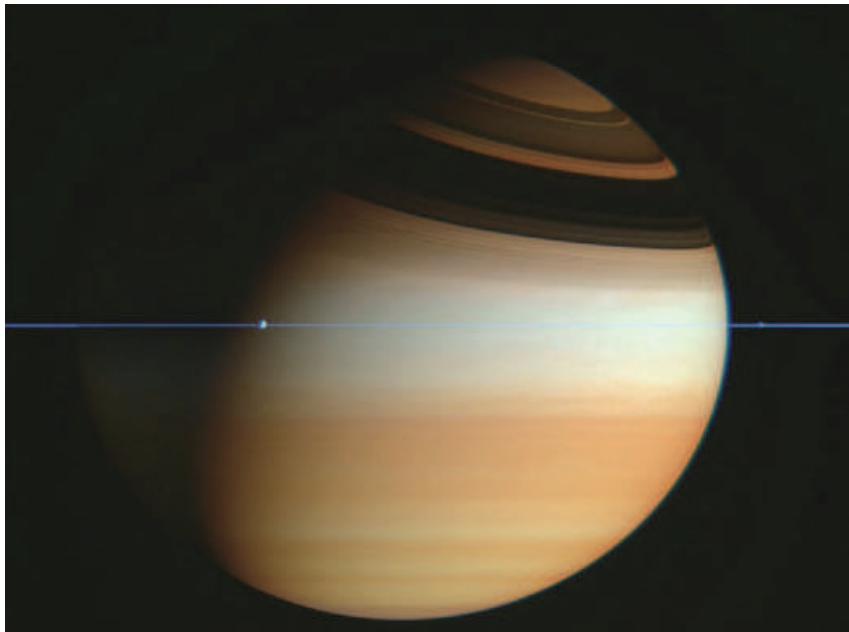
至於有哪些外力參與其中？土星環最外側（A 環）的邊界是由在外圍的衛星土衛十 (Janus) 的重力作用所界定。A 環和 B 環之間的卡西尼環縫則是由土星環和另一個衛星土衛一 (Mimas) 發生週期 2:1 的軌道共振作用所形成。至於 B 環和 C 環之間的縫隙，目前只有利用奈米級帶電塵埃粒子的電動力學才可以解釋。土星環中的物質由無數冰質粒子組成，乍看之下土星環很龐大，但它的厚度實際上只有 100 公尺左右。



▲圖 1 4 個外行星環系統的比較示意圖 (Reference: J. A. Burns, D. P. Hamilton, M. R. Showalter(2001). *Interplanetary Dust*. Berlin: Springer.)



▲圖 2 土星環的大型結構，主要部分從外到內可分為 A、B 及 C 環。卡西尼環縫中物質稀薄，將 A 環和 B 環分開。(Image credits: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute)

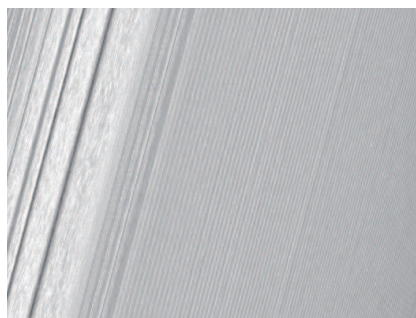


▲圖 3 卡西尼號太空船在穿越土星赤道平面時所見到的土星環，因為厚度太薄，差不多不見了。(Credits: Cassini Imaging Team/ISS/JPL/ESA/NASA)

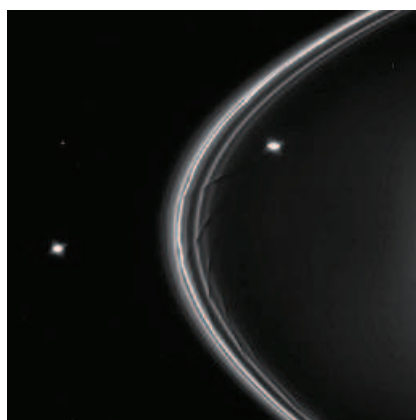
除了卡西尼環縫之外，我們還可以在土星環系統中找到許多由衛星共振作用所產生的密度波動變化。其中有個很特別的窄環結構位在 A 環之外，被命名為 F 環。第一次發現這個窄環時，科學家便提出兩點疑問：

- (1) 是何種物理機制讓 F 環的物質分布維持窄環的形狀？
- (2) 為什麼 F 環的某些位置會出現類似幾條絲絹綑綁在一起的扭結狀？

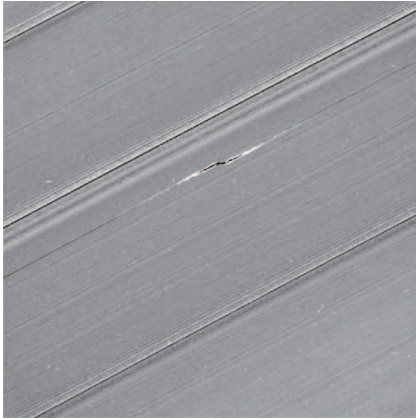
這兩個問題在卡西尼號太空船進行近距離的偵察後，已經真相大白。原來在 F 環兩旁各有一顆衛星，分別是土衛十六 (Prometheus) 和土衛十七 (Pandora)。其中土衛十六的重力作用有利於將粒子集中到同一個軌道的窄環系統，但更有趣的是，土衛十六的軌道與 F 環相交，所以它可以週期性地切入 F 環，改變它周圍的粒子軌道，將這些粒子扯離 F 環。



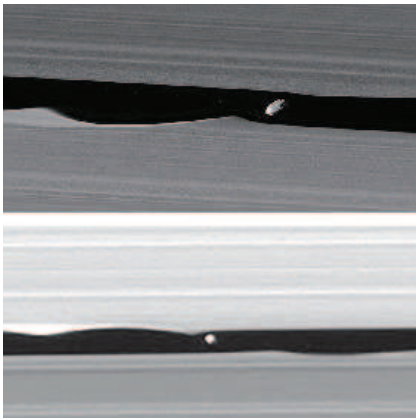
▲圖 4 在土星環的 A 環觀察到一圈圈的密度波結構。(Credits: NASA/JPL-Caltech/SSI)



▲圖 5 土星環的 F 環因為與小衛星土衛十六 (右) 作用而產生的一段又一段的「切痕」，土衛十七 (左) 則不會與 F 環作用。(Credits: NASA/JPL-Caltech/SSI)



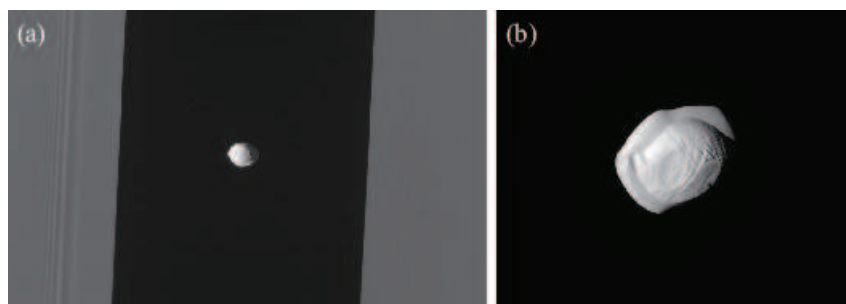
▲圖 6 土星環 A 環中的一個螺旋槳結構 (Credits: NASA/JPL-Caltech/SSI)



▲圖 7 A 環中的小衛星土衛三十五 (Daphnis) 有著橢圓形的形狀 (上)，在其所經之處兩邊產生波浪形的物質密度分布擾動 (下)。(Credits: NASA/JPL-Caltech/SSI)

除了徑長 10 公尺左右的粒子之外，在土星環中亦存在一些比較大的個體，當這些個體和鄰近的物質發生碰撞或重力彈射，可以產生各種結構。例如：在 A 環中可見到一種叫做「螺旋槳」的物體，呈現相對速度較低時的吸積過程，但受限於土星的潮汐力，這些物體長大到某一程度便會停滯成長或分裂，符合所謂「分久必合，合久必分」的說法。

在 A 環中還有一些空隙，可以從中找到幾個若干公里大的小衛星，它們會利用重力作用把環上的粒子推到兩旁，同時又產生軌道擾動，產生波浪形的結構傳播到遠處。



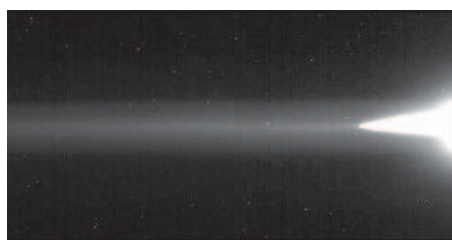
▲圖 8 (a)在另一個環縫中的小衛星土衛十八 (Pan);(b)土衛十八被一個微小粒子組成的扁盤圍繞著，成為土星環中的一個環系統。(Credits: NASA/JPL-Caltech/SSI)

稀薄的木星環

木星環有幾個部分：最主要也最亮的**主環**，軌道半徑是木星半徑的 1.806 倍，由兩顆衛星木衛十五 (Adrastea) 和木衛十六 (Metis) 的表面物質濺射到圍繞木星的克卜勒軌道所形成，物質的粒徑約為 15 微米。在主環外面還有兩顆衛星——木衛十四 (Thebe) 和木衛五 (Amalthea)²，在它們的軌道之內各自產生一個非常稀薄的環。



▲圖 9 伽利略號太空船在 1996 年 11 月所拍攝的木星環 (Credits: NASA/JPL-Caltech/Galileo Project, (NOAO), J. Burns (Cornell) et al.)

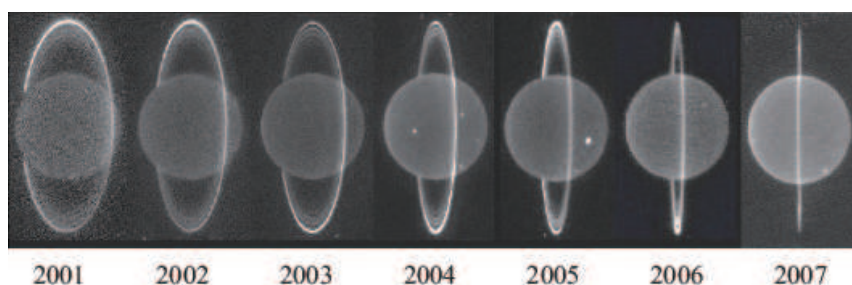


▲圖 10 木星環外圍的塵埃粒子分布狀態。主帶是曝光過度的部分；木衛十四和木衛五產生的稀薄環結構則在其外側。(Credits: NASA)

2. 木衛十四的軌道半徑約為木星半徑的 3.11 倍；木衛五的軌道半徑約為木星半徑的 2.54 倍。

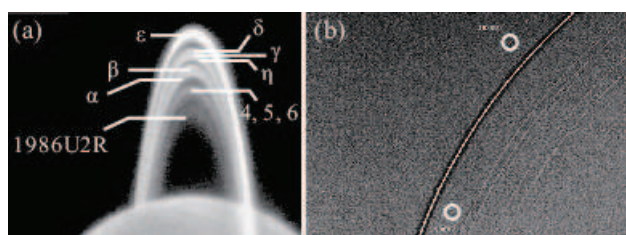
天王星的環系統

因為天王星的自轉軸差不多與黃道面位在同一平面，所以在不同時間從地球上觀察它的環系統，會有不同的投影角度。



▲圖 11 從 2001 年到 2007 年，凱克望遠鏡用紅外線攝影儀所拍攝的天王星環系統影像。最主要的是 ϵ 環。(Credits: W. M. Keck Observatory)

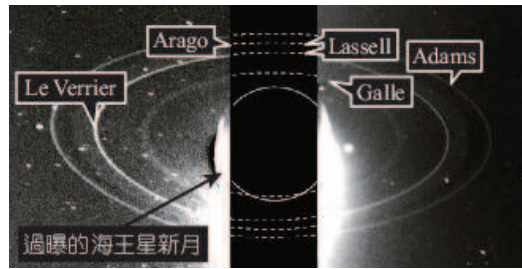
天王星環的構造非常複雜。最亮的 ϵ 環有一對衛星天衛六 (Cordelia) 和天衛七 (Ophelia) 在兩旁，把物質局限在寬度約 20~100 公里的軌道區域；但其他的窄環卻沒有找到相應的衛星進行同樣的動力學局限機制。在 ϵ 環的物質粒徑大約介於幾公分到幾公尺之間，微米級的粒子很少，科學家推測，這可能是因為天王星外球層的摩擦作用所致；也就是說， ϵ 環的來源可能和某顆小衛星受到碰撞而破裂成無數碎片有關。



▲圖 12 (a)利用影像處理方法得到天王星環系統 ϵ 環內部的環結構；(b) ϵ 環和它的一對守護衛星天衛六和天衛七。(Credits: (a) W. M. Keck Observatory; (b) NASA/JPL-Caltech)

海王星的環系統

除了地面上的天文掩星觀測以外，有關海王星環系統的資訊主要來自美國航太總署的航海家 (Voyager) 二號太空船飛越海王星時拍攝的影像。海王星有 3 個主要的窄環，分別以對發現海王星有重要貢獻的 3 位天文學家命名：亞當斯 (John C. Adams)、伽勒 (Johann G. Galle)、勒威耶 (Le Verrier)。其中有些環因為鄰近衛星的重力作用，會出現不連續的弧狀結構。目前我們對這些相關的動力學作用還是不夠清楚，如同天王星的環系統，尚待未來的太空探測提供更進步的資料，才能獲得更完整的瞭解。



▲圖 13 海王星環系統的影像 (Credits: NASA/JPL-Caltech)