

# 見微知著

## ——話地球自轉

趙 丰

地球的自轉，看似一成不變，實則變化多端；這些變化雖然微小，卻是曲折懸疑，大有文章。

地球繞太陽運行，這是人類在歷史上花了許多心血得來的結論，如今倒是孺子皆知。當然，我們也了解，這運轉的動力來源，源自牛頓在三百年前提出的萬有引力（註一）。多年來的努力，時至今日，一套健全的天體力學，佐以少數相對論效果，在太陽系裡已是無往而不利了。

以上所說的，是所謂的公轉。它把天體當做一個質點來考慮；以地球而言，天體力學告訴了我們地球的質心(center of mass)在太空中如何運行。可是，對你我來說，地球顯然不是一個質點！撇開公轉不談，地球本身相對於它的質心是怎樣運動的呢？換句話說，地球是如何自轉的呢？

你說：「地球繞著南北極軸，每24小時繞一圈。」這個答案恐怕太粗略。於是，仔細考量有關的定義，以及太陽日（以慣性坐標定義）和恆星日的區別後，你提出如下的答案：「地球在太空中每23小時56分4.099秒轉一圈；旋轉軸標定了南北極，而「秒」是根據原子鐘定義的。」

這個答案相當理想，可得99.99999分。然而地球的自轉畢竟不是如此恆定的，它有著不足千萬分之一的變化。本文要談的，正是這微小的變化。內

中曲折懸疑，大有文章。

### 物理概說

首先，讓我們寫下物體轉動的力學公式：

角動量的時變率=外力矩。

物理基本原理總是這麼簡單。但「簡單」可不是「容易」，這短短的公式實際包含了玄機萬種。

在我們的三維空間中，這公式可表為一向量方程式，用符號表示：

$$d(I \cdot \vec{\omega}) / dt = \vec{\tau} \quad (1)$$

$I \cdot \vec{\omega}$ 就是角動量向量，其中 $I$ 是物體的慣性矩張量（在數學上可用一矩陣表示），取決於該物體內部的質量分布； $\vec{\omega}$ 是角速度向量； $\cdot$ 是張量內積。 $\vec{\tau}$ 是外界施與物體的力矩向量。物體的轉動是用 $\vec{\omega}$ 來描述的， $\vec{\omega}$ 的指向（一個二維量）就是轉動軸的方向（通用右手定則取之），其大小（是個一維量）就是轉動速率。對於自轉速率，我們使用一個極容易了解的度量：一晝夜的長度，簡稱日長（length of day，註二）。

(1)式使用到實際問題時，其定量數學處理每

每變得非常繁複。本文中，我們在定性上分兩種情況考慮：

一、有外界施加的力矩 ( $\vec{\tau} \neq 0$ ) 的情況；二、外力矩為零 ( $\vec{\tau} = 0$ )，也就是角動量守恆的情況。

以上兩種情況又各自話分兩頭：自轉軸指向的變化和自轉速率的變化。這些由各種原因造成的林林總總的變化，在力學上都「各自為政」。地球真正的自轉，乃是前面提到的恆定自轉，疊加上這些所有變化的向量總和，繁複之情可想而知。

## 外力矩作用——日月潮

地球有那些外力矩來源呢？最大的外力，來自太陽、月球施加在地球上的萬有引力。如前述，這引力供給了地球質心的公轉所需。可是再進一步考慮，我們了解到，由於與日、月的距離不同，地球內部不同部位受到的是略為不同的引力，這引力差也就是一般所謂的「潮汐力」(tidal force)。潮汐力造成的現象，為人熟知的，當然就是在海邊見到的潮水漲落。對整個地球來說，潮汐力也造成力矩，影響著其自轉。

其他行星的引力，也對地球的公轉和自轉造成一些很緩慢的週期性變化，叫做米蘭科維茲循環 (Milankovitch cycles, 註三)。現在已發現許多古氣候、古地質的證據，顯示這些變化是地球冰河期消長的主因。這項研究本身饒有興味，但不在本文討論之列。另外還有一些甚小的外力，例如太陽風施加在地球磁場上的電漿壓力，隕石、流星的撞擊，以至宇宙射線等等，都是微不足道。

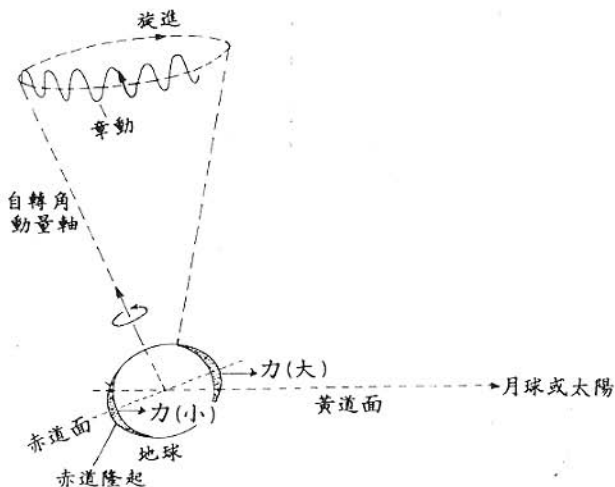
回到日、月潮。這兒先說明一件事實。物體間的萬有引力反比於距離的平方，而潮汐力（是一項引力差）則與距離的三次方成反比。由於這層關係，雖然太陽在公轉上是主動力，在潮汐力的產生上，較近的月球卻超過太陽兩倍有餘。在以下的論述中，為了方便計，我們只論及月球。至於太陽的影響，只需照同理疊加上即可。

潮汐力在自轉軸的指向上造成「歲差」：對自轉速率則產生因摩擦而減慢的現象。這兩種變化都是大規模而緩慢的：

### 一、歲差——自轉像陀螺

古人經過長期的天象觀察，早已發現歲差現象。原來四時節氣（例如春、秋分，冬、夏至）年年相對於星象略有推移，短期內也許看不出來，累積了長期就明顯了。直到十七世紀，才由牛頓提出了力學上的解釋。

在定性上我們可以這樣了解：我們知道，地球在自轉的離心力下呈橢球狀，有所謂的「赤道隆起」(equatorial bulge, 見圖一)。這橢率雖不大（約 $1/300$ ），但在力學上極重要。另一方面，地球自轉的赤道面和公轉的黃道面並不重合，有 $23.5^\circ$ 的傾斜（註四）。月球作用在近側的赤道隆起的引力，較之作用在遠側的，二者並不在同一直線上，而且大小也相異，於是形成一個力矩。這力矩垂直於自轉軸，企圖將地球「搬正」，兩下相持，造成力學上所謂的轉軸「旋進」(precession)現象。對地球上的觀察者而言，歲差就是旋進導致的現象之一。



圖一：由於黃道面與赤道面的夾角( $23.5^\circ$ )，月球或太陽作用在地球赤道隆起的引力形成的力矩，造成自轉軸在空間中的旋進和章動。

地球自轉軸維持一個 $23.5^\circ$ 的傾斜角，同時在太空中緩緩地逆向 (retrograde, 自東向西) 畫出一個直徑為 $47^\circ$ 的錐形。根據測量，週期長達將近26,000年。坐落在錐形底圓邊附近較明亮的星，在

兩萬多年的週期中都有輪到當「北極星」的任期。兩千多年前孔子提到的「居其所而眾星拱之」的北辰，是不是今天我們的北極星？也許有問題，因為在這段期間，地球自轉軸已在天空中移動10度以上了。

旋進現象另有一個在力學上相當尋常的例子：一個打轉的陀螺。我們常見到書上說的：「地球自轉似陀螺」，就是這道理。

讓我們更進一步考量。由於月球的軌道相對於地球的方位，以及月-地距離有著各種週期性的細微變化，前進的力矩隨之略有變化，旋進的軌跡也因而帶有複雜的、相對應的週期性擾動。例如其中最顯著的一項18.6年的週期，是由月球繞地球軌道面與黃道面交角（約 $\pm 5^\circ$ ）的變化所致。這些擾動，叫做「天文章動」（astronomical nutation），倒是和力學中常提及的陀螺旋進的章動是兩碼子事（後者是由旋進的起始條件決定的）。

旋進和章動只改變了自轉軸的指向，並不影響自轉速率，也不涉及機械能的轉移或消長。用力學術語來說，這是由於力矩垂直於轉軸之故。歸根究底，這垂直關係又是因為在過程中地球的行徑幾近剛體（rigid body），或頂多像個完全彈性體（elastic body），而作用力（潮汐力、離心力，甚或彈性力）又都屬保守力（conservative force）之故。現在讓我們談述另一項潮汐力造成的自轉變化，它涉及非保守力的作用，行徑大異。

## 二、潮汐摩擦——地球在煞車

這天，你偷得浮生半日閑，到海邊消磨。見到驚濤拍岸，你想：海浪的能量來源是什麼？「無風不起浪」，你馬上得到結論：來自太陽（輻射）能。可是半天之後，你注意到潮起潮落一輪迴，來去洶湧，規模也不小。你不禁奇怪：潮汐的能量來源是什麼？絕不是太陽能，因為潮汐是引力產生的，即使太陽無光無熱，潮汐仍將漲落不息。這個問題，在歷史上一定會多次出現在物理學家的腦海裡，終於把它解釋得透徹的，是十九世紀的喬治·達爾文（註五）。

假使地球是剛體，那麼潮汐力只產生前述的旋進和章動，無所謂潮汐變形。假使地球是完全彈性體，沒有內摩擦現象，那麼向著以及背著月球處，

就會各有一個潮汐隆起（tidal bulge，註六），這是所謂的「平衡潮」。

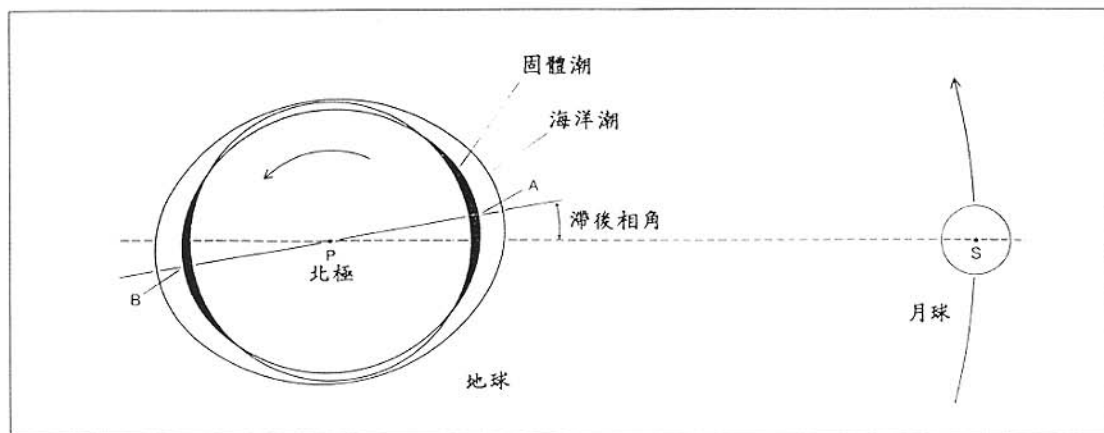
地球畢竟不是完全彈性體，再加上海洋的流動作用，潮汐力造成的變形（包括海潮）竟是萬分複雜，與理想中的平衡潮不可同日而語。平均而言，這變形可參考圖二所示的簡化模型。讓我們從北極的上空俯視地-月系統。經由內摩擦效果，地球的自轉企圖把潮汐隆起「帶走」，月球卻不放手，牽扯之下，隆起的形變軸並不似平衡潮那樣正對月球，而是稍微超前地-月連線一個小角度（僅相當於兩、三度）。地面觀察者先見月當空，後見潮汐，所以這是個潮汐相角的滯後現象。

相角滯後造成了一個力矩。其情形頗類似圖一，只不過這回力矩和自轉軸不是垂直，而是反向，其作用是牽制地球的自轉。我們可以說，兩處潮汐隆起好似一對煞車皮，迫使地球轉慢下來。

作用力必伴隨著反作用力。月球既然藉潮汐力讓地球煞車，其反作用力，也就是圖二中兩處潮汐隆起對月球的引力，則有一個將月球「牽著走」的合力分量，結果是增大了月球繞地球的公轉軌道（註七）。從另一個角度來看，把地-月視做一個密閉系統，那麼不論它們之間如何牽牽扯扯，其總角動量總是守恆的。既然地球自轉減緩，其損失的角動量自然都歸到月球去了。月球角動量的增加，反映到它公轉軌道上，則是半徑的增大。於是，月球逐漸離地球遠去。

喬治達爾文以此為據，推算月球在遠古時期（20~30億年前）應離地球極為接近。於是他進一步提出一項「親子說」，認為月球是從地球表面分離出去的，廣大的太平洋就是留下的「疤痕」。此說十分誘人，一舉解釋了大陸、海洋以及月球的成因。可是隨著人們對地球、月球知識的增長，如今雖然仍是眾說紛紜，「親子說」倒是愈來愈站不住腳了。

現在讓我們看看能量。既然有摩擦，就必然有機械能的耗損。事實上，伴隨著地球角動量減小的動能損失，遠超過讓月球增加等量角動量所需的動能。這大額的動能差，全都經由潮汐摩擦力的媒介化作熱能了。所以我們先前在海邊看到的海潮，其能量來源竟是地球的轉動能。事實上，一般相信，



圖二：從北極上方俯視，地-月連線(PS)與平均潮相(AB)之間有相角滯後現象，其伴隨的潮汐摩擦，使地球自轉減慢。

摩擦作用最烈的地方，可能正是世界各地的淺海。有名的錢塘潮，以及大到有發電經濟價值的加拿大芬地灣(Bay of Fundy)潮，只是略見一二而已。

大致折算之下，發現日長因此的增長量，每年不足 $1/10000$ 秒。小則小矣，以我們現今優良的測量技術，要量出這變化，只要假以時日，恐怕不會太難。

可惜事情不這麼簡單。原來，如下所述，日長變化實際上還有其他更大的各種規律的、不規律的短期變化(有些甚至來路不明)。我們此處的微小增長竟遭完全淹沒，而無法在已有的短短三、四十年的數據中有所判明。

直接測量既然行不通，我們卻另有蹊徑。前面說過，「地球煞車」和「月球退卻」，實是一體的兩面，所以知其一便知其二。1960、70年代中，美國的阿波羅和蘇聯的魯納(Luna)登陸月球計畫下，在月面留置了數台逆向反射鏡，多年來忠實地把從地面天文台站發射去的雷射脈衝反射回來，以供推算地-月距離及其變化。這是研究地-月動力系統一批很有價值的數據。結果顯示，月球確實在以每年大約3.7公分的平均速率退卻。這相當於每年 $2.4/100,000$ 秒的日長增長，和先前的猜估符合。

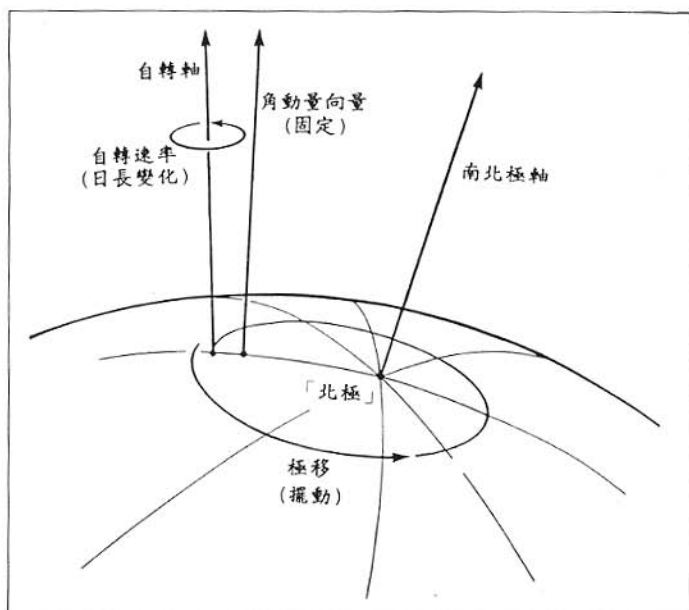
進一步，你這麼想：「日長既然在增長，那麼一整天後我實際上並沒有轉到我『應該』到的地方，而是稍稍落後了。」 $2.4/100000$ 秒，在赤道僅合

1公分！「微不足道！」你說。然而，略事推算後，你發現這落後的差距以時間的平方增加，日積月累之下，竟是十分可觀。例如，過去一千年來，累積的差距應已達兩千公里了！這累積的差距若可以量出，不也提供了又一項長期日長變化的證據？可是，怎麼「量」呢？

先民在史載中正留給了我們豐富而有趣的答案。中外古籍中不是屢有某年某處見到日蝕的記載嗎？今天我們用天體力學，可以推算出當年那一場日蝕，在日長沒有變化的假想情況下「應該」發生於何處。把這理想的日蝕帶和記載中實際看到日蝕之處相較，兩地之相距，正是前述的累積差距！這項研究，佐以其他較晚近的、紀錄較詳的天文事件(日、月蝕、月掩星、水星凌日等等)，得到了可喜的初步結果。

美中不足的是，古籍往往語焉不詳，因此誤差難免。目前已被整理引用的日蝕記載，主要來自(公元前的)巴比倫和(公元後的)阿拉伯古文獻。至於中國古籍，則只有零星的引用。這好比瑰寶儲於匣而不顧，因為中國歷代對天文、曆事的記載淵源流長，一般較西方詳盡而客觀，再加上浩瀚的地方誌，理應大有可為。這方面尚待有志之士下工夫。

另外一項令人意想不到的發現，竟來自古生物學。原來生物的生理、行為與其所處環境息息相關，所以古生物化石的研究，每每告訴我們許多古氣



圖三：在角動量守恆(無外力矩)的情況下，地球自轉速度的變化，包括極移和日長變化。

候、古環境的故事。有幾種水生生物，在生長過程中，它們的硬殼分泌速率隨晝夜、季節的變換而有所不同。所以這些硬殼不但像樹幹一樣長有「年輪」，而且還有細緻的「日輪」（有的甚至有「月輪」），好似一本本的日曆。一些珊瑚、蛤蚌及疊層藻岩（stromatolite，一種藍綠藻和沈澱物的混合體），都有這種現象。那麼，只需要在放大鏡下仔細數數一個年輪中的日輪數，我們就可以推斷該生物活著的時候，一年有幾晝夜。應用到古化石上，佐以放射性同位素的年代斷定，我們發現這類化石可追溯到四億年前，當時一年有大約四百個晝夜。天體力學告訴我們，地球繞日公轉一周的需時（一年的長度）是近乎不變的，所以我們可以推斷，那時候地球自轉比現在快約10%。在定量上，這項研究的誤差範圍甚大，同時也混入不少主觀的判斷；可是在定性上，它已為潮汐摩擦導致日長的增長，提供了又一強有力的證據，並上推到了數億年前。但這畢竟也只是地球年齡的十分之一都不到！

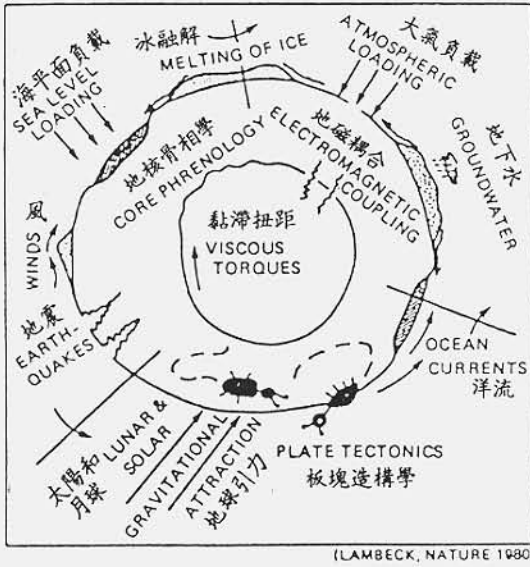
## 自動自發的 內力擾動

即使在沒有外力矩、也就是角動量守恆的情形下，一個三維物體的轉動也不一定是恆定的。一個最普通的例子：把一個塑膠盤子旋轉起來拋在空中，除非你技術精良，否則十有八九你可發現，盤子除了旋轉以外，還有擺動(wobble)。這是個古典力學裡很有名的問題，早在十八世紀就已被歐拉(註八)研究清楚了。地球也有這現象，這是轉軸指向上的變動；另外也有自轉速率的變化(見圖三)，以下會分頭述及。這裡先不妨略窺這些變化的來歷和觀測方法：

回頭看看(1)式。 $\vec{\tau} = 0$ 表示角動量  $I \cdot \vec{\omega}$  是常量。所以顯然

地，改變地球的慣性矩  $I$ ，就可以改變地球的自轉  $\vec{\omega}$ 。怎麼改變地球的  $I$  呢？很簡單，把地球上的物質搬動一番即可。例如你從站姿改為坐姿，地球就會轉得快一點；好比打轉的溜冰選手，把雙臂內收就可增加轉速一般。當然你我之功微不足道，但一些大規模的地球物理現象倒是不可小覷；例如由日月潮力造成的海潮和大地變形、大氣團的游移、季節性的雨雪消長、大地震的錯動、地函物質的蠕動等等，都能造成可觀的地球自轉變化(見圖四)。

這當兒，你不禁提問：所謂「地球」自轉，究竟是什麼意思？地球並不是剛體，不同的部件相互間也在運動中，例如大氣裡有風、海洋裡有洋流、地核裡有熔融物質流。我們所謂的自轉，只是根據實際測量出發，是固態地球表面的自轉(註九)，而地球的總角動量實際上應該涵括所有相對運動所帶有的「內」角動量。如此一來，任何其他部件的內角動量改變，就會反映在固態地球的角動量上，從而改變其自轉(見圖四)。這是改變地球自轉的另一法門。例如你朝東走時，(通過反作用力)就

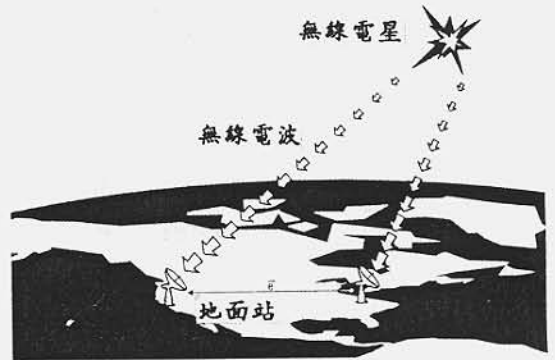
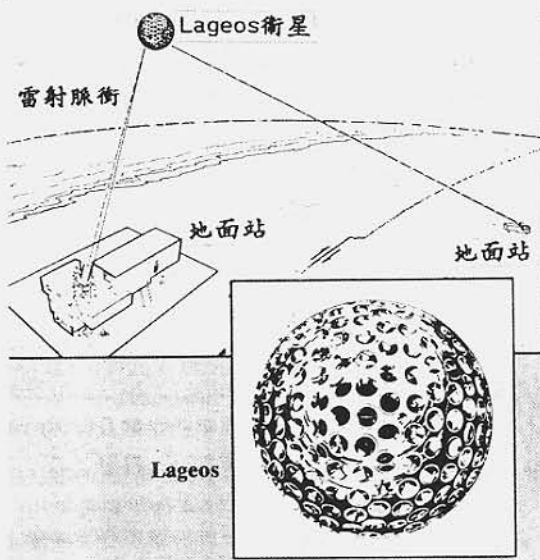


圖四：這是一幅地球動力學上經常引用的漫畫，說明各種可能影響地球自轉的地球物理現象。

會使地球轉得慢些；朝西走則反之。

行文至此，讓我們探究一下測量地球自轉的方法。首先我們要有一個參考坐標系統。最現成的，是由星象標定了的背景天幕。以此為基準的傳統光學天象測量，早已有很長的歷史，其精準度在不斷改善下，也算差強人意了。這在自轉軸的測量上尤然。例如，地球自身在擺動時，位於地球上的觀察者，從天文位置測量中，可以發現自己所處的緯度在微小地來回變動著。至於自轉速率的測量，還少不了精良的計時器。傳統的機械鐘力有不逮，所以精密的轉速測量一直到1950年代，銨-133原子鐘發明以後才實現。

時序進入1970年代後，隨著太空科技的發展和成熟，傳統光學方法逐漸被一些新技術所取代。新技術中最主要的有二（見圖五）：一是衛星的雷射測距，參考坐標也就由衛星軌道來標定。例如一顆名為Lageos的衛星，於1976年發射入一圓形的高軌道。它只是一顆直徑60公分的金屬圓球，表面布滿了數百個逆向反射鏡。運作道理很簡單：從地面台



圖五：兩種太空技術可以用來觀測地球的自轉。左圖是利用Lageos衛星的雷射測距法；右圖是利用無線電星為電波源的長基線干涉術。

站向它發射雷射脈衝，反射鏡就把脈衝沿原方向反射回台站。放、收之間的時差換算成距離，搜集了大量距離資料後，投進大電腦，可以算出很多地球動力學上的結果，自轉速度正是其一。

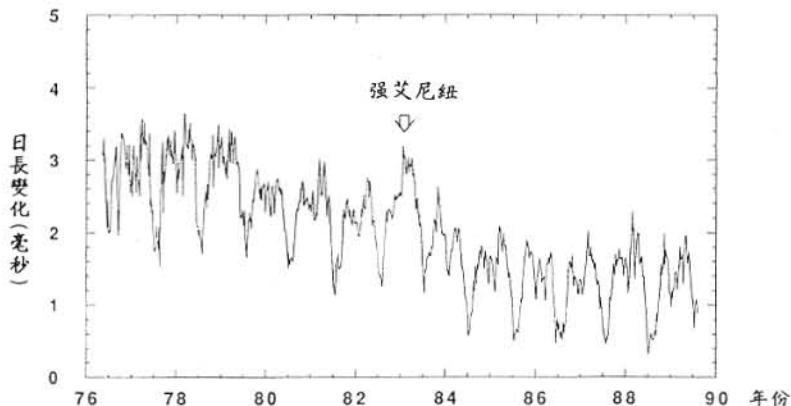
另一項新技術，是無線電天文學上行之有年的長基線干涉術 (very long base line interferometry)。方法是利用相距數千公里以上的多台天線，同時 (以原子鐘為準) 對同一個無線電天體 [例如似星體 (quasar)，又譯詭變] 作觀察，可以取得遠較單台天線，或相連天線組為佳的解析率。但從地學方面著眼，位置不同的台站接收到的無線電波，在時間上有一微小的差異，這差異也和當時地球的自轉方位有關，所以也可由此推算出自轉的變化情形。這裡用的參考坐標系，是由無線電天體標定的，和星象直接關聯。

另外還有一些太空技術，也可附帶地量度地球自轉。例如都卜勒衛星追蹤、月球雷射測距以及多用途的全球定位系統；在此表過不提。

新技術達到的精度，高得令人咋舌。在轉軸指向上的誤差，不超過一毫弧秒 ( $1/1,000$  弧秒)，相當於5公里外一張紙的厚度所張的角度！在日長測量上的精度，也已達到  $1/10000$  秒，相當於一日的十億分之一！

### 一、日長變化——林林總總

先瞧瞧圖六——過去十多年來的日長變化情形 (以原子鐘為準)。別小看了這條看起來亂糟糟



圖六：1976~1989年間的日長變化情形。縱軸零值代表標準日長(86,400秒)，每一單位是一毫秒。(數據得自Lageos衛星雷射測距)

的曲線；裡頭趣事多多呢！

圖六是根據前面提到的Lageos衛星雷射測距所導算出來的，每五天得一值。頭幾年裡因為觀測站較少、技術也未成熟，觀測雜訊較高；近些年則顯著改善。

首先，你注意到，這些年來的日長都比我們所謂的「標準日長」86400秒(相當於圖中的零值)要長幾個毫秒(1毫秒=1/1000秒)。日積月累下來，這就是為什麼國際時間標準局，每隔一、兩年就要通令全世界的標準鐘填加一個「閏秒」。從圖六看起來，目前總的趨勢是自轉愈來愈快(日子縮短)，可能不出幾年，日長就要短於標準日長，那時就須扣掉「負閏秒」了。以過去較長期的數據資料判斷，這趨勢每10~20年調一次頭，反覆不歇，可稱之為「旬年變化」。

前面不是提到：日月潮汐的摩擦會減慢地球的自轉嗎？是的，只不過這效應極微，在短短十多年的時間尺度下完全被其他變化所淹沒了，而無法現身。至於此處的旬年變化又是如何產生的？這問題尚待解決。目前一般認為是因為地核裡的熔融物質的流動，與地函固態物質摩擦而造成的。但是誰也拿不出確實證據來。

旬年變化表過不提。圖六還顯示明顯的週年及半年的季節週期性變化。既然是季節性的，會不會和天候、氣象有關？不錯，根據多年來全球大氣的數據資料，算出大氣的角動量變化，再和觀測到的

日長變化（見圖六）相比之下，發現絕大部分的季節性、以至更短促的日長變化，都是導因自全球風場環流的變化。其餘的季節性變化則可由氣團的游移、雨雪的消長來解釋。這項氣象學與測地學之間的完美相互映對，豈不會令人興奮！

再仔細瞧瞧圖六，你又發現各個年頭並不雷同。當然，每一年的氣候本不相同，但有些特別突出的異常（例如1982年尾到1983年頭），卻是源自氣象上一個十分有趣的現象——艾尼紐(El Niño)。

El Niño原是西班牙的「聖嬰」之意。原來早在百多年前，南美洲太平洋岸的居民就已注意到：每隔3~5年（不定），在耶誕節前後，海水會變得異常的暖，（「聖嬰」即指耶穌的誕生），當年漁獲就會大減（註十）。1960年代後發現，這現象延伸整個太平洋熱帶區，每次歷時十多個月。同時又發現，它與同區的大氣裡另一個現象，叫做「南方振盪」(southern oscillation)的，息息相關，二者實是一體的兩面。整個系統牽涉到東、西兩個高、低壓氣團來回的振盪，像翹翹板一般。連帶產生的風場變化規模甚大，反映在日長變化之上。1982~83年的艾尼紐正是有紀錄以來最強烈的一次。

另一項影響日長年際變化的，是在大氣同溫層裡的所謂「準雙年振盪」(quasi-biennial oscillation)。原來在赤道區上空15~30公里範圍內，有一環繞地球的東、西風帶，每兩年多，風向會調個頭。這伴隨的角動量反覆，當然也就反映在日長變化上，其規模大約是艾尼紐之半。

最近兩三年，部分日長變化的研究領域，正朝向極短促的變化進軍。一向成習的五日一值（見圖六）已漸不敷所求，而需要更高密度的數據了。例如，許多有趣的物理現象，舉凡各類潮汐、大氣風向，以至地核章動，都有週日甚或半日的變動。日長變化正是研究它們的一項有力工具；隨著知識的累積和測量精度的進展，其前景不可限量。

## 二. 極移——撲朔迷離

如圖三的示意，極移實在就是前面提到過的歐拉擺動。自轉軸和南北極軸都緩緩地圍繞著角動量軸；而角動量軸則固定在空間中。這和前面所述（見圖一），角動量向量在空間中受外力而旋進和章動，是兩碼子事。對地面觀察者而言，極移則表現

為自轉軸繞著南北極軸緩緩打轉。

假想你每隔幾天就去測量一次自轉軸的指向，並在該軸貫穿地表處（總在北極附近）釘下一根樁子。行之數年後你就可以標定出如圖七一般的極移軌跡來。現在讓我們細究圖七；其有趣之情，與圖六相較更有過之。

圖七是近年來根據長基線干涉術的測量而導算出來的，時間跨距是1984年初到1989年九月，五天一值。整個範圍幅度只有10~20公尺（圖三大大地誇張了，註十一）。每一點的精確度在3公分以內，毫不馬虎！

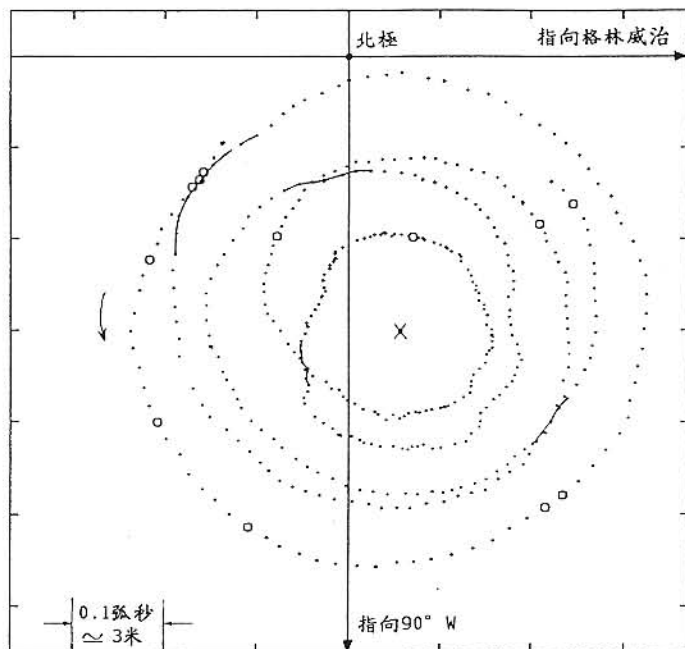
極移的軌跡是逆時鐘的（如圖七中箭頭所示），打一個轉需時一年多，呈螺旋狀：漸大、漸小交替。可是，你說：「這軌跡並不是繞著北極，而是繞著圖中打×的中心位置轉的呀！怎麼回事？」這就得追溯到當初「北極」是如何標定的。原來根據國際約定，現在我們所謂北極，是1900~1905年期間的極移軌跡中心點；而今天這中心點（圖中打×處）已相對於這北極點漂移了差不多10公尺了！我們可以粗略地這麼說：從過去90年有的紀錄看來，「真正」的北極並不「安分守土」，而是不斷地朝著西經80°的方向，以每年10公分左右的速度，在輕移蓮步。

所以，地球的極移，除了繞著打轉的擺動之外，還加上了軸漂移，情況好比颱風眼之於颱風。

你說：「一波未平，一波又起。擺動還沒來得及談，竟又出現這惱人的什麼漂移！」的確，軸漂移的來歷，至今尚不清楚；但是倒有個看來頗合理的說法：冰河期後的大陸抬升。

地球最近的一次冰河期，從幾萬年前到大約8000年前。這期間大半個歐洲及北美洲大陸，都覆蓋在2~3公里厚的冰層下面（好似今天的南極洲）。冰層的重量把地殼都壓陷下去了。等到冰河期一結束，冰化光了，地函如釋重負，就開始回升。回升的動作很慢，至今仍在進行。這牽涉到很大規模的質量重新分配，改變地球的慣性矩，從而推移著地球的自轉軸。以此來解釋軸漂移的大小和方向，大致不失。順便一提：這大陸的抬升，在地球動力學上是個很重要的現象。除了這兒論及的自轉外，它直接造成的大地形變，以及重力場改變、相對海





圖七：1984~1989年間的極移軌跡。每五天一位，軌跡是逆時鐘方向(如箭頭所示)。(數據得自長基線干涉術)

平面變化等，都是研究地球內部的彈性、滯性構造的重要依據。

現在，來談談擺動的故事。打從歐拉（註八）的理論研究以後，就不斷有人企圖從天文位置測量的紀錄中，尋找地球擺動的證據。根據理論，這擺動是一種自由振盪，固有週期是地球橢率的倒數，也就是大約300天。但多年尋覓，仍舊芳蹤杳然。一直到十九世紀末，才有了突破——錢德勒（註十二）一舉發現了兩種擺動：一種週期是一年，另一種週期是大約14個月。

年擺動的原因，大概總不外乎是氣候的變化，比較好辦。可是14個月的擺動又是什麼？

不久，就有人提出了解釋，而真相大白。原來歐拉的300天擺動，是在理論上假定地球是剛體而得到的。但是地球不是剛體，頂多只能視為一彈性體

，自由擺動的週期因而增長為14個月。這項地球的擺動，也從此被稱做「錢德勒擺動」。1900年起，國際間就成立了觀測極移的專司機構（前述及的北極點就是當時標定的）。多年來留下了一批寶貴的資料。

回到圖七。為什麼極移軌跡是逆時鐘的？很簡單，因為錢德勒擺動照理確實是與地球自轉同向的。為什麼又有繞圈漸大、漸小的現象？也不難，這是因為年擺動和錢德勒擺動二者疊加的效果——由於二者週期相近，振幅又差不多，疊加起來就有了在力學、聲學中常見的「拍」(beat)現象。在數據處理中，兩種擺動很容易分開，例如使用傅立葉分析(Fourier analysis)即可。

為什麼只觀測到兩個這麼相近的週期呢？是巧合嗎？難道沒有其他週期性的擺動嗎？例如半年擺動，或順時鐘方向的年擺動（週期相當於「負」一年）之類？這是由於物理學中有名的共振

現象。自由錢德勒擺動週期是14個月，只有靠近這週期的擺動，才較容易被激發。較遠離的週期，就算存在，也已被壓抑，振幅太小而不彰顯。

到現在為止，我們還沒有真正談到這兩種擺動的確實來歷——動力來源是什麼。年擺動，就像週年和半年的日長變化一樣，既然是季節性的，顯然是由氣候變化所激發的。與日長變化不同的是：根據最好的氣象、水文數據，把大氣團游移、風場變化以及雨雪消長等重要因素，都仔細估算並疊加後，還是不能圓滿地解釋所觀測到的年擺動。洩氣之餘，恐怕只好歸罪到其他尚未考慮到的因素，例如洋流、地下水和雪原的季節變化等等。可惜這些都缺乏全球規模的數據，猶待日後努力。

至於錢德勒擺動，你說：「既然它是『自由』擺動，就該擺個不停，又需要什麼激發源呢？」話

雖不錯，但就像一個搖盪的鞦韆，終將歸於靜止一樣，錢德勒擺動也會因地球內部的非完全彈性，而將能量耗散，遲早（也許幾十年）會停擺。所以，它的存在以及振幅的維持，正表示有些什麼事物不斷地在激發它。好比你每隔一會兒就去推一下那鞦韆，那麼它就永不停擺了。

的確，細察圖七，你馬上發現，極移軌跡並不是很平滑的。凹凸、轉折處比比皆是，這正是錢德勒擺動被「推」、被激發的痕跡！可是，這無形之手又是誰呢？

最顯而易見的「嫌疑犯」，仍舊是大氣變化。前面提過，大氣角動量雖然主要是季節性的，卻也不是平順年年如一的，而每每有短促以至年際的變化。取實際數據做定量計算後，卻發現：一來這些大氣變化力道不足，差了好幾倍；二來與極移軌跡相對照時，其相干性有時尚佳，有時毫不相干。是不是因為氣象數據還不夠好、不夠全呢？有可能。然而更可能的是，大氣變化只是個次號共犯。

另一長久以來被懷疑的是：地震。地震涉及斷層物質的錯動，可以改變地球的慣性矩，從而激發錢德勒擺動。這是個很有趣的假說。早期有人用很簡陋的模型，理論估計一下地震斷層附近的物質錯動，馬上可以推斷：地震的影響太微不足道了。可是，後來人們對地震的認識增加了，了解到地震牽動的物質錯動，並不局限在震央附近，而是全球性的。於是，定量計算之下，赫然發現，類似1960年的智利大地震，或1964年的阿拉斯加大地震，足可激發擺動達好幾十公分！這麼大的激發量，較之圖七軌跡的凹凸轉折量，是綽綽有餘。可惜當時的極移觀測精度太差（與圖七不可同日而語），無法用來判明。更糟的是：今天我們雖然有了很好的極移觀測，大地震卻付闕如。即使是1964年以來的最大地震——1977年印尼大地震，比起前述兩者都要小了好幾十倍，它留下的極移激發痕跡又太小了，所以仍舊無法判明。

你說：「個別大地震不提，每年成百上千的較小地震，效果疊加起來，夠不夠呢？」答案仍是否定的，因為地震的大小是以指數下降的；較小的地震，多則多矣，畢竟是不管用。這麼說來，圖七中顯示的極移激發，顯然也不是地震的傑作了。可以

這麼說：特大的地震雖也是共犯，但卻好比是「業餘」性質，只是偶一為之。

錢德勒擺動的激發源到底是什麼呢？這問題困擾了地球物理學家將近一百年了，始終疑團未解，令人汗顏不置！

## 訴說不盡的地球故事

地球的自轉變化那麼微小，我們卻談了這麼許多，諒不是「小題大作」，而應算是「見微知著」，因為它告訴了我們訴說不盡的地球故事。我們這兒談到的，只不過是略刮皮毛而已。許多問題還待深掘，更多的疑團等候解釋。這是個足可馳騁的樂園！

觀測技術上的進展也毫不鬆懈。正當大家還沈醉在目前已達到的成果中，科學家們已在國際地球自轉司（註十三）的籌畫下，信心十足地開始向下一個小數點進軍，希望在幾年之內，能達到測量精準度超過現行一個數量級的境界。新的研究領域將因而敞開，新的發現也將隨之湧現，讓我們拭目以待吧！ □

註一：牛頓（1643～1727年）的《Principia》一書出版於1686年。

註二：這兒的日長，為方便計，仍舊折算為以太陽標準日（24小時）為基準。

註三：米蘭科維茲（M. Milankovitch, 1879～1958年），南斯拉夫數學家。他的行星軌道與氣候關係的理論發表於1914年。

註四：四季變化由此產生，而 $23.5^\circ$ 當然也就是南、北回歸線的緯度。

註五：喬治·達爾文（1845～1912年），英國天文學家，係物種進化論創始人達爾文的兒子。

註六：至於為什麼這樣？基本上這是公轉離心力和潮汐力平衡下的產物。許多基礎書籍中皆有論及。

註七：同理，在前述的旋進現象中，地球赤道隆起也加諸地球的衛星一個反使用力，引致後者軌道進行所謂赤交點和近地點的旋進。這現象對月球而言甚微，對鄰近地球的人造衛星軌道卻很重要。但這是題外話了。

註八：歐拉 (L. Euler, 1707~1783年)，生於瑞士，可算是十八世紀最了不起的數學家。我們在中學裡學的解析幾何、三角、對數、複數等，泰半都是他的傑作。

註九：這樣的定義也只能算是差強人意，因為就連地殼板塊也是載著大陸、海洋，相互間緩慢地漂移著。

註十：現在我們知道，這是因為海水上升湧流暫時消失，底層養分上不來，造成浮游生物不繁，食物鏈不繼，對正常生態打擊至巨。艾尼紐的成因和預測，是目前氣象、海洋學上一個重大的課題。


註十一：請注意：這兒論及的極軸，和地球磁

場的磁極是風馬牛不相及。磁極偏離北極上千公里！

註十二：錢德勒 (S. Chandler, 1846~1913年)，美國人，從事保險業，卻在天文測量學上頗具貢獻。

註十三：本世紀內，國際間陸續成立了好幾個觀測日長和極移的機構。1988年合併規畫，成立國際地球自轉司 (International Earth Rotation Service)，總部承繼過去的國際時間局，設在巴黎。

趙丰任職於美國航太署戈達飛行中心



鄉間小路

鄉間小路帶給你來自土地上的訊息 指引你走向健康長壽之路

自然  
健康  
純樸

內容：

- 行政院農委會輔導發行
- 每星期一出版 / 全年52期
- 訂費：一年52期800元  
          二年104期1500元
- 郵政劃撥 / 0005930-0豐年社
- 尚未訂閱的請趕快訂閱
- 試閱 / 附回郵10元，即寄贈1本

豐年社

台北市溫州街14號  
服務電話(02) 3628148