趙丰曾任美國航太總署哥達德太空飛行中心的太空測地實驗室主任、中央大學地球科學院院長，現任中央研究院地球科學研究所所長；研究專長為地球與行星動力學、重力學、地球物理與地震學等。

天旋地轉尋根由

地球在自轉？誰說的？即使看起來理所當然，也得有個科學實證呀。

每個人都有這樣的經驗：閉上眼睛，在穩速行駛的車上，震動或晃動不算，只要不加減速、不轉彎，我們是不會感覺到自己在移動的。連古早的《尚書緯》都有這樣的論述：「地恆動不止，而人不知；譬如人在舟中，閉牖而坐，舟行不覺也。」這不是我們的感官不夠敏銳，而是一個物理基本原理：所謂「等速移動」只在相對下才有意義，它不是絕對存在的物理量。

換個場景：飆轉的雲霄飛車上。這時即使是等速率旋轉的當下，你一樣頭暈目眩，就算閉緊了眼睛，仍然能清楚感覺到自己在旋轉。這又牽涉到另一個物理原理：轉動不單有「相對」的意義，更是一個「絕對」存在的物理量。

為什麼移動和轉動在本質上會如此不同？誰也說不上來，只能說我們這個宇宙天生就是這樣吧。古典力學只說轉動挾帶有加速度，而你內耳的平衡裝置對加速度有反應，因此能感覺到轉動。馬赫原理試圖從物理哲學的角度來看：整個宇宙裡存在的所有遙遠星球形成的座標結構，定義出一物體本身的慣性質量，相對於該座標才有所謂的絕對轉動（否則孤零零一個物體的旋轉是啥意義？）。據說這種哲學觀對愛因斯坦發展廣義相對論有啟迪作用，在此表過不提。

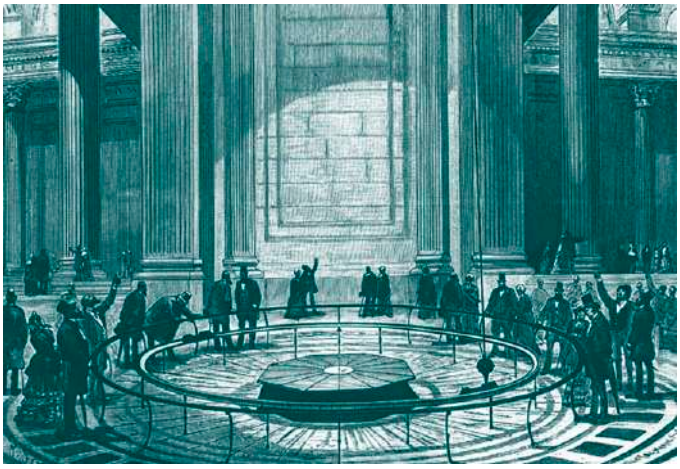
再換個場景：緩緩等速自轉的地球上。沒感覺到自己在轉嗎？這回確實是你我的感官不夠敏銳啦。（其實放心，動物的演化早就讓你我不至於過於敏感，隨時都陷入頭暈目眩的慘況！）

那我們怎麼知道地球在轉？確實，古時的人即使抬頭看見日出日落、月升月沒、夜夜斗轉星移，但囿於對宏觀宇宙的無知，對這些天體的運行和循環是有看沒有懂，無從設想到其實是自己的世界（一個三維的球面）在轉。中國上古的人還編出這樣一個想像力豐富的神話故事：共工氏與顓頊爭為帝，怒而觸不周之山，「天柱折」，從此天傾西北，日月星辰都一味地往西落去；同時「地維絕」，地陷東南，江河也就一味地往東流（見《淮南子・天文訓》）。至於日月星辰怎麼日復一日重複循環呢？就別多問了吧。後世雖然民智漸開，但依舊認定天圓地方、天旋地不轉；《晉書・天文志》裡也就說得既牽強又無奈：「《周髀》家云：天圓如張蓋，地方如棋局；天旁轉如推磨而左行，日月右行，隨天左轉；故日月實東行，而天牽之以西沒。」

時光快轉到近代。16世紀，哥白尼的「日心說」被接受以來，人類逐漸認識到地球只是孤懸於宇宙間的滄海一粟。於是在地球繞日公轉的基礎上，一旦外加每天一圈的自轉，竟然不費一兵一卒，所有晝夜交替循環和天體運行，不論大局細節，都得到了圓滿的解釋。千古的疑惑獲得了解答，這不啻是哥白尼學說的意外驚喜副產物。

故事就此劃上休止符嗎？才不！故事這才開始。

從邏輯上說，上述論證再圓滿，畢竟還是間接的，牽涉到的只是地球和日月星辰之間「相對」的旋轉，在邏輯上仍不能排除「天旋地不轉」的可能性，所以也並沒有真的證明地球在「絕對」的自轉。至於地球繞日往復的絕對公



1851年，巴黎先賢祠殿堂中庭的傅科擺，在眾目睽睽之下展示了地球的絕對自轉。

LOUIS FIGUIER

轉，在1725年已得到了證實——這是布萊德雷（James Bradley）由星光天文光行差現象得出的結論（也同時證明了光速並不是無窮大），是人類對天文認知的一大進展。

那麼，關上窗子，不看外面，如何直接證實地球的絕對自轉呢？這得憑藉比我們內耳的平衡裝置更靈敏的方法或儀器才行。17世紀時虎克（Robert Hooke）就曾接受牛頓這樣的建議：由於地球在轉，一高塔頂端的切線（水平）速是稍稍大於塔底切線速的，所以從塔頂自由落下的物體，其落點會稍稍超前，也就是略偏東。奈何這偏斜量小之又小，以當時的測量技巧可說無從驗證——他用高八公尺多的塔台，偏斜量估計不到半毫米。到18、19世紀，陸續有利用更高的塔台或礦井做更精密實驗的努力，算是勉強測量出了相應的小小偏斜量。可是這款實驗即便不是模稜兩可，也屬平淡無奇，人們期待的是更戲劇性、更經典的展示。

法國物理學家傅科

終於，大戲上演了。時間：1851年3月中旬起，整齣戲連續上演了長達一個月；地點：巴黎聖潔的先賢祠殿堂中庭；（唯一）主角：傅科擺——從殿堂67公尺高的中庭頂垂懸而下一顆沉重的銅殼鉛質大擺球；編劇兼導演：地球自轉；製作人兼場務：法國物理學家傅科（Leon Foucault, 1819~1868）；觀眾：王公士紳科學家軍民人等，一律免費自由進場。傅科本人則親駐現場為觀眾耐心講解。

劇情可說是既簡單又平實，可以這樣描述：想像你站在北極點，你面前是一個來回擺盪著的擺錘。由於擺錘的運動是在某一個鉛直面上，其既有的動量當然會讓擺錘一直維持在該平面上；從一個「局外人」看來，沒啥新鮮事可言，可是跟著地球一天逆時針自轉一圈的你，看到的反而是擺錘的運動面在一天內順時針緩緩偏轉了一整圈（軌跡好似一筆畫出五角星符，不過不是五角，而是千百角）。這擺錘的偏轉現象在其他任何緯度（雖然比較難琢磨）都照樣會發生，週期則長過一天，緯度越低週期越長（例如在巴黎是大約32小時，到赤道週期成為無窮大——也就是不偏轉了）；南半球亦同（只不過順、逆時針相反）。

仔細端詳之下，傅科擺其實不就是個陽春版的單擺嗎？沒錯，但是普通單擺要升格成傅科擺，得具備特異功能，其秘訣在於它不得有外力干擾，而且需要有經年累月不停休的能耐，空氣摩擦也因此得盡量微小。這就是為什麼懸索必須細長、擺球要沉重，而且支架的方式不得有絲毫的摩擦力，這些都是說來容易做時難。

在這場馬拉松式的大戲裡，傅科擺的擺錘面在眾目睽睽之下，逐漸緩緩偏移，清楚又直接地展示了地球的絕對自轉。觀眾中，來看熱鬧的鐵定打瞌睡，懂門道的則會嚇服於整齣戲的精采美妙，更會為正在目睹千古留名、劃時代的偉大歷史事件而深感興奮。傅科擺大戲立刻在全球造成「傅來瘋」——個把月內，在歐洲以及美國好幾十個大都會、城鎮裡，該戲碼被依樣複製演出。傅來瘋歷久不衰，傅科擺日後在全世界千百座博物館裡成為永不下檔的鎮館劇碼，沉醉、風靡了多少代人。

傅科擺的物理原理，卻惹出一樁歷史小插曲。物體的轉動力學其實早先已由歐拉、拉普拉斯、帕松等大師立下了完整的基礎；然而面對傅科擺，一時之間學界竟沒有人能夠把它的力學本質說得清楚透徹，反而七嘴八舌、又是幾何又是解析的，沒有定案；傅科本人此時倒全不參與置喙。幾經折騰，完整的描述才逐漸歸結到當時其實已知、而現代在古典力學裡稱為科氏力（Coriolis force）的現象。科氏力是在旋轉座標裡自然出現的兩種假力之一，運動中的物體都受到它的作用。除了傅科擺和前述自由落體的偏斜這些小場面外，科氏力更左右了地球（和行星）的大氣環流和洋流（見2012年1月號〈弄假成真的旁門左道〉），是一等一的重要。

就在1851年，法蘭西科學院要補選一名院士；傅科以先前量測光速的成就和這次傅科擺的光環被提名在列，結果以第二高票輸給一位時年73歲的資深前輩，那年他只有31歲。次年，傅科又顯身手，再次偵測出地球的絕對自轉——這回是憑藉了一款精心製作、超精緻的機械式陀螺儀（見2012年6月〈蒼茫大地何去何從：方向為憑〉）。可惜陀螺儀不可避免仍有些許摩擦力，以致於它每次只轉不到10分鐘就停了，無法持續做較長期的展示或量測。

傅科因免疫系統病變過世時，年僅49歲。今天他的名氏鑄於巴黎艾菲爾鐵塔的72名人之列，還有一顆太陽系的小遊星以他為名。 SA