



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。

# 弄假成真的旁門左道

怎麼說它呢？這傢伙專門弄假成真，行徑慣走旁門左道，卻竟是我們氣候的幕後操盤手。

朋友見面噓寒問暖，總扯些天氣。那是誰都可以評論、老天爺決定的事兒。

「老天爺」是誰？太陽只負責提供光照能源，熱鬧的天氣系統自有真正的締造者。首先是地球自轉，把陽光帶來的能量調勻；加上地球自轉赤道面與公轉黃道面間 $23.5^\circ$ 的傾角，成就了有緯度差別的四季。光這樣形容顯然還太小覷了形形色色、變幻多端的氣候。即使同緯度的地方，也有的濕暖、有的乾爽，有的冷壞人，顯然跟地理、地形、海陸分佈脫不了關係；在這些條件之下，更根本的問題是：為什麼大氣裡的風場、氣壓場是這樣，海裡的洋流是那樣的？這些決定氣候的因素，幕後的操盤手又是誰？

「科氏力」(Coriolis force) 出場。這是在旋轉著的(非慣性)座標系統裡會出現的假力，作用在運動中的物體上。假雖假，對生活在一個旋轉座標——地球上的你我而言，「弄假成真」的科氏力再真實不過！它的作用在日常生活裡微不足道，但是把尺度擴大到幾百、幾千公里以上，聚焦在地球的大流體——大氣和海洋的運動上，出人意料、令人驚歎的事就一件件發生了。

流體「隨器成形」，大氣和海洋卻是「隨力成行」。最偉大的力當然就是重力和由它衍生出來的浮力；但它們只控管垂直方向(所謂流體靜態平衡)的狀態和運動，那麼我們更感興趣的大尺度、水平方向的運動主要聽令於誰呢？除了摩擦力、慣性加速度等次要角色外，主要的力一者是源自氣壓差的氣壓梯度力，一者就是科氏力啦。在北(南)半球，水平運動中的物體(例如風場、洋流)會感受到由左(右)方推來的科氏力，緯度越高效果越強。

上述兩種力各有其規律，大氣、海洋的運動，也就是我們平常說的環流，就在它們相互拉扯之下達成妥協關係，這是經由19-20世紀多位氣象物理大師予以闡明的，術語叫做「地轉平衡」(geostrophy)，意思是氣壓梯度力與該環流運動產生的科氏力相等而反向，兩者相消；有你就有

我，一旦達到平衡，該狀態就會成為常態。

地球上低緯度接受的陽光熱能強過高緯度，造成的熱對流理應是南北方向循環，為什麼大氣環流卻主要是東西方向、呈緯度帶的風場，而且南北半球相對於赤道呈鏡像對稱(見右頁上圖)？沒錯，就是「旁門左道」科氏力的傑

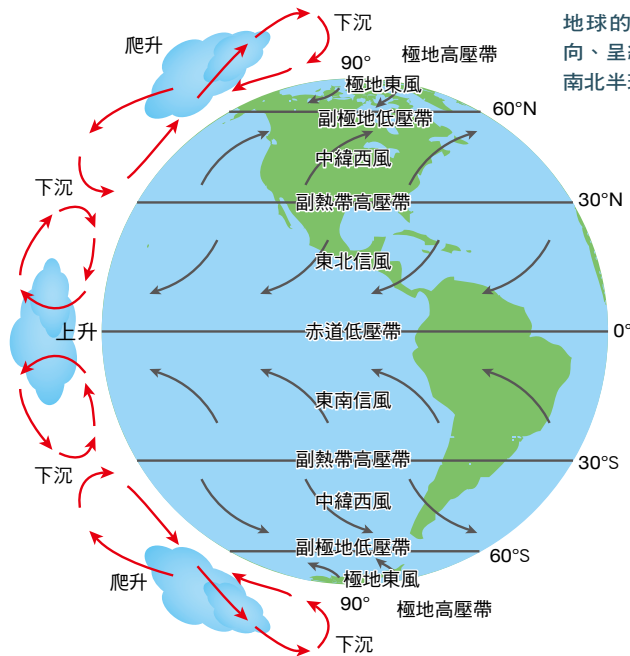
## 地 科 教 室

19世紀的法國數理學家科里奧利(Gustave Coriolis, 1792-1843)在處理砲彈軌跡問題時，發現需要加上一項側向的假力，才能描述在旋轉中的地球上的力學運動，後世稱此力為科氏力。

讓我們看看在旋轉著的(非慣性)座標系統裡，「立場不同、各自表述」下會發生什麼怪事。放一隻螞蟻在旋轉的轉盤上，牠必須牢抓盤面，否則馬上沿切線甩離；但對螞蟻而言，牠感受到有個力要把牠沿著徑向甩往盤緣，就像你坐雲霄飛車時感覺到的。這是有名的離心力，假力一號。

假力二號：科氏力。想像好動的螞蟻想往轉盤中心爬去，顯然牠的切線速度對內圈而言太快了。如果轉盤是逆時針方向轉，那麼對螞蟻而言，相當於有個來自左邊的力強迫牠偏右。其實，無論螞蟻是沿徑向往外、或往任何方向爬，該推力都來自左邊；若轉盤是順時針方向，則是右方來力。在三維的旋轉世界裡，科氏力等於物體的速度與旋轉角速的向量叉積(用右手定則)的兩倍，而與上兩者垂直。(垂直於速度的施力做功為零，物體動能不變——沒錯，否則假力導致真能量，就出現物理矛盾啦。)在北半球，物體水平運動時感受到的科氏力由左方推來，南半球則反之。

本文所述的地轉平衡是空間尺度很大才會出現的現象。科氏力的作用在日常生活裡微不足道，絕不是決定因素。例如：北半球的河流右岸侵蝕得較厲害？汽車右輪胎磨耗率較高？澡缸洩水、龍捲風總是逆時針轉？這些有趣問題的答案都是「似是而非」。精密的傅科(Foucault)擺，倒曾是史上有名的科氏力的演示。



地球的大氣環流主要是東西向、呈緯度帶的風場，它們在南北半球呈鏡像對稱。

右——水平的科氏力根本就為零，這就是為什麼赤道帶從來沒有颱風（見2009年9月號〈夏蟲字彙裡的「冰」字：What's in a name?〉）。

颱風在海面上不但可以活很久，甚至會接受海氣的潛熱能量加持而壯大，但終將登陸而在摩擦力之下消亡。摩擦作用不大的情況倒有個活生生的例子：伽利略在望遠鏡裡見到的木星表面大紅斑，隔了幾百年仍然旺盛如初。它是個特大（足以丟好幾個地球進去）颱風嗎？剛好相反——它在木星的南半球、卻是逆時針，因此是個高氣壓中心！

洋流是科氏力又一「力作」，它也呈南北的鏡像對稱，在北大洋（不論是太平洋或是大西洋）做順時針一大圈的循環，南大洋（還加入了印度洋）則逆時針（見下圖），這表示南北洋在各自中心區域存在著高水壓（類似於木星大紅斑）。這高水壓打哪來的？以北半球為例，中緯度西風帶和低緯度東風帶各自把洋面的水攆向右侧（而不是「順風推水」），也就是北洋的中心區——這是「艾克曼流」的結果，也是科氏力的體現。南半球的艾克曼流則把水攆向左侧，結果不論北或南，洋中心區都呈高水壓，聽命於地轉平衡的外圍海水，就繞成所見的洋流了。

地球的洋流有個非常有趣的現象：不論北或南半球，洋流的靠西股，也就是先前在赤道帶打了轉的暖水流，會特別集中、強大，大致沿著大陸東側的幾百米等海深線推進；而東股的洋流則散漫得多。這不對稱的現象一直讓海洋學家百思不得其解，似乎與科氏力的某些微妙作用及水流的能量耗散有關。最有名的例子是北太平洋西沿的黑潮（其實這是古時日本人的錯誤命名，因為它是洋流，與「潮」完全無關），從台灣東外海擦身北進；還有北大西洋西沿的墨西哥灣流——高緯度的歐洲之所以適合人居、發展了高度文化，全拜墨西哥灣流萬里送來的溫暖之賜。另外一個更為強大的環南極洲洋流，是唯一不受陸洲阻隔、自西向東環繞世界一整圈的洋流；它當然也處在地轉平衡的掌控下。

原來，地轉平衡就是老天爺。SA

原來，地轉平衡就是老天爺。SA

地球的洋流也是地轉平衡的結果，包括了著名的暖流——黑潮及墨西哥灣流。

作。旋轉中的木星、土星氣流更是清楚的緯度帶狀。

更戲劇性的例子是颱風。注意到沒？來台灣報到的颱風在衛星雲圖裡一律呈逆時針方向繞轉。颱風始自地區性的低氣壓，低氣壓一旦形成，周圍的空氣理當直接流補進去，立時收平搞定，並不會產生麻煩的颱風。可是對不起，在旋轉的地球的北半球，空氣打算流進低氣壓中心時，會受到來自左方的推力而持續偏轉，繞著氣壓中心逆時針打轉，對目標「可望而不可及」，風向並不垂直於等氣壓線，而是沿著等氣壓線！好比你想直直下山，山路卻老是橫向沿等高線盤旋。這時科氏力是徑向朝外，與朝內的氣壓梯度力達成地轉平衡，這就是颱風了。

把上文中的北換成南、左換成右、逆時針換成順時針，就得到了南半球的颱風。中間的赤道帶則是既不左也不

