

風從哪裡來？

文／王嘉琪

前言—天動說與地動說

「風兒真可愛，陣陣吹過來，誰能告訴我，風從那裏來？」這個開場不但暴露年齡，也點出一個千古疑問，風是怎麼形成的？對大多數現代學生來說，都知道「氣壓梯度力會推動空氣移動便產生風」，但是你知道這樣一句簡單的說明，是經歷了多少摸索才搞清楚的嗎？在摸索的過程中，科學知識的內涵也不斷修改，逐漸形塑出現代樣貌。

在古希臘時代，人們相信「風」是由風神控制的，而且不同方向的風，都有各自的風神，當時把風向分為八個方向，所以一口氣就有八個風神。雖然古希臘人相信風是風神製造的，但是他們已經有相對運動的概念了，很清楚的知道：如果空氣跟人之間有相對運動，就會產生風。為什麼這麼說？因為他們在辯論另一個千古疑問時就應用了這個概念。著名的到底是天在動（天動說），還是地在動（地動說）的疑問，當時支持「天動說」最有力的說法之一就是：如果是地在動，我們應該會感受到極大的風速，一直不斷的往某個方向吹。但是實際上，風時有時無，忽大忽小，所以不可能是地在動。「天動說」因此勝出，並影響後世直到約 16 世紀中。

天象論

「因為空氣在動，所以形成風」這個過程看來是沒問題的，如果不用風神來解釋，該怎麼解釋為什麼空氣會動呢？大約西元前 350 年，亞里斯多德出版了史上第一本氣象專書「天象論 (Meteorology)」，詳細描述了人類文明對自然環境及天氣變化的觀察與理解。當時認為地球上所有的物質都由四種基本元素（空氣、火、水、土）組成，每種元素有自己的「自然位置」，所以當元素離開自然位置時，就會「想要」回到原位，像是水往低處流，火舌往上竄等，因此產生我們觀察到的各種自然運動。關於「風」的成因，天象論裡提到一些跟「風」有關的舊觀念，例如：「風在土壤潮濕的地方才能觀察到」、「水從土壤蒸發時會形成風」、「當空氣移動或流動時就是風，所以風和空氣是一樣的。但是同樣的空氣，凝結時會變成雲和水，暗示風的本質也和水一樣」。

天象論中亞里斯多德對「風」的解釋也是承襲舊觀念，他還是認同空氣移動時會形成風，只是形成的過程更複雜了一些。他認為有兩種形式的蒸發，一種是潮濕的，也就是「水氣」，一種是乾燥的，姑且稱為「煙」。兩種蒸發都不能獨自存在，它們同等重要。

「水氣」會形成下雨，「煙」則是「風」的主要來源，他強調「風」和「水」的本質不應

該相同，但是即便本質不同，「風」和「水」還是會混在一起出現。同時他也試著利用乾、濕兩種蒸發的地區性差異及風的形成與消散來解釋為什麼冬季比較多雨。

整體想法是，在遠方潮濕的土壤上，受到太陽加熱後，「水」蒸發變成帶有「水」及「冷」的性質的空氣，也就是水氣，同時在乾燥的地表上也有「煙」蒸發出來並帶有「熱」的性質，提供了「風」的來源，風便帶著水氣移動過來。因為這些空氣帶有「冷」的性質，所以在移動過程中同時也會下雨，隨著空氣中的「水」越來越少，「冷」的性質也減少，逐漸只剩下「煙」，也就是具有「熱」的性質的空氣。等到「熱」的性質也會逐漸逸散消失，空氣運動就會慢下來，「風」就消失了。如果仔細思考，其實亞里斯多德說的「風」，應該就是中緯度常見的冬季風暴，在冬季由遠方帶來降水及冷空氣，整個風暴系統具有「風雨相隨，快速移動」的特徵，下雨過程結束後，風暴通常也消散了。後來，亞里斯多德的學說受到教會推崇，影響歐洲科學的發展長達 2000 年之久。

機械論

直到 16 世紀，因為宗教改革的影響，科學家開始挑戰教會權威及經典並帶動透過實作來理解大自然的風氣。從 16 世紀中開始，陸續有好幾位科學家，像是伽利略 (Galileo Galilei)、波以爾 (Robert Boyle) 等人，都非常熱愛在大眾面前展示各種新鮮有趣的實驗。隨著知識及工藝技術的進展，人類對自然運動的理解，逐漸由「因為他想動」轉變為「因為有外力推了他一把」的理性解釋，也就是所謂的「機械論」。機械論同時也把各種「性質」再分得更仔細一點，一種是物體的主要性質，包括組成成分及運動方式。一種是物體的次要性質，也就是「冷、熱、味道、顏色」這種跟人的感官直接連結的性質。這樣的分類可以協助科學家們在討論問題時，避免去爭辯這些可能因為個人感覺不同而產生的差異，更聚焦在可以客觀量化的主要性質上。機械論非常強調要尋找造成物體移動的「機械因」，因此科學家在描述過程時會變得更加仔細，上一個步驟和下一個步驟環環相扣，也因此發展理論時更容易找出邏輯缺口，可說是奠定了現代科學的思考方式。

在這段期間，有兩位重要的科學家先後完成了對氣壓的研究，分別是托里切利 (Evangelista Torricelli) 及帕斯卡 (Blaise Pascal)，也因此我們現在以這兩位科學家的姓作為氣壓單位。故事開始於 1635 年，在佛羅倫斯的宮廷修建花園的工人發現，不管怎麼調整抽水幫浦，水好像都無法抽到超過 10 公尺高的地方，伽利略就被授命研究一下這個問題，當然他依循了機械論的原則來解釋真空如何施力，可惜伽利略還沒來得及完成研究就過世了。在他生命的最後幾年，在托里切利的協助下，出版了他最後一本著作「關於兩門新科學的對話」(1638 年出版)，其中便有他關於「真空的力」的研究 (圖 1)。

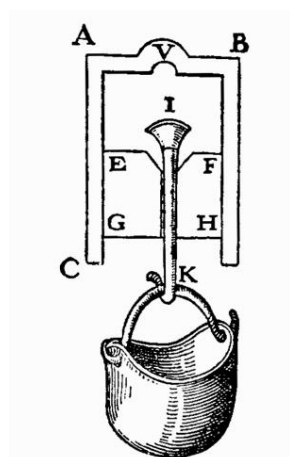


圖 1. 伽利略在「關於兩門新科學的對話」中提及一個用來證明「真空的力」的裝置。

ABC 是金屬桶，EFGH 是可以完全與桶子密合的木塞，IK 是可在木塞中活動的鐵絲，I 頭呈漏斗狀，與木塞的形狀要契合。實驗的方式是把木塞推到底，把空氣由鐵絲孔擠出來後，再把鐵絲拉緊就形成真空，K 的掛鉤處可以加上重物，藉此證明真空能施力在物體上。由於寫作這本書時，伽利略已經重病，一般認為他並沒有真的製作出這個裝置，而是一種「思想實驗 (thought experiment)」。書中提及的實驗皆遵守機械論的原則，詳細描述其過程。

實驗論證

在機械論被廣泛接受前，人們對於幫浦為什麼可以抽水的解釋方法是深受亞里斯多德影響的。當你把管子裡的空氣抽走形成真空時，下面的水因為「厭惡真空」，所以會上升來填補。而且不同的液體厭惡真空的程度還不太一樣，所以上升的程度不同。除此之外，也有不少人覺得那個空間中，除了空氣以外可能還有其他物質，這些不知名的物質可以通過管壁填補真空。

後來由他的學生--托里切利接續這個研究並設計了水銀管實驗，托里切利把夠長的試管裝滿水銀後暫時封住開口，倒置到一盆水銀中後再打開封口，管中的水銀會下降到高度約 76 公分，傾斜試管時，水銀在垂直方向上的高度是維持不變的。這個水銀管實驗順利證明了真空存在，也因此被稱為「托里切利真空」。與伽利略不同的是，托里切利認為支撐住水銀高度的力是從管子外面來的，由於底下那盆水銀的表面上只有空氣，他認為就是空氣的重量形成了這個外力（圖 2），而水銀柱的高度會與上方空氣的重量平衡，也因此留下一句名言：「我們生活在空氣之海的底部」。

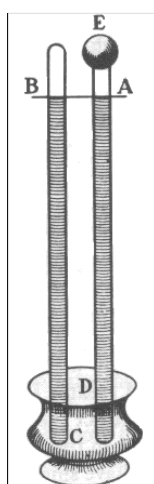


圖 2. 托里切利於 1644 年，寫給朋友 Michelangelo Ricci 描述關於水銀管實驗的信中的插圖。

E 的球狀空間是用來證明真空無法施力拉住水銀柱，他的想法是，如果真空是力的來源，較大的真空空間，應該可以把水銀拉到更高的地方。

(圖片來源：A Source Book in Physics by William Francis Magie)

但是新觀念的建立沒有那麼容易，一直不斷有支持亞里斯多德經典的科學家質疑真空是否存在。對於支持透過實作來獲取知識的科學家來說，氣壓也不是那麼容易理解，因為一般感官很難察覺氣壓的存在與變化。所以後來托里切利的學生，帕斯卡，也接手了水銀管實驗繼續釐清真空與氣壓間的關係。最後，帕斯卡在 1647 年證明了水銀管頂部必須是真空，空氣壓力才能支撐住水銀柱。如果說空氣壓力來自我們頭上的那一整層大氣，那表示在不同高度的地方，上方空氣的厚度不同時，氣壓應該也會不一樣，如果可以在不同高度的地方重複水銀管實驗，應該可以證明這件事。

帕斯卡由於身體不好，便央求姊夫佩里埃 (Florin Périer) 幫他執行這個計畫。計畫執行當天，還邀請了城內數名重要人士作為證人，這是當時展示實驗的必要條件之一。佩里埃先在城內的教會花園裡，在固定的位置上重複執行水銀管實驗三次，每次都使用了好幾根水銀管，確認每次實驗，每一根水銀管的結果都讀到 26.22 英寸的水銀高度 (約 66.6 公分，相當於 888 百帕)，最後他把其中一根水銀管固定好位置，標記當時水銀柱高度後，就請神父幫他看著並記錄可能發生的任何變化。接著他帶著其他器材爬到住家附近的多姆山 (Puy de Dôme)，海拔大約 1.46 公里，比教會的海拔高約 900 公尺。他在山頂上幾個不同的位置，重複同樣的實驗五次，每次都量到大約 23.125 英寸的高度 (約 58.74 公分，相當於 783 百帕)。因此證實了氣壓會隨高度減少，空氣是有重量的。

托里切利在數學及科學上的眾多成就大部分都沒有留下來，後人僅能從他與朋友間的書信略知一二，他在 1642 年被選入克魯斯卡學院 (Accademia della Crusca) 時曾給過一些演講，在其中一個關於「風」的演講中，他反駁了早期的理論 (濕潤的土壤在蒸發時釋出的空氣形成了風)，主張風是因為兩個地區間的溫度 (因此也可說是密度) 差異

造成的，這也是有史以來最接近現代理論的成因解釋。可惜他跟帕斯卡都還沒有把對氣壓的研究和風的成因連結起來。不過這是可以理解的，因為當時氣壓的觀念很新穎，氣壓計的製作技術也還不夠完善，難以大量製造並建立夠廣的觀測網。

海上貿易活動，助長人們對風的理解

人類文明對於風的系統性研究是因為海上貿易活動，在工業革命前海上貿易都是靠帆船進行，也就需要風力，因此大約在 14 世紀左右就已經知道「信風」這個現象，當時稱為「貿易風」。也許是因為伽利略的望遠鏡大力支持了地動說，人們開始接受貿易風的成因是因為在赤道地區，地球自轉的速率比空氣快，跟不上地球自轉的空氣自然形成東風，這種直覺的理解完全承襲了文章一開頭提到的相對運動，並不是正確的解釋。大約在 17 世紀末，英國皇家學會興起了一陣關於大氣環流的辯論，其中最有名的一位是天文學家哈雷 (Edmond Halley)，他在 1686 年發表的文章中描述了在大西洋赤道附近會有長年吹拂的東北風，也就是貿易風 (圖 3)。

他也描述了在靠近非洲大陸這一側的貿易風與美洲那側的不太一樣，在 Guinea Coast 的附近是吹西南風。類似的現象也在北印度洋出現，從十月到隔年四月會吹東北風，另外半年則吹西南風，也就是「季風」。除了以地球自轉及空氣的相對運動來解釋貿易風外，哈雷再加上太陽對海面的加熱差異，來解釋為何貿易風會出現南北方向的分量，而不是單純的東風。同時他也以太陽對陸地及海洋加熱的差異來解釋季風的形成，他的想法也是沿襲自托里切利的主張，因兩地的溫度差異形成了空氣密度的差異來解釋。人們對風的理解，自此又維持了大約半個世紀。

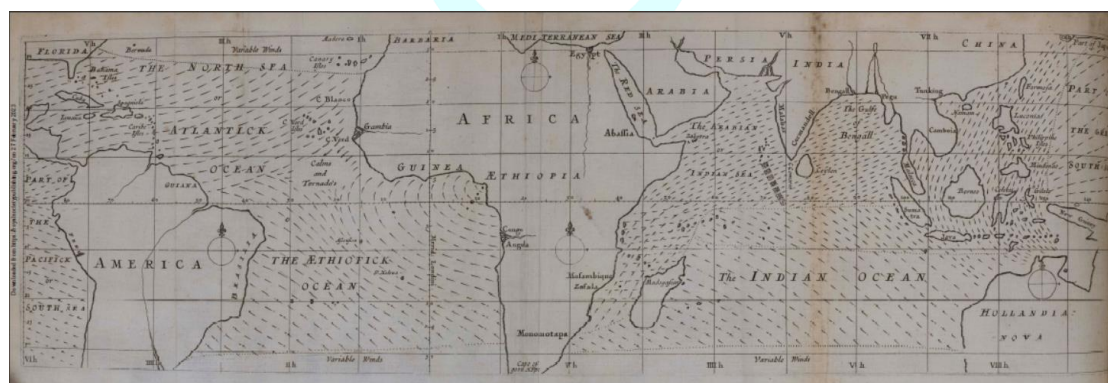


圖 3. 哈雷於 1686 年繪製的貿易風與季風圖。

科氏力—地球旋轉導致運動方向偏轉

到了 18 世紀，英國律師哈德里 (George Hadley) 提出地球自轉才是造成貿易風會偏轉的主要原因，他在 1735 年發表了這個理論：太陽在赤道地區加熱空氣，赤道的空氣

上升到高空後往兩極移動並漸漸變冷，到了兩極會下降回地面並往回流向赤道，這就是「單胞環流理論」。同時他也提出因為地球的自轉軸在赤道上比在南北回歸線上長的關係，使得由高緯往赤道走的空氣，在到達赤道時速度會比赤道自轉的速度慢，因此風向會偏東。也就是運動中的物體，在沒有摩擦力的情況下，動量要守恆的概念。但是哈德里的解釋在當時很不容易被理解，同時前輩哈雷的論文已經被收錄在當時百科全書 (*Chamber's Cyclopaedia*) 中，使得哈德里的解釋持續被忽視了近 100 年。

不過，因為地球旋轉產生運動方向偏轉的概念，其實早在 1674 年時就被提出來了。義大利神學家里喬利 (Giovanni Battista Riccioli) 就曾討論到發射砲彈時，砲彈軌跡會因為地球旋轉而產生偏移的可能性 (圖 4)；有趣的是，這樣的偏移以當時的技術無法觀察到，因此里喬利及其後好幾位科學家都以此為依據反對「地動說」。之後歐拉 (Leonhard Paul Euler, 1749) 及拉普拉斯 (Pierre-Simon, marquis de Laplace, 1778) 這兩位數學家都嘗試以數學方法理解這個偏向力，但一直到 1835 年才由法國科學家科里奧利 (Gaspard-Gustave Coriolis) 推導出完整的數學式子，當時用來解釋水車運轉時，水流會受到的力及產生的方向偏轉等問題，科里奧利將這個偏向力命名為「複合向心力」，以便跟已知的向心力區隔。到了 1856 年，美國氣象學家弗雷爾 (William Ferrel) 將「複合向心力」應用來解釋貿易風的風向偏轉，這種因為系統旋轉產生的偏向力才正式進入氣象學的領域，並在 1920 年左右正式出現「科氏力 (Coriolis force)」一詞。

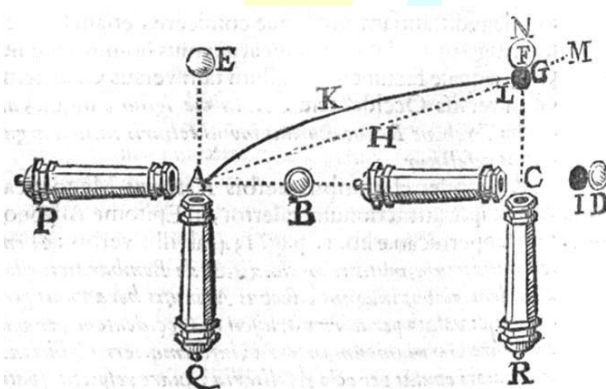


圖 4. 義大利神學家里喬利在 1651 年出版的「新天文學大成」中，用來解釋砲彈軌跡因為地球自轉而偏轉的插圖。

他認為位在 P 的砲台往東發射時，砲台與砲彈 B 會一起跟著地球自轉，所以最後一起移動到東方一點的位置上，且砲彈的軌跡不會偏轉。但是往北發射砲彈時，原本 AE 的砲彈軌跡，會因為砲台與砲彈分別跟著地球自轉移動到 R 與 G 的位置，所以軌跡變成 AG，表示有了偏轉。

氣壓分布與空氣運動的關係

人類第一次意識到有綜觀尺度的天氣系統存在，是在 1820 年左右，德國物理學家布蘭德斯（Heinrich Wilhelm Brandes）畫出世界上第一張天氣圖後（圖五），科學家終於有機會看到氣壓分布與空氣運動之間的關係：風向呈現逆時針轉並偏向低壓中心吹（cyclone）。但是當時「複合向心力」的概念還沒有出現，布蘭德斯也無法解釋為什麼空氣往低壓流動時會偏轉方向。

有系統的氣象觀測大約自 1850 年開始，英國海軍中將費茲羅（Robert FitzRoy）注意到地表氣壓的變化趨勢和天氣變化有明顯的相關，因此在英國建立了大約 15 個氣象站，並設定好固定的觀測時間，再利用電報機把氣象資料傳回來。英國氣象學家高爾頓（Francis Galton）則更進一步開始收集全歐洲的氣象資料，並首次建立起國際間一致的氣象觀測項目及時間，高爾頓也首度製作出具有即時天氣預報功能的天氣圖，並把順時針轉的天氣系統命名為反氣旋（anticyclone）。在美國則是 Joseph Henry 教授，透過史密森尼學會（Smithsonian Institution）招募志願者來組成氣象觀測網（詳見《科學研習》雙月刊，第 61 卷第 3 期，「集眾人之力的氣象研究」）。

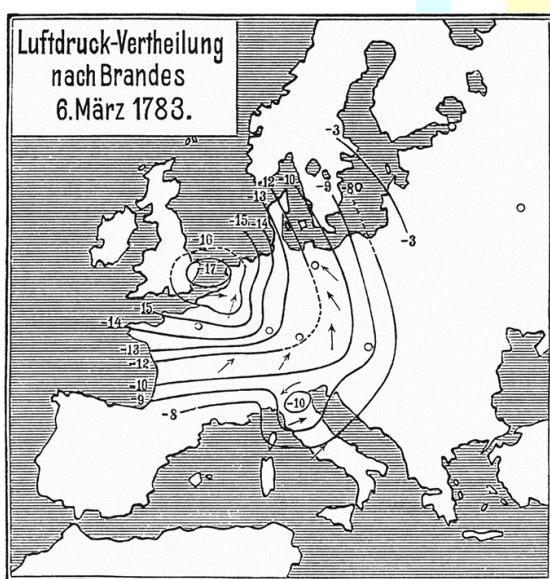


圖 5. 德國物理學家布蘭德斯於 1816~1820 年左右繪製的天氣圖。

此後，隨著觀測資料及天氣圖逐步累積，氣象學家終於有足夠多的資料來驗證假說，發展新理論。最後透過挪威氣象學家皮耶克尼斯（Vilhelm Friman Koren Bjerknes）及他領導的卑爾根學派（Bergen School of Meteorology），在 20 世紀初以數學及物理定律，釐清了空氣運動與氣壓梯度力及科氏力的關係，漸漸建立了動力氣象學及現代天氣預報的基礎，人類也終於搞清楚風從哪裡來了。

結語

我們學習的現代科學，來的並不是那麼理所當然。回顧歷史，會發現每個時代的科學家都可能被當時的信念框住，對於事實視而不見。或在他們摸索的過程中，受限於當時的科技水準及理解能力而受挫。但是每個時代都仍不斷創造出一些新觀念，淘汰一些

舊想法，因此在科學課程中應該包含了科學知識和世界觀的演變，也就是看看人類過去是如何理解自然的運作。學習科學史，知道人類文明是如何走到目前的樣態也是非常重要的過程。

王嘉琪

中國文化大學大氣科學系教授

圖片來源

- [1] Galileo G.: *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze* [Discourses and Mathematical Demonstrations Relating to Two New Sciences], translated by Crew H, di Salvio A. New York: Macmillan, 1914, p. 74–75
- [2] Evangelista Torricelli: Letter to Michelangelo Ricci concerning the Barometer, June 11, 1644. In: *Collected Works Vol. III* (1919) . Also in: William Francis Magie: *A Source Book in Physics* (New York: McGraw-Hill, 1935) .
- [3] Edmond Halley (1686) : An historical account of the trade winds, and monsoons, observable in the seas between and near the Tropicks, with an attempt to assign the physical cause of the said winds.
- [4] ETH Library (<https://library.ethz.ch/en/>)
<https://www.e-rara.ch/zut/content/pageview/141486>
- [5] Friendly, M. & Denis, D. J. (2001). Milestones in the history of thematic cartography, statistical graphics, and data visualization. Web document, <http://www.datavis.ca/milestones/>. Accessed: March 4, 2023.

參考文獻

- [1] 王嘉琪 (2022)：集眾人之力的氣象研究，《科學研習》雙月刊，第 61 卷第 3 期，P82-88。
- [2] 亞里斯多德，天象論（英文版） <http://classics.mit.edu/Aristotle/meteorology.html>
- [3] 科學革命：一段不存在的歷史。作者：史蒂文·謝平（Steven Shapin），譯者：許宏彬、林巧玲，出版社：左岸文化，出版日期：2010 年 07 月 30 日
- [4] 關於兩門新科學的對話（中文版），作者：伽利略，出版社：大塊文化，2019 出版。
- [5] 托里切利介紹 <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Torricelli/>
- [6] West, J.B. (2013) : Torricelli and the Ocean of Air: The First Measurement of Barometric Pressure. *Physiology* (Bethesda).66-73. doi: 10.1152/physiol.00053.2012. PMID: 23455767; PMCID: PMC3768090.

- [7] Brandes, H. W. (1819) : Einige Resultate aus der Witterungs-Geschichte des Jahres 1783, und Bitte um Nachrichten aus jener Zeit; aus einem Schreiben des Professor Brandes an Gilbert. Annalen der Physik. 61. 421-426. (Some results from the history of the weather in 1783, and asking for news from that time; From a letter from Professor Brandes to Gilbert)

