



智力的極限

人類是萬物之靈，但還想更聰明。
不過可能由於物理定律的限制，
我們大腦已經到達極限了。

撰文／福克斯（Douglas Fox）
翻譯／涂可欣

重點提要

- 人類智能可能已經接近演化的極限。各項研究顯示，可以讓我們變聰明的細微改變，大多數都會面臨物理定律設下的限制。
- 舉例來說，大腦變大可增加智力，但到了某個程度後報酬率開始遞減，大腦會過於耗能且運作緩慢；而大腦各區域間較佳的連線，同樣也有耗費能量和佔據空間的限制。
- 讓神經線路變細則會受限於熱力學，類似電晶體在電腦晶片上的情形，傳訊時產生太多雜訊。
- 人類可透過集思廣益獲得較高的智慧，輔以從書寫到電腦等科技，讓我們的心智跳脫身體的局限。

我從沒在科幻小說中看過有人討論這個想法。」

智能當然是一個籠統的詞，不容易評量，甚至很難定義。儘管如此，由大部份指標來看，人類堪稱地球上智力最高的動物。但人類大腦是否演化到資訊處理能力面臨極限的地步？以神經元為基礎的智能是否存在著一些物理限制，不僅困限了人類，還包括其他所有我們知道的生物？

大腦超耗能

要增強大腦功能最直覺而明顯的方法，就是讓腦變大。事實上，科學家對腦容量和智能高下的關聯，已經好奇了100多年。19世紀末和20世紀初，生物學家探討了生命的通則：動物界裡與身體質量（特別是大腦質量）有關的數學定律。體積大的優勢是可容納較多神經元，而增加腦的複雜度。但是智力顯然不光是由腦的大小來決定：牛腦比鼠腦大了100倍，但牛並不比小鼠聰明，相反的，隨動物體型增大的腦似乎都用來執行瑣碎的功能，例如體型變大會增加許多與智能無關的日常雜務，像是監控較多觸覺神經，處理來自較大視網膜的信號，和控制較多肌肉纖維。

1893年在爪哇發現直立人頭顱的荷蘭解剖學家杜波伊斯（Eugene Dubois），希望有一個能根據化石頭顱大小估計動物智能的方法，於是他致力找尋腦容量和動物體型間的精確數學關係，這個想法的假設是腦特別大的動物會比較聰明。杜波伊斯等人建立了一個腦和身體重量的資料庫，在一篇經典論文裡，研究人員列出3690種動物的身體、器官和腺體的重量，涵蓋蟑螂、黃喙白鷺、二趾樹懶和三趾樹懶等動物。

杜波伊斯的後繼者發現，哺乳動物大腦增大的幅度比牠們身體的增加來得小，更確切的說，腦重量與體重是3/4

第一次世界大戰前，諾貝爾獎得主、西班牙生物學家雷蒙卡厚爾（Santiago Ramón Y Cajal）曾詳細描述昆蟲的神經解剖構造。他將昆蟲視覺處理神經元的微小線路比喻為精緻的懷錶，而哺乳動物則像肚裡空空的老爺擺鐘。的確，蜜蜂的腦僅有幾毫克，卻一點不比哺乳動物遜色，能在迷宮或自然景物中穿梭自如，想到這裡，就不禁讓人謙卑起來。雖然蜜蜂的腦細胞較少，卻似乎能將功能發揮得淋漓盡致。

大象則是極端的反例。大象的腦是蜜蜂的500萬倍大，卻如美索不達米亞平原上龐大的帝國一樣缺乏效率，信號從腦的一端傳到另一端，或是從腦傳到腳，所需時間是蜜蜂的100倍，使得大象得減少仰賴反射，行動較遲緩，珍貴的腦資源必須用來計畫每一步怎麼走。

人類的大腦雖不像大象或蜜蜂的腦如此極端，卻很少人意識到相同的物理定律也嚴格規範著我們的大腦。人類學家曾推測腦容量增加可能面臨的障礙，舉例來說，較大的腦對雙足行走的人類來說，會讓嬰兒在出生時不易通過產道，但假設演化能解決產道問題，那麼我們會觸及更深入的問題。

例如，有人會想，演化過程可以增加大腦的神經元數目或提高神經元交換資訊的速度，而讓我們變得更聰明。但如果綜觀近期幾個研究並接受其中的邏輯推論，會得到以下的結論：這樣的改變很快就會遇到物理極限，而這些限制根植於神經元的本質和它們交流時在統計上相當嘈雜的化學交互作用。英國劍橋大學理論神經科學家勞夫林（Simon Laughlin）說：「資訊、雜訊和能量是密不可分的，它們的關係存在於熱力學層次。」

那麼是否熱力學定律限制了以神經元為基礎的智能？畢竟鳥類、靈長類、海豚或螳螂都使用了神經元。顯然我們從未以如此廣泛的角度來討論這個問題，但在這篇文章中受訪的科學家大致同意，這是個值得深思的問題。研究神經資訊編碼的美國賓州大學物理學家巴拉薩布藍曼尼恩（Vijay Balasubramanian）說：「這是個非常有趣的觀點，

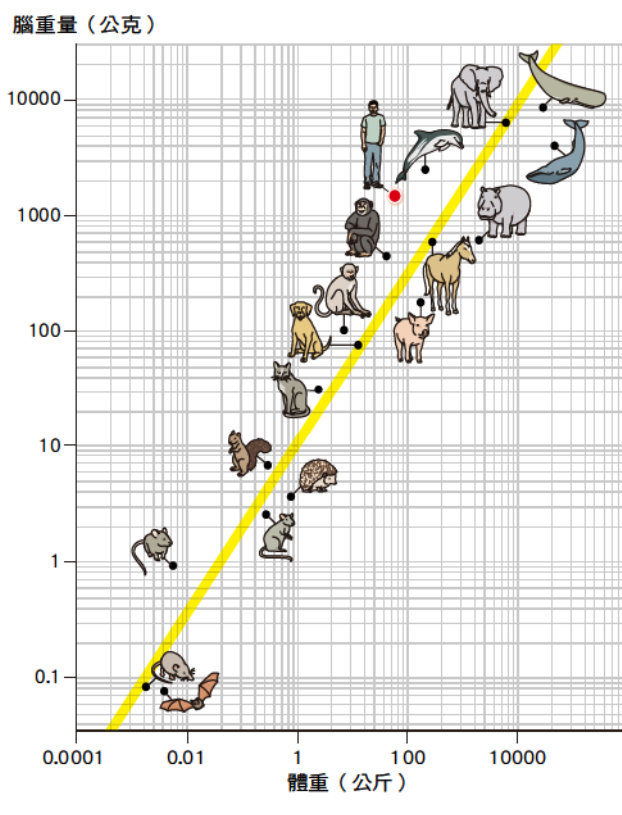


關於作者

福克斯是定居美國舊金山的自由作家，文章常見於《新科學家》、《發現》和《基督教科學箴言報》，曾獲頒多個獎項，最近榮獲美國記者及作家協會頒發的重要議題報導獎。

腦容量的異類

不管牠們有沒有比較聰明，大型動物通常也有較大的腦，不過當動物體型變大時，腦容量並不是以固定比率增加，比率約為體重的3/4次方；如果將腦與體重取對數，會呈現直線關係（下圖）。特別聰明的動物會偏離這個次方定律，而落在直線的上方。在所有物種中，人類偏離最多，為定律預測值的7.5倍。超過這個數值，腦容量擴增的效益開始遞減（參見50頁〈人類為何無法變得更聰明？〉）。



學家古貝格（Gustav Adolf Guldberg）在1880年代詳細描述了這耗時五小時的過程，包括用一把兩人操作的鋸子、一把斧頭、一把鑿子，還有很多氣力，像開罐頭般打開鯨魚的頭顱。

這些研究顯示，當大腦隨物種體型增加而變大時，出現了幾個細微但可能無法持續的改變。第一，神經細胞的平均大小增加，在大腦總神經元數也增加時，這樣讓神經元可以連接更多同伴。然而較大細胞在皮質中排列較為鬆散，細胞之間的距離變長，軸突也必須變長。較長軸突意味細胞間信號傳遞時間較久，若要維持相同的速度，軸突必須加粗（較粗的軸突傳信較快）。

次方的關係，所以體重是小鼠16倍的麝鼠，腦是小鼠的8倍大。從這數學關係可推衍出杜波伊斯想找尋的工具：大腦化商數（encephalization quotient）。大腦化商數能夠表示真實腦質量和根據動物體重推算出的預期腦質量之間的比值，換句話說，它可顯示物種偏離3/4次方定律的倍數。人類的大腦化商數為7.5（我們的腦為定律預測值的7.5倍），瓶鼻海豚為5.3，猴子大約4.8，而牛不出所料地跌至0.5（參見右側〈腦容量的異類〉）。簡言之，扣除處理瑣碎雜事（像是皮膚感覺）所需的神經元後，剩餘的神經元才與智力有關。更明白的說，智力與腦的大小至少有粗淺的關係。

當鳥類和哺乳類的腦擴增時，牠們必定受益於「規模經濟」，例如神經元傳遞信號時可使用的線路越多，每個信號便可攜帶較多資訊，這意味著當腦變大時，神經元每秒活化頻率可以較少。不過此時會有另一個趨勢與之抗衡。巴拉薩布藍曼尼恩說：「我相信，新增腦細胞對智能提升的效應存在著報酬率遞減的自然定律。」變大了負擔也增加，最明顯的就是消耗的能量增加。以人類來說，大腦是全身最飢渴的器官，它的重量只有體重的2%，卻像貪婪的條蟲般佔用了20%的能量（休息狀態下），新生兒更可高達65%。

務必保持聯繫

隨腦變大而增加的能量負荷，大多來自腦的通訊網絡：人類大腦皮質的耗能就有80%是用在通訊；隨著腦的擴增，還有些更精細的結構性問題，讓神經連結更為困難。事實上，20世紀初一些生物學家不但繼續蒐集著腦質量的資料，他們也投入更艱鉅的任務：找出大腦的「設計原則」，並探討不同大小的腦如何遵循這些設計原則。

典型神經元擁有一條細長的尾巴，稱為軸突（axon），軸突的末端會分叉，分支的頂端形成了突觸，也就是與其他細胞的接觸點。軸突就像電纜，可以連接大腦不同區域，也可以集結成神經，從中樞神經系統延伸到身體各個部位。

在研究初期，生物學家透過顯微鏡測量了軸突的直徑，計算了神經細胞的大小和密度，以及每個細胞擁有的突觸數量。他們檢查幾十種動物腦部裡數百、甚至數千個細胞，想讓他們的數學曲線更完美，可應用在體型更大的動物，他們甚至想辦法從鯨魚屍體中取出完整的腦部，生物

研究人員也發現，當腦隨著不同物種增大時，大腦會分隔出較大也較多不同的區域，如果將腦組織染色，放在顯微鏡下觀察，你可以看見那些皮質區域呈現不同的顏色。這些腦區通常對應著特化的功能，例如理解語言或辨識臉孔。而且隨著腦變大，大腦特化還出現另一層次：左腦和右腦對稱區域負責了不同的功能，例如一邊負責空間感，另一邊負責口語理解。

幾十年來，人們以為大腦形成較多工作區隔是智力的表徵，但美國愛達荷州2AI實驗室的理論神經生物學家常逸梓（Mark Changizi）認為，它可能反映了一個更平實的真相：特化可補償大腦變大後的連結問題。從小鼠腦到牛腦，細胞數量增加了100倍，但神經元卻趕不及維持相同程度的連結，為了解決這個問題，大腦把功能相似的神經元劃在一起，形成密切連結的單元，在各單元間則以少數長途線路銜接。左、右腦的特化也是為了解決類似的問題，它減少必須跨越左、右腦半球的資訊，因此減輕大腦維持跨腦半球長距軸突的負擔。常逸梓說：「我們在較大的腦所看到的複雜現象，全都只是當腦變大時，為了解決連結問題而不得不然，並沒意味這樣的腦會比較聰明。」

波蘭科學院計算神經科學家卡博斯基（Jan Karbowski）認同這個看法，他說：「大腦要同時讓幾個參數最佳化，一定得在其中取捨，你要改進某個特點，就會犧牲另一個特點。」舉例來說，當腦增大時，為了維持左右腦的連結度，連接左右腦的軸突束胼胝體（corpus callosum）也加粗，會產生什麼結果？如果讓胼胝體的軸突變粗，以避免左右腦信號傳遞延遲，又會如何？恐怕不會太好，胼胝體的擴增很快會推遠腦半球間的距離，抵消改進的效應。

許多實驗清楚證明了軸突粗細與傳導速度間的相抵現象。卡博斯基說，到最後，神經元確實隨腦的擴增而變大，但沒有快到足以維持一樣的連結程度；軸突確實隨腦的擴增而變粗，但沒有快到足以彌補較長傳導距離造成的延誤。

巴拉薩布藍曼尼恩說，讓軸突變粗的程度不要太大，將可節省空間和能量。軸突變粗一倍，能量消耗即增加一倍，電脈衝傳導速度卻只提高40%。即使動用所有節樽辦

法，當腦容量擴增時，白質（軸突）體積膨脹的速度仍比灰質（含細胞核的神經元本體）還要快。換句話說，腦變大時，大部份增加的體積都是線路，而不是實際進行運算的細胞，這現象再度顯示擴增終究是有限度的。

靈長類的優勢何來

因此我們很容易可看出，為什麼牛有柚子般大的腦，卻不比腦小如藍莓的小鼠聰明。不過演化卻另闢蹊徑，從腦的組成單元著手。2007年，美國范德比爾特大學神經科學家卡斯（Jon H. Kaas）和同事比較了多種靈長類腦細胞的型態，意外發現了一個扭轉遊戲規則的改變，可能賦予人類優勢。

卡斯發現靈長類和其他大部份哺乳動物不同，牠們皮質神經元隨大腦擴增而變大的現象並不明顯，雖然有少數神經元變大，但這些都是負責維持大腦良好連結的細胞，剩下絕大多數的細胞並沒有改變大小。因此當靈長

類的腦隨物種不同而擴增時，神經元排列密度仍維持不變，從絨猴到夜猴，腦容量加倍，神經元數大約也加倍；若是在齧齒動物，細胞數目只會增加60%。這差異有深遠的影響，人類1.4公斤的大腦含1000億個神經元，齧齒類若想擁有和人類相同數量的神經元，並遵循牠們神經元 - 腦容量的尺度定律的話，牠們得扛著45公斤的腦，而且從代謝角度來看，整個腦會耗盡所有能量。卡斯說：「這可能是大型齧齒動物看來並不比小型齧齒動物聰明的原因之一。」

神經元較小且排列緻密，看來確實會影響智力。2005年，德國不來梅大學神經生物學家羅斯（Gerhard Roth）和迪奇（Ursula Dicke），檢查了幾個比大腦化商數更能有效預測物種智力（由行為複雜度判定）的性狀，羅斯說：「唯一與智力有密切關聯的是皮質神經元數，再加上神經活動速度。」而神經活動速度會隨神經元之間距離增加而減慢，因軸突髓鞘化程度而加快。髓鞘是包裹在軸突外的絕緣脂質，可讓信號傳遞較快。

如果羅斯的看法正確，那麼靈長類較小的神經元將可產生雙重效應：第一，它們讓變大的腦可以增加更多細胞；第二，細胞排列緊密讓訊息傳遞較快。雖然大象和鯨魚的

大腦皮質中的神經元和其軸突已接近物理極限！

勞夫林，英國劍橋大學

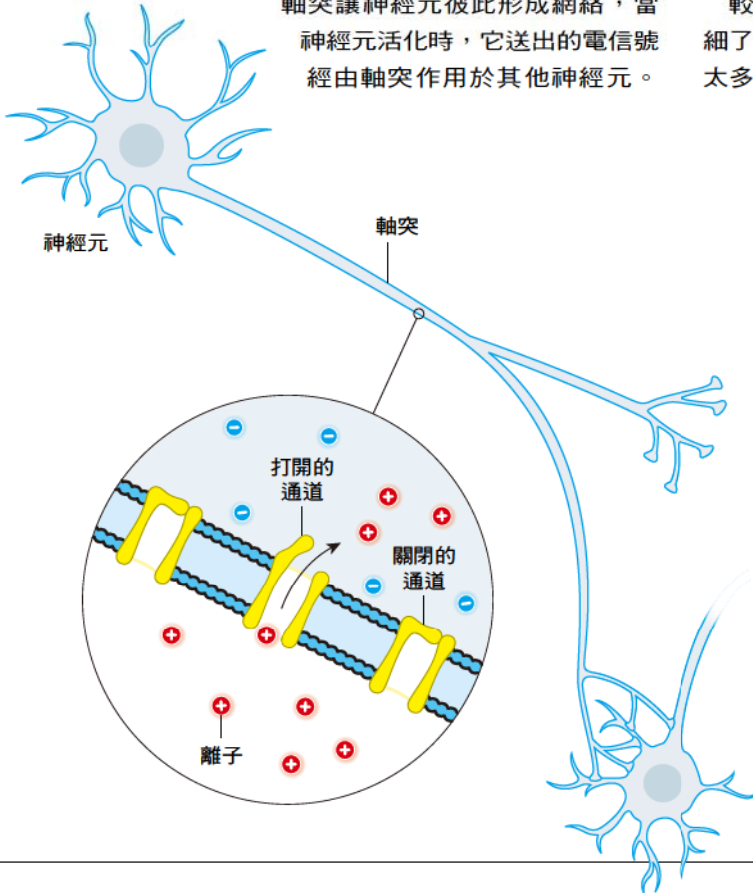
思想的物理基礎

就像縮小電晶體讓電腦功能變強，組成單元較小的腦原則上功能更強、運作更快。然而人類神經元（特別是軸突）可能接近或已達物理極限。

軸突讓神經元彼此形成網絡，當神經元活化時，它送出的電信號經由軸突作用於其他神經元。

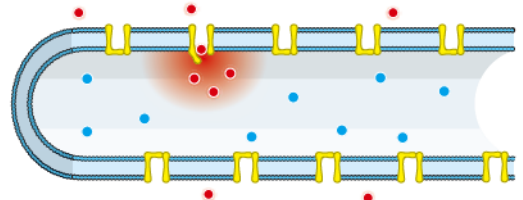
軸突傳遞信號的方法是開啟細胞膜上的通道，讓離子進出，當足夠的離子穿過通道，改變了細胞膜的電壓，而電壓變化又會讓鄰近通道開啟，產生骨牌效應。

較細的軸突可節省空間、減少耗能，但軸突似乎無法更細了，再縮減下去，離子通道的隨機開關將會讓軸突產生太多雜訊，使原本不該活化的神經元誤送出太多信號。



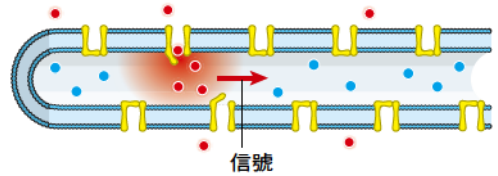
無關緊要的雜訊

在典型軸突上，若有一個離子通道自發性開啟，它會在產生任何效應前關閉。



意外的連鎖效應

在較細的軸突上，一個離子通道開啟後，有較大會讓鄰近通道跟著開啟，引發連鎖反應。



智力也不低，但牠們較大的神經元和較大的腦卻讓效率變差，羅斯說：「牠們神經元密度低多了，表示細胞之間的距離較遠，神經脈衝傳導速度較慢。」

事實上，神經科學家最近在人類身上也觀察到類似模式：腦區之間通訊最快的人看起來也最聰明。2009年，荷蘭烏特列茲大學醫學中心的范登侯維爾（Martijn P. van den Heuvel），利用功能性磁共振造影來測量不同腦區聯繫的直接程度：它們的信號會利用少數接點，還是需要經過許多媒介。范登侯維爾發現，腦區間線路越短的人智商越高。同年，英國劍橋大學造影神經科學家布爾摩爾（Edward Bullmore）也以不同方法獲得類似結果，他們比較29名健康受試者的工作記憶（能同時記得幾個數字的能力），然後從受試者頭皮測得腦磁波記錄，估計腦區之間傳訊的速度，通訊線路最直接、神經交流最快的人，工作

記憶也最佳。

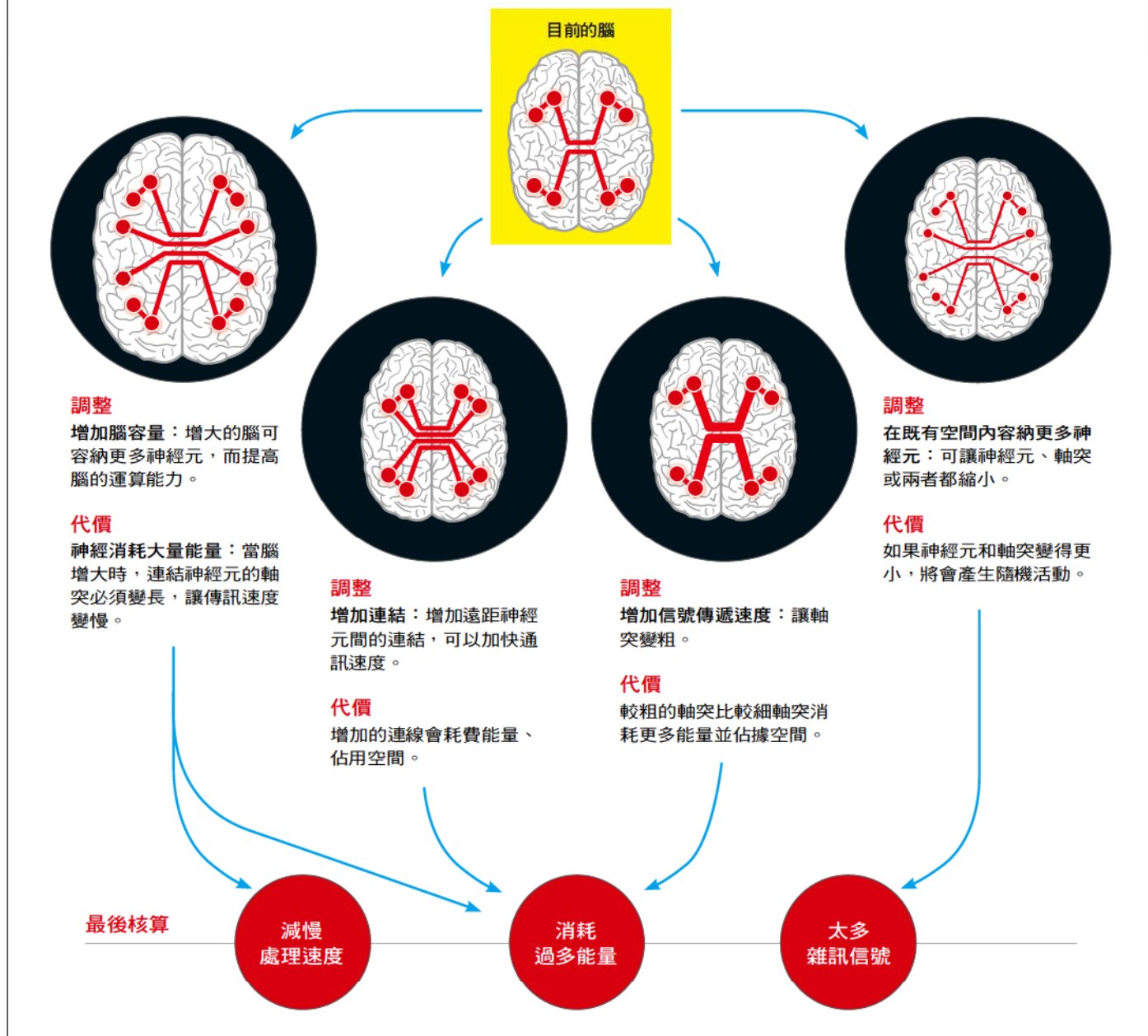
這是個非常重要的看法。我們知道當腦變大時，為了節省空間和能量，會限制連結各腦區的直接線路數量，人類大腦這種長距離連線較少，但布爾摩爾和范登侯維爾指出，這些稀少的直達線路對智力有很大的影響：若為了節省資源而刪減直接連結，即使數量極少，都會讓智力明顯變差。布爾摩爾總結：「你為了智能，必須付出代價，而代價就是不能任意減少連結線路。」

智能的物理極限

如果神經元間的交流、腦區間的聯繫是限制智力的主要瓶頸，那麼演化出更小的神經元（間距更短且傳訊更快）將可打造更聰明的腦；如果軸突能演化成不加粗但能更快將信號傳遞更遠，也可提高大腦的效率。但有些障礙讓神

人類為何無法變得更聰明？

縮小組成單元只是演化增進我們智能的其中一個辦法，但這些調整也伴隨著缺點，並且會遭遇熱力學限制，或許人類的大腦已經是神經元系統中的極致了。



經元和軸突無法縮得太小，你可以說這是所有限制的源頭：讓神經元產生電脈衝的離子通道，天生就不可靠。

由蛋白質構成的離子通道是位於細胞表面的小活門，透過蛋白質分子摺疊的變化來控制活門的開或關。當離子通道打開時，鈉、鉀、鈣離子可穿過細胞膜，產生神經元交談時倚賴的電信號。由於離子通道非常微小，很容易因熱

振動等細微變化而意外開關，有個簡單的生物學實驗可完全揭露它的缺陷。用一根細小的玻璃管將一個離子通道分離出來（有點像用玻璃杯將人行道上的一隻螞蟻蓋住），然後調整離子通道的電壓。理論上，電壓改變應可控制通道的開啟或關閉，但實際上無法像開關廚房的燈一樣簡單，離子通道的開或關往往是隨機的，有時完全打不開，

有時在不該開啟的時候打開，改變電壓充其量只是增加通道開啟的機率。

這聽起來像是演化設計上糟糕的缺陷，卻是折衷之道。勞夫林說：「如果你讓通道的彈簧太鬆，它會因為雜訊而不斷開關；如果太緊，雜訊減少了，卻要費力才能開關。」這迫使神經耗費較多能量來控制離子通道。換句話說，為了節約能源，神經元使用了一觸即發的離子通道，代價就是通道會意外開啟或關閉。這個辦法只有在離子通道數量龐大、可「投票表決」神經元該不該產生電脈衝時才可靠。但是當神經元縮小，投票制就會出問題。勞夫林說：「神經元縮小，可傳遞信號的通道數也隨之減少，這樣將導致雜訊增加。」

勞夫林和同事在2005年和2007年發表的兩篇論文中，計算了軸突縮小的限制是否是為了要維持足夠的離子通道，結果讓人驚訝，勞夫林說：「當軸突的直徑小到約150~200奈米時，信號就會充滿雜訊。」離子通道太少的軸突，會因為一個離子通道意外開啟，讓原本沒有要活化的神經元誤送信號（參見49頁〈思想的物理基礎〉）。現在大腦裡最小的軸突可能像打嗝般，每秒發出6次雜訊，若讓軸突再縮小一點點，它們會像連珠砲般，每秒產生超過100次的雜訊。勞夫林總結說：「大腦皮質中灰質的神經元和軸突的運作，已接近物理極限。」

資訊、能量和雜訊間的得失問題並非生物學獨有，從光纖通訊、業餘無線電到電腦晶片都存在相同的窘境。就像離子通道一樣，電晶體是電子信號的守門員。50年來，工程師不斷縮小電晶體，在晶片上裝入更多組件，製造出運算得更快的電腦。目前最新晶片上的電晶體為22奈米，在這些尺寸下，均勻摻雜變得極為困難（摻雜是在矽晶片中加入少量其他元素以調整半導體特性），如果電晶體縮小到10奈米，一個硼原子的存在與否就會造成影響，讓電晶體的行為變得難以預測。

為了避開目前電晶體的限制，工程師可能會選擇以全新的科技重新設計晶片，但演化卻無法整個重頭來過。瑞士巴塞爾大學發育神經生物學家瑞契特（Heinrich Reichert）說，演化必須在既有設計下使用存在了五億年的零件，就像是使用改裝的飛機零件來造戰艦一樣。

此外，還有其他理由讓我們相信「出現重大演化躍進，造就更聰明大腦」不太可能發生。神經元剛演化出來時，生物有廣泛多樣的可能性，但六億年後，奇怪的事發生

了。羅斯指出，蜜蜂、章魚、烏鴉和哺乳動物的大腦乍看之下完全不像，但若檢查牠們視覺、嗅覺、導向、記憶事件先後順序等特定功能的神經線路，「全都有相同的基本排列。」這樣的趨同演化通常代表特定的解剖或生理機制已趨近成熟，沒有多少改進的空間。

或許生命已經找到了最佳的神經藍圖。細胞在成長中的胚胎裡，靠著信號分子和物理性牽引，一步步按照已經在演化過程裡根深柢固的藍圖，形成大腦。

向蜜蜂學習

就目前既有組成元件來看，人類大腦的複雜度是否已演化到物理學容許的極限？勞夫林認為，腦功能可能不像光速有個固定值，「它較可能是報酬率遞減的關係，到後來你投資得越來越多，回收卻越來越少。」我們的腦只能容納一定數量的神經元，神經元彼此間只能建立一定數目的連結，這些連結每秒只能傳遞一定頻率的電脈衝。如果我們的身體和腦增大，就得付出代價：能量消耗、散熱，神經信號在身體各部位之間傳遞的時間也會隨之增加。

不過人類可能有更好的辦法，不靠演化即可提升心智能力，畢竟蜜蜂和其他社會性昆蟲都這麼做：與同巢同伴協力合作，所形成的集體智能可高出個體智能的總和。我們人類也可透過社會互動，學習如何集思廣益。

此外，人類還有科技。幾千年來，文字讓人類能將遠超過大腦記憶容量的資訊儲存在體外，我們或許可以說，電腦網路是人類智力向外擴展的最終結果。不過，也有人認為網路會讓我們變笨，在某些層面來說可能是真的，文化與電腦是人類集體智慧的產物，卻可能會減少演化出更聰明個體的動力。

SA

涂可欣是陽明大學神經科學研究所碩士，曾於美國伊利諾大學遺傳所從事博士研究，現專職科普翻譯。

延伸閱讀

Evolution of the Brain and Intelligence. Gerhard Roth and Ursula Dicke in *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 9, No. 5, pages 250–257; May 2005.

Cellular Scaling Rules for Primate Brains. Suzanaerculano-Houzel, Christine E. Collins, Peiyang Wong and Jon H. Kaas in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol. 104, No. 9, pages 3562–3567; February 27, 2007.

Efficiency of Functional Brain Networks and Intellectual Performance. Martijn P. van den Heuvel, Cornelis J. Stam, René S. Kahn and Hilleke E. Hulshoff Pol in *Journal of Neuroscience*, Vol. 29, No. 23, pages 7619–7624; June 10, 2009.

SCIENTIFIC AMERICAN ONLINE

聽作者怎麼說？請上網頁：ScientificAmerican.com/jul2011/brain