

從量變到質變

「量變造成質變」似乎是馬克思的思想，與自然科學沒有什麼關係。其實物理科學裡的許多現象正肇因於量變造成的質變，而背後的原因常與我們耳熟能詳的基本物理概念相關。

■ 陳宣毅 · 黃慕傑

20世紀以來，物理科學朝向兩個截然不同的方向發展。一方面在組成物質的基本單元上有更深入的認識，發現了許多基本粒子和它們之間的交互作用。這方面的研究就像小孩子把玩具車拆開，發現裡面有許多齒輪、螺絲和彈簧，以及這些元件的連結方式。這種把物質結構的基本單元和交互作用找出來的研究思維，稱作化約論。

化約論者的研究一向引人注目，也讓許多人以為物理科學的研究都是化約的。因此媒體所報導的物理研究進展，大約不脫新的粒子加速器、黑洞的觀測和理論等以化約論為主軸的研究領域。有人甚至宣稱，找到了組成物質的最基本粒子和它們之間的交互作用，就可以完全了解宇宙如何運行，而這便是基礎物理學的終結。

另一方面，過去百年裡，我們對許多由這些基本單元組合在一起以後形成的巨觀物理系統，如固體、液晶、塑膠等的認識，也有大幅進展。在大部分的科學報導裡，研究



● 化約式的研究好比是把玩具車拆開，試圖從組成的元件了解玩具車工作的原理。

知道基本單元和它們之間的交互作用，
仍無法了解許多基本單元放在一起可能發生的現象，
這種情形可簡單地說成「量變可以造成質變」。



● 了解單一神經元的結構和神經元間連結的原理，對於大腦的智慧，如家貓的行為，並沒有多大的幫助。

固體、液晶和塑膠常被看成應用科學或材料科學。雖然這些研究成果大大地改變了我們的日常生活，大家仍然很容易覺得，這些研究只是把化約論者研究的結果加以應用，並沒有關於大自然如何運作的最基本的觀念在裡面。

然而，所有的訊息真的都藏在基本單元和它們之間的交互作用裡嗎？知道螺絲和彈簧如何連

結，也許就可以讓小孩子了解玩具車如何運動。可是仍然有許多現象，並非靠化約論的知識就可以推論出來的。舉例來說，人類對於神經元的構造和神經元與另一神經元之間訊息傳遞的了解，已經相當深入，但是距離了解大腦如何思考，仍然有很長的路要走。而對單一神經元研究的新進展，大約不會對大腦運作原理的

研究產生決定性的幫助。

我們不了解大腦，最主要是因為對神經網絡這樣複雜系統的功能（也就是思考、記憶等功能），如何經由它的組成單元的組織來形成，缺乏足夠的知識。這種「知道基本單元和它們之間的交互作用，仍無法了解許多基本單元放在一起可能發生的現象」的情形，也可簡單地說

成「量變可以造成質變」，或「多了就不一樣」。

接下來將說明量變造成質變是科學裡常見的事，而在物理科學裡量變造成質變的原因，常來自大家耳熟能詳的基本物理觀念。既然多了就不一樣，我們對所謂基本觀念和基礎研究的範疇，也需要仔細思考。因為研究許多基本單元放在一起以後可能發生什麼事，是和研究基本單元之間的相互作用一樣的「基礎」。

下面的簡單例子可以幫助我們了解，為何量變造成質變牽涉到物理學中基本的觀念。

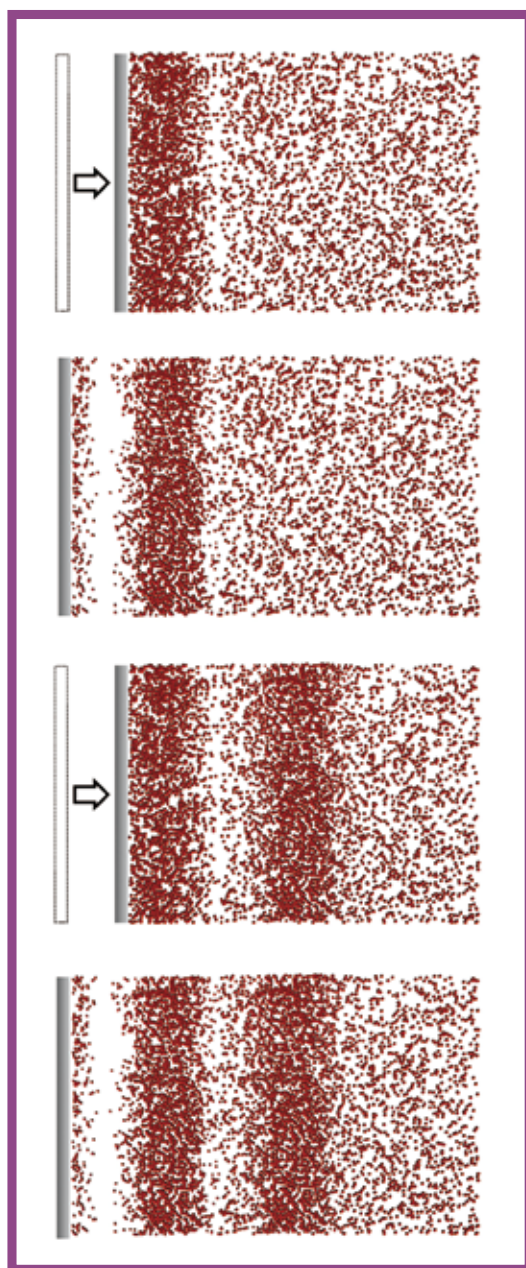
氣體分子與聲波

在考慮許多常見的物理現象時，並不需要考慮物質在比原子更小尺度時的結構。例如在思考氣體的物理性質時，可以把氣體分子當作物質的最小單位。這些分子太接近時相斥，遠離時相吸，又具有很高的動能，因此它們不會聚成液態；而且由於許多的相互碰撞，每個分子的飛行軌跡呈不規則狀。上面這段敘述，可以說是從化約論出發所得到的氣體的圖像。

「且慢！」氣體當然沒那麼單調，室外的空氣有風，也可以傳遞聲音，這些現象如何從各個氣體分子的運動看出來呢？

以聲波為例，我們可以想像輕彈一個音叉使它振動。當音叉向右移動時，附近的氣體分子被推向右方移動，使得這一區域的氣體密度變得較高。而這一密度較高的區域，有許多向右運動的分子撞到了區域右方做不規則運動的分子，這些碰撞造成了動量和動能在分子間交換。於是在下一刻時，許多原先在右方做不規則運動的分子變為向右運動，使得密度較高的區域也向右方移動。

而當音叉向左移動時，許多原先



● 聲波的產生，需要在聲波波長的範圍內有大量的氣體分子互相碰撞，聲源振動時給予氣體分子的能量，才能以波的形式在空間中傳遞。

在音叉附近向右運動的分子變為向左運動，結果在原先密度較高的區域中，離開的分子數比進入的分子數多，因此這時這個區域的分子密度下降，而在區域右方鄰近區域的分子密度增加。這樣周而復始，於是音叉四周的氣體密度呈疏密相間，而且這樣的密度變化，由於氣體分子彼此碰撞，在空間中傳遞開來成為聲波。

值得注意的是，聲波傳遞時，氣體分子的位移比起聲波的波長要小了許多。被聲波傳遞的是分子密度及分子運動的型態，這個型態代表的其實是該區域有較高的能量密度。

不均勻的密度使氣體被壓縮或擴張，換句話說，密度改變使氣體在該區域有較高的位能，因此氣體有恢復均勻密度的傾向。而在密度疏密相間的區域裡，分子在不規則的運動之外所得到的額外的平均運動傾向，則來自原先儲存的位能。因此有聲音的區域裡，氣體分子平均來說也擁有較高的動能。這就是為什麼我們常說聲波傳遞的是能量，而不是介質。

上面的討論可以如此總結，如果振動氣體，製造出疏密相間

的區域，這個區域的能量密度會比周圍高，這些能量能以聲波的形式向四面八方傳遞。

箭頭氣體分子

一樣是氣體，但是現在假設每一個分子都是一個小磁鐵。為了便於想像，在每一個分子上加一個箭頭來標明分子的磁北極的方向。這些箭頭的方向可以因為外加磁場，或藉著和其他分子碰撞而改變。

讓我們在空間中加一個小小的磁場，使得這些分子的箭頭有一點向左指的傾向。再假設擁有某個機器，可以讓這機器附近一小塊區域的分子都指向同一方向，我們可以操縱這個被選出來的方向，使它隨時間變換，先向右、再向左、再向右、再向左……如此反覆變換。這樣，可以看到如聲波般的一個空間中箭頭方向交替的「箭頭波」的傳遞嗎？這樣的波如果存在，傳遞的會是箭頭方向的偏好。

讓我們想想箭頭的方向會如何隨時間變化和傳遞。假如某一瞬間，這個機器附近的氣體分子箭頭都向右，接下來這些分子雖然會向四方運動，但它們箭頭的方向卻會因為外加的小磁場隨時

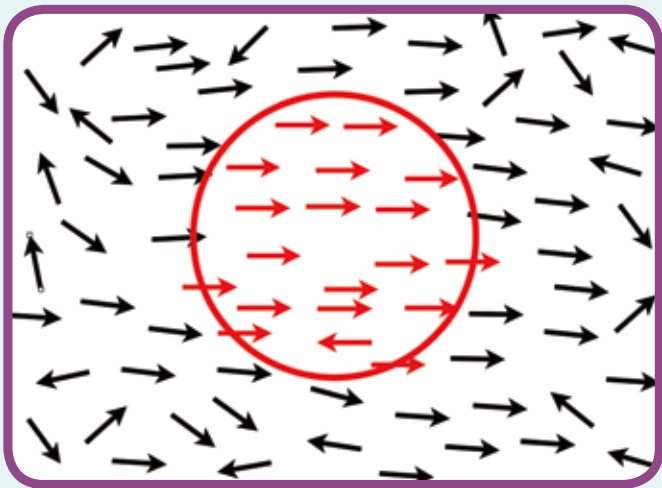
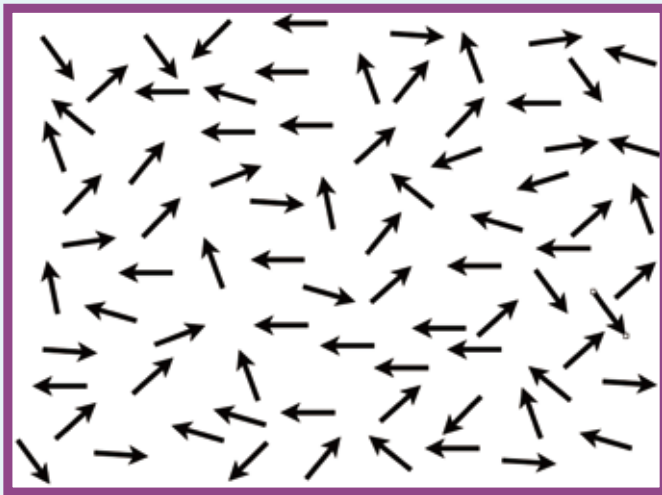
間繼續改變，結果氣體分子離開機器附近以後，很快箭頭又都有點向左指的傾向。因此在這個氣體中，「箭頭波」並不存在。

也許你會想，這一切都是外加磁場造成的，把外加磁場關了如何？其實外加磁場是否存在並不重要。如果外加磁場不存在，則離開機器附近的分子的箭頭方向也會由於分子間的碰撞而改變，由於沒有外來的磁場指出這些箭頭該朝向何方，很快它們便指向四面八方，看不出特定的方向。

現在我們知道了，氣體無法傳遞「箭頭波」，也就是說，向四面八方傳遞氣體分子的磁北極方向，在空間中交替變化的現象並不存在，但是任何氣體都可以傳遞聲波。因此，有些氣體的性質並不是由氣體的組成分子，以及這些分子之間的交互作用這類細節來決定的。

守恆律與聲波

讓我們看看造成「氣體無法傳遞箭頭波」，與「所有氣體都可以傳遞聲波」之間差異這麼大背後的原因。我們可以定出一個物理量來表示空間中某一小區域的氣體分子磁北極的平均排列方



● 具有磁性的氣體分子，在沒有外加磁場的時候，每個分子的磁北極的指向沒有規律。在空間中一個小範圍加一個向右的磁場，可以使該區域氣體分子的磁北極指向右方，但是只要氣體分子離開這區域，經過幾次碰撞後，磁北極的指向便沒有特定的傾向。

向和排列整齊的程度，這量有大小也有方向，是一個向量，一般人稱它為磁化強度。因此「無法傳遞箭頭波」應該說成「沒有傳遞磁化強度的波」。

這樣的波不存在的原因，並不是由於分子的磁北極喜歡指向磁場的方向，而在沒有磁場時，則沒有特定偏好的方向。如果仔細和聲波的傳遞比較，就可以發現沒有傳遞磁化強度的波，其實是由於磁化強度不需要守恆的關係，而聲波可以傳遞能量，則可以歸因於能量守恆定律。

在產生聲波的音叉振動時，被運動中的音叉撞擊的氣體分子得到了額外的能量，這是氣體密度疏密相間區域額外能量的來源。這額外的能量無法憑空消失，也不能突然增加，只能藉著氣體分子間的碰撞逐漸在空間中傳遞。於是即使不同的氣體，它們的組成分子間的作用各不相同，聲波總是存在的。

另一方面，磁化強度不需

隨著一個物理系統的分數逐漸增加，
可以發現只有少數分子的系統中沒有的物理現象，
在氣體中的聲波就是一個例子。

要遵守守恆律，某一區域的分子如果箭頭原本隨意指向各方向，下一刻可以由於外加磁場而指向同一個方向；反之，如果沒有外加磁場指出特定的方向，某一刻箭頭指向同一方向的氣體分子，在經過幾次碰撞後，就可以變成沒有任何秩序了。因此用個機器把某個小區域的磁化強度變成隨時間規律地左右變換，並沒有辦法讓這個箭頭分布的型態在空間中傳遞出去。從這裡可以看出，聲波的存在是物理守恆律的結果，和各個材料的特殊組成單元或組成單元間的交互作用的細節無關。

量變造成質變

比較細心的讀者可能會很快指出，我們的討論不應該就這樣結束。聲波存在固然需要能量守恆定律，另一個不可或缺的是大量的氣體分子。要有疏密波，先要在一個聲波波長的範圍內放進許多氣體分子，不然哪有什麼「密度在空間中的變化」可言！一個顯而易見的例子是，如果一

個密閉容器裡只有寥寥幾個氣體分子，怎麼可能想像密度和聲波這些概念呢？

的確，如果只考慮很少量的氣體分子，就算有能量守恆，也沒有聲波。每個氣體分子在兩次碰撞間所走的路徑，必須比聲波的波長短許多倍，否則不會有能量被傳遞，而分子卻沒有什麼位移的情形。換個角度說，在聲波的一個時間周期裡，每個氣體分子也都經過了許多次的碰撞。因為能量是守恆的，所以這許多的碰撞最後造成能量的傳遞；不守恆的磁化強度則在幾次碰撞後便消失不見。

隨著一個物理系統的分數逐漸增加，可以發現只有少數分子的系統中沒有的物理現象，在氣體中的聲波就是一個例子。而聲波的出現除了需要許多氣體分子外，還需要它傳遞的物理量—能量—滿足守恆律。

除了聲波以外，還可以列出許多隨系統粒子數增加而出現的物理現象，像是擴散現象、熱的概念、金屬和非金屬的區別、

玻璃態等。這些隨量變而出現的性質，起因當然各不相同，需要一一探索。除了上述比較簡單的物理系統以外，如何從神經元和神經網絡來了解腦，甚至從個人的行為來了解整個社會經濟現象等這類問題，雖然屬於生命和社會科學，也一樣有許多量變造成質變的現象。

找出量變造成質變背後的原因，是一門引人入勝的學問。以前物理學家稱它為統計力學和凝態物理學，現在人們發現這類研究在生命科學，甚至經濟、財金、政治，都用到許多類似的方法和觀念，因此，現在通稱所有關於量變造成質變的研究為複雜性科學。當然，複雜性科學不是建立在化約論上的應用科學，它應該被視為和研究基本粒子之間的交互作用一樣的基礎。如果要了解宇宙如何運行，對量變造成質變的了解絕對不可或缺。

陳宣毅·黃慕傑

中央大學物理系
