

活生生的量子世界

量子力學不只與微小的粒子有關，還適用於大大小小的東西：鳥類、植物，甚至人類。

撰文 / 費德拉 (Vlatko Vedral) 翻譯 / 張明哲

重點提要

- 量子力學通常被認為是描述微觀之物（分子、原子、次原子粒子）的理論。
- 不過，幾乎所有的物理學家都認為它適用於各種大小的東西。它的特徵無法彰顯，不只是因為物體的大小。
- 過去幾年來，實驗學者從越來越多的巨觀系統看到量子效應。
- 纏結這種典型的量子效應可以發生於大的、常溫的系統裡，包含生物體在內，即便分子的振動可能會破壞其纏結。

根據標準的物理教科書，量子力學是微觀世界的理論，用來描述粒子、原子和分子；而描述巨觀尺度的梨子、人和植物時，就得改用一般的古典物理。分子與梨子間有個邊界，在那兒量子力學的奇特行爲消失，出現我們熟悉的古典物理行爲。量子力學只適用於微小世界的這種印象，普遍存在於人們的科學知識裡。例如，在暢銷名著《優雅的宇宙》的第一頁，美國哥倫比亞大學的物理學家格林恩 (Brian Greene) 提到，量子力學「提供一個理論架構，讓我們理解最小尺度下的宇宙。」古典物理（涵蓋量子以外的所有理論，包括愛因斯坦的相對論）則負責最大尺度的世界。

然而，對世界做這種方便的切割，其實是種迷思。很少現代物理學家會認為古典物理和量子力學具有同等的地位，古典物理應該僅是具有量子本質的世界（不論大小）的一種有用的近似。雖然在巨觀世界可能比較難看到量子效應，但原因基本上跟大小無關，而是跟量子系統彼此作用的方式有關。一直到 10 幾年前，實驗學者仍未證實量子行爲可以出現在大尺度系統，如今這已是家常便飯。這些效應比任何人所想的都還要普遍，甚至可能出現在我們身體的細胞裡。

即使是我們這些靠研究這類效應吃飯的人，也還沒完全理解它所教給我們的、關於自然運作的方式。量子行爲難以視覺化，也不容易以常識理解。它迫使我們重新思考觀看這宇宙的方式，並接受一個新穎又陌生的世界圖像。

纏結難解的故事

對量子物理學家而言，古典物理是全彩世界的一個黑白影像，無法完整呈現這個豐富的世界。在舊教科書的觀點裡，當尺度一變大，色調就不再豐富。個別粒子具量子性質，一堆粒子則變為古典。然而，關於尺寸並非決定性因素的第一個線

索，可以追溯到物理學最有名的思想實驗之一：薛丁格的貓。

1935年，薛丁格想出這個病態的情節來說明微觀與巨觀世界是連在一起的，我們無法畫出界線。量子力學說，放射性原子可以同時處於衰變及未衰變的狀態；若將原子與一瓶可以殺死貓的毒藥連上關係，使得原子衰變會導致貓死亡，則貓會如同原子般處於模稜兩可的量子態。怪異性質由一個感染到另一個，大小在此不重要，問題是為何貓的主人都只會看到他們的寵物非死即活？

以現代的觀點，世界看起來像古典的，是因為物體與環境間複雜的交互作用將量子效應掩藏了起來。例如，貓的生死資訊透過光子和熱交換，迅速滲漏到環境裡。量子現象會牽涉到不同古典狀態的組合（例如同時死與活），而這種組合很快會散逸掉。這種資訊的滲漏是「去同調」過程的基礎。

大的東西比小的容易去同調，這就是為什麼物理學家通常可以只把量子力學當成微觀世界的理論。但在許多例子裡，這種資訊滲漏可被減緩或停止，如此一來，量子世界就會全然顯露。纏結（entanglement）是典型的量子現象，這是薛丁格1935年在那篇將他的貓介紹給全世界的論文裡發明的名詞。纏結將幾個獨立粒子綁為不可分割的整體。一個古典系統總是可以分割的，至少原則上是如此；由個別組件集合而得的性質，在個別組件裡也會有。但是纏結的系統無法如此分割，並且會導致奇怪的結果：纏結的粒子即使互相遠離，仍會表現為單一整體，這就是愛因斯坦所稱、著名的「幽靈般的超距作用」。

物理學家通常講的是電子等基本粒子的纏結。這些粒子可粗略想像為旋轉的小陀螺，以順時針或反時針方向旋轉，轉軸指向任意給定的方向：水平、垂直、45度角等。測量其自旋時，必須選定一個方向，觀測粒子是否順著那個方向轉動。

為了方便說明，假設粒子表現的是古典行為。你可以將一個粒子沿水平軸順時針方向旋轉，另一個沿水平軸反時針方向旋轉；如此一來，兩者的總自旋為零。它們的轉動軸在空間中是固定的，測量結果會取決於你選的方向是否沿著粒子的轉動軸。如果對兩者都做水平軸的測量，則會看到兩個粒子轉動方向相反；如果都做垂直軸的測量，則完全不會偵測到這兩個粒子的轉動。

然而，如果是具有量子性質的電子，則情況會驚人的不同。你可以讓粒子的總自旋為零——即使你沒有給定個別粒子的轉動方向。測量其中一個粒子時，你會看到它隨機以順時針或反時針方向轉動，就好像粒子是自己決定要朝哪個方向轉。而且，不管你選擇測量哪個方向，只要對這兩個粒子測量同一方向，則測得的轉動方向永遠相反，一個順時針，一個反時針。它們怎麼知道要這樣做？這仍然是個極其神秘的性質。不僅如此，如果你對一個粒子做水平軸測量，對另一個做垂

直軸測量，則個別仍可量到部份自旋；這就好像粒子沒有固定的轉動軸。因此，測量結果是古典物理無法解釋的。

是誰在幫助原子排列？

大部份的纏結實驗都只用到幾個粒子，因為一大群粒子不容易隔絕環境的影響，其中的粒子很容易跟無關的粒子纏結，破壞原始的內在連結。以去同調的說法，就是有太多資訊滲漏到環境裡，造成系統有古典的行為。對我們這些尋找纏結的實際用途（例如量子電腦）的研究人員來說，保持纏結是一項重要的挑戰。

2003 年，有一個巧妙的實驗證實，如能減少滲漏或加以抵消，則大的系統也可以保持纏結。英國倫敦大學學院的伊普利（Gabriel Aeppli）等人將一塊氟化鋰鹽放在外加的磁場裡。鹽裡的原子就像旋轉的小磁棒，會盡量與外加磁場同向，這種反應表現為磁化率。原子間的作用力就像同儕壓力般，會讓它們更快排列整齊。研究人員改變磁場強度，然後測量原子排得多快。他們發現，原子的反應速度比彼此作用力的強度所能提供的還快。顯然有額外的效應幫助原子排列整齊，而研究人員認為這是纏結造成的。若真如此，則鹽塊裡 1020 個原子形成了巨大的纏結態。

【欲閱讀完整的豐富內容，請參閱科學人 2011 年第 113 期 7 月號】