



量子隧穿效應及其應用

● 傅俊結*

量子力學是二十世紀最重要的科學理論之一，它徹底改變了人類對微觀世界的理解。在日常生活中，人們對物體運動的認知大多來自古典物理學，例如一顆球若沒有足夠的能量便無法越過高牆。然而在原子與次原子的尺度下，粒子的行為卻與我們熟悉的經驗截然不同。其中最令人驚奇的現象之一便是「量子隧穿效應」（Quantum Tunneling）。所謂量子隧穿效應，是指粒子即使沒有足夠的能量跨越一個位能障礙，仍有一定機率穿透障礙並出現在另一側。這種現象在古典物理學中幾乎是不可能發生的，但在量子力學的框架下卻是自然且普遍存在的結果。量子隧穿效應源自於粒子的波動性。根據德布羅意提出的物質波理論，所有粒子都具有波與粒子的雙重特性，因此電子、質子甚至原子都可以用波函數來描述其存在狀態。當粒子接近位能障礙時，其波函數不會像古典粒子一樣在障礙邊界立即消失，而是會延伸進入障礙區域，並以指數形式逐漸衰減。如果障礙物的厚度有限，波函數便可能延伸至障礙另一側，使粒子具有一定的機率被探測到。這種現象就好像粒子挖掘出一條穿越障礙的隧道，因此被稱為「隧穿效應」。量子隧穿效應的發現不僅驗證了量子力學理論的正確性，也揭示了微觀世界中許多看似違反常識的現象其實具有深刻的物理基礎。

量子隧穿效應的理論基礎建立於薛丁格方程式之上。1926 年，奧地利物理學家

* 傅俊結，南台科技大學通識教育中心副教授。



Erwin Schrödinger 提出波動方程，用來描述粒子波函數隨時間與空間的變化。透過求解薛丁格方程式，科學家發現粒子在位能障礙區域內的波函數雖然衰減，但並不會完全消失，因此產生穿透障礙的可能性。隧穿機率受到粒子質量、障礙高度以及障礙厚度等因素影響。一般而言，粒子越輕、障礙越薄或越低，隧穿機率便越高。例如電子的質量極小，因此在原子尺度下常常出現明顯的隧穿現象。量子隧穿效應最早的成功應用之一，是對放射性 α 衰變的解釋。早期科學家觀察到某些原子核會自發放出 α 粒子，但根據古典力學計算， α 粒子的能量不足以克服原子核內部強大的核力與庫侖位能障礙，因此無法理解其逃逸機制。1928 年，George Gamow 提出量子隧穿理論，指出 α 粒子能夠透過隧穿效應穿越位能障礙離開原子核，成功解釋了放射性衰變的規律。這項成果不僅成為核物理學的重要里程碑，也證明量子隧穿效應確實存在於自然界中。此外，在太陽與其他恆星內部所進行的核融合反應，也與隧穿效應密切相關。恆星核心雖然溫度極高，但從古典角度來看，質子仍難以克服彼此間的靜電排斥力。然而由於量子隧穿效應，部分質子能夠穿越庫侖障礙並發生融合反應，進而釋放大量能量。若沒有量子隧穿效應，太陽將無法持續進行核融合，也就無法提供地球生命所需的光與熱。

除了在自然界中的重要角色之外，量子隧穿效應在現代科技中也具有極為廣泛的應用。最著名的例子之一是穿隧二極體（Tunnel Diode）。傳統半導體元件依靠電子越過能障來導電，而穿隧二極體則利用電子直接穿透能障的能力來產生電流，因此具有極快的反應速度與特殊的負微分電阻特性，可應用於高頻振盪器與高速電子電路。另一項革命性的技術則是掃描穿隧顯微鏡（Scanning Tunneling Microscope, STM）。1981 年，Gerd Binnig 與 Heinrich Rohrer 發明 STM，利用極細的金屬探針靠近樣品表面，當兩者距離接近到數個原子尺度時，電子便會透過量子隧穿效應在探針與樣品之間流動。由於穿隧電流對距離變化極為敏感，因此能夠精確描繪出原子級別的表面結構。STM 的發明使人類首次得以直接觀察單個原子的排列情形，並開啟奈米科技的新時代。除此之外，現代電腦與智慧型手機所使用的快閃記憶體（Flash Memory）也依賴量子隧穿效應運作。在資料寫入與抹除過程中，電子藉由穿越極薄氧化層而進入或離開浮動閘極，藉此儲存數位資訊。隨著半導體元件尺寸不斷縮小，量子隧穿效應的



重要性也日益提升，因為它不僅是技術應用的基礎，同時也是限制元件微縮的重要因素。當電晶體尺寸縮小到奈米尺度時，電子可能不受控制地穿過絕緣層而造成漏電流，進而影響晶片效能與能源效率，因此工程師必須設計新的材料與結構來克服這些挑戰。

近年來，量子隧穿效應更進一步成為量子科技發展的重要基礎。在量子計算領域中，量子位元能夠利用量子疊加與量子穿隧等特性進行運算，使其在某些問題上具有遠超傳統電腦的潛力。例如量子退火技術便利用穿隧效應讓系統跳脫局部最佳解，尋找更理想的全域最佳解，因此在最佳化問題與人工智慧領域具有廣闊的應用前景。此外，在奈米電子學、自旋電子學以及超導量子元件中，量子隧穿現象也扮演關鍵角色。著名的約瑟夫森接面便是由兩層超導體中間夾著極薄絕緣層所構成，庫柏對電子可透過量子隧穿效應穿越絕緣層，形成約瑟夫森電流。此現象被廣泛應用於高靈敏度磁場量測儀器以及超導量子電腦之中。展望未來，隨著奈米科技與量子科技持續進步，人類對量子隧穿效應的理解將更加深入，其應用範圍也將持續擴展。從解釋恆星發光的自然現象，到支撐現代電子產品運作的核心技術，再到未來量子計算與新世代資訊科技的發展，量子隧穿效應都展現出極為重要的科學價值與工程意義。它不僅證明微觀世界遵循著與日常經驗不同的法則，也提醒人類在探索自然奧秘的過程中，許多看似不可能的現象其實蘊含著深刻而優美的物理規律。正因如此，量子隧穿效應被視為量子力學最具代表性且最具影響力的現象之一，並將在未來科學與科技發展中持續扮演不可或缺的角色。



