



有關巨觀量子隧道效應和量子穿越的微觀與巨觀探討

● 傅俊結*

今年(2025)諾貝爾物理獎於 10 月 7 日由瑞典皇家科學院宣布，頒發給三位傑出科學家：約翰·克拉克（John Clarke）、米歇爾·H·德沃雷（Michel H. Devoret）和約翰·M·馬蒂尼斯（John M. Martinis）。他們的獲獎理由是「在電路中發現巨觀量子機械隧道效應和能量量子化」。這項發現不僅證實了量子力學原則可以擴展到巨觀尺度，還為量子計算、量子感測和量子通訊等領域奠定基礎。三位得主在 1984 年至 1985 年間進行的實驗，使用超導電路和 Josephson 接面，展示了數十億電子集體行為如同單一量子粒子，穿越勢壘的現象。這挑戰了傳統觀念，即量子效應僅限於微觀世界，而在巨觀系統中會因環境干擾而消失。這三位得主分別來自英國、法國和美國，但他們的合作主要在加州大學柏克萊分校展開。克拉克生於 1942 年，為英國物理學家，專注於超導量子干涉裝置（SQUID）；德沃雷生於 1953 年，為法國物理學家，擅長量子電路理論；馬蒂尼斯生於 1958 年，為美國物理學家，後來領導量子計算研究。他們的工作源於 20 世紀 80 年代的量子力學理論進展，特別是 Anthony Leggett 在 1980 年代提出的巨觀量子隧道理論預測。這項發現不僅是實驗物理的里程碑，還橋接了微觀量子現象與巨觀工程應用，為未來科技開啟新時代。

* 傅俊結，南臺科技大學通識教育中心自然科學組副教授



我們從微觀尺度來簡單介紹量子隧道效應的基本概念。量子隧道效應（quantum tunneling），又稱量子穿越效應，是量子力學的核心現象之一。它描述粒子能夠穿越古典物理中不可逾越的勢能障礙，而無需具備足夠的能量來「翻越」障礙頂端。這源於量子力學的波粒二象性：粒子不是固定位置的點，而是以波函數描述的機率分佈。波函數在勢壘兩側皆有非零值，因此粒子有一定機率「滲透」障礙，出現於另一側。在微觀尺度，這種效應極為常見且至關重要。最早的理論解釋可追溯到 1928 年，喬治·伽莫夫（George Gamow）用量子隧道解釋了 α 衰變：原子核內的 α 粒子（氦核）被庫侖勢壘束縛，但透過隧道效應，它能以機率形式逃脫，導致放射性衰變。這解釋了為何某些放射性元素有半衰期，而非永遠穩定。微觀隧道的應用廣泛。例如，在掃描隧道顯微鏡（STM）中，電子透過真空勢壘隧道，從探針到樣品表面，實現原子級解析成像。這項技術於 1986 年獲得諾貝爾物理獎，證明隧道效應的實用性。在半導體產業，隧道效應導致電晶體中的電流洩漏，但也啟用閃存（flash memory），如 NAND 快閃記憶體，透過隧道注入電荷儲存資料。在生物系統中，酶促反應如光合作用中的氫轉移，可能涉及質子隧道，加速化學過程。另一經典例子是氨分子的反轉：氮原子透過氫原子形成的勢壘隧道，導致分子鐘頻率，為微波技術基礎。這些微觀現象通常涉及單粒子或少數粒子系統，量子不確定性主導行為，而環境干擾（如熱漲落）相對可控。在低溫下，隧道效應更顯著，因為熱能不足以激發粒子越過障礙。此外，在核融合中，隧道效應解釋了太陽內的氫融合：質子在高溫下接近，但古典上能量不足以克服庫侖排斥；量子隧道允許少量質子穿越，維持恆星能量輸出。在場效應電晶體（FET）中，隧道二極體利用負阻特性，實現高速開關。這些例子突顯微觀隧道效應不僅是基礎現象，還驅動科技進步，從電子裝置到能源科學。

傳統量子力學認為，隨著系統尺度增大，量子效應會逐漸消失。這是因為巨觀系統包含大量粒子（例如阿伏伽德羅數量級），粒子間交互和環境干擾導致量子相干性喪失，即「退相干」（decoherence）。埃爾溫·薛丁格（Erwin Schrödinger）在 1935 年提出的「薛丁格貓」思想實驗即突顯此問題：一隻貓處於生與死的疊加態，但巨觀世界中，我們從未觀察到這種疊加。因此，巨觀量子隧道似乎不可能，因為系統會迅速趨向古典行為。然而，超導性提供了突破。超導現象由 BCS 理論（1972 年諾貝爾物理獎）



解釋：低溫下，電子形成庫珀對（Cooper pairs），集體行為如單一波函數，抵抗散射。Josephson 接面（1973 年諾貝爾物理獎）則允許超導電流無阻礙穿越薄絕緣層，基於量子相位差。1980 年代，Anthony Leggett 預測，在超導迴路中，量子相位可如粒子般隧道穿越勢壘，形成巨觀量子隧道（Macroscopic Quantum Tunneling, MQT）。挑戰在於維持相干性：巨觀系統易受熱噪聲、電磁干擾影響。得主們透過極低溫（接近絕對零度）和精確屏蔽，克服此問題。他們的電路如一毫米大小的「人工原子」，數十億庫珀對共享同一波函數，集體隧道。這不僅放大微觀效應，還證明量子原則可應用於工程尺度系統。

三位得主的合作開始於 1984 年，在柏克萊分校使用超導電路進行實驗。電路包含 Josephson 接面：兩超導體間夾薄氧化鋁層。通電時，系統陷於零電壓態（勢井中），古典上需熱漲落逃脫。但他們觀察到隧道逃脫：系統突然產生電壓，證明量子隧道。實驗細節包括：精確測量電路參數，如電感、電容和 Josephson 臨界電流。隧道速率與理論預測吻合，無需調整參數。他們重複數千次試驗，繪製零電壓態持續時間分佈，類似微觀衰變的統計半衰期。引入微波輻射，激發系統至高能級，縮短隧道時間，證實能量量子化：系統僅以離散能階吸收能量，如原子般。

約翰·克拉克作為團隊領袖，他開發 SQUID 技術，用於偵測微弱磁場變化，捕捉隧道事件。他的貢獻在於實驗設計，確保低噪聲環境。早在 1970 年代，他研究超導量子效應，為 MQT 奠基。他們的論文發表於 1985 年的《物理評論快報》，詳細描述隧道速率測量。米歇爾·H·德沃雷專注理論與實驗整合，他設計 Josephson 配置，分析量子相位動態。他的工作揭示能量量子化，系統如「巨觀粒子」在勢景中運動。目前在耶魯大學，他繼續量子電路研究，應用於量子位元設計。約翰·M·馬蒂尼斯：負責數據分析與優化，排除熱效應干擾，確認純量子隧道。他的貢獻強調可重複性，後來應用於量子位元（qubit）開發，曾領導 Google 量子團隊，實現量子優越性。他們的實驗不僅證明 MQT，還展示了巨觀能量量子化，擴展量子力學邊界。這些貢獻不僅是技術成就，還解決了長久爭議：量子效應是否僅限微觀？他們的證據來自嚴格統計分析，排除替代解釋，如宏觀熱漲落。

這項發現的影響深遠。首先，它證實量子力學適用於巨觀，挑戰古典-量子分界，



啟發如單分子磁體中的隧道研究。在應用上，它奠基量子計算：馬蒂尼斯使用超導電路創建 qubit，兩個能階代表 0 和 1。Google 和 IBM 的量子電腦即源自此，處理複雜問題如藥物設計和加密。其他應用包括量子感測器：SQUID 用於腦磁圖（MEG）和地磁探測，提升醫學診斷。量子密碼學利用隧道效應確保安全通訊。未來，可能實現室溫量子裝置，革命電子產業。在基礎物理，它測試量子重力理論，探討退相干機制。教育上，它使抽象量子概念具體化，激勵新一代科學家。此外，在材料科學，MQT 啟發新型超導材料設計，提升高溫超導研究。在納米技術，隧道效應應用於單電子電晶體，實現低功耗裝置。在天體物理，類似效應解釋黑洞蒸發（霍金輻射），粒子隧道穿越事件視界。

展望未來，MQT 將推動可擴展量子系統。挑戰包括減低退相干，開發容錯 qubit。國際合作如歐盟量子旗艦計劃和中國量子衛星，將加速應用。潛在影響涵蓋 AI 優化、氣候模擬和新能源。然而，倫理問題浮現：量子計算可能破壞現有加密，需新安全標準。環境影響如低溫需求，也需考量。經濟上，它可能創造新產業，但也帶來就業轉型挑戰。三位得主的發現不僅深化量子隧道理解，從微觀 α 衰變到巨觀電路，還開啟量子科技新紀元。這提醒我們，量子世界無尺度限制，創新無止境。透過他們的工作，我們更接近量子革命，惠及人類社會。

