

光與量子科技

文・圖／王喬萱

人類對於光的本質一直充滿好奇，這種求知慾驅使了科學家們千年來持續地研究與探索，以期揭開光的真實面貌。20世紀初，愛因斯坦提出的光量子（light quanta）概念顛覆了人們對光的理解，進而推動了量子力學的發展。本文將淺談光與量子科技之間的關係，以及它們在量子模擬、量子計算和量子通訊方面的應用。

量子力學與量子光學

量子力學重新定義了物質世界的運行法則，帶來新的科學和技術發展，而量子理論的演進歷程與科學家對於光的本質之探究密不可分。在古典物理學中，光被視為一種電磁波，由馬克士威方程式來描述。1900年，為解釋黑體輻射——熱平衡下物體釋放出的電磁輻射——的實驗結果，普朗克（Max K. E. L. Planck）提出了能量量子（energy quanta）的假設。1905年，愛因斯坦（Albert Einstein）進一步支持普朗克的假說，將光描述成攜帶能量量子的波包，成功的詮釋了材料在受光照射時釋放出電子的光電效應現象。

有趣的是，雖然黑體輻射和光電效應推動了量子理論的萌芽，這兩種現象其實可以用半古典方法解釋，也就是將物質描述成量子系統，而將光視作古典電磁波來探討。在量子力學發展初期，光主要用來控制物質的量子態，造就了雷射和原子鐘等技術。一直到1963年，格勞柏（Robert J. Glauber）提出光學同調性的量子理論，首次確立了必須使用量子理論描述的光學現象範疇，開啟了量子光學的新篇章^[1]。2022年諾貝爾物理獎授予Alain Aspect、John F. Clauser、Anton Zeilinger三位學者，他們透過光的糾纏實驗驗證了量子糾纏的存在，為量子與古典理論之爭畫下了休止符，促成量子資訊科學的發展，而光也在這個新興領域中扮演著不可或缺的角色（圖1）。

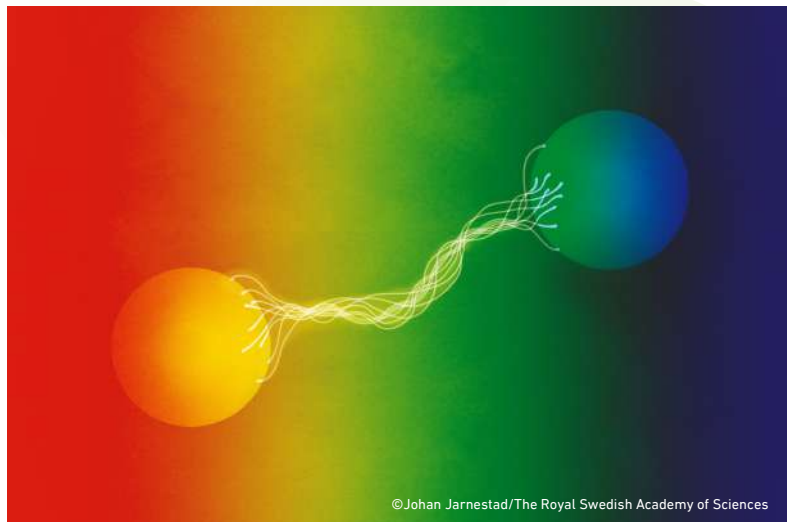
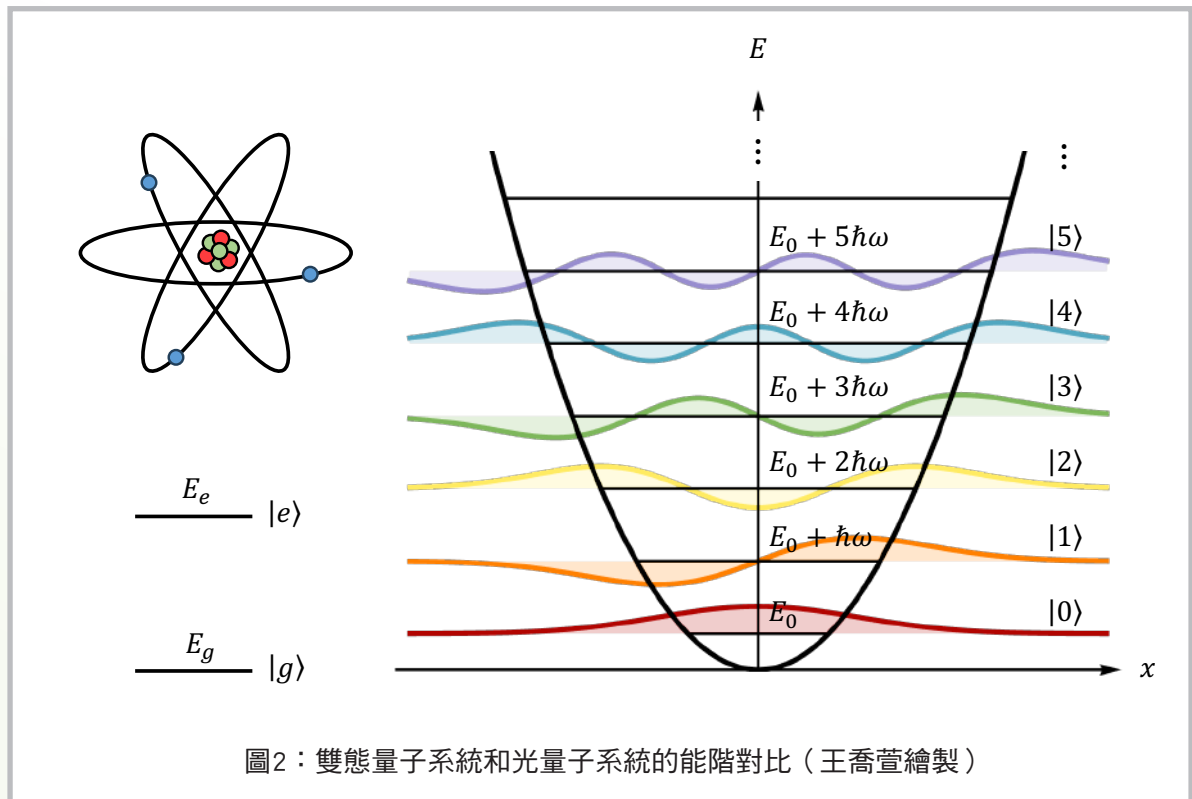


圖1：2022年諾貝爾物理學獎——量子糾纏©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

量子模擬

1981年，理查德·費曼（Richard P. Feynman）提出了量子模擬的概念——利用可控的量子系統來模擬另一個複雜的量子系統隨時間的變化，以便深入了解其特性和行為。由於古典電腦難以模擬複雜的量子系統，因此量子模擬成為研究原子分子結構、材料性質、量子多體系統、量子相變等問題的重要工具。

在量子力學的架構下，電磁場的能量可以描述成無限向上的量子簡諧振盪子之能階，其能階躍遷的媒介就稱為光子（photon），是屬於玻色子（boson）的一種基本粒



子。和原子等有限維度量子態系統相比，一個光量子系統的量子態就蘊含無限多維的自由度（圖2），也因此其複雜度超越古典電腦的運算能力。利用光量子系統進行量子模擬有助於了解各種複雜的量子系統行為，從而推動科學和技術的發展。

在美國馬里蘭大學攻讀博士學位期間，我有幸與Jacob M. Taylor教授和1997年諾貝爾物理學獎得主William D. Phillips等人共同研究雷射冷卻（laser cooling）機制下的量子光學新現象^{[2][3][4]}。我們發現，在使用共振腔來捕捉雷射冷卻過程中釋放的光子時，這些光子的平衡態會呈現出類似於具有靜止質量的玻色子系統的熱平衡態。在一般黑體輻射中，無靜止質量的光子基態是真空態，在低溫下光子的數量會急遽減少。相較之下，冷原子等具有靜止質量的玻色子系統在低溫下則會出現玻色-愛因斯坦凝聚現象，使得大量的玻

色子占據相同的量子態。我們的研究成果使得光量子系統能夠模擬具有靜止質量的玻色子系統，並在平衡狀態下維持大量的光子數，以利研究它們之間的交互作用和演化。

量子計算

量子計算是近年來快速發展的研究領域，利用量子力學的特性來處理資訊計算。與古典的二進位位元（bit）運算不同，量子電腦使用量子位元（qubit）做為基本運算單位。量子力學的疊加（superposition）和糾纏（entanglement）特性，使得量子系統能夠同時處於不同的疊加狀態，而遠距的量子系統之間也能透過量子糾纏這種特殊的關聯性在瞬間相互影響。建立在這兩個特性的基礎之下，量子電腦具有平行處理大規模問題的能力，有望解決無法使用古典電腦處理的難題。

控制光的量子特性是量子計算運行的關鍵之一。在超導量子位元（superconducting qubits）、量子點（quantum dots）、中性原子（neutral atoms）、離子阱（ion traps）等量子電腦系統中，光被廣泛應用於控制和測量量子資訊。除了作為量子位元的輔助，在微波光腔（microwave cavities）和線性光學（linear optics）系統中，光子也能直接作為承載資訊的主體。

微波光腔等光量子系統具有良好的同調性，能在量子計算中表現出較低的誤差率和較長的相干時間。此外，光的量子態具有無限多維的自由度，因此在小型光量子系統中可以處理複雜的計算問題。以這些優勢為基礎，微波光腔在量子除錯（quantum error correction）的實現上比雙態量子位元系統更早地取得了成功。有鑑於在微波光腔平台上實現容錯量子計算的潛力，我與美國耶魯大學Steven M. Girvin教授和美國芝加哥大學Liang Jiang教授的團隊合作，共同提出使用微波雷射來改變微波光腔能量的方法，這項研究成果能廣泛應用於量子計算和量子模擬領域^[5]。

量子通訊

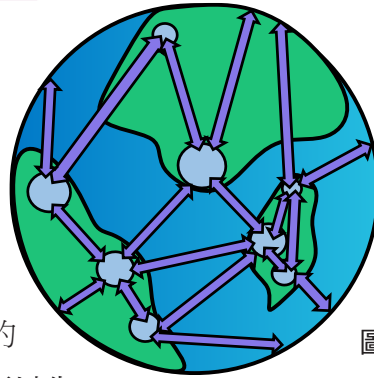
量子通訊是利用量子力學的原理來傳遞資訊的技術。在量子通訊中，光是主要的資訊傳輸載體。光能夠以光速在光纖或者真空中傳輸，並具有高度穩定性和低能量損耗的特點，其無限多維度的量子態亦能攜帶大量的資訊，有助實現高效率的量子資訊傳輸。

建造傳輸和接收量子資訊的通訊網路是各國重點發展的項目之一，其應用範圍包括利用量子加密技術提升通訊安全性，以及將小型處理器連接起來建立具備強大計算能力的量子電腦。此外，量子網路還有助於提升時間同步的精確度，進而改善GPS等量測工具的精確性。

實現量子網路的技術要求嚴苛，包括低損耗的遠距量子資訊傳輸，和高準確度的量子運算。然而，單一量子系統無法同時滿足這兩項條件，如何在不同平台間轉換量子資訊也

研究發展～量子物理

就成為了發展量子網路的關鍵技術挑戰。近幾年間，我和美國芝加哥大學Liang Jiang教授團隊一同探討如何實現高效率的量子轉換器（quantum transducer），並提出量化轉換器效能的具體指標^{[6][7]}。透過量子轉換器，資訊可以先



● 量子網路節點
↔ 量子通信通道

圖3：量子網路示意圖
（王喬萱繪製）

在量子網路節點上的量子電腦平台進行運算處理，再轉換至光纖或無線電的量子通信通道進行低損耗資訊傳輸，從而實現量子網路的建構（圖3）。

未來展望

伴隨著對於光的好奇與探究，20世紀量子力學的出現為人類社會帶來半導體、雷射等多樣技術，形塑了現代科學的發展軌跡。21世紀量子資訊科技領域的興起，又帶來量子計算、模擬、通訊、量測等更多的可能性，讓人不禁對未來的科學技術發展充滿期待。（本專題策畫／理學院副院長吳俊輝教授）

參考文獻：

- [1] Roy J. Glauber, *Reviews of Modern Physics* 78, 1267 (2006)
- [2] Michael Schirber, *Physics* 11, s83 (2018)
- [3] Chiao-Hsuan Wang*, M. J. Gullans, J. V. Porto, William D. Phillips, and Jacob M. Taylor, *Physical Review A* 98, 013834 (2018)
- [4] Chiao-Hsuan Wang*, M. J. Gullans, J. V. Porto, William D. Phillips, and Jacob M. Taylor, *Physical Review A* 99, 031801(R) (2019)
- [5] Chiao-Hsuan Wang*, Kyungjoo Noh, José Lebreuilly, S.M. Girvin, and Liang Jiang, *Physical Review Applied* 15, 044026 (2021)
- [6] Chiao-Hsuan Wang*, Mengzhen Zhang, and Liang Jiang, *Physical Review Research* 4, L042023 (2022)
- [7] Chiao-Hsuan Wang*, Fangxin Li, and Liang Jiang, *Nature Communications* 13, 6698 (2022)



王喬萱 小檔案

美國馬里蘭大學物理博士，曾任美國耶魯大學及美國芝加哥大學博士後研究員，現任臺灣大學物理學系助理教授、臺灣大學富邦拔萃講座學者、臺灣大學量子科學與工程研究中心成員、國家理論科學研究中心物理組中心科學家。研究興趣包括量子資訊科學理論和原子分子光學物理理論。