

從古典邏輯到量子糾纏

一、前言與選文動機

在科技快速更迭的現代，早已習慣半導體與積體電路帶來的便利。然而，當摩爾定律逐漸逼近物理極限，古典電腦的運算能力也面臨瓶頸。我選擇閱讀國立中央大學陳彥宏教授所撰寫的〈光量子技術—引領跨世紀之量子革命〉一文。

選擇此文的動機在於，作為熟悉程式編譯與演算法的學習者，日常處理的資料結構與邏輯判斷，皆建構古典物理法則之上。然而，近代物理學的發展卻打破了這種絕對決定論。本文不僅回顧了量子力學如何從備受爭議的假說，演變為斬獲 2022 年諾貝爾物理獎的實證科學，更詳細闡述了量子技術如何從「思想實驗」走向「工程實現」。透過這篇文章，我期望能從近代物理的顛覆性創新中，尋找突破現有資訊架構框架的靈感。

二、文本核心摘要：兩次量子革命的推進

本文將量子力學的發展劃分為兩次重大的革命。十九世紀末至二十世紀初，普朗克提出能量量子化假說，愛因斯坦以光量子成功解釋光電效應，為「第一次量子革命」奠定了基礎。這次革命促成了半導體、雷射等科技的誕生，造就了今日的資訊時代。然而，當時的物理學家對於量子力學中違反直覺的現象尤其是「量子糾纏」仍抱持懷疑。愛因斯坦甚至將其稱為「鬼魅般的超距作用」，認為量子理論並不完備。

直到約翰·貝爾提出貝爾不等式，以及阿斯佩、克勞澤、塞林格等科學家透過光子實驗證實量子糾纏確實存在，人類才正式迎來了「第二次量子革命」。這次革命的核心在於人類開始主動操控量子的疊加與糾纏特性。

文中特別聚焦於「光量子計算」，指出光量子位元具有不易受環境干擾、可室溫工作及高擴展性等優勢。傳統數位計算的位元只能是 0 或 1，但量子位元卻能透過布洛赫球面表示為 $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ 的疊加態。藉由各式線性光學元件（如分光器、相位調變器）組成量子邏輯閘（如 Hadamard gate 與 CNOT gate），量子電腦得以實現龐大的平行運算。其中最具衝擊性的，莫過於秀爾演算法（Shor's algorithm），它能將大整數質因數分解的時間複雜度從指數級降至多項式級，這對現今依賴大數分解困難度的密碼學產生了根本性的動搖。

三、跨領域觀點與論述：從物理思維到資訊科學的顛覆

1. 運算邏輯的降維打擊：從「絕對因果」到「機率疊加」

在日常的軟體開發或資料庫管理中，不論是撰寫 Python 控制流程或是設計 SQL 查詢視圖，底層邏輯皆建構於古典物理的布林代數上。系統的狀態是確定的，一條資料若不是 True 就是 False。然而，量子物理引入了「機率性」與「疊加態」。如同文章中提到的阿達馬閘（Hadamard gate），它能將一個確定的狀態轉置為均勻的疊加態。這種從「單一線性處理」躍升為「多維度平行處理」的物理創新，徹底打破了馮·諾伊曼架構的限制。這讓我意識到，未來的演算法設計將不再只是追求減少迴圈次數，而是必須具備量子機率論的全新思維。

2. 資訊安全的物理性重構：面對秀爾演算法的挑戰

過去在實作網路通訊協定，深知現今的網路安全（如 HTTPS）極度仰賴 RSA 加密演算法。RSA 的安全性建立在「古典電腦無法在有效時間內完成大質數分解」的數學壁壘上。然而，文中指出量子電腦若搭配秀爾演算法，原本需要 10^{17} 年的破解時間，將縮短至分鐘

等級。

物理學的進步直接宣告了現有數學加密的死刑。這也印證了文中提到的「量子密鑰分發」的重要性，資安防護將從「數學難題」轉移至「物理定律」（如量子不可複製定理），透過觀測即塌縮的特性來達到絕對的防竊聽。這種從底層物理機制解決應用層問題的思路，非常值得工程人員借鏡。

3. 突破機器學習算力瓶頸

在進行資料分析或訓練機器學習模型（例如使用支持向量機處理巨量影像特徵）時，經常面臨算力與運算時間的巨大瓶頸。古典超級電腦再怎麼提升時脈，也難以應付呈指數成長的資料維度。光量子電腦運用光子的多自由度（如時間、頻率、偏振）進行糾纏，其平行運算的潛力為 AI 領域帶來了全新的硬體解方。百年前，那些看似違背常理、在當時毫無工程實用價值的純粹物理理論（如薛丁格的貓、機率波），經過漫長的淬鍊，如今卻成了建構人類下一代超高速運算的強大基石。

四、 結論

〈光量子技術—引領跨世紀之量子革命〉一文，不僅是一部近代物理史的縮影，更是一份未來科技的藍圖。近代物理的發展過程，本身就是一場最極致的「創新與創意」展現——從不畏懼推翻經典、勇於提出荒謬卻精確的假說，到最終透過嚴謹的實驗將理論化為積體光路上的現實。

作為資訊領域的學生，這次的閱讀讓我深刻體認到，軟體與演算法的極限往往受制於硬體的物理底層。未來面對複雜的系統瓶頸時，不應僅侷限於既有程式碼的修補，而應具備跨領域的宏觀視野，擁抱物理學帶來的顛覆性思維。量子時代已經到來，唯有持續更新自身的知識架構，才能在這場跨世紀的量子革命中找到自己的定位。

五、 參考文獻

1. 陳彥宏（2025）。〈光量子技術—引領跨世紀之量子革命〉，《物理雙月刊》，2025年4月號，2025世界量子日》台灣物理學會出版。
全文連結：<https://bimonthly.ps-taiwan.org/bimonthlies/67fcc148c24a47ae6d9b8dc7>（檢索日期：2026年4月7日）

六、 生成式 AI 使用聲明

本報告在撰寫過程中，曾使用生成式 AI 輔助工具。主要應用於：

1. 尋找可用於報告的書籍或文章。
2. 針對已閱讀之文本，協助梳理文章脈絡與結構規劃。
3. 進行錯別字校對與語氣潤飾。

此報告核心觀點、跨領域論述邏輯及對文本的解讀，為本人親自閱讀文章後撰寫。