

量子科技發展趨勢

林姿伶

一、前言

量子科技為一個新興的科技領域，正吸引著全球各國政府競相投入大量資源進行研發，成為當前重點發展的科技。量子科技的迅速發展為全球科技帶來革命性的變革，臺灣也不例外。臺灣在半導體製程、IC 設計、封裝技術以及軟體與通訊產業方面具有全球領先的優勢，對量子科技發展是一大助力。目前，臺灣現已組建量子國家隊，致力於推進量子科技的硬體和軟體研發，及其相關應用。

國科會於 2018 年推動「量子電腦專案計畫」，提供學術界多個團隊資金、補助，鼓勵更多的研究機構和學者參與量子科技研究，在清華大學成立前瞻量子科技研究中心，以及在臺灣大學成立 IBM-NTU 量子電腦中心等。隨後，2020 年 11 月，政府推出「量子科技專案計畫」，透過建構產業交流平台，培養專業人才，整合量子關鍵技術研發能力，積極組建跨部會的量子國家隊。2021 年 9 月正式啟動「量子系統推動小組」，聚集專家學者、組成顧問團隊，並制定有效的任務管理機制，密切關注各部門和學術單位的量子研究進展，及時應對合作中可能遇到的挑戰，積極協調解決方案，最大程度地利用各方資源，以推動量子科技發展。2022 年 3 月，行政院正式宣布，將在 2022 年至 2026 年間投入 80 億台幣，目標是到 2030 年建立完整的量子科技產業鏈，推動臺灣在量子領域的技術與人才培育，透過國科會科技辦公室、中央研究院、經濟部等單位與產業界之間的合作，建立一個跨部會、跨領域的研發平台，促進量子科技在臺灣的創新應用與產業化。

量子國家隊由 17 個大學和研究機構組成，集合 72 位專家學者、24 家公司致力於研發量子元件、量子電腦、量子演算法和量子通訊等技術，未來，量子國家隊會和半導體產業鏈攜手合作，加快量子科技的研發和應用，讓這些先進技術進入各行各業，以推動醫療保健、氣候變遷、能源、通訊、金融等領域的進步，

提升臺灣在國際資訊與通訊科技市場的競爭力，確保在這場科技競賽中占據有利位置。

除此之外，量子科技領域的快速發展也為網路安全帶來新的挑戰。為了實現安全的通訊和數據保護，企業需要準備應對這些挑戰，把量子風險納入治理結構和現有的風險管理過程，並找到具備技術和軟技能的合適人才，採取主動的安全方法來保護關鍵資產和訊息。有鑑於此，臺灣數位部和公協會以及資安和晶片業者在 2024 年 5 月成立「後量子資安產業聯盟」，凝聚國內後量子資安產業研發能量，以應對未來量子電腦的攻擊。該聯盟將透過晶片研發、應用檢測與推廣等方式，為金融、醫療、交通等領域的業者提供量子時代的安全保障，確保各產業的安全性。

二、量子科技發展趨勢

量子科技的崛起正在塑造著我們未來的科技格局，其影響深遠而全面。隨著量子技術成熟並進入實用規模的量子計算時代，制定和使用量子能力的規範或戰略變得日益重要。

2024 年 1 月世界經濟論壇(World Economic Forum, WEF)發布的《量子經濟藍圖》報告中，提出構建一個量子經濟框架，幫助各地區和國家啟動、發展、支持和商業化量子技術，為產業界和學術界制定量子生態系統指南，加速推廣、幫助大家了解這些技術能帶來的新工作機會與經濟成長潛力，以及在保護經濟安全、業務誠信和網路安全的前提下，制定負責任、永續發展的使用策略。

隨著傳統電腦達到容量極限，難以處理大量和複雜數據，量子電腦將成為解決這些問題的重要工具。量子系統利用量子力學原理，能同時執行多項計算，速度比超級電腦快百萬倍。例如，Google 在 2019 年證明，量子電腦在 200 秒內解決的問題，傳統電腦需要 10000 年才能完成。此外，將量子技術應用在醫療保健、

航太、電子、地質及能源等領域，能大幅提升時間、頻率、加速度、溫度、磁場、電場的測量精度，像是用於化學、材料和製藥公司的分子建模、新藥開發、物流路徑最佳化、噴射發動機的氣流偵測等應用，都需要量子運算的強大能力，以及量子密碼學利用量子力學原理加密、傳輸數據，比傳統密碼技術更安全，以防範駭客攻擊。目前，成本依然是量子科技的大問題，量子硬體非常昂貴，消耗的資源也很多，商業級的量子硬體有數千個量子位元，開發與維護這些量子位元的成本都很高。依據 F&S 研究報告顯示，2023 年至 2030 年的全球量子運算的市場收益預測如圖 1 所示。

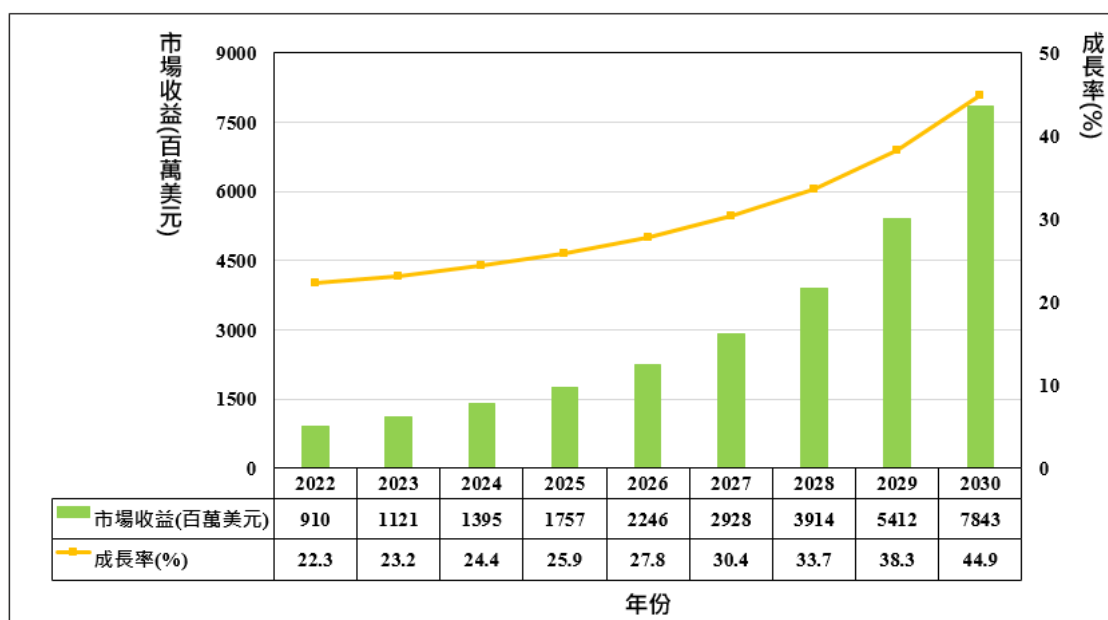


圖 1 全球量子運算的市場收益預測

資料來源：Frost & Sullivan，本研究整理

三、國際政策動態

隨著量子科技的迅速發展，各個國家紛紛加大對量子領域的投入。下文將說明主要國家在量子科技領域的投入概況，以及主要國家重要的量子研究機構。

(一)主要國家於量子科技領域投入之概況

量子研究正在快速擴展，許多國家意識到量子運算的重要性，積極投入龐大的研發資金，建立支援基礎設施的量子資料中心、量子測試平台，以實現對量子生態系統發展的快速追蹤。政府與企業之間的合作關係不斷增加，進一步加速量子運算的發展。下列為主要國家量子科技領域投入之概況。

1.美國

2019 年至 2021 年，美國進行大規模的量子研究投資，投入約 19.8 億美元的資金在美國國家量子倡議法案(National Quantum Initiative Act，簡稱 NQI 法案)的執行，同時設立美國國家量子計畫。透過與政府機構、學術單位及私人企業的合作，加速量子技術研發，其目的在促進、投資量子資訊科學與技術發展，培育量子領域的技能人才。美國科學和技術政策辦公室(Office of Science and Technology Policy, OSTP)於 2023 年 12 月發布的美國國家量子計畫 2024 年財政預算追加報告(National Quantum Initiative Supplement to the President's FY 2024 Budget)中指出，2019 年至 2023 年 NQI 法案的總投資金額達到 39.4 億美元(包含 2019 年至 2022 年實際支出、2023 年估計支出)。

2.歐洲

歐洲地區積極推動量子運算領域的技術創新，在 2018 年 10 月啟動量子技術旗艦計畫(Quantum Technologies Flagship)，投資約 10.9 億美元(實際金額 10 億歐元)，為期 10 年，提供量子科技研究之資金，成功吸引 NXP、意法半導體、博世(Bosch)等私人企業的投資，促進量子運算核心技術的發展。另外，歐洲地區於 2019 年 9 月啟動 OPENQKD 試驗專案(Open European Quantum Key Distribution Testbed)，在西班牙、波蘭、德國、荷蘭、法國、義大利及捷克等 13 個國家部署與測試量子通訊基礎設施，應對包含交通、藥物探索、新材料開發及天氣預報等領域之安全性。

3.英國

英國願景是在十年內成為世界領先的量子強國，確保英國的量子科學與工程達到國際頂尖地位，並成為全球供應鏈的重要地區。英國政府於 2023 年 3 月發布《國家量子戰略》，承諾未來十年將投入 25 億英鎊，將政府、學術單位及產業界緊密結合，確保其在量子技術領域的領先地位，此戰略不僅涵蓋學術研究與產業發展，還能讓更多人了解、接觸量子科學，期待未來能受益於量子科學所帶來的創新與進步。

4.加拿大

2023 年 1 月，加拿大政府宣佈啟動國家量子戰略(National Quantum Strategy)，在 2021 年預算案中承諾的約 2.7 億美元(實際金額 3.6 億加幣)投資，支持、強化量子研究。加拿大卡加利大學(University of Calgary)、滑鐵盧大學(University of Waterloo)、多倫多大學(University of Toronto)及渥太華大學(University of Ottawa)等多個學術機構，正積極進行量子領域的相關研究。

5.韓國

韓國科學技術情報通信部(Ministry of Science and ICT, MSIT)，於 2023 年 6 月的國家量子科學技術戰略計畫(대한민국 양자과학기술 전략)，發布未來 15 年內投資約 22.5 億美元(實際金額 3 萬億韓元)於量子技術，目標成為全球前 5 名的領導者。為達成目標，韓國主張強化量子科學的基礎研究與應用開發，鼓勵產業進入量子技術領域。

6.日本

2020 年 1 月日本內閣府發布量子技術創新戰略(量子技術イノベーション戰略)，將量子技術定位為未來 10 至 20 年國家核心重要技術。日本內閣府於 2023 年 1 月發布的 2022 財年補充預算及 2023 財年預算(令和 4 年度補正予算及び令和 5 年度予算案の状況)中，在 2023 年、2024 年分別投入 5.2 億美元(實際金額

777 億日圓)、2.8 億美元(實際金額 421 億日圓)，用於量子相關技術之投資。

(二)主要國家量子研究機構

隨著各國政府在量子技術領域扮演日益重要的角色，歐洲、美國及其他地區的量子國家實驗室和研究設施也扮演著越來越關鍵的角色。它們推動量子技術從理論研究走向初步實際應用的發展。更重要的是，這些量子研究機構作為量子技術生態系統發展中心，結合來自大專院校、國家實驗室及產業界的專家，他們有明確的商業目標，展開有組織的合作，把研究和生產能力整合到現有的基礎設施中，加快商業化和規模化的進程，縮短創新到市場的時間，共同推動量子領域發展。此舉不僅能幫助確定關鍵投資領域，提供重要資訊，設置優先順序，並更有效地培養具備相關技能和經驗的人才。下列為主要國家量子研究機構之簡介。

1.美國 NSF 量子資訊科學與工程研究中心(Quantum Information Science and Engineering Research at NSF)

NSF 量子資訊科學與工程研究中心為量子領域開闢新的前景和機會，包含：以新穎的材料、電路和演算法，實現新穎的量子 and 後量子應用；利用其在科學和工程領域的全部資助優勢，將來自多個學科的研究人員聚集在一起，解決基本的科學和工程問題，加速量子應用從感測、通訊到計算的進展；將量子現象之特性運用在感測和測量、計算和模擬以及通訊和網路等領域，提供技術上的進步和商業化行為。

2.英國國家量子計算中心(National Quantum Computing Center, NQCC)

NQCC 致力於解決和擴展與量子電腦相關的關鍵工程挑戰，是英國國家量子技術計畫的核心組成機構之一。該中心位於牛津大學內，與產業、政府和研究界密切合作，正在集結硬體和軟體開發人員，以建立、測試和託管量子電腦，並探索現在和未來利用量子電腦能力的應用程式，目標在 2025 年展示具有超過 100

個量子位元的可操作量子電腦。該中心近期的研究重點在於捕獲離子和超導電路的硬體架構，將逐漸轉向通用容錯(Fault Tolerance)量子計算的有噪音中等規模的量子系統(Noisy Intermediate-Scale Quantum, NISQ)機制開發，從硬體和軟體控制系統到應用程式開發。

3.加拿大社布魯克量子研究所(Institut Quantique Université de Sherbrooke)

IQ 研究所提供完善的實驗研究基礎設施，致力於量子科學技術的開發，匯集量子材料、量子資訊和量子科學的專家，進行高品質的基礎研究並開發可應用於未來之量子技術。IQ 研究所策略包含培養推動未來經濟發展的專業人才、加速量子科技的創業與營銷發展，不僅參與量子技術的開發，同時培養社會對量子科學所帶來的技術挑戰與認識；其研究包含在研究量子互聯網的儲能技術、量子材料、粒子物理、銅酸鹽超導體等先項目。

4.荷蘭量子之家(House of Quantum)

荷蘭量子之家是全球第一個國家量子園區，匯集當地與國際量子公司、相關投資者及研究人員，讓他們在同一屋簷下就能夠就進行量子領域的工作、會面、合作並發展業務，促進其知識流動和思想融合。希望透過荷蘭量子之家，實施荷蘭國家議程量子技術，建設與歐洲合作夥伴的相連接地點，讓荷蘭的量子生態系統更加蓬勃發展，成為著名的國際合作和創新中心。

5.韓國量子技術研究所(Quantum Technology Institute)

量子技術研究所為韓國標準科學研究院(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)旗下的機構，致力於開發用於測量和控制光子、原子、電子和聲子等量子物體的技術，以及產生和控制量子位元和量子糾纏等量子資訊特徵的技術，並且為各個領域帶來創新應用，包含新的測量標準(例如約瑟夫森電壓標準 Josephson Voltage Standard)、量子霍爾電阻標準 Quantum Hall Resistance

Standard、光晶格鐘 Optical Lattice Clock)、先進計算系統(例如量子電腦)、提高安全性的通訊系統(例如量子密碼學),以及感測和高靈敏度成像系統(例如量子感測器)。

6.新加坡量子技術中心(Centre for Quantum Technologies, CQT)

新加坡量子技術中心是由新加坡國家研究基金會(National Research Foundation, NRF)和教育部(Ministry of Education, MOE)的支持下成立,其研究領域包含量子通訊與安全、量子計算與模擬,以及量子感測與計量。新加坡量子技術中心致力於深入理解光、物質和資訊物理學的本質,開發新穎的工具來研究和控制它們的相互作用,以建構安全通訊、量子計算和精密測量技術,並與業界共同合作。

四、量子科技產業的新興應用

量子技術可以解決非常複雜的計算任務,並且在模擬、分子和藥物設計、機器學習、計量學和加密分析等領域有很多應用。現在,量子技術越來越受到關注,許多大型科技公司都在積極投資這項技術。目前,雖然很多量子技術之應用還在初期發展階段,未來,有望為企業與產業領導者解決當前的問題,提供短期內的解決方案。

(一)量子科技應用領域

量子科技的應用領域正在快速擴展,從理論研究逐步走向實際應用。量子計算、量子通訊和量子感測等技術,憑藉其獨特的量子特性,其潛在好處正在改變我們處理和理解複雜問題的方式,這些技術不僅在科學研究和工業製造中展現出巨大潛力,還在金融、醫療、物流等多個領域帶來顛覆性變革。下列將說明量子科技應用領域概況。

1.旅行、交通、物流

量子技術能讓各種車輛的導航變得更精確，即使在沒有 GPS 訊號或是在環境噪音干擾的情況下，也能正常運作。目前的導航裝置，像是手機、軍艦、潛水艇，是依賴初始已知位置和航向來推測位置，但這些裝置的可靠性和範圍有限，且需要頻繁校準，容易產生誤差。而量子感測器的校準頻率低，靈敏度高，可以提供更精確的測量數據。量子演算法的應用也可以幫助運輸和物流業者，更有效地管理車隊，降低貨運成本、提高客戶滿意度。同時，量子運算還提供強大的模擬工具，幫助企業預測和應對各種災難事件，從而減少供應鏈中斷或經濟損失。

2. 醫療保健

量子技術在醫療保健產業的應用與貢獻甚大。量子技術可以幫助研究人員更瞭解基因組(Genome)，發現新分子和新藥物，預測蛋白質摺疊(Protein Folding)結構。另外，還能夠利用量子技術評估個人健康相關數據，為每個人量身定制最合適的治療方案。此外，量子感測器可以更精確地定位人體內的磁訊號，目前的腦磁波儀(Magnetoencephalography)、磁共振造影(Magnetic Resonance Imaging, MRI)和心磁圖(Magnetocardiography, MCG)在消除雜訊的能力有限，且體積龐大、易碎，而量子生物感測器則可以在不需要低溫設備之環境下運行，快速、精確地定位磁訊號位置。

3. 電信媒體與網路

量子技術可以幫助電信業者更精準地規劃網路容量，網路架構最佳化，以及流量管理的改善與效能控制，以提高網路的效率和性能。量子運算還可以開發出更安全的加密技術，從而提升通訊的安全性和隱私保護。此外，還可以處理大量數據，準確預測網路設備的故障和維護需求，從而提高網路的可靠性和穩定性。

4. 銀行金融服務

量子運算有望優化金融領域的風險管理策略，藉此降低風險、獲得投資回報。

量子技術可以提供更精準的數據分析，透過準確的市場預測和經濟趨勢、辨識潛在風險，使金融機構能夠做出更明智的決策。例如，透過量子計算，金融機構可以更準確地評估不同投資組合的風險，並針對性地調整投資策略，以達到最佳風險與收益平衡。長期來看，量子運算在金融方面最有潛力的應用是投資組合和風險管理。

5.材料科學與製藥

材料科學和製藥業面臨一個大挑戰：如何理解分子和化學反應的行為，這對製藥、能源、農業和材料科學非常重要。透過量子電腦的模擬和建模，研究人員可以在更短的時間內進行更多模擬和試驗，幫助設計出理想的產品，解決這個挑戰。量子計算能大大改變生物製藥的分子結構研究和開發，讓藥物研發更有效率，減少試錯過程。在化學品方面，量子計算可以改進催化劑設計，讓生產流程更省錢。同時，還能夠開發出更創新、更環保的材料，取代石化產品。

6.能源與公用事業

能源和公用事業領域利用量子運算來應對各種複雜的業務挑戰，尤其是減少碳排放這一重要課題。這些應用包含模擬新材料、化學品和能源生產的催化劑，設計新穎的電池和儲能系統，製造更高效的太陽能電池，以及開發新型低碳產品，從而減少碳排放、提高能源利用效率。

7.國防與航太

在太空任務和火箭發射中，對於太空飛行器的設計和發射過程，理解和模擬複雜的大氣條件是必要的，其中，包含高度、溫度、風速、以及空氣密度等因素。量子技術可以用來模擬這些大氣條件，有助於確保太空任務的順利進行和火箭發射的成功。

(二)量子科技的主要市場參與者

隨著量子生態系統擴張、全球量子設備與系統普及，量子供應商正積極評估在各個產業和領域中使用量子運算的可能性，表現出對量子運算的極大關注。下列將說明量子運算市場的主要參與者。

1.美國 IBM 公司

在 90 年代末，IBM 開啟探索量子世界的旅程。從 2016 年開始，IBM 的量子系統已實現可以透過雲端外部存取。IBM 在量子領域提供完整的方案，包含硬體、中介軟體(Middleware)、演算法、軟體及函式庫(Library)。IBM 於 2023 年推出有 1,121 個量子位元的量子電腦「Condor」，並計劃透過短程通訊、遠端通訊，擴展至超過 10 萬個量子位元。現今量子電腦的主要挑戰之一為雜訊校正(Noise Correction)，IBM 透過開發電路編織(Circuit Knitting)與量子無伺服器技術來應對挑戰，以解決問題。

2.美國微軟公司(Microsoft)

微軟致力於研究的拓撲量子位元(Topological Qubits)之量子超級電腦，能夠每秒執行 100 萬次的穩定量子運算(Reliable Quantum Operations Per Second, rQOPS)¹，以解決現有的 NISQ 運算問題。微軟的拓撲量子位元具有高度可擴展性，量子位元由準粒子(Quasiparticles)構成，並藉由馬約拉納零模(Majorana zero modes, MZM)量子態，開發量子位元。此過程，微軟將量子位元技術從類比轉變為數位技術。此外，微軟結合高效能運算與 AI，開發出「Azure Quantum Elements」，其目的在模擬工作流程的最佳化，以加速科學發現。

3.美國英特爾公司(Intel)

英特爾於 2023 年推出使用矽自旋(Silicon Spin)量子位元技術的晶片「Tunnel Falls」，相較其他技術小 100 萬倍，尺寸為 50 奈米 x50 奈米，該公司預計於 2024 年發布 Tunnel Falls 下一代矽晶片。同時，英特爾也致力於建構冷凍探測器、量

子位元測試設備、全端軟體開發套件(Software Development Kit, SDK)，協助研究人員執行混合(經典與量子)演算法，在短期內實現商業級量子電腦所需的數千、數百萬個量子位元。

4.美國 Zapata Computing 公司

Zapata 公司致力於量子軟體與演算法的研究，開發出「Orchestra 平台」，該平台可以在公有或私有雲上運作，並提供可擴充性，幫助使用者建構量子化的工作流程，然後收集與分析產生的資料。透過 Orchestra 平台，使用者可以在 Python 中建立支援量子的工作流程，也能在不同硬體後端上執行工作，還能在任何硬體上使用任何量子語言，並應用專有演算法和開源資料庫，為化學、材料、金融、物流、製藥及汽車等產業創建應用程式，解決運算能力問題。

5. 英國 Riverlane 公司

Riverlane 公司開發出量子電腦的作業系統「Deltaflow.OS」，以及全球首個量子錯誤解碼器(Quantum Error Decoder)「Deltaflow.Decode」。Deltaflow.OS 將程式碼直接寫入控制系統的每個元件，使用現場可程式化邏輯閘陣列(Field Programmable Gate Array, FPGA)，增進可靠度並顯著提升效能，且適用於捕獲離子(Trapped Ions)、超導體(Superconducting)、矽光子學(Silicon Photonic)等多種技術。Deltaflow.Decode 將每秒產生大量資料錯誤的不穩定量子位元，轉換為穩定、無錯誤的邏輯量子位元(Logical Qubits)，從而實現材料、製藥、能源及航太領域的應用開發。

6.美國 SEEQC 公司

在平面架構的量子系統中，量子位元的讀取與控制設備，常因高功率需求而造成過載，使得量子系統難以實現大規模的運算。SEEQC 公司以單通量量子(Single Flux Quantum, SFQ)技術，設計多晶片模組(Multi-Chip Module, MCM)的數

位晶片，能夠在低溫下執行所有操作，電路的時脈頻率(Clock Frequency)高達 40 GHz，運作時所消耗的功耗較現有系統低 3 至 5 個數量級，也降低整體系統的散熱需求。此外，SEEQC 公司在 2023 年開發出量子電腦「SEEQC Red」，使用專有的韌體(Firmware)、軟體套件，以及提供雲端入口網站。

7.美國 QuEra 公司

QuEra 公司在 2022 年第四季推出具 256 量子位元的中性原子量子系統「Aquila」，以及協助用戶在中性原子量子架構中使用的開源軟體「Bloqade」。相對於半導體的量子系統，Aquila 使用的中性原子方法，量子位元為原子，操作更為簡便且更具擴展性。

8.美國亞馬遜公司(Amazon)

亞馬遜公司推出量子運算服務平台「Bracket」，協助雲端客戶量子運算的科學研究與軟體開發，該服務平台整合 D-Wave、IonQ、Oxford Quantum Circuits、QuEra、Rigetti Computers 公司的量子電腦，擴大用戶對量子運算的選擇。此外，亞馬遜公司也正致力於 CAT(Cavity Assisted Tomography)位元的量子電腦開發，其具有更強大的性能、更強的抗噪聲性質，以及節能之特性。

9.法國 Atos 公司

Atos 公司的子公司 Eviden 最近推出全方位的量子運算服務「Qaptiva」，為研究人員、科學家提供量子創新研發工作所需的工具與資源，其與 IQM、Aspen Systems、OVHcloud、西班牙加利西亞超級計算中心(CESGA)等機構合作，推動量子運算發展。

10.法國 Pasqal 公司

PASQAL 使用中性原子構建開型量子電腦，具有更長的量子位元相關時間(Coherence Time)與可擴展性。PASQAL 提供 100 個量子位元的量子硬體、軟體

及模擬器，開放原始碼工具(Open Source Framework)「Pulser」、化學模擬平台「Quebec」、雲端平台「Quantum Discovery」，以滿足用戶需求。PASQAL 與西門子合作，將量子演算法使用於計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)，並且結合人工智慧，整合至西門子的軟體設計與測試方案，以獲得高準確性模擬結果。

11.澳洲 Q-CTRL 公司

Q-CTRL 公司開發出先進量子感測軟體「Fire Opal」，其具嵌入式錯誤抑制技術，可最大限度地減少量子系統中的雜訊並減少錯誤，應用範疇包含生物成像、環境監測、導航系統。該公司用戶包含美國政府單位、澳洲國防單位，以及 IBM、IonQ、Nord Quantique、Pasqal 和 AtomComputing 等公司。

12.加拿大 D-Wave Systems 公司

D-Wave 致力於開發量子退火(Quantum Annealing)的特定形式量子運算，並成功將量子退火系統實際應用且商業化。D-Wave 不斷地開發「第五代 Advantage 退火系統」，並計劃在 2024 年推出超過 7000 個量子位元的「第六代 Advantage2 退火系統」，以因應更複雜的運算問題。在汽車領域，D-Wave 與福斯汽車公司、Denso 公司合作，分別進行交通路線的最佳化、在汽車廠間使用自動引導車輛(Automated Guided Vehicle, AGV)的車輛移動方法之可行性測試。另外，D-Wave 與豐田公司(Toyota)中央研發實驗室、東京大學攜手合作開發量子演算法，最大限度減少交通擁塞，更有效地管理交通號誌，提升交通流動性。

13.日本富士通集團(Fujitsu)

富士通在量子運算領域提供數位退火技術、超導電路技術，以及閘型(Gate-based)量子電腦，並擴展其應用範疇、滿足市場需求。在 2022 年，富士通開始推出 36 個量子位元的高速量子模擬器，應用於汽車、金融、化學及藥物發現等領

域。在交通領域，富士通的數位退火技術，成功應用於漢堡港務局(Hamburg Port Authority)場域，有效降低車輛行駛時間、減少二氧化碳排放、緩解交通堵塞問題，提升港區交通與物流的效能。富士通預計到 2026 年，開發出 1000 個量子位元系統。

14.美國 PsiQuantum 公司

PsiQuantum 的光子計算方法，使用光子作為量子位元執行量子運算，相較於其他量子運算方法，此方法對於量子電腦的低溫冷卻要求較低，可降低設備維護成本。PsiQuantum 與美國 GlobalFoundries 晶圓代工廠合作生產矽光子晶片，已在紐約與德國設立工廠，生產高階的光子與電子控制晶片。在汽車領域，PsiQuantum 與賓士合作，研究在容錯量子電腦(Fault-tolerant Quantum Computer)模擬鋰離子電池中的電解質。

15.美國 QC Ware 公司

QC Ware 提供「Forge」、「Promethium」兩個軟體即服務(Software as a Service, SaaS)平台，其中，「Promethium」是量子化學模擬平台，在汽車產業中，對電動車電池與燃料電池的材料研究，具有重要的影響力。2022 年，QC Ware 與法國 Bpifrance 銀行合作，獲得 150 萬美元資助，加速 Forge 平台中的應用程式介面(Application Programming Interface, API)開發。在汽車領域，QC Ware 與 BMW 公司合作，致力於量子機器學習應用在車輛路線最佳化之項目。另外，QC Ware 與美國空軍研究實驗室(Air Force Research Laboratory, AFRL)合作，利用量子機器學習演算法研究無人機飛行的最佳路徑。此外，QC Ware 也與摩根大通(JP Morgan)、高盛集團(Goldman Sachs Group)、空中巴士(Airbus)及愛信集團(Aisin Group)合作，依據客戶需求開發量子技術，應用於不同的場景。

五、結語

量子科技展現出卓越的運算能力，可以幫助人工智慧、區塊鏈、網路安全等新興技術的挑戰，在短時間內完成任務，解決現有技術難以處理的極複雜計算問題，這項技術正在影響金融、醫藥、化學、汽車、太空等多個產業。

未來，在量子科技領域，各個單位需要各司其職、相互合作。政府制定國家量子策略，確定優先投資的領域，應對政策挑戰，同時培育有效的本地生態系統。學術界負責培訓和教育下一代量子及相關領域的人才，設計量子研究計畫，進行前瞻性的科學研究。研究機構需要開發最先進的技術，參與量子技術應用的所有開發，從基礎研究到商業化應用的完整解決方案，包含量子硬體、軟體、演算法、通訊、網路技術及其相關服務，以確保量子技術能夠在實際應用中發揮最大效益，並且與相關單位合作，建立策略夥伴關係，以促進企業的創建和發展。量子新創公司需要進行概念驗證實驗，制定策略路線圖以融入業務，並建立內部量子團隊。企業與終端用戶應制定量子採用路線圖，共同開發技術，建立量子勞動隊伍，並使用量子服務。藉由上述流程，加快量子科技的商業化和規模化進程，實現創新到市場的快速轉化，促進整個量子產業生態系統的發展。

資料來源

1. 量子國家隊成軍，17 項團隊底定，聚焦未來量子世代臺灣產業鏈。(取自：
<https://www.ithome.com.tw/news/150015>)
2. 積極投入量子科技研究！台灣將籌組量子國家隊。(取自：
<https://www.ntdtv.com.tw/b5/20201107/video/282620.html>)
3. 量子推動小組簡介。(取自：
<https://site.etop.org.tw/qt/index.php?c=pub&m=loadpage&d=pub&mid=1015>)
4. 【臺灣資安大會直擊】臺灣後量子資安產業聯盟正式成立，凝聚產官學研能量，加速相關產業發展。(取自：<https://www.ithome.com.tw/news/162922>)
5. World Economic Forum (WEF), Quantum Economy Blueprint, 2024.
6. World Economic Forum (WEF), Quantum Computing Governance Principles, 2022.
7. European Patent Office (EPO), Quantum Computing Insight Report, 2023.
8. McKinsey & Company, McKinsey Quantum Technology Monitor, 2024.
9. World Economic Forum (WEF), Quantum Readiness Toolkit: Building a Quantum-Secure Economy, 2023.
10. Frost & Sullivan, Global Quantum Computing Growth Opportunities, 2023.
11. Office of Science and Technology Policy (OSTP), National Quantum Initiative Supplement to the President's FY 2024 Budget, 2023.
12. Quantum computing: Can China overtake the US? (取自：
<https://asiafundmanagers.com/us/quantum-computing-can-china-overtake-the-us/#:~:text=On%20the%20other%20hand%2C%20China,active%20in%20quantum%20technology%20research.>)

13. Quantum Technologies Flagship (取自 : <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship>)
14. Open European Quantum Key Distribution Testbed (取自 : <https://cordis.europa.eu/project/id/857156>)
15. Government of Canada launches National Quantum Strategy to create jobs and advance quantum technologies (取自 : <https://www.canada.ca/en/innovation-science-economic-development/news/2023/01/government-of-canada-launches-national-quantum-strategy-to-create-jobs-and-advance-quantum-technologies.html>)
16. Minister of Innovation, Science and Industry, Canada's National Quantum Strategy, 2022.
17. Ministry of Science and ICT(MSIT), 대한민국 양자과학기술 전략, 2023.
18. 日本内閣府, 量子技術イノベーション戦略, 2020.
19. 令和4年度補正予算及び令和5年度予算案の状況, 日本内閣府, 2023.
20. 日本首脳國産量子計算機將在網上開放使用(取自 : <https://zh.cn.nikkei.com/industry/scienceatechnology/51689-2023-03-10-09-11-25.html>)
21. Department of Science and Technology(印度科技部), National Quantum Mission(NQM), 2023.
22. Department for Science, Innovation and Technology (DSIT), National Quantum Strategy, 2023
23. Department for Science, Innovation & Technology, National Quantum Strategy: Additional Evidence, 2023.
24. Barclays Eagle Labs, Decrypting The UK's High-growth Quantum Technology Companies, 2023.

25. Quantum Information Science and Engineering Research at NSF (取自：
https://www.nsf.gov/mps/quantum/quantum_research_at_nsf.jsp)
26. National Quantum Computing CentreF (取自：<https://www.nqcc.ac.uk/>)
27. Institut Quantique (Université de Sherbrooke) (取自：
<https://www.usherbrooke.ca/iq/en/>)
28. House of Quantum (取自：<https://www.houseofquantum.com/>)
29. Quantum Delta NL Opens The First ‘House Of Quantum’ (取自：
<https://thequantuminsider.com/2022/11/28/quantum-delta-nl-opens-the-first-house-of-quantum/>)
30. Quantum Technology Institute (取自：
https://www.kriss.re.kr/departementEngWeb/departementMainView.es?mid=a2080400000&kd1_code=1000017)
31. Centre for Quantum Technologies (取自：<https://cqt10.quantumlah.org/>)
32. . European Patent Office (EPO), Quantum Computing Insight Report, 2023.
33. IQM OpenOcean, State of Quantum 2024: Understanding the 2023 Trends and Outlook for 2024, 2024.
34. Frost & Sullivan, Quantum Computing Solutions for the Automotive Industry, 2023, 2023.
35. Frost & Sullivan, Global Quantum Computing Growth Opportunities, 2023.
36. McKinsey & Company, Steady progress in approaching the quantum advantage, 2024.
37. McKinsey & Company, Quantum sensing: Poised to realize immense potential in many sectors, 2024.