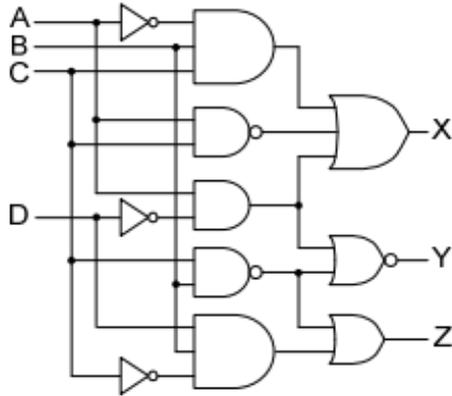


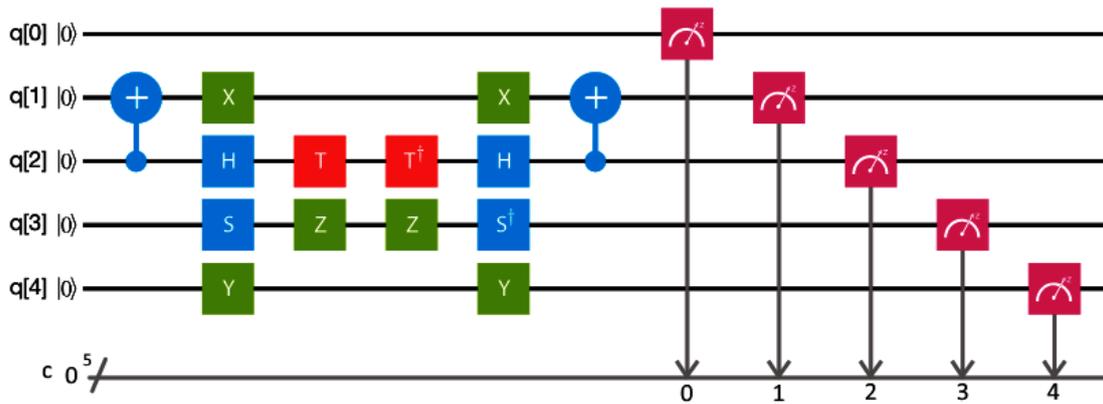
Quantum computing

傳統電腦: Classical Logic Circuit



Bits (0+1) logic gates (not, and, or)

量子電腦: Quantum Circuit



Qubits

quantum gates

measurements

Qubits up spin down spin

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle, \text{ 其中 } \alpha, \beta \in \mathbb{C}, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

$$= \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \quad |0\rangle := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad |1\rangle := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

量子疊加 (superposition)：一個量子狀態是 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的線性組合

Youtube： Dr Quantum 量子力學：雙縫實驗

<https://www.youtube.com/watch?v=9WWiqSB9jWg>



- 1) 薛丁格的貓
- 2) 愛因斯坦：「上帝不擲骰子」

量子糾纏：

$$|\Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B \pm |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B)$$

$$|\Psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |1\rangle_B \pm |1\rangle_A \otimes |0\rangle_B)$$

Quantum gates \Leftrightarrow Unitary(orthogonal) linear transformations

Measurement:

- 塌縮 (collapse) 到 $|0\rangle$ 或 $|1\rangle$ with probability
- $\Pr(|0\rangle) = \|\alpha\|^2$, $\Pr(|1\rangle) = \|\beta\|^2$

Bloch sphere: geometrical representation of qubits

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle, \text{ 其中 } \alpha, \beta \in \mathbb{C}, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

$$\alpha = \cos \theta e^{i\delta}, \quad \beta = \sin \theta e^{i(\delta+\phi)}$$

$$\Rightarrow |\psi\rangle = \cos \theta e^{i\delta} |0\rangle + \sin \theta e^{i(\delta+\phi)} |1\rangle = e^{i\delta} (\cos \theta |0\rangle + \sin \theta e^{i\phi} |1\rangle)$$

其中 $e^{i\delta}$ 稱作**共同相位** (global phase)，因為對 $|0\rangle$ 、對 $|1\rangle$ 都一樣影響，而在實驗上測量不出來，故可棄不看。

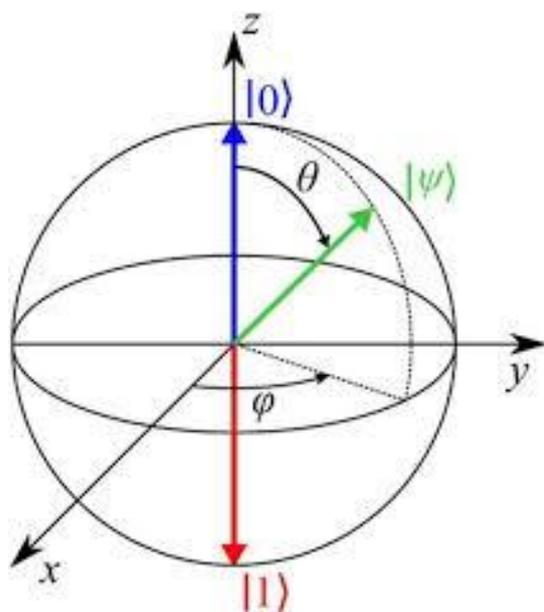
至於**相對相位** (relative phase) $e^{i\phi}$ 就不同了，它的影響可以在球面上表現出來。故得：

$$|\psi\rangle = \cos \theta |0\rangle + \sin \theta e^{i\phi} |1\rangle$$

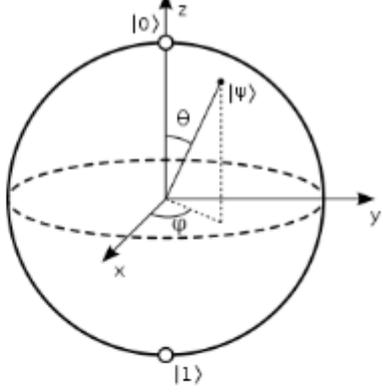
可以看到 $|0\rangle$ 的係數 $\cos \theta$ 是實數，並且 $\cos \theta$ 在原先 $\alpha = \cos \theta e^{i\delta}$ 所代表的是複數 α 的長度 (模、幅值, amplitude)，故 $\cos \theta$ 結果要是非負實數； $\sin \theta$ 亦是如此道理。故可定出 θ 與 ϕ 的範圍如下：

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \Rightarrow 0 \leq 2\theta \leq \pi,$$

$$0 \leq \phi < 2\pi$$



基礎架構比較

	古典電腦	量子電腦
資訊載體 (元件)	電晶體的 On/Off	光子的極化 (Polarization of Photon) 電子自旋 (Electron Spin) 原子/離子的能階 (quantum number)
編碼 (位元)	Bit: 0, 1	Qubit: 0, 1 的疊加狀態 
計算機架構	von Neumann Architecture	Quantum von Neumann Architecture
通用邏輯閘 universal gate	NAND / NOR	Hadamard gate (H), phase rotation gate, controlled NOT gate

Programing Quantum Algorithms

大廠商之量子電腦雲端服務 (語言介面: C/C++, Python, MATLAB 等):

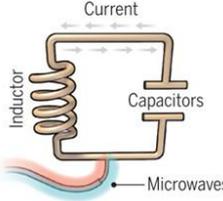
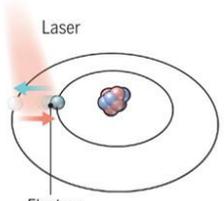
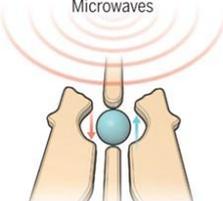
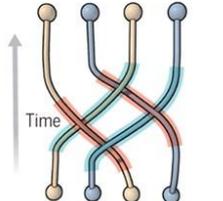
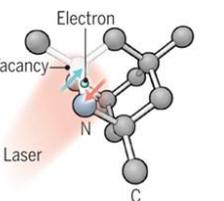
- Microsoft Q#
- IBM Q
- D-Wave

量子電腦計算機 (qubits, quantum gates, measure)

技術名稱	優點	缺點	代表公司
超導迴路	實踐快速、目前效果顯著	容易崩潰、必須一直保持低溫	Google, IBM, Intel, Microsoft
量子點	穩定、目前基礎	糾纏數量少，需長期保持低溫	IBM, Intel
囚禁離子	穩定，邏輯閘保真度 (fidelity) 高	運作緩慢、需要大型雷射系統	IonQ
拓樸量子位元	穩定度最高，能大幅降低錯誤率	理論最為困難，實作上相對不易	Microsoft, Bell Lab
鑽石空缺	可在室溫下操作	要達到糾纏態困難	Quantum Diamond Technologies Inc (QDTI)

A bit of the action

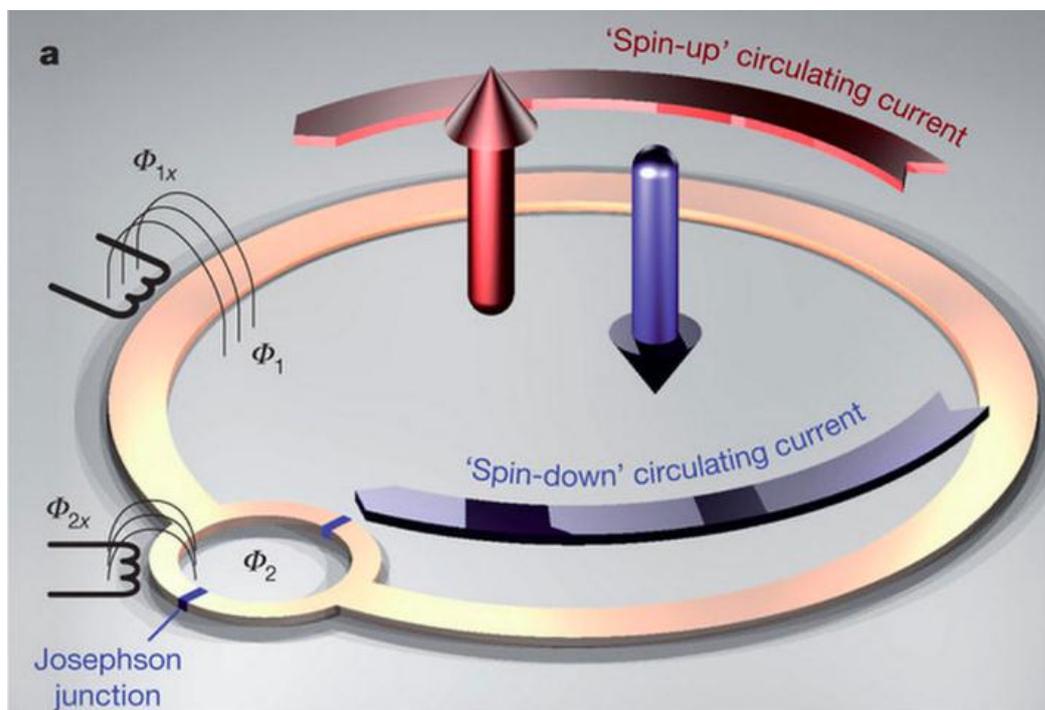
In the race to build a quantum computer, companies are pursuing many types of quantum bits, or qubits, each with its own strengths and weaknesses.

	Superconducting loops	Trapped ions	Silicon quantum dots	Topological qubits	Diamond vacancies
Diagram					
Description	A resistance-free current oscillates back and forth around a circuit loop. An injected microwave signal excites the current into superposition states.	Electrically charged atoms, or ions, have quantum energies that depend on the location of electrons. Tuned lasers cool and trap the ions, and put them in superposition states.	These "artificial atoms" are made by adding an electron to a small piece of pure silicon. Microwaves control the electron's quantum state.	Quasiparticles can be seen in the behavior of electrons channeled through semiconductor structures. Their braided paths can encode quantum information.	A nitrogen atom and a vacancy add an electron to a diamond lattice. Its quantum spin state, along with those of nearby carbon nuclei, can be controlled with light.
Longevity (seconds)	0.00005	>1000	0.03	N/A	10
Logic success rate	99.4%	99.9%	~99%	N/A	99.2%
Number entangled	9	14	2	N/A	6
Company support	Google, IBM, Quantum Circuits	ionQ	Intel	Microsoft, Bell Labs	Quantum Diamond Technologies
Pros	Fast working. Build on existing semiconductor industry.	Very stable. Highest achieved gate fidelities.	Stable. Build on existing semiconductor industry.	Greatly reduce errors.	Can operate at room temperature.
Cons	Collapse easily and must be kept cold.	Slow operation. Many lasers are needed.	Only a few entangled. Must be kept cold.	Existence not yet confirmed.	Difficult to entangle.

Note: Longevity is the record coherence time for a single qubit superposition state, logic success rate is the highest reported gate fidelity for logic operations on two qubits, and number entangled is the maximum number of qubits entangled and capable of performing two-qubit operations.

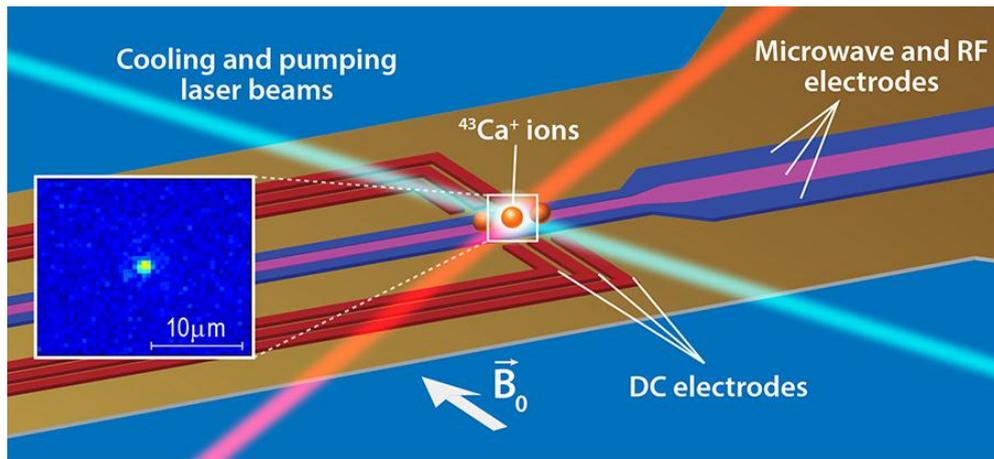
超導迴路 (Superconducting Loops)

超導量子電腦是將超導材料線迴路冷卻至接近絕對零度，使電流在沒有阻抗的情況下流動，因迴圈中的電流具有量子效應（能階量子化、疊加與糾纏），能作為量子位元。超導迴路中最重要的元件特徵為約瑟夫森介面。約瑟夫森介面是將兩層超導體線路間參入一層很弱的絕緣層，讓電子僅能透過量子穿隧效應通過絕緣層，在電路中作為非線性電感，改變電流相位(或電荷或通量)，作為兩種不同的量子位元。利用此技術 Google 量子 AI 實驗室發表了 72 qubits 的量子處理器 Bristlecone。

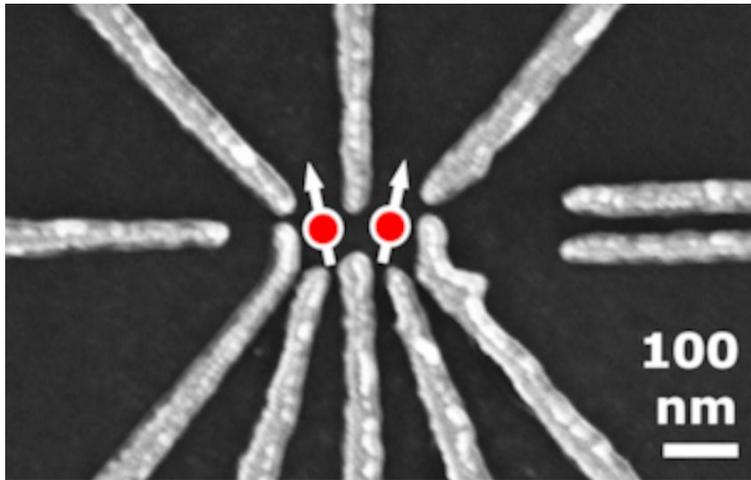


囚禁離子 (Trapped Ion)

利用電場或磁場將離子俘獲和囚禁在一定範圍內的裝置，離子的囚禁在真空中實現，離子與裝置表面不接觸。離子阱利用電極產生電場，將經過超冷處理的離子囚禁在電場裡，實現量子位元。其技術代表的公司為 [ionQ](#)，目前能把 22 個離子糾纏成一條線形鏈 (linear chain)，但至今還未能控制或讀取所有的離子對。



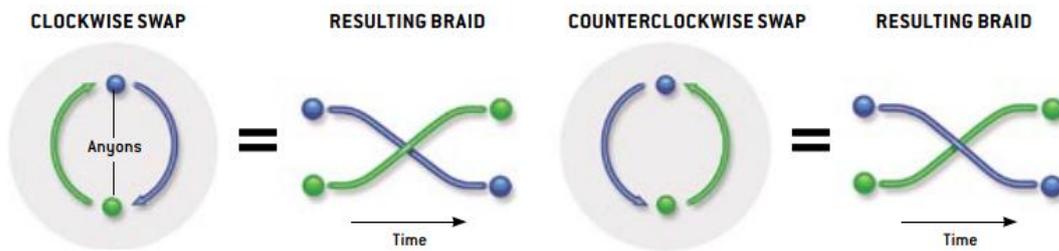
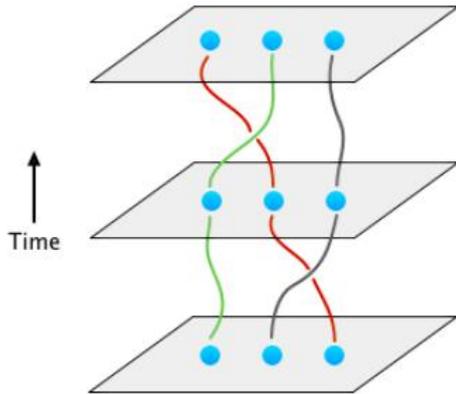
量子點 (Quantum Dot)



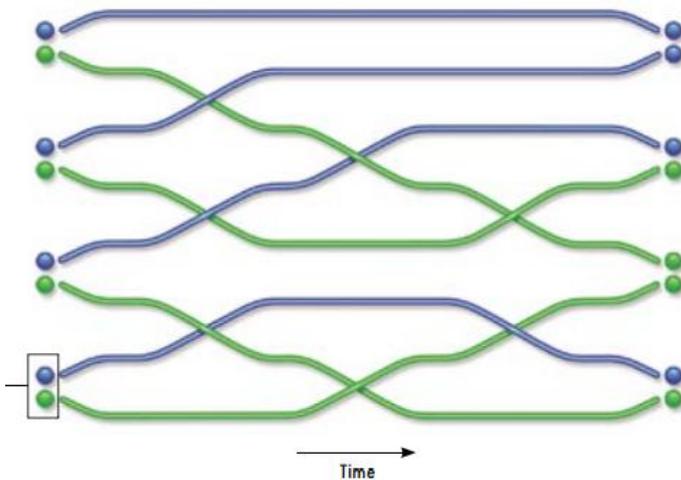
Intel 專注 silicon quantum dots 技術 (又被稱為人造原子)。量子點是能將電子束縛在三維空間中的半導體奈米結構。電子有自旋上或下的量子態可用來表示量子位元，並且不需像囚禁離子法需要雷射來困住它。早期量子點用砷化鎵晶體製作，但研究人員們更傾向於矽，希望能利用半導體產業的巨大產能，但大大落後於囚禁離子和超導量子技術。

拓樸量子位元 (Topological Qubit)

拓樸量子電腦的操作過程：將準粒子的順時針與逆時針交換當作量子位元基本操作，在三維時空中的世界線則形成對應的**辮子(braidings)**。

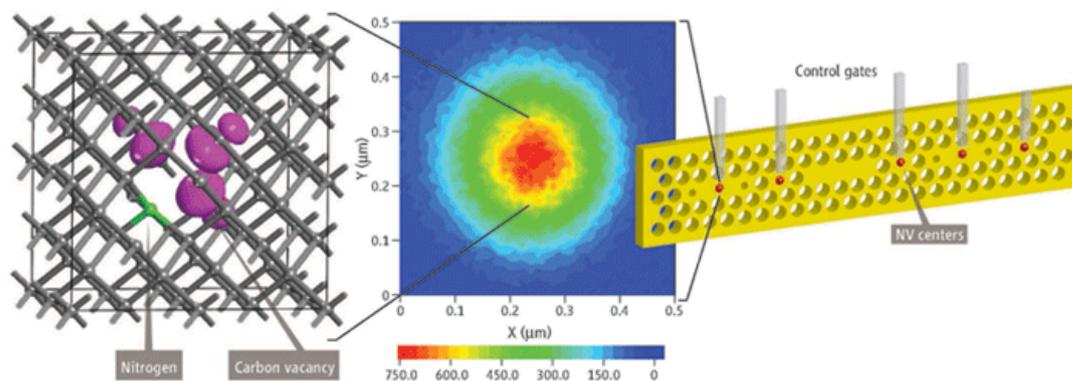


在操作**計算**時，將一群準粒子排列表達出輸入的量子位元。這些準粒子隨時間變化時會與鄰近的其他準粒子交換，這些交換就對應到量子位元的操作。最後計算完成後對準粒子逕行量測取的計算結果。



鑽石空缺 (Diamond Defect)

由人造鑽石中的氮空缺 (nitrogen-vacancy, NV) 中心所構成的。鑽石的晶格是相當穩定的，NV 中心是利用氮取代晶格中原本的碳原子，由於 5A 族的氮比 4A 的碳多出一個電子，這帶有自旋的電子被緊緊困於空缺中，可作為量子位元使用。在量子電腦中，如何從量子位元中讀取資訊是一個難題，而鑽石空缺中的光學性質能使得量子位元很容易被讀取。鑽石空缺放出的光子能處於疊加狀態，有利於量子計算。此外，鑽石空缺是目前唯一可以在室溫底下操作的量子計算技術。2012 年南加州大學成功用鑽石空缺技術的量子電腦實作 Grover 演算法。但目前尚未有顯著的商業應用。



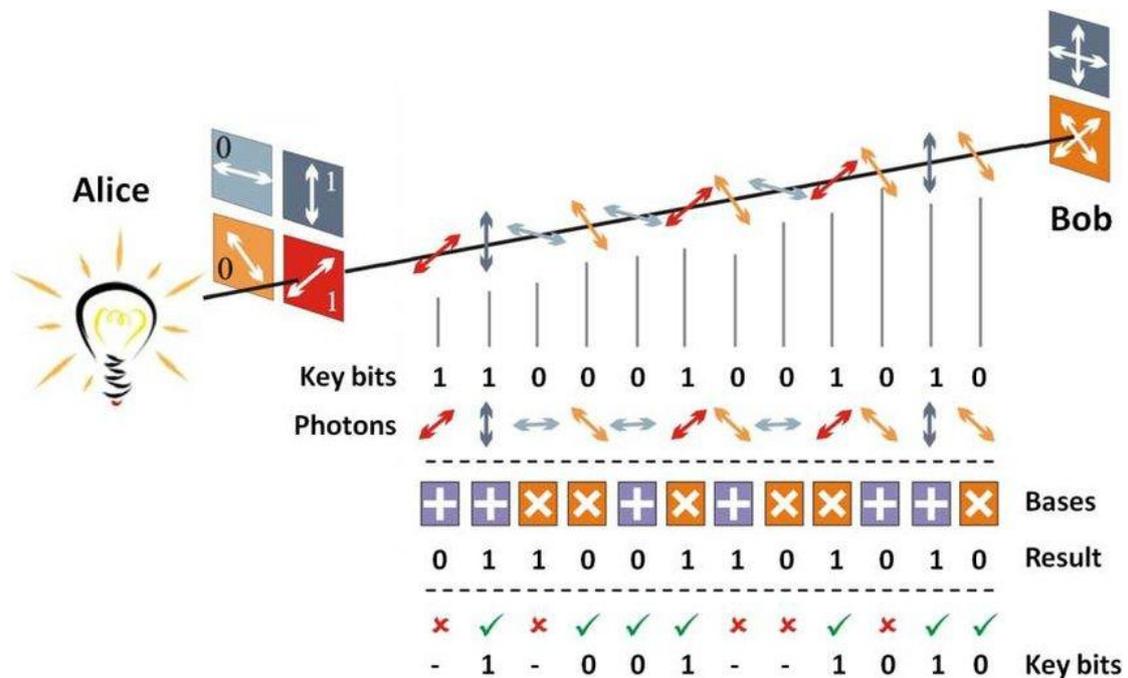
其它

量子退火 (Quantum Annealing)

模擬退火是熱力學中透過降低溫度找到最小能量狀態的過程；量子退火是在降溫時，系統逐漸靠近基態 (ground state) 並顯現出量子現象 (例如穿隧)，而加快得到最低能量，也就相對應全域最佳解。在該技術下，每個 qubit 只和臨近的 qubit 糾纏並交互作用 (稱為 coupler)。D-Wave (2000 qubits) 和 富士通 digital annealer 晶片 DAU，利用古典半導體元件模擬 quantum annealing 的方法，提供到 100 萬 bit 的大規模平行處理能力。

量子加密通訊 (Quantum quantum key distribution, QKD)

利用量子通道來傳遞加密金鑰，由於量子狀態被量測後會被破壞的特性 (wave collapse) 來避免被竊聽。理論上證明是安全無法破解的。若有人竊聽的話，可以被偵測出來。量子加密技術已經有透過光子的糾纏來實作的商業產品。目前量子通訊有數種協定：BB84、B92、E91 等協定。



IBM Q 53 Qubit (2019)

• 臺大 IBM 量子電腦中心 20 Qubit

量子電腦構造全解析

一台量子電腦由超過2,000種元件組成，利用兩種氦同位素元素的混合特性，來創造出適合量子位元的環境。量子位元必須要在絕對零度的恒定溫度中，才能夠正常運作。任何的熱能，都有可能導致失誤發生。這也就是為什麼整台量子電腦的設計，都是以維持絕對零度的環境為優先。

以IBM Q為例

量子位元訊號放大器
Qubit signal amplifier
量子電腦中共有兩種放大器，其中一種放大器必須保持在4開爾文 (Kelvin) 的溫度。

微波輸入線
input microwave lines
量子電腦必須保持在低溫環境，在高處理器發送控制、讀取訊號的過程中，微波輸入線能保護量子位元，避免受到熱雜音 (thermal noise) 干擾。

超導同軸線
superconducting coaxial lines
同軸線負責在第一和第二連接軸之間傳遞訊號。為了降低能量的損失，同軸線由超導體所製成。

混合室
mixing chamber
混合室位於最低溫度，提供整台量子電腦必需的冷卻能量，讓處理器與相關元件的溫度，降到比外太空還要寒冷的15mK。

低溫隔離器
cryogenic isolators
低溫隔離器可以讓量子位元在發送訊號時，避免受到雜音影響量子位元品質。

量子放大器
quantum amplifiers
量子放大器位於磁屏蔽罩內，除了能放大處理器所讀取的訊號，同時也能將雜音干擾最小化。

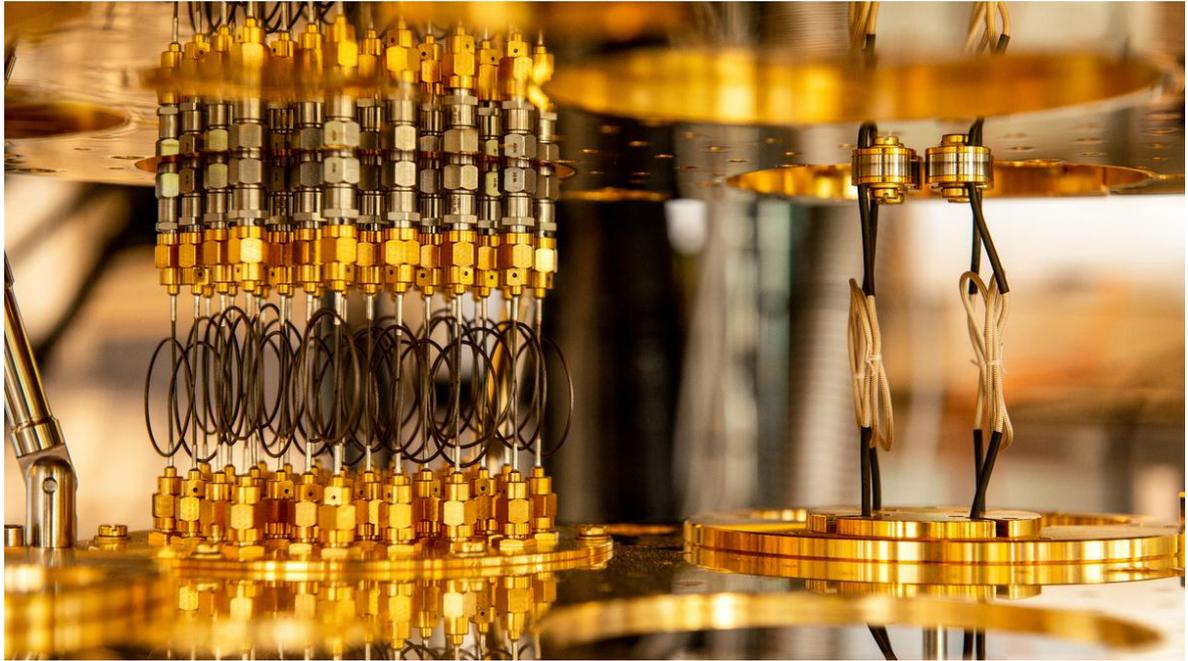
低溫盾
Cryoperm shield
量子處理器就位於低溫盾內，可以保護處理器不受電磁輻射干擾，來保持運作品質。

Google Sycamore

72 Qubits (2018)



Microsoft



D-Wave 2000 Qbits (2018) --- (simulated annealing)

