

量子之路

我們走了多久？又要去哪裡？

量子力學誕生之前，大家普遍認為牛頓力學已足以說明一切物體的運動。但當量子力學問世後，即明白自然界樣貌並非如此。相較於古典力學幾乎由牛頓一人獨挑大樑完成，量子力學的發展，是匯集幾個世代物理學家的貢獻和接力才奠下的根基。

人類的奮鬥不曾止息，這條路，我們走了多久？接下來，又要前往哪裡？



約瑟夫·湯姆森
Joseph John Thomson

- 1856 年 12 月 18 日 - 1940 年 8 月 30 日
- 英國物理學家
- 1897 年電子發現
- 1906 年諾貝爾物理學獎

談到構成物質最小的單元，你腦中會想到什麼？原子？電子？質子？還是夸克？這些在課本中熟悉的基本粒子，在 19 世紀末可是經過一番科學革命才被發現的。那個年代科學界正在流行一種神奇電力裝置——通了電壓就會發光的陰極射線管。為了搞懂這根管子裡面的光束到底是波還是粒子，科學家爭論不休，而在吵了將近 30 年後，JJ 湯姆森加入了這場論戰，在 1897 這年投下一篇名為《陰極射線》的震撼彈，他的結論大膽指出陰極射線是由微小的粒子所組成，而這些粒子就存在於原子內。現在看似理所當然的判斷，在當時可是直接推翻了百年來大家深信不疑的原子不能分割鐵則。

JJ 湯姆森這一發現，姑且先不論驗證了電子存在這回事，在更深一層的意義來說，他為人們帶出了對原子內部更多的想像，開啟了探討微觀尺度的大門。當然，發現電子這玩意還是很重要的，畢竟這也讓 JJ 湯姆森獲得了 1906 年的諾貝爾物理學獎。



馬克斯·普朗克 Max Karl Planck

- 1858 年 4 月 23 日 - 1947 年 10 月 4 日
- 德國物理學家
- 1900 年量子假說
- 1918 年諾貝爾物理學獎

你是否很難想像，如今被譽為量子論之父的普朗克，其實是個音樂才子，甚至想過以音樂家為職業（還好沒有）。

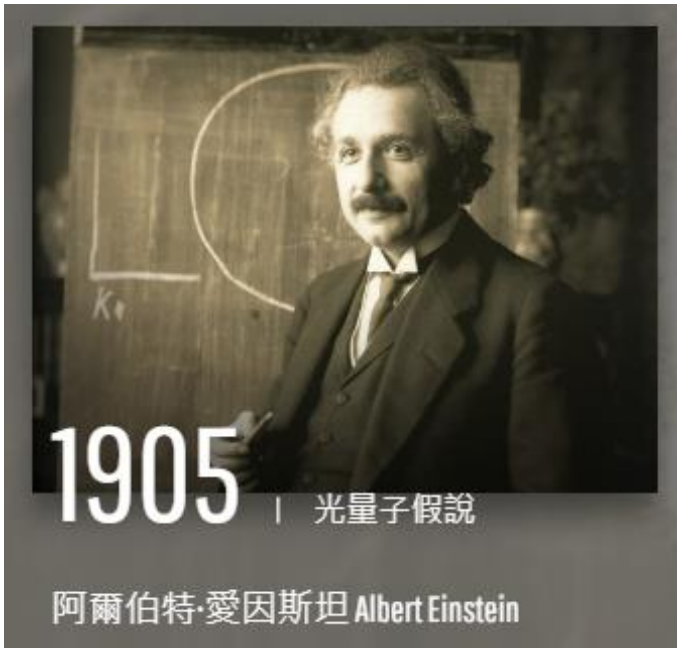
或者你可能也很難相信，在慕尼黑大學攻讀物理學系的普朗克，曾說過他其實並不想發現新的東西，只想理解物理學基礎這樣保守的話。

如今回首，他顯然走了比他自己當初預想更遠的路。

回到他所處的 19 世紀末，鋼鐵工業正快速崛起，在冶煉過程中，勢必會有個相當直球的問題被拋出：該如何精準得知冶煉溫度？這問題應該不難，當時正值物理學成果豐碩的年代，透過測定光的波長推測溫度顯然是個解方，但科學家失敗了。

就當時觀察的結果來說，的確無法解釋物體在不同高溫下所放出的火光顏色。原本只想學好基礎物理的普朗克，倒是率先提出物體受熱放光時能量「不連續」的概念，明顯挑戰了當時的主流認知，但卻成功說明了高溫物體火光顏色與溫度的關係。

他所提出的單位能量概念，醞釀了量子假說，1905 年愛因斯坦也是基於普朗克這個革新概念，成功地解釋了著名的光電效應。



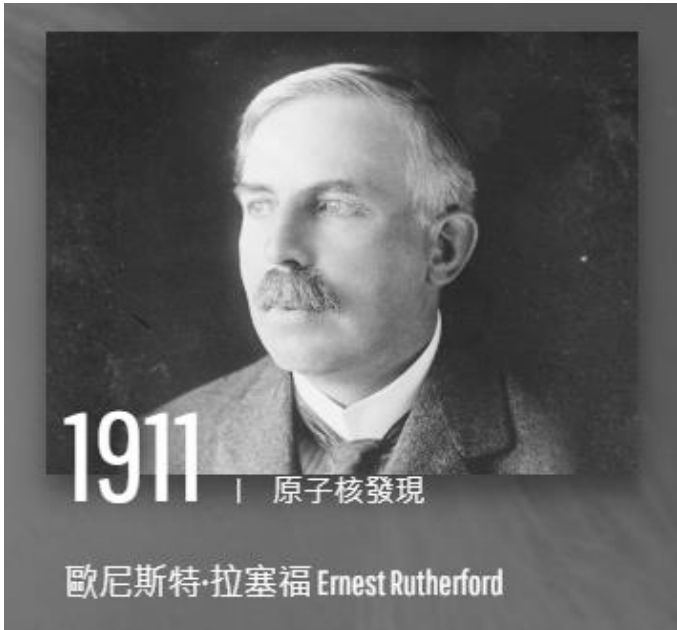
阿爾伯特·愛因斯坦 Albert Einstein

- 1879 年 3 月 14 日 - 1955 年 4 月 18 日
- 德國物理學家
- 1905 年光量子假說
- 1921 年諾貝爾物理學獎

1900 年普朗克提出了一個革新的概念，認為能量在發射和吸收時並非是連續的，而是一份一份地進行的，這樣一份能量稱為能量子。愛因斯坦利用普朗克的量子概念，在 1905 年進一步提出提出光量子假說，成功說明了光電效應的原理，也以此成果獲頒 1921 年諾貝爾物理學獎。

無獨有偶，就像普朗克之於愛因斯坦的啟發，愛因斯坦的光量子概念則給了法國物理學家德布羅意一些靈感，並在近 20 年後，提出了物質波假說。這篇論文由當時德布羅意的指導教授朗之萬寄給愛因斯坦，並得到了如此回覆：「他把巨大面紗的一角掀了起來。」

發展至今，已意味著量子論不再只是用來解釋之前困擾科學家多年的輻射問題，而是真真實實發生的物理現象。光電效應中的光子與電子交互作用，也是多年後量子電動力學 — 研究光子與物質互動的量子理論 — 的開端。



歐尼斯特·拉塞福 Ernest Rutherford

- 1871 年 8 月 30 日 - 1937 年 10 月 19 日
- 紐西蘭物理學家
- 1911 年原子核發現
- 1908 年諾貝爾化學獎

在 JJ 湯姆森率先打破原子不可分割這項鐵則，也證實電子的存在後，故事並未落幕。下一個接踵而來的問題是：電子是以什麼狀態存在原子中？

這個問題的答案，JJ 湯姆森本人倒是先提出了葡萄乾模型，認為電子是均勻散佈在原子裡面，就像散佈在瑪芬蛋糕裡面的葡萄乾一樣。但要驗證這答案，就得進行進一步的研究，而他的得意門生——拉賽福，倒是沒讓他失望。

拉賽福提出了一個暴力又直覺的實驗：想知道原子內部構造，打碎它不就得了。而扛起轟碎原子的這枚大砲，他最後是選定了 α 射線。這項完美的暴力計畫，就是我們現在知道的拉塞福散射實驗。1911 年，他正式提出了電子應該是在原子核周圍環繞的行星模型。

結果是漂亮的，但他大概也沒想到會推翻指導老師的模型。這位本來是要做電磁波研究的，結果卻先敲開核子世界大門。隨後，波耳即是根據這個行星模型，再加上量子的概念，催生了波耳的氫原子模型。



尼爾斯·波耳 Niels Bohr

- 1885 年 10 月 7 日 - 1962 年 11 月 18 日
- 丹麥物理學家
- 1913 年前期量子論的原子模型
- 1922 年諾貝爾物理學獎

原子模型從 JJ 湯姆森提出的第一代葡萄乾模型，到他的學生拉塞福透過散射實驗修正來到第二代的行星模型。但這個模型存在嚴重問題，當時的科學家也都清楚，那就是：原子是如何維持穩定性的？拉塞福的論文一開始也點出這問題先不在討論範圍中，因為這取決於原子細微結構和帶電組成的運動。

而接下解決這問題的棒子，交到了波耳手上。

1911 年拉塞福的行星模型公開後，馬上遭受到嚴厲的抨擊，依據已知的電磁學理論，繞原子核運轉的電子會釋放出電磁波，因此電子能量會逐漸減少並往原子核靠近，最後與原子核相撞，因此行星模型的原子不穩定 – 但原子顯然可以穩定存在才對。1912 年波耳來到了拉塞福實驗室，他馬上提出了解決這個問題的理論，進一步修正了行星模型。

利用普朗克提出的能量不連續概念，波耳說明電子雖然是繞著原子核旋轉，但只能存在特定的穩定軌道，而且軌道間是不連續的，因此每個軌道具有特定的能量（能階）。同時他也提出了電子可以在各能階之間躍遷，對應到原子吸光與放光的現象，用以解釋原子不連續的光譜。

這個突破性想法離真相又更進了一步，也為後來量子物理發展開創新境界。1922 年，波耳也因對原子結構理論的貢獻，獲頒諾貝爾物理學獎。



路易·德布羅意 Louis de Broglie

- 1892 年 8 月 15 日 - 1987 年 3 月 19 日
- 法國物理學家
- 1923 年物質波概念
- 1929 年諾貝爾物理學獎

愛因斯坦於 1905 年提出的光量子假說，無疑是先揭開了與光有關的量子序幕。而這個概念倒是給了德布羅意另一個更大膽的想像，這個假設是這樣的：既然光可以是波也能是粒子，那麼粒子不也有可能具有波的特性嗎？

因此，1923 年德布羅意正式提出了「物質波」這個概念，認為物質存在粒子與波動的特性，也就是波粒二相性的第一版提案。承襲自愛因斯坦的概念，這個突破性成果也獲得了他本人的認可。愛因斯坦在他自己的論文中，甚至引用並一再強調物質波概念的重要性。

當然，科學理論光有概念是不夠的，物質波的實驗證明接續是由戴維森 (C. Davisson)、革末 (L. Germer) 和湯姆森 (G.P. Thomson) 分別完成了，也為後來著名的薛丁格波動方程打下基礎。



維爾納·海森堡 Werner Heisenberg

- 1901 年 12 月 5 日 - 1976 年 2 月 1 日
- 德國物理學家
- 1925 年矩陣力學
- 1932 年諾貝爾物理學獎

波耳承襲拉塞福的原子行星模型，加入了普朗克的量子論，提出能階概念並修正為波耳原子模型。這個研究成果吸引了海森堡前來，接受為期一年的指導研究。

海森堡研究了波耳原子模型後，有了另一種想法：假設電子如同行星在特定軌道繞行，但其實我們能觀測的其實只有電子躍遷的能量差異，和所產生或吸收的電磁波頻率。所以他主張其實不需要行星軌道這個古典模型的假設，用觀測到的能量與頻率來描述粒子的行為就好。因此，1925 年他提出了用數學矩陣來表現量子力學的矩陣力學。

提到海森堡，當然不能不提到兩年後他的另一個著名發表：測不準原理 (uncertainty principle)。這個原理可說是充分表現出量子世界的奇異特性。怎麼說呢？如果你想知道粒子愈精確的位置，那勢必得用頻率最高，波長最短的光子來照射，但我們也知道光子的波長越短能量就越強，照射的同時更有機會改變粒子的動量，使得測得的動量變得不準確，所以位置與動量這兩者的測量永遠會顧此失彼。簡單來說：如果你精確測量了一個粒子位置，就不可能精確測量它的動量，反之亦然。



沃夫岡·恩斯特·包立 Wolfgang Ernst Paul

- 1900 年 4 月 25 日 - 1958 年 12 月 15 日
- 奧地利物理學家
- 1925 年包立不相容原理
- 1945 年諾貝爾物理學獎

提到包立，中學生應該都能立刻想到他所提出的「包立不相容原理」。這位天才型物理學家，不到 25 歲就提出了這項赫赫有名的原理，因為如果不知道這項理論，基本上我們無法了解化學元素的週期性。

這項原理重要之處，是解決了鹼金族的原子光譜無法用當時的量子理論解釋這個問題。包立提出一個電子的量子狀態可以透過四個量子數來描述，而且任何兩個電子無法擁有同一種量子狀態。也就是具有相同量子數的兩個電子，是不可能同時存在的。因此，如果我們想知道一個多電子原子的電子組態，那就得把電子一個個從最低能量態開始往上填，而最外層的電子數正是元素化學性質的關鍵。這個原理解釋了週期表與眾多物質性質，當然也包括適用於其他粒子，如質子、中子、夸克，是物理理論架構的核心原理之一。

此外，1926 年海森堡發表了量子矩陣力學不久後，包立也以該理論推導出氫原子光譜，可說是驗證海森堡理論的重要推手，讓當時看起來十分詭異的矩陣力學能夠迅速的被科學界接受。



埃爾溫·薛丁格 Erwin Schrodinger

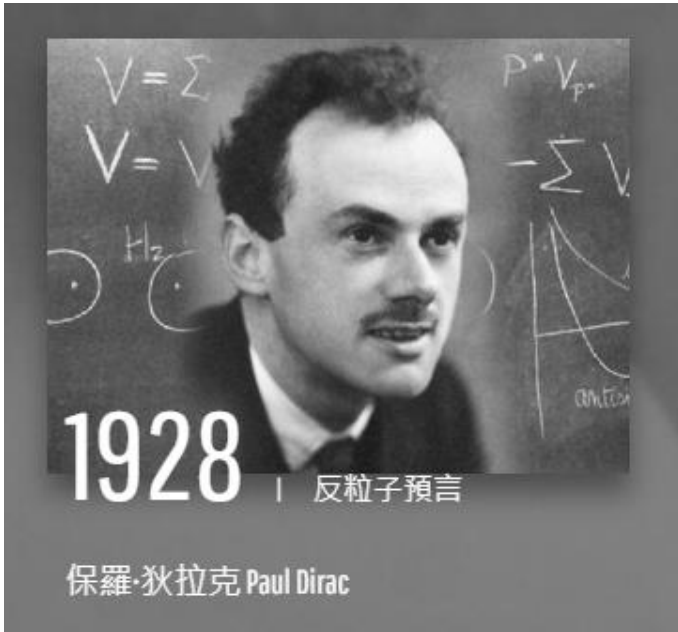
- 1887 年 8 月 12 日 - 1961 年 1 月 4 日
- 奧地利物理學家
- 1926 年波動力學
- 1933 年諾貝爾物理學獎

為描述一個量子系統的狀態如何隨時間演變，除了海森堡從數學矩陣概念下手外，薛丁格則是從直觀的波動方式來計算。這個量子力學方程式成功地以波函數描述粒子的量子態，另一層意義來說也等同為德布羅意的物質波提供了穩固的理論基礎。

這個成果很快的地獲得了普朗克、愛因斯坦等物理巨擘們的讚賞。不過，有個問題產生了：這個薛丁格方程式會出現複數解，這意味著什麼？

以波恩、海森堡、波耳為首的哥本哈根學派認為，這個波函數就是用來計算粒子在某位置或處於某種狀態的機率，所以量子系統本身的描述就是一種機率概念，而且這機率取決於我們如何觀察它、而不是它是什麼。

真實的物理學轉眼成了哲學問題，這說法當然沒獲得薛丁格同意，實實在在的波，怎麼就成了機率？！就如同愛因斯坦說的：上帝是不會擲骰子的！而他反擊的方式正是提出「薛丁格的貓」這個弔詭思想實驗來諷刺。但隨著時代推演，越來越多研究也顯示哥本哈根學派主張有其正確性。但最令人意外的，大概就是沒想到這個思想點子影響了人文、哲學界，至此「薛丁格的貓」成了鼎鼎大名詞彙。



保羅·狄拉克 Paul Dirac

- 1902 年 8 月 8 日 - 1984 年 10 月 20 日
- 英國物理學家
- 1928 年反粒子預言
- 1933 年諾貝爾物理學獎

在諸多科幻電影裡，總不乏看到反派角色有個名為「反物質」的奇妙武器，但這個物質究竟緣起什麼樣的面貌？

回到 20 世紀初，當量子力學開始解釋原子內部的物理規則的同時，愛因斯坦也提出了相對論來修正牛頓力學，據以描述質量極大，速度極快的物體行為。近代物理的兩大基石，便各自在不同的物理尺度下開始了對古典物理的全面性革命。

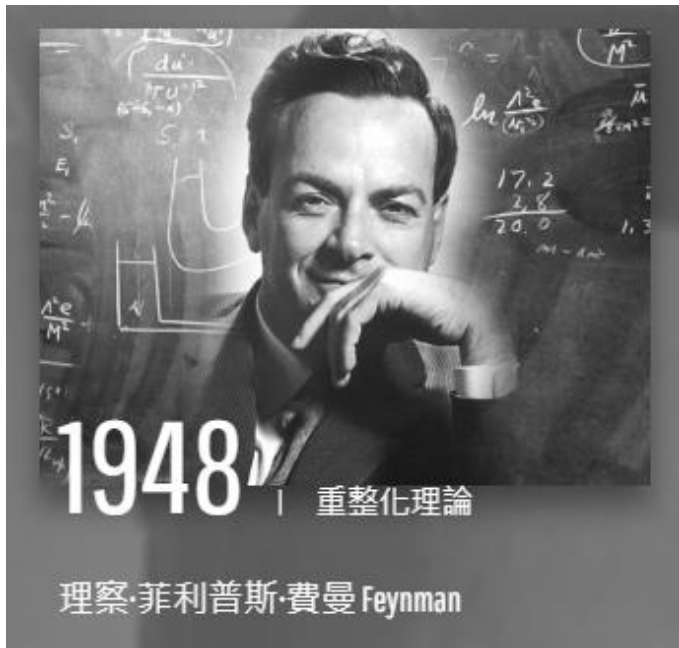
在此一時代背景下，有著純粹美感的英國物理學家狄拉克，便開始將相對論要求的一些物理特性納入量子力學的範疇下，展開量子力學與相對論初步的統合工作。他融合兩者原理所提出的狄拉克方程式，漂亮地導出已知的許多電子性質。但在計算中，出現了令人困惑的結果：方程式中竟出現了能量負值的解！

或許就只是個例外？

但曾留下「一個物理定律必須有數學美」名言的他，是無法接受任意用例外來刪除理論計算後的結果。苦思之後，他提出了非常大膽的假設——他認為負能量的量子狀態的確是存在的，而且可能是由我們尚未發現的粒子所組成。

這無疑是在物理學界投下了震撼彈。但過沒多久，1932 年美國物理學家卡爾·安德森就在實驗室裡發現了具有正電的電子 - 即所謂電子的反粒子，也稱「正子」。這個發現除了證實了狄拉克的理論外，也讓物理學家們更加重視物理世界中「對稱」的重要性，紛紛尋找起各種粒子的「對稱」孿生兄弟——反粒子。

狄拉克方程式顯然是一個無法忽視的存在。反物質的預測促進了高能物理的發展，同時他也為電磁理論發展到量子電動力學做出了重要的貢獻。1933 年狄拉克果然不負眾望地與薛丁格共同獲頒諾貝爾物理獎。



理察·菲利普斯·費曼 Richard Phillips Feynman

- 1918 年 5 月 11 日 - 1988 年 2 月 15 日
- 美國物理學家
- 1948 年重整化理論
- 1965 年諾貝爾物理學獎

當量子力學與狹義相對論這兩大近代物理基石各自發展之際，狄拉克率先不帶矛盾地成功融合兩套理論，提出了狄拉克方程式，並建立了狹義相對論量子力學。這個公式的重要性顯然不用多說，其正確性也很快得到了驗證。

狄拉克方程式相當成功，但這個理論的數學卻相當複雜，許多物理量的計算都得到發散的結果。而後來加以改良用一種更加簡潔的方式來描述相同物理過程的人，正是狄拉克的粉絲——理察·費曼。

費曼在 1948 年提出了量子電動力學新的理論形式、計算方法和重整化方法，進而避免了上述所說的發散結果。由於這一貢獻，他和美國的史溫格和日本的朝永振一郎共同獲頒 1965 年諾貝爾物理學獎。



約翰·斯圖爾特·貝爾 John Stewart Bell

- 1928 年 6 月 28 日 - 1990 年 10 月 1 日
- 愛爾蘭物理學家
- 1964 年貝爾不等式
- 1990 年諾貝爾物理學獎提名人選，但於當年 10 月 1 日逝世

提起貝爾最重要的貢獻，或許可以用美麗的意外這麼一句話來說明。

主宰微觀世界的量子理論，發展至 1960 年代其實已相當完備，只是以波恩、海森堡、波耳為首的哥本哈根學派與愛因斯坦、薛丁格等人對於機率詮釋持續論戰，並未有解答。究竟哪一派是對的？這難題勢必得留給新生代物理學家來解決。

過去兩派的爭辯，哥本哈根學派算是佔了上風，面對當年愛因斯坦對量子力學的種種質疑，波耳都能一一破解，但唯獨針對 1935 年對方陣營提出的 EPR 理論並未解決，也就是：相距很遠的兩個粒子到底能否保持連結(量子糾纏)，使得對一個粒子做測量時會影響到另一個粒子的狀態？

作為愛因斯坦的追隨者，貝爾顯然是站在古典力學這方，首要且直覺的方式，那就是去驗證 EPR 理論，而且這驗證得是一個確定且客觀的方式。

遵循著這個原則，1964 年貝爾成功提出了檢驗量子纏結是否存在的數學不等式。簡單來說，如果微觀世界遵循古典物理原則，那麼，這個不等式就會成立。反之則不成立。過去淪為哲學爭辯的物問題，如今回歸以客觀的數學語言來說話，這促使不少人開始投入驗證。

算式是完美的，但第一個驗證結果卻出乎貝爾意料，1972 年美國物理學家克勞澤首次驗證了算式並不成立，前仆後繼的實驗數據也都不符合貝爾不等式，等於說明了量子糾纏確實存在。

姑且不論貝爾是否樂見這樣的意外，多年來的兩派爭辯，終於在他的不等式中畫下句點。



阿蘭·阿斯佩 Alain Aspect

- 1947 年 6 月 15 日 -
- 法國物理學家
- 1982 年量子糾纏實證
- 2022 年獲諾貝爾物理學獎

量子力學中，令人最費解的現象之一，量子糾纏大概算得上前三。也就是相距很遠的兩個粒子，到底是否真的保持連結？如果對一個粒子做測量，是否就會影響到另一個？之所以令人費解，也是因為對於深受古典物理學思維影響的人來說，這遠遠違背了認知。

1964 年貝爾提出了以數學不等式來檢驗量子糾纏是否存在，1972 年美國物理學家克勞澤算是首次實驗驗證了不等式不成立，但是這些實驗總是有漏洞而不被完全接受。從 70 年代到 80 年代，隨著實驗技術漸漸成熟，終於在 1982 年，法國物理學家阿斯佩以更嚴謹且先進的技術，再次驗證了量子糾纏的確存在。

發展至此，量子力學可說是正式擺脫 EPR 悖論的糾纏，並開始衍生量子計算及量子加密等新技術。許多科學家認為量子糾纏的實證是近幾十年來科學最重要的發現之一，如果沒有這最後一哩路的堅持，或許量子計算的發展還得等上更久呢。



查爾斯·貝內特 Charles H. Bennett

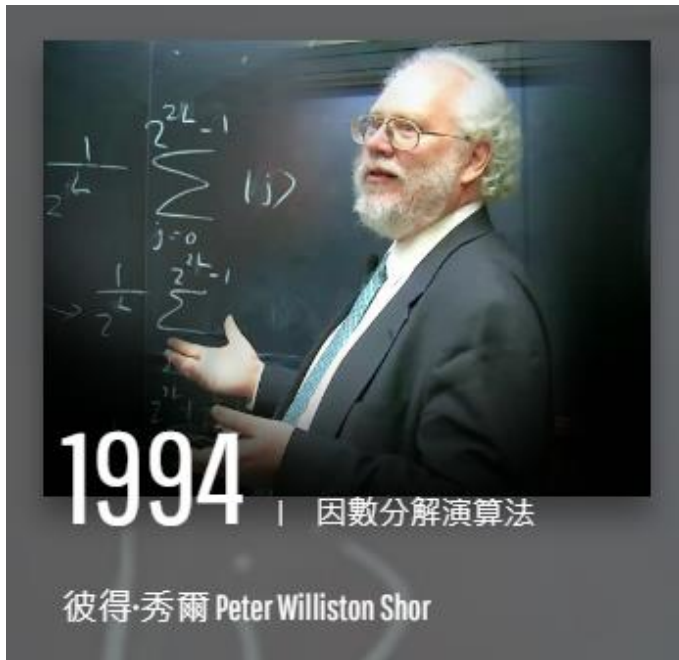
- 1943 年 -
- 美國物理學家
- 1993 年量子通訊與量子遙傳

傳統的通訊方式，如光纖電纜或無線電，都有被竊聽的可能。但這個問題在量子力學範疇中，顯然有了另一種突破可能。

1984 年美國科學家貝內特率先提出「量子通訊」概念，也就是利用量子糾纏的這個特性，來實現安全的密鑰傳遞。什麼意思呢？

回到量子糾纏特性來說：兩個或兩個以上的粒子若是處於彼此糾纏的狀態，如果改變了其中一顆粒子的狀態，那麼其他粒子的狀態也會隨之改變，無論它們距離多遠都會如此。

將此特性放到通訊安全的概念來說，任何竊聽者造成的擾動將會影響到粒子的狀態，進一步暴露曾經被竊聽的性質，因此可以透過協定達到保完全保密的通訊目的。除了量子密鑰以外，1993 年貝內特還提出了「量子遙傳」的概念，可以透過量子糾纏態傳送量子訊息，量子通訊以及量子遙傳的概念都已經被實驗實現，而實際能傳輸多遠的距離是下一步突破的重點。



彼得·秀爾 Peter Williston Shor

- 1959 年 8 月 14 日 -
- 美國計算機科學家
- 1994 年因素分解演算法

提到密碼，你可能會想到電影模仿遊戲中的諜報情段，或者更直覺地想到那些日常生活中多到記不住的各種長長短短的英數混合字串。

我們所處的資訊世界，小至登入電子信箱或大至商業資訊或國家資安，顯然都需要密碼學概念。就技術來說，現在通行於銀行及網路等常使用的 RSA 加密演算法，利用大質因數分解在傳統電腦上需要耗費巨大資源的特性，達成很高的安全性，其實本身並沒有什麼問題。有問題的是：量子技術的發展太快了。

1994 年美國計算機科學家秀爾率先提出量子質因數分解演算法，顯示量子電腦可以輕易破解目前常用的加密演算法。他的目的是要提醒一件事：量子電腦因為能利用量子特性運算，繼續發展下去，勢必對於主流的 RSA 加密演算法構成威脅。

雖然目前因為硬體容錯能力的限制，在短期內應該還看不到可以破解現有 2048 位元 RSA 編碼的量子電腦，但是量子科技的發展是絕對預期可見的，而加密的問題也的確不容忽視。因此，現行科學家們為防範量子運算帶來的負面衝擊，也開始陸續展開後量子密碼學加密研究。

很明顯地，量子力學帶來的革命正在發生，且將以你我想像不到的速度，大幅改變現在的資訊時代。我們可以不清楚那些複雜的背後原理，但千萬別以為這些名詞還與我們毫不相關喔。

圖片出處

1. 約瑟夫·湯姆森 [https://en.wikipedia.org/wiki/J. J. Thomson](https://en.wikipedia.org/wiki/J._J._Thomson)
2. 馬克斯·普朗克 <https://historia-biografia.com/max-planck>
3. 阿爾伯特·愛因斯坦
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%98%BF%E5%B0%94%E4%BC%AF%E7%89%B9%C2%B7%E7%88%B1%E5%9B%A0%E6%96%AF%E5%9D%A6>
4. 歐尼斯特·拉塞福 [https://en.wikipedia.org/wiki/Ernest Rutherford](https://en.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford)
5. 尼爾斯·波耳 <https://www.lindau-nobel.org/de/bohr-heisenberg-two-physicists-in-occupied-copenhagen/>
6. 路易·德布羅意
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Louis Victor Pierre Raymond, Duc de Broglie. Photograph by H Wellcome V0028118.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Louis_Victor_Pierre_Raymond,_Duc_de_Broglie._Photograph_by_H_Wellcome_V0028118.jpg)
7. 維爾納·海森堡
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%BB%B4%E5%B0%94%E7%BA%B3%C2%B7%E6%B5%B7%E6%A3%AE%E5%A0%A1>
8. 沃夫岡·恩斯特·包立
[https://he.m.wikipedia.org/wiki/%D7%A7%D7%95%D7%91%D7%A5:The physicist Paul Dirac, Wolfgang Pauli and Rudolf Peierls, c 1953. \(9660575591\).jpg](https://he.m.wikipedia.org/wiki/%D7%A7%D7%95%D7%91%D7%A5:The_physicists_Paul_Dirac,_Wolfgang_Pauli_and_Rudolf_Peierls,_c_1953._(9660575591).jpg)
9. 埃爾溫·薛丁格 <https://www.wikidata.org/wiki/Q9130>
10. 保羅·狄拉克
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%BF%9D%E7%BD%97%C2%B7%E7%8B%84%E6%8B%89%E5%85%8B>
11. 理察·菲利普斯·費曼 [https://en.wikipedia.org/wiki/Richard Feynman](https://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Feynman)
12. 約翰·斯圖爾特·貝爾 <https://home.cern/news/news/physics/fifty-years-bells-theorem>
13. 阿蘭·阿斯佩 [https://en.wikipedia.org/wiki/Alain Aspect](https://en.wikipedia.org/wiki/Alain_Aspect)
14. 查爾斯·貝內特 [https://en.wikipedia.org/wiki/Charles H. Bennett \(physicist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_H._Bennett_(physicist))
15. 彼得·秀爾 [https://en.wikipedia.org/wiki/Peter Shor](https://en.wikipedia.org/wiki/Peter_Shor)