

微軟的量子力學

撰文／湯姆·西門奈 (Tom Simonite) 譯／梁豫婷

一家老字號企業對基礎物理的鑽研，
能開啟一個電腦強到超乎想像的時代？

本刊取得美國麻省理工學院 Technology Review 期刊圖文授權
Technology Review,
Published by MIT,
TECHNOLOGY REVIEW
internet URL: www.
technologyreview.com

**MIT
Technology
Review**

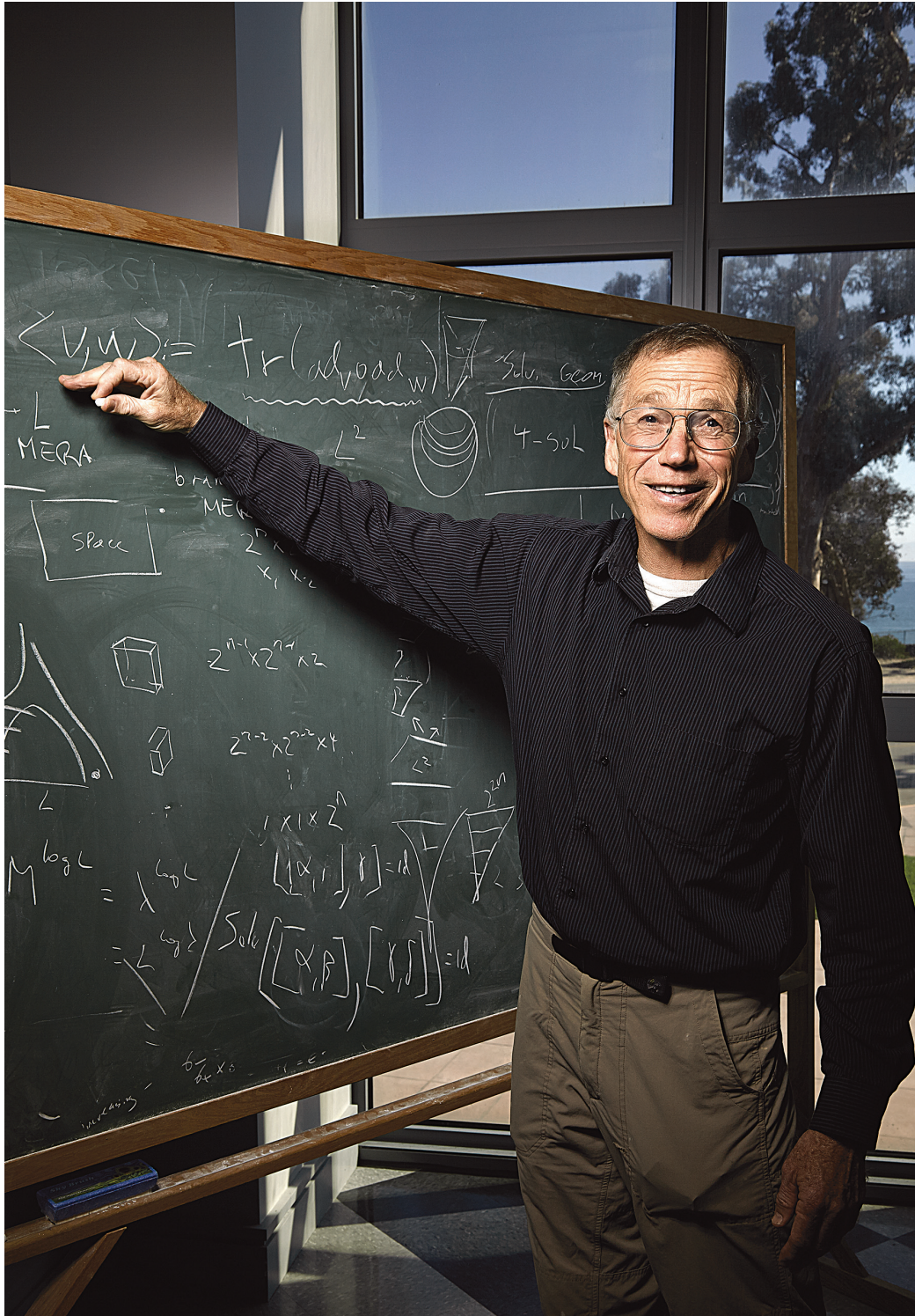
2012 年，一項粒子物理學新發現在荷蘭發表後，引起許多關於諾貝爾獎的議論。在一支溫度降到比外太空還低的極小半導體晶體中，物理學家首次觀察到稱為馬約拉納費米子 (Majorana fermion) 的奇妙粒子，而終於證實 1937 年的一則預測。乍看之下，這個進展和銷售辦公室應用軟體或跟亞馬遜爭奪雲端運算的挑戰毫無關聯，但微軟當時的技術和研究策略長蒙迪 (Craig Mundie) 卻很開心。由微軟提供部分經費的這項研究成果，其實攸關微軟一項利用量子物理處理資料，構建超強電腦為目標的計畫。蒙迪說：「這是很關鍵的時刻，因為這項研究幫我們指出一個實現超強電腦的方向。」

微軟近期才開始公開談論這項已進行 10 年的計畫，這項計畫一旦成功，可能對世界帶來極大變化。自從 1982 年，物理學家費曼 (Richard Feynman) 首次提出量子電腦的構想，理論學者已證明，這種電腦能處理傳統電腦最快也要

花幾億年才能解答的難題。例如，量子電腦或許能做為研發新藥或超高效太陽能電池的利器，也可能因此顛覆人工智慧技術。

往這種運算涅槃境界提升的進展一直很慢，因為遲遲做不出可靠的量子電腦基本建構單位，也就是利用量子效應進行資料編碼的量子位元 (quantum bit, 或簡稱 qubit)。學術界、政府研究單位、IBM 和惠普等企業的研發實驗室都曾建構量子位元，成功連結少數量子位元後，電腦效能確實有所提升。不過，由於對物理性無法有效掌握，這些量子位元還不能拿來做為通用電腦的基礎。

微軟連量子位元都還沒建構成功，但根據量子物理學可預見的矛盾，卻最可能率先做出實用的量子電腦。微軟正以 2012 年的荷蘭的研究成果為主要基礎，研發一種稱為「拓樸量子位元 (topological qubit)」的新型量子位元。我們有充分的理由相信，這種設計能擺脫目前量子位元難以控制的問題，



弗里德曼 (Michael Freedman)
 領軍 Station Q。
 攝影：Joseph Escamilla

也更適合投入量產。微軟研究院院長李彼得（Peter Lee）說：「我們正在做的事就好比打造第一個電晶體。」微軟同時也在研究如何設計及控制以拓撲量子位元製作的電腦電路。微軟開發量子電腦運算法的團隊已證明，只配備幾百個量子位元的電腦，就能操作目前任何超級電腦都跑不動的化學模擬過程。

大約明年左右，微軟所支援的物理實驗室，即將針對某位戶外型數學天才開發出的量子位元，展開關鍵組件測試。一旦測試成功，這家被很多人視作電腦界明日黃花的公司，或許又將前途一片光明。

更詭異的是：可能會由傳奇卻過氣的貝爾實驗室的一位物理學家拔得頭籌。

癥結所在

離太平洋咫尺之遙一間陽光明亮的屋子裡，促成微軟投入量子運算並做為技術智囊的弗里德曼（Michael Freedman）承認自覺渺小。他說：「認真想想量子運算，才會意識到我們人類像某種鈍重的化學電腦。」63歲的弗里德曼目前領導微軟 Station Q 研究團隊，在美國加州大學聖塔芭芭拉分校校園裡的十幾間研究室裡，合力研發拓撲量子位元。體格健康，膚色古銅的他，鞋上還有中午走海灘步道去用餐時沾到的沙塵。

他的腦袋若是笨重的化學電腦，也是卓然超群的一台。弗里德曼是數學天才，16歲進加州大學伯克萊分校，兩年後畢業，30歲

解開世紀數學難題「龐加萊猜想（Poincaré conjecture）」，而且他解題完全沒動筆，只靠腦中觀想四度時空在眼前扭曲變形的樣子。他回憶道：「我當時整個證明過程都用看的。」他將這個觀想過程寫成95頁的證明，而獲頒數學界最高榮譽菲爾茲獎（Fields Medal）。

弗里德曼因此一舉站穩拓撲學大師地位，拓撲學所研究的是不受變形影響的性質。（有則老笑話說，研究拓撲學的人分不出咖啡杯跟甜甜圈，因為兩者都是戳了一個洞的表面。）他開始受物理吸引，是由

於科學家在1988年發現，用數學描述的拓撲結構，跟解釋某些量子物理現象的一個理論有所關聯。弗里德曼說：「這太美好了。」他立刻想到，藉兩者間的關聯，以同樣量子物理原理控制的電腦，將能破解傳統電腦力有未逮的難題，於是他決定不理既有的量子運算概念，另闢蹊徑。

弗里德曼不斷琢磨自己這個構想，他在1997年加入微軟的理論數學研究團隊，不久後，與俄羅斯理論物理學家基塔耶夫（Alexei Kitaev）成為搭擋。基塔耶夫曾證

量子計畫

廠商	技術	可能失敗的原因
IBM	用超導金屬電路製造量子位元。	這種量子位元的錯誤率太高，無法用來組成實用性高的電腦。
微軟	打造一種新的「拓撲量子位元」，理論上應該比較可靠。	目前尚未證明這種量子位元所用的次原子粒子確實存在。即使存在，也還沒有證據顯示這種粒子能受控。
阿爾卡特朗訊	受微軟的研究啟發，但用不同材料製作拓撲量子位元。	同上。
D-Wave Systems	銷售512位元的超導晶片量子電腦。	目前尚不清楚這種晶片能控制量子效應。即使可以，目前設計也僅限於用來解決少數特定數學問題。
Google	自2009年起在D-Wave的電腦上試驗，最近成立實驗室研發類似D-Wave的晶片。	同上。此外，Google正將原先為另一種量子位元開發的技術，修改成適合D-Wave量子位元所使用。

明，基於這種物理原理形成的拓樸量子位元，比任何其他方式構成的量子位元更可靠。弗里德曼此時終於開始覺得，除了艱深的數學、物理學外，他所進行的研究其實值得更廣泛的關注。2004年，他跑進蒙迪的辦公室，宣稱已經看出怎麼建立可靠度更高，更有擴展潛力的量子位元。弗里德曼說：「到最後，像我自己蓋好了球場似的，彷彿只要願意，隨時可以動手建構這項技術。」

蒙迪買單了。雖然微軟本來沒有研發量子電腦的規畫，但他知道量子電腦潛力非凡，以及研發工作進展緩慢。他說：「搞不好可以採取完全不同的作法，這想法太讓我驚豔。以這種形式的運算為基礎所引發的變革，最後或許會帶來類似於過去60年傳統電腦對地球的影響。」蒙迪隨後籌組拓樸量子位元研發團隊，交由略顯忐忑的弗里德曼掌舵。弗里德曼說：「我這輩子可是連電晶體收音機都沒組裝過。」

遙不可及的夢

就某方面而言，量子電腦跟傳統電腦的差別沒那麼大。兩者皆以二進制位元處理資料，且兩種電腦中用來表示位元的基本組成單位，都像開關一樣，可在不同狀態間切換。傳統電腦晶片上小小的電晶體，每個都可分別用斷電表示0，開通表示1。而量子位元則是根據描述微小物質及能量行為的量子物理原理，由於會變奇妙的把戲而強大得多。量子位元可以進入被稱為

疊加（superposition）的狀態，同時表示0和1。一旦進入疊加狀態，量子位元便互相鏈接或糾纏（entangle），某種程度上，操縱其中一個會連帶影響另一個。因為疊加和糾纏，只要在一台量子電腦上進行單一操作，就可以執行相同數目的傳統位元必須進行很多很多次操作才能完成的運算。量子電腦基本上可以同時平行循大量可能路徑求解。對於某些類型的問題，量子電腦相對於傳統電腦的優勢，甚至隨待處理資料的量呈指數增長。加拿大安大略省滑鐵盧大學的量子運算研究所所長拉佛勒蒙（Raymond Laflamme）表示：「我到現在都還覺得量子位元的威力很驚人，他們改變了電腦科學的基礎及所謂可運算的範圍。」

然而，純粹的量子態很難維持，在精心控制的環境條件下才得以觀察操縱。要保持疊加穩定，量子位元必須不受任何看似微不足道的干擾，甚至次原子粒子的隨機碰撞或鄰近電子的微弱電場影響。目前兩種技術最優良的量子位元，分別是以磁場所捕捉充電原子的個別磁性質，或超導金屬電路中的微小電流。量子位元維持疊加不到幾分之一秒就會崩解，這個過程稱作退相干（decoherence）。目前最多只有7個量子位元能同時運作。

2009年以來，Google持續在測試新創公司D-Wave Systems標榜領先全世界上市的量子電腦，並在2013年收購了一款512位元的版本。不過這些量子位元都固定在

只能跑特定運算的電路上，因此能解的問題有限。成功的話，以這套方法進行的量子運算可比為鉗子，一種只能用在特定用途的工具；而微軟所遵循的傳統方法，則提供猶如完備的工具箱般，可自由編寫程式的電腦。此外，外界研究員一直無法肯定D-Wave的運算方式確實可算量子電腦。Google最近剛成立內部的硬體實驗室，試圖以相同技術建構另一種版本。

如何化解退相干並減少因而產生的運算錯誤，已成為量子運算領域的顯學。根據門羅（Chris Monroe）表示，要讓量子位元具擴展的潛力，意外崩解的發生率大概需要降到一百萬分之一左右。門羅為美國馬里蘭大學教授，並主持由美國國防部及高級情報研究計畫署（Intelligence Advanced Research Projects Activity; IARPA）資助的一項量子運算計畫。即使目前最好的量子位元，崩解率通常也仍是理想值的好幾千倍。

微軟Station Q用的方法可能更好。當初誘使弗里德曼投身物理的量子態，發生在電子受困於某些材料內的平面時。這種量子態因為對許多足以讓傳統量子位元失去穩定度的干擾無感，而具有研發量子位元的人所夢寐以求的穩定度。當溫度接近絕對零度時，這些材料中的電子會出現奇妙性質，形成所謂的電子流體（electron liquid），電子流體共同的量子性質可用來表示一個位元。這設計的精巧程度，加上現金贊助、設備、運算時間，成

功吸引到幾位世界級頂尖物理學者與微軟合作。（微軟不願透露該公司將每年 110 億美金的研發預算，投入多少比例在這項計畫。）

美中不足的是，這個物理現象尚未獲證實。要用電子流體的量子性質做為位元，研究員不得不操縱他們內部某種稱為非阿貝爾任意子（non-Abelian anyons）的粒子，讓他們互相旋繞。儘管物理學家認為有非阿貝爾任意子的存在，卻缺乏確鑿證據。

馬約拉納費米子，也就是 Station Q 及合作團隊所尋找的那種非阿貝爾任意子，又特別難以捉摸。首次在 1937 年假想這種粒子存在的是深居簡出的義大利物理學家馬約拉納（Ettore Majorana），他隨

大約明年左右， 微軟所支援的物理實驗室會開始測試微軟設計的量子位元。

即離奇失蹤。由於自為反粒子的獨特性質，兩個馬約拉納費米子碰撞，會湮滅彼此，迸發瞬間能量，這種特性讓物理學家著迷了幾十年

直到 2012 年令人信服的證據才出現。在微軟的資助和指導下，荷蘭臺夫特理工大學的考恩霍文

（Leo Kouwenhoven）宣布在銻化銦製成的半導體奈米線發現他們的蹤跡。他在奈米線的兩端分別連接超導電極和一般電極，以形成所需的電子流體，微軟的構想因而獲得有力支持。微軟的彼得李說：「這項發現讓我們士氣大振，看來我們的方向沒錯。」考恩霍文的團隊和其它實驗室正努力讓實驗成果更精密，並證明這種粒子可以操控。為因應可能的量產加快進展，並做好準備，微軟已與廠商展開合作，以確保控制拓樸量子位元所需的半導體奈米線和超導電子組件供應無虞。

不過到頭來，微軟還沒做出量子位元。必須先有辦法讓馬約拉納費米子彼此旋繞，才能對應代表 0 和 1。哥本哈根尼爾斯玻爾研究所（Niels Bohr Institute）的材料學家最近找到一種方法做出有支線的奈米線，容許粒子在支線裡閃避，讓另一個粒子通過。

從設計初期就與微軟合作的研究員馬克斯（Charlie Marcus）目前正準備用這種新的奈米線建構測試用系統。他說：「我猜這夠我們明年忙的了。」

成功的話，不但能印證微軟的量子位元構想，也可杜絕考恩霍

文 2012 年說不定沒檢測到馬約拉納費米子的傳言。但在加州理工學院擔任理論物理學教授普雷斯吉爾（John Preskill）說，拓樸量子位元仍只是一套漂亮的理論。「這構想我很喜歡，但都努力這麼多年了，還沒找到有力證據。」

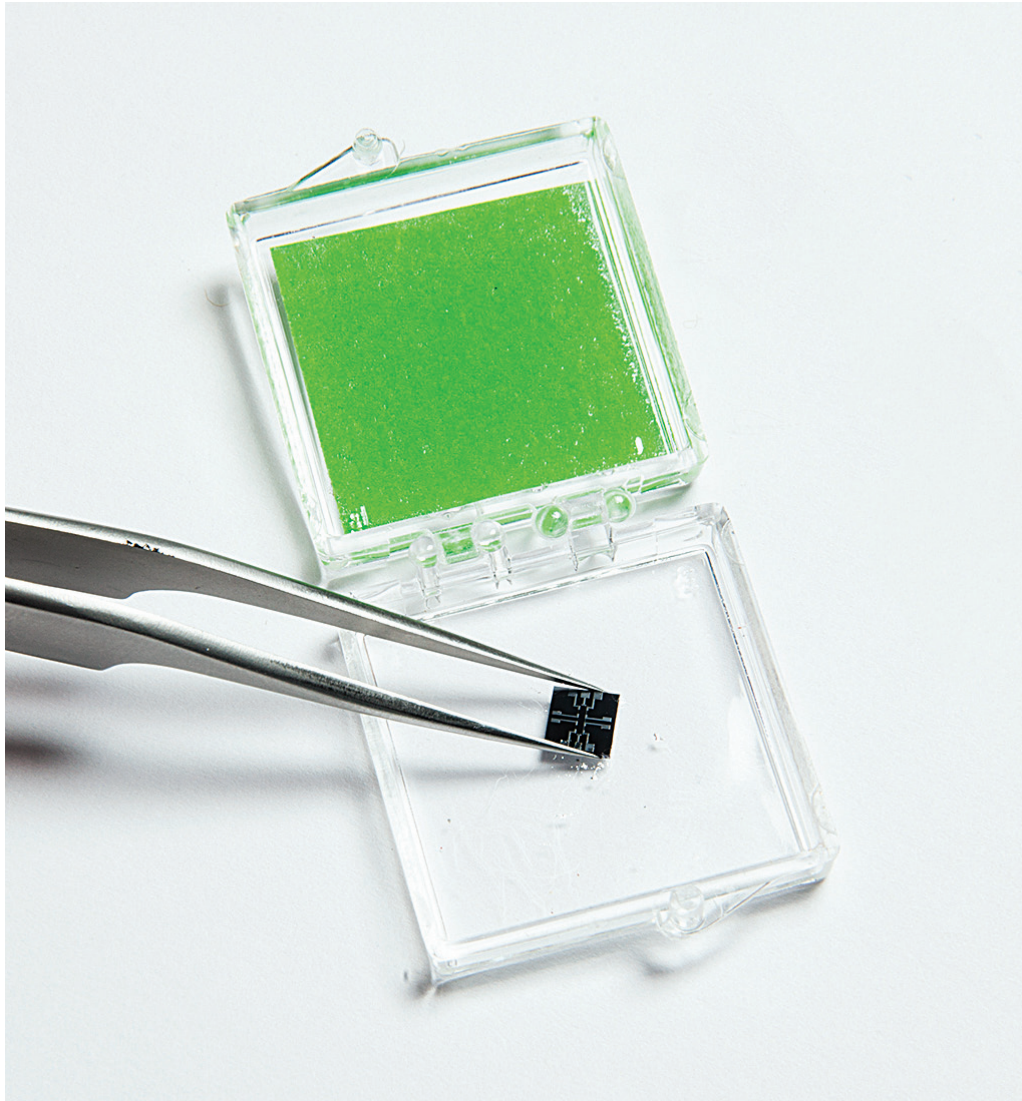
競爭激烈的物理學

位於紐澤西州的貝爾實驗室裡，威利特（Bob Willett）自稱已看到證據。他從眼鏡上方端倪一塊指甲大小的暗黑色長方型晶體，邊緣是一圈手工焊接的線，表面則是細微曲折的鋁，威利特宣稱在這晶片中央一個不到一微米寬的區塊內，檢測到非阿貝爾任意子。果真沒錯的話，那他已遙遙領先任何與微軟合作的對手。在他那幾間相連的狹小破舊研究室裡，威利特正準備打造（如果成功）世界上第一個拓樸量子位元。他說：「我們正把科學化為技術。」他的努力別具歷史意義。從威利特的研究室出來，經過走道上巨大的亞歷山大格雷翰貝爾（Alexander Graham Bell）胸像後，有個玻璃展櫃裡陳列著 1947 年在此誕生的全世界第一個電晶體。

類似威利特這種裝置的設計曾幾乎遭微軟放棄。微軟的弗里德曼和計畫合作夥伴剛開始原本認為，以超純砷化鎵晶體捕捉電子來構建拓樸量子位元應該可行。但經過 4 年實驗，微軟支援的物理實驗室仍未發現非阿貝爾任意子存在的確鑿證據。曾鑽研類似物理現象多年的威利特，在研讀弗里德曼與此設計



鮑伯威利特在貝爾實驗室的量子運算研究看來很有希望。



威利特宣稱曾觀察到拓樸量子位元的其中一個晶體。

法相關的論文後，決定自己試試身手。他於 2009 年至 2013 年間發表的一系列論文中，宣稱在自己設計的晶體裝置中發現關鍵粒子。這種晶體以液態氦冷卻到凱氏 1 度（ -272.15°C ）以下，並置於磁場內時，中央會形成電子流體。威利特使用電極讓粒子沿流體邊緣旋繞，圍著中央阿貝爾粒子旋繞的如果是非阿貝爾任意子，電子流體的整體拓樸態應該會隨之改變。正如理論學家所推測，他透過幾次不同實驗，

從粒子的流動中觀察到符合傳言的變化。實驗結果發表後，他正進一步著手設計量子位元。這比他初次實驗稍微複雜一點而已：只要把兩個相同的晶體背對背組合，再加幾個電極將電子流體相連，且能編寫和判讀代表 0 和 1 的量子態就可以了。

威利特希望能藉此杜悠悠之口，以免因沒人操作得出相同結果而存疑。跟微軟合作的馬克斯說，威利特「看見了我們沒看見的暗

號。」威利特反駁，認為是馬克斯和其他人做的裝置太大，而且用了性質差太多的晶體所致。他說最近複製其他人用的規格進行測試，結果不出所料：「試過其他人在用的材料，我現在曉得他們為何放棄了，根本難用到爆。」

貝爾實驗室現在屬於法國電信公司阿爾卡特朗訊，目前的規模和經費已不如當年在美國電信龍頭 AT&T 旗下的盛況，無法再讓眾多研究員自由發揮。從威利特的某些

研究室，可以俯瞰今年研究大樓某側整個拆除後留下的滿目瘡痍。不過他說，雖然研究人員編制變小了，但器材使用申請也變容易了。而且阿爾卡特朗訊開始對威利特的計畫挹注更多資金。以往只有另外3位物理學家跟他合作，最近開始有數學家 and 光學專家加入。貝爾實驗室的經營團隊已經問起哪些問題能用少數的量子位元解決，他說：「算是獲得蠻大力的推動。」

儘管威利特自視為微軟研究員的學術界同僚，而非業界競爭對手，且仍受邀出席弗里德曼在聖塔芭芭拉一年兩次的研討會，與微軟合作夥伴及頂尖物理學家共聚一堂；但最近幾次，微軟管理團隊表現得愈來愈明顯，他說，有時感覺自己來自別家公司的身分讓情況很尷尬。

假如被威利特早一步證明微軟所率先提出的構想可行，可就不只尷尬了。量子運算實用之路由微軟開關，會令人驚奇；由暮氣沉沉（母公司甚至沒涉足電腦業）的貝爾實驗室開關，則會教人錯愕。

量子碼

在綠樹成蔭的華盛頓雷德蒙微軟園區裡，幾千名軟體工程師埋頭幫 Windows 和 Microsoft Office 修正錯誤，增強功能；微軟博物館內，可看見遊客跟比爾蓋茨及創始員工攝於 1978 年的人型立牌合照；而在主研究大樓中，由斯沃列（Krysta Svore）帶領的十餘人團隊，正為不一定會出現的電腦開發軟體，釐清第一代量子電腦能用來做什麼。

會成立這支團隊是因為即使量子電腦再強大，也非無所不能。況且目前只有極少數的量子運算法開發完備，看來可具體運用在實際硬體上。斯沃列說：「量子運算或許威力驚人，但我們需要了解他的厲害之處在哪。」

量子電腦絕不可能做成行動電腦，因為量子位元需要超低溫環境（除非有朝一日靠量子電腦改良量子位元的設計）。比較可能的應用是做為提供網路服務的資料中心或超級電腦，或用來幫其他科技排除難題，獲得改進。

用量子電腦進行強大的化學模擬，以早日解決衛生、能源等領域的重大問題，看來大有可為。斯沃列表示，量子電腦能進行非常精確的模擬，進而取代好幾年單調乏味的實驗室工作。

根據美國能源部統計，目前全美國的超級電腦總計花三分之一的時間在模擬化學和材料科學。斯沃列的團隊已經開發一種運算法，讓第一代量子電腦就能夠解決複雜得多的問題，例如在短短幾小時或幾分鐘內，模擬測試完一種去除大氣層中二氧化碳的觸媒。他說：「這可能會是量子電腦的殺手級應用。」其實預想得到的殺手級應用不計其數。斯沃列的團隊已經初步證明，量子電腦可用於機器學習，這項微軟和競爭對手都愈來愈

重視的技術。近來因影像和語音識別的進展，重新掀起人工智慧研究的熱潮。但是，動輒幾千台電腦連線運作的結果，表現仍難望人腦項背。量子電腦或許能克服這項技術的局限。

從這樣的研究更能明白，率先建構出量子電腦的廠商，為何可能會取得史無前例的技術優勢。微軟的彼得李說：「我們自信有可能為一種嶄新的經濟打下根基。」。毫不意外地，他和所有其他研發量子硬體的人都說自己非常看好，但百

「我們自信有可能為一種嶄新的經濟打下根基。」

廢待舉，這項大獎依舊感覺遙不可及。量子技術彷彿進入疊加態，不是扭轉世界，就是發生退相干，崩解散落成一堆難懂的論文。開發量子技術的人每天都必須面對這樣的未定之天，但獎賞如此豐厚，誰會怪他們用盡全力，孤注一擲呢？■

- 西門奈是《Technology Review》舊金山分社社長。

Copyright © 2014, Tom Simonite. All Rights Reserved.