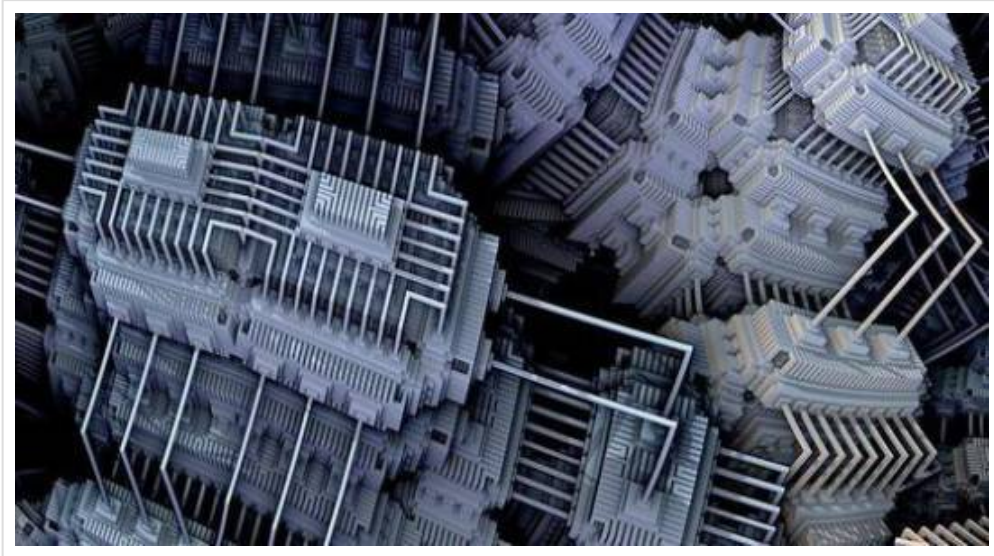


量子計算機永遠無法成功？可這場馬拉鬆開跑才十分鐘

北京新浪網 (2019-03-26 08:43)

分享     



來源：科研圈

擁有高出普通計算機數十乃至數百倍算力的量子計算機，是吸引了無數科技公司、大型學術團體乃至中國政府的研發熱點。

然而，希伯來大學的數學家、耶魯大學數學與計算機科學兼職教授吉爾·卡萊（Gil Kalai）卻表示，由於量子力學基本原理的限制，現有的主流技術永遠無法使量子計算機成功進入實際應用。

這種觀點引發了圈內人士激烈的爭論，也讓我們開始思考：在競爭激烈的賽道上，到底誰能夠最終實現超越普通計算機的「量子霸權」？

法國和瑞士的邊境線上，大型強子對撞機（Large Hadron Collider, LHC）正在地底沉眠。未來幾年裡，這台世界上最大的粒子加速器將得到升級，而功能的增強會帶來更加巨大的數據流——甚至可能到達高能物理學領域前所未見的數量級。

在 2018 年 12 月被關閉之前，LHC 每秒大約能產生 300 GB 的數據，一年下來數據量就能累積高達 25 拍位元組（petabytes，簡稱 PB。1 PB = 1024 TB）。換句話說，同等大小的 MP3 歌曲，一個人要用 5 萬年才能聽完。在 LHC 升級完成後，歐洲核子研究組織（European Organization for Nuclear Research，通稱 CERN）的科學家必須擁有比現在高 50 到 100 倍的計算機算力才能處理好隨之而來的數據。而尚處藍圖階段的未來環形對撞機（Future Circular Collider，FCC），規模是 LHC 的 4 倍，強度則是 10 倍，將會產生難以想像的海量數據——至少是 LHC 的 2 倍。

為了不被步步逼近的數據洪流淹沒，CERN 的一些成員開始將目光投向新興的量子計算領域。在 LHC 正在探查的自然法則驅動下，量子計算機在極短時間內處理海量數據將成為可能。更重要的是，量子計算機和 LHC 「語言相通」——量子力學是它們共同的基石。問題是，目前我們只擁有量子計算的理論原型，沒有人有把握能建起一個真正的、可靠的量子計算設備。

量子計算機

無論是 Apple Watch 還是計算能力卓越的超級計算機，這些傳統計算機都依賴於微小矽晶體管，通過類似「開、關」的狀態轉換來編碼數據。每個電路只存在兩個狀態——二進位代碼中的 1（開）或 0（關）；計算機通過控制電路中的電壓來轉換「開、關」狀態，完成編碼。

不過，量子計算機並不拘泥於這種「非 1 即 0」的存儲運算方式。它的內存由量子比特（quantum bits）組成。量子比特可以做到「既 1 又 0」，這意味著量子計算機可以疊加所有可能的 0 和 1 組合——讓「1」和「0」的狀態同時存在。

對 CERN 來說，量子計算機可以幫助他們了解大爆炸之後的幾分鐘內，早期宇宙的演變過程。物理學家確信，大爆炸剛剛結束後，整個宇宙是一鍋狀態奇特的「湯」，「燉著」被稱為夸克（quark）和膠子（gluon）的亞原子粒子。為了理解這種夸克-膠子等離子體怎樣演變成宇宙如今的樣子，研究人員模擬出了宇宙嬰兒期的狀況，然後在 LHC 上利用多次對撞實驗測試這一模型。因為量子計算和 LHC 中不停對撞的粒子被相同的物質法則支配，所以利用量子計算機進行模擬，可以得到更為精確的測試模型。



一場馬拉松

在基礎科學研究領域之外，銀行、製藥公司和政府也在苦苦等待——因為量子計算機可以提供比傳統計算機高幾十甚至上百倍的算力。

不僅是谷歌，IBM、微軟和英特爾，一些創業公司、學術團體甚至中國政府都加入了量子計算機研發的競爭中。這場「競賽」的投入相當豐厚：2018年10月，歐盟承諾在未來十年裡，為5,000余名歐洲量子技術研究人員提供10億美元的經費。與此同時，風險投資人僅在2018年一年間，就為研究量子計算的各種公司投入了約2.5億美元。悉尼大學微軟量子實驗室的人衛·雷利（David Reilly）評價說：「這是一場馬拉松，而我們在這場馬拉松里才剛跑了10分鐘。」

儘管圍繞量子計算的炒作不斷，新發佈的量子比特記錄每次都會引起媒體大肆報導，但其實沒有一個研究團隊達到甚至接近量子計算研究的第一個里程碑——「量子霸權」（quantum supremacy）。它指的是量子計算機在執行任務時，能夠超越經典計算機，表現得更好。這些任務可以是任何形式的，甚至可以是完全人為編造或毫無意義的。量子計算圈內很多傳言稱，谷歌可能已經接近了量子霸權，但悉尼大學的物理學家、量子計算創業公司Q-CTRL的創始人邁克爾·比埃庫克（Michael Biercuk）認為，即使這是真的，最多也就是給公司製造了一個吹噓的資本。雷利則表示：「這更像是一個人為設置的、用於吸引眼球的花招。……沒有任何現實意義。」

雷利和比埃庫克之所以這樣說，是因為這場馬拉松真正意義上的分水嶺——「量子優勢」（quantum advantage）比「量子霸權」更加遙遠。量子優勢指的是量子計算機在一項具有實際意義的任務上勝過經典計算機。（也有一些研究者認為「量子霸權」和「量子優勢」這兩個術語的意義是相同的。）只有達到了量子優勢，馬拉松比賽的終點線才得以顯現：通用量子計算機的誕生。人們希望通用量子計算機能夠帶來一場「計算革命」：在它的幫助下，我們可以設計出用於拯救生命的藥物新分子、幫助銀行調整其風險投資組合、突破

所有現行密碼學規則並開發出更強大的保密系統.....而對於 CERN 的科學家來說，那可以讓他們一窺大爆炸帶來的新生宇宙的真面目。

CERN 的物理學家費德里科·卡米納蒂（Federico Carminati）承認，今天的量子計算機難以給研究人員提供比傳統電腦更多的東西。但在等待技術成熟的過程中，不畏艱難的他已經開始修補 IBM 的量子計算機原型——這是當今量子馬拉松中我們邁出的最新一步。2018 年 11 月，CERN 和 IBM 在一個行業研討會上達成了合作協議。

IBM 一直在穩步增加其量子計算機上的量子比特數量，從微型的 5 比特（5-qubit）開始，發展到 16 和 20 量子比特（16- and 20-qubit），直到最近的 50 量子比特（50-qubit）處理器。CERN 研究人員則開始開發全新的演算法和計算模型，旨在與量子設備協同發展。卡米納蒂說：「這次合作的基礎是我們與技術提供商建立了穩固的關係，這是我們量子計算研究的第一步。儘管我們入局有點晚，但是能帶來獨特的專業知識。要知道我們是量子力學專家，而量子力學是量子計算的基石。」



取代傳統計算機？

英特爾前 CEO 戈登·摩爾（Gordon Moore）在 1965 年做出的著名預測——「集成電路中的元件數量大約每兩年增加一倍」——在過去的半個多世紀成為了計算機行業的聖經。但是越來越多的人認為，摩爾定律即將達到物理極限。20 世紀 80 年代以來，被加州理工學院著名物理學家理查德·費曼（Richard Feynman）發揚光大的「另一種方法」為計算機行業找到了新的出路。在 1981 年的一次演講中，他感嘆計算機無法真正模擬在亞原子水平上發生的事情，比如電子和光子這樣棘手的粒子——有時波函數能描述其運動，但它們有時又同時呈現兩個狀態，即量子疊加態。

費曼提議建造一台可以模擬亞原子水平粒子運動的機器。「對於所有分析都依據經典理論這件事，我並不是很欣賞，自然世界他的可不等於經典理論。」他這樣講道，「如果想模擬自然，最好用量子計算機。這絕對是個好主意，因為它聽上去可不怎麼容易。」

自此，量子計算機研究的馬拉松鳴槍開跑。量子比特可以用不同的方式構造出來，但這一過程必須遵循一定的規則：兩個量子比特可以同時處於狀態 A 或 B，也可以分別處於狀態 A 和 B，所以總共有四種可能情況。不過在測量之前，你很難知道量子比特的具體狀態。所以要了解其具體狀態，就必須將量子比特拉出量子世界，進入我們所在的平凡世界。

理論上量子計算機可以同時處理量子比特能夠擁有的所有狀態，內存中每增加一個量子比特，它的計算能力應該呈指數式增長。3 個量子比特有 $8 (2^3)$ 個狀態可以同時工作；4 個量子比特有 $16 (2^4)$ 個狀態；10 個量子比特有 $1024 (2^{10})$ 個狀態；對於 20 個量子比特，則會有高達 $1,048,576 (2^{20})$ 個狀態。我們甚至不需要太多量子比特，就可以超越世界上最頂尖的超級計算機的內存配置。而這就意味著，對於特定的任務，量子計算機可以比世界上所有常規計算機更快地找到解決方案。再加上量子力學的另一個關鍵概念：糾纏態（entanglement）。這意味著量子比特可以鏈接到整個量子系統，這樣對一個量子比特的操作就可以影響到系統的其餘部分。而量子計算機可以同時利用以上兩項優勢，大大提高其計算能力。

許多機構正在量子計算機馬拉松中全力前行之時，還有很多公司和實驗室利用不同的方法，和自己比賽。2018 年，來自加州理工學院和南加州大學的物理學家，使用量子計算機對 LHC 產生的數據進行篩選，成功複製了 2012 年希格斯玻色子的發現過程。這台量子計算機由 D-Wave 製造，這家來自加拿大的公司儘管沒有實現「量子霸權」，但是他們證明了量子計算機能夠完成傳統計算機完成過的工作。

超越之路

這場馬拉松中最早踏上跑道的運動員之一，D-Wave，在 2007 年宣布成功建造了一個功能齊全的商用 16-qubit 量子計算原型機，不過這一說法至今仍存在爭議。D-Wave 專注於一種被稱為「量子退火」（quantum annealing）的技術，以現實世界中量子系統自然趨向低能態的原理（有點像陀螺轉到最後總會倒下）為基礎。D-Wave 量子計算機將問題的可能解決方案視為地面上的山峰和山谷，用坐標來表示，而這些峰和谷的高度則代表其能量。量子退火允許設置問題的初始值，然後讓系統在大約 20 毫秒內降落到低能態，從而得到答案。在這個過程中，量子計算機會從能量高峰下落，直至找到廣闊地面中的最低點——也就是眾多解決方案中的最優解。但是它並不試圖完全糾正所有錯誤，這在量子計算中是不可避免的。D-Wave 的首席產品官阿蘭·巴拉茲（Alan Baratz）表示，公司正在研究可以通用的退火式量子計算機原型。



除了 D-Wave 的量子退火技術，還有三種巧妙利用量子世界的方法：集成電路（integrated circuits）、拓撲量子比特（topological qubits）和激光捕獲離子（ions trapped with lasers）。CERN 對第一種方法寄予厚望，但也在密切關注其他方面的進展。

IBM 研製的量子計算機剛開始被 CERN 投入使用，谷歌和英特爾也有類似的產品。他們都以超導金屬，即零電阻的金屬為載體，製造了具備集成電路的量子晶元「量子門」（quantum gates）。每個量子門都包含一對極易受到干擾的量子比特。任何雜訊信號都將破壞這對量子比特並導致誤差。在量子世界中，溫度波動、電磁波、聲波和物理振動等等任何干擾都屬於雜訊信號。

量子門晶元需要被冷卻到極低的溫度，才能最大程度擺脫外界雜訊，並使電路具有量子力學效應。坐落在蘇黎世的 IBM 量子實驗室中，晶元被安裝在一個白色的罐子里，那是一個懸掛在天花板上的低溫恆溫器。罐內溫度穩定在 10 毫開爾文（millikelvin, mk）或 -273°C ，這個溫度高於絕對零度（ -273.15°C ），但低於外太空溫度（ -270.15°C ）。不過即使如此低的溫度，也無法讓量子門達到最優狀態。

使用量子比特晶元時，科學家開始操作都會產生雜訊。2012 年創造了「量子霸權」概念的加州理工學院物理學家約翰·普雷斯基爾（John Preskill）表示：「外部世界會不斷與量子晶元相互作用，並破壞我們正在努力處理的信息。」由於做不到完全消除雜訊，研究人員只好儘可能地抑制它。而超低溫狀態下，至少量子晶元具有一定的穩定性，能給研究人員更多的時間來進行量子計算。

「我的工作就是延長量子比特的壽命，而且我們總共只有 4 個量子比特可用。」在蘇黎世實驗室（Zurich lab）工作的牛津大學博士后 Matthias Mergenthaler 說。4 個聽起來不是很多，不過對量子比特來說，質量比數量重要。而這就意味著，研究人員要保持儘可能

低的雜訊水平，以確保它們儘可能長時間地處於疊加態，從而允許量子計算的進行。這正是量子計算面臨的最大挑戰之一：需要極其精細的降噪手段。

一旦降噪成功，研究人員就會在傳統計算機上運行的特殊糾錯演算法的幫助下，對量子計算遺留下的問題進行糾錯。這種糾錯方式是對每個量子比特逐個糾正，所以量子比特越多，系統需要處理的錯誤就越多。假設量子計算機每 1,000 個計算步驟出錯 1 次（這聽起來不多），但經過 1,000 次左右的操作后，程序將輸出錯誤結果。所以，為了輸出有意義的計算結果並超越傳統計算機，量子計算機必須擁有大約 1,000 個處於較低的雜訊水平、並且得到了糾錯的量子比特。這 1,000 個量子比特作為一個整體，被研究人員稱做邏輯量子比特（logical qubit）。不過，這樣的邏輯量子比特到目前為止還難以成功維持——目前最好的量子計算原型機所能實現的對量子比特的糾錯，也只有 10 個。這就是它們被命名為「雜訊中尺度量子計算機（noisy intermediate-scale quantum computers, NISQ）」的原因。NISQ 這個術語誕生於 2017 年，和「量子霸權」一樣，命名者也是普雷斯基爾。

對於 CERN 的物理學家卡米納蒂來說，雖然量子計算機遠離一個成熟技術的標準還很遠，但這不是主要問題。他們面臨的挑戰是，做好在硬體條件滿足要求時，釋放量子計算機強大算力的準備。「一個令人興奮的可能是，我們可以用量子計算機對量子系統進行非常非常精確的模擬，畢竟它本來就是一個量子系統，」他說，「其他開創性突破將來自量子計算和人工智慧對大數據的聯合分析。這是個相當雄心壯志的構想，對我們的需求至關重要。」

各顯神通

但也有一些物理學家認為，我們永遠不可能為雜訊中尺度量子計算機（NISQ）降噪成功。耶魯大學教授吉爾·卡萊（Gil Kalai）表示，糾錯系統和降噪技術永遠都不可能發展到足夠成熟、能夠允許量子計算機進行有實際用途的計算的程度。他說，這不是技術原因，而是來自量子力學基本原理的限制。交互系統中的錯誤有連接或關聯的傾向，這意味著錯誤會同時影響許多量子比特。因此，對需要依靠大量量子比特完成計算的量子計算機而言，通過創建糾錯代碼來保持足夠低的雜訊水平，是不可能完成的。

「我的分析表明，幾十個量子比特的 NISQ 提供的算力極為低下，根本不可能作為模塊組成我們所需的更大規模的量子計算機。」吉爾·卡萊表示。這種懷疑論在科學界被熱議，卡萊等人的博客是討論者的聚集地。這裏最近出現了一篇分享次數不少的文章，題為《反對量子計算的案例》（The Case Against Quantum Computing）。而緊隨其後的就是對這篇文章的駁斥，《對反對量子計算的案例的反對》（The Case Against the Case Against Quantum Computing）。

目前，這些批評家仍然是少數。加拿大滑鐵盧大學（University of Waterloo）的物理學家雷·拉夫蘭姆（Ray Laflamme）認為：「如果我們能將量子比特保持在測量時的狀態

和規模，那麼（量子計算機的準確性）就沒什麼問題。」現在的著眼點並非能否達到 50、72 或 128 個量子比特，而是將量子計算機擴展到這樣的規模后，整體誤差率是否會顯著提高。

其他科學家則認為，用另一種方式構造量子比特，才是抑制雜訊與創建邏輯量子比特的最佳方法。比如微軟的研究人員正在研發拓撲量子（topological qubits）——儘管其世界各地的量子實驗室眾多，但時至今日也沒人成功。如果這種拓撲量子能夠成功問世，它們將比集成電路穩定很多。微軟的思路是把一個粒子（比如電子）割裂為兩部分，從而創造出馬約拉納費米子准粒子（Majorana fermion quasi-particles）。這種粒子在 1937 年被理論化，並於 2012 年由荷蘭代爾夫特理工大學（Delft University of Technology）的研究人員在微軟的凝聚態物理實驗室，獲得了證明其存在的首個實驗證據。

微軟的量子硬體（quantum hardware）總經理切坦·納亞克（Chetan Nayak）表示，「目前我們的 1 個拓撲量子比特相當於市場上的 1,000 個其他量子比特。」換句話說，每個拓撲量子比特本身就能構成一個邏輯量子比特。雷利認為，對這些行蹤縹緲難以捉摸的量子比特的研究是值得的，雖然幾年來進展甚微，不過一旦成功，將這種拓撲量子比特擴展到數千邏輯量子比特的規模，會比 NISQ 的降噪要容易得多。「對我們來說，嘗試在不同的量子模擬器和硬體上運行代碼和演算法，以期得到最終的解決方案十分重要，」卡米納蒂說。「當然，還沒有量子計算機能達到量子產品的黃金時期，我們也一樣。」

卡米納蒂正在密切關注的另一家公司是 IonQ，它是一家從馬里蘭大學誕生的創業公司。他們利用第三種方法來研究量子計算：捕獲離子（trapping ions）。這些離子是天然的量子，所以一開始在室溫下就具有疊加效應，這意味著它們不像 NISQ 的集成電路那樣需要超低溫條件。每個離子都是一個量子比特，研究人員用特製的微小矽離子籠捕獲它們，然後用激光照射，通過調整每個微小激光束擊中量子比特的時間和強度來運行演算法。光線會將數據編碼到這些被捕獲的離子中，並通過改變每個離子的電子狀態讀取數據。

IonQ 在 2018 年 12 月推出了商業化產品，這款量子計算機搭載了 160 個離子量子比特，並可以在 79 個量子比特組成的序列上執行簡單的量子操作。不過，目前這種離子量子比特同谷歌、IBM 和英特爾的集成電路一樣有著較大的雜訊信號。無論 IonQ，還是世界上其他同樣利用激光捕獲離子方法的實驗室，還沒有人實現量子霸權。

量子計算機相關的討論和炒作沸沸揚揚，然而時間不等人。短短五年內，LHC 就將從沉眠中醒來，變得更加強大。它產生的所有數據都需要進行分析。一個沒有雜訊信號、具備糾錯功能的量子計算機，將會使數據分析這項原本繁重的工作變得輕巧而便捷。量子計算機賽道上從不缺優秀競爭者，誰會是這場馬拉松的最後贏家？