



**BỘ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ
CỤC THÔNG TIN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ QUỐC GIA**

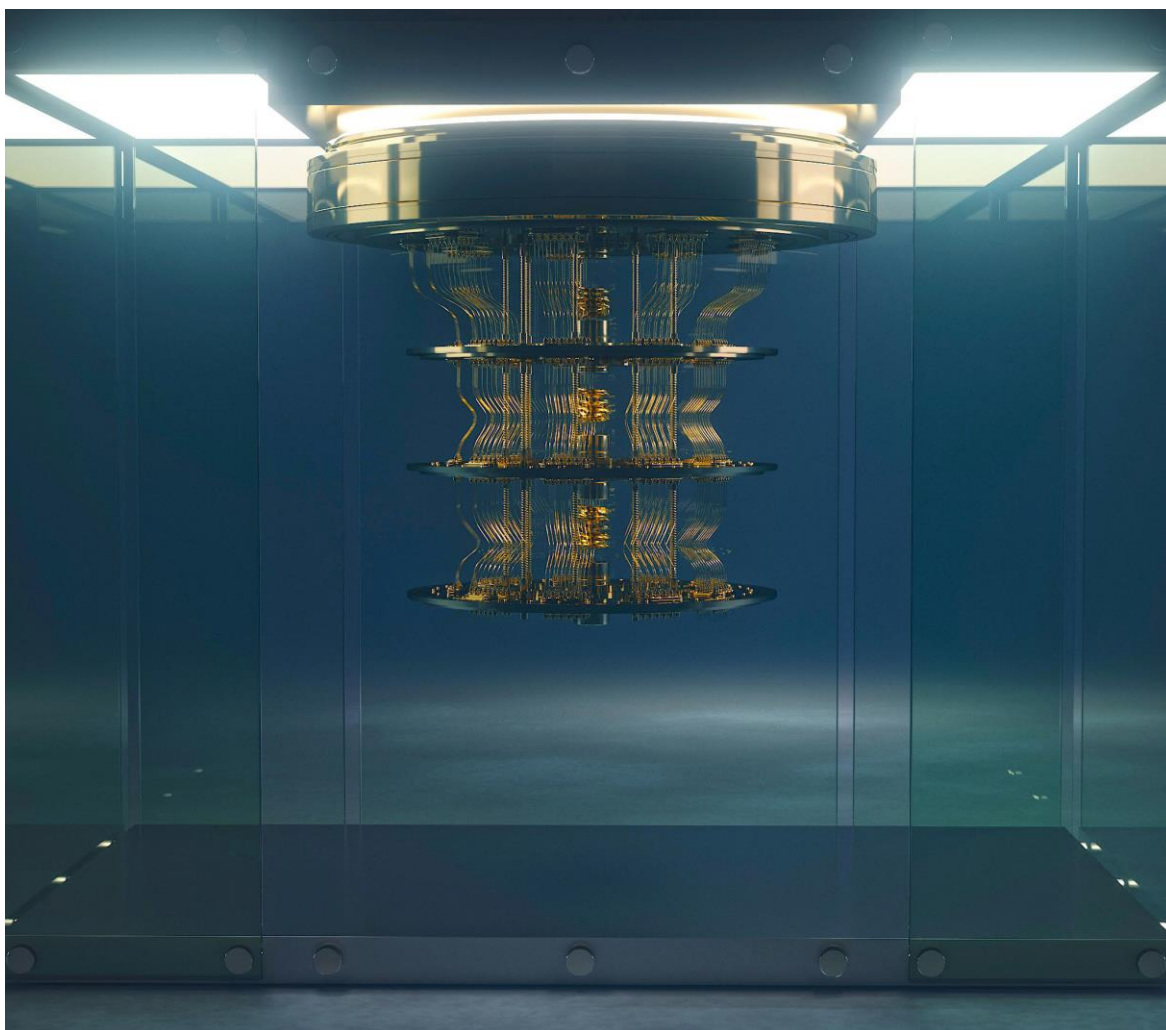
**TỔNG
LUẬN**

**KHOA HỌC
CÔNG NGHỆ
KINH TẾ**

ISSN 0866 - 7721

Số 2 - 2023

**THỰC TRẠNG ĐIỆN TOÁN LƯỢNG TỬ:
XÂY DỰNG NỀN KINH TẾ LƯỢNG TỬ**



Hà Nội, tháng 2-2023

CỤC THÔNG TIN VÀ KHOA HỌC CÔNG NGHỆ QUỐC GIA

Địa chỉ: 24, Lý Thường Kiệt, Hoàn Kiếm, Hà Nội.

Tel: (024) 38262718, Fax: (024) 39349127

BAN BIÊN TẬP

TS. Trần Đắc Hiến (Trưởng ban); ThS. Trần Thị Thu Hà (Phó Trưởng ban)

KS. Nguyễn Mạnh Quân; ThS. Nguyễn Lê Hằng; ThS. Phùng Anh Tiến

MỤC LỤC

LỜI NÓI ĐẦU.....	1
TÓM TẮT	3
GIỚI THIỆU.....	5
I. ĐIỆN TOÁN LƯỢNG TỬ: NỀN KINH TẾ ĐANG PHÁT TRIỂN NHANH CHÓNG.....	8
1.1. Sáng kiến toàn cầu và tài chính công.....	9
1.2. Tài chính tư nhân	12
II. MÁY TÍNH LƯỢNG TỬ CÓ THỂ VÀ SẼ LÀM ĐƯỢC GÌ?	15
2.1. Một tập hợp mới các khả năng tính toán	15
2.2. Các lĩnh vực chính cho các ứng dụng có tác động cao.....	17
III. THỰC TRẠNG CÔNG NGHỆ.....	26
3.1. Các thành phần quan trọng cho hoạt động của máy tính lượng tử	26
3.2. Máy tính lượng tử phát triển như thế nào?	27
3.3. Máy tính lượng tử nào tốt nhất?	31
IV. KHAI PHÁ TIỀM NĂNG CÔNG NGHỆ.....	36
4.1. Nguồn nhân lực sẵn có và phát triển/đào tạo.....	37
4.2. Chính sách và quy định.....	38
4.3. Tiêu chuẩn hóa trong việc phát triển các thuật toán và đo lường hiệu suất....	40
KẾT LUẬN	42
Tài liệu tham khảo.....	44

LỜI NÓI ĐẦU

Điện toán lượng tử được các nền kinh tế hàng đầu thế giới coi là công nghệ chiến lược. Cách tính toán mới này về cơ bản - nó không chỉ là một máy tính thông thường mạnh hơn - có khả năng thay đổi đáng kể khả năng của chúng ta trong việc giải quyết biến đổi khí hậu, nạn đói và bệnh tật. Đối với nhiều người, khả năng khiến các công nghệ mật mã phổ biến trở nên lỗi thời, tiềm năng kinh tế và tác động của nó đối với nền kinh tế kỹ thuật số toàn cầu khiến nó trở thành chiến lược địa chính trị.

Tuy nhiên, ngày nay, sự kết hợp của những điều không chắc chắn đi kèm với một công nghệ mới nổi và bối cảnh chuyển động nhanh chóng nhưng bị phân mảnh khiến những người ra quyết định ở khu vực tư nhân và công cộng gặp khó khăn trong việc duy trì nhận thức, xây dựng sự hiểu biết hoặc biết khi nào và làm thế nào để hành động.

Tổng luận này trình bày về tình trạng hiện tại của điện toán lượng tử – công nghệ, ứng dụng của nó, tình trạng của ngành công nghiệp mới nổi và các thành phần chính của một hệ sinh thái lượng tử thành công. Nó cung cấp cơ sở thông tin cho các nhà điều hành doanh nghiệp và các nhà hoạch định chính sách trên toàn thế giới, để hỗ trợ ý kiến sáng suốt và ra quyết định dựa trên thực tế.

Tổng quan cũng tìm cách tránh cả sự cường điệu quá khích và việc hạ thấp tác động tiềm ẩn của điện toán lượng tử. Nó cố gắng làm sáng tỏ điện toán lượng tử và xây dựng kiến thức về chức năng giữa các nhà lãnh đạo trong ngành công nghiệp và chính phủ cũng như những người có ảnh hưởng.

Để cung cấp cho bạn đọc một cái nhìn tổng quan toàn diện và khách quan về thực trạng của điện toán lượng tử và tiềm năng phát triển các ứng dụng của nó trong tương lai, Cục Thông tin khoa học và công nghệ quốc gia biên soạn Tổng luận "Thực trạng điện toán lượng tử: Xây dựng nền kinh tế lượng tử".

Trân trọng giới thiệu.

**CỤC THÔNG TIN KHOA HỌC VÀ
CÔNG NGHỆ QUỐC GIA**

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

AI	Trí tuệ nhân tạo
FDI	Đầu tư trực tiếp nước ngoài
NC&PT	Nghiên cứu và Phát triển
NISQ	Các thiết bị nhiễu lượng tử quy mô trung bình (Noisy intermediate-scale quantum)
PQC	Mật mã sau lượng tử (Post-quantum cryptography)
QC	Điện toán lượng tử (Quantum Computing)
QEC	Sửa lỗi lượng tử (Quantum error correction)
QED-C	Hiệp hội Phát triển Kinh tế Lượng tử
QKD	Kỹ thuật phân phối khóa lượng tử (Quantum key distribution)
QRNG	Bộ tạo số ngẫu nhiên lượng tử (Quantum random number generators)
RSA	Thuật toán mật mã hóa khóa công khai (Rivest–Shamir–Adleman)
WEF	Diễn đàn Kinh tế Thế giới

TÓM TẮT

Các công nghệ lượng tử đề cập đến một loạt các công nghệ dựa trên khả năng ngày càng tăng của chúng ta trong việc nhìn và kiểm soát thực tế ở cấp độ hạ nguyên tử (“lượng tử”) để xây dựng các cảm biến và một hình thức điện toán và truyền thông hoàn toàn mới. Các công nghệ lượng tử đang phát triển nhanh chóng, với số lượng ngày càng tăng của các chính phủ và doanh nghiệp đưa ra các sáng kiến chiến lược và đầu tư chung hơn 35,5 tỷ USD trên nhiều châu lục. Ngày nay, công nghệ này vẫn đang trong giai đoạn nghiên cứu và phát triển và trình diễn, khiến cho việc dự đoán chín xác các khoảng thời gian và các ứng dụng công nghệ này trở nên khó khăn – dẫn đến các niềm tin và đặt cược khác nhau trên thị trường.

Tổng luận này tập trung vào khía cạnh điện toán, trong đó các khả năng độc đáo của máy tính lượng tử mở ra tiềm năng giải quyết các vấn đề tính toán phức tạp, do những hạn chế cơ bản trong việc mở rộng quy mô tính toán cổ điển, khó xử lý bằng các phương pháp điện toán cổ điển và mở ra những khả năng mới chưa từng có. Do đó, nhiều người kỳ vọng rằng tác động của điện toán lượng tử sẽ mang tính biến đổi về cơ bản giống như sự khởi đầu của điện toán cổ điển vào giữa thế kỷ 20. Điện toán lượng tử cũng đi kèm với rủi ro, vì máy tính lượng tử dự kiến sẽ phá được các mã hóa được sử dụng để bảo mật thông tin liên lạc kỹ thuật số hiện đại, chuỗi khối và một số loại tiền điện tử.

Điều quan trọng cần lưu ý là điện toán lượng tử dự kiến sẽ hoạt động tốt nhất trên ba lĩnh vực nghiên cứu và công nghiệp cụ thể, với các cơ hội kinh tế, môi trường và xã hội quan trọng liên quan đến chúng:

1. Mô phỏng và khám phá phân tử trong khoa học vật liệu và sinh học
2. Tối ưu hóa và quản lý rủi ro trong các hệ thống phức tạp
3. Tác động hai chiều đối với các lĩnh vực công nghệ hiện có như AI, bảo mật và chuỗi khối.

Nói chung, điện toán lượng tử được định vị để bổ sung cho điện toán cổ điển và được áp dụng cho một số nhiệm vụ nằm ngoài khả năng của các siêu máy tính ngày nay, khắc phục khả năng tính toán mạnh mẽ chưa từng tồn tại trước đây của nó, cuối cùng mở rộng phạm vi nghiên cứu và phát triển cũng như kinh doanh hiện đại.

Hầu hết các ứng dụng lượng tử với lợi thế có thể chứng minh được so với các phương pháp cổ điển (bao gồm cả việc phá mã hóa) sẽ yêu cầu một máy tính lượng

tử quy mô lớn thực hiện. Các nền tảng phần cứng khác nhau cho điện toán lượng tử hiện đang được theo đuổi trên phạm vi quốc tế, ở các giai đoạn phát triển và thành tựu kỹ thuật khác nhau. Tuy nhiên, chưa có nền tảng nào đạt được quy mô, tốc độ và chất lượng tính toán cần thiết để thể hiện lợi thế so với các máy tính cổ điển trong một ứng dụng thực tế. Hơn nữa, còn quá sớm để nói nền tảng nào sẽ là nền tảng đầu tiên đạt được quy mô, chất lượng cần thiết hoặc khi nào.

Đồng thời, các máy tính lượng tử chưa hoàn hảo ngày nay phù hợp để xử lý một tập hợp con các ứng dụng không yêu cầu câu trả lời chính xác và việc thấy được xu hướng hoặc hướng đi vào có khả năng là quan trọng hơn. Điều này, cùng với khả năng truy cập đám mây hiện được cung cấp bởi nhiều nhà cung cấp máy tính lượng tử, đã cho phép nhiều tổ chức hơn bắt đầu thử nghiệm các ứng dụng lượng tử. Với sự phát triển công nghệ nhanh chóng, vấn đề chỉ còn là thời gian trước khi tìm ra được một ứng dụng mang lại lợi thế thực sự với công nghệ lượng tử hiện có. Khi nào điều này xảy ra và ứng dụng nào có thể tận dụng tốt nhất các tài nguyên tính toán có sẵn sẽ là mục tiêu mong đợi cuối cùng.

Mặc dù các hoạt động này nhận được rất nhiều sự chú ý, nhưng những thành tựu điện toán lượng tử hiện tại và sự phát triển trong tương lai phụ thuộc vào một số yếu tố hỗ trợ: sự sẵn sàng của lực lượng lao động, tiêu chuẩn hóa và chính sách. Lực lượng lao động sẵn có là nút thắt quan trọng.

Bất chấp sự không chắc chắn về thời điểm máy tính lượng tử sẽ sẵn sàng ở quy mô lớn, các chính phủ và doanh nghiệp phải hành động ngay vì không thể bỏ qua các rủi ro bảo mật lượng tử và cơ hội kinh doanh. Đây là một thời điểm độc đáo trong lịch sử hiện đại, nơi mọi người có thể chuẩn bị cho công nghệ khi nó đang được định hình và trưởng thành. Các chính phủ và giới học thuật có thể tiếp tục làm việc để mở rộng quy mô các chương trình lực lượng lao động lượng tử và xây dựng hệ sinh thái quốc gia, khuyến khích quan hệ đối tác. Ví dụ: bước đầu tiên tuyệt vời dành cho các doanh nghiệp là hiểu tác động của điện toán lượng tử đối với doanh nghiệp và ngành, đánh giá mức độ sẵn sàng lượng tử của họ và xây dựng chiến lược lượng tử, xây dựng năng lực nội bộ và phù hợp với quản lý cấp cao và các nhà hoạch định chính sách về các lĩnh vực trọng tâm quan trọng.

GIỚI THIỆU

Sự cường điệu xung quanh điện toán lượng tử đã tạo ra những giả định phi thực tế về công nghệ, nhưng trên thực tế, nó còn lâu mới đạt đến độ chín muồi. Trong khi các máy tính cổ điển được xây dựng từ các bit (1 và 0), đơn vị thông tin cơ bản trong điện toán lượng tử là một bit lượng tử (hay “qubit”). Một “bit” giống như một công tắc trong mạch điện tử có thể bật hoặc tắt, trong khi một qubit sử dụng các đặc tính độc đáo của cơ học lượng tử để cung cấp một đơn vị có thể là một hoặc không – hoặc bất kỳ thứ gì ở giữa. Các quy tắc từ cơ học lượng tử bao gồm các phép toán không tìm thấy trong lĩnh vực cổ điển, chẳng hạn như chồng chất, vướng víu và giao thoa. Bằng cách thiết kế các thuật toán tận dụng các hiệu ứng này, sẽ có một con đường hướng tới giải pháp cho các vấn đề có thể yêu cầu tài nguyên máy tính cổ điển lớn.

Máy tính lượng tử điều khiển các thuộc tính lượng tử của qubit để giải quyết các vấn đề quá khó đối với máy tính cổ điển, chẳng hạn như phân tích số lượng lớn để có khả năng phá vỡ mã hóa RSA (một thuật toán mật mã hóa khóa công khai). Việc chỉ đề cập đến những khả năng này, do tiềm năng vô hình của chúng, khiến công chúng và giới truyền thông lo lắng. Sự phức tạp của lý thuyết lượng tử mà máy tính lượng tử được xây dựng chỉ làm tăng kỳ vọng – và nỗi sợ hãi. Nếu máy tính lượng tử có thể làm những việc mà máy tính hiện đại không thể, thì chúng có thể làm bất cứ điều gì; từ giải quyết khủng hoảng khí hậu đến phá vỡ internet. Với những thông báo thường xuyên từ các công ty lớn như Google, IBM hoặc Microsoft về việc đạt được lợi thế về lượng tử hoặc đạt được bước đột phá với một loại qubit mới, công nghệ này dường như sắp xuất hiện. Tuy nhiên, điều quan trọng là phải có một cái nhìn sắc thái hơn về sự phấn khích.

Mỗi phần của tổng luận này cung cấp sự hiểu biết về cơ sở (tình trạng hiện tại) của công nghệ lượng tử, các mục tiêu là gì và ước tính khoảng cách từ việc thực hiện chúng. Mặc dù có vô số sự phát triển về công nghệ, điện toán lượng tử vẫn ở trong lãnh thổ chưa được khám phá, với nhiều điều chưa biết về phần cứng và không gian ứng dụng, bao gồm cả câu hỏi quan trọng: khi nào ứng dụng lợi thế lượng tử đầu tiên sẽ được thấy? Đây là lúc công nghệ sẽ bắt đầu có tác động thực sự. Liệu nó có thể đạt được với những chiếc máy tính không hoàn hảo ngày nay hay nó vẫn còn là một chặng đường dài?

Tổng luận này trình bày các nội dung trong bốn lĩnh vực:

Phần 1 xem xét mức tài trợ hiện tại, tốc độ tăng trưởng của ngành và mối quan tâm quốc gia đối với công nghệ lượng tử. Tiền đến từ đâu? Các khu vực phát triển cao nhất là gì? Những quốc gia nào đang sử dụng công nghệ này một cách nghiêm túc, đã phát triển một chiến lược lượng tử?

Phần 2 xem xét tiềm năng của điện toán lượng tử. Nó có thể làm gì hiện giờ? Nó sẽ có thể làm gì? Mặc dù triển vọng rất tuyệt vời, nhưng các trường hợp sử dụng chỉ tập trung trong một vài ngành. Công nghệ này cũng không phải là viên đạn bạc cho cuộc khủng hoảng khí hậu, mặc dù nó có tiềm năng mang lại rất nhiều sự trợ giúp.

Phần 3 cung cấp tổng quan về các phương pháp hiện có để xây dựng một máy tính lượng tử – dựa trên một mô hình nguyên bản, đơn giản. Nó làm sáng tỏ những gì cần thiết để máy tính lượng tử sẵn sàng, tại sao chúng vẫn chưa có, tại sao rất khó để dự đoán cách tiếp cận (và tổ chức) nào sẽ là người đầu tiên phát triển một máy tính lượng tử hữu ích và khi nào điều đó sẽ xảy ra. Cuối cùng đề cập đến mối liên hệ giữa sự trưởng thành của máy tính lượng tử và khả năng chạy các ứng dụng lượng tử của chúng – và phá vỡ mã hóa ngày nay.

Phần 4 xem xét liệu các hệ sinh thái lượng tử có tất cả các yếu tố hỗ trợ cần thiết để hỗ trợ đổi mới hay không. Yếu tố hạn chế đối với bất kỳ tổ chức nào muốn khám phá các ứng dụng điện toán lượng tử là gì? Tại sao rất khó để tìm được nhà cung cấp máy tính lượng tử phù hợp để hợp tác?

Sự cường điệu xung quanh điện toán lượng tử là có thật và tổng quan này là ánh sáng dẫn đường giúp các công ty bắt đầu hành trình lượng tử của họ.

Hộp 1. Top 12 khái niệm cần biết

Dưới đây là một số thuật ngữ và định nghĩa chính sẽ trở nên quen thuộc trong quá trình tìm hiểu lĩnh vực này:

1. *Công nghệ lượng tử*: Bất kỳ công nghệ nào sử dụng các nguyên tắc của vật lý lượng tử, bao gồm điện toán lượng tử, thiết bị y tế, cảm biến có độ nhạy cao, liên lạc an toàn, đồng hồ nguyên tử, ... Điện toán lượng tử là một tập hợp con của công nghệ lượng tử.
2. *Điện toán lượng tử (QC)*: Một cách tiếp cận mới để tính toán khai thác bản chất của việc lưu trữ và thao tác thông tin lượng tử.
3. *Qubit*: Một bit lượng tử, một đơn vị lưu trữ thông tin trong điện toán lượng tử về cơ bản khác với một “bit” cổ điển có thể chứa sự chồng chất tuyến tính của các trạng thái, nghĩa là nó có thể là 0 và 1 cùng một lúc, nhưng khi đo, cho biết một trong hai 0 hoặc 1 với sự phân phối xác suất xác định.
4. *Nền tảng phần cứng*: Các cách tiếp cận khác nhau để xây dựng một máy tính lượng tử dựa trên các cách khác nhau để tạo và kiểm soát các thuộc tính lượng tử của một qubit. Tùy thuộc vào nguyên tắc vật lý cơ bản, tất cả các nền tảng phần cứng sẽ có các đặc điểm riêng, ảnh hưởng đến tốc độ, khả năng mở rộng, chất lượng tính toán hoặc tích hợp với các công nghệ hiện có (ví dụ: chip silicon).
5. *Nhiều lượng tử*: Nhiều trong quá trình tính toán lượng tử gây ra bởi các yếu tố bên ngoài và bên trong không mong muốn có thể dẫn đến lỗi trong quá trình tính toán.
6. *Sửa lỗi lượng tử (QEC)*: Một kỹ thuật điện toán để xử lý lỗi trong máy tính lượng tử khai thác mã hóa trên số lượng qubit bổ sung (lớn) để giảm tỷ lệ lỗi.
7. *Các thiết bị nhiều lượng tử quy mô trung bình (NISQ)*: NISQ là một thuật ngữ thường được sử dụng để mô tả các máy tính lượng tử ngày nay, “nhiều” (tức là dễ bị lỗi, có thể tích lũy và dẫn đến tính toán không chính xác) và ở quy mô trung bình (tức là những thiết bị này có hàng chục đến hàng trăm qubit).
8. *Mạch lượng tử*: Một chuỗi các hoạt động lượng tử được áp dụng trên nhiều qubit. Nó là một chuỗi các cổng lượng tử, phép đo và thiết lập lại được sắp xếp theo thứ tự, tạo thành cơ sở của các thuật toán lượng tử.
9. *Thuật toán lượng tử*: Tập hợp các mạch lượng tử chạy trên máy tính lượng tử để tìm giải pháp cho một vấn đề. Các thuật toán lượng tử là động cơ của các ứng dụng lượng tử. Một thuật toán có thể là cơ sở của nhiều ứng dụng trong các ngành khác nhau.
10. *Lợi thế lượng tử*: Giai đoạn khi máy tính lượng tử có thể giải một số bài toán dễ hơn, nhanh hơn và chính xác hơn so với điện toán cổ điển.
11. *Mật mã sau lượng tử (PQC)*: Các thuật toán mã hóa được cho là an toàn trước các cuộc tấn công của máy tính lượng tử.
12. *Sự sẵn sàng lượng tử*: Khả năng của một doanh nghiệp hoặc tổ chức làm quen và chuẩn bị chạy các ứng dụng và đạt được lợi thế khi phần cứng máy tính lượng tử trưởng thành hơn.

I. ĐIỆN TOÁN LƯỢNG TỬ: NỀN KINH TẾ ĐANG PHÁT TRIỂN NHANH CHÓNG

Với những khoản đầu tư công và tư khổng lồ, cả công ty lâu niên và mới thành lập từ khắp nơi trên thế giới cho thấy động lực gia tăng với sự phát triển của công nghệ.

Sự phát triển của các công nghệ điện toán lượng tử ngày nay là một nỗ lực toàn cầu. Tất cả các châu lục đều là nơi có các công ty và chính phủ tích cực hỗ trợ việc tạo ra các giải pháp điện toán lượng tử mới. Các quốc gia có các cụm NC&PT lượng tử hàng đầu trên toàn cầu đã thực hiện các khoản đầu tư chiến lược để nắm bắt một phần chuỗi cung ứng điện toán lượng tử trong tương lai và tạo ra khả năng tiếp cận chiến lược và độc lập với các khả năng trong tương lai.

- Các hoạt động điện toán lượng tử có thể được thấy ở mọi châu lục, với các sáng kiến quan trọng hàng đầu được hiện thực hóa ở hầu hết các quốc gia G20.
- Đầu tư tư nhân đang tăng nhanh – và chuyển từ đầu tư mạo hiểm sang các dịch vụ công ban đầu đánh dấu sự trưởng thành ngày càng tăng của ngành.
- Tổng đầu tư công và tư nhân lên tới 35,5 tỷ USD vào năm 2022 trên một loạt các công nghệ lượng tử.

Những khoản đầu tư trị giá hàng tỷ đô la này thúc đẩy những tiến bộ công nghệ. Theo nghiên cứu mới nhất, đầu tư công vào công nghệ lượng tử vượt quá 30 tỷ USD (Bảng 1). Đầu tư tư nhân cho công nghệ lượng tử đã tăng thêm 3,2 tỷ USD chỉ riêng trong năm 2021 và hơn 5,5 tỷ USD trong thập kỷ qua. Điều quan trọng cần lưu ý là những con số này là ước tính thấp vì không phải tất cả đầu tư công đều được nắm bắt do lo ngại về an ninh quốc gia và những gì được theo dõi và báo cáo trong các khu vực khác nhau. Trong khi một số công ty lớn có quỹ tư nhân và quỹ công, một số ít hỗ trợ rất nhiều cho nỗ lực lượng tử của họ từ quỹ NC&PT của công ty. Cũng giống như các khoản đầu tư công, các quỹ NC&PT của công ty thường không được nắm bắt bởi các khoản đầu tư tư nhân được mô tả ở trên.

Sự kết hợp mạnh mẽ giữa các khoản đầu tư công và tư nhân đã tạo ra một nhóm các công ty đa dạng để phát triển máy tính lượng tử hoặc các khối xây dựng chính. Vào đầu năm 2022, 46 công ty trên toàn thế giới đang tích cực phát triển phần cứng điện toán lượng tử. Ngày càng có nhiều công ty khởi nghiệp tham gia vào lĩnh vực này và thu hút vốn từ các nhà đầu tư trên toàn thế giới. Do đó, các máy tính lượng tử giai đoạn đầu ngày nay hoạt động với nhiều nền tảng phần cứng khác nhau trong

các giai đoạn phát triển khác nhau. Chúng bao gồm qubit siêu dẫn, nguyên tử trung tính, ion bị bẫy, qubit quang tử và qubit dựa trên silicon.

Bảng 1. Đầu tư công toàn cầu trong các công nghệ lượng tử

TT	Quốc gia	Đầu tư (triệu USD)	TT	Quốc gia	Đầu tư (triệu USD)
1	Đức	3.100	12	Đài Loan (TQ)	282
2	Pháp	2.200	13	Thụy Điển	160
3	Trung Quốc	1.500	14	Singapore	109
4	Anh	1.300	15	Úc	98,5
5	Hoa Kỳ	1.200	16	Tây Ban Nha	67
6	Canada	1.100	17	Hàn Quốc	40
7	Ấn Độ	1.000	18	Đan Mạch	34
8	Hà Lan	904	19	Phần Lan	27
9	Nhật Bản	700	20	New Zealand	20,9
10	LB Nga	663	21	Hungary	11
11	Israel	380	22	Thái Lan	6
				...	
	Toàn cầu 2022	30.000			

Những thông tin điện toán lượng tử khác nhau này phản ánh một lĩnh vực công nghệ năng động và phát triển nhanh chóng. Các cột mốc quan trọng đã được báo cáo từ các nơi khác nhau trên hành tinh: bộ xử lý lượng tử đầu tiên được cung cấp cho mọi người thông qua truy cập đám mây vào năm 2016, vào năm 2019, thành tựu về ưu thế lượng tử đã được tuyên bố, theo đó bộ xử lý lượng tử được thực hiện chỉ trong vài phút một phép tính phức tạp mà hệ thống máy tính mạnh nhất thế giới vào thời điểm đó sẽ mất hai ngày để xử lý. Những cải tiến về tỷ lệ lỗi để kiểm soát qubit và khả năng đọc đáng tin cậy đã tiếp tục là một phần của bối cảnh NC&PT, cũng như những đột phá quan trọng trong việc mở rộng quy mô.

1.1. Sáng kiến toàn cầu và tài chính công

Châu Á, Bắc Mỹ, Châu Âu và Úc có hệ sinh thái đổi mới sáng tạo rất khác nhau. Do đó, các chính phủ quốc gia đi theo những con đường khác nhau trong hành trình điện toán lượng tử. Hoa Kỳ đã thành lập một chương trình quốc gia vào năm 2019, Đạo luật Sáng kiến Lượng tử Quốc gia, để hỗ trợ sự phát triển của tất cả các công nghệ lượng tử. Điều này bao gồm việc thành lập Hiệp hội Phát triển Kinh tế Lượng tử (QED-C) để hỗ trợ phát triển chuỗi cung ứng lượng tử với mục tiêu và

sứ mệnh hỗ trợ ngành công nghiệp lượng tử trong tương lai. Canada và các tỉnh của mình tiếp tục làm việc để phát triển các chiến lược cấp quốc gia và cấp tỉnh của họ.

Ở châu Âu, các sáng kiến quốc gia và khu vực đã được đưa ra để dẫn đầu sự phát triển của các giải pháp điện toán lượng tử. Vương quốc Anh, Hà Lan, Đức và Pháp đã phát triển các chương trình và chiến lược lượng tử quốc gia, với tổng hỗ trợ công cộng hơn 7 tỷ USD. Ủy ban châu Âu cũng đã thành lập một sáng kiến đổi mới và nghiên cứu riêng trị giá 1,1 tỷ USD được gọi là Flagship lượng tử của EU, dành riêng cho việc phát triển và thương mại hóa các công nghệ lượng tử ở Liên minh Châu Âu. Trong EU, điện toán lượng tử nổi bật và được phát triển với sự cộng tác của các nỗ lực của châu Âu về điện toán hiệu năng cao. Ngoài ra còn có các sáng kiến bên cạnh các trung tâm nghiên cứu hiện có và các cụm xuất sắc trong công nghệ lượng tử, ví dụ như Quantum Delta NL ở Hà Lan, một pháp nhân chuyên trách quản lý tất cả các khoản đầu tư công liên quan vào công nghệ.

Cùng với những khoản đầu tư này, ngành công nghiệp châu Âu cũng đã bắt đầu hợp nhất để đẩy nhanh quá trình phát triển các giải pháp lượng tử thương mại. Một ví dụ là Hiệp hội Công nghiệp Lượng tử Châu Âu (QuIC). Tổ chức toàn châu Âu này tập hợp các công ty khởi nghiệp, doanh nghiệp nhỏ và vừa (SME), các công ty lớn, nhà đầu tư, tổ chức nghiên cứu và công nghệ cũng như các hiệp hội khác. Ở cấp quốc gia, một số hiệp hội ngành khác cũng đã được thành lập, chẳng hạn như Le Lab Quantique (Pháp), Cộng đồng Lượng tử Đan Mạch (Đan Mạch), Viện Q Phần Lan và Vương quốc Anh Quantum (Vương quốc Anh).

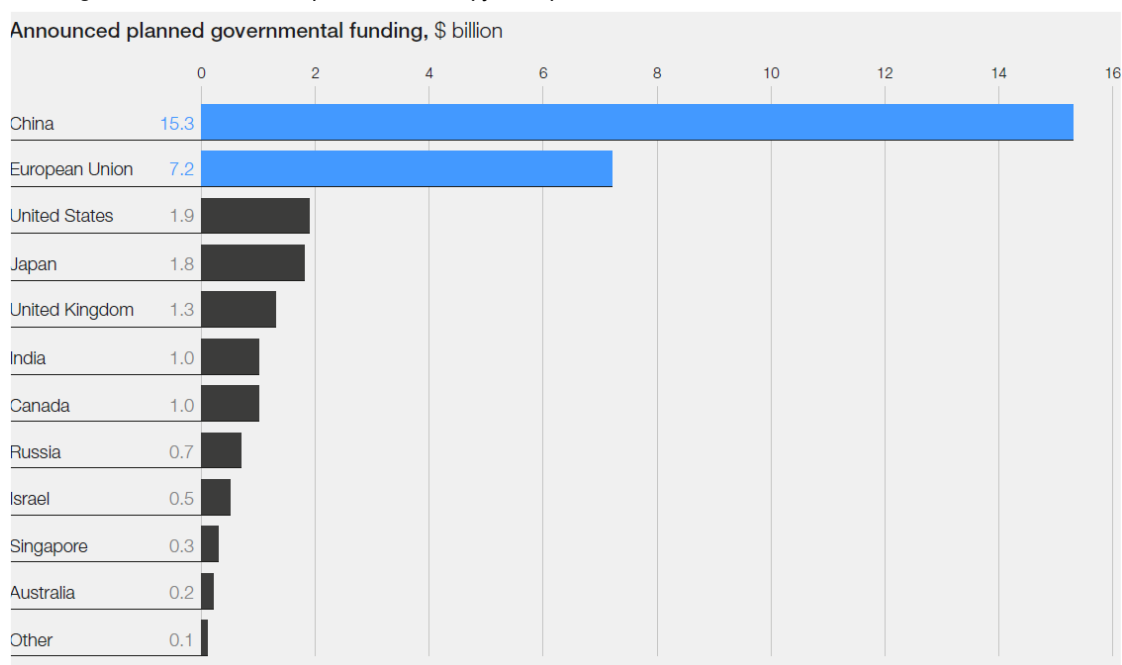
Châu Á đã có một nỗ lực lâu dài và ngày càng tăng trong bối cảnh lượng tử. Nỗ lực tập trung của Singapore vào thông tin lượng tử bắt đầu từ đầu những năm 2000. Điều này được theo sau bởi một nỗ lực đáng kể ở Trung Quốc, ban đầu tập trung vào truyền thông lượng tử nhưng hiện nay tập trung chủ yếu vào điện toán lượng tử. Kế hoạch 5 năm của Trung Quốc được đưa ra vào năm 2016 và đặt điện toán lượng tử làm ưu tiên hàng đầu cho chủ quyền công nghệ quốc gia. Trong mười năm qua, Trung Quốc đã đầu tư hơn 1 tỷ USD vào công nghệ lượng tử, với khoản đầu tư bổ sung 150 triệu USD vào quỹ khởi nghiệp. Các kế hoạch dài hạn bao gồm khoản đầu tư công lên tới 15 tỷ USD. Những nỗ lực ở Trung Quốc được cho là sẽ khá lớn, tuy không có số liệu công khai. Bắt đầu từ năm 2019, Nhật Bản và Hàn Quốc đã tạo ra các chiến lược lượng tử chính thức; cả hai đều nỗ lực xây dựng máy tính lượng tử và truy cập máy tính lượng tử thông qua đám mây trên phần cứng do các công ty khác tạo ra. Đầu năm 2022, Ấn Độ đã công bố kế hoạch chi hơn 1 tỷ USD trong 5

năm tới để hỗ trợ phát triển công nghệ lượng tử, bao gồm cả nỗ lực xây dựng một máy tính lượng tử nguyên mẫu nhỏ vào năm 2026.

Úc sở hữu các cơ sở nghiên cứu lượng tử đẳng cấp thế giới và chuyên môn được thành lập qua hai thập kỷ nghiên cứu và đầu tư bền vững. Vào năm 2020, quốc gia này đã công bố lộ trình công nghiệp lượng tử quốc gia và vào năm 2021, một Trung tâm Thương mại hóa Lượng tử mới để thiết lập quan hệ đối tác chiến lược với các quốc gia có cùng chí hướng nhằm thương mại hóa nghiên cứu lượng tử của Úc. Việc phát triển một chiến lược lượng tử quốc gia để vạch ra tầm nhìn của Úc đối với ngành công nghiệp lượng tử của nước này hiện đang được tiến hành.

Nhiều hoạt động đang được tiến hành ở những nơi khác trên thế giới, nơi hệ sinh thái lượng tử đang bị tụt hậu về kinh phí và công nghệ. Những sáng kiến như vậy bao gồm các chương khu vực từ One Quantum, Quantum Leap Africa, QWorld và các sự kiện như Quantum Latino và Quantum Eastern Europe.

Hình 1. Công bố tài trợ của chính phủ các nước (tỷ USD)



Nguồn: McKinsey & Company, adapted from Johnny Kung and Muriam Fancy, 2021

1.2. Tài chính tư nhân

Tài chính tư nhân đã cho phép sự gia tăng các công ty khởi nghiệp điện toán lượng tử.

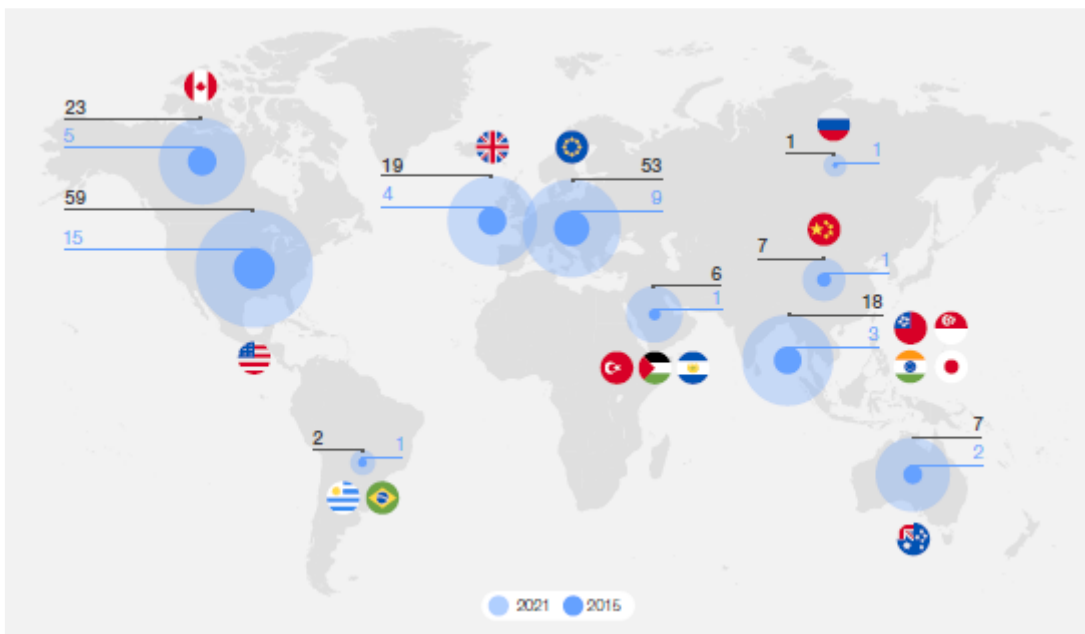
Công ty điện toán lượng tử chuyên dụng thương mại đầu tiên được thành lập vào năm 1999, và mười ba năm sau, công ty phần mềm điện toán lượng tử đầu tiên được thành lập. Kể từ đó, 196 công ty khởi nghiệp trên toàn cầu đã được thành lập. Hình 4 cho thấy sự gia tăng của điện toán lượng tử khởi nghiệp trên toàn cầu kể từ năm 2015. Sự tăng trưởng của các công ty tư nhân đã được kích hoạt nhờ tài chính tư nhân. Lượng tài chính tư nhân và số lượng công ty khởi nghiệp điện toán lượng tử đã tăng trưởng nhanh chóng song song.

Đầu tư tư nhân trong điện toán lượng tử

- 2/3 của tất cả các khoản đầu tư vốn cổ phần (~1,3 tỷ USD) đến từ năm 2018
- 800 triệu USD các khoản đầu tư vào cổ phần có thể đã đạt kỷ lục trong một năm vào năm 2021 (ước tính)
- 73% khoản đầu tư kể từ năm 2018 là vào phần cứng

Nguồn: Boston Consulting Group, 2021

Hình 2. Bản đồ các công ty khởi nghiệp trong điện toán lượng tử



Nguồn: McKinsey & Company, adapted from PitchBook, 2021, World Economic Forum analysis

Nguồn tài chính tư nhân chảy vào đầu

Vào năm 2020, hơn 90% khoản đầu tư này được đổ vào những công ty phần cứng. Tuy nhiên, số lượng các công ty khởi nghiệp về phần mềm và thuật toán đang tăng

nhANH hơn so với các công ty khởi nghiệp về phần cứng. Điều này có thể được giải thích là do các khoản đầu tư vốn khổng lồ cần thiết để phát triển phần cứng và kỳ vọng của nhiều người rằng, giống như trong nền kinh tế CNTT-TT hiện nay, có thể có rất nhiều giá trị được tạo ra trong miền ứng dụng.

Bảng 2. Tỷ lệ đầu tư khởi nghiệp

Công nghiệp điện toán lượng tử	Chế tạo linh kiện (Component)	Chế tạo phần cứng	Phần mềm hệ thống	Phần mềm ứng dụng	Dịch vụ	Tổng
Số công ty	Trên 100 nhà cung cấp (Phần lớn chuyên riêng cho phần cứng máy tính lượng tử; 38 nhà cung cấp linh kiện tập trung vào QC được tính vào tổng số công ty)	48	39	72	33	228
Tỷ lệ khởi nghiệp	4%	73%	14%	7%	2%	

Nguồn: McKinsey & Company, adapted from CaptallQ, Crunchbase, PitchBook, 2022

Các công ty chuyển từ tài chính tư nhân sang IPO, sáp nhập và mua lại, và các công ty khởi nghiệp

Một số công ty điện toán lượng tử đã hoàn thành đợt phát hành cổ phiếu lần đầu ra công chúng (IPO) thông qua các công ty mua lại có mục đích đặc biệt (SPAC). SPAC cho phép các công ty điện toán lượng tử này phá vỡ quy trình IPO, giúp họ tiết kiệm thời gian, tiền bạc và giảm sự giám sát của cơ quan quản lý (xem Bảng 3).

Bảng 3. Giao dịch SPAC điện toán lượng tử

Công ty	Sàn chứng khoán	SPAC	Ngày công bố	Tiền thu được
IonQ	New York Stock Exchange	SPAC dMY Technology Group Inc III	8/3/2021	636 triệu USD
Rigetti	NASDAQ	SPAC Supernova Partners Acquisition Company II	6/10/2021	261,75 triệu USD
Arqit	NASDAQ	Centricus AcquisitionCorp	12/5/2021	70 triệu USD
D-Wave	New York Stock Exchange	DPCM Capital	8/2/2022	9 triệu USD (sau mua lại)

IonQ là công ty điện toán lượng tử đầu tiên làm được điều này, trở thành “công ty điện toán lượng tử thuần túy, được giao dịch công khai đầu tiên”. Ngay sau đó là Rigetti, Arqit và D-Wave, tuy nhiên vẫn còn phải xem liệu chiến lược này có tiếp tục hay không vì cả bốn công ty đều đang giao dịch dưới mức định giá ban đầu, với một số mất tới 50% giá trị.

Sau khoản đầu tư của Honeywell vào Điện toán lượng tử Cambridge, vào tháng 6 năm 2021, Honeywell Quantum Systems đã sáp nhập với Hệ thống lượng tử Cambridge để tạo thành Quantinuum vào cuối năm 2021. Trong một thỏa thuận trước đó, vào ngày 25 tháng 5 năm 2021, Keysight Technologies đã mua lại Quantum Benchmark.

Các vụ sáp nhập và mua lại gần đây cũng đã được quan sát thấy ở châu Âu. Năm 2021 Zurich Instruments được mua lại bởi tập đoàn công nghệ Đức Rohde & Schwarz. Vào tháng 1 năm 2022, Qu&Co của Hà Lan sáp nhập với Pasqal. Vài tháng sau, QDevil của Đan Mạch trở thành một phần của Quantum Machines. Ngoài ra, nhiều công ty khởi nghiệp trẻ đã thoát ra khỏi tình trạng lén lút và trải qua quỹ đạo tăng trưởng dốc được thúc đẩy bởi vốn đầu tư mạo hiểm và các khoản đầu tư của Ngân hàng Đầu tư Châu Âu.

II. MÁY TÍNH LƯỢNG TỬ CÓ THỂ VÀ SẼ LÀM ĐƯỢC GÌ?

Điện toán lượng tử là một phần bổ sung công nghệ cung cấp tác động chuyển đổi trong khoa học vật liệu, sinh học, hệ thống phức tạp và ảnh hưởng đến bảo mật, blockchain và AI.

2.1. Một tập hợp mới các khả năng tính toán

Theo nhận thức phổ biến, máy tính lượng tử sẽ là máy tính nhanh hơn. Tuy nhiên, điều này không nhất thiết phải đúng vì điện toán lượng tử sẽ có điểm mạnh và điểm yếu so với điện toán kỹ thuật số. Với bản chất của cách sử dụng tính toán, nó sẽ tự nhiên cùng tồn tại thay vì thay thế điện toán cổ điển.

- Điện toán lượng tử có thể giải quyết bài toán mới, giống như cách tự nhiên hoạt động tại quy mô nguyên tử và hạ nguyên tử.
- Những vấn đề này tương ứng với trò chơi thay đổi các ứng dụng khoa học cơ bản và các ngành công nghiệp dựa trên chúng.
- Một rủi ro đáng kể đối với quản lý là an ninh mạng; tại quy mô, điện toán lượng tử sẽ phá vỡ các phương pháp mã hóa ngày nay.

Việc xây dựng lại điện toán từ “bit up” mở ra cơ hội giải quyết các loại vấn đề mới không khả thi thông qua điện toán cổ điển. Điện toán lượng tử có thể giải quyết một số loại bài toán nhất định, tương ứng với các tuyên bố cụ thể trên thế giới.

Ví dụ, máy tính lượng tử chứng minh được tiềm năng để phân tích số lượng lớn, một vấn đề toán học khó đến mức nó được sử dụng để mã hóa truyền dữ liệu, nhanh hơn theo cấp số nhân so với máy tính cổ điển. Ứng dụng tương ứng đơn giản nhất của khả năng này là phá vỡ mã hóa RSA, là nền tảng của phần lớn các phương thức truyền dữ liệu an toàn ngày nay.

Hộp 2. Máy tính cổ điển sẽ giữ hầu hết các tác vụ của chúng

Máy tính cổ điển dự kiến sẽ tồn tại song song với máy tính lượng tử, để hỗ trợ quy trình xử lý điện toán lượng tử (ví dụ: chạy mạch lượng tử) trong trung tâm dữ liệu lai và tiếp tục cung cấp năng lượng cho các tác vụ hàng ngày mà máy tính lượng tử không phù hợp (ví dụ: sao chép dữ liệu) hoặc không cung cấp bất kỳ lợi thế có ý nghĩa nào so với các máy tính hiện có (ví dụ: duyệt internet, đọc email, v.v.). Nói cách khác, nếu một ứng dụng hoạt động không yêu cầu các mạch lượng tử, nó sẽ có khả năng tiếp tục được thao tác bởi các máy tính cổ điển.

Các loại vấn đề toán học và vật lý chính mà máy tính lượng tử dự kiến sẽ giải quyết cực kỳ tốt bao gồm mô phỏng lượng tử, tối ưu hóa, đại số tuyến tính lượng tử

và phân tích thừa số nguyên tố. Khả năng giải quyết các vấn đề trừu tượng này (từng vấn đề một hoặc kết hợp) mở ra các cơ hội trong thế giới thực trong ba lĩnh vực rộng lớn (xem Bảng 4):

Bảng 4. Các lĩnh vực sử dụng máy tính lượng tử

Lĩnh vực ứng dụng	Khoa học vật liệu và sinh học	Các hệ thống phức tạp	Công nghệ và nghiên cứu hiện tại
Các ngành bị ảnh hưởng	Năng lượng, thực phẩm và nông nghiệp, sản xuất, hóa chất, dược phẩm.	Tài chính, vận tải và hậu cần, các ngành có sản phẩm phức tạp (hàng không, ô tô, v.v.).	Các ngành sử dụng nhiều AI, chuỗi khối hoặc điện toán hiệu năng cao (HPC) nói chung, công nghiệp năng lượng và vật liệu, truyền thông kỹ thuật số, quốc phòng và an ninh.
Các trường hợp sử dụng điện toán lượng tử	Khám phá và thiết kế các phân tử và vật liệu mới, ảnh hưởng đến nhiều lĩnh vực: phát triển vật liệu tiên tiến, thiết kế thuốc, cây trồng và phân bón, chất xúc tác hydro xanh, pin, hóa học.	Quản lý và tối ưu hóa các hệ thống tinh vi với một số lượng lớn các biến số hoặc ẩn số, từ những thách thức về lịch trình, hậu cần và chuỗi cung ứng rất phức tạp đến mô hình hóa danh mục đầu tư tài chính và hồ sơ rủi ro để đánh giá các chiến lược quốc phòng.	Tác động đến các công nghệ hiện có như AI, blockchain, cũng như khả năng khoa học của chúng ta
Tác động xã hội và môi trường	Giảm tiêu thụ năng lượng, thu giữ carbon, vật liệu và quy trình hiệu quả, nhiều loại cây trồng mạnh mẽ và thân thiện với thiên nhiên, phát hiện bệnh và phản ứng nhanh hơn, y học cá nhân hóa.	Giảm tiêu thụ năng lượng và khí thải trên các mạng lưới toàn cầu, các mô hình kinh doanh tuần hoàn.	Phá vỡ mật mã hiện tại, mật mã tiềm năng mạnh hơn với sự riêng tư và bảo mật được tăng cường. Tăng tốc thăm dò và khám phá trong nghiên cứu khoa học cơ bản. Giảm bớt tải tính toán cao nhất kết hợp với HPC.
Các ví dụ minh họa	Các phân tử có thuộc tính phù hợp để cô lập carbon ở quy mô lớn. Các loại ngũ cốc đàn hồi tự nhiên hơn để cải thiện sản xuất lương thực trong khi tránh độc canh.	Tối ưu hóa không gian container vận chuyển rỗng mang lại lợi ích cả về môi trường và kinh tế. Cải thiện chấm điểm tín dụng khách hàng theo thời gian thực.	Khả năng tăng tốc đào tạo các thuật toán học máy. Phá vỡ mã hóa RSA và tiền điện tử. Đóng góp vào sự hiểu biết cơ bản của chúng ta về hành vi lượng tử của tự nhiên.
Các vấn đề lượng tử cơ bản	Mô phỏng lượng tử, tối ưu hóa, đại số tuyến tính lượng tử và phân tích thừa số nguyên tố.		

Điện toán lượng tử dựa trên khả năng 1) tạo và 2) điều khiển các mạch lượng tử. Để triển khai hiệu quả trong thế giới thực, điều này cần phải xảy ra 3) ở **quy mô lớn, với chất lượng và tốc độ cao**. Mặc dù các lộ trình phát triển điện toán lượng tử

khác nhau đang ở các giai đoạn trưởng thành khác nhau, nhưng việc đạt đến quy mô, chất lượng và tốc độ phù hợp để chứng minh lợi thế lượng tử có tác động vẫn chưa được hiện thực hóa. Tình trạng hiện tại được xem xét sâu hơn trong phần “Tình trạng công nghệ”. Do đó, các ứng dụng trong phần 2.2 dựa trên sự hiểu biết chung về nơi công nghệ này phù hợp một cách tự nhiên để có tác động lớn – dựa trên bản chất của vấn đề và khả năng tự nhiên của điện toán lượng tử.

2.2. Các lĩnh vực chính cho các ứng dụng có tác động cao

❖ Khoa học vật liệu – bước vào kỷ nguyên khám phá mới

Với khả năng mô phỏng các tương tác lượng tử ở cấp độ nguyên tử và phân tử của máy tính lượng tử, các vấn đề nằm ngoài phạm vi của máy tính hiện tại có khả năng được giải quyết, mở ra một chương mới của khám phá khoa học (về vật liệu mới, y học, năng lượng, sinh học) điều đó có thể thay đổi cách thức quản lý khí hậu, an ninh lương thực và năng lượng cũng như sức khỏe.

Các hệ thống hoặc quá trình, chẳng hạn như phân tử, phản ứng hóa học, hạt nhân hoặc electron trong chất rắn, là cơ học lượng tử. Hiểu được hành vi và tính chất của các quá trình này là thách thức chính trong vật lý, hóa học và sinh học, đồng thời là cơ sở của sự tiến bộ trong dược phẩm, năng lượng, nông nghiệp và khoa học vật liệu.

Các phương pháp thử nghiệm truyền thống diễn ra chậm chạp. Số lượng lớn các tổ hợp phân tử có thể có theo cấp số nhân có thể tạo ra kết quả mong muốn - chẳng hạn như quy trình xúc tác sạch và hiệu quả để sản xuất năng lượng - có nghĩa là xác suất tìm ra giải pháp mới trong bất kỳ thí nghiệm cụ thể nào là thấp, khiến nỗ lực chung vừa chậm vừa tốn kém.

Việc các máy tính thông thường không có khả năng bắt chước chính xác các hệ lượng tử với nhiều hơn một vài hạt có nghĩa là điện toán đã hạn chế tác động lên các lĩnh vực này. Ngay cả những siêu máy tính tiên tiến nhất cũng phải mất hàng thế kỷ để mô hình hóa bất kỳ vấn đề nào trong số này.

Các tính chất của nguyên tử và phân tử cũng như tương tác của chúng được xác định bởi cơ học lượng tử, làm cho máy tính lượng tử phù hợp một cách tự nhiên để lập mô hình và đẩy nhanh đáng kể việc khám phá trong các lĩnh vực này.

Vật liệu cao cấp

Các năng lực tính toán lượng tử mới mở ra khả năng của các hệ thống mô hình

cơ học lượng tử, chẳng hạn như phân tử, polyme và chất rắn, ở một mức độ chính xác khác.

– Đối với các ngành công nghiệp dựa trên hóa chất, có thể xác định các thiết kế hoặc cấu trúc phân tử hiệu quả nhất để hoàn thành các nhiệm vụ cụ thể và đạt được các hiệu quả cần thiết – trước khi tổng hợp một phân tử đơn lẻ trong phòng thí nghiệm – từ chất xúc tác mới thành các cụm mới.

– Đối với các ngành sản xuất và xây dựng, việc mở rộng kiến thức từ các phân tử và hợp chất sang vật liệu sẽ cho phép thiết kế các hợp kim, vải và lớp phủ mới với các đặc tính mong muốn về trọng lượng, độ bền và tính linh hoạt với tốc độ nhanh hơn. Điều này sẽ mở đường cho các sản phẩm công nghiệp và khách hàng có ý thức tuân thủ hiệu quả năng lượng, an toàn, dị ứng hoặc các hạn chế khác (ví dụ: clanhke xi măng không carbon).

Các công ty Total Energies và Quantinuum đang sử dụng các thuật toán điện toán lượng tử để phát triển và triển khai các vật liệu thu giữ carbon mới bằng cách mô phỏng hành vi của các khung kim loại-hữu cơ, một nhiệm vụ quá khó đối với các siêu máy tính hiện đại.

Sản xuất, lưu trữ và hiệu quả năng lượng

Ứng dụng trực tiếp nhất của khoa học vật liệu cho ngành năng lượng nằm ở các thành phần của hệ thống năng lượng, cho phép tạo và lưu trữ điện, cũng như mô hình hóa và nghiên cứu các quá trình năng lượng. Ngoài ra, một số trường hợp sử dụng hứa hẹn những cải thiện đáng kể về hiệu quả sử dụng năng lượng – tất cả đều có thể góp phần vào nỗ lực biến đổi khí hậu đang diễn ra trong các ngành công nghiệp.

– Mô phỏng perovskites để tạo ra các tế bào năng lượng mặt trời hiệu quả hơn giúp chuyển đổi nhiều năng lượng mặt trời hơn thành điện năng. Điều này có thể liên quan đến việc bắt chước và học hỏi từ quá trình quang hợp tự nhiên diễn ra ở thực vật có thể được mô phỏng bằng máy tính lượng tử.

– Thiết kế các hệ thống lưu trữ năng lượng và pin mới, tăng tốc mô phỏng lượng tử của vật liệu điện phân, cực dương và cực âm, đồng thời chọn các tùy chọn tốt nhất thông qua tối ưu hóa.

– Khám phá các chất xúc tác tốt hơn – các hợp chất hóa học đặc biệt đẩy nhanh các phản ứng hóa học phục vụ một mục đích xác định. Chất xúc tác là chìa khóa để:

- + Giảm chi phí năng lượng và tốc độ sản xuất hydro xanh
- + Khả năng tồn tại và hiệu quả của quá trình cô lập carbon – một phản ứng hóa học tách carbon dioxide ra khỏi không khí (hay còn gọi là thu giữ carbon).

– Mô hình hóa các quy trình pha khí (cracking nhiệt, nhiệt phân, đốt cháy), giúp tạo ra và sử dụng năng lượng hiệu quả hơn trong các quy trình và sản phẩm khác nhau.

Các công ty Mercedes-Benz và PsiQuantum gần đây đã chia sẻ các kết quả nghiên cứu về tác động của điện toán lượng tử đối với việc thiết kế pin cho xe điện, bao gồm cả pin lithium-ion (phổ biến nhất), điều này cho thấy mức độ tăng tốc độ trong thời gian chạy điện toán.

Sản xuất lương thực

Mở rộng logic của khoa học vật liệu sang nông nghiệp, mọi thứ đều có cấu trúc phân tử, điều này làm cho điện toán lượng tử trở thành một công cụ thiết yếu để tăng tốc các quy trình hiện có và giải quyết một số vấn đề (hóa học) nan giải trước đây.

– Cải thiện hiệu suất năng lượng của quá trình sản xuất phân bón (amoniac), chiếm 1-2% lượng khí thải carbon dioxide trên toàn thế giới. Do tính phức tạp của nó, phân tử amoniac không thể được mô hình hóa bằng bất kỳ siêu máy tính hiện có nào. Quy trình công nghiệp duy nhất có thể thực hiện quá trình cố định đạm đã được phát triển vào những năm 1900 và nó vẫn đang được sử dụng để sản xuất amoniac mặc dù tiêu tốn nhiều năng lượng. Tương tự như trường hợp thu giữ carbon, quá trình cố định nitơ (sản xuất amoniac) có thể được mô hình hóa bằng máy tính lượng tử trong tương lai. Khi làm như vậy, các nhà nghiên cứu cũng có thể sử dụng máy tính lượng tử để bắt chước các quá trình bên trong hai loại vi khuẩn hiện có có thể thực hiện quá trình cố định đạm với yêu cầu năng lượng thấp – một nhiệm vụ nằm ngoài khả năng mô hình hóa của các máy tính hiện tại.

– Các hóa chất bảo vệ cây trồng mới với các đặc tính mong muốn có nhiều khả năng được thiết kế bằng cách sử dụng các công cụ tối ưu hóa và mô phỏng lượng tử, với lượng khí thải carbon ít đáng kể hơn và giảm tác dụng phụ đối với sự phát triển của cây trồng.

Khả năng ứng dụng của máy tính lượng tử để lập mô hình quá trình cố định

đam đã được ETH Zurich và Microsoft khám phá trong chứng minh khái niệm về lý thuyết.

Chăm sóc sức khỏe

Là một phần của tự nhiên, cơ thể con người cũng được cấu tạo từ các phân tử. Hiểu và xử lý cơ thể tốt hơn là một trong những cơ hội cơ bản mà điện toán lượng tử mang lại.

– Thiết kế thuốc hiệu quả hơn sẽ làm giảm đáng kể rào cản tính toán để đánh giá và so sánh các hợp chất mới và đặc tính của chúng “trong ống nghiệm”, mà không cần tổng hợp chúng. Cách tiếp cận tương tự áp dụng cho các lĩnh vực cụ thể của mô hình gấp protein và thiết kế peptide.

– Việc giải trình tự bộ gen sẽ được thực hiện trong một khoảng thời gian ngắn, mở đường cho bước tiếp theo trong thiết kế thuốc, thuốc cá nhân hóa, giải quyết các tình huống và dấu hiệu sinh học cụ thể của bệnh nhân, tăng hiệu quả điều trị về mặt lý thuyết.

Mười bảy công ty đã nhận ra tiềm năng của điện toán lượng tử và thành lập QuPharma, một tập đoàn hợp tác trước khi cạnh tranh, vào năm 2020. Đồng thời, các công ty dược phẩm hàng đầu (Biogen, Boehringer Ingelheim, Roche, Pfizer, Merck, Janssen) đã bắt đầu có quan hệ đối tác của mình và nghiên cứu về lượng tử hoặc các ứng dụng lấy cảm hứng từ lượng tử để khám phá phân tử nhỏ, mô phỏng động lực phân tử, mô phỏng phân tử hóa học mức lượng tử, v.v.

❖ Mô hình hóa các hệ thống phức tạp – cho phép ra các quyết định thời gian thực (tốt hơn)

Các máy tính lượng tử có thể chạy các mạch lượng tử được định vị một cách tự nhiên để hoạt động với các hệ thống phức tạp nơi dữ liệu có cấu trúc cố hữu và nhiều biến số. Cấu trúc phổ biến trên một không gian dữ liệu lớn cực kỳ tốn kém để xác định bằng máy tính cổ điển và việc giải quyết nhiều vấn đề tính toán khó ngày nay với cấu trúc này phụ thuộc vào việc tìm ra sự cân bằng giữa thời gian dành cho việc tìm kiếm câu trả lời và tính hữu ích của nó đối với người dùng cuối.

Với nhiều lĩnh vực công nghiệp ngày càng phụ thuộc vào dữ liệu để lập kế hoạch và vận hành, máy tính lượng tử sẽ cho phép các ngành tăng cường khả năng tối ưu hóa và quy trình học máy của họ để tìm ra những hiểu biết mới và đưa ra quyết định tốt hơn và chính xác hơn.

Sản phẩm tài chính, đầu tư và bảo hiểm

Một trong những ứng dụng đơn giản nhất của các khái niệm nói trên là trong ngành tài chính. Các ngân hàng, tổ chức tín dụng và các công ty thương mại đều đang xử lý một lượng lớn dữ liệu, xác suất và giả định trong quá trình ra quyết định của họ.

– Xử lý hàng tỷ và hàng nghìn tỷ giao dịch tài chính và dữ liệu liên quan về vị trí, thời gian trong ngày, lịch sử người bán, thói quen thanh toán, v.v. để xác định hoạt động bất thường và ngăn cản gian lận tiềm ẩn. Máy tính lượng tử có thể cải thiện khả năng nhận dạng mẫu trong các tập dữ liệu có cấu trúc và phi cấu trúc, cải thiện chất lượng và tốc độ phát hiện gian lận.

– Tương tự như vậy, chấm điểm tín dụng tại điểm bán hàng, xem xét các nguồn đa dạng và không phổ biến hơn, chẳng hạn như hành vi trên mạng xã hội hoặc các mẫu khác, có thể trở thành hiện thực do tốc độ và độ phức tạp của các mô hình chấm điểm tăng lên. Cách tiếp cận như vậy có thể làm tăng khả năng sinh lời của các ưu đãi tín dụng và cho phép tiếp cận dân số không có tài khoản ngân hàng.

– Định giá chứng khoán và phái sinh tốt hơn, kết hợp nhiều yếu tố thị trường hơn với rủi ro giá gần với thời gian thực. Phần mở rộng cuối cùng của điều này là đánh giá, phân tích và tối ưu hóa rủi ro danh mục đầu tư, cho phép hành vi trong tương lai được mô hình hóa và danh mục đầu tư được tối ưu hóa theo các tham số nhất định – bằng cách so sánh các kết hợp khác nhau theo cách hiệu quả hơn nhiều. Một ví dụ đáng chú ý là thực hiện tốt hơn các danh mục đầu tư bền vững, có tính đến nhiều thông tin liên quan đến ESG, chấm điểm. Cuối cùng, máy tính lượng tử cũng hiệu quả hơn trong việc chạy các mô phỏng (xác suất) Monte Carlo.

Một số tổ chức tài chính lớn nhất đã thực hiện các yêu cầu điều tra các trường hợp sử dụng hứa hẹn nhất để chuẩn bị cho ngành, hoặc đang nghiên cứu các ứng dụng lượng tử của họ với các mốc thời gian rõ ràng để trở thành người đầu tiên có được lợi thế cạnh tranh khi máy tính lượng tử được phát triển hơn (Goldman Sachs).

Vận tải, hậu cần và chuỗi cung ứng

Từ sự phức tạp của các tuyến đường vận chuyển đến chuỗi cung ứng toàn cầu, số lượng lớn các điểm bắt đầu và điểm kết thúc cũng như các loại hình vận chuyển dẫn đến vô số tùy chọn tuyến đường cần được tối ưu hóa theo các tiêu chí nhất định.

– Tối ưu hóa tuyến đường và giao thông cho giao thông công cộng có thể điều chỉnh theo điều kiện đường xá và nhu cầu trong thời gian thực, bao gồm nhiều phương thức vận tải hơn (tàu hỏa, xe đạp, taxi, v.v.).

– Tối ưu hóa các tuyến vận chuyển và giao hàng quốc tế giúp tăng khả năng dự đoán và quản lý sự gián đoạn dịch vụ.

– Quản lý và điều phối chuỗi cung ứng toàn cầu với hàng ngàn đối tác kinh doanh, các rủi ro quốc gia và vĩ mô ảnh hưởng đến hiệu suất giao hàng của họ.

Deutsche Bahn bắt đầu công việc khám phá tiềm năng của các máy tính lượng tử hiện có để sử dụng thường xuyên trong lịch trình tàu hỏa trong thế giới thực (giai đoạn 1) và tăng dung lượng và sử dụng mạng trong khi giảm thiểu chi phí (giai đoạn 2).

Thiết kế sản phẩm mới

Máy tính lượng tử có thể xử lý các nhiệm vụ thiết kế rất phức tạp với nhiều biến số, vừa mô phỏng hành vi của vật liệu hoặc hệ thống tiên tiến vừa tối ưu hóa các thành phần sản phẩm bằng cách so sánh các tùy chọn.

– Cho dù trong lĩnh vực hàng không vũ trụ hay hàng không, kỹ thuật đòi hỏi vô số lựa chọn thiết kế về vật liệu, cấu trúc, phân bổ trọng lượng, tính linh hoạt và chi phí để hoạt động hài hòa hoàn hảo để sản phẩm cuối cùng hoạt động. Các mô hình mới phải mất nhiều năm đến nhiều thập kỷ để phát triển. Điện toán lượng tử dự kiến sẽ đại tu quy trình với những cải tiến đáng kể về tốc độ và chất lượng.

– Một logic tương tự áp dụng cho hầu hết mọi sản phẩm công nghiệp hoặc tiêu dùng có thể sản xuất được. Việc cải thiện thiết kế sản phẩm và các đặc điểm của sản phẩm cuối cùng trong mọi lĩnh vực sẽ dẫn đến sự gia tăng tổng thể về chất lượng của sản phẩm mới, phát triển nhanh hơn và giảm thời gian đưa sản phẩm ra thị trường – buộc các công ty phải suy nghĩ lại về cách họ cạnh tranh.

Năm 2019, để đối phó với những hạn chế không thể tránh khỏi của điện toán, Airbus đã phát động Thử thách điện toán lượng tử, yêu cầu các nhóm cạnh tranh trên toàn thế giới giải quyết năm vấn đề thiết kế quan trọng để phát triển máy bay mới bằng phương pháp điện toán lượng tử. Nhóm chiến thắng đã phát triển một thuật toán lượng tử chứng minh rằng điện toán lượng tử có thể tối ưu hóa khả năng tải trọng của máy bay để tối đa hóa doanh thu, tối ưu hóa việc đốt cháy nhiên liệu và giảm chi phí vận hành tổng thể.

❖ Tác động đến các công nghệ, cơ sở hạ tầng kỹ thuật số và nghiên cứu

Các loại vấn đề mà điện toán lượng tử dự kiến sẽ giải quyết tốt nhất (mô phỏng lượng tử, tối ưu hóa, đại số tuyến tính lượng tử và phân tích thừa số nguyên tố) là nền tảng cho hoạt động bên trong của nhiều công nghệ hiện có. Một mặt, nó được kỳ vọng sẽ tăng tốc các thuật toán học máy và cung cấp các lộ trình cho các cơ hội chưa từng có trong khoa học cơ bản, từ vật lý đến hóa học, sinh học và các vật liệu tiên tiến. Mặt khác, nó mang một tiềm năng đột phá đối với an toàn của truyền thông kỹ thuật số ngày nay và mở rộng ra là an ninh quốc gia. Các giải pháp chuỗi khối, bao gồm cả tiền điện tử, cũng đang bị đe dọa, mặc dù vẫn có tin tốt cho những lĩnh vực này.

An ninh mạng

Các hệ thống, sản phẩm và dịch vụ kỹ thuật số hiện đại dựa trên một tập hợp các bài toán để đảm bảo thu thập, lưu trữ và trao đổi dữ liệu. Những vấn đề này nằm ngoài khả năng của máy tính cổ điển, nhưng điện toán lượng tử có thể giải quyết chúng nhanh hơn nhiều – chỉ trong vài phút và vài ngày – khiến việc phá vỡ mã hóa trở nên khả thi và đáng giá.

– Thuật toán của Shor, được phát triển vào năm 1994, dẫn đầu lĩnh vực điện toán lượng tử vì nó là một thuật toán lượng tử hữu hình có thể có ý nghĩa quan trọng đối với xã hội. Nếu được sử dụng trên máy tính lượng tử có thể mở rộng cho mục đích chung (chưa tồn tại), nó sẽ phá vỡ mã hóa của truyền thông kỹ thuật số ngày nay, làm tổn hại các thuật toán mã hóa khóa công khai hiện có.

Có rất nhiều rủi ro khi nói đến mã hóa kỹ thuật số:

- Vi phạm dữ liệu, đặc biệt là dữ liệu nhạy cảm về tài chính hoặc sức khỏe
- Truyền thông kỹ thuật số dành cho doanh nghiệp và cá nhân, bao gồm các đối tượng của cơ sở hạ tầng quan trọng như lưới điện
- Tính toàn vẹn của tài liệu số
- Phá vỡ chuỗi khối và tiền điện tử, cũng được sử dụng trong nhận dạng kỹ thuật số, giao dịch tài chính và giao dịch, trong số các lĩnh vực khác.

Tin tốt là có những cách tiếp cận khả thi để các doanh nghiệp triển khai nhằm bắt đầu chuẩn bị hoặc cho phép quá trình chuyển đổi toàn diện sang cơ sở hạ tầng bảo mật có khả năng chống lại các cuộc tấn công từ máy tính lượng tử:

– Đầu tiên là mật mã hậu lượng tử, một tập hợp các thuật toán mã hóa mới mà máy tính lượng tử không thể phá vỡ. Viện Tiêu chuẩn và Công nghệ Quốc gia Hoa Kỳ (NIST) vừa mới công bố kết quả của cuộc thi kéo dài sáu năm để phát triển các thuật toán kháng lượng tử. Bốn trong số này đã hình thành nên cơ sở của tiêu chuẩn mã hóa hậu lượng tử sắp tới.

– Cách tiếp cận thứ hai là sử dụng các bộ tạo số ngẫu nhiên lượng tử (QRNG) để bảo mật liên lạc thay vì các số giả ngẫu nhiên được tạo bằng các kỹ thuật ngày nay. Một số công ty khởi nghiệp điện toán lượng tử đang cung cấp các thiết bị QRNG.

– Cuối cùng, kỹ thuật phân phối khóa lượng tử (QKD) trao đổi khóa mã hóa bằng truyền thông lượng tử. Những thử nghiệm này đã thành công đối với các mạng có kích thước địa lý hạn chế và sự phát triển vẫn tiếp tục.

Không phương pháp nào trong số ba phương pháp là viên đạn bạc có thể cung cấp sự bảo vệ đảm bảo khỏi các vụ đột nhập trong kỷ nguyên điện toán lượng tử mới. Các tác nhân độc hại liên tục thích ứng, nhưng sử dụng ít nhất một trong các phương pháp đã nêu – hoặc kết hợp các phương pháp này – sẽ giảm rủi ro xuống mức có thể kiểm soát được.

Trí tuệ nhân tạo

Một ứng dụng chính của điện toán lượng tử là giải quyết các thuật toán máy học hiệu quả hơn, do đó thúc đẩy các ứng dụng AI hiện có và mới, ví dụ như các mô hình hỗ trợ lượng tử để tạo dữ liệu nhằm tăng cường dự báo thời tiết. Trong một số ứng dụng, chẳng hạn như mạng nơ ron lượng tử, toàn bộ kỹ thuật học được cấy ghép vào miền lượng tử.

Các vấn đề về máy học có liên quan trong nhiều ngành, chẳng hạn như lái xe tự động, giao dịch tự động, nhận dạng giọng nói và hình ảnh cũng như bảo trì dự đoán. Bằng cách đẩy nhanh các quy trình đào tạo máy học, với nhiều mô hình đột phá đòi hỏi một lượng năng lực tính toán đáng kể (ví dụ: GPT-3 được cho là mất 355 năm để tính toán hiệu quả), điện toán lượng tử có cơ hội trở thành một phần của sự thay đổi tổng thể hướng tới dân chủ hóa AI và mở ra cơ hội cho các công ty nhỏ hơn đào tạo các mô hình phức tạp về mặt lý thuyết với một phần nhỏ thời gian và chi phí và không cần truy cập vào các trung tâm dữ liệu siêu quy mô hiện đại. Đồng thời, với việc đào tạo nhanh hơn, các doanh nghiệp có thể chuyển đổi sang các ứng dụng AI có khả năng xử lý các luồng dữ liệu theo thời gian thực và không ngừng cải thiện

hoặc điều chỉnh theo hoàn cảnh, điều này sẽ kích hoạt các trường hợp sử dụng mới và các điểm xoay mô hình kinh doanh.

Quốc phòng và an ninh

Các chính phủ trên toàn thế giới đang đổ tiền vào nghiên cứu máy tính lượng tử để tăng cường an ninh quốc gia. Máy tính lượng tử có thể được sử dụng cho nhiều ứng dụng quốc phòng khác nhau, bao gồm phát triển vật liệu tốt hơn cho máy móc và vũ khí quân sự, truy cập các đường liên lạc an toàn của đối thủ và chạy mô phỏng chiến đấu. Trường hợp sử dụng quan trọng vẫn là khả năng phá mã hóa RSA của máy tính lượng tử. Vào ngày 4 tháng 5 năm 2022, Văn phòng Tổng thống Hoa Kỳ đã phát hành một bản ghi nhớ yêu cầu chuyển đổi các hệ thống quốc gia dễ bị tấn công sang mật mã kháng lượng tử, đánh dấu đây là quốc gia đầu tiên thực hiện hành động bảo mật chống lại mối đe dọa điện toán lượng tử tiềm ẩn ở cấp quốc gia.

Nhận thấy tiềm năng của công nghệ này, NATO đã ra mắt Quỹ đổi mới công nghệ mới nổi đa quốc gia trị giá 1 tỷ USD đầu tiên trên thế giới để hỗ trợ đầu tư vào các dự án kinh doanh giai đoạn đầu với các công nghệ sử dụng kép, bao gồm cả điện toán lượng tử.

Trung Quốc, quốc gia dẫn đầu thế giới về công nghệ lượng tử, rất hạn chế trong việc tiết lộ thông tin về tình trạng phát triển điện toán lượng tử. Tuy nhiên, Quân đội Giải phóng Nhân dân Trung Quốc được biết là tài trợ cho nghiên cứu lượng tử thông qua mạng lưới các học viện khoa học quân sự và các tổ chức học thuật hợp tác.

Đột phá khoa học

Mô phỏng, tối ưu hóa và học máy có thể đóng góp vào hiểu biết cơ bản của chúng ta trong các lĩnh vực khoa học như hạt nhân, hạt, vật chất ngưng tụ, chất lỏng và vật lý thiên văn, khoa học plasma, hóa học, vật liệu và sinh học. Đối với nhiều nhà khoa học, đây là động lực sâu xa hơn để làm việc trên máy tính lượng tử. Cho dù đó là các quá trình vật lý, hóa học và sinh học đã đề cập trước đó, việc tìm ra các mẫu trong một lượng lớn dữ liệu đến từ các đài quan sát không gian, việc làm sáng tỏ hành vi của các quark và gluon kết tụ với nhau bên trong hạt nhân nguyên tử, hay lời giải thích về vật chất tối trong vũ trụ của chúng ta, hay các hiện tượng mới xuất hiện từ hàng nghìn tỷ tỷ electron tương tác trong chất rắn, những hạn chế của điện toán cổ điển cản trở các lĩnh vực khoa học.

III. THỰC TRẠNG CÔNG NGHỆ

Mặc dù máy tính lượng tử vẫn chưa thể hiện được lợi thế của mình, nhưng sự phát triển phần cứng đang tiến triển đều đặn đến mức các tổ chức có thể thử nghiệm nó thông qua đám mây.

3.1. Các thành phần quan trọng cho hoạt động của máy tính lượng tử

Để khai thác hết tiềm năng của các ứng dụng lượng tử, cần phải có các máy tính lượng tử thực với phần cứng thực để chạy các mạch lượng tử. Mặc dù có thể sử dụng tính toán cổ điển để mô phỏng các qubit và tương tác lượng tử, nhưng điều này chỉ có thể được thực hiện ở một kích thước nhất định, sau đó không có đủ sức mạnh tính toán.

Vậy điều gì là cần thiết để máy tính lượng tử hoạt động?

Điện toán lượng tử dựa trên hệ thống phân cấp hay còn gọi là “ngăn xếp” các thành phần để

đảm bảo tính dễ sử dụng, khả năng tương tác, khả năng mở rộng và khả năng tái tạo. Cùng với nhau, tập hợp các công nghệ có liên quan với nhau này – phần cứng vật lý, thiết bị điện tử điều khiển, ngôn ngữ lập trình và thuật toán, v.v. – cho phép các hướng dẫn hình thành mạch lượng tử tiếp cận bộ xử lý lượng tử và thực hiện các hành động cần thiết trên qubit để tạo ra kết quả tính toán. Máy tính lượng tử có thể hoạt động độc lập hoặc song song với máy tính cổ điển, song song hoặc theo trình tự. Chẳng hạn, máy tính lượng tử chiếm một phần tính toán, nơi nó có thể mang lại lợi thế về tốc độ hoặc chất lượng tính toán, trong khi phần còn lại của vấn đề đang được máy tính cổ điển giải quyết.

- Với nhiều lộ trình công nghệ đang phát triển song song, một giai đoạn thú vị của những tiến bộ công nghệ ổn định đang bắt đầu với các lộ trình hữu hình để theo dõi tiến trình và điều chỉnh sự tiếp thu của ngành.
- Hai cách tiếp cận để xây dựng một máy tính lượng tử – qubit siêu dẫn và các ion bị bẫy – hiện đã đạt đến mức độ phát triển tiên tiến hơn các phương pháp khác, mặc dù có khả năng nhiều nền tảng phần cứng sẽ có thể bắt kịp hoặc đóng một vai trò nào đó trong tương lai.
- Do các yêu cầu cao về cơ sở hạ tầng vật lý để tạo môi trường mà máy tính lượng tử hoạt động, hầu hết người dùng sẽ có quyền truy cập vào công nghệ thông qua đám mây và có khả năng kết hợp với các dịch vụ điện toán đám mây truyền thống khác.
- Mặc dù các máy tính lượng tử không hoàn hảo ngày nay vẫn chưa thể hiện được lợi thế lượng tử và không thể chạy nhiều ứng dụng công nghiệp đầy hứa hẹn, nhưng chúng đã có thể được truy cập để nghiên cứu, thử nghiệm và đánh giá trường hợp sử dụng kinh doanh.

Mặc dù tất cả các thành phần của ngăn xếp điện toán lượng tử đều quan trọng và có thể ảnh hưởng đến chất lượng cũng như tốc độ tính toán, nhưng phần cứng cơ bản và mạch lượng tử để chạy được cho là những thành phần quan trọng nhất phải được tìm ra.

– Phần cứng lượng tử (ví dụ: bộ xử lý qubit hoặc QPU) là nơi chạy các mạch lượng tử thực tế.

– Mạch lượng tử là một chuỗi các hoạt động lượng tử được áp dụng trên nhiều qubit. Sự kết hợp các kết quả của các mạch lượng tử thúc đẩy một chương trình để giải quyết một phép tính.

Nhiều nền tảng phần cứng điện toán lượng tử yêu cầu các môi trường chuyên biệt để hoạt động bên trong, bao gồm làm mát bằng phương pháp đông lạnh, chân không siêu cao và che chắn từ tính.

Hộp 3. Truy cập đám mây vào máy tính lượng tử như một nhân tố thay đổi cuộc chơi

Yêu cầu phần cứng cao có nghĩa là hầu hết các hệ thống thương mại đều được cung cấp “dưới dạng dịch vụ”, thường là với sự cộng tác của các nhà cung cấp đám mây hàng đầu. Điều này có nghĩa là các tổ chức có thể sẽ mua thời gian tính toán chứ không phải máy tính lượng tử.

Tuy nhiên, bạn nên tạo sự rõ ràng về “có gì trong hộp” hoặc đám mây và liệu đó có phải là lựa chọn phù hợp cho một tổ chức hay không. Biết được trạng thái phát triển và các loại phần cứng lượng tử là điều cần thiết từ góc độ ứng dụng lượng tử. Chỉ một phần của thuật toán lượng tử (và là các ứng dụng) có thể chạy trên các máy lượng tử không hoàn hảo ngày nay; các ứng dụng hứa hẹn nhất của lượng tử với lợi thế có thể chứng minh được (ví dụ như của Shor) sẽ cần phần cứng lượng tử có khả năng mở rộng và phát triển hơn nhiều để hoạt động.

3.2. Máy tính lượng tử phát triển như thế nào?

Các hệ thống điện toán lượng tử cạnh tranh đang được phát triển ngày nay dựa trên các tương tác vật lý lượng tử khác nhau để xác định qubit – điện, quang và từ. Phần cứng và các điều kiện cần thiết để tạo và kiểm soát các qubit khác nhau tùy theo hoạt động lượng tử được kiểm soát, ví dụ như một photon ánh sáng hoặc spin của một electron. Mỗi cách tiếp cận có sự đánh đổi khác nhau về mặt đầu tư và lợi ích. Một lần nữa, ở đây có những điểm tương đồng với điện toán cổ điển, vốn đã phát triển qua nhiều chế độ cơ sở hạ tầng vật lý – từ bóng chân không đến băng từ đến mạch silicon trên chip.

Vào năm 2022, tiếp tục có những cải tiến về công nghệ trên nhiều nền tảng phần cứng với các lộ trình phát triển công nghệ để giúp dự đoán các lộ trình.

Bất chấp sự khác biệt trong cách tiếp cận, các mốc quan trọng cơ bản trong quá trình phát triển hệ thống máy tính lượng tử là như nhau:

1. Hệ thống phải có khả năng tạo 46 qubit đặc trưng.
2. Hệ thống phải cho phép các qubit được khởi tạo, được kiểm soát toàn cầu và có thể đo lường được để tính toán.
3. Hệ thống phải có khả năng sửa các lỗi vốn có trong quá trình thực hiện phần cứng vật lý của các qubit.
4. Hệ thống phải có khả năng thực hiện tất cả những điều trên ở quy mô lớn.

Dựa trên những điều trên, tất cả các nền tảng phần cứng có thể được phân loại theo các mốc đạt được vào giữa năm 2022 (xem Bảng 5, trong đó cấp 1 đang ở giai đoạn đầu, cấp 3 là tiên tiến nhất về mặt kỹ thuật và các hệ thống cấp cao hơn đáp ứng tất cả các yêu cầu cấp thấp hơn).

Trong khi hai nền tảng phần cứng đang đi trước trên con đường phát triển – qubit siêu dẫn và các ion bị bẫy – thì các nền tảng và phương pháp tiếp cận khác vẫn có thể bắt kịp ở giai đoạn sau. Về lâu dài, có khả năng nhiều cách tiếp cận phần cứng sẽ cùng tồn tại và tìm thấy vị trí thích hợp của chúng trong hệ sinh thái tính toán lượng tử mới, dựa trên những lợi thế vốn có của chúng.

Điều quan trọng cần lưu ý là hiện nay không có hệ thống nào đạt đến cột mốc thứ tư (cấp 4) và không thể hoạt động trên quy mô lớn. Nói một cách đại khái, “ở quy mô lớn” có thể được hiểu là khả năng kiểm soát 1 triệu qubit trong một phép tính, về mặt lý thuyết cho phép tạo ra đủ số lượng qubit đã sửa lỗi để thể hiện lợi thế lượng tử trong ứng dụng thực tế. Ngày nay, các nền tảng hoạt động tốt nhất của chúng ta đã thể hiện khả năng ở mức thấp hàng trăm.

Các hệ thống xây dựng tuân theo bốn bước phát triển yêu cầu điều khiển phổ quát và có khả năng chạy các mạch lượng tử. Tất cả các “nền tảng mô hình mạch lượng tử” này đều có một bộ công phổ quát, là một bộ công cho phép chạy bất kỳ mạch lượng tử tùy ý nào và sự kết hợp của các mạch lượng tử với các thuật toán tính toán cổ điển để thúc đẩy phát triển ứng dụng. Đây là những điều kiện tiên quyết quan trọng để xây dựng một máy tính lượng tử đa năng có thể được tích hợp như một phần của quy trình tính toán. Như đã đề cập trước đó, máy tính lượng tử sẽ

không tự tồn tại trong chân không mà phải được cấu trúc thành cơ sở hạ tầng máy tính cổ điển phù hợp để người dùng cuối dễ sử dụng và linh hoạt.

Một cách tiếp cận hiện có bên ngoài lĩnh vực điện toán lượng tử phổ quát là ủ lượng tử, phương pháp này sẽ không bao giờ tạo ra các máy tính lượng tử có mục đích chung nhưng được điều chỉnh để giải quyết các vấn đề tối ưu hóa nhất định. Nó dễ xây dựng và mở rộng quy mô hơn một chút, do đó nó là một trong những nền tảng thương mại đầu tiên có được, hiện có vài nghìn qubit. Không rõ liệu nó có thể chứng minh lợi thế tính toán so với các máy tính cổ điển (tăng tốc) hay không vì khó có thể thực hiện nghiêm ngặt không gian bài toán.

Một số ứng dụng và lợi ích hữu ích có thể được thực hiện ở mức độ chưa hoàn thiện hoặc quy mô chưa đầy đủ – cho cả phương pháp tiếp cận dựa trên mạch và không phổ quát.

Bảng 5. Nền tảng phần cứng máy tính lượng tử theo mức độ phát triển của chúng hướng tới máy tính lượng tử phổ quát

Mức trưởng thành	Cấp 1	Cấp 2	Cấp 3	Cấp 4
Cột mốc/ngưỡng	Các nền tảng thể hiện các thuộc tính kết hợp (tạo qubit).	Các nền tảng thể hiện một bộ công cụ phổ quát (qubit điều khiển).	Các nền tảng thể hiện khả năng sửa lỗi lượng tử và/hoặc giảm thiểu lỗi.	Các nền tảng thể hiện các thuộc tính cấp 1-3 ở quy mô lớn.
Nền tảng phần cứng (không đầy đủ)	Tế bào T Ưu điểm: tiềm năng tích hợp trên chip, dự kiến có khả năng mở rộng.	Nguyên tử trung tính Ưu điểm: độ ổn định của qubit (thời gian kết hợp dài) và tỷ lệ lỗi thấp, tính mô đun (liên kết quang hoặc con thoi trên chip), các qubit giống hệt nhau. Mô phỏng quang tử Ưu điểm: kết nối tất cả, khả năng mở rộng theo chiều ngang, có khả năng được tích hợp liền mạch trong kiến trúc chip (silicon) hiện có, qubit chống nhiễu (nhiều). Hệ thống spin Ưu điểm: tiềm năng tích hợp trên chip, dẫn đến khả năng mở rộng và sản xuất dễ dàng hơn, tốc độ hoạt động,	Qubit siêu dẫn Ưu điểm: tốc độ hoạt động, khả năng tích hợp thông qua kỹ thuật đóng gói và chia tỷ lệ chất bán dẫn, tương đối dễ sản xuất. Ion bị bẫy Ưu điểm: kết nối tất cả với tất cả (điều này có thể cho phép xây dựng các mạch lượng tử ngắn hơn (nhanh hơn) và sử dụng nhiều phương pháp sửa lỗi lượng tử hơn), tính mô đun (liên kết quang hoặc con thoi trên chip), qubit giống hệt nhau.	Không có (chưa)

Mức trưởng thành	Cấp 1	Cấp 2	Cấp 3	Cấp 4
		tính ổn định (thời gian kết hợp lâu). Các trung tâm trống nitơ Ưu điểm: tiềm năng tích hợp trên chip, tính ổn định (thời gian kết hợp lâu), tính mô đun (liên kết quang).		

Nền tảng phần cứng có thể làm gì ở mỗi cấp độ?

Cấp 1: Nền tảng thể hiện tính chất liên kết. Các phương pháp tiếp cận ở cấp độ này đã chứng minh rằng chúng có thể tạo ra các qubit nhưng không nhất thiết phải kiểm soát chúng một cách đáng tin cậy. Việc không có kiểm soát phổ quát (được thực hiện với triển khai bộ cổng phổ quát) chưa cho phép các nền tảng này chạy các thuật toán lượng tử phổ quát. Điều quan trọng là các qubit được trình bày ở đây cho thấy tiềm năng đạt được quy mô, chất lượng và tốc độ để thực hiện các hoạt động mạch lượng tử hiệu quả. Một số cách tiếp cận, chẳng hạn như qubit Majorana, hứa hẹn là qubit có khả năng chống nhiễu nội tại, khá gần nhưng chưa đạt được tiêu chí cho nền tảng Cấp 1. Tất cả các phương pháp kỹ thuật không dựa trên công có thể được coi là Cấp 1.

Cấp 2: Các nền tảng thể hiện một bộ cổng phổ quát. Tất cả các phương pháp ở cấp độ này đã chứng minh rằng chúng có thể chạy một ứng dụng lượng tử tùy ý – nếu hoặc khi chúng đạt đến quy mô và chất lượng tính toán cần thiết theo yêu cầu của thuật toán lượng tử. Điều này đạt được bằng cách chứng minh khả năng chạy các mạch lượng tử chung với một bộ cổng phổ quát. Một bộ cổng phổ quát điển hình bao gồm một thao tác đặt lại để khởi tạo các qubit, một tập hợp các thao tác qubit đơn và một thao tác hai qubit vướng víu và một thao tác đo lường.

Tuy nhiên, phần cứng cấp 2 thường hoạt động mà không cần sửa lỗi, được gọi là “thiết bị lượng tử mức nhiễu trung gian” hoặc thiết bị NISQ. Các lỗi xảy ra ở cấp độ này có thể được loại bỏ bằng cách sử dụng các kỹ thuật giảm thiểu lỗi nhưng không được loại bỏ hoàn toàn, do đó có khả năng ảnh hưởng đến chất lượng tính toán và khả năng sử dụng của nó trong các tình huống thực tế.

Cấp 3: Các nền tảng thể hiện khả năng sửa lỗi lượng tử và/hoặc giảm thiểu lỗi. Các yêu cầu kỹ thuật để xử lý lỗi trong các hệ thống lượng tử là một thách thức

đối với tất cả các hệ thống phần cứng vật lý. Đạt được khả năng sửa lỗi lượng tử (QEC) có thể mở rộng được coi là mục tiêu cuối cùng cho khả năng chung của các hệ thống máy tính lượng tử. Nếu chất lượng của qubit đủ cao, sao cho việc thực thi thuật toán sửa lỗi sẽ giải quyết được nhiều lỗi hơn số lỗi mà nó tạo ra, thì việc nhân rộng thành số lượng qubit lớn hơn sẽ giảm tỷ lệ lỗi. Nói cách khác, chìa khóa của QEC có khả năng chịu lỗi có thể mở rộng sẽ là nhiều qubit chất lượng cao trong kiến trúc hệ thống có thể mở rộng. Đây là một lĩnh vực nghiên cứu đang diễn ra, nơi đã đạt được những minh chứng ban đầu về các khái niệm QEC trên một vài nền tảng phần cứng.

Các con đường khám phá khác bao gồm các kỹ thuật triệt tiêu và giảm thiểu lỗi, đòi hỏi các phương pháp để tìm hiểu tiếng ồn vật lý thông qua việc chạy một tập hợp các mạch lượng tử lớn hơn hoặc thay đổi các mạch lượng tử để giảm thiểu tác động của một số dạng tiếng ồn nhất định. Những kỹ thuật này mở rộng những gì có thể có trên các hệ lượng tử quy mô trung bình ồn ào nhưng có khả năng phải trả giá bằng thời gian chạy mạch tổng thể và độ ổn định của hệ thống.

Cấp 4: Các nền tảng thể hiện các đặc tính gắn kết, tốc độ và chất lượng trên quy mô lớn. Chưa có nền tảng phần cứng nào đạt đến cấp độ này, vì nó sẽ biểu thị việc thể hiện lợi thế lượng tử trên một ứng dụng trong thế giới thực. Tuy nhiên, có những lộ trình được xác định (mặc dù được cập nhật liên tục) cho một số nền tảng, có nghĩa là việc máy tính lượng tử sẽ đạt được điều đó chỉ là vấn đề thời gian.

3.3. Máy tính lượng tử nào tốt nhất?

So sánh các phương pháp tiếp cận khác nhau về hiệu suất không đơn giản như người ta nghĩ. Tương tự như việc chọn một PC mới, người ta có thể ưu tiên tốc độ hơn bộ nhớ, độ tin cậy tính toán hơn các tính năng đặc biệt hoặc mức tiêu thụ điện năng. Về cơ bản hơn, các nền tảng phần cứng khác nhau có thể theo dõi hợp pháp các số liệu cụ thể về tiến độ hoặc hiệu suất dựa trên các mục tiêu kiến trúc đang được theo đuổi.

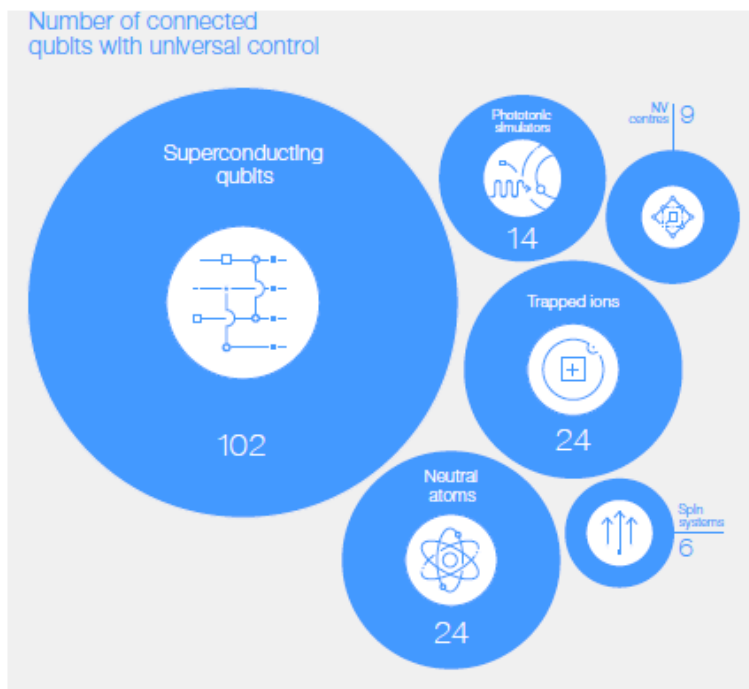
Kể từ năm 2022, ba thách thức chính cần được giải quyết để xây dựng một máy tính thể hiện lợi thế lượng tử với các ứng dụng trong thế giới thực: quy mô, tốc độ và chất lượng, tương ứng với các lĩnh vực mà hệ thống có thể được đánh giá. Do đó, các số liệu hiệu suất có thể được nhóm lại một cách đại khái thành phân tích các thành phần và điểm chuẩn riêng lẻ để đưa ra phân tích tổng thể về toàn bộ hệ thống.

Quy mô

Các bài báo thường trình bày số lượng qubit như một thước đo để đánh giá những thành tựu mới trong phần cứng lượng tử. Số lượng qubit giải thích khả năng mở rộng của phần cứng, nhưng nó không giải thích bất cứ điều gì về chất lượng hoặc tốc độ của qubit và hoạt động lượng tử. Các con số có thể dao động đáng kể tùy thuộc vào qubit nào được tính đến. Chẳng hạn, nền tảng nguyên tử trung tính đã thể hiện 289 qubit kết hợp, thành tựu lớn nhất cho đến nay; tuy nhiên, không phải tất cả chúng đều vướng víu nhau (bị rối) hoặc thậm chí được kết nối hoàn toàn (ở đây con số giảm xuống còn 24 qubit) và do đó việc sử dụng chúng có thể bị hạn chế.

Một trong những cách cân bằng để xem xét quy mô thuần túy của các nền tảng (xem Hình 3) là đếm số lượng qubit được kết nối lớn nhất với khả năng kiểm soát phổ quát (để chuẩn bị một trạng thái lượng tử có ý nghĩa). Một lần nữa, mọi số liệu sẽ có cảnh báo trước và không nên được sử dụng làm thước đo độc lập để đánh giá nền tảng.

Hình 3. Số qubit kết nối với kiểm soát phổ quát



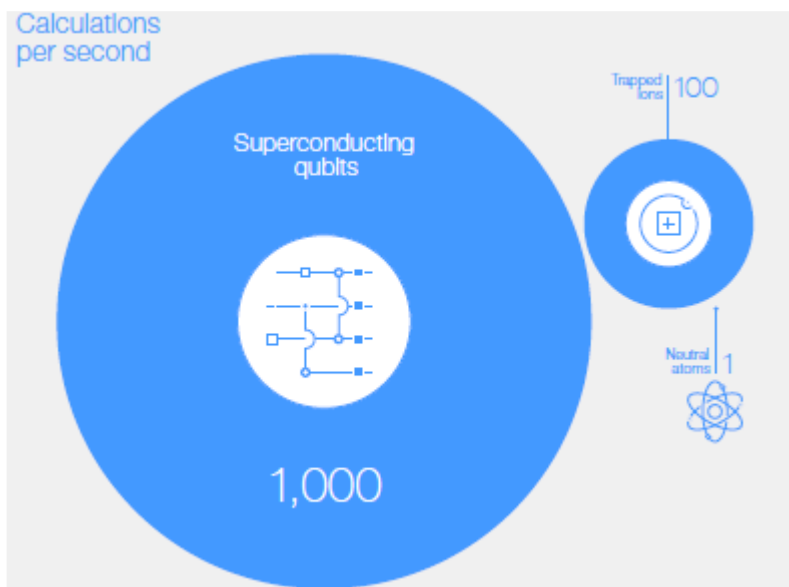
Chú thích: Số qubit kết nối với kiểm soát phổ quát: Qubit siêu dẫn - 102; Mô phỏng quang tử - 14; Nguyên tử trung tính - 24; Ion bị bẫy - 14; Các trung tâm có ý nghĩa - 9; Hệ thống spin - 6

Nguồn: World Economic Forum, Global Future Council on Quantum Computing

Tốc độ

Đối với máy tính lượng tử, tốc độ tính toán được đo bằng số lượng mạch (hoặc thuật toán) được thực hiện trong một thời gian nhất định. Do đó, “các phép tính trên giấy” cho QC không thể so sánh với tiêu chuẩn âm thanh tương tự của máy tính cổ điển. Hình 4 cho thấy thứ tự chung về độ lớn trong tốc độ thực hiện đối với các ion bị bẫy, hệ thống nguyên tử siêu dẫn và trung tính, có dữ liệu. Các tính toán mỗi giây càng lớn thì càng tốt. Đối với các tính toán thực tế, có khả năng cần phải chạy một số lượng lớn các mạch để cải thiện độ chính xác. IBM đã đề xuất hoạt động của lớp mạch trên giấy (CLOPS) như một thước đo có khả năng nghiêm ngặt hơn cho tốc độ đo điểm chuẩn. Cho đến nay, CLOPS chỉ được đo cho nhiều nền tảng qubit siêu dẫn.

Hình 4. So sánh tốc độ nền tảng điện toán lượng tử: số lượng mạch được thực hiện trong một thời gian nhất định



Chú thích: Phép tính trên giấy: Qubit siêu dẫn - 1.000; Ion bị bẫy 100; Nguyên tử trung tính - 1

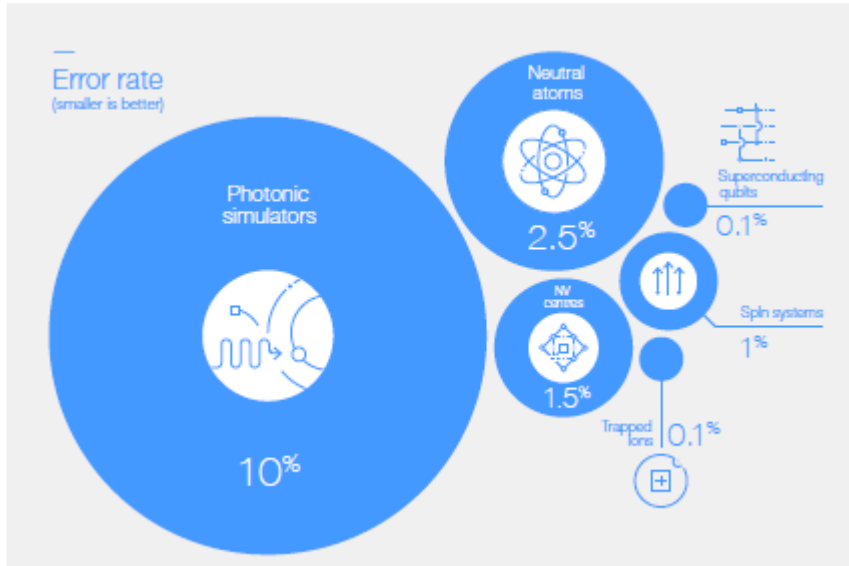
Nguồn: World Economic Forum, Global Future Council on Quantum Computing

Chất lượng

Chất lượng của tính toán lượng tử được đo bằng độ chính xác của kết quả khi chạy các mạch lượng tử – xem xét tỷ lệ lỗi. Các mạch lượng tử khác nhau có độ phức tạp khác nhau rõ ràng sẽ có hiệu suất lỗi khác nhau (xem Hình 5). Lưu ý rằng đối với các phép đo hiệu suất chung, có khối lượng lượng tử (QV), đưa ra một con số duy nhất dựa trên hiệu suất của hệ thống trên một tập hợp các mạch ngẫu nhiên.

Một biện pháp tổng thể như vậy cố gắng loại bỏ sự thiên vị phần cứng và xem xét một số tính năng của phần cứng cơ bản, từ cổng và lỗi đo lường, kết nối, nhiễu xuyên âm và tiếng ồn ngoài ý muốn khác để đưa ra ý tưởng tổng thể tốt hơn về tính hữu ích của máy tính lượng tử.

Hình 5. So sánh chất lượng nền tảng điện toán lượng tử: tỷ lệ lỗi cổng hai qubit



Chú thích: Tỷ lệ lỗi (càng thấp càng tốt): Mô phỏng quang tử - 10%; Nguyên tử trung tính - 2,5%; Các trung tâm có ý nghĩa - 1,5%; Hệ thống spin - 1%; Qubit siêu dẫn - 0,1%; Ion bị bẫy - 0,1%.

Source: World Economic Forum, Global Future Council on Quantum Computing

Hộp 4. Kiến thức cần thiết để hiểu rõ hơn những thách thức về chất lượng QC

Crosstalk: Xảy ra khi một thao tác trên một qubit vô tình ảnh hưởng đến các qubit khác. Crosstalk là một nguồn nhiễu chính trong các hệ thống NISQ và là một thách thức cơ bản đối với thiết kế phần cứng.

Khả năng kết nối: Mô tả các kết nối giữa các qubit trong kiến trúc lượng tử. Các kết nối này cho phép vướng víu giữa các qubit khác nhau.

Các cách khác để đánh giá hiệu suất của một hệ thống là cách tiếp cận “dựa trên ứng dụng”: Sự kết hợp giữa tốc độ và chất lượng, xem xét việc thực hiện một thuật toán cụ thể để theo dõi tiến trình hướng tới lợi thế lượng tử hữu ích. QED-C đã phát triển một bộ điểm chuẩn có thể đo lường tiến độ hướng tới hiệu suất của điện toán lượng tử trên bốn thuật toán và trường hợp sử dụng cụ thể. Khi các thuật toán mới được phát triển, chúng có thể được thêm vào bộ phần mềm.

3.4. Phần cứng nào cần thiết để chạy các ứng dụng?

Ngày nay, tất cả các ứng dụng lượng tử có thể được chia thành hai loại tùy

thuộc vào yêu cầu phần cứng máy tính lượng tử: khả năng chịu lỗi (yêu cầu phần cứng trên cấp 3) và ứng dụng ngắn hạn (có thể chạy trên phần cứng cấp 2 và 3).

1. Khả năng chịu lỗi: Các ứng dụng có lợi thế có thể chứng minh được so với các phương pháp tính toán hiện tại có khả năng sẽ yêu cầu một máy tính lượng tử phát triển hơn có khả năng sửa lỗi lượng tử.

2. Ngắn hạn: Các ứng dụng có thể chạy trên các máy tính lượng tử nhiều hiện nay, mặc dù vẫn chưa rõ liệu các ứng dụng này có mang lại bất kỳ lợi thế nào so với các ứng dụng tương tự chạy trên các máy tính cổ điển hay không. Kết nối những điều này với những gì có khả năng đạt được trong thời gian tới với những gì đã được chứng minh trên các máy tính lượng tử được sửa lỗi lớn là chủ đề của nghiên cứu và khám phá mạnh mẽ trong toàn ngành.

Cho đến nay, các ứng dụng lượng tử đang được sử dụng vẫn chưa thể hiện được lợi thế của chúng trong kịch bản thực tế và vẫn chưa được sử dụng hàng ngày để cung cấp năng lực cho các giải pháp người dùng cuối trên quy mô lớn. Tuy nhiên, các nhà nghiên cứu và doanh nghiệp đã thử nghiệm các ứng dụng lượng tử ngắn hạn để đánh giá tiềm năng của công nghệ – cho ngành của họ và để cung cấp thông tin cho các nỗ lực nghiên cứu sâu hơn về các thuật toán và ứng dụng mới.

Tóm lại, hiện chưa biết liệu chúng ta có thể đạt được lợi thế lượng tử trên một máy tính lượng tử không chịu lỗi hay không. Điều chắc chắn là các kỹ thuật giảm thiểu lỗi với máy tính lượng tử nhiều hiện tại cho phép chạy một số ít ứng dụng, đủ tốt để các tổ chức bắt đầu yêu cầu và chuẩn bị sẵn sàng, thay vì chờ phần cứng lượng tử cho mục đích chung (cấp 4) được phát triển đầy đủ.

IV. KHAI PHÁ TIỀM NĂNG CÔNG NGHỆ

Việc nhận ra lợi ích của điện toán lượng tử sẽ phụ thuộc vào các yếu tố hỗ trợ chính: sự sẵn sàng của lực lượng lao động, tiêu chuẩn hóa và chính sách

Tiến bộ trong một số lĩnh vực “tạo khả năng” là cần thiết để công nghệ điện toán lượng tử được áp dụng cho các vấn đề trong thế giới thực: 1) sự sẵn có và phát triển của lực lượng lao động, 2) các chính sách và quy định, và 3) tiêu chuẩn hóa.

- Sự thiếu hụt kỹ năng lượng tử là một hạn chế chính hiện nay.
- Các tiêu chuẩn đã được phát triển cho an ninh mạng trong lĩnh vực chính sách nhưng thiếu hiệu quả năng lượng và phát triển công nghệ có trách nhiệm.
- Tiêu chuẩn về khả năng tương tác và phép đo hiệu suất của máy tính lượng tử cần được quan tâm.

Sự sẵn có và phát triển của lực lượng

lao động: Tình trạng hiện tại của lực lượng lao động lượng tử bao gồm các công việc trong học viện, chính phủ cũng như các công ty nhà nước và tư nhân. Ngoài lực lượng lao động hiện tại, điều quan trọng cần lưu ý là trạng thái của nội dung hỗ trợ cho lực lượng lao động trong tương lai, bao gồm bằng đại học, khóa học trung học và nội dung giáo dục khác, chẳng hạn như sách, bài nói chuyện và khóa học trực tuyến. Hơn nữa, tình trạng hợp tác giữa ngành công nghiệp, chính phủ và học viện phải được xem xét. Nếu không có lực lượng lao động hiện tại, tiến bộ của công nghệ sẽ bị đình trệ và nếu không có lực lượng lao động tiềm năng, tiến bộ trong tương lai sẽ dừng lại. Do đó, sự sẵn có và phát triển của lực lượng lao động là rất quan trọng để công nghệ lượng tử phát triển và được ứng dụng.

Chính sách và quy định: Các chính sách thông báo cho lực lượng lao động và các bên liên quan khác về cách phát triển và áp dụng công nghệ. Tình trạng hiện tại của các chính sách và quy định phải được xem xét liên quan đến quyền truy cập vào phần cứng lượng tử, đạo đức của công nghệ và hợp tác quốc tế. Với tầm quan trọng chiến lược đã nêu, một loạt các biện pháp can thiệp chính sách đang phát triển ở nhiều nơi trên thế giới, bao gồm kiểm soát xuất khẩu, sàng lọc đầu tư và quan hệ đối tác chiến lược.

Tiêu chuẩn hóa: Tiêu chuẩn hóa cho phép cộng tác và giao tiếp tốt hơn trong ngành lượng tử. Tiêu chuẩn hóa có thể được thực hiện trên các khía cạnh khác nhau của ngành lượng tử, bao gồm các tiêu chuẩn trong phần cứng, công cụ, phần mềm và thuật toán lượng tử. Các tiêu chuẩn trong quá trình phát triển công nghệ cho phép phát triển nhanh hơn và định chuẩn tốt hơn cho các nhà nghiên cứu và kỹ sư. Tiêu

chuẩn hóa thuật ngữ trong ngành lượng tử sẽ dẫn đến một ngôn ngữ chung có thể cho phép giao tiếp tốt hơn trong ngành và với các bên liên quan bên ngoài. Cũng lưu ý rằng, tiêu chuẩn hóa nên được xử lý cẩn thận, vì nếu sử dụng không đúng cách, nó có thể cản trở đáng kể sự phát triển công nghệ.

4.1. Nguồn nhân lực sẵn có và phát triển/đào tạo

Từ góc độ toàn cầu, mọi châu lục đều đã có các công ty khởi nghiệp về công nghệ lượng tử và con số này tiếp tục tăng lên. Sự bùng nổ kinh doanh này sẽ đòi hỏi số lượng việc làm tăng theo cấp số nhân trong các công nghệ lượng tử trong hai thập kỷ tới.

Lĩnh vực công nghệ lượng tử cần có lao động lành nghề. Hơn một nửa số công ty lượng tử hiện đang tuyển dụng lao động. Các công ty này cố gắng để tìm những người có kỹ năng phù hợp cho các vị trí mới trong thị trường việc làm lượng tử mới nổi. Một số người gọi đây là “sự thiếu hụt kỹ năng lượng tử”. Thực tế là các công nghệ lượng tử vẫn còn ở giai đoạn sơ khai có nghĩa là hầu hết các công việc hiện tại đều mang tính kỹ thuật cao, đặc biệt là với các chuyên ngành nghiên cứu hàn lâm và tiên sĩ. Tuy nhiên, trong năm qua, các hồ sơ đa dạng hơn, chẳng hạn như vai trò tiếp thị và bán hàng yêu cầu kinh nghiệm làm việc trước đó, đã bắt đầu xuất hiện, cho thấy thị trường đang trưởng thành. Đồng thời, những người được đào tạo trong lĩnh vực công nghệ lượng tử đều có tính học thuật cao, tức là ở cấp độ tiên sĩ. Việc tìm kiếm những cá nhân đủ tiêu chuẩn có kinh nghiệm làm việc trước đây trong thế giới kinh doanh hoặc kỹ thuật trong một nhóm nhân tài vốn đã khan hiếm ngày càng khó khăn.

Quan trọng hơn, các nỗ lực cần phải đảm bảo để có đủ người có kỹ năng phù hợp để lấp đầy sự bùng nổ việc làm này trong 20 năm tới. Cách duy nhất để gđào tạo lực lượng lao động của tương lai là giới thiệu các khái niệm lượng tử ở cấp giáo dục tiểu học và trung học, đồng thời tạo ra nhiều cơ hội và chương trình dành riêng cho kỹ thuật lượng tử. Giáo dục lực lượng lao động tương lai là một quá trình lâu dài, nhưng đã có một số chương trình giáo dục đại học trên toàn thế giới tập trung vào kỹ thuật

Bảng 6. Các chương trình thạc sĩ trên thế giới tập trung vào công nghệ lượng tử:

Quốc gia	Số lượng	Quốc gia	Số lượng
Hoa Kỳ	11	Ấn Độ	1
Thụy Điển	1	Tây Ban Nha	5
Anh	4	Pháp	3
Ai-len	1	Thụy sĩ	1
Hà Lan	4	Italia	1
Đức	1	Hungary	1
CH Séc	2	Rumani	1
Canada	1		

Nguồn: QURECA, 2022

lượng tử. Lực lượng lao động lượng tử bao gồm nhiều loại lao động lành nghề, chẳng hạn như nhà vật lý lượng tử, nhà khoa học máy tính, kỹ sư, kỹ thuật viên và những người có nền tảng kinh doanh, bán hàng và chính sách.

Trên toàn cầu, nhiều cá nhân, cả sinh viên và chuyên gia, đang tìm kiếm các nguồn lực bổ sung để giúp họ xây dựng sự nghiệp trong lĩnh vực công nghệ lượng tử. Các công ty mới chuyên về lĩnh vực lượng tử tập trung vào việc hỗ trợ những người tìm kiếm việc làm trong công nghệ lượng tử, cung cấp cho họ hướng dẫn chuyên môn và đặt họ làm ứng viên lý tưởng trong các công ty lượng tử. Có rất nhiều cơ hội để xây dựng và duy trì lực lượng lao động sẵn sàng cho lượng tử, bao gồm quan hệ đối tác công-tư, hợp tác giữa công nghiệp và học viện, phát triển các chương trình giáo dục lượng tử quốc gia và giải quyết các vấn đề đa dạng khác nhau.

Ngoài ra còn có vấn đề nan giải là đưa các công nghệ lượng tử đến gần hơn với người dùng cuối tiềm năng và các lĩnh vực kinh doanh cụ thể chưa phải là một phần của hệ sinh thái lượng tử. May thay, có kịch bản rất hứa hẹn về tài nguyên giáo dục cho cả cá nhân và doanh nghiệp ở các cấp độ chuyên môn hóa khác nhau với nhiều sáng kiến giáo dục toàn cầu bao gồm các trò chơi, khóa học trực tuyến và sự kiện.

4.2. Chính sách và quy định

Giờ đây, vào năm 2022, là thời điểm lý tưởng để tạo ra các chính sách liên quan đến điện toán lượng tử, vì bản thân công nghệ này đang tiến gần đến điểm hấp dẫn khi ngày càng rõ ràng công nghệ sẽ có thể làm được gì và có thể dự kiến tác động gì đối với các lĩnh vực kinh tế khác nhau, trong khi các ứng dụng thực tế hiện đang còn hạn chế, do đó, mọi quy định sẽ vẫn là chủ động nhưng được thông báo. Bài học rút ra từ AI cho thấy rằng không bao giờ là quá sớm để xem xét và giải quyết bất kỳ vấn đề kinh tế xã hội nào do công nghệ mới đặt ra. Diễn đàn Kinh tế Thế giới đã xuất bản báo cáo Nguyên tắc Quản trị Điện toán Lượng tử¹ để giúp các nhà

¹ Các chủ đề xác định nhóm các nguyên tắc bao gồm:

1. *Khả năng biến đổi*: Khai thác các khả năng biến đổi của công nghệ này và các ứng dụng vì lợi ích của nhân loại đồng thời quản lý rủi ro một cách thích hợp.
2. *Truy cập vào cơ sở hạ tầng phần cứng*: Đảm bảo quyền truy cập rộng rãi vào phần cứng điện toán lượng tử.
3. *Đổi mới sáng tạo mở*: Khuyến khích hợp tác và môi trường tiền cạnh tranh, cho phép phát triển công nghệ nhanh hơn và hiện thực hóa các ứng dụng của nó.
4. *Nâng cao nhận thức*: Đảm bảo người dân nói chung và các bên liên quan đến điện toán lượng tử nhận thức được, tham gia và được cung cấp đầy đủ thông tin để có thể liên tục đối thoại và liên lạc có trách

hoạch định chính sách và chính phủ phát triển các chính sách và quy định về điện toán lượng tử.

Các loại chính sách và quy định cần thiết trong điện toán lượng tử bao gồm những chính sách và quy định liên quan đến lợi ích chung, trách nhiệm giải trình, tính toàn diện, tính công bằng, không ác ý, khả năng tiếp cận và tính minh bạch. Mỗi đe dọa của điện toán lượng tử đối với an ninh mạng cũng đòi hỏi các chính sách để giảm thiểu rủi ro này. Hơn nữa, trong kỷ nguyên NISQ đang phát triển nhanh chóng, bảo mật đảm nhận một vai trò mới và độc đáo với tư cách là người hỗ trợ. Vào tháng 1/2022 tại Hoa Kỳ, một sắc lệnh hành pháp đã được thông qua đã thu hút sự chú ý cao đối với hệ sinh thái an ninh mạng lượng tử, trình bày lộ trình chuyển đổi tất cả các cơ quan liên bang sang mật mã hậu lượng tử vào năm 2035. Ngay sau Sắc lệnh này là bản ghi nhớ của Tổng thống về an ninh lượng tử và phát triển hệ sinh thái lượng tử.

Nhiều quốc gia, bao gồm cả những quốc gia ở Châu Âu, Bắc Mỹ, Châu Á và Úc, đang ngày càng phát triển các quy định xung quanh các công nghệ mới nổi và quan trọng; nhiều quy định bao gồm các công nghệ lượng tử.

Các chính sách này bao gồm các vấn đề xung quanh kiểm soát xuất khẩu có thể sẽ được xác định trong một số sáng kiến quốc gia và hy vọng sẽ được điều chỉnh thông qua các hiệp định quốc tế. Rủi ro có thể nằm ở các quốc gia riêng lẻ hành động để kiểm soát các hạng mục phân cứng cụ thể liên quan đến việc xây dựng máy tính lượng tử vì cả lý do kinh tế và an ninh quốc gia. Với giá trị tiềm năng của điện toán lượng tử đối với lợi ích xã hội và khả năng cạnh tranh kinh tế, có thể nói rằng các thỏa thuận quốc tế rộng rãi là quy trình đạo đức và công bằng nhất để tiến lên phía trước. Hơn nữa, chuỗi cung ứng để xây dựng máy tính lượng tử có khả năng mang tính toàn cầu, giống như đối với hầu hết các ngành công nghệ cao. Mặc dù, với tình hình địa chính trị hiện tại, các khuyến khích chính trị có thể sẽ địa phương

nhiệm; các bên liên quan với sự giám sát và thẩm quyền sẽ có thể đưa ra quyết định sáng suốt về điện toán lượng tử trong các lĩnh vực tương ứng của họ.

5. *Xây dựng và phát triển lực lượng lao động*: Xây dựng và duy trì lực lượng lao động sẵn sàng lượng tử.
6. *An ninh mạng*: Đảm bảo quá trình chuyển đổi sang thế giới kỹ thuật số an toàn lượng tử.
7. *Quyền riêng tư*: Giảm thiểu các vi phạm tiềm ẩn về quyền riêng tư dữ liệu thông qua hành vi trộm cắp và xử lý bằng máy tính lượng tử.
8. *Tiêu chuẩn hóa*: Thúc đẩy các tiêu chuẩn và cơ chế lập lộ trình để thúc đẩy sự phát triển của công nghệ.
9. *Tính bền vững*: Phát triển một tương lai bền vững với và cho công nghệ điện toán lượng tử.

hóa chuỗi cung ứng và hướng tới chủ quyền công nghệ chiến lược thông qua các biện pháp như sàng lọc đầu tư trực tiếp nước ngoài (FDI).

Hiện tại chưa có chính sách nào liên quan đến điện toán lượng tử và việc sử dụng năng lượng của nó. Việc đưa ra các chính sách như vậy nên được xem xét để đảm bảo công nghệ có thể mở rộng trong tương lai mà không phải trả giá bằng chi phí năng lượng khổng lồ. Có thể rút ra bài học từ điện toán cổ điển, hiện đang gặp khó khăn trong việc khử cacbon và chịu trách nhiệm cho khoảng 4% lượng điện tiêu thụ toàn cầu và 1,4% lượng khí thải carbon toàn cầu. Việc thúc đẩy điện toán lượng tử xanh không nên chậm trễ nếu các lựa chọn công nghệ được thực hiện trong quá trình phát triển của nó.

4.3. Tiêu chuẩn hóa trong việc phát triển các thuật toán và đo lường hiệu suất

Khi điện toán lượng tử tiếp tục hoàn thiện, một số mức độ tiêu chuẩn hóa trên một số khía cạnh của quá trình phát triển có thể giúp cho khả năng giao tiếp, đo lường điểm chuẩn và khả năng tương thích tốt hơn giữa các sản phẩm khác nhau – đồng thời giảm thiểu rủi ro cản trở sự phát triển công nghệ. Ví dụ, các tiêu chuẩn và thỏa thuận hệ sinh thái có thể có hiệu lực trong các lĩnh vực sau:

- Thuật ngữ để giao tiếp tốt hơn
- Điểm chuẩn và số liệu để đánh giá các thuật toán lượng tử và phản ứng lượng tử
- Tiêu chuẩn phát triển phần mềm, thuật toán và ngôn ngữ lượng tử
- Hướng dẫn và thực tiễn tốt nhất
- Chứng nhận và giao thức thử nghiệm.

Nhiều tổ chức tiêu chuẩn quốc tế đã tham gia và bắt đầu thảo luận về chặng đường phía trước cho các tiêu chuẩn trong tương lai. Chúng bao gồm Lĩnh vực Tiêu chuẩn hóa Viễn thông ITU (ITU-T), Viện Kỹ sư Điện và Điện tử (IEEE), Ủy ban Châu Âu về Tiêu chuẩn hóa Kỹ thuật Điện tử (CEN-CENELEC), Tổ chức Tiêu chuẩn hóa Quốc tế (ISO), Tập đoàn Sáng kiến Mạng Giáo dục ở California (CENIC), ngoài những tổ chức khác.

Hiện nay, các hoạt động có giá trị nhất không xoay quanh các tiêu chuẩn chính thức mà là tích lũy các điểm chuẩn để mô tả hiệu suất tổng thể của phần cứng và tạo ra một bộ tiêu chuẩn có thể làm cơ sở để so sánh các phần cứng lượng tử khác nhau.

Các tiêu chuẩn đóng vai trò nền tảng trong việc phát triển thị trường, đặc biệt là đối với các công nghệ mới nổi như điện toán lượng tử. Bằng cách xác định thuật ngữ chung, chuyển giao giữa các công ty, giao diện giữa các thiết bị, các phương pháp hay nhất và điểm chuẩn, các tiêu chuẩn là chất keo gắn kết chuỗi cung ứng với nhau.

Tuy nhiên, các khu vực tiêu chuẩn hóa nên được lựa chọn cẩn thận. Do sự phổ biến và phát triển của nhiều nền tảng phần cứng cho điện toán lượng tử, còn quá sớm để phát triển các tiêu chuẩn cho nhiều khía cạnh của công nghệ này. Ví dụ, điện toán lượng tử quang tử sẽ cần các tiêu chuẩn kết nối quang học để kết nối nguồn photon với chip xử lý quang tử với máy dò photon. Vì có nhiều sơ đồ khác nhau đang được phát triển sử dụng các bước sóng ánh sáng khác nhau và các cách mã hóa thông tin khác nhau nên các kết nối tùy chỉnh cần thiết cho hệ thống của một tổ chức sẽ không nhất thiết phải phù hợp với các phương pháp kỹ thuật khác. Vấn đề này không chỉ giới hạn ở điện toán quang tử, vì các loại ion khác nhau là trung tâm của các nền tảng điện toán ion bị bẫy khác nhau, các thành phần mà chúng kết nối sẽ cần phải hoạt động ở các bước sóng khác nhau, khiến cho các tiêu chuẩn trở nên quá sớm.

Một lĩnh vực quan trọng đáng được tập trung là phát triển các điểm chuẩn hiệu suất và ứng dụng cho phép so sánh và đánh giá các tác động công nghệ khác nhau của điện toán lượng tử, sự khác biệt về hiệu suất cơ bản, thay đổi kết nối và thay đổi cuối cùng trong mã sửa lỗi.

KẾT LUẬN

Các chính phủ, doanh nghiệp và tổ chức nghiên cứu có tiềm năng thúc đẩy phát triển công nghệ vì lợi ích chung – nếu họ hợp tác cùng nhau. Nhiều tiến bộ đã đạt được trong thời kỳ đại dịch, đặc biệt là trong năm qua, cả về phát triển công nghệ và khả năng tiếp cận thông qua điện toán đám mây, điều này đã thúc đẩy các doanh nghiệp thử nghiệm ứng dụng trong thế giới thực sớm.

Trong khi chưa biết phương pháp công nghệ nào hoặc cách tiếp cận nào để xây dựng máy tính lượng tử ở quy mô lớn sẽ chiếm ưu thế và khi nào máy tính lượng tử sẵn sàng, nhưng không còn nghi ngờ gì về việc xuất hiện của chúng. Ngoài tài trợ công, đầu tư tư nhân đã vượt qua quy mô, đánh dấu sự chuyển đổi của công nghệ lượng tử từ phòng thí nghiệm sang thế giới thực.

Một số lực lượng mạnh mẽ đang thúc đẩy các chính phủ và doanh nghiệp di chuyển:

Thứ nhất, khi máy tính lượng tử đạt đến mức mà chúng có thể mang lại lợi thế so với máy tính cổ điển, chúng sẽ có khả năng bị thiếu hụt. Với tiềm năng đột phá của các ứng dụng lượng tử trong một số ngành nhất định, không ai muốn thấy mình trong tình huống mà đối thủ cạnh tranh của họ đột nhiên có thể tổng hợp các hợp chất mới cho các loại thuốc tiềm năng trong vài ngày chứ không phải vài năm. Đầu tư hoặc hợp tác với một công ty phát triển máy tính lượng tử về cơ bản là mua quyền truy cập ưu tiên vào công nghệ khi nó sẵn sàng – hoặc quyền bán quyền truy cập ưu tiên, nếu bạn là nhà đầu tư.

Thứ hai, các nhà phát triển điện toán lượng tử cần các đối tác kinh doanh để hướng dẫn sự phát triển của công nghệ. Họ là những chuyên gia về vật lý lượng tử nhưng không phải trong các ngành công nghiệp hiện đại. Đây là nơi các công ty hướng tới, tiếp cận sớm và có cơ hội định lượng tác động tiềm năng của công nghệ đối với ngành của họ, tìm ra các trường hợp sử dụng hiệu quả nhất và đồng thời giúp đẩy nhanh sự hiểu biết và phát triển công nghệ. Với quyền truy cập đám mây vào máy tính lượng tử, các nhà cung cấp công nghệ có thể tìm kiếm đối tác bên ngoài vị trí địa lý của họ.

Thứ ba, nếu triển vọng của công nghệ không thuyết phục được các tổ chức hoặc họ đến từ các ngành có thể ít bị ảnh hưởng hơn và không được đề cập rõ ràng trong phần “Các ngành chính cho các ứng dụng có tác động lớn”, thì họ vẫn có thể phải lo ngại về an ninh mạng. Việc hiểu mức độ tiếp xúc với cuộc tấn công máy tính lượng tử

tử tiềm ẩn và xác định các bước cần thiết để bảo vệ tổ chức của họ là điều hoàn toàn có thể thực hiện được vào năm 2022.

Các chính phủ và doanh nghiệp cần có thêm hành động để duy trì đà phát triển:

Sự hợp tác công tư và tiền cạnh tranh sẽ cần phải phát triển mạnh hơn để mở rộng quy mô các chương trình nghiên cứu và phát triển lực lượng lao động hiện có, đồng thời tìm sự đồng thuận về các tiêu chuẩn hoạt động và ngôn ngữ chung, kết hợp với các chính sách và quy định mới để đảm bảo sự phát triển và sử dụng công nghệ có đạo đức và đáng tin cậy. Thông tin chi tiết hơn về các hành động được khuyến nghị cho các bên liên quan nhằm thúc đẩy sự phát triển có trách nhiệm của công nghệ được đề cập trong tài liệu Nguyên tắc quản trị điện toán lượng tử. Nhiều doanh nghiệp cần hiểu ý nghĩa của điện toán lượng tử đối với ngành của họ và xây dựng chiến lược điện toán lượng tử. Theo nghiên cứu được thực hiện vào tháng 3 năm 2022, chỉ có 24% công ty ở Vương quốc Anh – quốc gia sở tại của một trong những hệ sinh thái lượng tử sôi động nhất – đã thành lập một nhóm để khám phá tiềm năng của điện toán lượng tử. Tuy nhiên, 44% đang có kế hoạch thực hiện điều này trong thời gian tới, nghĩa là hiểu được tác động của điện toán lượng tử đối với các tổ chức đang trở thành một yếu tố chính trong công nghệ và chiến lược kinh doanh.

Cuối cùng, tổng luận này sẽ đạt được tác động mong muốn nếu độc giả cảm thấy hứng thú tìm hiểu về cách thức hoạt động của máy tính lượng tử và cách chúng mang lại lợi ích cho chúng trong cuộc sống hàng ngày. Bản năng này có thể chứng minh là vô giá, giúp giảm bớt sự e ngại và bắt đầu đưa ra những lựa chọn có học thức trong quan hệ đối tác, phát triển công nghệ và các trường hợp sử dụng. Với việc ngày càng có nhiều người áp dụng khả năng sáng tạo và cộng tác vào công nghệ lượng tử, nhân loại có thể bước vào thời kỳ hoàng kim của sự đổi mới, tăng trưởng và thịnh vượng sớm hơn – cũng như có cơ hội chống lại biến đổi khí hậu bằng quá trình khử cacbon bằng năng lượng lượng tử và các giải pháp khác. Chúng ta còn có thể mong muốn điều gì khác?

Biên soạn: Trung tâm Thông tin và Thống kê KH&CN

Tài liệu tham khảo

1. McKinsey & Company, The Quantum Technology Monitor, 2022, <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/quantum%20computing%20funding%20remains%20strong%20but%20talent%20gap%20raises%20concern/quantum-technology-monitor.pdf>.
2. National Institute of Standards and Technology, NIST Announces First Four Quantum-Resistant Cryptographic Algorithms [Press release], 5 July 2022, <https://www.nist.gov/news-events/news/2022/07/nist-announces-first-four-quantumresistant-cryptographic-algorithms>.
3. “National Quantum Initiative Act”, US Congress, 26 June 2018, <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/housebill/6227/text>.
4. “The Rise of Quantum Computing” McKinsey, 14 December 2021, <https://www.mckinsey.com/featured-insights/the-rise-of-quantum-computing>.
5. Budde, Florian and Daniel Volz, “The next big thing? Quantum computing’s potential impact on chemicals”, McKinsey & Company, 12 July 2019, <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/the-next-big-thing-quantumcomputings- potential-impact-on-chemicals>.
6. Venegas-Gomez, Araceli, “The Quantum Ecosystem and Its Future Workforce”, Phonotics Views, vol. 17, no. 6, pp. 34-38, January 2021, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/phvs.202000044>.
7. World Economic Forum, State of Quantum Computing: Building a Quantum Economy , 9/2022. https://www3.weforum.org/docs/WEF_State_of_Quantum_Computing_2022.pdf
8. World Economic Forum, Quantum Computing Governance Principles, 1/ 2022, <https://www.weforum.org/reports/quantum-computing-governance-principles/>.