

MÁY TÍNH TỪ ĐIỆN TỬ ĐẾN LƯỢNG TỬ

ĐỊNH LUẬT MOORE VÀ GIỚI HẠN CỦA MÁY TÍNH ĐIỆN TỬ

Máy tính điện tử đã trải qua lịch sử phát triển hơn nửa thế kỷ, từ chức năng ban đầu là thực hiện các tính toán số học, thì ngày nay với chức năng xử lý, lưu trữ và truyền tin, máy tính đã xâm nhập vào tất cả mọi lĩnh vực hoạt động của con người, trở thành trụ cột của công nghệ thông tin và đã làm thay đổi căn bản bộ mặt của thế giới hiện đại, bao gồm cả thói quen sinh hoạt và lề lối làm việc của con người. Yếu tố khiến máy tính có những bước tiến như vậy là sự gia tăng tốc độ tính toán của nó theo quy luật hàm số mũ. Điều này đã được Gordon Moore - Chủ tịch Hội đồng các giám đốc của tập đoàn Intel - phát hiện vào năm 1965 và phát biểu thành định luật Moore. Theo định luật này thì công suất tính toán của máy tính cứ mỗi 24 tháng tăng lên hai lần. Sự gia tăng tốc độ tính toán của máy tính là kết quả gia tăng mật độ các bóng bán dẫn trên mỗi đơn vị diện tích của bản mạch.

Tốc độ máy tính gia tăng đồng nghĩa với gia tăng mật độ bóng bán dẫn trong một đơn vị diện tích. Cứ 24 tháng tốc độ máy tính tăng lên hai lần có nghĩa là các nhà sản xuất phải giảm kích thước bán dẫn hai lần trong thời gian này. Nhưng việc giảm kích thước bán dẫn cũng có giới hạn do sự chi phối của các định luật vật lý. Thứ nhất, khi bán dẫn đạt kích thước nguyên tử, sẽ xảy ra các tương tác lượng tử, làm mất khả năng đo được chuyển động của điện tử và hệ quả là quá trình xử lý thông tin cũng mất hiệu lực. Thứ hai là hiệu ứng tỏa nhiệt: mật độ bán dẫn càng cao thì nhiệt tỏa ra càng nhiều và khi nhiệt độ cao đến một giới hạn sẽ ảnh hưởng nghiêm trọng đến tính dẫn điện của bán dẫn.

Trong cuộc đua tốc độ máy tính, một số hãng công nghệ đang cố gắng giảm kích thước bán dẫn. Kích thước nhỏ nhất được biết hiện nay là 22 nanomet trong bộ vi xử lý Intel Haswell. Nhưng dù cố gắng đến đâu thì các định luật của tự nhiên cũng sẽ kết thúc hiệu lực của định luật Moore. Các nhà khoa học

dự đoán định luật Moore sẽ chỉ còn hiệu lực trong từ 3 đến 5 năm nữa, sau đó để đạt được đột phá về tốc độ, công nghệ máy tính phải chuyển sang công nghệ mới dựa trên các hệ lượng tử. Máy tính dựa trên các hệ này được gọi là máy tính lượng tử. Một câu hỏi đặt ra: con người có thật sự cần đến máy tính lượng tử có tốc độ lớn hơn hàng ngàn lần so với các siêu máy tính hiện có hay đó đơn thuần chỉ là sự cảm dỗ đối với các nhà khoa học và công nghệ?

Máy tính thông thường, kể cả các siêu máy tính với tốc độ tính toán hàng nghìn tỉ phép tính/giây hiện vẫn bất lực trước nhiều bài toán đặt ra của khoa học - công nghệ hiện đại, đặc biệt là các vấn đề mô phỏng các hệ vi mô có ý nghĩa quyết định trong việc tạo ra các loại vật liệu mới.

Xét ví dụ bài toán mô hình hóa các tính chất lượng tử của nguyên tử sắt. Để giải quyết bài toán này đòi hỏi phải xem xét chuyển động của 26 điện tích trong không gian ba chiều, dẫn đến yêu cầu giải phương trình Schrodinger trong không gian có số chiều bằng $26 \times 3 = 78$ (chưa tính đến spin của các điện tích - yếu tố làm cho việc nghiên cứu chuyển động phức tạp hơn nhiều). Nếu chỉ mới sử dụng lược đồ sai phân khá thô, trong đó chia mỗi tọa độ thành 10 phần thì cũng đã đòi hỏi 10^{78} nốt để thực hiện lược đồ sai phân tương ứng. Có nghĩa việc giải bài toán đơn giản trên cũng đã vượt xa khả năng của tất cả các loại máy tính hiện có.

Một khi máy tính lượng tử ra đời sẽ tạo ra các đột phá trong hàng loạt lĩnh vực như trí tuệ nhân tạo, mật mã, dự báo thời tiết, chế tạo vật liệu mới, mô hình hóa phân tử, mô hình hóa thị trường tài chính....

CƠ SỞ VẬT LÝ CỦA MÁY TÍNH LƯỢNG TỬ

Vào những năm cuối thế kỷ 19 đầu thế kỷ 20, trong vật lý học đã xuất hiện những hiện tượng không thể giải thích được trong khuôn khổ của vật lý cổ điển như: hiện tượng bức xạ vật đen, hiện tượng quang điện và sụp đổ mô hình quỹ đạo hành

ting của nguyên tử. Những cố gắng không mệt mỏi của các nhà vật lý trong việc giải thích các hiện tượng trên đã dẫn đến sự ra đời của môn vật lý lượng tử, là ngành khoa học nghiên cứu thế giới vật chất ở cấp độ vi mô: các hạt vật chất có kích thước nguyên tử và hạt nguyên tử như photon, electron và các hạt cơ bản khác.

Vật lý lượng tử không chỉ là chìa khóa mở ra các bí mật của thế giới vi mô mà còn là cơ sở cho những đột phá công nghệ mới, đặc biệt là công nghệ thông tin lượng tử, bao gồm máy tính lượng tử, mật mã lượng tử và truyền thông lượng tử. Máy tính lượng tử nếu chế tạo thành công, chắc chắn sẽ là đột phá công nghệ lớn nhất của thế kỷ 21. Và cũng tương tự như những gì kỷ nguyên máy tính điện tử đã mang đến trong những thập kỷ qua, máy tính lượng tử cũng sẽ đưa lại những thay đổi và cơ hội chưa từng có cho con người.

Ý tưởng sử dụng các hạt vi mô để chế tạo máy tính lượng tử đã được nhà vật lý người Mỹ - Friedman đưa ra vào năm 1985 và trước đó hai năm bởi nhà toán học người Nga - Manin. Cơ sở để hai ông đề xuất ý tưởng này là các định luật chi phối thế giới vi mô bao gồm nguyên lý chồng chập trạng thái (superposition of states), tính rối lượng tử (Entanglement) của các hạt vi mô và sự sụp đổ của hàm sóng (Collapse of wave function).

Tiền đề xuyên suốt lý thuyết lượng tử là tính chất lưỡng tính của vật chất ở cấp độ vi mô, tức là hạt vi mô vừa có tính chất sóng vừa có tính chất hạt. Tính chất này đã làm thay đổi bức tranh cổ điển về thế giới vật chất, nhiều khái niệm đã không còn mang ý nghĩa như trong vật lý cổ điển. Chẳng hạn như khái niệm quỹ đạo của hạt vật chất: nếu như tại một thời điểm hạt vi mô luôn ở một vị trí xác định, thì vào cùng một thời điểm hạt vi mô có thể có mặt ở khắp mọi nơi, tức là cùng một lúc có mặt ở tất cả các trạng thái có thể của nó. Đặc tính này được gọi là nguyên lý chồng chập trạng thái và là cơ sở đầu tiên để xây dựng máy tính lượng tử.

Máy tính lượng tử được cấu tạo từ các hạt lượng tử hai trạng thái, ví dụ photon với trạng thái phân cực ngang và phân cực dọc, hạt nhân nguyên tử với spin lên và spin xuống (spin up và spin down), electron với spin lên và spin xuống,

nguyên tử với hai mức năng lượng (mức cơ bản và mức kích thích) hay mạch siêu dẫn với trạng thái lên và xuống. Bình thường khi ở trạng thái cô lập, tức không có tác động nào từ bên ngoài, các hạt này ở trạng thái chồng chập của hai trạng thái trên: hạt photon vừa phân cực ngang vừa phân cực dọc, electron vừa quay sang trái vừa quay sang phải.

Nếu máy tính điện tử sử dụng bit là đơn vị thông tin, thì máy tính lượng tử sử dụng hạt hai trạng thái làm đơn vị thông tin được gọi là qubit. Trong điều kiện cô lập các hạt lượng tử đồng thời ở cả hai trạng thái, do đó nếu máy tính được chế tạo từ N hạt (gọi là máy tính N-qubit) thì nó đồng thời tồn tại ở 2^N trạng thái, tức có thể thực hiện một lúc 2^N phép tính. Hiệu ứng này được gọi là tính song song lượng tử, nó đảm bảo cho sự gia tăng tốc độ tính toán theo hàm mũ của máy tính lượng tử.

Rối lượng tử là hiệu ứng lượng tử, trong đó trạng thái lượng tử của hai hay nhiều hạt có liên hệ với nhau, sao cho nếu tác động lên một hạt thì lập tức hạt kia cũng chịu ảnh hưởng, tác động đó là tức thì và không phụ thuộc vào khoảng cách. Như vậy, nếu máy tính lượng tử được chế tạo từ các hạt rối, thì các giá trị qubit không chỉ biến thiên liên tục thông qua chồng chập lượng tử, mà còn ở chỗ cùng một lúc nhiều qubit có thể tồn tại và liên hệ với nhau qua hiện tượng rối lượng tử, tức cho phép thể hiện các chồng chập cùng một lúc. Do đó, rối lượng tử được coi là tài nguyên cơ bản của công nghệ tính toán lượng tử, bởi nếu thiếu nó tính toán lượng tử không còn có nghĩa.

Trong vật lý học việc xác định trạng thái cụ thể của hệ vật lý được gọi là phép đo hay phép quan sát. Tương tự, xác định trạng thái lượng tử gọi là phép đo hay phép quan sát lượng tử. Nếu như có thể đo hệ vật lý vi mô với độ chính xác tùy ý, thì với hạt lượng tử điều này không còn đúng. Thuyết lượng tử khẳng định: không thể xác định chính xác trạng thái lượng tử, tức là bất kỳ một can thiệp từ bên ngoài đều làm thay đổi trạng thái của hệ lượng tử.

Cụ thể, theo thuyết lượng tử, mỗi hạt lượng tử có một số trạng thái riêng (ví dụ electron với hai trạng thái riêng là spin up và spin down). Đó là các trạng thái có thể quan sát được với một xác suất nhất định. Bình thường khi không có quan sát, hạt ở trạng thái chồng chập các trạng thái riêng và được

mô tả bởi hàm sóng là nghiệm của phương trình Schrodinger. Khác với hạt cổ điển, hàm sóng không xác định trạng thái, mà chỉ cho ta biết thông tin xác suất về trạng thái của hạt. Khi có quan sát, tức có tương tác giữa hạt với thế giới vĩ mô, các trạng thái chồng chập biến mất và chuyển vào một trong các trạng thái riêng. Hiện tượng này được gọi là suy sụp hàm sóng và đó là một trong những thách thức lớn nhất trong việc chế tạo máy tính lượng tử.

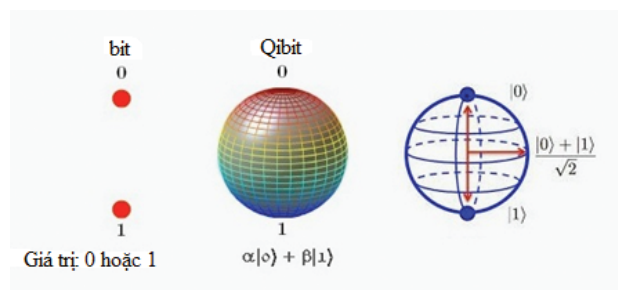
ĐƠN VỊ THÔNG TIN CỦA MÁY TÍNH LƯỢNG TỬ

Sự khác nhau cơ bản giữa máy tính điện tử và máy tính lượng tử là ở đơn vị biểu diễn thông tin. Đơn vị biểu diễn thông tin của máy tính điện tử là bit, được ký hiệu là 0 và 1. Đó là ký hiệu của một hệ vật lí nhất định, ví dụ như tụ điện với trạng thái tích điện (bit 1), không tích điện (bit 0); tranzito với trạng thái thông điện (bit 1), không thông điện (bit 0),....

Đơn vị thông tin của máy tính lượng tử là qubit. Đó là ký hiệu trạng thái của hạt lượng tử hai trạng thái. Hai trạng thái riêng của hạt được ký hiệu là $|0\rangle$ và $|1\rangle$ (ví dụ $|0\rangle$ là spin up và $|1\rangle$ là spin down). Khi ở trạng thái cô lập thì hạt ở trạng thái chồng chập: $|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, trong đó α, β là các số phức thỏa mãn điều kiện $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Mỗi trạng thái chồng chập là một qubit, do đó ứng với hai bit cổ điển $|0\rangle$ và $|1\rangle$ sẽ có vô số qubit. Bằng cách chuyển sang tọa độ cầu trong không gian ba chiều có thể biểu diễn qubit dưới dạng:

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle$$

Công thức trên cho thấy các qubit tạo thành một mặt cầu đơn vị trong không gian ba chiều, gọi



Hình 1: Biểu diễn bit và qubit

là quả cầu Bloch, trong đó các bit cổ điển $|0\rangle$ và $|1\rangle$ là hai điểm cực Bắc và cực Nam (Hình 1).

Việc qubit lấp đầy một mặt cầu dẫn đến ý nghĩ là có thể gói một lượng vô hạn thông tin cổ điển trong một bit lượng tử, nhưng thực tế không xảy ra như vậy. Bởi khi đọc thông tin từ máy tính lượng tử ta đã thực hiện hành vi đo lường tử, do đó xảy ra hiện tượng suy sụp hàm sóng và trạng thái chồng chập lập tức biến thành trạng thái cổ điển, tức các qubit biến thành bit và ta cũng chỉ thu được một trong hai bit cổ điển.

NHỮNG THÀNH TỰU TRONG CHẾ TẠO MÁY TÍNH LƯỢNG TỬ

Mẫu máy tính lượng tử đầu tiên là máy 2-qubit, được chế tạo vào năm 1996 bởi hai tác giả là N.Gershenfeld và I.L. Cubinec. Các qubit được hiện thực bởi spin hạt nhân của các nguyên tử thuộc phân tử chloroform, như vậy máy tính lượng tử ở đây đơn giản là một phân tử Chloroform. Tiếp đó, một số mẫu máy 3, 5, 7, 15 qubit được giới thiệu và các mẫu này chủ yếu được thực hiện tại trung tâm nghiên cứu Almaden của hãng IBM - trong các năm 1999, 2000, 2002, 2005.

Đáng chú ý là mẫu máy có tên Orion của Hãng D-Wave systems of Vancouver của Canada. Orion có 16-qubit, được chế tạo dựa trên vật liệu siêu dẫn có thể thực hiện một số phép tính số học đơn giản. Linh kiện của máy này dựa trên mạch được chế tạo bởi hai loại bán dẫn là Al và Nb. Dòng điện trong các qubit của Orion có thể truyền vòng quanh cuộn dây theo hoặc ngược chiều kim đồng hồ, hoặc cả hai hướng tương ứng với bit 0, bit 1 hoặc chồng chập các giá trị đó. Để thực hiện các tính toán, Orion được làm lạnh xuống nhiệt độ 0,01K nhằm hạn chế các nhiễu nhiệt có thể phá hủy trạng thái chồng chập và vướng víu lượng tử. Sau Orion, hãng này tiếp tục cho ra các mẫu khác: bộ xử lí 128 qubit D-Wave One vào tháng 5/2011, D-Wave 2X vào 2016 và phiên bản thương mại D-Wave 2000Q vào 2017 với số lượng qubit nhiều gấp đôi so với D-Wave 2X. Sản phẩm của Hãng D-Wave systems of Vancouver đã được Cơ quan hàng không vũ trụ

Hoa kỳ (NASA), Google và Intel mua để phục vụ cho mục tiêu nghiên cứu.

Năm 2017, ba hãng công nghệ lớn: Google, Intel, IBM đều giới thiệu các mẫu máy 50-qubit; tháng 3/2018, Google cho ra đời mẫu máy 72-qubit. Hai quốc gia là Trung Quốc và Nga cũng đang ráo riết tham gia vào cuộc đua này với các khoản đầu tư lớn, đặc biệt là Trung Quốc sẽ chi hơn 10 tỉ USD cho nghiên cứu công nghệ tính toán lượng tử trong những năm sắp tới. Vào đầu năm 2018, hai nước này đã tuyên bố chế tạo thành công các mẫu máy 50-qubit và 51-qubit.

Trong việc chế tạo máy tính lượng tử, nhiều công nghệ đã được đề xuất, nhưng triển vọng hơn cả là những mô hình máy tính lượng tử được chế tạo từ: chất khí (các qubit là những ion trong chất khí bị bẫy bởi hiệu ứng làm lạnh bằng laser); chất lỏng (sử dụng spin của hạt nhân các phân tử làm qubit); chất rắn - bán dẫn (qubit là các trạng thái spin của điện tử (electron)); từ cặp chắm lượng tử (dựa trên công nghệ Si, Ge và GaAs sử dụng tính chất spin của các điện tử trong cặp chắm lượng tử).

NHỮNG KHÓ KHĂN TRONG CHẾ TẠO VÀ TRIỂN VỌNG CỦA MÁY TÍNH LƯỢNG TỬ

Tính đến nay, những mẫu máy tính lượng tử đã được giới thiệu mới chỉ được xem là máy mô phỏng (Simulator) mà chưa phải là máy tính lượng tử thực thụ. Tức là các máy tính có khả năng giải được một phổ rộng các bài toán mà máy tính thông thường, kể cả các siêu máy tính hiện có cũng không có khả năng giải.

Các mẫu máy được D-Wave systems of Vancouver giới thiệu cũng chỉ giải được các bài toán rất hẹp, thậm chí chỉ giới hạn ở bài toán tìm kiếm tối ưu. Điều này khiến nhiều chuyên gia đặt vấn đề liệu các mẫu máy của hãng này có phải là máy tính lượng tử hay không. Tương tự các mẫu máy có số lượng 50 qubit của IBM, Google..., thời gian tính toán chỉ mới kéo dài trong 90 microgiây (tức thời gian duy trì tính rối của các qubit), quá ngắn để có thể giải các bài toán phức tạp kiểu mô hình hóa các hệ thống hóa học mà người ta đang đặt hy vọng vào các máy tính lượng tử. Bên cạnh đó là môi trường vận hành khắt

khe mà chúng đòi hỏi, chẳng hạn chip lượng tử gần đây của Intel vận hành ở nhiệt độ 0-tuyệt đối.

Theo đánh giá của các chuyên gia, mặc dù với sự ra đời các mẫu máy 50-qubit của IBM hay 72-qubit của Google báo hiệu thời điểm vượt trội lượng tử đang đến gần, nhưng để đi đến máy tính lượng tử thực thụ thì cần phải giải quyết hàng loạt khó khăn nữa.

GS. Lukin, tác giả mẫu máy 51-qubit vừa được giới thiệu vào đầu năm 2018 cho biết, số lượng qubit trong một máy tính chỉ mới là tiêu chuẩn đầu tiên, đơn giản nhất của máy tính lượng tử. Theo ông máy tính lượng tử muốn đạt công suất vượt trội cần có ba yếu tố chính: số lượng qubit phải đủ lớn, thời gian duy trì tính rối các qubit đủ lâu, mức độ lặp trình được trên máy cao và có khả năng sửa lỗi. Yếu tố thứ nhất là hiển nhiên, vì cứ tăng mỗi qubit thì năng suất tính toán sẽ tăng gấp đôi. Yếu tố thứ hai quyết định thời gian vận hành của máy, thời gian rối của các qubit càng dài thì máy tính hoạt động càng lâu. Yếu tố thứ ba quyết định phổ rộng hay hẹp các bài toán khó mà máy tính lượng tử có thể giải quyết. Đặc điểm này quyết định sự khác nhau giữa máy tính lượng tử mô phỏng và máy tính thực thụ, vì máy tính mô phỏng chỉ lập trình được cho một phổ rất hẹp các bài toán.

Một trở ngại lớn nữa trong việc chế tạo máy tính lượng tử với số lượng qubit lớn là lỗi xuất hiện tất yếu trong quá trình tính toán, đọc và ghi thông tin. Càng nhiều qubit thì lỗi xuất hiện càng nhiều và tỉ lệ lỗi cao đã hạn chế công suất tính toán. Nhiều nghiên cứu trong lĩnh vực tính toán lượng tử cơ bản hiện nay được dành cho các phương pháp sửa lỗi và đã đạt một số thành tựu nhất định, nhưng với yêu cầu số lượng qubit lớn, thì đây vẫn là một trong các vấn đề nan giải nhất.

Để tiến tới một cuộc cách mạng lượng tử thật sự, loài người sẽ còn phải giải quyết rất nhiều vấn đề khoa học công nghệ. Trong việc đánh giá triển vọng của máy tính lượng tử cũng có không ít ý kiến hoài nghi, nhưng đa số lạc quan cho rằng với sự phát triển gia tốc trong thời đại hiện nay, máy tính lượng tử thực thụ sẽ ra đời sau khoảng một thập kỷ nữa.

TS. Trần Đức Lịch (tổng hợp)