

양자정보연구지원센터

Quantum Information Research Support Center

NEWSLETTER

<Research Trend>



※ 본 연구동향은 양자정보연구지원센터 뉴스레터의 내용입니다.

중성 원자 기반 양자 컴퓨팅 연구동향

[작성: University of Wisconsin-Madison 송윤홍 박사후연구원]

양자 컴퓨팅 구현을 위한 학계와 산업계의 관심과 노력이 대폭 증가하면서 최근 기반 기술들이 괄목할 만한 성장을 하였고 초전도체, 이온 트랩, 광자, 반도체 양자점과 같은 플랫폼들에서 수 큐비트의 작은 스케일에서 프로그래밍 가능한 양자 컴퓨터가 실험적으로 구현되었습니다. 거대한 스케일에서 범용으로 쓸 수 있는 고장 허용 (fault-tolerant) 양자 컴퓨팅은 아직 요원해 보이지만, 수십에서 수백개 정도 큐비트 사이의 NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) 시스템에서도 양자 이점 (advantage)을 보일 수 있을지도 모른다는 단서들이 보고되면서 많은 기대감을 불러오고 있습니다 [1]. 중성 원자 기반 양자 플랫폼은 자연스럽게 주어지는 동등한 큐비트들이 전기적 중성 덕분에 많은 숫자로 준비될 수 있어서 확장성 (scalability)이 좋으며, 또 필요할 때면 높은 에너지의 리드버그 (Rydberg) 상태로 전이시켜서 큰 전자 원자핵 간 거리에서 오는 전기 쌍극자 모멘트를 통해서 강한 원자 간 상호작용으로 멀티 큐비트 게이트나 양자 얽힘 (entanglement) 형성을 빠르게 할 수 있습니다. 이렇게 양자 정보 플랫폼으로서 큰 잠재력을 지니고 있음에도 불구하고, 중성 원자를 이용해서 아직 양자 회로를 실행할 수 있는 프로그래밍 가능한 장치가 구현된 적이 없었습니다.

중성 원자 시스템에서는 레이저 냉각과 포획을 통해서 준비된 단일 원자들의 에너지 상태 중에서 주로 긴 수명을 갖고 자기장에 둔감하여 긴 결맞음 (coherence) 시간을 제공하는 시계 상태 (clock states)가 큐비트로 이용됩니다.

최근 몇 년간 이러한 큐비트를 이용한 양자 컴퓨팅 구현의 여러 장애 요인들을 극복할 수 있는 기술적 진보들이 있었습니다. 최근 발표된 두 가지 결과 [2,3]는 이러한 기술적 진보들을 결합하고 발전시켜서 중성 원자 시스템을 기반으로 양자 회로를 구현할 수 있음을 서로 상호보완적인 방법을 통해서 각각 실험적으로 보였습니다.

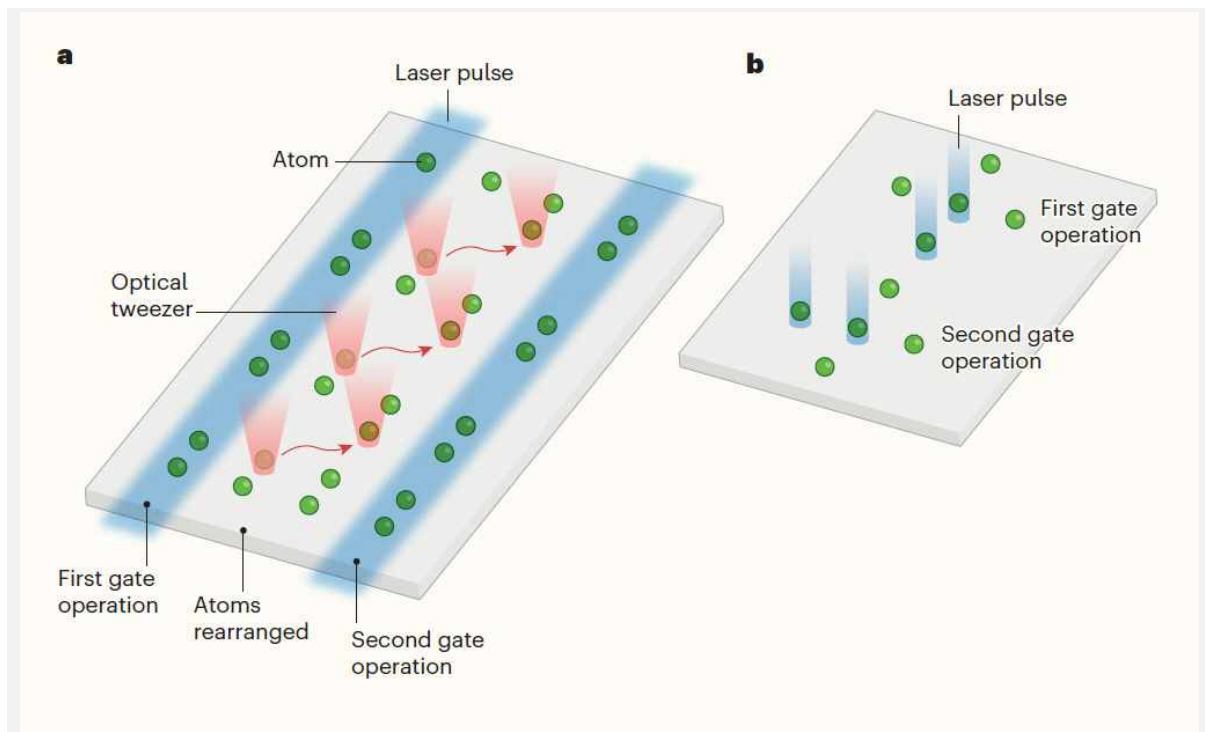


그림 1. 중성 원자 기반으로 양자 회로를 프로그래밍하는 두 가지 방법, (a) 얽힌 원자들의 결맞은 수송과 (b) 두 원자 어드레싱을 이용한 두 큐비트 게이트 구현 (image from [4]).

먼저 그림 1 a에 소개된 Harvard 대학과 MIT 그리고 QuEra Computing의 공동 연구로 이루어진 결과입니다. 재배열 가능한 red-detuned 광 집게 (optical tweezer)에 포획된 ^{87}Rb 원자의 시계 상태가 큐비트로 사용되고 이들 전체를 커버하는 레이저들에 의한 Raman 전이와 Rydberg 전이를 이용하여 단일 큐비트와 두 큐비트 게이트가 구현됩니다. 양자 회로를 프로그래밍하기 위해서 CZ 게이트를 위한 레이저가 가해질 때 원하는 원자 쌍들만 서로 가까이 있도록 결맞은 (coherent) 수송을 이용하였습니다. 이를 통해 97.4%의 충실도 (fidelity)로 준비된 Bell 상태의 원자 쌍이 $110\ \mu\text{m}$ 를 움직인 후에도 94.8%의 충실도로 유지될 수 있었습니다. 하지만 충분한 결맞음을 주기 위해서는 수백 nm를 움직이는 동안 적어도 $1\ \mu\text{s}$ 의 시간이 필요하여 원하는 회로 구현을 위해서 수십에서 수백 μs 이 필요하다는 결점이 있고, 이를 극복하기 위해서 NMR 등에서 많이 사용되었던 방법인 XY 스핀 에코나 BB1 조합 펄스 등이 사용되었습니다.

이를 통해서 여러 양자 정보 처리에서 자원으로 쓰일 수 있는 cluster 상태의 구현과, 양자 오류 정정 (quantum error correction)을 위한 대표적인 상태인 Steane, surface, toric code 상태들을 구현하고 이를 통한 오류 탐지를 성공적으로 보였습니다. 또 이러한 수송 기술을 통해서 시스템의 양자 얽힘을 정량화하는 Renyi 얽힘 엔트로피의 측정이 가능하다는 것도 보여서 이러한 기술이 하이브리드 아날로그 디지털 양자 시뮬레이션에도 쓰일 수 있는 강력한 기술임을 보였습니다. 이 기술은 추후 고장 허용 양자 컴퓨팅에 필수적인 회로 도중 (mid-circuit) 큐비트 측정에도 응용될 수 있을 것으로 기대됩니다.

다음으로 그림 1 b에 소개된 Wisconsin-Madison 대학과 ColdQuanta, Riverlane의 공동 연구에서는 이에 상호보완되는 타이트하게 초점이 맺혀진 레이저를 이용한 큐비트 어드레싱 방법으로 양자 회로의 프로그래밍을 구현하였습니다. 이 연구에서는 원자가 잡히는 자리의 레이저 세기가 약하여 결맞음 시간 확보와 리드버그 원자 포획에 도움이 될 수 있는 blue-detuned 광 트랩을 이용하여 ^{133}Cs 원자를 포획하였고, red-detuned 광 집계를 이용한 원자 재배열을 통해 원하는 큐비트 배열을 만들었습니다. 그리고 원자 배열 전체를 커버하는 마이크로파와 수 μm 의 작은 크기로 원자에 초점이 맺혀진 레이저들을 이용하여 임의의 단일 큐비트 게이트와 CZ 게이트로 시계 상태 큐비트에 대해서 보편 (universal) 양자 게이트를 이용한 양자 회로 프로그래밍을 수행하였습니다. 이에 따라 게이트의 구현이 수 μs 의 짧은 시간에 이루어질 수 있었고, 스핀 에코와 같은 기술을 사용하지 않았을 때는 결맞음 시간이 수 ms으로 제한됨에도 불구하고 18 CZ 게이트에 이르는 회로 깊이 (circuit depth)까지도 구현이 가능하였습니다. 양자 컴퓨터를 벤치 마킹하는 데에 표준으로 사용되는 GHZ 상태가 6 큐비트까지 성공적으로 준비되었고, 대표적인 지수함수적 속도 향상을 불러오는 양자 알고리즘인 양자 위상 추정 (quantum phase estimation)을 이용하여 수소 분자의 바닥 상태 에너지를 계산하였으며, NISQ를 이용한 양자 이득을 얻는 데에 기여할 수 있을 것으로 기대되고 있는 하이브리드 양자 고전 알고리즘인 QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm)를 4 꼭짓점 그래프에 대한 MaxCut 문제를 푸는 데에 이용하여 성공적으로 프로그래밍 가능한 양자 컴퓨팅을 소규모에서 보일 수 있었습니다.

이러한 중성 원자 시스템은 레이저의 파워를 추가하기만 하면 큐비트의 개수가 늘어나고 현재 구현된 양자 회로 프로그래밍 방법이 더 큰 시스템으로도 원리적으로 바로 확장이 가능하기 때문에 앞으로 몇 년 사이에 더 빠르게 발달하여 NISQ 시대에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대됩니다. 앞으로 비파괴적 읽어내기 (nondestructive readout)도 더욱 발전하여 추후 고장 허용 양자 컴퓨팅의 구현에도 역할을 할 수 있을 것이라고 희망합니다 [5].

지금까지 주로 이용된 하나의 원자가 전자를 갖는 알칼리 원자를 기반한 장치뿐만이 아니라, 2개의 원자가 전자를 갖는 알칼리 토금속 계열 (Alkaline-earth-like)에서도 이제 막 큐비트로서의 가능성 [6]이 보여져 중성 원자 양자 컴퓨팅의 발전에 함께 기여해 나갈 수 있을 것으로 보입니다.

참고문헌:

- [1] Google AI Quantum, "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor," *Nature* **574**, 505 (2019).
- [2] D. Bluvstein, M. D. Lukin et al., "A quantum processor based on coherent transport of entangled atom arrays," *Nature* **604**, 451–456 (2022).
- [3] T. M. Graham, Y. Song, M. Saffman et al., "Multi-qubit entanglement and algorithms on a neutral-atom quantum computer," *Nature* **604**, 457–462 (2022).
- [4] H. J. Williams, "Versatile neutral atoms take on quantum circuits," *Nature* **604**, 429 (2022).
- [5] F. G. Mejia, A. Kumar, T.-Y. Wu, P. Du, and D. S. Weiss, "State-selective EIT for quantum error correction in neutral atom quantum computers," arXiv:2205.01602.
- [6] M. Stephens, "A New Option for Neutral-Atom Quantum Computing," *Physics* **15**, s55 (2022).

