

리드버그원자 양자컴퓨터 개발

Rydberg quantum computer

연구책임자 | 안재욱 소속학과 | 물리학과 참여연구원 | 김민혁, 김강흔, 황재용, 문은국

연구실 홈페이지 | <http://qcl.kaist.ac.kr>

양자단열 방식의 범용양자컴퓨터는 큐비트간 임의의 연결성을 프로그램할 수 있어야 한다. 관련하여 초전도체 큐비트 기반의 D-wave 양자컴퓨터는 고정형 큐비트를 연결하는 체인(chain, 초전도체 큐비트열)을 이용한다. 본 연구에서는 리드버그 양자컴퓨팅에서 큐비트간 임의의 연결성을 가능하게 하는 리드버그 양자선(중성원자열)을 제안하고 실험적으로 구현하였다. 기존의 평면 그래프에 추가하여, 쿠로토프스키 그래프들(K_5 와 $K_{3,3}$)을 실험적으로 구현함으로써, 모든 큐비트 그래프 구조의 구현이 원리적으로 가능함을 증명하였다.

연구배경

양자컴퓨터는 양자역학의 원리를 사용하여, 디지털컴퓨터로는 불가능한 계산을 수행할 것으로 예상되는 대표적 미래기술이다. 가령 20큐비트급 양자컴퓨터는 기존 컴퓨터가 백만(10^6)회 순차 처리해야 하는 계산량을 한 번에 처리하는 계산성을 갖는다. 세계 주요국들은 양자컴퓨팅을 전략기술로 분류해, 국가적 연구역량을 집중하고 있으며 글로벌 대기업, 기술벤처, 국가연구소와 주요 대학의 막대한 시설과 인력, 연구비가 동원되고 있다. 우리나라 정부도 양자기술을 10대 전략기술의 하나로 선정해 투자를 확대하고 있다. 소형(20~50큐비트급)의 양자컴퓨터가 속속 개발되고 있는 현시점에서, 가장 중요한 이슈 중 하나는 '디지털컴퓨팅 알고리즘으로는 비효율적인 계산 문제(NP-문제로 분류됨)를 양자컴퓨터가 계산할 수 있는지'이다. 여행자 문제(Traveling Salesman Problem), 최대독립집합 문제 등으로 대표되는 NP-문제들은 디지털 컴퓨팅의 알고리즘으로는 효율적으로 계산할 수 없음이 잘 알려져 있다. 따라서, 양자컴퓨터가 NP-문제들을 계산할 수 있을지가 큰 관심사다.

연구내용

본 연구에서 KAIST 물리학과와 양자컴퓨팅팀은 최대 126개의 리드버그 원자를 이용하는 양자단열 방식의 양자컴퓨터를 개발하고, 이를 이용하여 NP-문제의 하나인 최대독립집합 문제를 20큐비트급 그래프에 대하여 계산하는데 성공했다. 또한 원거리 꼭지점들을 있는 리드버그 양자선 개념을 최초로 개발해 모든 꼭지점(큐비트)들을 임의로 연결하는 초기하학적 그래프를 구현할 수 있음을 보였다.

양자 단열형 양자컴퓨팅은 양자 회로형(또는 양자디지털형), 측정기반형과 함께 범용양자컴퓨팅 방식으로 알려져 있다. 양자단열 양자컴퓨팅은 범용양자컴퓨팅을 구현하기 위해서는 큐비트간 임의의 연결성을 프로그램할 수 있어야 한다. 관련하여 대표적인 양자단열컴퓨터인 D-wave 양자컴퓨터는 고정형 큐비트를 연결하기 위해 체인(chain,

초전도체 큐비트열)을 이용한다. 본 연구에서는 리드버그 양자컴퓨팅에서 큐비트간 임의의 연결성을 가능하게 하는 리드버그 양자선(중성원자열)을 제안하고 실험적으로 구현하였다. 기존의 평면 그래프에 추가하여, 쿠로토프스키 그래프들(K_5 와 $K_{3,3}$)을 실험적으로 구현함으로써, 모든 큐비트 그래프 구조의 구현이 원리적으로 가능함을 증명하였다. 아래 그림은 리드버그 양자선(각각 빨강, 주황, 노랑 꼭지점들)을 이용하여 간선으로 연결되지 않는 데이터 큐비트(하얀 꼭지점들)를 연결하는 3차원 큐비트 구조체의 모식도이다. 이 구조는 쿠라토프스키 그래프로 잘 알려진 $K_{3,3}$ 그래프이다. 참고로 쿠라토프스키 K_5 와 $K_{3,3}$ 그래프쌍은 만들기 쉬운 평면그래프와 조합하여 모든 그래프를 만들 수 있다. 본 연구는 K_5 와 $K_{3,3}$ 을 실험적으로 최초 구현하였다.



리드버그 양자컴퓨터의 모식도:

양자단열컴퓨팅을 위해 초고진공 공간에 5~10 마이크로미터의 간격으로 리드버그 원자들이 배열된다. 20개의 리드버그 원자들이 데이터 큐비트(백색 꼭지점)와 보조 양자선 큐비트(유색 꼭지점)로 구성된 쿠라토프스키 그래프 $K_{3,3}$ 을 구현하고 있다.

기대효과

국내 최초로 일정규모(20큐비트급)에서 양자컴퓨팅 계산을 수행하는 장치를 개발하여 보고하였다. 해당 장치(리드버그 양자컴퓨터)는 NP-완전문제의 하나인 최대독립집합 문제 계산에 특화된 물리적 특성을 갖고 있어서, 다양한 조화 최적화 문제에 적용가능하다. 따라서, 본 리드버그 양자컴퓨터의 성능(큐비트 수 등)을 향상하면 물류, 생산관리, 작업관리, 네트워크 디자인 등에서 경제가치를 창출할 가능성이 있다.

연구성과

- [논문1] Minhyuk Kim, Kangheun Kim, Jaeyong Hwang, Eun-Gook Moon, and Jaewook Ahn*, "Rydberg Quantum Wires for Maximum Independent Set Problems," *Nature Physics* 18, 755 (2022/06/20) [2021 Impact Factor = 19.68].
- [논문2] Andrew Byun, Minhyuk Kim, and Jaewook Ahn, "Finding the maximum independent sets of Platonic graphs using Rydberg atoms," *PRX Quantum* 3, 030305 (2022). [2021 Impact Factor = 6.1].

연구비 지원

- 삼성미래기술육성재단(리드버그 양자 시뮬레이터 얽힘제어 연구)