

Penn 연구진, 상온 다이아몬드 시스템에서 4개 큐비트 얽힘 구현

(2026.10.19., 양자정보연구지원센터)

□ 펜실베이니아대학 연구진, 상온 다이아몬드 시스템에서 4개 큐비트 얽힘 구현, 10배 빠른 속도 달성

○ Penn 연구진, 상온 다이아몬드에서 4큐비트 얽힘 구현

- 다이아몬드 내 질소-공공(NV) 센터를 활용해 상온에서 4개의 큐비트를 하나의 게이트로 얽히는 기술을 실험적으로 구현함

* NV 센터는 다이아몬드 결정에서 탄소 원자 하나가 질소 원자로 대체되고 인접한 위치가 비어 있는 결함으로, 이 결함에 갇힌 전자의 양자 상태를 빛과 마이크로파 펄스를 이용해 제어·측정할 수 있음

- NV 센터의 전자를 중심 큐비트로 사용하고, 주변의 탄소-13(^{13}C) 핵스핀 3개를 추가 큐비트로 활용해 총 4개의 큐비트로 구성된 GHZ(Greenberger-Horne-Zeilinger) 상태를 생성함, GHZ 상태는 3개 이상의 양자 시스템이 하나의 집단적 양자 상태로 연결된 다중 큐비트 얽힘의 대표적인 형태로, 양자 알고리즘, 오류정정 및 정밀 양자센싱 등에 활용될 수 있음

○ 기존 순차적 게이트 대신 큐비트 간 상호작용을 활용한 병렬 제어

- 기존에는 여러 큐비트를 얽히기 위해 중심 큐비트와 주변 큐비트를 2개씩 순차적으로 얽히는 방식을 사용했음, 이 방식은 큐비트 수가 증가할수록 필요한 게이트와 제어 펄스가 늘어나면서 연산 시간이 길어지고, 잡음과 제어 오류가 누적될 가능성이 커지는 문제가 있음
- 연구진은 이러한 문제를 해결하기 위해 NV 센터 전자와 주변 핵스핀 사이의 상호작용을 억제하는 대신, 이를 적극적으로 활용하는 제어 방식을 개발함, 정밀하게 조절된 마이크로파 펄스의 타이밍을 통해 전자가 주변의 3개 핵스핀에 동시에 조건부 회전을 일으키도록 하여, 기존의 여러 2큐비트 게이트를 하나의 4큐비트 얽힘 게이트로 통합함

- 그 결과 4큐비트 얽힘 상태를 만드는 데 $14.8\mu s$ 가 소요됐으며, 기존 순차적 방식의 약 $139.9\mu s$ 보다 약 10배 빠른 속도를 기록함, 이 속도가 전자와 핵스핀 사이의 물리적 상호작용 강도가 결정하는 근본적인 속도 한계에 근접한 수준이라고 설명함

○ 연산 속도 향상과 함께 얽힘 정확도도 개선

- 병렬 방식은 단순히 연산 시간을 줄이는 데 그치지 않고, 양자 상태를 보다 정확하게 생성하는 효과도 보임. 4큐비트 병렬 게이트의 충실도(fidelity)는 0.92 ± 0.04 로 측정된 반면, 기존 순차적 방식은 0.69 ± 0.03 에 그침
- 충실도는 실제 구현된 양자 상태 또는 연산이 목표한 상태와 얼마나 일치하는지를 나타내는 지표로, 1에 가까울수록 이상적인 연산에 가까움을 의미함. 병렬 방식은 연산 시간이 짧고 필요한 제어 펄스도 적어, 연산 과정에서 오류가 누적되는 시간 줄였음
- 또한 기존 방식에서 문제가 되었던 큐비트 간 누화(crosstalk)도 감소시킬 수 있었음. 연구진은 반복적인 게이트 적용과 양자 상태 측정을 통해 생성된 얽힘 상태가 시간에 따라 어떻게 변화하는지 분석하고, 게이트 자체에서 발생하는 오류와 상태 준비·측정 과정에서 발생하는 오류를 구분해 평가함
- 3큐비트 병렬 게이트에서도 평균 충실도가 0.83으로 순차 방식의 0.78보다 높았으며, 연산 속도 역시 약 2배 향상된 것으로 나타남

○ 상온 양자센싱 및 오류정정 기술로의 활용 가능성

- 이번 기술은 양자컴퓨팅뿐만 아니라 상온에서 작동하는 양자센서 개발에도 활용될 가능성이 있음. 다이아몬드의 NV 센터는 매우 작은 자기장을 측정할 수 있어 나노스케일 핵자기공명(NMR), 스캐닝 자기측정 등 다양한 양자센싱 분야에서 연구되고 있음
- 특히 얽힌 큐비트를 활용하면 독립적으로 작동하는 큐비트보다 특정 조건에서 미세한 신호에 대한 센서의 민감도를 높일 수 있음. GHZ 상태는 여러 큐비트가 하나의 집단적 상태로 움직이기 때문에 약한 물리적 신호에 대한 반응을 증폭하는 데 유리함

- 상온에서는 극저온 환경에 비해 양자 결맞음이 상대적으로 빠르게 손실될 수 있기 때문에 얽힘 상태를 빠르게 준비하는 기술이 중요함. 얽힘 생성에 소요되는 시간을 줄이면 양자 정보가 환경 잡음에 의해 손실되기 전에 실제 측정에 더 많은 시간 사용 가능
- 또한 빠른 다중 큐비트 게이트는 양자 오류정정에도 활용될 가능성이 있음. 오류정정에서는 여러 물리적 큐비트에 양자정보를 분산하고 반복적인 연산을 통해 오류를 탐지·수정하기 때문에, 여러 큐비트를 동시에 제어할 수 있는 빠른 게이트는 회로의 깊이를 줄이고 오류가 누적될 기회를 감소시킬 수 있음. 다만 이번 연구에서 완전한 오류정정이나 내결함성(fault-tolerant) 연산을 직접 구현한 것은 아님

○ 현재 한계와 향후 확장 가능성

- 이번 실험은 대규모 양자 프로세서나 실제 양자계산을 구현한 단계는 아님. 또한 상온 환경에서는 전자 상태의 판독 효율과 결맞음 시간이 제한적이며, 상태 준비 및 측정(SPAM) 과정에서 발생하는 오류도 여전히 존재함
- 반복 판독, 높은 자기장 환경에서의 측정, 스핀 상태를 전하 신호로 변환하는 방법 등을 통해 이러한 오류를 줄일 수 있을 것으로 제안함. 또한 적절한 핵스핀 배열을 갖는 양자 레지스터를 확보하면 병렬 제어를 더 많은 큐비트로 확장 가능 분석함
- 500개의 무작위 NV 센터 레지스터를 시뮬레이션한 결과, 적절한 조건에서는 2~3개의 핵스핀을 동시에 제어하는 병렬 게이트가 대부분의 구성에서 가능하며, 일부 레지스터에서는 4~5개의 핵스핀까지 병렬 얽힘을 구현할 가능성이 있는 것으로 나타남
- 향후 이러한 병렬 제어 원리는 다이아몬드의 다른 결함이나 실리콘카바이드(SiC), 실리콘 기반 양자 레지스터에도 적용될 가능성이 있음

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/09/14/penn-researchers-demonstrate-room-temperature-diamond-system-that-entangles-four-qubits-10-times-faster/>