

광자 기반 양자 컴퓨팅을 위한 결정론적 얽힘

(2025.07.24., 양자정보연구지원센터)

□ 결정론적 광자 얽힘 생성을 위한 원자 기반 인터페이스 방식

○ 배경 및 문제의식

- 광자 기반 양자 컴퓨팅은 디코히런스에 강하고 상온에서도 작동 가능한 장점을 가지나, 광자 간 상호작용이 없어 얽힘(entanglement) 형성이 확률적 방식에 의존함
- 현재의 광자 얽힘 방식은 비선형 광학 효과나 빔스플리터에서의 양자 간섭과 후선택(post-selection)에 기반해 있으며, 성공 확률이 낮고 수천 번의 시도 후 한 번의 얽힘만 성공하는 비효율적 구조
- 확률적 광자 생성 및 얽힘 방식은 양자 오류 정정에 필요한 수백만 개의 얽힌 큐비트를 확장하는 데 기술적·경제적으로 비현실적임

○ 연구 내용

- Weizmann Institute와 Quantum Source의 공동 연구진은 광자-원자 상호작용 기반의 결정론적 얽힘 방식 제안
- 광자 간 직접적인 상호작용 대신, 하나의 원자를 광자와의 얽힘 및 변환을 담당하는 '게이트 노드' 로 사용
- 루비듐-87 원자와 광 공진기를 기반으로 한 이 노드는 결정론적 단일 광자 생성과 두 종류의 광자-원자 게이트 연산(SWAP, Controlled-Z)을 구현

○ 주요 기술 및 구조

- (결정론적 광자 생성 및 연산 방식) 원자의 단일 여기 상태가 정확히 하나의 광자를 방출하게 하여 다중광자 문제 제거
- SWAP 게이트: SPRINT 방식을 통해 광자가 원자 큐비트 상태를 전환함
- CZ 게이트: 광자가 원자 상태에 따라 위상 변화를 겪어 얽힘을 유도
- 이 방식은 나노초 단위로 작동하며 시간 스펙트럼 다양성이 있는

광자와도 호환 가능

- (그래프 상태 생성 및 확장) 측정 기반 양자 컴퓨팅의 기반이 되는 그래프 상태를 생성하기 위해 CZ 게이트로 광자와 원자를 얽히게 한 뒤, SWAP 게이트로 그 상태를 다음 광자에 복사
- 6노드 기반 실험에서 3개 노드(광자 생성), 나머지 3개 노드(얽힘 연산)
- 코드 단계에서 결정론적 실행가능, 노드를 추가하면 확장성 보장
- (스티칭(stitching) 방식의 연결) 서로 다른 모듈에서 생성된 그래프 상태를 결정론적 비파괴적으로 연결
- 광자 두 개를 원자와 차례로 상호작용하게 하여 얽힘 유도, 이후 원자 상태를 광자에 복사, 기존 방식과 달리 광자 간 간섭 요구가 없고 손실 위험이 낮아, 높은 결합률과 신뢰성 제공

○ 기술적 이점 및 확장성

- (게이트 충실도 및 실용성) SWAP 게이트: 99.6% 이상의 공정 충실도, CZ 게이트: 99.8% 이상의 공정 충실도
- 단일광자 생성 성공률 99% 이상(평균 광자 수 5인 코히런트 펄스 사용 시)
- 스펙트럼 정합 조건이 완화되어 실제 환경에서도 안정적 구현 가능
- (모듈형 확장 구조) 동일한 구조의 모듈을 필요에 따라 광자 소스, 게이트, 또는 스티칭 인터페이스로 재구성 가능
- 칩 위에 집적하거나 광섬유를 통한 분산형 연결도 가능
- 필요에 따라 노드 수 조절, 속도, 복잡도, 오류율 사이의 균형 조절 가능

○ 결론 및 전망

- 원자를 광자 간 간접 상호작용 중개자로 활용, 기존 확률적 방식 병목 해결
- 속도, 충실도, 확장성 면에서 기존 방식보다 뛰어남, 실제 상용화 고려 설계
- 광자가 정보 운반체 역할을 지속하는 동시에, 원자가 상호작용의 중심 역할을 담당하는 새로운 스케일러블 아키텍처로 주목됨

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/07/07/deterministic-entanglement-for-photonic-quantum-computing-atom-as-interface/>