

양자의 제2법칙, 얽힘에 대한 가역적 규칙 발견

(2025.08.07. 양자정보연구지원센터)

□ 양자 얽힘의 ‘제2법칙?’ 가역적인 얽힘 변환 이론 정립

○ 연구 개요 및 배경

- 국제 공동 연구팀이 얽힘 상태를 가역적으로 변환할 수 있는 새로운 이론적 틀을 제시, 이를 “얽힘의 제2법칙” 으로 명명함
- 이 연구는 *Physical Review Letters*에 발표되었으며, 얽힘 자원을 에너지처럼 저장하고 활용할 수 있는 ‘얽힘 배터리’ 개념을 도입함
- 해당 결과는 얽힘을 손실 없이 변환하는 조건을 밝혀낸 것으로, 양자 정보 이론에서 오랜 난제였던 문제를 해결함

○ 얽힘 배터리와 변환 조건

- 얽힘 배터리는 변환 과정 중 얽힘을 일시적으로 공급하거나 흡수 하되, 초기와 동일한 얽힘량을 유지해야 함
- 이 조건이 만족되면, 한 얽힘 상태에서 다른 상태로의 전환은 가역적이며, 변환 비율은 두 상태의 얽힘량의 비율로 결정됨
- 예를 들어, 시작 상태 Q의 얽힘량이 목표 상태 O의 두 배일 경우, Q 하나로 O 두 개를 만들 수 있음

○ 구현 방식 및 이론 모델

- 이 모델을 두 실험 참가자(앨리스와 밥)가 얽힘 상태 일부와 얽힘 배터리를 공유하고, 고전적 통신 및 국소 조작(LOCC)을 통해 상태를 변환하는 방식임
- 무한 복사본(asymptotic limit)을 고려할 경우 모든 얽힘 상태 쌍 간의 가역 변환이 가능하며, 유한 복사본에서도 얽힘 비율이 유리수일 경우 가역성 확보 가능
- 얽힘 측정량(entanglement quantifier)으로는 squash entanglement 등이 적합하며, 연속성(continuity), 가법성(additivity), 비대칭적 행

동 등의 수학적 특성을 만족해야 함

- 연구 의의 및 응용 가능성, 양자 자원 이론의 확장과 통합
 - 얽힘 뿐만 아니라 양자 열역학 등 다른 자원 이론에도 동일한 ‘배터리 기반 가역성’ 개념을 적용 가능함
 - 자유 에너지 배터리 개념을 통해, 고전적 열역학의 제2법칙이 양자 영역(특히 코히런트 상태 포함)까지 확장될 수 있음을 보여줌
 - 이는 양자 시스템에서 촉매적 상태 전환(catalytic transformation)에 대한 운용적 해석을 제공함
- 양자 기술로의 잠재적 확장
 - 얽힘을 단방향 소모형 자원이 아닌 순환 가능한 자원으로 인식함, 양자 컴퓨터의 얽힘 자원 효율성을 크게 향상시킬 수 있음
 - 향후 얽힘 재사용, 자원 분배 최적화, 양자 네트워크 설계개선, 모듈형/분산형 양자 아키텍처 구축 등 다양한 기술에 응용 가능
 - 이론적으로는 얽힘 ‘통화’ 개념으로 확장 가능하며, 실험적 구현 시 얽힘 자원 회수 및 최적화 기술의 기반이 될 수 있음
- 한계 및 향후 과제
 - 얽힘 측정 방식에 따라 이론의 적용 여부가 달라질 수 있음(예: geometric entanglement는 자원 보존 위배 가능성 있음)
 - 얽힘 배터리를 현실에서 구현하는 데 기술적 제약이 존재하며, 통신 없는 가역 변환의 가능성 등 해석상의 논란 여지도 있음
 - 최종 상태의 상관관계 존재 여부에 따라 가정 조건이 달라지므로, 유효한 얽힘 측정량을 식별하는 연구가 지속적으로 요구됨
 - 얽힘 외 자원(coherence, 비대칭성 등)에서 가역 변환 가능성 탐색
 - 이론을 토대로 얽힘 배터리 기반 양자 회로 설계 및 얽힘 분배 프로토콜 개발 가능성 타진

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/07/23/quantums-second-law-scientists-find-reversible-rulebook-for-entanglement/>