

# 시가 드러낸 양자 얽힘의 숨은 구조

(2025.10.02., 양자정보연구지원센터)

## □ AI를 활용해 양자 얽힘의 보이지 않는 네트워크 규명

### ○ 연구개요

- AI가 양자 측정 과정에서 발생하는 숨은 얽힘(measurement-induced entanglement)을 탐지할 수 있음을 실험적으로 제시
- 측정 자체가 새로운 얽힘을 생성하는 현상을 관찰하고, 이를 인공지능이 학습할 수 있음을 입증

### ○ 연구 배경

- “얽힘(entanglement)”은 양자컴퓨팅의 핵심으로, 큐비트 간 장거리 상관관계를 형성하여 정보 처리를 가능하게 함
- 하지만 다수의 측정이 이루어질 경우, 결과가 무작위로 변하고 얽힘 패턴을 추적하기 어려움
- (기존 한계): 측정 유도 얽힘은 그 결과가 비결정적이기 때문에 관측을 위해서는 실험을 지속적으로 반복해야 했음, 대규모 양자 시스템에서는 현실적으로 불가능

### ○ 연구 목적

- 연구진은 AI를 이용하여 측정 결과의 원시(raw) 데이터로부터 숨겨진 얽힘 패턴을 직접 찾아낼 수 있는지 검증하고자 함
- 이를 통해 얽힘 탐지 과정을 자동화하고, 기존의 후선택(postselection)이나 상태 사전 지식 없이 양자 상태의 특성을 추론할 수 있음을 입증

### ○ 연구 방법 및 실험 구성

- (양자 장비) 구글의 초전도 양자 프로세서 Sycamore 및 Willow(105큐비트) 사용, 2019년 “양자 우월성(quantum supremacy)” 실험에 사용된 플랫폼

- (준비된 상태): “클러스터 상태(cluster states)” 라 불리는 얽힘 구조 형성, 1차원(34큐비트) 및 2차원(6×6, 36큐비트) 배열 구성
- (측정 방식): 대부분의 큐비트를 측정하고, 두 개의 “탐침 큐비트(probe qubits)” 만 남김, 이 두 큐비트가 중간 측정으로 인해 얽혔는지를 관찰
- (AI 모델 구성): 지도되지 않은(unsupervised) 방식의 신경망(neural network) 사용, BERT 등 언어모델에서 영감을 받은 어텐션(attention) 메커니즘 기반 생성형 모델과 텐서 네트워크(tensor network) 변분 최적화 모델을 병행, 사전 라벨이나 양자 상태의 준비 정보 없이, 측정 결과 데이터만으로 훈련
- (검증 기법): “클래시컬 섀도(classical shadows)” 기법 사용, 탐침 큐비트에 임의의 유니타리 연산을 가한 뒤 측정하여 AI 예측값과의 상관관계를 비교함으로써 얽힘 및 엔트로피 경계 설정

○ 주요 결과

- (AI가 숨은 얽힘 구조를 성공적으로 복원) 측정 데이터만으로 탐침 큐비트의 상태를 예측 가능, 1차원(34큐비트) 및 2차원(36큐비트) 시스템 모두에서 측정 유도 얽힘의 존재 확인
- (측정 설정에 따른 임계점(phase transition) 발견) 특정 측정 조건에서는 AI가 얽힘을 명확히 학습, 반대로 다른 조건에서는 무의미한 평탄한 예측 결과 생성, 이는 “측정 유도 상전이(measurement-induced phase transition)” 현상과 일치.
- (대규모 데이터 활용) 2차원 실험의 경우 약 7,800만 회의 실험 데이터로 훈련, 이는 가능한 모든 측정 조합에 비하면 극히 적은 수지만, 지수적 반복 없이 통계적 신뢰성을 확보함

○ 의미 및 응용 가능성

- (측정 유도 효과의 확장 가능성) 대규모 양자 시스템에서 측정이 미치는 집단적 효과를 확장 가능하고 체계적으로 연구할 수 있는 방법 제시
- (오류 보정(error correction)에의 응용) 양자 오류 보정은 지속적인

- 측정을 필요로 하지만, 측정 결과의 무작위성 때문에 분석이 어려움
- AI가 측정 데이터로부터 얽힘 패턴을 복원함으로써 새로운 형태의 스마트 오류 보정 기법 설계 가능성 제시
- (양자 제어(quantum control) 연구 기반 확장) 측정 결과만으로 양자계의 내부 자유도를 추론할 수 있음을 보임, 향후 양자 상태 제어 및 안정화 연구의 기초 도구로 활용 가능
- (AI-양자 융합의 새로운 사례) 머신러닝이 이미지 분석, 신약 개발 등에서 보여준 것처럼, 양자 실험 데이터 분석에서도 필수적 도구로 자리할 가능성을 시사
- 무질서하고 복잡한 측정 결과 속에서도 AI가 질서 있는 패턴을 찾아냄
- 한계 및 주의점
  - (모델의 불완전성) AI가 예측한 얽힘 경계는 노이즈나 탈결맞음(decoherence)에 민감, 일부 조건에서는 얽힘이 존재함에도 신경망이 이를 탐지하지 못함
  - (데이터 규모의 제약) 지수적 반복은 피했지만 여전히 대규모 데이터가 필요, 예: 2D 실험에서는 수천만 회의 측정 반복 필요
  - (실험 장치의 한계) 노이즈와 측정 기저 선택이 결과에 큰 영향을 미치며, 완전한 통제에는 여전히 기술적 제약 존재
  - (사전 검증 단계) 본 연구는 arXiv에 공개된 비심사(preprint) 논문으로, 정식 학술지 심사를 통한 검증은 아직 이루어지지 않음
- 결론 및 향후 전망
  - 이번 연구는 “AI가 측정 결과만으로 양자 얽힘의 숨은 구조를 식별할 수 있다” 는 것을 실험적으로 보여줌
  - 측정이 단순한 관측 행위가 아니라 새로운 얽힘을 생성할 수 있음을 관찰, AI를 통해 이 복잡한 상관관계를 효율적으로 재구성

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/09/18/researchers-use-ai-to-expose-hidden-webs-of-entanglement/>