

현존 양자컴퓨터로 복잡한 물리현상을 신뢰성 있게 연구 가능

(2026.02.17. 양자정보연구지원센터)

- 현존 양자컴퓨터로 복잡한 물리 현상을 신뢰성 있게 연구 가능함 입증
 - 91큐비트 초전도 양자 프로세서를 활용하여, 완전한 오류정정 없이 오류완화(error mitigation) 기법만으로 양자 혼돈(quantum chaos)의 특징을 정확히 재현함
 - 고전적으로 검증이 어려운 복잡한 다체(many-body) 양자 동역학을 실제 하드웨어에서 구현·측정하고, 이론 예측과 일치하는 결과를 도출함
 - 이는 내결함(fault-tolerant) 양자컴퓨터 도래 이전에도 복잡한 물리계 연구가 가능함을 보여주는 실증 사례임
 - 연구배경 및 문제의식
 - 근미래(NISQ) 양자컴퓨터는 노이즈가 크고 큐비트 수가 제한적이어서 결과 신뢰성 확보가 핵심 과제임
 - 특히 연구 대상이 고전 컴퓨터로 정확 검증이 불가능할 정도로 복잡한 경우, 양자 결과를 어떻게 신뢰할 것인지가 지속적 문제로 제기되어 왔음
 - 본 연구는 하드웨어 실험, 해석적 해가 존재하는 모델, 사후 오류완화 기법을 결합하여 신뢰성 확보 방안을 제시함
 - 실험 설계 및 방법
 - 연구진은 IBM Quantum의 초전도 양자컴퓨터를 이용해 ‘듀얼-유니터리(dual-unitary) 회로’를 구현함
 - 듀얼-유니터리 회로는 정보 혼잡이 극대화된 혼돈적 특성을 가지면서도, 특정 관측량에 대해서는 정확한 해석적 예측이 가능한 특수 회로임

- 최대 91큐비트, 4,000개 이상의 2큐비트 게이트를 실행하여 대규모 양자 동역학을 구현함
- 급격한 섭동 이후 정보 전파 속도를 나타내는 ‘무한온도 자기상관함수(infinite-temperature autocorrelation function)’ 를 측정함

○ 오류완화 기법(Tensor-Network Error Mitigation, TEM)

- 원시 데이터는 하드웨어 노이즈로 인해 이론보다 빠르게 감쇠하는 경향을 보였음
- 연구진은 텐서네트워크 기반 오류완화(TEM)를 적용하여 노이즈 효과를 수학적으로 역보정함
- TEM은 회로 자체를 수정하지 않고, 측정 관측량을 재구성하여 이상적(노이즈 없는) 기대값을 추정하는 사후 보정 방식임
- 오류완화 후 결과는 51~91큐비트 범위 및 적분가능 영역에서 강혼돈 영역까지 이론 곡선과 높은 일치도를 보임

○ 주요 성과

- 비(非)클리포드(non-Clifford) 회로에서도 오류완화가 효과적으로 작동함을 입증함
- 이는 단순 벤치마크용 회로가 아닌 실제 과학적 응용에 가까운 회로에서도 활용 가능성을 의미함
- 전체 실험(노이즈 특성화 · 보정 · 데이터 수집 포함)은 약 3시간 내 수행되었으며, 초당 1,000회 이상의 측정 속도를 기록함

○ 고전 계산과의 비교 및 역할 변화

- 정확 해가 존재하지 않는 영역에서, 양자 결과를 두 가지 근사적 고전 텐서네트워크 시뮬레이션과 비교함
- 두 고전 방법은 서로 다른 예측을 제시했으나, 오류완화된 양자 데이터는 연산자 기반 시뮬레이션과 더 높은 일치도를 보임
- 이는 양자컴퓨터가 단순한 “속도 경쟁자” 가 아니라, 고전 계산

간 상충 결과를 판별하는 독립적 기준(arbitrator) 역할을 수행할 수 있음을 시사함

○ 의의 및 응용 가능성

- 완전한 양자 오류정정 없이도 복잡계 물리 시뮬레이션이 가능함을 보여주어, 근미래 양자컴퓨팅의 실질적 활용 가능성을 확장함
- 다체 물리에서의 수송, 국소화, 열화(thermalization) 연구에 활용 가능
- 장기적으로는 신소재 개발, 신약 탐색, 교통 흐름·물류 최적화 등 복잡 상호작용 시스템 분석에 기여 가능성 제시

○ 오류완화는 하드웨어 안정성과 정확한 노이즈 모델링에 의존하며, 회로가 더 깊어질 경우 편향이 누적될 수 있음

- 전 범위 상관함수나 얽힘(entanglement) 측정 등 보다 일반적 관측량에는 추가적 샘플링과 자원이 필요함
- 오류완화는 근본적 오류정정을 대체할 수 없으며, 장기적으로는 내결함 양자컴퓨터 개발이 필수적임

○ 본 연구는 91큐비트 규모에서 양자 혼돈을 신뢰성 있게 재현함으로써, 근미래 양자컴퓨터가 복잡한 다체 물리 연구의 실질적 도구로 활용될 수 있음을 보여준 대표적 사례임

- 양자컴퓨터의 역할을 “계산 우위 확보” 에서 “고전 계산 보완 및 검증 도구” 로 확장했다는 점에서 중요한 전환점을 제시함.

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/01/20/researchers-show-todays-quantum-computers-can-reliably-study-complex-physics/>