

양자 컴퓨터의 희귀 자기 현상 시뮬레이션 능력

(2025.04.10., 양자정보연구지원센터)

□ 양자 컴퓨터, 기존 방식으로 어려운 희귀 자기 현상 시뮬레이션 성공

○ 연구 개요 및 의의

- Quantinuum과 국제 공동 연구팀은 56큐비트 디지털 양자컴퓨터 H2를 사용해 고전적 방식으로는 어려운 “Floquet 예열화(Floquet prethermalization)” 라는 희귀한 자기 현상을 시뮬레이션 하는 데 성공함
- 이는 양자 시뮬레이션이 실질적인 과학적 의미를 지닌 문제에서 고전 시뮬레이션을 능가했음을 보여주는 중요한 사례로, “양자 우위(Quantum Advantage)” 를 향한 진전으로 평가됨
- 재료과학과 응집물질물리학에서 양자컴퓨터 활용의 가능성을 넓힘(arXiv 게재)

○ Floquet Prethermalization

- 이는 시간에 따라 주기적으로 구동되는 양자 시스템이 완전한 무질서 상태로 가기 전, 일시적으로 안정된 상태(열역학적 평형)를 유지하는 현상임
- 마치 회전하는 동전이 완전히 멈추기 전 잠시 안정적으로 보이는 순간처럼, 이 현상은 시스템이 무질서해지기 전 나타나는 질서 있는 과도기적 상태임

○ 시뮬레이션 방법 및 실험 세부

- 연구진은 transverse-field Ising 모델을 기반으로 한 7×8 격자의 스핀 구조를 양자 시뮬레이션 함
- 시간 진화를 모사하기 위해 2차 Trotter 분해법을 사용하여 연속

적인 시간 변화를 이산적인 양자 게이트로 근사

- 20단계의 시뮬레이션에 걸쳐 2,000개 이상의 2큐비트 게이트를 포함한 회로를 구현
- 시뮬레이션의 안정성을 검증하기 위해 스핀 상관관계의 시간에 따른 붕괴를 측정했고, 일정 조건 하에서는 무질서로 가지 않고 안정된 자기 영역을 유지하는 상태를 확인함

○ 물리적 분석 및 하이드로다이내믹(hydrodynamic) 특성 확인

- Floquet 예열 상태에서 시스템의 “열적 확산 상수(diffusion constant ≈ 0.38)” 를 추출하여, 이 시스템이 실제 열 수송 법칙을 따름을 증명함
- 이는 양자 시스템이 실제로 하이드로다이내믹(유체역학적) 거동을 보인다는 점에서 중요한 의미를 가짐
- 불균일한 초기 상태에서 국소 에너지 구배가 시간에 따라 평형화 되는 과정을 관찰하여 확산 방정식 적용 가능성 입증

○ 고전 시뮬레이션과의 비교

- 비교 대상으로는 MPS(Matrix Product State), PEPS(Projected Entangled Pair States), Sparse Pauli Dynamics, 신경망 기반 양자 상태 등이 사용됨
- 이들 고전적 방법은 짧은 시간 및 작은 시스템에서는 유효하지만, 격자 크기(7×8)와 시간 스케일이 커지면 메모리 부족, 수렴 실패, 근사 오류 등의 한계로 신뢰성이 급감
- 연구팀은 제로 노이즈 외삽(ZNE, Zero-Noise Extrapolation) 기법을 통해 양자 노이즈를 제거하고, 단순한 경우에는 고전 방식과 일치함을 검증함

○ 연구의 의의와 미래 방향

- 이번 연구는 양자컴퓨터가 단순한 수학적 문제를 넘어서 실제 물

리적 시스템(응집물질, 자기 현상 등)을 이해하는 데 활용될 수 있음을 보여줌

- 향후에는 고온 초전도체, 양자 스핀 액체, 강상관계 물질 등 복잡한 계의 실시간 동역학을 양자컴퓨터로 탐구하는 것이 가능할 것으로 기대됨
- 연구진은 이 기술을 고에너지 물리학, 양자 열화학, 물질의 비평형 거동 연구 등으로 확장하고, 고전 알고리즘의 성능을 테스트할 양자 기준(benchmark) 개발도 제안
- 본 연구는 Quantinuum(미국, 영국, 독일), Technical University of Munich, Caltech, EPEL(스위스), University of Texas at Austin 등 다수의 대학 및 연구소가 협력

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/03/28/quantum-computers-ability-to-simulate-elusive-magnetic-behavior-could-challenge-classical-methods/>