

양자 시뮬레이터, 실시간 끈의 동역학(String dynamics) 포착

(2025.10.02., 양자정보연구지원센터)

□ 양자 시뮬레이터, 실시간 끈의 동역학(String dynamics) 포착

○ 연구개요

- 물리학자들은 초전도 양자 프로세서를 이용하여 입자 사이의 힘의 끈(string)이 늘어나고, 진동하며, 분열되는 과정을 실시간으로 관측
- 이는 자연계에서 가장 강한 힘(강한 상호작용)의 결합 메커니즘을 이해하는 데 중요한 진전
- 연구는 CERN 이론물리학 프로그램 하에 진행(arXiv에 선공개)

○ 연구 배경 및 의의

- 게이지 이론(gauge theory)은 강한 핵력과 같은 상호작용을 설명하는 수학적 틀
- 이번 연구에서는 단순화된 Z₂-Higgs 모형을 IBM 초전도 큐비트 칩(heavy-hex 구조)에 구현
- QCD(양자색역학)보다 간소화, 구속(confinement) 현상 포착 가능
- 기존의 고전적 격자 시뮬레이션(lattice simulation)은 정적 성질은 계산 가능하지만, 실시간 동역학 계산에는 sign problem, 얽힘 장벽으로 한계 존재
- 양자 장치를 활용하면 비섭동(non-perturbative) 영역을 탐색할 수 있는 새로운 경로를 제시

○ 실험 방법

- 최대 144큐비트, 약 200층(two-qubit gate) 회로를 사용하여 끈의 생성 및 진화를 모사
- (두 가지 운동 양상 관찰) “요요 모드(yo-yo)” : 입자가 탄성 밴드에 연결된 듯 끈이 왕복 진동
- “굽힘 모드(bending)” : 끈 끝점이 옆으로 이동 → 메손 궤적과

유사한 회전 패턴의 전구 현상

- 다중 끈 환경에서는 플릭스 튜브(fragmentation 및 재결합) 현상이 관찰 → 충돌기 실험에서의 제트(jet) 현상과 유사
- (노이즈 대응 전략) 게이지 동적 디커플링(gauge dynamical decoupling), Gauss sector correction
- 오퍼레이터 재정규화, Pauli twirling 기법 병행
- 최대 60만 회 측정(shots)으로 통계적 신뢰 확보

○ 주요 성과

- 기존 고전 컴퓨터로는 불가능한 실시간 끈 동역학 추적에 성공
- 관측된 동역학은 고전적 텐서 네트워크 시뮬레이션(tensor network, Galerkin method) 결과와 교차 검증
- 현재의 하드웨어 제약(회로 깊이, 시스템 크기)에도 불구하고 양자 시뮬레이션의 가능성 증명(proof-of-principle) 달성

○ 한계점

- 플라켓 항(plaquette terms) 생략 → 끈의 풍부한 요동 반영 어려움
- QCD 수준의 복잡도에는 아직 도달 불가
- 장시간 스케일 시뮬레이션(열화, 완전 회전 등)은 미해결
- 위상 반전 오류(phase-flip errors)는 완전한 보정 어려움

○ 향후 방향

- 확장성 제고 : 더 큰 큐비트 수, 높은 게이트 충실도 확보 시 집합적 현상(끈 산란, 바운드 상태) 모사 가능
- 모형 확장 : $U(1)$, $SU(3)$ 게이지군으로 확장, 실제 입자물리 대칭에 근접
- 변분 알고리즘 도입 : 기저상태/열상태 준비 및 위상전이 연구 활용
- 장기적으로 QCD의 완전한 양자 시뮬레이션 위한 기반 마련 기대

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/09/09/quantum-simulators-capture-real-time-string-dynamics/>