

IBM 연구진, 양자컴퓨팅의 ‘노이즈 장벽에 도전

(2025.10.12., 양자정보연구지원센터)

□ IBM 과학자들, 양자 잡음의 한계를 넘어서는 새로운 가능성 제시

○ 연구개요

- 기존 “노이즈(noise)는 양자컴퓨터의 최대 적”이라는 통설을 재검토
- 특정 조건에서 노이즈가 오히려 계산을 유지 or 향상 가능성을 제시
- 비유니탈(nonunital) 노이즈를 이용한 “RESET 프로토콜” 제안
- Challenging the Quantum Noise Barrier(*PRX Quantum*, 2025 게재)

○ 배경 및 기존 관점

- (기존 인식) 양자 하드웨어는 불가피하게 노이즈를 포함하며, 에러 보정(error correction)이나 회로 내 측정(mid-circuit measurement) 없이 깊은 회로를 실행하면 정보가 빠르게 소실됨
- 유니탈(unital) 노이즈(예: depolarizing noise)는 “크림을 휘젓는 커피” 처럼 모든 상태를 무작위로 섞어 coherence를 붕괴시킴
- 따라서 회로 깊이는 로그(logarithmic) 수준에 제한된다는 이론이 일반적이었음
- (문제意識) 실제 하드웨어의 노이즈는 이상적인 유니탈 형태가 아니라 방향성을 가진 비유니탈(nonunital) 특성을 가짐
- 예를 들어, “진폭 감쇠(amplitude damping)” 은 큐비트를 특정 방향(바닥 상태)으로 ‘끌어당기는’ 비대칭적 성질을 가짐
- 이러한 비유니탈 노이즈가 계산에 활용될 가능성이 충분히 탐구되지 않음

○ 새로운 접근, “Quantum Refrigerator” 개념 확장

- 기존 연구에서 제시된 양자 냉장고(quantum refrigerator) 개념을

기반으로, 소모적인 노이즈 과정을 이용해 큐비트를 ‘냉각’ 시키고 더 순수한 상태로 재설정(reset)하는 방식을 고안.

○ RESET 프로토콜의 3단계 구조

- 수동 냉각(passive cooling): 보조 큐비트(ancilla qubit)를 노이즈에 노출시켜 예측 가능한 부분적으로 정렬된 상태로 만듦
- 알고리즘적 압축(algorithmic compression): 특수 회로(compound quantum compressor)를 이용해 정렬된 정보를 소수의 큐비트로 농축, 고순도 상태 확보
- 스와핑(swapping): 이 “깨끗한” 큐비트를 메인 회로의 “더러운” 큐비트와 교체해 전체 계산 시스템을 재활성화(refresh)

○ 핵심 결과

- 비유니탈 노이즈 환경에서 측정 없이도 회로의 오류를 억제하고 계산 깊이를 임의로 연장할 수 있음.
- 회로의 오버헤드는 다항 로그(polylogarithmic) 수준으로 증가에 그침 → 문제 규모가 커져도 비용 증가가 매우 완만.
- 충분히 약하고 잘 특성화된 비유니탈 노이즈 하에서는 계산이 여전히 “보편적(universal)”이며, 고전 컴퓨터로 효율적 시뮬레이션이 어려운 영역까지 도달 가능.

○ 연구의 의의

- (노이즈의 ‘적’ 에서 ‘자원’ 으로의 전환) 소멸 과정(dissipation)을 단순한 방해요소가 아닌 계산 자원으로 재해석.
- “노이즈 억제” 중심의 패러다임에서 “노이즈 활용” 접근으로 전환.
- (측정 없는 오류 보정 가능성) 측정(measurement)은 많은 양자 플랫폼에서 가장 어려운 연산 중 하나
- RESET 프로토콜은 측정을 대체함으로써 하드웨어 요구사항을 크

게 완화할 수 있음

- (양자 우위(quantum advantage)의 확장 가능성) 실제 장비가 가진 비유니탈 노이즈 특성을 고려할 경우, 기존 모델보다 훨씬 깊은 회로에서도 고전적 시뮬레이션이 어려운 계산을 유지 가능
- 이는 “노이즈 환경에서도 양자 우위가 실현될 수 있다” 는 새로운 이론적 근거를 제시함
- (실험적 · 공학적 설계 방향 제시) 단순히 노이즈를 최소화하기보다, 노이즈의 구조적 특성을 반영한 회로 및 하드웨어 설계 가능성 제시
- 예: 특정 비유니탈 경로를 활용한 “자기 냉각형” 회로 구성

○ 한계 및 과제

- (매우 엄격한 노이즈 임계 조건) 이론상 허용되는 노이즈 강도는 약 10^{-5} 수준(10만 번 중 1회 오류), 실제 하드웨어는 아직 이 기준에 크게 못 미침
- (보조 큐비트의 대규모 오버헤드) RESET 과정에는 방대한 수의 ancilla qubit이 필요할 수 있음, 일부 이론적 모델에서는 수백만 개의 보조 큐비트를 요구
- (노이즈 특성의 정밀 파악 필요) 비유니탈 노이즈라고 모두 유용한 것은 아님, 노이즈의 세기와 방향성이 잘못되면 오히려 계산 붕괴를 가속할 수 있음
- (실험적 검증의 초기 단계) 본 연구는 이론적 분석 중심으로, 실제 하드웨어에서의 구현 및 성능 검증은 아직 제한적

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/09/13/ibm-scientists-challenge-quantums-noise-barrier/>