양자 기술의 결합, 기초 양자 현상 관측, 하이브리드 QC 구현

(2026.11.19., 양자정보연구지원센터)

□ 양자 기술의 결합으로 기초 양자 현상을 관측하는 하이브리드 양자컴퓨터 구현

○ **하이브리드 양자컴퓨터를 활용한 아하로노프-봄(Aharonov-Bohm) 효과 구현**

- 영국 옥스퍼드대학교 물리학과 연구진은 큐비트(qubit)와 양자 진동자(quantum oscillator)를 결합한 하이브리드 양자컴퓨터를 이용해 양자 시뮬레이션에서 아하로노프-봄 효과를 관측함. 연구 결과는 국제 학술지 Nature Physics에 게재됨.

- 아하로노프-봄 효과는 입자가 자기장이 존재하는 영역을 직접 통과하지 않더라도, 자기선속 주변을 이동하면서 측정 가능한 양자 위상 변화를 얻는 현상으로, **양자역학의 비고전적 특성**을 보여주는 대표적인 기초 현상임.

○ **격자 게이지 이론의 양자 시뮬레이션 구현**

- 연구진은 물질과 게이지 장(gauge field) 사이의 상호작용을 기술하는 **격자 게이지 이론(lattice gauge theory)**을 구현함. 해당 이론은 입자물리학 및 고에너지물리학의 기본 상호작용을 설명하는 데 활용됨.

- 격자 게이지 이론은 물질을 격자의 각 지점에, 게이지 장을 지점 사이를 연결하는 링크에 배치하는 구조로 표현됨. 시스템 규모가 커질수록 고전 컴퓨터로 계산하기 어려워지므로, 실제 양자 시스템을 이용해 이론의 동역학을 재현하는 양자 시뮬레이션이 대안으로 주목받고 있음.

○ **큐비트와 양자 진동자를 결합한 하이브리드 구조 개발**

- 세바스티안 자너(Sebastian Saner) 박사와 오아나 바자반(Oana

Bazavan) 박사 등 옥스퍼드대학교 연구진은 스페인 마드리드 이론물리연구소의 알레한드로 베르무데스(Alejandro Bermudez) 박사와 협력해 2022년부터 실험을 개발함.

- 이 시스템에서 이온의 내부 상태로 구현한 큐비트는 게이지 장을, 동일한 이온의 진동 상태로 구현한 양자 진동자는 물질을 나타냄. 연구진은 두 개의 양자 진동자로 물질이 존재하는 두 지점을 구성하고, 두 큐비트로 지점 사이의 게이지 장을 표현해 이론의 기본 단위인 폐곡선 구조를 구현함.

○ **얽힘 상태를 이용한 동적 자기선속 구현**

- 연구진은 두 큐비트를 얽힘 상태(entangled state)로 준비해 격자 루프를 관통하는 자기선속을 표현함. 기존 방식으로는 하드웨어가 제공하지 못하는 상호작용이 필요했으나, 게이지 장 자체를 양자 상태로 인코딩하는 방식을 통해 이를 구현함.
- 이를 통해 고정된 자기장 배경에서 물질이 움직이는 상황이 아니라, 물질과 게이지 장이 서로 영향을 주고받으며 함께 변화하는 동적 양자 시스템을 구현했다는 점에서 의미가 있음.

○ **간섭에 의한 입자 터널링 억제 및 아하로노프-봄 효과 관측**

- 연구진은 루프를 따라 물질 입자가 터널링하는 과정을 관측했으며, 자기선속이 없는 경우 입자는 자유롭게 터널링했지만 자기선속이 존재하면 두 경로에서 발생한 양자파가 상쇄 간섭을 일으켜 터널링이 완전히 억제됨.
- 그 결과 시스템은 초기 상태에 머무르는 현상을 보였으며, 이를 통해 동적으로 변화하는 게이지 장 환경에서 아하로노프-봄 효과를 실험적으로 구현함.

○ **기초 입자물리학 연구 및 양자 시뮬레이션 활용 가능성 확대**

- 이번 연구는 고전 컴퓨터로 계산하기 어려운 물질과 게이지 장의 상호작용을 하이브리드 양자컴퓨터로 시뮬레이션할 수 있음을 보여줌.

특히 큐비트와 양자 진동자의 서로 다른 물리적 특성을 결합해 복잡한 양자 현상을 구현하는 접근법을 제시함.

- 같은 학술지에는 미국 메릴랜드대학교 노버트 링케(Norbert Linke) 교수 연구진이 **하이브리드 양자 시스템으로 핵·입자물리학과 관련된 유카와 퍼텐셜(Yukawa potential)을 시뮬레이션한 연구**도 함께 소개됨. 두 연구는 하이브리드 양자 아키텍처가 기초 물리학의 상호작용을 연구하는 유용한 플랫폼이 될 가능성을 보여줌.

ㅇ 연구 결과 발표

- 관련 논문 「Aharonov-Bohm interference in a $\mathbb{Z}_2$ lattice gauge theory on a hybrid qubit-oscillator quantum computer」는 2026년 9월 25일 국제 학술지 Nature Physics에 게재됨.
- 이번 성과는 하이브리드 양자컴퓨터가 단순한 계산 장치를 넘어, 물질과 게이지 장의 상호작용 및 기초 양자 현상을 실험적으로 탐구하는 연구 플랫폼으로 활용될 수 있음을 시사함.

(원문)

1. https://thequantuminsider.com/2026/10/12/quantum-meet-quantum-hybrid-quantum-computer-lets-scientists-peak-in-on-foundational-quantum-effect/