

칼텍, 양자 시뮬레이터로 양자 물질의 보편적 규칙 규명

(2026.09.16., 양자정보연구지원센터)

□ 양자 시뮬레이터로 양자 물질의 보편적 규칙 규명

- 양자 물질의 ‘보편성’에 대한 최초의 직접 실험
 - 미국 (Caltech) 연구진은 파리-사클레대학교 및 뮌헨공과대학교 연구진과 공동으로 양자 시뮬레이터를 활용해 “등각장론(Conformal Field Theory, CFT)”이 예측하는 양자 물질의 에너지 준위를 직접 측정함
 - 연구 결과는 국제학술지 Nature에 게재되었으며, Ising 및 삼중임계 Ising(tricritical Ising) 등각장론이 예측한 에너지 스펙트럼을 실험적으로 확인한 최초의 사례임
- 서로 다른 물질에서 나타나는 ‘보편성’ 규명
 - 물이 끓거나 자석의 자성이 사라지는 것처럼 물질이 한 상태에서 다른 상태로 전이할 때, 물질의 미시적인 차이와 관계없이 서로 동일한 수학적 규칙을 따르는 “보편성(universality)”이 나타날 수 있음
 - 이러한 보편적 특성은 양자 얽힘과 중첩 등이 나타나는 양자계가 서로 다른 상태의 경계에 도달할 때 특히 중요하며, 이를 설명하는 이론적 틀이 등각장론임
 - 연구진은 절대영도에 가까운 환경에서 온도 변화가 아닌 순수한 양자 효과에 의해 발생하는 상전이를 구현하고 그 특성을 측정함
- 중성 원자 기반 양자 시뮬레이터 활용
 - 실험에는 레이저로 개별 원자를 포획하는 광학 집게(optical tweezers) 기술과 스트론튬 원자를 이용한 양자 시뮬레이터가 활용됨

- 원자를 일렬로 배열한 뒤 레이저를 이용해 원자를 고에너지 상태인 **리드베리(Rydberg)** 상태로 전이시켜 인접 원자 간 강한 상호작용을 유도함
- 이 과정에서 개별 원자들이 독립적으로 행동하는 대신 하나의 집단적인 양자계처럼 거동하도록 만들고, 레이저 조건을 조절해 Ising 및 삼중임계 Ising 이론이 적용되는 임계점에 시스템을 위치시킴

○ ‘다체 변조 분광법’을 통한 에너지 준위 측정

- 연구진은 이번 연구를 위해 개발한 “다체 변조 분광법 (many-body modulation spectroscopy)”을 이용해 양자계의 에너지 준위를 측정함
- 레이저의 주파수를 변화시키면서 원자 배열 전체를 미세하게 흔들고, 특정 주파수에서 나타나는 반응의 증가를 측정해 양자계의 에너지 준위 구조를 파악함
- 최대 35개의 원자로 구성된 사슬에서 측정한 에너지 준위는 시스템 크기에 따라 재조정했을 때 하나의 보편적인 곡선으로 수렴했으며, 이는 Ising 등각장론의 이론적 예측과 일치함
- 또한 삼중임계점에서는 일반적인 Ising 모델과 구별되는 에너지 준위 비율을 측정하여 삼중임계 Ising 등각장론의 예측도 확인함

○ 원자 단위 제어를 통한 추가적인 양자 상태 분석

- 광학 집계를 이용하면 배열 내 각각의 원자를 개별적으로 제어할 수 있기 때문에 기존 물질 실험에서는 구현하기 어려운 정밀한 측정이 가능함
- 연구진은 양자 여기(excitation)를 대칭성에 따라 분류해 기존 측정에서 드러나지 않았던 추가적인 에너지 준위 계열을 확인함

- 또한 원자 사슬 양 끝의 조건을 조절함으로써 에너지 준위의 배열을 변화시켰으며, 각각의 조건에서 삼중임계 Ising 이론이 예측하는 서로 다른 패턴을 관측함
- 양자 시뮬레이터의 기초물리 연구 활용 가능성 확대
 - 이번 연구는 양자컴퓨터 개발을 위해 발전해 온 중성 원자 기반 기술을 기초물리학 연구에 활용했다는 점에서 의미가 있음
 - 특히 이론적으로만 예측되어 온 등각장론의 에너지 스펙트럼을 실제 양자계에서 직접 측정함으로써, 양자 상전이와 보편성에 대한 이론적 이해를 실험적으로 검증할 수 있는 기반을 마련함
 - 연구진은 향후 원자를 1차원 선형으로 배열하는 방식에서 나아가 2차원 격자 형태의 더 큰 양자 시스템을 구축해 현재 이해가 부족한 2차원 등각장론을 연구할 계획임
 - 또한 향후에는 이론적 해답을 미리 알 수 없고 기존 고전 컴퓨터로는 계산하기 어려운 양자계에 해당 기술을 적용해, 양자 시뮬레이터를 이용한 새로운 물리 현상 탐색으로 연구를 확대할 예정임

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/08/20/caltech-team-uses-quantum-simulator-to-probe-universal-rules-of-quantum-matter/>