

IBM 양자 하드웨어를 활용한 입자물리학 핵심 과정 모델링

(2026.08.11., 양자정보연구지원센터)

□ 입자물리학의 핵심 과정을 IBM 양자 하드웨어로 모델링

- IBM 양자컴퓨터 활용한 입자물리학 핵심 과정 ‘하드론화’ 시뮬레이션 성공
 - 미국 로렌스 버클리 국립연구소(Lawrence Berkeley National Laboratory) 연구진이 IBM 양자컴퓨터를 활용해 입자물리학의 핵심 과정인 하드론화(hadronization)를 시뮬레이션하는 데 성공
 - 오크리지 리더십 컴퓨팅 시설(OLCF)이 운영하는 “양자컴퓨터 사용자 프로그램(QCUP)” 을 통해 IBM 양자컴퓨터에 원격 접속해 연구 수행
 - 이번 연구는 단순화된 양자역학 모델을 기반으로 진행됐으나, 향후 기존 슈퍼컴퓨터로 수행하기 어려운 대규모 과학 계산을 양자컴퓨터로 처리하기 위한 기반 기술을 마련했다는 데 의의
 - 연구 결과는 국제 학술지 Physical Review D에 게재
- 하드론화: 물질의 기본 구조를 이해하는 핵심 과정
 - 하드론화는 두 개 이상의 쿼크(quark)가 “강한 핵력(strong nuclear force)” 에 의해 결합해 하드론(hadron)이라는 복합 입자를 형성하는 과정
 - 대표적인 하드론으로 원자핵을 구성하는 양성자와 중성자가 있으며, 하드론화 과정을 이해하는 것은 물질의 구조와 우주의 근본적인 특성을 이해하는 데 중요
 - 그러나 실제 입자 충돌 실험만으로는 하드론화 과정의 모든 단계를 직접 관측하기 어려워 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 보완이 필요
 - CERN의 대형강입자충돌기(LHC)에서는 양성자를 빛에 가까운 속도로 가속해 충돌시키고 그 결과 발생하는 쿼크·반쿼크 등을 분석하지만, 이들 입자는 하드론화가 매우 빠르게 일어나 직접적인 측정에 한계가 존재

○ 기존 고전적 슈퍼컴퓨터의 계산 한계

- 하드론화를 설명하는 이론적 기반은 존재하지만, 이를 이용해 실제 하드론화 과정을 정밀하게 예측하는 것은 고전적 컴퓨터의 계산 능력으로는 매우 어려운 상황
- 특히 쿼크와 글루온 사이의 강한 상호작용을 설명하는 “양자색 역학(QCD, Quantum Chromodynamics)”은 복잡한 양자 얽힘과 상관관계를 포함
- 고전적 컴퓨터에서는 입자 수나 시뮬레이션 시간 단계가 증가할 때 필요한 메모리와 연산량이 **지수적으로 증가**하는 문제가 발생
- 반면 양자컴퓨터는 큐비트가 양자 중첩과 얽힘을 활용해 여러 양자 상태를 동시에 표현할 수 있어, 양자역학적 시스템을 자연스럽게 모델링할 수 있다는 장점을 보유

○ IBM 156큐비트 Heron 프로세서 활용

- 연구진은 QCUP을 통한 클라우드 접속으로 IBM Quantum Platform의 156큐비트 Heron 프로세서 중 104큐비트를 활용해 시뮬레이션 수행
- 현재 양자컴퓨터는 큐비트 수가 제한적이고 오류율이 높아 대규모·고정밀 QCD 계산을 직접 수행하기에는 한계가 있으나, 이번 연구에서는 기존 하드웨어에서 가능한 범위 내에서 계산 기법을 단순화해 적용
- 연구의 궁극적인 목표는 향후 더 많은 큐비트와 낮은 오류율을 갖춘 양자컴퓨터를 활용해 대규모 아원자 입자계의 QCD를 직접 시뮬레이션할 수 있는 계산 기술을 개발하는 것

○ 하드론화의 핵심 현상인 ‘끈 끊김(String Breaking)’ 구현

- 연구진은 하드론화 과정에서 나타나는 핵심 현상인 “끈 끊김(string breaking)”을 시뮬레이션
- 쿼크 사이에는 글루온(gluon)으로 구성된 일종의 ‘끈’이 형성되며, 쿼크들이 서로 멀어지면서 이 끈에 에너지가 축적

- 일정 수준 이상의 에너지가 축적되면 글루온 끈이 끊어지고 새로운 쿼크-반쿼크 쌍이 생성되어 하드론을 형성
- 계산을 단순화하기 위해 상대적으로 질량이 큰 쿼크를 이용해 시뮬레이션하고, 이를 바탕으로 가벼운 쿼크의 거동을 추정하는 방식 적용
- 양자 진공 상태 구현 및 계산 규모 확장 기법 적용
 - 연구진은 자체 개발한 “확장 가능한 회로 동시 변분 양자 솔버 (scalable circuit concurrent variational quantum solver)”를 활용해 양자컴퓨터를 양자 진공 상태로 준비
 - 양자 진공은 시스템에서 가장 낮은 에너지 상태로, 상대적으로 안정적인 초기 상태를 의미
 - 작은 규모의 시스템에서 회로의 최적 조건을 먼저 찾은 뒤, 시스템 규모를 단계적으로 확대하면서 얻은 결과를 바탕으로 더 큰 시스템의 계산 조건을 추정하는 방식을 적용
 - 이를 통해 현재 제한적인 큐비트 수를 가진 양자컴퓨터에서도 향후 수백 큐비트 규모의 계산으로 확장할 수 있는 가능성을 제시
- 1차원 시뮬레이션으로 기존 연구 결과 재현
 - 초기 연구에서는 계산 복잡성을 낮추기 위해 입자의 움직임을 1차원으로 제한해 왼쪽과 오른쪽으로만 이동하도록 설정
 - 시뮬레이션 결과는 기존 고전적 슈퍼컴퓨터를 활용한 연구 결과와 일치하는 것으로 나타나, 현재의 양자 하드웨어와 알고리즘을 활용해 입자물리학 계산을 수행할 수 있음을 확인
 - 특히 글루온 끈이 끊어지기 전에 그 중간 부분에서 유한한 온도에서 기체화(gasification)되는 듯한 현상이 나타나는 기존 연구 결과를 재현
 - 향후 다양한 단순화 모델에서 동일한 현상이 반복적으로 확인될 경우, 해당 현상이 실제 QCD에서도 나타나는 물리적 특성일 가능성이 높아질 것으로 기대

- 향후 연구 방향 및 양자컴퓨팅의 과학적 활용 가능성
 - 연구진은 향후 성능이 향상된 양자컴퓨터와 알고리즘을 활용해 현재 1차원으로 제한된 시뮬레이션을 2차원 이상으로 확장할 계획
 - 향후 큐비트 수 증가와 오류율 감소가 이루어질 경우, 보다 복잡한 QCD 시스템을 양자컴퓨터에서 직접 계산할 수 있을 것으로 기대
 - 이를 통해 기존 슈퍼컴퓨터로는 계산하기 어려운 하드론화 과정의 세부적인 물리 현상을 예측하고, LHC 등 입자가속기에서 새로운 물리학을 탐색하는 데 활용할 가능성이 있음
 - 이번 연구는 양자컴퓨터가 아직 초기 단계임에도 불구하고 실제 과학 문제에 적용해 기존 계산 결과를 재현하고 새로운 계산 가능성을 확인했다는 점에서 의미
- 양자컴퓨터를 활용한 과학 계산 기반 확대
 - QCUP은 연구자들에게 상용 첨단 양자컴퓨팅 자원에 대한 접근 기회를 제공해 과학적 발견과 혁신적인 계산 연구를 지원하는 프로그램
 - 이번 연구는 국립연구소의 과학 연구 역량과 상용 양자컴퓨팅 하드웨어를 결합해 양자컴퓨터의 실제 과학적 활용 가능성을 검증한 사례
 - 현재 양자컴퓨터는 고전적 슈퍼컴퓨터를 전면적으로 대체하기보다는, 고전 컴퓨터로 효율적으로 계산하기 어려운 양자계 문제를 보완하는 새로운 계산 수단으로서 가능성을 확대하고 있음
 - 향후 하드웨어 성능과 양자 알고리즘이 발전하면 입자물리학뿐만 아니라 화학·재료·핵물리 등 다양한 분야의 대규모 과학 계산에 양자컴퓨팅이 활용될 가능성이 높음

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/07/01/researchers-use-ibm-quantum-hardware-to-model-a-key-particle-physics-process/>