

인공지능, 양자장 이론을 계산 가능하게 만들다

(2026.02.18. 양자정보연구지원센터)

□ 인공지능, 양자장 이론을 계산 가능하게 만들다

○ 연구 개요

- 양자장 이론(Quantum Field Theory, QFT)의 수치 시뮬레이션을 인공지능(AI)으로 최적화하여, 복잡한 입자물리 계산을 보다 효율적으로 수행할 수 있는 새로운 방법을 제시한 연구임
- TU Wien 연구진이 미국·스위스 연구팀과 협력하여, 격자(lattice) 기반 양자장 이론의 매개변수화를 AI로 개선하는 데 성공함
- 계산 불가능하거나 비효율적이던 기존 격자 표현을, 물리 법칙을 보존하면서 계산 친화적으로 재구성하는 접근법을 제안함

○ 연구 배경 및 문제의식

- 양자장 이론은 현대 물리학의 기초 이론으로, 입자의 상호작용과 우주 초기 조건 등을 설명함
- 그러나 복잡한 상호작용 문제는 해석적 계산이 불가능하며, 초대형 컴퓨터 시뮬레이션에 의존해야 함
- 연속적인 시공간을 컴퓨터에서 다루기 위해서는 3차원 공간과 1차원 시간을 포함한 4차원 격자로 이산화(discretization)해야 함
- 동일한 연속 이론에 대해 서로 다른 격자 표현이 가능하지만, 어떤 표현은 계산상 비효율적이거나 부정확하여 실질적 활용이 어려움

○ 격자 이론과 고정점 방정식의 중요성

- 성공적인 시뮬레이션의 핵심은 ‘고정점(fixed point)’ 특성을 갖는 격자 이론 선택임
- 격자의 간격을 거칠게 또는 촘촘하게 바꾸어도 물리적 성질이 유

지된다면, 이는 연속 이론과 일관된 신뢰성 있는 표현임을 의미

- 이는 서로 다른 축척의 지도에서 국가 경계가 동일하게 유지되는 것과 유사한 개념임
- 하지만 이러한 조건을 만족하는 최적의 격자 작용(action)을 찾기 위해서는 수십만 개 이상의 매개변수를 조정해야 하며, 인간의 수작업으로는 사실상 불가능함

○ 인공지능 기반 접근

- 연구진은 기존 범용 AI가 아닌, 물리 법칙 준수를 구조적으로 보장하도록 설계된 특수 신경망을 개발함
- 이 신경망은 격자 이론의 핵심 물리량인 ‘작용(action)’을 매개변수화하여, 고정점 특성을 최대한 유지하도록 학습됨
- 그 결과, 비교적 거친 격자에서도 오차가 매우 작은 계산 결과를 도출할 수 있음을 입증함
- 이는 동일 정확도를 위해 필요한 계산 자원을 크게 줄일 수 있음

○ 연구 성과 및 의의

- AI를 활용해 복잡한 양자장 이론의 격자 표현을 자동 최적화함으로써, 계산 효율성과 정확성을 동시에 개선하는 새로운 경로를 개척함
- 기존에는 기술적 한계로 실현되지 못했던 개념을 최신 AI 기술을 통해 재조명·구현함
- 대규모 입자 충돌 시뮬레이션, 초기 우주 물질 거동 연구 등 고난도 물리 문제 해결에 적용 가능성 제시
- 복잡계 물리 계산을 ‘계산 가능(computable)’한 수준으로 확장하는 데 기여

○ 한계 및 향후 과제

- 현재 접근은 특정 유형의 격자 이론에 초점을 두고 있으며, 다양

한 상호작용 이론으로의 일반화가 필요함

- 신경망 학습 과정의 안정성 및 확장성, 대규모 병렬 계산 환경에서의 효율성 검증이 요구됨
- 향후 고성능 컴퓨팅 및 차세대 AI 기법과의 결합을 통해 보다 복잡한 양자장 이론 문제로 확장 가능성 존재
- 본 연구는 인공지능을 활용해 양자장 이론 시뮬레이션의 구조 자체를 재설계함으로써, 계산 자원의 제약으로 인해 어려웠던 고난도 물리 문제 해결의 새로운 가능성을 제시함
- 이는 AI가 단순 데이터 분석 도구를 넘어, 이론물리학의 계산적 기반을 혁신하는 도구로 활용될 수 있음을 보여주는 사례임

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/01/27/artificial-intelligence-makes-quantum-field-theories-computable/>