

# 블랙홀 물리학과 양자 머신러닝: 정보복원 한계탐구

(2025.06.20. 양자정보연구지원센터)

## □ 블랙홀 물리학과 양자 머신러닝의 만남, 정보 복원 한계 탐구 노력

- 블랙홀 증발 현상과 머신러닝의 “더블 디센트(double)” 현상 간의 수학적 유사성을 밝히며, 양자 중력과 정보 복원 사이의 새로운 연결고리를 제안함
  - 블랙홀 외부 방사선에서 정보가 점차 드러나는 방식이, 과적합(overparameterization)된 머신러닝 모델이 예측 정확도를 회복하는 방식과 유사하다고 분석함
  - 이는 블랙홀 증발을 하나의 양자 회귀 문제(quantum regression problem)로 재해석하는 시도이며, 물리적 정보 패턴을 머신러닝 개념으로 설명하려는 새로운 프레임워크를 제시함
- 핵심 개념 연결
  - 블랙홀 물리학의 Page 곡선과 머신러닝의 더블 디센트 곡선은 정보 접근성의 변화라는 공통 주제를 가짐
  - Page 시간: 블랙홀 복사선에서 내부보다 더 많은 정보가 포함되기 시작하는 시점
  - Interpolation threshold: 모델 파라미터 수가 데이터 수를 넘어 정확히 학습 가능한 시점이며, 일반화 성능이 갑자기 떨어졌다가 이후 다시 회복되는 현상이 발생
  - 연구진은 이 두 개념의 유사성이 Marchenko-Pastur 분포라는 랜덤 행렬 이론의 도구를 통해 설명된다고 주장함
- 모델링 방식
  - 블랙홀 마이크로상태 수를 학습 데이터 수로, 복사선의 차원을 모델의 파라미터 수로 설정함
  - 양자 회귀 문제로서, 복사선의 관측값(특징)을 통해 블랙홀 내부

상태(레이블)를 예측하는 구조로 모델링

- Page 시간에서 테스트 오류가 급증하고, 이후 감소하는 곡선은 더블 디센트에서의 학습 오차 곡선과 동일한 기하학적 대칭을 보임

#### ○ 정보 복원과 대칭성

- 모델 용량과 데이터 수가 일치할 때 성능이 가장 나쁜 점, 이후 성능이 다시 향상되는 패턴은 머신러닝에서도 발견됨
- 양자 시스템도 동일한 정보이론적 제약을 따르며, 물리계에서 발생하는 정보 손실 역시 이와 유사한 메커니즘을 통해 복원 가능하다고 시사함
- 이 대칭성은 고차원 정보 구조의 일반화 능력을 설명하는 새로운 수단이 될 수 있음

#### ○ 이론적 기초와 한계

- 제안된 모델은 양자 정보 이론과 랜덤 행렬 이론에 기반을 둔 밀도 행렬(density matrix)을 이용함
- 회계적 분석을 토대 예측 오차의 분산 등을 수학적으로 유도함
- 실험적 증거는 없으며, 블랙홀이 실제로 머신러닝을 수행한다는 것이 아니라 두 시스템의 구조적 유사성을 해석한 이론적 모델임
- 전제 조건(마이크로상태에 대한 완전한 지식, 양자중력 완성 이론, 극한 관측 능력 등)이 현재로서는 현실적으로 달성 불가능하다는 점을 인정함

#### ○ 미래 연구 방향

- 머신러닝 개념(편향, 분산 등)을 양자 중력 해석 도구로 활용 가능, 기존 물리 이론(온도, 엔트로피 등)을 확장하는 접근법 제시
- 반대로, 블랙홀의 학습 동역학 분석을 통해 데이터가 부족하거나 과잉일 때 양자 머신러닝의 일반화 성능 향상에 대한 통찰을 줄 수 있음

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2025/06/16/black-hole-physics-meets-quantum-machine-learning-in-study-exploring-information-retrieval-limits/>