

블랙홀도 숨기지 못한 양자 얽힘

(2026.01.06., 양자정보연구지원센터)

□ 블랙홀조차도 양자 얽힘을 완전히 숨기지 못할지 모른다

- 블랙홀이 정보를 완전히 지운다는 기존의 직관적 가정에 의문을 제기하며, 중력과 양자역학의 관계를 재조명함
 - 새로운 이론 연구에 따르면, 블랙홀의 사건지평선 너머로 입자가 사라지더라도 양자 얽힘의 흔적이 원칙적으로는 외부에서 감지 가능할 수 있음이 제시됨
- 연구 배경과 문제의식
 - 양자역학은 정보 보존을 기본 원리로 삼는 반면, 블랙홀은 사건지평선을 넘어간 정보가 영원히 접근 불가능해 보인다는 점에서 ‘정보 역설’을 낳아왔음
 - 기존 통념에 따르면, 얽힌 입자 쌍 중 하나가 블랙홀 안으로 들어가면 외부 관측자는 얽힘 여부를 전혀 구분할 수 없다고 여겨옴
- 연구진과 핵심 아이디어
 - 바르샤바대 이론물리학연구소의 미할스키와 드라간은 arXiv에 공개한 논문에서 이 가정을 재검토함
 - 연구의 핵심은 “이론적으로 무엇이 존재하는가”가 아니라, “양자역학이 허용하는 측정 한계 안에서 관측자가 실제로 무엇을 구분할 수 있는가”라는 운영적(operational) 관점
- 연구 방법
 - 연구진은 점입자가 아닌, 공간에 퍼진 양자 파동묶음(wave packet) 두 개를 고려함
 - 하나의 파동묶음은 블랙홀 사건지평선을 넘어가고, 다른 하나는

외부에 남아 관측 가능함

- 외부 관측자는 접근 가능한 영역에서만 측정을 수행해, 초기 상태가 ‘얽힘 상태’ 였는지 ‘비얽힘 상태’ 였는지를 판별하려 함
- 이를 위해 양자 정보 이론의 ‘양자 상태 구분(quantum state discrimination)’ 기법을 적용함

○ 주요 결과

- 양자 상태는 불확정성 원리에 따라 완벽하게 국소화될 수 없기 때문에, 사건지평선 안팎의 상태가 완전히 분리되지 않음
- 이로 인해 극히 미세하지만, 외부 관측자가 두 경우(얽힘 vs 비얽힘)를 통계적으로 구분할 수 있는 정보가 남는다는 결과 도출됨
- 즉, 얽힘 여부에 따른 차이는 “실제로는 거의 0에 가깝지만, 원칙적으로는 0이 아니다” 라는 점이 핵심

○ 주장의 한계와 주의점

- 연구진은 블랙홀 내부의 정보를 꺼내거나 신호를 보낼 수 있다고 주장하지 않음
- 또한 사건지평선을 넘은 뒤에도 얽힘이 실질적으로 유지된다고 말하는 것도 아님
- 효과는 극도로 작고, 이상적인 측정과 완벽한 시스템 지식이 필요해 현재 또는 가까운 미래의 실험으로는 검증이 불가능함

○ 이론적 · 개념적 의미

- 본 연구는 “실질적으로 불가능한 것” 과 “원칙적으로 불가능한 것” 을 동일시해 온 기존 논의에 제동을 걸
- 사건지평선이 외부 세계와 내부를 완벽히 단절한다는 단순화된 가정이 운영적 관점에서는 성립하지 않을 수 있음을 시사함
- 이는 블랙홀 정보 역설을 직접 해결하지는 않지만, 그 논의의 전제 중 하나를 약화시키는 역할을 함

- 확장 가능성과 향후 연구
 - 향후 연구에서는 다른 시공간 기하, 다양한 양자장, 혹은 호킹 복사를 포함한 상황으로 분석을 확장할 수 있음
 - 실제 블랙홀 대신 실험실에서 사건지평선을 모사하는 아날로그 시스템(광학·응집물질 등)에서 관련 원리를 탐구할 가능성도 제시
- 본 연구는 블랙홀과 양자 얽힘을 둘러싼 오래된 논의에 새로운 관점을 제공하는 이론적 성과임
 - 효과는 극히 미약하지만, “완전히 사라진 것처럼 보이는 양자 정보도 원칙적으로는 흔적을 남길 수 있다” 는 점에서 양자역학과 중력의 접점을 다시 생각하게 만듦

(원문)

1. <https://thequantuminsider.com/2026/01/03/even-black-holes-may-not-fully-hide-quantum-entanglement/>