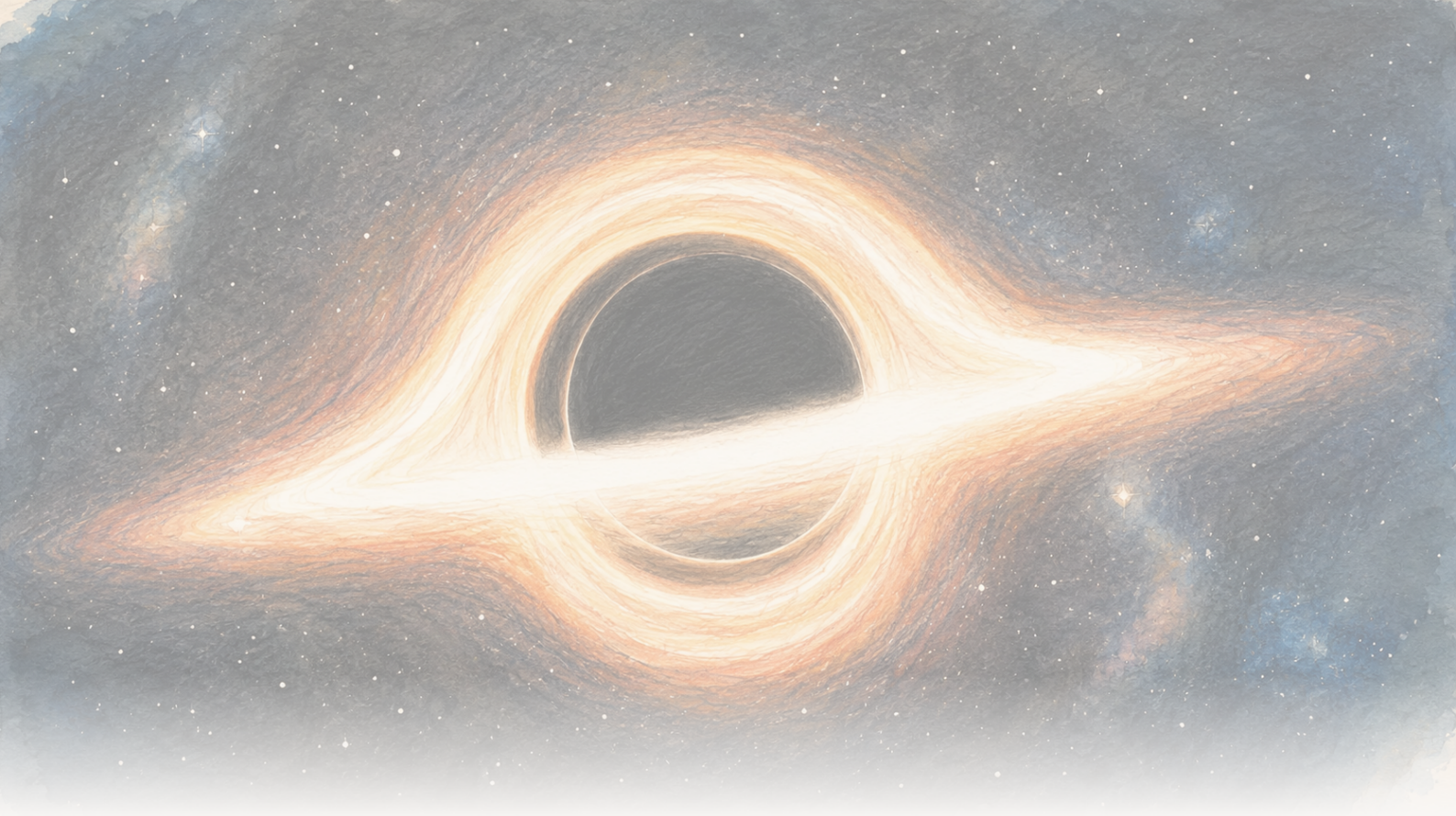




The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

블랙홀은 열역학적“법칙”을 따른다—새 결과가 이를 격렬한 비평형 블랙홀까지 확장했다

1970년대부터 블랙홀이 열역학을 닮은 법칙을 따른다는 사실이 알려져 왔지만, 가장 명료한 형태는 조용한 평형 상태의 블랙홀에만 적용됐다. *Physical Review Letters*의 새 논문은 제 1 법칙과 제 2 법칙을 준국소적 지평선 중 동역학적 지평선 구간의 조건을 충족하고 강착, 붕괴, 블랙홀 병합의 대부분 단계에서 평형으로부터 임의로 멀리 떨어질 수 있는 부분까지 확장한다. 시뮬레이션은 병합 전 과정에 걸쳐 준국소적 지평선을 추적하지만, 그 지평선이 동역학적 지평선 구간이 아닌 합체 바로 전후의 짧은 구간은 법칙이 아직 다루지 못한다. 핵심 틀은 일반상대론에 있으며 증발에는 반고전적으로 적용된다. 이는 새로운 양자중력도, 관측도, 블랙홀 정보 문제의 해결도 아니다.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium*, Abhay Ashtekar, Daniel E. Paraizo, Jonathan Shu, *Physical Review Letters* 136, 251405 (2026) · DOI: 10.1103/3c1r-v8f1

블랙홀에는 열역학을 닮은 “법칙” 이 있다. 하지만 가장 단순한 형태는 평형에 가까울 때만 성립했다

물리학에서 가장 기묘한 사실 가운데 하나는 블랙홀이 뜨거운 물체처럼 행동한다는 것이다. 1970년대 초 Bekenstein 과 Hawking 은 블랙홀을 지배하는 방정식이 열역학 법칙과 항목별로 대응한다는 사실을 알아냈다. 블랙홀의 엔트로피는 지평선 면적에 비례하고, 온도는 표면중력에 비례한다. 이어 Hawking 은 이 온도가 가장 깊은 의미에서 실체라는 사실을 보여 줬다. 블랙홀은 아주 희미하지만 실제로 열복사를 내며 빛난다.

호킹 복사란 무엇인가?

고전적으로는 블랙홀에서 아무것도 빠져나올 수 없으므로 완전히 검고 온도도 없어야 한다. 그러나 1974년 Stephen Hawking 은 지평선 근처에 양자이론을 적용하면 상황이 달라진다는 것을 보였다. 블랙홀은 희미한 열복사를 방출하며 그만큼 천천히 질량을 잃고, 즉 “증발” 한다. 스펙트럼은 호킹 온도에서 열적이지만, 휘어진 시공간을 통과하는 과정이 무한히 먼 곳에 도달하는 복사를 바꾼다. 흔한 휴리스틱 설명 – Hawking 의 실제 유도 과정은 아니다 – 에서는 지평선 바로 바깥의 양자 요동이 입자쌍을 만들고 한쪽은 복사로 탈출하며 다른 쪽은 안으로 떨어진다고 그린다.

핵심은 이 온도가 블랙홀 질량에 반비례한다는 것이다. 블랙홀이 작을수록 더 뜨겁다. 망원경으로 볼 수 있는 어떤 블랙홀도 온도는 상상할 수 없을 만큼 낮고 주변의 빈 공간보다도 훨씬 차갑기 때문에, 실제로는 복사가 극도로 미약하며 직접 측정된 적이 없다. 중요성은 개념적이다. 호킹 복사는 블랙홀 역학과 열역학의 비유를 실제 열역학으로 바꿔 준다. 블랙홀이 진짜 온도를 가지므로 이 법칙에 등장하는 “온도” 와 “엔트로피” 는 형식적인 우연이 아니라 실제 열역학적 양이다. (이는 현재 논문의 배경이며 이번 연구의 결과는 아니다.)

이 대응의 중심에는 **블랙홀 역학의 제 1 법칙**이라 불리는 결과가 있다 (Bardeen, Carter, Hawking, 1973). 말로 풀면 이렇다. 안정된 한 상태의 블랙홀을 아주 조금 변화시켜 가까운 다른 안정 상태로 옮기면, 질량 변화는 온도와 엔트로피 변화의 곱에 회전 항을 더한 것과 같다. “들어간 열은 온도와 엔트로피 변화의 곱과 같다” 는 열역학 관계의 블랙홀 버전이다.

문제는 가까운 안정 상태라는 표현에 숨어 있다. 1973년의 단순한 형태의 법칙은 평형 상태에서 조용히 있는 두 블랙홀을 비교하며, 둘의 차이도 무한소라고 본다. 실제 **과정** – 별을 삼키는 블랙홀, 서로 합쳐지는 두 블랙홀, 격렬한 탄생 뒤 흔들리며 안정화되는 갓 태어난 블랙홀 – 은 전혀 기술하지 않는다. 우리가 가장 이해하고 싶은 상황이 바로 이런 경우이고, “조용히 있는 상태” 와 정반대다. 블랙홀이 가장 흥미로울 때 기존 법칙만으로는 설명이 부족해진다.

뻔해 보이는 해결책이 왜 작동하지 않는가

물질이 떨어질 때 지평선이 자라는 모습을 그냥 추적하면 되지 않을까 싶다. 문제는 어떤 지평선을 말하느냐다.

사람들이 흔히 떠올리는 지평선, 즉 진정한 돌아올 수 없는 경계인 **사건의 지평선 (event horizon)** 에는 미묘하고 불편한 성질이 있다. 우주의 전체 미래를 알아야 정의할 수 있다는 점이다. 사건의 지평선이 지금

어디에 있는지 정확히 알려면 앞으로 영원히 무엇이 블랙홀에 떨어질지 모두 알아야 한다. 사소한 기술적 문제가 아니다. 사건의 지평선은 나중에 물질이 반드시 들어올 운명이라는 이유만으로, 그 물질이 도착하기 전의 완전히 비어 있고 평평한 공간에서부터 자라기 시작할 수 있다. 국소적으로는 아무 일도 일어나지 않는 곳에서 면적이 늘어날 수 있다.

물질이 도착하기 전에 지평선이 어떻게 자랄 수 있을까?

이 퍼즐의 과학적 이름은 사건의 지평선의 **목적론적 (teleological) 성질**, 또는 **전역적 정의 (global definition)** 다. 여기서 “목적론적”이라는 말은 지평선이 목적을 갖는다거나, 미래를 예측한다거나, 영향을 시간 역방향으로 보낸다는 뜻이 아니다. 어떤 사건이 지평선 안에 속하는지는 시공간의 완전한 미래 역사를 알아야만 결정할 수 있다는 뜻이다.

정식 정의도 같은 내용을 더 압축해서 말한다. **미래 영무한 (future null infinity) — “아이 플러스 (I-plus)”** 라고 읽고 $\mathcal{I}^+$ 로 쓰는 곳 — 을, 끝없이 탈출하는 빛이 그렇지 않으면 비어 있는 무한히 먼 미래에 도달하는 목적지라고 생각해 보자. 사건의 지평선은 바깥으로 보낸 빛 신호가 결국 그곳에 도달할 수 있는 사건들과, 어떤 신호도 영원히 도달할 수 없는 사건들을 나누는 경계다. 일반상대론의 표준 표기에서는 미래 영무한의 인과적 과거의 경계, 즉 $\partial\mathcal{J}^-(\mathcal{I}^+)$ 다. 정의 속에 영원히라는 조건이 들어 있기 때문에 지금 여기에서 한 측정만으로 사건의 지평선을 정확히 찾을 수 없다.

붕괴하는 구형 껍질을 생각하면 이상함이 잘 보인다. 껍질이 도착하기 전 내부는 비어 있고 국소적으로 평평할 수 있다. 중심에서 점점 낮은 시각에 바깥 방향 광선을 보내 보자. 일찍 나온 광선은 탈출하지만, 늦게 나온 광선은 붕괴하는 껍질과 만나 더 이상 빠져나올 수 없는 기하 구조에 들어간다. 사건의 지평선은 이 두 결과를 가르는 경계다. 그 경계를 시간을 거꾸로 따라가면 껍질이 도착하기 전, 여전히 비고 평평한 내부에서 중심부터 시작해 팽창한다. 면적이 증가한다고 해서 그곳을 국소적으로 물질이 통과했다는 뜻이 아니다. 완성된 시공간에서 어떤 탈출 경로가 남아 있는지를 기록하는 것이다.

이 그림에서 어떤 것도 과거로 거슬러 작용하지 않는다. 만약 껍질이 다른 곳으로 방향을 틀어 블랙홀이 만들어지지 않았다면 완성된 시공간 자체가 달라졌을 것이고, 그 앞선 영역도 사건의 지평선 일부가 아니었을 것이다. 교훈은 미래가 과거를 바꾼다는 것이 아니라, 사건의 지평선은 주변 관측자가 한 순간에 검출할 수 있는 표면이 아니라 **전역적 인과 경계**라는 점이다. 블랙홀이 변하는 모습을 추적할 때 물리학자들이 준국소적 또는 동역학적 지평선을 쓰는 이유가 바로 이것이다.

이 성질 때문에 사건의 지평선은 블랙홀의 “상태”를 실시간으로 기록하는 데 쓸모가 없다. 컴퓨터 시뮬레이션에서도 계산이 끝나기 전에는 사건의 지평선을 정확히 찾을 수 없으며, 순간순간의 온도나 엔트로피를 추적하는 데 사용하는 것은 더더욱 어렵다.

핵심 전환: 국소적으로 정의할 수 있는 지평선

Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo, Jonathan Shu 의 새 논문은 다른 지평선 개념, 즉 무한한 미래를 참조하지 않고 그 주변의 기하학만으로 정의되는 **준국소적 (quasi-local) 지평선**을 바탕으로 결과를 도출한다. 이러한 **준국소적 지평선**은 수치상대론 연구자들이 시뮬레이션 전반에 걸쳐 병합 전 블랙홀들을 찾아내고, 병합을 추적하며, 병합 후 잔존 블랙홀을 찾아내는 데 이미 사용하는 표면이다. 여기서 개발된 열역학 법칙은 준국소적 지평선 중 **동역학적 지평선 구간 (dynamical horizon segment)**이 되기 위한 추가 조건을 충족하는 부분에 적용된다. 그러한 각 구간에서 면적은 먼 미래의 사건이 아니라 국소 에너지 플럭스에 직

접 반응해 변한다. 양의 유입이 있으면 증가하고, 음의 에너지 플럭스를 동반하는 증발 중인 시간꼴 지평선에서는 감소한다.

저자들은 그 위에서 더 어려운 절반의 문제를 푼다. 일반 열역학에서 평형에서 멀리 떨어진 계는 다루기 매우 까다롭다. 온도나 압력 같은 양은 계가 충분히 안정된 뒤에야 깔끔하게 정의되므로 하나의 값을 부여하기 어렵다. 블랙홀도 같은 문제를 겪는다. 하지만 저자들은 일반상대론의 특수한 성질을 이용하면 이를 피할 수 있다고 보인다. 평형 상태의 블랙홀, 즉 Kerr 블랙홀은 크기와 회전이라는 두 숫자로 정해진다. 저자들은 동역학적 지평선 구간을 따라 놓인 각 상태를 취하고, 그 구간의 각 단면에서 그 상태가 순간적으로 닮은 평형 블랙홀의 두 숫자를 읽어 내는 사상을 만든다. 이를 통해 격렬하게 변화하는 블랙홀에도 구간을 따라 시간에 따라 달라지는 온도와 회전을 부여할 수 있다.

국소적으로 정의되어 지평선을 가로질러 흐르는 에너지와 순간적인 세기량을 이용해 저자들은 제 1 법칙을 평형에서 임의로 멀리 떨어진 블랙홀까지 확장한다. 핵심은 새 법칙이 얼어붙은 두 상태 사이의 무한소 단계가 아니라, **실제 물리 과정이 일으키는 유한한 변화** (물질과 중력파가 지평선을 가로지르는 과정)를 기술한다는 점이다. 이에 대응하는 제 2 법칙도 제시하며, 그 진술은 이제 정량적이다. 지평선 면적의 변화는 국소 에너지 플럭스와 직접 연결되어, 양의 유입이 있을 때는 증가하고 음의 플럭스를 동반하는 증발 중인 시간꼴 지평선에서는 감소한다. 제 1 법칙과 제 2 법칙을 함께 적용하면 하나의 명확한 결론에 이른다. 아무리 격렬하더라도 동역학적 지평선 구간으로 표현되는 모든 단계에서 엔트로피의 올바른 척도는 여전히 그 지평선의 면적이다.

이 연구가 증명하지 않는 것

- **양자중력을 해결하지 않는다.** 핵심 틀은 일반상대론으로 정식화되어 있다. 블랙홀 증발에 적용할 때는 양자 물질장이 고전적 시공간에 작용하는 반고전적 근사를 사용한다. 또한 지평선 면적을 엔트로피와 동일시하는 표준적인 관계를 여전히 가정할 뿐, 그 엔트로피를 더 근본적인 무언가에서 유도하지는 않는다.
- **미시상태를 세거나 블랙홀 엔트로피가 무엇으로 이루어졌는지 설명하지 않는다.** 블랙홀 열역학의 장부 정리를 확장할 뿐, 상자를 열어 미시적 자유도를 보여 주는 것은 아니다.
- **블랙홀 정보 역설을 해결하지 않는다.** 그 문제는 양자이론에 속하며 이 논문은 다루지 않는다.
- **관측이나 측정이 아니다.** 망원경도, 데이터도, 중력과 신호도 관여하지 않는다. 이것은 수학이다. 블랙홀이 진화할 때 동역학적 지평선에 부여되는 “온도”는 방정식에서 정밀하게 정의된 양이지 온도계로 읽을 수 있는 것이 아니다.
- **두 블랙홀의 전체 합체 과정에 대한 연속적인 열역학적 기술을 아직 제공하지는 않는다.** 수치 시뮬레이션은 병합 전 블랙홀들에서 병합을 거쳐 병합 후 잔존 블랙홀까지 전체 진화 동안 준국소적 지평선을 추적하지만, 병합에 매우 가까운 짧은 구간에서는 그 지평선이 동역학적 지평선 구간에 필요한 조건을 충족하지 못한다. 동반 논문은 이 구간에 대한 열역학적 설명이 여전히 진행 중인 과제라고 밝힌다.
- **Bekenstein과 Hawking을 뒤집지 않는다.** 오히려 원래의 평형 전용 법칙이 말할 수 없었던 동역학적 영역으로 그 그림을 확장한다.

근거는 얼마나 탄탄한가?

이런 성격의 연구로서는 강한 근거다. 해당 분야를 선도하는 연구진이 수행한 신중하고 내부적으로 일관된 수리물리학 연구이며, *Physical Review Letters* 의 *Editors' Suggestion* 으로 출판됐다. 동료 심사를 거친 동반 논문은 더 긴 유도 과정을 제시하고 레터에서 압축해 제외한 경우들을 다룬다.

정직하게 말해야 할 단서는 품질보다 종류에 관한 것이다.

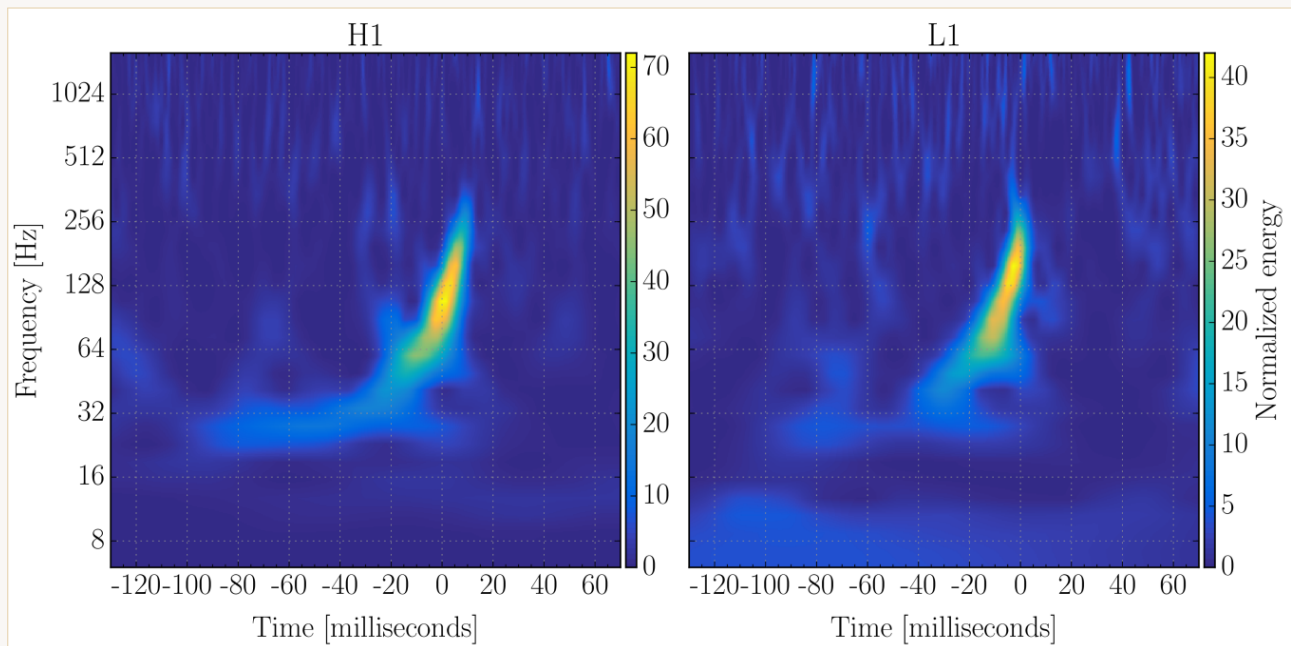
- 지평선 면적이 엔트로피라는 표준적 가정, 즉 면적을 뉴턴 상수와 플랑크 상수를 포함한 계수로 나눈 값이라는 동일시에 기대고 있다. 완전한 양자중력 이론이 언젠가 이 동일시를 수정한다면 해석도 함께 달라질 수 있다.
- 짧은 레터는 간결성과 단순성을 위해 공간꼴·축대칭 동역학적 지평선을 사용해 주요 유도를 제시한다. 동료 심사를 거친 동반 논문은 시간꼴 동역학적 지평선을 명시적으로 분석하고 회전 Killing 장 없이 각운동량을 구성한다. 다만 증발 중인 시간꼴 지평선에서 역반응을 명시적으로 다룬 부분은 구면대칭으로 제한된다.
- “평형 밖에서도 엔트로피 = 지평선 면적”이라는 것은 새 제 1·제 2 법칙 덕분에 매우 자연스러워진 동일시이지, 미시적 통계에서 처음부터 증명한 정리는 아니다.

따라서 이는 50 년 된 틀을 엄밀하게 확장한 결과이지, 실험적 발견이나 앞으로 시험해야 할 새로운 자연 법칙의 발표는 아니다.

왜 중요한가

이유는 두 가지다. 하나는 실용적이고, 하나는 개념적이다.

실제로 우리가 현재 연구하는 블랙홀, 즉 LIGO와 Virgo가 병합음을 포착하는 블랙홀은 가장 중요한 순간을 평형에서 멀리 떨어진 상태로 보낸다. 시뮬레이션은 병합 전 블랙홀들에서 병합을 거쳐 병합 후 잔존 블랙홀까지 준국소적 지평선을 추적한다. 이 논문의 물리량은 그 지평선 중 동역학적 지평선 구간의 조건을 충족하는 부분에 적용되므로, 모든 것이 안정된 뒤뿐 아니라 병합 진화의 대부분 단계와 붕괴 도중에도 블랙홀의 엔트로피와 온도를 원칙에 따라 논할 수 있는 방법을 제공한다. 합체 바로 전후의 짧은 구간에도 준국소적 지평선은 계속 추적되지만 현재의 열역학적 기술 범위 밖에 있다.



직접 검출된 최초의 중력파 신호 GW150914 는 두 블랙홀이 병합하며 만들어졌다. 이 시간-주파수 지도는 LIGO Hanford(왼쪽) 와 LIGO Livingston(오른쪽) 의 신호를 보여 준다. 두 검출기 모두에서 밝은 흔적이 병합에 가까워질수록 주파수가 올라가며 위로 휘어진다. 이는 평형에서 멀리 떨어진 실제 블랙홀 계의 사례이지만, 새 열역학적 틀을 관측으로 검증한 증거는 아니다.

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration / Classical and Quantum Gravity, Fig. 10 CC BY 3.0

개념적으로 블랙홀의 열역학적 행동은 양자중력에 대한 몇 안 되는 구체적 단서 가운데 하나다. 중력, 양자 이론, 열역학이 눈에 보이게 만나는 곳이기 때문이다. 격렬하게 변하는 블랙홀에서 “엔트로피” 와 “온도” 가 정확히 무엇을 뜻하는지 더 날카롭게 정의하면, 미래의 어떤 양자중력 이론도 맞춰야 할 표적이 더 정밀해진다. 블랙홀의 엔트로피가 실제로 무엇인지라는 깊은 질문에 답하지는 않는다. 대신 질문 자체를 더 정확하게 만든다. 이 물리학의 영역에서는 그것만으로도 상당한 진전이다.

핵심 요약

블랙홀은 열역학을 닮은 법칙을 따르지만, 명료한 1973 년의 “제 1 법칙” 은 평형 상태에서 정지한 블랙홀들만 비교했으며 실제 과정을 기술하지 못했다. Ashtekar, Paraizo, Shu 는 준국소적 지평선을 사용하고, 그 동역학적 지평선 구간에 열역학 법칙을 적용하며, 해당 구간을 따라 놓인 각 상태에 순간적인 온도와 스핀을 부여하는 사상을 만들어 제 1 법칙과 제 2 법칙을 평형에서 임의로 멀리 떨어진 블랙홀, 즉 물질을 유입받고 붕괴하고 링다운을 거치며 병합의 대부분 단계를 통과하는 블랙홀까지 확장한다. 결론은 동역학적 지평선 구간으로 표현되는 모든 단계에서 지평선 면적이 엔트로피의 올바른 척도로 남는다는 것이다. 시뮬레이션이 준국소적 지평선을 계속 추적하더라도 합체에 매우 가까운 짧은 구간은 아직 그 열역학적 기술에 포함되지 않는다. 핵심 틀은 일반상대론에 있으며 증발에는 반고전적으로 적용된다. 이는 양자중력도, 관측도, 미시상태 계수도, 정보 역설의 해법도 아니다.

과장 없이 보면

논문이 보여 주는 것: 준국소적 지평선과 그중 동역학적 지평선 구간의 조건을 충족하는 부분을 이용해 블랙홀 역학의 제 1·제 2 법칙을 완전히 동역학적이고 평형에서 멀리 떨어진 블랙홀까지 수학적으로 일관되게 확장한다. 유한한 실제 과정에 기반한 제 1 법칙과 정량적 제 2 법칙을 정의하며, 동역학적 블랙홀의 엔트로피를 지평선 면적과 동일시하는 것을 자연스럽게 만든다.

실제이지만 해석이 필요한 부분: 평형 밖에서도 “엔트로피 = 지평선 면적”이라는 동일시. 새 법칙들이 이를 강하게 뒷받침하지만, 미시적으로 유도한 것이 아니라 표준적인 고전적 면적-엔트로피 가정을 이어받는다.

보여 주지 않는 것: 양자중력 이론, 블랙홀 엔트로피의 미시적 기원이나 미시상태의 “개수”, 정보 역설의 해결, 관측 또는 실험 결과, 실제로 물리적으로 측정할 수 있는 온도.

주요 한계: 핵심 유도는 일반상대론에 기반하지만 시간꼴 지평선의 증발에 적용할 때는 반고전적 근사를 사용한다. 쌍성 합체에 매우 가까운 짧은 구간은 동역학적 지평선 구간으로 표현되지 않으며, 이에 대한 열역학적 기술은 여전히 진행 중인 과제지만 수치 시뮬레이션은 준국소적 지평선을 계속 추적한다. 증발 중인 시간꼴 지평선의 역반응을 명시적으로 다룬 부분은 구면대칭으로 제한된다. 면적과 엔트로피의 동일시는 가정이지 통계역학에서 증명된 것이 아니다.

일반 독자는 얼마나 신뢰해야 하는가? 이것이 블랙홀 열역학을 실제 동역학 영역으로 확장하는 견고하고 평가받는 이론적 진전이라는 점에는 높은 신뢰를 가져도 된다. 동시에 새로운 관측 결과도, 양자중력도, 유명한 정보 문제의 해법도 아니라는 점에도 똑같이 높은 신뢰를 가져야 한다. 적절한 태도는 이렇다. 망원경이 아니라 칠판으로 이론, 이해의 실제 한 걸음이다.

게시 후 업데이트

• 정정 · 2026-08-27

교신저자 Abhay Ashtekar 의 피드백을 반영해, 시간꼴 및 비축대칭 경우가 동료 심사를 거친 동반 논문에서 명시적으로 다루진 것이 아니라 논증만 되었다고 서술한 두 문장을 바로잡았다. 검토 과정에서는 준국소적 지평선이 동역학적 지평선 구간의 조건을 충족하지 못하는 쌍성 합체의 매우 가까운 짧은 구간을 이 틀이 아직 다루지 못한다는 점도 명확히 했다.

• 정정 · 2026-08-28

교신저자 Abhay Ashtekar 의 추가 설명에 따라, 수치 시뮬레이션이 병합 전 블랙홀들에서 병합을 거쳐 병합 후 잔존 블랙홀까지 추적하는 준국소적 지평선과 열역학 법칙이 적용되는 동역학적 지평선 구간의 추가 조건을 충족하는 부분을 구분했다.

출처

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium, Phys. Rev. Lett. 136, 251405 (2026)

<https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1>

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of dynamical black holes beyond perturbation theory, Gen. Relativ. Gravit. 58, 91 (2026)

<https://doi.org/10.1007/s10714-026-03585-4>