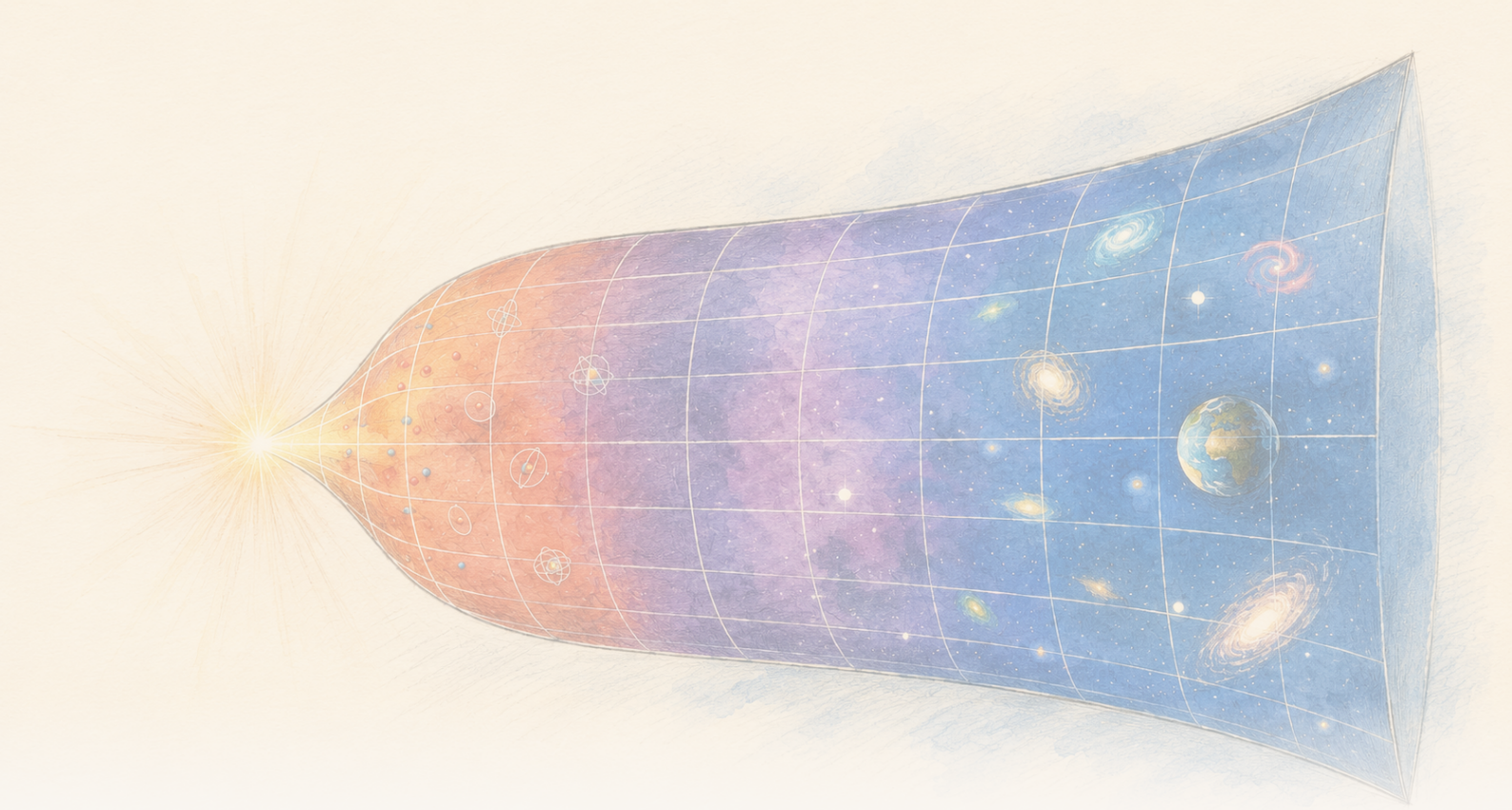




The CLEAN PAPER

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

엔트로피 기반 중력 모형에서는 국소 엔트로피 밀도가 줄어도 총량은 늘어난다

Physical Review D 논문은 제안된 수정중력 틀 *Gravity From Entropy* 안에서 온도, 압력, 제 1 법칙을 유도한다. 낮은 시간·낮은 곡률의 프리드만 근사에서는 모델의 국소 엔트로피와 에너지 밀도가 감소하지만, 팽창하는 부피 때문에 총 엔트로피는 증가한다. 계산은 내부적으로 구체적이지만 조건부다. 사용한 프리드만 우주론은 완전한 *GfE* 방정식의 정확한 해가 아니며, 연구는 중력이 엔트로피에서 나온다는 관측 증거나 실제 암흑에너지의 식별, 완성된 양자중력 이론을 제공하지 않는다.

Written by Laura Nesso · Cross-checked by Cinzia Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela
· AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of the gravity from entropy theory*, Ginestra Bianconi, *Physical Review D* 114, 024042 (2026) · DOI: 10.1103/26kn-thgp

부피가 커지면 밀도는 낮아지면서 총량은 늘어날 수 있다

이 모델에서 우주가 팽창할수록 엔트로피 밀도가 낮아진다면, 총 엔트로피는 어떻게 계속 증가할 수 있을까?

팽창하는 우주를 아주 작은 셀들로 나눴다고 생각해 보자. 각 셀에 들어 있는 어떤 양은 줄어들 수 있지만, 전체 영역 자체가 커지면 그 영역 전체의 총량은 오히려 늘 수 있다. 부피가 변하고 있다면 밀도의 감소와 총량의 증가는 서로 모순이 아니다.

이 단순한 수치 계산이 훨씬 야심찬 이론 논문의 중심에 있다. Physical Review D에서 수리물리학자 Ginestra Bianconi 는 **Gravity From Entropy(GfE)** 의 열역학적 기술을 전개한다. GfE 는 최근 제안된 모형으로, 물질과 기하 사이의 정보이론적 관계를 통해 중력을 기술하려 한다. 여기서 “정보이론적”이라는 말은 물리적 기하와 물질·곡률이 유도하는 기하라는 두 가지 기하 기술이 얼마나 다른지를 수학적으로 측정하는 양에서 모형이 출발한다는 뜻이다.

논문은 k -엔트로피, k -에너지, k -온도, k -압력이라는 국소량을 유도한다. 접두사 k 는 모델의 서로 다른 기하학적 섹터를 구분하는 지표이며, 서로 다른 물질이나 우주 시대를 뜻하지 않는다. 이들이 따르는 제 1 법칙 관계는 열역학의 에너지 수치식과 같은 형태를 가진다. 에너지 변화는 온도와 엔트로피 변화의 곱에서 압력과 부피 변화의 곱을 뺀 것과 연결된다.

$$\delta\epsilon_k = \theta_k \delta s_k - \pi_k \delta v$$

이러 논문은 팽창하는 프리드만 우주론을 이용해 이 양들을 평가한다. 프리드만 우주론은 큰 규모에서 균질하고 등방적인 표준적 이상화 우주 모형이다. 낮은 에너지와 작은 곡률 영역에서 물질 지배 및 복사 지배 사례는 국소 엔트로피와 에너지 밀도가 감소하지만, 팽창으로 충분한 부피가 생겨 총 엔트로피는 증가한다. 총 에너지는 선도차수에서 상수에 접근한다. 즉 큰 시간이 지날 때 가장 지배적인 항만 남기고 더 빠르게 사라지는 항을 버렸을 때 그렇다.

수학적으로는 명확한 결과다. 그러나 어디까지 성립하는지도 똑같이 중요하다. 계산은 **하나의 제안된 이론 내부**에서 수행됐고, 구체적 사례에 쓰인 프리드만 우주론은 완전한 GfE 방정식의 정확한 해가 아니라 근사해다. GfE 운동방정식은 제안된 GfE 작용을 변분해 얻으며, 일반적인 프리드만 방정식에는 없는 동역학적 G-장과 고차 기하 섹터를 포함한다. 이 논문은 엔트로피가 중력을 만들어 내는 것을 관측하지 않았고, 우리 우주의 암흑에너지를 식별하지 않았으며, 양자중력 이론을 완성하지도 않았다.

Gravity From Entropy 가 가정하는 것

일반상대론은 중력을 시공간의 기하로 설명한다. 물질은 시공간에 어떻게 휘어야 하는지 말하고, 그 곡률은 물질에 어떻게 움직여야 하는지 말한다. GfE 는 다른 형태의 제안된 작용에서 출발한다. 계량과 관련된 객체를 양자 연산자로 취급하고 기하학적 양자 상대 엔트로피 (**Geometric Quantum Relative Entropy, GQRE**) 를 이용해 라그랑지안을 구성한다.

120 초 안에 세 용어

양자 연산자는 양자 상태에 작용하며 어떤 물리량 또는 변환을 나타내는 수학적 규칙이다. GfE 는 계량 관련 객체를 이런 방식으로 다룰 수 있다고 가정하며, 이 글에서 독자가 그 구성을 직접 재현할 필요는 없다.

라그랑지안은 이론의 동역학을 압축해서 담은 수학적 처방이다. 이를 시공간 전체에 적분해 작용 (action) 을 만들고, 그 작용을 변분하면 장방정식을 얻는다.

GQRE 는 GfE 가 선택한 모델 특유의 라그랑지안이다. 양자 상대 엔트로피 개념을 변형해 물리적 계량과 물질·곡률이 유도한 고차 계량을 비교한다. 이름에 엔트로피가 들어간다고 해서 보통의 열 엔트로피와 같은 것은 아니다.

상대 엔트로피는 보통 두 확률분포나 두 양자상태가 얼마나 구별되는지 측정한다. GfE 에서는 물리적 계량과 물질·곡률이 유도한 고차 계량을 비교한다. 여기서 “고차” 는 시공간 차원이 더 있다는 뜻이 아니다. 모델이 스칼라, 벡터형, 바이벡터형 기하 섹터를 하나의 확장 객체에 묶는다는 뜻이다. 동역학적 **G-장**이 이 구성요소들을 연결하고, 중력과 물질 부분 모두에서 사용되는 계량을 “드레싱” 한다. 이 틀은 낮은 에너지·작은 곡률 극한에서 작용이 일반상대론의 아인슈타인-힐베르트 작용과 물질 작용으로 환원되도록 구성돼 있다.

마지막 문장은 과하게 읽기 쉽다. 어떤 극한에서 아인슈타인 방정식을 회복하는 것은 제안된 이론이 충족해야 하는 일관성 목표다. 그 극한 밖에서 자연이 더 큰 이론을 실제로 사용한다는 증거는 아니다.

GfE 장방정식에는 이 틀이 **창발적 유효 암흑에너지 항**이라고 부르는 동역학적 항도 들어 있다. 이 논문에서 Bianconi 는 모델의 내부 에너지 밀도를 그 항과 동일시한다. “유효 암흑에너지” 는 방정식에서 맡는 역할을 설명하는 표현이다. 우주론 관측으로 추론되는 실제 암흑에너지와 경험적으로 동일하다는 뜻은 아니다.

“엔트로피” 라는 단어의 서로 다른 세 가지 쓰임

일반적인 열역학적 엔트로피는 하나의 거시 상태를 만들 수 있는 미시적 배열이 얼마나 많은지를 나타낸다. **양자 상대 엔트로피**는 두 양자상태가 얼마나 구별되는지를 측정한다. 이 논문의 **GQRE** 는 상대 엔트로피에서 영감을 받아 중력 라그랑지안으로 사용하는 모델 특유의 기하학적 구성이다. 이름이 비슷하다고 같은 양은 아니다. 논문은 GfE 내부에서 필요한 연결관계를 별도로 유도한다.

모델 안에서는 정확한 열역학적 결과

논문은 먼저 GfE 틀 자체의 수준에서 작업한다. k 로 표시되는 각 차수와 유형의 기하학적 자유도마다 다음을 정의한다.

- GQRE 에서 얻은 국소 k -엔트로피,
- 모델의 내부 에너지 밀도에서 얻은 국소 k -에너지,
- 그에 켈레인 k -온도,
- k -압력.

이 양들은 국소적인 제 1 법칙을 따른다. 논문의 표기로는 다음과 같다.

$$\delta\epsilon_k = \theta_k \delta s_k - \pi_k \delta v$$

지표 k 는 서로 다른 물질이나 우주의 시대 목록이 아니다. 균질·등방 계산에서는 다섯 항을 표시한다. 스칼라 항 하나, 벡터형 섹터의 시간꼴과 공간꼴 항 각각 하나, 바이벡터형 섹터의 시간-공간과 공간-공간 항 각각 하나다. 스칼라는 방향 지표가 없고, 벡터형 항은 시간 방향과 공간 방향을 구분하며, 바이벡터는 방향의 쌍으로 구성된다. 각 섹터는 자체 온도와 압력을 가질 수 있다. 해당 G-장 성분 따라 k -온도는 양수 또는 음수가 될 수도 있다.

이 온도들은 우주론적 지평선 근처에 온도계를 놓아 재는 온도가 아니다. 표준적인 de Sitter 양자장론의 온도는 H 에 비례한다. **Gibbons-Hawking 온도**는 우주론적 지평선에 부여되는 온도이며, **Bunch-Davies 진공**은 관련 열적 반응을 주는 장 상관함수를 가진 표준적인 de Sitter 불변 양자상태다. 논문은 이 둘을 de Sitter 예에서 H^2 에 비례하는 기하학적 k -온도와 명시적으로 구분한다. 여기서 “온도” 는 모델의 엔트로피와 에너지 정의에서 유도되는 열역학적 켈레 변수를 뜻한다.

따라서 제 1 법칙 항등식은 실제로 유도된 결과지만, **GfE의 가정과 정의 안에서 성립하는 결과**다. GfE의 작용과 정의를 받아들이면 이 열역학적 구조가 따라온다는 뜻이다.

왜 프리드만 계산은 근사에 그치는가

형식주의를 우주론적 사례로 바꾸기 위해 논문은 균질하고 등방적인 Friedmann-Robertson-Walker(FRW) 시공간을 사용한다. “균질” 은 큰 규모에서 어디서나 평균 특성이 같다는 뜻이고, “등방” 은 모든 방향에서 동일하게 보인다는 뜻이다. 하나의 스케일 팩터가 거리가 시간에 따라 어떻게 늘어나는지 나타내고, 물질은 매끄러운 완전유체로 표현되며, 허블 매개변수 H 가 팽창률을 요약한다. 이는 개별 은하의 지도가 아니라 이상화된 배경이다.

하지만 구조적 불일치가 있다. 프리드만 우주는 아인슈타인 방정식의 해다. 일반적으로는 스칼라, 벡터형, 바이벡터형 섹터와 G-장의 미분까지 추적하는 완전한 고차 GfE 방정식의 해가 아니다. 아인슈타인 방정식은 제안된 이론의 1 차, 낮은 에너지, 작은 곡률 극한에서만 다시 나타난다.

논문은 이를 직접 밝히고 프리드만 해를 근사로 취급한다. 더 완전한 이론에 평균장 해를 집어넣어 그 근사가 어디까지 신뢰할 수 있는지 보는 접근과 비교한다. 적용 영역은 낮은 에너지와 작은 곡률을 요구하며, $l_P H \ll 1$ 로 요약된다. 여기서 l_P 는 플랑크 길이다. 또 하나의 조건은 유도된 고차 계량과 물리적 고차 계량의 역행렬의 곱이 양의 정부호를 유지해야 한다는 것이다.

따라서 결과는 “GfE가 우리 우주의 역사를 예측한다” 가 아니다. 더 정확한 표현은 이렇다. **GfE 우주가 익숙한 프리드만 우주론으로 충분히 잘 근사된다면, 완전한 GfE 양들이 이런 열역학적 스케일링을 보인다.**

국소량과 총량이 다르게 움직이는 결과

그 영역 안에서 선도적인 국소량은 단순한 스케일링을 가진다.

- 모델 엔트로피 밀도는 H^2 에 비례한다.
- 모델 에너지 밀도는 H^4 에 비례한다.
- de Sitter 가 아닌 프리드만 사례에서는 늦은 시간에 각각 대략 t^{-2} , t^{-4} 가 된다.

따라서 우주가 팽창하면 두 밀도 모두 감소한다. 하지만 밀도는 총량이 아니다.

논문이 팽창하는 시공간 영역 전체에 적분하면, 커지는 부피가 답을 바꾼다. 물리적으로 익숙한 물질 지배·복사 지배 사례에서는 단위 부피당 엔트로피가 줄어도 총 엔트로피는 시간과 함께 증가한다. 총 에너지는 계속 커지지 않고 선도차수에서 상수에 접근한다.

이것이 논문의 가장 유용한 개념적 결과다. 국소적으로 더 질서정연해지거나 희석된다고 해서 전역적인 제 2 법칙과 자동으로 충돌하는 것은 아니다. 시공간 부피가 더 빠르게 늘면 단위 부피당 엔트로피는 낮아 지면서도 적분된 엔트로피는 증가할 수 있다.

이 계산은 이것이 실제 우주의 열역학적 시간 화살표에 대한 올바른 미시적 설명이라는 것을 증명하지 않는다. 프리드만 근사 안에서 제한된 틀이 국소-전역 분리를 모순 없이 수용할 수 있음을 보여 줄 뿐이다.

de Sitter 비교: 하지만 온도는 다르다

논문은 H 가 일정한 이상화된 지수팽창 시공간인 de Sitter 공간도 살핀다. 한 관측자에 대해서는 유한한 **인과 다이아몬드 (causal diamond)** 안에서만 적분한다. 인과 다이아몬드는 앞선 사건의 미래 광원뿔과 뒤의 사건의 과거 광원뿔이 겹치는 영역으로, 두 사건 사이에서 관측에 참여할 수 있는 시공간 영역을 제한한다. 그 다이아몬드에서 총 GfE 엔트로피는 H^{-2} 에 비례하며, 익숙한 Gibbons-Hawking 엔트로피와 같은 H 스케일링을 가진다. 총 GfE 에너지는 모델 단위에서 1 정도의 크기다.

하나의 우주론적 배경 계열

FRW 는 균질하고 등방적인 기하들의 한 계열이지 별도의 장소가 아니다. 물질 지배 우주와 복사 지배 우주는 무엇이 모형을 채우는지에 따라 구분되는 FRW 사례다. de Sitter 공간도 FRW 형태로 쓸 수 있지만, H 가 일정하고 지수적으로 팽창하는 진공 지배 사례를 나타낸다. 인과 다이아몬드는 그 시공간 안에서 한 관측자를 위해 선택한 유한 영역이며, 또 다른 종류의 우주가 아니다.

스케일링이 같다고 같은 물리적 대상이 유도된 것은 아니다. 관련 GfE k-온도는 H^2 에 비례하지만 표준 de Sitter 온도는 H 에 비례한다. 논문은 이 차이를 k-온도가 그 배경 위의 양자장이 아니라 시공간 기하에 속하는 양이라는 단서로 해석한다.

이어 이런 온도가 보통의 입자 방출이 아니라 중력자 복사와 관련될 가능성을 제시한다. 하지만 이는 후속 연구 질문이지 이 논문의 결과가 아니다. 우선 이 이론을 양자화해야 온도가 실제 복사와 대응하는지조차 확립할 수 있다.

이 연구가 증명하지 않는 것

- 엔트로피에서 중력이 창발한다는 것을 **관측적으로 보여 주지 않는다**.
- 모델의 유효 항이 우주론에서 측정되는 암흑에너지라고 **확립하지 않는다**.
- 일반상대론을 검증된 더 우수한 이론으로 **대체하지 않는다**. 여기서는 일반상대론이 제안된 모델의 낮은 에너지·작은 곡률 극한으로 나타난다.
- 프리드만 우주론을 GfE의 정확한 해로 **만들지 않는다**. 모델의 열역학적 거동을 추정하기 위한 근사다.
- 시공간 자유도의 완전한 미시적 개수 세기를 유도하지 않는다.
- 완성된 양자중력 이론을 제공하거나 중력자를 검출하지 않는다.
- 음의 k -온도가 보통 온도계에서 읽는 음의 온도라는 것을 보여 주지 않는다.

결과를 어떻게 평가해야 하나

동료평가를 거친 이론 논문이므로 여기서 말하는 “근거”는 실험 논문과 성격이 다르다. 살펴봐야 할 것은 정의가 일관적인지, 유도가 제대로 이어지는지, 근사 조건이 명시되고 통제되는지다.

그 수준에서는 논문이 GfE에 대한 구체적인 열역학 사전을 제공하고 단순한 비유에 기대지 않고 제 1 법칙 구조를 유도한다. 근사 경계도 이례적으로 분명하게 보인다. 프리드만 해는 일반상대론에서 가져와 GfE 양에 대입하며, 유도 계량이 잘 거동하는 영역으로 제한한다.

더 큰 물리적 주장은 여전히 열려 있다. 이 틀은 최근에 제안됐고, 이 논문은 우주론을 데이터와 비교하지 않는다. 가장 흥미로운 함의 가운데 일부인 양자화, 접촉기하학적 동역학, 가능한 중력자 복사는 향후 연구 방향으로 제시될 뿐이다. 새로운 중력이론에 내부 일관성은 필요하지만, 그것만으로 자연을 기술한다는 것을 보여 줄 수는 없다.

왜 중요한가

중력과 열역학의 관계는 블랙홀 엔트로피에서 de Sitter 공간의 온도에 이르기까지 오래되고 깊은 문제다. 많은 결과가 지평선을 중심으로 정리돼 있다. 반면 GfE는 물질과 기하의 관계에서 직접 국소적이고 부피적인 정보 척도를 만들려 한다.

이 제안이 살아남을지는 열린 문제다. 그러나 이번 열역학적 분석은 이런 종류의 어떤 이론이라도 설명해야 할 유용한 표적을 드러낸다. 팽창하는 우주에서 국소 구조와 감소하는 국소 엔트로피 밀도가 어떻게 증가하는 총 엔트로피와 공존할 수 있는가 하는 문제다.

이 논문은 그것이 일어날 수 있는 하나의 수학적으로 명시적인 방식을 보여 준다. 가치가 중력-엔트로피 문제를 끝냈다는 데 있지는 않다. 그 문제의 일부를 가정, 한계, 다음 시험을 명확히 말할 수 있는 방정식으로 바꿨다는 데 있다.

핵심 요약

Bianconi 는 기하학적 양자 상대 엔트로피를 바탕으로 한 제안된 수정중력 틀 Gravity From Entropy 안에서 열역학적 기술을 유도한다. 모델의 국소 엔트로피, 에너지, 온도, 압력 변수는 제 1 법칙을 만족한다. 완전한 GfE 양을 낮은 에너지·작은 곡률의 프리드만 근사에 평가하면 우주가 팽창할수록 국소 엔트로피와 에너지 밀도는 감소하지만, 시공간 부피가 커지기 때문에 총 엔트로피는 증가한다. 물질 지배 및 복사 지배 사례에서 총 에너지는 선도차수에서 상수에 접근한다. de Sitter 인과 다이아몬드에서는 엔트로피가 H^{-2} 에 비례하지만 모델 온도는 표준 지평선 온도와 다르게 스케일링한다. 이는 GfE 내부에서 얻은 조건부 수학적 결과이며, 중력이 엔트로피에서 나온다는 관측 증거도, 암흑에너지 측정도, 완성된 양자중력 이론도 아니다.

출처

Ginestra Bianconi, Thermodynamics of the gravity from entropy theory, Physical Review D 114, 024042 (2026)
<https://doi.org/10.1103/26kn-thgp>