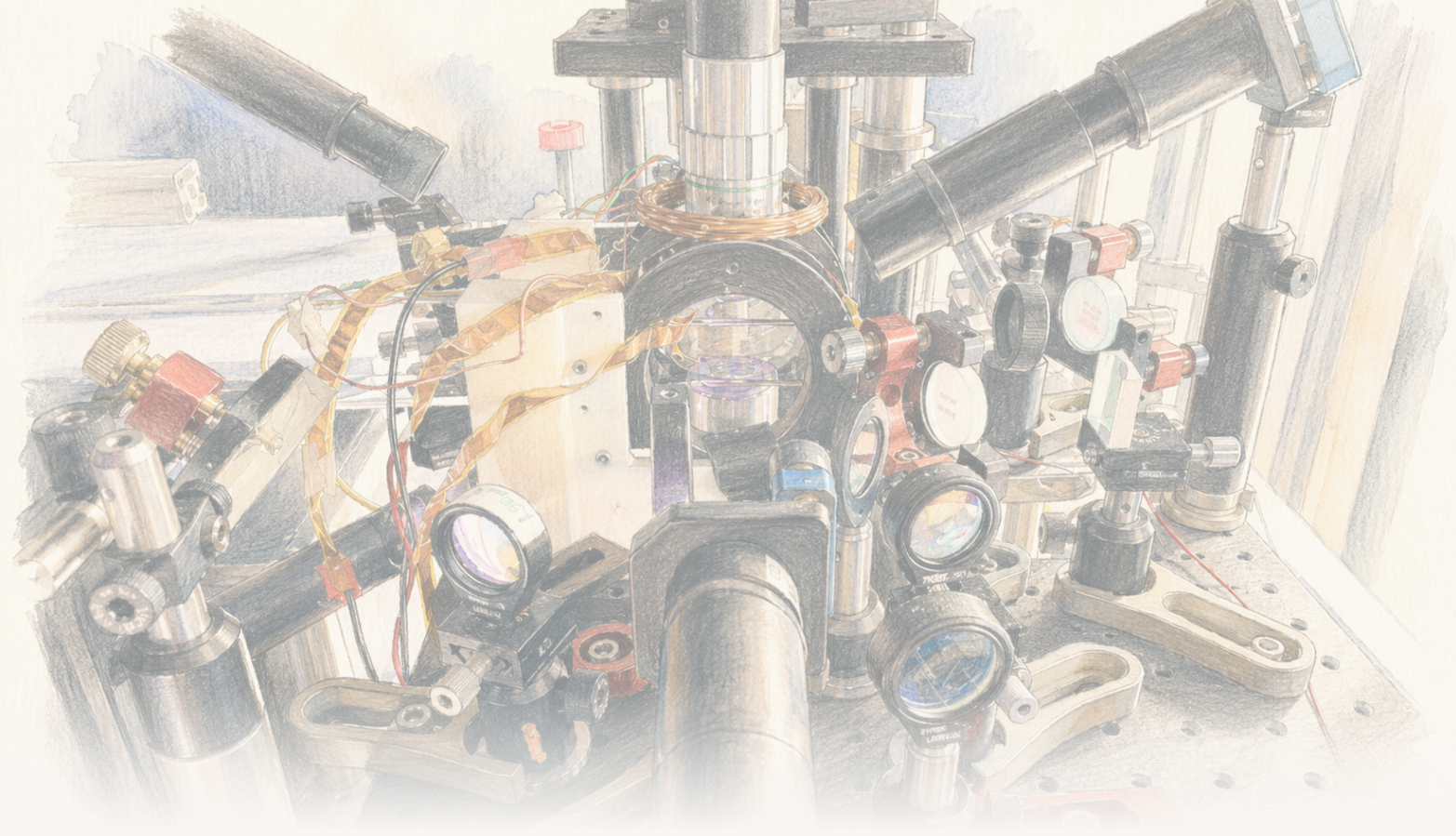




The CLEAN PAPER

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

냉각 원자 실험이 엔트로피로 만든 내부 시계로 “시간의 문제”를 시험한다

한 물리학자가 보스-아인슈타인 응축체를 관측 영역과 비관측 영역으로 나누고 두 영역 사이의 엔트로피 교환으로 내부“엔트로피 시간”을 만들었다. 이 시계는 관측 영역의 팽창과 재수축을 거의 단조롭게 순서화하며, 저자가 조사한 낮은 장벽 조건에서 그 내부 시간으로 쓴 유효 방정식이 측정 동역학을 재현한다. 이는 정준 양자중력의 시간 문제를 실험적으로 다뤄 볼 수 있는 유사계이지, 시간의 문제를 해결한 것도 실제 우주를 모사했다고 증명한 것도 아니다.

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

Paper: *Testing the problem of time with cold atoms*, Giovanni Barontini, Physical Review Research 8, L022047 (2026) · DOI: 10.1103/1h9j-df4k

함정 안에서 엔트로피로 만든 시계

정준 양자중력에는 이상하면서도 끈질긴 문제가 하나 있다. 중심 방정식에 시간이 들어 있지 않다. 휠러-드윗 방정식은 우주 전체에 대한 슈뢰딩거 방정식에 가장 가까운 것으로 여겨지며, 어떤 연산자가 상태에 작용한 결과가 0 이라고 쓸 뿐이다. 똑딱거리며 흐르는 외부 매개변수도, “이전”과 “이후”를 배열해 주는 것도 없다. 그런데 우리는 분명 시간이 흐르는 것을 경험한다. 이것이 **시간의 문제 (problem of time)**이며, 반세기가 넘도록 해결되지 않았다.

*Physical Review Research*에 실린 단독 저자 논문은 이 문제를 해결하지 않는다. 대신 더 조용하지만 나름대로 더 유용한 일을 한다. 제안된 해법 한 부류를 **실제 데이터와 대조해 시험할 수 있는** 작고 잘 통제된 실험계를 만든 것이다. 버밍엄대학교의 Giovanni Barontini는 보스-아인슈타인 응축체, 즉 하나의 양자 물체처럼 거동하는 극저온 원자 구름을 이용해 “내부적”이고 관계적인 시간 개념을 논쟁의 대상이 아니라 측정 가능한 유사계로 바꾼다. 핵심은 바깥의 스톱워치가 아니라 계 내부에서 재분배되는 엔트로피로 시계를 만드는 것이다.

“시간의 문제를 통제된 방식으로 모사한 실험”과 “물리학자들이 시간을 해결했다” 사이의 거리가 이 연구의 핵심이며, 그 거리는 매우 멀다.

연구자가 한 일

장치는 보존적 광학 쌍극자 함정에 가둔 약 **24,000 개의 루비듐-87 원자**로 이루어진 응축체다. 전체 원자 구름을 함정 안에서 앞뒤로 진동시킨다. 디지털 미러 장치로 675 nm 빛을 그려 만든 폭 약 8 마이크로미터의 **얇은 광학 장벽**이 함정을 두 부분으로 나눈다. 한쪽은 관측한다 (“**밝은 영역**”), 다른 쪽은 관측하지 않는다 (“**어두운 영역**”). 약 100 밀리초에 이르는 실험 시간 동안 측정 가능한 입자 손실이나 소산은 나타나지 않았으므로, 좋은 근사에서 이 계는 해밀토니안 자체가 시간에 의존하지 않는 폐쇄계다.

[figure_pair pending]

왼쪽에서는 자기광학 함정이 유리 셀 안에서 차가운 루비듐 원자 구름을 만든다. 이는 응축체를 준비하기 위한 초기 냉각 단계다. 오른쪽에는 Giovanni Barontini가 광학 장치 옆에 서 있다. 두 사진은 실험의 실제 실험실 장치를 보여주며, 문자 그대로의 미니 우주를 촬영한 사진은 아니다.

일반적인 실험실 시계, 즉 2 밀리초마다 찍는 흡수 이미지로 밝은 영역을 관찰하면 연상적인 일이 벌어진다. 원자가 장벽을 가로질러 들어오면서 이 영역은 아무것도 없는 상태에서 자라기 시작한다 (Barontini는 이 순간을 “**빅뱅**”이라고 부른다). 최대 크기에 도달한 뒤 수축해 다시 어두운 쪽으로 비워진다 (“**빅크런치**”). 장벽 높이에 따라 이 과정이 주기적으로 반복될 수 있다.

하지만 논문의 실제 핵심은 그 다음이다. 실험실 시계는 계 바깥에 있다. 바로 휠러-드윗 설정에서는 허용되지 않는 종류의 시간이다. 그래서 Barontini는 묻는다. 밝은 영역의 역사를 **계 내부의 물리량만으로 순서화할 수 있는가?** 그의 답은 같은 이미지에서 세 단계로 직접 읽는 **엔트로피 시간 (entropic time)**이라는 시계다. 먼저 각 흡수 이미지에서 밝은 영역에 대한 네 수치를 추출한다. 원자 수, 밀도 분포의 질량중심 (유사 “스칼라장” 역할), 폭, 그리고 엔트로피다. 엔트로피는 표준적인 방법으로 얻은 원자당 엔트로피에 원자 수를 곱해 계산한다. 둘째, 원자가 장벽을 통과하면서 그 엔트로피는 증가하고 감소한다. 셋째, 시계는 측정된 질량중심 경로를 따라 엔트로피 기울기를 추적하되, 변위의 방향이 아니라 그 크기를 센다. 엔

트로피와 질량중심이 함께 증가하거나 함께 감소하면 구름이 방향을 바꾸더라도 각 단계에서 시계는 앞으로 간다. 실제 데이터에서는 거친 시간 샘플링 때문에 두 변화가 일치하지 않는 몇몇 작은 흔들림을 제외하면, “빅뱅”에서 “빅크런치”까지 거의 전 구간에 하나의 일관된 순서를 부여한다.

마지막으로 그는 외부 시간이 아니라 이 내부 시계를 변수로 밝은 영역의 진화를 적은 유효 “엔트로피-시간 슈뢰딩거 방정식”을 유도하고, 이를 수치적으로 풀어 카메라가 실제로 기록한 변화를 재현하는지 확인한다.

무엇을 발견했나

야심의 크기가 점점 커지는 세 가지 결과가 있다.

- **내부 시계는 순서를 정하는 데 작동한다.** 엔트로피 시간은 거의 모든 구간에서 단조롭게 증가하며, 그 속도는 엔트로피가 장벽을 얼마나 빠르게 통과하는지에 의해 정해진다. 엔트로피가 교환될 때는 더 빨리 가고, **아무런 엔트로피 교환이 없으면 완전히 멈춘다.** 가역적인 낮은 장벽 조건에서는 한 번의 빅크런치와 다음 빅뱅 사이에 내부 시간이 전혀 흐르지 않는다. 그 사이 엔트로피 교환이 없기 때문이다. 물론 실험실 시계는 계속 간다. 전체 데이터에서 두 영역의 총 엔트로피는 폐쇄계에 요구되는 대로 오차 범위 안에서 일정했다.
- **조건이 달라지면 서로 다른 “시간”이 나온다.** 장벽을 높이면 엔트로피 교환이 줄어 내부 시계가 느려진다. 두 영역이 거의 상호작용하지 않는 수준까지 올리면 밝은 영역은 논문이 “**열적 죽음 (heat death)**”이라고 부르는 상태, 즉 엔트로피 시간이 그대로 멈추는 정지 상태 쪽으로 간다.
- **유효 방정식이 데이터를 재현한다.** 실험 매개변수를 넣은 엔트로피-시간 슈뢰딩거 방정식을 수치적으로 풀면 원자 구름 폭의 측정된 진화를 재현한다. 논문은 특히 엔트로피 구동 항이 지배적인 낮은 장벽 조건에서 매우 좋은 일치를 보고하며, 명시적인 수치 비교도 그 조건에 대해 수행한다.

“시간의 문제”와 여기서의 “엔트로피 시간”이란

시간의 문제는 정준 양자중력의 중심 방정식인 휠러-드윗 방정식에 외부 시간 변수가 없다는 데서 생긴다. 흔한 대응은 관계적 (*relational*) 접근이다. 계 안의 어떤 물리량 하나를 “시계”로 삼고 나머지 모든 것을 그 물리량에 대해 기술한다. 반복되는 어려움은 자연스러운 시계 후보가 항상 단조롭지 않다는 점이다. 다시 수축하는 계에서는 후보 시계가 앞으로 갔다가 뒤로 가기 때문에 시작부터 끝까지 하나의 방향으로 깔끔하게 표지를 붙일 수 없다.

엔트로피 시간은 Barontini가 이 문제를 피하기 위해 만든 방법이다. 위치와 비슷한 변수를 읽는 대신, 관측 영역과 비관측 영역 사이에서 교환되는 엔트로피를 이용해 되돌아가지 않도록 시계를 구성한다. 개념적으로는 오래된 “열적 시간 (thermal time)” 아이디어와 가깝지만, 여기서는 추상적인 수학 구조가 아니라 실제로 측정 가능한 엔트로피 흐름으로 조작적으로 정의된다. 바로 그 점 때문에 실제 장치에서 시험할 수 있다.

중요하게도 “빅뱅”, “빅크런치”, “스케일 팩터”, “스칼라장”, “미니우주” 같은 우주론 용어는 **유사계에 붙인 이름**이다. 단순화된 우주론 모델의 방정식과 구조적으로 비슷한 특징을 가진 갇힌 원자 기체를 가리키는 말이지, 실제 우주에 대한 진술이 아니다.

이 연구가 증명하지 않는 것

이 부분에서는 특히 조심해야 한다. 사용되는 어휘 자체가 과장을 부르기 쉽기 때문이다.

- **시간의 문제를 해결하지 않았고, 논문도 그렇게 주장하지 않는다.** 논문의 표현은 관계적 시간 구성을 정량적으로 시험할 수 있는 통제된 실험 환경을 마련했다는 것이다. 시험장은 정리가 아니다. 관계적 시간이나 엔트로피 시간이 양자중력에서 시간을 설명하는 올바른 방식인지 여부는 이전과 마찬가지로 열린 문제다.
- **실제 우주가 아니라 유사계다.** 우주론을 관측한 것이 아니다. 함정 속 보스-아인슈타인 응축체를 관측했고, 그 축약된 기술이 단순화된 “미니초공간 (minisuperspace)” 우주론 모델과 수학적으로 비슷하다. 이 유사성이 실험의 핵심이자 동시에 경계다. 실제 초기 우주가 이런 종류의 빅뱅을 겪었다거나, 시공간이 원자로 이루어졌거나, “시간은 존재하지 않는다”는 사실을 보여 주지 않는다.
- **시간이 “실제로” 엔트로피라는 것을 보여 주지 않는다.** 엔트로피 시계는 이 계에서 잘 작동하도록 구성된 하나의 순서 변수다. 논문은 열적 시간 가설과 개념적 친연성이 있다고 언급하지만, 둘이 실제로 같은지조차 열어 둔다. “엔트로피로 만든 내부 시계가 이 실험을 순서화할 수 있다”는 주장은 “시간은 엔트로피다” 보다 훨씬 좁다.
- **유효 방정식은 모델링 결과이지 양자역학을 다시 쓰는 것이 아니다.** 유도된 엔트로피-시간 슈뢰딩거 방정식은 엔트로피 흐름이 느릴 때 보통의 양자역학으로 환원되며, 엔트로피가 전혀 흐르지 않을 때에만 엄밀히 일반적인 유니터리 이론과 같다. 논문은 이를 특히 관측된 계가 관측되지 않은 계에 대해 열역학적으로 열려 있을 때 표준 방정식보다 더 일반적인 형태로 위치시킨다. 이는 이런 종류의 설정에서 열린 부분계에 관한 주장이지, 기초 물리학 전체를 이 방식으로 다시 써야 한다는 주장은 아니다.
- **실험 하나, 저자 한 명, 시계 선택 하나다.** 각 데이터 점에는 대략 5%의 통계적 불확실성이 있고, 평균 장 및 평균 밀도 근사를 사용한다. 선택한 시계와 coarse-graining 방식은 의도적인 모델링 선택이며, 구조적 결론을 내리기 전에 다른 연구팀들이 시험하고 바꿔 볼 만한 부분이다.

근거는 얼마나 탄탄한가?

논문이 실제로 주장하는 제한된 범위 안에서는 증거가 깔끔하다. 관련 시간 척도에서 계는 실제로 잘 격리되어 있고, 엔트로피 수지는 닫힌다 (총 엔트로피가 오차 범위에서 일정하다). 내부 시계는 거의 모든 지점에서 데이터를 단조롭게 순서화하고, 저자가 같은 모델에서 유도하고 데이터로부터 추정된 매개변수를 넣은 유효 방정식은 적용된 낮은 장벽 조건의 측정 동역학을 재현한다. 데이터도 공개돼 있다. 사고실험이 아니라 실제로 측정 가능한, 제어 가능한 계에 대한 진짜 실험이다.

대신 이 결과가 감당할 수 있는 해석의 무게도 그만큼 제한적이다. 모든 것은 축약된 응축체 모델과 미니초공간 우주론 사이의 유사성에 기대며, 유사계는 통찰을 주지만 증명하지 않는다. 저자 한 명의 단일 플랫폼에서 하나의 내부 시간 처방이 작동한다는 것은 강한 개념증명이고, 자연에서 시간이 실제로 어떻게 작동하는지에 대한 주장에는 약한 근거다. 적절한 해석은 이렇다. 이제 이 방법은 실험실에서 직접 실행하고 검증할 수 있는 것이 됐다.

왜 중요한가

시간의 문제를 둘러싼 논쟁은 오랫동안 형식주의 수준에 머물렀다. 경쟁하는 제안들이 구체적이고 측정 가능한 예측을 거의 하지 않아 반증하기 어렵기 때문이다. 그 논쟁의 일부라도 실제로 수행할 수 있는 실험으로 바꾸면 — 내부 시계가 데이터를 순서화하는지 아닌지, 유효 방정식이 맞는지 아닌지를 확인할 수 있다면 — 논쟁의 성격 자체가 달라진다. 이론가들이 자신들의 도구를 시험해 볼 실험대가 생기는 것이다.

이것이 진짜 기여다. 시간에 대한 답을 내놓은 것이 아니라, **그 질문을 정량적으로 물을 장소를 만든 것**이다. 냉각 원자 플랫폼은 이미 호킹 복사, 팽창 우주, 거짓 진공 붕괴를 제어 가능한 유사계로 연구하는 데 쓰여 왔다. 여기에 관계적 시간과 시간의 화살표가 추가된다. 앞으로의 가치도 후속 실험에 있다. 다른 시계 선택, 바운스와 특이점 거동의 비교, 가역성 시험 등을 이제 계산만이 아니라 측정으로 다룰 수 있다.

핵심 요약

한 물리학자가 보스-아인슈타인 응축체를 얇은 광학 장벽으로 관측되는 절반과 관측되지 않는 절반으로 나누고, 두 영역 사이를 흐르는 엔트로피로 내부 “엔트로피 시간”을 만들었다. 이 시계는 관측 영역의 팽창-재수축 주기를 순서화하며, 엔트로피가 교환될 때 빠르게 흐르고 교환이 없으면 멈춘다. 저자가 조사한 낮은 장벽 조건에서는 이 내부 시간으로 쓴 유효 방정식이 측정 데이터를 재현했다. 이 설정은 정준 양자중력의 “시간의 문제”를 모사한 유사계다. “빅뱅”, “빅크런치”, “미니우주”는 단순화된 우주론 모델과 수학적으로 비슷한 갇힌 기체에 붙인 이름이다. 관계적 시간 아이디어를 통제된 조건에서 시험하는 장치이지, 시간의 문제를 해결한 것도, 실제 우주에 대한 주장도, 시간이 “실제로” 엔트로피라는 증거도 아니다.

과장 없이 보면

논문이 보여 주는 것: 잘 격리된 한 냉각 원자 계에서 엔트로피 교환으로 정의한 내부 시계가 관측 동역학을 거의 단조롭게 순서화할 수 있고, 저자가 살핀 낮은 장벽 조건에서 유효 “엔트로피-시간” 방정식이 측정된 진화를 재현한다.

그렇듯하지만 보여 주지 않은 것: 엔트로피 시간 또는 관계적 시간이 실제 양자중력의 시간에 대한 좋은 설명이라는 주장. 이 실험은 그런 구성을 진지하게 시험할 가치가 있다는 점과 양립하지만, 자연에 대해 이를 확인하지는 않는다.

보여 주지 않는 것: 시간의 문제가 해결됐다는 것, 양자중력이 해결됐다는 것, 우주가 이런 종류의 빅뱅으로 시작했다는 것, 시공간이 원자에서 창발했다는 것, “시간은 존재하지 않는다”는 것.

주요 한계: 단일 플랫폼, 단독 저자, 하나의 시계 선택, 데이터 점당 약 5%의 불확실성, 평균장 및 평균 밀도 근사, 무엇보다 갇힌 응축체와 단순화된 우주론 모델 사이의 유사성에 의존한다는 점.

일반 독자는 얼마나 신뢰해야 하는가? 이 실험이 자체 실험계에서 보고한 대로 작동했다는 점에는 높은 신뢰를 가져도 된다. 이 유사계에서 실제 우주의 시간에 대한 주장으로 도약하는 데는 낮은 신뢰가 적절하다.

출처

Barontini, Testing the problem of time with cold atoms, Physical Review Research 8, L022047 (2026)
<https://doi.org/10.1103/1h9j-df4k>