

# 시간의 흐름이 공간을 정의한다

On 관찰자 스케일 모델을 통한 시공간 에세이

장용일

2026년 2월

© 2026 장용일 ([yongiljang@gmail.com](mailto:yongiljang@gmail.com)).

버전 1.0 (공개일: 2026-02-25).

이 저작물은 Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) 라이선스를  
따릅니다.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

권장 인용: 장용일, 시간의 흐름이 공간을 정의 한다, v1.0, 2026-02-25.

## 프롤로그: 왜 이 글을 쓰는가

어린 시절, 밤하늘의 별을 올려다보다 문득 이런 생각이 들었다. “저 별빛이 수백 년 전에  
출발한 것이라면, 지금 내가 보는 저 별은 진짜 별인가, 아니면 과거의 잔상인가?” 그 의문  
은 시간이 지나도 사라지지 않았고, 오히려 물리학의 기본 개념을 접할수록 더 깊어졌다.

이 에세이는 전문 물리학자의 논문이 아니다. 물리학이라는 거인의 어깨 위에서 한  
개인이 바라본 세계의 풍경을 기록한 것이다. 아인슈타인의 일반 상대성이론, 노탈의  
스케일 상대성, 만델브로의 프랙탈 기하학이라는 이미 확립된 토대 위에 나만의 작은  
망원경을 올려놓고, “시간과 공간은 어떤 관계인가”라는 오래된 질문에 대해 조심스럽게  
하나의 시선을 제안한다.

엄밀한 증명보다는 직관적 탐색을, 결론보다는 질문을 중시하는 이 글이 독자에게도  
비슷한 호기심을 불러일으킨다면 그것으로 충분하다.

## 1. 서론: 시간이 공간보다 앞선다는 관점

우주를 이해하기 위한 전통적인 출발점은 공간이다. 3차원 좌표계를 펼쳐 놓고, 그 위에 시간이라는 축을 추가하는 것이 우리에게 익숙한 방식이다. 그러나 이 에세이는 정반대의 시선에서 출발한다.

“시간의 흐름이 없다면, 공간은 정의될 수 있는가?”

이것은 물리학적 증명이 아닌, 사고 실험의 출발점이다. 열역학 제2법칙에 따르면 고립계의 엔트로피는 감소하지 않으며, 이는 비가역적 시간의 흐름을 내포한다.

$$\Delta S \geq 0 \quad (1)$$

만약 시간의 흐름이 완전히 정지한 세계를 상상한다면—어떠한 물리적 상호작용도, 정보교환도, 에너지 전달도 일어나지 않는 세계—그 공간은 존재한다고 말할 수 있을까? 물리적 과정이 전혀 진행되지 않는 공간은 측정할 수도, 관측할 수도, 의미를 부여할 수도 없다.

물론, 현대 물리학에는 이와 다른 관점도 존재한다. 아인슈타인의 상대성이론에서 시간과 공간은 대등한 좌표로서 4차원 시공간 다양체를 구성하며, “블록 우주(Block Universe)” 해석에서는 과거·현재·미래가 동시에 존재하는 정적 구조로 보기도 한다. 이러한 관점에서는 “시간의 흐름” 자체가 물리적 실재라기보다 인간의 인지 현상일 수 있다.

그러나 바로 그 지점에서 흥미로운 가능성의 열린다. 만약 블록 우주 해석이 수학적으로 옳다 하더라도, 우리가 경험하는 물리 현상은 시간의 흐름 없이는 기술될 수 없다. 측정이란 곧 시간 속에서의 상호작용이며, 공간의 구조는 그 상호작용의 결과로 우리에게 드러난다. 이 에세이는 그러한 경험적 관점—“시간의 흐름이 상호작용을 매개함으로써 비로소 공간을 구조화하고 정의한다”—을 탐구의 렌즈로 삼는다.

이 관점이 궁극적으로 블록 우주와 같은 정적 해석과 양립할 수 있는지, 아니면 시간의 흐름이 공간 자체의 발현에 필수적인 요소라는 더 강한 주장으로 확장될 수 있는지는 열린 질문으로 남겨둔다. 이 에세이에서는 우선 이 관점이 어디까지 우리를 데려가는지 따라가보겠다.

### 정리: Fact / Hypothesis / Metaphor

**Fact.** 열역학에서 엔트로피 증가가 시간의 비가역성을 제공하며, 상대론에서는 관찰자/중력장에 따라 시간 측정이 달라진다.

**Hypothesis.** “시간의 흐름을 1차적 구조로 두고, 공간을 그 위에서 관계적으로 정의해보자는 관점을 탐색한다.

**Metaphor.** 시간이 흐를 때 비로소 장면이 드러나는 “필름/셔터의 비유.”

## 2. On 관찰자 스케일 모델과 시공간의 인지

시간과 공간이 상호 의존적이라면, 대상을 관찰하는 “관찰자의 물리적 크기(Scale)”에 따라 사건의 주기와 시간의 흐름은 상대적으로 다르게 체감되어야 한다. 로랑 노탈(Laurent Nottale)의 스케일 상대성 이론(Scale Relativity)을 확장하여, 공간 스케일에 따른 관찰자의 계층을 나누는 **On 관찰자 스케일 모델(Observer Scale Model)**을 정의한다.

- $O_{n-1}$  (아원자 미립자의 세계):  $L \sim 10^{-15} \text{ m}$  이하의 극미시 공간
- $O_n$  (원자 및 분자의 세계):  $L \sim 10^{-10} \text{ m}$ 의 미시 공간
- $O_{n+1}$  (인간 및 일상적 관찰자의 세계):  $L \sim 10^0 \text{ m}$  수준의 거시 공간
- $O_{n+2}$  (항성과 은하의 세계):  $L \sim 10^{21} \text{ m}$  수준의 초거시 공간

### 2.1 스케일에 따른 특성 시간의 상대성

빛의 속도  $c$ 가 일정하고, 정보 전달의 최대 속도가 제한되어 있다는 전제 하에, 각 스케일 계 내부에서 물리적 상호작용이 1회 완료되는 고유한 특성 시간  $\tau_n$ 은 시스템의 공간적 크기  $L_n$ 에 비례한다.<sup>1</sup> 스케일 상수(Scaling Factor)를  $\alpha$  라 할 때, 공간과 시간은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$L_{n+1} \approx \alpha \cdot L_n ; \quad \tau_{n+1} \approx \alpha \cdot \tau_n \quad (2)$$

인간( $O_{n+1}$ )이 원자( $O_n$ )를 관찰하면, 전자의 전이 및 궤도 운동은 인간의 시간 척도에서 수경 분의 1초 만에 발생한다. 반면 인간이 우주( $O_{n+2}$ )를 관찰할 때, 은하의 회전이나 별의 진화는 수억 년이 걸린다. 인간의 짧은 인지 시간( $\tau_{n+1}$ )으로는 우주가 정지한 것처럼 보이지만, 이는 단지 관찰자와 관찰 대상 간의 스케일 불일치에서 오는 상대론적 착시일 뿐이다.

#### 정리: Fact / Hypothesis / Metaphor

**Fact.** 정보 전달에는 상한( $c$ )이 있고, 관측은 유한한 해상도와 샘플링을 가진다.

**Hypothesis.** 관찰자 스케일( $O_n$ ) 전환에서 특성 길이와 시간이 함께 스케일링되어, 동일한 과정이 서로 다르게 “보일 수 있다.”

**Metaphor.** 서로 다른 FPS(프레임레이트) 카메라가 같은 현상을 다르게 기록하는 비유.

<sup>1</sup> 이러한 스케일링 관계는 엄밀한 물리 법칙이 아닌 개념적 틀(conceptual framework)로 이해해야 한다. 실제 물리에서 각 스케일은 서로 다른 지배적 힘에 의해 작동한다—아원자 세계에서는 강한 핵력과 약한 핵력이, 원자·분자 세계에서는 전자기력이, 거시 세계에서는 중력이 지배한다. 따라서 아래의 비례 관계는 “모든 스케일을 관통하는 정보 전달 속도의 상한( $c$ )”이라는 공통 제약을 기반으로 한 개략적 모델이며, 정량적 정밀도를 목표로 하지 않는다.

### 3. 중첩된 우주 가설과 프랙탈 시공간

앞선 On 모델을 확장하면, 우주가 특정 스케일에서 끝나는 것이 아니라 자기 유사성 (Self-similarity)을 띠는 무한한 프랙탈 구조(Fractal Structure)를 가질 가능성을 제안할 수 있다.

만약 우리 우주( $O_{n+2}$ ) 전체를 외부에서 관찰할 수 있는 초거대 존재( $O_{n+3}$ )가 있다면, 그들의 시간 관념( $\tau_{n+3}$ )에서는 수십억 년의 우주적 사건이 찰나의 순간으로 압축된다. 그 거대한 관찰자의 눈에 우리 우주는, 마치 현재의 인간( $O_{n+1}$ )이 역동적으로 진동하는 전자 ( $O_n$ )를 보는 것과 정확히 동일한 형태의 “하나의 미립자”로 보일 것이다. 역으로, 우리가 관찰하는 아원자 세계( $O_{n-1}$ ) 내부에 또 다른 거대한 우주가 펼쳐져 있을 가능성을 배제할 수 없다.

즉, 절대적인 “우주”나 “기본 입자”는 존재하지 않으며, 오직 관찰자의 스케일에 따른 “고유 시간 흐름의 차이”가 대상을 입자로 보이게 하거나 우주로 보이게 할 뿐이다.

#### 3.1 철학적 상상, 그러나 닫을 수 없는 문

솔직히 인정해야 할 것이다. 현재까지의 관측으로는, 이 가설을 직접 검증할 방법이 없다. WMAP과 Planck 위성의 우주배경복사(CMB) 관측은 약 100 Mpc 이상의 대규모 구조에서 우주가 등방적이고 균질하다는 것을 보여주며, 이는 단순한 자기유사적 프랙탈 구조와 긴장 관계에 있다.

그러나 이 가설의 가능성을 완전히 닫아버리기에는 몇 가지 흥미로운 단서들이 존재 한다.

1. 자연의 자기유사성: 해안선, 혈관 분포, 번개의 가지, 은하의 필라멘트 구조에 이르기까지, 자연은 다양한 스케일에서 놀라울 정도의 자기유사적 패턴을 반복한다. 만델브로가 보여준 것처럼, 프랙탈은 자연의 근본적인 조직 원리 중 하나다 [4].
2. 올더쇼의 이산 스케일 상대성: 올더쇼(Oldershaw)는 원자계, 항성계, 은하계 사이에 통계적으로 유의미한 구조적 유사성이 존재한다는 관측적 증거를 제시했다 [3]. 원자핵과 중성자별의 밀도 비율, 보어 원자 반경과 태양계 크기의 스케일링 관계 등은 단순한 우연으로 치부하기 어려운 패턴을 보인다.
3. 관측 한계의 존재: 우리가 “균질하다”고 결론 내리는 것은 관측 가능한 우주 내에서의 이야기다. 관측 가능 우주 너머, 혹은 플랑크 스케일( $\sim 10^{-35} \text{ m}$ ) 이하의 구조에 대해 우리는 아직 아무것도 모른다.
4. 양자중력 이론의 시사: 루프 양자중력 [6]이나 인과적 동적 삼각분할 같은 양자중력 후보 이론들은 플랑크 스케일에서 시공간이 매끈한 연속체가 아닌 이산적이고 거친 구조를 가진다고 제안한다. 이는 “더 작은 스케일에는 또 다른 복잡한 구조가 있을 수 있다”는 프랙탈적 직관과 맞닿아 있다.

5. 우주론적 다중우주 가설: 끈 이론의 “경관(Landscape)” 시나리오나 영원한 인플레이션(Eternal Inflation) 모델에서는 우리 우주가 거대한 다중우주의 하나의 거품에 불과할 수 있다고 제안한다. 이는 “우주 위에 더 큰 구조가 있을 수 있다”는 본 에세이의 상상과 구조적으로 유사하다.

이 가설이 현재로서 검증 불가능한 사변적 상상이라는 점은 분명하다. 그러나 물리학의 역사에서 가장 심오한 통찰 중 일부는 바로 이러한 “아직 증명할 수 없지만 닫아버릴 수도 없는” 영역에서 태어났다.

#### 정리: Fact / Hypothesis / Metaphor

**Fact.** 자연에는 자기유사(프랙탈) 구조가 나타나며, 유효이론은 스케일에 따라 달라진다.

**Hypothesis.** 우주가 계층적으로 중첩될 수 있고, 상위 스케일 관찰자는 하위 스케일 세계를 “입자처럼 볼 수 있다는 가설을 제안한다.

**Metaphor.** 멀리서 은하가 점처럼 보이듯, 스케일 차이가 “세계를 “입자로 보이게 한다는 비유.

## 4. 중력의 기하학적 기원: 시간의 기울기가 낳는 공간의 가속

스케일의 연속성을 이해했다면, 일상 스케일( $O_{n+1}$ )에서 관측되는 가장 지배적인 현상인 “중력(Gravity)”의 본질을 “시간”的 관점에서 들여다볼 수 있다.

### 4.1 4차원 속도와 가속도의 역설

지구 표면에 가만히 서 있는 관찰자는 일반 상대성이론의 등가원리에 의해  $1g$  ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ) 의 가속도를 지속적으로 받고 있는 상태와 같다. 공간적으로 정지해 있음에도 가속도가 누적되어 광속에 도달하지 않는 이유는, 이 가속이 3차원 공간이 아닌 4차원 시공간을 향하고 있기 때문이다.

시공간에서 시간꼴(타임라이크) 세계선을 따르는 물체는 4-속도  $u^\mu = dx^\mu/d\tau$  의 불변 노름이  $u^\mu u_\mu = -c^2$  로 일정하다. 공간 이동이 없는 지구 위의 관찰자는, 그 가속도를 텅 빙 공간을 가로지르는 데 쓰는 것이 아니라, 질량에 의해 왜곡된 시공간 속에서 “자신의 시간 축”을 향한 이동(고유 시간의 흐름)을 유지하는 데 온전히 소모하고 있는 것이다.

### 4.2 시간의 기울기(Time Gradient)

질량을 가진 물체가 다른 물체를 끌어당기는(공간의 가속을 유발하는) 본질적인 이유는 측지선 방정식(Geodesic Equation)에서 명쾌하게 드러난다.

$$\frac{d^2x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} \frac{dx^\alpha}{d\tau} \frac{dx^\beta}{d\tau} = 0 \quad (3)$$

**가정(뉴턴 극한).** 아래 전개는 정적 계량( $\partial_t g_{\mu\nu} = 0$ ), 약한 중력장( $|\Phi|/c^2 \ll 1$ ), 저속 운동( $v \ll c$ ) 및 적절한 좌표 선택 하에서의 근사(뉴턴 한계)로 이해하는 것이 안전하다.

정지해 있거나 느리게 움직이는 물체의 경우, 4차원 속도의 공간 성분은 0에 수렴하고 시간 성분( $dt/d\tau \approx c$ )만 남는다. 이 경우 물체가 겪는 3차원 공간적 가속도( $a^i$ )는 다음과 같이 유도된다.

$$a^i = \frac{d^2x^i}{dt^2} \approx -c^2 \Gamma^i_{00} \approx \frac{1}{2} c^2 \nabla_i g_{00} \quad (4)$$

여기서  $g_{00}$ 은 시공간의 계량 텐서 중 “시간 성분”이다. 이 관계는 (정적·약한 장·저속의) 뉴턴 극한에서, 물체의 공간 가속( $a^i$ )이 위치에 따른 시간 성분( $g_{00}$ )의 변화( $\nabla_i g_{00}$ )와 연결됨을 보여준다.

질량 중심에 가까울수록 시간이 미세하게 느리게 흐른다. 마치 한쪽 바퀴가 느리게 구르는 자동차가 그 방향으로 꺾이듯, 시간 축을 향해 직진하려던 물체의 궤적이 시간이 느리게 흐르는 공간 축(질량 중심) 방향으로 꺾여버리는 현상이 바로 “중력”이다. 이 관점에서 ‘당기는 힘’으로 묘사되는 중력은, 시간 흐름의 공간적 기울기로 직관화할 수 있다.

#### 정리: Fact / Hypothesis / Metaphor

**Fact.** 정적·약한 장·저속 한계에서  $a^i \approx \frac{1}{2}c^2 \nabla_i g_{00}$ 이며,  $g_{00}$ 은 뉴턴 퍼텐셜과 연결된다.

**Hypothesis.** 중력을 “시간 흐름의 공간적 기울기로 직관화하면 등가원리/측지선 그림과 잘 호응한다(근사 범위 내)."

**Metaphor.** 한쪽 바퀴가 느리게 구르는 자동차가 그 방향으로 휘는 비유.

## 5. 시간의 렌즈로 본 열, 빛, 그리고 중력

앞 장에서 중력을 “시간 흐름의 기울기”로 이해했다. 이 렌즈가 유효하다면, 같은 시선으로 다른 익숙한 현상들—열, 빛의 속도, 그리고 에너지의 흐름—도 바라볼 수 있지 않을까?

### 5.1 온도: 미시적 시계의 빠르기

온도란 본질적으로 미시적 입자들의 운동 에너지에 대한 통계적 척도이다. 기체의 분자들은 온도가 높을수록 더 빠르게 움직이고, 온도가 낮아질수록 그 운동은 느려진다. 절대영도(0 K)에서는 양자역학적 영점에너지를 제외하면 모든 운동이 멈춘다.

이 사실을 On 스케일 모델의 시선으로 다시 보면, 흥미로운 유비가 떠오른다. 온도가 낮아져 입자의 운동이 극도로 느려진 계(系)를 거시적 관찰자가 바라보면, 그 계의 내부 “시계”는 사실상 거의 멈춘 것처럼 보인다. 반대로 온도가 극히 높은 플라스마 상태에서는 입자들의 상호작용이 폭발적으로 빨라지며, 그 내부의 “시계”는 관찰자 기준에서 매우 빠르게 흐르는 셈이다.

즉, 온도는 미시적 스케일에서의 시간 흐름의 빠르기를 거시적 관찰자가 감지하는 방식일 수 있다.

이것이 단순한 비유에 그치지 않는 이유는, 현대 물리학에서 가속도(중력)와 온도가 실제로 연결되어 있기 때문이다.

- **운루 효과(Unruh Effect)** [14]: 등가속도로 운동하는 관찰자는, 관성 관찰자에게는 완벽한 진공인 공간에서 열복사를 감지한다. 가속도  $a$ 에 의해 관찰되는 온도는

$$T = \frac{\hbar a}{2\pi c k_B} \quad (5)$$

이다. 가속 = 시간의 기울기라는 본 에세이의 관점을 적용하면, 시간 흐름의 기울기가 곧 온도를 낸다는 해석이 가능하다.

- **호킹 복사(Hawking Radiation)**: 블랙홀은 온도를 가진다. 극단적인 시공간 왜곡 (극단적인 시간의 기울기)이 열을 발생시킨다는 사실은, 중력과 온도, 그리고 시간이 근본적으로 얹혀 있음을 시사한다.
- **Jacobson의 열역학적 유도(1995)** [15]: 테드 제이콥슨은 아인슈타인의 장방정식을 열역학적 고려—엔트로피, 온도, 열 흐름—만으로 유도할 수 있음을 보였다. 이는 시공간의 기하학이 열역학과 분리된 것이 아니라 동일한 현상의 다른 표현일 수 있다는 강력한 단서다.

## 5.2 매질 속 빛의 속도: 시공간 구조의 밀도

진공에서 빛의 속도는  $c$ 로 일정하지만, 물이나 유리 같은 매질 속에서 빛은 느려진다. 현대 전자기학은 이를 매질 내 원자의 전자기적 상호작용(흡수와 재방출 과정)으로 명쾌하게 설명하며, 이는 확립된 물리학이다.

그러나 On 스케일 모델의 시선으로 같은 현상을 바라보면, 보완적인 직관이 생긴다. 매질이란 원자와 분자라는 미시적 시공간 구조가 밀집한 공간이다. 빛이 진공을 통과할 때에는 단일 스케일의 평탄한 시공간만 횡단하지만, 매질을 통과할 때에는 원자 하나하나가 가진 고유한 시공간적 구조—전자의 진동, 에너지 준위의 전이—를 관통해야 한다.

각 원자 내부의 “특성 시간( $\tau_n$ )”과 그 사이의 상호작용이 빛의 전파를 지연시킨다면, 매질에서 빛이 느려지는 현상은 “미시적 시공간 구조의 밀도가 정보 전달을 지연시킨다”

는 관점으로도 해석할 수 있다.<sup>2</sup> 매질이 치밀할수록(굴절률이 높을수록) 빛이 더 느려지는 것은, 미시적 스케일에서의 시공간 구조가 더 복잡하고 조밀하기 때문이라는 직관이다.

### 5.3 열의 흐름과 중력: 놀라운 구조적 유사성

열은 언제나 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐른다. 이것은 열역학 제2법칙의 직접적인 귀결이다. 그런데 이 에세이에서 중력을 “시간 흐름의 기울기”로 이해했다면, 다음과 같은 유비가 성립한다.

열은 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐른다.

시공간은 시간이 빠른 곳에서 느린 곳으로 “기울어진다”(중력).

만약 앞 절에서 논의한 것처럼 온도가 미시적 시간 흐름의 빠르기라면, 열의 흐름(고온→저온)과 중력에 의한 시공간의 기울어짐(빠른 시간→느린 시간)은 구조적으로 동일한 현상의 서로 다른 스케일에서의 발현일 가능성이 있다.

이것이 단순한 비유 이상일 수 있다는 근거는, 2011년 에릭 베를린데(Erik Verlinde)가 제안한 엔트로피 중력(Entropic Gravity) 가설에서 찾을 수 있다[16]. 베를린데는 중력이 근본적인 힘이 아니라, 엔트로피 증가라는 열역학적 경향에서 발현되는 힘이라고 제안했다. 이 관점에서 중력은 “온도 차이가 만드는 열의 흐름”과 본질적으로 같은 범주에 속한다.

에세이의 핵심 논지(“시간의 기울기 = 중력”)와 베를린데의 엔트로피 중력(“엔트로피 기울기 = 중력”)은 서로 다른 출발점에서 놀라울 정도로 유사한 결론에 도달한다. 열, 중력, 시간—이 세 가지가 하나의 깊은 뿌리에서 갈라져 나온 가지들일 가능성은, 적어도 탐구할 가치가 있다.

#### 정리: Fact / Hypothesis / Metaphor

**Fact.** 가속과 온도를 잇는 Unruh 효과, 블랙홀 열역학 등에서 중력-열-정보의 연결 고리가 나타난다.

**Hypothesis.** 시간 기울기/가속이 국소적 온도·엔트로피 흐름과 연결될 수 있다는 “지도(map)를 제안한다(엄밀 동치 주장 아님).

**Metaphor.** 시간을 “굴절률처럼 보는 렌즈의 비유.

## 6. 양자역학으로의 확장: 시공간적 잔상 가설

본 에세이의 On 프랙탈 스케일 모델은 거시 세계(상대성이론)와 미시 세계(양자역학)의 모순을 해결할 철학적 단초를 제공할 수 있을까? 관찰자 스케일이 미시 세계( $O_n \rightarrow O_{n-1}$ )

<sup>2</sup>이 해석은 기존 전자기학의 설명과 대립하는 것이 아니라, 동일한 현상을 시공간적 관점에서 재서술하는 시도이다.

로 극단적으로 작아지면, 거시 세계 관찰자 기준에서 미시 세계의 시간은 무한대에 가깝게 압축되어 흐른다.

이 관점에서 양자역학의 핵심인 전자의 “확률적 중첩(Superposition)”과 “불확정성(Uncertainty)”을 부정하려는 것이 아니라, 거시 관찰자의 시간 해상도 한계가 측정 기록을 어떻게 “흐릿하게” 만들 수 있는지에 대한 직관을 제안한다. 거시적 관찰자( $O_{n+1}$ )의 느린 시간 인지 해상도—마치 느린 셔터 속도의 카메라—는 빠른 자유도들을 효과적으로 *coarse-graining*(거칠게 평균)하여, 측정 기록 수준에서 “시공간적 잔상(Temporal Blur)”처럼 보이는 양상을 만들 수 있다. 이러한 관점은 빠른 자유도를 추적 불가능한 것으로 취급할 때 유효한 혼합상태가 나타난다는 데코히レン스(decoherence) 논의와도 맞닿아 있다. [9]

## 6.1 정직한 한계: Bell의 부등식과의 대면

이 가설에 대해 정직해져야 하는 지점이 있다. 양자역학의 역사에서 가장 중요한 실험적 이정표 중 하나인 Bell의 부등식(Bell's Inequality) 위반 실험 [7, 8]이 바로 그것이다.

1964년, 존 스튜어트 벨은 만약 양자 입자들이 우리가 아직 발견하지 못한 “숨은 변수(Hidden Variables)”에 의해 결정론적으로 행동한다면, 특정 통계적 부등식이 반드시 만족되어야 함을 증명했다. 1982년, 알랭 아스페(Alain Aspect)의 실험은 이 부등식이 실제로 위반됨을 보여주었다. 이후 수십 년간 반복된 더욱 정교한 실험들도 같은 결론에 도달했다.

만약 “시공간적 잔상”을 “전자는 사실 확정된 궤적을 가지고 있으나 우리가 보지 못하는 것”이라는 국소적 결정론(숨은 변수 복원)으로 해석한다면, 이는 Bell의 부등식 위반이라는 실험적 사실과 직접 충돌할 가능성이 높다. 따라서 이 에세이에서의 “잔상”은 양자론을 대체하는 존재론이 아니라, 관찰/기록의 coarse-graining을 돋는 해석적 그림으로 제한한다. 이중 슬릿 실험에서 전자를 하나씩 발사해도 간섭 무늬가 형성된다는 사실 역시, 단순한 “잔상”으로 설명하기 어려운 현상이다.

이 한계를 인정한다. 현재의 “시공간적 잔상” 가설은 Bell의 부등식 위반을 설명하지 못하며, 양자 얹힘(Entanglement)의 비국소성(Nonlocality)을 스케일 모델만으로는 도출 할 수 없다.

## 6.2 그럼에도 남는 질문

그러나 이러한 한계를 인정한 후에도, 몇 가지 질문을 놓을 수 없다.

매끄러운 중력과 거친 양자 파동은 근본적으로 다른 법칙인가, 아니면 스케일에 따른 관찰자의 “인지 해상도” 차이가 빛어낸 동일한 프랙탈 시공간의 양면일 가능성은 정말로 없는가? 만약 스케일 간의 시간 압축이 단순한 선형적 “잔상”이 아니라, 비국소적 상관관계를 내포하는 더 복잡한 구조를 가진다면? 그리고 궁극적으로, 양자중력 이론이 완성되

었을 때 그것은 스케일의 경계를 어떤 방식으로 넘나들 것인가?

이 질문들에 대한 답은 아직 없다. 그것이 이 에세이의 한계이자, 동시에 이 에세이가 존재하는 이유이기도 하다.

#### 정리: Fact / Hypothesis / Metaphor

**Fact.** 간섭과 Bell 부등식 위반은 단순한 기기 해상도/무지로는 설명되기 어렵다.

**Hypothesis.** “Temporal Blur”는 양자론을 대체하는 존재론이 아니라, 관측 기록의 coarse-graining(및 데코하런스 직관)을 돋는 제한된 해석 그림으로 둔다.

**Metaphor.** 느린 셔터 사진이 빠른 운동을 한 장에 겹쳐 담는 비유.

## 7. 결론

“시간의 흐름이 곧 공간을 정의한다”는 관점 하에, 이 에세이는 네 가지 풍경을 순회했다.

첫째, 질량에 의해 발생한 시간 흐름의 공간적 불균형—시간의 기울기—이 물체의 이동 경로를 공간의 가속도(중력)로 변환시킨다는 것을 일반 상대성이론의 수학적 구조를 통해 확인했다. 우주는 고정된 3차원의 캔버스가 아니라, 시간의 흐름에 의해 끊임없이 조각되는 역동적 구조다.

둘째, 같은 렌즈로 열과 빛을 바라보았다. 온도는 미시적 시계의 빠르기이며, 매질 속 빛의 감속은 미시적 시공간 구조의 밀도에 의한 것일 수 있고, 열의 흐름과 중력은 “기울기에 따른 흐름”이라는 동일한 구조를 공유할 가능성이 있음을 탐색했다.

셋째, 관찰자의 스케일( $O_n$ )에 따라 사건의 인지 주기가 달라져 원자가 우주가 되고 우주가 원자가 되는 “프랙탈 구조”的 가능성을 탐색했다. 이 가

#### 정리: Fact / Hypothesis / Metaphor

**Fact.** 본 글은 표준 이론을 대체하기보다는, 시간 중심의 직관으로 상대론·열역학·양자론 사이의 연결을 사유한다.

**Hypothesis.** 스케일과 시간 해상도의 관점이 유효한 “질문 틀이 될 수 있다는 가능성”을 남긴다.

**Metaphor.** 하나의 현상을 다른 투영법으로 다시 그려보는 “지도 투영의 비유.”

설은 아직 검증 불가능하지만, 자연의 자기유사성과 관측 한계를 고려할 때 완전히 닫아버릴 수 없는 문이다.

넷째, 거시계의 상대성이론과 미시계의 양자역학을 잇는 개념적 다리로서 “시공간적 잔상” 가설을 제안하되, Bell의 부등식이라는 실험적 장벽 앞에서 이 가설의 현재 한계를 솔직히 인정했다.

우주는 관찰자의 크기와 질량이 만들어내는 “상대적 시간의 흐름”에 따라 그 기하학적 형태가 결정되는 역동적이고 무한한—혹은 최소한 우리가 아직 그 끝을 보지 못한—프랙

탈 시공간 연속체일 수 있다.

## 에필로그: 이 에세이가 답하지 못한 질문들

---

모든 좋은 탐구는 답보다 더 많은 질문을 남긴다. 이 에세이도 예외가 아니다.

- 스케일 상수  $\alpha$ 는 보편적 상수인가, 아니면 스케일마다 다른 동적 변수인가?
- 프랙탈 시공간이 실재한다면, 그 자기유사성의 하한과 상한은 존재하는가?
- “시간의 기울기”라는 관점은 암흑에너지에 의한 가속 팽창도 설명할 수 있는가?
- 열, 중력, 시간이 하나의 뿌리에서 갈라진 것이라면, 그 뿌리의 정체는 무엇인가?
- 양자 얹힘의 비국소성은 스케일 간의 어떤 구조적 연결로 이해할 수 있는가?
- 의식이라는 현상은 특정 스케일의 관찰자에게만 발현하는 것인가?

이 질문들은 한 개인의 에세이로 답할 수 있는 범위를 넘어선다. 그러나 질문을 품는 것 자체가 탐구의 시작이며, 때로는 그것만으로도 충분히 가치 있다. 이 글을 읽은 누군가가 이 질문들 중 하나를 가슴에 품고 더 깊이 나아간다면, 이 에세이는 그 역할을 다한 것이다.

## References

---

- [1] Einstein, A. (1916). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 354(7), 769–822.
- [2] Nottale, L. (1992). The theory of scale relativity. *International Journal of Modern Physics A*, 7(20), 4899–4936.
- [3] Oldershaw, R. L. (1989). Discrete Scale Relativity. *Astrophysics and Space Science*, 161(2), 313–332.
- [4] Mandelbrot, B. B. (1983). *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman.
- [5] Thorne, K. S. (1994). *Black Holes and Time Warps*. W. W. Norton & Company.
- [6] Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press.
- [7] Bell, J. S. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics*, 1(3), 195–200.
- [8] Aspect, A., Dalibard, J., & Roger, G. (1982). Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell’s Inequalities. *Physical Review Letters*, 49(25), 1804–1807.

- [9] Zurek, W. H. (2003). Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. *Reviews of Modern Physics*, 75(3), 715–775.
- [10] Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. (1973). *Gravitation*. W. H. Freeman.
- [11] Pietronero, L. (1987). The fractal structure of the universe: Correlations of galaxies and clusters on large spatial scales. *Physica A*, 144(2–3), 257–284.
- [12] Penrose, R. (2004). *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Jonathan Cape.
- [13] Weinberg, S. (1972). *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*. John Wiley & Sons.
- [14] Unruh, W. G. (1976). Notes on black-hole evaporation. *Physical Review D*, 14(4), 870–892.
- [15] Jacobson, T. (1995). Thermodynamics of Spacetime: The Einstein Equation of State. *Physical Review Letters*, 75(7), 1260–1263.
- [16] Verlinde, E. (2011). On the Origin of Gravity and the Laws of Newton. *Journal of High Energy Physics*, 2011(4), 29.