

時間の矢と成長する因果球

— Penrose の Weyl 曲率仮説を、光球のエントロピー増大として読む —

熱力学アークの締め

著者: 山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

所属: Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan | 山岸勇輝ラボ

投稿区分: 論文75 (Paper 75) | Zenodo: 10.5281/zenodo.21670183

Category: 物理学 / 宇宙論・時間の矢 / 構造的解釈

キーワード: 時間の矢, 第二法則, Weyl曲率仮説, 重力エントロピー, 因果球, 一般化第二法則, Penrose

— From thinking to syncing. —

本稿の位置づけ

本稿は構造的解釈であり、熱力学アークの中で最も野心的——ゆえに最も注意深く限定された——一本である。時間の矢の問題を解かず、低エントロピーの過去（「過去仮説」）も説明しない；用いる Penrose の Weyl 曲率仮説は、初期条件についての未証明の予想そのものである。行うのは、重力的な時間の矢を幾何学的に読むこと——論文61の因果（光）球の成長と、そのエントロピー（論文65・73）を通して——そしてその読みを Penrose の仮説と一般化第二法則の中に置くこと。これは創発重力アーク（論文62・72・73・74）を閉じる：矢は、重力＝熱力学の時間的な顔である。既存理論と矛盾する主張は含まない。

概要

第二法則は低エントロピーの過去（「過去仮説」）を要し、重力的にはこれは微妙である：滑らかで一様な分布が低重力エントロピーで、ブラックホールへの凝集が高。Penrose の Weyl 曲率仮説はこれを符号化する：初期特異点は Weyl 曲率が消え（滑らか・低）、終末特異点は Weyl が発散（凝集・高）；時間の矢は、滑らかな始まりからの重力エントロピーの増大。本稿はこの矢を体系自身の幾何を通して読む。論文61の因果（光）球 $r = ct$ は時間とともに成長し、面積 $A = 4\pi(ct)^2$ は増大し、そのペケンシュタイン--ホーキング・エントロピー $S = A/(4l_p^2)$ （論文65・73）も増大する。因果球の地平線エントロピーの単調増大が一般化第二法則の幾何学的な顔であること（命題3.1）、それが Penrose の凝集する Weyl 増大の、膨張する地平線の相補であること（観察4.1）を記す。これは論文62・72・73・74 の熱力学アークの締めである：創発重力の傘の下で、時間の矢は時間の中で読まれた重力＝熱力学。過去仮説も初期 Weyl の小ささもここでは説明されない——Penrose（そして我々）の未解決の予想として残る——こと、この読みが位置づけであって導出でないことを明示する。

§1. 序論

なぜ時間には向きがあるのか。微視法則は本質的に時間対称なのに、第二法則は巨視過程を不可逆にする。Boltzmann と Penrose が鋭くした深い謎は、第二法則が宇宙が非常に低いエントロピーの状態が始まったことを要する——過去仮説——ことである。重力的には低エントロピーの状態は直観に反する：滑らかで一様なガスは重力的に低エントロピーで、重力的凝集（究極的にはブラックホール）が高。初期宇宙は熱いが滑らか——低重力エントロピー——で、それが特別な初期条件である。

Penrose の Weyl 曲率仮説はこれを幾何学的にする：重力エントロピーは曲率の Weyl（潮汐的・源のない）部分に住み、Ricci 部分（物質で固定）でない；初期特異点は $\text{Weyl} \approx 0$ 、終末特異点は $\text{Weyl} \rightarrow \infty$ 、時間の矢は滑らかから凝集への増大。

本稿はこの矢を体系の因果球を通して読む。これは熱力学アーク（論文62・72・73・74）の最後一枚：論文74の創発重力の傘の下で、時間の矢は、時間の中で読まれた重力＝熱力学。

本稿が行わないこと。過去仮説も初期 Weyl の消失も説明せず（Penrose 自身の未解決の予想）、矢を導出しない。既知の矢を体系の幾何を通して読む。

§2. 重力的な矢（確立）

三つの確立された事実が読みを枠づける。

- 過去仮説（Boltzmann）：第二法則のエントロピー増大は、宇宙が非常に低いエントロピーの巨視状態で始まったから成り立つ；矢は力学でなく初期条件についての言明。
 - Weyl 曲率仮説（Penrose 1979）：重力エントロピーは Weyl 曲率 $C_{\mu\nu\rho\sigma}$ （自由な重力場）で測られ、Ricci 部分でない。初期特異点は $C \rightarrow 0$ 、終末特異点は $C \rightarrow \infty$ 。滑らかは低、凝集は高。
 - 一般化第二法則（Bekenstein 1974; Gibbons--Hawking 1977）：物質エントロピーと地平線エントロピーの和 $S_{\text{matter}} + S_{\text{horizon}}$ ($S_{\text{horizon}} = A/(4l_P^2)$) は減少しない；宇宙論的（ド・ジッター）地平線はそのエントロピーを担い、最大値へ向けて成長する。
-

§3. 因果球は成長する

命題 3.1 (因果球のエントロピーは単調増大する)

論文61の因果（光）球は $r = ct$ ；面積は $A(t) = 4\pi(ct)^2$ 、論文65・73 のベケンシュタイン--ホーキング・エントロピーを割り当てると

$$S(t) = \frac{A(t)}{4l_P^2} = \frac{\pi c^2 t^2}{l_P^2}$$

これは t とともに単調に増大する。この増大は一般化第二法則の地平線エントロピー項の幾何学的な顔：因果的地平線が膨張するにつれ、割り当てられる地平線エントロピーが増える。

注意深く述べる：一般化第二法則の厳密な地平線エントロピーの言明は、事象地平線とド・ジッター地平線について。因果（粒子）球は、同じ膨張する地平線現象への体系の幾何学的な取っ手である。 $S(t)$ の増大は矢の光球の像であって、新しい熱力学法則ではない。

§4. Weyl 曲率仮説の中に置く

観察 4.1 (重力的な矢の二つの顔)

重力的な矢は、いずれも滑らかな低エントロピーの始まりから指す、二つの相補的な顔を持つ：

- 凝集 (Penrose)：物質が重力で凝縮し、Weyl 曲率が増大し、重力エントロピーがブラックホールへ向けて上がる——Penrose の Weyl 増大。
- 膨張 (本稿)：因果的地平線が成長し、地平線エントロピー $S(t) = A(t)/4l_P^2$ がそのド・ジッター最大値へ向けて上がる——論文61の因果球の成長。

初期状態が共通の起源：小さな因果球とほぼ零の Weyl——両方で低い。時間の矢は、その共同の成長。ゆえに体系の因果球は、Penrose の凝集仮説の、膨張する地平線の相補；両者が合わさって幾何学的な矢をなす。

論文74の傘の下で、これは期待される：重力が熱力学なら、それは第二法則を持ち、第二法則は矢を持つ。論文62・72は宇宙項を熱力学的に読み、論文73は地平線エントロピーを読み、論文74は創発の枠組みを名指した；本稿はその枠組みの時間を読む。

§5. 主張の射程

確立されたこと

- 論文61の因果球は成長し、そのBHエントロピー $S(t) = \pi c^2 t^2 / l_P^2$ は単調増大する——一般化第二法則の成長する地平線項の幾何学的な顔（命題3.1）。
- これは Penrose の Weyl 凝集の、膨張する地平線の相補；両者は滑らかな低エントロピーの起源を共有（観察4.1）。論文62・72・73・74の熱力学アークを閉じる。

確立されていないこと／未解決問題

- 時間の矢の問題の解決。過去仮説（なぜ低エントロピーで始まったか）は説明されない。
- 初期 Weyl の消失の説明。それは Penrose の予想で、ここでは仮定であって導出でない；初期条件がなぜ特別だったかは未解決のまま。
- 因果球エントロピーが矢の全体であること。それは一つの（地平線の）顔；凝集（Weyl）の顔と物質エントロピーが残り。
- 未解決：体系の構造は初期状態を制約するか——立体角パッチや $n=2$ フラックス幾何は、ほぼ零の初期 Weyl を仮定でなく自然に示るか？ それは過去仮説そのもの、アークの最も深い問い；ここでは試みず、読み以上のはるかに多くを要する。

§6. 結論：アークを閉じる

重力的に、時間の矢は、滑らかな低エントロピーの始まりからのエントロピー増大：Weyl 曲率の凝集（Penrose）と地平線の膨張が合わさったもの。体系の幾何を通して読めば、膨張の側は論文61の因果球の成長とそのBHエントロピー（論文65・73）、 $S(t) = \pi c^2 t^2 / l_P^2$ ——第二法則の光球の像。これは熱力学アークの締め：論文62・72は宇宙項を境界/積分定数として、論文73は地平線エントロピーの係数を、論文74は創発重力の傘を名指し、本稿はその時間の矢を読む。すべては一つの態度——重力＝熱力学——であり、矢はその時間的な顔である。アークが行わないこと、そして本稿が最も行わないことは、なぜ始まりが特別だったかを説明

すること；過去仮説と初期 Weyl の消失は、正直に、Penrose の——そして我々の——未解決の予想として残る。

参考文献

1. Boltzmann, L. (1896). *Vorlesungen über Gastheorie*. Leipzig.
 2. Penrose, R. (1979). *Singularities and time-asymmetry*. In S. W. Hawking & W. Israel (eds.), *General Relativity: An Einstein Centenary Survey*, 581–638. Cambridge Univ. Press.
 3. Bekenstein, J. D. (1974). *Generalized second law of thermodynamics in black-hole physics*. Phys. Rev. D, 9, 3292–3300.
 4. Gibbons, G. W. & Hawking, S. W. (1977). *Cosmological event horizons, thermodynamics, and particle creation*. Phys. Rev. D, 15, 2738–2751.
 5. Penrose, R. (2004). *The Road to Reality*. Jonathan Cape. (第27–28章)
 6. Wald, R. M. (1994). *Quantum Field Theory in Curved Spacetime and Black Hole Thermodynamics*. Univ. of Chicago Press.
 7. [Yamagishi 2026, Paper 60] *c as the Radius of Velocity Space*. Zenodo. [10.5281/zenodo.21598012](https://zenodo.org/record/21598012)
 8. [Yamagishi 2026, Paper 61] *The Light Sphere $r = ct$* . Zenodo. [10.5281/zenodo.21598127](https://zenodo.org/record/21598127)
 9. [Yamagishi 2026, Paper 65] *The Bekenstein–Hawking Entropy of the Causal Sphere and c^3* . Zenodo. [10.5281/zenodo.21616466](https://zenodo.org/record/21616466)
 10. [Yamagishi 2026, Paper 73] *The "1/4" in Black-Hole Entropy*. Zenodo. [10.5281/zenodo.21666086](https://zenodo.org/record/21666086)
 11. [Yamagishi 2026, Paper 74] *The Yamagishi Patch within Emergent Gravity*. Zenodo. [10.5281/zenodo.21670102](https://zenodo.org/record/21670102)
-

— *From thinking to syncing.* —

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

© 2026 Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan · Licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)