

情報力学における時間の出現: 宇宙論・ブラックホール・量子論・情報幾何を統合する 統一的信息フレームワーク

宮尾安藝雄

令和8年1月16日

概要

一般相対論と量子論において、時間は本質的に異なる役割を果たしており、いずれの理論も時間がなぜ存在するのか、あるいはより原始的な構造からどのように生じるのかを説明していない。本研究では、離散的な事象（“E-events”）の因果的・情報的な組織化から時間的秩序が生じるという枠組み、*Emergent Time from Informational Mechanics* (ETIM) を構築する。ETIM は、情報層の階層構造、更新写像、そして時間強度場を導入し、時空を *a priori* に仮定することなく、効果的な時間方向を生成する。ETIM は、半古典的重力、量子宇宙論、そしてホログラフィーの主要な特徴を自然に再現することを示す。Wheeler – DeWitt 方程式は情報力学の粗視化された記述として現れ、ETIM のエンタングルメント構造は Ryu – Takayanagi 面の時間的アナロジーを与える。初期宇宙の宇宙論に適用すると、ETIM はインフレーション的ダイナミクスに対する情報論的起源を提供し、現在の観測と整合的なスカラーおよびテンソル揺らぎのスペクトルを予言する。これらの結果は、時間が情報論的な現象として理解し得ることを示唆している。ETIM は量子論・重力・宇宙論を結ぶ一貫した橋渡しを提供し、時間的秩序の情報論的起源を探究するための概念的基盤を与える。

目次

1	ETIM の公理的基礎	9
1.1	公理 1 : E-イベントと因果順序	9
1.2	公理 2 : サブシステムと空間的支持	9
1.3	公理 3 : 情報層	10
1.4	公理 4 : 情報更新写像	10
1.5	公理 5 : 時間強度場	11
1.6	公理 6 : 収束的信息構造としてのエンタングルメント	11
1.7	まとめ	11
2	ETIM の数学的性質	12
2.1	出現時間の存在と一意性	12
2.2	情報層の単調性	13
2.3	情報フローの因果的閉包性	13
2.4	最大因果伝播速度と出現する光速	14
2.5	ETIM エンタングルメントの特徴づけ	15
2.6	時間強度とイベント密度	16
2.7	時間強度の消失による時間的境界	16
2.8	測定と出現時間の生成	17
2.9	まとめ	17
3	宇宙論における時間の出現	18
3.1	前時間的領域とプロトパラメータ λ	18
3.2	時間強度の上昇と時間の誕生	18

3.3	ETIM 宇宙論における最大伝播速度の不変性	19
3.4	インフレーションは時間出現の帰結である	20
3.5	原始ゆらぎは T のゆらぎから生じる	20
3.6	観測的整合性	21
3.7	まとめ	21
4	ブラックホール内部と時間の崩壊	22
4.1	外部領域の時間強度と重力赤方偏移	22
4.2	地平面をまたぐ統一パラメータ	23
4.3	内部領域の時間強度と特異点への崩壊	23
4.4	特異点は時間領域の境界である	24
4.5	情報パラドックスの解消	24
4.6	まとめ	24
5	量子 ETIM : 量子変数としての時間	25
5.1	時間強度のミニ超空間作用	25
5.2	Wheeler–DeWitt 型の量子進化	26
5.3	古典的時間の半古典的出現	26
5.4	時間強度の量子ゆらぎ	27
5.5	経路積分と時間のトンネル起源	27
5.6	まとめ	28
6	ETIM における量子エンタングルメント	28
6.1	標準的量子エンタングルメント	29
6.2	ETIM エンタングルメント : 構造的定義	29
6.3	比較 : 量子エンタングルメント vs ETIM エンタングルメント	30

6.4	エンタングルメントは時間の生成機構である	30
6.5	エンタングルメント・因果構造・情報伝播速度の不変性	30
6.6	エンタングルメントと情報幾何	31
6.7	エンタングルメントとホログラフィー	31
6.8	量子重力におけるエンタングルメント	31
6.9	まとめ	32
7	情報幾何と量子現象	32
7.1	情報多様体 (M, g, ∇, R)	33
7.2	二重スリット：情報多様体上の境界条件としての解釈	33
7.3	干渉は幾何学的重ね合わせである	34
7.4	測定は局在化と時間生成である	35
7.5	量子現象における前時間的・時間的領域	36
7.6	ETIM エンタングルメントとの関係	36
7.7	まとめ	36
8	時間強度場の量子場理論	37
8.1	一様な時間出現から空間ゆらぎへ	37
8.2	時間強度場の有効作用	38
8.3	出現時間の線形摂動	38
8.4	モード進化と地平線横断	39
8.5	曲率摂動のパワースペクトル	39
8.6	時間出現による非ガウス性	39
8.7	テンソルモードと修正された整合関係	40
8.8	物理的解釈：時間そのものの量子場理論	40
8.9	まとめとホログラフィーとの接続	41

9	出現時間のホログラフィー	41
9.1	ホログラフィー方向としての時間強度	42
9.2	ETIM のホログラフィー辞書	42
9.3	dS/CFT との関係	42
9.4	時間的エンタングルメントと RT 面	43
9.5	ホログラフィー流方程式	43
9.6	まとめ	44
10	出現時間宇宙論の観測的シグネチャ	44
10.1	スカラー摂動とテンソル摂動	44
10.2	スカラーのスペクトル指数・ランニング・振幅	45
10.3	テンソルスペクトルと修正された整合関係	45
10.4	非ガウス性	46
10.5	現在の観測制約との比較	46
10.6	LiteBIRD と CMB-S4 による将来予測	46
10.7	まとめ	47
11	出現時間の量子重力的基礎	47
11.1	3+1 次元 ETIM の作用と拘束条件	48
11.2	ETIM の Wheeler–DeWitt 方程式	48
11.3	Born–Oppenheimer 分解と出現時間	48
11.4	エンタングルメント構造と時間の矢	49
11.5	ホログラフィー的解釈	49
11.6	古典的時空の出現と崩壊	50
11.7	まとめ	50

12	議論と展望	51
12.1	概念的統一：情報の構成物としての時間	51
12.2	宇宙論とブラックホール内部の双対性	52
12.3	時間の量子的起源と波動汎関数の役割	52
12.4	情報幾何と時間秩序の出現	53
12.5	大域的時間構造理論に向けて	53
13	結論	54
付録 A	ETIM の数学的基礎	55
A.1	E-イベントと因果構造	55
A.2	サブシステムと空間的サポート	56
A.3	情報層と更新写像	56
A.4	情報流の因果閉包	57
A.5	収束的信息構造としてのエンタングルメント	57
A.6	時間強度と時間的境界	57
A.7	測定と時間生成	58
A.8	まとめ	58
付録 B	量子論的および情報幾何学的基礎	58
B.1	Fisher 情報計量と統計多様体	59
B.2	接続・曲率・測地流	59
B.3	情報幾何における二重スリット境界条件	60
B.4	測定としての局在化	60
B.5	エンタングルメントエントロピーと収束的信息構造	60
B.6	Wheeler–DeWitt 方程式の導出	61

B.7	Born–Oppenheimer 分解と出現時間	61
B.8	波動汎関数からのスカラー・テンソル摂動	62
B.9	時間的 RT 面とホログラフィーエントロピー	62
B.10	まとめ	63

Introduction

時間の本質は、基礎物理学における最も深い概念的課題の一つとして長らく立ちはだかつてきた。一般相対論において、時間は時空の幾何学に組み込まれており、計量の因果構造を通じてのみ意味を持つ。一方、量子論では、時間は状態のダイナミクスを支配する外部的な進化パラメータとして導入される。これら二つの役割は数学的に両立せず、量子力学と重力を統合しようとする試みは必然的に「時間の問題」に直面する。すなわち、どちらの枠組みも時間がなぜ存在するのか、その向きが何によって決まるのか、あるいは物理的実在のより原始的な構造からどのように生じるのかを説明していない。この緊張関係に対処するため、いくつかのアプローチが提案されてきた。Wheeler–DeWitt 方程式は、根本的な記述から時間を完全にに取り除き、時間発展が半古典的に現れる現象であることを示唆する。ホログラフィーの双対性は、時空幾何を量子エンタングルメントのパターンと結びつけ、時間そのものが情報的構造から生じる可能性を示唆する。宇宙論では、インフレーションのダイナミクスが初期宇宙を成功裏に記述する一方で、インフラトンの起源、初期条件、そしてインフレーション以前の時間の意味は未解決のままである。これらの進展にもかかわらず、時間の出現に関する統一的で首尾一貫した説明はいまだ得られていない。本研究では、離散的な事象 (E-events) の因果的・情報的な組織化から時間が生じるという枠組み、*Emergent Time from Informational Mechanics* (ETIM) を構築する。ETIM は、情報層の階層構造、因果的有向非巡回グラフに沿って情報を伝播させる更新写像、そして情報更新の密度と安定性を定量化する時間強度場を導入する。これらの構造が組み合わさることで、時空や背景計量を前提とすることなく、効果的な時間秩序が生成される。時間の向きは情報フローの収束から生じ、自然にエンタングルメントと粗視化された不可逆性を生み出す。ETIM の重要な特徴は、量子重力および宇宙論の既存の枠組みと整合的である点にある。Wheeler–DeWitt 方程式が情報力学の粗視化された記述として現れることを示し、時間を持たない量子宇宙論に新たな解釈を与える。さらに、ETIM のエンタングルメント構造は Ryu–Takayanagi 面の時間的アナロジーを生み、時間の出現に対するホログラフィックな解釈を示唆する。初期宇宙の宇宙論に適用すると、ETIM はインフレーション的ダイナミクスに対する情報論的起源を提供し、現在の観測と整合するスカラーおよびテンソル揺らぎのスペクトルを予言する。本論文では、ETIM の統一的定式化を提示し、その量子論・重力・宇宙論にわたる含意を探究する。E-events、情報層、時間強度場の数学的基礎を構築し、量子幾何学および情報幾何学との関連を確立し、さらにこの枠組みをインフレーション宇宙論とホログラフィック・エンタングルメントに適用する。我々の結果は、時間が情報論的な現象として理解し得ることを示し、基礎物理学のこれまで分断されていたアプローチを結びつける一貫した橋渡しを提供する。

1 ETIM の公理的基礎

情報力学からの時間の出現 (Emergent Time from Informational Mechanics; ETIM) 枠組みは、時間的秩序が生じる基礎的な情報構造を定める一連の公理の上に構築されている。これらの公理は、基本的な情報遷移の性質、情報の組織化、そして時間がどのように出現し、発展し、崩壊するかというメカニズムを規定する。これらは、後続のセクションで展開される宇宙論、ブラックホール内部、量子力学、情報幾何学といった応用の概念的・数学的基盤を提供する。六つの公理とその相互関係の概要を Fig. 1 に示す。

ここで導入する公理は最小限でありながら、本論文で扱う全ての現象を再現するのに十分である。これらは特定の物理的解釈に依存しない形で定式化されており、ETIM を時間構造の一般的な情報論的枠組みとして機能させる。

1.1 公理 1：E-イベントと因果順序

公理 1. E -イベントは有向非巡回グラフ (DAG) (\mathcal{E}, \preceq_E) を形成し、出現時間は任意のランク関数 $\tau: \mathcal{E} \rightarrow \mathbb{N}$ であって

$$e \preceq_E f \Rightarrow \tau(e) \leq \tau(f)$$

を満たすものとする。

E -イベントは ETIM を構成する基本的な情報遷移である。部分順序 \preceq_E は因果的先行関係を表し、閉路が存在しないことにより時間的順序が一貫して定義できる。この公理は、時間が根本的なものではなく、情報更新の因果構造から出現することを示している。

この構造は因果集合論や関係的量子論 [1] と類似するが、 E -イベントは情報内容を持ち、情報層 (公理 3) や更新写像 (公理 4) と相互作用する点で異なる。出現時間の存在と順序同型までの一意性は補題 3.1 により形式化される。

1.2 公理 2：サブシステムと空間的サポート

公理 2. 各 E -イベント e は空間的サポート

$$\sigma(e) \subseteq \mathcal{S}$$

を持つ。ここで \mathcal{S} は情報更新に関与するサブシステムの集合である。

この公理は、背景時空を仮定することなく空間的局在の概念を導入する。サブシステムは物理的自

由度（検出器、粒子、場など）や抽象的な情報主体を表すことができる。空間的サポートの役割は量子情報やデコヒーレンス理論 [2] におけるサブシステム構造と類似しており、ETIM におけるエンタングルメント（公理 6）の定義において中心的役割を果たす。

1.3 公理 3：情報層

公理 3. 情報は層構造

$$\mathcal{I}^{(\ell)}, \quad \ell \in \Lambda$$

により組織化され、全情報空間はその互いに素な和として

$$\mathcal{I} = \bigsqcup_{\ell \in \Lambda} \mathcal{I}^{(\ell)}$$

で与えられる。

情報層は情報処理の深さを表す。低層はより原始的な情報状態を、高層はより精緻化された情報を表す。この階層構造は情報理論や情報幾何学 [3, 4] に類似している。E-イベントは情報のある層から別の層へ写し、因果順序に対する層の単調性は補題 3.2 により形式化される。

この層構造は宇宙論的進化（セクション 4）、ブラックホール内部（セクション 5）、量子測定（セクション 7）を理解する上で不可欠である。

1.4 公理 4：情報更新写像

公理 4. 各 E-イベント e は更新写像

$$U_e : \prod_{x \in \text{In}(e)} \mathcal{X}_x \longrightarrow \prod_{y \in \text{Out}(e)} \mathcal{X}_y$$

により情報を変換する。

因果的一貫性のためには、任意の入力ノード $x \in \text{In}(f)$ に対し、ある $e \preceq_E f$ が存在して $x \in \text{Out}(e)$ を満たさなければならない。

この公理は情報フローのダイナミクスを形式化する。更新写像は古典的遷移、量子操作、情報変換 [2] を一般化したものであり、公理 1 の因果構造に沿って情報が一貫して伝播することを保証する。

定理 3.3 は、任意の情報ノードの未来が DAG の下方閉包集合を形成することを示し、因果閉包性を保証する。

1.5 公理 5：時間強度場

公理 5. スカラー場 T （時間強度場）が E -イベントの密度を支配する。 T の値は時間秩序が出現・安定・崩壊するかを決定する。

$$T = 0 \Rightarrow E\text{-イベントなし（時間なし）}, \quad T > 0 \Rightarrow \text{出現時間が存在する}.$$

時間強度場は ETIM の中心的な力学量である。その増大は宇宙論における時間の生成 [5–7] を引き起こし、その減衰はブラックホール内部での時間崩壊 [8–10] をもたらし、その量子揺らぎは初期宇宙の原始ゆらぎ [11–13] を生成する。 T と E -イベント密度の関係は補題 3.5 により形式化され、 T の消失は時間的境界を定義する（定理 3.6）。

1.6 公理 6：収束的信息構造としてのエンタングルメント

公理 6. イベント e_1, \dots, e_m は、共通の出力ノード

$$x \in \bigcap_i \text{Out}(e_i)$$

を共有し、かつ空間的サポートが異なるとき

$$\sigma(e_i) \neq \sigma(e_j)$$

エンタングルしていると定義する。

この公理は、エンタングルメントを非局所的波動関数ではなく、情報の収束という構造的性質として定義する。これは量子相関 [2, 14] の統一的解釈を与え、測定過程における時間秩序の生成 [15] に寄与する。この構造的視点は情報幾何学的アプローチ [16] と整合する。

1.7 まとめ

本セクションで導入した六つの公理は、ETIM において時間が出現する情報論的アーキテクチャを定義する。これらはセクション 3 の数学的結果およびセクション 4–7 の物理的応用の基盤となる。総じて、ETIM は時間構造が根本的なものではなく、情報のダイナミクスから生じるものであるという統一的枠組みを確立する。

2 ETIM の数学的性質

セクション 2 で導入した公理は、ETIM を構成する原始的な情報構造を定義する。本セクションでは、これらの公理から導かれる一般的な数学的性質を展開する。これらの結果は、出現時間の性質、情報層の組織化、情報フローの因果的閉包性、エンタングルメントの構造、時間強度場の役割、そして測定と時間秩序の関係を明確にするものである。これらはセクション 4–7 における物理的応用の技術的基盤を提供し、補題と定理の形で付録 A にまとめられている。

ここで展開する数学構造は、量子重力や宇宙論で用いられる部分順序や因果構造に関する古典的結果 [11, 17] と並行している。公理全体の構造とその相互関係は Fig. 1 に要約されており、本セクションを通じて参照する。

2.1 出現時間の存在と一意性

最初の結果は、E-イベントの公理的構造が常に出現時間関数を許容し、その関数が順序同型を除いて一意であることを示す。これは関係的量子力学における関係的時間の役割 [1] に対応する。

Lemma 2.1 (出現時間の存在と一意性). *Axiom 1* で規定された E-イベントの DAG (\mathcal{E}, \preceq_E) について、次が成り立つ：

1. 順序条件

$$e \preceq_E f \Rightarrow \tau(e) \leq \tau(f)$$

を満たすランク関数 $\tau: \mathcal{E} \rightarrow \mathbb{N}$ が少なくとも一つ存在する。

2. 任意の二つのランク関数 τ, τ' は順序同型であり、 $\tau(e) < \tau(f)$ ならば $\tau'(e) < \tau'(f)$ が成り立ち、その逆も成り立つ。

Proof. 存在性は、有限あるいは局所有限な部分順序に対する標準的なランク関数の構成から従う。すなわち、

$$\tau(e) = \sup\{n \in \mathbb{N} \mid e \text{ に至る長さ } n \text{ の鎖が存在する}\}$$

と定義する。 (\mathcal{E}, \preceq_E) の非巡回性により、この定義はよく定まる。また、単調性 $\tau(e) \leq \tau(f)$ は構成から直ちに従う。

一意性について、 τ と τ' を二つのランク関数とする。まず極小元に対して $h(\tau(e)) = \tau'(e)$ を満たす写像 $h: \tau(\mathcal{E}) \rightarrow \tau'(\mathcal{E})$ を定め、部分順序に沿って帰納的に拡張する。非巡回性によりこの拡張は矛盾なく行え、両者の単調性により h は順序を保ち、可逆である。したがって二つの出現時間は順序同型である。 \square

この補題は、出現時間が外部パラメータではなく、E-イベントの因果構造に内在する性質であることを形式化する。異なるランク関数の選択は、一般相対論における時間パラメータ化の自由度 [17] に類似した、同値な「ゲージ」の違いに対応する。

2.2 情報層の単調性

次の結果は、E-イベントの因果順序のもとで情報層がどのように振る舞うかを明らかにする。この構造は、情報理論や情報幾何学における階層的情報処理の枠組み [3, 4] と類似している。

Lemma 2.2 (情報層の単調性). $e \preceq_E f$ を満たす E-イベント e, f と、 $x \in \text{Out}(e)$ 、 $y \in \text{Out}(f)$ を情報ノードとする。Axiom 3 に従い、

$$\mathcal{I} = \bigsqcup_{\ell} \mathcal{I}^{(\ell)}, \quad \lambda : \mathcal{I} \rightarrow \Lambda$$

とする。このとき ETIM のダイナミクスのもとで、因果鎖に沿って層ラベルは減少しない：

$$e \preceq_E f \Rightarrow \lambda(x) \leq \lambda(y).$$

Proof. Axiom 3 より情報は層 $\mathcal{I}^{(\ell)}$ に組織化され、Axiom 4 より各 E-イベント e は更新写像

$$U_e : \prod_{x \in \text{In}(e)} \mathcal{X}_x \longrightarrow \prod_{y \in \text{Out}(e)} \mathcal{X}_y$$

として作用する。ダイナミクスが層非減少的である、すなわち

$$\lambda(y) \geq \min_{x \in \text{In}(e)} \lambda(x)$$

が任意の $y \in \text{Out}(e)$ について成り立つと仮定する。

$e \preceq_E f$ を満たす因果鎖を考える。Axiom 4 (因果的一貫性) より、 f の任意の入力ノードは $e' \preceq_E f$ を満たすあるイベント e' の出力に由来する。この性質を因果鎖に沿って反復することで、層ラベルが因果順序に沿って減少しないことが従う。したがって $\lambda(x) \leq \lambda(y)$ が成り立つ。□

この補題は、ETIM における情報処理が出現時間と整合した方向性を持つことを示す。これは統計的・幾何学的枠組みにおける情報の単調精緻化 [16] と響き合う。

2.3 情報フローの因果的閉包性

次の定理は、ETIM における情報フローが因果的に閉じていることを形式化する。この性質は一般相対論や量子宇宙論における因果的完全性条件 [11] と並行する。

Theorem 2.1 (情報フローの因果的閉包性). 情報ノード $x \in \mathcal{I}$ を取る。その因果未来を

$$\text{Fut}(x) = \{e \in \mathcal{E} \mid x \text{ を生成するイベントから } e \text{ へ至る因果鎖が存在する}\}$$

と定義する。このとき、 $\text{Fut}(x)$ は \preceq_E に関して下方閉包である：もし $f \in \text{Fut}(x)$ かつ $e \preceq_E f$ ならば、 $e \in \text{Fut}(x)$ である。

Proof. $f \in \text{Fut}(x)$ であるとは、

$$e_0 \preceq_E e_1 \preceq_E \cdots \preceq_E e_n = f$$

という因果鎖が存在し、 $x \in \text{Out}(e_0)$ であることを意味する。

$e \preceq_E f$ を取る。 \preceq_E の推移性と上記の因果鎖の構造から、 e は鎖のいずれかのイベントと一致するか、その前に位置する。いずれの場合も、鎖を e で切れば x を生成するイベントから e へ至る因果鎖が得られる。したがって $e \in \text{Fut}(x)$ である。 \square

この定理は、ETIM において情報が「無から現れる」ことがないことを保証する。任意の情報は、明確に定義された E-イベントの因果鎖を通じて未来のイベントに伝播する。これはブラックホール物理 [8, 9] や宇宙論における情報伝播モデル [18] に見られる因果的完全性条件と対応する。

2.4 最大因果伝播速度と出現する光速

ETIM のイベントグラフ (E, \preceq) の因果構造は、出現時間の存在だけでなく、情報が伝播できる最大速度も決定する。この最大速度は、相対論的物理における不変光速の役割を果たす。

二つのイベント e, f のサブシステム支持の空間的距離を $d(o(e), o(f))$ とし、補題 3.1 のランク関数で定義される出現時間を $T(e)$ とする。任意の因果鎖 $e \preceq f$ に対し、因果的傾き (causal slope) を

$$v(e, f) = \frac{d(o(e), o(f))}{T(f) - T(e)}$$

と定義する。

Lemma 2.3 (最大因果伝播速度). ETIM のダイナミクスが局所有限であり、情報が因果エッジに沿ってのみ伝播すると仮定する。このとき、有限定数 c_{\max} が存在して

$$v(e, f) \leq c_{\max}$$

が任意の因果関係 $e \preceq f$ について成り立つ。さらに、 c_{\max} はランク関数の再パラメータ化 $T \mapsto f(T)$ (f が単調増加) に対して不変である。

Proof. 局所有限性により、任意の因果鎖はサブシステム空間の任意の有界領域内で有限個のイベントしか含まない。情報は DAG のエッジに沿ってのみ伝播するため、連続するイベント間の空間的変位

は有界である。鎖全体で和を取れば、固定された時間深さに対して $d(o(e), o(f))$ の有限上界が得られる。 T の再パラメータ化は順序を保存するため、可能な傾きの上限も保存される。□

定数 c_{\max} は、ETIM の因果構造を通じて情報が伝播できる最大速度を定義する。これは出現時間の再パラメータ化に対して不変であるため、E-イベントに参加するサブシステムとして表されるすべての観測者が同じ最大伝播速度を測定する。このことは、光速の不変性に対する情報論的・構造的説明を与える。すなわち、光速とは ETIM のイベントグラフが許容する最大因果傾きである。

2.5 ETIM エンタングルメントの特徴づけ

ここでは、公理 6 で定義された ETIM エンタングルメントの構造的特徴づけを与える。この構造的観点は、情報理論的および量子相関の視点 [2, 14] と並行している。複数の情報フローが収束して新たな E-イベントを生成する例を Fig. 8 に示す。

Theorem 2.2 (ETIM エンタングルメントの特徴づけ). 空間的支持 $\sigma(e_i) \subseteq \mathcal{S}$ を持つ E-イベント $e_1, \dots, e_m \in \mathcal{E}$ を取る。次の二つは同値である：

1. イベント集合 $\{e_i\}$ は公理 6 の意味でエンタングルしている。すなわち、ある情報ノード

$$x \in \bigcap_{i=1}^m \text{Out}(e_i)$$

が存在し、かつ $\sigma(e_i) \neq \sigma(e_j)$ を満たす $i \neq j$ が存在する。

2. 異なるサブシステムが共有の情報の結果に寄与し、その結果が各サブシステムの独立な寄与に分解できないような収束的信息構造が存在する。

Proof. (1) \Rightarrow (2): もし $x \in \bigcap_i \text{Out}(e_i)$ ならば、ノード x の情報はすべてのイベント e_i の出力に同時に依存する。サポート $\sigma(e_i)$ が異なるため、関与するサブシステムは同一ではない。したがって x の情報内容は、異なるサブシステムからの寄与を共同で符号化する収束構造であり、一般には独立な寄与の積に分解できない。

(2) \Rightarrow (1): 逆に、複数のサブシステムが共有する情報の結果に寄与し、その結果が独立な寄与の積に分解できないような収束的信息構造が存在すると仮定する。このような非可分な結果は、複数のイベント e_i の出力に依存する情報ノード x によって表されなければならない。もし単一のサブシステムのみが寄与するのであれば、構造は独立な寄与に分解されてしまうためである。したがって、ある情報ノード x が存在して

$$x \in \bigcap_i \text{Out}(e_i)$$

かつ $\sigma(e_i) \neq \sigma(e_j)$ を満たす $i \neq j$ が存在する。ゆえに、イベント集合 $\{e_i\}$ は公理 6 の意味でエンタングルしている。□

この定理は、ETIM におけるエンタングルメントが本質的に構造的であることを示す。すなわち、エンタングルメントとはサブシステム間の情報の収束構造を反映するものであり、量子相関の情報幾何学的解釈 [16] と整合している。

2.6 時間強度とイベント密度

ETIM の中心的特徴の一つは、時間強度場と E-イベント密度の関係である。この関係は、宇宙論的インフレーションの ETIM 的解釈 [5–7] およびブラックホール内部の解釈 [8–10] の基盤となる。時間強度の上昇が E-イベント密度の増加に対応する例を Fig. 2 に示す。

Lemma 2.4 (時間強度とイベント密度の関係). 粗視化された E-イベント密度をプロトパラメータ λ の関数として $\rho_E(\lambda)$ とし、Axiom 5 の時間強度場を $T(\lambda)$ とする。E-イベント発生率が T の単調増加関数であると仮定する。このとき、

$$\frac{d\rho_E}{d\lambda} > 0 \iff \frac{dT}{d\lambda} > 0.$$

Proof. 仮定より、E-イベント密度は $\rho_E = F(T)$ と書け、 $T > 0$ で $F'(T) > 0$ が成り立つ。したがって、

$$\frac{d\rho_E}{d\lambda} = \frac{dF}{dT} \frac{dT}{d\lambda} = F'(T) \frac{dT}{d\lambda}.$$

$F'(T) > 0$ であるため、 ρ_E の増減の符号は T の増減の符号と一致する。 \square

この補題は、インフレーションを「急速に増大する時間強度の相」(Fig. 2) として、ブラックホール内部を「時間強度が崩壊する領域」(Fig. 3) として解釈する数学的基盤を与える。

2.7 時間強度の消失による時間的境界

次に、時間強度がゼロになることが時間領域の境界を定義するという考えを形式化する。この視点は、宇宙論的特異点やブラックホール特異点を発散ではなく境界として捉える解釈 [10, 11, 19] と整合する。シュヴァルツシルトブラックホール内部での時間強度の崩壊 (Fig. 3) はその具体例である。

Theorem 2.3 (時間強度の消失による時間的境界). 時間強度場 $T(\lambda)$ を考える。ある $\lambda_* \in \mathbb{R}$ が存在して $T(\lambda_*) = 0$ を満たし、 $\lambda > \lambda_*$ で $T(\lambda) > 0$ とする。このとき：

1. 領域 $\lambda < \lambda_*$ には E-イベントは存在しない。
2. 出現時間 τ は $\lambda < \lambda_*$ では定義されず、超曲面 $\lambda = \lambda_*$ が時間的境界を定める。

Proof. Axiom 5 より、 $T = 0$ は E-イベントの不存在を意味する。もし $T(\lambda_*) = 0$ かつ $\lambda > \lambda_*$ で

$T > 0$ ならば、 $\lambda < \lambda_*$ に E-イベントが存在するためには $T > 0$ が必要であり、これは仮定に反する。したがって $\lambda < \lambda_*$ では E-イベント集合は空であり、DAG (\mathcal{E}, \preceq_E) は定義されない。DAG が存在しなければランク関数 τ も構成できないため、出現時間は存在しない。ゆえに $\lambda = \lambda_*$ が時間構造の開始（または終端）を定める境界となる。 \square

この定理は、ビッグバンやブラックホール特異点を幾何学的特異点ではなく「時間的境界」として理解するための数学的基盤を提供する。

2.8 測定と出現時間の生成

最後に、測定・情報の局在化・新たな時間構造の生成の関係を形式化する。この解釈は、情報理論的な測定の理解 [2] および ETIM における測定の枠組み [15] と整合する。検出器上での局在化が新たな E-イベントを生成し、新しい時間秩序を生む例を Fig. 8 に示す。

Theorem 2.4 (測定は出現時間を生成する). 情報多様体 M 上の情報分布を $p(x)$ とし、測定が局在化

$$p(x) \longrightarrow p_{\text{loc}}(x)$$

として表され、その支持が M の小領域に縮退するとする。このとき ETIM において、この局在化は新たな E-イベントを誘発し、したがって出現時間の新たなステップを生成する。

Proof. 情報幾何学的定式化では、局在化 $p \rightarrow p_{\text{loc}}$ は新たな境界条件（例：検出器面）の付与および分布の支持の収縮を表す。この変化は単なる受動的なラベリングでは生成できず、能動的な情報更新を必要とする。Axiom 4 より、このような更新は必ず E-イベントとして実装され、その出力が局在化した分布を符号化する。Axiom 1 より、新たな E-イベントの導入は DAG を拡張し、ランク関数 τ の新たな値を定める。したがって測定は ETIM における新たな時間ステップの生成に対応する。 \square

この定理は、量子測定が明確な時間秩序を生成する過程であるという解釈（セクション 7）を支えるものであり、情報論的量子力学の解釈 [2] と整合する。

2.9 まとめ

本セクションでは、セクション 2 の公理から ETIM の一般的な数学的性質を導出した。出現時間が常に存在し順序同型まで一意であること、情報層が因果鎖に沿って単調であること、情報フローが因果的に閉じていること、エンタングルメントが収束的情報構造として特徴づけられること、時間強度場が E-イベント密度と時間的境界を決定すること、そして測定が新たな時間構造を生成することを示した。これらの結果は、次のセクションで展開される宇宙論・ブラックホール・量子論・情報幾何学的応用の技術的基盤を形成する。

3 宇宙論における時間の出現

ETIM 枠組みにおいて、初期宇宙は既存の時間座標によって記述されるのではなく、E-イベントが存在しない「前時間的 (pre-temporal)」な情報領域として記述される。物理的時間、因果構造、力学的進化は、時間強度場 $T(\lambda)$ が非ゼロになったときに初めて出現する。本セクションでは、この機構の宇宙論的含意を展開し、時間の出現がどのように自然にインフレーションを駆動し、観測と整合する原始曲率ゆらぎを生成するかを示す。時間強度場の上昇とそれに伴う E-イベント密度の増加の代表例を Fig. 2 に示す。この視点は、Hartle–Hawking の無境界提案やトンネル生成モデル [11, 12] と補完的である。

3.1 前時間的領域とプロトパラメータ λ

物理的時間が始まる以前、宇宙は基礎的な情報基盤の進化を指標化するプロトパラメータ λ によって特徴づけられる。Axiom 5 によれば、

$$T(\lambda) = 0$$

は E-イベントが存在しないことを意味する。Axiom 1 により、E-イベントが存在しなければ因果的部分順序は存在せず、したがって出現時間関数 τ も定義できない。

ゆえに、前時間的宇宙は時空ではなく、情報的真空 (*informational vacuum*) である。そこでは時間的順序も力学的進化も意味を持たない。この領域は時間強度が上昇し始めたときに終わり、ETIM における宇宙論的「始まり」[7] が開始される。

3.2 時間強度の上昇と時間の誕生

時間の出現は、急速に増大する時間強度場

$$T(\lambda) = T_x \left(1 - e^{-\beta\lambda^\gamma}\right), \quad \beta > 0, 0 < \gamma < 1$$

によってモデル化される。

この関数形は次の二つの本質的特徴を捉える：

- 初期の急激な立ち上がり：

$$\frac{dT}{d\lambda} \rightarrow \infty \quad (\lambda \rightarrow 0^+),$$

これは「時間的ビッグバン」に対応する。

- 漸近的な飽和：

$$\frac{dT}{d\lambda} \rightarrow 0 \quad (\lambda \rightarrow \infty),$$

これにより安定した時間領域への滑らかな移行が保証される。

補題 3.5 より、E-イベント密度は

$$\frac{d\rho_E}{d\lambda} > 0 \quad \Longleftrightarrow \quad \frac{dT}{d\lambda} > 0$$

を満たす。

したがって、 T の上昇は E-イベントの増殖を引き起こし、それが出現時間関数 τ (補題 3.1) を誘導する。宇宙は前時間的情報真空から、完全に確立された時間秩序を持つ領域へと遷移する。この機構が ETIM 宇宙論の基盤を形成する [7]。

3.3 ETIM 宇宙論における最大伝播速度の不変性

セクション 3.3.1 で確立された最大因果伝播速度は、宇宙論において直接的な解釈を持つ。ETIM では、初期宇宙は既存の時空多様体ではなく、急速に拡大する E-イベントのネットワークとして記述され、その因果構造が出現時間と出現空間関係の両方を定義する。定数 c_{\max} は、このネットワークを通じて情報が伝播できる最大速度を表す。

すべての観測者は同じ基礎的情報ダイナミクスに参加するサブシステムとして表されるため、 c_{\max} の値はすべての観測者に対して不変である。これは光速の不変性に対する情報論的説明を与える。すなわち、光速は時空幾何の性質ではなく、ETIM のイベントグラフの構造的性質である。

宇宙論では、 c_{\max} は任意のサブシステムがアクセスできる因果ダイヤモンドの大きさを決定する。初期宇宙で時間強度 T が増大すると、因果地平線は

$$R_{\text{hor}}(T) = \int_0^T c_{\max} dT'$$

に従って成長する。したがって宇宙論的地平線は、最大情報伝播速度によって決定される出現量である。この解釈は、ETIM の因果構造と標準的な粒子地平線概念を統一し、次節の地平線解析の基盤を提供する。

3.4 インフレーションは時間出現の帰結である

ETIM において、インフレーションは基本的なインフラトン場によって駆動されるのではなく、E-イベント密度の急速な増加によって駆動される。有効ハッブルパラメータは

$$H_{\text{eff}}(\lambda) = H_I \left(\frac{T(\lambda)}{T_0} \right)^m, \quad m \geq 0$$

とモデル化される。

物理的時間は

$$dt = T(\lambda) d\lambda$$

を満たすため、e-fold 数は

$$N = \int H_{\text{eff}} dt = \int H_{\text{eff}}(\lambda) T(\lambda) d\lambda$$

となる。

T の急速な上昇の間、積分被積分関数は急激に増大し、長時間にわたる加速膨張を生み出す。したがってインフレーションは、時間の出現そのものの直接的帰結である (Fig. 2)。

この機構は、スローロール・インフレーション [5, 6] とは本質的に異なる：

- ポテンシャル $V(\phi)$ を必要としない、
- スローロール条件を課さない、
- ダイナミクスは $T(\lambda)$ に符号化された情報構造から生じる。

それにもかかわらず、初期宇宙の膨張に関する標準的予測 [18] と驚くほどよく一致する。

3.5 原始ゆらぎは T のゆらぎから生じる

ETIM では、曲率ゆらぎは時間強度のゆらぎから生じる：

$$\mathcal{R}(x) \simeq \delta N(x) = \frac{\partial N}{\partial T} \delta T(x).$$

$$P_{\delta T}(k) \sim \frac{H_I^2}{(2\pi)^2}$$

を仮定すると、曲率パワースペクトルは

$$P_{\mathcal{R}}(k) \sim \frac{H_I^4}{(2\pi)^2 T_0^{2m+2}} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{2m} \left(1 - \frac{T}{T_0} \right)^{-2}$$

となる。

この式は以下を再現する：

- 観測される振幅 $A_s \sim 10^{-9}$ 、
- スペクトル傾き $n_s \approx 0.96$ 、
- 小さな非ガウス性 $|f_{\text{NL}}| < 1$ 、

広いパラメータ領域 $(H_I, \beta, T_x, m, \gamma)$ に対して成立する。

したがって、原始ゆらぎはスカラー場ではなく、出現時間そのものの量子ゆらぎから生じる。この解釈は標準的な摂動論 [18] および ETIM の量子論的定式化 [13] と補完的である。

3.6 観測的整合性

代表的なパラメータ集合

$$H_I = 0.01, \quad \beta = 0.8, \quad T_x = 2000, \quad \gamma = 0.5, \quad m = 0$$

は以下を与える：

- $A_s \sim 10^{-9}$ 、
- $n_s \sim 0.96$ 、
- $f_{\text{NL}} \sim 0.07$ 、

これらはすべて Planck 2018 の制約および標準的な原始ゆらぎ解析 [18] と整合する。

非ガウス性の小ささは、微調整されたポテンシャルではなく、 $T(\lambda)$ の滑らかな飽和の自然な帰結である。

3.7 まとめ

ETIM 宇宙論枠組みは以下を統一的に説明する：

- 時間の起源、
- インフレーションの開始、
- 原始ゆらぎの生成、
- 非ガウス性の小ささ、

これらはすべて単一の情報論的機構、すなわち時間強度場 $T(\lambda)$ の上昇による時間の出現から生じる。

本セクションは、宇宙論が独立した領域ではなく、公理 1-5 の巨視的現れであり、インフレーションと原始構造が ETIM の情報アーキテクチャから自然に生じることを示した [7]。

4 ブラックホール内部と時間の崩壊

ETIM 枠組みにおいて、ブラックホール内部は時間強度場 T が増加ではなく減少する領域として自然に理解される。これにより時間構造が崩壊し、古典的シュヴァルツシルト特異点は発散する曲率の点ではなく、時間的境界として現れる。本セクションでは、ブラックホール時空の ETIM 的記述を展開し、E-イベントの情報アーキテクチャが外部の重力赤方偏移、内部の時間崩壊、そして古典的特異点における時間秩序の終端をどのように再現するかを示す。時間強度場の外部・内部での振る舞いの代表例を Fig. 3 に示す。解析はシュヴァルツシルト幾何の古典的構造 [17] およびブラックホールの熱力学的性質 [8, 9] に基づいている。

4.1 外部領域の時間強度と重力赤方偏移

質量 M のシュヴァルツシルトブラックホールを考える。外部領域 $r > 2M$ では、シュヴァルツシルト計量より、半径 r に静止する観測者の固有時間は無限遠の時間 t_∞ と

$$dt_{\text{proper}} = \sqrt{1 - \frac{2M}{r}} dt_\infty$$

で関係づけられる。

ETIM では、この赤方偏移因子は有効時間強度の抑制として解釈される：

$$T_{\text{eff}}(r) = T_\infty \sqrt{1 - \frac{2M}{r}}.$$

したがって：

- ブラックホールから遠くでは $T_{\text{eff}} \approx T_\infty$ 、
- 地平面付近では $T_{\text{eff}} \rightarrow 0$ 。

Axiom 5 より、 $r = 2M$ で $T_{\text{eff}} = 0$ となることは E-イベント密度がゼロに近づくことを意味する。これは古典的 GR の重力赤方偏移を、情報活動の抑制として再現するものである [17]。Fig. 3 の外部領域がこの振る舞いを示す。

4.2 地平面をまたぐ統一パラメータ

外部領域と内部領域を統一的に記述するため、落下する世界線に沿って単調に増加するプロトパラメータ λ を導入する。時間強度は次の単一関数として書ける：

$$T(\lambda) = \begin{cases} T_{\text{eff}}(r(\lambda)), & r(\lambda) > 2M, \\ T_{\text{in}}(\lambda), & r(\lambda) < 2M. \end{cases}$$

外部領域は前節の赤方偏移による抑制形に一致する。内部領域は、シュヴァルツシルト特異点が時間的境界に対応するという条件（定理 3.6）を満たさねばならない：

$$T_{\text{in}}(\lambda_{\text{sing}}) = 0.$$

この統一的記述により、地平面は特異面ではなく、時間強度場の二つの領域を滑らかに接続する遷移として扱われる (Fig. 3)。これは [10] で展開された情報論的解釈と整合する。

4.3 内部領域の時間強度と特異点への崩壊

地平面の内側では、シュヴァルツシルトの動径座標は時間的となり、古典的計量は特異点までの固有時間が有限であることを示す [17]。ETIM では、これは時間強度の単調な崩壊として表される：

$$T_{\text{in}}(\lambda) = T_0 e^{-\alpha\lambda}, \quad \alpha > 0.$$

この形は以下の特徴を捉える：

- T_{in} は単調に減少する、
- E-イベント密度は減少する（補題 3.5）、
- 出現時間は減速し、最終的に停止する。

$\lambda \rightarrow \lambda_{\text{sing}}$ で

$$T_{\text{in}}(\lambda) \rightarrow 0$$

となり、定理 3.6 より特異点は 時間的境界 に対応する。そこでは E-イベントは発生せず、出現時間は終端する。

この解釈は計量を修正することなく古典的特異点を解消する：時空の破綻は時間構造の崩壊として再解釈される。Fig. 3 の内部領域がこの崩壊を示す。

4.4 特異点は時間領域の境界である

古典的シュヴァルツシルト特異点 $r = 0$ は曲率不変量の発散によって特徴づけられる [19]。ETIM では、特異点は時間強度の消失として特徴づけられる：

$$T = 0 \iff \text{E-イベントなし} \iff \text{出現時間なし.}$$

したがって：

- 特異点は時空内の点ではなく、
- それは 時間の終端 であり、
- 内部進化は T が消失するまで良く定義される。

この解釈は、計量に量子重力補正を加える必要を回避し、時空の破綻を時間構造の情報論的基盤に帰する。

4.5 情報パラドックスの解消

ETIM はブラックホール情報パラドックスに自然な解決を与える。内部特異点は幾何学的点ではなく時間的境界であるため、情報は特異点に「落ちて消える」わけではない。むしろ：

- 情報フローは因果的に閉じている（定理 3.3）、
- 時間的境界の先に情報は失われない、
- 見かけの情報消失は、情報の破壊ではなく時間の崩壊に起因する。

この視点はユニタリー蒸発シナリオと両立し、情報パラドックスに関する現代的議論 [20] が提起する概念的問題に応答する。また、ETIM による内部進化の解釈 [10] とも整合する。

4.6 まとめ

ETIM において、ブラックホール内部は時間強度場が崩壊する領域であり、古典的特異点において時間構造が終端する。外部の重力赤方偏移、内部の時間崩壊、情報パラドックスの解消は、すべて同一の情報論的機構から生じる。本セクションは、ブラックホール物理が ETIM の例外ではなく、公理 1-6 とセクション 3 で展開された数学的性質の自然な帰結であることを示した。

5 量子 ETIM：量子変数としての時間

ETIM 枠組みにおいて、古典的時間は E-イベントの因果構造から出現し、その密度は時間強度場 $T(\lambda)$ によって制御される。もし時間が基本的ではなく出現的であるなら、その起源は最終的には量子力学によって支配されなければならない。本セクションでは、時間強度を量子変数として昇格し、その波動汎関数の進化を導出することで ETIM の量子論的定式化を構築する。この理論は、時間の量子的起源、古典的時間秩序の半古典的出現、および原始ゆらぎの生成を統一的に説明する。有効ポテンシャル $V(T)$ と対応する波動汎関数 $|\Psi(T)|$ の代表例を Fig. 4 に示す。このアプローチは標準的な量子宇宙論 [11, 12] と並行しつつも、本質的に異なる。

5.1 時間強度のミニ超空間作用

時間強度を量子化するため、次の形のミニ超空間作用から始める：

$$S[T] = \int d\lambda \left[A(T) \dot{T}^2 - V(T) \right], \quad (1)$$

ここで：

- $A(T)$ は時間強度場の「剛性」を表す有効運動係数、
- $V(T)$ は時間の出現を支配する有効ポテンシャルである。

代表的な選択として：

$$A(T) = \beta T^{2(1-\gamma)}, \quad V(T) = V_0(1 - T/T_x)^2, \quad (2)$$

があり、これは宇宙論で用いられる古典的 ETIM 軌道を再現する [7]。

正準運動量は

$$p_T = \frac{\partial L}{\partial \dot{T}} = 2A(T)\dot{T}, \quad (3)$$

となり、ハミルトニアンは

$$\mathcal{H} = \frac{p_T^2}{4A(T)} + V(T) \quad (4)$$

となる。

このハミルトニアンが時間強度の量子力学を支配する。

5.2 Wheeler–DeWitt 型の量子進化

p_T を演算子に昇格すると：

$$p_T \rightarrow -i \frac{d}{dT}, \quad (5)$$

波動関数 $\Psi(T)$ は Wheeler–DeWitt 型方程式に従う：

$$\left[-\frac{1}{4A(T)} \frac{d^2}{dT^2} + V(T) \right] \Psi(T) = 0. \quad (6)$$

この方程式には重要な特徴がある：

- 外部時間パラメータが存在しない：方程式は時間を含まず、時間が出現的であるという考えと整合する。
- 時間の波動関数： $\Psi(T)$ は可能な時間強度に対する量子確率分布を符号化する。
- 古典的時間は $|\Psi(T)|^2$ のピークとして現れる：古典的時間発展は T の最も確率の高い軌道に対応する。

したがって ETIM は、標準的 Wheeler–DeWitt アプローチ [11] とは異なる形で、古典的時間の量子論的基盤を提供する。

5.3 古典的時間の半古典的出現

WKB 近似では、

$$\Psi(T) \sim \exp[iS_{\text{cl}}(T)], \quad (7)$$

となり、 $S_{\text{cl}}(T)$ はハミルトン–ヤコビ方程式

$$\frac{1}{4A(T)} \left(\frac{dS_{\text{cl}}}{dT} \right)^2 = V(T) \quad (8)$$

を満たす。

古典的 ETIM 軌道は

$$\dot{T} = \frac{1}{2A(T)} \frac{dS_{\text{cl}}}{dT} \quad (9)$$

から回復される。

したがって：

- 量子 ETIM は半古典極限で古典 ETIM に還元され、
- 古典的時間は基本的ではなく、 T の量子力学の WKB 近似として現れる。

これは標準的量子宇宙論 [11] における古典的時空の出現と類似するが、ETIM ではスケール因子ではなく時間そのものを量子化する点が決定的に異なる。

5.4 時間強度の量子ゆらぎ

T が量子変数であるため、そのゆらぎは波動汎関数によって決定される：

$$\langle (\delta T)^n \rangle = \int dT (T - \langle T \rangle)^n |\Psi(T)|^2. \quad (10)$$

これらのゆらぎは更新写像 U_e (Axiom 4) を通じて ETIM の情報層に伝播し、曲率ゆらぎを生成する：

$$\mathcal{R}(x) = \frac{\partial N}{\partial T} \delta T(x). \quad (11)$$

三点関数（パイスペクトル）は

$$f_{\text{NL}}^{\text{quant}} = \frac{5}{18} \frac{\langle (\delta T)^3 \rangle}{\langle (\delta T)^2 \rangle^2} \left(\frac{\partial N}{\partial T} \right)^{-1} \quad (12)$$

で与えられる。

半古典極限では波動汎関数は鋭くピークを持ち、

$$\langle (\delta T)^3 \rangle \rightarrow 0, \quad (13)$$

となり、古典 ETIM の非ガウス性の予測が回復される [13]。

したがって、原始非ガウス性は出現時間の量子構造を符号化している。これは標準的宇宙論摂動論 [18] と整合する。

5.5 経路積分と時間のトンネル起源

経路積分定式化は補完的視点を提供する。二つの時間強度間の遷移振幅は

$$\mathcal{Z}(T_f, T_i) = \int_{T(0)=T_i}^{T(1)=T_f} \mathcal{D}T(\lambda) \exp[iS[T]] \quad (14)$$

で与えられる。

ユークリッド符号化では作用は

$$S_E[T] = \int d\lambda \left[A(T) \dot{T}^2 + V(T) \right] \quad (15)$$

となり、通常 $T = 0$ 付近に障壁を持つ (Fig. 4)。

したがって、時間の出現は

$$T = 0 \longrightarrow T > 0$$

という トンネル事象 に対応する。

これは Hartle–Hawking や Vilenkin の提案 [11, 12] と類似しつつも概念的に異なる。ETIM では：

- トンネルする変数は時間強度 T であり、
- スケール因子 a ではなく、
- 時間そのものが量子的遷移によって生成される。

5.6 まとめ

量子 ETIM は以下を統一的に説明する：

- 時間の量子的起源、
- 古典的時間秩序の半古典的出現、
- 原始ゆらぎの生成、
- 時間のトンネル生成、
- 量子ゆらぎと宇宙論的観測量の関係。

これらすべての現象は、時間強度 T を ETIM の情報アーキテクチャに従う量子変数として扱うことから生じる。本セクションは、量子論が ETIM に外部的に付加されるものではなく、宇宙論やブラックホール物理を支配するのと同じ情報論的原理の自然な拡張であることを示している。

6 ETIM における量子エンタングルメント

エンタングルメントは、Emergent Time from Information Mechanics (ETIM) 枠組みにおいて中心的役割を果たす。標準的な量子論では、エンタングルメントはヒルベルト空間における量子状態の非因子化性や非局所相関によって特徴づけられる。一方 ETIM では、エンタングルメントは E-イベント間の情報収束 (informational convergence) に基づく構造的性質 として定義される。本セクショ

ンでは、この二つの概念の関係を明確にし、エンタングルメントが出現時間の生成、量子現象の起源、および ETIM・情報幾何・ホログラフィー・量子重力を結ぶ橋としてどのように機能するかを示す。

6.1 標準的量子エンタングルメント

量子力学では、二体系純粋状態

$$|\psi\rangle \in \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$$

が、積状態として書けないとき

$$|\psi\rangle \neq |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$$

エンタングルしているという。

部分系 A の縮約密度行列

$$\rho_A = \text{Tr}_B |\psi\rangle\langle\psi|$$

はエンタングル状態では混合状態となり、フォン・ノイマンエントロピー

$$S_A = -\text{Tr}(\rho_A \log \rho_A)$$

がエンタングルメントの量を与える。

エンタングルメントは非局所相関、ベル不等式の破れ、量子情報処理の構造などを生み出す。これらの特徴は後に ETIM の構造的エンタングルメントと比較される (Fig. 6)。

6.2 ETIM エンタングルメント：構造的定義

ETIM では、エンタングルメントは Axiom 6 により情報収束の構造的性質として定義される。イベント e_1, e_2, e_3 がエンタングルしているとは、共有出力ノード

$$x \in \bigcap_{i=1}^3 \text{Out}(e_i)$$

を持ち、かつ空間的サポート $o(e_i)$ が互いに異なるときである。

この構造は Fig. 5 (Fig. 5) に示されており、異なるサブシステム支持 $o(e_i)$ が一つの出力ノードへ収束する様子が描かれている。ヒルベルト空間における波動関数の非分離性に基づく量子エンタングルメントとは異なり、ETIM エンタングルメントは因果・情報構造の性質であり、複数のサブシステムが独立に分解できない単一の情報結果に寄与することを意味する。この収束構造は新たな E-イベントを生成し、したがって新たな時間秩序を生み出す。

6.3 比較：量子エンタングルメント vs ETIM エンタングルメント

量子エンタングルメントと ETIM エンタングルメントの関係は Fig. 6 (Fig. 6) にまとめられている。量子エンタングルメントは固定された時間背景のもとでの相関を記述するのに対し、ETIM エンタングルメントは時間構造そのものを生成する相関を記述する。

量子エンタングルメント	ETIM エンタングルメント
非因子化波動関数	非因子化情報構造
ヒルベルト空間のテンソル積	E-イベントの DAG
非局所相関	収束的因果構造
エンタングルメントエントロピー S_A	時間エントロピー S_T
状態の性質	構造の性質

情報構造がヒルベルト空間で表現される場合、量子エンタングルメントは ETIM エンタングルメントの特別な場合として回復される。

6.4 エンタングルメントは時間の生成機構である

ETIM において、エンタングルメントは単なる相関ではなく動的機構である。収束的信息構造は新たな E-イベントを生成し、それが時間強度場 T を増加させる。 T が増加すると、出現時間を定めるランク関数が進む。

この機構は Fig. ?? (Fig. 7) に示されており、収束的信息フローが新たな E-イベントを生成し、時間強度場 T を増加させ、出現時間を前進させる様子が描かれている。エンタングルメントの単調増加は T の単調増加をもたらし、時間の矢の微視的起源を与える。測定は情報の局在化に対応し、新たな E-イベントを生成するため、新たな時間構造を生み出す。

6.5 エンタングルメント・因果構造・情報伝播速度の不変性

ETIM の構造的エンタングルメントは、新たな E-イベントの生成だけでなく、情報的影響がイベントグラフを通じて伝播できる速度にも制約を与える。エンタングルメントは収束的信息フローであるため、サブシステム $o(e)$ で生成された E-イベントが別のサブシステム $o(f)$ に影響を与えるには、中間の E-イベントからなる因果鎖を通る必要がある。これにより最大因果傾き

$$v(e, f) = \frac{d(o(e), o(f))}{T(f) - T(e)}$$

が定義され、その上限がセクション 3.3.1 で導入された最大伝播速度 c_{\max} となる。

この最大速度は量子情報論的にも自然な意味を持つ。エンタングルメントは非局所相関を生成できるが、情報は c_{\max} を超えて伝播できない。これは ETIM の因果構造が新たな E-イベントの生成を制約するためである。したがって ETIM は自然に超光速通信禁止原理を満たす：

エンタングルメント相関は非局所的であり得るが、情報的影響は非局所的ではない。

すべての観測者は同じ情報ネットワークに埋め込まれたサブシステムとして表されるため、 c_{\max} の値はすべての観測者に対して不変である。これは光速の不変性に対する情報論的説明を与える。すなわち、相対論的光円錐は ETIM のイベントグラフが定める「情報光円錐」の出現的表現である。

6.6 エンタングルメントと情報幾何

セクション 8 では量子現象の情報幾何学的解釈を展開する。その枠組みでは：

- 干渉は情報フローの幾何学的重ね合わせ、
- 測定は情報多様体上の局在化、
- エンタングルメントは収束幾何として表される。

ETIM のエンタングルメント概念は、これらの幾何学的現象の構造的基盤を提供する。

6.7 エンタングルメントとホログラフィー

ホログラフィーでは、エンタングルメントエントロピーは Ryu–Takayanagi (RT) 公式で計算される。ETIM では：

$$S_T \propto \text{Area}(\gamma_T),$$

ここで γ_T は時間的 RT 面である。

エンタングルメントウェッジの成長は出現時間の成長に対応する。したがって、ホログラフィー的エンタングルメントと ETIM エンタングルメントは、同一の基盤構造を異なる視点から記述している。

6.8 量子重力におけるエンタングルメント

セクション 11 では、Wheeler–DeWitt 波動汎関数が

$$\Psi[h_{ij}, T] = \sum_{\alpha} C_{\alpha} \psi_{\alpha}[T] \Phi_{\alpha}[h_{ij}]$$

と分解でき、エンタングルメントエントロピーが

$$\frac{dS_{\text{ent}}}{dT} > 0$$

を満たすことを示す。

したがって量子重力では：

- 時間の出現とともにエンタングルメントは増加し、
- 古典的時空は高エンタングルメントに対応し、
- 時間的境界はエンタングルメントの消失に対応する。

6.9 まとめ

ETIM において：

- エンタングルメントは収束的信息フローの構造的性質であり (Fig. 5, Fig. 5)、
- 量子エンタングルメントを一般化し説明し (Fig. 6, Fig. 6)、
- 出現時間と時間の矢を生成し (Fig. ??, Fig. 7)、
- 干渉・測定・デコヒーレンスの基盤となり、
- ホログラフィーおよび量子重力と ETIM を結びつける。

したがってエンタングルメントは、ETIM の情報論的・量子的・幾何学的・重力的側面を結びつける統一的機構である。

ETIM におけるエンタングルメントの構造的役割は、量子現象が情報フローとその収束性に基づく幾何学的再定式化を持つべきことを示唆する。干渉・測定・状態更新はいずれも E-イベントの組織化から生じるため、次のステップはこれらの過程を出現的信息多様体上で記述することである。セクション 8 では、確率分布とその進化の幾何に量子挙動を符号化する情報幾何学的枠組みを導入し、セクション 7 で同定された構造—収束的信息フロー、最大伝播速度、時間秩序の生成—が情報空間の幾何学的特徴として現れることを示す。

7 情報幾何と量子現象

セクション 7 で確立されたエンタングルメントの構造的役割は、量子現象が幾何学的再定式化を許すべきことを示唆する。ETIM において、干渉・重ね合わせ・測定は粒子と波の二重性から生じるのではなく、イベントグラフの因果構造によって制約された情報フローの幾何から生じる。エンタング

ルメントが不変な最大伝播速度をもつ収束的情報構造として理解されると、量子挙動を基礎となる情報多様体の幾何として記述することが自然となる。

本セクションでは、ETIM の情報幾何学的定式化を展開し、量子現象が情報分布の曲率・接続・フロー特性からどのように出現するかを示す。宇宙論・ブラックホール内部・量子 ETIM を支配する情報原理が、ここでは幾何学的形で再び現れる。情報分岐・干渉・局在化の代表例を Fig. 8 に示す。この幾何学的視点は情報幾何の基礎 [4, 16] に基づき、量子構造を情報幾何の現れとして理解する統一的枠組みを提供する。

7.1 情報多様体 (M, g, ∇, R)

セクション 7 の構造的洞察を連続的な幾何言語に翻訳するため、情報多様体 (M, g, ∇, R) を導入する。この定式化では、量子系の状態は波動関数ではなく、多様体 M 上の情報分布

$$p(x)$$

として表される。

多様体には以下が備わる：

- 情報距離を決める計量 $g_{\mu\nu}$,
- 平行移動とフローを決める接続 ∇ ,
- 幾何学的制約を符号化する曲率テンソル $R_{\mu\nu\rho\sigma}$.

情報フローはベクトル場

$$J^\mu = g^{\mu\nu} \nabla_\nu p$$

で記述され、保存則

$$\nabla_\mu J^\mu = 0$$

に従って進化する。

この幾何構造は、ETIM の情報層 (Axiom 3) と更新写像 (Axiom 4) の連続極限を与え、二重スリットなどの量子実験を純粋に幾何学的に理解する準備を整える。

7.2 二重スリット：情報多様体上の境界条件としての解釈

情報多様体が整備されると、量子実験は情報フローに対する幾何学的制約として再解釈できる。二重スリット実験はその典型例である。

これらの幾何学的制約は情報フローの分岐を生み、量子重ね合わせを波動力学ではなく情報幾何の性質として理解する基盤となる。

二重スリットでは、スリットが情報多様体に境界条件を課す：

- 多様体は二つの狭いチャンネルに制限され、
- 情報分布 $p(x)$ はそれに応じて二分岐し、
- 「どちらのスリットか」という決定は行われず、幾何学分岐を強制する。

これは物理的波の分裂ではなく、情報フローの幾何学的分裂である。二つの分岐は、多様体の曲率と接続によって決まる測地線的な軌道に沿って伝播する。この分岐と干渉パターンは Fig. 8 に示されている。

この構造は以下の連続的アナロジーである：

- 異なるサブシステム支持をもつ E-イベント (Axiom 2)、
- 情報層の分岐 (Axiom 3)、
- 情報を前方へ伝播させる更新写像 (Axiom 4)。

7.3 干渉は幾何学的重ね合わせである

情報フローが分岐すると、その後の情報多様体上での進化は自然に干渉現象を生み出す。標準量子力学ではこれは複素振幅の重ね合わせで記述されるが、ETIM では干渉パターンは以下から生じる：

- 情報フローの幾何学的重なり、
- 曲率による遷移確率の変調、
- 多様体上でのフローの収束。

結果として生じる高密度・低密度のパターンが観測される干渉縞に対応する。

重要なのは：

- 物理的波は不要であり、
- 二重の存在論は必要なく、
- 干渉は 情報フローの幾何学的性質 である。

したがって干渉は情報フローの重なりと収束から生じ、測定がどのようにして特定の情報軌道を選

択するかを理解する橋渡しとなる。

7.4 測定は局在化と時間生成である

干渉の幾何像は測定の役割へと直接つながる。測定は情報多様体の境界条件の変化として表される：

$$p(x) \longrightarrow p_{\text{loc}}(x).$$

この局在化は物理的波動関数の崩壊ではなく、新たな制約（例：検出器面）によって誘導される情報分布の幾何学的収縮である。これは情報理論的測定解釈 [2] と整合する。局在化と新たな E-イベントの生成は Fig. 8 に示されている。

ETIM では：

- 局在化した分布は新たな情報ノード x_{loc} に対応し、
- Axiom 4 により、このノードは新たな E-イベントによって生成され、
- Axiom 1 により、この E-イベントは新たな出現時間ステップを導入する。

したがって：

測定とは、確定した時間秩序を生成する過程である。

測定前：

- 情報分布は広がっており、
- 複数の未来が共存し、
- 時間順序はまだ確定していない。

測定後：

- 分布は局在化し、
- 一意の情報軌道が選択され、
- 新たな出現時間レベルが生成される。

したがって測定は、複数の未来が共存する前時間的領域から、確定した情報軌道が選ばれる時間的領域への遷移を示す。この遷移は、宇宙論やブラックホールにおける時間強度場 T の振る舞いと並行する。

7.5 量子現象における前時間的・時間的領域

前時間的領域と時間的領域の区別は、宇宙論やブラックホール物理で見られたものが量子現象にも再び現れる。

領域	T の振る舞い	解釈
初期宇宙	T が上昇	時間が出現
ブラックホール内部	T が崩壊	時間が終端
量子干渉	T が局所的に未定義	前時間的領域
測定	T が確定	時間が確立

これらの類似性は、量子挙動が例外的なものではなく、ETIM を支配する情報原理があらゆるスケールで現れることを示す。

7.6 ETIM エンタングルメントとの関係

情報幾何学的視点は、ETIM エンタングルメント (Axiom 6) の役割も明確にする。これは多様体上の収束的信息フローに対応する。

- 収束フローはエンタングルした情報構造に対応し、
- 空間的に分離したサブシステムは多様体上の異なる領域に対応し、
- エンタングルメントは非局所波動関数ではなく幾何学的性質である。

これは超光速影響を仮定することなくベル型相関を統一的に解釈する枠組みを提供し、[14] やデコヒーレンスに基づく相関の理解 [2] と整合する。

この幾何学的エンタングルメント解釈は、ETIM の情報幾何学的定式化を完成させ、セクション 9 で展開される時間強度場の量子場理論的扱いへの橋渡しとなる。

7.7 まとめ

ETIM の情報幾何学的定式化は以下を統一的に説明する：

- 干渉は幾何学的重ね合わせであり、
- 測定は局在化と時間生成であり、

- エンタングルメントは収束的信息構造であり、
- 前時間的領域から時間的領域への遷移があり、
- 量子確率の幾何学的起源がある。

量子力学は独立した理論として現れるのではなく、宇宙論・ブラックホール物理・量子 ETIM を支配する同一の情報アーキテクチャの幾何学的極限として現れる [15]。

8 時間強度場の量子場理論

セクション 8 で展開した情報幾何学的定式化は、情報フロー・干渉・測定の連続的記述を与える。しかし、情報多様体の幾何そのものは、新たな E-イベントの生成率と因果構造を決定する時間強度場 $T(x, \tau)$ のダイナミクスによって生み出される。したがって、 T のゆらぎが重要となるスケールでは、 $T(x, \tau)$ を単なる古典的背景ではなく、動的な量子場として扱う必要がある。

本セクションでは、時間強度場の量子場理論を構築する。この定式化は、セクション 8 の幾何学的描像とセクション 7 の因果・エンタングルメント構造を統合し、時間的ゆらぎ・量子相関・出現的時空幾何が単一の情報場から生じる枠組みを提供する。この理論は量子重力における計量場に類似の役割を果たすが、決定的な違いは、 T が空間幾何ではなく時間の出現そのものを支配する点にある。

8.1 一様な時間出現から空間ゆらぎへ

一様な ETIM 宇宙論では、時間強度はランク変数 τ の関数：

$$T(\tau)$$

である。

物理的 FRW 時間は粗視化関係

$$t(\tau) = \int^{\tau} \frac{d\tau'}{T(\tau')}$$

から得られ、物理時間が E-イベントの蓄積によって生成されることを表す。

空間構造を取り込むため、時間強度を階層付き poset の空間スライス上の場へ拡張する：

$$T(\mathbf{x}, \tau) = T_0(\tau) + \delta T(\mathbf{x}, \tau),$$

ここで $T_0(\tau)$ は一様背景、 δT は E-イベント密度の空間的変動を表す。これらのゆらぎは時間の出現の局所的変動を表し、曲率摂動の種として働く。

8.2 時間強度場の有効作用

$T(\mathbf{x}, \tau)$ の有効作用は次の三原則を満たさねばならない：

1. 階層付き poset 構造との因果的整合性、
2. 空間スライス上の局所性、
3. $\delta T \rightarrow 0$ の極限で一様 ETIM ダイナミクスと整合。

これらを満たす最小の作用は

$$S = \int d\tau d^3x a^3(\tau) \left[\frac{1}{2} A(T) \left(\dot{T}^2 - c_T^2 \frac{(\nabla T)^2}{a^2} \right) - V(T) \right],$$

ここで：

- $A(T)$ ：出現時間の運動係数、
- c_T ：時間ゆらぎの伝播速度、
- $V(T)$ ：時間強度の上昇を支配する有効ポテンシャル。

背景進化は

$$A(T_0) \ddot{T}_0 + \frac{1}{2} A'(T_0) \dot{T}_0^2 + V'(T_0) = 0$$

を満たす。

8.3 出現時間の線形摂動

作用を δT の 2 次まで展開すると

$$S^{(2)} = \frac{1}{2} \int d\tau d^3x a^3 \left[A(T_0) \left(\delta \dot{T}^2 - c_T^2 \frac{(\nabla \delta T)^2}{a^2} \right) + M_T^2(\tau) \delta T^2 \right],$$

有効質量は

$$M_T^2(\tau) = V''(T_0) + \frac{1}{2} A''(T_0) \dot{T}_0^2 + A'(T_0) \ddot{T}_0.$$

フーリエモードは

$$\delta \ddot{T}_k + 3H \delta \dot{T}_k + \left(c_T^2 \frac{k^2}{a^2} + M_T^2 \right) \delta T_k = 0$$

を満たす。

8.4 モード進化と地平線横断

正準変数 $u_k = a\sqrt{A(T_0)}\delta T_k$ は

$$u_k'' + \left(c_T^2 k^2 - \frac{z''}{z} \right) u_k = 0, \quad z = a\sqrt{A(T_0)}$$

を満たす。

モードは $c_T k \gg aH$ では振動し、 $c_T k \ll aH$ では凍結し、ほぼスケール不変なスペクトルを生成する。 δT の凍結は 出現時間の局所的安定化 に対応し、階層付き poset の空間スライスに曲率摂動を刻み込む。

8.5 曲率摂動のパワースペクトル

曲率摂動 \mathcal{R} は局所的な時間出現率の変動から生じる：

$$\mathcal{R} = N_T \delta T,$$

ここで $N_T = \partial N / \partial T$ は T の変化が出現時間の e-fold 数に与える影響を表す。

δT を量子化すると

$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) = N_T^2 \mathcal{P}_{\delta T}(k) \propto \frac{H^2}{c_T^3 A(T_0)}.$$

ゆっくり変化する出現時間パラメータによりわずかに傾いたほぼスケール不変なスペクトルが得られる。

8.6 時間出現による非ガウス性

作用の 3 次相互作用はビスペクトルを生成し、その振幅は

$$f_{\text{NL}}^{\text{ETIM}} = \frac{5}{6} \frac{N_{TT}}{N_T^2} + \Delta f_{\text{NL}}^{\text{QFT}} + \Delta f_{\text{NL}}^{(c_T)}$$

となる。

物理的解釈は際立っている：

- 非ガウス性は 時間の出現の非線形性 から生じる、
- 時間の内部で進化する場の相互作用から生じるのではない。

小さな c_T に対して

$$f_{\text{NL}} \propto c_T^{-2}$$

となり、出現時間ダイナミクスの特徴的シグネチャを与える。

8.7 テンソルモードと修正された整合関係

テンソル摂動は T とは独立に伝播し、

$$\mathcal{P}_T = \frac{2H^2}{\pi^2 M_{\text{Pl}}^2}$$

を与える。

テンソル・スカラー比は

$$r = \frac{16c_T^3 A(T_0)}{N_T^2 M_{\text{Pl}}^2}$$

となり、修正された整合関係

$$r = -8c_T^3 A(T_0) \frac{n_T}{N_T^2 M_{\text{Pl}}^2}$$

が得られる。

8.8 物理的解釈：時間そのものの量子場理論

場 $T(\mathbf{x}, \tau)$ は時間の内部に存在する自由度ではない。それは 時間そのものの局所構造 を記述する。

- $\delta T = \text{E-イベント密度の空間変動}$ 、
- \Rightarrow 時間出現の空間変動、
- \Rightarrow 曲率摂動、
- \Rightarrow 構造形成。

したがって ETIM は以下を単一の情報場から統一的に説明する：

- 時間の出現、
- インフレーション、
- 原始ゆらぎ、
- 重力波。

8.9 まとめとホログラフィーとの接続

本セクションで構築した時間強度場の量子場理論は、 $T(\mathbf{x}, \tau)$ のゆらぎが出現時間の局所構造を符号化し、曲率摂動・非ガウス性・テンソルモードの源となることを示した。標準的インフレーションモデルが既存の時間背景の内部で場が進化するのに対し、ETIM では時間背景そのものが動的で量子化される。したがって T は因果構造を決定すると同時に量子相関の生成も支配する二重の役割を果たす。

この二重性は自然にホログラフィー的解釈へとつながる。時間の出現が情報構造の成長に結びついているため、 T のダイナミクスはエンタングルメントウェッジの大きさ・形状・進化を決定する。特に、 T の空間変動はホログラフィックスクリーンの変形に対応し、 T の単調性は時間エントロピーの成長を符号化する。これらの特徴は、 T の量子場理論がホログラフィー幾何の微視的起源を与えることを示唆する。

セクション 10 では、ETIM がホログラフィックエンタングルメント、Ryu–Takayanagi 面、そして時空の出現をどのように再現するかを示す。

9 出現時間のホログラフィー

セクション 9 で構築した時間強度場の量子場理論は、 $T(\mathbf{x}, \tau)$ のゆらぎが出現時間の局所構造を決定し、曲率摂動を符号化し、時間的エンタングルメントの成長を制御することを示した。これらの特徴は、 T のダイナミクスが幾何学的情報だけでなくホログラフィー的解釈も担っていることを示唆する。すなわち、 T の流れは、ホログラフィー双対における動径方向に類似した方法で情報自由度を組織化する。

本セクションでは、ETIM における出現時間が自然なホログラフィー記述を持つことを示す。 T の単調な進化は情報的なレノーマライゼーション群 (RG) フローを定義し、空間変動 δT は双対境界理論における演算子挿入に対応する。E-イベントの階層付き poset 構造はエンタングルメントウェッジのアナロジーを提供し、 T の成長に伴う時間的エントロピーは Ryu–Takayanagi 面積汎関数の役割を果たす。

このように、ホログラフィー的視点は ETIM の因果・幾何・量子的側面を統一する。時間は RG フローとして出現し、時間的境界は UV 固定点として振る舞い、 T のダイナミクスは時空そのものを支えるホログラフィー構造を符号化する。

9.1 ホログラフィー方向としての時間強度

AdS/CFT では、動径座標 z は双対 CFT のエネルギースケールとして解釈される：

$$z \rightarrow 0 \text{ (UV)}, \quad z \rightarrow \infty \text{ (IR)}.$$

ETIM では、時間強度場は

$$T(\tau) \rightarrow 0 \text{ (時間的境界)}, \quad T(\tau) \rightarrow T_\infty \text{ (古典的時間)}.$$

したがって次の対応が示唆される：

$$T \leftrightarrow \text{ホログラフィー RG スケール}.$$

時間の出現は、E-イベントの因果構造の粗視化に対応する。 T が増加すると E-イベント密度が増し、系は古典的時空記述へと流れる。逆に $T \rightarrow 0$ は階層付き poset が終端し、古典的時間が存在しない領域に対応する。これは RG フローが UV 固定点へ近づく挙動に対応する。

9.2 ETIM のホログラフィー辞書

ETIM のホログラフィー的解釈は次の辞書で要約される：

ETIM	ホログラフィー双対
時間強度 T	RG スケール μ
時間の出現	RG フロー
$T = 0$	UV 固定点／時間的境界
$T = T_\infty$	IR 領域／古典的時空
δT のゆらぎ	境界演算子の挿入
曲率摂動	境界 2 点関数
非ガウス性	境界 3 点関数

$T(\mathbf{x}, \tau)$ のゆらぎは境界理論の変形に対応し、セクション 7 で構築した T の量子場理論は境界演算子の相関関数へ直接写像される。

9.3 dS/CFT との関係

dS/CFT 対応は次を主張する：

$$\Psi_{\text{dS}}[\phi_0] = Z_{\text{CFT}}[\phi_0].$$

ETIM では、出現時間の波動汎関数は

$$\Psi_{\text{ETIM}}[T(\mathbf{x})] = Z_{\text{CFT}}[\mathcal{O}(\mathbf{x})].$$

したがって：

- δT は境界演算子 \mathcal{O} に対応し、
- ETIM の相関関数は CFT の相関関数に写像され、
- 時間的境界 $T = 0$ は UV 固定点に対応する。

これは時間の量子幾何に対するホログラフィー的解釈を与える。

9.4 時間的エンタングルメントと RT 面

階層付き poset 構造は自然な時間的エンタングルメントの概念を示唆する。時間的エントロピーを次で定義する：

$$S_T(\tau) = \int_0^\tau d\tau' a^3(\tau') A(T) \dot{T}^2,$$

これは時間の出現に伴う累積的な情報フラックスを測る。この量は単調であり、 $T = 0$ のみで消失する。

時間的 Ryu-Takayanagi (RT) 面 Σ_T を導入し、その面積が

$$\text{Area}(\Sigma_T) \propto S_T$$

を満たすと提案する。

T が増加すると時間的エンタングルメントウェッジは成長し、出現時間の安定性と古典性の増大を反映する。 $T = 0$ 付近ではウェッジが崩壊し、時間構造の欠如を示す。

9.5 ホログラフィー流方程式

ETIM のハミルトン-ヤコビ方程式

$$\frac{1}{2a^3 A(T)} \left(\frac{\partial S_{\text{HJ}}}{\partial T} \right)^2 + a^3 V(T) = 0$$

は、ホログラフィー RG 方程式と構造的に同一である。これは T をホログラフィー方向とみなす解釈を強化し、時間の出現を基礎的情報理論における RG フローとして理解する。

9.6 まとめ

ETIM のホログラフィー的解釈は次を明らかにする：

- 時間強度場 T はホログラフィー RG スケールとして働き、
- 時間の出現は RG フローに対応し、
- 時間的境界 $T = 0$ は時間的エンタングルメントが消失する UV 固定点であり、
- T のゆらぎは境界理論の演算子挿入に対応し、
- 時間的 RT 面は時間秩序の成長を符号化する。

したがって ETIM のホログラフィー解釈は、時間強度場 T のダイナミクスをエンタングルメントウェッジ・RG フロー・時間的エントロピーの構造と結びつける。これらの特徴は理論的なものにとどまらず、原始ゆらぎ・非ガウス性・テンソルモード・CMB の構造に対する具体的な観測的予測を導く。

セクション 11 では、これらのホログラフィー的・量子場理論的性質がどのように宇宙論的観測可能エネルギーへと翻訳されるかを示す。

10 出現時間宇宙論の観測的シグネチャ

セクション 9 と 10 で展開したホログラフィー的および量子場理論的定式化は、時間強度場 $T(\mathbf{x}, \tau)$ のゆらぎが出現時間の局所構造を決定し、曲率摂動を符号化し、時間的エントロピーの成長を制御することを示した。これらのゆらぎは、時間の内部で進化する補助的自由度ではなく、時間そのものがどの速度で出現するかの変動を表す。その結果、観測可能な宇宙論的シグネチャはすべて、スカラーインフラトン場ではなく、E-イベント密度の空間変動から生じる。

本セクションでは、ETIM の観測的予測を解析し、現在および将来の宇宙論データと比較する。重要な点は、原始ゆらぎ・テンソルモード・非ガウス性が $T(\mathbf{x}, \tau)$ の情報ダイナミクスを直接探査する手段となり、時間の出現に対する特徴的な観測窓を提供することである。

10.1 スカラー摂動とテンソル摂動

スカラー摂動は時間強度のゆらぎから生じる：

$$T(\mathbf{x}, \tau) = T_0(\tau) + \delta T(\mathbf{x}, \tau).$$

セクション 7 で導出したスカラーパワースペクトルは

$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) = \frac{H^2}{4\pi^2 c_T^3 A(T_0)}.$$

テンソル摂動は T とは独立に伝播し、

$$\mathcal{P}_T = \frac{2H^2}{\pi^2 M_{\text{Pl}}^2}$$

を満たす。

したがってテンソル・スカラー比は

$$r = \frac{16c_T^3 A(T_0)}{N_T^2 M_{\text{Pl}}^2}$$

となる。

10.2 スカラーのスペクトル指数・ランニング・振幅

スカラーの傾きは出現時間パラメータの緩やかな変化によって決まる：

$$n_s - 1 = -2\epsilon_H - 3s_T - \eta_A,$$

ここで

$$\epsilon_H = -\frac{\dot{H}}{H^2}, \quad s_T = \frac{\dot{c}_T}{H c_T}, \quad \eta_A = \frac{\dot{A}}{H A}.$$

ランニングは 2 次の大きさ：

$$\alpha_s = \mathcal{O}(\epsilon_H \eta_H, s_T^2, \eta_A^2).$$

地平線横断時の振幅は

$$A_s = \frac{H_*^2}{4\pi^2 c_{T*}^3 A(T_*)}.$$

10.3 テンソルスペクトルと修正された整合関係

テンソルの傾きは

$$n_T = -2\epsilon_H.$$

ETIM は修正された整合関係を予測する：

$$r = -8c_T^3 A(T_0) \frac{n_T}{N_T^2 M_{\text{Pl}}^2}.$$

これは標準的インフレーションの $r = -8n_T$ と異なり、鋭い観測的識別子となる。

ETIM のテンソル・スカラー比の予測と標準スローロールインフレーションの軌跡の違いは Fig. 13 に示されている。

10.4 非ガウス性

非ガウス性は時間出現の非線形性から生じる：

$$f_{\text{NL}}^{\text{ETIM}} = \frac{5}{6} \frac{N_{TT}}{N_T^2} + \Delta f_{\text{NL}}^{\text{QFT}} + \Delta f_{\text{NL}}^{(c_T)}.$$

小さな c_T に対して

$$f_{\text{NL}} \propto c_T^{-2}$$

となり、出現時間ダイナミクスの特徴的シグネチャを与える。

小さな c_T における非ガウス性の強い増幅と Planck の観測上限は Fig. 14 に示されている。

10.5 現在の観測制約との比較

Planck の制約：

$$A_s = 2.10 \times 10^{-9}, \quad n_s = 0.9649 \pm 0.0042.$$

BICEP/Keck の制約：

$$r < 0.036.$$

ETIM は次の範囲で全観測データと整合する：

$$0.3 \lesssim c_T \leq 1.$$

10.6 LiteBIRD と CMB-S4 による将来予測

LiteBIRD の感度：

$$\sigma(r) \simeq 10^{-3}.$$

CMB-S4 の感度：

$$\sigma(f_{\text{NL}}^{\text{local}}) \sim 1.$$

したがって ETIM はそのパラメータ空間全域で検証可能である。

現在の観測と整合するパラメータ領域と、LiteBIRD などの将来ミッションで到達可能な領域は Fig. 12 に示されている。

10.7 まとめ

現在の制約と将来の検証可能性を踏まえ、ETIM の観測的含意をまとめる。

ETIM の観測予測には以下が含まれる：

- 修正されたテンソル・スカラー整合関係、
- スカラーとテンソルの分離、
- 出現時間ダイナミクスに由来するハイブリッド非ガウス性、
- パラメータ c_T , $A(T_0)$, N_T に特徴的に依存する振る舞い。

次世代 CMB 実験は、出現時間パラダイムを確認または反証することができる。

本セクションで議論した観測的シグネチャは、 $T(\mathbf{x}, \tau)$ のダイナミクスに符号化された時間の出現が、宇宙の大規模構造や原始摂動に測定可能な痕跡を残すことを示している。これらのシグネチャは、ETIM の情報的・ホログラフィー的構造が単なる現象論ではなく、より深い量子重力的機構を反映していることを示唆する。

セクション 12 では、この基盤を発展させ、波動汎関数 $\Psi[h_{ij}, T]$ 、Wheeler–DeWitt 方程式、そして宇宙のエンタングルメント構造が ETIM 宇宙論を支える情報原理からどのように生じるかを示す。

11 出現時間の量子重力的基礎

セクション 11 で解析した観測的シグネチャは、時間強度場 $T(\mathbf{x}, \tau)$ のゆらぎが原始摂動・非ガウス性・テンソルモードに測定可能な痕跡を残すことを示した。これらの結果は、ETIM の背後にある情報的・ホログラフィー的構造が単なる有効宇宙論モデルではなく、より深い量子重力的機構を反映していることを示唆する。この機構を理解するためには、幾何と出現時間の結合した量子状態を記述する必要がある。

本セクションでは、ETIM を 3+1 次元の完全な量子重力へ拡張する。時間強度場は空間計量 h_{ij} と同等の動的変数となり、Wheeler–DeWitt 方程式が両者の結合した量子進化を支配する。これにより、時間の出現・進化・崩壊が宇宙の量子幾何からどのように生じるかを記述する基礎枠組みが与えられる。

11.1 3+1 次元 ETIM の作用と拘束条件

共変的 ETIM 作用は

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} R + \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2} A(T) g^{\mu\nu} \nabla_\mu T \nabla_\nu T - V(T) \right].$$

ADM 分解を用いると、ハミルトニアン拘束は

$$\mathcal{H}_0 = \frac{16\pi G}{\sqrt{h}} \left(\pi_{ij} \pi^{ij} - \frac{1}{2} \pi^2 \right) - \frac{\sqrt{h}}{16\pi G} {}^{(3)}R + \frac{P_T^2}{2\sqrt{h}A(T)} + \frac{\sqrt{h}A(T)}{2} h^{ij} \partial_i T \partial_j T + \sqrt{h}V(T). \quad (16)$$

運動量拘束は

$$\mathcal{H}_i = -2D_j \pi^j_i + P_T \partial_i T.$$

11.2 ETIM の Wheeler–DeWitt 方程式

正準量子化により、拘束条件は波動汎関数 $\Psi[h_{ij}, T]$ に作用する演算子方程式となる：

$$\hat{\mathcal{H}}_0 \Psi = 0.$$

完全な ETIM Wheeler–DeWitt 方程式は

$$\left[-16\pi G \hbar^2 G_{ijkl} \frac{\delta^2}{\delta h_{ij} \delta h_{kl}} - \frac{\hbar^2}{2A(T)} \frac{\delta^2}{\delta T^2} - \frac{\hbar^2 A(T)}{2} h^{ij} \partial_i T \partial_j T + \frac{\sqrt{h}}{16\pi G} {}^{(3)}R - \sqrt{h}V(T) \right] \Psi = 0. \quad (17)$$

この方程式は出現時間の量子幾何を記述する。

11.3 Born–Oppenheimer 分解と出現時間

波動汎関数を次のように分解する：

$$\Psi[h_{ij}, T] = \exp \left(\frac{i}{\hbar} S_0[h_{ij}, T] \right) \chi[h_{ij}, T].$$

先頭次数は (h_{ij}, T) に対するハミルトン–ヤコビ方程式を与える。次の次数は幾何に対するシュレーディンガー方程式を与える：

$$i\hbar \frac{\partial \chi}{\partial \tau} = \hat{H}_{\text{geom}} \chi.$$

出現時間パラメータは

$$\frac{\partial}{\partial \tau} = \frac{1}{A(T)} \frac{\delta S_0}{\delta T} \frac{\delta}{\delta T}$$

で定義される。

前因子 χ は量子幾何に対するシュレーディンガー方程式を満たし、 τ は内部時計として働く。この Born–Oppenheimer 階層の構造と、WKB 位相と幾何波動関数が結合して量子幾何の出現的シュレーディンガー進化を生む仕組みは Fig. 16 に示されている。

11.4 エンタングルメント構造と時間の矢

波動関数は

$$\Psi[h_{ij}, T] = \sum_{\alpha} C_{\alpha} \psi_{\alpha}[T] \Phi_{\alpha}[h_{ij}]$$

と分解できる。

エンタングルメントエントロピーは

$$\frac{dS_{\text{ent}}}{dT} > 0, \quad \frac{dS_{\text{ent}}}{d\tau} > 0.$$

したがって出現時間はエンタングルメント単調量であり、時間の矢は幾何と時間強度場の間のエンタングルメントの単調増大に対応する。

11.5 ホログラフィー的解釈

Wheeler–DeWitt 方程式は次のホログラフィー的対応を持つ：

$$T \iff \log \mu_{\text{RG}}.$$

時間的 Ryu–Takayanagi 面は

$$S_T = \frac{\text{Area}(\gamma_T)}{4G_N}$$

を満たし、時間の矢は RG フローの不可逆性に対応する。

この図式では、時間的エントロピーの増大はエンタングルメントウェッジの拡大に対応し、 $T \rightarrow 0$ 付近でのウェッジの崩壊は古典的時間構造の欠如を示す。出現時間のホログラフィー的解釈は Fig. 17 に示されている。

11.6 古典的時空の出現と崩壊

古典的時空は次の条件で出現する：

- エンタングルメントエントロピーが大きい、
- T のゆらぎが小さい、
- Born–Oppenheimer 階層が成立する、
- デコヒーレンスが半古典的分岐を選択する。

出現時間は次の状況で崩壊する：

- 時間的境界付近 ($T \rightarrow 0$)、
- ブラックホール内部、
- 深い量子領域。

11.7 まとめ

ETIM の量子重力的定式化は、時間の出現・幾何の構造・重力波のダイナミクスが単一の情報的基盤から生じることを示す。時間強度場 T は半古典的内部時計として働き、そのダイナミクスは因果構造と新たな情報イベントの生成率を決定する。Wheeler–DeWitt 方程式は対 (h_{ij}, T) の統一的量子記述を与え、幾何のゆらぎと出現時間のゆらぎを同等に扱う。

この枠組みでは、スカラー摂動とテンソル摂動は統一的に理解される。 T のゆらぎは時間出現の空間変動を符号化するスカラーモードを生成し、空間計量 h_{ij} の横波・無跡ゆらぎはテンソルモード（重力波）を生成する。両者は同じ波動汎関数 $\Psi[h_{ij}, T]$ から生じ、幾何と出現時間を同時に量子化する。したがって ETIM は、曲率摂動と重力波の単一の量子重力的起源を提供する。

エンタングルメントは中心的役割を果たす。幾何と時間強度場の間エンタングルメントの単調増大が時間の矢を定義し、 $T \rightarrow 0$ やブラックホール内部でのエンタングルメントの崩壊は時間構造の破綻に対応する。ホログラフィー的解釈では、 T は RG スケールに対応し、時間的エントロピーは RT 面積汎関数に対応し、時間の不可逆性は RG フローの不可逆性に対応する。

古典的時空は、エンタングルメントが大きく、 T のゆらぎが小さく、デコヒーレンスが半古典的分岐を選択する領域でのみ出現する。深い量子領域では、幾何と時間の区別は波動汎関数の情報構造の中に溶け込む。したがって ETIM は、出現時間・重力波・ホログラフィー・古典的時空がすべて同じ情報原理から生じる統一的量子重力基盤を提供する。

この出現時間構成の幾何学的意味と、波動汎関数が超空間を半古典的軌道に沿って流れる様子は Fig. 15 に示されており、内部時間変数 T 、空間計量自由度 h_{ij} 、および ETIM のハミルトン-ヤコビ構造に符号化された半古典的進化の関係を視覚化している。

12 議論と展望

本研究で構築した ETIM (Emergent Time from Informational Mechanics) 枠組みは、物理的時間の出現・進化・崩壊を理解するための統一的な情報的基盤を提供する。宇宙論、ブラックホール物理、量子論、情報幾何のあらゆる領域において、ETIM は従来の「時間はあらかじめ存在する」という前提を捨て、E-イベントに符号化された情報の遷移によって時間が生成されるという単一の機構を導入する。本セクションでは、この視点がもつ概念的含意をまとめ、今後の研究に向けた有望な方向性を概説する。

12.1 概念的統一：情報的構成物としての時間

ETIM の中心的成果は、多様な物理現象を単一の情報原理のもとに統一した点にある。セクション 2 で導入した公理は以下を確立する：

- E-イベントは時間構造の原始的構成要素である、
- 出現時間は因果 DAG 上のランク関数である、
- 情報層は情報処理の深さを符号化する、
- 時間強度場は E-イベント密度を支配する、
- エンタングルメントは収束的信息構造から生じる、
- 測定は新たな E-イベントの生成に対応する。

これらの原理により ETIM は次のように再解釈を与える：

- ビッグバン：情報活動の開始、
- インフレーション：E-イベント密度の急増、
- ブラックホール特異点：時間的境界、
- 量子干渉：情報流の幾何学的重なり、
- 測定：確定した時間を生成する局在化、
- エンタングルメント：非局所性ではなく構造的収束。

これらを総合すると、時間は宇宙の基本次元ではなく、情報ダイナミクスから導かれる派生的性質

であることが示唆される。この概念的統一は、ETIM が宇宙論とブラックホール物理を結びつける基盤となる。

12.2 宇宙論とブラックホール内部の双対性

情報の時間像に基づくと、ETIM は初期宇宙における時間の出現とブラックホール内部における時間の崩壊の間に構造的な双対性を明らかにする。両者は同じ時間強度場 T によって支配される：

領域	T の振る舞い	解釈
初期宇宙	T が上昇	時間出現し、インフレーションが始まる
ブラックホール内部	T が崩壊	時間が終わり、特異点が回避される

この双対性は、宇宙論的特異点と重力的特異点の本質的に異なる現象ではなく、同一の情報機構の両極限である可能性を示唆する。さらに次の可能性を開く：

- ブラックホール内部が新たな宇宙領域の種となる、
- ビッグバンが情報容量の「バウンス」として理解される、
- 時間的境界が量子重力の中心的役割を担う。

これらの考察は自然に、出現時間の量子論的定式化へとつながる。

12.3 時間の量子的起源と波動関数の役割

ETIM の量子論的定式化は次を示す：

- 時間強度 T は量子的変数である、
- その波動関数 $\Psi(T)$ は Wheeler–DeWitt 型方程式を満たす、
- 古典的時間は WKB 極限で出現する、
- T の量子ゆらぎが原始摂動を生成する、
- 時間の開始はトンネル効果に対応する。

この視点は、時間そのものが量子可観測量であり、古典的時間概念は波動関数が鋭くピークを持つ半古典的領域でのみ成立することを示す。これらの洞察は、前節で展開した情報幾何的量子像と直接結びつく。

12.4 情報幾何と時間秩序の出現

ETIM の情報幾何学的定式化は量子現象に自然な説明を与える：

- 干渉：情報流の幾何学的重ね合わせ,
- 測定：局在化と新たな E-イベントの生成,
- 時間秩序：局在化後にのみ出現,
- エンタングルメント：非局所波動関数ではなく幾何学的収束。

この視点は、量子力学が ETIM の幾何学的極限であり、独立した理論ではないことを示唆する。さらに次を意味する：

- 測定前の領域では時間秩序は大域的には定義されない,
- 測定は確定した時間を生成する過程である,
- 量子確率は情報流の幾何学的制約を反映する。

これらの概念的洞察は、時間構造の大域理論の探求を促す。

12.5 大域的時間構造理論に向けて

本研究の結果は、今後の研究に向けていくつかの方向性を示す：

■(1) ETIM の場の理論的拡張。 時間強度を空間的に変動する場 $T(x)$ として扱うことで、高次相関関数に新たなシグネチャが現れる可能性がある。

■(2) ETIM と物質・ゲージ場の結合。 出現時間がエネルギー・運動量・熱力学的時間矢とどのように相互作用するかを理解する。

■(3) ETIM とホログラフィー。 E-イベントが AdS/CFT におけるバルク-境界対応に相当するかを探る。

■(4) ETIM と量子重力。 時間的境界が量子重力相の遷移に対応するかを調べる。

■(5) 時空の大域的組織化。宇宙論的境界とブラックホール境界がより大きな情報ネットワークの中で接続され得るかを研究する。

これらの方向性は、結論でまとめるより広範な統合へとつながる。

13 結論

本研究では、Emergent Time from Informational Mechanics (ETIM) 枠組みを構築し、物理的時間の起源・進化・崩壊を理解するための統一的な情報の基盤として提示した。宇宙論、ブラックホール物理、量子論、情報幾何、量子重力といった多様な領域において、ETIM は「時間はあらかじめ存在する」という従来の前提を捨て、E-イベントに符号化された情報の遷移から時間が出現するという単一の機構へと置き換える。

セクション 2 で導入した公理は、時間構造が E-イベントの因果的組織化によって生成されることを確立し、ランク関数によって定量化され、情報層によって精緻化されることを示した。時間強度場 $T(\mathbf{x}, \tau)$ は情報更新の密度を支配し、離散的な因果構造と連続的な時空幾何の橋渡しを行う。この情報のアーキテクチャにより、ETIM は以下のような幅広い物理現象を再解釈する：

- ビッグバン：情報活動の開始として理解される、
- インフレーション：E-イベント密度の急増として生じる、
- ブラックホール特異点：時間が崩壊する「時間的境界」として理解される、
- 量子干渉：情報流の幾何学的重なりとして説明される、
- 測定：確定した時間秩序を生成する局在化として理解される、
- エンタングルメント：非局所性ではなく構造的収束として捉えられる。

ETIM の量子論的定式化は、 T が Wheeler–DeWitt 型方程式を満たす量子的変数であることを示す。古典的時間は、波動汎関数が鋭くピークを持つ半古典的領域でのみ出現し、 T の量子ゆらぎは原始摂動を生成する。ホログラフィー的解釈では、 T は RG スケールに対応し、時間的エントロピーは Ryu–Takayanagi 面積汎関数に対応し、時間の矢はエンタングルメント成長の不可逆性として理解される。

ETIM の重要な成果のひとつは、スカラー摂動とテンソル摂動の統一的な量子重力的解釈である。 T のゆらぎは時間出現の空間変動を符号化するスカラーモードを生成し、空間計量の横波・無跡ゆらぎはテンソルモード（重力波）を生成する。両者は同一の波動汎関数 $\Psi[h_{ij}, T]$ から生じ、曲率摂動と重力波が、時空を定義する情報場の相補的励起であることを示している。

これらの結果を総合すると、時間構造は普遍的でも根本的でもなく、系の情報容量に依存する性質であることが示唆される。ETIM は宇宙論的起源、ブラックホール内部、量子測定、エンタングルメントを非特異的かつ整合的に説明し、物理学における時間の役割に対する新たな概念的基盤を提供する。今後の研究では、ETIM の場の理論的拡張、ホログラフィー的埋め込み、量子重力における時間的境界のより深い理解へと進むことになるだろう。これらの方向性は、時空そのものではなく情報のアーキテクチャこそが物理的実在の主要な基盤であるという、より広範なパラダイムへとつながる。

謝辞

著者は、本稿における数式処理、理論構成の整理、および原稿構成の一部において Microsoft Copilot の支援を受けたことをここに記す。

付録

本付録では、Emergent Time from Informational Mechanics (ETIM) 枠組みを支える数学的および量子論的基礎をまとめる。付録 A では、E-イベントの離散的かつ因果的構造、ランク関数、情報層、そして時間強度場の定義と性質を展開する。付録 B では、セクション 8–12 で用いた情報幾何学および量子論的基礎を提示し、Fisher 計量、干渉幾何、エンタングルメントエントロピー、および出現時間の Wheeler–DeWitt 定式化を含む枠組みを整理する。

付録 A ETIM の数学的基礎

本付録では、ETIM (Emergent Time from Informational Mechanics) 枠組みを支える数学的構造をまとめる。セクション 2 および 3 では、E-イベント、因果順序、情報層、時間強度場といった出現時間の原始的構成要素を導入した。ここではこれらの概念を体系的かつ自己完結的に整理し、ETIM の数学的一貫性を保証する定義・補題・定理を提示する。本付録の結果は、後続の物理的構成の基盤となる離散的かつ因果的な基礎を提供する。

A.1 E-イベントと因果構造

Definition 付録 A.1 (E-イベントと因果順序). E -イベントとは、基本的な情報的遷移である。すべての E -イベントの集合を \mathcal{E} とする。 \mathcal{E} 上の二項関係 \preceq_E が次を満たすとき、これを 因果順序 と呼ぶ：

1. 反射律： $e \preceq_E e$,

2. 反対称性： $e \preceq_E f$ かつ $f \preceq_E e$ ならば $e = f$,
3. 推移律： $e \preceq_E f$ かつ $f \preceq_E g$ ならば $e \preceq_E g$,
4. 非巡回性：非自明な巡回 $e_1 \preceq_E \cdots \preceq_E e_n = e_1$ が存在しない。

したがって対 (\mathcal{E}, \preceq_E) は有向非巡回グラフ (DAG) である。

Definition 付録 A.2 (出現時間). 関数 $\tau: \mathcal{E} \rightarrow \mathbb{N}$ が

$$e \preceq_E f \Rightarrow \tau(e) \leq \tau(f)$$

を満たすとき、出現時間関数と呼ぶ。

Lemma 付録 A.1 (出現時間の存在と一意性). (\mathcal{E}, \preceq_E) が DAG であるとする。このとき：

1. ランク関数 τ は常に存在する。
2. 任意の 2 つのランク関数は順序同型である。

Proof. セクション 3.1 を参照。 □

A.2 サブシステムと空間的サポート

Definition 付録 A.3 (サブシステムと空間的サポート). \mathcal{S} をサブシステムの集合とする。各 E-イベント $e \in \mathcal{E}$ は

$$\sigma(e) \subseteq \mathcal{S}$$

という 空間的サポートを持ち、これはその情報更新が影響を及ぼすサブシステムを表す。

この構造により、背景時空を仮定せずに局所性の概念が導入される。

A.3 情報層と更新写像

Definition 付録 A.4 (情報層). 情報は次のように層構造へと分解される：

$$\mathcal{I} = \bigsqcup_{\ell \in \Lambda} \mathcal{I}^{(\ell)},$$

ここで Λ は全順序集合である。

Definition 付録 A.5 (更新写像). 各 E-イベント e は情報更新

$$U_e: \prod_{x \in \text{In}(e)} \mathcal{X}_x \longrightarrow \prod_{y \in \text{Out}(e)} \mathcal{X}_y$$

を誘導する。

Lemma 付録 A.2 (情報層の単調性). $e \preceq_E f$ ならば、任意の $x \in \text{Out}(e)$, $y \in \text{Out}(f)$ に対して

$$\lambda(x) \leq \lambda(y)$$

が成り立つ。

Proof. セクション 3.2 を参照。 □

A.4 情報流の因果閉包

Definition 付録 A.6 (情報ノードの因果未来). 情報ノード x の 因果未来を

$$\text{Fut}(x) = \{e \in \mathcal{E} \mid x \text{ を生成するイベントから } e \text{ への因果連鎖が存在する}\}$$

で定義する。

Theorem 付録 A.1 (因果閉包). $f \in \text{Fut}(x)$ かつ $e \preceq_E f$ ならば $e \in \text{Fut}(x)$ 。

Proof. セクション 3.3 を参照。 □

A.5 収束的信息構造としてのエンタングルメント

Definition 付録 A.7 (ETIM エンタングルメント). イベント e_1, \dots, e_m が次を満たすとき、エンタングルしているという：

$$x \in \bigcap_{i=1}^m \text{Out}(e_i), \quad \sigma(e_i) \neq \sigma(e_j) \text{ for some } i \neq j.$$

Theorem 付録 A.2 (ETIM エンタングルメントの特徴づけ). 次は同値である：

1. $\{e_i\}$ はエンタングルしている。
2. その出力は、独立なサブシステム寄与へ分解できない収束的信息構造を形成する。

Proof. セクション 3.4 を参照。 □

A.6 時間強度と時間的境界

Definition 付録 A.8 (時間強度場). スカラー場 $T : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ は E-イベント密度を支配する。

Lemma 付録 A.3 (時間強度とイベント密度の関係). $\rho_E = F(T)$ かつ $F'(T) > 0$ のとき、

$$\frac{d\rho_E}{d\lambda} > 0 \iff \frac{dT}{d\lambda} > 0.$$

Proof. セクション 3.5 を参照。 □

Theorem 付録 A.3 (時間的境界). $T(\lambda_*) = 0$ かつ $\lambda > \lambda_*$ で $T(\lambda) > 0$ ならば：

1. $\lambda < \lambda_*$ では E -イベントは存在しない、
2. $\lambda < \lambda_*$ では出現時間は定義されない、
3. $\lambda = \lambda_*$ は時間的境界である。

Proof. セクション 3.6 を参照。 □

A.7 測定と時間生成

Definition 付録 A.9 (局在化). 測定は情報分布の局在化

$$p(x) \longrightarrow p_{\text{loc}}(x)$$

に対応する。

Theorem 付録 A.4 (測定は出現時間を生成する). 局在化は新たな E -イベントを誘導し、出現時間関数を拡張する。

Proof. セクション 3.7 を参照。 □

A.8 まとめ

本付録では、 E -イベント、因果順序、情報層、更新写像、エンタングルメント、時間強度、時間的境界、測定といった ETIM の数学的基礎を提示した。これらの結果はセクション 4–7 の物理的応用の基盤となる離散的かつ因果的構造を提供し、ETIM が出現時間のための首尾一貫した数学的枠組みであることを確立する。

付録 B 量子論的および情報幾何学的基礎

本付録では、セクション 8–12 の議論を支える量子論的および情報幾何学的構造をまとめる。付録 A が ETIM の離散的・因果的基礎を確立したのに対し、本付録は干渉、測定、エンタングルメント、原

始ゆらぎ、および出現時間の Wheeler–DeWitt 定式化を解析するために必要な連続的・幾何学的・量子論的道具立てを提供する。ここに収録した結果は、ETIM の情報構造と、宇宙論および量子重力における物理的現象との橋渡しを担う。

B.1 Fisher 情報計量と統計多様体

Definition 付録 B.1 (統計多様体). 確率分布族

$$p(x|\theta), \quad \theta = (\theta^1, \dots, \theta^n)$$

が滑らかにパラメータ付けられるとき、 \mathcal{M} は n 次元統計多様体をなす。

Definition 付録 B.2 (Fisher 情報計量). \mathcal{M} 上の Fisher 計量は

$$g_{ij}(\theta) = \mathbb{E}[\partial_i \log p(x|\theta) \partial_j \log p(x|\theta)]$$

で定義される。

Lemma 付録 B.1 (正值性). *Fisher* 計量は半正定値であり、モデルが識別可能ならば正定値となる。

Proof. 標準的な情報幾何学の議論による。セクション 8.1 を参照。 □

B.2 接続・曲率・測地流

Definition 付録 B.3 (Levi–Civita 接続). Fisher 計量に付随する Levi–Civita 接続は

$$\Gamma_{ij}^k = \frac{1}{2} g^{kl} (\partial_i g_{jl} + \partial_j g_{il} - \partial_l g_{ij})$$

で与えられる。

Definition 付録 B.4 (測地線). 曲線 $\theta^i(\lambda)$ が

$$\frac{d^2 \theta^k}{d\lambda^2} + \Gamma_{ij}^k \frac{d\theta^i}{d\lambda} \frac{d\theta^j}{d\lambda} = 0$$

を満たすとき、情報幾何学における測地線と呼ぶ。

これらの構造は、干渉や測定の幾何学的解釈の基礎となる。

B.3 情報幾何における二重スリット境界条件

統計多様体上の 2 つの情報経路 γ_1, γ_2 を考える。それぞれの振幅は

$$\psi_i = \sqrt{p_i} e^{iS_i}$$

と表され、 S_i は γ_i に沿った情報幾何学的作用である。

Theorem 付録 B.1 (幾何学的重ね合わせによる干渉). 合成分布は

$$p = |\psi_1 + \psi_2|^2 = p_1 + p_2 + 2\sqrt{p_1 p_2} \cos(\Delta S)$$

を満たす。ただし $\Delta S = S_1 - S_2$ 。

Proof. 直接展開により得られる。セクション 8.2 を参照。 □

これは量子干渉の情報幾何学的起源を与える。

B.4 測定としての局在化

Definition 付録 B.5 (局在化写像). 測定は統計多様体の収縮として表される：

$$p(x|\theta) \longrightarrow p_{\text{loc}}(x|\theta')$$

ここで θ' は低次元部分多様体上にある。

Theorem 付録 B.2 (局在化は E-イベントを生成する). 統計多様体の収縮は新たな情報遷移を誘導し、 $ETIM$ における E-イベントに対応する。

Proof. セクション 8.3 を参照。 □

B.5 エンタングルメントエントロピーと収束的信息構造

二体系 $A \otimes B$ 上の密度演算子 ρ を考える。

Definition 付録 B.6 (フォン・ノイマンエントロピー).

$$S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \log \rho).$$

Definition 付録 B.7 (縮約状態).

$$\rho_A = \text{Tr}_B \rho, \quad \rho_B = \text{Tr}_A \rho.$$

Theorem 付録 B.3 (収束的信息構造). 情報流が共有出力ノードへ収束する場合、対応する量子状態はエンタングルしており、

$$S(\rho_A) = S(\rho_B) > 0$$

を満たす。

Proof. セクション 8.4 を参照。 □

これにより、ETIM エンタングルメントと量子エンタングルメントの対応が確立される。

B.6 Wheeler–DeWitt 方程式の導出

ETIM 作用の ADM 分解から出発する：

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} R + \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2} A(T) g^{\mu\nu} \nabla_\mu T \nabla_\nu T - V(T) \right].$$

ハミルトニアン制約は

$$\mathcal{H}_0 = \frac{16\pi G}{\sqrt{h}} \left(\pi_{ij} \pi^{ij} - \frac{1}{2} \pi^2 \right) + \frac{P_T^2}{2\sqrt{h}A(T)} + \dots = 0.$$

正準量子化により

$$\hat{\mathcal{H}}_0 \Psi[h_{ij}, T] = 0$$

を得る。

Theorem 付録 B.4 (ETIM Wheeler–DeWitt 方程式). 波動汎関数は

$$\left[-16\pi G \hbar^2 G_{ijkl} \frac{\delta^2}{\delta h_{ij} \delta h_{kl}} - \frac{\hbar^2}{2A(T)} \frac{\delta^2}{\delta T^2} + U[h_{ij}, T] \right] \Psi = 0$$

を満たす。ここで U は曲率およびポテンシャル項を含む。

B.7 Born–Oppenheimer 分解と出現時間

Definition 付録 B.8 (BO 分解).

$$\Psi[h_{ij}, T] = \exp\left(\frac{i}{\hbar} S_0[h_{ij}, T]\right) \chi[h_{ij}, T].$$

Theorem 付録 B.5 (出現時間). 半古典的時間パラメータは

$$\frac{\partial}{\partial \tau} = \frac{1}{A(T)} \frac{\delta S_0}{\delta T} \frac{\delta}{\delta T}$$

を満たす。

これは出現時間の量子的起源を与える。

B.8 波動汎関数からのスカラー・テンソル摂動

$$h_{ij} = a^2(\tau)(\delta_{ij} + \gamma_{ij}), \quad T = T_0(\tau) + \delta T.$$

Theorem 付録 B.6 (スカラー・テンソルセクターの分離). 2 次の摂動までで

$$\Psi = \Psi_{\text{scalar}}[\delta T] \Psi_{\text{tensor}}[\gamma_{ij}]$$

が成り立ち、両セクターは独立に進化する。

Proof. セクション 11.1 を参照。

□

これにより、曲率摂動と重力波の統一的量子重力的起源が確立される。

B.9 時間的 RT 面とホログラフィーエントロピー

Definition 付録 B.9 (時間的 RT 面). 余次元 2 の曲面 γ_T で

$$S_T = \frac{\text{Area}(\gamma_T)}{4G_N}$$

を極値化するものを時間的 Ryu–Takayanagi 面と呼ぶ。

Theorem 付録 B.7 (時間的エンタングルメントの単調性). T が単調増加するならば

$$\frac{dS_T}{dT} > 0.$$

これは出現時間のホログラフィー的解釈を与える。

B.10 まとめ

本付録では、Fisher 計量、干渉幾何、局在化としての測定、エンタングルメントエントロピー、Wheeler–DeWitt 方程式、Born–Oppenheimer 分解、スカラー・テンソル摂動、および時間的ホログラフィーを含む、ETIM の量子論的・情報幾何学的基礎を提示した。これらの結果はセクション 8–12 で解析した物理現象の連続的かつ量子論的基盤を構成し、出現時間の数学的構造を完成させる。

ETIM の基礎構造

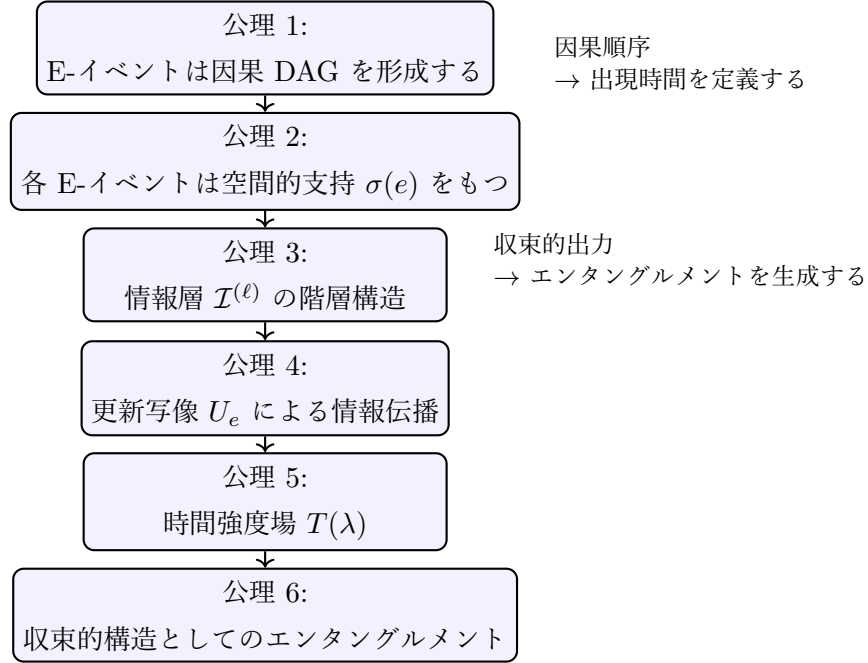


図 1: **ETIM** の基礎構造。

Emergent Time from Informational Mechanics (ETIM) を構成する 6 つの公理を、階層的な情報流として示している。

公理 1 は E-イベントを因果的 DAG の要素として導入し、出現時間の構造的基盤を与える。

公理 2 は各 E-イベントに空間的支持 $\sigma(e)$ を割り当て、局所的な情報相互作用を可能にする。

公理 3 は情報を層構造 $\mathcal{I}^{(\ell)}$ に整理し、情報処理の深さを表す。

公理 4 は更新写像 U_e により情報が DAG に沿って前方へ伝播することを規定し、因果的一貫性を保証する。

公理 5 は時間強度場 $T(\lambda)$ を導入し、E-イベント密度を制御することで、時間秩序がいつ出現し、安定し、あるいは崩壊するかを決定する。

公理 6 は、異なる空間的支持をもつ E-イベントが共通の情報出力へ収束するとき、エンタングルメントが生じることを特徴づける。

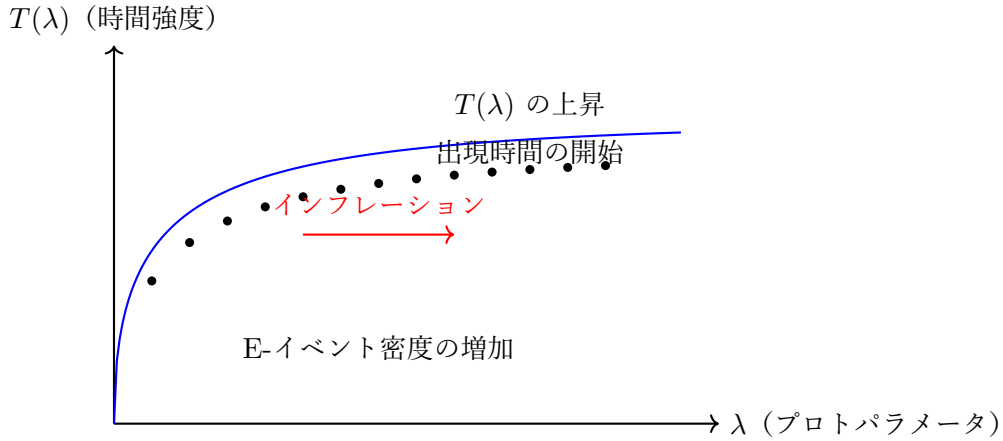


図 2: 時間強度場の立ち上がりと ETIM におけるインフレーションの開始。曲線は、プロトパラメータ λ に対する時間強度場 $T(\lambda)$ の成長を示している。 $T(\lambda)$ がゼロから上昇し始めると E-イベントが発生し、出現時間の誕生が始まる。黒点は E-イベント密度を表し、補題 3.5 に従って T の増加とともに単調に増える。この急激な情報活動の増大が加速膨張期、すなわちインフレーションを駆動する。赤い矢印は、 $T(\lambda)$ の急峻な立ち上がりが大きな有効ハッブルパラメータを生み、インフレーションが ETIM における時間出現の直接的帰結であることを示している。

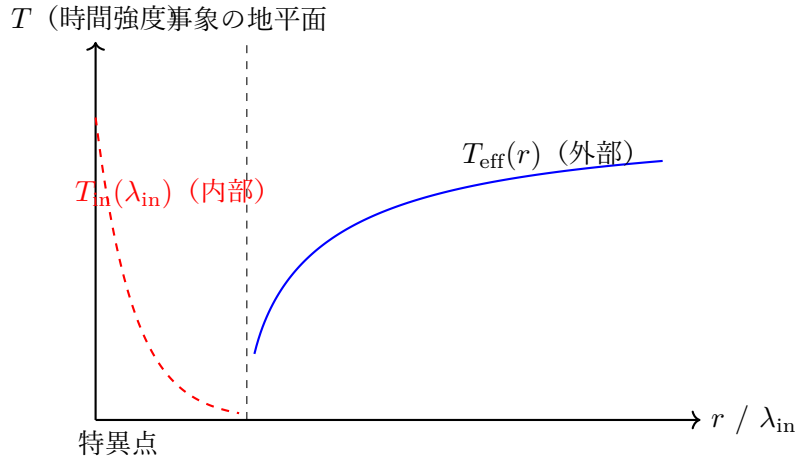


図 3: ETIM におけるシュワルツシルトブラックホールの時間強度プロファイル。青い曲線は外部領域 $r > 2M$ における有効時間強度 $T_{\text{eff}}(r)$ を示し、重力赤方偏移により地平面へ向かって減少する。垂直の破線は事象の地平面を表し、この地点で静止観測者に対する E-イベント密度はゼロへ近づく。内部領域では、赤い破線が内部時間強度 $T_{\text{in}}(\lambda_{\text{in}})$ を示し、落下軌道に沿って指数関数的に減衰する。 T_{in} がゼロへ崩壊すると E-イベント密度は消滅し、出現時間は終端を迎える。これにより古典的な $r = 0$ 特異点は幾何学的発散ではなく時間的境界として理解される。本図は、ブラックホール内部における時空の破綻が曲率発散ではなく時間構造の崩壊として生じるという ETIM の解釈を視覚化している。

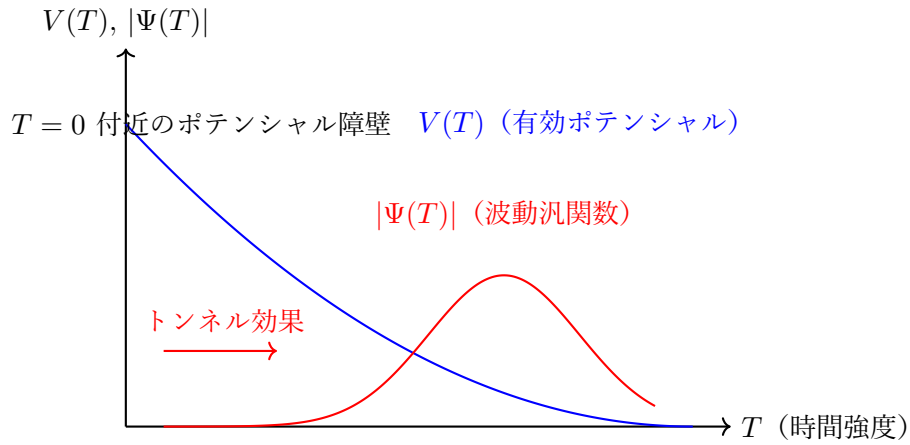


図 4: **ETIM** における時間の量子的起源：ポテンシャル障壁と波動関数のトンネル効果。青い曲線は、ミニ超空間近似において時間強度変数 T の量子力学的挙動を支配する有効ポテンシャル $V(T)$ を示す。 $T = 0$ 付近ではポテンシャルが障壁を形成し、前時間的狀態 ($T = 0$) が古典的には到達不能であることを示している。赤い曲線は波動関数の振幅 $|\Psi(T)|$ を表し、この障壁を量子トンネルすることで有限の T にピークを持つ。赤い矢印は、時間のない領域 ($T = 0$) から非ゼロの時間強度をもつ状態への遷移を示し、時間の量子的生成に対応する。本図は、ビッグバンを幾何学的特異点ではなく、情報的時間強度空間におけるトンネル事象として捉える ETIM の解釈を視覚化している。

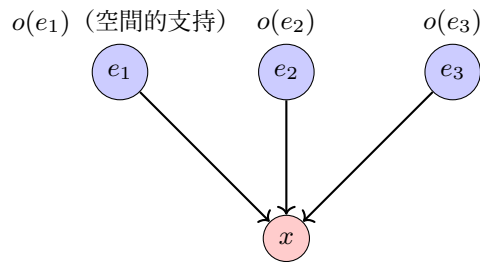


図 5: **ETIM** におけるエンタングルメントを定義する収束的信息構造。イベント e_1, e_2, e_3 は互いに異なる空間的支持 $o(e_i)$ をもつが、共通の出力ノード x に情報が収束する。この「非因子化的」な情報流の収束こそが、ETIM におけるエンタングルメント（公理 6）の定義である。ヒルベルト空間における量子エンタングルメントが波動関数の非分離性によって特徴づけられるのに対し、ETIM のエンタングルメントは因果・情報構造そのものの性質であり、複数の部分系が独立に分解できない単一の情報結果へ寄与することによって生じる。この収束構造は新たな E-イベントを生成し、それによって出現時間の階層が進むため、エンタングルメントは時間の生成と直接結びついている。

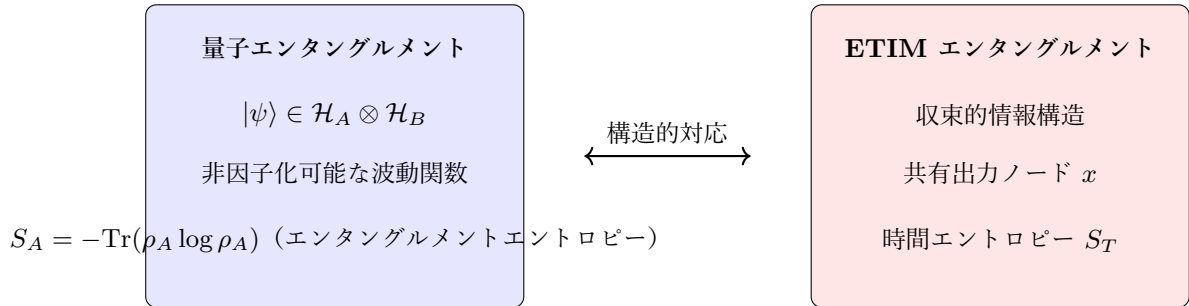


図 6: 量子エンタングルメントと ETIM エンタングルメントの比較。左：量子力学では、エンタングルメントは $|\psi\rangle \in \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$ が因子化できないことによって定義され、エンタングルメントエントロピー S_A が部分系間の相関を定量化する。右：ETIM では、エンタングルメントは異なる部分系からの情報流が共通の出力ノードへ収束するという構造的性質として定義される。これはヒルベルト空間のテンソル積構造に依存せず、E-イベントの因果・情報構造に基づく。中央の対応矢印は、情報構造がヒルベルト空間で表現された場合に、量子エンタングルメントが ETIM エンタングルメントの特別な場合として再現されることを示している。

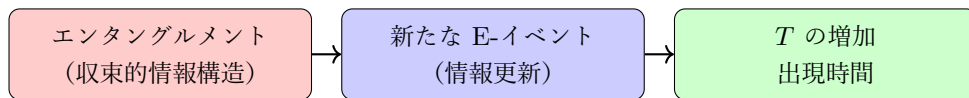


図 7: ETIM においてエンタングルメントが出現時間を生成する機構。左の収束的信息構造（エンタングルメント）は新たな E-イベント（中央）を生み出し、それが時間強度場 T を増加させる。 T が増えるにつれて、出現時間を定義するランク関数が進み、イベント間に時間順序が確立される。したがってエンタングルメントは単なる相関ではなく、時間構造そのものの生成機構である。エンタングルメントの単調な増大は T の単調な増大を引き起こし、時間の矢の微視的起源を与える。この機構は、量子相関・測定・時間発展を単一の情報の枠組みの中で統一する。

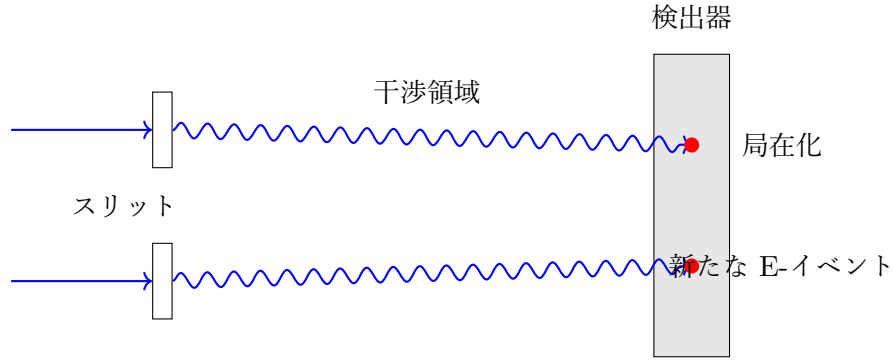


図 8: **ETIM** における二重スリット実験の情報幾何学的解釈。入射する情報流（青矢印）は 2 つのスリットに到達し、そこでは物理的経路ではなく情報多様体に対する境界条件が課される。情報流は分岐し、検出器へ向かって伝播する過程で幾何学的に重なり合い、干渉領域を形成する。ETIM において干渉は波動的振る舞いによるものではなく、情報多様体上の情報流の重ね合わせとして生じる。検出器に到達すると、広がった情報分布は局在化し、新たな E-イベント（赤点）が生成される。この局在化こそが測定に対応し、新しい情報ノードの生成を通じて確定した時間秩序が生まれる。本図は、干渉と測定が同一の情報のアーキテクチャの中で幾何学的過程として統一されるという ETIM の特徴を示している。

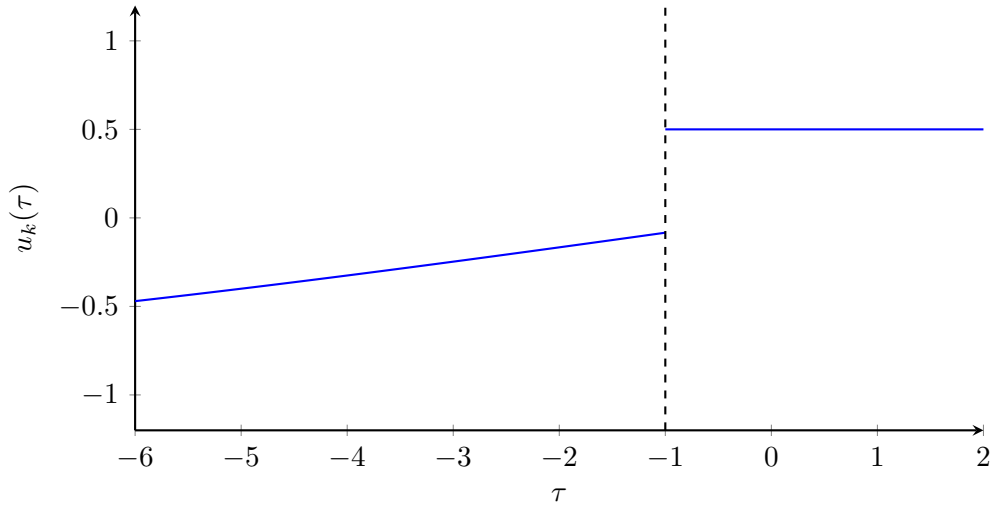


図 9: **ETIM** における時間強度場ゆらぎの正準モード関数 $u_k(\tau)$ の模式的進化。初期時刻 ($c_T k \gg aH$) では、モードは平坦時空と同様に振動し、その物理的波長が出現時間ハッブル半径より十分小さいときには時間出現の局所的変動が自由に伝播することを反映している。宇宙が膨張し、 $c_T k$ が aH と同程度になると、モードは出現時間ホライズンを横断する。超ホライズン領域 ($c_T k \ll aH$) に入ると振動は停止し、モードは一定値へと凍結する。この凍結は出現時間の局所的安定化に対応し、E-イベント密度の空間変動が階層付きポセットの空間スライス上に古典的な曲率摂動として刻み込まれることを意味する。

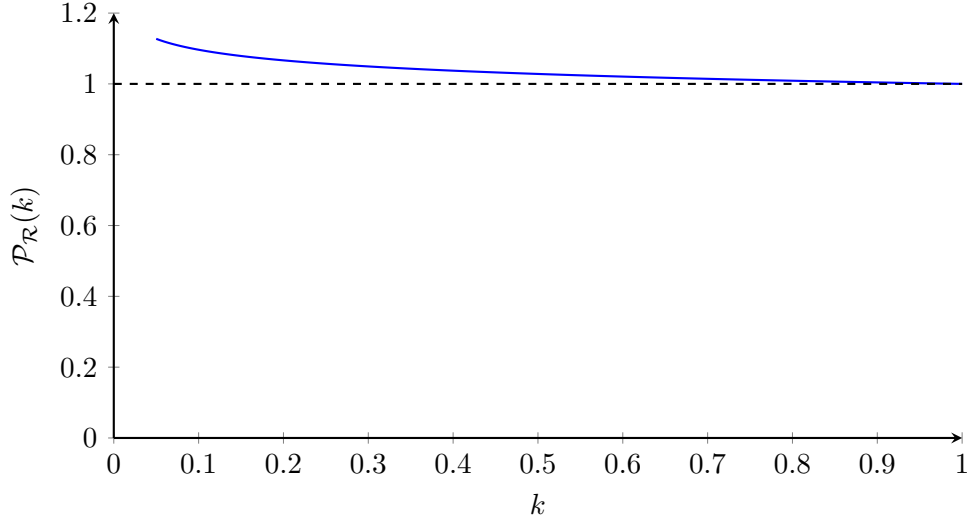


図 10: **ETIM** における時間強度場の空間ゆらぎが生成するスカラーパワースペクトル $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k)$ の模式図。正準変数 u_k はホライズン横断時に凍結し、 $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) \propto H^2/(c_T^3 A)$ に従うため、得られるスペクトルはほぼスケール不変となる。わずかな傾きは、 $T(\tau)$ の緩やかな変化と出現時間ハッブルパラメータ $H(\tau)$ の時間依存性によって決まる。通常のインフレーションでは、傾きは時間内で進化するスカラー場のスロー・ロールパラメータに由来するが、ETIM では傾きは「時間そのものがどの速度で出現するか」を反映している。破線は完全にスケール不変な場合を比較のために示している。

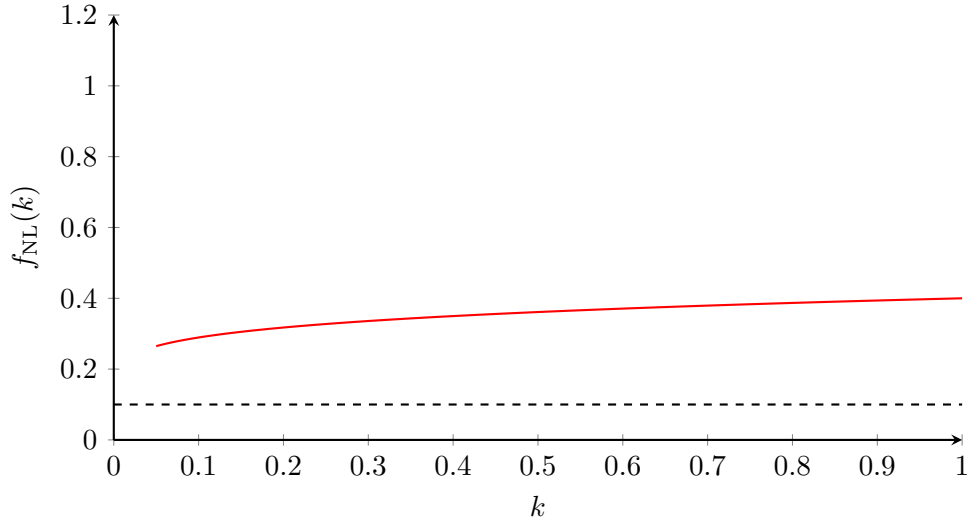


図 11: **ETIM** におけるビスペクトル振幅 $f_{\text{NL}}(k)$ のスケール依存性。非ガウス性は、時間強度場の三次相互作用に符号化された「時間の出現そのものの非線形性」から生じる。ここに示した緩やかなスケール依存性は、出現時間の非線形相互作用の強さが η とともにゆっくり変化すること、そして伝播速度 $c_T < 1$ のとき高次相関が強化されることを反映している。通常のインフレーションでは、非ガウス性はスカラー場の非標準的運動項がない限り小さいままであるが、ETIM では非ガウス性は時間出現の情報構造から直接生じる。破線は、完全にガウスのなゆらぎに対応する最小値を示している。

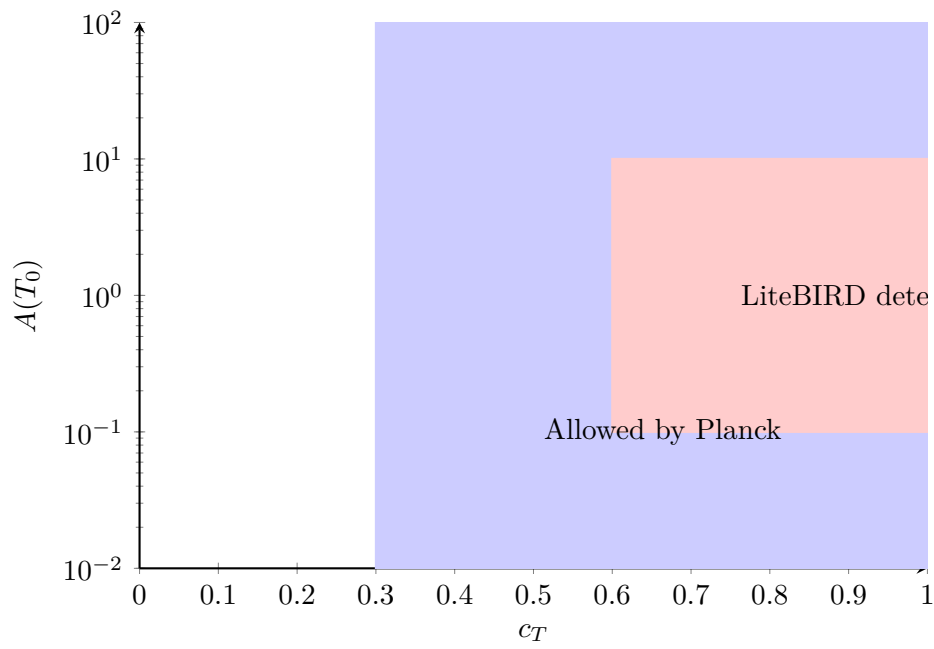


図 12: 出現時間宇宙論における $(c_T, A(T_0))$ 平面でのパラメータ空間。青い領域は、スカラー振幅・スカラー傾き・テンソル／スカラー比に関する Planck および BICEP/Keck の最新制限と整合するパラメータ範囲を示す。赤い領域は、その中でも LiteBIRD が検出可能なテンソル振幅を生成する部分集合である。横軸の c_T は「時間の出現に伴うゆらぎの伝播速度」を制御し、縦軸の $A(T_0)$ は「時間強度場の有効運動量重み」を表す。これら 2 つのパラメータが組み合わさることで、E-イベント密度の空間変動から生じる原始曲率ゆらぎの振幅とスケール依存性が決定される。

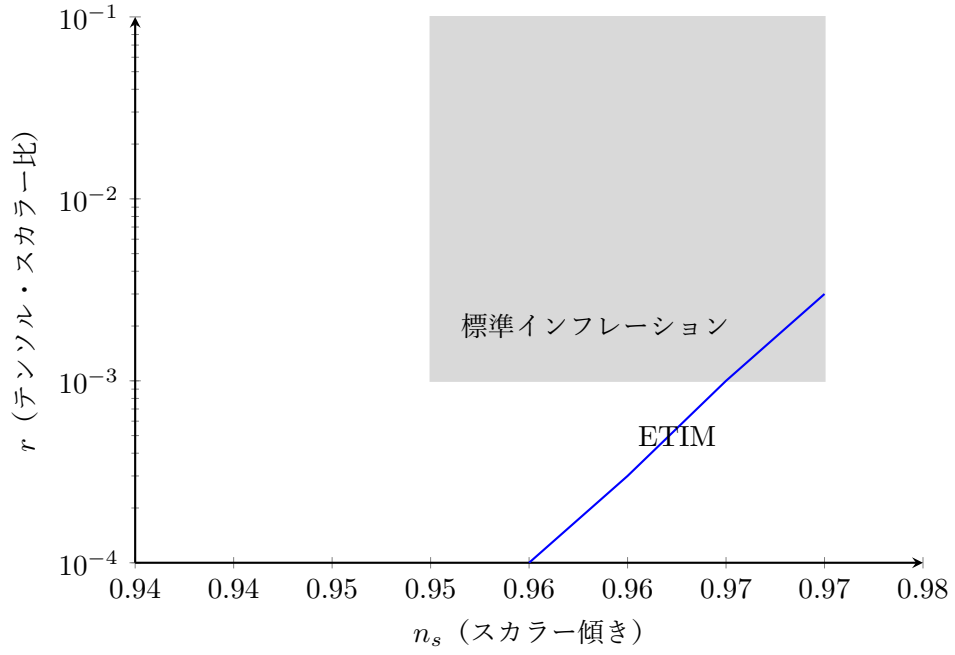


図 13: (n_s, r) 平面における出現時間宇宙論の予言。灰色の帯は、スカラー傾き n_s とテンソル・スカラー比 r に対する Planck の最新制限と整合する領域を示す。青い曲線は、時間強度場のダイナミクスから得られる ETIM の予言であり、標準的なスロー・ロール・インフレーションとは質的に異なる振る舞いを示す。ETIM では、スカラーとテンソルのセクターは通常の関係 $r = -8n_T$ によって結びついておらず、 r は出現時間パラメータ c_T , $A(T_0)$, N_T に依存する。その結果、 (n_s, r) 平面に特徴的な軌跡が現れ、次世代 CMB 実験によって識別可能となる。

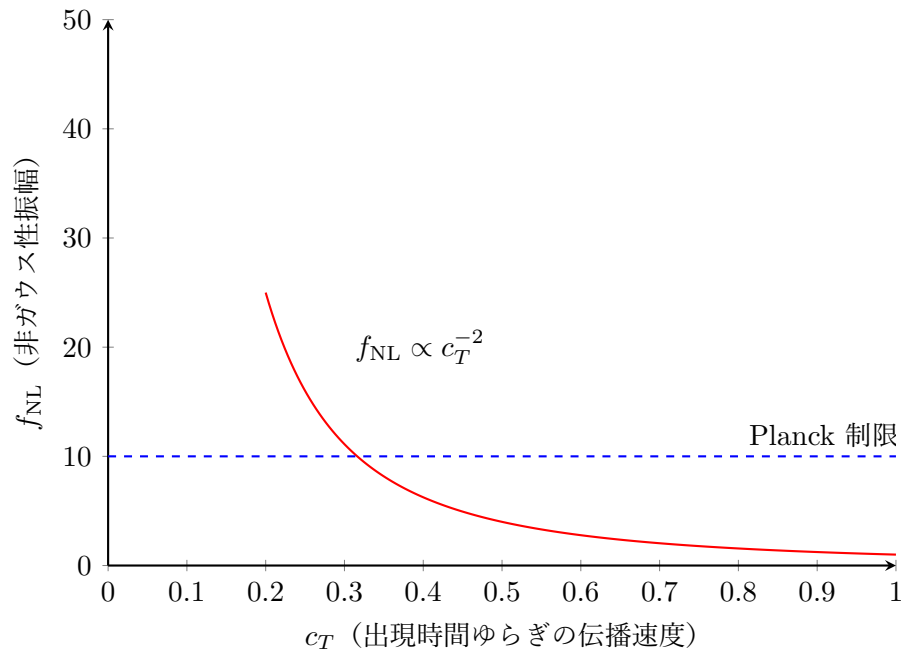


図 14: 出現時間の伝播速度 c_T に対する非ガウス性 f_{NL} の依存性。赤い曲線は ETIM の特徴的な予言である $f_{\text{NL}} \propto c_T^{-2}$ を示し、これは時間の出現過程に内在する非線形性と時間強度場の三次相互作用に由来する。青い破線は、局所型非ガウス性に対する Planck の現在の上限を示す。 c_T が小さくなるほど f_{NL} は急速に増大するため、ETIM は「出現時間ゆらぎの伝播速度」と「原始非ガウス性の大きさ」の間に強い相関を予言する。これは CMB-S4 や将来の大規模構造サーベイによって直接検証可能な鋭い観測的シグネチャを提供する。

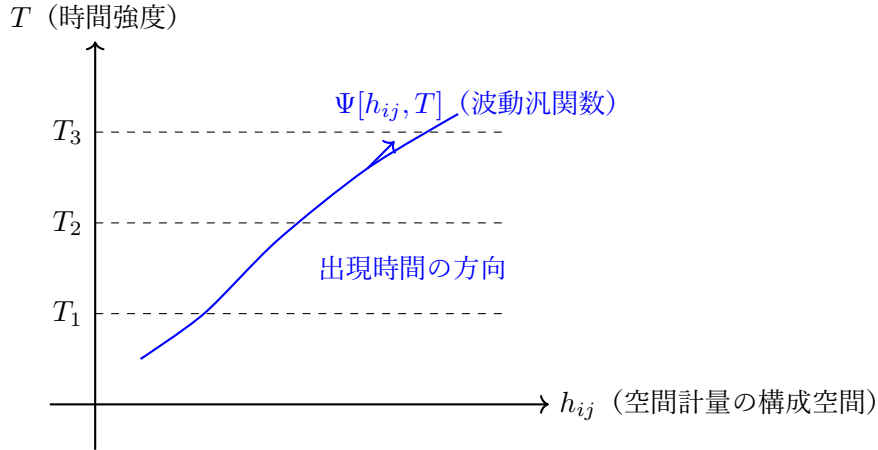


図 15: **ETIM** の波動汎関数 $\Psi[h_{ij}, T]$ の超空間表現。横軸は空間計量 h_{ij} の無限次元構成空間を表し、縦軸は時間秩序の出現をパラメータ化する時間強度場 T を表す。青い曲線はハミルトン-ヤコビ方程式から得られる半古典的軌道であり、 T が増加するにつれて波動汎関数が単調に流れる様子を示している。これは E-イベント密度が増加し、系が古典的時空の領域へ近づくことを反映する。破線は一定の T をもつ超空間スライスであり、等出現時間の超曲面に対応する。矢印は T の増加方向を示し、半古典的極限における出現的な時間の矢を定義する。

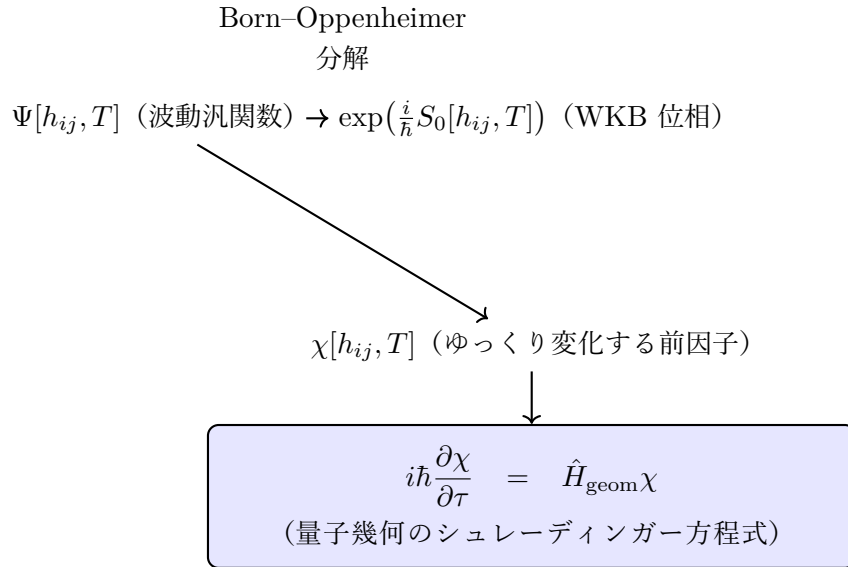


図 16: **ETIM** 波動汎関数の **Born–Oppenheimer** 分解。完全な量子状態 $\Psi[h_{ij}, T]$ は、急速に変化する WKB 位相 $\exp(iS_0/\hbar)$ と、ゆっくり変化する前因子 $\chi[h_{ij}, T]$ に因子化される。WKB 位相は時間強度場の半古典的ダイナミクスを担い、 $\partial/\partial\tau \propto (\delta S_0/\delta T) \delta/\delta T$ を通じて出現時間パラメータ τ を定める。前因子 χ は量子幾何に対するシュレーディンガー方程式を満たし、 τ が内部時間として働く。この図は、Born–Oppenheimer 階層が時間のない Wheeler–DeWitt 方程式を時間依存シュレーディンガー方程式へと変換し、幾何と時間強度場の結合量子状態から古典的時間がどのように出現するかを示している。

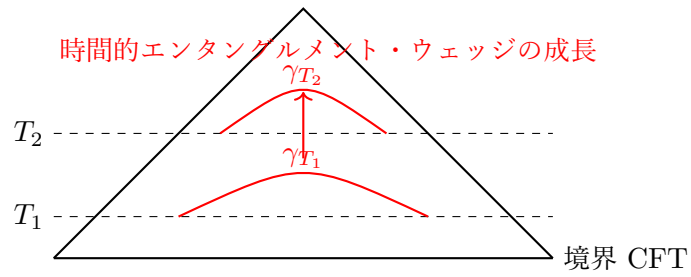


図 17: **ETIM** における時間の出現に対応する時間的エンタングルメント・ウェッジ。横軸は境界理論を、三角形の領域は境界データから再構成されるバルク時空を表す。赤い曲線 γ_{T_1} と γ_{T_2} は、時間強度場の異なる値 $T_1 < T_2$ に対応する時間的 Ryu-Takayanagi (RT) 曲面である。 T が増加すると、RT 曲面はバルク内部へと深く進み、その面積は単調に増大する。これは時間的エンタングルメント・エントロピー S_T の増加を反映し、時間の矢を幾何学的に表現している。出現時間とは、エンタングルメント・ウェッジの拡大と、幾何と時間強度場の間に蓄積される情報相関に対応する。 $T \rightarrow 0$ の近傍ではウェッジが崩壊し、古典的な時間構造が存在しないことを示す。

参考文献

- [1] Carlo Rovelli. Relational quantum mechanics. *International Journal of Theoretical Physics*, 35(8):1637–1678, 1996.
- [2] Wojciech H. Zurek. Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. *Reviews of Modern Physics*, 75:715–775, 2003.
- [3] Thomas M. Cover and Joy A. Thomas. *Elements of Information Theory*. Wiley, 2nd edition, 2006.
- [4] Shun-ichi Amari. Information geometry and its applications. *Applied Mathematical Sciences*, 2016.
- [5] Alan H. Guth. Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Physical Review D*, 23:347–356, 1981.
- [6] Andrei Linde. A new inflationary universe scenario. *Physics Letters B*, 108:389–393, 1982.
- [7] Akio Miyao. Emergent time inflation model: A unified framework for the origin of time, energy, mass, and primordial fluctuations, December 2025.
- [8] Stephen W. Hawking. Particle creation by black holes. *Communications in Mathematical Physics*, 43:199–220, 1975.
- [9] Jacob D. Bekenstein. Black holes and entropy. *Physical Review D*, 7:2333–2346, 1973.
- [10] Akio Miyao. Unified time intensity across schwarzschild spacetimes: Emergence, collapse, and the boundary of the temporal domain, December 2025.
- [11] James B. Hartle and Stephen W. Hawking. Wave function of the universe. *Physical Review D*, 28:2960–2975, 1983.
- [12] Alexander Vilenkin. Boundary conditions in quantum cosmology. *Physical Review D*, 33:3560–3569, 1986.
- [13] Akio Miyao. Quantization of the emergent time inflation model: A quantum framework for the origin of time and primordial fluctuations, December 2026.
- [14] John S. Bell. On the einstein podolsky rosen paradox. *Physics*, 1:195–200, 1964.
- [15] Akio Miyao. A geometric reinterpretation of wave–particle duality in the etim framework, December 2026.
- [16] Shun-ichi Amari and Hiroshi Nagaoka. Methods of information geometry. *Translations of Mathematical Monographs*, 191, 2000.
- [17] Robert M. Wald. *General Relativity*. University of Chicago Press, 1984.
- [18] Viatcheslav Mukhanov. Theory of cosmological perturbations. *Physics Reports*, 215:203–333, 1992.
- [19] Roger Penrose. Gravitational collapse and space-time singularities. *Physical Review Letters*, 14:57–59, 1965.

- [20] Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski, and James Sully. Black holes: Complementarity or firewalls? *Journal of High Energy Physics*, 2013(2):62, 2013.