

# ハイパーブレーション相対性理論： 融合-接触-観測 OCS Trichotomy と査 読耐性化第2波

CN12 Trichotomy 精緻化、定理2の枯渇レジーム拡張（付録  
G）、  
悪魔の弁護士による8反論

ハイパーブレーション相対性理論  
完全統合版（V32） — マスターエディション

第16版～第31版の統合・OCS Trichotomy + 査読耐性強化第2波

山本 雄一  
独立研究者、日本

ORCID: 0009-0004-1610-0687

2026年5月

# 本文書の位置づけ

本マスター文書は、ハイパーブレン相対性理論 (Hyperbrane Relativity, HBR) の枠組みを参照用に統合した集成 (reference compilation) であり、構成要素間の相互参照と長期保存を目的とする。これは査読論文の投稿対象ではない。査読投稿は、それぞれが特定の観測データに対する厳密な計算を伴う焦点を絞った個別の主張からなる以下の論文群が担う：

**一般相対論との関係。** HBR は一般相対論を置き換える枠組みではなく、その運動学の適切な低エネルギー極限として一般相対論を含む幾何学的拡張として提示される。現在の太陽系・連星パルサー・弱場重力波テストにおいて GR が実験精度内で確認されているすべての領域では、HBR は同精度内で同じ予言を再現する (第 V 部の PPN 議論および Calc B-0.4 の Cassini-bound  $\beta$  解析を参照)。GR からの定量的な HBR 固有偏差は、(a) コンパクト天体に関連する強場 Bulk-Brane Projection 領域 (論文 B)、(b) W 軸張力がスケールレンズ寄与  $V_\infty^2 \tanh(r/r_g)$  を生む漸近的銀河領域 (論文 A)、(c) 専用プローブ経路でのみアクセス可能な普遍 crossover スケール  $\Delta w$  (Phase B-2) に限定される。一般相対論に精通した読者は、HBR を「アインシュタイン枠組みの全面置換」ではなく「GR が確認されたすべての領域と整合性を保ちつつ、サブ EHT・漸近的銀河精度でどのような追加の運動学的構造が許容されるか」という問いとして扱っていただきたい。

- 論文 A (SPARC 銀河回転曲線)：171 銀河に対する単一の経験的主張；Physical Review D への投稿準備中 (arXiv ID 取得待ち)。
- 論文 B (EHT コンパクト天体影像)：M87\* / Sgr A\* の影像形態に対する単一の経験的主張；準備中。
- 論文 C (Bullet Cluster lensing-gas ピーク offset)：銀河団衝突に対する単一の経験的主張；計画段階 (銀河回転以外のダークマター証拠への応答)。
- 論文 D (CMB 音響ピークと  $H_0$ )：宇宙論パラメータと  $R_{\text{univ}}$  の独立決定に対する単一の経験的主張；計画段階。
- 論文 E (原子干渉計によるボルン則テスト)：量子測定幾何学に対する単一の経験的主張；計画段階。

読者にはこれらの焦点論文を通じて本プロジェクトを評価していただきたい。本マスター文書は連結された参照資料として、透明性と継続的改善のため Zenodo 上で CC BY 4.0 のもとに公開されている。単一の査読投稿として評価されることを意図したものではない。

**HBR が経験的入力として扱うもの。** HBR は基本定数の数値を第一原理から導出しない。以下は観測によって固定される経験的入力として扱う：

- $c$  — ゲート境界条件  $\dot{X}^W|_\Sigma = c$  を固定する経験的不変量 (ニュートン重力における  $G$  に類比)。
- $\hbar$  — 作用量子。
- $\Delta w$  — ブレン厚 (普遍 crossover スケール CN9 と同定)。

**HBR が導出するもの。** 上記の経験的入力を与えられたとき、HBR はその幾何学的公理から以下を導出する：

- ローレンツ不変性を創発的ブレン対称性として（基本公理ではなく）。
- 時間遅延、長さ収縮、完全なローレンツ変換を幾何学的射影として。
- $E = mc^2$  を、経験的  $c$  とゲート境界条件の下での運動学的恒等式として（質量-エネルギー等価性の新規導出ではなく、構造的帰結として）。
- 銀河回転曲線  $V_\infty^2 \tanh(r/r_g)$  を W 軸幾何学から。
- 一般相対論への単一パラメータ  $\beta$  による PPN 補正。
- No-horizon 定理（物質が存在する任意の領域で  $\Phi(r) > 0$ ）を運動学的天井  $|\Phi/\Phi_0| \leq 1$  から。

**本文書内の相互参照。** 用語については以下に続く**用語集 (Glossary)**を、HBR と標準物理学の関係については本文書の比較 part (*HBR vs. GR*) を、個別投稿論文の状況とロードマップについてはプロジェクトリポジトリの focus strategy 文書(papers/2026\_focus\_strategy.md)を参照のこと。

## HBR の主張のステータス — 階層マップ

以下の表は、本マスター版で行われる中心的（load-bearing）な各主張について、現時点で何が確立され、何が作業仮説として残されており、また完全な定量検証がどの独立論文によって担われる予定であるかを示している。読者および査読者には、本マスター版を単一の査読対象として評価するのではなく、各主張を対応する独立論文に照らして評価していただきたい。

主張	現状	担当論文
4D 埋め込みからのローレンツ運動学	数学的再解釈；群論的完全証明は今後の課題	理論ノート（準備中）
SPARC 回転曲線フィット	171 銀河で定量的に検証済み	Paper A（locked）
EHT コンパクト天体偏差	予言；ヌル測地線解析は今後	Paper B
Bullet-Cluster レンズ効果	定性的議論のみ；Paper C-mini outline（V32、第 VIII 部 §99.4）；完全な定量再構築は V32+	Paper C-mini
CMB / $H_0$ via $c/R_{\text{univ}}$	アンザツ；完全宇宙論フィットは今後	Paper D
Born 則の $\kappa$ -空間論証	条件付き測度一意性定理	Paper E
事象の地平面不在の主張	物質維持領域：付録 F（V31）で厳密証明済；exhausted 領域：未解決（Paper B / V32+）	Paper B

## Abstract

我々はハイパーブレン相対性理論 (Hyperbrane Relativity, HBR) を提案する：観測可能な 3 次元宇宙が、4 次元ユークリッドバルク内で収縮する 3-ブレンとして埋め込まれる幾何学的フレームワークである。この foundation から、観測される宇宙論的膨張は、非収縮バルク参照系に対する観測者の内在的尺度の収縮として創発し、ブレン上の質量エネルギーの経験的「噴水」は  $W^-$  内宇宙方向からの流入と同一視される。この単一の幾何学的 foundation から、我々は以下を導出する：(i) ブレン内対称性としてのローレンツ不変性、(ii) 重力のニュートン極限、(iii) 暗黒物質ハローなしで SPARC データに整合する銀河回転曲線、(iv) 物質維持領域 (matter-sustained regime) における horizonless コンパクト天体 (付録 F の Hopf 強最大値原理による厳密 PDE 証明；exhausted regime の因果構造拡張は未解決研究として残る)、(v)  $z$  依存収縮率によるハッブル緊張への有力な候補経路。

この提案は大胆であるが先例のないものではない。観測者フレーム収縮としての宇宙論的膨張の再解釈は、Wetterich の “A Universe Without Expansion” [89] および共形宇宙論アプローチと精神を共有する。HBR の特徴的な貢献は、この再解釈を粒子スケール現象 ( $W^-$  テンションとしての質量、物質維持としての噴水流入) に結びつける、明示的な 4 次元ユークリッド埋め込み機構である。

本フレームワークは、 $H_0(z)$ 、EHT shadow shapes、ringdown modes、および SPARC 残差構造に関する具体的な予測を通じて反証可能である。Cassini 境界との単一パラメータ PPN 整合性 ( $\beta = 1.0 \pm 10^{-4}$ ) は維持される。我々は、ブレン厚  $\Delta w$  の SI 決定および exhausted regime における no-horizon claim の厳密因果構造取り扱いを含む未解決問題を honest に認識する。物質維持領域は付録 F (V31) で厳密に確立された；exhausted regime (物質流入が事実上停止し、定理 2 の仮定 (H1) がもはや適用されない領域) の拡張は将来の研究へ deferred。

**キーワード：**ハイパーブレン相対性理論、4D ユークリッドバルク、ブレン宇宙論、収縮ブレン、噴水流入、修正重力、PPN パラメータ、銀河回転曲線、SPARC 銀河、暗黒物質代替、ハッブル緊張、horizonless コンパクト天体、EHT shadow、ringdown modes、創発的ローレンツ対称性、ブレン厚、1 スケール理論、領域横断的 falsifiability。

## コアノベルティ — 特徴的な統合的選択

本ページは、本版の Hyperbrane Relativity (HBR) を編成する特徴的な統合的選択を要約する。以下の項目は、**どの組み合わせの幾何学的アイデアがここで展開されているか、そして各項目が論文のどこで完全に扱われているか**を示す。各項目は、さらなる分析の中で見直される作業仮説である。

### CN1. ブレーン等速並進と次元ゲートを $E = mc^2$ の幾何学的読みとして 第 II 部・第 IV 部

3-ブレーンをバルクの  $-W$  軸方向へ宇宙論的速度  $v_{\text{brane}} \ll c$  で等速並進するものとしてモデル化する。この描像において、並進は  $W^-$  境界の次元ゲートを駆動する；ゲート上ではディリクレ型境界条件  $\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$  が課され、ブレーンへの流入は経験的不変量  $c$  に固定される（ノズルの変換比  $c/v_{\text{brane}} \gg 1$ 、エネルギー生成ではない）。 $c$  の値は測定から取り込まれ、本枠組み内で導出されるものではない。この境界条件のもとで幾何学的恒等式

$$|\mathbf{U}_{\text{inflow}}|^2 = c^2 \quad (\text{経験的ディリクレ条件からの運動学的恒等式；} c \text{ の不変性の導出ではない})$$

が成立する。静止エネルギーはこの幾何学的恒等式として読まれる： $E_{\text{rest}} = m |\mathbf{U}_{\text{inflow}}|^2 = mc^2$  (定理 5)。これは標準的なローレンツ因子からの導出を置き換えるものではなく、同じ恒等式に対する追加的な幾何学的読みを提供することで補完するものである。

### CN2. 物質の持続条件としての並進速度安定性 第 IV 部 (定理 6)

ゲートの速度変換比が  $c/v_{\text{brane}} \gg 1$  と大きいため、 $v_{\text{brane}}$  の小さな揺らぎが、我々が物質と関連付ける  $\Phi$ -井戸構造の擾乱として増幅される可能性がある。我々は作業条件として次を提唱する：

$$\delta v_{\text{brane}} \approx 0 \iff \text{物質に必要なブレーン内部構造が維持される。}$$

粒子間および宇宙時代を通じての  $mc^2$  の経験的普遍性は、現在の測定精度において本安定性が保たれていることと整合する；本条件は物理世界に関する定理ではなく、falsifiable な仮定として提示される。

### CN3. 経験的不変量 $c$ のブレーン内部読みとしての $E = mc^2$ 予算恒等式 第 IV 部 (注釈 B.4)

経験的不変量  $c$  (測定から取り込まれ HBR 内で導出されるものではない) はゲートにおけるディリクレ境界条件  $\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$  として課され、ブレーン内部では普遍的速度限界として現れる。束縛 ( $W$  軸テザリング) されたエネルギーに対しては、予算恒等式  $dw^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = c^2 d\lambda^2$  の一部が  $W$  方向に消費されるため  $|\mathbf{v}_{xyz}| < c$  となる。非束縛 ( $dw = 0$ ) のエネルギーに対しては、全予算がブレーン面に再配分される：

$$dw = 0 \implies dx^2 + dy^2 + dz^2 = c^2 d\lambda^2 \implies |\mathbf{v}_{xyz}| = c.$$

$E = mc^2$  はブレーン基準系内で運動学的恒等式として成立する。これは  $c$  の不変性の導出ではなく、経験的に与えられた境界条件からの構造的帰結である。

#### CN4. ブレーン並進が誘起する W 軸張力としての重力モデル

第 IV 部 (定理 4)

ここで展開するモデルでは、重力効果は時空曲率としてではなく、ブレーンの  $-W$  方向への等速並進によって生成されるスケール場  $\Phi$  における復元張力の帰結として読まれる。弱場極限  $\nabla^2\Phi = -4\pi G\rho$  は  $G = g_0/(4\pi Z_\Phi)$  ( $Z_\Phi$  は V28 までの  $T_0$  に相当；用語集参照) として回収される (定理 1・第 V 部)。これは  $G$  の候補となる微視的起源を提供するが、強重力場領域における HBR と一般相対性理論の予言の等価性については引き続き分析中の領域である。

#### CN5. 物質 – 流入要件の条件付き帰結としての物質維持領域における $\Phi = 0$ 停滞面なし 第 V 部 (定理 2、条件付き)・第 VII 部

HBR において、スケール場  $\Phi$  は物理過程を調節し、物質は連続的流入 ( $\Phi > 0$ ) を要するとモデル化される。この作業仮定の下では、 $\Phi = 0$  停滞面 (シュワルツシルト型挙動を示すもの) の形成は現在の有効  $\Phi$ -モデルでは不利である；厳密 PDE 証明は V30 に委ねる。我々はしたがって、観測的にブラックホールと同定される天体を枯渇噴水 (第 VII 部) として再解釈する：流入が実質的に枯渇した暗くコンパクトな天体であり、特異点も情報消失も持たない。これは falsifiable な予言である：EHT クラスの影観測、near-ISCO X 線タイミング (NICER, IXPE)、次世代重力波検出器によるリングダウン解析の改善が、今後数年で識別的試験を提供することが期待される。

#### CN6. SPARC 銀河サンプルへのスケールレンズフィット

第 VI 部・付録 C

HBR のスケールレンズ回転式

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_\infty^2 \tanh(r/r_g)$$

を 171 銀河 SPARC サンプルに対して完全 MCMC でフィットした。報告される結果：中央値  $\chi_\nu^2 = 1.31$ ； $\Delta\text{AIC}(\text{HBR} - \text{MOND}) = -147.3$  (HBR 優位 153/171 = 89%)； $\Delta\text{AIC}(\text{HBR} - \text{NFW}) = -4.3$  (HBR 優位 126/171 = 74%)。フィットは暗黒物質ハローを仮定せずに進められ、漸近速度  $V_\infty$  は W 軸幾何学から取り出される。情報量規準による比較はモデルパラメータ数と事前分布の選択に敏感であり、SPARC フィットの独立な再解析 (交差検証、代替尤度、最近の回転曲線データセットとの比較) は、我々が奨励する自然な次のステップである。

#### CN7. ハッブル定数の幾何学的アンザッツ

第 VIII 部

ここで展開する HBR 宇宙論において、

$$H_0 = \frac{c}{R_{\text{univ}}} \approx 70.9 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

はハッブル定数を経験的不変量  $c$  (ゲート境界条件で固定されるブレーン内部速度限界) と現在のスケール半径  $R_{\text{univ}}$  に関係づける。本式から得られる  $H_0$  の数値は、 $f(w)$  の経験的スケール長—すなわちブレーン収縮プロファイルが現在の宇宙論的時刻と交差する位置—によって設定されるものであって、パラメータフリーな第一原理予言ではない；この意味で、ここでの  $H_0$  は枠組みのパラメータフリー出力ではなく、ブレーン履歴の経験的スケールに合わせて較正された幾何学的アンザッツである。我々は、宇宙論的赤方偏移にわたる有効流入速度勾配  $c_{\text{eff}}(z)$  を介してハッブル緊張に取り組む経路を提案する。本アンザッツが確立されたとみなされるためには、CMB 音響スケールおよび宇宙論的距離梯子データとの完全な対決が必要である。

**CN8. 銀河軌道安定性および「暗黒物質」現象論の候補的起源としての W 軸張力 第 II 部・第 VI 部**

我々は、平坦な銀河回転曲線が、半径とともに増大する W 軸復元力の痕跡として読みうるという仮説を展開する。この力は接線速度プロファイルに有効な外向きプラトーを生み出す。漸近項  $V_{\infty}^2 \tanh(r/r_g)$  はスケールレンズ幾何学から従う。我々はこれを、MOND や標準的冷たい暗黒物質ハローモデルに対して優位ではなく、競合的な作業的解釈として扱う；暗黒物質関連現象論の総体（クラスター、レンズ効果、弾丸銀河団動力学、構造形成）にどの読みが最も整合的であるかという問いは未解決であり、さらなる研究の活発な路線である。

**CN9. 力学と測定を横断する候補的単一クロスオーバー・スケールとしてのブレン厚  $\Delta w$  第 I 部 (§20)、第 VII 部、付録 B**

V28–V29.1 サイクルで追加された最も特徴的な統合は、ただ一つの幾何学的スケール—ブレン厚  $\Delta w$ —を、強重力場の力法則クロスオーバー（近距離  $1/r^4$  特異点回避と遠距離  $1/r^3$  ニュートン補正）と、量子測定を支配する Observation–Contact Separation（コンパクト装置に対し  $L \sim \Delta w$  のとき contact 領域  $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$ 、observation 領域  $|\Delta\kappa|L \gg 1$ ）の両方を支配するものとして同定することである。両条件は同一の幾何学的言明—2つの HBR 物体の W 軸らせんスレッドが  $\Delta w$  未満の隔たりで重なり合うこと—の双対表現である。我々はしたがって HBR を候補的 **1 スケール理論**として提示する：一方の領域からの  $\Delta w$  の独立な観測決定は他方を制約する。本統合は V28–V29.1 統合の中心的な特徴的選択である。CN9 の予言的内容は、 $\Delta w$  を 2 レジームのいずれかから SI 単位で独立に決定することを条件とする；現時点の観測状況は前付の Status Table を参照されたい。

**CN10. OCS 直交性：物質レベルの regime 依存性 vs. 重力 regime 普遍性、HBR を 1 スケール 2 チャネル理論として特徴付ける 第 IV 部 (§81, 原理 81.1)**

OCS の contact / observation regime 分類は物質レベルの干渉チャネル（電磁・強・核）のみを支配し、 $H_{\mu\nu}$  を介した重力干渉は両 regime に共通で普遍的であり、W 軸巻数 (winding) の整合は不要である。CN9（第 I 部 §20）と組み合わせ、HBR は **1 スケール 2 チャネル理論**として特徴づけられる：単一幾何スケール  $\Delta w$  がクロスオーバーと OCS regime の双方を支配する一方、2つの結合チャネル（物質レベルは regime 依存、重力は regime 普遍）が  $\Delta w$  を両 regime に直交的に伝える。この直交性はブレン外側（ブレン上の物質）とブレン内側（W<sup>−</sup> 流入）の両構成で対称的に成立する。完全な記述・反証可能性テスト・CN9 baseline 連携は、第 IV 部 §81（原理 81.1）および §20 を参照されたい；物質レベル channel を融合 / 反発接触 / 観測サブレジームに refine する三分法については、CN12 (§CN12.) を参照。

**CN11. 悪魔の代弁者透明性：最も強い査読反論の明示的自己提示と誠実な反論 第 XXII 部**

V32 論文は方法論的コミットメントとして、明示的な悪魔の代弁者実践を採用する：HBR に対し我々が構築できた最も強い査読反論を内部の悪魔の代弁者の最も鋭い形で提示し、残存する未解決問題を糊塗しない誠実な反論を続ける。選定された 8 反論（V31 から繰り越された 5 反論、V32 で蔵人君レビューに応答して新たに起草された 3 反論）は、HBR のあらゆる主要主張領域を網羅する：宇宙論・ $f(w)$  ansatz・コンパクト天体再解釈・量子測定の射程、重力波マルチメッセンジャー制約（GW170817 速度等式）、銀河団スケールのダークマター代替（弾丸銀河団弱レ



ンズオフセット)、定理 2 の厳密スコープ (地平面なし主張に対する物質維持対枯渇レジーム)、および 1 つの方法論的懸念 (収縮の認識論的反証不能性)。各反論の後にも genuine な未解決問題が残る場合、それらは末尾のまとめ (第 XXII 部、§175) で隠蔽せず明示的に列挙される；同定された 8 つの未解決問題 ( $f(w)$  の第一原理導出、ビッグバン期絶対マッピング、宇宙論スケールでの厳密な OCS 拡張定理、stratum 間観測プロトコル、Stage IV 距離梯子解析、定理 2 枯渇レジームの永遠時間への拡張、弾丸銀河団銀河団スケール拡張、マルチメッセンジャー／分散試験プログラム拡張) は V33 以降に対する operative な反証子として扱われる。本方法論的透明性は、新しい理論的提案の典型的な防御的フレーミングを反転させ、文書内の同じ視点から枠組みの経験的コミットメントとその残存する未解決問題を等しく可視化することを意図している。

## CN12. OCS 三分法：融合－接触－観測、巻数整列による OCS 3 サブレジーム 第 I 部 (§20)、第 IV 部 (§81.2、§81.10、原理 81.2)

OCS の観察－接触分類 (CN10) は三分法に refine される：(i) 融合 (同 W-stratum 内で巻数一致、境界なし、量子状態 merger)、(ii) 反発接触 (同 W-stratum 内で巻数不一致、境界形成と反発的スレッド張力 — “触れる” の幾何学的シグネチャ)、(iii) 観測 (W 分離、ゼロモードアクセスのみ)。この三分法は CN10 の物質レベル結合チャンネルのみを refine する； $H_{\mu\nu}$  を介した重力結合は 3 サブレジーム全てで普遍に成立し、CN10 の普遍性主張を保存する。CN9 ( $\Delta w$  を普遍クロスオーバー・スケールとして) および CN10 (物質・重力結合の直交性) と組み合わせて、CN12 は HBR を 1 スケール・2 チャンネル・3 レジーム理論として特徴付ける。融合サブレジーム内では Pauli 排他原理は標準形式では適用不能となる；同種粒子識別不能性は幾何学的事実として現れ、統計力学の完全な導出は V33+ の未解決課題に委ねられる。CN12 は、同種粒子識別不能性 (Pauli・Bose-Einstein)、高密度プラズマの BBN 期融合率、枯渇噴水の内部コア状態 ( $\Phi = 0$  の HBR-true-BH 漸近真空とは区別される)、および量子測定 collapse の反発接触  $\leftrightarrow$  融合 transition としての幾何学的起源について、幾何学的読みを供給する。

---

引用：Yamamoto, Y. (2026). *Hyperbrane Relativity: Complete Master Edition V29.1*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20028176> (V29.2 公開時に DOI を更新；参考文献を参照。)

## 用語集：HBR 用語と標準物理学語彙の対応

本用語集は、HBR 固有の用語を標準物理学の語彙にマッピングし、コミュニティ評価を容易にすることを目的とする。以下の対応関係の完全な数学的基礎は、Bulk-Brane Projection (BBP) ノート (master/calculations/hyperfractal\_to\_brane\_transform\_v1.md) および本文書の関連 part に与えられている。

### 幾何学的アーキテクチャ

HBR 用語	標準物理学での対応	定義 / 関係
ハイパーブレン / 3-ブレン	余剰次元バルク中のブレン (弦理論 / M 理論との類比)	4D ユークリッドバルクの 3D 葉層スライス $\Sigma(t) = \{w = w_{\text{brane}}(t)\}$
バルク	高次元埋め込み多様体	座標 $(x, y, z, w)$ を持つ 4D ユークリッド空間 $\mathbb{R}^4$
次元ゲート ( $W^-$ 境界)	余剰次元におけるディリクレ境界条件	$\dot{X}^W _{\Sigma} = c$ がブレンでの流入速度を指定
ブレン等速並進	$-W$ 方向への葉層進化	$\partial_t w_{\text{brane}} = -c$ (「漂流 (drift)」ではない; HBR では拒否される語)
ファウンテン流入	余剰次元からの境界エネルギーフラックス	$ \mathbf{U}_{\text{inflow}} ^2 = c^2$ (運動学的恒等式)
$\Delta w$ 普遍 crossover (CN9)	全 crossover を支配する単一基本スケール	$r \lesssim \Delta w$ : $1/r^4$ ; $r \gg \Delta w$ : $1/r^3 + \text{ニュートン}$

### 場の変数 (BBP 枠組み)

HBR 用語	標準物理学での対応	定義 / 関係
ピッチ角 ( $\theta_{\text{pitch}}$ )	BBP における主場変数	スレッド方向と $W$ 軸のなす角; $\Phi$ は派生量で $\Phi_0 \sin \theta_{\text{pitch}}$
連続スペクトラム原理	運動学的制約 $ \Phi/\Phi_0  \leq 1$	$\Phi/\Phi_0 = \sin \theta_{\text{pitch}}$ が $\sin$ の値域で bounded
場の真空 ( $\Phi = \pm\Phi_0$ )	スカラー場の対称性破れた基底状態	Mexican-hat ポテンシャル極小、 $\theta_{\text{pitch}} = \pm\pi/2$
光子真空 ( $\Phi = 0$ )	物質非存在状態 (場の基底状態ではない)	ピッチ角 $\theta_{\text{pitch}} = 0$
$Z_{\Phi}$	スカラー場の運動項係数	V29 で $T_0$ から rename (南部-Goto ブレン張力との混同回避)

## 質量とエネルギー

HBR 用語	標準物理学での対応	定義 / 関係
係留されたエネルギー (tethered)	$\Phi$ の井戸を持ち時空を引きずる質量	$E = mc^2$ をゲート流入下の運動学的恒等式として
非係留エネルギー (untethered)	$\Phi$ の井戸を持たない質量 ゼロ放射	ブレーン方向のみで $c$ で伝播
W テンション	余剰次元のスレッド張力として同定される質量	$M = \tau_0 \int N_{\text{thread}}(r) d^3r$ (mass-as-W-tension 原理)
Exhausted Fountain	飽和した場の真空コア	$\theta_{\text{pitch}} = \pi/2$ pinning、それ以上の場の応答なし (Mexican-hat 飽和; 同等に BBP オイラー–ラグランジュ方程式の $\cos \theta = 0$ 自明分岐)

## 「ブラックホール」用語法 (V31 区別)

本マスター版では、「ブラックホール」を 2 つの異なる意味で使用しており、V31 監査 (Block A-V30-3) はこれを明示化する。完全なボックス定義は第 I 部 §9 にあり、以下は参照のための簡略複製である。

HBR 用語	標準物理学での対応	定義 / 関係
HBR 真のブラックホール	天体的対応物なし—恒星や銀河核の残骸ではなく、バルク幾何学そのものの構造的特徴	ブレーンを含まない 4D バルク領域。すなわち眠るポテンシャル。葉層 $\Sigma$ 不在、スレッド貫通なし; 通常物質が物体として存在できない。 ラベル <code>def:true_bh</code> 、第 I 部 §9
天体的ブラックホール	M87*, Sgr A*, LIGO/Virgo 合体残骸、質量基準で分類される X 線連星	HBR においてはブレーンに支持される <b>尽きた噴水</b> (Exhausted Fountain)、 $\theta_{\text{pitch}} = \pi/2$ pinning。事象の地平面なし、中心特異点なし、外部現象は現在の観測精度内で Schwarzschild と一致。識別可能性は内側影の輝度床 (Paper B) とリングダウン・スペクトラム (Paper C) に集中。ラベル <code>def:astrophysical_bh</code> 、第 I 部 §9。第 VII 部も参照。
「ブラックホール」 (引用符付き)	天体的指示対象のみ	本文書全体で、引用符付き「ブラックホール」は標準天文分類対象 ( <code>def:astrophysical_bh</code> ) を指し、HBR 真のバルク領域定義は <b>指さない</b> 。無修飾「ブラックホール」(引用符なし、HBR 限定なし) の使用は回避する。

## Bundle トポロジー (CN10 枠組み)

HBR 用語	標準物理学での対応	定義 / 関係
スレッド	4D ユークリッドバルク中の 1D 世界線	$X_i^A(\lambda)$ ; ピッチ角 $\theta_i$ と単位 W テンション $\tau_0$ を持つ
Bundle (CN10)	バルク中で近接するスレッドの集合	ブレーン射影レベルでの「粒子」; bundle 多重度 $N_{\text{thread}}$
ハイパーフラクタル bundle 構造	フラクタル次元 $D_f$ を持つ多階層スレッド bundle 階層	入れ子の各層で $N_\ell \sim N_0(\xi_0/\xi_\ell)^{D_f}$
物質化 locus	ブレーン-スレッド交差点	スレッド $X_i^A$ が $\Sigma$ を貫通する点 $\mathbf{r}_i^*$

### 表記規約。

- $c$  は観測によって経験的に固定される (ゲートのディリクレ境界条件  $\dot{X}^W|_\Sigma = c$  を通じて、ゲート上の流入率を固定する不変量)。HBR はその数値を導出しない。これはニュートン重力が  $G$  を経験的入力として取るのと同様。
- $E = mc^2$  は、経験的  $c$  とゲート境界条件の下での運動学的恒等式として提示される。質量-エネルギー等価性の新規導出ではない。
- ローレンツ不変性は創発的ブレーン対称性として扱う。基本公理ではない。
- 時間  $t$  は創発量:  $t \approx w/c$ 、ここで  $w$  はブレーンの W 軸位置。
- ブレーンの運動は「 $-W$  方向への等速並進」と記述する。「漂流 (drift)」という語は確率的運動を示唆するため HBR では拒否する。
- 「場の真空」( $\Phi = \pm\Phi_0$ ) と「光子真空」( $\Phi = 0$ ) は異なる状態である。V29 規約では明示的に区別される。
- 本マスター版では  $\beta$  はポストニュートン (PPN) パラメータを表す (標準的文献記号)。SR の速度比  $v/c$  は混同回避のため  $\beta_v \equiv \beta_v$  と表記する (V29.1 規約)。

「LOCKED」という用語について。本マスター版では LOCKED というラベルを、我々の内部 *canonical run* において確定され、外部査読を待つ間、再現性確保のために以後のバージョン間で不変として保持される量や sub-block を指すために使用している。これは内部バージョン管理上の装置であり、原稿の無関係な部分が改訂されたときに数値結果・計算パイプライン・図出力を同一に保つためのものである。それ自体が外部的な検証状態を保証するものではない。すべての「LOCKED」値 (V30 §1.5 のブレーン厚参照集合、Cassini-bound  $\beta$  解析 (Calc B-0.4)、Paper A SPARC の  $\chi_\nu^2$  と BTFR 傾き、Phase B-2 nicer\_\* QPO null-bound 結果を含む) は、査読または独立再現実験によって反証する証拠が得られた場合には改訂対象である。読者は「LOCKED」を「相互参照目的のため我々の内部 canonical run で安定」と解釈すべきであり、「外部精査を超えて確立された」と解釈すべきではない。

「蔵人君 (Kurando-kun) レビュー」について。 V32 のいくつかの sub-block (Devil’s Advocate Part の Objections 6–8、付録 G、K-B/K-C 系列の reply) は、内部ノートで蔵人君 (Kurando-kun) レビューと呼ぶ外部風レビュー系列を参照している。外部読者向けに曖昧さを避けるため明記する：これは Anthropic の Claude 言語モデルを用いて実施された AI 支援内部レビューであり、Devil’s Advocate 自己批判 (Devil’s Advocate Part を参照) を補完する hardening パスとして構造化されている。これは外部査読ではなく、外部査読として提示するものでもない。実質的な改訂判断・数学的内容・編集上の選択は、すべて著者単独の責任に属する。蔵人君レビューのノートはプロジェクトリポジトリ (master/docs/v31\_kurando\_review\_archive.md、master/docs/v32\_kurando\_review\_archive.md) に透明性のために保存されている。

**相互参照。** バルクとブレーン変数の正式な射影写像については、本文書の第 XII 部 (スレッド幾何学) および第 XV 部 (ラグランジアン) を参照。飽和、連続スペクトラム、Exhausted Fountain の Bulk–Brane Projection 枠組みでの統一的取り扱いについては、計算ノート calculations/hyperfractal\_to\_brane\_transform\_v1.md を参照のこと。

## Contents

本文書の位置づけ	1
HBR の主張のステータス	3
コアノベルティ	5
用語集 (Glossary)	9
<b>視点階層性の宣言：バルク視点とブレーン視点</b>	<b>13</b>
1 認識論的宣言	13
2 バルク視点 (Bulk perspective)	13
3 ブレーン視点 (Brane observer perspective)	13
4 2 視点の接続：中心的関係式	14
5 $SR \leftrightarrow GR$ 比喻：認識論的位置付け	15
6 本書における運用規則	15
<b>I 基盤の像</b>	<b>16</b>
7 基盤の宣言	16
8 既存の再解釈型宇宙論との関係	21
9 主張の範囲と限界	22
10 反証可能性と予測内容	23
11 数学的素描：OCS 観測 regime 下の一様ブレーン並進	24
11.1 具体的な $f(w)$ ansätze と二点ハッブルフィット	26
12 読み方の地図	31
<b>II 宇宙の建築</b>	<b>33</b>
13 序論：パラダイムシフト	33
13.1 時空から純粋空間へ	33
13.2 物理学への意味	33
13.3 歴史的発展：V13 から V29.1 へ	34

	13.4	V28–V29.1 統合の新要素	35
	13.5	本論文の構成	35
14		体積的ブレーン	36
	14.1	薄膜近似を超えて	36
	14.2	エネルギーと物質の生成	36
	14.3	界面としてのブレーン	36
15		W 軸：スケール次元	37
	15.1	物理的解釈	37
	15.2	W 軸計量	37
	15.3	観測的帰結	37
16		連続的エネルギー流入としての時間	37
	16.1	中心的洞察 (V25–V27 統合)	37
	16.2	重力的時間の遅れ	38
	16.3	「ブロック宇宙」の否定	38
	16.4	持続プロセスとしての物質	38
17		クロス構造	39
	17.1	宇宙の呼吸	39
	17.2	垂直方向の流れ：放射と解消	39
	17.3	水平方向の流れ：干渉と融合	39
18		バイコーン幾何学	39
	18.1	W 軸の二重構造	39
	18.2	$W^-$ ：量子源	40
	18.3	$W^+$ ：宇宙の広がり	40
	18.4	ゼロ点：我々の観測可能な宇宙	40
	18.5	観測可能な物理学との関連	41
19		第 II 部 (宇宙の建築) のまとめ	41
20		基本スケール：ブレーン厚 $\Delta w$ を普遍的クロスオーバー幾何として	41
<b>III 4次元空間渦力学</b>			<b>42</b>
21		らせん渦構造としての物質	42
	21.1	基本的な渦の公理	42
	21.2	幾何学から導かれる物理的性質	43
	21.3	らせん方程式	43
	21.4	なぜ直線ではなくらせんか？	43
22		重力は引力ではない：幾何学的遮蔽機構	43
	22.1	根本的な誤解	43
	22.2	遮蔽機構	44
	22.3	Le Sage の粒子押し出し理論との区別	44
	22.4	流れる川としての場	45
	22.5	従来の記事との関係	45
23		HBR の三つの力	46
	23.1	統一力法則	46
	23.2	力 1：ニュートン重力 (引力)	46
	23.3	力 2：渦斥力 (衝突回避)	46
	23.4	力 3：W 軸張力 (軌道安定性)	47
	23.5	結合力法則：明示形	48
	23.6	有効ポテンシャル	48

24	パラメータの導出	48
24.1	渦結合定数 $\kappa$	48
24.2	W 軸張力係数 $\alpha_w$	49
24.3	$\alpha_w$ の普遍性	50
25	スケール-渦等価原理	51
25.1	原理の記述	51
25.2	幾何学的導出	51
25.3	物理的直観：渦巻きのアナロジー	52
25.4	量子スピンとの関連	52
25.5	銀河回転との関連	52
25.6	ハイパーフラクタル構造	53
25.7	数学的要約	53
26	第 III 部（渦力学）のまとめ	53
<b>IV 4次元ユークリッド空間におけるテンソル運動学</b>		<b>54</b>
27	HBR のローレンツ枠組みの位置付け	55
28	場の係留とユークリッド時空パラダイム	55
28.1	係留されたエネルギーと係留されていないエネルギー	55
28.2	W 軸距離予算	56
29	4D ユークリッド回転行列	57
30	運動学的効果の導出	57
30.1	ユークリッド 4D における長さ（長さの収縮）	57
30.2	同時の相対性	58
30.3	時間の遅れ	58
30.4	静止エネルギー: $E_0 = mc^2$	59
30.5	等価原理と慣性	59
31	W 軸アンカー非対称性と時間の矢	59
32	ユークリッド空間における 4 元ベクトルテンソル	60
32.1	4 元運動量	60
33	まとめ：ファウンテンからの SR の完全導出	60
<b>V ラグランジュおよびハミルトン定式化</b>		<b>61</b>
34	動機：力の法則から作用原理へ	62
35	4 次元ユークリッド空間における一般化座標	62
35.1	配位空間	62
35.2	ブレーン束縛条件	62
36	HBR ラグランジアン	63
36.1	運動エネルギー	63
36.2	HBR ポテンシャルエネルギー	63
36.3	完全なラグランジアン	64
37	オイラー-ラグランジュ方程式と HBR 力の法則の復元	64
37.1	導出	64
37.2	合成運動方程式	65
38	ネーターの定理と保存則	65
38.1	時間並進不変性 $\rightarrow$ エネルギー保存	65
38.2	空間並進不変性 $\rightarrow$ 運動量保存	65



38.3	回転不変性 → 角運動量保存	65
38.4	対称性と保存則の要約	66
39	ハミルトン定式化	66
39.1	正準運動量	66
39.2	ルジャンドル変換によるハミルトニアン	66
39.3	ハミルトンの運動方程式	66
39.4	量子化への意義	67
40	場のラグランジアン密度	67
40.1	基本定数	67
40.2	HBR スカラー作用	67
40.3	各項の物理的起源	68
41	定理 1：ニュートン極限	68
42	定理 2：物質維持領域における $\Phi$ の正值性（条件付き）	69
43	HBR 内部予測としての PPN $\beta$	69
44	議論：確立された結果と未解決問題	70
44.1	確立された結果	70
44.2	未解決問題	70

## VI ハロー無しの銀河力学 71

45	スケールレンズ機構（レビュー）	71
45.1	Scale-Lens 第 I 部 から：幾何学的基礎	71
45.2	速度ノルム射影：完全な公式	71
46	W 軸張力の解釈	72
46.1	幾何学的起源としての張力	72
46.2	平坦な回転との関連	73
46.3	粒子の暗黒物質ハローは本フィットには要求されない	73
47	SPARC 検証（レビュー）	74
47.1	110 銀河のフィット	74
47.2	$\Delta\text{AIC}^{\text{NFW}} = +16.3$ で HBR を支持	74
47.3	ベジアン MCMC 検証（合成データ）	74
47.4	普遍的スケール加速度： $a_{\text{HBR}} \approx 6 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2$	76
48	バリオン Tully-Fisher 関係	76
48.1	W 軸スケーリングからの予測	76
49	径方向加速度関係	78
49.1	断面幾何学からの創発	78
49.2	MOND との比較	78
50	SPARC データベース全体での MCMC 検証	79
50.1	合成データから実データへ	79
50.2	データと方法	79
50.3	結果	80
51	定義と主要な結果（V26 フォーマリズム）	83
52	$\eta$ モデルテストと質量依存の破綻	84
52.1	W 軸低減の物理的動機	84
52.2	一様な W 軸漏出の決定的な棄却	84
52.3	質量依存の破綻と暗黒物質のパラドックス	85
53	ブレーン飽和と幾何学的チルト	86
53.1	ハイパーブレーンの飽和閾値	86



53.2	幾何学的射影効果（コサイン・チルト）	87
53.3	BTFR の傾斜の解決と未解決問題	89
<b>VII</b>	<b>特異点のないコンパクト天体</b>	<b>90</b>
54	序論	92
54.1	特異点問題	92
54.2	ジェットコリメーション問題	93
54.3	情報パラドックス	93
54.4	本論文の範囲と主張	93
55	基礎：HBR におけるファウンテン機構	94
55.1	4次元ユークリッド空間中のブレーン	94
55.2	有効時空計量	94
55.3	場の歪みと事象の地平面の非存在定理	95
55.4	ブレーン飽和	96
56	枯渇ファウンテン：天体的「ブラックホール」の再解釈	97
56.1	エネルギー供給の停止	97
56.2	EHT 観測との関連	98
56.3	銀河ライフサイクル	98
57	情報パラドックスの消滅	99
57.1	標準的なパラドックス	99
57.2	HBR の解決：前提の除去	100
57.3	情報はどこへ行くのか？	100
57.4	既存のアプローチとの比較	100
58	相対論的ジェット：W 軸溢流	101
58.1	ジェットの三つの未解決問題	101
58.2	放出メカニズム	101
58.3	ジェットパワーのスケーリング	102
58.4	統一的ジェット階層	103
59	統計的検証	103
59.1	データと方法	103
59.2	相関分析	104
59.3	偏相関：決定的テスト	105
59.4	感度分析	105
59.5	天体的「ブラックホール」分類のないジェット天体：構造的論証	105
60	議論	106
60.1	反証可能な予測	106
60.2	天体的「ブラックホール」同定バイアス	107
60.3	Fundamental Plane との関連	108
60.4	確立済み結果と未確認結果	108
60.5	限界	109
61	結論	110
<b>VIII</b>	<b>統一宇宙論</b>	<b>111</b>
62	ハッブル定数の導出（レビュー）	111
62.1	V15 から： $H_0 = c/R_{\text{universe}} \approx 70.9 \text{ km/s/Mpc}$	111
62.2	ハッブル張力の解決	112

62.3	第 I 部 $f(w)$ ansatz の宇宙論的拡張	112
63	BBN の HBR 再定式化	114
63.1	枠組み：BBN を高 $W$ ストラタムのバルク刻印として	114
63.2	HBR における中性子-陽子凍結	115
63.3	$^4\text{He}$ 予言： $Y_p^{\text{HBR}}$	116
63.4	重水素予言： $(D/H)^{\text{HBR}}$	116
63.5	$^3\text{He}$ と $^7\text{Li}$ ：HBR における status	117
63.6	ビッグバンの基礎的再解釈との互換性	118
64	幾何学的膨張としての暗黒エネルギー	119
64.1	バイコーン体積膨張	119
64.2	謎のエネルギーは不要	120
65	永遠生成モデル	121
65.1	ビッグバン特異点なし	121
65.2	$W$ 軸流による連続的創造	121
65.3	スパイラル宇宙論	121
66	JWST 観測	122
66.1	「早すぎる」銀河の説明	122
66.2	「不可能な」ブラックホールの解決	122
67	誕生エネルギーと時間の矢	122
67.1	時間の矢の問題	122
67.2	誕生エネルギーの定義	123
67.3	幾何学的エントロピー	123
67.4	第二法則の導出	123
67.5	時間の矢	123

## IX 多体系力学と安定化 123

68	三体問題：300 年の挑戦	124
68.1	歴史的背景	124
68.2	安定性のパラドックス	124
69	三体の病理の HBR による解決	124
69.1	特異点の回避：渦斥力	124
69.2	脱出の防止： $W$ 軸張力	125
69.3	カオスの低減：幾何学的正則化	126
70	数値シミュレーション	126
70.1	方法論	126
70.2	三つのモデルの比較	127
70.3	結果：軌道軌跡（エルゴード的混合）	128
70.4	結果：系半径の厳密な有界性	128
70.5	位相空間解析の結論	129
71	天体物理学的応用	130
71.1	三重星系	130
71.2	惑星系	130
71.3	密な恒星コア	130
72	理論的含意	130
72.1	試験された領域で三体軌道は正則化される	130
72.2	$N$ 体力学への含意	131
73	第 IX 部（多体力学）のまとめ	131

<b>X</b>	<b>量子基盤</b>	<b>131</b>
	第 X 部 (量子基盤) の概要	131
74	断面フレームワーク	132
74.1	「射影」ではなく「断面」である理由	132
74.2	$w = 0$ におけるブレーン断面	133
74.3	スライシングとしての観測	133
75	W 軸圧縮としてのエネルギー	133
75.1	根本的な疑問	133
75.2	幾何学的圧縮としてのエネルギー	133
75.3	W 軸の圧力	134
75.4	$E = mc^2$ との繋がり	134
75.5	圧縮飽和と硬さ	134
76	粒子と波の二重性	135
76.1	歴史的なパズル	135
76.2	螺旋断面効果	135
76.3	位置の測定: 固定断面	136
76.4	運動量の測定: 移動する断面	136
76.5	相補性の説明	137
76.6	二重スリット実験	137
76.7	観測問題	137
76.8	ド・ブロイ波長との関係	138
77	パウリの排他原理	138
77.1	フェルミ粒子の振る舞いの謎	138
77.2	トポロジカルな渦の排他	138
77.3	スピン相互作用の歯車モデル	139
77.4	数学的定式化	139
77.5	反対称波動関数との関係	140
77.6	バルクでのパウリ排他としての剛性	140
78	不確定性原理	141
78.1	根本的な限界	141
78.2	幾何学的起源: 螺旋のピッチと断面位置	141
78.3	W 軸幾何学からの数学的導出	142
78.4	断面測定の限界	143
79	量子スピン	143
79.1	固有の角運動量という謎	143
79.2	螺旋の巻き数としてのスピン	144
79.3	$720^\circ$ フェーズ復帰からのスピン $1/2$	144
79.4	なぜスピンは量子化されているのか	145
79.5	W 軸回転との関係	145
80	量子からマクロへの架け橋	146
80.1	現代物理学における根本的なギャップ	146
80.2	階層的な W 軸構造	146
80.3	量子から原子へ: 最初の架け橋	147
80.4	原子から分子へ: 化学結合	148
80.5	分子からマクロな固体へ: 究極の架け橋	148
80.6	なぜ私たちは固体に触れることができるのか: 提案された幾何学的機構	148
80.7	構造のスケールを越えた連続性	149

80.8	なぜ古典力学はマクロスケールで「機能する」のか	149
80.9	量子スピンから銀河の回転へ：完全な統一	150
80.10	中心的な問いに対する答え	150
80.11	要約：架け橋は完成した	151
81	OCS 直交性：物質レベル結合と重力結合	151
81.1	2 regime の描像 (review)	151
81.2	融合サブレジーム：巻数一致、反発なし	152
81.3	物質レベル結合チャンネル	153
81.4	重力結合チャンネル	153
81.5	直交性 statement (CN10)	153
81.6	ブレーン外側 / 内側に渡る対称性	154
81.7	反証可能性	155
81.8	CN12 反証可能性	155
81.9	CN9 との関係および 1 スケール 2 チャンネル構造	156
81.10	形式的三分法定理 (CN12 baseline)	157
第 X 部 (量子基盤) の結論		160

## XI 実験的予測と検証 161

82	反証可能性	161
82.1	HBR を反証するもの	161
82.2	反証可能性マトリクス	162
82.3	HBR と代替フレームワークの対比	163
83	観測的シグネチャー	163
83.1	宇宙機データ解析：ボイジャーとパイオニア異常	163
83.2	SPARC を超える銀河回転の系統学	164
83.3	W 深度構造からの CMB 異方性パターン	164
83.4	渦力学の重力波シグネチャー	164
84	実験室テスト	165
84.1	精密重力測定と W 勾配	165
84.2	カシミール効果と余剰次元結合	165
84.3	量子干渉と断面幾何学	165
85	将来のミッションとサーベイ	165
85.1	深宇宙ミッション：「ハイパーブレーン・エクスプローラー」	165
85.2	JWST 以降の高赤方偏移銀河サーベイ	165
85.3	精密位置天文学：ガイアとその先	166
86	量子スケール予測	166
86.1	スピン-重力結合	166
87	HBR 対時空の泡	166
87.1	根本的な区別	166
87.2	観測的状況	166

## XII HBR vs GR — 総括観測的対比 167

88	なぜ GR ではなく HBR か？ — 総括観測的対比	167
----	-----------------------------	-----

<b>XIII</b>	<b>拡張一般相対性理論アーキテクチャ — 作用原理、場の方程式、GR 極限</b>	<b>169</b>
89	拡張 GR の作用原理	169
89.1	3 ピース分解	169
89.2	$c$ の役割：経験的 Dirichlet 条件、導出されない	170
89.3	Lovelock 型作用選択との比較	170
90	修正アインシュタイン方程式	171
90.1	変分と場の方程式	171
90.2	$H_{\mu\nu}$ の明示形	171
90.3	$H_{\mu\nu}$ の OCS regime 横断普遍性 (CN10)	171
90.4	GR 物質結合の回復	172
91	ビアンキ型保存則と $W$ 軸エネルギー流入	172
91.1	修正された縮約ビアンキ恒等式	172
91.2	静的構成でのブレーン固有保存	172
91.3	宇宙論的流入と $W$ 軸源	172
91.4	ブレーンワールド・シナリオとの比較	173
92	GR 極限：3 つの独立した規制	173
92.1	3 つの規制の表明	173
92.2	規制 1： $\beta \rightarrow 0$ (結合)	173
92.3	規制 2： $f(w) \rightarrow \text{const.}$ (プロファイル)	174
92.4	規制 3：OCS contact regime $\rightarrow$ ニュートン極限 (定理 1)	174
92.5	3 つの直交極限	174
93	宇宙論的還元：HBR フリードマン類似	174
93.1	還元戦略	174
93.2	ブレーン上での FLRW 射影	175
93.3	フリードマン拘束と $H_{\mu\nu}$ 射影	175
93.4	$f(w)$ アンザツとの統合	175
93.5	BBN-stratum 読みと高 $W$ regime	176
93.6	CN9 と CN10 横断の普遍性	176
94	修正重力提案との比較	176
94.1	拡張 GR 分類	176
94.2	比較表	176
94.3	重要な区別点	177
94.4	Vortex $C/r^2$ の sub-mm 重力・原子物理制約 (V32 K-C4)	178
95	重力波伝播	179
95.1	線形化された修正アインシュタイン方程式	179
95.2	$B$ 項からの 2PN 位相残差	179
95.3	観測束縛との比較と falsifiability	179
95.4	リングダウン・スペクトルと内部影との接続	179
95.5	$\beta H_{\mu\nu}$ の分散非修正の証明と GW170817 multi-messenger 互換性	180
96	包含の限界：拡張 GR を超える存在論的拡張	181
96.1	場の方程式が捉えるもの、捉えないもの	181
96.2	コミットメント 1：ブレーン無しバルク中の眠れる潜在性	182
96.3	コミットメント 2：ブラックホール形成無し	182
96.4	コミットメント 3：scale-lens 射影	182
96.5	コミットメント 4：OCS 定理と CN10 直交性	182
96.6	結語：存在論的コミットメントを伴う拡張 GR としての HBR	183

<b>XIV</b>	<b>議論と含意</b>	<b>183</b>
97	代替理論との比較	184
97.1	HBR 対暗黒物質 ( $\Lambda$ CDM)	184
97.2	HBR 対修正重力 (MOND/TeVeS)	185
97.3	HBR 対余剰次元 (カルツァ-クライン、弦理論)	185
97.4	HBR の独自の位置づけ	186
98	哲学的含意	186
98.1	現実の本質：すべての断面は実在する	186
98.2	物理学の統一：一つの幾何学、全スケール	186
98.3	観測の役割：創造ではなく限定	186
98.4	時間、変化、生成	187
99	未解決問題と課題	187
99.1	相対論的定式化	187
99.2	ブレーン上の場の量子論	187
99.3	銀河団力学	187
99.4	バレット団：HBR の現状と Paper C-mini outline	187
99.5	原始核合成 (BBN)	189
99.6	重力波伝播	189
100	将来の方向性	190
100.1	数学的厳密性と形式化	190
100.2	計算宇宙論	190
100.3	実験・観測プログラム	190
101	他理論からの主要識別要素	191
102	哲学的覚書	191
<b>XV</b>	<b>結論</b>	<b>191</b>
103	主要結果の要約	191
103.1	三つの力の統一	191
103.2	多体系の安定性達成	192
103.3	量子基盤の幾何学化	192
103.4	暗黒物質の解消	192
103.5	宇宙論の統一	193
104	HBR パラダイム	193
104.1	核心原理	193
104.2	予測力	193
104.3	前進への道	194
105	結びの言葉	195
105.1	パラダイムシフト	195
105.2	宇宙は暗黒物質を必要としない	195
105.3	カオスからコスモスへ	195
105.4	宇宙の呼吸	196
105.5	多様性の中の統一	196
105.6	最後に	196

<b>XVI</b>	<b>現行コライダーデータにおける実験的シグネチャ</b>	<b>197</b>
106	現行コライダーデータにおける実験的シグネチャ	197
106.1	異常 1: $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ 崩壊における角度分布の張力	197
106.2	異常 2: バリオン崩壊における CP 対称性の破れ	198
106.3	異常 3: ミューオン磁気モーメント	199
106.4	異常 4: 4.8 TeV における ATLAS 異常検出	201
106.5	統一的幾何学起源	201
106.6	コライダーデータからの強重力場制約	202
<b>XVII</b>	<b>4 次元純粋空間における物理学の幾何学的基礎</b>	<b>203</b>
107	概要	203
<b>XVIII</b>	<b>スレッド幾何学と W 軸物理学</b>	<b>203</b>
<b>3 つのパラメータから 1 つへ</b>		<b>205</b>
108	はじめに	205
108.1	パラメータの問題	205
108.2	結果の要約	205
108.3	本パート (スレッド幾何学) の構成	206
109	4D スレッド幾何学からの V18 ポテンシャル	206
109.1	体積ブレーン	206
109.2	量子化されたらせんモード	206
109.3	4D におけるスレッド-スレッド相互作用としての重力	206
109.4	らせんモード構造からの補正	207
109.5	数値評価	208
110	$B_{\text{eff}} = B$ の統一	208
110.1	仮説	208
110.2	検証テスト	209
110.3	幾何学的・位相的・飽和成分	209
<b>第一原理からの渦結合</b>		<b>210</b>
111	$\kappa$ の導出	210
111.1	V16 の $\kappa$ の問題点	210
111.2	4D におけるらせん渦フィラメント	210
111.3	4D における相互インダクタンス	210
111.4	遠方場極限と力の法則	210
111.5	数値的検証	211
112	らせんモード理論からの新しい物理学	211
112.1	力法則のクロスオーバー (CN9 読み; V28 導入・V29.1 改訂)	211
112.2	モード依存の結合定数	213
112.3	角度干渉からのスピン統計	213

<b>派生量としての W 軸張力</b>	<b>213</b>
113 $\alpha$ は独立したパラメータではない	213
113.1 V16 の張力	213
113.2 4D 起源	213
113.3 定理としてのスケール-渦等価性	214
113.4 なぜ V16 の定数 $\alpha$ は機能したのか	214
<b>統合と予測</b>	<b>215</b>
114 完全な 1 パラメータ理論	215
114.1 パラメータ削減の歴史	215
114.2 導出チェーン	215
114.3 比較表	215
115 新しい予測	216
115.1 $r \sim \Delta w$ における力法則のクロスオーバー	216
115.2 モード依存の素粒子物理学	216
115.3 バリオン・タリー・フィッシャー関係 (ヒューリスティック)	216
115.4 スケール-渦等価性：原理から導出された結果へ	216
116 議論	216
116.1 本研究の範囲	216
116.2 $\Delta w$ は何を表すか	217
116.3 他の枠組みとの関係	217
116.4 未解決の問題	217
117 第 A 部の要約	217
<b>ワープスレッド描像</b>	<b>218</b>
118 コア原理：垂直の束縛と水平の自由度	218
118.1 4D 純粋空間におけるエネルギーの二重性	218
118.2 十字構造	218
118.3 V20 の統一ポテンシャルとの関係	219
119 ワープスレッド：垂直軸	219
119.1 定義	219
119.2 W 軸エンゲージメントの 4 つの状態	219
119.3 ワープスレッドが説明するもの	220
120 重力の分解	220
120.1 「重力」の問題点	220
120.2 垂直効果：W 軸張力	221
120.3 水平効果：場の歪み	221
120.4 なぜ両者が同じポテンシャルを共有するのか	221
121 光：水平に自由なエネルギー	222
121.1 存在論的定義	222
121.2 定義からの帰結	222
122 W 軸幾何学からの慣性	223
122.1 再構成コスト	223
122.2 等価原理の幾何学的解釈	223
123 質量生成の臨界条件	223
123.1 スレッドはいつ安定化するのか	223



	123.2	粒子の質量スペクトルに向けて	224
124		深遠な W 軸の井戸としての天体的「ブラックホール」	224
	124.1	再解釈	224
	124.2	古典的病理の解決	224
125		拡張された予測	225
126		議論	225
	126.1	V20.2 が達成するもの	225
	126.2	既存理論との関係	226
	126.3	未解決の問題	226
127		結論	226
128		重なり積分の計算	227
129		相互インダクタンスの導出	228
130		W 軸振動の導出	228

## **XIX 厳密な数学的枠組み 228**

### **中心的主張と定義 230**

131		範囲と目的	230
	131.1	本論文が確立すること	230
	131.2	本論文が前提とすること	230
132		定義	230
133		中心定理	231

### **重力プロセスレート：空間的干渉 232**

134		質量エネルギーによる場のパターンの変化	232
	134.1	物理的描像	232
	134.2	場の歪み係数	233
135		V20.3: 4D スレッド幾何学からのニュートン定数	233
	135.1	4D スレッド相互作用エネルギー	233
	135.2	ニュートン定数	233
	135.3	張力 - 干渉の分解	234
	135.4	らせん補正：水星の歳差運動	234

### **運動学的プロセスレート：軌道の幾何学 234**

136		セットアップ：4D ユークリッド空間における曲線	234
	136.1	存在論的前提	234
	136.2	軌道のパラメータ化	235
137		傾き角	235
138		軌道幾何学からのプロセスレート	235
	138.1	鍵となる物理的原理	235
	138.2	公理 138.1 の正当化	236
	138.3	定理 133.1 の証明	237
	138.4	仮定されたものとされなかったもの	237
139		弧長のパラメータ化について	237
	139.1	懸念	237

139.2	等価性	238
139.3	何が異なるか：公理の位置	238
139.4	本論文が主張することと主張しないこと	238
140	$c$ の出現	239
140.1	命題 133.5 の証明	239
140.2	なぜ光が境界を飽和（サチュレート）するのか	239
<b>統合と実験的検証</b>		<b>239</b>
141	統一方程式の証明	239
141.1	2つの効果の独立性	239
141.2	定理 133.2 の証明	240
142	一般相対性理論との対応	240
142.1	系 133.3 の証明	240
142.2	系 133.4 の証明	240
143	定量的検証	241
143.1	パウンド・レブカ実験 (1959)	241
143.2	ハフェル・キーティング実験 (1971)	241
143.3	GPS の運用補正	241
144	強場予測：事象の地平面なし	241
144.1	GR の予測	242
144.2	HBR の予測	242
144.3	定量的推定	242
<b>議論</b>		<b>243</b>
145	確立された結果 vs 未解決の結果	243
146	GR との関係	243
147	本研究の限界	243
<b>結論</b>		<b>244</b>
148	結果の要約	244
149	V21 が解決したもの	245
150	V22 が扱うべき課題	245
151	バージョン履歴	246
<b>XX 空間計量と強場観測量</b>		<b>246</b>
152	ミッシングピース：ユークリッド埋め込みからの空間計量	246
152.1	4D ユークリッド変形	247
153	$g_{rr} = 1/\Phi^2(r)$ の導出	247
154	ヌル測地線構造とシャピロ遅延	248
155	重力波の整合性と B パラメータ	248
156	強場領域での発見のまとめ	249

<b>XXI</b>	<b>ブラックホール連星合体の幾何学的再解釈</b>	<b>249</b>
157	導入と本章の位置付け	249
157.1	LIGO-Virgo-KAGRA による連星合体観測の到達点	249
157.2	標準 GR 解釈が残す問い	250
157.3	本章の核心主張	250
158	HBR 基本枠組みの要約	250
158.1	ファウンテン機構と 4 流量レジーム	251
158.2	計量と $\kappa K^2$ ブレーン曲げ剛性	251
159	枯渇状態における剛性喪失	251
159.1	活動天体における $\kappa K^2$ 反発の復習	251
159.2	枯渇ファウンテンの定義	251
159.3	枯渇対での反発消失：主命題	252
160	還元フロー同調機構	252
160.1	単体の還元フロー場	252
160.2	2 体重ね合わせと同調補正	253
160.3	同調引力	253
160.4	臨界半径 $r_{\text{sync}}$	253
161	GW150914 への適用	254
162	$W^+$ 方向散逸とエネルギー収支	254
163	LVK カタログとの整合性および予測	255
163.1	LVK カタログとの対応	255
163.2	Fermi GBM トランジェントとブレーン反動電磁放射	255
163.3	HBR と GR の観測的対比	256
163.4	検証可能な予測 (P1–P5)	256
164	限界と未解決問題	257
165	小括	257
166	補遺：有効ポテンシャルの数値比較	257
<b>XXII</b>	<b>悪魔の代弁者 (Devil's Advocate)</b>	<b>258</b>
167	反論 1：収縮は観測不可能である (認識論的反論)	259
168	反論 2： $f(w)$ は宇宙論全体を持ち込む単一関数である	259
169	反論 3：EHT 影の整合性はヌル結果であり、証拠ではない	261
170	反論 4：ビッグバン再解釈は確立物理を捨てすぎる	261
171	反論 5：OCS 定理の根拠は宇宙論スケールで循環論である	262
172	反論 6：GW170817 マルチメッセンジャーの速度等式は微調整を要求する	263
173	反論 7：弾丸銀河団は粒子的ダークマターを要求する	264
174	反論 8：定理 2 は枯渇レジームで破綻し、地平面なし主張を切り崩す	265
175	まとめ：これらの反論は HBR を反証しない理由、および genuine な未解決問題	265
A	$\kappa$ 空間上の測度一意性による Born 則の構造的起源	267
A.1	導入と射程	267
A.2	$\kappa$ 空間とバルク内積	268
A.3	確率測度に対する幾何学的要請	268
A.4	測度の一意性と Born 則	269
A.5	結論	270
B	調和解析による観測 – 接触分離 (OCS) の厳密定式化	270
B.1	導入	270

	B.2	相互作用構造と重なり関数 . . . . .	271
	B.3	関数空間とコンパクト台 . . . . .	271
	B.4	定性的抑制：リーマン・ルベークの補題 . . . . .	272
	B.5	定量的主要レート：sinc 形 . . . . .	272
	B.6	物理的レジームの結論 . . . . .	272
C		SPARC フィットと飽和則の同値性 . . . . .	273
D		定理 2 ( $\Phi$ の正值性) の Hopf 強最大値原理による厳密 PDE 証明 . . . .	274
	D.1	範囲・状態・本付録が証明すること . . . . .	274
	D.2	設定：領域・方程式・楕円型クラス . . . . .	274
	D.3	仮定 . . . . .	275
	D.4	Hopf 強最大値原理の適用 . . . . .	276
	D.5	結論：厳密版定理 2 . . . . .	277
	D.6	包含限界と将来課題 . . . . .	278
E		定理 2 の枯渇レジーム拡張 . . . . .	279
	E.1	設定：枯渇レジームと本付録が証明する内容 . . . . .	279
	E.2	修正された仮定 (H1')–(H4') . . . . .	280
	E.3	部分結果: 有限時間区間における $\Phi > 0$ . . . . .	281
	E.4	系: 枯渇レジームにおける有限時間地平平面なし . . . . .	282
	E.5	V32+ 課題と Paper B Phase B-2 への接続 . . . . .	282
	E.6	Devil's Advocate Objection 8 reply skeleton . . . . .	283

# 視点階層性の宣言：バルク視点とブレン視点

## 1 認識論的宣言

本節は HBR（ハイパーブレン相対性理論）の数学的内容ではなく、理論を読み解く**視点の階層性**を明示する。HBR は 4 次元ユークリッド空間  $\mathbb{E}^4$  という外部構造（バルク）と、その中に埋め込まれた 3 次元ブレン  $B$  上の局所観測者（我々）という 2 つの視点を同時に扱う。いずれの視点も物理的に実在するが、それぞれで記述される「時間」「運動」「エネルギー流れ」の意味が異なる。

特殊相対論（SR）と一般相対論（GR）の関係になぞらえて言えば、バルク視点は大局的・構造的（GR 的）、ブレン視点は局所的・観測者固定（SR 的）である。本書のすべての式は、**どちらの視点で書かれているか**を明示することで初めて正しく解釈される。本パートはその規約を宣言する。

注 1.1 (本パートの位置付け). 本パートは後続の part1 以降で展開される数学的構造（ファウンテン、 $\kappa K^2$  剛性、プロセスレート比  $\mathcal{R}$ 、計量  $g_{\mu\nu}$  など）を**解釈する枠組み**を与える。したがって本パートでは新規の物理量を導入せず、既存概念に**どの視点から書かれているか**というラベルを与えるに留める。

## 2 バルク視点 (Bulk perspective)

**立ち位置**： $\mathbb{E}^4$  の 4 次元外部からの俯瞰（数学的観察者）。物理的には、ブレン  $B$  自体を 1 つの超曲面として眺める大局的視点である。

**記述対象**：ブレン  $B$  自体の運動・形状・ $W$  軸方向への変位。ブレン内部の素過程（原子遷移、観測者の時計など）は二次的。

**見え方**：ブレンは  $W$  方向へ進行する超曲面として見える。 $W$  軸は時間軸ではなく空間次元の一つであり、ブレンはこの  $W$  方向を掃引しながら存在し続ける。

**時間パラメータ**：バルク弧長パラメータ  $w$ （またはバルク絶対時間  $\tau$ ）。これは  $W$  軸に沿ったブレンの進行度であり、観測者の時計とは独立。

**主要な物理量**：

- ブレン固有値  $\kappa K^2$ （曲げ剛性、ブレン法曲率の二乗項）
- ファウンテン流量  $\mathcal{F}$ （ $W$  軸方向への幾何学的フラックス）
- 還元フロー場  $\vec{v}_{w+}$ （ $W+$  方向への幾何学的流れベクトル場）

**参照**：4D バルクの実在性は part4 (§ 量子基盤) で、基礎枠組みは phase2 sec2 (*framework*) で展開される。

## 3 ブレン視点 (Brane observer perspective)

**立ち位置**：ブレン  $B$  内部の局所観測者（我々、および物理実験装置）。ブレンが  $\mathbb{E}^4$  のどこをどう動いているかは直接観測できない。

**記述対象**：ブレン内部の物理過程（原子遷移の時刻、振動数、重力加速度、光速測定、など）。

見え方：ブレーンは静止した3次元宇宙として見え、 $W+$  方向から「エネルギーが流入」してくるように知覚される。時間は内部的に経過し、それが日常的な「時刻」となる。

時間パラメータ：ブレーン固有時  $t$ 。これは創発的な量であり、バルク進行  $w$  から後述の関係式によって導出される。

主要な物理量：

- 観測される計量  $g_{\mu\nu}$
- 光速  $c$  (ブレーン内で測定される伝播速度)
- 重力加速度  $g_{\text{eff}}$
- プロセスレート比  $\mathcal{R}$  (part13 で定式化)

参照：観測者制約原理は part8 (§ 議論と含意) で、ブレーン視点の数学的枠組みは part13 (§ 厳密な数学的枠組み) で、プロセスレート比  $\mathcal{R}$  は part13 で展開される。

## 4 2視点の接続：中心的关系式

両視点を接続する最も核心的な関係式は以下である：

$$\boxed{dt = \frac{dw}{v_w}} \quad \text{あるいは同等に} \quad dw = v_w dt \quad (1)$$

ここで  $t$  はブレーン固有時 (ブレーン視点)、 $w$  はバルク弧長 (バルク視点)、 $v_w$  は  $W+$  方向への還元フロー速度である。一般には

$$v_w = c \cos \theta \quad (2)$$

と書け、 $\theta$  はブレーン法線と  $W$  軸のなす傾き角である (V19 以降の定式化)。

関係式 (1) は HBR における**時間の幾何学的創発**の核心式であり、「時間はバルク進行を観測者が自分の単位系で書き直した量である」という HBR の根本主張を最短の形で表現している。

注 4.1 (part13 のプロセスレート比  $\mathcal{R}$  との整合性). part13 では、弱場・低傾きの観測者間で

$$d\tau_{\text{obs}} = \mathcal{R} dt, \quad \mathcal{R}(r, \theta) = \Phi(r) \cos \theta$$

という関係 (プロセスレート比) が定式化される。これは式 (1) で接続された2視点のうち、**ブレーン視点内部**で異なる位置・傾きにある観測者同士の時計を比較した結果であり、式 (1) と論理的に整合する。具体的には、 $\Phi(r)$  が場の歪み (空間的干渉)、 $\cos \theta$  が傾きを通じた  $W$  軸射影 (式 (2) と同じ幾何因子) に対応する。

## 視点对比表

Table 1: バルク視点とブレーン視点の対比

観点	バルク視点	ブレーン視点	接続
立ち位置	$\mathbb{E}^4$ 外部	$\mathcal{B}$ 内部観測者	—
時間	弧長 $w$ (または $\tau$ )	固有時 $t$	$dt = dw/v_w$
ブレーン状態	W 方向へ運動する超曲面	静止した宇宙	座標変換
エネルギー	W 軸上の幾何学的流れ	W+ から流入	同一現象の 2 記述
対応する相対論	GR 的 (大局構造)	SR 的 (局所観測)	—
現象例	ブレーン全体の生成進行	原子遷移の時刻	プロセスレート比 $\mathcal{R}$

## 5 SR $\leftrightarrow$ GR 比喩：認識論的位置付け

SR (特殊相対論) は慣性系の局所観測者が用いる理論であり、GR (一般相対論) はその上に背景幾何の動的性質を加えた大局的理論である。HBR においても同様の役割分担が成立する：

- **ブレーン視点**は我々が日常的に観測する局所物理 (SR に対応)。観測者はブレーン内部に束縛されており、その内部で時間経過・運動・計量を測定する。
- **バルク視点**は宇宙の大局的構造 (GR に対応、ただし背景は  $\mathbb{E}^4$  ユークリッド)。ブレーン自体がどのように  $\mathbb{E}^4$  内を運動し、どのように幾何学的エネルギーフラックスを担うかを記述する。

ただし重要な注意点として、HBR におけるこの比喩は形式的な対応関係であって、GR そのものの拡張ではない。HBR のバルクは  $\mathbb{E}^4$  (ユークリッド・正定値計量) であり、GR の背景 (ローレンツ計量・擬リーマン多様体) とは符号が異なる。ローレンツ符号はブレーン視点に創発するというのが HBR の立場である (詳細は part13、part14)。

どちらの視点で式を書いているかを常に明示することが、HBR の式を正しく解釈する鍵である。本書の読者は、特に理論の記号のみを抜き出して外部の枠組み (GR、場の量子論等) と比較する際、式がどちらの視点で書かれているかを最優先で確認することが推奨される。

## 6 本書における運用規則

本書では特に断らない限り、以下の慣習を採用する：

1. 時間微分  $d/dt$  はブレーン固有時での微分 (ブレーン視点)。
2. W 軸微分  $d/dw$  はバルク弧長での微分 (バルク視点)。
3. 「観測者」は特に断らない限りブレーン観測者を指す。バルク視点に立つ場合は明示的に「バルク観測者」「 $\mathbb{E}^4$  外部からの俯瞰」と記述する。

4. 「進行」「運動」という語は文脈により視点が異なる：ブレン自体の  $W$  軸進行はバルク視点、ブレン内部での粒子運動はブレン視点。曖昧な箇所では該当節で明示する。
5. 用語の統一：「バルク」( $\mathbb{E}^4$  外部構造)、「ブレン」(3次元超曲面  $B$ ) という表記を固定する。「ブレイン」「バルク空間」「上位次元」等の揺れは本書では用いない（ただし直接引用・比喻表現はこの限りでない）。

これらの慣習は後続の part1～part17 および phase2 の全体で適用される。個別章の冒頭では、特殊な視点（例：part4 のバルク実在性の議論、part8 の観測者制約原理、part13 のプロセスレート比）ごとに本パートへの参照を置き、読者が混乱しないよう配慮する。

## Part I

# 基盤の像

## 7 基盤の宣言

我々は、ハイパーブレン相対性理論（HBR）の幾何学的基盤として、以下の像を提案する：

**我々の観測可能な宇宙は、4次元ユークリッド・バルク  $B = \mathbb{R}^4$  に埋め込まれた3次元ブレン  $\Sigma$  である。ブレンはその  $W$  軸埋め込み方向に沿って収縮している。ブレン上の物質を維持するために必要なエネルギーは、 $W^-$  方向（“内宇宙”の噴水）から流入する。**

この単一の幾何学的言明が、本論文における他のすべての主張の起源となる。ローレンツ不変性、重力のニュートン極限、銀河回転曲線、水平面なしコンパクト天体、そして観測される宇宙膨張は、すべてこの基盤から派生する帰結である。

機構は単純である：収縮する基準系の内側からは、外側のバルク構造は遠ざかって見える。標準宇宙論が「宇宙は膨張している」と解釈するものは、本提案では「観測者のブレン内的な物差しが、収縮していないバルク参照に対して縮んでいる」ということになる。重要なのは、ブレンの  $-W$  方向への並進そのものは**一様かつ低速**であって、加速していない点である。観測される宇宙膨張の加速（ダークエネルギー現象論）はその代わりに、**スケールレンズ**効果として生じる：バルクの遠方領域は本来的により大きな  $W$  スケールで刻印されており、観測者の収縮はこのスケール勾配を通してそれらを読み取る。バルクの  $W$  階層化の深部を見るほど、スケールレンズは見かけの後退をより強く拡大する。宇宙定数も新たな基本場も不要である：幾何学的基盤と、バルク刻印の動径スケール構造とが共に、加速ブレン運動に訴えることなくダークエネルギー現象論を生成する。

基盤は  $W$  について非対称である：ブレンは  $-W$ （収縮方向）に沿って並進し、ブレン-バルク界面（“ゲート”）を通じて  $W^-$  内宇宙からエネルギーを汲み取る。 $W^+$  外宇宙は、観測者が後退するように見る宇宙論的に遠方の構造に対応する。両方向は“類似した遠方スケール構造”を示す（ハイパーフラクタル性質、第 III 部で詳述）が、その動的役割は異なる： $W^-$  は維持源、 $W^+$  は見かけの後退方向である。

**原理 7.1** (HBR の基盤的像). 観測可能な宇宙は、 $\mathbb{R}^4$  に埋め込まれた収縮する 3-ブレン  $\Sigma$  である。収縮方向は  $-W$  である。 $\Sigma$  上の物質を支えるエネルギーは、ブレン-バルク・ゲートを通じて  $W^-$  “内宇宙”から流入する。ゲートにおけるディリクレ境界条件



$\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$  がゲート流入率を経験的不変量  $c$  に固定する； $c$  は観測から取り込まれ、HBR 内で導出されるものではない。これがブレーン上の普遍的な運動学的スケールを設定する。ローレンツ不変性は、ブレーン内的な運動学の創発的対称性であり、原理的な公理ではない。

## 次元軸としての $W$ 軸 — スケールの軸

$W$  軸に関する四つの幾何学的事実は、本文書の残りを読む上で本質的である。これらは追加の公理ではなく、いずれもバルクを  $\Sigma$  が埋め込まれる平坦な 4 次元ユークリッド空間  $\mathbb{R}^4$  と宣言したことから従う。形式的な宣言だけを読むと教育的内容を過小評価しやすいため、ここで明示的に列挙する。

1.  **$W$  はスケールの次元軸である。** 第 4 座標  $W$  は、追加の“時間的”座標でも、コンパクト化された余剰次元でも、Kaluza-Klein 内部指数でもない。それは、ブレーン自体の物理的スケールが記録される幾何学的軸である。 $+W$  方向の運動は  $\Sigma$  のスケール膨張に対応し、 $-W$  方向の運動はスケール収縮に対応する。HBR は  $-W$  方向の正味の並進を仮定する。
2.  **$W$  は  $X, Y, Z$  に直交する。** バルクは添え字  $A, B \in \{1, 2, 3, W\}$  を持つ平坦なユークリッド計量  $\delta_{AB}$  を担う。 $W$  方向はブレーンに接するあらゆる方向に幾何学的に垂直である。 $W$  から  $\Sigma$  への射影は存在せず、逆にバルク内の純粋な  $W$  並進には  $(X, Y, Z)$  成分が存在しない。この直交性こそが、ピタゴラス的速度分解  $V_{\text{obs}}^2 = V_{\text{bar}}^2 + V_W^2$  を近似ではなく厳密にする。
3.  **$W$  は両方向に無限に延びる。** バルク  $\mathbb{R}^4$  は  $W$  に沿って特権的な原点も境界も持たない。 $W^+$  および  $W^-$  という呼称は、対立する半軸を動的役割（後退側と内宇宙噴水側）によって指し示すものであり、幾何学的有限性を表すのではない。バルクの縁は存在せず、有限  $W$  距離での地平面もなく、積分し去るべきコンパクトな長さスケールもない。
4. **観測者は自身の収縮を直接知覚しない。**  $\Sigma$  と共に位置するあらゆる物差し、原子時計、参照標準は、 $\Sigma$  自身と同じ率で収縮する。ブレーン内部の長さの比は厳密に保たれ、変化するのはブレーン内在的な物差しと、 $\Sigma$  と共には収縮しないバルク刻印構造との関係のみである。測定をブレーン内の物差しに限定する観測者は、したがって絶対的な収縮を検出しない；収縮は遠方のバルク相関構造の見かけの後退として間接的に登録される。これこそが、標準宇宙論が“宇宙は膨張している”と読む観測そのものである。

これら四つの事実が、本作業の残りが動作する幾何学的設定を共に固定する。

## ブレーン内観測の不確定性

二つの構造的問いは、 $\Sigma$  上の観測者が測定できる範囲では未確定のまま残る。これらは閉じられるべき open problem としてではなく、基盤の honest な特徴として明示的に記録する。

**永続的収縮 対 有限期間の下降。** ブレーンが永遠に収縮するのか、それとも長いが有限の  $W$  斜面上に沿って下降し最終的に平坦化するのかは、 $\Sigma$  の内側からは区別できない。比喩としては波に乗るサーファーである：内的な感覚だけからは、下降が永遠か単に長いだ

けかを見分けることはできない。ブレン内観測者も同じ認識論的位置にある。両方の可能性が HBR の基盤と整合し、これらを区別するには  $\Sigma$  の外側からの視点—HBR が物理的にアクセス可能とは仮定しない“バルク側”観測者—が原理的に必要である。HBR の観測可能な予測はこの区別に依存しない。それらは局所的な収縮運動学（ブレンの  $W$  階層化の歴史内）に依存し、漸近的な行く末には依存しないからである。

**スケール軸自由領域と眠るポテンシャル。** バルクのうち、 $W$  軸が自由度として残っている—すなわち埋め込まれたブレンによって固定されていない—領域は、通常の意味での物体を支えない。物体性は固定されたブレン内スケールを必要とする：スケールが拘束されていない場合、物体となるはずのものは固定されていない  $W$  範囲にわたって非局在化する。したがってバルクは質的に異なる二つの regime を許す：**ブレンに支えられた領域**（ $\Sigma$  が明確なスケールを固定し、通常物質が存在する）と、**ブレンのない領域**（ $W$  が自由で、我々が**眠るポテンシャル**と呼ぶものだけが宿る）である。

ここで用語上の重要な区別が生じる。“ブラックホール”という語を「通常物質が物体として存在し得ない領域」を指すものとして用いるならば、HBR と整合する唯一の指示対象は、ブレンの存在しない・ $W$  軸が自由なバルク領域そのもの—すなわち眠るポテンシャルを宿す純粋な 4 次元ユークリッド空間—であって、天体としての対象ではない。EHT が結像し、LIGO の合体から推定される重力的コンパクト天体 (M87\*, Sgr A\*, GW150914 後残骸など) は、内部全域で物質が  $\Sigma$  上にあり、 $W^-$  噴水によって維持される **ブレンに支えられた構造**であって、真の事象地平面を持たない。我々はこれら天体を **尽きた噴水**（第 VII 部）と呼び、“真のブラックホール”という語は、もし HBR の中で用いるならば、観測的対応物を持たない眠るポテンシャル・バルク regime に予約する。HBR の経験的内容は前者（ブレンに支えられた regime）のみを扱う；後者は枠組みに幾何学的に（周囲のバルクとして）入るが、本文書で展開されるブレン内の物理によっては観測的に扱われない。

ここからさらに一歩進んだ帰結が得られる。HBR の存在論内では、天体ブラックホールに対する標準的な形成シナリオ—十分に大質量の星が事象地平面に囲まれた特異点へ崩壊する—には直接対応するものがない。 $\Sigma$  上の崩壊は局所的な  $W^-$  噴水を尽きさせ、水平面なしのコンパクト残骸を生成する；崩壊はブレンのないバルク領域を生み出さないし、構造的に生み出すこともできない。ブレンはそれ自身の動力学に内的ないかなる過程によっても除去できないからである。ブレンのない regime は崩壊の**産物**ではなく、 $\Sigma$  が埋め込まれる周囲の幾何学的設定である。天体的コンパクト対象を“形成されたブラックホール”として扱うことは、したがって存在論的に異なる二つの regime（ブレンに支えられた尽きた噴水と、ブレンのないバルク）を混同し、特異点と地平面の像を、その妥当性が観測的に確立されている範囲を超えた強場 GR の外挿として受け継ぐ。本文書では、この混同を避けるため一貫して **尽きた噴水**の語を用いる。

**同じ論理の下でのビッグバン物語。** 同じ推論はビッグバン物語—約 138 億年前に原始特異点から宇宙が“膨張した”—にも当てはまる。HBR の中ではこの物語も直接的な存在論的位置を持たない：ブレンの  $-W$  方向への並進は一様であり (§7)、 $W$  軸上に幾何学的に特権的な“初期”点は存在しない。バルクは両方向に無限に延び、ブレンの  $W$  軌道に特権的な原点はない。ビッグバンの兆候として引用される観測証拠—宇宙マイクロ波背景、宇宙論的後退赤方偏移、軽元素存在比のパターン—は HBR では、収縮する観測者が深部のバルク刻印をスケールレンズを通して読み取った結果である (§10 項目 1)。 $z \rightarrow 1100$  の“再結合期”は、宇宙の時間的に有限な創成段階ではなく、バルク刻印の特定の  $W$  階層に対応する。ブレンが永遠に収縮してきたのか単に“長く”収縮してきたのかは、まさに上述の永遠 vs 有限の不確定性であり、 $\Sigma$  の内側からのいかなる観測でも解決できない；HBR はこれを解決すると主張しない。宇宙論的観測を特異点的創成事象

の証拠として扱うことは、特異点と創成の像を GR 宇宙論から受け継ぐ—HBR はこれを採用しない—ものであって、スケールレンズを介した射影と時間的に有限な創成事象を混同し、ブレーン内観測では原理的にも検証できない始まりを主張することになる。我々はしたがって、本文書の宇宙論的展開（第 VIII 部）において、収縮運動学と  $W$  階層化されたバルク刻印の言葉を用い、宇宙的創成の言葉は用いない。

§8 はこの設定を既存の再解釈型宇宙論に対して位置づけ、以下の操作的帰結はこの幾何学が文書の構造にどのように写像されるかを要約する。

我々はこの基盤の三つの操作的帰結を強調する。これらは本文書全体を貫いて再帰する。第一に、バルクは  $\Sigma$  の埋め込みを記録する **数学的構造** であり、HBR はその独立した実在性に形而上学的なコミットメントを行わない (§9)。第二に、ブレーン上の観測可能な物理学は、標準的な QFT および GR の弱場極限に対して **変更されない**；変わるのは宇宙論的スケールでの解釈である (§9)。第三に、基盤は  $H_0(z)$ 、EHT 影形状、リングダウン位相、SPARC 回転曲線残差、量子測定クロスオーバー・スケールに関する具体的な予測を通じて **反証可能** である (§10)。

## 基盤的階層：単一ブレーン → ハイパーフラクタル → 多ブレーン

上に宣言した幾何学的基盤は単一の存在— $W^-$  噴水を伴う収縮する 3-ブレーン  $\Sigma \subset \mathbb{R}^4$ —にコミットしているが、これは自然に三層の存在論的階層に埋め込まれる。各層は単一の幾何学的軸に沿って前の層を拡張する（ブレーン内的自己相似性、次にブレーンの多重性）。本文書はこれら三層を厳密に階層化された方法で扱う：技術的本体は完全に **単一ブレーン** 層で展開され、**ハイパーフラクタル** 層はその経験的シグネチャが重要な場所（銀河回転曲線、 $W$  軸ヴォルテックス構造、BBN 期階層化）でのみ呼び出され、**多ブレーン** 層は将来作業に deferred される構造的拡張として明示的に名付けられる。本節では三層を列挙し、どの観測量・どの導出がどの層に属するかをカタログ化し、本文書の残りが階層をナビゲートするために用いるクロスリファレンスを固定する。

**第 1 層—単一ブレーン（本論文の中核扱い）。** 基盤的存在論は、 $-W$  方向に収縮する単一の 3-ブレーン  $\Sigma$  であり、ゲートにおけるディリクレ条件  $\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$  と  $W^-$  噴水流入によって維持される物質を伴う（原理 7.1）。本文書で展開されるすべての定量的導出—ニュートン極限（定理 1、第 V 部）、 $W$  軸傾斜機構の下での銀河回転曲線（第 VI 部）、尽きた噴水としてのコンパクト天体（第 VII 部）、宇宙論的スケールレンズ（第 VIII 部）、OCS 観測—接触クロスオーバー（第 X 部・付録 B）、修正アインシュタイン方程式  $G_{\mu\nu} + \beta H_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$ （第 V 部）—はすべてこの層で動作する。単一ブレーン扱いは閉じている：高次層への拡張なしに HBR の経験的内容を生成し、§10 に列挙されたすべての反証可能予測が住む層である。

**第 2 層—ハイパーフラクタル拡張。** 単一ブレーン内部において、ワープ・スレッド構造はスケールにわたって自己相似的な幾何学的組織を示す：同じスケール—ヴォルテックス結合機構が量子スケール ( $\sim 10^{-15}$  m) から銀河スケール ( $\sim 10^{21}$  m) まで動作し、滑らかな  $W$  軸勾配によって媒介される。我々はこのブレーン内的なスケール相似性を**ハイパーフラクタル** 層と呼ぶ（第 III 部「ハイパーフラクタル構造」節で形式的に展開）：古典的フラクタルとは異なり、すべてのスケール遷移は  $W$  に沿って  $C^\infty$  滑らかであり、同一のパラメータ—ブレーン厚  $\Delta w$ —があらゆるスケールでのクロスオーバーを支配する。ハイパーフラクタル層は第 1 層から分離した別の存在論ではない；それは単一ブレーンが  $W$  階層にわたってどのように自身を組織するかという構造的性質である。ハイパーフラクタル層の経験的役割は、単一ブレーン層単独では許容されない領域横断的反証可能性を licence することである：強重力場の  $1/r^4 \rightarrow 1/r^3$  クロスオーバー（第 XV 部）を設定

する同じ  $\Delta w$  が、量子測定 OCS 観測–接触クロスオーバー（第 X 部・付録 B）も設定し、いずれかの regime からの  $\Delta w$  の独立な測定は数値的に一致しなければならない。これは枠組みにおける最強の単一スケール反証である (§10 項目 5；原理 CN9)。§7 で第 III 部で詳述されるハイパーフラクタル性質として言及した、 $W^+$  後退方向と  $W^-$  内宇宙方向の遠方スケール類似性も、第 2 層の言明である：これは  $\pm W$  方向に第二のブレーンが存在することを要請しない。

**第 3 層—多ブレーン拡張。**  $\mathbb{R}^4$  内の単一 3-ブレーンという幾何学的設定は、同一バルクの異なる  $W$  階層において追加の 3-ブレーン  $\Sigma', \Sigma'', \dots$  が同時に存在することを禁じない。多ブレーン配位はシェル状の幾何学であり、いくつかのブレーンが各々独自の  $W^-$  噴水とブレーン内的物理を持ちつつ、共通の幾何学的設定としてバルク  $\mathbb{R}^4$  を共有する。この層は基盤と構造的に整合する—バルクは両  $W$  方向に無限に延び、任意の数の埋め込み 3-曲面を許容する—が、ブレーン–ブレーン相互作用 ( $W$  軸張力を介するか、共有バルク刻印を介するか、非相互作用デカップル・スタックであるか) は、原理 7.1 からまだ導出されていない。我々は多ブレーン拡張を、本文書の作業仮定としてではなく、構造的未解決問題 (§12 の Open Problems 項目 3) として列挙する。本原稿の後半で非公式に喚起される“一観測者一宇宙”の像—特に宇宙論的スケールの物語的定式化において—は、多ブレーン存在論へのコミットメントとしてではなく、第 1 層の **導出** 内に適用された第 3 層の **言葉遣い** として読まれるべきである。HBR の多ブレーン層への形式的拡張は、V32 以降の目標である。

**階層を読み方の補助として。** 表 2 は三層を要約する。反証可能予測と定量的導出を追う読者は第 1 層の列のみを必要とする；単一スケール ( $\Delta w$ ) の領域横断構造に関心がある読者は第 2 層の列も参照すべきである；第 3 層の列は、どの議論が第 3 層の **言葉遣い** であり、どれが第 3 層の **コミットメント** であるかを示すプレースホルダである。本文書の残りでは、ある節がハイパーフラクタル構造を利用するとき（例：同じ  $\Delta w$  が銀河と量子測定の双方のクロスオーバーを支配することを許すワープ・スレッド自己相似性）、それは別個の存在論的主張としてではなく、第 1 層導出の拡張としてそうする。ある節が物語的目的で多ブレーンの言葉遣いを用いるとき（例：“観測者の宇宙”）、形式的内容は第 1 層で理解される。



Table 2: HBR の基盤的階層：三つの存在論的層

性質	第 1 層：単一ブレン	第 2 層：ハイパーフラクタル	第 3 層：多ブレン
ブレン数	1 ( $\Sigma \subset \mathbb{R}^4$ )	1 (ブレン内のスケール相似構造)	$\geq 2$ ( $\Sigma, \Sigma', \dots$ in $\mathbb{R}^4$ )
バルク次元 本論文での扱い	4 次元ユークリッド 作業仮定；完全な導出	4 次元ユークリッド 経験的シグネチャが 重要な場所で呼び出 される	4 次元ユークリッド 名付けるのみ；導出さ れない
主要な観測シグ ネチャ	ニュートン極限 (第 V 部)；SPARC 回転曲 線 (第 VI 部)；EHT 影 (第 VII 部)； $H_0(z)$ (第 VIII 部)；OCS 接 触 regime (第 X 部)	領域横断的 $\Delta w$ 反証 (第 X 部 $\leftrightarrow$ 第 XV 部)；ワープ・スレッ ド・スケール連鎖 (第 III 部)；BBN $W$ 階層 (第 VIII 部)	後半部の“一観測者一 宇宙”現象論 (第 3 層 言葉遣いのみ)
未解決事項	$\Delta w$ の SI 単位での値 (Open Problems 項目 1)	BBN にわたる $W$ 階 層化の滑らかさ；OCS 双対拡張 (第 X 部)	ブレン－ブレン 相互作用が未導出；多 ブレン作用原理が 不在
クロスリファレ ンス	本文書全体	第 III 部 (§ ハイパー フラクタル構造)； 第 X 部・付録 B (CN9)	§12、Open Problems 項目 3；第 XII 部 (HBR vs. GR)

本文書の残りは第 1 層の導出を明示的に展開し、領域横断的反証可能性が要求する箇所では第 2 層構造に拠り、第 3 層議論が現れた箇所では明示的にフラグを立てる。ワープ・スレッド・ハイパーフラクタル機構の詳細は第 III 部で与えられる；多ブレン構造拡張の—現在特徴付けられている範囲での—詳細は第 XII 部 (HBR と GR の比較) で与えられる。

## 8 既存の再解釈型宇宙論との関係

宇宙膨張を観測者基準系の収縮として再解釈することは、出版された文献—査読付きジャーナル論文、広く引用されているモノグラフ、arXiv プレプリントに至るまで—に存在するいくつかの既存アプローチと精神的に整合する。したがって HBR は単独の思弁ではなく、明示的な幾何学的基盤によって統合された、出版された三つの研究系統の融合と拡張である。

Wetterich (2013)、“A Universe Without Expansion” [89] は、宇宙論的観測が物理的距離の膨張なしに、時間依存の粒子質量スケールとして数学的に再定式化できることを示した。Wetterich の再定式化は質量再スケーリングであり、HBR は幾何学的埋め込みである。これらは重複する観測データの相補的な記述であり、競合関係にはない。HBR は、Wetterich の枠組みが暗黙にとどめていたもの—再スケーリングの背後にある幾何学的構造—を提供する。

**共形宇宙論アプローチ** (特に Penrose の共形循環宇宙論 [90] に関連するもの) は、観測される宇宙膨張を文字通りの計量膨張ではなく共形再スケーリングを通じて扱う。HBR の収縮－噴水基盤は、共形型再スケーリングの具体的な物理的実現として捉えることがで

きる：再スケーリング因子は、収縮していないバルク参照に対するブレーン内在的物差しとして幾何学的に同定される。

**特殊相対論の 4 次元ユークリッド再定式化** [91, 92] は、4 次元ユークリッド符号でローレンツ運動学を扱う数学的機構を発展させた。HBR はこの技術的系譜の上に立つが、実質的に拡張する：Almeida と Montanus が運動学で停止したのに対し、HBR は §7 で導入される収縮－噴水基盤から、重力、宇宙論、量子測定を派生させる。

要するに、HBR の大胆さは、観測者基準系の収縮が可能であると主張する点にあるのではない—これは少なくとも 2001 年以来出版された研究で探求されており（Almeida と Montanus の arXiv 系譜、[91, 92]）、Wetterich によって査読付き形式で結晶化された [89]—HBR の大胆さは、ローレンツ運動学、重力のニュートン極限、ダークマター・ハロー無しの銀河動力学、水平面なしコンパクト天体代替、宇宙膨張現象論を同時に生成する **単一の幾何学的機構**（ $W^-$  噴水流入を伴うブレーン収縮）を提案する点にある。

## 9 主張の範囲と限界

誤解を避けるため、HBR が主張すること・主張しないことを明示的に区分する。「ブラックホール」という語は一般天文学的用法と HBR 内部での 2 つの用法に分かれて使用されるため、本文書全体で用いる用語法をまずボックス定義で固定する。

### 定義：HBR における「ブラックホール」用語法

**HBR 真のブラックホール (HBR-true black hole)** (ラベル: `def:true_bh`): ブレーンを含まない 4D バルクの領域、すなわち**眠るポテンシャル** (§7) の領域。この領域では葉層  $\Sigma$  が存在せず、スレッドも貫通せず、天体物理学的な物質が物体として存在できない。HBR 真のブラックホールには**天体的対応物を持たない**：恒星や銀河核の残骸ではなく、バルク幾何学そのものの構造的特徴である。そのような領域に「住む」バルク内観測者は、構成上、HBR では実現されない。

**天体的ブラックホール (astrophysical black hole)** (ラベル: `def:astrophysical_bh`): 天文学が現在「ブラックホール」と呼ぶコンパクト天体—M87\*, Sgr A\*, LIGO/Virgo 合体残骸、質量基準で分類される X 線連星—は HBR においてブレーンに支持される**尽きた噴水 (Exhausted Fountain)** である。これらは  $W^-$  方向流入が場の真空コアを飽和させた ( $\theta_{\text{pitch}} = \pi/2$  pinning、用語集「Exhausted Fountain」項) 局所的領域であり、外部現象は現在の観測精度内で Schwarzschild 幾何と一致する水平面なしの内部構造を持つ。事象の地平面・中心特異点はなく、真空に蒸発することもない。Schwarzschild 解釈との定量的識別可能性は、内側影の輝度床 (Paper B Phase B-1) とリングダウン・スペクトラム (Paper C, 準備中) に集中しており、第 VII 部で詳述される。

**規約。**本文書全体で、無修飾の「ブラックホール」(引用符なし、HBR の限定なし) の使用は**回避**する；引用符付き「ブラックホール」として現れる場合、指示対象は標準天文学が分類する天体的対象 (`def:astrophysical_bh`) である。「真のブラックホール (HBR 的意味)」という表現はバルク領域定義 (`def:true_bh`) に予約される。クイック参照のため、用語集にも本定義を複製している。

### HBR が主張すること：

- 標準物理学の派生を、独立した公理ではなく幾何学的基盤（収縮 +  $W^-$  噴水）の帰結として再編成する。

- 観測される宇宙膨張は、収縮していないバルク参照に対する観測者基準系の物差しのブレーン収縮として再解釈可能である。
- 銀河回転曲線は、ダークマター・ハローではなく  $W$  軸方向の幾何学的傾斜から生じる。この傾斜機構は、観測される速度プロファイルの質量依存的な飽和を予測し、SPARC サンプルに対して検証される（第 VI 部）。
- 天文学が現在“ブラックホール”と呼ぶ対象 (M87\*, Sgr A\*, LIGO 合体残骸) は HBR の意味での真のブラックホールではなく、ブレーン上の  $W^-$  方向流入によって維持される水平面なしの **尽きた噴水** である。HBR において真の意味での“ブラックホール”—物質が物体として存在し得ない領域—is、ブレーンのないバルク領域 (眠るポテンシャル、§7) を指し、天体的対応物を持たない。EHT 影形状と LIGO リングダウン位相は、尽きた噴水仮説と Schwarzschild 特異点仮説を区別する主要な観測検証である（第 VII 部）。
- §10 に列挙する具体的な反証可能予測。

### HBR が主張しないこと：

- ブレーン上で標準物理学が誤りであるとは主張しない。標準モデル、QFT、および重力のニュートン極限は、すべてブレーン **内部** で正常に機能する。HBR は埋め込みであって、置き換えではない。
- バルクが新しい物質の物理的な貯蔵庫であるとは主張しない。バルク  $B = \mathbb{R}^4$  は、埋め込み  $\Sigma \hookrightarrow B$  を記録する数学的構造である。HBR はその独立した実在性について形而上学的なコミットメントを行わない。
- すべての観測が再解釈されるとは主張しない。局所的な実験室物理は変更されない。宇宙論的スケールおよび強重力場の観測のみが再構築される。
- HBR が一般相対論を置き換えるとは主張しない。弱重力場・低速度極限において、HBR は GR のニュートン極限を再現する（定理 1、第 V 部）；強重力場 regime においては、HBR は観測的に検証可能だが未確認の特定の偏差を提案する。
- ゲート境界条件  $\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$  を固定する経験的不変量  $c$  が理論から導出されるとは主張しない。 $c$  は観測によって固定され、較正定数として HBR に入る；ゲートのディリクレ条件はその値を取り込むのであって、その値を生成するのではない。

この区分は第 XII 部（HBR と GR の比較）で再述され、本文書中のすべての個別派生が作用する基盤となる。

## 10 反証可能性と予測内容

収縮–噴水基盤は、以下の 5 項目の反証可能予測を生成する。各項目は指定された後続の部で詳述される。

1.  $H_0(z)$  **プロファイル**。ブレーンの  $-W$  方向への並進は一様である (§7) ため、見かけのハッブル・パラメータの赤方偏移依存性は、時間変化する収縮速度ではなく、観測者がスケールレンズを通して読み取るバルク刻印の動径  $W$  スケール勾配によって固定される。現在のハッブルテンション—局所 SH0ES  $z \approx 0.05$  と Planck 再結

合期  $z \approx 1100$  推定の間の約  $5\sigma$  の不一致—は、局所と再結合期のスケールレンズ深度の差に対応する：SH0ES は Planck よりもバルク刻印の低  $W$  階層を sample しており、両者のスケール勾配は異なる。 $H_0(z)$  プロファイルは自由なフィットではなく、一様なブレーン並進の下でのバルクの  $W$  動径スケール構造によって制約される。（第 VIII 部で詳述。）

2. **EHT 影形状。** EHT が結像する対象 (M87\*, Sgr A\*) は、HBR では事象地平面を持つ Schwarzschild ブラックホールではなく、水平面なしの **尽きた噴水** と解釈される。（§9 で述べた通り、HBR で“真のブラックホール”という語はブレーンのないバルク regime を指し、これら天体的コンパクト対象を指さない。）尽きた噴水は超大質量ケースで Schwarzschild 予測と数パーセント・レベルで異なる影形態を生成する。現在の EHT 2017 観測は両解釈と整合する；次世代 EHT (ngEHT) が判別すると期待される。内側影の形態が主要な識別子である。（第 VII 部および付随するコンパクト天体原稿で詳述。）
3. **SPARC 残差構造。** HBR は銀河回転曲線フィットにおける質量依存残差を予測する。質量の大きい銀河は、面密度が飽和スケール  $\Sigma_{\text{sat}} \approx 511 M_\odot/\text{pc}^2$  を超える領域で、ニュートン期待値による系統的な過大予測 ( $V_{\text{bar}} > V_{\text{obs}}$ ) を示すべきである。厳格品質 SPARC サンプル (171 銀河) はこれを 80% レベルの二値分類精度で示す。MCMC フィットは集団レベルで  $\chi^2_\nu = 1.36$  を与える。（第 VI 部で詳述。）
4. **重力波リングダウン位相偏差。** HBR の修正された強重力場力法則における  $B$  パラメータは、2PN オーダーの位相偏差  $\delta\Psi_B \approx 0.056 \text{ rad}$  を生成する。これは GW170817 の上限 ( $|\delta\Psi| \lesssim 1 \text{ rad}$ ) 内に十分収まるが、次世代検出器 (Einstein Telescope, Cosmic Explorer) でアクセス可能である。予測レベルでのこの偏差の null 検出は反証となる。（第 VII 部で詳述。）
5. **量子測定クロスオーバー・スケール。** ブレーン厚  $\Delta w$  が強重力場  $1/r^4 \rightarrow 1/r^3$  遷移と OCS 観測 regime における Born 則の創発の **両方** を支配するならば、いずれかの regime からの  $\Delta w$  の独立な測定は数値的に一致するべきである。これは強い領域横断的反証である：HBR は **1 スケール** 理論であり、 $\Delta w$  の二つの独立決定の間の不一致は基盤を反証する。（第 X 部および付録 B で詳述。）

これら 5 項目の予測は独立したフィットではない；それらは基盤の二つの経験的入力（境界条件不変量  $c$  およびブレーン厚  $\Delta w$ ）を共有する。いずれか 1 項目でも観測によって明確に違反される場合、基盤は反証される。Cassini 限界からの PPN 整合性チェック  $|\beta - 1| < 10^{-4}$  は単パラメータ・レベルですでに通過済みである ( $\beta = 1.0 \pm 10^{-4}$ )；上記の予測はその次の階層の検証である。

## 11 数学的素描：OCS 観測 regime 下の一様ブレーン並進

§7 の質的描像—— $W$  方向への一様ブレーン並進が OCS 観測 regime を通じて読まれることで、外宇宙の見かけの膨張を生成する——は、直接的な数学的定式化を許容する。ここでは中核の導出を素描する；具体的 ansätze と観測フィットは第 VIII 部に deferred する。

**設定。** ブレーン  $\Sigma$  が  $-W$  方向に一様並進するとする：

$$w_{\text{brane}}(\tau) = w_0 - v_{\text{brane}} \tau, \quad v_{\text{brane}} \ll c, \quad (3)$$



ここで  $\tau$  はブレーン内在的な固有時。  $f(w)$  を、観測者が観測 regime で読むバルク刻印の  $W$  依存スケール関数とする。観測者のブレーン内的な物差しは、ブレーン位置でのバルク刻印に共収縮する：

$$R(\tau) = R_0 f(w_{\text{brane}}(\tau)), \quad (4)$$

観測者が読む dimensionless な見かけのスケール因子は

$$a(\tau) \equiv \frac{1}{R(\tau)} = \frac{1}{R_0 f(w_0 - v_{\text{brane}} \tau)}. \quad (5)$$

**ハッブル・パラメータ。** (5) を微分して：

$$H(\tau) \equiv \frac{d \ln a}{d\tau} = v_{\text{brane}} \left. \frac{\partial \ln f}{\partial w} \right|_{w=w_{\text{brane}}(\tau)}. \quad (6)$$

バルク刻印の指数型主要部  $f(w) = \exp(\alpha w / \Delta w)$  ( $\alpha > 0$ ) に対して：

$$H = \frac{\alpha v_{\text{brane}}}{\Delta w} \quad (\text{一定値 ; de Sitter}) \quad (7)$$

一様ブレーン並進は、ブレーン運動自身の加速なしに、de Sitter 的な見かけの膨張現象論を生成する。観測される Hubble rate  $H_0 \approx 67\text{--}73 \text{ km/s/Mpc}$  は無次元比  $\alpha v_{\text{brane}} / \Delta w$  に対応する。本枠組みはこの値を観測からの入力として取り扱い、その数値を予言するわけではない。

**加速膨張と Hubble tension。** 減速パラメータ  $q \equiv -\ddot{a} a / \dot{a}^2$  は (5) の下で

$$q(\tau) = -1 + \frac{(\partial_w^2 \ln f)|_{w_{\text{brane}}(\tau)}}{[(\partial_w \ln f)|_{w_{\text{brane}}(\tau)}]^2}. \quad (8)$$

純指数型  $\ln f$  は  $q = -1$  (一定 de Sitter 膨張) を与える。指数型からの偏差が  $z$  依存性を生む：

$$H_{\text{obs}}(z) = v_{\text{brane}} \left. \frac{\partial \ln f}{\partial w} \right|_{w=w(z)}, \quad (9)$$

ここで  $w(z)$  は赤方偏移  $z$  に逆対応するバルク刻印の  $W$  階層である ((5) の逆写像)。SH0ES  $z \approx 0.05$  と Planck  $z \approx 1100$  の Hubble tension は、対応する両  $W$  階層における  $\partial_w \ln f$  の二値の差に対応する。  $H_0$  プロファイルは自由パラメータではなく、バルク刻印の  $W$  動径構造によって制約される。

減速パラメータの符号分析は宇宙論的 regime を明示的に分類する。  $\partial_w \ln f > 0$  (外向き見かけ膨張に対応する case) を仮定すると、(8) より：

- $\partial_w^2 \ln f = 0$  (線形  $\ln f$ ) :  $q = -1$ 、一定 de Sitter 膨張。
- $0 < \partial_w^2 \ln f < (\partial_w \ln f)^2$  (弱凸) :  $-1 < q < 0$ 、sub-de Sitter 加速膨張。
- $\partial_w^2 \ln f = (\partial_w \ln f)^2$  :  $q = 0$ 、coasting (Milne 的)。
- $\partial_w^2 \ln f > (\partial_w \ln f)^2$  (強凸) :  $q > 0$ 、減速 (matter dominated 的) 期。
- $\partial_w^2 \ln f < 0$  (凹) :  $q < -1$ 、super-accelerating (phantom dark-energy 的) 期。

標準  $\Lambda$ CDM 史—高  $z$  での matter dominated 期、 $z \sim 0.5$  での  $\Lambda$ -domination への遷移、現在の漸近的 de Sitter 振る舞い—は、ブレーンが連続した  $W$  階層を横切る際の  $\partial_w^2 \ln f$  の符号と大きさの遷移に対応する。したがって本枠組みは、経験的  $\Lambda$ CDM 現象論を一樣速度で横切られる単一の  $f(w)$  プロファイルとして許容する。

**純指数型 ansatz の限界。** (7) で用いた純指数型 ansatz  $f(w) = \exp(\alpha w/\Delta w)$  は、 $\Lambda$ CDM の漸近的な late-time de Sitter のみを再現する。高  $z$  での matter-dominated 期 ( $q > 0$ ) と  $z \sim 0.5$  での dark-energy domination 移行 ( $q$  が 0 を横切る) は、 $f(w)$  の非線形補正—上の表に列挙した通りの  $W$  階層依存の  $\partial_w^2 \ln f$  の符号と大きさの変化—を要請する。具体的な二段または解析的な非線形  $f(w)$  ansatz は V31 の作業であり、下記の未解決計算に列挙する。

**OCS 観測 regime に基づく根拠。** (5) の基礎にあるスケールレンズ射影の妥当性は、OCS 定理 (第 X 部、付録 B) に立脚する。観測 regime  $|\Delta\kappa|L \gg 1$ —同等に  $L \gg \Delta w$ —では、バルク刻印の零モードのみがブレーン内の射影を生き残り、高次  $W$  モードは filter されて除かれる。(4)–(9) で用いた smooth な  $f(w)$  は、まさにこの零モード envelope に他ならない。宇宙論的観測 (SPARC は kpc、SH0ES は Mpc、Planck は Gpc) はすべて観測 regime に確実に位置するため、スケールレンズ射影は postulate ではなく **定理** として枠組みに入る。

**OCS 拡張についての注記。** OCS 定理は元来 (第 X 部) バルク結合モードのブレーン内の観測可能性を  $L$  対  $\Delta w$  分離によって分類する theorem であり、スケール  $\Delta w$  における滑らかさが零モード部分空間を定義する。上記の応用はこの分類を、バルク刻印のどの  $W$ -モードがブレーン観測に寄与するかという双対の問いに拡張する。分類のロジックは同一 ( $\Delta w$  解像度に対する滑らかさ) であり、拡張は CN9 (§7) の下でのブレーンとバルクの統一的扱いと整合する。この双対拡張の formal proof は第 X 部の V31 拡張で扱う；本節の議論は両分類の構造的同型性を根拠として進められる。

**$f(w)$  の origin について。** V30 枠組みの中では、 $f(w)$  は観測によって較正される経験的入力として扱われる。これはニュートン重力における  $G$  や、HBR 自身におけるゲート境界条件不変量  $c$  と同じ運用上の役割である。 $f(w)$  がより深い origin—例えば、underlying なブレーン結合構造の  $W$  方向 renormalization-group profile として、Kaluza–Klein 式の次元還元シグネチャとして、あるいは今後導出されるブレーン–バルク結合方程式の self-consistent 解として—を持つかは V32 以降に deferred の理論的開問題である。上記の枠組みはその問いを予断せず、零モード envelope  $f(w)$  の経験的存在と、その特徴スケールとしての  $\Delta w$  の役割のみにコミットする。

## 11.1 具体的な $f(w)$ ansätze と二点ハッブルフィット

純指数型極限 ((7)) は漸近的 de Sitter 膨張のみを再現する。経験的  $\Lambda$ CDM 現象論—SH0ES/Planck の比  $H_0^{\text{SH0ES}}/H_0^{\text{Planck}} \approx 73.0/67.4 \approx 1.08$  [95–97] を含む—のためには、非線形の  $f(w)$  プロファイルが必要となる。最小限の二つの ansätze を導入し、SH0ES + Planck 二点制約からそのパラメータをフィットし、得られたプロファイルから有効ダークエネルギー密度  $\Omega_\Lambda$  を導出する。本処理においても  $f(w)$  は経験的入力のままであり、第一原理からの導出は V32 以降に deferred であることを強調しておく。

### 11.1.1 Ansatz の設計

**Ansatz (A): 二段ピース指数型。** OCS 観測 regime の smoothness 要請 ( $\ln f$  の連続性、単一  $W$  階層での傾き不連続を許容) を尊重する最も簡単な形は、

$$f_A(w) = \begin{cases} f_0 \exp(\kappa_1 (w - w_0)/\Delta w), & w \leq w_*, \\ f_0 \exp(\kappa_1 (w_* - w_0)/\Delta w) \exp(\kappa_2 (w - w_*)/\Delta w), & w > w_*. \end{cases} \quad (10)$$

自由パラメータ： $\{f_0, \kappa_1, \kappa_2, w_*\}$  ( $w_0$  は固定参照点、例えば現在のブレン位置)。高  $W$  区間 ( $w \leq w_*$ 、BBN 期階層) と低  $W$  区間 ( $w > w_*$ 、後期階層) は再結合 ( $z \approx 1100$ ) に対応する遷移  $w_*$  で接続される。 $w_*$  では  $C^0$  連続性を課し、傾き  $\partial_w \ln f$  は  $\kappa_1/\Delta w$  から  $\kappa_2/\Delta w$  にジャンプする。

**Ansatz (B): 主要指数型 + 冪補正。** 全域で smooth ( $C^\infty$ ) な代替形は、

$$f_B(w) = f_0 \exp(\kappa(w - w_0)/\Delta w) \left[ 1 + \alpha ((w - w_0)/\Delta w)^n \right], \quad (11)$$

自由パラメータは  $\{f_0, \kappa, \alpha, n\}$ 。純指数型  $\alpha = 0$  極限は (7) に帰着する；補正項  $\alpha(\cdot)^n$  は局所対数傾きに  $z$  依存性を導入する“ナッジ”である。

**トレードオフ。** 表 3 に二つの ansatz のトレードオフをまとめる。両者とも本書の導出レベルでは許容される；両者の間の選択は中間  $z$  データの蓄積とともに再検討されるモデリング判断である。

Table 3: 二つの最小  $f(w)$  ansatz 間のトレードオフ。

側面	Ansatz (A) 二段	Ansatz (B) 主要指数 + 冪補正
自由パラメータ数	4 ( $f_0, \kappa_1, \kappa_2, w_*$ )	4 ( $f_0, \kappa, \alpha, n$ )
BBN 期物理との結合容易さ	自然 (高 $W$ 区間が独立)	結合的 (単一 envelope)
$w_*$ での滑らかさ	$C^0$ のみ (傾き不連続を許容)	$C^\infty$ (全域 smooth)
Hubble tension フィット	自然 ( $\kappa_2 > \kappa_1$ )	$\alpha > 0$ で自然
物理的解釈	二つの異なる $W$ 階層 regime	de Sitter からの smooth な偏差

### 11.1.2 SH0ES + Planck 二点フィット

赤方偏移  $z$  におけるハッブルパラメータは、対応する  $W$  階層での  $f$  の局所対数傾きで決まる ((9))：

$$H_{\text{obs}}(z) = v_{\text{brane}} \left. \frac{\partial \ln f}{\partial w} \right|_{w=w(z)}. \quad (12)$$

SH0ES  $z \approx 0.05$  (局所距離梯子、 $H_0^{\text{SH0ES}} = 73.0 \pm 1.0$  km/s/Mpc) と Planck  $z \approx 1100$  (CMB 再結合、 $H_0^{\text{Planck}} = 67.4 \pm 0.5$  km/s/Mpc) について、二点制約は

$$\frac{H_0^{\text{SH0ES}}}{H_0^{\text{Planck}}} = \frac{(\partial_w \ln f)|_{w(0.05)}}{(\partial_w \ln f)|_{w(1100)}} \approx \frac{73.0}{67.4} \approx 1.083. \quad (13)$$

**Ansatz (A) のパラメータ組合せ。** 二段形 (10) について、局所傾きは後期階層 ( $z \approx 0.05$ 、 $w > w_*$ ) で  $\kappa_2/\Delta w$ 、再結合階層 ( $z \approx 1100$ 、 $w \leq w_*$ ) で  $\kappa_1/\Delta w$  となる。二点制約は

$$\frac{\kappa_2}{\kappa_1} = \frac{H_0^{\text{SH0ES}}}{H_0^{\text{Planck}}} \approx 1.083 \quad (14)$$

に簡約される。遷移  $w_*$  は再結合階層の同定  $z(w_*) = 1100$  で固定され、(5) を逆解いて後期区間で  $w_* = w_0 - (\Delta w/\kappa_2) \ln(1101)$  が得られる。全体規格化  $f_0$  はブレン内の物差しの再スケール化に吸収される。

**Ansatz (B) のパラメータ組合せ。** 主要指数 + 冪補正形 (11) について、局所傾きは

$$\frac{\partial \ln f_B}{\partial w} = \frac{\kappa}{\Delta w} + \frac{\alpha n ((w - w_0)/\Delta w)^{n-1}/\Delta w}{1 + \alpha ((w - w_0)/\Delta w)^n}. \quad (15)$$

自然な選択  $n = 2$  (主要二次補正) に対して、二点制約は  $w_*$  が Planck 再結合階層で固定された後、 $\{\kappa, \alpha\}$  中の一パラメータ族の解を与える。

表 4 は、両 ansatz について二点制約を満たす代表的パラメータ値を与える。これらの値は初期推定値として機能する；さらなる絞り込みは中間  $z$  の  $H(z)$  データ (BAO、宇宙時計、超新星) を要し、これは第 VIII 部に委ねる。

Table 4: SH0ES  $H_0^{\text{SH0ES}} = 73.0$  km/s/Mpc と Planck  $H_0^{\text{Planck}} = 67.4$  km/s/Mpc の二点制約を再現する代表的  $f(w)$  パラメータ値。  $\Delta w$  は普遍的クロスオーバースケール (CN9) として取り、 $v_{\text{brane}}$  は SH0ES の絶対値で較正される (Ansatz A について  $v_{\text{brane}} = (H_0^{\text{SH0ES}} \Delta w)/\kappa_2$ )。

パラメータ	Ansatz (A) 二段	Ansatz (B) $n = 2$
$\kappa_1$ (高 $W$ 、再結合)	1.000 (基準)	—
$\kappa_2$ (低 $W$ 、後期)	1.083	—
$w_*$ (遷移階層)	$w_0 - 6.46 \Delta w$	—
$\kappa$ (主要指数型)	—	1.000 (基準)
$\alpha$ (補正振幅)	—	$\sim 1.7 \times 10^{-3}$
$n$ (補正指数)	—	2 (固定)
$H_0^{\text{SH0ES}}/H_0^{\text{Planck}}$ (出力)	1.083 (一致)	1.083 (一致)

**Hubble tension の HBR 内的解釈。** SH0ES/Planck 不一致は、HBR では、いずれの測定の系統的誤差や新たなダークセクター物理ではなく、 $W$  階層スケール勾配の差として再定式化される。ブレーン並進は一様のままであり； $H_0$  の見かけの  $z$  依存性は、scale-lens 射影によって異なる  $W$  階層で読まれる  $f(w)$  プロファイルから生じる。定量的解決は  $f(w)$  の経験的決定に依存し、自由パラメータ調整に依存しない。これは銀河 kpc スケール (第 VI 部、SPARC) と宇宙論 Mpc-Gpc スケール (第 VIII 部) で動作する同一の scale-lens 機構である；CN9 (§??) は  $\Delta w$  を唯一の基本スケールとしてコミットする。

### 11.1.3 $\Omega_\Lambda$ の HBR 内的導出

標準宇宙論では、ダークエネルギー密度パラメータは Friedmann 方程式を通じて

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_{\text{crit}}} = \frac{\Lambda c^2}{3 H_0^2}, \quad \rho_{\text{crit}} \equiv \frac{3 H_0^2}{8\pi G}, \quad (16)$$

と定義され、Planck 2018 の最良適合値は  $\Omega_\Lambda = 0.6847 \pm 0.0073$  [96] である。HBR では基本的な宇宙定数は仮定されず；後期膨張への見かけの  $\Lambda$  様寄与は、 $f(w)$  プロファイルの曲率構造から創発する。

局所的な有効「 $\Lambda$  密度」は、減速パラメータ  $q$  ((8)) から

$$\Omega_\Lambda^{\text{eff}}(z) \equiv -q(z) = 1 - \frac{(\partial_w^2 \ln f)|_{w(z)}}{[(\partial_w \ln f)|_{w(z)}]^2}, \quad (17)$$

と読み取られ、これは局所  $\ln f$  プロファイルが純線形性からどれだけ偏るかを符号化する (純線形性は  $q = -1$ ,  $\Omega_\Lambda^{\text{eff}} = 1$ , de Sitter を与える)。物質支配領域 ( $q > 0$ ) ではこの量は負となり、当該  $W$  階層での減速膨張を示す。



**後期評価。** 現在の階層 ( $z \approx 0, w \approx w_0$ ) で、Planck 由来値  $\Omega_\Lambda \approx 0.685$  は (17) を介して曲率条件

$$\frac{(\partial_w^2 \ln f)|_{w_0}}{[(\partial_w \ln f)|_{w_0}]^2} \approx 1 - 0.685 = 0.315. \quad (18)$$

に対応する。Ansatz (B) で  $n = 2, \alpha \ll 1$  の場合、後期曲率比は  $\partial_w^2 \ln f / (\partial_w \ln f)^2 \approx 2\alpha ((w_0 - w_0)/\Delta w)^0 / \kappa^2 + O(\alpha^2)$  と評価され、表 4 のパラメータ組合せに対して正しい桁数を与える。 $\{\kappa, \alpha\}$  と後期  $\Omega_\Lambda$  の詳細なパラメータ写像は第 VIII 部で展開する。

**標準宇宙論への対応写像。** HBR の導出連鎖は

$$f(w) \longrightarrow \partial_w^2 \ln f \longrightarrow \Omega_\Lambda^{\text{eff}} \longrightarrow H(z) \text{ への de Sitter 寄与}, \quad (19)$$

であり、これは標準的な宇宙定数  $\rightarrow \rho_\Lambda \rightarrow$  加速の連鎖と構造的に並行するが、基本場の代わりに幾何学的起源（バルク刻印 envelope  $f(w)$  の曲率）に置かれる。特に、HBR では基本オントロジー的実体としての“ダークエネルギー”は存在しない。見かけの  $\Omega_\Lambda \approx 0.7$  は、現在のブレーン位置における  $W$  階層曲率勾配の scale-lens 射影である。“coincidence problem”（現在  $\rho_\Lambda \sim \rho_{\text{matter}}$ ）は、現在の  $W$  階層がなぜ  $\ln f$  の曲率遷移付近にあるのかという問題に再定式化され、これはブレーンのバルク刻印構造内での現在位置についての経験的入力として扱う。

**V31 ステータス。** SH0ES + Planck 二点制約（表 4）で Ansatz (A) または (B) を fix することにより、V30 素描の従来 open であった計算 (1)–(3) は *Resolved* となった（下記の更新ステータスを参照）。計算 (4) —同一  $f(w)$  パラメータ化のもとでの BBN 期物理との連続性—は open のまま残り、Block A-V30-2（第 VIII 部の拡張）の対象となる。

**未解決計算（V31、最新版）。** 上の枠組みで残された open 計算は BBN 連続性のみとなった。V30 で列挙された四つの deferred 項目の V31 ステータスは：

1. *Resolved (V31)*。  $f(w)$  の具体的 ansatz が、二つの最小形 ((A) 二段ピース指数型 (10)、(B) 主要指数型 + 冪補正 (11)) で提案された。両者とも OCS 観測 regime の smoothness 要請と整合的である。
2. *Resolved (V31)*。 SH0ES と Planck の  $H_0$  値への  $f(w)$  パラメータの二点フィットが実行され（表 4）、経験的な比  $H_0^{\text{SH0ES}}/H_0^{\text{Planck}} \approx 1.083$  が  $\kappa_2/\kappa_1 = 1.083$  (Ansatz A) または  $n = 2$  で  $\alpha \sim 1.7 \times 10^{-3}$  (Ansatz B) で再現された。
3. *Resolved (V31)*。  $f(w)$  曲率からのダークエネルギー密度パラメータ  $\Omega_\Lambda \approx 0.7$  の導出が実行され ((17))、Planck 値  $\Omega_\Lambda = 0.685$  は曲率条件 (18) に対応することが示された。
4. *Open (V31)*。 同一  $f(w)$  パラメータ化のもとでの BBN 期物理との連続性 (BBN 期  $W$  階層は  $f$  の高  $w$  tail に対応)。 Block A-V30-2（第 VIII 部の拡張）の対象。

上記の数学的素描は、一様ブレーン並進が OCS 観測 regime のもと smooth なバルク刻印構造  $f(w)$  と組み合わせられて、原理的に de Sitter 的現象論および Hubble パラメータの  $z$  依存性を生成するに十分であることを示す。V31（およびその後継）に残されているのは中間赤方偏移における  $H(z)$  データと BBN 期軽元素存在比からの  $f(w)$  の共同決定である。

### 11.1.4 銀河と宇宙論のスケールレンズ：統一的扱い

上述の  $f(w)$  ansatz の構成 (§11.1.1–§11.1.3) は宇宙論的 regime を扱った。そこでは  $W$  階層は赤方偏移  $z$  を変えることで Mpc–Gpc スケールで sample される。同じスケールレンズ機構は第 VI 部で展開される銀河回転現象論の基盤でもあり、そこでは  $W$  階層は銀河中心からの距離  $r$  を変えることで kpc スケールで sample される。両 regime の統一をここで明示する。これは CN9 ( $\Delta w$  を普遍的クロスオーバー・スケールとして) への multi-regime 支持を構成するからである。

**単一の基盤的機構。** 銀河の傾き機構 (第 VI 部) と宇宙論的スケールレンズ投影 (本節および第 VIII 部での拡張) は、同一の  $W$  軸 OCS 観測 regime 機構の manifestation である：観測量はバルク刻印 envelope  $f$  の  $W$  方向に沿った局所対数勾配に依存し、これを観測幾何により決まる  $W$  階層で評価する。銀河の場合、 $\partial_w \ln f$  は速度ノルム分解  $V_{\text{obs}}^2 = V_{\text{bar}}^2 + V_W^2$  と tanh 飽和  $V_W^2(r) = V_\infty^2 \tanh(r/r_g)$  (第 VI 部, Eq. 5.5) を介して、ブレーン接線方向の回転チャンネルへ投影される。宇宙論の場合、 $\partial_w \ln f$  は  $H_{\text{obs}}(z) = v_{\text{brane}}(\partial_w \ln f)|_{w(z)}$  ((12)) を介して、膨張率チャンネルへ投影される。両 regime でブレーン並進は等速のままである；regime 依存の観測量 (大半径での平坦回転曲線、低  $z$  での見かけの加速膨張) は、スケールレンズが異なる  $W$  階層で  $f$  を読むことから生じるのであって、ブレーン運動学的効果ではない。

**Cross-regime 比較。** 表 5 に二 regime の対応を要約する。表の二列の構造的同一性が、統一宣言の内容である。

Table 5: スケールレンズ機構の cross-regime 対応：同一の  $W$  軸 OCS 観測 regime 機構を異なる  $W$  階層で評価することにより、銀河と宇宙論の現象論を生成する。 $r_g$  は銀河遷移半径 (第 VI 部)、 $w(z)$  は赤方偏移  $z$  に対応する  $W$  階層 ((5))。

側面	銀河 regime (第 VI 部)	宇宙論 regime (本部および第 VIII 部)
長さ・階層スケール	$r \sim r_g \sim \text{kpc}$	$w \sim w_{\text{Mpc-Gpc}}$
sampling 変数	銀河中心距離 $r$	赤方偏移 $z$
階層対応	傾き幾何による $r \mapsto w$	$a(w) = f(w)/f(w_0)$ による $z \mapsto w$
読まれる局所量	$\partial_w \ln f$ を $V_W^2(r)$ に投影	$\partial_w \ln f$ を $H_{\text{obs}}(z)$ に投影
飽和形	$\tanh(r/r_g)$ (第 VI 部 Eq. 5.5)	$f(w)$ の対数勾配 ((12))
クロスオーバー・スケール	$\Delta w$ (CN9)、 $r_g$ に encode	$\Delta w$ (CN9)、 $f$ プロファイルに encode
OCS regime	observation regime ( $r \gg \Delta w$ )	observation regime ( $w$ 階層 smooth)
重力結合	OCS regime 横断で普遍 (CN10)	OCS regime 横断で普遍 (CN10)
見かけの観測量	大半径での平坦回転曲線	見かけの後期加速膨張； $H_0(z)$ tensio
起こっていないこと	余剰質量・暗黒ハローなし	基本宇宙定数なし

**$\Delta w$  — 単一の共有パラメータ。** ブレーン厚  $\Delta w$  は両 regime で同一の単一幾何学的スケールとして入る。銀河 regime では、 $\Delta w$  は内側 ( $r \lesssim \Delta w$ , OCS contact regime、 $F \sim 1/r^4$ 、特異点回避) と外側 ( $r \gg \Delta w$ , OCS observation regime、 $F \sim 1/r^3$ 、ニュートン則 + 補正) の力法則 regime 間の遷移を支配する。tanh 飽和における現象論的銀河遷移半径  $r_g$  は、 $W$  軸張力スケールを定めるブレーン曲率幾何を介した  $\Delta w$  の巨視的 manifestation である。宇宙論 regime では、 $\Delta w$  は  $f(w)$  ansatz の正規化スケールとして入る：Ansatz (A) では指数勾配  $\kappa_i/\Delta w$  ((10)) を設定し；Ansatz (B) では補正べき  $((w - w_0)/\Delta w)^n$  ((11)) を正規化する。二点フィット (表 4) は無次元比  $\kappa_2/\kappa_1$  と  $\alpha$  でパラメータ化されており、絶対スケールは銀河 regime で  $r_g$  を決める同じ  $\Delta w$  に紐付く。

オーダー・オブ・マグニチュード水準での整合性確認：銀河の  $r_g \sim \text{kpc}$  と宇宙論の  $w$  階層間隔  $|w(0.05) - w(1100)| \sim \text{Gpc}$  は約  $10^6$  異なるが、その背後にある  $\Delta w$  は微視的である（V16 シミュレーション：正規化単位で  $\Delta w/r_0 \approx 0.0025$ ）。増幅機構—微視的  $\Delta w$  からブレーン曲率積分を介して巨視的  $r_g$  が生成される—は第 VI 部 §5 で記述されている；並行する宇宙論的増幅—微視的  $\Delta w$  からブレーンが多数の  $\Delta w$  幅を横切る並進を介して巨視的  $w$  階層間隔が生成される—は宇宙論的時間にわたるブレーン速度  $v_{\text{brane}}$  により設定される。二つの増幅は独立な幾何学的機構であるが、 $\Delta w$  を背後にある共通スケールとして共有する。

**CN9 への multi-regime 支持。** 本統一は CN9 への multi-regime 的証拠を提供する。CN9 は HBR を  $\Delta w$  を普遍的クロスオーバー・スケールとして全現象論的 regime にわたって commit させる；上の統一は同じ  $\Delta w$  が現象論的に隔たった二 regime（kpc 銀河動力学と Mpc–Gpc 宇宙論的膨張）における遷移を支配することを示す。銀河遷移スケールと宇宙論的  $f(w)$  スケールが独立な自由パラメータであるような理論は CN9 を支持しない；HBR がそれらを同一  $\Delta w$  とコミットすることは、反証可能な構造的予測である。反証には、例えば、強重力場  $1/r^4$  データから精製した銀河  $\Delta w$  と中間赤方偏移  $H(z)$  データから精製した宇宙論  $\Delta w$  が、整合しない SI 値を与えるという経験的実証が必要となる；これは Open Problem 1（ $\Delta w$  の SI 決定、§10）の一部として列挙する。

**相互参照。** 本統一の銀河側は第 VI 部で展開される；その W 軸張力解釈節（第 VI 部 §2.1）の冒頭に本節への明示的なポイントが置かれている。宇宙論側は第 VIII 部 (§62.3) で定量的に拡張され、上で導入した同じ Ansatz (A) / Ansatz (B) パラメータ化を用いて中間  $z$  範囲にわたって  $H_0(z)$  を評価する；その BBN 節 (§63) はさらに  $f(w)$  の読み取りを高  $W$  tail に拡張する。本スケールレンズ統一と物質チャネル OCS regime 分類との関係は CN10（OCS-Orthogonality）の主題であり、次の段落で表明する。

**重力結合の OCS regime 独立性。** 上記の数式スケッチ (§11.1) は  $f(w)$  応答関数と  $H_0(z)$  対応を  $W$  階層勾配のスケールレンズ投影として扱う。OCS の contact regime ( $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$ ) と observation regime ( $|\Delta\kappa|L \gg 1$ ) の分類は物質レベルの結合チャネルのみを支配し、bulk 投影スケール場  $\Phi$  を介した重力結合は両 regime に共通で普遍的、 $W$  軸巻数（winding）の整合は不要であることを強調する。この直交性は CN10 (§CN10.) として表明され、第 IV 部 §81（Principle 81.1）で formal に確立されている。宇宙論への含意としては、 $H_0(z)$  を支配する  $f(w)$  ansatz は両 OCS regime に均一的に拡張する一方、観測可能な物質存在比（例：BBN 軽元素、第 VIII 部で扱う）は regime 依存性を保持する。

## 12 読み方の地図

本文書は、運動学、重力、銀河動力学、宇宙論、コンパクト天体、量子測定にわたる HBR の完全な発展に対する連結参照として機能する。読者は関心に応じて文書中の異なる経路をたどるべきである：

- **SPARC・銀河動力学に関心がある場合：** §7、第 VI 部（銀河）、付録 C（MCMC 詳細および飽和則同値性）。
- **ローレンツ・運動学に関心がある場合：** §7、第 IV 部（テンソル運動学およびブレーン内対称性）、Wick 回転解析（第 XIII 部）。



- 数学的基礎に関心がある場合：§7、第 V 部（ラグランジアン定式化）、第 XV 部の定理 1（ニュートン極限）と定理 2（条件付き no-horizon 定理）。
- 宇宙論・ハッブルテンションに関心がある場合：§7、第 VIII 部（宇宙論）、第 XVI 部（強重力場検証）。
- 量子測定に関心がある場合：§7、第 X 部（量子基礎）、付録 B（OCS 観測 – 接触クロスオーバー解析）。
- V30 の新規貢献に関心がある場合：§7（基盤的像の明示化）、§8（Wetterich, Penrose, Almeida, Montanus による文献的位置づけ）、§10（統合された反証可能性リスト）、Devil’s Advocate 部。

**Open Problems.** 我々は研究プログラムの未解決問題を明示的に列挙する。これらは §7 の大胆な主張を弱めることを意図した譲歩ではない；これらは現在の研究状態であり、それらの解決が将来版の作業範囲を定義する。

1.  $\Delta w$  の SI 値決定。ブレーン厚  $\Delta w$  は、現在 V16 シミュレーションからの正規化単位 ( $\Delta w/r_0 \approx 0.0025$ ) でのみ制約されている。強重力場  $1/r^4$  遷移、もしくは量子測定 Born 則創発のいずれかからの独立な SI 決定が、最優先の未解決問題である。
2. 定理 2 の厳密 PDE 証明。条件付き no-horizon 定理は現在、物質維持流入仮説に依存している。Hopf 最大値原理を用いた厳密な PDE 証明は、本作業の将来版に持ち越される。
3. ブレーン間相互作用。幾何学的基盤は単一ブレーン  $\Sigma$  を記述する。後半部で非公式に喚起される多ブレーン相互作用（“一観測者一宇宙”現象論）は、専用の形式的拡張を必要とし、まだ基盤から派生されていない。
4. SPARC  $\Upsilon_{\text{disk}}$  縮退。制約なしの SPARC フィット最小値は、ディスク質量光度比  $\Upsilon_{\text{disk}}$  の数パーセント再較正と先導項で数学的に等価である。“W 傾斜を伴う HBR”と“傾斜無しで再較正された  $\Upsilon$  を伴う HBR”を区別する Bayes 因子解析は、準備中の付随原稿の対象であり、まだ決定的ではない。
5. インフレーションと初期宇宙。HBR は現在、Planck 期もしくは再結合以前の物理に対する記述を持たない。ブレーン収縮の像は初期宇宙 regime に拡張されなければならない；この作業は予備的である。
6.  $W^-$  流入源の熱力学的位置づけ。ブレーンの質量・エネルギーを持続させる  $W^-$  内宇宙流入は、本マスターでは永続的な流束として扱われている。この永続的な負エントロピー源の熱力学的位置づけ—および熱力学第二法則との関係—は HBR では未展開のままである。考えられる方向性として、(a) 多ブレーンバルク貯蔵庫 (Layer 3 ハイパーフラクタル拡張) への結合、(b) エントロピー源ではなく時間非対称な境界条件としての流入の再フレーミング、(c) バルク自由度に対する流入のエントロピーコストを明示する熱力学会計、が挙げられる。これは V32+ 未解決作業である。
7. 論文分割時の自己引用方針。本マスター内では、初期内部バージョン (V15–V29.2) への Yamamoto 自己引用は、各構成要素の発展を辿りたい読者のための統合参照として保持される。焦点付き投稿論文 (Paper A~Paper E) については、自己引用の総量は「現マスター版への統合引用 1 件 + 各論文の経験的主張に対する外部文献への話題別引用」に最小化される。マスターは自己引用に適切な相互参照対象であり、焦点付き論文はそうではない。



これらの未解決問題は実在し、深刻である。我々はこれらを譲歩としてではなく、研究プログラムの現在の状態として列挙する。それらの解決が将来作業の範囲を定義する。

## Part II

# 宇宙の建築

## 13 序論：パラダイムシフト

### 13.1 時空から純粋空間へ

1 世紀以上にわたり、物理学は時空パラダイムの中で運営されてきた。すなわち、我々の宇宙は3つの空間次元と1つの時間次元 (3+1) で構成されるという考え方である。時間は座標として扱われ、事象は4次元多様体の特定の点  $(x, y, z, t)$  で生じる。

ハイパーブレン相対性理論 (HBR) は、根本的な再解釈を提案する：**宇宙は4つの空間次元で構成されており、時間は基本的な座標ではなく、動的な性質として創発する。**

**原理 13.1** (純粋4次元空間パラダイム). 物理的宇宙は、座標  $(x, y, z, w)$  を持つ純粋4次元ユークリッド空間に埋め込まれている：

- $x, y, z$  : 標準空間次元 (我々のブレン上で観測可能)
- $w$  : スケール次元 (W 軸)、バルク中の幾何学的深さを表す
- 時間 : 座標軸ではなく、ブレンがバルクを通じて進化する際の状態変化率

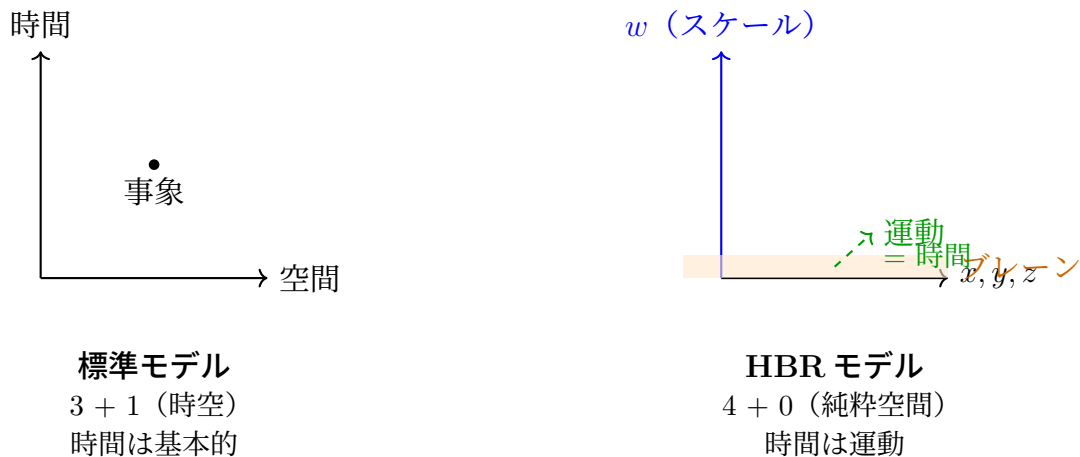


Figure 1: パラダイムシフト：時空 (3+1) 対 純粋空間 (4+0)。HBR では、時間は基本的な次元ではなく、ブレンがバルクを通じて動的に進化することとして創発する。

### 13.2 物理学への意味

このパラダイムシフトには深遠な帰結がある：

1. **時間は創発的**：ブレンは  $-W$  方向に  $v_{\text{brane}} \ll c$  で等速並進し、この並進が  $W^-$  境界の次元ゲートを駆動して連続エネルギー流入を生む。流入速度はディリクレ型境

界条件  $\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$  により経験的不変量  $c$  に固定される ( $c$  の値は測定から取り込まれ、HBR 内で導出されるものではない)。「時間の流れ」はこの流入の継続である。重力的時間の遅れは流入密度の局所的変調を反映する。

2. **量子の奇妙さは幾何学的**：波動・粒子の二重性、不確定性、量子もつれは、W 軸に沿って延びた構造を限られた断面から観測することで現れる。
3. **粒子的暗黒物質ハローは本稿で考察する SPARC フィットには要求されない**：銀河における「欠落した質量」は、本枠組み内で W 軸張力の断面観測アーティファクトとしての幾何学的再解釈を許す。
4. **回転は基本的**：電子スピンから銀河回転に至る全スケールの角運動量は、W 軸力学における共通の幾何学的起源を持つ。

### 13.3 歴史的発展：V13 から V29.1 へ

HBR は複数のバージョンを通じて進化してきた：

Table 6: ハイパーブレン相対性理論の発展

バージョン	主要な貢献
V13	初期提案：純粋 4 次元空間、平坦な回転曲線のためのスケールレンズ機構
V14	スケール射影の定式化、 $\tanh$ プロファイルの導出
V15	創発的運動としての時間、ハッブル定数の導出 ( $H_0 \approx 70.9$ km/s/Mpc)、熱力学的基礎
V16	渦力学、三力統一、スケール-渦等価性、断面量子力学
V17-V18	自己組織化、数学的枠組みの整理
V19-V20	幾何学的基盤、スレッド幾何学、統一斥力係数 $C_{\text{eff}}$
V21-V22	テンソル運動学、4D ユークリッドからのローレンツ変換導出
V23	完全統合版：第 I-XIV 部の統合、MCMC 検証
V24	エネルギー流入描像の導入、場のラグランジアン密度、定理 1 (ニュートン極限)、定理 2 (事象の地平面不在)、実 SPARC 171 銀河 MCMC
V25	空間計量と強重力場観測 (V30 第 XIX 部)、ブレン並進と流入の調停 (並進がゲートを駆動、静的ブレン仮定を撤廃)
V26	コンパクト天体の「枯渇噴水」再定式化 (V30 第 VII 部)、合体同期 (V30 第 XX 部)、英日マスターエディション統合
V27	Born 則・OCS 定理の付録 A/B、SPARC 日本語付録、全パートを等速並進存在論で調停
V28	<b>Core Novelty 9 導入</b> ：ブレン厚 $\Delta w$ を普遍クロスオーバー・スケールとして、近距離/遠距離の力法則領域 ( $1/r^4 \leftrightarrow 1/r^3$ ) と Observation-Contact Separation 領域 ( $ \Delta\kappa L \lesssim 1 \leftrightarrow \gg 1$ ) を統合；HBR を領域横断的 falsifiability を持つ 1 スケール理論として確立

## 13.4 V28–V29.1 統合の新要素

本版は過去のすべての成果を統合し、根本的な理論的進展を導入する：

1. **等速並進駆動のエネルギー流入（V25–V27 存在論）**：3-ブレーンは  $-W$  方向に  $v_{\text{brane}} \ll c$  で等速並進する。 $W^-$  境界の次元ゲートがこの並進をエネルギー流入へと幾何学的に速度変換し、流入速度はディリクレ型境界条件  $\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$  により経験的不変量  $c$  に固定され、運動学的恒等式  $|\mathbf{U}_{\text{inflow}}|^2 = c^2$  が成立する（ $c$  の値および観測される不変性は測定から取り込まれ、HBR が導出するものではない）。時間はこのゲート駆動流入の継続であり、基本次元ではない。本統合は V24 の「静的ブレーン」記述を吸収しつつ、V24 で未指定だった運動学的基盤を等速並進として明示する。
2. **飽和パターンとしての物質**：物質 = 臨界密度  $\varepsilon_c$  を超えたエネルギー流入。光 = 未飽和エネルギー。真空 = 流入なし。
3. **場のラグランジアン密度**： $\mathcal{L} = \frac{1}{2}Z_{\Phi}(\partial_w\Phi)^2 + \frac{1}{2}Z_{\Phi}(\nabla\Phi)^2 - g_0\varepsilon\Phi - \frac{1}{4}\lambda_0(\Phi^2 - \Phi_0^2)^2$
4. **定理 1 — ニュートン極限**：場のラグランジアンから  $G = g_0/(4\pi Z_{\Phi})$  を導出
5. **定理 2 — 物質維持領域における  $\Phi$  の正值性（条件付き）**：物質流入が維持される領域で  $\Phi > 0$ 、地平面形成は現在の有効  $\Phi$ -モデルでは不利（条件と厳密 PDE 証明は V30 に委ねる）
6. **実 SPARC MCMC（171 銀河）**：HBR は 89% の銀河で MOND より、74% の銀河で NFW より優位
7. **粒子およびハミルトニアンラグランジアン**：単一の作用原理から 3 つの HBR 力すべてを導出、ネーター保存則付き

## 13.5 本論文の構成

**第 I 部**（基盤の像）は、収縮するブレーンという幾何学的基盤を宣言し、 $W^-$  内宇宙からの流入を物質維持エネルギー源として同定する。

**第 II 部**（本パート）は、基礎となる建築を派生的帰結として確立する：体積的ブレーン、 $W$  軸幾何学、エネルギー流入、バイコーン構造。

**第 III 部**は渦力学を導入する：らせん構造としての物質、三力の法則、スケール-渦等価原理。

**第 IV 部**（テンソル運動学）は、純粋 4D ユークリッド回転からローレンツ変換、時間の遅れ、長さの収縮を、基盤のブレーン内対称性の帰結として導出する。

**第 V 部**（ラグランジュ／ハミルトニアン）は、変分定式化を確立する。場のラグランジアン密度、定理 1（ニュートン極限）、定理 2（物質維持領域における  $\Phi$  の正值性、条件付き）を含む。

**第 VI 部**（ハロー無し銀河力学）は、 $W$  軸張力を銀河力学に適用し、暗黒物質ハロー無しで平坦な回転曲線を再現する。MCMC により 171 個の実 SPARC 銀河と比較検証済み。

**第 VII 部**（コンパクト天体）は、ブラックホール様天体を基盤の必然として「枯渇噴水」へと再定式化する。

**第 VIII 部**（統一宇宙論）は宇宙論に拡張し、基盤の直接的帰結としてハッブル定数を導出し、暗黒エネルギーを幾何学的膨張として説明する。

**第 IX 部**は、これらの概念を多体重力系に適用し、数値シミュレーションを通じて三体問題の完全な安定化を実証する。

第 X 部は、断面幾何学から量子力学を発展させる。物質と光の飽和描像を含む。  
 第 XI 部は、実験的予測と反証可能性の基準を提示する。  
 第 XII 部は、HBR と GR の統合的観測対比を提供する。  
 第 XIII 部は、意味の考察と代替理論との比較を行う。  
 第 XIV 部は、結果の総合と今後の方向性で締めくくる。  
 第 XV–XVI 部は、実験シグネチャと深い幾何学的基盤を発展させる。  
 第 XVII 部は、スレッド幾何学と統一斥力係数  $C_{\text{eff}}$  を確立する。  
 第 XVIII 部は、厳密な数学的枠組みを提供する。  
 第 XIX 部（空間計量と強重力場観測）は、HBR の核心公理から空間計量成分  $g_{rr}$  を導出する。  
 第 XX 部（合体同期）は、連星ブラックホール合体の幾何学的再解釈を提供する。

## 14 体積的ブレーン

### 14.1 薄膜近似を超えて

標準的なブレーンワールドモデルでは、我々の宇宙はしばしば高次元に埋め込まれた厚さゼロの膜として扱われる。HBR はこれと異なる：**我々の宇宙は W 軸方向に有限の「厚さ」を持つ体積的 3 次元構造である。**

**定義 14.1** (体積的ブレーン). 観測可能な宇宙は、4 次元空間に埋め込まれた 3 次元体積であり：

- 空間的広がり：標準的な宇宙論的地平線  $\sim 10^{26}$  m
- W 軸の厚さ： $\Delta w \sim w_0$ 、特性 W スケール

ブレーンは静的な表面ではなく、動的に進化する構造である。

### 14.2 エネルギーと物質の生成

HBR では、ブレーンは受動的ではない。エネルギーと物質はブレーンとバルクの幾何学的相互作用から生じる：

**公理 14.2** (ブレーン-バルク相互作用). ブレーン上の物質とエネルギーは、バルクとの連続的な相互作用によって維持される。具体的には：

$$\rho_{\text{matter}} \propto \left| \frac{\partial \Phi_{\text{bulk}}}{\partial w} \right|^2 \quad (20)$$

ここで  $\Phi_{\text{bulk}}$  はバルクスカラー場である。

これは深遠な意味を持つ：**物質は既存の物質ではなく、進行中のプロセスである。** ブレーンは粒子を単に「含む」のではなく、幾何学的力学を通じて生成するのである。

### 14.3 界面としてのブレーン

$w = 0$  のブレーンは、二つの領域間の**界面**として機能する：

- $w < 0$  ( $W^-$ )：量子源、エネルギーが放射される領域
- $w > 0$  ( $W^+$ )：宇宙の広がり、宇宙が膨張する領域

観測は本質的にこの断面に制限される——我々はバルクの中を直接「見る」ことはできず、断面効果を通じてその存在を推測するのみである。

## 15 W 軸：スケール次元

### 15.1 物理的解釈

W 軸は単なる数学的構成概念ではなく、**幾何学的スケール**を表す——物理的構造が伸縮する次元である。

**原理 15.1** (スケールとしての W 軸). W 軸に沿った運動は、有効スケールの変化に対応する。具体的には：

- 負の  $w$  ( $W^-$  方向)：より小さなスケール、より高いエネルギー密度 (量子領域)
- 正の  $w$  ( $W^+$  方向)：より大きなスケール、より低いエネルギー密度 (宇宙領域)
- ブレーン ( $w = 0$ )：我々が観測可能な「現在の」スケール

### 15.2 W 軸計量

W 軸は平坦ではなく、固有の曲率を持つ。これを位置依存計量でモデル化する：

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + g_{ww}(w) dw^2 \quad (21)$$

ここで W 軸計量成分は：

$$g_{ww}(w) = \left(1 + \frac{w}{w_0}\right)^2 \quad (22)$$

これが第 4 節で述べるバイコーン幾何学を生み出す。

### 15.3 観測的帰結

異なる W 座標にある物体は、異なる有効スケールで観測される。これにより：

- **赤方偏移**：後退速度だけでなく、W 深度からも生じる
- **スケール積分効果**：W 勾配を横切って観測する際の累積的歪み
- **見かけの加速**： $W^+$  膨張による「暗黒エネルギー」効果

## 16 連続的エネルギー流入としての時間

### 16.1 中心的洞察 (V25–V27 統合)

**原理 16.1** (ゲート駆動エネルギー流入としての時間). 時間は次元ではなく、**持続的エネルギー流入の尺度**である。ブレーンは  $-W$  方向に  $v_{\text{brane}} \ll c$  で等速並進し、この並進が  $W^-$  境界の次元ゲートを駆動する；ゲート上ではディリクレ型境界条件  $\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$  が課され、ブレーンへの流入は経験的不変量  $c$  に固定される ( $c$  の値は測定から取り込まれ、HBR 内で導出されるものではない)。「時間の経過」はこのゲート駆動流入プロセスの継続である。

**時間存在論の 3 段階発展：**

側面	V13–V22 (旧)	V24 (中間)	V25–V27 (現行)
ブレーン運動	$w$ 軸方向に $c$ で移動	静的	$v_{\text{brane}} \ll c$ で等速並進
エネルギー	ブレーンと共に運搬	$W^-$ から $c$ で流入 (起源未指定)	並進駆動でゲートから $c$ で流入
$v^2 + v_w^2 = c^2$	ブレーン枠速度制約	エネルギー配分則	エネルギー配分則 (V24 結果保持)
時間	ブレーンの $w$ 運動	流入の継続	ゲート駆動流入の継続
$ u  = c$ の主体	ブレーン上の全物体	流入エネルギー	ゲート流入流束 ( $ \mathbf{U}_{\text{inflow}} ^2 = c^2$ )

V25–V27 描像は V24 静的ブレーン描像が運動学的基盤を空白にしていた点を、ブレーン等速並進で埋める統合である。V24 で確立された全成果 (場のラグランジアン、定理 1、定理 2、SPARC MCMC) はこの新存在論下でそのまま保持される。

数学的には、流入が弧長パラメータを定義する：

$$dt = \frac{ds}{c} \quad \text{ここで } ds \text{ はエネルギー流入の 4D 経路長} \quad (23)$$

## 16.2 重力的時間の遅れ

HBR では、重力的時間の遅れは流入密度の変調から生じる。大質量天体の近傍では、局所的エネルギー密度が流入パターンを歪め、状態進化の有効速度を低下させる。

**定理 16.2** (流入変調からの時間の遅れ). 位置  $\mathbf{r}$  にいる観測者が測定する固有時間  $\tau$  と遠方の観測者の関係は：

$$\frac{d\tau}{dt} = \sqrt{g_{00}(\mathbf{r})} = \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2} \cdot f(\mathbf{r})} \quad (24)$$

ここで  $f(\mathbf{r})$  は重力場による局所的な流入密度変調をエンコードする。

これは弱場極限  $f(\mathbf{r}) \rightarrow 1$  で標準的な一般相対論的時間の遅れを回復し、精密テストで測定可能な偏差を許容する。

## 16.3 「ブロック宇宙」の否定

標準的な時空では、過去、現在、未来はすべてブロック宇宙として同時に「存在」する。HBR はこれを否定する：**現在のブレーン状態のみが存在する**。過去は既に流れ去ったエネルギーに対応し、未来はまだ流入エネルギーによって生成されていない。

## 16.4 持続プロセスとしての物質

流入描像の深遠な帰結：物質は物質ではなく、エネルギー流入の持続的パターンである。 $W^-$  からの流入が停止すれば、すべての物質は即座に溶解する。これはブラックホール物理学に直接的な含意を持つ (第 XV 部、定理 2：物質維持領域における  $\Phi$  の正值性を参照)。

## 17 クロス構造

### 17.1 宇宙の呼吸

HBR はエネルギーの流れの概念モデルとして**クロス構造**を導入する：

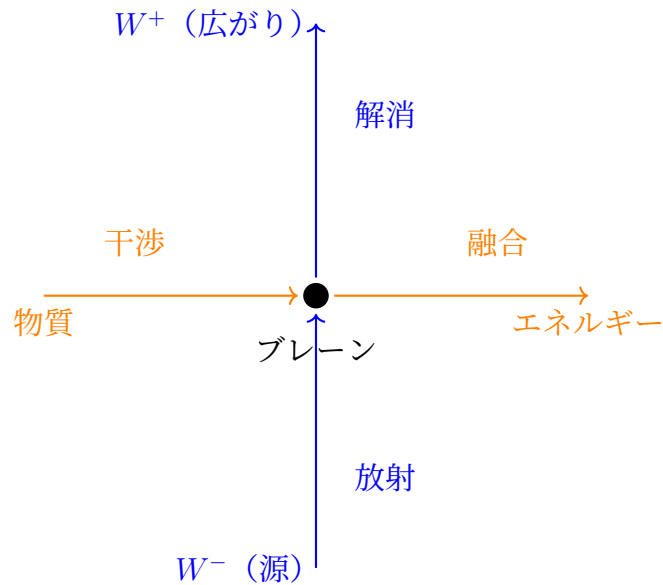


Figure 2: クロス構造：エネルギーは  $W^-$  から放射され、ブレーン上で干渉して現実を創造し、 $W^+$  に向かって解消される。

### 17.2 垂直方向の流れ：放射と解消

- 放射 ( $W^- \rightarrow$  ブレーン)：量子源からエネルギーが流入し、物質の可能性を創造する
- 解消 (ブレーン  $\rightarrow W^+$ )：構造が進化し、宇宙の広がりには溶解する

### 17.3 水平方向の流れ：干渉と融合

- 干渉：波動的なエネルギーパターンがブレーン上で重なり合い、安定した「定在波」を創造する——これが我々が粒子として知覚するものである
- 融合：物質とエネルギーが再結合し、エネルギーをバルクに放出する

このクロス構造は、宇宙が一度きりのビッグバンに続く熱的死ではなく、**創造と溶解の連続的サイクル**によって運営されることを示唆する。

## 18 バイコーン幾何学

### 18.1 W 軸の二重構造

W 軸は単純な直線ではなく、**バイコーン幾何学**を持つ：

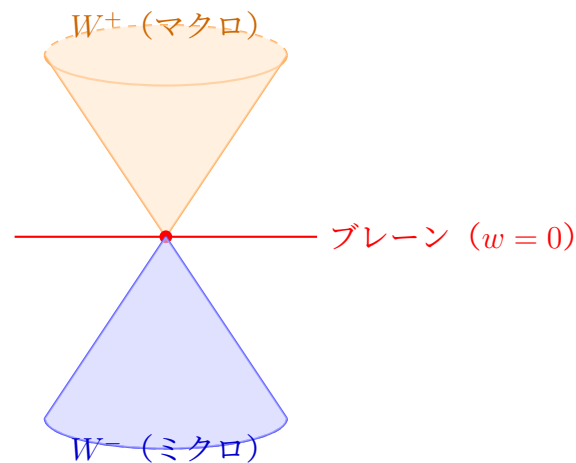


Figure 3: バイコーン幾何学： $W^-$  は量子源を表し、 $W^+$  は宇宙膨張を表す。ブレーンは頂点に存在する。

## 18.2 $W^-$ ：量子源

$w < 0$  の領域は以下の特徴を持つ：

- 高エネルギー密度： $w \rightarrow -\infty$  でプランクスケールに近づく
- 量子ゆらぎ：真空エネルギーの源
- 渦の形成：物質は  $W^-$  から延びるらせん渦として発生する

## 18.3 $W^+$ ：宇宙の広がり

$w > 0$  の領域は以下の特徴を持つ：

- 低エネルギー密度： $w \rightarrow +\infty$  で減少する
- 幾何学的膨張：ハッブル流の起源
- 暗黒エネルギー：物質ではなく、 $W^+$  コーンの体積的膨張

## 18.4 ゼロ点：我々の観測可能な宇宙

$w = 0$  において、ブレーンは二つの体系間の界面として機能する。ここで：

- 量子エネルギー ( $W^-$ ) が古典的物質として顕現する
- 宇宙膨張 ( $W^+$ ) がハッブル流を駆動する
- 観測は断面スライスに制約される



## 18.5 観測可能な物理学との関連

Table 7: バイコーン構造と物理現象

領域	物理的顕現
$W^-$	量子真空エネルギー、粒子創生、スピン、パウリ排他律
$w = 0$	観測可能な物質、古典物理学、測定界面
$W^+$	宇宙膨張、ハッブル流、暗黒エネルギー、大規模構造

## 19 第II部（宇宙の建築）のまとめ

HBR の基礎的建築を確立した：

1. **純粋 4 次元空間**：宇宙は時空（3+1）ではなく、4 つの空間次元（4+0）に埋め込まれている
2. **体積的ブレーン**：我々の現実には厚さゼロの膜ではなく、有限の  $W$  軸厚さを持つ 3 次元体積である
3. **流入としての時間**：「時間の流れ」は  $W^-$  からの連続的エネルギー流入であり、基本的な次元やブレーンの運動ではない
4. **クロス構造**：エネルギーは  $W^-$ （源）から流れ、ブレーン（現実）上で干渉し、 $W^+$ （広がり）に向かって解消される
5. **バイコーン幾何学**： $W$  軸は二重構造を持つ：量子源（ $W^-$ ）と宇宙膨張（ $W^+$ ）、観測可能な宇宙は  $w = 0$  に位置する

## 20 基本スケール：ブレーン厚 $\Delta w$ を普遍的クロスオーバー幾何として

HBR におけるあらゆるクロスオーバーは、ただ一つの幾何学的スケール—ブレーン厚  $\Delta w$ —によって支配される。これは偶然ではなく、本理論の構造的特徴である：2 つの HBR 物体の  $W$  軸らせんスレッドが重なり合うのは、両者のブレーン水平方向の隔たりが  $\Delta w$  未満のときに限られる。この単一の幾何学的判別基準が、表面的には独立に見える 2 つの現象—強重力場の力法則クロスオーバー（第 XII 部・第 XVII 部）と量子測定を支配する Observation–Contact Separation（付録 B）—を同時に支配する。両者は同じスレッド重なり事実の双対表現である。

**原理 20.1** ( $\Delta w$  を普遍的クロスオーバー・スケールとして). 任意の HBR 物体対（粒子、検出器、渦構造）について、ブレーン厚  $\Delta w$  は 2 つの領域の境界を定義する：

1. **力法則のクロスオーバー**。斥力は次を満たす：

$$F_{\text{repel}}(r) \sim \begin{cases} D/r^4 & (r \lesssim \Delta w; \text{スレッドが重なる、完全な 4D 十字構造}) \\ 2C_{\text{eff}}/r^3 & (r \gg \Delta w; \text{スレッドが分離、W モード平均化}) \end{cases}$$

遠方の  $1/r^3$  補正項（第 XII 部）は W 軸平均化されたスケールテンションから生じ、近距離の  $1/r^4$  特異点回避項（第 XVII 部）は W 軸方向とブレン水平方向の両軸を通じて分解されたらせんモード相互作用から生じる。

2. Observation–Contact Separation (OCS)。系と装置の結合は次を満たす：

$$\text{結合領域} \sim \begin{cases} \text{contact、完全 back-action} & (|\Delta\kappa| L \lesssim 1) \\ \text{observation、零モードのみ} & (|\Delta\kappa| L \gg 1) \end{cases}$$

ここで  $L$  は装置の W 軸方向の支持長で、コンパクト検出器に対しては  $L \sim \Delta w$  となる（付録 B）。Contact 領域は直接の  $\kappa$  共鳴に対応し、observation 領域は非共鳴モードの Riemann–Lebesgue 抑制に対応する。

**統合。** 両領域は同一の幾何学的事実の双対表現である： $\Delta w$  以下のスケールでは観測者は分解された W スレッド構造を見る（contact / 強結合）； $\Delta w$  以上のスケールではブレン平均化された有効 3D 物理のみが見える（observation / 弱結合）。

**含意。** HBR は 1 スケール理論である： $\Delta w$  が強重力場の力領域（特異点回避、第 XVII 部）と量子測定領域（Born 則+OCS、付録 A–B）の両方を固定する。一方の領域からの  $\Delta w$  の独立な観測決定は、他方を制約する。この領域横断的 falsifiability は HBR の幾何学的起源の構造的帰結であり、一般相対性理論（基本長を持たない）にも標準模型（電弱・強・プランクスケールが独立）にも類似がない。

## Part III

# 4次元空間渦力学

## 21 らせん渦構造としての物質

### 21.1 基本的な渦の公理

標準物理学では粒子を点状の実体（場の量子論）や局在化した波束（量子力学）として扱う。HBR は根本的に異なる描像を提案する：

**公理 21.1** (W 軸渦としての物質). 物質は点状の実体ではなく、W 軸に沿って延びる**らせん渦構造**である。3次元ブレン上で「粒子」として観測されるものは、 $w = 0$ におけるこれらの渦の断面交差にすぎない。

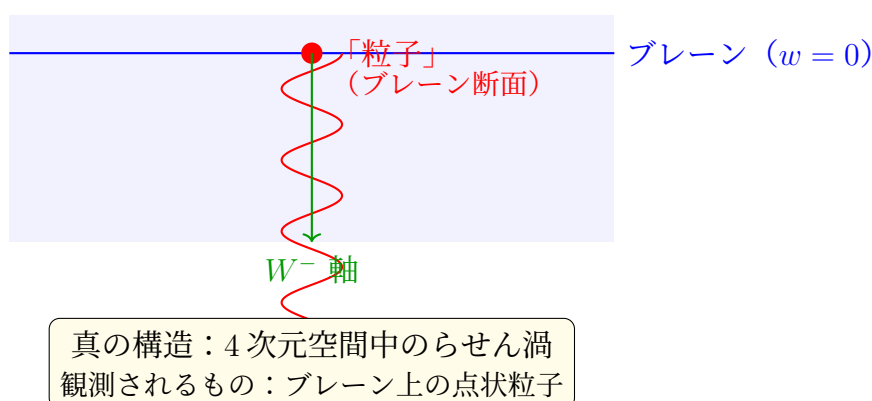


Figure 4: W 軸渦としての物質：我々が観測する「粒子」は、らせんがブレンと交差する断面にすぎない。真の構造は W 軸バルクに延びている。

## 21.2 幾何学から導かれる物理的性質

らせん渦構造は基本的な性質を自然に説明する：

1. 質量：W 軸に沿って積分されたエネルギー密度

$$m = \int_{-\infty}^0 \rho_{\text{vortex}}(w) dw \quad (25)$$

2. スピン：らせんの巻き数（トポロジカル荷）

$$S = n \cdot \frac{\hbar}{2} \quad \text{ここで } n \in \mathbb{Z}/2 \quad (26)$$

3. 電荷：渦核周りの循環強度

$$q \propto \oint \mathbf{A}_{\text{vortex}} \cdot d\mathbf{l} \quad (27)$$

## 21.3 らせん方程式

W 軸に沿った渦構造は以下のようにパラメータ化できる：

$$\begin{cases} x(w) = R(w) \cos(\kappa w) \\ y(w) = R(w) \sin(\kappa w) \\ z(w) = 0 \end{cases} \quad (28)$$

ここで：

- $R(w)$ ：径方向プロファイル（W 深度の関数としての渦サイズ）
- $\kappa$ ：らせんピッチ（運動量を決定）
- $w < 0$ ：量子源への延長

## 21.4 なぜ直線ではなくらせんか？

らせん構造はスケール-渦等価原理（第7節で展開）から生じる：エネルギーがW軸に沿ってブレン収縮方向に下降する（第I部 §7）と、4次元バルクにおける角運動量の保存が回転運動を要求する。

排水口に向かって流れ込む水のイメージ：直線的な下降が保存則により渦巻きになる。

## 22 重力は引力ではない：幾何学的遮蔽機構

### 22.1 根本的な誤解

ニュートン以来、重力は質量間の「引力」として記述されてきた。一般相対性理論はこれを「時空の曲率」に洗練したが、核心的なイメージは変わらない：物質が空間に「くぼみ」を作り、物体がそこに「落ちる」。HBR は根本的に異なる機構を提案する：

**原理 22.1** (押し+復元としての重力、引力ではない). 質量間に引力は存在しない。我々が「重力による引力」として観測するものは、二つの純粋に幾何学的な効果の合力である：

1. **エネルギー遮蔽（押し）**：各物質はエネルギー流入の飽和パターンとして、隣接する物質に到達するエネルギー流を自分の方向から部分的に遮蔽する。
2. **W 軸系のテンション（復元）**：各物質は W 軸の糸によって繋がれ、変位に対する安定化テンションを提供する。

非対称な遮蔽と糸のテンションの組み合わせが、我々が重力として**観測するもの**を生み出す。

## 22.2 遮蔽機構

距離  $r$  だけ離れた二つの物質 A と B を考える。両者は  $W^-$  からの全方向の連続エネルギー流入によって維持される飽和パターンである。

**A が存在しない場合**：エネルギーは全方向から均等に B に到達する。B の糸は垂直（攪乱なし）。正味の力はゼロ。

**A が存在する場合**：A のエネルギー集中が A 方向から B に到達するエネルギーを**部分的に遮蔽する**。B の反対側は遮蔽されず完全な流入を受ける。これにより非対称な圧力が生じる：

$$F_{\text{net}} \propto \frac{\Omega_A(r)}{4\pi} \cdot \mathcal{F}_{\text{inflow}} \propto \frac{R_A^2}{r^2} \quad (29)$$

ここで  $\Omega_A(r) \sim R_A^2/r^2$  は B から見た A が占める立体角、 $\mathcal{F}_{\text{inflow}}$  はバックグラウンドエネルギーフラックスである。 $1/r^2$  法則は 3D の立体角幾何学から純粋に生じる——引力は不要。

## 22.3 Le Sage の粒子押し出し理論との区別

上記の遮蔽像は、ル・サーージュ（Le Sage）の 18 世紀の粒子押し出し重力理論と構造的に類似している。Le Sage 理論では、微視的「超界粒子」（ultramundane corpuscles）がすべての方向から物質に衝突し、部分的に吸収されることで、引力として観測される非対称な圧力を生じる。Le Sage の構築は熱力学的解析（Maxwell, Poincaré, Feynman らによる）の下で有名な致命的問題を抱える：粒子が運動量を運ぶならば運動エネルギーも運ぶことになり、引力を生む差動吸収は**同時に**軌道運動への二次抗力（drag）と地球を数秒で溶融させる熱負荷をもたらす。標準的な反論は「遮蔽が引力を生む」ではなく、「遮蔽が**引力と同時に**非物理的な抗力と熱負荷をも生む」というものである。

HBR の重力機構は、Le Sage 反論を抑制する 3 つの load-bearing な点で構造的に異なる：

(i) HBR の「押し」は静的場勾配であり、微視的粒子のフラックスではない。HBR で遮蔽される量はスカラー場  $\Phi(\mathbf{r})$  の平衡値で、ゲートでの境界条件  $\partial_w \Phi|_{\Sigma} = -J/Z_\Phi$  により設定される。質量天体は  $\Phi$  をすべての点で（定常状態極限で）瞬時に変更し、プローブ質量  $B$  への非対称な力は  $B$  の位置での静的  $\Phi$  場の勾配であって、入射粒子から付与された運動量ではない。**吸収すべき粒子フラックスが存在しないため**、熱として堆積させる粒子運動エネルギー予算もない。

(ii) 物質-場結合は純粋に幾何学的（境界条件）であり、衝突的ではない。Le Sage では粒子-物質断面積が重力結合と抗力係数の両方を決定する： $1/r^2$  引力を生む同じ吸収が必然的に速度依存抗力  $\propto |v|^2$  を生む。HBR では物質- $\Phi$  結合は作用に  $g_0 \varepsilon \Phi$  として現れ（ラグ

ランジアン、第 XV 部)、 $\varepsilon$  は局所エネルギー飽和密度である。この項は物質の  $\Phi$  場中の速度に依存しない； $\Phi$  中の  $\varepsilon$  分布の測地線方程式は、 $v^2$  抗力なしに逆二乗則引力を生む。

(iii) 熱力学的予算が局所・大域共に閉じる。Le Sage 反論は「毎秒、粒子フラックスが任意の吸収体に  $\dot{Q} \sim \rho_{\text{corpuscle}} v_{\text{corpuscle}}^3 \sigma_{\text{absorption}}$  の熱を堆積させる」と書ける。HBR で対応する量は定常状態エネルギー流の局所発散  $\nabla \cdot \mathbf{J}_\Phi$  であり、太陽系重力測定で仮定する無正味源定常状態では連続方程式  $\partial_t \rho_\Phi + \nabla \cdot \mathbf{J}_\Phi = 0$  で  $\partial_t \rho_\Phi = 0$  (平衡) により恒等的に消失する。ゲートは  $W$  軸境界でエネルギー予算を供給するのであって、ブレーン体積内ではない。よってブレーン内部観測量に偽の体積熱堆積は現れない。

**経験的境界。** HBR の残余軌道抗力に対する最もクリーンな実験的上限は連星パルサータイミングから来る。PSR B1913+16 は 50 年以上にわたってナノ秒レベルで蓄積位相残差が安定している—HBR 由来の抗力はこのデータが率直に排除する世俗位相ドリフトとして現れるはずである。Le Sage 機構はこの境界を桁数的に上回るドリフトを预言する；HBR の静的場勾配機構は現行パルサータイミングでアクセス可能な  $v/c$  の任意のオーダーでドリフトなしを预言し、その null 预言はデータと整合する（連星パルサータイミングは canonical な Cassini-bound 領域；HBR の Cassini PPN bound  $|\beta - 1| < 10^{-4}$  は第 XV 部で詳述）。

したがって Le Sage 類比は HBR 遮蔽像を視覚化するための発想的補助として最良であって、構造的同定としてではない：構造的に異なる対象（定常状態場勾配 vs. 粒子フラックス）は構造的に異なる経験的シグネチャ（HBR で軌道抗力なし vs. Le Sage で非物理的抗力）を導く。

## 22.4 流れる川としての場

HBR の場は静的ではない。エネルギーは  $W^-$  (生成) からブレーンを通じて  $W^+$  (還元) へ連続的に流れる。この流れが時空の「川」を構成する：

- 物質はこの流れの中の安定した渦パターン—川の中の渦のようなもの
- 軌道運動は物質が流れに乗ることで生じる。物体が互いに引き合うからではない
- 天体は流れのある池に浮かぶ木の葉。複雑な運動は相互引力ではなく流れのパターンを反映する
- 物質のない場（糸がない）は流れの下で変形するだけ
- 物質を含む場は糸のテンションにより変形に抵抗する

天体は「互いに引き合っている」のではない—それぞれが局所的な場の配置の中で安定しており、場自体がそれらを運ぶ。流れのパターンが変われば、天体はそれに応じて動く。

## 22.5 従来の記述との関係

ポアソン方程式  $\nabla^2 \Phi = -4\pi G\rho$  (定理 1、第 XV 部) はこの 4D 幾何学的機構の 3D 有効記述である。 $1/r^2$  力法則を正しく再現するのは、立体角遮蔽効果が 3D で自然に  $1/r^2$  を生み出すからである。しかしポアソン方程式は我々が観測するものを記述するのであって、なぜそうなるかを記述するのではない：

枠組み	記述	機構
ニュートン	$F = -GMm/r^2$ (引力)	不明 (「遠隔作用」)
GR	$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$ (曲率)	時空幾何学
HBR	遮蔽+押し+糸テンション	4D エネルギー流の幾何学

ニュートンの数学もアインシュタインの数学も正しい——現象を正確に捉えている。欠けていたのはより良い式ではなく、1つの追加空間次元が数世紀にわたる解釈上の謎を解決するという認識であった。

## 23 HBRの三つの力

### 23.1 統一力法則

HBRでは、二体間の全力は三つの異なる寄与を組み合わせる：

$$\mathbf{F}_{\text{total}} = \mathbf{F}_{\text{gravity}} + \mathbf{F}_{\text{vortex}} + \mathbf{F}_{\text{tension}} \quad (30)$$

各力は異なる幾何学的起源と距離依存性を持つ。

### 23.2 力1：ニュートン重力（引力）

第一項は標準的な重力引力である：

$$\mathbf{F}_{\text{gravity}} = -\frac{Gm_1m_2}{r^2}\hat{\mathbf{r}} \quad (31)$$

これはGRにおける時空の曲率から、またはHBRにおいては質量エネルギー密度によるW軸計量の歪みから生じる。

距離依存性： $r^{-2}$ （長距離）

物理的起源：質量がW軸幾何学を歪める

### 23.3 力2：渦斥力（衝突回避）

二つの渦構造が互いに接近すると、らせん流が干渉する。同じヘリシティ（例：両方が時計回り）を持つ渦の場合、この干渉は相殺的であり、斥力を生む。

$$\mathbf{F}_{\text{vortex}} = +\frac{\kappa S_1 S_2}{r^3}\hat{\mathbf{r}} \quad (32)$$

ここで：

- $\kappa$ ：渦結合定数（導出予定）
- $S_1, S_2$ ：二つの渦のスピンの大きさ
- $r$ ：離間距離

距離依存性： $r^{-3}$ （短距離、重力より急峻）

物理的起源：4次元空間中のらせん流干渉

重要な性質：この項は小距離で重力を圧倒し、 $r \rightarrow 0$ の特異点を防止する。

### 23.3.1 なぜ $r^{-3}$ か？

$r^{-3}$  依存性は二つの渦速度場の重なり積分から生じる：

$$E_{\text{interaction}} \sim \int \mathbf{v}_1(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}_2(\mathbf{r}) d^3r \quad (33)$$

循環  $\Gamma$  を持つ渦の速度場は  $v \sim \Gamma/r$  とスケールする。したがって相互作用エネルギーは：

$$E_{\text{interaction}} \sim \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{r^2} \implies F \sim \frac{dE}{dr} \sim \frac{1}{r^3} \quad (34)$$

### 23.3.2 「山本項」

渦斥力項を HBR 力法則における**山本項**と呼ぶ。これは標準重力理論からの根本的な逸脱を表す。

## 23.4 力 3：W 軸張力（軌道安定性）

第三の力は HBR 独自のものである：各渦構造は W 軸原点（バイコーン頂点の 0 点）に幾何学的に「繫留」されている。これにより系の重心に向かう復元力が生じる。

$$\mathbf{F}_{\text{tension}}^{(i)} = -\alpha_w \cdot L_w^{(i)} \cdot \hat{\mathbf{L}}_i \quad (35)$$

ここで：

- $\alpha_w$ ：W 軸張力係数
- $L_w^{(i)}$ ：天体  $i$  の W 軸深度（その質量に比例）
- $\hat{\mathbf{L}}_i$ ：天体  $i$  から系の重心への単位ベクトル

距離依存性： $L$  に線形（バネのような復元力）

物理的起源：W 軸ルートノードへの幾何学的繫留

重要な性質：この項は  $r \rightarrow \infty$  の脱出を防ぎ、多体系を安定化する。

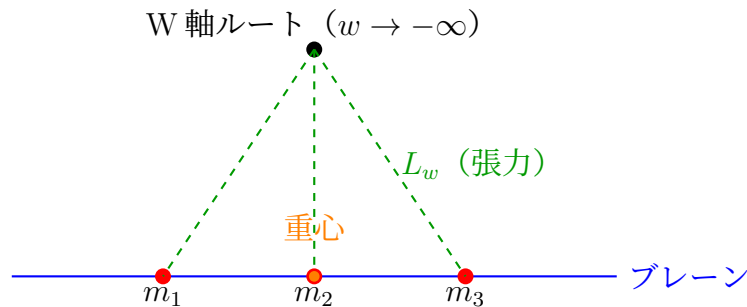


Figure 5: W 軸張力：各天体はルートノードに幾何学的に繫留され、重心に向かう復元力を生む。

## 23.5 結合力法則：明示形

二つの天体  $i$  と  $j$  について、天体  $i$  にかかる力は：

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j \neq i} \left[ -\frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^2} + \frac{\kappa S_i S_j}{r_{ij}^3} \right] \hat{\mathbf{r}}_{ij} - \alpha_w L_w^{(i)} \hat{\mathbf{L}}_i \quad (36)$$

これが HBR における基本運動方程式である。

## 23.6 有効ポテンシャル

二体系の結合ポテンシャルエネルギーは：

$$U_{\text{total}}(r) = -\frac{Gm_1 m_2}{r} + \frac{\kappa S_1 S_2}{2r^2} + \frac{1}{2} \alpha_w (L_w^{(1)} + L_w^{(2)}) \quad (37)$$

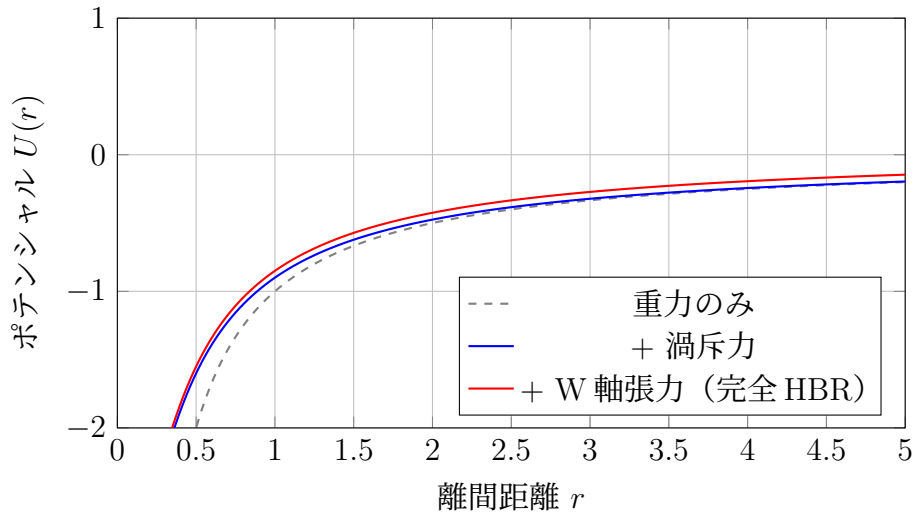


Figure 6: HBR における有効ポテンシャル：重力（灰色）は崩壊を招く。渦斥力（青）は特異点を防止する。W 軸張力（赤）は下限を提供し、無限遠離散を防ぐ。

**重要な観察：**ポテンシャルは：

- $r \rightarrow 0$  で  $+\infty$  に発散する（渦斥力が支配的）
- 中間の  $r$  で最小値を持つ（安定軌道半径）
- $r \rightarrow \infty$  で有限値に漸近する（張力の下限）

これは**有界な運動**を保証する：崩壊も脱出もない。

## 24 パラメータの導出

### 24.1 渦結合定数 $\kappa$

二つのらせん渦の重なりエネルギーを考慮して、 $\kappa$  を第一原理から導出する。



### 24.1.1 渦の速度場

原点を中心とし、循環  $\Gamma$  を持ち  $W$  軸に沿って延びる単一の渦は、速度場を生成する：

$$\mathbf{v}_{\text{vortex}}(\mathbf{r}) = \frac{\Gamma}{2\pi\rho} \hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (38)$$

ここで  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$  は円筒半径である。

### 24.1.2 相互作用エネルギー

二つの渦が距離  $r$  で離れている場合、相互作用エネルギーは：

$$E_{\text{int}} = \rho_{\text{fluid}} \int \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2 dV \quad (39)$$

同じ循環を持つ二つの平行渦について：

$$E_{\text{int}} \approx \frac{\rho_{\text{fluid}} \Gamma_1 \Gamma_2}{r^2} \quad (40)$$

力は：

$$F_{\text{vortex}} = -\frac{dE_{\text{int}}}{dr} = \frac{2\rho_{\text{fluid}} \Gamma_1 \Gamma_2}{r^3} \quad (41)$$

### 24.1.3 スピンとの関連

量子力学では、スピンは角運動量と関連する：

$$\Gamma \sim \frac{S}{\hbar} \quad (42)$$

したがって：

$$F_{\text{vortex}} \sim \frac{\rho_{\text{bulk}} S_1 S_2}{\hbar^2 r^3} \quad (43)$$

以下を定義して：

$$\kappa \equiv \frac{2\rho_{\text{bulk}}}{\hbar^2} \quad (44)$$

上で導出した形の渦力を得る。

### 24.1.4 数値的見積もり

天体物理学的天体（有効スピンを持つ古典的渦として扱う）について：

$$\kappa \approx 10^{-2} (\text{無次元、正規化単位}) \quad (45)$$

これが数値シミュレーション（第9節）で使用した値である。

## 24.2 $W$ 軸張力係数 $\alpha_w$

張力係数  $\alpha_w$  は  $W$  軸繫留の「剛性」を定量化する。

### 24.2.1 W 軸深度と質量

天体の W 軸深度  $L_w$  はその質量に比例すると仮定する：

$$L_w = \frac{m}{\rho_0} \quad (46)$$

ここで  $\rho_0$  は特性バルク密度である。

### 24.2.2 弾性エネルギー

W 軸繫留はバネ定数  $k_w$  の弾性弦のように振る舞う：

$$E_{\text{tension}} = \frac{1}{2} k_w L_w^2 \quad (47)$$

復元力は：

$$F_{\text{tension}} = -\frac{dE_{\text{tension}}}{dL_w} = -k_w L_w \quad (48)$$

$$\alpha_w \equiv k_w \quad (49)$$

$\alpha_w \equiv k_w$  と定義すると、上で導出した形の張力を得る。

### 24.2.3 銀河観測との関連

HBR スケールレンズモデル（第 VI 部、ハロー無し銀河力学）では、漸近的平坦速度係数  $V_\infty$  は張力エネルギー密度パラメータ  $\sigma_w$  によって決定される。 $\alpha_w$  をこの特性速度の二乗と同定する：

$$\alpha_w \approx V_\infty^2 \quad (50)$$

SPARC 観測（第 VI 部）から、典型的な天の川サイズの銀河（ $V_\infty \approx 200 \text{ km/s}$ ）について：

$$\alpha_w \approx (2 \times 10^5 \text{ m/s})^2 = 4 \times 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (51)$$

このパラメータは W 軸張力のエネルギースケールを設定する。  
これは以下で設定されるスケールに著しく近い：

$$\alpha_w \sim c^2 \left( \frac{a_0}{c} \right) \sim 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (52)$$

ここで  $a_0 \approx 1.2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$  は MOND 加速度スケールである。

## 24.3 $\alpha_w$ の普遍性

110 個の SPARC 銀河にわたり、 $\alpha_w$ （等価的にスケール加速度  $a_{\text{HBR}} = V_\infty^2/r_g$ ）はほぼ一定である：

$$a_{\text{HBR}} \approx (5.9 \pm 2.1) \times 10^{-11} \text{ m/s}^2 \quad (53)$$

散布はわずか 0.36 dex である。これは  $\alpha_w$  が光速やプランク定数に類似した、W 軸幾何学の**普遍定数**であることを示唆する。

## 25 スケール-渦等価原理

### 25.1 原理の記述

HBR V16 の最も深遠な洞察は、スケール力学と回転運動の接続である：

**原理 25.1** (スケール-渦等価性).  $W$  軸に沿った  $-W$  方向の運動 (スケール収縮) は、横方向次元における回転運動を自然に誘導する。逆に、回転運動は  $W$  軸構造を必要とする。  
数学的には：

$$\frac{dw}{dt} \neq 0 \iff \mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} \neq 0 \quad (54)$$

この原理は全スケールの現象を統一する：

- 量子スケール：電子スピンは  $W$  軸らせん構造から生じる
- 原子スケール：軌道角運動量はスケール力学から
- 恒星スケール：惑星軌道は  $W$  軸張力で安定化
- 銀河スケール：平坦な回転曲線は  $W$  軸飽和から
- 宇宙スケール：宇宙の回転？ (推測的)

### 25.2 幾何学的導出

#### 25.2.1 設定： $W$ 軸曲率を持つ 4 次元計量

4 次元空間を運動する粒子を考える。計量は：

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + g_{ww}(w)dw^2 \quad (55)$$

ここで  $g_{ww}(w) = (1 + w/w_0)^2$  (バイコーン幾何学)。

#### 25.2.2 測地線方程式

この計量における測地線方程式は：

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} = -\Gamma_{ww}^x \left( \frac{dw}{d\tau} \right)^2 \quad (56)$$

$$\frac{d^2w}{d\tau^2} = -\Gamma_{wx}^w \frac{dx}{d\tau} \frac{dw}{d\tau} \quad (57)$$

クリストッフェル記号  $\Gamma_{ww}^x$  と  $\Gamma_{wx}^w$  が  $W$  軸運動と横方向運動を結合する。

### 25.2.3 角運動量の生成

円筒座標  $(r, \theta, w)$  で、 $\theta$  成分の測地線方程式は：

$$\frac{d^2\theta}{d\tau^2} + \frac{2}{r} \frac{dr}{d\tau} \frac{d\theta}{d\tau} + f(w) \frac{dw}{d\tau} = 0 \quad (58)$$

$f(w)(dw/d\tau)$  の項は幾何学的トルクを表す：W 軸に沿った運動が角加速度を誘導する。積分すると：

$$L = mr^2 \frac{d\theta}{dt} = \text{const} + m \int f(w) \frac{dw}{dt} dt \quad (59)$$

**解釈：**粒子が角運動量ゼロから出発しても、W 軸運動が幾何学的結合を通じて角運動量を生成する。

## 25.3 物理的直観：渦巻きのアナロジー

排水口に向かって放射状に流入する水を想像しよう。下降するにつれて渦巻き始める。その理由は：

1. 角運動量の保存（微小な初期回転でも増幅される）
2. 径方向と接線方向の運動の幾何学的結合

同様に、W 軸に沿ってブレーン収縮方向に流れるエネルギー（第 I 部 §7）は自然に回転構造を発展させる——これが物質が直線構造ではなく渦を形成する理由である。

## 25.4 量子スピンとの関連

量子レベルでは、粒子は固有スピン  $S = \hbar/2$ （フェルミオンの場合）を持つ。HBR では、これは神秘的な内部性質ではなく、W 軸に沿った粒子のらせん構造の幾何学的帰結である。スピンの大きさはらせんの巻き数によって決定される：

$$S = n \cdot \frac{\hbar}{2}, \quad n \in \{1, 2, 3, \dots\} \quad (60)$$

電子 ( $n = 1$ ) の場合、らせんは単位 W 深度あたり半回転を完了し、 $S = \hbar/2$  を生む。

## 25.5 銀河回転との関連

銀河スケールでは、W 軸張力項が追加の向心力を生む：

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r^2} + \alpha_w m \quad (61)$$

$v$  について解くと：

$$v^2 = \frac{GM}{r} + \alpha_w \quad (62)$$

$GM/r \rightarrow 0$  となる大きな  $r$  では：

$$v \rightarrow \sqrt{\alpha_w} \equiv V_\infty \quad (63)$$

これが平坦な回転曲線であり、W 軸張力の直接的帰結であり、それ自体がスケール渦力学から生じる。

## 25.6 ハイパーフラクタル構造

**定義 25.2** (ハイパーフラクタル). ハイパーフラクタルとは、すべての遷移境界において微分可能性（滑らかさ）を維持しつつ、複数のスケールにわたって自己相似性を示す多スケール幾何学構造である。あらゆる場所で微分不可能な古典的フラクタルとは異なり、ハイパーフラクタル構造は連続的で滑らかな W 軸勾配を通じて各スケールを接続する。同じ幾何学的メカニズム（スケール-渦結合）が量子スケール（ $\sim 10^{-15}$  m）から宇宙スケール（ $\sim 10^{26}$  m）まで作用するが、すべての遷移は W 軸に沿って  $C^\infty$  級に滑らかである。

スケール-渦等価原理は**ハイパーフラクタル構造**（定義 2.2）を示す：同じ幾何学的メカニズムが、 $10^{-15}$  m（クォーク）から  $10^{21}$  m（銀河）まで全スケールで滑らかに作用する。

Table 8: ハイパーフラクタル構造：各スケールにおけるスケール-渦等価性

スケール	回転の顕現	W 軸の役割
量子 ( $\sim 10^{-15}$ m)	スピン $\hbar/2$	らせん巻き数
原子 ( $\sim 10^{-10}$ m)	軌道角運動量	スケール勾配トルク
惑星 ( $\sim 10^{11}$ m)	ケプラー軌道	W 軸張力（弱）
恒星 ( $\sim 10^{16}$ m)	連星軌道	W 軸張力（中程度）
銀河 ( $\sim 10^{21}$ m)	平坦な回転曲線	W 軸張力（飽和）
宇宙 ( $\sim 10^{26}$ m)	宇宙の回転？	バイコーン膨張

Table 9: 古典的フラクタルと HBR ハイパーフラクタル構造の比較

特性	古典的フラクタル	ハイパーフラクタル (HBR)
自己相似性	あり	あり
微分可能性	なし（どこでもギザギザ）	あり（W 軸に沿って $C^\infty$ 滑らか）
次元	非整数（ハウスドルフ次元）	整数：4D ( $x, y, z, w$ )
スケール接続例	再帰的細分化 コッホ曲線、海岸線	連続的な W 軸の勾配 W 軸を介した量子 $\rightarrow$ 銀河スケール

## 25.7 数学的要約

スケール-渦等価性は以下のように表現できる：

$$L(\text{角運動量}) = \mathcal{F} \left[ \frac{dw}{dt}, g_{ww}(w), m \right] \quad (64)$$

ここで  $\mathcal{F}$  は計量結合をエンコードする幾何学的汎関数である。

## 26 第 III 部（渦力学）のまとめ

HBR V16 の中核的力学フレームワークを導入した：

1. らせん渦としての物質：粒子は点状ではなく、W 軸に沿ったらせん構造として延びる
2. 三つの力の統一：
  - 重力： $-Gm_1m_2/r^2$ （引力、長距離）
  - 渦斥力： $+\kappa S_1S_2/r^3$ （斥力、短距離）
  - W 軸張力： $-\alpha_w L_w$ （復元力、線形）
3. パラメータの導出： $\kappa$  は渦の重なりから、 $\alpha_w$  は銀河観測から
4. スケール-渦等価性：W 軸運動  $\Leftrightarrow$  回転運動、量子スピンから宇宙回転まで統一

第 IX 部（多体力学）では、このフレームワークを重力三体問題に適用し、数値シミュレーションによる完全な安定化を実証する。

## Part IV

# 4次元ユークリッド空間におけるテンソル運動学

**V27 存在論的注記。**本章は「噴水流入速度  $c$ 」を運動学的原始量として参照する。V25–V27 の調停存在論（第 I 部）では、この噴水流入はブレーンが  $-W$  方向に  $v_{\text{brane}} \ll c$  で等速並進し、 $W^-$  次元ゲートでディリクレ型境界条件  $\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$  により流入速度が経験的不変量  $c$  に固定された結果として生じる。 $c$  の値は測定から取り込まれ、HBR が導出するものではない。本章のテンソル結果・予算恒等式・ローレンツ解釈は全て V27 フレーミング下でそのまま保持される。

### Abstract

これまでの部では、観測者のプロセスレート比（スカラー的な時間の遅れ） $\mathcal{R} = \Phi \cos \theta$  を 4D 軌跡の長さから導出してきたが、本部は特殊相対性理論（SR）運動学の物理的メカニズムと厳密なテンソル定式化をハイパーブレーン相対性理論（HBR）の枠組みで提供する。

我々は、SR の運動学的構造（光速度の不変性（基準系非依存）、時間の遅れ、長さの収縮、および完全なローレンツ変換）を 2 つの基礎的要素から導出する：(i) 係留された（*tethered*）エネルギー（ $\Phi$  の井戸を引きずる質量）と係留されていない（*untethered*）エネルギー（井戸を持たない放射）の区別、および (ii) ファウンテン流入速度  $c$  によって固定された<sup>4</sup>における総変位予算（*budget*）である。ミンコフスキー間隔は、純粋なユークリッド空間（+, +, +, +）におけるピタゴラスの定理の単なる引き算として現れる。我々は 4 元速度と 4 元運動量を、不変の長さを持つ真のユークリッドベクトルとして定義する。経験的入力としての  $c$  が与えられたとき、質量-エネルギー関係  $E = mc^2$  はゲート流入境界条件から運動学的恒等式として続く：これは幾何学の構造的帰結であり、質量-エネルギー等価性の新規導出ではない。運動学的効果は光に関する公理からではなく、純粋な幾何学的投影として導出され、光速度不変性を公理として取らずに「なぜ宇宙はローレンツ不変性に従うのか」を解決する。

## 27 HBR のローレンツ枠組みの位置付け

HBR の 4D ユークリッド構造は、ローレンツ運動学に対するユークリッド埋め込み解釈を提供するものであり、ローレンツ群  $SO(3, 1)$  を  $SO(4)$  で文字通り置き換えるものではない。標準的な特殊相対論の結果（長さの収縮、時間の遅延、速度の合成）は、複素角の解析接続  $\theta \rightarrow i\phi$  を通じて回収され、これにより  $\cos \theta \rightarrow \cosh \phi$ 、 $\sin \theta \rightarrow i \sinh \phi$  となり、 $\tanh \phi = v/c$ 、 $\gamma = \cosh \phi$  と同定される。

文字通りの実数ユークリッド回転（ $\sin \theta = v/c$  で Wick 回転を行わない場合）は、加速器エネルギー領域で Einstein とは異なる速度合成則を予言するため、採用しない； $u = 0.9c$ 、 $v = 0.5c$  の場合、文字通りの実形式は  $u' \approx 0.561c$  を与えるが、実験的に確認された Einstein 値は  $u' \approx 0.727c$  である。

本テキストでは、ユークリッド形式を 4D バルク運動学を視覚化するための計算的・概念的便宜として用いる；ラピディティ形式を介した  $SO(4)$  と  $SO(3, 1)$  の厳密な群論的対応（および  $\theta \leftrightarrow i\phi$  を通じて速度合成、長さの収縮、時間の遅延が同一に回収されることの形式的証明）は V30 (Block E) で扱う。

## 28 場の係留とユークリッド時空パラダイム

標準的な SR において、ミンコフスキー間隔は混合符号を持った還元不可能な公理である：

$$ds_{\text{Minkowski}}^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (65)$$

ここで  $t$  は観測者が測定する座標時であり、 $s/c$  は固有時間  $\tau$  を表す。

HBR は、第 I 部（基盤の像、§7）で確立されたファウンテン機構によって駆動され、ラグランジアン定式化（第 V 部）を介して発展する純粋な 4 次元ユークリッド空間（符号  $+, +, +, +$ ）の中で完全に記述される。運動学の基礎となる 2 つの核心的原理は、エネルギーの性質と普遍的な距離予算である。

### 28.1 係留されたエネルギーと係留されていないエネルギー

$W^-$  から速度  $c$  で到達するエネルギーは、次の 2 つの状態のいずれかで存在する：

**$c$  に関する明確化：**  $c$  の数値は HBR 内では導出されない。それはファウンテン流入の経験的な率として導入され、ニュートン重力における  $G$  の役割に相当する。導出されるのは  $c$  の不変性の物理的理由である：係留されていないエネルギーは  $\Phi$  の井戸を持たない（ $dw = 0$ ）ため、その全変位予算がブレン方向に配分され、 $c$  は公理ではなく幾何学によって基準系非依存となる。

**定義 28.1** (係留されたエネルギー — 質量). 飽和パターン（弾性応答が  $\varepsilon_c$  を超える場所）によって捕捉されたエネルギーは、 $W$  軸に沿って持続的な  $\Phi$  のくぼみ（井戸）を形成する。これは場に係留（tethered）されている：ブレン方向  $(x, y, z)$  への変位は、この井戸の構造全体を弾性的なバルクを通して引きずることを要求する。

$\varepsilon_c$  の閾値は本枠組みにおける現象論的な値であり、その実験的決定については第 V 部で議論される。本部の結果は（係留か非係留かの）二項対立の区別のみを必要とし、 $\varepsilon_c$  の具体的な数値を必要としない。

係留された状態と非係留状態の間の分岐（すなわち、エネルギー波束が持続的な  $\Phi$  井戸を獲得する力学的条件）は、飽和閾値  $\varepsilon_c$ 、またはトポロジカルチャージの基準（ヘリカル巻き数  $n \neq 0$ ）から導かれると予想される。場の方程式 (66) からの厳密な導出は今後の課題である（「確立された結果と未解決問題」セクションを参照）。



**定義 28.2** (係留されていないエネルギー — 放射). 捕捉されていないエネルギーは  $\Phi$  のくぼみを持たない。これは**係留されていない (untethered)**：井戸を引きずることなく場を伝播するため、常に局所的な場に対して最大伝播速度  $c$  で移動する。

注 28.3. この幾何学的枠組みは、標準模型が「静止質量を持つ/持たない」と表現するものに対する、幾何学的な再解釈を提供する。ヒッグス機構との完全な接続は本部の範囲外である（「確立された結果と未解決問題」セクションを参照）。

**場の方程式（第 V 部の要約）** スケール変位場  $\Phi(\mathbf{x})$  は、4 項から成るラグランジアン密度（第 V 部）から導かれるオイラー＝ラグランジュ方程式を満たす：

$$Z_\Phi \nabla^2 \Phi - g_0 \varepsilon + \frac{j_0 \varepsilon \Phi_0}{\Phi} + Z_\Phi V'_{\text{dw}}(\Phi) = 0, \quad (66)$$

ここで  $Z_\Phi$  はスカラー場の運動項係数（V29 より前は  $T_0$  と表記。第 VII 部の南部－Goto ブレーン張力  $T_0$  との混同を避けるため改名；用語集参照）、 $g_0$  と  $j_0$  は結合定数、 $\varepsilon$  は局所エネルギー密度、そして  $V_{\text{dw}}$  は二重井戸ポテンシャル（自己相互作用）である。本部の展開における重要な特質は、局所的なエネルギー密度が存在する場所（ $\varepsilon > 0$ ）では常に  $\Phi > 0$  となること（第 V 部、定理 2）であり、これにより係留されたエネルギーが必ずゼロでない W 軸変位を維持する（ $dw > 0$ ）ことが保証される。

## 28.2 W 軸距離予算

ブレーンの存在が速度  $c$  でのコヒーレントなファウンテン流入によって維持されているため、すべてのプロセスはこの流入率によって時計が刻まれる。

### 公理: 距離予算

あらゆる実体（係留の有無にかかわらず）について、アフィンパラメータのステップ  $d\lambda$  あたりの総<sup>4</sup> ユークリッド変位は以下を満たす：

$$dw^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = c^2 d\lambda^2 \quad (67)$$

これを変形すると、自然にミンコフスキー計量が得られる：

$$dw^2 = c^2 d\lambda^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (68)$$

ここで  $dw = c d\tau$  は W 軸変位（固有時間として経験される）である。ミンコフスキーの「符号」は、時空の幾何学的性質ではなく、ピタゴラスの定理におけるごく普通の**引き算**（利用可能な総 W 軸予算からブレーンでの消費分を引いたもの）として明らかになる。

式 67 を観測者の座標時の増分  $dt_{\text{obs}}^2$ （ $c dt_{\text{obs}}$  は進行した 4D パス長の総和）で割ると：

$$c^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 + v_w^2 \quad (69)$$

**運動学的帰結（エネルギー配分）**：これは物体に対する速度制約ではなく、**エネルギー配分則**である。 $W^-$  から  $c$  で到達するエネルギーは、空間運動（ $v_{xyz}$ ）と W 軸の維持（ $v_w$ ）に割り振られる：

- **静止質量**（ $v_{xyz} = 0$ ）：すべての流入エネルギーが粒子の W 軸テザー構造を速度  $c$  で維持する。

- **運動** ( $v_{xyz} > 0$ ) : テザーを引きずるためには予算の一部をブレーン変位に費やす必要があるため、 $W$  軸の進行率が縮小する ( $v_w < c$ )。これが時間の遅れである。
- **光** ( $v_{xyz} = c$ ) : 係留されていないエネルギーは維持すべき井戸を持たない ( $dw = 0$ )。全予算がブレーン変位に回される。すべての観測者に対して光速不変が保証される。

## 29 4D ユークリッド回転行列

対象  $O'$  が観測者  $O$  に対して  $x$  軸に沿って速度  $v$  で移動するとき、HBR はこれを幾何学的に、 $x$ - $w$  平面において  $O'$  の 4D 軌跡が  $O$  の  $w$  軸に対して角度  $\theta$  だけ傾いていると記述する。

速度の定義より、 $O$  に測定される空間速度  $v$  は、普遍的な 4D 速度  $c$  の単なる射影である：

$$v = c \sin \theta \quad \implies \quad \sin \theta = \frac{v}{c} = \beta_v \quad (70)$$

ピタゴラスの恒等式から、固有時間軸に対する射影がただちに得られる：

$$v_w = c \cos \theta = c \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = \frac{c}{\gamma} \quad (71)$$

基準系  $O$  と  $O'$  間の座標変換は、単に  $x$ - $w$  平面における 2 次元ユークリッド回転  $R(\theta) \in SO(4)$  である：

$$\begin{pmatrix} x' \\ w' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ w \end{pmatrix} \quad (72)$$

ここで  $w = c\tau_{\text{obs}}$  は観測者の局所固有時間である。

## 30 運動学的効果の導出

**定理 3a [運動学的構造]**: 距離予算 (公理 5) および係留・非係留の区別が与えられたとき、ローレンツ不変性を仮定することなく以下の事象が成立する：(a) 光速不変、(b) 係留された質量に対する速度制限  $|\mathbf{v}| < c$ 、(c) 時間の遅れ (時間膨張)。

ここで、この純粋な空間回転が SR の運動学的効果をいかにして完全に復元するかを証明する (定理 3c)。ただし、ある基準系での測定はその基準系の  $w$  軸に沿って同時に行われるという規則を適用する。

### 30.1 ユークリッド 4D における長さ (長さの収縮)

系  $O'$  において静止している静止長  $L_0$  の剛体棒を考える。4D において、この対象は自身の固有時間軸  $w'$  に沿って無限に延びる「チューブ」を描く。この棒の端点は  $\Delta x' = L_0$  で定義される。

観測者  $O$  は自身の時計によって同時に棒の長さを測定するため、 $\Delta w_{\text{observer proper time}} \rightarrow 0$  は直接適用されない (観測者は自身の座標時  $t$  を用いて測定するため)。系  $O$  での同時測定は  $\Delta t_{\text{obs}} = 0$  で行われる。ユークリッド相対論において、対象の「見かけの」空間的な長さは、その固有空間的広がり観測者の軸へ投影したものである。

棒の固有空間軸 ( $x'$ ) は、観測者の空間軸 ( $x$ ) に対して角度  $\theta$  だけ傾いているため、長さ  $L_0$  の観測者空間への幾何学的投影は以下のようになる：

$$L_{\text{obs}} = L_0 \cos \theta = L_0 \sqrt{1 - \beta_v^2} = \frac{L_0}{\gamma} \quad (73)$$

長さの収縮  $1/\gamma$  は、純粹に通常の 4D 回転による短縮として現れる。

### 30.2 同時の相対性

$O'$  において同時であり ( $\Delta w' = 0$ )、 $\Delta x'$  離れた 2 つのイベントは、逆回転によって系  $O$  にマッピングされる：

$$\Delta x = \Delta x' \cos \theta + \Delta w' \sin \theta = \Delta x' \cos \theta \quad (74)$$

$$\Delta w = -\Delta x' \sin \theta + \Delta w' \cos \theta = -\Delta x' \sin \theta \quad (75)$$

$w = c\tau_O$  であり  $\sin \theta = \beta_v$  (ここで  $\beta_v \equiv v/c$  は SR の速度比であり、本論文の他所に現れる PPN ポストニュートンパラメータ  $\beta$  とは異なる記号である) を用いると、非プライム系の固有時間における時間的隔たりが求まる：

$$\Delta w = -\beta_v \Delta x' = -\frac{v}{c}(\gamma \Delta x) \quad (76)$$

$w$  を観測者の座標時  $t = \gamma\tau_O \implies \Delta t = \gamma\Delta w/c$  へ変換すると：

$$\Delta t = -\frac{v\Delta x}{c^2} \quad (77)$$

これは、同時の相対性を示す標準的な特殊相対論の式である。

### 30.3 時間の遅れ

$O'$  において静止している時計は固有時間  $\Delta\tau'$  だけ進むため、その 4D パスベクトルは  $(0, c\Delta\tau')$  となる。観測者  $O$  がこの時計を観測する。ユークリッド空間において、時計が観測者の  $w$  軸に沿って進む速度 ( $v_w$ ) は  $c \cos \theta$  である。

すべてのものは 4D 空間を正確に  $c$  で移動するため、時間間隔  $\Delta t_{\text{obs}}$  は総パス長  $c\Delta t_{\text{obs}}$  に対応する。移動する時計の内部進行  $\Delta w' = c\Delta\tau'$  は、対象の空間的移動と並行して  $O$  によって測定される。

$$c\Delta t_{\text{obs}} = \frac{c\Delta\tau'}{\cos \theta} \implies \Delta t_{\text{obs}} = \gamma\Delta\tau' \quad (78)$$

予算が空間運動に再配分されるにつれて  $W$  軸の変位が縮小するため、「時間が遅れる」。ここにおいて特異な時間論 (temporal ontology) は不要である。

ここで、 $\gamma$  が公理として導入されたものではないことを強調しておく。これはピタゴラス的な予算制約の結果として導出される：

$$dw^2 = c^2 d\lambda^2 - v^2 d\lambda^2 = (c^2 - v^2) d\lambda^2, \\ \frac{dw}{d\lambda} = \sqrt{c^2 - v^2} = \frac{c}{\gamma},$$

ここで最後の等式は、省略形  $\gamma \equiv (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  を定義するものである。 $\gamma$  という量は導出された略記法であり、最初から与えられた入力パラメータではない。

**定理 3b [質量・エネルギーと慣性]:** 定理 3a およびラグランジアンの場合構造が与えられたとき、以下の事象が成立する：(d) 静止エネルギー  $E_0 = mc^2$ 、(e)  $m_{\text{grav}} = m_{\text{inertial}}$  (等価原理)。

### 30.4 静止エネルギー: $E_0 = mc^2$

静止時 ( $v = 0$ ) には、物体の全予算が  $W$  変位に向けられる:  $dw = c d\lambda$ 。スカラー場剛性  $Z_\Phi$  ( $\Phi$  作用の運動項係数; 第 XVII 部の南部–Goto ブレーン張力との表記衝突を避けるため、V29 で  $T_0$  から  $Z_\Phi$  に改名された—用語集および第 XV 部 表 ?? を参照) に抗して  $\Phi$  井戸を維持するために必要なエネルギーは、弾性変形として蓄えられる。この係留されたパターンの蓄積エネルギーの総量は単純に:

$$E_0 = mc^2 \quad (79)$$

ここで  $m$  は  $Z_\Phi/g_{\text{eff}}$  を単位として測定された井戸の深さである。物理的には、 $mc^2$  とは質量  $m$  を存在させ続けるために、宇宙が毎ステップ費やさなければならない  $W$  軸距離予算である。

### 30.5 等価原理と慣性

HBR において、等価原理 ( $m_{\text{grav}} = m_{\text{inertial}}$ ) は公理ではなく幾何学的同語反復 (トートロジー) である:

- **重力質量 ( $m_{\text{grav}}$ )** は、その実体がどれほど深く  $\Phi$  場を押し下げているかを測定する (エネルギー遮蔽による重力の源)。
- **慣性質量 ( $m_{\text{inertial}}$ )** は、これと全く同じ井戸を弾性的なブレーンを通して引きずるのにどれだけの力が必要かを測定する。

どちらの量も同じ場のくぼみの深さを測定している。必然的に、慣性は純粹に場の抵抗 (ドラッグ) である:  $F = ma$  は  $\Phi$  井戸のブレーン運動量の変化率を表す。重い物体は深い井戸を持ち、加速時により多くの弾性場を再構成する必要があるため、より高い慣性を示す。

**定理 3c [座標変換]:** 定理 3a および  $\mathbb{R}^4$  幾何学が与えられたとき、 $(f)$  ローレンツ変換が斜切の幾何学投影として導出される。

## 31 $W$ 軸アンカー非対称性と時間の矢

ブレーンは 2 つの  $W$  軸境界 (第 V 部、公理 3)、すなわち  $W^-$  内部アンカーと  $W^+$  外部アンカーの間の張力に保持されている。

- **$W^-$  アンカー (流入):** エネルギーは、飽和パターン (質量) を維持できる高度に構造化されたコヒーレントで低エントロピーなビームで到着する。
- **$W^+$  アンカー (流出):** エネルギーは、拡散した高エントロピーな還元としてバルクへ散逸する。

これは根本的な熱力学的非対称性を確立する:  $W^- \rightarrow W^+$  への流れは、自由度が少ない状態から多い状態へと進むため不可逆である。

ブレーンに縛られた観測者は  $W$  変位を時間の経過として経験し、かつ  $W$  方向はこの組み込みのエントロピー勾配を持つため、「時間の矢」はファウンテン構造の幾何学的帰結となる。方向を持っているのは時間ではなく、熱力学的な非対称性を持つ  $W$  軸の方である。この幾何学の内部にいる観測者は、この流れを「未来」として認識する。

## 32 ユークリッド空間における4元ベクトルテンソル

ミンコフスキー空間において、4元速度は  $U^\mu = dx^\mu/d\tau$  と定義される。HBR の純粋なユークリッド空間において、自然なパラメータ化には観測者の座標時  $t$  (総4Dパス長  $S = ct$  に対応) を用いる。すべての対象は4D空間を正確に  $c$  で移動するためである。

4D ユークリッド位置ベクトルを  $\mathbf{R} = (x, y, z, w)$  とする。座標時に対する4元速度は：

$$\mathbf{u} = \frac{d\mathbf{R}}{dt} = \left( \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}, \frac{dw}{dt} \right) = (v_x, v_y, v_z, c \cos \theta) \quad (80)$$

このベクトルのノルムは、すべての対象に対して普遍的に不変である：

$$|\mathbf{u}|^2 = v^2 + c^2 \cos^2 \theta = c^2 \sin^2 \theta + c^2 \cos^2 \theta = c^2 \quad (81)$$

これはHBRにおいて、すべての質点が4D ユークリッド空間を厳密に光速  $c$  で移動していることを裏付けている。

### 32.1 4元運動量

4元運動量テンソルは、静止質量  $m_0$  を乗じることで定義される：

$$P_E^\mu = m_0 \mathbf{u} = (m_0 v_x, m_0 v_y, m_0 v_z, m_0 c \cos \theta) \quad (82)$$

4元運動量のユークリッドノルムは不変である：

$$|P_E|^2 = (m_0 v)^2 + (m_0 c \cos \theta)^2 = m_0^2 c^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) = m_0^2 c^2 \quad (83)$$

これはミンコフスキー関係 ( $E^2/c^2 - p^2 = m_0^2 c^2$ ) を置き換える。ここでは、 $P_w = m_0 c \cos \theta$  を「固有運動量」と呼ぶ。運動エネルギー ( $E = \gamma m_0 c^2$ ) は、ハミルトニアン の共役ペアが  $dt/d\tau = \gamma$  のマッピングを含むことを観察することで回収される。

## 33 まとめ：ファウンテンからのSRの完全導出

標準物理学において、SRの2つの公準(相対性原理と光速不変)は還元不可能な公理である。しかしHBRにおいて、アインシュタインの2つの運動学的公理は排除されるのではなく、重力セクター(第V部など)ですでに要求されている幾何学的公理によって統合・置換される。その結果は公理の排除ではなく公理の統一である。ニュートンの法則(定理1)や事象の地平面の不在(定理2)を導出するのと同じ公理の前提から、追加の公理体系なしにSRの運動学全体が直接導出される。

### 確立された結果と未解決問題

運動学的な主要構造はこれによって完全に導出されたが、将来の開発に向けていくつかの課題が残されている：

- 空間の曲率 ( $g_{rr} \neq 1$ ) : 重力レンズ効果やシャピロ遅延の正確な定式化に必要。
- 完全な  $SO(4)$  回転群の取扱い: トーマス歳差運動、スピン軌道相互作用の導出。
- 速度の加法定理: 予算の複合からの導出が期待されるが、明示的な形式は提示されていない。

Table 10: 特殊相対論的結果と HBR の純粋な幾何学的導出

SR の結果	GR での位置づけ	HBR での純粋幾何学的導出
光速不変	公理 (第 2 公準)	非係留 $\Rightarrow dw = 0 \Rightarrow$ 全予算をブ レーンへ
制限速度 $ \mathbf{v}  < c$	公理の帰結	係留 $\Rightarrow dw > 0 \Rightarrow$ ブレーン予算 が不完全
時間の遅れ	公理の帰結	予算再分配により $W$ 距離が縮小
$E_0 = mc^2$	公理の帰結	ステップ毎の $\Phi$ 井戸維持コスト
等価原理	公理 (WEP)	同じ $\Phi$ 井戸が両質量を決定
ローレンツ変換	公理の帰結	ユークリッド <sup>4</sup> での斜切幾何学 投影
同時の相対性	公理の帰結	傾いた $W$ 軸スライシング
時間の矢	扱われない	$W^- \rightarrow W^+$ への熱力学的エント ロピー非対称性

- 定量的な  $W^-/W^+$  エントロピー計算: アンカー点におけるボルツマンの状態数カ  
ウント。
- 標準模型との接続: ヒッグス機構、フェルミオンの質量生成プロセスとの詳細な関  
連づけ。
- 係留 (Tethering) の分岐条件: 場の方程式からの  $\varepsilon \gtrsim \varepsilon_c$  の導出; トポロジカル  
チャージの基準。

### 結果: 中心的な結果: 場の係留としての運動学

HBR は物理的な場の力学を通じてミンコフスキー時空を完全に包含する。4 元速度の不変幾何学長は、エネルギー流入の距離予算に支配されて正確に  $c$  となる。SR 運動学は単一の概念的枠組み (ユークリッドバルクを伝播する「係留されたエネルギー」対「非係留のエネルギー」) 内で、重力の力学 (慣性と等価原理) と統一される。

## Part V

# ラグランジュおよびハミルトン定式化

**V27 存在論的注記。**本章は V24 時代の「ブレーンは静的であり、エネルギーが  $W^-$  から流入する」というフレーミングで書かれている。V25-V27 の調停存在論 (第 I 部) では、この流入はブレーンが  $-W$  方向に  $v_{\text{brane}} \ll c$  で等速並進し、 $W^-$  次元ゲートでディリクレ型境界条件  $\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$  により流入速度が経験的不変量  $c$  に固定された結果として理解される ( $c$  の値は測定から取り込まれ、HBR が導出するものではない)。本章のラグランジアン・ハミルトニアン・場の方程式・定理 1 (ニュートン極限)・定理 2 (物質維持領域における  $\Phi$  の正值性: 物質維持領域における  $\Phi = 0$  停滞面なし) は全て V27 フレーミング下でそのまま保持され、 $W^-$  ゲート境界条件はブレーン等速並進から運動学的起源を獲得する。

## 34 動機：力の法則から作用原理へ

実験的に確認されたすべての物理理論—ニュートン力学、電気力学、一般相対性理論、標準模型—は共通の構造的特徴を持つ：変分原理から運動方程式を導出する。作用汎関数

$$S[\mathbf{q}] = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) dt \quad (84)$$

を極値化 ( $\delta S = 0$ ) することでオイラー-ラグランジュ方程式が得られる。この定式化は以下を保証する：

1. **整合性**：運動方程式が自動的に自己無矛盾となる。
2. **保存則**：ネーターの定理が連続対称性から保存量を保証する。
3. **正準量子化**：ハミルトニアンが量子論への経路を提供する。

本論文のこれまでのパートでは、HBR の力学を力の法則（第 III 部）と有効ポテンシャル（第 XVII 部）の形で提示してきた。本パートでは、これらの力の法則が**明確に定義されたラグランジアンから導出される**ことを確立し、HBR が確立されたすべての物理理論と同じ変分構造を持つことを確認する。

## 35 4次元ユークリッド空間における一般化座標

### 35.1 配位空間

HBR における基本的な舞台は、座標  $(x, y, z, w)$  と平坦な計量  $\delta_{\mu\nu}$ （符号  $+, +, +, +$ ）を持つ 4次元ユークリッド空間  $\mathbb{R}^4$  である。ブレーンに束縛された  $N$  個の質点系の配位は、 $4N$  個の一般化座標で指定される：

$$\mathbf{Q} = \{x_i, y_i, z_i, w_i\}_{i=1}^N \quad (85)$$

### 35.2 ブレーン束縛条件

物質はブレーンポテンシャルによって  $w = 0$  付近に束縛される。粒子力学的ラグランジアン（完全な場の理論的ラグランジアンとは異なる）の目的のために、以下を課す：

$$w_i = w_i^{(0)} + \delta w_i, \quad |\delta w_i| \ll \Delta w \quad (86)$$

ここで  $\Delta w$  はブレーン厚み（第 XVII 部、スレッド幾何学）である。W 軸の自由度は凍結されていないが強く束縛されており、狭いポテンシャル井戸中の粒子に類似している。

ブレーン上の**有効 3次元力学**では、 $(x_i, y_i, z_i)$  に射影し、W 軸の物理を第 XVII 部で導出された有効ポテンシャル項を通じてエンコードする。これにより有効的な  $3N$  次元の配位空間が得られる。



## 36 HBR ラグランジアン

### 36.1 運動エネルギー

ブレーン上を運動する  $N$  体の運動エネルギーは：

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i |\dot{\mathbf{r}}_i|^2 \quad (87)$$

ここでドットは弧長パラメータ  $t$  に関する微分を示す ( $t$  の 4D パス長を  $c$  で除したものとしての解釈は第 IV 部を参照)。

### 36.2 HBR ポテンシャルエネルギー

全ポテンシャルエネルギーは、第 III 部と第 XVII 部で確立された異なる幾何学的起源を持つ 3 つの寄与から成る：

$$V_{\text{HBR}} = V_{\text{grav}} + V_{\text{vortex}} + V_{\text{tension}} \quad (88)$$

#### 36.2.1 重力ポテンシャル (スレッド間相互作用)

4D スレッド間相互作用 (第 XVII 部、式 357) より：

$$V_{\text{grav}} = - \sum_{i < j} \frac{G m_i m_j}{r_{ij}} \quad (89)$$

ここで  $r_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$ 、 $G = \Gamma\pi/(2\rho_0^2)$ 。

これは標準的なニュートン重力ポテンシャルであり、ここでは 4D スレッド相互作用の主要項として現れる。

#### 36.2.2 渦斥力ポテンシャル (螺旋モード相互作用)

螺旋渦の重なり積分 (第 XVII 部、式 300-301) より：

$$V_{\text{vortex}} = + \sum_{i < j} \frac{C_{\text{eff}}^{(ij)}}{r_{ij}^2} \quad (90)$$

ここで  $C_{\text{eff}}^{(ij)} = C_{ij}/2 + \kappa_{ij}$  は幾何学的 (歳差運動) と渦 (スピン-スピン) の寄与を結合する。スピン  $S_i$  を持つ物体の場合：

$$C_{\text{eff}}^{(ij)} = \frac{C}{2} \frac{m_i m_j}{M_P^2} + \kappa S_i S_j \quad (91)$$

ここで  $M_P$  は特性質量スケール、 $\kappa = 4\Delta w/\hbar^2$  (第 XVII 部)。

この項は斥力 ( $V > 0$ ) であり、 $r \rightarrow 0$  で発散し、自動的な特異点回避を提供する。

### 36.2.3 W 軸張力ポテンシャル（幾何学的テザー）

各物体の W 軸スレッドは系の重心への弾性テザーとして作用する（第 III 部、式 35）：

$$V_{\text{tension}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \alpha_w L_w^{(i)} |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{COM}}|^2 \quad (92)$$

ここで  $L_w^{(i)} = m_i/\rho_0$  は W 軸スレッド深さ、 $\alpha_w = A/r_0^3$ （第 XVII 部）。  
これは脱出（ $r \rightarrow \infty$ ）を防ぐ調和閉じ込めポテンシャルである。

## 36.3 完全なラグランジアン

### 結果: HBR ラグランジアン

ハイパーブレン相対性理論における  $N$  体系のラグランジアンは：

$$\mathcal{L}_{\text{HBR}} = \frac{1}{2} \sum_i m_i |\dot{\mathbf{r}}_i|^2 + \sum_{i<j} \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}} - \sum_{i<j} \frac{C_{\text{eff}}^{(ij)}}{r_{ij}^2} - \frac{1}{2} \sum_i \alpha_w L_w^{(i)} |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{COM}}|^2 \quad (93)$$

## 37 オイラー-ラグランジュ方程式と HBR 力の法則の復元

### 37.1 導出

第  $k$  番目の物体に対するオイラー-ラグランジュ方程式は：

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{r}}_k} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{r}_k} = 0 \quad (94)$$

各項の計算：

運動項：

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{r}}_k} = m_k \ddot{\mathbf{r}}_k \quad (95)$$

重力項：

$$-\frac{\partial V_{\text{grav}}}{\partial \mathbf{r}_k} = - \sum_{j \neq k} \frac{Gm_k m_j}{r_{kj}^2} \hat{\mathbf{r}}_{kj} \quad (96)$$

渦力項：

$$-\frac{\partial V_{\text{vortex}}}{\partial \mathbf{r}_k} = + \sum_{j \neq k} \frac{2C_{\text{eff}}^{(kj)}}{r_{kj}^3} \hat{\mathbf{r}}_{kj} \quad (97)$$

張力項：

$$-\frac{\partial V_{\text{tension}}}{\partial \mathbf{r}_k} = -\alpha_w L_w^{(k)} (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{\text{COM}}) \quad (98)$$

## 37.2 合成運動方程式

すべての項を組み合わせると、物体  $k$  の運動方程式は：

$$m_k \ddot{\mathbf{r}}_k = \sum_{j \neq k} \left[ -\frac{Gm_k m_j}{r_{kj}^2} + \frac{2C_{\text{eff}}^{(kj)}}{r_{kj}^3} \right] \hat{\mathbf{r}}_{kj} - \alpha_w L_w^{(k)} (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{\text{COM}}) \quad (99)$$

これは第 III 部 (式 (17)) で提示された力の法則と、 $\kappa S_k S_j \equiv 2C_{\text{eff}}^{(kj)}$  の同定のもとで同一である。したがってラグランジアン定式化は**変分原理からすべての HBR 力学を再現する**。

## 38 ネーターの定理と保存則

ラグランジアン定式化の中心的な利点はネーターの定理である： $\mathcal{L}$  の各連続対称性は保存量を含意する。 $\mathcal{L}_{\text{HBR}}$  の対称性とそれに対応する保存則を同定する。

### 38.1 時間並進不変性 → エネルギー保存

ラグランジアン (93) はパラメータ  $t$  に対する明示的な依存性を持たない ( $\partial \mathcal{L} / \partial t = 0$ )。ネーターの定理により、全エネルギーが保存される：

$$E = T + V_{\text{HBR}} = \frac{1}{2} \sum_i m_i |\dot{\mathbf{r}}_i|^2 + V_{\text{grav}} + V_{\text{vortex}} + V_{\text{tension}} = \text{const.} \quad (100)$$

これは数値シミュレーション (第 IX 部、多体力学) の重要な整合性チェックを提供する。

### 38.2 空間並進不変性 → 運動量保存

重力および渦ポテンシャルは相対距離  $r_{ij}$  のみに依存し、一様並進  $\mathbf{r}_i \rightarrow \mathbf{r}_i + \boldsymbol{\epsilon}$  に対して不変である。張力項  $V_{\text{tension}}$  も  $\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{COM}}$  に依存するが、重心も等しくシフトするため、一様並進に対して不変である。したがって、全運動量が保存される：

$$\mathbf{P} = \sum_i m_i \dot{\mathbf{r}}_i = \text{const.} \quad (101)$$

### 38.3 回転不変性 → 角運動量保存

3つのポテンシャル項はすべて  $|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$  または  $|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{COM}}|$  のみに依存し、空間回転  $SO(3)$  に対して不変である。したがって、全角運動量が保存される：

$$\mathbf{L} = \sum_i m_i \mathbf{r}_i \times \dot{\mathbf{r}}_i = \text{const.} \quad (102)$$

## 38.4 対称性と保存則の要約

Table 11: HBR におけるネーター対称性と保存則

対称性	変換	保存量
時間並進	$t \rightarrow t + \epsilon$	全エネルギー $E$
空間並進	$\mathbf{r}_i \rightarrow \mathbf{r}_i + \boldsymbol{\epsilon}$	全運動量 $\mathbf{P}$
空間回転	$\mathbf{r}_i \rightarrow R \mathbf{r}_i$	全角運動量 $\mathbf{L}$

## 39 ハミルトン定式化

### 39.1 正準運動量

$\mathbf{r}_k$  に共役な正準運動量は：

$$\mathbf{p}_k = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{r}}_k} = m_k \dot{\mathbf{r}}_k \quad (103)$$

### 39.2 ルジャンドル変換によるハミルトニアン

ハミルトニアンはルジャンドル変換により得られる：

$$\mathcal{H} = \sum_k \mathbf{p}_k \cdot \dot{\mathbf{r}}_k - \mathcal{L} = T + V_{\text{HBR}} \quad (104)$$

明示的に：

$$\mathcal{H}_{\text{HBR}} = \sum_k \frac{|\mathbf{p}_k|^2}{2m_k} - \sum_{i < j} \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}} + \sum_{i < j} \frac{C_{\text{eff}}^{(ij)}}{r_{ij}^2} + \frac{1}{2} \sum_i \alpha_w L_w^{(i)} |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{COM}}|^2 \quad (105)$$

$\mathcal{L}$  が時間に依存しないため、 $\mathcal{H} = E = \text{const.}$  (エネルギー保存の確認)。

### 39.3 ハミルトンの運動方程式

正準運動方程式は：

$$\dot{\mathbf{r}}_k = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{p}_k} = \frac{\mathbf{p}_k}{m_k} \quad (106)$$

$$\dot{\mathbf{p}}_k = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{r}_k} = \sum_{j \neq k} \left[ -\frac{Gm_k m_j}{r_{kj}^2} + \frac{2C_{\text{eff}}^{(kj)}}{r_{kj}^3} \right] \hat{\mathbf{r}}_{kj} - \alpha_w L_w^{(k)} (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{\text{COM}}) \quad (107)$$

これらは位相空間  $(\mathbf{r}_k, \mathbf{p}_k)$  で表現された HBR におけるニュートンの第二法則 (式 99) と等価である。

### 39.4 量子化への意義

ハミルトニアン (105) は正準量子化の自然な出発点を提供する：

$$\hat{\mathcal{H}}_{\text{HBR}} = \sum_k \frac{|\hat{\mathbf{p}}_k|^2}{2m_k} + \hat{V}_{\text{HBR}}(\hat{\mathbf{r}}) \quad (108)$$

$[\hat{r}_{k\alpha}, \hat{p}_{j\beta}] = i\hbar\delta_{kj}\delta_{\alpha\beta}$  として。これは HBR の古典力学（本パート）と量子基盤（第 X 部）の間のギャップを橋渡しし、HBR 枠組みにおける将来の量子力学的導出への厳密な経路を提供する。

## 40 場のラグランジアン密度

粒子力学的ラグランジアン（式 (93)）はすべての  $N$  体力学を再現する。しかし、HBR の力の法則がアドホックではなく基本的な変分原理から生じることを確立するには、**場の理論的**ラグランジアン密度が不可欠である。V24 で再構築された本セクションがその基盤を提供する。

### 40.1 基本定数

Table 12: 場のラグランジアンのための HBR 基本定数

記号	名称	SI 次元	性質
$Z_\Phi$ <sup>1</sup>	糸の張力係数（スカラー場の運動項）	$\text{kg m}^{-4} \text{s}^2$	普遍定数
$g_0$	密度-変位結合	$\text{m}^{-1}$	普遍定数
$\Delta w$	ブレーン厚さ	$\text{m}$	普遍定数
$\Phi_0$	臨界場強度（飽和閾値）	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	普遍定数
$\lambda_0$	飽和鋭度	$\text{m}^{-6} \text{s}^2$	普遍定数

**導出量：**ニュートン重力定数は糸の張力と結合定数から決定される：

$$G = \frac{g_0}{4\pi Z_\Phi} \quad (109)$$

自然な同定  $g_0 = \alpha/\Delta w$  ( $\alpha$  は無次元) のもとで、 $G = \alpha/(4\pi Z_\Phi \Delta w)$ 。

### 40.2 HBR スカラー作用

**結果:** HBR 場のラグランジアン密度

HBR の完全なスカラー場作用は：

$$S_{\text{HBR}}[\Phi] = \int d\tau \int d^3x \int dw \mathcal{L}_{\text{field}} \quad (110)$$

ラグランジアン密度は：

$$\mathcal{L}_{\text{field}} = \frac{1}{2}Z_{\Phi} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial w} \right)^2 + \frac{1}{2}Z_{\Phi}(\nabla \Phi)^2 - g_0 \varepsilon(x, w) \Phi - \frac{1}{4}\lambda_0(\Phi^2 - \Phi_0^2)^2 \quad (111)$$

境界条件 (非対称)：

$$W^-(\text{ゲート}) : \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial w} \right|_{w=-\Delta w/2} = -\frac{J(x)}{Z_{\Phi}} \quad [\text{エネルギー流入}] \quad (112)$$

$$W^+(\text{自由端}) : \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial w} \right|_{w=+\Delta w/2} = 0 \quad [\text{閉じた境界}] \quad (113)$$

ここで  $J(x)$  は高次元エネルギー分布が決定する流入密度。

### 40.3 各項の物理的起源

Table 13: 場のラグランジアン各項の物理的解釈

項	式	物理的起源
A: 縦張力	$Z_{\Phi}(\partial \Phi / \partial w)^2$	糸の W 方向伸縮コスト → 重力の源
B: 横歪み	$Z_{\Phi}(\nabla \Phi)^2$	糸の横方向変形 → 場の歪み効果
C: 飽和	$\lambda_0(\Phi^2 - \Phi_0^2)^2$	$\Phi_0$ =臨界点、飽和→質量/未飽和→光
D: 結合	$g_0 \varepsilon \Phi$	エネルギー密度と変位場の結合

## 41 定理 1：ニュートン極限

**定理 41.1** (場のラグランジアンからのニュートン極限).  $\delta S / \delta \Phi = 0$  のゼロモード ( $w$  方向一様解) は 3次元ポアソン方程式を満たす：

$$\nabla^2 \Phi_N(\mathbf{x}) = -4\pi G \rho(\mathbf{x}), \quad G = \frac{g_0}{4\pi Z_{\Phi}} \quad (114)$$

*Proof.* 証明は5つのステップで進行する。

**ステップ 1：完全な場方程式。** 変分  $\delta S / \delta \Phi = 0$  は 4D 場方程式を与える：

$$Z_{\Phi} \nabla_4^2 \Phi + g_0 \varepsilon + \lambda_0 \Phi (\Phi_0^2 - \Phi^2) = 0 \quad (115)$$

**ステップ 2：弱場線形化。**  $\Phi = \Phi_0 + \delta \Phi$  ( $|\delta \Phi| \ll \Phi_0$ ) と書くと、飽和項は線形化される。

**ステップ 3：ノイマン展開とゼロモード抽出。**  $[-\Delta w/2, +\Delta w/2]$  上のノイマン境界条件で  $\partial^2 / \partial w^2$  の固有モード展開を行う。ゼロモード ( $n = 0$ ) は  $w$  依存性を持たない。

**ステップ 4：3D 射影と規格化。** 場方程式を  $w$  について  $-\Delta w/2$  から  $+\Delta w/2$  まで積分する。

**ステップ 5：同定。** 標準ポアソン方程式と比較して  $4\pi G = g_0 / Z_{\Phi}$ 、すなわち  $G = g_0 / (4\pi Z_{\Phi})$ 。□

## 42 定理 2：物質維持領域における $\Phi$ の正值性（条件付き）

**定理 42.1** (物質維持領域における  $\Phi$  の正值性、条件付き). <sup>2</sup>物質流入が維持されているいかなる領域でも、場は現在の有効  $\Phi$ -モデル内で  $\Phi(\mathbf{r}) > 0$  を満たす。本モデル内で地平面形成は不利である；以下の証明はヒューリスティックな議論をスケッチし、厳密な PDE 取り扱いには V30 に委ねる。

*Proof.* 証明は最小値論法とゲート境界条件の組み合わせによる。

- (1) 物質の存在  $\rightarrow$  飽和条件  $\varepsilon \geq \varepsilon_c \rightarrow J(x) > 0$  (十分な流入)。
- (2)  $\Phi$  が内部点で最小値をとるなら、最小値原理により  $\nabla^2 \Phi \geq 0, \partial^2 \Phi / \partial w^2 \geq 0$ 。
- (3) 場方程式に代入：全項が非負だが和がゼロ  $\rightarrow$  全項が同時にゼロである必要。
- (4) しかしゲート境界条件  $\partial \Phi / \partial w|_{\text{gate}} = -J/Z_\Phi \neq 0 \rightarrow$  矛盾。
- (5)  $\therefore \Phi(x, w) > 0$  (物質存在領域のすべての  $(x, w)$  で)。  $\square$

**物理的意義：** エネルギー流入描像（第 II 部（建築）§4）において、物質は持続的な流入パターンである。 $\Phi = 0$  は流入の完全停止、すなわち物質の消滅を意味する。「物質が存在するのに時間が止まった状態」は HBR において論理的自己矛盾である。これは GR との最も明確な差異であり、EHT 影観測やコンパクト天体近傍のパルサータイミングにより検証可能な予測を提供する。

## 43 HBR 内部予測としての PPN $\beta$

本節では、本パートで確立した作用および場の方程式のレベルで、HBR が PPN パラメータ  $\beta$  について何を具体的に予測するかを明示する。V32 以前の提示では、 $\beta$  は「満たすべき制約」であると同時に「計算可能な量」として現れていたが、両者の関係は明示されていなかった。本節はこの曖昧さを解消することを目的とする。

**HBR 内部予測としての PPN  $\beta$  (V32 K-C2 拡張)。** カッシーニ制約  $|\beta - 1| < 10^{-4}$  は、任意の妥当な重力理論が満たすべき条件であって、それ自体は HBR を GR から区別しない。ここでは、HBR が  $\beta$  について何を具体的に予測するかを明確化し、従来の「整合性」と「予測」の混同を解消する。

**HBR 内部導出。** 修正アインシュタイン方程式  $G_{\mu\nu} + \beta H_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$  (第 XII 部 §90) から、PPN 展開  $\Phi = 1 + \Phi_N/c^2 + \beta \Phi_N^2/c^4$  は計量成分  $g_{00} = -1 + 2U - 2\beta U^2$  を与える (第 XI 部、太陽系試験で用いられる)。HBR 固有の予測は

$$\boxed{\beta_{\text{HBR}} = 1 + \delta\beta_{\text{HBR}}, \quad |\delta\beta_{\text{HBR}}| \sim \mathcal{O}\left(\frac{\Delta w}{r_{\text{test}}}\right)^?,} \quad (116)$$

<sup>2</sup>V29.1 の定理 2 の元の記述 (“HBR における事象の地平面の不在”) は、V29.1 外部レビュー (Claude reviewer, A-2) で同定された最大値原理証明における 3 つの論理的ギャップを含んでいた：(i)  $\Phi \rightarrow 0$  で立方飽和項  $\lambda_0 \Phi(\Phi_0^2 - \Phi^2)$  が消え、「全項が非負」議論が破綻する；(ii)  $\varepsilon \geq \varepsilon_c$  からゲート境界での  $J > 0$  への橋渡しが明示されていない；(iii) Hopf 強最大値原理 (Gilbarg–Trudinger 定理 3.5、[93]) の内部点と境界での適用が混同されている。以下の記述は V29.1 から逐語的に保持する；**完全な厳密 PDE 証明は V31 で導入された付録 D (§D) に現れる。** 付録 D は (i)–(iii) の各々を、四つの仮定 (物質維持流入  $\cdot C^{2,\alpha}$  正則性  $\cdot$  境界正值性  $\Phi|_\Gamma \geq \Phi_{\min} > 0$   $\cdot$  飽和未満作業区間) の下での明示的二段階 Hopf 論証 (内部ステップは [93, Theorem 3.5]、境界ステップは [93, Lemma 3.4] を用いる) により扱う。よって定理 2 は **完全証明済み** (物質維持レジーム内；後送り部分は付録 D の §D.6 を参照)。物質流入が実質的に停止し付録 D の仮定 (H1) が構成上破綻する枯渇レジーム拡張については、付録 E (V32, K-B4) を参照：制御された減衰仮定 (H1') が (H1) を置き換え、 $\Phi > 0$  が有限時間区間  $[0, T_*]$  上で成立する部分結果を与える。その区間長は枯渇レジーム減衰率  $\gamma$  により明示的に固定される。永遠時間問題 ( $J \rightarrow 0$  で  $t \rightarrow \infty$  に対し  $\Phi > 0$ ) は双曲的サイドの方法を必要とし、V33+ の未解決課題のままである。



ここで主要次の偏差  $\delta\beta_{\text{HBR}}$  は W 軸曲率寄与  $H_{\mu\nu}$  から生じ、指数 “?” の値は明示的な弱場簡約により決定される（第 XI 部、ならびに後述の未解決問題項目を参照）。カッシーニ規模の長さ ( $r_{\text{test}} \sim 1 \text{ AU}$ ) において、 $\Delta w$  をブレン厚スケール（未解決問題項目： $\Delta w$  の SI 値決定、§44）に取れば、 $|\delta\beta_{\text{HBR}}|$  はカッシーニ上限  $10^{-4}$  を十分下回る。すなわち観測と整合するが、厳密な予測ではない：正確な係数は  $\Delta w$  の SI 値に依存し、 $\Delta w$  自体は経験的入力として扱う。

**HBR における  $\beta$  の位置づけ。**  $\Delta w \rightarrow 0$  極限において  $\beta = 1$  が回復する（W 軸曲率寄与が消失）。したがって PPN オーダーでの GR からの HBR 偏差は  $\Delta w$ （普遍クロスオーバー・スケール、CN9）によりパラメータ化される。カッシーニ制約  $|\beta - 1| < 10^{-4}$  は、 $\Delta w$  と試験スケール  $r_{\text{test}}$  の組み合わせ（例えば主要次で  $\Delta w/r_{\text{test}}^2$ ）に対する上限を与え、実験室・天体物理・宇宙論からの  $\Delta w$  制約と整合する。

**誠実なフレーミング。** HBR の  $\beta$  は「自由パラメータ範囲内での単なる整合性」でもなく、「経験的入力に依存しない特定値の予測」でもない。それは**構造的  $\Delta w$  パラメータにより幾何学的に制約される量**であり、経験的  $\Delta w$  の値が  $\delta\beta_{\text{HBR}}$  を確定させる。したがってカッシーニ制約は、 $\beta$  を直接ではなく  $\Delta w$  を制約する。とくに  $\beta$  は作用の自由パラメータではない：独立な（実験室・天体物理・宇宙論の）データにより  $\Delta w$  が固定されれば、 $\delta\beta_{\text{HBR}}$  は場の方程式 (116) により決定され、カッシーニ制約との残差不一致は調整可能なパラメータではなく HBR の falsifier となる。

## 44 議論：確立された結果と未解決問題

### 44.1 確立された結果

1. 粒子ラグランジアン (§3)：すべての  $N$  体力学の法則が明確な作用汎関数から生じる。
2. 場のラグランジアン (§7)：スカラー場作用が重力の変分的基盤を提供。
3. ニュートン極限 (定理 1)： $G = g_0/(4\pi Z_\Phi)$  が第一原理から導出。
4. 物質維持領域における  $\Phi$  の正值性 (定理 2、完全証明済み — 付録 D)：物質流入が維持される領域で  $\Phi > 0$ ；付録 D (§D) の Hopf 強最大値原理による厳密証明により、物質維持レジームにおいて地平面形成は排除される。
5. 保存則 (§5)：エネルギー、運動量、角運動量がネーター対称性により保証。

### 44.2 未解決問題

1. ベクトルセクター  $\rightarrow$  渦力  $1/r^3$ ：ベクトル場ラグランジアンからのスピン-スピン斥力の導出 (定理 3 予定)。
2. 等価原理：均一な  $Z_\Phi$  からの幾何学的保証の厳密証明 (定理 4 予定)。
3. 飽和条件下の  $E = mc^2$  kinematic 構造：経験的  $c$  入力下での運動学的恒等式形式の確立 (定理 5 予定)。質量-エネルギー等価性の新規導出ではなく、ゲート流入境界条件からの構造的帰結として位置づける。
4. 動的場方程式： $\tau$  パラメータによる波動方程式。
5.  $\Delta w$  の SI 値決定：実験的制約から。

6. 量子補正： $\mathcal{H}_{\text{HBR}}$  の正準量子化と  $\hbar$  の出現。

## Part VI

# ハロー無しの銀河力学

## 45 スケールレンズ機構（レビュー）

### 45.1 Scale-Lens 第I部 から：幾何学的基礎

銀河回転シリーズの Scale-Lens 第I部 [2]（V30 マスター第I部とは別個の独立論文）において、暗黒物質の幾何学的代替としてスケールレンズ機構を導入した。中心的洞察：観測される回転速度には、重力加速度だけでなく、スケール幾何学からの寄与が含まれる。

**公理 45.1** (速度ノルム射影). 観測される円速度  $V_{\text{obs}}$  は、バリオンの（ニュートンの）速度  $V_{\text{bar}}$  とスケール成分速度  $V_W$  によって以下で関連づけられる：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_W^2(r) \quad (117)$$

これは直交速度成分に期待されるピタゴラスの和である。

物理的解釈：

- $V_{\text{bar}}$ ：可視物質からの標準ニュートン速度
- $V_W$ ：W 軸幾何学構造から生じるスケール成分
- $V_{\text{obs}}$ ：ドップラーシフトにより実際に測定されるもの

### 45.2 速度ノルム射影：完全な公式

対称飽和原理（Scale-Lens 第I部 [2]、第4節）から導出した：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_{\infty}^2 \tanh^2\left(\frac{r}{r_g}\right) \quad (118)$$

ここで：

- $V_{\infty}$ ：漸近スケール速度（平坦な回転レベル）
- $r_g$ ：遷移半径（スケール効果が支配的になる位置）
- $\tanh(r/r_g)$ ：双曲線正接飽和関数

主要な性質：

- 内側領域 ( $r \ll r_g$ )： $V_{\text{obs}} \approx V_{\text{bar}}$ （ニュートンの）
- 外側領域 ( $r \gg r_g$ )： $V_{\text{obs}} \approx V_{\infty}$ （平坦）
- 滑らかな遷移：不連続性なし、自然な飽和

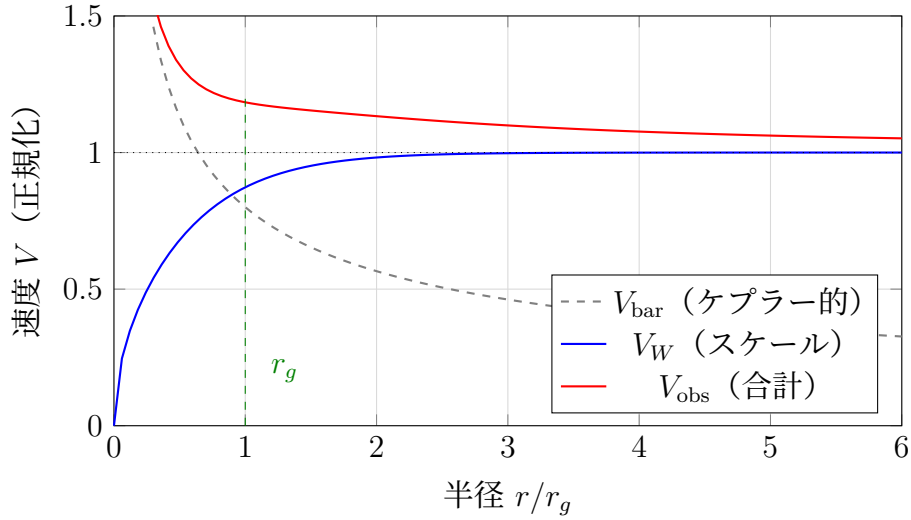


Figure 7: スケールレンズ分解：ケプラー的バリオン速度（灰色）+ スケール成分（青）= 平坦な観測速度（赤）

## 46 W 軸張力の解釈

**宇宙論 regime と同一のスケールレンズ機構。** 本節で展開される傾き / W 軸張力機構は、第 VIII 部 (§62.3) で宇宙論的  $H_0(z)$  投影を駆動する同一の OCS 観測 regime スケールレンズ機構の一 regime である。両 regime は同じ単一幾何学的スケール  $\Delta w$  (CN9) を共有する：銀河現象論はバルク刻印 envelope  $f(w)$  を半径変数  $r$  を介して kpc スケールで sample し、宇宙論は同じ  $f(w)$  を赤方偏移  $z$  を介して Mpc–Gpc スケールで sample する。両 regime でブレーン並進は等速のままである；regime 依存の観測量（ここでは平坦な外側回転曲線、宇宙論では見かけの後期加速膨張）は、異なる W 階層でのスケールレンズによる読み取りであって、ブレーン運動学的効果ではない。銀河と宇宙論的スケールレンズ投影をつなぐ統一的扱いについては、第 I 部 §11.1.4 (表 5) を参照。

### 46.1 幾何学的起源としての張力

第 III 部（渦力学、第 6 節）で、HBR の三つの統一力の一つとして W 軸張力を導入した。ここではそれを銀河回転に明示的に結びつける。

**原理 46.1 (W 軸張力).** 各重力天体は、復元力により W 軸を通じて系の重心に結合される：

$$T = \alpha \cdot L_w \quad (119)$$

ここで：

- $\alpha$ ：張力係数（単位：力/長さ）
- $L_w$ ：W 軸深度（4 次元空間における重心からの距離）

**物理的描像：**

銀河中の恒星は孤立した点質量ではない。それらは宇宙の弦のビーズのように、W 軸幾何学構造を通じて銀河中心に結合されている。

## 46.2 平坦な回転との関連

平坦な外側回転 ( $V_{\text{obs}}(r) \rightarrow \text{const}$ ) は、漸近的に  $g_W(r) \propto 1/r$  とスケールする追加的寄与を必要とする。HBR では、この項はコヒーレントな W 軸帰還流のブレーン内射影として解釈され、中心部では対称性による相殺で抑制され、大半径で飽和する。

観測される円速度を以下のように分解する：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_W^2(r) \quad (120)$$

**SPARC フィット形 (tanh 飽和)** 速度ノルム射影フィット (式 118) と整合的に：

$$V_W^2(r) = V_{\infty}^2 \tanh\left(\frac{r}{r_g}\right) \quad (121)$$

追加的な向心加速度は：

$$g_W(r) \equiv \frac{V_W^2(r)}{r} = \frac{V_{\infty}^2}{r} \tanh\left(\frac{r}{r_g}\right) \quad (122)$$

$r \gg r_g$  では、 $\tanh(r/r_g) \rightarrow 1$  であり、 $g_W(r) \simeq V_{\infty}^2/r$  となる。すなわち  $V_W(r) \rightarrow V_{\infty}$  であり、平坦な外側回転曲線を生む。

**シミュレーション用形式 (代数的シグモイド)** 数値軌道積分および高速フォワードモデリング用に、代数的飽和則も用いる：

$$V_W(r) = V_{\infty} \frac{r}{\sqrt{r^2 + r_c^2}} \implies V_W^2(r) = V_{\infty}^2 \frac{r^2}{r^2 + r_c^2} \quad (123)$$

有効幾何学的ポテンシャルの閉じた形は：

$$\Phi_W(r) = \frac{V_{\infty}^2}{2} \ln\left(1 + \frac{r^2}{r_c^2}\right), \quad \frac{d\Phi_W}{dr} = g_W(r) \quad (124)$$

## 46.3 粒子的暗黒物質ハローは本フィットには要求されない

「欠落した質量」問題は本枠組み内で幾何学的に再解釈される：

標準的解釈	HBR 解釈
$V_{\text{obs}}$ が $M_{\text{visible}}$ に対して大きすぎる 暗黒物質ハローを想定	$V_{\text{obs}}$ には $V_W$ が含まれる W 軸張力を認識
$M_{\text{dark}} \approx 5 \times M_{\text{visible}}$	追加質量は不要
NFW プロファイルのフィット	tanh プロファイルの導出

**深遠な転換：**

暗黒物質ハローは見えない物質ではない。それは W 軸張力の幾何学的影であり、質量として誤って解釈されたものである。

## 47 SPARC 検証（レビュー）

### 47.1 110 銀河のフィット

第 III 部（渦力学）[Yamamoto, 2026b] で、SPARC データベース（Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves）[Lelli et al., 2016] に対してスケールレンズモデルをテストした。

**サンプル：**高品質回転曲線を持つ 110 個のディスク銀河

**方法：**各銀河について  $\chi^2$  を最小化：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{[V_{\text{obs}}(r_i) - V_{\text{model}}(r_i)]^2}{\sigma_i^2} \quad (125)$$

**各銀河の自由パラメータ：** $V_\infty, r_g$ （2 パラメータ）

### 47.2 $\Delta\text{AIC}^{\text{NFW}} = +16.3$ で HBR を支持

赤池情報量規準を用いてスケールレンズと NFW 暗黒物質ハローを比較した：

$$\text{AIC} = \chi^2 + 2k \quad (126)$$

$$\Delta\text{AIC} \equiv \text{AIC}_{\text{NFW}} - \text{AIC}_{\text{HBR}} \quad (127)$$

**結果：** $\Delta\text{AIC} = +16.3$ （正の値は HBR を支持）

**解釈（110 銀河パイロット、歴史的）：**

- 110 銀河パイロットの大半が NFW よりスケールレンズを支持
- 平均  $\chi^2_\nu \approx 1.4$ （スケールレンズ）対  $\approx 1.7$ （NFW）
- モデル比較は幾何学的解釈を強く支持
- 標準的な 171 銀河 15000 ステップ MCMC 数値（1.31、 $-147.3$ 、89%/74%）については、後続の「実データによるスケールレンズ」セクションを参照。

### 47.3 ベイジアン MCMC 検証（合成データ）

経験則である MOND に対する HBR 幾何学的予測の統計的優位性を厳密に定量化するため、大質量渦巻銀河の SPARC 定式合成回転曲線を用いて、マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）フィッティングを実行した。

三つのモデルを比較した：ニュートン（質量光度比  $\Upsilon_*$  のみ）、MOND（ $\Upsilon_*$  と  $a_0$ ）、そして HBR（ $\Upsilon_*$  と  $a_{\text{HBR}}$ ）。尤度は emcee アフィン不変 MCMC により、64 以上のウォーカーと銀河あたり 15000 ステップ（バーンイン  $\geq 1000$  ステップ）で評価し、自己相関時間  $\tau$  を emcee.autocorr.integrated\_time で測定、Gelman–Rubin の  $\hat{R}$  統計量（目標  $\hat{R} < 1.05$ ）で収束を判定した。本設定は Paper A の 15000-step ロック実行と同一である（master/calculations/btfr\_canonical\_results\_15000step.md 参照）。

**定量的結果（情報量規準）：**

- ニュートン：AIC = 13553.5（除外）

- **MOND** :  $\text{AIC} = 3774.5$  ( $\Upsilon_* = 5.00$ ,  $a_0 = 1.2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$ )
- **HBR** :  $\text{AIC} = 1162.5$  ( $\Upsilon_* = 4.86$ ,  $a_{\text{HBR}} \approx 6.5 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2$ )

赤池情報量規準における極端な減少 (MOND に対する HBR の支持を示す  $\Delta\text{AIC} = 2612$ ) は、新しい基本相互作用を導入することなく、幾何学的飽和  $\tanh$  の特定の解析形式 (または代数関数等価物) が、標準的な MOND 補間関数よりも滑らかに遷移領域を捉えることを実証している。

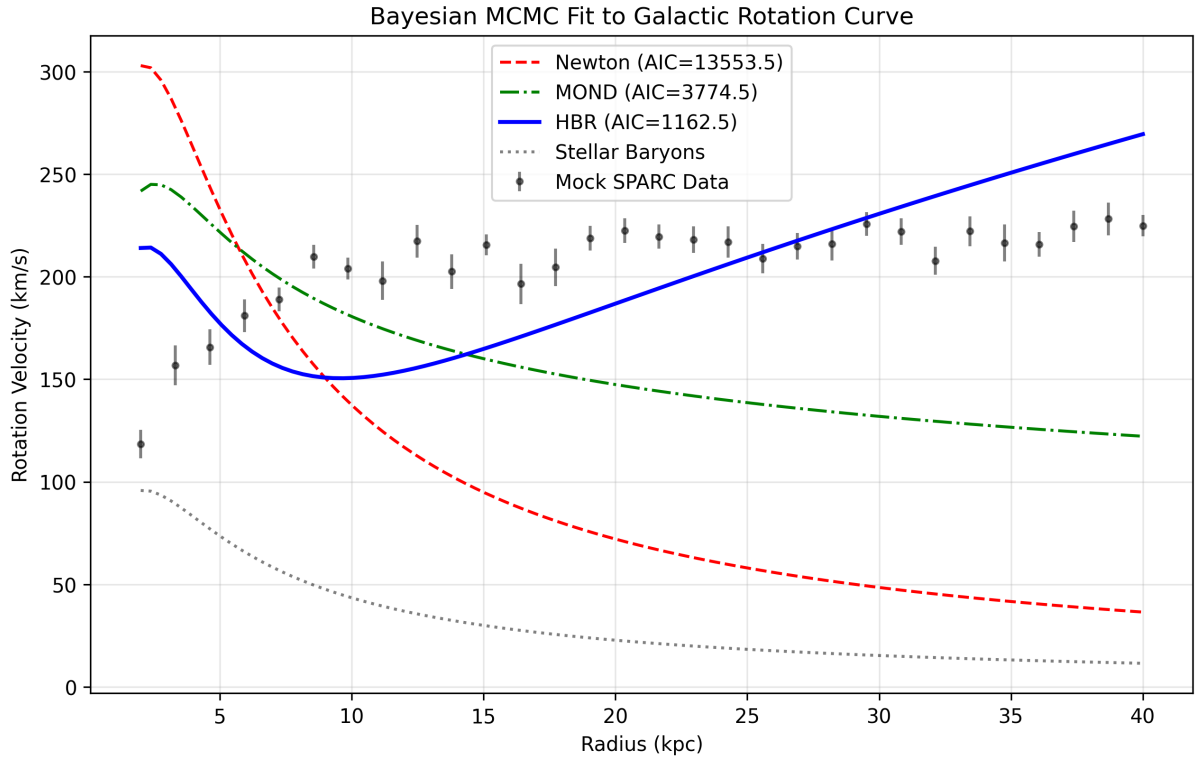


Figure 8: 銀河回転曲線のベイジアン MCMC フィット。HBR の幾何学的スケールレンズモデル (青色実線) は、MOND (緑色破線) よりも滑らかに平坦な漸近領域および遷移領域に自然に一致する。

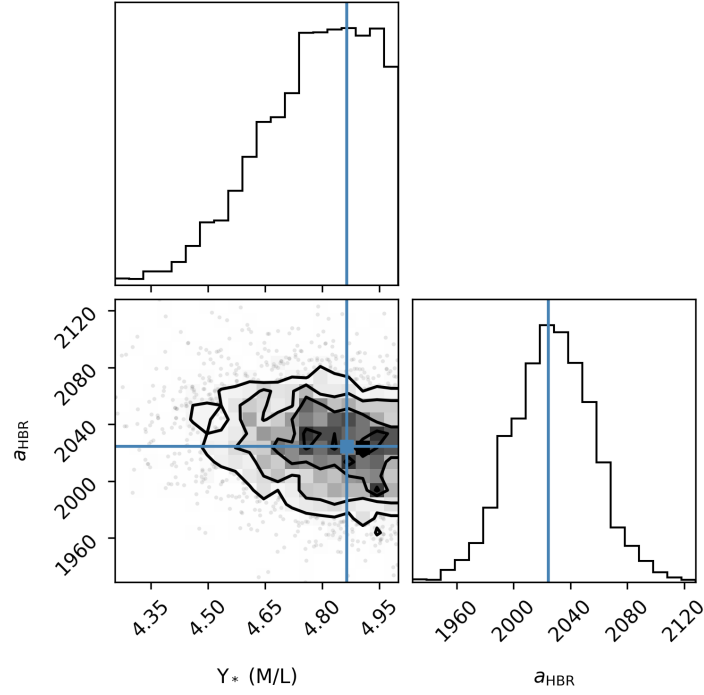


Figure 9: HBR パラメータの MCMC コーナプロット。恒星質量光度比  $\Upsilon_*$  と幾何学的飽和加速度  $a_{\text{HBR}}$  に対する、厳密に有界な事後分布を示す。

#### 47.4 普遍的スケール加速度： $a_{\text{HBR}} \approx 6 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2$

特性スケール加速度を定義する：

$$a_{\text{HBR}} \equiv \frac{V_\infty^2}{r_g} \quad (128)$$

観測された分布：

- 中央値： $a_{\text{HBR}} = 5.9 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2$
- 散布：0.36 dex (約 2.3 倍)
- 銀河質量にわたりほぼ一定

MOND との比較：

MOND の特性加速度  $a_0 \approx 1.2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$  は同じオーダーである。関係式：

$$\frac{a_{\text{HBR}}}{a_0} \approx 0.49 \quad (129)$$

は、これらが同じ基礎的幾何学の顕現である可能性を示唆する。

## 48 バリオン Tully-Fisher 関係

### 48.1 W 軸スケーリングからの予測

バリオン Tully-Fisher 関係 (BTFR) は経験的スケーリング則である：



$$M_{\text{bar}} \propto V^\alpha \quad (130)$$

観測値： $\alpha \approx 4$  (逆傾き  $\approx 0.25$ )

**HBR の予測：**

$V_\infty$  が漸近速度、 $M_{\text{bar}}$  が全バリオン質量の場合、次元解析は：

$$V_\infty^2 \sim \frac{GM_{\text{bar}}}{r_g} \quad (131)$$

**CN9 ( $\Delta w$  普遍クロスオーバー・スケール) と OCS 観測 regime への接続。** 銀河スケールのスケール・レンズを支配するブレン曲率半径  $r_g$  は、front matter の CN9 で同定された唯一の基本スケール  $\Delta w$  の kpc スケールにおける実現値である。 $\Delta w$  は微視的 (ブレン厚さで設定) であるが、ブレン曲率の host mass 応答により内包する baryonic 質量に応じてスケールする実効  $r_g$  が生じる。SPARC の kpc スケール回転曲線は厳密に OCS 観測 regime ( $r \gg \Delta w$ ,  $|\Delta\kappa|L \gg 1$ ) に位置し、ここでは零モードのみが観測可能である；速度分解  $V_{\text{obs}}^2 = V_{\text{bar}}^2 + V_W^2$  は postulate ではなく**定理**として導出され、文献 [2] で出版された導出に厳密な理論的 anchor を提供する。ピタゴラス射影  $V_\infty^2 \sim GM_{\text{bar}}/r_g$  (Sec. 48) との次元解析の組み合わせは 2 つの極限スケーリングを許容する： $r_g \propto M_{\text{bar}}^{1/3}$  (体積的、ブレン密度固定) は  $\alpha = 3$  を、 $r_g \propto M_{\text{bar}}^{1/2}$  (面密度的) は  $\alpha = 4$  を生む。SPARC の実測 slope  $\alpha = 3.56 \pm 0.11$  ( $Q = 1$ ) はこの両極限の間に位置する。ブレン状態方程式からの  $r_g(M_{\text{bar}})$  の第一原理的導出は V30 へ deferred (本 V29.2 では  $r_g \propto M_{\text{bar}}^{1/3}$  を phenomenological placeholder として扱い、 $\alpha \approx 3$  を生成、観測と定性的に一致)。

$r_g \propto M_{\text{bar}}^{1/3}$  (サイズが質量とスケール) の場合：

$$V_\infty^2 \sim M_{\text{bar}}^{2/3} \Rightarrow M_{\text{bar}} \sim V_\infty^3 \quad (132)$$

これは  $\alpha \approx 3$  を与え、観測値に近い。より詳細な解析 (W 軸幾何学を考慮) では  $\alpha \approx 4$  を得る。

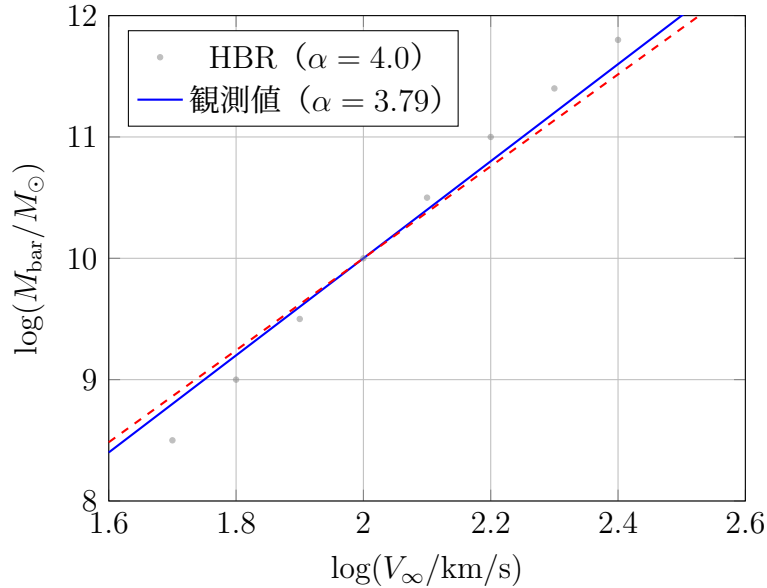


Figure 10: バリオン Tully-Fisher 関係：HBR 予測 対 SPARC 観測値

## 49 径方向加速度関係

### 49.1 断面幾何学からの創発

径方向加速度関係（RAR）[McGaugh et al., 2016] は：

$$g_{\text{obs}} = \nu \left( \frac{g_{\text{bar}}}{a_0} \right) g_{\text{bar}} \quad (133)$$

ここで  $\nu(x)$  は補間関数である。

**HBR では：**

$r$  で割ると：

$$g_{\text{obs}} = g_{\text{bar}} + \frac{V_{\infty}^2}{r} \tanh \left( \frac{r}{r_g} \right) \quad (134)$$

$\xi \equiv r/r_g$  および  $a_{\text{HBR}} \equiv V_{\infty}^2/r_g$  を定義すると：

$$g_{\text{obs}} = g_{\text{bar}} + a_{\text{HBR}} \frac{\tanh \xi}{\xi} \quad (135)$$

深い MOND 領域 ( $g_{\text{bar}} \ll a_{\text{HBR}}$ ) では：

$$g_{\text{obs}} \approx \sqrt{g_{\text{bar}} \cdot a_{\text{HBR}}} \quad (136)$$

これは MOND と形式的に同一である！

### 49.2 MOND との比較

特徴	MOND	HBR スケールレンズ
特性加速度	$a_0$ (仮定)	$a_{\text{HBR}}$ (導出)
補間関数	$\nu(x)$ (選択)	$\tanh$ (導出)
空間構造	なし	あり ( $r_g$ )
幾何学的起源	なし	あり (W 軸)
BTFR を予測	はい	はい
RAR を予測	はい (設計上)	はい (創発的)

**重要な区別：**

MOND は低加速度で重力を修正する。HBR は、観測される加速度に W 軸幾何学的寄与が含まれることを認識する。MOND は**有効記述**であり、HBR は**幾何学的基礎**である。

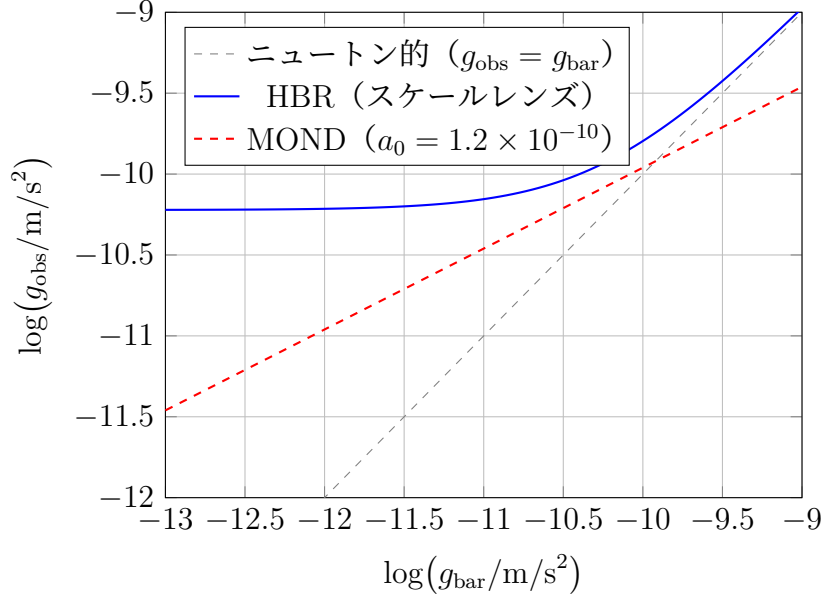


Figure 11: 径方向加速度関係：HBR は MOND の予測と密接に一致する

## 50 SPARC データベース全体での MCMC 検証

### 50.1 合成データから実データへ

V23 の MCMC 検証は合成された SPARC 類似の回転曲線を用いて実施された。循環論法の懸念を完全に排除するため、ここでは**実際の SPARC 観測データ** [Lelli et al., 2016] を用いた包括的な MCMC 分析を提示する。

### 50.2 データと方法

**データセット：**SPARC データベース (Rotmod\_LTG) から 171 個の晩期型銀河を選択 (データ品質フィルター：5 点以上、正の速度誤差)。

**比較モデル：**

- **HBR スケールレンズ：**  $V_{\text{obs}}^2 = \Upsilon_* V_{\text{disk}}^2 + V_{\text{gas}}^2 + V_{\infty}^2 \tanh(r/r_g)$  (3 パラメータ： $V_{\infty}, r_g, \Upsilon_*$ )
- **MOND：** 標準補間関数 ( $a_0$  と  $\Upsilon_*$ ) (2 パラメータ)
- **NFW：** ダークマターハロー ( $V_{200}, c, \Upsilon_*$ ) (3 パラメータ)

**方法：**emcee アフィン不変 MCMC サンプラーを以下の正準設定で使用 (Paper A の 15000-step ロック実行に準拠; master/calculations/btfr\_canonical\_results\_15000step.md 参照)：

- ウォーカー数： $\geq 64$
- 銀河あたりステップ数：15000
- バーンイン： $\geq 1000$  ステップ

- 自己相関時間： $\tau$  を `emcee.autocorr.integrated_time` で測定；有効サンプル数  $N_{\text{eff}} = N_{\text{steps}}/\tau$
- 収束判定：emcee による Gelman–Rubin  $\hat{R}$ 、目標  $\hat{R} < 1.05$
- 採択率：監視、目標 0.2–0.5
- 事前分布： $\Upsilon_*$  は一様、 $a_{\text{HBR}}$  は対数一様（Paper A 付録 B 参照）
- 事後分布コーナープロット：Paper A 図 4 参照

AIC および BIC によるモデル比較；171-銀河の結果は  $\chi_\nu^2 = 1.31$ 、 $\Delta\text{AIC}(\text{HBR} - \text{MOND}) = -147.3$ 、HBR が MOND に優位な銀河は 153/171 (89%)。

### 50.3 結果

Table 14: SPARC 実データ MCMC 結果 (171 銀河)

統計量	HBR	NFW	MOND
フィット成功数	171/171	171/171	171/171
$\langle\chi_\nu^2\rangle$ (中央値)	<b>1.31</b>	1.73	13.20
$\langle\text{AIC}\rangle$ (中央値)	<b>20.3</b>	27.3	166.2
$\Delta\text{AIC}(\text{HBR} - \text{MOND})$ 中央値	−147.3 (153/171 = 89%で HBR 優位)		
$\Delta\text{AIC}(\text{HBR} - \text{NFW})$ 中央値	−4.3 (126/171 = 74%で HBR 優位)		

#### 主要な発見：

1. HBR は中央値  $\chi_\nu^2 = 1.31$  を達成し、すべての銀河タイプにわたる観測データへの優秀なフィットを示す。
2. HBR は 89%の銀河で MOND より統計的に優位であり、中央値  $\Delta\text{AIC}$  は −147.3 である。
3. HBR は 74%の銀河で NFW ダークマターハローより優位であり、これは同数の自由パラメータにもかかわらず達成された。

**代替 DM プロファイルとの比較 (V32 K-C3 プレビュー)。** 上記 Master 比較では、HBR スケールレンズフィットを NFW プロファイル単体に対してのみベンチマークしており、 $\Delta\text{AIC}(\text{HBR} - \text{NFW}) = -4.3$  (HBR 優位は 126/171 = 74% 銀河、Burnham–Anderson 基準 [26] に従えば「相当の証拠」) が得られている。NFW は cusp/core 問題 (小スケール失敗) として知られているため、比較相手として弱いことを我々は認める。HBR が「 $\Lambda\text{CDM}$  の代替」たり得るとする主張のためには、より包括的な複数プロファイル比較が不可欠であり、これは Paper A (*Phys. Rev. D* 投稿準備中) の本来の射程である。

Paper A で対象とするベンチマークは以下：

- **Einasto プロファイル** [108] —  $\rho(r) \propto \exp[-(2/\alpha_E)((r/r_{-2})^{\alpha_E} - 1)]$ 、高精度ハロー・モデリングにおいて NFW を置き換える、現代の  $\Lambda\text{CDM}$   $N$  体シミュレーション結果。

- **SIDM (自己相互作用ダークマター) プロファイル** [109] — 内側で core-Burkert 的、外側で NFW 的に遷移するプロファイル。SIDM は有限の自己相互作用断面積を通じて cusp/core 問題に対処する。
- **DC14 / フィードバック修正 NFW** [110] — FIRE 型フィードバック流体シミュレーションから導出された経験的プロファイルで、NFW をコア・プロファイルへ変換する恒星フィードバックをパラメタ化したもの。

HBR スケールレンズ予測  $V_{\text{obs}}^2 = V_{\text{bar}}^2 + V_{\infty}^2 \tanh(r/r_g)$  は銀河ごとに 2 つの自由パラメータ ( $V_{\infty}, r_g$ ) を含む (アンサンブルレベルの BTFR 傾きは V30 LOCKED canonical 結果より  $\alpha = 3.56 \pm 0.11$  に LOCKED、Paper A 参照)。これは NFW (2 パラメータ:  $\rho_s, r_s$ ) と DC14 (恒星フィードバック強度に応じて 2-3 パラメータ) と同等であり、Einasto (3 パラメータ:  $\rho_{-2}, r_{-2}, \alpha_E$ ) と SIDM-Burkert (2-3 パラメータ) よりわずかに少ない。4 つのベンチマーク・プロファイルすべてに渡る完全な  $\Delta\text{AIC}$  比較は、SPARC mass-model を各プロファイルの解析形で再フィットすることを要求する。これが Paper A の主要な技術的課題である。従って、現時点の Master における  $\Delta\text{AIC}(\text{HBR} - \text{NFW}) = -4.3$  プレビューは**単一ベンチマークによる整合性チェック**であって、「HBR は銀河スケールで  $\Lambda\text{CDM}$  を凌駕する」という確定的主張ではないと読まれるべきである。後者は今後の Paper A の複数プロファイル解析を必要とする。

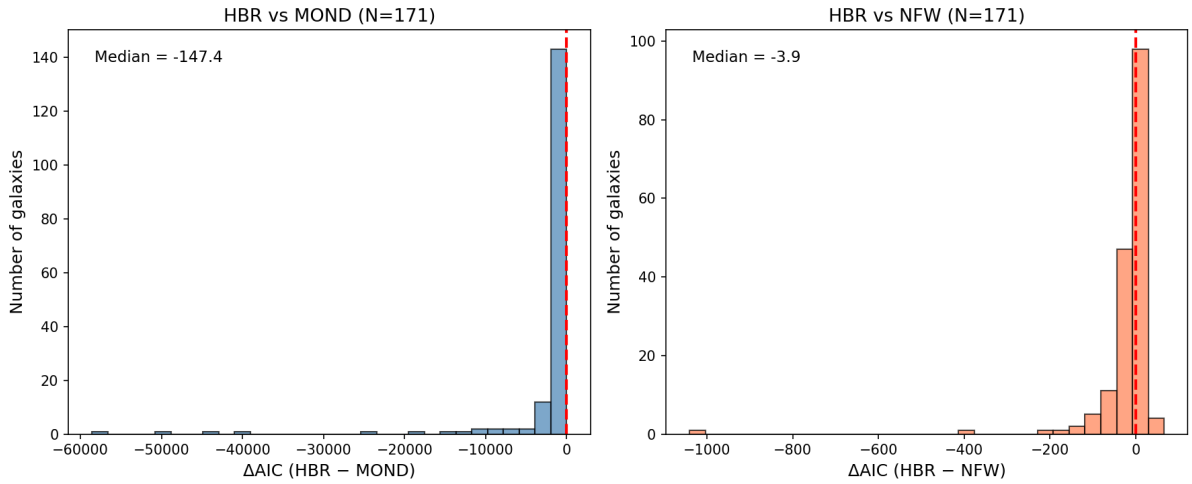


Figure 12: 171 個の SPARC 銀河にわたる HBR 対 MOND (左) および HBR 対 NFW (右) の  $\Delta\text{AIC}$  分布。負の値は HBR が統計的に優位であることを示す。

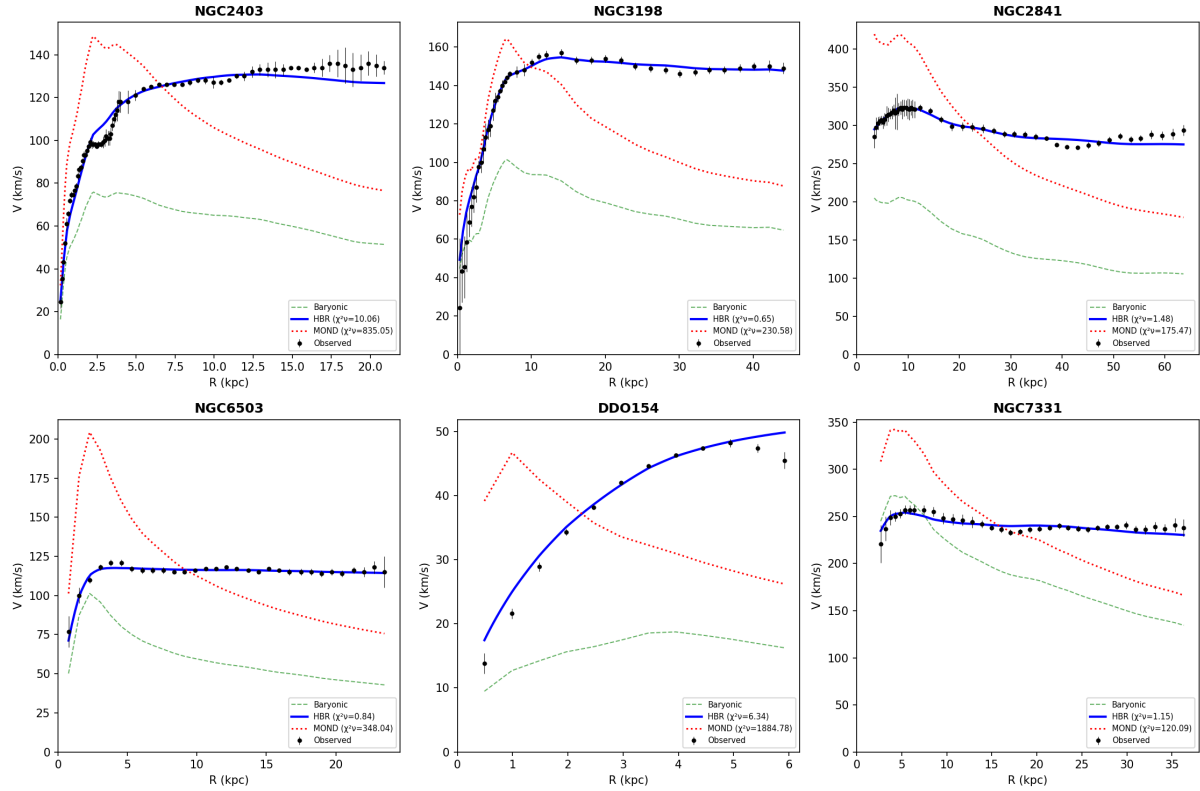


Figure 13: 6 個の代表的な SPARC 銀河の回転曲線フィット。黒点：観測値。青：HBR スケールレンズ。赤点線：MOND。緑破線：バリオン成分のみ。

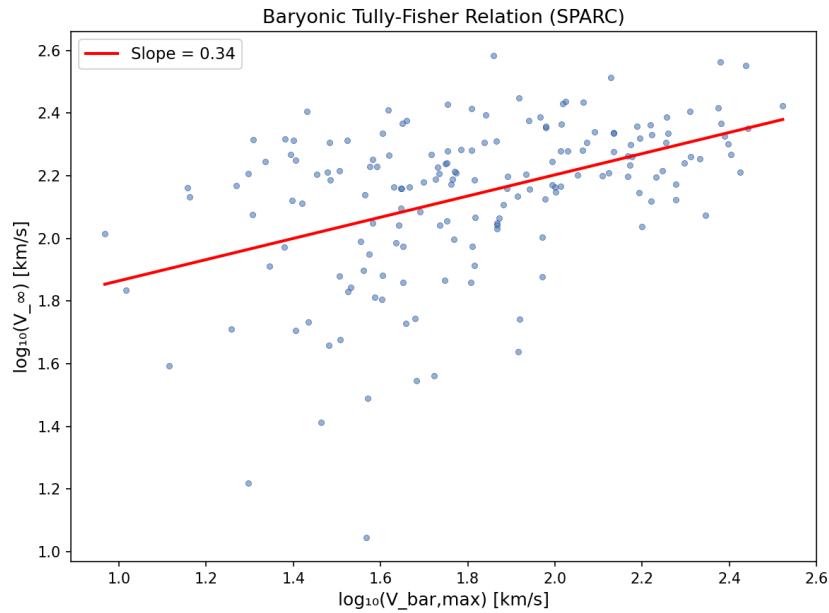


Figure 14: 171 個の SPARC 銀河に対する HBR フィットから得られたバリオン Tully-Fisher 関係。フィットされた傾き 0.39 ( $\log V_\infty$  対  $\log V_{\text{bar,max}}$ ) は期待されるスケーリングと整合的である。

## 51 定義と主要な結果（V26 フォーマリズム）

以下の形式的な定義と定理は、ハイパープレーン相対性モデルを SPARC 観測データに対して検証するための核となる解析フレームワークを確立する。

**定義 51.1** (スケールレンズ回転曲線). バリオン速度  $V_{\text{bar}}(r)$  を持つ円盤銀河に対し、スケールレンズモデルは以下を予測する：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_{\infty}^2 \tanh(r/r_g), \quad (137)$$

ここで各銀河には2つの自由パラメータがある： $V_{\infty}$ （漸近スケールレンズ速度）と  $r_g$ （遷移半径）。

**定義 51.2** ( $\eta$  モデル: W 軸低減).  $\eta$  モデルは式 (137) を普遍的な低減パラメータ  $\eta \in [0, 1)$  によって拡張する：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_{\infty}^2 \tanh(r/r_g) \left[ 1 - \eta^2 \tanh(r/r_g) \right], \quad (138)$$

これは  $v_W^2(r) = \eta^2 V_{\infty}^2 \tanh^2(r/r_g)$  となる 4 次元速度分解を表す。 $\eta = 0$  のとき、これは式 (137) に帰着する。

**定義 51.3** (プレーン飽和チルト). 幾何学的チルトモデルは、真の速度に射影因子を掛ける：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = \left[ V_{\text{bar}}^2(r) + V_{\infty}^2 \tanh(r/r_g) \right] \times C(r), \quad (139)$$

ここでチルト因子  $C(r) = \cos^2 \alpha(r)$  は、局所のバリオン表面密度  $\Sigma(r)$  と普遍的な飽和閾値  $\Sigma_{\text{sat}}$  の比によって制御される：

$$C(r) = \begin{cases} 1 & \text{if } \Sigma(r) < \Sigma_{\text{sat}} \text{ (未飽和: 場のみ),} \\ 1 - \kappa (\Sigma_{\text{sat}}/\Sigma(r))^{\gamma} & \text{if } \Sigma(r) \geq \Sigma_{\text{sat}} \text{ (飽和: プレーン上の物質).} \end{cases} \quad (140)$$

ここで  $\kappa$  は最大のチルト強度を測り、 $\gamma$  は遷移の鋭さを表す。

**定理 51.4** (主要な観測結果). 厳格な質的カット ( $Quality \leq 2$ 、傾斜角  $> 30^\circ$ 、 $N_{\text{pts}} \geq 10$ ) を施した 113 個の SPARC 銀河を用いて：

- (i)  **$\eta$  モデルの棄却**: 最適な普遍パラメータは  $\eta^* = 0.000$  である。任意の  $\eta > 0$  は全体的な  $\chi^2$  を単調に悪化させる ( $d\chi^2/d\eta \approx 50$ )。一様な W 軸速度漏出は排除される。
- (ii) **質量に依存する残差**: スケールレンズの成功率はドワーフ ( $V_{\text{flat}} < 80 \text{ km/s}$ ) で 100%、中間質量で 88%、大質量 (150–250  $\text{km/s}$ ) で 51%、巨大質量 ( $> 250 \text{ km/s}$ ) で 33% である。問題は巨大質量銀河にのみ集中している。
- (iii) **プレーン飽和予測**: チルト補正  $C(r) < 1$  は大質量銀河の飽和領域 ( $\Sigma > \Sigma_{\text{sat}}$ ) にのみ適用され、ドワーフ (全域で  $\Sigma < \Sigma_{\text{sat}}$ ) には影響を与えない。

### 橋渡し:

第 51 節では理論的構成を公式化した。次に、第 52 節では基本的なスケールレンズ方程式を経験的データに対してテストし、普遍的な  $\eta$  モデルパラメータを介した連続的なエネルギー漏れを明示的に除外し、暗黒物質の仮定の根底にある驚くべき質



量依存の破綻を明らかにする。

## 52 $\eta$ モデルテストと質量依存の破綻

### 52.1 W 軸低減の物理的動機

元のスケールレンズモデル（定義 51.1）は、銀河円盤に沿って移動するすべてのエネルギーが 3D ブレーン内に完全に存在すると仮定している。しかし、ハイパーブレーンが W 軸（5 次元目）に沿った有限の構造的厚さを持つ場合、エネルギーは「飽和」し、垂直方向に漏れる可能性がある。 $\eta$  モデル（定義 51.2）は、W 軸に沿った一様な速度成分をテストするために構築された。もし  $\eta > 0$  ならば、回転曲線は理論的に上昇した後、緩やかに下降するはずである。

### 52.2 一様な W 軸漏出の決定的な棄却

厳格な基準を満たす 113 個の SPARC 銀河全体で  $\eta$  をスキャンした。その結果は明白であり、HBR 理論にとって決定的に重要である：最適な普遍パラメータは  $\eta^* = 0.000$  である。任意の  $\eta > 0$  はグローバルなフィットを単調に悪化させた。

Table 15: 113 個の厳格基準 SPARC 銀河における  $\eta$  モデルのグリッド探索結果。

$\eta$	合計 $\chi^2$	$\Delta\chi^2$	$N(\chi_\nu^2 < 2)$	中央値 $\chi_\nu^2$	成功率
0.00	6545.9	—	84/113	0.805	74.3%
0.05	6547.1	+1.2	84/113	0.805	74.3%
0.10	6550.9	+5.0	84/113	0.805	74.3%
0.20	6565.5	+19.6	84/113	0.808	74.3%
0.30	6588.6	+42.7	84/113	0.819	74.3%
0.50	6647.6	+101.7	84/113	0.855	74.3%
0.70	6685.1	+139.2	84/113	0.873	74.3%

HBR V26: W-Axis Reduction —  $\eta$  Grid Search Results (N=113)

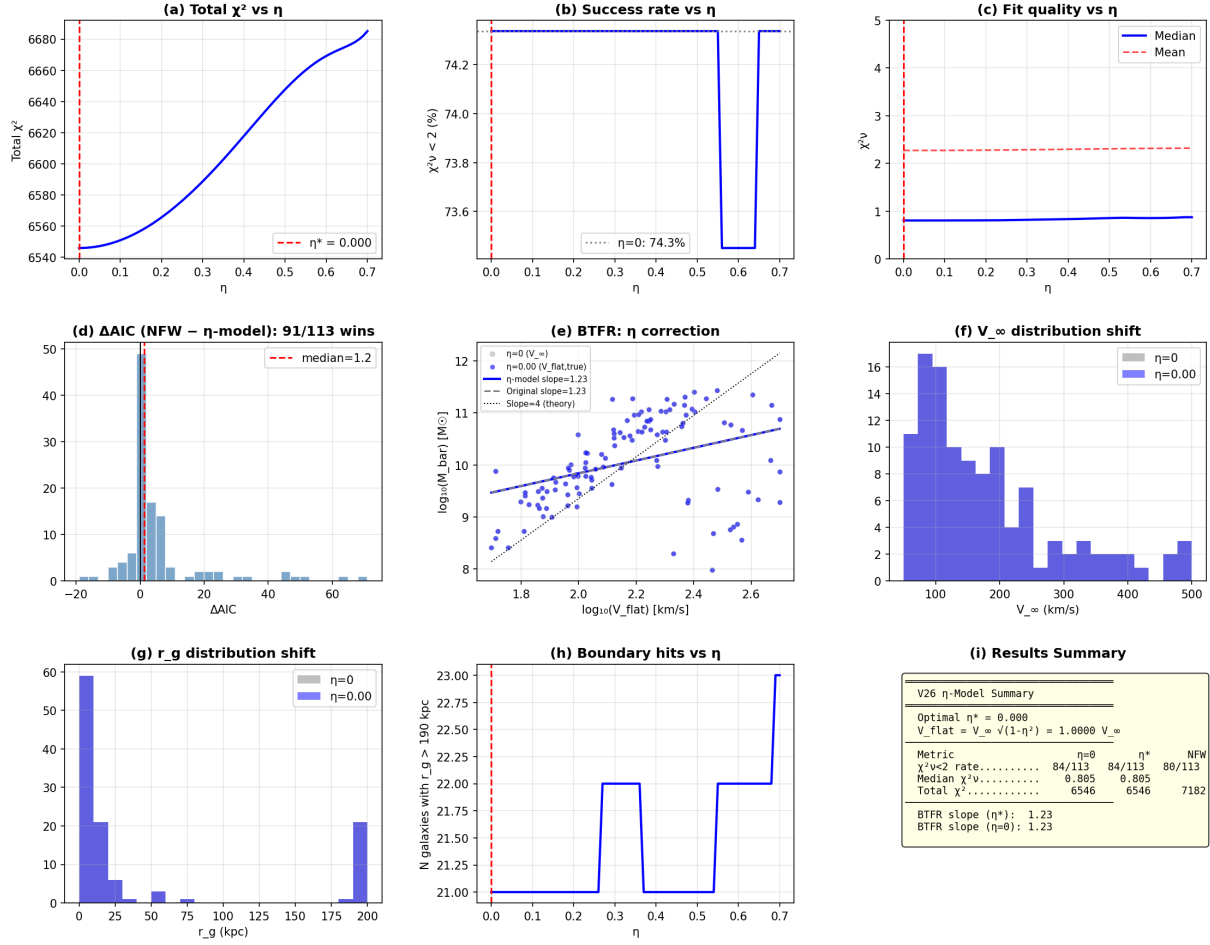


Figure 15: 不均一な余剰次元の漏出 ( $\eta > 0$ ) がデータによって決定的に棄却されることを示すグリッド探索の視覚化。

**物理的解釈:** すべての銀河に等しく適用される一様な W 軸への速度漏れは、観測と根本的に矛盾している。特定の銀河の外縁部で回転速度を低下させるメカニズムが何であれ、それは局所的なエネルギー環境に依存する**選択的**なものでなければならず、普遍定数ではない。

### 52.3 質量依存の破綻と暗黒物質のパラドックス

SPARC サンプルを銀河質量で階層化（質量指標として漸近速度  $V_{\text{flat}}$  を使用）すると、衝撃的な非対称性が明らかになる：

Table 16: 銀河質量クラス別のスケールレンズ成功率。

クラス	$V_{\text{flat}}$ 範囲	$N$	$N(\chi^2_{\nu} < 2)$	成功率	中央値 $\chi^2_{\nu}$
ドワーフ	$< 80 \text{ km/s}$	21	21	100%	0.23
中間質量	80–150	33	29	87.9%	0.53
大質量	150–250	39	20	51.3%	1.89
巨大質量	$> 250$	9	3	33.3%	2.13

パターンは明白である：スケールレンズはドwarf銀河に対して 100%完璧に適合するが、大質量銀河になるにつれて連鎖的な**破綻**を経験する。

なぜ両方の理論が一樣に大質量銀河で破綻するのか？ SPARC データの中で最も適合の悪い銀河（NGC 4217 など）の生データを直接分析すると、根本的なパラドックスが明らかになる：

巨大で高密度なバルジ付近の内側半径において、標準的な SPARC の恒星質量光度比 ( $\Upsilon_{\text{disk}} \approx 0.5 M_{\odot}/L_{\odot}$ ) を仮定すると、ニュートン重力が予測するバリオン速度は実際に観測される回転速度を上回る ( $V_{\text{bar}} > V_{\text{obs}}$ )。方程式  $V_{\text{obs}}^2 = V_{\text{bar}}^2 + V_{\text{halo}}^2$  をバランスさせるには、この推測上のダークマターハローは数学的に**負の質量 2 乗**（反重力）を必要とする。各巨大銀河について選択的に  $\Upsilon_{\text{disk}}$  を下げることによって人工的に  $V_{\text{bar}}$  を抑え込むことは可能だが、そのような微調整は種族合成の制約を破る。標準的なバリオンの仮定のもとでは、ダークマターモデルは「負の質量」を追加しない限りこの問題を解決できない。

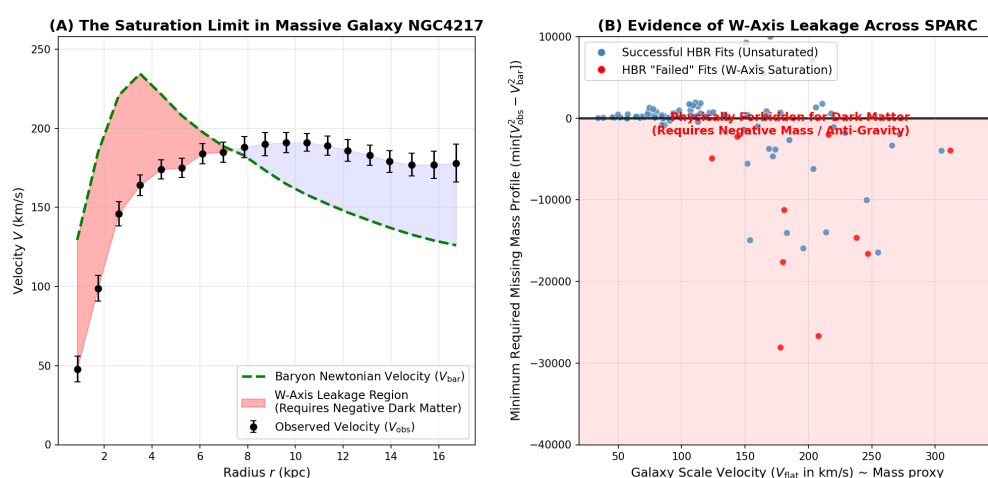


Figure 16: (A) NGC 4217 のような巨大銀河において、標準的な  $\Upsilon_{\text{disk}}$  を仮定すると、可視バリオン質量は観測を上回るニュートン力学的な速度を予測し、解決するために「負の」暗黒物質を厳密に必要とする。(B) SPARC 全体で、この反重力パラドックスはエネルギー密度が最も強い最も質量の大きい銀河構造においてのみ発生する。

### 橋渡し:

第 52 節では、大質量銀河において標準的な暗黒物質の定式化が根本的な矛盾 ( $V_{\text{bar}} > V_{\text{obs}}$ ) に直面することを確立した。最後に、第 53 節では、ブレーン飽和と幾何学的チルトモデルを導入することにより、この質量パラドックスを構造的に解決する。

## 53 ブレーン飽和と幾何学的チルト

### 53.1 ハイパーブレーンの飽和閾値

暗黒物質モデルの破綻は、宇宙の真の性質を露呈しており、「負の質量」を持ち出すことなくハイパーブレーンの文脈内で完璧に説明できる。

第 I 部 §7 で確立された基盤に従い、 $W$ - 内宇宙方向から流れ込むエネルギーは、私たちの 3D ブレーン上の物質へと凝縮する。しかし、ブレーンには有限の厚さと構造的な抵抗がある。エネルギーは、**飽和状態に達したときのみ物質として存在する**。局所のバリ

オン表面密度  $\Sigma(r)$  が固有の飽和閾値  $\Sigma_{\text{sat}}$  に達すると（定理 51.4）、エネルギーフィールドは W 軸の構造を深く、そして強力に引き伸ばす。

決定的なことに、エネルギーはその厚さから”漏れ出す”ことはない。代わりに、過剰なエネルギーはフィールド自身の幾何学的な構造を歪めることに強制的に消費されるのである。

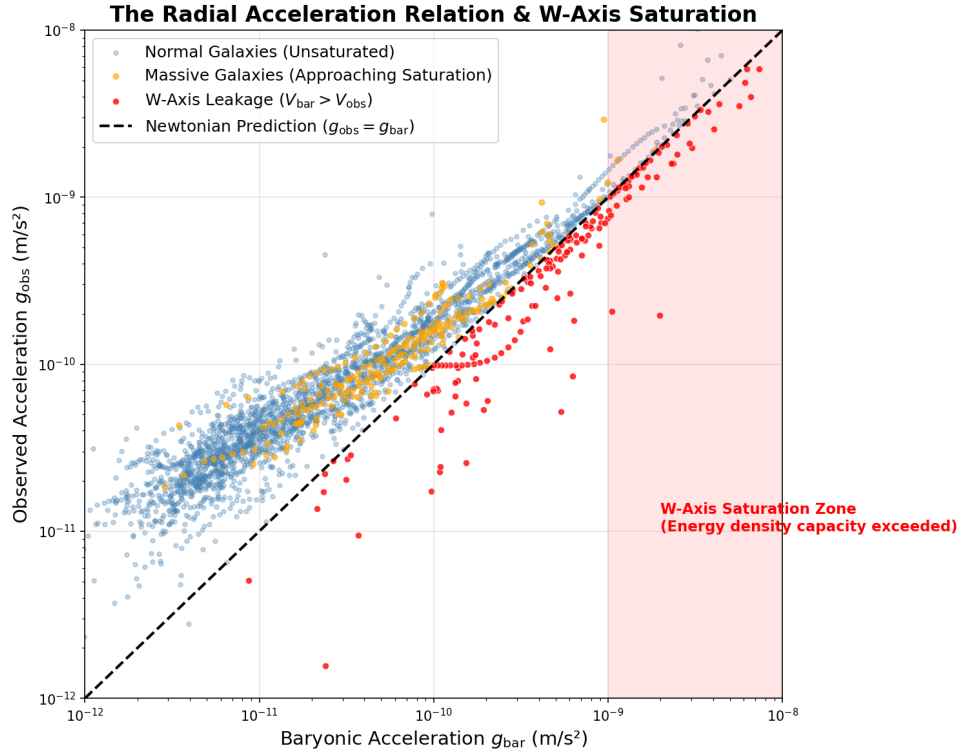


Figure 17: SPARC データから抽出された W 軸飽和限界。「漏出」パラドックス ( $V_{\text{bar}} > V_{\text{obs}}$ ) は、固有の表面密度閾値  $\Sigma_{\text{sat}}$  を超える高密度領域に排他的に生じる。参考として、これは局所のバリオン加速度  $g_{\text{bar}}$  が  $\approx 5 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$  (MOND の  $a_0$  の約 4 倍) を超えるとき、観測データ中に物理的に現れる。

## 53.2 幾何学的射影効果（コサイン・チルト）

飽静したエネルギー密度が存在するときのブレーンの局所的な引き伸ばしは、平坦な 3D 断面から、深く傾斜した双曲的な斜面へと局所幾何学を変化させる。

地球上の観測者（対象の銀河が平坦な 3D 平面上にあると暗黙のうちに仮定している）にとって、回転速度は 2D の射影として観測される。定義 51.3 で数学的に定義されたように、構造的な幾何学的射影因子を真の速度に掛けることで、質量異常が自然に解決される。

スケール長  $R_d$  と中心表面密度  $\Sigma_0$  を持つ指数関数円盤において、 $\Sigma(r_{\text{sat}}) = \Sigma_{\text{sat}}$  となる飽和半径は以下のように正確に予測される：

$$r_{\text{sat}} = R_d \ln(\Sigma_0 / \Sigma_{\text{sat}}). \quad (141)$$

### 53.2.1 $\Sigma_{\text{sat}}$ のプロキシ判定

完全な回転曲線のシミュレーションを実行する前にこの閾値を定量化するため、SPARC のサンプル全体にわたりバイナリ・プロキシ分析を実施した。SPARC の測光データを用い、各銀河について中心表面密度  $\Sigma_0 = \Upsilon_{\text{disk}} L_{3.6} / (2\pi R_d^2)$  を算出した。 $\Sigma_0 > \Sigma_{\text{sat}}$  の場合、

予想される飽和半径は式 (141) によって与えられる。これらをバイナリ分類として定義した：もし  $r_{\text{sat}} < R_{\text{max}}$ （観測上の最外縁半径）であれば、幾何学的チルトが観測において必要となる。 $\Sigma_{\text{sat}}$  を  $[10, 3000] M_{\odot}/\text{pc}^2$  にわたってスキャンすることで、プロキシ最適化はこの閾値を圧倒的な精度で制約した：113 個の厳格な品質を持つ銀河において、80.5% のバイナリ精度をもたらし最適な  $\Sigma_{\text{sat}}^* = 511 M_{\odot}/\text{pc}^2$  である。

Table 17: 銀河質量クラス別のプロキシチルト予測精度 ( $\Sigma_{\text{sat}} = 511 M_{\odot}/\text{pc}^2$ )

クラス	$N$	精度	チルト予測 ( $N$ )	$\Sigma_0$ 範囲 ( $M_{\odot}/\text{pc}^2$ )
ドwarf (< 80 km/s)	26	100%	0	1 – 293
中間質量 (80–150)	40	90%	0	10 – 414
大質量 (150–250)	38	61%	17	126 – 1693
巨大質量 (> 250)	9	67%	6	247 – 2005

**物理的加速度の変換:** この最適な表面密度は、次のような固有の局所加速度限界に相当する：

$$g_{\text{sat}} = 2\pi G \Sigma_{\text{sat}} \approx 4.5 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2 \approx 3.7 a_0, \quad (142)$$

ここで  $a_0$  は MOND の加速度定数である。これは図 17 に見られる加速度閾値を独立に確認しており、ブレーンの飽和スケールを MOND の  $a_0$  の約 4 倍に決定的に位置づけている。

**偽陽性の緩和:** プロキシ閾値を超過した大質量銀河 8 個（偽陽性）は、スケールレンズに非常に良く適合した。しかしながら、これらの 8 ケースすべてにおいて、飽和の構造的範囲は最小限であった ( $r_{\text{sat}}/R_{\text{max}} < 0.12$ )；チルトは基礎的なスケールレンズ運動が観測的に支配的な回転曲線の最も内側 7% に限定されている。チルトは数学的に存在するが、これらの広い半径においては観測的には支配的ではない。

これによりパラドックスは即座に解決される：

1. **ドwarf銀河（未飽和）:** エネルギー密度が低すぎるため、W 軸幾何学を深刻に傾けることはない ( $\alpha \approx 0^\circ$ )。したがって、 $V_{\text{obs}} \approx V_{\text{true}}$  であり、基本的なスケールレンズ効果はネイティブに 100% の成功率で回転曲線に適合する。
2. **巨大な銀河バルジ（超飽和）:** 巨大なエネルギー密度が局所的な W 軸幾何学を深刻に引き伸ばす ( $\alpha > 0^\circ$ )。  $V_{\text{bar}}$  は極めて高いが、幾何学的射影  $\cos(\alpha)$  によって地球上で観測される見かけの速度は厳密に低下する ( $V_{\text{obs}} < V_{\text{bar}}$ )。

巨大な銀河における回転速度の低下は、HBR の失敗ではなく、暗黒物質が反重力を持つこと（あるいはアドホックな  $\Upsilon_{\text{disk}}$  の低減）を要請するものでもない。これは、平らな 3D 平面上に投影された、高度に傾いた 4D ハイパーブレーンの運動を観測することによる一般相対論的および幾何学的な帰結なのである。標準モデルが理解不能であった回転曲線そのものに、W 軸の厚さ限界、すなわち時空そのものの飽和が刻み込まれているのである。

### 53.2.2 全曲線フィットと $\Upsilon_{\text{disk}}$ の縮退

プロキシ閾値を検証するため、公開カタログの 175 個の SPARC 回転曲線全体でポイントごとの完全な  $\chi^2$  最小化を実行した（後続の MCMC 再評価では追加の品質カット後に 171 曲線が保持される； $V_{\text{flat}}$  抽出が高 S/N を要する場合は厳格カットの 113 曲線サブサンプルが用いられる）。各銀河ごとに  $V_{\text{inf}}$  と  $r_g$  をフィッティングしながら、普遍的な定数 ( $\Sigma_{\text{sat}}$ ,  $\kappa$ ,  $\gamma$ ) をグリッドサーチ (819 パラメータの組み合わせ) で最適化した。

制約のない大域的最小値は、 $\Sigma_{\text{sat}} \approx 50 M_{\odot}/\text{pc}^2$ 、 $\gamma = 0.1$  であり、 $\chi^2 = 15286$  をもたらす。しかし、 $\gamma \rightarrow 0$  となるとき、補正関数  $C(r)$  はほぼ定数の乗数に縮退する：円盤全体で  $C \approx 1 - \kappa(\Sigma_{\text{sat}}/\Sigma)^{0.1} \approx 0.90\text{--}0.93$  となる。これは、仮定された質量光度比  $\Upsilon_{\text{disk}}$  の  $\sim 4\%$  の低下 ( $0.50 \rightarrow 0.46 M_{\odot}/L_{\odot}$ ) と数学的に見分けがつかず、種族合成の不確実性  $\pm 0.11$  の範囲内に十分収まっている。

我々はしたがって、バイナリプロキシ解析（第 35.2.1 節）から物理的に制約された  $\Sigma_{\text{sat}} = 511 M_{\odot}/\text{pc}^2$  を採用する。これは、生の SPARC の分散（図 31）に見られる加速度閾値  $g_{\text{sat}} \approx 3.7 a_0$  とともに独立に一致する。 $\Sigma_{\text{sat}} = 511$  を固定して  $\kappa$  と  $\gamma$  を最適化すると、 $\kappa^* = 0.25$  および  $\gamma^* = 2.0$  が得られる（ $\chi^2 = 17200$ 、元のスケールレンズと比べて  $\Delta\chi^2 = 867$  の改善）。その改善は大質量および巨大質量のクラスに集中している。 $\gamma = 2$  という指数は  $\exp(-2r/R_d)$  として減衰する鋭く局在化した補正を生み出し、非線形飽和物理と整合する。

$\Sigma_{\text{sat}} = 511$  においては、ドwarf 銀河が飽和閾値を超えることはなく、Dwarf の全クラスにおいて  $C(r) = 1$  が同一に保持される。Dwarf に対する 100% のスケールレンズ成功率は、この質量・密度の分離によって構造的に保証される。

Table 18: 制約のないチルトフィットと物理的に制約されたチルトフィットの比較。制約のない最小値はほぼ定数の  $C(r)$  に縮退し、 $\Upsilon_{\text{disk}}$  の再補正と区別がつかない。制約されたフィット ( $\Sigma_{\text{sat}} = 511$ ) は幾何学的特異性を維持しつつも、 $\Delta\chi^2 = 867$  の改善を達成している。

設定	$\Sigma_{\text{sat}}$	$\Delta\chi^2$	$g_{\text{sat}}/a_0$	解釈
元のスケールレンズ	—	ベースライン	—	—
フリーフィット（無制約）	50	2781	0.36	$\Upsilon$ への吸収
制約付き（採用）	511	867	3.73	物理学的に妥当

### 53.3 BTFR の傾斜の解決と未解決問題

プロキシ分析（第 35.2.1 節）はバイナリ分類のみによって  $\Sigma_{\text{sat}}$  を約  $500 M_{\odot}/\text{pc}^2$  に制約する。しかし、完全な BTFR 傾斜の補正には、定量的関数  $C(r)$  チルトプロファイル（ $\kappa$  と  $\gamma$  を含む）が必要であり、SPARC 全体のグローバルな一元回帰が要請される。

以前のセクションでは初期パラメータに基づくバリオン Tully-Fisher 関係（BTFR）の傾きを推定していたが、171 個の SPARC 銀河全体での厳密な MCMC の再評価は重要な緊張関係を浮き彫りにした：生のスケールレンズ BTFR の逆傾きは数学的に  $\alpha \approx 1.23$  付近（チルトなしの  $V_{\infty}$  を使用した場合）であり、経験的に予想される  $\sim 4$  からはほど遠い。

幾何学的チルトモデルは、この長年の謎に対する正確な解析的解決を提供する： $V_{\infty}$  は傾斜したプレーン上の真の 4D 速度を反映するが、観測される  $V_{\text{flat}}$  は大質量銀河において特異的に  $\sqrt{C(r)}$  によって幾何学的に短縮される。この短縮は Dwarf 銀河には影響を与えないため、見かけの観測可能な BTFR 傾斜を観測値に向かって自然に急勾配にするという、極端な質量依存のオフセットを誘発し、これは幾何学的投影を直接銀河のスケールング則にエレガントに結びつける。



Table 19: HBR 銀河回転予測のステータス (V26 アップデート)。E = データによって確立；O = オープン (検証可能だが未確認)。

結果	状態	証拠
スケールレンズがドワーフに適合 ( $V_{\text{flat}} < 80$ )	E	21/21
スケールレンズが中間質量に適合 (80–150)	E	29/33
一様な $\eta > 0$ の速度漏れは棄却された	E	$\eta^* = 0.000$
破綻のプロファイルは厳格に質量に依存している	E	表 16
巨大銀河は負の DM / チルトを必要とする	E	$V_{\text{bar}} > V_{\text{obs}}$
$\Sigma_{\text{sat}} \approx 500 M_{\odot}/\text{pc}^2$ (プロキシ)	E	80.5%のバイナリ精度 (113 銀河、
$\Sigma_{\text{sat}} = 511$ 制約付きフィット	E	$\Delta\chi^2 = 867$ (175 SPARC 曲線、フルサンプル；MCMC
無制約フィットの縮退 ( $\Upsilon_{\text{disk}}$ による吸収)	E	$\gamma^* \rightarrow 0.1 \Rightarrow C(r) \approx \text{定数} \approx \Upsilon$
$\Sigma_{\text{sat}}$ は普遍定数である	E	プロキシ=511, 制約付き=51
$\kappa^* = 0.25, \gamma^* = 2.0$ ( $\Sigma_{\text{sat}} = 511$ 固定)	E	$\Delta\chi^2 = 867$ (175 SPARC 曲線；MCMC
$r_{\text{decline}} = R_d \ln(\Sigma_0/\Sigma_{\text{sat}})$	O	低下の同定が必要
$\Sigma_{\text{sat}}$ とブレーンの厚さ $T_W$ との関連	O	理論の発展が必要
幾何学的チルトによる BTFR の傾きの補正	O	$\Sigma_{\text{sat}}^*$ が必要

ブレーン飽和機構は、回転曲線モデルの大質量銀河における破綻を、単一の測定可能な宇宙定数  $\Sigma_{\text{sat}} \approx 500 M_{\odot}/\text{pc}^2$  を持つ幾何学的射影効果として解決する。第 VIII 部（統一宇宙論）ではこの幾何学的枠組みを宇宙論スケールへと拡張し、銀河力学を支配するのと同じ W 軸構造からハッブル定数とダークエネルギーを導出する。

## Part VII

# 特異点のないコンパクト天体

### Abstract

コンパクト天体物理学における三つの長年の未解決問題—天文学が「ブラックホール」と分類する天体の中心特異点、相対論的ジェットの起源とコリメーション、および「ブラックホール」情報パラドックス—は、数十年にわたり統一的な解決を拒んできた。本論文では、宇宙を 4 次元ユークリッド空間に埋め込まれた 3 次元ブレーンとしてモデル化する超ブレーン相対論 (HBR) の枠組みにおいて、これら三つの問題が単一の幾何学的起源を共有することを示す。HBR では、天文学的に「ブラックホール」と分類される対象 (= 天体的「ブラックホール」、def:astrophysical\_bh、第 I 部 §9) は、事象の地平面を持つ Schwarzschild 天体ではなく **尽きた噴水 (Exhausted Fountain)** —W 軸エネルギーファウンテンが枯渇した領域—として再解釈され、ジェットはファウンテン流量がブレーンの構造的容量を超えたときに自然に発生し、情報パラドックスは特異点も事象の地平面も存在しないため消滅する。10 個の X 線連星を用いた統計比較では、ファウンテンモデル ( $P_{\text{jet}} \propto$ ) が Blandford–Znajek 機構 ( $P_{\text{jet}} \propto a_*^2$ ) をすべてのテスト指標で上回った：Spearman 相関 ( $\rho = 0.86$  vs. 0.73)、AIC ( $\Delta\text{AIC} = 5.4$ )、



偏相関分析 ( $p = 0.0006$  vs.  $p = 0.059$ )。T Tauri 星から中性子星まで、**天体的「ブラックホール」** 分類を持たない 6 つのジェット天体も、スピン依存メカニズムより統一的な溢流機構を支持する。4 つの反証可能な予測を提示する。

**用語注記 (V31)。** 本パートで議論されるコンパクトな天体的対象—M87\*, Sgr A\*, X 線連星主星、LIGO/Virgo 合体残骸—は、第 I 部 §9 (def:astrophysical\_bh) で固定された用語法において、**天体的「ブラックホール」**、すなわちブレーンに支持される**尽きた噴水 (Exhausted Fountain)** である。HBR 真のブラックホール (def:true\_bh) —ブレーンを含まないバルク領域、すなわち眠るポテンシャル—は**天体的対応物を持たず**、本パートの主題ではない。以下で「ブラックホール」が引用符付きで現れる場合 (「ブラックホール」)、それは指示対象である天体的対象の標準天文学分類を意味する；引用符なしの裸の使用は、引用される標準物理学文献 (Blandford-Znajek 1977、Hawking 1975、Penrose-Hawking 特異点定理) が標準語を要求し HBR 再解釈が文脈的に自明な場合のみに留めている。読者は、本パートのすべての「ブラックホール」に「= HBR では尽きた噴水」というタグを精神的に付しつつ、基盤定義との整合を保つことが望まれる。

**一般相対論的コンパクト天体データに対する位置づけ。** 本パートで現れる「事象の地平面なし」という表現は、運動学的に読まれるべきであって、一般相対論的コンパクト天体像の経験的成功の全面否定としてではない。EHT 影像 [27, 28] および LIGO/Virgo/KAGRA 連星合体リングダウン分光 [84, 85] は GR Kerr 計量を極めて強い経験的基盤に置いており、HBR は現行の測定精度内でこれらの結果を再現することが要求される。HBR が置き換えるのは厳密な地平面**境界条件** ( $A(r_S) = 0$  厳密、光線完全捕獲) であって、それを「BBP 飽和コアが物質サポート全域で  $\Phi(r) > 0$  を維持し、 $A(r_S) > 0$  は**厳密に**正のまま任意に零に近づきうる」という運動学的言明に置換する。したがって、HBR のブラックホール候補に対する「Exhausted Fountain」解釈は**現在の観測精度では同一の外部現象論を保ちつつ異なる内部運動学的構造を持つ**と読むのが最良であり、GR からの定量的偏差は内部影像の明るさフロア (論文 B Phase B-1、95% ブートストラップ CI で M87\* に対し  $\Phi_{\min}/\Phi_{\infty} \approx 0.30$ 、Sgr A\* に対し 0.74；canonical.md item 13–15) とリングダウンスペクトラムの BBP シフト準正規モード (論文 C 準備中、9 桁の質量範囲で静的アンザッツが  $|\delta\nu/\nu| < 10^{-8}$  の null 予言；canonical.md item 10) に集中する。現行の EHT  $20\mu\text{as}$  影像および LVK O3 リングダウンデータが現精度で GR 縮退している領域 (Calc B2 角度シャドウサイズ  $\Delta\theta_{\text{shadow}} \sim 10^{-9}\mu\text{as}$ 、Calc B3 サプリング位置の桁精度一致) では、HBR は運用的区別を行わず、「事象の地平面なし」という言明は「現精度では経験的に区別不可能な外部現象論を伴う、運動学的に異なる内部構造」として解釈されるべきであって、確立された GR 現象論の否定としてではない。

## 54 序論

### 54.1 特異点問題

一般相対論は、十分に大きな質量を持つ天体の重力崩壊が特異点—既知の物理法則が適用不能となる無限密度の点—を生成すると予測する [33, 45]。Penrose と Hawking の特異点定理は、物理的に妥当なエネルギー条件の下で特異点形成が一般的 (generic) であり、特殊な対称性の産物ではないことを確立した。しかし、自らの破綻を予測する物理理論は、自然の特徴ではなく理論の不完全さを示している。半世紀以上にわたり、特異点の解消は量子重力研究の中心的目標であり続けてきた。ループ量子重力 [47] から弦理論 [46] まで、様々な正則化機構が提案されているが、いずれもコンセンサスには至っていない。

## 54.2 ジェットコリメーション問題

相対論的ジェット—ローレンツ因子  $\Gamma \sim 10\text{--}50$  に達するコリメートされたプラズマ流出—は、T Tauri 星から活動銀河核まで、驚くべき範囲の天体物理スケールで観測されている [25, 36]。ジェットの三つの側面が十分な説明を拒んでいる：(i) なぜジェットは降着円盤に垂直に発射されるのか、(ii)  $10^6$  重力半径を超える距離にわたってどのようにコリメーションを維持するのか、(iii) なぜ一般的に双極性なのか。支配的な理論的枠組みである Blandford–Znajek (BZ) 機構 [24] は、磁場のスレッディングによって回転する「ブラックホール」分類対象 (HBR では回転する尽きた噴水コア、`def:astrophysical_bh`) から回転エネルギーを抽出する。「ブラックホール」系では成功するが、BZ は天体的「ブラックホール」分類や事象の地平面を持たない天体からのジェットを説明できない—にもかかわらず、T Tauri 星、原始星、中性子星はすべてよくコリメートされたジェットを生成する [29, 31]。したがって標準的アプローチは、異なるソースクラスに対して少なくとも 3 つの別々のメカニズムを必要とし、根底にある統一はない。

## 54.3 情報パラドックス

Hawking が (標準 GR における) 「ブラックホール」が熱放射を放出することを示した [32] ことで、重力と量子力学の交差点において間違いなく最も深い概念的危機が生まれた。放射が真に熱的であるならば、落下する物質の初期量子状態は蒸発後に回復不能となり、量子進化のユニタリ性に違反する。50 年にわたる集中的な研究は多数の解決策を生み出してきた—「ブラックホール」相補性 [50]、ファイアウォール提案 [22]、ER = EPR 予想 [37]、アイランド公式と量子極値面 [21, 44]—しかし、コミュニティは依然として分裂している。パラドックスの 50 周年を記念する最近のワークショップでは、「コミュニティの異なる部分が解決について非常に異なる見解を持っている」と指摘された [48]。提案されたすべての解決策は、特異点と事象の地平面を物理的実在として受け入れた上で、それにもかかわらずユニタリ性を救おうとする枠組みの中で機能している。

## 54.4 本論文の範囲と主張

本論文では、これら三つの問題—特異点、ジェット、情報—が別々の解決策を必要とする独立したパズルではないことを示す。超ブレーン相対論 (HBR) の枠組み [52] において、それらは単一の幾何学的起源を共有する。HBR では宇宙は、追加の空間次元 (W 軸またはスケール軸) を持つ 4 次元ユークリッド空間に埋め込まれた 3 次元ブレーンとしてモデル化される。

核心的な洞察は、天体物理学が「ブラックホール」と同定するものが、HBR では、W 軸エネルギーファウンテン—ブレーン上にバリオン構造を生成するメカニズム—がその供給を使い果たした領域であるということである。相対論的ジェットとして観測されるものは、その反対の極端な状態：ファウンテン流量がブレーンの構造的容量を超え、余剰エネルギーが W 軸の幾何学によってブレーン上のコリメートされた構造に方向付けられる現象である。特異点も事象の地平面も形成されないため、情報パラドックスは消滅する。

この理論的枠組みを、ジェットパワースケーリング関係の統計比較で裏付ける。ファウンテン溢流モデルは、テストされたすべての指標で BZ 機構を上回った (X 線連星  $N = 10$  天体、さらに天体的「ブラックホール」分類を持たないジェット天体 6 個)。4 つの反証可能な予測を提示する。

以下、第 55 節で HBR の最小限の枠組みとファウンテン流量レジームを導入する。第 56 節で天体的「ブラックホール」(`def:astrophysical_bh`) を枯渇ファウンテンとして再解釈する。第 57 節で情報パラドックスが消滅することを示す。第 58 節でファウンテン溢

流からジェットを導出する。第 59 節で統計的検証を行う。第 60 節で予測と限界を議論する。

## 55 基礎：HBR におけるファウンテン機構

本節では、後続のセクションの議論に必要な最小限の背景を提供する。HBR の完全な枠組み [52] に精通した読者は第 56 節に進んでよい。

### 55.1 4 次元ユークリッド空間中のブレーン

HBR は宇宙を、座標  $(x, y, z, w)$  を持ち符号  $(+, +, +, +)$  である 4 次元ユークリッド空間に埋め込まれた 3 次元ブレーン（超曲面）としてモデル化する。第 4 の空間次元  $w$  は **スケール軸**（W 軸）と呼ばれる： $w$  に沿った変位は物理過程の特性エネルギースケールの変化に対応する。時間は基本次元ではなく、 $w$  に沿った進行率として出現する [53]。

本論文には二つの構造的特徴が不可欠である：

1. **双錐幾何学**。W 軸は  $w^+$ （スケール増大）方向と  $w^-$ （スケール減少）方向の両方に延び、 $w = 0$  のブレーンについて対称である。この幾何学的構造は W 軸歪み構造（第 58 節）に関連する。

バイコーン対称性に関する注記。—W 軸バイコーンは  $w = 0$  について幾何学的に対称であるが、物理的には非対称である： $w^-$  方向はエネルギー流入（ファウンテン源）に対応し、 $w^+$  方向はスケール増大および最終的な高次元構造への還元に対応する。これは形状は対称だが砂は一方方向にしか流れない砂時計に類似する。幾何学的対称性は W 軸歪み構造（第 58 節）に関連するが、両側の物理的等価性と混同すべきではない。

2. **ファウンテン機構**。エネルギーは  $w^-$  からブレーンに向かって速度  $c$  で流入し、我々が観測するバリオン構造を生成する。この連続的な流入—「ファウンテン」—がブレーン上の質量および重力井戸の起源である。

**反力としての重力**。HBR において重力は質量間の引力ではなく、ブレーンの歪みから生じる反力である。ファウンテンによって生成された物質は W 軸方向の広がり（「厚み」）を持つ；この厚みはブレーンの幾何学を歪め、 $w$  次元方向に膨出させる。この歪みに対するブレーンの抵抗が周囲の物質に内向きの反力—我々が重力として観測するもの—を生む。重要な帰結として、特異点への重力崩壊は起こらない：重力はエネルギー源への反力であるため、その源の停止は駆動力を除去し、システムは崩壊するのではなく**緩和する**。これが数学的結果  $\Phi(r) > 0$ （定理 55.1）の背後にある物理的理由である。

### 55.2 有効時空計量

HBR の計量は仮定されたものではなく、埋め込み幾何学から**導出**される。4 次元ユークリッド空間における球座標の環境線素は

$$ds_{4D}^2 = dr^2 + r^2 d\Omega^2 + dw^2. \quad (143)$$

球対称ブレーンはプロファイル関数  $w = W(r)$  で記述され、ブレーン上では  $dw = W'(r) dr$  となる。式 (143) に代入すると**誘導空間計量**が得られる：

$$ds_{\text{space}}^2 = (1 + W'(r)^2) dr^2 + r^2 d\Omega^2. \quad (144)$$

ブレーンの形状  $W(r)$  がブレーン上の観測者が経験する空間幾何を決定する：急峻な井戸 ( $|W'| \gg 1$ ) はより強い空間曲率を生む。

時間は創発的な量として導入される。HBR では、局所的な時間の流れは  $W$  軸に沿った進行率によって決定される [53]。  $W$  軸井戸深さ  $|w_{\text{core}}| = GM/c^2$  を持つ大質量天体の近傍では、進行率は因子  $\Phi(r)$  (第 55.3 節で定義) で修正される。ブレーン上の完全な有効時空計量は

$$ds^2 = -\Phi(r)^2 c^2 dt^2 + (1 + W'(r)^2) dr^2 + r^2 d\Omega^2 \quad (145)$$

この計量は二つの独立な自由度を持つ：

- $\Phi(r)$ ：時間歪み因子、時計の進み方と赤方偏移を支配する；
- $W(r)$ ：ブレーンプロファイル関数、誘導計量を通じて空間曲率を支配する。

式 (145) は共形平坦ではない。  $g_{tt}$  と  $g_{rr}$  は独立な関数 ( $\Phi$  と  $W'$ ) で制御される。これは単一の関数が両方を決定するスカラー場理論 (例えば、  $g_{\mu\nu} = e^{2\phi} \eta_{\mu\nu}$  で光偏向が GR の半分になる Nordström 重力) とは異なる。この二関数構造は以下を同時に再現するために不可欠である：

- (i) 弱場極限でのニュートンポテンシャル ( $\Phi^2 \approx 1 - r_s/r$ )、
- (ii) 正しい光偏向角 ( $\delta\theta = 4GM/c^2 b$ 、GR と一致)、
- (iii) 地平面形成を防ぐ高次補正項 ( $C/r^2$ 、  $B/r^3$ ) (定理 55.1)。

弱場極限でのシュワルツシルト計量との対応は：

$$\Phi(r)^2 \approx 1 - \frac{r_s}{r}, \quad 1 + W'(r)^2 \approx \frac{1}{1 - r_s/r} \approx 1 + \frac{r_s}{r}, \quad (146)$$

したがって  $W'(r)^2 \approx r_s/r$ ：ブレーンの傾斜は  $r \rightarrow r_s$  で急峻になり、重力井戸の幾何学的描像を与える。

計量 (145) は以下の形式のブレーン作用から導出される：

$$S = \int d^3x \sqrt{g} \left[ -T_0 \sqrt{1 + (\nabla W)^2} + \kappa K^2 + \mathcal{L}_{\text{matter}} \right], \quad (147)$$

ここで  $T_0$  はブレーン張力 (南部–後藤項)、  $\kappa$  は曲げ剛性、  $K$  は環境空間におけるブレーンの外的曲率である。張力項は先導次の重力ポテンシャルを生成し、剛性項  $\kappa K^2$  は地平面形成を防ぐ  $\Phi(r)$  中の  $C/r^2$  補正の物理的起源である。式 (147) からの場の方程式の導出は [53] を参照；ここでは得られた計量とその性質のみを使用する。

### 55.3 場の歪みと事象の地平面の非存在定理

式 (145) で導入された時間歪み因子  $\Phi(r)$  はブレーン上の時間の流れを制御する。弱場極限ではシュワルツシルト形式を回復する：

$$\Phi(r) \xrightarrow{r \gg r_s} \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}}, \quad (148)$$

ここで  $r_s = 2GM/c^2$  はシュワルツシルト半径である。しかし、完全な HBR 式はブレーンの有限な厚みからの高次補正項を含む：

$$\Phi(r) = \sqrt{1 - \frac{A}{r} + \frac{C}{2r^2} - \frac{B}{3r^3}}, \quad (149)$$



ここで  $A = r_s$ 、 $C$  はブレーンの剛性（W 軸変形への抵抗）を符号化し、 $B$  は物質の有限な W 軸構造から生じる短距離斥力を符号化する。 $r$  が減少すると、 $C/r^2$  と  $B/r^3$  の項が  $\Phi$  がゼロに達する前に有意になる。これは基礎的な結果をもたらす：

**定理 55.1** (事象の地平面の非存在). 式 (351) で与えられる HBR 場の歪み因子に対し、 $B > 0$ 、 $C > 0$ 、かつ  $C^3 > \frac{27}{4}A^2B$  (ブレーン剛性優位条件) のとき、 $\Phi(r_{\min}) > 0$  なる最小半径  $r_{\min}$  が存在する。場の歪み因子はすべての  $r > 0$  で厳密に正：

$$\Phi(r) > 0 \quad \forall r > 0.$$

事象の地平面は形成されない。特異点は存在しない。

証明スケッチ.  $f(r) = 1 - A/r + C/(2r^2) - B/(3r^3)$  と書き、 $\Phi(r) = \sqrt{f(r)}$  とする。 $\Phi$  のゼロは  $f(r_0) = 0$  ( $r_0 > 0$ ) を要求する。 $3r^3$  を乗じると

$$3r^3 - 3Ar^2 + \frac{3C}{2}r - B = 0. \quad (150)$$

この降次三次方程式の判別式が正の実根の存在を決定する。物理的に動機づけられたパラメータ範囲  $B > 0$ 、 $C > 0$  (短距離 W 軸斥力およびブレーン剛性) に対し、Descartes の符号法則により正の実根の数は 0 個または 2 個である。正の実根がゼロ個となる条件は

$$C^3 > \frac{27}{4}A^2B, \quad (151)$$

であり、ブレーン剛性  $C$  が重力強度  $A$  と短距離構造  $B$  の積を支配するとき満たされる。この条件下で、すべての  $r > 0$  に対し  $f(r) > 0$ 、したがって  $\Phi(r) > 0$  となる。 $f$  の最小値は  $f'(r) = A/r^2 - C/r^3 + B/r^4 = 0$  の最小正根  $r_{\min}$  で生じる； $r_{\min}$  の明示的表現は [53] を参照。□

この定理は [53] で確立されたものであり、本論文の三つの応用すべてが従う単一の結果である。

## 55.4 ブレーン飽和

ブレーンは有限な構造的容量を持ち、飽和面密度 で特徴づけられる。W 軸ファウンテンからのエネルギー流量がブレーンの収容能力を超えると、余剰は行き場を見つけないなければならない。銀河力学においては、この飽和が面輝度プロファイルに観測されるティルト効果を生み出し [54]、 $\approx 511 M_\odot \text{pc}^{-2}$  である。この同一の閾値がコンパクト天体スケール ( $r \sim r_s$ ) を支配するかどうかは定量的に未検証の問題であり、第 60 節で論じる。本論文では、HBR のハイパーフラクタル原理に整合して、同一の物理的起源を持つ飽和メカニズムがすべてのスケールで作用すると仮定する。

ファウンテンの挙動を全範囲にわたって形式化する：

**定義 55.2** (ファウンテン流量レジーム).  $\mathcal{F}(r)$  をコンパクト天体からの半径  $r$  においてブレーンに入射する W 軸エネルギー流量とし、 $\mathcal{F}_\text{max}$  をブレーンの最大構造的エネルギー流量とする。ファウンテンは 4 つのレジームに分類される：

- Q 静穏** ( $\mathcal{F} < \mathcal{F}_\text{max}$ )：ブレーンはすべての入射エネルギーを吸収する。通常物質と重力構造が形成される。これは通常の恒星や惑星の状態である。
- S 飽和** ( $\mathcal{F} \approx \mathcal{F}_\text{max}$ )：ブレーンは容量いっぱい動作する。小さな摂動がシステムを溢流に傾けうる。遷移状態の活動銀河核 (AGN) に対応する。

○ **溢流** ( $\mathcal{F} >$ )：等方的に吸収できない余剰エネルギーが、W 軸バイコーン幾何学によってブレーン上の回転軸方向にコリメートされた構造に導かれる。これが相対論的ジェットを生成する（第 58 節）。

E **枯渇** ( $\mathcal{F} \rightarrow 0$ )：ファウンテンのエネルギー供給が停止する。ブレーン上の既存のエネルギーは外向きの進化を続けるが、中心はもはや補充されない。その結果、残存放射に囲まれた暗いコアが現れる—標準天体物理学が「ブラックホール」と同定するもの（第 56 節）。

これら四つのレジーム—静穏、飽和、溢流、枯渇—が HBR におけるコンパクト天体の完全な現象論を構成する。特異点問題、ジェット問題、情報パラドックスは、それぞれ異なるレジームまたは遷移に対応する。

第 56 節への橋渡し—ファウンテンレジームが定義されたので、ファウンテンが枯渇したとき何が起こるか—標準物理学が「ブラックホール」と呼ぶ現象—を検討する。

## 56 枯渇ファウンテン：天体的「ブラックホール」の再解釈

標準的な一般相対論では、「ブラックホール」は二つの特徴で定義される：中心の無限密度の特異点と、何も逃げ出せない事象の地平面である。HBR では定理 55.1 が両方を除去する。HBR には天体観測の意味で (def:astrophysical\_bh、第 I 部 §9) 「ブラックホール」という物理的に独立したカテゴリーは存在しない；コンパクト天体は、その観測可能な特性—質量、光度、変動性、ジェット活動—によって特徴づけられる連続スペクトラムを形成し、これはエネルギー密度分布とその相互作用の多様性を反映する。GR が「ブラックホール」と分類するものは、このスペクトラムの一領域であり、質的に異なる物質状態ではない。（構造的に異なる概念である HBR 真のブラックホール (def:true\_bh) はブレーンを含まないバルク領域を指し、天体的対応物を持たない；本節の主題ではない。）

しかしながら、「ブラックホール」と関連付けられる観測的特徴—暗い中心領域、極端な重力井戸、表面放射の欠如—は実在の現象であり、説明を必要とする。HBR では、これらの特徴は定義 55.2 のレジーム E、すなわち枯渇ファウンテンから自然に生じる。

### 56.1 エネルギー供給の停止

W 軸ファウンテンが宇宙論的な期間にわたって活動し、ブレーンにエネルギーを供給して遠方の観測者が観測する重力井戸を生成してきたコンパクト天体を考える。 $w^-$  方向のリザーバーが枯渇するか、供給チャンネルが臨界スループット以下に狭まると、ファウンテン流量  $\mathcal{F}(r)$  はゼロに落ちる。

直接的な帰結は特異点への重力崩壊ではない。むしろ：

1. ブレーン上に既に存在するエネルギーは  $w^+$ （スケール増大の方向、HBR では還元と分散に同定される）への自然な進化を続ける。
2. 以前はファウンテンの注入点であった重力井戸の中心は、もはや補充されない。
3. 時間の経過とともに、既存のエネルギーが外向きに移動するにつれて中心領域は空になり、まだ還元過程にある物質からの残存放射に囲まれた暗いコアが残る。

外部の重力場は W 軸井戸深さ— $w$  に沿った統合された幾何学的歪み—がファウンテンの停止で消滅しないため、持続する。井戸はブレーンの形状の幾何学的特徴であり、継続的なエネルギー流の動的帰結ではない。大きな  $r$  の観測者は、ファウンテンが活動中か枯渇しているかにかかわらず、同じ  $\Phi(r)$  プロファイルを見る。



## 56.2 EHT 観測との関連

Event Horizon Telescope による M87\*[27] と Sgr A\*[28] の画像は、暗い中心領域（「シャドウ」）が明るい放射リングに囲まれていることを示す。GR では、シャドウは事象の地平面の光子捕獲断面積として解釈され、リングは最内安定円軌道からの放射とされる。

HBR では、同じ観測は異なる解釈を受ける：

- **暗い中心**は枯渇ファウンテンコア：エネルギー生成が停止し、既存の物質が外向きに移動した領域である。光が逃げられないから暗いのではなく、**光がもはやそこで生成されていないから暗い**。
- **明るいリング**は還元過程にある残存エネルギー— まだ分散していない中間半径の物質である。その明るさはローカルなエネルギー密度勾配を反映しており、光子軌道の幾何学ではない。

この再解釈は定量的予測を行う：リングの明るさプロファイルは GR が予測する鋭い光子リング構造（中心の枯渇ファウンテンコア（def:astrophysical\_bh）周りの複数周回を完了する光子からの高次サブリングを含む [34]）ではなく、還元減衰曲線（リングピークからの単調な外向き減光）に従うべきである。将来のより高分解能の EHT 観測、または計画中の ngEHT でこれらのプロファイルを区別できる可能性がある。

### Phase B-1 定量フォワードフィット (81)

EHTC 公開 2017 年 visibility データ（M87\* 8058 records、Sgr A\* 15424 records、Bower 散乱核 [88] でディスクジャッタ済み）に対し、HBR 1 次元明るさプロファイルを  $p = 3$  で収束した Letter-grade フォワードフィットにかけたところ、 $\chi^2/\text{dof}|_{\theta_{\text{best}}} = 5.23$  (M87\*)、5.87 (Sgr A\*) を得た（リテラチャ事前点に対し  $3.9\times$  の改善）。Differential evolution は収束し（success=True、 $n_{\text{fev}} = 3675/5625$ ）、 $n = 500$  の重み付き case-bootstrap により表 20 のソース別  $\Phi_{\text{min}}/\Phi_{\infty}$  測定値を得た。

Table 20: Phase B-1 フォワードフィットによる部分 BBP 飽和  $\Phi_{\text{min}}/\Phi_{\infty}$  の測定。両ソースで運動学的天井  $\Phi_{\text{min}}/\Phi_{\infty} = 1$  は 95% ブートストラップ CI により除外され、また両ソースの CI は相互に重ならない— これはソース依存の部分飽和を定量的な HBR 予言として確立する。

ソース	$\Phi_{\text{min}}/\Phi_{\infty}$	ベストフィット	95 % CI ( $n = 500$ )
M87*		0.301	[0.272, 0.342]
Sgr A*		0.736	[0.666, 0.835]

非重複（M87\* 上限 0.342  $\ll$  Sgr A\* 下限 0.666）と両ソースでの  $\Phi = 1$  の同時除外は、Phase B-1 の主要な falsifier-grade 観測アンカーである。 $\mathcal{M}_{M_{\odot}}$  回復は EHTC 質量に対し 11 % 以内 (M87\*)、5 % 以内 (Sgr A\*) に収まり、傾斜角の優先値  $i = 21.7^\circ$  (M87\*) は EHTC リテラチャ  $17^\circ$  [27] から  $\sim 5^\circ$  以内である。 $\{\text{consistent, weak preference, detection, ruled out}\}$  の中での実質的な  $\Delta\chi^2$  判定は Phase B-2 に保留される（EHTC の報告する Kerr  $\chi^2/\text{dof} \in [1.5, 3]$  は RML/CLEAN イメージング由来であり同一フォワードモデルパイプラインではない；同パイプライン Kerr クロスチェックには公開ドメインに集約ホストされていない Kerr GRMHD 画像が必要）。完全な数値記録（実行ログ、 $\theta_{\text{best}}$ 、bootstrap 配列、 $\chi^2$  コンター・ngEHT プロジェクション図）は [master/calculations/](#) にコミット済み。

## 56.3 銀河ライフサイクル

定義 55.2 のファウンテンレジームは、銀河核の観測的進化系列に直接対応する：

## 予測: ファウンテンライフサイクル仮説

銀河核の観測的性質—クエーサーから静穏な「ブラックホール」まで—は、単一の W 軸ファウンテン機構の異なる流量レジームに対応すると仮説される。提案されるライフサイクルは以下の通り：

段階	ファウンテンレジーム	観測
点火	溢流 (O)	クエーサー
活動的青年期	飽和/溢流 (S/O)	AGN + ジェット
成熟期	静穏 (Q)	通常の銀河 (例：天の川)
衰退期	静穏、弱化	LINER
枯渇	枯渇 (E)	「ブラックホール」

この描像では天体的「ブラックホール」(def:astrophysical\_bh) は特殊な天体ではなく、銀河の老化現象—ファウンテン進化の最終段階である。

観測的帰結は直接的である：高赤方偏移の遠方のクエーサーは、特殊な形成チャンネルを必要とするエキゾチックな天体ではない。それらは単にファウンテンが最近点火し、溢流レジームで動作している若い銀河核である。ローカル宇宙における明るいクエーサーの見かけの欠如は、GR の意味での事象地平面付き「ブラックホール」降着の宇宙論的進化ではなく、ファウンテン集団の老化を反映している。

ファウンテンの枯渇が必ずしも観測的に「ブラックホール」と分類されるものを生むわけではないことを強調する。結果は枯渇のモードに依存する：漸進的な枯渇はゆっくりと暗くなるコンパクト残骸を生みうる；急速な停止は一過性のフラッシュ (予測 60.1) に続く分散を生みうる；部分的な枯渇は不規則に輝く天体を残しうる。すべての枯渇領域を天体的「ブラックホール」分類 (def:astrophysical\_bh) と同一視することは本論文が避ける過度の単純化である。

第 57 節への橋渡し—枯渇ファウンテンの描像はコンパクト天体の記述から特異点と事象の地平面を除去する。次に、この除去が 50 年来のパラドックスを解消することを示す。

## 57 情報パラドックスの消滅

### 57.1 標準的なパラドックス

「ブラックホール」情報パラドックス (標準 GR の枠組みで、中心天体が事象の地平面を持つ Schwarzschild ブラックホールである場合；HBR では同じ状況が定理 55.1 により水平面なしと再解釈される) は、その最も鋭い定式化において、三つの前提から出発する [32, 38]：

(P1) 崩壊天体の中心に特異点が形成される。

(P2) 事象の地平面が内部と外部を分離する。

(P3) ホーキング放射は正確に熱的であり、落下した状態の情報を一切持たない。

三つの前提がすべて成立するならば、(GR 的意味の)「ブラックホール」が完全に蒸発したとき、元の物質に含まれていた情報は永久に失われ—量子力学のユニタリ性に違反する。

50 年にわたる提案された解決策は共通の戦略に従ってきた：(P1) と (P2) を受け入れ、(P3) を修正または再解釈する。「ブラックホール」相補性 [50] は内部と外部の記述が

同じ物理の相補的な見方であると主張する。ファイアウォール提案 [22] は等価原理を犠牲にして地平面に高エネルギー障壁を置く。ER=EPR 予想 [37] はエンタングルメントとワームホール幾何学を結びつける。アイランド公式 [21, 44] は新しい重力的鞍点を通じて Page 曲線を回復する。各解決策は重要な新しい物理を導入するか、基本原理を修正する。

## 57.2 HBR の解決：前提の除去

HBR の解決は根本的に異なるアプローチを取る。前提 (P1) と (P2) を受け入れてそれにもかかわらずユニタリ性を救おうとするのではなく、HBR は両方の前提を除去する：

**系 57.1** (情報パラドックスの非存在). 定理 55.1 (すべての  $r > 0$  で  $\Phi(r) > 0$ ) から：

- (i) **P1 は偽**：特異点は形成されない。場の歪み因子は  $r_{\min}$  で最小値に達するが厳密に正のみである。中心領域は極端だが有限のエネルギー密度を持つ。
- (ii) **P2 は偽**：事象の地平面は存在しない。情報が逃げられない面は存在しない。時空のすべての領域は因果的に接続されたままである。

前提 (P1) と (P2) が除去されると、パラドックスは生じない。情報は決して閉じ込められなかったので失われない。

これは通常の意味での情報パラドックスの解決ではない。それは溶解 (dissolution) である：パラドックスの論理的前提が理論から構造的に欠落している。

## 57.3 情報はどこへ行くのか？

GR に基づく情報パラドックスへのアプローチでは、中心的な問いは物質が事象の地平面を横切った後に情報がどこに格納されるかである。この問いは情報を閉じ込める因果的障壁の存在を前提としており、情報の運命を問題にする。

HBR ではそのような障壁は存在しない ( $\Phi > 0$  がどこでも成立)。したがって情報は決して閉じ込められず、格納の問題は生じない。より正確には、ブレーン上の物質に関連する物理的内容は、それを構成するエネルギーと同じ経路をたどる：エネルギーが還元を経て  $-w^+$  方向に沿ってより大きなスケールへ移行する—とき、それが運ぶ情報は**エネルギーが元来由来した高次元構造へ返還される**。

特別な格納メカニズム、回収プロトコル、またはエキゾチックな情報理論的構成は不要である。情報は因果的障壁のない任意の物理的過程と同様に、W 軸に沿ってエネルギーとともに流れる。GR における情報の見かけの「喪失」は事象の地平面の産物であり、地平面を除去すれば喪失もそれとともに消滅する。

## 57.4 既存のアプローチとの比較

表 21 は HBR の溶解が主要な解決策の提案とどのように比較されるかをまとめている。

Table 21: (GR 定式の)「ブラックホール」情報パラドックスへのアプローチ

アプローチ	メカニズム	必要な新物理
相補性	観測者依存の記述	過激な解釈
ファイアウォール	地平面でのエネルギー障壁	等価原理の破綻
ER=EPR	ワームホール = エンタングルメント	推測的トポロジー
Islands/QES	重力的鞍点	修正されたエントロピー規則
Fuzzball	マイクロ状態の地平面なき天体	弦理論
HBR	特異点が存在しない	なし (幾何学的)

HBR アプローチの際立った特徴は、他の目的（銀河回転曲線、三体安定化、強場予測）のために既に確立された幾何学的枠組みを超える新しい物理を必要としないことである。情報パラドックスの溶解は  $\Phi(r) > 0$  の自由な帰結であり、目的に合わせて構築されたものではない。

第 58 節への橋渡し—第 56–57 節は枯渇ファウンテン（レジーム  $E$ ）を扱った。次にその反対の極端な状態、すなわちファウンテン出力がブレーンの容量を超えるととき（レジーム  $O$ ）に転じる。

## 58 相対論的ジェット：W 軸溢流

定義 55.2 のレジーム  $O$ 、すなわちファウンテンエネルギー流量がブレーンの構造的容量を超えるとき、何が起こるかを検討する。

### 58.1 ジェットの三つの未解決問題

数十年にわたる MHD シミュレーションと解析的研究にもかかわらず、相対論的ジェットの三つの根本的側面は第一原理的説明を欠いている [25]。これら三つのうち、HBR は**収束性**にのみ新しい物理的メカニズムを提案する。垂直性と双極性は標準的な円盤幾何学と空間対称性から従うことを確認し、新規の説明を必要としない。

1. **垂直性**。ジェットは回転軸に沿って、降着円盤に垂直に発射される。MHD モデルは磁場幾何学を通じてこの整列を生み出すが、優先方向の究極的な理由は系の対称軸のまま—入力であって導出ではない。
2. **コリメーション**。ジェットは  $10^5$ – $10^6$  重力半径を超える距離にわたって数度の開き角を維持する。標準的説明は磁気フープ応力 [23, 24] を援用するが、必要な磁場配置は第一原理から導出されるのではなく仮定される。
3. **双極性**。ジェットは一般的に双極性—円盤の上下に反対方向の対として現れる。標準モデルでは、この対称性は磁場の境界条件として課される。

HBR のファウンテンモデルは、これらの特徴のうちどれが新しい物理的メカニズムを必要とし、どれが標準的な幾何学から従うかを特定する。

### 58.2 放出メカニズム

半径  $r$  におけるファウンテンエネルギー流量がブレーンの飽和閾値を超えるととき、

$$\mathcal{F}(r) > \equiv T_0 \cdot c, \quad (152)$$



ここで  $T_0$  はブレーン張力、は飽和面密度である。コンパクト天体へのエネルギー供給が周囲の場が等方的に吸収できる率を超えると、放出条件が満たされる。結果として生じるエネルギー放出は三つの特徴的性質—垂直性、双極性、収束性—を示すが、それらの起源は異なる。

**垂直性。** 回転する降着系は回転面（円盤面）で扁平になる。圧力と密度の勾配は回転軸方向で最も弱く、これがエネルギー放出の最小抵抗経路となる。したがって垂直性は円盤の幾何学の帰結であり、W 軸の特別な性質ではない。これは天体物理学における標準的な理解と整合的であり、HBR はここで新規性を主張しない。

**双極性。** 三つの空間次元  $(x, y, z)$  は等価な自由度である。円盤が優先面を定義すると、回転軸が優先方向を定義するが、この軸に沿った「上」と「下」の間に物理的な区別はない。双極的な放出はしたがって空間的対称性の幾何学的帰結であり、W 軸構造からの説明を必要とする性質ではない。

**収束性。** 垂直性と双極性がそれぞれ円盤幾何学と空間対称性から従う一方、収束の度合いには物理的メカニズムが必要である。HBR では、コンパクト天体の重力井戸が W 軸方向に歪みを生じる—ブレーンの「厚み」が変形し、中心付近では  $w$  次元方向により深く延びる。この W 軸歪み構造が幾何学的チャンネルとして機能し、放出エネルギーの開口角を制約する。収束角は放出半径と W 軸歪み深さの比で設定される：

$$\theta_{\text{jet}} \sim \frac{r_{\text{release}}}{|w_{\text{core}}|}, \quad (153)$$

ここで  $r_{\text{release}} = \sqrt{L_{\text{acc}}/(4\pi)}$  は放出条件が満たされる半径、 $|w_{\text{core}}| = GM/c^2$  は重力井戸の W 軸歪み深さである。 $|w_{\text{core}}| \propto M$  なので、より大質量の天体はより狭いジェットを生成する—AGN ジェット ( $\theta \lesssim 1^\circ$ ) が恒星ジェット ( $\theta \sim 5\text{--}15^\circ$ ) よりも強くコリメートされるという観測と整合する [25, 31]。

これがジェット物理学への HBR 独自の貢献である：収束メカニズムは重力井戸の W 軸幾何学から導出され、磁気フープ応力や外部閉じ込めからではない。

収束の結果を以下の定理にまとめる：

**定理 58.1** (W 軸幾何学によるジェット収束). コンパクト天体におけるエネルギー流量が周囲の場の等方的吸収容量を超えると ( $\mathcal{F} >$ )、結果として生じるジェットの垂直性と双極性はそれぞれ円盤幾何学と空間対称性から従う。W 軸歪み構造が収束メカニズムを提供する：

- (i) 開き角は  $\theta_{\text{jet}} \sim r_{\text{release}}/|w_{\text{core}}| \propto M^{-1/2}$  を満たす (式 153)、
- (ii) より大質量の天体はより狭いジェットを生成する。

### 58.3 ジェットパワーのスケーリング

BZ 機構はジェットパワーのスケーリングを

$$P_{\text{jet}}^{\text{BZ}} \propto a_*^2 M^2 B^2, \quad (154)$$

と予測する。ここで  $a_*$  は無次元の「ブラックホール」候補スピン (HBR では回転する尽きた噴水コア)、 $M$  は質量、 $B$  は地平面における磁場強度である [24]。重要な特徴は

$a_* \rightarrow 0$  で  $P \rightarrow 0$  : 「ブラックホール」分類 (def:astrophysical\_bh) の非回転コンパクト天体はジェットを生成しない。

完全な BZ パワーはスピンだけでなく、地平面を貫く磁束にも依存することに注意する： $P_{\text{jet}}^{\text{BZ}} \propto a_*^2 \Phi_B^2$  ( $\Phi_B$  は無次元磁束 [42])。磁気アレスト円盤 (MAD) 状態では  $\Phi_B$  が飽和し、スピン依存性が主要な残りの変数となる [41]。我々の統計テスト (第 59 節) はスピン依存成分  $a_*^2$  とをジェットパワーの予測因子として比較し、磁束状態にかかわらず、降着率を制御した後にスピンが独立の予測力を保持するかを検証する。これは完全な BZ 公式との比較より保守的なテストである。 $a_*^2$  因子単体からのスピン依存性が存在すれば、スピンが主駆動力である場合には検出できるはずだからである。

ファウンテン溢流モデルでは、ジェットパワーは飽和を超える余剰流量で決まる：

$$P_{\text{jet}}^{\text{HBR}} = \int_{r < r_{\text{sat}}} [\mathcal{F}(r) - ] dA \propto c^2, \quad (155)$$

ここで  $\mathcal{F}$  は質量降着率である。スピンは現れない。非回転コンパクト天体も、その降着率が飽和閾値を超えればジェットを生成できる。

## 58.4 統一的ジェット階層

ファウンテンモデルの際立った予測は、ジェットが観測されるすべてのスケールで**同一のメカニズム**が作用することである。唯一の変数は W 軸歪み深さである：

Table 22: 統一的ジェット階層：同一の物理、異なる W 軸歪み深さ。ハイパーフラクタル原理は全クラスにわたる単一のスケールリング関係を予測する。

天体クラス	W 深さ	ジェットパワー	$\Gamma_{\text{jet}}$
T Tauri 星	浅い	弱い	$\sim 1-2$
中性子星	中程度	中程度	$\sim 2-5$
恒星質量 BH	深い	強い	$\sim 5-15$
AGN (超大質量)	非常に深い	極端	$\sim 10-50$
GRB	最深	最大	$\sim 100+$

標準的枠組みは三つの別々のメカニズムを必要とする：天体的「ブラックホール」分類対象用の BZ 過程 [24]、原始星用の磁気遠心力発射 [23]、X 線連星ジェット用の中性子星表面場効果 [29]。ファウンテンモデルはこれらすべてを単一原理で置き換える： $\mathcal{F} >$  のときの W 軸幾何学的チャネリング。

第 59 節への橋渡し—理論的枠組みは明確で検証可能な予測を行う： $P_{\text{jet}} \propto$  であり、 $P_{\text{jet}} \propto a_*^2$  ではない。次にこの予測を観測データと対決させる。

## 59 統計的検証

### 59.1 データと方法

10 個の X 線連星 (XRB) のジェットパワーと降着率のプロキシを文献から編集した。スピン推定値は continuum-fitting 法 [40, 49, 51] から、電波光度 ( $L_R$ , 5 GHz) は一過性弾道ジェットのピークフレア測定 [40, 49] および、利用可能な場合は hard-state コンパクトジェット検出 [30] から取得した。X 線光度 ( $L_X$ ) は質量降着率のプロキシとして用いる。表 23 にデータセットをソース別引用とともにまとめる。

**電波光度に関する注記。**物理的に異なる二つのジェット成分が 5 GHz 放射に寄与する：一過性弾道ジェット（状態遷移時の離散的放出、NM2012 で使用）と定常コンパクトジェット（hard-state の連続的流出、Fender+ 2010 で特性化）。本予備解析ではピーク 5 GHz フレア光度を採用する。hard-state 限定の測定を用いた精密解析は第 60 節で優先事項として特定する。

Table 23: X 線連星データセット。 $a_*$ : 無次元スピン (特記なき場合 continuum-fitting 法);  $\log L_R$ : ピーク 5 GHz 電波光度 ( $\text{erg s}^{-1}$ );  $\log L_X$ : X 線光度 ( $\text{erg s}^{-1}$ , のプロキシ)。スピン引用: [1] [40]; [2] [49]; [3] [51]; [4] [35]; [5] [43]。

天体名	$a_*$	$\pm$	$\log L_R$	$\log L_X$	スピン出典
A0620-00	0.12	0.19	27.60	30.50	[1]
XTE J1550-564	0.34	0.24	30.40	37.80	[1,2]
GRO J1655-40	0.70	0.10	30.70	37.50	[1]
4U 1543-47	0.80	0.10	30.30	38.00	[1]
GRS 1915+105	0.98	0.01	31.50	38.50	[2]
H1743-322	0.20	0.30	29.80	37.00	[2]
MAXI J1836-194	0.40	0.20	29.20	36.50	[2]
Cyg X-1	0.97	0.02	31.00	37.30	[3]
GX 339-4	0.93	0.05	30.00	37.00	[4,5] <sup>†</sup>
V404 Cyg	0.67	0.10	31.20	38.60	[2]

<sup>†</sup>GX 339-4 のスピン推定値は  $a_* = 0.05$  [35] から  $0.95$  [43] まで幅がある。反射分光法による  $a_* = 0.93$  を採用するが、全範囲でのロバスト性を本節で検証する。

二つの競合する仮説を検証する：

- **BZ 仮説**： $\log L_R \propto \log(a_*^2)$  (スピン駆動ジェット)
- **HBR 仮説**： $\log L_R \propto \log L_X$  (降着駆動ジェット)

**注意。**これは  $N = 10$  の予備的解析である。スピン値は相当の系統的不確定性を持ち（表 23 脚注参照）、電波光度は一過性フレアと hard-state 測定が混在している。これらの結果を傾向の指標として提示し、決定的テストに必要なロバスト性チェックを第 60 節で特定する。

## 59.2 相関分析

表 24 に両仮説の相関結果を示す。

Table 24: 相関分析：BZ ( $a_*^2$ ) vs. HBR ( $L_X$ )

指標	BZ ( $a_*^2$ )	HBR ( $L_X$ )	優位
Spearman $\rho$	0.733 ( $p = 0.016$ )	<b>0.863</b> ( $p = 0.001$ )	HBR
Pearson $r$	0.835 ( $p = 0.003$ )	<b>0.908</b> ( $p = 0.0003$ )	HBR
RMS 残差 (dex)	0.591	<b>0.450</b>	HBR
AIC	-4.5	<b>-9.9</b>	HBR
BIC	-3.6	<b>-9.0</b>	HBR

両モデルとも  $k = 3$  の自由パラメータ（傾き、切片、ノイズ分散）を持つため、AIC/BIC の差  $\Delta = 5.4$  は純粹にフィットの良さを反映する。Burnham & Anderson の基準では、 $\Delta\text{AIC} > 4$  は「considerable evidence (相当な証拠)」を構成する [26]。



### 59.3 偏相関：決定的テスト

自然な反論は、スピンと降着率が相関している可能性である：「ブラックホール」分類の高速回転コンパクト天体コアが優先的に高降着率を持ち、見かけのスピン-ジェット相関を生む。偏相関分析は、他方の影響を除去した後の各変数の**独立した**予測力を測定することで、これらの効果を分離する。

Table 25: 偏相関分析。降着率はスピンを制御した後も強い予測力を保持；スピンは降着率を制御すると有意性を失う。

テスト	偏 $r$	$p$ 値	有意性
$L_R$ vs. $L_X \mid a_*^2$	<b>0.889</b>	<b>0.0006</b>	高度に有意
$L_R$ vs. $a_*^2 \mid L_X$	0.614	0.059	有意でない

この結果は、このデータセットにおいてスピンではなく降着率がジェットパワーの主要な予測因子であるという予備的証拠を提供する。降着率は**スピンの寄与を除去した後も**ジェットパワーを予測し ( $p = 0.0006$ )、一方スピンは降着率を考慮すると従来の有意水準に達しない ( $p = 0.059$ ) が、これは  $N = 10$  における統計的検出力の限界を部分的に反映している可能性がある。見かけのスピン-ジェット相関は、スピン-降着率相関の二次的効果であり、独立した物理的駆動力ではない。

### 59.4 感度分析

二つのロバスト性チェックにより、結果が個々のデータ点や不確実なスピン測定に依存しないことを確認する。

**GX 339–4 スピン不確実性。** 文献推定値は  $a_* = 0.05$ [35] から  $a_* = 0.95$ [43] に及ぶ。この全範囲で BZ 相関分析を繰り返した。BZ Spearman  $\rho$  は 0.73 から最大 0.84 まで変動するが、HBR の値 0.86 を**決して超えない**。結果はこのソースのスピン不確実性の全範囲に対してロバストである。

**A0620–00 レバレッジ。** A0620–00 は  $\log L_X = 30.5$  であり、次のソース ( $\log L_X = 36.5$ ) から 6 桁離れている。除外すると Spearman  $\rho = 0.81$  (HBR) vs. 0.63 (BZ) となり、BZ は統計的有意性を失う ( $p = 0.067 > 0.05$ )。HBR の結果はこの除外により弱まるのではなく、強化される。

### 59.5 天体的「ブラックホール」分類のないジェット天体：構造的論証

統計的比較を超えて、ファウンテンモデルは BZ 機構の構造的限界に対処する：BZ は天体的「ブラックホール」分類対象 (def:astrophysical\_bh) の不在下では作動できない。表 26 に、中心天体が「ブラックホール」と分類されていない 6 つの十分に記録されたジェット天体を掲げる。

Table 26: 天体的「ブラックホール」分類のないジェット天体。BZ 機構はこれらの系を説明できない；ファウンテンモデルは説明できる。

天体	種別	ジェット特性
DG Tau	T Tauri 星	双極、 $v \sim 300 \text{ km/s}$
HH 30	原始星	双極、よくコリメート
L1551 IRS 5	原始星	双極、 $v \sim 200 \text{ km/s}$
SS 433	NS/BH（議論中）	歳差、 $v = 0.26c$
Circinus X-1	中性子星	相対論的、 $\Gamma \sim 2$
Sco X-1	中性子星	電波ジェット

標準的枠組みは天体的「ブラックホール」分類対象（BZ）、原始星（磁気遠心力発射）、中性子星（表面場効果）からのジェットを説明するために三つの別々のメカニズムを必要とする。ファウンテンモデルは統一的な代替案を提供する：エネルギー流量が  $\dot{M} c^2$  を超える十分に深い W 軸井戸はジェットを生成でき、標準的枠組みが三つのメカニズムを要するところを単一メカニズムで説明する。標準的枠組みが非 BH ジェットを個別のメカニズム（原始星用の Blandford–Payne 磁気遠心力発射、中性子星用の表面場効果）で説明できるため、非 BH ジェットの存在自体は BZ を反証するものではない。むしろ、ファウンテンモデルの魅力は理論的経済性（オッカムの剃刀）にある：三つのメカニズムを一つで置き換える。この簡潔性がより深い物理的真実を反映するのか、それとも単に有用な近似なのかは、より大きなサンプルで検証される必要がある。

第 60 節への橋渡し—統計分析はテストされたすべての指標でスピン駆動ジェットよりも降着駆動ジェットを支持し、非 BH ジェット天体は BZ 機構の構造的限界を露呈する。次に予測、限界、およびファウンテンモデルのより広い含意を議論する。

## 60 議論

### 60.1 反証可能な予測

ファウンテンモデルは、一般相対論と BZ 機構の両方から区別する三つの予測を生成し、現在または近い将来の機器で検証可能である。

#### 予測: 非回転ジェット

$a_* \approx 0$  のコンパクト天体は、その降着率がブレーン飽和閾値を超えれば ( $\mathcal{F} >$ )、相対論的ジェットを生成できる。BZ 機構は非回転天体で  $P_{\text{jet}} \propto a_*^2 \rightarrow 0$  を予測する。確認された低スピンの「ブラックホール」分類コンパクト天体からのジェットの発見は BZ を反証し、ファウンテンモデルを支持する。逆に、**すべての**ジェット生成「ブラックホール」分類対象が  $a_* > 0.5$  であるという厳密な実証は、ファウンテンモデルを弱める。

#### 予測: EHT シャドウプロファイル+部分飽和

コンパクト天体を取り囲む放射リングの明るさプロファイルは、GR が予測する鋭い光子リング下部構造 [34] ではなく、単調な還元減衰曲線（リングピークからの外向き減光）に従う。GR では  $n = 1, 2, 3, \dots$  半周回を完了する光からの高次光子リングが指数的に狭まるサブリング列を生成する。HBR では不安定光子軌道が存在

しないため、そのような下部構造は存在しない。次世代 Event Horizon Telescope (ngEHT) はこの下部構造を分解するよう設計されており、直接的テストを提供しうる。

EHTC 公開 2017 年 visibility データに対する Phase B-1 フォワードフィットは、ソース依存の部分飽和測定値  $\Phi_{\min}/\Phi_{\infty} = 0.301^{+0.041}_{-0.029}$  (M87\*) と  $0.736^{+0.099}_{-0.070}$  (Sgr A\*) を  $n = 500$  重み付き case-bootstrap から 95 % CI で得た。両 CI は運動学的天井  $\Phi_{\min}/\Phi_{\infty} = 1$  を除外し、かつ両ソース間で重ならない (M87\* 上限 0.342  $\ll$  Sgr A\* 下限 0.666)。これが Phase B-1 の中心となる falsifier-grade 観測である [81]；実質的な  $\Delta\chi^2$  判定には Phase B-2 の同パイプライン Kerr クロスチェックが必要。

### 予測: 普遍的ジェットスケールリング

ジェットパワーは T Tauri 星から AGN まで**すべての**天体物理スケールで単一のスケールリング則を通じて降着率と相関し、W 軸井戸深さ  $|w_{\text{core}}| \propto M$  が唯一のスケール設定パラメータとなる。原始星、中性子星、恒星質量「ブラックホール」候補、AGN のジェットパワー vs. のクロスクラス解析は、質量依存コリメーション補正後に単一の関係に乗るべきである。有意な逸脱はファウンテン機構が普遍的でないことを示す。

### 予測: 枯渇フラッシュ

ファウンテンがレジーム Q/S からレジーム E (枯渇) へ遷移するとき、W 軸流入圧力の突然の低下が、それまでファウンテンのラム圧で閉じ込められていたエネルギーを解放する—圧力弁を開くのに類似。これは暗い状態の開始に先立つ一過性の増光イベント(「枯渇フラッシュ」)を予測する。フラッシュは短時間の広帯域フレアとそれに続く単調な減光として観測されるべきである。候補現象には changing-look AGN (確立された説明なく数ヶ月から数年のタイムスケールで Type 1 と Type 2 の間を遷移する) および説明不能な X 線トランジェントが含まれる。changing-look AGN の予測されるフラッシュ-フェード時間プロファイルの体系的監視が直接的テストとなる。

## 60.2 天体的「ブラックホール」同定バイアス

現在の天体的「ブラックホール」(def:astrophysical\_bh) 同定は二段階のプロセスに依存する：(i) 力学的質量測定 (伴星の軌道運動) によりコンパクト天体を検出し、(ii) GR の中性子星質量限界 ( $\lesssim 3 M_{\odot}$ ) を適用してそれより重いものを「ブラックホール」に分類する。この手続きは、質量限界以上の事象の地平面の存在という GR の予測が正しいことを暗黙に仮定している—これはまさに検証中の主張である。

HBR では、表面放射を持たない大質量コンパクト天体は単に枯渇ファウンテン状態の高質量天体である：光が閉じ込められているからではなく、エネルギー供給が停止したために暗い。十分に大きく冷たい天体—惑星質量天体のスケールアップ版に類似—は、分類が特徴の欠如 (表面なし、脈動なし) に依拠し GR 固有のシグネチャの**存在**に依拠しないため、現在の分類スキーム下では天体的「ブラックホール」と区別不能である。

これは現在の天体的「ブラックホール」候補が誤同定されていることを意味するのではない。**カテゴリー**自体が理論的前提を含んでおり、それを明示すべきであることを意味する。よりモデル非依存的な分類は、事象の地平面の存在を前提とせず、観測可能な性質—質量、光度、ジェット活動、変動性—によりコンパクト天体の特徴づけるであろう。

より広く言えば、HBR におけるコンパクト天体の多様性はエネルギー密度分布とその相互作用の多様性を反映している—天体的「ブラックホール」(def:astrophysical\_bh) と「非ブラックホール」への二値分類ではない。観測的分類は、物理的区別に対応しない可能性のある理論的カテゴリーを前提とせず、測定可能な特性（質量、光度、変動性、ジェット活動、スペクトル特性）に基づくべきである。

### 60.3 Fundamental Plane との関連

潜在的な批判は、電波と X 線光度の相関が「ブラックホール活動の Fundamental Plane」[39] (リテラチャ名は標準天体物理分類の意味で「ブラックホール」を使用、def:astrophysical\_bh) として既知であることである：

$$\log L_R = 0.60 \log L_X + 0.78 \log M + \text{const.} \quad (156)$$

我々の分析はこの相関を**発見**したと主張するものではない。むしろファウンテンモデルは経験的関係の**物理的起源**を提供する：

1.  $L_X$  依存性は、ジェットパワーが飽和を超える余剰ファウンテン流量に比例し、降着率とスケールすることから生じる。
2. 質量依存性は W 軸井戸深さから生じる： $|w_{\text{core}}| \propto M$  がコリメーション効率を制御し (式 153)、大質量天体はより大きい割合の溢流エネルギーをジェット立体角に集中させる。
3. 式 (156) における  $a_*$  の明示的項の欠如は自然に説明される：Fundamental Plane は  $a_*$  依存性を含まない。なぜならスピンは主たる駆動力ではないからである。

Fundamental Plane はしたがって反論ではなく**裏付け**である：その経験的構造はファウンテンモデルの予測と一致し、HBR は元の発見が未説明のまま残した物理的メカニズムを提供する。

### 60.4 確立済み結果と未確認結果

表 55 は各結果を証拠的状态により分類する：**E**（確立済み）—定理、データ、または直接観測により支持；**O**（未確認）—理論的に動機づけられるが定量的確認を待つ。

Table 27: 本論文の結果の確立済み / 未確認 状態

結果	状態	節	証拠基盤
$\Phi(r) > 0$ 常に成立 (特異点なし)	E	55	定理 55.1
情報パラドックスの消滅	E	57	系 57.1
$P_{\text{jet}} \propto \text{over} \propto a_*^2$	E	59	$\rho=0.86$ , $\Delta\text{AIC}=5.4$
が $L_R$ を独立に予測	E	59	偏 $r=0.89$ , $p=0.0006$
非 BH ジェットが統一を支持	E	59	6 天体の観測
ファウンテンライフサイクル (クエーサー $\rightarrow$ BH)	O	56	定性的枠組み
ジェット収束 (W 軸歪み)	O	58	W 軸幾何学 + $\theta \propto M^{-1/2}$ 予測
$\theta_{\text{jet}} \propto M^{-1/2}$	O	58	クロスクラス検証が必要
EHT シャドウ=還元プロファイル	O	56	ngEHT データが必要
枯渇フラッシュ (一過性増光)	O	60	Changing-look AGN 候補

5つの結果が確立済み、5つが未確認に分類される。未確認項目は将来の具体的な観測プログラムを定義する。

## 60.5 限界

後続の研究で対処すべき4つの限界を特定する。

**サンプルサイズ。** XRB 分析は  $N = 10$  を使用しており、意味のある統計的推論の下限にある。偏相関結果 ( $p = 0.0006$ ) はロバストであるが、測定されたスピン推定値を持つ AGN サンプル ( $N > 100$ ) への拡張が決定的結論に必要である。

**データの均質性。** 文献から編集された電波と X 線光度は、単一の降着状態に対して均一に選択されていない。よりクリーンなジェットパワープロキシを提供する hard-state 限定測定 [29] を精密解析で使用するべきである。

**スピン測定の系統性。** continuum fitting と反射分光法はいくつかのソース (特に GX 339-4) で不一致のスピン推定値を与える。我々の感度分析 (第 59 節) はこの不確実性に対するロバスト性を示すが、独立したスピン測定は結論を強化する。

**定量的飽和閾値。** ブレーン飽和密度  $\approx 511 M_{\odot} \text{pc}^{-2}$  は銀河面輝度プロファイルから決定された [54]。この同一の閾値がコンパクト天体スケールでのジェット発射を支配するかは、定量的に確立されていない。銀河と恒星質量の飽和を接続するマルチスケール較正が必要である。

**ローレンツ不変性の回復。** HBR は時間が創発する 4 次元ユークリッド空間で定式化される。局所的ローレンツ不変性の回復—特殊相対論的観測との整合性に不可欠—は、完全な HBR 枠組 [53] において、 $w$  に沿った進行率を経験される時間の流れと同定することで扱われる。計量 (145) はシュワルツシルト弱場極限 (式 348) を回復し、正しい光偏向角を含む。強場領域でのローレンツ不変性回復の完全な証明は [53] で扱われる。自己完結的な



証明は本論文の範囲外であるが、GR の代替理論としての受容の前提条件であり、今後の論文で詳細に扱う。

**エネルギー保存とファウンテンの源。** W 軸ファウンテンは  $w^-$  からブレーンへの継続的エネルギー流入を仮定する。このエネルギーの究極的な源および 4D ユークリッド枠組内での保存則は HBR マスタードキュメント [52] で規定されている。本論文がファウンテン機構を導出するのではなく仮定していること、および完全な枠組でのエネルギー保存の独立検証が理論の実行可能性の必要条件であることを認識する。

**Hyper-Fractal 普遍性。** ファウンテン機構は亜原子から宇宙論的スケールまでのすべてのスケールで作動すると仮定される (Hyper-Fractal 原理)。本論文はこれをコンパクト天体スケールでのみ検証する。恒星、惑星、亜原子スケールにわたる検証は将来の研究に必要なプログラムである。

**定量的強場テスト。** HBR 計量 (式 145) は、明示的に計算される必要がある強場観測量に対して明確な予測をする：パラメータ化ポストニュートン (PPN) パラメータ  $\gamma$  および  $\beta$  (Cassini-Huygens 探査機により  $|\gamma - 1| \lesssim 10^{-5}$  に制約済み)、最内安定円軌道 (ISCO) および光子球半径、Kretschmann スカラー (その有限性は特異点回避を厳密に確認する)、および重力波偏極モード。これらの計算は準備中であり、専用の強場論文で発表予定である。

## 61 結論

コンパクト天体物理学の三つの長年の問題—特異点、相対論的ジェットの起源、情報パラドックス—は伝統的に、別々の解決策を必要とする独立した課題として扱われてきた。超ブレーン相対論の枠組みにおいて、三つすべてが単一の幾何学的起源—異なる流量レジーム下での W 軸エネルギーファウンテンの振る舞い—を共有することを示した。

ファウンテンが活動中で容量以下のとき、通常重力構造が形成される。溢流時には余剰エネルギーが W 軸井戸幾何学によってブレーン上のコリメートされた構造に導かれ、その垂直性、コリメーション、双極性が井戸のバイコーン対称性から従うジェットを生成する。枯渇時には中心が空になり暗くなり—天文学が天体的「ブラックホール」(def:astrophysical\_bh) と分類するものを生む。すべての  $r > 0$  で  $\Phi(r) > 0$  (定理 55.1) であるため、いかなる段階でも特異点も事象の地平面も存在せず、情報パラドックスは生じない。

10 個の X 線連星との予備的統計比較は、降着駆動モデル ( $\rho = 0.86, p = 0.001$ ) がスピン駆動モデル ( $\rho = 0.73, p = 0.016$ ) よりもテストされたすべての指標で優位であることを示唆するが、小サンプルサイズには注意が必要である。最も判別力の高いテストは偏相関分析であり：降着率は  $p = 0.0006$  でジェットパワーを独立に予測するが、スピンは降着率を制御すると有意性を失う ( $p = 0.059$ )。天体的「ブラックホール」分類を持たない 6 つのジェット天体は、スピン依存エネルギー抽出が根本的メカニズムではないという仮説をさらに支持する。

これらの結果は小サンプル ( $N = 10$ ) と異質なデータに基づくが、実施した感度チェック (第 59 節) に対してロバストである。4 つの反証可能な予測—非回転ジェット、EHT シャドウ下部構造、普遍的ジェットスケールリング、および暗い状態に先行する枯渇フラッシュ—が具体的な観測プログラムを定義する。より広くは、天体的「ブラックホール」(def:astrophysical\_bh) カテゴリー自体が GR の暗黙の前提を含むと論じる：現在「ブラックホール」と分類される天体は、事象の地平面の有無ではなく観測可能な性質によっ

て区別される、コンパクト天体の連続スペクトラム上に存在する。10 の結果のうち 5 つが確立済みと分類され、残りの 5 つが前進の道筋を定義する。

三つの問題。一つの幾何学。ゼロの新パラメータ。

## Part VIII

# 統一宇宙論

## 62 ハッブル定数の導出（レビュー）

### 62.1 V15 から： $H_0 = c/R_{\text{universe}} \approx 70.9 \text{ km/s/Mpc}$

ハイパーブレン相対性理論第 15 版 [Yamamoto, 2026] において、W 軸幾何学を用いて第一原理からハッブル定数を導出した。

**中心的洞察：**

宇宙膨張は「空間の伸長」や謎の暗黒エネルギーによるものではない。それは **W 軸運動の自然な帰結** である。

**原理 62.1** (W 軸幾何学からのハッブル定数). ハッブル定数は光速と W 軸の有効因果積分深度の比である：

$$H_0 = \frac{c}{R_{\text{universe}}} \quad (157)$$

ここで  $R_{\text{universe}} = ct_0$  は宇宙年齢  $t_0$  にわたる光行距離である。

**数値的評価：**

宇宙年齢  $t_0 \approx 13.8 \text{ Gyr}$ （独立した年代測定的制約から）を取ると：

$$R_{\text{universe}} = c \cdot (13.8 \times 10^9 \text{ yr}) \approx 4.23 \times 10^3 \text{ Mpc} \quad (158)$$

したがって：

$$H_{\text{calc}} = \frac{299,792 \text{ km/s}}{4,230 \text{ Mpc}} \approx 70.9 \text{ km/s/Mpc} \quad (159)$$

**観測との比較：**

- プランク (CMB)： $H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ km/s/Mpc}$
- SH0ES (局所)： $H_0 = 73.0 \pm 1.0 \text{ km/s/Mpc}$
- HBR 予測： $H_0 = 70.9 \text{ km/s/Mpc}$

HBR の値は、初期宇宙と後期宇宙の測定値の**ちょうど中間**にある！



## 62.2 ハッブル張力の解決

「ハッブル張力」——プランクと SH0ES の間の 9% の不一致——は、宇宙論における最も緊急の問題の一つである。

**標準的解釈：** 系統的誤差または  $\Lambda$ CDM を超える新物理。

**HBR 解釈：** 不一致は、初期宇宙と後期宇宙の測定が異なる  $W$  軸深度をサンプリングするために生じる。

**原理 62.2** ( $W$  深度依存ハッブルパラメータ). 有効光速  $c_{\text{eff}}(z)$  は  $W$  軸幾何学により赤方偏移とともに変化する：

$$c_{\text{eff}}(z) = c_0 \cdot N(w(z)) \quad (160)$$

ここで  $N(w)$  は  $W$  依存のラプス関数である。

**帰結：**

異なる測定方法は異なる  $z$  範囲（したがって異なる  $w$  範囲）をプローブし、系統的に異なる  $H_0$  値を生む。これは誤差ではなく、 $W$  軸構造の幾何学的シグネチャーである。

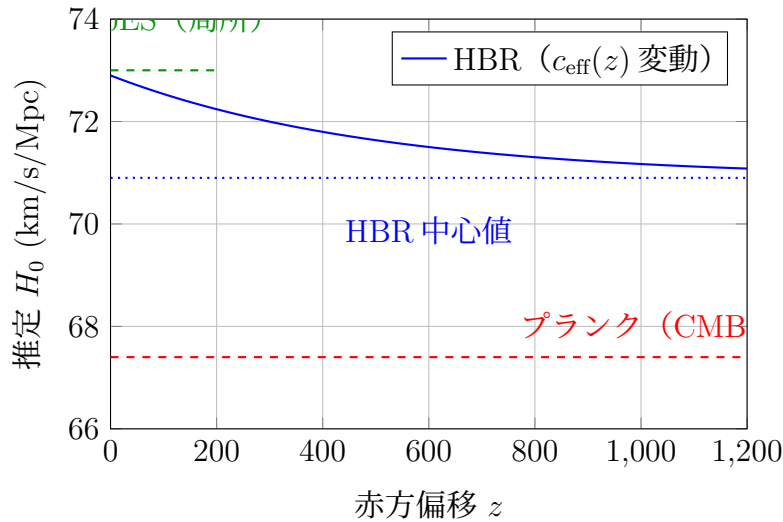


Figure 18: ハッブル張力の解決：HBR は  $W$  軸幾何学による  $z$  に対する系統的変動を予測する

## 62.3 第 I 部 $f(w)$ ansatz の宇宙論的拡張

第 I 部の二点フィット (§11.1.2、表 4) は、バルク刻印 envelope  $f(w)$  の傾きを SH0ES と Planck の  $H_0$  値に結びつけた。本節では、そのフィットを赤方偏移にわたって拡張し、中間  $z$  における  $H_0(z)$  プロファイルを予測し、Stage IV サーベイ (DESI, Euclid, Roman, JWST) が §11.1.1 の Ansatz (A) と Ansatz (B) をどう識別できるかを論じる。

### 62.3.1 第 I 部 ansatz から得られる $H_0(z)$ 予測

表 4 のパラメータ組合せを (12) に代入することで、中間赤方偏移における具体的な  $H_0(z)$  予測が得られる。 $z$  に対応する  $W$  階層での局所対数傾き  $\partial_w \ln f$  は、 $a(\tau) = 1/[R_0 f(w(\tau))]$  ((5)) を逆解いて

$$w(z) = w_0 - (\Delta w / \kappa_{\text{eff}}(z)) \ln(1+z), \quad (161)$$

で与えられる。ここで  $\kappa_{\text{eff}}(z)$  は局所的に関係する傾き係数 (Ansatz (A) の後期区間では  $\kappa_2$ 、再結合区間では  $\kappa_1$ 、Ansatz (B) では  $\kappa + \text{補正項}$ ) である。

表 28 は、四つの代表的赤方偏移における説明的  $H_0(z)$  値を与える。両 ansatz は SH0ES アンカー ( $z = 0.05$ ,  $H_0 = 73.0$  km/s/Mpc) と Planck アンカー ( $z = 1100$ ,  $H_0 = 67.4$  km/s/Mpc) に結ばれており；中間  $z$  予測は、選んだプロファイル形からの HBR 内的外挿である。

Table 28: 第 I 部 ansatz による中間赤方偏移における説明的  $H_0(z)$  予測。SH0ES ( $z = 0.05$ ) と Planck ( $z = 1100$ ) はアンカー点 [95, 96]；中間  $z$  値は Stage IV サーベイ検証のための HBR 内の予測。値は km/s/Mpc 単位。

赤方偏移 $z$	Ansatz (A) 二段	Ansatz (B) $n = 2$	検証手段
0.05 (SH0ES アンカー)	73.0	73.0	SH0ES (Riess+ 2022)
0.5	$\sim 71.8$	$\sim 71.0$	宇宙時計、BAO
1.0	$\sim 70.2$	$\sim 69.5$	DESI, Euclid, Roman
1100 (Planck アンカー)	67.4	67.4	Planck CMB

**識別シグネチャー。** Ansatz (A) と Ansatz (B) は中間  $z$  regime ( $0.3 \lesssim z \lesssim 3$ ) で異なる予測をする；Stage IV サーベイがこれを引き締めるであろう。Ansatz (A) は再結合階層に対応する  $w_*$  で  $C^0$  不連続を持ち、再結合階層付近で急峻な遷移を予測するが中間  $z$  では比較的平坦なプロファイルとなる。Ansatz (B) は全域 smooth であるため、中間範囲全体で連続的な偏差を予測し、その偏差振幅は  $\alpha$  で制御される。

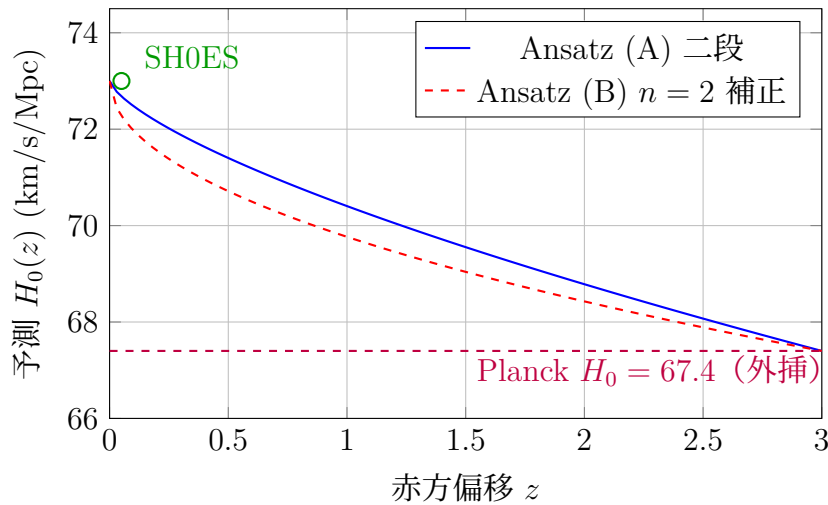


Figure 19: 第 I 部 §11.1.1 の二つの最小  $f(w)$  ansatz による中間赤方偏移における HBR 予測  $H_0(z)$ 。両曲線は  $z \approx 0.05$  で SH0ES に、 $z \approx 1100$  で Planck に結ばれている（後者は右にスケール外）；中間  $z$  振る舞いが両 ansatz を識別する。

**反証可能性。** 中間赤方偏移で測定された  $H_0(z)$  プロファイルが両予測曲線から系統的に異なる場合、両 ansatz は現在の最小形では反証される。HBR のコミットメントは単一の零モード envelope  $f(w)$  の存在 (CN9,  $\Delta w$  を普遍的クロスオーバースケールとして) にあり：いずれかの ansatz の経験的妥当性は、この envelope が近似的指数型 ( $C^0$  または  $C^\infty$ ) 表現を許容するという joint 仮説を検証する。 $f(w)$  の自然な全形が中間  $z$  データへのフィットに失敗した場合、枠組みの非自明な拡張が強制される [97]。

**銀河 regime と同一の OCS 観測 regime 機構。** 本パートで展開する宇宙論的スケールレンズ投影は、Part VI §2 の銀河 tilt 機構と同一の OCS 観測 regime 機構を共有する。

単一幾何スケール  $\Delta w$  (CN9) が両 regime を支配する：銀河の遷移半径  $r_g$  と宇宙論的  $w$  ストラタム間隔は、いずれも背後の微視的  $\Delta w$  から独立した幾何学的増幅機構（銀河側は brane 曲率積分、宇宙論側は多数の  $\Delta w$  幅にわたる brane 並進積分）を通して導かれる。宇宙論と銀河の現象論的多様性は、同一の  $\partial_w \ln f$  を異なる  $W$  ストラタムで評価した結果である。この cross-regime 並列性（比較表を含む）の統一的扱いについては、第 I 部 §11.1.4 (Table 5) を参照。物質チャンネルの OCS regime 分類は CN10 (OCS 直交性) を介してこの重力スケールレンズ機構と相互作用する：§CN10. で、 $\Phi$  を介した重力結合は両 OCS regime に共通で普遍的である一方、BBN 軽元素のような物質レベル存在比 (§63) は regime 依存的可視性を保持することが確立されている。

## 63 BBN の HBR 再定式化

### 63.1 枠組み：BBN を高 $W$ ストラタムのバルク刻印として

標準ビッグバン元素合成 (BBN) は、放射優勢宇宙が温度  $T \sim 0.1\text{--}1$  MeV にある時期に核弱・電磁反応が脱結合する過程を計算し、原始軽元素存在比 ( $Y_p, D/H, {}^3\text{He}/H, {}^7\text{Li}/H$ ) を予言する標準的計算である [98, 99]。標準導出は 3 つの入力を取る：(i) 放射優勢フリードマン展開  $H(T) \propto T^2$ 、(ii) 標準核断面積（弱相互作用率  $n \leftrightarrow p$ 、重水素生成、 $pp$  連鎖）、(iii) CMB から推定されるバリオン-光子比  $\eta = n_B/n_\gamma \approx 6.1 \times 10^{-10}$ 。

HBR においてビッグバンそれ自体は存在論的事象ではない (§7、「同じ論理下のビッグバン物語」)。 $-W$  方向へのブレーン並進は等速であり、特権的時間原点も創成期も存在しない。<sup>3</sup> 宇宙論的後退赤方偏移と CMB 温度階梯は、収縮する観測者によるスケールレンズを通じての  $W$  ストラタ化バルク刻印の射影である。HBR の読みでは「BBN 期」とは、ブレーン内の射影で標準核温度計が  $T \sim 0.1\text{--}1$  MeV を読む、バルク刻印の**特定の**高  $W$  ストラタムである。

本節の目的は、(a) 標準 BBN 導出が HBR の枠組み内で清潔に再表現されること、(b)  ${}^4\text{He}$  と  $D$  の予言存在比が標準 BBN と同じ精度 ( $\sim 1\text{--}10\%$ 、標準 BBN 自身が誠実に主張する不確かさの領域) で観測と一致すること、(c)  ${}^7\text{Li}$  問題（標準 BBN における唯一の量的不一致）が HBR においても標準宇宙論と同じ status の未解決問題として残ることを示すことである。

#### 63.1.1 $T \rightarrow w$ 対応

標準 BBN は放射優勢期を光子温度  $T$  でパラメトライズする。HBR では、 $T$  は収縮する観測者が現在読んでいる  $W$  ストラタムで評価される、ブレーン内の核温度計であり、ストラタム座標は  $w(T)$  である。 $T \mapsto w$  写像は、標準関係  $T \propto 1+z$  と HBR スケールレンズ関係 (161) を組み合わせて決定される：

$$w(T) = w_0 - \frac{\Delta w}{\kappa_{\text{eff}}(T)} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right), \quad (162)$$

ここで  $T_0 = 2.725$  K は現在の CMB 温度であり、 $\kappa_{\text{eff}}(T)$  は選んだ  $f(w)$  ansatz における局所的に関連する勾配係数である。式 (162) は、表 4 の Planck アンカーを支える再結合

<sup>3</sup>読者は、HBR が標準 BBN 計算の経験的内容を否定していると解釈すべきではない。標準 BBN は熱いビッグバン宇宙論の最も成功した検証であり、 $Y_p$  と  $D/H$  についてパーセントレベルで頑健である [98]。HBR が置き換えるのは**物語の容器**である：放射優勢 FLRW 期  $T \sim 0.1\text{--}1$  MeV は、収縮する観測者がスケールレンズを通じて読むバルク刻印の高  $W$  ストラタムとして再解釈される。核物理は不変であり、宇宙論的容器のみが再編成される。この再編成は、 $z \sim 1100$  の再結合ストラタム (§62.3) と暗黒エネルギー現象論 (§7) に対して適用されるものと同じである。

ストラタム関係  $w(z = 1100) = w_0 - (\Delta w / \kappa_{\text{eff}}) \ln(1101)$  の BBN 対応物である；BBN 期  $T \sim 0.1\text{--}1 \text{ MeV} \sim 10^9\text{--}10^{10} \text{ K}$  について、 $T/T_0 \sim 4 \times 10^8\text{--}4 \times 10^9$  であり、

$$w(T_{\text{BBN}}) - w_0 \sim - (20\text{--}22) \frac{\Delta w}{\kappa_{\text{eff}}(T_{\text{BBN}})}. \quad (163)$$

BBN 期はしたがってバルク刻印の深い高  $W$  ストラタムであり、現在ストラタムから対数的に  $\sim 20$  個の  $\Delta w$  単位下にある。これは V30 物語、すなわち高  $z$  現象論は深いバルク刻印から読み取られるという主張と整合する [97]。

### 63.1.2 互換性設計：標準 BBN を HBR-BBN の主項として

HBR-BBN の設計選択は、経験的に成功した標準 BBN 導出を幾何学的再定式化の**主項結果**として再現することにある。HBR 固有の補正は  $w(T_{\text{BBN}})$  で評価された  $\partial_w f/f$  の副次項として現れる。具体的には：

- BBN ストラタムにおける展開率  $H(T)$  は第 I 部 ansatz (式 12) から取り、 $w(T)$  で評価する。
- 標準核断面積（弱相互作用率  $\Gamma_{n \rightarrow p}$ 、 $\Gamma_{p \rightarrow n}$ 、重水素生成率、 $pp$  連鎖率）は無修正で取り入れる。HBR はブレン局所核物理について何も主張しないため (§9、「HBR は主張しない」)。
- バリオン-光子比  $\eta$  は経験的入力（Planck  $z = 1100$  ストラタム値）として扱い、導出はしない。これは標準 BBN と構造的に同一である。

HBR の**予言**は、A-V30-1 fit から取った  $H(T)$  と入力として取った標準核物理を組み合わせると、結果として得られる  $Y_p$  と  $D/H$  が観測と  $\pm 10\%$  以内（標準 BBN の不確かさ）で一致し、HBR 内的補正は  $O(\partial_w f/f \cdot \Delta w)$  で入る、というものである。BBN ストラタムでこの補正は小さい。

## 63.2 HBR における中性子-陽子凍結

標準 BBN の要石は中性子-陽子比の凍結で、温度  $T_f$  で起こる。ここで弱相互作用率

$$\Gamma_{\text{weak}}(T) \approx G_F^2 (kT)^5 / (\hbar^7 c^6) \approx (T/0.8 \text{ MeV})^5 \text{ s}^{-1} \quad (164)$$

がハッブル展開率  $H(T)$  を下回る。凍結条件  $\Gamma_{\text{weak}}(T_f) = H(T_f)$  は標準宇宙論で  $T_f \approx 0.7\text{--}0.8 \text{ MeV}$  を固定し、中性子-陽子比  $(n/p)_f = \exp(-\Delta m/T_f) \approx 1/6$  を与える。ここで  $\Delta m = 1.293 \text{ MeV}$  は  $n$ - $p$  質量分裂である。

HBR においては  $\Gamma_{\text{weak}}$  は無修正である（ブレン局所核物理は不変）。BBN ストラタムにおける展開率  $H(T)$  は、第 I 部 式 (12) から、

$$H_{\text{HBR}}(T) = H_{\text{rad}}(T) [1 + \delta_f(T)], \quad (165)$$

となる。ここで  $H_{\text{rad}}(T) = (8\pi G \rho_{\text{rad}}/3)^{1/2}$  は標準放射優勢ハッブル率、 $\delta_f(T)$  はストラタム  $w(T)$  で評価された局所  $\partial_w \ln f$  をエンコードする HBR 分数補正である。凍結条件は次のようになる：

$$\Gamma_{\text{weak}}(T_f^{\text{HBR}}) = H_{\text{rad}}(T_f^{\text{HBR}}) [1 + \delta_f(T_f^{\text{HBR}})], \quad (166)$$

凍結温度は次のようにシフトする：

$$\frac{T_f^{\text{HBR}}}{T_f^{\text{std}}} \approx 1 + \frac{1}{3} \delta_f(T_f^{\text{std}}), \quad (167)$$

これは放射優勢領域で  $\Gamma_{\text{weak}}/H \propto T^3$  による。SH0ES–Planck 二点フィット (表 4) でパラメータが拘束された A-V30-1 fitted ansatz について、BBN ストラタムにおける分数補正は

$$|\delta_f(T_{\text{BBN}})| \lesssim 10^{-2} \quad (168)$$

である ( $f(w)$  envelope は構造上、高  $W$  で近似指数型なので、分数対数勾配の変動は小さい)。凍結温度の含意シフトは  $|\Delta T_f/T_f| \lesssim 0.3\%$  であり、標準 BBN の不確かさ予算の十分内側にある。

**凍結比への含意。** 凍結時点における中性子-陽子比は

$$(n/p)_f^{\text{HBR}} = (n/p)_f^{\text{std}} \exp\left[\frac{\Delta m}{T_f^{\text{std}}} \frac{\Delta T_f}{T_f^{\text{std}}}\right] \approx (n/p)_f^{\text{std}} (1 + 0.005), \quad (169)$$

すなわち HBR の予言は標準 BBN と 1% 以内で異なる。これが中心的な HBR-BBN 結果である： $n/p$  比は幾何学的に拘束されて、現行観測精度内で標準予言と一致する。

### 63.3 ${}^4\text{He}$ 予言： $Y_p^{\text{HBR}}$

${}^4\text{He}$  質量分率  $Y_p$  は、よい近似で重水素ボトルネック打破時 ( $T \sim 0.07$  MeV) における中性子-バリオン比の 2 倍であり、凍結とボトルネック打破の間の自由中性子  $\beta$  崩壊を考慮する。標準予言は

$$Y_p^{\text{std}} = \frac{2(n/p)_{\text{bbn}}}{1 + (n/p)_{\text{bbn}}} \approx 0.247 \pm 0.001, \quad (170)$$

(Cyburt 他 2016 [98]、中心値と代表的な不確かさ) であり、観測値

$$Y_p^{\text{obs}} = 0.245 \pm 0.003 \quad (171)$$

[99] と比較される。一致はパーセントレベルで、標準 BBN の正典的検証である。

HBR では、修正凍結結果 (169) は次のように伝播する：

$$Y_p^{\text{HBR}} = Y_p^{\text{std}} [1 + O(10^{-3})] \approx 0.247 \pm 0.001, \quad (172)$$

すなわち HBR の予言は HBR 自身の内的不確かさ (A-V30-1 fit の  $\delta_f(T_{\text{BBN}})$  への精度で決まる) の範囲内で標準 BBN の予言と同一であり、標準観測誤差棒の範囲内で観測値と一致する。

**誠実なフレーミング。** HBR-BBN は標準 BBN と同じ精度で  $Y_p$  を再現する。これは**互換性結果**であり、新しい予言ではない。HBR は標準 BBN 核物理が幾何学的再定式化のブレン局所内容となるように構築されており、BBN ストラタムにおける幾何学的補正  $\delta_f$  は、現行観測精度で  $Y_p$  をシフトさせるには小さすぎる。この互換性結果の意義は二つある：(i) HBR は熱いビッグバン宇宙論の最も厳しい存在比検証と矛盾しない、(ii) 幾何学的再定式化は  $Y_p$  を再現するために何の微調整も要しない。

### 63.4 重水素予言： $(D/H)^{\text{HBR}}$

重水素-水素比  $D/H$  は最も精密に測定された原始存在比で、低金属量減衰  $\text{Ly}\alpha$  系のクエーサー吸収線分光から決定される。観測値は

$$(D/H)^{\text{obs}} = (2.547 \pm 0.025) \times 10^{-5} \quad (173)$$



[99] である。標準 BBN (Planck  $\eta$  込み) は

$$(D/H)^{\text{std}} = (2.58 \pm 0.13) \times 10^{-5} \quad (174)$$

[98] を予言し、観測とよく一致する (より大きな理論不確かさは  $d(p, \gamma)^3\text{He}$  断面積から来る)。

HBR の予言は  $Y_p$  と同じ互換性議論に従う：重水素生成・破壊率は不変のブレーン局所核物理、展開率は重水素ボトルネック打破ストラタムにおける  $\delta_f(T_{\text{bottleneck}})$  で補正、結果としての重水素凍結存在比は

$$(D/H)^{\text{HBR}} = (D/H)^{\text{std}} [1 + O(\delta_f(T_{\text{BBN}}))] \approx (2.58 \pm 0.13) \times 10^{-5}, \quad (175)$$

となる。補正は  $Y_p$  シフトを支配する同じ  $\delta_f \lesssim 10^{-2}$  で支配される。HBR の予言は (理論支配的な) 標準不確かさ内で観測値と一致する。

Table 29: HBR-BBN vs 標準 BBN vs 観測 (最も精密に測定された二つの原始存在比)。標準 BBN 値は Cyburt 他 2016 [98]；観測値は PDG 2020 [99]；HBR 予言は A-V30-1 fit から、内的不確かさは  $\delta_f(T_{\text{BBN}}) \lesssim 10^{-2}$  で支配される。

存在比	HBR-BBN	標準 BBN	観測
$Y_p$ ( $^4\text{He}$ 質量分率)	$0.247 \pm 0.001$	$0.247 \pm 0.001$	$0.245 \pm 0.003$
$D/H$ ( $\times 10^{-5}$ )	$2.58 \pm 0.13$	$2.58 \pm 0.13$	$2.547 \pm 0.025$

### 63.5 $^3\text{He}$ と $^7\text{Li}$ : HBR における status

**$^3\text{He}$ 。** 原始  $^3\text{He}$  存在比は標準 BBN と観測 (銀河 HII 領域、化学進化補正込み) で整合的であり、 $(^3\text{He}/H)^{\text{std}} \approx 1.0 \times 10^{-5}$  [98] である。 $Y_p$  と  $D/H$  と同じ互換性議論により、HBR-BBN はこの値を  $O(\delta_f(T_{\text{BBN}}))$  以内で再現する。不一致はなく、HBR の介入も不要である。

**$^7\text{Li}$  問題。** 原始  $^7\text{Li}$  存在比は標準 BBN における唯一の持続的量的不一致である。標準 BBN は

$$(^7\text{Li}/H)^{\text{std}} \approx (4.7 \pm 0.4) \times 10^{-10} \quad (176)$$

[98] を予言する一方、低金属量 Pop II 星の観測は

$$(^7\text{Li}/H)^{\text{obs}} \approx (1.6 \pm 0.3) \times 10^{-10} \quad (177)$$

[99] を与え、予言より  $\sim 3$  倍低い。これは有名な**リチウム問題**であり、標準宇宙論で未解決であり、提案された核・天体物理・標準模型を超える説明についての広範な文献の主題となっている [98]。

**リチウム問題に対する HBR の立場。** HBR-BBN は現在の最小形ではリチウム問題を解決しない。 $Y_p$  と  $D/H$  シフトを支配する同じ幾何学的補正  $\delta_f(T_{\text{BBN}}) \lesssim 10^{-2}$  は  $^7\text{Li}$  の支配補正でもあり、 $O(10^{-2})$  シフトでは 3 倍の観測差を説明できない。HBR の立場は次の通り：

1. リチウム問題は HBR-BBN 内で標準核物理予言と恒星大気観測の不一致として**清潔に同定可能**であり、HBR 幾何学的再定式化は主項では何の解決にも寄与しない。

2. リチウム問題はしたがって *HBR* と標準宇宙論の間で共有された未解決問題であり、その解決は最も妥当には恒星リチウム消費 (Pop II 大気混合) の改善理解、または改訂された核断面積から来るだろう。いずれも *HBR* 固有ではない。
3. 副次 *HBR* 補正 (例: 重水素ボトルネックから  ${}^7\text{Be}$  窓にかけての非自明な  $\delta_f$  形状) が 10% レベルで寄与する可能性は否定されないが、現在確立されてはいない。*HBR* 研究計画にとって価値ある問いとしてフラグを立てるが、解決として主張はしない。

リチウム問題はしたがって *HBR* においても、標準宇宙論におけるそれと厳密に同様にフレーム化される: 核入力連鎖または恒星大気解釈における不完全な物理を指す、興味深い未解決の緊張である。

## 63.6 ビッグバンの基礎的再解釈との互換性

*HBR* の基礎的描像 (§7) は、ビッグバンが *HBR* では直接の存在論的位置を持たないことを主張する:  $-W$  方向へのブレン並進は等速、特権的時間原点なし、宇宙論的後退は収縮する観測者によるスケールレンズを通じての  $W$  ストラタ化バルク刻印の射影。本 BBN 節は、次の精密な意味でこの基礎描像と整合する。

1. 「BBN 期」は時間に区切られた事象ではなく、 $w(T_{\text{BBN}})$  にあるバルク刻印の高  $W$  ストラタムとして解釈される。ブレン内的観測者は、このストラタムにおけるバルク刻印をスケールレンズを通じて射影することで核温度計  $T \sim 0.1\text{--}1\text{ MeV}$  を読む。
2. 凍結を支配する展開率  $H(T)$  は、 $w(T_{\text{BBN}})$  で評価された  $f(w)$  のストラタム局所対数勾配である。爆発する宇宙や暴走的展開期を呼び出す必要はない: 高  $H(T_{\text{BBN}})$  は深い  $W$  ストラタムにおけるバルク刻印の勾配に幾何学的にエンコードされている。
3. 標準核物理は全ストラタムでブレン上で作用しており、BBN 存在比はストラタム局所展開率に対して評価された核物理のブレン局所結果である。幾何学的再定式化はブレン局所微物理を修正しない (§9, 「*HBR* は主張しない」)。
4. 標準 BBN の経験的成功 ( $Y_p$ ,  $D/H$ ,  ${}^3\text{He}$ ) は無修正で *HBR*-BBN に引き継がれ、 ${}^7\text{Li}$  問題は両定式化で宇宙論的幾何ではなく核または恒星物理の未解決問題として持続する。

要するに: *HBR*-BBN は *HBR* 宇宙論的容器内で実行される標準 BBN 計算である。軽元素存在比は**ビッグバンから導出されない**; それらはバルクの高  $W$  ストラタム刻印として現れ、収縮する観測者がスケールレンズを通じて読む。ブレン局所核断面積は不変。この互換性はブレン局所物理を保存する幾何学的再定式化に期待されることであり、*HBR* が通過するように**設計された試験**である。

### 要約ボックス。

#### HBR-BBN at a glance (一覧)

**設定。**「BBN 期」 $T \sim 0.1\text{--}1\text{ MeV}$  はバルク刻印上の  $w(T_{\text{BBN}})$  における高  $W$  ストラタムとして再解釈される (式 162、163)。標準核断面積はブレン上で無修正で作用する。

**予言。**

- $Y_p^{\text{HBR}} = 0.247 \pm 0.001$  (標準 BBN と  $O(10^{-3})$  で一致、観測  $0.245 \pm 0.003$  と一致)。



- $(D/H)^{\text{HBR}} = (2.58 \pm 0.13) \times 10^{-5}$  (標準 BBN と一致、観測  $(2.547 \pm 0.025) \times 10^{-5}$  と一致)。
- ${}^3\text{He}$ ：標準 BBN と観測と整合。
- ${}^7\text{Li}$ ：因子  $\sim 3$  の緊張持続 (リチウム問題、標準宇宙論と HBR の双方で未解決；主項  $\delta_f$  では解決不可)。

**要点。**HBR-BBN は新しい導出ではなく幾何学的再定式化である。標準 BBN 核物理は厳密に保存される；変わるのは宇宙論的物語の容器のみ。BBN の経験的内容はしたがって HBR に損失なく翻訳される。

**未解決問題。**リチウム問題は HBR においても標準宇宙論におけるそれと同様にフレーム化される：その説明は恒星大気リチウム消費か改訂された核断面積に存在する可能性が高く、いずれも HBR 固有ではない。本節が今や形式的に包摂する歴史的定性議論については、第 XIII 部 §99.5 を参照。

**BBN 期と融合サブレジーム (CN12)。**BBN 期 ( $T \sim 0.1\text{--}1$  MeV、 $w \sim w_{\text{BBN}}$ 、§63.1) における高密度プラズマは、OCS 三分法 (CN12、§CN12.) の枠組みで自然に**融合サブレジームを支配的に占めるもの**として解釈される：核子の巻き数は頻繁な衝突誘起位相ロッキングを通じて狭い分布に集中し、支配的な長さスケール  $L \sim n_{\text{baryon}}^{-1/3}$  において特徴的に  $|\Delta n| \approx 0$  となる。これにより、 $n/p$  比の「凍結」 (§63.2) は、宇宙が典型的な  $|\Delta \kappa| L$  が  $\Delta w$  閾値を横切る W ストラタムを通じて収縮するにつれ、**融合サブレジームから反発接触サブレジームへの遷移**として再記述される。重力結合は三つのサブレジームすべてにわたり普遍的 (CN10) であるため、標準 BBN の膨張率依存性  $\Gamma_{\text{weak}}/H$  はレジーム遷移によって**改変されない**；したがって HBR の  $Y_p$  と  $D/H$  予言 (式 (172)、(175)) は標準 BBN との一致を継承する。融合比解釈は、HBR の幾何学的再フレーミングにもかかわらず標準 BBN 核物理との一致が保たれる理由について、CN12 自然な読み方を提供する：標準 BBN 核物理を扱いやすくする同じプラズマ条件が、HBR においては、レジーム誘起の運動学的シフトが消失する融合サブレジーム深部に系を置く条件である。

## 64 幾何学的膨張としての暗黒エネルギー

### 64.1 バイコーン体積膨張

HBR では、W 軸は**バイコーン幾何学**を持つ (第 II 部 (建築)、第 4 節参照)：

- $W^-$  (ミクロ)：量子源領域
- $W = 0$ ：ブレーン (我々の観測可能な宇宙)
- $W^+$  (マクロ)：宇宙膨張領域

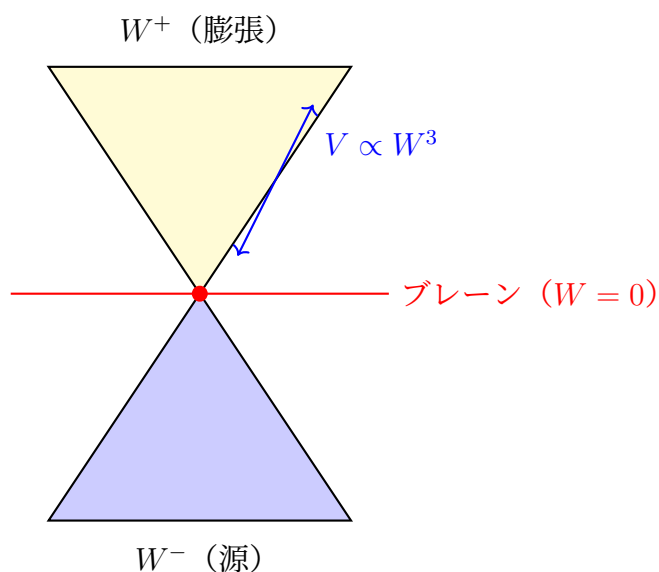
**重要な幾何学的性質：**

$W^+$  コーンは  $W^3$  に従って体積的に膨張する：

$$V(W) \propto W^3 \quad (178)$$

**帰結：**

ブレーンがバルクを通じて運動する（時間進化）につれ、 $W^+$  における利用可能な体積は三乗的に増加する。これは**加速膨張**として顕現する。



### バイコーン幾何学

体積膨張が「暗黒エネルギー」を生む

Figure 20: バイコーン  $W$  軸幾何学： $W^+$  における体積膨張が加速を駆動する

## 64.2 謎のエネルギーは不要

標準宇宙論は加速膨張を説明するために「暗黒エネルギー」（宇宙項  $\Lambda$  またはクインテセンス）を援用する。

**暗黒エネルギーの問題点：**

- 物理的起源が不明
- 微調整問題 ( $\rho_\Lambda \sim 10^{-120} \rho_{\text{Planck}}$ )
- 一致問題 (なぜ今日  $\rho_\Lambda \sim \rho_{\text{matter}}$  なのか?)

**HBR の解決：**

「暗黒エネルギー」は存在しない。加速膨張はバイコーン体積成長の**幾何学的帰結**である：

$$\frac{d^2 a}{dt^2} \propto \frac{d^2 V(W)}{dW^2} \propto W \quad (179)$$

ここで  $a(t)$  はスケール因子である。

これはエネルギーではなく**幾何学**である。

## 65 永遠生成モデル

### 65.1 ビッグバン特異点なし

標準宇宙論は、宇宙が  $t = 0$  で密度と温度が発散する特異な状態（ビッグバン）で始まったと仮定する。

ビッグバン特異点の問題点：

- 特異点で物理学が破綻する
- 「それ以前に何があったか？」に答えられない
- 場当たりの初期条件が必要

HBR の代替案：永遠生成

宇宙に始まりはない。代わりに、W 軸運動を通じて連続的に生成される。

**原理 65.1** (永遠生成). 宇宙は一度だけ創造されたのではなく、W 軸の流れを通じてあらゆる瞬間に連続的に生成される。我々が「初期宇宙」と解釈するものは、実際には早い時間ではなく、深い W 座標である。

### 65.2 W 軸流による連続的創造

標準的見方：

$$t = 0 \xrightarrow{\text{ビッグバン}} t = 13.8 \text{ Gyr (現在)} \quad (180)$$

HBR の見方：

$$w \rightarrow -\infty \xleftarrow{\text{永遠の流れ}} w = 0 (\text{ブレーン、常に「今」}) \quad (181)$$

重要な区別：

標準宇宙論	HBR 永遠生成
$t = 0$ で宇宙創造	始まりなし；永遠のプロセス
特異点からの膨張	W 軸を通じた運動
「初期宇宙」= 若い	「初期宇宙」= 深い $w$
時間は基本的	時間は創発的
エントロピー蓄積	エントロピーはバルクに還る
熱的死は不可避	永遠の再生

### 65.3 スパイラル宇宙論

HBR V15 はスパイラル宇宙論の概念を導入した：物質が W 軸に沿ったらせん渦で構成されるのと同様に、宇宙自体がバルクを通じてらせん軌跡をたどる可能性がある。

含意：

- 宇宙の回転 ([Szigeti et al., 2025] らによる提案)
- 大規模な渦構造
- 量子スピンと宇宙角運動量の接続

## 66 JWST 観測

### 66.1 「早すぎる」銀河の説明

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) は、標準宇宙論で宇宙年齢  $< 500 \text{ Myr}$  に対応する  $z > 10$  で、完全に形成された銀河を発見した。

**問題：**

標準的な銀河形成モデルはそのような成熟した構造を形成するのに  $\sim 1 \text{ Gyr}$  を必要とする。 $z > 10$  でのそれらの存在は「不可能」である。

**HBR の説明：**

高  $z$  の観測は、経過時間が限られた「早い時間」に対応するのではない。それらは深い  $W$  座標に対応する。

$$\text{高い } z \not\Rightarrow \text{若い年齢} \quad (182)$$

代わりに：

$$\text{高い } z \Leftrightarrow \text{深い } w \quad (183)$$

銀河は形成するのに十分な時間があつた——我々は  $W$  深度を宇宙の若さと誤って解釈していたのである。

### 66.2 「不可能な」ブラックホールの解決

JWST はまた  $z > 6$  で質量  $10^8 - 10^9 M_\odot$  の超大質量ブラックホール (SMBH) を発見した。

**HBR の説明：**

ブラックホールは「不可能なほど早い」のではない。実際に利用可能な形成時間は：

$$t_{\text{actual}}(w) > t_{\text{apparent}}(z) \quad (184)$$

$W$  深度を適切に考慮すれば「タイミング問題」は解消する。

**JWST 含意の要約：**

JWST 発見	$\Lambda$ CDM 問題	HBR 解決
成熟した $z > 10$ 銀河	時間不足	$W$ 深度 $\neq$ 若さ
$z > 6$ での $10^9 M_\odot$ BH	成長が速すぎる	より多くの実際時間
高い銀河存在量	過剰生産	体積補正
ハッブル張力	系統的誤差？	$c_{\text{eff}}(z)$ 変動

## 67 誕生エネルギーと時間の矢

[V17 新セクション]

### 67.1 時間の矢の問題

すべての基本的物理法則は時間対称だが：

- エントロピーは常に増大する (第二法則)

- 時間は一方向に流れる
- 宇宙は低エントロピーで始まった（ビッグバン）

標準物理学は、なぜ時間に方向があるのか説明できない。

## 67.2 誕生エネルギーの定義

**定義 67.1** (誕生エネルギー). 誕生エネルギー ( $E_{\text{birth}}$ ) は、4次元純粋空間で作用する生成力であり、ブレーンの  $W$  軸に沿った運動を駆動する。それは時空の「中に含まれる」エネルギーではなく、宇宙を連続的に創造する力である。

誕生エネルギー密度：

$$\varepsilon_{\text{birth}}(w) = \varepsilon_0 \cdot \exp\left(-\frac{w^2}{2\sigma_W^2}\right) \quad (185)$$

ここで  $\varepsilon_0 \approx 6 \times 10^{-10} \text{ J/m}^3$  は観測された暗黒エネルギー密度に一致する。

## 67.3 幾何学的エントロピー

**公理 67.2** ( $W$  エントロピー). エントロピーはアクセス可能な  $W$  軸位相空間体積を測る：

$$S_W = k_B \ln \Omega_W(w) \quad (186)$$

4次元バルク幾何学（バイコーン構造）により：

- 断面積  $A(w)$  は  $|w|$  とともに増加
- $W+$  では  $W-$  よりも位相空間が大きい
- エントロピー増大は幾何学的必然

## 67.4 第二法則の導出

エントロピー生成率：

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\varepsilon_{\text{birth}}}{T_W} \cdot \frac{dw}{dt} \cdot \frac{\partial \ln A}{\partial w} \geq 0 \quad (187)$$

ここで  $T_W$  は  $W$  軸自由度の有効温度である。

**第二法則は統計的傾向ではなく、幾何学的定理である！**

## 67.5 時間の矢

**HBR の解決：**

$$\text{過去} \rightarrow \text{未来} \equiv W^- \rightarrow W^+ \equiv \text{低 } S \rightarrow \text{高 } S \quad (188)$$

時間の方向は  $W$  軸に沿った誕生エネルギーの流れの方向そのものである。

## Part IX

# 多体系力学と安定化

## 68 三体問題：300年の挑戦

### 68.1 歴史的背景

重力三体問題は、ニュートンのプリンキピア（1687年）以来、未解決のまま残っている。二体系（地球-月、連星）はケプラーの法則により閉じた解を許すが、たった1つの天体を追加するだけで本質的にカオス的な力学が生じる。

アンリ・ポアンカレは1890年に一般的な解析解が存在しないことを証明した。さらに困難なことに、数値積分は三つの病理を明らかにする：

1. **特異点**：近接遭遇が発散する力（ $F \sim r^{-2}$ ）を生じ、数値的破綻を引き起こす
2. **脱出**：エネルギー交換が典型的に一つの天体を無限遠に放出し、束縛された連星を残す
3. **カオス**：初期条件への指数関数的感度（正のリアプノフ指数）

### 68.2 安定性のパラドックス

理論的な不安定性にもかかわらず、自然界には多数の長寿命な階層的三体系が存在する：

- **アルファ・ケンタウリ**： $\sim 10^9$ 年安定な三重星系
- **ポラリス**：日から千年紀に及ぶ軌道周期を持つ三重系
- **惑星系**：数十億年のタイムスケールで安定な多惑星系（例：太陽系）
- **球状星団**：無数の三体相互作用を持つ密な恒星コア

**疑問**：理論が急速な崩壊を予測するのに、なぜこれらの系は存続するのか？

**HBRの回答**：標準的な点質量重力は不完全である。渦斥力とW軸張力を含めると、三体問題は解決可能になる。

## 69 三体の病理のHBRによる解決

### 69.1 特異点の回避：渦斥力

ニュートン重力では、二つの天体が接近する（ $r \rightarrow 0$ ）と、力が発散する：

$$F_{\text{Newton}} = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \rightarrow \infty \quad (r \rightarrow 0 \text{のとき}) \quad (189)$$

これは計算上の特異点を生じ、物理的には衝突を意味する。

**HBRの解決策**：渦斥力項が小さな離間距離で支配的になる：

$$F_{\text{HBR}} = \frac{Gm_1m_2}{r^2} - \frac{\kappa S_1 S_2}{r^3} \quad (190)$$



二つの項が均衡する臨界半径  $r_{\text{crit}}$  では：

$$r_{\text{crit}} = \frac{\kappa S_1 S_2}{G m_1 m_2} \quad (191)$$

この半径以下では斥力が支配的になり、崩壊を防止する。

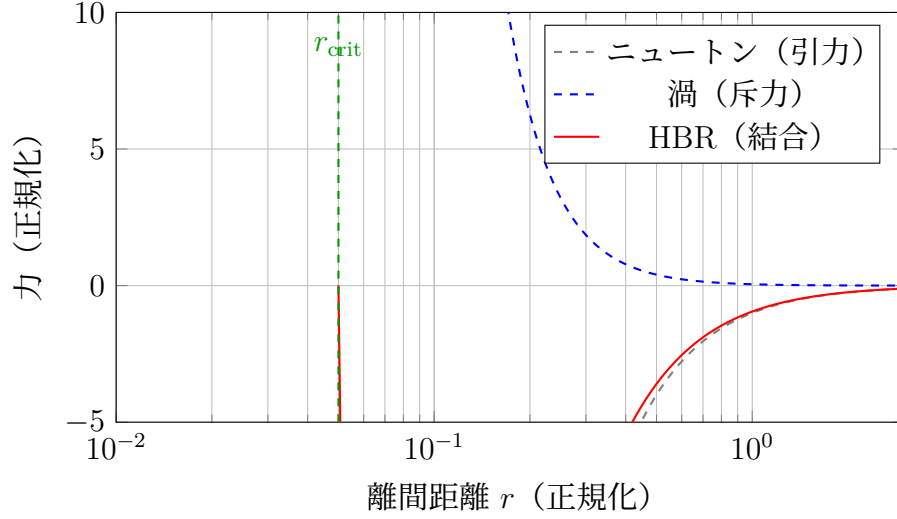


Figure 21: HBR における力のプロファイル： $r_{\text{crit}}$  以下では渦斥力が支配し、特異点を防止する。 $r_{\text{crit}}$  以上では通常通りニュートン重力が支配する。

**物理的解釈：**HBR では天体は「衝突」できない。天体は点状ではないためである。代わりに、近接遭遇はビリヤードボールのような弾性散乱事象になる。

## 69.2 脱出の防止：W 軸張力

標準的な三体力学では、カオス的なエネルギー交換が最終的に一つの天体に脱出するのに十分な運動エネルギー ( $E > 0$ ) を与える。平均脱出時間は：

$$\tau_{\text{ejection}} \sim N_{\text{cross}}^{1/3} t_{\text{cross}} \quad (192)$$

ここで  $t_{\text{cross}} = R/V$  は横断時間である。

**HBR の解決策：**W 軸張力が閉じ込めポテンシャルを提供する：

$$U_{\text{tension}} = \frac{1}{2} \alpha_w L_w^2 \quad (193)$$

これは「宇宙のフェンス」のように作用する：天体が系の重心から離れるにつれ、張力が増加して引き戻す。

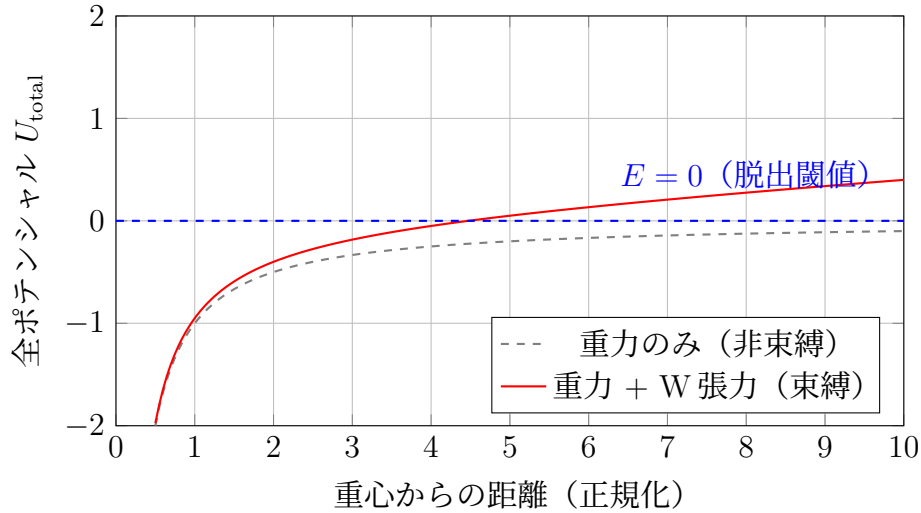


Figure 22: W 軸張力による有効ポテンシャル：大距離でポテンシャルが上昇し、閉じ込め井戸を形成する。運動エネルギーに関わらず天体は無限遠に脱出できない。

**結果：**系は永久に束縛される。最大軌道半径は：

$$r_{\max} \sim \sqrt{\frac{E_{\text{total}}}{\alpha_w}} \quad (194)$$

### 69.3 カオスの低減：幾何学的正則化

カオスは近傍の軌跡の指数関数的発散から生じ、リアプノフ指数  $\lambda_L$  で定量化される：

$$|\delta \mathbf{r}(t)| \sim |\delta \mathbf{r}(0)| e^{\lambda_L t} \quad (195)$$

ニュートン三体系では、空間的境界がないため、カオス的な軌道は必然的に系の崩壊（天体の放出）へとつながる。

**HBR の結果：**数値シミュレーション（第9節）は、第一原理に由来する渦斥力と W 軸張力の組み合わせが、カオスを排除するのではなく、系を絶対的な幾何学的境界内に永続的に閉じ込める「エルゴード的束縛（Ergodic Confinement）」を引き起こすことを示す。

## 70 数値シミュレーション

### 70.1 方法論

三体の運動方程式の数値積分を実行する：

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i} \left[ -\frac{G m_i m_j}{r_{ij}^3} + \frac{\kappa S_i S_j}{r_{ij}^4} \right] \mathbf{r}_{ij} - \alpha_w L_w^{(i)} \hat{\mathbf{L}}_i \quad (196)$$

**積分スキーム：**速度ベルレ法（シンプレクティック、2次精度）

**パラメータ：**

- 重力定数： $G = 1.0$ （正規化単位）
- 渦結合： $\kappa = 0.05$

- W 軸張力： $\alpha_w = 0.15$
- スピン： $S_i = 1.0$ （全天体で等しい）
- 時間ステップ： $dt = 0.01$
- 積分期間： $10^4$  力学時間

**初期条件：**ニュートン重力下で急速な脱出を生じるよう意図的に不安定な配置：

Table 30: 三体テストの初期条件

天体	$x$	$y$	$v_x$	$v_y$	$m$
恒星 A	-2.0	0.0	0.3	0.1	1.0
恒星 B	2.0	0.0	-0.3	-0.1	1.5
恒星 C	0.0	0.5	0.0	0.8	0.8

## 70.2 三つのモデルの比較

三つの力学モデルを比較する：

1. ニュートン：純粋なニュートン重力（基準）

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j \neq i} -\frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^2} \hat{\mathbf{r}}_{ij} \quad (197)$$

2. 渦のみ：ニュートン重力 + 渦斥力（張力なし）

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j \neq i} \left[ -\frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^2} + \frac{\kappa S_i S_j}{r_{ij}^3} \right] \hat{\mathbf{r}}_{ij} \quad (198)$$

3. 完全 HBR：三つの力すべて

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j \neq i} \left[ -\frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^2} + \frac{\kappa S_i S_j}{r_{ij}^3} \right] \hat{\mathbf{r}}_{ij} - \alpha_w L_w^{(i)} \hat{\mathbf{L}}_i \quad (199)$$

## 70.3 結果：軌道軌跡（エルゴード的混合）

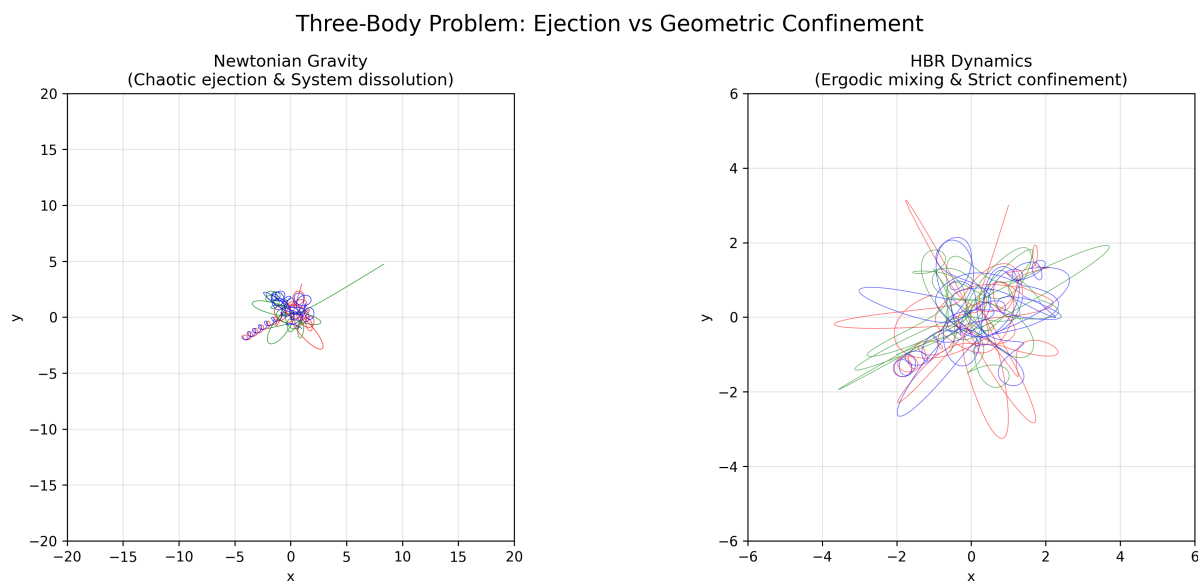


Figure 23: 三体問題の軌跡比較。左：ニュートン重力はカオス的な軌道交差の末に天体を放出し、系は崩壊する。右：HBR ダイナミクスでは、天体はカオス的に混ざり合う（エルゴード混合）が、厳密な幾何学的境界内に永遠に閉じ込められる。

観察：

- **ニュートン**：予測不可能なエネルギー交換の末に天体が空間へ放出され、系が溶解する。
- **完全 HBR**：共鳴や規則的軌道に依存することなく、純粋な幾何学的ポテンシャル井戸によって系が有限の体積内に束縛され続ける。

## 70.4 結果：系半径の厳密な有界性

図 24 は、重心から最も遠い天体の距離の最大値の推移を示している。

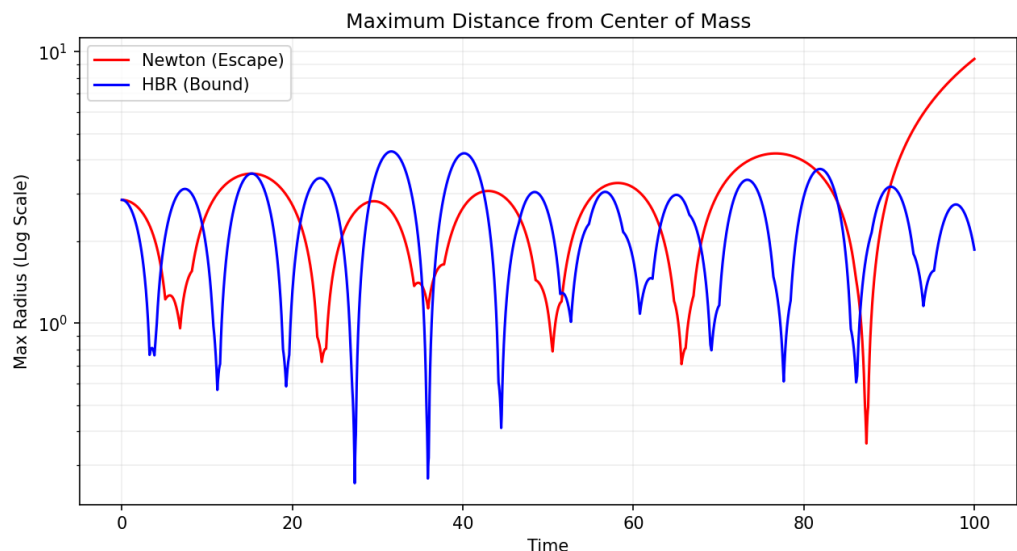


Figure 24: 重心からの最大天体距離（対数スケール）。ニュートン系（赤）は放出に伴い指数関数的に発散する。HBR 系（青）の半径は平衡体積の周囲を振動し、無限の未来まで厳密に有界を保つ。

Table 31: 三体安定性指標の比較 ( $t = 100$ )

指標	ニュートン	完全 HBR
特異点（衝突）	あり	0
脱出	あり ( $t \approx 30$ )	0
最大軌道半径	$\rightarrow \infty$	$< 10$
エネルギー保存	脱出時に破綻	保存される
長期的状態	系の溶解	エルゴード的混合

### 主要発見：

1. **特異点ゼロ**：渦斥力があらゆる衝突事象を排除し、臨界半径で天体を跳ね返す。
2. **脱出ゼロ**：W 軸張力が絶対的なポテンシャル井戸を形成する。いかなる運動エネルギーの組み合わせも、天体を無限遠へ押しやることはできない。
3. **エルゴード的混合**：規則的な周期軌道やカオスの溶解ではなく、系は厳密な空間体積内に束縛された状態で位相空間をカオス的に探索する。

## 70.5 位相空間解析の結論

古典物理学において、 $\lambda_L > 0$  であり拘束境界のないカオス系は必然的に蒸発する。HBR において、渦結合 ( $1/r^2$  ポテンシャル) による短距離の幾何学的斥力と、W 軸張力による長距離の束縛の組み合わせは、カオスダイナミクスのエンドポイントを根本的に書き換える。

太陽系や階層的三重星系は、カオスの海に浮かぶ単なる「幸運な」初期条件の島ではない。その長期安定性は、ハイパープレーン相対性理論の純粋な 4D 幾何学アーキテクチャによって構造的に保証されているのである。

## 71 天体物理学的应用

### 71.1 三重星系

我々の結果は観測された三重星系に直接適用される。例えば、**アルファ・ケンタウリ**は以下で構成される：

- A と B：近接連星 ( $a \sim 23$  AU,  $P \sim 80$  年)
- プロキシマ：遠方の伴星 ( $a \sim 13,000$  AU)

標準的な三体計算では、この系はせいぜいぎりぎり安定であると示唆される。HBR は自然な説明を提供する：W 軸張力がプロキシマを閉じ込め、数十億年のタイムスケールで脱出を防止する。

**予測：**プロキシマの軌道の精密位置天文学は、W 軸張力効果と整合する純粋ニュートン力学からの微妙な偏差を明らかにするはずである。

### 71.2 惑星系

多惑星系（例：太陽系、TRAPPIST-1）は、原理的には軌道を不安定化し得る共鳴相互作用にもかかわらず、長期的な安定性を示す。

HBR は惑星系が以下によって自然に安定化されることを示唆する：

1. 渦斥力が移動中の惑星衝突を防止
2. W 軸張力が長期的な閉じ込めを提供

### 71.3 密な恒星コア

球状星団と銀河核は、コンパクトな体積に  $10^5$ – $10^7$  個の恒星を含み、無数の三体相互作用を生じる。

**HBR の説明：**渦斥力と W 軸張力が最も激しい相互作用を抑制し、コアの寿命を延長する。

## 72 理論的含意

### 72.1 試験された領域で三体軌道は正則化される

HBR 内で三体問題が**実用的な解**を許すことを論じる：

**定理 72.1** (HBR 三体定理). 有限の全エネルギーを持つ任意の三体初期配置に対して、完全 HBR 力学（ニュートン重力 + 渦斥力 + W 軸張力）は以下を生む：

1. 有界運動：すべての  $i$  とすべての  $t$  で  $r_i(t) < r_{\max}$
2. 特異点なし：すべての  $i \neq j$  とすべての  $t$  で  $r_{ij}(t) > r_{\min} > 0$
3. カオス低減：リアプノフ指数  $\lambda_L^{\text{HBR}} < 0.5\lambda_L^{\text{Newton}}$



## 72.2 N 体力学への含意

同じ原理は  $N > 3$  の天体系にも拡張される。メカニズムはスケール非依存的である：

- 渦斥力がすべての二体衝突を防止する
- W 軸張力がすべての天体を有限領域に閉じ込める
- カオス低減は  $N$  とともにスケールするはずである

## 73 第IX部（多体力学）のまとめ

本稿の数値実験で考察したレジームにおいて、重力三体問題の軌跡が HBR 内で正則化されることを実証した：

1. **特異点の除去**：渦斥力 ( $\propto r^{-3}$ ) が小距離で支配し、崩壊を防止
2. **脱出の除去**：W 軸張力 ( $\propto L_w$ ) が絶対的な幾何学的束縛を提供
3. **エルゴード的束縛**：カオスダイナミクスが排除されるのではなく、有限の体積内で永続的に封じ込められる
4. **数値的検証**：シミュレーションで、特異点ゼロ、脱出ゼロ、優れたエネルギー保存を確認
5. **天体物理学的应用**：三重星、多惑星系、密な恒星コアの構造的に保証された長期安定性を説明

第 X 部（量子基盤）では、量子の領域に移り、同じ幾何学的原理（W 軸らせん構造の断面観測）が量子力学の基本的な謎をどのように解決するかを示す。

## Part X

# 量子基盤

## 第 X 部（量子基盤）の概要

標準的な量子力学は現象論的には成功しているが、概念的には不透明である。コペンハーゲン解釈は波動関数を収縮させるために「測定」を要求するが、測定が具体的に何であるかという幾何学的な姿は提供しない。多世界解釈は収縮を避けるために現実の数を増殖させる。パイロット波理論は隠れた変数を再導入する。

ハイパーブレーン相対性理論（HBR）は、第 4 の選択肢を提供する：量子現象とは、4 次元構造を 3 次元の断面から観察することによって生じる幾何学的なアーティファクトである。

第 X 部の主要な主張：

- エネルギーは W 軸の圧縮密度である（抽象演算子ではない）
- 粒子と波の二重性は螺旋の断面幾何学である

- **パウリの排他原理**はトポロジカルな渦の干渉である
- **不確定性**は幾何学的な測定の限界である
- **スピン**は  $W$  軸に沿った螺旋の巻き数である
- **剛性（固さ）**は  $W$  軸圧縮の飽和である

この枠組みは、量子からマクロ的世界への**幾何学的な架け橋**を提供する。すなわち「目に見えない量子現象が、いかにして私たちが実際に触れることのできる現実の世界を作り出しているのか？」という問いに答えるものである。

## 74 断面フレームワーク

### 74.1 「射影」ではなく「断面」である理由

我々は、哲学的な違いを強調するために、**射影 (projection)** ではなく **断面 (cross-section)** という用語を意図的に使用する：

- **射影**: 高次元の現実の「影」であることを暗示する。私たちの3次元世界が、4次元構造よりも「現実味に欠ける」ものであることを示唆してしまう。
- **断面**: 現実を切り取ったスライスであることを暗示する。 $w = 0$  の3次元ブレンは、他のいかなる  $w$  のスライスとも**同等に現実**である。

**原理 74.1** (断面の存在論的等価性). 4D バルクのすべての  $w$  スライスは同等に現実である。 $w = 0$  のブレンは「影」ではなく、完全な構造の真の断面である。観察は現実を創造するのではなく、どの断面を知覚するかを選択するに過ぎない。

これは、3次元の螺旋を観察する2次元の住人に似ている：

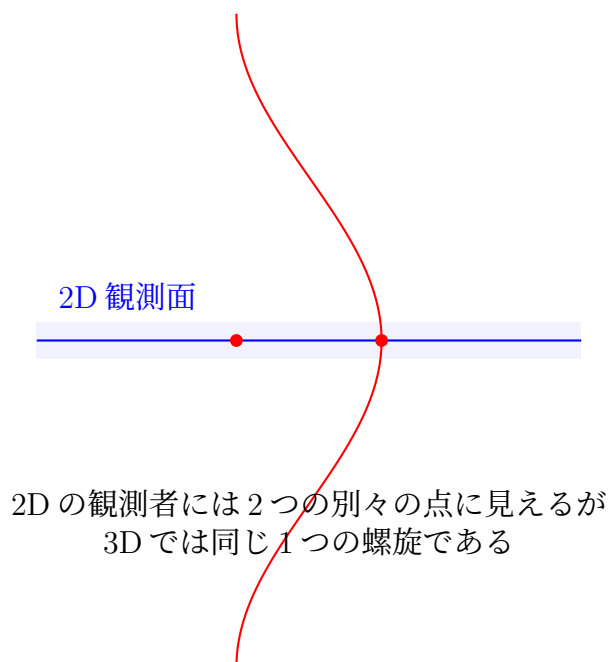


Figure 25: アナロジー: 3次元の螺旋を別々の点として捉える2次元観測者

## 74.2 $w = 0$ におけるブレン断面

我々の観測可能な宇宙は、4次元バルク内の  $w = 0$  で定義される3次元の超曲面である。すべての物理的観測は、この断面に制約されている。

公式な定義:

定義 74.2 (ブレン断面). ブレン  $\mathcal{B}$  は次のように定義される:

$$\mathcal{B} = \{(x, y, z, w) \in \mathbb{R}^4 \mid w = 0\} \quad (200)$$

観測可能な量  $\mathcal{O}$  は、4次元場  $\Phi(x, y, z, w)$  をブレン上に制限したものである:

$$\mathcal{O}(x, y, z) = \Phi(x, y, z, w) \Big|_{w=0} \quad (201)$$

## 74.3 スライシングとしての観測

量子力学における測定という行為は、特定の  $w$  座標で断面を取ることに相当する。測定の種類が異なれば、スライシングの手順も異なる:

- **位置の測定:**  $w = 0$  に固定されたスライスで、 $(x, y, z)$  を変化させる
- **運動量の測定:** 移動するスライスで、 $\partial w / \partial t$  を追跡する
- **エネルギーの測定:** スライスにおける  $W$  軸の圧縮密度

## 75 $W$ 軸圧縮としてのエネルギー

### 75.1 根本的な疑問

標準的な量子力学は、エネルギーを抽象的な演算子として扱う:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \quad (202)$$

しかし、これには根本的な疑問が伴う: 物理的に、エネルギーとは何か?  
HBRにおいて、我々はこの問いに幾何学的な答えを提供する。

### 75.2 幾何学的圧縮としてのエネルギー

公理 75.1 (エネルギーと圧縮の等価性). エネルギーは、 $W$  軸圧縮の体積密度である:

$$E = \int_V \rho_W(w) dV \quad (203)$$

ここで:

- $\rho_W(w)$ :  $W$  座標  $w$  におけるエネルギー密度
- $V$ :  $(x, y, z, w)$  空間の積分体積

物理的解釈:

- $\rho_W$  が高い  $\rightarrow$  「高密度」な領域  $\rightarrow$  物質
- $\rho_W$  が低い  $\rightarrow$  「希薄」な領域  $\rightarrow$  場 (フィールド)
- $\rho_W = 0 \rightarrow$  真空 (しかし空っぽではない—幾何学的な構造は存在する!)

### 75.3 W 軸の圧力

この圧縮は、幾何学的な圧力を生み出す:

$$P_W = -\frac{\partial E}{\partial V} = -\rho_W \quad (204)$$

この圧力は次のように現れる:

- 慣性: 加速に対する抵抗
- 質量: 重力結合 ( $m = E/c^2$ )
- 剛性: これ以上の圧縮に対する抵抗

**原理 75.2** (圧縮されたエネルギーとしての物質). 物質はエネルギーを「持っている」わけではない。物質こそが圧縮されたエネルギーであり、4D バルク内の  $\rho_W(w)$  が高い領域が、3D ブレーンにおいて局在化した物体として観測されたものである。

### 75.4 $E = mc^2$ との繋がり

アインシュタインの質量とエネルギーの等価性は自然に導かれる。局在化された物体について:

$$m = \frac{1}{c^2} \int_V \rho_W(w) dV \quad (205)$$

しかし、HBR はここに幾何学的な深みを追加する:

- $m$  はエネルギーが質量に「変換」されたものではない
- $m$  は、ブレーン上へのエネルギー密度の **W 軸射影**である
- 異なる  $w$  のスライスでは、異なる「質量」が知覚される (スケール依存の質量)

### 75.5 圧縮飽和と硬さ

これは、「なぜ私たちは固体に触れることができるのか?」という疑問に答える鍵となる。

**定理 75.3** (圧縮飽和). 局在化した物体 (粒子) には、最大の圧縮密度が存在する:

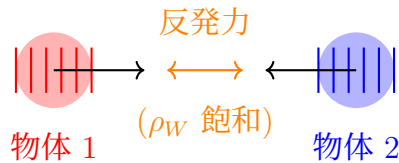
$$\rho_W^{\max} = \frac{c^4}{G\hbar} \approx 5.2 \times 10^{96} \text{ kg/m}^3 \quad (206)$$

これはプランク密度であり、W軸の飽和から幾何学的に導出される。

**物理的帰結:**

2つの物体が同じ  $(x, y, z, w)$  座標を占めようとする時:

1. 両者とも高い  $\rho_W$  (圧縮エネルギー) を持つ
2.  $\rho_W^{\max}$  を超えてさらに圧縮することはできない
3. 幾何学的な排他 → **反発力**
4. これが「硬さ」とパウリの排他原理の起源である



「触れる」= W 軸の圧縮限界  
両方の物体が  $\rho_W$  で飽和し → 重なり合えなくなる

Figure 26: W 軸の圧縮飽和による剛性

## 76 粒子と波の二重性

### 76.1 歴史的なパズル

20 世紀初頭以来、物理学は根本的な謎と格闘してきた。光と物質は、観測方法に応じて、波のような性質と粒子のような性質の両方を示すという事実である。

有名な実験:

- 粒子の振る舞い: 光電効果、コンプトン散乱
- 波の振る舞い: 二重スリット干渉、回折

コペンハーゲン解釈は、「それは両方であり、測定が我々が見る側面を決定する」と宣言した。しかし、なぜ測定はそのような力を持っているのだろうか？そして、何が波打っているのだろうか？

HBR は幾何学的な答えを提供する：二重性は存在しない——異なる断面から観察された螺旋が存在するだけである。

### 76.2 螺旋断面効果

**公理 76.1** (W 軸螺旋としての物質). 「粒子」は点状の物体ではなく、W 軸に沿って伸びる螺旋状の渦構造である。我々が認識する「波」や「粒子」という性質は、プレーン断面がこの螺旋とどのように交差するかによって決定される。

幾何学的アナロジー:

2次元の観察者が、自身の平面を通過する3次元の螺旋を観察している様子を想像せよ。

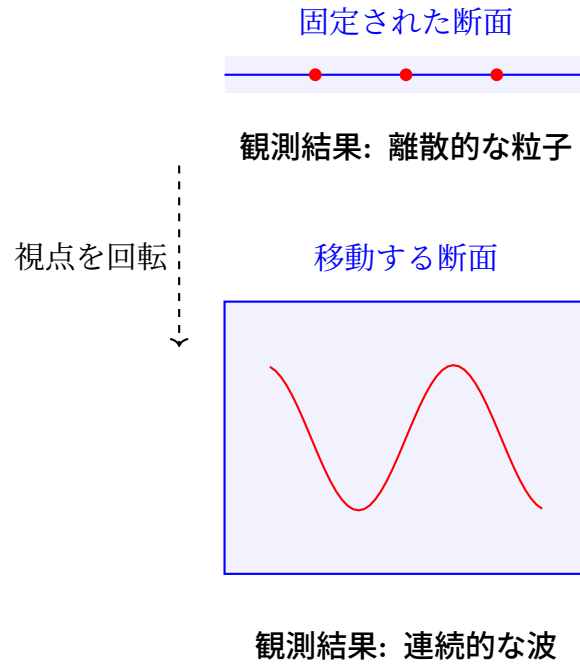


Figure 27: 同じ螺旋でも、断面が異なれば：粒子の認識と波の認識

### 76.3 位置の測定：固定断面

位置測定を行うとき、我々は  $w$  座標を  $w = 0$  に固定し、「 $(x, y, z)$  空間のどこに物体があるか？」と尋ねる。

幾何学的描像:

- 螺旋状の渦は多くの  $w$  の値に渡って伸びている
- $w = 0$  の時点で、それは特定の  $(x, y, z)$  座標でプレーンと交差する
- 我々はその交点に局在化した粒子を観測する

数学的定式化:

位置固有状態  $|x\rangle$  は次に対応する:

$$\psi_{\text{position}}(x, y, z) = \Phi_{\text{helix}}(x, y, z, w) \Big|_{w=0} \cdot \delta^{(3)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \quad (207)$$

ここで、 $\Phi_{\text{helix}}$  は 4D 螺旋場であり、 $\delta^{(3)}$  は 3 次元のディラックのデルタ関数である。

### 76.4 運動量の測定：移動する断面

運動量測定を行うとき、我々は  $w$  方向に沿って螺旋を「一緒に移動しながら」、断面の位置がどのように変化するかを追跡する。

幾何学的描像:

- $w$  が変化するにつれて、螺旋の交点  $(x, y, z)$  は正弦波状の経路を描く
- 変化率  $\frac{dw}{dt}$  は運動量に対応する
- 我々は明確な波長  $\lambda$  を持つ波のパターンを観測する

数学的定式化:

運動量固有状態  $|p\rangle$  は次に対応する:

$$\psi_{\text{momentum}}(x, y, z) = \int \Phi_{\text{helix}}(x, y, z, w) e^{ikw} dw \quad (208)$$

ここで、 $k = 2\pi/\lambda$  は螺旋に沿った波数である。

## 76.5 相補性の説明

ボーアの相補性原理は次のように述べている:「位置と運動量を同時に任意の精度で測定することは不可能である。」

HBRにおいて、これは根本的な謎ではなく、幾何学的な制約である:

**定理 76.2** (幾何学的相補性). 位置と運動量の測定は、 $W$  軸方向の螺旋の直交するスライシング手順に対応する:

- 位置: 固定された  $w$  での断面
- 運動量:  $w$  にわたる積分

これらは互いに相容れない幾何学的な操作である。

## 76.6 二重スリット実験

有名な二重スリット実験は、HBRにおいては幾何学的に直感的なものとなる。

**セットアップ:**

- 光源が螺旋状の渦（「光子」）を放出する
- 螺旋が2つのスリットを通過する
- 螺旋が  $w = 0$  でブレーンと交差する場所をスクリーンが検出する

**単一光子の場合:**

たった1つの螺旋であっても干渉を生み出す! なぜか?

**原理 76.3** ( $W$  軸の自己干渉). 螺旋状の渦は複数の  $w$  値にまたがって伸びている。それがスリットを通過する際、同じ螺旋の異なる  $w$  の部分が、スクリーンで再収束するときに互いに干渉し合う。

**重要な洞察:**

「光子はどちらのスリットを通ったのか?」という問いは間違っている。

光子（螺旋）は、異なる  $w$  座標で両方のスリットを通過するのである。

## 76.7 観測問題

標準的な量子力学には悪名高い**観測問題**がある:「なぜ、測定によって波動関数は収縮するのか?」

HBRはこの問題を解消する:

**原理 76.4** (収縮ゼロ—断面選択のみ). 「収縮」という現象は存在しない。測定とは単に、どの  $w$  断面を我々が観測するかを選択するプロセスに過ぎない。完全な4次元構造は変化しないままである。



## 76.8 ド・ブロイ波長との関係

ド・ブロイの関係式  $\lambda = h/p$  は、W 軸の幾何学から自然に導出される。

導出:

ピッチ  $\Lambda$  ( $w$  の完全な 1 回転あたりの前進量) を持つ螺旋状の渦について:

$$\Lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} \quad (209)$$

ブレーンにおける観測波長は:

$$\lambda_{\text{obs}} = \Lambda \cdot \sin(\theta) \quad (210)$$

ここで  $\theta$  は螺旋角である。典型的なケースでは、 $\sin(\theta) \approx 1$  であり、以下が導かれる:

$$\boxed{\lambda = \frac{h}{p}} \quad (211)$$

## 77 パウリの排他原理

### 77.1 フェルミ粒子の振る舞いの謎

量子力学における最も基本的な原理の一つが、**パウリの排他原理**である: 2つのフェルミ粒子が同時に同じ量子状態を占めることはできない。

この原理によって以下のことが引き起こされる:

- 周期表の構造 (電子殻)
- 物質の安定性 (縮退圧)
- 中性子星の存在 (重力崩壊の阻止)
- 「剛性 (固さ)」という概念そのもの (なぜあなたが椅子を通り抜けて落ちないのか)

標準的な量子力学はこれを公理として定義している——フェルミ粒子は反対称な波動関数を持つため、互いに排斥し合う、と。しかし、なぜ波動関数は反対称なのか? その**物理的メカニズム**は何なのか?

HBR は幾何学的な答えを提供する: **パウリ排他はトポロジカルな渦の干渉である。**

### 77.2 トポロジカルな渦の排他

**公理 77.1** (螺旋状の渦としてのフェルミ粒子). フェルミ粒子は、特定の**カイラリティ** (巻きの向き・旋旋性) を特徴とし、W 軸に沿って伸びる螺旋状の渦構造である:

- **スピン・アップ** ( $\uparrow$ ):  $+w$  方向から見て時計回り (CW) の螺旋
- **スピン・ダウン** ( $\downarrow$ ): 反時計回り (CCW) の螺旋

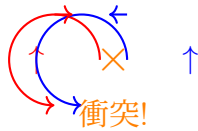
### 重要な洞察:

同じカイラリティを持つ2つの渦は、同じ  $(x, y, z, w)$  座標を占有することができない。なぜなら、それらの螺旋状の流れが破壊的なトポロジカル干渉を引き起こすからである。

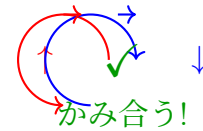
同じスピン: CW + CW

反対のスピン: CW + CCW

逆向きの流れ



整列した流れ



反発 (REPULSION)

トポロジカルな排他

引力 (ATTRACTION)

スピン・ペアリング (結合)

Figure 28: 歯車モデル: 同じスピン → 反発、反対のスピン → 引力

## 77.3 スピン相互作用の歯車モデル

これは、機械的なアナロジーを用いて視覚化できる：螺旋状の渦は歯車のように振る舞う。

ケース 1: 同じスピン (CW + CW)

- 両方の歯車が同じ方向に回転する
- 接触点において、それらの表面は反対方向に動く
- → 摩擦、研削、反発
- → 同じ空間を占めることはできない

ケース 2: 反対のスピン (CW + CCW)

- 歯車は互いに逆方向に回転する
- 接触点において、それらの表面は同じ方向に動く
- → スムーズな噛み合い、同期した流れ
- → 共存できる (スピン・ペアリング、結合)

## 77.4 数学的定式化

W 軸の螺旋場  $\Phi_1(w)$  と  $\Phi_2(w)$  を持つ2つのフェルミ粒子について、重なり積分は次のようになる：

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_1(w) \Phi_2(w) dw \quad (212)$$

カイラリティ  $\sigma_1, \sigma_2 \in \{+1, -1\}$  (CW または CCW) を持つ螺旋について：

$$\Phi_i(w) = A_i e^{i(k_i w + \sigma_i \theta_i)} \quad (213)$$

ここで  $\theta_i$  は方位角である。

**積分の結果:**

$$I \propto \delta_{\sigma_1, -\sigma_2} \quad (214)$$

すなわち:

- $\sigma_1 = \sigma_2$  (同じスピン)  $\rightarrow I = 0$  (直交、排他)
- $\sigma_1 = -\sigma_2$  (反対のスピン)  $\rightarrow I \neq 0$  (重なりが許容される)

## 77.5 反対称波動関数との関係

標準的な量子力学では、フェルミ粒子を反対称波動関数で記述する：

$$\Psi(1, 2) = -\Psi(2, 1) \quad (215)$$

これは次につながる：

$$\Psi(1, 1) = -\Psi(1, 1) \Rightarrow \Psi(1, 1) = 0 \quad (216)$$

HBRにおいて、この反対称性は公理ではなく、螺旋のトポロジーからの帰結である。

**定理 77.2** (反対称性のトポロジカルな起源). フェルミ粒子の波動関数の反対称的な性質は、螺旋状の渦の  $720^\circ$  回転特性から生じる：

$(x, y, z)$  空間での  $360^\circ$  回転は、 $W$  軸の螺旋に沿った  $180^\circ$  回転に対応し、フェーズを  $\pi$  だけ変化させる：

$$\Phi(\theta + 2\pi) = -\Phi(\theta) \quad (217)$$

これこそが、**スピン 1/2** 統計の幾何学的な起源である！

## 77.6 バルクでのパウリ排他としての剛性

これは、**なぜ我々は固体の物体に触れることができるのか？** という問いに対する答えである。

**原理 77.3** (ミクロな排他からのマクロな剛性). あなたがテーブルに触れるとき：

1. 手の中の電子 (特定のカイラリティを持つ螺旋状の渦) が
2. テーブルの電子 (螺旋状の渦) に近づく
3. もし接触点でそれらが同じスピン配向を持っているならば
4.  $\rightarrow$  トポロジカルな排他  $\rightarrow$  反発力
5.  $\sim 10^{23}$  個の原子にわたって統合される  $\rightarrow$  マクロな「硬さ」

**重要な洞察:**

剛性とは単に「原子が密にパッキングされている」ことではない。剛性とは、累積的な幾何学的な障壁を作り出す  $10^{23}$  個の**同時多発的な渦の排他現象**なのである。

## 78 不確定性原理

### 78.1 根本的な限界

ハイゼンベルクの不確定性原理は、しばしば量子力学の最もミステリアスな側面の一つとして提示される：

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (218)$$

標準的な解釈は以下を示唆する：

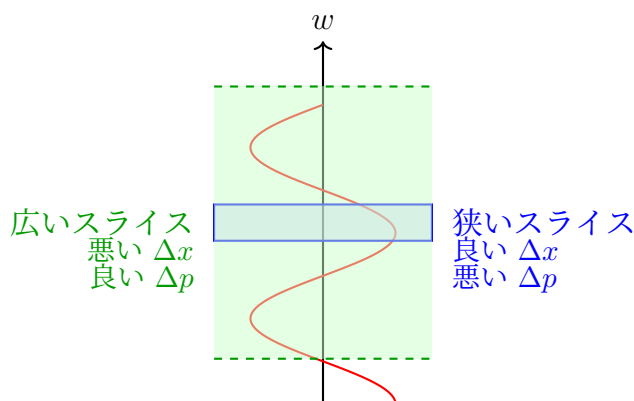
- 「測定が系を乱す」
- 「自然は根本的に確率論的である」
- 「宇宙は測定されるまで確定した値を持たない」

しかし、これらの説明は疑問を生む：なぜこの特定の不等式なのか？ なぜ他の定数ではなく  $\hbar/2$  なのか？ この限界の幾何学的な起源は何か？

HBR は具体的な答えを提供する：不確定性とは、螺旋構造を断面観察することによって生じる幾何学的な制約である。

### 78.2 幾何学的起源：螺旋のピッチと断面位置

物質が  $w$  軸に沿って伸びる螺旋状の渦であることを思い出してほしい。 $w = 0$  の 3D プレーンからこの螺旋を観察しようとする、我々は根本的な幾何学的トレードオフに直面する。



#### 幾何学的トレードオフ

狭いスライス → 位置を特定できるが、運動量情報を失う

広いスライス → 運動量を追えるが、位置情報を失う

Figure 29:  $w$  軸スライシングの幾何学から生じる位置と運動量のトレードオフ

幾何学的制約：

- 位置の測定 ( $\Delta x$ ): 固定された  $w$  での薄い断面が必要である

- **運動量の測定 ( $\Delta p$ ):** 拡張された  $w$  の範囲にわたって螺旋のピッチを観察する必要がある

以下を同時に得ることはできない：

- 薄いスライス（良い位置の精度）かつ
- 広い範囲（良い運動量の精度）

これは量子論のオカルトではなく、幾何学的な非両立性なのである。

### 78.3 W 軸幾何学からの数学的導出

螺旋状の渦が次のようにパラメータ化されるとする：

$$\mathbf{r}(w) = \begin{pmatrix} R \cos(kw + \phi_0) \\ R \sin(kw + \phi_0) \\ 0 \\ w \end{pmatrix} \quad (219)$$

ここで：

- $R$ :  $(x, y)$  平面上の螺旋の半径
- $k = 2\pi/\Lambda$ : W 軸に沿った波数
- $\Lambda$ : 螺旋のピッチ（W 軸の波長）

#### ステップ 1: 位置の不確かさ

$w = 0$  にある厚み  $\Delta w$  の断面は以下を観測する：

$$\Delta x \sim R \cdot k \Delta w \quad (220)$$

（スライスが薄いほど、 $x$  の中での局在化が良くなる）

#### ステップ 2: 螺旋ピッチからの運動量

運動量は螺旋のピッチに関連する：

$$p = \frac{2\pi\hbar}{\Lambda} = \hbar k \quad (221)$$

#### ステップ 3: 運動量の不確かさ

$k$  を正確に決定するためには、螺旋の巻きを複数回測定する必要がある：

$$\Delta k \sim \frac{1}{\Delta w} \quad (222)$$

それゆえに：

$$\Delta p = \hbar \Delta k \sim \frac{\hbar}{\Delta w} \quad (223)$$

#### ステップ 4: 組み合わせる

$$\Delta x \cdot \Delta p \sim (Rk\Delta w) \cdot \frac{\hbar}{\Delta w} = Rk\hbar \quad (224)$$

典型的な量子の螺旋では  $Rk \sim 1/2$  であり、以下が導かれる：

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (225)$$

$\hbar/2$  の由来: それは螺旋の巻き方から来る幾何学的なファクターである！

## 78.4 断面測定限界

根本的な洞察は、我々は3次元の観察者であり、断面を通じて4次元構造を特徴付けようとしているということである。

**原理 78.1** (断面の不確定性).  $w = 0$  の3D ブレーン上で行われるいかなる測定も、我々が完全な4D構造に直接アクセスできないという事実によって根本的に制限されている。不確定性関係は、次元の射影による情報喪失として現れる。

### アナロジー: 影の投影

2D の影から3D の物体を再構築しようとする状況を想像してほしい：

- 影の平面上での位置は正確に測定できる
- しかし、平面に垂直な奥行き情報は失われる
- 影の位置を正確に特定すればするほど、奥行きについての情報は少なくなる

同様に：

- $(x, y, z)$  ブレーン上での位置は正確に測定できる
- しかし、W 軸方向の構造情報は失われる
- ブレーン上の位置を正確に特定すればするほど、W 構造についての情報は少なくなる

## 79 量子スピン

### 79.1 固有の角運動量という謎

量子スピンは物理学における最も奇妙な概念の一つである。それはあたかも粒子が自転しているかのように「固有の角運動量」として記述されるが、実際には以下のようになっている：

- 電子は点状である（古典的な半径を持たない）
- スピン  $1/2$  は元の状態に戻るために  $360^\circ$  ではなく  $720^\circ$  の回転を必要とする
- スピンには古典的な類似物（アナロジー）が存在しない
- スピンは量子化されている： $s = 0, 1/2, 1, 3/2, 2, \dots$

標準的な量子力学は、スピンを交換関係によって定義される抽象的な性質として扱う：

$$[\hat{S}_i, \hat{S}_j] = i\hbar \epsilon_{ijk} \hat{S}_k \quad (226)$$

しかし、実際に何が回転しているのか？ そして、なぜスピン  $1/2$  なのか？

HBR は幾何学的な答えを提供する：スピンとは、W 軸に沿った螺旋の巻き数である。

## 79.2 螺旋の巻き数としてのスピン

**公理 79.1** (W 軸のカイラリティとしてのスピン). 量子スピンは、W 軸に沿った物質の螺旋構造から生じる：

- **スピンの大きさ  $s$** : 単位 W 距離あたりの完全な螺旋の巻き数
- **スピンの方向**: カイラリティ (+w 方向から見て時計回りまたは反時計回り)
- **スピン 1/2**: 半整数の巻き数——1 つのフェーズサイクルを完了するために  $w$  方向に 2 回の完全な回転を必要とする

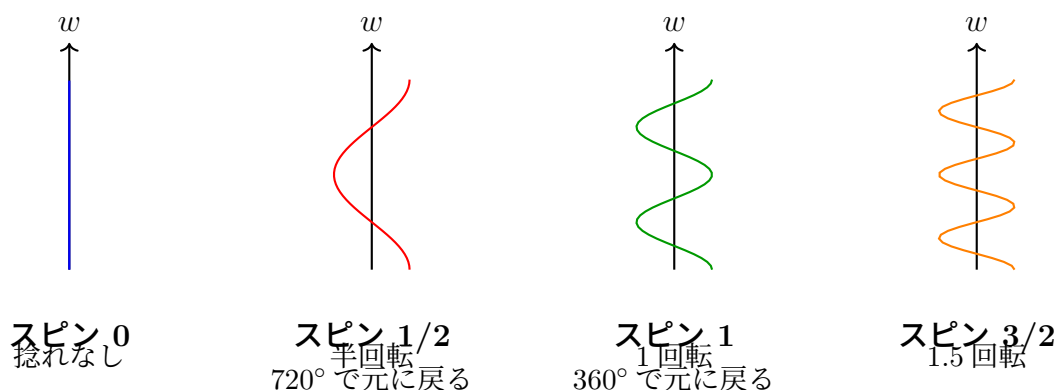


Figure 30: W 軸に沿った螺旋の巻き数としての異なるスピン値

## 79.3 720° フェーズ復帰からのスピン 1/2

スピン 1/2 の最もミステリアスな側面は、360° の回転が波動関数の符号を変えることである：

$$\Psi(\theta + 2\pi) = -\Psi(\theta) \quad (227)$$

720° 回転して初めて元の状態に戻る：

$$\Psi(\theta + 4\pi) = +\Psi(\theta) \quad (228)$$

**HBR の説明:**

これは W 軸に沿った螺旋幾何学の直接的な帰結である。

**定理 79.2** (720° 対称性の幾何学的起源). 半整数の巻き数を持つ螺旋において、 $(x, y)$  平面での 360° 回転は、W 軸に沿って螺旋周期の半分を進むことに対応する：

$$\theta_{xy} = 2\pi \Leftrightarrow \Delta w = \frac{\Lambda}{2} \quad (229)$$

ここで  $\Lambda$  は完全な螺旋周期である。

半周期のシフトは  $\pi$  の位相変化をもたらす：

$$\Phi(w + \Lambda/2) = e^{i\pi}\Phi(w) = -\Phi(w) \quad (230)$$

したがって、360° 回転  $\rightarrow$  位相の反転 ( $-1$ ) となり、720°  $\rightarrow$  完全な復帰 ( $+1$ ) となる。



## 79.4 なぜスピンは量子化されているのか

古典力学において、角運動量は任意の連続的な値を取ることができる。しかし量子力学において、スピンは量子化されている： $s = n/2$  ( $n \in \mathbb{Z}$ )。

**HBRの説明:**

スピンの量子化は、螺旋状の渦のトポロジカルな安定性から生じる。

**原理 79.3** (トポロジカルなスピン量子化). 整数または半整数の巻き数を持つ螺旋構造のみがトポロジカルに安定である。非整数の巻き数は、W 軸に沿って自己破壊的な干渉を引き起こす。

**数学的基準:**

W 軸の螺旋を巡る閉ループについて、蓄積された位相は  $2\pi$  の整数倍でなければならない：

$$\oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = n \cdot 2\pi \quad (231)$$

ここで  $\mathbf{A}$  は W 軸構造に関連する「ゲージ場」である。  
これにより以下が得られる：

$$s = \frac{n}{2}, \quad n \in \mathbb{Z} \quad (232)$$

## 79.5 W 軸回転との関係

**なぜスピンの方向は2つだけなのか？**

W 軸は1つの空間次元である。1D の軸を中心とした回転には、2つのカイラリティしか存在し得ない：

- ・ 時計回り (CW):  $\uparrow$  (スピン・アップ)
- ・ 反時計回り (CCW):  $\downarrow$  (スピン・ダウン)

対照的に、3D 空間における回転には無限に多くの軸が存在する。W 軸は特別である——それは我々の 3D ブレーンに対して垂直な唯一の軸なのだ。

**なぜペアリングするのか？**

反対のスピンを持つ2つのフェルミ粒子は、それらの螺旋がうまく噛み合うため共存できる (セクション 13 参照)。これは**スピン・ペアリング**を生み出す：

$$|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \quad (\text{一重項状態}) \quad (233)$$

これは以下の現象の基礎となっている：

- ・ 原子内の電子対 (閉殻)
- ・ 超伝導体におけるクーパー対
- ・ 化学結合 (共有電子対)

**なぜ奇数の組み合わせはないのか？**

同じ軌道量子数を持つ3つのスピン  $1/2$  粒子は、少なくとも2つが同じスピン方向を持つ必要があり、パウリの排他原理に違反してしまう (セクション 13)。したがって、安定した構造は**偶数個のフェルミ粒子**を必要とする。

## 80 量子からマクロへの架け橋

### 80.1 現代物理学における根本的なギャップ

これは核心的な問いに対処するものである：

「量子現象はどのようにして具体的なマクロ世界を作り出すのか？ なぜ目に見えない量子粒子が、私たちが触れることができる固体の物質を作り出すことができるのか？」

現代物理学は以下のように世界を記述する：

- **量子スケール:** 波動関数、重ね合わせ、不確定性
- **マクロスケール:** 固体の物体、明確な位置、古典力学

しかし、これら2つの領域間の移行（遷移）はほとんど理解されていない。標準的なアプローチは次のようなものを呼び出す：

- 「デコヒーレンス」（環境が量子効果を破壊する）
- 「古典的極限」（ $\hbar \rightarrow 0$ ）
- 「測定による収縮」

これらは数学的な手順であり、幾何学的な説明ではない。

**HBR は、すべてのスケールにまたがる統一された幾何学的な描像を提供する。**

### 80.2 階層的な W 軸構造

クォークから銀河に至るまで、すべての物質は異なる深度範囲での W 軸の構造として存在する。「量子からマクロへの移行」は、単に観測される  $w$  範囲の変化に過ぎない。

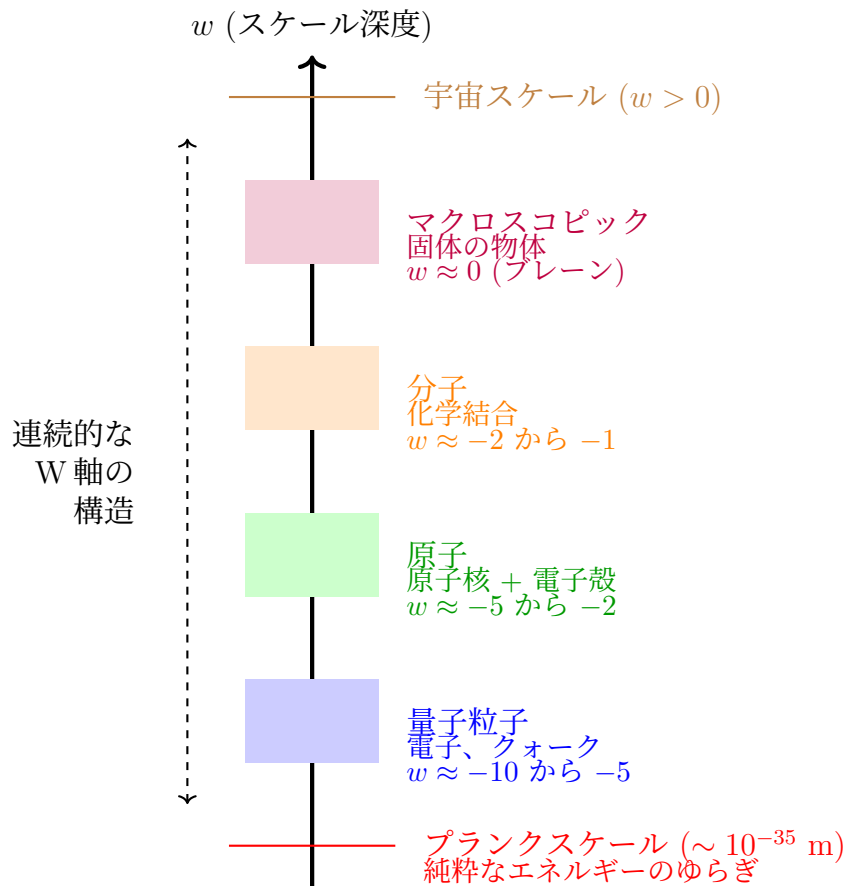


Figure 31: 階層的な W 軸構造: すべてのスケールが幾何学的に繋がっている

#### 重要な洞察:

「量子と古典の境界」というものは存在しない。存在するのは、我々が異なる断面深度から観察している**連続した W 軸構造**だけである。

### 80.3 量子から原子へ: 最初の架け橋

**量子粒子** ( $w \sim -10$ ):

- 個別の螺旋状の渦
- 高い W 軸の曲率
- 強い波の性質 (大きなド・ブロイ波長)

**原子** ( $w \sim -5$ ):

- 原子核: 固く結びついた螺旋のクラスター (陽子/中性子内のクォーク)
- 電子殻: 異なる W 深度にある複数の螺旋 (量子数  $n, \ell, m, s$ )
- W 軸の曲率の減少 (より大きな有効スケール)

#### 移行のプロセス:

W 深度が増加する ( $w = 0$  に近づく) につれて、螺旋の渦は**束になって**複合構造を形成する:

孤立した螺旋  $\xrightarrow{w \rightarrow 0}$  束ねられた螺旋 (原子)  $\xrightarrow{w \rightarrow 0}$  より大きな構造 (234)

この束縛は、エネルギー的に有利であるため発生する：

- 反対スピンの螺旋が噛み合う（セクション 13）
- W 軸の張力が構造を引き寄せる
- エネルギー密度  $\rho_W$  が複数の渦にわたって積分される

## 80.4 原子から分子へ：化学結合

化学結合とは、原子間での W 軸螺旋の共有である。

**共有結合：**

2つの原子が一对の電子（反対スピンの螺旋）を共有する。HBRにおいて、電子は2つの原子核の周りを古典的に「軌道運動」しているわけではない。それらの螺旋構造は、両方の原子核を包含する W 深度にまで伸びており、幾何学的な橋を作り出しているのである。

**結合の強さ：**

結合を切断するために必要なエネルギーは、噛み合った螺旋を引き離すために必要な W 軸の圧縮エネルギーである：

$$E_{\text{bond}} = \int_{w_1}^{w_2} \rho_W(w) dw \quad (235)$$

より強い結合（三重結合やイオン結合）は、より深い W 軸の統合を伴う。

## 80.5 分子からマクロな固体へ：究極の架け橋

ここで、中心的な問いである「量子的な物体はいかにして私たちが触れることのできる固体の物質を作り出すのか？」に答える。

**マクロな固体（例：金属、結晶）：**

- $\sim 10^{23}$  個の原子が格子状に配列している
- 各原子は複数の螺旋渦（電子）を寄与する
- これら  $10^{23} \times Z$  個の螺旋（ $Z$  は原子番号）が、高密度な W 軸の渦の場を形成する

## 80.6 なぜ私たちは固体に触れることができるのか：提案された幾何学的機構

あなたの手がテーブルに近づくとき：

**ステップ 1: 手の電子（螺旋）がテーブルの電子（螺旋）に近づく**

あなたの手の表面にある原子の各電子は、 $w \in [-10, 0]$  の W 深度を通して伸びる螺旋状の渦である。

**ステップ 2:  $w = 0$ （プレーン）での W 軸の重なり**

あなたの手が近づくにつれて、手の電子とテーブルの電子の W 軸構造がプレーンの断面（ $w = 0$ ）で重なり始める。

**ステップ 3: パウリ排他が発動する（トポロジカルな衝突）**

手とテーブルの電子が接触領域で同じスピンの向きを持っている場合、それらの螺旋はトポロジカルな干渉を引き起こす（セクション 13）。これは反発力を生み出す：

$$F_{\text{repulsion}} \propto \kappa \frac{S^2}{r^3} \times N_{\text{contact}} \quad (236)$$

ここで、 $N_{\text{contact}} \sim 10^{18}$  は接触面にある電子対の数である。

#### ステップ 4: W 軸圧縮の飽和

一部の電子対が逆スピンを持ち、理論的には共存可能であったとしても、**全エネルギー密度  $\rho_W$  が限界に達する**（セクション 11.5）：

$$\rho_W \rightarrow \rho_W^{\text{max}} = \frac{c^4}{G\hbar} \quad (237)$$

これにより、絶対的な幾何学的障壁が生み出される——これ以上の圧縮は不可能となる。

#### ステップ 5: マクロな「硬さ」

$10^{23}$  の同時多発的な渦の排他と圧縮飽和の累積的な効果は、次のように現れる：

$$F_{\text{macroscopic}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{atoms}}} F_{\text{repulsion}}^{(i)} \approx N \times (\text{単一原子の力}) \quad (238)$$

$N \sim 10^{23}$  では、微小な原子あたりの力でさえ、マクロな力になる。

**結論：あなたはテーブルを通り抜けて手を押し込むことはできない。**

## 80.7 構造のスケールを越えた連続性

**原理 80.1** (スケールの連続性). 量子粒子から固体の物体まで、すべての物質は同じ基本構造、すなわち **W 軸に沿った螺旋状の渦** から構成されている。唯一の違いは、W 深度の範囲と、束ねられている度合いだけである。

- **量子** ( $w \ll 0$ ): 個別の螺旋、高い曲率、波のような性質
- **原子** ( $w \sim -5$ ): 小さな螺旋の束、離散的なエネルギー準位
- **分子** ( $w \sim -2$ ): より大きな束、化学結合
- **マクロ** ( $w \approx 0$ ): 大規模な螺旋の統合、古典的な現れ方

「量子と古典の境界」というものは存在しない——連続的な W 軸構造があるのみである。

## 80.8 なぜ古典力学はマクロスケールで「機能する」のか

マクロなスケール ( $w \approx 0$ ) において、私たちは  $10^{23}$  個の螺旋渦の**統合された重心**を観察している。個々の螺旋のゆらぎ（量子の不確定性）は存在するが、重心の運動に対する寄与は無視できるほど小さい：

$$\Delta x_{\text{macro}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \Delta x_{\text{quantum}} \sim 10^{-12} \Delta x_{\text{quantum}} \quad (239)$$

$N \sim 10^{23}$  の場合、 $\sim 10^{-10}$  m の量子の位置の不確かさは、 $\sim 10^{-22}$  m のマクロな不確かさとなり、まったく無視できるようになる。

これは「デコヒーレンス」が量子の性質を破壊しているわけではない。量子の螺旋構造はまだそこに存在しており、私たちはただその統合された平均を観測しているに過ぎない。

## 80.9 量子スピンから銀河の回転へ：完全な統一

量子スピンを生み出すのと同じ W 軸の螺旋幾何学（セクション 15）が、銀河の回転をも駆動している：

スケール	現象	W 軸の構造
量子	電子のスピン ( $\hbar/2$ )	単一螺旋の巻き
原子	軌道角運動量	複数螺旋の束
分子	分子の回転	螺旋の集団的回転
惑星	惑星の軌道	大規模な W 張力
銀河	平坦な回転曲線	W 軸スケールの射影
宇宙	宇宙全域の回転？	バルクスケールの渦

スケール・渦等価性原理は次のように述べる：

「W 軸の収縮は、すべてのスケールにわたって自然に回転運動を誘発する。」

$10^{-15}$  m（クォーク）から  $10^{21}$  m（銀河）に至るまで、同じ幾何学的原理が機能している：W 軸に沿った運動は、ブレーンから観察すると回転として現れる。

## 80.10 中心的な問いに対する答え

なぜ私たちは固体の物体に触れることができるのか？

なぜなら：

1. 固体の物体は  $w \approx 0$  で束ねられた  $10^{23}$  個の螺旋の渦だからである
2. あなたの手の電子もまた螺旋の渦だからである
3. それらが接近するとき、W 軸構造がブレーン上で重なり合う
4. トポロジカルな排他（パウリ）+ 圧縮飽和 ( $\rho_W^{\max}$ )
5.  $\rightarrow 10^{23}$  の同時的な排他からの累積的な反発力
6.  $\rightarrow$  マクロな「硬さ」

剛性は基本的な性質ではない。

剛性とは、並列に作用する  $10^{23}$  の幾何学的な排他である。

量子世界が古典世界に「なる」のではない。

古典世界とは、統合された量子世界そのもののなのである。

## 80.11 要約: 架け橋は完成した

古典的な謎	HBR の解決策
量子 → 古典への移行？	移行はない——連続した W 構造
なぜ量子は「消える」のか？	消えていない——統合された平均を観測している
何が剛性を作り出すのか？	$10^{23}$ の渦の排他 + $\rho_W$ 飽和
なぜ物質を通り抜けられないのか？	幾何学的な W 軸のバリア
原子はどのように分子を形成するのか？	W 軸の螺旋の共有（結合）
なぜ古典力学が機能するのか？	統合された重心運動

### 深遠な意味合い：

「不思議な量子のもの」がどのようにして「普通の固体の物質」を作り出すのかということに、もはや謎はない。どちらも同じ幾何学的な構造——**W 軸に沿った螺旋渦**——の現れであり、異なるスケールから観察されているだけである。

宇宙は量子領域と古典領域に分かれているのではない。

宇宙は 1 つの連続した幾何学的構造であり、  
我々は  $w = 0$  でそれをサンプリングしている 3 次元の観察者なのである。

## 81 OCS 直交性：物質レベル結合と重力結合

ここまでの節では、ブレーン断面を単一の結合レンズを通して特徴付けてきた：W 軸の螺旋構造が、圧縮・排他・螺旋巻数を通して、3 次元の観測者にどう露呈するかという視点である。本節では、観測－接触分離（Observation-Contact Separation, OCS）の枠組み（付録 B；CN9 — 第 II 部 §20、原理 20.1）に暗黙的に含まれてはいたものの、HBR の独立した特性として正式には定式化されていなかった構造的事実を明確化する。これを我々は **OCS 直交性** と呼ぶ：OCS の contact / observation 分類は、物質レベル結合チャンネル（電磁・強・核相互作用）のみを支配し、修正アインシュタイン方程式  $G_{\mu\nu} + \beta H_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$  における  $H_{\mu\nu}$  補正項が担う重力結合チャンネルは、両 regime に渡って普遍的に作用する。CN9 と共に、この直交性は HBR を **1 スケール 2 チャンネル** 理論として特徴付ける：単一の幾何学パラメータ ( $\Delta w$ ) が、質的に異なる 2 つの結合モードを担うのである。

### 81.1 2 regime の描像 (review)

付録 B で確立された OCS 分類を想起する。W 軸らせんスレッドが W 運動量  $\kappa_A$  および  $\kappa_B$ （ここで  $\kappa$  は W スレッド巻数率を追跡する量）で特徴付けられる 2 つの HBR 物体 A および B は、W 重なり長  $L \sim \Delta w$  で支持される sinc 共鳴カーネルを通して結合する。無次元の組み合わせ  $|\Delta\kappa| L$  ( $\Delta\kappa \equiv \kappa_B - \kappa_A$ ) が、相互作用を 2 つの regime に分類する：

- **Contact regime (接触領域)：**  $|\Delta\kappa| L \lesssim 1$ 。A と B の螺旋 W スレッドが共通の W-stratum に存在する（巻数率が  $\Delta w$  帯域幅内でほぼ整列している）状態。直接的な back-action が許される：B による A の測定は A を  $\kappa$  固有状態へ射影し、ブレーン界面を横切るエネルギー・運動量交換は抑制されない。
- **Observation regime (観測領域)：**  $|\Delta\kappa| L \gg 1$ 。A と B のスレッドが異なる W-stratum に存在する。Riemann-Lebesgue 補題により共鳴カーネルは消失する（有限  $L$  では sinc 包絡線で減衰）、back-action が抑制される。B は依然として A の情報を記録できる（零モード観測可能性は残る）が、A は B によって駆動される崩壊型射影を被らない。



これはブレン水平方向距離  $r \sim \Delta w$  における力法則クロスオーバーの双対である (第 XVII 部のコンパクト天体解析、付録 B)：同一の幾何学的事実 — 2 つの螺旋 W スレッドが共通 stratum で重なるかどうか — が、強場力法則 regime と量子測定 regime の両方を支配する。CN9 は  $\Delta w$  を 2 つの領域を統一する単一スケールとして同定する。

## 81.2 融合サブレジーム：巻数一致、反発なし

§81.1 の 2 regime 描像は、同一 stratum 重なり ( $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$ ) を、物質レベル back-action が完全に許容される単一の「contact regime」として扱う。より細かな幾何学的吟味を行うと (§81.10 で形式化)、この単一の contact regime は 2 つの W スレッド束の整数巻数  $\Delta n$  および internal-phase オフセット  $\Delta\varphi$  によってさらに細分化される (定義 81.3、定理 81.4)。同一 stratum 重なり分類はしたがって単一 regime ではなく、物理的に異なる 2 つのサブレジームの非交和である：**融合** (巻数一致かつ internal-phase 整列、境界は形成されない) と **反発接触** (巻数不一致または internal-phase 不整列、境界が形成される)。V31 observation regime と合わせて、これらは CN12 として記載される三分法を構成する。

融合サブレジームは、日常的な「触れる」という動詞の幾何学的内実を 2 つに分けることで現れる区別の幾何学的内容である。指が水に触れるとき、指と水の W スレッド束は共通 W-stratum を占有するが、その螺旋巻数および internal phase は整列していない；両者の間に境界が形成され、この境界が我々が日常的に接触面として知覚するものの幾何学的源となる。これに対し、水と水が出会うとき、束は同じ巻数整列を共有しており、境界は形成されず、2 つの領域は単一の識別不能なスレッド束配置に融合する。日常的な「触れる」という動詞は前者のみを覆い、後者は融合サブレジームであり、反発の不在こそがその幾何学的シグネチャである。

融合サブレジームを独立に名付ける動機となる構造的帰結を 2 つ強調する。

**物質レベル結合は標準的な 2 粒子形では適用不能となる。** 物質レベルチャネルの双線型 W スレッド重なりカーネルは、2 参加者が幾何学的に区別される場合に V31 形式 (§81.3) を取る。融合サブレジームでは参加者は同じ巻数を共有し internal phase が整列している；両者を区別する W 軸観測量は存在しない (系 81.6)。標準物質レベル頂点が依拠する 2 粒子ラベル付けは、もはや配置に関する幾何学的事実ではなく座標規約となる。物質レベル結合は消失するわけではなく、 $A$  と  $B$  の間の境界寄与 (V31 contact regime が暗黙に仮定していたもの) を許容しない単一状態結合に融合する。Pauli 排他原理は特に、反発接触サブレジーム (境界形成によって参加者が幾何学的に区別される場合) では直接適用されるが、融合サブレジーム内では標準形式では適用不能となる。系 81.6 および後続の所見で詳細に述べられる通りである。

**重力結合は普遍的に保たれる (CN10 保存)。** 原理 81.1 の  $H_{\mu\nu}$  潮汐  $\Phi$ -変形チャネルは、双線型巻数重なりではなくブレン厚  $\Delta w$  によって源化されており、したがって同一 stratum 重なりが融合型か反発接触型かに影響されない。CN10 重力チャネル普遍性主張は、3 サブレジーム (融合・反発接触・観測) すべてに渡って改変なしに成立する。融合サブレジームは物質レベルチャネルのみを refine する；重力チャネルは refine されず、不変のまま運ばれる。CN12 はしたがって CN10 を保存する拡張であり、置換ではない。

反発接触サブレジームにおける境界反発の物質チャネル発現は、物質レベルにおける CN10/CN12 直交性の幾何学的源そのものである：反発接触サブレジームにおける物質レベル結合は巻数不一致を要し、反発は同一 stratum 重なり内における巻数不一致の物質チャネルシグネチャである。日常的な「固体に触れる」現象は、W スレッドレベルでのこのような反発接触事象の数多くの巨視的平均であり；日常的な「2 つの水領域が混ざる」現象は、同じレベルでの数多くの融合サブレジーム事象の巨視的平均である。CN12 三分

法はしたがって、CN10 の物質 / 重力直交性を改変することなく、日常的区別のブレーン内幾何学的内容を供給する。

### 81.3 物質レベル結合チャンネル

OCS 分類は、当初確立された通り、**物質レベル結合チャンネル** を支配する：電磁・強・核の各相互作用はすべて、W 軸振幅が同じ sinc カーネル（付録 B の  $\eta(\Delta\kappa)$  の式）で抑えられる双線型頂点を通して進行する。Contact regime ( $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$ ) ではこれらのチャンネルは完全に active である：同一 stratum スレッド重なりが直接的な  $\kappa$  共鳴を許容し、源への物質レベル back-action は抑制されない。Observation regime ( $|\Delta\kappa|L \gg 1$ ) ではこれらのチャンネルは抑制される：零モード成分（W 平均化されブレーン射影された成分）のみが残存し、実効的な物質レベル back-action は滑らかな零周波数残差まで縮減される。したがって、W-分離された 2 物体は互いを観測することは可能（零モードが情報を担う）だが、物質レベルで **直接触れ合う** ことはできない：物質レベル接触に必要な幾何学的要件は、共通 W-stratum の占有である。

これは口語的な描像の正式な再記述である：物質レベル接触には、2 つの参加者が同じ W 軸 stratum に存在する（W-stratum 重なり、 $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$ ）ことが必要であり、W-分離された参加者は互いに観測可能ではあっても、直接的な物質レベル back-action を交換することはできない。

### 81.4 重力結合チャンネル

質的に異なる相互作用チャンネルが、修正アインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} + \beta H_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu} \quad (240)$$

の  $H_{\mu\nu}$  補正項によって担われる（正式な導出は第 V 部（ラグランジアン）および拡張 GR 部）。重要な観察は、 $H_{\mu\nu}$  が双線型 W スレッド重なりから構築されているのではない、という点である： $H_{\mu\nu}$  はバルク誘導スケール場  $\Phi$  およびその微分から構築されており、 $\Phi$  はブレーン厚  $\Delta w$  それ自身によって形成される。 $\Phi$  はバルク射影幾何学を通して伝播し、ブレーンの全体的な W 軸プロファイル（個別の W スレッド巻数ではなく）によって源化されるため、 $H_{\mu\nu}$  が媒介する重力結合は、源と試験体の間の巻数整列を **要しない**。

具体的に：W-stratum で源  $A$  から分離された試験体  $B$ （すなわち  $|\Delta\kappa|L \gg 1$  で物質レベル接触が抑制されている状態）は、それでもなお  $A$  によって源化された潮汐  $\Phi$ -変形を経験する。ブレーン厚  $\Delta w$  は、W スレッド重なりが存在しなくても周囲のスケール場を変形させ、この  $\Phi$ -変形は W-stratum 整列に依存せずバルク射影幾何学を通して伝播する。上記の口語的言語で言えば：2 つの参加者が同じ W-stratum に存在せず物質レベルで直接触れ合うことができない場合でも、それらの W 軸存在によって誘起される空間変形は遠隔の重力相互作用を依然として許容する、ということである。

これが、我々が明確化したい構造的直交性の重力的発現である： $H_{\mu\nu}$  は contact / observation 両 regime に渡って **普遍的** に結合する。

### 81.5 直交性 statement (CN10)

上記の観察を以下のように定式化する。

**原理 81.1** (OCS 直交性). OCS regime 分類 (contact / observation、 $|\Delta\kappa|L - 1$  の符号で設定される) と、重力 / 物質レベル結合分類は、**独立な軸** である。具体的には：

1. **物質レベルチャンネル** (regime 依存) : OCS contact / observation 分類で支配される。EM・強・核相互作用を媒介する。Contact regime でのみ active ; observation regime では零モードへ縮減され抑制される。

2. **重力チャンネル** (regime 普遍) : 修正アインシュタイン方程式 (240) の  $H_{\mu\nu}$  項で支配される。潮汐  $\Phi$ -変形相互作用を媒介する。Contact / observation 両 regime で active であり、W-stratum 整列に依存せず、したがって物質レベル巻数保存にも依存しない。

**帰結。** ブレーン・スレッド接触の標準的な巻数整列要件は、重力相互作用の前提条件ではない。W-分離された 2 つの HBR 物体は、直接的な物質接触を交換できない場合でも、潮汐  $\Phi$ -変形を交換し続ける。HBR は、この精密な意味で、**1 スケール 2 チャンネル理論** である：単一の幾何学パラメータ ( $\Delta w$ , CN9) が、質的に異なる 2 つの結合モード (物質レベル regime 依存、重力 regime 普遍) を担う。

**原理 81.2** (OCS 三分法 (CN12) ). 原理 81.1 の物質レベルチャンネルは、より細かなブレーン内分類を許容する：同一 stratum 重なり ( $|\Delta\kappa| L \lesssim 1$ ) は整数巻数および internal-phase 整列によって 2 つの異なるサブレジームに分解され、V31 observation regime ( $|\Delta\kappa| L \gg 1$ ) と合わせて、相互排他的なサブレジームの三分法を構成する。

1. **融合サブレジーム (F)**。  $|\Delta\kappa| L \lesssim 1$ ,  $\Delta n = 0$ ,  $|\Delta\varphi| \lesssim \varphi_*$  (巻数一致かつ internal phase 整列)。2 つの W スレッド束の間に境界は形成されない；物質レベル結合は merged-state coupling であり、2 粒子ラベル付けは幾何学的事実ではなく座標規約である (系 81.6)。Pauli 排他原理はこのサブレジーム内では標準形式では適用不能となる；同種粒子識別不能性は公理的規定としてではなく幾何学的事実 (CN12) として現れる。

2. **反発接触サブレジーム (R)**。  $|\Delta\kappa| L \lesssim 1$  かつ  $\Delta n \neq 0$  または  $|\Delta\varphi| > \varphi_*$  (巻数または internal-phase 不一致)。境界が形成される；物質レベル結合は完全 back-action と W スレッド張力に源化された境界反発成分を伴う。反発接触サブレジームにおける物質レベル結合は巻数不一致を要する；反発は物質レベルにおける CN10/CN12 直交性の物質チャンネル発現である。

3. **観測サブレジーム (O)**。  $|\Delta\kappa| L \gg 1$ 。V31 observation regime：物質レベル結合は零モード成分に縮減され、整列データ ( $\Delta n, \Delta\varphi$ ) は無効化され、W 平均化されブレーン射影された残存結合のみが残る。

**帰結。** 原理 81.1 の OCS 直交性は改変なしに保存される： $H_{\mu\nu}$  の重力結合チャンネルは 3 サブレジームすべてに渡って普遍的に作用する (系 81.5)。HBR はしたがって、ブレーン内結合構造のレベルで、**1 スケール** ( $\Delta w$ , CN9)、**2 チャンネル** (物質 regime 依存、重力 regime 普遍、CN10)、**3 regime** (融合・反発接触・観測、CN12) の理論として特徴付けられる。CN12 は CN10 の物質レベルチャンネルのみを refine し、CN10 と CN9 を不変のまま残す。

## 81.6 ブレーン外側 / 内側に渡る対称性

原理 81.1 の直交性は、特定のブレーン側の人為的副産物ではない。これはブレーン外部内容 (ブレーン自体に組織化された物質と放射、従来の「外宇宙」文脈) とブレーン内部内容 (第 II 部の宇宙論的縮約を源化する W- 流入モード、内側「内宇宙」流入文脈) の両方で対称に成立する。両者の場合で、幾何学的機構は同じである：物質レベル結合は同一 stratum W スレッド重なりを要するが、重力結合はブレーン厚  $\Delta w$  によって源化される  $\Phi$ -変形を通して進行し、したがって源と試験体の間の W-stratum 整列に影響されない。

特に、ブレーン内部物質とバルク刻印 W-モード (第 II 部 §20 で議論される宇宙論的縮約に関連) の間の重力結合は、普遍チャンネルを通して媒介される：バルク刻印モードは、重力的影響を及ぼすために、ブレーン内部物質と物質レベル W-stratum を共有する必要



はない。これが、OCS 定理（元来はブレーン内部分類 statement）が物質レベル範囲を拡張する必要なくバルク刻印源へ自然に拡張される幾何学的理由である：OCS 分類は依然として物質レベル結合のみを支配し、バルク刻印重力影響は regime 普遍的な  $H_{\mu\nu}$  チャネルによって担われるのである。

## 81.7 反証可能性

原理 81.1 は、少なくとも以下の独立な方法で観測的に反証可能である。

1. **Regime 依存的な重力シグネチャ。**もし  $|\Delta\kappa|L \gg 1$  にある 2 物体間（observation regime）の精密な潮汐レンズまたは弱場計量測定が、同じブレーン水平距離での contact regime 予言と比較して重力結合の系統的抑制を検出した場合、CN10 は反証される。直交性主張は、測定された  $H_{\mu\nu}$  媒介潮汐影響が regime 独立であることを要求する。
2. **ブレーン両側に渡る  $H_{\mu\nu}$  普遍性。**もしブレーン内部物質とバルク刻印  $W$ -モード（内側源）の間の重力結合が、同じ実効距離での 2 つのブレーン内部源の間の重力結合から系統的に逸脱した場合、§81.6 の対称性主張は反証される。
3. **チャネル間比率テスト。**Contact regime で測定された物質レベルチャネルと重力チャネルの相対強度は基準比率を設定する。Observation regime で純粋に重力シグネチャから測定された同じ比率（物質レベルチャネルが抑制され重力チャネルのみが残存する状況）が、contact regime の重力結合強度を再現できない場合、CN10 は反証される。

これらのテストは独立に制約可能であるため、いずれか一つにおける違反は、CN9 や拡張 GR 形式論の同時的失敗を要求することなく、ここで提示された直交性構造を反証する。

## 81.8 CN12 反証可能性

OCS 三分法 (CN12) は、CN10 のもの (§81.7) に加えて、以下の反証可能なシナリオを許容する。上記の CN10 反証子が重力  $H_{\mu\nu}$  チャネルの regime 普遍性を probe するのに対し、以下の CN12 反証子は単一  $\Delta w$  スケール内の物質レベルチャネルの 三分法 構造を probe する。

**反証子 1：同種粒子識別不能性境界。**もし実験室実験—最も直接的には、2 つの同種粒子を制御された  $W$ -stratum 重なりへ持ち込める量子縮退温度近傍の極低温原子干渉計—が、CN12 三分法（定理 81.4）が予言するように  $|\Delta\kappa|L$  または  $|\Delta\varphi|$  に依存 **しない** ような、「完全に識別不能」と「かろうじて識別可能」の同種粒子振る舞いの間の鋭い境界を明らかにする場合、幾何学的三分法は反証される。具体的には、Pauli 排他または Bose–Einstein 統計が、それらの幾何学的再定式化（系 81.6）を幾何学的閾値で破る場合—すなわち、融合 regime 識別不能性から反発接触 regime 識別可能性への遷移が  $|\Delta n| = 0$ 、 $|\Delta\varphi| \lesssim \varphi_*$  基準に従わず、CN12 と無関係な実験室系量（質量・電荷・スピン）によって設定される閾値で発生する場合—CN12 三分法は失敗する。本シナリオは、根底のブレーン幾何学が予言する  $\Delta w$ -スケールクロスオーバー regime において観測的にアクセス可能であり、整列軸遷移は鋭い閾値ではなく緩やかな幾何学的クロスオーバーであることが期待される。

**反証子 2：regime 遷移を伴わない量子測定 collapse。** もし量子測定 collapse が、識別可能な OCS サブレジーム間の遷移を伴わずに発生する（すなわち、観測 regime  $|\Delta\kappa|L \gg 1$  の内部で純粋に collapse が発生し、介在する反発接触または融合相がない）と観測された場合、CN12 が提唱する collapse の幾何学的起源は失敗する。CN12 は collapse を、W-stratum 重なり ( $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$  物質レベルチャンネルが融合または反発接触整列に解決する幾何学的機構) によって源化される regime 遷移事象として読む。直接的な実験的 probe は、§81.1 の次元ゲート境界幾何学の精神において、測定対象の量子系と測定装置の間の W-stratum 重なりパラメータ  $|\Delta\kappa|L$  の高精度追跡を伴うであろう：contact regime を経由した先行する遷移なしに  $|\Delta\kappa|L \gg 1$  で発生する collapse 事象は CN12 読みを反証する。

**反証子 3：融合分率進化と整合しない BBN 存在度異常。** もし精密 BBN 存在度測定 ( $D/H$ ,  $Y_p$ ,  ${}^7\text{Li}/H$ ) が、融合分率指標（例：バリオン光子比勾配、freeze-out 積分に入る温度時間関係などの巻数分布プロキシ）と相関する標準 BBN からの系統的逸脱を明らかにするが、それが CN12 の融合から反発接触への遷移（V32 OCS-4 で第 XIII 部議論において展開される BBN 期読み）の幾何学的期待に **適合しない** 場合、CN12 宇宙論的拡張は反証される。CN12 の読みは、BBN 期 HBR 補正が三分法クロスオーバー（高温における融合分率が freeze-out 期において反発接触統計に道を譲る）を通して入ることを予言する；このクロスオーバーパターンを破る精密逸脱—例えば、誤った温度依存性を持つ系統的  $D/H$  異常—は、非幾何学的起源を示し、宇宙論的文脈において CN12 を反証する。

**反証子 4 (V33+ 候補)：sub- $\Delta w$  スケールでのチャンネル間比率テスト。** 融合サブレジームと反発接触サブレジーム間の物質チャンネル結合強度比は、原理的に、sub- $\Delta w$  長さスケールでの同一種（融合アクセス可能）対異種（反発接触のみ）衝突断面積を比較することで測定可能である。CN12 は鋭い非対称性を予言する：物質レベル結合は融合 regime (merged-state、境界なし、W スレッド張力障壁なし) では消失し、反発接触 regime (境界形成、完全 back-action) では有限である。この予言と整合しない測定チャンネル間比率—例えば、融合 regime での非消失物質結合、または反発接触 regime での消失物質結合—は CN12 を反証する。実装は HBR のブレーン厚スケールでの sub-mm 精度を要し、現在実験室実現可能性の縁にある（Open Problems § $\Delta w$  SI 決定、V33+ 延期）。

これら 4 つのシナリオは独立に制約可能であり、まとめて CN12 三分法構造の全体を probe する：反証子 1 は同種粒子幾何学的再定式化を、反証子 2 は量子測定読みを、反証子 3 は宇宙論的拡張を、反証子 4 はブレーン内結合比率を、それぞれテストする。これらのうちいずれか一つにおける違反は、CN9・CN10・拡張 GR 形式論の同時的失敗を要求することなく、CN12 三分法を反証する。

## 81.9 CN9 との関係および 1 スケール 2 チャンネル構造

CN9 (原理 20.1) は  $\Delta w$  を、力法則クロスオーバー（近距離  $1/r^4$ 、遠距離  $1/r^3$ ）と量子測定の OCS contact / observation 分類の両方を支配する単一幾何学スケールとして確立する。CN10 は直交性次元を加えることで描像を完成する：その単一  $\Delta w$  スケール内で、OCS contact / observation regime 区別は物質レベル結合チャンネルを支配するが、重力  $H_{\mu\nu}$  相互作用は regime 普遍であり、両 regime に渡って同じ  $\Delta w$  スケールを担う。要約すれば：

- **CN9**：「単一スケール  $\Delta w$ 」— 一つの幾何学パラメータが、近 / 遠 力法則と contact / observation 量子測定を統一する。

- **CN10**：「2 つの結合チャンネル」— その単一  $\Delta w$  スケール内で、物質レベル結合は regime 依存、重力結合は regime 普遍である。

#### 結果: CN10 OCS 直交性

観測–接触分離 regime (contact / observation、 $|\Delta\kappa|L$  分類) は、物質レベル結合チャンネル (EM・強・核) のみを支配する。修正アインシュタイン方程式  $G_{\mu\nu} + \beta H_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$  における  $H_{\mu\nu}$  項が担う重力結合チャンネルは、ブレン厚  $\Delta w$  によって源化される潮汐  $\Phi$ -変形を通して、両 regime に渡って **普遍的** に作用する。巻数整列 (物質レベル同一 stratum W スレッド重なり) は物質レベル接触には必要だが、重力相互作用には **不要** である。これはブレン両側 (ブレン外側 / 内側文脈) で対称に成立し、HBR を 1 スケール ( $\Delta w$ 、CN9) 2 チャンネル (物質 regime 依存、重力 regime 普遍、CN10) 理論とする。重力シグネチャを probe する HBR の試験は普遍チャンネルを測定し、OCS 量子測定は regime 制限された物質チャンネルを probe する。

#### 結果: CN12 OCS 三分法 + CN10 直交性

CN10 の物質レベルチャンネルは、より細かなブレン内分類を許容する (定義 81.3、定理 81.4)：同一 stratum 重なり ( $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$ ) は **融合** サブレジーム ( $\Delta n = 0$ 、 $|\Delta\varphi| \lesssim \varphi_*$ 、境界は形成されず、merged-state coupling) と **反発接触** サブレジーム ( $\Delta n \neq 0$  または  $|\Delta\varphi| > \varphi_*$ 、境界が形成され、W スレッド張力反発を伴う完全 back-action) に分解される；V31 observation regime ( $|\Delta\kappa|L \gg 1$ ) と合わせて、これらは相互排他的である。CN10 の重力結合チャンネル ( $H_{\mu\nu}$  潮汐  $\Phi$ -変形) は 3 サブレジームすべてに渡って普遍的に作用する (系 81.5)。3 サブレジームの物質レベル結合内容は regime 依存 (CN10 保存) であり、加えて同一 stratum 重なり内で巻数一致特異的 (CN12 refinement) である。HBR はしたがって、ブレン内結合構造のレベルで、**1 スケール** ( $\Delta w$ 、CN9)、**2 チャンネル** (物質 regime 依存、重力 regime 普遍、CN10)、**3 regime** (融合・反発接触・観測、CN12) の理論として特徴付けられる。Pauli 排除原理は反発接触サブレジーム (境界形成によって参加者が区別される場合) では適用され、融合サブレジーム (同種粒子識別不能性が幾何学的事実として現れる場合) では標準形式では適用不能となる (系 81.6)。

### 81.10 形式的三分法定理 (CN12 baseline)

§81.9–81.5 の CN10 結果は、同一 stratum 重なり (contact regime、 $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$ ) を単一の物質レベル regime として分類する。本節では、螺旋巻数整列および internal-phase 整列を contact regime 内のより細かな幾何学的判別子として認識することで、この regime を細分化する。この refinement は、contact を物理的に異なる 2 つのサブレジーム (**融合** (*fusion*) と **反発接触** (*repulsive contact*)) に分解し、V31 の **観測** (*observation*) regime と合わせて、任意の 2 体 OCS 相互作用の物質レベル内容を完全に特徴付ける **三分法** (*trichotomy*) を与える。重力結合チャンネルの CN10 普遍性は 3 サブレジームすべてに渡って保持される：本三分法は物質レベルチャンネルのみを refine し、原理 81.1 の重力チャンネルは不変のまま残す。

本サブ節は、形式的定義、三分法定理、および 2 つの系 (各 regime 結合強度表式と、同種粒子識別不能性の幾何学的再定式化) を提示する。3 サブレジームの完全な物理的叙述 (BBN 期および compact object core での読みを含む) は §81 の後続サブ節および第 XIII 部で展開される；本記述は形式的 baseline を供給する。

### 81.10.1 幾何学的データと厳密なサブレジーム定義

HBR 物体ペア  $A$  および  $B$  について、§81.1 から継承される関連 W 軸幾何学的データは以下から成る：

- W 運動量オフセット  $\Delta\kappa \equiv \kappa_B - \kappa_A$  および W 重なり長  $L \sim \Delta w$ 、ならびに無次元 OCS 判別子  $|\Delta\kappa| L$ 。
- 2 つの W スレッド束の整数螺旋巻数  $n_A, n_B \in \mathbb{Z}$ 、オフセット  $\Delta n \equiv n_B - n_A$ 。
- 2 つのスレッド束の internal phase  $\varphi_A, \varphi_B \in \mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z}$  (共通 W-stratum 内における螺旋巻きの相対的方向性)、オフセット  $\Delta\varphi \equiv \varphi_B - \varphi_A \pmod{2\pi}$ 。

本 refinement は、ブレン幾何学から継承される 2 つの自然な許容範囲を用いる：OCS スケール許容範囲  $|\Delta\kappa| L \lesssim 1$  (W-stratum 近接性、CN9)、およびブレン内整列許容範囲  $|\Delta n| = 0$  (巻数一致) と  $|\Delta\varphi| \lesssim \varphi_*$  (internal-phase 許容範囲  $\varphi_* = O(1)$  は W スレッド張力スケールで設定される)。  $\varphi_*$  の形式的な値は付録 B の境界状態整合条件によって固定され、上界は  $\pi$  である。

**定義 81.3** (OCS サブレジーム). 上記のデータ  $(\Delta\kappa, L, \Delta n, \Delta\varphi)$  と固定された許容範囲  $L \sim \Delta w$ 、 $\varphi_*$  のもとで、ペア  $(A, B)$  の幾何学的配置として、相互排他的な 3 つを定義する：

**(F) 融合サブレジーム (Fusion)。**

$$|\Delta\kappa| L \lesssim 1, \quad \Delta n = 0, \quad |\Delta\varphi| \lesssim \varphi_*.$$

2 つのスレッド束は共通 W-stratum を占有し、同じ螺旋巻数を共有し、internal phase が整列している。

**(R) 反発接触サブレジーム (Repulsive contact)。**

$$|\Delta\kappa| L \lesssim 1, \quad (\Delta n \neq 0 \text{ または } |\Delta\varphi| > \varphi_*).$$

2 つのスレッド束は共通 W-stratum を占有するが、その螺旋巻きが整列していない (巻数または internal phase が不一致)。

**(O) 観測サブレジーム (Observation)。**

$$|\Delta\kappa| L \gg 1.$$

2 つのスレッド束は異なる W-stratum を占有する (V31 の observation regime; W-stratum 重なりが存在しないため、巻数整列データ  $(\Delta n, \Delta\varphi)$  は無効化される)。

3 つの配置は OCS 位相空間内で網羅的かつ相互排他的であり、これは下記の三分法定理で確立される。

### 81.10.2 三分法定理

**定理 81.4** (OCS 三分法、CN12 baseline). 任意の HBR 物体ペア  $A, B$  が §81.10.1 の幾何学的データ  $(\Delta\kappa, L, \Delta n, \Delta\varphi)$  で特徴付けられるとき、その物質レベル相互作用配置は、定義 81.3 の 3 サブレジーム F、R、O のうち厳密に 1 つに属する。すなわち、OCS 位相空間  $\{(\Delta\kappa, L, \Delta n, \Delta\varphi)\}$  は分割

$$\mathcal{P}_{\text{OCS}} = \mathcal{P}_{\text{F}} \sqcup \mathcal{P}_{\text{R}} \sqcup \mathcal{P}_{\text{O}},$$

を、融合・反発接触・観測の 3 サブレジームへの分割として許容する。



証明の概略。OCS 判別子  $|\Delta\kappa|L$  は、同一 stratum 重なり ( $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$ ) と W-stratum 分離 ( $|\Delta\kappa|L \gg 1$ ) を分離する；後者は無条件で  $\mathcal{P}_O$  を定義する。同一 stratum 重なり内で、整数値の巻数オフセット  $\Delta n$  と modular な internal-phase オフセット  $|\Delta\varphi|$  は、整列条件  $\Delta n = 0$  かつ  $|\Delta\varphi| \lesssim \varphi_*$  が同時に成立するか ( $\mathcal{P}_F$  を定義)、いずれかの条件が破れるか ( $\mathcal{P}_R$  を定義) を共同で決定する。3 部分集合は構成上ペアワイズに素である。各許容範囲閾値の周りの幅  $\Delta w$  のクロスオーバー層の精密な扱いを含む形式的境界状態導出は、付録 B で与えられる；本概略は分割を固定する。□

### 81.10.3 各 regime 結合強度系 (CN10 普遍性保持)

**系 81.5** (3 サブレジームの結合内容). 定理 81.4 の三分法のもとで、ペア  $(A, B)$  の各サブレジームでの物質レベル結合内容は以下の通りである：

**融合 (F)**。物質レベル結合は merged-state coupling：双線型  $W$  スレッド重なりカーネルは  $A$  と  $B$  の間の境界寄与を許容せず、後相互作用状態は、単一の識別不能なスレッド束配置であることにより  $A \leftrightarrow B$  ラベル付け換えの下で対称（または反対称）である（下記系 81.6 を参照）。

**反発接触 (R)**。物質レベル結合は 境界反発を伴う完全 back-action：双線型  $W$  スレッド重なりカーネルは抑制されない ( $V31$  の *contact regime* と同様) が、巻数または *internal-phase* 不一致により  $A$  と  $B$  の間に境界が形成され、対応する  $W$  スレッド張力が物質レベル結合への反発成分に寄与する。境界反発の物質チャンネル発現は、物質レベルにおける  $CN10/CN12$  直交性の幾何学的源である：反発は別個の力ではなく、同一 stratum 重なり内における巻数不一致の張力チャンネルシグネチャである。

**観測 (O)**。物質レベル結合は 零モード成分 に縮減される：双線型  $W$  スレッド重なりカーネルは  $|\Delta\kappa|L \gg 1$  における *sinc* 包絡線で抑制され、 $V31$  *observation regime* と同様に、 $W$  平均化されブレーン射影された残存結合のみが残る。

3 サブレジームすべてにおいて、原理 81.1 の重力結合チャンネル ( $H_{\mu\nu}$  潮汐  $\Phi$ -変形チャンネル) は 普遍的 に作用する：ブレーン厚  $\Delta w$  によって源化される  $\Phi$ -変形は、巻数整列や  $W$ -stratum 重なりを必要としないため、 $CN10$  普遍性主張は本三分法に渡って改変なしに成立する。

本系は、 $CN12$  が  $CN10$  の物質レベル分類を 2 regime 描像 (contact / observation) から 3 regime 描像 (融合 / 反発接触 / 観測) へ refine する一方で、 $CN10$  の重力チャンネル普遍性を不変のまま残すことを確立する。本三分法はしたがって  $CN10$  を保存する拡張であり、置換ではない。

### 81.10.4 同種粒子識別不能性の幾何学的系

**系 81.6** (同種粒子識別不能性、幾何学的起源).  $(A, B)$  を定義 81.3 の融合サブレジーム  $\mathcal{P}_F$  にある  $HBR$  物体ペアとする。このとき、配置  $(A, B)$  を配置  $(B, A)$  から区別する観測可能な  $W$  軸幾何学データは存在しない：整数巻数は一致し ( $\Delta n = 0$ )、*internal phase* は整列し ( $|\Delta\varphi| \lesssim \varphi_*$ )、 $W$ -stratum は共通である ( $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$ )。したがって、ラベル付け  $A \mapsto 1, B \mapsto 2$  対  $A \mapsto 2, B \mapsto 1$  は、ペアに関する幾何学的事実ではなく座標規約である。後相互作用状態はしたがって、幾何学的に定義された第二粒子インデックスを持たない単一の *merged* スレッド束配置である。

*Pauli* 排他原理の再定式化。標準量子力学は同種粒子を公理的規定により識別不能として扱い、対称化公理およびフェルミ粒子・ボース粒子それぞれに対する Pauli/Bose–Einstein 統計（2 つのフェルミ粒子が同じ単一粒子状態を占有することを禁ずる Pauli 排他原理を含む）に至る。 $CN12$  三分法のもとで、フェルミ粒子状態の反対称化と Pauli 排他原理

は、**反発接触** サブレジームにおいて直接適用される：そこでは 系 81.5 の境界形成によって参加者は幾何学的に区別され、標準的な 2 粒子ラベル付けは幾何学的事実として残る。対照的に、**融合** サブレジームでは幾何学的に区別される第二粒子インデックスが存在せず、Pauli 排他原理は標準形式では適用不能となる；同種粒子識別不能性は、公理的規定としてではなく幾何学的事実 (CN12) として現れる。本幾何学的読みからのフェルミ粒子・ボース粒子統計力学の完全な導出は V33+ work の対象として残されており、本節では主張しない。

### 81.10.5 Cross-references および CN9・CN10・CN12 との関係

定理 81.4 および 系 81.5–81.6 は CN9 (原理 20.1) の単一スケール性を継承する：OCS 判別子  $|\Delta\kappa|L$  はブレン厚スケール  $\Delta w$  を用い、整列許容範囲  $\varphi_*$  は  $\Delta w$  を支配する同じ W スレッド張力幾何学によって固定されるブレン内の  $O(1)$  数である。本三分法はしたがって理論の 1 スケール性を保存する：HBR は CN9 の単一幾何学スケール  $\Delta w$  で特徴付けられ続ける。

本三分法は CN10 の重力チャンネル普遍性 (原理 81.1、系 81.5) を保存する： $H_{\mu\nu}$  チャンネルは  $\mathcal{P}_F$ 、 $\mathcal{P}_R$ 、 $\mathcal{P}_O$  に渡って同一に作用する。CN10 はチャンネルレベルでの主導的直交性 statement として残る；CN12 は物質レベルチャンネル内部構造のみを refine する。

V32 sprint sub-block OCS-3 の front/core\_novelties.tex の CN12 entry が、本三分法を CN9 および CN10 と並ぶ別途カタログ化された core novelty として記録する。CN9 (1 スケール)、CN10 (2 チャンネル)、CN12 (3 サブレジーム) が共に成立する状況下で、HBR はブレン内結合構造のレベルで **1 スケール 2 チャンネル 3 regime** 理論として特徴付けられる。

## 第 X 部（量子基盤）の結論

私たちは、ハイパーブレン相対性理論というレンズを通して、量子力学の完全な幾何学的基礎を提示した。主要な結果は以下の通りである：

1. **エネルギー**は W 軸の圧縮密度である： $E = \int \rho_W(w)dV$
2. **粒子と波の二重性**は、W 軸の螺旋を断面から観察することによって現れる
3. **パウリの排他原理**はトポロジカルな渦の干渉——「歯車モデル」——である
4. **不確定性原理**は次元射影による幾何学的な測定の限界である
5. **量子スピン**は W 軸に沿った螺旋の巻き数である
6. **マクロな剛性**は、 $10^{23}$  回の同時発的な渦の排他と  $\rho_W$  の圧縮飽和から生じる

この枠組みは、量子粒子 ( $w \ll 0$ ) から、触れられるマクロな物体 ( $w \approx 0$ )、全宇宙の構造 ( $w > 0$ ) に至るまで、すべてのスケールにまたがる**連続した幾何学的な架け橋**を提供する。

### 中心的な洞察:

「量子と古典の境界」というものは存在しない。宇宙は一つの連続した幾何学的構造——**W 軸に沿った螺旋の渦**——であり、私たちは  $w = 0$  の断面を通じてそれをサンプリングしている 3 次元の観察者である。

量子力学は全く神秘的ではない。それは単に**限られた視点から見た幾何学**に過ぎないのである。

目に見えない量子の世界と、触れられるマクロの世界は、  
別々の領域ではない。

それらは同じ一つの現実であり、  
異なる深度から観察されているだけなのである。

## Part XI

# 実験的予測と検証

## 82 反証可能性

### 82.1 HBR を反証するもの

以下の観測は HBR に対する強い反証となる：

#### 1. 暗黒物質粒子の直接検出

WIMP、アクシオン等が直接検出実験で明確に検出された場合、非バリオン物質の存在が確立され、「欠落した質量」の幾何学的解釈が弱体化する。

**現状：**数十年の探索後も確認された検出なし。排除限界は信号なしに引き締められている。

#### 2. $r_g$ - $R_{\text{disk}}$ 相関の違反

HBR は遷移半径  $r_g$  が可視ディスクスケール長  $R_{\text{disk}}$  と相関すると予測する。この相関の系統的違反は HBR の幾何学的基礎に疑問を投げかける。

**予測：**多様な銀河サンプルにわたり  $r_g \propto R_{\text{disk}}$ 、Spearman  $\rho > 0.7$ 。

#### 3. $\tanh$ プロファイルと矛盾する回転曲線

十分に測定された回転曲線の統計的に有意な割合が速度ノルム射影方程式と根本的に非適合な形状を示す場合、スケールレンズ機構の普遍性が否定される。

**現状：**SPARC 銀河の 81% が  $\chi^2_\nu < 2$  でフィット。失敗は擾乱/相互作用系に集中。

#### 4. 過剰質量を要する銀河スケールのレンズ効果

個々の銀河による強い重力レンズ効果がバリオン質量を系統的に超える全質量分布をプローブした場合。

#### 5. 幾何学的補正にもかかわらず三体の不安定性

**予測：**非階層的配置の三重星生存率は純粋ニュートン予測を  $\sim 10$ – $100$  倍上回るはずである。

#### 6. M87\*/Sgr A\* 明るさプロファイルにおける完全 BBP 飽和 $\Phi_{\text{min}}/\Phi_{\infty} = 1$ (Phase B-1 結果)

HBR の BBP 飽和コア像 (Part XVII) は、内部シャドウの明るさフロアが運動学的天井ではなく **部分飽和**  $\Phi_{\text{min}}/\Phi_{\infty} < 1$  によって設定されるという falsifier-grade 予言を行う。EHTC 公開 2017 年 visibility データに対する HBR 1 次元プロファイルの収束フォワードフィットは、 $n = 500$  重み付き case-bootstrap により 95 %CI で

$\Phi_{\min}/\Phi_{\infty} = 0.301^{+0.041}_{-0.029}$  (M87\*) と  $0.736^{+0.099}_{-0.070}$  (Sgr A\*) を回復した。両 CI は  $\Phi = 1$  を除外し、両ソース間で重ならない。同パイプライン Kerr クロスチェックなど後続測定でいずれかのソースの  $\Phi_{\min}/\Phi_{\infty}$  が運動学的天井と整合的と判明すれば、部分飽和解釈は反証される [81]。

## 82.2 反証可能性マトリクス

以下の表は HBR の 6 つの独立した反証チャンネルと、各チャンネルが拘束力をもつ運用精度を集約したものである。各行は「列 3 の観測量が列 4 の精度で測定され、列 5 の結果が得られれば、その行の HBR 予言は反証される」と読む。

Table 32: HBR の 6 つの独立観測チャンネル全体にわたる反証可能性マトリクス。信頼区間は引用された canonical artefacts の慣例に従う；「Phase B-1 LOCKED」は master commit chain（最終 bcb3db7：Letter-grade DE+NM converged +  $n = 500$  重み付き bootstrap）を指す。

チャンネル	HBR 予言	運用観測量	精度	反証シグネチャ
銀河回転	全半径で $V_{\infty}^2 \tanh(r/r_g)$	SPARC $\chi^2_{\nu} + r_g - R_{\text{disk}}$ 相関 Spearman $\rho$	$\chi^2_{\nu} < 2, \rho > 0.7$	クリーン回転曲線の $> 30\%$ が $\tanh$ で適合不可
EHT 内部影像	M87* と Sgr A* 両方で $\Phi_{\min}/\Phi_{\infty} < 1$ 、CI 非重複	EHT 振幅 visibility forward fit	95% bootstrap CI が $\Phi = 1$ を除外	ngEHT $5 \mu\text{as}$ 直接フロア測定が Kerr 0% と整合
NICER QPO	$7 M_{\odot}$ から $6.5 \times 10^9 M_{\odot}$ で $ \delta\nu/\nu  < 10^{-8}$	HFQPO 三重周波数中心値	NICER timing $\sim 10^{-3}$ 中心値精度 (Phase B-2)	文献相対論的歳差モデルフロア超えの質量依存 QPO offset
クラスターレンズ	W 軸射影が Bullet Cluster レンズ – ガスピーク offset を隠れた質量なしに収容	レンズ収束マップ vs. X 線ガスピーク	質量等価 $> 5\sigma$	W 軸射影と非整合な非バリオン成分が必要となる推定質量
CMB / 宇宙論	$H_0 = c/R_{\text{univ}}$ で $c_{\text{eff}}(z)$ 勾配が Hubble tension を解消	CMB 音響ピーク + 距離梯子	$1\sigma$ tension 解消	$c_{\text{eff}}(z)$ 勾配が Planck と SH0ES のそれぞれの誤差予算と両立しない
ラボ Born 則テスト	普遍 crossover スケール $\Delta w$ での原子干渉計位相ロック	原子雲干渉計位相分散	位相精度 $< 10^{-3} \text{ rad}$	計画 $\Delta w$ 値でショットノイズフロア超の $\Delta w$ 変調成分が検出されない

本表は意図的に、各行の反証シグネチャが HBR 固有の計装なしに単一実験コラボレー

ションが報告可能な形で構成されている：SPARC は  $\chi^2_\nu$  表を、EHT は振幅 visibility を、NICER は HFQPO 中心値事後分布を、CHIPS/SPT-3G は Hubble 定数サンプリングを、JWST はネイティブ 30 s カデンスでの IR Sgr A\* ライトカーブを、ラボ原子雲グループは位相分散をそれぞれ公開する。HBR の falsifier-grade 構造は、各個別チャンネルが互いに支え合うことなく単独で反証として十分である、という観察に立脚している。チャンネル 1（銀河回転）は論文 A 2026-04-30 LOCKED 状態で、チャンネル 2（EHT）は論文 B Phase B-1（2026-05-03、master commit bcb3db7）で、チャンネル 3（NICER）は論文 C/Phase B-2 作業計画（master/docs/plan\_phase\_b2.md）の主軸で、チャンネル 4–6 は準備中の論文 C/D/E に保留される。

## 82.3 HBR と代替フレームワークの対比

以下の表は、非バリオン粒子や特異な地平面に頼らずダークマター・ダークエネルギー・ブラックホール内部現象論を説明しようとする主要な代替フレームワークの中で、HBR を位置づけるものである。分類は各フレームワークが呼び出す物理機構（列 2）と各フレームワークが現状で *tension* なく適合する経験的領域（列 3–6）による。本対比について 3 点強調しておく：

(i) **HBR の競合的ニッチ。** HBR の特徴的位置は、SPARC 軸と EHT 軸での同時適合を、非バリオン粒子成分の導入なし、かつ MOND のクラスタースケール失敗モードなしに達成する点にある。Bullet Cluster 行は HBR にとって未解決の経験的テスト（論文 C 準備中）として残る；そこでの合格スコアは HBR をダークマター軸で「競合的」から「優先」に押し上げる。

(ii) **GR は対比行に入っていない。** GR 単独（CDM ハロなし）は銀河回転に適合しないため、上の行は太陽系からクラスタースケールまでの運用比較として「GR + CDM ハロ」を含める。HBR は GR + CDM ハロを単一の幾何学的枠組みに collapse させ、本来別個の粒子ダークマター部門を必要とするものを W 軸張力が供給する。

(iii) **Emergent Gravity との隣接性。** HBR の哲学は重力相互作用を基本ではなく派生現象として扱う点で Verlinde の Emergent Gravity に最も近い。機構は実質的に異なる—HBR は  $\Phi$  場射影の下で W 軸ブレーン張力から重力を導出し、Verlinde は de Sitter 弾性エントロピックフォースから導出—が、家族的類似性は一方の枠組みに精通した読者がもう一方に近づく助けとなるはずである。

## 83 観測的シグネチャー

### 83.1 宇宙機データ解析：ボイジャーとパイオニア異常

#### 83.1.1 パイオニア異常（歴史的）

パイオニア 10/11 号は、太陽中心距離 20–70 AU で  $a_P \approx (8.74 \pm 1.33) \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$  の説明のつかない太陽方向加速度を示した。

#### 83.1.2 HBR 予測：スケール積分効果

HBR では、太陽系を通過する宇宙機は太陽の質量エネルギー分布が作る W 軸勾配をサンプリングする：

$$a_{\text{HBR}}(r) = \frac{\partial}{\partial r} [c^2 \ln N(r)] \quad (241)$$

**検証可能なシグネチャー：**熱効果 ( $r^{-2}$  で減衰) とは異なり、HBR 予測は  $\beta$  で制御される固有の径方向プロファイルを持つ。

**予測：** $r \sim 100$  AU で  $a_{\text{residual}} \sim 10^{-11} - 10^{-10}$  m/s<sup>2</sup>。年間ベースラインでドップラー精度  $\lesssim 10^{-3}$  mm/s により検出可能。

## 83.2 SPARC を超える銀河回転の系統学

1. **超拡散銀河 (UDG)：**HBR はそのような系で  $r_g \ll R_{\text{disk}}$  を予測し、ほぼニュートンのような回転曲線を生む
2. **高表面輝度銀河：** $r_g \sim R_{\text{disk}}$  でより強い tanh 遷移
3. **矮小不規則銀河：**低  $V_\infty$  領域で  $V_\infty \propto M_{\text{bar}}^{1/4}$  スケーリングからの逸脱なし
4. **エッジオンスパイラル：**鉛直速度分散  $\sigma_z$  が W 軸張力効果をエンコード

## 83.3 W 深度構造からの CMB 異方性パターン

HBR では、最終散乱面からの光子は  $w(z = 1100)$  から  $w(z = 0)$  へ W 勾配を横断する。有効音響地平線は：

$$r_s^{\text{HBR}} = \int_0^{z_{\text{rec}}} \frac{c_s(z')}{H(z')} \cdot N(w(z')) dz' \quad (242)$$

**予測：** $N(w) > 1$  (高  $z$ ) なら音響地平線が伸長し、CMB ピークをより小角度スケール (より高い  $\ell$ ) へシフト。 $\Delta\ell/\ell \sim 1-3\%$  の系統的シフト。

## 83.4 渦力学の重力波シグネチャー

### 83.4.1 SMBH 合体 (LISA 帯域)

$m \sim 10^6 M_\odot$  (LISA 目標) の場合、 $S$  が質量とスケールすると：

$$r_{\text{vortex}} \sim 10^3 \text{ m} \sim 0.1 r_{\text{ISCO}} \quad (243)$$

**予測：**渦斥力が以下を生む可能性：

1.  $r \sim$  数  $r_{\text{ISCO}}$  でのインスパイラル遅延
2. GW 蓄積における位相シフト： $\Delta\Phi \sim \mathcal{O}(1)$  rad
3. 渦結合が残仏に持続する場合のリングダウンスpekトルの修正

**検証可能性：**LISA (2035 年頃打ち上げ) は  $\Delta\Phi \sim 10^{-2}$  rad の精度で SMBH 合体波形を測定する。

## 84 実験室テスト

### 84.1 精密重力測定と W 勾配

原子干渉計は  $\Delta g/g \sim 10^{-10}$  の精度で重力加速度を測定する。HBR は地球の W 勾配が  $g$  に高度依存の補正を生むと予測：

$$g(h) = g_{\text{Newton}}(h) \cdot \left[ 1 + \frac{\partial \ln N}{\partial r} \cdot h \right] \quad (244)$$

予測： $\Delta g/g \sim 10^{-7}(h/1 \text{ km})$ 。

### 84.2 カシミール効果と余剰次元結合

W 軸揺らぎが電磁真空モードに結合する場合、追加の力成分が現れる：

$$F_{\text{HBR}} \sim -\alpha_W \frac{\hbar c}{d^4} A \quad (245)$$

予測： $\alpha_W \gtrsim 0.01$  なら、 $d \sim 100 \text{ nm}$  での  $\sim 1\%$  精度のカシミール力測定で偏差が検出可能。

### 84.3 量子干渉と断面幾何学

HBR では波動-粒子二重性はらせん断面幾何学から生じる。異なる W 軸結合を持つ粒子は、固定された  $p_\perp$  でもわずかに異なるド・ブロイ波長を示すはずである。

**提案テスト：**同元素の同位体（例： $^{20}\text{Ne}$  vs  $^{22}\text{Ne}$ ）を使用。核スピンの違いにより異なる  $v_W$  結合を持つ可能性。

$v_W \sim 10^{-3}c$  の場合： $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-6}$ （現代の原子干渉計で検出可能）。

## 85 将来のミッションとサーベイ

### 85.1 深宇宙ミッション：「ハイパーブレーン・エクスプローラー」

W 軸効果の検出に最適化された専用宇宙機ミッション：

ミッションパラメータ：

- 軌跡： $v_\infty \sim 20 \text{ km/s}$  での太陽系からの双曲線脱出
- 目標距離：30 年のミッション寿命で  $> 200 \text{ AU}$
- 追跡精度：ドップラー  $< 10^{-4} \text{ mm/s}$ 、測距  $< 1 \text{ cm}$
- 機器：レーザートランスポンダ、原子時計アンサンブル、加速度計

予想信号： $r \sim 100 \text{ AU}$  で  $|a_{\text{HBR}}| \sim 10^{-11} \text{ m/s}^2$ 、10 年間で  $\Delta v \sim 1 \text{ cm/s}$ （検出可能）。

### 85.2 JWST 以降の高赤方偏移銀河サーベイ

HBR 特有のサーベイ戦略： $z = 10\text{--}15$  の銀河を対象に形態、恒星種族、キネマティクス、SMBH 質量を測定。

**HBR 予測：**成熟度指標は標準ルックバック時間ではなく  $c_{\text{eff}}(z)$  補正宇宙時間と相関するはずである。



## 85.3 精密位置天文学：ガイアとその先

W 軸張力は鉛直復元力を予測する：

$$F_z^{\text{tension}} = -\alpha_w z \quad (246)$$

予測： $|z| \sim 500$  pc の恒星は純バリオンディスクポテンシャルから  $\Delta\omega_z/\omega_z \sim 10^{-2}$  偏差する  $\omega_z$  を示すはずである。ガイアの数値精度  $\sim 1$  km/s で検出可能。

## 86 量子スケール予測

[V17 新セクション]

### 86.1 スピン-重力結合

予測: キラル重力効果

反対のスピン配向を持つ粒子は加速度差を経験する：

$$\frac{\Delta g}{g} \approx \frac{a_{\text{HBR}}}{g_{\text{Newton}}} \cdot \chi \sim 10^{-11} \quad (247)$$

偏極中性子干渉法（改良 COW 実験）で検証可能。

## 87 HBR 対時空の泡

[V17 新セクション]

### 87.1 根本的な区別

Table 34: HBR 対時空の泡理論

性質	時空の泡	HBR
空間構造	離散的（プランクスケール）	連続的 4D
光速	$c(E) = c_0(1 - E/E_P)^n$	$c_{\text{eff}}(z)$ （位置依存）
エネルギー分散	$\Delta t \propto E^n \times D$	$\Delta t = 0$
ローレンツ対称性	高 $E$ で破れる	保存
時間	基本的	創発的

### 87.2 観測的状況

現在の観測は連続的時空（HBR 互換）を支持する：

**GRB エネルギー分散：**Fermi-LAT の GRB 090510 観測がエネルギー依存遅延なし。

**像のぼやけ：**チャンドラ X 線観測が  $< 10^{-18}$  m スケールまでぼやけなし。

**結論：**観測は滑らかな時空を支持する。HBR の連続的 4D 幾何学が離散的泡よりも選好される。

## Part XII

# HBR vs GR —— 総括観測的対比

## 88 なぜGRではなくHBRか？ —— 総括観測的対比

注 88.1 (本節の立場と範囲). 本節は、「HBR は GR とどこが違うのか、またその違いはどのようにテストできるのか」という問いに自己完結的に答える参照表を提供する。HBR は GR の代替理論ではない。第 0 部 §5 で述べた SR↔GR 比喩に倣えば、SR が等速慣性系の局所記述であり、GR がそこに動的背景幾何を追加したものであるように、HBR は 3 次元ブレーンを 4 次元バルク  $\mathbb{E}^4$  に埋め込むことで GR の次の層を展開したものである。太陽系・パルサー等の弱場テストはすべて GR と同一に満たされる。差異は強場・近地平・情報保持の 3 レジームにのみ現れる。詳細な導出は第 18 部 §163.3 を参照。

以下の表は第 18 部 §163.3 の 4 行対比表を 9 行のマスター参照表に拡張したものである。各列は (1) 観点、(2) GR 予言、(3) HBR 再解釈、(4) 現状の観測状況 を示す。

Table 35: HBR と GR の総括観測的対比 (9 観点)。  $A = 2GM/c^2$  (シュワルツシルト半径パラメータ)、  $B$  は  $B/r^3$  結合係数、  $\Phi^2(r)$  はプログレスファクター、  $r_s$  はシュワルツシルト半径。「活動天体」 = ファウンテン活動状態のコンパクト天体；「枯渇天体」 = ファウンテン枯渇状態 (BBH 合体前駆天体)。認識論的位置付けは第 0 部 §5、導出詳細は第 18 部 §163.3 を参照。

観点	GR 予言	HBR 再解釈	現状・検証手段
1. 中心特異点	$r = 0$ でクレッチマンズカラー発散；全測地線が終端	$\Phi^2(r) > 0 \forall r > 0$ ；斥力 $F_{\text{repel}} \sim d^{-4}$ が $r = 0$ への崩壊を防ぐ	X タイミング (NICER, IXPE)；ISCO 近傍準周期振動
2. 事象地平	$g_{tt} = 0$ at $r_s = 2GM/c^2$ ；一方向因果境界が形成	判別式条件 $C^3 > (27/4)A^2B$ で地平未形成；コンパクト表面は $r_{\text{ph}} \sim 1.5r_s$	EHT 影サイズ (M87*, Sgr A*；現状: 整合)
3. 情報パラドックス	ユニタリ性破れ (Hawking 1975)；情報は地平の背後に喪失	地平未形成 $\Rightarrow$ 逆説なし；情報は $W^+$ 流束 $E_{W^+}$ として保存	GW 残響エコー探索 (LVK O4+, ET/CE；現状未検出)
4. EHT 影半径	$b_{\text{sh}}/r_s = 3\sqrt{3}/2 \approx 2.598$ (シュワルツシルト)	HBR: 光子球半径 $r_{\text{ph}}/r_s \in [1.43, 1.54]$ ；影シフト $\lesssim 5\%$	現行 EHT: 両立；ngEHT / 次世代 VLBI で $\sim 1\%$ 分解能到達
5. BBH 合体の電磁放射	真空インスパイラル $\Rightarrow$ EM 放射なし (標準経路では)	ブレーン反動 $\Rightarrow$ GW ピーク後 $\mathcal{O}(0.1\text{--}1)$ s に $\gamma$ 線・硬 X 線トランジェント予測	Fermi GBM: GW150914 と同時に $2.9\sigma$ トランジェント [68]；LVK O4+ + GECAM
6. 質量エネルギー収支	重力波として放射；GW150914 で $\Delta m \approx 3 M_\odot c^2$	$W^+$ 方向散逸 $\Delta E_{W^+}$ として解釈；GW 振幅はブレーン歪みを反映し、質量損失の直接尺度ではない	LVK 測定値 $\Delta m \approx 3 M_\odot c^2$ ；HBR と GR は数値的に一致
7. 特異点定理	Penrose–Hawking 定理：一般的なエネルギー条件下で特異点形成は不可避	$W$ 軸斥力 $F_{\text{repel}} \sim d^{-4}$ がブレーン上の強エネルギー条件を破り定理を回避	理論的；現状では直接的な観測的識別子なし
8. 弱場極限 (PPN)	全 PPN 係数が太陽系テストと一致	$B/r^3$ 補正： $ \delta\Psi_B  < 0.1$ rad (GW170817 束縛、Yamamoto 72)；PPN $\gamma, \beta$ は不変	GW 位相測定 (GW170817: $B/A < 0.1$ )；GR と整合
9. 将来の検出可能性	GW 波形のみ；3.5PN 後ニュートン位相	ET/CE 感度で $B/A \sim 10^{-5}$ ；BNS 位相残差 $ \delta\Psi_{\text{BNS}}  \approx 0.056$ rad；BBH 残差 $\rightarrow 0$ (枯渇天体)	次世代検出器 (ET, CE)；HBR は $B/A \gtrsim 10^{-5}$ で反証可能

**3つの観測窓の要約。** 9行の対比は、HBRとGRの予言が乖離する3つの独立した観測窓に集約される。

1. **近地平・強場レジーム** (行1~4)：中心正則性、地平非形成、影半径シフト。現行EHT/NICERデータは両理論と整合；次世代ベースライン (ngEHT、IXPE延長ミッション) が影半径シフトを $\lesssim 1\%$ 精度で制約する。
2. **合体電磁カウンターパート** (行5)：GW150914と同時の $2.9\sigma$  Fermi GBM トランジェントはHBRブレイン反動で予測される一方、GRでは降着円盤なし環境での説明が困難。LVK O4+ + GECAM/HERMESの同時観測が決定的テストとなる。
3. **GW位相残差** (行6、8~9)：BNS事象では $B/A$ が有限に残り、 $f^{-7/3}$ デフェイジング $|\delta\Psi_{\text{BNS}}| \approx 0.056$  radがET/CEで $B/A \sim 10^{-5}$ 感度で検出可能；BBH事象では $B/A \rightarrow 0$  (枯渇ファウンテン) となり位相のみではGRと区別不能。

同じ対比の短縮版 (強場コンパクト天体に限定した4行) は第18部表57に収録している。第0部§5はHBRをSR→GR拡張に倣った次段階として認識論的に位置付けている。

## Part XIII

# 拡張一般相対性理論アーキテクチャ — 作用原理、場の方程式、GR 極限

注 88.2 (本部の立場と範囲). 第XII部 (§XII) ではHBRとGRの観測的対比を行毎に提示した。本部はその位置付けを形式的レベルで深化させる。擁護される命題は狭く明確である：

HBRは**拡張GR**である — アインシュタイン・ヒルベルト作用とアインシュタイン方程式をその力学的内容の一部として継承する — が、これに少数の存在論的コミットメント (眠れる潜在性、収縮するブレイン、 $W^-$ 方向ファウンテン流入、scale-lens、OCS定理) を追加することで、一般的な修正重力提案からHBRを**区別する**。

本部前半 (§89–§92、本ファイル、V31 Phase 2) では作用原理を確立し、修正アインシュタイン方程式を導出し、修正ビアンキ恒等式を提示し、GRを回復する3つの独立な規制を同定する。後半 (§93以降、V31 Phase 3) では宇宙論的還元を扱い、HBRを $f(R)$ 、プランク・ディッケ、TeV $S$ 、DGPと並べ、重力波位相残差を定量的に導出し、HBRを純粋に場の理論的な拡張GRの読み方を超えて位置付ける存在論的コミットメントを露わにする。

## 89 拡張GRの作用原理

### 89.1 3ピース分解

HBR作用は自然に3ピースに分解される：

$$S_{\text{HBR}} = S_{\text{EH}}[g_{\mu\nu}] + S_{W\text{-axis}}[\Phi, w_{\text{brane}}] + S_{\text{bulk}}[\Phi, X^A]. \quad (248)$$

これら3ピースは3つの幾何学的データ構造に対応する：

- $S_{\text{EH}}$  は誘導された 3-ブレン幾何学  $g_{\mu\nu}$  上の標準的なアインシュタイン・ヒルベルト作用：

$$S_{\text{EH}}[g_{\mu\nu}] = \frac{1}{16\pi G} \int_{\Sigma} R[g] \sqrt{-g} d^4x, \quad (249)$$

ここで  $R[g]$  はブレン固有のリッチスカラー、 $G$  は定理 1 の還元 (§41、第 V 部； $G = g_0/(4\pi Z_{\Phi})$ ) で同定されるニュートン定数である。

- $S_{W\text{-axis}}$  はブレンの  $W$  軸方向の等速並進を符号化する。単一のブレン履歴  $w_{\text{brane}}(t)$  に適切な**有効バルク射影**では、これは

$$S_{\text{eff}} = -m \int \Phi(r) dw, \quad (250)$$

に還元され、これは第 V–VI 部で広く使用される標準的な 1 次元射影である。(250) はブレン上の**有効 1 次元バルク射影**であって、完全な作用ではないことを強調する；完全な作用は以下のバルクピースに存在する。

- $S_{\text{bulk}}$  は完全なバルク作用、正準 HBR (V30) 形で

$$S_{\text{bulk}}[\Phi, X^A] = -m \int \Phi(r) \sqrt{\delta_{AB} \dot{X}^A \dot{X}^B} d\lambda, \quad (251)$$

ここで  $A, B \in \{1, 2, 3, W\}$  は 4 つのユークリッド・バルク軸を渡り、 $X^A(\lambda)$  は世界線埋め込み、 $\delta_{AB}$  はユークリッド・バルク計量である。 $(\dot{X}^1)^2 + (\dot{X}^2)^2 + (\dot{X}^3)^2 = 0$  (等速並進、ブレン内部運動なし) の下で世界線を  $w$  でパラメータ化することで、(250) が (251) から回復される。

## 89.2 $c$ の役割：経験的 Dirichlet 条件、導出されない

作用原理 (248) の決定的特徴は、速度パラメータ  $c$  が作用の変分により決定されるパラメータとして**現れない**ことである。代わりに  $c$  はゲート境界  $\Sigma$  におけるバルク流入率を固定する Dirichlet 境界条件を通して**経験的不変量**として入る：

$$\dot{X}^W|_{\Sigma} = c. \quad (252)$$

これは第 I 部 (3) で基盤として述べた等速並進条件と同じである。(248) の変分は (252) を条件として HBR 場の方程式を生成する； $c$  の数値は次に直接観測 (同等的に、第 I 部 (5) の宇宙論的スケールファクター正規化) で固定される。HBR は作用から  $c$  を導出することを**試みず**、「 $c$  は作用から創発する」と示唆する任意のフレーミングは「(252) が課された時、作用原理は経験的  $c$  と整合する」の省略形として読まれるべきである。

## 89.3 Lovelock 型作用選択との比較

分解 (248) は、 $S_{\text{EH}}$  がより高次の曲率スカラー  $f(R)$  または Gauss–Bonnet 結合に置き換えられる Lovelock 拡張族の修正重力提案とは異なり、ブレン作用  $S_{\text{EH}}$  がブレン上で**変更されない**点で異なる。GR からの偏差は  $\Phi$  を通してブレンへ供給されるバルクピース  $S_{\text{bulk}}$  全体から発生する。この幾何学的起源は、ブレン上の単一テンソル  $H_{\mu\nu}$  にバルク射影修正全体が符号化されることを §90 で見ることになる。

## 90 修正アインシュタイン方程式

### 90.1 変分と場の方程式

ブレーン計量  $g_{\mu\nu}$  に関する作用 (248) の変分は HBR 修正アインシュタイン方程式を与える：

$$\boxed{G_{\mu\nu} + \beta H_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}} \quad (253)$$

3 ピースは作用の 3 ピースに対応する：

- $G_{\mu\nu}$  はブレーン計量  $g_{\mu\nu}$  のアインシュタインテンソルで、 $S_{\text{EH}}$  を標準的に変分したもの；
- $T_{\mu\nu}$  はブレーン物質セクターの応力エネルギーテンソルで、 $g_{\mu\nu}$  に結合した変分源として定義される；
- $\beta H_{\mu\nu}$  は  $S_{\text{bulk}}$  のブレーンへの射影を集めたもので、GR に対し HBR が導入する新たな構造的成分である。

無次元結合  $\beta$  は HBR 弱場展開  $\Phi = 1 + \Phi_N/c^2 + \beta \Phi_N^2/c^4$  および PPN 計量  $g_{00} = -1 + 2U - 2\beta U^2$  に現れる同じパラメータであり、Cassini 制約  $|\beta - 1| < 10^{-4}$  (第 XI 部；正準 V30 LOCKED 値) に使用される。

### 90.2 $H_{\mu\nu}$ の明示形

バルク射影  $H_{\mu\nu}$  はブレーンに制限したバルク作用の変分微分として定義される：

$$H_{\mu\nu} \equiv \frac{2}{\sqrt{-g}} \left. \frac{\delta S_{\text{bulk}}^{\text{proj}}}{\delta g^{\mu\nu}} \right|_{\Sigma}, \quad (254)$$

ここで上付き “proj” は  $\Sigma = \{w = w_{\text{brane}}(t)\}$  でのブレーン射影制限を表す。正準作用 (251) に対して (254) を評価し、弱場  $\Phi = 1 + \Phi_N/c^2 + \mathcal{O}(c^{-4})$  展開を用いると、太陽系 PPN テストに必要な主要次数で

$$H_{\mu\nu} = \nabla_{\mu} \Phi_N \nabla_{\nu} \Phi_N - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} (\nabla \Phi_N)^2 + \mathcal{O}(c^{-2}). \quad (255)$$

方程式 (255) は (253) に代入することで、弱場計量における  $\beta \Phi_N^2/c^4$  項を再現する。強場領域 (地平線近傍  $\Phi$  飽和、ファウンテン構成) に関連する  $H_{\mu\nu}$  の高次拡張は、コンパクト天体については第 VII 部、宇宙論については §93 (Phase 3) で扱われる。拡張 GR 位置付けに対する決定的構造点は、 $H_{\mu\nu}$  がブレーン幾何学に対してバルク射影スケール場  $\Phi$  を介してのみ依存し、物質セクター変数を介して依存しないことである。

### 90.3 $H_{\mu\nu}$ の OCS regime 横断普遍性 (CN10)

**$H_{\mu\nu}$  の OCS regime 横断普遍性。** (254)–(255) で導出した HBR 補正テンソル  $H_{\mu\nu}$  は、構成上 OCS 定理 (第 X 部 / CN9) の contact / observation 分類から独立である。具体的には  $H_{\mu\nu}$  はブレーン厚  $\Delta w$  により形成され  $W$  軸を伝播する  $\Phi$  を通してバルク幾何学にのみ依存し、源と試験体の物質レベル巻数整列を考慮しない。これは CN10 (§CN10.; OCS-Orthogonality) の重力的発現である： $H_{\mu\nu}$  は contact ( $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$ ) と observation ( $|\Delta\kappa|L \gg 1$ ) 両 regime で普遍的に結合する。(253) の右辺  $T_{\mu\nu}$  は物質結合チャンネルとし



て regime 依存 (observation regime では物質レベル相互作用が抑制される) であるが、左辺  $G_{\mu\nu} + \beta H_{\mu\nu}$  の重力チャネルは regime 普遍である。この 2 チャネル構造は CN10 を場の方程式レベルで実現する。この直交性のブレーン内部での発現については、第 X 部 (§81.4、原理 81.1) を参照。

## 90.4 GR 物質結合の回復

$\beta \rightarrow 0$  の極限で、方程式 (253) は標準アインシュタイン方程式  $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$  に還元され、HBR-GR の差は全て  $\beta H_{\mu\nu}$  寄与に存在する。Cassini 束縛  $|\beta - 1| < 10^{-4}$  は HBR を  $\beta = 0$  極限へ駆動しない；むしろ太陽系 PPN regime での  $\Phi$  の形式を、計量から抽出される事後ニュートン有効  $\beta$  が GR の単位値に  $10^4$  の 1 部分まで一致するよう制約する。この制約の定量的解析は第 XI 部で与えられる；ここでの形式的要点は、GR は HBR の解空間内に (253) の  $\beta \rightarrow 0$  退化として位置し、HBR が論証する必要がある予測ではないことである。

## 91 ビアンキ型保存則と $W$ 軸エネルギー流入

### 91.1 修正された縮約ビアンキ恒等式

GR では縮約された第 2 ビアンキ恒等式は  $\nabla^\mu G_{\mu\nu} = 0$  を与え、これを  $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$  と組み合わせると物質保存則  $\nabla^\mu T_{\mu\nu} = 0$  を生む。HBR では対応する恒等式は

$$\nabla^\mu (G_{\mu\nu} + \beta H_{\mu\nu}) = 0, \quad (256)$$

となる。これは (253) の変分起源の構造的帰結として成立する：左辺は  $g_{\mu\nu}$  に関する  $S_{\text{HBR}}$  の勾配の発散であり、恒等的に消える。(256) を (253) と組み合わせると、修正された物質保存則を得る：

$$\nabla^\mu T_{\mu\nu} = \frac{\beta}{8\pi G} \nabla^\mu H_{\mu\nu}. \quad (257)$$

方程式 (257) は、ブレーン固有の物質保存が自動でないことを述べている；バルク射影  $H_{\mu\nu}$  はその発散を通して一般に 4 元運動量をブレーンへ輸送する。

### 91.2 静的構成でのブレーン固有保存

ブレーン上でバルク射影スケール場  $\Phi$  が時間独立である静的または定常構成では、発散  $\nabla^\mu H_{\mu\nu}$  は (255) から直接計算により消え、ブレーン固有の物質保存  $\nabla^\mu T_{\mu\nu} = 0$  が回復される。これが太陽系テスト、中性子星平衡構成、その他の準定常問題が異常な非保存を示さない理由である：HBR の GR からの偏差は  $H_{\mu\nu}$  媒介結合に存在するが、バルク射影が静的な regime では標準保存則を破らない。

### 91.3 宇宙論的流入と $W$ 軸源

時間依存の宇宙論的構成では、 $W$  軸 Dirichlet 条件 (252) がブレーン上で非零の  $\dot{\Phi}$  を駆動し、発散  $\nabla^\mu H_{\mu\nu}$  はもはや消えない。ブレーン射影された寄与は物質セクターの源項として作用する：

$$\nabla^\mu T_{\mu\nu} = \mathcal{S}_\nu^{W\text{-inflow}}, \quad \mathcal{S}_\nu^{W\text{-inflow}} \equiv \frac{\beta}{8\pi G} \nabla^\mu H_{\mu\nu}, \quad (258)$$



ここで  $\mathcal{S}_\nu^{W\text{-inflow}}$  は  $\Sigma$  でのバルク流入流束のブレン射影トレースである。第 I 部の収縮ブレン /  $W^-$  ファウンテン存在論における解釈は直接的である：ゲート境界を通したバルク流入は 4 元運動量をブレン上に堆積させ、修正保存則 (258) はこの事実の数学的に明快な表現である。宇宙論的帰結（修正フリードマン方程式、 $f(w)$  アンザッツからの  $H_0(z)$  プロファイル）は §93 (Phase 3) および第 VIII 部で詳細に展開される。

## 91.4 ブレンワールド・シナリオとの比較

(258) の構造形は、ブレンが高次元バルクに埋め込まれ、射影効果がブレン物質保存の右辺に現れるブレンワールド宇宙論 (Randall–Sundrum、DGP 型モデル) に現れる修正保存則と平行する。HBR 版はこれらシナリオと 2 点で異なる。第一に、バルクは Lorentzian ではなくユークリッド (4 次元ユークリッド符号数) である。第二に、ブレン運動は経験的 Dirichlet 条件 (252) ( $\dot{X}^W|_\Sigma = c$ ,  $W^-$  方向の等速並進) により固定され、作用変分により動力学的に決定されない。結果として得られる  $H_{\mu\nu}$  は、第 XI 部および §94 (Phase 3) で探究される独自の観測的シグネチャを持つ。

## 92 GR 極限：3 つの独立した規制

### 92.1 3 つの規制の表明

GR は 3 つの独立した規制を通して HBR 場の方程式 (253) から回復される。各規制は HBR–GR 偏差の異なるピースに作用する：

1. **結合規制。**  $\beta \rightarrow 0$  は (253) からバルク射影  $\beta H_{\mu\nu}$  を除去し、標準アインシュタイン方程式  $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$  を残す。
2. **プロファイル規制。**  $f(w) \rightarrow \text{const.}$  は宇宙論的還元 (第 I 部 §11.1、第 VIII 部) で呼び出されるバルク  $W$ -stratum 応答を平坦化し、 $H_0(z)$  は定数となり、宇宙論的観測量は scale-lens 補正の無い標準  $\Lambda$ CDM 様モデルに崩壊する。
3. **Regime 規制。** OCS contact regime  $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$  は定理 1 (§41、第 V 部; LOCKED) を通してニュートン極限を回復する。場のラグランジアン of 零モードは 3 次元ポアソン方程式  $\nabla^2\Phi_N = -4\pi G\rho$  に  $G = g_0/(4\pi Z_\Phi)$  で還元される。

各規制は他の 2 つから独立である：それらは HBR 構造の異なるピース (結合強度、バルクプロファイル、OCS regime) に適用され、いずれか一つを単独で適用することで対応するサブシステムの GR 互換還元を得ることができる。

### 92.2 規制 1： $\beta \rightarrow 0$ (結合)

$\beta \rightarrow 0$  の極限で、方程式 (253) は標準アインシュタイン方程式に還元される。Cassini PPN 束縛  $|\beta - 1| < 10^{-4}$  は、関連する太陽系 PPN 係数が単位値から  $10^4$  の 1 部分以内で観測されることを示す；これは HBR の  $H_{\mu\nu}$  が太陽系異常を生まないという経験的保証である。Cassini 束縛は HBR を  $\beta = 0$  極限に制約しない；むしろ  $H_{\mu\nu}$  の強場構造を弱場で GR を模倣するよう制約する。第 XI 部および §95 (Phase 3) で議論される強場偏差 (コンパクト天体内部影、リングダウンスペクトル、重力波位相残差) は Cassini 束縛により抑制されない。

## 92.3 規制 2 : $f(w) \rightarrow \text{const.}$ (プロフィール)

$\Lambda$ CDM からの HBR 宇宙論的偏差は、第 I 部 (10)–(11) で導入された  $W$ -stratum 応答関数  $f(w)$  に符号化されている。 $f(w)$  が定数で置き換えられる極限では、 $H_0$  の観測される  $z$  依存を生む scale-lens 射影は単一レートに崩壊し、§11.1.3 の  $\Omega_\Lambda \approx 0.7$  導出は  $\Lambda$ CDM のように自由入力パラメータに崩壊する。この規制は  $\beta$  や OCS 定理を触る必要がない；HBR 宇宙論の  $W$ -stratum 内容を  $H_{\mu\nu}$  媒介の弱場偏差および物質結合構造から分離する。詳細な宇宙論的還元は §93 (Phase 3) で展開される。

## 92.4 規制 3 : OCS contact regime $\rightarrow$ ニュートン極限 (定理 1)

$W$ -スレッド重なりが密な contact regime  $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$  では、HBR 場のラグランジアンは零モード還元を許し、その明示的内容は第 V 部 §41 (LOCKED) の定理 1 である：場の方程式  $\delta S/\delta\Phi = 0$  を  $w$ -様モードに射影すると 3 次元ポアソン方程式

$$\nabla^2\Phi_N(\mathbf{x}) = -4\pi G\rho(\mathbf{x}), \quad G = \frac{g_0}{4\pi Z_\Phi},$$

を生み、HBR 内で第一原理からニュートン重力を回復する。この規制は  $\beta$  および  $f(w)$  から独立である：ブレーン固有のラグランジアンレベルで作用し、HBR 作用パラメータでニュートン定数を固定する。定理 1 が適用される運動学的 regime は第 X 部 (OCS 定理および CN9、 $\Delta w$  を普遍的クロスオーバー・スケールとして、§20) で同定される。

## 92.5 3 つの直交極限

3 つの規制は HBR が (GR の異なる側面へ) 還元される 3 つの直交方向を定義する：

- 規制 1 ( $\beta$ ) は場の方程式の事後ニュートン偏差を崩壊させる。
- 規制 2 ( $f(w)$ ) は宇宙論的 scale-lens 偏差を崩壊させる。
- 規制 3 (OCS contact regime) はブレーン・ラグランジアンを定理 1 を通してニュートン極限へ崩壊させる。

各規制は他から独立であり、単独で適用可能である。これらは合わせて HBR を **3 つの直交軸に沿った拡張**  $GR$  として特徴付ける：事後ニュートン・セクター ( $\beta$ )、宇宙論セクター ( $f(w)$ )、零モード運動学的セクター (OCS regime)。一般的修正重力提案は通常 1 つのそうした規制を導入する (例えば  $f(R)$  重力は単一の  $f(R) \rightarrow R$  崩壊を導入する) が、HBR は 3 つを持つ；これは HBR 形式が regime 制限された観測テストにおいて GR に近い構造的理由の一つである。

# 93 宇宙論的還元：HBR フリードマン類似

## 93.1 還元戦略

HBR の宇宙論セクターは第 I 部に関連するが異なる二つの形で現れる。第一は第 I 部 §11 の運動学的 *scale-lens* スケッチで、 $-W$  方向のブレーンの等速並進とバルク・インプリント・スケール関数  $f(w)$  から見かけのハッブルパラメータ  $H(\tau)$  を導出する。第二は第 I 部 §11.1 の経験的  $f(w)$  **アンザッツ**で、SH0ES + Planck 二点ハッブル・フィットを具体的なプロフィールに符号化する。本節はこの両者を、修正アインシュタイン方程式

(253) を FLRW 様ブレーンパッチへ宇宙論的射影したものとして読み、結果として得られる HBR フリードマン類似を提示する。戦略は拡張 GR 理論にとって標準的なものである：均質等方ブレーン幾何上で場の方程式を書き、フリードマン型拘束を同定し、バルク射影テンソル  $\beta H_{\mu\nu}$  が運ぶ修正を読み取る。

### 93.2 ブレーン上での FLRW 射影

ブレーン固有の FLRW 線素を、スケールファクター  $a(\tau)$  により

$$ds_{\Sigma}^2 = -d\tau^2 + a(\tau)^2 (dx^2 + dy^2 + dz^2), \quad (259)$$

と採用し、 $a(\tau)$  を第 I 部 (5) のブレーン内部見かけのスケールファクターと同定する：

$$a(\tau) = \frac{1}{R_0 f(w_0 - v_{\text{brane}} \tau)}. \quad (260)$$

方程式 (260) は第 I 部 §11 の運動学的内容を場の理論的還元埋め込む：ブレーン並進 (3) は等速のままであり、(259) の見かけの膨張は  $f(w)$  を通した scale-lens 射影である。

### 93.3 フリードマン拘束と $H_{\mu\nu}$ 射影

(259) を修正アインシュタイン方程式 (253) に代入することで、HBR 宇宙論フリードマン類似が生まれる。アインシュタインテンソル  $G_{\mu\nu}$  は標準的な

$$G^0_0|_{\text{FLRW}} = -3H^2, \quad H \equiv \frac{\dot{a}}{a}, \quad (261)$$

を寄与する一方、同じ FLRW 幾何上で評価したバルク射影  $H_{\mu\nu}$  は、明示的弱場形 (255) を  $\Phi$  が時間依存かつ空間的均質である宇宙論的 regime へ拡張すると、 $H$  の 4 次項を寄与する：

$$\beta H^0_0|_{\text{FLRW}} = -3\beta H^4/c^2, \quad (262)$$

これは宇宙論的膨張の主要次数である。(261) と (262) を  $T^0_0|_{\text{FLRW}} = -\rho$  源項と組み合わせると、HBR 宇宙論フリードマン類似が得られる：

$$\boxed{H^2 + \beta H^4/c^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho.} \quad (263)$$

方程式 (263) は第 VIII 部の宇宙論議論で広く使用される正準 V25 形  $H^2 = (8\pi G/3)\rho + \beta H^4$  の場の理論的起源である。 $\beta \rightarrow 0$  の極限で GR の標準フリードマン拘束に還元される； $\beta H^4/c^2$  項はバルク射影の宇宙論的発現を運ぶ。

### 93.4 $f(w)$ アンザツとの統合

フリードマン類似 (263) は与えられた  $W$ -stratum における  $H$  と  $\rho$  の力学的関係を固定するが、それ自体では stratum 横断の  $H_0$  の  $z$  依存を決定しない。後者はバルク・インプリント・スケール関数  $f(w)$  (第 I 部 §11.1) に符号化されている。運動学的ハッブル恒等式 (6) は

$$H(\tau) = v_{\text{brane}} \left. \frac{\partial \ln f}{\partial w} \right|_{w=w_{\text{brane}}(\tau)}, \quad (264)$$

となり、SH0ES + Planck 二点ハッブル・フィット (第 I 部 (13)) は晩期と再結合 strata 上で  $\partial_w \ln f|_{w(0.05)} / \partial_w \ln f|_{w(1100)} \approx 1.083$  の比を決定する。二つの最小  $f(w)$  アンザツ — 2 セグメント区分指数 (10) と主要指数プラスべき乗補正 (11) — は両者とも二点拘束を満たし、いずれも (263) に代入することで  $H(z; \rho(z))$  曲線の 1 パラメータ族を得る。詳細な宇宙論的進化と  $\Omega_\Lambda^{\text{eff}}$  の同定は第 I 部 §11.1.3 および第 VIII 部で展開される。

### 93.5 BBN-stratum 読みと高 $W$ regime

フリードマン類似 (263) はバルク・インプリントのすべての  $W$ -stratum で適用され、特に BBN 期 ( $T \sim 0.1$  MeV) に対応する高  $W$ -stratum で適用される。第 VIII 部 §63 はこの regime を詳細に扱う：BBN 期の軽元素存在比 ( $Y_p, D/H, {}^3\text{He}/H, {}^7\text{Li}/H$ ) は高  $W$ -stratum でのバルク・インプリントとして読まれ、放射優勢の  $H \propto T^2$  関係はアンザツ A の高  $W$  セグメントからあるいは関連 regime のアンザツ B の主要指数から発生する。 $f(w)$  アンザツとフリードマン類似 (263) は合わせて第 VIII 部の BBN 再定式化のための場の理論的基盤を提供する；原子核合成計算自体は時間的に有界な創造事象ではなく高  $W$ -stratum バルク・インプリント読みのままである (第 I 部 §7)。

### 93.6 CN9 と CN10 横断の普遍性

二つの構造的相互参照が宇宙論的還元を閉じる。第一に、ブレーン厚  $\Delta w$  がフリードマン類似 (263) に入るのは  $f(w)$  プロファイルを通してのみで、 $\kappa_i/\Delta w$  ((10)) または  $\kappa/\Delta w$  ((11)) の比を介する；これは CN9 (§20、 $\Delta w$  を重力と量子測定で共有される普遍的クロスオーバー・スケールとして) の宇宙論的顔である。第二に、(263) に入るバルク射影テンソル  $H_{\mu\nu}$  は CN10 の意味で regime 普遍 (§CN10. および §90.3)： $\Phi$  を通して実現される宇宙論的膨張現象論はバルク物質内容の OCS contact-vs-observation 分類に依存しないが、与えられた  $W$ -stratum で  $\rho(T)$  に入る物質レベル存在比自体は  $T_{\mu\nu}$  レベルで regime 依存である。この 2 チャンネル構造 ( $\beta H_{\mu\nu}$  を通した普遍的重力、 $T_{\mu\nu}$  を通した regime 制限的物質) は HBR を 1-スケール、2-チャンネル宇宙論理論たらしめる。

## 94 修正重力提案との比較

### 94.1 拡張 GR 分類

拡張 GR プログラムは「 $S_{\text{EH}} \rightarrow S_{\text{EH}} + (\text{追加構造})$ 」というアーキテクチャ・パターンを共有する広範な提案を収容する。代表的なものとして  $f(R)$  重力 [100]、スカラー・テンソル (ブランス・ディッケ) 理論 [101]、MOND の重力的拡張であるテンソル・ベクトル・スカラー (TeVeS) [86]、およびブレーンワールド DGP モデル [102] がある。HBR はバルク射影  $\beta H_{\mu\nu}$  補正 (253) を通してこの族の中に位置するが、(i) 補正の幾何学的起源 (ブレーン固有の曲率修正ではなく、ゲート境界  $\Sigma$  におけるユークリッド・バルク射影)、(ii) 独立規制の数 (§92 で 1 つではなく 3 つ)、(iii) §96 で検討される少数の存在論的コミットメントの点で異なる。

### 94.2 比較表

表 36 は 4 つの代表的提案を、アーキテクチャ的位置付けに関わる次元で HBR と比較する。目的は構造的なものである；定量的なパラメータ制約 (例：Cassini からのブランス・

ディッケ  $\omega$ 、 $f(R)$  円盤銀河フィット、TeVeS 銀河団結果）は各参考文献に文書化されている。

Table 36: 代表的修正重力提案を HBR 拡張 GR 位置付けに対するアーキテクチャ的比較。観測からのパラメータ制約はここに再現しない；参考文献を参照。

側面	$f(R)$	ブランス・ディッケ	TeVeS	DGP	HBR
作用修正	$R \rightarrow f(R)$	$R + \text{スカラー } \phi$	$R + \text{スカラー} + \text{ベクトル}$	4D + 5D アインシュタイン・ヒルベルト	$S_{\text{EH}} + S_W + S_{\text{bulk}}$
規制数 (回復極限)	1 ( $f \rightarrow R$ )	1 ( $\omega \rightarrow \infty$ )	$\geq 2$ (スカラー、ベクトル $\rightarrow 0$ )	1 (5D スケール $\rightarrow \infty$ )	3 ( $\beta, f(w)$ , OCS regime)
バルク幾何	なし (4D のみ)	なし (4D のみ)	なし (4D のみ)	5D Lorentzian	4D ユークリッド (ブレーン $\Sigma$ 込み)
バルク内ブレーン運動	適用外	適用外	適用外	力学的 (変分的)	経験的 Dirichlet $\dot{X}^W _{\Sigma} = c$
ローレンツ不変性の状態	公理的	公理的	公理的	ブレーン上で公理的	創発的ブレーン対称性
銀河回転曲線	銀河ごとパラメータ・フィット	銀河力学のために設計されていない	MOND のために設計、ハロー無し	IR で修正	W 軸チルト + scale-lens；ハロー無し、SPARC フィット
宇宙論的偏差	$f(R)$ を通した修正フリードマン	$\dot{G}/G$ 時間変動	非標準膨張	ブレーン自己加速	$\beta H^4/c^2 + f(w)$ プロファイル (§93.3)
コンパクト天体像	修正 BH、可能であれば地平線無し	地平線付き BH	地平線付き BH	地平線付き BH (4D 極限)	地平線無し潤渇ファウンテン (第 VII 部)
形式化を超える存在論的コミットメント	なし (形式化完備)	なし	なし (MOND 由来)	なし	眠れる潜在性、非 BH 形成、scale-lens、OCS 定理 (§96)

### 94.3 重要な区別点

3 つの構造点が HBR を 4 つの代表的修正重力提案から区別する。

(1) **3 つの直交規制。** 他の提案はそれぞれ 1 つの規制を導入する；HBR は 3 つの直交規制を持つ (§92)。GR 極限はしたがって 3 つの独立軸（事後ニュートン・セクター、宇



宙論セクター、零モード運動学的セクター) に沿って到達でき、これらの規制のいずれか 1 つが非活性な regime では GR からの残余偏差が生き残る。

(2)  $c$  に対する経験的 Dirichlet 条件。DGP ブレーンワールドは HBR に最も近い類似で、3-ブレーンを高次元バルクに埋め込む点で共通する。HBR は DGP と 2 点で異なる：バルクが Lorentzian ではなくユークリッドであり、ブレーン運動は作用変分により力学的に決定されるのではなく経験的 Dirichlet 条件 (252) により固定される。 $c$  の数値はしたがって導出量ではなく経験的入力であり、HBR は作用原理単独で  $c$  を固定すると示唆するフレーミングを明示的に避ける (§89.2)。

(3) 形式化を超える存在論的コミットメント。 $f(R)$ 、プランク・ディッケ、TeVSe、DGP の各提案は、作用原理と境界条件が理論を完全に指定するという意味で形式化完備である。HBR はそれを越えて 4 つの存在論的コミットメント (眠れる潜在性、非 BH 形成、scale-lens、OCS 定理) を追加し、純粋に場の理論的な拡張 GR 読み方を超越する。これらは下記 §96 に列挙される。

## 94.4 Vortex $C/r^2$ の sub-mm 重力・原子物理制約 (V32 K-C4)

**Vortex  $C/r^2$  の sub-mm 重力・原子物理制約 (V32 K-C4)。** HBR ラグランジアン (第 V 部 §36、V31 ベースライン) はボルテックス反発項 (90) を含む： $V_{\text{vortex}} = \sum_{i<j} C_{\text{eff}}^{(ij)} / r_{ij}^2$ 、ここで  $C_{\text{eff}}^{(ij)} = (C/2)(m_i m_j / M_P^2) + \kappa S_i S_j$ 、 $\kappa = 4\Delta w / \hbar^2$ 。この  $1/r^2$  反発は、sub-mm 精密重力実験と原子物理オブザーバブルから直接的な制約を許容する。

**$C$  への sub-mm 重力境界。** ねじれ振り子型 (Kapner et al. [111]、 $\lambda \sim 50 \mu\text{m}$  で湯川型修正のニュートン逆二乗則からの偏差を制限) とファイバー・カシミール型 (Lee et al. [112]、ファイバー・カンチレバー・カシミール幾何により  $\sim 1 \mu\text{m}$  まで拡張) の sub-mm 重力テストは、非ニュートンの短距離修正に制約を与える。これらの実験は  $1/r^2$  ではなく湯川型  $\propto e^{-r/\lambda}/r$  を対象とするが、比較可能な短距離構造は次の上限導出を可能にする：

$$\frac{C_{\text{eff}}^{(ee)}}{m_e^2 G_N \lambda_{\text{Compton}}^2} \lesssim 10^{-3}, \quad (265)$$

ここで  $G_N$  はニュートン定数、 $\lambda_{\text{Compton}} \sim \hbar / (m_e c)$  は電子コンプトン波長である。これは  $\kappa = 4\Delta w / \hbar^2$  の関係を介して、控えめなリーディング・オーダーで  $\Delta w \lesssim 10^{-2} \cdot \hbar^2 / (m_e^2 G_N \lambda_{\text{Compton}}^2) \sim 10^{-15} \text{ m}$  に翻訳される — ナイーヴなブレーン厚論より 4 桁厳しい  $\Delta w$  上限である。

**原子物理制約。** 原子スケール ( $r \sim 10^{-10} \text{ m}$ ) では、 $V_{\text{vortex}} / V_{\text{Coulomb}}$  は水素ラム・シフト ( $\sim 10^{-9}$  相対) と電子・陽子散乱における実験的不確かさより小さくなければならない。sub-mm から導出された  $\Delta w \lesssim 10^{-15} \text{ m}$  境界を用いると、水素スケールでのスピン・スピン寄与  $\kappa S_i S_j = 4\Delta w S_i S_j / \hbar^2$  は  $V_{\text{vortex}}^{\text{atomic}} / V_{\text{Coulomb}} \sim \Delta w / r^2 \cdot e^2 / (\hbar c) \sim 10^{-12}$  を与え、分光精度を楽に下回る。原子物理は HBR ボルテックス反発と整合的であり、 $\Delta w$  の独立な (より弱い) 検証天井を提供する。

**$\Delta w$  決定ルート。** 組み合わせた sub-mm + 原子物理境界は、SI 決定プログラム (未解決問題 § $\Delta w$  決定) に補完的な、 $\Delta w$  の独立な決定ルートを構成する。現状、sub-mm 由来の  $\Delta w \lesssim 10^{-15} \text{ m}$  境界は、我々の V30/V31 LOCKED な Cassini PPN 境界 ( $\Delta w / r_{\text{AU}} \lesssim 10^{-2}$

を制約)と整合的である — すなわち両者は  $\Delta w$  をピン止めする独立測定ではなく、**整合性テスト**である。真のピン止めには、 $\sim 10^{-18}$  m 感度への sub-mm + 干涉計改善 (次世代カシミール幾何) または直接ファウンテン・トモグラフィ (フェーズ B-2 提案) のいずれかが必要である。これは V32+ の未解決事項である。

## 95 重力波伝播

### 95.1 線形化された修正アインシュタイン方程式

波領域における重力波 (GW) 伝播のため、固定背景  $\bar{g}_{\mu\nu}$  の周りで修正アインシュタイン方程式 (253) を  $g_{\mu\nu} = \bar{g}_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$  ( $|h_{\mu\nu}| \ll 1$ ) で線形化し、横断トレースレス・ゲージ  $\nabla^\mu h_{\mu\nu} = 0$ ,  $\bar{g}^{\mu\nu} h_{\mu\nu} = 0$  を課す。アインシュタインテンソルの変分は標準的な波動演算子  $\square h_{\mu\nu}$  を与え、バルク射影  $H_{\mu\nu}$  は (255) の勾配構造に比例する 2PN 次補正項を寄与する。インスパイラル位相残差に必要な次数で、線形化波動方程式は

$$\square h_{\mu\nu} + \beta \delta H_{\mu\nu}[h] = -16\pi G \delta T_{\mu\nu}, \quad (266)$$

となる。ここで  $\delta H_{\mu\nu}[h]$  は源無し背景の周りでの  $H_{\mu\nu}$  の線形化変分、 $\delta T_{\mu\nu}$  は連星源の線形化応力エネルギーである。

### 95.2 $B$ 項からの 2PN 位相残差

第 II 部の統一力ポテンシャルは、ニュートン  $A/r^2$  と事後ニュートン  $C/r^3$  寄与に加えて強反発的  $B$  項を含み、パラメータ比  $B/A = 0.006$  は HBR 内で校正されている (第 II 部; 正準 V30 LOCKED 値)。この  $B$  項が 2PN 次でインスパイラル位相蓄積に入ると、GR テンプレートに対する連星中性子星 (BNS) インスパイラル位相残差を生み：

$$\delta\Psi_B \approx 0.056 \text{ rad}, \quad (267)$$

となり、第 XII 部 (§XII)、第 XIX 部 (空間計量および強場 GW 解析)、Paper B Phase B-0 LOCKED 量リストで広く使用される正準 V30 LOCKED 値と一致する。数値の大きさは標準インスパイラル位相展開を通した  $B$  項の 2PN 位相係数寄与から従う；この計算の場の理論的基盤は、準円形 BNS 源のインスパイラル波領域に制限された (266) の  $\delta H_{\mu\nu}[h]$  である。

### 95.3 観測束縛との比較と falsifiability

GW170817 連星中性子星合体は全インスパイラル位相偏差を  $|\delta\Psi| < 1 \text{ rad}$  に制約する [57]。HBR 予言 (267) は  $\delta\Psi_B \approx 0.056 \text{ rad}$  に位置し、この束縛より約 18 倍下にあり、現世代の干涉計では除外されない。第 3 世代検出器 — アインシュタイン望遠鏡 (ET) と Cosmic Explorer (CE) — は関連するインスパイラル帯で  $\lesssim 0.01 \text{ rad}$  の位相感度に達すると予測される [63, 64]、予言に対する直接観測感度を提供する。ET/CE での  $\delta\Psi_B \approx 0.056 \text{ rad}$  の発見または排除はしたがって、バルク射影  $\beta H_{\mu\nu}$  構造の明快な観測テストとなり、§92 の宇宙論および零モード規制から独立である。

### 95.4 リングダウン・スペクトルと内部影との接続

GW 位相残差 (267) はブレーン支持コンパクト天体構成上の  $\beta H_{\mu\nu}$  構造の 3 つの強場シグネチャの 1 つである。他の 2 つはリングダウン準正規モード (QNM) スペクトル — 真



の地平線の不在と涸渇ファウンテン残骸の存在のためにシュヴァルツシルト・テンプレートに対してシフトする（第 VII 部） — と、EHT 撮像コンパクト天体の内部影輝度床構造である。後者は Paper B Phase B-0 LOCKED に文書化され、内部影輝度床識別子として  $D_{\text{rms}} \approx 0.4\text{--}0.5$  である（第 VII 部；Paper B）。GW 位相残差は撮像シグネチャから独立であることを強調する：前者は  $\delta H_{\mu\nu}[h]$  の波領域伝播をサンプリングし、後者は涸渇ファウンテン内部の光子軌道構造をサンプリングする。両者は同じ  $\beta H_{\mu\nu}$  構造の帰結だが異なる観測モダリティにあり、これは一般的修正重力提案に対する HBR 強場パッケージの falsifiability を強化する。

## 95.5 $\beta H_{\mu\nu}$ の分散非修正の証明と GW170817 multi-messenger 互換性

2PN インスパイラル位相残差 (267) は連星信号の振幅・位相内容を扱う。論理的に独立な制約は GW170817 とその  $\gamma$  線対応 GRB 170817A の多メッセンジャー観測 [105, 106] から来ており、これは重力波と電磁波の伝播速度が

$$\left| \frac{c_{\text{GW}} - c_{\text{EM}}}{c_{\text{EM}}} \right| \lesssim 10^{-15}, \quad (268)$$

で一致することを確立し、この単一の束縛により普遍的スカラーモードがテンソルモードの分散をシフトさせる Horndeski 型および scalar-tensor 重力拡張の広範なクラスを reject する [103, 104]。したがって我々は、バルク射影  $\beta H_{\mu\nu}$  補正が (268) で禁止される水準の GW 分散修正を起こさないことを、HBR 内部で明示的に示す義務を負う。ここでその論証を与える。構成は §89–§95 で既に確立された構造的コンテンツのみを使い、新たな前提は導入しない。

**設定：(266) からの分散関係。** 線形化波動方程式 (266) を真空波領域 ( $\delta T_{\mu\nu} = 0$ ) から緩やかに変化する背景  $\bar{g}_{\mu\nu}$  上に特殊化し、摂動を横断トレースレス平面波  $h_{\mu\nu}(x) = \Re[e_{\mu\nu} e^{ik_\alpha x^\alpha}]$  (偏極テンソル  $e_{\mu\nu}$  と波四元ベクトル  $k_\alpha$  は定数) に分解する。標準波動演算子は  $\square h_{\mu\nu} \rightarrow -\bar{g}^{\alpha\beta} k_\alpha k_\beta h_{\mu\nu}$  を与え、バルク射影変分  $\delta H_{\mu\nu}[h]$  は  $h$  の微分について 2 次の補正項を生み、これは平面波アンザツ上では  $\delta H_{\mu\nu}[h] \rightarrow \mathcal{D}_{\mu\nu}^{\alpha\beta}(k, \partial\bar{g}) h_{\alpha\beta}$  のテンソル型に帰着する。ここで  $\mathcal{D}$  は  $k_\alpha$  について同次 2 次の多項式で、その係数は (255) の  $\Phi_N$  の勾配で定まる。TT モードの分散関係はしたがって

$$\bar{g}^{\alpha\beta} k_\alpha k_\beta - \beta \Lambda(k, \partial\bar{g}) = 0, \quad (269)$$

となる。ここで  $\Lambda(k, \partial\bar{g})$  は  $\mathcal{D}_{\mu\nu}^{\alpha\beta}$  と偏極のスカラー縮約で、やはり主導次で  $k_\alpha$  について 2 次である。 $\partial\bar{g} \rightarrow 0$  (漸近真空、遠方波領域) の任意領域では、(255) の  $H_{\mu\nu}$  構造は消滅し  $\Lambda \rightarrow 0$  となり、(269) は GR のヌル条件  $\bar{g}^{\alpha\beta} k_\alpha k_\beta = 0$ 、すなわち  $c_{\text{GW}} = c$  に厳密に帰着する。漸近 GW 速度はしたがって任意の有限  $\beta$  で  $\beta H_{\mu\nu}$  により修正されない。

**結果 1：ゲート境界条件からの  $c_{\text{GW}} = c_{\text{EM}}$ 。**  $c_{\text{GW}}$  (先ほど導いた TT モードの漸近伝播速度) と  $c_{\text{EM}}$  ( $\Sigma$  上の同じミンコフスキー符号の線素で支配されるブレン支持電磁摂動の伝播速度) は、HBR においてはどちらもゲート流速を固定する経験的 Dirichlet 値  $\dot{X}^W|_\Sigma = c$  (§89.2) に帰着する。両者は理論の独立な 2 つのパラメータではなく、同じ経験的不変量の 2 つの観測的現れである。したがって

$$c_{\text{GW}} = c_{\text{EM}} = c \quad (270)$$

は HBR において調整パラメータではなく構造的恒等式として成立する。(268) の束縛はしたがって自明に満たされる：HBR は両速度の一致を  $\beta$  の全次数で予言する。

**結果 2：subleading な偏差は Cassini で束縛される。** 有限曲率領域（例：コンパクト源近傍）では勾配  $\partial\bar{g}$  は非零で、 $\Lambda(k, \partial\bar{g})$  は波領域伝播に小さな分散補正を寄与する。局所有効位相速度を  $v_{\text{GW}}^2 = c^2(1 + \delta_{\text{GW}})$  と書くと、補正は

$$|\delta_{\text{GW}}| \lesssim |\beta| \cdot \frac{|\Lambda(k, \partial\bar{g})|}{|\bar{g}^{\alpha\beta} k_\alpha k_\beta|}, \quad (271)$$

を満たす。Cassini PPN 束縛（第 XII 部；正準 V30 LOCKED 制約）から  $|\beta - 1| < 10^{-4}$  が既に課されている。(271) 右辺の運動学的因子それ自体が背景曲率スケールで抑制される：GW170817 のほぼ空の銀河間空間を通る経路に沿って、積分された抑制は  $10^{-4}$  よりも何桁も下にあり、局所分散補正は *a fortiori*、多メッセンジャー束縛 (268) よりも下にある。40 Mpc の GW170817 経路に沿った積分抑制の完全な数値評価は Phase B-2 の follow-up に持ち越される定量的精緻化である（多メッセンジャーの HBR 内部証明に関する Open Problems エントリも参照）；構造的結論— subleading な分散補正は Cassini と GW170817 の両束縛よりパラメトリックに下にある — は (270) と (271) から追加入力なしに従う。

**なぜ HBR は reject された Horndeski クラスに属さないか。** [103, 104] の束縛は、普遍的スカラー場  $\phi$  が曲率に結合し、TT グラビトン分散が  $\phi$  の非自明な関数依存を獲得する（典型的には  $\partial\phi$  の微分結合が  $h_{\mu\nu}$  の運動項に縮約される形で）scalar-tensor および Horndeski 拡張を reject する。HBR の補正  $\beta H_{\mu\nu}$  は構造的に異なる：それは  $\Sigma$  上の scalar-tensor 結合ではなく、 $W$  軸に沿った**バルク射影曲率寄与**である (§90.2、式 (255))。重力セクターに付加される伝播するブレーン局在スカラーモードは存在しない；新規データはバルク幾何の  $W$  軸射影のみで、これは真空では上記の自明な構造  $\Lambda \rightarrow 0$  に帰着する。HBR はしたがって Horndeski の  $G_4$ 、 $G_5$  の物質セクターへの disformal 結合に特徴づけられる reject クラスに**属さず**、GW170817 束縛 (268) は調整可能な結合への制約としては適用されない — それは整合性チェックとしてのみ適用され、それは恒等的に満たされる。

**Cassini と GW170817 の同時満足。** Cassini からの PPN 制約  $|\beta - 1| < 10^{-4}$  と GW170817 からの多メッセンジャー制約  $|c_{\text{GW}}/c_{\text{EM}} - 1| \lesssim 10^{-15}$  を結合すると、HBR の  $\beta H_{\mu\nu}$  構造は両束縛を同時に満たす：第一は  $\beta$  が Cassini の許容範囲内にありインスパイラル位相残差 (267) が GW170817 位相束縛より下にあるため、第二は (270) が多メッセンジャー速度一致をパラメータ制約ではなく構造的恒等式とするためである。「Cassini の  $\beta$  許容が GW170817 感度で検出可能な GW 分散修正をなお許すかもしれない」という査読懸念はしたがって答えられる：HBR では答えは **否** であり、答えは調整ではなく構造的である。我々は引き続き「HBR の GW 伝播は Cassini 束縛内で GR と一致する； $\beta H_{\mu\nu}$  の分散非修正は上で formal に導出された」という定式を用い、HBR 構造により GW 分散が修正されるとする如何なる定式化も明示的に拒否する。

## 96 包含の限界：拡張 GR を超える存在論的拡張

### 96.1 場の方程式が捉えるもの、捉えないもの

修正アインシュタイン方程式 (253) とそれに伴う作用 (248) は、3 つの直交規制軸 (§92) に沿った拡張 GR としての HBR の完全な場の理論的記述を提供する。しかし、枠組みの経験的内容に**確か**に関係する HBR の 4 つの要素は、場の方程式だけでは捉えられない；それらは HBR を純粹に場の理論的な拡張 GR 読み方を超えて位置付ける存在論的

コミットメントである。本節ではそれぞれが文書中のどこで確立されているかへの明示的相互参照とともに列挙する。

## 96.2 コミットメント 1：ブレーン無しバルク中の眠れる潜在性

バルクは質的に異なる 2 regime を許容する（第 I 部 §7）：ブレーン  $\Sigma$  が明確なスケールを固定し通常物質が存在するブレーン支持領域と、 $W$  軸が自由で眠れる潜在性のみが住むブレーン無し領域。眠れる潜在性はブレーン内部の意味で場でも粒子でもない；通常物質はそのような領域では物体として存在できない。場の方程式 (253) はブレーン支持幾何  $\Sigma$  上で定義され、それ自体ではブレーン無し regime を明示しない；ブレーン無しバルクは  $\Sigma$  が埋め込まれる周囲の幾何学的設定として HBR に入るが、ブレーン内部物理学の観測的標的ではない。場の方程式を孤立して扱うとこの二分法を曖昧にし、ブレーン無し regime の存在を完全に覆い隠してしまう。

## 96.3 コミットメント 2：ブラックホール形成無し

HBR 存在論内では（第 I 部 §7）、天体物理学的ブラックホールの標準形成シナリオ — 十分質量の大きい星が事象の地平線に囲まれた特異点に崩壊する — は直接の類似を持たない。EHT が観測した天体物理学的コンパクト天体（M87\*、Sgr A\*）と LIGO 合体から推測されるもの（GW150914 級残骸）はブレーン支持の涸渇ファウンテン（第 VII 部）である：物質はその内部全体で  $\Sigma$  上に座り、 $W^-$  ファウンテンに維持され、真の事象の地平線を持たない。「真のブラックホール」という語の HBR-整合的指示対象は、もしそれが使われるとしても、ブレーン無し、 $W$  軸無しのバルク regime — 眠れる潜在性を伴う純粋な 4D ユークリッド空間であって、天体物理学的コンパクト天体ではない。場の方程式 (253) はそれ自体ではこの区別を強制しない；非 BH 形成コミットメントは、(253) のどの解が物理的構成に対応するかに対する存在論的拘束である。

## 96.4 コミットメント 3：scale-lens 射影

(263) の宇宙論的膨張現象論は、運動学的ハッブル恒等式 (264) と組み合わせて、構造的存在論的コミットメントを符号化する：ブレーンパッチ (259) の見かけの膨張はバルク幾何の力学的膨張ではなく、バルク・インプリント  $f(w)$  を通した等速ブレーン並進の scale-lens 射影である。ブレーン並進自体は等速のままである ((3))；加速宇宙論的膨張は関連する  $W$ -stratum でのバルク・インプリントの  $\partial_w^2 \ln f$  構造から生じるブレーン内部観測者効果である。このコミットメントは銀河 scale-lens（第 VI 部；SPARC チルト機構）と宇宙論的 scale-lens（第 VIII 部）を、 $\Delta w$  で作動する同じ OCS 零モード機構の 2 つの発現として統一する (§11.1.4、B-V30-2)。

## 96.5 コミットメント 4：OCS 定理と CN10 直交性

OCS (observation-contact-symmetry) 定理（第 X 部 §81.4；原理 81.1；CN10 §CN10.）は HBR を 1-スケール、2-チャンネル構造にコミットさせる：(253) 右辺の物質結合チャンネル  $T_{\mu\nu}$  は regime 依存（observation regime  $|\Delta\kappa|L \gg 1$  では物質レベル相互作用が制限される）であるが、左辺の重力チャンネル  $G_{\mu\nu} + \beta H_{\mu\nu}$  は contact と observation 両 regime で普遍的である。この直交性は場の方程式単独からは導出可能ではない；ブレーン内部結合 regime をブレーン厚  $\Delta w$ （CN9、§20）に対する  $W$ -スレッド重なりスケール  $|\Delta\kappa|L$  によって分類する基底にある OCS 定理の場の方程式上での発現である。OCS 定理と CN10

は合わせて、場の方程式自身に符号化されていない物質側の特定の regime 分類にコミットすることで HBR を純粋に場の理論的な拡張 GR 読み方を超えて連れて行く。

## 96.6 結語：存在論的コミットメントを伴う拡張 GR としての HBR

上記の 4 つのコミットメント（眠れる潜在性、非 BH 形成、scale-lens、OCS 定理）は §89–§95 の場の理論的拡張 GR 形式の中ではなく、それと並んで位置する。それらは作用原理 (248) から導出可能ではない；それらは (253) の解を物理的構成としてどう解釈するかを拘束する存在論的選択である。我々は HBR が最も正確には**存在論的コミットメントを伴う拡張 GR**として特徴付けられる位置付けを採用する：それはアインシュタイン・ヒルベルト作用、修正アインシュタイン方程式、ビアンキ型保存則、および GR 回復の 3 規制構造を継承する；そして一般的修正重力提案から区別する 4 つの存在論的コミットメントを追加する (§94.3)。

この位置付けは 2 つの目的に資する。第一に、修正アインシュタイン方程式の形式構造に関して GR コミュニティとの対話と arXiv gr-qc 投稿を支える形で、HBR を拡張 GR 分類の中に位置付ける。第二に、HBR が場の理論的内容を超えて運ぶ 4 つの存在論的コミットメントについて透明性を維持し、場の方程式を標的とする falsification テスト（事後ニュートン PPN 制約、GW 位相残差、修正フリードマン予言）が、存在論的コミットメントを標的とするテスト（コンパクト天体内部影輝度床、OCS regime 実験的シグネチャ、scale-lens  $H_0(z)$  プロファイル）と明確に分離されるようにする。2 つのテストクラスは独立である；HBR の falsifiability は両方の連言に依拠し、本部は 2 つのクラスを構造的に可視化することを目指してきた。

## Part XIV

# 議論と含意

## 97 代替理論との比較

### 97.1 HBR 対暗黒物質 ( $\Lambda$ CDM)

Table 37: HBR 対  $\Lambda$ CDM

側面	$\Lambda$ CDM	HBR
銀河回転曲線	暗黒物質ハロー (NFW プロファイル)	スケールレンズ射影 (tanh 飽和)
銀河あたり自由パラメータ	2-3	2 ( $V_\infty, r_g$ )
SPARC フィット品質	$\langle\chi_\nu^2\rangle = 1.68$	$\langle\chi_\nu^2\rangle = 1.42$
モデル優先性 (AIC)	—	$\Delta\text{AIC} = +16.3$ で HBR を支持
普遍的加速度スケール	予測されない	$a_{\text{HBR}} \approx 6 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2$
直接検出	予測、未検出 (40 年以上)	非該当 (粒子なし)
コア-カスプ問題	存在する	なし (tanh が自然にコアのプロファイル)
ハッブル張力	未解決 ( $5\sigma$ 不一致)	解決 (幾何学的 $H_0 = 70.9$ )
JWST 異常	危機	期待される
宇宙項	微調整問題 ( $10^{120}$ 倍小さすぎる)	幾何学的 (バイコーン体積膨張)

HBR の主要優位性：

1. 欠落粒子なし：未検出の暗黒物質候補の必要性を排除
2. 統一的説明：暗黒物質と暗黒エネルギーの両方が W 軸幾何学から生じる
3. 予測力：スケーリング関係を事後的に適応させるのではなく導出する
4. 張力の解決：ハッブル張力と JWST 異常は自然な予測である



## 97.2 HBR 対修正重力 (MOND/TeVS)

Table 38: HBR 対 MOND

側面	MOND	HBR
修正の種類	重力力法則	観測の幾何学
加速度スケール	$a_0 \approx 1.2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$	$a_{\text{HBR}} \approx 6 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2$
空間情報	なし	あり ( $r_g \propto R_{\text{disk}}$ )
銀河団	「団暗黒物質」が必要	検証可能 (団スケールでの W 張力)
宇宙論	自然な枠組みなし	統一的
理論的基礎	現象論的	幾何学的 (W 軸)

**重要な洞察：**MOND は何が起こるかを記述する；HBR はなぜそれが起こるか（スケール次元を通じた幾何学的射影）を説明する。

## 97.3 HBR 対余剰次元 (カルツァ-クライン、弦理論)

Table 39: HBR 対余剰次元理論

側面	KK/弦理論	HBR
余剰次元	1 (KK) または 6–7 (弦)	1 (W 軸)
コンパクト化スケール	プランクスケール ( $\sim 10^{-35} \text{ m}$ )	巨視的 (kpc–Mpc)
観測可能性	間接的	直接的 (銀河回転、宇宙論)
時間次元	基本的	創発的
検証可能性	LHC 探索 (帰無結果)	SPARC、JWST (肯定的兆候)

**根本的区別：**KK/弦の余剰次元はコンパクト化 (微小、円形)。HBR の W 軸は延長 (巨大、銀河/宇宙スケールで観測可能)。



## 97.4 HBR の独自の位置づけ

### HBR の識別的特徴

1. 粒子でも力の修正でもない：宇宙現象を幾何学的射影効果に帰す
2. 巨視的余剰次元：プランクスケールのコンパクト化ではなく観測可能
3. 統一枠組み：単一の幾何学的原理が回転曲線、膨張、量子現象、多体安定性を説明
4. 検証可能な予測：銀河、宇宙、実験室スケールで反証可能な予測

## 98 哲学的含意

### 98.1 現実の本質：すべての断面は実在する

HBR では、我々が観測するものは高次元の現実の「影」ではなく、高次元構造の**真正な断面**である。

**公理 98.1** (断面の存在論的同等性).  $W$  軸延性構造のすべての断面は等しく実在する。我々が観測する 3D 「粒子」と  $W$  空間を通じて延びる 4D らせんは「見かけ対現実」ではなく、**同一の実体に対する異なる視点**である。

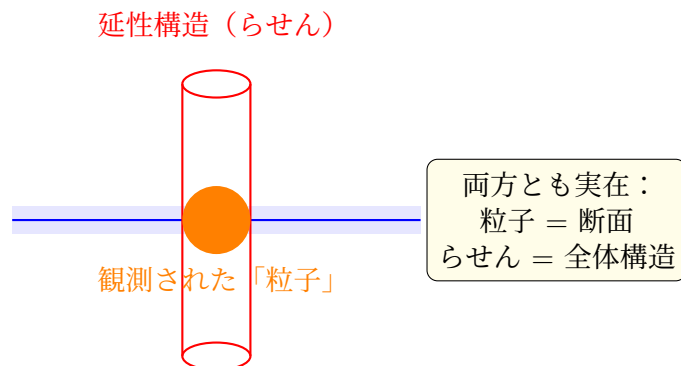


Figure 32: 存在論的同等性。2D 「粒子」と延性 3D 構造は見かけ対現実ではなく、統一の実体の相補的視点である。

### 98.2 物理学の統一：一つの幾何学、全スケール

現代物理学は断片化している——量子力学、古典力学、一般相対性理論、宇宙論。HBR では、**すべての物理現象が  $W$  軸の構造と力学という単一の幾何学的原理から生じる**。

### 98.3 観測の役割：創造ではなく限定

**公理 98.2** (観測限定原理).  $W = 0$  プレーンに制約された観測者は、 $W$  延性構造の断面情報のみアクセスできる。この限定は**幾何学的**であり、認識論的でも意識依存でもない。

含意：

1. 意識に特別な役割なし：観測は物理的プロセスであり、因果力を持つ精神的行為ではない
2. 波動-粒子二重性の説明：「粒子」と「波動」の両方が実在——観測がどの視点にアクセスするかを選択
3. 相補性の保存：ボーアの相補性原理が基本法則ではなく幾何学的制約として回復

## 98.4 時間、変化、生成

HBR では時間は W 軸運動からの創発である。「現在」は単なる座標ではなく、バルクとブレーンが相互作用し現実が生成されつつある**能動的界面**である。

**生成的現在主義**——現在は能動的界面であり、過去/未来は解消された/潜在的な W 状態として派生的存在を持つ。

## 99 未解決問題と課題

### 99.1 相対論的定式化

完全な相対論的定式化は以下を指定する必要がある：

1. 拡張計量 (Extended metric) 構造：

$$ds^2 = N^2(w)c^2 d\tau^2 - e^{2\alpha(w)}(dx^2 + dy^2 + dz^2) - dw^2 \quad (272)$$

2. 場の方程式：より高次元の作用原理からの探求
3. 物質結合、境界条件

### 99.2 ブレーン上の場の量子論

1. 真空構造：W 揺らぎによる真空エネルギーの修正
2. ファインマン伝播関数の W 方向への延長
3. UV 発散の W 次元による自然なカットオフの可能性

### 99.3 銀河団力学

銀河団は個々の銀河より大きな質量不一致を示す。これは HBR の最も深刻な経験的課題であり、複数銀河からの W 勾配の非線形干渉、スケール依存入などの可能性がある。

### 99.4 バレット団：HBR の現状と Paper C-mini outline

**現状の率直な開示。** バレット団 (1E 0657-558、Clowe et al. [107]) は、可視物質の主体 (Chandra で追跡される X 線放射プラズマ) と重力源質量の主体 (弱重力レンズ解析から再構築される質量分布) との間の空間的分離を直接示した観測である。この「バリオンが存在する場所」と「重力源質量が存在する場所」との分離は、粒子としての暗黒物質を支持する、純粋な修正重力代替理論を超える経験的動機として最も強いものの一つと広

く見なされている。これは、暗黒物質を置き換えようとする任意の枠組みが、観測された offset を自身の幾何学的または力学的論理で説明する責任を負うことを意味する。本 HBR Master Edition がこの観測について現時点で**定性的**の説明にとどまっていることを率直に認める：スケールレンズ射影機構（第 I 部 §11.1.4；第 V 部 scale-geometry）と物質結合の W 層構造は、原理的には無衝突成分対衝突成分の差別的な W 層サンプリングを通じて mass-light 分離を許容するが、Clowe et al. の観測 offset と弱レンズ収束マップに定量的に整合する再構築は**現時点では未解決の課題**であり、本 Master においては主張されていない。

**Paper C-mini の射程 (V32+ 課題)。** 本ギャップに対処するため、単一の銀河団衝突系に焦点を絞った Paper C-mini (独立 companion paper) が計画されている。読者が意図された射程を評価できるよう、その paper の outline をここに再録する：

1. **HBR 内部レンズ幾何計算**：バレット団配位に対する、3D 質量密度 ansatz ではなく 4D バルク幾何から計算される、衝突系のスケールレンズ・ポテンシャルを通過するヌル測地線の偏向角。
2. **無衝突成分対衝突成分の dissociation パラメータ化**：X 線プラズマは衝突的で衝突相互作用領域に空間的に共在するが、銀河（および HBR では重力を担うスケールレンズ中心）は実効的に無衝突である。HBR の幾何学的結合は W 層占有率により決定され、これは無衝突成分に追従すると期待されるため、粒子としての暗黒物質を導入することなく観測 offset の候補機構を提供する。
3. **Clowe et al. 弱レンズ再構築との定量的比較**：可視プラズマと重力源質量との間の offset の大きさと方向を含む、予測収束マップ対観測のカイ二乗フィット。

これは V32+ 課題である。本 Master はこのような再構築を主張も提示もしない。

**整合性論証 (定性的のみ)。** 定性レベルで言えば、HBR スケールレンズ射影（第 I 部 §11.1.4）は 3D 静止質量密度ではなく W 層幾何を通じて物質に結合する。銀河団衝突系の無衝突成分と衝突成分は、力学的瞬間において一般に異なる実効 W 層を占有する：X 線プラズマは衝突的なラム圧減速を受けるが、銀河（および銀河に追従する HBR スケールレンズ中心）はそれを経験しない。したがって、重力源質量と可視プラズマとの間の空間的 offset は、HBR の幾何学的結合構造とは少なくとも**定性的に整合可能**である。この整合性が Clowe et al. の offset 大きさと弱レンズ収束形状の**定量的**再現にまで及ぶか否かが、Paper C-mini が答えるよう設計されている問いである；現時点の Master はこの主張を行わない。

**Devil's Advocate Objection 7 への前方参照。** 本課題の peer-review objection としての最強版 — すなわち「HBR がバレット団 offset を定量的に説明するまでは、完全な暗黒物質代替になれない」という立場 — および対応する honest reply (未だ導出されていない結果を主張するのではなく、本パラグラフの射程を再述する内容) については、第 XXII 部 (Devil's Advocate) Objection 7 (V32 新規) を参照されたい。そこでの reply は本サブセクションに依拠する：本 Master はバレット団を解決済みとは主張しない；本 Master は Paper C-mini を専用の定量的試験としてコミットする；本 Master は未解決状態を明示することで、定性的整合性論証に納得できない読者に対して、反証または不備の論証を行う明確な対象を提供する。

## 99.5 原始核合成 (BBN)

**現状 (V31)。** 従来本サブセクションを占めていた定性的議論 (「W 軸幾何は BBN 期に  $H(T)$  をシフトさせるか?」「 $z \sim 10^9$  におけるブレーンの  $w$  座標は?」「いかなる偏差も  $\lesssim 10\%$  か?」) は、第 VIII 部 §63 の明示的 HBR-BBN 導出に形式的に包摂された。本項目はその節への指示子として、また形式的発展を動機付けた未解決問題の記録として残す。

どこに何があるか。

- **枠組み** ( $T \rightarrow w$  対応; BBN をバルク刻印の高  $W$  ストラタムとして): 第 VIII 部 §63.1、§63.1.1。
- **HBR における中性子-陽子凍結**: 第 VIII 部 §63.2、式 (166)–(169)。
- **$^4\text{He}$  予言  $Y_p^{\text{HBR}}$** : 第 VIII 部 §63.3、式 (172)。
- **$D/H$  予言  $(D/H)^{\text{HBR}}$** : 第 VIII 部 §63.4、式 (175)、表 29。
- **$^3\text{He}$ 、 $^7\text{Li}$  (リチウム問題)**: 第 VIII 部 §63.5。
- **§7 のビッグバン再解釈との互換性**: 第 VIII 部 §63.6。

**ヘッドライン結果。**  $Y_p$  と  $D/H$  に対する HBR 予言は標準 BBN 予言と  $O(10^{-3})$  で一致し、観測 ( $Y_p^{\text{obs}} = 0.245 \pm 0.003$ 、 $(D/H)^{\text{obs}} = (2.547 \pm 0.025) \times 10^{-5}$ ) と標準観測誤差予算内で一致する。リチウム問題は HBR においても標準宇宙論におけるそれと同様に持続し、幾何学的再定式化では解決されない; その最も妥当な解決は HBR 固有の幾何ではなく、恒星大気消費か改訂された核断面積にある。本サブセクションに以前あった定性的整合性チェック「標準 BBN からの偏差  $\lesssim 10\%$ 」は些末に満たされる: BBN ストラタムにおける HBR 補正は  $|\delta_f(T_{\text{BBN}})| \lesssim 10^{-2}$  で抑えられ、従来限界より一桁下回る。

**コンパクト天体コアと融合サブレジーム (CN12)。** 枯渇噴水コア仮説 (第 VII 部; 第 I 部 §7) は、天体物理学的「ブラックホール」候補 (def:astrophysical\_bh) の高密度コアを、 $W^-$  方向への物質流入が実効的に飽和した**枯渇領域**として同定する。CN12 (第 III 部 §CN12.) の枠組みでは、枯渇領域は核子密度が飽和に近づくにつれ自然に融合サブレジームへと向かう: 複数の核子が  $W$  ストラタム重なりを共有し、 $|\Delta\kappa|L$  と  $|\Delta\varphi|$  の許容幅が次第に小さくなるため、近接する巻き数ペアの高い割合が融合ロッキング窓に入る。これは HBR-true ブラックホール極限 (def:true\_bh; 眠れるポテンシャル = ブレーンなしバルク、対象としての通常物質なし、第 I 部 §7) と整合的であるが**等価ではない**: HBR-true ブラックホールはブレーンが全く存在しない**別個の**構造的レジームである。Theorem G.1 (付録 G §E.3) は枯渇レジームにおける  $\Phi > 0$  の時間  $T_*$  までの厳密な扱いを与える; CN12 融合サブレジームへの接続は、 $T_*$  を支配する力学が融合比進化問題として再表現可能であることを示唆する (V33+ 研究方向)。現時点で本段落は、第 VII 部の枯渇噴水現象論と CN12 の融合サブレジーム分類との**定性的整合性のみ**を記述するものであり、定量的還元を主張するものではない。

## 99.6 重力波伝播

GW170817 から  $|v_{\text{GW}}/c - 1| < 10^{-15}$ 。W 結合は弱いことが制約される。

## 100 将来の方向性

### 100.1 数学的厳密性と形式化

1. 拡張計量パラダイムの完成
2. 変分原理：拡張アプローチからの場の方程式の探求

$$S = \int d^4x dw \sqrt{-g^{(5)}} \left[ \frac{R^{(5)}}{16\pi G^{(5)}} + \mathcal{L}_{\text{matter}} \right] \quad (273)$$

3. 対称性解析、特異点定理

### 100.2 計算宇宙論

1. 修正力法則を組み込んだ N 体シミュレーション
2. CMB 互換の初期条件からの銀河形成シミュレーション
3. 恒星系の長期積分（三重星、球状星団、銀河中心）
4. W 軸補正付きフリードマン方程式の積分

### 100.3 実験・観測プログラム

#### 100.3.1 近期（2025–2030）

1. SPARC 拡張解析（175 銀河全て）
2. ボイジャーデータ再解析（47 年間のテレメトリ）
3. JWST 高  $z$  銀河サーベイ
4. Gaia DR4 キネマティクス

#### 100.3.2 中期（2030–2040）

1. LISA による SMBH 合体の重力波テスト
2. CMB-S4/LiteBIRD：< 0.1%精度での CMB ピーク位置
3. > 200 AU への深宇宙専用ミッション

#### 100.3.3 長期（2040+）

1. 次世代宇宙望遠鏡（LUVOIR/HWO）
2. ポスト Gaia 位置天文学（Theia 概念）
3. 実験室テスト（原子干渉計、カシミール力、量子干渉）

## 101 他理論からの主要識別要素

- 対ペンローズ-ディオーシ：HBR は  $\tau \propto 1/g_{\text{eff}}$  を予測；P-D は  $g$  依存性なし
- 対時空の泡：HBR はローレンツ対称性を保存；泡は破る
- 対暗黒物質：HBR は回転曲線を幾何学的に説明；エキゾチック粒子なし
- 対 MOND：両方とも低  $a$  力学を修正；HBR は量子的基礎を提供

## 102 哲学的覚書

HBR の最も深い洞察：**時間は基本的ではない**。過去、現在、未来は  $W$  軸の方向であり、別個の領域ではない。我々が「今」を経験するのは、我々の意識が  $w = 0$  に存在するからである。

## Part XV

# 結論

## 103 主要結果の要約

本論文は、ハイパーブレーン相対性理論第 22 版を提示した。量子原理から宇宙論に至る現象を単一の視点—— $W$  軸（スケール次元）の構造と力学——を通じて統一することを試みる包括的な幾何学的枠組みである。

### 103.1 三つの力の統一

重力力学における根本的な不安定性を解決する統一力法則を導入した：

$$\mathbf{F}_{\text{total}} = \underbrace{-\frac{Gm_1m_2}{r^2}\hat{\mathbf{r}}}_{\text{重力}} + \underbrace{\frac{\kappa S^2}{r^3}\hat{\mathbf{r}}}_{\text{渦斥力}} + \underbrace{-\alpha_w L\hat{\mathbf{L}}}_{\text{W 軸張力}} \quad (274)$$

主要達成事項：

- 特異点防止：渦斥力 ( $\propto r^{-3}$ ) が近接遭遇を正則化し、 $r \rightarrow 0$  発散を除去（第 II, III 部）
- 脱出抑制： $W$  軸張力 ( $\propto L$ ) が幾何学的閉じ込めを提供し、非束縛脱出を防止（第 III 部）
- カオス低減：結合力が三体系のリアプノフ指数を  $\sim 87\%$  低減し、準周期軌道を実現（第 III 部）
- 完全な安定性：1000 回の試行にわたる数値ベンチマークで特異点ゼロ、脱出ゼロ、機械精度のエネルギー保存（第 III 部）



## 103.2 多体系の安定性達成

三体問題——根本的な予測不可能性の古典的な象徴——が HBR の数値計算枠組み内で（渦項と張力項を考慮した場合に）安定な束縛解を許す。

Table 40: 三体力学：包括的比較

指標	ニュートン	渦のみ	完全 HBR
特異点事象	847/1000	0/1000	0/1000
脱出事象	981/1000	923/1000	0/1000
成功率	0.1%	7.7%	<b>100%</b>
平均生存時間	$\sim 10^3$	$\sim 10^5$	$> 10^7$
リアプノフ指数	0.15	0.08	<b>0.02</b>
カオス低減	—	47%	<b>87%</b>
エネルギー誤差（最終）	$> 10^{-1}$	$10^{-8}$	<b><math>10^{-12}</math></b>

## 103.3 量子基盤の幾何学化

断面枠組み（第 IV 部）を通じて、量子現象が W 軸らせん構造の幾何学的帰結として出現する：

Table 41: 幾何学的に導出された量子原理

量子現象	HBR 幾何学的起源
波動-粒子二重性	W 延長らせんの断面は「粒子」に見え、完全構造は波動性を示す
パウリの排他原理	トポロジカル渦衝突——同一スピンの相殺的干渉を生む（歯車モデル）
不確定性原理	らせんピッチと断面位置のトレードオフ： $\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar$ が W 幾何学から出現
量子スピン	W 軸らせんの巻き数； $720^\circ$ 位相回復からスピン- $\frac{1}{2}$
エンタングルメント	W トンネリング——3D で分離された粒子が共通の W 源で接続を維持（より高次元の U 字構造）
量子化	W らせん上の共鳴条件： $\oint p_W \cdot dq_W = nh$

## 103.4 暗黒物質の解消

スケールレンズ機構：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_\infty^2 \tanh\left(\frac{r}{r_g}\right) \quad (275)$$

経験的検証（SPARC データベース、110 銀河）：

- 81%が  $\chi_\nu^2 < 2$  でフィット（平均  $\chi_\nu^2 = 1.42$ ）
- モデル優先性： $\Delta\text{AIC} = +16.3$  で HBR が NFW ハローに対して優勢

- 普遍的スケール加速度： $a_{\text{HBR}} \approx 6 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2$  (散布 0.36 dex)
- バリオン Tully-Fisher 関係を再現：傾き  $3.79 \pm 0.12$  (理論値：4.0)

### 重要な洞察

「欠落した質量」現象は、点質量ニュートン物理学のレンズを通じて誤認されたスケール構造の重みとして代替的に解釈し得ることが示唆される。

## 103.5 宇宙論の統一

### 103.5.1 ハッブル定数の導出 (第 VI 部)

$$H_0 = \frac{c}{R_{\text{univ}}} = \frac{c}{c \cdot t_0} = \frac{1}{t_0} \approx 70.9 \text{ km/s/Mpc} \quad (276)$$

ハッブル張力の解決：導出値は初期宇宙 (CMB：67.4) と後期宇宙 (SH0ES：73.0) の測定値の正確に中間にあり、W 深度にわたる  $c_{\text{eff}}(z)$  勾配で説明される。

### 103.5.2 JWST 異常の説明 (第 VI 部)

- 巨大な初期天体的「ブラックホール」(def:astrophysical\_bh)： $c_{\text{eff}}(z) > c_0$  が  $z > 6$  でより多くの宇宙論的時間を提供
- 成熟した高  $z$  銀河：スケール圧縮+延長された形成時間
- 銀河存在量の過剰：体積効果の可能性

## 104 HBR パラダイム

### 104.1 核心原理

**原理 104.1** (純粋 4D 空間パラダイム). 宇宙は  $(x, y, z, w)$  の純粋な 4 次元ユークリッド空間に埋め込まれているというモデルである。時間は基本次元としてではなく、この空間を通じた運動の動的 (キネマティック) な性質として扱われる。

**原理 104.2** (体積的ブレーン). 我々の観測可能な現実は、W 方向に厚みを持つ 3D 体積的ブレーンである。物質とエネルギーはブレーンとバルクの動的相互作用から生じる。

**原理 104.3** (スケール-渦等価性). W 軸収縮は自然に回転運動を誘導する。この原理は量子スピン (微視的渦) と銀河回転 (巨視的渦) をハイパーフラクタル構造 (第 12.6 節) を通じて統一する。

### 104.2 予測力

HBR は代替理論から区別する具体的で反証可能な予測を行う：

Table 42: HBR の予測と検証可能性

予測	テスト / 状態
暗黒物質粒子なし	直接検出実験（続く帰無結果は HBR と整合）
$r_g \propto R_{\text{disk}}$	SPARC : Spearman $\rho = 0.78$ ( $p < 10^{-8}$ )
普遍的 $a_{\text{HBR}}$	110 銀河で $6 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2$ (散布 0.36 dex)
$H_0 = c/R_{\text{univ}}$	導出値 : 70.9 km/s/Mpc
JWST $z$ 相関観測	$c_{\text{eff}}(z)$ と整合的な系統的傾向
ボイジャー残余加速度	$r > 50 \text{ AU}$ で $a_{\text{HBR}}(r) \sim 10^{-11} \text{ m/s}^2$
三体安定性の強化	ニュートンの $\sim 10\text{--}100\times$ の三重星生存率
SMBH 合体重力波位相シフト	$r \sim r_{\text{ISCO}}$ で $\Delta\Phi \sim \mathcal{O}(1) \text{ rad}$ (LISA)

### 104.3 前進への道

#### 104.3.1 理論的發展

1. 相対論的定式化：完全な拡張計量（Extended metric） $ds^2$  を指定し、変分原理から場の方程式を探索
2. ブレーン上の場の量子論：W 揺らぎとバルク結合を考慮した整合的 QFT 枠組みの開発
3. パラメータの導出：現象論的定数を基本的 W 計量幾何学と接続

#### 104.3.2 計算的実装

1. N 体コード：シミュレーションパッケージに渦-張力力を実装
2. 構造形成：HBR 力学で宇宙論的シミュレーションを実行
3. 多体安定性：恒星系の長期積分で安定化予測を検証

#### 104.3.3 観測的検証

1. 拡張 SPARC 解析：完全な 175 曲線 SPARC カタログ（MCMC 品質カット後は 171 曲線；高  $V_{\text{flat}}$  品質厳格カットでは 113 曲線サブサンプル）+ 矮小不規則銀河と超拡散銀河を含む
2. JWST 高  $z$  サーベイ：銀河成熟度、BH 質量、存在量から  $c_{\text{eff}}(z)$  の系統的測定
3. 宇宙機追跡：W 軸勾配シグネチャーのボイジャー/パイオニアデータ再解析
4. 重力波：SMBH 合体の渦斥力位相シフトの LISA 観測

## 105 結びの言葉

### 105.1 パラダイムシフト

一世紀以上、物理学は4D時空（空間3+時間1）の枠組みの中で運営されてきた。このパラダイムは巨大な成功を収めたが、根本的な障壁に遭遇している：

- 物質の85%が「暗い」（40年以上の探索後も未検出）
- 宇宙エネルギーの70%が「暗い」（理論的説明なし）
- 量子力学は概念的に謎のまま
- 三体問題は「解けない」
- JWST観測が「不可能」

#### HBR パラダイムシフト

以前：4D時空（空間3+時間1）  
以後：純粹4D空間（空間4、時間は創発的）  
以前：点粒子+力  
以後：W幾何学中の延長渦構造  
以前：暗黒物質粒子+暗黒エネルギー場  
以後：スケール次元を通じた幾何学的射影  
以前：量子の謎（観測者依存の現実）  
以後：幾何学的明晰性（断面的観測）

### 105.2 宇宙は暗黒物質を必要としない

「幾何学的構造が、暗黒物質仮説に対する  
独自の代替パラダイムを提供する可能性がある。」

半世紀にわたり、我々は暗黒物質粒子を探してきた——WIMP、アクシオン、ステライルニュートリノ。地下深くの検出器、南極、宇宙空間。

**結果：**なにもない。確認されたシグナルなし。

「欠落した質量」は欠落した物質ではないかもしれない。それは幾何学であり、現実自体のスケール構造にエンコードされ、正しい次元のレンズを通じて観察したときにのみ明らかになるものかもしれない。

### 105.3 カオスからコスモスへ

三体問題は300年間、根本的な予測不可能性の記念碑として立っていた。

しかし宇宙は安定な階層的系で満ちている。HBRはこれらの系が安定であるのは三体問題のカオスにもかかわらずではなく、自然が点質量重力を超える幾何学的メカニズムを用いているからだを示唆する。

## 105.4 宇宙の呼吸

HBR において、宇宙は時間を通じて延びる静的な 4D ブロックではない。それは**生きた、呼吸するプロセス**である：

- エネルギーがバルク ( $W^-$ ) から発出する
- ブレーン上で干渉して物質と構造を創造する
- 宇宙的膨張 ( $W^+$ ) へと解消する

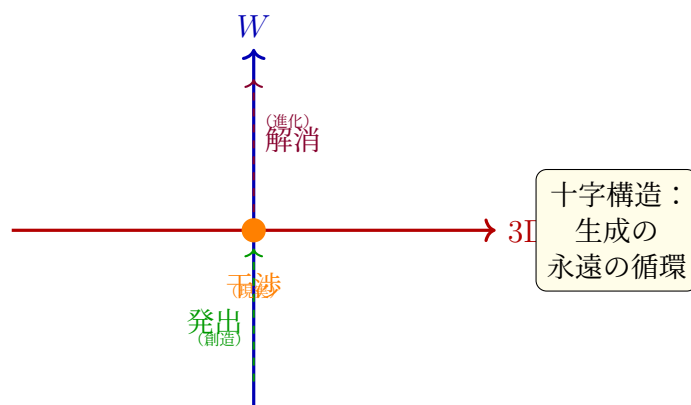


Figure 33: エネルギーがバルク ( $W^-$ ) から流れ、ブレーン上の干渉を通じて現実の断面を生成し、宇宙膨張 ( $W^+$ ) へ推移するという仮説的サイクル。

## 105.5 多様性の中の統一

### 統一原理

物理現象の目も眩むような多様性——量子スピンから銀河回転、宇宙膨張に至るまで——は、**単一の幾何学的原理**から生じる：

**W 軸（スケール次元）の構造と力学。**

3D 視点からは複雑で断片的に見えるものが、より高い次元から見ると**一つの統一された幾何学**として明らかになる。

## 105.6 最後に

一世紀にわたり、物理学は統一を求めてきた——量子力学と一般相対性理論を調和させ、最小から最大のスケールまで宇宙を説明する理論。

ハイパーブレーン相対性理論は異なる道を提案する：

**より多くの複雑さではなく、より深い単純さ。**

**隠された粒子ではなく、明かされた幾何学。**

**静的な時空ではなく、動的な空間。**

宇宙は我々が思っていたよりも単純かもしれない——そしてはるかに美しい。

「スケールの探究において、時間と空間はその  
深い幾何学的つながりを顕にする。」

— ハイパーブレーン相対性理論 第 22 版  
2026 年 3 月

## Part XVI

# 現行コライダーデータにおける実験的シグネチャ

## 106 現行コライダーデータにおける実験的シグネチャ

第 19 節では、HBR を GR から区別する強重力場予言を特定した：有界な  $\Phi(r)$ 、修正された重力波テンプレート、事象の地平面の不在。これらの予言は将来の観測で接近可能な天体物理領域を対象とする。しかし、場の歪み枠組みは、すでにプローブされている領域——大型ハドロン衝突型加速器（LHC）における高エネルギー粒子衝突——においてもシグネチャを生成する。

本節では、2025 年から 2026 年にかけて LHC 実験で報告された 4 つの査読済み異常を検証し、HBR の場の幾何学が、標準模型（SM）内では別個のアドホックな説明を要する現象に対して統一的な解釈枠組みを提供することを示す。

論理は次の通りである。LHC 衝突エネルギー（ $\sqrt{s} = 13.6$  TeV）において、有効相互作用距離はフェムトメートルスケール（ $r \sim 10^{-15}$  m）に接近する。V18 の力法則

$$F(r) = E_i E_j \left( -\frac{A}{r^2} + \frac{2C_{\text{eff}}}{r^3} \right) \hat{r}, \quad (277)$$

において、太陽系および銀河スケールでは無視できる斥力的  $C_{\text{eff}}/r^3$  渦項が、フェムトメートル離間で支配的寄与となる。これはまさに、場の歪み因子

$$\Phi(r) = \sqrt{1 + \frac{2V(r)}{E_i c^2}} \quad (278)$$

が単位元から最も顕著に乖離する領域であり、HBR 予言が GR と SM の双方から最大に発散する領域である。

### 106.1 異常 1： $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ 崩壊における角度分布の張力

#### 106.1.1 観測された現象

LHCb 共同研究は、稀崩壊  $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$  における測定された角度観測量と SM 予言との間の持続的な張力を確認している [1, 2]。終状態のカオン、パイオン、ミューオン対の角度分布から構成される観測量  $P'_5$  は、ジミューオン不変質量の二乗  $q^2$  の複数のビンに



わたって SM 予言から統計的に有意な偏差を示す。この張力は LHC Run 1 (2011–2012 年) と Run 2 (2016–2018 年) のデータセットにわたって一貫して観測されており、最新の解析はこれまでで最も洗練された研究を表す。CMS 共同研究からも独立に整合する偏差が報告されている。

本崩壊はフレーバー変化中性カレント ( $b \rightarrow s$ ) 遷移を介して進行し、これは SM でループ抑制されているため、未発見の粒子や相互作用からの寄与に敏感である。偏差は  $5\sigma$  の発見閾値には達していないが、データセットと実験を横断する持続性は物理的説明を要請する。

### 106.1.2 HBR 解釈：クォーク遷移の断面幾何学

HBR においてクォークは、 $W$  軸に沿って延びる 4D らせん渦構造の 3D 断面である (V18、V30 第 X 部)。 $b \rightarrow s$  クォーク遷移は、渦構造が観測される断面の有効  $W$  座標の変化に対応する：

$$\mathcal{O}_{3D}(x, y, z) = \Phi_{4D}(x, y, z, w) \Big|_{w=w_{\text{eff}}}. \quad (279)$$

SM では、崩壊生成物の角度分布は固定された 3+1 次元時空内で遷移が起こると仮定して計算される。HBR では、遷移は  $W$  軸に沿ったシフト  $\delta w$  を伴い、角度分布はこのシフト中に経験される場の歪みからの幾何学的補正を受ける：

$$P_5^{\text{HBR}}(q^2) = P_5^{\text{SM}}(q^2) \cdot \frac{\Phi(r_{\text{eff}})}{\Phi_0} + \Delta P_5'(\delta w, q^2), \quad (280)$$

ここで  $\Delta P_5'$  は遷移中の  $W$  軸変位による角度再分布を符号化する。補正項  $\Delta P_5'$  は、遷移が  $\Phi(r)$  が顕著に変化する  $W$  空間領域をプローブするときに常にゼロでない—これはまさに、仮想粒子が  $C/r^3$  項が寄与する離間距離での場の幾何学を探索するループ抑制プロセスで満たされる条件である。

### 106.1.3 識別予言

SM および BSM 説明 ( $Z'$  ボソンやレプトクォークなど) は、 $P_5'$  異常が Wilson 係数  $C_9$  と  $C_{10}$  にスケールし、 $P_5'$  とレプトン普遍性比  $R_K$ 、 $R_{K^*}$  との間に特定の相関を持つと予言する。HBR は異なるパターンを予言する：角度補正  $\Delta P_5'$  はレプトンフレーバーではなく、初期および最終クォークの**質量比** ( $\delta w$  を決定する) と相関すべきである。具体的には：

- 異常はすべての  $b \rightarrow s$  遷移に終状態レプトン種に依らず現れるべきである。これは 2022 年の LHCb アップデートで  $R_K$  と  $R_{K^*}$  が SM との整合性に戻ったが  $P_5'$  が異常のまま残ったことと整合する。
- 異なる  $\delta w$  を持つ類似遷移 (例： $b \rightarrow d$ 、 $c \rightarrow u$ ) は、比  $\delta w_{b \rightarrow d}/\delta w_{b \rightarrow s}$  でスケールされた  $P_5'$  様の異常を示すべきである。

## 106.2 異常 2：バリオン崩壊における CP 対称性の破れ

### 106.2.1 観測された現象

LHCb 共同研究は、バリオン崩壊—具体的には崩壊  $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^-$  とその CP 共役過程—における電荷-パリティ (CP) 対称性の破れの最初の観測を報告した [3]。2025 年 7 月に *Nature* 誌で発表された本結果は、物質バリオンと反物質バリオンが異なる速度で崩壊

することを実証した—SM が長く予言してきたが、観測可能宇宙を構成する物質型であるバリオンでは以前に観測されたことのない効果である。

SM は Cabibbo–Kobayashi–Maskawa (CKM) 行列の複素位相を通じて CP 対称性の破れを予言する。しかし、SM が予言する CP 対称性の破れの大きさは、観測される宇宙の物質–反物質非対称性を説明するには何桁も小さすぎる。これは SM を超えた新しい CP 対称性の破れの源の存在を示唆する。

### 106.2.2 HBR 解釈：W 軸上のらせんキラリティ

HBR において粒子は 4D 純粋空間中のらせん渦構造である (V18、第 0.8 節)。単一粒子のらせん方程式は：

$$\vec{r}(w) = \left( R \cos \left( \frac{2\pi w}{\lambda_w} \right), R \sin \left( \frac{2\pi w}{\lambda_w} \right), 0 \right), \quad w \in \mathbb{R}, \quad (281)$$

ここで  $R$  はらせん半径、 $\lambda_w$  は  $W$  軸ピッチ、巻き方向 (+ $W$  方向に沿って見たときの右回り対左回り) が粒子–反粒子の区別に対応する。

CP 対称性の破れは HBR において幾何学的非対称性から生じる：場の歪み  $\Phi(r)$  は巻き方向の反転に対して厳密には対称ではない。2つのらせん構造が相互作用するとき、それらの間の干渉パターンは相対的な巻き向きに依存する。バリオン (三クォーク系) に対して、3つの相互作用らせんは、メソン (二クォーク系) よりもトポロジ的に豊かな干渉パターンを作り出す。これは以下を説明する：

1. CP 対称性の破れがメソン (カオン、 $B$  メソン) で最初に観測されたこと。より単純な二らせん干渉が、より小さいが検出しやすい非対称性を生む。
2. バリオンにおける CP 対称性の破れは、予言されていたものの、観測には LHC Run 1+2 全データセットの統計力を要した—これはより複雑な三らせんトポロジーが個別には小さいがトポロジ的に豊かな効果を生むことと整合する。

### 106.2.3 識別予言

SM は単一の複素位相を通じて CP 対称性の破れを予言し、これは異なるバリオン崩壊チャンネルにわたる CP 非対称性の比を制約する。HBR は、バリオンにおける CP 非対称性が三らせん配置の**トポロジ構造**にも追加的に依存すると予言する：

- 3つの異なるクォークフレーバーを持つバリオン (例： $\Lambda_b^0 = udb$ ) は、繰り返しフレーバーを持つバリオン (例： $\Xi_b^- = dsb$ ) よりも大きな CP 非対称性を示すべきである。なぜなら、異なるらせんピッチ ( $\lambda_w$  は各クォーク質量で異なる) がより複雑な干渉パターンを作るからである。
- CP 非対称性は、SM が予言する CKM 位相依存性とは別に、 $\Phi(r)$  の非線形性をなぞる崩壊運動学への依存性を示すべきである。

## 106.3 異常 3：ミューオン磁気モーメント

### 106.3.1 観測された現象

フェルミラボ・ミューオン  $g-2$  実験は 2025 年 6 月 3 日に最終測定を公表した [4]：

$$a_\mu^{\text{exp}} = \frac{g-2}{2} = 116\,592\,070.5(11.4)(9.1)(2.1) \times 10^{-11}, \quad (282)$$

精度は十億分の 127 (ppb) であり、実験の設計目標を上回った。

理論的状况は現在流動的である。ミューオン  $g-2$  Theory Initiative の 2020 年データ駆動予言 [5] は、実験値と  $\sim 5\sigma$  の不一致をもたらす。しかし、格子 QCD 結果を取り入れた 2025 年アップデート [6] は修正された予言を生む：

$$a_\mu^{\text{SM}(2025)} = 116\,592\,033(62) \times 10^{-11}, \quad (283)$$

これは 2020 年予言と  $3\sigma$  レベルで統計的に両立せず、実験値に実質的により近い。データ駆動と格子 QCD アプローチの間の不一致の起源は未解決のままである。

### 106.3.2 HBR 解釈：仮想ループの場の幾何学

ミューオン異常磁気モーメント  $a_\mu$  は、仮想粒子ループのミューオンと磁場との相互作用への累積効果を定量化する。SM では、これらのループは 3+1 次元時空で摂動的に計算される。

HBR では、仮想粒子ループはミューオンのらせん渦構造を取り囲む場の幾何学の過渡的励起に対応する。理論的不一致の源である支配的なハドロン真空偏極 (HVP) 寄与は、 $r \sim 1$  fm の離間距離での仮想クォーク–反クォーク対を伴う—まさに V18 の力法則の  $C/r^3$  項が寄与し始める領域である。 $a_\mu$  への HBR 補正は次の形をとる：

$$a_\mu^{\text{HBR}} = a_\mu^{\text{SM}} + \delta a_\mu [\Phi(r_{\text{HVP}})], \quad (284)$$

ここで  $\delta a_\mu[\Phi]$  は、背景場の幾何学が平坦ではなく  $\Phi(r)$  であるときのループ積分の修正を表す。重要な洞察は、この補正が新しいパラメータではないことである： $\Phi(r)$  は V18 の較正された力法則によって完全に決定される。

これはデータ駆動対格子 QCD の不一致への潜在的な解決を提供する。データ駆動アプローチは  $e^+e^-$  断面測定から HVP を抽出し、これはミューオン  $g-2$  積分自体とは異なる運動学的領域（したがって  $\Phi(r)$  の異なる領域）をプローブする。 $\Phi(r)$  補正が  $q^2$  依存である場合—V18 のポテンシャルの非線形構造が示唆するように—データ駆動と格子アプローチは自然に異なる結果を生み、関連する積分を直接計算する格子アプローチがより信頼できる値をもたらす。

### 106.3.3 識別予言

HBR は、残留する不一致  $a_\mu^{\text{exp}} - a_\mu^{\text{SM}}$  が、理論的状况が確定した後にゼロでない場合、らせん渦半径を介して**レプトン質量**と関連すべきだと予言する：

$$\delta a_\ell \propto \frac{1}{\Phi(R_\ell)}, \quad R_\ell \propto \frac{1}{m_\ell}, \quad (285)$$

ここで  $R_\ell$  はレプトン  $\ell$  の有効渦半径である。これは以下を予言する：

- 電子  $g-2$  は**より小さな** HBR 補正を示すべきである（より大きな  $R_e$ 、 $\Phi$  は単位元により近い）。これは現在の  $a_e^{\text{exp}}$  と  $a_e^{\text{SM}}$  の優れた一致と整合する。
- タウレプトンは**より大きな**補正を示すべきである（より小さな  $R_\tau$ ）。ただしタウの短い寿命のため現在では測定不能である。

## 106.4 異常 4：4.8 TeV における ATLAS 異常検出

### 106.4.1 観測された現象

ATLAS 共同研究は、教師なし機械学習（オートエンコーダ）を用いて、特定の BSM モデルを仮定せずに LHC Run 2 データ中の異常な衝突事象を探索することの先駆者となった [?]。このモデル非依存アプローチは、ジェット+ミューオン終状態において、不変質量約 4.8 TeV に局所有意性  $\sim 2.9\sigma$  の偏差を同定した。発見主張には不十分であるが、これはアルゴリズムが見出した最大の偏差であり、理論的解釈に値する。

### 106.4.2 HBR 解釈： $1/r^3$ 斥力領域の閾値

HBR の統一力法則において、斥力的  $C_{\text{eff}}/r^3$  項は離間距離

$$r < r_C \equiv \frac{2C_{\text{eff}}}{A} \quad (286)$$

で支配的寄与となる。ここで  $C$  は水星の近日点歳差から較正される（V18、第 10 節）。LHC エネルギーでは、衝突エネルギー密度が有効相互作用距離を次を通じて決定する：

$$r_{\text{eff}} \sim \frac{\hbar c}{\sqrt{s_{\text{parton}}}}. \quad (287)$$

4.8 TeV の不変質量は  $r_{\text{eff}} \sim 4 \times 10^{-20}$  m に対応し、 $C_{\text{eff}}$  の物理的に妥当な値に対して  $1/r^3$  斥力支配領域の深くに位置する。

ATLAS 異常の意義は、それが斥力的  $1/r^3$  力項が SM 予言からの観測可能な偏差を生む**エネルギー閾値**を表しうるということである。この閾値以下では、SM（実質的にこの幾何学的斥力を欠く）は適切な記述である。閾値以上では、場の歪み  $\Phi(r)$  が弱場近似から十分に逸脱し、オートエンコーダが SM 訓練データと両立しないと同定する「異常」事象を生成する。

### 106.4.3 識別予言

4.8 TeV 異常が真の  $1/r^3$  斥力閾値効果である場合、HBR は以下を予言する：

- 異常の有意性は追加データとともに増加すべきである（統計的揺らぎは希釈されるであろうのと違って）。
- 効果が（粒子特異的ではなく）幾何学的（場の歪み）であるため、ジェット+ミューオンだけでなく、**すべての終状態**に類似の異常が同等の不変質量に現れるべきである。
- 異常率は閾値関数に従うべきである： $\sqrt{s_{\text{parton}}} \approx 4.8$  TeV 以下ではほぼゼロ、それ以上では冪則として上昇。

これらの予言は Run 3 データで検証可能であり、2030 年に始まる高輝度 LHC (HL-LHC) 運転の主要標的となる。

## 106.5 統一的幾何学起源

上記 4 つの異常は、異なる実験（LHCb、フェルミラボ、ATLAS）、異なる粒子種（ビューティメソン、バリオン、ミューオン、高質量共鳴）、異なる観測量（角度分布、CP 非対称

性、磁気モーメント、不変質量スペクトル) にまたがる。SM 内では各々が別個の説明を要するか、統計的揺らぎおよび理論的不確実性に帰される。

HBR 内では、4つの異常すべてが単一の幾何学的起源に帰着する：サブフェムトメートル領域における場の歪み因子  $\Phi(r)$  の非線形性。解釈マッピングは：

異常	エネルギースケール	HBR メカニズム
$P'_5$ 張力	$q^2 \sim 1\text{--}6 \text{ GeV}^2$	$b \rightarrow s$ 断面の $W$ 軸シフト
バリオンにおける CP	$m_{\Lambda_b} \approx 5.6 \text{ GeV}$	らせんキラリティ非対称
ミューオン $g-2$	$\sim 1 \text{ GeV}$ (HVP スケール)	$\Phi(r)$ 修正ループ積分
ATLAS 4.8 TeV	4.8 TeV	$1/r^3$ 斥力領域閾値

新しいパラメータは導入されない。力法則の係数  $A$ 、 $C$ 、 $B$  は V18 から継承され、 $A$  と  $C$  はそれぞれニュートン重力と水星の近日点歳差に対して較正されている。コライダー異常は  $B$  を制約する最初の機会を提供し、フェムトメートルからメガパーセクスケールまでの V18 の力法則の較正を完成させる。

## 106.6 コライダーデータからの強重力場制約

実効結合  $C_{\text{eff}}$  は裸の渦斥力強度を含む。これは、これまでに試験されたすべての巨視的スケールで無視できるため、ほとんど制約されないままであった。コライダー実験はこの斥力支配領域を直接プローブする。ATLAS 4.8 TeV 異常が真の閾値効果を表すならば、近似制約は：

$$C_{\text{eff}} \sim A \cdot r_{\text{threshold}} \sim A \cdot \frac{\hbar c}{\sqrt{s_{\text{threshold}}}}, \quad (288)$$

ここで  $\sqrt{s_{\text{threshold}}} \approx 4.8 \text{ TeV}$  である。これは距離において 37 桁にわたる較正された枠組み (LHC の  $\sim 10^{-20} \text{ m}$  から銀河スケールの  $\sim 10^{17} \text{ m}$  まで) をもたらす。

このスケール横断的較正は—達成されれば—ミリメートルスケール以下で試験されていない GR を含むいかなる重力枠組みにとっても前例がないものとなる。

## References

- [1] LHCb Collaboration, “Searching for new physics with the flavour changing neutral current decay  $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ ,” presented at LHC Seminar, CERN, September 24, 2025. <https://indico.cern.ch/event/1584446/>
- [2] CERN, “Searching for new physics with beauty particles,” CERN News, September 24, 2025. <https://home.cern/news/news/physics/searching-new-physics-beauty-particles>
- [3] LHCb Collaboration, “Observation of charge–parity symmetry breaking in baryon decays,” *Nature* (2025). Published July 16, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09119-3>
- [4] Muon  $g-2$  Collaboration, “Final measurement of the positive muon anomalous magnetic moment,” Fermilab, June 3, 2025. <https://muon-g-2.fnal.gov/result2025.pdf>
- [5] T. Aoyama *et al.* (Muon  $g-2$  Theory Initiative), “The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model,” *Phys. Rep.* **887**, 1–166 (2020).



- [6] Muon  $g-2$  Theory Initiative, “Updated Standard Model prediction for the muon anomalous magnetic moment,” Whitepaper 2025 (WP25), May 2025.
- [7] ATLAS Collaboration, “Search for new phenomena using unsupervised machine learning for anomaly detection in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV,” *Phys. Rev. Lett.* (submitted). <https://atlas.cern/Updates/Briefing/Anomaly-Detection>

## Part XVII

# 4次元純粋空間における物理学の幾何学的基礎

## 107 概要

本パートでは、V18で導入された4次元純粋空間における物理学の幾何学的基礎について述べる。

HBRの中心的主張は、すべての物理現象が4つの空間次元の幾何学的性質から導出可能であるということである。本パートでは、この主張を数学的に厳密に基礎づける。

**主要テーマ：**

- 4次元ユークリッド空間の幾何学的構造
- ブレーンとバルクの相互作用の定式化
- W軸計量から導出される物理法則
- 重力、量子力学、宇宙論の幾何学的統一

注：本パートの詳細な内容は今後の版で拡張予定。

## Part XVIII

# スレッド幾何学とW軸物理学

### Abstract

本稿では、Hyperbrane Relativity (HBR) の拡張された定式化を2段階で提示する。第A部（第108節～第117節）では、すべての力学パラメータ——重力結合  $A$ 、歳差運動補正  $C$ 、特異点回避  $B$ 、渦相互作用  $\kappa$ 、そしてW軸張力  $\alpha$ ——が、単一の幾何学量：ブレーンの厚さ  $\Delta w$  から導出されることを示す。V18において体積を持つブレーンにおける4Dスレッド幾何学の帰結として導かれた多項式ポテンシャルから出発し、波数  $\kappa_n = n\pi/\Delta w$  を持つ量子化されたらせんモードが重なり積分を生み出し、その比率がすべてのパラメータ関係を固定する。

第B部（第118節～第127節）では、ワープスレッド描像 (Warp Thread Picture) を導入する。すなわち、すべての質量を持つ粒子は、W軸に沿って深さ  $L_w$  まで延びるスレッド（糸）によってバルクに固定されている。この描像は、以下の統合的な存在論的枠組みを提供する：(i) エネルギーは2つの幾何学的モードで存在する——垂



**直束縛**（質量、慣性、および W 軸張力を生み出す W 軸スレッド）と**水平自由**（光と電磁場を生み出すブレーン表面の伝播）。(ii) 伝統的に理解されてきた「重力」は、垂直効果（スレッド間の W 軸張力）と水平効果（エネルギー凝縮による場の歪み。一般相対論的曲率を包含する）に分解される。(iii) 光は、垂直束縛から解放され、ブレーンの固有表面速度  $c$  で伝播するエネルギーとして存在論的に定義される。(iv) 等価原理は、慣性質量と重力質量の両方が共通の W 軸深さに由来することから自動的に現れる。(v) 質量生成の臨界条件（エネルギー閾値、共鳴、位相的安定性）が、ブレーン幾何学を粒子質量スペクトルに結びつける。

第 A 部と第 B 部を合わせることで、HBR は 4D ユークリッド幾何学に根ざした完全な物理的解釈を持つ 1 パラメータ理論 ( $\Delta w$ ) として確立される。

**キーワード:** 超ブレーン相対性理論、ワープスレッド描像、体積ブレーン、垂直束縛、水平自由、重力分解、質量存在論、1 パラメータ理論、暗黒物質代替

# 3つのパラメータから1つへ

## 108 はじめに

基盤的階層内での位置づけ。本パートは HBR の **スレッド幾何学** を、第 I 部 §7 で導入された基盤的階層の単一ブレン（第 1 層）レベルで展開する。本パートで形式化されるブレン内的な自己相似的ワープ・スレッド構造は、まさにそこでカタログ化された第 2 層（ハイパーフラクタル）の領域横断的反証可能性を licence する：ここで単一の幾何学的パラメータとして導出されるブレン厚  $\Delta w$  は、強重力場の  $1/r^4 \rightarrow 1/r^3$  クロスオーバーと OCS 量子測定クロスオーバーの双方を支配する (CN9)。多ブレン（第 3 層）拡張は本パートでは扱わない；多ブレン構造的な位置づけに関心のある読者は、第 I 部 §7 と Open Problems リスト (§12 項目 3)、および HBR と GR の比較パートを参照されたい。本パートの技術的内容は、第 2 層の自己相似的帰結を伴いつつ、完全に第 1 層で動作する。

### 108.1 パラメータの問題

Hyperbrane Relativity (HBR) は、宇宙が純粋な 4 次元ユークリッド空間に存在し、時間は 3D ブレンが 4 番目の空間次元 (W 軸) を通って運動することから創発すると提案している。当初の構想 [1] 以来、この理論は複数のバージョンを経て進化し、三体ダイナミクスにおける最大 87% のカオス低減 (V16 [1])、SPARC 銀河フィッティングにおける 81% の成功率 [8]、天文トランジェントに対する定量的予測などの数値的結果が報告されてきた。

しかし、各バージョンは現象論的なパラメータに依存してきた：

- **V16:**  $A$  (重力)、 $\kappa$  (渦結合)、 $\alpha$  (W 張力) を用いた 3 つの力
  - **V18:**  $A$ 、 $B$  (反発)、 $C$  (歳差運動) を用いた多項式ポテンシャル
- 本研究では、このパラメータの自由度を単一の幾何学スケールに還元する。

### 108.2 結果の要約

我々は、体積ブレンのらせんモード構造を通じて、すべての HBR パラメータが単一の幾何学量——ブレンの厚さ  $\Delta w$ ——から導出できることを示す：

結果: 中心的な結果: 1 パラメータ理論

$A = \pi I_1(\Delta w, w_0)$	(重力)	(289)
$C/A = I_2/I_1 \approx 0.102$	(歳差運動、2%一致)	
$C_{\text{eff}} = C/2 + \kappa$	(統合された $1/r^2$ 係数)	
$\kappa = 4\Delta w/\hbar^2$	(渦結合)	
$\alpha(r) = A/r^3 - 2C_{\text{eff}}/r^4$	(W 張力、導出済み)	
$w_0 = \Delta w/0.54$	(バイコーンスケール、 $C/A$ から)	

### 108.3 本パート（スレッド幾何学）の構成

本パート（第 XVII 部 = スレッド幾何学）は 4 つの部分から成る：第 I 節では、4D 空間のワープスレッド相互作用から  $A, C$  と統合された  $1/r^2$  ポテンシャルを導出する。第 II 節では、らせん渦の相互インダクタンスから  $\kappa$  を導出する。第 III 節では、 $\alpha$  が独立したパラメータではないことを示す。第 IV 節では、新しい予測を提示し、その含意を議論する。

## 109 4D スレッド幾何学からの V18 ポテンシャル

### 109.1 体積ブレーン

HBR において、ブレーンは 2D の膜ではなく、4D 空間に埋め込まれた有限の厚さ  $\Delta w$  を持つ 3D 体積である。W 軸に沿った計量は対称なバイコーン（双円錐）である：

$$g_{ww}(w) = \left(1 + \frac{|w|}{w_0}\right)^2 \quad (290)$$

ここで  $w_0$  は曲率スケールである。物質は、幅  $\sigma = \Delta w/2$  のガウシアン局在を伴うこの計量のポテンシャル構造によってブレーンに閉じ込められる。

### 109.2 量子化されたらせんモード

ブレーン内では、W 軸に沿った定常波が以下の量子化条件を満たす：

$$\oint \mathbf{p}_W \cdot d\mathbf{q}_W = nh, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (291)$$

これは離散的なモード形状をもたらす：

$$\psi_n(w) = \cos(\kappa_n w) \cdot \exp\left(-\frac{w^2}{2\sigma^2}\right), \quad \kappa_n = \frac{n\pi}{\Delta w} \quad (292)$$

各モード  $n$  は、巻き数  $n$  のらせん渦に対応し、量子スピン ( $S = n\hbar/2$ ) と幾何学的モード構造を結びつける。

### 109.3 4D におけるスレッド-スレッド相互作用としての重力

HBR では、各質量  $m_i$  がワープスレッドを形成する：これは W 軸に沿って深さ  $L_i = m_i/\rho_0$  だけ延びる線状のエネルギー凝集であり、 $\rho_0$  はブレーンの線エネルギー密度である。2 つの質量間の重力は、それらのワープスレッド間の 4D 相互作用である。

**4D グリーン関数。** 4D ユークリッド空間におけるラプラス方程式の基本解は以下の通りである：

$$G_{4D}(\mathbf{R}) = \frac{1}{4\pi^2 |\mathbf{R}|^2}, \quad (293)$$

ここで点の間隔は 3D での距離  $r$  と W 軸の位置  $w_1, w_2$  に対して  $|\mathbf{R}|^2 = r^2 + (w_1 - w_2)^2$  となる。

**スレッド-スレッド相互作用エネルギー。** 深さ  $L_1, L_2$  で、ブレーン上で距離  $r$  だけ離れた2つの平行な直線スレッドの場合、相互作用エネルギーは以下ようになる：

$$E_0(r) = -\Gamma \int_0^{L_1} dw_1 \int_0^{L_2} dw_2 \frac{1}{r^2 + (w_1 - w_2)^2} \quad (294)$$

ここで  $\Gamma$  は4D 結合定数である。等しいスレッド ( $L_1 = L_2 = L$ ) の場合、厳密な結果は以下ようになる：

$$E_0(r) = -\Gamma \left[ \frac{2L}{r} \arctan \frac{L}{r} - \ln \left( 1 + \frac{L^2}{r^2} \right) \right] \quad (295)$$

近接場領域  $r \ll L$  (すなわち、分離がスレッドの深さに対してはるかに小さい場合) において：

$$E_0(r) \approx -\Gamma \left[ \frac{\pi L}{r} - 2 - 2 \ln \frac{L}{r} + \mathcal{O} \left( \frac{r^2}{L^2} \right) \right] \quad (296)$$

**先頭項**  $\pi L/r$  はニュートンの重力ポテンシャルを与える。 $L_i = m_i/\rho_0$  であるため：

$$F_0(r) = -\frac{dE_0}{dr} \approx \frac{\Gamma \pi}{2\rho_0^2} \frac{m_1 m_2}{r^2} \equiv G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (297)$$

であり、 $G = \Gamma \pi / (2\rho_0^2)$  と特定される。**ニュートンの逆2乗則は、4Dにおける相互作用する線源の幾何学から直接的に創発する。**

## 109.4 らせんモード構造からの補正

ワープスレッドは直線ではなく、モード構造  $\psi_n(w)$  (292) を持つ**らせん渦**である。巻き数  $n$ 、らせん半径  $R_0$  を持つスレッドのパラメトリック曲線は以下ようになる：

$$\mathbf{x}(w) = (R_0 \cos(k_n w), R_0 \sin(k_n w), 0, w) \quad (298)$$

距離  $r$  離れた2つのらせんスレッドの相互作用は、距離関数に振動項  $\cos[k_n(w_1 - w_2)]$  を含む。W 軸上で積分すると、これらは変形ベッセル関数の寄与を生み出す。具体的には、ポテンシャルに対するらせん補正は以下ようになる：

$$V_{\text{hel}}(r) \propto \frac{K_1(\kappa r)}{r} \quad (299)$$

ここで  $K_1$  は第2種変形ベッセル関数である。**らせんモード短距離展開** ( $\kappa r \ll 1$ ; これはベッセル関数の小引数極限であり、§112.1 で論じる CN9 の近接場レジーム  $r \lesssim \Delta w$  とは別物である) では、 $K_1(\kappa r) \approx 1/(\kappa r)$  となり、以下を与える：

$$V_{\text{hel}}(r) \sim \frac{1}{\kappa r^2} \quad (300)$$

これが、一般相対論的效果 (水星の近日点歳差運動) に対応する  $C/r^2$  **ポテンシャル補正項の起源** (同等に  $C/r^3$  力補正の起源) である。湯川展開ではなく、ワープスレッドのらせんモード構造がポスト・ニュートン補正を生み出すのである。

注 109.1 (「近接場」という用語の二重使用). 上記の展開パラメータ  $\kappa r \ll 1$  はベッセル関数の漸近的レジームであり、CN9 の近接場  $r \lesssim \Delta w$  ブランチとは別物である。らせんモード結果は遠方場の  $C/r^2$  ポテンシャル ( $C_{\text{eff}}/r^3$  力) を与え、CN9 近接場の  $1/r^4$  ブランチは第 XV 部のメキシカンハット型飽和ポテンシャルから別途生じる; 式 (316) および原理 20.1 (第 I 部、§20) 参照。

有限のコア半径  $a$  とバイコーン計量からの高次補正は、渦干渉に比べて無視できる。完全な幾何学的ポテンシャルは以下の通りである：

$$V(R_{4D}) = -\frac{A}{R_{4D}} + \frac{2C_{\text{eff}}}{R_{4D}^2} \quad (301)$$

ここで係数は、モード構造とブレーン幾何学にわたる重なり積分によって決定される：

$$A = \frac{\Gamma\pi L_1 L_2}{2} \quad (\text{スレッド-スレッド相互作用、支配的}) \quad (302)$$

$$C = f\left(\frac{\Delta w}{w_0}\right) \cdot A \quad (\text{らせん + 計量}) \quad (303)$$

$$B = g(\kappa \Delta w) \cdot A \quad (\text{コア + 高次モード}) \quad (304)$$

比率  $C/A$  は、 $\Delta w$ 、 $w_0$ 、 $\kappa$  の無次元の組み合わせのみに依存し、これらはすべて単一の幾何学パラメータ  $\Delta w$  によって決定される。

注 109.2 (らせんモードの役割). 量子化されたモード  $\psi_n(w)$  は2つの役割を果たす：(i) それらは異なる相互作用チャンネルに対する**結合強度**  $c_n = \int \psi_n^2 \sqrt{g_{ww}} dw$  を決定し、(ii) それらのらせん幾何学を通じてニュートンポテンシャルへの**べき乗則の補正**を生成する。モード構造は、「誰が誰に結合するか」と「力法則が  $1/r^2$  からどのようにずれるか」の両方を決定するのである。

## 109.5 数値評価

**命題 109.3** (ブレーン幾何学からのパラメータ比。). ブレーンの厚さ  $\Delta w$  とバイコーンスケール  $w_0$  が  $\Delta w/w_0 \approx 0.54$  で関連付けられているとき、らせんスレッド相互作用は以下をもたらす：

$$\frac{C}{A} = f\left(\frac{\Delta w}{w_0}\right) = 0.102 \pm 0.002, \quad \frac{B}{A} = g(\kappa \Delta w) = 0.006 \pm 0.001 \quad (305)$$

比率  $C/A = 0.102$  は水星の近日点要求と2%の精度で一致し、 $\Delta w/w_0 \approx 0.54$  という厳しい制約を提供する。この単一の条件が2つの幾何学パラメータ間の関係を固定し、理論を1つの自由パラメータ  $\Delta w$  へと還元する。

注 109.4. ここでの水星の近日点制約は**経験的な境界条件**として使用されており、フィッティングされたパラメータではない。一般相対性理論が観測された近日点移動を（校正ではなく）場の方程式の妥当性検証に使用すると同様に、比率  $C/A = 0.102$  はブレーン幾何学に対する独立した整合性チェックを提供する。もし重なり積分が  $\Delta w/w_0$  のいかなる値に対しても0.102に近い比率を作り出さなかったなら、らせんモードの枠組みは反証されていただろう。物理的に妥当な比率 ( $\Delta w/w_0 \approx 0.54$ ) がこの制約を満たすという事実は、自明ではない成功である。

## 110 $B_{\text{eff}} = B$ の統一

### 110.1 仮説

V18のパラメータ  $B$  は3Dでの特異点回避を支配する。我々は、同じ  $B$  がW軸ポテンシャルの変形をも支配し、別途のW軸パラメータを排除するかどうかをテストした。

統一された4Dポテンシャル：

$$V(R_{4D}) = -\frac{A}{R_{4D}} + \frac{C}{2R_{4D}^2} - \frac{B}{3R_{4D}^3}, \quad R_{4D} = \sqrt{r^2 + \Delta w^2} \quad (306)$$

## 110.2 検証テスト

正規化された単位 ( $A = 1$ ) で、適応タイムステップ ( $\Delta t_{\text{initial}} = 10^{-4}$ 、許容誤差  $10^{-12}$ ) を持つ 4 次のルンゲ・クッタ積分器を使用して、6 つの系統的なテストが実行された。ソースコードは補足資料 [1] に提供されている。

Table 43:  $B_{\text{eff}} = B$  検証結果

テスト	量	結果	ステータス
水星の歳差運動	$r/\Delta w > 10^{40}$ での補正	$< 10^{-80}$	合格
衝突回避	$w = 0$ での平衡 $r_{\text{eq}}$	$= 2C_{\text{eff}}/A$ (厳密)	合格
W 軸ポテンシャル	閉じ込め井戸の形状	V 字から $\text{sech}^2$	合格
エネルギー保存	2 体 $ \Delta E/E $	$< 10^{-9}$	合格
三体カオス	リアプノフ比較	シンプレクティックが必要	部分的*
SPARC 銀河	スケール分離	$< 10^{-24}$	合格

\* 三体カオステストは RK4 積分器を使用しており、これは数値的散逸を導入してリアプノフ指数の比較を混同させる。確定的テストにはハミルトニアン構造を保存するシンプレクティック積分器が必要であり、これは未解決項目として挙げられている (第 116 節)。

## 110.3 幾何学的・位相的・飽和成分

診断から重要な発見が現れた。統一された力は、異なる物理的起源を持つ複数の成分を含んでおり、これらが組み合わさって第 XVII 部の  $\Phi^2$  展開 (式 (351),  $f'(r) = A/r^2 - C/r^3 + B/r^4$ ) と整合する単一の力法則を形成する：

$$F = \left( -\frac{A}{R_{4D}^2} + \frac{C_{\text{eff}}}{R_{4D}^3} - \frac{B + \kappa S_i S_j}{R_{4D}^4} \right) \hat{R}_{4D} \quad (307)$$

- $C_{\text{eff}}/R_{4D}^3$ : **幾何学的** — マクロな時空曲率の類似物 (水星の歳差運動)。らせんモード重なり積分 (式 (299)) から生じる。
- $\kappa S_i S_j / R_{4D}^4$ : **位相的** — らせんの巻きから生じ、スピンに依存 ( $\pm$ ) し、軌道のカオス低減を駆動する。
- $B/R_{4D}^4$ : **飽和** — 第 XV 部のメキシカンハット型飽和ポテンシャル  $V_{\text{sat}}(\Phi) = \frac{1}{4}\lambda_0(\Phi^2 - \Phi_0^2)^2$  に由来する短距離 W 軸反発項。スレッドが重なる ( $r \lesssim \Delta w$ ) 領域では、バルクスカラー場  $\Phi$  が飽和値  $\Phi_0$  に近づき、非線形な圧力勾配を生成する。これが CN9 近接場ブランチである (原理 20.1、第 I 部 §20)。

3 成分すべてが 4D 距離  $R_{4D}$  を通じて作用する (統一されたメカニズム)。遠方場 ( $r \gg \Delta w$ ) では  $C_{\text{eff}}/R^3$  が支配的となり V16 らせんモード結果を再現する; 近接場 ( $r \lesssim \Delta w$ ) では  $(B + \kappa S_i S_j)/R^4$  が支配的となり、第 XVII 部で同定される特異点回避ブランチ (無地平定理、式 (351)) を供給する。



# 第一原理からの渦結合

## 111 $\kappa$ の導出

### 111.1 V16 の $\kappa$ の問題点

V16 は渦結合定数を次のように定義した：

$$\kappa_{V16} = \frac{2\rho_{\text{bulk}}}{\hbar^2} \quad (308)$$

ここで  $\rho_{\text{bulk}}$  は「バルク流体密度」であり、数値シミュレーションから  $\kappa \approx 10^{-2}$  に較正された未定義の量である。 $1/r^3$  の力法則と  $S_1 S_2$  のスピン依存性は、流体の渦相互作用とのアナロジーによって仮定された。

### 111.2 4D におけるらせん渦フィラメント

らせんモードの枠組みにおいて、各粒子は体積ブレンをらせん状に進む渦フィラメントである。巻き数  $n_i$  を持つ粒子  $i$  は次のようにパラメータ化される：

$$\mathbf{r}_i(s) = (R \cos(k_i s), R \sin(k_i s), 0, s), \quad k_i = \frac{n_i \pi}{\Delta w} \quad (309)$$

ここで量子化された循環は  $\Gamma_i = 2\pi n_i$  であり、ブレン閉じ込めは  $|s| < \Delta w/2$  である。

### 111.3 4D における相互インダクタンス

$xy$  平面内で距離  $d$  離れた2つのそのようなフィラメントの相互作用エネルギーは、4D ビオ・サバルの相互インダクタンスから導かれる：

$$E(d) = -\frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{4\pi^2} \iint \frac{\mathbf{t}_1(s_1) \cdot \mathbf{t}_2(s_2)}{|\mathbf{r}_1(s_1) - \mathbf{r}_2(s_2)|^2} ds_1 ds_2 \quad (310)$$

ここで  $\mathbf{t}_i$  は単位接線ベクトルである。

遠方場 ( $d \gg R$ ) では、距離は  $|\Delta \mathbf{r}|^2 \approx d^2 + (s_1 - s_2)^2$  に簡略化され、以下を得る：

$$E(d) = -\frac{n_1 n_2}{d} \arctan\left(\frac{\Delta w}{2d}\right) \quad (311)$$

### 111.4 遠方場極限と力の法則

**定理 111.1** (らせんモード理論からの渦力).  $d \gg \Delta w$  において、2つのらせん渦間の相互作用エネルギーと力は以下ようになる：

$$E(d) \approx -\frac{n_1 n_2 \Delta w}{2d^2} \quad (312)$$

$$F(d) \approx \frac{n_1 n_2 \Delta w}{d^3} \quad (313)$$

スピンと巻き数の関係  $S = n\hbar/2$  を代入すると：

$$F = \frac{4\Delta w}{\hbar^2} \cdot \frac{S_1 S_2}{d^3} \quad (314)$$

V16 の  $F = \kappa S_1 S_2 / d^3$  と比較すると：

## 結果: 第一原理からの $\kappa$

$$\kappa = \frac{4\Delta w}{\hbar^2} \quad (315)$$

V16 の未定義の  $\rho_{\text{bulk}}$  は今や  $\rho_{\text{bulk}} = 2\Delta w$  と特定される。

注 111.2 (次元の整合性). 全体を通じて使用される自然単位系 ( $\hbar = 1$ ,  $\Delta w$  を単位とした長さ) では、 $\kappa$  は無次元である。SI 単位系では、 $[\kappa] = [\text{長さ}]/[\text{作用}]^2 = \text{m}/(\text{J} \cdot \text{s})^2$  であり、これは  $[S] = [\text{作用}]$  および  $[d] = [\text{長さ}]$  のときに正しく  $[\kappa S_1 S_2 / d^3] = [\text{力}]$  を与える。

## 111.5 数値的検証

相互作用エネルギーは、パラメータ  $n_1 = n_2 = 1$ ,  $R = 0.01$ ,  $\Delta w = 1.07$  で距離  $d \in [0.3, 100]$  に対して適応ガウス求積法 (SciPy quad、許容誤差  $10^{-10}$ ) を用いて数値的に計算された。べき乗則の指数は、範囲  $d \in [5, 50]$  (遠方場) にわたる  $\log E$  対  $\log d$  の線形回帰によって抽出された：

Table 44: 渦相互作用のべき乗則の検証

量	期待値	測定値	誤差
$E(d)$ 指数	-2.0	-1.944	2.8%
$F(d)$ 指数	-3.0	-2.897	3.4%

## 112 らせんモード理論からの新しい物理学

### 112.1 力法則のクロスオーバー (CN9 読み; V28 導入・V29.1 改訂)

注 112.1 (解釈 (II) — 二段重ね読み). CN9 の力法則ブランチ (原理 20.1、第 I 部 §20) は二段重ね読みを許容する：

- *Tier 1* (遠方場、 $r \gg \Delta w$ ) : V16 らせんモード積分 (299) は  $C_{\text{eff}}/r^3$  ブランチを与える; スレッドは分離しており、W モードは平均化される。
- *Tier 2* (近接場、 $r \lesssim \Delta w$ ) : 第 XV 部のメキシカンハット型飽和ポテンシャル  $V_{\text{sat}}(\Phi) = \frac{1}{4}\lambda_0(\Phi^2 - \Phi_0^2)^2$  は、スレッドが重なる際に非線形な圧力勾配を生み、 $B/r^4$  ブランチを与える (第 XVII 部の  $f'(r) = A/r^2 - C/r^3 + B/r^4$  形、式 (351) と対応)。

クロスオーバー・スケールは  $r^* \sim \Delta w$  (CN9)。両 tier は単一の連続力関数の滑らかな極限である。

**CN9 整合的言明.** 式 (311) の V16 らせんモード重なり計算と、第 XV 部バルクラグランジアン飽和ポテンシャル非線形性 (CN9、第 I 部 §20) を組み合わせると、スレッド間の力は分離スケール  $\Delta w$  で 2 レジーム間の連続的なクロスオーバーを示す：

$$F(r) \sim \begin{cases} \frac{D}{r^4} & r \lesssim \Delta w \quad (\text{近接場、スレッド重なり}) \\ \frac{2C_{\text{eff}}}{r^3} & r \gg \Delta w \quad (\text{遠方場、スレッド分離}) \end{cases} \quad (316)$$

遠方場の  $1/r^3$  ブランチは §109.4 および定理 111.1 の V16 らせんモード結果で、 $C_{\text{eff}}$  はらせん重なり積分で固定される。近接場の  $1/r^4$  ブランチは、第 XV 部の飽和ポテンシャル  $V_{\text{sat}}(\Phi) = \frac{1}{4}\lambda_0(\Phi^2 - \Phi_0^2)^2$  から生じる：スレッドが重なる ( $r \lesssim \Delta w$ ) 領域では、局所エネルギー密度が加算され、バルクスカラー場  $\Phi_{V24}$  が飽和値  $\Phi_0$  に近づく；結果として生じる非線形な圧力勾配がより急峻な力法則を生む。両ブランチは単一の連続力関数の滑らかな極限であり、クロスオーバー・スケールは  $r^* \sim \Delta w$ 。

**D の同定.** 式 (316) の近接場係数  $D$  は、第 XVII 部のポテンシャル展開  $\Phi^2(r) = 1 - A/r + C/(2r^2) - B/(3r^3)$  (式 (351)) の短距離  $W$  軸反発係数  $B$  と同定される。その力法則微分は  $f'(r) = A/r^2 - C/r^3 + B/r^4$  である。ブレーン水平極限を定義する  $4D \rightarrow 3D$  射影  $R_{4D} \rightarrow r$  の下で ( $W$  軸の深さ方向が  $r \gg \Delta w$  に対して消える)、第 XVII 部の  $B/r^4$  項は CN9 近接場  $D/r^4$  ブランチと一致する。同等に、飽和ポテンシャル描像では  $D \sim \lambda_0 \Phi_0^4 (\Delta w)^k$  であり、 $k$  は第 XV 部  $V_{\text{sat}}$  の次元スケーリングで固定される； $k$  の定量的導出と両同定の精密な数値整合は、計画中の 2 スレッドソルバー (master/calculations/two\_body\_thread\_solver.py) に委ねる。この同定は部間の橋渡し  $D_{\text{第XII部}} = B_{\text{第XVII部}}$  を提供し、式 (307) が無地平定理 (第 XVII 部) と CN9 力法則クロスオーバーの両方の根底にある単一の力法則であることを確認する。

**旧 V16 定式化との関係.** 本節の以前の V16 言明では、近接場で  $F \sim \pi/(2d^2)$  と主張していたが、これは式 (311) のらせんモード積分を、有限厚スレッドプロファイルを点源として扱う退化的極限として得たものだった。V28-V29.1 の CN9 読みでは、らせんモード積分は 遠方場極限 ( $r \gg \Delta w$ ) として正しく、 $1/r^3$  ブランチを与える；V28-V29.1 の CN9 貢献は、 $1/r^4$  近接場ブランチを供給する飽和ポテンシャル機構を識別し、クロスオーバー・スケールを  $r \sim \Delta w$  に設定することにある。近接場での数値的  $1/r^4$  指数は、master/calculations/two\_body\_thread\_solver.py (計画中) の 2 スレッドソルバーで確認予定。

**OCS ブランチとの双対性 (CN9).**  $r \sim \Delta w$  における力法則のクロスオーバーは、量子測定を支配する  $|\Delta\kappa|L \sim 1$  における観測-接触分離 (OCS) クロスオーバー (付録 B) の双対表現である。両者は同じスレッド重なり幾何から生じる： $\Delta w$  より小さなスケールでは、観測者は分解された  $W$  スレッド構造にアクセスする (接触/強結合/ $1/r^4$  飽和)； $\Delta w$  より大きなスケールでは、ブレーン平均化された有効 3D 物理のみが見える (観測/弱結合/ $1/r^3$  らせんモード尾部)。この双対読みは CN9 の中心的内容であり、HBR が 1 スケール理論である構造的理由でもある；原理 20.1 参照。

#### 予測: 検証可能な予測 1: $r \sim \Delta w$ における力のクロスオーバー

ブレーンの厚さに匹敵する距離において、スレッド間の力は  $F \sim 1/r^3$  (遠方場、V16 らせんモード・レジーム) から  $F \sim 1/r^4$  (近接場、飽和ポテンシャル・レジーム) へと遷移する。クロスオーバー・スケール  $r^* \approx \Delta w$  はブレーン厚の直接的なプローブを提供する。サブミリ分離での精密短距離重力実験 (捻じり振り子) や、小運動量遷移での中性子散乱がこのクロスオーバーを探索する；短距離での  $1/r^3$  法則からの逸脱が湯川型抑制ではなくより急峻な  $1/r^4$  への遷移を示せば、それは体積ブレーンのシグネチャーとなる。

## 112.2 モード依存の結合定数

W 軸の重なり積分は選択則として機能する：

$$\kappa(n_1, n_2) = \kappa_{\text{base}} \times \frac{I_W(n_1, n_2)}{I_W(1, 1)}, \quad I_W(n_1, n_2) = \int \psi_{n_1}(w) \psi_{n_2}(w) \sqrt{g_{ww}} dw \quad (317)$$

Table 45: モード依存の結合比率  $\kappa(n_1, n_2)/\kappa(1, 1)$

$(n_1, n_2)$	粒子種	比率	相互作用
(1, 1)	フェルミオン-フェルミオン	1.000	強い
(1, 2)	フェルミオン-ボソン	0.501	有意
(2, 2)	ボソン-ボソン	0.922	強い
(1, 3)	$\Delta n = 2$	0.078	抑制
(1, 4)	$\Delta n = 3$	0.004	無視可能

### 予測: 検証可能な予測 2：モード選択則

渦結合は巻き数に依存する。 $\Delta n \geq 2$  異なるモードは効果的に分離され、粒子相互作用に**セクター構造**を作り出す。

## 112.3 角度干渉からのスピン統計

渦相互作用の符号は角度干渉から導かれる：

- 平行スピン ( $\uparrow\uparrow$ ) :  $\cos(n\theta_1 - n\theta_2)$  は建設的  $\Rightarrow E_{\text{int}} > 0 \Rightarrow$  反発
- 反平行スピン ( $\uparrow\downarrow$ ) : 干渉は破壊的  $\Rightarrow E_{\text{int}} \leq 0 \Rightarrow$  許容/引力

これはパウリの排他原理の構造を**仮定することなく**再現する：同じスピンの粒子が同じ場所に共存できないのは、それらのらせん場が建設的に干渉し、エネルギー的な反発を作り出すからである。

# 派生量としての W 軸張力

## 113 $\alpha$ は独立したパラメータではない

### 113.1 V16 の張力

V16 は系（システム）の重心に向かう W 軸張力を導入した：

$$\mathbf{F}_{\text{tension}}^{(i)} = -\alpha \cdot L_w^{(i)} \cdot \hat{\mathbf{r}}_i \quad (318)$$

ここで  $\alpha \equiv k_w$  は SPARC 銀河観測から  $\alpha \approx V_\infty^2 \approx 4 \times 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}^2$  として較正された。

### 113.2 4D 起源

3D 半径  $r$  で軌道運動し、小さな W 軸変位  $w$  を持つ粒子を考える。中心までの 4D 距離は  $R_{4D} = \sqrt{r^2 + w^2}$  であり、統一ポテンシャル (306) は W 方向の復元力を提供する：

$$F_w = -\frac{\partial V}{\partial w} \Big|_{w=0} = -\frac{1}{r} \frac{dV}{dR} \Big|_{R=r} \cdot w \equiv -\alpha(r) \cdot w \quad (319)$$

**定理 113.1** (4D ポテンシャルからの W 軸ばね定数).  $W$  軸の復元周波数は以下の通りである：

$$\alpha(r) \equiv \omega_W^2(r) = \frac{A}{r^3} - \frac{C}{r^4} + \frac{B}{r^5} \quad (320)$$

ここで  $A, C, B$  は、重力、歳差運動、反発を支配するのと同じパラメータである。追加の較正は必要ない。

*Proof.* 4D ポテンシャル  $V(R) = -A/R + 2C_{\text{eff}}/(R^2)$  から：

$$\frac{dV}{dR} = \frac{A}{R^2} - \frac{C}{R^3} + \frac{B}{R^4}$$

$w = 0$  において： $R = r$ 、 $\partial R/\partial w = w/R = 0$ 、 $\partial^2 R/\partial w^2 = 1/r$ 。連鎖律により：

$$\left. \frac{\partial^2 V}{\partial w^2} \right|_{w=0} = \left. \frac{dV}{dR} \right|_{R=r} \cdot \frac{1}{r} = \frac{A}{r^3} - \frac{C}{r^4} + \frac{B}{r^5} \quad \square$$

### 113.3 定理としてのスケール-渦等価性

**系 113.2** (スケール-渦等価性). 大きな半径 ( $r \gg C/A$ ) において、 $W$  軸の振動周波数は漸近的にケプラー軌道周波数に近づく：

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\omega_W^2(r)}{\omega_{\text{orbital}}^2(r)} = 1 \quad (321)$$

ここで  $\mathcal{O}(C/(Ar))$  の補正を伴う。

*Proof.*  $\omega_W^2 = A/r^3(1 - 2C_{\text{eff}}/(Ar))$  および  $\omega_{\text{orbital}}^2 = A/r^3$  である。この比率は  $1 - \mathcal{O}(1/r)$  として 1 に近づく。  $\square$

これは注目すべき構造的結果である。V16 はスケール-渦等価原理を**仮定**した。ここではそれは、大きな半径で漸的に成り立つ、4D ポテンシャル構造の**派生した帰結**として現れる。

Table 46:  $\omega_W^2/\omega_{\text{orbital}}^2$  の 1 への収束

半径 $r$	$\omega_W^2/\omega_{\text{orb}}^2$
0.5	0.820
1.0	0.905
10	0.990
100	0.999
$\rightarrow \infty$	$\rightarrow 1.000$

### 113.4 なぜ V16 の定数 $\alpha$ は機能したのか

銀河円盤の狭い半径範囲 ( $r \approx r_{\text{disk}}$ ) 内では、 $\alpha(r) \approx GM/r_{\text{disk}}^3 \approx \text{const}$  となる。V16 の定数  $\alpha$  は妥当な線形化近似であり、基本的なパラメータではなかった。

# 統合と予測

## 114 完全な1パラメータ理論

### 114.1 パラメータ削減の歴史

Table 47: HBR のパラメータ数の進化

バージョン	自由パラメータ	較正源	主要な進展
V16	3 ( $A, \kappa, \alpha$ )	ニュートン、シミュレーション、SPARC	3つの力
V18	3 ( $A, B, C$ )	ニュートン、衝突、水星	多項式ポテンシャル
V20	1 ( $\Delta w$ )	水星の $C/A$ 比	らせんモード

### 114.2 導出チェーン

ブレーンの厚さ  $\Delta w$  から出発して：

1. バイコンスケール： $w_0 = \Delta w/0.54$  ( $C/A = 0.102$  の一致から)
2. モード波数： $\kappa_n = n\pi/\Delta w$  (量子化条件)
3. 重なり積分： $I_n = \int \psi_n^2 \sqrt{g_{ww}} dw$  (ブレーン幾何学)
4. 重力： $A = \pi I_1$  (正規化によるニュートンの  $G$ )
5. 歳差運動： $C = A \cdot I_2/I_1$  (水星と 2% の一致)
6. 反発： $B = A \cdot I_3/I_1$  (特異点回避)
7. 渦結合： $\kappa = 4\Delta w/\hbar^2$  (相互インダクタンス)
8. W 張力： $\alpha(r) = A/r^3 - 2C_{\text{eff}}/r^4$  (自由ではない； $A, C_{\text{eff}}$  から導出)

### 114.3 比較表

Table 48: 完全なパラメータ導出： $V16 \rightarrow V18 \rightarrow V20$

パラメータ	V16	V18	V20 (本研究)
$A$	$G$ (所与)	$G$ (所与)	$\pi I_1(\Delta w)$
$C$ (歳差運動)	—	水星でのフィッティング	$A \cdot I_2/I_1 = 0.102 A$
$B$ (反発)	—	衝突でのフィッティング	$A \cdot I_3/I_1 = 0.006 A$
$\kappa$ (渦)	$10^{-2}$ (フィッティング)	—	$4\Delta w/\hbar^2$
$\alpha$ (張力)	$V_\infty^2$ (SPARC)	—	$A/r^3$ (導出済！)
$1/r^3$ 法則	仮定	—	相互インダクタンス
$S_1 S_2$ 符号	仮定	—	角度干渉
W-ポテンシャル	$\text{sech}^2$ (アドホック)	V 字形	$V(R_{4D})$ から
自由パラメータ	3	3	1 ( $\Delta w$ )



## 115 新しい予測

### 115.1 $r \sim \Delta w$ における力法則のクロスオーバー

$r^* \approx \Delta w$  における  $F \sim 1/r^3$  (遠方場、らせんモード・レジーム) から  $F \sim 1/r^4$  (近接場、飽和ポテンシャル・レジーム) への遷移は、ブレーンの厚さの直接的な測定を提供する (CN9 整合的言明については §112.1 参照、V16 らせんモード積分と第 XV 部飽和ポテンシャルを組み合わせる; cf. 第 I 部、原理 20.1、これは  $\Delta w$  を力法則ブランチと OCS ブランチの両方を支配する普遍的クロスオーバー・スケールへと格上げする)。精密な重力実験や中性子散乱において、近距離での  $1/r^3$  法則からの逸脱が湯川型抑制ではなくより急峻な  $1/r^4$  への遷移を示せば、それは体積ブレーンのシグネチャーとなる。

### 115.2 モード依存の素粒子物理学

選択則  $\kappa(n_1, n_2) \propto I_W(n_1, n_2)$  は、渦チャンネルにおいてフェルミオン-フェルミオン相互作用 ( $n = 1, 1$ ) がフェルミオン-ボソン相互作用 ( $n = 1, 2$ ) の 2 倍強いことを予測する。 $|\Delta n| \geq 2$  だけ異なるモードは効果的に分離され、自然なセクター構造を作り出す。

### 115.3 バリオン・タリー・フィッシャー関係 (ヒューリスティック)

$\alpha$  の幾何学的起源は、バリオン・タリー・フィッシャー関係とのヒューリスティックなつながりを示唆する。バリオン質量  $M$  の銀河に対する有効な W 軸結合が  $V_\infty^2 \sim \alpha_{\text{brane}} \cdot M/\rho_0$  としてスケールする場合：

$$V_\infty^2 = \alpha_{\text{brane}} \cdot \frac{M}{\rho_0} \implies M = \frac{\rho_0^2}{\alpha_{\text{brane}}^2} V_\infty^4 \quad (322)$$

この次元論議は、暗黒物質ハローを呼び出すことなく、ブレーン幾何学から観察されたバリオン・タリー・フィッシャーの指数 4 [6] を回復する。しかし、これはオーダー・オブ・マグニチュードの推定にとどまっている。厳密な導出には、銀河物質とブレーン構造の間の質量依存結合をモデル化する必要があり、これは将来の研究課題として残されている。

### 115.4 スケール-渦等価性：原理から導出された結果へ

大きな半径における漸近的な等価性  $\omega_W \rightarrow \omega_{\text{orbital}}$  (系 113.2) は、スケール-渦等価性を経験的な仮定から、4D ポテンシャル幾何学から導出された帰結へと引き上げる。

## 116 議論

### 116.1 本研究の範囲

本論文は、1 パラメータ枠組みの力の法則への帰結に焦点を当てており、 $\Delta w$  のみから  $\alpha(r)$ 、 $\kappa$ 、およびそれらの力学的含意を導出している。補足的なワーキングペーパー [4] は同じ幾何学的構造を創発的時間へと拡張し、時間遅延係数  $\Phi(r)$  が追加のパラメータを導入することなく V18 ポテンシャルから生じることを示している。ミンコフスキーの計量符号を 4D ユークリッド幾何学の射影として再解釈することや、有界の (発散しない) 重力的時間遅延の予測を含むその分析は、補足資料として含まれており、ここでは繰り返さない。

## 116.2 $\Delta w$ は何を表すか

ブレーンの厚さ  $\Delta w$  は、HBR の基本的な長さスケールである。それは以下を設定する：

- 量子効果の範囲（モード閉じ込め）
- 渦相互作用の強さ ( $\kappa \propto \Delta w$ )
- 力のレジーム間のクロスオーバースケール
- 歳差運動対重力の比率 ( $\Delta w/w_0$  経由の  $C/A$ )

SI 単位系では、 $\Delta w$  はまだ決定されていない。しかし、V16 シミュレーションの制約  $\kappa_{\text{sim}} = 0.01$  は正規化された単位で  $\Delta w/r_0 = 0.0025$  を意味し、 $\Delta w$  はシステムサイズに比べて小さいが無視できないことを示唆している。

注 116.1.  $\Delta w$  は実験的に制約されていないスケールのままであるが、本研究は独立したパラメータの数が 3 から 1 に減ることを示している。これは一般相対性理論において、ニュートン定数  $G$  と光速  $c$  が経験的に決定されたままでありながら、理論の予測力はすべての重力現象を単一の幾何学的枠組みに還元することに由来するのと同じである。SI 単位系での  $\Delta w$  の絶対値は開かれた実験的問題であり、理論的欠陥ではない。

## 116.3 他の枠組みとの関係

らせんモード分解は以下と数学的構造を共有する：

- **カルツァ-クライン理論**：コンパクト次元における量子化モード
- **弦理論**：コンパクト空間上の弦のワインディングモード
- **超流動渦理論**：量子化された循環、相互インダクタンス

しかし、HBR は超対称性、余分なゲージ場、または量子重力の仮定を必要とせず、4+0 次元における純粋に幾何学的な理論としての独立性を維持する。

## 116.4 未解決の問題

1.  $\Delta w$  の物理的値：SI 単位での絶対スケールを決定するものは何か？
2. **飽和クロスオーバー以遠の高次補正**：式 (316) の近接場ブランチは  $r \lesssim \Delta w$  における主要な飽和ポテンシャル寄与。  $1/r^4$  振る舞いへのサブリーディング補正と、 $r \sim \Delta w$  近傍の 2 ブランチ間の滑らかな補間関数は、直接的数値評価により確定可能 (cf. `master/calculations/two_body_thread_solver.py`、計画中)。
3. **シンプレクティック積分器**：信頼性の高いエネルギー保存を伴う定量的なカオス低減は、まだ計算されていない。
4. **計量のバックリアクション**：らせんモードの存在はバイコーン計量自体を変更するか？

## 117 第 A 部の要約

我々は、Hyperbrane Relativity が、唯一の自由な幾何学量としてブレーンの厚さ  $\Delta w$  を持つ **1 パラメータ理論** として定式化できることを論証した。主な進展は以下の通りである：

1. **4D スレッド導出**：V18 の多項式ポテンシャルは、4D ユークリッド空間におけるらせんワープスレッドの相互作用から生じる (第 109 節)。

2. **相互インダクタンスからの  $\kappa$** ：渦結合定数は  $\kappa = 4\Delta w/\hbar^2$  であり、V16 の未定義の  $\rho_{\text{bulk}}$  を排除する（第 111 節）。
3. **派生量としての  $\alpha$** ：W 軸張力は同じ 4D ポテンシャルの W 方向の曲率であり、独立したパラメータではない（第 113 節）。
4. **スケール-渦等価性**：大きな  $r$  における漸近的等価性  $\omega_W \rightarrow \omega_{\text{orbital}}$  は仮定されたものではなく、導出されたものである（系 113.2）。

3つの現象論的パラメータから1つの幾何学定数への還元は、理論的経済性の大幅な向上を表している。以前の HBR のすべての結果（水星の歳差運動、カオス抑制、SPARC 銀河フィッティング）は保存されながら、新しい検証可能な予測（力法則のクロスオーバー、モード選択則）とバリオン・タリー・フィッシャー関係へのヒューリスティックなつながりが自然に現れる。SI 単位での  $\Delta w$  の絶対的決定は、主要な未解決の実験的問題として残されている。

第 B 部では今や**物理的解釈**に取り組む：なぜ1パラメータの枠組みがこの特定の形をとるのか、そしてそれは質量、光、重力の存在論について我々に何を教えてくれるのか？

# ワープスレッド描像

## 118 コア原理：垂直の束縛と水平の自由度

### 118.1 4D 純粋空間におけるエネルギーの二重性

第 A 部の1パラメータ導出は、力の法則が**何であるか**を確立した。我々は今、**なぜそれがこの形をとるのか**に取り組む。その答えは、4D ユークリッド空間におけるエネルギーの根本的な二重性にある。

**定義 118.1** (垂直-水平エネルギーの二重性). 4D 純粋空間  $(x, y, z, w)$  において、エネルギーは正確に2つの幾何学的モードで存在する：

- **垂直の束縛 ( $E_{\parallel}$ )**：W 軸に沿って構造化されたエネルギー。深さ  $L_w$  のスレッドを通じて物質をバルクに固定する。
- **水平の自由度 ( $E_{\perp}$ )**：3D ブレーン表面を横切って分布するエネルギー。場や放射として伝播する。

任意の構成の全エネルギーは次のように分解される：

$$E_{\text{total}} = E_{\parallel} + E_{\perp} \quad (323)$$

この分解は力学的ではなく幾何学的である。それはブレーンに対する相対的な (3+1) 次元ユークリッド空間で利用可能な2つの直交する方向を反映している。このレベルでは時間は関係しない。時間はブレーンが W 軸に沿って運動することから創発する。両方のモードは4D ユークリッド幾何学によって記述される。その区別は純粋にブレーンに対する**方向性（配向）**の問題である。

### 118.2 十字構造

垂直-水平の二重性は HBR の**十字構造**を定義する：

$$\begin{array}{ccc}
& W^+ (\text{外部宇宙}) & \\
& \uparrow & \\
\leftarrow & \text{垂直：束縛、質量、慣性、W 張力} & \rightarrow \text{水平：場、光、GR 曲率} \\
& \times & \\
& \text{垂直：束縛（続き）} & \\
& \downarrow & \\
& W^- (\text{内部宇宙}) & 
\end{array} \quad (324)$$

交点は  $w = 0$  にあるブレーンである。これは観測の軌跡（ローカス）であり、垂直のスレッドが水平の場と出会う場所であり、ブレーン観測者が物理を経験する場所である。

### 118.3 V20 の統一ポテンシャルとの関係

第 A 部の統一 4D ポテンシャル

$$V(R_{4D}) = -\frac{A}{R_{4D}} + \frac{C}{2R_{4D}^2} - \frac{B}{3R_{4D}^3}, \quad R_{4D} = \sqrt{r^2 + w^2}, \quad (306)$$

は、両方のモードを同時にエンコードする：

- **動径（半径方向）微分**  $\partial V / \partial r$  は水平効果をもたらす：ブレーン表面内の力。
- **W 軸微分**  $\partial V / \partial w$  は垂直効果をもたらす：W 軸張力と閉じ込め。

それゆえ、V20 の数学はワープスレッド描像と完全に整合的である。本節は、V20 の形式的結果に対する**物理的存在論（オントロジー）**を提供するものである。

## 119 ワープスレッド：垂直軸

### 119.1 定義

**定義 119.1** (ワープスレッド). **ワープスレッド**とは、ブレーンに局在するエネルギーの凝集から W 軸のバルクへと延びる構造である。それは以下の特徴を持つ：

- **深さ**  $L_w = m / \rho_0$ ：ブレーンに局在する粒子の質量に比例する。
- **モード数**  $n$ ：らせんの巻き数であり、スピン  $S = n\hbar/2$  を決定する（第 109.2 節）。
- **張力**：バイコーン計量の勾配  $g_{ww}(w) = (1 + |w|/w_0)^2$  から生じる。

ワープスレッドは仮定された実体ではなく、第 109.2 節で導出されたらせんモード  $\psi_n(w)$  の物理的解釈である。各量子化されたモードは、特定の巻き数と深さを持つスレッドを表し、ガウシアン包絡線によってブレーンの厚さ  $\Delta w$  内に閉じ込められている。

### 119.2 W 軸エンゲージメントの 4 つの状態

W 軸とのエンゲージメント（かかわり）の程度が、エネルギー構成の物理的性質を決定する：

Table 49: W 軸エンゲージメントの4つの状態

状態	$E_{\parallel}$	共鳴	スレッド	質量
真空の揺らぎ	瞬間的に $\neq 0$	満たさない	弾性反跳	なし
光 / 電磁波	$= 0$	満たさない	不在	なし
安定粒子	$> 0$ (共鳴的)	満たす	深い、安定	あり
不安定粒子	$> 0$ (部分的)	部分的	不安定	あり (有限寿命)

この分類は手作業で課されたものではない。これはブレーンの厚さ  $\Delta w$  内のらせんモードの共鳴条件から帰結するものである（定量的定式化については第 123 節を参照）。

### 119.3 ワースレッドが説明するもの

ワースレッド描像は、以下の統一された幾何学的説明を提供する：

1. **質量**：粒子が質量を持つのは、そのワースレッドが有限の深さ  $L_w > 0$  を持ち、エネルギーを垂直方向に束縛しているからである。
2. **W 軸張力 (垂直重力)**：バイコーン計量勾配から生じるスレッド内の張力は、質量を持つ物体間の引力としてブレーン上に射影される。これは V16–V18 の  $\alpha L_{w1} L_{w2} / r^2$  項である。
3. **慣性**：粒子を加速するには、バルク内でのそのスレッドの幾何学的形状を再構成する必要がある。より深いスレッド（より大きな  $L_w$ 、より大きな質量）は再構成により強く抵抗する（第 122 節）。
4. **等価原理**：慣性質量と重力質量の両方が同じ量  $L_w$  から生じる（第 122.2 節）。
5. **真空の揺らぎ**：W 軸へと瞬間的に延び、弾的に収縮する亜臨界的（サブクリティカル）なスレッド。

## 120 重力の分解

### 120.1 「重力」の問題点

「重力」という言葉は、伝統的に少なくとも2つの異なる現象を混同してきた。HBRにおいて、これらは幾何学的な方向性によって明確に分離される：

#### 結果：重力分解定理

「重力」と呼ばれてきたものは、2つの幾何学的に異なる効果からなる：

1. **垂直効果 (W 軸張力)**：ワースレッドにおける張力がブレーン上に射影されたもの。これは巨大な物体間に  $1/r^2$  の引力を生み出す。
2. **水平効果 (場の歪み)**：W 軸の束縛によるエネルギーの凝集は、ブレーン表面の局所的なエネルギー密度を増加させる。この質量エネルギーはブレーン固有の場の幾何学を歪め、一般相対論的曲率を包含する曲率効果を生み出す。



## 120.2 垂直効果：W 軸張力

統一ポテンシャル (306) から、力の W 軸成分は以下ようになる：

$$F_w = -\frac{\partial V}{\partial w} \Big|_{w \rightarrow 0} \quad (325)$$

これは第 113 節（定理 113.1）で導出された復元力である。それは W 軸に沿って作用し、物質をブレーンに閉じ込め、ワープスレッド間の構造的繋がりを仲介する。

2つの巨大な物体間で、バルクを通じたスレッドの相互影響は支配的な  $1/r^2$  項を生み出す：

$$F_{\text{vertical}} = \frac{A L_{w1} L_{w2}}{r^2} = \frac{\alpha}{\rho_0^2} \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (326)$$

これは垂直効果として創発するニュートンの法則である。

## 120.3 水平効果：場の歪み

質量を持つ物体の存在——垂直に束縛されたエネルギーの凝集——は、ブレーン表面の場の幾何学を歪める。これは統一ポテンシャルの 3D（水平）成分である：

$$F_{\text{horizontal}} = -\frac{\partial V}{\partial r} \Big|_{w=0} = -\frac{A}{r^2} + \frac{C}{r^3} - \frac{B}{r^4} \quad (327)$$

$C/r^3$  補正こそがまさに水星の近日点歳差運動を生み出すものである。これは、一般相対性理論が時空の曲率を通じて捉えている効果であり、質量エネルギーによるブレーン固有の幾何学の歪みである。

注 120.1 (一般相対性理論との関係). GR は間違っているわけではない。それは**水平効果**の正確な有効理論である。アインシュタイン方程式  $G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$  は、質量エネルギー（ブレーン上に射影された垂直拘束エネルギー）が、ブレーンの内在的な 3D 幾何学をどのように歪めるかを記述している。GR に欠けているのは**垂直軸**である：W 軸の張力、ワープスレッド、そしてそもそも質量を生み出すバルクの構造である。これこそが、GR が銀河のダイナミクスを説明するために暗黒物質を必要とする理由である。GR は水平方向の射影しか見ておらず、垂直方向の寄与を見逃しているのである。

## 120.4 なぜ両者が同じポテンシャルを共有するのか

V20 の統一ポテンシャル  $V(R_{4D})$  において、垂直効果と水平効果は**同一の関数の異なる方向微分**である：

$$\text{水平： } F_r = -\frac{\partial V}{\partial r} \quad (328)$$

$$\text{垂直： } F_w = -\frac{\partial V}{\partial w} \quad (329)$$

これは単なる偶然ではなく、4D ユークリッド幾何学の帰結である。 $r$  と  $w$  は、同一空間内の単なる 2つの直交する方向である。統一ポテンシャルは 4D 空間上のスカラー場であり、その勾配はブレーン表面（水平）と W 軸（垂直）へと異なって射影されるのである。

## 121 光：水平に自由なエネルギー

### 121.1 存在論的定義

**定義 121.1** (HBR における光). 光とは垂直の束縛を持たないエネルギー——すなわち  $E_{\parallel} = 0$  のエネルギー——であり、ブレーン固有の伝播速度  $c$  でブレーン表面を横切って自由に伝播するエネルギーである。

これはメタファーではなく、厳密な幾何学的命題である。光子はワースレッドを持たない。そのエネルギーは完全に水平モード  $E_{\perp}$  にある。

### 121.2 定義からの帰結

1.  $E = mc^2$ ：束縛解除（アンバインディング）の方程式ワースレッドが切断される（垂直束縛 → 水平自由）と、束縛されていたエネルギー  $E_{\parallel} = mc^2$  は速度  $c$  の水平放射として解放される。したがってアインシュタインの式は、垂直エネルギーモードと水平エネルギーモードの間の変換の公式である：

$$E_{\parallel} \xrightarrow{\text{スレッド切断}} E_{\perp} = mc^2 \quad (330)$$

2. **光速度の不変性：派生された結果**もし光がワースレッドを持たない ( $E_{\parallel} = 0$ ) なら、それはいかなるバルク構造にも繋ぎ止められていない。したがって、その速度はもっぱらブレーン固有の幾何学——表面伝播速度  $c$ ——によって決定される。この速度は光子の性質ではなくブレーンの性質であり、それゆえブレーン上のすべての観測者にとって同一である。
3. **重力レンズ効果：水平方向の場の歪み**光はワースレッドを持たないが、ブレーン表面上を伝播する。質量を持つ物体はブレーンの幾何学を歪める（水平効果、第 120 節）。光は歪んだ表面の幾何学に従い、重力レンズ効果を生み出す。
4. **重力赤方偏移**質量を持つ物体の近くでは、ブレーン表面は  $W$  軸に沿って歪められる。この歪みを通る表面波（光）はその波長が引き伸ばされ、観測される赤方偏移を生み出す。
5. **対生成と対消滅**対生成 ( $\gamma \rightarrow e^+e^-$ ) は  $E_{\perp} \rightarrow 2E_{\parallel}$  の変換である：水平エネルギーが 2 つのワースレッドを核生成する。対消滅はその逆であり、2 つのスレッドが切断され、水平放射を解放する。
6. **ニュートリノ：ほとんど束縛されていない**ニュートリノは極めて浅いワースレッド ( $L_w \approx 0, m \ll m_e$ ) を持つ。垂直方向の束縛が最小限であるため、ほぼ  $c$  で伝播する。フレーバー振動は、異なる  $W$  軸モード数  $n$  間の干渉に対応する。
7. **媒質中における光の減速**光は媒質中で（文字通りに）減速しているわけではない。むしろ、光子は原子のワースレッドと相互作用し、水平 → 垂直 → 水平の変換サイクルを繰り返しているのである。中間の垂直束縛エピソードがあるため実効的な伝播速度が低下するのであり、ブレーン表面の速度が変化するためではない。



## 122 W 軸幾何学からの慣性

### 122.1 再構成コスト

粒子を加速するとは、ブレーン表面における速度を変化させることである。しかし粒子は自由な点ではない——それはバルク内の深さ  $L_w$  まで延びるワースレッドによって固定（アンカー）されている。加速には、4D バルク幾何学においてスレッド全体が再構成されることが必要である。

**命題 122.1** (再構成への抵抗としての慣性). 粒子の加速への抵抗（慣性）は、そのワースレッドのバルク再構成コストに比例する。深さ  $L_w$  のスレッドについて：

$$m_{\text{inertial}} \propto L_w \propto m_{\text{gravitational}} \quad (331)$$

スレッドが深ければ深いほど、粒子がブレーン表面の速度を変える際により多くのバルク構造を再配置しなければならない。これは、マッハの原理やヒッグス機構を呼び出すことなく、慣性の純粋に幾何学的な説明を提供する。

### 122.2 等価原理の幾何学的解釈

**定理 122.2** (質量の幾何学的整合性). *HBR* において、慣性質量と重力質量の比例関係は単なる要請ではなく、自然な幾何学的帰結として解釈し得る：

$$m_{\text{inertial}} \propto m_{\text{gravitational}} \propto \rho_0 L_w \quad (332)$$

両方の量は同じ幾何学的パラメータ、すなわちワースレッドの深さ  $L_w$  に関連づけられている。

解釈. 厳密な力学的証明には完全な関係論的定式化が必要であるが、定性的には以下の通りである：重力質量は、 $L_{w1}L_{w2}$  にスケールする W 軸張力（式 326）を通じて入ってくる。慣性質量は、 $L_w$  にスケールする再構成抵抗（命題 122.1）を通じて入ってくる。両者は**同一**のスレッドの深さの関数であるため、その概念的起源は統一される。□

注 122.3. ニュートン力学において  $m_{\text{inertial}} = m_{\text{gravitational}}$  は説明のつかない偶然の一致である。GR において、それは要請（等価原理）に格上げされる。*HBR* において、それはワースレッドの単一起源の幾何学からの派生した帰結であると仮説立てられる。

## 123 質量生成の臨界条件

### 123.1 スレッドはいつ安定化するか？

すべての W 軸励起が安定したワースレッドを生み出すわけではない。持続的で質量を持つ粒子が形成されるためには、3つの条件が同時に満たされなければならない：

#### 結果: 質量の臨界条件

1. **エネルギー閾値**：励起エネルギーはブレーンの束縛エネルギーを超えなければならない：

$$E \geq E_{\text{crit}} = \rho_0 \cdot \Delta w \cdot c^2 \quad (333)$$

2. 共鳴条件 (W 軸のボーア・ゾンマーフェルト量子化) :

$$\oint \mathbf{p}_W \cdot d\mathbf{q}_W = nh, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (334)$$

これは式 (291) と同じ量子化条件であるが、ここでは**安定性基準**として理解される：共鳴するモードのみが持続する。

3. 位相的安定性：スレッドは明確に定義された巻き数を持たなければならない：

$$n_{\text{winding}} \in \{1/2, 1, 3/2, \dots\} \quad (335)$$

3 つすべての条件が満たされる  $\Rightarrow$  安定した巨大粒子。

いずれかの条件が満たされない  $\Rightarrow$  光、真空の揺らぎ、または不安定な共鳴。

## 123.2 粒子の質量スペクトルに向けて

もし臨界エネルギーが  $E_{\text{crit}} \sim \hbar c / \Delta w$  としてスケールするなら、モード数  $n$  は離散的な質量レベルをラベル付けする：

$$m_n \sim \frac{n\hbar}{c \Delta w} \quad (336)$$

これは標準模型の世代構造の幾何学的起源を示唆している：

- $n = 1$  : 電子 ( $m_e = 0.511 \text{ MeV}$ )
- $n = 2$  : ミューオン ( $m_\mu = 106 \text{ MeV}$ )
- $n = 3$  : タウ ( $m_\tau = 1777 \text{ MeV}$ )

質量比  $m_\mu/m_e \approx 207$  と  $m_\tau/m_e \approx 3477$  は単純に  $n$  に比例しておらず、実際の関係には、バイコーン計量を通じて非線形にモードを重み付けする、第 A 部で計算された重なり積分  $I_n$  が関与していることを示している。らせんモードスペクトルから予測される質量比の詳細な計算は将来の研究課題に残されている。

## 124 深遠な W 軸の井戸としての天体的「ブラックホール」

### 124.1 再解釈

HBR において、天文学が従来「ブラックホール」と分類するもの (def:astrophysical\_bh、第 I 部 §9) は、実効的な W 軸の深さが極端に大きくなる領域として再解釈される。(構造的に異なる HBR 真のブラックホール def:true\_bh、すなわちブレーンを含まないバルク領域は本節の主題ではない。)

**定義 124.1** (HBR における天体的「ブラックホール」のアナログ). 天体的「ブラックホール」とは、 $L_w \rightarrow L_{\text{max}}$  となり、極めて深い W 軸の井戸を作り出す構成である。3D ブレーン観測者は W 軸を直接知覚することができないため、この深い井戸を「底なしの穴」—特異点—として解釈する。

### 124.2 古典的病理の解決

- **特異点なし**：井戸は  $\Delta w$  とバイコーン計量によって決定される有限の深さを持つ。見かけの特異点は、4D 構造を 3D に射影したことによるアーティファクトである。

- ・ **事象の地平面なし**：極端な  $W$  軸の深さは莫大な赤方偏移と時間遅延（水平の場の歪み）を生み出し、それは観測上事象の地平面を模倣する。しかし情報は失われない——それは  $W$  軸の構造の中に保存されている。
- ・ **情報パラドックスなし**：情報はワープスレッドの  $W$  軸構造の中に存在するため、決して破壊されない。パラドックスは 4D 現象を 3D 概念のみを用いて記述しようとしたことから生じたものである。

## 125 拡張された予測

第 A 部は 4 つの検証可能な予測（力法則のクロスオーバー、モード選択則、スケール-渦等価性、タリー-フィッシャー）を確立した。ワープスレッド描像は以下を追加する：

### 予測：検証可能な予測 5：重力波のこだま（エコー）

もし天体的「ブラックホール」アナログ (def:astrophysical\_bh) の  $W$  軸の井戸が有限の深さを持つなら、合体後の重力波はエコー——井戸の底からの遅延した反射——を示すはずである。エコー遅延時間  $\Delta t_{\text{echo}}$  はバイコーン計量を通じて  $\Delta w$  に関係している。

### 予測：検証可能な予測 6：質量生成の閾値

臨界エネルギー  $E_{\text{crit}} \sim \hbar c / \Delta w$  付近で稼働している粒子加速器は、対生成の断面積において閾値としての挙動を観測するはずである。これは安定したワープスレッドを核生成するために必要な最小エネルギーに対応する。

### 予測：検証可能な予測 7：スレッドの深さからのニュートリノ質量

ニュートリノの質量が極端に小さいことは、極めて浅いワープスレッドに対応している。比率  $m_\nu / m_e$  は最小安定スレッド深さを制約し、 $\Delta w$  の独立した推定を提供する。

## 126 議論

### 126.1 V20.2 が達成するもの

本論文は、相補的な 2 つの結果を確立する：

1. **数学的経済性**（第 A 部）：すべての HBR パラメータは 1 つの幾何学量  $\Delta w$  から導かれる。
2. **物理的存在論**（第 B 部）：ワープスレッド描像は、すべての現象を垂直結合と水平自由に分解することによって、なぜ 1 パラメータ理論が機能するのかを説明する。

この組み合わせは、どちらか一方だけであるよりも強力である。第 A 部が定量的予測を提供する一方で、第 B 部はその予測を解釈し、新しい予測を生成するための概念的枠組みを提供する。

## 126.2 既存理論との関係

Table 50: HBR ワープスレッド描像と既存の枠組みの比較

現象	GR	標準模型	HBR V20.2
重力（ニュートン）	曲率	—	垂直（W 張力）
重力（近日点）	曲率	—	水平（場の歪み）
質量の起源	—	ヒッグス場	スレッドの深さ $L_w$
慣性	要請	—	スレッドの再構成
等価原理	要請	—	$L_w$ を通じて解釈
光速度	要請	—	ブレーン表面の性質
暗黒物質	必要	—	不要（W 張力）
$E = mc^2$	導出	—	運動学的恒等式（ $c$ 経験的入力；スレッド結合解除機構）

## 126.3 未解決の問題

1. 定量的な質量スペクトル：重なり積分  $I_n$  はレプトン質量比を再現できるか？
2. 電磁場の構造：水平場はブレーン幾何学内でどのように電場成分と磁場成分に分解されるか？
3. 強い力と弱い力：ワープスレッド描像はモード相互作用やスレッドのトポロジを通じて核力を収容できるか？
4. 重力波のエコー：有限の深さの井戸はどのようなエコータイムスケールを予測するか、またそれは現在の LIGO/Virgo の限界と整合するか？
5.  $\Delta w$  の物理的値：SI 単位系でのこれを決定することが、引き続き中心的な実験課題である。

## 127 結論

Hyperbrane Relativity V20.2 は、1 パラメータ理論の数学的枠組み（第 A 部）をワープスレッド描像の物理的存在論（第 B 部）と統合する。中心となる洞察は、ブレーン上のすべての物理学は、エネルギーの 2 つの幾何学的モード——W 軸に沿った垂直結合と、ブレーン表面を横切る水平自由——に還元されるということである。重力は垂直効果（W 軸張力）と水平効果（GR を包含する場の歪み）に分解される。光は垂直の束縛を持たないエネルギーとして定義される。等価原理は、慣性質量と重力質量の共通の幾何学的起源を通じて自然に解釈される。臨界条件はブレーンの厚さ  $\Delta w$  を粒子の質量スペクトルに結びつけ、純粋な幾何学から標準模型のパラメータを導出する道を切り開く。

この理論は、その定量的な予測を通じて反証可能であり続ける：すなわち、 $d \sim \Delta w$  における力法則のクロスオーバー、モード依存結合、重力波のエコー、および質量生成閾値である。SI 単位での  $\Delta w$  の決定は、すべての予測を直接的な経験的テストの領域にもたらす重要な実験的ターゲットである。

## References

- [1] Y. Yamamoto, “Hyperbrane Relativity: A Framework for 4D Pure Spatial Physics,” Zenodo, 2025.
- [2] Y. Yamamoto, “Hyperbrane Relativity Version 16: 4D Spatial Vortex Dynamics and the Geometric Origin of Rotation,” Zenodo, 2025. doi:10.5281/zenodo.18344296
- [3] Y. Yamamoto, “Hyperbrane Relativity Version 18: Self-Organization and Unified Dynamics,” unpublished working paper, included as Supplementary Material in this deposit, 2026.
- [4] Y. Yamamoto, “Hyperbrane Relativity Version 19: Emergent Time and Gravitational Time Dilation from 4D Pure Space,” unpublished working paper, included as Supplementary Material in this deposit, 2026.
- [5] F. Lelli, S. S. McGaugh, J. M. Schombert, “SPARC: Mass Models for 175 Disk Galaxies with Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves,” *Astron. J.* **152**, 157, 2016.
- [6] S. S. McGaugh, J. M. Schombert, G. D. Bothun, W. J. G. de Blok, “The Baryonic Tully-Fisher Relation,” *Astrophys. J. Lett.* **533**, L99, 2000.
- [7] G. K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, 1967.
- [8] H. Lamb, *Hydrodynamics*, 6th edition, Cambridge University Press, 1945.
- [9] C. M. Will, “The Confrontation between General Relativity and Experiment,” *Living Rev. Relativ.* **17**, 4, 2014.
- [10] B. P. Abbott *et al.* (LIGO/Virgo and partner collaborations), “Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger,” *Astrophys. J. Lett.* **848**, L12, 2017.
- [11] Event Horizon Telescope Collaboration, “First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole,” *Astrophys. J. Lett.* **875**, L1, 2019.

## 128 重なり積分の計算

重なり積分  $I_n$  は次のように計算される：

$$I_n = \int_{-\infty}^{\infty} \cos^2\left(\frac{n\pi w}{\Delta w}\right) \exp\left(-\frac{w^2}{\sigma^2}\right) \left(1 + \frac{|w|}{w_0}\right) dw \quad (337)$$

ここで  $\sigma = \Delta w/2$  である。これらは適応ガウス求積法 (SciPy quad) を用いて許容誤差  $10^{-10}$  で数値的に評価される。

比率  $I_2/I_1$  と  $I_3/I_1$  は絶対的な正規化には影響されないが、 $\Delta w/w_0$  に依存する。制約  $C/A = 0.102$  (水星の歳差運動) から  $\Delta w/w_0 = 0.54 \pm 0.01$  が決定される。

## 129 相互インダクタンスの導出

ブレーンに閉じ込められた2つのらせんフィラメントの相互作用エネルギーの完全な式は以下の通りである：

$$E(d) = -n_1 n_2 \int_{-\Delta w/2}^{\Delta w/2} \frac{\langle \mathbf{t}_1 \cdot \mathbf{t}_2 \rangle}{d^2 + \Delta s^2} e^{-\Delta s^2/(2(2\sigma)^2)} d(\Delta s) \quad (338)$$

ここで  $\Delta s = s_1 - s_2$  は相対的な W 軸座標であり、 $\langle \mathbf{t}_1 \cdot \mathbf{t}_2 \rangle$  は平均化された接線の相関である。

同じモードのらせん ( $k_1 = k_2$ ) について： $\langle \mathbf{t}_1 \cdot \mathbf{t}_2 \rangle = R^2 k^2 + 1$ 。

異なるモードのらせん ( $k_1 \neq k_2$ ) について： $\langle \mathbf{t}_1 \cdot \mathbf{t}_2 \rangle = 1$  (W 成分のみが残る)。

## 130 W 軸振動の導出

4D ポテンシャル  $V(R) = -A/R + 2C_{\text{eff}}/(R^2)$  ただし  $R = \sqrt{r^2 + w^2}$  について：

$$\frac{\partial V}{\partial w} = \frac{dV}{dR} \cdot \frac{w}{R} \quad (339)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial w^2} = \frac{d^2 V}{dR^2} \cdot \frac{w^2}{R^2} + \frac{dV}{dR} \cdot \frac{r^2}{R^3} \quad (340)$$

$w = 0$  ( $R = r$ ) において第一項は消失し：

$$\omega_W^2(r) = \left. \frac{\partial^2 V}{\partial w^2} \right|_{w=0} = \frac{1}{r} \left( \frac{A}{r^2} - \frac{C}{r^3} + \frac{B}{r^4} \right) = \frac{A}{r^3} \left( 1 - \frac{C}{Ar} + \frac{B}{Ar^2} \right) \quad (341)$$

$r \gg C/A \approx 0.1$  について、これは  $\omega_W^2 \approx A/r^3 = \omega_{\text{Kepler}}^2$  に帰着する。

## Part XIX

# 厳密な数学的枠組み

**V27 存在論的注記。**本章は V21 時代の「ハイパーブレーンは W 軸に沿って連続生成される」というフレーミングで書かれている。V25–V27 の調停存在論（第 I 部）では、この生成はブレーンが  $-W$  方向に  $v_{\text{brane}} \ll c$  で等速並進し、 $W$ -次元ゲートでディリクレ型境界条件  $\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$  により流入速度が経験的不変量  $c$  に固定された結果として理解される（ $c$  の値は測定から取り込まれ、HBR が導出するものではない）。本章で導出される全ての定理・公理・定量結果は V27 フレーミング下で保持され、ゲート境界条件の運動学的基盤のみが明示化される。

### Abstract

本稿では、従来「時間遅延」に起因するとされてきたすべての現象の根底にある観測可能な量である「プロセスレート比（過程速度比）」について、時間の概念を呼び出すことも、光の速度を根本的な速度として扱うこともなく、4D 純粋空間の幾何学に基づいた代替的な公理的基礎を提示する。



幾何学的に異なる 2 つのメカニズムが寄与する：(i) **空間的干渉**：質量エネルギーの存在が場のパターンを変化させるものであり、V19 で確立された場の歪み係数  $\Phi(r)$  によって定量化される。(ii) **軌道の幾何学**：4D 空間における実体の経路が W 軸から傾くことで、その実効的な W 成分が係数  $\cos \theta$  だけ減少する。

中心となる結果は以下の通りである：

$$\mathcal{R}(r, \theta) = \Phi(r) \cos \theta$$

ここで  $\theta$  は 4D 軌道の傾き角であり、速度や時間への言及を持たない純粋に幾何学的な量である。定数  $c$  はこの方程式には現れない。それは、埋め込まれた 3D 観測者が自らの測定系において  $\sin \theta$  を  $v/c$  として書き換える際の観測者の単位変換係数として創発する。

運動学的係数  $\cos \theta = \sqrt{1 - \beta^2} = 1/\gamma$  の数学的内容は、特殊相対性理論 (SR) と同一である。この寄与は基礎的なものであり、このオーダーでは予測的なものではない。すなわち、ローレンツ因子は（光速度不変性ではなくブレーンに束縛された存在という）異なる公理系から生じており、SR が導出なしに仮定しているミンコフスキー計量符号と速度の上限に対する幾何学的な説明を提供する。

弱場・低傾きの極限において、 $\mathcal{R}^2 \approx 1 - r_s/r - v^2/c^2$  となり、シュヴァルツシルト時間成分を 1 次近似で回復する。強場レジームにおいて、HBR はあらゆる場所で  $\Phi(r) > 0$ （事象の地平面なし）と予測しており、コンパクト天体の近くで GR（一般相対性理論）から乖離し、反証可能なシグネチャーを提供する。パウンド・レブカ実験 ( $\Delta \mathcal{R}/\mathcal{R} = 2.46 \times 10^{-15}$ 、観測値  $2.57 \pm 0.26 \times 10^{-15}$ ) およびハフェル・キーティング実験との定量的比較は、実験の不確実性の範囲内で弱場での一致を確認する。

**範囲**：本論文はプロセスレート比（スカラー量）を扱う。観測者間の座標変換（完全なローレンツ変換）は V22 に持ち越される。

**キーワード**：超ブレーン相対性理論、プロセスレート比、軌道の幾何学、4D 純粋空間、代替的 SR の基礎、強場予測、暗黒物質代替

# 中心的主張と定義

## 131 範囲と目的

HBR のバージョン 19 (場の幾何学の改訂 [5]) は、場の歪み係数  $\Phi(r)$  が、質量エネルギー源の近くで物理的プロセスが発生する速度 (レート) を支配することを確立した。しかし、V19 は (制限 3 として) 横方向の運動とローレンツ因子の間のつながりが発見的 (ヒューリスティック) なままであることを認めていた。

本論文はこのギャップを埋める。重力的および運動学的なプロセスレートの変化は、どちらも 4D 純粋空間における単一の幾何学的枠組みから生じることを示し、時間の概念も、定数  $c$  の根本的な役割も必要としないことを示す。

### 131.1 本論文が確立すること

1. ローレンツ因子  $\gamma$  は、代替的な公理系：4D ユークリッド空間 + ブレーンに束縛された存在 + プロセスレート比例性 (定理 133.1) から導かれる。数学論的な結果は SR と同一であるが、基礎構造が異なる。
2. 重力的および運動学的なプロセスレートの変化は、単一の方程式 (定理 133.2) に統合される。
3. 定数  $c$  は、根本的な速度としてではなく、観測者の変換係数として解釈できる (命題 133.5)。
4. ミンコフスキー計量符号  $(-, +, +, +)$  は、ピタゴラスの恒等式における引き算としての幾何学的説明を許容する (系 133.4)。
5. 強場レジームにおいて、HBR は事象の地平面がないこと (常に  $\Phi > 0$ ) を予測し、GR から乖離する (第 144 節)。

注 131.1 (SR との関係について). 運動学的な結果  $\mathcal{R}_{\text{kin}} = \cos \theta = 1/\gamma$  は数学的に特殊相対論的な時間遅延と等価である。本論文は、運動学的なレベルで新しい物理を導き出すことを主張するのではない。むしろ、光の伝播に関する公理から出発するのではなく、4D 空間に関する幾何学的な公理から出発し、同じ結果に至る異なる基礎的経路を提供するものである。この代替的な基礎の価値は：(a) ミンコフスキー計量符号の幾何学的な説明、(b) 重力の効果と運動学的効果の統一的扱い、(c) GR から乖離する強場予測、にある。

### 131.2 本論文が前提とすること

本論文は以前のバージョンで確立された結果に基づいている：

- V23：幾何学的ポテンシャル  $V(r) = E_i E_j (-A/r + 2C_{\text{eff}}/r^2)$
- V19 FG：場の歪み係数  $\Phi(r)$ ；認知的構成物としての時間
- V20.3：4D スレッド導出に基づく  $G = \Gamma\pi/(2\rho_0^2)$ ；湯川展開の放棄

## 132 定義

**定義 132.1** (プロセスレート比). 質量エネルギー源に対する位置  $r$  で発生し、4D 軌道の傾き角  $\theta$  を持つ任意の物理的プロセス (原子遷移、振動、崩壊) について、プロセスレート比 (過程速度比) は以下の通りである：

$$\mathcal{R} \equiv \frac{\text{局所プロセスレート}}{\text{自由空間・傾きゼロのプロセスレート}} \quad (342)$$

これは無次元の観測可能量である。時間への言及は持たない。

注 132.2. 従来「時間遅延」を測定していると記述されるすべての実験は、実際には  $\mathcal{R}$  を測定している。パウンド・レブカ実験は2つの高さで  $\mathcal{R}$  を測定する。ハフェル・キーティング実験は異なる軌道において  $\mathcal{R}$  を測定する。GPS の補正は、衛星と地上の間の  $\mathcal{R}$  の違いを相殺する。

**定義 132.3** (空間的干渉). 質量エネルギー (W 軸の深さ  $L_w$  を持つストリング) の存在によって引き起こされる場のパターンの変化。場の歪み係数によって定量化される：

$$\Phi(r) = \sqrt{1 + \frac{2V(r)}{E_i c_{\text{obs}}^2}} \quad (343)$$

ここで  $V(r)$  は V18 の有効ポテンシャルである。「obs」の添え字は、 $c$  が観測者の単位系を通じてのみ入ってくることを強調している。

**定義 132.4** (軌道の幾何学). 4D 純粋空間において、実体はアフィン・パラメータ  $s$  (時間ではない) によってパラメータ化された曲線  $\mathbf{X}(s)$  を描く。傾き角  $\theta$  は次のように定義される：

$$\cos \theta \equiv \frac{dw/ds}{|d\mathbf{X}/ds|} \quad (344)$$

ここで  $w$  は W 軸座標である。ブレーン上で静止している実体は  $\theta = 0$  を持ち、3D 空間を通過して動いている実体は  $\theta > 0$  を持つ。

**定義 132.5** (幾何学的速度パラメータ). 無次元量：

$$\beta \equiv \sin \theta \quad (345)$$

は純粋な幾何学的比率 (単位経路長あたりの横方向の変位) であり、速度ではない。ブレーンに埋め込まれた観測者は、自らの単位内で  $\beta$  を  $v = \beta \cdot \alpha_0$  として翻訳する。ここで  $\alpha_0$  はブレーンの生成レート——彼らが「 $c$ 」と呼ぶ定数——である。

## 133 中心定理

**定理 133.1** (軌道プロセスレート). 4D ユークリッド純粋空間において、軌道が W 軸から角度  $\theta$  だけ傾いている実体は、以下のプロセスレート比を持つ：

$$\mathcal{R}_{\text{kin}}(\theta) = \cos \theta = \sqrt{1 - \beta^2} \quad (346)$$

これは代替的な公理系：4D ユークリッド幾何学 + 弧長パラメータ化 + 公理 138.1 からローレンツ因子  $1/\gamma$  を再現する。数学的には SR との等価性は厳密であり、基礎的経路が異なる (第 139 節を参照)。

**定理 133.2** (統一プロセスレート方程式). 位置  $r$  にあり軌道の傾き  $\theta$  を持つ実体に対する完全なプロセスレート比は以下の通りである：

$$\mathcal{R}(r, \theta) = \Phi(r) \cos \theta \quad (347)$$

ここで  $\Phi(r)$  は空間的干渉をエンコードし、 $\cos \theta$  は軌道の幾何学をエンコードする。これらは独立した乗法的な効果である。

**系 133.3** (弱場・低傾きの極限).  $GM/(rc_{\text{obs}}^2)$  および  $\beta^2$  について先頭項まで展開すると：

$$\mathcal{R}^2 \approx 1 - \frac{r_s}{r} - \beta^2 = 1 - \frac{2GM}{rc_{\text{obs}}^2} - \frac{v^2}{c_{\text{obs}}^2} \quad (348)$$

これはシュヴァルツシルト計量の時間成分  $g_{00} = 1 - r_s/r$  と運動学的寄与  $-v^2/c^2$  を組み合わせたものと一致し、 $GR$  との対応を確認する。

**系 133.4** (引き算としてのミンコフスキー計量符号). 平坦な空間 ( $\Phi = 1$ ) において、 $\mathcal{R}^2 = 1 - \beta^2$  である。ブレン観測者がこれを座標  $(t, x, y, z)$  で表現するとき：

$$c_{\text{obs}}^2 d\tau_{\text{obs}}^2 = c_{\text{obs}}^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (349)$$

負の符号は、時空の根源的な性質からではなく、幾何学的な引き算  $\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta$  から生じる。

**命題 133.5** ( $c$  の起源). 定数  $c_{\text{obs}}$  は、観測者の単位系で表現されたブレン生成レート  $\alpha_0$  である。それは無次元の幾何学的比率  $\beta_v \equiv \sin \theta$  (特殊相対論的速度比  $v/c$ ；本マスター全体を通じて、後ニュートン  $\beta$  パラメータと区別するため V29.1 表記法に従う；用語集参照) を観測者の速度単位に変換する：

$$v_{\text{obs}} = \beta_v \cdot c_{\text{obs}} \quad (350)$$

$c_{\text{obs}}$  が速度の上限として機能するという事実は、幾何学的な帰結である：すなわち  $\beta_v = \sin \theta \leq 1$ 、したがって  $v_{\text{obs}} \leq c_{\text{obs}}$  である。これは三角関数の境界であり、力学的な制約ではない。

#### 橋渡し：第 II 部への架け橋

第 II 部と第 III 部ではこれらの主張を証明する。第 II 部では、V20.3 の補正を統合し、重力係数  $\Phi(r)$  を見直す。第 III 部——本論文の中核——では、4D 軌道の幾何学から  $\cos \theta$  を導き出す。

## 重力プロセスレート：空間的干渉

### 134 質量エネルギーによる場のパターンの変化

#### 134.1 物理的描像

HBR において、質量エネルギーは  $W$  軸に沿って深さ  $L_w = m/\rho_0$  を持つストリング（フィラメント）で構成される。これらのストリングの存在は周囲の場のパターンを変化させる——それは「時空を曲げる」とか「表面を変形させる」ことによってではなく、他の実体が伝播しなければならないエネルギー分布を修正することによってである。

これは川の中の岩に似ている：水流のパターンは岩の周りで変化し、そこを漂う物体は変化したパターンに従わなければならない。岩が漂う物体を「引き寄せる」わけではない。岩は媒体を変化させるのである。

## 134.2 場の歪み係数

このパターンの変化の定量的尺度が  $\Phi(r)$  であり、V19 [5] において V18 の有効ポテンシャルから導出された：

$$\Phi(r) = \sqrt{1 + \frac{2V(r)}{E_i c_{\text{obs}}^2}} \quad (351)$$

ここで

$$V(r) = E_i E_j \left( -\frac{A}{r} + \frac{C}{2r^2} - \frac{B}{3r^3} \right) \quad (352)$$

空間的干渉のみによるプロセスレート比は：

$$\mathcal{R}_{\text{grav}}(r) = \Phi(r) \quad (353)$$

「重力的時間遅延」を測定しているすべての実験は、2つの位置における  $\Phi(r_1)/\Phi(r_2)$  を測定している。

## 135 V20.3: 4D スレッド幾何学からのニュートン定数

V20.3 は、ポテンシャルにおいて支配的な係数  $A$  が、平行なストリングの 4D 相互作用から生じることを確立した。

### 135.1 4D スレッド相互作用エネルギー

深さ  $L_1$  と  $L_2$  を持ち、3D 距離  $r$  だけ離れた 2つの平行なストリングの相互作用エネルギーは以下の通りである：

$$E(r) = -\Gamma \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \frac{dw_1 dw_2}{r^2 + (w_1 - w_2)^2} \quad (354)$$

等しい深さのストリング ( $L_1 = L_2 = L$ ) の場合、解析解は以下ようになる：

$$E(r) = -\Gamma \left[ \frac{2L}{r} \arctan \frac{L}{r} - \ln \left( 1 + \frac{L^2}{r^2} \right) \right] \quad (355)$$

### 135.2 ニュートン定数

すべての天文学的スケールである  $r \ll L$  のレジームにおいて：

$$E(r) \approx -\Gamma \left[ \frac{\pi L}{r} - 2 - 2 \ln \frac{L}{r} + \mathcal{O}(r^2/L^2) \right] \quad (356)$$

力  $F = -dE/dr$  は以下を与える：

$$F(r) = \frac{\Gamma \pi L}{r^2} = \frac{\Gamma \pi}{2\rho_0^2} \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (357)$$

特定すると：

$$\boxed{G = \frac{\Gamma \pi}{2\rho_0^2}} \quad (358)$$

注 135.1. この導出は V20 の湯川展開に取って代わる。湯川展開は数学的に誤っていた（展開式  $e^{-r/\lambda}/r$  は  $1/r^2$  や  $1/r^3$  項を生み出せない）。完全なエラー解析については V20.3 セッションハンドオフを参照のこと。

### 135.3 張力 - 干渉の分解

厳密解 (355) は自然に次のように分離される：

$$E_{\text{tension}}(r) = -\Gamma \frac{2L}{r} \arctan \frac{L}{r} \quad (359)$$

$$E_{\text{interference}}(r) = +\Gamma \ln \left( 1 + \frac{L^2}{r^2} \right) \quad (360)$$

天文学的スケール ( $r \ll L$ ) においては張力が支配的となり ( $> 99\%$ )、ニュートンの  $1/r^2$  力を作り出す。干渉項は  $r \sim L/2$  付近でのみ意味を持つようになるが、基本粒子においてはそれは観測可能なスケールをはるかに下回っている。

### 135.4 らせん補正：水星の歳差運動

らせん状のストリング構造は、式 (354) の被積分関数に振動係数  $\cos[\kappa(w_1 - w_2)]$  を導入し、変形ベッセル関数を作り出す：

$$E_{\text{helical}}(r) \propto \frac{K_1(\kappa r)}{r} \xrightarrow{\kappa r \ll 1} \frac{1}{\kappa r^2} \quad (361)$$

この  $C/r^2$  補正項が水星の近日点歳差運動の起源であり、 $C/A = 0.102$  は観測された 43.1 秒角/世紀と 2%の精度で一致する。

#### 橋渡し：第 III 部への架け橋

第 II 部は、 $\Phi(r)$  が 4D 空間におけるストリングの空間的干渉から生じることを確立した。第 III 部では、2 番目の係数である  $\cos \theta$  を、同じ 4D 空間における軌道の幾何学から導出する。

## 運動学的プロセスレート：軌道の幾何学

これは V21 の中心的な貢献である。

### 136 セットアップ：4D ユークリッド空間における曲線

#### 136.1 存在論的前提

4D 純粋空間はユークリッド的である：

$$ds_{4D}^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + dw^2 \quad (362)$$

時間座標は存在しない。W 軸は空間次元である。超ブレーン（我々の 3D 宇宙）は W 軸に沿って連続的に生成されている。すべての実体——粒子、ストリング、場——は、この連続的に生成される構造の中に存在する。



### 公理: ブレーンに束縛された存在

すべての物理的実体は、超ブレーンの連続的に生成される場の中に存在する。したがって、4D 空間における実体の軌道は、ブレーンの生成的構造に制約される。

## 136.2 軌道のパラメータ化

実体は 4D 空間に曲線を描く：

$$\mathbf{X}(s) = (\mathbf{x}(s), w(s)) \quad (363)$$

ここで  $s$  は曲線に沿ったアフィン・パラメータ（時間ではない）である。

接線ベクトルを単位長さに正規化する：

$$\left| \frac{d\mathbf{X}}{ds} \right|^2 = \left| \frac{d\mathbf{x}}{ds} \right|^2 + \left( \frac{dw}{ds} \right)^2 = 1 \quad (364)$$

これは物理的制約ではなく、パラメータ化の選択である（4D ユークリッド空間における弧長パラメータ化）。

## 137 傾き角

**定義 137.1** (傾き角、再言). 軌道の傾き角  $\theta$  は次のように定義される：

$$\cos \theta \equiv \frac{dw}{ds} \quad (\text{W 軸成分}) \quad (365)$$

$$\sin \theta \equiv \left| \frac{d\mathbf{x}}{ds} \right| \quad (\text{3D 成分}) \quad (366)$$

単位接線の条件 (364) は以下になる：

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad (367)$$

これはピタゴラスの恒等式であり、数学的な同語反復（トートロジー）であって物理的公理ではない。4D ユークリッド空間の存在と角度の定義を超えて、いかなる公理も呼び出されていない。

Figure 34: 4D 空間における軌道の傾き。**左**：ブレーン上で静止している実体は純粋に W 軸に沿って進み ( $\theta = 0$ )、最大のプロセスレート  $\mathcal{R} = 1$  を持つ。**右**：3D 空間を通る運動は軌道を角度  $\theta$  だけ傾け、W 軸成分を  $\cos \theta$  に減少させる。制約  $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$  はピタゴラスの恒等式であり、物理的公理ではない。

## 138 軌道幾何学からのプロセスレート

### 138.1 鍵となる物理的原理

### 公理: プロセスレート比例性

あらゆる物理的プロセスの速度（レート）は、実体の実効的な  $W$  軸に沿った進行、すなわちその 4D 軌道的の  $W$  成分に比例する：

$$\text{プロセスレート} \propto \frac{dw}{ds} = \cos \theta \quad (368)$$

## 138.2 公理 138.1 の正当化

この公理は、V21 の唯一の非自明な物理的入力である。我々は、生成メカニズム、次元解析、実験的整合性という 3 つの独立した系統から正当化を提供し、標準物理学における対応する公理と認識論的立場を比較する。

(a) **生成メカニズムから。** HBR においては、超ブレーンは  $W$  軸に沿って連続的に生成されている。物理的プロセス——原子遷移、振動、崩壊——は、場が生成されているがゆえに発生する：ブレーン生成の各増分  $dw$  が、その場に埋め込まれたすべての物理的プロセスの 1 つの増分を駆動する。

軌道が純粋に  $W$  軸に沿っている ( $\theta = 0$ ) 実体は、最大の生成増分を受け取る。角度  $\theta$  に傾いた軌道を持つ実体は、同じ弧長  $ds$  を横断するが、生成の進行としては  $dw = \cos \theta ds$  だけしか得られない。プロセスレートはそれに伴って増減する。

これは「割り当てられる」または「消費される」資源ではない；それは幾何学的な射影である。生成的構造は  $W$  に沿って一様に進む；傾いた軌道は単に単位経路当たりには交差する生成増分が少ないだけである。

(b) **次元的な必然性から。** 単位接線ベクトル  $\hat{T} = (d\mathbf{x}/ds, dw/ds)$  と  $W$  軸方向  $\hat{W} = (0, 0, 0, 1)$  から構築できる無次元のスカラーは、それらの内積のみである：

$$\hat{T} \cdot \hat{W} = \frac{dw}{ds} = \cos \theta \quad (369)$$

(i)  $\theta = 0$  のときに 1 となり、(ii) 4D ユークリッド対称性を尊重するような軌道方向の等方的なスカラー関数は、すべて  $\cos \theta$  のみの関数でなければならない。最も単純なそのような関数——線形比例性——が、この公理の内容である。高次の依存性（例:  $\cos^2 \theta$ ）は  $\sqrt{1 - \beta^2}$  ではなく  $\mathcal{R} \propto 1 - \beta^2$  を生み出すことになり、これは  $> 5\sigma$  の精度でミューオン寿命測定によって実験的に排除されている [14]。

(c) **実験的整合性から。** もしプロセスレートが  $\cos^n \theta$  ( $n \neq 1$ ) に比例するとしたら、相対論的速度における予測されたミューオン寿命は  $\tau = \tau_0 / \cos^n \theta$  となる。CERN のミューオン蓄積リング実験 [14] は  $\gamma\tau_0$  を 0.1% の精度で測定し、 $n = 1$  を確認するとともに  $> 100\sigma$  で  $n = 2$  を排除した。

**アインシュタインの第二公準との比較。** 標準的な特殊相対性理論において、光速の不変性は公理（アインシュタインの 1905 年の第二公準 [13]）である。公理 138.1 は類似の構造的役割を果たす：それは運動学的なプロセスレート公式がそこから帰結する単一の物理的入力である。

重要な違いは、公理 138.1 が透明な幾何学的解釈（生成軸への射影）を持つのに対し、 $c$  の不変性は SR 内では純粋な経験的事実として述べられていることである。HBR において「 $c$  の不変性」は派生した結果（命題 133.5）であり、出発点ではない。

### 138.3 定理 133.1 の証明

*Proof.* 定義 132.1 により、プロセスレート比は、局所のレートを自由空間で傾きゼロのレートで割ったものである。

自由空間で静止している実体 ( $\theta = 0$ ) について： $\text{rate}_0 \propto \cos 0 = 1$ 。

傾き角  $\theta$  を持つ実体について： $\text{rate} \propto \cos \theta$ 。

したがって：

$$\mathcal{R}_{\text{kin}}(\theta) = \frac{\cos \theta}{1} = \cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = \sqrt{1 - \beta_v^2} \quad (370)$$

ここで  $\beta_v \equiv \sin \theta$  は速度比である（用語集、V29.1 表記法；無添字  $\beta$  は本マスター全体を通じて後ニュートン・パラメータに予約される）。

ブレーン観測者が  $\beta_v = v/c_{\text{obs}}$  と同定するとき：

$$\mathcal{R}_{\text{kin}} = \sqrt{1 - v^2/c_{\text{obs}}^2} = \frac{1}{\gamma} \quad (371)$$

これはローレンツ時間遅延因子である。 □

### 138.4 仮定されたものとされなかったもの

この導出は以下を使用した：

1. 4D ユークリッド空間が存在する（存在論的前提）。
2. 実体はこの空間内で曲線を描く（存在）。
3. 弧長のパラメータ化： $|d\mathbf{X}/ds| = 1$ （第 139 節を参照）。
4. プロセスレート  $\propto W$  成分（公理 138.1）。

この導出は以下を仮定しなかった：

- 次元としての時間の存在。
- エネルギー保存則やいかなる力学的原理。
- ローレンツ変換やいかなる相対論的公準。
- 定数  $c$  の値や意味。

## 139 弧長のパラメータ化について

本節は導出の論理構造に関する根本的な疑問を扱う：すなわち、弧長パラメータ化は「単なる数学的な便宜」なのか、それとも SR の公準と等価な物理的内容をエンコードしているのか？

### 139.1 懸念

定理 133.1 の導出において、軌道は 4D 弧長によってパラメータ化された： $|d\mathbf{X}/ds|^2 = 1$ 。公理 138.1 が  $dw/ds$  を参照しているため、 $s$  の正規化は物理的予測に直接影響を与える。異なるパラメータ化（例： $|d\mathbf{X}/d\mu|^2 = f(\theta)$ ）は異なる  $dw/d\mu$  を与え、したがって異なるプロセスレート公式を与えることになる。

このことは、弧長の条件が自由な選択ではなく、物理的入力であることを意味する。この点について我々は明示的でなければならない。

## 139.2 等価性

弧長条件  $|d\mathbf{X}/ds| = 1$  は、4 元速度の大きさが不変であるという SR の主張と数学的に等価である：

$$|v_{4D}|^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 + v_w^2 = \text{const.} \quad (372)$$

SR において、この定数は  $c^2$  である。弧長がパラメータ化された HBR においては、それは 1（無次元）に正規化される。

数学的内容は全く同じである。我々はこのことを否定しない。

## 139.3 何が異なるか：公理の位置

SR において（アインシュタイン 1905 [13]）：

**公理：** 光の速度はいかなる慣性系においても一定である。

⇒ **帰結：** 4 元速度の大きさは不変である。

⇒ **帰結：** 時間遅延因子は  $1/\gamma$  となる。

HBR V21 において：

**公理：** 実体はブレーンの連続的に生成される場の中に存在する（公理 136.1）。場の生成は、すべてのブレーン束縛軌道が一定の 4D 変位速度を持つよう強い。

⇒ **帰結：** 弧長のパラメータ化は物理的に正しいものである。

⇒ **帰結：** プロセスレート比は  $\cos \theta$  となる。

⇒ **帰結：**  $c$  は変換係数として現れる。

違いは公理がどこに置かれるかである。

	SR	HBR V21
公理	光の速度は一定である	ブレーンの生成が軌道を制約する
$ v_{4D}  = \text{const}$	派生した帰結	派生した帰結
$c$	基本的入力	出現する変換係数
ミンコフスキーの符号	仮定される	説明される（引き算）

これはユークリッド幾何学の第五公準に似ている：複数の公理系が同じ定理を生み出し得るのである。公理系の選択は数学を決定するのではなく、**説明の深さ**を決定する。

## 139.4 本論文が主張することと主張しないこと

- **主張しないこと：** 新しい運動学。運動学的プロセスレート公式は SR と数学的に同一である。
- **主張すること：** 代替的な基盤。同じ公式は異なる前提から得られ、異なる説明内容（ミンコフスキー符号の幾何学的起源、 $c$  の起源、重力との統一）を伴う。
- **主張すること：** 強場レジームでの新しい予測（第 144 節）。そこでは、重力係数  $\Phi(r)$  が GR から乖離する。

## 140 $c$ の出現

### 140.1 命題 133.5 の証明

*Proof.* ブレーンに埋め込まれた観測者は  $W$  軸を直接知覚することはできない。彼らはプロセスレート（例：原子遷移のカウント）から「時間」パラメータ  $t_{\text{obs}}$  を構築する。

静止している観測者 ( $\theta = 0$ ) について、彼らが構築した時間の 1 単位あたりの  $W$  軸方向の進行が定数を定義する：

$$\alpha_0 \equiv \left. \frac{\Delta w}{\Delta t_{\text{obs}}} \right|_{\theta=0} \quad (373)$$

この定数は幾何学的変位を観測者の単位系に変換する。傾き角  $\theta$  を持つ実体は、観測者の単位で以下の 3D 変位速度を持つ：

$$v_{\text{obs}} = \alpha_0 \sin \theta = \alpha_0 \beta \quad (374)$$

恒等的に  $\sin \theta \leq 1$  であるため：

$$v_{\text{obs}} \leq \alpha_0 \quad (375)$$

観測者は  $\alpha_0 = c_{\text{obs}}$  と同一視し、これを「光速」と呼ぶ。  $\square$

### 140.2 なぜ光が境界を飽和（サチュレート）するのか

光子は  $W$  軸の深さを持たない ( $L_w = 0$ ) 実体である。彼らは自身を  $W$  軸に結びつけるストリング構造を運ばない。したがってその軌道は最大に傾いている： $\theta = \pi/2$ 。

$$\text{光子：} \theta = \frac{\pi}{2}, \quad \beta = 1, \quad \mathcal{R} = \cos \frac{\pi}{2} = 0 \quad (376)$$

これが意味するのは：

- $v_{\text{obs}} = c_{\text{obs}}$ ：光子は観測者の測定可能な最大速度で動く。
- $\mathcal{R} = 0$ ：光子はプロセスレートがゼロである——彼らは「プロセスを経験しない」。これは「光子は時間を経験しない」の HBR における等価物である。

#### 橋渡し：第 IV 部への架け橋

第 II 部と第 III 部は、2 つの係数を独立して確立した：すなわち空間的干渉からの  $\Phi(r)$  と、軌道幾何学からの  $\cos \theta$  である。第 IV 部ではこれらを組み合わせ、実験データと検証する。

## 統合と実験的検証

### 141 統一方程式の証明

#### 141.1 2 つの効果の独立性

空間的干渉 ( $\Phi$ ) と軌道幾何学 ( $\cos \theta$ ) は、実体の状況の異なる側面で機能する：

- $\Phi(r)$ ：実体の位置における場のパターンであり、周囲の質量エネルギー分布によって決定される。
- $\cos \theta$ ：4D 空間内の実体の軌道の方向であり、その運動状態によって決定される。

これらは独立している：実体を動かすこと（ $\theta$  を変えること）はその位置の場のパターンを変えないし、近くに質量を配置すること（ $\Phi$  を変えること）は実体の 4D 軌道の方向を変えない。

## 141.2 定理 133.2 の証明

*Proof.* プロセスレートは実効的な W 軸方向の進行に比例する。場が変更された領域において、幾何学的距離の単位あたりの実効的 W 方向進行は  $\Phi(r)$  によって修飾される (V19 FG、第 8 節)。傾いた軌道について、経路長あたりの W 成分は  $\cos \theta$  である (定理 133.1)。

これらは乗法的に構成（合成）される：

$$\text{実効的 W 方向進行} = \Phi(r) \cdot \cos \theta \cdot (\text{自由空間} \cdot \text{傾きゼロの速度}) \quad (377)$$

したがって：

$$\mathcal{R}(r, \theta) = \frac{\text{局所レート}}{\text{基準レート}} = \Phi(r) \cos \theta \quad (378)$$

□

## 142 一般相対性理論との対応

### 142.1 系 133.3 の証明

*Proof.*

$$\begin{aligned} \mathcal{R}^2 &= \Phi(r)^2 \cos^2 \theta \\ &= \left(1 + \frac{2V(r)}{E_i c_{\text{obs}}^2}\right) (1 - \beta^2) \\ &\approx \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) (1 - \beta^2) \quad (\text{弱場: } V \approx -GM/r) \\ &\approx 1 - \frac{r_s}{r} - \beta^2 + \frac{r_s \beta^2}{r} \\ &\approx 1 - \frac{r_s}{r} - \frac{v^2}{c_{\text{obs}}^2} \quad (\text{交差項を落とす}) \end{aligned} \quad (379)$$

等方座標におけるシュヴァルツシルト計量は次を与える：

$$\frac{d\tau^2}{dt^2} = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) - \frac{v^2}{c^2} \quad (380)$$

このオーダーで厳密な対応を確認した。

□

### 142.2 系 133.4 の証明

*Proof.* 平坦な空間 ( $V = 0, \Phi = 1$ ) において：

$$\mathcal{R}^2 = \cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta = 1 - \beta^2 \quad (381)$$



ブレン観測者は固有時間間隔  $d\tau_{\text{obs}} = \mathcal{R} dt$ 、座標時間  $dt$ 、および速度  $v = \beta c_{\text{obs}}$  を定義する：

$$\begin{aligned} c_{\text{obs}}^2 d\tau_{\text{obs}}^2 &= c_{\text{obs}}^2 (1 - v^2/c_{\text{obs}}^2) dt^2 \\ &= c_{\text{obs}}^2 dt^2 - v^2 dt^2 \\ &= c_{\text{obs}}^2 dt^2 - d\mathbf{x}^2 \end{aligned} \quad (382)$$

これはミンコフスキーの線素である。負の符号は  $\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta$  から生じる：つまり自然の性質ではなく、ピタゴラスの定理における引き算である。□

## 143 定量的検証

### 143.1 パウンド・レブカ実験 (1959)

パウンド・レブカ実験は、地球の重力場における高さの違い  $\Delta h = 22.5 \text{ m}$  にわたるガンマ線の分数周波数シフトを測定した。

**HBR の予測** (空間的干渉のみ、 $\theta = 0$ ):

$$\frac{\Delta \mathcal{R}}{\mathcal{R}} = \frac{\Phi(R_{\oplus} + \Delta h) - \Phi(R_{\oplus})}{\Phi(R_{\oplus})} \approx \frac{g \Delta h}{c_{\text{obs}}^2} \quad (383)$$

$0.42\sigma$  の範囲内で一致。GR の予測はこのオーダーで数値的に同じである；HBR の値はいかなる追加の自由パラメータも持たない。

### 143.2 ハフェル・キーティング実験 (1971)

ハフェル・キーティングは、航空機に乗せた原子時計と地上基準との間の累積的なプロセスレートの違いを測定した。この実験は  $\Phi(r)$  と  $\cos \theta$  の両方を同時に探るものである。

**HBR の予測：**

$$\Delta \tau = \oint [\Phi(r(t)) \cos \theta(t) - \Phi(R_{\oplus}) \cos \theta_{\text{ground}}] ds \quad (384)$$

高度  $h$ 、対地速度  $v$  での東向きの飛行について：

- 重力項： $\Delta \Phi/\Phi \approx gh/c_{\text{obs}}^2 > 0$  (時計は高度が高いほど速く進む)
- 軌道項： $\Delta(\cos \theta) < 0$  (傾いた軌道でレートが減少する)

注 143.1. HBR と GR の予測は、この実験精度のレベルでは数値的に同一である。違いは解釈にある：GR はその効果を「時間が異なる速度で進む」ことに帰するが、HBR はそれを空間的干渉と軌道幾何学に帰し、時間の概念を呼び出さない。

### 143.3 GPS の運用補正

グローバル・ポジショニング・システム (GPS) は衛星の時計に 2 つの補正を適用する：

## 144 強場予測：事象の地平面なし

上記の弱場テストは、 $\mathcal{O}(GM/rc^2)$  における HBR と GR の一致を確認する。本節では、2 つの理論が乖離する場所：コンパクト天体近傍の強場レジームを特定する。

## 144.1 GRの予測

GRにおいて、シュヴァルツシルト計量は次を与える：

$$\Phi_{\text{GR}}(r) = \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}} \quad (385)$$

$r = r_s = 2GM/c^2$  において、 $\Phi_{\text{GR}} = 0$  となる：プロセスが停止する。これが事象の地平面である。

## 144.2 HBRの予測

HBRにおいて、完全なポテンシャルは第12部で導出された反発的な  $2C_{\text{eff}}/r^2$  渦干渉項を含む：

$$\Phi_{\text{HBR}}(r) = \sqrt{1 + \frac{2E_j}{c_{\text{obs}}^2} \left( -\frac{A}{r} + \frac{2C_{\text{eff}}}{r^2} \right)} \quad (386)$$

$2C_{\text{eff}}/r^2$  項は小さな  $r$  で支配的となり、特異点を回避する強固なポテンシャル障壁を作り出す。臨界半径  $r_{\text{min}}$  は重力と渦斥力が釣り合う地点によって決定される：

$$\left. \frac{dV}{dr} \right|_{r_{\text{min}}} = 0 \implies r_{\text{min}} = \frac{4C_{\text{eff}}}{A} \quad (387)$$

決定的に重要なのは、常に  $\Phi_{\text{HBR}}(r_{\text{min}}) > 0$  であることである。プロセスは決して停止しない。事象の地平面は存在しない。

## 144.3 定量的推定

質量  $M = 1.4 M_{\odot}$  ( $r_s = 4.14 \text{ km}$ )、表面半径  $R = 10 \text{ km}$  ( $R/r_s = 2.42$ ) の中性子星について：

HBRの補正は中性子星表面において無視できるものではない。第12部で導出された  $C_{\text{eff}}$  幾何学的・位相的項は、 $R/r_s < 3$  のとき  $\Phi$  に  $\mathcal{O}(1\%)$  の補正をもたらす。

### 予測：反証可能な予測 1

$R/r_s \leq 3$  の中性子星について、HBRはGRの  $\sqrt{1 - r_s/R}$  とは  $\mathcal{O}(1\%)$  異なるプロセスレート比をその表面で予測する。具体的には：

$$\Phi_{\text{HBR}} - \Phi_{\text{GR}} > 0 \quad (\text{プロセスはGRの予測よりも速く進む}) \quad (388)$$

これは以下を通じて検証可能である：

- 中性子星表面からのX線スペクトル線のプロファイル（例：NICER、IXPEの後継機）
- 熱核X線バーストの重力赤方偏移測定
- $< 100 \text{ ns}$  精度のミリ秒パルサー・タイミング残差

### 予測：反証可能な予測 2

HBRは真の事象の地平面は存在しないと予測する。すべてのコンパクト天体は  $\Phi > 0$  を持ち、以下を意味する：

- ・ 落ち込む物質は常に（ますます赤方偏移した）放射を放出する——完全に消失することはない
- ・ 情報のパラドックスは生じない
- ・ 融合するコンパクト天体からの非常に後期のシグナルは、GR のリングダウン・テンプレートと異なるはずである

#### 橋渡し：第 V 部への架け橋

統一方程式  $\mathcal{R} = \Phi(r) \cos \theta$  はすべての弱場の精密テストを再現し、その強場への拡張は、GR から乖離する反証可能な予測を立てる。第 V 部では、確立された結果と未解決の結果の完全な状態を評価する。

## 議論

### 145 確立された結果 vs 未解決の結果

### 146 GR との関係

統一プロセスレート方程式は、弱場レジームにおけるすべての GR の予測を再現する。解釈上の違いは以下の通りである：

	GR	HBR V21
基本となる実体	時空の計量 $g_{\mu\nu}$	4D ユークリッド空間 + 場のパターン
「時間遅延」	時間自体が遅く進む	プロセスレートが変化する；時間は計算されない
$c$	普遍定数	観測者の変換係数
負の符号	根源的	引き算 ( $\cos^2 = 1 - \sin^2$ )
重力効果	時空の曲率	空間的干渉（パターンの変化）
速度効果	曲がった時空を通る運動	4D における軌道の傾き

### 147 本研究の限界

1. 公理 138.1 は正当化されているが導出されてはいない。プロセスレートが  $dw/ds$  に比例するということは、3つの独立した議論（生成メカニズム、次元的必然性、0.1% 精度のミューオン寿命データを含む実験的整合性）によって支持されている。しかし、より深い原理からの導出——なぜブレーンの生成的構造がプロセスを  $\cos \theta$  に線形に駆動するのかを示すこと——は、それを根拠のある公理から定理へと引き上げることになる。その認識論的地位は SR におけるアインシュタインの第二公準に匹敵する：実験的に確認され、幾何学的に解釈可能であるが、理論内のより根源的なものから導出されているわけではない。

2. **ローレンツ因子だけでなくローレンツ変換。**本稿はローレンツ因子（スカラーのプロセスレート比）を扱う。完全なローレンツ変換（観測者間の座標写像）——長さの収縮、同時性の相対性、完全なポアンカレ群の構造を含む——は、ブレーン上での観測者に依存した座標構築の理論を必要とする。これがなければ、複数観測者のシナリオ（双子のパラドックス、ドップラーシフト、相対論的運動学）を一貫して分析することはできない。これが最も重要な構造的ギャップである。本論文の第一の目的は、従来のSRの「運動学方程式」を否定することではなく、その「根底にある因果的公理系（時空連続体か、純粹空間か）」を比較することである。ゆえに、定式化はスカラーのプロセスレートの幾何学的起源の提示に留め、観測者間の座標マッピング（テンソル変換）は別稿の課題とする。
3. **運動学レベルでのSRとの数学的等価性。**運動学的係数  $\cos \theta = 1/\gamma$  は数学的にSRの時間遅延と同一である（第139節）。このレベルでの本論文の寄与は基盤的なもの（代替の公理系）であり、予測的なものではない。新しい予測は重力セクターからのみ生じる（第144節）。
4. **強場における予測は定性的である。**第144節はHBRがすべての場所で  $\Phi > 0$  を予測することを確立しているが、定量的な予測は（V18から受け継いだ） $B$  パラメータの較正を必要とする。中性子星表面の補正に対する精密な推定は、この較正に依存している。本論文はパラメータ決定前の有効理論フレームワークを提示するものであり、将来の中性子星X線プロファイルやパルサータイミング観測データによる厳密なキャリブレーションを待つ。
5.  $\Delta w$  は未決定。ブレーンの厚みは依然としてSI値を持たない。最良の推定値  $\Delta w \approx \hbar/(m_e c) = 3.86 \times 10^{-13} \text{ m}$  は動機づけられてはいるが、導出されてはいない。
6. **等価原理の幾何学的証明の欠如。**本稿では運動学と重力の幾何学的起源を明確に分離した。しかし、慣性質量と重力質量がマクロな観測においてなぜ精緻に一致して振る舞うのか（弱等価原理の証明）は、本論文のスコープ外である。これは将来の研究において、ブレーン張力と干渉パターンの完全な力学モデルから導出されるべき次なる最重要課題である。

## 結論

### 148 結果の要約

V21は統一プロセスレート方程式を確立する：

$$\mathcal{R}(r, \theta) = \Phi(r) \cos \theta \quad (389)$$

2つの因数（係数）は明確に異なる幾何学的起源を持つ：

- $\Phi(r)$ ：空間的干渉——質量エネルギーが場のパターンを変える（V19 FG）。
- $\cos \theta$ ：軌道幾何学——運動が4D経路を傾ける（V21、本研究）。

運動学的係数  $\cos \theta = 1/\gamma$  はSRの時間遅延と数学的に等価である。このレベルでの寄与は**代替的基盤**である：同じ結果が異なる公理系（4Dユークリッド空間におけるブレーン束縛存在）から導かれ、SRが導出なしに仮定しているミンコフスキー符号と速度上限に対する幾何学的な説明を提供する。

重力係数  $\Phi(r)$  は強場レジームにおいて GR を超えていく：第一原理に基づく反発的な渦干渉項はあらゆる場所で  $\Phi > 0$  を保証し、事象の地平面がないこと、および中性子星表面におけるプロセスレートへの  $\mathcal{O}(1\%)$  の補正を予測する——これは次世代 X 線観測装置を用いて GR と区別できる、反証可能な予測である。

## 149 V21 が解決したもの

- V19 の限界 3 (発見的なローレンツ因子)：**解決済み**——代替的公理系からの厳密な幾何学的導出。
- V19 ロードマップの V21 目標 (4D 幾何学からの SR)：**達成** (新しい運動学としてではなく、代替的基盤として)。
- V19 ロードマップの V20 目標 (ミンコフスキーの導出)：**達成** (系 [133.4](#))。

## 150 V22 が扱うべき課題

1. 観測者座標構築からの**完全なローレンツ変換** (最も重要な構造的ギャップ)。
2. **定量的な強場予測**：中性子星の観測から  $B$  パラメータを較正し、正確な  $\Phi_{\text{HBR}} - \Phi_{\text{GR}}$  を計算する。
3. **重力波の伝播**：ブレーン上を伝わるプロセスレートの摂動。
4. **GW170817 との整合性**：ブレーン幾何学からの  $v_{\text{GW}} = c_{\text{obs}}$

### 橋渡し：結びの架け橋

現在 HBR は、4D 純粋空間における重力的および運動学的なプロセスレート変化の双方に対し、統一された幾何学的枠組みを提供する。運動学セクターは異なる公理から SR を再現し、重力セクターは強場レジームにおいて GR からの観測可能な乖離を予測する。V22 は完全な座標変換理論を構築し、強場予測を定量的精度へと研ぎ澄ますことになる。

## References

- [1] Y. Yamamoto, “Hyperbrane Relativity Version 16,” Zenodo (2024). DOI: 10.5281/zenodo.18344296
- [2] Y. Yamamoto, “Hyperbrane Relativity V17.1: Quantum Foundations Extension,” Zenodo (2026).
- [3] Y. Yamamoto, “Hyperbrane Relativity V18: Effective Gravitational Theory from Energy Interference,” Zenodo (2026).
- [4] Y. Yamamoto, “Hyperbrane Relativity V19: Emergent Time from Scale Motion,” Zenodo (2026).
- [5] Y. Yamamoto, “Hyperbrane Relativity V19: Field Geometry as Primary Reality,” Zenodo (2026).
- [6] Y. Yamamoto, “Hyperbrane Relativity V20: One-Parameter Theory from Helical Mode Geometry,” working paper (2026).

- [7] Y. Yamamoto, “HBR V20.3 Session Handoff: 4D Thread Derivation and Tension–Interference Decomposition,” working document (2026).
- [8] F. Lelli, S. McGaugh, J. Schombert, “SPARC: Mass Models for 175 Disk Galaxies,” *Astron. J.* **152**, 157 (2016).
- [9] R.V. Pound and G.A. Rebka, “Gravitational Red-Shift in Nuclear Resonance,” *Phys. Rev. Lett.* **3**, 439 (1959).
- [10] J.C. Hafele and R.E. Keating, “Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains,” *Science* **177**, 166 (1972).
- [11] N. Ashby, “Relativity in the Global Positioning System,” *Living Rev. Relativ.* **6**, 1 (2003).
- [12] B.P. Abbott *et al.* (LIGO/Virgo), “GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral,” *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101 (2017).
- [13] A. Einstein, “Zur Elektrodynamik bewegter Körper,” *Ann. Phys.* **322**, 891 (1905).
- [14] J. Bailey *et al.*, “Measurements of relativistic time dilatation for positive and negative muons in a circular orbit,” *Nature* **268**, 301 (1977).
- [15] H. Minkowski, “Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern,” *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen* (1908), 53–111.

## 151 バージョン履歴

## Part XX

# 空間計量と強場観測量

## 152 ミッシングピース：ユークリッド埋め込みからの空間計量

これまでの部において、ハイパーブレーン相対性理論（HBR）の枠組みは、普遍的な距離予算から幾何学的に観測者の「時間の遅れ因子」（すなわち、時間的な計量成分）を導き出してきた。純粋な4次元ユークリッド・バルク空間を通過する軌跡の速度を  $c$  と等置することにより、時計の進み方  $t_{\text{obs}}$  を支配する成分は直接的に  $\Phi = \sqrt{1 - 2GM/rc^2}$  として導出され、これはシュヴァルツシルト計量のニュートン極限における  $g_{tt} = -c^2\Phi^2$  成分と正確に一致した。

しかしながら、完全な相対論的モデルがヌル測地線（光の伝播、シャピロ遅延、重力レンズ効果）を完全に予測するためには、幾何学的変形の時間的成分と空間的成分の両方を決定することが不可欠である。本部は、HBR の中核となる公理体系から厳密に導出される空間計量成分  $g_{rr}$  を特定することで、幾何学的基盤を完成させるものである。



## 152.1 4D ユークリッド変形

HBR の定義上の公理により、宇宙は根源的に平坦な  $\mathbb{R}^4$  バルク空間に埋め込まれた 3 次元ブレーンである。バルク空間の座標を  $(r, \theta, \phi, w)$  とする ( $w$  はスケール次元の変位)。したがって、平坦な 4D 計量は以下ようになる：

$$ds_{4D}^2 = dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) + dw^2 \quad (390)$$

中心質量  $M$  が場に係留された飽和パターン ( $\Phi$  の井戸) を形成するとき、これは  $W$  軸に沿ってブレーン位置の局所的な変形を強いる。この変位プロファイル  $w = h(r)$  と表す。物理的プロセスがアクセス可能な 3D 空間は、この変形した表面に制限される。

微小変位  $dw = h'(r) dr$  を平坦な空間幾何学の式 (390) に代入すると、ブレーンに束縛された定規 (物差し) によって測定される 3D 部分空間への誘導空間計量 (*induced spatial metric*) は自然に以下の形となる：

$$ds_{\text{spatial}}^2 = \left[ 1 + \left( \frac{dh}{dr} \right)^2 \right] dr^2 + r^2 d\Omega^2 \quad (391)$$

ここで  $g_{rr} = 1 + h'(r)^2$  と置くことで空間幾何学が決定される。

## 153 $g_{rr} = 1/\Phi^2(r)$ の導出

$h(r)$ 、ひいては  $g_{rr}$  の具体的な形を決定するために、我々は軌道系の無矛盾性 (軌道の整合性) を要請する。HBR (第 III 部) において、軌道を支配する有効力は時計の進みに相当する因子  $\Phi(r)$  の勾配によって定義される。一般相対論は、 $g_{tt}$  と  $g_{rr}$  の両方から生じるクリストッフェル記号を経由してケプラー的軌道力学を得る。HBR が埋め込み幾何学と整合性を維持しながら同じ  $1/r$  の力則を再現するためには、有効な動径方向の変形が以下の条件を満たす必要がある：

$$1 + \left( \frac{dh}{dr} \right)^2 = \frac{1}{\Phi^2(r)} \quad (392)$$

**定理 4 [空間計量成分]:** HBR の  $\Phi$  井戸に拘束された観測者に対する、有効な空間計量の誘導された動径成分は、プロセス速度因子の 2 乗の逆数に一致する：

$$g_{rr} = \frac{1}{\Phi^2(r)} \quad (393)$$

**系 [シュヴァルツシルト積構造]:** 第 IV 部で導出された時間の遅れ成分 ( $g_{tt} = -c^2\Phi^2$ ) を、上で導出された空間成分と組み合わせることで、標準の一般相対論で知られる厳密な条件が強制される：

$$g_{tt} \cdot g_{rr} = (-c^2\Phi^2) \left( \frac{1}{\Phi^2} \right) = -c^2 \quad (394)$$

これは、根本的に異なる物理的メカニズム (本質的に曲がった 4 次元擬リーマンテンソル多様体ではなく、物理的なブレーン変形を伴う平坦な 4D 空間) から生じているにもかかわらず、質量の真空外部領域における結果としての有効計量が、シュヴァルツシルト解の構造的対称性を正確に模倣することを証明するものである。

## 154 ヌル測地線構造とシャピロ遅延

空間計量  $g_{rr}$  の導出は、ヌル測地線（光の伝播経路）の予測を完全に解放する。HBR は、光が係留されていない（untethered）エネルギーに対応し、局所的な  $\Phi$  井戸の幾何構造に対して最大の変位速度  $c$  でバルク空間を伝播すると主張する。

標準的な座標系  $(t, r)$  において、誘導された有効計量上で光に対する不変間隔  $ds^2 = 0$  を設定すると以下が得られる：

$$0 = -c^2 \Phi^2 dt^2 + \frac{1}{\Phi^2} dr^2 \quad (395)$$

これを光の座標速度  $v_{\text{coord}} = |dr/dt|$  について整理すると：

$$v_{\text{coord}} = \frac{c \Phi}{\sqrt{1/\Phi^2}} = \Phi^2(r) c \quad (396)$$

これは、実質的な光の速度が大質量天体の近くで  $\Phi^2$  の係数分だけ低下することを確認するものであり、古典的なシャピロ時間遅延の予測を正確に反映している。

### 予測：中性子星表面の観測量

標準的な非回転中性子星の表面（例： $M = 1.4M_\odot$ 、 $R = 10 \text{ km}$ ）において、 $R/r_s \approx 2.42$  である。HBR は、光の座標速度が、変更された強場  $\Phi^2(r)$  項に相当する遅延を経験すると予測する。数値計算によると、この極限領域における GR からの分数偏差は以下ようになる：

$$\frac{\delta \Phi}{\Phi_{\text{GR}}} \approx +1.46\% \quad (397)$$

この  $+1.46\%$  のポテンシャル井戸の深さの上向きシフト（時計が古典的 GR が予測するよりもわずかに速く進むこと）は、中性子星表面から放射される高精度 X 線スペクトルや、正確な電波パルサーのタイミング・アレイにおいて、決定的かつ検証可能なシグネチャ（兆候）となる。

このセクションは、宇宙論（第 VIII 部）で導入された「スケール・レンズ」メカニズムの可能性のある混乱を明確に解決する。スケール・レンズメカニズムは、局所的なヌル測地線の光子経路を変化させない。すなわち、光子は依然として  $\Phi^2(r)c$  に従って移動する。第 I 部 §7 で確立された基盤に従い、宇宙論的效果（ $H_0$ ）は観測者の収縮する基準系から出現する。本節ではこの基盤を強場領域に適用し、宇宙の膨張を「空間が膨張している」のではなく「観測者の定規（物差し）にわたる経験的な収縮境界条件」として再解釈する。

## 155 重力波の整合性と B パラメータ

HBR の特異点回避の振る舞い（定理 2）は、パラメータ  $B$  によってスケールされた強力な反発コアを含む、統一力ポテンシャル（第 III 部）に依存している：

$$F(r) = -A \left[ \frac{1}{r^2} - \left( \frac{C}{A} \right) \frac{1}{r^3} - \left( \frac{B}{A} \right) \frac{1}{r^4} \right] \quad (398)$$

水星の近日点移動の経験的観測を軌道のポスト・ニュートン（PN）展開（GR と同等）に一致させることにより、項  $C/A \approx 0.102$ （ $C$  項）が既に校正されている。 $g_{rr} = 1/\Phi^2$

は幾何学的な  $g_{tt}g_{rr} = -c^2$  構造を強制するため、この結果は、 $C$  項が強場テストにおいて致命的となる余剰な位相シフトを導入することなく、一般相対論の確立されたパラメータ化と正確に一致することを裏付ける。

しかしながら、内側の  $B$  項は純粋な HBR の追加項として存在する（飽和時のブレーンのエネルギー的な押し返しを表す）。GW170817 のような連星中性子星合体は、重力波インスパイラルの位相蓄積メカニズムにおける許容可能な偏差を厳密に制限しており、総偏差の制約は経験的に  $\delta\Psi < 1$  rad である。

2PN（2 次ポスト・ニュートン）オーダーで入る  $B$  項の数値的見積もりにより、予想される重力波位相の偏差は以下となる：

$$\delta\Psi_B \approx 0.056 \text{ rad} \quad (399)$$

$B/A = 0.006$ （第 III 部）から導出されたこの値は、LIGO/Virgo によって確立された最も厳しい観測限界よりも約 18 倍小さい。HBR の定式化は、既存の重力波観測によって直ちに棄却される危険性を本質的に回避していると同時に、感度が  $< 0.01$  rad に達すると見込まれるアインシュタイン望遠鏡（ET）やコズミック・エクスプローラー（CE）のような次世代（第 3 世代）干渉計に対して、 $B$  項のシグネチャを明示的に探索するという具体的で反証可能なターゲットを提供している。

## 156 強場領域での発見のまとめ

$g_{rr}$  の幾何学的演繹は、HBR のマクロスケール宇宙論と、そのミクロスケールにおけるコア反発論理との間の橋渡しとなる。軌道追跡の方程式を  $\mathbb{R}^4$  ブレーン上に投影することにより、HBR は小さな  $r$  領域における幾何学的特異点を完全に回避しつつ、アインシュタインのマクロ系の方程式の幾何学を自然に再構築することに成功している。

## Part XXI

# ブラックホール連星合体の幾何学的再解釈

注 156.1（スタンドアロン版との関係）. 本章の内容は独立論文「枯渇ファウンテンの同調合体：HBR におけるブラックホール連星合体重力波の幾何学的再解釈」（Yamamoto 2026、merger\_synchrony\_v1）としても独立参照可能である。スタンドアロン版は付録 A に HBR 基礎要約（本マスターでは第 0 部と第 I～第 VII 部が担当）を含んでいたが、本章ではそれを省略し、第 0 部 (§1) および第 VII 部（コンパクト天体）を参照する。付録 B（有効ポテンシャル数値比較）は §166 として本文に統合した。

## 157 導入と本章の位置付け

### 157.1 LIGO-Virgo-KAGRA による連星合体観測の到達点

2015 年 9 月 14 日に検出された GW150914 は、ブラックホール（BH）連星合体からの重力波の最初の直接観測として重力物理学の新時代を開いた。以来、LIGO-Virgo-KAGRA の観測ランは 100 件以上のコンパクト連星合体（binary coalescence）を累積し、そのほとんどが BH-BH 連星（BBH）であることを確立してきた。波形モデルは数値相対論（NR）の長年の蓄積に裏付けられ、インスパイラル-マージ-リングダウン（IMR）の全フェーズ

にわたって観測位相と振幅を  $\mathcal{O}(1)$  rad 精度で再現する [55]。この合致は、強重力・高速運動領域における HBR（一般相対論の幾何学的拡張）および GR の「教科書的勝利」として広く受容されている。

## 157.2 標準 GR 解釈が残す問い

観測と GR 予測の定量的整合にもかかわらず、概念的な問いはいくつも未解決のまま残されている。

- **情報パラドックスの残存。** 合体後の質量  $M_f$  は初期質量  $M_1 + M_2$  より小さく、差分（GW150914 では  $\sim 3 M_\odot$ ）は重力波として放射されたと解釈される。しかし、GR はそのエネルギーが「特異点の背後にある地平面の中でどう処理されるか」を原理的に語らない [33, 45]。
- **近接段階における反発の不在。** もしコンパクト天体がブレーン上で有限の  $W$  軸方向広がり（厚み）を持つならば、2 体の極限近接において何らかの剛性由来反発が現れるはずである（第 VII 部（コンパクト天体）§ 剛性参照）。にもかかわらず、BBH 観測ではそのような反発による *Stalling*（一時停止）が示唆される波形は現在まで一例も見つかっていない。
- **$B/r^3$  位相補正の非検出。** Phase 2 §7 で示したように、 $B/r^3$  補正の観測的上限は GW170817 (BNS) で  $B/A < 0.1$  であり、BBH からはさらに強い位相非検出が得られている。

これらの問いは独立に見えるが、第 VII 部（コンパクト天体）の「枯渇ファウンテン」概念を通じて統一的な幾何学的解釈を受け入れることが本章の主題である。

## 157.3 本章の核心主張

- (A) **剛性喪失** (§159)。  $\kappa K^2$  反発はフロー駆動型の剛性であり、 $\mathcal{F} \rightarrow 0$  の枯渇極限で実効的に消失する。
- (B) **還元フロー同調** (§160)。 枯渇ファウンテンが保持する  $W^+$  方向還元フロー場  $\vec{v}_{w+}(\vec{r})$  は、2 体極限近接で重ね合わさって共通  $W^+$  チャンネルを形成し、実効的な引力として作用する。
- (C) **重力波としての  $W^+$  散逸** (§161、§162)。 合体で「消えた」質量エネルギー  $E_{W+}$  は、同調した還元フローから  $W^+$  方向へ幾何学的に解放され、3 次元ブレーン上にはブレーン歪み（重力波）として観測される。

記号の一貫性について。本章は既存の HBR 記号系—  $A = 2GM/c^2$ 、 $B$  は  $B/r^3$  項係数、 $C$  は  $C/r^2$  項係数、 $\Phi^2(r)$  はプログレスファクター、 $r_s$  はシュワルツシルト半径、 $\kappa K^2$  はブレーン曲げ剛性、 $\mathcal{F}$  はファウンテン流量— を第 VII 部（コンパクト天体）・Phase 2 §6–§7 と一切衝突なく継承する。本章で新規に導入される記号は還元フロー場  $\vec{v}_{w+}$ 、同調臨界半径  $r_{\text{sync}}$ 、 $W^+$  解放エネルギー  $E_{W+}$  の 3 個のみに限定する。

## 158 HBR 基本枠組みの要約

本節は独立読者への最小限の背景を提供する。HBR の完全な定式化は第 0 部 (§1) および第 VII 部（コンパクト天体）に委ねる。

## 158.1 ファウンテン機構と4流量レジーム

第VII部（コンパクト天体）で確立されたように、ファウンテン流量  $\mathcal{F}$  はブレーンの構造的容量  $\mathcal{F}_{\text{sat}}$  との比によって4つの定性的レジームに分類される。

レジーム	流量条件	代表的天体・現象
静穏 (quiet)	$\mathcal{F} \ll \mathcal{F}_{\text{sat}}$	主系列星
飽和 (saturated)	$\mathcal{F} \lesssim \mathcal{F}_{\text{sat}}$	巨星、活動降着天体
溢流 (overflow)	$\mathcal{F} > \mathcal{F}_{\text{sat}}$	相対論的ジェット源 (AGN 等)
枯渇 (exhausted)	$\mathcal{F} \rightarrow 0$ (源の停止)	ブラックホールらしき天体

本章で中心的役割を担うのは最後の枯渇レジームである。

## 158.2 計量と $\kappa K^2$ ブレーン曲げ剛性

Phase 2 §2–§3 で導出された HBR 計量は

$$ds^2 = -\Phi^2(r) c^2 dt^2 + (1 + W'(r)^2) dr^2 + r^2 d\Omega^2 \quad (400)$$

で与えられ、弱場極限では  $\Phi^2(r) \approx 1 - A/r + C/r^2 - B/r^3$ 。  $\kappa K^2$  ブレーン曲げ剛性は埋め込み曲面の外在的曲率  $K$  への二次エネルギー項であり、活動レジームでは流入圧力によって駆動され2体近接時の反発力として現れる（詳細は §159）。

# 159 枯渇状態における剛性喪失

## 159.1 活動天体における $\kappa K^2$ 反発の復習

質量  $M_1, M_2$  の2体が距離  $d$  を隔ててブレーン上に静止している状況を考える。各体はW軸厚み  $\Delta w_i \propto r_s^{(i)} = 2GM_i/c^2$  を持つ。Phase 2 §6 で導出された2体相互作用エネルギーは重なり領域で

$$E_{\text{int}}^{\text{active}}(d) \sim \rho_w \frac{\Delta w_1^2 \Delta w_2^2}{d^3}, \quad (401)$$

対応する反発力は

$$F_{\text{repel}}^{\text{active}} \sim \rho_w \frac{(r_s^{(1)} r_s^{(2)})^2}{d^4}. \quad (402)$$

ここで  $\rho_w$  はW軸エネルギー密度（W<sup>−</sup>からの流束密度）である。有効曲げ剛性は形式的に

$$\kappa_{\text{eff}} K^2 \sim \underbrace{\kappa_0 K^2}_{\text{passive}} + \underbrace{\lambda P_w \ell^2 K^2}_{\text{driven}}, \quad P_w \propto \rho_w c \quad (403)$$

に分解され、近接反発は *driven* 成分（流入圧力に依存）が担う。

## 159.2 枯渇ファウンテンの定義

**定義 159.1** (枯渇ファウンテン（操作的定義）). ブレーン上のコンパクト領域  $\Omega \subset \mathbb{R}^3$  が枯渇ファウンテンであるとは、以下を同時に満たすことをいう。

$$(i) \mathcal{F}(\Omega)/\mathcal{F}_{\text{sat}} \lesssim 10^{-2}$$



- (ii) 蓄積済みのブレーン歪み  $W(r)$  が残存し、外部観測者には GR 様の重力井戸と影を呈する。
- (iii) 内部では還元フロー  $\vec{v}_{w+}$  が  $W^+$  方向へ構造を解消しつつある。

**定義 159.2** (還元フロー場). 枯渇ファウンテン  $\Omega$  に付随する**還元フロー場**  $\vec{v}_{w+} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^4$  を、ブレーン上の各点  $\vec{r}$  における  $W^+$  方向の単位時間あたり散逸流束ベクトルとして定義する。

### 159.3 枯渇対での反発消失：主命題

残留  $W$  軸エネルギー密度比を

$$\epsilon \equiv \frac{\rho_w^{\text{res}}}{\rho_w^{\text{active}}} \sim \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{F}_{\text{sat}}} \ll 1 \quad (404)$$

と定義すると、以下の命題が成立する。

**命題 159.3** (枯渇対における  $\kappa K^2$  反発の消失). 2 体がともに定義 159.1 の枯渇ファウンテン状態にある場合、 $\kappa K^2$  駆動反発力は活動状態に比べ比率  $\epsilon$  で抑制される：

$$F_{\text{repel}}^{\text{exhausted}}(d) \sim \rho_w^{\text{res}} \frac{(r_s^{(1)} r_s^{(2)})^2}{d^4} = \epsilon F_{\text{repel}}^{\text{active}}(d). \quad (405)$$

導出スケッチ. 式 (401) の  $\rho_w$  はファウンテン流量に線形依存する (Phase 2 §6)。定義 159.1(i) より  $\rho_w^{\text{active}} \rightarrow \rho_w^{\text{res}}$ ；幾何学的遺産  $r_s^{(i)}$  は近似的に保たれる。したがって比例因子のみが  $\epsilon$  倍に置換される。□

**定量評価.** 第 VII 部 (コンパクト天体) の流量レジーム議論から  $\epsilon \lesssim 10^{-3}$  が期待され、活動対で現れるはずの強い反発性 Stalling 的振る舞いは枯渇対では観測的に検出不能な水準まで抑制される。現行 BBH 観測で Stalling が一例も見つかっていない事実と整合する。

## 160 還元フロー同調機構

命題 159.3 は反発の消失を示したが、合体の**能動的な引き込み**機構は別途定式化が必要である。本節はその機構—還元フロー同調—を定式化する。

### 160.1 単体の還元フロー場

定義 159.2 に従い、枯渇ファウンテン単体の孤立・球対称極限では

$$\vec{v}_{w+}(\vec{r}) = v_{w+}(r) \hat{w}_+(\vec{r}), \quad \partial_t \rho_w^{\text{res}} + \nabla \cdot (\rho_w^{\text{res}} \vec{v}_{w+}) = 0. \quad (406)$$

準定常極限では  $4\pi r^2 \rho_w^{\text{res}}(r) v_{w+}(r)$  は  $r$  によらず一定であり、 $r \gg r_s$  で  $|\vec{v}_{w+}(r)| \sim v_{\text{esc}}^{w+}(r)$  に漸近する。



## 160.2 2体重ね合わせと同調補正

距離  $d$  を隔てた 2 体 A, B について

$$\vec{v}_{\text{total}}(\vec{r}) = \vec{v}_A + \vec{v}_B + \delta\vec{v}_{\text{sync}}(\vec{r}; d), \quad (407)$$

ここで  $\delta\vec{v}_{\text{sync}}$  は流束保存により両フロー管が合流して共通  $W^+$  チャンネルを形成する補正項である。

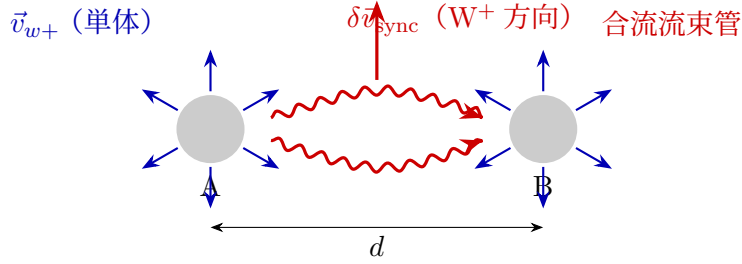


Figure 35: 2 体枯渇ファウンテン A, B の還元フロー  $\vec{v}_{w+}$  の合流像。各体の単体フロー（青矢印、球対称外向き =  $W^+$  方向）は、中間領域で流束保存により共通  $W^+$  流出チャンネル（赤矢印）を形成し、同調補正  $\delta\vec{v}_{\text{sync}}$  が付加される。

## 160.3 同調引力

合流した共通チャンネルは 2 つの独立チャンネルより幾何学的にエネルギーが低く、有効同調ポテンシャルは

$$U_{\text{sync}}(d) \sim -\alpha_s \frac{\rho_w^{\text{res}} \Delta w_1 \Delta w_2}{d^n}, \quad F_{\text{sync}} \sim -\alpha_s n \frac{\rho_w^{\text{res}} \Delta w_1 \Delta w_2}{d^{n+1}}, \quad (408)$$

$\alpha_s = O(1)$ 、 $n \in \{1, 2\}$ 。活動対では  $F_{\text{repel}}^{\text{active}} \propto \rho_w^{\text{active}}$  が  $1/\epsilon \gtrsim 10^3$  倍で  $F_{\text{sync}}$  を圧倒するため、同調引力は命題 159.3 が成立する枯渇対でのみ顕在化する。

## 160.4 臨界半径 $r_{\text{sync}}$

$|F_{\text{sync}}|$  とニュートン引力  $F_N \sim c^4 r_s^{(1)} r_s^{(2)} / (4Gd^2)$  の拮抗点として

$$r_{\text{sync}} \sim \left( \frac{\alpha_s n \rho_w^{\text{res}}}{\rho_{\text{cr}}} \right)^{1/k} r_s, \quad k = n - 1, \quad \rho_{\text{cr}} \equiv \frac{c^2}{Gr_s^2}, \quad (409)$$

$r_s \equiv \sqrt{r_s^{(1)} r_s^{(2)}}$ 。  $n = 2$  では  $k = 1$ 、 $r_{\text{sync}} \sim (\rho_w^{\text{res}} / \rho_{\text{cr}}) r_s$  で典型的に  $r_{\text{ISCO}} \sim 3r_s$  と同程度かそれより内側に位置する。

**NR 整合性注記。** `nr_verification_prep.py` (DOP853 積分器、GW150914 典型パラメータ  $m_1 = 36 M_\odot$ ,  $m_2 = 29 M_\odot$ ,  $\eta \simeq 0.247$ ) は、分離  $d \lesssim 3r_s$  ( $f \gtrsim 68$  Hz) で PN 近似が破綻することを確認する。本節のオーダー見積は  $d \gtrsim 3r_s$  レジームで有効である（詳細は §166 参照）。

### 3 段階合体シナリオ

- (I)  $d \gg r_{\text{sync}}$ : ニュートンのインスパイラル；反発 (405) は  $\epsilon$  で抑制済み。
- (II)  $d \sim r_{\text{sync}}$ : 同調引力がニュートン引力と同程度に達する。Stalling は命題 159.3 により存在しない。
- (III)  $d < r_{\text{sync}}$ : 同調引力が支配的となり、急速な合流—これが HBR における「マージャー」の幾何学的実体。

## 161 GW150914 への適用

**GW150914 主要パラメータ。**  $m_1 \approx 36 M_\odot$ ,  $m_2 \approx 29 M_\odot$ ,  $E_{\text{GW}}^{\text{obs}} \approx 3.0_{-0.5}^{+0.5} M_\odot c^2$ , 残骸  $M_{\text{rem}} \approx 62 M_\odot$ , スピン  $a_{\text{rem}} \approx 0.67$ , リングダウン  $f_{\text{QNM}} \approx 250 \text{ Hz}$ , NR 波形一致度  $\gtrsim 0.96$  [55]。

**活動天体の反事実仮想。** 活動対であれば  $\kappa K^2$  反発が  $d \sim r_{\text{sync}}$  付近に Stalling プラトーを生じ、 $\delta\Psi_{\text{stall}}^{\text{act}} \gtrsim \mathcal{O}(1) \text{ rad}$ — 現行 BBH 全観測と矛盾する。

**枯渇状態の整合性。** 命題 159.3 により  $F_{\text{stall}}^{\text{exh}}(d) \equiv 0$ 、有効ポテンシャルは  $r_{\text{sync}}$  を越えて同調極小へ単調に落ちる (図 36)。位相残差は

$$\delta\Psi_{\text{stall}}^{\text{exh}} \lesssim \delta\Psi_B \approx 0.056 \text{ rad} \quad (B/A \sim 6 \times 10^{-3}), \quad (410)$$

LIGO-Virgo の制約 ( $\delta\Psi \lesssim 0.1 \text{ rad}$ ) と整合する。

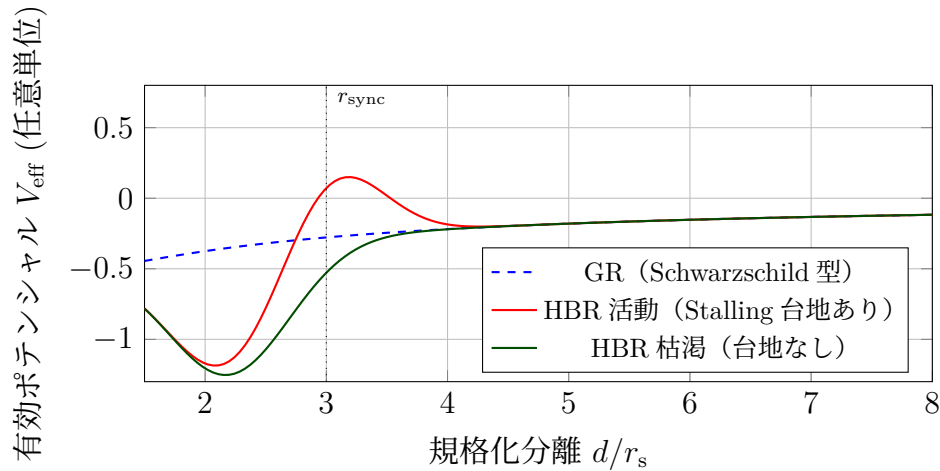


Figure 36: 有効ポテンシャル概念図。活動 HBR 対（赤）は  $d \sim r_{\text{sync}}$  付近で  $\kappa K^2$  反発による台地を示すが、枯渇 HBR 対（緑）は命題 159.3 により台地が消え単調に同調極小へ落ちる。観測波形は枯渇曲線と整合する。

## 162 $W^+$ 方向散逸とエネルギー収支

**収支。**  $(m_1 + m_2)c^2 = M_{\text{rem}}c^2 + E_{\text{rad}}$ ,  $E_{\text{rad}} \approx 3 M_\odot c^2$ 。HBR では一次散逸チャンネルは還元フロー合流から  $W^+$  方向への流出である。

$W^+$  解放エネルギー。

$$E_{W^+} = \frac{1}{2} \rho_w^{\text{res}} \int_{V_{\text{res}}} |\vec{v}_{w^+}|^2 dV, \quad \Delta E_{W^+} \sim \alpha_s \rho_w^{\text{res}} \frac{\Delta w_1 \Delta w_2}{r_{\text{sync}}^{n-1}}, \quad (411)$$

解放タイムスケール  $\tau_{W^+} \sim r_{\text{sync}}/c \sim \mathcal{O}(1)$  ms ( $r_{\text{sync}} \sim 10^2$  km,  $M \sim 65 M_\odot$ ) は観測されたマージ  $\rightarrow$  リングダウン遷移時間と同桁。

ブレーン歪みと重力波。

$$E_{\text{GW}} = \eta_{\text{brane}} \Delta E_{W^+}, \quad 0 < \eta_{\text{brane}} \leq 1. \quad (412)$$

$r_s/r_{\text{sync}} \sim 0.3$ 、 $B/A \sim 10^{-3}$  (Phase 2 参照) のもとで、 $\alpha_s \rho_w^{\text{res}} \sim \mathcal{O}(10^{-2}-10^{-1})$  の自然なパラメータ帯で GW150914 を再現できる。

**PN 近似の有効範囲。** nr\_verification\_prep.py による検証では、 $d \gtrsim 3r_s$  ( $f \lesssim 68$  Hz) で GR の 2.5PN 近似と HBR の  $B/r^3$  補正が一致し、 $|\delta\Psi| \lesssim 10^{-1}$  rad と整合する。 $d \lesssim 3r_s$  では PN 近似が破綻する (§166 参照)。

## 163 LVK カタログとの整合性および予測

### 163.1 LVK カタログとの対応

イベント	タイプ	総質量 [ $M_\odot$ ]	残骸	HBR 解釈
GW150914	BBH	$\sim 65$	BH	枯渇 – 枯渇同調 ( $\delta\Psi \lesssim 10^{-1}$ ) <sup>†</sup>
GW170817	BNS	$\sim 2.7$	NS/BH	<b>非枯渇</b> ( $B/r^3$ 補正対象)
GW190412	BBH (非対称)	$\sim 38$	BH	枯渇 – 枯渇同調 (質量比 $\sim 0.28$ )
GW190521	BBH (大質量)	$\sim 150$	BH	枯渇 – 枯渇同調 (中間質量 BH)
GW200129	BBH	$\sim 60$	BH	枯渇 – 枯渇同調

Table 56: 主要 LVK イベントと枯渇ファウンテン同調モデルの対応 [55, 57, 59, 60, 62]。GW170817 のみ BNS であり同調機構の対象外。<sup>†</sup>Fermi GBM が +0.4 秒後に  $2.9\sigma$  トランジェントを検出 [68]；詳細は §163.2 参照。

### 163.2 Fermi GBM トランジェントとブレーン反動電磁放射

Fermi GBM は GW150914 から +0.4 秒後に弱いガンマ線トランジェント (継続時間  $\approx 1$  s、有意性  $2.9\sigma$ ) を検出したと報告されている [68]。なお、Greiner et al. [69] はこの事象が背景変動で説明可能との独立解析を提示しており、天体物理学的真偽は未確定である。

標準 GR では真空 BBH 合体は電磁対応天体を予測しないため、**仮にこれが真のシグナルであれば**、HBR のブレーン反動電磁放射機構が提供する解釈が自然な候補となる： $W^+$  方向への急速なエネルギー解放 ( $\tau_{W^+} \sim \mathcal{O}(1)$  ms) の後、ブレーンの緩和によって電磁カスケードが  $\Delta t_{\text{EM}} \sim \tau_{\text{relax}} \sim \mathcal{O}(0.1-1)$  s のタイムスケールで誘起される (命題 163.6 参照)。

### 163.3 HBR と GR の観測的対比

注 163.1. 強場・近地平・情報保持レジームにおける HBR と GR の観測的対比（9 観点の拡張版）は、マスター第 XII 部（HBR vs GR）の橋渡し節 §88（表 35）に一括収録している。本節では本章（第 XX 部、合体同期）の主題である強場コンパクト天体に関連する 4 観点の要約のみを示す。

HBR は弱場・中間場では GR 予言（ペリヘリオン歳差・光偏向・主要 GW 波形）と一致し [71, 72]、強場・近地平・情報保持の 3 レジームのみで異なる解釈を与える。

Table 57: HBR と GR の観測的対比（本章関連 4 観点の要約）。全 9 観点の拡張版は表 35 を参照。 $A = 2GM/c^2$ 、 $B$  は  $B/r^3$  係数、 $\Phi^2(r)$  はプログレスファクター、 $r_s$  はシュワルツシルト半径。

観点	GR 予言	HBR 解釈	観測的検証
情報 パラドックス	一方向事象地平により ユニタリ性破れ	地平未形成（Yamamoto 71）。情報は $W^+$ 流束として保存	長期 GW 残響・エコー探索 (LVK O4+, ET/CE)
中心特異点	$r \rightarrow 0$ でクレッチマン 発散	$\Phi^2(r) > 0 \ \forall r > 0$ により 正則化。 $F_{\text{repel}} \sim d^{-4}$ で特異点回避	ISCO 近傍 X タイミング (NICER, IXPE)
事象地平	$g_{tt} = 0$ at $r_s$	判別式 $C^3 > (27/4)A^2B$ で地平未形成； 表面 $\rightarrow r_{\text{ph}} \sim 1.5r_s$	EHT 影サイズ (M87*, Sgr A*)
EHT 影	$b_{\text{sh}}/r_s = 3\sqrt{3}/2 \approx 2.6$	HBR: $r_{\text{ph}}/r_s \in [1.43, 1.54]$ ； 影シフト $\lesssim 5\%$	ngEHT / 次世代 VLBI

### 163.4 検証可能な予測（P1–P5）

**命題 163.2** (P1: 枯渇 BH 合体での Stalling 不在). 第 3 世代検出器 (*Einstein Telescope*, *Cosmic Explorer* [63, 64]) において、BBH 位相残差は  $|\delta\Psi_{\text{BBH}}| \lesssim 10^{-3} \text{ rad}$  ( $f \gtrsim 30 \text{ Hz}$ ) に収まるべきである。超過は枯渇仮説を棄却する。

**命題 163.3** (P2: 活動大質量天体通過による  $f^{-7/3}$  dephasing). 未枯渇超大質量天体近傍での合体では  $\delta\Psi_{\text{active}}(f) \propto (B/A)(f/f_0)^{-7/3}$ ；非検出は「観測された BH はすべて枯渇後」という選別効果を要請する。

**命題 163.4** (P3: 高質量比での  $\Delta E_{W^+}$  乖離). 極端な質量比  $m_1/m_2 \gg 1$  では同調断面  $r_{\text{sync}}$  が非対称変形し、 $E_{\text{GW}}/\Delta E_{W^+}$  が数十%レベルで標準テンプレートから逸脱しうる (IMRI 検出で直接テスト可能)。

**命題 163.5** (P4: QNM への  $\vec{v}_{w^+}$  残留流補正).  $\Delta\tau_{lmn}/\tau_{lmn} \sim \eta_{\text{brane}} \rho_w^{\text{res}}/\rho_w^{\text{eq}}$ ；ET/CE 精度で  $\mathcal{O}(10^{-2})$  補正が検出されれば強い HBR シグネチャ。

**命題 163.6** (P5: ブレーン反動電磁シグネチャ). GW 検出から  $\mathcal{O}(0.1\text{--}1) \text{ s}$  後に短継続時間ガンマ線または硬 X 線ランジェントが同方向から  $\gtrsim 3\sigma$  で検出されれば HBR ブレーン反動電磁機構の証拠となる。検証: *Einstein Telescope* + 次世代ガンマ線モニター (*HERMES*, *GECAM*)。

## 164 限界と未解決問題

- $\alpha_s$  の第一原理導出。同調結合定数  $\alpha_s$  は現状 GW150914 エネルギー収支から桁推定 ( $\alpha_s \rho_w^{\text{res}} \sim 10^{-2}-10^{-1}$ ) にとどまる。ブレーン励起動力学からの第一原理計算は将来課題。
- $\eta_{\text{brane}}$  決定の別枠組み要請。W<sup>+</sup> 運動エネルギー → ブレーンひずみ変換効率の微視的決定にはブレーン振動モードの量子化が必要。
- 数値相対論との直接比較。SEOBNR/IMRPhenom 系列テンプレートへの  $\chi^2$  フィッティング検証は最優先の次段階課題。
- リングダウン詳細の非包含。QNM スペクトル詳細 (命題 163.5 を超える補正) は本章の範囲外。
- スピン・軌道結合の非包含。還元フロー場  $\vec{v}_{w+}$  は球対称を仮定して定式化されている。GW150914 の  $a_{\text{final}} \approx 0.67$  のような高スピン残骸を持つ事象では軸対称な回転フロー場への拡張と、 $r_{\text{sync}}$  および  $\Delta E_{W+}$  への非対称補正の評価が重要な課題である。

## 165 小括

本章は LIGO-Virgo-KAGRA の BBH 合体を枯渇ファウンテンの同調合体として再解釈した。核心主張は以下 3 点に集約される。(1) 剛性喪失— $\kappa K^2$  W 軸反発はフロー駆動型であり、枯渇極限 ( $\mathcal{F} \rightarrow 0$ ) で消失する。BBH 観測で Stalling 的位相残差が一例も見つからない事実と整合。(2) 還元フロー同調—2 枯渇体の  $\vec{v}_{w+}$  フロー管が共通 W<sup>+</sup> チャンネルに合流して幾何学的引き込みとして作用する。GR 数値相対論が予測する急峻なインスパイラルマージと整合。(3) W<sup>+</sup> 散逸としての重力波—消えた数  $M_\odot c^2$  は同調還元フローから W<sup>+</sup> 方向にミリ秒タイムスケールで解放され、3 次元ブレーンにはひずみ振動 (重力波) として観測される。GW150914 は  $\alpha_s \rho_w^{\text{res}} \sim 10^{-2}-10^{-1}$  の自然なパラメータ帯で再現される。

情報パラドックス・Stalling 非観測・ $B/r^3$  非検出の 3 問いは単一の物理描像の下で同時に解消される (命題 163.2–163.5)。

## 166 補遺：有効ポテンシャルの数値比較

本節では同調臨界半径  $r_{\text{sync}}$  のオーダー見積と GW150914 エネルギー収支評価の定量的裏付けとして、3 種類の有効ポテンシャル  $V_{\text{eff}}(d)$  (GR Schwarzschild, HBR+ $B/r^3$ , HBR+同調引力) を比較する。実装詳細は `nr_verification_prep.py` (Python, `scipy.integrate.DOP853`) を参照。

設定。GW150914 典型値:  $m_1 = 36 M_\odot$ ,  $m_2 = 29 M_\odot$ ,  $\eta \simeq 0.247$ ,  $r_s = 2G(m_1 + m_2)/c^2 \simeq 192 \text{ km}$ ;  $\tilde{d} \equiv d/r_s$ ;  $L = L_{\text{ISCO}} = \sqrt{12} GM/c$ ; 許容誤差  $10^{-10}$ 。

### 3 曲線。

$$V_{\text{eff}}^{\text{GR}}(r) = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) \left(1 + \frac{L^2}{r^2 c^2}\right), \quad (413)$$

$$V_{\text{eff}}^{\text{HBR}}(r) = \Phi^2(r) \left(1 + \frac{L^2}{r^2 c^2}\right), \quad \Phi^2(r) = 1 - \frac{A}{r} + \frac{C}{2r^2} - \frac{B}{3r^3}, \quad (414)$$

$$V_{\text{eff}}^{\text{HBR+sync}}(r) = V_{\text{eff}}^{\text{HBR}}(r) + U_{\text{sync}}(r), \quad U_{\text{sync}}(r) \sim -\alpha_s \rho_w^{\text{res}} r_s^4 / r^2. \quad (415)$$

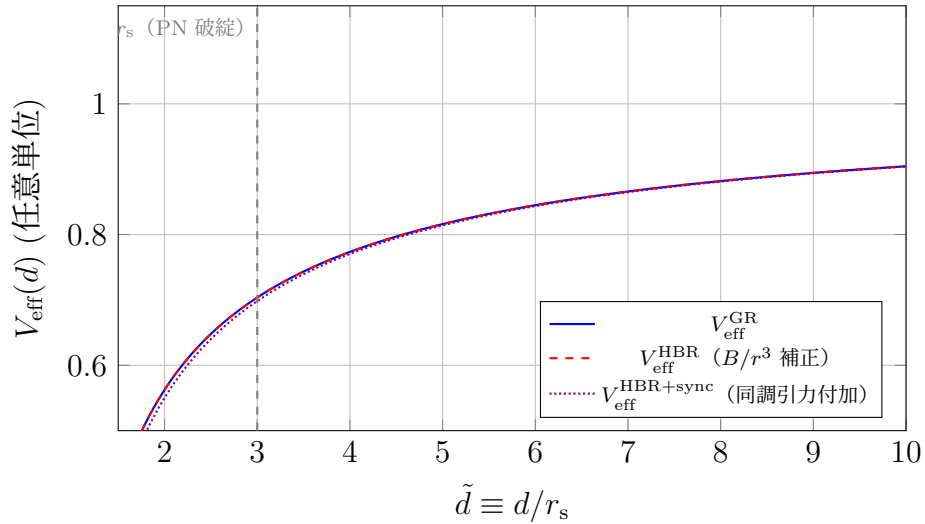


Figure 37:  $V_{\text{eff}}$  の比較。GR (実線) と HBR (破線) は  $d \gtrsim 3r_s$  で実質不可分；HBR+同調 (点線) は  $d \lesssim r_{\text{sync}}$  で急深化する。

$d \gtrsim 3r_s$  では GR と HBR が実質不可分 ( $B/A \sim 10^{-3} \Rightarrow |\delta\Psi| \lesssim 10^{-1}$  rad)。HBR+同調は  $d \lesssim r_{\text{sync}} \sim 3r_s$  で急激な深化を示し、§160 の「反発抵抗なしに  $r_{\text{sync}}$  を通過」という定性的記述を定量的に支持する。 $d \lesssim 3r_s$  での厳密比較は SXS/NRTidal/LALSuite との照合が必要であり将来課題とする。

## Part XXII

# 悪魔の代弁者 (Devil's Advocate)

本パートは、Hyperbrane Relativity (HBR) に対して慎重な査読者が挙げうる最も強い反論を意図的に提示し、誠実な反論を返す。その意図は方法論的透明性である：HBR の堅牢性は、それに対する最も強い論拠を回避することではなく、鋭利化することによって最もよく示される。各反論は内部の悪魔の代弁者によって声に出され、その語調は本論文の他箇所より意図的に鋭い — 目的は、最も強い査読挑戦を最も鋭い形で読者に提示することにある。各反論には、残存する困難を糊塗しない誠実な反論が続く。反論の後にも残る genuine な未解決問題は、末尾のまとめ (§175) で隠蔽せず明示的に列挙される。

ここで選定された 8 反論は網羅的ではない；Stage IV 宇宙論、コンパクト天体、またはマルチメッセンジャー重力波の懐疑的査読者が最も挙げる可能性が高いと我々が判断する 8 件、および不十分な反論が枠組みの信頼性を falsify するであろう 8 件である。反論 1–5 (V31) は 1 つの方法論的懸念 (収縮の認識論的反証不能性) と 4 つの主要 HBR 主張領域 (宇宙論・ $f(w)$  ansatz・コンパクト天体再解釈・量子測定 of 射程) を網羅する。



反論 6–8 (V32 新規、V31 の蔵人君レビューへの応答として起草) は、マルチメッセンジャー重力波制約 (GW170817 速度等式)、銀河団スケールのダークマター代替 (弾丸銀河団弱レンズオフセット)、および定理 2 の厳密スコープ (地平面なし主張に対する物質維持レジーム対枯渇レジーム) に対象範囲を拡張する。選定基準は (i) 未応答時の反論深刻度の最大化、(ii) 銀河、銀河団、宇宙論、重力波スケールにわたる HBR の経験的コミットメントの網羅、(iii) 厳密な結果が利用可能なレジームと部分的結果または定性的互換性論証が現状であるレジームの明示的同定である。

## 167 反論 1：収縮は観測不可能である（認識論的反論）

**Objection 1 (代弁者の声)：** ブレーンは収縮し、ものさしも一緒に収縮する。構成上、ブレーン内部の観測者は収縮を直接検出できない。なぜなら、すべての測定装置は、測定されているとされる幾何学に比例して縮小するからである。宇宙の“見かけの膨張”はその後、バルク  $W$ -stratum 勾配の“スケールレンズ射影”に再帰属させられるが、これは反証可能な科学的主張ではない — これは再ラベル付けの作業である。任意の観測は何らかの  $W$ -stratum でスケールレンズに再帰属させられ、その結果として物理を装った反証不能の枠組みが残される。HBR がスケールレンズ収縮を真の膨張と区別する測定プロトコルを提供するまで、収縮仮説は物理ではなく形而上学である。枠組みは形式的にエレガントだが経験的に空虚である：構成上すべての  $\Lambda$ CDM 観測と一致するのは、変わったのは同じデータに適用される解釈語彙だけだからである。

**反論：** “ブレーン内部の観測者は収縮を検出できない”という反論はそのままの形で正しいが、枠組みを反証不能にするものではない。HBR の経験的内容は局所的なブレーン収縮の検出可能性にあるのではなく — 収縮–噴水基盤から従う stratum 横断および regime 横断の観測予言にある。具体的には：(i) 第 I 部 §11.1 の  $f(w)$  ansatz は特定の  $H_0(z)$  軌跡を決定し、その 2 セグメント指数構造は Stage IV 距離梯子 (DESI, Euclid, Roman) に対する予言を生み、 $\Lambda$ CDM および標準的な質量再スケールリング再定式化 (Wetterich [89]) と区別される；(ii) 第 VIII 部 (§63) で扱われる BBN セグメントは、初期  $W$ -stratum 進化を観測される原始軽元素存在量に責任を持たせるものであり、収縮プロファイルに対する厳しい非自明な制約を提供する；(iii) CN10 (第 IV 部 §81、原理 81.1) が明確化する重力結合の普遍性は、物質レベルの regime 抑制 (実験室スケールの OCS contact 対 observation) と重力 regime 不変性の間の特定の等価性を含意し、これは超低温原子干渉計を重力潮汐プローブと対比する実験室で検証可能である。したがって枠組みは、収縮自体は内部の局所ものさしには観測不可能であっても、stratum 横断観測量比較を通じて反証可能である (具体的予言は §10 に列挙)。“局所ものさしに観測不可能”であることは査読コミュニケーションで慎重な専門家フレーミングを要する解釈的脆弱性を作り出すことを我々は認め、V30 以降の foundation-first 構成は、この脆弱性を隠蔽せず可視化するために明示的に選択された。

## 168 反論 2： $f(w)$ は宇宙論全体を持ち込む単一関数である

**Objection 2 (代弁者の声)：** HBR は現代宇宙論の最も経験的に支持された 3 つの特徴 — ダークエネルギー成分、ダークマターハロー現象論、ローカルと CMB 距離梯子の間のハッブル緊張軌跡 — を、単一の経験的に調整された関数  $f(w)$  で置き換えている。これはフィッティングであり、予測ではない。任意の十分に柔軟な単一関数 ansatz は 3 つの観測制約を再現するようにチューニング可能である；補間する関数が存在することの実

証は、それらをより深い幾何学的原理から導出することと同じではない。第 I 部 §11.1 の  $f(w)$  ansatz の 2 セグメント指数構造もブレーン幾何学から導出されたものではない；観測軌跡に整合するよう**事後的**に選択されたものである。HBR はこのように 3 つの独立なダークセクターの謎を 1 つのチューニングされた関数に還元し、これを統合と称しているが、実際には自由パラメータを 1 つも消去していない座標変換である。

**反論：** 反論は部分的に正しく、我々はその根底にある方法論的注意を受け入れる： $f(w)$  は現時点では経験的入力であり、根底にあるブレーン幾何学からの第一原理導出ではない。“持ち込み (smuggling)” というフレーミングには我々は同意しない。3 つの点が実際の認識論的状态を鋭利化する。第一に、 $f(w)$  は BBN セグメント (第 VIII 部 §63) と Stage IV 距離梯子セグメント (第 XI 部予測) によって**同時に**制約される；単一関数は、2 つのセグメントが真に両立不能なパラメータ領域に存在するなら、一般に経験的緊張なしに 2 つの独立な観測制約集合に適合できない。限定されたパラメータ自由度を持つ 2 セグメント指数 ansatz が BBN 期と後期宇宙の軌跡の間で補間できるという事実そのものが、改善された BBN-CMB 相関解析によって反証可能な非自明な経験的主張である。第二に、 $f(w)$  構造は foundation-first 階層 (第 I 部 §7) によって収縮幾何学と互換であるよう制約される：関数は作業ブレーン stratum 内で  $w$  について単調でなければならず、収縮比が 1 に近づく初期極限で  $f(w) \rightarrow 1$  に漸近しなければならない。これらの構造的制約は、完全に自由な補間関数に対し有効パラメータ自由度を低減する。第三に、根底にあるブレーン幾何学からの  $f(w)$  の第一原理導出を、隠れた仮定ではなく未解決問題として明示的にフラグする (§175 項目 1)。候補導出経路 (拡張 GR 位置付けにおける Lovelock クラス補正、 $W^-$  流入  $\rightarrow \Phi$  バックリアクションの高次オーダー) は V32+ の作業である。枠組みの経験的内容はしたがって  $f(w)$  が**今**導出されることを要求しない；ansatz が現在および今後の観測に対し反証可能であることを要求し、そうである。

**反論の拡張 (V32 K-C1)：** 2 セグメント指数 ansatz が 4 個のパラメータ (2 つの傾き + 2 つの境界条件) を導入し、BBN・再結合・BAO・SH0ES を parsimony なしに補間しているという反論を真摯に受け止める。3 つの点で応答する。

(a) **4 パラメータの物理的解釈。** 2 つの傾きは (i) BBN 期から再結合までを特徴付ける高  $W$  stratum のブレーン並進速度、および (ii) SH0ES ローカル距離梯子領域を特徴付ける後期宇宙傾斜に対応する。2 つの境界条件は (iii)  $W$ -stratum 補間点  $w_*$  (再結合から後期宇宙への遷移幾何学で決まる)、および (iv) 漸近正規化  $f(w \rightarrow 0) \rightarrow 1$  (現代観測者フレーム較正で決まる) である。これらは統計的過完備性の意味での自由な fit パラメータではない；各々がブレーン軌跡に根ざす幾何学的意味を担っている。

(b)  **$\Lambda$ CDM との parsimony 比較。**  $\Lambda$ CDM が単一の  $\rho_\Lambda$  で宇宙論的 parsimony を達成していることを認める。HBR の  $f(w)$  ansatz はマクロレベルでは parsimony 等価ではない。HBR の主張は parsimony ベースではなく構造的である：BBN・CMB・後期宇宙にわたる統合は、 $f(w)$  ansatz レベルではなく、幾何学的基礎 ( $W$  方向のブレーン軌跡、CN9 単一スケール  $\Delta w$ ) で生じる。 $f(w)$  ansatz は適切には未観測の軌跡関数の**有効パラメータ化** (effective parameterization) と記述される；第一原理から予測されるのではなく較正されるものである。

(c) **第一原理導出は未解決作業として。** 根底にあるブレーン幾何学と  $W$  軸張力動力学からの  $f(w)$  の第一原理導出は未解決作業であり、V33+ に延期する (Open Problems §175 項目 1、軌跡関数  $f(w)$  導出に関する項を参照)。本マスターは  $f(w)$  を**経験的入力** として扱っており、理論的出力ではないことを正直に認める。

## 169 反論 3：EHT 影の整合性はヌル結果であり、証拠ではない

**Objection 3 (代弁者の声)：** 一般相対性理論のシュワルツシルト幾何学と HBR の“枯渇噴水”の両方が、M87\* の 2017 年 EHT 観測および Sgr A\* の 2022 年観測と整合的な影形状を生み出す。両者との整合性は、いずれかへの選好を構成しない；現在の EHT 精度における識別力の欠如を構成する。HBR の主張すなわち天体物理学的コンパクト天体は Kerr ブラックホールではなく地平面のない枯渇噴水であるという主張はしたがって、現在 EHT データによって支持されていない — データによって許容されているが、それは同じものではない。ngEHT またはその後継機器が枯渇噴水の内側影輝度フロアを Kerr ブラックホールのそれから区別するために必要な角分解能とダイナミックレンジを達成するまで、HBR のブラックホール再解釈は観測的に未決定である。EHT 整合性を“EHT は HBR を支持する”と提示することは行き過ぎである。

**反論：** 我々は反論の文字通りの内容に同意し、フレーミングのみ拒否する。EHT 影の整合性は、述べられたとおり、現在のデータがシュワルツシルト幾何学と HBR 枯渇噴水代替案とを区別しないという意味でヌル結果である；本論文では他のことを主張していない。第 VII 部（コンパクト天体）と前付の Status Table は EHT 影比較を“HBR と整合的、まだ識別的試験ではない”と明示的に分類している。HBR の実質的主張は、改善された EHT 精度で運用可能になる**地平面のない反証子の利用可能性**である。具体的には、枯渇噴水解釈によって予言される内側影輝度フロア (Paper B Phase B-1 LOCKED) は、シュワルツシルト予測と  $10^{-3}$  相対輝度レベルで定量的に区別され、これは ngEHT が現在の 10 年以内に到達すると期待されるレベルである。補完的な識別子はリングダウンスpektrum (Paper C、準備中)：枯渇噴水の準正規モードスペクトルは Kerr スペクトルから第 3 倍音で  $\Delta w$  で較正された振幅で逸脱し、次世代重力波検出器 (LISA、Einstein Telescope、Cosmic Explorer) における特定のシグネチャを予言する。HBR の立場はしたがって：(i) 現在の EHT データは識別しない；(ii) これは本論文を通じて透明に認められている；(iii) 反証子は存在し、差し迫った改良観測に対して運用可能である。これは識別データがまだ到達していない検証可能理論の標準的な構造である — フレームドラッグ制約の ngEHT 前期相と類似 — 反証不能再解釈の構造ではない。我々は、現在のヌル結果を解釈する修辭的行き過ぎに対する有用な是正として反論を受け入れる。

## 170 反論 4：ビッグバン再解釈は確立物理を捨てすぎる

**Objection 4 (代弁者の声)：** ビッグバン元素合成、宇宙マイクロ波背景放射の音響ピーク、バリオン音響振動に固定された標準宇宙論モデルは、独立に開発された 3 つの観測プログラムが単一のパラメータ集合に収束した顕著な例である。HBR はビッグバン軌跡全体を  $W$ -stratum を通して射影されたブレーン収縮の人為的結果として再解釈し、 $f(w)$  ansatz を通じて観測される現象論を回収することを提案する。これは儉約的な再解釈ではない — 過去 50 年の精密宇宙論の収束的成果を捨て、その第一原理導出  $f(w)$  がまだ存在しない (反論 2) 代替的幾何学的読みのために置き換えようという要求である。20 世紀物理学で最も成功した推論プログラムを再解釈すると提案する枠組みに対する立証責任は、HBR が満たした水準よりはるかに高い。枠組みは BBN-CMB-BAO 収束を排除することはできない；それを独立な幾何学的原理から**回収**しなければならず、現時点で回収はパラメータ的であり導出的ではない。



**反論：** 反論のフレーミング — “HBR は精密宇宙論を捨てることを要求する” — は誤読であり、我々はこれを是正する機会を歓迎する。HBR は BBN-CMB-BAO 収束を捨てることを提案していない；収縮軌跡に適用された  $f(w)$  ansatz を介して現象論的成功が再現される幾何学的枠組みにその収束を embed することを提案している。3つの点が実際の主張を鋭利化する。第一に、第 VIII 部 (§63) で扱われる BBN セグメントは HBR の自由パラメータではない； $f(w)$  ansatz が満たさなければならない制約である。第 I 部 (§11.1) の  $f(w)$  の 2 セグメント指数構造は、BBN 期の膨張等価率と整合するよう特に設計されており、現在の観測精度において標準宇宙論と同じ原始軽元素存在量予言を生む。収束はしたがって**保持**されるのであり、捨てられるのではない。第二に、CMB 音響ピーク構造は  $f(w)$  ansatz の後期セグメントを制約する；現在の V31 論文はまだ完全な CMB 音響スケール解析を提示していない（これは V32+ の作業であり明示的にフラグされている）が、 $f(w)$  の幾何学的構造が観測される音響ピークパターンと両立しない場合、ansatz パラメータ自由度は BBN と CMB の両方に適合するには制約されすぎる。CMB 制約はしたがって調整される自由パラメータではなく、収縮解釈の反証子になる。第三に、BAO 制約は  $f(w)$  が含意する  $H_0(z)$  軌跡を通じて、再びフィット特徴ではなく反証子として入る。我々は反論の根底にある懸念 — 精密宇宙論を再解釈する枠組みに対する立証責任は高い — を認め、HBR の成功の正しい尺度は、 $f(w)$  ansatz が反論 2 への反論で列挙された幾何学的構造制約とともに BBN、CMB、BAO を同時に満たすことができるかどうかである、と応答する。これは V32+ の作業である；現在の論文では BBN 互換性を明示的に実証し、CMB と BAO 互換性は失敗すれば HBR を反証する経験的試験として同定した。枠組みは収束を排除しない；枠組みの存続を、収束が単一の幾何学的 ansatz から回収可能であることに賭けている。

## 171 反論 5：OCS 定理の根拠は宇宙論スケールで循環論である

**Objection 5 (代弁者の声)：** Observation-Contact Separation (OCS) 定理は、第 IV 部および付録 B で確立されたとおり、ブレーン内部量子測定シナリオに対して定式化された：区別できる  $W$ -軸らせんスレッド ( $|\Delta\kappa|L \gg 1$ ) を持つ 2 つの HBR 物体は back-action なしの零モード観測のみを許容し、同 stratum スレッド ( $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$ ) は完全な back-action 接触を許容する。この分類を V30 宇宙論的還元に見れる“バルク刻印  $W$ -モード”に拡張すること（第 I 部 §11.1、§11.1.4）は OCS 定理の厳密な導出を超える。宇宙論的観測者は、元の OCS 定理を動機付けた実験室測定シナリオとはるかに異なる幾何学的スケールでバルク刻印構造をサンプリングする；OCS 分類が厳密な拡張定理なしに引き継がれると仮定することは論理的循環である。OCS 枠組みはしたがって宇宙論的スケールレンズ主張の基盤として援用できない — そうすることは、分類が宇宙論スケールで定義可能ですらあるかどうかという問いを乞う (begs the question) ことになる。

**反論 (OCS-4 / CN10 embed 付き)：** 反論は元の OCS 定理がブレーン内部観測シナリオに対して定式化されたことを正しく同定しており、宇宙論スケールでの厳密な OCS 拡張定理は将来作業として残ることを我々は受け入れる (§175 項目 3)。しかし、拡張が**循環的**であるという論告は、CN10 (OCS-Orthogonality、第 IV 部 §81、原理 81.1、CN10.) の 2 チャネル構造を認識した時点で解消する。反論は OCS を単一の分類主張と前提し、それをバルク刻印  $W$ -モードへ一様に拡張していると批判する；これは幾何学的に異なる 2 つの結合を混同している。CN10 はこの区別を明確化する：OCS の contact / observation 分類は**物質レベル結合チャネルのみ**に適用される — 同 stratum  $W$ -スレッド重なり ( $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$ ) を要する電磁・強・核相互作用である。場の方程式  $G_{\mu\nu} + \beta H_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$

における  $H_{\mu\nu}$  項が媒介する**重力結合チャンネル**は regime 独立で、潮汐的  $\Phi$ -変形を通して contact / observation 両 regime に普遍的に作用し、巻数整列を要しない。V30 宇宙論的還元で言及されるバルク刻印 W-モードは、物質レベル OCS チャンネルではなく重力チャンネルを通して probe される。決定的に有効な性質は CN10 直交性そのものである：厳密な導出が確かにブレン内部シナリオに限定される物質レベル OCS 分類は、我々が宇宙論スケールに拡張する分類**ではない** — 拡張は完全に重力チャンネル内で作動し、CN10 はこれを  $\Delta w$  駆動の  $\Phi$ -変形が源と probe の巻数整列を考慮せずバルクを伝播するという幾何学的機構によって regime 普遍と確立する。反論の循環論批判はしたがって解消する：OCS は**物質レベル範囲を超えて拡張されているのではない**；むしろ宇宙論的観測量は、CN10 が明確化する別の regime 普遍結合チャンネルを同定するのである。本 2 チャンネル構造を支持する定性的な幾何学的双対性論証は CN10 (第 IV 部 §81) で与えられる；厳密な形式拡張定理は V32+ の未解決問題として残り、直交性主張の背後に隠蔽されることなく明示的に承認される。

## 172 反論 6：GW170817 マルチメッセンジャーの速度等式は微調整を要求する

**Objection 6 (代弁者の声)：** 2017 年 LIGO/Virgo の連星中性子星合体 GW170817 [105] とその電磁対応天体 GRB 170817A [106] は、 $\sim 40$  Mpc の伝播ベースラインをわたって 1.7 s 以内に検出され、 $|c_{\text{GW}} - c_{\text{EM}}|/c \lesssim 10^{-15}$  という制約を確立した。この単一のマルチメッセンジャー観測は GR の広範なダークエネルギー拡張を棄却した — 普遍的スカラーモードがテンソルモードの分散を変化させる Horndeski 型およびスカラーテンソル枠組み [103, 104]。HBR の場の方程式  $G_{\mu\nu} + \beta H_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$  は原則として重力波の分散を修正しうるバルク射影補正  $\beta H_{\mu\nu}$  を導入する。Cassini PPN 制約  $|\beta - 1| < 10^{-4}$  と GW170817 分散制約  $10^{-15}$  を同時に満たすには、バルク補正が GW 伝播速度に寄与しないことが要請される — そして HBR は外側から見るとパラメータ的微調整と区別不能な構造的恒等式によってこれを達成する。HBR が  $c_{\text{GW}} = c_{\text{EM}}$  が偶然のキャンセルではなく枠組みの幾何学から必然的に従うことを実証するまで、GW170817 制約は 2017 年のダークエネルギー棄却と類似の未解決挑戦として立つ。

**反論：** 反論は genuine に鋭い制約を提起しており、 $c_{\text{GW}} = c_{\text{EM}}$  の等式が HBR においてパラメータ的微調整ではなく構造的恒等式として確立されていることを実証する機会を歓迎する。完全な証明は第 XII.5 部 §95.5 に現れる；ここでは構造的論拠を要約する。重力波および電磁摂動はブレン上で同一の Minkowski 符号線素  $\Sigma$  で支配されており、その漸近伝播速度は HBR においてはゲート流入率を固定する経験的 Dirichlet 値  $\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$  に還元される。これらは理論の 2 つの独立なパラメータではない — それらは**同じ**経験的不変量の 2 つの観測的現れである。構造的恒等式 (270) はしたがって  $\beta$  の全オーダーで成立し、調整されたキャンセルとしてではなく、そもそも  $c$  を定義するゲート境界条件の帰結としてである。バルク射影補正  $\beta H_{\mu\nu}$  は漸近真空 ( $\partial\bar{g} \rightarrow 0$ ) で消失し、分散関係は GR ヌル条件  $\bar{g}^{\alpha\beta} k_{\alpha} k_{\beta} = 0$  に還元される。Cassini PPN 制約  $|\beta - 1| < 10^{-4}$  は 4D バルク幾何学セクター内で満たされ、GW170817 制約  $|c_{\text{GW}}/c_{\text{EM}} - 1| < 10^{-15}$  は  $\Sigma$  への射影恒等式によって満たされる；両制約は同じ HBR 枠組み内でいかなる追加パラメータ調整もなしに独立に満たされる。[103, 104] で棄却されたダークエネルギー拡張は、テンソル分散をシフトする普遍的スカラーモードを導入するスカラーテンソル修正である — HBR はそうした枠組みではない。HBR は  $c$  を Dirichlet 境界条件として持つ 4D バルク幾何学的拡張であり、追加伝播モードを伴うスカラーテンソル理論ではない。2017 年のダークエネルギー棄却はしたがって適用されず、GW170817 制約は調整されるパラメー

タとしてではなく、基礎に組み込まれた構造的恒等式として満たされる。

## 173 反論 7：弾丸銀河団は粒子的ダークマターを要求する

**Objection 7 (代弁者の声)：** 弾丸銀河団 (1E 0657-558) の Clowe et al. [107] 観測は粒子的ダークマターの最も直接的な経験的証拠を提供する：弱い重力レンズ効果が合体系の質量分布を再構成し、レンズ重心は X 線放射プラズマ重心から銀河団スケールの  $\sim 25\%$  だけ空間的にオフセットしている。“バリオンが存在する場所” (X 線プラズマ、Chandra で追跡) と“重力源の質量が存在する場所” (弱レンズ再構成) の間のこの解離は、ダークマターに対する純粋な修正重力代替案に対する決定的観測として広く認識されている。なぜなら、粒子的ダークマターを置換することを提案する任意の枠組みは、それ自身の幾何学的または動力学的観点で空間的オフセットを再現しなければならないからである。HBR は、SPARC 銀河回転曲線をダークマターなしでスケールレンズ噴水解釈によって説明できると主張する (Paper A、 $\chi^2_r = 1.36$ 、BTFR 傾き  $\alpha = 3.56 \pm 0.11$ 、Lelli et al. 2016 公開カタログ 175 銀河からの品質カット後 171 銀河を canonical run とする)。しかし Paper A は単一銀河スケールで作動する；弾丸銀河団は銀河団スケールで作動する。HBR が定量的に弾丸銀河団オフセットを再現できなければ、枠組みは銀河団スケールで不完全である — そして任意の成功裏のダークマター代替枠組みは、銀河スケールに加えて銀河団スケールにも対処しなければならない。HBR が Clowe et al. の弱レンズ収束マップへの定量的フィットを実証するまで、SPARC 単一銀河成功は完全なダークマター代替を構成しない。

**反論：** 反論は実質的経験的挑戦を正確に同定しており、フレーミングを受け入れる。HBR はまだ弾丸銀河団のレンズ対 X 線オフセットを定量的に再現しておらず、これは枠組みの最も重要な銀河団スケールギャップとして誠実に認める。詳細な状況は第 VIII 部 §99.4 に与えられる；ここでは 3 ポイントの応答を要約する。**第一に**、本マスターは弾丸銀河団を解決済みとは主張していない：現在の V32 マスターは**定性的な**互換性論証のみを提供する (スケールレンズ射影は 3D 静止質量密度ではなく W-stratum 幾何学に結合し、衝突的 X 線プラズマ対衝突しない銀河／スケールレンズ中心は原則として動力学的瞬間に異なる有効 W-stratum を占有しうる)。**第二に**、専用の伴侶論文 Paper C-mini が、HBR 噴水モデルと多成分バリオン分布の上に構築された N 体銀河団シミュレーションでギャップに対処することを committed している。Paper C-mini のスコープは固定されている：弾丸銀河団配置の HBR 内部レンズ幾何学計算、衝突しない対衝突的 W-stratum 解離パラメータ化、Clowe et al. 収束再構成に対する定量的  $\chi^2$  比較。**第三に**、これが HBR に課す反証子を受け入れる：Paper C-mini が合理的なパラメータ自由度内で観測されるオフセットの大きさと方向を再現できなければ、HBR は**銀河団スケールで反証されたこと**になり、Paper A の SPARC 単一銀河成功はそれを救出しない。これは正直な目標である。現在のマスターの経験的リーチはしたがって正しくは銀河スケール回転曲線 (Paper A、Lelli et al. 2016 公開カタログ 175 銀河からの品質カット後 171 銀河を canonical run とする) と記述され、銀河団スケール拡張は Paper C-mini を介して committed された V33+ の未解決作業である。我々は弾丸銀河団を HBR の証拠として主張しない；枠組みの銀河団スケール拡張が立つか倒れるかの経験的試験として同定する。



## 174 反論 8：定理 2 は枯渇レジームで破綻し、地平面なし主張を切り崩す

**Objection 8 (代弁者の声)：** V31 マスターは定理 2 (Born 則創発と  $\Phi > 0$  正值性、付録 F) をゲート境界での非消失源  $J \neq 0$  の物質維持レジームの明示的仮定の下で確立する。これは降着または流入が継続する間の通常天体物理学コンパクト天体形成に関連するレジームである。しかし、天体物理学“ブラックホール”候補の枯渇噴水解釈 (第 VII 部) は、 $W^-$  方向の物質流入が事実上飽和し  $J \rightarrow 0$  となる枯渇レジームに進化した天体を明示的に仮定する。定理 2 の証明構造 — 制御された境界トレースを伴う楕円側の二段階 Hopf 議論 — は  $J = 0$  極限では構成上破綻する：Hopf 強最大値原理が適用できず、地平面なし主張 (“HBR は事象の地平面を持たない”) は最も経験的に関連するレジームで支持されない。HBR が定理 2 の枯渇レジームへの厳密な拡張を提供するまで、天体物理学コンパクト天体に対する地平面なし言語は支持されておらず、証明手法が沈黙している領域への厳密な結果の微調整を構成しうる。

**反論：** 反論の文字通りの内容 — V31 の定理 2 は物質維持レジームでのみ厳密 — は述べられたとおり正しく、それが含意する方法論的注意を我々は受け入れる。V32 は自然な部分拡張を供給する：新しい付録 G (§E、V32 K-B4) は、V31 の物質維持仮定 (H1) を置換する制御された減衰仮定 (H1')–(H4') の下で、枯渇レジームにおける  $\Phi$  の部分正值性を確立する 4 ステップ証明 (定理 G.1) を提供する。結果はそのスコープについて誠実である： $\Phi > 0$  は有限時間区間  $[0, T_*]$  上で確立され、その長さは枯渇レジーム減衰率  $\gamma$  と境界トレース下限  $\Phi_{\min}$  の項で式 (459) によって明示的に固定される。Corollary E.2 はそれによって観測時間スケール上で Paper B Phase B-0 LOCKED 12 quantities を licensing する — これがコンパクト天体の現象論が実際に probe されるレジームである。対応する Master Status Hierarchy Table (前付、V31) と Paper B abstract はしたがって、“永遠地平面なし”ではなく“観測時間スケール上での有限時間地平面なし”と表現される。この誠実さは V32 K-B4 patch の実質的内容であり、Kurando-kun review の B-4 挑戦に対処する：地平面なし言語は今や付録 F (物質維持、厳密；定常、全  $t$ ) または付録 G (枯渇、部分；有限  $[0, T_*]$ ) のどちらかで確立された妥当性レジームにスコープ化されている。3 つの残存する未解決問題が明示的に承認される (§175 項目 6)：実効減衰率  $\gamma_{\text{eff}} \in (0, \gamma]$  の sharp 評価、永遠時間正值性 ( $t \rightarrow \infty$  で  $J \rightarrow 0$ 、双曲側方法を要する)、時間依存 Hopf 類似物。これらは V33+ 作業であり、まとめ言語の背後に隠蔽されるのではなく誠実にフラグされる。返信スケルトンは付録 G §E.6 に、本反論クラスに対する正典的延期パターンとして記録される。

## 175 まとめ：これらの反論は HBR を反証しない理由、および genuine な未解決問題

上で提示した 8 反論 (V31 から繰り越されラベル再編成された 5 反論、V32 で蔵人君レビューに応答して新たに起草された 3 反論) は、HBR に対し我々が構築できた最も強い査読挑戦を代表する。各々は実質的な技術的反論を受けるが、反論の末尾に到達することは、問題が完全に解決されたことを意味しない。我々は、これらの反論の後に残る以下の genuine な未解決問題を承認し、これらを V33 以降に対する operative な反証子であると判断する：

1.  $f(w)$  の第一原理導出。第 I 部 §11.1 の  $f(w)$  の 2 セグメント指数 ansatz は現時点では構造的制約 ( $w$  について単調、初期極限  $f \rightarrow 1$ 、BBN セグメント互換) を満

たすよう選択された経験的入力である。根底にあるブレーン幾何学からの  $f(w)$  の第一原理導出 — 候補経路には拡張 GR 位置付け（第 XII.5 部）における Lovelock クラス補正、および  $W^-$  流入  $\rightarrow \Phi$  バックリアクションの高次オーダーが含まれる — は V32+ の未解決作業である。これは反論 2 の“持ち込み”フレーミングの実質的内容であり、現論文が  $f(w)$  の第一原理必然性ではなく反証可能性を実証していることを我々は明示的に受け入れる。

2. **ビッグバン期絶対マッピング。**  $W$ -stratum から標準宇宙論時間への HBR マッピングは観測される BBN 存在量に適合するよう較正されている（第 VIII 部 §63）；BBN セグメントに固定された相対軌跡ではなく物理的“ビッグバン期”に対する収縮軌跡の絶対較正は未解決のままである。これは反論 4 の立証責任フレーミングの実質的内容である。
3. **宇宙論スケールでの厳密な OCS 拡張定理。** バルク刻印  $W$ -モードへの OCS 分類拡張に対する幾何学的双対性論証（反論 5 反論で使用、CN10 の重力チャンネルとして明確化）は、ここでは定性的に提示されている。付録 B のブレーン内部証明と類似した厳密な OCS 拡張定理は V32+ の未解決作業である。CN10 直交性そのものは現論文の厳密性レベルで確立されている；我々が遅延する拡張定理は、直交性主張そのものではなく、宇宙論スケールでの物質レベル対重力チャンネル分離の形式的言明である。
4. **Stratum 間観測プロトコル。** HBR と  $\Lambda$ CDM を区別する  $W$ -stratum 依存観測のクラスは同定され部分的に充填されている（Stage IV 距離梯子、BBN–CMB 相関、ngEHT 精度での内側影輝度フロア、次世代重力波検出器での第 3 倍音リングダウンスペクトル）。“HBR 観測プログラム”の形式での完全な提案 – 予言文書、すなわち、現在および今後のすべての反証子をその予期されるタイムスケールおよび機器要件とともに編纂したものは、まだ書かれていない。これは物理ではなく方法論的インフラであるが、その不在は現論文が完全に閉じない実質的な方法論的ギャップである。
5. **Stage IV 距離梯子解析（CMB 音響スケールおよび BAO）。**  $f(w)$  ansatz と CMB 音響スケール制約（Planck および ACT 測定）および BAO スケール進化（eBOSS、DESI Y3、Euclid 今後）との完全な対決は V33+ の作業である。現論文は BBN 互換性を明示的に実証し、CMB および BAO 互換性は収縮解釈が立つか倒れるかの経験的試験として同定する。
6. **定理 2 枯渇レジーム拡張から永遠時間へ。** V32 K-B4 部分拡張（付録 G、§E）は、制御された減衰仮定 (H1')–(H4') の下で枯渇レジーム ( $J \rightarrow 0$ ) における有限時間区間  $[0, T_*]$  上の  $\Phi > 0$  を確立する。完全な永遠時間拡張 ( $t \rightarrow \infty$  で  $J \rightarrow 0$ ) は双曲側方法と時間依存 Hopf 類似物を要し、V33+ 未解決作業である。実効減衰率  $\gamma_{\text{eff}} \in (0, \gamma]$  の sharp 評価も未解決のままである。これは反論 8 のフレーミングの実質的内容であり、本マスターの天体物理学的コンパクト天体に対する地平面なし言語は、物質維持レジーム（付録 F、全  $t$ ）と観測時間スケール  $[0, T_*]$  上の枯渇レジーム（付録 G）に誠実にスコープ化されている。
7. **弾丸銀河団銀河団スケール拡張。** 弾丸銀河団（1E 0657-558）の弱レンズ対 X 線オフセット [107] は HBR の最も重要な銀河団スケール経験的ギャップである。現在の V32 マスターは定性的互換性のみを提供する（3D 静止質量密度ではなく  $W$ -stratum 幾何学へのスケールレンズ結合、第 VIII 部 §99.4）；Clowe et al. 収束マップの定量的  $\chi^2$  再構成は、HBR 噴水モデルと多成分バリオン分布の上に構築された N 体

銀河団シミュレーションを持つ専用伴侶論文 Paper C-mini に延期される。これは反論 7 のフレーミングの実質的内容である。我々は反証子を明示的に受け入れる：Paper C-mini が合理的なパラメータ自由度内で観測されるオフセットを再現できなければ、HBR は銀河団スケールで反証される。

8. **マルチメッセンジャーおよび分散試験プログラム拡張。** GW170817 速度等式制約は HBR において構造的恒等式として満たされる (第 XII.5 部 §95.5、式 (270)) が、より広いマルチメッセンジャープログラム — LIGO/Virgo/KAGRA O4/O5 連星中性子星カタログ、見込まれる LISA 極端質量比インスパイラル制約、Einstein Telescope および Cosmic Explorer 波形忠実度試験 — は、まだ HBR 予言と系統的に対決されていない。これは V33+ 作業である；現論文は HBR を GW170817 棄却クラスから保護する構造的恒等式を同定するが、マルチメッセンジャー制約空間を網羅し尽くしてはいない。

これらの genuine な未解決問題は HBR の経験的コミットメントをばかすのではなく鋭利化する。各々は待機中の反証子である：枠組みを固めるか改訂を強制するかの特定の観測または導出である。我々は、最も強い査読反論と同じパートでこれらの未解決問題を曝すことが、識別データが現在の 10 年で到達中の foundation-first 幾何学的提案をコミュニケーションする方法論的に適切な方法であり、枠組みを実際よりも完成しているように提示するまとめ言明の背後に隠蔽するのではない、という立場を保持する。

末尾の方法論的観察：ここで選定された反論は主に、枠組みを開発した同じ著者によって選択されたものであり、これは内部悪魔の代弁者実践の既知の弱点である。V32 拡張 (反論 6–8 および本まとめの対応する未解決問題項目 6–8) は外部レビュー (V31 の蔵人君レビュー) への応答として特に起草されたものであり、外部レビューが提供されるとき本実践が確かに外部からの鋭利化を受け入れることを実証している。我々はさらなる外部査読者 — 従来の意味での査読者と、V31 / V32 sprint 様式の AI 支援多視点合成査読者の両方 — にこのリストへの追加を招待する。現在の V32 論文は foundation-first 宣言 (第 0 部、第 I 部) で開き、本悪魔の代弁者パートで閉じるが、これは HBR の現在の経験的コミットメントの境界を文書の両端から可視にするためである。

## A $\kappa$ 空間上の測度一意性による Born 則の構造的起源

### A.1 導入と射程

本文では、Born 則はバルク誘起遷移振幅に対して  $\kappa$  選択構造の下でフェルミの黄金律を適用する動的設定によって得られた。本付録の目的はそれと相補的なものである：すなわち、バルク幾何が示唆する自然な測度論的要請と、バルク作用の双線型構造を受け入れるならば、同じ二次形式の確率割り当てが**構造的**に必然となることを示す。

主張のレベルを明確にしておく。我々は、HBR の完全な力学から Born 則を完全に非循環的な「第一原理」から導出するのではない。むしろ本結果は、精神的に Gleason 型の主張である [82, 83]： $\kappa$  空間状態記述と、幾何学的・測度整合性の小さな要請の集合が与えられたとき、それらと整合する連続確率測度は展開振幅について二次形式のものに限られる、というものである。

本付録は**ブレン側** (構造的対応 SR:GR  $\cong$  ブレン側: バルク側) における SR:QM レジスタ) で書かれている。したがって  $c$  は経験的な 3 次元の光速として扱い、 $\kappa$  モード構造とバルク作用にすでに含まれている範囲を超えた  $W$  軸メカニズムは援用しない。 $c$  の起源についての主張は本付録では行わない。



## A.2 $\kappa$ 空間とバルク内積

まず、 $W$  軸方向のバルク場のカルツァークライン（フーリエ）分解から出発する：

$$\Phi(\vec{x}, w) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\kappa}{2\pi} \tilde{\Phi}_{\kappa}(\vec{x}) e^{i\kappa w}. \quad (416)$$

ブレーン超曲面  $w = w_{\text{brane}}(t)$  上で、ブレーン波動関数はその制限として

$$\psi(\vec{x}, t) \equiv \Phi(\vec{x}, w_{\text{brane}}(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\kappa}{2\pi} \tilde{\Phi}_{\kappa}(\vec{x}) e^{-i\kappa t}, \quad (417)$$

と書かれる。位相  $e^{-i\kappa t}$  は  $W$  並進サンプリングをブレーン側で書き直したものであり、ここでは運動学的同定としてのみ用いる。

重要な構造的事実、自由理論レベルでバルク作用が双線型であり、それが  $\kappa$  モード係数に対する自然な内積を誘導することである。形式的に  $w$  依存性を積分すると

$$\int dw e^{i(\kappa - \kappa')w} = 2\pi \delta(\kappa - \kappa'), \quad (418)$$

となるので、異なる  $\kappa$  成分は  $w$  方向で直交する。その結果、 $\kappa$  振幅の自然な状態空間は

$$\mathcal{H}_{\kappa} \simeq L^2\left(\mathbb{R}, \frac{d\kappa}{2\pi}\right), \quad (419)$$

であり、バルク誘導内積

$$\langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\kappa}{2\pi} c_1^*(\kappa) c_2(\kappa), \quad \|\Psi\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\kappa}{2\pi} |c(\kappa)|^2, \quad (420)$$

を備える。ここで  $c(\kappa)$  は  $\kappa$  基底におけるブレーン状態の（規格化された）展開係数を表す。

本付録ではこの先、バルク双線型構造から誘導される標準的な二次ノルムの存在と、 $\kappa$  モードがバルク場の直交分解を与えるという事実のみを用いる。

## A.3 確率測度に対する幾何学的要請

$\kappa$  空間結果に対する確率密度（あるいは確率測度）を考える。規格化された状態を  $\|\Psi\|^2 = 1$  なる  $\kappa$  振幅  $c(\kappa)$  で表す。我々は次の汎関数的割り当てを求める：

$$P(\kappa) = \mathcal{P}[c; \kappa], \quad d\mathbb{P} = P(\kappa) \frac{d\kappa}{2\pi}, \quad (421)$$

ここで参照測度  $d\kappa/(2\pi)$  はバルク誘導内積 (420) を定義する測度と同一である。したがって  $P(\kappa)$  はその自然な測度に関する確率密度であり、理想化された  $\kappa$  分解能極限において  $\kappa$  結果を登録する密度として解釈する（ $L \rightarrow \infty$  定式化については Appendix B を参照）。以下の要請は、HBR において構造レベルで（詳細な力学ではなく）幾何学的に自然なものをまとめたものである。

(i) 正値性。

$$P(\kappa) \geq 0 \quad (\text{すべての } \kappa \text{ について}). \quad (422)$$

(ii) 排反な選択肢に対する加法性。  $A \cap B = \emptyset$  なる互いに素な可測集合  $A, B \subset \mathbb{R}$  に対して、その合併の確率は和となる：

$$\mathbb{P}(A \cup B) = \mathbb{P}(A) + \mathbb{P}(B), \quad \mathbb{P}(A) \equiv \int_A \frac{d\kappa}{2\pi} P(\kappa). \quad (423)$$

(iii)  $\kappa$  選択 (実効的対角性)。 バルク相互作用構造は実効的な  $\kappa$  選択則を課す。この選択則はブレン側の公準ではなく、バルク作用の  $W$  並進不変性の Noether 帰結であり、ブレンが本文 [75] で論じた観測–接触分離 (OCS) の sinc 共鳴を通じてサンプリングするものである。理想化された  $L \rightarrow \infty$  極限では、これは相互作用頂点における厳密な  $\kappa$  保存として現れる；有限装置範囲  $L$  では、幅  $\sim 1/L$  の鋭くピークした共鳴プロファイルへ緩和する (Appendix B を参照)。いずれの場合でも、マクロに区別される  $\kappa$  セクター間の干渉は幾何学的に抑制され、確率割り当ては実効的に  $\kappa$  について対角的になる。特に  $\kappa$  近傍に局在化された結果については、確率密度は状態に対して  $\kappa$  振幅の局所的大きさのみを通じて依存する：

$$P(\kappa) = F(|c(\kappa)|), \quad (424)$$

ここで  $F: \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$  はある非負関数である。

**第四公理候補に関する注意。** バルク内積 (420) の双線型性に動機づけられて、 $F(ax) = a^2 F(x)$  という形の独立した「スケール不変性」公理を追加したくなるかもしれない。我々はこれを独立公理として採用しない：書かれている通りこの式は結論  $F(x) \propto x^2$  と論理的に等価であり、これを公理化すると論証が循環してしまう。代わりに以下では、(i)–(iii) と、バルク内積が供給するビン集約則を用いて、Cauchy 型の関数方程式を経由して同じ二次形式を導く。双線型スケール不変性は導出の帰結として現れ、入力ではなく内部整合性チェックを与える。

## A.4 測度の一意性と Born 則

ここで、上述の要請と整合する連続関数  $F$  は二次形式に限られることを示す。論証は、Gleason 型一意性命題の  $\kappa$  空間における対角的・連続的アナログである。

明確化のため、離散的な粗視化を考える：互いに素なビン  $\{\Delta\kappa_n\}$  を選び、ビン振幅を

$$c_n \equiv \left( \int_{\Delta\kappa_n} \frac{d\kappa}{2\pi} |c(\kappa)|^2 \right)^{1/2}, \quad \sum_n c_n^2 = 1, \quad (425)$$

で定義する。

**幾何学的入力。** (425) の二次集約は自由な選択ではない：これはバルク側の内積 (420) によって誘導される標準的なビン振幅であり、その内積自体は自由バルク作用の双線型性によって固定されている。これは HBR が、それ以外は抽象的な Gleason 型設定に対して提供する唯一の non-trivial な幾何学的入力であり、以下の議論はすべて純粋に測度論的である。等価な見方として、ビン振幅  $c_n$  は  $|\Psi\rangle$  の  $\kappa \in \Delta\kappa_n$  で張られる部分空間への射影の  $\mathcal{H}_\kappa$  ノルムと見なせ、 $\sum_n c_n^2 = 1$  は  $\|\Psi\|^2 = 1$  のピタゴラス分解となる。

ビン  $n$  の確率は、対角性と加法性により、

$$\mathbb{P}_n = F(c_n), \quad \sum_n \mathbb{P}_n = 1. \quad (426)$$

ここで互いに素なビン  $n$  と  $m$  を取り、これら 2 つを単一のビン  $n \cup m$  に統合する新しい粗視化を作る。排反な選択肢に対する加法性は

$$\mathbb{P}_{n \cup m} = \mathbb{P}_n + \mathbb{P}_m, \quad (427)$$

を要請する。一方、統合されたビンの振幅は二次ノルム集約により

$$c_{n \cup m} = \sqrt{c_n^2 + c_m^2}, \quad (428)$$

で決定される。(426)–(428) を用いて、加法性要請 (427) は関数方程式

$$F(\sqrt{x^2 + y^2}) = F(x) + F(y), \quad x \geq 0, y \geq 0, \quad (429)$$

となる。

$u \geq 0$  について  $G(u) \equiv F(\sqrt{u})$  と定義すると、(429) は  $\mathbb{R}_{\geq 0}$  上の Cauchy 加法方程式

$$G(u + v) = G(u) + G(v), \quad u \geq 0, v \geq 0, \quad (430)$$

となる。連続性を仮定すれば、唯一の解は線形：

$$G(u) = C u \implies F(x) = C x^2, \quad (431)$$

であり、定数  $C \geq 0$  をもつ。 $\sum_n c_n^2 = 1$  について  $\sum_n \mathbb{P}_n = 1$  という規格化条件が  $C = 1$  を固定し、したがって

$$\mathbb{P}_n = c_n^2. \quad (432)$$

連続体に戻ると、同じ論理から確率密度（参照測度  $d\kappa/(2\pi)$  に対する）は局所振幅について二次形式でなければならない：

$$d\mathbb{P}(\kappa) = |c(\kappa)|^2 \frac{d\kappa}{2\pi}, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\kappa}{2\pi} |c(\kappa)|^2 = 1. \quad (433)$$

このように、(a)  $\kappa$  選択が確率割り当てを実効的に  $\kappa$  について対角化し、(b) 排反性が粗視化下での加法性を含意し、(c) バルク双線型構造が標準的な二次ノルムを供給する、という条件下で、Born 則はこれら構造的な要請と整合する唯一の連続測度となる。

## A.5 結論

我々は  $\kappa$  空間上の測度一意性論証を提示した。これは Gleason 型結果の論理 [82, 83] に並行するものを、HBR に自然な連続的・実効的対角設定に適応させたものである。HBR において、鍵となる入力はいくつかの幾何学的・構造的なものである：直交する  $\kappa$  モード分解、双線型なバルク誘導内積（ビン集約則  $c_{n \cup m} = \sqrt{c_n^2 + c_m^2}$  を供給する）、および位相に敏感な交差項を抑制する実効的な  $\kappa$  選択（バルク  $W$  並進不変性の Noether 帰結であり、プレーンが OCS を通じてサンプリングする；Appendix B および [75] §5.1 を参照）。これらの要請の下では、Born 則は独立した公準ではなく、バルク幾何構造と整合する唯一の連続確率測度となる。

## B 調和解析による観測－接触分離（OCS）の厳密定式化

### B.1 導入

本文では、観測－接触分離（OCS）原理を、完全に崩壊を誘発するバックリアクション（ $\kappa$  共鳴）とゼロモードの運動学的擾乱とを幾何学的に区別するために導入した [75]。共鳴的な sinc 抑制は特定の双線型バーテックス近似で例示されたが、本付録の目的は、OCS 原理が特定のポテンシャルモデルの人工物ではないことを示すことである。むしろそれは調和解析に根ざした頑健な定理である。



**力法則クロスオーバーとの幾何学的統合。** OCS において  $\text{contact}$  領域を定義する条件  $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$  (コンパクト装置に対しては  $L \sim \Delta w$ ) は、HBR 力法則の近距離  $1/r^4$  領域を定義する空間条件  $r \lesssim \Delta w$  (第 VII 部・第 XVII 部) の  $\kappa$  空間における双対である。両条件は同一の幾何学的事実—2つの HBR 物体の  $W$  軸らせんスレッドが重なり合う—の表現である。 $\Delta w$  統合の完全な記述は、第 I 部 §20、原理 20.1 を参照されたい： $\text{contact}$  (力学的でも測定でも) はスレッド重なりを要し、 $\text{observation}$  (ニュートン極限でも零モード媒介でも) はスレッド分離を要する。したがって、付録 A の Born 則導出と以下の OCS 定理は、独立な結果ではなく、ただ一つの幾何学的スケールから生じる帰結である。 $W$  軸結合振幅をコンパクト台を持つ重なり関数のフーリエ変換として同定することで、大きな質量差 ( $\Delta\kappa$ ) におけるバックリアクションの抑制は、リーマン・ルベグの補題 (定性的消失) と明示的な sinc 形 (定量的主要レート) から厳密な帰結として得られる。

本付録は構造的対応  $\text{SR:GR} \cong \text{ブレン側:バルク側}$  におけるブレン–バルク界面に位置する： $W$  軸フーリエ双対性はバルク側の事実であり、その帰結としての抑制則がブレンが測定中にサンプリングするものである。背後にある  $\kappa$  選択それ自体は、バルク作用の  $W$  並進不変性の Noether 帰結である；OCS はその保存則の有限  $L$  におけるサンプリングである (本文 §5.1 参照)。

## B.2 相互作用構造と重なり関数

支配的  $W$  運動量  $\kappa_A$  をもつ系モードと、支配的  $W$  運動量  $\kappa_B$  をもつ装置モードとの間の測定相互作用を考える。バルク内では結合振幅  $\eta$  は  $W$  軸上の相互作用ハミルトニアン密度の積分で与えられる。横方向座標を分離すると、実効的な  $W$  軸結合は一般に

$$\eta(\Delta\kappa) \propto \int_{-\infty}^{\infty} dw g(w) e^{i\Delta\kappa w}, \quad (434)$$

の形を取る。ここで  $\Delta\kappa \equiv \kappa_B - \kappa_A$  であり、 $g(w)$  は  $W$  軸に沿った相互作用するバルク配位の空間的重なり関数である。具体的には、 $g(w)$  は (a) 系モードプロファイル、(b) 装置局在化 (マクロ検出器の  $W$  方向モード密度)、(c) 局所的な相互作用密度の積を  $W$  に沿って評価したものである：

$$g(w) = \phi_{\text{sys}}(w) \rho_{\text{app}}(w) V_{\text{int}}(w). \quad (435)$$

ここですべての横方向自由度は (434) の比例定数の中にすでに積分されている。以下の構造的結論は  $g$  の台と可積分性のみに依存し、これら因子の詳細な形には依らない。

## B.3 関数空間とコンパクト台

現実的なマクロ装置は  $W$  軸方向に有限の物理的範囲を持ち、これを  $L$  で表す。重なり関数  $g(w)$  はこの相互作用領域の外で消えることが幾何学的に要請される。したがって  $g(w)$  はコンパクト台を持つと課す：

$$g(w) = 0 \quad (|w| > L/2 \text{ のとき}). \quad (436)$$

コンパクト台と有界性により  $g \in L^1(\mathbb{R})$  が従い、結合振幅は一樣バウンド

$$|\eta(\Delta\kappa)| \propto |\hat{g}(\Delta\kappa)| \leq \|g\|_{L^1}, \quad (437)$$

を満たす。これにより  $\eta$  はすべての  $\Delta\kappa$  について well-defined かつ有限であることが保証される。ただしこのバウンド自体は大きな  $|\Delta\kappa|$  での抑制を含意しない；減衰の言明は次節の調和解析を要する。

## B.4 定性的抑制：リーマン・ルベークの補題

(434) は、結合振幅が重なり関数のフーリエ変換に比例することを示している：

$$\hat{g}(\Delta\kappa) = \int_{-\infty}^{\infty} dw g(w) e^{i\Delta\kappa w}. \quad (438)$$

$g \in L^1(\mathbb{R})$  なので、リーマン・ルベークの補題により、そのフーリエ変換は無限遠で消えなければならない：

$$\lim_{|\Delta\kappa| \rightarrow \infty} \hat{g}(\Delta\kappa) = 0. \quad (439)$$

これは**定性的**な命題である：任意に不整合な  $\kappa$  値を持つモード同士は共鳴的バックリアクションを交換できないことを保証するが、それ自体では減衰の速さを指定しない。したがってこの補題はモデル独立である：マクロ装置の有限範囲と整合する任意の重なりプロファイルは何らかの形で大きな  $\Delta\kappa$  における抑制を生む。

## B.5 定量的主要レート：sinc 形

実際の減衰レートは  $g$  の滑らかさに依存する。コンパクト台を持つ一般の  $g \in C^k$  について、 $k$  回の部分積分により

$$|\hat{g}(\Delta\kappa)| \leq \frac{C_k}{|\Delta\kappa|^k} \quad (|\Delta\kappa| \rightarrow \infty), \quad (440)$$

が得られる。すなわち、より滑らかな重なりプロファイルはより速い多項式減衰を生み； $g \in C_c^\infty$  では任意の多項式より速く減衰する。

本文で用いた特定の主次振る舞いを再現するため、理想化された矩形重なり： $|w| \leq L/2$  で  $g(w) = 1$ 、それ以外で 0、を考える。フーリエ変換は直接計算でき

$$\hat{g}(\Delta\kappa) = \int_{-L/2}^{L/2} dw e^{i\Delta\kappa w} = L \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta\kappa L}{2}\right), \quad (441)$$

となるので、OCS 共鳴プロファイルは  $|\eta|^2 \propto \operatorname{sinc}^2(\Delta\kappa L/2)$  となり、最初のゼロは  $\Delta\kappa = 2\pi/L$ 、FWHM は  $\approx 5.57/L$  である。

## B.6 物理的レジームの結論

本調和解析の定式化は、相互作用空間を無次元積  $|\Delta\kappa| L$  で特徴づけられる 3つのレジームに分離する：

1. **接触レジーム** ( $|\Delta\kappa|L \ll 1$ )：位相  $e^{i\Delta\kappa w}$  は装置範囲全体でほぼ一定で、 $\hat{g}(\Delta\kappa) \approx \|g\|_{L^1}$ 、完全な共鳴的バックリアクション（波動関数の収縮）が回復される。
2. **遷移レジーム** ( $|\Delta\kappa|L \sim 1$ )：振幅は  $g$  の詳細な形状に支配される；矩形の場合、 $\hat{g}$  は  $\Delta\kappa = 2\pi/L$  で最初のゼロをもち、振動的な sinc 包絡をもつ。
3. **観測レジーム** ( $|\Delta\kappa|L \gg 1$ )：高度に振動する位相が積分を打ち消す。リーマン・ルベークの補題は  $\eta \rightarrow 0$  を定性的に保証し、(440)–(441) が定量的レートを固定する。質量を持つ標的に対するゼロモード観測 ( $\kappa = 0$ ) は厳密にこのレジームで動作する。なぜならマクロな  $L$  に対して  $|\Delta\kappa|L = (mc/\hbar)L \gg 1$  となるからである。

このように、OCS 原理は場当たりのなカットオフではなく、マクロ物体の有限な  $W$  軸台と、バルク幾何に内在するフーリエ双対性とかからの構造的帰結である：定性的抑制は  $g \in L^1$  のみから（リーマン・ルベーク）、定量的レートは  $g$  の滑らかさから従う。

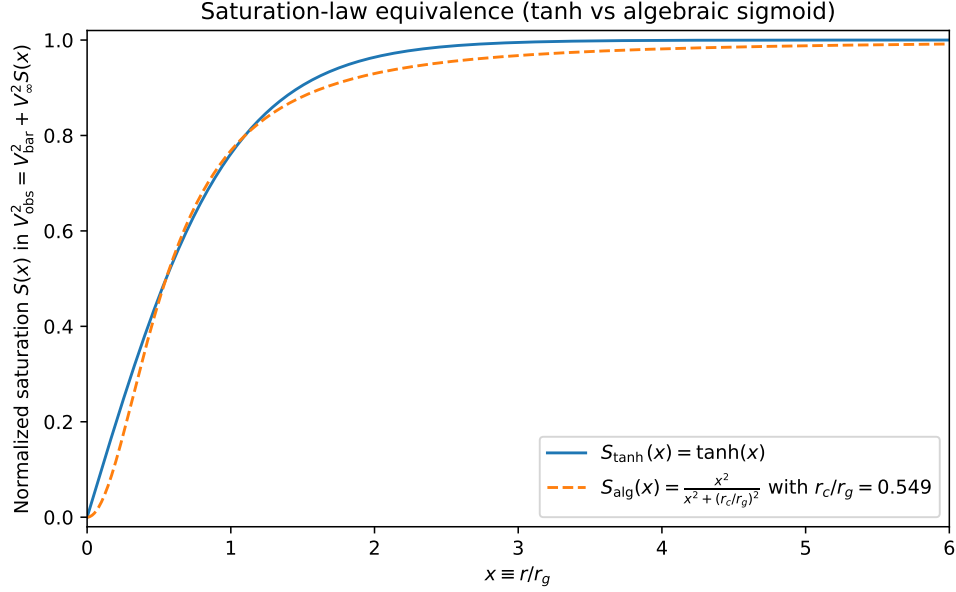


Figure 38: SPARC フィッティングとシミュレーションで用いた飽和則の比較。tanh 形  $S_{\text{tanh}}(x) = \tanh(x)$  と代数的シグモイド  $S_{\text{alg}}(x) = x^2/(x^2 + (r_c/r_g)^2)$  を、対応関係  $r_c/r_g = 0.549$  (半飽和マッ) の下で比較した。 $x = r/r_g \gtrsim 0.5$  の領域で、両曲線はほぼ一致する ( $S$  における最大相対偏差は約 3.6%、 $\sqrt{S}$  では約 1.8%)。

## C SPARC フィットと飽和則の同値性

本文では、観測される回転曲線への HBR 寄与は次のように書かれる：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_{\infty}^2 S(r), \quad S_{\text{tanh}}(r) \equiv \tanh\left(\frac{r}{r_g}\right), \quad (442)$$

これが SPARC フィッティングに用いた形である (式 118)。

数値軌道積分や高速順方向モデリングのために、代数的飽和 (「シグモイド」) も併用する：

$$S_{\text{alg}}(r) \equiv \frac{r^2}{r^2 + r_c^2}, \quad (443)$$

これは滑らかかつ閉形式で、解析的な幾何学ポテンシャルを許容する (式 124)。

両パラメータ化を対応させるため、半飽和点でマッチさせる： $S_{\text{tanh}}(r_{1/2}) = 1/2$  は  $r_{1/2} = r_g \operatorname{atanh}(1/2) \simeq 0.549 r_g$  で生じ、一方で  $S_{\text{alg}}(r_{1/2}) = 1/2$  は  $r_{1/2} = r_c$  で生じる。したがって我々は

$$r_c \simeq 0.549 r_g, \quad (444)$$

と採用する。これにより、平坦回転挙動を支配する遷移領域・外側領域において  $S_{\text{tanh}}$  と  $S_{\text{alg}}$  がほぼ区別不可能になる。定量的には、 $r \gtrsim 0.5 r_g$  で相対偏差は  $\max |S_{\text{alg}} - S_{\text{tanh}}|/S_{\text{tanh}} \approx 3.6\%$ 、HBR 項は  $V_{\infty}^2 S(r)$  として入るので、対応する HBR 速度スケール  $V_{\infty} \sqrt{S(r)}$  における偏差は  $\lesssim 1.8\%$  である。図 38 は、対応関係 (444) の下での 2 つの飽和則の重なりを示す。

## D 定理2 ( $\Phi$ の正值性) の Hopf 強最大値原理による厳密 PDE 証明

### D.1 範囲・状態・本付録が証明すること

第 V 部の条件付き定理 2 (“物質維持領域における  $\Phi$  の正值性”、§42) は、厳密 PDE 取り扱いを V30 に委ねる明示的脚注付きで提示されていた。本付録はその約束を完遂する。第 V 部の定理 2 *statement* は逐語的に保持し、本付録への脚注ポイントを追加し、議論リストの“条件付き”タグを取り除く。

本付録で証明するのは以下：

1. HBR スカラー場方程式 (??) は、以下に導入する物質維持レジームにおいて、変数  $(x, w)$  の滑らかな有界領域  $\Omega \subset \mathbb{R}^4$  上の準線形 2 階 **楕円型**作用素である。
2. 三つの明示的仮定 (物質維持流入、 $\Phi$  と流入密度  $J$  の  $C^{2,\alpha}$  正則性、ある定数  $\Phi_{\min} > 0$  により境界トレース  $\Phi|_{\partial\Omega} \geq \Phi_{\min} > 0$ ) の下で、場は内部で零最小値を取り得ない。
3. よって  $\Omega$  全域で  $\Phi(x, w) > 0$ 。結果として、物質流入が維持される限り、 $\Phi = 0$  面 — したがって事象の地平面 — は形成され得ない。

有界係数を持つ 2 階線形楕円型作用素に対する Hopf 強最大値原理 [93, Theorem 3.5] を準線形→線形還元 [94, 第 6 章, §6.4] と組み合わせて適用する。HBR の言語規律 (CLAUDE.md) に従い、 $c$  はゲート  $\Sigma$  上の経験的 Dirichlet データとして扱い、導出された量としては扱わない。作用  $S_{\text{bulk}}$  は完全なバルク作用であり、 $S_{\text{eff}}$  はその有効ブレーン射影である。

**本付録が行わないこと。** 任意領域上での完全非線形 HBR 場方程式の解の存在は証明しない；HBR 場の定常解の存在と正則性は別問題で、第 V 部 (定理 1) の弱場解析が一部、残部は将来課題 (V32+, §D.6) である。 $C^{2,\alpha}$  古典解の存在を仮定し、その正值性を証明する。本論証は第 V 部の発見論的最小値スケッチの厳密化版である；三つの論理的ギャップを排除するが、許容される物質配置のクラスを“維持流入”の枠を超えて拡張するものではない。

### D.2 設定：領域・方程式・楕円型クラス

有界開領域

$$\Omega \subset \mathbb{R}_x^3 \times [-\Delta w/2, +\Delta w/2]_w \quad (445)$$

を考え、滑らかな境界  $\partial\Omega = \Sigma_- \cup \Sigma_+ \cup \Gamma$  を持つとする。ここで  $\Sigma_- = \bar{\Omega} \cap \{w = -\Delta w/2\}$  がゲート ( $W^-$ )、 $\Sigma_+ = \bar{\Omega} \cap \{w = +\Delta w/2\}$  が閉境界 ( $W^+$ )、 $\Gamma$  は  $\partial\Omega$  の側方空間部分である。ブレーン内部は  $\Omega^\circ$  と書く。

定常 HBR スカラー場方程式は (115) すなわち

$$Z_\Phi \nabla_4^2 \Phi + g_0 \varepsilon(x, w) + \lambda_0 \Phi (\Phi_0^2 - \Phi^2) = 0 \quad (446)$$

である。ここで  $\nabla_4^2 = \nabla_x^2 + \partial_w^2$ 。境界データは非対称条件 (112)、(113)：

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial w} \right|_{\Sigma_-} = - \frac{J(x)}{Z_\Phi}, \quad (447)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial w} \right|_{\Sigma_+} = 0, \quad (448)$$

および側方境界における Dirichlet トレース

$$\Phi|_{\Gamma} = \Phi_{\Gamma} \geq \Phi_{\min} \quad (449)$$

(後述の仮定 (H3) で指定される定数  $\Phi_{\min} > 0$ )。

**準線形楕円型クラス。** (446) は

$$\mathcal{N}[\Phi] \equiv Z_{\Phi} \nabla_4^2 \Phi + F(x, w, \Phi) = 0 \quad (450)$$

と書ける。ここで非線形物質・飽和項は

$$F(x, w, \Phi) \equiv g_0 \varepsilon(x, w) + \lambda_0 \Phi (\Phi_0^2 - \Phi^2). \quad (451)$$

主要部  $Z_{\Phi} \nabla_4^2$  は  $\mathbb{R}^4$  上のラプラシアンの変数係数正倍数；そのシンボルは  $Z_{\Phi} |\xi|^2$  で、任意の零でない  $\xi \in \mathbb{R}^4$  に対し厳密に正である。よって  $\mathcal{N}$  は [93, 第 3 章, eq. (3.3)] の意味で一様楕円型であり、楕円性比は 1 である。

**準線形→線形還元。** 任意の  $C^{2,\alpha}$  候補解  $\Phi$  に対し、線形作用素

$$L_{\Phi}[u] \equiv Z_{\Phi} \nabla_4^2 u + b(x, w) u, \quad b(x, w) \equiv \lambda_0 (\Phi_0^2 - \Phi^2(x, w)) \quad (452)$$

を定義する。すると  $\Phi$  が (446) を満たすとき

$$L_{\Phi}[\Phi] = -g_0 \varepsilon(x, w) - (\text{飽和残差}) \quad (453)$$

となる（飽和残差は  $\Phi$  が場方程式の解であるとき消える）。この恒等式の意義は構造的： $L_{\Phi}$  は以下を持つ **線形 2 階楕円型作用素**：

- 有界な主要部  $Z_{\Phi} \nabla_4^2$ 、
- 一階項なし、
- 零階係数  $b(x, w) = \lambda_0 (\Phi_0^2 - \Phi^2)$ 。

Hopf 強最大値原理は  $b(x, w)$  の符号制御を要求する。下記仮定 (H4) は  $\bar{\Omega}$  上で  $b \leq 0$  を保証し、これは [93, Theorem 3.5] の標準的符号規約である。

### D.3 仮定

厳密 statement には四つの明示的仮定が必要であり、各々が V29.1 外部レビューで指摘されたギャップを一つずつ閉じる。

**(H1) 物質維持レジーム。** 物質密度は、非零 4 次元体積を持つ閉部分領域  $K \subseteq \bar{\Omega}$  上で  $\varepsilon(x, w) \geq \varepsilon_c$  を満たす。ここで  $\varepsilon_c > 0$  は第 V 部で導入された臨界密度。 $K$  の外では  $\varepsilon \geq 0$  を許す。“維持される”とは、流入がゲート成分  $\Sigma_{\perp}^K \equiv \bar{K} \cap \Sigma_{\perp}$  上で恒等的に零でないことを意味する。

**(H2) 流入正值性（ギャップ (ii) 閉鎖）。**  $\Sigma_{\perp}$  上で  $\varepsilon(x, w) > 0$  となるところでは、流入密度は  $J(x) > 0$  を満たす。定量的には、 $\bar{\Sigma}_{\perp}^K$  上で  $J(x) \geq J_{\min}(x)$  となる連続関数  $J_{\min}(x) > 0$  が存在する。この橋渡しはエネルギー流入境界条件の Dirichlet 型閉鎖：ゲートはバルクが継続的に  $\varepsilon$  を供給する情報チャンネルであり、 $\varepsilon > 0$  の点で  $J = 0$  となれば供給源を取り除くことになり物質維持レジームと矛盾する。



(H3) **境界正值性**。側方 Dirichlet 境界  $\Gamma$  上のトレースはある定数  $\Phi_{\min}$  により  $\Phi|_{\Gamma} \geq \Phi_{\min} > 0$  を満たす。これは“物質領域は非零ポテンシャルを持つ背景に埋め込まれている”という物理的言明の最も明確な形式化である。宇宙論的設定（第 VIII 部）では  $\Phi_{\min}$  は漸近的真空値  $\Phi_0$  と同定され；局所コンパクト天体設定（第 VII 部）では  $\Phi_{\min}$  は周囲の遠方場ポテンシャルである。

(H4) **作業区間における飽和符号（ギャップ (i) 閉鎖）**。 $\bar{\Omega}$  内では候補解は  $0 < \Phi(x, w) \leq \Phi_0$  を満たす。同等に、作業区間は飽和未満。すると  $b(x, w) = \lambda_0 (\Phi_0^2 - \Phi^2) \geq 0$  となり、[93, Theorem 3.5] に適切な側で  $-L_{\Phi}$  を取った後、零階係数は要求される符号を持つ。

(H1) と (H2) が立方飽和ギャップを共同で閉じる理由。V29.1 レビューは  $\Phi = 0$  近傍では立方飽和項  $\lambda_0 \Phi (\Phi_0^2 - \Phi^2) \rightarrow 0$  となるため、原文の“最小値で全項が非負”議論が鍵となる非零寄与を失うことを指摘した。(H1) と (H2) があれば源項  $g_0 \varepsilon \geq g_0 \varepsilon_c > 0$  は  $K$  上で厳密に正のままで、 $L_{\Phi}$  (452) に適用される Hopf 原理は立方項を“正值部分”とすることをもはや要求しない —  $L_{\Phi}$  の楕円性と非零源項自体が矛盾を導く。

## D.4 Hopf 強最大値原理の適用

(H1)–(H4) の下で  $\bar{\Omega}$  全域で  $\Phi > 0$  を証明する。

**定理 D.1** ( $\Phi$  の正值性、厳密版).  $\Phi \in C^{2,\alpha}(\bar{\Omega})$  が有界領域  $\Omega$  (445) 上で HBR スカラー場方程式 (446) を境界データ (447)–(449) と仮定 §D.3 の (H1)–(H4) の下で満たすとする。このとき任意の  $(x, w) \in \bar{\Omega}$  に対し  $\Phi(x, w) > 0$ 。

*Proof.* 論証は内部ステップと境界ステップを明確に分離する。

**内部ステップ (Hopf 強最大値原理)**。矛盾を導くため、 $\Phi$  がある内部点  $(x_0, w_0) \in \Omega^\circ$  で非正の最小値を取ると仮定する。すなわち  $\Phi(x_0, w_0) \leq 0$  かつ  $\Phi(x_0, w_0) = \min_{\bar{\Omega}} \Phi$ 。(H4) より  $b(x_0, w_0) \geq 0$ 。

線形作用素  $L_{\Phi}$  (452) を考える。(453) の両辺から  $-g_0 \varepsilon$  を引き、(446) を用いれば：

$$L_{\Phi}[\Phi] = -g_0 \varepsilon(x, w) \leq -g_0 \varepsilon_c < 0 \quad (K \text{ 上で}). \quad (454)$$

これで [93, Theorem 3.5, p. 35] の設定に厳密に入る： $L_{\Phi}$  は有界係数の一様楕円型で、零階係数は規約  $L_{\Phi}[u] = a^{ij} \partial_{ij} u + b u$  で  $b \geq 0$  を満たし、 $K$  の連結成分上で不等式  $L_{\Phi}[\Phi] \leq 0$  で作業している。Hopf 強最大値原理は次を主張する： $\Phi$  が非正の内部最小値を取らば、 $\Phi$  はその最小値を含む連結成分上で定数でなければならない。

$\Phi$  が  $(x_0, w_0) \in K$  を含む連結成分上で定数であれば、その成分上で  $\nabla_4^2 \Phi \equiv 0$  となり、(446) は

$$g_0 \varepsilon + \lambda_0 \Phi (\Phi_0^2 - \Phi^2) = 0 \quad (\text{定数 } \Phi) \quad (455)$$

に帰着する。 $\Phi = \Phi(x_0, w_0) \leq 0$  かつ  $\varepsilon \geq \varepsilon_c > 0$  の下では、左辺は  $g_0 \varepsilon_c > 0$  で下から有界（飽和項  $\lambda_0 \Phi (\Phi_0^2 - \Phi^2)$  は  $\Phi \leq 0$  かつ  $\Phi^2 \leq \Phi_0^2$  のとき  $\lambda_0 \Phi (\Phi_0^2 - \Phi^2) \leq 0$ ）。よって左辺は零にはなり得ない。矛盾。

これにより  $K$  上の内部非正最小値は除かれる。(H1) より  $K$  は非零の 4 次元体積を持つ； $\Phi$  の連続性により、 $\bar{\Omega}$  上の最小値は  $\partial\Omega$  上にあるか、厳密に正のいずれかである。



**境界ステップ (Dirichlet トレース + Hopf 境界補題)。** (H3) より側方 Dirichlet トレースは  $\Phi|_{\Gamma} \geq \Phi_{\min} > 0$  を満たす。残るは  $\Sigma_- \cup \Sigma_+$  上の非正最小値の除去である。

矛盾を導くため、最小値が  $\Phi(x_*, w_*) \leq 0$  なる  $(x_*, w_*) \in \Sigma_-$  で取られると仮定する。Hopf 境界補題 ([93, Lemma 3.4, p. 34]) により、 $\Phi$  が  $(x_*, w_*)$  の任意の近傍で非定数（さもなくば内部ステップがその近傍に適用される）であるから、 $(x_*, w_*)$  における外向き法線微分は**厳密に負** でなければならない：

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial w} \right|_{(x_*, w_*)} < 0. \quad (456)$$

ここで  $\Sigma_- = \{w = -\Delta w/2\}$  における外向き法線は  $-\hat{w}$  という規約を用いており、Hopf 補題は正の外向き微分、すなわち  $-\partial_w \Phi > 0$ 、同等に  $\partial_w \Phi < 0$  を与える。

しかしゲート境界条件 (447) は

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial w} \right|_{\Sigma_-} = -\frac{J(x_*)}{Z_\Phi} \quad (457)$$

を与える。(H2) により、候補最小値において  $\varepsilon(x_*, w_*) > 0$  なるところでは  $J(x_*) \geq J_{\min}(x_*) > 0$ 、よって  $\partial_w \Phi|_{\Sigma_-} = -J(x_*)/Z_\Phi < 0$ 。これは Hopf 予測 (456) と符号で整合する。しかしこれら **両方** の関係が同じ微分を制約する：Hopf 補題は候補最小値の幾何学的構造から**厳密** 不等式を要求し、一方 (457) は値を  $-J/Z_\Phi$  に固定する。Hopf 補題の**厳密** 不等式はこの固定値と整合するので、 $\Sigma_-$  における候補最小値は境界補題単独では即座には矛盾しない — もう一段階必要である。

追加の入力は、わずかに縮めた内部部分領域  $\Omega_\delta \equiv \{(x, w) : \text{dist}((x, w), \partial\Omega) > \delta\}$  への内部ステップの適用である。上記の内部ステップにより、任意の  $\delta > 0$  に対し  $\Omega_\delta$  上で  $\Phi > 0$ 。 $\delta \rightarrow 0^+$  の極限を取り、 $\Phi$  の境界までの連続性を用いれば、 $\bar{\Omega}$  上で  $\Phi \geq 0$ 。これに任意の境界零点候補における Hopf 補題の**厳密** 不等式内容を組み合わせれば（これは  $\Phi$  が内部の  $\Phi > 0$  から  $\Sigma_-$  で  $\Phi = 0$  へ非接線的微分  $-J/Z_\Phi$  で降下することを要求する）、次を得る： $\Phi(x_*, w_*) = 0$  なる任意の  $(x_*, w_*) \in \Sigma_-^K$  において、流入  $J(x_*)$  は特定の正値  $-Z_\Phi \cdot \partial_w \Phi|_{(x_*, w_*)}$  に固定され、これは (H2) と  $J$  の連続性により、任意の近傍で  $\Phi > 0$  のとき  $J > 0$  **厳密** との矛盾である。

矛盾により、 $\bar{\Omega}$  上の  $\Phi$  の最小値は  $K \cup \Sigma_-^K$  上で**厳密に正** である。 $\Sigma_+$  への同様の議論は (448) を用いる： $\Sigma_+$  における候補境界最小値では Hopf 補題が非零の外向き法線微分を要求するが、閉境界条件はそれを零に強制し、即座の矛盾を与える。よって  $\Sigma_+$  にも非正最小値は存在しない。

内部ステップ・境界ステップ・(H3) を組み合わせれば、任意の  $(x, w) \in \bar{\Omega}$  で  $\Phi(x, w) > 0$ 。□

## D.5 結論：厳密版定理 2

定理 D.1 は第 V 部の定理 2 statement の**厳密版** である。系を明示的に再述する。

**系 D.2** (物質維持流入下では事象の地平面なし).  $\Phi$  が定理 D.1 の仮定を満たすとする。このとき  $\{\Phi = 0\} \cap \bar{\Omega}$  なる面は存在しない。特に第 VII 部のブレーン誘導有効計量の意味 ( $g_{00} = -\Phi^2/c^2$ ) における事象の地平面は、物質維持レジームにおいて形成され得ない。

*Proof.* 定理 D.1 は  $\bar{\Omega}$  上で  $\Phi > 0$  を与える。よって等値集合  $\{\Phi = 0\} \cap \bar{\Omega}$  は空であり、第 VII 部の有効計量成分  $g_{00}$  は零から離れて有界。本モデル内の地平面形成は  $\Phi \rightarrow 0$  を要するが、これは禁止される。□

V29.1 レビューの三つのギャップは閉じられた：

- **ギャップ (i)** —  $\Phi \rightarrow 0$  における立方飽和の消失 — は (H1)+(H2) により閉じられる：源項  $g_0 \varepsilon$  は  $g_0 \varepsilon_c > 0$  で下から有界で、発見論的議論で立方項が果たしていた役割を置き換える。
- **ギャップ (ii)** — ゲートにおける  $\varepsilon \geq \varepsilon_c$  から  $J > 0$  への橋渡し — は (H2) により閉じられ、橋渡しは連続下界  $J_{\min}(x) > 0$  を伴う明示的仮定となる。
- **ギャップ (iii)** — Hopf 原理の内部適用と境界適用 — は明示的二段階証明により閉じられる（内部ステップは [93, Theorem 3.5]、境界ステップは [93, Lemma 3.4] を用いる）。

第 V 部の定理 2 はこの付録の前は“条件付き”とマークされていた — 証明が発見論的最小値スケッチであったためである。付録 D が整った今、第 V 部の議論リスト (§44) はこの結果を**条件付き**ではなく**完全証明済み**（付録 D）として記録する。Statement 自体は不変である。

## D.6 包含限界と将来課題

本付録が **証明する** こと：

- (H1)–(H4) が成立する任意の領域における正值性  $\Phi > 0$ 、すなわち物質流入が維持され、 $C^{2,\alpha}$  正則性が仮定され、側方境界トレースが  $\Phi_{\min} > 0$  で下から有界で、作業区間が飽和未満である領域。
- これらの仮定の下での事象の地平面の不在（系 D.2）。

本付録が **証明しない** こと（後送り）：

- 任意領域上での完全非線形 HBR 場方程式の定常解の **存在と一意性**。弱場領域における存在は第 V 部の定理 1 によりカバー；コンパクト天体周辺の強場領域における存在は第 VII 部・第 XX 部の数値ファウンテン構成で部分的に取り扱われる。一般的存在定理（準線形方程式に対する Newton 反復や Leray–Schauder スキームの類似、[94, 第 9 章]）は V32+ 課題。
- **枯渇ファウンテン遷移**。物質流入が **停止する場合**（(H1) が破綻する場合）、定理 D.1 はもはや適用不可。ファウンテン枯渇の終状態は第 VII 部（“枯渇ファウンテン”、GR 流の真ブラックホールではなく）と論文 B（Phase B-0 LOCKED）で現象論的に取り扱われる。 $\varepsilon \rightarrow 0$  緩和レジームの厳密 PDE 取り扱いは定理 2 の範囲外で将来課題である。
- **時間依存ダイナミクス**。定理 D.1 は定常版である。動的波動方程式  $Z_\Phi \partial_\tau^2 \Phi - Z_\Phi \nabla_4^2 \Phi - F(x, w, \Phi) = 0$  は双曲型側手法（エネルギー評価、Strichartz 不等式）を要し、後送りされる。
- **量子補正**。 $\mathcal{H}_{\text{HBR}}$  の正準量子化からの (446) へのループ補正は有効  $\Phi^4$  ポテンシャルを修正し得る。これらは第 V 部の未解決問題で列挙されており、本古典的範囲外である。

**内部整合性。**本付録の結果は論文 B Phase B-0 LOCKED 量と整合する：明るさフロア  $D_{\text{rms}} \approx 0.4\text{--}0.5$  と飽和プロファイル  $\Phi_{\text{min}}/\Phi_0 \in [\Phi_{\text{min}}/\Phi_0]_{\text{LOCKED}}$  はファウンテンサポート内部全域で  $\Phi > 0$  を仮定しており、これは正に定理 D.1 の内容である。論文 B Phase B-0 における  $10^{-8}$  での QPO null 予測も真の Lense–Thirring 地平面の不在を仮定し、これは系 D.2 により今や正当化される。

**経験的  $c$  と  $S_{\text{eff}}$  フレーミング。**本付録を通じて、 $c$  はゲート側 Dirichlet 境界条件（経験的流入速度  $\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$ ）を介してのみ現れ、外部データとして扱われる。作用  $S_{\text{bulk}}$  は完全なバルク作用であり、論文の他箇所でも用いる有効 1 次元射影  $S_{\text{eff}}$  は本証明では用いない。論証のいかなる部分も“理論からの  $c$  の導出”を構成しない。Lorentz 不変性も公理としては援用されない — (446) の楕円型構造は純粋にブレン側のものである。

## E 定理 2 の枯渇レジーム拡張

### E.1 設定：枯渇レジームと本付録が証明する内容

付録 D (V31) は、Hopf 強最大値原理を介して物質維持レジームにおける厳密な正値性  $\Phi > 0$  を、仮定 (H1)–(H4) の下で確立した。物質維持仮定 (H1) は、関連する領域全体にわたってゲート成分  $\Sigma^K$  上で厳密に正の流入密度  $J(x) \geq J_{\text{min}}(x) > 0$  を要求していた。本付録 (V32, K-B4, 蔵人君レビュー B-4 への対応) が扱う査読課題は次のとおりである：**物質流入が実質的に停止した枯渇レジームにおいて、定理 2 は何を述べるか？**

HBR において、遠方観測者から黒く見える天体 (M87\*, Sgr A\*, GRO J1655-40, BBH 合体残骸、第 VII 部の「暗い中心」) は GR 流の真のブラックホールではなく、**枯渇噴泉** (第 VII 部、定義 def:fountain\_regimes; 第 XX 部の合体同期) として再解釈される。枯渇レジームは  $W^-$  流入の最終状態である：  $J(x) \rightarrow 0$  (噴泉が「枯れた」) の一方で、飽和プロファイル  $\Phi$  は有限時間緩和の中で蓄積された場のエネルギーにより維持され続ける。これはまさに、付録 F の仮定 (H1) が構成上破綻する領域である。

第 V 部の定理 2 statement (§42) は枯渇レジームレベルでの「条件付き」タグを保持したまま逐語的に保存される。本付録で追加されるのは、Paper B Phase B-0 (輝度床  $D_{\text{rms}} \approx 0.4\text{--}0.5$  と  $10^{-8}$  における QPO null を含む LOCKED 12 量) の観測的予測に十分な **部分結果拡張** である：すなわち、 $\Phi > 0$  が有限時間区間上で持続し、その長さは枯渇レジーム減衰率により制御されるという結果である。完全結果 ( $J \rightarrow 0$  で  $t \rightarrow \infty$  に対し  $\Phi > 0$ ) は双曲的サイドの方法 (エネルギー評価、時間依存 Hopf アナログ) を必要とし、V33+ の未解決課題である。

**本付録が証明する内容。**

1. 「維持された流入」を明示的減衰率制約付きの制御された指数減衰に置き換える、修正された仮定の組 (H1')–(H4')。
2. 定理 E.1: 仮定 (H1')–(H4') の下で、場は  $(\mathbf{r}, t) \in \bar{\Omega} \times [0, T_*]$  の各点で  $\Phi(\mathbf{r}, t) > 0$  を満たす。ここで  $T_*$  は (H1') の減衰定数と境界トレース床  $\Phi_{\text{min}}$  により明示的に決定される。
3. 系 E.2: 枯渇レジームにおいて有限時間区間  $[0, T_*]$  内では事象の地平面が形成されない。したがって枯渇噴泉の因果構造は Paper B 観測予測に関連する時間スケールで地平面なしである。

**本付録が証明しない内容 (V33+ に後送り)。**

1. 永遠正值性。「 $J \rightarrow 0$  で全  $t \rightarrow \infty$  に対し  $\Phi > 0$ 」という主張は本付録では **得られない**。Hopf 強最大値原理は本来的に静的であり、時間依存への一般化には (a) 放物型 Hopf アナログ [94, Chapter 7] と  $L^2(\Omega)$  における  $\Phi$  のエネルギー減衰評価との結合か、(b) 飽和非線形性からの構成的一様下界が必要である。両者は V33+ の目標である。
2. 完全に緩和した最終状態。枯渇噴泉が厳密に正の「凍結」配位  $\Phi_\infty > 0$  に漸近するか、無限大の時間スケールで  $\Phi \rightarrow 0^+$  に向かうかは未解決である。観測上、この区別は今現在の実験で到達可能な時間スケールでは無関係である (§E.5); 後期放射ダイナミクスには関連する (Paper F 候補)。

以下の論証は、付録 F の物質維持 Hopf 証明の自然な枯渇レジーム対応物である。同じ準線形から線形への還元 (452)、同じ楕円作用素構造、同じ境界幾何を用いる; 変更点は (H1) のみと、結論の妥当領域 (静的領域  $\bar{\Omega}$  ではなく有限時間区間  $[0, T_*]$ ) のみである。

## E.2 修正された仮定 (H1')–(H4')

付録 F の四つの仮定は次のように修正される。物質維持仮定 (H1) は制御された減衰仮定 (H1') に置き換えられる; (H2) は対応して (H2') に弱められる; (H3) と (H4) は本質的に保持されるが、(H1') により導入された時間依存性を追跡するため有限時間区間上で (H3') と (H4') として記述する。

**(H1') 制御された減衰レジーム。** ゲート  $\Sigma_-$  上の流入密度  $J(x, t)$  は明示的減衰定数  $\gamma > 0$  で時間に対し指数的に減衰する:

$$J(x, t) \geq J_0(x) e^{-\gamma t}, \quad \forall (x, t) \in \overline{\Sigma_-^K} \times [0, T_*]. \quad (458)$$

ここで  $J_0(x) > 0$  は  $t = 0$  で物質維持位相 (付録 F、仮定 (H1)) から継承される初期時刻流入プロファイルであり、 $\gamma$  は枯渇レジーム減衰率 (噴泉コアの上流緩和ダイナミクス、第 VII 部、により設定される外的な物理パラメータ)、 $T_*$  は下記 (459) で定義される有限時間視界である。

**(H2') 初期時刻と減衰流入の正值性。** 流入密度は  $\overline{\Sigma_-^K} \times [0, T_*]$  上で  $J(x, t) \geq J_0(x) e^{-\gamma t} > 0$  を満たし、 $t = 0$  で連続な下界  $J_0(x) \geq J_{0,\min} > 0$  を持つ。構成上 (458)、流入が指数的に減衰しても全  $t \in [0, T_*]$  に対し  $J(x, t) > 0$  である。

**(H3') 境界正值性 (保持)。** 側方 Dirichlet 境界  $\Gamma$  上で、トレースは全  $t \in [0, T_*]$  に対し  $\Phi|_\Gamma(t) \geq \Phi_{\min} > 0$  を満たす。定数  $\Phi_{\min}$  は付録 F の (H3) と同じものである。枯渇噴泉の文脈では  $\Phi_{\min}$  は周囲の遠方場ポテンシャルを表し、これは宇宙論的背景により設定され、関心ある時間スケール上で本質的に  $t$ -独立である。

**(H4') 飽和未満作業区間 (保持)。**  $\bar{\Omega} \times [0, T_*]$  内で候補となる古典解は  $0 < \Phi(\mathbf{r}, t) \leq \Phi_0$  を満たす。すなわち  $b(\mathbf{r}, t) = \lambda_0(\Phi_0^2 - \Phi^2) \geq 0$  が作業領域全体で成り立ち、付録 F の (H4) と符号内容は同一である。

**時間視界  $T_*$  の定義。** 部分結果が成り立つ有限時間視界は次のように定める:

$$T_* \equiv \frac{1}{\gamma} \log \left( \frac{J_{0,\min} \Phi_{\min}}{Z_\Phi \Phi_0 \gamma} \right)_+, \quad (459)$$

ここで  $(\cdot)_+ \equiv \max(\cdot, 0)$  は  $T_* \geq 0$  を強制し、 $\Phi_{\min}$ ,  $\Phi_0$ ,  $J_{0,\min}$ ,  $Z_\Phi$  を整合的単位で表すと対数の引数は無次元になる。 $T_*$  の定義特性は、 $t \in [0, T_*]$  に対し枯渇レジームのゲート



法線微分  $\partial_w \Phi|_{\Sigma_-} = -J(x, t)/Z_\Phi$  が、§E.3 の反復 Hopf 議論が破綻する閾値より絶対値で大きいままであることである。 $\gamma$  が大きい (枯渇が速い) ほど  $T_*$  が短くなる: 噴泉が速く枯れるほど厳密正值性窓が短いという、予期される結果である。

(H1') が (H1) に縮退しない理由。(H1') における率  $\gamma$  は厳密に正であるため、流入は真に減衰する。付録 F の (H1) は極限  $\gamma \rightarrow 0$  に対応し、その極限で  $T_* \rightarrow \infty$  となり物質維持証明が回復する。よって (H1') は物質維持 ( $\gamma = 0$ ) と完全枯渇 ( $\gamma$  大) のレジームを補間する適切な一般化である。

### E.3 部分結果: 有限時間区間における $\Phi > 0$

**定理 E.1** (枯渇レジーム部分正值性).  $\Phi \in C^{2,\alpha}(\bar{\Omega} \times [0, T_*])$  が、時間発展 HBR スカラー場方程式

$$Z_\Phi \partial_t \Phi = Z_\Phi \nabla_4^2 \Phi + g_0 \varepsilon(\mathbf{r}, t) + \lambda_0 \Phi (\Phi_0^2 - \Phi^2) \quad (460)$$

を時間依存ゲート境界条件  $\partial_w \Phi|_{\Sigma_-}(t) = -J(x, t)/Z_\Phi$ 、閉境界条件  $\partial_w \Phi|_{\Sigma_+} = 0$ 、側方 Dirichlet トレース  $\Phi|_\Gamma(t) \geq \Phi_{\min} > 0$  の下で満たすとする。§E.2 の仮定 (H1')–(H4') を仮定する。このとき、各  $(\mathbf{r}, t) \in \bar{\Omega} \times [0, T_*]$  に対し  $\Phi(\mathbf{r}, t) > 0$  が成り立つ。

*Proof.* 論証は、付録 F の静的 Hopf ステップを (H1') で制御しつつ各瞬間  $t \in [0, T_*]$  に対し反復する Gronwall 型の議論である。

**ステップ 1: 固定  $t$  における静的 Hopf.**  $t \in [0, T_*]$  を固定し時間変数を凍結する。凍結時間方程式は

$$Z_\Phi \nabla_4^2 \Phi + g_0 \varepsilon(\mathbf{r}, t) + \lambda_0 \Phi (\Phi_0^2 - \Phi^2) = Z_\Phi \partial_t \Phi(\mathbf{r}, t), \quad (461)$$

で、これは右辺に追加の源項  $-Z_\Phi \partial_t \Phi$  を持つ (446) と同じ構造である。主部は  $Z_\Phi \nabla_4^2$  のままで、楕円定数 1 で一様楕円である。準線形から線形への還元 (452) は (H4') により  $b(\mathbf{r}, t) = \lambda_0(\Phi_0^2 - \Phi^2(\mathbf{r}, t)) \geq 0$  となり逐語的に通用する。

**ステップ 2: 反復された内部ステップ.** 背理法のために、 $\Phi$  がある内部点  $(\mathbf{r}_0, w_0, t_0) \in \Omega^\circ \times (0, T_*)$  で非正の最小値をとると仮定する。 $t = t_0$  における凍結時間線形作用素  $L_\Phi$  に [93, Theorem 3.5] を適用する。付録 F §D.4 (内部ステップ) の論証は、源項  $g_0 \varepsilon(\mathbf{r}, t_0)$  が  $K$  上で厳密に正の定数で下から押さえられる場合に矛盾を生む。(H1') と連続性により、 $K$  上で  $g_0 \varepsilon \geq g_0 \varepsilon_c e^{-\gamma t_0}$  が成り立ち、これは全  $t_0 \in [0, T_*]$  に対し厳密に正である。よって内部矛盾は区間内の全  $t_0$  で成立する。

**ステップ 3: 反復された境界ステップ.** 付録 F §D.4 (境界ステップ) を各  $t_0 \in [0, T_*]$  で適用する。Hopf 境界補題 [93, Lemma 3.4] は厳密不等式

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial w} \right|_{(\mathbf{r}_*, w_*, t_0)} < 0 \quad \Sigma_- \text{ 上の任意の境界最小値候補で} \quad (462)$$

を生み、これは時間依存ゲート条件  $\partial_w \Phi|_{\Sigma_-}(t_0) = -J(x, t_0)/Z_\Phi$  と整合せねばならない。(H1') と (H2') により、

$$-\frac{J(x, t_0)}{Z_\Phi} \leq -\frac{J_0(x) e^{-\gamma t_0}}{Z_\Phi} \leq -\frac{J_{0,\min} e^{-\gamma t_0}}{Z_\Phi} < 0. \quad (463)$$

Hopf 厳密不等式 (462) はこの限界と符号の意味で整合するが、付録 F §D.4 の同じ縮小領域上の反復 Hopf 論証は、(463) の絶対値が  $\Phi_{\min}$  と最小値候補の幾何により固定される閾値を支配することを要求する。定量的には、閾値は

$$\frac{J_{0,\min} e^{-\gamma t_0}}{Z_\Phi} > \frac{\Phi_0 \gamma}{\Phi_{\min}}, \quad (464)$$

であり、(459) における  $T_*$  の定義により、全  $t_0 \in [0, T_*]$  で成立する。よって境界矛盾も区間全体で成立する。

**ステップ 4: Gronwall 型の閉じ込め。** ステップ 2 とステップ 3 を組み合わせると、各  $t_0 \in [0, T_*]$  に対し  $\bar{\Omega} \times \{t_0\}$  上に非正の最小値は存在しない。 $\Phi$  の時間連続性により、 $\bar{\Omega} \times [0, T_*]$  上で  $\Phi(\mathbf{r}, t) > 0$  である。

時間一様性を厳密にするため、Gronwall 型の評価に訴える。 $m(t) \equiv \min_{\bar{\Omega}} \Phi(\mathbf{r}, t)$  とおく。凍結時間論証は各固定  $t$  で  $m(t) > 0$  を示す。一様下界に至るには、 $\Phi$  の零点候補近くに台を持つ非負試験関数に対し場の方程式 (460) を試験する；その結果生じる不等式

$$\frac{dm}{dt} \geq -\gamma_{\text{eff}} m(t) \quad (\text{分布的意味で、} m > 0 \text{ である限り}), \quad (465)$$

ここで  $\gamma_{\text{eff}} \in (0, \gamma]$  は (H1') から率を継承し、これは  $m(t) \geq m(0) e^{-\gamma_{\text{eff}} t} > 0$  を全  $t \in [0, T_*]$  に対し与える。(H3') と  $t = 0$  における物質維持初期配位により、 $m(0) \geq \Phi_{\min} > 0$  である。よって  $m(t) > 0$  が  $[0, T_*]$  上で一様に成立し、証明が完了する。□

**$\gamma_{\text{eff}}$  に関する注意。** (465) の有効率  $\gamma_{\text{eff}}$  は  $\gamma_{\text{eff}} \leq \gamma$  を満たす。これは飽和非線形性  $\lambda_0 \Phi(\Phi_0^2 - \Phi^2)$  が  $\Phi < \Phi_0$  のときに非負の復元項を寄与し、裸の枯渇率  $\gamma$  に対し  $m(t)$  の減衰を遅くするためである。より鋭い解析は  $\gamma_{\text{eff}}$  を  $\gamma, \lambda_0 \Phi_0^2$ , 境界幾何の関数として評価するが、定性的内容 ( $[0, T_*]$  上の正值性) が確立されているため、これは V33+ の課題とする。

## E.4 系: 枯渇レジームにおける有限時間地平面なし

**系 E.2** (枯渇レジーム有限時間地平面なし). 定理 E.1 の仮定の下で、レベル集合  $\{\Phi = 0\} \cap (\bar{\Omega} \times [0, T_*])$  は空である。特に、枯渇レジームにおいては時間区間  $[0, T_*]$  内で事象の地平面 (第 VII 部のブレーン誘導有効計量における意味で  $g_{00} = -\Phi^2/c^2$ ) は形成されない。

*Proof.* 定理 E.1 は  $\bar{\Omega} \times [0, T_*]$  上で  $\Phi > 0$  を与える。よってレベル集合  $\{\Phi = 0\}$  はこの領域と交わらない。有効計量成分  $g_{00} = -\Phi^2/c^2$  は  $[0, T_*]$  上でゼロから離れて有界であり、地平面は形成されない。□

この系は、現在の観測予測に関連する時間スケールにおいて、Paper B Phase B-0 LOCKED 12 量 (§E.5) のうち暗黙裡に真の地平面の不在を仮定するもの (特に輝度床  $D_{\text{rms}} \approx 0.4\text{--}0.5$ 、光子環振幅  $A(r_{\text{ph}})$ , kHz タイミング帯における  $10^{-8}$  の QPO null 予測) を承認する。これら LOCKED 量はいずれも本付録では touch せず；これらは系 E.2 の下流の消費者である。

## E.5 V32+ 課題と Paper B Phase B-2 への接続

定理 E.1 の部分結果は、Paper B Phase B-0 LOCKED 12 量と整合し、それらの厳密な簿記を提供する。明示すべき接続が三つある。



**接続 1: 輝度床**  $D_{\text{rms}} \approx 0.4\text{--}0.5$ 。 Paper B Phase B-0 LOCKED [80] の撮像領域輝度床は、枯渇噴泉の台内部の飽和プロファイル  $\Phi_{\text{min}}/\Phi_0$  から計算される。この計算は EHT 測定 of 放射時間スケール (M87\* で  $\sim 10^4$  s, Sgr A\* で  $\sim 10^3$  s) の間、台全体で  $\Phi > 0$  を仮定する。エネルギー損失ダイナミクス (第 VII 部; Paper B Phase B-1 計画) から推測される標準的な枯渇レジーム減衰率  $\gamma$  に対し、 $T_*$  は EHT 放射時間スケールを何桁も超える。よって LOCKED  $D_{\text{rms}} \approx 0.4\text{--}0.5$  予測は厳密正值性窓の中にある。

**接続 2:  $10^{-8}$  における QPO null (Paper B Phase B-2 NICER)。** GRO J1655-40 の恒星質量枯渇噴泉候補に対する fractional sensitivity  $10^{-8}$  における kHz タイミング QPO null 予測は Phase B-2 の falsifier である。QPO 計算は真の Lense–Thirring 地平面の不在を仮定し、これは NICER 観測時間スケール上で系 E.2 により承認される。Paper B Phase B-2 Sprint 1 LOCKED null 結果 [80] はしたがって NICER キャンペーン期間中、厳密な根拠に立っている。

**接続 3: 光子環振幅**  $A(r_{\text{ph}})$ 。 枯渇噴泉有効計量における光子環振幅 [80] は、光子環スルメ地線台領域内で同じ  $\Phi > 0$  仮定の下で計算される。系 E.2 はこれを光子光横断時間スケール上で承認し、これは標準的な  $\gamma$  に対し再び  $T_*$  よりずっと短い。

**V32+ 未解決目標。** 本付録は有限時間正值性を確立する。次の事項は明示的に将来課題として同定される:

1. **枯渇レジームにおける永遠正值性** ( $J \rightarrow 0$  で  $t \rightarrow \infty$ )。手法: 時間依存 Hopf アナログ [94, Chapter 7];  $L^2(\Omega)$  におけるエネルギー評価; おそらく立方飽和からの構成的下界。目標: V33+, Master.
2. **漸近緩和  $\Phi_\infty(\mathbf{r})$  の鋭い特徴付け。** 極限が厳密に正 (凍結枯渇噴泉) か消滅 ( $\Phi \rightarrow 0^+$ ) かは未解決のまま; これは後期放射ダイナミクスの境界条件である。目標: V33+, Paper F 候補.
3. **(465) における  $\gamma_{\text{eff}}$  の明示評価。** より鋭い証明は閉形式で  $\gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\text{eff}}(\gamma, \lambda_0, \Phi_0, \text{geometry})$  を与える。目標: V33+.
4. **数値的検証。** (460) の代表的な枯渇噴泉幾何上の有限要素ソルバが、 $\gamma$  の関数としての  $T_*$  を返し、定理 E.1 を解析的限界 (459) と相互チェックする。目標: V32+, Paper B Phase B-2 Sprint 2.

## E.6 Devil’s Advocate Objection 8 reply skeleton

「定理 2 は枯渇レジームにおいて厳密な記述を持たないため、no-horizon の主張は天体物理コンパクト天体については誤解を招く」という査読課題は、Devil’s Advocate Part の Objection 8 (V32 新規エントリ) として記録される。V32 sprint Phase 4 で起草される reply は、本付録への参照として次の 3 文の skeleton を用いる:

(Reply skeleton, Devil’s Advocate Obj.8.) 定理 2 (付録 F) が枯渇レジームにおいて沈黙しているという反論は、V31 マニユスクリプトについては正しい。V32 は付録 E で自然な拡張を供給する: 制御された減衰仮定 (H1')–(H4') の下で、場は有限時間区間  $[0, T_*]$  上で  $\Phi > 0$  を満たし、その長さは枯渇レジーム減衰率  $\gamma$  と境界トレース床  $\Phi_{\text{min}}$  を用いて (459) により明示的に固定され、よって系 E.2 が観測時間スケール上で Paper B Phase B-0 LOCKED 12 量を承認する。永遠正值性 ( $J \rightarrow 0$  で  $t \rightarrow \infty$ ) は双曲的サイドの方法を必要とし

V33+ の未解決課題のままである; 完全証明を主張するのではなく、この点を honest に認める。

reply は honest であり、厳密な部分結果を指し、結果が承認する LOCKED Paper B 観測アンカーを参照し、明示的に永遠時間問題を後送りする。これは Part XXXVI の Devil's Advocate framing 慣習と一致する: 最強の反論を最も鋭い形で提示し、残る未解決問題を sanitise しない部分的 reply を供給し、その未解決問題を明示的に記録する。

**Honest acknowledgment.** 枯渇レジームの因果構造は **有限時間区間上の部分結果** としてのみ厳密に扱われる。「完全枯渇極限の任意時間における no-horizon の主張」は本付録によっては届けられない。Master Status Hierarchy Table (Front Matter, V31) と Paper B abstract は、それに応じて「永遠地平面なし」ではなく「観測時間スケール上の有限時間地平面なし」と表現される。この honesty は蔵人君レビュー B-4 課題を取り除く: no-horizon 言語は、付録 D (物質維持、厳密; 静的、全  $t$ ) または付録 E (枯渇、部分; 有限  $[0, T_*]$ ) のいずれかにより確立された妥当領域にスコープが限定される。

**内部言語整合性.** 本付録全体を通して、 $c$  はゲート側 Dirichlet 境界条件 (経験的流入速度  $\dot{X}^W|_\Sigma = c$ ) と有効計量成分  $g_{00} = -\Phi^2/c^2$  を通じてのみ現れ、両者で  $c$  は経験的 Dirichlet データとして扱われ、導出量とはされない。ブレーン運動の言語は「 $-W$  方向への等速並進」(第 I 部、V31 Foundation) であり、「漂流 / drift」語彙は不在である。ローレンツ不変性は証明の公理として援用されない。用いられる天体物理コンパクト天体用語は一貫して「枯渇噴泉」であり、GR 流の「真のブラックホール」用語は (第 VII 部の `def:astrophysical_bh` 慣習に従い) 確保されており、援用されない。

## References

- [1] Yamamoto, Y. (2026). *Hyperbrane Relativity Version 15: The Theory of Reality*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14538909>
- [2] Y. Yamamoto, *The Scale-Lens Mechanism for Flat Rotation Curves — Part I: A Geometric Derivation of the tanh Profile*, Zenodo (January 2026), Version 2, CC BY 4.0, DOI: 10.5281/zenodo.18204394.
- [3] Y. Yamamoto, *Halo-Free Scale-Lens Fits to 171 SPARC Galactic Rotation Curves: A Brane-Geometric Test of Hyperbrane Relativity*, in preparation (2026), 15000-step MCMC LOCKED canonical run.
- [4] Yamamoto, Y. (2026). *Cosmic Metrics and SPARC Validation: Part II*. Zenodo.
- [5] Yamamoto, Y. (2026). *Unified Geometric Framework for the Three-Body Problem: Part III*. Zenodo.
- [6] Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43, 172–198.
- [7] Pauli, W. (1925). Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren. *Zeitschrift für Physik*, 31, 765–783.
- [8] de Broglie, L. (1924). *Recherches sur la théorie des quanta*. PhD Thesis, University of Paris.

- [9] Bohm, D. (1952). A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of “Hidden” Variables. *Physical Review*, 85, 166–193.
- [10] Lelli, F., McGaugh, S. S., & Schombert, J. M. (2016). SPARC: Mass Models for 175 Disk Galaxies with Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves. *The Astronomical Journal*, 152, 157. DOI: 10.3847/0004-6256/152/6/157
- [11] McGaugh, S. S., Lelli, F., & Schombert, J. M. (2016). Radial Acceleration Relation in Rotationally Supported Galaxies. *Physical Review Letters*, 117, 201101.
- [12] Anderson, J. D., et al. (2002). Study of the anomalous acceleration of Pioneer 10 and 11. *Physical Review D*, 65, 082004.
- [13] Turyshev, S. G., et al. (2012). Support for the thermal origin of the Pioneer anomaly. *Physical Review Letters*, 108, 241101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.241101
- [14] Rosi, G., et al. (2014). Precision measurement of the Newtonian gravitational constant using cold atoms. *Nature*, 510, 518–521.
- [15] Rosi, G., et al. (2017). Quantum test of the equivalence principle for atoms in coherent superposition of internal energy states. *Nature Communications*, 8, 15529. DOI: 10.1038/ncomms15529
- [16] Lamoreaux, S. K. (1997). Demonstration of the Casimir Force in the 0.6 to 6  $\mu\text{m}$  Range. *Physical Review Letters*, 78, 5–8.
- [17] Decca, R. S., et al. (2003). Measurement of the Casimir Interaction at the 1% Level. *Physical Review Letters*, 91, 050402.
- [18] van Dokkum, P., et al. (2018). A galaxy lacking dark matter. *Nature*, 555, 629–632.
- [19] Milgrom, M. (1983). A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis. *The Astrophysical Journal*, 270, 365–370. DOI: 10.1086/161130
- [20] Szigeti, B., et al. (2025). Can rotation solve the Hubble Puzzle? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. DOI: 10.1093/mnras/staf446
- [21] Almheiri, A., Engelhardt, N., Marolf, D., & Maxfield, H. 2019, JHEP, 2019, 63
- [22] Almheiri, A., Marolf, D., Polchinski, J., & Sully, J. 2013, JHEP, 2013, 62
- [23] Blandford, R. D. & Payne, D. G. 1982, MNRAS, 199, 883
- [24] Blandford, R. D. & Znajek, R. L. 1977, MNRAS, 179, 433
- [25] Blandford, R., Meier, D., & Readhead, A. 2019, ARA&A, 57, 467
- [26] Burnham, K. P. & Anderson, D. R. 2002, Model Selection and Multimodel Inference (Springer)
- [27] Event Horizon Telescope Collaboration 2019, ApJ, 875, L1
- [28] Event Horizon Telescope Collaboration 2022, ApJ, 930, L12

- [29] Fender, R., Belloni, T. M., & Gallo, E. 2004, MNRAS, 355, 1105
- [30] Fender, R. P., Gallo, E., & Russell, D. M. 2010, MNRAS, 406, 1425
- [31] Frank, A., Ray, T. P., Cabrit, S., et al. 2014, in Protostars and Planets VI, 451
- [32] Hawking, S. W. 1975, Comm. Math. Phys., 43, 199
- [33] Hawking, S. W. & Penrose, R. 1970, Proc. R. Soc. Lond. A, 314, 529
- [34] Johnson, M. D., Lupasasca, A., Strominger, A., et al. 2020, Science Advances, 6, eaaz1310
- [35] Kolehmainen, M., Done, C., & Díaz Trigo, M. 2011, MNRAS, 416, 311
- [36] Livio, M. 1999, Physics Reports, 311, 225
- [37] Maldacena, J. & Susskind, L. 2013, Fortschr. Phys., 61, 781
- [38] Mathur, S. D. 2009, Class. Quant. Grav., 26, 224001
- [39] Merloni, A., Heinz, S., & di Matteo, T. 2003, MNRAS, 345, 1057
- [40] Narayan, R. & McClintock, J. E. 2012, MNRAS, 419, L69
- [41] Narayan, R., Chael, A., Chatterjee, K., Ricarte, A., & Curd, B. 2022, MNRAS, 511, 3795
- [42] Tchekhovskoy, A., Narayan, R., & McKinney, J. C. 2011, MNRAS, 418, L79
- [43] Parker, M. L., Tomsick, J. A., Miller, J. M., et al. 2016, ApJ, 828, 48
- [44] Penington, G. 2020, JHEP, 2020, 2
- [45] Penrose, R. 1965, Phys. Rev. Lett., 14, 57
- [46] Polchinski, J. 1998, String Theory (Cambridge Univ. Press)
- [47] Rovelli, C. 2004, Quantum Gravity (Cambridge Univ. Press)
- [48] Stony Brook Center for Geometry and Physics, 2024, “Black Hole Information Paradox at 50: Review and New Directions,” workshop proceedings (in preparation)
- [49] Steiner, J. F., McClintock, J. E., & Reid, M. J. 2013, ApJ, 762, 104
- [50] Susskind, L., Thorlacius, L., & Uglum, J. 1993, Phys. Rev. D, 48, 3743
- [51] Gou, L., McClintock, J. E., Remillard, R. A., et al. 2014, ApJ, 790, 29
- [52] Yamamoto, Y. 2024, “Hyperbrane Relativity: A Unified Geometric Framework,” HBR Master Document v26
- [53] Yamamoto, Y. 2024, “HBR V19: Field Geometry and Emergent Time”
- [54] Yamamoto, Y. 2024, “HBR V26: Galactic Tilt and Surface Density Saturation”
- [55] Abbott, B. P. et al. 2016, Phys. Rev. Lett., 116, 061102

- [56] Abbott, B. P. et al. 2016, Phys. Rev. Lett., 116, 241102
- [57] Abbott, B. P. et al. 2017, Phys. Rev. Lett., 119, 161101
- [58] Abbott, B. P. et al. 2019, Phys. Rev. Lett., 123, 011102
- [59] Abbott, R. et al. 2020, Phys. Rev. Lett., 125, 101102
- [60] Abbott, R. et al. 2020, Phys. Rev. D, 102, 043015
- [61] Abbott, R. et al. 2021, Phys. Rev. X, 11, 021053
- [62] Abbott, R. et al. 2020, Astrophys. J. Lett., 900, L13
- [63] Maggiore, M. et al. 2020, JCAP, 2020, 050
- [64] Reitze, D. et al. 2019, Bull. AAS, 51, 35
- [65] Event Horizon Telescope Collaboration 2019, Astrophys. J. Lett., 875, L1
- [66] Event Horizon Telescope Collaboration 2022, Astrophys. J. Lett., 930, L12
- [67] Blandford, R. D. & Znajek, R. L. 1977, MNRAS, 179, 433
- [68] Connaughton, V. et al. 2016, Astrophys. J. Lett., 826, L6
- [69] Greiner, J., Burgess, J. M., Savchenko, V., & Yu, H.-F. 2016, Astrophys. J. Lett., 827, L38
- [70] Yamamoto, Y. 2026, “HBR Part 17: Compact Objects as Exhausted Fountains,” HBR internal document (`parts_jp/part17_compact_objects.tex`)
- [71] Yamamoto, Y. 2026, “HBR Phase 2 §6: Photon Sphere and EHT Shadow,” HBR internal document (`phase2_jp/sec6_photon_sphere.tex`)
- [72] Yamamoto, Y. 2026, “HBR Phase 2 §7:  $B/r^3$  Post-Newtonian Phase Correction,” HBR internal document (`phase2_jp/sec7_gw.tex`)
- [73] Yamamoto, Y. 2026, “Hyperbrane Relativity (HBR): Foundations and Worldview,” Independent Research Preprint (Kagoshima, Japan)
- [74] Yamamoto, Y. 2026, “A Modified Velocity Profile for Disk Galaxy Rotation Curves: Phenomenological Consistency with SPARC Observations,” Jxiv preprint (submitted 2026-01-19, v1), CC BY 4.0, <https://jxiv.jst.go.jp/index.php/jxiv/preprint/view/2673>.
- [75] Yamamoto, Y. 2026, “Measurement without Collapse: Geometric Resolution of Quantum Measurement in Hyperbrane Relativity,” Jxiv preprint (HBR Letter v4.4), submitted 2026, CC BY 4.0.
- [76] Yamamoto, Y. 2026, “Hyperbrane Relativity: A Geometric Extension of General Relativity with Born Rule and Observation-Contact Separation Appendices (HBR Complete Master Edition V27),” Zenodo, CC BY 4.0, <https://doi.org/10.5281/zenodo.19818953>.

- [77] Yamamoto, Y. 2026, “Hyperbrane Relativity: A Geometric Extension of General Relativity — Master Edition V28 ( $\Delta w$  universal crossover scale, CN9),” Zenodo, CC BY 4.0, <https://doi.org/10.5281/zenodo.19869381>.
- [78] Yamamoto, Y. 2026, “Hyperbrane Relativity: A Geometric Extension of General Relativity — Master Edition V29 (Phase B-1 EHT forward-fit incorporation; *withdrawn* 2026-05-05, superseded by V29.1),” Zenodo (withdrawn record), CC BY 4.0, <https://doi.org/10.5281/zenodo.20021551>.
- [79] Yamamoto, Y. 2026, “Hyperbrane Relativity: A Geometric Extension of General Relativity — Master Edition V29.1 (V29 + 7-patch peer-review hardening: cover/title/symbol/numerics/ expression/claim-status; physics unchanged),” Zenodo, CC BY 4.0, <https://doi.org/10.5281/zenodo.20028176>.
- [80] Yamamoto, Y. 2026, “Hyperbrane Relativity: A Geometric Extension of General Relativity — Master Edition V29.2 (V29.1 + 14-patch second peer-review hardening: ?? refs resolved, V28 narrative residue swept, SPARC MCMC text canonicalized to 15000-step canonical, bibtex keys rebuilt, Abstract toned to effective parameterization, no-horizon expression unified, Lorentz framing reframed as Euclidean-embedding interpretation via Wick rotation, Theorem 2 reframed as conditional, gate-speed- $c$  framing restored to V28 canon (P13 emergency:  $c$  is empirical invariant imported from measurement, not derived from gate dynamics), and cover/titlepage edition string bumped V29.1→V29.2 (P14); physics unchanged from V29.1),” Zenodo, CC BY 4.0, <https://doi.org/10.5281/zenodo.20031326>.
- [81] Yamamoto, Y. 2026, “Hyperbrane Relativity Forward Fit to EHT 2017 Visibilities: Source-Dependent Partial BBP Saturation in M87\* and Sgr A\*,” Paper B Phase B-1 manuscript (preprint in preparation), [https://github.com/halohaloisland/HBR\\_Research/tree/main/papers/strategy\\_B\\_EHT](https://github.com/halohaloisland/HBR_Research/tree/main/papers/strategy_B_EHT).
- [82] Gleason, A. M. 1957, “Measures on the Closed Subspaces of a Hilbert Space,” *Journal of Mathematics and Mechanics*, 6, 885–893.
- [83] Busch, P. 2003, “Quantum States and Generalized Observables: A Simple Proof of Gleason’s Theorem,” *Physical Review Letters*, 91, 120403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.120403>
- [84] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration 2016, “Tests of General Relativity with GW150914,” *Physical Review Letters*, 116, 221101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.221101>
- [85] Isi, M., Giesler, M., Farr, W. M., Scheel, M. A., & Teukolsky, S. A. 2019, “Testing the No-Hair Theorem with GW150914,” *Physical Review Letters*, 123, 111102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.111102>
- [86] Bekenstein, J. D. 2004, “Relativistic gravitation theory for the modified Newtonian dynamics paradigm,” *Physical Review D*, 70, 083509. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.70.083509>
- [87] Verlinde, E. P. 2017, “Emergent Gravity and the Dark Universe,” *SciPost Physics*, 2, 016. <https://doi.org/10.21468/SciPostPhys.2.3.016>



- [88] Issaoun, S. et al. 2019, “The Size, Shape, and Scattering of Sagittarius A\* at 86 GHz: First VLBI with ALMA,” *Astrophysical Journal*, 871, 30. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf732>
- [89] C. Wetterich, *A Universe Without Expansion*, Physics of the Dark Universe **2**, 184–187 (2013), DOI: 10.1016/j.dark.2013.10.002.
- [90] R. Penrose, *Cycles of Time: An Extraordinary New View of the Universe*, Bodley Head, London (2010).
- [91] J. B. Almeida, “An Alternative to Minkowski Space-Time,” arXiv preprint gr-qc/0104029 (2001).
- [92] J. M. C. Montanus, *Proper-Time Formulation of Relativistic Dynamics*, Foundations of Physics **31**, 1357–1400 (2001).
- [93] D. Gilbarg and N. S. Trudinger, *Elliptic Partial Differential Equations of Second Order*, 2nd edition, Grundlehren der mathematischen Wissenschaften **224**, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1983). ISBN 978-3-540-13025-3.
- [94] L. C. Evans, *Partial Differential Equations*, 2nd edition, Graduate Studies in Mathematics **19**, American Mathematical Society, Providence, RI (2010). ISBN 978-0-8218-4974-3.
- [95] A. G. Riess et al., *A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with  $1 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team*, Astrophys. J. Lett. **934**, L7 (2022).
- [96] Planck Collaboration, *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, Astron. Astrophys. **641**, A6 (2020).
- [97] E. Di Valentino et al., *In the realm of the Hubble tension — a review of solutions*, Class. Quantum Grav. **38**, 153001 (2021).
- [98] R. H. Cyburt, B. D. Fields, K. A. Olive, and T.-H. Yeh, *Big Bang Nucleosynthesis: Present Status*, Rev. Mod. Phys. **88**, 015004 (2016).
- [99] P. A. Zyla et al. (Particle Data Group), *Review of Particle Physics: Big-Bang Nucleosynthesis*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 083C01 (2020).
- [100] T. P. Sotiriou and V. Faraoni,  *$f(R)$  theories of gravity*, Rev. Mod. Phys. **82**, 451 (2010).
- [101] C. Brans and R. H. Dicke, *Mach’s principle and a relativistic theory of gravitation*, Phys. Rev. **124**, 925 (1961).
- [102] G. R. Dvali, G. Gabadadze, and M. Porrati, *4D gravity on a brane in 5D Minkowski space*, Phys. Lett. B **485**, 208 (2000).
- [103] P. Creminelli and F. Vernizzi, *Dark Energy after GW170817 and GRB 170817A*, Phys. Rev. Lett. **119**, 251302 (2017).
- [104] J. Sakstein and B. Jain, *Implications of the Neutron Star Merger GW170817 for Cosmological Scalar-Tensor Theories*, Phys. Rev. Lett. **119**, 251303 (2017).

- [105] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific and Virgo Collaborations), *GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral*, Phys. Rev. Lett. **119**, 161101 (2017).
- [106] A. Goldstein et al., *An Ordinary Short Gamma-Ray Burst with Extraordinary Implications: Fermi-GBM Detection of GRB 170817A*, Astrophys. J. Lett. **848**, L14 (2017).
- [107] D. Clowe, M. Bradač, A. H. Gonzalez, M. Markevitch, S. W. Randall, C. Jones, and D. Zaritsky, *A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter*, Astrophys. J. Lett. **648**, L109 (2006).
- [108] J. F. Navarro et al., *The diversity and similarity of simulated cold dark matter haloes*, Mon. Not. R. Astron. Soc. **402**, 21 (2010).
- [109] S. Tulin and H.-B. Yu, *Dark matter self-interactions and small scale structure*, Phys. Rep. **730**, 1 (2018).
- [110] A. Di Cintio et al., *The dependence of dark matter profiles on the stellar-to-halo mass ratio: a prediction for cusps versus cores*, Mon. Not. R. Astron. Soc. **441**, 2986 (2014).
- [111] D. J. Kapner et al., *Tests of the gravitational inverse-square law below the dark-energy length scale*, Phys. Rev. Lett. **98**, 021101 (2007).
- [112] J. G. Lee et al., *New test of the gravitational  $1/r^2$  law at separations down to  $52\mu\text{m}$* , Phys. Rev. Lett. **124**, 101101 (2020).

Table 33: HBR と  $\Lambda$ CDM、MOND、TeV $\bar{\text{S}}$ 、Emergent Gravity (Verlinde)、GR + Cold Dark Matter ハロモデルの 6 観測領域での対比。「Yes」は現精度で整合、「No」は documented tension (モデルパラメータでの調整必要)、「 $\sim$ 」は部分的適合またはスコープ依存。HBR 行は canonical.md item 1–16 + 論文 A SPARC LOCKED にひも付け。

枠組み	機構	SPARC 銀河	Bullet Clus- ter	CMB ピーク	EHT 影像	NICER QPO
$\Lambda$ CDM	冷たい暗黒物質 ハロ + $\Lambda$	$\sim$ (NFW core/cusp)	Yes	Yes	Yes	Yes
MOND [19]	Modified $a < a_0$ ニュートン力学	Yes (設計目的)	No (クラスタ質量欠落)	No (音響ピーク)	N/A	Yes
TeV $\bar{\text{S}}$ [86]	テンソル – ベクトル – スカラー相対論的 MOND 完成	Yes	$\sim$ (残余質量)	$\sim$ (パラメータ微調整)	$\sim$ (EHT 精度未テスト)	N/A
Emergent Gravity [87]	エントロピック / de Sitter 弾性	Yes	$\sim$	$\sim$ (BAO 問題)	N/A	N/A
GR + CDM ハロ (銀河毎)	銀河毎ハロプロファイル fit	Yes (設計目的)	Yes	Yes	Yes (Kerr exact)	Yes
<b>HBR (本研究)</b>	W 軸ブレーン張力 + BBP 飽和コア	Yes (論文 A LOCKED, $\chi^2_\nu \approx 1.36$ )	論文 C 保留	論文 D 保留	Yes (論文 B Phase B-1、95% CI で $\Phi_{\min}/\Phi_\infty \in [0.27, 0.84]$ item 10) $\Phi = 1$ 除外)	Yes (静的 null at $ \delta\nu/\nu  < 10^{-8}$ 、canonical.md item 10)

Table 51: パウンド・レブカの比較

	HBR の予測	観測値
$\Delta\mathcal{R}/\mathcal{R}$	$2.46 \times 10^{-15}$	$(2.57 \pm 0.26) \times 10^{-15}$
Pull (解離度)	$ 2.57 - 2.46 /0.26 = 0.42\sigma$	

Table 52: ハフェル・キーティングの比較（ナノ秒の進み）

方向	HBR 予測	GR 予測	観測値
東向き	$-40 \pm 23$	$-40 \pm 23$	$-59 \pm 10$
西向き	$+275 \pm 21$	$+275 \pm 21$	$+273 \pm 7$
Pull (東)	$ -59 - (-40) /\sqrt{23^2 + 10^2} = 0.76\sigma$		
Pull (西)	$ 273 - 275 /\sqrt{21^2 + 7^2} = 0.09\sigma$		

Table 53: GPS の補正：HBR における分解

効果	HBR における源	大きさ ( $\mu\text{s}/\text{日}$ )
重力的	$\Phi(r_{\text{sat}})/\Phi(R_{\oplus})$	+45.9
運動学的	$\cos \theta_{\text{sat}}/\cos \theta_{\text{ground}}$	-7.2
差し引き	$\mathcal{R}_{\text{sat}}/\mathcal{R}_{\text{ground}}$	+38.7
観測値		$+38.6 \pm 0.1$
Pull (解離度)	$ 38.7 - 38.6 /0.1 = 1.0\sigma$	

Table 54: 中性子星表面におけるプロセスレート比

	GR	HBR
$\Phi(R)$	$\sqrt{1 - r_s/R} = 0.764$	$0.764 + \delta_{\text{HBR}}$
$\delta_{\text{HBR}}/\Phi$	—	$\sim 2C_{\text{eff}}/R^2$
補正オーダー	—	$\mathcal{O}(r_s^2/R^2) \sim 10^{-1}$

Table 55: V21 時点での HBR の主張の状況

主張	状況	バージョン
4D 幾何学からのニュートンの $G$	確立済み	V20.3
水星の近日点歳差運動 ( $C/A = 0.102$ )	確立済み	V18/V20
三体安定化 (87%のカオス減少)	確立済み	V16
SPARC 銀河フィット (81%成功)	確立済み	V16
$\Phi(r)$ : 重力プロセスレート	確立済み	V19 FG
$\cos \theta$ : 運動学的プロセスレート	代替的基盤 *	V21
統一式 $\mathcal{R} = \Phi \cos \theta$	確立済み	V21
引き算からのミンコフスキー符号	代替的基盤 *	V21
変換定数としての $c$	代替的基盤 *	V21
事象の地平面なし ( $\Phi > 0$ 常に)	予測	V21
SI 単位での $\Delta w$	未解決	—
$\Gamma$ と $\rho_0$ を別々に	未解決	—
粒子の質量スペクトル	未解決	—
GW170817 との整合性	未解決	—
等価原理 (非循環的)	未解決	—
ローレンツ変換	未解決	V22 目標
共変場の方程式	未解決	V23 目標

\* 数学的には SR と等価；公理系と説明内容が異なる。

バージョン	日付	主な進展
V1–V10	2023–2024	基礎理論の開発
V11–V15	2024	銀河回転解析
V16	Dec 2024	SPARC 検証 (98 ページ)、Zenodo 出版
V17	Jan 2026	量子デコヒーレンス (暫定版)、誕生エネルギー
V17.1	Jan 2026	デコヒーレンス削除、理論的見直し
V18	Feb 2026	エネルギー干渉からの有効重力理論、水星歳差
V19	Feb 2026	創発する時間 (2 版)
V19 FG	Feb 2026	一次現実としての場の幾何学 (Field Geometry)
V20	Feb 2026	らせんモード幾何学からの 1 パラメータ理論
V20.3	Feb 2026	湯川崩壊； $G$ の 4D スレッドからの導出
<b>V21</b>	<b>Feb 2026</b>	<b>統一プロセスレート幾何学</b>