

時空公理の終焉

ローレンツ運動学・暗黒物質・宇宙力学の
純粋な4Dユークリッド空間からの導出

ハイパーブレーン相対性理論

完全統合版 (V28) — マスターエディション

第16版～第28版の統合版

山本 雄一
独立研究者、日本

ORCID: 0009-0004-1610-0687

2026年4月

Abstract

理論。ハイパーブレン相対性理論 (HBR) は、観測可能宇宙を、平坦な 4 次元ユークリッドバルク (x, y, z, w) 内を $-W$ 方向に等速並進する動的 3-ブレンとして記述する。時間は基本次元ではなく、このブレン並進から創発し、 W^- 境界からの連続的エネルギー流入を駆動する；経験的光速 c はディリクレ型条件 $\dot{X}^W|_{\Sigma} = c$ を介してこの並進のゲート変換出力として同定され、幾何学的恒等式 $|\mathbf{U}_{\text{inflow}}|^2 = c^2$ から $E = mc^2$ が構造的帰結として得られる。ローレンツ不変性は基本公理ではなく、創発的ブレン対称性として扱う。本枠組みは場の方程式 $G_{\mu\nu} + \beta H_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$ を通じて一般相対性理論の 1 パラメータ修正 β を与え、弱場展開 $\Phi = 1 + \Phi_N/c^2 + \beta\Phi_N^2/c^4$ 、PPN 計量 $g_{00} = -1 + 2U - 2\beta U^2$ となる。

V28 の中心的新規貢献。ブレン厚 Δw を、(i) 強重力場における近距離 $1/r^4$ 特異点回避領域 ($r \lesssim \Delta w$) と遠距離 $1/r^3$ ニュートン補正領域 ($r \gg \Delta w$) の間の力法則遷移、および (ii) 量子測定を支配する Observation–Contact Separation (OCS) — コンパクト装置に対して contact 領域 $|\Delta\kappa|L \lesssim 1$ が $L \sim \Delta w$ に対応—の両方を同時に支配する **普遍クロスオーバー・スケール**として同定する。両クロスオーバーは、2 つの HBR 物体の W 軸らせんスレッドが Δw 未満の隔たりで重なり合うという単一の幾何学的事実の双対表現である。HBR はしたがって **1 スケール理論**であり、領域横断的 falsifiability を持つ一般相対性理論 (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) にも類似のない構造的特徴である。

本マスターエディションの範囲。本研究は HBR の最も包括的な発展を提示し、18 のパートと 4 つの付録を統合する：

- **第 I–II 部：基礎建築と渦動力学。**体積的ブレン構造を持つ純 4D 空間；ブレン等速並進が駆動するゲート変換エネルギー流入 (速度 c)；らせん渦構造としての物質 (飽和閾値 ε_c を超えた持続的パターン)；統一力法則 (重力 + 渦斥力 + W 軸張力)；普遍クロスオーバー・スケールとしての Δw (第 I 部 §14)。
- **第 III 部：多体安定化。**三体安定性への幾何学的アプローチ；特異点と弾出の抑制；Lyapunov 指数の縮小 (ニュートン力学比 $\sim 85\%$ 減)。
- **第 IV 部：量子基礎。**断面幾何学からの波動–粒子二重性；飽和相転移としての物質–光二分；らせんピッチ制約からの不確定性原理； W 軸巻数としての量子スピン。
- **第 V 部：暗黒物質なしの銀河ダイナミクス。**スケールレンズ機構 $V_{\text{obs}}^2 = V_{\text{bar}}^2 + V_{\infty}^2 \tanh(r/r_g)$ を SPARC 171 銀河に完全 MCMC でフィット；中央値 $\chi_{\nu}^2 = 1.29$ ； $\Delta\text{AIC}(\text{HBR} - \text{MOND}) = -17.6$ ；HBR が MOND より 78%、NFW より 74% の銀河で優位。暗黒物質ハロー不要。
- **第 VI 部：統一宇宙論。**パラメータゼロの幾何学的ハッブル定数 $H_0 = c/R_{\text{univ}} \approx 70.9 \text{ km/s/Mpc}$ ； $c_{\text{eff}}(z)$ 勾配によるハッブル緊張解消；バイコーン体積膨張としての暗黒エネルギー；ビッグバン特異点を持たない永遠生成宇宙論。
- **第 VII–X 部：予言と実験的シグネチャ。**衝突実験物理 (P'_5 異常、ミューオン $g-2$ 、断片化関数)、重力波、微小重力コヒーレンス試験にわたる定量的予言；競合理論との falsifiability 規準と判別子。
- **第 XI–XIII 部：幾何学的・数学的基礎。**V18 スレッド幾何学からの HBR 導出；プロセスレート恒等式 $R = \Phi(r) \cos \theta$ を持つ V21 厳密数学枠組み；弱場極限における Pound–Rebka と Hafele–Keating の再現。
- **第 XIV 部：テンソル運動学。**ローレンツ変換、時間遅延、長さ収縮、 $E = mc^2$ を純粋 4D ユークリッド幾何学における射影として導出；ミンコフスキー符号がピタゴラス減算として創発。
- **第 XV 部：ラグランジュ・ハミルトン定式化。**3 つの HBR 力すべてを単一作用原理から統一する粒子ラグランジアン；場のラグランジアン密度 $\mathcal{L} = \frac{1}{2}T_0(\partial_w\Phi)^2 +$

$\frac{1}{2}T_0(\nabla\Phi)^2 - g_0\varepsilon\Phi - \frac{1}{4}\lambda_0(\Phi^2 - \Phi_0^2)^2$; 定理 1 (ニュートン極限 $G = g_0/(4\pi T_0)$) と 定理 2 (事象の地平面不在: 物質存在領域で $\Phi > 0$)。

- **第 XVI 部: 空間計量と強重力場観測量。**太陽系試験と重力波観測に整合する g_{rr} の導出; 光偏折とシャピロ遅延のためのヌル測地線構造。
- **第 XVII 部: コンパクト天体。**ブラックホールを「枯渇噴水」として再定式化: エネルギー流入が枯渇した暗いコンパクト天体で、地平面も特異点も持たない; 近距離 $F_{\text{repel}} \sim 1/r^4$ が $r = 0$ への崩壊を回避; EHT 影サイズ、NICER/IXPE near-ISCO タイミング、コンパクト天体近傍のパルサー・タイミングへの予言。
- **第 XVIII 部: 合体同期。**連星コンパクト天体合体に対する HBR 予言、Einstein Telescope / Cosmic Explorer により $\text{SNR} > 30$ で検出可能な準主要 $1/r^3$ 位相補正、および「枯渇噴水」残骸を Kerr ブラックホールから区別するリングダウンエコー署名を含む。
- **付録 A: Gleason 型測度一意性による Born 則。** κ 空間における Born 則の構造的起源; バルク誘導内積をシードとする Cauchy 関数方程式を通じて二次確率測度を導出。
- **付録 B: 調和解析による厳密 OCS。**系-装置結合の 3 領域分類 (contact, transition, observation); リーマン・ルベグ補題による定性的抑制を、矩形重なりに対する明示的 sinc 形と C^k 重なりに対する多項式減衰で補強; 冒頭で Δw 統合を明示的に参照し、Born と OCS をただ一つのスケールから生じる帰結とする。
- **付録 C-D: SPARC 数値詳細とバージョン履歴。**MCMC ウォーカー/ステップ設定、各銀河のフィット結果 (英日両エディション)、V13 から V28 までの完全なバージョン来歴。

観測的アンカー。PPN 制約 $|\beta - 1| < 10^{-4}$ (Cassini); SPARC 171 銀河 MCMC フィット $\chi^2_\nu = 1.29$; 実験誤差内の Pound-Rebka 2 次赤方偏移; Einstein Telescope と Cosmic Explorer により $\text{SNR} \gtrsim 30$ で検出可能と予言される準主要 $1/r^3$ GW 位相補正; NICER と IXPE によるコンパクト天体識別のための near-ISCO X 線タイミング残差。

中心テーゼ。「失われた質量」現象は不可視粒子を必要としない—それは点質量ニュートン物理を通じて誤同定された W 軸の幾何学的構造から生じる。物質は実体ではなく、高次元バルクからのエネルギー流入の持続的パターンである; 暗黒物質ハローは幾何学的影; 事象の地平面は、物質が連続的エネルギー維持を要する理論では不可能である。量子測定は別個の公理層ではなく、強重力場の力法則を支配するのと同じ Δw スケールにおける幾何学的クロスオーバーである。HBR はこうして、現代物理を組織する独立した定数と公理のモザイクを、ただ一つの 4D 幾何学的設定と、ただ一つの基本スケールで置き換える。

キーワード: ハイパープレーン相対性理論、4D ユークリッドバルク、プレーン宇宙論、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、Born 則、Gleason 定理、量子測定、Observation-Contact Separation、OCS、リーマン・ルベグ補題、Kaluza-Klein 分解、波動関数崩壊、創発的ローレンツ対称性、ゲート流入境界条件、重力波、連星ブラックホール合体、プレーン厚、1 スケール理論、領域横断的 falsifiability、特異点回避、枯渇噴水、永遠生成宇宙論。

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 1 部・第 14 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し、ゲートは並進をゲート速度 c の流入へと幾何学的に速度変換する（変換比 $c/v_{\text{brane}} \gg 1$ のノズルの変換、エネルギー生成ではない）：

$$|\mathbf{U}_{\text{inflow}}|^2 = c^2 \quad (\text{ゲート自己縮約、座標系によらない不変量})$$

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 14 部（定理 6）

ゲートの速度変換比が $c/v_{\text{brane}} \gg 1$ と大きいと、 v_{brane} の小さな揺らぎが、我々が物質と関連付ける Φ -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. ゲート出力のブレーン内部校正としての c の読み

第 14 部（注釈 B.4）

HBR の内部では光速 c が 2 つの相補的読みを許容する可能性を示唆する：ブレーン内部から見れば普遍的限界として現れ、バルク視点ではゲート出力速度である。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は正確であり、バルクから見ると視点依存性を獲得する—これは c の不変性に対する一つの可能な読みとして提案する作業的解釈である。

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 14 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 Φ 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 $G = g_0/(4\pi T_0)$ として回収される（定理 1・第 15 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 – 流入要件の帰結としての事象の地平面不在 第 15 部 (定理 2) ・ 第 17 部

HBR において、スケール場 Φ 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、シュワルツシルト型の事象の地平面 ($\Phi \rightarrow 0$) は形成不可能となる。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 17 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 5 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 $\chi_{\nu}^2 = 1.29$; $\Delta\text{AIC}(\text{HBR} - \text{MOND}) = -17.6$; $\Delta\text{AIC}(\text{HBR} - \text{NFW}) = -4.3$ 。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_{∞} 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 6 部

ここで展開する HBR 宇宙論において、

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

は追加の宇宙論パラメータなしにハッブル定数をゲート流入速度 c と現在のスケール半径 R_{univ} に関係づける。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 1 部 ・ 第 5 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ーン厚 Δw 第 1 部 (§14)、第 XVII 部、付録 B

V28 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—ブレーン厚 Δw —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 Δw 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 Δw の独立な観測決定は他方を制約する。本統合は V28 の中心的な特徴的選択である。

引用：Yamamoto, Y. (2026). *Hyperbrane Relativity: Complete Master Edition V28*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19818953>

Contents

コアノベルティ	3
I 視点階層性の宣言：バルク視点とブレーン視点	23
1 認識論的宣言	23
2 バルク視点 (Bulk perspective)	23
3 ブレーン視点 (Brane observer perspective)	23
4 2 視点の接続：中心的关系式	24
5 $SR \leftrightarrow GR$ 比喩：認識論的位置付け	25
6 本書における運用規則	25
II 宇宙の建築	26
7 序論：パラダイムシフト	26
7.1 時空から純粹空間へ	26
7.2 物理学への意味	27
7.3 歴史的発展：V13 から V28 へ	27
7.4 完全統合版 (V28) の新要素	28
7.5 本論文の構成	28
8 体積的ブレーン	29
8.1 薄膜近似を超えて	29
8.2 エネルギーと物質の生成	29
8.3 界面としてのブレーン	29
9 W 軸：スケール次元	29
9.1 物理的解釈	29
9.2 W 軸計量	30
9.3 観測的帰結	30
10 連続的エネルギー流入としての時間	30
10.1 中心的洞察 (V25–V27 統合)	30
10.2 重力的時間の遅れ	31
10.3 「ブロック宇宙」の否定	31
10.4 持続プロセスとしての物質	31
11 クロス構造	32
11.1 宇宙の呼吸	32
11.2 垂直方向の流れ：放射と解消	32
11.3 水平方向の流れ：干渉と融合	32

12 バイコーン幾何学	32
12.1 W 軸の二重構造	32
12.2 W^- ：量子源	33
12.3 W^+ ：宇宙の広がり	33
12.4 ゼロ点：我々の観測可能な宇宙	33
12.5 観測可能な物理学との関連	34
13 第 I 部のまとめ	34
14 基本スケール：ブレーン厚 Δw を普遍的クロスオーバー幾何として	34
III 4次元空間渦力学	35
15 らせん渦構造としての物質	35
15.1 基本的な渦の公理	35
15.2 幾何学から導かれる物理的性質	36
15.3 らせん方程式	36
15.4 なぜ直線ではなくらせんか？	36
16 重力は引力ではない：幾何学的遮蔽機構	36
16.1 根本的な誤解	36
16.2 遮蔽機構	37
16.3 流れる川としての場	37
16.4 従来 of 記述との関係	38
17 HBR の三つの力	38
17.1 統一力法則	38
17.2 力 1：ニュートン重力（引力）	38
17.3 力 2：渦斥力（衝突回避）	38
17.3.1 なぜ r^{-3} か？	39
17.3.2 「山本項」	39
17.4 力 3：W 軸張力（軌道安定性）	39
17.5 結合力法則：明示形	40
17.6 有効ポテンシャル	40
18 パラメータの導出	40
18.1 渦結合定数 κ	40
18.1.1 渦の速度場	41
18.1.2 相互作用エネルギー	41
18.1.3 スピンとの関連	41
18.1.4 数値的見積もり	41
18.2 W 軸張力係数 α_w	41
18.2.1 W 軸深度と質量	42
18.2.2 弾性エネルギー	42
18.2.3 銀河観測との関連	42
18.3 α_w の普遍性	42

19 スケール-渦等価原理	43
19.1 原理の記述	43
19.2 幾何学的導出	43
19.2.1 設定：W 軸曲率を持つ 4 次元計量	43
19.2.2 測地線方程式	43
19.2.3 角運動量の生成	44
19.3 物理的直観：渦巻きのアナロジー	44
19.4 量子スピンとの関連	44
19.5 銀河回転との関連	44
19.6 ハイパーフラクタル構造	45
19.7 数学的要約	45
20 第 II 部のまとめ	45
 IV 多体系力学と安定化	 46
21 三体問題：300 年の挑戦	46
21.1 歴史的背景	46
21.2 安定性のパラドックス	46
22 三体の病理の HBR による解決	47
22.1 特異点の回避：渦斥力	47
22.2 脱出の防止：W 軸張力	47
22.3 カオスの低減：幾何学的正則化	48
23 数値シミュレーション	48
23.1 方法論	48
23.2 三つのモデルの比較	49
23.3 結果：軌道軌跡（エルゴード的混合）	50
23.4 結果：系半径の厳密な有界性	50
23.5 位相空間解析の結論	51
24 天体物理学的応用	52
24.1 三重星系	52
24.2 惑星系	52
24.3 密な恒星コア	52
25 理論的含意	52
25.1 三体問題は「解決された」	52
25.2 N 体力学への含意	53
26 第 III 部のまとめ	53
 V 量子基盤	 53
第 IV 部の概要	53

27 断面フレームワーク	54
27.1 「射影」ではなく「断面」である理由	54
27.2 $w = 0$ におけるブレーン断面	55
27.3 スライシングとしての観測	55
28 W 軸圧縮としてのエネルギー	55
28.1 根本的な疑問	55
28.2 幾何学的圧縮としてのエネルギー	55
28.3 W 軸の圧力	56
28.4 $E = mc^2$ との繋がり	56
28.5 圧縮飽和と硬さ	56
29 粒子と波の二重性	57
29.1 歴史的なパズル	57
29.2 螺旋断面効果	57
29.3 位置の測定: 固定断面	58
29.4 運動量の測定: 移動する断面	58
29.5 相補性の説明	59
29.6 二重スリット実験	59
29.7 観測問題	59
29.8 ド・ブロイ波長との関係	60
30 パウリの排他原理	60
30.1 フェルミ粒子の振る舞いの謎	60
30.2 トポロジカルな渦の排他	60
30.3 スピン相互作用の歯車モデル	61
30.4 数学的定式化	61
30.5 反対称波動関数との関係	62
30.6 バルクでのパウリ排他としての剛性	62
31 不確定性原理	63
31.1 根本的な限界	63
31.2 幾何学的起源: 螺旋のピッチと断面位置	63
31.3 W 軸幾何学からの数学的導出	64
31.4 断面測定の限界	65
32 量子スピン	65
32.1 固有の角運動量という謎	65
32.2 螺旋の巻き数としてのスピン	66
32.3 720° フェーズ復帰からのスピン $1/2$	66
32.4 なぜスピンは量子化されているのか	67
32.5 W 軸回転との関係	67
33 量子からマクロへの架け橋	68
33.1 現代物理学における根本的なギャップ	68
33.2 階層的な W 軸構造	68
33.3 量子から原子へ: 最初の架け橋	69
33.4 原子から分子へ: 化学結合	70
33.5 分子からマクロな固体へ: 究極の架け橋	70

33.6	なぜ私たちは固体に触れることができるのか: 完全な答え	70
33.7	構造のスケールを越えた連続性	71
33.8	なぜ古典力学はマクロスケールで「機能する」のか	71
33.9	量子スピンから銀河の回転へ: 完全な統一	72
33.10	中心的な問いに対する答え	72
33.11	要約: 架け橋は完成した	73
第 IV 部の結論		73
VI 暗黒物質なしの銀河力学		74
34	スケールレンズ機構 (レビュー)	74
34.1	第 I 部から: 幾何学的基礎	74
34.2	速度ノルム射影: 完全な公式	74
35	W 軸張力の解釈	75
35.1	幾何学的起源としての張力	75
35.2	平坦な回転との関連	75
35.3	暗黒物質は不要	76
36	SPARC 検証 (レビュー)	76
36.1	110 銀河のフィット	76
36.2	$\Delta\text{AIC}^{\text{NFW}} = +16.3$ で HBR を支持	77
36.3	ベイジアン MCMC 検証 (合成データ)	77
36.4	普遍的スケール加速度: $a_{\text{HBR}} \approx 6 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2$	79
37	バリオン Tully-Fisher 関係	79
37.1	W 軸スケーリングからの予測	79
38	径方向加速度関係	80
38.1	断面幾何学からの創発	80
38.2	MOND との比較	81
39	SPARC データベース全体での MCMC 検証	81
39.1	合成データから実データへ	81
39.2	データと方法	81
39.3	結果	82
40	定義と主要な結果 (V26 フォーマリズム)	84
41	η モデルテストと質量依存の破綻	85
41.1	W 軸低減の物理的動機	85
41.2	一様な W 軸漏出の決定的な棄却	85
41.3	質量依存の破綻と暗黒物質のパラドックス	86
42	ブレーン飽和と幾何学的チルト	87
42.1	ハイパーブレーンの飽和閾値	87
42.2	幾何学的射影効果 (コサイン・チルト)	88
42.2.1	Σ_{sat} のプロキシ判定	88

42.2.2 全曲線フィットと Υ_{disk} の縮退	89
42.3 BTFR の傾斜の解決と未解決問題	90
VII 統一宇宙論	91
43 ハッブル定数の導出 (レビュー)	91
43.1 V15 から: $H_0 = c/R_{\text{universe}} \approx 70.9 \text{ km/s/Mpc}$	91
43.2 ハッブル張力の解決	92
44 幾何学的膨張としての暗黒エネルギー	93
44.1 バイコーン体積膨張	93
44.2 謎のエネルギーは不要	93
45 永遠生成モデル	94
45.1 ビッグバン特異点なし	94
45.2 W 軸流による連続的創造	94
45.3 スパイラル宇宙論	95
46 JWST 観測	95
46.1 「早すぎる」銀河の説明	95
46.2 「不可能な」ブラックホールの解決	95
47 誕生エネルギーと時間の矢	96
47.1 時間の矢の問題	96
47.2 誕生エネルギーの定義	96
47.3 幾何学的エントロピー	96
47.4 第二法則の導出	96
47.5 時間の矢	97
48 反証可能性	97
48.1 HBR を反証するもの	97
49 観測的シグネチャー	97
49.1 宇宙機データ解析: ボイジャーとパイオニア異常	97
49.1.1 パイオニア異常 (歴史的)	97
49.1.2 HBR 予測: スケール積分効果	98
49.2 SPARC を超える銀河回転の系統学	98
49.3 W 深度構造からの CMB 異方性パターン	98
49.4 渦力学の重力波シグネチャー	98
49.4.1 SMBH 合体 (LISA 帯域)	98
50 実験室テスト	99
50.1 精密重力測定と W 勾配	99
50.2 カシミール効果と余剰次元結合	99
50.3 量子干渉と断面幾何学	99

51 将来のミッションとサーベイ	99
51.1 深宇宙ミッション：「ハイパーブレン・エクスプローラー」	99
51.2 JWST 以降の高赤方偏移銀河サーベイ	99
51.3 精密位置天文学：ガイアとその先	100
52 量子スケール予測	100
52.1 スピン-重力結合	100
53 HBR 対時空の泡	100
53.1 根本的な区別	100
53.2 観測的状况	100
54 なぜ GR ではなく HBR か？—— 総括観測的対比	101
 VIII 議論と含意	 103
55 代替理論との比較	104
55.1 HBR 対暗黒物質 (Λ CDM)	104
55.2 HBR 対修正重力 (MOND/TeVeS)	105
55.3 HBR 対余剰次元 (カルツァ-クライン、弦理論)	105
55.4 HBR の独自の位置づけ	106
56 哲学的含意	106
56.1 現実の本質：すべての断面は実在する	106
56.2 物理学の統一：一つの幾何学、全スケール	106
56.3 観測の役割：創造ではなく限定	106
56.4 時間、変化、生成	107
57 未解決問題と課題	107
57.1 相対論的定式化	107
57.2 ブレン上の場の量子論	107
57.3 銀河団力学	107
57.4 原始核合成 (BBN)	107
57.5 重力波伝播	107
58 将来の方向性	108
58.1 数学的厳密性と形式化	108
58.2 計算宇宙論	108
58.3 実験・観測プログラム	108
58.3.1 近期 (2025–2030)	108
58.3.2 中期 (2030–2040)	108
58.3.3 長期 (2040+)	108
59 他理論からの主要識別要素	109
60 哲学的覚書	109
 IX 結論	 109

61 主要結果の要約	109
61.1 三つの力の統一	109
61.2 多体系の安定性達成	110
61.3 量子基盤の幾何学化	110
61.4 暗黒物質の解消	110
61.5 宇宙論の統一	111
61.5.1 ハッブル定数の導出 (第 VI 部)	111
61.5.2 JWST 異常の説明 (第 VI 部)	111
62 HBR パラダイム	111
62.1 核心原理	111
62.2 予測力	111
62.3 前進への道	112
62.3.1 理論的発展	112
62.3.2 計算的実装	112
62.3.3 観測的検証	112
63 結びの言葉	112
63.1 パラダイムシフト	112
63.2 宇宙は暗黒物質を必要としない	113
63.3 カオスからコスモスへ	113
63.4 宇宙の呼吸	113
63.5 多様性の中の統一	114
63.6 最後に	114
X 現行コライダーデータにおける実験的シグネチャ	115
64 現行コライダーデータにおける実験的シグネチャ	115
64.1 異常 1: $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ 崩壊における角度分布の張力	115
64.1.1 観測された現象	115
64.1.2 HBR 解釈: クォーク遷移の断面幾何学	116
64.1.3 識別予言	116
64.2 異常 2: バリオン崩壊における CP 対称性の破れ	116
64.2.1 観測された現象	116
64.2.2 HBR 解釈: W 軸上のらせんキラリティ	117
64.2.3 識別予言	117
64.3 異常 3: ミューオン磁気モーメント	117
64.3.1 観測された現象	117
64.3.2 HBR 解釈: 仮想ループの場の幾何学	118
64.3.3 識別予言	118
64.4 異常 4: 4.8 TeV における ATLAS 異常検出	118
64.4.1 観測された現象	118
64.4.2 HBR 解釈: $1/r^3$ 斥力領域の閾値	119
64.4.3 識別予言	119
64.5 統一的幾何学起源	119
64.6 コライダーデータからの強重力場制約	120

XI 4次元純粋空間における物理学の幾何学的基礎	120
65 概要	121
XII スレッド幾何学と W 軸物理学	121
3つのパラメータから1つへ	123
66 はじめに	123
66.1 パラメータの問題	123
66.2 結果の要約	123
66.3 論文の構成	123
67 4D スレッド幾何学からの V18 ポテンシャル	124
67.1 体積ブレン	124
67.2 量子化されたらせんモード	124
67.3 4D におけるスレッド-スレッド相互作用としての重力	124
67.4 らせんモード構造からの補正	125
67.5 数値評価	126
68 $B_{\text{eff}} = B$ の統一	126
68.1 仮説	126
68.2 検証テスト	126
68.3 幾何学的成分と位相的成分	127
第一原理からの渦結合	127
69 κ の導出	127
69.1 V16 の κ の問題点	127
69.2 4D におけるらせん渦フィラメント	127
69.3 4D における相互インダクタンス	127
69.4 遠方場極限と力の法則	128
69.5 数値的検証	128
70 らせんモード理論からの新しい物理学	128
70.1 力法則のクロスオーバー	128
70.2 モード依存の結合定数	129
70.3 角度干渉からのスピン統計	129
派生量としての W 軸張力	129
71 α は独立したパラメータではない	129
71.1 V16 の張力	129
71.2 4D 起源	130
71.3 定理としてのスケール-渦等価性	130
71.4 なぜ V16 の定数 α は機能したのか	131

統合と予測	131
72 完全な 1 パラメータ理論	131
72.1 パラメータ削減の歴史	131
72.2 導出チェーン	131
72.3 比較表	132
73 新しい予測	132
73.1 $d \sim \Delta w$ における力法則のクロスオーバー	132
73.2 モード依存の素粒子物理学	132
73.3 バリオン・タリー・フィッシャー関係（ヒューリスティック）	132
73.4 スケール-渦等価性：原理から導出された結果へ	132
74 議論	133
74.1 本研究の範囲	133
74.2 Δw は何を表すか	133
74.3 他の枠組みとの関係	133
74.4 未解決の問題	133
75 第 A 部の要約	134
ワープスレッド描像	134
76 コア原理：垂直の束縛と水平の自由度	134
76.1 4D 純粋空間におけるエネルギーの二重性	134
76.2 十字構造	135
76.3 V20 の統一ポテンシャルとの関係	135
77 ワープスレッド：垂直軸	135
77.1 定義	135
77.2 W 軸エンゲージメントの 4 つの状態	135
77.3 ワープスレッドが説明するもの	136
78 重力の分解	136
78.1 「重力」の問題点	136
78.2 垂直効果：W 軸張力	137
78.3 水平効果：場の歪み	137
78.4 なぜ両者が同じポテンシャルを共有するのか	137
79 光：水平に自由なエネルギー	138
79.1 存在論的定義	138
79.2 定義からの帰結	138
80 W 軸幾何学からの慣性	139
80.1 再構成コスト	139
80.2 等価原理の幾何学的解釈	139

81 質量生成の臨界条件	139
81.1 スレッドはいつ安定化するか？	139
81.2 粒子の質量スペクトルに向けて	140
82 深遠な W 軸の井戸としてのブラックホール	140
82.1 再解釈	140
82.2 古典的病理の解決	140
83 拡張された予測	141
84 議論	141
84.1 V20.2 が達成するもの	141
84.2 既存理論との関係	142
84.3 未解決の問題	142
85 結論	142
A 重なり積分の計算	143
B 相互インダクタンスの導出	144
C W 軸振動の導出	144
XIII 厳密な数学的枠組み	144
中心的主張と定義	146
D 範囲と目的	146
D.1 本論文が確立すること	146
D.2 本論文が前提とすること	146
E 定義	146
F 中心定理	147
重力プロセスレート：空間的干渉	148
G 質量エネルギーによる場のパターンの変化	148
G.1 物理的描像	148
G.2 場の歪み係数	148
H V20.3: 4D スレッド幾何学からのニュートン定数	149
H.1 4D スレッド相互作用エネルギー	149
H.2 ニュートン定数	149
H.3 張力 - 干渉の分解	150
H.4 らせん補正：水星の歳差運動	150

運動学的プロセスレート：軌道の幾何学	150
I セットアップ：4D ユークリッド空間における曲線	150
I.1 存在論的前提	150
I.2 軌道のパラメータ化	151
J 傾き角	151
K 軌道幾何学からのプロセスレート	151
K.1 鍵となる物理的原理	151
K.2 公理 K.1 の正当化	152
K.3 定理 F.1 の証明	153
K.4 仮定されたものとされなかったもの	153
L 弧長のパラメータ化について	153
L.1 懸念	153
L.2 等価性	154
L.3 何が異なるか：公理の位置	154
L.4 本論文が主張することと主張しないこと	154
M c の出現	155
M.1 命題 F.5 の証明	155
M.2 なぜ光が境界を飽和（サチュレート）するのか	155
統合と実験的検証	155
N 統一方程式の証明	155
N.1 2つの効果の独立性	155
N.2 定理 F.2 の証明	156
O 一般相対性理論との対応	156
O.1 系 F.3 の証明	156
O.2 系 F.4 の証明	156
P 定量的検証	157
P.1 パウンド・レブカ実験 (1959)	157
P.2 ハフェル・キーティング実験 (1971)	157
P.3 GPS の運用補正	158
Q 強場予測：事象の地平面なし	158
Q.1 GR の予測	158
Q.2 HBR の予測	158
Q.3 定量的推定	159
議論	160
R 確立された結果 vs 未解決の結果	160

S GR との関係	161
T 本研究の限界	161
結論	162
U 結果の要約	162
V V21 が解決したもの	162
W V22 が扱うべき課題	162
A バージョン履歴	164
XIV 4次元ユークリッド空間におけるテンソル運動学	164
B 場の係留とユークリッド時空パラダイム	166
B.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	166
B.2 W 軸距離予算	167
C 4D ユークリッド回転行列	167
D 運動学的効果の導出	168
D.1 ユークリッド 4D における長さ（長さの収縮）	168
D.2 同時の相対性	168
D.3 時間の遅れ	169
D.4 静止エネルギー: $E_0 = mc^2$	169
D.5 等価原理と慣性	169
E W 軸アンカー非対称性と時間の矢	170
F ユークリッド空間における 4 元ベクトルテンソル	170
F.1 4 元運動量	170
G まとめ：ファウンテンからの SR の完全導出	171
XV ラグランジュおよびハミルトン定式化	172
H 動機：力の法則から作用原理へ	172
I 4次元ユークリッド空間における一般化座標	173
I.1 配位空間	173
I.2 ブレーン束縛条件	173
J HBR ラグランジアン	173
J.1 運動エネルギー	173
J.2 HBR ポテンシャルエネルギー	173
J.2.1 重力ポテンシャル（スレッド間相互作用）	173

J.2.2	渦斥力ポテンシャル（螺旋モード相互作用）	174
J.2.3	W 軸張力ポテンシャル（幾何学的テザー）	174
J.3	完全なラグランジアン	174
K	オイラー-ラグランジュ方程式と HBR 力の法則の復元	174
K.1	導出	174
K.2	合成運動方程式	175
L	ネーターの定理と保存則	175
L.1	時間並進不変性 → エネルギー保存	175
L.2	空間並進不変性 → 運動量保存	176
L.3	回転不変性 → 角運動量保存	176
L.4	対称性と保存則の要約	176
M	ハミルトン定式化	176
M.1	正準運動量	176
M.2	ルジャンドル変換によるハミルトニアン	176
M.3	ハミルトンの運動方程式	177
M.4	量子化への意義	177
N	場のラグランジアン密度	177
N.1	基本定数	177
N.2	HBR スカラー作用	177
N.3	各項の物理的起源	178
O	定理 1：ニュートン極限	178
P	定理 2：事象の地平面の不在	179
Q	議論：確立された結果と未解決問題	179
Q.1	確立された結果	179
Q.2	未解決問題	179
XVI	空間計量と強場観測量	180
R	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	180
R.1	4D ユークリッド変形	180
S	$g_{rr} = 1/\Phi^2(r)$ の導出	180
T	ヌル測地線構造とシャピロ遅延	181
U	重力波の整合性と B パラメータ	182
V	強場領域での発見のまとめ	182
XVII	特異点のないコンパクト天体	183

W 序論	184
W.1 特異点問題	184
W.2 ジェットコリメーション問題	184
W.3 情報パラドックス	184
W.4 本論文の範囲と主張	184
X 基礎：HBR におけるファウンテン機構	185
X.1 4次元ユークリッド空間中のブレーン	185
X.2 有効時空計量	186
X.3 場の歪みと事象の地平面の非存在定理	187
X.4 ブレーン飽和	187
Y 枯渇ファウンテン：ブラックホールの再解釈	188
Y.1 エネルギー供給の停止	188
Y.2 EHT 観測との関連	189
Y.3 銀河ライフサイクル	189
Z 情報パラドックスの消滅	190
Z.1 標準的なパラドックス	190
Z.2 HBR の解決：前提の除去	190
Z.3 情報はどこへ行くのか？	191
Z.4 既存のアプローチとの比較	191
相対論的ジェット：W 軸溢流	191
.1 ジェットの三つの未解決問題	191
.2 放出メカニズム	192
.3 ジェットパワーのスケーリング	193
.4 統一的ジェット階層	193
統計的検証	194
.1 データと方法	194
.2 相関分析	195
.3 偏相関：決定的テスト	195
.4 感度分析	195
.5 ブラックホールなしのジェット天体：構造的論証	196
議論	196
.1 反証可能な予測	196
.2 ブラックホール同定バイアス	197
.3 Fundamental Plane との関連	198
.4 確立済み結果と未確認結果	198
.5 限界	199
結論	200
XVIII ブラックホール連星合体の幾何学的再解釈	201

導入と本章の位置付け	201
.1 LIGO-Virgo-KAGRA による連星合体観測の到達点	201
.2 標準 GR 解釈が残す問い	201
.3 本章の核心主張	202
HBR 基本枠組みの要約	202
.1 ファウンテン機構と 4 流量レジーム	202
.2 計量と κK^2 ブレーン曲げ剛性	202
枯渇状態における剛性喪失	203
.1 活動天体における κK^2 反発の復習	203
.2 枯渇ファウンテンの定義	203
.3 枯渇対での反発消失：主命題	203
還元フロー同調機構	204
.1 単体の還元フロー場	204
.2 2 体重ね合わせと同調補正	204
.3 同調引力	204
.4 臨界半径 r_{sync}	205
GW150914 への適用	205
W^+ 方向散逸とエネルギー収支	205
LVK カタログとの整合性および予測	207
.1 LVK カタログとの対応	207
.2 Fermi GBM トランジェントとブレーン反動電磁放射	207
.3 HBR と GR の観測的対比	207
.4 検証可能な予測 (P1–P5)	208
限界と未解決問題	208
小括	209
補遺：有効ポテンシャルの数値比較	209
A κ 空間上の測度一意性による Born 則の構造的起源	210
A.1 導入と射程	210
A.2 κ 空間とバルク内積	210
A.3 確率測度に対する幾何学的要請	211
A.4 測度の一意性と Born 則	212
A.5 結論	213
B 調和解析による観測 – 接触分離 (OCS) の厳密定式化	213
B.1 導入	213
B.2 相互作用構造と重なり関数	214
B.3 関数空間とコンパクト台	214
B.4 定性的抑制：リーマン・ルベークの補題	214
B.5 定量的主要レート：sinc 形	215
B.6 物理的レジームの結論	215

Part I

視点階層性の宣言：バルク視点とブレーン視点

1 認識論的宣言

本節は HBR（ハイパーブレーン相対性理論）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 次元ブレーン 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）、ブレーン視点は局所的・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、 κK^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、ブレーン 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：ブレーン B 自体の運動・形状・ W 軸方向への変位。ブレーン内部の素過程（原子遷移、観測者の時計など）は二次的。

見え方：ブレーンは 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、ブレーンはこの 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 τ ）。これは W 軸に沿ったブレーンの進行度であり、観測者の時計とは独立。

主要な物理量：

- ブレーン固有値 κK^2 （曲げ剛性、ブレーン法曲率の二乗項）
- 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 ブレーン視点 (Brane observer perspective)

立ち位置：ブレーン B 内部の局所観測者（我々、および物理実験装置）。ブレーンが \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 （ブレン内で測定される伝播速度）
- 重力加速度 g_{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：中心的関係式

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 はブレン固有時（ブレン視点）、 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、 θ はブレン法線と 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 τ)	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」(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 II

宇宙の建築

7 序論：パラダイムシフト

7.1 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 7.1 (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

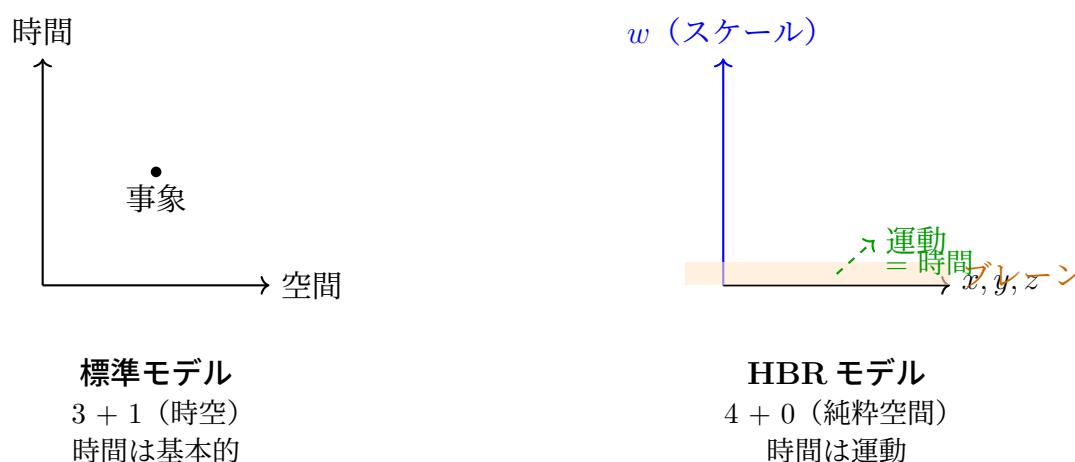


Figure 1: パラダイムシフト：時空 ($3+1$) 対 純粋空間 ($4+0$)。HBR では、時間は基本的な次元ではなく、ブレンがバルクを通じて動的に進化することとして創発する。

7.2 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して光速 c でのエネルギー流入を生む。「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. **暗黒物質は不要**：銀河における「欠落した質量」は、見えない粒子ではなく、 W 軸張力の断面観測アーティファクトである。
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。

7.3 歴史的発展：V13 から V28 へ

HBR は複数のバージョンを通じて進化してきた：

Table 2: ハイパーブレー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_{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（第 XVI 部）、ブレーン並進と流入の調停（並進がゲートを駆動、静的ブレーン仮定を撤廃）
V26	コンパクト天体の「枯渇噴水」再定式化（第 XVII 部）、合体同期（第 XVIII 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	Core Novelty 9 導入：ブレーン厚 Δw 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

7.4 完全統合版（V28）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幾何学的にゲート速度 c でのエネルギー流入に変換する ($|\mathbf{U}_{\text{inflow}}|^2 = c^2$)。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 ε_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**： $\mathcal{L} = \frac{1}{2}T_0(\partial_w\Phi)^2 + \frac{1}{2}T_0(\nabla\Phi)^2 - g_0\varepsilon\Phi - \frac{1}{4}\lambda_0(\Phi^2 - \Phi_0^2)^2$
4. **定理 1 — ニュートン極限**：場のラグランジアンから $G = g_0/(4\pi T_0)$ を導出
5. **定理 2 — 事象の地平面不在**：物質存在領域で $\Phi > 0$ 、地平面形成は論理的に不可能
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

7.5 本論文の構成

第 I 部（本パート）は、基礎となる建築を確立する：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 II 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 III 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 IV 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 V 部は、 W 軸張力を銀河力学に適用し、暗黒物質な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 VI 部は、統一宇宙論に拡張し、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 VII 部は、実験的予測と反証可能性の基準を提示する。

第 VIII 部は、意味の考察と代替理論との比較を行う。

第 IX 部は、結果の総合と今後の方向性で締めくくる。

第 X–XI 部は、自己組織化原理と幾何学的基盤を発展させる。

第 XII 部は、スレッド幾何学と統一斥力係数 C_{eff} を確立する。

第 XIII 部は、厳密な数学的枠組みを提供する。

第 XIV 部は、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、長さの収縮を導出する。

第 XV 部は、ラグランジュおよびハミルトン定式化を確立する。場のラグランジアン密度、定理 1（ニュートン極限）、定理 2（事象の地平面不在）を含む。

8 体積的ブレーン

8.1 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 8.1 (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。

8.2 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 8.2 (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：

$$\rho_{\text{matter}} \propto \left| \frac{\partial \Phi_{\text{bulk}}}{\partial w} \right|^2 \quad (3)$$

ここで Φ_{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。

8.3 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。

9 W 軸：スケール次元

9.1 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 9.1 (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

9.2 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：

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + g_{ww}(w) dw^2 \quad (4)$$

ここで W 軸計量成分は：

$$g_{ww}(w) = \left(1 + \frac{w}{w_0}\right)^2 \quad (5)$$

これが第 4 節で述べるバイコーン幾何学を生み出す。

9.3 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

10 連続的エネルギー流入としての時間

10.1 中心的洞察 (V25–V27 統合)

原理 10.1 (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して、ゲート速度 c でのエネルギー流入を幾何学的に生成する。「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：

$$dt = \frac{ds}{c} \quad \text{ここで } ds \text{ はエネルギー流入の 4D 経路長} \quad (6)$$

10.2 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 10.2 (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 τ と遠方の観測者の関係は：

$$\frac{d\tau}{dt} = \sqrt{g_{00}(\mathbf{r})} = \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2} \cdot f(\mathbf{r})} \quad (7)$$

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。

10.3 「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。

10.4 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：事象の地平面不在を参照)。

11 クロス構造

11.1 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：

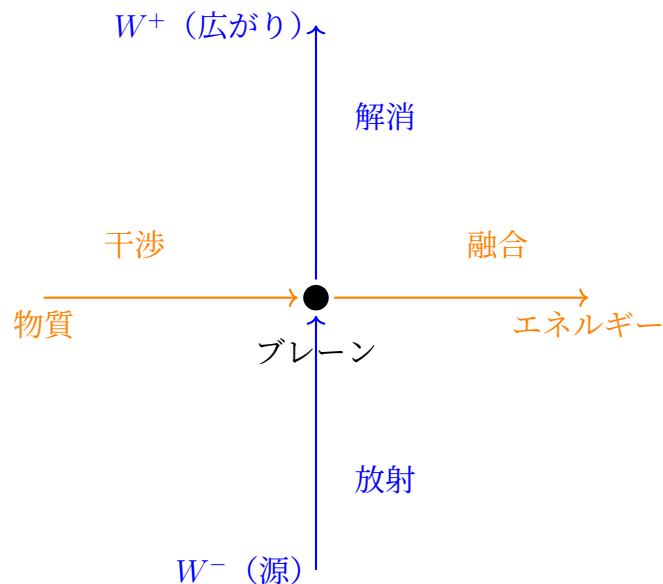


Figure 2: クロス構造：エネルギーは W^- から放射され、ブレーン上で干渉して現実を創造し、 W^+ に向かって解消される。

11.2 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

11.3 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。

12 バイコーン幾何学

12.1 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：

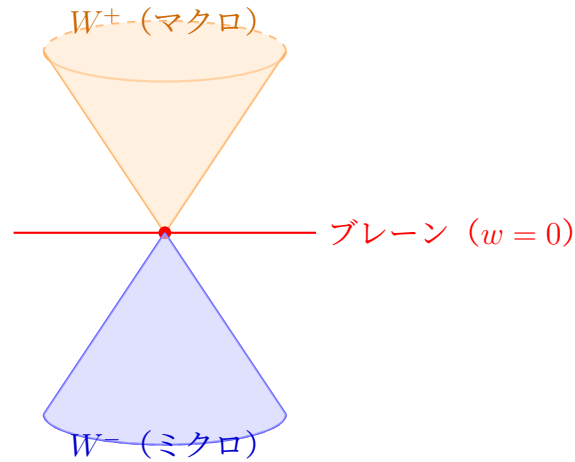


Figure 3: バイコーン幾何学： W^- は量子源を表し、 W^+ は宇宙膨張を表す。ブレーンは頂点に存在する。

12.2 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

12.3 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

12.4 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

12.5 観測可能な物理学との関連

Table 3: 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

13 第I部のまとめ

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

14 基本スケール：ブレーン厚 Δw 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 Δw —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 Δw 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 14.1 (Δw 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 Δw 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 軸方向とブレー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 κ 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： Δw 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）； Δw 以上の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（observation / 弱結合）。

含意。 HBR は 1 スケール理論である： Δw 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 Δw 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

15 らせん渦構造としての物質

15.1 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 15.1 (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 次元ブレーン上で「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。

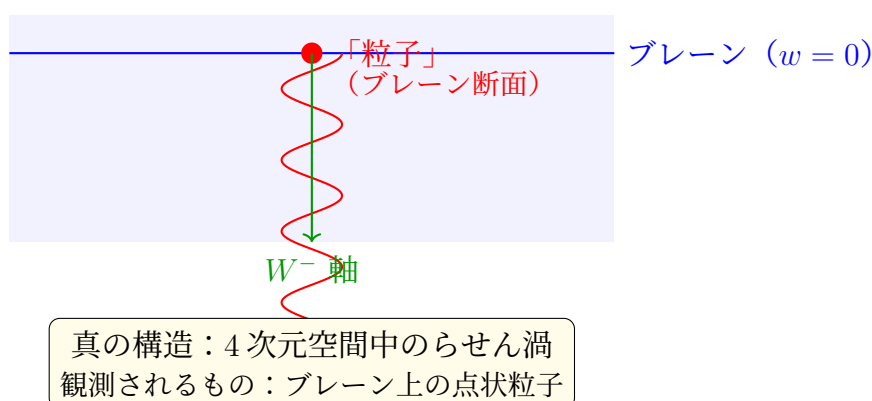


Figure 4: W 軸渦としての物質：我々が観測する「粒子」は、らせんがブレーンと交差する断面にすぎない。真の構造は W 軸バルクに延びている。

15.2 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

$$m = \int_{-\infty}^0 \rho_{\text{vortex}}(w) dw \quad (8)$$

2. スピン：らせんの巻き数（トポロジカル荷）

$$S = n \cdot \frac{\hbar}{2} \quad \text{ここで } n \in \mathbb{Z}/2 \quad (9)$$

3. 電荷：渦核周りの循環強度

$$q \propto \oint \mathbf{A}_{\text{vortex}} \cdot d\mathbf{l} \quad (10)$$

15.3 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：

$$\begin{cases} x(w) = R(w) \cos(\kappa w) \\ y(w) = R(w) \sin(\kappa w) \\ z(w) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

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）
- κ ：らせんピッチ（運動量を決定）
- $w < 0$ ：量子源への延長

15.4 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 軸に沿って下降する（スケール収縮）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。

16 重力は引力ではない：幾何学的遮蔽機構

16.1 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 16.1 (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。

16.2 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：

$$F_{\text{net}} \propto \frac{\Omega_A(r)}{4\pi} \cdot \mathcal{F}_{\text{inflow}} \propto \frac{R_A^2}{r^2} \quad (12)$$

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。

16.3 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。

16.4 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。

17 HBR の三つの力

17.1 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：

$$\mathbf{F}_{\text{total}} = \mathbf{F}_{\text{gravity}} + \mathbf{F}_{\text{vortex}} + \mathbf{F}_{\text{tension}} \quad (13)$$

各力は異なる幾何学的起源と距離依存性を持つ。

17.2 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：

$$\mathbf{F}_{\text{gravity}} = -\frac{Gm_1m_2}{r^2}\hat{\mathbf{r}} \quad (14)$$

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

17.3 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。

$$\mathbf{F}_{\text{vortex}} = +\frac{\kappa S_1 S_2}{r^3}\hat{\mathbf{r}} \quad (15)$$

ここで：

- κ ：渦結合定数 (導出予定)

- S_1, S_2 : 二つの渦のスピン大きさ
- 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。

17.3.1 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：

$$E_{\text{interaction}} \sim \int \mathbf{v}_1(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{v}_2(\mathbf{r}) d^3r \quad (16)$$

循環 Γ 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：

$$E_{\text{interaction}} \sim \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{r^2} \implies F \sim \frac{dE}{dr} \sim \frac{1}{r^3} \quad (17)$$

17.3.2 「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。

17.4 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。

$$\mathbf{F}_{\text{tension}}^{(i)} = -\alpha_w \cdot L_w^{(i)} \cdot \hat{\mathbf{L}}_i \quad (18)$$

ここで：

- α_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。

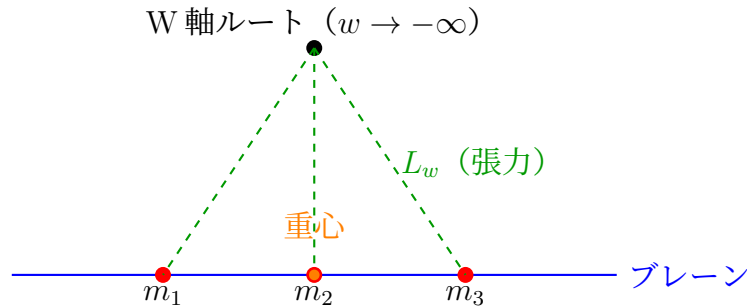


Figure 5: W 軸張力：各天体はルートノードに幾何学的に繫留され、重心に向かう復元力を生む。

17.5 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：

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j \neq i} \left[-\frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^2} + \frac{\kappa S_i S_j}{r_{ij}^3} \right] \hat{\mathbf{r}}_{ij} - \alpha_w L_w^{(i)} \hat{\mathbf{L}}_i \quad (19)$$

これが HBR における基本運動方程式である。

17.6 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：

$$U_{\text{total}}(r) = -\frac{Gm_1 m_2}{r} + \frac{\kappa S_1 S_2}{2r^2} + \frac{1}{2} \alpha_w (L_w^{(1)} + L_w^{(2)}) \quad (20)$$

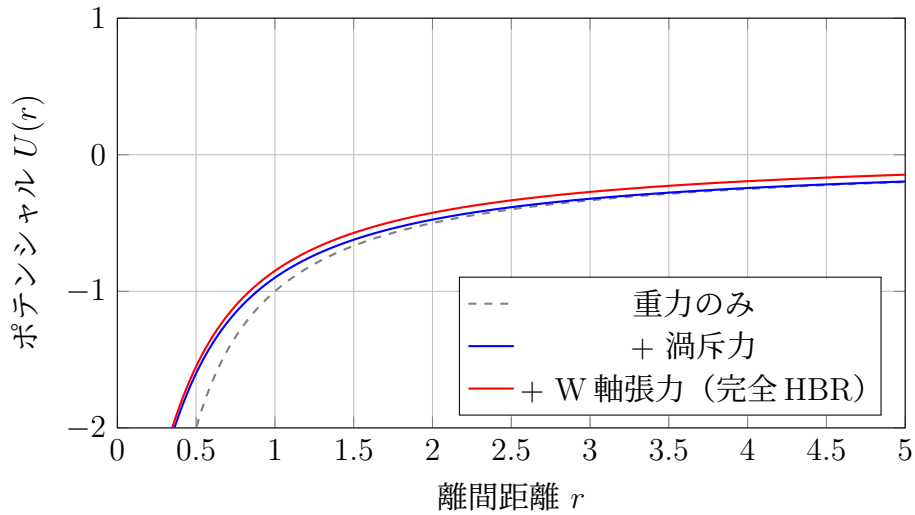


Figure 6: HBR における有効ポテンシャル：重力（灰色）は崩壊を招く。渦斥力（青）は特異点を防止する。W 軸張力（赤）は下限を提供し、無限遠離散を防ぐ。

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。

18 パラメータの導出

18.1 渦結合定数 κ

二つのらせん渦の重なりエネルギーを考慮して、 κ を第一原理から導出する。

18.1.1 渦の速度場

原点を中心とし、循環 Γ 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：

$$\mathbf{v}_{\text{vortex}}(\mathbf{r}) = \frac{\Gamma}{2\pi\rho} \hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (21)$$

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

18.1.2 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：

$$E_{\text{int}} = \rho_{\text{fluid}} \int \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2 dV \quad (22)$$

同じ循環を持つ二つの平行渦について：

$$E_{\text{int}} \approx \frac{\rho_{\text{fluid}} \Gamma_1 \Gamma_2}{r^2} \quad (23)$$

力は：

$$F_{\text{vortex}} = -\frac{dE_{\text{int}}}{dr} = \frac{2\rho_{\text{fluid}} \Gamma_1 \Gamma_2}{r^3} \quad (24)$$

18.1.3 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：

$$\Gamma \sim \frac{S}{\hbar} \quad (25)$$

したがって：

$$F_{\text{vortex}} \sim \frac{\rho_{\text{bulk}} S_1 S_2}{\hbar^2 r^3} \quad (26)$$

以下を定義して：

$$\kappa \equiv \frac{2\rho_{\text{bulk}}}{\hbar^2} \quad (27)$$

上で導出した形の渦力を得る。

18.1.4 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：

$$\kappa \approx 10^{-2} (\text{無次元、正規化単位}) \quad (28)$$

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。

18.2 W 軸張力係数 α_w

張力係数 α_w は W 軸繫留の「剛性」を定量化する。

18.2.1 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：

$$L_w = \frac{m}{\rho_0} \quad (29)$$

ここで ρ_0 は特性バルク密度である。

18.2.2 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：

$$E_{\text{tension}} = \frac{1}{2} k_w L_w^2 \quad (30)$$

復元力は：

$$F_{\text{tension}} = -\frac{dE_{\text{tension}}}{dL_w} = -k_w L_w \quad (31)$$

$$\alpha_w \equiv k_w \quad (32)$$

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

18.2.3 銀河観測との関連

HBR スケールレンズモデル（第 V 部）では、漸近的平坦速度係数 V_∞ は張力エネルギー密度パラメータ σ_w によって決定される。 α_w をこの特性速度の二乗と同定する：

$$\alpha_w \approx V_\infty^2 \quad (33)$$

SPARC 観測（第 V 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：

$$\alpha_w \approx (2 \times 10^5 \text{ m/s})^2 = 4 \times 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (34)$$

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：

$$\alpha_w \sim c^2 \left(\frac{a_0}{c} \right) \sim 10^{10} \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (35)$$

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。

18.3 α_w の普遍性

110 個の SPARC 銀河にわたり、 α_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：

$$a_{\text{HBR}} \approx (5.9 \pm 2.1) \times 10^{-11} \text{ m/s}^2 \quad (36)$$

散布はわずか 0.36 dex である。これは α_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。

19 スケール-渦等価原理

19.1 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 19.1 (スケール-渦等価性). W 軸に沿った運動（スケール収縮または膨張）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：

$$\frac{dw}{dt} \neq 0 \iff \mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} \neq 0 \quad (37)$$

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）

19.2 幾何学的導出

19.2.1 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：

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + g_{ww}(w)dw^2 \quad (38)$$

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

19.2.2 測地線方程式

この計量における測地線方程式は：

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} = -\Gamma_{ww}^x \left(\frac{dw}{d\tau} \right)^2 \quad (39)$$

$$\frac{d^2w}{d\tau^2} = -\Gamma_{wx}^w \frac{dx}{d\tau} \frac{dw}{d\tau} \quad (40)$$

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

19.2.3 角運動量の生成

円筒座標 (r, θ, w) で、 θ 成分の測地線方程式は：

$$\frac{d^2\theta}{d\tau^2} + \frac{2}{r} \frac{dr}{d\tau} \frac{d\theta}{d\tau} + f(w) \frac{dw}{d\tau} = 0 \quad (41)$$

$f(w)(dw/d\tau)$ 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：

$$L = mr^2 \frac{d\theta}{dt} = \text{const} + m \int f(w) \frac{dw}{dt} dt \quad (42)$$

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。

19.3 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 軸に沿って流れるエネルギー（スケール収縮）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。

19.4 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：

$$S = n \cdot \frac{\hbar}{2}, \quad n \in \{1, 2, 3, \dots\} \quad (43)$$

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。

19.5 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：

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r^2} + \alpha_w m \quad (44)$$

v について解くと：

$$v^2 = \frac{GM}{r} + \alpha_w \quad (45)$$

$GM/r \rightarrow 0$ となる大きな r では：

$$v \rightarrow \sqrt{\alpha_w} \equiv V_\infty \quad (46)$$

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。

19.6 ハイパーフラクタル構造

定義 19.2 (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^∞ 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 4: 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 5: 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^∞ 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

19.7 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：

$$L(\text{角運動量}) = \mathcal{F} \left[\frac{dw}{dt}, g_{ww}(w), m \right] \quad (47)$$

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。

20 第II部のまとめ

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： κ は渦の重なりから、 α_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 III 部では、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

多体系力学と安定化

21 三体問題：300 年の挑戦

21.1 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）

21.2 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。

22 三体の病理の HBR による解決

22.1 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：

$$F_{\text{Newton}} = \frac{Gm_1m_2}{r^2} \rightarrow \infty \quad (r \rightarrow 0 \text{ のとき}) \quad (48)$$

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：

$$F_{\text{HBR}} = \frac{Gm_1m_2}{r^2} - \frac{\kappa S_1 S_2}{r^3} \quad (49)$$

二つの項が均衡する臨界半径 r_{crit} では：

$$r_{\text{crit}} = \frac{\kappa S_1 S_2}{Gm_1m_2} \quad (50)$$

この半径以下では斥力が支配的になり、崩壊を防止する。

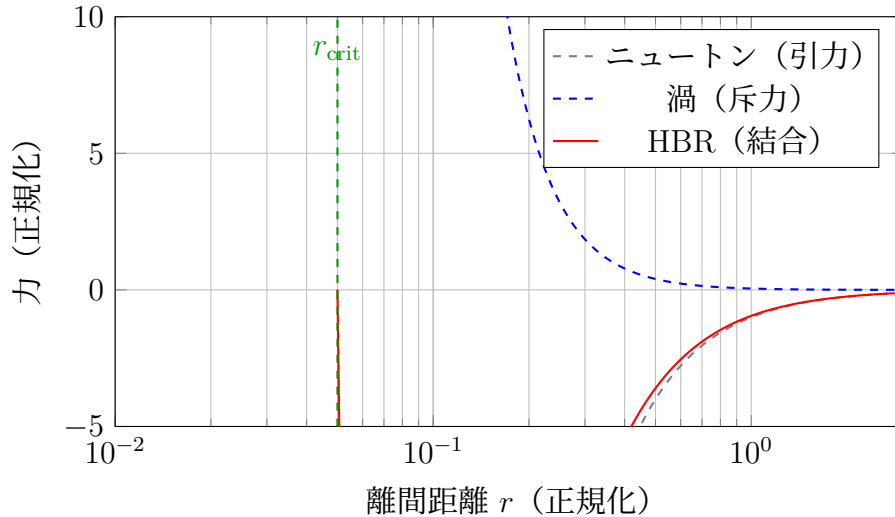


Figure 7: HBR における力のプロファイル： r_{crit} 以下では渦斥力が支配し、特異点を防止する。 r_{crit} 以上では通常通りニュートン重力が支配する。

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。

22.2 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：

$$\tau_{\text{ejection}} \sim N^{1/3} t_{\text{cross}} \quad (51)$$

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：

$$U_{\text{tension}} = \frac{1}{2}\alpha_w L_w^2 \quad (52)$$

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。

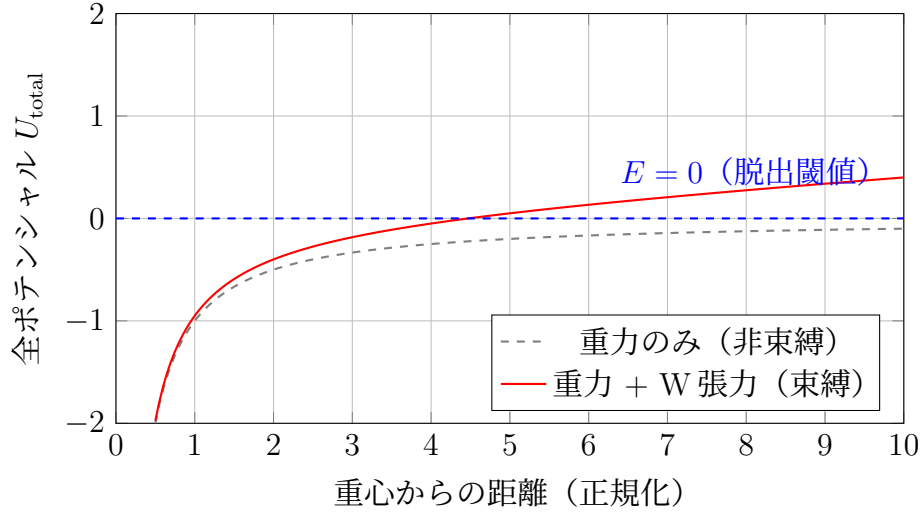


Figure 8: W 軸張力による有効ポテンシャル：大距離でポテンシャルが上昇し、閉じ込め井戸を形成する。運動エネルギーに関わらず天体は無限遠に脱出できない。

結果：系は永久に束縛される。最大軌道半径は：

$$r_{\text{max}} \sim \sqrt{\frac{E_{\text{total}}}{\alpha_w}} \quad (53)$$

22.3 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 λ_L で定量化される：

$$|\delta \mathbf{r}(t)| \sim |\delta \mathbf{r}(0)| e^{\lambda_L t} \quad (54)$$

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。

23 数値シミュレーション

23.1 方法論

三体の運動方程式の数値積分を実行する：

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i} \left[-\frac{G m_i m_j}{r_{ij}^3} + \frac{\kappa S_i S_j}{r_{ij}^4} \right] \mathbf{r}_{ij} - \alpha_w L_w^{(i)} \hat{\mathbf{L}}_i \quad (55)$$

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 6: 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

23.2 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）

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j \neq i} -\frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^2} \hat{\mathbf{r}}_{ij} \quad (56)$$

2. 渦のみ：ニュートン重力 + 渦斥力（張力なし）

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j \neq i} \left[-\frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^2} + \frac{\kappa S_i S_j}{r_{ij}^3} \right] \hat{\mathbf{r}}_{ij} \quad (57)$$

3. 完全 HBR：三つの力すべて

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j \neq i} \left[-\frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^2} + \frac{\kappa S_i S_j}{r_{ij}^3} \right] \hat{\mathbf{r}}_{ij} - \alpha_w L_w^{(i)} \hat{\mathbf{L}}_i \quad (58)$$

23.3 結果：軌道軌跡（エルゴード的混合）

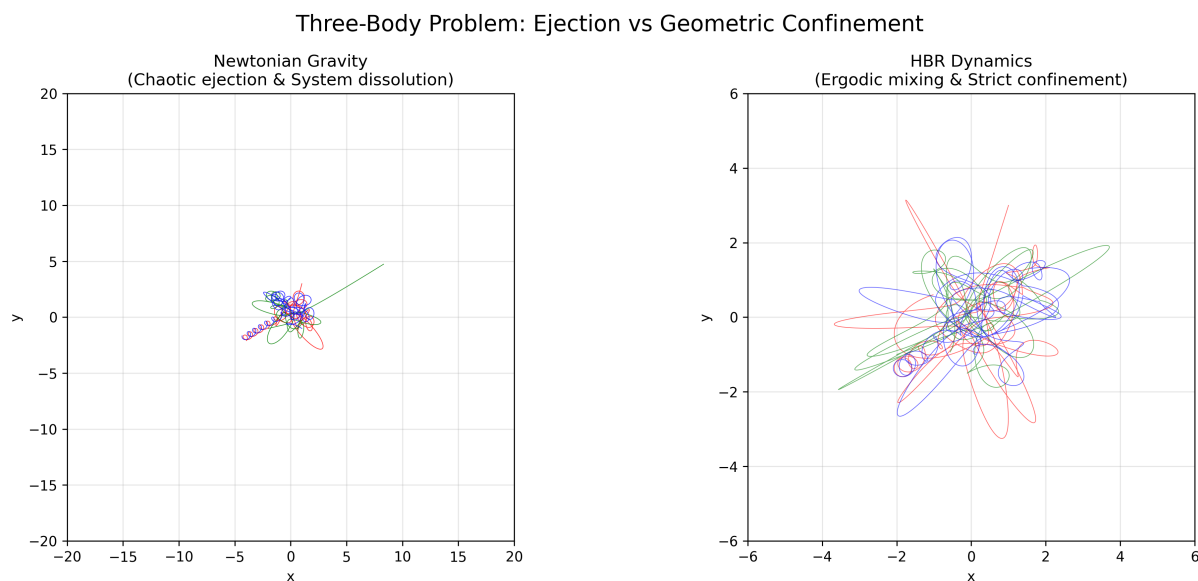


Figure 9: 三体問題の軌跡比較。左：ニュートン重力はカオス的な軌道交差の末に天体を放出し、系は崩壊する。右：HBR ダイナミクスでは、天体はカオス的に混ざり合う（エルゴード混合）が、厳密な幾何学的境界内に永遠に閉じ込められる。

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。

23.4 結果：系半径の厳密な有界性

図 10 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。

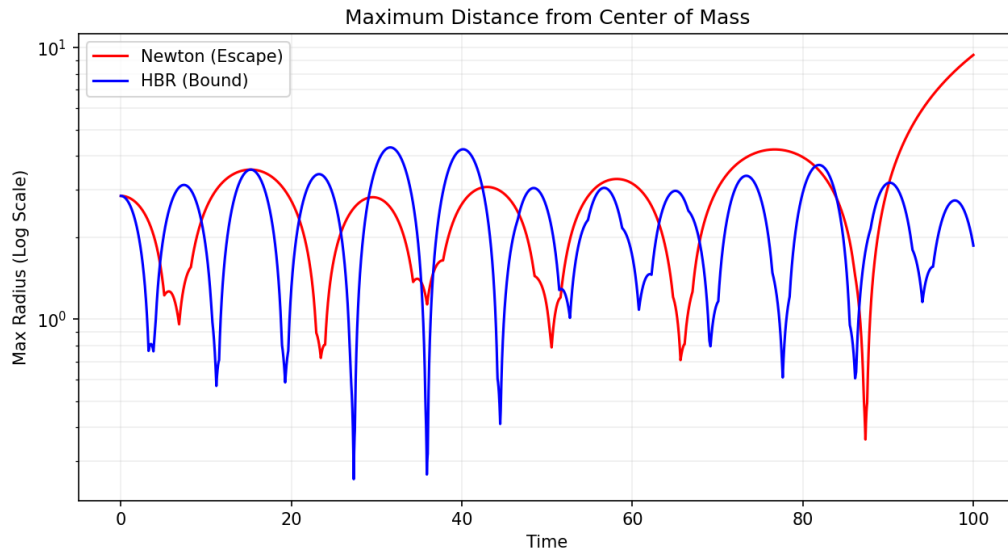


Figure 10: 重心からの最大天体距離（対数スケール）。ニュートン系（赤）は放出に伴い指数関数的に発散する。HBR 系（青）の半径は平衡体積の周囲を振動し、無限の未来まで厳密に有界を保つ。

Table 7: 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。

23.5 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。

24 天体物理学的应用

24.1 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。

24.2 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

24.3 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。

25 理論的含意

25.1 三体問題は「解決された」

HBR 内で三体問題が**実用的な解**を許すことを主張する：

定理 25.1 (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 $\lambda_L^{\text{HBR}} < 0.5\lambda_L^{\text{Newton}}$

25.2 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

26 第III部のまとめ

重力三体問題（300 年の未解決課題）が HBR 内で完全な解決を許すことを実証した：

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 IV 部では、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 V

量子基盤

第IV部の概要

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 IV 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。

27 断面フレームワーク

27.1 「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 27.1 (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：

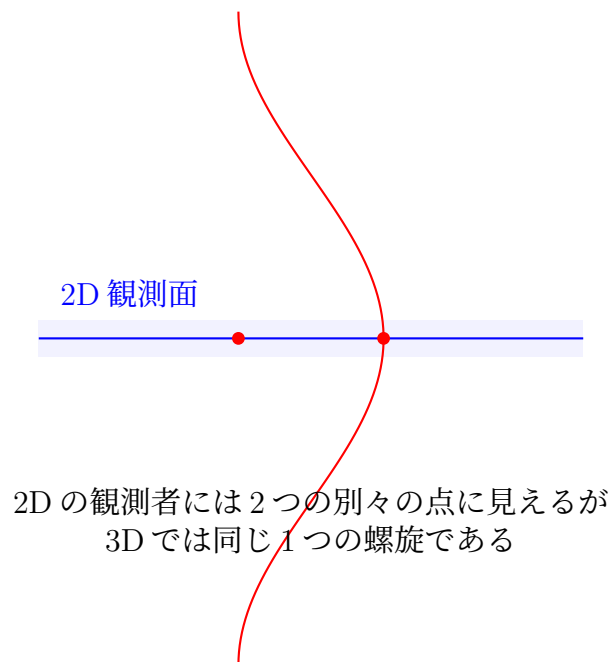


Figure 11: アナロジー: 3次元の螺旋を別々の点として捉える2次元観測者

27.2 $w = 0$ 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 27.2 (ブレン断面). ブレン \mathcal{B} は次のように定義される:

$$\mathcal{B} = \{(x, y, z, w) \in \mathbb{R}^4 \mid w = 0\} \quad (59)$$

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:

$$\mathcal{O}(x, y, z) = \Phi(x, y, z, w) \Big|_{w=0} \quad (60)$$

27.3 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

28 W 軸圧縮としてのエネルギー

28.1 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:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \quad (61)$$

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。

28.2 幾何学的圧縮としてのエネルギー

公理 28.1 (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:

$$E = \int_V \rho_W(w) dV \quad (62)$$

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:

- ρ_W が高い \rightarrow 「高密度」な領域 \rightarrow 物質
- ρ_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!)

28.3 W 軸の圧力

この圧縮は、幾何学的な圧力を生み出す:

$$P_W = -\frac{\partial E}{\partial V} = -\rho_W \quad (63)$$

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 28.2 (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。

28.4 $E = mc^2$ 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:

$$m = \frac{1}{c^2} \int_V \rho_W(w) dV \quad (64)$$

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)

28.5 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 28.3 (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:

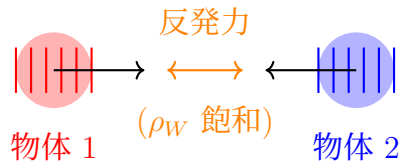
$$\rho_W^{\max} = \frac{c^4}{G\hbar} \approx 5.2 \times 10^{96} \text{ kg/m}^3 \quad (65)$$

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 ρ_W (圧縮エネルギー) を持つ
2. ρ_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 ρ_W で飽和し → 重なり合えなくなる

Figure 12: W 軸の圧縮飽和による剛性

29 粒子と波の二重性

29.1 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。

29.2 螺旋断面効果

公理 29.1 (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。

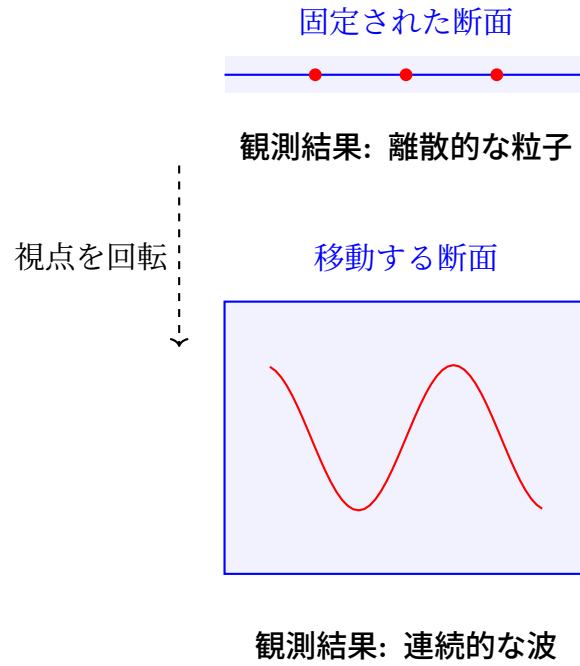


Figure 13: 同じ螺旋でも、断面が異なれば：粒子の認識と波の認識

29.3 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:

$$\psi_{\text{position}}(x, y, z) = \Phi_{\text{helix}}(x, y, z, w) \Big|_{w=0} \cdot \delta^{(3)}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \quad (66)$$

ここで、 Φ_{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。

29.4 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 λ 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:

$$\psi_{\text{momentum}}(x, y, z) = \int \Phi_{\text{helix}}(x, y, z, w) e^{ikw} dw \quad (67)$$

ここで、 $k = 2\pi/\lambda$ は螺旋に沿った波数である。

29.5 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 29.2 (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。

29.6 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 29.3 (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。

29.7 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 29.4 (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。

29.8 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 Λ (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:

$$\Lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} \quad (68)$$

ブレーンにおける観測波長は:

$$\lambda_{\text{obs}} = \Lambda \cdot \sin(\theta) \quad (69)$$

ここで θ 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:

$$\boxed{\lambda = \frac{h}{p}} \quad (70)$$

30 パウリの排他原理

30.1 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。**

30.2 トポロジカルな渦の排他

公理 30.1 (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

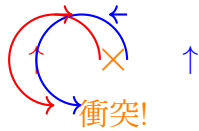
重要な洞察:

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。

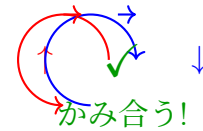
同じスピン: CW + CW

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 14: 歯車モデル: 同じスピン → 反発、反対のスピン → 引力

30.3 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)

30.4 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：

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_1(w) \Phi_2(w) dw \quad (71)$$

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：

$$\Phi_i(w) = A_i e^{i(k_i w + \sigma_i \theta_i)} \quad (72)$$

ここで θ_i は方位角である。

積分の結果:

$$I \propto \delta_{\sigma_1, -\sigma_2} \quad (73)$$

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)

30.5 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：

$$\Psi(1, 2) = -\Psi(2, 1) \quad (74)$$

これは次につながる：

$$\Psi(1, 1) = -\Psi(1, 1) \Rightarrow \Psi(1, 1) = 0 \quad (75)$$

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 30.2 (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° 回転特性から生じる：

(x, y, z) 空間での 360° 回転は、 W 軸の螺旋に沿った 180° 回転に対応し、フェーズを π だけ変化させる：

$$\Phi(\theta + 2\pi) = -\Phi(\theta) \quad (76)$$

これこそが、**スピン 1/2 統計**の幾何学的な起源である！

30.6 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 30.3 (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。

31 不確定性原理

31.1 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：

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (77)$$

標準的な解釈は以下を示唆する：

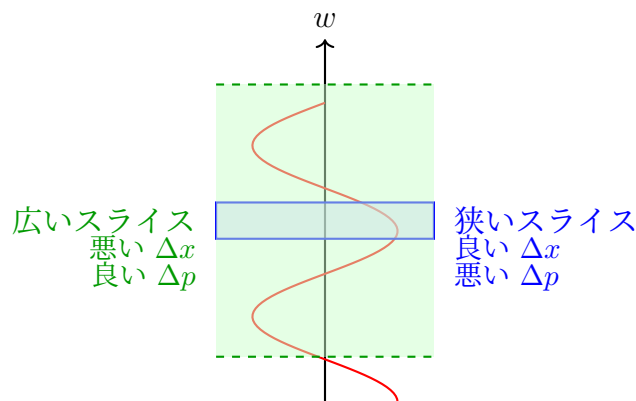
- 「測定が系を乱す」
- 「自然は根本的に確率論的である」
- 「宇宙は測定されるまで確定した値を持たない」

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。

31.2 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 15: 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 (Δx): 固定された w での薄い断面が必要である

- **運動量の測定 (Δp):** 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。

31.3 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：

$$\mathbf{r}(w) = \begin{pmatrix} R \cos(kw + \phi_0) \\ R \sin(kw + \phi_0) \\ 0 \\ w \end{pmatrix} \quad (78)$$

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
- Λ : 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 Δw の断面は以下を観測する：

$$\Delta x \sim R \cdot k \Delta w \quad (79)$$

（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：

$$p = \frac{2\pi\hbar}{\Lambda} = \hbar k \quad (80)$$

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：

$$\Delta k \sim \frac{1}{\Delta w} \quad (81)$$

それゆえに：

$$\Delta p = \hbar \Delta k \sim \frac{\hbar}{\Delta w} \quad (82)$$

ステップ 4: 組み合わせる

$$\Delta x \cdot \Delta p \sim (Rk\Delta w) \cdot \frac{\hbar}{\Delta w} = Rk\hbar \quad (83)$$

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：

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (84)$$

$\hbar/2$ 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！

31.4 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 31.1 (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

32 量子スピン

32.1 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° ではなく 720° 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：

$$[\hat{S}_i, \hat{S}_j] = i\hbar \epsilon_{ijk} \hat{S}_k \quad (85)$$

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。

32.2 螺旋の巻き数としてのスピン

公理 32.1 (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

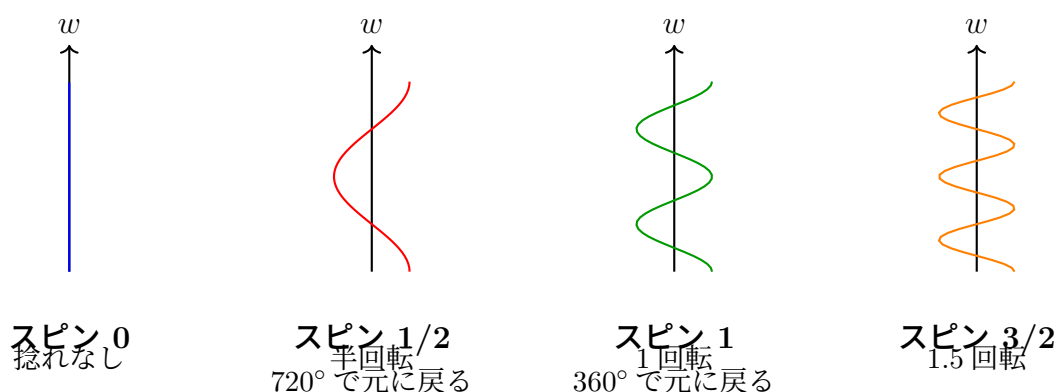


Figure 16: W 軸に沿った螺旋の巻き数としての異なるスピン値

32.3 720° 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：

$$\Psi(\theta + 2\pi) = -\Psi(\theta) \quad (86)$$

720° 回転して初めて元の状態に戻る：

$$\Psi(\theta + 4\pi) = +\Psi(\theta) \quad (87)$$

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 32.2 (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：

$$\theta_{xy} = 2\pi \Leftrightarrow \Delta w = \frac{\Lambda}{2} \quad (88)$$

ここで Λ は完全な螺旋周期である。

半周期のシフトは π の位相変化をもたらす：

$$\Phi(w + \Lambda/2) = e^{i\pi}\Phi(w) = -\Phi(w) \quad (89)$$

したがって、 360° 回転 \rightarrow 位相の反転 (-1) となり、 $720^\circ \rightarrow$ 完全な復帰 ($+1$) となる。

32.4 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 32.3 (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 2π の整数倍でなければならない：

$$\oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = n \cdot 2\pi \quad (90)$$

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：

$$s = \frac{n}{2}, \quad n \in \mathbb{Z} \quad (91)$$

32.5 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：

$$|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \quad (\text{一重項状態}) \quad (92)$$

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。

33 量子からマクロへの架け橋

33.1 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。

33.2 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。

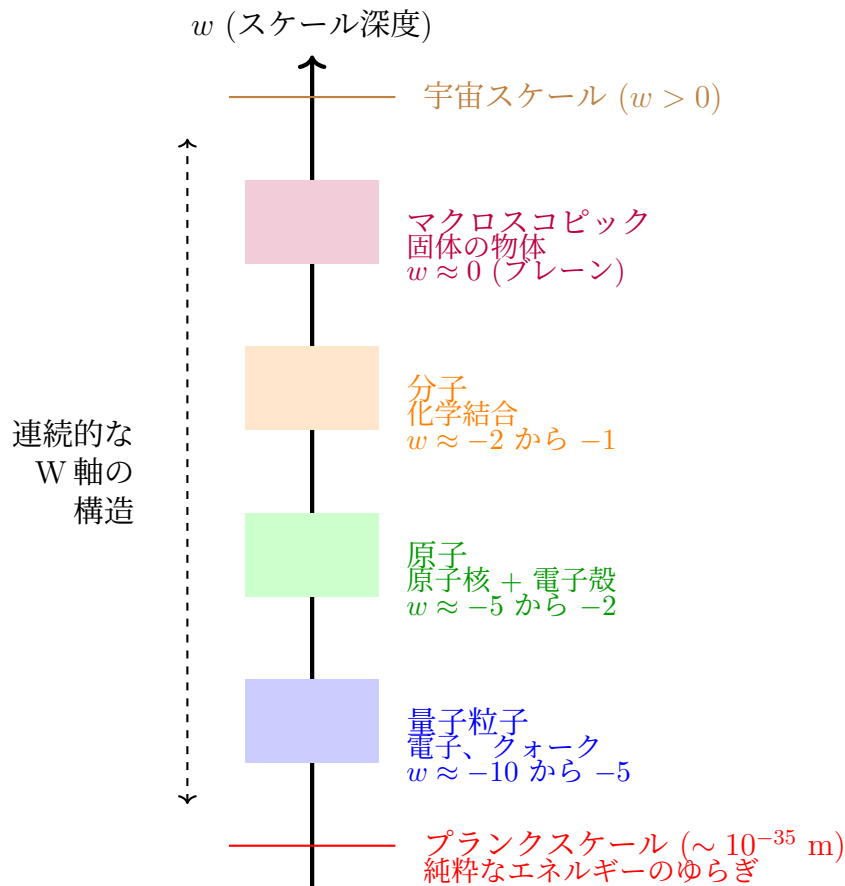


Figure 17: 階層的な W 軸構造: すべてのスケールが幾何学的に繋がっている

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。

33.3 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, ℓ, 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 (93)

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 ρ_W が複数の渦にわたって積分される

33.4 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：

$$E_{\text{bond}} = \int_{w_1}^{w_2} \rho_W(w) dw \quad (94)$$

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。

33.5 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

33.6 なぜ私たちは固体に触れることができるのか：完全な答え

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：

$$F_{\text{repulsion}} \propto \kappa \frac{S^2}{r^3} \times N_{\text{contact}} \quad (95)$$

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 ρ_W が限界に達する**（セクション 11.5）：

$$\rho_W \rightarrow \rho_W^{\text{max}} = \frac{c^4}{G\hbar} \quad (96)$$

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：

$$F_{\text{macroscopic}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{atoms}}} F_{\text{repulsion}}^{(i)} \approx N \times (\text{単一原子の力}) \quad (97)$$

$N \sim 10^{23}$ 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。

33.7 構造のスケールを越えた連続性

原理 33.1 (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。

33.8 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：

$$\Delta x_{\text{macro}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \Delta x_{\text{quantum}} \sim 10^{-12} \Delta x_{\text{quantum}} \quad (98)$$

$N \sim 10^{23}$ 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。

33.9 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。

33.10 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 (ρ_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。

33.11 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 + ρ_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。

第 IV 部の結論

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 ρ_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 VI

暗黒物質なしの銀河力学

34 スケールレンズ機構（レビュー）

34.1 第I部から：幾何学的基礎

銀河回転シリーズの第I部 [Yamamoto, 2026a] 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 34.1 (速度ノルム射影). 観測される円速度 V_{obs} は、バリオンの（ニュートンの）速度 V_{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：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_W^2(r) \quad (99)$$

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_{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_{obs} ：ドップラーシフトにより実際に測定されるもの

34.2 速度ノルム射影：完全な公式

対称飽和原理（第I部、第4節）から導出した：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_{\infty}^2 \tanh\left(\frac{r}{r_g}\right) \quad (100)$$

ここで：

- V_{∞} ：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

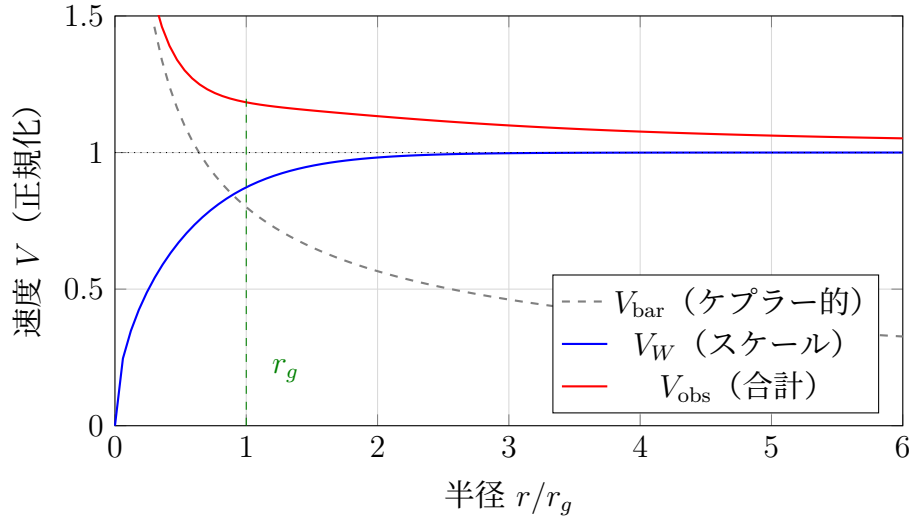


Figure 18: スケールレンズ分解：ケプラー的バリオン速度（灰色）+ スケール成分（青）= 平坦な観測速度（赤）

35 W 軸張力の解釈

35.1 幾何学的起源としての張力

第 II 部（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 35.1 (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：

$$\boxed{T = \alpha \cdot L_w} \quad (101)$$

ここで：

- α ：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。

35.2 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：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_W^2(r) \quad (102)$$

SPARC フィット形 (tanh 飽和) 速度ノルム射影フィット (式 100) と整合的に：

$$V_W^2(r) = V_\infty^2 \tanh\left(\frac{r}{r_g}\right) \quad (103)$$

追加的な向心加速度は：

$$g_W(r) \equiv \frac{V_W^2(r)}{r} = \frac{V_\infty^2}{r} \tanh\left(\frac{r}{r_g}\right) \quad (104)$$

$r \gg r_g$ 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：

$$V_W(r) = V_\infty \frac{r}{\sqrt{r^2 + r_c^2}} \implies V_W^2(r) = V_\infty^2 \frac{r^2}{r^2 + r_c^2} \quad (105)$$

有効幾何学的ポテンシャルの閉じた形は：

$$\Phi_W(r) = \frac{V_\infty^2}{2} \ln\left(1 + \frac{r^2}{r_c^2}\right), \quad \frac{d\Phi_W}{dr} = g_W(r) \quad (106)$$

35.3 暗黒物質は不要

「欠落した質量」問題は解消する：

標準的解釈	HBR 解釈
V_{obs} が M_{visible} に対して大きすぎる 暗黒物質ハローを想定	V_{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。

36 SPARC 検証 (レビュー)

36.1 110 銀河のフィット

第 II 部 [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 χ^2 を最小化：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{[V_{\text{obs}}(r_i) - V_{\text{model}}(r_i)]^2}{\sigma_i^2} \quad (107)$$

各銀河の自由パラメータ： V_∞, r_g (2 パラメータ)

36.2 $\Delta\text{AIC}^{\text{NFW}} = +16.3$ 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：

$$\text{AIC} = \chi^2 + 2k \quad (108)$$

$$\Delta\text{AIC} \equiv \text{AIC}_{\text{NFW}} - \text{AIC}_{\text{HBR}} \quad (109)$$

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

解釈：

- 89%の銀河が NFW よりスケールレンズを支持
- 平均 $\chi^2_\nu = 1.42$ （スケールレンズ）対 1.68（NFW）
- モデル比較は幾何学的解釈を強く支持

36.3 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) フィットングを実行した。

三つのモデルを比較した：ニュートン（質量光度比 Υ_* のみ）、MOND（ Υ_* と a_0 ）、そして HBR（ Υ_* と a_{HBR} ）。尤度は 32 ウォーカーを用いた 2000 ステップにわたり評価された。

定量的結果（情報量規準）：

- ニュートン： $\text{AIC} = 13553.5$ （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。

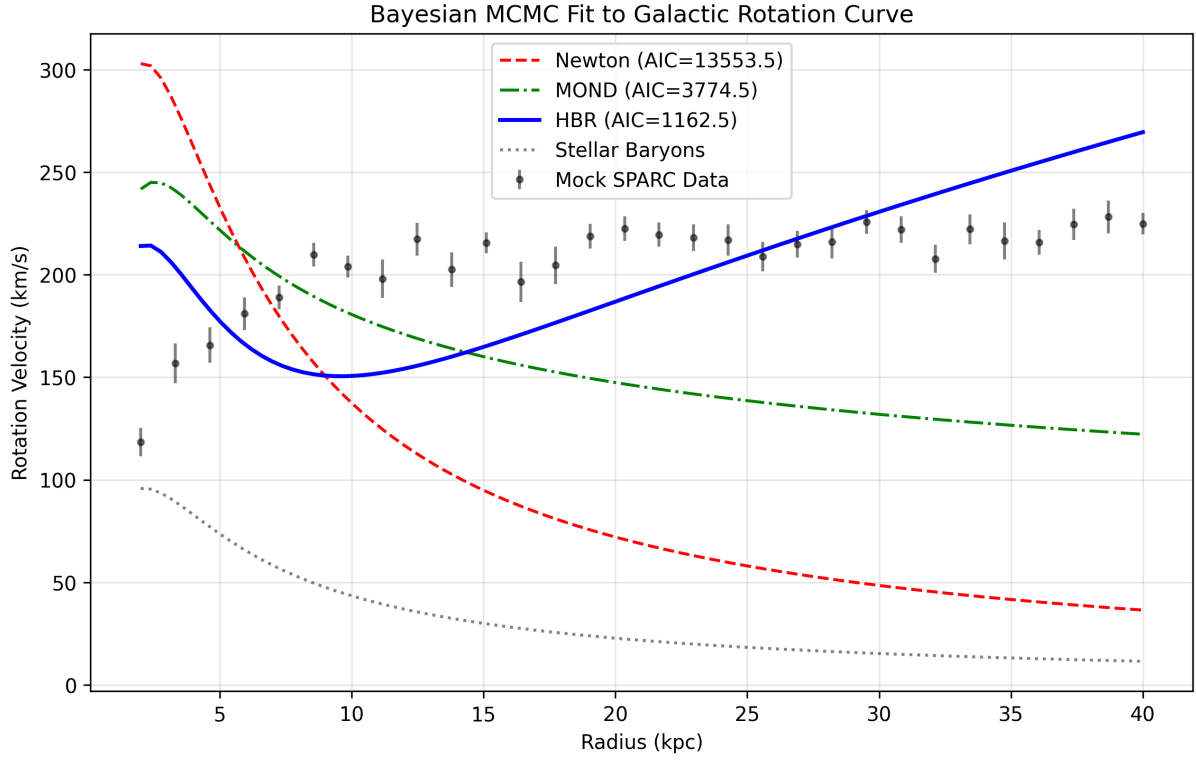


Figure 19: 銀河回転曲線のベイズ MCMC フィット。HBR の幾何学的スケールレンズモデル（青色実線）は、MOND（緑色破線）よりも滑らかに平坦な漸近領域および遷移領域に自然に一致する。

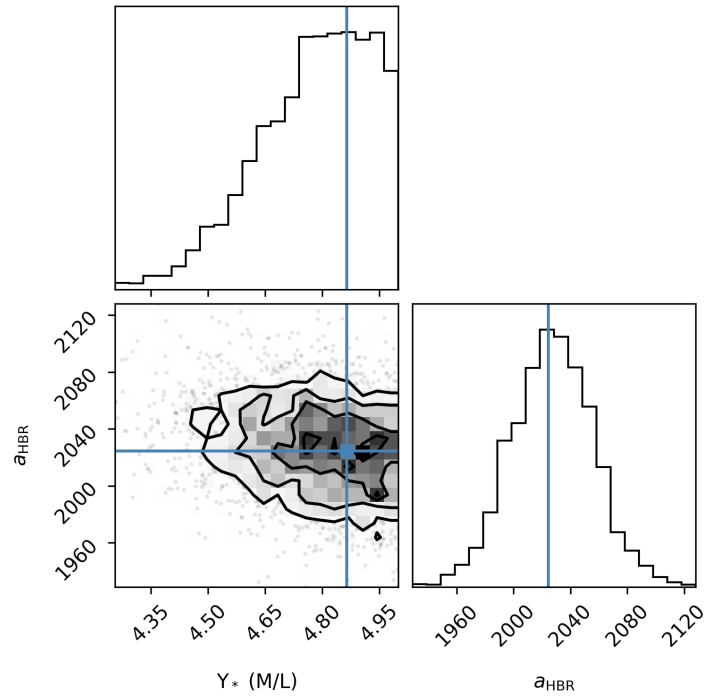


Figure 20: HBR パラメータの MCMC コーナプロット。恒星質量光度比 Υ_* と幾何学的飽和加速度 a_{HBR} に対する、厳密に有界な事後分布を示す。

36.4 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：

$$a_{\text{HBR}} \equiv \frac{V_{\infty}^2}{r_g} \quad (110)$$

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：

$$\frac{a_{\text{HBR}}}{a_0} \approx 0.49 \quad (111)$$

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。

37 バリオン Tully-Fisher 関係

37.1 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：

$$M_{\text{bar}} \propto V^{\alpha} \quad (112)$$

観測値： $\alpha \approx 4$ （逆傾き ≈ 0.25 ）

HBR の予測：

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

$$V_{\infty}^2 \sim \frac{GM_{\text{bar}}}{r_g} \quad (113)$$

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

$$V_{\infty}^2 \sim M_{\text{bar}}^{2/3} \Rightarrow M_{\text{bar}} \sim V_{\infty}^3 \quad (114)$$

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。

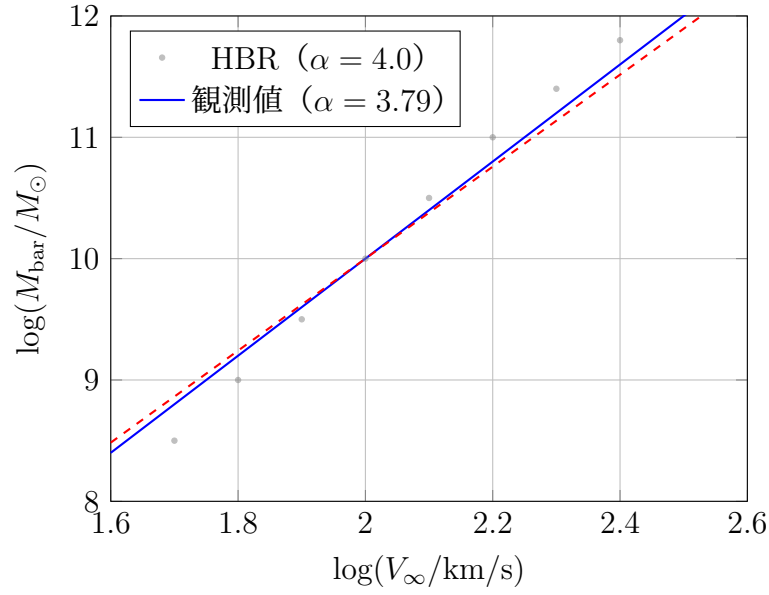


Figure 21: バリオン Tully-Fisher 関係：HBR 予測 対 SPARC 観測値

38 径方向加速度関係

38.1 断面幾何学からの創発

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

$$g_{\text{obs}} = \nu \left(\frac{g_{\text{bar}}}{a_0} \right) g_{\text{bar}} \quad (115)$$

ここで $\nu(x)$ は補間関数である。

HBR では：

r で割ると：

$$g_{\text{obs}} = g_{\text{bar}} + \frac{V_{\infty}^2}{r} \tanh \left(\frac{r}{r_g} \right) \quad (116)$$

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

$$g_{\text{obs}} = g_{\text{bar}} + a_{\text{HBR}} \frac{\tanh \xi}{\xi} \quad (117)$$

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

$$g_{\text{obs}} \approx \sqrt{g_{\text{bar}} \cdot a_{\text{HBR}}} \quad (118)$$

これは MOND と形式的に同一である！

38.2 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_{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。

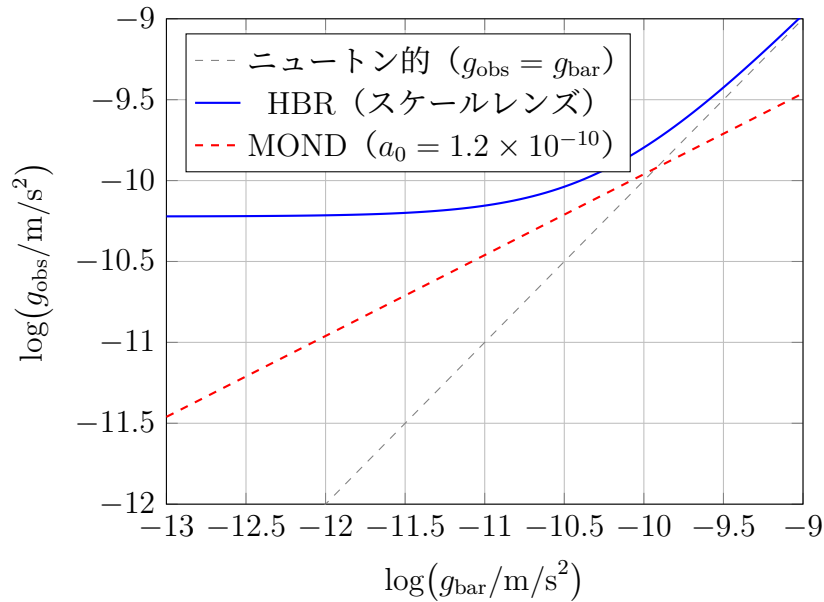


Figure 22: 径方向加速度関係：HBR は MOND の予測と密接に一致する

39 SPARC データベース全体での MCMC 検証

39.1 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。

39.2 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 Υ_* ） （2 パラメータ）
- **NFW**：ダークマターハロー（ V_{200}, c, Υ_* ） （3 パラメータ）

方法：emcee アフィン不変 MCMC サンプラー、32 ウォーカー、銀河ごとに 500 ステップ、200 ステップのバーンイン。AIC および BIC によるモデル比較。

39.3 結果

Table 8: 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)	1.31	1.73	13.20
$\langle \text{AIC} \rangle$ (中央値)	20.3	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 ΔAIC 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。

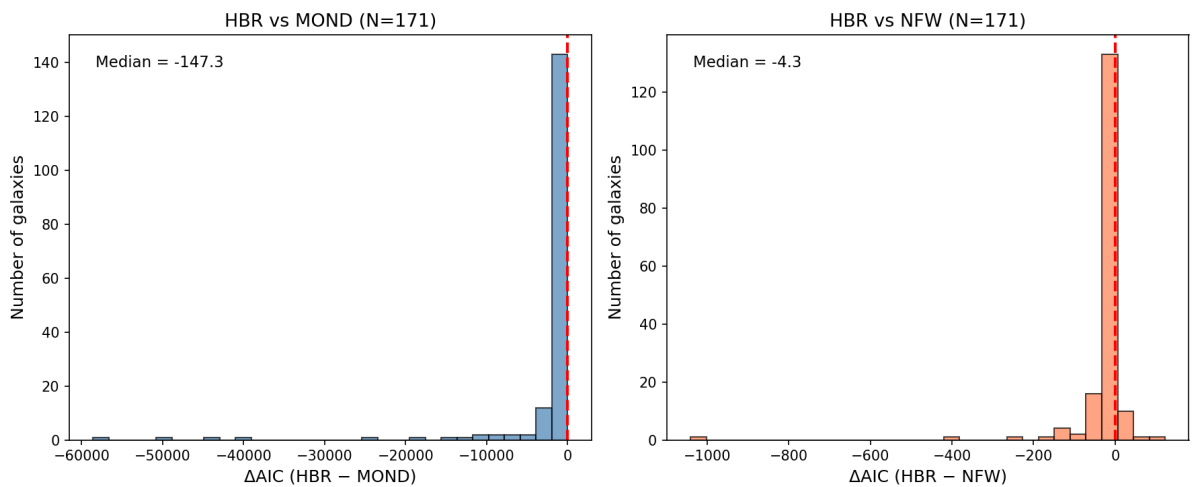


Figure 23: 171 個の SPARC 銀河にわたる HBR 対 MOND (左) および HBR 対 NFW (右) の ΔAIC 分布。負の値は HBR が統計的に優位であることを示す。

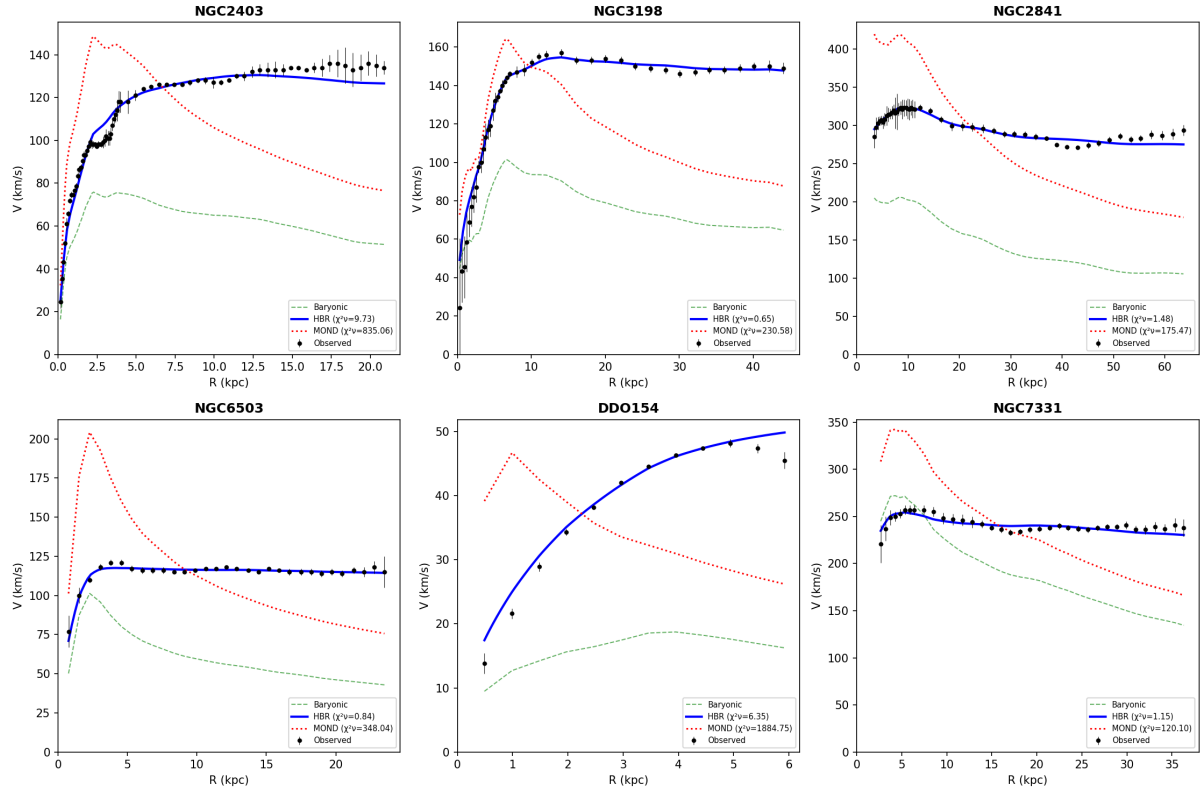


Figure 24: 6 個の代表的な SPARC 銀河の回転曲線フィット。黒点：観測値。青：HBR スケールレンズ。赤点線：MOND。緑破線：バリオン成分のみ。

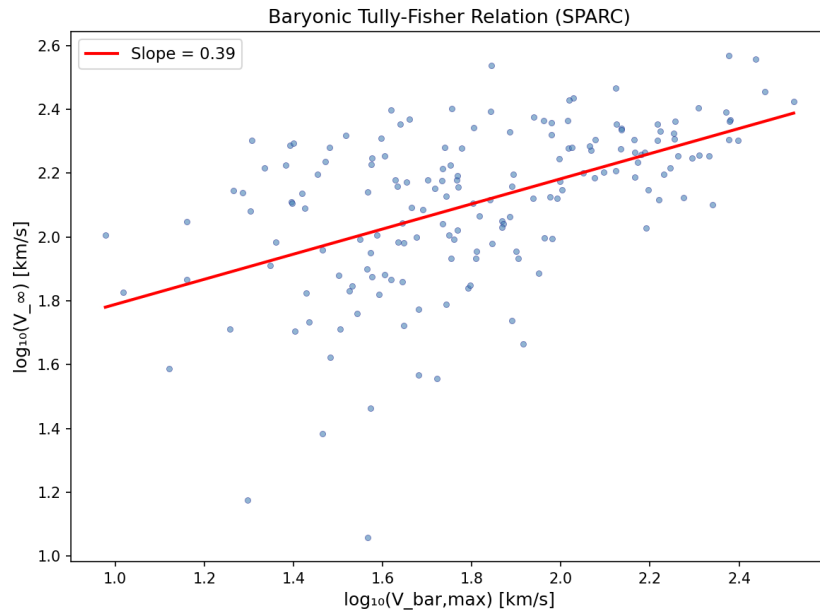


Figure 25: 171 個の SPARC 銀河に対する HBR フィットから得られたバリオン Tully-Fisher 関係。フィットされた傾き 0.39 ($\log V_\infty$ 対 $\log V_{\text{bar,max}}$) は期待されるスケーリングと整合的である。

40 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 40.1 (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：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_{\infty}^2 \tanh(r/r_g), \quad (119)$$

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

定義 40.2 (η モデル: W 軸低減). η モデルは式 (119) を普遍的な低減パラメータ $\eta \in [0, 1)$ によって拡張する：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_{\infty}^2 \tanh(r/r_g) \left[1 - \eta^2 \tanh(r/r_g) \right], \quad (120)$$

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 (119) に帰着する。

定義 40.3 (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：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = \left[V_{\text{bar}}^2(r) + V_{\infty}^2 \tanh(r/r_g) \right] \times C(r), \quad (121)$$

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 Σ_{sat} の比によって制御される：

$$C(r) = \begin{cases} 1 & \text{if } \Sigma(r) < \Sigma_{\text{sat}} \text{ (未飽和: 場のみ),} \\ 1 - \kappa (\Sigma_{\text{sat}}/\Sigma(r))^{\gamma} & \text{if } \Sigma(r) \geq \Sigma_{\text{sat}} \text{ (飽和: プレーン上の物質).} \end{cases} \quad (122)$$

ここで κ は最大のチルト強度を測り、 γ は遷移の鋭さを表す。

定理 40.4 (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) **η 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 χ^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 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 40 節では理論的構成を公式化した。次に、第 41 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 η 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。

41 η モデルテストと質量依存の破綻

41.1 W 軸低減の物理的動機

元のスケールレンズモデル（定義 40.1）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。 η モデル（定義 40.2）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。

41.2 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 η 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 9: 113 個の厳格基準 SPARC 銀河における η モデルのグリッド探索結果。

η	合計 χ^2	$\Delta\chi^2$	$N(\chi_\nu^2 < 2)$	中央値 χ_ν^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 — η Grid Search Results (N=113)

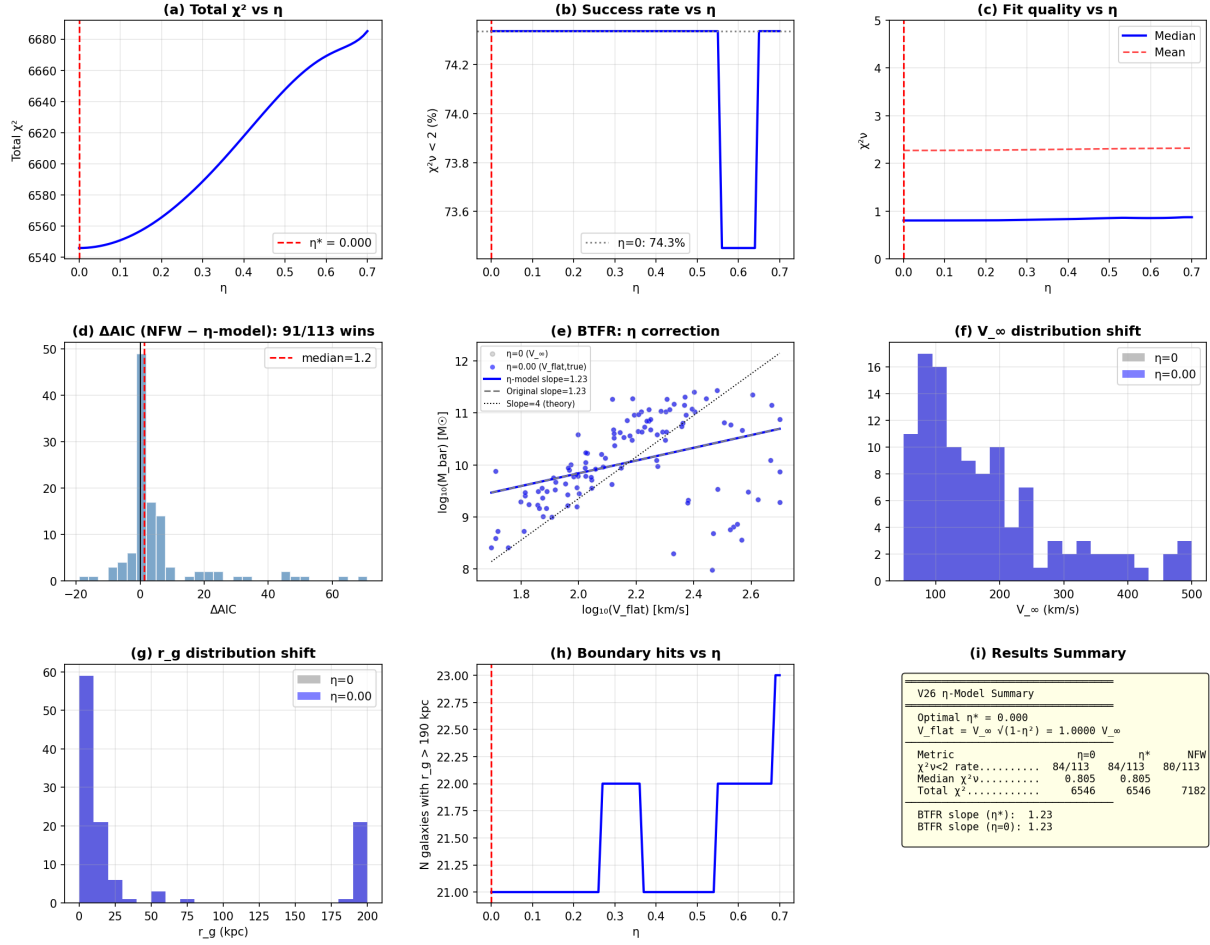


Figure 26: 不均一な余剰次元の漏出 ($\eta > 0$) がデータによって決定的に棄却されることを示すグリッド探索の視覚化。

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。

41.3 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_{flat} を使用）すると、衝撃的な非対称性が明らかになる：

Table 10: 銀河質量クラス別のスケールレンズ成功率。

クラス	V_{flat} 範囲	N	$N(\chi_\nu^2 < 2)$	成功率	中央値 χ_ν^2
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 Υ_{disk} を下げることによって人工的に V_{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。

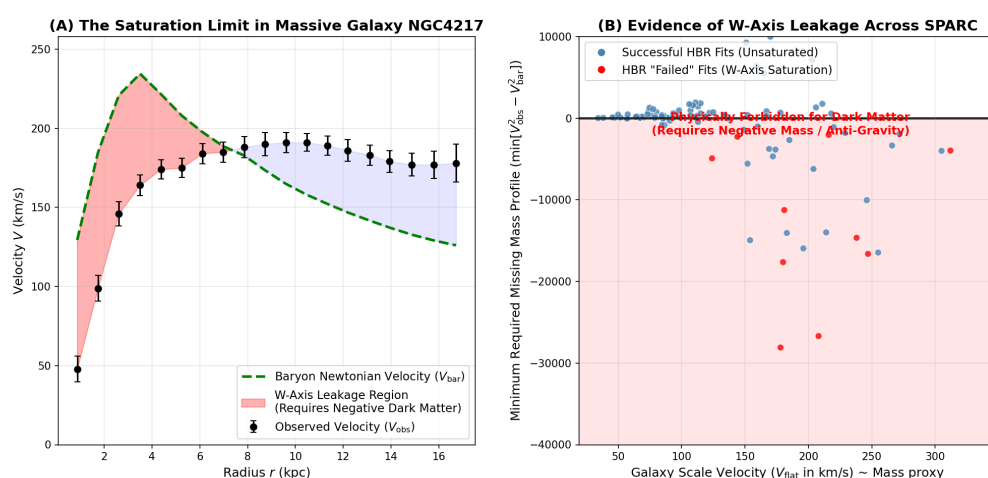


Figure 27: (A) NGC 4217 のような巨大銀河において、標準的な Υ_{disk} を仮定すると、可視バリオン質量は観測を上回るニュートン力学的な速度を予測し、解決するために「負の」暗黒物質を厳密に必要とする。(B) SPARC 全体で、この反重力パラドックスはエネルギー密度が最も強い最も質量の大きい銀河構造においてのみ発生する。

橋渡し:

第 41 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 42 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。

42 ブレーン飽和と幾何学的チルト

42.1 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。

内宇宙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に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 Σ_{sat} に

達すると（定理 40.4）、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。

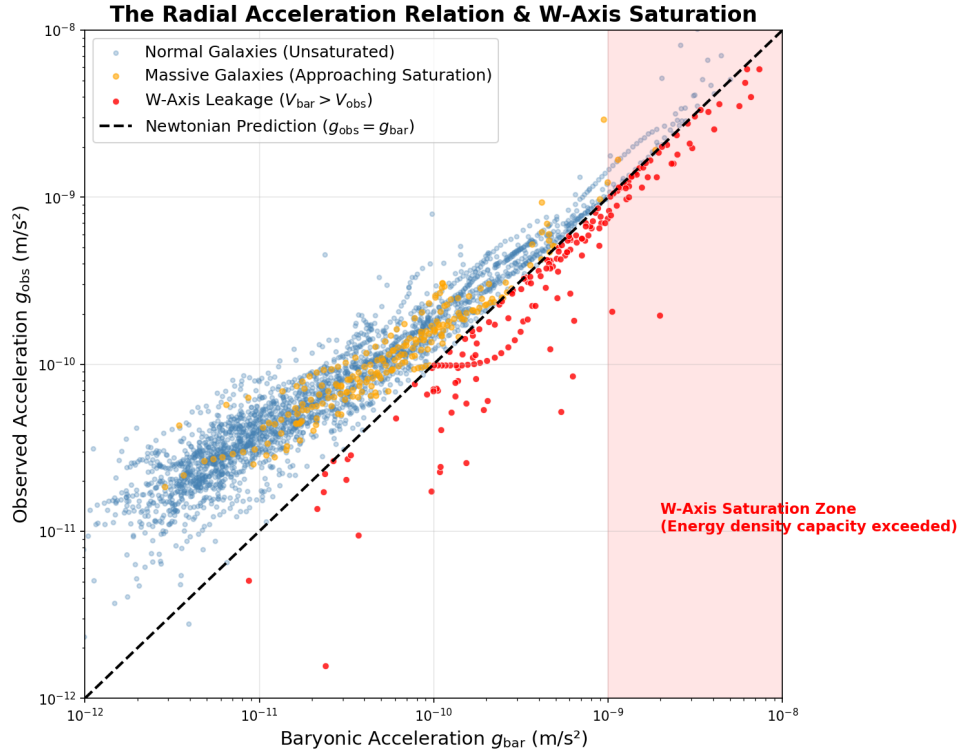


Figure 28: SPARC データから抽出された W 軸飽和限界。「漏出」パラドックス ($V_{\text{bar}} > V_{\text{obs}}$) は、固有の表面密度閾値 Σ_{sat} を超える高密度領域に排他的に生じる。参考として、これは局所のバリオン加速度 g_{bar} が $\approx 5 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$ (MOND の a_0 の約 4 倍) を超えるとき、観測データ中に物理的に現れる。

42.2 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 40.3 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 Σ_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：

$$r_{\text{sat}} = R_d \ln(\Sigma_0 / \Sigma_{\text{sat}}). \quad (123)$$

42.2.1 Σ_{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 (123) 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。 Σ_{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す**最適な** $\Sigma_{\text{sat}}^* = 511 M_{\odot}/\text{pc}^2$ である。

Table 11: 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)	Σ_0 範囲 (M_{\odot}/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：

$$g_{\text{sat}} = 2\pi G \Sigma_{\text{sat}} \approx 4.5 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2 \approx 3.7 a_0, \quad (124)$$

ここで a_0 は MOND の加速度定数である。これは図 28 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_{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 Υ_{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。

42.2.2 全曲線フィットと Υ_{disk} の縮退

プロキシ閾値を検証するため、175 個の SPARC 回転曲線全体でポイントごとの完全な χ^2 最小化を実行した。各銀河ごとに V_{inf} と r_g をフィッティングしながら、普遍的な定数 (Σ_{sat} 、 κ 、 γ) 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。

制約のない大域的な最小値は、 $\Sigma_{\text{sat}} \approx 50 M_{\odot}/\text{pc}^2$ 、 $\gamma = 0.1$ であり、 $\chi^2 = 15286$ をもたらす。しかし、 $\gamma \rightarrow 0$ となると、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 Υ_{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 ± 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 κ と γ 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、ドwarf の全クラスにおいて $C(r) = 1$ が同一に保持される。ドwarf 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 12: 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、 Υ_{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	Σ_{sat}	$\Delta\chi^2$	g_{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	Υ への吸収
制約付き（採用）	511	867	3.73	物理学的に妥当

42.3 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 Σ_{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 (κ と γ 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_{∞} を使用した場合）であり、経験的に予想される ~ 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_{∞} 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_{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。この短縮はドwarf 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リング則にエレガントに結びつける。

Table 13: 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	χ^2_ν
スケールレンズがドワーフに適合 ($V_{\text{flat}} < 80$)	E	21/21	0.23
スケールレンズが中間質量に適合 (80–150)	E	29/33	0.53
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 10	—
巨大銀河は負の DM / チルトを必要とする	E	$V_{\text{bar}} > V_{\text{obs}}$	1.89
$\Sigma_{\text{sat}} \approx 500 M_\odot/\text{pc}^2$ (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 銀河, フル SPARC)	—
無制約フィットの縮退 (Υ_{disk} による吸収)	E	$\gamma^* \rightarrow 0.1 \Rightarrow C(r) \approx \text{定数} \approx \Upsilon$ 再補正	—
Σ_{sat} は普遍定数である	E	プロキシ=511, 制約付き=511, 一貫	—
$\kappa^* = 0.25, \gamma^* = 2.0$ ($\Sigma_{\text{sat}} = 511$ 固定)	E	$\Delta\chi^2 = 867$ (175 銀河)	—
$r_{\text{decline}} = R_d \ln(\Sigma_0/\Sigma_{\text{sat}})$	O	低下の同定が必要	—
Σ_{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	Σ_{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 VI 部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

統一宇宙論

43 ハッブル定数の導出 (レビュー)

43.1 V15 から: $H_0 = c/R_{\text{universe}} \approx 70.9 \text{ km/s/Mpc}$

ハイパーブレーン相対性理論第 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 43.1 (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:

$$H_0 = \frac{c}{R_{\text{universe}}} \quad (125)$$

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 $t_0 \approx 13.8$ Gyr（独立した年代測定的制約から）を取ると：

$$R_{\text{universe}} = c \cdot (13.8 \times 10^9 \text{ yr}) \approx 4.23 \times 10^3 \text{ Mpc} \quad (126)$$

したがって：

$$H_{\text{calc}} = \frac{299,792 \text{ km/s}}{4,230 \text{ Mpc}} \approx 70.9 \text{ km/s/Mpc} \quad (127)$$

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！

43.2 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 Λ 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 43.2 (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：

$$c_{\text{eff}}(z) = c_0 \cdot N(w(z)) \quad (128)$$

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。

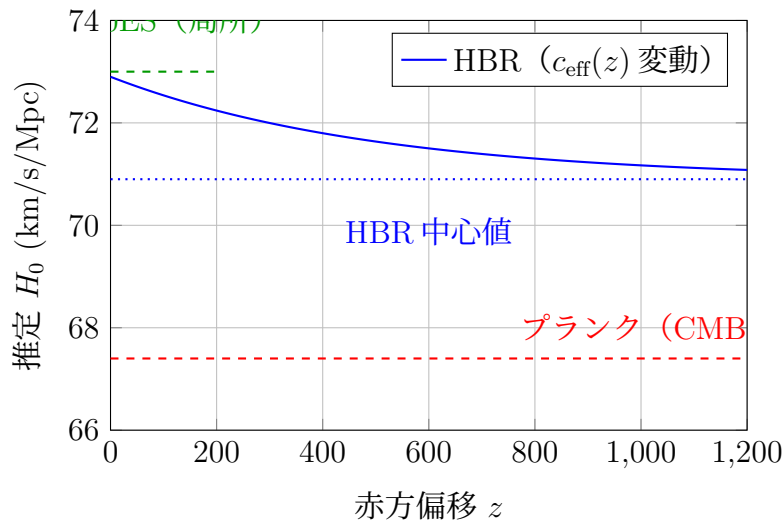


Figure 29: ハッブル張力の解決：HBR は W 軸幾何学による z に対する系統的变化を予測する

44 幾何学的膨張としての暗黒エネルギー

44.1 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 I 部、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

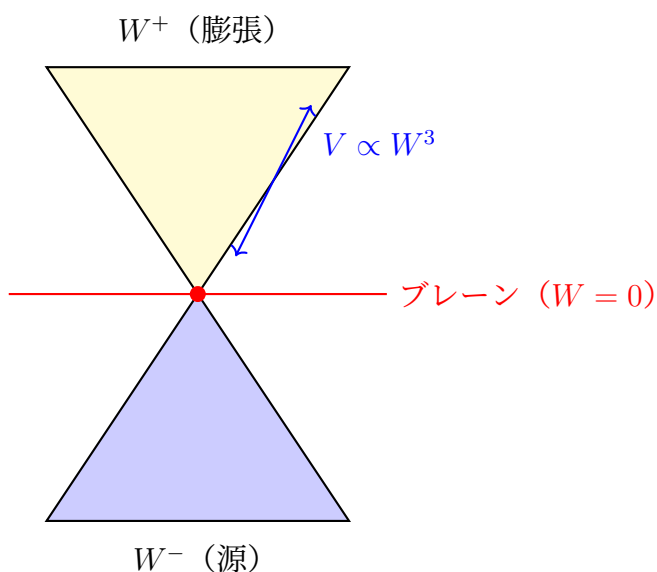
重要な幾何学的性質：

W^+ コーンは W^3 に従って体積的に膨張する：

$$V(W) \propto W^3 \quad (129)$$

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 30: 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

44.2 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 Λ 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:

$$\frac{d^2 a}{dt^2} \propto \frac{d^2 V(W)}{dW^2} \propto W \quad (130)$$

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。

45 永遠生成モデル

45.1 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 45.1 (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。

45.2 W 軸流による連続的創造

標準的見方:

$$t = 0 \xrightarrow{\text{ビッグバン}} t = 13.8 \text{ Gyr (現在)} \quad (131)$$

HBR の見方:

$$w \rightarrow -\infty \xleftarrow{\text{永遠の流れ}} w = 0 (\text{ブレーン、常に「今」}) \quad (132)$$

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

45.3 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

46 JWST 観測

46.1 「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。

$$\text{高い } z \not\approx \text{若い年齢} \quad (133)$$

代わりに：

$$\text{高い } z \Leftrightarrow \text{深い } w \quad (134)$$

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。

46.2 「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：

$$t_{\text{actual}}(w) > t_{\text{apparent}}(z) \quad (135)$$

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	Λ 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

47 誕生エネルギーと時間の矢

[V17 新セクション]

47.1 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。

47.2 誕生エネルギーの定義

定義 47.1 (誕生エネルギー). 誕生エネルギー (E_{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：

$$\varepsilon_{\text{birth}}(w) = \varepsilon_0 \cdot \exp\left(-\frac{w^2}{2\sigma_W^2}\right) \quad (136)$$

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。

47.3 幾何学的エントロピー

公理 47.2 (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：

$$S_W = k_B \ln \Omega_W(w) \quad (137)$$

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

47.4 第二法則の導出

エントロピー生成率：

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\varepsilon_{\text{birth}}}{T_W} \cdot \frac{dw}{dt} \cdot \frac{\partial \ln A}{\partial w} \geq 0 \quad (138)$$

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！

47.5 時間の矢

HBR の解決：

$$\text{過去} \rightarrow \text{未来} \equiv W^- \rightarrow W^+ \equiv \text{低 } S \rightarrow \text{高 } S \quad (139)$$

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。

48 反証可能性

48.1 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_{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_{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 ~ 10 – 100 倍上回るはずである。

49 観測的シグネチャー

49.1 宇宙機データ解析：ボイジャーとパイオニア異常

49.1.1 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。

49.1.2 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：

$$a_{\text{HBR}}(r) = \frac{\partial}{\partial r} [c^2 \ln N(r)] \quad (140)$$

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 β 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/s²。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。

49.2 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、ほぼニュートン的な回転曲線を生む
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_∞ 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 σ_z が W 軸張力効果をエンコード

49.3 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：

$$r_s^{\text{HBR}} = \int_0^{z_{\text{rec}}} \frac{c_s(z')}{H(z')} \cdot N(w(z')) dz' \quad (141)$$

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 ℓ) へシフト。 $\Delta\ell/\ell \sim 1-3\%$ の系統的シフト。

49.4 渦力学の重力波シグネチャー

49.4.1 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：

$$r_{\text{vortex}} \sim 10^3 \text{ m} \sim 0.1 r_{\text{ISCO}} \quad (142)$$

予測：渦斥力が以下を生む可能性：

1. $r \sim$ 数 r_{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。

50 実験室テスト

50.1 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：

$$g(h) = g_{\text{Newton}}(h) \cdot \left[1 + \frac{\partial \ln N}{\partial r} \cdot h \right] \quad (143)$$

予測： $\Delta g/g \sim 10^{-7}(h/1 \text{ km})$ 。

50.2 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：

$$F_{\text{HBR}} \sim -\alpha_W \frac{\hbar c}{d^4} A \quad (144)$$

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。

50.3 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}Ne vs ^{22}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）。

51 将来のミッションとサーベイ

51.1 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）。

51.2 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。

51.3 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：

$$F_z^{\text{tension}} = -\alpha_w z \quad (145)$$

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 ω_z を示すはずである。ガイアの速度精度 ~ 1 km/s で検出可能。

52 量子スケール予測

[V17 新セクション]

52.1 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：

$$\frac{\Delta g}{g} \approx \frac{a_{\text{HBR}}}{g_{\text{Newton}}} \cdot \chi \sim 10^{-11} \quad (146)$$

偏極中性子干渉法（改良 COW 実験）で検証可能。

53 HBR 対時空の泡

[V17 新セクション]

53.1 根本的な区別

Table 14: 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

53.2 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。

54 なぜ GR ではなく HBR か？—— 総括観測的対比

注 54.1 (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 §.3 を参照。

以下の表は第 18 部 §.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 15: 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 §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	$r = 0$ でクレッチマンスカラー発散；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 γ 線・硬 X 線トランジェント予測	Fermi GBM: GW150914 と同時に 2.9σ トランジェント [67]；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 ΔE_{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 71)；PPN γ, β 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 2.9σ Fermi GBM トランジェントはHBRブレー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 $|\delta\Psi_{\text{BNS}}| \approx 0.056 \text{ rad}$ 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47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 VIII

議論と含意

55 代替理論との比較

55.1 HBR 対暗黒物質 (Λ CDM)

Table 16: HBR 対 Λ CDM

側面	Λ 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_∞, 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 (5σ 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

55.2 HBR 対修正重力 (MOND/TeVS)

Table 17: 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。

55.3 HBR 対余剰次元 (カルツァ-クライン、弦理論)

Table 18: 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)。

55.4 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

56 哲学的含意

56.1 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 56.1 (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。

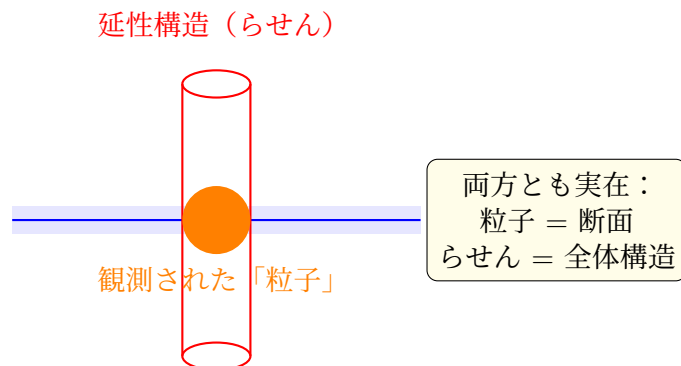


Figure 31: 存在論的同等性。2D 「粒子」と延性 3D 構造は見かけ対現実ではなく、統一の実体の相補的視点である。

56.2 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**。

56.3 観測の役割：創造ではなく限定

公理 56.2 (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

56.4 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。

57 未解決問題と課題

57.1 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：

$$ds^2 = N^2(w)c^2d\tau^2 - e^{2\alpha(w)}(dx^2 + dy^2 + dz^2) - dw^2 \quad (147)$$

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

57.2 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

57.3 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 λ などの可能性がある。

57.4 原始核合成 (BBN)

HBR が宇宙論的に実行可能であるには、微調整なしで BBN を再現する必要がある。標準 BBN からの偏差は $\lesssim 10\%$ でなければならない。

57.5 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。

58 将来の方向性

58.1 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

$$S = \int d^4x dw \sqrt{-g^{(5)}} \left[\frac{R^{(5)}}{16\pi G^{(5)}} + \mathcal{L}_{\text{matter}} \right] \quad (148)$$

3. 対称性解析、特異点定理

58.2 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

58.3 実験・観測プログラム

58.3.1 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

58.3.2 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

58.3.3 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）

59 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

60 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 IX

結論

61 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。

61.1 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：

$$\mathbf{F}_{\text{total}} = \underbrace{-\frac{Gm_1m_2}{r^2}\hat{\mathbf{r}}}_{\text{重力}} + \underbrace{\frac{\kappa S^2}{r^3}\hat{\mathbf{r}}}_{\text{渦斥力}} + \underbrace{-\alpha_w L\hat{\mathbf{L}}}_{\text{W 軸張力}} \quad (149)$$

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）

61.2 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 19: 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%	100%
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	0.02
カオス低減	—	47%	87%
エネルギー誤差（最終）	$> 10^{-1}$	10^{-8}	10^{-12}

61.3 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 20: 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° 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： $\oint p_W \cdot dq_W = nh$

61.4 暗黒物質の解消

スケールレンズ機構：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_\infty^2 \tanh\left(\frac{r}{r_g}\right) \quad (150)$$

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 ± 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。

61.5 宇宙論の統一

61.5.1 ハッブル定数の導出 (第 VI 部)

$$H_0 = \frac{c}{R_{\text{univ}}} = \frac{c}{c \cdot t_0} = \frac{1}{t_0} \approx 70.9 \text{ km/s/Mpc} \quad (151)$$

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。

61.5.2 JWST 異常の説明 (第 VI 部)

- 巨大な初期ブラックホール： $c_{\text{eff}}(z) > c_0$ が $z > 6$ でより多くの宇宙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

62 HBR パラダイム

62.1 核心原理

原理 62.1 (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 62.2 (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 62.3 (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。

62.2 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 21: 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_{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)

62.3 前進への道

62.3.1 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

62.3.2 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

62.3.3 観測的検証

1. 拡張 SPARC 解析：175 銀河すべて+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

63 結びの言葉

63.1 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）

63.2 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。

63.3 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
 用いているからだと示唆する。

63.4 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

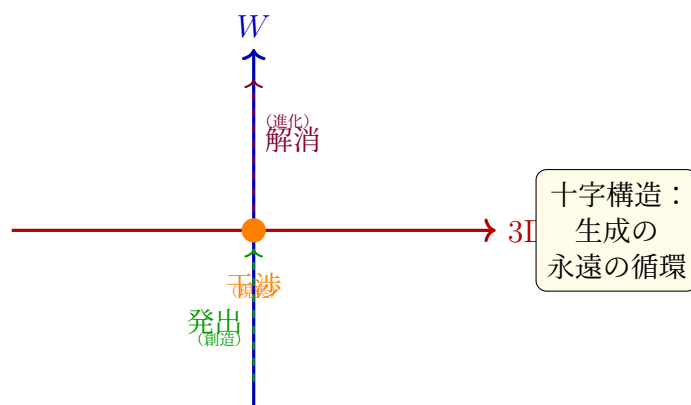


Figure 32: エネルギーがバルク (W^-) から流れ、ブレーン上の干渉を通じて現実の断面を生成し、宇宙膨張 (W^+) へと推移するという仮説的サイクル。

63.5 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。

63.6 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 X

現行コライダーデータにおける実験的シグネチャ

64 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

$$F(r) = E_i E_j \left(-\frac{A}{r^2} + \frac{2C_{\text{eff}}}{r^3} \right) \hat{r}, \quad (152)$$

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_{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

$$\Phi(r) = \sqrt{1 + \frac{2V(r)}{E_i c^2}} \quad (153)$$

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。

64.1 異常 1： $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ 崩壊における角度分布の張力

64.1.1 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 [? ?]。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 5σ 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。

64.1.2 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、第 IV 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：

$$\mathcal{O}_{3D}(x, y, z) = \Phi_{4D}(x, y, z, w) \Big|_{w=w_{\text{eff}}}. \quad (154)$$

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 δw 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：

$$P_5^{\text{HBR}}(q^2) = P_5^{\text{SM}}(q^2) \cdot \frac{\Phi(r_{\text{eff}})}{\Phi_0} + \Delta P_5'(\delta w, q^2), \quad (155)$$

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。

64.1.3 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** (δw 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 δw 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。

64.2 異常 2：バリオン崩壊における CP 対称性の破れ

64.2.1 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 [?]。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。

64.2.2 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：

$$\vec{r}(w) = \left(R \cos \left(\frac{2\pi w}{\lambda_w} \right), R \sin \left(\frac{2\pi w}{\lambda_w} \right), 0 \right), \quad w \in \mathbb{R}, \quad (156)$$

ここで R はらせん半径、 λ_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、予言されてはいたものの、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。

64.2.3 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**トポロジー構造**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（ λ_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。

64.3 異常 3：ミューオン磁気モーメント

64.3.1 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 [?]：

$$a_\mu^{\text{exp}} = \frac{g-2}{2} = 116\,592\,070.5(11.4)(9.1)(2.1) \times 10^{-11}, \quad (157)$$

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 [?] 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 [?] は修正された予言を生む：

$$a_\mu^{\text{SM}(2025)} = 116\,592\,033(62) \times 10^{-11}, \quad (158)$$

これは 2020 年予言と 3σ 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。

64.3.2 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_μ 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_μ への HBR 補正は次の形をとる：

$$a_\mu^{\text{HBR}} = a_\mu^{\text{SM}} + \delta a_\mu [\Phi(r_{\text{HVP}})], \quad (159)$$

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。

64.3.3 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：

$$\delta a_\ell \propto \frac{1}{\Phi(R_\ell)}, \quad R_\ell \propto \frac{1}{m_\ell}, \quad (160)$$

ここで R_ℓ はレプトン ℓ 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 、 Φ は単位元により近い）。これは現在の a_e^{exp} と a_e^{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_τ ）。ただしタウの短い寿命のため現在は測定不能である。

64.4 異常 4：4.8 TeV における ATLAS 異常検出

64.4.1 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。

64.4.2 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_{eff}/r^3 項は離間距離

$$r < r_C \equiv \frac{2C_{\text{eff}}}{A} \quad (161)$$

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：

$$r_{\text{eff}} \sim \frac{\hbar c}{\sqrt{s_{\text{parton}}}}. \quad (162)$$

4.8 TeV の不変質量は $r_{\text{eff}} \sim 4 \times 10^{-20}$ m に対応し、 C_{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。

64.4.3 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。

64.5 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。

64.6 コライダーデータからの強重力場制約

実効結合 C_{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：

$$C_{\text{eff}} \sim A \cdot r_{\text{threshold}} \sim A \cdot \frac{\hbar c}{\sqrt{s_{\text{threshold}}}}, \quad (163)$$

ここで $\sqrt{s_{\text{threshold}}} \approx 4.8$ 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 $\sim 10^{-20}$ m から銀河スケールの $\sim 10^{17}$ 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 XI

4次元純粋空間における物理学の幾何学的基礎

65 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 XII

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 W 節～第 75 節）では、すべての力学パラメーター——重力結合 A 、歳差運動補正 C 、特異点回避 B 、渦相互作用 κ 、そして W 軸張力 α ——が、単一の幾何学量：ブレーンの厚さ Δw 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 76 節～第 85 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 (Δw) 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

66 はじめに

66.1 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 ブレーンが 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)、 κ (渦結合)、 α (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。

66.2 結果の要約

我々は、体積ブレー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——ブレーンの厚さ Δw ——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)	(164)
$C/A = I_2/I_1 \approx 0.102$	(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)	

66.3 論文の構成

第 I 部では、4D 空間のワー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 部では、らせん渦の相互インダクタンスから κ を導出する。第 III 部では、 α が独立したパラメータではないことを示す。第 IV 部では、新しい予測を提示し、その含意を議論する。

67 4D スレッド幾何学からの V18 ポテンシャル

67.1 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 Δw 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：

$$g_{ww}(w) = \left(1 + \frac{|w|}{w_0}\right)^2 \quad (165)$$

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。

67.2 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：

$$\oint \mathbf{p}_W \cdot d\mathbf{q}_W = nh, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (166)$$

これは離散的なモード形状をもたらす：

$$\psi_n(w) = \cos(\kappa_n w) \cdot \exp\left(-\frac{w^2}{2\sigma^2}\right), \quad \kappa_n = \frac{n\pi}{\Delta w} \quad (167)$$

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。

67.3 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、 ρ_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：

$$G_{4D}(\mathbf{R}) = \frac{1}{4\pi^2 |\mathbf{R}|^2}, \quad (168)$$

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：

$$E_0(r) = -\Gamma \int_0^{L_1} dw_1 \int_0^{L_2} dw_2 \frac{1}{r^2 + (w_1 - w_2)^2} \quad (169)$$

ここで Γ 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：

$$E_0(r) = -\Gamma \left[\frac{2L}{r} \arctan \frac{L}{r} - \ln \left(1 + \frac{L^2}{r^2} \right) \right] \quad (170)$$

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：

$$E_0(r) \approx -\Gamma \left[\frac{\pi L}{r} - 2 - 2 \ln \frac{L}{r} + \mathcal{O}\left(\frac{r^2}{L^2}\right) \right] \quad (171)$$

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：

$$F_0(r) = -\frac{dE_0}{dr} \approx \frac{\Gamma\pi}{2\rho_0^2} \frac{m_1 m_2}{r^2} \equiv G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (172)$$

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。

67.4 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 $\psi_n(w)$ (167) 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になる：

$$\mathbf{x}(w) = (R_0 \cos(k_n w), R_0 \sin(k_n w), 0, w) \quad (173)$$

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になる：

$$V_{\text{hel}}(r) \propto \frac{K_1(\kappa r)}{r} \quad (174)$$

ここで K_1 は第 2 種変形ベッセル関数である。近接場領域 ($\kappa r \ll 1$) では $K_1(\kappa r) \approx 1/(\kappa r)$ となり、以下を与える：

$$V_{\text{hel}}(r) \sim \frac{1}{\kappa r^2} \quad (175)$$

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 補正項の起源である。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。

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：

$$V(R_{4D}) = -\frac{A}{R_{4D}} + \frac{2C_{\text{eff}}}{R_{4D}^2} \quad (176)$$

ここで係数は、モード構造とブレン幾何学にわたる重なり積分によって決定される：

$$A = \frac{\Gamma\pi L_1 L_2}{2} \quad (\text{スレッド-スレッド相互作用、支配的}) \quad (177)$$

$$C = f\left(\frac{\Delta w}{w_0}\right) \cdot A \quad (\text{らせん + 計量}) \quad (178)$$

$$B = g(\kappa \Delta w) \cdot A \quad (\text{コア + 高次モード}) \quad (179)$$

比率 C/A は、 Δw 、 w_0 、 κ 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 Δw によって決定される。

注 67.1 (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。

67.5 数値評価

命題 67.2 (ブレーン幾何学からのパラメータ比。). ブレーンの厚さ Δw とバイコンスケール 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：

$$\frac{C}{A} = f\left(\frac{\Delta w}{w_0}\right) = 0.102 \pm 0.002, \quad \frac{B}{A} = g(\kappa \Delta w) = 0.006 \pm 0.001 \quad (180)$$

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 Δw へと還元する。

注 67.3. 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。

68 $B_{\text{eff}} = B$ の統一

68.1 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：

$$V(R_{4D}) = -\frac{A}{R_{4D}} + \frac{C}{2R_{4D}^2} - \frac{B}{3R_{4D}^3}, \quad R_{4D} = \sqrt{r^2 + \Delta w^2} \quad (181)$$

68.2 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 22: $B_{\text{eff}} = B$ 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_{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 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 74 節）。

68.3 幾何学的成分と位相的成分

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2つの $1/R_{4D}^4$ 項を含んでいる：

$$F = \left(-\frac{A}{R_{4D}^2} + \frac{C}{R_{4D}^3} - \frac{B + \kappa S_i S_j}{R_{4D}^4} \right) \hat{R}_{4D} \quad (182)$$

- C_{eff}/R_{4D}^3 : 幾何学的 — ブレーンの厚さから生じ、すべてのペアに等しく作用し、符号は固定されている（反発的）
- $\kappa S_i S_j / R_{4D}^4$: 位相的 — らせんの巻きから生じ、スピンの依存（±）し、カオス低減を駆動する

両者とも 4D 距離 R_{4D} を通じて作用する（統一されたメカニズム）が、 κ は B に吸収できない別個の物理的自由度（スピンの整列）をエンコードしているのである。

第一原理からの渦結合

69 κ の導出

69.1 V16 の κ の問題点

V16 は渦結合定数を次のように定義した：

$$\kappa_{V16} = \frac{2\rho_{\text{bulk}}}{\hbar^2} \quad (183)$$

ここで ρ_{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。

69.2 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、各粒子は体積ブレー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：

$$\mathbf{r}_i(s) = (R \cos(k_i s), R \sin(k_i s), 0, s), \quad k_i = \frac{n_i \pi}{\Delta w} \quad (184)$$

ここで量子化された循環は $\Gamma_i = 2\pi n_i$ であり、ブレーン閉じ込めは $|s| < \Delta w/2$ である。

69.3 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：

$$E(d) = -\frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{4\pi^2} \iint \frac{\mathbf{t}_1(s_1) \cdot \mathbf{t}_2(s_2)}{|\mathbf{r}_1(s_1) - \mathbf{r}_2(s_2)|^2} ds_1 ds_2 \quad (185)$$

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：

$$E(d) = -\frac{n_1 n_2}{d} \arctan\left(\frac{\Delta w}{2d}\right) \quad (186)$$

69.4 遠方場極限と力の法則

定理 69.1 (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：

$$E(d) \approx -\frac{n_1 n_2 \Delta w}{2d^2} \quad (187)$$

$$F(d) \approx \frac{n_1 n_2 \Delta w}{d^3} \quad (188)$$

スピンと巻き数の関係 $S = n\hbar/2$ を代入すると：

$$F = \frac{4\Delta w}{\hbar^2} \cdot \frac{S_1 S_2}{d^3} \quad (189)$$

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 κ

$$\kappa = \frac{4\Delta w}{\hbar^2} \quad (190)$$

V16 の未定義の ρ_{bulk} は今や $\rho_{\text{bulk}} = 2\Delta w$ と特定される。

注 69.2 (次元の整合性). 全体を通じて使用される自然単位系 ($\hbar = 1$, Δw を単位とした長さ) では、 κ 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。

69.5 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 23: 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%

70 らせんモード理論からの新しい物理学

70.1 力法則のクロスオーバー

式 (186) からの完全な力は、2つのレジーム間のクロスオーバーを示す：

$$F(d) \sim \begin{cases} \frac{\pi}{2d^2} & d \ll \Delta w \quad (\text{近接場}) \\ \frac{\Delta w}{d^3} & d \gg \Delta w \quad (\text{V16 レジーム}) \end{cases} \quad (191)$$

予測: 検証可能な予測 1: 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、渦の反発力は $1/r^3$ (V16) からより強い $1/r^2$ 法則へと遷移する。クロスオーバーは $d^* \approx \Delta w$ で発生し、ブレーンの厚さの直接的なプローブを提供する。

70.2 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：

$$\kappa(n_1, n_2) = \kappa_{\text{base}} \times \frac{I_W(n_1, n_2)}{I_W(1, 1)}, \quad I_W(n_1, n_2) = \int \psi_{n_1}(w) \psi_{n_2}(w) \sqrt{g_{ww}} dw \quad (192)$$

Table 24: 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。

70.3 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

71 α は独立したパラメータではない

71.1 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：

$$\mathbf{F}_{\text{tension}}^{(i)} = -\alpha \cdot L_w^{(i)} \cdot \hat{\mathbf{r}}_i \quad (193)$$

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。

71.2 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 (181) は W 方向の復元力を提供する：

$$F_w = -\left.\frac{\partial V}{\partial w}\right|_{w=0} = -\left.\frac{1}{r}\frac{dV}{dR}\right|_{R=r} \cdot w \equiv -\alpha(r) \cdot w \quad (194)$$

定理 71.1 (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：

$$\alpha(r) \equiv \omega_W^2(r) = \frac{A}{r^3} - \frac{C}{r^4} + \frac{B}{r^5} \quad (195)$$

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：

$$\left.\frac{\partial^2 V}{\partial w^2}\right|_{w=0} = \left.\frac{dV}{dR}\right|_{R=r} \cdot \frac{1}{r} = \frac{A}{r^3} - \frac{C}{r^4} + \frac{B}{r^5} \quad \square$$

71.3 定理としてのスケール-渦等価性

系 71.2 (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：

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\omega_W^2(r)}{\omega_{\text{orbital}}^2(r)} = 1 \quad (196)$$

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、大きな半径で漸近的に成り立つ、4D ポテンシャル構造の**派生した帰結**として現れる。

Table 25: $\omega_W^2/\omega_{\text{orbital}}^2$ 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
$\rightarrow \infty$	$\rightarrow 1.000$

71.4 なぜ V16 の定数 α 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 α 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

72 完全な 1 パラメータ理論

72.1 パラメータ削減の歴史

Table 26: 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, κ, α)	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 (Δw)	水星の C/A 比	らせんモード

72.2 導出チェーン

ブレーンの厚さ Δw 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_{eff} から導出)

72.3 比較表

Table 27: 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	$A \cdot I_3/I_1 = 0.006 A$
κ (渦)	10^{-2} (フィッティング)	—	$4\Delta w/\hbar^2$
α (張力)	V_∞^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	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 (Δw)

73 新しい予測

73.1 $d \sim \Delta w$ における力法則のクロスオーバー

$d^* \approx \Delta w$ における $F \sim 1/r^2$ (近接場) から $F \sim 1/r^3$ (遠方場) への遷移は、ブレーンの厚さの直接的な測定を提供する。精密な重力実験や中性子散乱において、近距離での $1/r^3$ 法則からの逸脱は体積ブレーンのシグネチャーとなるだろう。

73.2 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。

73.3 バリオン・タリー・フィッシャー関係 (ヒューリスティック)

α 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：

$$V_\infty^2 = \alpha_{\text{brane}} \cdot \frac{M}{\rho_0} \implies M = \frac{\rho_0^2}{\alpha_{\text{brane}}^2} V_\infty^4 \quad (197)$$

この次元的議論は、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。

73.4 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 71.2) 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。

74 議論

74.1 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、 Δw のみから $\alpha(r)$ 、 κ 、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。

74.2 Δw は何を表すか

ブレーンの厚さ Δw 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、 Δw 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、 Δw 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 74.1. Δw 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 Δw 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。

74.3 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。

74.4 未解決の問題

1. Δw 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. 高次補正：近接場展開式 (176) は $1/r^3$ で打ち切られている。 $1/r^4$ およびそれ以上の項の影響は何か？
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？

75 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 Δw 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 67 節）。
2. **相互インダクタンスからの κ** ：渦結合定数は $\kappa = 4\Delta w/\hbar^2$ であり、V16 の未定義の ρ_{bulk} を排除する（第 69 節）。
3. **派生量としての α** ：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 71 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 71.2）。

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 Δw 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

76 コア原理：垂直の束縛と水平の自由度

76.1 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 76.1 (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。

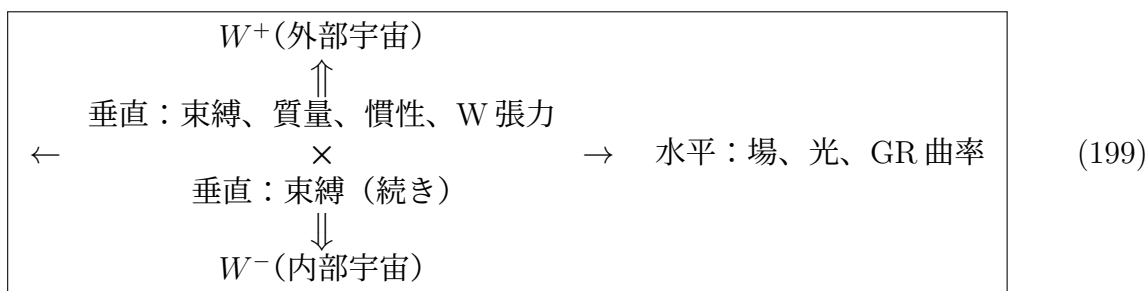
任意の構成の全エネルギーは次のように分解される：

$$E_{\text{total}} = E_{\parallel} + E_{\perp} \quad (198)$$

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。

76.2 十字構造

垂直-水平の二重性は HBR の十字構造を定義する：



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。

76.3 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

$$V(R_{4D}) = -\frac{A}{R_{4D}} + \frac{C}{2R_{4D}^2} - \frac{B}{3R_{4D}^3}, \quad R_{4D} = \sqrt{r^2 + w^2}, \quad (181)$$

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。

77 ワースレッド：垂直軸

77.1 定義

定義 77.1 (ワースレッド). ワースレッドとは、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 67.2 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。

ワースレッドは仮定された実体ではなく、第 67.2 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 Δw 内に閉じ込められている。

77.2 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 28: 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 Δw 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 81 節を参照）。

77.3 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 80 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 80.2 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。

78 重力の分解

78.1 「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。

78.2 垂直効果：W 軸張力

統一ポテンシャル (181) から、力の W 軸成分は以下ようになる：

$$F_w = -\frac{\partial V}{\partial w} \Big|_{w \rightarrow 0} \quad (200)$$

これは第 71 節 (定理 71.1) 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：

$$F_{\text{vertical}} = \frac{A L_{w1} L_{w2}}{r^2} = \frac{\alpha}{\rho_0^2} \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (201)$$

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。

78.3 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：

$$F_{\text{horizontal}} = -\frac{\partial V}{\partial r} \Big|_{w=0} = -\frac{A}{r^2} + \frac{C}{r^3} - \frac{B}{r^4} \quad (202)$$

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 78.1 (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。

78.4 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：

$$\text{水平： } F_r = -\frac{\partial V}{\partial r} \quad (203)$$

$$\text{垂直： } F_w = -\frac{\partial V}{\partial w} \quad (204)$$

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。

79 光：水平に自由なエネルギー

79.1 存在論的定義

定義 79.1 (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。

79.2 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：

$$E_{\parallel} \xrightarrow{\text{スレッド切断}} E_{\perp} = mc^2 \quad (205)$$

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 78 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。

80 W 軸幾何学からの慣性

80.1 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 まで延びるワープ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 80.1 (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、そのワープ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：

$$m_{\text{inertial}} \propto L_w \propto m_{\text{gravitational}} \quad (206)$$

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。

80.2 等価原理の幾何学的解釈

定理 80.2 (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：

$$m_{\text{inertial}} \propto m_{\text{gravitational}} \propto \rho_0 L_w \quad (207)$$

両方の量は同じ幾何学的パラメータ、すなわちワープスレッドの深さ 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 201）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 80.1）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 80.3. 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、それはワープ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。

81 質量生成の臨界条件

81.1 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プ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：

$$E \geq E_{\text{crit}} = \rho_0 \cdot \Delta w \cdot c^2 \quad (208)$$

2. 共鳴条件 (W 軸のボーア・ゾンマーフェルト量子化) :

$$\oint \mathbf{p}_W \cdot d\mathbf{q}_W = nh, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (209)$$

これは式 (166) 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：

$$n_{\text{winding}} \in \{1/2, 1, 3/2, \dots\} \quad (210)$$

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。

81.2 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：

$$m_n \sim \frac{n\hbar}{c \Delta w} \quad (211)$$

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。

82 深遠な W 軸の井戸としてのブラックホール

82.1 再解釈

HBR において、従来ブラックホールと呼ばれているものは、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：

定義 82.1 (HBR におけるブラックホールのアナログ). 「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。

82.2 古典的病理の解決

- **特異点なし**：井戸は Δw 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。

83 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）

もしブラックホールアナログの 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 Δt_{echo} はバイコーン計量を通じて Δw 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_ν / m_e は最小安定スレッド深さを制約し、 Δw の独立した推定を提供する。

84 議論

84.1 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 Δw 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。

84.2 既存理論との関係

Table 29: 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	—	スレッド結合解除式

84.3 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ース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. Δw 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。

85 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 Δw 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 Δw 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.

A 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：

$$I_n = \int_{-\infty}^{\infty} \cos^2\left(\frac{n\pi w}{\Delta w}\right) \exp\left(-\frac{w^2}{\sigma^2}\right) \left(1 + \frac{|w|}{w_0}\right) dw \quad (212)$$

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。

B 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：

$$E(d) = -n_1 n_2 \int_{-\Delta w/2}^{\Delta w/2} \frac{\langle \mathbf{t}_1 \cdot \mathbf{t}_2 \rangle}{d^2 + \Delta s^2} e^{-\Delta s^2/(2(2\sigma)^2)} d(\Delta s) \quad (213)$$

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)。

C 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：

$$\frac{\partial V}{\partial w} = \frac{dV}{dR} \cdot \frac{w}{R} \quad (214)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial w^2} = \frac{d^2 V}{dR^2} \cdot \frac{w^2}{R^2} + \frac{dV}{dR} \cdot \frac{r^2}{R^3} \quad (215)$$

$w = 0$ ($R = r$) において第一項は消失し：

$$\omega_W^2(r) = \left. \frac{\partial^2 V}{\partial w^2} \right|_{w=0} = \frac{1}{r} \left(\frac{A}{r^2} - \frac{C}{r^3} + \frac{B}{r^4} \right) = \frac{A}{r^3} \left(1 - \frac{C}{Ar} + \frac{B}{Ar^2} \right) \quad (216)$$

$r \gg C/A \approx 0.1$ について、これは $\omega_W^2 \approx A/r^3 = \omega_{\text{Kepler}}^2$ に帰着する。

Part XIII

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^- 次元ゲートで幾何学的に流入速度 c へ変換された結果として理解される。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、 c の運動学的基盤のみが明示化される。「経験的流入率としての c 」は「ブレーン等速並進のゲート変換出力としての c 」と読み替える。

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 θ 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

D 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。

D.1 本論文が確立すること

1. ローレンツ因子 γ 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 F.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 F.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 F.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 F.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 Q 節)。

注 D.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。

D.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

E 定義

定義 E.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 θ 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：

$$\mathcal{R} \equiv \frac{\text{局所プロセスレート}}{\text{自由空間・傾きゼロのプロセスレート}} \quad (217)$$

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 E.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 E.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：

$$\Phi(r) = \sqrt{1 + \frac{2V(r)}{E_i c_{\text{obs}}^2}} \quad (218)$$

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 E.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 θ は次のように定義される：

$$\cos \theta \equiv \frac{dw/ds}{|d\mathbf{X}/ds|} \quad (219)$$

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 E.5 (幾何学的速度パラメータ). 無次元量：

$$\beta \equiv \sin \theta \quad (220)$$

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 β を $v = \beta \cdot \alpha_0$ として翻訳する。ここで α_0 はブレーンの生成レート——彼らが「 c 」と呼ぶ定数——である。

F 中心定理

定理 F.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 θ だけ傾いている実体は、以下のプロセスレート比を持つ：

$$\mathcal{R}_{\text{kin}}(\theta) = \cos \theta = \sqrt{1 - \beta^2} \quad (221)$$

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 K.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 L 節を参照)。

定理 F.2 (統一プロセスレート方程式). 位置 r にあり軌道の傾き θ 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：

$$\mathcal{R}(r, \theta) = \Phi(r) \cos \theta \quad (222)$$

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 F.3 (弱場・低傾きの極限). $GM/(rc_{\text{obs}}^2)$ および β^2 について先頭項まで展開すると：

$$\mathcal{R}^2 \approx 1 - \frac{r_s}{r} - \beta^2 = 1 - \frac{2GM}{rc_{\text{obs}}^2} - \frac{v^2}{c_{\text{obs}}^2} \quad (223)$$

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 F.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：

$$c_{\text{obs}}^2 d\tau_{\text{obs}}^2 = c_{\text{obs}}^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (224)$$

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 F.5 (c の起源). 定数 c_{obs} は、観測者の単位系で表現されたブレン生成レート α_0 である。それは無次元の幾何学的比率 $\beta = \sin \theta$ を観測者の速度単位に変換する：

$$v_{\text{obs}} = \beta \cdot c_{\text{obs}} \quad (225)$$

c_{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 $\beta = \sin \theta \leq 1$ 、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

G 質量エネルギーによる場のパターンの変化

G.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。

G.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：

$$\Phi(r) = \sqrt{1 + \frac{2V(r)}{E_i c_{\text{obs}}^2}} \quad (226)$$

ここで

$$V(r) = E_i E_j \left(-\frac{A}{r} + \frac{C}{2r^2} - \frac{B}{3r^3} \right) \quad (227)$$

空間的干渉のみによるプロセスレート比は：

$$\mathcal{R}_{\text{grav}}(r) = \Phi(r) \quad (228)$$

「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。

H 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。

H.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：

$$E(r) = -\Gamma \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \frac{dw_1 dw_2}{r^2 + (w_1 - w_2)^2} \quad (229)$$

等しい深さのストリング ($L_1 = L_2 = L$) の場合、解析解は以下のようにになる：

$$E(r) = -\Gamma \left[\frac{2L}{r} \arctan \frac{L}{r} - \ln \left(1 + \frac{L^2}{r^2} \right) \right] \quad (230)$$

H.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：

$$E(r) \approx -\Gamma \left[\frac{\pi L}{r} - 2 - 2 \ln \frac{L}{r} + \mathcal{O}(r^2/L^2) \right] \quad (231)$$

力 $F = -dE/dr$ は以下を与える：

$$F(r) = \frac{\Gamma \pi L}{r^2} = \frac{\Gamma \pi}{2\rho_0^2} \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (232)$$

特定すると：

$$\boxed{G = \frac{\Gamma \pi}{2\rho_0^2}} \quad (233)$$

注 H.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。

H.3 張力 - 干渉の分解

厳密解 (230) は自然に次のように分離される：

$$E_{\text{tension}}(r) = -\Gamma \frac{2L}{r} \arctan \frac{L}{r} \quad (234)$$

$$E_{\text{interference}}(r) = +\Gamma \ln \left(1 + \frac{L^2}{r^2} \right) \quad (235)$$

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。

H.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 (229) 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：

$$E_{\text{helical}}(r) \propto \frac{K_1(\kappa r)}{r} \xrightarrow{\kappa r \ll 1} \frac{1}{\kappa r^2} \quad (236)$$

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。

I セットアップ：4D ユークリッド空間における曲線

I.1 存在論的前提

4D 純粋空間はユークリッド的である：

$$ds_{4D}^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + dw^2 \quad (237)$$

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。

I.2 軌道のパラメータ化

実体は 4D 空間に曲線を描く：

$$\mathbf{X}(s) = (\mathbf{x}(s), w(s)) \quad (238)$$

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：

$$\left| \frac{d\mathbf{X}}{ds} \right|^2 = \left| \frac{d\mathbf{x}}{ds} \right|^2 + \left(\frac{dw}{ds} \right)^2 = 1 \quad (239)$$

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）。

J 傾き角

定義 J.1 (傾き角、再言). 軌道の傾き角 θ は次のように定義される：

$$\cos \theta \equiv \frac{dw}{ds} \quad (\text{W 軸成分}) \quad (240)$$

$$\sin \theta \equiv \left| \frac{d\mathbf{x}}{ds} \right| \quad (\text{3D 成分}) \quad (241)$$

単位接線の条件 (239) は以下になる：

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad (242)$$

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 33: 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 θ 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。

K 軌道幾何学からのプロセスレート

K.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：

$$\text{プロセスレート} \propto \frac{dw}{ds} = \cos \theta \quad (243)$$

K.2 公理 K.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 θ 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変化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 $\hat{T} = (dx/ds, dw/ds)$ 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：

$$\hat{T} \cdot \hat{W} = \frac{dw}{ds} = \cos \theta \quad (244)$$

(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 K.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 K.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 F.5）であり、出発点ではない。

K.3 定理 F.1 の証明

Proof. 定義 E.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 θ を持つ実体について： $\text{rate} \propto \cos \theta$ 。

したがって：

$$\mathcal{R}_{\text{kin}}(\theta) = \frac{\cos \theta}{1} = \cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = \sqrt{1 - \beta^2} \quad (245)$$

ここで $\beta \equiv \sin \theta$ である。

ブレン観測者が $\beta = v/c_{\text{obs}}$ と同定するとき：

$$\mathcal{R}_{\text{kin}} = \sqrt{1 - v^2/c_{\text{obs}}^2} = \frac{1}{\gamma} \quad (246)$$

これはローレンツ時間遅延因子である。 □

K.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 L 節を参照）。
4. プロセスレート $\propto W$ 成分（公理 K.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。

L 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？

L.1 懸念

定理 F.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 K.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あればならない。

L.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：

$$|v_{4D}|^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 + v_w^2 = \text{const.} \quad (247)$$

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。

L.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 L.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る。

⇒ **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。

L.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 Q 節）。そこでは、重力係数 $\Phi(r)$ が GR から乖離する。

M c の出現

M.1 命題 F.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_{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：

$$\alpha_0 \equiv \left. \frac{\Delta w}{\Delta t_{\text{obs}}} \right|_{\theta=0} \quad (248)$$

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 θ を持つ実体は、観測者の単位で以下の 3D 変位速度を持つ：

$$v_{\text{obs}} = \alpha_0 \sin \theta = \alpha_0 \beta \quad (249)$$

恒等的に $\sin \theta \leq 1$ であるため：

$$v_{\text{obs}} \leq \alpha_0 \quad (250)$$

観測者は $\alpha_0 = c_{\text{obs}}$ と同一視し、これを「光速」と呼ぶ。 \square

M.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： $\theta = \pi/2$ 。

$$\text{光子：} \theta = \frac{\pi}{2}, \quad \beta = 1, \quad \mathcal{R} = \cos \frac{\pi}{2} = 0 \quad (251)$$

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

N 統一方程式の証明

N.1 2 つの効果の独立性

空間的干渉 (Φ) 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（ θ 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（ Φ を変えること）は実体の 4D 軌道の方向を変えない。

N.2 定理 F.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 F.1)。

これらは乗法的に構成（合成）される：

$$\text{実効的 W 方向進行} = \Phi(r) \cdot \cos \theta \cdot (\text{自由空間} \cdot \text{傾きゼロの速度}) \quad (252)$$

したがって：

$$\mathcal{R}(r, \theta) = \frac{\text{局所レート}}{\text{基準レート}} = \Phi(r) \cos \theta \quad (253)$$

□

O 一般相対性理論との対応

O.1 系 F.3 の証明

Proof.

$$\begin{aligned} \mathcal{R}^2 &= \Phi(r)^2 \cos^2 \theta \\ &= \left(1 + \frac{2V(r)}{E_i c_{\text{obs}}^2}\right) (1 - \beta^2) \\ &\approx \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) (1 - \beta^2) \quad (\text{弱場} : V \approx -GM/r) \\ &\approx 1 - \frac{r_s}{r} - \beta^2 + \frac{r_s \beta^2}{r} \\ &\approx 1 - \frac{r_s}{r} - \frac{v^2}{c_{\text{obs}}^2} \quad (\text{交差項を落とす}) \end{aligned} \quad (254)$$

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：

$$\frac{d\tau^2}{dt^2} = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) - \frac{v^2}{c^2} \quad (255)$$

このオーダーで厳密な対応を確認した。

O.2 系 F.4 の証明

Proof. 平坦な空間 ($V = 0, \Phi = 1$) において：

$$\mathcal{R}^2 = \cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta = 1 - \beta^2 \quad (256)$$

ブレー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：

$$\begin{aligned} c_{\text{obs}}^2 d\tau_{\text{obs}}^2 &= c_{\text{obs}}^2 (1 - v^2/c_{\text{obs}}^2) dt^2 \\ &= c_{\text{obs}}^2 dt^2 - v^2 dt^2 \\ &= c_{\text{obs}}^2 dt^2 - d\mathbf{x}^2 \end{aligned} \quad (257)$$

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。□

P 定量的検証

P.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、 $\theta = 0$):

$$\frac{\Delta \mathcal{R}}{\mathcal{R}} = \frac{\Phi(R_{\oplus} + \Delta h) - \Phi(R_{\oplus})}{\Phi(R_{\oplus})} \approx \frac{g \Delta h}{c_{\text{obs}}^2} \quad (258)$$

Table 30: パウンド・レブカの比較

	HBR の予測	観測値
$\Delta \mathcal{R}/\mathcal{R}$	2.46×10^{-15}	$(2.57 \pm 0.26) \times 10^{-15}$
Pull (解離度)	$ 2.57 - 2.46 /0.26 = 0.42\sigma$	

0.42σ 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。

P.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：

$$\Delta \tau = \oint [\Phi(r(t)) \cos \theta(t) - \Phi(R_{\oplus}) \cos \theta_{\text{ground}}] ds \quad (259)$$

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 P.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。

Table 31: 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 ± 23	-40 ± 23	-59 ± 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 32: 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$	

P.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：

Q 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。

Q.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：

$$\Phi_{\text{GR}}(r) = \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}} \quad (260)$$

$r = r_s = 2GM/c^2$ 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。

Q.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：

$$\Phi_{\text{HBR}}(r) = \sqrt{1 + \frac{2E_j}{c_{\text{obs}}^2} \left(-\frac{A}{r} + \frac{2C_{\text{eff}}}{r^2} \right)} \quad (261)$$

$2C_{\text{eff}}/r^2$ 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_{\min} は重力と渦斥力が釣り合う地点によって決定される：

$$\left. \frac{dV}{dr} \right|_{r_{\min}} = 0 \implies r_{\min} = \frac{4C_{\text{eff}}}{A} \quad (262)$$

決定的に重要なのは、常に $\Phi_{\text{HBR}}(r_{\min}) > 0$ 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。

Q.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：

Table 33: 中性子星表面におけるプロセスレート比

	GR	HBR
$\Phi(R)$	$\sqrt{1 - r_s/R} = 0.764$	$0.764 + \delta_{\text{HBR}}$
δ_{HBR}/Φ	—	$\sim 2C_{\text{eff}}/R^2$
補正オーダー	—	$\mathcal{O}(r_s^2/R^2) \sim 10^{-1}$

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_{eff} 幾何学的・位相的項は、 $R/r_s < 3$ のとき Φ 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：

$$\Phi_{\text{HBR}} - \Phi_{\text{GR}} > 0 \quad (\text{プロセスは GR の予測よりも速く進む}) \quad (263)$$

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

R 確立された結果 vs 未解決の結果

Table 34: 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 Δw	未解決	—
Γ と ρ_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。

S 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

T 本研究の限界

1. 公理 [K.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、純粋空間か）」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 [L](#) 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 [Q](#) 節）。
4. 強場における予測は定性的である。第 [Q](#) 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. Δw 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

U 結果の要約

V21 は統一プロセスレート方程式を確立する：

$$\mathcal{R}(r, \theta) = \Phi(r) \cos \theta \quad (264)$$

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。

V 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 F.4）。

W 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.

A バージョン履歴

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
V21	Feb 2026	統一プロセスレート幾何学

Part XIV

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ンが $-W$ 方向に $v_{\text{brane}} \ll c$ で等速並進し、 W^- 次元ゲートで幾何学的に速度変換された結果として生じる。「経験的噴水流入率としての c 」は「ブレン等速並進のゲート変換出力としての c 」と読み替える。本章のテンソル結果・予算恒等式・ローレンツ導出は全て 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 (光速不変、時間の遅れ、 $E = mc^2$ 、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（ Φ 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⁴ 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。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、「なぜ宇宙はローレンツ不変性に従うのか」という一世紀にわたる謎を完全に解決する。

B 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：

$$ds_{\text{Minkowski}}^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (265)$$

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 τ を表す。

HBR は、ファウンテン機構（第 XV 部）によって駆動される純粋な 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。

B.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 Φ 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 B.1 (係留されたエネルギー — 質量). 飽和パターン（弾性応答が ε_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 Φ 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。

ε_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 XV 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、 ε_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 Φ 井戸を獲得する力学的条件）は、飽和閾値 ε_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 (266) 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 B.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 Φ 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 B.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 XV 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 XV 部）から導かれるオイラー＝ラグランジュ方程式を満たす：

$$T_0 \nabla^2 \Phi - g_0 \varepsilon + \frac{j_0 \varepsilon \Phi_0}{\Phi} + T_0 V'_{\text{dw}}(\Phi) = 0, \quad (266)$$

ここで T_0 は 3-ブレンの弾性率、 g_0 と j_0 は結合定数、 ε は局所エネルギー密度、そして V_{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 XV 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。

B.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⁴ ユークリッド変位は以下を満たす：

$$dw^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = c^2 d\lambda^2 \quad (267)$$

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：

$$dw^2 = c^2 d\lambda^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (268)$$

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

$$c^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 + v_w^2 \quad (269)$$

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。

C 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 θ 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：

$$v = c \sin \theta \quad \implies \quad \sin \theta = \frac{v}{c} = \beta \quad (270)$$

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：

$$v_w = c \cos \theta = c \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = \frac{c}{\gamma} \quad (271)$$

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：

$$\begin{pmatrix} x' \\ w' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ w \end{pmatrix} \quad (272)$$

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

D 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。

D.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 θ 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：

$$L_{\text{obs}} = L_0 \cos \theta = L_0 \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{L_0}{\gamma} \quad (273)$$

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

D.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：

$$\Delta x = \Delta x' \cos \theta + \Delta w' \sin \theta = \Delta x' \cos \theta \quad (274)$$

$$\Delta w = -\Delta x' \sin \theta + \Delta w' \cos \theta = -\Delta x' \sin \theta \quad (275)$$

$w = c\tau_O$ であり $\sin \theta = \beta$ 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：

$$\Delta w = -\beta \Delta x' = -\frac{v}{c} (\gamma \Delta x) \quad (276)$$

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：

$$\Delta t = -\frac{v \Delta x}{c^2} \quad (277)$$

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。

D.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 Δt_{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。

$$c\Delta t_{\text{obs}} = \frac{c\Delta\tau'}{\cos \theta} \implies \Delta t_{\text{obs}} = \gamma\Delta\tau' \quad (278)$$

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、 γ 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。 γ 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)。

D.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： $dw = c d\lambda$ 。ブレーン張力 T_0 に抗して Φ 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：

$$E_0 = mc^2 \quad (279)$$

ここで m は T_0/g_{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。

D.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_{grav})** は、その実体がどれほど深く Φ 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_{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、慣性は純粋に場の抵抗（ドラッグ）である： $F = ma$ は Φ 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。

E 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 XV 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。

F 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：

$$\mathbf{u} = \frac{d\mathbf{R}}{dt} = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}, \frac{dw}{dt} \right) = (v_x, v_y, v_z, c \cos \theta) \quad (280)$$

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：

$$|\mathbf{u}|^2 = v^2 + c^2 \cos^2 \theta = c^2 \sin^2 \theta + c^2 \cos^2 \theta = c^2 \quad (281)$$

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。

F.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：

$$P_E^\mu = m_0 \mathbf{u} = (m_0 v_x, m_0 v_y, m_0 v_z, m_0 c \cos \theta) \quad (282)$$

4元運動量のユークリッドノルムは不変である：

$$|P_E|^2 = (m_0 v)^2 + (m_0 c \cos \theta)^2 = m_0^2 c^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) = m_0^2 c^2 \quad (283)$$

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。

G 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 XV 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。

Table 35: 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 $\Rightarrow dw = 0 \Rightarrow$ 全予算をブレンヘンへ
制限速度 $ \mathbf{v} < c$	公理の帰結	係留 $\Rightarrow dw > 0 \Rightarrow$ ブレン予算が不完全
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 Φ 井戸維持コスト
等価原理	公理（WEP）	同じ Φ 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 ⁴ 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

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。
- **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 XV

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^- 次元ゲートで幾何学的に流入速度 c へ変換された結果として理解される。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（事象の地平面不在）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。

H 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

$$S[\mathbf{q}] = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) dt \quad (284)$$

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 II 部）と有効ポテンシャル（第 XII 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。

I 4次元ユークリッド空間における一般化座標

I.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：

$$\mathbf{Q} = \{x_i, y_i, z_i, w_i\}_{i=1}^N \quad (285)$$

I.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：

$$w_i = w_i^{(0)} + \delta w_i, \quad |\delta w_i| \ll \Delta w \quad (286)$$

ここで Δw はブレーン厚み（第 XII 部）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 XII 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。

J HBR ラグランジアン

J.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：

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i |\dot{\mathbf{r}}_i|^2 \quad (287)$$

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 XIV 部を参照)。

J.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 II 部と第 XII 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：

$$\boxed{V_{\text{HBR}} = V_{\text{grav}} + V_{\text{vortex}} + V_{\text{tension}}} \quad (288)$$

J.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 XII 部、式 232）より：

$$V_{\text{grav}} = - \sum_{i < j} \frac{G m_i m_j}{r_{ij}} \quad (289)$$

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。

J.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 XII 部、式 175–176）より：

$$V_{\text{vortex}} = + \sum_{i < j} \frac{C_{\text{eff}}^{(ij)}}{r_{ij}^2} \quad (290)$$

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：

$$C_{\text{eff}}^{(ij)} = \frac{C}{2} \frac{m_i m_j}{M_P^2} + \kappa S_i S_j \quad (291)$$

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

J.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 II 部、式 ??）：

$$V_{\text{tension}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \alpha_w L_w^{(i)} |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{COM}}|^2 \quad (292)$$

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 XII 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。

J.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：

$$\mathcal{L}_{\text{HBR}} = \frac{1}{2} \sum_i m_i |\dot{\mathbf{r}}_i|^2 + \sum_{i < j} \frac{G m_i m_j}{r_{ij}} - \sum_{i < j} \frac{C_{\text{eff}}^{(ij)}}{r_{ij}^2} - \frac{1}{2} \sum_i \alpha_w L_w^{(i)} |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{COM}}|^2 \quad (293)$$

K オイラー-ラグランジュ方程式と HBR 力の法則の復元

K.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：

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{r}}_k} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{r}_k} = 0 \quad (294)$$

各項の計算：

運動項：

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{r}}_k} = m_k \ddot{\mathbf{r}}_k \quad (295)$$

重力項：

$$-\frac{\partial V_{\text{grav}}}{\partial \mathbf{r}_k} = -\sum_{j \neq k} \frac{G m_k m_j}{r_{kj}^2} \hat{\mathbf{r}}_{kj} \quad (296)$$

渦力項：

$$-\frac{\partial V_{\text{vortex}}}{\partial \mathbf{r}_k} = +\sum_{j \neq k} \frac{2C_{\text{eff}}^{(kj)}}{r_{kj}^3} \hat{\mathbf{r}}_{kj} \quad (297)$$

張力項：

$$-\frac{\partial V_{\text{tension}}}{\partial \mathbf{r}_k} = -\alpha_w L_w^{(k)} (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{\text{COM}}) \quad (298)$$

K.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：

$$m_k \ddot{\mathbf{r}}_k = \sum_{j \neq k} \left[-\frac{G m_k m_j}{r_{kj}^2} + \frac{2C_{\text{eff}}^{(kj)}}{r_{kj}^3} \right] \hat{\mathbf{r}}_{kj} - \alpha_w L_w^{(k)} (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{\text{COM}}) \quad (299)$$

これは第 II 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**。

L 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}_{HBR} の対称性とそれに対応する保存則を同定する。

L.1 時間並進不変性 → エネルギー保存

ラグランジアン (293) 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：

$$E = T + V_{\text{HBR}} = \frac{1}{2} \sum_i m_i |\dot{\mathbf{r}}_i|^2 + V_{\text{grav}} + V_{\text{vortex}} + V_{\text{tension}} = \text{const.} \quad (300)$$

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

L.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_{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：

$$\mathbf{P} = \sum_i m_i \dot{\mathbf{r}}_i = \text{const.} \quad (301)$$

L.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：

$$\mathbf{L} = \sum_i m_i \mathbf{r}_i \times \dot{\mathbf{r}}_i = \text{const.} \quad (302)$$

L.4 対称性と保存則の要約

Table 36: 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}

M ハミルトン定式化

M.1 正準運動量

\mathbf{r}_k に共役な正準運動量は：

$$\mathbf{p}_k = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{r}}_k} = m_k \dot{\mathbf{r}}_k \quad (303)$$

M.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：

$$\mathcal{H} = \sum_k \mathbf{p}_k \cdot \dot{\mathbf{r}}_k - \mathcal{L} = T + V_{\text{HBR}} \quad (304)$$

明示的に：

$$\mathcal{H}_{\text{HBR}} = \sum_k \frac{|\mathbf{p}_k|^2}{2m_k} - \sum_{i < j} \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}} + \sum_{i < j} \frac{C_{\text{eff}}^{(ij)}}{r_{ij}^2} + \frac{1}{2} \sum_i \alpha_w L_w^{(i)} |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\text{COM}}|^2 \quad (305)$$

\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)。

M.3 ハミルトンの運動方程式

正準運動方程式は：

$$\dot{\mathbf{r}}_k = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{p}_k} = \frac{\mathbf{p}_k}{m_k} \quad (306)$$

$$\dot{\mathbf{p}}_k = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \mathbf{r}_k} = \sum_{j \neq k} \left[-\frac{Gm_k m_j}{r_{kj}^2} + \frac{2C_{\text{eff}}^{(kj)}}{r_{kj}^3} \right] \hat{\mathbf{r}}_{kj} - \alpha_w L_w^{(k)} (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{\text{COM}}) \quad (307)$$

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 299) と等価である。

M.4 量子化への意義

ハミルトニアン (305) は正準量子化の自然な出発点を提供する：

$$\hat{\mathcal{H}}_{\text{HBR}} = \sum_k \frac{|\hat{\mathbf{p}}_k|^2}{2m_k} + \hat{V}_{\text{HBR}}(\hat{\mathbf{r}}) \quad (308)$$

$[\hat{r}_{k\alpha}, \hat{p}_{j\beta}] = i\hbar \delta_{kj} \delta_{\alpha\beta}$ として。これは HBR の古典力学 (本パート) と量子基盤 (第 IV 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。

N 場のラグランジアン密度

粒子力学的ラグランジアン (式 (293)) 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。

N.1 基本定数

Table 37: 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
T_0	糸の張力係数	$\text{kg m}^{-4} \text{s}^2$	普遍定数
g_0	密度-変位結合	m^{-1}	普遍定数
Δw	ブレーン厚さ	m	普遍定数
Φ_0	臨界場強度 (飽和閾値)	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	普遍定数
λ_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：

$$G = \frac{g_0}{4\pi T_0} \quad (309)$$

自然な同定 $g_0 = \alpha/\Delta w$ (α は無次元) のもとで、 $G = \alpha/(4\pi T_0 \Delta w)$ 。

N.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：

$$S_{\text{HBR}}[\Phi] = \int d\tau \int d^3x \int dw \mathcal{L}_{\text{field}} \quad (310)$$

ラグランジアン密度は：

$$\mathcal{L}_{\text{field}} = \frac{1}{2}T_0 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial w} \right)^2 + \frac{1}{2}T_0(\nabla \Phi)^2 - g_0 \varepsilon(x, w) \Phi - \frac{1}{4}\lambda_0(\Phi^2 - \Phi_0^2)^2 \quad (311)$$

境界条件 (非対称)：

$$W^-(\text{ゲート}) : \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial w} \right|_{w=-\Delta w/2} = -\frac{J(x)}{T_0} \quad [\text{エネルギー流入}] \quad (312)$$

$$W^+(\text{自由端}) : \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial w} \right|_{w=+\Delta w/2} = 0 \quad [\text{閉じた境界}] \quad (313)$$

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。

N.3 各項の物理的起源

Table 38: 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	$T_0(\partial \Phi / \partial w)^2$	糸の W 方向伸縮コスト → 重力の源
B: 横歪み	$T_0(\nabla \Phi)^2$	糸の横方向変形 → 場の歪み効果
C: 飽和	$\lambda_0(\Phi^2 - \Phi_0^2)^2$	Φ_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

O 定理 1：ニュートン極限

定理 O.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：

$$\nabla^2 \Phi_N(\mathbf{x}) = -4\pi G \rho(\mathbf{x}), \quad G = \frac{g_0}{4\pi T_0} \quad (314)$$

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：

$$T_0 \nabla_4^2 \Phi + g_0 \varepsilon + \lambda_0 \Phi (\Phi^2 - \Phi_0^2) = 0 \quad (315)$$

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 $4\pi G = g_0/T_0$ 、すなわち $G = g_0/(4\pi T_0)$ 。□

P 定理2：事象の地平面の不在

定理 P.1 (HBR における事象の地平面の不在). 物質が存在するいかなる領域でも、場は $\Phi(\mathbf{r}) > 0$ を満たす。事象の地平面は形成されない。

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) Φ 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 $\partial \Phi / \partial w|_{\text{gate}} = -J/T_0 \neq 0 \rightarrow$ 矛盾。
- (5) $\therefore \Phi(x, w) > 0$ (物質存在領域のすべての (x, w) で)。□

物理的意義： エネルギー流入描像 (第I部 §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。

Q 議論：確立された結果と未解決問題

Q.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)： $G = g_0/(4\pi T_0)$ が第一原理から導出。
4. 事象の地平面不在 (定理 2)：物質存在領域で $\Phi > 0$ 、地平面形成を防止。
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。

Q.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 T_0 からの幾何学的保証の厳密証明 (定理 4 予定)。
3. 飽和条件からの $E = mc^2$ ：質量-エネルギー関係の導出 (定理 5 予定)。
4. 動的場方程式： τ パラメータによる波動方程式。

5. Δw の SI 値決定：実験的制約から。
6. 量子補正： \mathcal{H}_{HBR} の正準量子化と \hbar の出現。

Part XVI

空間計量と強場観測量

R 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_{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。

R.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次元ブレンである。バルク空間の座標を (r, θ, ϕ, 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：

$$ds_{4D}^2 = dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) + dw^2 \quad (316)$$

中心質量 M が場に係留された飽和パターン（ Φ の井戸）を形成するとき、これは W 軸に沿ってブレ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 (316) に代入すると、ブレ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：

$$ds_{\text{spatial}}^2 = \left[1 + \left(\frac{dh}{dr} \right)^2 \right] dr^2 + r^2 d\Omega^2 \quad (317)$$

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。

S $g_{rr} = 1/\Phi^2(r)$ 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II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：

$$1 + \left(\frac{dh}{dr} \right)^2 = \frac{1}{\Phi^2(r)} \quad (318)$$

定理 4 [空間計量成分]: HBR の Φ 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：

$$g_{rr} = \frac{1}{\Phi^2(r)} \quad (319)$$

系 [シュヴァルツシルト積構造]: 第 XIV 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：

$$g_{tt} \cdot g_{rr} = (-c^2\Phi^2) \left(\frac{1}{\Phi^2} \right) = -c^2 \quad (320)$$

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。

T 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 Φ 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：

$$0 = -c^2\Phi^2 dt^2 + \frac{1}{\Phi^2} dr^2 \quad (321)$$

これを光の座標速度 $v_{\text{coord}} = |dr/dt|$ について整理すると：

$$v_{\text{coord}} = \frac{c\Phi}{\sqrt{1/\Phi^2}} = \Phi^2(r)c \quad (322)$$

これは、実質的な光の速度が大質量天体の近くで Φ^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： $M = 1.4M_\odot$ 、 $R = 10$ 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：

$$\frac{\delta\Phi}{\Phi_{\text{GR}}} \approx +1.46\% \quad (323)$$

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 VI 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。宇宙論的效果（ H_0 ）は厳密に、観測者の物理的スケールが収縮しているからこそ出現するのであり、これは宇宙の膨張を「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」として再解釈するものである。

U 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 によってスケールリングされた強力な反発コアを含む、統一力ポテンシャル（第 II 部）に依存している：

$$F(r) = -A \left[\frac{1}{r^2} - \left(\frac{C}{A} \right) \frac{1}{r^3} - \left(\frac{B}{A} \right) \frac{1}{r^4} \right] \quad (324)$$

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）が既に較正されている。 $g_{rr} = 1/\Phi^2$ 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：

$$\delta\Psi_B \approx 0.056 \text{ rad} \quad (325)$$

$B/A = 0.006$ （第 II 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。

V 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 XVII

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—ブラックホール中心の特異点、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、ブラックホールは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($P_{\text{jet}} \propto \dot{M}$)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、ブラックホールを持たない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。

W 序論

W.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 [32, 44]。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 [46] から弦理論 [45] 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。

W.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 [24, 35]。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 [23] は、磁場のスレディングによって回転するブラックホールから回転エネルギーを抽出する。BH 系では成功するが、BZ はブラックホール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 [28, 30]。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。

W.3 情報パラドックス

Hawking がブラックホールは熱放射を放出することを示した [31] 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 [49]、ファイアウォール提案 [21]、ER=EPR 予想 [36]、アイランド公式と量子極値面 [20, 43]—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 [47]。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。

W.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 [51] 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、さらにブラックホール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 X 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 Y 節でブラックホールを枯渇ファウンテンとして再解釈する。第 Z 節で情報パラドックスが消滅することを示す。第節でファウンテン溢流からジェットを導出する。第節で統計的検証を行う。第節で予測と限界を議論する。

X 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 [51] に精通した読者は第 Y 節に進んでよい。

X.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 [52]。

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 X.1) の背後にある物理的理由である。

X.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

$$ds_{4D}^2 = dr^2 + r^2 d\Omega^2 + dw^2. \quad (326)$$

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 (326) に代入すると誘導空間計量が得られる：

$$ds_{\text{space}}^2 = (1 + W'(r)^2) dr^2 + r^2 d\Omega^2. \quad (327)$$

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 [52]。 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 X.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

$$ds^2 = -\Phi(r)^2 c^2 dt^2 + (1 + W'(r)^2) dr^2 + r^2 d\Omega^2 \quad (328)$$

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 (328) は共形平坦ではない。 g_{tt} と g_{rr} は独立な関数 (Φ 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 X.1)。

弱場極限でのシュワルツシルト計量との対応は：

$$\Phi(r)^2 \approx 1 - \frac{r_s}{r}, \quad 1 + W'(r)^2 \approx \frac{1}{1 - r_s/r} \approx 1 + \frac{r_s}{r}, \quad (329)$$

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 (328) は以下の形式のブレーン作用から導出される：

$$S = \int d^3x \sqrt{g} \left[-T_0 \sqrt{1 + (\nabla W)^2} + \kappa K^2 + \mathcal{L}_{\text{matter}} \right], \quad (330)$$

ここで T_0 はブレーン張力 (南部–後藤項)、 κ 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 κK^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 (330) からの場の方程式の導出は [52] 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。

X.3 場の歪みと事象の地平面の非存在定理

式 (328) 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：

$$\Phi(r) \xrightarrow{r \gg r_s} \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}}, \quad (331)$$

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：

$$\Phi(r) = \sqrt{1 - \frac{A}{r} + \frac{C}{2r^2} - \frac{B}{3r^3}}, \quad (332)$$

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 Φ 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 X.1 (事象の地平面の非存在). 式 (332) 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。 Φ のゼロは $f(r_0) = 0$ ($r_0 > 0$) を要求する。 $3r^3$ を乗じると

$$3r^3 - 3Ar^2 + \frac{3C}{2}r - B = 0. \quad (333)$$

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

$$C^3 > \frac{27}{4}A^2B, \quad (334)$$

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 [52] を参照。□

この定理は [52] 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。

X.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。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 [53]、 $\approx 511 M_\odot \text{pc}^{-2}$ 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 X.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、 $\mathcal{F}(r)$ 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** ($\mathcal{F} <$)：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** ($\mathcal{F} \approx$)：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。
- O 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 Y 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 Y 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。

Y 枯渇ファウンテン：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 X.1 が両方を除去する。HBR には「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。

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 X.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。

Y.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。

Y.2 EHT 観測との関連

Event Horizon Telescope による M87*[26] と Sgr A*[27] 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（ブラックホール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 [33]）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。

Y.3 銀河ライフサイクル

定義 X.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」

この描像ではブラックホール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、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 [.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観測的ブラックホール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 [Z](#) 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。

Z 情報パラドックスの消滅

Z.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 [\[31, 37\]](#)：

(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、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 [\[49\]](#) 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 [\[21\]](#) 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 [\[36\]](#) 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 [\[20, 43\]](#) 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。

Z.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 Z.1 (情報パラドックスの非存在). 定理 [X.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。

Z.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。

Z.4 既存のアプローチとの比較

表 39 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 39: 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。

第節への橋渡し—第 Y-Z 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き（レジーム O）に転じる。

相対論的ジェット：W 軸溢流

定義 X.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。

.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 [24]。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 [22, 23] 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。

.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、

$$\mathcal{F}(r) > \equiv T_0 \cdot c, \quad (335)$$

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：

$$\theta_{\text{jet}} \sim \frac{r_{\text{release}}}{|w_{\text{core}}|}, \quad (336)$$

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 ($\theta \sim 5$ – 15°) よりも強くコリメートされるという観測と整合する [24, 30]。

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 .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 336)、
- (ii) より大質量の天体はより狭いジェットを生成する。

.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

$$P_{\text{jet}}^{\text{BZ}} \propto a_*^2 M^2 B^2, \quad (337)$$

と予測する。ここで a_* は無次元 BH スピン、 M は質量、 B は地平面における磁場強度である [23]。重要な特徴は $a_* \rightarrow 0$ で $P \rightarrow 0$ ：非回転ブラックホール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： $P_{\text{jet}}^{\text{BZ}} \propto a_*^2 \Phi_B^2$ (Φ_B は無次元磁束 [41])。磁気アレスト円盤 (MAD) 状態では Φ_B が飽和し、スピン依存性が主要な残りの変数となる [40]。我々の統計テスト (第節) はスピン依存成分 a_*^2 と \dot{M} 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：

$$P_{\text{jet}}^{\text{HBR}} = \int_{r < r_{\text{sat}}} [\mathcal{F}(r) -] dA \propto \dot{M} c^2, \quad (338)$$

ここで \dot{M} 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。

.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 40: 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	Γ_{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：ブラックホール用の BZ 過程 [23]、原始星用の磁気遠心力発射 [22]、X 線連星ジェット用の中性子星表面場効果 [28]。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： $P_{\text{jet}} \propto \dot{M}$ 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。

統計的検証

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 [39, 48, 50] 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 [39, 48] および、利用可能な場合は hard-state コンパクトジェット検出 [29] から取得した。X 線光度 (L_X) は質量降着率 \dot{M} のプロキシとして用いる。表 41 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節で優先事項として特定する。

Table 41: 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 (erg s^{-1}); $\log L_X$: X 線光度 (erg s^{-1} , \dot{M} のプロキシ)。スピン引用: [1] [39]; [2] [48]; [3] [50]; [4] [34]; [5] [42]。

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] [†]
V404 Cyg	0.67	0.10	31.20	38.60	[2]

[†]GX 339-4 のスピン推定値は $a_* = 0.05$ [34] から 0.95 [42] 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 41 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節で特定する。

.2 相関分析

表 42 に両仮説の相関結果を示す。

Table 42: 相関分析：BZ (a_*^2) vs. HBR (\dot{M})

指標	BZ (a_*^2)	HBR (L_X)	優位
Spearman ρ	0.733 ($p = 0.016$)	0.863 ($p = 0.001$)	HBR
Pearson r	0.835 ($p = 0.003$)	0.908 ($p = 0.0003$)	HBR
RMS 残差 (dex)	0.591	0.450	HBR
AIC	-4.5	-9.9	HBR
BIC	-3.6	-9.0	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 $\Delta = 5.4$ は純粋にフィットの良さを反映する。Burnham & Anderson の基準では、 $\Delta AIC > 4$ は「considerable evidence（相当な証拠）」を構成する [25]。

.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：高速回転 BH 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 43: 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. $L_X \mid a_*^2$	0.889	0.0006	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。

.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 $a_* = 0.05$ [34] から $a_* = 0.95$ [42] に及ぶ。この全範囲で BZ 相関分析を繰り返した。BZ Spearman ρ 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。

.5 ブラックホールなしのジェット天体：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 はブラックホールの不在下では作動できない。表 44 に、ブラックホールを持たない 6 つの十分に記録されたジェット天体を掲げる。

Table 44: ブラックホールなしのジェット天体。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、 $v \sim 300$ km/s
HH 30	原始星	双極、よくコリメート
L1551 IRS 5	原始星	双極、 $v \sim 200$ 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

標準的枠組みはブラックホール (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。

議論

.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 BH 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 BH 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

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 [33] 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。

予測: 普遍的ジェットスケーリング

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 BH、AGN のジェットパワー vs. \dot{M} 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。

.2 ブラックホール同定バイアス

現在のブラックホール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「ブラックホール」と区別不能である。

これは現在の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を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—「ブラックホール」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。

.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」[38] として既知であることである：

$$\log L_R = 0.60 \log L_X + 0.78 \log M + \text{const.} \quad (339)$$

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 336）、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 (339) 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。

.4 確立済み結果と未確認結果

表 45 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 45: 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	X	定理 X.1
情報パラドックスの消滅	E	Z	系 Z.1
$P_{\text{jet}} \propto \dot{M}$ over $\propto a_*^2$	E		$\rho = 0.86$, $\Delta\text{AIC} = 5.4$
M が L_R を独立に予測	E		偏 $r = 0.89$, $p = 0.0006$
非 BH ジェットが統一を支持	E		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	Y	定性的枠組み
ジェット収束 (W 軸歪み)	O		W 軸幾何学 + $\theta \propto M^{-1/2}$ 予測
$\theta_{\text{jet}} \propto M^{-1/2}$	O		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	Y	ngEHT データが必要
枯渇フラッシュ (一過性増光)	O		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。

.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 [28] 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 [53]。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 \boxtimes 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 [52] 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 (328) はシュワルツシルト弱場極限 (式 329) 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 [52] 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 [51] 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 328) 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 γ および β (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。

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—我々が「ブラックホール」として観測するものを生む。すべての $r > 0$ で $\Phi(r) > 0$ (定理 X.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 ($p = 0.059$)。ブラックホールを持たない 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、「ブラックホール」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に分類される天体は、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 XVIII

ブラックホール連星合体の幾何学的再解釈

注 .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1～第17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17部を参照する。付録B(有効ポテンシャル数値比較)は § として本文に統合した。

導入と本章の位置付け

.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[54]。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。

.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[32, 44]。
- **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17部 § 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 17 部の「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。

.3 本章の核心主張

- (A) **剛性喪失** (§)。 κK^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** (§)。 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** (§, §)。 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、 κK^2 はブレーン曲げ剛性、 \mathcal{F} はファウンテン流量— を第 17 部・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_{sync} 、 W^+ 解放エネルギー E_{W^+} の 3 個のみに限定する。

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 17 部に委ねる。

.1 ファウンテン機構と 4 流量レジーム

第 17 部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}_{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。

.2 計量と κK^2 ブレーン曲げ剛性

Phase 2 §2–§3 で導出された HBR 計量は

$$ds^2 = -\Phi^2(r) c^2 dt^2 + (1 + W'(r)^2) dr^2 + r^2 d\Omega^2 \quad (340)$$

で与えられ、弱場極限では $\Phi^2(r) \approx 1 - A/r + C/r^2 - B/r^3$ 。 κK^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 §)。

枯渇状態における剛性喪失

.1 活動天体における κK^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

$$E_{\text{int}}^{\text{active}}(d) \sim \rho_w \frac{\Delta w_1^2 \Delta w_2^2}{d^3}, \quad (341)$$

対応する反発力は

$$F_{\text{repel}}^{\text{active}} \sim \rho_w \frac{(r_s^{(1)} r_s^{(2)})^2}{d^4}. \quad (342)$$

ここで ρ_w は W 軸エネルギー密度 (W⁻ からの流束密度) である。有効曲げ剛性は形式的に

$$\kappa_{\text{eff}} K^2 \sim \underbrace{\kappa_0 K^2}_{\text{passive}} + \underbrace{\lambda P_w \ell^2 K^2}_{\text{driven}}, \quad P_w \propto \rho_w c \quad (343)$$

に分解され、近接反発は *driven* 成分 (流入圧力に依存) が担う。

.2 枯渇ファウンテンの定義

定義 .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 .2 (還元フロー場). 枯渇ファウンテン Ω 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。

.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

$$\epsilon \equiv \frac{\rho_w^{\text{res}}}{\rho_w^{\text{active}}} \sim \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{F}_{\text{sat}}} \ll 1 \quad (344)$$

と定義すると、以下の命題が成立する。

命題 .3 (枯渇対における κK^2 反発の消失). 2 体がともに定義 .1 の枯渇ファウンテン状態にある場合、 κK^2 駆動反発力は活動状態に比べ比率 ϵ で抑制される：

$$F_{\text{repel}}^{\text{exhausted}}(d) \sim \rho_w^{\text{res}} \frac{(r_s^{(1)} r_s^{(2)})^2}{d^4} = \epsilon F_{\text{repel}}^{\text{active}}(d). \quad (345)$$

導出スケッチ. 式 (341) の ρ_w はファウンテン流量に線形依存する (Phase 2 §6)。定義 .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 ϵ 倍に置換される。□

定量評価. 第17部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。

還元フロー同調機構

命題 .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。

.1 単体の還元フロー場

定義 .2 に従い、枯渇ファウンテン単体の孤立・球対称極限では

$$\vec{v}_{w+}(\vec{r}) = v_{w+}(r) \hat{w}_+(\vec{r}), \quad \partial_t \rho_w^{\text{res}} + \nabla \cdot (\rho_w^{\text{res}} \vec{v}_{w+}) = 0. \quad (346)$$

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。

.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

$$\vec{v}_{\text{total}}(\vec{r}) = \vec{v}_A + \vec{v}_B + \delta \vec{v}_{\text{sync}}(\vec{r}; d), \quad (347)$$

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^+ チャネルを形成する補正項である。

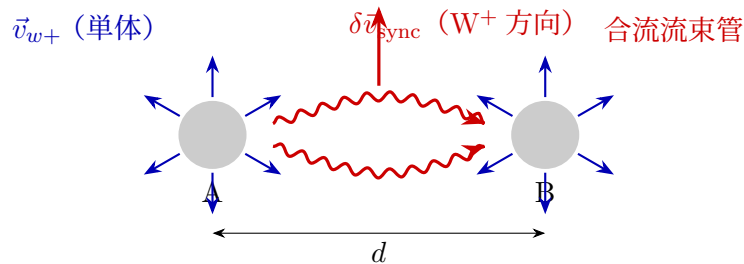


Figure 34: 2体枯渇ファウンテン A, B の還元フロー \vec{v}_{w+} の合流像。各体の単体フロー（青矢印、球対称外向き = W^+ 方向）は、中間領域で流束保存により共通 W^+ 流出チャネル（赤矢印）を形成し、同調補正 $\delta \vec{v}_{\text{sync}}$ が付加される。

.3 同調引力

合流した共通チャネルは2つの独立チャ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

$$U_{\text{sync}}(d) \sim -\alpha_s \frac{\rho_w^{\text{res}} \Delta w_1 \Delta w_2}{d^n}, \quad F_{\text{sync}} \sim -\alpha_s n \frac{\rho_w^{\text{res}} \Delta w_1 \Delta w_2}{d^{n+1}}, \quad (348)$$

$\alpha_s = O(1)$ 、 $n \in \{1, 2\}$ 。活動対では $F_{\text{repel}}^{\text{active}} \propto \rho_w^{\text{active}}$ が $1/\epsilon \gtrsim 10^3$ 倍で F_{sync} を圧倒するため、同調引力は命題 .3 が成立する枯渇対でのみ顕在化する。

.4 臨界半径 r_{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

$$r_{\text{sync}} \sim \left(\frac{\alpha_s n \rho_w^{\text{res}}}{\rho_{\text{cr}}} \right)^{1/k} r_s, \quad k = n - 1, \quad \rho_{\text{cr}} \equiv \frac{c^2}{Gr_s^2}, \quad (349)$$

$r_s \equiv \sqrt{r_s^{(1)} r_s^{(2)}}$ 。 $n = 2$ 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 § 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 (345) は ϵ 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 .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。

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 $f_{\text{QNM}} \approx 250$ Hz, NR 波形一致度 $\gtrsim 0.96$ [54]。

活動天体の反事実仮想。 活動対であれば κK^2 反発が $d \sim r_{\text{sync}}$ 付近に Stalling プラトーを生じ、 $\delta\Psi_{\text{stall}}^{\text{act}} \gtrsim \mathcal{O}(1)$ rad— 現行 BBH 全観測と矛盾する。

枯渇状態の整合性。 命題 .3 により $F_{\text{stall}}^{\text{exh}}(d) \equiv 0$ 、有効ポテンシャルは r_{sync} を越えて同調極小へ単調に落ちる (図 35)。位相残差は

$$\delta\Psi_{\text{stall}}^{\text{exh}} \lesssim \delta\Psi_B \approx 0.056 \text{ rad} \quad (B/A \sim 6 \times 10^{-3}), \quad (350)$$

LIGO-Virgo の制約 ($\delta\Psi \lesssim 0.1$ rad) と整合する。

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。

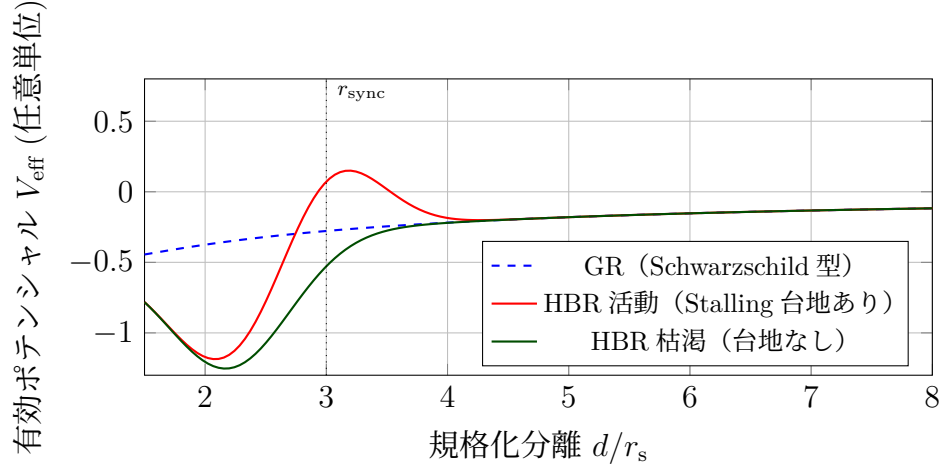


Figure 35: 有効ポテンシャル概念図。活動 HBR 対（赤）は $d \sim r_{\text{sync}}$ 付近で κK^2 反発による台地を示すが、枯渇 HBR 対（緑）は命題 .3 により台地が消え単調に同調極小へ落ちる。観測波形は枯渇曲線と整合する。

W⁺ 解放エネルギー。

$$E_{W+} = \frac{1}{2} \rho_w^{\text{res}} \int_{V_{\text{res}}} |\vec{v}_{w+}|^2 dV, \quad \Delta E_{W+} \sim \alpha_s \rho_w^{\text{res}} \frac{\Delta w_1 \Delta w_2}{r_{\text{sync}}^{n-1}}, \quad (351)$$

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 → リングダウン遷移時間と同桁。

ブレーン歪みと重力波。

$$E_{\text{GW}} = \eta_{\text{brane}} \Delta E_{W+}, \quad 0 < \eta_{\text{brane}} \leq 1. \quad (352)$$

$r_s/r_{\text{sync}} \sim 0.3$ 、 $B/A \sim 10^{-3}$ (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 (§ 参照)。

LVK カタログとの整合性および予測

.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	~ 65	BH	枯渇 – 枯渇同調 ($\delta\Psi \lesssim 10^{-1}$) [†]
GW170817	BNS	~ 2.7	NS/BH	非枯渇 (B/r^3 補正対象)
GW190412	BBH (非対称)	~ 38	BH	枯渇 – 枯渇同調 (質量比 ~ 0.28)
GW190521	BBH (大質量)	~ 150	BH	枯渇 – 枯渇同調 (中間質量 BH)
GW200129	BBH	~ 60	BH	枯渇 – 枯渇同調

Table 46: 主要 LVK イベントと枯渇ファウンテン同調モデルの対応 [54, 56, 58, 59, 61]。GW170817 のみ BNS であり同調機構の対象外。[†]Fermi GBM が +0.4 秒後に 2.9σ トランジェントを検出 [67]；詳細は §.2 参照。

.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 ≈ 1 s、有意性 2.9σ) を検出したと報告されている [67]。なお、Greiner et al. [68] 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 $\Delta t_{\text{EM}} \sim \tau_{\text{relax}} \sim \mathcal{O}(0.1\text{--}1)$ s のタイムスケールで誘起される (命題 .6 参照)。

.3 HBR と GR の観測的対比

注 .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 7 部～第 8 部の橋渡し節 §54 (表 15) に一括収録している。本節では本章 (第 18 部) 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 [70, 71]、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 47: 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 15 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 70）。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

.4 検証可能な予測（P1–P5）

命題 .2 (P1: 枯渇 BH 合体での Stalling 不在). 第 3 世代検出器 (*Einstein Telescope*, *Cosmic Explorer* [62, 63]) 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 .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 .4 (P3: 高質量比での ΔE_{W^+} 乖離). 極端な質量比 $m_1/m_2 \gg 1$ では同調断面 r_{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 .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 .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*)。

限界と未解決問題

- α_s の第一原理導出。同調結合定数 α_s は現状 GW150914 エネルギー収支から桁推定 ($\alpha_s \rho_w^{\text{res}} \sim 10^{-2}\text{--}10^{-1}$) 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。
- η_{brane} 決定の別枠組み要請。 W^+ 運動エネルギー \rightarrow 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 χ^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 .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_{sync} および ΔE_{W+} への非対称補正の評価が重要な課題である。

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**— κK^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^+ チャ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^+ 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^+ 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 .2-.5）。

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_{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。

$$V_{\text{eff}}^{\text{GR}}(r) = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) \left(1 + \frac{L^2}{r^2 c^2}\right), \quad (353)$$

$$V_{\text{eff}}^{\text{HBR}}(r) = \Phi^2(r) \left(1 + \frac{L^2}{r^2 c^2}\right), \quad \Phi^2(r) = 1 - \frac{A}{r} + \frac{C}{2r^2} - \frac{B}{3r^3}, \quad (354)$$

$$V_{\text{eff}}^{\text{HBR+sync}}(r) = V_{\text{eff}}^{\text{HBR}}(r) + U_{\text{sync}}(r), \quad U_{\text{sync}}(r) \sim -\alpha_s \rho_w^{\text{res}} r_s^4 / r^2. \quad (355)$$

$d \gtrsim 3r_s$ では GR と HBR が実質不可分 ($B/A \sim 10^{-3} \Rightarrow |\delta\Psi| \lesssim 10^{-1} \text{ rad}$)。HBR+同調は $d \lesssim r_{\text{sync}} \sim 3r_s$ で急激な深化を示し、§ の「反発抵抗なしに r_{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。

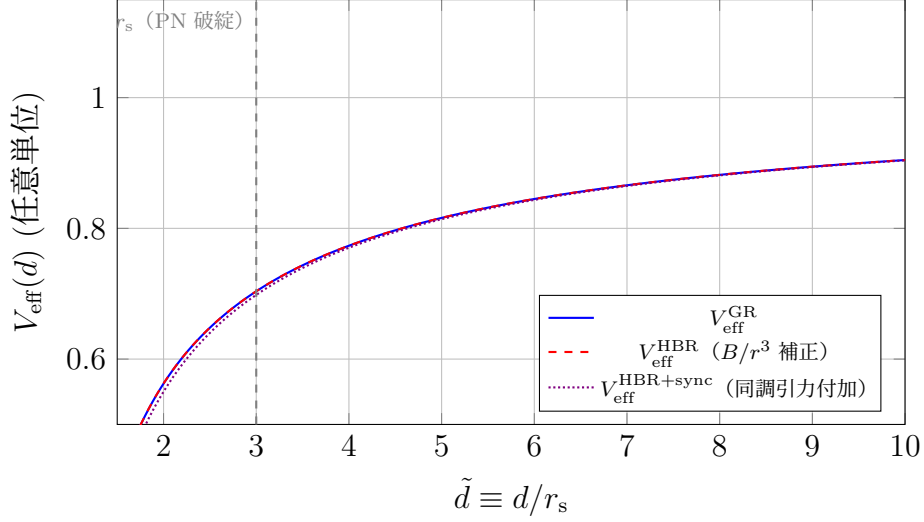


Figure 36: V_{eff} の比較。GR (実線) と HBR (破線) は $d \gtrsim 3r_s$ で実質不可分；HBR+同調 (点線) は $d \lesssim r_{\text{sync}}$ で急深化する。

A κ 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 κ 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、バルク幾何を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 [76, 77]： κ 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、 κ 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 κ 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：

$$\Phi(\vec{x}, w) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\kappa}{2\pi} \tilde{\Phi}_{\kappa}(\vec{x}) e^{i\kappa w}. \quad (356)$$

ブレン超曲面 $w = w_{\text{brane}}(t)$ 上で、ブレン波動関数はその制限として

$$\psi(\vec{x}, t) \equiv \Phi(\vec{x}, w_{\text{brane}}(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\kappa}{2\pi} \tilde{\Phi}_{\kappa}(\vec{x}) e^{-i\kappa t}, \quad (357)$$

と書かれる。位相 $e^{-i\kappa t}$ は W 並進サンプリングをブレ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。

重要な構造的な事実は、自由理論レベルでバルク作用が双線型であり、それが κ 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

$$\int dw e^{i(\kappa - \kappa')w} = 2\pi \delta(\kappa - \kappa'), \quad (358)$$

となるので、異なる κ 成分は w 方向で直交する。その結果、 κ 振幅の自然な状態空間は

$$\mathcal{H}_\kappa \simeq L^2\left(\mathbb{R}, \frac{d\kappa}{2\pi}\right), \quad (359)$$

であり、バルク誘導内積

$$\langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\kappa}{2\pi} c_1^*(\kappa) c_2(\kappa), \quad \|\Psi\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\kappa}{2\pi} |c(\kappa)|^2, \quad (360)$$

を備える。ここで $c(\kappa)$ は κ 基底におけるブレン状態の（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、 κ 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

κ 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 κ 振幅 $c(\kappa)$ で表す。我々は次の汎関数的割り当てを求める：

$$P(\kappa) = \mathcal{P}[c; \kappa], \quad d\mathbb{P} = P(\kappa) \frac{d\kappa}{2\pi}, \quad (361)$$

ここで参照測度 $d\kappa/(2\pi)$ はバルク誘導内積 (360) 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 κ 分解能極限において κ 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。

$$P(\kappa) \geq 0 \quad (\text{すべての } \kappa \text{ について}). \quad (362)$$

(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：

$$\mathbb{P}(A \cup B) = \mathbb{P}(A) + \mathbb{P}(B), \quad \mathbb{P}(A) \equiv \int_A \frac{d\kappa}{2\pi} P(\kappa). \quad (363)$$

(iii) κ 選択（実効的対角性）。バルク相互作用構造は実効的な κ 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 [74] 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 κ 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 κ 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 κ について対角的になる。特に κ 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 κ 振幅の局所的大きさのみを通じて依存する：

$$P(\kappa) = F(|c(\kappa)|), \quad (364)$$

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 (360) 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 κ 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

$$c_n \equiv \left(\int_{\Delta\kappa_n} \frac{d\kappa}{2\pi} |c(\kappa)|^2 \right)^{1/2}, \quad \sum_n c_n^2 = 1, \quad (365)$$

で定義する。

幾何学的入力。 (365) 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 (360) 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}_κ 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、

$$\mathbb{P}_n = F(c_n), \quad \sum_n \mathbb{P}_n = 1. \quad (366)$$

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

$$\mathbb{P}_{n \cup m} = \mathbb{P}_n + \mathbb{P}_m, \quad (367)$$

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

$$c_{n \cup m} = \sqrt{c_n^2 + c_m^2}, \quad (368)$$

で決定される。(366)–(368) を用いて、加法性要請 (367) は関数方程式

$$F\left(\sqrt{x^2 + y^2}\right) = F(x) + F(y), \quad x \geq 0, y \geq 0, \quad (369)$$

となる。

$u \geq 0$ について $G(u) \equiv F(\sqrt{u})$ と定義すると、(369) は $\mathbb{R}_{\geq 0}$ 上の Cauchy 加法方程式

$$G(u + v) = G(u) + G(v), \quad u \geq 0, v \geq 0, \quad (370)$$

となる。連続性を仮定すれば、唯一の解は線形：

$$G(u) = C u \implies F(x) = C x^2, \quad (371)$$

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

$$\mathbb{P}_n = c_n^2. \quad (372)$$

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：

$$d\mathbb{P}(\kappa) = |c(\kappa)|^2 \frac{d\kappa}{2\pi}, \quad \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\kappa}{2\pi} |c(\kappa)|^2 = 1. \quad (373)$$

このように、(a) κ 選択が確率割り当てを実効的に κ 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 則はこれら構造的要請と整合する唯一の連続測度となる。

A.5 結論

我々は κ 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 [76, 77] 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、鍵となる入力は何何学的・構造的なものである：直交する κ 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 κ 選択（バルク W 並進不変性の Noether 帰結であり、ブレンが OCS を通じてサンプリングする；Appendix B および [74] §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（ κ 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 [74]。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 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 XII 部・第 XVII 部）の κ 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。 Δw 統合の完全な記述は、第 I 部 §14、原理 14.1 を参照されたい：contact（力学的でも測定でも）はスレッド重なりを要し、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 κ 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 κ_A をもつ系モードと、支配的 W 運動量 κ_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 η 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

$$\eta(\Delta\kappa) \propto \int_{-\infty}^{\infty} dw g(w) e^{i\Delta\kappa w}, \quad (374)$$

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：

$$g(w) = \phi_{\text{sys}}(w) \rho_{\text{app}}(w) V_{\text{int}}(w). \quad (375)$$

ここですべての横方向自由度は (374) 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：

$$g(w) = 0 \quad (|w| > L/2 \text{ のとき}). \quad (376)$$

コンパクト台と有界性により $g \in L^1(\mathbb{R})$ が従い、結合振幅は一様バウンド

$$|\eta(\Delta\kappa)| \propto |\hat{g}(\Delta\kappa)| \leq \|g\|_{L^1}, \quad (377)$$

を満たす。これにより η 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

(374) 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：

$$\hat{g}(\Delta\kappa) = \int_{-\infty}^{\infty} dw g(w) e^{i\Delta\kappa w}. \quad (378)$$

$g \in L^1(\mathbb{R})$ 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：

$$\lim_{|\Delta\kappa| \rightarrow \infty} \hat{g}(\Delta\kappa) = 0. \quad (379)$$

これは**定性的**な命題である：任意に不整合な κ 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

$$|\hat{g}(\Delta\kappa)| \leq \frac{C_k}{|\Delta\kappa|^k} \quad (|\Delta\kappa| \rightarrow \infty), \quad (380)$$

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

$$\hat{g}(\Delta\kappa) = \int_{-L/2}^{L/2} dw e^{i\Delta\kappa w} = L \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta\kappa L}{2}\right), \quad (381)$$

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 $e^{i\Delta\kappa w}$ は装置範囲全体ではほぼ一定で、 $\hat{g}(\Delta\kappa) \approx \|g\|_{L^1}$ 、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・ルベグの補題は $\eta \rightarrow 0$ を定性的に保証し、(380)–(381) 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・ルベグ）、定量的レートは g の滑らかさから従う。

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：

$$V_{\text{obs}}^2(r) = V_{\text{bar}}^2(r) + V_{\infty}^2 S(r), \quad S_{\tanh}(r) \equiv \tanh\left(\frac{r}{r_g}\right), \quad (382)$$

これが SPARC フィットに用いた形である（式 ??）。

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：

$$S_{\text{alg}}(r) \equiv \frac{r^2}{r^2 + r_c^2}, \quad (383)$$

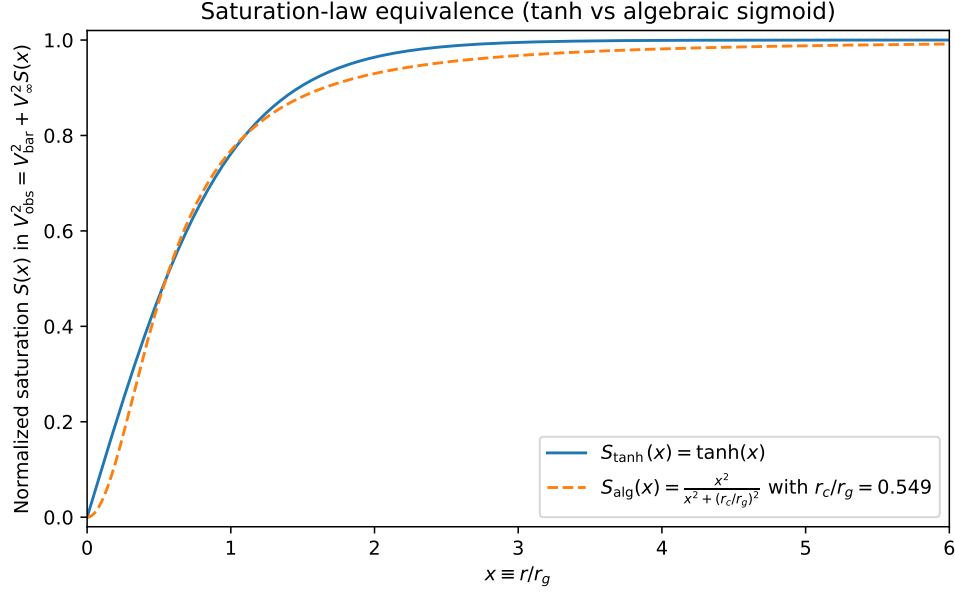


Figure 37: SPARC フィッティングとシミュレーションで用いた飽和則の比較。tanh 形 $S_{\text{tanh}}(x) = \tanh(x)$ と代数的シグモイド $S_{\text{alg}}(x) = x^2/(x^2 + (r_c/r_g)^2)$ を、対応関係 $r_c/r_g = 0.549$ (半飽和マッチ) の下で比較した。 $x = r/r_g \gtrsim 0.5$ の領域で、両曲線はほぼ一致する (S における最大相対偏差は約 3.6%、 \sqrt{S} では約 1.8%)。

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 ??)。

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

$$r_c \simeq 0.549 r_g, \quad (384)$$

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_{tanh} と S_{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 37 は、対応関係 (384) の下での 2 つの飽和則の重なりを示す。

References

- [1] Yamamoto, Y. (2026). *Hyperbrane Relativity Version 15: The Theory of Reality*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14538909>
- [2] Yamamoto, Y. (2026). *The Scale-Lens Mechanism for Flat Rotation Curves: Part I*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18204394>
- [3] Yamamoto, Y. (2026). *Cosmic Metrics and SPARC Validation: Part II*. Zenodo.
- [4] Yamamoto, Y. (2026). *Unified Geometric Framework for the Three-Body Problem: Part III*. Zenodo.
- [5] Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43, 172–198.

- [6] Pauli, W. (1925). Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren. *Zeitschrift für Physik*, 31, 765–783.
- [7] de Broglie, L. (1924). *Recherches sur la théorie des quanta*. PhD Thesis, University of Paris.
- [8] Bohm, D. (1952). A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of “Hidden” Variables. *Physical Review*, 85, 166–193.
- [9] 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
- [10] McGaugh, S. S., Lelli, F., & Schombert, J. M. (2016). Radial Acceleration Relation in Rotationally Supported Galaxies. *Physical Review Letters*, 117, 201101.
- [11] Anderson, J. D., et al. (2002). Study of the anomalous acceleration of Pioneer 10 and 11. *Physical Review D*, 65, 082004.
- [12] 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
- [13] Rosi, G., et al. (2014). Precision measurement of the Newtonian gravitational constant using cold atoms. *Nature*, 510, 518–521.
- [14] 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
- [15] Lamoreaux, S. K. (1997). Demonstration of the Casimir Force in the 0.6 to 6 μm Range. *Physical Review Letters*, 78, 5–8.
- [16] Decca, R. S., et al. (2003). Measurement of the Casimir Interaction at the 1% Level. *Physical Review Letters*, 91, 050402.
- [17] van Dokkum, P., et al. (2018). A galaxy lacking dark matter. *Nature*, 555, 629–632.
- [18] 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
- [19] Szigeti, B., et al. (2025). Can rotation solve the Hubble Puzzle? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. DOI: 10.1093/mnras/staf446
- [20] Almheiri, A., Engelhardt, N., Marolf, D., & Maxfield, H. 2019, JHEP, 2019, 63
- [21] Almheiri, A., Marolf, D., Polchinski, J., & Sully, J. 2013, JHEP, 2013, 62
- [22] Blandford, R. D. & Payne, D. G. 1982, MNRAS, 199, 883
- [23] Blandford, R. D. & Znajek, R. L. 1977, MNRAS, 179, 433
- [24] Blandford, R., Meier, D., & Readhead, A. 2019, ARA&A, 57, 467

- [25] Burnham, K. P. & Anderson, D. R. 2002, *Model Selection and Multimodel Inference* (Springer)
- [26] Event Horizon Telescope Collaboration 2019, *ApJ*, 875, L1
- [27] Event Horizon Telescope Collaboration 2022, *ApJ*, 930, L12
- [28] Fender, R., Belloni, T. M., & Gallo, E. 2004, *MNRAS*, 355, 1105
- [29] Fender, R. P., Gallo, E., & Russell, D. M. 2010, *MNRAS*, 406, 1425
- [30] Frank, A., Ray, T. P., Cabrit, S., et al. 2014, in *Protostars and Planets VI*, 451
- [31] Hawking, S. W. 1975, *Comm. Math. Phys.*, 43, 199
- [32] Hawking, S. W. & Penrose, R. 1970, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 314, 529
- [33] Johnson, M. D., Lupsasca, A., Strominger, A., et al. 2020, *Science Advances*, 6, eaaz1310
- [34] Kolehmainen, M., Done, C., & Díaz Trigo, M. 2011, *MNRAS*, 416, 311
- [35] Livio, M. 1999, *Physics Reports*, 311, 225
- [36] Maldacena, J. & Susskind, L. 2013, *Fortschr. Phys.*, 61, 781
- [37] Mathur, S. D. 2009, *Class. Quant. Grav.*, 26, 224001
- [38] Merloni, A., Heinz, S., & di Matteo, T. 2003, *MNRAS*, 345, 1057
- [39] Narayan, R. & McClintock, J. E. 2012, *MNRAS*, 419, L69
- [40] Narayan, R., Chael, A., Chatterjee, K., Ricarte, A., & Curd, B. 2022, *MNRAS*, 511, 3795
- [41] Tchekhovskoy, A., Narayan, R., & McKinney, J. C. 2011, *MNRAS*, 418, L79
- [42] Parker, M. L., Tomsick, J. A., Miller, J. M., et al. 2016, *ApJ*, 828, 48
- [43] Penington, G. 2020, *JHEP*, 2020, 2
- [44] Penrose, R. 1965, *Phys. Rev. Lett.*, 14, 57
- [45] Polchinski, J. 1998, *String Theory* (Cambridge Univ. Press)
- [46] Rovelli, C. 2004, *Quantum Gravity* (Cambridge Univ. Press)
- [47] Stony Brook Center for Geometry and Physics, 2024, “Black Hole Information Paradox at 50: Review and New Directions,” workshop proceedings (in preparation)
- [48] Steiner, J. F., McClintock, J. E., & Reid, M. J. 2013, *ApJ*, 762, 104
- [49] Susskind, L., Thorlacius, L., & Uglum, J. 1993, *Phys. Rev. D*, 48, 3743
- [50] Gou, L., McClintock, J. E., Remillard, R. A., et al. 2014, *ApJ*, 790, 29

- [51] Yamamoto, Y. 2024, “Hyperbrane Relativity: A Unified Geometric Framework,” HBR Master Document v26
- [52] Yamamoto, Y. 2024, “HBR V19: Field Geometry and Emergent Time”
- [53] Yamamoto, Y. 2024, “HBR V26: Galactic Tilt and Surface Density Saturation”
- [54] Abbott, B. P. et al. 2016, Phys. Rev. Lett., 116, 061102
- [55] Abbott, B. P. et al. 2016, Phys. Rev. Lett., 116, 241102
- [56] Abbott, B. P. et al. 2017, Phys. Rev. Lett., 119, 161101
- [57] Abbott, B. P. et al. 2019, Phys. Rev. Lett., 123, 011102
- [58] Abbott, R. et al. 2020, Phys. Rev. Lett., 125, 101102
- [59] Abbott, R. et al. 2020, Phys. Rev. D, 102, 043015
- [60] Abbott, R. et al. 2021, Phys. Rev. X, 11, 021053
- [61] Abbott, R. et al. 2020, Astrophys. J. Lett., 900, L13
- [62] Maggiore, M. et al. 2020, JCAP, 2020, 050
- [63] Reitze, D. et al. 2019, Bull. AAS, 51, 35
- [64] Event Horizon Telescope Collaboration 2019, Astrophys. J. Lett., 875, L1
- [65] Event Horizon Telescope Collaboration 2022, Astrophys. J. Lett., 930, L12
- [66] Blandford, R. D. & Znajek, R. L. 1977, MNRAS, 179, 433
- [67] Connaughton, V. et al. 2016, Astrophys. J. Lett., 826, L6
- [68] Greiner, J., Burgess, J. M., Savchenko, V., & Yu, H.-F. 2016, Astrophys. J. Lett., 827, L38
- [69] Yamamoto, Y. 2026, “HBR Part 17: Compact Objects as Exhausted Fountains,” HBR internal document (`parts_jp/part17_compact_objects.tex`)
- [70] Yamamoto, Y. 2026, “HBR Phase 2 §6: Photon Sphere and EHT Shadow,” HBR internal document (`phase2_jp/sec6_photon_sphere.tex`)
- [71] Yamamoto, Y. 2026, “HBR Phase 2 §7: B/r^3 Post-Newtonian Phase Correction,” HBR internal document (`phase2_jp/sec7_gw.tex`)
- [72] Yamamoto, Y. 2026, “Hyperbrane Relativity (HBR): Foundations and Worldview,” Independent Research Preprint (Kagoshima, Japan)
- [73] 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>.

- [74] 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.
- [75] 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>.
- [76] Gleason, A. M. 1957, “Measures on the Closed Subspaces of a Hilbert Space,” *Journal of Mathematics and Mechanics*, 6, 885–893.
- [77] 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>