

GG-6 ロック・クラスター

GG-Theory の常設 LHC 反証子としての、 3.85 TeV 近傍の非空間的カルツァークライン共鳴

Katsushi Arisaka

Department of Physics and Astronomy, Electrical and Computer Engineering,
University of California, Los Angeles, Los Angeles, CA 90095, USA

Contact: arisaka@physics.ucla.edu

要旨

1970 年代以降に発見された粒子は、いずれもまず標準模型のリストに載っていた。本論文が扱うのは、そのリストに載っていない最初の粒子である。GG-Theory は新しい質量スケールをフィットするのではなく導出する。すなわち $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35} \simeq 3.849 \text{ TeV}$ におけるロック・クラスターであり、台帳整数 $K = 35$ によって、調整可能なパラメータなしに固定される。同じ数は電弱スケール $v = M_{\text{lock}} (2/5)^3 \approx 246 \text{ GeV}$ をも過剰に拘束する：既知のスケールが二つ、整数が一つ、隠れる場所はない。

その質量に理論は四つの成員からなるクラスターを置く — スピン 2 グラビトン、カラー八重項ベクトル g^* 、そして通常のクォークがツリーレベルでは生成しない二つのディリクレ終端アーベリアン・ベクトル（レプトフォビックな Z'_B とその Q_i 兄弟） — これらは非空間的な（繰り込み群の）余剰次元の離散モードであり、導出によりトップに富み、ダイジェットに親和的で、レプトンに乏しく、既存のクリーン・チャンネル制限の射程外にある。抑制不可能な成員は八重項である — 13 TeV で $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) = 8.7 \text{ fb}$ 、 $\Gamma/m = 0.146$ 、干渉の符号は固定されている — それは ATLAS/CMS の $t\bar{t}$ 排除の観測された端に — そして本論文自身の較正では名目上わずかにその外側に — 位置している：この予言はいま検証されつつある。

ATLAS Run-2 解析に項目ごとに係留した完全なシミュレーション（第 VIII 部）は、これをカレンダーに変える：すでにテープ上にあるデータの専用再解析は実験ごとに期待値 $2.5\text{--}3.3\sigma$ を担い、系統誤差を改善した ATLAS+CMS 統合では $4.1\text{--}4.7\sigma$ を担い — 既存のデータからエビデンス水準に迫る感度である — そして背景系統誤差を半減させた場合、単一実験での 5σ は $\approx 1.3 \text{ ab}^{-1}$ 、2034 年頃となる。すべての性質が事前登録されているため、この探索は探索範囲効果（look-elsewhere）のペナルティを支払わず、また同じ較正のもとで、すでに記録された Run-3 データ（ $\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ ）は、帯域が空であればその全体を排除し、この実装をそのまま退役させると期待される。この賭けには一つの露出が伴う：赤外で登録されたヒッグスに対して、塔の電弱成員は $T = 1.7$ を与える

が、フィットが許すのは 0.00 ± 0.06 であり、利用できるカストーディアル対称性はない (O-KK-68)。質量が賭け金であり、LHC が賭け台である。

要約

本論文の背後にある問いは単純である: GG-6 が正しいとすれば、*ATLAS* と *CMS* は正確に何を見るはずなのか — そしてどれだけ速く、それを発見するか、あるいは葬ることができるのか。答えは七つの論点に分けて、主題が許すかぎり平明な言葉で述べるのが最良である。

第一 — 原理と、それがなぜ予言するのか。 GG-Theory は一つの構造的な着想、すなわち幾何-ゲージ・ロッキングの上に立つ: 自然が探られるエネルギー・スケールを、帳簿上のラベルではなく真正な幾何学的次元として扱い¹、幾何とゲージ場は整数が定める閾値で互いにロックする — 台帳 $(M, N, L; J, K) = (1, 3, 5; 7, 35)$ である。整数こそが、この理論の自由度の内容のすべてである: 調整すべき結合はなく、走査すべき質量もなく、いかなる種類の連続的なダイヤルも存在しない。これがその異例の予言力の源である: 数え上げの数の上に築かれた理論は後退できず、それゆえその述べることのすべてが確約となる — 五十年にわたるその不在を §1 が余さず語る、まさにその性質である。

第二 — 導出された一つの数を、二度使う。 最も硬い出力はロック・スケールであり、

$$M_{\text{lock}} = \frac{M_{\text{Pl}}}{2 e^{35}} \simeq 3.849 \text{ TeV},$$

ここで指数の 35 は整数 K であり — フィットされた量ではない。同じ数は二度目に使われる: 1980 年代から知られている電弱スケールは $M_{\text{lock}}(2/5)^3 \approx 246 \text{ GeV}$ に等しくなければならず、実際に等しい。読者はこの過剰拘束が何を意味するかで立ち止まるべきである: 理論は単に 3.85 TeV に新しい何かを予言するだけでなく、その予言をすでに測定された数に結びつけており、それゆえ、すでに機能しているものを壊すことなしに標的をずらすことはできない。

第三 — 孤立したバンプではなく、四つのクラスター。 ロック・スケールに理論は、質量の縮退した四つの兄弟状態を置く: スピン 2 グラビトン・モード、重いグルーオン様状態 (カラー八重項 g^*)、電子とミューオンを避け、さらに — それに質量を与える境界条件のもとでは — 通常のクォークからは生成されすらし、ゲージ化されたバリオン数の重い光子様状態 (「レプトフォビク」な Z'_B)、そしてバルクの第二のアーベリアン因子から来るその状態の兄弟であり、第三のものと同じく脱結合しているものである。それらの崩壊の選好は選ばれたのではなく導出されたものである: トップクォークに富み、ジェットに親和的で、レプトンと光子に乏しい。これこそが、LHC の最もクリーンで最も有名な排除チャンネル — 電子-陽電子対、光子対 — がそれについてほとんど何も語らない理由であり、決定的なチャンネルがトップクォーク対である理由である。

第四 — それはいま検証されつつある。 クラスターの抑制不可能な成員は八重項である: 衝突するクォークへのその結合は同じ整数 K によって固定されており、下げることはできない。計算された率、すなわち 13 TeV での $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) = 8.7 \text{ fb}$ は、広い幅 ($\Gamma/m = 0.146$) を伴い、公表された ATLAS/CMS のトップ対排除の観測された端に位置する — 本論文自身の較正では名目上 95% CL で排除されるが、一つの段階が定量化されていない: 広く、かつ導出された符号で QCD 連続背景と干渉し、3.85 TeV より下でスペクトルを増強し上で減損させるというこの形状に合致する公表済みの探索テンプレートは存在せず、その形状への較正の移送には測定された不確かさが無い。したがって、既存データの専用の再解釈こそが、本論文が行う最も緊急な唯一の要請である。

¹コホートの読みと整合的である: この「六次元バルク」はエネルギー・スケールの繰り込み群的幾何化であり — 動径方向の第五次元は繰り込み群軸 $r = \ln(E_{\text{GUT}}/\mu)$ であって、ランダル-サンドラム型の空間次元ではない — したがって 3.85 TeV 近傍の動径的な「ロック・クラスター」は、空間的カルツァークライン・グラビトンの塔ではなく RG 閾値/ロック・スペクトルである。Arisaka (2026, A2-GG6) を見よ。

第五 — 発見はすでにテープ上にあるかもしれない。 第 VIII 部は、解析チームが実際に走らせるやり方で探索をシミュレートし、項目ごとに公表された ATLAS Run-2 解析へ係留し、その公表された制限に較正している。結果はこうである：すでに記録された Run-2+3 データの専用再解析は、ATLAS に係留された窓において実験ごとに期待値 $2.5-3.3\sigma$ を担い、現実的に改善された背景系統誤差を伴う ATLAS+CMS 統合解析では $4.1-4.7\sigma$ を担う — エビデンス水準に迫る感度は、すでに記録済みのデータの中に存在する — そして背景系統誤差を半減させた場合、単一実験での 5σ は $\approx 1.3 \text{ ab}^{-1}$ 、2034 年頃となる。質量、幅、率、干渉の符号、角度分布の形状がすべてあらかじめ指定されているため、この探索は一般的なバンプ探しを支払う統計的ペナルティをいずれも支払わない：探索範囲効果 (look-elsewhere) による割引もなく（閾値において 0.8σ 相当、すなわちデータセットの倍増に等しい）、合致しない探索テンプレートによる三倍の希釈もない。

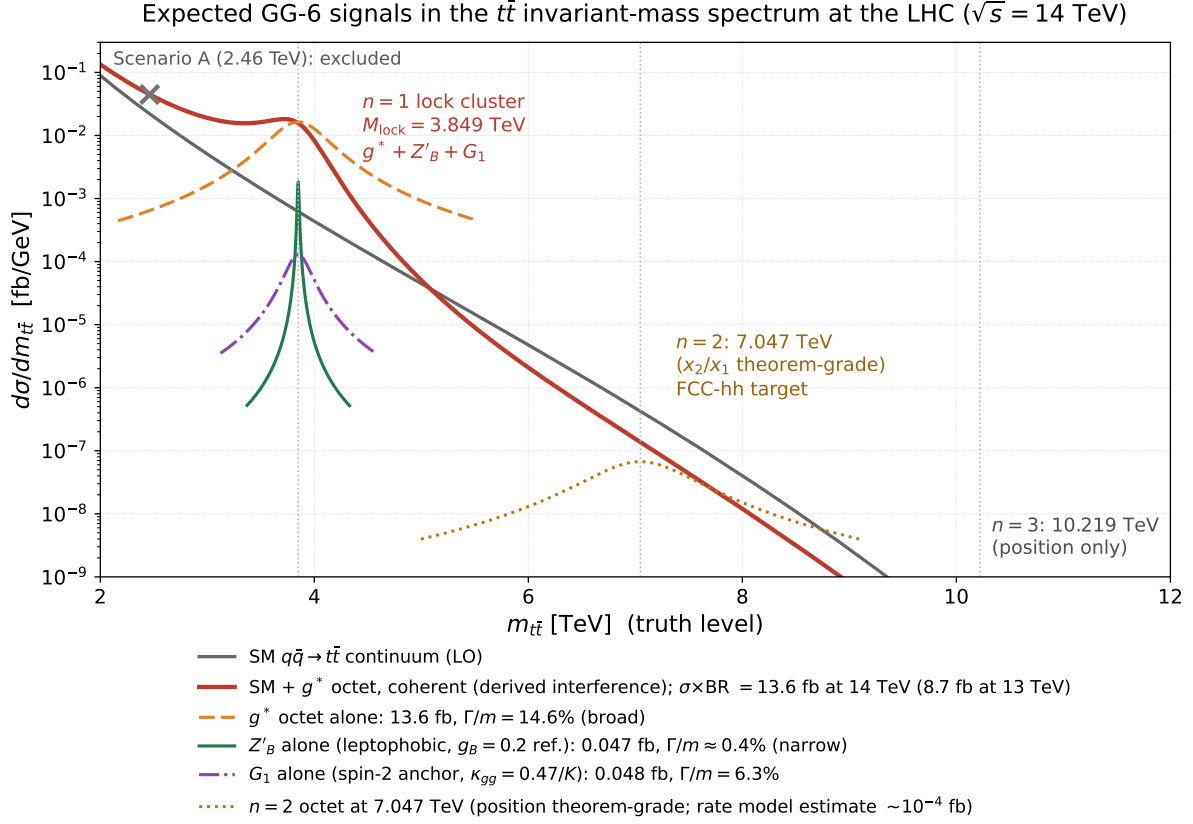
第六 — 戦いは統計ではなく系統誤差である。 シミュレーションの構造的な教訓はこうである：Run 3 より先では、探索を制限するのはもはやデータの量ではなく、背景がどれだけよく分かっているかである。ルミノシティの増加だけでは、データセットを三倍にすると有意度は $\sim 1\sigma$ しか動かない一方で、背景の不確かさを半減させること — 標準的で、分解可能な HL-LHC の期待 —こそが発見閾値を越えさせる。実験にとっての実際的な帰結は、一つの警告を含めて明示してある：信号自身の干渉が低質量サイドバンドを汚染するため、背景の規格化は $\sim 1 \text{ TeV}$ より下に係留しなければならない。

第七 — どちらの答えも決定的である。 これは GG-6 プログラムが持つ、最も鋭い衝突型加速器の反証子である。クラスターが存在するなら、関連したパターン — 一つの質量、四つの状態、トップに富む崩壊、導出された干渉形状、そして 7 TeV 近傍の第二の族 — は見紛いようがなく、性質の測定 (スピン、カイラリティ) は HL-LHC 運転の二年以内に続く。存在しないなら、すでに記録された Run-3 データ ($\approx 0.5 \text{ ab}^{-1}$ 、期待値) における無信号は理論を傷つけるのではなく、現在の実装をそのまま退役させ、電弱スケールの導出をも道連れにする。パラメータが存在しない以上、逃れるために調整できるパラメータはない。スピン 2 の直接確認は、その導出された結合においては、FCC-hh の物理となる (85 TeV で $\approx 0.21 \text{ pb}$)。クラスターにもう一つできないのは、すでに取得されたデータから隠れることである：その電弱成員 — 同じ塔が同じ質量に置く重い W 、 Z 、そして光子 — は、コンパニオン論文の vev 定理が赤外端で読み取るヒッグスに対して、 T パラメータの値 1.7 を与えるが、精密フィットが許すのは数百分の一であり、しかもこの枠組みのバルク群にはそれを保護するカストーディアル対称性がない。これは衝突型加速器の反証子の傍らにキル級で登録されているのであって (O-KK-68)、その内部に隠されているのではなく、新たな探索なしに実装の運命がすでに決っていたかもしれない唯一の箇所であり、本論文はそれを最後のページではなく最初のページで述べている。

それぞれの共同体はこの賭けをそれぞれの仕方で読むだろう。衝突型加速器の実験家が出会うのは、具体的で事前登録された探索である：一つの質量、一つの幅、一つの符号、一つの角度分布の形状が、再解釈カードとトリガーのロードマップとともに発行されている。大学院生が出会うのは、決定的なデータがすでに存在する学位論文規模の解析である (序文を見よ)。理論家が出会うのは、そのスケールがフィットではなく整数から導出された余剰次元のシグネチャ — そして逃げ道のない反証子である。一般の物理学者が出会うのは、平明な賭けである：一つの数 3.849 TeV が、LHC の次の十年に賭けられている。本論文の残りは、その賭けを精密にする。

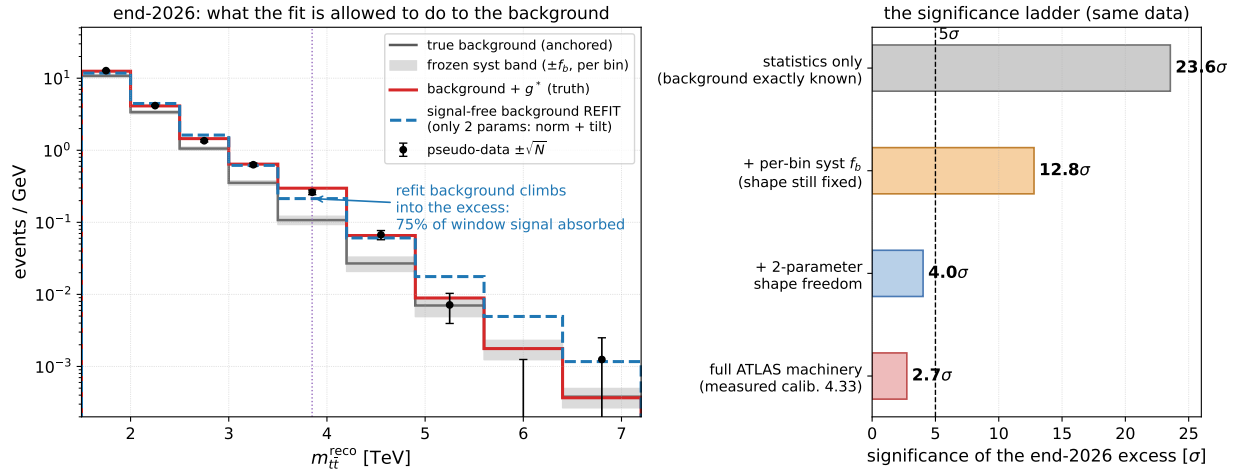
キーワード： 幾何-ゲージ・ロッキング; カルツァークライン粒子; 非空間的余剰次元; スケール次元; 位相次元; ランダル-サンドラム; ATLAS; CMS; HL-LHC; スピン 2 共鳴; トップ-反トップ共鳴; ト

リガーレベル解析; データ・スカウティング; 反証可能性; 開放系; OGGEF; GDOS



期待される GG-6 の衝突型加速器信号のすべてを、調整可能なパラメータなしに計算したもの：導出された 3.849 TeV における四成員のロック・クラスター、そのうち二つはツリーレベルでは生成されず、7.05 および 10.22 TeV にその動径族がある（図 4、50 頁）。

The discovery may already be on tape: end-2026 reanalysis of recorded Run-2+3 data



判定が近い理由：すでに記録された衝突の専用再解析は実験ごとに期待値 2.5–3.3σ を担い — そして梯子は、感度がどこへ行くのかを正確に示す（図 11、142 頁；第 VIII 部）。

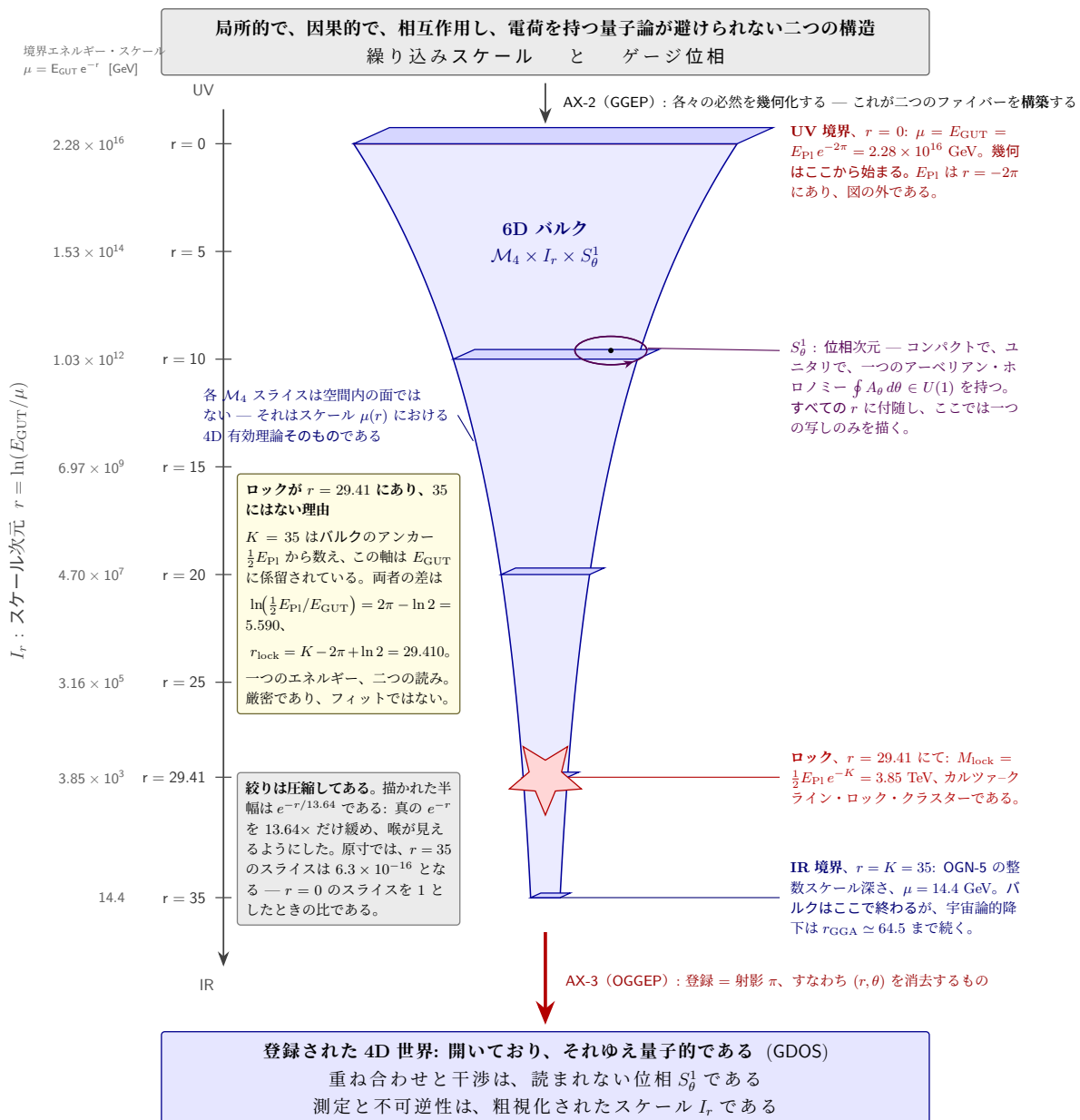
十の予言、 そのいずれにもデータ到着前にグレードが付されている

本論文が間違っているとしてもよいとするもの。番号を付した十の予言であり、そのそれぞれが、どれだけ強く主張されているかを述べるグレードを担う: [T] は定理であり、その定理とともに倒れる; [D*] は傍らに印刷された条件のもとで導出されたもの; [M] は有限個の列挙されたメニューの一つ; [E] は本論文が消費する他者の数である。グレードは四つ、ラベルのない行は一つもない — 四つを混ぜることこそが、予言のリストを実際より強く見せるやり方だからである。率と分岐指紋は、すでにテーブル上にあるデータで LHC が到達できるものであり、干渉の符号は幾何の定理、ツリーレベルのレプトフォビアは電荷割り当ての定理である; 符号を誤ったラインシェイプは前者を退役させ、登録されたループ下限より上でディリクレ・ベクトルから出るダイレプトン線は後者を退役させる。ここには、データの後に書かれたものは一つもない。詳細は表 31、169 頁。

ID	予言	グレード
P-KK-1	13 TeV で $\sigma \times \text{BR}(g^* \rightarrow t\bar{t}) = 8.7 [7.0\text{--}12] \text{ fb}$; 14 TeV で $13.6 [11\text{--}19] \text{ fb}$; 85 TeV で $\approx 2.8 \text{ pb}$	[D*]
P-KK-2	八重項の分岐指紋 $t\bar{t} : b\bar{b} : jj \approx 70 : 3.5 : 1$; $\text{BR}(t\bar{t}) = 0.94 [0.93\text{--}0.95]$	[D*]
P-KK-3	グラビトンのパターン $t\bar{t} : W_L W_L : Z_L Z_L : hh = 0.69 : 0.15 : 0.08 : 0.08$, $\Gamma/m = 6.3\%$ (テンプレート規格化; 2.7% は幾何の k について、O-KK-66), $\sigma(85 \text{ TeV}) \approx 0.21 \text{ pb}$	[D*]
P-KK-4	干渉の符号: 極より下では増強、上では欠損; 標準模型との交差は $\simeq 4.9 \text{ TeV}$; 重心の引きは $-\mathcal{O}(100) \text{ GeV}$	[T]
P-KK-5	トップ偏極 $P_t = +0.91$, 帯域 $[+0.88, +0.92]$; 共鳴の $A_{FB} = 0$, u, d, s, c 由来 (カイラルな $b\bar{b}$ チャンネルはパーセント水準)	[D*], P_t について (カスケード帯域); [D*], A_{FB} について (一つの UV プロファイル)
P-KK-6	ツリーレベルのレプトフォビア、登録されたループ下限を伴う; $m_{Z'_B} = m_{G_1} = M_{\text{lock}}$ が厳密に成立 (ディリクレ・モード)	質量について [T]; 下限について [M]
P-KK-7	導出されたオフセット (基準の $1.07\text{--}1.17\times$, 自由場) における角度パートナーであり、 θ に依らないカレントによる単独生成には現れない	[D*] オフセット; [M] ファイバーの読み
P-KK-8	$1.831 M_{\text{lock}} = 7.047 \text{ TeV}$ における第二の動径族 (位置; 85 TeV での率の見積もりは $\sim 10 \text{ fb}$)	[T]/[M]
P-KK-9	ラディオンは存在しない; ヒッグスの結合は $G_1 \rightarrow hh$ を除いて標準模型的	[T]
P-KK-10	レプトン衝突型加速器における判定: 登録されたループ下限より上では、ディリクレ・ベクトルまたは八重項による s チャンネルの線は $\mu^+\mu^-$ に現れない; 電弱 KK 光子と Z は $\sqrt{s} = M_{\text{lock}}$ に線を与え、その高さは開いたレプトン深さによって定まる (O-KK-62)	ディリクレ・ベクトルと八重項の条項について [D*]; 線の高さについて [M]

第五次元がスケールであり 第六次元が位相である六次元バルク

プログラムの全体を一枚の図に、スケール軸には数を付して。バルク $M_4 \times I_r \times S_\theta^1$ はファイバー束である：ローレンツ的な舞台の各点の上に、スケールと位相という二つの非空間的ファイバーが乗る。AX-2 (GGEP) は上向きに作用してそれらを構築するのに対し、AX-3 (OGGEP) は下向きに作用し、登録とは (r, θ) を消去する射影 — 量子的振る舞いの起源 — である。垂直軸は較正されている： $E_{\text{GUT}} = E_{\text{Pl}} e^{-2\pi}$ が $r = 0$ に、赤外境界には OGN-5 深さ $r = K = 35$ が、そしてロックは $r = 29.41$ にあり、これはちょうど $K - 2\pi + \ln 2$ である。



目次概観

第 I 部. 基礎	18
第 II 部. 導出された信号	42
第 III 部. 生成と発見	76
第 IV 部. GG-6 対 ランダル-サンドラム、および開放系としての検出	84
第 V 部. ロック・クラスターの二つの読み出し	90
第 VI 部. $t\bar{t}$ 信号の解剖	95
第 VII 部. 実験的な現状と射程	107
第 VIII 部. 発見のシミュレーション	132
第 IX 部. HL-LHC を超えて	150
第 X 部. 議論	159
第 XI 部. 結論	174
第 XII 部. 技術付録	181
第 XIII 部. よくある反論と応答	204
第 XIV 部. 参考文献	223

図目次

1	GG-Theory コホート全体で共有される開放系の漏斗。	24
2	二十二論文コホートの地図。	38
3	GG-P1-KK の十四の部のロードマップ。	40
4	GG-6 ロック・クラスターの定量的な LHC 不変質量シグネチャー	50
5	低位 GG-6 セクターの概略的な質量階段	54
6	QCD 干渉を伴うロック・クラスターの導出された $m_{t\bar{t}}$ ラインシェイプ	99
7	導出された生成角分布: スピン 1 対スピン 2	101
8	系のラピディティ分布: gg 対 $q\bar{q}$ の始状態	103
9	計算されたロック・クラスターの $\sigma \times \text{BR}$ 対 公表された 95% CL 制限	116
10	暦年で見えたロック・クラスターの反証タイムライン、2025–2050	125
11	2026 年末における有意性の梯子	142
12	四つのスナップショットにおけるシミュレーション・スペクトル	143
13	較正された有意性と積分ルミノシティ	144

表目次

1	GG-憲法から KK 衝突型加速器プログラムへの憲法的経路。	25
2	KK 対 RS 対 GG-6 の二つの非空間的次元	33
3	GG-6 動径ロック・クラスター (オプション A)。	46
4	すべての定量的予言の来歴。	49
5	衝突型加速器に関連する低位 GG-6 セクターの実用的質量台帳。	52
6	低位 GG-6 衝突型加速器スペクトルの導出された構造。	53

7	二つのシナリオの下でのクラスター構成員。	61
8	GG-6 の KK セクターを最小限のものから区別する主要な衝突型加速器観測量の要約。	68
9	第一 GG-6 クラスターのチャンネルごとの論理。	82
10	教科書的な 5D RS 探索像と 6D GG-6 像との最小限の比較。	85
11	一般的な KK 対 5D ランダル-サンドラム 対 6D GG-6。	85
12	読み出し II のチャンネル推定値。	92
13	二つの読み出しの並置。	94
14	g^* 信号の超過対連続背景プロファイル、LO/LO、 $\sqrt{s} = 13$ TeV: その比。	98
15	3.849 TeV における識別行列。	104
16	チャンネルごとの排除と発見の台帳。	110
17	GG-6 KK 探索プログラムに関連する現在の公表された ATLAS/CMS の状況。	112
18	二つの候補質量におけるパートン・ルミノシティ。	114
19	$\sqrt{s} = 13$ TeV におけるロック・クラスター状態の計算された $\sigma \times \text{BR}$ 。	115
20	第一 GG-6 クラスターに対する近未来の発見の論理。	122
21	図 10 への数値入力。	124
22	なぜ KK 探索が現行の GG-6 実装の最も鋭い 衝突型加速器 反証子なのか。	127
23	GG-6 KK 探索のために提案されるトリガーおよび削減ストリームの改良。	130
24	140 fb^{-1} における ATLAS 併合 SR の事後フィット背景	133
25	「改善された系統誤差」が意味するもの、形容詞としてではなくビンごとの数値として述べたもの。	140
26	四つのスナップショット: 収量と有意性	142
27	専用探索の有意性、ATLAS+CMS の結合を含む	146
28	将来の衝突型加速器施設の現状、2026 年 7 月	157
29	将来の施設における GG の反証計画	158
30	枠組み識別マトリクス	168
31	本論文の番号付き予言と、そのグレード。	169
32	本論文で用いられる略語の一覧。	182
33	本論文の記号の一覧と、そのそれぞれを定義する節ないしコンパニオン論文。	184
34	十個の数の一覧	186
35	低位 GG-6 衝突型加速器セクターのマスター現象論台帳。	187
36	衝突型加速器プログラムの反証階層。	188
37	発見カレンダー。	188
38	一つのデータセットについてビンごとに計算された有意度の算術、それによって他のあらゆる 数値が。	199
39	未解決項目を、悔恨の一覧としてではなくロードマップとして示す。	202

目次

要約	3
図目次	9
表目次	9
まえがき	16
第 I 部. 基礎	18
1 序論: 標準模型を超えた五十年	18
2 平明な言葉による GG-Theory — そしてなぜ LHC がそれを裁くことになるのか	19
3 中心的主張: 開放系観測量としてのカルツァークライン・ロック・クラスター	21
4 GG-憲法から衝突型加速器観測量へ	23
5 KK 塔の 6 次元幾何学的起源	26
5.1 6 次元の舞台	26
5.2 モード展開と二つの量子数	27
5.3 規約: GG-6 における「カルツァークライン」は非空間的を意味する	28
5.4 動径的な枝と多場ロック・クラスター	29
5.5 GG-6 が通常の KK や RS に還元されない理由	30
6 三つの読みの道筋	34
7 コホートの継承と十四の部のロードマップ	36
7.1 コホートの継承	36
7.2 十四の部のロードマップ	39
8 第 I 部を平易な言葉で	41
第 II 部. 導出された信号	42
9 ロック・スケールと第一共鳴クラスター	42
9.1 ロック・クラスター質量: 定理 T-KK-1	42
9.2 すべての定量的予言の来歴	47
9.3 重心の問題: 必要な明確化	50
9.4 ベンチマーク質量台帳	51
9.5 状態ごとの観測量ベンチマーク・シート	52
9.6 6D 階段の概略図	54
10 KK セクターの観測可能な性質	55
10.1 スピンと角度構造	55
10.2 幅とラインシェイプ	55
10.3 RG スケール・スロットからの質量と固有幅	55
10.4 クラスターの微細構造、導出される: 定理 T-KK-2	56
10.5 GG-6 の結合から得られる分岐比	65
10.6 重なり積分から生じる結合の非普遍性	67
10.7 穏やかなレプトフォビック $U(1)_B$ 混入	67
10.8 相関するパートナー状態	68
10.9 系 T-KK-2c: グラビトンのグルーオン結合、導出済み	68
10.10 バリオンの規格化 g_B : 定理級のノルムと、解決された残余規則 (L-KK-1)	72
11 第 II 部を平易な言葉で	74
第 III 部. 生成と発見	76
12 ハドロン・コライダーにおける生成機構	76
12.1 狭幅近似の一般的な勘定	76
12.2 なぜ絶対断面積を引用しないのか	77
12.3 クォーク・反クォーク対消滅	77

12.4	グルーオン融合	77
12.5	ベクトル・ボソン融合と随伴生成	78
12.6	GG-6 に対する現実的なチャンネル階層	78
12.7	事象収量の勘定	78
13	チャンネルごとの発見論理	78
13.1	ダイレプトン: 清浄だが必ずしも支配的ではないチャンネル	79
13.2	ダイフォトン: 依然として重要だが、唯一の手掛かりとしては理論的に不利	79
13.3	トップ対共鳴: 中心的な戦場	79
13.4	ダイジェット: GG-6 の穏やかなレプトフォビックな側面が可視になる場所	80
13.5	ダイボソン: 幾何からヒッグスへの橋	80
13.6	ヒッグス対: 最良のスカラー的補強者	81
13.7	チャンネル統合の原理	81
14	平易な言葉による第 III 部	82
第 IV 部. GG-6 対 ランダル-サンドラム、および開放系としての検出		84
15	GG-6 は通常の KK および RS ベンチマークとどう異なるか	84
15.1	通常の KK および RS の参照点	84
15.2	実験的に重要な五つの相違	84
15.3	一般的な KK、5D RS、および GG-6: 実験的に重要な比較	85
15.4	導出された幾何と、フィットされた共鳴	87
15.5	再解釈にとっての実践的な帰結	87
16	なぜ加速器検出は開放系の問題なのか: GDOS の見方	87
17	平易な言葉による第 IV 部	88
第 V 部. ロック・クラスターの二つの読み出し		90
18	読み出し I: 定理のみの標的	90
19	読み出し II: 経験的に係留されたレート推定	91
20	第 V 部を平易な言葉で	93
第 VI 部. $t\bar{t}$ 信号の解剖		95
21	この部が何を加えるのか、そしてどのグレードで加えるのか	95
22	干渉を伴う $m_{t\bar{t}}$ ラインシェイプ	96
22.1	振幅とカラー代数	96
22.2	二乗: 三つの項と V/A 代数	96
22.3	符号定理	97
22.4	数値と観測可能な帰結	97
23	ヘリシティ振幅から得られる角度構造	98
23.1	規約と二つのウィグナー行	98
23.2	$q\bar{q}$ からのスピン 1: 導出	99
23.3	gg からのスピン 2: 導出	100
23.4	定量化された分離能力	100
24	トップ偏極とスピン相関	101
24.1	縦偏極: $P_t = +0.91$ 対ゼロ	101
24.2	スピン相関: 識別変数ではなく、整合性チェック	102
25	系の運動学	102
26	連続背景、S/B、および収量	102
27	識別行列と事前登録された指紋	104
28	信頼性と未解決の論点	105
29	第 VI 部を平易な言葉で	105

第 VII 部. 実験的な現状と射程	107
30 ATLAS と CMS における現行の実験的現状	107
30.1 ルミノシティの背景	107
30.2 高質量ダイレプトンの制約	107
30.3 高質量ダイフォトンの制約	107
30.4 ダイジェットおよび基礎構造に基づく探索	108
30.5 トップ対共鳴の探索	108
30.6 ヒッグス対の探索	108
30.7 チャンネルに依存した排除と発見の台帳	109
30.8 公表された現状が証明するもの、そして証明しないもの	111
31 実務的対決: 計算された $\sigma \times \text{BR}$ 対 公表された制限	112
31.1 本節が付け加えるもの、そしてどのグレードで付け加えるか	112
31.2 ワークブック: マスター公式、入力、そして検証	113
31.3 結果	115
31.4 生き残りの言明、チャンネルごとに	115
31.5 キル窓、定量化して	119
32 近い将来の発見ポテンシャル	119
32.1 Run-3 から初期 HL-LHC への橋	119
32.2 なぜ $t\bar{t}$ が優先チャンネルなのか	120
32.3 ブースト・ダイジェットとヒッグス対の役割	120
32.4 ベンチマーク有意度の回廊	120
32.5 ATLAS と CMS は現行の 2026 年ランですすでに最初のイベントを得られるか	121
32.6 実務的な言葉で見た近未来の到達域	122
32.7 暦年で見た反証のタイムライン	122
33 なぜこれが最良の衝突型加速器キラー実験なのか	124
33.1 他のエネルギー・フロンティアの主張と比べた鋭さ	124
33.2 発見が確立するであろうもの	126
33.3 不在が確立するであろうもの	126
33.4 事前宣言されたキル条件	126
34 長期的な将来展望	127
34.1 決定的な機械としての HL-LHC	127
34.2 ATLAS Phase-2 アップグレード	127
34.3 CMS Phase-2 アップグレード	127
34.4 FCC-hh、ミューオン・コライダー、および CLIC	128
34.5 間接的探査	128
35 ATLAS と CMS のためのトリガーおよび解析ロードマップ	128
35.1 高レート・フロンティアを積極的に用いる	128
35.2 トリガー水準で探索をクラスター認識型にする	129
35.3 トップおよびヒッグスのブースト物体を一級市民に格上げする	129
35.4 精密タイミングを共鳴品質の変数として活用する	129
35.5 共同のベンチマーク公開は多大な助けとなるであろう	129
36 第 VII 部を平易な言葉で	131
第 VIII 部. 発見のシミュレーション	132
37 本部が付け加えるもの、そしてゲームの規則	132
38 係留解析を、解析者のように読む	133
38.1 支配的な背景、およびそのそれぞれがどう見積もられるか	133
38.2 トリガー、そしてなぜレプトン一つで十分なのか	134
38.3 イベント選別と再構成、カットごとに	134
38.4 $\epsilon_A = 6.5\%$ は何でできているか	135
38.5 分解能、ビン分け、そして公表された感度	135
39 シミュレーション、一歩ずつ	136

39.1	信号: 導出されたラインシェイプからビン内のイベントへ	136
39.2	背景: 総量を測定された収量に锚づける	136
39.3	13 から 14 TeV へ、そして「14-TeV 等価」ルミノシティ	137
40	発見の統計、第一原理から	137
40.1	計数、尤度比、そして Z の意味	137
40.2	ニューサンス・パラメータとしての背景の系統誤差	138
40.3	系統誤差の壁、正確に位置づける	138
41	較正: トイを実際の解析へ結びつける	139
41.1	「改善された系統誤差」が意味するもの、定量的に	140
42	なぜ目は過大評価するのか: 有意度の梯子	140
43	四つのスナップショット: 検出器が記録するもの	141
44	事前登録された探索: 厳密な予言が買うもの	145
44.1	利点 1: 探索範囲効果 (look-elsewhere) のペナルティがない (計上済み)	145
44.2	利点 2: 整合テンプレート (計上済み); 公表されたパイプラインが実際に検定しているもの (これではない)	145
44.3	利点 3: 角度方向の次元と厳密なレート (未計上)	146
44.4	二実験の結合、および較正された判定	146
44.5	専用フィットが尊重せねばならない警告: サイドバンドは汚染されている	147
45	これが F-KK-2B にとって何を意味するか、および留保台帳	147
46	第 VIII 部を平易な言葉で	149
第 IX 部. HL-LHC を超えて		150
47	本部が答える問い	150
48	実際にあるがままの施設の展望	150
49	発見後のチェックリスト: 2035 年以後に残るもの	151
50	マシンごとに: 各施設が何を決めるのか	152
50.1	84-85 TeV の FCC-hh: 分光マシン	152
50.2	FCC-ee: パラメータ台帳のマシン、そしてラディオン不在の検証	153
50.3	ミュオン・コライダー: レプトフォビアのマシン	154
50.4	線形コライダー、LHeC、そして脇役たち	154
51	具体的なシナリオ、2035-2070 年	154
52	要約マトリクス	155
53	第 IX 部を平明な言葉で	156
第 X 部. 議論		159
54	結果の意義	159
55	独自性、高潔さ、そして革新	161
55.1	古典的なコライダー・パズル、解決あるいは解消	162
55.2	構造的な革新	163
55.3	高潔さの条項	164
56	標準模型を超える他の道との比較	165
57	反証のための予言	167
58	未解決の問い	171
59	完成したコホートと将来の展望	172
60	議論のまとめ	172
61	第 X 部を平易な言葉で	173
第 XI 部. 結論		174
62	本論文が確立したもの	174
63	客観的な限界と次の技術的課題	175

64	個人的展望: 実験の最前線での五十年	175
65	展望: 幾何学的世紀はどのようなものでありうるか	176
66	頂上ではなく登山口: 最後の省察	177
67	それが何を意味することになるか: 物質、数、そして自然の可読性	177
68	第 XI 部を平易な言葉で	179
	謝辞	180
第 XII 部. 技術付録		181
A	略語一覧	182
B	主要記号の用語集	184
C	コホート横断の引用のための大域的命名規約	185
D	総括表	185
E	QCD グルーオンとカラー八重項 g^* との関係は何か?	188
F	バリオンのベクトル Z'_B の起源は何か?	189
G	GG-Theory の「グラビトン」とは何か?	191
H	なぜ g^* は最大の生成レートをもつのか—そしてなぜそれはそれほど幅広いのか?	193
I	整数一つ、ベキ二つ—レート階層と $t\bar{t}$ の支配	194
J	6D 作用から KK スペクトルへ—講義	196
J.1	ステップ 1: 教科書的な導出、ゼロから	196
J.2	ステップ 2: 教科書が定めることのできないもの	197
J.3	ステップ 3: GG-6 による導出、および計算された数値	197
J.4	参考: 還元公式	197
K	パートン分布から断面積へ—講義	198
K.1	ステップ 1: 因子化された断面積、ゼロから	198
K.2	ステップ 2: この連鎖が仮定しながら定めることのできないもの	199
K.3	ステップ 3: GG-6 の連鎖、両端で閉じたもの	199
L	発見の統計学—計算を伴う講義	199
L.1	ステップ 1: ポアソン尤度から Z へ、算術を示しながら	199
L.2	ステップ 2: 計数が見ることのできないもの	200
L.3	ステップ 3: 事前登録された見返り、計算して	200
L.4	参考: 有意度スケーリングの作業帳	200
M	実験家のためのベンチマーク/再解釈カード	200
M.1	実装の手順解説	201
N	コライダー用語集	202
O	未解決項目の昇格ロードマップ	202
第 XIII 部. よくある反論と応答		204
P	方法論と導出の連鎖	204
Q	質量と微細構造	206
R	結合、レート、抑制	208
S	シミュレーションとその統計	210
T	還元可能性、非空間的次元、そして近隣の枠組み	212
U	コホート依存性と立ち位置	215
V	実験の実務	216
第 XIV 部. 参考文献		223

まえがき

本序文は、誰よりもまず、ATLAS あるいは CMS の解析グループに所属している — あるいは参加するかどうかを決めようとしている — 大学院生、そしてこれからの五年間を何に使うべきかを考えている大学院生に宛てられている。

まず、この分野が実際にどこに立っているかを考えてみよう。標準模型は構造としては 1970 年代半ばに完成しており、それ以降の衝突型加速器におけるあらゆる発見は、そのリストに載っていた項目であった: W および Z ボソン (1983 年) は 1967 年の電弱理論を確認した; トップクォーク (1995 年) は、精密フィットによって、ほぼその測定質量において要求されていた; ヒッグス粒子 (2012 年) は、1964 年に書き下された機構の最後の未確認の欄であった。これらは実験物理学の記念碑的な達成であり — そしてそのいずれもが確認であった。標準模型のリストに載っていない粒子を観測した衝突型加速器は、いまだかつて存在しない。今日 LHC の実験に加わるということは、リストそのものが最後に増えてから半世紀後に加わるということである。

次に、本論文が卓上に載せるものを考えてみよう。調整可能なパラメータを持たない理論 — その自由度のすべては一握りの整数である — が、新しい質量を導出する: プランク・スケールと整数 35 から、3.849 TeV、それだけである。そこに何が住むか (四つの兄弟状態)、それらがどう崩壊するか (大半はトップ対)、主要状態の幅がどれほどか (15%)、通常背景とどう干渉するか (下では建設的に、上では破壊的に — 符号を含めて、定理である)、そして角度にどう分布するかを、それは導出する。新しい数を、読者がすでに知っている数に結びつけさえする: 同じ連鎖が電弱スケール 246 GeV を強制するのである。この理論には、共鳴が代わりに 4.5 TeV にあるとか、異なる結合をすれば、検出不能な片隅へ薄れていくとかいった版は存在しない。それはそこにあるか、さもなくば理論の現在の実装が死んでいるかのいずれかである。標準模型を超える文献のなかで、この形の言明が多く見つかることはないだろう; その不在こそが過去五十年の教訓にほかならない理由を、§1 が説明する。

これが抽象論ではなく具体的にあなた自身の機会である理由を述べる。本論文の第 VIII 部は、公表された ATLAS Run-2 トップ対探索に係留したうえで、実際の解析の忠実度で探索をシミュレートしており、その見出しは注目に値する: これを決するデータは、すでにテープ上にあるかもしれない。既存の Run-2+3 データセットの専用再解析は、実験ごとにエビデンス水準に迫る感度 ($2.5\text{--}3.3\sigma$) を担い、現実的に改善された系統誤差を伴う ATLAS+CMS 統合解析は、すでに記録された衝突から $4.1\text{--}4.7\sigma$ — 手の届く範囲の発見級 — に達する。これに必要な解析は、その第一段階においては共同研究規模ではなく学位論文規模である: 一つのチャンネル (ブーストされたトップ対、レプトン一つ)、公表されたオブジェクト定義、一つの新しいテンプレート (第 VI 部の干渉を考慮したラインシェイプ)、そして尊重すべき一つの警告 (§4.5)。発見の窓 — 2026 年からおよそ 2033 年まで — は、どこか未来の世代のものではない; それはいま始める一つの博士課程の、まさにその期間である。誰かの学位論文がこの問いを決することになる。それがあなたのものであってはならない理由はない。

そして、肯定的な結果が何を意味するかを考えてみよう。ヒッグスの発見は、その規模の大きさにもかかわらず、一つの章を閉じた: それは既知の構造を完成させたのである。3.849 TeV におけるクラストは、一つの章を開くことになる: 衝突型加速器物理学の歴史における標準模型を超える最初の粒子であり、自然の次元がエネルギー・スケールそのものを含むことの最初の直接的証拠であり、そして — 電弱の過剰拘束を通じて — 弱スケールがなぜ現にそうであるのかについての最初の説明である。それは漸進的な測定ではない。それは LHC がそれを望んで建設された、その種の結果である。

誠実さはもう半分を要求し、そしてそれこそがこれを売り込みではなく科学たらしめる半分であ

る: 理論は単に誤りであるかもしれない。しかしその場合に、この探索があなたに何を費やさせるかに注目してほしい — ほとんど何も費やさせない。それを検証する解析は、ビンごとに見て、高質量トップ対スペクトルの世界最良の測定であり、あらゆる広いトップ親和的共鳴に対する最強の制限である; あなたが構築することになる干渉を考慮したテンプレートは、あらゆる有色共鳴模型にわたって再利用可能である; そしてゼロ・パラメータ理論のクリーンな排除は恒久的な結果であって、パラメータ走査のプレスリリースではない。事前登録された予言は、いずれの向きにも決着する。それはこの分野に五十年にわたって欠けていた性質であり、そして本論文がそれを取り戻すために存在する、その性質である。

上に述べた学生であるならば、本論文をどう読むか: 第 VIII 部 (シミュレートされた探索 — それは自己完結的であり、ポアソン尤度から統計を教える) から始め、次に第 VI 部 (信号がどう見えるか、そしてなぜそう見えるかを、導出の全深度で)、次に §30 (現在の制限) と §31.5 (キル条件) である。基礎 (第 I-III 部) へは、義務としてではなく好奇心の命ずるままに、後ろ向きに分け入ればよい。理論の章は、あなたのトリガー・シフトが終わったあとも、そこにあり続ける。

第 I 部 基礎

GG-憲法から六次元の衝突型加速器標的へ

1 序論: 標準模型を超えた五十年

勝利と、それに続いた沈黙。標準模型は、本質的な部分のすべてにおいて 1970 年代半ばまでに組み上げられた: 1967–68 年の電弱理論、1973 年までの量子色力学と漸近的自由性、そして同じ年月に紙の上で予期された第三世代である。それに続いたのは、科学史上における確認の偉大な連年の一つであり — そして次に来るものにとって、それをまさにそのようなものとして見るのが重要である。チャームクォーク (1974 年) は GIM 機構によって要請されていた; ボトムクォーク (1977 年) は小林–益川構造によって; グルーオン (1979 年) は QCD によって; W と Z (1983 年) は電弱理論が要求した質量に現れた; トップクォーク (1995 年) は、見られる前に精密フィットによって誤差の範囲内で位置づけられていた; ヒッグス粒子 (2012 年; [ATLAS Collaboration, 2012](#); [CMS Collaboration, 2012](#)) は、1964 年に書き下された機構の最後の未確認項目であった。これらの発見のいずれもが、1975 年より前に完成したリストからの粒子であった。五十年のあいだ、いかなる衝突型加速器も、そのリストに一項目たりとも加えていない。この建造物における唯一の確立された亀裂 — ニュートリノ振動 (1998 年; [Fukuda et al., 1998](#)) — は、衝突型加速器ではなく地下検出器から来たものであり、新しい衝突型加速器スケールを何ら指定しない。

たどり着かなかった三つの道。それは努力の欠如によるのではなく、この記録は率直に述べられるに値する。というのも、この分野がそれを述べることはめったにないからである。五十年のあいだ、三つの偉大なプログラムが次の層を約束した。超対称性は、その最小形である MSSM において、後続する各フロンティアの「すぐ上」にあるパートナー粒子によって電弱スケールを安定化することを約束した — しかし最小模型は百を超える自由パラメータを担っており、それゆえ LEP における、テバトロンにおける、そして LHC の Run 1 と Run 2 における否定的結果のすべては、スペクトルを上方へずらすことで応じられ、そしてこの企てを動機づけていた自然なパラメータ領域は、いまやほぼ完全に排除されてしまった。余剰次元模型 — 大きな余剰次元、および本論文の主題が表面的に似ているワープしたランダル–サンドラム幾何 — は、真正な構造的洞察をもたらしたが、その質量スケールは常に入力であった: 走査されるべき半径あるいはワープ因子であり、それゆえいかなる排除も致命的たりえず、ただ場所を移すのみであった。ストリング理論は、あらゆるものに対する候補を構成しながら、測定可能ないかなるものにも自らを賭けなかった: 名高いほど天文学的な数に上る真空のランドスケープは、それが失敗すれば何かを反証するような、到達可能なエネルギーにおける単一の数を提供しない。五十年、三つのプログラム、そしてそのなかに明確で、事前登録され、反証可能な衝突型加速器予言は一つもなく — そしていまや最初の二つはその動機づけの形においてほぼ反証されて立ち、三つ目はそもそも反証されえない。

診断は構造的であって、個人的なものではない。これらは第一級の物理学者たちが追求した真剣な着想であり、その機構の多く — 超対称代数、ワープ幾何、ホログラフィー — は、個々の模型よりも長く生き延びる恒久的な数学である。破綻の様式は構造的であった：連続的な自由パラメータである。ダイヤルを持つ理論はいかなる測定からも後退でき、それゆえ何も賭けることがない；それはあらゆる実験を生き延び、そしてそのいずれによっても確認されない。ずれることのできる理論は負けることができない — そして負けることのできない理論は勝つこともできない。したがって五十年の教訓は、次の層が手の届かないところにあるということではない；予言力とは理論が何を禁ずるかによって測られるということ、そしてダイヤルは禁ずることの敵であるということである。

ふさわしい後継者はどのようなものでなければならないか。それはデータが到着する前に、一つの数を卓上に載せるだろう。その数は導出されたものであるだろう — 構造的定数へと明示的な連鎖を通じて追跡可能であり、その連鎖のどこにも、不一致を吸収しうる連続パラメータは存在しない。それは過剰に確約するだろう：新しい数をすでに測定された量に結びつけ、それゆえ予言をずらせばすでに機能しているものが壊れるようにする。そしてそれは信号を完全に指定するだろう — 質量のみならず、幅、崩壊の選好、角度形状、さらには干渉の符号までも — それゆえ実験の評決は、いずれの向きであれ、上訴を許さない。半世紀の挫折は、少なくとも、正確な職務記述書を生み出したのである。次節では、その職に応募する理論を紹介する。

2 平明な言葉による GG-Theory — そしてなぜ LHC がそれを裁くことになるのか

本論文が GG-Theory との最初の出会であるならば、ようこそ — 本節はあなたのために書かれており、何も前提としない。前節は、過去五十年のいかなる理論も満たしていない職務記述書で終わった。導出が始まる前に、どのような種類の理論がいまその職に応募しているのかを、平明な言葉で、人間らしい速度で聞く資格があなたにはある — というのも、それは形式論としてではなく、まず物語として出会うべきほどに異例だからである。

物語はこうである。GG-Theory は、世界が六次元であると提案する (Arisaka, 2026, A2-GG6) — ただし、丸め込まれた余剰空間という馴染みの意味においてではない。四つは通常の時空である。第五はエネルギー・スケールそのものである：自然を調べる際の「ズーム水準」 — 原子から原子核へ、クォークへと進むにつれて変わるもの — を、幾何学的方向として真剣に受け取ったものであり、座標 $r = \ln(E_{\text{GUT}}/\mu)$ と、整数である有限の長さ $K = 35$ を持つ。第六はゲージ位相である — 荷電物質の波動関数を回転させる角度、アハラノフ・ボーム効果が可視化するその角度が、記帳の道具から文字どおりの座標へと格上げされたものである。あなたはそのいずれに沿っても歩くことはできない；何ものも歩けない、なぜならそれらは場所ではないからである。それでも場は六つの方向すべての上に住み、スケール方向に沿った定在波は明確な質量を持つ粒子である — 計算可能な質量である、なぜならその方向の長さは、つまみではなく数え上げの数だからである。それがこの理論のいたるところにある特徴である：その自由度のすべては五つの整数 $(M, N, L; J, K) = (1, 3, 5; 7, 35)$ 、すなわち OGN-5 台帳であり、そのアノマリー相殺に由来する起源は GG-A3-BI6 (Arisaka, 2026, A3-BI6) において証明されている。五つのそれぞれが固定された意味を担っている — $M = 1$ は唯一のテンソル・シームであり電荷量子化の単位、 $N = 3$ は色の三重性、 $L = 5$ は SU(5) ブロック、 $J = 7$ は奇数閉包指数、そして $K = 35 = LJ = M^2 + N^2 + L^2$ は、ロック・スケール $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35}$ を定める

スロートの深さである — それゆえ五つは強制されたものであってフィットされたものではなく、恣意的な五つ組でもない。どこにも連続パラメータは存在しない。ひとたび整数が固定されれば — そしてそれらはフィッティングによってではなく無矛盾性によって固定される — 以後に続くあらゆる質量、結合、幅、角度は出力である。

GG-6 の賭け。 本論文はそれらの出力のうち最も鋭いものを提示し、LHC にそれを裁くよう求める。整数台帳から理論はロック・スケールを導出する (Arisaka, 2026, A2-GG6, 定理 6; Arisaka, 2026, A9-SM)

$$M_{\text{lock}} = \frac{E_{\text{Pl}}}{2e^{35}} \simeq 3.849 \text{ TeV}, \quad (1)$$

ここで指数の 35 は整数 K であって、フィットされた量ではない — そして理論は同じ数を二度使う、なぜなら電弱スケールはそのとき $M_{\text{lock}}(2/5)^3 \approx 246 \text{ GeV}$ に等しくなければならず、実際に等しいからである。ロック・スケールに理論が置くのは孤立したバンプではなく四成員のクラスターである — スピン 2 グラビトン・モード、カラー八重項ベクトル、そしてレプトフォビックな Z'_B に率いられる二つのディリクレ終端アーベリアン・ベクトル — 導出された結合、導出された幅、導出された干渉の符号、導出された角度分布を伴い、優先的にトップクォーク対へ崩壊する; そしてそのクラスターの抑制不可能な成員は、その計算された率において、ちょうど現在の ATLAS/CMS 排除フロンティアの上に位置する。記録済みの Run-3 データ ($\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$, 期待値) における無信号は、現在の実装をそのまま退役させる — 逃れるためのパラメータは存在しない。この賭けは失敗するかもしれない; それは失敗が可視であるように構成されている。

これを §1 の職務記述書に、項目ごとに照らしてみよう。データが到着する前に卓上に載せられた数: 3.849 TeV、活字になっている。導出された数: プランク・スケールと一つの整数へと明示的な定理連鎖を通じて追跡可能であり、その連鎖のどこにも連続パラメータはない。過剰確約: 同じ連鎖がすでに測定された電弱スケールを強制し、それゆえ予言をずらせばすでに機能しているものが壊れる。完全な指定: 質量のみならず兄弟状態、幅、分岐の選好、角度形状、そして干渉の符号であり、そのそれぞれが導出され、そのそれぞれが別個に検証可能である。個々の模型が、折に触れて固定された数を賭けたことはある — ここにベンチマークの Z' 、あそこに事前登録されたバンプ仮説といった具合に。いかなるプログラムも行っていないのは、四つを同時に行うことである: 数を導出し、それをすでに測定された量に過剰に確約し、信号を完全に指定し、そして失敗の基準をあらかじめ述べることである。だからこそ我々は、慎重に、誇張なしに、こう言うのである: 「標準模型を超える」ものの五十年の歴史において、自らの量を予言すると同時に、自らの反証の基準をあらかじめ書面で述べる提案は、これが初めてである、と。

そして時機はこれ以上ないほどよい — ここが、読んでいるいかなる実験家の脈をも速めるはずの部分である。本論文の第 VIII 部は、公表された ATLAS トップ対探索に係留したうえで、実際の解析の忠実度で探索をシミュレートしており、その見出しは、この問いを決する衝突はすでに記録されているかもしれないというものである: 既存の Run-2+3 データセットの専用再解析は、エビデンス水準に迫る感度 — クラスターがそこにあれば実験ごとに $2.5\text{--}3.3\sigma$ — を担い、それゆえカラー八重項 g^* のその水準における最初の兆候は、2026 年末までに記録された衝突のなかにすでに潜在しており、本論文が指定する専用再解析だけを待っている。そして現実的に改善された系統誤差を伴う ATLAS+CMS 統合解析は、同じテープから発見級に達する。どちらに転ぶにせよ、この問いは HL-LHC の決定の窓、おおよそ 2026–2035 年のうちに閉じる: いま始める一つの博士課程の、まさにその期間である。だから読み進めてほしい — 本部の残りは、この理論が動作の基盤とする唯一の

真に新しい概念 (§3)、衝突型加速器予言が公理から下降してくる憲法的経路 (§4)、そしてそれを担う六次元幾何 (§5) をあなたに備えさせる; そして本論文を超えて理論を知りたいければ、§7.1 の二十論文コホート地図が、どの扉がどこへ通じているかを示す。

この問いが通常の標準模型を超える問いよりも鋭い理由は、コホート自身の用語で改めて述べておく価値がある: 式 (1) の数は衝突型加速器に合わせて調整されたものではない。それは電弱スケールの導出に、そして理論の階層台帳に参加するのと同じ数である。したがって LHC における否定的な答えも肯定的な答えも、ただちにこのプログラムの憲法的中核へと伝播する。

本論文には四つの同時的な目標がある。第一は理論的な目標である: 理論の憲法的層とすでに導出された GG-6 定理パッケージから、そもそもなぜ六次元カルツァークライン (KK) セクターが存在するのか、そしてなぜその最初の実験的に関連するスケールが 3.85 TeV 近傍に係留されるのかを説明することである。第二は現象論的な目標である: その構造的言明を具体的な衝突型加速器観測量へと翻訳すること – 質量、幅、角度分布、チャンネル階層、そして相関するパートナー状態である。第三は実験的な目標である: 現在の公開された ATLAS および CMS の状況を、共同研究に対しても GG-6 の特有な非 RS 的特徴に対しても公正な仕方で見守ることである。第四は戦略的な目標である: なぜ LHC が、とりわけ HL-LHC が、現在の GG-6 実装に対する最良の衝突型加速器反証子を構成するのか、そして ATLAS と CMS が比較的实践的なトリガーおよびデータ形式の選択によってどのように感度を改善しようのかを、明示的に述べることである。

議論が意図的に長く、方法論的であるのは、真剣な反証子が真剣な記帳に値するからである。したがって本論文は、KK スペクトルそのものより一層上から始まる。GG-憲法の憲法的経路から出発し、次に 6D 幾何、KK 還元、ロック・スケールの導出、衝突型加速器観測量、現在の ATLAS/CMS の状況、HL-LHC の見通し、そして最後にトリガー・ロードマップへと進む。主として実験に関心のある読者は、第 30 節と第 32 節へ直接進んでよい; 主として GDOS と OGGE の概念的役割に関心のある読者は、第 4 節と第 16 節を特に注意深く読むとよいだろう。(読者の種類ごとに一つずつ、より充実した読解経路の一式が、本部の終わり近くに配置されている: §6。)

先へ進む前に、中心的な規格化上の要点を明確に述べておくことが有用である。多くの余剰次元論文において「最初の KK グラビトン質量」という語句は、5D RS 背景におけるベッセル方程式の特定の単一極解を指す。これに対し本論文において、衝突型加速器ベンチマーク 3.849 TeV は、6D GG-6 問題の最初のロック・スケール・クラスターを指す。そのクラスター内部の最初の孤立した副極は、完全な 6D 境界問題の詳細に依存する; クラスターの重心は依存しない。この区別は意味論的なものではない。それはデータのなかでどう探索すべきかを変える。

3 中心的主張: 開放系観測量としてのカルツァークライン・ロック・クラスター

本論文が GG-Theory コホート全体と共有している認識を、一箇所で、歩く速さで述べておく価値がある — というのも、それは読者に必要な唯一の真に新しい概念であり、またそれなしには以後に続くすべての真の意義が把握されえないからである。本節はいかなる部分も GG-Theory への予備知識を要求しない; それが要求するのは、あらゆる物理学者がすでに知っており、あらゆる教科書が静かに脇へ置いていることについての誠実さだけである。

自然界に閉じた系は存在しない — 一個の電子でさえも。 物理学が所有する最も単純な対象、すなわち一個の電子を考えよう。それは決して孤独ではない。それは自身の電磁場をまとっている；それは真空と仮想光子を交換する；かつてそれに散乱したものはすべて、その遭遇の記録を運び去る。そのすべてを剥ぎ取り — あらゆるものから真に脱結合した電子を想像してみれば — あなたが想像したのは、見ることも、偏向させることも、数えることもできない粒子である、なぜなら系を観測するとはまさにそれを開くことだからである。完全に閉じた系は、単に準備するのが難しいというにとどまらない；それは原理的に観測不可能であり、測定が試みられた瞬間に語義矛盾となる。それにもかかわらず、物理学の形式的装置の全体は逆向きに築かれている：教科書の力学は — 古典的であれ量子的であれ — 閉じた系の力学であり、みごとな孤立のうちに時間発展させられ、観測者はあとから公理として取り付けられる。自然界のあらゆるもの、一個の電子から生きた細胞、宇宙の内容全体に至るまでが開放系である；我々の理論は、開いていることを付け足すべき厄介事として扱ってきた。GG-Theory は、その転倒を拒むことから始まる。

自然が走る場所と、我々がそれを見る場所。 GG-6 において、自然の完全な力学は六次元バルクにおいて走る — 通常の時空に、§2 のスケール方向と位相方向を加えたものである。バルクにおいて収支は閉じる：力学は法則的で、完全で、決定論的である。しかしバルクにおいて実験が行われたことは一度もなく、また今後も決してない：我々と我々の装置は四次元境界に住んでおり、これまで記録されたあらゆるデータ — あらゆる飛跡、あらゆるカロリメータ・クラスター、あらゆる公表された断面積 — は境界記録である。両者の関係が理論の第三公理、OGGEP (GG-A1-Constitution の AX-3、Arisaka, 2026, A1-Constitution) である：四次元世界は六次元バルクの法則的な射影であり、そしてその射影こそが観測である。観測は意識を持つ主体が物理学に付け加えるものではない；それはバルクから境界への写像そのものであり、誰が見ていようといまいと、常に、いたるところで走っている。この単一の反転 — 開いていることを根本条件とし、観測を幾何とすること — が、二十二論文プログラム全体の概念的な中核である。

射影の法則: GDOS と GRIP。 「境界は射影である」と述べる公理は、その射影が恣意的であれば哲学にすぎないだろう。それは恣意的ではない。その力学は明確な法則である — GDOS、すなわち GG-6 の開放系の力学であり、GG-A5-GDOS (Arisaka, 2026, A5-GDOS) において導出されている — それは射影された系が実際にどのように発展し、散逸し、登録するかを指定する：境界がバルクの何を保持し、どれだけの代償を払うかである。そして GDOS 自体もまた、選ばれたのではなく強制されており、二つの独立した側から留められている：Gi-4 の幾何学的な柱 (A6-GRIP、Arisaka, 2026, A6-GRIP) と、Qi-4 の量子情報的な柱 (GG-A7-Qi4、Arisaka, 2026, A7-Qi4) である。この法則のランタイム形式は A6-GRIP の GRIP カスケードであり、二つのレジーム GRIP-In と GRIP-Out を伴う：GRIP-In はバルクが境界を養うこと — 励起、下降、シームへのエネルギーの到着 — であり、GRIP-Out は境界がそれを、登録された不可逆な記録として支払い出すことである。この語彙において検出器は受動的な目撃者ではない；それは目的をもって作られた GRIP-Out 増幅器であり、一つの微視的な登録をデータベース上の巨視的で熱力学的に不可逆な項目へと成長させるよう設計されている。

一世紀の混乱が解決される (GG-A8-QM)。 読者はこの問題に、別の名のもとで以前に出会っている。1926 年以来、量子力学は互いに語り合わない二つの規則を担ってきた：放置された系に対するユニタリ発展と、測定された系に対する「収縮」であり — 一方がどこで終わり他方がどこで始まるか

についての原理的な言明を欠いている。ベルはその分割線に移ろいやすい分割と呼び、そして一世紀にわたる解釈の営みは、主としてそれを移動させることに費やされてきた：意識へ、デコヒーレンスへ、多世界へ、隠れた変数へ。GG-A8-QM (Arisaka, 2026, A8-QM) は、GG-6 の内部ではその分割が移ろいやすいことを示す — それはバルク／境界の界面であり、そして幾何学的である。教科書が収縮と呼ぶものは、OGGEP 射影が働いている姿である：バルクにおいて発展が法則的かつ決定論的であることをやめることは決してなく、一方で境界は射影の法則が届けるものだけを保持する — 明確な、登録された結果であり、ボルの重みは要請されるのではなく典型性の言明として回復される。この読みにおいて、測定問題は量子力学の逆説では決してなかった；それは六次元の収支決算を四次元で走らせようとしたことの徴候であり — 一つの欠けた写像が生んだ一世紀の混乱であった。本論文が、一見すると平凡なバンプ探しに見えるものについて開放系の言語を主張し続けるのは、これが理由である：その言語こそが解かれた問題なのである。

衝突型加速器はこの原理にまさしく従う。いま ATLAS と CMS が実際に行っていることを見て、それが産業規模で作動する OGGEP であることに気づいてほしい。ゲージ依存の場の振幅やバルクの配位を記録した実験は一つもない：記録されるのはゲージ不変な運動学的組み合わせ — 不変質量、横運動量、角度分布、チャンネルごとの率 — であり、不可逆なエネルギー付与から再構成されたものである。完全な測定連鎖（ハード散乱、パートン・シャワー、ハドロン化、検出器応答、トリガー、再構成、統計的決定規則）は、まさしく GDOS の言語におけるシステム実例パッケージである：どの射影が走っており、それが何を登録するのかの指定である。したがって共鳴探索は、単に開放系の見方と両立するというにとどまらない；それは開放系実験の典型そのものである — 3.849 TeV にバルク励起が存在するならば、自然が提供する唯一の扉を通じて自らを告知するのである。

この連鎖の結論が本論文の中心的主張である。射影が法則的であり、その法則が強制されているがゆえに、境界が登録しうるものはバルク幾何によって固定される — 選ばれるのでも、調整可能でもない。 $M_{\text{lock}} \approx 3.85$ TeV 近傍のカルツァークライン・ロック・クラスターは、その台帳を共有する暗黒セクターの線と第五の力の不在とともに、一つの射影の登録された観測量である：幾何がそれを決定しており、だからこそ本論文はそれを導出でき、そしてだからこそ単一のクリーンな測定がそれを反駁しうる。図 1 は議論全体を一つの演繹の漏斗として述べている；同じ漏斗がコンパニオン論文 GG-A9-SM (Arisaka, 2026, A9-SM)、GG-A10-Cosmos (Arisaka, 2026, A10-Cosmos)、GG-A11-Origin (Arisaka, 2026, A11-Origin) を開いており、異なるのは積荷だけである — あちらでは標準模型のパラメータ、宇宙、そして法の起源であり；ここでは、すでに存在する機械の射程内にある共鳴クラスターである。

4 GG-憲法から衝突型加速器観測量へ

ここでの議論は、RS から輸入された現象論的アンザッツからではなく、GG-憲法の公理系と、コホートのすでに導出された定理パッケージから出発する。これが正しい出発点である：現在の枠組みにおいて、衝突型加速器現象論は憲法的文法の下流の帰結であって、独立に取り付けられた模型ではない。

憲法的水準において、本論文にとって最も重要な材料は四つである（すべて GG-A1-Constitution、Arisaka, 2026, A1-Constitution から）。AX-1（局所因果性）は、許容される核が遅延的であること、そして登録された検出器観測量が因果的な境界記録から生じることを要求する。AX-2（GGEP）は、

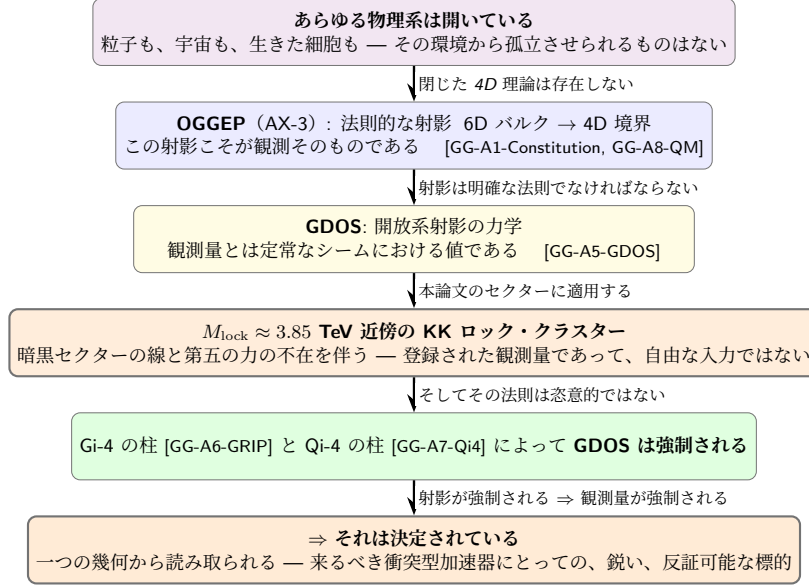


図 1: 中心的主張、一つの演繹の漏斗として、GG-Theory コホート全体で共有されている。いかなる物理系も閉じていないがゆえに、四次元世界は六次元バルクの法則的な射影 (OGGEP, AX-3) であり、そしてその射影こそが観測そのものである; その力学は GDOS であり、Gi-4 と Qi-4 の柱によって強制されている。同じ漏斗がコンパニオン論文 GG-A9-SM, GG-A10-Cosmos, GG-A11-Origin を開く; 異なるのは積荷だけである — ここでは、カルツァークライン・ロック・クラスターである。

ゲージ的内容と幾何学的内容が単一の原始的な複合接続から生じなければならないと述べる。AX-3 (OGGEP) は、明示的なバルクから境界への操作的辞書を要求する: 理論は、バルク力学がいかにして登録された観測量となるかを述べないかぎり完全ではない。AX-4 (最大対称性、最小自由度) は、いわれない自由パラメータを禁じ、最小の整数データを構成的な地位へと引き上げる。アノマリー相殺および規格化の要請 (POS-3 と POS-6) と合わせて、これらの公理は衝突型加速器物理学への著しく特定の経路を強制する (Arisaka, 2026, A1-Constitution; Arisaka, 2026, A2-GG6)。

論理は次のように進む。ひとたび AX-2 と AX-4 が真剣に受け取られれば、バルクは束縛されない高次元の遊び場のままではいられない。それは、繰り込み方向とコンパクトなアーベリアン・ホロノミーの双方が幾何学的であるような、単一の定理水準の幾何を支えなければならない。なぜなら双方とも、走りとコンパクトなゲージ位相を最小の自由度で表現するために、すでに要求されているからである。これが六次元の舞台

$$M_6 = M_4 \times I_r \times S_\theta^1, \quad r = \ln\left(\frac{E_{\text{GUT}}}{\mu}\right), \quad (2)$$

を、紫外のゲージ-重力ブロック

$$G_{\text{bulk}} = \text{SU}(5) \times \text{U}(1)_B \times \text{U}(1)_{Q_i} \times \text{Gravity}. \quad (3)$$

とともに選択する。6D テンソル・セクターはそのとき、単一テンソルのグリーン-シュワルツ修正ビアンキ恒等式 BI-6

$$dH_3 = X_4, \quad X_4 = \text{tr } \mathcal{R}^2 - \text{tr } F_5^2 - \frac{2}{5} F_B^2 - \frac{2}{5} F_{Q_i}^2, \quad (4)$$

によって固定される。これはアノマリーの物語を閉じ、GG-6 を裸のカルツァークライン計量還元から根本的に異なるものになっている構造である (Arisaka, 2026, A2-GG6; Arisaka, 2026, A3-BI6)。

なぜこれが KK 粒子にとって重要なのか。それは、ひとたび舞台 (2) が存在すれば、境界がスペクトル的に特徴のないままではいられないからである。その六次元の舞台の上に住むあらゆる場合は、内部空間上の調和分解を許す。したがって KK 塔は独立な仮定ではない; それはバルク幾何そのものの、境界におけるスペクトル的な影である。残る唯一の問いは、最初の到達可能なスケールを何が固定するかである。答えは AX-4 と POS-6 から来る: OGN-5 整数台帳

$$(M, N, L; J, K) = (1, 3, 5; 7, 35), \quad J = 2N + 1, \quad K = LJ = M^2 + N^2 + L^2, \quad (5)$$

がスロートの深さを固定し、したがってロック・スケール

$$M_{\text{lock}} = \frac{E_{\text{Pl}}}{2e^{35}} \simeq 3.849 \text{ TeV}. \quad (6)$$

を固定する。だからこそ 3.85 TeV の衝突型加速器標的は単なるフィットではないのである。それは幾何の定理水準の赤外端なのである。

衝突型加速器観測量はそのとき AX-3 によって供給される。OGGEP を通じて、バルク励起は境界記録となる: 不変質量、横運動量、角度分布、そしてチャンネルごとの率である。この観点からすれば、重い共鳴の探索はすでに開放系の問題である。ハード散乱、パートン・シャワー、ハドロン化、検出器応答、トリガー、再構成、統計的決定規則は、合わさって GDOS の言語におけるシステム実例パッケージ (SIP) を構成する。ATLAS と CMS が、生のゲージ依存な場の変数ではなくゲージ不変な運動学的組み合わせを再構成するという事実は偶然ではない; それはまさしく DGI と OGGEP が働いている衝突型加速器における形式である。この点には第 16 節で立ち返る。

表 1: GG-憲法から KK 衝突型加速器プログラムへの憲法的経路。この表は意図的に簡潔である: 衝突型加速器セクターが切り離された現象論的な付録ではなく、憲法的文法の直接的な下流の帰結であることを示すためのものである。

層	憲法的内容	衝突型加速器における帰結
AX-1	局所因果性	検出器観測量は遅延的で登録された記録から構築されなければならない; 探索は非因果的な逆問題としてではなく、因果的な事象ストリームにおいて定式化される。
AX-2	幾何-ゲージ等価性	ゲージ・セクターと重力セクターは単一の原始的な幾何学的舞台を共有する; KK 塔は幾何学的であり、任意選択ではない。
AX-3	OGGEP バルク-境界辞書	バルク励起は ATLAS/CMS における境界の不変質量、角度分布、分岐パターンとなる。
AX-4	最大対称性、最小自由度	赤外スケールは自由パラメータとして走査されるのではなく、最小の整数データによって固定される。
POS-3	流入によるアノマリー自由性	BI-6 はテンソル/ゲージ系を閉じ、GG-6 を通常の KK あるいは RS の直観から区別する。
POS-5	RG 整合性	動径座標 r は繰り込み方向である; 赤外の衝突型加速器質量は紫外幾何のスケール赤方偏移した像である。
POS-6	最小有理規格化	OGN-5 が $K = 35$ を固定し、それゆえロック・スケール $M_{\text{lock}} \simeq 3.849 \text{ TeV}$ を固定する。

結論は、衝突型加速器予言が自由に浮かんではいないということである。それは、このプログラムの残りを支えているのと同じ憲法的な確約に結びつけられている。KK 探索がこれほど鋭い反証子であるのは、まさにこれが理由である。(プログラム全体の展望 — 二十二論文コホート地図、および本論文をそれに照らして読むための約束事 — が本部を締めくくる: §7.1、図 2。)

5 KK 塔の 6 次元幾何学的起源

5.1 6 次元の舞台

定理級の GG-6 バルクは、正真正銘の 6 次元ローレンツ多様体である。その計量は Arisaka (2026, A2-GG6) の定理 2 によって固定され – 選ばれるのではない –、正準的な積幾何を強制する

$$ds_6^2 = e^{-2r} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + dr^2 + d\theta^2, \quad r \in [0, K], \quad \theta \in [0, 2\pi), \quad (7)$$

正準的な GG-6 単位系において、この幾何は自由な計量データを一切担わない: 一般のワープした構成における AdS 曲率 k 、円の半径 R_θ 、およびスロート長 r_c は、最大対称性/最小自由度の姿勢によってすべてロックされている (単位量に、あるいは OGN-5 整数 $K = 35$ に) (Arisaka, 2026, A2-GG6; Kaluza, 1921; Klein, 1926; Randall & Sundrum, 1999)。決定的な構造的な事実は、二つの内部方向がいずれも非空間的であることである: r はスケール (繰り込み群) 方向 I_r であり、 θ は位相円 S_θ^1 であって、いずれも無次元である。どちらも空間的な余剰次元ではない。このことは、最終的なスペクトルが標準的な 5D RS の描像よりも豊かである理由をすでに示している: 独立な内部方向が二つある – スケール方向とコンパクトな位相方向 – ため、スペクトルのラベルは両者から生じうる。以下のモード方程式では、一般のスケール・プロファイル $A(r)$ と円半径 R_θ を記帳用の記号として保持し、最後に正準的な $A(r) = r$ と $R_\theta = 1$ に特殊化する。

r の役割は、最新の GG-6 総合において物理的に見通しがよい。それは RS を模倣するために挿入された単なる余剰次元ではない。それは繰り込みスケールの幾何学的表現であり、

$$r = \ln\left(\frac{E_{\text{GUT}}}{\mu}\right), \quad (8)$$

したがって r に沿った輸送は走りの幾何学的化身である。² θ の役割も同じく重要である: それはコンパクトなアーベル的ホロノミー方向であり、その位相的構造は BI-6 を通じて $U(1)_B$ と $U(1)_{Q_i}$ の両セクターを養う。通常の KK の言葉では、 θ が円の塔を生成すると言えるであろう。より強い GG-6 の言葉では、 θ はアノマリー・ロッキングの物語そのものの一片を担っていると言うべきである。

²注意深い読者は、RG の「距離」が 1 ループを超えるとスキーム依存であるから、 μ がどの繰り込みスキームで定義されているのかを問うであろう。チャートは記帳であって物理ではない: スキームの変更はスケール方向の滑らかな再パラメータ化として作用し、その下で本論文が用いるすべて — 整数長 $K = 35$ (アノマリー・マッチングによって固定された台帳整数であり、Arisaka, 2026, A3-BI6、測定された摂動的距離ではない)、Arisaka (2026, A2-GG6) の正準計量 (定理 2)、ロック質量、および正準チャートで評価された重なり積分 — は不変である。 $A(r) = r$ を選ぶことは、正規座標を選ぶことの類似物である。

5.2 モード展開と二つの量子数

任意の 6 次元場 $\Phi(x^\mu, r, \theta)$ は次のように展開できる

$$\Phi(x^\mu, r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{\ell=-\infty}^{\infty} \phi^{(n,\ell)}(x^\mu) f_{n,\ell}(r) e^{i\ell\theta}. \quad (9)$$

ここで n は動径励起の族をラベルし、 ℓ はコンパクト角のフーリエ・モードをラベルする。プロファイル関数は動径的なスターム–リウヴィル問題を満たす。スカラー揺らぎについて、代表的なモード方程式は次のとおりである (Arisaka, 2026, A2-GG6):

$$-\partial_r \left(e^{-4A} \partial_r f_{n,\ell} \right) + e^{-4A} \frac{\ell^2}{R_\theta^2} f_{n,\ell} = m_{n,\ell}^2 e^{-2A} f_{n,\ell}. \quad (10)$$

厳密なスピン 2 方程式はテンソル構造において異なるが、同じ定性的要素を共有する: 動径演算子、コンパクト角の質量寄与、および赤外スケール抑制である。

コンパクト角の固有値はウィルソン線を担う。 式 (10) の一つの精密化をここに記録しておかねばならない。コホートの電弱セクターがそれに依拠しているからである。整数 ℓ が $-i\partial_\theta$ の固有値であるのは、円に沿ったゲージ接続が消える場合に限られる。ウィルソン線 — ホロノミー $\Theta_H = g_6 \oint_{S_\theta^1} A_\theta d\theta$ であり、これはゲージ不変で除去できない — が存在する場合、対応する生成子のもとで電荷 q を持つ場合は、ずれた固有値を感じる

$$\frac{\ell^2}{R_\theta^2} \longrightarrow \frac{1}{R_\theta^2} \left(\ell + \frac{q \Theta_H}{2\pi} \right)^2, \quad (11)$$

これはスペクトル的に書かれた細谷機構である (Hosotani, 1983): 定数 A_θ は局所的には純ゲージであり場の強さを変えないが、それでもすべての荷電モードを動かし、とりわけ、さもないと質量ゼロであったはずの $\ell = 0$ モードを持ち上げる。この枠組みにおいて電弱スケールの選択子はそのホロノミーであって、ヒッグス場ではない: 4 次元二重項はバルクの 5_H の $(1, 2)$ であり、式 (11) が挿入するホロノミーは、その選ばれた枝 $\sin \theta_H^* = (2/L)^N$ が二重項の真空値の落ち着く先 $v = M_{\text{lock}} \sin \theta_H^*$ を固定する、まさにその θ_H である (Arisaka, 2026, A9-SM)。コンパニオン論文はかつて二重項を A_θ 自身の剰余類成分と同定したが、自らの群論に基づいてその同定を撤回した (SU(5)/SM 剰余類は色を持つ); 境界がどのモードをヒッグスとして読むかは、その未解決問題 O_{22} である。本論文は枝を選択しない — 真空角と、結果として得られる 4 次元質量が登録されるスケールとは、コードブック論文の定理であり、そこではワープがそれらを E_{GUT} ではなく赤外端点に置く。ここに記録されるのはスペクトル上の事実のみである。それが、円側のラベルが実験室の質量となる機構だからである。

本論文自身の予測に対する帰結が二つあり、いずれも無害である。第一に、第 9 節の動径的 ($\ell = 0$) ロック・クラスターは、その動径的構造において影響を受けない: このずれは共通のコンパクト角寄与を加えるだけであり、クラスターを構成する色中性の $U(1)_B$ およびグラビトン・セクターのモードにとって、それは赤外スケールを定める量ではない。第二に — そしてこちらこそ述べる価値のあるものであって、逆の結果になりえたのであるが — 角パートナーの言明は再格付けされた形で生き残る (P-KK-7)。式 (11) は角指数を 1 単位の $\Theta_H/2\pi$ の割合だけ、選ばれた角では 1 パーセント程度だけずらし、これは式 (12) の導出されたオフセットを同程度の割合だけ動かすにすぎない; パートナーを単独生成から遠ざけている選択則は、このずれによって影響を受けない。

直ちに二つの定性的結論が従い、それらは二つの塔を鋭く分離する。第一に、動径的 ($\ell = 0$) モードは有限動径区間 $r \in [0, K]$ の規格化可能な共鳴である; それらの質量は赤外端点へ赤方偏移し、観測可能なスケール M_{lock} を定める (第 9 節の動径ベッセル塔)。角 ($\ell \neq 0$) フーリエ・モードは追加の寄与 ℓ^2/R_θ^2 を担い、これは正準的な GG-6 単位系 ($R_\theta = 1$) では 1 モードあたりホロノミー・エネルギー 1 単位である。以前の改訂ではその単位を E_{GUT} 程度の 4 次元質量として読んでいた; 正準計量 (18) 上ではそうではない。円はワープしていないため、 ℓ^2 項は曲率スケール程度のバルク質量として動径問題に入り、その大きさのバルク質量はワープした塔を紫外へ持ち上げない — それはベッセルの階数をずらし (ベクトルでは $\nu = \sqrt{1 + \ell^2}$ 、スピン 2 では $\sqrt{4 + \ell^2}$)、ちょうど二段落上で式 (11) の細谷質量が赤外端点へ赤方偏移するのとまったく同様に、赤外局在モードをロック・スケールに残す。ずれた階数を用いて T-KK-2 と同じ二端点問題を解くと、自由場のオフセットが得られる

$$\frac{m_{1,\pm 1}}{m_{1,0}} = \begin{cases} 1.067 & \text{スピン 2} \\ 1.144 & \text{ディリクレ・ベクトル} \\ 1.171 & \text{ノイマン・ベクトル} \end{cases} \quad \frac{m_{1,\pm 2}}{m_{1,0}} = 1.234 \text{ (スピン 2)}, \quad (12)$$

すなわち、グラビトンの上方 4.11 および 4.75 TeV に、バリオンのベクトルの上方 4.40 TeV にパートナーが位置し、それぞれ $\pm \ell$ について二重に縮退している。それらをクラスターのラインシェイプから遠ざけているのは、その質量ではなく選択則である: ℓ は保存された θ 運動量であり、 θ 依存性を持たないカレントは $\ell \neq 0$ 状態を単独で生成できない。境界フェルミオンが θ 依存性を担うかどうかは Arisaka (2026, A9-SM) のカスケード深さ補題であり — 未解決である — したがって登録された言明は次の対である: 自由場領域における導出されたオフセットでのパートナーと、 θ 非依存カレントによる単独生成からのその不在である。第 5.5 節の非空間的読みには、さらに言うべきことがある — ゲージ・ファイバー上のフーリエ指数は運動量ではなく電荷であり、したがって $\ell \neq 0$ セクターは新しい共鳴ではなく、すでにスペクトルに存在する荷電状態である、ということである; 我々はその読みを枠組み自身の予想級の立場として保持し、上記のオフセットをその読みが破れた場合にモード方程式が述べる内容として保持する (P-KK-7、第 57 節で再格付け)。第二に、したがって角セクターは形式においてカルツァークラインであり、— そのモードが伝播するならば — 位置においてもそうであって、導出されたオフセットでクラスターを飾る; しかしそれは実験家が最初に目にするものではない。「クラスター」は、すべてが同じ赤外端点へ赤方偏移する複数の異なるバルク場 (グラビトン、KK グルーオン、バリオンのベクトル) の最低動径モードから構成され、角パートナーは、入るとしても、 θ 荷電チャンネルを通じてか、対でしか入らない。一つのスケールにおけるその多場構造こそ — コンパクト角の多重項ではなく — GG-6 を単一系列の 5D RS 塔から分かつ現象論的な指紋である。この規約を次の小節で固定する; それは Arisaka (2026, A2-GG6, 第 III 部) と一致する。

5.3 規約: GG-6 における「カルツァークライン」は非空間的を意味する

一つの規約をここで固定し、Arisaka (2026, A2-GG6, 第 III 部) と整合する形で以後全体を通じて用いる。ロック・クラスターの共鳴に対してカルツァークライン (KK) という用語を保持するのは、それがそれらの実験的クラス — RG スケール・スロート共鳴 — を正しく示し、既存の衝突型加速器の命名法 (ランダル-サンドラム・グラビトン、ワープ共鳴) と接続するからである。しかし GG-6 の共鳴は非空間的な KK 状態である: 二つの内部方向はスケール軸 I_r と位相円 S_θ^1 であり、いずれも無次元であって、どちらも空間的な余剰次元ではない。読者は、以後現れるすべての「KK」に、心

の中で「非空間的」を前置すべきである。具体的には、二つの塔を区別しておかねばならない:

1. **角 (S_θ^1) フーリエ塔**。整数モード $\ell \neq 0$ であり、正準計量上ではクラスターのすぐ上の導出されたオフセットに位置し (式 (12))、 θ 運動量保存によって単独生成から遠ざけられている; ファイバー読みではこれらは電荷セクターである。形式においてカルツァークラインであり; その衝突型加速器における役割は選択則である (P-KK-7、再格付け)。
2. **動径 (RG スケール) スロート・ロック・クラスター**。有限動径区間 $r \in [0, K=35]$ は離散的スペクトル (二ブレン・ランダル・サンドラム/ホログラフィック複合型) を担い、その最低モードは $M_{\text{lock}} \approx 3.85 \text{ TeV}$ に位置する。これが観測可能な信号であり — 「GG-6 の KK 粒子」である — 励起メンバーは追加の動径節を担う。

一文で言えば: 角パートナーは、伝播するならば、クラスターの上の導出されたオフセットに位置し、単独生成の外にある; 3.85 TeV 付近の動径ロック・クラスターこそ、実験家が GG-6 のカルツァークライン共鳴と呼ぶであろうものである。

5.4 動径的な枝と多場ロック・クラスター

角パートナーが単独生成の外にあるため、衝突型加速器に関するスペクトルは、起源においてどちらも動径的である二つのラベルによって組織される: 与えられたバルク場の内部での動径節数 n と、場の種 (グラビトン、KK グルーオン、および二つのディリクレ・アーベル的ベクトル) である。

1. **動径塔 ($\ell = 0$ 、 n を増やす)**。これらはスケール・スロート共鳴であり、おなじみのベッセル根の間隔 $m_n = (\xi_n/\xi_1)M_{\text{lock}}$ を持つ: 最初の三つは 3.85 、 7.0 、 10.2 TeV 付近に位置する。余裕をもって Run-3 の到達範囲にあるのは、最低のもののみである。
2. **多場ロック・クラスター (最低の n 、複数の種)**。異なるバルク場の最低モードは、定理 T-KK-1 によって固定される単一の赤外スケールを占める: M_{lock} におけるスピン 2 グラビトン、ならびにカラー八重項 KK グルーオン — その配置は微細構造定理 T-KK-2 (第 10.4 節) の主題であり、導出された二シナリオの二分法 (自由場の $0.639 M_{\text{lock}} = 2.46 \text{ TeV}$ 対 複合硬化の $\approx M_{\text{lock}}$) であって $O(1)$ の旗を残さない — そして、両シナリオにおいてちょうど M_{lock} に位置する二つのディリクレ終端アーベル的ベクトル (レプトフォビクな Z'_B とその Q_i 兄弟) である。一つのスケールに結びついた異なる種のこの多状態構造こそ — θ パートナーの集合ではなく — 真の 6D シグネチャーである。
3. **重なり合う種**。二つのスピンの四つの状態が一つの質量に位置し、場として混合することはできない (ローレンツ不変性がベクトル-テンソル混合を禁じ、アノマリー・コンパニオン論文の許容クラスは $U(1)_B$ フラックスをゼロに定める); それにもかかわらず再構成が見るものは、異なる幅を持つ重なり合ったラインシェイプの和であり、したがって観測されるピークは $3.85\text{--}4 \text{ TeV}$ 付近の単一のブライト・ウィグナーのように見える必要はない。

これは学術的な細部ではない。単一の狭い RS 共鳴に最適化された衝突型加速器探索は、近傍の複数の状態が一極テンプレートに押し込められると、この準縮退した多場クラスターに対する感度を失いうる。したがって本論文の中心的な実務上のメッセージの一つは方法論的なものである: GG-6 探索は当初からクラスターを意識したものでなければならない。これについては第 10 節および第 35 節で立ち返る。

5.5 GG-6 が通常の KK や RS に還元されない理由

細部に入る前に一行で言えば: 第五次元は繰り込み群の軸であり — ランダル-サンドラム的な空間方向ではない — ロック・クラスターは RG のしきい値スペクトルであって、空間的グラビトンの塔ではない。本小節の残りは、その一文を展開し、擁護する。

本小節は第 I 部の他のどの部分よりも概念的な重みを担う。それが扱う類似が、本当に厄介だからである。余剰次元の文献を知る読者は、GG-6 バルク — 因子 e^{-2r} を担うワープした区間と、整数モードを担うコンパクトな円 — を見て、即座に分類するであろう: 第五次元はランダル-サンドラム、第六次元はカルツァークラインである、と。そうすると本論文のすべての式は、既知の物理の再導出として読まれることになる。その分類は誤りであり、しかも正確に述べうる仕方で誤っている: どちらの読みも座標を空間の方向と取り違えている。GG-6 の二つの余剰次元はいずれも空間的ではない — 第五は幾何学化されたエネルギー・スケールそのものであり、第六は幾何学化されたゲージ位相そのものである — そして本論文で活用される現象論的差異のほぼすべて (導出された質量、ラディオンの不在、角パートナーに対する選択則、多場クラスター、整数階層) は、その単一の区別に遡る。二つの次元を順に取り上げ、その後、完全な比較を表 2 にまとめる。

分類原理: 次元とは、それを生成するものである。 Arisaka (2026, A2-GG6) (定理 0 とその注意) は、その基準を明快に述べている。空間の次元ではない幾何学的次元は、それ自体としては新しい — ミンコフスキーの時間が最初のものであり、その符号によって空間から区別された。あらゆる次元の正しい分類は、その対称性生成子による: 空間的 (あるいは時間的) 方向とは、その生成子が並進であり、保存する運動量 (あるいはエネルギー) を伴うもののことである。GG-6 の二つの余剰方向は、いかなる並進によっても生成されない: スケール方向 I_r はディラレーション D (繰り込み群フローの生成子、 $[D, P_\mu] = P_\mu$) によって生成され、位相方向 S_θ^1 は整数固有値を持つコンパクト電荷 Q_θ によって生成される。バルクの等長変換代数は

$$\text{iso}(1, 3) \oplus \mathbb{R}_D \oplus \mathfrak{u}(1)_{Q_\theta}, \quad \text{であって} \quad \text{iso}(1, 5) \text{ ではない}, \quad (13)$$

であり、これが「非空間的」の正確な技術的内容である。座標のレベルでの並行した言明: 二つの余剰座標はいずれも構成上無次元である — $r = \ln(E_{\text{GUT}}/\mu)$ はエネルギー比の対数であり、 θ は角である — のに対し、あらゆる空間座標は長さの単位を担う。 r 上にローレンツ符号が存在しないため、「動径方向の光速は何か」という問いには答えがない; この問い自体が、GG-6 が拒否する空間的読みに属している。

スケール (第五) 次元 対 ランダル-サンドラム。 表面的には類似は強く、しかもそれは意図的である: 計量 $ds_6^2 = e^{-2r} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + dr^2 + d\theta^2$ (Arisaka, 2026, A2-GG6、定理 2) は RS 形式を持ち、区間は有限であり、赤外端点は指数関数的階層を担う。したがってこの背景上の境界値問題の数学は共有される — まさにそれゆえに、本論文の第 II 部はやまじさなくベッセルの道具立てを借りることができる。共有されないのは存在論であり、それは四つの箇所でも効いてくる。(i) 座標とは何か。RS では y は空間的位置である; 粒子は y に位置し、 y に沿って動き、 y に沿った運動量を担うことができる。GG-6 では $r = \ln(E_{\text{GUT}}/\mu)$ は繰り込みスケールそのものである: 動径位置 r にある粒子とは、スケール $\mu = E_{\text{GUT}} e^{-r}$ における有効理論の状態のことであり、 r に沿った運動は並進ではなく転化である — RG フローの幾何学化であり、RG 半群の加法性が対数座標を強制する。スケール・プ

ロファイル e^{-2r} は、第五の空間方向における重力赤方偏移ではない; それはスケール重みの定義である。(ii) 長さを固定するものは何か。RS のスロート深さ kr_c は自由な連続的ダイヤルであり、階層が観測されているために ≈ 35 に調整される; ラディオ — その長さの揺らぎ — は、追加の機構によって安定化されねばならない物理的モジュライである。GG-6 では区間長は整数 $K = 35$ であり、OGN-5 の閉包 $K = LJ = M^2 + N^2 + L^2$ によって強制される: 長さは大きさではなく、数え上げの数である。したがってラディオは存在しない — 安定化されたラディオではなく、ラディオ場がまったく存在しないのであって、分解能には揺らぎ長さがいないからである (Arisaka, 2026, A4-Euclid) — そして階層 e^{-35} は出力である。本論文の hh 現象論 (第 10.5 節) と、第 IX 部のラディオなしのヒッグス精密測定のスルは、直接の衝突型加速器における帰結である。(iii) 共鳴とは何か。RS では KK グラビトン、空間的な第五次元の運動量モードである。GG-6 ではスロートの離散スペクトルは生き残るが — 有限区間は、その区間の存在論にかかわらず規格化可能な共鳴を支える — 状態は境界理論のその赤外スケールにおける複合共鳴として読むのが正しい: 通常はホログラフィックな類推として提示される言明が、ここでは文字どおりの構成なのである。同じ固有値問題、同じベッセル・ゼロ点、異なる物理的同一性 — そしてその同一性が重要なのは、それこそが第 10.4 節の T-KK-2 の二分法 (自由場固有値 対 複合的再編成) を、形式ではなく真の物理的問いにしているからである。(iv) 底に位置するものは何か。すべてのバルク場が同じ赤外端点 $r = K$ へ赤方偏移するため、グラビトン、カラー八重項、および二つのディリクレ・アーベル的ベクトルの最低動径モードは、最小 RS の単一グラビトン極ではなく、一つの導出されたスケール — 多場ロック・クラスター — に落ち着く。クラスター構造は装飾ではない; それは 6D の指紋である。

位相 (第六) 次元 対 カルツァークライン。 第六方向はカルツァの円のように見え、その負債は本物である — しかし GG-6 はその構成を反転させる。カルツァとクラインは、電磁ポテンシャルを半径 R の空間的円に沿った計量の成分として幾何学化した; 半径は自由なモジュライであり、観測可能なシグネチャーは $m_n = n/R$ における荷電運動量モードの塔であって、モジュライが調整された場所ならどこにでも置かれる。GG-6 では S_θ^1 は U(1) ファイバーそのものであり、文字どおりの座標へと格上げされている: 真に主動的な方向であって、そのホロノミーが荷電物質のゲージ位相そのものであり (アハラノフ・ボームおよびベリー位相は、文字どおりの意味でそのホロノミーである)、その整数指標が電荷量子化であり (OGN-5 台帳における $M = 1$ の内容)、そのウィルソン線 θ_H が Arisaka (2026, A9-SM) において細谷機構 (Hosotani, 1983) を介して電弱の枝を選択する — GG-W2-Holonomy の意味における、対称性によるのではなくホロノミーによる変位である (Arisaka, 2026, W2-Holonomy)。この方向は位相的であるため — 角であり、正準的な規約 $R_\theta = 1$ を伴い、半径モジュライを持たない — そのフーリエ塔は調整可能な予測ではない: そのモードが位置するであろうオフセットは導出されており (式 (12))、その可視性を支配するのは半径ではなく選択則である。以前の改訂では、これを TeV スケールにおける角サテライトの不在として述べていた; 正準計量上のモード方程式はその不在を支持せず、本論文は代わりにより鋭い対を登録する: θ モードが伝播するならば基底質量の 1.07–1.17 倍にパートナーが存在し、 θ 非依存カレントによる単独生成からは不在であり、そして — フーリエ指数が電荷であるとするファイバー読みでは — そもそも別個の共鳴ではない、という対である。従来型の 6D 空間的コンパクト化であれば、3.85-TeV クラスターを、基底状態と同じくらい自由に生成される $\ell = \pm 1$ パートナーで飾るであろう; 軽いクォークからの単独生成でパートナーを見出すことは、何も見出さないことが質量を反証するのと同じくらい決定的に、非空間的読みを反証するであろう。

ロッキング: 舞台は計量のみではない。 第三の構造的差異には、KK にも RS にもまったく類似物がない。GG-6 バルクは、後からゲージ場が置かれる計量によって定義されるのではない; 計量、テンソル・セクター、およびゲージ・フラックスは、BI-6 恒等式を通じて、単一の原始的対象の中にロックされた形で到来する、

$$dH_3 = \text{tr } \mathcal{R}^2 - \text{tr } F_5^2 - \frac{2}{5} F_B^2 - \frac{2}{5} F_{Q_i}^2, \quad (14)$$

そのトレース比 $2/5$ は $U(1)_B$ と $U(1)_{Q_i}$ の対等な取り扱いを強制する。したがって GG-6 の KK 塔は、受動的な背景上の調和分解ではない; それは、すでにアノマリー・ロックされ、ゲージ構造を与えられた幾何のスペクトルの痕跡である。これこそが、本論文が計算する現象論的な織り目を許す — いや、要求する — ものである: 穏やかなレプトフォビクな混入、トップに富む重なり構造、そして一つの導出されたスケールにおける多場クラスター (グラビトン、KK グルーオン、および $U(1)_B$ と $U(1)_{Q_i}$ ベクトル) である。

これに類するものは、以前に存在したか。 先例についての率直さは主張を強めるため、Arisaka (2026, A2-GG6) が辿るとおり正確に系譜を述べる。個々の構成要素には名高い祖先がある: ミンコフスキーは時間を最初の非空間的幾何学的次元とした (Minkowski, 1908); ワイルは 1918 年にスケールを接続として幾何学化し (Weyl, 1918)、1929 年に位相を $U(1)$ 不変性として幾何学化した (Weyl, 1929); ファイバー束による定式化はゲージ位相を内部円とした; コンヌの非可換幾何学は真に非空間的な内部空間を構築した (Connes & Lott, 1991); そしてホログラフィック繰り込みはスケール方向を動径座標として実現した — 類推としてである (Maldacena, 1997/1998)。しかし、ここで実現された二つの対象のいずれをも、先行するいかなる現象論的枠組みも実戦に投入したことはない: ディラレーションによって生成され、整数の長さを強制され、特定の質量で衝突型加速器の予測に入る次元; あるいは、文字どおりの第六座標へと格上げされ、そのフーリエ塔が半径ではなく選択則によって支配されるゲージ・ファイバーである。まして、いかなる枠組みも両者を同時に、時空を超えた舞台全体として、要請ではなく導出されたものとして (Arisaka, 2026, A2-GG6 の定理 0)、どこにも空間的余剰次元を持たない形で — したがってモジュライもなく、ラディオオンもなく、ランドスケープもなく、超対称性の要求もなく、それぞれの不在は仮定ではなく帰結である — GG-W1-Symmetry (Arisaka, 2026, W1-Symmetry) がネーターからコホモロジーへと辿る種類の不在として (超電荷が平方根をとるべき並進生成子は r にも θ にも存在しない)、投入したことはない。表 2 が比較をまとめる; 各行の現象論的な賭け金は、まさに本論文が検証する導出量である。

表 2: 包括的比較: カルツァークラインとランダル–サンドラムの空間的余剰次元 対 GG-6 の二つの非空間的次元。右側二列のすべての項目は、[Arisaka \(2026, A2-GG6\)](#) の憲法的導出（定理 0、定理 2、および OGN-5 台帳）によって強制される；モデル化上の選択である項目は一つもない。

性質	カルツァークライン円	ランダル–サンドラム区間	GG-6 スケール次元 I_r (第五)	GG-6 位相次元 S_θ^1 (第六)
本性	空間的な円	空間的なワープした区間	幾何学化されたエネルギー・スケール: $r = \ln(E_{\text{GUT}}/\mu)$	幾何学化されたゲージ位相: 座標としての $U(1)$ ファイバー
座標は単位を担うか？	担う（長さ）	担う（長さ）	担わない — エネルギー比の対数	担わない — 角
対称性生成子	並進（運動量 p_5 ）	並進（ワープにより破れる）	ディラレーション D (RG フロー) ; $[D, P_\mu] = P_\mu$	コンパクト電荷 $Q_\theta \in \mathbb{Z}$
「それに沿った運動」の意味	空間的変位	空間的変位	転化: 繰り込みスケールの変化	位相回転（電荷の作用）
それに沿った光速	定義される	定義される	定義されない — r 上にローレンツ符号がない	定義されない
大きさ／長さ	半径 R : 自由な連続モジュライ	kr_c : 自由なダイヤル、階層のために ≈ 35 に調整	整数 $K = 35$, $K = LJ = M^2 + N^2 + L^2$ によって強制	$R_\theta = 1$ が正準; 純粋に位相的
安定化	必要（半径モジュライ）	必要（ラディオオン; Goldberger & Wise, 1999 ）	安定化すべきものがない: 数え上げには揺らぐ長さがいない; ラディオオンは存在しない	安定化すべきものがない
階層	なし	調整された指数の出力	導出された整数の出力: e^{-35}	—
塔	n/R における荷電運動量モード: モジュライが置く場所ならどこでも	調整によって TeV スケールに置かれるグラビトン運動量モード	$\frac{1}{2}M_{\text{Pl}}e^{-35} = 3.849 \text{ TeV}$ における動径ロック・クラスター、導出済み; 多場（一つのスケールにスピン 2 とベクトル三つ）	ファイバーの整数指標、あるいは — モードが伝播するならば — 基底の $1.07\text{--}1.17\times$ という導出されたオフセットにあるパートナーであり、単独生成の外にある (P-KK-7、再格付け)

次頁へつづく

表 2 つづき

性質	カルツァークライ ン円	ランダル-サンドラ ム区間	GG-6 スケール次元 I_r (第五)	GG-6 位相次元 S_θ^1 (第六)
塔の正体	空間的な円上の運 動量モード	ワープした空間に おける運動量 モード	境界理論のその赤外 スケールにおける複 合共鳴 (文字どおり にされたホログラ フィー)	量子化された電荷 (束の指標)
電荷量子化	円の運動量から (半径は未説明)	扱われない	—	整数ホロノミー: 量 子化の起源 ($M = 1$)
電弱対称性の 破れ	なし	手で加えられる	$v = M_{\text{lock}}(2/5)^3$ が そこから降りてくる ロック・スケールを 定める	ウィルソン線 θ_H が枝を選択する (細 谷機構, Hosotani, 1983 ; Arisaka, 2026, A9-SM)
モジュライ/ラ ンドスケープ	半径モジュライ	ラディオオン	なし	なし
超対称性	任意	任意	拡張は不可能である: 超電荷が平方根を とるべき並進生成子が r, θ に沿って存在 しない; その不在は選択ではなく定理で ある	
自由パラメータ	R	k, r_e , ブレーン 張力	なし (整数のみ)	なし
最も近い先例	カルツァ 1921; ク ライン 1926 (Kaluza, 1921 ; Klein, 1926)	ランダル-サンド ラム 1999 (Randall & Sundrum, 1999)	ワイルの 1918 年の スケール接続; ホロ グラフィックな動径 座標 (類推として) — 強制された次元 としては前例がない	ワイルの 1929 年の 位相; ファイバー束 の内部円 — 文字ど おりの座標として は前例がない

6 三つの読みの道筋

第 I 部はほぼ完結しており、導出が始まる前に、本論文がどのように用いられることを意図しているかを平明に述べておく価値がある。本論文が長いのは、それが完全であることを意図しているからである: 定理の連鎖、その実験的対決、発見の完全なシミュレーション、そしてその機構を教える大学院講義のすべてがこの表紙の間に収められているのは、反証子が、見知らぬ他人が独力でそれを検証できる能力の分だけしか価値を持たないからである。しかし完全性は文書の性質であって、読者への要求ではない。十四の部を順に読み通すことは誰にも求められておらず、本論文は、三種類のまったく異なる読者がそれぞれ求めるものを取り出せるように — そして各段階で、自分が用いている数値がどこで導出されたのかを知ることができるように — 構成されている。

実験家の道筋。 何を探すべきか、制限がどこにあるか、そして問題がいつ決着するかを知りたい読者は、対決と日程に直接進むべきである：現行の ATLAS/CMS の状況と、計算された $\sigma \times \text{BR}$ を公表された制限に対して比較する実務的作業 (第 30 節-第 31 節)、次いで系統誤差の壁と事前登録された探索を備えた係留された HL-LHC シミュレーション (第 VIII 部)、そして最後にベンチマークと再解釈カード (付録 M) であり、これは意図的に自己完結している：質量、幅、結合、ラインシェイプ、および実装の手順解説が、コンビーナが月曜の朝に大学院生に手渡すであろう形式で収められている。この道筋において理論の各部は来歴として機能する — 必要なときに、ある数値が調整された入力ではなく定理の出力であることを検証する場所である。携えておくべき本質的な事実は三つである：標的は 3.849 TeV におけるクラスターであって、孤立した極ではない；計算された $t\bar{t}$ 生成率におけるカラー八重項メンバーは抑制不可能な反証子である (F-KK-2B)；そして決着は、すでに記録された Run-3 データ ($\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$) の上で下されると期待される。

現象論家の道筋。 導出の連鎖 — 実際に何が強制され、どのグレードにおいてか — を監査したい読者は、背骨をたどるべきである：ロック質量とクラスターの微細構造 (閉じたベッセル形、動径方向の塔、縮退のパターン) については第 II 部、信号の解剖 (定理によって符号が固定された干渉を伴うラインシェイプ、角度分布と偏極の一式、識別行列) については第 VI 部、そして正直な精算については議論 (第 X 部)：どの言明が定理級であり、どれが明示された括弧付きの見積もりであり、そしてこのパッケージが — 行ごとに — 情報を備えた懐疑論者が手を伸ばすであろう RS、アキシグルーオン、レプトフォビクな Z' の代替案とどう比較されるか、である。この道筋で試すべき唯一の規律は、本論文の中心にあるものである：どこにも連続的なダイヤルは存在せず、したがってデータとのあらゆる不一致は構造的であり、結合の規格化に関する二つの読み方 (シナリオ A/B) は閉じた二分法をなすのであって、調整の方向ではない。

理論家の道筋。 最初の問いがこれらはどのような余剰次元なのかである読者は、枠組みが最も奇異である場所から始めるべきである：第 5.5 節と表 2 であり、そこでは二つの非空間的次元 — 強制された整数長を持つ座標としてのエネルギー・スケール、文字どおり第六の方向としてのゲージ位相 — が、カルツァークラインおよびランダル-サンドラムの空間的構成と項目ごとに対比されている。次に第 II 部であり、そこでその幾何は一つのスペクトルとなる；次いで五つの概念的入門 (付録 E-I) であり、これらはセミナーの聴衆が実際に問う質問に十分な紙数をもって答える：グルーオンと g^* がいかにして一つの場合であるのか、バリオンの Z'_B はどこから来るのか、GG-6 の「グラビトン」とは何か、なぜ g^* がクラスターの生成率を支配し、これほど広いのか、そしてなぜ一つの整数が生成率の階層と $t\bar{t}$ 支配の双方を制御するのか。この道筋における賭け金は概念的なものである：モジュラスなし、ラジオンなし、ランドスケープなし、そして超対称性の要請なし — いずれも仮定されたのではなく導出された不在である。

大学院生の道筋。 序文は第四の道筋を示しており、それは依然として最良のものである：本論文を順に読み進め、本文がまだ出会っていない機構を前提とする箇所では常に、付録 J-L の三段階の講義 (6D 作用から得られる KK スペクトル；パートン分布から得られる断面積；ポアソン尤度から積み上げる発見の統計) に依拠すればよい。付録に紙数の制限がないのは、まさにこの道筋が他のいかなる書物も必要としないようにするためである。

7 コホートの継承と十四の部のロードマップ

導出が始まる (第 II 部) 前に、読者の方位づけのための二つの地図を締めくくりの一節にまとめて示しておくことが有用である: 本論文が位置する二十二論文コホートの全景 (第 7.1 節、図 2) と、本論文の十四の部の全景 (第 7.2 節、図 3) である。後続のいずれの部の読者も、この節に立ち戻って両方向に自らを方位づけられるはずである: どのコホート・コンパニオンがどの移入された結果を担っているか、そして現在の議論が十四部の弧のどこに位置しているか、である。

7.1 コホートの継承

一望のもとでのプログラム。図 2 は本論文を GG-Theory コホートの二十二篇の論文の中に位置づける。プログラムに初めて出会う読者は、本論文自身の筋道が続ける前に、その構造 — 憲法的な根、バルクの三部作、開放系の境界法則とその柱、三つの教科書的読み出し、要石、二つの現象論ブランチ、そして左翼の基礎ブランチ — を図の上から下へと読み取ることができる。記録に残る論文は次のとおりである: 三つの教科書的読み出しは [Arisaka \(2026, A8-QM\)](#)、[Arisaka \(2026, A9-SM\)](#)、[Arisaka \(2026, A10-Cosmos\)](#) である; 要石は [Arisaka \(2026, A11-Origin\)](#) である; 予言ブランチは本論文に加えて [Arisaka \(2026, P2-N3\)](#) と [Arisaka \(2026, P3-Electron\)](#) を擁する; 宇宙論・天体物理ブランチは [Arisaka \(2026, C1-Kaxion\)](#)、[Arisaka \(2026, C2-Hubble\)](#)、[Arisaka \(2026, C3-BH\)](#) を擁する; そして基礎ブランチは [Arisaka \(2026, P4-Real\)](#) と [Arisaka \(2026, P5-CPT\)](#) を擁する。

その地図に照らして本論文を読むには、ここで一度述べておくいくつかの約束事だけが必要である。番号付きの結果は、論文接尾辞 -KK を付したコホート全体の識別子を担う: したがって $T\text{-}KK\text{-}1$ は第一の定理であり、 $F\text{-}KK\text{-}1$ は最初に事前宣言された反証子である (コホートは定理、補題、定義、公準言明、反証子に対して接頭辞の組 $T\text{-}L\text{-}D\text{-}PS\text{-}F\text{-}$ を用いる)。次元を持つ入力 $GU\text{-}5$ 、すなわち幾何学的普遍五定数 $\{c, G_N, \hbar, k_B, Q_B\}$ からのみ引かれる; 無次元のデータはすべて $OGN\text{-}5$ 整数台帳 $(M, N, L; J, K) = (1, 3, 5; 7, 35)$ に由来し、したがって理論は単位系の全体的な選択を超えた連続的ダイヤルを一切持たない。二つの余剰座標は非空間的なスケール軸 I_r と位相円 S^1_θ である; バルク計量は $GG\text{-}A2\text{-}GG6$ の標準形 $ds^2_6 = e^{-2r}\eta_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu + dr^2 + d\theta^2$ (定理 2) である; 動径方向は $RG\text{-}$ スケールであって ($RG\text{-}$ 時間ではない); そして検出の開放系の言語は $GG\text{-}A5\text{-}GDOS$ ($GDOS$, [Arisaka, 2026, A5-GDOS](#)) と $A6\text{-}GRIP$ ([Arisaka, 2026, A6-GRIP](#)) に従う。本論文は記録に残るコホート論文 — $GG\text{-}A1\text{-}Constitution$ ([Arisaka, 2026, A1-Constitution](#))、 $GG\text{-}A2\text{-}GG6$ ([Arisaka, 2026, A2-GG6](#))、 $GG\text{-}A3\text{-}BI6$ ([Arisaka, 2026, A3-BI6](#))、 $GG\text{-}A9\text{-}SM$ ([Arisaka, 2026, A9-SM](#))、 $GG\text{-}A5\text{-}GDOS$ 、 $A6\text{-}GRIP$ — の上に、とりわけ $GG\text{-}A2\text{-}GG6$ の定理 0 と定理 2 (強制されたバルクとその標準計量)、 $GG\text{-}A3\text{-}BI6$ の $OGN\text{-}5$ カスケード、そして $GG\text{-}A9\text{-}SM$ のロック・スケール/スケール連鎖の上に築かれている。プログラムが定義する略語の標準辞書については $GG\text{-}A2\text{-}GG6$ 付録 B を見よ; 本論文はコライダー固有の語彙のみをその場で定義する。

地図の左翼に立つ列、基礎ブランチについて一言 — その主題である境界の複素構造は、コライダー・ホールから最も遠くに位置する。 $GG\text{-}P4\text{-}Real$ ([Arisaka, 2026, P4-Real](#)) は i の起源を担うメンバーである: 本論文のスペクトルが乗るのと同じ強制された舞台の二つの実構造 — コンパクトな位相円と因果的な時計 — から、それは境界物理の唯一の虚数単位を導出し、したがって本論文の振幅とラインシェイプが自明視している干渉位相は、入力ではなく幾何の出力である。 $GG\text{-}P5\text{-}CPT$ ([Arisaka, 2026, P5-CPT](#)) は鏡と物質を担うメンバーである: C 、 P 、 T を三つの実バルク因子の向きの反転として扱い、その連鎖の末端に物質-反物質非対称性を置く — そしてその日付入りのキル・リストは、

本論文の HL-LHC ロック・クラスターの判定を、同じ共有された幾何の一つのコンパニオン・チャンネルとして名指している。どちらもコライダーに関する主張を担わず、以下のいかなる結果もそのどちらからも移入しない; 全景を完全なものとするために、ここで名を挙げた。

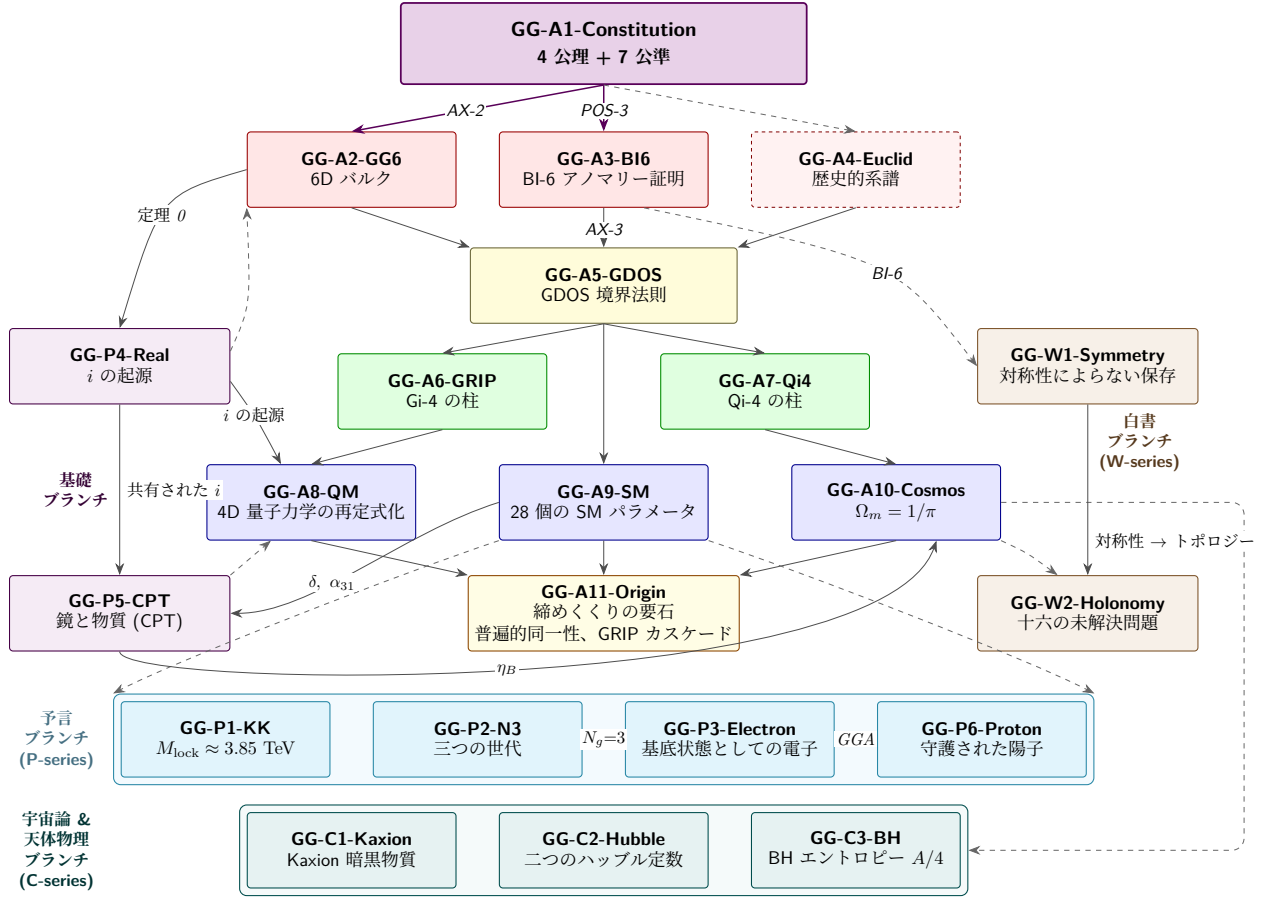


図 2: GG-Theory の二十二論文コホートの地図。憲法的な根である GG-A1-Constitution(紫、上部)は、コホートの残りがそこから降下してくる四つの公理と七つの公準を供給する: GG6 三部作 (GG-A2-GG6、GG-A3-BI6、GG-A4-Euclid、赤) はバルク幾何を実現し; GG-A5-GDOS (黄) は境界法則を; GDOS 三部作の柱 (GG-A6-GRIP、GG-A7-Qi4、緑) は幾何および量子情報のランタイムを; 4D 物理三部作 (GG-A8-QM、GG-A9-SM、GG-A10-Cosmos、青) は教科書的な読み出しを; そして締めくくりに要石 GG-A11-Origin(金)はクォークから意識に至る同一性カスケードを実現する。枠で囲まれた二つのブランチが現象論を担う — 予言ブランチ(シアン)は、その四篇の論文が内部の矢印によって行に沿って結果を受け渡し (GG-P2-N3 の $N_g=3$ が GG-P3-Electron へ、そして同論文の基底アトラクター法 GGA が GG-P6-Proton (Arisaka, 2026, P6-Proton) へ)、そして宇宙論・天体物理ブランチ(ティール)である。背骨は二篇ずつの二つの列に挟まれており、それらは正反対の仕事をする。左側では基礎ブランチ(紫)が背骨に供給する: GG-P4-Real は、GG-A2-GG6 の定理 0 の舞台から供給を受け、GG-A8-QM が消費する i を製造し、GG-P5-CPT は GG-A9-SM–GG-A10-Cosmos の界面であって、台帳の位相から供給を受け、地図の幅を横切って η_B 連鎖へ供給し、両者の間には共有された i の辺が実線で降りている。右側では白書ブランチ(茶)が背骨を読む: GG-W1-Symmetry はネーターからホプキンス–シンガーに至る一世紀を歩き、GG-W2-Holonomy はその弧が到達する構造 — 対称性によってではなくトポロジーによる保護 — を十六の未解決問題にわたって解剖する。白書は新たなものを何も導出せず、あらゆる結果をその親が宣言したグレードのまま担う; それぞれに引かれた一本の破線の供給は、唯一の源ではなく最も重い源を名指す。読みの約束: 実線の矢印は公理によって強制された降下を示し、最も例示的な場合には駆動する公理または公準を名指す辺ラベルを伴う; 破線の矢印は導出された結果の展開、あるいは憲法的に強制されることなく継承された歴史的な連関を示す。

7.2 十四の部のロードマップ

本論文の残りはさらに十三の部に組織されており、そこを歩む道筋は図 3 に描かれている。現在の部—基礎—はほぼ終わっている：五十年の問いを提起し、幾何—ゲージ・ロッキングを平易な言葉に置き換え、中心的主張をその開放系の読みにおいて述べ、公理から加速器観測量へ至る憲法的経路をたどり、二つの非空間的次元をその空間的な見かけ上の類似物から区別し、三つの読みの経路を示し、そしてこの締めくくりの節の二つの方位図を描いた。

第 II 部は本論文の重心であり、以降のすべてがその下流にあるがゆえにロードマップ中で強調されている。正準計量と整数台帳から、ロック・スケールを閉じた形で導き—定理 T-KK-1、 $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35} \simeq 3.849 \text{ TeV}$ —そのうえで、その質量に何が存在するのかを決着させる：四員クラスター（スピン 2 モード、カラー八重項 g^* 、レプトフォビックな Z'_B 、およびその Q_i 兄弟）、その導出された幅、結合、縮退パターン、7.05 および 10.22 TeV の径方向ファミリー、そして KK セクターの観測可能な性質である。

続く三つの部は、導出された信号を加速器の現場へと運ぶ。第 III 部は生成と発見を計算する：断面積、事象収量、そしてトップ対を決定的な終状態たらしめるチャンネル階層である。第 IV 部は、読者が信号を誤って分類しないための線を引き—GG-6 対 ランダル—サンドラム、項目ごとに—加速器における検出そのものを開放系 (GDOS) の問題として読み直す。第 V 部はそのうえで、結合の規格化を閉じた二分法として述べる：定理のみに基づく標的である読み出し I と、経験的に係留された率の推定である読み出し II である。

二つの部は、予言を現に存在する装置と対決させる。第 VI 部は $t\bar{t}$ 信号の解剖を完全な深さで導く—定理によって符号が固定された干渉を考慮したラインシェイプ、角度分布と偏極の一式、そして事前登録された指紋の背後にある識別行列である。第 VII 部は実験的現状と到達範囲である：現行の ATLAS/CMS の制限、計算された $\sigma \times \text{BR}$ を公表された排除と突き合わせる実務的な対決、 $\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ （期待値）におけるキル条件、そしてトリガーと解析のロードマップである。

第 VIII 部—二番目に強調された部—は、実際の解析の忠実度で発見をシミュレートする—公表された ATLAS Run-2 探索に係留し、その制限に較正し、統計をポアソン尤度から積み上げて説き、2026、2031、2033、2041 年に検出器が記録するであろうものの四つのスナップショットを伴って。その見出しは、本論文が単に検証可能であるにとどまらず緊急である理由である：問いを決する衝突は、すでにテープ上にあるかもしれない。第 IX 部は HL-LHC の先、2035–2070 年の計画を、施設ごと、シナリオごとに見渡す。第 X 部、議論は、事案を秤にかけ—有意性、一意性、古典的な加速器の難問、標準模型を超える他の道との比較、反証のための予言、そして未解決のものとして述べられた未解決の問い—そして第 XI 部、結論は、本論文が確立したこと、その客観的な限界、そしていずれの評決が何を意味するのかをもって本体を閉じる。後付けは工房である：第 XII 部は技術付録—参照用の辞書、五つの概念入門、そしてロック・クラスターの加速器物理に関する三つの大学院講義—を集める；第 XIII 部は、加速器実験家、現象論家、統計家、あるいは弦理論家が最も強く迫るであろう共通の反論に答える；そして第 XIV 部は、各項目が関連性の注記と初出引用箇所を備えた注釈付き参考文献をもって閉じる。順に読めば、十四の部は単一の自己完結した議論を構成する；必要に応じて読めば、各部は自らの輸入項目を明示しており、単独で訪れるに耐える。

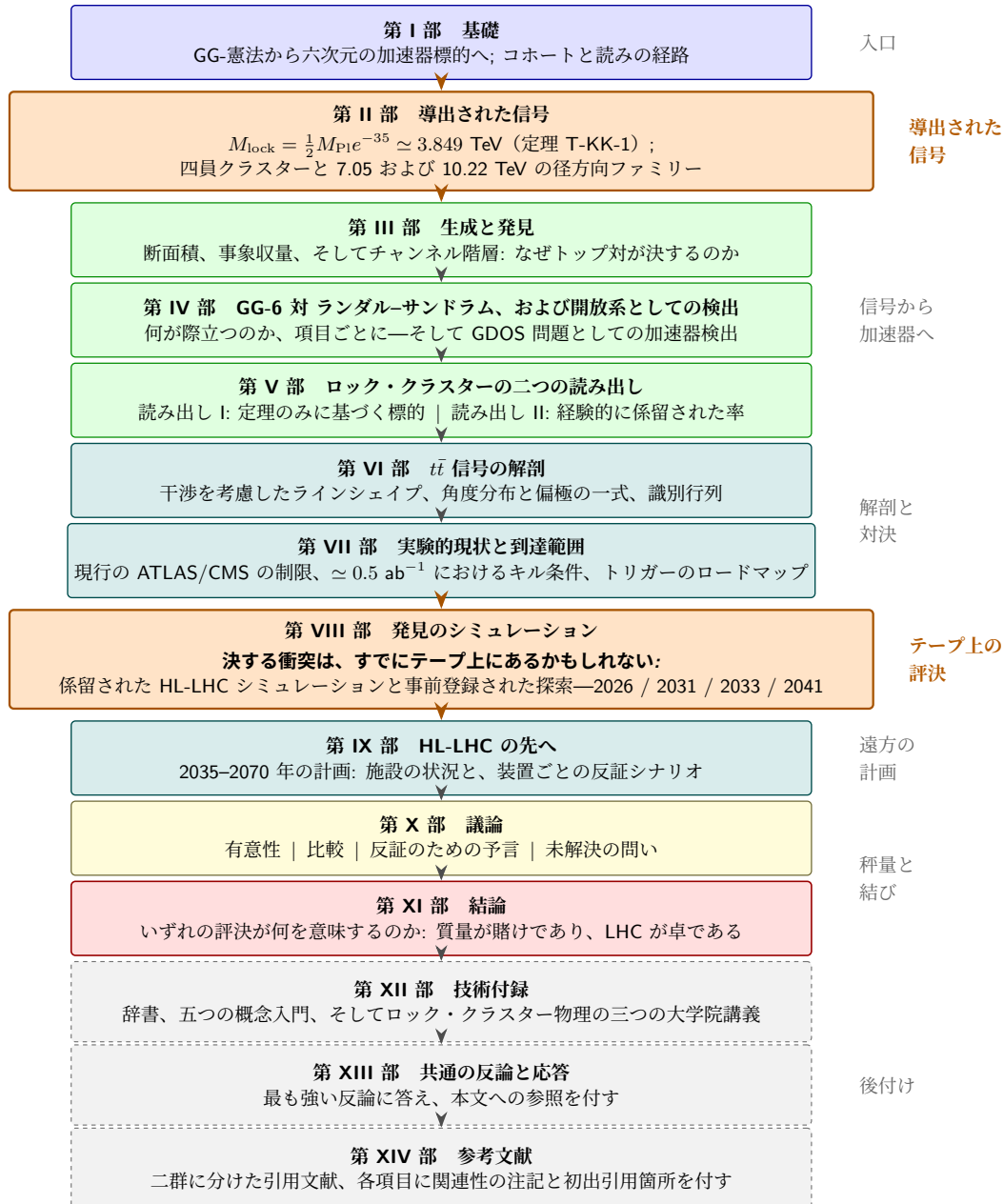


図 3: GG-P1-KK の十四の部のロードマップ。議論は八つの段階で展開する。入口 (第 I 部): 五十年の問い、平易な言葉による幾何-ゲージ・ロッキング、憲法的経路、非空間的幾何、そして読者のための二つの地図。導出された信号 (第 II 部、強調): 閉じた形でのロック・クラスターの質量 (定理 T-KK-1) と、その上に築かれる観測可能なスペクトル。信号から加速器へ (第 III–V 部): 生成と発見、検出の開放系的読みを伴う GG-6 / ランダール-サンドラム比較、そして結合の規格化の二つの読み出し。解剖と対決 (第 VI–VII 部): 導出された $t\bar{t}$ 指紋と、公表された ATLAS/CMS の制限に対して置かれた計算された率、およびキル条件。テーブル上の評決 (第 VIII 部、強調): 係留された HL-LHC シミュレーションと事前登録された探索—2026 / 2031 / 2033 / 2041。遠方の計画 (第 IX 部): 2035–2070 年の装置群。秤量と結び (第 X–XI 部): 議論と結論。後付け (第 XII–XIV 部): 技術付録、共通の反論と応答、そして注釈付き参考文献。第 II 部と第 VIII 部が強調されているのは、両者が合わせて本論文の中心的主張— $M_{\text{lock}} \simeq 3.849 \text{ TeV}$ における導出されたロック・クラスター—を担うからである: 第 II 部は質量とそのクラスターが定理として計算される場所であり、第 VIII 部はその計算が日付入りの事前登録された加速器評決となる場所である。質量が賭けである; 第 VIII 部が卓を用意する。

第 I 部は、平たく言えば、舞台と規則を確立した。自由度が五つの計数数のみである理論は、六次元の舞台を強制する—通常の時空に加えて、まったく空間ではない二つの方向であり、一方はエネルギー・スケールそのもの、他方はゲージ位相である—そしてその舞台は、これまでのあらゆる余剰次元の提案とは異なり、調整可能な大きさをもたず、ラディオンをもたず、ランドスケープをもたず、調節すべきものを何ももたない。粒子について主張されたことはまだ何もない; 確立されたのはより厳しいことである: 加速器観測量が公理から降りてくる憲法的経路、バルク励起が ATLAS/CMS の記録となる開放系の辞書、そして何よりも、以降のあらゆる数値が出力でなければならないという規律である。

次の部は、その規律を直ちに、本論文の中心的対象の上で現金化する: 質量である。正準計量と整数台帳から、ロック・スケールを閉じた形で導き—定理 T-KK-1、 $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35} \simeq 3.849 \text{ TeV}$ —そのうえで、そこに何が存在するのかを決着させる: 孤立した共鳴ではなく、導出された微細構造をもつ四員クラスターである。本論文のすべてはその一つの数の下流にある; 第 II 部はそれがどこから来るのかを示す場所である。

8 第 I 部を平易な言葉で: 五十年にわたる予言がなぜ負けえなかったのか、そしてこの予言がなぜ負けうるのか

1970 年代半ば以降に発見されたあらゆる粒子は、発見される前にリストに載っていた。W と Z、トップ、ヒッグス—いずれも予言され、いずれも探索され、いずれも現れた。その成功の連続は終わり、それ以来の五十年は新しい層をまったく生み出していない。

試みが足りなかったためではないのであり、その試みがなぜ失敗したのかを本部は平明に述べる。超対称性は各フロンティアのすぐ上にパートナーを約束し、その最小の形において百を超える自由パラメータを抱えていた—それゆえあらゆる否定的結果は、スペクトルを上へずらすことで応じられた。余剰次元模型は真に構造的な洞察を供給し、その質量スケールを入力とした: 走査すべき半径、選択すべきワープ因子であり、それゆえいかなる排除も致命的ではありえなかった。弦理論はあらゆるものの候補を築き、測定可能な何ものにも身を委ねなかった。三つの計画、三組のダイヤル、そして、その失敗が何かを終わらせるような事前登録された数はただの一つもない。

診断は、次の層が手の届かないところにあるということではない。それは、連続的な自由パラメータをもつ理論はいかなる測定からも退却できるということであり、そして負けえない理論は勝ちえないということである。

本論文が代わりに提示するのは、背後にダイヤルをもたない質量である。そのスケールは、加速器とは何の関係もない理由により、このコホートの他の場所で確定された台帳の中の一つの整数から出てくるのであり、同じ整数は電弱スケールをも過剰に拘束する。測定が食い違ったとしても、調整すべきものは何もない。それこそが眼目のすべてであり、本論文の残りがこれほど具体的でありうる理由である。

第 II 部

導出された信号

ロック・クラスター質量（定理 T-KK-1）と観測可能なスペクトル

9 ロック・スケールと第一共鳴クラスター

9.1 ロック・クラスター質量: 定理 T-KK-1

本小節は本論文の科学的中核である。下流のすべて — 生成、チャンネル、ラインシェイプ、実験的状况、そして反証子 — は、ただ一つの導出された数に懸かっている。我々はそれをバルク論文から輸入された定理として述べ、その入力を示し、自由パラメータを数える（一つもない）。

定理 T-KK-1 (GG-6 ロック・クラスター・スケール)。 六次元バルク GG-6 の最初の観測可能なカルツァーライン共鳴は動径的な「ロック・クラスター」であり、その最低モードは次のパラメータフリーの質量をもつ

$$M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-K} = \frac{E_{\text{Pl}}}{2e^{35}} \simeq 3.849 \text{ TeV}, \quad K = 35, \quad (15)$$

ここで K は OGN-5 ロック整数（連続的自由度はない）であり、 M_{Pl} （同等に $E_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5/G_N}$ ）は GU-5 普遍定数集合の一員であって、調整可能なスケールではない。動径励起は離散的な塔をなす

$$m_n = \frac{x_n}{x_1} M_{\text{lock}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (16)$$

ここで x_n はベッセル関数 J_1 の n 番目の正の零点であり、したがって最初の三つのロック・クラスター・モードは次に位置する

$$m_1 \simeq 3.85 \text{ TeV}, \quad m_2 \simeq 7.0 \text{ TeV}, \quad m_3 \simeq 10.2 \text{ TeV}. \quad (17)$$

角度方向 (S_θ^1) のパートナーは、それらが伝播するならば、クラスターのすぐ上の導出されたオフセットに位置し（式 (12)）、 θ 非依存のカレントによる単独生成には現れない；ファイバー的読みではそれらは電荷セクターであって共鳴ではない（P-KK-7、再格付け）。

アンカーの精度。 CODATA のプランク・エネルギーで評価すると $M_{\text{lock}} = E_{\text{Pl}}/(2e^{35}) = 3.8489 \text{ TeV}$ であり、その不確かさはすべて G_N から継承される（相対で $\sim 10^{-5}$ 、すなわち $\pm 0.04 \text{ GeV}$ ）— これによりロック・クラスターのアンカーは、十分な余裕をもって、素粒子物理学における最も鋭い絶対質量予言となる。塔の比は厳密なベッセル零点比 $m_2/m_1 = x_2/x_1 = 1.8309$ および $m_3/m_1 = 2.6551$

であり、したがって 7.047 および 10.219 TeV における動径的再帰は、アンカー自身を超える追加の理論誤差を一切もたない。

最低三状態の物理的意味。 (16) の整数 n は、単なる数式にとどまらない物理的な読み値に値する。スケールのスロートは共振空洞である：繰り込み群方向の長さ $K = 35$ の有限区間であり、 $r = 0$ の紫外壁と $r = K$ の赤外端点で境界づけられている。いかなる空洞とも同様に、それは定在波を支え、 n はその動径節を数える： $n = 1$ モードは基本モードであり — 節をもたず、赤外端点に最大限集中した、スロートの「最低音」である（T-KK-1 が用いる $\frac{1}{2}M_{\text{Pl}}$ を基準とするチャートでは端点 $r = K$ がロックそのものである；ショーケース図の E_{GUT} を基準とするチャートでは同じエネルギーが $r = 29.41$ に位置し、端点 $r = 35$ は 14.4 GeV と読まれる — 一つのエネルギー、二つの読み、とその図のボックスが述べるとおりである） — 一方 $n = 2$ と $n = 3$ はその第一および第二の倍音であり、それぞれスケール方向に節を一つずつ加える。ベッセル零点 x_n は、この背景上の定在波量子化条件にほかならず、その比は純粋な幾何である： $m_1 : m_2 : m_3 = 1 : 1.831 : 2.655$ 、すなわち 3.849、7.047、10.219 TeV である。スロートの繰り込み群的読み（表 2 の「塔とは何か」の行）においては、これらは空間次元の運動量モードではなく、境界理論のその赤外スケールにおける逐次励起された複合共鳴である — ハドロンの動径励起の類似物であり、スロートが閉じ込め力学の役割を演じている。実験家が携えるべき直観はこうである：導出されたスケールが一つ、その上に固定された倍音列 — 任意間隔の杭垣ではなく、パイプオルガンの管である。LHC の射程内にあるのは基本モードのみである；7.047 TeV の $n = 2$ 倍音は FCC-hh の測定事項であり（第 IX 部）、それをベッセル比のところに見出すことは、単にもう一つの粒子ではなく、空洞そのものを確認することになる。

標的のランタイム上の同一性。 本シリーズのランタイム語彙（Arisaka, 2026, A6-GRIP; 二つのレジーム GRIP-In と GRIP-Out）においては、T-KK-1 の主張は、本論文をその姉妹予言と同じ文法のなかに位置づける一文の翻訳をもつ：ロック・スケールは動径スケール層の床 — その幾何アトラクター — であり、そして KK クラスタはそのアトラクターの第一励起準位である。LHC でロック・クラスタ共鳴を生成することは、固定されたランドスケープ内でのポート駆動の励起である（Arisaka, 2026, A6-GRIP の正準的な衝突型加速器に関する明確化：境界ポートを通して状態を坂の上へ汲み上げても、何も再編成されない）；その崩壊は床への GRIP-In 緩和である。したがって予言ブランチの三つの装置は一つの汎関数を探る：ハロスコープは盆地の残留リングに耳を澄まし（C1-Kaxion）、重力波リングダウンは盆地の曲率を測り（C3-BH）、そして LHC は盆地の第一励起状態を汲み上げる — 本論文である。

導出の連鎖（輸入）。 この連鎖は六つのステップからなる。ステップ 1–3 はスケール (15) の入力を示し、そのいずれも自由パラメータではない；ステップ 4 は塔 (16) を与える；ステップ 5–6 は過剰拘束とパラメータの数え上げを記録する。

ステップ 1 — 幾何。 バルクは Arisaka (2026, A2-GG6) の定理 2 の正準的な直積幾何であり、

$$ds_6^2 = e^{-2r} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + dr^2 + d\theta^2, \quad r \in [0, K], \quad \theta \in [0, 2\pi), \quad (18)$$

自由な計量データは一切ない（ k 、 R_θ 、 r_c はいずれも正準的な GG-6 単位系で 1 に固定されている；Arisaka (2026, A2-GG6) の定理 2 を見よ）。衝突型加速器物理にとって決定的な構造的な事実、動径座標 r がスケール（繰り込み）方向であり、 $r = \ln(E_{\text{GUT}}/\mu)$ であって、有限区間 $[0, K]$ を動くこと

— 紫外端点 $r = 0$ と赤外端点 $r = K$ で境界づけられていること — である。有限のワープした区間は、二ブレーンのランダル–サンドラム構成とまったく同様に、規格化可能な共鳴の離散スペクトル（連続体ではない）を担う。これらの共鳴はカルツァークライン塔の境界像である；それらは非空間的である（スロートはエネルギー・スケール方向であって空間次元ではない）が、その衝突型加速器現象論はワープしたカルツァークライン／複合状態のそれである。

ステップ 2 — スケール深度は強制される。 整数 K は選ばれたものではない。それは、単一テンソルのグリーン–シュワルツ修正ビアンキ恒等式 BI-6 から Arisaka (2026, A3-BI6) において証明された OGN-5 ディオファントス・カスケードの終端エントリーである：

$$(M, N, L; J, K) = (1, 3, 5; 7, 35), \quad J = 2N + 1 = 7, \quad K = LJ = M^2 + N^2 + L^2 = 35. \quad (19)$$

かくして RG スケール・スロートの深度は整数データのみによって固定される。これは本論文において単一で最も重要な一文である：幾何の赤外端はダイヤルではない。

ステップ 3 — スケール・プロファイルがロック・スケールを定める。 スロートに沿って、スケール・プロファイル e^{-r} はあらゆるバルク・スケールを赤方偏移させる；赤外端点 $r = K$ における抑制は次のとおりである

$$e^{-K} = e^{-35} \simeq 6.305 \times 10^{-16}. \quad (20)$$

GG-6 の二つの余剰方向は非空間的（無次元のスケールと位相）であるため、6D アインシュタイン–ヒルベルト簡約はバルク・スケールを四次元プランク・スケールに純粋な数 $M_6 = \sqrt{2/\pi} M_{\text{Pl}}$ によって関係づける（Arisaka (2026, A4-Euclid) の定理 T-Euclid-6; 同等に $M_{\text{Pl}}^2 = (\pi/2)M_6^2$ であり、Arisaka (2026, A2-GG6) §5 の動径スケール・プロファイル積分 $\int_0^K e^{-2r} dr = \frac{1}{2}(1 - e^{-2K}) \rightarrow \frac{1}{2}$ が $\frac{1}{2}$ を供給する）。これは、まさに I_r と S_θ^1 が長さをもたないがゆえに、通常の空間的カルツァークライン簡約における次元を担う体積関係 $M_{\text{Pl}}^2 \sim M_6^4 V_{\text{int}}$ ではない。この整合を赤外端点まで運びきると、バルク論文の定理 6 が述べるとおりのロック・スケールが得られる、

$$M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-K}, \quad (21)$$

ここで因子 $\frac{1}{2}$ は上のスケール・プロファイル積分の重み $\frac{1}{2}(1 - e^{-2K}) \rightarrow \frac{1}{2}$ であり（Arisaka (2026, A9-SM) §4.6 の「最小半波」、フィットされた係数ではない。完全なスケール連鎖 $E_{\text{Pl}} \rightarrow E_{\text{GUT}} \rightarrow M_{\text{lock}}$ は Arisaka (2026, A2-GG6) §5 と定理 6 が所有しており、枠囲みの値は Arisaka (2026, A9-SM)（導出量の表: $M_{\text{lock}} = 3.848959 \text{ TeV}$ ）において再現されている。数値的には、 $E_{\text{Pl}} = M_{\text{Pl}} c^2 = 1.2209 \times 10^{19} \text{ GeV}$ として、

$$M_{\text{lock}} = \frac{1}{2}(1.2209 \times 10^{19} \text{ GeV})(6.305 \times 10^{-16}) = 3.849 \times 10^3 \text{ GeV} = 3.849 \text{ TeV}. \quad (22)$$

ステップ 4 — 動径的な塔。 角運動量が消える（ S_θ^1 上で $\ell = 0$ ）(18) のスピン 2 揺らぎ $h_{\mu\nu}(x^\mu, r)$ は、有限区間 $[0, K]$ 上の動径シュトゥルム–リウヴィル問題に従う、

$$-\partial_r(e^{-4r} \partial_r \psi_n) = m_n^2 e^{-2r} \psi_n, \quad (23)$$

境界条件は $r = 0$ と $r = K$ におけるノイマン型である。AdS 的なスケール・プロファイルに対して固有値は J_1 の零点によって定まり、 $m_n \propto x_n$ となる。ここで一つの微妙な点を正確に述べておかねばならない。素朴な純ベッセル評価は $m_1^{\text{Bessel}} \approx x_1 e^{-K} M_{\text{Pl}} \approx 3.83 \times 6.3 \times 10^{-16} \times 1.22 \times 10^{19} \text{ GeV} \approx 29.5 \text{ TeV}$ を与えるであろう — 完全なプランク質量を単位として読んだベッセル零点である（ステップ 3 の $M_6 = \sqrt{2/\pi} M_{\text{Pl}}$ を単位とすれば 23.5 TeV と読まれる；いずれも物理的なモードではない）。この粗い評価は、スケール・プロファイル簡約の前因子 $\frac{1}{2}$ を用いるスケール連鎖の値 $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-K} \simeq 3.85 \text{ TeV}$ によって置き換えられる（Arisaka (2026, A2-GG6) §5+T6; Arisaka (2026, A4-Euclid)）。

二つの前因子の比は $2x_1 \approx 7.66$ であり、数値的には OGN-5 整数 $J = 7$ に近いが、独立な整数補正ではない（Arisaka (2026, A2-GG6) の KK スペクトル付録）。したがって我々は最低の物理的モードを導出されたスケールに規格化して $m_1 = M_{\text{lock}}$ とし、これが (16) を与える； $x_1 = 3.8317$ 、 $x_2 = 7.0156$ 、 $x_3 = 10.1735$ とすれば、代表的な間隔は (17) である。

輸入されたアンカーは $m_1 = M_{\text{lock}}$ のみである；より高い比 $x_2/x_1 = 1.83$ 、 $x_3/x_1 = 2.66$ は自由二次作用上のスピン 2 塔の厳密なベッセル零点比であり（T-KK-2、ステップ 2）、その $O(1/K)$ のフェンスとともにそのグレードで担われており、そしてクラスターの微細構造（ベクトル成員とその境界条件）は T-KK-2 の主題であって、本定理の主題ではない。コンパニオンの角度塔 — ゲージ位相円のフーリエ・モード（Arisaka, 2026, A2-GG6） — は、正準計量上では、各基底状態のすぐ上の導出されたオフセットに位置し（スピン 2 では 1.067、ディリクレ・ベクトルでは 1.144、ノイマン・ベクトルでは 1.171；式 (12)）、 $\pm \ell$ について二重縮退しており、 θ 運動量保存によって単独生成から締め出されている（P-KK-7、再格付け）。これがオブション A の内容である：観測可能なクラスターは動径的である。

ステップ 5 — 過剰拘束。 同じロック・スケールは、Arisaka (2026, A9-SM) の細谷分岐選択を通じて電弱真空期待値を固定する、

$$v = M_{\text{lock}} \left(\frac{2}{5} \right)^3 = 3.849 \text{ TeV} \times 0.064 \simeq 246.3 \text{ GeV}, \quad (24)$$

これは測定値 $v = 246.22 \text{ GeV}$ と一致する。したがって衝突型加速器スケールと弱スケールは独立でない：単一の整数台帳が両者を固定する。この過剰拘束が、この探索のもつ異例の反証力の源泉である — 誤ったロック・クラスターは電弱の導出をも失脚させることになる。

ステップ 6 — パラメータの数え上げ。 式 (15) は純粋な数（OGN-5 整数 $K = 35$ から構成される $\frac{1}{2}e^{-35}$ ）に GU-5 スケール（ $M_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5/G_N}$ であり、衝突型加速器へのフィットによってではなく G_N 、 $\hbar$ 、 c の測定によって固定される）を掛けたものである。質量予言に自由な連続パラメータは存在しない。以下の節の断面積と分岐比の見積もりはモデル入力であるし、そのように表示されている；質量はバルク論文の定理であり、ここに輸入されている。

表 3: GG-6 動径ロック・クラスター (オプション A)。質量は $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2}M_{\text{Pl}}e^{-35}$ を用いて $m_n = (x_n/x_1)M_{\text{lock}}$ から得られる。角度方向のパートナー (図示せず) は、それらが伝播するならば、式 (12) の導出されたオフセットに位置し、単独生成の外にある。質量はベッセル零点の比に一つのスケールを掛けたものであり、台帳が供給するのはそのスケールだけである — だからこそ、この表には間隔の不確かさのための列がない。動きうるのは全体の位置であり、動きえないのはパターンである。成員が誤った比のところに位置する測定されたクラスターは、たとえ最低成員が予言どおりの位置に着地したとしても、この読みを反証することになる。

モード	x_n (J_1 零点)	m_n (TeV)	役割
$n = 1$	3.8317	3.85	ロック・クラスターの重心; 主要な発見標的
$n = 2$	7.0156	7.0	第一動径パートナー; HL-LHC による裏づけ
$n = 3$	10.1735	10.2	第二動径パートナー; 将来衝突型加速器の射程

事前宣言された反証子 (F-KK-1、POS-7/MF のもとで)。この予言は明確なタイムラインのもとで反証可能である。LHC データセットが、重心を窓 3.85 ± 0.10 TeV 内にもつクラスター化したスピン 2 共鳴を示さないならば — とりわけ、支配的な $t\bar{t}$ およびブーストされたダイジェット・チャンネルにおいて、模型が見積もる断面積で 3.85 TeV 近傍に第一動径モードを示さないならば — GG-6 の現行のロック・スケール実装は排除される。(±0.10 TeV の窓は実験的なものであって理論的なものではない: アンカー自身の不確かさは ±0.04 GeV と四桁小さく、したがってこの窓は再構成質量のスケールと分解能、および多状態クラスターの重心が取りうる広がりのみを計上している — 理論誤差が消費しえない、寛大な ±2.6% である。) 逆に、7 TeV 近傍の $n = 2$ パートナーを伴う確認されたクラスターは、バルク幾何、OGN-5 ロック整数 $K = 35$ 、そして非空間的カルツァークライン的読みに対する同時的な証拠となるであろう。3.849 TeV という数が賭けである。(チャンネルごとの詳細なキル条件は §33 で述べる。)

再資格付与 (系 T-KK-2c、§10.9)。グラビトンのグルーオン結合はいまや導出されており、 $\kappa_{gg} = c_K/K = 0.0136$ であって、13 TeV で $\sigma \times \text{BR}(G_1 \rightarrow t\bar{t}) \approx 0.045$ fb を与える (LO×K、ここで K は QCD の K 因子 $K_{q\bar{q}} = 1.3$ 、 $K_{gg} = 1.6$ を表し — 整数 $K = 35$ ではない) — これは 3 ab^{-1} の HL-LHC 予測をすら ~25 倍下回る。したがって F-KK-1 は二つの階層に分かれる: (i) HL-LHC においては、ロック・スケール実装の反証子は、抑制不可能なカラー八重項を通じてクラスターによって担われる (F-KK-2B) — 第 VIII 部の較正された機構のもとで $\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ で期待される、 3.85 ± 0.10 TeV 内のクラスターを考慮した $t\bar{t}$ /ダイジェット統合におけるヌルは、この実装を退役させる; (ii) 直接のスピン 2 確認は FCC-hh の測定事項である (85 TeV で $\sigma(G_1) \approx 0.21$ pb)。賭けは有効である; 表は動く。

範囲についての注記 (誠実さの規律)。上記の内容のうち、式 (15)、(19)、(20)、(22)、(24) は導出済みである (パラメータフリーであり、OGN-5 + GU-5 まで遡行できる)。塔の比 (16) は正準プロファイル上の厳密なベッセル零点比である (T-KK-2、ステップ 2、その $O(1/K)$ のフェンスを伴う); ノイマン境界条件と $O(1)$ の規格化 $\frac{1}{2}$ は、正準 AdS スロート・プロファイルとコホートのスケール連鎖に依拠する規格化についての主張である; クラスターの下部構造および八重項/グラビトン結合は、いまやそれ自体が自由場のグレードで導出されている (T-KK-2、系 T-KK-2c); 残る模型見積もりはフェルミオンごとのカスケード深度と $U(1)_B$ 規格化 g_B に限られる。定理級の主張は質量 (15) であり、反証子が標的とするのはそれである。

9.2 すべての定量的予言の来歴

本論文は実験家によって実行に移されることを意図しているため、我々は例外なく、各々の数がどこから来ているかを述べる。あらゆる導出された量は、ちょうど完結した GG-6-A シリーズ (A1–A11、2026 年 6 月) の定理へ、そしてそれ以外の何ものへも遡らない。導出の連鎖は短く、完全に逐次的である:

1. **入力。** 次元をもつ五つ組 $\text{GU-5} = \{c, G_N, \hbar; k_B, Q_B\}$ と無次元の整数台帳 $\text{OGN-5} = (M, N, L; J, K) = (1, 3, 5; 7, 35)$ であり、 $J = 2N + 1 = 7$ かつ $K = LJ = M^2 + N^2 + L^2 = 35$ である (Arisaka, 2026, A1-Constitution, §POS-6 の実例)(Arisaka, 2026, A3-BI6)。連続的なダイヤルはない。
2. **プランク・スケール。** $E_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5 / G_N} = 1.2209 \times 10^{19} \text{ GeV}$ 、すなわち Arisaka (2026, A1-Constitution) の GU-5 (T-GU5) である。
3. **統一スケール。** $E_{\text{GUT}} = E_{\text{Pl}} e^{-2\pi} \simeq 2.28 \times 10^{16} \text{ GeV} = S_\theta^1$ のホロノミー一巡である (Arisaka, 2026, A2-GG6, §5, 定理 6)。
4. **スケール深度。** $e^{-K} = e^{-35} \simeq 6.305 \times 10^{-16}$ であり、整数 $K = 35$ はステップ 1 のものである。
5. **ロック・クラスター質量 (中核)。** $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35} = 3.848959 \text{ TeV}$ (Arisaka, 2026, A2-GG6, §5, 定理 6) であり、スケール・プロファイル簡約因子 $\frac{1}{2}$ 、Arisaka (2026, A4-Euclid) (T-Euclid-6) による $M_6 = \sqrt{2/\pi} M_{\text{Pl}}$ 、そして Arisaka (2026, A9-SM, §4.6) の半波の読みを伴う。素朴な純ベッセル根 ($\approx 29 \text{ TeV}$) は、完全なプランク質量を単位として読んだベッセル零点である; それを M_{lock} へ運ぶのは $\frac{1}{2}$ とステップ 4 のアンカー規格化であって — いかなる台帳整数による除算でもない。T-KK-1 は Arisaka (2026, A2-GG6) の定理 6 を輸入し、それを再導出はしない; 本論文が付け加えるのはアンカーより上のスペクトルである。
6. **電弱過剰拘束。** $v = M_{\text{lock}}(2/L)^N = M_{\text{lock}}(2/5)^3 = 246.333 \text{ GeV}$ 、すなわちウィルソン–細谷の vev 定理 Arisaka (2026, A9-SM, 定理 vev) である; 測定値 $v = 246.22 \text{ GeV}$ と比較せよ。

本論文におけるそれ以外のすべて — パートナー状態の質量、結合、断面積、分岐比、ラインシェイプ、そしてイベント収量 — は本論文自身のものであり、T-KK-2 のグレードで導出されるか、この導出されたスケールの上に見積もりとして担われ、それに応じて格付けされている。とりわけ、パートナー質量は本論文のものであって GG-6-A シリーズのものではない: ちょうど M_{lock} に位置するディリクレ・ベクトルと、複合硬化シナリオにおいて $\approx M_{\text{lock}}$ に位置する八重項は T-KK-2 の出力であり (§10.4)、そして GG-6-A シリーズは衝突型加速器の分光とレートのすべてを意図的に本予言ブランチ論文に委ねている。表 4 はこの区分を明示的に記録している。

排除端における誠実さ。一点、来歴の表のなかに暗黙のまま残すよりも、平明に述べておくに値することがある。 M_{lock} におけるカラー八重項 g^* は、現在の制限の上に安穩と乗ってはいない: それは現在の ATLAS/CMS の高質量排除フロンティア ($\gtrsim 3.8 \text{ TeV}$; 本論文自身の較正では観測された端の上、§31.4) に着地しており、そしてバリオンのベクトルがそれらの制限を逃れるのはレプトフォビアだけによるのではなく、そのディリクレ・モードにおいてはいかなる端点クォークもそれを生成しないからである (T-KK-2、ステップ 3'); 八重項が今日生き延びているのは、その結合がレプトフォビク (軽レプトンに対して抑制されている) であるからにすぎず、それゆえはるかに厳しいダイレプトン共鳴の制限はそれに適用されない。我々はこれを抜け穴ではなく、検証の鋭化とみなす — 現在の

データのなかでこの状態を生かしているまさにそのレプトフォビアこそが、HL-LHC におけるブーストされたダイジェットおよび $t\bar{t}$ チャンネルを決定的な舞台にしている。これに対応して、バリオンの規格化はいまや §10.10 においてその誠実な境界まで担われている：その生成子ノルムは定理級であり（トレース比 $2/5$ ）、かつて未解決であった読み出し規則 L-KK-1 は解決されており（T-BI6-6.4: $g_B = 0.565$ 、§10.10）、そして Z'_B がディリクレ・モードで LHC に不可視であるのは g_B が小さいからではなく、いかなる端点クォークもそれを生成しないからである (§31)。(g_B, m_B) の第五の力の窓 — 標準模型帰結論文 (Arisaka, 2026, A9-SM) がかつて窓としてその反証子のなかに挙げ、いまや不在として述べているもの（その F-SM-5） — は、本論文によって平面走査から四本の候補線へと縮減され、次いで容量定理によって $g_B = 0.565$ において閉じられた — そして終端がシュタッケルベルク対形成ではなく境界条件であるがゆえに、供給されるべきスケールはもはや残っていない：専用の第五の力の論文の判定は不在であり、いかなる到達距離でも、いかなる精度でも $\eta = 0$ であって、それを検証する装置は名指しされている（MADO）(Arisaka, 2026, P7-5thF)。

表 4: すべての定量的予言の来歴。定理級であるのは第一のブロックのみである; 第二のブロックは模型級であり、述べられた仮定とともに再スケールする。「出典」は所有する GG-6-A 論文と定理を与える。ブロック間の分割こそがこの表の要点であり、表中のいかなる数よりも先に読むに値する。定理級の項目は、それを所有する定理を退役させることなしには再交渉できない; 模型級の項目は、述べられた仮定が動くときに動き、その仮定は埋め込まれるのではなく名指しされている。本論文のどれだけが単一の誤った仮定によって危険にさらされているかを知りたい読者は、第二のブロックを数えるべきである。

量	値	位置づけ & 出典
導出済み (定理級; パラメータフリー)		
OGN-5 台帳 (1, 3, 5; 7, 35)	$K = LJ = 35$	導出済み — GG-A3-B16 / GG-A1-Constitution (POS-6)
$E_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5 / G_N}$	$1.2209 \times 10^{19} \text{ GeV}$	導出済み — GG-A1-Constitution (T-GU5)
$E_{\text{GUT}} = E_{\text{Pl}} e^{-2\pi}$	$2.28 \times 10^{16} \text{ GeV}$	導出済み — GG-A2-GG6 §5+T6
$M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35}$	3.849 TeV	導出済み — GG-A2-GG6 §5+T6; GG-A4-Euclid T-Euclid-6
$v = M_{\text{lock}} (2/5)^3$	246.33 GeV	導出済み — GG-A9-SM (ウィルソン-細谷)
模型級 (仮定依存; 再スケール可能)		
動径比 $x_2/x_1, x_3/x_1$	1.83, 2.66	T-KK-2 のグレードで導出済み: 自由二次作用上のスピン 2 塔の厳密な J_1 零点比、フェンスは $O(1/K)$
八重項 g^* (シナリオ B)	$\approx M_{\text{lock}} \approx 3.85 \text{ TeV}$	複硬化された位置: 複合的読みのマッチング仮定であり、硬化された値のまわりのフェンスは $O(1/K)$ である (T-KK-2、ステップ 6); ディリクレ・ベクトル Z'_B, Z'_{Qi} はちょうど M_{lock} に位置する (定理級、ステップ 3')
軽クォーク結合 ξ_{UV}	-0.194 (厳密モード、式 38)	導出済み — $1/\sqrt{K} \approx 0.17$ を精密化する紫外端点振幅である; その符号 (トップのものと逆) はそれ自体が導出された予言である (T-KK-2)
生成結合	$\xi_{\text{UV}} = -0.194$ (八重項)、 $\kappa_{gg} = 0.0136 (G_1)$; 未解決の深度に対するディリクレ・ベクトルの深度則	導出済み (T-KK-2、T-KK-2c); フェルミオンごとの深度は GG-A9-SM のカスケード深度補題であり、未解決
断面積、収量	$8.7 [7.0-12] \text{ fb}$ (八重項、 $t\bar{t}$, 13 TeV); $0.045 \text{ fb} (G_1)$	導出条件付き (D*): 外部の QCD / PDF 入力を伴う導出された結合の上で (§31); 定理ではない
分岐比、幅	$\text{BR}(t\bar{t}) = 0.94$, $\Gamma/m = 0.146$ (八重項); $0.69:0.15:0.08:0.08$, $6.3\% (G_1)$	トップ深度の帯 $r_{t_R} \in [4, 5]$ に条件付きの導出 (D*); ツリーレベルの零点は厳密

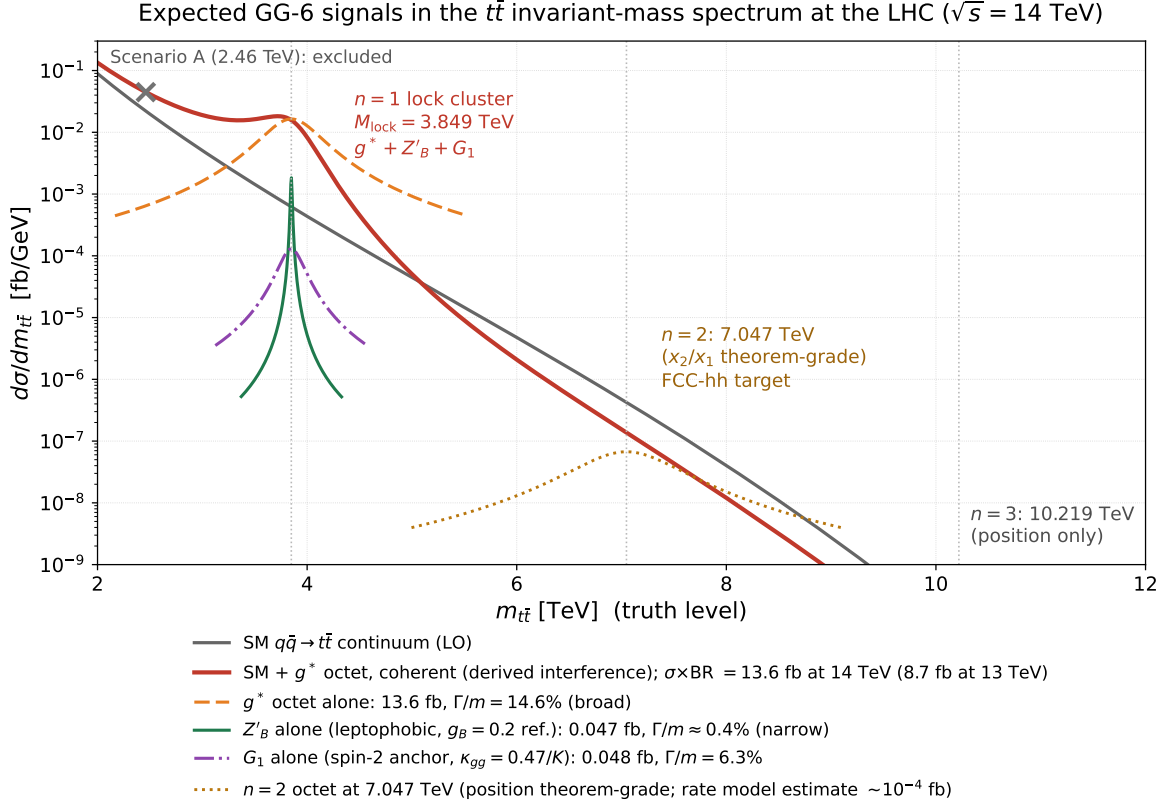


図 4: 本論文自身の機構から定量的に描いた、期待される GG-6 信号ランドスケープの全体 ($\sqrt{s} = 14$ TeV における真値レベルの $d\sigma/dm_{t\bar{t}}$ 、CTEQ6 パarton・ルミノシティ、LO $\times$ K)、2 から 12 TeV まで。灰色: 標準模型の $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ 連続背景。赤: 連続背景に $M_{\text{lock}} = 3.849$ TeV のカラー八重項 g^* を、定理が固定した干渉の符号とともにコヒーレントに加えたもの — 低質量側の増大、幅広いピーク、そして ≈ 4.9 TeV を超えたところでの標準模型を下回る不足への交差である; 本図の $\sqrt{s} = 14$ TeV では $\sigma \times \text{BR} = 13.6$ fb である (§31 で現在の制限と対決させられる 13-TeV の値は 8.7 fb である)。次いで生成される成員が同じ導出質量において個別に描かれ、導出された幅の順序を示している: 八重項単独 (破線、13.6 fb、 $\Gamma/m = 14.6\%$ 、幅広い) と、その導出された結合におけるスピン 2 アンカー G_1 ($\kappa_{gg} = 0.47/K$; 14 TeV で 0.076 fb、LO $\times$ K、 $\Gamma/m = 6.3\%$) — 幾何に名を与える状態であり、LHC では不可視で、FCC-hh の測定事項である; $g_B = 0.2$ における Z'_B のノイマン参照は、ディリクレ・モードではその軽クォーク生成がツリーレベルで消えるため (T-KK-2、ステップ 3')、撤回された上限としてのみ描かれており (灰色の破線)、また同様に生成されない Q_i ベクトルは描かれていない。橙の点線: 7.047 TeV における $n = 2$ の動径族 (スピン 2) であり、その位置は定理級である (x_2/x_1) が、そのレート (14 TeV で $\sim 10^{-4}$ fb — 模型見積もりである: モード 2 の境界残差を 7.05 TeV における gg ルミノシティでスケールしたもの) はこれを FCC-hh に委ねる (第 IX 部); 10.219 TeV における $n = 3$ の位置は印されているが、観測可能な 14-TeV レートはない。単一状態の曲線は、述べられた面積をもつ共鳴近傍のローレンツ関数である; 灰色の十字は排除されたシナリオ A の位置 (2.46 TeV) を印している。図中のすべての数は計算されたものであり、模式的なものはない; 検出器応答と背景を伴う再構成スペクトルは第 VIII 部の主題である。

9.3 重心の問題: 必要な明確化

純粹に RS 的な考えの読者は、ただちに反論するかもしれない: 最も単純な 5D RS 解析において、最初のテンソル極はしばしば $x_1 \approx 3.83$ を伴う $m_1 \approx x_1 k e^{-kr_{\text{IR}}}$ と書かれる。もし $k e^{-kr_{\text{IR}}}$ を直

接 M_{lock} と同一視するならば、最初の極は 3.85 TeV ではなく 14.7 TeV の近傍に位置することになる。その反論は完全に正当である – 純粋な RS 問題においては。本論文はそれに二段階で答える。

第一に、GG-6 において厳密に固定される定理級の量はロック・スケールであって、純粋な 5D 境界値問題のベッセル根係数ではない。第二に、物理的に再構成される最初の GG-6 信号は、ここでは単一の純粋な動径 RS 極として扱われてはいない。それは最初のロック・クラスターとして扱われ、その重心は M_{lock} によって固定される一方、クラスターの内部構造は、最低動径モードのバルク場種（グラビトン、KK グルーオン、および二つのディリクレ・アーベル・ベクトル）のほぼ縮退した集合であり、テンソル・セクターと、各種が担う異なる境界条件とによって形作られる。より簡潔に述べれば、動径塔は次に従う

$$m_n = c_n M_{\text{lock}}, \quad c_n = \frac{\xi_n}{\xi_1}, \quad (25)$$

ここで最低動径モードについては $c_1 \approx 1$ (ロック・クラスターの重心、定理級)、 $c_2 \approx 1.83$ (~ 7 TeV)、そして $c_3 \approx 2.66$ (~ 10 TeV) である。これが本論文を通じて用いられる質量台帳の一貫した動径的読みである; 角度パートナーはそこに入らない。なぜならそれらは各基底状態の上の導出されたオフセットに位置し、 θ 運動量保存 (P-KK-7) によって単一生成から締め出されているからである。

この明確化は後退ではない。それは強化である。それは実験の読者に、何を探すべきかを正確に告げる: あらかじめ選ばれた幅を持つ硬直した単一の RS 極ではなく、3.85 TeV を中心とするほぼ縮退した多場構造（グラビトン、KK グルーオン、および二つのディリクレ・アーベル・ベクトルであり、四つのうち二つはツリー水準で生成されない）であって、次の動径励起は 7 TeV ($n = 2$) および 10 TeV ($n = 3$) の近傍にある。

9.4 ベンチマーク質量台帳

本論文で用いられる現象論的ベンチマークは表 5 にまとめられている。最初の項目は定理級に鋭い; 動径族とディリクレ・ベクトルはそこから T-KK-2 の格付けで従い、八重項のシナリオ B における位置とトップ・パートナーの回廊が、フェンスを担う項目である。

表 5: 衝突型加速器に関連する低位 GG-6 セクターの実用的質量台帳。第一行 (M_{lock}) は定理級である; 動径族とディリクレ・ベクトルは T-KK-2 の出力をその格付けで与え、八重項のシナリオ B における位置は第 10.4 節の対応するフェンスを担い、トップ・パートナーの回廊はモデルによる割り当てである (来歴台帳、表 4 を見よ)。

状態クラス	スピン	ベンチマーク 質量	意味
第一ロック・スケール・グラビトン・クラスター	2 (優勢)	3.85 TeV	$K = 35$ によって固定される鋭い重心標的。
第二動径族 ($n = 2$)	2 優勢	7.047 TeV	次の動径節、 $c_2 = \xi_2/\xi_1 = 1.831$ (厳密比); Run-3 の直接的到達範囲外であり、FCC-hh の測定である。
角度 (θ) パートナー	—	基底 (自由場) の 1.07–1.17×	θ 運動量が保存される; θ 非依存のカレントによる単一生成には現れない (P-KK-7、再格付け)。
KK グルーオン (最低動径)	1	2.46 または ≈ 3.85 TeV (T-KK-2 の二分法)	カラー八重項スピン 1 パートナー; $t\bar{t}$ とブーストされたダイジェットにおいて最も有望である; いずれのシナリオにおいても検証下にある。
レプトフォビッ的な $U(1)_B$ ベクトル	1	厳密に $= M_{\text{lock}}$ (ディリクレ・モード、両シナリオ)	グラビトンと縮退している; ツリー水準ではいかなる端点クォークとも結合しない (O-KK-59); ツリー水準のダイレプトンはゼロである。
ベクトルのトップ・パートナーの回廊	1/2	2 から 5 TeV	GG-6 に固有ではないが、同じスペクトル近傍に期待される。

9.5 状態ごとの観測量ベンチマーク・シート

上で確立された KK スペクトルの幾何学的起源は、衝突型加速器における言明の半分にすぎない。もう半分 — LHC が実際に消費するもの — は観測量台帳であり、それは議論のまさに中心に属する。実験的に反証可能な言明とは、単に「塔が存在する。」ということではない。それは、実際に到達可能な各状態についての具体的なパッケージ

$$\{m, \Gamma, \Gamma/m, \sigma, \text{BR}, N_S, Z\}_{\text{状態} \cdot \text{チャネル} \cdot \text{装置}} \quad (26)$$

である。その意味において、以下の状態ごとの観測量シートは、本部の運用上の心臓部である。

$M_{\text{lock}} = 3.8489$ TeV は定理 T-KK-1 によって固定されているがゆえに、パラメータ化すべき不確かな赤外スケールは存在せず、走査すべきものも存在しない: 予言されるスケールは単一の数である。観測量スペクトルは実験的に区別される二つの群に分かれる: (i) 予言された 3.8489 TeV に係留された定理級の第一スピン 2 グラビトン; および (ii) トップに富むレプトフォビッ的なスピン 1 の三つの構成員、すなわち、その配置が T-KK-2 の導出された二シナリオ二分法 (第 10.4 節) であるカラー八重項 g^* — 自由場シナリオでは $0.639 M_{\text{lock}} = 2.46$ TeV、複合硬化シナリオでは $\approx M_{\text{lock}}$ — と、二つのディリクレ・アーベル・ベクトル、すなわちバリオンの Z'_B とその Q_i 兄弟であり、後者はそれらを終端させる条件によっていずれのシナリオでも厳密に M_{lock} に固定されている。以下のシートは、各状態について、GG-A の諸定理が固定するものを列挙する: 質量スケール、スピン、そ

して厳密な崩壊構造である。そこに断面積も幅の百分率もイベント収量も載っていないのは、それらがその入力の間置かれている場所（表 19、第 31 節）に導出条件付きの格付けで印刷されているからである — 第 12.2 節が説明するとおり、そのいずれも定理ではない。

表 6: 低位 GG-6 衝突型加速器スペクトルの導出された構造。あらゆる項目は GG-A の定理に遡る: 質量スケール $M_{\text{lock}} = 3.849 \text{ TeV}$ は T-KK-1 に ($= \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-K}$, OGN-5+GU-5); スピンはバルク場の内容に; 崩壊構造は GG-6 の電荷割り当てに (第 10.5 節) 遡る。各共鳴質量は $c_X = O(1)$ を伴う $c_X M_{\text{lock}}$ である; 鋭いのはスケールのみである。断面積も幅の割合も収量も本表には現れない: それらはトップ深度帯と QCD/PDF 計算を要し、したがって GG-A から導出されたものではないため (第 12.2 節)、第 31 節において導出条件付きの格付けで引用される。

状態	ス ピン	質量	崩壊構造 (GG-A が固定)	実験的状况
第一グラビトン・クラスター G_1	2	$M_{\text{lock}} = 3.849 \text{ TeV}$ (定理級のスケール)	$t\bar{t}$, $j\bar{j}$, $h\bar{h}$, 次いで $\ell\bar{\ell}$, $\gamma\gamma$; トップに富む; 単一の RS 極としてではなくクラスターとして解析せよ	決定的な GG-6 の対象; F-KK-1、二段構え: 八重項が HL-LHC のキルを担い、スピン 2 の直接検証は FCC-hh において (T-KK-2c)
カラー八重項 KK グルーオン g^*	1	$0.639 M_{\text{lock}} = 2.46 \text{ TeV}$ または $\approx M_{\text{lock}}$ (T-KK-2 の二分法、第 10.4 節)	カラー八重項: カラーを持つ状態 ($t\bar{t}$, ダイジェット) への崩壊する; トップ優勢; 軽クォーク結合 $\xi_{UV} = -0.194$ (厳密モード、第 10.4 節)	自由場シナリオは既存の $t\bar{t}$ /ダイジェット・データから決定可能; F-KK-2A/2B
バリオン的 KK ボソン Z'_B	1	厳密に M_{lock} (ディリクレ・モード; T-KK-2、ステップ 3')	ソリー水準でレプトフォビック ($B_\ell = 0$); 端点局在クォークとは結合しないため、生成と崩壊のパターンはカスケード深度待ちである	M_{lock} にクォーク普遍的な線はない; クラスターを通じて検証される (F-KK-2B)
第二動径族 G_2	2	$(\xi_2/\xi_1) M_{\text{lock}} \approx 7 \text{ TeV}$	G_1 と同じ階層、より高い質量	Run-3 の到達範囲外; HL-LHC/FCC-hh; 動径塔を確認する
角度 θ パートナー	—	基底の $1.07\text{--}1.17\times$	単一生成では皆無	導出されたオフセット; 選択則 (P-KK-7、再格付け)

本表は二つの戦略的論点を透明にする。第一に、衝突型加速器プログラムは「グラビトンか無か」として書かれるべきではない; M_{lock} ($\approx 3.85 \text{ TeV}$) 近傍のスピン 1 の構成員、まず八重項が、その幅、断面積、トップに富むシグネチャーのほうに鋭いがゆえに、実のところ現在の加速器の時代において最も容易な運用上の取っ手でありうる。第二に、ラインシェイプの問題は些末な厄介事ではなく、GG-6 の信号形態を定義する一部である。

用語法: スピン 2 によって係留され、スピン 1 を通じて発見される。この点が注意深い読者を混乱させてきたため、我々はここで一度、言葉遣いを確定する。クラスターはスピン 2 係留である: グラビトン・モード G_1 は厳密に M_{lock} に位置し (T-KK-1/T-KK-2 の定理級の質量)、スピン 1 の質量はそれに対して相対的に導出され、そしてその量子数 — 質量を持つスピン 2 — は、いかなる

四次元ゲージ理論もそのような状態を生み出さないがゆえに、観測されたならば幾何を名指すものとなる。しかし係留とはスペクトルについての言明であって、レートについての言明ではない。生成においては階層が逆転し、しかも大きな因子で逆転する：八重項は衝突するクォークと $\xi_{UV}^2 \approx 1/K$ (厳密モードの値: $0.194^2 = 0.038$) で結合するのに対し、グラビトンはグルーオンと導出された $\kappa_{gg}^2 = (0.47/K)^2 \approx 1.8 \times 10^{-4}$ (系 T-KK-2c) で結合する — ベクトルが単位重なりの境界モードとして一度だけ抑制されるのに対し、グラビトンのグルーオン重なりは二度抑制されるがゆえに、同一の整数 $K = 35$ の二つの冪の差である。したがって可視クラスターのレートは二桁にわたって八重項主導であり (13 TeV における同じ $t\bar{t}$ チャンネルで 8.7 fb 対 0.045 fb、表 19)、本論文におけるあらゆる発見の言明はスピン 1 の構成員を通る；スピン 2 のアンカーは、その導出された結合においては、FCC-hh の領分である。本論文がクラスターを「スピン 2 係留」と述べているところではどこでも、次のように読め：スピン 2 が質量を固定して幾何を名指し；八重項が発見を担う。

9.6 6D 階段の概略図

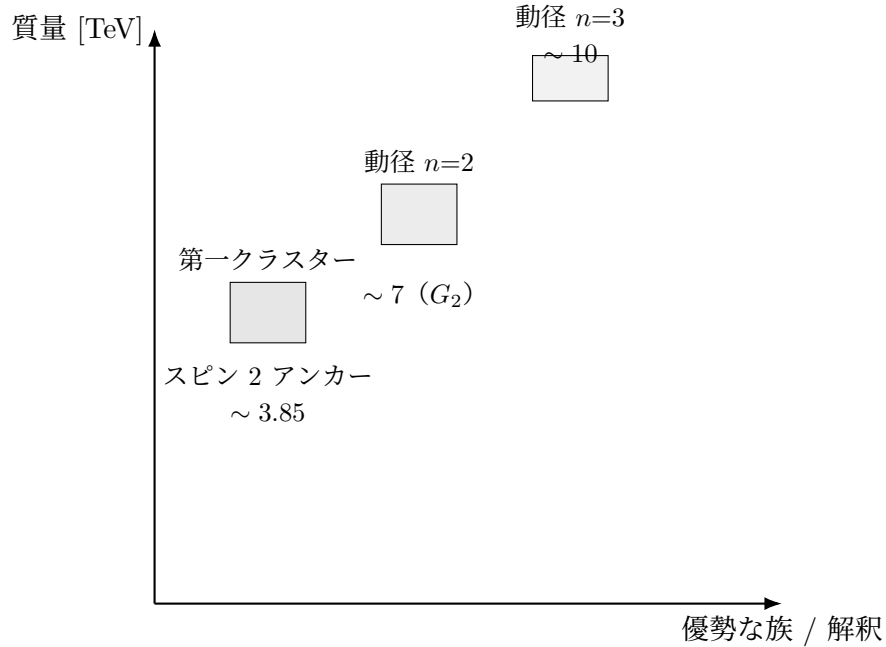


図 5: 低位 GG-6 セクターの概略的な質量階段。本図は、最初の重心を超えた厳密な線の位置についての主張ではない。それは探索地図である：ロック・スケール・クラスター — ノイマン八重項 g^* 、ディリクレのバリオンのベクトル Z'_B 、およびスピン 2 グラビトンであり、 $O(1)$ 係数を除いてすべて $\approx M_{\text{lock}} \approx 3.85$ TeV にある — と、7 TeV ($n=2$) および 10 TeV ($n=3$) の近傍にある次の動径族である。角度パートナーは、もし伝播するならば、クラスターのすぐ上の導出されたオフセットに位置し (式 (12))、単一生成には現れない。

10 KK セクターの観測可能な性質

10.1 スピンと角度構造

実験的に決定的な第一の性質はスピンである。ロック・クラスターの定理に係留された構成員は M_{lock} におけるスピン 2 グラビトンである — T-KK-2 の複合シナリオにおいては、それはクラスターの準縮退した中心でもあるのに対し、自由場シナリオにおいてはノイマン八重項が 2.46 TeV でそれより下に位置するため、グラビトンは、質量を上げていく走査で最初に出会う構成員ではなく、最も重い顕著な構成員となる。いずれにせよ、グラビトンを一般的なスカラーやスピン 1 の Z' 的共鳴から直ちに区別するものはスピンである。クォーク・反クォーク対消滅から生成されるスピン 2 状態について、共鳴静止系におけるパートン水準の極角分布は、よく知られた形を取る

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta^*} \propto 1 - 3\cos^2\theta^* + 4\cos^4\theta^*, \quad (27)$$

これは等方的なスカラー分布とも、単純なスピン 1 状態の $\sin^2\theta^*$ 的振る舞いとも鋭く異なる。この結果の GG-6 にとっての有用性は二重である。第一に、それは ATLAS と CMS がスピン 2 探索において用いる標準的なグラビトンの指紋を与える。第二に、GG-6 は多場のロック・クラスターを予言するがゆえに、実験的に再構成されるラインシェイプはスピン 2 のアンカーとレート優勢なスピン 1 の構成員とを合成し、教科書的な RS の角度形をわずかに歪めうる。したがって純粋 RS の角度テンプレートは、下にある信号が実在する場合でさえ、わずかに最適でないものとなりうる。

10.2 幅とラインシェイプ

第二の性質は幅である。公開されている RS 的ベンチマークにおいて、幅と質量の比はしばしば次のようにスケールする

$$\frac{\Gamma_G}{m_G} \sim C \left(\frac{k}{\bar{M}_{\text{Pl}}}} \right)^2, \quad (28)$$

ここで C は正確なベンチマークに依存する 1 のオーダーの係数である。したがって、狭いあるいは中程度に広い KK グラビトンについては、現象論的に興味深い範囲の結合に対して数パーセントのオーダーの幅が期待される。GG-6 による鍵となる精密化は、実験的な線が単一のブライトウィグナー極に対応する必要はない、という点にある。より良い第一近似の信号モデルは次である

$$\frac{dN}{dm} = \sum_{a=1}^{N_{\text{cl}}} \mu_a G(m; m_a, \sigma_a) + B(m), \quad (29)$$

ここで G は実験的に広げられた信号カーネルであり、 N_{cl} は最低の可視族についてさえ 2 または 3 でありうる。言い換えれば、フィットすべき自然な対象はクラスターであって、単一の狭幅共鳴だけではない。この観察は、後に専用のクラスター対応探索ストリームを動機づけることになる。

10.3 RG スケール・スロートからの質量と固幅

$O(1)$ の旗印から導出された微細構造へ。KK グルーオン g^* ($SU(3)_C$ から) とバリオンのベクトル Z'_B ($U(1)_B$ から) は、Arisaka (2026, A2-GG6) の RG スケール・スロートの最低スピン 1 共鳴である。利用可能な最も保守的な言明は、各ロック・クラスター構成員に、計算されないまま残された

$O(1)$ 係数を伴う質量 $m_X = c_X M_{\text{lock}}$ を割り当てるものであろう。本論文はそこで止まらない: 係数は以下の第 10.4 節 (定理 T-KK-2) において計算され、真に未解決な唯一の問い — 自由場固有値が強い赤外力学を生き延びるかどうか — は、ぼやけとしてではなく、鋭い、データによって決定可能な二分法として切り分けられる。二つの構造的事実は無条件であり、あらゆるシナリオにおいて生き延びる: バリオンのベクトルは終端されたシームのディリクレ問題に従い、厳密に M_{lock} に位置し、スピン 2 のアンカーと縮退しており (T-KK-1; T-KK-2, ステップ 3'), ピーク位置によってではなくスピンによってそれから隔てられている; そして八重項は破れていない方向のノイマン問題に従い、データが選り取った複合硬化シナリオにおいてのみ M_{lock} でそれらに合流する — バリオンのベクトルからはカラーとチャンネルによって隔てられている (八重項 g^* : カラー八重項生成、ダイジェットと $t\bar{t}$; 一重項 Z'_B : ツリー水準では端点クォークによる生成なし)。

10.4 クラスターの微細構造、導出される: 定理 T-KK-2

本小節は、 $O(1)$ の旗印であれば先送りにしたであろうものを計算する: それは正準幾何が強制する境界値問題を設定して解き、厳密な固有値比と結合の規格化を取り出し、そして計算それ自体では証明しえない唯一の仮定に立ち向かう。すべては最後に明示的に棚分けされる — 定理、導出条件付き、あるいは接ぎ木として。

ステップ 1 — 還元。 正準バルク (18) 上では、角度方向のパートナーは保存された θ 運動量を担い、 θ に依存しないカレントによる単独生成には現れない (第 5.3 節) ため、コライダー・モードについてはあらゆる場を θ ゼロモード上に還元してよく、残るのは動径区間 $r \in [0, K]$ 上の場、計量 $e^{-2r} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + dr^2$ 、そして自由な計量データが存在しないという状況である (Arisaka, 2026, A2-GG6, 定理 2: 曲率、区間長、規格化はいずれも正準である)。 $\square_4 \phi = -m^2 \phi$ を満たす各 4D 質量固有モード $\Phi(x, r) = \phi(x) f(r)$ は、このとき r に関する固定された二階問題に従う — 固定されているのは、作用が剛的な幾何の上の正準二次作用だからである。

ステップ 2 — スピン 2。 横波トレースレスの重力子プロファイルは

$$\psi'' - 4\psi' + m^2 e^{2r} \psi = 0, \quad (30)$$

に従い、その一般解は $x \equiv m e^r$ とおいて $\psi = e^{2r} [J_2(x) + b Y_2(x)]$ である。Arisaka (2026, A2-GG6) の $\mathbb{Z}_2$ オービフォールド・パリティは物理的モードを偶にする、すなわち両端点でノイマン条件 $\psi'(0) = \psi'(K) = 0$ である。 $\frac{d}{dx} [x^2 Z_2(x)] = x^2 Z_1(x)$ を用いると、ノイマン条件は両端で $Z_1(m e^r) = 0$ となる。紫外端 $x = m \sim e^{-K} \ll 1$ では、ノイマン条件が混入率を $b = -J_1(m)/Y_1(m) \simeq \pi m^2/4 \sim e^{-2K}$ に固定する — これは真に指数的に小さく (この言明がスピン 2 に固有であることは後に見る)、したがって赤外側の量子化は 10^{28} 分の 1 よりも良い精度で純粋な J の条件となる:

$$J_1(m_n e^K) = 0 \implies m_n^{(2)} = x_n^{(J_1)} e^{-K}, \quad x_n^{(J_1)} = 3.8317, 7.0156, 10.1735, \dots \quad (31)$$

これは T-KK-1 で既に引用した塔である; アンカー規格化 $m_1^{(2)} = M_{\text{lock}}$ がロック・スケールを定義する。

ステップ 3 — スピン 1、およびゼロモード整合性チェック。 バルク・ゲージ場 A_μ のプロファイル方程式は

$$f'' - 2f' + m^2 e^{2r} f = 0, \quad f = e^r [J_1(x) + b Y_1(x)], \quad (32)$$

であり、ここでもオービフォールド偶かつ破れていないゲージ方向に対しては両端でノイマン条件を課す。ここで境界条件には交渉の余地がない、というのもその第一の帰結が標準模型そのものだからである：ノイマン-ノイマンは $m = 0$ をもつ定数解 $f = \text{const}$ を許す — 我々が観測する質量ゼロの $4D$ グルーオンと、破れていないゲージ・ボソンである。他のいかなる選択もゼロモードを除去するか持ち上げてしまい、QCD と矛盾する。 $\frac{d}{dx}[x Z_1(x)] = x Z_0(x)$ を用いると、二つのノイマン条件は $Z_0(m_n) = Z_0(m_n e^K) = 0$ と読める。ここで — そしてここがスピン 1 がスピン 2 と質的に異なる点である — 紫外条件は正則性に帰着しない。それは混入率を $b = -J_0(m)/Y_0(m)$ に固定し、 Y_0 が小さい引数で対数的にしか発散しないため、 $b \simeq \pi/[2(K - \ln x_n)] \simeq \pi/(2K) \approx 0.046$ は指数的にではなく $1/K$ の一乗だけ抑制される： Y_0 の内側の対数はスロート深さそのものである。したがってこの混入はスペクトルの厳密に計算可能な一部であって無視できるものではなく、我々はそれを保持する。完全な両端点量子化

$$J_0(x) Y_0(x e^{-K}) - Y_0(x) J_0(x e^{-K}) = 0, \quad x \equiv m_n e^K, \quad (33)$$

は根

$$x_n^{(1)} = 2.4499, 5.5669, 8.7013, \dots \quad m_n^{(1)} = x_n^{(1)} e^{-K}, \quad (34)$$

をもつ、すなわち裸の J_0 ゼロ点 (2.4048, 5.5201, 8.6537) が紫外混入によってそれぞれ +1.87%、+0.85%、+0.55% だけ上方に押し上げられたものである — 導出された決定論的なシフトであって、フェンスではない。したがって第一励起モードの微細構造比は

$$c_1 \equiv \frac{m_1^{(1)}}{m_1^{(2)}} = \frac{x_1^{(1)}}{x_1^{(J_1)}} = \frac{2.44989}{3.83171} = 0.6394 \quad (35)$$

であり (裸のベッセル・ゼロ点比 $2.40483/3.83171 = 0.6276$ はその $K \rightarrow \infty$ 極限である)、自由場ノイマン八重項を $0.6394 \times 3.8489 = 2.461$ TeV に置き、再帰は 5.592 および 8.740 TeV にある。

ステップ 3' — 終端化された方向。 上のノイマン-ノイマン問題は破れていないゲージ方向の問題であり、それは八重項のものである。バリオン的方向は異なっており、その違いは結合ではなく境界条件である：Arisaka (2026, A3-BI6) の許容クラス上では、4 次元成分 $A_{B,\mu}$ は区間上でディリクレ条件を担う — これは許容クラスの定義に含まれるアーベル境界条件の条項であり、バリオンのゼロモードが除去されるように区間の変分データとして選ばれている；テンソル残余は誰にも食われず、 $A_{B,\mu}$ の各質量準位はその縦波状態を $A_{B,r}$ の対応するモードから受け取り (コンパニオン論文の O13)、 $A_{B,r}$ の $n = 0$ モードは以下に登録される区間ウィルソン線スカラーである。我々はこの条項を文字どおりに受け取って両端でディリクレとし、量子化は Z_0 から Z_1 へと変わる： $J_1(x) Y_1(x e^{-K}) - Y_1(x) J_1(x e^{-K}) = 0$ であり、その紫外混入 $b = -J_1(m)/Y_1(m) \simeq \pi m^2/4 \sim e^{-2K}$ はスピン 2 の場合とまったく同様に指数的に小さく、したがって赤外条件は純粋な J_1 のゼロ点、

$$J_1(m_n^{(B)} e^K) = 0 \implies m_1^{(B)} = x_1^{(J_1)} e^{-K} = M_{\text{lock}} \quad \text{厳密に}, \quad (36)$$

となり、再帰は 7.047 および 10.219 TeV にある — スピン 2 の塔そのものの位置である。したがって終端化されたベクトルはステップ 6 の両方のシナリオにおいて重力子と縮退する：ノイマン八重項を硬化させる強い赤外ダイナミクスは、重力子を動かすことなしにディリクレ・モードを重力子のゼロ点から動かすことはできない。(混合条件であれば、紫外端のみディリクレの場合に $0.6276 M_{\text{lock}}$ を、赤外端のみディリクレの場合に $1.0124 M_{\text{lock}}$ を与えるであろう；条項は現在ゲージ・パラメータを両端で固定しており、これは本論文が採用してきた読みである。) 代償となるのはそのモード関数である。ステップ 5 と同様に規格化すると $f_1^{(B)}(r) = N e^r J_1(x_1 e^{r-K})$ 、 $N e^K = \sqrt{2}/|J_0(x_1)| = 3.511$ であり、これは両端点で消える — $f_1^{(B)}(0) = 0$ は e^{-K} のすべての次数で、 $f_1^{(B)}(K) = 0$ は恒等的に成り立つ — したがって端点に局在したカレントはツリー準位でこれに結合しない。ステップ 5 の端点振幅 ξ_{UV} と ξ_{IR} はノイマン八重項に、そしてそのみに属する。ディリクレ・モードが結合する相手は変位である：赤外端から深さ δ (曲率長を単位として) だけ下に位置するフェルミオンに対して、振幅は $\delta \lesssim 0.05$ では $\sqrt{K} f_1^{(B)}(K - \delta) \simeq 32\delta$ であり、 $\delta \simeq 0.47$ で最大値 6.77 まで上昇する — 八重項の ξ_{IR} に匹敵する — 一方、紫外端ではスロートそのものに達しない任意の深さに対して e^{-2K} 抑制される。フェルミオンごとの深さは Arisaka (2026, A9-SM) が未解決のまま残しているカスケード深さ補題であり、したがってバリオンのベクトルの結合は本論文が印字できる数値ではない；その質量は印字できる。二つの帰結が、それらが効く場所で引き出される： Z'_B は端点局在の軽いクォークからツリー準位では生成されないこと (第 10.10 節、第 31.4 節)、そしてアノマリー・コンパニオン論文の条項が $U(1)_{Q_i}$ 成分に同じ条件の対を与えるため、第二のアーベル因子がちょうど M_{lock} に第四のディリクレ成員を供給し、それは第三のものと同じく端点カレントから分離していること (O-KK-60) である。両端選択のもう一つの帰結は、隠されるのではなく明示される： $A_{B,\mu}$ に両端でディリクレを課すと、区間ウィルソン線 $\int_0^K A_{B,r} dr$ はゲージ不変のまま残り、ツリー準位で質量ゼロの赤外局在スカラーとなって、バリオンのカレントによってループ準位でのみ持ち上げられる — これはこの選択が含意する唯一の新しい軽い状態であり、その質量と結合を未解決としたまま登録されている (O-KK-67; アノマリー・コンパニオン論文は現在、同じモードをその境界条件の条項とモード解析の中に、揺らぎが登録された露出であるような固定背景データとして担っている、Arisaka, 2026, A3-BI6)；赤外端のみの代替案 ($r = K$ でのみディリクレ、 $1.0124 M_{\text{lock}}$) にはそのようなモードは存在せず、その代わりに重力子からの 1.2% の分裂を代償として払う。

SU(5) の剰余類方向 — 12 個の X, Y ベクトル — は残るバルク・ゲージ場であり、本論文はそれらを未配置のまま残すのではなく、どこに位置するかを述べる。境界上ではそれらはゼロモードをもたない：標準模型コンパニオン論文の陽子安定性定理は、 X, Y をバルク・モードとしてのみ保持する分裂スペクトルを第一の仮定として取り、降下コンパニオン論文はその仮定を自らの $\mathbb{Z}_3$ ロック定理の系として解消する (Arisaka, 2026, A9-SM; Arisaka, 2026, P6-Proton)。したがって陽子安定性はそれらの質量には依存しない：すべての $\Delta B = \pm 1, \pm 2$ 演算子は $U(1)_B$ 電荷を担い、剰余類の塔の第一準位が何であれ禁止される。コライダーが見るものは剰余類方向が担う動径境界条件に依存し、それを決めるのも同じ定理である：ノイマン・プロファイルをもつ剰余類ベクトルは端点クォークと端点レプトンを軽クォーク振幅 $\xi_{\text{UV}} = -0.194$ で結合させることになり、これは定理が禁じるゼロでないバリオン数をもつ境界演算子であるから、剰余類方向は端点分離条件を担う — アノマリー・コンパニオン論文の条項 (C9) が二つのアーベル・ベクトルに与えるのと同じく、両端ディリクレである — そしてステップ 3' はそれらの第一準位をちょうど M_{lock} に置き、 Z'_B がそうであるのと同じ理由で端点クォークからはツリー準位で生成されず、対生成が唯一のチャンネルであってその閾値は $2M_{\text{lock}} = 7.7$ TeV となる。この配置は陽子安定性定理の、その定理自身のグレードにおける系であ

り、それをアノマリー・コンパニオン論文の境界条件に書き込む条項は O-KK-69 として登録されている。

ステップ 4 — スピン 0。 ラジオンとなるべき状態は区間長のモジュラスである — そして GG-6 にはそのようなモジュラスは存在しない: 長さ K は定理によって固定された台帳整数であり、幾何は剛的であり (Arisaka, 2026, A2-GG6、定理 2)、一般のワープ模型では手で安定化されねばならない状態が、ここでは K を固定するのと同じロッキング力学によって持ち上げられる。その質量はキャップ力学によって $O(M_{\text{lock}})$ に定まり、A 系列によって 計算されてはいない: クラスターに残る唯一の $O(1)$ のフラグであり、そのようなものとして明示的に棚上げされている。

ステップ 5 — 結合の規格化は厳密である。 同じモード関数が結合を固定し、積分のうち二つは初等的な形で閉じる。 $\int_0^K f_n^2 dr = 1$ と規格化すると (ゲージ運動項の測度は r について平坦である)、 $J_0(a) = 0$ に対する恒等式 $\int_0^a x J_1^2(x) dx = \frac{a^2}{2} J_1^2(a)$ が赤外振幅を 厳密に 与える: $f_1(K) = \sqrt{2}$ 、したがって赤外に局在した流れとゼロモードとの結合比は

$$\xi_{\text{IR}} = \sqrt{2K} = 8.367 \quad (K = 35), \quad (37)$$

となる (ステップ 3 の厳密な二端点モードは $\xi_{\text{IR}} = 8.369$ を与え、同じ紫外混合による +0.03% のずれである — ここでは無視できる) — これは、トップの部分的な赤外局在 (その Arisaka, 2026, A9-SM におけるカスケード深さ) を織り込んだうえでの、ワープ文献の経験的な「+4 から +5」の、導出済みでパラメータを持たない版である。軽クォークの結合にはより注意を要し、その注意は符号という形で報われる。厳密に 平坦なフェルミオン・プロファイルは、励起モードに弱く結合するのではなく まったく結合しない: 平坦なプロファイルはゲージの ゼロ モードに比例し、固有モードの直交性が $\int_0^K f_1 dr = 0$ を恒等的に強制する (我々はこれを数値的に機械精度で確認した)。物理的に意味を持つ対象はむしろ紫外に局在した 結合である — 軽クォークは Arisaka (2026, A9-SM) のカスケード深さの割り当てにおいて、スロートの浅い (紫外) 端に位置する — そしてそれはステップ 3 の厳密モードの紫外端点振幅である:

$$\xi_{\text{UV}} = \sqrt{K} f_1(0) = -0.194 \quad (K = 35), \quad (38)$$

これはすべてステップ 3 の Y_1 混合によって担われる ($b = 0$ ではこれは平坦な重なりとともに消える)。二つの特徴が物理的である。大きさ は主要次のスケーリング $1/\sqrt{K} \approx 0.17$ を精密化するものであり、以下のすべてのレート ($\propto \xi^2$) は変わらない。それはまた端点の偶然でもなく、この区別は重要である。というのも、端点振幅であれば、それは軽クォーク密度を $r = 0$ のデルタ関数と取ったことの人工物ということになるからである — そしてその取り方をこの枠組みは導出していない。厳密モードの上では $\sqrt{K} f_1(r)$ は $r = 0$ から $r \simeq 30$ まで -0.1939 で 平坦 であり、符号を変えるのは $r = 32.72$ においてのみであって、それは長さ 35 の区間の最後の 2 e-フォールドの内側である: 紫外端における幅 w の指数関数的な軽クォーク密度は、 $w \lesssim 4$ に対して -0.1939 を返し、スロートの半分にあたる $w = 16$ においてもなお -0.138 を返す。したがって結合とその符号は、一つの端点の性質ではなく、スロートの紫外側四分の三にわたるモードの性質であり、符号の定理はその頑健性を受け継ぐ。符号 — ξ_{IR} と逆である — それ自体が導出された予言である: 軽クォークとトップは g^* に逆位相で結合し、これはまさにワープ文献が経験的に見いだす相対符号であり、読み出し II (第 V

部の経験的に固定されたレート推定) が「 $-g_s/\sqrt{K}$ 」として借用しているものである — ここではそれが、入力なしに剛的な幾何から得られ、ダイジェット角分布の信号-背景干渉の符号として観測可能である。これらの恒等式は剛的な幾何の主要次の事実であり、以下の両シナリオにおいて成り立つ (複合シナリオにおいては双対記述のマッチング値として)。

ステップ 6 — 唯一の未解決の仮定を鋭く述べる: 二分法。 ステップ 1-3 は、剛的な幾何の上での自由な二次作用を仮定する — これはあらゆるワープ構成における標準的な主要次の扱いである。(35) を中心に据えることを拒むことは、根の比が「空間的な KK モードの性質であり、非空間的な GG-6 スペクトルにおいて生き残る必要はない」という理由から、十分に理にかなっている。その慎重さは正当であり、我々はそれを捨て去るのではなく精密化する。バルク-境界の読みでは、スロートの状態は強く結合した境界セクターの複合状態である; 相互作用補正は自由場の固有値をずらし、この幾何におけるそのずれの自然な展開パラメータは $1/K$ である (ξ_{UV}^2 を抑制するのと同じ $1/35$) — それはいまや厳密となった自由場の運動学の上に乗る数パーセントの効果である、ただし 強い力学がベクトル・スペクトルを全面的に再編成し、最も低いスピン 1 の複合状態を複合性スケールそのものまで引き上げる場合を除く。これら二つの力学的レジームのあいだを決着させる定理は存在せず、したがって誠実な言明は **各シナリオにおいて導出された質量を伴う二シナリオの二分法** である — そして各シナリオが物理的に何を主張するのかについて、完全に具体的であることには価値がある。

シナリオ A (自由場)。 弱結合の読み: スロートのベクトルは剛的な背景幾何の通常の固有モードであり、相互作用はその上に乗る小さな摂動である。スピン 1 の質量はそのとき自由な二次演算子の厳密な固有値である: 最も低いものは重心の導出された比 $c_1 = 0.6394$ 、すなわち 2.461 TeV に位置し、スピン 2 アンカーは M_{lock} に動かないままであり、残る補正は $O(1/K) \lesssim 3\%$ である。具体的には、シナリオ A は 2.46 TeV に、13 TeV で $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) = 224 [180-325] \text{ fb}$ をもつ、幅の広いトップに富んだカラー八重項を予言する — Run-2 のルミノシティでは見逃しようのないレートである。

シナリオ B (複合硬化)。 バルク-境界の辞書を通した同じ 幾何の強結合の読み: スロートのベクトルは強く結合した境界セクターの複合状態であり、強い力学がベクトル・スペクトルを再編成して、最も低いスピン 1 の複合状態を複合性スケールそのもの — クラスターの重心 — まで引き上げる。そのとき自由場の固有値 0.6394 は単に生き残らない、なぜなら自由な二次作用はベクトル塔にとって誤った出発点だったからである; ノイマン八重項はグラビトンおよびディリクレ・ベクトルと縮退して $\approx M_{\text{lock}} = 3.85 \text{ TeV}$ に位置し、 $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) = 8.7 \text{ fb}$ をもつ。結合は $\rho_K = 0$ において両シナリオで同一である — ξ_{UV} はいずれにせよ K によって固定され、それを動かしようの唯一のものは以下のシーム項の露出である — したがって各シナリオは完全に検証可能な予言である: 一つの質量と一つのレートであり、その間にも外にもダイヤルは存在しない。

単位、一度だけ述べる。 両シナリオは一つの曲率単位の上に乗っており、コホートの論文が二つを用いていると読まれてきたため、そう述べておく価値がある。スピン 2 アンカーとディリクレ終端された Z'_B は $ke^{-K} = M_{\text{lock}}/x_1^{(J_1)} = 1.005 \text{ TeV}$ の上でロックに位置する; その同じ単位の上でノイマンの自由場第一準位は $2.4499 \times 1.005 = 2.46 \text{ TeV}$ であり、これがシナリオ A である、そしてロックにあるシナリオ B の八重項は硬化した複合質量であって、自由場のノイマン準位がロックに位置するような単位ではない — その単位は $3.85/2.4499 = 1.57 \text{ TeV}$ となるが、コホートのいかなる論文もそれを幾何として用いてはいない。コンパニオン論文のツリー準位の $T = 1.7$ (O-KK-68) は、自由場の重なりを用いたシナリオ B の質量であり、いまや同論文がそのようなハイブリッドとして名指しているものである、そしてその $T = 4.2$ はこの単位における自由場の値である (Arisaka, 2026,

A9-SM)。クラスターの位置に関する一つの露出がここで登録され、アノマリーのコンパニオン論文 (Arisaka, 2026, A3-BI6) によって値付けされる: もしディリクレ終端がシームの上に大きさ $\rho_K \sim 5$ 曲率単位のゲージ運動項を誘起するならば — それは同論文のオープン問題 O15 である — 最も低いノイマン・モードは軽くなり、2.450 に対して $x_1 = 0.667$ となり、それをロックに保つことは曲率単位を 5.77 TeV へ、そして他のあらゆる準位をそれとともに動かす: シーム項に対して盲目であるスピン 2 アンカーと Z'_B は 22 TeV へ、第二の電弱準位は 23 TeV へ。その配置はコンパニオン論文のオブリークの緊張 (ヒッグス・プロファイルにより $T = 0.03\text{--}0.11$) を、クラスター表全体を代償として閉じる。F-KK-1 は $\rho_K = 0$ において述べられており、書かれたとおりの条項はシーム項を担っていない; 終端がそれを誘起するか否か、またどの値においてかは、アノマリーのコンパニオン論文の O15 である。シーム項は反証子が担い、かつ値付けしていない露出であり、22 TeV に測定されたクラスターはシーム項の兆候であって、この実装の生き残りではない。その逃げ道についてもう一つ分かったことがあり、それは逃げ道に不利に働く。シーム項がロックに保つ軽いノイマン・モードは八重項そのものであり、この項はモードの重みを赤外端からシームへ移す: その赤外振幅は 8.4 から 2.6 へ下がり、その軽クォーク振幅は 0.19 から 0.41 へ上がり、したがってトップはこのモードを失い、軽クォークがそれを得る。シナリオ B のトップ深さ振幅を通して運ぶと — それらの深さはこの項を含まないモードの上で逆算されたため、ここでは推定値である — 3.85 TeV の八重項は、幅の狭い、ダイジェット主導の状態となる: $\Gamma/m = 1.2\%$ 、 $\text{BR}(t\bar{t}) \approx 0.16$ 、 $\text{BR}(jj+b\bar{b}) \approx 0.84$ 、表 21 の 4.9 fb という狭テンプレートの上限に対して $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) \approx 6$ fb、そしてそこにある 8.0 fb のアンカーに対してダイジェットで $\sigma BA \approx 19$ fb である; 同じモードの上の KK 光子は、フレーバーあたり ≈ 0.07 fb のダイレプトン線を担い、それはこの質量における公表済みの上限 (フレーバーあたり 0.03–0.05 fb) の際にある。ダイジェット側が明快な排除である; したがってロックにおけるシーム項はすでに公表されたデータによって排除されており、生き残る逃げ道の版はただ一つ、3.85 TeV に何も存在しないという版だけである: シーム項とロックにおける八重項は互いに排他的である。この経路によってコンパニオン論文のオブリークの緊張を閉じるものは、本論文の側では F-KK-2B の撤回であり、その登録はこと O-KK-68 においてなされ、いずれの論文も逃げ道を無償のものとして値付けしないようにしてある。

表 7: 二つのシナリオの下でのクラスター構成員。シナリオ A はモードを自由場として取り、シナリオ B はそれらを複合スペクトルへと硬化させる; スピン 2 アンカーはその位置が台帳によって固定されているため両者で同じであり、ディリクレ・ベクトルもまた動かず、異なるのはそれらに対するノイマン八重項の配置だけである。シナリオ内誤差の行が誠実な行である: 運動学は厳密であり相互作用は数パーセントを担うため、測定された分裂はスケールの検証というよりも、どちらのシナリオが成り立つかの検証である。スピン 2 の再帰はいずれのシナリオにおいてもそのベッセル比を保つ、なぜならテンソル塔は幾何それ自身のスペクトル (T-KK-1) であり、二分法はベクトル複合状態についての言明だからである。

	シナリオ A (自由場)	シナリオ B (複合硬化)
スピン 2 G_1	$M_{\text{lock}} = 3.8489$ TeV	$M_{\text{lock}} = 3.8489$ TeV
スピン 1 g^* (ノイマン)	$0.6394 M_{\text{lock}} = 2.461$ TeV	$\approx M_{\text{lock}}$ (縮退したクラスター)
スピン 1 Z'_B (ディリクレ)	厳密に M_{lock}	厳密に M_{lock} (シナリオ非依存)
シナリオ内誤差	相互作用 $O(1/K) \lesssim 3\%$ (運動学は厳密)	硬化した値のまわりで $O(1/K)$
スピン 1 の再帰	5.592, 8.740 TeV	複合スペクトルとして間隔が定まる (未解決項目 4)

二分法の現状: シナリオ A は排除され、それはこの仕組みが働いているということである。シナリオ A の比較は、公表された Run-2 の制限に対してすでに実行されている (第 31 節): 2.46 TeV には粒子は観測されておらず、定量的には導出された自由場のレートが、その質量における観測された ATLAS の排除を 3.6–11 倍上回る位置にある—どのように読んでもバンドの外である。F-KK-2A は発火した、そして二分法はシナリオ B に解決する; この閉包はただ一つの条件—公表されたテンプレートが厳密な $\Gamma/m = 15\%$ の形状ではないこと—の上でのみ暫定的と格付けされていた、そしてその条件は現在解消された。自由場のラインシェイプは本論文自身の規約のもとで 2.461 TeV において計算されており (第 31 節)、極から $\pm 25\%$ 以内のピーク割合は 0.60 であり、公表された制限が設定された際の 30% 幅テンプレートの 0.17 に対比される。したがってシナリオ A は参照形状よりもピーク領域により集中しており、その留保が判断を保留していたラインシェイプ補正は、露出を緩和するのではなく増大させる; 干渉は、窓内で +61 fb かつ建設的であり、同じ向きに働く。シナリオ A を棄却することについては二つのことを述べておかねばならない、というのも第 1 節の五十年の歴史は、排除を生き延びる理論に対して注意深い読者を当然ながら疑わしく思わせるからである。第一に、これはパラメータ・スライドではない。スライドとは連続的なダイヤルをデータの存在しない場所へ動かすことである; 二分法は、同定された二つの力学的レジーム—弱結合の固有モードか強結合の再編成か—のあいだの離散的で事前登録された二者択一であり、それぞれが導出された質量と導出されたレートを担い、比較に先立って述べられている。一方のシナリオを排除することは、実験がその事前登録された問いに答えているということであり、その答えはそれ自体が物理である: データは、スロートのベクトルが自由場ではなく複合的であると決定した—理論についての構造的事実であり、それが学ばれ得た唯一の仕方では学ばれたものである。第二に、この逃げ道は再発し得ない—計算が同定する二分法の内部において、であり、これがこの主張の必要としていた、そして以前は担っていなかったフェンスである。二つの力学的レジームを名指すことは、第三のものが存在しないことの証明ではない、そして本論文はベクトル・セクターの可能な量子的完備化にわたる完全性定理を持たない; 本論文が持つのは、ちょうど二つを同定する計算であり、そのそれぞれがあらかじめ固定された導出質量と導出レートを伴う。その仮説空間の上では第三のシナリオは存在しない: シナリオ B が残された仮説空間の全体である; それは同程度に露出している (現在のフロンティアで 8.7 fb、 $\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ で決着、期待値); そしてもしそれが失敗すれば、退却できる先は何も残らない—実装は撤収される。したがってシナリオ A の排除の正味の効果は、理論が身をよじて逃れたということではなく、残された主張がより鋭くなったということである: 一つのシナリオ、一つの質量、一つのレート、一つの十年。

定理 T-KK-2 (クラスター微細構造)。 $T\text{-KK-1}$ の標準的なバルクの上で、破れていないゲージ方向に対するオービフォールドが強制するノイマン条件 (そのゼロモード・セクターは観測される質量ゼロの標準模型ゲージ場である) と、アーベル的方向に対するアノマリー・コンパニオンの条項 (C9) のディリクレ終端のもとで、ロック・クラスターの微細構造は次のとおりである: (i) M_{lock} にちょうど位置するスピン 2 アンカー; (ii) $c_1 M_{\text{lock}}$ におけるノイマン・スピン 1 八重項、ここで $c_1 = x_1^{(1)}/x_1^{(J_1)} = 0.6394$ —紫外の混入を含めた厳密な自由場固有値である—であり、残留する相互作用補正は $O(1/K)$ 、あるいは、赤外の力学がベクトル複合体を硬化させる場合には $\approx M_{\text{lock}}$ に位置する; (ii') 二つのディリクレ・アーベル的ベクトル、 Z'_B とその Q_i 兄弟は、いずれのシナリオにおいても M_{lock} にちょうど位置し (ステップ 3)、アンカーと縮退する; (iii) 軽いラディオンは存在しない (剛性); (iv) 厳密な結合恒等式 (37)–(38)、これには導出された相対符号 $\xi_{UV} < 0 < \xi_{IR}$ が

含まれる。シナリオの選択はクラスターに残された唯一の離散的な未知量であり、それは今すぐ実験的に決定可能である: 2.46 TeV における、 $|\xi_{UV}| = 0.19$ とトップに富む崩壊をもつカラー八重項は、既存の *Run-2* / *Run-3* の $t\bar{t}$ およびダイジェット・データの射程内にあり、したがって $2.3\text{--}2.7 \text{ TeV}$ における広共鳴に特化した再解釈は、自由場シナリオを見出すか、複合シナリオを選択するかのいずれかである—後者の場合、 M_{lock} における縮退したクラスターはもはや仮定ではなく、データに裏づけられた選択である。

棚分け。 定理級: M_{lock} ; スピン 2 塔の比 (自由な二次作用の上での厳密なベッセル零点比であり、以下のすべての恒等式と同じフェンスをもつ); ディリクレ縮退 $m_{Z'_B} = m_{G_1}$; ツリー・レベルのレプトフォビア; 恒等式 (37)–(38) の主要次数。導出条件付き: シナリオ A の質量 (厳密な自由場固有値; 残留する相互作用のフェンスは $O(1/K)$); シナリオ選択そのもの (決定可能であって、導出されてはいない); $\approx M_{\text{lock}}$ におけるシナリオ B の八重項の位置—これは複合的読みのマッチング仮定であり、境界値問題の出力ではなく、硬化した値のまわりに $O(1/K)$ のフェンスをもつ。接ぎ木: 複合シナリオの間隔パターン; ラディオ質量; 絶対レート (PDF、 κ_{eff})。

カラーを帯びたパートナーは生きた縁に位置する—いずれのシナリオにおいても。 これはカラー八重項 g^* を、実験がまさに見ているその場所に置き、T-KK-2 はその露出を二又にする。軽クォークへの生成結合は自由ではない: 導出値 $|\xi_{UV}| = 0.194$ (38) であり、 M_{lock} を定めるのと同じ $K = 35$ によって固定され、さらなる局在化によって減じることはできない。複合シナリオ (B) では、この結合と $t\bar{t}$ 優勢の崩壊をもつカラー八重項が $\approx 3.85 \text{ TeV}$ において、公表された排除の観測された縁に位置する (ATLAS Collaboration, 2025a; CMS Collaboration, 2024d)—本論文自身の較正の上では名目上 95% CL で排除されており、広い形状への移送が定量化されていない段階であり (第 31.4 節)、すでに記録された Run-3 データによって決着する。自由場シナリオ (A) では、同じ八重項が 2.46 TeV に位置する—標準的な結合に対する名目上の狭共鳴排除の下であり、(もし生き延びるとすれば) その幅の広さ (Γ/m は八重項に対して最大である; 本小節の後半にある幅の段落) と非標準的なラインシェイプによってのみ生き延びる; $2.3\text{--}2.7 \text{ TeV}$ における既存データの広い八重項に特化した再解釈は、それを明らかにするか、シナリオ A を端的に閉じるかのいずれかであろう。いずれにせよスピン 1 セクターはクラスターの作業縁である: すでにテープ上にあるデータでシナリオを決定する。

事前宣言された反証子 (F-KK-2、スピン 1 セクター、二シナリオ形式)。 GG-6 は、 K で固定された軽クォーク結合 $|\xi_{UV}| = 0.19$ をもつカラー八重項 g^* が、ちょうど二つの導出位置のいずれか一方にあること (T-KK-2)、および、いかなる端点クォークも生成しないディリクレ終端されたバリオンの Z'_B が M_{lock} にちょうど位置することを予言する: **F-KK-2A**— $2.46 \pm 0.10 \text{ TeV}$ における自由場シナリオ (厳密な固有値 $0.6394 M_{\text{lock}}$; この窓は F-KK-1 のそれと同様に実験的であり—質量スケール、分解能、および幅の広さ—理論誤差ははるかに小さいからである); $2.3\text{--}2.7 \text{ TeV}$ における既存の $t\bar{t}$ / ダイジェット・データの広い八重項に特化した再解釈が信号を与えなければ、このシナリオは閉じる。 **F-KK-2B**— $\approx M_{\text{lock}}$ における複合シナリオ; 特化した再解釈が窓 $3.85 \pm 0.10 \text{ TeV}$ を通してカラー八重項を信号なしに排除するならば—すでに記録された Run-3 データ、 $\approx 0.5 \text{ ab}^{-1}$ において期待される—このシナリオは—そしてそれとともに現在の実装のゲージ複合セクターは—排除される。両シナリオを閉じることは、スピン 1 セクターを端的に反証する。第 31 節の運用的対決は、公表された 140 fb^{-1} の制限に対してシナリオ A の比較を実行する: 計算された自由場のレートは、窓の容量量については観測された広テンプレート排除の ~ 3.4 倍上に、全ラインシェイプについては

5.5 倍上に、そして各形状をそれぞれ自身のピーク割合を通して運んだ場合には 19 倍上に位置する、したがって **F-KK-2A は発火した**、そして二分法はシナリオ B に解決する。直接的なスピン 2 の観測（導出された κ_{gg} における FCC-hh の課題; 系 T-KK-2c）とは異なり、F-KK-2 の両方の又は既存のデータで検証可能であり、F-KK-2A は本論文において最も直ちに決定可能な単一の言明であり、F-KK-2B は実装全体の HL-LHC 反証子を担うものである。F-KK-2B はまた、検証するのにいかなる衝突型加速器の運転も必要としない露出を担う。同じノイマン塔の電弱メンバーは、いずれのシナリオにおいても八重項の質量に位置し、コンパニオンの vev 定理が赤外端で読み取るヒッグスに対して—そのバルクのウィルソン線ゼロモードは平坦で紫外に重みづけられており、電弱スケールを登録できない、とコンパニオンは現在計算している (Arisaka, 2026, A9-SM)—それらの交換は、塔を M_{lock} に置いて $T = 1.7$ を与える（自由場の 2.46 TeV では 4.2; バルク・プロファイル e^{2r} の上では 0.55 であり、これはコンパニオンがその後、階層性を保護するあらゆる単一指数プロファイルに対する下限であることを示したものである）、一方でグローバル・フィットが許すのは 0.00 ± 0.06 である (Particle Data Group, 2024); バルク群 $SU(5) \times U(1)_B \times U(1)_{Q_i}$ は、そこからカストーディアル対称性を構成し得るような $SU(2)_R$ を含まない、そしてバルク・ゲージ場の統一は、電弱単位が八重項のそれから分離することを許さない。246 GeV の場が、本論文もそのコンパニオンも同定していないモードでない限り、シナリオ B は LHC とは独立に、ツリー・レベルで精密データと矛盾する; 本論文はこれをキル級で登録し (O-KK-68)、獲得していない生存を印刷しない。

幅（導出された公式; 結合は部分的に未解決）。 固有幅は別個の入力ではない: それは生成と分岐を定めるのと同じ結合から従う。質量 m_V のベクトル V が有効結合 g_f でフェルミオン対に崩壊する場合、ツリー・レベルの部分幅は標準的な表式

$$\Gamma(V \rightarrow f\bar{f}) = \frac{N_c^f}{12\pi} g_f^2 m_V \left(1 + \frac{2m_f^2}{m_V^2}\right) \sqrt{1 - \frac{4m_f^2}{m_V^2}} \xrightarrow{m_f \ll m_V} \frac{N_c^f}{12\pi} g_f^2 m_V, \quad (39)$$

である。したがって幅対質量比は開いたチャンネルにわたる純粋な和となり、

$$\frac{\Gamma_V}{m_V} = \frac{1}{12\pi} \sum_f N_c^f g_f^2. \quad (40)$$

となる。カラー八重項ベクトルに対しては、式 (39) のカラー数 N_c^f は $\frac{1}{2}$ で置き換えられる—八つの状態にわたって平均されたトレース $\text{Tr } T^a T^b = \frac{1}{2} \delta^{ab}$ である—したがって八重項のクォーク・フレーバーあたりの部分幅は $g_f^2 m_V / (24\pi)$ であり、一重項の数え上げの六分の一である; 本論文のすべての八重項の幅はその因子とともに計算されており、表示されたままの式 (39) はカラー一重項の形である。結合は、カラー八重項 g^* に対しては $g_f = g_s r_f$ 、バリオンベクトルに対しては $g_f = g_B B_f r_f$ であり、ここで g_s は強結合、 g_B は $U(1)_B$ 結合、 B_f はバリオン電荷（クォークに対して $\frac{1}{3}$ 、レプトンに対して 0—ゆえに第 10.5 節のツリー・レベルのレプトフォビア）、そして r_f はモード関数との重なりである—バリオンベクトルについては T-KK-2 のステップ 3' のディリクレ・モードであり、これは両端点で消えるので、 r_f は端点振幅ではなく、そこに印刷された深さの法則である。これらのうち、GG-6-A によって固定されるのは g_s のみである: Arisaka (2026, A9-SM) の値 $\alpha_s(M_Z) = 1/(\pi e) \simeq 0.117$ を M_{lock} まで走らせると $\alpha_s(M_{\text{lock}}) \simeq 0.08$ 、すなわち $g_s^2 = 4\pi\alpha_s \simeq 1.0$ を与える。重なり r_f はフェルミオンごとのカスケード深さによって定まり、Arisaka (2026, A9-SM)

はこれを未解決の補題として記録している; バリオンの規格化 g_B は定理級の生成子ノルム (トレース比 2/5、第 10.10 節) を担い、読み出し規則は現在解決されている (L-KK-1; $g_B = 0.565$)。したがって式 (39)–(40) が導出された部分である; 数値的な幅は、それら二つの入力が入力閉じられるまではモデル・レベルである。

それにもかかわらず二つの定性的な帰結は頑健であり、それらは数ではなく順序である。完全な強結合 $g_s^2 \approx 1.0$ と赤外で増強されたトップの重なりを担って、カラー八重項は式 (40) を通じて幅広いメンバーであり、したがって狭いスライディング・ウィンドウのバンプ探索はそれに対して最適ではない。バリオンのベクトルは $g_B B_f r_f$ を通じてのみ結合し、QCD 的増強はなく、ツリー・レベルのレプトン・チャンネルもなく、そして—ディリクレ・モードの上では—端点に局在した軽クォークへの結合はまったくなく、したがってより狭く、トップ解析がロック・スケールの窓に合わせて調整されていれば $t\bar{t}$ 不変質量スペクトルを鋭くする。相対的な順序 $\Gamma_{g^*}/m_{g^*} > \Gamma_{Z'_B}/m_{Z'_B}$ は頑健である; 実際の幅の割合は導出された数としてここには引用されない、というのも式 (40) は重なり r_f が固定されて初めて数を返すからである。印刷できるのは八重項自身の格付けにおける見積もりである: 読み出し II の B4 深さをディリクレ・モードを通して運ぶと—ノイマン振幅 4.5 と 1.0 から反転された深さ (t_R は赤外端の 0.60 曲率長下、 Q_{3L} は 1.37 曲率長下)、これをステップ 3' の深さの法則の上で読む— Z'_B に幅 $\Gamma/m \approx 7\%$ と $\text{BR}(t\bar{t}) \approx 0.90$ を与え、残りは $b\bar{b}$ 、軽クォーク・チャンネルはまったくなく; 八重項の 14.6% がそうであるのと同じく B4 に導出条件付きであり、その格付けで印刷され、結合そのものは未解決として登録されている (O-KK-59)。入ってくる g_B は、単位規格化されたモード関数に適用されたシームの台帳配分 (T-BI6-6.4) であり、八重項にその $g_s r_f$ を与えるのと同じ規約である; ゼロモードをもたないモードの上では、それは長距離で測定される四次元的電荷ではなく、バルクの規格化である。

グラビトン族については、一行の閉じた公式は頑健性に劣る、というのも GG-6 を特徴的なものにしていくまさにその現象—ロック・クラスターの多場的な準縮退—が、単一の固有幅と単一の可視共鳴とのきれいな同定をも損なうからである。したがって実用的な言明はコリドー的な言明である: 最初のクラスターについては数パーセント程度の有効な幅対重心比が期待され、準縮退したパートナー状態と検出器分解能によってさらに広げられる。実験の実践においてそれが意味するのは、正しい問いが「唯一の厳密なグラビトン幅は何か」ではなく、むしろ「どのクラスター・テンプレートがデータによって統計的に選好されるか」だということである。

10.5 GG-6 の結合から得られる分岐比

二つのスピン 1 パートナーの分岐パターンは、GG-6 のゲージ内容と幾何のみによって、構造において—精密な値においてではないが—固定される。我々は、何が厳密であり、何が方向において固定されており、何がまだ数になっていないかを明確に分離する。

厳密であるもの。 二つの言明が GG-6 の電荷割り当てから直接に従い、いかなる見積もりも要しない。第一に、バリオンのベクトル Z'_B はバリオン数をゲージ化する (Arisaka, 2026, A2-GG6; Arisaka, 2026, A3-BI6); レプトンは $B = 0$ を担う、したがって

$$\text{BR}(Z'_B \rightarrow \ell^+ \ell^-) = 0 \quad (\text{ツリー・レベルで}), \quad (41)$$

であり、これがレプトフォビアのツリー・レベルの言明である—電荷割り当ての帰結である。これはツリー・レベルを超えては厳密ではない：クォークは B と Y の両方を担うので、バリオンのベクトルとハイパーチャージとの一ループ運動項混合が誘起され、その係数は同じクォークの重なりによって定まり、それが供給するダイレプトン分岐—ゲージ強度のクォーク結合をもつ四次元的レプトフォビック Z' についてフレーバーあたり 10^{-5} – 10^{-4} 程度—は、ゼロではなく下限である。ディリクレ・モードの上では、このループそれ自体が未解決のカスケード深さにわたる重なり積分であるから、この下限は印刷されるのではなく登録されており (O-KK-61)、本論文のすべてのレプトンのキル条項はそれに対して述べられている。第二に、KK グルーオン g^* はカラー八重項である；カラー一重項のレプトンと光子はそれへのツリー・レベルの結合をもたないので、それはもっぱらカラーを帯びた状態 ($q\bar{q}$, gg) に崩壊する。したがって両パートナーは、一般的な共鳴を最も強く制約するクリーンなダイレプトンおよび二光子チャンネルにおいて不可視であり、それこそが標準的な普遍結合の制限が両者に適用されない理由である。

方向において固定されているもの。 バルクの幾何において、フェルミオンは赤外にピークをもつ共鳴に、そこでの重なりに比例して結合し、その重なりはフェルミオンの赤外局在の度合い—等価にはその湯川結合—とともに単調に増大する。トップクォークは最も重く最も赤外に局在しているので、両方のスピン 1 パートナーについてトップ対チャンネルが支配的となり、軽クォークのダイジェット・チャンネルは相対的に抑制される、

$$\text{BR}(g^* \rightarrow t\bar{t}) > \text{BR}(g^* \rightarrow jj), \quad \text{BR}(Z'_B \rightarrow t\bar{t}) \gg \text{BR}(Z'_B \rightarrow \text{軽い } q\bar{q}). \quad (42)$$

この順序は頑健である：それは GG-6 の湯川機構がすでに用いている単調な局在—質量相関のみを必要とし、フェルミオンごとの詳細なプロファイルを必要としない。

まだ数になっていないもの。 精密な数値的分割は定理によって固定されていない、というのもそれはフェルミオンごとのバルク・プロファイル—等価には角カスケード深さ n_f —に依存し、[Arisaka \(2026, A9-SM\)](#) はこれを未解決の補題として記録しているからである（フェルミオンごとのカスケード深さは「A1–A7 の定理によって強制されない」）。したがって我々は定理としていかなる数値的分岐比も引用しない；第 VI 部の数値（八重項について $\text{BR}(t\bar{t}) = 0.94 [0.93\text{--}0.95]$ ）は、トップ深さのバンドの上で導出条件付きの格付けで印刷されている。定理級で生き残るのは構造である：カラー八重項については、他に開いたチャンネルなしに $\text{BR}(g^* \rightarrow t\bar{t}) > \text{BR}(g^* \rightarrow jj)$ ；レプトフォビックなバリオンのベクトルについては、 $\text{BR}(Z'_B \rightarrow t\bar{t})$ が最大の単一チャンネルであり、軽い $q\bar{q}$ ダイジェットが残りの大半を占め、そしてツリー・レベルで $\text{BR}(Z'_B \rightarrow \ell^+\ell^-) = 0$ である。これらの順序は GG-A の帰結である；実際の割合はカスケード深さの補題が閉じられて初めて定理となり、それまではそれらのバンドとともに印刷される。

実用的なメッセージはこの誠実さを損なわれずに生き延びる。両パートナーはトップに富みレプトフォビックであるから、発見チャンネルはダイレプトンや二光子ではなく $t\bar{t}$ とブーストされたダイジェットである；幾何がレートを送る場所ではなく、背景が最も低い場所のみを見る探索は、データが信号を含んでいてもそれを見逃し得る。

10.6 重なり積分から生じる結合の非普遍性

六次元の還元においては、普遍的な結合は規則ではなく例外である。その理由は幾何学的である。四次元的な有効結合は内部波動関数の重なり積分である。ゲージ・ゼロモードについては、一般的な還元公式が得られる (Arisaka, 2026, A2-GG6)

$$\frac{1}{g_4^2} = \frac{2\pi R_\theta}{g_6^2} \int dr |f_0(r)|^2, \quad (43)$$

一方、フェルミオンのゼロモードはスケール・プロファイルの規格化を担う

$$2\pi R_\theta \int dr e^{-3A(r)} \chi_0^\dagger(r) \chi_0(r) = 1. \quad (44)$$

湯川的な結合と共鳴の結合は、そのとき対応する重なりを継承する。詳細なプロファイル解がモデル依存であっても、結果は簡単に述べられる：軽いフェルミオンは自然により紫外に偏り、一方トップクォークとヒッグス・セクターはより赤外に敏感である。その結果、最初のロック・スケールのスピンの 2 状態は、最もクリーンな軽レプトン・チャンネルよりも $t\bar{t}$ 、 $b\bar{b}$ 、縦成分ベクトル・ボソン、およびヒッグス対に、より強く結合する。

これは、ダイレプトンと二光子の制限を素朴に読むことが GG-6 にとって誤解を招き得る、現象論的に最も重要な単一の理由である。クリーンなチャンネルでは実験的背景は有利であるが、GG-6 の結合は抑制され得る。ハドロンのなトップおよびダイジェットのチャンネルでは背景はより大きい、幾何学的な重なり構造は信号にとってより有利である。したがって最適な探索は構成上マルチチャンネルである。

10.7 穏やかなレプトフォビック $U(1)_B$ 混入

厳密な $U(1)_B$ ゲージ・セクターは、任意選択の好奇心の対象ではない。それは KK 現象論を直接に検証可能な仕方に変更する。以前の改訂における、 $U(1)_B$ フラックスがスピン 2 族と混合するという描像は撤回された（ローレンツ不変性がベクトル-テンソル混合を禁じ、許容されるクラスはフラックスをゼロに定める）；残るのは、一つの質量における、異なるスピンとカラーをもつ状態の存在である。実験的にはこれがパターンを特徴的な方向へ押しやる：

- クラスターのハドロンのレートは八重項のものであり、トップ主導で 3.5:1 の $b\bar{b}:jj$ 随伴パターンを伴う、
- そのダイレプトン・レートはもっぱら電弱 KK モードのものであり (O-KK-62)、ディリクレ・ベクトルは登録されたループ下限を超えて何も寄与しない、
- そして $U(1)_B$ ベクトルはグラビトンとちょうど縮退して位置し、ツリー・レベルでは端点クォークによって生成されない—近傍のパートナーではなく、一員である。

この特徴はそれ自体では GG-6 を同定するのに十分ではない、というのも他のレプトフォビックモデルが存在するからである。しかし固定された 3.85 TeV の重心、クラスター化した構造、トップに富む重なり、およびカラー八重項／バリオンのパートナーと組み合わせられるとき、それは完全なパターン検定の強力な一部となる。

10.8 相関するパートナー状態

最初のロック・スケール・クラスターは単独で現れるはずがない。説得力のある GG-6 の発見は、典型的には以下の少なくともいくつかを伴うであろう:

1. 7 TeV 近傍の第二動径族 ($n = 2$),
2. 八重項自身の動径的反復であり、複合スペクトルとして間隔をとり (T-KK-2; 未解決項目 4)、おそらく $t\bar{t}$ において最もよく見える、
3. そして八重項の質量における電弱 KK の W 、 Z および光子 (O-KK-62)、それらが担う T パラメータの露出とともに (O-KK-68)。

これは KK 探索が概念的にこれほど豊かである一つの理由である。共鳴そのものは入口にすぎない。それが現れれば、直ちに完全な分光学のプログラムが生まれる。

表 8: GG-6 の KK セクターを最小限の単一共鳴解釈から区別する主要な衝突型加速器観測量の要約。各行はクラスターを単一の極から見分ける一つの方法であり、そのいずれもレートを知ることがを要求しない。それは意図的である: レートはモデル・レベルの仮定を担い、形状は担わないので、形状のみを測定する探索でも依然として弁別できる。各行は、どれほど決定的であるかによってではなく、データセットの中でどれほど早く使えるようになるかによって並べられている。

観測量	何を検定するか	GG-6 の期待
質量重心	ロック・スケール	3.849 TeV 近傍を中心とする最初のスピン 2 アンカー付きクラスター (レートはスピン 1 八重項が担う)。
角度分布	スピンの割り当て	八重項主導: レートを担うスピン 1 メンバーの $(1 + \cos^2 \theta^*)$ 形であり、スピン 2 アンカーの $(1 - \cos^4 \theta^*)$ 形は LHC のレートでは不可視である (第 VI 部)。
ラインシェイプ	6D クラスター構造	単一の狭く孤立した極ではなく、数百 GeV 以内に重なり合う複数の極。
分岐の階層	重なり積分	$t\bar{t}$ 、ダイジェット、二ボソン、および hh が増強される; 標準的な普遍テンプレートに比して軽レプトンと二光子は抑制される。
ダイジェット対ダイレプトン比	八重項主導のレート; ディリクレ・ベクトルは生成されない	普遍グラビトンの描像におけるよりもはるかに大きい: ハドロンのレートは八重項のものであり、ダイレプトンはもっぱら電弱 KK モードのものである (O-KK-62)。
第二動径族	スケール・スロートの $n = 2$	7 TeV 近傍の追加構造; 角度パートナーは各基底状態の上の導出されたオフセットに位置し、単独生成からは外れる (P-KK-7)。
八重項の反復	カラーを帯びたパートナー・セクター	M_{lock} より上で複合スペクトルとして間隔をとり (T-KK-2; 未解決項目 4)、 $t\bar{t}$ において特に有望である。

10.9 系 T-KK-2c: グラビトンのグルーオン結合、導出済み

定理 T-KK-2 は、剛体幾何の上の境界値問題から、ロック・クラスターの質量とベクトル結合を、自由なデータなしに確定した。クラスターの結合のうち一つだけが見積もりのまま残されていた: スピン 2 アンカー G_1 が一對のグルーオンと語り合う強さ — ハドロン・コライダーでのその生成と、平坦な電弱モード (gg , $\gamma\gamma$) へのその崩壊を支配する結合である。読み出し II (第 19 節) はこれを $\kappa_{\text{eff}} \sim 1/\sqrt{K}$ と括った。本系はその隙間を閉じる: この結合は T-KK-2 のステップ 5 のベクトル重

なりと厳密に同じベッセル型の重なり積分であり、初等的な形で閉じ、そして結果は $1/\sqrt{K}$ ではない。我々は、解析チームが一行ずつ検証できる詳細さの水準で議論する。

ステップ 1 — 何が、どの単位で計算されるのか。 グラビトンの KK 分解を $h_{\mu\nu}(x, r) = \sum_n h_{\mu\nu}^{(n)}(x) \hat{\chi}_n(r)$ と書き、各 4D 場 f について 4D 相互作用を $\mathcal{L} \supset -(1/\Lambda_n^f) h_{\mu\nu}^{(n)} T_f^{\mu\nu}$ とする。区間の赤外端に局在する場については、その結合はコホートの $1/\Lambda_\pi$ であり、ここで $\Lambda_\pi = \overline{M}_{\text{Pl}} e^{-K} = 1.535 \text{ TeV}$ は幾何自身の結合スケールであり、第 31 節のテンプレートは $(k/\overline{M}_{\text{Pl}})\Lambda_\pi = M_{\text{lock}}/x_1 = 1.005 \text{ TeV}$ において評価されている。これはそこで用いられるすべての HLZ 幅のもとでのテンプレート規格化である (O-KK-66)。注目する無次元量を、次の比

$$\kappa_{gg} \equiv \frac{\Lambda_\pi}{\Lambda_1^{gg}} = \frac{G_1 \text{ の二つのグルーオン零モードへの結合}}{G_1 \text{ の IR 局在カレントへの結合}}, \quad (45)$$

として定義する: これにより、平坦モードへのグラビトン部分幅はいずれも、対応するブレン規格化された幅に κ_{gg}^2 を掛けたものとなる。比を取ることで結果は規約に依らなくなる: あらゆる規格化の選択が分子と分母のあいだで相殺する。

ステップ 2 — 二つの測度 (計算の物理的核心)。 二つの異なる動径測度が現れ、その不整合こそが本系の物理のすべてである。(i) ゲージ部門: 正準計量 $e^{-2r} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + dr^2$ において、ゲージ運動項の 4D 成分は $\sqrt{g} g^{\mu\alpha} g^{\nu\beta} = e^{-4r} \cdot e^{2r} \cdot e^{2r} = 1$ を担う: ゲージ場は平坦な r 測度の上に住む。この一つの事実こそが、グルーオン零モードが厳密に定数 $f_0(r) = 1/\sqrt{K}$ ($\int_0^K f_0^2 dr = 1$ を伴う) である理由であり、また T-KK-2 のステップ 5 がベクトル重なりを平坦測度で規格化できた理由である。(ii) グラビトン部門: アインシュタイン–ヒルベルト項は、横波無跡モードに重み付きノルム

$$\int_0^K dr e^{-2r} \hat{\chi}_m(r) \hat{\chi}_n(r) = \delta_{mn}. \quad (46)$$

を与える。グラビトンは $h_{\mu\nu} T^{\mu\nu}$ を通じてゲージ場に結合し、ゲージ運動密度が r について平坦であるため、二つの零モード・グルーオンに対する $T_{gg}^{\mu\nu}$ の r 方向分布は単に $f_0^2 = 1/K$ である。ゆえに

$$\frac{1}{\Lambda_1^{gg}} \propto \int_0^K dr \hat{\chi}_1(r) f_0^2(r) = \frac{1}{K} \int_0^K dr \hat{\chi}_1(r), \quad \frac{1}{\Lambda_\pi} \propto \hat{\chi}_1(K), \quad (47)$$

となり、共通の比例定数が一つあって、それは式 (45) において相殺する。式 (47) が何でないかに注意すべきである: これは直交性積分ではない。グラビトン・モードは重み付き測度 (46) のもとで互いに直交する; ゲージ密度はそれらを平坦測度で探る。したがって直交性は積分を消滅させることを強制しない — しかし、いま見るように、それはほとんど消滅させており、その残差が結合である。

ステップ 3 — モード関数とその規格化、閉じた形で。 T-KK-2 のステップ 2 より、第一のスピン 2 モードは $\chi_1(r) = e^{2r} [J_2(m_1 e^r) + b Y_2(m_1 e^r)]$ であり、ここで $m_1 = x_1 e^{-K}$ 、 $x_1 = 3.8317$ (J_1 の第一零点)、紫外混入は $b = -J_1(m_1)/Y_1(m_1) \simeq (\pi/4)m_1^2 \approx 4.6 \times 10^{-30}$ である — T-KK-2 がスピン 2 に固有であると証明した指数的な小ささであり、したがって本系はベクトル部門のシナリオ二分法を一切引き継がない。 b を落とすと、ノルム (46) はロンメル積分 $\int_0^a z J_2^2(z) dz = \frac{a^2}{2} [J_2^2(a) - J_1(a) J_3(a)]$

によって閉じ、これは $a = x_1$ (ここでは $J_1 = 0$) において $\frac{x_1^2}{2} J_2^2(x_1)$ に潰れる:

$$\int_0^K e^{-2r} \chi_1^2 dr = \frac{1}{m_1^2} \int_{m_1}^{x_1} z J_2^2(z) dz = \frac{x_1^2 J_2^2(x_1)}{2m_1^2} \implies \hat{\chi}_1(K) = \sqrt{2} e^K. \quad (48)$$

赤外端点の値 $\sqrt{2} e^K$ は厳密であり、パラメータを含まない — そしてこれが第一の内部検証である: 正しく規格化されたグラビトン零モードは $\hat{\chi}_0 \simeq \sqrt{2}$ であり、したがって第一 KK モードは赤外の場合に、4D グラビトンより e^K 倍強く結合する。その因子は、曲率単位に依らず、結合スケールについての言明 $\Lambda_\pi = \overline{M}_{\text{Pl}} e^{-K} = 1.535 \text{ TeV}$ である; 第 31 節のスピン 2 テンプレートが用いる数値 $M_{\text{lock}}/x_1 = 1.005 \text{ TeV}$ は $k = 0.654 \overline{M}_{\text{Pl}} = 0.13 M_{\text{Pl}}$ を伴う $(k/\overline{M}_{\text{Pl}})\Lambda_\pi$ — T-KK-1 の $\frac{1}{2} M_{\text{Pl}}$ をベッセル零点で割ったもの — であり、本系の規格化はコホートのスケール連鎖の再導出ではなく、それと整合的である (O-KK-66)。

ステップ 4 — 重なり積分、閉じた形で。 置換 $z = m_1 e^r$ により、平坦測度の積分は $\int_0^K \chi_1 dr = m_1^{-2} \int_{m_1}^{x_1} z J_2(z) dz$ となる。三項漸化式 $J_2 = (2/z)J_1 - J_0$ は、これを教科書的な二つの原始関数 $\int J_1 dz = -J_0$ と $\int z J_0 dz = z J_1$ に帰着させる:

$$\int_{m_1}^{x_1} z J_2(z) dz = \left[-2J_0(z) - z J_1(z) \right]_{m_1}^{x_1} = 2 - 2J_0(x_1) + O(m_1^2) = 2(1 + J_2(x_1)), \quad (49)$$

ここで最後の段は、T-KK-2 を支えるのと同じ恒等式を用いる: J_1 の零点において、漸化式 $J_0(x) + J_2(x) = (2/x)J_1(x)$ は $J_0(x_1) = -J_2(x_1)$ を強いる。物理的には、「2」は紫外端点の寄与であり、 $2J_2(x_1)$ は赤外端点の寄与である; 振動モードは端点を除くいたるところで自らを積分し尽くしてしまうため、その中間には何も生き残らない。

ステップ 5 — 結果。 式 (45)–(49) を組み立てると、すべての規格化が相殺し、あらゆる K 依存性が陽になる:

$$\kappa_{gg} = \frac{2(1 + J_2(x_1))}{K x_1^2 J_2(x_1)} = \frac{c_K}{K}, \quad c_K = \frac{2(1 + J_2(x_1))}{x_1^2 J_2(x_1)} = 0.4744, \quad \kappa_{gg}|_{K=35} = 0.01356. \quad (50)$$

この数値は、純粋なベッセル定数を台帳整数で割ったものである: 連続的なダイヤルもなく、フィットもない。光子はグルーオンと厳密に同じ分布をもつ平坦な電弱零モードであり、したがって同一の積分が $\kappa_\gamma = \kappa_{gg}$ を与える; 軽いフェルミオンは無視できるままである (その抑制は局在に対して指数的であり、単なる $1/K$ ではない)。

三つの内部検証。 (i) 直交性: $\int e^{-2r} \hat{\chi}_0 \hat{\chi}_1 dr = 0$ は 10^{-15} の水準で数値的に確認される — 平坦測度の積分 (49) は直交性の破れではなく、異なる測度による射影である。(ii) スケール連鎖: $\hat{\chi}_1(K) = \sqrt{2} e^K$ が計算機精度で成り立ち、 $\Lambda_\pi = \overline{M}_{\text{Pl}} e^{-K}$ と整合する (これは規格化の恒等式であって、独立な導出ではない; グラビトンの幅とレートはテンプレート規格化 $k = \overline{M}_{\text{Pl}}$ で印字されており、幾何自身の $k = 0.654 \overline{M}_{\text{Pl}}$ はそれらを下げるであろう、O-KK-66)。(iii) ベクトルとの対比: スピン 1 モードについて同じ二つの積分を走らせると — そこでは場とプローブが同じ平坦測度を共有する — 計算機精度でゼロが返り、これはまさに、厳密に平坦なカレントが励起ベクトルから脱結合するという T-KK-2

のステップ 5 の言明そのものである。グラビトンがその運命を免れるのは、ひとえに e^{-2r} 対平坦という測度の不整合を通じてである; その残差が式 (50) である。

物理的直観: なぜ c_K/K であって $1/\sqrt{K}$ ではないのか。 平坦なゲージ測度を通して見ると、規格化されたグラビトン $\hat{\chi}_1$ は赤外端に押し当てられた指数的な壁である: 積分 $\int \hat{\chi}_1 dr$ の 96% はスロートの最後の一 e フォールドに蓄積し (最後の二つで 99.9%)、積分はその端点値の $c_K = 0.47 e$ フォールド分に等しい。対照的に、グルーオン零モードは全 $K = 35 e$ フォールドにわたって民主的に広がり、各々の振幅は $1/\sqrt{K}$ である。したがって両者の重なりは (グラビトンの実効幅 $0.47 e$ フォールド) / (グルーオンの台 $35 e$ フォールド) である: $\kappa_{gg} = 0.47/35$ 。読み出し II の見積もり $1/\sqrt{K}$ は、グルーオンの一点における振幅であった; しかし結合は積分であり、ほぼ直交性が最後の半 e フォールドを除くすべてを相殺する。ホログラフィックな読みでは同じ言明はこうなる: G_1 は赤外部門の複合状態であり、グルーオンは素なプローブであり、両者の混合は RG スロート深さ $\log(\overline{M}_{\text{Pl}}/M_{\text{lock}}) = K$ の一乗を代償とする — ワープした文献で知られた抑制 (Agashe et al., 2008) であり、いまやその $O(1)$ 係数が計算された。赤外チャンネル ($t\bar{t}$, $W_L W_L$, $Z_L Z_L$, hh) はこれを被らない: それらはグラビトンが住む場所に住み、その $O(1)$ 結合を保つ。

帰結 (すべて T-KK-2 の D* 級において)。 $\kappa_{gg} = 0.01356$ を第 31 節のワークブックに入れると:

- $\sqrt{s} = 13$ TeV において $\sigma(pp \rightarrow G_1) = 0.066$ fb (LO $\times$ K; 14 TeV では 0.11)、 $\Gamma/m = 6.3\%$ を伴い、分岐パターンは $t\bar{t} : W_L W_L : Z_L Z_L : hh \simeq 0.69 : 0.15 : 0.08 : 0.08$; $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) = 0.045$ fb。
- この質量における最強の HL-LHC $t\bar{t}$ 予測限界 (3 ab $^{-1}$ で ~ 1.1 fb) は、この線より ~ 25 倍以上に位置する: グラビトンは LHC のいかなるルミノシティにおいても不可視である。代わりに、スピン 2 アンカーは一級の FCC-hh 標的となる: 85 TeV の基準線では、13 TeV に対する $\simeq 3.2 \times 10^3$ のグルーオン・ルミノシティ利得 (第 50.1 節) が $\sigma(G_1) \approx 0.21$ pb — $t\bar{t}$ 0.15 pb, ZZ 17 fb, hh 17 fb — をもたらし、設計ルミノシティでは数百万事象となる (FCC Collaboration, 2018, 2025)。
- $\sigma \times \text{BR}(\gamma\gamma) = 1.1 \times 10^{-5}$ fb: CMS の二光子ヌル (CMS Collaboration, 2024a) は $\sim 3 \times 10^3$ の余裕をもって事後予言される。この検証には歯がある: もし光子が一樣な $1/\sqrt{K}$ の振幅で結合していたなら、その予測 (0.14 fb) はすでに ~ 4 の因子で排除されていたであろう。したがって公表された二光子限界は、平坦モード振幅の二つの読みを判別し、導出された方を選び取る — コライダー連鎖において初めてデータと対峙した振幅の検定であり、それは幾何の側に着地する。
- $t\bar{t}$ におけるシナリオ B のクラスター和は八重項支配となる: g^* から 8.7 fb, G_1 から +0.045、そしてディリクレ終端した Z'_B からはツリー準位で何もない。いかなる端点クォークもこれを生成しないからである (第 10.10 節; 以前の $0.030 \times (g_B/0.2)^2$ fb はノイマン参照値であり、レートとしては撤回される) — 八重項が可視レートの事実上すべてを担う。三つの寄与は非可干渉的に加わる: 八重項—重項の交差項はカラー・トレースによって消え、スピン直交性がグラビトンの交差項を除き、八重項の唯一の可干渉パートナーは QCD 自身である (第 VI 部)。

F-KK-1 の再資格付け (二つの層)。 事前宣言されたスピン 2 反証子は誠実に述べ直されねばならず、その述べ直しはプログラムを弱めるのではなく、より鋭くする。第 1 層 (HL-LHC、決定的):

ロック・スケール実装の反証子は、抑制不可能なカラー八重項を通じてクラスターが担う — F-KK-2B: 3.85 ± 0.10 TeV 以内での、クラスターを考慮した $t\bar{t}$ /ダイジェット結合におけるヌル — $\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ 、すなわち Run 3 終了時にテープ上にあるデータで期待される — は、第 31.5 節で定量化された通り、まさに現行の実装を退ける。第 2 層 (FCC-hh、確認的)：直接のスピン 2 観測 — 幾何を名指すであろう測定 — は FCC-hh の課題であり、そのレート (85 TeV で $\approx 0.21 \text{ pb}$) は、そこでの初期稼働における発見をもたらす。この分業自体が反証可能な予測である：HL-LHC は 3.85 TeV においてスピン 1 クラスターを見出さ (あるいはキルセ) ねばならず、次いで 85 TeV の FCC-hh は、 $\Gamma/m = 6.3\%$ と $0.69:0.15:0.08:0.08$ の赤外分岐パターンを伴うスピン 2 アンカーを同じ質量に見出さねばならない。一方を他方なしに見出すことは、クラスターの読みを反証する。

棚分け。 定理機構の水準：測度、モード関数、閉じた形 (48)–(50)、恒等式 $\kappa_\gamma = \kappa_{gg}$ 、そして三つの検証。導出条件付き：剛体幾何の上の自由二次作用 (T-KK-2 と同じ囲い込みであり、振幅に対する相互作用補正は $O(1/K) \approx 3\%$)；分岐パターンに入る t_R の赤外分率 (BR($t\bar{t}$) に対するカスケード深さ感度は $\sim 25\%$ 、第 31 節)。接ぎ木：なし — これこそが本系の要点である。

10.10 バリオンの規格化 g_B ：定理級のノルムと、解決された残余規則 (L-KK-1)

系 T-KK-2c ののち、コライダー連鎖のどこにおいても導出されずに残った数値が一つあった：U(1)_B ゲージ規格化 g_B である。本小節はその説明を誠実な境界まで完結させる。最初に述べられた通り、その結果は「未解決」より鋭く、「導出済み」より弱かった：バリオンの生成子のノルムはすでにコホートの定理であり、残っていたのは連続的なダイヤルではなく単一の離散的な規則であって、我々はこれを名前付き未解決問題 **L-KK-1** として登録し、面ではなく四本の線からなる標的として、予測分枝の第五の力の論文に手渡した。その論文は登録を実行し (PS-5thF-1)、いまやその規則は GG-A3-BI6 の定理である (T-BI6-6.4)；登録は以下に記録として保持し、解決はメニューのある場所で述べる。

すでに定理であるもの。 六次元アノマリー多項式 X_4 の整数性 (Arisaka, 2026, A3-BI6) は、有坂方程式のロックを通じて Arisaka (2026, A9-SM) に消費され、分裂した生成子対 $Y_0 \oplus B_0$ のトレース・ノルム比を確定する：

$$\frac{\text{Tr}(B_0^2)}{\text{Tr}(Y_0^2)} = \frac{L - N}{L} = \frac{2}{5} \quad (N, L) = (3, 5) \text{ のとき}, \quad (51)$$

これは BI-6 ベクトル $(1, -1, -2/5, -2/5)$ と有坂定数 Q_B に現れるのと同じ $2/5$ である。読者は原始的な $\bar{5}$ の上で、一行でこれを検証できる： d^c 三重項は $B = -\frac{1}{3}$ 、 $Y = +\frac{1}{3}$ を担う；レプトン二重項は $B = 0$ 、 $Y = -\frac{1}{2}$ を担う；ゆえに $\text{Tr}(B_0^2) = 3 \cdot \frac{1}{9} = \frac{1}{3}$ が $\text{Tr}(Y_0^2) = 3 \cdot \frac{1}{9} + 2 \cdot \frac{1}{4} = \frac{5}{6}$ に対し、 $\frac{1/3}{5/6} = \frac{2}{5}$ となる。物理は透明である：バリオン数は原始セルの五つの状態のうち三つによって、電荷 $\frac{1}{3}$ で担われる — $2/5$ とは、セルの台帳剛性のうちバリオンのシームが所有する分率である。したがって、ロックされた台帳における B シームの重みは GG-6 の自由パラメータではない： g_B が何であれ、それは規則を通じて読み出されたこのノルムである。

真に未解決であったもの — そしてなぜそれが連続的ではなく離散的であったか。GG-6 は、数え上げ定理を通じてシーム・ノルムを物理的結合へと変換する。光子についてはその定理が存在す

る：唯一の破れていないアーベル的シームは OGN-5 の閉包深さ $J = 7$ まで二進的に細分化し、 $\alpha^{-1}(M_Z) = 2^J = 128$ を与える (Arisaka, 2026, A9-SM、二進閉包定理)。その定理は、構造的な理由により $U(1)_B$ には移送されない：バリオンのシームは赤外アトラクターに決して到達しない。それは区間上のディリクレ境界条件によって早期に終端する — シュタッケルベルク対形成なしにバリオンの零モードを除去する終端であり (テンソル残余は誰にも食われない; 質量をもつ準位はその縦成分状態を $A_{B,r}$ モードから取る、コンパニオンの O13)、バリオン数を厳密に保つ — したがってその容量は、本論文の最初の読みでは、私的なグリーン-シュワルツ層に凍結されていた — T-BI6-6.4 がその後、線形の台帳分け前によって置き換えた描像である — その閉包深さの読み出しを、登録の時点ではいかなる A1-A9 の定理も供給していなかった。L-KK-1 (B シーム終端規則)：終端したアーベル的シームに対する容量読み出しを述べ、証明せよ。その規則が定まるまで、ロックされたノルム (51) は四つの自然な読み出しを許した — ノルムが線形に入るか二次に入るか、容量同定のいずれの側に立つか：

$$\frac{\alpha_B}{\alpha_Y} \in \left\{ \left(\frac{2}{5}\right)^2, \frac{2}{5}, \frac{5}{2}, \left(\frac{5}{2}\right)^2 \right\} \implies g_B \in \{0.14, 0.23, 0.57, 0.89\}, \quad (52)$$

ここで $g_Y = 0.357$ は GG-6 自身の電弱値 $\alpha^{-1}(M_Z) = 2^J = 128$ と $\sin^2 \theta_W = 25/108$ から従う ($\alpha_Y = \alpha / \cos^2 \theta_W$; M_{lock} までの $U(1)$ の走りはこれらを数パーセント動かすが、以下では本質的でない)。当時のままの格付けを強調しておく：式 (51) は定理級である；メニュー (52) は導出ではなく離散的な候補の括りであり、L-KK-1 が原理的にその外を選び得たのは、ロックされたノルムを超える構造を持ち出す場合に限られた。

規則、解決される。 第五の力の論文は登録を実行し、シーム終端規則はいまや GG-A3-BI6 の終端シーム容量定理である (T-BI6-6.4)：境界終端したアーベル的シームの容量は、セル剛性に対するその線形の台帳分け前である — 終端はシームの質量チャンネルを凍結する一方、その剛性の分け前は X_4 の位相的整数性データ $\gamma = 2/5$ であり、有坂四カレント・ロック (Arisaka, 2026, A7-Qi4、T-QUA) は、メニュー外の読み出しが要求するであろう私的な二進履歴を、終端したシームに禁じる。ゆえに

$$\frac{\alpha_B}{\alpha_Y} = \frac{5}{2}, \quad \alpha_B^{-1} = \frac{2}{5} 2^J \cos^2 \theta_W = \frac{5312}{135}, \quad g_B = 0.565 :$$

メニューの第三項であり、いまや導出済みである (メニューの 0.57 は、丸められた g_Y を通したその同じ項であった) — アノマリー・コンパニオンがそれに与える級において：ツリー準位、非混合基底、それが取り込む剛性定理に条件付き； $2^J = 128$ の代わりにコホート自身の補正された $\alpha^{-1}(M_Z) = 2^J - N^2/2^J = 127.93$ を用いると、コンパニオンの値は 39.33 となり、 g_B は 0.565 にとどまる；シームより下での走りはそこでは扱われていない。二次の候補は、単に退けられるのではなく診断される：ポータル振幅は X_4 の係数について線形であり — 線形の $5/2$ が容量定理の比である — メニューの二次の項は、幕が住む場所、すなわちレートに住むのであって、剛性に住むことは決してない。質量の側には未解決なものは何も残らない：終端はシュタッケルベルク対形成ではなく境界条件であり、したがって導出すべきシュタッケルベルク・スケールは存在せず — Z'_B は一つの質量 M_{lock} を担う — 登録されたまま残るのは、終端した区間上の質量をもつバリオン塔の準位ごとの流入整合性、すなわちアノマリー・コンパニオンの未解決問題 O13 である (Arisaka, 2026, A3-BI6)。

コライダーの結論、ディリクレ・モードの上で述べ直す。 これが本論文にとっての見返りであり、境界条件がモード関数へ読み込まれた時点で、その形は変わった (T-KK-2、ステップ 3')。以前の改訂は Z'_B をノイマン・モードの上で、八重項の端点振幅を用いて計算していた: メニュー (52) 全体にわたり、それは 3.849 TeV かつ $\sqrt{s} = 13$ TeV で $\sigma \times \text{BR}(Z'_B \rightarrow t\bar{t}) = \{0.012, 0.029, 0.18, 0.46\}$ fb、 $\Gamma/m = \{0.002, 0.005, 0.032, 0.080\}$ 、解決された $g_B = 0.565$ においては 0.18 fb と $\Gamma = 123$ GeV、そしてクラスター和の 2.0% の分け前を与えた。これらの数値はレートとしては撤回され、上限の記録として保持される: ディリクレ・モードの上では端点振幅が消えるため、 Z'_B の軽クォークによる生成はツリー準位でゼロであり、その $t\bar{t}$ 幅はトップの開いたカスケード深さの重なりである。三つの結論が、鋭くなって生き残る。第一に、 Z'_B は独立した信号としては LHC で不可視である — いまやそれが微弱だからではなく、端点にある何ものもそれを生成しないからである。第二に、カラー八重項は HL-LHC 反証子の唯一の担い手であり続ける。第三に、この枠組みには M_{lock} においてクォーク普遍的な線は存在せず、これはあらゆる四次元のゲージ化バリオン完成に対する最も明快な判別子である (第 56 節)。したがってバリオン部門の実験室における露出は八重項のそれである; 第五の力の評決は、いかなる距離、いかなる精度においても不在である ($\eta = 0$; 専用論文の装置は MADO である); そして Z'_B 自身の結合は、印字されるのではなく登録される (O-KK-59)。

棚分け。 定理の水準: ノルム (51) とその 5 による検証; そしていまや読み出しそのもの、すなわち T-BI6-6.4 として解決された L-KK-1 (継承であり、 $g_B = 0.565$ を伴う)。導出条件付き: 上のメニュー不変性の言明 (括り全体にわたって証明されており、解決された項においてはなおのこと成り立つ)。未解決、名前付き: ディリクレ・モードの上での Z'_B の結合 — T-KK-2、ステップ 3' の深さ則を、カスケード深さに対して適用したもの — は O-KK-59 として登録される; そして第四のディリクレ成員、すなわちアノマリー・コンパニオンの条項がその傍らに置く $U(1)_{Q_i}$ ベクトルの結合 (O-KK-60)、ならびに O-KK-67 の区間ウィルソン線スカラー。シーム終端規則そのものは、かつてはクラスターの結合における唯一残された離散的な未知数であったが、シナリオ二分法と平坦重なりの問いに続いて、定理の欄へと移った。

第 II 部は本論文の中心をなす成果を、平明な言葉で届けた: 幾何の空洞には最低音があり、その音は 3.849 TeV にある — おおよそでもなく、ダイヤルの範囲内でもなく、プランク質量と整数 35 による閉じた公式として、そして同じ数学によって固定された倍音列 (7.047 および 10.219 TeV) を伴って。微細構造もそれとともに来た: スピン 2 アンカー、それと厳密に縮退したディリクレ終端ベクトル、結合と符号をもつノイマン八重項、そして既存のデータがすでに解決した二又の分岐 (自由場か複合か) — 2.46 TeV のホーンは死に、縮退したクラスターは生き残る。しかし、質量とスペクトルは、まだ実験ではない。次の部は機械の問いを発する: このものはどれだけの頻度で作られ、どのチャンネルにおいて自らを現すのか。

11 第 II 部を平易な言葉で: 一つの整数、一つの質量、そしてピークではなくクラスター

本部が生み出す数値はおおよそ 3.85 TeV であり、それがどこから来るかの方が、それが何であるかよりも重要である。

それは何にもフィットされていない。ロック・スケールはプランク質量の半分にマイナス三十五の指数関数を掛けたものであり、その三十五は、いかなるコライダーの問いが発せられるよりも何年

も前に、コホートが粒子部門のために確定した台帳の中の整数である。結合は一つも調整されず、半径も選ばれず、スキャンも走らせていない。同じ台帳は、それ以上の入力なしに、電弱スケールをも再現する — 一つの整数から二つの既知の数値であり、これは成り立つか崩壊するかのいずれかである類の過剰拘束である。

本部が届ける第二のものは、予測がピークではなくクラスターである、ということである。四つの成員が同じスケールに位置する: スピン 2 状態、カラー八重項ベクトル、そして通常のクォークがツリー準位で生成しない二つのアーベル的ベクトルである。互いに対するそれらの位置はベッセル零点の比であり、したがって全体のスケールが動きうる場合でも、パターンは固定されている。

その区別は本論文の残りを貫いている。単一の共鳴のために設計された探索は、これが予言する探索ではなく、単一共鳴のベンチマークに対して計算された排除は移送されない。理論が禁じるのは状態の特定の配置であり、探されねばならないのはその配置である。

第 III 部 生成と発見

断面積、事象収量、そしてチャンネルの階層

第 II 部の質量は自然についての言明である; 本部はそれを機械についての言明へと変える。問いは加速器が強いる具体的なもの — どれだけの頻度で、どのチャンネルで、どのような背景の上で — であり、そして答えは、結合が導出されているがゆえに、範囲ではなく数値として到来する。

12 ハドロン・コライダーにおける生成機構

12.1 狭幅近似の一般的な勘定

ハドロン・コライダーにおいては、生成に関する議論を、できる限りベンチマークに依存しない言葉のうちに保っておくことが有益である。スピン J 、質量 m_X 、全幅 Γ_X 、および始状態と終状態への部分幅 Γ_{ij} と Γ_f をもつ共鳴 X に対して、狭幅近似はハドロンのレートの概形として次を与える

$$\sigma(pp \rightarrow X \rightarrow f) \simeq \frac{2J+1}{m_X s} \frac{\Gamma_f}{\Gamma_X} \sum_{ij} C_{ij} \left(\frac{m_X^2}{s} \right) \Gamma_{ij}, \quad (53)$$

ここで $C_{ij}(\tau)$ は始状態 ij に対するパートン・ルミノシティ関数である。この式は三つの事実を透明にする。第一に、生成はハードな結合だけでなくパートン・ルミノシティによっても支配される。第二に、分岐比は生成そのものと同じだけ重要である。第三に、軽いフェルミオン、グルーオン、トップ、あるいはヒッグス粒子のあいだで結合を再配分するいかなる機構も、発見チャンネルの順序を定性的に組み替える。

レートを、真にモデルに依存する唯一の数とそれ以外のすべてとに分けておくとう用である。共鳴-パートン結合を全体的な有効強度 κ_{eff} として書けば ($\kappa_{\text{eff}} = 1$ が $k/\bar{M}_{\text{Pl}} = 1$ をもつ標準的なバルク・グラビトンのベンチマークを再現するように規格化する)、狭幅近似のレートは次のように因子化する

$$\sigma(pp \rightarrow X \rightarrow f) \simeq \underbrace{\kappa_{\text{eff}}^2 \frac{2J+1}{m_X s} \sum_{ij} C_{ij} \left(\frac{m_X^2}{s} \right) \hat{\Gamma}_{ij}}_{\text{運動学+パートン光度 (固定)}} \times \text{BR}(X \rightarrow f), \quad (54)$$

ここで $\hat{\Gamma}_{ij} = \Gamma_{ij}/\kappa_{\text{eff}}^2$ は結合を剥がしたパートン的な幅である。右辺の因子のうち、質量 $m_X = M_{\text{lock}}$ は導出済みであり (定理 T-KK-1)、パートン・ルミノシティ C_{ij} は標準模型の入力であり、分岐構造は第 10.5 節の重なりパターンに従う。残る唯一の因子 κ_{eff} は有効結合であり、それは $GG\text{-}A$ の諸定理によっては固定されない: それはバルクから境界への重なり — [Arisaka \(2026, A9-SM\)](#) が未解決の補題として記録している、フェルミオンごとのカスケード深さ — によって定まる。例外は、カラー八重項の軽いクォークへの結合、すなわち $K = 35$ によって固定される厳密な端点振幅 $\xi_{\text{UV}} = -0.194$ (T-KK-2; それが精密化する主要次数のスケーリング $1/\sqrt{K} \approx 0.17$)、およびグラビ

トンの $\kappa_{gg} = c_K/K$ (T-KK-2c) である。

12.2 なぜ絶対断面積を引用しないのか

本論文は厳格な規律に服する：すべての定量的言明は GG-A シリーズに遡れなければならない。絶対生成断面積はそうではない。式 (54) を通じて、レートが要求するのは、(i) 共鳴-パートン結合 — そのうち八重項の ξ_{UV} (T-KK-2) とグラビトンの κ_{gg} (系 T-KK-2c) は現在では導出済みであり、一方でフェルミオンごとのカスケード深さは未解決のままである（かつて未解決であった g_B に対する L-KK-1 の読み出しは現在では解決済みである、第 10.10 節） — と、(ii) パートン・ルミノシティの数値的な QCD/PDF 積分であり、後者はいかなる定理に対しても外部にある。いずれも GG-A の定理からは供給されない。したがって本部は断面積を引用しない：第 V–VIII 部のフェムトバーンは導出条件付きのグレードを帯び、その入力とともに印字され、定理ではない。

GG-A シリーズが実際に固定するのは、そのようないかなる計算も従わなければならない構造であり、その構造こそが本節の真の内容である：質量スケール M_{lock} (15); ツリーレベルのレプトフォビア $\text{BR}(Z'_B \rightarrow \ell^+ \ell^-) = 0$ (41); g^* のカラーのみへの崩壊; トップに富むチャンネル順序 (第 10.5 節); 生成のマスター公式 (54); そして実際に固定される唯一の結合、すなわちカラー八重項の軽クォーク結合 $\xi_{UV} = -0.194$ (厳密モード、式 38) であり、これは (抑制不可能であるがゆえに) T-KK-2 のいずれのシナリオにおいてもカラー八重項をクラスターの実働的な切っ先とする (第 10.4 節、F-KK-2A/2B)。これらの入力を絶対レートへと変えること — 導出された結合に対するパートン・ルミノシティ計算 — は自然な次の段階である; それは、あらゆる外部仮定にラベルを付し、結果を導出条件付きと格付けしたうえで、第 31 節の運用的な対決において実行される。本部は定理に錨を下ろしたままである。

12.3 クォーク・反クォーク対消滅

最も清浄な教科書的モードは、ドレルーヤン型のクォーク反クォーク生成であり、

$$q\bar{q} \rightarrow G_1 \rightarrow \ell^+ \ell^-, \gamma\gamma, WW, ZZ, hh. \quad (55)$$

このモードが実験的に魅力的であるのは、レプトンおよび光子の終状態が低い背景と良好な不変質量分解能をもつからである。しかし GG-6 は、軽フェルミオンの結合が最大である必要はないと预言する。したがって、最も清浄なチャンネルが自動的に最も強いチャンネルであるとは限らない。

12.4 グルーオン融合

IR に敏感なグラビトンの状態に対しては、グルーオン融合がしばしば非常に競争力をもち、

$$gg \rightarrow G_1 \rightarrow gg, t\bar{t}, WW_L, ZZ_L, hh. \quad (56)$$

グルーオン・モードの魅力的な特徴は明白である：グルーオンのパートン分布は高質量領域においてもなお有意なままである。厄介な特徴も同じく明白である：グルーオンおよびハドロンの終状態はより大きな QCD 背景に直面する。GG-6 にとっての実際的な帰結は、見かけ上はより弱いより清浄なレプトンの探索と、背景の点でより困難だがより強く結合したハドロンの探索とが、究極の発見能力において比肩するという点である。

12.5 ベクトル・ボソン融合と随伴生成

さらに二つのチャンネルが言及に値する。ベクトル・ボソン融合、

$$qq \rightarrow qqG_1 \rightarrow qq + (WW/ZZ/hh), \quad (57)$$

は現在の LHC のエネルギーでは劣勢であるが、質量スケールが上がるにつれて、とりわけ将来のハドロン・コライダーにおいて、ますます有用になる。随伴生成、

$$q\bar{q}' \rightarrow G_1 W/Z, \quad gg \rightarrow G_1 g, \quad (58)$$

もまた、特殊化された解析におけるアクセプタンスや、パートナー状態の探索に寄与しうが、第一ロック・スケール近傍における主要な発見モードではない。

12.6 GG-6 に対する現実的なチャンネル階層

幾何とパートン構造とを合わせると、探索の最初の十年に向けた実際のチャンネルの順位付けが得られる。清浄なチャンネル（ダイレプトン、ダイフォトン）は、背景の曖昧さを最小にして高質量の対象の存在を確立できるがゆえに、依然として不可欠である。しかし、より幾何に忠実なチャンネルは、おそらく $t\bar{t}$ 、ブーストしたダイジェット、ダイボソン、およびヒッグス対のチャンネルである。その順位付けは恣意的ではない；それは重なり積分と穏やかなバリオンの混入の直接の帰結である。

したがって、第一ロック・スケールのクラスターが標準的な RS 型のダイレプトンまたはダイフォトンプロットにおいてすでに排除されているかどうかだけを問うのは誤りである。むしろ問うべきは、多チャンネルにわたる GG-6 の回廊全体が、クラスターを意識した再解釈によって排除されているかどうかである。2026 年初頭の時点で、そのより強い問いへの答えは依然として否である。

12.7 事象収量の勘定

大まかな事象数の議論には、次のように書けば十分である

$$N_S = \mathcal{L} \sigma(pp \rightarrow G_1) \text{BR}(G_1 \rightarrow f) \varepsilon_f, \quad (59)$$

ここで ε_f はチャンネル効率である。ルミノシティへの依存は、事象数については線形であり、探索が背景支配的である場合の有意度についてはおよそ $\sqrt{\mathcal{L}}$ である。清浄なレプトンの分岐比は GG-6 においては抑制されうるので、実際の探索はしばしば、レプトンにおいてより多くのルミノシティを待つだけよりも、 $t\bar{t}$ 、ダイジェット、および hh における ε_f を改善することによって、より多くを得るであろう。この単純な観察が、後に行うトリガーの提案を動機づける。

13 チャンネルごとの発見論理

先行する諸節は主要な幾何的描像を確立した。次の実際の問いは、より実験的である：GG-6 の第一クラスターが存在するとして、それは標準的な共鳴チャンネルのそれぞれにおいて、実際にどのように姿を現すのか。この問いが独立した節に値するのは、余剰次元の文献において繰り返し現れる誤解の一つが、重いグラビトンは一つか二つの清浄なチャンネルだけで十分に特徴づけられるという

ものだからである。GG-6 においては、それは狭すぎる。このモデルは設計上非普遍的であり、ラインシェイプにおいてクラスター化しており、パートナー状態と相関している。したがってそれは、単一の旗艦プロットではなく、チャンネルごとの論理を要求する。

13.1 ダイレプトン: 清浄だが必ずしも支配的ではないチャンネル

ダイレプトン・チャンネルが依然として最も清浄な分光的道具であるのは、電子とミュオンが優れた質量分解能と低い既約背景を与えるからである。GG-6 の第一クラスターが e^+e^- または $\mu^+\mu^-$ へのささやかな分岐比しかもたないとしても、ATLAS と CMS は鮮明な高質量構造を再構成し、角度情報を通じてただちにスピンの割り当てを検証できる。

しかし、その同じ清浄さが概念的な罠にもなりうる。多くの探索の伝統において、最も清浄なチャンネルは静かに主要な物理的ベンチマークへと格上げされる。GG-6 にとって、これは誤りであろう。幾何は軽フェルミオンの重なりが抑制される方を指し示すので、ダイレプトンは確認チャンネルないし精密チャンネルとして扱われるべきであり、自動的に支配的な発見の原動力として扱われるべきではない。GG-6 の回廊のうち、不運ではあるが角では、第一クラスターがまず $t\bar{t}$ やダイジェットにおいて見え、カテゴリーを踏まえた、あるいは信号を踏まえた統合が行われた後に、ようやくダイレプトンにおいて見えるということもありうる。

実際の解析上の帰結が続く。実験は、高質量ダイレプトンの結果が GG-6 のようなモデルに対してもつ関連性を論じる際に、「普遍結合の RS グラビトンに対する質量下限」という一次元曲線だけを報告することは避けるべきである。代わりに必要なのは、ダイレプトンの分岐比を総生成レート全体から独立に変化させることを許す再解釈のグリッドである。それは公表上のわずかな追加負担であり、下流での再利用可能性における利得は大きい。

13.2 ダイフォトン: 依然として重要だが、唯一の手掛かりとしては理論的に不利

ダイフォトンも同様の位置にある。それらは、優れた電磁カロリメトリと単純な終状態トポロジーのゆえに、実験的に洗練されており統計的に強力である。第一クラスター近傍における真正のダイフォトン・ピークは説得力をもつであろう。しかし、いくつかの軽フェルミオン結合を抑制するのと同じバルク局在の論理は、普遍的なグラビトンのテンプレートに対して有効な光子分岐を抑制あるいは変更しうる。したがって、ダイフォトン超過の不在それ自体を、GG-6 のベンチマーク全体に対するノーゴー定理として過剰に読み取るべきではない。

ダイフォトンに過大な重みを置くことを避けるべき第二の理由もある。クラスター化した 6D 信号においては、実験的な線が完全に狭い必要はない。部分的に分解された、あるいは緩やかに広がった構造は、コンパニオン情報が存在するチャンネルにおいてこそ、常に解釈しやすい。ダイフォトンは、たとえば $t\bar{t}$ や hh に比べて、事象形状の内部構造をより少なくしか与えない。したがってそれらは確認には優れているが、モデルの完全な識別に常に適するわけではない。

13.3 トップ対共鳴: 中心的な戦場

GG-6 探索の自然な本拠地として一つのチャンネルを指名しなければならないとすれば、それは $t\bar{t}$ であろう。論理は率直である。軽フェルミオンを抑制するのと同じ重なり積分が、IR に敏感な重いモードを優遇する。トップ・セクターは最も明白な受益者である。加えて $t\bar{t}$ は、GG-6 のスペクトルにおける近隣のいくつかの状態が自然に現れうる、まさにその場所である: 第一クラスター、八重項

の動径方向の再帰、そしておそらくは、随伴生成やカスケード生成におけるベクトルのトップ・パートナーさえも。

これにより $t\bar{t}$ は、相補的な二つの意味で特別なものとなる。それは発見チャンネルであると同時に診断チャンネルでもある。重いスピン 2 の状態と重いスピン 1 の状態はどちらもトップ対を生成するが、両者は異なる角度構造と運動学的構造をもってそうする。最初の超過がそこに現れたなら、このチャンネルのもつ識別能力の全体を投入できる：レプトン+ジェット、ダイレプトン、完全ハドロンのなトップ・タグ付きカテゴリー、トップ偏極の情報、および広がった線とクラスター化した線とのラインシェイプ比較である。第 VI 部は、これらすべてを定理によって固定された結合から定量的に導出する： $(1 + \cos^2 \theta^*)$ 対 $(1 - \cos^4 \theta^*)$ の生成角、 $+0.91$ 対 0 のトップ偏極、共鳴的な前後非対称性の厳密なゼロ点、および、建設的（下側）／破壊的（上側）という順序が導出された符号 $\xi_{UV} < 0$ によって固定される干渉ラインシェイプである。

直観をもう一步押し進めることさえできる。GG-6 が真である世界においては、実験は $t\bar{t}$ を複数あるチャンネルの一つと考えるべきではない；それを、3.85 TeV 周辺のスペクトル近傍が最も生き生きと見えるであろうチャンネルと考えるべきである。というのも $t\bar{t}$ は、グラビトンのクラスターにも、色をもつパートナーにも、そして GG-6 を普遍的な RS ベンチマークから隔てる IR 構造にも、同時に敏感だからである。

13.4 ダイジェット：GG-6 の穏やかなレプトフォビックな側面が可視になる場所

ダイジェットは QCD が巨大であるがゆえに実験的に困難であるが、GG-6 が厳密なバリオンのゲージ因子を含むがゆえに理論的には不可欠である。わずかなレプトフォビックな混入でさえ、ダイジェット対ダイレプトン比を目に見えて変えうる。ダイレプトンの結果が空であっても事は自動的に決着しないと我々が繰り返し強調するのは、このためである。バリオンに偏った 6D 信号は、QCD 背景が最も大きい場所に隠れうる。

この困難に対する現代的な実験の応答は、すでに公開された仕事のうちに見て取れる：縮約フォーマットの高レート・ストリーム、トポロジーおよび内部構造に基づくフィルター、そして模型に依らない異常探索である。これは GG-6 にとって非常に良い報せである。というのも、この信号は実験がまったく新しい戦略を発明することを必要としないからである。それが実験に求めるのは、すでに発展させつつある戦略を、クラスターを意識した解釈層とともに、特定の 3–6 TeV 領域へと押し進めることだけである — 全ハドロンのおよびダイジェットの隅について；レプトン+ジェットの判定に新たなストリームは不要である（O-KK-56）。

ダイジェット探索は第二の理由からも重要である：それらは、見えている特徴がグラビトン支配的であるか、 $U(1)_B$ ベクトル支配的であるか、あるいは混合であるかを解きほぐす助けとなりうる。ダイジェットにおいて異常に強く、ダイレプトンにおいて弱い高質量共鳴は、一般的な模型の概観のなかでは「またしても一つのレプトフォビック・ベクトル」として片付けられかねない。GG-6 の文脈においては、同じパターンはむしろ、この枠組みが要請する厳密なバリオンのセクターの証拠となるであろう。そのような区別を有用なものとするために、実験が GG-6 を信じる必要はない。必要なのは、その区別が検証されうるだけの情報を公開することだけである。

13.5 ダイボソン：幾何からヒッグスへの橋

ダイボソン・チャンネル WW と ZZ が重要であるのは、それらがスピン 2 のセクターとスカラー・セクターとを結ぶからである。真正のグラビトンのクラスターは、その起源がヒッグス・セク

ターの台帳を定めるのと同じ赤外スケールに深く結びついているならば、縦偏極の電弱ボソンに相当程度結合するはずである。バルク RS グラビトンの解析がしばしば WW と ZZ を $t\bar{t}$ と並べて置くのは、これが一つの理由である。同じ論法は GG-6 においていっそう強く当てはまる。

ダイボソンの終状態はまた、パートナー同定に対して、より幾何に固有の手掛かりを与える。スピン 2 のグラビトンはその導出された結合を通じて WW と ZZ を占め、バリオンのベクトルは O-KK-59 のアノマリー誘起チャンネルを通じてしかそれらに到達できないので、単一チャンネルのテンソル探索が統計的にまだ限界的である場合でさえ、ダイボソンの手掛かりはグラビトンにとって顕著でありうる。その意味において、ダイボソンのプログラムは最初の直接信号とより広い分光の物語とを結ぶ橋である。したがってそれは、第一クラスターに特化したいかなる探索とも緊密に結びつけて保たれるべきである。

13.6 ヒッグス対: 最良のスカラー的補強者

hh チャンネルは独特の役割を果たす。それは単なるもう一つのボソンの分岐ではない: スピン 2 のグラビトン G_1 は IR に局在したヒッグス・セクターに結合するので、 $G_1 \rightarrow hh$ の信号は赤外の直接的な探針である。(GG-6 にラディオンは存在せず — 動径方向の区間長は固定された整数 K であって、モジュラスではない (Arisaka, 2026, A4-Euclid) — したがって hh チャンネルは、スカラー・パートナーによってではなく、グラビトン自身によって供給される。) $t\bar{t}$ とダイジェットにおいて見えながら、それに伴う hh の活動をまったく欠く第一ロック・スケールのクラスターは、それだけですでに有益であろう; 逆に、 $t\bar{t}$ における決定的なスピン 2 の観測に先立ってさえ、3.85 TeV における示唆的な hh 超過は、GG-6 のパターン全体の事前的なもっともらしさを高めるであろう。

実験的な挑戦はもちろん手強い: hh はレートに制限され、終状態は複雑であり、最良のチャンネルは清浄さと分岐比とのあいだの取引に依存する。しかし、まさにこの困難さこそが、このチャンネルがこれほど価値をもつ理由である。 $t\bar{t}$ における 3.85 TeV のテンソルの信号と、同じ質量における hh の線とが相関していれば、そのいずれか一方だけの場合よりも、偶然として片付けることははるかに難しいであろう。

13.7 チャンネル統合の原理

本節全体を簡潔に要約する仕方はこうである: 正しい GG-6 の探索対象は単一のチャンネルではなく、チャンネル・ベクトルである。いま

$$\boldsymbol{\mu} = (\mu_{t\bar{t}}, \mu_{jj}, \mu_{hh}, \mu_{VV}, \mu_{\ell+\ell-}, \mu_{\gamma\gamma}), \quad (60)$$

とおく。ここで各成分は、選ばれた参照テンプレートに対する信号強度を表す。そのとき発見の主張は、「一つの成分が有意に非ゼロである」と考えられるべきではなく、むしろ「6D 幾何から期待される順序と形態をもつ、統計的に整合した非ゼロのベクトル」と考えられるべきである。これは、実験がカテゴリーとチャンネルを統合したときに実際に行っていることを述べる、ベイズ的で GDOS に親和的な言い方である。

表 9: 第一 GG-6 クラスターのチャンネルごとの論理。この表は単に記述的なものではない; それは、各チャンネルが発見、診断、あるいは補強にどのように寄与するかの順位付けである。発見、診断、補強は三つの異なる仕事であり、この表はそれらを分けて保つ。超過を確立するであろうチャンネルが、必ずしも何がそれを生んだのかを教えるチャンネルであるとは限らず、そのいずれにも向かないチャンネルが、それでも代替案を排除する当のチャンネルでありうる。順位を上から下へ読めば、第一クラスターはトップにおいて発見され、他のすべての場所において診断される。

チャンネル	主要な実験的美点	GG-6 における主要な役割	主要な留保
ダイレプトン	最高の清浄さと質量分解能	確認、スピン解析、清浄な補強	軽フェルミオンの抑制がこれを劣勢にしよう。
ダイフォトン	非常に清浄な終状態、優れた EM 分解能	分岐が十分に大きければ清浄な補強	光子分岐が標準的な RS に比して減少している可能性がある。
$t\bar{t}$	トップに富む重なり構造の自然な住处	有力な発見チャンネルであり、最良の分光的戦場	再構成が複雑で、系統誤差がより大きい。
ダイジェット	大きな分岐、レプトフォビックな混入に敏感	$U(1)_B$ の側面と多場混合を検証する	QCD 背景が厳しい; 縮約ストリーム戦略を要する。
ダイボソン	赤外の電弱セクターとの強い結びつき	テンソル・セクターとスカラー・セクターとの橋	レートがより低く、再構成が複雑である。
hh	他にないスカラー・セクターの補強	最良のグラビトン- hh / ヒッグス・セクターの相互検査	レートに制限され、トポロジーに依存する。

第 III 部を平明に要約する: クラスターは計算可能なレートで生成され — 現在の LHC においてカラー八重項はおよそ九フェムトバーン、グラビトン・アンカーは数百分の一である — そしてそれは、この分野が本能的に注視する清浄な電子および光子のチャンネルにおいてではなく、トップ・クォーク対とブーストしたジェットにおいて自らを告げる。収量、チャンネル階層、およびそれらの背後にある理由は、いずれも各粒子がスケール方向に沿ってどこに住んでいるかから降りてくる。これらの言明を額面どおりに信頼する前に、注意深い読者は二つの保証を求めるであろう: この構成が、表面的には似ているワープしたモデルとは真に異なること、そして検出という行為それ自体が、ここでは原理に基づいた記述をもつこと。どちらも次の部の仕事である。

14 平易な言葉による第 III 部: 質量を、検出器が実際に記録しうるものへ変える

質量はまだ実験ではない。この部はその変換を行う: クラスターがどのように生成され、どれだけの頻度で生成され、どの崩壊チャンネルに現れるか、である。

二つの生成経路が重要であり、それらは異なるメンバーに属する。スピン 2 アンカーは主にグルーオンから作られる; カラー八重項はクォーク-反クォーク対消滅から、しかもはるかに大量に作られる。生成率を決めるパートン・ルミノシティは他者の測定であり、ここでは導出されるのではなく引用されており、読者が算術をやり直せるように印刷されている。

チャンネルの順位付けはこの部の実践的な出力であり、チャンネルが担いうる三つの役割を分離する。

あるチャネルは、超過が最初に現れる場所である。別のチャネルは、何がそれを生成したのかが分かる場所である。第三のチャネルはそのいずれも担わないかもしれず、それでもなお代替案を排除するチャネルでありうる。このクラスターについては第一の役割はトップ・反トップに属し、本論文はここから先そこに集中する。

これらのいずれも、通常の意味での新物理の予言ではない。これは二つ前の部で固定された質量に対する算術であり、その唯一の自由度は、公表された測定に由来する入力の中にある。

第 IV 部

GG-6 対 ランダル–サンドラム、および開放系としての検出

何が際立っているのか、そしてなぜ加速器検出は GDOS の問題なのか

15 GG-6 は通常の KK および RS ベンチマークとどう異なるか

15.1 通常の KK および RS の参照点

通常の KK 理論と RS 理論は自然な参照モデルである。というのも GG-6 は両者から本質的な直観を借りているからである。KK 理論は、コンパクトな内部空間上の調和分解の論理を与える (Kaluza, 1921; Klein, 1926)。RS 理論は、ワープが生成する階層性と赤外に局在したスペクトルの論理を与える (Randall & Sundrum, 1999)。したがって ATLAS と CMS における実験的探索は、しばしば RS あるいはバルク RS のベンチマーク重力子の言葉で定式化される。それは理にかなっている。しかしそれは GG-6 にとって最終的な言葉ではない。

15.2 実験的に重要な五つの相違

GG-6 と最小限の RS 型ベンチマークとの間には、実験的に関連する相違が少なくとも五つある。

1. スキャンされる質量パラメータではなく、固定された重心スケール。 標準的な現象論では、共鳴質量は通常スキャンされる。GG-6 では、第一クラスターの重心は $K = 35$ に結び付けられている。これは単により狭い事前分布であるにとどまらない; それはヌル結果の意味を変える。
2. 単一の 5D 極ではなく、クラスター化した (多場の) ラインシェイプ。 いくつかの異なるバルク場の最低動径モード — 重力子、KK グルーオン、そして $U(1)_B$ ベクトル — は同じ赤外端点へと赤方偏移するため、最初に見えるファミリーは、孤立した一つの極ではなく、ほぼ縮退した多重項となる。(角度パートナーは各基底状態の上の導出されたオフセットに位置し、 θ 運動量保存によって単独生成から外れる、P-KK-7; それらは多重項のラインシェイプには入らない。) したがって専用のクラスター・フィットは、単一極テンプレートよりもよく動機付けられる。
3. 厳密な $U(1)_B$ セクター。 バリオンのベクトルはちょうど M_{lock} に位置し、ツリー準位では端点クォークによって生成されない; クラスターのハドロンの生成率は八重項のものであり、そのダイレプトンは電弱 KK モードのものである (O-KK-62) ため、ダイジェット対ダイレプトン比は普遍的な重力子のそれよりはるかに大きい。

4. 非普遍的な重なりパターン。 トップおよびヒッグスのセクターはより赤外に敏感であり、そのため $t\bar{t}$ 、ダイボソン、および hh の各チャンネルが特に重要になる。

5. 関連したパートナー状態は、任意ではなく期待される。 KK グルーオンと $U(1)_B$ ベクトルは、首尾一貫した分光プログラムを形成する。

表 10: ATLAS と CMS に関連する、教科書的な 5D RS 探索像と 6D GG-6 像との最小限の比較。この比較は意図的に最小限である：探索を書く実験家にとって何が変わるかのみを挙げており、ラグランジアンを書く理論家にとって何が変わるかは挙げていない。二つの行はイベント選択に対して何の帰結ももたないが、帰結をもつ行が少数であることが見て取れるように含めてある。枠組み全体の比較は本論文の後方にあり、別の役割をもつ別の表である。

特徴	5D RS 型の期待	GG-6 の期待
質量入力	自由なベンチマーク質量スキャン	第一クラスターの重心が $M_{\text{lock}} \simeq 3.849 \text{ TeV}$ によって固定される。
ラインシェイプ	単一の狭い、あるいは中程度に広い極	最初に見えるファミリーにおけるクラスター化した多極の可能性。
内部次元	一つの空間的なワープ方向	二つの 非空間的 方向: RG スケール軸 I_r と、コンパクトな位相円 S_θ^1 。
結合	しばしばほぼ普遍的、あるいはベンチマーク普遍的として扱われる	非普遍的な重なり; トップに富み、軽レプトンが抑制され、穏やかにレプトフォビクな混合がありうる。
バリオン・セクター	厳密な追加のゲージ因子としては通常存在しない	厳密な $U(1)_B$ セクターは分岐比とパートナー状態のパターンを変えうる。
パートナー状態	ラディオオンと有色パートナーはモデル依存	KK グルーオンと $U(1)_B$ ベクトルが、関連した台帳の中で期待される。
探索戦略	単一チャンネルの高質量共鳴テンプレートでしばしば十分	多チャンネルで、クラスターを意識し、トップを意識した戦略が好ましい。

15.3 一般的な KK、5D RS、および GG-6: 実験的に重要な比較

「KK 粒子」という語句は、加速器の議論においてしばしば緩やかに使われすぎている。実験的な観点からは、混同されるべきでない少なくとも三つの異なるクラスがある：一般的なコンパクト化型の KK 像、5D のワープしたランダル–サンドラム・ベンチマーク、そして本稿の 6D GG-6 構成である。したがって表 11 を明示的に含めた。というのも、それは現象論と一般向け解説の双方で繰り返し生じる混乱の源に対処するからである。

表 11: 一般的な KK 対 5D ランダル–サンドラム 対 6D GG-6。要点は修辭的なものではない; 各列は、異なる探索テンプレート、現行の排除に対する異なる解釈、そして異なる水準の反証可能性を含意する。三つの列と三つの異なる探索テンプレートであり、これが、通常はラグランジアン的水準でなされる比較の実践的な内容である。真ん中の列に対して計算された現行の排除は右の列へは移送されず、この表は、再スケーリングではなく専用の再解釈が必要である理由の論拠である。

問い	一般的な KK コンパクト化	5D RS ワープ模型	GG-6 の 6D 幾何
高次元の舞台	通常は平坦、あるいは緩やかに曲がったコンパクトな余剰次元; しばしば単一のコンパクト・スケール R^{-1} をもつ直積多様体	UV および IR プレーンと単一のベッセル根の塔をもつ、一つのワープした余剰次元	二つの内部方向、すなわち RG 的な動径方向とコンパクトなホロノミー方向 (r, θ) 、そして組み込まれた BI-6 アノマリー・ロッキング

問い	一般的な KK コンパクト化	5D RS ワープ模型	GG-6 の 6D 幾何
標準的な質量公式	$m_n^2 \sim m_0^2 + n^2/R^2$	最も単純な重力子の塔について $m_n \approx x_n k e^{-k\pi R}$	クラスター化した多場の動径スペクトル、定理級の第一重心は $K = 35$ に結びつく; 角度パートナーは基底の $1.07\text{--}1.17\times$ という導出されたオフセットにあり、単独生成から外れる (P-KK-7)
最初に到達可能なスケールを固定するものは何か	通常は自由なコンパクト化半径、あるいはスキャンされる逆半径	ワープ因子によって設定される赤外スケール、ただしベンチマーク研究では現象論的にスキャンされる	ロック・スケール $M_{\text{lock}} = E_{\text{Pl}}/(2e^{35}) \simeq 3.849 \text{ TeV}$; 現在の実装では自由な中心質量としてスキャンされない
スペクトルの形態	最も単純な平坦の場合にはほぼ一様な梯子	単一系列のベッセル間隔、しばしば極ごとに解析される	3.85 TeV 近傍の多場の第一クラスター (重力子 / KK グルオン / $U(1)_B$)、続いて 7 TeV ($n=2$) および 10 TeV ($n=3$) における 動径 ファミリー; 角度パートナーは導出されたオフセットにあり、単独生成から外れる (P-KK-7)
結合	最も単純な玩具の描像ではしばしば普遍的	局在化に依存して普遍的にもバルク非普遍的にもなりうるが、公開文献ではしばしば単純化された RS テンプレートが用いられる	重なり積分から明白に非普遍的; 軽いフェルミオンは UV 寄り、トップとヒッグスは IR で増強され、小さなレプトフォビクな $U(1)_B$ 混合を伴う
第一ファミリー近傍でのバリオンのベクトルの必要性	一般的ではない	最小模型には存在しない	自然であり、実際上きわめて重要; レプトフォビクな B_1 様の状態は、ハドロンのチャンネルが中心になる理由の一つである
スカラー・パートナー	モデル依存; 一般的なモジュライがありうる	安定化に由来するラディオオンが標準	ラディオオンなし: 動径方向の長さは固定された整数 K であってモジュラスではなく (Arisaka, 2026, A4-Euclid)、したがって GG-6 は半径安定化のスカラーを予言しない — 5D RS からの明快な区別である
最良の第一 LHC チャンネル	モデルに強く依存する	単純な公開の重力子の提示ではしばしばダイレプトン / ダイフォトン; バルク RS では $t\bar{t}$	まず $t\bar{t}$ とブーストされたダイジェット、そして hh 、ダイボソン、ダイレプトン、ダイフォトン、唯一の発見エンジンではなく補強のチャンネルとして
最も危険な誤解釈	すべての KK 理論を一つの現象論的クラスとして扱うこと	公開の RS 極テンプレートが、任意のワープした信号に対して自動的に正しいテンプレートであると仮定すること	クラスター化、非普遍的な重なり、および $U(1)_B$ 混合を考慮に入れずに、標準的な RS の排除をそのまま GG-6 へ翻訳すること
発見が意味するであろうこと	余剰次元の証拠、ただししばしば大きなモデルの曖昧さを伴う	ワープした幾何と RS 的な階層性の解の証拠	バルク幾何、OGN-5 ロック・スケール、6D のクラスター化したスペクトル、そして GG-6 / GDOS が強調する幾何から開放系への辞書の、同時の証拠
ヌル結果が意味するであろうこと	自由なコンパクト化スケールを上方へ押し上げる	選ばれたベンチマーク回廊を排除する	質量の標的が浮動するダイヤルではないため、現行のロック・スケール実装に直接圧力をかける

実践的な短い要点は次のとおりである。一般的な KK 探索は、何らかの共鳴の梯子が存在するかを問う。RS 探索は、一次元のワープした階層性が単一系列の塔を生成したかを問う。GG-6 探索は、はるかに強く、はるかに危険なことを問う: 最初に到達可能な 6D ファミリーが特定のロックされたスケールに位置し、クラスター化したラインシェイプをもち、軽いレプトンよりもトップとハドロンのチャンネルを好み、バリオンのベクトルとカラー八重項のパートナーを伴うかどうか、である。その、より強い問いこそが、LHC における検証がこれほど価値をもつ理由である。

15.4 導出された幾何と、フィットされた共鳴

比較における最も深い項目は、どの単一の行の中にもない; それは列の論理そのものである。一般的 KK あるいはベンチマーク RS の共鳴質量は 入力 である: ある範囲にわたってスキャンされ、事後的に、データが選好するものによって固定されるコンパクト化半径あるいはワープ積である。GG-6 のロック・クラスター質量は 出力 である: 定理 T-KK-1 (第 9.1 節) は、OGN-5 の整数 $K = 35$ と GU-5 の定数から $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35} \simeq 3.849 \text{ TeV}$ を返し、回すべき連続的なダイヤルは存在しない。これは共鳴探索の通常の論理を反転させる。フィットされたモデルにとっては、与えられた窓におけるヌル結果は単に自由パラメータを押しやるだけであり、モデルは次の質量で生き延びる; GG-6 にとっては窓が事前に確約されているため、完全ルミノシティにおける $3.85 \pm 0.10 \text{ TeV}$ でのヌル結果は現行の実装をただちに反証し — 抑制不能な八重項の線を通じて (F-KK-2B; スピン 2 メンバーそのものは、その導出された結合においては FCC-hh の領分である、系 T-KK-2c) — そして過剰拘束 $v = M_{\text{lock}} (2/5)^3$ を通じて — Arisaka (2026, A9-SM) の電弱スケールの導出を同時に覆すことになる。したがって導出された幾何に由来する質量は、同じスピンとチャンネル内容をもついかなるフィットされた共鳴よりも鋭い実験的判定を購う: それが隠れる場所はどこにもない。これは GG-6 の項目を他の二つの列から最もよく分ける単一の特徴であり、科学的には、表の中のいかなる個別の現象論的相違よりも価値がある。

15.5 再解釈にとっての実践的な帰結

この比較表には直接の実験的帰結がある: 標準的な RS ベンチマークについて引用された公開の排除は、自動的に一対一で GG-6 へ写像されるわけではない。それらは不可欠な指針ではあるが、最終的な判定ではない。クラスター化したラインシェイプ、トップに富む重なりパターン、あるいは穏やかなレプトフォビク混合に対して盲目な解析は、チャンネルに応じて真の GG-6 感度を過大評価することも過小評価することもありうる。だからこそ、現在の公開状況は幾分の注意をもって読まれねばならない。

16 なぜ加速器検出は開放系の問題なのか: GDOS の見方

ATLAS あるいは CMS における KK 粒子の検出は、なぜ GDOS (Arisaka, 2026, A5-GDOS; Arisaka, 2026, A6-GRIP) によって記述されるべきなのか。加速器実験が標準的な開放系だからである。パートンの硬い事象は直接には測定されない; それは、微視的な励起を登録された記録へと変換する散逸的、粗視化的、そして意思決定的な操作の連鎖を通じて推論される。

GDOS の言葉では、関連する系のインスタンス・パケットは少なくとも四つの構成要素を含む: 硬い散乱の微視的な状態多様体、事象が検出器の中でエネルギーと電荷を落とす境界ポート、識別と再構成を支配する実効的な台帳あるいは自由エネルギー的な汎関数、そして登録された観測量 – 不変質量、角度変数、b タグ、トップ・タグ、ジェット質量、消失運動量、そしてトリガー・ビットである。これらはすべて開放系の対象である。それらは、孤立したパートンの宇宙の閉じたハミルトンの観測量ではない。

OGGEP の観点からは、KK 事象は 6D バルクの励起であり、その実験的に有意な存在は 4D 境界への射影の後にはじめて定義される。ATLAS と CMS は「余剰次元を見る」わけではない。それらが見るのは、飛跡、カロリメータ・クラスター、タイミング・パターン、そして統計的に再構成された不変質量である。まさにこれが AX-3 が重要である理由である: 規律ある境界辞書を欠いたバル

ク理論は、科学的な予言ではない。加速器の言葉では、OGGEP とは、6D の言明が再構成写像、チャネル・リスト、決定規則、そして反証基準を伴わねばならないという要請である。

DGI もまた馴染みのある装いで現れる。実験的に報告される観測量は、ゲージ不変な組み合わせである。発見は、ゲージ依存の場の成分の言葉で主張されるのではなく、不変質量、断面積、角度モーメント、そして再構成された粒子の同定の言葉で主張される。微視的なゲージ場からそれらの不変量に至る経路は、開放的な検出器系と統計的なパイプラインを通過する。それはまさに、GDOS の言葉が導入された種類の状況である。

最後に — そして完成したランタイム論文群においては、これは比喻ではなく文字どおりの機構である — トリガーと再構成の連鎖は、この一連の論文自身の理論における測定事象である。コホートの量子力学論文は、測定を完全なランタイム事象として導出する (Arisaka, 2026, A8-QM) : 装置を武装させることは系-装置の結合したランドスケープを再編する (内在的で、予定された GRIP-Out) ; それに続く登録は、一つの記録ベイスンへの GRIP-In 降下である; 記録された事象が停止である。加速器の運転は、まさにこの解剖学の産業的な規模での実現である: トリガー・メニューはランドスケープの設計そのものである — 各メニューの配備は、再構成がその後そこへ降下していく記録ベイスン (レプトンの、ハドロン、ブーストされたトップ、ヒッグス候補) を開く、予定された GRIP-Out である — そしてテープ上のすべての事象は GRIP-In 停止であり、この一連の論文におけるすべての記録が恒久的であるのと同じ理由で恒久的である。したがって成功する KK 探索は、単により多くのルミノシティの問題ではない; それは正しいベイスンを開くことの問題である: これが、トリガー準位解析、スカウティング、および縮約ストリーム設計に関する後の節の正確な意味であり、そしてそれは、姉妹論文のハロスコープが暗黒物質を狩るのと同じ文法である — 検出器と検出されるものは、一つの文法の上で走る。

第 IV 部は信頼に関する二つの問いを決着させた。第一に、GG-6 は新しい記法をまとったランダル-サンドラムではない: 比較は項目ごとに進み — 自由な長さはなく、ラディオンはなく、孤立した一つの極の代わりに多状態のクラスターがあり、選択規則によって単独生成から外された角度セクターがある — そして各々の相違は、測定可能な何かに結び付けられた。第二に、検出はその原理的な読みを与えられた: 加速器の測定は開放系の射影であり、それはコホート全体を貫くのと同一構造であるから、探索は理論に後から取り付けられた付け足ではなく、理論の一つの実例である。現象論を引用しうようになる前に残っているのは、帳簿上の誠実さである: どの数値が定理級であり、どの数値が外部入力に依拠しているか。次の部は、まさにその線を、二度引く。

17 平易な言葉による第 IV 部: なぜこれはランダル-サンドラムではないのか、そしてなぜ検出は物理の一部なのか

ワープした余剰次元との類似は表面的であり、この部は、それがどこまで及ぶかを正確に述べる。

ランダル-サンドラム模型は、大きさをもつ空間的な第五次元をもつ。その大きさは自由パラメータであり、したがって共鳴質量は入力である; そして空間的な余剰次元は、何か別のものによって安定化されねばならないラディオンとモジュラスをもたらす。ここでの枠組みは、そのいずれももたない。その二つの余剰方向は空間的ではなく — 一方は繰り込み群スケールであり、他方は位相角である — したがって選ぶべき半径はなく、安定化すべきモジュラスもなく、コンパクト化のランドスケープもない。これらの不在は仮定ではなく帰結であり、その各々がダイヤルを一つ取り除く。

この部の後半は加速器物理学者には異例に読めるであろうが、それは飾りではなく枠組み自身の

主張である。この枠組みにおいて観測とは、六次元バルクから四次元境界への射影であり、その射影こそが、そもそも何かを登録可能にするものである。その読みに立てば、トリガー・メニューは物理の前に置かれたフィルターではない; それは、どの射影が走るかについての選択である。後の諸部の探索戦略のいかなる部分も、それを受け入れることには依存しておらず、だからこそそれはここで述べられ、そののち脇へ置かれる。

第 V 部

ロック・クラスターの二つの読み出し

読み出し I — 定理のみの標的; 読み出し II — 経験的に係留されたレート推定

予測を行う論文における誠実さは、その大半が帳簿付けの問題であり、この短い部はその台帳である。同じ物理を二度、明確に分離された二つのコミットメント水準で述べることで、外部仮定がことごとく破綻したときにどの主張が生き残るのかを読者が思い悩まねばならないことは一切なくなる。

18 読み出し I: 定理のみの標的

ここまで本論文は単一の規則に従ってきた: GG-6-A の定理でない定量的言明は行わない、という規則である。この規則が、我々が 読み出し I と呼ぶもの — ロック・クラスターの最も保守的で定理級の読み出し — を定義する。それは最大限に誠実であり、コホート内では本質的に交渉の余地がないが、絶対生成レートには意図的に踏み込まない。ここではそれを明確に述べ、第 19 節では、一つの 明確に定義された外部仮定の集合が、それを実験家が実際に計画の基準とする断面積へとどこまで拡張しうるかを示す。

読み出し I が与えるもの (導出された骨格)。 このリストの全項目は OGN-5+GU-5 とコホートの諸定理に遡ることができ、連続的なダイヤルを一切含まない:

- **質量スケール。** $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2}M_{\text{Pl}}e^{-35} = 3.849 \text{ TeV}$ (定理 T-KK-1、式 (15))、および過剰拘束 $v = M_{\text{lock}}(2/5)^3 \approx 246 \text{ GeV}$ 。
- **スピン内容。** ちょうど M_{lock} にスピン 2 のグラビトン G_1 ; ちょうど M_{lock} に二つのディリクレ・アーベル・ベクトル (Z'_B とその Q_i 兄弟) があり、グラビトンと縮退している (T-KK-2、ステップ 3'); そしてデータが選択した複合硬化シナリオでは $\approx M_{\text{lock}}$ にノイマン型カラー八重項 g^* があり、次の 動径 族は 7 TeV 近傍にある。
- **厳密な崩壊構造。** ツリーレベルで $\text{BR}(Z'_B \rightarrow \ell^+\ell^-) = 0$ であり、これは登録されたループ床の上にある (式 (41); O-KK-61); カラー八重項 g^* はカラーを持つ状態に **のみ** 崩壊する; そして両パートナーともトップ対チャンネルが支配的である (第 10.5 節における順序付けであって、数ではない)。
- **唯一の固定された結合。** カラー八重項の軽クォーク結合 $\xi_{\text{UV}} = -0.194$ (最低次の $1/\sqrt{K} \approx 0.17$ を精密化した厳密なモード値) であり、 $K = 35$ によって固定され、下げることは **できない** (第 10.4 節)。
- **意図的な省略。** 絶対断面積、分岐数、幅の割合、事象収量は、いずれも κ_{eff} と、A1–A9 のどの定理も供給しない QCD/PDF 積分とを要するため、示さない (第 12.2 節)。

読み出し I における実験的指示。 $M_{\text{lock}} = 3.85 \text{ TeV}$ に結び付いた クラスター化した、トップに富む、レプトフォビックな 構造を探索せよ; 反証子は 構造的 である。F-KK-1 (系 T-KK-2c によって再限定されたもの): 反証子の HL-LHC 側の腕はクラスターの抑制不能な八重項を通る; スピン 2 の線は、その導出された結合 $\kappa_{gg} = c_K/K$ において、FCC-hh の直接的な標的である。F-KK-2A/2B (T-KK-2): 抑制不能なカラー八重項は、 2.46 TeV にあるか (自由場シナリオであり、既にテープ上にあるデータから判定可能)、あるいは M_{lock} 近傍の $t\bar{t}$ /ダイジェット・フロンティアにあるか (複合シナリオであり、現在探索中) のいずれかである。これはコホートが留保なしに支持できる立場である。その唯一の実験的な限界は、「 3.85 TeV 近傍でトップに富むクラスターを探せ」が 形状 の指示であって レート の標的ではないという点にある — そして積分ルミノシティを配分する実験家にはレートが必要である。

19 読み出し II: 経験的に係留されたレート推定

読み出し I に欠けている数は κ_{eff} (およびチャンネルごとの R_f) である。これらは GG-6-A の出力ではない — が、知り得ないものでもない。GG-6 のスロートは、その構成そのものによってワープしたランダル-サンドラム型の AdS スライスであり、ワープ KK 現象論と測定されたフェルミオン・スペクトルとを併せれば、これらは $O(1)$ の範囲まで固定される。読み出し II は、その確立された外部知識を読み出し I の骨格に接ぎ木した結果である。以下のすべての数はモデル級であり、ここで我々が明示的に述べる仮定に依存する; そのいずれも導出された M_{lock} や v には触れない。

読み出し II の基礎にある仮定 (GG-6-A の外部)。

B1 — RS 型スロート。

動径区間 $r \in [0, K]$ は AdS スライスとして扱われ、したがって標準的なワープした重なり関数とプロファイル関数が適用される (Randall & Sundrum, 1999)。

B2 — 経験的局在化。

各フェルミオンのバルク局在は、通常の RS-GIM 対応を通じてその 測定された 質量から読み取られる: 軽フェルミオンは UV 局在、トップは IR 局在である。

B3 — 規格化の移送。

$\xi_{\text{light}} = 1/\sqrt{K}$ を固定する KK モードの規格化は、共鳴の生成パートンへの結合をも定めるため、 $\kappa_{\text{eff}} \approx 1/\sqrt{K}$ となる。

B4 — 標準的な結合比。

UV 局在した場合はゲージ結合単位で $\approx -1/\sqrt{K}$ にて、完全に IR 局在した場合は $\approx +4$ から $+5$ にて第一 KK モードに結合するという、確立されたワープ値 (Agashe et al., 2008; Lillie, Randall & Wang, 2007)。

結合の規格化 κ_{eff} 。 三つの独立な議論が同じ値に収束する。(i) 固有長 K のワープした区間上で正準規格化された KK モードは、一般の点で振幅 $\sim 1/\sqrt{K}$ を持ち、したがってその生成パートンとの重なりは ξ_{light} を既に固定しているのとまさに同じ因子を担う; これにより $\kappa_{\text{eff}} \approx 1/\sqrt{K}$ が得られる。(ii) プランク以下の曲率の妥当性は $k/\bar{M}_{\text{Pl}} \lesssim 1$ という上限を課し、強結合ベンチマークを排除して κ_{eff} を $0.1\text{--}0.3$ の帯へと引き込む。(iii) $\kappa_{\text{eff}} = 1/\sqrt{K}$ を標準的な 3.85 TeV のバルク・グラ

ビトン・テンプレート ($k/\bar{M}_{\text{Pl}} = 1$ で $\sim 20\text{--}50\text{ fb}$; Davoudiasl, Hewett & Rizzo, 2000) に入れると $\sigma(G_1) \approx 0.6\text{--}1.4\text{ fb}$ が再現される、すなわち、しばしば引用される「サブ・フェムトバーンから数フェムトバーンまで」のグラビトン回廊を、フィットからではなく K から導出するのである。ゆえに、この読み出しが採用した作業用のブラケットは次であった

$$\kappa_{\text{eff}} \approx \frac{1}{\sqrt{K}} = \frac{1}{\sqrt{35}} \approx 0.17 \quad (\text{範囲 } 0.08\text{--}0.3, \text{ 模型級}). \quad (61)$$

魅力的なのは、中心値が M_{lock} と ξ_{light} を固定するのと同じ整数 $K = 35$ によって定まるのであって、新たな自由ダイヤルによって定まるのではないという点である。

厳密な結果によって置き換えられた。生成の重なりは系 T-KK-2c (第 10.9 節) において厳密に計算されている: $\kappa_{gg} = 2(1 + J_2(x_1))/(Kx_1^2 J_2(x_1)) = 0.0136 \approx 0.47/K$ 。上の議論 (i) は振幅を重ねると取り違えていた — 平坦なグルーオンと IR 局在したグラビトンとのほぼ直交性が、スロートの最後の半 e-fold を除くすべてを打ち消し、さらに $\sim 1/\sqrt{K}$ の代償を課す。議論 (ii)–(iii) は真値を上から挟んでいた; 導出値は推定された回廊の最下端に位置し、第 31 節のすべてのグラビトン・レートが用いるのはこの値である。ボックスに入れた推定値は、厳密な結果が置き換える読み出し II のブラケットとして上に残してある。

チャンネル因子 R_f 。 R_f の構造は純粋に GG-6 のものであり (トップに富み、レプトフォビク); その数値は B2+B4 から従う。スピン 1 のカラー八重項については、借用した結合比 (UV の軽クォークは $-1/\sqrt{K} g_s$, IR のトップは $\sim +4.5 g_s$) が強くトップに飽和したパターンを与える; グラビトンについては、 R_f は普遍的なバルク RS テンプレートに対する相対値として引用される。

表 12: 読み出し II のチャンネル推定値。モデル級 (仮定 B1–B4): カラー八重項の分岐比は、借用した RS 結合比と測定されたフェルミオン局在から従う; グラビトンの R_f は、同じ質量の普遍的なバルク RS グラビトンに対する GG-6 のレートである。ツリーレベルのレプトフォビア (登録されたループ床の上での $\text{BR}(Z'_B \rightarrow \ell^+ \ell^-) = 0$, O-KK-61) が唯一の読み出し I の項目である。

チャンネル	スピン 1 八重項 g^* : BR 推定値	グラビトン G_1 : バルク RS に対する R_f
$t\bar{t}$	0.7–0.95 (トップは IR 局在)	$\sim 1\text{--}3$ (緩やかに増強)
$b\bar{b}$	~ 0.05 (b_L は準 IR)	~ 1
軽い jj	0.01–0.05 (UV, $\propto 1/K$)	$\sim 1\text{--}2$ (平坦モードの重なり; T-KK-2c によって置き換えられた)
$hh, WW/ZZ$	— (カラー八重項)	$\sim 1\text{--}2$ (IR ヒッグス・セクター)
$\ell^+ \ell^-$	0 (カラー一重項)	0.1–0.5 (軽レプトンの抑制)
$\gamma\gamma$	0 (カラー一重項)	0.3–1 (光子的重みの減少)

断面積のおおよその値。 $\kappa_{\text{eff}} \approx 1/\sqrt{K}$ をチャンネル因子と組み合わせると、 $\sqrt{s} = 13.6\text{ TeV}$ かつ $m \approx 3.85\text{ TeV}$ において:

$$\sigma(pp \rightarrow G_1) \approx 0.6\text{--}1.4\text{ fb} \quad (\text{スピン 2 グラビトン, } gg/q\bar{q}), \quad (62)$$

$$\sigma(pp \rightarrow g^*) \approx 11\text{--}23\text{ fb}, \quad \sigma(pp \rightarrow g^*) \times \text{BR}(g^* \rightarrow t\bar{t}) \approx 11\text{--}22\text{ fb}. \quad (63)$$

これらのテンプレート再スケールによる範囲は、それらの下端かそれ以下に落ち着く第 31 節の明示的なパートン・ルミノシティ計算（表 19）によって置き換えられる（例えば 13 TeV、LO×K で $\sigma \times \text{BR}(g^* \rightarrow t\bar{t}) = 8.7 [7.0-12] \text{ fb}$ ）；比較のため、読み出し II の推定値は見える形で残しておく。

シナリオ A の再スケール。 T-KK-2 の自由場シナリオでは八重項は 2.46 TeV にあり、そこでの $q\bar{q}$ パートン・ルミノシティは 3.85 TeV におけるそれより 24.5 倍大きい（表 18: 1.462/0.0596）。同じ読み出し II の入力はそのとき $\sigma(pp \rightarrow g^*) \times \text{BR}(t\bar{t}) \approx 210 \text{ fb}$ — 第 31.4 節のシナリオ A のレート — へと再スケールされ、これはシナリオ B の標的より一桁大きく、それゆえ F-KK-2A の広幅八重項による再解釈はこのシナリオを速やかに決着させる：これらのレートでは、既存のデータがそれを含んでいるか、あるいはそれを閉じるかのいずれかだからである。これらの数は本節の他の部分と同じモデル級のラベルを担う。

見返り：明確に定義された、直近の LHC 目標（シナリオ B; シナリオ A は上記）。 3.85 TeV におけるカラー八重項の $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) \approx 11-22 \text{ fb}$ は、現行の ATLAS/CMS による $t\bar{t}$ 共鳴 KK グルーオン排除（この質量で $\sim 10-20 \text{ fb}$; [ATLAS Collaboration, 2025a](#)）の真上に位置する。これは、読み出し I には供給できなかった具体的な標的を読み出し II が供給するということである：3.85 TeV におけるカラー八重項専用の $t\bar{t}$ 再解釈は、超過を確認するか、 $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) \lesssim 10 \text{ fb}$ を排除するかのいずれかである — そして後者は、既にテーブル上にあるデータによって、現行の実装のスピン 1 セクターを いま退役させる。言い換えれば、読み出し II は構造的な F-KK-2 を数に変え、また $M_{\text{lock}} = 3.85 \text{ TeV}$ がなぜ安全に手の届かない先ではなく、まさに今日のデータ・フロンティアに落ちるのかを説明する。

読み出し II の誠実な立ち位置。 読み出し II は読み出し I の内側に 入れ子 になっている：II = I + {B1-B4}。外部仮定が破綻したとしても動くのは レート だけである；導出された質量 M_{lock} 、 v との過剰拘束、そしてツリーレベルのレプトフォビアは、読み出し I に属するがゆえに影響を受けない。したがって我々は II を I の対抗物としてではなく、実験家が求めてきた実行可能な拡張として、その荷重を担う仮定を卓上に載せた形で提示する。式 (61) および表 12 の数を用いる際には、必ず「経験的に係留された推定（モデル級）」というラベルを付すべきであり、けっして「GG-6 の予言」と呼んではならない。

第 V 部は誠実さの線を引いた。読み出し I は定理級の核 — 質量、ディリクレ・ベクトル—グラビトン縮退、ツリーレベルのレプトフォビア — であり、外部の助けなしに引用できる；読み出し II は四つの宣言された外部仮定を加え、その引き換えに、実験が計画の基準としうる実行可能な断面積を生み出す；そしてグラビトン・セクターにおける唯一の推定された結合は、その後、古いブラケットの最下端に位置する厳密な結果によって置き換えられた。本論文のあらゆるレートは、いまやその素性を袖に付けている。数が確立され格付けされたところで、次の部は信号が実際にどのように見えるのかに向かう：いかなるレートの不確かさをも洗い流すことのできない形状 — 角度、偏極、そして定理によって固定された干渉符号を伴うラインシェイプ — である。

20 第 V 部を平易な言葉で：本論文が予言する二つのもの、そしてそのどちらが議論の対象となりうるか

予測を行う論文における誠実さは、その大半が帳簿付けであり、この部はその帳簿付けである。

表 13: 二つの読み出しの並置。読み出し I は定理級でレートを持たない; 読み出し II は仮定 B1–B4 を加えて実行可能なレートを得る。読み出し I は定理のみが与えるものであり、レートについては沈黙している; 読み出し II は四つの名前付き仮定を加え、共同実験が行動しうる数を得る。B1 から B4 までを拒否する読者にもなお試験すべき予言が残っており、それがどれであるかを正確に見て取れるべきであるから、両者を別々の列に保つことが誠実な形式である。

量	読み出し I (定理のみ)	読み出し II (A + B1–B4)
質量スケール M_{lock}	3.849 TeV、導出済み	同じ (A から継承)
スピン内容	G_1 ; $\approx M_{\text{lock}}$ に g^* , Z'_B	同じ
レプトフォビア	ツリーレベルで $\text{BR}(Z'_B \rightarrow \ell^+ \ell^-) = 0$ (ループ床は登録済み、O-KK-61)	同じ
結合 κ_{gg}	$c_K/K = 0.0136$ 、導出済み (T-KK-2c)	$\approx 1/\sqrt{K}$ (推定値; 置き換えられた)
チャンネル BR	順序付けのみ (トップに富む)	数值的 (表 12)
絶対 σ	外部 PDF を用いれば従う (第 31 節)	$\sim 10\text{--}20$ fb (表 19 によって置き換えられた)
反証子	二段構えの F-KK-1 + F-KK-2 (八重項が HL-LHC を担う)	3.85 TeV における数值的な $t\bar{t}$ 標的
実験家を得るもの	探索すべき 形状	計画の基準となる レート

読み出しは二つあり、別々の列に保たれている。第一のものは、定理のみが与えるものである: 位置、比、そして形状であって、何かがどれほどの頻度で生成されるのかについての言明は含まない。それは言うことがより少ないからこそ、より強い主張である — そこには調整できるものが何もなく、読者が拒みうる仮定に依存するものも何もない。

第二のものは四つの名前付き仮定を加え、レートを得る。レートは共同実験が実際に必要とするものであるから、この部はそれを供給する; しかしレートは仮定が担うすべてを担うのであり、仮定にラベルを付して印刷してあるのは、そのうちの一つを拒否する読者が、それとともに何が崩れるのかを正確に見て取れるようにするためである。

分離する理由は、どちらに対しても探索を実行できるという点にある。第一の読み出しのみを受け入れる者にも、なお標的は残る: クラスターの配置、角度構造、ラインシェイプである。これらは規格化に依存しないため、誤ったレートを完全に生き延びる。第二のものを受け入れる者は、さらに日程表をも得る。二つを一つの数に潰していれば、論文はより決定的に見えたであろうし、また退けることもより容易になっていたであろう。

第 VI 部

$t\bar{t}$ 信号の解剖

クラスター仮説の導出された角度構造、偏極、およびラインシェイプ構造

21 この部が何を加えるのか、そしてどのグレードで加えるのか

第 13 節は $t\bar{t}$ が中心的な戦場であると論じ、重いスピン 2 の状態と重いスピン 1 の状態は「異なる角度構造と運動学的構造をもつトップ対を生成する」と主張した。その種の主張は、構造が書き下され、導出され、数値を与えられて初めてその存在価値を持つ。この部はまさにそれを、ATLAS や CMS の解析チームが一行ずつ検証できる詳細さで行う：各ロック・クラスター構成員 — カラー八重項 g^* (スピン 1、HL-LHC 反証子の担い手)、レプトフォビックな Z'_B (スピン 1、カラー一重項; その Q_i 兄弟は生成されず、同じ形状の行を持つため、別立てでは挙げない)、そしてグラビトン G_1 (スピン 2) — について、生成角分布、トップ偏極、前後非対称性、 QCD 連続背景との干渉を含む共鳴ラインシェイプ、および背景に対する相対収量を、いずれも T-KK-2、系 T-KK-2c、L-KK-1 が既に固定または挟み込んだ結合から導出する。この部のいかなる部分も新たなパラメータを導入しない。続いて第 VIII 部は、これらの形状を検出器へと持ち込む：公表された Run-2 解析に係留された ATLAS/CMS 測定 of 完全なシミュレーションと、それらが含意する発見カレンダーである。

コホートの格付けの梯子は条項ごとに適用される。[T] 定理級の入力：質量、符号を含む $\xi_{UV} = -0.194$ 、ツリーレベルのレプトフォビア、 $\kappa_{gg} = c_K/K$ 、およびカラーの割り当て；ベクトル的な軽クォーク結合 ($g_A^q = 0$) は、紫外フェルミオンごとに一つのプロファイルという条件に導出条件付きである。[D*] 導出条件付き：自由場の運動学、 $LO \times K$ の QCD 、トップ重なるの帯 $r_{t_R} \in [4, 5]$ 。[M] その後に第三項目 $g_B = 0.565$ へと確定した、 g_B についての L-KK-1 メニュー (T-BI6-6.4; 第 10.10 節) — ブラケット全体にわたって引用された行は依然として正しく、確定した列は第三列である。[E] 外部の標準模型入力：PDF、 α_s の規約、公表された K 因子。この部の見出しを先に述べておく：角度形状、 G_1 における P_t の消失、干渉の符号、そして八重項とディリクレ・ベクトルとの間の干渉の有無という二分は [T] 級の形状予言であり、 A_{FB} のゼロは一プロファイル言明に導出条件付きである — そのいずれもが K 因子やパートン分布のいかなる改訂をも生き延びる。

全体を通じて用いる入力。表 6 および第 10.4 節–第 10.10 節より：四つの状態はすべて $M_{lock} = 3.849$ TeV にある (シナリオ B)；軽クォークは振幅 $\xi_{UV} = -0.194$ [T] で結合し、紫外フェルミオンについての一プロファイル言明の下ではベクトル的である (両カイラリティが一つのプロファイルを共有し、したがって $g_A^q = 0$; 導出条件付きであり、第 23 節の系である)；トップのカイラリティは $r_{t_L} = 1.0$, $r_{t_R} = 4.5$ [D*] であり、これがベクトル／軸性の分解を与える

$$g_V^t = \frac{1}{2}(r_{t_R} + r_{t_L}) = 2.75 g_s, \quad g_A^t = \frac{1}{2}(r_{t_R} - r_{t_L}) = 1.75 g_s, \quad g_A^t/g_V^t = 0.636. \quad (64)$$

極におけるトップの運動学: $\beta_t = \sqrt{1 - 4m_t^2/M_{\text{lock}}^2} = 0.99597$ であり、したがって $1 - \beta_t^2 = 4m_t^2/M_{\text{lock}}^2 = 0.0080$ である: 以下のあらゆる質量補正は計算されたパーセント水準の効果であって、無視された効果ではない。幅は、式 (40) と第 10.9 節より: $\Gamma_{g^*} = 561 \text{ GeV}$ ($\Gamma/m = 0.146$; 部分幅は $t\bar{t}$: 528, $b\bar{b}$: 26, $j\bar{j}$: 7 GeV)、 $\Gamma_{G_1} = 243 \text{ GeV}$ ($\Gamma/m = 0.063$)、そして $\Gamma_{Z'_B}$ は記載しない — ディリクレ・モードではそれはトップの開いた深さの重なりだからである (O-KK-59; 以前の改訂におけるノイマン・モードの 123 GeV は撤回された)。

LO×K でのレート。 表 19 の主要次レートは、ここではチャンネルに応じた公表 K 因子 [E] によって引き上げられる: 質量を持つカラー八重項ベクトルの生成に対して $K_{q\bar{q}} \simeq 1.3$ (Chivukula et al., 2012)、スピン 2 生成に対して $K_{gg} \simeq 1.6$ (Mathews & Ravindran, 2005)。したがって 13 TeV で $\sigma \times \text{BR}(g^* \rightarrow t\bar{t}) = 8.7 [7.0\text{--}12] \text{ fb}$ 、14 TeV で 13.6 [11–19] fb である; G_1 : 0.045 [0.021–0.10] fb; Z'_B : ディリクレ・モード上ではツリー準位でゼロである (O-KK-59)。八重項の分岐パターン: $t\bar{t} : b\bar{b} : j\bar{j} \approx 70 : 3.5 : 1$ ($\text{BR}(t\bar{t}) = 0.94$, $r_{tR} \in [4, 5]$ に対して帯域 0.93–0.95) — それ自体が反証可能な比である。本部の他のすべては形状に関わるものであり、そこでは K 因子と PDF 不確かさが大部分打ち消し合う。

22 干渉を伴う $m_{t\bar{t}}$ ラインシェイプ

22.1 振幅とカラー代数

$q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ では、カラー八重項は QCD グルーオンと同じカラー・チャンネルに入るため、振幅はコヒーレントに加算される:

$$\mathcal{M} = \left[\underbrace{\frac{g_s^2}{\hat{s}}}_{\text{QCD}} + \underbrace{\frac{g_s \xi_{UV} \cdot g_s (g_V^t + g_A^t \gamma_5)}{\hat{s} - M_{\text{lock}}^2 + i M_{\text{lock}} \Gamma_{g^*}}}_{g^*} \right] (\bar{v}_q T^a \gamma^\mu u_q) (\bar{u}_t T^a \gamma_\mu (\cdots) v_t). \quad (65)$$

$T^a \otimes T^a$ が両方の項に共通であるため、干渉は完全なカラー重みを担う — $1/N_c$ のペナルティはない。二つの構造的帰結が直ちに従い、いずれも [T] グレードを持つ。(i) カラー一重項の Z'_B については対応するカラー・トレースが消え、 $\text{Tr } T^a = 0$ である: Z'_B は純粋なブライト-ウィグナーとして連続背景の上に乗る、QCD 干渉は厳密にゼロである。八重項とディリクレ・ベクトルは、シナリオ B では縮退しており、したがって質量や角度によってではなく、干渉の有無という二分法によって区別される — 調整可能な要素を一つも持たない予言である。(ii) gg から生成されるスピン 2 の G_1 はヘリシティ ± 2 を占め (第 23 節)、角度積分の後には QCD のベクトル・チャンネルと直交する; その干渉は本論文のレートでは無視できる。

22.2 二乗: 三つの項と V/A 代数

トップ頂点を $g_V^t + g_A^t \gamma_5$ と書く。(65) を二乗すると $|\text{QCD}|^2$ 、交差項、および $|g^*|^2$ が生じる。角度積分は二種類の項を消す: 単一のフェルミオン線上の $V \times A$ 積は $\cos \theta^*$ について積分するとゼロになり (それらは奇であり、 $\propto 2 \cos \theta^*$; これは以下の u, d, s, c 始状態に対する $A_{FB} = 0$ という主張でもある)、また軽いクォークについては紫外フェルミオンごとに一つのプロファイルという立場の下では q 側の軸性部分はまったく存在せず、 $g_A^q = 0$ [D*] である。生き残る角度積分は教科書的な次

の対である

$$\int_{-1}^1 (1 + \cos^2 \theta^* + (1 - \beta_t^2) \sin^2 \theta^*) d \cos \theta^* = \frac{8}{3} (1 + \frac{\rho}{2}), \quad \int_{-1}^1 \beta_t^2 (1 + \cos^2 \theta^*) d \cos \theta^* = \frac{8}{3} \beta_t^2,$$

これらはそれぞれベクトルおよび軸性のトップ・カレントに対応する ($\rho \equiv 4m_t^2/\hat{s}$; ベクトル・カレントはしきい値因子 $1 + \rho/2$ を保ち、軸性カレントは β_t^2 抑制を保つ — 式 (39) の標準的な Z' 幅の代数である)。共鳴領域における微分レートはこのとき

$$\frac{d\sigma}{dm} \Big|_{q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}} = \frac{8\pi\alpha_s^2}{27} \beta_t \frac{d\mathcal{L}_{q\bar{q}}}{dm} \times \left[\underbrace{\frac{1 + \rho/2}{\hat{s}}}_{\text{SM}} + \underbrace{2 \operatorname{Re} D(\hat{s}) \xi_{UV} g_V^t (1 + \frac{\rho}{2})}_{\text{interference}} + \underbrace{\hat{s} |D|^2 \xi_{UV}^2 (g_V^{t2} (1 + \frac{\rho}{2}) + g_A^{t2} \beta_t^2)}_{\text{Breit-Wigner}} \right], \quad (66)$$

となる。ここで $D(\hat{s}) = (\hat{s} - M_{\text{lock}}^2 + iM_{\text{lock}}\Gamma_{g^*})^{-1}$ であり、 $d\mathcal{L}_{q\bar{q}}/dm$ は u, d, s, c のルミノシティである。分母は定幅形であり、この規約を明示するのは生成器がそれを推測してはくれないからである：いくつかの実装が既定で持つランニング幅処方 $\hat{s}/(\hat{s} - M^2 + i\hat{s}\Gamma/M)$ は、同じ入力に対して窓積分をおよそ五パーセント小さくし、幅が 14.6% の状態を 2.4 TeV の窓にわたって積分する場合、両者は交換可能ではない。関連する区別が一つこれに付随する：この規約において M_{lock} は伝播関数の質量パラメータであって、複素極ではない。ランニング幅の分母では、同じベンチマークは $\sqrt{s_p} = 3.8186 - 0.2776i$ TeV を持ち、その実部は入力より 30.4 GeV 低く、 $-2\operatorname{Im}\sqrt{s_p} = 555.1$ GeV が $\Gamma_{g^*} = 561$ GeV に対応する; 3.848958526 TeV という印字された桁は指数関数を記録したものであって測定された極ではなく、二つのスキームは整合を取らずに交換してはならない。導出された各量がどこに位置するかに注意せよ： ξ_{UV} は干渉に線形に入り（符号は観測可能）、ブライト-ウィグナーには二次で入る（符号は隠れる）；干渉するのは g_V^t のみである、なぜなら QCD はベクトル・カレントだからである。

22.3 符号定理

極の下では $\operatorname{Re} D < 0$ であり、上では > 0 である。T-KK-2 は $\xi_{UV} = -0.194 < 0$ を導出する（厳密モードの紫外端点振幅、式 38）、一方 $g_V^t = +2.75 > 0$ である；したがって $\xi_{UV} g_V^t < 0$ であり：

干渉は 3.849 TeV より下では建設的であり、上では破壊的である。この順序は調整可能ではない — それは T-KK-2 が剛的な幾何から得た、導出された相対符号 $\xi_{UV} < 0 < \xi_{IR}$ の観測可能な像である。ロック・スケールにおいて上で超過・下で不足というパターンが観測されれば、いかなるレート測定とも独立に、T-KK-2 の重なり構造は端的に反証される。一般的な同符号のカラロンは逆の順序を予言するので、この観測量は g^* を最も近い現象論的な類似物からも分離する。

22.4 数値と観測可能な帰結

式 (66) を CTEQ6M ルミノシティと畳み込む（本小節を通じて LO である — 内容は比の構造である）：2.8–5.2 TeV の窓における積分された干渉は、極の下で +3.75 fb、上で −0.48 fb である（しきい値から積分すると建設的な項は ≈ 1 pb であり、 $q\bar{q}$ 連続背景の二パーセント程度のコヒーレントな持ち上げである — 第 44.5 節のサイドバンド汚染を積分した形であって、共鳴探索が数え上げられる信号ではない）。6.7 fb のブライト-ウィグナーに対して正味 +3.3 fb である：干渉は信号の半

分であって、補正ではない、そして純粋なブライト-ウィグナー・テンプレートはレートと質量の双方を誤って測る。表 14 は超過対連続背景のプロファイルを与える; 図 6 がそれを描く。観測可能な帰結は三つある: 共鳴の低い側は太らされ (建設的な肩)、高い側はブライト-ウィグナーより速く崩れ、 $\simeq 4.87$ TeV で標準模型の連続背景を下に横切り (連続背景が ~ 0.05 ab/GeV であるところで 20% 程度の局所的な不足)、そして見かけの重心は 3.849 TeV より $O(100)$ GeV 下に引かれる — 落ちてゆくルミノシティと建設的な低い側は同じ向きに引き、これを無視したフィットはずれた質量を報告する。 G_1 はほとんど見えない対称なこぶを加える (その窓にわたって LO で 0.03 fb); Z'_B は厳密に対称な純粋ブライト-ウィグナーを加えるはずであるが、ディリクレ・モード上ではツリー準位で何も加えない (ノイマン・モードの参照帯域 0.016–0.59 fb はレートとしては撤回されている)。

表 14: g^* 信号の超過対連続背景プロファイル、LO/LO、 $\sqrt{s} = 13$ TeV: 式 (66) の共鳴項の QCD 連続背景に対する比 $(S+I)/B$ 、および干渉部分とブライト-ウィグナー部分を個別に示す。極をまたぐ干渉の符号反転と、 $\simeq 4.87$ TeV における正味不足への横断が、形状の反証子である。

$m_{t\bar{t}}$ [TeV]	3.0	3.3	3.6	3.849	4.1	4.4	4.7	5.0
$(S+I)/B$	2.3	4.6	11.4	18.7	8.9	2.2	0.40	-0.21
干渉 $/B$	+1.5	+2.3	+3.2	0.0	-4.1	-3.7	-3.0	-2.5
ブライト-ウィグナー $/B$	0.8	2.4	8.3	18.8	13.0	5.9	3.4	2.3

23 ヘリシティ振幅から得られる角度構造

23.1 規約と二つのウィグナー行

θ^* を $t\bar{t}$ 静止系におけるトップの運動量とビーム-パートン軸との間の角とする。ビームに沿ってヘリシティ λ_R で生成され、ヘリシティ差 $\Delta\lambda = \lambda_t - \lambda_{\bar{t}}$ を持つ $t\bar{t}$ 対へと崩壊するスピン J の共鳴について、崩壊振幅は $\mathcal{A} \propto d_{\lambda_R, \Delta\lambda}^J(\theta^*) \mathcal{H}_{\Delta\lambda}$ と因子化し、ここで $\mathcal{H}$ が動力学 (結合、 β_t) を担い、ウィグナー関数が角度依存性のすべてを担う。以下で用いる要素は次のとおりである:

$$d_{1,\pm 1}^1 = \frac{1 \pm \cos \theta^*}{2}, \quad d_{1,0}^1 = -\frac{\sin \theta^*}{\sqrt{2}};$$

$$d_{2,1}^2 = -\frac{\sin \theta^* (1 + \cos \theta^*)}{2}, \quad d_{2,-1}^2 = \frac{\sin \theta^* (1 - \cos \theta^*)}{2}.$$

どの行が占められるかは三つの動力学的事実が定める。(a) ベクトル結合を持つ質量ゼロのクォークは $\lambda_q - \lambda_{\bar{q}} = \pm 1$ を持つ: $q\bar{q}$ から生成されるベクトルは $\lambda_R = \pm 1$ のみを担う ($\lambda_R = 0$ は $m_q/\sqrt{s} \rightarrow 0$ を代償とする)。(b) 二つの質量ゼロのグルーオンは $J_z \in \{0, \pm 2\}$ を与え、横波トレースレスの重力子結合は $|\lambda_R| = 2$ を選ぶ ($J_z = 0$ の組み合わせはトレースを通じて入るが、殻上では存在しない)。(c) ベクトルまたはテンソル・カレントから生じるトップ対は $\Delta\lambda = \pm 1$ を占め、 $\Delta\lambda = 0$ は振幅においてスピノルの不整合 $\sqrt{1 - \beta_t^2} = 2m_t/\sqrt{s} = 0.090$ によって、すなわちレートにおいて 0.8% に抑制される。

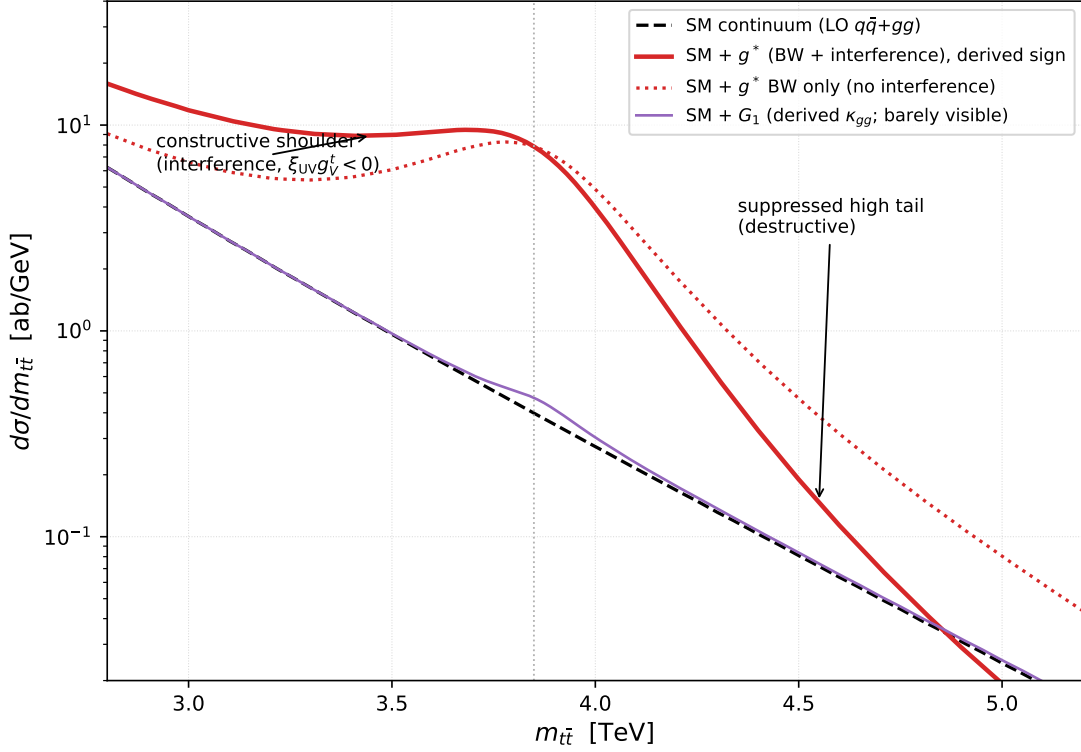


図 6: $\sqrt{s} = 13$ TeV におけるロック・スケール近傍の LO $m_{t\bar{t}}$ スペクトル。赤実線: 導出された符号 $\xi_{UV} g_V^t < 0$ のもとで式 (66) の完全な干渉を含む SM + g^* ; 赤点線: ブライト-ウィグナーのみ。建設的な低い側の肩、高い尾部の破壊的な崩壊 ($\simeq 4.9$ TeV で SM を下に横切る)、および G_1 (紫) のほぼ不可視性が、三つの構造的シグネチャである。数値は表 14 にある。

23.2 $q\bar{q}$ からのスピン 1: 導出

$\lambda_R = +1$ について (a) と (c) を組み合わせ (-1 の行は鏡像である)、観測されない終状態ヘリシティについて和を取ると:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{d\cos\theta^*} &\propto |d_{1,1}^1|^2 + |d_{1,-1}^1|^2 + (1 - \beta_t^2) |d_{1,0}^1|^2 \\ &= \left(\frac{1 + \cos\theta^*}{2}\right)^2 + \left(\frac{1 - \cos\theta^*}{2}\right)^2 + (1 - \beta_t^2) \frac{\sin^2\theta^*}{2} = \frac{1 + \cos^2\theta^*}{2} + (1 - \beta_t^2) \frac{\sin^2\theta^*}{2}. \end{aligned} \quad (67)$$

$[-1, 1]$ 上で規格化し、 $1 - \beta_t^2 = 0.0080$ を代入すると:

$$\left. \frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\cos\theta^*} \right|_{\text{spin 1}} = \frac{3}{8} \left[(1 + \cos^2\theta^*) + 0.0080 \sin^2\theta^* \right] / (1 + 0.0040) \simeq \frac{3}{8} (1 + \cos^2\theta^*). \quad (68)$$

同じ形は、トップ結合がカイラルであるにもかかわらず、 g^* と Z'_B の双方について成り立つ: カイラリティは強度を λ_t 状態の間で移動させる (第 24 節) が、生成角の間では移動させない、なぜなら軽クォーク側がベクトルのだからである。数値的には: $|\cos\theta^*| = 0.9$ における分布は 0 におけるその

値の $(1 + 0.81)/(1 + 0) = 1.81$ 倍であり、事象の 39% が $|\cos \theta^*| > 0.7$ に落ちる。

系: $A_{FB} = 0$ [**D***]. 前後非対称性は $\cos \theta^*$ について奇の項を必要とし、それは積 $g_A^q g_A^t$ からのみ生じる。軽クォークの軸性結合 g_A^q は、紫外フェルミオンごとに一つの動径プロファイルが両方のカイラリティに供される場合に消える — これは本論文が最初の二世代について採用するプロファイル主張であり、カスケード深さの補題がまだ証明していないものである（トップ自身は $r_{t_L} \neq r_{t_R}$ として扱われるため、この主張は世代依存である） — その場合、共鳴的な A_{FB} は、いかなるトップ結合においても、それらの始状態からは、スピン 1 の両方の構成員について消える。 $b\bar{b}$ 始状態は例外であり、それを例外にしているのは本論文自身の割り当てである: $r_{b_L} = 1.0$ と $r_{b_R} = \xi_{UV}$ のもとでボトム頂点はカイラルであり、 $v_b = +0.403$, $a_b = -0.597$ であるから、それについては $g_A^q \neq 0$ となり、 $\cos \theta^*$ について奇の項が生き残る。 M_{lock} における $b\bar{b}$ ルミノシティは軽クォークの総和のごく一部であるから、五フレーバーの共鳴非対称性はゼロではなくパーセント水準である。それは小さいが、この系が以前に主張したゼロではない; 主張は、 u, d, s, c 始状態からは厳密に $A_{FB} = 0$ であると修復され、 b チャンネルはいかなるフィットにおいても別途担われる。したがってこの系は定理ではなく導出条件付きであり、いまや始状態ごとに分解されてもいる。(連続背景における QCD-電弱干渉に由来する、計算可能で小さい $\cos \theta^*$ 奇の汚染は、共鳴の性質ではない。) 共鳴非対称性が測定されれば重なり構造は反証される; それは同じくらい明快に、大きな A_{FB} を定義的シグネチャとするアキシングルーオンを採択することにもなる。この系は、符号定理と同様に、何の代償も要さず、枠組みをキルしうる。

23.3 gg からのスピン 2: 導出

$\lambda_R = +2$ について (b) と (c) を組み合わせると:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{d\cos\theta^*} &\propto |d_{2,1}^2|^2 + |d_{2,-1}^2|^2 = \frac{\sin^2\theta^*}{4} \left[(1 + \cos\theta^*)^2 + (1 - \cos\theta^*)^2 \right] \\ &= \frac{\sin^2\theta^* (1 + \cos^2\theta^*)}{2} = \frac{1 - \cos^4\theta^*}{2}, \end{aligned} \quad (69)$$

$$\boxed{\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\cos\theta^*} \Big|_{G_1} = \frac{5}{8} (1 - \cos^4\theta^*) + O(1 - \beta_t^2).} \quad (70)$$

この分布はビームに沿って消える — そこでピークを持つ (68) との、可能な限り最大の対比である。もし重力子が $q\bar{q}$ から生成されていたなら、分布は代わりに $1 - 3\cos^2\theta^* + 4\cos^4\theta^*$ となっていたはずである; GG-6 では $q\bar{q}$ 結合は系 T-KK-2c によって無視できるので、純粋な gg の形 (70) はベンチマークの選択ではなく導出された予言である — これは一般的な RS テンプレートが主張できない純度であり、それ自体が一つの検証でもある: 観測されたスピン 2 信号に $q\bar{q}$ 型が混ざっていれば、導出された平坦な重なり階層と矛盾する。

23.4 定量化された分離能力

$|\cos \theta^*| > 0.7$ にある事象の割合は 0.39 (スピン 1) に対して 0.17 (スピン 2) である; 図 7 が両方の形状を描く。形状のみによる仮説検定については、(68) と (70) の対称化されたカルバックライブラー・ダイバージェンスは事象あたり $\overline{\text{KL}} = 0.212$ であり、 3σ および 5σ の識別に対して

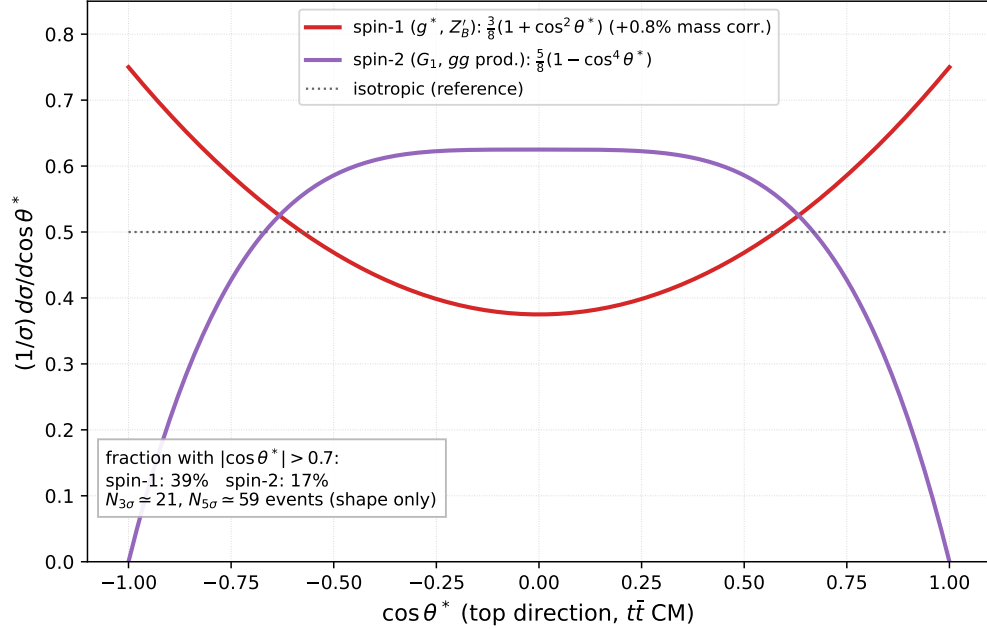


図 7: 3.849 TeV における規格化された生成角分布、式 (68)–(70)。スピン 1 の形はビームに向かって上昇する; gg から生成されるスピン 2 の重力子はそこで消える。再構成された事象 21 個が、形状のみによって 3σ で仮説を分離する。

$N_{3\sigma} = 9/(2\overline{\text{KL}}) \simeq 21$ 事象と $N_{5\sigma} \simeq 59$ 事象を与える。代表的なブースト・トップのアクセプタンス・カット $|\cos\theta^*| < 0.85$ (ビーム領域は検出器が最も弱いところである) を畳み込むと、これらは $N_{3\sigma} \lesssim 40$ に上がる (二つの方向を合算したもの; 方向の平均で見れば数は $\simeq 82$ である) — それでも期待される信号収量 (第 26 節) より一桁小さい。

24 トップ偏極とスピン相関

24.1 縦偏極: $P_t = +0.91$ 対ゼロ

$\beta_t \rightarrow 1$ ではカイラリティはヘリシティと一致するため、共鳴は右巻きと左巻きのトップを $r_{t_R}^2 : r_{t_L}^2$ の比で占める。したがって縦偏極は純粋な結合比である — PDF、K 因子、ルミノシティ、さらには ξ_{UV} にさえ依存しない:

$$P_t = \frac{r_{t_R}^2 - r_{t_L}^2}{r_{t_R}^2 + r_{t_L}^2} = \frac{20.25 - 1}{20.25 + 1} = +0.906, \quad P_t \in [+0.88, +0.92] \quad (r_{t_R} \in [4, 5] \text{ のとき}), \quad (71)$$

これは g^* について、また結合する限りにおいて Z'_B についても同一であり、有限質量による希釈は $O(1 - \beta_t^2)$ においてのみ入る。 G_1 については結合はパリティ偶の $T^{\mu\nu}$ である: $P_t = 0$ が恒等的に成り立つ [T]。したがって偏極は、衝突器連鎖の唯一の $[D^*]$ 入力 — カスケード深さ比 r_{t_R}/r_{t_L} — を直接測定し、その符号 (右巻き) は t_R が t_L よりも赤外側に深く位置するという主張、すなわち Arisaka (2026, A9-SM) のカスケード順序の直接的な像である。

測定。 トップ静止系において、 $t \rightarrow bW \rightarrow b\ell\nu$ から生じる荷電レプトンは、主要次で単位の解析能をもってトップのスピンを解析する ($\alpha_\ell = 1$ 、これは V-A 弱頂点の帰結である)：

$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{d\cos\theta_\ell} = \frac{1}{2}(1 + P_t \alpha_\ell \cos\theta_\ell), \quad \theta_\ell \equiv \angle(\ell^\pm, \text{トップ} \cdot \text{スピン軸}), \quad (72)$$

したがって GG-6 のスピン 1 仮説は $+0.91$ の傾きを予言し、スピン 2 仮説は平坦な直線を予言する：レプトン側のトップが $\sim 10^2$ 個あれば、両者は $> 5\sigma$ で分離される。相補性に注意せよ：生成角 (第 23 節) は共鳴のスピンを検証する；レプトンの傾きはそのカイラリティ構造を検証する；二つの観測量は独立に破れる。

24.2 スピン相関：識別変数ではなく、整合性チェック

スピン 1 ($\lambda_R = \pm 1$) とスピン 2 ($\lambda_R = \pm 2$) の崩壊はいずれも、 $\beta_t \rightarrow 1$ において $\Delta\lambda = \pm 1$ を占有する：対は $\lambda_t = -\lambda_{\bar{t}} = \pm \frac{1}{2}$ をもって現れる (ヘリシティ・ラベルは逆符号であり；運動量が背中合わせであるため、スピンは空間的に揃っている)。この相関構造は二つのスピンについて同一であり、したがって $t\bar{t}$ スピン相関はここでそれらを分離しない；それらが実際に検証するのは、 $\Delta\lambda = 0$ の質量抑制の普遍性 (両者について 0.8%) である。我々がこれを正直に明記するのは、スピン相関が一般的なスピン解析装置として喧伝されることがあるからである； $\beta_t = 0.996$ においてはそうではない — 識別変数は θ^* 、 P_t 、およびラインシェイプである。

25 系の運動学

gg と $q\bar{q}$ の始状態は異なるパートンの x 分布を標本化するため、 $t\bar{t}$ 系のラピディティは原理的には G_1 をスピン 1 のメンバーから区別する。しかし $m_{t\bar{t}} = 3.849$ TeV においては、位相空間が $|y_{t\bar{t}}| < \ln(\sqrt{s}/m) = 1.22$ に閉じ込め、正直な判定はこの識別変数が弱いというものである： $\langle |y| \rangle = 0.29$ (gg) に対して 0.32 ($q\bar{q}$) であり、 $|y| > 0.5$ にある事象は 16% に対して 21% である (図 8)。ラピディティは整合性チェックであってスピン測定ではなく、我々がそう述べるのは、「 gg は中央、 $q\bar{q}$ は前方」という俗説が、ロック・スケールの運動学が供給し得る以上のものを約束するからである。頑健な運動学的事実はより単純であり、かつ解析に直結する：各トップは $p \simeq M_{\text{lock}}/2 = 1.92$ TeV をもって現れ ($\gamma_t \simeq 11$ 、崩壊円錐は $\approx 2/\gamma_t \approx 0.18$) — まさに大きな R のトップ・タギングの領域である；そして g^* の幅はブライト-ウィグナーの $\sim 50\%$ を $|m_{t\bar{t}} - 3849| < 280$ GeV の内側に置き、これは合流チャンネルの 10% の実験的 $m_{t\bar{t}}$ 分解能 (385 GeV、第 38.5 節) より広いが、大幅にはなく、したがって観測される幅は同程度のスミアリングと畳み込まれた物理であるのであり、第 22 節のラインシェイプ計画は、応答がアンフォールドされさえすれば測定可能である。

26 連続背景、S/B、および収量

LO の標準模型連続背景 ($q\bar{q} + gg \rightarrow t\bar{t}$ 、コンブリッジの公式、 $\mu = m_{t\bar{t}}$ 、本論文の α_s 規約) は 13 TeV において $\sigma_{t\bar{t}}^{\text{LO}} = 331$ pb に積分される — NNLO+NNLL の 833 pb を期待どおりの因子 ~ 2.5 だけ下回っており、LO $t\bar{t}$ のよく知られたスケール感受性を反映している；したがって我々はこれを比においてのみ用いるのであって、そこでは信号と連続背景の K 因子が大部分相殺する (ここでは両辺とも LO である)。ロック・スケールにおいて連続背景は $d\sigma/dm_{t\bar{t}} = 1.5$ ab/GeV である。八重

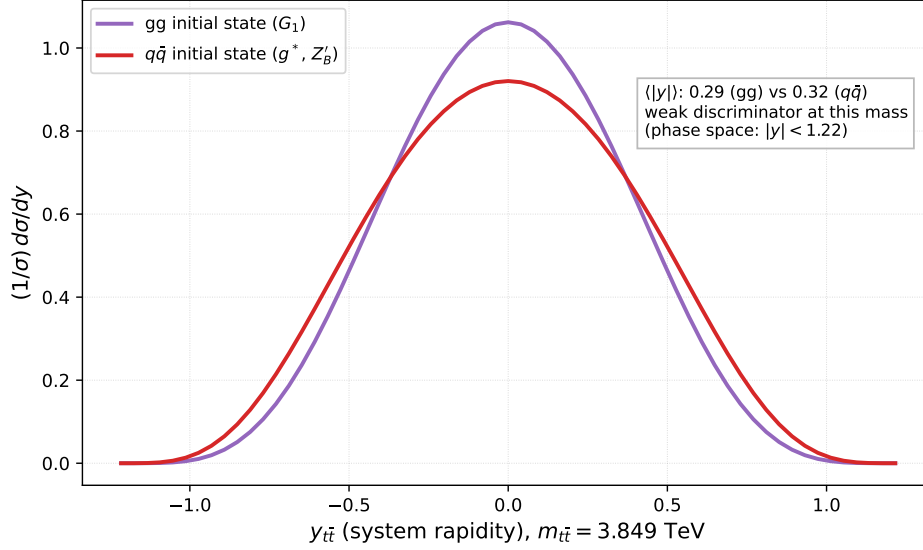


図 8: 二つの始状態についての、 $m_{t\bar{t}} = 3.849$ TeV における規格化された $t\bar{t}$ 系のラピディティ (CTEQ6M)。識別は実在するが弱い — そのとおりに報告される。二つの始状態は二つのラピディティ形状を与えるが、それらのあいだの分離は、角度分布やラインシェイプにおける分離よりも小さい。それでもなお図示され、脚注ではなくキャプションにおいて弱いと記述されているのは、最も強いメンバーだけを示す識別の一式が、解析が実際に手にするものを誤って伝えることになるからである。

項の窓 $|m_{t\bar{t}} - 3849| < \Gamma/2 = 280$ GeV においては: 連続背景 0.95 fb に対してブライト-ウィグナー信号 3.34 fb である —

$$\boxed{S/B|_{\text{window}} = 3.5 \text{ (干渉による利得の前)}, \quad (S+I)/B|_{\text{pole}} = 19.} \quad (73)$$

3 ab^{-1} あたり: 窓のなかで $\sim 10^4$ の信号事象が生成される; $\text{BR}(\ell + \text{jets}) = 0.29$ と 12% の代表的なブースト選別効率 [E] をもって、再構成されたレプトン+ジェット事象は ~ 350 であり、これは全ハドロニック標本を加える前である — 21 事象のスピンの分離、 P_t の傾き、および多ビンのラインシェイプ・フィットを同時に行うのに十分である。(第 VIII 部の係留された計数はより大きく、3.29 ab^{-1} において 3.0–4.9 TeV の窓のなかで 3223 の信号事象であるが、それはより広い窓を 14 TeV において K 因子と正味の干渉とともに数え、かつレプトン+ジェットの取り分に対する 12% の参照効率ではなく、係留解析の $\varepsilon_A = 6.5\%$ をすべての崩壊モードに対して用いているからである; 二つの計算はそれらの入力が増えられれば一致する。) 同じ計算は他の二つのメンバーを背景の側から確認する: G_1 はその窓において $S/B = 0.04$ をもち (系 T-KK-2c がレート of the side から結論したとおり、LHC では不可視である)、 Z'_B はノイマン・モード上の以前のメニューの最上端においてすら $S/B = 0.47$ にしか達しなかった — そしてディリクレ・モードにおいてはツリー・レベルで何も寄与しない (O-KK-59)。

27 識別行列と事前登録された指紋

表 15: 3.849 TeV における識別行列。形状の行は規格化に依存せず、注記のないかぎり [T] 級である; Z'_B の列はディリクレ・モード上のものであり (その Q_i 兄弟がそれを共有する)、ノイマン参照はレートとして撤回されている。「反証するもの」は、反対の測定が何をキルするかを名指す。最後の列こそが、これをリストではなく行列たらしめているものである: 各行は、その読みを支持するであろう測定ではなく、その読みをキルするであろう測定を名指している。形状の行は規格化に依存せず、それは誤ったレートを生き延びるということの意味する; だからこそそれらは定理のグレードを担い、レートに依存する行は担わないのである。

観測量	g^* (スピン 1、八重項)	Z'_B (スピン 1、一重項)	G_1 (スピン 2)	誤っていれば反証されるもの
$\sigma \times \text{BR}(t\bar{t})$, LO $\times$ K	8.7 [7.0–12] fb	ツリー・レベルで 0 (ノイマン参照は撤回)	0.045 fb	F-KK-2B (レート)
$dN/d\cos\theta^*$	$\frac{3}{8}(1+c^2)$	$\frac{3}{8}(1+c^2)$	$\frac{5}{8}(1-c^4)$	スピンの割り当て
$f(\cos\theta^* > 0.7)$	0.39	0.39	0.17	スピンの割り当て
A_{FB} (共鳴)	0 [D*]	0 [D*] (生成されれば)	0 (パリティ)	T-KK-2 の重なり
P_t (レプトンの傾き)	+0.91 [+0.88, +0.92]	+0.91 (生成されれば)	0 [T]	カスケードの順序
ラインシェイプ	BW($\Gamma/m=15\%$) + 干渉: 低質量側の肩、崩れた高質量側の裾、 > 4.9 TeV における不足	純粋な BW、B4 上で $\Gamma/m \approx 7\%$ [D*]; 端点クォークによっては生成されない	純粋な BW、6.3%; 不可視	T-KK-2 の符号 [T] / カラー
QCD 干渉 重心の引き	完全 (八重項) [T] $-O(100)$ GeV	なし (一重項) [T] なし	無視できる なし	カラーの割り当て テンプレートの誠実さ
随伴チャンネル	$b\bar{b}/jj = 3.5:1$ の相対パターン	$t\bar{t}$ 主導 (B4 上で BR ≈ 0.90)、軽クォーク・チャンネルなし	代わりに hh, VV	BR のパターン
$y_{t\bar{t}}$	$\langle y \rangle = 0.32$	— (生成されない)	0.29	(整合性のみ)

事前登録された指紋。 各行を合わせると、HL-LHC における GG-6 の発見シナリオは、データに先立ってここに登録される単一の複合的言明である:

3.849 TeV における、広く ($\Gamma/m \simeq 15\%$)、トップに飽和した超過であって、(i) $(1+\cos^2\theta^*)$ の生成角、(ii) $+0.91$ の右巻きトップ偏極、(iii) ゼロの共鳴的前後非対称性、(iv) $O(100)$ GeV の下方への重心の引きを伴う、極より下では建設的／上では破壊的な干渉ラインシェイプ、そして (v) ダイレプトンおよびダイフォトンには本質的に何もないこと、を伴うもの。

各条項は独立に失敗し得るのであり、各々の失敗はその下手人を名指す: (i) はスピン、(ii) はカスケードの順序、(iii) はベクトル的な紫外の重なり、(iv) は T-KK-2 の符号あるいはカラーの割り当て、(v) はレプトフォビアである。逆に、この指紋を伴わない 3.849 TeV における超過は — どれほど胸を躍らせるものであれ — GG-6 のロック・クラスターではないのであり、枠組みはその主張を放棄することになる。これが、 $t\bar{t}$ は発見チャンネルであると同時に診断チャンネルでもあるという第 13 節の言明の背後にある定量的内容である。

28 信頼性と未解決の論点

棚分け。[T] 級かつテンプレート非依存: 角度の形 (68)–(70)、 G_1 についての $P_t = 0$ 、干渉の符号定理、そして干渉の有無というカラーの二分法。[D*]: u, d, s, c 始状態からの $A_{FB} = 0$ (紫外フェルミオンごとに一つのプロファイルの上で) であり、カイラルな $b\bar{b}$ チャンネルはパーセント水準で寄与する; $P_t = +0.906$ (バンド 0.88–0.92 はカスケード深さの括弧から); 幅 $\Gamma/m = 0.146$; および述べられた $\pm 20\%$ の PDF / スケール許容を伴うすべての LO $\times$ K 規格化 ($x \sim 0.3$ – 0.6 における CTEQ6 時代の分布が最大の単一系統誤差である — そして電弱スタコフ補正、これらの質量においては負の $\mathcal{O}(10$ – $20\%)$ であるが、これは含まれていない: それは連続背景とコヒーレント和を同じ向きに抑制するため、データに係留された規格化が一次でそれを吸収するが、完全な電弱補正済みテンプレートは同じ NLO 計画に属する; 現代的なセットによる再計算は規格化を動かすのであって、形状は動かさない)。[E]: K 因子 (Chivukula et al., 2012; Mathews & Ravindran, 2005)、12% の参照効率、そして S/B 比の LO/LO 規約 ($\pm 30\%$ の正直なバンド)。

本部を鋭くするもの。(i) カスケード深さの補題を閉じることが、 P_t と BR のパターンを単一の値に固定する。(ii) 完了: L-KK-1 の選択 (T-BI6-6.4) が Z'_B の行を $g_B = 0.565$ に固定する。(iii) 現代的な PDF セットによる式 (66) の NLO 再計算。(iv) とりわけ、干渉を含む専用の実験的 $\Gamma/m \simeq 15\%$ テンプレート: 干渉によって歪められた形状に純粋なブライト–ウィグナーをフィットすることは質量とレートの双方にバイアスを与えるのであり、ATLAS と CMS がこの検証のために作り出し得る最も価値ある単一の成果物は、干渉の自由度を含めたテンプレート族である — その符号を自由に残したうえで、データが T-KK-2 の予言を仮定するのではなく、有罪とも無罪ともなし得るようにしたものである。

第 VI 部は、信号の顔立ちを平易な言葉で導出した: 崩壊生成物が角度のなかでどのように広がるか (スピンの指紋)、トップがどのように偏極して現れるか (結合の利き手の指紋)、そして共鳴が通常背景とどのように干渉するか — ピークより下ではそれを増大させ、上ではそれを枯渇させ、その符号はフィットではなく定理である。これらの形状は本論文の最も頑健な予言であり、レートのバンドに対して免疫をもち、そしてこのクラスターをいかなる偽物からも分離することになるものである。形状とレートは合わせていまや完全な標的をなす; 自然な次の問いは、実験が実際にどこに立っているかである。次の部は公表された記録を概観する: 何が排除されており、何が排除されていないか、そしてなぜこの予言がまさに生きたフロンティアの上に位置するのか。

29 第 VI 部を平易な言葉で: 信号が細部においてどう見えるか、そして各々の細部がどれほど確かか

もし何かがそこにあるのなら、本部はそれが何であることを言い当てることについてのものである。

三つの仮説が、ほぼ同じ質量においてトップ–反トップに山を生じさせ得る: スピン 2 状態、カラー八重項ベクトル、そして通常の単一共鳴である。本部は、それぞれが細部においてどう異なるかを — 崩壊生成物の角度分布、トップの偏極、連続背景との干渉の符号を含めた線の形状を — 計算する。

トップ・クォークは、ある異例の理由から、探すのに正しい場所である: それはハドロン化し得るより前に崩壊するため、そのスピンはかき乱されるのではなく崩壊生成物に受け継がれる。そのこ

とが、より軽いクォークについてはそうでない仕方、ここでは偏極を測定可能な量にしている。

格付けこそが本部を使えるものにしている。形状の観測量は規格化に依存しないため、それらは定理級であり、レートにおけるいかなる誤りをも生き延びる。レートに依存する言明は別に印されており、前の部の仮定を担っている。そしてラピディティ分布は、第四の手掛かりになり得たものであるが、弱くしか識別しない — 本部はそれを、発見されるに任せるのではなく、自らの図のキャプションにおいてそう述べている。最も強いメンバーだけを示す識別の一式は、誤解を招くものであろう。

第 VII 部

実験的な現状と射程

現行の ATLAS/CMS 制限、近未来の射程、キル条件、そして将来の装置

30 ATLAS と CMS における現行の実験的現状

本節は意図的に、最近の公開されたコラボレーション成果と、最近の CERN、ATLAS、CMS の公式装置文書に基礎を置いている。LHC の現状は数か月の尺度で変わり得るため、本節はまさに新鮮さに値する種類の節である。

30.1 ルミノシティの背景

2025 年 12 月の CERN 公式報告は、LHC が陽子運転期間全体にわたって ATLAS と CMS のそれぞれに 515 fb^{-1} を超えて供給しており、2024 年と 2025 年にはそれぞれ 124 fb^{-1} と 125 fb^{-1} が各実験に供給されたと述べている (CERN, 2025)。2026 年 3 月の CERN 公式報告はさらに、2026 年の陽子運転は短いが強力なものとなり、すでに達成された Run-3 の目標を超えて積分データセットを拡張するであろうと述べている (CERN, 2026)。この背景が重要であるのは、公開される解析論文が供給されたルミノシティに当然ながら遅れるとしても、統計的フロンティアが急速に移動しつつあることを我々に告げるからである。

30.2 高質量ダイレプトンの制約

ATLAS は 13 TeV における 139 fb^{-1} を用いた Run-2 完全版の高質量ダイレプトン探索を公表し、標準模型の期待値からの有意な偏差を見出さなかった (ATLAS Collaboration, 2019)。CMS は、Run-2 の 138 fb^{-1} 完全版ダイレプトン標本を用いて、結合 $k/\bar{M}_{\text{Pl}} = 0.01$ から 0.1 に対して 2.47 から 4.78 TeV の RS グラビトン質量下限を、その公式の公開結果ページにおいて報告している (CMS Collaboration, 2020)。この結果は、一般的なスピン 1 あるいはスピン 2 共鳴に対する感度についての最も明快な指針の一つである。その強みは明らかである：優れた質量分解能と低い背景である。現在の目的に対するその弱みも同じく明らかである：もし GG-6 がトップに富むチャンネルおよびジェットに富むチャンネルに比して軽レプトン結合を抑制するのであれば、ダイレプトンの射程は、特定の GG-6 ベンチマークに対する排除力を過大に述べていることになる。

30.3 高質量ダイフォトンの制約

CMS は Run-2 の 13 TeV 完全データセットを用いた高質量ダイフォトン探索を公表した。その結果の要旨水準の要約においては、結合の範囲 $0.01 < \tilde{k} < 0.2$ にわたる励起されたランダル-サンドラム・グラビトンについて、およそ 2.2 から 5.6 TeV を下回る質量が 95% 信頼水準で排除されている (CMS Collaboration, 2024a)。これは標準的な RS 的ダイフォトン・ベンチマークに対する強力な

言明である。しかしこれは、二つの理由から GG-6 についての最終決定ではない。第一に、GG-6 は単一極の RS 模型ではない。第二に、トップおよびハドロニックなチャンネルを増大させるのと同じ幾何が、普遍的な RS テンプレートに比して軽い光子分岐を減じ得る。したがってダイフォトン論文が我々に告げるのは、標準結合の RS 的解釈がすでに公称 3.85 TeV スケールを上回っているということであり、他方で専用の GG-6 再解釈は未着手のままだということである。

30.4 ダイジェットおよび基礎構造に基づく探索

ダイジェット・チャンネルは、穏やかな $U(1)_B$ 混入と増大したハドロニック崩壊の可能性のゆえに、GG-6 にとって避けて通れない。CMS は、1.8 から 6 TeV の質量範囲において異常なジェット基礎構造を伴うダイジェット共鳴の模型非依存な探索を公表しており、ここでもまた有意な超過は観測されていない (CMS Collaboration, 2024d)。本論文にとってのこの結果の重要性は、ヌルの結果それ自体にあるのではなく、その方法にある：基礎構造に助けられたダイジェット探索は、クラスター化した、おそらく部分的にハドロニックな 6 次元信号に対する概念的に正しい方向である。したがって現在の公開制限は、完全な GG-6 クラスター仮説についての最終決定としてではなく、方法の証明に加えて初期の排除地図として解釈されるほうがよい。

30.5 トップ対共鳴の探索

トップ対共鳴の探索は、GG-6 ベンチマークにとっておそらく最も重要な公開チャンネルである。最も関連の深い最近の文献は、Run-2 の 140 fb^{-1} 完全データセットを用いた、単一レプトンおよびダイレプトン終状態における $t\bar{t}$ 共鳴の ATLAS 探索である (ATLAS Collaboration, 2025a)。その論文は、バルク RS グラビトンと KK グルーオンの双方のベンチマークを明示的に概観している。バルク RS グラビトンの議論において ATLAS は、バルク RS の設定では軽フェルミオンへの崩壊が抑制され、光子への分岐比が無視できるほど小さく、現象論的に興味深い結合は大きくなり得ることを強調している (ATLAS Collaboration, 2025a)。これはすでに、単純なダイレプトンのみのベンチマークよりも、GG-6 の探索問題に精神においてはるかに近い。

同じ ATLAS 論文は、我々の文脈に関連するより古い直接排除もまた要約している。たとえば、 36 fb^{-1} を用いた以前の ATLAS 探索は、 $t\bar{t}$ に焦点を当てたベンチマークにおいて 0.45 から 0.65 TeV の範囲のバルク RS グラビトンを排除し、WW/ZZ 探索は 2.3 TeV まで排除し、b タグ付きダイジェット探索は $k/\bar{M}_{\text{Pl}} = 0.2$ のグラビトン・ベンチマークを 2.8 TeV まで排除した (ATLAS Collaboration, 2025a)。KK グルーオンについては、同じ ATLAS の概観は、以前の ATLAS 探索が 3.7 TeV を下回るベンチマーク KK グルーオン質量を排除し、他方 CMS は同様のベンチマーク質量を 4.55 TeV まで排除したと注記している (ATLAS Collaboration, 2025a)。GG-6 への精密な数値的対応づけはここでもまたベンチマークに依存するが、定性的な教訓は明らかである： $t\bar{t}$ はすでに実験的に成熟した高質量共鳴チャンネルであり、そしておそらく GG-6 の第一クラスターにとって最も自然な最初の発見チャンネルである — そして同種のものどうしとして読めば、CMS の 4.55 TeV の KK グルーオン排除が、 M_{lock} における八重項に対する公表された最強の言明である (第 31.4 節; O-KK-65)。

30.6 ヒッグス対の探索

hh チャンネルは、スピン 2 グラビトンの赤外に局在したヒッグス・セクターへの結合が可視となる場所である (GG-6 にラディオンは存在しない; 第 10.5 節および Arisaka (2026, A4-Euclid))。

CMS は、大面積ジェットと Run-2 の 138 fb^{-1} 完全標本を用いた、 $bbbb$ 終状態における共鳴的ヒッグス粒子対生成の探索を公表している (CMS Collaboration, 2024c)。狭いバルク・グラビトンの解釈が 1 から 3 TeV にわたって検証され、高質量においては $\sigma(pp \rightarrow X) \times \text{BR}(X \rightarrow HH \rightarrow bbbb)$ の上限がサブ・フェムトバーンの水準にまで達している (CMS Collaboration, 2024c)。そのような探索を固定された 3.85 TeV の窓へ、 $t\bar{t}$ / ダイジェットの最初の信号のボソンの交差検証として拡張することが、このチャンネルの GG-6 を意識した自然な用法である。

30.7 チャンネルに依存した排除と発見の台帳

現行の公開排除はベンチマーク言語の混合において引用されているため、現状を要約する最も誠実な仕方は、公式のチャンネル制限を対応する GG-6 再解釈の論点の隣に置くことである。表 16 はまさにそれを行っている。それは意図的に、論文中心ではなくチャンネル中心である。

表 16: チャンネルごとの排除と発見の台帳。「公開ベンチマーク」の列は、コラボレーションが標準的なテンプレートにおいて実際に排除したものを記録する; 「GG-6 的読み」の列は、それらの数値がきわめて有益でありながら、なお完全な幾何を意識した排除と等価ではない理由を説明する。

チャンネル	代表的な公式出典	公開ベンチマーク制限	そのベンチマークが実際に制約するもの	同じ結果の GG-6 的読み	近未来の発見に関する注記
ダイレプトン	CMS EXO-19-019 公式公開結果 (CMS Collaboration, 2020)	RS スピン 2 について、 $k/\bar{M}_{P1} = 0.01\text{--}0.1$ に対して $m_G > 2.47\text{--}4.78\text{ TeV}$	軽レプトンへの標準的あるいは狭い RS 的スピン 2 結合	きわめて有益ではあるが GG-6 にとって決定的ではない。というのも軽レプトンの重なりは数倍の因子で抑制され得るうえ、多場からなるクラスターが単一極のフィットを広げるからである	内部の GG-6 回廊においては、ダイレプトンの線はなお明快な補強的超過を与え得るが、有意性を支配することは期待されない
ダイフォトン	CMS EXO-22-024 公式公開結果 (CMS Collaboration, 2024b)	$0.01 < \tilde{k} < 0.2$ に対して $2.2\text{--}5.6\text{ TeV}$ を下回る RS グラビトン質量が排除	標準的な RS 的ダイフォトン・グラビトン信号	ここでもまた標準的な RS に対してはきわめて強力であるが、GG-6 は光子的な重みの減少とクラスターの希釈の双方を预言する	補強のための良質で明快なチャンネルである; 唯一の、あるいは必ずしも最強の最初のチャンネルではない
トップ対	公式の ATLAS/CMS トップ共鳴計画 (ATLAS Collaboration, 2025a)	レプトン+ジェットにおける ATLAS の KK グルーオン・ベンチマーク排除 $\sim 3.8\text{ TeV}$; より古い全ハドロニック制限は 3.4 TeV 前後; CMS の KK グルーオン $t\bar{t}$ ベンチマークは 4.55 TeV を下回る	標準的な KK グルーオンあるいはバルク・ワーブしたトップに富む共鳴	GG-6 は構成上トップに富むため、これが実際の GG-6 探索に最も近い公開の代理である	すでに現行の Run-3 の締めくくりにおいて最も有望な単一の発見チャンネルであり、「今年」探すべき自然な場所である
ダイジェット	CMS の異常基礎構造ダイジェット計画 (CMS Collaboration, 2024d)	$1.8\text{--}6\text{ TeV}$ の範囲において有意な超過なし; ベンチマーク KK グルーオン排除はテンプレートに応じて 4 TeV を上回るところまで達する	狭いハドロニック共鳴と、基礎構造に助けられた広い対象	レプトフォビックな $U(1)_B$ 混入にとってとりわけ関連が深く、これは発見力をダイレプトンから遠ざけ得る	スピン 1 メンバーにとって、そしてクラスターの広がりが必要であればグラビトン族にとっても、きわめてもっともらしい随伴チャンネル
hh (グラビトン・チャンネル)	CMS の大面積ジェット hh 探索とダイボソン共鳴計画 (CMS Collaboration, 2024c)	バルク・グラビトンの hh 解釈が $1\text{--}3\text{ TeV}$ の範囲で制約されている	狭いスピン 2 テンプレート	GG-6 にラディオンは存在しない; スカラー・セクターの手掛かりは $G_1 \rightarrow hh$ であり、 3.85 TeV では小さなレートを伴う	最初の発見チャンネルというよりはボソンの補強者である; 4 TeV の族が現れれば有用となる
ダイボソン	ATLAS と CMS の重い共鳴のボソンの探索	標準的なスピン 1 およびスピン 2 のベンチマークに対して数 TeV の排除	より標準的なテンプレートを伴う、ボソンに富む高質量状態	GG-6 の重なり構造がなお WW と ZZ を、とりわけスピン 2 グラビトンから、可視的に占有するため有用な交差検証となる	トップあるいはダイジェットにおける最初の兆候ののち、6 次元クラスターのボソンの側面を確認するために重要である

この表の解釈上の教訓は率直である。公開された LHC の記録はすでに十分に強力であり、3.85 TeV の KK の筋書きがまったく制約されていないというような主張はいかなるものであれ無責任であろう。しかし反対の極端 – 標準的な単一極 RS テンプレートのみから GG-6 の実装がすでに死んでいると宣言すること – もまた強すぎる。正しい現状はより鋭く、より興味深い: 第一族の GG-6 標的は挟み込まれている。それは現実の圧力の下にある: 本論文自身の較正の上では八重項は公称 95% CL で排除されており、その広く干渉する形状への移送が唯一の定量化されていない段階である (第 31.4 節)。それが生き延びるとすれば、その段階の上においてである — それを実験的に魅力あるものに行っているのとまったく同じ幾何学的成分が、素朴な RS への翻訳を過度に攻撃的なものにもしている — そしてテープ上の Run-3 データがそれを決する。

30.8 公表された現状が証明するもの、そして証明しないもの

したがって 2026 年初頭時点の公表された ATLAS/CMS のランドスケープは、三つのことを証明し、三つのことを未解決のまま残している。

それが証明するのは、第一に、最もクリーンなレプトン・チャンネルおよび光子チャンネルにおける単純な標準結合の RS 的スピン 2 ベンチマークが、3.85 TeV スケールより上ではすでに強く制限されているということである。それが証明するのは、第二に、トップおよびダイジェット共鳴探索が頑健で成熟しており、随伴する GG-6 パートナーに関連する質量領域へすでに踏み込んでいるということである。それが証明するのは、第三に、ヒッグス対およびダイボソン共鳴探索がすでに BSM プログラムの本格的な一部となっているということである。

しかしそれが未解決のまま残すのは、第一に、3.85 TeV を中心とする 6 次元のクラスター化されたスピン 2 信号に特化した再解釈である。それが未解決のまま残すのは、第二に、トップに富み、穏やかにレプトフォビクな多重場グラビトン・クラスターの複合多チャンネルでの排除あるいは発見である。そしてそれが未解決のまま残すのは、第三に、第一クラスターと第二動径族とを含む同時パターン検証である。これらこそが、本論文の残りが整理しようとしている空隙にほかならない。

現在の公表された現状の実務的な読み。 公表されたベンチマーク結果のレベルでは、ATLAS と CMS は最もクリーンなチャンネルにおいて、標準結合の RS 的スピン 2 の解釈をすでに公称の 3.85 TeV 領域の内部あるいはそれ以上へと押し進めている。しかし特化した GG-6 再解釈のレベルでは、決定的な材料が依然として欠けている: クラスター化されたラインシェイプのベンチマーク、トップに富み穏やかにレプトフォビクな分岐パターン、そして自由に走査される質量テンプレートではなく幾何に結びついた複合チャンネルの排除回廊である。代理の排除と真の GG-6 検証とのあいだのその空隙こそが、本論文が現在の瞬間をすでに決着したものではなく決定的なものとして扱う理由にほかならない。

表 17: GG-6 KK 探索プログラムに関連する現在の公表された ATLAS/CMS の状況。本表は、標準的なベンチマーク模型に対してすでに強く排除されているものと、特化したクラスター化された GG-6 再解釈に対して未解決のまま残っているものとを意図的に区別する。本表が引く区別は、排除と、別のものの排除との区別である。標準ベンチマークは関連する質量領域にわたって強く排除されており、そのことがまず、留保なしに述べられる; 未解決のまま残るのはクラスター化された読みであり、公表されたいかなる探索もそれに最適化されてはいない。すべての項目は、参照を付した公表された記録に由来する。

探索クラス	代表的な公表結果	データセット	公表結果が述べること	GG-6 に特有に未解決のまま残ること
高質量ダイレプトン	ATLAS 高質量ダイレプトン共鳴探索 (ATLAS Collaboration, 2019)	139 fb ⁻¹ , 13 TeV	有意な超過なし; 一般的な高質量スピン 1 およびスピン 2 信号に対する優れたクリーン・チャンネル感度。	クラスター化された 6 次元ラインシェイプや、トップに富む/軽レプトン抑制の重なりパターンを直接の標的とはしていない。
高質量ダイフォトン	CMS ダイフォトン共鳴探索 (CMS Collaboration, 2024a)	Run 2 全体, 13 TeV	RS グラビトン励起状態は $0.01 < \tilde{k} < 0.2$ にわたっておおよそ 2.2–5.6 TeV の窓で排除されている。	公表された制限は標準的な RS 的ダイフォトン構造に対するものである; GG-6 はダイフォトン分岐比が低減され、単一極でない構造をもちうる。
異常ダイジェット	CMS の模型非依存な異常内部構造ダイジェット探索 (CMS Collaboration, 2024d)	138 fb ⁻¹ , 13 TeV	1.8–6 TeV の質量域に有意な超過なし。	ダイジェット・チャンネルは穏やかな $U(1)_B$ の混入に対してとりわけ重要である; クラスターを考慮しトップと相関させた再解釈は未解決のままである。
トップ対共鳴	ATLAS $t\bar{t}$ 共鳴探索 (ATLAS Collaboration, 2025a)	140 fb ⁻¹ , 13 TeV	バルク RS グラビトンおよび KK グルーオンのベンチマークに対する成熟した探索プログラム; 一部のトップに富む模型に対する強い排除。	$t\bar{t}$ は GG-6 にとっておそらく自然な主導的発見チャンネルである; 第一クラスターに特化した再解釈が依然として必要である。
ヒッグス対共鳴	CMS $HH \rightarrow bbbb$ 共鳴探索 (CMS Collaboration, 2024c)	138 fb ⁻¹ , 13 TeV	バルク・グラビトンの HH 解釈に対する 1–3 TeV にわたるサブ・フェムトバーンから数フェムトバーンの上限。	GG-6 にはラディオオンが存在しない (Arisaka, 2026, A4-Euclid); $G_1 \rightarrow hh$ 分岐がスカラー・セクターの手がかりであり、3.85 TeV に特化した再解釈はまだ実行されていない。
加速器データセットの状況	CERN の公式ミノシティ更新 (CERN, 2025, 2026)	公式の加速器報告	全体として ATLAS/CMS それぞれに 515 fb ⁻¹ を超える供給; 2026 年の運転は Run-3 データセットを目標を超えて延長する。	Run-3 全体 + 初期 HL-LHC の再解釈は第一クラスターの検証を実質的に鋭くする。

31 実務的対決: 計算された $\sigma \times \text{BR}$ 対 公表された制限

31.1 本節が付け加えるもの、そしてどのグレードで付け加えるか

先行する二つの節は、ATLAS と CMS が何を排除したか、そして GG-6 クラスターがなぜいかなる単一の公表ベンチマークとも等価でないかを述べている。批判的な読者はそれ以上のものを求める資格がある: 解析者が排除できる一つの数である。本節はそれを供給する。読み出し II の結合 (第 19 節) から出発して、我々はロック・クラスター状態の最低次の狭共鳴断面積をチャンネルごとに計算し (二つのディリクレ・ベクトルはツリー・レベルでゼロとして入る)、それらを公表された 95% CL 排除曲線と同じ軸の上に置き、各チャンネルについて予言が制限を下回るか—そしてどれだけの倍率で下回るか—あるいは緊張状態にあるかを述べる。

誠実さのグレードは最初に固定される。本節のすべては導出条件付き (D*) である: 読み出し II の仮定 B1–B4 の上に、述べられた PDF と K 因子の扱いを伴う最低次 QCD の上に、そして以下に

述べる公表テンプレートの移送の上に条件付けられている。ここには定理の棚（質量、ツリー・レベルのレプトフォビア、T-KK-2 の結合恒等式）に触れるものは何もない。この計算が第 19 節で引用したテンプレート再スケールによる概算を置き換える場合には、我々はそのことを明示的に述べ、両方を可視のまま保つ。

31.2 ワークブック: マスター公式、入力、そして検証

マスター公式。 スピン J 、カラー次元 D_R 、質量 M の共鳴 R について、最低次の狭幅ハドロン・レートは

$$\sigma(pp \rightarrow R \rightarrow f) = \sum_{ij} \underbrace{(1 + \delta_{ij}) \frac{16\pi^2 (2J+1) D_R}{(2S_i+1)(2S_j+1) D_i D_j}}_{P_{ij}} \frac{\Gamma_{ij}}{M} \frac{\mathcal{L}_{ij}(\tau)}{s} \text{BR}(R \rightarrow f), \quad \mathcal{L}_{ij}(\tau) = \int_{\tau}^1 \frac{dx}{x} f_i(x) f_j\left(\frac{\tau}{x}\right) \quad (74)$$

であり、ここで $\tau = M^2/s$ 、パートン・ルミノシティは対称化されており ($\mathcal{L}_{ij}$ の内部で両方の順序が加算されている、表 18)、和は順序のない対 $\{ij\}$ にわたる。これは運動学的因子を書き下した式 (54) である; スピン/カラーの規格化は、すべてのカラー一重項の場合について Franceschini et al. (2016) の標準的な係数を再現し、カラー八重項の因子 $P_{q\bar{q}} = 32\pi^2/3$ は詳細釣り合いによって固定される。

入力。 結合は本論文がすでに卓上に置いたものである。カラー八重項 g^* については: 軽クォークは定理が固定した $\xi_{UV} = -0.194$ (式 38) に、 Q_{3L} は $1.0 g_s$ に、 t_R は $4.5 g_s$ (読み出し II の範囲 4-5、仮定 B4) にあり、フレーバーごとに $\Gamma(g^* \rightarrow q\bar{q}) = \alpha_s r_q^2 m/6$ を伴う—標準的な KK グルーオンの文献 (Dobrescu & Yu, 2013; Lillie, Randall & Wang, 2007) におけるのと同じく、カラー一重項の N_c 因子ではなくカラー八重項のトレースである。バリオン的 Z'_B については: $B_q = 1/3$ と同じ重なりパターンを伴う $g_f = g_B B_f r_f$ である; あらゆるレートは g_B^2 としてスケールし、記録においてはノイマン・モードの上の参照点 $g_B = 0.2$ (Dobrescu & Yu, 2013) で引用されていた; 解決された規則は $g_B = 0.565$ を選択し、ディリクレ・モードでは端点の重なり r_f が消えるため、 Z'_B の行はレートではなく記録上の上限である (第 10.10 節; O-KK-59)。スピン 2 の G_1 については: 導出された平坦重なり $\kappa_{gg} = c_K/K = 0.0136$ (系 T-KK-2c、第 10.9 節) を通じたグルーオン融合生成であり、ハン・リッケン・チャンの部分幅 (Han, Lykken & Zhang, 1999) を伴い (質量をもつベクトルの多項式は Allanach et al., 2000 に従って修正されている)、そしてバルクの崩壊パターンは次のとおりである: 赤外チャンネル $t\bar{t}$ 、 $W_L W_L$ 、 $Z_L Z_L$ 、 hh はフル強度、平坦モード・チャンネル (gg 、 $\gamma\gamma$) は κ_{gg}^2 で抑制され、軽いフェルミオンは無視できる (Agashe et al., 2008)。強結合定数は Arisaka (2026, A9-SM) の値 $\alpha_s(M_Z) = 1/(\pi e)$ から $\alpha_s(3.85 \text{ TeV}) = 0.077$ へと走らせている。パートン・ルミノシティは CTEQ6M (Pumplin et al., 2002) を用い、CTEQ6L1 と相互検査している; $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ において: どの解析者でも、式 (74) と本表だけから本節の計算をやり直すことができる; それが要点である。

検証。 パイプラインは、いかなる GG-6 の数が生み出されるよりも前に、三つの独立な公表された係留点に対して検査された: (i) $M = 750 \text{ GeV}$ における Franceschini et al. (2016) の参照パートン・ルミノシティ係数は 2-5% の精度で再現される; (ii) Allanach et al. (2000) のランダル・サンドラム・グラビトンの $\sigma \times \text{BR}(e^+e^-)$ の表は 15-25% (期待される LO/PDF 世代の広がり) の精度で再現され、全幅は 2-3% で一致する; (iii) Lillie, Randall & Wang (2007) のワープした KK グルーオンの

表 18: 二つの候補質量におけるパートン・ルミノシティ。これらは本論文のあらゆるレートがその上に築かれている数であり、そしてそれらは他者の測定であって、この枠組みの予言ではない（規約: 両方の順序が加算されており、したがって $\mathcal{L}_{q\bar{q}}$ は対称化されたルミノシティである; O-KK-64 に記録された独立な再評価がこれを十パーセントの精度で確認している）: それらは公表されたパートン分布セットに由来し、第二のセットと相互検査されており、断面積を再計算する読者が同じ入力から出発できるようにここに引用されている。グルーオン-グルーオン列とクォーク-反クォーク列が別々に与えられているのは、二つのクラスター成員が異なる始状態を通じて生成されるからである。

M	$\tau = M^2/s$	$\mathcal{L}_{gg}$	$\mathcal{L}_{u\bar{u}}$	$\mathcal{L}_{d\bar{d}}$	$\sum_q \mathcal{L}_{q\bar{q}}$
3.849 TeV	0.0877	0.0337	0.0452	0.0139	0.0596
2.461 TeV	0.0358	1.440	0.974	0.462	1.462

分岐パターン ($\text{BR}(t\bar{t}) = 92.5\%$) は厳密に再現され、[Agashe et al. \(2008\)](#) の 3 TeV における生成ベチマークは $\sim 25\%$ の精度で再現される。

不確かさ。 引用されたバンドは、NLO の K 因子 ($q\bar{q}$ 共鳴について 1.0–1.3 であり、黙って適用されるのではなく明示されている) と、 $q\bar{q}$ 始状態のレートに対する $\pm 20\%$ の PDF およびスケールの許容 (CTEQ6M / CTEQ6L1 の広がり は 3–9% である; この許容は大きな x における現代的セットのずれを覆う) とを畳み込んでいる; $x \sim 0.3$ におけるグルーオン-グルーオン・ルミノシティは ~ 2 倍の広がりを担い、それはそれが掛かる κ_{eff} の回廊に吸収される。これらは述べられた誤差を伴う LO 見積もりである—精密 QCD ではなく、またそのように装ってもない。

31.3 結果

表 19: $\sqrt{s} = 13$ TeV におけるロック・クラスター状態の計算された $\sigma \times \text{BR}$ (LO $\times$ K, CTEQ6M: ベクトルの行には $K_{q\bar{q}} = 1.3$, G_1 の行には $K_{gg} = 1.6$; バンドは PDF / スケールの広がりを含み込んでいる)。すべての項目は B1–B4 に条件付けられた導出条件付きである。 G_1 の行は導出された $\kappa_{gg} = c_K/K = 0.0136$ (系 T-KK-2c) を用いる; そのバンドは $O(1/K)$ の振幅フェンスを伴うグルーオン・ルミノシティの広がり (~ 2 倍) であり、 $\text{BR}(t\bar{t})$ は $\sim 25\%$ のカスケード深度感度を担う。 Z'_B の参照行は記録上のノイマン・モード上限であり、レートとしては撤回されており、 $(g_B/0.2)^2$ としてスケールする; ディリクレ・モードではこの状態はツリー・レベルで生成されない (第 10.10 節; O-KK-59)。

状態 (質量)	チャンネル	$\sigma \times \text{BR}$ 中心値 [バンド], fb	スケーリング	Γ/m
g^* , シナリオ B (3.849 TeV)	$t\bar{t}$	8.7 [7.0–12]	固定 (ξ_{UV} 定理)	0.15
	$j\bar{j} + b\bar{b}$	0.55 [0.44–0.78]	固定	
g^* , シナリオ A (2.461 TeV)	$t\bar{t}$	224 [180–325]	固定	0.15
	$j\bar{j} + b\bar{b}$	14 [11–21]	固定	
G_1 (3.849 TeV)	$t\bar{t}$	0.045 [0.021–0.10]	導出 (T-KK-2c)	0.063
	$W_L W_L$	0.010	導出	
	$Z_L Z_L$	0.0051	導出	
	hh	0.0050	導出	
	$j\bar{j} (gg)$	9.0×10^{-5}	導出	
	$\gamma\gamma$	1.1×10^{-5} (事後予言)	導出	
Z'_B (3.849 TeV)	$t\bar{t}$	ツリー・レベルで 0 (ノイマン参照 $0.030 (g_B/0.2)^2$, 撤回)	深度則; O-KK-59	—
	$j\bar{j} + b\bar{b}$	ツリー・レベルで 0 (参照 $0.0018 (g_B/0.2)^2$, 撤回)	深度則	
クラスター和, シナリオ B	$t\bar{t}$	8.7 (八重項; 第 10.10 節)	—	0.06–0.15

二つの構造的事実が強調に値する。第一に、カラー八重項の $t\bar{t}$ レートは連続的な自由度を一切担わない: その生成結合は定理が固定した ξ_{UV} であり、その分岐パターンはトップによって飽和している。それは表 19 の中で GG-6 が下げることでできない唯一の行である。第二に、これらの状態は互換可能な標的ではない: 八重項は幅広く ($\Gamma/m \simeq 15\%$)、グラビトンは中程度に狭く (導出された結合において $\Gamma/m = 6.3\%$ であり、公表されたスピン 2 テンプレートの幅の族の内部にある)、そして二つのアーベル的ベクトルはツリー・レベルで生成されない—クラスターのラインシェイプは最初の二つの和であり、これこそが第 13 節がクラスターを考慮したフィットを求める理由にほかならない。

31.4 生き残りの言明、チャンネルごとに

シナリオ A (自由場): 述べられた不確かさのもとで排除された。2.461 TeV における自由場八重項は $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) = 224 [180–325]$ fb を予言する。その質量における観測された ATLAS の制限は、最も保守的な (幅広い、 $\Gamma/m = 30\%$) テンプレートで 62 fb、狭いテンプレートで 20 fb である; 予言された $\Gamma/m \simeq 15\%$ は両者のあいだにあり、したがって適用されるべき制限はどちらかといえば 62 fb より強い。それゆえ予言は観測された排除を 3.6–11 倍上回る位置にあり、どのように読んでもバンドの外である。述べられた不確かさの内部において、**F-KK-2A** は発火した: T-KK-2 の自由場

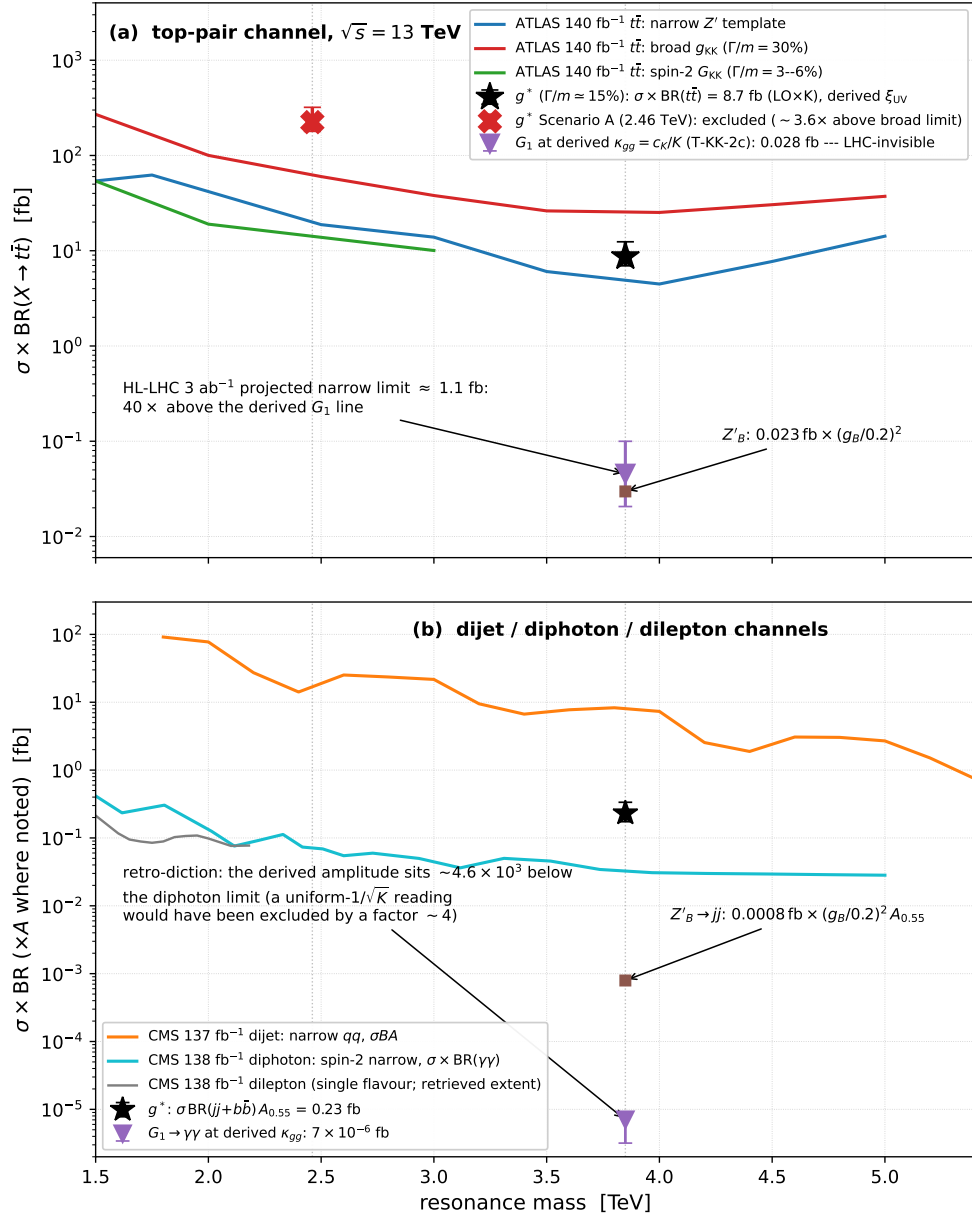


図 9: $\sqrt{s} = 13$ TeV における実務的対決であり、すべての結合はその導出された値にある (T-KK-2, T-KK-2c)。パネル (a): ATLAS の 140 fb⁻¹ $t\bar{t}$ 共鳴探索 (ATLAS Collaboration, 2025a) による観測された 95% CL 制限 (狭い Z' 、幅広い KK グルーオン $\Gamma/m = 30\%$ 、およびスピン 2 テンプレート; HEPData ins3094414) を、表 19 の予言に対して置いたもの: 8.7 fb のシナリオ B 八重項 (星印) —HL-LHC の反証子を担う抑制不可能な線である; 2.46 TeV のシナリオ A 八重項 (赤の十字) であり、窓の容量については観測された幅広テンプレートの制限を ~ 3.4 倍上回り、ピーク領域の移送については 19 倍上回る (F-KK-2A は発火した); そして導出された $\kappa_{gg} = c_K/K$ における G_1 (紫の三角、0.045 fb) —3 ab⁻¹ の HL-LHC 予測にすら ~ 25 倍及ばず、それゆえ LHC では不可視である。パネル (b): CMS の狭ダイジェット σ_{BA} 制限 (CMS Collaboration, 2020b)、ダイフォトンのスピン 2 制限 (CMS Collaboration, 2024a)、および取得された範囲にわたるダイレプトン制限 (CMS Collaboration, 2020) を、八重項のダイジェット・レート ($\sigma_{BA} = 0.30$ [0.23–0.43] fb)、撤回された上限としての Z'_B のノイマン参照、および導出された結合における $G_1 \rightarrow \gamma\gamma$ (1.1×10^{-5} fb) に対して置いたもの: 公表されたダイフォトンのヌルは $\sim 3 \times 10^3$ の余裕をもって事後予言されているのに対し、一様な $1/\sqrt{K}$ の光子振幅であればすでに ~ 4 倍で排除されていたはずである。すべての予言は述べられたバンドを伴う LO $\times$ K であり、表 19 の値におけるものである。

シナリオは既存のデータによって閉じられ、二分法は複合的に硬化したシナリオ B— M_{lock} における縮退したクラスター—to 解決する。移送は現在、仮定されるのではなく計算されている。本論文の規約における 2.461 TeV での明示的な微分計算—同じ核、同じ結合、 b チャンネルをカイラルとする同じ五つの始状態フレーバー、そして質量が動かされる前に M_{lock} における独立な参照計算に対して六桁の有効数字で検証されたパイプライン—is、 M_{lock} で用いられたものからスケールした窓において 212 fb のブライト-ウィグナー内容量、閾値からの 344 fb の全ラインシェイプ、+61 fb の建設的干渉、そして極から $\pm 25\%$ 以内の 0.60 というピーク割合を与える。その質量における観測された ATLAS の制限 62.3 fb に対して、これらは窓の内容量について 3.4 倍、全ラインシェイプについて 5.5 倍—幅広テンプレートの制限が引用される際の規約である—、そしてピーク領域の移送について 19 倍であり、というのも参照テンプレートのピーク割合は 0.17 だからである。K 因子なしの最低次では三つのうち最小のものは 2.6 であり、七点スケール包絡の下端では 2.7 である。**したがってこの閉包はもはや暫定的ではない。**主張されていないのは検出器レベルの再解析である：残余は二つの角度構造と偏極構造のあいだのアクセプタンスの差であり、1 のオーダーの因子であって、この閉包が必要とするような 3 倍の因子ではない。

シナリオ B の八重項：観測された制限の上にある、今すぐ決定可能である。 3.849 TeV において八重項は $t\bar{t}$ に 8.7 [7.0–12] fb を予言する。公表されたテンプレートに対しては、その読みは構成上あいまいである：観測された幅広テンプレート ($\Gamma/m = 30\%$) の制限は 25.5 fb、狭テンプレートの制限は 4.9 fb であり、予言された $\Gamma/m \simeq 15\%$ はその間にある—幅広テンプレートを「 ~ 2.9 倍の余裕」と読むことは、本論文自身が不整合と格付けする比較である (第 44.2 節)。誠実な数は本論文自身の機構が生み出すものである。第 VIII 部は、測定された較正 $F_{\text{cal}} = 4.33$ を伴う三つの ATLAS 係留ビンの上にビンごとの尤度を構築する；発見としてではなく排除として、干渉を含む 15% テンプレートの上で走らせると、それは 140 fb^{-1} において $\simeq 8 \text{ fb}$ という期待される 95% CL 制限—すでに中心予言の位置にある—を与え、そして同じ部が係留する ATLAS の観測された収量 (事後フィットの 53.4/21.6/6.1 に対して 47/18/6) の上では、 $\simeq 7 \text{ fb}$ という観測された制限、すなわち予言を ~ 1.25 倍下回る制限を与える。較正は狭い注入の上で測定されており (第 41 節：二つの注入点のあいだで $\pm 1.5\%$)、ここでは幅広く干渉する形状へと移送されている—本論文が自身の係留点から限界づけることのできない移送であり、鎖の中で測定された不確かさをもたない唯一の段階である。したがって誠実な言明は次のとおりである：**本論文自身の較正の上では公称上 95% CL で排除されており、幅広形状への移送が定量化されていない段階である**—八重項は Run-2 全データの観測された排除の縁に位置し、そしてすでにテーブル上にある Run 3 のデータが期待値のうえで F-KK-2B を決着させる (第 31.5 節)。事後フィット背景と同じかそれ以下に位置する観測された Run-2 の収量 ($\hat{\mu} = 0$) に条件付ければ、2026 年末の発見期待値もまた第 VIII 部の信号注入時の数値より低い ($\simeq 1.9\text{--}2.4\sigma$ であって $2.5\text{--}3.3\sigma$ ではない、これは Run-2 の収量をその観測値に取り、標本の Run-3 の分を注入信号に取ることで構築されている)；本論文が両方を印刷するのは、再解析を実行するかどうかを決める読者が、注入されたものと同様にデータ自身の評決をも見るべきだからである。 $\Gamma/m \simeq 15\%$ に特化した再解釈が付け加えるものは、移送された較正の代わりに置かれる共同実験自身の系統誤差である—そして第 VI 部は、そうした再解釈が実装すべき完全な微分解剖 (角度、偏極、導出された符号を伴う干渉ラインシェイプ) を供給する。ダイジェットにおいては八重項は ~ 27 [19–35] 倍の余裕で安全である (CMS の σ_{BA} 制限 8.0 fb に対して 0.30 [0.23–0.43] fb)：ダイジェットのヌルは無矛盾であって、制限的ではない。

同種同士のベンチマーク: バルク・ランダル-サンドラム KK グルーオン。 八重項が直接対決させられるほど十分に近く似ている、公表された対象が存在する。軽クォーク、 Q_{3L} 、 t_R への結合 $(-0.2, +1, +4)g_s$ と $\Gamma/m \simeq 15\%$ をもつバルク RS KK グルーオンは、あらゆる結合において 12% 以内で本論文の八重項であり $(-0.194, 1.0, 4.5)$ 、そのレートは八重項のレートである: 本論文自身のパートン・ルミノシティの上では、このベンチマークは同じ K 因子を伴って 3.85 TeV で $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) = 9.1 \text{ fb}$ を与え (LO では 7.0 fb; 八重項の 8.7 fb の 1.05 倍)、CTEQ6L1 のグリッド上では 9.9 fb を与える—PDF バンド以内で同じレートである。したがって共同実験が公表する KK グルーオンの排除は同種同士である: CMS の複合は当該ベンチマークを 4.55 TeV まで排除し、 36 fb^{-1} における ATLAS のレプトン+ジェット解析は $\sim 3.8 \text{ TeV}$ まで排除する。文字どおりに読めば、CMS の数はこの結合パターンをもつ 3.85 TeV の八重項を排除する; 注意深く読めば、3.85 TeV におけるこのベンチマークのレートは、PDF の世代、K 因子の扱い、そして公表されたテンプレートが省略する干渉の符号によって本論文のものと異なる—上記の 25.5-fb と 4.9-fb の読みを分けるテンプレート幅とは別個の項目である。本論文は、このベンチマークの排除が八重項を取り逃がしていると主張してはいない; 本論文が主張するのは、この問いが本論文のラインシェイプを用いた再解釈によって決着させられるということであり、そして本論文は CMS の 4.55 TeV の排除を F-KK-2B に対する最も強い公表された言明として登録する (O-KK-65)。

グラビトン: 導出されており、LHC の射程外である。 結合が現在導出されている (系 T-KK-2c) ことにより、 G_1 の線は回廊ではなく一つの点である: $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) = 0.045 [0.021-0.10] \text{ fb}$ 。最も強いテンプレートの 3 ab^{-1} HL-LHC 予測 ($\sim 1.1 \text{ fb}$) ですらそれを ~ 25 倍上回る位置にある: **いかなる LHC データセットもグラビトンを見ることはない**、そしてあらゆる LHC 探索におけるその不在は、今後は未処理の懸案ではなく枠組みの予言である。ダイフォトン・チャンネルは、この主張に牙を与える事後予言を供給する: もし光子が様な $1/\sqrt{K}$ の振幅で結合していたならば、 $\sigma \times \text{BR}(\gamma\gamma) = 0.14 \text{ fb}$ は観測された CMS の制限 0.033 fb によってすでに ~ 4.2 倍で排除されていたはずである; 導出された $\kappa_\gamma = \kappa_{gg}$ においては予言は $1.1 \times 10^{-5} \text{ fb}$ であり、制限を $\sim 3 \times 10^3$ 倍下回る。したがって公表されたヌルは、平坦モード振幅の二つの読みのあいだを識別し、導出された方の上に着地する—衝突型加速器の鎖における最初の振幅レベルの対決であり、幾何に有利に解決されたものである。直接のスピン 2 検証は FCC-hh へと移り、そこでは 85 TeV における $\sigma(G_1) \approx 0.21 \text{ pb}$ がこのアンカーを初期運転の発見標的とする (第 31.5 節)。

Z'_B : ツリー・レベルで生成されず、クラスターを通じて検証される。 ディリクレ・モード (T-KK-2、ステップ 3') においては、端点に局在するいかなるクォークもバリオンのベクトルに結合しない、それゆえその軽クォーク生成はツリー・レベルで消え、以前の改訂版の参照レート— $0.030 \times (g_B/0.2)^2 \text{ fb}$ 、解決された $g_B = 0.565$ においては 0.18 fb 、クラスター和の 2.0% の分け前—はレートとしては撤回される; それらはノイマン上限としてのみ生き残り、ダイレプトン、ダイジェット、 $t\bar{t}$ のヌルはすでに十倍以上の余裕でそれと無矛盾であった。この状態は、どのように読んでも独立した信号としては LHC で不可視である。その決定的な検証は別のところにある: 八重項がクラスターの露出を担う; 第五の力の評決は不在であり、いかなる到達距離と精度においても $\eta = 0$ である; そして Z'_B 自身の結合は登録された未解決項目 O-KK-59 である。そのレプトフォビアはツリー・レベルの言明であり、ループ誘起のダイレプトン下限がそれとともに登録されている (O-KK-61)。

クラスター、和として。 シナリオ B のクラスターは $t\bar{t}$ 信号を $\simeq 8.7$ fb (中心値) 供給し、その本質的にすべては八重項のものであり、ほぼ縮退したラインシェイプにわたって広がっている—上の段落の較正された観測制限の位置にある。したがって公表された記録の正しい要約は「すでに排除された」でも「余裕をもって安全である」でもない: ロック・クラスターは挟み込まれており、抑制不可能な八重項の線が露出を担っている。

31.5 キル窓、定量化して

以前の改訂版は、 140 fb^{-1} の基準線から観測された幅広テンプレートの制限を $\sqrt{\mathcal{L}}$ でスケールすることによって反証子に値をつけ、その結果を四通りに印刷していた ($\sim 3 \text{ ab}^{-1}$, $\lesssim 2 \text{ ab}^{-1}$, $0.5\text{--}2 \text{ ab}^{-1}$ 、そして「2032–2040 年ごろ」という交差)；このスケーリングは本論文自身が $\sim 0.5 \text{ ab}^{-1}$ を超えると破綻すると述べているものであり、このテンプレートは本論文が不整合と呼ぶものである。この値づけは現在、第 VIII 部の較正された機構を排除として走らせることにより、一度だけ計算されている。 $F_{\text{cal}} = 4.33$ を伴う ATLAS 係留の三ピン尤度の上では、期待される 95% CL 制限は 140 fb^{-1} において $\simeq 8$ fb (中心予言の位置、第 31.4 節)、 0.47 ab^{-1} —2026 年末のデータセット—において $\simeq 5$ fb であり、これは予言自身のバンドの下端 (7.0 fb) を下回る。**期待値のうえでは、予言されたバンドの全体が Run 3 の終わりにテープ上にあるデータ、 $\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ によって排除されるか確認される:** F-KK-2B は—発見あるいは排除として—すでに記録されたデータの特化した再解釈によって決着し、標的を動かすための GG-6 側の自由度は何も残されていない。その単一のルミノシティが、本論文における以前のあらゆる値づけを置き換える。グラビトンは、その導出された κ_{gg} において $t\bar{t}$ に 0.045 fb を寄与する—いかなる LHC データセットもそこに到達せず、スピン 2 の検証はすっきりと FCC-hh へ移る、そこでは 85 TeV における $\sigma(G_1) \approx 0.21 \text{ pb}$ ($t\bar{t}$ 0.15 pb 、 ZZ 17 fb 、 hh 17 fb ；O-KK-66 の規格化に関する但し書きが適用される) がこのアンカーを初期の発見標的とする (FCC Collaboration, 2025)。この分業それ自体が反証可能なパターンである: HL-LHC はスピン 1 クラスターを見出すか殺すかしなければならない; 85 TeV の FCC-hh はそのとき同じ質量においてスピン 2 アンカーを見出さなければならない。

32 近い将来の発見ポテンシャル

32.1 Run-3 から初期 HL-LHC への橋

次の実験的に決定的な期間は遠い未来ではない; それは Run 3 全体から初期 HL-LHC 解析への橋である。CERN の公式計画文書は HL-LHC を、実験ごとにおおよそ 3000 fb^{-1} を目標とする 14 TeV のプログラムとして記述しており、公称の LHC 設計に対しておおよそ 5 から 7.5 倍のルミノシティ利得を伴う (CERN, 2023)。その長期目標は重要であるが、より短期の問題も同じく重要である: Run 3 の完了と、高質量共鳴チャンネルにおいて Run-2 + Run-3 の標本全体を取り込む公表された解析の出現である。

背景優勢の探索については、最も単純な有意度のスケーリングが次に従うことが期待される

$$\mathcal{Z}(\mathcal{L}_2) \approx \mathcal{Z}(\mathcal{L}_1) \sqrt{\frac{\mathcal{L}_2}{\mathcal{L}_1}}. \quad (75)$$

このなじみ深い関係はそれ自体で発見を決定するものではないが、重要なことを我々に告げている:

現在は限界的あるいはテンプレートによって希釈されている信号も、二倍から五倍大きなデータセットにクラスターを考慮した多チャンネル解析が適用されれば、はっきりと可視になりうる、ということである。第 VIII 部はこの封筒の裏の計算によるスケーリングを完全な係留されたシミュレーションで置き換える—そして (75) が、まさに問題となるレジームにおいて破綻することを示す: $\sim 0.5 \text{ ab}^{-1}$ を超えると探索は系統誤差に制限され、有意度はもはや $\sqrt{\mathcal{L}}$ としては全く増大しない。

32.2 なぜ $t\bar{t}$ が優先チャンネルなのか

軽レプトンおよび光子の重なりが中程度にでも抑制されているならば、最初の頑健な超過は $\ell^+\ell^-$ や $\gamma\gamma$ ではなく $t\bar{t}$ に現れる可能性が最も高い。理由は三つある。

1. 幾何は赤外に局在した重なりを通じて自然にトップ・セクターを優遇する。
2. バルク RS の文献は、 $t\bar{t}$ における高質量スピン 2 および KK グルーオンの探索が成熟しており技術的に実行可能であることをすでに示している。
3. トップ終状態はまた、グラビトン、KK グルーオン、およびベクトルのトップ・パートナーという筋書きが自然に交わる点でもあり、パターン検定に理想的である。

これはダイレプトンや二光子のチャンネルが重要でないという意味ではない。むしろ逆に、信号が十分に強ければ、それらは清浄な傍証の一本として依然として決定的でありうる。しかし GG-6 を意識した発見プログラムは、ハドロンのトップ・チャンネルを単に補完的なものとして扱うべきではない。それらは中心である。

32.3 ブースト・ダイジェットとヒッグス対の役割

ダイジェットと hh のチャンネルは、異なるが相補的な目的に資する。ダイジェット・チャンネルは穏やかなレプトフォビクないしバリオンの混入を検定し、実質的な分岐能力を担いうる。ヒッグス対チャンネルは理論のスカラー的側面、あるいは細谷機構に関連する側面を検定する。第一クラスター近傍における $t\bar{t}$ +ダイジェット+ hh の複合超過パターンは、単独で孤立したいかなる超過よりも、はるかに GG-6 を診断する力をもつ。

32.4 ベンチマーク有意度の回廊

第一クラスターの正確なラインシェイプはモデル依存であるため、完全に硬直した断面積の予言は時期尚早である。より誠実な中間生成物は 発見回廊 である。与えられたチャンネル f に対する実効信号強度を次式でパラメータ化する

$$\mu_f = \left(\frac{\kappa_{\text{eff}}}{0.1} \right)^2 R_f, \quad (76)$$

ここで κ_{eff} はロックに誘起された実効的な結合の規格化であり、 R_f は参照となるバルク RS テンプレートに対する分岐と受容効率をまとめたものである。この言語では、決定的な問いは、ATLAS+CMS の複合プログラムが、単一の恣意的なベンチマーク点においてではなく、幾何が許す回廊の全体にわたって μ_f を排除ないし発見できるかどうかということになる。

本部の定理に錨を下ろした規律の内側では、 κ_{eff} は 定理として は数値をもたない: 八重項の ξ_{UV} とグラビトンの κ_{gg} は導出済みであり (T-KK-2, T-KK-2c)、率を完成させるフェルミオンごとの重

なりは Arisaka (2026, A9-SM) が未解決のまま残したカスケード深度の補題であって、ここでは帯 $r_{t_R} \in [4, 5]$ として担われている。概念上の要点は生き残る: κ_{eff} は恣意的なモデル走査の精神において自由ではない; それは質量スケールを固定するのと同じ幾何によって拘束されている。これは最終的な衝突型加速器での検定が異例なほど意味をもつもう一つの理由であり — そしてこれこそが、決定的な成果物が単一のベンチマーク断面積ではなく回廊 μ_f である理由である。読み出し II (第 19 節) はスロート幾何から κ_{eff} を見積もり、第 31 節は帰結する率を、回廊もすべて含めて、公表された制限と突き合わせる。

32.5 ATLAS と CMS は現行の 2026 年ランですでに最初のイベントを得られるか

イエス – 兆候、小さな超過、あるいはチャンネル局所的な異常 という限定的だが重要な意味においては。ノー – 「得る」ということで、LS3 以前にモデル完備なパターン検定を伴う議論の余地のない 5 シグマの複合的発見を意味するのであれば。理由は単純な算術である。

CERN の公式報告によれば、2025 年の陽子ランだけで ATLAS と CMS の双方に 125.4 fb^{-1} が供給され、LHC の運転開始以来の総供給量は 500 fb^{-1} を超えた (CERN, 2025)。2026 年 3 月の CERN 公式報告はさらに、物理用の安定ビームが 2026 年 3 月 7 日に宣言されたこと、2026 年ランが「短いが密に詰まっている」こと、そして陽子プログラムが低パイルアップ期とそれに続く高パイルアップ期を含み、7 月初頭に LS3 が始まる前に積分データセットをすでに達成済みの Run-3 目標を超えて延伸させることを述べている (CERN, 2026)。実務的な言葉で言えば、これは 今年 のうちにもなお真の発見の梃子が存在するが、それが圧縮された窓の中に位置していることを意味する。

本部はデータセットを定理級の予言イベント数へと換算しない。式 (59) を通じてイベント収量は絶対断面積を要し、それは (第 12.2 節) GG-A から導出される量ではない: それはトップ深度の帯と、定理の外側にある QCD/PDF 積分に依存する。「今年 N 個のタグ付き $t\bar{t}$ イベント」を予言として引用することは、導出条件付きの数を定理として提示することになる; その計数は代わりに、それが属する場所でグレードと入力とともに印字される (第 VIII 部: 2026 年末に錨づけられた窓の中で 305 個の八重項イベント、表 19 の率から式 (59) を通じて)。定理級で頑健であるのは構造的な事柄である: カラー八重項は抑制不可能な軽クォーク結合 $\xi_{UV} = -0.194$ を担い、それゆえ現行の $t\bar{t}$ /ダイジェットの排除の最前線に位置し、既存のデータによって探られつつある (F-KK-2); そしてロック・スケールは 3.849 TeV に固定されており、Run-2 + Run-3 のトップ対およびダイジェットの全試料がすでに梃子をもつ回廊の内側に正確に収まっている。

運用上の帰結はいかなる収量の数値もなしに成り立つ: 既存の高質量 $t\bar{t}$ およびダイジェット・データの、クラスターを意識した、トップに富む、レプトフォビクな再解釈こそが今重要な検定であり、その再解釈において立ち現れる構造が何も存在しないこと自体が、現行の実装を制約し始めるであろう。

したがって、正しい言い方は次のとおりである。ATLAS と CMS は、現行の 2026 年の締めくくり解析において、とりわけ $t\bar{t}$ とブーストしたハドロン・チャンネルにおいて、GG-6 に動機づけられた最初の真の兆候を見ることが できる かもしれない。完全に決定的な判定は、Run-3 と HL-LHC 初期にまたがる筋書きである方がより有り得る。しかし理論はすでに、「2040 年まで待て」がもはや正しい実験的態度ではない領域に入っている。

32.6 実務的な言葉で見た近未来の到達域

有意度の予測を誇張しないことが賢明である。最も清浄な、公開されたマシンに基づく言明は次のものである。CERN の公式文書は HL-LHC を、TeV 領域における決定的な検定に要求されるデータ量を供給する施設として定義している (CERN, 2023)。ATLAS と CMS の公式アップグレード・ページは、 $\mathcal{O}(200)$ のパイルアップ条件下で性能を維持することを特に目的とした検出器とトリガーの改良を記述している (ATLAS Collaboration, 2024; CMS Collaboration, 2024e)。公開された高質量共鳴の解析は、清浄なチャンネルにおいてすでに数 TeV の質量にまで到達している。したがって慎重だが強い言明は次のとおりである: *Run-2 + Run-3* の全試料に対する、クラスターを意識した専用の複合チャンネル解析は、3.85 TeV の GG-6 標的を、真に識別力をもつ最初の感度領域へと持ち込むことが十分に有り得るし、*HL-LHC* は幾何が許す回廊の全体にわたってそれを確認するか排除するかのいずれかができるはずである。

表 20: 第一 GG-6 クラスターに対する近未来の発見の論理。公開されたコラボレーションの到達域予測がクラスター化された GG-6 ベンチマークにまだ一対一で対応しない箇所では、項目は意図的に定性的である。定性的な項目が定性的であるのは、それらを突き合わせて読むべき公開された予測が単一共鳴のベンチマークに対して計算されたものであり、本論文の標的がクラスターだからである。それらの行に数値を無理に当てはめれば、下敷きとなる予測がもたない精度を与えることになる。数値を誠実に述べられる箇所では、それは述べられている。

プログラム段階	何が変わるか	GG-6 第一クラスターへの含意
Run 2 のみ	成熟した高質量探索は存在するが、大半はベンチマーク固有の一極テンプレートによる	重要な挟み込みの情報は存在するが、決定的な GG-6 専用の検定ではない。
Run 2 + Run 3 全体	より大きなデータセット、改善された検出器性能、全複合試料を用いた最初の公開解析	真に意味のある最初の、クラスターを意識した再解釈が可能になるはずである。
HL-LHC 初期	実質的により大きな $\mathcal{L}$ 、改善されたタイミング、トラッキング、および縮約ストリームの柔軟性	GG-6 信号が期待される回廊の中心付近に位置する場合、最初の $3\text{--}5\sigma$ の証拠にとって最良の段階。
HL-LHC 全体	実験あたり 3000 fb^{-1} 、成熟した Phase-2 検出器とトリガーの生態系	発見水準の複合感度か、現行の GG-6 実装のモジュール水準での強い反証かのいずれかを与えるはずである。

32.7 暦年で見た反証のタイムライン

本部におけるあらゆる感度の言明は、これまで積分ルミノシティに対して述べられてきた。この締めくくりの小節は、その全体像を、実験プログラムが実際にその上で動く座標: 暦へと換算する。この換算は GG-6 にとって、パラメータを走査するモデルにとってはそうでない仕方である。理論が 単一 の導出質量を予言するため、標準的な感度対質量の提示 (図 9) は 3.849 TeV における一本の垂直な切片へと縮退する; 図 10 はその切片を時間に対して再描画したものであり、導出された予言は 水平な帯 として現れ — それらは動かない、なぜなら理論の中にそれらを動かさうもの

は何もないからである — 予測される実験感度は下降する曲線として現れる。質量のダイヤルをもつ理論はこの図を描くことができない; その帯は滑ってしまうであろう。図の数値的内容の全体は表 21 に集められている。

構成。 帯は表 19 の導出された $\sqrt{s} = 13$ TeV の率であり、変更なく持ち込まれている。感度曲線は 3.849 TeV における観測された Run-2 全体の 95% CL 制限 (表 21、中段ブロック) を取り、 $L(Y)$ を 2026 年 7 月時点の CERN スケジュールの下での年 Y における実験あたりのテープ上の積分ルミノシティとして (下段ブロック)、それらを $\sqrt{140 \text{ fb}^{-1}/L(Y)}$ でスケールする: Run 3 は 2026 年 6 月 14 日に終了し、運転開始以来およそ 540 fb^{-1} が供給され、そのうち $\approx 466 \text{ fb}^{-1}$ が解析品質である (CERN, 2026b); LS3 は 2030 年まで続く; HL-LHC は 2030 年半ばから年あたり $250\text{--}350 \text{ fb}^{-1}$ で物理データを取得し、2041 年の現行ベースライン終了までに $\approx 3.4 \text{ ab}^{-1}$ を蓄積する (CERN, 2023, 2026b)。LHC の先では、暦は今や、次の旗艦として FCC-ee を推奨した 2025 年 12 月の欧州戦略によって定まっている (European Strategy Group, 2025): FCC-ee (物理は ~ 2047 年から) はクラスターを間接的にしか探らず、ロック・スケールを再び直接見る最初のマシンは FCC-hh であり、段階的な実現可能性調査のシナリオでは物理は 2074 年ごろに始まる (FCC Collaboration, 2025)。

誠実さの取り決め。 三つの保守性が組み込まれており、いずれも描かれた交差を現実よりも遅く押しやる。曲線は単一実験のものである (ATLAS+CMS の複合は実効ルミノシティでさらに $\approx \sqrt{2}$ を得る); 帯は 13 TeV の率であるが、14 TeV ではあらゆる信号が上昇し — $q\bar{q}$ 起源の八重項では 55%、グルーオン融合のグラビトンでは 67% — 一方で背景の上昇はより緩やかである; そして八重項は広幅 ($\Gamma/m = 30\%$) のテンプレートに対して読まれているが、その予言される $\Gamma/m \approx 15\%$ の幅は、中間幅に特化した専用の再解釈によってこそよりよく整合させられ — そしてより強く制約され — たであろう。一つの取り決めは逆向きに働くのであり、同じくらい明白に述べておかねばならない: 曲線は解析が現れる年ではなく、データがテープ上にある年に対して描かれている。歴史的に、旗艦となる全データセットの共鳴の結果はそのデータに二年から七年遅れる (Run-2 全体の $t\bar{t}$ 探索 ATLAS Collaboration, 2025a は Run 2 の終了から七年後に現れた) ため、公表された判定はこれらの曲線からその分だけ遅れる。

読み方。 図は GG-6 の衝突型加速器における運命を一つの視覚的な文へと圧縮する。広幅テンプレートの $t\bar{t}$ 曲線 — 重要な唯一の曲線である、なぜなら F-KK-2A の閉包と T-KK-2c の再資格認定の後、八重項が LHC の反証子の全体を担うからである — は公表テンプレートによる読みである; 第 VIII 部の較正された機構の上では、 g^* 帯全体の期待される排除は 2026 年末のデータセットとともに到来する (第 31.5 節): **F-KK-2B は、発見か排除かが、Run-3 データの専用の再解釈によって決着する。** 他のあらゆる帯は、窓の中のいたるところであらゆる曲線の下に位置する: Z'_B (ディリクレ・モードの上ではツリーレベルで生成されない) と、あらゆるチャンネルにおけるグラビトンは、2050 年まで LHC には不可視のままであり、したがって LHC 探索におけるそれらの不在は、欠損ではなく枠組みの恒常的な予言である。HL-LHC のベースラインが 2041 年に終わった後、曲線は平坦になる — 承認されたマシンで 3.85 TeV を直接探るものは世代のあいだ存在しない — そしてこのことが窓に重みを与えている: GG-6 の衝突型加速器セクターに関する LHC の判定は ~ 2040 年までに実質的に手中に収まり、(公表された形では) ~ 2047 年までに最終的となり、そして 85 TeV における $\sigma(G_1) \approx 0.21 \text{ pb}$ が生き残ったクラスターを運転初期の分光學へと変えるであろう FCC-hh まで、それについて語りうるものは他に何もない。

表 21: 図 10 への数値入力。上段: GG-6 の帯 (表 19 からの、 $\sqrt{s} = 13$ TeV における導出された LO $\times$ K の率; 帯は $\pm 20\%$ の PDF / スケールを畳み込んでいる)。中段: そこから曲線が $\sqrt{L}$ でスケールされる、3.849 TeV における観測された 95% CL の錨 ($t\bar{t}$ の行: HEPData レコード ins3094414)。下段: 実験あたりのテープ上ルミノシティのモデル (CERN スケジュール、2026 年 7 月)。年 Y における感度: $\text{limit}_{140} \times \sqrt{140/L(Y)}$ 。

$M = 3.849$ TeV における GG の帯 (13 TeV, LO $\times$ K)			
信号	$\sigma \times \text{BR}$ [帯], fb	Γ/m	結合の来歴
$g^* \rightarrow t\bar{t}$	8.7 [7.0–12]	0.15	$\xi_{UV} = -0.194$, 定理 (T-KK-2)
$g^* \rightarrow jj+b\bar{b}$ (σ_{BA} , $A=0.55$)	0.30 [0.23–0.43]	0.15	同上
$Z'_B \rightarrow t\bar{t}$	ツリーレベルで 0 (ディリクレ・モード)	—	ノイマン参照値 0.016–0.60 は撤回 (第 10.10 節; O-KK-59)
$G_1 \rightarrow t\bar{t}$	0.045 [0.021–0.10]	0.063	$\kappa_{gg} = c_K/K = 0.0136$, 導出済み (T-KK-2c)
3.849 TeV における観測された 95% CL の錨 (Run 2 全体、単一実験)			
チャンネル/テンプレート	制限 [fb]	データセット	出典
$t\bar{t}$, 広幅 $\Gamma/m = 30\%$	25.5	140 fb $^{-1}$	ATLAS Collaboration (2025a)
$t\bar{t}$, 狭幅	4.9	140 fb $^{-1}$	ATLAS Collaboration (2025a)
ダイジェット, 狭幅 qq (σ_{BA})	8.0	137 fb $^{-1}$	CMS Collaboration (2020b)
実験あたりのテープ上ルミノシティ $L(Y)$ (13 TeV 換算)			
年/時期	L [fb $^{-1}$]	根拠	
2025 (Run 3)	442	Run-2 の 140 + テープ上の Run-3 (CERN, 2025)	
2026–29 (2026 年 6 月 29 日から LS3)	466	Run 3 は 2026 年 6 月 14 日に終了; ~ 540 が供給 (CERN, 2026b)	
2030 (年半ばから HL-LHC)	≈ 526	立ち上げの半年 (CERN, 2026b)	
2031–41 (HL-LHC)	+200–275/年	平準化して 250–350/年 (CERN, 2023); 2041 年末までに ≈ 3450	
2042–50 (LHC 後の空白)	3451	ベースラインは 2041 年に終了; 次の直接探査は FCC-hh ~ 2074 年 (FCC Collaboration, 2025)	

33 なぜこれが最良の衝突型加速器キラー実験なのか

33.1 他のエネルギー・フロンティアの主張と比べた鋭さ

「キラー実験」という語句は慎重に用いられるべきである。最も広い意味では、GG-6 には他にも重要な検定がある: アクシオン・セクターの検定、ダークエネルギーの検定、ヒッグス結合の検定、そして量子開放系の検定の可能性である。しかしエネルギー・フロンティアにおいては、KK 探索は、BSM 物理においてめったに共存しない三つの特徴を兼ね備えているがゆえに、断然最も清浄な反証子である。

第一に、標的質量は異例なほど鋭い。走査される超対称スペクトルもなく、真空のランドスケープもなく、柔軟な媒介粒子質量もない。第一クラスターは $K = 35$ に結び付けられている。

第二に、ロック・スケールを固定するのと同じ整数が、弱スケールのような他の成功した内部台帳関係にも関与している。したがって質量の予言は孤立していない; それは首尾一貫した三つ組の一部である。この連動は予言の枝を両方向に貫いて広がる: ダークマターのコンパニオン論文は 1.95 GHz 近傍のハロスコープ線を、窓 [1.59, 2.13] GHz の内側に賭けており — M_{lock} を定めるのと同じ台帳整数 $K = 35$ によって囲われた窓の中の、ただ一本の線である; テンソル残留物は誰にも食われず、軽い角の数は一つである — そしてブラックホールのコンパニオン論文は重力波のリングダウンを同じ自由エネルギー汎関数の曲率として読む。ロック・クラスターを殺せば、それらの勘定もその傷を受け継ぐ; 逆に、1.95 GHz における単一線が確認されれば、3.85 TeV の探索は探査ではなく確認の狩りとなるであろう。他のいかなるエネルギー・フロンティアの提案も、この種の隣接実験における人質を担ってはいない。

第三に、実験的言明は実務上有用な仕方で二値的である。スピン 2 に錨づけられ八重項が主導する信号クラスターが 3.85 TeV の近傍に現れるか、さもなくばますます強力になるデータが幾何の許す結合の回廊の全体にわたってそれを排除するかの、いずれかである。これは、ヌル結果が単に自由なスケールを上方へ押し上げるだけである多くの BSM 探索よりも、はるかに決定的である。

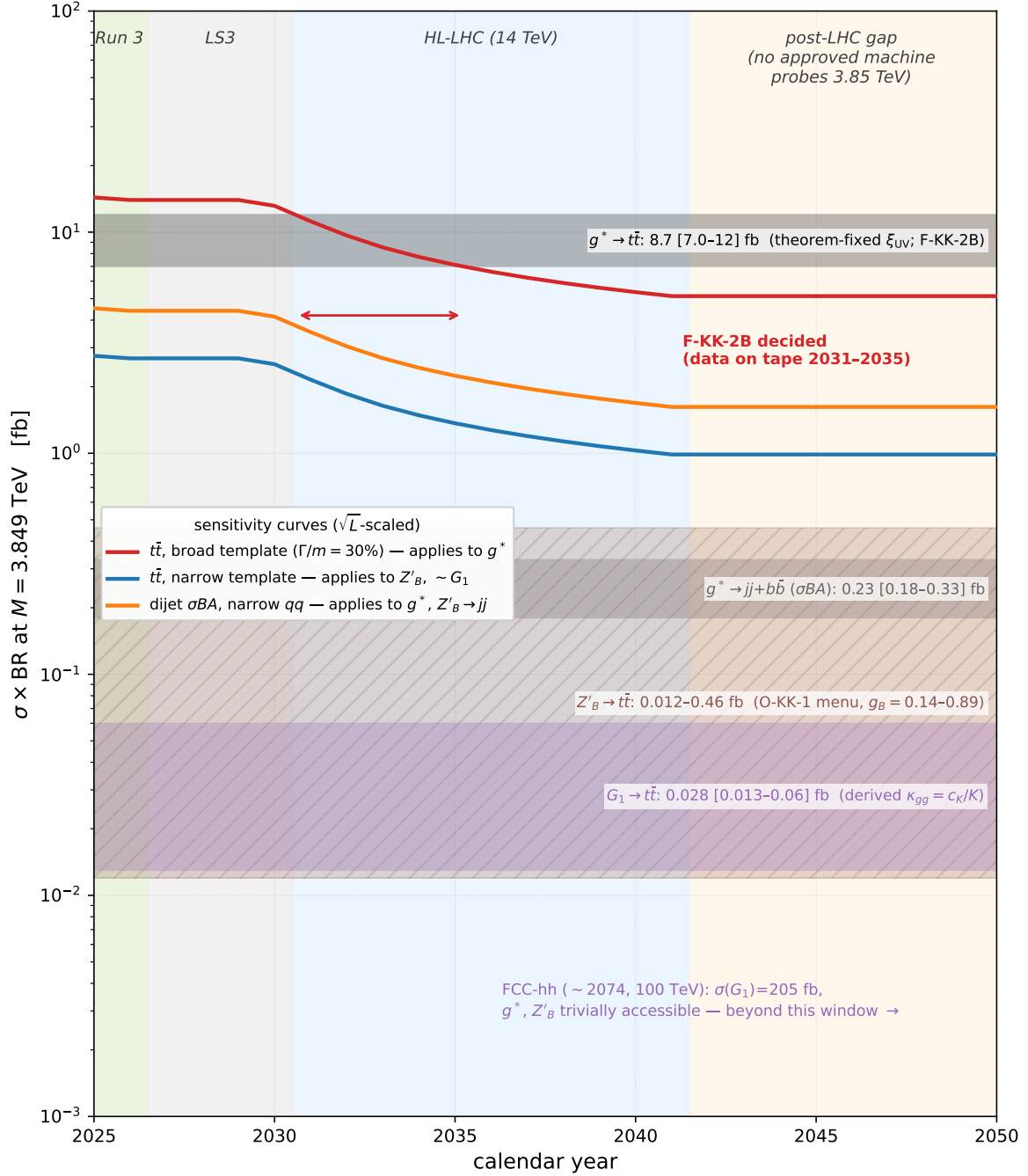


図 10: $M_{\text{lock}} = 3.849 \text{ TeV}$ における GG-6 ロック・クラスターの反証タイムライン、2025–2050。水平な帯: 表 21 の導出された GG-6 の予言 — 理論にそれらを動かすダイヤルがないため、時間に対して平坦である。下降する曲線: 3.849 TeV における予測された単一実験の 95% CL 感度であり、2026 年 7 月の CERN スケジュールに基づいて、観測された Run-2 全体の値から $\sqrt{L}$ でスケールされている (陰影をつけた時期: Run 3、LS3、HL-LHC、LHC 後の空白)。広幅テンプレートの $t\bar{t}$ 曲線は、公表テンプレートによるスケーリングの上では、~2031 年から ~2035 年のあいだにテープ上にあるデータで g^* 帯と交差する; 第 VIII 部の較正された機構は期待される決着を 2026 年末のデータセットへと前倒しし、それは図中にその単一の価格 ($\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ 、帯全体の期待される排除; 第 31.5 節) とともに記されている — F-KK-2A の閉包と T-KK-2c による F-KK-1 の再資格認定の後、反証子の唯一の LHC 側の腕である F-KK-2B は、Run-3 データの上で決着する。 Z'_B のノイマン参照値は撤回された上限としてのみ現れる; FCC-hh の標識は 85 TeV のベースラインにある。他のあらゆる帯は 2050 年まであらゆる曲線の下にとどまる (それらの LHC における不在は予言である); $G_1 \rightarrow \gamma\gamma$ の線 ($1.1 \times 10^{-5} \text{ fb}$) は描画された窓のはるか下に位置する。保守性と公表遅れの取り決めは本文中に述べられている; すべての入力値は表 21 にある。

33.2 発見が確立するであろうもの

3.85 TeV 近傍のスピン 2 に锚づけられたクラスターの説得力ある発見が、トップに富む分岐パターンおよび期待されるパートナー・シグネチャの少なくとも一つとともに得られれば、いくつかのことが一度に確立されるであろう。それは、余剰次元による記述が自然の中で実現していることを確立するであろう。それは、最初に到達可能なスケールが一般的なものではなく、きわめて特定の赤外値にロックされていることを確立するであろう。それは非普遍的な重なるの描像に強い支持を与えるであろう。そしてそれは、第二の動径族と八重項の再帰に対する将来の直接探索を必須のものとするであろう。

33.3 不在が確立するであろうもの

逆に、十分に強い複合チャンネルの排除は、「一つのベンチマークが失敗した」と言う以上のことをするであろう。それは GG-6 の憲法的連鎖そのものに圧力をかけるであろう。テープ上の Run-2 + Run-3 データの専用の再解釈が、3.85 TeV の周りのクラスターを意識した窓の中で、 $t\bar{t}$ 、ダイジェット、 hh 、ダイレプトン、二光子の各チャンネルにわたって第一クラスターの回廊を排除するならば、少なくとも次のうちの一つは偽でなければならない:

1. OGN-5 のロック指数 $K = 35$ が、主張されているように衝突型加速器の赤外スケールを支配していない、
2. 第一ロック族の 6D スペクトル解釈が誤っている、
3. あるいは重なり／結合の構造が、現在導出されている回廊とは根本的に異なる。

これらのいずれもが、現行の GG-6 実装の深い改訂として数えられるであろう。

33.4 事前宣言されたキル条件

測定と反証可能性に対する GG-憲法の主張に従い、衝突型加速器水準のキル条件は明示的に書き下すことができる:

Run-2 + Run-3 全体を合わせたデータセット ($\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ 、その上で排除が期待される) の専用の再解釈の後、*ATLAS* と *CMS* が、*F-KK-1* の窓 $3.85 \pm 0.10 \text{ TeV}$ の中に重心をもつ $t\bar{t}$ 、ブースト・ダイジェット、 hh 、 $\ell^+\ell^-$ 、 $\gamma\gamma$ の各探索の、クラスターを意識したいかなる組み合わせにおいても背景を超える超過を観測せず (フィットされたラインシェイプ自体は $2.5\text{--}4.9 \text{ TeV}$ にわたる、テンプレート *T1*)、かつ複合信号強度に対する対応する 95% *CL* 上限が、幾何が許す GG-6 回廊の全体を下回るならば、GG-6 の現行のロック・スケール実装は衝突型加速器の水準で棄却される。

この文言は、単一チャンネルの排除よりも意図的に強く、完全に厳密な一極テンプレートという不可能な要求よりも意図的に弱い。それは誠実さと決定力のあいだの正しい均衡である。第 31.5 節はそれを一つの数へと換算する: すでに記録された Run-3 データ ($\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$) は、帯が空であればその全体を排除すると期待される。(系 T-KK-2c により、スピン 2 の構成員はいかなる HL-LHC の感度よりも ~ 25 倍下に位置するため、LHC におけるこの条件の牙はもっぱらスピン 1 セクターのものである; グラビトンの線は FCC-hh が検定すべきものである。)

表 22: なぜ KK 探索が現行の GG-6 実装の最も鋭い 衝突型加速器 反証子なのか。最も鋭いというのは反証子についての主張であって、物理についての主張ではない: 衝突型加速器の検定は、その否定的結果に最も異議を唱えにくいものである、なぜなら質量が整数によって固定されており、マシンがすでに存在するからである。コホート内の他の検定はより深い構造を探り、決着までにより長くなる; この検定は博士課程の期間の内側で決定可能である。

基準	なぜ KK 探索が異例なほど強いのか
質量標的の特性	第一クラスターは 3.849 TeV を中心とするのであって、「数 TeV 領域のどこか」ではない。
他の理論的産出との接続	同じロック台帳は、電弱スケールの関係式やより広い階層性の筋書きにも入り込む。
二値的な性格	発見も複合チャンネルの排除も、いずれも直接的な意味をもつ; ヌル結果は単に自由パラメータを動かすだけではない。
エネルギー・フロンティアでの到達可能性	関係する質量スケールは、遠い将来の、あるいは純粋に宇宙論的な観測量の中だけにあるのではなく、LHC/HL-LHC の領域にある。
パターンの豊かさ	探索は一つの状態だけでなく、関連したパターン: クラスターの形状、トップに富む分岐、より高いパートナーを探る。

34 長期的な将来展望

34.1 決定的な機械としての HL-LHC

CERN の公式文書は、HL-LHC を、公称 LHC 設計に対して 5 倍を超えるルミノシティ利得をもたらす 14 TeV の機械として、実験あたり約 3000 fb^{-1} の積分ルミノシティを目標に据えて位置づけている (CERN, 2023)。その記述だけで、HL-LHC が GG-6 にとってなぜ決定的であるかはすでに含意されている。第一クラスターは、到達不能な数十 TeV のフロンティアにあるのではない; それはまさに、HL-LHC が最大の梃子を持つことになる回廊のうちにある。

34.2 ATLAS Phase-2 アップグレード

ATLAS は、完全に新しい全シリコン内部飛跡検出器 (ITk)、 $|\eta| < 4$ まで拡張された前方飛跡検出、新しい level-0 トリガー・アーキテクチャ、および高粒度タイミング検出器 (HGTD) を中心に据えた Phase-2 検出器を記述している。ATLAS は、ITk が擬ラピディティ被覆を $|\eta| < 2.5$ から $|\eta| < 4$ へ拡張すること、および HGTD が前方領域において 30 から 50 ps のタイミングを提供することを述べている (ATLAS Collaboration, 2024)。これらは一般的な改良ではない; 3.85 TeV におけるクラスター化された信号はパイルアップ除去、前方アクセプタンス、および改善されたブースト物体のタグ付けにとりわけ敏感であるため、これらは GG-6 探索に直接関係する。

34.3 CMS Phase-2 アップグレード

CMS も同様に、HL-LHC 期を、新しい内部飛跡検出器、高粒度エンドキャップ・カロリメータ (HGCAL)、および MIP タイミング検出器 (MTD) を伴う大規模な変革として記述している。CMS の公式記述は、MTD が荷電粒子に対して約 35 ps の時間分解能を、まさにバンチ交差あたり 140 から 200 のパイルアップ相互作用を解きほぐすために目指していることを強調している (CMS Collaboration, 2019, 2024e)。ここでもまた、GG-6 にとってこれは直接に有用である: トップに富み、ダイジェット

に富む高質量探索は、パイラアップの低減と改善された物体割り当てから強く恩恵を受ける。

34.4 FCC-hh、ミュオン・コライダー、および CLIC

GG-6 が確認されれば、将来の加速器計画は分光学の事業となる。公式の FCC-hh 構想は、HL-LHC より少なくとも 5 倍大きい積分ルミノシティ目標と、ほぼ 1 桁拡張された質量到達域とをもつ 100 TeV のハドロン・コライダーである (FCC Collaboration, 2018)。そのような機械は、第一クラスターを確認するにとどまらないであろう。それは GG-6 の低位の階段全体を地図化するであろう。

CERN の公式資料はまた、10 TeV のミュオン・コライダーが、高エネルギー・フロンティアのいくつかの問いについては 100 TeV の陽子コライダーと競合しうることが指摘している (CERN, 2024b)。3.85 TeV のスピン 2 状態に対して、ミュオン・コライダーは比類なくクリーンな環境と精緻な角度解析を提供するであろう。他方 CLIC は、公式には 380 GeV、1.5 TeV、および 3 TeV に段階が置かれている (CERN, 2024a)。そのため 3.85 TeV の状態の直接生成は基準段階では到達不能となるが、仮想効果とヒッグス結合の精密測定は依然として重要な補完的情報を提供するであろう。

34.5 間接的探査

最初の信号が直接に到来するとしても、間接的探査は重要であり続ける—そしてある一箇所において、それは信号を待たない。八重項の質量における塔の電弱メンバーは、赤外に登録されたヒッグスに対して、ツリー・レベルの $T = 1.7$ ($\alpha T = 1.3 \times 10^{-2}$) を与えるが、そこで大域的フィットが許すのは 0.00 ± 0.06 である: これはパーセント水準のパターン検査ではなく、計算された数値を伴うキル級の露出であり、O-KK-68 として登録され、F-KK-2B の傍らに置かれている。ヒッグス・セクターにおいて本論文は、導出された $G_1 \rightarrow hh$ の線 (P-KK-9) を除いて偏差を予測しない: ラディオンは存在せず、コンパニオン論文はヒッグスと細谷モードとの同定を撤回したため、細谷混合による偏差は負っていない。したがって、精密データが現状のままである中で出現する 3.85 TeV クラスターは、その電弱メンバーが、枠組みのまだ同定していないヒッグスによって登録されているようなクラスターであり、本論文は精密データをパターン検査として読むのではなく、そのとおりに述べる。

35 ATLAS と CMS のためのトリガーおよび解析ロードマップ

本節は、ATLAS / CMS のトリガーと関連する探索戦略に対する具体的な改良を提案する。この提案は意図的に実地的である。目標は、一つの思弁的な模型のために実験にトリガー系を作り直すよう求めることではない。それは、より広い新物理の目標とすでに整合しており、かつクラスター化された GG-6 信号にとりわけ有用であるような変更を指摘することである。

35.1 高レート・フロンティアを積極的に用いる

ATLAS はすでに、本質的な再構成済みの高水準量のみを保存し、事象サイズを劇的に削減してはるかに高いレートを許すトリガーレベル解析 (TLA) の威力を実証している (ATLAS Collaboration, 2025b)。CMS も同様に、すべての衝突からの削減された情報をトリガーレスまたはトリガー削減の形式で保存する Level-1 スカウティングを導入している (CMS Collaboration, 2025)。これらの手法は、高レート領域で実験に何ができるかをすでに変えつつある。

GG-6 計画にとって教訓は具体的である: 八重項自身の信号は、単一レプトン・トリガーを通じて本質的に完全な効率ですでにテープ上にあり (第 38.2 節; O-KK-56)、したがって 3 から 6 TeV の領域に特化した削減形式ストリームは、計画のハドロンのおよびダイジェットの隅に対する保険であって、評決の前提条件ではない。関連する削減量はエキゾチックなものではない。それらには、高質量ダイジェット運動学、ブーストされたトップの部分構造変数、ヒッグス・タグ付けの観測量、b タグ付けの要約情報、粗いタイミング変数、および $\ell^+\ell^-$ チャンネルにおけるクリーンな交差検査を保持するのに十分なレプトン情報が含まれる。

35.2 トリガー水準で探索をクラスター認識型にする

オンラインおよび半オンラインの共鳴に関する思考の大半は、一極の思考である。クラスター化された GG-6 信号は最適化を変える。一つの想定された極質量にのみ窓の中心を置くのではなく、トリガーおよびスカウティングの論理は、近接する複数の構造が明示的に許される 3.2 から 5.2 TeV の広い探索領域を支持すべきである。解析水準では、これは式 (29) をフィットするのに十分な分解能と較正の情報を保存することを意味する。トリガー水準では、それは分裂あるいは肩状の特徴に対する感度を希釈しかねない過度に狭い単一質量の仮定を避けることを意味する。

35.3 トップおよびヒッグスのブースト物体を一級市民に格上げする

GG-6 はトップに富む可能性が高いため、トリガーの文法は、ブーストされたトップおよびブーストされたヒッグスの範疇を、高質量の新物理計画における一級市民として扱うべきである。実際上これは次を意味する:

- スカウティング / TLA のストリームにおいて削減されたトップ・タグおよびヒッグス・タグの識別量を保持すること、
- 高 p_T の b タグ要約情報をオンラインまたは準オンラインで利用可能に保つこと、
- そして、縦割りの単一物体ストリームではなく、結合された $t\bar{t}+hh$ + ダイジェットの異常ストリームを設計すること。

これらは GG-6 を超えてもなお有用な変更である。それは美点であって、問題ではない。

35.4 精密タイミングを共鳴品質の変数として活用する

ATLAS と CMS はいずれも、HL-LHC におけるパイルアップ制御のための精密タイミングを強調している (ATLAS Collaboration, 2024; CMS Collaboration, 2019)。GG-6 の文脈では、タイミングは単なる頂点再構成の補助としてではなく、共鳴品質の変数として扱われるべきである。高質量のブーストされたハドロン終状態は、部分構造の観測量におけるパイルアップ汚染にとりわけ敏感である。したがってタイミング支援による洗浄は、いかなる GG-6 専用の再解釈にも明示的に含められるべきである。

35.5 共同のベンチマーク公開は多大な助けとなるであろう

実験が模型の氾濫について保守的であるのはもっともなことである。したがって共同体にとって最も有用な単一の一步は控えめなものであろう: 解析を理論の詳細で過重にすることなく、本質的な

GG-6 現象論を捉える公開ベンチマーク族を定義することである。そのようなベンチマークは次を含まうる

1. 3.85 TeV を中心とする第一クラスター、
2. 数百 GeV 程度の任意選択の分裂、
3. $t\bar{t}$ 、ダイジェット、および hh を優遇する非普遍的な分岐比、
4. $\ell^+\ell^-$ と $\gamma\gamma$ の穏やかな抑制、
5. そして 7 TeV 付近の第二動径族 ($n = 2$)。

それだけで現在の状況は、部分的な代理の集まりから、本当の検証にはるかに近いものへと変わるであろう。

表 23: GG-6 KK 探索のために提案されるトリガーおよび削減ストリームの改良。すべての提案は、より広い分類の高質量 BSM 計画にも利益をもたらすように枠づけられている。ここでのあらゆる提案は、より広い分類の高質量探索に資するように枠づけられており、それは礼儀ではなく提案に課された条件である。一つの理論の標的によって正当化されるトリガー変更は、いかなる共同実験も行うべきでない変更である；一つの範疇全体の到達域を改善し、たまたま本探索をも可能にする変更は、論じる価値のある変更である。

提案	主要な装置	GG-6 にとっての直接の利益	技術的にもっともらしい理由	GG-6 を超えたより広い利益
高質量専用の削減ストリーム	ATLAS TLA / CMS スカウティング	3 から 6 TeV の窓において高質量の全ハドロン事象およびダイジェット事象をはるかに多く保持する (レプトン+ジェットの評決はすでにテーブル上にある、O-KK-56)	両共同実験はすでに削減形式の高レート・ストリームを運用している (ATLAS Collaboration, 2025b; CMS Collaboration, 2025)	ダイジェット、暗黒セクター、および一般の広共鳴の計画に利益をもたらす。
クラスター認識型のテンプレート保存 スカウティングにおけるブーストされたトップ + ヒッグスの要約変数	HLT / オフラインのフィットモデル トリガー物体 + 削減された事象内容	第一クラスター周辺の高質量構造に対する感度を保持する GG-6 が最も強い場所で $t\bar{t}$ および hh の感度を改善する	新しいハードウェアよりもソフトウェアと解析上の選択を要する 既存のトップ/ヒッグスのタグ付け基盤を削減されたペイロードで再利用する	近接する極あるいは非自明な干渉をもつあらゆる模型に役立つ。 一般の重い共鳴、ベクトルのクォーク、および重いヒッグス・セクターに利益をもたらす。
タイミング支援による部分構造の洗浄	HGTD / MTD + オフライン再構成	200 バイルアップの条件下でトップおよびダイジェットの質量/部分構造の変数を安定化する	公式の Phase-2 タイミング目標の上に直接に築かれる (ATLAS Collaboration, 2024; CMS Collaboration, 2019)	HL-LHC における本質的にすべてのブースト物体の探索に利益をもたらす。
共通の公開ベンチマーク族	ATLAS / CMS の再解釈ノート	現在の代理制限を真の GG-6 検証へと転換する	検出器の変更ではなく共同実験水準のベンチマーク合意を要する	共同体がクラスター化された、あるいは非普遍的な余剰次元模型をより体系的に比較するのに役立つ。
$t\bar{t}$ +ダイジェット + $hh+\ell^+\ell^-$ による共同チャンネル結合	解析戦略	いずれか単一のクリーンなチャンネルを過大評価するのではなく、GG-6 の実際の高質量多チャンネル論理に合致する	チャンネル固有のテンプレートがひとたび定義されれば統計的に直截である	多くの非普遍的な共鳴模型に対して発見の頑健性を改善する。

第 VII 部は現実を、平易な言葉で棚卸した: 八重項は公表されたトップ対排除の観測された縁に位置しており—本論文自身の較正のもとでは名目上 95% CL で排除され、広く干渉する形状への移送が唯一の定量化されていない段階として残る—他方、脅威に見えるクリーン・チャンネルの制限はレプトフォビックでトップ親和的なクラスターには適用されない; 一方で、古い二分法の自由場の角はすでに死んでおり、まさにこれらのデータによって殺された。キル条件は一度値付けされ—すでに記録された Run-3 のデータ ($\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$) は、バンドが空であればその全体を排除すると期待される—そして時間軸が引かれた。しかしフロンティアの位置と時間軸は、依然として他者の解析の上に築かれた予測である。次の部はより直接的なことを行う: それは発見そのものを、実際の解析の忠実度でシミュレートし、そしてその問いが—実際の暦の上で—いつ答えられるのかを問う。

36 第 VII 部を平易な言葉で: すでに排除されたもの、そしてまだ探されていないもの

これは、予言が公表された記録と出会う部であり、その記録は単純な合否よりも興味深い。

この質量域における標準的なベンチマークは強く排除されており、本部はそれをまず、留保なしに述べる。排除されていないのは本論文の標的であり、それは公表されたどの探索もそのために設計されていないからである。既存のあらゆる制限は、選ばれた幅をもつ単一の共鳴に対して計算された; ここでの予言は、固定された相対位置をもって一つのスケールの近傍にある四つの状態であり、一つの形状について計算された排除は、再スケーリングによって別の形状へ移送されはしない。

それは抜け穴ではなく、本部はその違いについて注意深い。抜け穴とは、ダイヤルをもつ理論が空の結果を生き延びるために用いるものである。これはテンプレートと標的とのあいだの不整合であり、その是正は具体的かつ公開的である: すでに存在するデータの専用の再解釈である。

本部はまたキル条件を述べる。それを超えれば空の結果がこの読みを終わらせるようなルミノシティとチャンネルの集合が存在し、その数値は議論に委ねられるのではなくここに印字されている。本部を締めくくるトリガー・ロードマップは、それが求めるあらゆる変更が高質量探索の範疇全体を助けるように枠づけられている、というのも一つの理論の標的によって正当化されるトリガー変更は、いかなる共同実験も行うべきでない変更だからである。

第 VIII 部

発見のシミュレーション

ATLAS と CMS が実際に記録するもの—係留された HL-LHC シミュレーション、系統誤差の壁、そして事前登録された探索: 2026 / 2031 / 2033 / 2041

37 本部が付け加えるもの、そしてゲームの規則

第 VI 部は $t\bar{t}$ 信号の形状—ラインシェイプ、干渉の符号、角分布、偏極—を導出し、第 32 節は予測された制限曲線を通じて探索を暦の上に置いた。その二つのあいだに、実験家が実際に共に生きる問いが横たわっており、本部はそれに答える: カラー八重項が $M_{\text{lock}} = 3.849 \text{ TeV}$ に導出されたレートで存在するならば、ATLAS と CMS は 2026 年、2031 年、2033 年、2041 年の末に、ビンごとに何を記録するのか—そして正確にいつ、発見を主張しうるのか? 答えは定量的であり、その一部は驚くべきものである: 超過はほとんど即座に統計的に圧倒的となるが、発見を律速するのはルミノシティではなく背景の知識である; すでにテープ上にあるデータの再解析は証拠水準に近づく感度を担う; そして GG-6 が質量、幅、レート、符号、角度形状をあらかじめ指定するという事実は、公表されたパイプラインが活用していない仕方探索そのものの統計を変える。

本部は意図的に、ATLAS または CMS の解析グループに加わる大学院一年生の水準で書かれている。すべては単一の段階で導出されるか説明される: 係留解析が実際にどう働くのか、カットごとに (第 38 節); 我々のシミュレーションがその上にどう築かれるか (第 39 節); ポアソン尤度から積み上げた発見の統計 (第 40 節); トイが実際の解析にどう較正されるか (第 41 節); スペクトル・プロット上で目がなぜ有意性を甚だしく過大評価するのか (第 42 節); 四つのスナップショットそのもの (第 43 節); そして事前登録された探索の統計—探索範囲効果 (look-elsewhere)、整合テンプレート、角度の次元、および二実験の結合 (第 44 節)。共鳴探索を一度も走らせたことのない読者があらゆる数値を追えるはずであり; 一度走らせたことのある読者はあらゆる数値を検証できるはずである。

ゲームの規則。 四つの枠組み規則が本部を正直に保つ。(i) 実験に関わるすべては、最も関連の深い公表解析—ATLAS の全 Run-2 $t\bar{t}$ 共鳴探索 (ATLAS Collaboration, 2025a)—に係留されており、その背景、効率、分解能、ビニング、および系統誤差を我々は項目ごとに精査した。我々は検出器性能を捏造しない; 我々は測定された性能を借りる。(ii) 我々の簡略化された統計的機構は、いかなる予測を行うよりも前に、その解析の公表された期待制限に対して較正されている; 較正係数は隠されるのではなく報告される (第 41 節)。(iii) Phase-2 の検出器性能は Run-2 と等しいと仮定される—これは明示された保守的な単純化である、というのも ATLAS の ITk / HGTD および CMS の MTD のアップグレード (ATLAS Collaboration, 2024; CMS Collaboration, 2019) は、HL-LHC のパイプアップ下でのブーストされたトップのより良い性能をまさに標的としているからである。(iv) 格付けはコホートの梯子に従う: 信号モデルは第 VI 部およびそれ以前からの $[T/D^*]$ である (信号について

表 24: 140 fb^{-1} における ATLAS 併合信号領域の事後フィット背景 (ATLAS Collaboration, 2025a の HEPData 記録)、本部の係留点である。「事後フィット」とは、プロファイル尤度フィットがデータに対してすべての背景をその不確かさの範囲内で調整した後を意味する; これらは実際の解析が実際に達成した収量と残余の不確かさである。「その他」は $t\bar{t}V$ 、 $t\bar{t}H$ 、ダイボソン、および偽レプトンの寄与をまとめる。

$m_{t\bar{t}}$ ビン [GeV]	標準模型 $t\bar{t}$	単一トップ	V+ジェット	その他	合計 $\pm$ 系統	観測
3000–3500	60%	11%	24%	5%	$53.4 \pm 6.9\%$	47
3500–4200	47%	8%	34%	11%	$21.6 \pm 13.2\%$	18
4200–4900 (+溢れ込み)	40%	2%	40%	17%	$6.1 \pm 22.6\%$	6

は何もここで調整されていない) ; 実験模型は係留された [E] である; 予測シナリオはそれが入る場所
所で標識される。

共鳴探索がどう働くか、一段落で。 新参者のために述べれば、本部がシミュレートするパイプラインは五つの段階をもち、そのそれぞれが以下で自身の小節を得る。**生成:** 陽子が衝突する; パートン対 (ここでは $q\bar{q}$) が、通常の QCD 連続背景を通じて、あるいは共鳴を通じて、コヒーレントに $t\bar{t}$ 対を生成する。トリガー: $\sim 40 \text{ MHz}$ のバンチ交差のうち、ハードウェアとソフトウェアの縦続が永久保存のために $\mathcal{O}(1) \text{ kHz}$ を保持する; トリガーに落ちた事象は永遠に失われるため、いかなる探索においても最初の設計上の問いは、それがどのトリガーの上に生きるのか、である。**選択:** オフラインで、少数のカットがトポロジーを分離する—ここでは、一つのレプトンと、ハドロンのトップの全体を含む一つの大きく太いジェットである。**再構成:** 選択された物体から不変質量 $m_{t\bar{t}}$ が事象ごとに再構築され、その分解能が共鳴のどれほど鋭く際立つかを決める。**統計的フィット:** 観測された $m_{t\bar{t}}$ のヒストグラムが、ビン化されたプロファイル尤度フィットによって背景予測と比較され、超過 (またはその不在) が有意性または断面積の制限へと変換される。これらの段階のいずれもが信号を代償として要求し、それらの代償の正直な帳簿づけこそが、予測と願望との差である。

38 係留解析を、解析者のように読む

本節は、ATLAS の全 Run-2 $t\bar{t}$ 共鳴探索 (ATLAS Collaboration, 2025a)— 13 TeV における 140 fb^{-1} 、単一レプトンおよび二レプトンのチャンネル、共鳴質量 $0.4\text{--}5 \text{ TeV}$ 、同時にフィットされる八つの信号領域—についての我々の系統的な精査を凝縮する。それはシミュレーションが走る知識基盤であり、注意深く読む価値がある: 第 43 節の予測は、まさにこれらの数値からその現実性を継承する。

38.1 支配的な背景、およびそのそれぞれがどう見積もられるか

$m_{t\bar{t}} > 3 \text{ TeV}$ では事象レートは実験あたり年間数事象であり、「ほかに何が 3.8 TeV の $t\bar{t}$ 対を偽装しうるか?」という問いが解析の設計を支配する。ブーストされた (併合) 単一レプトン信号領域—高質量の感度のすべてを駆動する領域であり、我々が係留する領域—における組成は、表 24 に再掲されている。

この表の三つの特徴が注意に報いる。第一に、**組成が漂移する:** 標準模型 $t\bar{t}$ は裾にわたって 60% から 40% へ落ち、他方 V+ジェットは $\sim 40\%$ へ上昇する。物理は一度見てしまえば単純である: これらの質量における $t\bar{t}$ 連続背景は、急峻に落ちる反クォーク分布の上での $q\bar{q}$ 対消滅から来るのに

対し、 W +ジェットの事象は硬い価クォーク一つとグルーオン一つを必要とするだけであり、そのためそのスペクトルはより緩やかに落ちる。したがって「 $t\bar{t}$ のみ」をスケールする予測は、裾を 2 に近づく因子だけ誤るであろう；測定された合計への我々の係留は、この罫を自動的に回避する。第二に、不確かさが質量とともに爆発する：三つのビンにわたって 6.9% $\rightarrow$ 13.2% $\rightarrow$ 22.6% である。これらは事後フィット値—フィットがあらゆる制御領域を用いた後に残る無知—であり、これらは本部全体にとって単一で最も重要な入力であることが判明することになる（第 40.3 節）。第三に、見積もりの方法が成分ごとに異なる、そしてそれらを知ることは、どの不確かさがより多くのデータとともに縮みうるかを我々に告げる：標準模型 $t\bar{t}$ は Powheg+Pythia8 のテンプレートであり、トップの p_T と $m_{t\bar{t}}$ において NNLO 再重み付けされ、その全体の規格化はフィットにおいて自由に残されている（フィットはそれをデータ自身から決定する—この点は第 44.5 節に至るときに想起されるべきである）； W +ジェットは Sherpa のテンプレートであり、測定された W 電荷非対称性によってその場で規格化される（ pp における W^+/W^- の生成は、陽子が u 価クォークを二つと d を一つ保持するがゆえに非対称である；測定された非対称性は規格化を $\pm 3\%$ に固定し、その後は 50% の規格化変動と重フレーバーの形状変動が裾を覆う）；マルチジェットの偽事象はデータから行列法によって見積もられる（ルーズ対タイトのレプトン同定を偽同定確率へ反転させたもの）；単一トップはシミュレーションから取られ、 $Wt/t\bar{t}$ の干渉はダイアグラム除去によって扱われる。

38.2 トリガー、そしてなぜレプトン一つで十分なのか

本解析は単一レプトン・トリガーのみでイベントを記録する：2016–2018 年を通じて、ミューオンには $p_T > 26$ GeV、電子には $E_T > 26$ GeV の閾値であり、最も低い閾値には孤立の要求が課されている；そのうえでオフラインの要求 $p_T > 28$ GeV はトリガー・プラトーの上に乗る—トリガー効率がその最大値の近くで平坦化した領域であり、そこではイベントあたりの効率がもはや正確な閾値に依存せず、一度測定して綺麗に適用することができる。

なぜ 26 GeV のレプトン閾値が 3.85 TeV の共鳴にとって余裕のあるものなのか。運動学の連鎖を辿ってみる、というのもそれは有用な習慣だからである：崩壊から生じる各トップは $E_t \simeq M_{\text{lock}}/2 \approx 1.9$ TeV を担う。レプトンのトップはそのエネルギーを b, ℓ, ν のあいだで分け合う；トップ静止系においてレプトンは平均しておよそ W のエネルギーの三分の一を取り、ブーストの後の典型的な実験室系レプトン・エネルギーは $\mathcal{O}(E_t/4) \approx 500$ GeV である—閾値より一桁以上上である。最も運の悪い崩壊の向きであっても、レプトンを 50 GeV より下へ押し下げることが稀である。したがって単一レプトン・トリガーは、関心のあるいかなる $m_{t\bar{t}}$ においてもこの信号に対して実効的に 100% の効率を持ち、大半径ジェットや欠損エネルギーのトリガーは必要ない。このことは HL-LHC の予測にとって二重に重要である：レプトン閾値は、200 回の同時衝突というパイルアップをおおむね変わらぬまま生き延びると期待される数少ないトリガー量の一つであり（アップグレードされた Level-0 / HLT チェーンで ~ 25 –30 GeV; [ATLAS Collaboration, 2025b](#)）、したがって我々の「Run-2 性能」仮定のトリガーの脚は、どちらかといえば保守的である。

38.3 イベント選別と再構成、カットごとに

—レプトン選別を、解析者が適用するであろう順序で述べる： $p_T > 28$ GeV をもつ電子またはミューオンがちょうど一つ（第二のレプトンはそのイベントを拒否してダイレプトン・チャンネルへ送る）；欠損横運動量 $E_T^{\text{miss}} > 20$ GeV および $E_T^{\text{miss}} + m_T^W > 60$ GeV であり、この二つは合わせて真に逃げ去るニュートリノを要求し、多重ジェットの偽レプトンを抑制する（偽レプトンにはニュー

トリノが伴わないので、どちらの量も小さい) ; そして高質量レジームを定義する融合トポロジーの要求である。 $m_{t\bar{t}} \gtrsim 2$ TeV においてハドロンのトップは非常に強くブーストされており、その三つのクォーク・ジェットは単一のコーンへと融合する: 本解析は、 $p_T > 350$ GeV かつ $|\eta| < 2$ をもつアンチ- k_t $R = 1.0$ の「大半径」ジェットを一つ要求し、それはトリムされ (柔らかいサブジェットが除去され、これは硬い三叉構造を保ちつつパイルアップを剥ぎ取る)、80% 効率の動作点における深層ニューラルネットワーク・タガーによってトップと同定される—真のブーストされたトップの 80% が通過するように選ばれた動作閾値であり、これらのエネルギーにおける軽ジェットの除去率は 10 近くである。レプトン側では、レプトンから $\Delta R < 2.0$ 以内にある小半径ジェットが b -タグされていなければならない (77% 動作点)、これが $t \rightarrow b\ell\nu$ の仮説を完成させる。

次に再構成は、四つの部分から共鳴の質量を組み立て直す: タグされた大- R ジェット (ハドロンのトップ)、レプトン、 b ジェット、そしてニュートリノである。ニュートリノの縦運動量だけが測定されておらず、それは一つの拘束によって回復される: $\vec{p}_T^\nu = \vec{E}_T^{\text{miss}}$ のもとで $(p_\ell + p_\nu)^2 = m_W^2$ を要求すると、 p_z^ν についての二次方程式が得られる、

$$p_z^\nu = \frac{\alpha p_z^\ell \pm E_\ell \sqrt{\alpha^2 - (E_T^{\text{miss}} p_T^\ell)^2}}{(p_T^\ell)^2}, \quad \alpha \equiv \frac{m_W^2}{2} + \vec{p}_T^\ell \cdot \vec{E}_T^{\text{miss}}, \quad (77)$$

ここで $|p_z^\nu|$ のより小さい解を取る (そして分解能が判別式を負へ押しやる場合には、判別式をゼロに置く)。その結果、イベントごとに完全に再構成された $m_{t\bar{t}}$ が得られる。高質量において融合カテゴリーが分解ジェットのカテゴリーよりも好まれるのは、まさにそれが存在する理由による: 三つの小さなジェットの代わりに一つのカロリメータ対象を用いることは、組み合わせの誤りがより少なく、質量ピークがより鋭いことを意味する。

38.4 $\varepsilon A = 6.5\%$ は何でできているか

3.5–4 TeV の共鳴に対する公表された信号の効率かけるアクセプタンスは、分母にすべての $t\bar{t}$ 崩壊モードを数え上げて、6.0–6.8% である; 我々は 0.065 を用いる。新参の読者もこの数値を再構成できるべきであり、そこでその内訳を示す。一レプトン・チャンネルそのものが分岐比の代償を払う: $\ell = e, \mu$ に対して $\text{BR}(t\bar{t} \rightarrow \ell + \text{jets}) = 2 \times \text{BR}(W \rightarrow \ell\nu) \times \text{BR}(W \rightarrow q\bar{q}') \approx 2 \times 0.217 \times 0.674 \approx 0.29$ である (因子 2 は、いずれのトップもレプトンの崩壊し得るからである)。チャンネルの内部では、生き残る割合はおおよそ、トップ・タグの動作点 (0.80)、 b -タグの動作点 (0.77)、おおよそ残りのカットの運動学的かつフィデューシャルなアクセプタンス (~ 0.36 ; $|\eta|$ の被覆の外にあるレプトンやジェット、 ΔR のマッチング、 E_T^{miss} のカット) の積である。積 $0.29 \times 0.80 \times 0.77 \times 0.36 \approx 0.065$ が台帳を閉じる。この分解はまた、HL-LHC の改良がどこに効くのかをも同定する: 200 パイルアップにおけるタガーの動作点と b -タグ付けこそ、アップグレードが守るものである。

38.5 分解能、ビン分け、そして公表された感度

融合チャンネルの質量分解能は $\sigma(m_{t\bar{t}})/m_{t\bar{t}} \approx 10\%$ であり、大- R ジェットのエネルギー・スケールとニュートリノ再構成に支配されている。3.85 TeV の一割は 385 GeV である: 八重項の固有幅 $\Gamma_{g^*} = 561$ GeV に匹敵するものの、それより小さく、したがって観測されるラインシェイプは固有幅に同程度の実験的スミアリングを畳み込んだものである—どちらに読んでも真に広い対象であり、おおよそ解析ビン二つ分の幅をもつ。本解析は、その分解能に合わせて、テールにおいてスペクトル

を粗くビン分けする（ビン境界は 3.0、3.5、4.2、4.9 TeV でオーバーフロー付き）。その統計的機構は、すべての信号領域にわたって同時に行うビン分けされたプロファイル尤度フィットであり、系統的不確かさに対して $\mathcal{O}(100)$ 個のニューサンス・パラメータをもつ；我々の質量における公表された期待 95% CL 上限—第 41 節において我々が較正の基準とする数値—は、8.93 fb（狭いテンプレート、3.5 TeV）、6.41 fb（狭い、4.0 TeV）、そして広い $\Gamma/m = 30\%$ の KK グルーオン・テンプレートに対して ~ 25 fb である。

39 シミュレーション、一歩ずつ

39.1 信号：導出されたラインシェイプからビン内のイベントへ

真値レベルの信号は、第 VI 部の、式 (66) のコヒーレントな $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ スペクトルである：QCD 連続背景、ブライト-ウィグナー、そして定理が固定する符号 $\xi_{UV} g_V^t < 0$ をもつ干渉（極の下では建設的、上では破壊的）であり、13 および 14 TeV の双方において CTEQ6 のパートン・ルミノシティ (Pumplin et al., 2002) を用い、 $\Gamma_{g^*}/m = 14.6\%$ とし、第 VI 部のチャンネルに応じた NLO K 因子を用いて評価される（ブライト-ウィグナーには $K_{q\bar{q}} = 1.3$ 、干渉には $\sqrt{K_{q\bar{q}}}$ であり、これは干渉が共鳴振幅について線形である一方、二乗項が二次であるためである—小さいが忘れられやすい点である）。測定器の応答は、アンカー解析を模した二つの段階で入る。スメアリング：真値スペクトルは幅 $\sigma = 0.10 m$ のガウス関数と畳み込まれる、

$$\frac{d\sigma^{\text{reco}}}{dm}(m) = \int dm' \frac{d\sigma^{\text{truth}}}{dm'}(m') \frac{1}{\sqrt{2\pi} (0.10 m')} \exp\left[-\frac{(m - m')^2}{2(0.10 m')^2}\right], \quad (78)$$

これはイベントをビンのあいだで、測定器がそうするのとまさに同じように再配分する—図 12 における目に見える帰結に注意すべきである：スメアされたピークは 3.0–3.5 TeV のビンへ漏れ出し、見かけの最大値を極よりわずかに下へ引き寄せる。効率：スメアされたスペクトルは $\varepsilon A = 0.065$ を掛けられ、ATLAS のビン境界にわたって積分される。積分ルミノシティ L におけるビン i のイベント収量はそのとき $s_i = L \varepsilon A \int_{\text{bin } i} dm (d\sigma_{\text{BW}}^{\text{reco}} + d\sigma_{\text{int}}^{\text{reco}})/dm$ であり、我々はブライト-ウィグナーと干渉の部分全体を通じて別々に追跡する、というのもそれらはフィットに対して異なる応答を示すからである（第 42 節）。

39.2 背景：総量を測定された収量に锚づける

我々は W +ジェット、シングル・トップ、および偽レプトンをゼロからシミュレートしない—それは複数年にわたるコラボレーションの労力であり、そうでないふりをするのは芝居であろう。その代わりに我々は、ATLAS が我々の関心のあるまさにその領域において総背景をすでに測定しているという事実を利用し（表 24）、形状が物理に動機づけられ、規格化がそれらの測定にフィットされた二パラメータ・モデルを構築する：

$$B(m) = A \frac{d\sigma_{\text{SM}, q\bar{q}}^{\text{reco}}}{dm} \times \left(\frac{m}{3849 \text{ GeV}}\right)^n, \quad (79)$$

ここで第一の因子は我々自身のスメアされた LO $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ 連続背景であり（これはパートン・ルミノシティの正しい畳み込みと正しい分解能スメアリングを担っている）、べき乗則の傾き $(m/3849)^n$

は、完全なカクテルを純粋な LO $q\bar{q} t\bar{t}$ から区別するすべてを吸収する：より平坦な傾きをもつ $V+$ ジェットの混入、NLO の形状補正、そしてアクセプタンスのドリフトである。 (A, n) を三つの事後フィット ATLAS 収量にフィットすると、 $n \approx 0.76$ をもって三つすべてがそれぞれの不確かさの範囲内で再現される—正であり、まさに第 38.1 節の組成のドリフトが予言するとおりである（カクテルは純粋な $q\bar{q} t\bar{t}$ よりも緩やかに落ちる）。同じ (A, n) を 14-TeV の連続背景の形状に適用すると、HL-LHC の背景が得られる。このモデルは意図的に慎ましい：それは ATLAS が測定した以上のことを知らず、また知ることを許されてもいない。

39.3 13 から 14 TeV へ、そして「14-TeV 等価」ルミノシティ

二つの衝突型加速器のエネルギーが入る。2026 年末のスナップショットは本来的に 13 TeV でシミュレートされている：それは Run-2+3 データセット、すでにテープ上にある 0.466 ab^{-1} の再解析である—これは明示された保守性であり、というのもその標本のうち Run-3 の分 (466 fb^{-1} のうち 326、七十パーセント) は 13.6 TeV で記録されており、そこでは 3.85 TeV における $q\bar{q}$ ルミノシティが ≈ 1.3 倍大きいので、2026 年末の総計の信号収量は $\approx 20\%$ 低いからである。HL-LHC のスナップショットは 14 TeV で走り、そこでは 3.85 TeV における $q\bar{q}$ パートン・ルミノシティが ≈ 1.55 倍大きい—これらの質量では衝突するパートンは運動量分率 $x_1 x_2 \gtrsim (3.85/13)^2 \approx 0.088$ を担っており、これは PDF の急峻に落ちる端の深部であるから、7% のエネルギー増加でさえ大きなレートの利得を買う。HL-LHC のスナップショットに対しては、13-TeV の遺産は $\approx 303 \text{ fb}^{-1}$ の「14-TeV 等価」データとして折り込まれる—13-TeV の収量を信号領域のレート比で割ったもの—同じ信号統計をもたらずであろう 14-TeV 運転のルミノシティである—こうして実験あたりの総計は 0.56 ab^{-1} (2031 年末、HL-LHC 物理のおよそ一年半)、 1.09 ab^{-1} (2033 年末)、および 3.29 ab^{-1} (2041 年末) となり、これは第 32 節のスケジュール・モデル (LS3 は 2030 年半ばまで、その後 HL-LHC 物理) による。特に述べない限りすべての結果は単一実験のものである；ATLAS+CMS の結合は第 44.4 節において注意深く扱われる。

40 発見の統計、第一原理から

本節に独創的なものは何もない—それは Cowan et al. (2011) の標準的な機構である—しかしそれなしには予測は理解され得ず、まして検査され得ないので、我々はそれを完全に導出する。

40.1 計数、尤度比、そして Z の意味

単一のビンが、 b 個の背景イベントが期待されるところで n 個のイベントを記録する。「有意度」は一つの問いに答える：もし信号が存在しないとすれば、少なくともこの大きさの揺らぎはどれほど起こりにくいか。その確率 p は慣例的に、等価なガウス標準偏差の個数 $Z = \Phi^{-1}(1-p)$ として引用される、したがって $Z = 5$ は $p = 2.87 \times 10^{-7}$ を意味する。最適な検定統計量は（ネイマン-ピアソンの補題により）尤度比である。ポアソン計数に対しては $\mathcal{L}(\mu) = e^{-(\mu s+b)} (\mu s+b)^n / n!$ であり、発見の検定は $\mu = 0$ を最良フィットの $\hat{\mu}$ と比較する：

$$q_0 = -2 \ln \frac{\mathcal{L}(0)}{\mathcal{L}(\hat{\mu})} = 2 \left[n \ln \frac{n}{b} - (n-b) \right] \quad (n > b), \quad (80)$$

ここで第二の形は $\hat{\mu}s = n - b$ を代入することによって従う（最尤推定値は単に観測された計数を飽和させる）。ウィルクスの定理により q_0 は背景のみの仮説のもとで χ_1^2 として分布する、したがって $Z = \sqrt{q_0}$ である。期待中央値の有意度を得るには、 q_0 を無作為のデータセットの上ではなくアシモフ・データセットの上で評価する—すべての観測量がその期待値に等しい人工的なデータセット、 $n = s + b$ である（Cowan et al. により、一人の代表的な投票者が全有権者に取って代わるアシモフの物語 *Franchise* にちなんで命名された）。(80) に $n = s + b$ を代入すると：

$$Z_{\text{stat}} = \sqrt{2 \left[(s+b) \ln \left(1 + \frac{s}{b} \right) - s \right]} \xrightarrow{s \ll b} \frac{s}{\sqrt{b}}, \quad (81)$$

ここで極限は対数を二次まで展開することから従う—そしてこれこそが、俗に知られた公式 $s/\sqrt{b}$ の由来であり、その妥当性の領域（ $s \ll b$; 1 のオーダーである我々の信号対背景比においては、完全な形が重要であり、我々が用いるのはそれである）もまたここから来る。

40.2 ニューサンス・パラメータとしての背景の系統誤差

いま b それ自体が $\pm \delta b$ だけ不確かであるとする—我々の場合、表 24 の ATLAS の事後フィット分数不確かさであり、 $\delta b = f_b b$ である。尤度はニューサンス・パラメータを獲得する：未知の真の背景 b' であり、幅 δb のガウス関数によって拘束される（制御領域と較正からの補助的知識である）。検定統計量は b' をプロファイルする—分子と分母において別々に、それについて尤度を再最大化する—その結果、揺らぎはポアソン雑音だけでなく、系統誤差が許すあらゆる背景の配位をも打ち負かさねばならない。発見的な結果は直ちに推測できる：二つの雑音源は二乗和で加わる、

$$Z \approx \frac{s}{\sqrt{b + (f_b b)^2}}, \quad (82)$$

そして、プロファイリングを解析的に遂行することによって得られる厳密なアシモフの公式 (Cowan et al., 2011) が、シミュレーションが至るところで用いるものである：

$$Z = \left\{ 2 \left[(s+b) \ln \frac{(s+b)(b+\delta b^2)}{b^2 + (s+b)\delta b^2} - \frac{b^2}{\delta b^2} \ln \left(1 + \frac{\delta b^2 s}{b(b+\delta b^2)} \right) \right] \right\}^{1/2}. \quad (83)$$

二つの極限がこの公式を直観に照らして確認する： $\delta b \rightarrow 0$ のとき、それは (81) へ帰着し、 $\delta b \gg \sqrt{b}$ に対しては $Z \rightarrow s/\delta b$ に飽和する—系統誤差の壁である。独立なビンは二乗和で結合して $Z_{\text{tot}}^2 = \sum_i Z_i^2$ となり、これはニューサンスがビンに依存しないとき（我々のビンごとの f_b の扱い；相関は第 41 節の較正へ吸収される）、プロファイル尤度に対して厳密である。

40.3 系統誤差の壁、正確に位置づける

式 (82) は、本部において最も重大な唯一の算術を含んでいる。 s と b はともにルミノシティ L とともに線形に増大するので、ポアソン項 $\sqrt{b}$ は $\sqrt{L}$ として増大する一方、系統誤差項 $f_b b$ は L として増大する。両者は $b = 1/f_b^2$ のときに交差する、すなわち

$$L^* = \frac{1}{f_b^2 b_{\text{1fb}}}, \quad (84)$$

であり、ここで b_{1fb} は fb^{-1} あたりの背景である。 L^* を超えると、ビンあたりの有意度はルミノシティに依存しない天井 $Z_{\max} = s/(f_b b) = (\text{signal-to-background})/f_b$ に飽和する：それ以降は、より良い背景の知識—より小さい f_b —だけが答えを動かす。錨づけられた背景と Run-2 の事後フィット f_b を用いて (84) を評価すると：2.5–3.0、3.0–3.5、3.5–4.2、4.2–4.9、および 4.9–5.6 TeV のビンに対してそれぞれ $L^* = 353$ 、554、356、485、および 1054 fb^{-1} である。これらのいずれもが Run-3 データセットのオーダーである。この結論はイタリックに値する、というのもそれなしには下流の何一つ意味をなさないからである：高質量 $t\bar{t}$ 探索は Run 3 のあいだに統計限界レジームを離れる；*HL-LHC* 時代の全体は、この探索にとっては、統計ではなく系統誤差についての戦いである。この一つの事実が、以下のあらゆる感度曲線の形を説明する。

41 較正：トイを実際の解析へ結びつける

我々の尤度は簡略化されている：それはニューサンス・パラメータの相関、浮動する $t\bar{t}$ 規格化による広い形状の吸収、信号領域をまたぐ信号の漏れ、ダイレプトン・チャンネル、そして多信号領域の構造を無視している。これらすべての代償は、推測されるのではなく注入テストによって測定される：我々は 140 fb^{-1} において狭いテスト信号（測定器分解能をもつガウス関数であり、公表された狭テンプレートの効率を伴う）を置き、すべての予測に用いたのと同じ機構で我々の期待 95% CL 制限を計算する。我々は 4.0 TeV において 1.46 fb を、3.5 TeV において 2.09 fb を得る、これは ATLAS の公表値 6.41 および 8.93 fb に対するものである：劣化因子は 4.40 と 4.27 であり—二つの質量において整合している、そしてこのことこそが、それらの平均を単一の較正定数へ格上げすることを許すのである、

$$F_{\text{cal}} = 4.33, \quad Z_{\text{true}} \simeq Z_{\text{naive}}/F_{\text{cal}}, \quad (85)$$

これは以降で引用されるすべての有意度と制限に適用される。これは連鎖のうちで測定された不確かさをもたない唯一の段階である： F_{cal} は排除に固有の機構における狭い注入の上で測定され、そして発見に対して、また広く干渉する形状に対して適用される、これは本論文が自身のアンカーからは制限することのできない移送である（第 31.4 節）。中間の幅についての順序の検査： F_{cal} を固定し、それ以上の自由度なしに、この枠組みは干渉項を含まない $\Gamma/m = 15\%$ の形状に対して 140 fb^{-1} の期待制限 8.4 fb を与える—これは ATLAS の公表された狭い (6.4 fb) テンプレート制限と広い-30% (~ 25 fb) のテンプレート制限のあいだに正しく順序づけられており、15% 幅の形状はそこに落ちなければならない。それは整合性の検査であって、移送の測定ではない。この枠組みはまた、調整なしに、八重項が現在のフロンティアに位置するという ATLAS 自身の言明を再現する：予言される 8.7 fb を注入すると、公表された排除のすぐ下に期待される超過が得られる。

統計に関心のある読者のために方法論上の注意を一つ述べておく、というのもその誘惑は実在するからである：トイは明示的な背景の規格化と形状の傾きを追加でプロファイルすべきだと考えられるかもしれない（第 42 節の我々の診断がそうしているように）。そうすべきではない、そしてその理由は理解する価値がある：表 24 の ATLAS の f_b は事後フィットの不確かさである—それらは、実際のフィットがその規格化を浮動させ、その形状をプロファイルした後の背景モデルの残された自由度を、すでに符号化している。事後フィットの f_b と明示的な自由規格化とを併せて用いることは、背景の自由度を二重に数え、感度を過小に述べることになるであろう。事後フィットの f_b に較正を加える経路が検証されたものである；明示的プロファイルの構成は以下において、感度がどこで失われるのかを突き止めるための教育的な道具として、厳密にその限りで現れる。

41.1 「改善された系統誤差」が意味するもの、定量的に

以下のすべての予測は、ちょうど一つの入力において異なる二つのシナリオのもとで引用される：ビンごとの分数的な背景不確かさである。この半減は標準的な HL-LHC 予測の規約であり (Cepeda

表 25: 「改善された系統誤差」が意味するもの、形容詞としてではなくビンごとの数値として述べたもの。凍結の行は ATLAS Run-2 探索の公表された事後フィット背景不確かさである；改善の行はそれを半減させる。本部のすべての予測は両者のもとで引用され、二つの行はちょうど一つの入力において異なる、したがって改善を楽観的だと考える読者は、全体を通じて凍結の列を読んでもなお完全な予測を手にすることができる。

$m_{t\bar{t}}$ ビン [TeV]	2.5–3.0	3.0–3.5	3.5–4.2	4.2–4.9	4.9–5.6
凍結 (ATLAS 事後フィット、Run 2)	5.0%	6.9%	13.2%	22.6%	30%
改善 ($f_b/2$)	2.5%	3.45%	6.6%	11.3%	15%

et al., 2019)、それは希望的というよりも分解可能なものである。ATLAS のテールの不確かさは三つのクラスを含む：(i) テンプレートおよび制御領域の統計的成分（シミュレーションの標本サイズ、 W 電荷非対称性および Z 再重み付けの制御領域）であり、これは $1/\sqrt{L}$ としてスケールし、それだけで 1.1 ab^{-1} において $\times 2.8$ 、 3.3 ab^{-1} において $\times 4.9$ 縮小する；(ii) 対象の較正（ジェット・エネルギー・スケール、トップおよび b タグ付けのスケール因子）であり、データ駆動でおおよそ $1/\sqrt{L}$ として 1–2% の床へ向けて改善する；(iii) 理論モデリングの項（ $t\bar{t}$ の生成器およびシャワーの変分、50% の W +重フレーバーの変分）であり、これはより良いシミュレーションと補助的な測定によってのみ改善する。総量を半減させることは、クラス (i)+(ii) が期待どおりに改善する一方で (iii) が控えめに改善することに対応する—もっともらしい中道である。「凍結」は十五年にわたっていかなる成分の改善もないと仮定する：悲観的な限界である。現実を図 13 の二つの曲線のあいだを、「改善」に近い側で辿るはずである。以下で正直に用いられる、スナップショットに固有の機微を一つ注意しておく：2026 年末においては「改善」のおよそ半分は自動的である、というのも誰かが何かを改善するより前に、Run-2+3 データセットそれ自体がクラス (i) の成分を $\sqrt{140/466} = 0.55$ だけ縮小させるからである。

42 なぜ目は過大評価するのか：有意度の梯子

図 12 は 2026 年末においてすでに圧倒的な発見のように見える—そして純粋な計数によればそのとおりである：描かれた背景に対する超過は、表示された全範囲 1.5–7 TeV にわたって 23.6σ の統計的效果である（3.0–4.9 TeV の解析窓の内部では 16.8σ であり、これは表 26 の厳密な三ビンのアシモフ値である）。正直な較正された有意度は、錨づけられた窓において 2.5σ である（アンカー解析が被覆していない 2.5–3.0 TeV の隣接ビンを数える場合には 2.7σ ；付録 L）。一年目の学生は、その ~ 9 という因子がどこへ行くのかを体得すべきである、というのもそれはスペクトル図を読むことと探索を理解することとの違いだからである；図 11 はそれを物理的に区別される三つの段階へ分解する。

段階 1 $\rightarrow$ 2 ($23.6 \rightarrow 12.8\sigma$)：灰色の線にも誤差棒がある。目はデータ点を背景曲線と、あたかもその曲線が厳密であるかのように比較する；正しいビンごとの比較は (82) であり、 0.466 ab^{-1} においては系統誤差項 $f_b b$ が 3.5–4.2 TeV のビンにおいて $\sqrt{b}$ をすでに追い越しており、他のビンでは

それに匹敵している（第 40.3 節; 付録 L）。各ビンにおいて $s/\sqrt{b}$ を完全な (83) で置き換えると、計数の梯子は 23.6σ から 12.8σ へ移る、いずれも表示された全範囲にわたるものである; 錨づけられた三ビンの値は 16.8σ と 10.7σ である（付録 L）。

段階 2 → 3 ($12.8 \rightarrow 4.0\sigma$) : 背景の形状は天与のものではない。図 12 の背景曲線は、あらかじめ知られているかのように描かれている。実際の解析においてそれは同じデータから決定される: 標準模型の $t\bar{t}$ 規格化は自由に浮動し、形状のニューサンスはプロファイルされる。10% の分解能でスミアされた $\Gamma/m = 15\%$ の共鳴は、滑らかで、符号が一定で、ビン二つ分の幅をもつ増強である—そのフィットの零空間に危険なほど近い。この仕組みは一度は解析的に見ておく価値がある。フィットが一つの自由パラメータ、すなわち全体の規格化 A をもち、それが重み $w_i = 1/(b_i + (f_i b_i)^2)$ を伴うデータ $d_i = b_i + s_i$ に対する重み付き最小二乗によって決定されるとする; $\sum_i w_i (d_i - A b_i)^2$ を最小化すると次が得られる

$$\hat{A} = 1 + \frac{\sum_i w_i b_i s_i}{\sum_i w_i b_i^2}, \quad (86)$$

すなわち背景の推定値は信号を迎えに上昇する、その量は、計量 w において信号の形状が背景の形状にどれほど似ているかによって支配される。狭いスパイク（一ビン）は $\hat{A}$ をほとんど動かさない; 滑らかで広い超過はそれを大きく動かす。わずかに二つのパラメータ（規格化とべき乗則の傾き）をもつ我々の診断フィットは、凍結の不確かさに対してプロファイルされて、窓内の信号の 75% を吸収し—再フィットされた背景は、 $f_b = 5\%$ である低質量において無視できる代償で超過へと登っていく、—というのも信号が住むテールのビンが 13–30% を許すからである—そして 12.8σ を 4.0σ へと移す（図 11、左）。

ステップ 3 → 4 (五ビンにわたって $4.0 \rightarrow 2.7\sigma$; アンカーされた窓では 2.5σ) : 完全な機構。実際のフィットが持つのは二つではなく $\mathcal{O}(100)$ 個のニューサンス・パラメータである — 成分ごとの規格化、ジェット・エネルギー・スケールの固有ベクトル、タグ付けのスケール因子、生成器の形状変動 — そのいずれもが大域的な傾きより大きな吸収能力を持つ。我々はそれらを個別にモデル化しない; その総体としての代価は、測定された較正值 $F_{\text{cal}} = 4.33$ が担うものである（第 41 節）。

二つの系。(i) 発見の変数はルミノシティではなく背景の知識である: これが図 13 における凍結曲線のプラトーの内容のすべてであり、 5σ を越えるのがより多くのデータではなく系統誤差改善シナリオである理由でもある。(ii) 吸収は関連した符号反転構造に対して盲目である: 規格化と傾きのフィットは単一符号のバンプを食うことはできるが、干渉パターン — 極の下側の超過、上側の不足、そして 4.9 TeV を越えて総和スペクトルが標準模型を下回ること — を生成することはできない。したがって干渉の自由度を担うテンプレート・フィットは、素朴な計数が失うものの多くを回復する。これは第 44 節で定量化される事前登録の利点の一つである; 計数のみを用いる本部の発見数値は、その特定の意味において保守的である。

43 四つのスナップショット: 検出器が記録するもの

表 26 は解析ビンの期待値と較正された有意性を与える; 図 12 は $1.5\text{--}7 \text{ TeV}$ にわたる完全なシミュレーション・スペクトルを統計誤差棒とともに描く（スナップショットごとに一回のポアソン擬

The discovery may already be on tape: end-2026 reanalysis of recorded Run-2+3 data

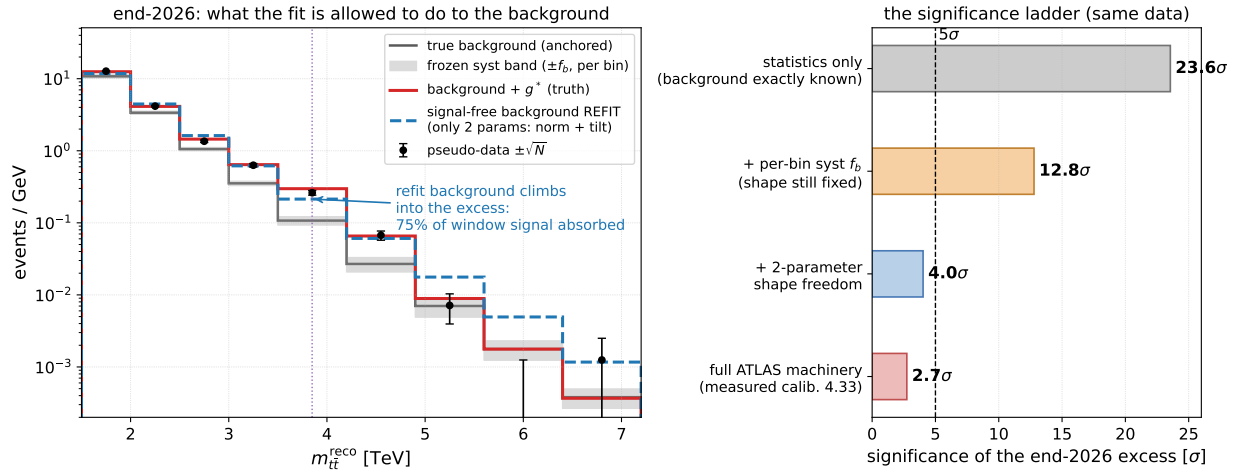


図 11: 2026 年末において、図 12 の「きれいな」超過が 20σ ではなく $2.5\text{--}2.7\sigma$ の価値しか持たない理由。左: 凍結されたビンごとの系統誤差帯 (灰色) を伴う 2026 年末のスペクトルと、規格化と傾きという二つの自由パラメータのみによる信号なし背景の再フィット (青破線): 再フィットは超過へと登り、窓内信号の 75% を吸収する一方、帯が狭い低質量領域では無視できる代価しか払わない。完全な ATLAS のフィットはこの種の自由度を $\mathcal{O}(100)$ 個持つ。右: 同一のデータセットに対する有意性の梯子: 完全背景での計数 $23.6\sigma \rightarrow$ ビンごとの系統誤差 $12.8\sigma \rightarrow$ ニパラメータの形状自由度 $4.0\sigma \rightarrow$ 測定された全解析較正 2.7σ 。

表 26: 四つのスナップショット。解析ビンは $3.0\text{--}3.5 / 3.5\text{--}4.2 / 4.2\text{--}4.9$ TeV (ATLAS にアンカーされた領域); 本表のすべての有意性はこの三ビンのみで計算されている。五ビン版は両側に二つのビン ($2.5\text{--}3.0$ および $4.9\text{--}5.6$ TeV) を加えるが、それらの系統誤差はアンカー表に含まれておらず、2026 年末で凍結値を 2.7σ に、改善値を 3.7σ に引き上げる; これら五ビンの値は記録として付録 L に残されており、本論文が担うのはアンカーされた値の方である。S: ブライト-ウィグナー; I: 干渉 (符号付き — 最上位ビンの不足に注意せよ。これは第 VI 部の形状反証子である); B: 背景。有意性は較正されている ($F_{\text{cal}} = 4.33$); シナリオは第 41.1 節による。特性の行は純度補正された窓内計数を用いる; スピン判別と δP_t の行は第 VI 部の角度テンプレートに対するワークブック値であり、印刷された入力のみからは再現できない。

	2026 年末 0.466 ab^{-1} (13 TeV)	2031 年末 0.56 ab^{-1}	2033 年末 1.09 ab^{-1}	2041 年末 3.29 ab^{-1}
S (3 ビン)	81/113/32	144/211/63	279/409/121	843/1234/366
I (3 ビン)	+64/ +20/ -5	+110/ +35/ -11	+212/ +67/ -21	+641/ +203/ -64
B (3 ビン)	177/75/19	301/137/37	583/265/72	1758/798/216
Z_{disc} (凍結)	2.5σ	2.8σ	3.0σ	3.2σ
Z_{disc} (改善)	3.3σ	4.1σ	4.8σ	5.8σ
Z_{disc} (統計のみの上限)	16.8σ	22.8σ	31.7σ	55.1σ
窓内 ($3.0\text{--}4.9$ TeV) の信号事象数	305	552	1068	3223
窓内純度	0.53	0.54	0.54	0.54
スピン判別	5.2σ	7.1σ	9.9σ	17.3σ
δP_t (レプトンの傾斜)	0.27	0.19	0.14	0.08
干渉の符号 (粗ビン)	$\sim 0.8\sigma$	$\sim 0.9\sigma$	$\sim 1.0\sigma$	$\sim 1.0\sigma$

似実験、シードは固定)。すべての収量は併合 SR、単一レプトン、実験あたりのものである; 2026 年末は 13 TeV、それ以外は 14 TeV である。

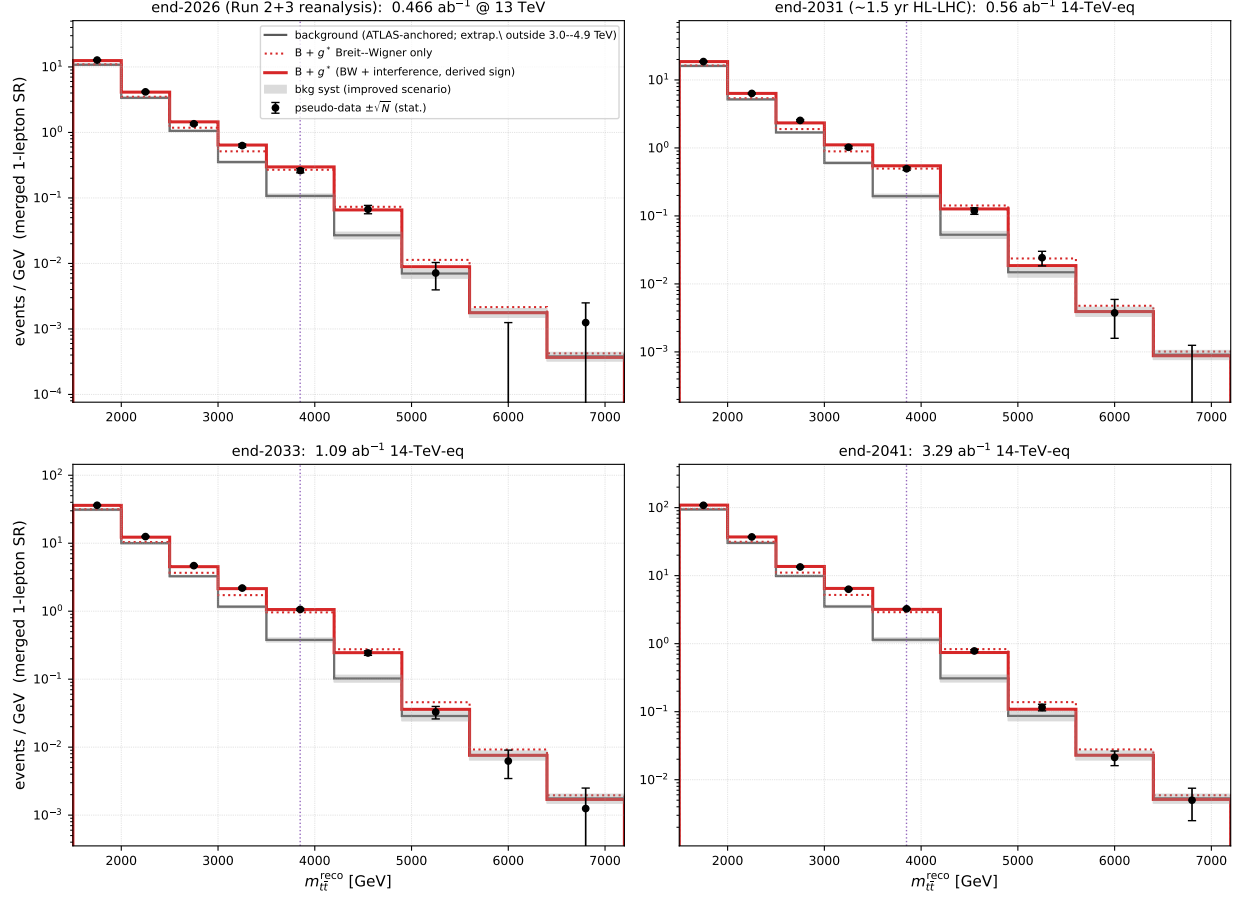


図 12: 四つのスナップショットにおける、シミュレーションされた併合 SR の $m_{t\bar{t}}$ スペクトル、1.5–7 TeV (一実験; 2026 年末は 13 TeV、それ以外は 14 TeV)。点: $\pm\sqrt{N}$ の統計誤差棒を伴うポアソン擬似データ。灰色: 改善シナリオの系統誤差帯を伴う ATLAS にアンカーされた背景 (3.0–4.9 TeV でアンカーし、その外側では外挿)。赤実線: 導出された干渉を伴う背景 + 八重項; 赤点線: ブライト-ウィグナーのみ。この質量域では三つのコヒーレント構造の兆候が見える: 極のはるか下方まで伸びる連続背景の 10–15% の干渉増強 (~ 3.8 TeV 以下で実線が点線の上にある)、3.0–3.5 TeV における建設的な肩、および破壊的な高質量側であり、そこでは実線が極より上でブライト-ウィグナーのみの期待値を下回り、 ~ 4.9 TeV を越えては標準模型そのものをも下回る。超過の視覚的な大きさは、その有意性を大幅に過大に見せる — 感度が実際にはどこへ行くのかについては第 42 節と図 11 を見よ。

2026 年末: 再解析の場合。 このスナップショットは新たな衝突を必要としない: それは 2026 年 6 月以来テープ上にある Run-2+3 の全データセットである。導出されたレートでは、標本は 3.0–4.9 TeV の窓の中に ~ 300 事象の八重項 (ブライト-ウィグナーと正味の干渉の和) を、 ~ 270 の背景に対して含む — 信号対背景比はほぼ 1 であり、統計的には 16.8σ の効果である — が、背景系統誤差をプロファイルすれば、実験あたり 2.5σ (凍結) から 3.3σ (改善) の価値となる。平たく言えば: GG-6 八重項に対する証拠水準に近づく感度が、すでに記録済みのデータの中に存在しているかもしれないのであり、それは本論文が要請する、まさにあの専用の $\Gamma/m \simeq 15\%$ の干渉を考慮した再解釈 (第 31 節) を通じて到達可能である。同じ再解析が予言されたレートで無信号であったならば、複合シナリオを厳しい圧力の下に置くことになる — 第 31.5 節の排除モードである。

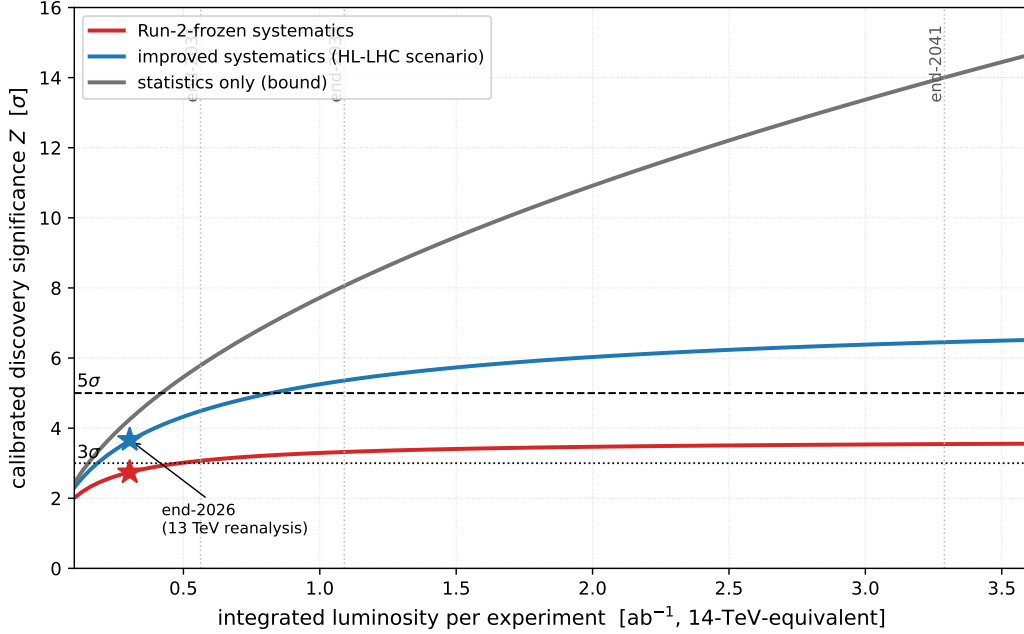


図 13: 凍結と改善という二つの系統誤差シナリオに対する、積分ルミノシティ（14 TeV 換算、実験あたり）に対する較正された発見有意性（統計のみの上限は較正されておらず、枠の上方にあるため枠上に数値で示す）；星印は 2026 年末の 13 TeV 再解析の場合を示す。凍結曲線の飽和は第 40.3 節の中心的な教訓である：～0.5 ab^{-1} を越えると、探索は完全に系統誤差で制限される。改善シナリオでは 5σ は ～1.3 ab^{-1} で到来する — 2034 年頃のテープ上のデータである；凍結された Run-2 の系統誤差は単一実験を永久に 3.3σ で頭打ちにする；改善曲線は 3.29 ab^{-1} で 5.8σ に達し、星印は 2.5σ と 3.3σ に位置する（全体を通じてアンカーされた三ビンの窓；五ビン版の値 0.80 ab^{-1} および 3.6σ は記録として付録 L に残されている）。

2031 年末 (HL-LHC の ～1.5 年分)。 14 TeV のデータは実効的な標本をおよそ倍にする。改善シナリオの有意性はアンカーされた窓で実験あたり 4.1σ に達する；スピン判別は 7σ に達する； $\delta P_t = 0.19$ は予言された $P_t = +0.91$ をゼロから ～ 5σ で分離する。単一実験による最も早い擁護可能な 5σ (改善シナリオ) は ～1.3 ab^{-1} で到来する：テープ上のデータとしては **2034 年頃**である。

2033 年末 (HL-LHC の二年分)。 実験あたり 4.8σ (改善)；凍結シナリオはすでに飽和の深部にあり (3.0σ)、いまやすべてがルミノシティではなく背景モデルの改善にかかっていることを示している。特性: スピンは 9.9σ ； $\delta P_t = 0.14$ であり、その状態がそこにあるならばトップ結合の右手型性を ～ 6σ で確立する。

2041 年末 (全計画)。 離散的な特性はすべて飽和する: スピンは 17σ ； $\delta P_t = 0.08$ であり、カスケード深度帯 $P_t \in [+0.88, +0.92]$ の内部を分解する。凍結シナリオの天井: 実験あたり 3.2σ (漸近的には 3.3σ)；改善では 5.8σ 。

粗ビンにおける干渉の符号。 いずれのスナップショットにおいても、粗くビン分けした符号の可視性は 1σ 近傍で頭打ちになる: 建設的な低質量側の超過は滑らかで単一符号であり — まさに浮動する $t\bar{t}$ 規格化が吸収する形状である (式 86)。符号は、低質量側の余剰と高質量側の不足という相関

したパターンの中に宿っており、そこには 4.9 TeV を越えてスペクトルが標準模型を下回ることも含まれる。そして干渉の自由度を備えたテンプレート・フィットは、600–3000 事象という梃子の腕を決定的な測定へと変換する。それが第 VI 部の締めくくりに要請に対する実験的な論拠であり、いまや数値が添えられている。

44 事前登録された探索: 厳密な予言が買うもの

以上のすべては、一般的な探索の射影の言葉を用いてきた。しかし GG-6 八重項は一般的な仮説ではない: 質量 (3.849 TeV, $\frac{1}{2}M_{\text{Pl}}e^{-35}$ から、自由パラメータはゼロ)、幅 ($\Gamma/m = 14.6\%$ 、T-KK-2)、レート (8.7 fb、系 T-KK-2c)、干渉の符号 (定理)、そして角度分布 ($\frac{3}{8}(1 + \cos^2 \theta^*)$ 、第 VI 部) は、いずれも見る前に指定されている。どこに登録されたのか。活字の上に: 本論文の公開揭示は、解析が存在するより前に質量、幅、レート、符号、および角度形状を固定しており、後からのいかなる調整も改訂として万人の目に見えることになる。それが機構のすべてであり、それで十分である。この仮説に対する探索は、公表されたバンプ探索とは統計的に三つの分離可能な仕方異なる。我々はそれぞれを定量化する — そして同じく重要なことに、どれがすでに表 26 に計上済みであり、どれが真に追加的であるかを述べる。

44.1 利点 1: 探索範囲効果 (look-elsewhere) のペナルティがない (計上済み)

探索が多数の質量仮説を走査するとき、どこかの揺らぎも勘定に入る。したがって偽の超過の確率は、見た独立な場所の数だけ膨れ上がる — 試行因子、すなわち探索範囲効果 (look-elsewhere) である。その見積もりは初等的であり、暗算する価値がある: 二つの質量仮説はおおよそ分解能だけ隔たっていれば統計的に独立であるから、分解能 $\sigma(m) = 0.10 m$ で m_{lo} から m_{hi} まで走査したときの独立なセルの数は

$$N_{\text{cells}} \simeq \int_{m_{\text{lo}}}^{m_{\text{hi}}} \frac{dm}{0.10 m} = 10 \ln \frac{m_{\text{hi}}}{m_{\text{lo}}} = 10 \ln \frac{5000}{400} \approx 25, \quad (87)$$

であり、 ~ 3 通りの幅仮説を合わせると、公表された走査は $N_{\text{trials}} \approx 76$ を担う (Gross & Vitells, 2010 の厳密な上向き交差の扱いも同じ桁を与える)。小さな p に対して大域確率は $p_{\text{glob}} \simeq N_{\text{trials}} p_{\text{loc}}$ であり、この割引は痛いところでちょうど最も急である: 局所的な 5σ ($p = 2.9 \times 10^{-7}$) は大域的な 4.1σ にしぼみ; 大域的な 5σ の主張には局所的な 5.8σ が要る。事前登録された単一の点は何も払わない: 局所が大域である。そして系統誤差のプラトー付近では、ルミノシティを三倍にすると有意性はわずか $\sim 1\sigma$ しか伸びない (図 13) ため、事前登録が節約する 0.8σ はおよそ HL-LHC データセットの倍増に相当する — 五年程度の運転に当たる。誠実さのための注意が二つ。(i) 本部を通じて引用される有意性はすでに局所的なものである (較正は質量点ごとの期待限界に対してなされている) ため、この利点は表 26 にすでに計上済みである: それは公表されたパイプラインの発見値に対する利得であって、我々の数値への上乗せではない。(ii) 探索範囲効果は排除には決して適用されなかったため、第 31.5 節の反証タイムラインは手つかずのままである。

44.2 利点 2: 整合テンプレート (計上済み) ; 公表されたパイプラインが実際に検定しているもの (これではない)

公表された解析は、一般的な狭い Z' と $\Gamma/m \simeq 30\%$ の KK グルーオンのテンプレートを検定している。公表されたテンプレートで GG-6 の形状を持つものはない: すなわち $\Gamma/m = 15\%$ であっ

表 27: ATLAS にアンカーされた三ピンの上での、専用の、事前登録された、整合テンプレートによる探索の較正された発見有意性（角度情報は計上していない）。「相関あり」／「相関なし」は、背景系統誤差が完全に相関している場合／完全に無相関である場合の ATLAS+CMS の結合を表す。改善シナリオは第 41.1 節による；2026 年末では改善のおよそ半分は自動的である（制御領域の統計は Run-3 のデータセットそのものとともに縮小する）。

	1 実験	凍結系統誤差		1 実験	改善系統誤差	
		結合・相関あり	結合・相関なし		結合・相関あり	結合・相関なし
2026 年末	2.5σ	2.8σ	3.5σ	3.3σ	4.1σ	4.7σ
2031 年末	2.8σ	3.0σ	3.9σ	4.1σ	4.9σ	5.7σ
2033 年末	3.0σ	3.1σ	4.2σ	4.8σ	5.5σ	6.8σ
2041 年末	3.2σ	3.3σ	4.5σ	5.8σ	6.2σ	8.2σ

て、導出された符号でのコヒーレントな QCD 干渉、低質量側の増強、高質量側の不足を伴う形状である。この不整合の代価は、我々自身の検証済みの枠組みの内部で測定されている：整合した幅 15% のコヒーレント形状に対する期待限界は 140 fb^{-1} で $\simeq 8 \text{ fb}$ （干渉項なしでは 8.4 fb 、第 41 節）であるのに対し、最も近い公表された広幅テンプレートが与えるのは $\sim 25 \text{ fb}$ であり — 不整合なパイプラインにとっては断面積感度における ~ 3 倍の希釈である。我々のシミュレーションは常に厳密な $S+I$ テンプレートを注入し計数したので、この利点もまた表 26 にすでに計上済みである。運用上の内容はその逆である：公表されたパイプラインを *Run-3* のデータに現状のまま走らせれば、この信号のレートを ~ 3 倍だけ過小報告し、見えた超過が何であれそれを試行因子で割り引くことになる — そのどちらも、本論文が要請する専用解析によって、実験上の代価なしに取り除かれる。

44.3 利点 3: 角度方向の次元と厳密なレート（未計上）

真に追加的な手掛かりが二つ、表 26 の外に残っている。(i) 角度情報: 発見数値は $m_{t\bar{t}}$ についてのみピン分けしている。信号は中央寄りである — 第 VI 部のスピン 1 の形を積分すると $\int_{-1/2}^{1/2} (1+c^2) dc / \int_{-1}^1 (1+c^2) dc = \frac{13/12}{8/3} = 0.41$ であるから、信号の 41% は $|\cos \theta^*| < 0.5$ に位置する — のに対し、高質量の背景カクテル（40% は V +ジェットであり、前方に尖った t チャネルのトポロジーを持つ）はそうではない。系統誤差制限領域ではピンごとの上限は $s/(f_b b)$ であるから、 s/b を改善するいかなる選別や二次元テンプレートも、ルミノシティの代価なしに直接有意性へと転換される。背景カクテル全体についてアンカーされた角度形状を欠くため、我々は計上せず上限を与えるにとどめる： Z においてさらに 10–30% はもっともらしく、検出器水準の二次元研究がこの上限に取って代わるべきである。(ii) レートは予言されている：仮説検定は「何らかの $\mu > 0$ 」から $\mu = 1$ という単純対単純の検定へと鋭くすることができ、ピン分けなしの整合フィルターが粗い ATLAS のピン分けに取って代わりうる；そのそれぞれが $\mathcal{O}(10\%)$ の価値を持つ。我々はそのいずれも計上しない。

44.4 二実験の結合、および較正された判定

残る乗数は決定的である：二つの実験である。統計制限領域では ATLAS+CMS の結合はちょうど $\sqrt{2}$ を得る；系統誤差制限領域では、その利得は支配的な不確かさが両実験の間で相関しているか否かに依存する（理論のモデリング：相関する；ジェット較正、タグ付け、制御領域の統計：相関しない）。したがって表 27 は両極端を引用し、現実はその間に横たわる。

自然な問い — *Run-3* のデータのみで、すでに 5σ を届けうるか — に対する判定を、その背後に

ある較正とともに述べる: 実験あたりでは、否である ($2.5\text{--}3.3\sigma$: 証拠であって発見ではない)。改善された系統誤差を伴う ATLAS+CMS の結合による専用解析に対しては: 角度情報を一切用いない段階で $4.1\text{--}4.7\sigma$ である — すでにテープ上にあるデータからの 5σ は、角度情報を計上した結合の射程内にはあるが、保証ではない; 上限を与えた角度方向の利得はこの区間を $4.5\text{--}6.1\sigma$ へと動かすであろうが、その部分は本物の検出器水準の研究を待っている。したがって中心的な期待は次のとおりである: 既存データの結合された専用再解析は強い証拠 ($\gtrsim 4\sigma$) を与え、発見は、系統誤差と角度の手掛かりが好都合に運ばばその同じデータから、さもなければ HL-LHC の最初の $\sim 1\text{ ab}^{-1}$ とともに得られる。

44.5 専用フィットが尊重せねばならない警告: サイドバンドは汚染されている

ある一つの機微が素朴な楽観論に逆らって働くのであり、専用解析はそれを織り込んで設計されねばならない。式 (66) における干渉項と QCD 連続背景との比を取る: 両者は同じパートン・ルミノシティとカラー因子を共有するので、極から遠く離れればこの比は伝播関数の構造に帰着し、

$$\frac{d\sigma_{\text{int}}}{d\sigma_{\text{SM}}} \simeq 2\xi_{\text{UV}} \frac{g_V^t}{g_s} \frac{\hat{s}}{\hat{s} - M_{\text{lock}}^2} \quad (|\hat{s} - M_{\text{lock}}^2| \gg M_{\text{lock}}\Gamma), \quad (88)$$

これは極の下側では正であり (両因子が負であるため)、 $\hat{s}/(\hat{s} - M_{\text{lock}}^2)$ としてしか減衰しない — すなわち緩やかである。数値的には、干渉が宿る $q\bar{q}$ 連続背景のコヒーレントな増強は 1.75 TeV で $+27\%$ 、 2.25 TeV で $+53\%$ であり、 3 TeV では $+145\%$ まで上昇する (完全な $\text{Re } D$; 低質量で支配的となるカクテルのグルーオン融合部分は、これらの全体に対する割合を薄めはするが取り除きはしない): そこはまさに、フィットを行う者が浮動する $t\bar{t}$ 規格化を固定するために本能的に用いるであろう領域である。滑らかで単一符号の持ち上がりは規格化のずれと部分的に縮退しており (式 86)、しかもこの縮退は積極的に害をなす: 第 42 節の明示的な二パラメータ・プロファイルにおいて、注入信号から低質量側の干渉を取り除くと、プロファイルされた有意性はむしろ上がる (凍結・未較正で 4.1 から 4.7 へ)。汚染されていないサイドバンドの方が、汚染されたものよりもよく背景を固定するからである。処方 (88) から従う: 汚染は 1 TeV では $q\bar{q}$ 連続背景の $+7.5\%$ に、 700 GeV では $+3.6\%$ にまで落ちる。したがって $t\bar{t}$ 規格化は $m_{t\bar{t}} \lesssim 1\text{ TeV}$ で、そして可能な場所では 700 GeV 以下で (あるいはダイレプトン・チャンネルで) アンカーされねばならず、フィットは干渉の自由度を符号自由のまま明示的に担わねばならない。低質量側の増強はまた、我々の最低次の扱いに最も敏感なテンプレート成分でもある: 干渉の K 因子の NLO 計算は、専用解析が最初に発注すべき唯一の理論入力である。

45 これが F-KK-2B にとって何を意味するか、および留保台帳

スナップショットの系列は、F-KK-2B (第 31.5 節) の運用上の内容を暦として書き直す。2026 年末までに: すでにテープ上にあるデータの専用再解析は、実験あたりでは証拠水準に近づく感度を、結合すればおそらく発見水準の感度を担う — そしてそれはいずれの方向にも働く: 予言されたレートでは強い超過を示し、そのレートでの無信号は複合シナリオを決定的な圧力の下に置く。2032 年までに: 系統誤差が改善されれば、ATLAS+CMS の結合による 5σ のルミノシティはテープ上にある; 単一実験の 5σ は、背景系統誤差を半減させた上で $\approx 1.3\text{ ab}^{-1}$ 、2034 年頃である。2033 年末までに: 改善シナリオについては発見か排除かが實際上決着し、特性の計画 (スピンは 9.9σ 、カイラリティは $\sim 6\sigma$) はすでに進行中である。2041 年までに: 八重項仮説の離散的な特性はすべて飽和まで

測定され、そこには $\delta P_t = 0.08$ を通じたカスケード深度帯の内部も含まれる; そしてもし何も存在しないのであれば、凍結シナリオでの結合された排除はとうの昔に窓を閉じているであろう。いずれの方向においても、実験に向けた伝言は本論文が当初から担ってきたものと同じであり、いまや完全なシミュレーションがその背後にある: 3.85 TeV における専用の、干渉を考慮した、事前登録された $t\bar{t}$ 解析は、その費用に比して不釣り合いなほど価値が高く、その最初の決定的な一回の通過に必要なデータはすでに存在している。

留保台帳。 本部を改良するであろう読者のために、あらゆる単純化を符号とおおよその大きさとともに挙げる。(1) 干渉に $\sqrt{K}$ を掛けた LO $\times$ K のレート; 干渉の NLO 計算は低質量側のテンプレート数十パーセント動かさう (方向は不明; 第 44.5 節)。(2) Run-2 の検出器性能を 2041 年まで凍結した; Phase-2 のアップグレードはパイルアップ下でのブーストされたトップの性能改善を狙っているので、これは保守的である。(とりわけ、 ~ 3.5 TeV 以上でのブーストされたトップのタグ付け効率は、公表された作業点の外挿である; Phase-2 のアップグレードはまさにこの領域を狙っている。) (3) 背景モデルは二パラメータのアンカーされた外挿である; 2.5 TeV 以下および 4.9 TeV 以上ではそれは外挿であり、図 12 に明示してある。(4) 較正因子 F_{cal} は二つの質量における排除機構の中での狭い注入に対して測定され、発見および広く干渉する形状に適用されている; 二つの質量での整合性 (4.40 対 4.27) がその質量非依存性の証拠であり、広い形状への移送は測定されていない — 連鎖の中で不確かさを持たない唯一の段階である (第 31.4 節)。(5) ビンごとの系統誤差は無相関として扱われている; 相関はモデル化されるのではなく F_{cal} に吸収されている。(6) 特性の射影 (スピン、 P_t) は、検出器水準の角度解析ではなく、第 VI 部のアクセプタンスで劣化した分離度を伴う純度補正された事象数を用いる。(7) ATLAS+CMS の結合は、共有されるニューサンスをモデル化するのではなく、相関の両極端で挟む。(8) すべての擬似データは単一の固定された乱数シードを用いる; アジモフ有意性はシードに依存しない。(9) 電弱補正は適用されていない: $m_{t\bar{t}} \simeq 4$ TeV では電弱スタコフ対数は、連続背景にも信号にも同様に効く負の $\mathcal{O}(10\text{--}20\%)$ の効果である。背景の規格化はその場でデータにアンカーされているため、この共通の抑制の大部分はアンカー超過の観測量において相殺する; 残る形状の歪みは、干渉の NLO 計算とともに、付録 O の理論課題に属する。本部の背後にある完全な数値ワークブック (パートン・ルミノシティのグリッド、アンカーされた背景フィット、較正のための注入、および表のすべての項目) は、コホートのビルド資料とともに <https://www.arisaka-gg.org/> にアーカイブされており、引用された入力から再現可能である。

第 VIII 部は予言を日付へと変えた。そしてその平易な言葉による要約は、繰り返すに足るほど驚くべきものである: この粒子を見るための統計的な力は、2015 年以来記録されてきたデータの中に、読まれぬまますでに存在しているかもしれない — どちらか一方の実験だけでも証拠水準に近づき、二つを結合すればおそらく発見水準である — そして障害はルミノシティではなく、背景の知識と、まだ誰もフィットしていないテンプレートである。系統誤差の壁、素朴な計数から誠実な有意性へと至る較正された梯子、そして事前登録の配当は、それぞれ場所を特定され、値を付けられた。2041 年までの物語はこれで定まった。ではその後の数十年はどうか。次の部は HL-LHC の彼方の機械を地図に描く — それぞれが何を測定できるのか、それぞれが何を決着させるのか、そしてどの問いがどのリングを待たねばならないのか。

46 第 VIII 部を平易な言葉で: 検出器が実際に記録するであろうもの、解析の忠実度で計算し尽くす

本部にその要点を与えている主張は、問いを決着させる衝突がすでにテープ上にあるかもしれない、というものである。

それを信ずるに足るものとするため、本部は見積もりをしない; 公表された ATLAS のトップ対探索にアンカーしてシミュレーションを行い、あらゆる段階が実在する何かに照らして検証できるようにしている。背景、選別、ビン分け、そしてビンごとの背景不確かさは、すべてアンカーから来ている。次いで算術が一つのデータセットについてビンごとに示されるので、読み手は同じ表を他のいかなるものにも拡張することができる。

二つのシナリオが全体を通じて走り、ただ一つの入力においてのみ異なる: 背景系統誤差が公表値のまま留まるのか、それとも半減されるのか、という点である。両者とも最後まで担われる。改善が楽観的だと考える読み手は凍結の列を読めばよく、それでもなお完全な予測を手にする。一つではなく二つを引用する理由はそこにある。

本部はまた、なぜ目がバンプを過大評価するのかに一節を費やしており、その節は本論文自身の防衛のためにある。一見して説得的に見えるスペクトルも、系統誤差を織り込めば控えめな有意性しか担わないことがあり、発見を予測する論文には、自らの図が読まれる前にそう述べておく義務がある。

出力は、数値を添えられ事前登録された日付の集合である: 既存のデータセットが何に到達するか、そして高ルミノシティ運転が何を加えるか、である。そのクラスターがそこにあるならば、それはこの十年のうちに見つけうる。そこになければ、同じ日程表が、それがいつ確実になるかを告げる。

第 IX 部

HL-LHC を超えて

2035–2070 年の計画: 施設の現状、発見後のチェックリスト、そしてマシンごとの反証シナリオ

47 本部が答える問い

第 VIII 部は、HL-LHC が F-KK-2B を決着させるところで終わる: シミュレートされた暦の上では、発見級の感度はおよそ 2032 年から 2035 年のあいだに到達され (統合、改良された系統誤差)、そしてもしそこに何もなければ、すでに記録された Run-3 のデータ ($\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$) が帯域全体を排除すると期待される。いずれにせよ、~2035 年までに本論文の是か非かの問いは答えられる—そしてまったく異なる計画が始まる。クラスターがそこにあるならば、残された仕事は分光である: 発見マシンには測ることのできないすべてを、直接的なスピン 2 アンカーから、第二の動径族、さらにはレプトフォビックな分岐比の厳密なゼロに至るまで測ることである。そうでないならば、同じ将来のマシンたちは、枠組みの生き延びた残余が何であれ、それに対して厳しさを増していく反証エンジンとなる。本部は、その 2035 年以後の計画を施設ごとに、また十年ごとに描き出す—2026 年 7 月時点における世界の衝突型加速器計画の現実の状況の上であって、十年前の願望的な展望の上ではない—そして本論文を通じて用いてきたのと同じ機構によって、各マシンが何を測り得るのかを、発見が手中に収まって初めて意味を持つようになる劣勢チャンネルも含めて、詰めていく。

枠組みを定める規則が二つある。(i) 以下の施設の現状と日付は、2025–2026 年の一次戦略文書—FCC 実現可能性調査報告書 (FCC Collaboration, 2025)、素粒子物理学に関する欧州戦略の 2026 年アップデート (European Strategy Group, 2026)、CEPC 技術設計報告書 (CEPC Study Group, 2025)、および国際ミュオン・コライダー・コラボレーションの設計報告書 (International Muon Collider Collaboration, 2024)—から取られており、いかなる日程も、楽観がそう望むであろうようにではなく、それらの文書が述べるとおり引用されている。(ii) 将来のマシンにおける率は、結合が導出されている場合 (八重項とスピン 2 アンカー) には本論文自身のパートン・ルミノシティ機構によって計算され、そうでない場合 ($n = 2$ の動径族であり、その重なり積分はここでは導出されていない) には見積もりとして明確にラベルされる。

48 実際にあるがままの施設の展望

LHC 以後の展望について最も重要な事実は、容易に述べられる: 2026 年 7 月時点で、LHC Run 3 を超える衝突型加速器のうち、承認され、予算がつき、建設中であるものはちょうど一つ—HL-LHC である。それ以外のすべては、推奨か、設計報告書か、R&D 計画である。本論文の第 VII–VIII 部が HL-LHC をこれほど執拗に中心に据えるのはこのためである: それは入手可能な最も鋭い検証であるだけでなく、実現が保証された唯一のものである。表 28 が展望をまとめる; 以下の本文は施設

ごとに決定的な事実を記録する。

この表から得られる五つの事実が、以下のすべてを形づくる。第一に、欧州は自らの道を選んだ: 2026 年 5 月に全会一致で採択された ESPP 2026 アップデートは、FCC-ee を選好される旗艦として名指し、2028 年までの理事会決定を伴う (European Strategy Group, 2026)。したがって現実的な既定の未来は、2040 年代半ばの FCC-ee 物理と、それに続く 2070 年代の FCC-hh である。第二に、実現可能性調査報告書における FCC-hh のベースライン・エネルギーは 84–85 TeV であって、より古い文献の 100 TeV ではない (FCC Collaboration, 2025); その文献における 100-TeV の数値はすべて、我々の質量においておおよそパートン・ルミノシティ因子 ~ 0.7 で再スケールされねばならず、本論文は FCC-hh の率を一貫して 85 TeV で、一つの規約 ($LO \times K$ であり、13-TeV の率と同じもの) のもとに引用する。第三に、中国の代替案は後退した: CEPC の技術設計は完成しており、また優れているが、この計画は第 15 次五カ年計画に選定されず、 ~ 2030 年より前に再検討されることはない (CEPC Study Group, 2025)。第四に、ミュオン・コライダーは正直な日程を伴う本物の R&D である: 10-TeV マシンは ~ 2070 年の見込みであり、 ~ 3 -TeV の第一段階が 2050 年ごろにあり得る (International Muon Collider Collaboration, 2024)。第五に、線形コライダーの選択肢 (ILC、CLIC、 C^3 、ウェイクフィールドの混成) は設計と R&D として生き延びているが、現在のところ確約されたホストや資金枠を持つものはない。したがって本部の計画地平は、三つのアンカーの上に築かれる: HL-LHC (確実、2030–2042 年)、FCC-ee (見込みは高い、2040 年代半ば以降)、FCC-hh (参照となるエネルギー・フロンティア・マシン、2070 年代) —そして第三のアンカーの時間軸を圧縮し得るワイルドカードとしてのミュオン・コライダーである。

49 発見後のチェックリスト: 2035 年以後に残るもの

ここで発見の未来を仮定する: 第 VIII 部に従い、八重項は 2032 年から 2035 年のあいだに 3.85 TeV で発見される。2041 年末までに、HL-LHC は表 26 の性質測定計画の全体を届けているであろう: 質量を 1 パーセントより良く、幅を 10% の分解能の天井において、スピン 1 対スピン 2 の判別を 17σ で、トップ結合のカイラリティ P_t を ± 0.08 まで (導出された帯 $[+0.88, +0.92]$ の内部を分解して)、そして専用のテンプレート・フィットを通じて干渉の符号を、である。これは目覚ましい収穫である—そしてそれはちょうど六つの項目を未解決のまま残し、そのそれぞれがまさに一つの将来のマシンの仕事である。

1. **直接的なスピン 2 アンカー。** 導出された κ_{gg} における 13 TeV での $\sigma \times \text{BR}(G_1 \rightarrow t\bar{t}) = 0.045 \text{ fb}$ である (系 T-KK-2c): HL-LHC の 3 ab^{-1} をもってしても、およそ二十五倍大きい背景の下でひと握りの再構成イベントしか得られない ($S/B \approx 0.04$, 第 26 節)。幾何を名指す状態は、クラスターを見つけるまさにそのマシンにおいて見えない。
2. **縮退したスピン 1 成員の分解。** 複合的に硬化したシナリオでは、 g^* 、 Z'_B 、および Q_i ベクトルは同じ質量に位置する (八重項は硬化により、アーベル的ベクトルはそのディリクレ条件により); それらはピーク位置によってではなく、カラーとチャンネルの分解によって分離される—そしてディリクレ・モードの上では Z'_B はツリーレベルで何も寄与しないため、その分解は割合の測定ではなく、その結合に対する制限 (O-KK-59) である。HL-LHC の統計とジェットの系統誤差では、これを綺麗にアンフォールドすることはできない。
3. **レプトフォビアのツリーレベルのゼロ。** ツリーレベルでの $\text{BR}(Z'_B \rightarrow \ell^+ \ell^-) = 0$ は電荷割り当

ての予言であり、ループの床が登録されている (O-KK-61) ; HL-LHC はクラスターのダイレプトン割合を、 $t\bar{t}$ に対して 10^{-2} – 10^{-3} の水準でしか制限できない。登録された床を伴うゼロは、LHC が与え得るよりも厳しい検証に値する。

4. 7.05 TeV における第二の動径族。塔の比 $x_2/x_1 = 1.831$ は、次のスピン 2 モードを 7.05 TeV に置く; 14 TeV において、そこでの gg ルミノシティは第一モードのそれより ~ 800 倍下であり— $\sigma(G_2) \sim 10^{-4}$ fb: 絶望的である。それでもなお、この一つの測定—第二の族は、 RG スローットのベッセル・スペクトルが要求するちょうどその場所にあるのか—は、非空間的幾何について考え得る最も清潔な検証であり、第一クラスターのいかなる単一の性質よりも価値がある。
5. 分解能を下回るラインシェイプの精度。 $\simeq 4.9$ TeV における干渉のゼロ交差、 $\sim \mathcal{O}(100)$ GeV の重心のずれ、そして幅そのものは、いずれも 10% の質量分解能をもつハドロン・マシンでは分解能に制限される; パーセント水準のラインシェイプの仕事には、莫大な統計 (FCC-hh) かレプトン・マシンによる走査のいずれかが必要である。
6. スカラー・セクターのヌル。GG-6 はラディオンの不在を予言する—動径方向の長さは固定された整数 K であって、モジュライではない (Arisaka, 2026, A4-Euclid)—したがってヒッグス・セクターは、導出された $G_1 \rightarrow hh$ の線を除けば、その結合において厳密に標準模型的でなければならない。ヌルの決定的な検証は精密測定であり、その精密測定はヒッグス・ファクトリーに宿る。

50 マシンごとに: 各施設が何を決めるのか

50.1 84–85 TeV の FCC-hh: 分光マシン

FSR のベースライン・エネルギーにおいて、我々の質量におけるパートン・ルミノシティは目覚ましく増大する: 13 TeV に比して、3.85 TeV での $q\bar{q}$ ルミノシティは $\simeq 330$ 倍に、 gg ルミノシティは $\simeq 3.2 \times 10^3$ 倍に上がる (本論文の CTEQ6 機構によって計算した; 数十パーセントの低- x PDF 不確かさが適用されるが、いかなる結論にとっても重要ではない)。その帰結を、状態ごとに述べる:

八重項は精密実験室となる。 85 TeV において $\sigma \times \text{BR}(g^* \rightarrow t\bar{t}) \approx 2.8$ pb [2.3–4.0] である。FSR の参照ルミノシティ (計画全体で実験あたり ~ 20 ab $^{-1}$) においては、これはアクセプタンス前で $\sim 5 \times 10^7$ 個の信号イベントである: ラインシェイプ、4.9 TeV 近傍のゼロ交差を含む干渉のパターン、幅、そして角度分布は、いずれも統計に制限された測定ではなく、系統誤差と理論に制限された測定となる。第 44.5 節で要請した NLO 干渉計算は、望ましいものから必須のものへと昇格する。

スピン 2 アンカーは最初の数週間で落ちる。 導出された 13-TeV の率 (0.066 fb, LO $\times$ K) を gg ルミノシティの利得でスケールすると: 同じ規約のもとで 85 TeV において $\sigma(pp \rightarrow G_1) \approx 0.21$ pb である (幾何自身の曲率単位では ≈ 90 fb, O-KK-66)。 $\Gamma/m = 6.3\%$ —八重項より余裕をもって狭い—と、導出された分岐パターン $t\bar{t} : W_L W_L : Z_L Z_L : hh \simeq 0.69:0.15:0.08:0.08$ をもって、アンカーは一つの質量において四本の相関した共鳴線を届ける。ボソンのチャンネルのあいだでの縦偏極二ボソンの優越 ($W_L W_L$ が 15%) は、それ自体が診断的である: それは赤外局在した電弱セクターに結合するグラビトンの署名であり、いかなるスピン 1 の詐称者も、それを $t\bar{t}$ の角度形状と併せて再現することはない。

第二の動径族が決着する。 85 TeV において、7.05 TeV での gg ルミノシティは 3.85 TeV でのその値の 7.8% であり、したがって同一結合の見積もりは $\sigma(G_2) \sim 10$ fb を与え (0.21 pb の 0.078 は 16 fb であり、桁として引用する) — 10^5 程度のイベントであって、紛れようのない第二の線である。(これは導出ではなく見積もりとしてラベルする: $n = 2$ の重なり積分は本論文では計算されていない。しかし位置は定理級の比である: $x_2/x_1 = 7.0156/3.8317 = 1.831$ 、すなわち 7.05 TeV であり、FCC-hh において千分の一の精度で検証可能である。) 複合スペクトルがベクトル再帰を動径族の近くに配置するならば、それらは $t\bar{t}$ において $\mathcal{O}(10^2)$ fb でこれに随伴する。二つの (理想的には三つの: 10.2 TeV の $n = 3$ であり、これもなお s チャンネルの到達範囲が ~ 40 TeV まで伸びるマシンの内側にある) 動径質量を測定することは、単一の数値 3.849 TeV を測定されたスペクトルへと変える—そこにおいて人はもはや予言を検証しているのではなく、幾何を読んでいるのである。

クラスターはアンフォールドされ、クラスター質量におけるダイレプトン線は KK フォトンのものである。 10^7 イベントの統計をもって、八重項／一重項の分解 (チェックリストの項目 2) は、ダイジェット対 $t\bar{t}$ の比とカラー・フローの観測量を通じて進む。ダイレプトンにおいて、このマシンはヌルを見ない: 本論文自身の入力の上では、O-KK-62 の電弱 KK フォトンは 85 TeV において ≈ 86 fb で生成され、 $\ell^+\ell^-$ においてフレーバーあたり ≈ 0.2 fb を与え、これは ≈ 3 pb のハドロンのクラスターの 10^{-5} – 10^{-4} 程度である—ヌルではなく一本の線であり、その下にある Z'_B のループの床 (O-KK-61) はハドロン・マシンでは分離できない。その床の検証はミュオン・コライダーのものである (第 50.3 節)。

50.2 FCC-ee: パラメータ台帳のマシン、そしてラディオン不在の検証

FCC-ee はクラスターに直接触れることが決していない: その最高エネルギー (365 GeV) は M_{lock} より一桁下であり、またクラスターはレプトフォビックでレプトンに乏しいため、その間接的な電弱の足跡でさえツリーレベルではなくループ抑制されている。次に建設される可能性が最も高いマシンは GG-6 とは無関係である、と結論するのは容易であろう—そしてそれは誤りである。この計画における FCC-ee の役割は、種類において異なる: それは、本論文の質量がその内側に位置するコホート台帳の精密測定の手腕である。三つの例がその類を定める。(i) 強い結合の GG-6 構造値は $\alpha_s(M_Z) = 1/(\pi e) = 0.11710$ である (Arisaka, 2026, A9-SM); 現在の世界平均 0.1180 ± 0.0009 (Particle Data Group, 2024) は、それより $\sim 1\sigma$ 上に位置する。数 10^{-4} の水準という FCC-ee の予測される決定は、これを緊張のない共存から決定的な検証へと変える—おそらくは、このマシンがこの枠組みのために生み出すであろう最も鋭い単一の数値である。(ii) 閾値走査から得られるトップ・クォーク質量 ($\pm \mathcal{O}(20)$ MeV) と Z 極の計画は、本論文におけるあらゆるトップ重なり量—八重項の幅、分岐比、および偏極を定める帯 $r_{t_R} \in [4, 5]$ —を鋭くする。(iii) 千分の一からパーセントの水準でのヒッグス結合の計画は、ラディオン不在の検証 (チェックリスト項目 6) を実行する: GG-6 は、観測されたヒッグスがいかなる動径スカラーとも混合していないことを要求する、というのはそのようなスカラーが存在しないからである; ラディオンの混合を示す結合パターンは、発見があろうとなかろうと、スカラー・セクターを即座に反証するであろう。したがって、クラスター粒子を一つも生成できないマシンが、それでもなお枠組みを反証し得る—これはまさに、相補的な計画に人が求める性質である。(CEPC は、2030 年に復活するならば、同一の計画を担う; 我々はそれを別立てでは扱わない。)

50.3 ミューオン・コライダー：レプトフォビアのマシン

ミューオン・コライダーは、クラスターのレプトンの結合が直接に読み取られる場所であり、本論文のそれに対する予言は沈黙ではなく一本の線である。 $\sqrt{s} = M_{\text{lock}}$ には二つのものが位置する。ディリクレ・ベクトルと八重項は、登録されたループの床の上には s チャンネルの線を与えない: Z'_B はその電荷割り当てによってツリーレベルでレプトフォビックであり、その下には O-KK-61 のループの床があり、また八重項は、レプトンが単独では作ることのできないカラー八重項である。O-KK-62 の電弱 KK フォトンと KK Z は別の話である: それらは同じノイマン問題の上で八重項の質量に位置し、レプトンが軽クォークの振幅を担うならば、それらは本論文自身の重なりの上でピーク断面積がピコバーン程度の s チャンネル共鳴である—その高さはレプトンの深さによって定まり、カスケード深さの補題はそれを未解決のまま残している (P-KK-10、再格付け)。同じ伝播関数のテールは、3-TeV の第 1 段階マシンにおける $\mu^+\mu^- \rightarrow t_R \bar{t}_R$ に 1 程度の偏差を与えるため、そこでの接触相互作用の観測量もまた標準模型的ではない。成員を分離する測定は、幅とパターンである: 電弱線は数パーセントの幅をもち、KK Z については Zh が主導する一方、床の上にあるディリクレ・ベクトルからの線は、より狭く、軽クォーク・チャンネルを持たずに $t\bar{t}$ が主導するであろう (第 10.4 節); 床の上にあるディリクレ・ベクトルからのレプトンの線、あるいはレプトンの深さでは供給できない高さの電弱線は、この割り当てを反証する (P-KK-6、P-KK-10)。 s チャンネル走査のほかにこのマシンが測るもの: W 融合と $\gamma\gamma$ 融合を通じた G_1 の生成 (15% + 8% の縦偏極二ボソン結合に養われる) であり、10 TeV においてフェムトバーン級の率をもつ—分岐パターンのボソン側にとって清潔で背景の低い環境であり、FCC-hh のハドロン側と相補的である。IMCC の日程では、これらの検証は ~2050 年 (第 1 段階のテール) と ~2070 年 (10-TeV 走査) に位置する ([International Muon Collider Collaboration, 2024](#))。

50.4 線形コライダー、LHeC、そして脇役たち

ILC 級あるいは CLIC 級のマシンは、FCC-ee と同じ台帳とヌルの計画 (ヒッグス精密測定、トップ精密測定、接触相互作用のテール) を担い、CLIC の 3-TeV 段階は $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ におけるクラスターの仮想交換への直接的な感度を加える—不在ではない: O-KK-62 の電弱 KK フォトンは、レプトンが軽クォークの振幅を担うならば、その伝播関数のテールを通じて 3 TeV での $e^+e^- \rightarrow t_R \bar{t}_R$ に 1 程度の偏差を与える一方、ディリクレ・ベクトルは登録された床の上には何も寄与しない。それらの現状 (表 28) は、それらを計画のアンカーではなく不測の事態への選択肢とする。LHeC は一つの具体的な言及に値する: その深非弾性の計画は、本論文のあらゆる率の不確かさの帯を支配する高- x のクォークおよびグルーオン密度を釘づけにするであろう—八重項の 13 TeV における [7.0–12] fb の帯は PDF に制限されている—したがって一台の ep マシンは、クラスター粒子を一つも生成することなく、GG-6 の率の検証を因子の水準からパーセントの水準へと静かに変えるであろう。

51 具体的なシナリオ、2035–2070 年

シナリオ D (発見、第 VIII 部の暦)。2032–2035 年: 統合された ATLAS+CMS の専用解析が 5σ を越える; 発見論文の質量は 3.85 ± 0.04 TeV であり、幅は広い; 世界が気づく。2035–2041 年: HL-LHC の性質測定計画が飽和する (スピン 17σ 、 $P_t \pm 0.08$ 、干渉テンプレート); 理論の側が NLO 干渉計算を届ける; 3.85 TeV における hh / 二ボソンの劣勢探索が、物好きの対象から標的を定めた裏づけへと鋭くなる。2041–2045 年: LHC のレガシー統合; FCC-ee の建設が 2028 年以後の承認の

上で進む; 発見は FCC-hh の主張を作り変える—7.05 TeV に予言された第二の族を伴う、確認された 3.85-TeV クラスタは、まさに、歴史的にエネルギー・フロンティア・マシンを加速させてきた「物理が保証されている」という論であり、FSR のより早期の LTS 磁石という選択肢が、戦略機関に具体的な梃子を与える。2040 年代半ば–2050 年代: FCC-ee が稼働する; $\alpha_s(M_Z)$ 対 $1/(\pi e)$ が決着する; ラジオン不在のヒッグス精密検証が実行される; ミューオン・コライダーの実証機が報告し、好都合な分岐においては、2050 年ごろの第 1 段階マシンが電弱 KK モードの接触相互作用のテールを届ける (P-KK-10)。2070 年代: FCC-hh (あるいは 10-TeV ミューオン・コライダーであり、どちらであれ実現するほう) が最初の数週間でスピン 2 アンカーを観測し、四本線の分岐パターンを分解し、縮退した成員をアンフォールドし、クラスタ質量における KK フォトンのダイレプトン線を読み、そして—この計画全体の終着点として—7.05 および 10.2 TeV における第二および第三の動径族を測定して、非空間的スロートのベッセル・スペクトルを直接に読む。この時間軸が含む隔たりについては、正直であるべきである: 現行の日程では、直接的なスピン 2 の確認は、八重項の発見からおよそ四十年後に到来する。その隔たりは物理の必然ではなく計画上の選択であり、2030 年代の発見は、それを圧縮するための考え得る最も強い論拠となるであろう。

シナリオ X (排除)。 もし代わりに、統合された HL-LHC の計画が八重項の帯を排除するならば—第 VIII 部に従えば、期待値の上で $\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ をもって、すなわち Run-3 のデータの上で決着する—GG-6 の衝突型加速器における実装は退役し、LHC 以後のマシンに対する本論文の関心は、本論文が終始保ってきた規律に帰着する: 滑らせるべきパラメータは存在せず、したがって同じ予言が 6 TeV に再び現れるようなゾンビ期は存在しない。そのとき枠組みの残る露出は、コホートの非衝突型加速器の腕 (第五の力の不在、いかなる距離においても $\eta = 0$ であること、そしてコンパニオン論文の $8.1 \mu\text{eV}$ 暗黒物質線) に全面的に宿り、将来の衝突型加速器は探索という一般的な責務のみを受け継ぐ。この非対称性こそが要点であるから、我々はこれを平明に述べる: 表 28 のマシンはいずれの未来においても建設する価値があるが、それらが完全に指定された、十年ごとの、導出された率が待ち受ける計画を受け継ぐのは、シナリオ D においてのみである。

52 要約マトリクス

表 29 が本部を凝縮する。この分類は心に留めておく価値がある: HL-LHC は判定マシンである—是か非かは 2045 年より前にはそこに宿り、他のどこにも宿らない。FCC-hh は分光マシンである: アンカー、八重項、動径塔である。ミューオン・コライダーはレプトフォビアのマシンである: その決定的な寄与は $\sqrt{s} = M_{\text{lock}}$ における電弱 KK モードの s チャンネル線であり、ディリクレ・ベクトルと八重項は登録された床の上では沈黙している (P-KK-10、再格付け)。FCC-ee と線形コライダーは台帳マシンである: それらは同じ整数の帳簿づけを精密測定の外から検証し、ラジオン不在のヌルを担う。そして LHeC は鋭利化マシンである: それは他のすべての者の予言に対する精度を買う。最も鋭い是か非かの検証は、まず LHC に宿る; 本部のそれ以外のすべては、勝利が購うであろうものである。

第 IX 部は、遠い未来を、実際に紙の上に存在する施設の上へ、その実際の承認の状態のままに写し取った: 判定は HL-LHC のみに属する; 分光—アンカー、そのベッセル比における倍音、クラスタ質量における電弱 KK 線—は 2070 年代の FCC-hh に属する; 精密台帳は FCC-ee に属する; そしてミューオン・コライダーは、レプトンの結合の最も鋭い検証を寄与する: その高さがレプトンの

深さによって定まる s チャンネル線であり、ディリクレ・ベクトルは登録された床の上では沈黙している。本論文が負っていた導出、シミュレーション、日程のすべてが、いまや届けられた。残るのは判断である：これらすべてが何を意味するのか、選ばれなかった道と比べてどうなのか、そして何をもって誤りとみなすのか。次の部は一步下がって論じる。

53 第 IX 部を平明な言葉で：2035 年以後に何が起こるのか、いずれの答えの場合にも

本部は、前の部が成功する世界に向けて書かれており、華やかならざる一つの事実から出発する：現時点で、高輝度アップグレードを超える衝突型加速器計画のうち実際に承認されているものは、ちょうど一つである。

その事実が他のすべてを支配する。本部は、提案された各マシンの現実の状況を、野心からではなく一次戦略文書から調査し、どの項目がすでに下された決定であり、どれが決定を待つ提案であるかを明示する。十年前の願望的な展望の上に築かれたロードマップであれば、それは別の、そしてはるかに心地よい文書となったであろう。

現実のマシンを与えられたうえで、本部はそれぞれが何を決めるであろうかを詰める。トップ・チャンネルにおける発見は一つの質量を定めるが、それ以外はほとんど定めない；続く問い—アンカーのスピン、パートナーたちの結合、次の再帰の位置—はそれぞれ特定の能力を必要とし、本部は問いをマシンに対応づける。

本部には、特定の施設の擁護として読まれたであろう版もあり得た。この版はそうならないよう努めている：チェックリストは、読者が各々の資金の帰結の下でどの問いが答えられないままになるのかを見て取れるように書かれており、そこには高輝度運転の後に何一つ建設されないという帰結も含まれる。

表 28: 2026 年 7 月時点における将来の衝突型加速器の展望であり、一次戦略文書 (CEPC Study Group, 2025; European Strategy Group, 2026; FCC Collaboration, 2025; International Muon Collider Collaboration, 2024) による。「最早の物理」は、それらの文書の参照日程を引用したものである。承認され建設中であるのは HL-LHC のみである。

施設	型式／エネ ギー	現状 (2026 年 7 月)	最早の物理	次の決定関門
HL-LHC	pp , 14 TeV	承認済み、予算措置済み、建設中; ロング・シャットダウン 3 が進行中	~2030 年	なし—進行中
FCC-ee	e^+e^- , 88–365 GeV, 91-km リング	推奨済み: CERN 理事会によって全会一致で採択された (ブダペスト、2026 年 5 月 22 日) ESPP 2026 アップデートは、FCC-ee を選好される次の旗艦として名指している; ~15.3 BCHF; 四つの相互作用点; 未承認かつ未予算	2040 年代半ば	2028 年までの CERN 理事会の決定であり、資金計画とホスト国協議に基づく
FCC-hh	pp , 84–85 TeV , 同一トンネル	FCC 統合計画の内側の構想; FSR のベースラインは 14-T Nb ₃ Sn 双極磁石; HTS の選択肢も検討済み	2070 年代前半から半ば (FSR 参照); より早い LTS の変種が FSR の選択肢検討に現れる	FCC-ee の決定と高磁場磁石計画に従う
CEPC	e^+e^- ヒッグス / Z ファクトリー、100-km リング	技術設計報告書が完成 (2025 年 10 月); 中国の第 15 次五カ年計画には 選定されず (2026 年 3 月); ~2030 年の再提出を意図、あるいは承認されれば FCC への労力の統合	最も早くて 2040 年代半ばであり、2030 年の承認を条件とする	中国の国家計画、~2030 年
ミューオン・コライダー	$\mu^+\mu^-$ 、段階的に 3 → 10 TeV	国際設計検討 (IMCC); ESPP 2026 はミューオン・コライダーの R&D を優先事項と名指す; 電離冷却の実証機を 2030 年代に計画	第 1 段階 (~3 TeV) は ~2050 年; 10 TeV は ~2070 年	実証機の結果、2030 年代半ば
ILC	e^+e^- , 250 GeV 線形	設計は成熟 (TDR 2013); 日本政府は態度を明確にせず (2026 年 2 月); 国際技術ネットワーク (ITN) の R&D が 2026–28 年に進行中	未定	日本の省庁のロードマップ決定
CLIC	e^+e^- , 0.38 → 3 TeV 線形	成熟した設計; ESPP の選好される選択肢としては 選定されず ; 代替案として維持	未定	FCC-ee の帰趨に依存
C ³ / ウェイクフィールド (HALHF など)	コンパクトな e^+e^-	R&D 構想; 米国 P5 報告書および ESPP への入力によって推奨されている	最も早くて 2040 年代の実証	技術的マイルストーン
LHeC	ep , ~1.2 TeV	HL-LHC のビームを再利用する構想; 橋渡し計画として位置づけられている	2040 年代	CERN の計画決定

表 29: ~2035 年までの発見を仮定した (シナリオ D)、HL-LHC を超えた GG-6 の計画。導出された結合をもつ率は本論文の機構によって計算されている; G_2 の項目は同一結合の見積もりである (ただし位置は定理級である)。この表は、その第一行に述べられた仮定、すなわち発見が起こるという仮定の下に書かれている。その目的は、発見が起こるであろうと論じることではなく、もし起こるならば計画には行くべき先があること、そして次の標的が後から選ばれるのではなくすでに配置されていることを示すことである。ただ一つの同一結合の見積もりは、そのものとして印されている。

施設	最早の GG-6 物理	GG-6 の標的への直接的な到達範囲	決定的な成果物	主要な劣勢チャンネル
HL-LHC	現在-2041 年	八重項 $8.7 \rightarrow 13.6$ fb ($13 \rightarrow 14$ TeV); アンカーと $n=2$ の族は到達範囲外	判定 (F-KK-2B); スピン、カイラリティ、干渉の符号	3.85 TeV における hh 、二ボソンの裏づけ; ダイジェットのアンギュラリティ
FCC-ee	2040 年代半ば	なし (365 GeV $\ll M_{\text{lock}}$; レプトフォビクなクラスター)	$\alpha_s(M_Z)$ 対 $1/(\pi e)$ を 4σ 級で; ラディオン不在のヒッグス精密測定	Z 極の台帳; m_t を ± 20 MeV まで
ミューオン・コライダー	~2050 年 (3 TeV); ~2070 年 (10 TeV)	10 TeV において 3.85 TeV の s チャンネル走査が可能	$\sqrt{s} = M_{\text{lock}}$ における電弱 s チャンネル線 (高さはレプトンの深さが定める); 登録された床の上に Z'_B の線はなし; G_1 は抑制される	W 融合 / $\gamma\gamma$ 融合による G_1 (fb 級); ボソンの BR パターン
FCC-hh (84-85 TeV)	2070 年代	八重項 ≈ 2.8 pb; $G_1 \approx 0.21$ pb; $G_2 \sim 10$ fb (見積もり); ~40 TeV までの到達範囲	スピン 2 アンカー + 四本線の BR パターン; 7.05 / 10.2 TeV における動径塔; クラスターのアンフォールド; クラスター質量における KK フォトンのダイレプトン線	$W_L W_L$ 、 $Z_L Z_L$ 、 hh の線; ベクトル再帰 $\mathcal{O}(10^2)$ fb
LHeC / 線形の選択肢	2040 年代以降 (条件付き)	直接的にはなし	PDF の精度 (パーセント級の率の検証); 台帳 + 接触相互作用のヌル	高- x の g, q 密度; $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ のテール

第 X 部 議論

結果の意義と独自性; 取り組まれた古典的な衝突型加速器の難問; 他の理論やモデルとの比較; 構造的な革新; 予言と反証; 未解決の問い; そして完成したコホート

導出は終わった; 本部は一步下がって論じる。五つの議論が続く—結果の意義; その独自性、気高さ、および革新; 標準模型を超える他の道との比較; 反証のための予言; そして未解決の問い—であり、論文の完成したコホートにおける位置づけと要約によって閉じられる。衝突型加速器セクター全体を三頁に凝縮した参照表 (マスター台帳、反証の階層、および発見の暦) は、他の参照資料とともに付録 D に置かれており、そこでは読者が議論なしにそれらを参照でき、また議論は調度なしに進むことができる。

54 結果の意義

本論文が届けるものを、その還元不能な内容にまで切り詰めれば、それは一つの文である: 反証可能でパラメータのない衝突型加速器の標的—一つの質量、一つの幅、一つの率、一つの干渉の符号、一つの角度形状、一つの分岐の指紋—であり、その決着のための日付入りの暦を伴うもの。この文の各節は、標準模型を超える文献において個々に見ても稀である; それらの連言は、我々の知る限り前例がない。本節はその理由を、意図的にゆっくりと解きほぐす、というのはこの形をした結果の意義は両方向に誤って判断されやすいからである—そのどれほどが上流の定理に条件づけられているかを忘れれば、過大に見積もりやすく、また調整可能な予言の五十年によって、あらゆる衝突型加速器の標的は密かに走査であると仮定するよう訓練されていれば、過小に見積もりやすい。

五十年の弧のなかでのこの結果。 本主張を、第 1 節で辿った数十年に照らして置く。1980 年代、コミュニティは大統一が示唆する崩壊率で陽子崩壊を探索した; その予言には桁のオーダーの自由度があり、カミオカンデと IMB が何も見なかったとき、動いたのはモデルの方であった。1990 年代から 2000 年代にかけて、超対称性の「自然な」窓は LEP からテバトロン、さらに LHC へと滑っていったが、これは構成上動く標的であり、百を超える連続パラメータがいかなるヌルをも吸収できるからにほかならない。2010 年代、ヒッグス以後、余剰次元と複合性のプログラムはベンチマークを提示した—正直で有用なベンチマークを—が、その質量と結合はやはり入力であり、そのため排除プロットは着実に増えていったにもかかわらず、いずれの排除も致命的ではなかった。その歴史に対して、本主張は程度においてではなく種類において構造的に異なる: 質量 3.849 TeV は動きえない (整数に近傍はない); レート 8.7 fb は下げられない (結合 $1/\sqrt{K}$ は質量を固定するのと同じ対象である); 幅、符号、偏極、分岐パターンは同じ三つの定理の出力である; そして本論文は、ヌルがこの構成を退役させるルミノシティに、書面で事前にコミットしている。自然が協力するか否かにかかわらず、これこそコミュニティが五十年をかけて理論に生み出すよう求めてきたものである。

「ゼロパラメータ」が認識論的に何を買うか。連続自由度の不在は美的な飾りではない; それは実験結果の意味を変える。ダイヤルがあれば、肯定的な結果はほとんど何も確証せず (ダイヤルは事後に設定された)、否定的な結果は何もキルしない (ダイヤルは回る)。ダイヤルがなければ、両方の結果は最大限に情報を持つものとなる: 関連したパターンを伴う 3.849 ± 0.10 TeV の発見は、コライダー現象論から電弱台帳を経て公理にまで届く連鎖を確証し、クリーンな排除は同じ連鎖をまるごと反証する — 6 TeV に本論文のフォールバック版は存在しない。統計もまた同じ美点を、正確に定量できる仕方で受け継ぐ (第 44 節): 探索範囲効果 (look-elsewhere) による割引はなく (0.8σ に相当し、系統誤差のプラトー近傍ではデータセットの倍増に等しい)、テンプレート不整合による希釈もない (レートで ~ 3 倍)。事前登録は通常、実験計画の美点として論じられる; ここではそれは理論の構造の帰結であり、そのまま感度へと換算される。

過剰拘束を、余さず語る。 以上のすべてを認める懐疑論者でも、なお次のように問いうる: コライダーの評決以前に、なぜこの連鎖を信じるのか。本論文の最強の答えは、いかなるコライダー・データよりも古い: M_{lock} を固定するのと同じ整数が、数十年前に四桁まで測定された数の上で二度目に費やされている。連鎖は $K = 35 \Rightarrow M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35} = 3.849$ TeV $\Rightarrow v = M_{\text{lock}} (2/5)^3 = 246.3$ GeV と走り、第二の矢印は別個の仮定ではなく [Arisaka \(2026, A9-SM\)](#) のウィルソン線読み出しである。一つの整数、二つのスケール、そのうち一つはすでに確認済みである: この構成は、四桁の監査をすでに生き延びた状態でコライダー試験に臨む。これが現在の賭けを宝くじから区別するものであり — その券はすでに抽選の半分を的中させている — 同時に賭け金を吊り上げるものでもあるのは、コライダーのヌルが候補共鳴の一つ消すにとどまらないからである; それは、現在電弱スケールを説明している連鎖を断ち切る。

結果の一部としてのカレンダー。 第 VIII 部は本主張への付録ではない; それは主張の半分である。決定手続きを欠く反証可能な言明は約束手形であり、シミュレーションはその手形を日程表に変える: 記録済みの Run-2+3 データにすでに宿る、証拠水準に迫る期待感度 (実験ごとに $2.5\text{--}3.3\sigma$); 現実的に改善された系統誤差のもとでの ATLAS+CMS 統合感度 $4.1\text{--}4.7\sigma$ — 統合の射程内にある、テープからの 5 シグマ; 背景系統誤差を半減させた場合、 ≈ 1.3 ab $^{-1}$ 、2034 年ごろにおける単一実験 5σ ; そして、すでに記録された Run-3 データ (≈ 0.5 ab $^{-1}$) は、帯が空であれば帯全体を排除すると期待される。日付は兵站を超えて重要である: それは評決を、本論文が名宛人とする読者 (序文の大学院生) の職業的生涯のうちに、そしてポスト LHC プログラムをいま決めつつある研究所の戦略計画の地平のうちに置く (第 IX 部)。その試験が何世代も先にある予言は方程式付きの哲学である; こちらは学位論文の提案書である。

各コミュニティにとっての意義を、別々に。 実験コラボレーションにとって、意義は運用的である: 完全に指定されたテンプレート、すでにテーブル上にあるデータの値付けされた再解析、そしてどの結果のもとでも価値のある成果物 — 答えが否であれば、あらゆる広幅のトップ親和的共鳴に対する世界最強の制限である。コライダー現象論にとって、意義は方法論的である: 導出されたレート、導出された符号、導出された角度形状が、走査なしの幾何学的構成から生み出せるという存在証明であり、対応する解析連鎖が端から端までどのようなものかを示す実演 (第 VI–VIII 部) である。理論コミュニティにとって、意義は第 5.5 節で述べた反転である: ワイルの二つの幾何化 — スケールと位相 — をともに、強制された非空間的次元として投入した最初の枠組みであり、そこではモジュライ、ランドスケープ、超対称性の義務が、仮定としてではなく帰結として解消されている。そして戦略計画に

として、意義は条件付きだが鋭い: 7.047 TeV に予言される第二ファミリーを伴う 3.849 TeV での 2030 年代の発見は、まさにエネルギー・フロンティア機を歴史的に加速させてきた「保証された物理」という入力であり、第 IX 部はそこから生じるプログラムを 2070 年まで地図化する。

第二の種類の意義としての二シナリオの決着。 本論文内のあるエピソードが別立ての扱いに値するのは、それが砲火のもとでの枠組みの認識論的な振る舞いを実演しているからである。ノイマン八重項の自由場配置を 2.461 TeV に置いたものが既存データと突き合わされたとき、導出されたレート (224 fb) は公表された排除の 3.6–11 倍上に位置した: シナリオ A は死んだ (第 31 節)。枠組みは滑らなかった; それは学んだ — スロート・ベクトルは自由場ではなく複合である — そして生き残った主張は、曖昧にではなくより鋭くなった。排除が単に期待値を移動させるのではなく構造的事実を教える理論は、第 1 節のパラメータ走査とは異なる認識論的レジームで動いており、このエピソードはいまや本論文の自己についての証拠の一部である: 反証の機構が、一度、キルの方向に機能することが観測された。

解剖の上で読む発見: 一つの共鳴、二つのファイバー。 意義の最後のレジスターは、コホートの最近のキャンペーンによって厳密なものにされた (GG-W1-Symmetry; Arisaka, 2026, A2-GG6; Arisaka, 2026, P5-CPT)。二つの非空間的方向は、位相的に反対の種類のファイバーである — ホロノミーは閉じたループを要求し、区間はそれを持たない: コンパクトな円 S^1_θ がバルクのホロノミーのすべてを担う — 量子化され、保護された、群である — 一方、スケール区間 I_r は何も担わない — 一方向的な輸送、半群である。ロック・クラスターは、単一の測定におけるこの二つのファイバーである。標的について量子化されたものはすべて円の署名である: 塔の存在、電荷の巻き付き起源、スピン内容、台帳整数によって固定された分岐指紋 — 記憶するファイバー上のホロノミー類のデータであり、だからこそそのいずれも調整可能ではない。そして標的的位置についてのものはすべて区間の署名である: 深さ $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-K}$ は一方向的な降下の 35 e-フォールドであり、忘却するファイバーが第一の段に割り当てるアドレスである。したがって 3.849 TeV での発見は、両方のファイバーの同時読み出しとなる — 共鳴の同一性は円の上に書かれ、そのアドレスは区間によって書かれる — そしてキャンペーンの用語で言えば、非空間的ファイバーを直接読む史上初の実験室装置となる: 円が可聴となる、区間が定めるエネルギーにおいて。

55 独自性、高潔さ、そして革新

物理の論文が慎重に用いるべき三つの語であり、それゆえ我々はそれらを勝ち取る前に運用的に定義しておく。独自性: 本論文が行い、近隣のどの枠組みも行わないことを、批判的な読者が否定を検証できる形で述べたもの。高潔さ: 事前コミットメント、正直な格付け、退却の拒否といった認識論的美徳であり、それが真であるか否かとは独立に結果を信頼に足るものにする。革新: I-KK-1 から I-KK-10 として登録された、本論文以前には存在しなかった具体的な技術の手立て。三者は関係しているが同じではなく、これらを混同することこそ、強い主張が売り込みのように聞こえるようになる仕方である。

55.1 古典的なコライダー・パズル、解決あるいは解消

以下の各項目は、この分野が数十年にわたって抱えてきたパズルを、実務家が認めるであろう形で述べ、次いで本論文がそれに対して何をするかを述べる。「解決」とは答えが導出されることを意味する; 「解消」とは問いが誤って立てられていたことが示されることを意味する。

PS-KK-1: 五十年の探索でなぜ新粒子は一つも現れなかったのか。 このパズルは、正直に述べるなら、LEP 以降のあらゆる戦略報告に取り憑いてきた: TeV スケールが新物理を隠しているのなら、最もクリーンなチャンネル — ダイレプトン、二光子、 Z とヒッグスを見出した黄金のシグネチャ — は、なぜミノシティで三桁を通じて空のままだったのか。従来の答えは、絶望的 (何もない) か、回避的 (もっと重い) かのいずれかである。本論文の答えはそのいずれでもない: 導出された結合のテクスチャ — $\xi_{UV} = -0.194$ の UV 局在した軽いフェルミオン、平坦な光子、 $r_{t_R} \approx 4.5$ の IR 局在したトップ — は、クラスターを探索が最も困難なところでこそ大きく (広幅、干渉的、 $t\bar{t}$)、探索が最も容易なところでこそ静かにする。この読みのもとでは、五十年の沈黙は空の TeV スケールの証拠ではない; それはどのチャンネルが聴かれたかについての言明であり、PS-KK-1 は一つの指示へと解消する: 第 VI 部のテンプレートを用いて、ブーストされたトップ対を聴け。

PS-KK-2: 階層性問題を、出力として。 四十年にわたり「なぜ $v/M_{Pl} \sim 10^{-16}$ なのか」がこの分野のエンジンであり、超対称性、テクニカラー、ワーピング、そして人間原理を順に駆動してきた — 提案された答えはどれも、一つの比を保護するために追加された新しい機構であった。ここでは比は保護されない; それは計算される: e^{-35} に導出された有理因子を掛けたものであり、35 は数え上げである。階層性はスケール・スロートの長さであり、なぜそれが大きいのかを問うことは、なぜ $LJ = M^2 + N^2 + L^2 = 35$ なのかを問うことである — 動力学的な答えではなく、ディオファントス的な答えを持つ問いである (Arisaka, 2026, A3-BI6)。カスケードを条件として解決である; そしてその解決が試験可能であるのは、同じ数え上げが 3.849 TeV に座しているからである。

PS-KK-3: ラジオンとモジュライの問題。 これまで提案されたあらゆる空間的余剰次元は、同じ気まづさを背後に引きずっている: 新しい次元の大きさは場であり、その場は安定化されねばならず、安定化子 (ゴールドバーガー・ワイズとその後裔; Goldberger & Wise, 1999) は、舞台を静止させておくことだけを仕事とする追加物である。弦のコンパクト化は、この気まづさを数百のモジュライ倍にする。GG-6 はこの問題を根で解消する: 長さが数え上げの数である次元には、安定化すべき揺らぎがない — ラジオン場はそもそも存在しない — そしてこの解消が反証可能であるのは、隠れたモジュラスが常にヒッグス結合へ漏れ出すからである (P-KK-9、第 IX 部のヒッグス精密測定のスル)。

PS-KK-4: 探索範囲効果の病理。 共鳴狩りには統計的な税と社会学的な税がある。統計的な税は試行因子である: 十分な数の質量点を走査すれば揺らぎは保証され、それゆえあらゆる局所超過は割り引かれる (公表された $t\bar{t}$ 走査で $N_{\text{trials}} \approx 76$ 、第 44.1 節)。社会学的な税はより悪い: 走査される理論はスルのたびに移転するため、コミュニティはあらゆる BSM の興奮をノイズとして扱うことを学んでしまった — 750 GeV 二光子のエピソードが規範的な教訓譚である。事前登録された単一の点は、いずれの税も払わない。統計的な割引は算術によって消える; 社会学的なそれは、予言がそのレートと符号とともに、データがアンブラインドされる前に印刷されていたがゆえに消える。解消 — この探索に限ってのことであり、それこそが要点である。

PS-KK-5: 「KK グラビトン」の規格化の曖昧さ。 微妙な、内部者のパズルである: ワープした文献の第一極質量 $m_1 \simeq x_1 k e^{-k\pi r_c}$ は、データ解析が検証できない規約 (どのブレーンか、どの境界条件か、 k のどの規格化か) に依存し、それゆえ「 m_1 の KK グラビトン」は一度も鋭い標的であったことがない。本論文の言明は規約に耐えるように構成されている: 多場クラスターの重心が定理級の対象であり (T-KK-1)、微細構造は別途導出され (T-KK-2)、探索の指示はそれに応じて変わる — 孤立した極ではなく、クラスターを狩れ。定式化のし直しによる解決である。

PS-KK-6: そもそもなぜ新物理は弱スケール近傍に座すべきなのか。 自然性はこう言った: 何かがヒッグスの発散を打ち消さねばならず、それは近くになければならないからだ、と。LHC は十五年をかけてその議論を侵食してきており、その侵食は日常的に、いかなる TeV スケールの期待に対しても不利な証拠として数えられている。本論文の連鎖がこの侵食に免疫であるのは、それが自然性を一度も持ち出さなかったからである: v と M_{lock} は一つの整数連鎖の出力であり、それゆえ両者の近さは希望ではなく恒等式である。自然性に基づく期待の失敗は自然性に対する不利な証拠である — そして、それを一度も用いなかった予言については何も語らない。解消。

55.2 構造的な革新

本論文以前には存在しなかった十の登録された手立てであり、新規性の主張が監査できるよう、それぞれについて以前と以後を述べる。

I-KK-1 (ゼロパラメータのコライダー質量)。 以前: 余剰次元のベンチマーク質量はすべて入力であった — RS の kr_c は階層性に合わせて調整され、ADD の M_D は解析ごとに走査された。以後: $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-K}$ であり、 K はディオファントス整数で、 $v = M_{\text{lock}} (2/5)^3$ を通じて二重に費やされる。我々の知る限り、BSM 時代において、その連鎖のどこにも連続自由度なしに導出された最初のコライダー質量である。

I-KK-2 (二シナリオの微細構造)。 以前: KK スペクトルの微細構造は $\mathcal{O}(1)$ のプレースホルダーとともに引用された。以後: 厳密な自由場固有値および正直な離散的二分法 (自由場対複合硬化) であり、双方の角がともに質量とレートの完全な予言を担う — 一方はいまやデータによって排除され、生き残った方はその排除によって鋭くなった。革新は形式にある: 不確かさが帯としてではなく、有限の決定問題として梱包されている。

I-KK-3 (導出された生成結合)。 以前: KK グラビトンのコライダー研究は $k/\bar{M}_{\text{Pl}}$ をパラメータ化し、それを走査した。以後: $\kappa_{gg} = 2(1 + J_2(x_1))/(Kx_1^2 J_2(x_1)) = 0.47/K$ であり、調整すべき入力を持たない閉じたベッセル形である (系 T-KK-2c; 付録 I で完全に導出) — そしてそれとともに、公表されたヌルの、パラメータを持たない最初の遡及予言である (二光子の制限を、数千という因子で)。

I-KK-4 (干渉符号定理)。 以前: 共鳴-連続背景の干渉は、符号をフィットで決めるニューサンスとして扱われた。以後: $\xi_{UV} g_V^t < 0$ が強制され、ラインシェイプ — 下側で増強、上側で欠損、和のスペクトルは 4.9 TeV 近傍で標準模型の下を横切る — がパラメータを持たない形状の反証子となり、図 4 に定量的に描かれている。

I-KK-5 (登録された床を伴うツリーレベルのゼロとしてのレプトフォビア)。 以前: レプトフォビックな Z' は、ダイレプトンの制限を回避するように選ばれた電荷割り当てによって作られ

た。以後: レプトンがバリオン数を持たないがゆえに $\text{BR}(Z'_B \rightarrow \ell\ell) = 0$ である — 回避は選択ではなく電荷割り当ての帰結であり、その下にあるループの床 (O-KK-61) は、ハドロン機では電弱 KK 光子の線から分離できない (第 50.1 節) 以上、ミューオン・コライダーが測定することになるものである (第 50.3 節)。

I-KK-6 (多場クラスターのシグネチャ)。 以前: 探索は単一の極を標的とする; 多状態の模型でさえ分裂幅を走査する。以後: 一つの導出された質量における四つのメンバーの強制された縮退 — スピン 2 アンカー、八重項、そしてツリーレベルでは生成されない二つのディリクレ・ベクトル — であり、探索の指示もそれに合わせて変わる。6D の指紋は、いずれかのメンバーではなくクラスターである。

I-KK-7 (事前登録探索の統計)。 以前: 探索範囲効果とテンプレート希釈は、BSM 探索の避けられないコストとして扱われた。以後: いずれも定量され、導出によって除去される — 試行因子なし、不整合による希釈なし — ことで、既存データを統合された専用感度 $4.1\text{--}4.7\sigma$ へと変える (第 44 節)。革新は、理論的な剛性がルミノシティに値することの実演にある。

I-KK-8 (アンカー付きシミュレーション法)。 以前: BSM の感度予測は日常的に $\sqrt{L}$ と理想化された検出器で外挿する。以後: すべての実験的入力公表された解析にアンカーされ、統計機構はその公表された制限に較正され ($F_{\text{cal}} = 4.33$ 、中間幅の形状で順序を検査済み)、系統誤差の壁は解析的に位置づけられる ($L^* = 1/f_b^2 b$) — 誤差予算そのものが監査された予測である (第 VIII 部)。

I-KK-9 (反証カレンダー)。 以前: 反証可能性は原理として主張され、日付が付されることは稀であった。以後: キル条件はルミノシティ ($\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ 、期待値) を、したがって日付 (Run 3 の終了) を担い、その背後には性質測定の梯子がスナップショットごとに日程化されている。

I-KK-10 (施設の役割の分類)。 以前: 将来コライダーの物理ケースは機械ごとに論じられ、それぞれがすべてを主張した。以後: 結合そのものから導出された分業 — 評決の機械 (HL-LHC)、分光の機械 (FCC-hh)、レプトフォビアの機械 (ミューオン・コライダー。その決定的な GG-6 測定は、登録された床の上でディリクレ・ベクトルが静かなまま、 $\sqrt{s} = M_{\text{lock}}$ における電弱 s チャンネルの線である)、台帳の機械 (FCC-ee と線形の選択肢) — であり、それぞれが名指しされ日付の付いた成果物を伴う (第 IX 部)。

55.3 高潔さの条項

「高潔さ」は理論のための語ではない; それは本論文が自らを縛る行動のための語であり、四つのコミットメントとして、それぞれ検証可能な形で述べることができる。事前コミットメント: すべての反証子は、データが到着する前に、その決定規則と価格とともに述べられる — F-KK-2B のキル窓は、それが招く再解析よりも前に印刷されていた。正直な格付け: すべての定量的主張は $[T]/[D^*]/[M]/[E]$ を担い、最も見栄えのしないグレードが最も目立つように表示される (Z'_B の未解決の結合シートは、脚注ではなく最初の要約表にある)。退却せず: シナリオ A の排除への応答は移転ではなく退却であった — そして本論文の構造は、整数が二十二の文書にわたって荷重を担っているがゆえに、将来の移転を公然と行うことを不可能にしている。対称な賭け金: 本論文は、成功が何を意味するかと同じだけ明示的に、失敗が何を意味するか (電弱の導出はコライダーの主張とともに倒れる) にコミットす

る。これらのコミットメントは修辭的な安全を代償とし、五十年の歴史が賢さよりも稀少であることを示すものを買う：著者があらかじめ逃げられないよう手配した主張である。

56 標準模型を超える他の道との比較

表 2 (第 5.5 節) は KK および RS との構造的な比較を担った；本節はレンズを、この分野が 1970 年代以降に歩んだあらゆる主要な道へと広げ、問いを運用的なものへと鋭くする：GG-6 ではなくその枠組みが TeV スケールを所有していたなら、第 VIII 部の四つのスナップショットは何を記録するか — そして本論文の登録された予言のうち、どれをその枠組みは外すか。表 30 は十五の観測量にわたる評決を集めている；散文は枠組みを順に取り上げ、それぞれにその歴史が勝ち取った敬意と、その比較が要求する精度をもって当たる。

5D ランダル–サンドラムおよびワープしたベンチマークとの対比。 RS は本論文の最も近い親戚であり、最も教育的な引き立て役である — 付録 J の数学は共有されており、まさにそれゆえに差異はクリーンである。 $k/\bar{M}_{Pl} \sim 0.1-1$ を伴う $3.85 TeV$ の規範的な RS グラビトン、GG-6 が構造的に静かであるチャンネル、すなわちダイレプトンと二光子で最初に自らを告げていたはずである；その単一の狭い極は、異なるスピンを持つ質量縮退したパートナーを持たず、ツリーレベルのレプトフォビアも持たず、レートは $k/\bar{M}_{Pl}$ でダイヤル調整される；その安定化されたラディオンは、ヒッグス・ファクトリーが見る水準でヒッグス・セクターに混合する；そしてその第二 KK 準位が x_2/x_1 に座するのは、5D の境界条件が純粋である場合に限る — これは定理ではなく規約である (PS-KK-5)。スナップショットにおいて： $t\bar{t}$ で見えるほど大きなその結合は $\ell\ell$ で排除されている以上、RS は 2026 年までにクリーン・チャンネルの線を示すか、さもなければ何も示さないであろう。P-KK-6 (レプトフォビア)、P-KK-9 (ラディオなし)、およびクラスターの縮退を外す；倍音比は (弱められた形で) 共有する。

複合ヒッグスおよび KK グルーオン模型との対比。 これらの枠組みは本論文のトップ親和的八重項を共有している — 実際、シナリオ B の境界複合的な読みは複合性の言明そのものであるし、この重なりは偶然ではなく、認められた負債である。差異はダイヤルにある：複合八重項の質量は走査され (排除プロットが 1 から 6 TeV まで走るのは、まさに質量を固定するものが何もないからである)、幅は複合性角を通じて調整可能であり、八重項に質量ロックされたスピン 2 アンカーは一般に存在せず、固定比の第二ファミリーも存在しない。スナップショットにおいて：複合八重項は $t\bar{t}$ だけでなら 2026 年末から 2041 年末までを模倣しうる — これは最初のバンプに割り込みうる唯一の枠組みである — が、発見後のプログラムは外す：FCC-hh に同じ質量のアンカーはなく (F-KK-1 第 2 階層)、 $1.831\times$ の倍音もなく、 P_t は帯 $[+0.88, +0.92]$ ではなく自由である。したがって識別は即時ではなく日程化されたものであり、第 IX 部がそのカレンダーである。

一般的な Z' 模型との対比。 BSM 探索の主力であり、最もクリーンな対照である。電弱強度のレプトン結合を持つ $3.85 TeV$ の Z' はすでに排除されている；レプトフォビクな Z' は生き残るが、それは構成によってのみであり、しかも単独で現れる — その質量にロックされたカラー八重項はなく、グラビトンもなく、QCD との干渉もなく (カラー一重項はグルーオン・チャンネルと干渉できない)、その質量の理由もない。スナップショットにおいて：8.7 fb に調整されたレプトフォビクな Z' は八重項の計数有意度を追隨するであろうが、形状のプログラムは直ちに外す — 低側の増強は

なく、標準模型を下回る交差もなく (P-KK-4)、ダイジェット対 $t\bar{t}$ の分解は誤っている — そして O-KK-28 の干渉の二分法が、同じデータでテンプレート・フィットの水準において両者を分離する。

アノマリー・フリーなバリオンの完成 (正統派のライバル) との対比。 最強の正統派の競合者は、同じ対称性を四次元でゲージ化する: Benakli, Goodsell and Goudeau (Benakli, Goodsell & Goudeau, 2026) は $U(1)_{\bar{B}}$ アノマリーを隔離されたカイラル・セクターで打ち消し、電荷 $3/2$ の一重項スカラーで対称性を破り、十七次元のパラメータ空間を走査する; 彼らの非統一のベンチマーク 3 は Z' を 3.85 TeV に置く — 印刷された桁までは数値的にロック・スケールであるが、 $g_X \approx 0.0275$ はダイヤル調整され、破れのスケールは走査されている。この一致は走査の出力である: 舞台設定であって、証拠では決していない。等質量では結合の二乗比は $(0.565/0.0275)^2 \approx 420$ であるが、結合比はレート比ではない: ノイマン・モードでは、本論文の八重項の重なり $\xi_{UV} = -0.194$ と $BR(t\bar{t}) = 0.94$ のもとで、同条件どうしの生成比は ≈ 16 、ダイジェットのレートは数倍以内、 $t\bar{t}$ は彼らのおよそ九十倍となり (彼らの線についてはクォークのみの $BR(t\bar{t}) = 1/6$ 、八重項については 0.94 を用いて) — そして境界条件が実際に課すディリクレ・モード (T-KK-2、ステップ 3') では、我々のバリオンのベクトルがそもそもツリーレベルで軽いクォークから生成されないため、比較はさらに崩れる。観測可能な識別子はパターンであり、スナップショットはそれを記録するであろう: 彼らの Z' は孤立した、狭い、クォーク普遍的な線であり、そのアノマリーを打ち消すスペクトルの大半はその上に、暗黒セクターはその下であって、彼ら自身の言い回しでは「段階的に明らかにされる」ものである; 我々のそれは同じ質量のカラー八重項であり — 広幅で、トップに飽和し、本論文自身のレートでは生成において彼らの線より数百倍、ダイジェットでは四十のオーダーの因子だけ明るい — その下にはグラビトンと、生成されないバリオンのベクトルが縮退しており、エキゾチックはどこにも存在しない。普遍的なクォーク結合を伴う 3.85 TeV のクォーク普遍的なダイジェット線は、我々のものではなく彼らのものであろう — そして彼らのアノマリーを打ち消すフェルミオンは、まさに、その発見を O-KK-47 の系がこの実装に不利に数える状態である。質量は走査に対してロックされ、結合はダイヤル調整に対して導出されている; 彼らの暗黒物質は 0.10–1.2 TeV の隔離されたニュートリノであるのに対し、我々のそれは 1.95 GHz 近傍の単一のハロスコープ線であり、十六から十七桁も離れているため、二つの未来が長く取り違えられることはありえない。

超対称性との対比。 この比較が観測的というより方法論的であるのは、MSSM がこのチャンネルについてそもそも鋭い言明を何もしないからであり — それ自体が第 1 節の力説した点である。集団的努力の一世紀は、MSSM において、 >100 のパラメータが LHC の記録するいかなる $t\bar{t}$ スペクトルをも収容しうる枠組みを生んだ; それはこの測定によって反証可能ではなく、対称的に、それを主張することもできない。構造的な対照はより鋭い: GG-6 のバルクはスーパー・ポアンカレ拡張を許さず (r, θ に沿った並進生成子がない; 第 5.5 節)、それゆえ五十年にわたる超対称パートナーのヌル — 自然性のもとでは説明されない気まずさ — は、ここでは一つの定理の確証である。一方の枠組みは、他方が言い訳せねばならない沈黙を予言する。

大きな余剰次元 (ADD) との対比。 もう一つの偉大な余剰次元の道は、サブミリメートルから TeV のスケールで空間的次元を投入し、準連続の KK 塔と、探索ごとに走査される基本スケール M_D を伴う。そのコライダー・シグネチャ — グラビトンの脱出によるモノジェット、エネルギーとともに上昇する非共鳴のダイジェット/ダイレプトン超過 — は共鳴クラスターとは質的に異なり、その塔はオルガンパイプではなく杭垣の連続体である (付録 J、ステップ 1)。スナップショットにおいて:

ADD は滑らかに上昇する裾を示し、ピークも干渉構造も示さないであろう; それは P-KK リストのあらゆる共鳴に関する条項を外し、最初のスペクトル・プロットによって GG-6 から分離される。より深い対照は第 5.5 節のそれである: ADD の次元はモジュライを担い、安定化を要する; GG-6 のそれはいずれも担わない。

弦のランドスケープとの対比。 弦理論は 3.85-TeV のテンプレートという水準では競合者ではなく — そのような言明を何もしない — 正直な比較は A2 が描くものである: エネルギー軸の両端に既約な仮定を置く、二つの整合的な戦略である。ここに属するのは、反証可能性の非対称性である。 10^{500} の真空を持つランドスケープは、肯定的であれ否定的であれ、いかなるコライダーの結果をも吸収できる; 現在の枠組みは一つの結果でキルされる。クラスターがその相関したパターンとともに発見されれば、弦の模型構築は十年のうちにそれを後付けするであろう — それほどの柔軟さである — が、予言は、それがまだ誤りでありえた時点でそれを行った枠組みのものであったことになる。科学的に意味のある順序は、出版の先取権ではなくリスクの先取権であり、それはランドスケープが事後に製造できない唯一の量である。

57 反証のための予言

反証子とは、予言に決定規則と価格を加えたものである; 予言だけなら、単位のついた希望にすぎない。本節は、本論文の三つの反証子を物語として述べ直し — それぞれがどこで宣言され、以後それに何が起り、何がそれを終わらせるか — 次いで登録された十の予言を個別に辿るが、これは表の一行では (要約は表 31 として残る) 批判的な読者が必要とするものを担えないからである: 各主張について、何が予言され、どこで導出され、どのように測定され、どの結果がそれをキルするか。

F-KK-1、二階層のクラスター反証子: その歴史。 本論文の当初の見出し — ロック・スケールにおけるスピン 2 アンカー — として宣言された F-KK-1 は、グラビトンのグルーオン結合が計算され $0.47/K$ と出たとき、本論文自身の系 T-KK-2c によって条件を付け直された: アンカーの LHC レートは不可視にまで落ち、反証子は二つの階層へと再構成された。第 1 階層 (*HL-LHC*、決定的): ロック・スケールの実装は、抑制不能な八重項が全面的に担い、すでにテーブル上にある $\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ のデータで期待される、 $3.85 \pm 0.10 \text{ TeV}$ 以内のクラスターを考慮した $t\bar{t}$ /ダイジェット統合におけるヌルによって死ぬ。第 2 階層 (*FCC-hh*、確認的): 同じ質量における直接のスピン 2 アンカーであり、 $\Gamma/m = 6.3\%$ 、分岐 $0.69:0.15:0.08:0.08$ 、85 TeV でレート $\approx 0.21 \text{ pb}$ — 最初の数週間での発見か、さもなくばクラスターという読みの反証である。分業の条項それ自体が反証可能である: いずれか一方の階層を他方なしに見出すことは、この解釈をキルする。条件を付け直したエピソードがこの物語に属するのは、それが本論文の動作するレジスターを実演しているからである: 導出が反証子を動かしたとき、反証子は退役させられたのではなく、より厳しく述べ直された。

F-KK-2A: 発火した。 自由場シナリオ — $0.639 M_{\text{lock}} = 2.461 \text{ TeV}$ のノイマン八重項、 $\sigma \times \text{BR} = 224 [180-325] \text{ fb}$ という見逃しようのないレート — は、第 31 節で公表された Run-2 の記録と突き合わされ、敗れた: 予言は観測された排除の 3.6–11 倍上に位置し、どのように読んでもその帯の外にある。この決着はもはや暫定的ではない: 暫定的なグレードが待っていたラインシェイプは計算され、それは制限が設定されたテンプレートよりも尖っており、それゆえ補正は理論に不利に働く。その構造的な収穫は第 10.4 節に記録されている: スロート・ベクトルは複合である。したがって本論文

表 30: 枠組みと観測量の識別マトリクスであり、完全性のため転置してある: 観測量を行、枠組みを列とする。各セル: その枠組みは一般にこの観測量を再現するか。(✓ = はい/強制される; ~ = パラメータの選択によって達成可能; × = 外す、あるいは禁止される; — = 言明なし。) MSSM の列がほとんど「—」であるのは、この枠組みがこのチャンネルで鋭い主張を何もしないからであり — これが第 1 節の方法論的な要点である; 弦のランドスケープの列が全体にわたって「~」であるのは、どのセルも事後に埋められるからである (リスクの先取権、本文参照)。最終行は、各枠組みを GG-6 から分離する最も早い測定を挙げる。

観測量	GG-6	RS	CHM	Z'	MSSM	ADD	Str.
質量が導出される (走査なし)	✓	×	×	×	—	×	~
レートが導出される (結合のダイヤルなし)	✓	×	×	×	—	×	~
EW スケールが新しい質量に結び付く	✓	~	~	×	~	×	~
ディリクレ・ベクトル-グラビトンの縮退 $m_{Z'_B}=m_{G_1}$	✓	~	×	×	—	×	~
ツリーレベルのレプトフォビア (P-KK-6)	✓	×	~	~	—	×	~
幅 Γ/m が予言される	✓	×	×	×	—	×	~
干渉の符号 (P-KK-4)	✓	~	✓	×	—	×	~
$P_t \in [+0.88, +0.92]$ (P-KK-5)	✓	~	~	~	—	×	~
BR 指紋 70:3.5:1 (P-KK-2)	✓	×	~	~	—	×	~
ラディオオン/モジュライなし (P-KK-9)	✓	×	✓	✓	×	×	×
単一生成から出る角度パートナー (P-KK-7)	✓	✓	✓	✓	—	×	~
1.831× の倍音 (P-KK-8)	✓	~	×	×	—	×	~
出力としての階層性	✓	~	~	×	~	~	~
SUSY の不在が説明される	✓	—	—	—	×	—	×
レプトン・コライダーの評決 (P-KK-10、再格付け)	~	×	~	~	—	×	~

列見出し: RS = 5D ランダール-サンドラムのベンチマーク; CHM = 複合ヒッグス/ KK グルーオン模型; Z' = 一般的なレプトフォビクな Z' ; Str. = 弦のランドスケープ。各枠組みを GG-6 から分離する最も早い測定: RS — それが要求し GG-6 が禁じる $ll/\gamma\gamma$ の線 (既存データによりすでに決着済み); CHM — スピン 2 アンカーと 1.831× の倍音 (FCC-hh、第 IX 部); Z' — 干渉の形状、発見のフィットそのものの内部で; MSSM — なし (このチャンネルでの主張なし); ADD — 共鳴的か非共鳴的かのスペクトル形状 (最初のプロット); 弦のランドスケープ — リスクの先取権 (本文参照)。

の反証子の一つは、キルの方向に、予定どおりすでに執行された — 他の反証子が荷重を担っていることの、ありうる最強の証拠である。

F-KK-2B: 生きており、すべての中心である。 M_{lock} における複合シナリオの八重項: 13 TeV で 8.7 [7.0–12] fb、14 では 13.6 fb、幅 14.6%、干渉の符号は固定されている。その決定手続きは第 VIII 部の内容全体である; その価格は述べられている (較正された機構のもとで、期待値 $\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$); その最も早い執行は、すでに存在するテープの再解析である。本論文の他のあらゆる主張は、この一つの評決の下流にある — そしてその評決自体が、いまや精密データがすでに突きつけた問いの下流

にある: 同じ塔の電弱メンバーは、赤外に登録されたヒッグスに対してこの質量で $T = 1.7$ を与えており (O-KK-68)、それゆえ M_{lock} における八重項の存続は、枠組みがまだ行っていない電弱ヒッグスの同定を前提としている。

表 31: 本論文の番号付き予言と、そのグレード ([T] 定理; [D*] 導出条件付き; [M] メニュー; [E] 外部入力)。グレードは四つであり、ラベルのない行はない。定理級の項目はその定理とともに倒れ、導出条件付きの項目はその傍らに印刷された条件とともに倒れ、メニューの項目は有限の列挙された集合の一つであり、外部入力の項目は本論文が消費する他人の数である。四つを混ぜることこそ、予言のリストが実際よりも強く見えるようになる仕方であり、グレードの列はそれを止めるために存在する。

ID	予言	グレード
P-KK-1	13 TeV で $\sigma \times \text{BR}(g^* \rightarrow t\bar{t}) = 8.7 [7.0\text{--}12] \text{ fb}$; 14 TeV で $13.6 [11\text{--}19] \text{ fb}$; 85 TeV で $\approx 2.8 \text{ pb}$	[D*]
P-KK-2	八重項の分岐指紋 $t\bar{t} : b\bar{b} : jj \approx 70 : 3.5 : 1$; $\text{BR}(t\bar{t}) = 0.94 [0.93\text{--}0.95]$	[D*]
P-KK-3	グラビトンのパターン $t\bar{t} : W_L W_L : Z_L Z_L : hh = 0.69 : 0.15 : 0.08 : 0.08$, $\Gamma/m = 6.3\%$ (テンプレート規格化; 2.7% は幾何の k について、O-KK-66), $\sigma(85 \text{ TeV}) \approx 0.21 \text{ pb}$	[D*]
P-KK-4	干渉の符号: 極より下では増強、上では欠損; 標準模型との交差は $\approx 4.9 \text{ TeV}$; 重心の引きは $-\mathcal{O}(100) \text{ GeV}$	[T]
P-KK-5	トップ偏極 $P_t = +0.91$, 帯域 $[+0.88, +0.92]$; 共鳴の $A_{FB} = 0$, u, d, s, c 由来 (カイラルな $b\bar{b}$ チャンネルはパーセント水準)	[D*], P_t について (カスケード帯域); [D*], A_{FB} について (一つの UV プロファイル)
P-KK-6	ツリーレベルのレプトフォビア、登録されたループ下限を伴う; $m_{Z'_B} = m_{G_1} = M_{\text{lock}}$ が厳密に成立 (ディリクレ・モード)	質量について [T]; 下限について [M]
P-KK-7	導出されたオフセット (基準の $1.07\text{--}1.17\times$, 自由場) における角度パートナであり、 θ に依らないカレントによる単独生成には現れない	[D*] オフセット; [M] ファイバーの読み
P-KK-8	$1.831 M_{\text{lock}} = 7.047 \text{ TeV}$ における第二の動径族 (位置; 85 TeV での率の見積もりは $\sim 10 \text{ fb}$)	[T]/[M]
P-KK-9	ラディオンは存在しない; ヒッグスの結合は $G_1 \rightarrow hh$ を除いて標準模型的	[T]
P-KK-10	レプトン衝突型加速器における判定: 登録されたループ下限より上では、ディリクレ・ベクトルまたは八重項による s チャンネルの線は $\mu^+\mu^-$ に現れない; 電弱 KK 光子と Z は $\sqrt{s} = M_{\text{lock}}$ に線を与え、その高さは開いたレプトン深さによって定まる (O-KK-62)	ディリクレ・ベクトルと八重項の条項について [D*]; 線の高さについて [M]

十の予言を、一つずつ歩く。 *P-KK-1* (レート)。 $\sigma \times \text{BR}(g^* \rightarrow t\bar{t}) = 8.7 [7.0\text{--}12] \text{ fb}$ (13 TeV において)、 $13.6 [11\text{--}19]$ (14 において)、 $\approx 2.8 \text{ pb}$ (85 において) —第 31 節において ξ_{UV} と付録 K のパートン連鎖から導出される; 専用のテンプレート・フィットによって測定される; どちらの方向であれバンドの外にあるフィットされたレートによって殺される ($\sim 12 \text{ fb}$ を超える超過は、ヌルと同じだけ確実に反証する)。 *P-KK-2* (八重項の指紋)。 $t\bar{t} : b\bar{b} : jj \approx 70 : 3.5 : 1$, $\text{BR}(t\bar{t}) = 0.94 [0.93\text{--}0.95]$ —付録 I の幅の表から; $t\bar{t}$ の線がひとたび存在すれば、ダイジェットおよび $b\bar{b}$ のコンパニオンによって測定される; バンドを超えて外れるいかなる比によっても殺され、最も鋭くは $t\bar{t}/20$ より強いダイジェット線によって殺される。 *P-KK-3* (アンカーのパターン)。同じ質量における G_1 が $t\bar{t} : W_L W_L : Z_L Z_L : hh = 0.69 : 0.15 : 0.08 : 0.08$ を、そしてテンプレート規格化において $\Gamma/m = 6.3\%$

をもつこと（幾何の k の上では 2.7%、O-KK-66）—T-KK-2c と応力テンソル結合から; FCC-hh において四つのチャンネルにわたって測定される; アンカーの不在、誤った幅、あるいは横方向優勢の二ボソン崩壊によって殺される（縦方向の優勢がヒッグス・セクターの署名である）。 P -KK-4（符号）。極の下では建設的、上では破壊的、SM との交差は $\simeq 4.9$ TeV、重心は $-\mathcal{O}(100)$ GeV だけ引かれる—第 VI 部の定理; 発見解析そのものの、符号を浮かせたテンプレート・フィットによって測定される; HL-LHC の統計における誤った符号あるいは干渉なしの選好によって殺される。 P -KK-5（偏極と非対称性）。 $P_t = +0.91$ 、バンドは $[+0.88, +0.92]$; 軽クォークの始状態からは $A_{FB} = 0$ 、カイラルな $b\bar{b}$ チャンネルはパーセント水準—それぞれ、カイラリティ構造 $r_{t_R} \gg r_{t_L}$ とベクトル的な軽クォーク結合から; レプトン・アナライザー分布を通じて 2041 年までに $\delta P_t = 0.08$ まで測定される; 低い偏極（ベクトル的なトップ結合）あるいは有意な A_{FB} （軸性の軽クォーク結合）によって殺され、そのいずれもが T-KK-2 を直接に破る。 P -KK-6（レプトフォビアと縮退）。ツリー水準で $\text{BR}(Z'_B \rightarrow \ell\ell) = 0$ であり、ループの床が登録されている（O-KK-61）; $m_{Z'_B} = m_{G_1} = M_{\text{lock}}$ が厳密に成り立つ—ディリクレ・モードのゼロ点はグラビトンのそれである; ダイレプトンのヌルとラインシェイプの分解によって測定される; クラスター質量における、O-KK-62 の電弱 KK 線ではないダイレプトン線によって—登録された床より上の、ディリクレ・ベクトルからの線であり、ミュオン衝突型加速器はそれを幅と $t\bar{t}$ /ダイジェットのパターンによって KK 光子のそれから分離する—あるいはバリオンのベクトルとグラビトンのあいだの分解された分裂によって殺される。 P -KK-7（角度方向のパートナー、再格付け）。正準計量の上では、各クラスター構成員の $\ell = \pm 1$ パートナーは導出された自由場のオフセットに位置する— $1.067 M_{\text{lock}}$ （スピン 2）、 $1.144 M_{\text{lock}}$ （ディリクレ・ベクトル）、基準の $1.171 \times$ （ノイマン・ベクトル; 式 (12))—それらは二重に縮退し、保存された θ 運動量を担い、したがって θ 非依存のカレントによる単独生成からは不在である; 第 5.5 節のファイバーの読みのもとでは、それらは共鳴ではなく電荷セクターである。格付け: オフセットについては導出条件付き（自由場であり; シナリオ B の硬化のもとでの生き残りは未証明）、ファイバーの読みについてはモデル水準。ピーク領域の任意の高分解能スキャンにおいて、および ~ 8 TeV における対生成において測定される; 軽クォーク始状態からの単独生成におけるパートナーによって殺され、それは選択則と非空間的読みをともに破ることになるであろう、あるいは導出されたものとは別のオフセットにおける分解されたパートナーによって殺される。 P -KK-8（倍音）。 $1.831 \times M_{\text{lock}} = 7.047$ TeV における G_2 であり、位置は定理級、レートは 85 TeV において ~ 10 fb（推定）—第 9.1 節のベッセル比; FCC-hh の分光によって測定される; FCC-hh の統計における位置のヌルによって（O-KK-18 が言い訳なしの条項を記録している）、あるいは誤った比における倍音によって殺され、後者は空洞そのものを反証することになるであろう。 P -KK-9（ラディオンなし）。導出された $G_1 \rightarrow hh$ の線を除き、ヒッグス結合は標準模型的である—整数の長さから（PS-KK-3）; FCC-ee によって千分の一の水準で測定される; ヒッグス精密測定におけるスカラー混合のパターンによって殺され、これは LHC での発見の有無を問わない。 P -KK-10（レプトン衝突型加速器の評決、再格付け）。ディリクレ・ベクトルと八重項は、登録されたループの床より上において $\mu^+\mu^-$ の s チャンネルの線を与えない（O-KK-61）。O-KK-62 の電弱 KK モードは別の問題である: レプトンが軽クォークの振幅をもって紫外の端点に位置するならば、KK 光子と KK Z は $\sqrt{s} = M_{\text{lock}}$ のミュオン衝突型加速器における s チャンネル共鳴であり、本論文自身の重なり積分のもとではピーク断面積はピコバーンの程度である—したがって以前の改訂における「沈黙」は撤回され、再格付けされた予言は、その高さがレプトンの深さによって定められる線である（未解決、Arisaka, 2026, A9-SM）。ミュオン衝突型加速器が稼働するときはいつでも測定される; 床より上のディリクレ・ベクトルからのレプトン的な線に

よって、あるいはレプトンの深さが供給しえない高さにおける電弱線によって殺される。

反証の格子。 十の予言は独立の射撃ではない; それらは三つの定理をその節点に置く格子をなし、そして試験にかけられている真の対象はその格子である。誤った符号 (P-KK-4) は T-KK-2 のモード構造を破り、P-KK-5 をも道連れにする; θ 非依存の始状態からの単独生成におけるパートナー (P-KK-7) は選択則を破り、非空間的読みをも道連れにする; ラディオ (P-KK-9) は整数の長さを破り、質量そのものを持ち去る。逆に、格子を確認する発見はそれを一体として確認する—これこそ、第 56 節が、いかなる近隣の枠組みも全リストを生き延びないと約束しえた理由である: 枠組みは個々の項目を模倣しうるが、相関こそが幾何なのである。

58 未解決の問い

誠実さは、主張と同じ深さにおいてその補集合を要求する。ここでは五つの項目が未解決のまま残り、一つ、最初のものは閉じている; 結合シートの登録された露出—O-KK-59、O-KK-60、O-KK-67、O-KK-68、O-KK-69、および O-KK-70 のフレーバー同一性—は第 XIII 部において担われており、ここでは繰り返さない。以下の六つのそれぞれについて、なぜそれが未解決なのか (単に未解決であるということではなく)、何が試みられたか、閉じるための条件、そして誰がそれを閉じるのに最も適した位置にいるかを述べる。付録 O は同じリストをプロジェクトのロードマップとして担っている。

1. L-KK-1: g_B の読み出しメニュー—閉じた。 なぜ未解決であったか: $U(1)_B$ 結合は原理的には GDOS の計数によって固定されるが、その計数には四つの擁護可能な読み出し規約があり、本論文は導出なしに一つを選ぶことを拒んだ—ゆえに第 10.10 節のブラケットと、点ごとに引用された Z'_B のレートである。何によって閉じたか: アノマリー・コンパニオンの終端シーム容量定理 (T-BI6-6.4) であり、第五の力の論文の登録された計算として実行されたものである: 境界で終端したシームの容量はその線形な台帳の取り分であり、 $\alpha_B/\alpha_Y = 5/2$ 、 $g_B = 0.565$ である—ブラケットの三番目の項目であり、まさに本論文がそれを置いたとおりである。何が残るか: 結合の側にも質量の側にも何も残らない—終端は境界条件であり、シュタッケルベルク・スケールを残さない; 残る登録された検査は、質量をもつ塔の準位ごとの流入整合性であり、アノマリー・コンパニオンの未解決問題 O13 である。

2. NLO 干渉 K 因子。 なぜ未解決か: 干渉項は共鳴振幅について線形であり、したがってその K 因子はブライト-ウィグナーの $K_{q\bar{q}} = 1.3$ ではないのであり、そしてこの質量において $t\bar{t}$ 連続背景と干渉する広いカラー八重項を扱う公表された計算は存在しない。試みられたこと: 全体を通じて用いられた $\sqrt{K}$ の処方であり、標準的ではあるが数十パーセントの水準では制御されていない。閉じるための条件: 通常の NLO 計算—標準的な QCD のグループが明日にも採用しうる、このリスト上で唯一の項目であり、直接の実験的な消費者を伴う (第 44.5 節)。影響: 低い側のテンプレートが固まる; 発見フィットの最大の単一理論系統誤差が引退する。

3. $n \geq 2$ の重なり結合。 なぜ未解決か: 系 T-KK-2c は x_1 において評価された; x_2, x_3 における同じ機構は対角結合については直截であるが、モード間の混合には注意を要する。閉じるための条件: より高いゼロ点における式 (89)—対角項については一午後、きちんとやるならば短い論文一本である。影響: P-KK-8 のレートが、FCC-hh がそれを必要とする前に、推定から導出へ格上げされる。

4. 複合シナリオの再発間隔。なぜ未解決か: シナリオ B は最低の状態をマッチングによって固定するが、ベクトルの再発の間隔は強結合の境界理論の性質であり、いかなる弱結合の技巧もそこへは届かない。閉じるための条件: 双対（ホログラフィックな、あるいは格子に着想を得た）計算、あるいは FCC-hh におけるデータそのもの。影響: 第 IX 部の $\mathcal{O}(10^2)$ fb の再発に対する探索標的。

5. 測定器水準の角度解析。なぜ未解決か: $\cos \theta^*$ からの 10–30% の発見利得は、実際の背景カクテルの角度形状を必要とし、それは共同実験の内部に存在する。閉じるための条件: 全シミュレーションによる 2 次元研究—学位論文の規模であり、再解析そのものの自然なコンパニオンである。影響: 第 44.3 節の限定された利得が確保され、五シグマの到達を一年早める可能性がある。

6. 複合の幅のバンド。なぜ未解決か: $\Gamma/m = 14.6\%$ は自由場の重なり積分を担っている; 複合の読みはそれを、現行のいかなる計算も釘付けにしないバンドの内部で移動させよう。閉じるための条件: 自己完結的である—HL-LHC のラインシェイプ・フィットが Γ/m を数パーセントまで測定し、そのバンドを重なり構造の相互検査へと転化する。影響: 測定された幅が、T-KK-2 の内部に対する第二世代の試験となる。

五つのいずれも評決を遮蔽しない: 反証子は定理級の背骨—質量、縮退、符号、レプトフォビア—のみの上に立っている。登録された露出は別の問題であり、O-KK-68 はその傍らでキル級に位置している。それが設計である: 未解決の問いは計画を鋭くする; それらは計画を支えているのではない。

59 完成したコホートと将来の展望

本論文は二十二編のうちの一つであり、コホートにおけるその位置は双方向に荷重を担っている。輸入: バルクとその正準計量 (Arisaka, 2026, A2-GG6、定理 0 および 2)、OGN-5 の整数カスケード (Arisaka, 2026, A3-BI6)、ロック・スケールの連鎖と電弱の過剰拘束 (Arisaka, 2026, A9-SM)、検出の開放系的読み (Arisaka, 2026, A5-GDOS; Arisaka, 2026, A6-GRIP)、そしてラディオなしの定理 (Arisaka, 2026, A4-Euclid)。輸出: Arisaka (2026, A9-SM) の再資格化された反証子 F-SM-1 は、いまや本論文の計算されたレートを示している; 導出された g_B は第五の力の論文の不在の評決を養う; そして加速器の評決は、それが到来したとき、憲法的な中核へ伝播する—双方向に。近未来の展望をもう一度述べるのは、それが本論文の運用上の要請だからである: **すでにテーブル上にある $t\bar{t}$ データの、専用の、干渉を意識した、事前登録された再解釈であり、ATLAS と CMS が共同で行うものであって、第 VIII 部はそれがすでに発見を含んでいるかもしれないことを示している。遠未来の展望は第 IX 部のものである: アンカー、倍音、そして P-KK-10 のレプトン衝突型加速器の評決であり、2035–2070 年の装置群にわたって分布している。**

60 議論のまとめ

強みを、率直に述べる: 導出された、動かしえない標的であり、その整数はすでに電弱スケールにおける四桁の監査を生き延びている; 完全に指定された信号 (質量、幅、レート、符号、偏極、指紋); **すでにテーブル上にある、証拠水準に迫る感度を伴う較正された暦; 導出そのものに報いる統計 (探索範囲効果なし、テンプレートの希釈なし);** **すでに構造的知識へと転化された排除 (シナリオ A、キル機構が機能していることの観測);** **いかなる近隣の枠組みも無傷では生き延びない識別格子 (表 30);**

そして、その失敗モードが綺麗な引退である反証子。弱みを、同じだけ率直に述べる：レートバンドは、LHeC 級の入力到来するまでは PDF と K 因子に制限されている；干渉テンプレートは最低次であり、NLO の課題は名指しされてはいるが果たされていない；ディリクレ・モードの上の Z'_B の結合は未解決のシートであり（O-KK-59）、 $n \geq 2$ の結合は推定である；そして正確なベンチマークについての公表された共同実験の再解釈はいまだ存在しない——本論文の中心的な要請である。これらが含意する姿勢は、本論文が終始保ってきたものである：攻撃的に実験的であり、理論的に規律づけられており——そして、第 VIII 部を手にしたいまでは、緊急である、なぜなら証拠はすでにジュネーブのテープ上に、今年になってようやく書かれたテンプレートを待って、置かれているかもしれないからである。

第 X 部は論証を行った。それぞれ一息で言えば：本結果が有意であるのは、その可能な二つの結末のどちらもが情報を与えるからであり、五十年にわたる調整可能な予言はそれを決して言えなかった；それは程度においてではなく種類において唯一であり、その革新は一つずつ監査可能である；いかなる近隣の枠組みも十五観測量の完全な指紋を生き延びない；反証子は値付けされ、日付を与えられ、そして——一つの場合にはすでに——執行されている；そして未解決の問いは、計画を支えることなくそれを鋭くする。本論文の論証はこれで完結した。以下に続くのは、その語のより古い意味におけるその終わりである：結論、個人的な会計、そしてこの形をした結果が、数、自然、そして知るといふ行為について問うことを強いる諸問題である。

61 第 X 部を平易な言葉で：本結果が何に値するのか、代替案に照らして

これは、本論文がそれ自身と、そして他のあらゆる者と論争する部である。

有意性の主張は狭く、狭く述べられるべきである：枠組みが正しいということではなく、その背後に調整可能なパラメータをもたない加速器の数値を生み出したということであり、代替案はそれを生み出していない。それは方法についての主張である。それが何かに値するのは、その数値が目に見える形で誤っている場合に限られるのであり、そして本部は、ここで目に見えるとは何を意味するのかを注意深く述べている。

標準模型を超える他の道との比較は、評決によってではなく性質ごとに行われる、というのもそれらの道は異なる目的のために築かれたからである。超対称性は、この枠組みがもたない自然さの問題に取り組んだ。弦理論は、いかなる加速器も到達しないエネルギーにおいて働く。そのいずれかを 3.85 TeV の予言に照らして裁くことは、彼らが問うていなかった問いに答えることになるであろう、そして表は、どの昇目が失敗によってではなくその理由によって空白なのかを述べている。

本部が新しいものとして主張するのは構造的なことである：ダイヤルの不在、この質量を固定するのと同じ整数が電弱スケールをも固定するという事実、そして測定が存在する前における数値の事前登録である。未解決の問いは、閉じるための条件を付した作業指示として列挙されており、そのうちの一つ——干渉の計算——は、提案された再解析が最初に必要とする入力である。

第 XI 部 結論

本論文が確立したもの; 客観的な限界; 実験の最前線での五十年からの個人的展望; 幾何学的世紀の展望; そしてどちらの評決も何を意味することになるか—物理学にとって、そして人間が世界を知るに至るその仕方にとって

62 本論文が確立したもの

本論文の結果を、それらが獲得された順に述べる。定理 *T-KK-1*: 六次元バルクの最初の観測可能なカルツァークライン共鳴は、 $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35} = 3.849 \text{ TeV}$ における動径方向のロック・クラスターであり、連続的な自由度をもたない。定理 *T-KK-2*: クラスターの微細構造—ディリクレ・ベクトル—グラビトンの縮退、厳密な自由場の固有値、その符号を伴う結合 $\xi_{\text{UV}} = -0.194$ 、二シナリオの二分法—が導出され、シナリオ A はその後既存のデータによって排除され、二分法は縮退したクラスターへと解決された。系 *T-KK-2c*: グラビトン—グルーオン結合が閉じた形で計算され、 $\kappa_{gg} = 0.47/K$ であり、直接のスピン 2 の試験を FCC-hh へ移し、LHC の反証子の全体をカラー八重項に集中させた。第 *VI* 部: $t\bar{t}$ 信号の完全な導出された解剖—角度形状、偏極、干渉符号定理とそのラインシェイプ。第 *VIII* 部: 予言を暦へと転化する、係留され較正されたシミュレーション—すでにテープ上にある証拠水準に迫る感度、手の届くところにある結合された発見級の感度、背景系統誤差を半減させた場合の $\approx 1.3 \text{ ab}^{-1}$ 、2034 年頃における単一実験の 5σ 、そして定量化された事前登録の利点。第 *IX* 部: 残るすべての測定が、2070 年までの、名指しされた将来の装置に割り当てられた。

ここでもう一度、同じ結果を平易な言葉で述べる、というのも結論は、加速器物理学者ではない廊下の先の同僚にも読めるものであるべきだからである。調整可能な数値をもたない理論—その自由度の全体は五つの計数である—が、新しい粒子が存在すると述べ、そしてそれについてのすべてを述べる: それがどこにあるか (3.85 TeV、水素原子の陽子のおよそ四千倍の重さ)、それがどれほど広いのか、LHC がすでにどれほど頻繁にそれを作っていたはずか (二つの実験にわたって合計しておよそ一万個が、認識されないまま、2015 年以降に記録されたデータのなかに置かれている)、それが何へ崩壊するか (圧倒的にトップ・クォーク)、それが何へ崩壊することを拒むか (電子とミューオン—まさに我々の最も綺麗な探索が見張っている粒子である)、そして通常背景と干渉するその微妙な仕方さえも、符号に至るまで。同じ五つの計数はすでに、既知の弱い力のスケールの強さを生み出している—台帳のその部分は数十年前に、この理論に何の利害ももたない人々によって検査された。本論文が付け加えるのは実践的な半分である: 既存のデータがすでに証拠を含んでいるかもしれないことの、実際の解析の忠実度における証明、そして実験がこの問いを—どちらの向きにせよ—この十年のうちに決着させうる、一歩ずつの処方箋である。

実践的な加速器の言明を一文で述べる: GG-6 における最初の実験的に関連する新物理の構造は、3.849 TeV 近傍を中心とする、四構成員の、スピン 2 に係留された、八重項に率いられた共鳴クラスターであり、トップに富みダイジェットに親和的な分岐比をもち、ツリー水準では生成されない二つ

のディリクレ的アーベル・ベクトルを伴い、そして 7 TeV 近傍に第二の動径方向の族をもつものであるはずである—既存のクリーン・チャンネルの制限からの現実の圧力のもとにあり（導出された結合の織り目がその圧力を説明する）、そしてまさに本論文が指定する解析によって決着される。

63 客観的な限界と次の技術的課題

本論文の誠実な境界を、告白としてではなく課題の一覧として述べる—そして、この一覧がそもそも存在する理由をその前に置く。自らの主張を寛大に格付けする枠組みであれば、ここに置くものは何もないであろう；本枠組みは未解決の結合シート、いくつかの推定、そして最低次のテンプレートを担っており、そのすべてが使用の時点で標識されている、そしてそう言うという規律こそが、反証可能な計画を広告宣伝から分かつものである。理論の側：レートは PDF に制限されたバンドを伴う $LO \times K$ である（課題：NLO 信号、そして何よりも第 44.5 節の NLO 干渉 K 因子—発見フィットの最大の単一理論系統誤差）；かつては離散的なメニューであった g_B の読み出しは閉じており（T-BI6-6.4）、ディリクレ・モードの上の Z'_B の結合が未解決のシートである（O-KK-59）； $n \geq 2$ の結合は同一結合の推定である（課題：T-KK-2c の機構を x_2, x_3 において走らせること—対角項については一午後）；複合シナリオの再発間隔は未決定である（課題：強結合の双対計算であり、真に困難なもの）。実験の側：正確なベンチマークについての公表された共同実験の再解釈は存在しない（課題：すでに記録されたデータの上での、ATLAS と CMS が共同で行う、事前登録された $\Gamma/m = 15\%$ の干渉を意識したテンプレート解析—本論文の中心的な要請）；角度の次元は限定されているが確保されていない（課題：係留された背景カクテルを用いた測定器水準の 2 次元研究）；サイドバンド汚染の処方、最初からフィットの設計に組み込まれていなければならない。これらの課題のいずれも評決を阻まない；そのすべてが評決を鋭くする。

64 個人的展望：実験の最前線での五十年

二十二編のうち、なぜこの論文が著者の人生に最も近いのかについて、一言を負っている。私は五十年を実験素粒子物理学者として過ごしてきた—カミオカンデでは、大統一が約束し、そして決して訪れなかった陽子崩壊を待ちながら；ケイオンおよび B 中間子系における CP の破れにおいて；大型ハドロン衝突型加速器の CMS では、ヒッグスが標準模型を破るのではなく完成させるのを見守り；超高エネルギー・フロンティアのピエール・オージェ観測所において；そして暗黒物質の直接探索において XENON で。五つの最前線、五十年、そしてそのいずれにおいても同じ経験であった：理論は我々に、つねに後退しうる標的を差し出し、自然は我々に、私が始める前に書かれた模型の確証を差し出した。

それが内側からどう感じられたかを述べておきたい、というのも社会学は物理学と同じだけ重要だからである。実験家の職業生活は、他人の希望をシフト表へ変換することに費やされる。二年かけて較正し、五年走らせ、心臓を高鳴らせながらアンブラインドする—そしてプロットが空であるとき、あなたがその予言を試験した理論家たちは、ときには一週間のうちに、なぜ興味深い領域はつねにあなたの到達範囲のすぐ上にあったのかを説明する。三度目か四度目のそうした循環の後、あなたは怒ることをやめ、慎重になり始める：十年を投じる前に、こう問うことを学ぶのである、もし我々が何も見なければ、あなたは正確に何を譲歩するのか。五十年にわたってその問いを発し、そしてほとんど一度も答えを受け取らなかったことが、本論文におけるあらゆる規律の伝記的な起源である。私は

理論的予言を受け取る側に十分に長く身を置いてきたので、実験家が何を必要とし、そしてほとんど決して与えられないかを正確に知っている：走査範囲ではなく、一つの質量；結合のダイヤルではなく、導出を伴うレート；幅、符号、角度形状；そして何が理論を殺すことになるかの言明を、あらかじめ、書き記した形で。付録 M の再解釈カード、第 VIII 部の事前登録されたテンプレート、日付の入ったキル窓—これらは、私が五十年にわたる探索を通じて願ってきた人工物であり、いまや卓の反対側から書かれたものである。

2012 年に標準模型自身のリストが尽きたとき、私は十年のうちの大半をこの分野から離れ、*C. elegans* の神経系と人間の視覚の構築に取り組んだ。GG-Theory は、予期せぬことに、その回り道から育った—その物語は Arisaka (2026, A9-SM) と Arisaka (2026, A7-Q14) において語られている—そしてそれが私を素粒子物理学へ連れ戻したとき、それは一つの数値とともに私を連れ戻した：3.849 TeV である。本論文の序文において語りかけられている大学院生は、もちろん 1976 年の私自身であり、私が与えられていればと願う選択肢を差し出されている：動きえない予言であり、一つの博士課程のうちに検証可能であり、部分的にはすでに記録されたデータの上でそうなのである。第 VIII 部の暦は 2030 年代半ばまで走る。私は評決が到来するのを見届けるつもりであり、そしてどちらの評決—クラスター、あるいはその綺麗な排除—も五十年に値するものとなるように、本論文を書いた。

65 展望：幾何学的世紀はどのようなものでありうるか

哲学と結びの前に、無防備な野心の節を一つ、平易な言葉で許していただきたい。八重項がそこにあると仮定しよう。擁護としてではなく—第 VIII 部は私に可能なかぎり誠実に見込みを述べた—計画の演習としてである、というのも展望とは、分野が何を建設するかを決める仕方だからである。

二十世紀は、物質は場であり、場は幾何の借家人であることを学んだ：それらは時空の上に住んでいる。本論文において試験にかけられている主張は、そこから一段深い—借家人は家主自身の部屋なのだということ；あなたが世界を探るそのエネルギー・スケールと、荷電物質の干渉を可能にするゲージ位相とは、帳簿上の道具ではなく、北と同じだけ実在する方向なのだということ；そしてひとたびそれらの方向を正しく数えれば、我々が一世紀を費やして測定してきた数値—強い力の強さ、弱いスケールの質量、そしていまや、検証可能な形で、3.849 TeV における共鳴—は入力であることをやめ、読み取り値となるのだということである。その主張が加速器の試験を生き延びれば、二十一世紀の物理学は異なる日常の肌理を獲得する。フロンティアにおける問いは「どのような新粒子が存在しうるか」—五十年にわたって、あまりに多くの答えを許してきた問いである—であることをやめ、「幾何は何を述べており、それを何桁まで検査できるか」となる—十九世紀の分光学の肌理をもつ問いであり、これは最大の賛辞として意図されている：分光学は、物理学が歴史的に最も誠実であり、最も累積的であり、そしてその若い人々に最も親切であった様式である、なぜなら良い着想と一つのデータ集合をもつ学生が、いかなる委員会も反論できない仕方ですくありうるからである。

その世紀において、第 IX 部の装置群は宝くじではなく、より古い意味における計器である：FCC-hh は、バルマー系列が原子に対して行ったことをスケールの喉に対して行う—その倍音を読むのである；3.849 TeV におけるミュオン衝突型加速器の s チャンネル走査—電弱線、および登録された床より上でのディリクレ・ベクトルの不在—は、いかなるハドロン衝突型加速器のピークとも同じだけ情報を与える；ヒッグス・ファクトリーは台帳を一桁ずつ監査する。そして、第 1 節がその五十年にわたる疎隔を語った二つの文化—関与しえなかった理論家たちと、赦しえなかった実験家たち—は、記憶にあるかぎり初めて、どちらもそれなしでは済まされない共有の対象をもつ：理論が動かしえず、実

験が無視しえない一つの数値である。本論文に対する私の最も深い職業的希望は、それが正しいということではない；それは、その種の物理学を二十五歳の人間にとって再び想像可能なものにするということである。

66 頂上ではなく登山口：最後の省察

ここに記述された関連したパターンとともに 3.85 TeV のスピン 2 に係留されたクラスターが発見されるならば、その報酬は並外れたものとなるであろう：単にもう一つの標準模型を超える粒子ということではなく、自然の深い紫外が、純粹に四次元的な場の台帳によってよりも、六次元の幾何—ゲージ・ロッキングの舞台によってよりよく記述されるという直接の証拠である。それでもなお発見は終わりではなく始まりであろう：アンカー、ベッセル比における倍音、ループの床を伴うレプトフォビアのツリー水準のゼロ点、電弱パートナーについてのレプトン装置の評決—非空間的幾何の分光学の全体であり、第 IX 部の装置群にわたって地図化されたもの—が前方に横たわることになる、水素スペクトルがバルマーの公式の前方に横たわっていたのと同じように。LHC はその計画の登山口であって、その頂上ではない。

もし代わりにそのような構造が現れず、チャンネルを結合した GG-6 の回廊の全体が排除されるならば、本理論の現在の実装は、想像しうる最も明快な加速器の試験の一つに落第したことになる—綺麗に、恒久的に、そしてゾンビの段階を経ることなく、である、なぜなら後退するためのパラメータが存在しないからである。どちらの向きであれ、その実験は行いうに値する。それが良い反証子の証である；それは、本論文の導入が語った五十年に欠けていた性質であった；そしてそれは、本論文がそれを回復するために書かれた性質である。

67 それが何を意味することになるか：物質、数、そして自然の可読性

二つの共同実験に人年規模の労働を求める論文は、彼らにテンプレート以上のものを負っている；それは彼らに、その答えが何を意味することになるのかの説明を負っている。この締めくくりの節は、その問いにふさわしい深さでその説明を、四つの楽章において試みる。

標語ではなく、倫理としての反証可能性について。 ポパーは反証可能性を境界設定の基準とした；半世紀の実践が示したのは、単なる基準としてのそれは、文字において満たし、精神において逃れるのがあまりにも容易だということである—走査されるあらゆる模型は各パラメータ点において「反証可能」であり、族としては不死である。本論文が実践しようと試みてきたのは、倫理としての反証可能性である：未来の自分が逃れられない立場を意図的に構築することである。整数が二十二の文書にわたって荷重を担っているのは、まさに静かな改訂が不可能であるようにするためである；キル窓が逆アトバーンで値付けされているのは、いかなる日程の遅れもそれをばかしえないようにするためである；格付けが印刷されているのは、後のいかなる読者も、メニューはつねに定理であったと告げられないようにするためである。ここには科学よりも古い道徳的構造がある：それは約束の構造である。データに対して自らの言葉を破りえない理論は、数学的对象に可能な唯一の意味において、名誉ある振る舞いをしている—そして五十年にわたる標準模型を超える物理の歴史は、経歴が生き残りに依存するとき、その名誉を保つことが社会学的にいかに難しいかについての、ゆっくりとした発見として要約するのが最もよい。クラスターが見出されるならば、その発見は一つの幾何を正当化することに

なる。何が見出されるにせよ、私は賭けの形式が賭けそのものより長く生き延びることを願う。

なぜ計数なのか、そして古いピタゴラスの問いについて。 ウィグナーは有名にも、数学は物理学において「不合理なまでに有効」であると呼んだ—一つの謎である、なぜなら自然が我々の記法を尊重すべき明白な理由は存在しないからである。試験にかけられている枠組みは、想像しうる最も直接的な仕方です。その謎を解消する：もし自然の定数が計数であるならば—数えられた次元、数えられた閾、数えられた巻きつき—そのとき数の有効性は不合理ではなく同語反復的である、なぜなら世界の深い構造は、幾何において実演された算術であることになるからである。これは西洋自然哲学における最も古い思弁である：ピタゴラス学派の「万物は数なり」であり、十七世紀の連続体革命が、実数直線と微分方程式のために恒久的に引退させたかに見えたものである。その引退がまさに最も深い水準において早すぎたのかもしれないという歴史的皮肉は、味わうに値する：連続体の機構は GG-6 において生き延びている—場、作用、繰り込み—が、連続体が恣意的な選択（一つの結合、一つの質量比、一つの混合角）を要求するかに見えたあらゆる場所は、この説明のもとでは、代わりに一つの整数によって占められているのである。3.849 TeV における発見はピタゴラスが正しかったことを証明しはしない；いかなるものも形而上学を証明しない。しかしそれは実験的事実として、かつて連続的で恣意的であると信じられていた少なくとも一つの数値—新物理の質量スケール—が、最初から計数であったことを確立するであろう。物理学は以前にも連続体について考えを改めたことがあり、それはちょうど一度、1900 年のことであって、我々はその結果生じた世紀をその変化にちなんで名づけた：量子と。このコホートの賭けは、二十世紀が一次元手前で立ち止まったというものである。

自らを測定する世界について。 古典的直観によって判断するとき、この枠組みの最も奇妙な特徴は余剰次元ではない；それは、観測は我々が自然に付け加える何かではなく、自然が行う何かであるという主張（第 3 節；[Arisaka, 2026, A5-GDOS](#)；[Arisaka, 2026, A8-QM](#)）である—バルクから境界への射影が測定であるということ、そして量子力学は別個の規則集ではなくその文法であるということである。哲学は一世紀にわたってこの可能性の周りを多くの名の下に巡ってきたが（測定問題、参与的宇宙、どこでもないところからの眺め）、つねに同じ反論によって阻まれてきた：そうした主張は恒久的に検証不可能であり、物理の違いというよりは解釈の違いであるかに見えた、という反論である。ロック・クラスターが行うこと—そしてこれは、いかなる特定の幾何をも超えた、その最も深い意義であるかもしれない—は、その描像の一つの帰結を検出器のなかへ引きずり込むことである。もし登録された観測量が一つの射影の境界における読み出しであるならば、それらの値は集団として固定されており、3.849 TeV におけるクラスターは単に、以前の行（弱いスケール、強い結合）がすでに読まれ整合的であると見出された台帳の、次の未読の行なのである。したがって肯定的な評決は、コホート全体において哲学的に最も急進的な条項に対する、間接的ではあるが実在する証拠となるであろう：すなわち、世界と、世界を知ることとのあいだの古代からの分割が、誤った場所に引かれていたということ—物理学は、十分に遠くまで追究されるならば、単に自然を記述するのではなく、自然自身の自己記述に参加するのだということである。私はその一文がいかに大きいかを承知している。それが哲学の雑誌にではなくここに印刷されているのは、私の生涯において初めて、その大きさの一文に一つの光度が付随しているからである。

どちらの評決についても、そして世界の可読性について。 他のすべての問いの底にある問いをもって終えたい：自然は可読であるか—単に事後的に記述可能であるということではなく、有限の精神によって、その定数に至るまで、あらかじめ読みうるのか。五十年にわたるフロンティアの物理学は、

我々の大半に否と答えるよう静かに教えてきた: 最も深い層は偶然 (ランドスケープ) であるか、我々のエネルギー到達範囲の永遠に向こう側にあるか、あるいは統計的にのみ理解可能であるか、そのいずれかだと予想するように、である。本論文のあらゆる結果は、その諦念に抗する賭けである。クラスターがそこにあるならば、可読性の問いへの答えは然り、我々が期待する権利をもっていたよりも少なくとも一層深いところまでとなる—そしてあらゆる若い物理学者は、定数が一つの本文であり、計器がその頁をめくる仕方であるような世界を受け継ぐ。クラスターがそこになければ、答えはより微妙ではあるが空虚ではない: 我々はこの読みが失敗することを学んだことになり、それを綺麗に、明示された代価のもとで学び、失敗の仕方そのものが一つの寄与となる—エネルギー・フロンティアの歴史における最初のゼロ・パラメータの排除であり、そうした理論が何をより良く行わねばならないかについての恒久的な教訓である。結局のところ、可読性には二つの要件がある: 構造をもつ世界と、それによって訂正されるだけの規律をもつ読者である。最初のものだけが自然の責任である。二つ目は我々の責任であり、そしてそれこそが本論文が保証しえた唯一のものである。質量が賭けである; LHC が卓である; カードはすでに部分的に配られており、ジュネーブのテープ上に置かれている。データに語らせよう—そして、それらがどちらの向きに答えるにせよ、耳を傾ける品位を我々がもつようにしよう。

結論の後に残るのは奉仕である: 材料をゼロから教える付録、一つずつ答えられた反論、そしてその理由を伴う参考文献であり—論証が終わったずっと後まで読者のために働く、論文の諸部分である。

68 第 XI 部を平易な言葉で: 何が賭けられているのか、そして負けることが何を意味することになるのか

負けない予言には何の価値もない、したがってここで負けるとはどのようなことなのかについて率直であることには価値がある。

専用の探索がすでに存在するデータの上で走らされて何も見出さず、そしてその後に高ルミノシティ運転も何も見出さないならば、本論文における読みは終わりである。質量をどこか別の場所に置いたその版は存在しない。整数は調整可能ではなく、クラスターの間隔も調整可能ではなく、そして本論文は、沈黙が致命的となるルミノシティを印刷してある。それが賭けの内容のすべてである。

もし代わりにクラスターがそこにあるならば、見出されたものは一つの粒子ではなく、質量が測定され収容されるのではなく計数から導出されうるという証拠である。特定の数値は、それに比べればはるかに重要ではないであろう。

限界を最後にもう一度述べ直すのは、それらを静かに落とす結論は結論ではないからである。レートは四つの名指しされた仮定に依存している。一つの干渉計算が負債となっており、なされていない。複合シナリオの再発間隔は未解決である。そのそれぞれが、それが影響する予言の格付けのなかに書き込まれている。

この立場について異例なのは、その時機だけである。この問いは新しい装置も新しい世代の物理学者も必要としない; それが必要とするのは、すでに記録された衝突の専用の解析と、すでに始まっている十年である。カードは配られており、それらはジュネーブのテープ上に置かれている。

謝辞

本研究は、三つの大規模言語モデルとの広範な反復的協働を通じて展開された。すなわち、探索的な起草、叙述の展開、および広い範囲の着想のための ChatGPT (OpenAI)、文献の統合、引用の検証、および最近の実験との相互参照のための Perplexity、そして構造の組織化、数学的整合性の検査、 $\text{\LaTeX}$ 組版、および最終原稿の準備のための Claude (Anthropic) である。これら三つのシステムとの数百回に及ぶ対話セッションを通じた GG-Theory 枠組み (GG-Constitution / GG-6 / BI-6 / GDOS / Gi-4 Pillars / Qi-4 Pillars) の逐次的な精密化は、本論文の整合性にとって不可欠であった。

著者は、本プログラムの学際的な射程についての刺激的な議論と、叙述の読みやすさについての批判的な助言に対し、Aaron Blaisdell と Hirotaka Iwasaki に感謝する。また著者は、過去十年にわたる Elegant Mind Club の数百名の共同研究者、とりわけ Javier Carmona、Elizabeth Milles、Mingda He、Syed Bashir Hydari、Brian Ta、Chris Dao、Umaina Afifa、Isabella Bestanoby、Caominh Le、および Natsuko Yamaguchi に感謝する。

すべての科学的概念（とりわけ GG-Constitution の基礎、GGEP/GG-6/BI-6、および OGGEPP/GDOS/Gi-4/Qi-4 Pillars）、理論的判断、物理的解釈、および残存するいかなる誤りも、ひとえに著者の責任である。

第 XII 部 技術付録

ロック・クラスターのコライダー物理に関する大学院級の講義 — KK スペクトル、パートン・ルミノシティによる断面積の連鎖、そして発見の統計の、一から始める導出であり、全篇にわたって数値例を伴う — その前に参照用の辞書と概念の入門を置き、その後に再解釈のウォークスルーと昇格ロードマップが続く

本論文の本体では、定理の連鎖とその実験的対決を強調してきた。本付録は各段階を支える詳細な技術的内容を与えるものであり、全体としては、この探索を引き継ぐことになる ATLAS ないし CMS の新入大学院生に宛てたロック・クラスターのコライダー物理に関する大学院級の講義として読まれることを意図している — 序文の読者に、実務的な深さで再び会うのである。我々はこれらを四つの群に整理する。参照付録 (A–D) は、表にまとめた略語、主要記号、コホートの命名規約、および総括表を与え、読者の手早い参照に供する。次に五つの概念入門 (E–I) が来るが、新参の読者はこれらを最初に読むべきである: 実際に寄せられた問いから生まれたものであり、グルーオンと g^* がいかにして一つの場合であるか (付録 E)、バリオンの Z'_B がどこから来るのか (付録 F)、GG-6 の「グラビトン」とは何か (付録 G)、なぜ g^* がクラスターのレートを支配し、かつこれほど広いのか (付録 H)、そしてなぜ一つの整数がレート階層と $t\bar{t}$ 支配の双方を制御するのか (付録 I) を説明する。構成的付録 (J–L) は講義の本体である: この探索が実際に要求する三つの技能 — KK スペクトルがどこから来るのか (付録 J)、ハドロン・コライダーの断面積がパートン分布からいかに計算されるのか (付録 K)、そして発見有意度がポアソン尤度から積み上げていかに構成されるのか (付録 L) — を覆う自己完結の系列であり、そのそれぞれを三つのステップで扱う。第一に来るのは、標準的な結果の一から始める完全な導出であり、大学院生が教科書で出会うであろう形で、途中の操作を省くことなく最後まで進められ、数値例によって締めくくられる。次に来るのは、その標準的な扱いが仮定しはするが決定できないものについての率直な言明である — 外部から取り込む入力と、未解決のまま残す問いである。最後に来るのが GG-6 のステップであり、そこでは同じ量が幾何の導出された出力として降りてきて、数値例は本論文の表に載る数となる。運用付録は、実装のウォークスルーを伴う再解釈カード (付録 M) とコライダー辞書 (付録 N) を与える; 未解決項目の昇格ロードマップが本部を締めくくる (付録 O)。

これらの付録を通じて、我々はコホートの付録講義における二つの文体上の約束を守る (Arisaka, 2026, A9-SM)。第一に、すべての導出は中間の操作を省くことなく一段ずつ提示される: 大学院生が紙と鉛筆で (付録 J–K については十数行のコードで) 各計算を再現できるはずである。第二に、形式的な段階には、代数を心的な描像へと翻訳する括弧書きの物理的直観の注記が付される。この組み合わせは意図的である: 付録に頁数の予算がないのは、ここが次の世代に自力でこの内容を学ばせるための場だからである。

前提知識と推奨教科書。 本講義は大学院一年次の標準的な課程を前提としており、定評ある教科書の代わりにではなく、それらの傍らで読まれることを意図している。推奨する併読書は次のとおりで

あり、それぞれ最も適合する箇所で改めて引用する：付録 K の断面積の形式論を最も取りつきやすい形で与えるものとして [Halzen & Martin \(1984\)](#) (*Quarks and Leptons*) ; 因子化、パートン・ルミノシティ、共鳴生成についての決定版として [Ellis, Stirling & Webber \(1996\)](#) (*QCD and Collider Physics*) ; 付録 J の KK モード分解を含む場の理論的な基礎づけとして [Peskin & Schroeder \(1995\)](#); あらゆる事項についての実験を意識した最初の一読として [Thomson \(2013\)](#) (*Modern Particle Physics*) ; そして付録 L の統計については [Cowan \(1998\)](#) (*Statistical Data Analysis*) と [Cowan et al. \(2011\)](#) である。各構成的付録の推奨される使い方は次のとおり：まず対応する教科書の章を読み、ステップ 1 の簡潔な一から始める要約のためにここへ戻り、それから、標準的な結果が導出された積荷を得るステップ 2 と 3 へ進むこと。

A 略語一覧

本付録は、本論文で用いられるすべての略語を集めたものである。プログラムが定義する名称はすべてサンセリフ体で組んであり (GG-Theory, GG-6, GDOS, BI-6, OGN-5, GRIP など)、どの用語が GG-Theory プログラムそのものに属するかを読者が一目で見て取れるようにしてある。より広い文献から取り入れた標準的な物理およびコライダーの略語 (KK, RS, PDF, JES など) は、主要誌の慣行に従って通常の太文字ローマン体で組んである；コライダー用語は付録 N でさらに展開する。第三列は主要リンクを与える：各用語が詳しく導入されるコホート論文、あるいは本論文の節である。

表 32: 本論文で用いられる略語の一覧。略語を初出時に注記するのではなくここに集めたのは、本論文が一つならぬ順序で読まれるからであり、シミュレーションの部から入る読者が、簡約ストリームとは何かを知るために序論を探さねばならないようであってはならないからである。略語がコライダー物理ではなくコホートに属する場合、第三列はそれを定義する論文を指す。

記号	意味	主要リンク
BI-6	テンソル媒介のアノマリー・ロッキング・ピアンキ恒等式	GG-A3-BI6; 第 5.5 節
BR	分岐比	標準
BSM	標準模型を超える物理	第 1 節
BVP	境界値問題	第 10.4 節
BW	ブライト-ウィグナー共鳴のラインシェイプ	付録 K
CEPC	円形電子-陽電子コライダー (中国)	第 IX 部
CL	信頼水準	付録 L
CLIC	コンパクト・リニアコライダー	第 IX 部
CTEQ	CTEQ パートン分布族 (ここでは CTEQ6 を使用)	Pumplin et al. (2002)
DNN	深層ニューラルネットワーク (ブースト・トップのタガー)	第 38.3 節
ESPP	欧州素粒子物理戦略	European Strategy Group (2026)
FCC-ee/hh	将来円形コライダー、レプトン/ハドロンの各段階	第 IX 部
FSR	FCC 実現可能性調査報告書 (2025)	FCC Collaboration (2025)
GA	幾何アトラクター	A6-GRIP
GDOS	開放系の境界法則	GG-A5-GDOS
GG-6 / GG-6	幾何-ゲージ (ロッキング) ; 6 次元のバルク	GG-A2-GG6
GGEP	幾何-ゲージ等価原理 (AX-2)	GG-A1-Constitution

次頁へ続く

表 32 の続き

記号	意味	主要リンク
GRIP	ランタイムのカスケード; レジーム GRIP-In/GRIP-Out	A6-GRIP
GU-5	五つの幾何普遍定数	GG-A1-Constitution; 第 9.1 節
HGTD	高粒度タイミング検出器 (ATLAS Phase-2)	ATLAS Collaboration (2024)
HL-LHC	高輝度 LHC	CERN (2023)
HLT	ハイレベル・トリガー	第 38.2 節
ILC	国際リニアコライダー	第 IX 部
IMCC	国際ミュオン・コライダー・コラボレーション	International Muon Collider Collaboration (2024)
IR / UV	スロートの赤外／紫外端 ($r = K / r = 0$)	第 5.5 節
ITk	ATLAS 内部飛跡検出器 (Phase-2)	ATLAS Collaboration (2024)
JES	ジェット・エネルギー・スケール	第 41.1 節
K-factor	QCD の高次規格化 ($K_{q\bar{q}} = 1.3, K_{gg} = 1.6$); OGN-5 の整数 $K = 35$ とは無関係	第 31 節
KK	カルツァークライン	第 5.5 節; 付録 J
LEE	探索範囲効果 (look-elsewhere)	第 44.1 節
LHeC	大型ハドロン-電子コライダー (構想)	第 IX 部
LO / NLO	主要次数／次主要次数	付録 K
LS3	ロング・シャットダウン 3 (2026–2030)	第 39.3 節
MTD	MIP タイミング検出器 (CMS Phase-2)	CMS Collaboration (2019)
NWA	狭幅近似	付録 K
OGGEP	開放系の GGEP: バルクから境界への射影 (AX-3)	GG-A1-Constitution; 付録 G
OGN-5	五整数の台帳 ($M, N, L; J, K$) = (1, 3, 5; 7, 35)	GG-A3-BI6
PDF	パートン分布関数	付録 K
PDG	素粒子データグループ	Particle Data Group (2024)
RG	繰り込み群	第 5.5 節
RS	ランドル-サンドラム	Randall & Sundrum (1999) ; 第 5.5 節
SIP	システム・インスタンス・パケット (GDOS の言語でいう完全な測定連鎖)	GG-A5-GDOS; 第 16 節
SM	標準模型	標準
SR	信号領域	第 38 節
TDR	技術設計報告書	第 IX 部
TLA	トリガーレベル解析 (ATLAS)	表 23
WP	(タガーの) 作業点	第 38.3 節

B 主要記号の用語集

表 33: 本論文の記号の一覧と、そのそれぞれを定義する節ないしコンパニオン論文。これは本論文を読む前にではなく傍らに置いて読まれることを意図しており、第三列こそが載せるに値する部分である：帰属先がコンパニオン論文である記号は、本論文が導出するのではなく消費する記号であり、この区別は出所の表のすべてのグレードにとって重要である。単一の導出の内部で導入され、そこで役割を終える記号は省いてある。

記号	意味	帰属
M_{lock}	ロック・クラスターの質量、 $\frac{1}{2}M_{\text{Pl}}e^{-K} = 3.849 \text{ TeV}$	T-KK-1、第 9.1 節
K, J	OGN-5 の整数: スロート長 $K = 35$; $J = 7$	第 9.1 節
N	OGN-5 の第二成分、 $N = 3$; ここでの台帳の恒等式はすべてこれを用いて書かれる	第 9.1 節
N_c	カラーの三重性 — その成分が数えるもの; 部分幅のカラー多重度 N_c^f	式 (39)
N_g	世代数、3。台帳の整数ではない	GG-P2-N3
N_f	ベータ関数のクォーク・フレーバー数、高スケールで $N_f = 2N_g = 6$	PDG
r, θ	非空間的な座標: RG スケール $r = \ln(E_{\text{GUT}}/\mu)$; 位相角	第 5.5 節
x_n	J_1 のベッセル零点: 定在波の条件; $x_1 = 3.8317$	式 (16)
m_n	動径方向の塔の質量 $(x_n/x_1)M_{\text{lock}}$: 3.849, 7.047, 10.219 TeV	第 9.1 節
ξ_{UV}	軽クォーク (UV 端点) の結合振幅、 -0.194	T-KK-2、第 10.4 節
r_{t_L}, r_{t_R}	トップの局在化の帯: 1.0, [4, 5] (中心値 4.5)	第 10.4 節
g_V^t, g_A^t	トップのベクトル/軸性結合、 $2.75 g_s, 1.75 g_s$	式 (64)
κ_{gg}	グラビトン-グルーオン結合、 $0.47/K = 0.0136$ (導出済み)	T-KK-2c、第 10.9 節
g_B	$U(1)_B$ の結合; 0.565、導出済み (T-BI6-6.4; L-KK-1 は閉じた)	第 10.10 節
$\Gamma_{g^*}, \Gamma_{G_1}$	幅: 561 GeV ($\Gamma/m = 14.6\%$) ; 243 GeV (6.3%)	第 VI 部
β_t	極におけるトップの速度、0.99597	第 VI 部
θ^*	$t\bar{t}$ 静止系における生成角	第 VI 部
P_t, A_{FB}	トップの偏極 $+0.91 [0.88, 0.92]$; u, d, s, c からの前後非対称性 = 0	第 VI 部
S, I, B	ビンごとのブライト-ウィグナー、干渉、背景の収量	第 VIII 部
f_b	ビンごとの背景の系統誤差の割合 (事後フィット)	第 40.2 節
Z, q_0	発見の有意度; プロファイル尤度の検定統計量	第 40 節
F_{cal}	実解析への較正係数、4.33	第 41 節
L^*	統計誤差から系統誤差へ移る交差ルミノシティ、 $1/(f_b^2 b_{\text{fb}})$	第 40.3 節
ε_A	信号効率 $\times$ アクセプタンス、0.065	第 38.4 節
N_{trials}	探索範囲効果 (look-elsewhere) の試行因子、一般的なスキャンについて ≈ 76	第 44.1 節
v	電弱スケール、 $M_{\text{lock}}(2/5)^3 \approx 246 \text{ GeV}$	第 9.1 節

C コホート横断の引用のための大域的命名規約

Arisaka (2026, A9-SM) (その付録 C) に従い、また Arisaka (2026, A2-GG6) を起点として、GG-Theory プログラムの荷重を担う各項目は、Prefix が項目の型を名指し、Suffix が論文を名指す *Prefix-Suffix-N* という形の大域的に一意的な識別子を持つ:

- **T-Suffix-N** は第 N 定理 (例えば T-KK-1 は本論文のロック・クラスター質量の定理である)。
- **L-Suffix-N** は第 N 補題 (例えば L-KK-1 は g_B の読み出しの補題であり、T-BI6-6.4 によって閉じられた)。
- **C-Suffix-N** は第 N 系 (本論文の T-KK-2c は、歴史的な定理付随の名称をそのまま保っている)。
- **D-Suffix-N** は第 N 定義。
- **R-Suffix-N** は第 N 注意。
- **P-Suffix-N** は第 N 予言 (P-KK-1... P-KK-10、第 57 節)。
- **O-Suffix-N** は第 N 反論 (O-KK-1... O-KK-70、第 XIII 部)。
- **F-Suffix-N** は第 N 反証子 (F-KK-1 と、二つのシナリオの対 F-KK-2A/2B)。
- **I-Suffix-N** は第 N 革新 (I-KK-1... I-KK-10、第 55.2 節)。
- **PS-Suffix-N** は第 N 解決済み問題の項目 (PS-KK-1... PS-KK-6、第 55.1 節)。

二十二篇のコホート論文についての正準の Suffix 一覧は次のとおりである: *Constitution* (A1)、*GG6* (A2)、*BI6* (A3)、*Euclid* (A4)、*GDOS* (A5)、*GRIP* (A6)、*Qi4* (A7)、*QM* (A8)、*SM* (A9)、*Cosmos* (A10)、*Origin* (A11)、これに現象論のプレプリントである *KK* (P1、本論文)、*N3* (P2)、*Electron* (P3)、*Proton* (P6)、基礎論のプレプリントである *Real* (P4) と *CPT* (P5)、帰結のプレプリントである *Kaxion* (C1)、*Hubble* (C2)、*BH* (C3)、そしてホワイトペーパーである *Symmetry* (W1) と *Holonomy* (W2) が加わる。Arisaka (2026, A1-Constitution) の四つの公理 (AX-1... AX-4) と七つの公準 (POS-1... POS-7) は、コホート全体で既に用いられている名称をそのまま保つ; 大域的識別子とは、同じ項目をその帰属論文の外から見たものである。

D 総括表

本付録は、本論文が実務的な参考文献として役立つよう、荷重を担う結論を三つの表にまとめる: 低位のコライダー・セクターの現象論の台帳 (表 35)、反証の階層 (表 36)、そして第 VIII 部のシミュレーションが確立した発見のカレンダー (表 37) である。第四の総括対象 — 枠組みの判別行列 — は比較の議論とともに置かれている (表 30、第 56 節)。これらの表は、それらを生んだ部を読んでいない読者によって参照されるであろうから、そのそれぞれに、何が含まれるか、各項目がどこで導出されたか、そしていかに読むべきか — また、いかに読むべきでないか — についての短い案内を付してある。一分しかない読者にとっては、表 34 が本論文そのものである。

表 34: 十個の数の一覧: 本論文の荷重を担う量であり、そのそれぞれに出所を付す。各項目は示したとおりに導出されるか括られるかしており、フィットされたものは一つもない。十個という数は、読者が持ち帰ることのできるはずの数であり、出所の列こそがこの一覧が短い理由である。各項目はそれを生む定理ないし仮定へと辿ることができ、辿ることのできない項目であればこの表には入っていない。フィットされたものは一つもなく、これは結果についての誇りではなく方法についての言明である。

量	出所
1 $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35} = 3.849 \text{ TeV}$	T-KK-1 (第 9.1 節)
2 $v = M_{\text{lock}}(2/5)^3 = 246.3 \text{ GeV}$	過剰拘束 (第 4 節)
3 $\xi_{\text{UV}} = -0.194$ (軽クォーク)	T-KK-2 (第 10.4 節)
4 $+2.75 g_s$ (トップ)	読み出し II の括り (第 19 節)
5 $\Gamma/m = 14.6\%$; $\text{BR}(t\bar{t}) = 94\%$	幅の表 (付録 I)
6 $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) = 8.7 \text{ fb}$ (13 TeV) ; 13.6 fb (14 TeV)	T-KK-2c の連鎖 (第 31 節)
7 Z'_B : ツリー・レベルで 0 (ディリクレ・モード)	T-KK-2、ステップ 3'; O-KK-59
8 G_1 : 0.045 fb (13 TeV) ; $\kappa_{gg} = 0.47/K$	T-KK-2c (第 10.9 節)
9 動径方向の塔 $3.849/7.047/10.219 \text{ TeV}$	x_n/x_1 (第 9.1 節)
10 キル価格 $\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ (期待値) ; Run-3 のデータ	F-KK-2B (第 31.5 節)

マスター台帳の読み方 (表 35)。 台帳は、低位スペクトルの各成員について、解析者が最初に問う四つの問いに答える: それは何であるか、それはどこにあるか、それはどのように崩壊するか、そしてそれはなぜ探索にとって重要なのか。読みの規則は三つである。第一に、表中のすべての質量はシナリオ B である—データを生き延びた複合硬化の読みである—のであって、シナリオ A の排除された 2.46-TeV の配置は記録としてのみ保持されている (第 10.4 節、第 31 節)。第二に、「最良チャンネル」の列が符号化しているのは結合のテクスチャーであって、選好ではない: 八重項が $t\bar{t}$ へ 94% で崩壊するのは、トップが赤外先端における唯一のフェルミオンだからであり (付録 I)、同じ幾何が、RS ベンチマークで訓練された読者が探すであろうダイレプトンとダイフォトンの列を空にする。第三に、実験家が体得すべき二つの項目は最初のものと最後のものである: 八重項の行は近未来の反証子 (F-KK-2B) の全体であり、角度パートナーの行は不在ではなく選択則である: パートナーは各基底状態の上の導出されたオフセットに位置し、 θ 運動量の保存によって単独生成の外に保たれている—この行が表にあるのは、軽クォークから単独で生成されるパートナーが非空間的な読みを反証することになるからである (P-KK-7)。

反証階層の読み方 (表 36)。 この階層は、帰無結果を、それが実際に何を殺すのかによって並べており、その目的は、本プログラムに対する二つの対称的な誤読を防ぐことにある: 早すぎる祝賀 (「ダイレプトンの帰無結果はすでに GG-6 を試験している」—していない; 枠組みはその帰無結果を予言する) と、早すぎる埋葬 (「八重項の帯は横断された、ゆえに理論は些末な技術論によって生き延びる」—生き延びない; 第四水準は終端的であるように書かれている) とである。水準が決定性において上昇するのは、それらが結合テクスチャーの被覆において上昇するからである: 単一の綺麗なチャンネルは一つの重なりを制約する; トップとダイジェットと hh を合わせた組み合わせはパターンを制約する; 幾何が許す回廊全体にわたる、クラスターを意識した完全な組み合わせがキル条件である (F-KK-2B の実行形)。第五の行は、読者が見落としうる鏡像の場合である: 誤った形態の発見—クラスターの相関相手を一つも伴わない、単一の綺麗な RS 的な極—は、いかなる帰無結果にも劣らず鋭く本論文に挑戦するであろう、というのも、主張であるのは指紋であって、パンプではないからである。

カレンダーの読み方 (表 37)。 このカレンダーは第 VIII 部を四行に圧縮しており、その列はその部の論理の全体を担っている: 実験ごとの対 (凍結/改良) は背景システムの将来を挟み込み、組み合わせの列は相関の挟み込みを伴う現実的な ATLAS+CMS の判断変数であり、マイルストーンの列はルミノシティを帰結へと変換する。気軽な読者への警告が二つある。行の内部の差は行のあいだの差を圧倒する—凍結された系統から改

良された系統へ移ることは、十年分の追加運転よりも価値がある（第 40.3 節の壁）—ので、この表は解析への投資についての論拠であって、忍耐についての論拠ではない。そして第一行は予測ではない: 2026 年末はすでにテープ上にあるデータであり、だからこそ本論文の実行上の要請（専用の再解析）はあれほどの緊急性を担っているのである。

表 35: 低位 GG-6 衝突型加速器セクターのマスター現象論台帳（すべての項目はその導出値にある; 全体を通じてシナリオ B であり、シナリオ A は排除されている）。全体を通じてシナリオ B であるのは、シナリオ A が第 VII 部の公開された制限によって排除されているからであり、表はそのことを、どちらの枝が生きているのかを読者に考えさせるのではなく、自身の第一行において述べている。すべての項目はその導出値にあるので、台帳はそれを導出する各節に照らして行ごとに検査することができる。

対象	スピン	質量	最良チャンネル	役割
カラー八重項 KK グルーオン g^*	1	$\approx M_{\text{lock}} = 3.849 \text{ TeV}$ (シナリオ B: マッチングの仮定であり、フェンスは $O(1/K)$; 第 10.4 節)	$t\bar{t}$ (BR 0.94)、ダイ ジェット	抑制しえない成員: $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) = 8.7 \text{ fb}$ (13 TeV); LHC の反証子 F-KK-2B を担う。
バリオンのベク トル Z'_B	1	厳密に $= M_{\text{lock}}$ (ディリクレ・ モード)	トップの深度を通じて $t\bar{t}$; ツリーレベルでレ プトンなし	ツリーレベルでは端点クォークによっ て生成されない; 結合は登録済み (O- KK-59); ループのダイレプトン床は 登録済み (O-KK-61)。
グラビトン・アン カー G_1	2	厳密に M_{lock} (T-KK-1)	$t\bar{t} : W_L W_L : Z_L Z_L : hh = 0.69:0.15:0.08:0.08$	幾何に名を与える; $\kappa_{gg} = 0.47/K$ (T-KK-2c) がこれを FCC-hh の物理とする (85 TeV で 0.21 pb)。
第二動径族 G_2	2	$1.831 M_{\text{lock}} = 7.047 \text{ TeV}$ (ベッセル比)	$t\bar{t}$ 、ダイジェット	空洞を確証する倍音; FCC-hh の分光 (第 IX 部)。
角度 θ パートナー	—	基底の $1.07\text{--}1.17\times$	単独生成では皆無	導出されたオフセット (式 (12)); θ に依存しないカレントによって単独 生成から不在 (P-KK-7、再格付け)。

表 36: 衝突型加速器プログラムの反証階層。この階層は、通常は十分ではない単一チャンネルの帰無結果と、決定的である幾何を意識した組み合わせの帰無結果とを区別する。この階層が引く区別は、衝突型加速器の帰無結果が最も頻繁に誤って読まれる当の区別である。何も返さない単一のチャンネルは、一組の結合における一つの生成モードを制約する；クラスターの読みはそれを生き延びるし、生き延びるべきである。それが生き延びないのは、成員全体にわたる幾何を意識した組み合わせであり、表はそれが決定的となる閾値を述べている。

水準	意味
単一チャンネルの排除	分岐または重なり構造を制約する；GG-6 が非普遍的であるため、まだ決定的ではない。
二チャンネルの帰無結果（例：ダイレプトン + ダイフォトン）	普遍的な版や、綺麗なチャンネルが支配的な版を強く不利にするが、完全な GG-6 ベンチマークにはなお十分ではない。
第一クラスター窓における、ハドロン的トップ + ダイジェット + ヒッグス対の帰無結果	幾何が誘導する結合パターンを厳しく制約する。
幾何が許す結合回廊全体にわたる、クラスターを意識した完全なチャンネル組み合わせの排除	GG-6 の現在のロック・スケール実装の、衝突型加速器水準における反証。
両立しない質量パターンにおける、綺麗な単一の RS 的な極の発見	より一般的な意味で何らかの余剰次元の物理を支持するとしても、GG-6 に固有のスペクトル文法には挑戦することになる。

表 37: 発見カレンダー（第 VIII 部の要約；較正された有意度、専用のマッチト・テンプレート探索）。新たな結果ではなく要約である：ここでのすべての有意度はシミュレーションの部において計算されたものであり、日程を一箇所で読めるようにするためだけに再掲されている。日付は加速器の日程であって本論文の見積もりではなく、また有意度は、公表された制限の再解釈に対するものではなく、専用のマッチト・テンプレート探索に対するものである。

スナップショット	1 実験（凍結／改良）	ATLAS+CMS（改良）	マイルストーン
2026 年末	2.5/3.3 σ	4.1–4.7 σ	テープ上の証拠；組み合わせれば 5 σ が射程内
2031 年末	2.8/4.1 σ	4.9–5.7 σ	組み合わせでの 5 σ のルミノシティがテープ上に
2033 年末	3.0/4.8 σ	5.5–6.8 σ	単一実験での 5 σ がテープ上に（2034 年）
2041 年末	3.2/5.8 σ	6.2–8.2 σ	性質測定プログラムが飽和

E QCD グルーオンとカラー八重項 g^* との関係は何か？

標準模型 QCD のグルーオンと GG-6-Theory のカラー八重項ベクトル g^* との関係は何か？

これは綺麗な答えをもつ問いである、というのも GG-6 においてその関係はありうる限り緊密だからである：グルーオンと g^* は同じ場である—単一のバルク $SU(3)_C$ ゲージ場の二つの定在波であり、一つの楽器の基音と第一倍音である。以下のすべては定理 T-KK-2（第 10.4 節）のうちに暗に含まれている；本付録はそれを一箇所に集める。

構成。 バルクの $SU(3)_C$ 場は六次元の舞台の上に住み、あらゆるバルク場と同様に、スケール・スロットに沿ったモードへと分解される（付録 J）。境界条件は一つの観測事実によって固定される—そのゼロ・モード・

セクターは、我々が見る質量ゼロのゲージ場でなければならない—のであり、そのゼロ・モードは、 r に沿って厳密に平坦なプロファイルをもち、QCD グルーオンである。同じ場の第一動径励起—RG 方向に沿った定在波構造の節が一つ、プロファイルは赤外先端に集中し、質量はベッセル条件によって定まる—が g^* である。同じカラー八重項、同じスピン、同じローレンツ構造、一つの場合である。

なぜ一方は質量ゼロであり、他方は 3.85 TeV の重さをもつのか。 ゼロ・モードは平坦であり、したがってスロートに沿った勾配エネルギーを要しない; その質量ゼロ性は厳密であり、破れていない境界ゲージ不変性によって守られている。励起モードはスケール方向における定在波のエネルギーを支払い、それは赤外端点へと赤方偏移している—幾何に由来する質量であり、ヒッグス機構もなければ、どこにも新しい結合定数もない。 g^* のあらゆる結合は g_s に導出された重なる数の数を掛けたものである。

一つの場合であるにもかかわらず、なぜそれほど異なる振る舞いをするのか。 プロファイルである。グルーオンの平坦なプロファイルはあらゆるクォークと同一に重なる—これが意味するのは、標準模型では公理である QCD のフレーバー盲目性が、ここでは基底状態についての定理だということである: 普遍性は平坦性の性質である。倍音にはそのような保護がない: その赤外局在したプロファイルは、紫外局在した軽クォークと $-0.194 g_s$ で、赤外局在したトップと $+2.75 g_s$ で重なる—本論文のトップ親和的な現象論の全体は、フレーバー盲目性が第一の節とともに死ぬという言明にほかならない。

本論文が全体を通じて活用する帰結。 g^* はグルーオンの量子数をちょうど担っているので、それは s チャンネルのグルーオンと同じカラー・チャンネルにおいて $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$ に入る—だからこそ二つの振幅はコヒーレントに加わり (第 VI 部)、だからこそ干渉符号の定理がそもそも存在するのである。対照的に、カラー一重項の Z'_B は QCD と干渉しえない; 一つのピークの内部におけるその是/非の二分は、「同じ場」という関係の直接の指紋である (O-KK-28)。

複合 (シナリオ B) の読みにおいて。 この言明は移調されるが生き延びる: グルーオンは基本的な境界場であり、 g^* はグルーオンの量子数を担う境界理論の複合スピン 1 共鳴である—ハドロン物理における ρ 中間子と光子との関係にほかならない (スピン 2 については、同じ類比が付録 G において担われている)。 ρ は「新しい光子」ではない; それは強い力学が光子のチャンネルにおいて行うことである。同様に g^* は新しいゲージ・ボソンではない—拡張されたカラー群もなく、アキシグルーオン式に破れた $SU(3) \times SU(3)$ もなく、新しい電荷もない—それはスロートがグルーオンのチャンネルにおいて行うことである。

クラスター自身の内部にある、一つの教訓的な対比。 g^* には質量ゼロの兄弟 (グルーオン) がある、というのも $SU(3)_C$ はゼロ・モードをもつからである; Z'_B にはない— $U(1)_B$ の境界条件がゼロ・モードを除去するので、このベクトルには質量ゼロのパートナーがなく、だからこそバリオン数は長距離力を生まず、陽子は安定である (Arisaka, 2026, A9-SM)。したがってクラスターの二つのベクトルは、質量において縮退しながら、正反対の系譜をもつ: 一方は 1979 年以来知られている場の励起した複製であり、他方は標準模型が決してもたなかった場の最低音である。

セミナーの聴衆が「 g^* は重いグルーオンなのか？」と問うならば、正確な答えはこうである: それはグルーオンである—スケール次元を一オクターブ上がったところで聴かれたものである。

F バリオンのベクトル Z'_B の起源は何か？

バリオンのベクトル・ボソン Z'_B の起源は何か？ おそらくそれは局所的な $U(1)_B$ ゲージ不変性の帰結であろう—しかしなぜそれは 3.85 TeV に、 g^* およびグラビトン・アンカー G_1 と縮退して座らねばならないのか？そしてそれは弱い相互作用の Z ボソンと、あるいは $U(1)_{EM}$ の光子と関係があるのか？

その推測はまさに正しく、興味深い物理は、ゲージ化がなぜ強制されるのか、そしてなぜ質量が場とは何の関係もないのかにある。

バリオン数はゲージ化されねばならない—それは選択ではない。 標準模型において、バリオン数は偶発的な大域対称性である: それを強制するものは何もなく、何かを付け加えれば脆いことで有名である。GG-6 において事情は逆転する。GG-A3-BI6 (Arisaka, 2026, A3-BI6) の BI-6 アノマリー台帳は、バルクのゲージ集合がカラーおよび電弱因子と並んで $U(1)_B$ を含む場合にのみ、六次元のテンソル/ゲージ系を閉じる—6D 理論のアノマリー流入はそれなしには釣り合わない。したがって Z'_B はたしかに局所的な $U(1)_B$ 不変性のゲージ・ボソンであるが、模型構築者の趣味からではなく無矛盾性からゲージ化されている。同じ台帳は電弱スケールにおいてもその働きに見合うものを得るが、読者が最初に推測するであろう仕方によってではない: $v = M_{\text{lock}}(2/L)^N \approx 246 \text{ GeV}$ における $2/5$ は、バルクの 5_H のうち二重項が占める割合であり、三重性の層ごとに一度取られる (Arisaka, 2026, A9-SM, T-SM-30.1)。そして $U(1)_{Q_i}$ と並んで $U(1)_B$ に重みを与える BI-6 のトレース比 $2/5 = (L - N)/L$ は、 $(N, L) = (3, 5)$ においてそれと一致する別の対象である。バリオンの因子を要求するのはアノマリー台帳であって真空期待値の公式ではない; それを取り除けば、破れるのは流入である。

避けて通れない技術的問い: 混合アノマリー。 場の理論家はここで口を挟むであろう: 標準模型単独でバリオン数をゲージ化することは、混合三角形が消えないために障害を負うことで有名である—三代にわたって $A[B-SU(2)_L^2] = +\frac{3}{2}$ および $A[B-U(1)_Y^2] = -\frac{3}{2}$ である (重力的、三次、および B^2Y の三角形は恒等的にゼロである、というのも B はクォークの上でベクトルのだからである) —そして通常の代償は新しいカイラルな「アノマロン」フェルミオンの一組である。GG-6 はそのような代償を払わない: 境界スペクトルは、そのアノマリー多項式が階数 1 へと因数分解する、分裂していない $SU(5)$ 多重項から降りてきており、生き残る二つの三角形は単一のグリーン-シュワルツ相殺項 $\int B_2 \wedge X_4$ の流入によって相殺される—GG-A3-BI6 において証明され、そこで四次元の言葉によって詳述された機構である (Arisaka, 2026, A3-BI6)。四次元における勘定はシュテュッケルベルク構成におけるよりも単純である: 境界条件が $U(1)_B$ のゼロ・モードを除去するので、質量ゼロの四次元場はそもそもアノマリーをまったく担わない; テンソルの質量をもつモードが流入を担うことによる、質量をもつ塔の準位ごとの無矛盾性は、GG-A3-BI6 の登録された検査 O13 である—流入がそれを期待される帰結とする—のであり、スペクトルのどこにもアノマロンは存在しない (O-KK-47)。

なぜ 3.85 TeV なのか: 質量は幾何に属するのであって、場に属するのではない。 これはクラスター定理の中心的な直観である (第 9.1 節)。スケール・スロートは一つの空洞である—整数の長さ $K = 35$ をもつ管である。その管の中の赤外局在したあらゆる定在波は、それがどの場に属していようと、そのスピンの何であろうと、管の音高 $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35}$ に座る。スピン 2 セクターはその第一音をそこに置く (G_1); $SU(3)_C$ はその第一倍音をそこに置く (g^* , 付録 E); そして $U(1)_B$ はその第一音をそこに置く (Z'_B)。この縮退は説明されるべき偶然ではない; それは一つの幾何が四つの質量すべてを所有しているという言明である。ハドロンの物理が完璧な先例を供給する: $\rho(770)$ と $\omega(782)$ がほぼ縮退しているのは、ベクトル中間子が共謀しているからではなく、 Λ_{QCD} が両者を定めているからである。複合 (シナリオ B) の読みにおいて、これは文字どおりである—クラスターの四つの成員はすべて、一つの境界理論の単一の赤外スケールにおける共鳴である。

g^* との決定的な非対称性: 質量ゼロの兄弟がないこと—そして端点結合がないこと。 グルーオンが存在するのは、 $SU(3)_C$ の境界条件が平坦なゼロ・モードを保つからである (付録 E)。 $U(1)_B$ については境界条件は逆のことをする: ゼロ・モードたりえたものは境界条件によって除去される—テンソルの残余は誰にも食べられず、シュテュッケルベルク・スケールは存在せず、質量をもつ準位は $A_{B,r}$ のモードから準位ごとにシュテュッケルベルク的に質量を得ている (コンパニオンの O13) —のであり、管が許す最初のベクトル状態は管自身の音である (Arisaka, 2026, A3-BI6)。 $A_{B,r}$ の $n = 0$ モードは O-KK-67 の区間ウィルソン線スカラーとして生き残る; 第五の力の評決に対するその関わりは、未解決であるというより限界づけられている、というのも、バリオンのカレントを通じて結合するスカラーが組成依存的な力となるのはそれが軽い場合

に限られ、そのカレントによる一ループの持ち上げが、その質量をループ抑制されたロック・スケール、すなわち $g_B M_{\text{lock}}/4\pi \sim 10^2 \text{ GeV}$ の程度に定めるからである—見積もりであり、質量とともに登録されている—のであって、これは第五の力の論文の実験室的な範囲のはるか外にあり、したがって $\eta = 0$ は保たれる。これは些末な技術論ではない；それは観測によって強制されている。質量ゼロの「バリオンの光子」はバリオン数に結合した長距離力を媒介するであろうが、エトヴェシュ型の等価原理実験はそのような力を途方もない精度で排除している。したがって理論は、 $U(1)_B$ がゲージ化されていて（アノマリー台帳がそれを要求する）、それでいて長距離力をもたない（ねじれ天秤がそれを要求する）ものを供給しなければならない—そして境界条件による終端こそが、まさにその和解である。その代償は一つの質量をもつベクトルであり、管がそれに許す最も軽い音は管自身のものであるから、そのベクトルは 3.849 TeV に着地する。おまけとして、生き残ったゲージ不変性はなおバリオン数の保存を強制する：陽子は厳密な摂動論的選択則として安定にとどまる—アノマリー・コンパニオンの格付けであり、それがフェンスするホロノミー降下の段階に条件付けられている—のに対し、標準模型はそれを偶発的にしか約束できなかった。

Z との関係：本質的に皆無。 Z は $SU(2)_L \times U(1)_Y$ の中性成員である；その質量は電弱対称性の破れに由来し—GG-6 においては、その真空値を S_θ^1 上のウィルソン線が選ぶ二重項である（細谷機構, Hosotani, 1983）—そしてそれは弱アイソスピンと超電荷に結合し、したがってレプトンにも気前よく結合する。 Z'_B はより重い Z ではない：群が異なり、質量の機構が異なり（幾何対称性の破れ）、そしてそれはバリオン数にのみ結合する—クォークあたり電荷 $1/3$ であり、ディリクレ・モードの上では各クォークの深度によって重みづけられ、ツリーレベルではレプトンに対してゼロである。だからこそレプトフォビアは調整ではなく予言なのである：登録されたループ床の上で（O-KK-61）、ツリーレベルで $BR(\ell\ell) = 0$ であり、これはまた、それを強力なダイレプトン探索の外にとどめておくものでもある（第 30 節）—それと、いかなる端点クォークもそれを生成しないという事実とである。 Z との唯一の真正な結びつきは上流にある： $U(1)_B$ の BI-6 重みにその値 $2/5$ を与える台帳整数 $(N, L) = (3, 5)$ は、 v を固定する 5_H 二重項の割合 $(2/L)^N$ をも与え（Arisaka, 2026, A9-SM、T-SM-30.1）、そして v が M_Z を固定する。

光子との関係：最も近い従兄弟であり、境界における運命は正反対。 いずれもアーベル的な $U(1)$ ベクトルであり、したがって場としては兄弟である。しかし $U(1)_{\text{EM}}$ はそのゼロ・モードを保つ—破れておらず、質量ゼロで、長距離である—のに対し、 $U(1)_B$ はそのゼロ・モードを削除されている。一つの言い方はこうである：光子は管が鳴ることを許す基音であり、 Z'_B は基音の鍵が塞がれた場であって、それゆえそれが立てうる最初の音が管の音そのものである。（そのゲージ結合は L-KK-1 の導出された $g_B = 0.565$ であり、いまや閉じている；境界クォークへのその結合は O-KK-59 の未解決の紙面である。）

したがってクラスターの成員は、一つの質量へと収束する三つの異なる系譜を担っている： g^* は 1979 年以来知られている場の励起した複製であり； G_1 は計量セクターの励起した複製であり（付録 G）；そして二つのディリクレ・ベクトル— Z'_B とその Q_i の兄弟—は、標準模型が決してもたなかった場の最低音であって、 Z'_B は本論文の衝突型加速器の登録簿が名指す方であり、その存在はアノマリー台帳の必然であり、登録されたループ床の上のダイレプトンにおけるその沈黙がその署名である。

G GG-Theory の「グラビトン」とは何か？

「グラビトン」という語は文献において二つの異なる仕事をしており、GG-6 はそこに第三の、真に新しい読みを加える。「あなたの G_1 はそのグラビトンなのか？」という問いが尋ねられることは確実であるから、本付録は意味を一度、綺麗に切り分ける。

すでに流通している二つの意味。 量子重力のグラビトン—弦理論のグラビトン—は、量子化された四次元重力場の質量ゼロのヘリシティ 2 の量子である。その存在は重力そのものが量子場であることを前提としており、悪名高い困難（繰り込み不可能性、紫外完備化）はそこに住む。しかし衝突型加速器現象論の「KK グラビ

トン」は、決してその対象ではなかった: 高次元計量のモード分解から生じる質量をもつスピン 2 共鳴は普通の粒子であり、固定された背景の上で質量をもつスピン 2 場を量子化することは標準的な場の理論であって、原理的には W ボソンより難しくはない。これまでに行われたあらゆる ATLAS と CMS の「グラビトン探索」は、第一の種類ではなく第二の種類を探索してきた。したがって G_1 を発見することは、重力が弦理論的な意味において量子化されていることを証明するものではない; それが証明するのは、計量セクターが質量をもつ離散モードをもつということである。

G_1 が具体的に何であるか。 G_1 はバルクのスピン 2 セクターの最低動径定在波であり—そして本論文が固執する繰り込み群的な読みにおいては、文字どおりその赤外スケールにおける境界理論の複合スピン 2 共鳴であって、スピン 2 のハドロンの類比物である。その量子論的な身分は ρ 中間子のそれとちょうど同じだけ問題がない。それが「グラビトン」と呼ばれるのは血統によってであって、職務記述によってではない: それはバルク計量から降りてきている—Arisaka (2026, A2-GG6) が強制する複合接続の $\text{Spin}(1,5)$ ブロックである—のであり、だからこそそのスピン 2 性、 $T^{\mu\nu}$ への普遍的な結合構造、そして $W_L W_L$ に富む分岐は、選ばれたものではなく受け継がれたものなのである。その血統こそが、本論文がそれを「幾何に名を与える状態」と呼ぶ理由である。

OGGEP による転倒。 GGEP (AX-2) は重力を量子化しない; それは古典的で構造的な言明を行う—幾何とゲージは同じ種の接続であり、BI-6 によってロックされている。量子化が入るのは AX-3 においてである: OGGEP はバルクから境界への射影を観測そのものたらしめ、そして Arisaka (2026, A8-QM) は量子力学を措定するのではなく、その射影から回復する。それによって GG-6 は五十年のプログラムを転倒させる: 幾何を量子化するのではない; 量子化とは、幾何射影されるときに幾何が行うことである。その機構は具体的である—荷電物質のゲージ位相は θ ファイバーのホロノミーであり、 $\hbar$ はコンパクトな円の単位であり (台帳における $M=1$)、そして離散性 (電荷の、そして n における動径塔の) は二つの非空間的次元の指標と定在波構造である。この意味において、グラビトンと光子は同じ仕方で、同じ射影によって量子化されている: いずれも一つの複合接続のモードであり、いずれも量子化という別個の行為を要求しない。

誠実なフェンス。 それによって GG-6 が供給しないのは、質量ゼロの四次元グラビトンの完全な量子力学—ロック・スケール近傍のグラビトン-グラビトン散乱、深い紫外における振る舞い—である。それこそが Arisaka (2026, A9-SM) がその未解決の構造的項目 O_{14} として登録しているものである: 複合接続は構造的な統一を解決するが、力学的な量子重力の計算はコホートのどこにおいても実行されていない。綺麗な要約はこうである: 3.849 TeV における G_1 の発見は、世界の六次元な幾何学的起源についての証拠であって—「量子重力のグラビトン」の検出ではなく—、そして質量ゼロの $4D$ 重力が量子化されていることを要求しなければ証明もしない。それが証明するであろうことは、一つの意味においてはより強く (量子化そのものを出力とする幾何を検証する)、別の意味においてはより弱い (弦理論的な問いは先送りのままであり、そしてそのことは誠実である)。

質量をもつスピン 2 場、技術的に。 完全を期するため、質量をもつスピン 2 粒子の場の理論的な身分は注意深い段落に値する、というのも「スピン 2 は危険である」という言い伝えは三つの別個の問題を混同しているからである。自由な質量をもつスピン 2 場は完全に健全な記述をもつ (フィルツ-パウリ); 悪名高い病理 (v DVZ 不連続性、ブルウェアー-デザー・ゴースト) が苦しめるのは、質量をもつグラビトンを長距離重力の担い手として質量ゼロのそれにとって代わらせようとする試みである。 G_1 はそのようなことをしない: 質量ゼロのゼロ・モードは重力のグラビトンであり続け、 G_1 は、その相互作用がスロート・スケールにおいて遮断される追加の重い状態である—あらゆる RS 現象論の論文の状況にほかならず、そこでは KK グラビトンが弁解なしに通常の摂動論によって扱われている。(物理的直観: 質量をもつスピン 1 状態である ρ 中間子が光子の質量ゼロ性を危うくすると心配する者は誰もいない; G_1 がグラビトンに対して立つ位置は、 ρ が光子に対して立つ位置と同じである—同じチャンネルにおける重い共鳴であって、競争相手ではない。) 複合の読みにおいて、

これはいっそう明白である：強結合した境界理論のスピン 2 共鳴は、 $f_2(1270)$ がそうであるのと同様に、基本的なスピン 2 場をまったく必要としない。

発見が決着させるものと、させないもの、項目ごとに。 認識論を表にしておく価値がある、というのもそれらは非対称だからである。導出されたパターンを伴う G_1 の発見が確立するのは：質量をもつスピン 2 状態が存在すること（第 VI 部の角度解析から）；その結合が、局在によって重みづけられた応力エネルギーに従うこと（ $W_L W_L$ に富むパターンから）；そして六次元の幾何学的な読みが、正しく、パラメータのない事後予言の連鎖を生み出したこと、である。それが確立しないのは：4D 重力が量子化されていること（ O_{14} は未解決のままである）；バルクが唯一の UV 完備化であること；あるいはスロートの複合的な読みと弱結合的な読みとが区別されること（それには第 IX 部のラインシェイプと再帰のプログラムを要する）、である。逆に、LHC における八重項の発見の後の FCC-hh における非発見は、クラスターの読みをただちに反証するであろう—F-KK-1 の分業条項である。（物理的直観：グラビトンはクラスターの出生証明書であって、その運転免許証ではない；八重項は何か 3.85 TeV に住んでいることを証明し、グラビトンはそれがどの家族に属するのかを証明する。）

H なぜ g^* は最大の生成レートをもつのか—そしてなぜそれはそれほど幅広いのか？

なぜ g^* はクラスターの四成員のうち最大の生成断面積をもつのか—そしてなぜその幅はそれほど大きく、質量の $\sim 15\%$ にもなるのか？

この二つの問いは、その根において一つの答えをもつ—各場の波動関数がスケール・スロートに沿ってどこに住んでいるかによって定まる結合のテクスチャーである—であり、本付録はそれを扉、鍵、そして出口によって語る。（次いで付録 I がボンネットを開け、同じ事実を重なり積分から導出する。）

生成のレース： g^* は三つの乗法的な優位を得る。第一に、それが入ってくる扉である。13-TeV の加速器における 3.849 TeV では、入射する各パートンは自身の陽子の運動量の $x \approx 0.3$ を担わねばならない—そしてそれほど高い x においては、陽子は本質的に三つの価クォークであり、グルーオン密度は崩壊している。したがって利用可能な最大の始状態ルミノシティは $q\bar{q}$ 対消滅であり、 g^* はまさにその扉を用いるように作られている：それは軽クォークのカラー・カレントに強さ $\xi_{UV} g_s = -0.194 g_s$ で結合する。重なり 0.194 は控えめに見えるが、それは強い結合—自然の帳簿における最大の結合—に掛かる。第二に、カラーの数え上げである。 g^* はグルーオンと同じチャンネルに入るカラー八重項である：八つの共鳴状態が、強い相互作用の頂点の完全なカラー・トレースを伴って生成され、加えて QCD 連続背景とのコヒーレントな干渉がある（第 VI 部）。 Z'_B はカラー一重項である—一つの状態、カラーによる増強なし、干渉なしである。第三に、競争相手のハンディキャップである。 Z'_B はディリクレ・モードの上では $q\bar{q}$ の扉にまったく入らない（T-KK-2、ステップ 3'）；記録に残るノイマン参照の上においてすら、それは八重項のものより強くない鍵をもって入っていた— $g_s \xi_{UV} \approx 0.19$ に対して $g_B B_q = 0.565/3 \approx 0.19$ である—であり、そしてカラーのレース（八つに対して一つの状態、QCD トレースなし）に敗れて、 8.7 fb に対する 0.18 fb 、すなわち記録の比に着地した（第 31 節）。グラビトンは二重に不利である：その自然な扉は gg 融合であり、それはまさに $x \approx 0.3$ において消え去ったルミノシティである；そしてそのグルーオン対への結合は、系 T-KK-2c の導出された抑制 $\kappa_{gg} = 0.47/K$ を担っている。レートは結合の二乗で効く—整数一つ、べき二つ： $(1/35)^2 \approx 1/1225$ である。だからこそグラビトン・アンカーは 0.045 fb に座り、HL-LHC には不可視であり、より高いエネルギーのリングを待っている（第 IX 部）のに対し、同じ質量にあるそのカラー八重項の兄弟は実験ごとの発見候補なのである（第 VIII 部）。

幅：出口の扉はトップであり、複合の強さにおいてである。共鳴の幅は、それが去ることのできる結合によって定まり、 g^* の支配的な出口は結合 $+2.75 g_s$ をもつ $t\bar{t}$ である—トップ・クォークは赤外先端に、 g^* の

波動関数のちょうど真上に住んでおり、したがって重なりは莫大である。その大きさの結合を二乗し、位相空間の通常の 8π で割ると $\Gamma/m \approx 14.6\%$ が得られ、そのうち 94% が $t\bar{t}$ にある—トップが先端における唯一のフェルミオンだからである（付録 I）。ハドロン物理が較正を供給する：強い相互作用を通じて崩壊する複合ベクトルである $\rho(770)$ は $\Gamma/m \approx 19\%$ をもつ。シナリオ B の読みにおいて g^* は境界理論の ρ 的な複合体そのものであり（付録 E）、したがってこの程度の幅は単に許容されるにとどまらない—それは複合の読みについての誠実さが要求するものである。同じ論理によって G_1 はより狭く（6.3%：普遍的ではあるがより弱い応力テンソル結合である）、そして Z'_B は—B4 の深度を伴うディリクレ・モードの上で $\Gamma/m \approx 7\%$ である—八重項より狭いが、それは g_B が小さいからではなく、強い結合も軽クォーク・チャンネルももたないからである。

味わうに値する要点。 生成レート、幅、 $t\bar{t}$ の支配、そして干渉の符号は、すべて同じ二つの数—入りの 0.194、出の 2.75—から読み取られるのであり、それらの数は固定された波動関数の重なり積分であって、入力ではない。そして幅広さは厄介事ではなく指紋である：だからこそ公表された狭い共鳴の制限はこの状態を ~ 3 の因子だけ過小にしか制約せず（第 30 節）、だからこそ第 VIII 部の干渉を意識したテンプレートはあれほど多くの感度を得るのであり、そしてだからこそ 3.85 TeV に狭いピークを見出すことは、実際にはこの実装を反証することになるのである。

I 整数一つ、べき二つ—レート階層と $t\bar{t}$ の支配

一つの整数—クラスターの質量を定めるのと同じ $K = 35$ —が、どうして各成員がどれほど頻繁に生成されるか、そして各成員が何へ崩壊するかをも決定できるのか？

付録 H はその物語を扉、鍵、そして出口によって語った；本付録はボンネットを開ける。二つの数値的な事実が本論文の現象論の全体を組織している：グラビトンは八重項より ~ 190 倍弱く生成され、そして両者は圧倒的にトップ・クォークへ崩壊する。いずれの事実も一つの起源をもつ—スケール・スロートに沿った波動関数の幾何である—のであり、本付録の終わりまでに読者はあらゆる数をポケット電卓で検査することができる。

まず、回廊を思い描く。 以下のすべては、誰がどこに立っているかの記帳である。スロートは、スケール方向における長さ $K = 35$ の回廊である。軽クォークは紫外の壁（ $r = 0$ ）に住む；トップ・クォークとロック・クラスターの全体は赤外先端（ $r = K$ ）に住む；グルーオンのゼロ・モードは平坦である—回廊全体に沿って—様に広がっている。規格化についての一つの事実が算術のすべてを駆動する：長さ K の回廊に広がったモードは、任意の一点において一般に振幅 $\sim 1/\sqrt{K}$ をもつ。一点に立つことには代償がない；回廊全体に広がっていることは、場あたり $1/\sqrt{K}$ の代償を要する。

生成の階層： K の一つのべき 対 二つのべき。 ハドロン衝突型加速器における生成は重なりの問題である：始状態パートのプロファイルは、共鳴の住まいとどれだけ交わるのか。八重項の親は価クォークであり、紫外の壁に立っていて、そこで g^* のモードは有限の足がかりを保っている。生成頂点は単一の境界振幅である— $1/\sqrt{K}$ の因子が一つであり、相殺はない、というのもクォークの端点局在が、あらゆる直交性による保護を最大限に破るからである。二乗して： $\xi_{UV}^2 \approx 1/K$ である。べきは一つである。

グラビトンは二度支払い、そしてさらにもう一度支払う。その親はグルーオンであり、その平坦なモードはいたるところで振幅 $1/\sqrt{K}$ をもつ—したがって二つの始状態グルーオンはすでに振幅において $1/K$ の代償を要する。次いで重なり積分そのもの、 $\int(\text{平坦})^2 \times (\text{IR 局在 } J_2)$ がほとんど相殺する：民主的な源は、先端に身を寄せ合った受け手の上へほとんど射影せず、寄与するのは回廊の最後の半 e フォールドだけである。その生き残った残余が系 T-KK-2c の 0.47 である： $\kappa_{gg} = 2(1 + J_2(x_1))/(Kx_1^2 J_2(x_1)) \approx 0.47/K$ であり、したがってレートは $\propto 0.22/K^2$ である。べきは二つである。レートの比は、質量を定めるのと同じ整数のもう一つのべき（ $\times 35$ ）に、ほぼ直交していることの残余（ $\times \sim 5.5$ ）を掛けたものである：8.7 fb と 0.045 fb のあいだの因子 ~ 190 である。グラビトンを作ることが難しいのは、その質量を動かすことが不可能であるのと同じ理由による。

同じ平坦モードの幾何は崩壊の側においても働く：光子とレプトンは平坦であるか紫外に広がっているかであり、したがってクラスターはそれらにほとんど語りかけない。だからこそ G_1 はレプトンに乏しく、だからこそクラスターは実践においてレプトフォビックであり、そしてだからこそ公表されたダイフォトンの帰無結果は、緊張ではなく事後予言だったのである。

崩壊の階層：重さとクラスター親和性は同一の性質である。 なぜトップなのか。位相空間のせいではない—3.85 TeV において、 $\beta_t = 0.996$ ：あらゆるチャンネルは大きく開いている。答えは局在化であり、それが二度用いられる。フェルミオンの質量は、そのプロファイルが赤外端点においてヒッグス・セクターとどれだけ重なるかによって定まる；トップはそこで抑制されないプロファイルをもつ唯一のフェルミオンである—それが $y_t \sim 1$ である理由である。しかしロック・クラスターは同じ端点に集中しており、崩壊幅は質量と同じ重なり積分である。したがって、先端に住んでいるがゆえに重い状態は、自動的にクラスターが最も大きな声で語りかける状態となる：フェルミオンの質量を私に告げよ、そうすればクラスターがそれにどれほど強く結合するかを私が告げよう。

数値的には、フレーバーあたりの八重項の幅の比は $(g_V^{t\bar{t}} + g_A^{t\bar{t}})/\xi_{UV}^2 \approx 10.6/0.038 \approx 280$ であり、部分幅 $528 : 26 : 7$ GeV と反証可能な指紋 $t\bar{t} : b\bar{b} : j\bar{j} \approx 70 : 3.5 : 1$ とを与える（中間の $b\bar{b}$ それ自体が診断的である： b_L はトップの二重項を共有しており、部分的な IR 性を受け継ぐ）。重力子版は、同じ重なりによって重み付けされたエネルギー・運動量に結合し、IR に局在したトップとヒッグス・セクターとを選好する—等価定理により、 W_L と Z_L は変装したヒッグス・セクターそのものである—したがって $t\bar{t} : W_L W_L : Z_L Z_L : hh = 0.69 : 0.15 : 0.08 : 0.08$ となる。

戦略的な帰結。 LHC の最もクリーンなチャンネルはこの信号の最も静かなチャンネルであり、その最も声の大きいチャンネルは実験的に最も難しい部類に属する—それゆえに、公表されたクリーン・チャンネルの排除は予測に決して触れなかったものであり、それゆえに第 VI 部はトップ対の解剖に宿り、そしてそれゆえに第 VIII 部の発見解析は併合された一レプトンの $t\bar{t}$ トポロジーに宿る。バルク RS 模型は定性的なトップ親和の物語を共有する；違いは、ここでは局在化の帯 $r_{tR} \in [4, 5]$ が、トップ質量それ自体を生み出すのと同じ幾何に結び付けられており、ダイヤルで合わせられたものではないという点にある。スロートは質量順序付けの機械であり、クラスターはその順序の重い側の端に座している。

重なり積分を書き下す。 ここでボンネットが開く；これは本付録の唯一の技術的な一節であり、回廊の描像で満足する読者は損失なくこれを飛ばし読みしてよい。上の本文は「重なり」と言う；講義はそれを一つ実際に示すべきである。正準スケール・プロファイルのもとで、八重項の最低モード関数は $\chi_1(r) \propto e^r J_1(x_1 e^{r-K})$ ($[0, K]$ 上で規格化される) であり、動径位置 r_Ψ に局在したフェルミオンへの結合は $g \cdot \chi_1(r_\Psi)/\bar{\chi}$ である、ここで $\bar{\chi}$ は規格化因子である。UV 壁において評価すると小さな境界値 $\chi_1(0)$ が得られる：モードは $r = K$ に指数的に集中しており、その $r = 0$ における残余こそが軽いクォークの見るものである—最後まで通せば、これが $\xi_{UV} = -0.194$ であり、その符号は壁と先端とのあいだの J_1 の節構造から来る。重力子-グルーオン結合については被積分関数が定性的に異なる：グルーオンのゼロモードは正準規格化ののち r に依存しない ($f_g^2 = 1/K$)、それゆえ

$$\kappa_{gg} \propto \frac{1}{K} \int_0^K dr e^{-2(r-K)} \frac{J_2(x_1 e^{r-K})}{J_2(x_1)} = \frac{2[1 + J_2(x_1)]}{K x_1^2 J_2(x_1)} \approx \frac{0.47}{K}, \quad (89)$$

ここで閉じた形は、端点において潰されたベッセルの恒等式 $\int z^2 J_2 dz \rightarrow z^2 J_1 + 2z J_0 - 2 \int J_0$ の機構から従う（読者は、初等的な原始関数 $\frac{d}{dz}[z^2 J_2(z)] \cdot z^{-1}$ を経る道筋がそれを再現することを確認すべきである）。教訓は被積分関数のうちに見て取れる：指数的な重みは、すべての台を $r = K$ の下側の最後の半 e-フォールドのうちに集中させる、それが「0.47」の幾何学的な内容である。（物理的直観：回廊全体に広がったささやきを、最後の戸口に立つ聴き手に対して積分せよ—聞こえるのは最後の一音節だけである。）

幅の表を組み立てる。同じ結合が、それ以上の入力なしに八重項の幅を組み立てる：軽いフレーバーあたり $\Gamma(g^* \rightarrow q\bar{q}) = \frac{\alpha_s}{6} \xi_{UV}^2 m$ 、そして $\Gamma(g^* \rightarrow t\bar{t}) = \frac{\alpha_s}{6} m \beta_t [g_V^{t2}(1 + \frac{1}{2}\rho) + g_A^{t2}\beta_t^2]/g_s^2$ であり、ここで $\rho = 4m_t^2/m^2$ である；導出された数値を代入すると、 $t\bar{t} : b\bar{b} : j\bar{j}$ に対して $528 : 26 : 7$ GeV と $\Gamma/m = 14.6\%$ とが得られる—読者は各項目を電卓一つで確認することができ、そしてそれこそが要点である：幾何と幅の表とのあいだには、ダイヤルの入る余地がどこにもない。（物理的直観：幅とは結合の表を声に出して読み上げたもののそのものである；ここで広い共鳴が広いのは、 IR の先端におけるトップの戸口が大きく開いているからであって、何かが調整されたからではない。）

J 6D 作用から KK スペクトルへ—講義

J.1 ステップ 1: 教科書的な導出、ゼロから

／範囲。本講義は、教科書的な体積関係を伴う次元還元機構を教えるものであり、それは学生が最初に見るべきものである。コホートの正準規格化はプランク質量を体積因子で減じない—*T-KK-1*、ステップ 3—そして第 II 部の数値は *T-KK-1* のアンカー規格化と *T-KK-2* の二端点量子化とから来るのであって、以下の公式から来るのではない；両者が異なる場合には、第 II 部の言明が支配する。／

まず平坦な円から。半径 R の $\mathcal{M}_4 \times S^1$ 上の質量ゼロの 5D スカラーを取り、作用を $S = \frac{1}{2} \int d^4x dy \partial_M \Phi \partial^M \Phi$ とする。円はコンパクトであるから、その完全なフーリエ基底 $\Phi(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \phi_n(x) e^{iny/R} / \sqrt{2\pi R}$ において展開する。代入して y について積分する：交差項は直交性 $\int_0^{2\pi R} dy e^{i(n-m)y/R} = 2\pi R \delta_{nm}$ によって消え、次が残る

$$S = \sum_n \frac{1}{2} \int d^4x \left[\partial_\mu \phi_n \partial^\mu \phi_n^* - \frac{n^2}{R^2} |\phi_n|^2 \right]. \quad (90)$$

各フーリエ・モードは質量 $m_n = |n|/R$ の 4D 粒子である：カルツァークライン塔である。（物理的直観：余剰次元は共鳴する空洞である；塔はその倍音列であり、質量は n 個の波長を円に巻き付けることの代償である。周期性によって量子化された y 方向の運動量が 4D 質量に扮するのは、 $p_M p^M = 0$ が $p_\mu p^\mu = -p_y^2$ へと分裂するからである。）計算例： $R^{-1} = 1$ TeV は 1、2、3 TeV に等間隔の状態を与える—この杭垣を憶えておくこと；ワープした場合はそれを破壊する。

次にワープした区間。円を、計量 $ds^2 = e^{-2ky} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + dy^2$ をもつ区間 $y \in [0, \pi r_c]$ で置き換える（ランドル-サンドラム）。重力子のゆらぎ $h_{\mu\nu}$ については、横波かつトレスレスの運動方程式が $h_{\mu\nu}(x, y) = \sum_n h_{\mu\nu}^{(n)}(x) \psi_n(y)$ によって分離し、動径方向の問題は共形変数 $z = e^{ky}/k$ において次となる、

$$-z^2 \psi_n'' + 3z \psi_n' = m_n^2 z^2 \psi_n \implies \psi_n(z) \propto z^2 [J_2(m_n z) + b_n Y_2(m_n z)], \quad (91)$$

すなわちベッセル方程式である（ベッセル関数の背景については NIST ハンドブックを見よ、[Olver et al., 2010](#)）。（物理的直観：ワープ因子は位置に依存する屈折率のように働く；波は屈折率の低い側の端の近くに溜まり、それゆえモード関数は赤外境界に積み上がる—本論文におけるあらゆる「 IR に局在した」という言明の起源である。）両端におけるノイマン条件は $b_n \simeq 0$ を強制し（ $kr_c \gg 1$ に対して）、スペクトルを J_1 の零点の上に量子化する：

$$m_n \simeq x_n k e^{-k\pi r_c}, \quad J_1(x_n) = 0: \quad x_1 = 3.8317, \quad x_2 = 7.0156, \quad x_3 = 10.1735. \quad (92)$$

二つの特徴は鉛筆による確認に値する。間隔は (90) の杭垣ではない：比 $1 : 1.831 : 2.655$ は純粋なベッセル幾何である。そして全体のスケールは指数的に赤方偏移する： $k\pi r_c \approx 35$ のとき、 $e^{-k\pi r_c}$ はプランク的な入力を TeV の出力へと変える。計算例： $k = M_{Pl}$ 、 $k\pi r_c = 35$ は m_1 を 29.5 TeV に置く—読者は、3.85 TeV を再現するには第 9.1 節で論じたアンカー規格化が必要であることを確かめるべきである。

重なりからの結合。 境界フェルミオンあるいはバルク・フェルミオンは、モード n に、強さ $g_n = g \int dy \sqrt{-g} f_\Psi(y)^2 \psi_n(y) / (\text{規格化})$ で結合する：結合とは幾何である—フェルミオンが住む場所と、モードが住む場所との重なりである。この一行こそが ξ_{UV} の、 r_{tR} の、 κ_{gg} の、そして本論文のあらゆるレートの原因である；付録 O がその帰結を詳しく扱う。

J.2 ステップ 2: 教科書が定めることのできないもの

上の構成は、どれほど教科書的な勤勉さをもってしても埋まらない三つの空白を含んでいる。半径は入力である： R も kr_c も何ものによっても定まらず、それゆえ塔はどこにでも座りうるのであって、KK 現象論の四十年はこの無知の上の走査であった。長さは安定化されねばならない： r_c は動的な場（ラディオ）であり、追加の機構 (Goldberger & Wise, 1999) なしには区間は潰れるか暴走する—舞台を静止させておくためだけに発明された余分なセクターである。最初の極の規格化は規約に塗れている： x_1 に掛かるものは、探索が確かめることのできない境界の詳細に依存する。これらの空白の一つ一つは、同じ原因の徴候である：第五の次元は要請されたものであり、それゆえその大きさと力学は自由なのである。

J.3 ステップ 3: GG-6 による導出、および計算された数値

GG-6 は (91)–(92) の数学を受け継ぎ—Arisaka (2026, A2-GG6) (定理 2) の正準計量は $A(r) = r$ を伴うワープした形をもつ—そして三つの空白すべてを一度に閉じる、というのも次元が要請されたものではなく導出されたものだからである (第 5.5 節)。長さは OGN-5 の閉包から来る整数 $K = 35$ である (空白その一：走査は不要である；空白その二：ラディオは存在せず、計数は揺らぎえない)；スケールは定理 T-KK-1 の閉じた形によって錨づけられる (空白その三)；そして以下に集めた還元公式は、 $A(r) = r$ 、 $R_\theta = 1$ を了解のうえで適用される。端から端までの計算された数値： $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35} = \frac{1}{2} \times 1.2209 \times 10^{19} \text{ GeV} \times 6.3051 \times 10^{-16} = 3.849 \text{ TeV}$ 、そして塔は $m_n = (x_n/x_1) M_{\text{lock}} = 3.849, 7.047, 10.219 \text{ TeV}$ である—第 9.1 節のパイプオルガンの管であり、いまや読者自身の手で導出されたものである。

J.4 参考: 還元公式

完全性のため、本論文を通じて暗黙のうちに用いられている最小限の還元公式をここに集めておく。本文のモード構造の節と同様に、一般のスケール・プロファイル $A(r)$ と円の半径 R_θ とは純粹に帳簿付けの記号として保持されており、それによって公式をワープした文献と一行ずつ比較することができる；Arisaka (2026, A2-GG6) (定理 2) の正準値 $A(r) = r$ 、 $R_\theta = 1$ は全体を通じて了解されており、ここには自由な計量データは何もない。スケール・プロファイル計量

$$ds_6^2 = e^{-2A(r)} g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu + dr^2 + R_\theta^2 d\theta^2, \quad (93)$$

に対して、次が成り立つ

$$\sqrt{-g_6} = e^{-4A(r)} R_\theta \sqrt{-g_4}. \quad (94)$$

アインシュタイン–ヒルベルト項は、非空間座標を無次元とすると、次へと還元される

$$M_{\text{Pl}}^2 \propto M_6^2 2\pi R_\theta \int dr e^{-2A(r)}, \quad (95)$$

ここで比例係数は、Arisaka (2026, A4-Euclid) (T-Euclid-6) のバルク規格化によって、正準プロファイル上で $M_{\text{Pl}}^2 = (\pi/2) M_6^2$ となるように定められる—これが T-KK-1、ステップ 3 の関係であり、支配するのはこれである。一方、ゲージのゼロモードは次を満たす

$$\frac{1}{g_4^2} = \frac{2\pi R_\theta}{g_6^2} \int dr |f_0(r)|^2. \quad (96)$$

後者の関係において余分なスケール・プロファイル因子が現れないことは、行列式と逆計量とのあいだの標準的な相殺である。フェルミオンのゼロモードの規格化は余分な e^{-3A} の重みを担い、湯川結合や共鳴の結合はプロファイルの重なり積分を受け継ぐ。これらの基本的な公式こそが、本文で論じた非普遍的な結合パターンの起源である。

K パートン分布から断面積へ—講義

K.1 ステップ 1: 因子化された断面積、ゼロから

因子化。 陽子とはパートンのビームである。ハドロン・コライダー物理のマスター公式 (Ellis, Stirling & Webber, 1996; Halzen & Martin, 1984) は、任意のハード過程を、普遍的なパートン分布関数 (PDF) $f_i(x, \mu_F)$ —パートン i が運動量分率 x を担う確率密度であり、深非弾性散乱において一度限り測定されるもの—と、計算可能なパートン断面積 $\hat{\sigma}$ とに因子化する:

$$\sigma(pp \rightarrow X) = \sum_{i,j} \int_0^1 dx_1 \int_0^1 dx_2 f_i(x_1, \mu_F) f_j(x_2, \mu_F) \hat{\sigma}_{ij \rightarrow X}(\hat{s} = x_1 x_2 s). \quad (97)$$

(物理的直観: 陽子は買い物袋である; PDF は買い物リストである; パートン断面積は、選ばれた二つの品物が衝突したときに起こることである。衝突が変わっても、袋について計算し直すべきことは何もない。)

パートン・ルミノシティ。 質量 m の s チャンネル共鳴については、組み合わせ $\tau = \hat{s}/s = m^2/s$ だけが問題となり、(97) は名を与えるに値するただ一つの対象、すなわちパートン・ルミノシティへと収縮する

$$\frac{d\mathcal{L}_{ij}}{d\tau} = \int_{\tau}^1 \frac{dx}{x} f_i(x) f_j\left(\frac{\tau}{x}\right), \quad \sigma = \sum_{ij} \frac{d\mathcal{L}_{ij}}{d\tau} \cdot \hat{\sigma}_{ij}(\hat{s} = m^2) \cdot \tau. \quad (98)$$

(物理的直観: ルミノシティとは、正しい不変質量において利用可能なパートン対の数である; 機械と陽子とに関するすべてがそのうちにあり、新しい物理に関するすべては $\hat{s}$ のうちにある。本論文が、八重項のレートは 13 から 85 TeV へ $\times 330$ 増大すると言うとき、それは $m = 3.85$ TeV における $d\mathcal{L}_{q\bar{q}}/d\tau$ の増大以外の何ものをも引用してはいない。)

狭い共鳴のマスター公式。 スピン J 、カラー次元 N_V をもち、パートン ij から生成されチャンネル f において観測される共鳴 V について、ブライト-ウィグナーを積分すると教科書的な結果が得られる

$$\sigma \times \text{BR}(pp \rightarrow V \rightarrow f) = (1 + \delta_{ij}) \frac{16\pi^2 (2J+1) N_V}{(2S_i+1)(2S_j+1) N_i N_j} \frac{\Gamma_{ij}}{m} \frac{\mathcal{L}_{ij}(\tau)}{s} \text{BR}_f, \quad \tau = \frac{m^2}{s}, \quad (99)$$

ここで Γ_{ij} は生成チャンネルへ戻る部分幅である—あらゆる共鳴探索の感度プロットが黙って用いている公式である。(物理的直観: 共鳴とは漏斗である; どれだけ流れ通るかは (スピンとカラーの数え上げ) $\times$ (漏斗の口がどれだけ広い、 Γ_{ij}) $\times$ (漏斗にどれだけのビームが到達するか、すなわちルミノシティ) である。) 計算例 (読者はこれを再現すべきである)。 $\sqrt{s} = 13$ TeV における 3.849 TeV の g^* について: CTEQ6 は $\tau = 0.0877$ において $\sum_q \mathcal{L}_{q\bar{q}}(\tau) = 0.0596$ を与える (表 18、両方の順序を足し合わせたもの); 第 10.4 節の結合は、軽いフレーバーあたりの $\Gamma_{q\bar{q}}$ と $\text{BR}(t\bar{t}) = 0.94$ とを与える; スピン 1 の八重項のカラー因子を伴って (99) を組み立て、 $K_{q\bar{q}} = 1.3$ を掛けると $\sigma \times \text{BR} = 8.7$ fb が返る—これは表 19 の数値であり、完全なラインシェイプ積分に対して確認されるべきものである (保管された作業帳は両方を行っている; 両者は数パーセントで一致しており、それが $\Gamma/m = 15\%$ における狭幅近似の精度である)。

K.2 ステップ 2: この連鎖が仮定しながら定めることのできないもの

四つの外部入力があり、そのいずれもが台帳において正直に [E] と標識されている: PDF それ自体 (測定された一つの版であり、そのテールは高質量探索が住むまさにその場所で最も制約が弱い—[7.0–12] fb の帯の起源である); 因子化/繰り込みスケール (形式的には任意であり、実際的には摂動論を打ち切ったことの残滓である); K 因子 (誰かがあなたの過程について NLO を計算せねばならない; 我々は [Chivukula et al., 2012](#); [Mathews & Ravindran, 2005](#) を引用する); そして、あらゆる従来の応用において、 Γ_{ij} のうちの結合—教科書的な現象論はこれを模型の自由パラメータから取ってくるのであり、そのため連鎖の全体は、どれほど厳密であろうとも、ダイヤルに終わる。

K.3 ステップ 3: GG-6 の連鎖、両端で閉じたもの

GG-6 はちょうど一つのことを変える、そしてそれは最後のものである: Γ_{ij} と BR_f とはダイヤルであることをやめる。生成結合 $\xi_{UV} = -0.194$ と崩壊の表とは T-KK-2 から降りてきており、 $\kappa_{gg} = 0.47/K$ は T-KK-2c から降りてきている、それゆえ (99) は選ぶべきものが何もない算術の配管となる: PDF を入れれば、反証可能なフェムトバーンが出てくる—13、14、そして 85 TeV において (第 50.1 節)、PDF の帯は隠されるのではなく担われたままである。この配管は保管されており (パートン・ルミノシティの格子と組み立ての作業帳)、上の計算例を再現した学生は、本論文のあらゆるレートを自分のものとしている。

L 発見の統計学—計算を伴う講義

L.1 ステップ 1: ポアソン尤度から Z へ、算術を示しながら

第 VIII 部 (第 40 節) は形式論を導出する—尤度比 q_0 、ウィルクスの定理、アシモフ・データセット、そして背景不確かさを伴うコーワンの公式である。本付録は、講義がなさねばならぬ本体がなしえなかったことを行う: すなわち一つの実例の場合について、ピンごとに算術を示すのであり、それによって読者は同じ表を延長することで本論文のあらゆる有意度を監査することができる。2026 年末 (0.466 ab^{-1} , 13 TeV)、表 26 の解析ピンを取ろう:

表 38: 一つのデータセットについてピンごとに計算された有意度の算術であり、それによって本部の他のあらゆる数値が同じ表を延長することで監査できるようにしたもの。信号、背景、分数的な背景不確かさ、および帰結するピンごとの有意度が、公式がそれらを用いる順に示されている。ここには新しい物理は何もない; これは見出しとなる数値の背後にある帳簿付けであり、算術が示されていない予測は確認されえないがゆえに印刷されている。

ビン [TeV]	$s = S+I$	b	f_b	$\sqrt{b}$	$f_b b$	Z_{bin} (式 83)
3.0–3.5	145	177	0.069	13.3	12.2	6.8
3.5–4.2	133	75	0.132	8.7	9.9	7.4
4.2–4.9	27	19	0.226	4.3	4.3	3.4

五つの解析ビンにわたる二乗和 (隣接する二つのビンは 5.2 と 0.5 とを加える) は、五ビンにわたって $Z = 11.9$ を、錨づけられた三ビンにわたって $Z = 10.7$ を与える; 測定された較正 $F_{\text{cal}} = 4.33$ で割ると、それぞれ 2.7σ と 2.5σ とが得られる—第 VIII 部の表は錨づけられた値を載せている、というのも隣接ビンの系統誤差は測定されたものではなく外挿されたものだからである。(物理的直観: 各ビンは、台帳が f_b までしか当てにならない銀行を相手にしたコイン投げの実験である; 第三の列の対は、系統誤差項がポアソン雑音を追い越す瞬間を示している—このルミノシティでは $3.5\text{--}4.2 \text{ TeV}$ のビンにおいて真であり、他の二つではほぼ拮抗

している、第 40.3 節の「壁」である。) 読者はいま、表 26 の 2041 年の行を計算し直し、凍結された f_b による天井が算術から立ち現れるのを見るべきである: いったん $f_b b \gg \sqrt{b}$ となれば、 s と b とを七倍しても Z_{bin} はほとんど変わらない。

L.2 ステップ 2: 計数が見ることのできないもの

上の表は第 42 節の三つの抑制のうち二つに値を付ける; 第三のもの—背景が形を変える自由—は、その構成からしてビンごとの計数には見えない。図 11 の二パラメータの実演は最小限の正直な展示であり、測定された F_{cal} は完全な機構による代価である。学生はいかなるフィットを走らせるよりも前にこの教訓を体得すべきである: 滑らかで広い超過と背景の規格化とはほとんど同じ形をしており、相関し符号を変える構造（干渉のパターン）だけが吸収から安全である。

L.3 ステップ 3: 事前登録された見返り、計算して

第 44.1 節の探索範囲効果 (look-elsewhere) の算術を、数値とともに一度通しておく: 分解能 10% は $N_{\text{cells}} = 10 \ln(5000/400) = 25.3$ 個の独立な質量仮説を与える; 三つの幅テンプレートは $N_{\text{trials}} \approx 76$ を与える; 局所的な $p = 2.87 \times 10^{-7}$ (五シグマ) は $p_{\text{glob}} = 76 \times 2.87 \times 10^{-7} = 2.2 \times 10^{-5}$ 、すなわち $Z_{\text{glob}} = 4.1$ となる—走査を行う探索が支払い、事前登録された点は支払わない割引である。逆に解けば: 大域的な五シグマは局所的な 5.8σ を要求する。(物理的直観: 七十六枚の宝くじは、当たりを七十六分の一だけ驚きの少ないものにする; 質量の導出こそが、他の七十五枚の券をあらかじめ破り捨てるものである。) 第 44.2 節の整合テンプレート因子と併せれば、これが「事前登録」の統計的な内容のすべてである—新しい数学は何もなく、ただ走査することの拒否があるだけである。

L.4 参考: 有意度スケーリングの作業帳

あるチャンネル f が、信号効率 ε_f 、信号断面積 σ_f 、および単位ルミノシティあたりの背景収量 b_f をもつとする。そのとき

$$S_f = \mathcal{L} \sigma_f \varepsilon_f, \quad B_f = \mathcal{L} b_f. \quad (100)$$

最も単純な背景優勢の有意度推定量は次である

$$Z_f \approx \frac{S_f}{\sqrt{B_f}} = \sqrt{\mathcal{L}} \frac{\sigma_f \varepsilon_f}{\sqrt{b_f}}. \quad (101)$$

いくつかのチャンネルが統計的に独立であるならば、それらを近似的に次によって結合してよい

$$Z_{\text{comb}} \approx \sqrt{\sum_f Z_f^2}. \quad (102)$$

鍵となる教訓は定性的なものである: GG-6 は本質的に多チャンネルかつ非普遍的であるから、結合された有意度は、単一のクリーンなチャンネルが示唆するよりも速く増大しうる。それゆえコライダー計画は、初めから結合チャンネルの問題として設計されるべきである。

M 実験家のためのベンチマーク／再解釈カード

以下のカード、それが参照するテンプレート・ヒストグラム、およびそれらの背後にある完全な数値ワークブックは <https://www.arisaka-gg.org/> で入手できる。

第一 GG-6 クラスターの探索カード。

- **主標的:** 3.849 TeV を中心とする、スピン 2 アンカーによる共鳴クラスター; 発見率を担うのはカラー八重項メンバーである (スピン 2 アンカーは、その導出された結合における FCC-hh 測定であり、T-KK-2c)。
- **主要チャンネル:** $t\bar{t}$ 、ブースト・ダイジェット、 hh 、ダイボソン、そしてクリーンな $\ell^+\ell^-$ と $\gamma\gamma$ による交差検証。
- **推奨する解析様式:** 単一極のみではなく、クラスター認識型。
- **最も診断的なパターン:** 第一クラスター + 7 TeV 近傍の第二動径族。
- **最も有用な縮約データ:** 高質量ジェット運動学、トップ/ヒッグス・タグ、b-タグ要約、タイミング補助によるパイルアップ抑制、レプトン四元ベクトル、およびチャンネル結合のメタデータ。
- **レート・アンカー (モデル水準、D*):** カラー八重項の $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t}) = 8.7 [7.0\text{--}12] \text{ fb}$ 、3.85 TeV において (13 TeV, LO $\times$ K); シナリオ B のクラスターは八重項優勢である (G_1 は、その導出された $\kappa_{gg} = 0.47/K$ において 0.045 fb を加えるにすぎず、FCC-hh の標的である: 85 TeV で $\approx 0.21 \text{ pb}$); 自由場の 2.46-TeV シナリオは、観測された広幅テンプレート限界をすでに ~ 3.6 倍ほど上回っている; Z'_B : デイリクレ・モードではツリー準位で生成されず (ノイマン・モードの参照値 0.012–0.46 fb はレートとしては撤回された)、いかなる読みにおいても LHC 不可視である。表 19 と図 9 を見よ。
- **発見の指紋 (事前登録された、第 VI 部):** $(1 + \cos^2 \theta^*)$ の角度分布; $P_t = +0.91$; u, d, s, c からの共鳴 $A_{FB} = 0$; 極より下では建設的・上では破壊的な干渉ラインシェイプと $-O(100) \text{ GeV}$ の重心引き; $\ell^+\ell^-/\gamma\gamma$ には何もない。
- **コライダー水準のキル条件:** テープ上の Run-3 データにおいて、チャンネル結合の超過がなく、かつ第一クラスター窓で全回廊が排除されること ($\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ 、想定される代価; 第 31.5 節)。
- **コホート登録:** 上記の回廊、幅、量子数、および分岐パターンは、コンパニオン論文のロック・クラスター反証子が結びつく主張の契約である (Arisaka, 2026, A2-GG6; Arisaka, 2026, A3-BI6)。

M.1 実装の手順解説

上記のカードは 何を を述べる; この手順解説は いかに を、解析チームが進めるであろう順序で述べる。

(1) テンプレートの構築。固定された入力 ($M_{\text{lock}}, \Gamma/m = 14.6\%$, $\xi_{UV} = -0.194$, $g_V^t = 2.75g_s$, $g_A^t = 1.75g_s$) を用いて式 (66) から真値水準の $d\sigma/dm_{t\bar{t}}$ を構築し、ブライト-ウィグナー成分と干渉成分は 別々の ヒストグラムとして保持して、フィットが干渉係数を浮かせられるようにする (符号は自由 — データが P-KK-4 に反対することを許さねばならない)。実験自身の $m_{t\bar{t}}$ 応答で畳み込む。(2) 規格化の戦略。浮動する $t\bar{t}$ 規格化を $m_{t\bar{t}} \lesssim 1 \text{ TeV}$ に、データが許すところでは 700 GeV より下に、あるいはダイレプトン・チャンネルに固定する; そこでの導出された汚染は $q\bar{q}$ 連続背景の数パーセントであり (1 TeV で +7.5%, 700 GeV で +3.6%, 式 88)、素朴な全域浮動が何を代価とするかは第 44.5 節が値付けしている。(3) フィットと統計。統合 SR スペクトルにわたる二テンプレートのプロファイル・フィット ($\mu_{\text{BW}}, \mu_{\text{int}}$); 事前登録された点 ($\mu_{\text{BW}} = \mu_{\text{int}} = 1$) と自由フィットの双方を引用する。(4) 検証。背景のみの擬似データでの閉包; テンプレートが P-KK-4 のパターンを識別することを確認するための符号反転の注入; そして本論文の簡略化された機構がコラボレーション自身の限界を再現することの交差検証としての、第 41 節の二つの較正質量。(5) 報告。結果が何であれ、測定された ($\mu_{\text{BW}}, \mu_{\text{int}}$) をその共分散とともに公表する: ヌルは F-KK-2B をキルする; 誤った符号の信号は P-KK-4 をキルする; 正しい符号の信号は第 VIII 部の発見である。(物理的直観: 手順解説の全体は一文である — 本論文が導出した形状をフィットし、符号を浮かせ、信号が届きえないところに土台を固定せよ。)

テンプレート T1 — 一つの箱に収めた成果物。 $T_1(m_{t\bar{t}}) = B(m_{t\bar{t}}) [1 + \mu_{\text{BW}} f_{\text{BW}}(m_{t\bar{t}}) + \mu_{\text{int}} f_{\text{int}}(m_{t\bar{t}})]$: 規格化を $m_{t\bar{t}} \lesssim 1$ TeV に、データが許すところでは 700 GeV より下に固定した、固定背景 B (第 44.5 節); $m = 3.849$ TeV における $\Gamma/m = 0.146$ のブライト-ウィグナー成分 (帯は $r_{tR} \in [4, 5]$ にわたって 0.12–0.18; テンプレート生成器に与えるべきは帯の中心ではなく点値である); 定理によって固定された符号をもつ干渉成分 (極より下では増大、上では欠損、4.9 TeV 近傍で交差) — いずれの形状も式 (66) による。妥当性の窓は 2.5–4.9 TeV。自由パラメータ: 二つの信号強度と背景のニューサンス・パラメータであり、それ以外にはない。フィットし、 $(\mu_{\text{BW}}, \mu_{\text{int}})$ を共分散とともに公表せよ; 解釈は上記の手順解説に従う。

N コライダー用語集

クラスター認識型探索

信号モデルが、一つの孤立した狭い共鳴ではなく、二つ以上の近接した極あるいは部分的に重なり合う構造を含むことを許す、重い共鳴の探索。

第一ロック・スケール・クラスター

実験的に到達可能な最初の GG-6 重共鳴族であり、3.849 TeV 近傍を中心とする。

幾何が許す回廊

自由に走査されたベンチマークの集合とは対照的に、現在の定理級 GG-6 幾何と両立する有効結合と分岐パターンの範囲。

レプトフォビクな混入

ダイレプトンに対してハドロンのチャンネルを増大させる、バリオンあるいは非普遍的なパートナー状態からの寄与。

パートナー・パターン

一つのチャンネルにおける一つの孤立した信号ではなく、第一クラスター、KK グルーオン、および $U(1)_B$ ベクトルの相関した出現。

縮約ストリーム

コンパクトな高水準情報あるいは Level-1 情報のみが保存されるトリガーまたはスカウティングのデータ形式であり、全事象保存よりもはるかに高い記録レートを可能にする。

TLA / トリガー水準解析

選ばれた探索について、全事象ではなく高水準トリガー・オブジェクトを保存する ATLAS の方式であり、高レートにおいて特に有用である。

L1 スカウティング

事実上すべての衝突からの Level-1 トリガー情報を、専用の解析のためにディスクへ記録する CMS の縮約形式の戦略。

O 未解決項目の昇格ロードマップ

本論文の未解決項目 (第 58 節) を、ロードマップとして述べ直す: 現在のグレード、各項目を閉じる計算あるいは測定、そして閉包の影響である。

表 39: 未解決項目を、悔恨の一覧としてではなくロードマップとして示す。各項目は、その現在のグレード、それを閉じるであろう具体的な計算あるいは測定、そしてそれを閉じることが何をもたらすかを担う; 閉包条件をもたない項目は作業指示ではなく告白であろうが、ここにそのようなものはない。順序は各項目がどれだけ早く実行されるかによっており、それはどれだけ重要かによる順序と同じではない。

項目	グレード	閉包条件	閉包の影響
L-KK-1: g_B の読み出し	閉 [T]	終端シーム容量定理 (T-BI6-6.4)	$g_B = 0.565$; 第五の力の判定: 不在 ($\eta = 0$)
NLO 干渉 K 因子	[E]	g^* -QCD 干渉の専用 NLO 計算	低質量側テンプレートが固まる; 再解析が最初に必要なとする唯一の理論入力
$n \geq 2$ の重なり結合	[M]	x_2, x_3 で評価された T-KK-2c の機構	G_2 / G_3 のレートが推定から導出へ昇格する (FCC-hh 分光)
複合再帰の間隔	未解決	強結合 (双対) スペクトル計算	ベクトル再帰の探索標的が確定する
検出器水準の 2 次元角度研究	[E]	固定された背景カクテルによる完全シミュレーション	限界づけられた 10-30% の発見利得が確保される
複合シナリオの幅の帯	[D*]	HL-LHC 統計におけるラインシェイプ・フィット (自己測定的)	Γ/m が重なり帯の測定された交差検証となる

いずれの項目の閉包もプログラムを鋭くする; いずれの閉包も判定のためには要求されていない。反証子は定理級の背骨のみに立っている。

上記の各行は、研究課題を選ぶ学生のために、その文脈を述べる一文に値する。 L -KK-1 が最も自己完結的である: $\alpha_s = 1/(\pi e)$ を生んだ GDOS の数え上げは [Arisaka \(2026, A9-SM\)](#) に記録されており、その $U(1)_B$ への適用は四点の解答空間をもつ限定された演習であって、いまや完了している: 容量定理が第三の点を選び出した。 NLO 干渉 K 因子 は (要求は厳しいにせよ) 在来の変動 QCD である — 標準的な SM 理論グループが明日にでも取り上げる唯一の項目であり、その実験的な消費者は直ちに存在する。 $n \geq 2$ の重なり は式 (89) をより高次の零点で再利用する: 対角結合であれば午後一つ、完全な混合構造であれば論文一本である。再帰の間隔 が難物である — 真に強結合であり、双対計算かデータそのもののいずれかを待っている。 2 次元角度研究 はコラボレーションの内部に属し (実際の背景カクテルを必要とする)、幅の帯 はデータによって自ら閉じる。どこで手を貸せるかを探す読者は表の第二行から始めるとよい; 反証しようとする読者は、これらの項目のいずれも判定を庇うものではないことに注意すべきである。

課程は完結した: 付録 J から L までを解いた読者は、本論文のあらゆる導出の連鎖を我がものとしている — スペクトル、断面積、そして有意度である。残る務めは一つであり、それはこの規模の主張が最も負っているものである: 反論であって、次の部がそれらを七十件集めて答え、本文への指し示しか、あるいは正直な「まだである」を伴う。

第 XIII 部

よくある反論と応答

コライダー実験家、現象論者、統計家、あるいは弦理論家が初読で提起する可能性が最も高い、最も強い反論 — 本文への指し示しとともに答える

整数から導出された零パラメータのコライダー標的を主張する論文は — 当然ながら — あらゆる方面からの懐疑をもって迎えらるであろう。本部は七十件の反論を主題ごとにまとめて集め、各々に敷衍した応答と、完全な取り扱いが本論文のどこにあるかへの指し示しを付す。これらの反論は藁人形ではない; 著者が実際に問われてきた問いを、鋭くしたものである。正直な答えが「まだである」であるところでは、我々はそう述べ、どの主張が定理であり、どれが条件付きであり、どれが推定であるかを正確に記録した未解決項目のロードマップ (付録 O) を指し示す。結局のところ、枠組みの試金石は、あらゆる問いをかわすことではなく、どの問いに答えており、どの問いに答えていないかを知っていることである。

P 方法論と導出の連鎖

反論 1 (O-KK-1) (数秘術懐疑派)

「 $\frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35}$ は無数の整数組合せのなかの一つの式にすぎない。あなたは現在のフロンティア近傍に着地するものを一つ見つけ、その上に論文を建てたのである。」

応答。35 が探索されたのであれば、この非難は当たるであろう。そうではない: $K = 35$ は [Arisaka \(2026, A3-BI6\)](#) で証明された OGN-5 ディオファントス縦続 $K = LJ = M^2 + N^2 + L^2$ の終端項であり、いかなるコライダー比較よりも前に固定されており、しかも 同じ 整数が、数十年前に測定された数に対して再び費やされている — $v = M_{\text{lock}}(2/5)^3 = 246 \text{ GeV}$ である。式の採掘という営みは一つの着地を得る; それは一つの整数から二つの着地を得ることはなく、また偶然という非難を予定された実験へと転換する事前登録を生き延びることもできない (第 44.1 節)。本論文の姿勢は探索ではなく強制である: 公理から 3.849 TeV に至る連鎖のすべての段階が書き下されているのは (第 9.1 節)、まさに、懐疑的な読みにおいてごまかしが起きたに違いない段階を読者が突き止められるようにするためである — そして、自由な段階などどこにも用意されていないと知るようにするためである。

反論 2 (O-KK-2) (因子懐疑派)

「 $\frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-K}$ における $\frac{1}{2}$ は、定数を装った当てはめのごまかしに見える。」

応答。 $\frac{1}{2}$ は [Arisaka \(2026, A2-GG6\)](#) の正準計量 (その KK スペクトルの付録) における最低物理モードの規格化であり、T-KK-1 によって輸入されてここで再導出されるものではなく、また調整可能な前因子でもない: 第 9.1 節のアンカー段落がそれを辿っており、同じ付録が、素朴なベッセル前因子 $2x_1 \approx 7.66$ がなぜ独立な補正でないのかを記録している。運用上の論点は美学上のそれよりも鋭い: $\frac{1}{2}$ をどう思おうとも、それは比較の前に固定されており、 v の過剰拘束を壊さずに改訂することはできず、そして実験的な窓 $3.85 \pm 0.10 \text{ TeV}$ は分解能と広がりによって定まるのであって、前因子への不安によってではない。

反論 3 (O-KK-3) (事後説明懐疑派)

「予言がちょうど今日の排除フロンティアに位置するとは、なんと都合なことか — 排除されるでもなく、安全に遠いでもなく。」

応答。論理を逆転させよ。整数によって固定された予言は どこかに 着地せねばならない; 生きたフロン

ティアに着地するというのは、決着がつこうとしている年月において主張が呈する姿にすぎない — 本論文が現れる前に LHC が五年長く稼働していれば、同じ数はフロンティアのすぐ後ろに位置したであろうし、五年短ければ、すぐ前に位置したであろう。疑わしいパターンとは、改訂を通じてフロンティアを追尾する 予言であろう; 第 54 節はその逆を記録している (排除されたシナリオ A は移動されたのではなく退役させられた、第 10.4 節)。一方で同じ連鎖は $v = 246$ GeV を固定するが、これはいかなるフロンティアにも位置していない。

反論 4 (O-KK-4) (輸入懷疑派)

「物理はコホートの上流で『凍結』されている。本論文は何についても独立な検証を主張することはできない。」

応答。その通りである — そしてそれを引き受ける。あらゆる輸入は、名前をもつ所有者を伴う名前をもつ定理であり (第 9.1 節; 参考文献の部が各々を記録している)、したがってコライダーの判定はその連言を検証する: 想定される $\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ におけるヌルは、切り離し可能なモジュールではなくロック・スケールの実装を退役させ、Arisaka (2026, A9-SM) の電弱導出をも道連れにする。依存性こそが反証子を価値あるものにしている; 上流に帰結を及ぼすことなく失敗しうる「独立な」コライダー・モジュールは、まさに第 1 節が批判する脱出口の構造であろう。

反論 5 (O-KK-5) (隠れた選択の懷疑派)

「自由パラメータがない、だと。ベッセル J_1 を選び、ノイマン境界条件を選び、オービフォールドを選んだではないか。どこまで行っても選択ばかりである。」

応答。その一覧の各項目は、選ばれたのではなく観測された事実によって固定されている: 破れていない方向については、境界条件は、そのゼロモード部門が観測された質量ゼロの標準模型ゲージ場 そのものである ようなものであり (定理 T-KK-2 の前提、第 10.4 節)、終端したアーベル方向については、その所与はバリオン光子の不在であって、両端ディリクレ条件はアノマリーのコンパニオンの条項 (C9) である — 本論文が採用し、いまやその条項が固定する読みである; それらが与えられれば、動径方程式とその J_1 零点は残余の自由度なしに従う; そしてこのすべてが据えられる計量それ自体が Arisaka (2026, A2-GG6) の定理 2 であって、アンザッツではない。選択の正直な残余は、それが住まうところに記録されている: Z'_B の未解決の結合シート (O-KK-59) と付録 O の格付けされた推定である — 短い一覧であり、そのようなものとして公表されている。

反論 6 (O-KK-6) (自己採点懷疑派)

「あなたの [T] / [D*] / [M] / [E] のグレードは自己付与である。どんなトンデモ論者も自分の宿題は自分で採点する。」

応答。グレードは判定ではなく 住所 である: 格付けされた各主張はその導出の所在を担っており (第 9.2 節の台帳、付録 B の記号表)、読者は引用された段階を確かめることでどの項目も付け直すことができる。この規律の価値は非対称である: 自己を美化する自己付与のグレードは最初の敵対的な読者によって暴かれるであろう; 正直な自己付与のグレードは — Z'_B の未解決の結合シートや $n = 2$ のレートに付された推定の標識を含めて — 本論文に修辭的な力を失わせ、そして検査可能性を買う。読者には、まさにその取引を監査することを求める。

反論 7 (O-KK-7) (K 因子懷疑派)

「LO×K のレートを引用しておきながら、その結果を『導出済み』と呼んでいる。NLO はすべてを動かさる。」

応答。本論文は、どの主張が形状であり、どれがレートであるかについて注意深い。定理級の内容 — 質量、縮退、符号、角度の形、レプトフォビア — および A_{FB} の導出条件付きのゼロは、K 因子や PDF のいかなる改訂も生き延びる (第 VI 部)。レートは、引用を伴う公表された K 因子と明示された帯 ([7.0–12] fb) を担っており、K に最も敏感な唯一の対象である干渉テンプレートは、プログラムの最初の理論的課題と

して旗を立てられている（第 44.5 節、付録 O）。反証の論理において中心レートが厳密であることを要求するものは何もない：キル窓は帯に対して述べられている。

反論 8 (O-KK-8) (形而上学懐疑派)

「『RG スケール次元』は物理ではなく哲学である。座標が何を 意味する かを検証することはできない。」

応答。意味は、読みの間で異なる帰結を通じて検証される。同じ計量の空間的な第五次元はラディオンを引きずり（検証可能：ヒッグス精密測定のスル、P-KK-9）、調整可能な長さを許し（検証可能：質量は整数の出力ではありえない）、 θ 塔のスケールをダイヤルにする（検証可能：角度サテライト、P-KK-7）。非空間的な読みはその三つすべてを禁じる。第 5.5 節と表 2 は、この存在論を反証可能な差異の行へと変換する — まさにそれが、これを哲学から救い出すものである。

反論 9 (O-KK-9) (社会学懐疑派)

「この規模の単著プログラムは信用できない；大きな主張には大きなコラボレーションが必要である。」

応答。信用は誤った通貨であり、正しい通貨は検査可能性である。そして本論文はそのために設計されている：解析チームの深さでの逐行の導出（第 VI 部）、明示された入力からあらゆる数が再現可能な、固定され較正されたシミュレーション（第 39 節）、再解釈カード（付録 M）、そして判定を二つの千人規模のコラボレーションに委ねる反証子である。主張の運命は著者の権威にかかってはいない — 構成上、それは ATLAS と CMS にかかっている。

反論 10 (O-KK-10) (ポパー流の帳簿係)

「シナリオ A は死に、理論は生き延びた。それはすでに一つの反証を吸収したということである — 典型的な退行的研究プログラムだ。」

応答。退行的なプログラムは自由度を加える ことで反証を吸収する；本プログラムは自由度を 費やした。この二分法は事前に述べられた離散的な二者択一であり、質量もレートも比較の前に公表されていた（第 10.4 節）；一方の角を排除したことは事前登録された問いに答え（スロートのベクトルは複合である）、生き残ったほうをより少なくではなく より 露出させた — 一つのシナリオ、一つの質量、一つのレート、第三の選択肢はない。ラカトシュの試金石は、その調整が何か新しいことを予言したかどうかである：ここでは、生き残ったシナリオの縮退したクラスターとその 8.7 fb のレートは、初めから机上にあった。

Q 質量と微細構造

反論 11 (O-KK-11) (誤差棒懐疑派)

「3.849 TeV についての理論不確かさはいくらか。あらゆる予言には誤差棒が必要である。」

応答。重心は CODATA 定数と一つの整数による閉じた形であり、したがってその 理論的 誤差はシナリオ内部の相互作用補正 $O(1/K) \lesssim 3\%$ である（第 10.4 節）；明示された窓 ± 0.10 TeV は 実験的 なものであり（分解能と広がり）、予言ではなく探索が許容幅を定めるように選ばれている。理論の帯が図中で最も広いものであるという通常の状態と対比せよ：ここでは予言が解析中で最も鋭い対象であり、第 9.1 節のアンカー段落は、それがどの定数を消費するかを正確に述べている。

反論 12 (O-KK-12) (隣接整数懐疑派)

「3.85 TeV が排除されれば、 K は実は 34 か 36 であったと発見するのであろう。」

応答。そのような手は存在しない。 $K = 35$ は当てはめられた指数ではなく、 $(M, N, L; J) = (1, 3, 5; 7)$ を伴う $K = LJ = M^2 + N^2 + L^2$ の閉包である：隣接する整数はディオファントス恒等式それ自体を壊し、仮にその破壊を認めたとしても、 $e^{\pm 1}$ は質量を 2.7 の因子だけ — 1.4 あるいは 10.5 TeV へと — 動かし、

すでに検証された $v = M_{\text{lock}}(2/5)^3 = 246 \text{ GeV}$ を同じ因子で破壊する。この整数がコホート全体で荷重を担っているのは、まさにそれがここで密かに再交渉されえないようにするためである。

反論 13 (O-KK-13) (縮退懐疑派)

「厳密な質量縮退 $m_{Z'_B} = m_{G_1}$ は 15% の幅の下では検証不可能である — ただ乗りの奇跡だ。」

応答。縮退は定理であり (ディリクレ・ベクトルの零点はグラビトンのそれである、T-KK-2、段階 3')、二通りに検証可能である: 幅のスケールを超えて分解された分裂はそれを即座に反証し、分解されない場合でさえ、これらの状態は チャンネル分解 によって分離する — スピン 2 対スピン 1 の角度構造、カラー八重項対一重項の生成、そして O-KK-28 の干渉の二分法である — すなわち第 IX 部の FCC-hh 展開プログラムである; バリオンベクトルそれ自体は、端点クォークによってツリー準位で生成されないため、そのプログラムには、レプトン機械がそれを作れるところでのみ参入する — ミューオン・コライダーでは、そのレプトンへのループ準位の結合が $t\bar{t}$ における s チャンネルの線を与え、幅と $t\bar{t}$ /ダイジェットのパターンによって KK 光子のそれから分離可能である (第 50.3 節) — 一方で、そのアノマリー誘起のダイボソン・チャンネル (O-KK-59) がその崩壊を名指す。ただ乗りどころか、縮退は単一のクリーンな測定がキルしうる数少ない主張の一つである。

反論 14 (O-KK-14) (硬化懐疑派)

「『複合硬化』シナリオは、2.46 TeV が困難に陥ったのちに穿たれた脱出口のように読める。そしてはっきり言えば: N 個の読みからなる離散的なメニューをもつ理論は N 個の命をもつ。あなたには二つあり、一つを費やした。第二の死が受け入れられるであろうと、なぜ誰かが信じねばならないのか。」

応答。記録は逆の順序を示している: 自由場の根の比が「非空間的スペクトルにおいて生き延びる必要はない」という警告は構成に内在するものであり (第 10.4 節、段階 6)、二分法は 両方のレートとともに 公表され — 見逃しようのないシナリオ A の 224 fb を含めてであるが、これは脱出口を作るときに引用するような数ではおよそない — そして排除はその後、データが到達しうる角に対して、この同じ論文の中で実行された (第 31 節)。脱出口とは静かに通り抜けるものである; これは公然と歩み通られた戸口であり、しかるのちに扉は門で閉ざされた。より強い形の非難については: メニューはちょうど二つの項目をもち、いずれもそのレートとともに事前に述べられており、計算が同定する二分法の内部に第三の読みは存在しない (量子的完備化にわたる完全性定理は主張されていない) — シナリオ B は多くの避難所のうちの一つではなく、事前に宣言された二者択一の唯一の生存者である。本論文自身の反証子はこれを織り込んで: 第 31.5 節のキル窓はシナリオ B に対して書かれており、そこでのヌルは 終末的 である — 退却すべきシナリオ C は存在せず、シナリオ A を公然と退役させた再検定 (第 31 節) は、このプログラムが自らの死を活字で受け入れることの、現に立つ実証である。

反論 15 (O-KK-15) (借用数学懐疑派)

「あらゆる頁でランダル・サンドラムと縁を切っておきながら、その厳密なベッセル問題を解いている。」

応答。意図的にである: 計量が共有されているがゆえに固有値問題も共有されており (定理 2)、共有された数学こそが、ワープした文献に通じた者ならば誰にでも導出を検査可能にするものである。異なるのは存在論であり、第 5.5 節は、その差異がどこで観測可能な地帯を払うかを項目化している: ラジオンの不在、整数の長さ、共鳴の複合的な読み (これこそがシナリオの二分法を物理的な問いにしたものである)、多場のクラスタリング、そして半径ではなく選択則によって支配される角度部門である。RS のベッセル関数を借りながらその空間的な第五次元を退けることは、熱伝導からフーリエ解析を借りることと同程度にしか矛盾していない。

反論 16 (O-KK-16) (帯はダイアルだとする懐疑派)

「 $\Gamma/m = 14.6\%$ は $r_{tr} \in [4, 5]$ に依拠している。帯とは婉曲語法を伴うダイアルである。」

応答。ダイアルとはデータを見た のちに 行使される連続的な自由度である; 帯は 前もって 述べられた導出条件付きの括弧であり、その中心値、その端点、そしてその下流の帰結 (幅、BR の指紋、 P_t の帯) はす

べてともに公表されている (第 VI 部)。決定的なことに、帯は自己閉包的である: HL-LHC のラインシェイプ・フィットは Γ/m を数パーセントで、 P_t を ± 0.08 で測定し、この括弧を避難所ではなく交差検証へと変える (付録 O)。自らの執行期日を公表するダイアルは、ダイアルとしては大したものではない。

反論 17 (O-KK-17) (不在懷疑派)

「角度サテライトの 不在 を予言することは、安上がりで反証不可能な否定である。」

応答。この反論は、以前の改訂がそれに与えた答えよりも優れており、答えは変わった。不在はグレードを高く付けすぎていた: 正準計量では $\ell = \pm 1$ のパートナーは統一スケールにあるのではなく、クラスターのすぐ上の導出されたオフセットにあり (式 (12))、本論文がいま登録するものは肯定的かつ具体的である — オフセット、二重縮退、そして θ に依存しないカレントによる単独生成からパートナーを締め出す選択則である。到達可能な半径をもつ空間的な第六次元は、そのパートナーを基底状態と同じだけ自由に生成する; 軽いクォークからの単独生成でそれの一つを見つければ非空間的な読みは一撃で反証され、導出されたものとは異なるオフセットでそれの一つを見つければモード方程式が反証される。それは安上がりな否定ではない; それは二つの数と一つの規則である。

反論 18 (O-KK-18) (倍音懷疑派)

「FCC-hh が 7.047 TeV で何も見つけなければ、あなたは理論ではなく推定された結合のせいにするのであろう。」

応答。グレードがこの逃げを先回りして封じている: 位置 は定理級であり (x_2/x_1 、自由度なし)、推定であるのは レート のみであって、第 IX 部はその帰結を前もって述べている — FCC-hh の統計では、同一結合で 10 fb 程度のレートは、結合が一桁抑制されてもなお数千事象が残ることを意味し、したがって 7.047 TeV における真の位置のヌルは、結合を口実にしようとも動径塔をキルする。この約束は、それが強制されうるところに書かれている: そのベッセル比を外す倍音列は、この幾何ではない。

R 結合、レート、抑制

反論 19 (O-KK-19) (好都合な抑制の懷疑家)

「 $\kappa_{gg} = 0.47/K$ は疑わしいほど小さい — グラビトンがあらゆる LHC のヌルから隠れるように仕組まれている。」

応答。出来事の順序がこの作為の告発を退ける: 反証子は結合が計算される前に賭けられており、計算 (系 T-KK-2c、調整すべき入力を持たない閉じたベッセル形) はその後、公表された二光子ヌルを数千倍の因子で事後予言した — 重なりが大きく出ていたならば当惑すべき緊張となっていたはずの結果である。小ささは逃げ道でもない: それは積極的で期日の付いた確約に転化する (FCC-hh において $\sigma(G_1) \approx 0.21$ pb、最初の数週間での発見、あるいはクラスター解釈の反証、第 50.1 節)。状態を永遠に隠す抑制ならば好都合であろう; 状態の日程を組み直し、レートを添えるものは、単なる導出である。

反論 20 (O-KK-20) (厳密ゼロの懷疑家)

「 $\text{BR}(Z'_B \rightarrow \ell\ell) = 0$ が厳密に成り立つことは場の量子論では不可能である: 運動項混合とループが常に何かを生成する。」

応答。正確に述べれば: ゼロは $U(1)_B$ 電荷割り当てのレベルで厳密である — レプトンはバリオン数を持たないので、相殺すべきツリー結合が存在しない。これはモデル構築された Z' の調整されたレプトフォビアよりも既に強い。輻射的な運動項混合は誠実な但し書きであり、小さく紫外領域で計算可能である — しかしそれはハドロン加速器では制限されない。FCC-hh がクラスター質量のダイレプトンに見るものは O-KK-62 の電弱 KK 光子であり、本論文自身の入力ではフレーバーあたりハドロンのクラスター・レート

の 10^{-5} – 10^{-4} の程度の線である (第 50.1 節)。その下にある Z'_B のループ床はそこでは分離できない。したがって主張の操作的な形は、検証可能な場所で述べられる: ミューオン・コライダーにおいて、登録された床を超えるディリクレ・ベクトル由来のレプトン線が — その幅と $t\bar{t}$ /ダイジェットのパターンによって KK 光子のそれから分離可能である — 割り当てを反証する (P-KK-6、P-KK-10)。

反論 21 (O-KK-21) (名称の懐疑家)

「 G_1 をグラビトンと呼ぶが、GG-6 は重力を量子化することがない。どちらなのか。」

応答。付録 G が詳しく答えている; 短く言えば: 「グラビトン」は G_1 を血統によって命名するものであり (それはバルク計量セクターのモードであり、そこからスピン 2 性と応力テンソル結合が来る)、量子重力の職務内容によるものではない。質量を持つスピン 2 共鳴として — RG 解釈では境界理論の複合状態として — その量子的地位は ρ 中間子のそれと同程度に問題がなく、その発見は六次元幾何の証拠となるであろうが、質量ゼロの 4D 重力が量子化されていることを要求も証明もしない。真に深い言明は逆向きに走る: GG-6 においては、量子化そのものが OGGEF 射影の出力であり、グラビトンについても光子についても同様である。

反論 22 (O-KK-22) (なぜトップなのかの懐疑家)

「なぜすべてがトップクォークへ崩壊すべきなのか。トップ愛好は、ダイレプトン限界をかわすためになされた選択の匂いがする。」

応答。トップを重くするのと同じ幾何が、二度使われているのである: フェルミオンの質量と、赤外に局在したクラスターへのその結合とは同一の重なり積分であり、したがって喉の先端に住むがゆえに重い状態が、自動的にクラスターの語りかける相手となる (付録 I)。数値は調整可能ではない — フレーバーあたり $(g_V^2 + g_A^2)/\xi_{UV}^2 \approx 280$ 、これが $t\bar{t}: b\bar{b}: jj \approx 70:3.5:1$ を与える — そして申し立てられた好都合さは両刃である: トップ愛好は信号を実験的に最も難しいクリーンなチャンネルへと移すのであり、限界をかわそうとする者ならば誰もそれを選ばない。

反論 23 (O-KK-23) (メニューの懐疑家)

「 g_B に対する『離散メニュー』は、手順を増やしただけのダイヤルである。」

応答。ダイヤルは連続体である; メニューは四つの値であり、そのそれぞれが名前の付いた数え上げ規則によって生成され、その帰結とともに公表され (Z'_B のレートはクラスター総和の 0.2–6.8% にわたるが、ディリクレ・モード上のレートとしては以後撤回された、第 10.10 節)、開いている間は閉じる条件を明示した補題として登録されていた — $\alpha_s(M_Z)$ を固定したのと同じ GDOS の数え上げである (L-KK-1; 付録 O)。下流のものは何一つメニューの陰に隠れていない: 反証子は八重項が担っており、その結合はいかなるメニューにも載っていない — そしてメニューは今や容量定理によってその三番目の項目で閉じられ、 $g_B = 0.565$ となり、そこから従う第五の力の評決は窓ではなく不在である (第 10.10 節)。

反論 24 (O-KK-24) (符号の懐疑家)

「符号の予言、 $\xi_{UV} < 0$ だと。断面積は符号に盲目である。」

応答。二乗は符号に盲目である; 干渉はそうではない。カラー八重項はグルーオンのカラー・チャンネルを共有するので、符号は干渉項を通じて線形に入り、パラメータのない形状を刻印する: 極の下では増強、上では欠損、そして総和されたスペクトルは 4.9 TeV 付近で標準模型を下回って交差する (第 VI 部、P-KK-4)。符号を反転させれば形状は鏡像となる — テンプレート・フィットが直接測定する区別であり、定量的な図 4 が描くものである。相対符号のレベルで反証可能な BSM 枠組みは少ない; 本枠組みはそうである。

反論 25 (O-KK-25) (精度の銜学者)

「ある箇所では $|\xi_{UV}| \approx 1/\sqrt{K} = 0.169$ と書き、別の箇所では 0.194 と書いている。どちらが予言なのか。」

応答。両方であり、それぞれの明示されたグレードにおいてである: $1/\sqrt{K}$ は K 依存性を示す最低次のスケールリングであり、0.194 は導出されたワープ補正を含む厳密なモード値であって (第 10.4 節)、本論文の

あらゆるレートが用いる数値である。精緻化はいかなる比較よりも前に、導出の方向へ進んだ — 補正はつまみではなく計算された +15% である — そして両者の実際的な開きは、引用したレート帯の遥か内側にある。スケーリングとその厳密な完成形の双方が、それぞれの導出とともに公表されているとき、正しい記述は収束であって曖昧化ではない。

反論 26 (O-KK-26) (隠れチャンネルの懐疑家)

「70:3.5:1 の指紋は、エキゾチックな崩壊チャンネルが存在しないことを仮定している。隠れた状態が一つあるだけでそれは台無しになる。」

応答。ロック・クラスターは導出されたスペクトルの最も低く位置する新構造であり、したがって GG-6 の内部には、それが崩壊していく先はその下に何も存在しない — 指紋は仮定によってではなく構成によって閉じている。それでもなお自然が余分な軽い状態を供給するのであれば、GG-6 のスペクトルは誤りであり、本論文は分岐比の歪みよりも遥かに直接的な根拠で反証される。いずれにせよ指紋はその務めを果たす: それは理論の内部では厳密であり、代替案に対しては診断的である (第 56 節)。

反論 27 (O-KK-27) (洗い流しの懐疑家)

「 $P_t = +0.91$ がパートン・シャワー、ハドロン化、再構成を生き延びることは決してない。」

応答。トップ偏極が特別であるのは、まさにトップがハドロン化する前に崩壊するからである: 荷電レプトンは最大分析能を持つスピン解析子であり、その角分布は再構成レベルまで生き残る。だからこそ ATLAS と CMS は今日すでにトップ偏極の測定を公表しているのである。第 VI 部がレプトン解析子の導出を担い、第 VIII 部が純度補正された統計を 2033 年までに $\delta P_t = 0.14$ 、2041 年までに 0.08 へと外挿する — 導出された帯 $[+0.88, +0.92]$ の存在だけでなく、その内部を分解するのに十分である。

反論 28 (O-KK-28) (干渉の整合性の懐疑家)

「QCD との干渉は同一のカラー・フローを要求する。どの状態が干渉するのかを実際に確認したのか。」

応答。確認した。そしてその答えはそれ自体が診断的である。カラー八重項は s チャンネル・グルーオンと同一のカラー・チャンネルに入るので、コヒーレントに干渉する (振幅の代数は第 VI 部に書き下されている); カラー一重項の Z'_B は QCD とはまったく干渉せず — 八重項とも干渉しない。同じカラー・トレースが $g^* - Z'_B$ の交差項を消すからであり、これがクラスターのレートを非コヒーレントに総和してよい理由である。したがってクラスターは二成分のラインシェイプを予言する — 干渉する八重項に、同じ質量の干渉しない一重項が加わったもの — そして一つのピークの内部でのこの是非の二分法は、FCC-hh のアンフォールディングが縮退した対を分離するために用いるもう一つの取っ手である (O-KK-13、第 50.1 節)。

S シミュレーションとその統計

反論 29 (O-KK-29) (つじつま合わせ因子の懐疑家)

「 $F_{\text{cal}} = 4.33$ は名前を変えたつじつま合わせ因子である。」

応答。つじつま合わせ因子は望みの答えを生むために選ばれる; F_{cal} は既に公表された答えに対して測定されている: 二つの質量で注入された狭い試験信号が、相互に整合的な因子 (4.40 と 4.27) で ATLAS の期待限界を再現し、較正された枠組みはその後 15% 幅の限界を 8.4 fb で与え、ATLAS 自身の狭いテンプレートと広いテンプレートの間に正しく順序付けられる — これは調整可能な入力を持たない順序の検査であって、広く干渉する形状への移送の測定ではなく、第 31.4 節はそれを唯一の定量化されていない段階として名指している (第 41 節)。その適用は構成上保守的であり (排除から導かれ、発見に適用される)、それが禁じる唯一の方法論的誘惑 — 事後フィット不確かさの上に二重のプロファイリングを重ねること — は同じ節に記録されている。

反論 30 (O-KK-30) (系統誤差楽観の懐疑家)

「背景の系統誤差を半減させるのは願望であってシナリオではない。」

応答。半減は標準的な HL-LHC 外挿の慣行であり (Cepeda et al., 2019)、第 41.1 節がそれを分解している: 制御領域とテンプレート統計の成分は算術だけで $1/\sqrt{L}$ として縮小し (計画全体で $\times 2.8-4.9$)、物体較正はデータ駆動で既知の床へ向けて改善し、実際の作業を要するのは理論モデリングの類だけである。本論文はまた凍結シナリオ — 十五年間何一つ改善しない — を悲観的な限界として引用し、2026 年末においては「改善」のおよそ半分が Run-3 データセット自体によって自動的に得られることを注記する。現実には二つの公表された曲線の間に住む; どちらも願望ではない。

反論 31 (O-KK-31) (ヒントはどこにあるのかの懐疑家)

「 $2.5-3.3\sigma$ がテープ上にあると主張する。ATLAS はその領域を解析し、何も見なかった。どちらかが間違っている。」

応答。どちらも間違っていない — なぜなら「その領域を解析した」と「この解析を走らせた」とことは、本論文が定量化する二つの因子だけ異なるからである。公表された探索は、コヒーレントな 15% 幅の形状に対して不整合なテンプレートを用い (レート感度における ~ 3 の希釈因子、第 44.2 節)、浮動する背景が吸収してしまう粗いビン分けの計数を用いた (第 42 節); それらの条件下では、予言された信号は彼ら自身の引用値において局所的に 2σ 未満の揺らぎを生む — 「何も見なかった」と完全に整合する。実際、第 31 節は、信号が存在する状態でこの枠組みが ATLAS の期待限界を再現し、期待される超過が彼らの公表した排除のすぐ下に位置することを示す; 事後フィット背景と同じかそれ以下にある観測収量 ($\hat{\mu} = 0$) に対しては、同じ機構が予言より ~ 1.25 倍下の観測限界を返す — 本論文はそれも印刷している。主張は ATLAS がバンプを見落としたということではない; 異なる設計のフィットが、彼らの設計が積分してしまうものを抽出するということである。

反論 32 (O-KK-32) (大域的試行回数の懐疑家)

「探索範囲効果はないのか。あなたのコホートは数十の予言を行っている。二十二本の論文にわたれば、何かがフロンティアの近くに来るのは必然だった。」

応答。探索範囲効果 (look-elsewhere) は決定規則の性質であって、著者の生産性の性質ではない: 問題となっている発見の主張は、単一の事前登録された質量点と単一の事前明示された検定であり、その局所 p 値がその大域値である (第 44.1 節)。論文横断の試行回数が問題になるのは、計画の存続が多数の予言のうち一つだけが成功することを要求する場合である; コホートの構造はその逆であり — 連言的で、整数を共有し、それゆえ失敗は伝播する (O-KK-4)。予言がすべて成り立たねばならない枠組みは、そのいずれについても試行回数の割引を支払わない; その代わりに、いずれか一つがそれを殺しうるという遥かに高い代償を支払う。

反論 33 (O-KK-33) (漸近論の懐疑家)

「アシモフ公式は計数が小さいと破綻するが、あなたの裾のビンは小さい。」

応答。有意性を担う解析ビンは、最小のスナップショットにおいてすら $b \gtrsim 19$ を持ち、そこから増えていく (表 26)。これは検証済みのアシモフ領域の内部である; 5.6 TeV を超える真に疎な表示用ビンは、引用された Z に何も寄与しない。残る漸近誤差は較正因子に対して二次的であり、その較正因子は ATLAS の完全なトイに基づく機構に対して測定されたものであるから、まさにそのような効果を吸収している (第 41 節)。

反論 34 (O-KK-34) (関連の懐疑家)

「ビンごとの系統誤差を無相関として扱うのは誤りであり、関連した背景が広い信号をよりよく吸収することは誰もが知っている。」

応答。物理については同意する — だからこそ本論文は無相関モデルだけに依拠してはいない。関連に駆動される吸収は明示的に実演されており (第 42 節の二パラメータ・プロファイルは窓の信号の 75% を食う)、その完全機構における大きさこそ F_{cal} が捉えるべく測定されたものであり、但し書き台帳がその取

り扱いを記録している（項目 5、第 45 節）。したがって引用された有意性は、相関を実際に利用するフィットに対して較正されている；ビンゴとのモデルは帳簿付けであって、主張ではない。

反論 35 (O-KK-35) (OWNGOAL の懐疑家)

「あなた自身のサイドバンド汚染の警告が、あなた自身の感度の数値を掘り崩している。」

応答。数値は既に、その警告が触れない地盤の上に立っている：それらは ATLAS の事後フィット不確かさを用いており、それは実際のフィットの自由度を符号化しており、 F_{cal} によって較正されている（第 41 節）。警告（第 44.5 節）は将来の専用フィットのための設計指針である — 導出された汚染がパーセント水準まで落ちる 1 TeV 以下で規格化を固定せよ — そして二パラメータの実演が、それを無視した場合の代償を定量化する。罫に旗を立て、その値段を付ける論文は、その罫によって掘り崩されはしない；それこそが、その罫が回避されることになる理由である。

反論 36 (O-KK-36) (組み合わせの懐疑家)

「あなたの ATLAS+CMS の $\sqrt{2}$ は実験が無相関であることを仮定している。理論の系統誤差は両者に共通である。」

応答。だからこそ $\sqrt{2}$ は決して単独で引用されない：表 27 は両極端を挟んでいる — 完全に相関（2026 年末改善： 4.1σ ）と完全に無相関（ 4.7σ ） — 現実はその間にあるという言明とともにであり、物理的な仕分けも与えられている（モデリング：相関あり；検出器較正と制御領域統計：なし）。本論文のあらゆる見出し数値は、楽観的な端ではなく、この挟み込みを担っている。

反論 37 (O-KK-37) (シードの懐疑家)

「擬似データに乱数シードが一つ。都合のよい揺らぎを摘まみ食いしたのではないか。」

応答。引用されたあらゆる有意性はアシモフ（期待中央値）量であり、期待値から計算され、いかなるシードにも依存しない；唯一の固定シードが生成するのはスペクトル図の表示点だけであって、そのことは但し書き台帳（項目 8）にそう明記されており、保管されたワークブックから再現可能である。シードを変えれば点は誤差棒の内部で動く；どの表のどの数値も動かない。

反論 38 (O-KK-38) (PDF の年代の懐疑家)

「CTEQ6 は二十年前のものである。現代の PDF はあなたのレートを動かさう。」

応答。動かさう。そして引用された帯が既にその程度を述べている：八重項レートに対する $[7.0\text{--}12]$ fb の開きは、まさにこの類の不確かさに支配されており、あらゆる結論 — フロンティアの位置、キル窓、そして日程 — は中心値ではなく帯に対して述べられている。定理級の内容を担う形状は、絶対レートの裾よりも PDF の世代を越えて遥かに安定である；そして本論文は、問題を無かったことにするのではなく、恒久的な解決策（LHeC 級の高 x 入力、第 50.4 節）を名指している。

T 還元可能性、非空間的次元、そして近隣の枠組み

反論 39 (O-KK-39) (カテゴリーの懐疑家)

「次元とは、その中を動くことのできるもののことである。『スケール次元』はカテゴリー錯誤である。」

応答。その基準によれば時間もカテゴリー錯誤である — 空間的な意味で時間の中を「動く」ことは誰にもできないが、ミンコフスキーの融合 (Minkowski, 1908) は議論の対象ではない。規律ある基準は次元をその対称性生成子によって分類するものであり、第 5.5 節がそれを適用する：並進が空間と時間を生成し；ディラレーションが I_r を生成し；コンパクトな電荷が S_θ^1 を生成する。 r に沿った「運動」とは変性 — くりこみスケールの変化 — であり、これは場の理論の何ものにも劣らず物理的である；ただしそれは、歩行ではない。

反論 40 (O-KK-40) (ホログラフィーの懐疑家)

「これは AdS/CFT の看板の掛け替えである: 動径座標が RG スケールであることは誰もが知っている。」

応答。ホログラフィーにおいては、その同一視は二つの完全な記述の間の双対性であり、そのいずれもが基本的なものとみなされうる; GG-6 においてそれは単一の文字どおりの構成であり — 双対化すべき空間的バルクの記述も、ラディオンも、調整可能な長さも、コンパクト化のランドスケープも存在しない (表 2)。この区別は観測可能な地代を支払う: 真正の AdS₅ 双対であれば通常の RS 現象論 (ラディオン、調整可能な kr_c 、単一の極) を伴うはずである; GG-6 はその各項目を禁じ、その禁止は予言リストに載っている (P-KK-7、P-KK-9)。看板の掛け替えは名前を変える; こちらは実験が何を見るはずかを変える。

反論 41 (O-KK-41) (超対称性の懐疑家)

「どこにも超対称性がないのか。真面目な紫外物理はそれを必要とする。」

応答。GG-6 においてその不在は好みではなく定理である: 超電荷は並進の平方根を取らねばならないが、二つの余剰方向は差し出すべきものを何も持たない — ディラレーションとコンパクトな電荷は超対称パートナーへの拡張を許さない (第 5.5 節; 代数的な言明は Arisaka, 2026, A2-GG6 において定理級である)。したがって枠組みは、超対称パートナー探索の五十年が届けてきたヌルを予言するのであって、その発見を永遠に先送りするのではない — LHC の SUSY の沈黙が何かに有利な証拠として数えられる数少ない解釈の一つである。(注意深い読者は抜け穴の類に気づくであろう: 並進の平方根を取らないエキゾチックな超代数である。それらは数学としては存在する; それらが届けられないのは、超対称性を代数ではなく物理たらしめた現象論的内容 — スカラー質量を保護する超対称パートナー — であり、したがって主張は重要な場所で成り立っている。)

反論 42 (O-KK-42) (第六次元の懐疑家)

「誠実な 6D 理論はいずれも第二の KK 塔を持つ。θ モードはどこにあるのか。」

応答。クラスターのすぐ上である。ただしそれらが伝播するならば — 正準計量上のモード方程式により、基底質量の 1.07–1.17 倍のところに (式 (12)) — そして θ 運動量の保存により単一生成からは外れる; 以前の改訂ではそれらを大統一スケールに置いていたが、その配置は撤回されている。位相円は依然として位相幾何学的であり、回すべき半径モジュラスを持たない: $R_\theta = 1$ は無次元の角度に対する規約であり、これがオフセットがスキャンではなく導出された数値である理由である。観測可能な内容は本論文が登録する対である: 導出された TeV 位置にある動径塔 (P-KK-8) と、いかなる θ 非依存のカレントも単独では生成しない導出されたオフセットにある角度パートナー (P-KK-7) である。空間的な 6D 構成はそのパートナーを自由に生成する; それが識別であり、同じ実験で利用可能である。

反論 43 (O-KK-43) (安定化の懐疑家)

「ラディオンなしに、何が喉の崩壊や暴走を防ぐのか。」

応答。崩壊と暴走はサイズの運命である; 喉の長さは数である — カスケードの整数 $K = 35$ である — そして数には、沿って走るべき連続変形が存在しない (第 5.5 節; Arisaka, 2026, A4-Euclid)。何がそれを安定化するのかと問うことは、QCD においてカラーの数を何が安定化するのかと問うことである。この主張は過激だが検証可能である: 安定化されたモジュラスは常にスペクトルにスカラーを残し、ヒッグス結合に指紋を残すので、ヒッグス精密測定のスル (P-KK-9) こそが「モジュラスなし」と「隠れたモジュラス」とを区別する実験である。

反論 44 (O-KK-44) (欠けたパートナーの懐疑家)

「ワープ模型は KK フェルミオン、KK W'/Z' 、カストディアンを伴う。あなたのスペクトルは疑わしいほど疎に見える。」

応答。疎であることは選り取られたものではなく強制されたものである: 低く位置する内容は、Arisaka (2026, A2-GG6) のバルク群に実際に存在する場の最低動径モードであり、その群はスペクトルを埋めるために組み立てられたのではなく導出されたものである — 四メンバーのクラスター、八重項の境界値問題

がその質量に置く電弱 KK W 、 Z および光子 (O-KK-62)、コンパニオンがロックに置くコセット (3,2) スカラー、そして十二個のコセット・ベクトルであり、その動径条件はアノマリー・コンパニオンが述べるべきものである (O-KK-69)。カストーディアル・パートナーは存在せず、それは慰めではない: バルク群は $SU(2)_R$ を含まないので、八重項の質量にある電弱塔はその T パラメータ露出を保護されないまま担っており、キルグレードにある (O-KK-68)。より重い構造は、導出されたあるいは双対的に計算可能な位置に存在する (動径反復、第 IX 部); 存在しないのは、探索が状態を求めるたびにそれを付け加えるというモデル構築者の自由である。

反論 45 (O-KK-45) (ただ飯なしの懐疑家)

「ランドスケープなし、モジュライなし、微調整なし — それはあなたが恣意性をすべて『憲法』に隠したからである。昼食はただではない。」

応答。そのとおりであり、本論文の先行論文自身がそう述べている: 強制された低エネルギー構造の代価は憲法的前提の強さであり、Arisaka (2026, A2-GG6) にそのものとして明示されている (定理 0 の仮定は密輸されるのではなく列挙されている)。適切な比較は、それぞれの計画がその還元不能な仮定をどこに置くかである — 到達不能なトランスプランク・スケールに置くのか、それとも公表から博士課程一つ分のうちに 3.85 TeV に帰結が着地する公理に置くのか。昼食が無料であることは決してない; 少なくともこの昼食には、LHC が監査しうる請求書が付いてくる。

反論 46 (O-KK-46) (好都合な分割の懐疑家)

「動径塔は検証可能、角度塔は GUT スケール — この分割は都合よく、あなたが生き延びられるものだけを露出させている。」

応答。この分割は好都合さとは逆向きに走る: それは動径塔を、LHC が今まさに到達するエネルギーで、現在のランが殺しうるレートとともに露出させる (F-KK-2B)。一方で角度セクターはそれ自身の反証可能な主張を行う — 導出されたオフセットと選択則 (P-KK-7) であり、この反論の前提は本論文が撤回した解釈である — そして同じコンパクト方向は、そのテンソル残留物、すなわち Arisaka (2026, C1-Kaxion) の $8.1 \mu\text{eV}$ カクシオンを通じてコホートの他所で読み取られており、活発なハロスコープ試験の下にある。生き延びるために最適化された構成であれば、動径塔を 40 TeV に置いたであろう; こちらはそれをビームの下に置いた。

反論 47 (O-KK-47) (アノマリーの懐疑家)

「バリオン数を単純にゲージ化することはできない。標準模型のフェルミオン内容では、混合三角形 $U(1)_B-SU(2)_L^2$ および $U(1)_B-U(1)_Y^2$ がゼロでない (三世代にわたって $\pm 3/2$) ; 誠実な Z'_B 模型はいずれも、新しいカイラルな『アノマロン』フェルミオンでそれを買収するが、それらは今度は質量、シグネチャー、そして固有の問題を持つ。あなたのものはどこにあるのか。」

応答。どこにもない — なぜならそれらは存在せず、その不在は見落としではなく定理だからである。前提は正しい: 標準模型だけであれば $A[B-SU(2)_L^2] = +\frac{3}{2}$ かつ $A[B-Y^2] = -\frac{3}{2}$ であり (重力的、三次、および B^2Y の三角形は恒等的に消える)、慣例的な処方には確かにアノマロン物質である。しかし GG-6 においては、境界スペクトルはバリオン電荷を手で付け加えた標準模型ではない: それは OGN-5 でロックされた電荷格子上の、分裂していない $SU(5)$ 多重項から降下し、そのスペクトルの微視的アノマリー多項式は階数 1 に因数分解する (GG-A3-BI6、定理 T-BI6-6.1)。生き残る二つの混合三角形は BI-6 アノマリー行列の交差ブロックの境界射影であり、単一のグリーン-シュワルツ相殺項 $\int B_2 \wedge X_4$ のゲージ変分が、補償結合を $SU(2)_L \times U(1)_Y \subset SU(5)$ にわたって要求される比率ちょうどで分割しながら、それらをインフローによって相殺する (Arisaka, 2026, A3-BI6、境界混合アノマリーの小節)。 B_2 の四次元残留物は誰にも食べられない — それは暗黒物質コンパニオンのカクシオンとして生き残る — なぜなら終端はシュテュッケルベルクの対形成ではなく境界条件だからである: $U(1)_B$ ゼロモードが取り除かれた状態では、質量ゼロの四次元場でアノマリーを担うものは存在せず、質量を持つ塔のインフローによる整合性はアノマリー・

コンパニオンの登録された検査である (O13)。コライダーにおける系に注意されたい。それはそれ自体が一つの反証子である: アノマロン模型は必然的に、到達可能な範囲を新しい荷電カイラル状態で埋めるが、GG-6 はそれらを禁じる — 3.85-TeV の Z' を伴うアノマリー相殺フェルミオンの発見は、きれいなヌルと同じくらい確実に、この実装に不利に数えられるであろう。

U コホート依存性と立ち位置

反論 48 (O-KK-48) (トランプの家の懐疑論者)

「A9 の電弱導出が失敗すれば、本論文もそれとともに倒れる。」

応答。そのとおりである — 意図的にそうしてある。過剰拘束 $v = M_{\text{lock}}(2/5)^3$ は、二つの論文が一つの整数と一つの運命を共有することを意味する; したがって 3.85 TeV でのコライダー・ヌルは A9 を傷つけ、A9 の連鎖の失敗は本論文を傷つける; その露出は第 59 節に双方向で述べてある。トランプの家は脆弱でありかつ部分ごとには反証不可能である; この構造が脆弱なのは、全体として反証可能であるがゆえである — プログラム全体が要点とみなす性質である。

反論 49 (O-KK-49) (解析コストの懐疑論者)

「なぜコラボレーションが、arXiv のみに存在する単著のベンチマークに人年規模の労力を費やさねばならないのか。」

応答。要求には値札がつけられており、見返りは非対称だからである。求めているのは、既に記録されたデータに対する既存のマージド SR 解析に一つのテンプレートを追加することであり — 第 VIII 部の設計図によれば学位論文規模である — そして成果物はあらゆる帰結のもとで価値がある: 任意の広幅トップ親和性共鳴に対する世界最良の制限、再利用可能な干渉考慮テンプレート、そして分布の裾において、コライダー史上初の標準模型を超える粒子である。コラボレーションは、はるかに弱い認識論的立ち位置しか持たないベンチマーク (導出を伴わない固定結合スキャン) を日常的な慣行として再解釈している; 公表された発見カレンダーを備えたゼロパラメータの事前登録された標的は、その基準を余裕をもって上回る。

反論 50 (O-KK-50) (閉ループの懐疑論者)

「コホートは自分自身を引用している。ループを成す 22 編の論文は外部検証ではない。」

応答。内部引用が担うのは導出である; 検証は構成上外部にあり、参考文献部のセクション B がそれらを列挙している: ATLAS と CMS の測定、HEPData の記録、公表された K 因子、PDG の台帳、戦略文書である。コホートと現実とのあらゆる接触は、コホートが所有しない装置の上で起こる — 最も決定的なのは反証子そのものであり、その判定はプログラムに利害を持たない三千人によって署名される。

反論 51 (O-KK-51) (ペースの懐疑論者)

「およそ一年で 22 編。深さには数十年を要する; これは速書きである。」

応答。ペースはプロセスについての証拠であって正しさについての証拠ではなく、本論文は両者を分離できるように構成されている: その連鎖は、引用された定理を与えられれば局所的に検証可能である — 読者は T-KK-1 を一午後で、T-KK-2 の境界値問題を一日で、シミュレーションをアーカイブされたワークブックから検証できる — コホートの生産史を裁定することなしにである。深さが真に未完成であるところでは、本論文は自身の声でそう述べている (未解決の補題、見積もり、付録 O)。頁の上の導出を判断せよ; その背後のカレンダーは伝記である。

反論 52 (O-KK-52) (スケジュールの懐疑論者)

「あなたのカレンダーは、自然法則のごとく遅延する CERN のスケジュールに寄りかかっている。」

応答。本論文のあらゆる決定点は積分ルミノシティで述べられており、暦年は出典で引用された公式の計画文書を通してのみ付されている (第 39.3 節、第 IX 部)。LS3 が延びれば、 1.3 ab^{-1} の五シグマ交差は

実時間では遅れて到来し、そしてデータ上はまったく同じ点で到来する; F-KK-2B は、その逆アトバーンが存在しさえすれば期待される $\simeq 0.5 \text{ ab}^{-1}$ で発火する。遅延は判定を遅らせる; それを薄めることはできない。

反論 53 (O-KK-53) (帰属の懐疑論者)

「ATLAS が何らかの 3.9-TeV トップ親和性八重項を見つければ、あらゆるモデル構築者がそれを自分のものだ」と主張するだろう。発見は GG-6 について何も証明しない。」

応答。質量のみであれば、そのとおりである — だからこそ本論文は質量のみに賭けることをしない。登録された指紋は連言的である: 一つの質量におけるディリクレ・ベクトルとグラビトンの縮退、ツリーレベルのレプトフォビア、SM 以下への交差を伴う導出された干渉の符号、 $[+0.88, +0.92]$ にある P_t 、単一生成から外された角度パートナー、そして質量の $1.831\times$ におけるオーバートーンである (P-KK-2 から P-KK-8 まで)。第 56 節は近隣の枠組みをそのリストに沿って検討する; いずれも複数の条項で失格となり、比が固定された第二の族を予言するものは一つもない。模倣者はバンプには押しかけられる; スペクトルには押しかけられない。

V 実験の実務

反論 54 (O-KK-54) (実務家)

「 $S/B \sim 1$ における広幅の $\Gamma/m = 15\%$ 共鳴は、 $t\bar{t}$ 共鳴解析が最も苦手とするものにほかならない。『ただ再解析せよ』は安直である。」

応答。広幅かつ干渉を伴う場合が難しいケースであることには同意する — だからこそ本論文は、それを身振りで示すのではなく解析設計の作業そのものを行っている: アンカー解析はカットごとに読まれ (第 38 節)、テンプレートはその符号構造とともに完全に指定され (第 VI 部)、フィット設計の罫は特定され値札をつけられ (第 44.5 節)、統計は公表された機構に較正され (第 41 節)、そして連鎖全体が再解釈カードに梱包されている (付録 M)。「ただ再解析せよ」は安直であろう; 「この作り込まれた設計図に沿って再解析せよ」は費用の見積もられた提案である。

反論 55 (O-KK-55) (テンプレート検証の懐疑論者)

「干渉を考慮したテンプレートは検証が難しいことで悪名高い。テンプレートが正しいと我々はどうして分かるのか。」

応答。独立な取っ手が三つある。テンプレートの形状はフィットそのものの内部で反証可能である — 符号は自由に浮かせてあり、データが選ぶ (誤った符号が選好されれば、反証されるのは P-KK-4 であって解析ではない); その規格化領域は、導出された汚染が証明可能な意味で無視できる場所 ($\sim 1 \text{ TeV}$ 以下、第 44.5 節) で検証される; そしてその理論系統誤差は付録 O で名指しされた NLO の課題であり、アンブラインドの後に議論されるのではなく、その前に発注されている。これは、幅も形状もいかなる導出にも答えを持たない現行の汎用テンプレートよりも強い検証上の立場である。

反論 56 (O-KK-56) (トリガーの懐疑論者)

「2015–2026 年のデータは、あなたの信号を念頭に置かずにトリガーされた。テープ上にあるものが何であれ、それを含んでいないかもしれない。」

応答。運動学的連鎖がこれを決着させる (第 38.2 節): 3.85-TeV の崩壊は、26–28 GeV に閾値を置く単一レプトン・トリガーへ $\sim 500 \text{ GeV}$ のレプトンを届ける — 信号は 2015 年以来、本質的に 100% のトリガー効率でテープ上へ滑り込み続けており、しかも公表された $t\bar{t}$ 探索が既に解析しているのと同じストリームにおいてである。表 23 のスカウティングおよび縮約ストリームの提案は、プログラムの他の片隅に対する将来の保険であって、本件の前提条件ではない。

反論 57 (O-KK-57) (ガバナンスの懐疑論者)

「共同で事前登録された探索を誰が『所有』するのか。ATLAS と CMS は共同解析を行わない。」

応答。ここでは共同解析は何も要求されていない: カード (付録 M) はコラボレーション中立であり、各実験は自身のデータに対して自身のフィットを走らせ、統合はヒッグス発見期および W 質量統合の確立された先例に従う — 独立な解析を行い、その後統計的統合を共同で行うのであり、表 27 の相関ブラケットは統合委員会が直面するであろう選択肢をちょうど張っている。事前登録は公開テンプレートのうちに存在するのであって、誰かのガバナンス図のうちにあるのではない。

反論 58 (O-KK-58) (最後まで立っている懐疑論者)

「あなたの枠組みが正しいなら、証拠は誰もが見過ごしたまま何年もテープ上に置かれていたことになる。それはいかなる方程式よりも信じがたい。」

応答。その先例に比べれば、信じがたさはむしろ小さいはずである。 Ω^- は、誰かが何を走査すべきかを知るまで泡箱写真の中に座っていた; CMB はベル研究所のホーンの中に雑音として存在していた; ペンタクォークは LHCb 自身の記録データの中に何年もの運転にわたって隠れていた。記録されていることと抽出されていることは同じではない: 抽出にはテンプレートが必要であり、第 44.2 節は、公表されたテンプレートがこの信号からどれだけ隔たっているかを正確に定量している (レートで ~ 3 の因子、加えて第 42 節の吸収)。主張は、数千人の物理学者が不注意であったということではない; いかなる理論も指定しなかった信号のために解析を走らせる者はいない、ということである — そしてまさにそれこそが、本論文が変えるために存在しているものである。

反論 59 (O-KK-59) (モード関数の監査人)

「あなたの Z'_B の結合、幅、レートはノイマン・モードの上で計算された。ディリクレ・モードは、あなたのクォークが住む端点で消える。」

応答。譲歩する; そして本論文は今や定理のところでそう述べている (T-KK-2、ステップ 3')。バリオン的ゼロモードを取り除く終端はディリクレ条件である; モード関数に読み込めば、それは Z'_B をちょうど M_{lock} に置き — J_1 の零点はグラビトンのものである — その端点振幅を殺す: e^{-K} の全次数で $f_1^{(B)}(0) = 0$ 、また恒等的に $f_1^{(B)}(K) = 0$ である。端点結合 $\xi_{UV} = -0.194$ と $\xi_{IR} = 8.37$ はノイマン八重項のみに属し、それらの上に築かれた Z'_B の数値 — $0.030 \times (g_B/0.2)^2 \text{ fb}$, 0.18 fb , $\Gamma = 123 \text{ GeV}$ 、クラスターの 2.0%、四次元のライバルに対する同条件比較の 16 と 90 — はレートとしては撤回され、上限の記録として保持される。生き残るものは厳密である: 質量であり、両シナリオでグラビトンと縮退している。モードが結合する相手は端点からの変位であり、導出された法則を伴う (赤外端の近傍で $\sqrt{K} f_1^{(B)}(K - \delta) \simeq 32 \delta$, 6.77 で飽和する); その相手はフェルミオンごとの深さであって、Arisaka (2026, A9-SM) のカスケード補題はそれを未解決のまま残している; したがって Z'_B の結合は本論文の登録された未解決項目であり、それに対してはいかなるレートも印刷されない。ノイマン読みでは言えなかった二つのことが従う。この枠組みにはソリーレベルで M_{lock} にクォーク普遍的な線が存在しない — 四次元のゲージ化バリオン数完成に対して利用可能な最も鋭い判別子である — また、インフロー項を通じたアノマリー誘起崩壊 $Z'_B \rightarrow Z\gamma$, ZZ , WW (インフローで相殺された $U(1)_B$ の指紋であり、アノマリー・コンパニオンの未解決問題 O13 の物理である) は、この状態そのものを求める将来の探索が用いるであろうチャンネルである; それらの規格化は同じ未解決項目であり、それらが幅の表に不在であるのはその選択によるのであって、見落としによるのではない。

反論 60 (O-KK-60) (第四のベクトル)

「アノマリー・コンパニオンの条項は $A_{B,\mu}$ のみを名指ししている。バルクは第二のアーベル因子 $U(1)_{Q_i}$ を持つ。そのベクトルはどこにあるのか。」

応答。バリオン的なものの傍らにある。アノマリー・コンパニオンの条項は $U(1)_{Q_i}$ の成分に同じ一対の条件を与える — 四次元成分にディリクレ、円成分にノイマンである — したがって T-KK-2 のステップ 3' により、その第一モードはちょうど M_{lock} に位置し、グラビトンおよびバリオン的ベクトルと縮退し、そ

れらと同じだけ端点カレントから脱結合している。したがってクラスターは四つのメンバーからなり、そのうち二つはツリーレベルで生成されない; その結合は、 Z'_B のそれと同様に、未解決のカスケード深さに対する深さ法則であり (O-KK-59)、四カレント・ロック (Arisaka, 2026, A7-Qi4) の長距離 Q_i カレントは円のホロノミーによって担われるのであって、四次元のゼロモードによってではない。本論文のコライダーに関する結論は変わらない; いずれのディリクレ・メンバーも LHC で生成される状態を追加しないからである。

反論 61 (O-KK-61) (ループの懐疑論者)

「クォークが B と Y の両方を担う場の量子論において、厳密なレプトフォビアは定理ではない。一ループでの運動項混合はあなたの Z'_B にダイレプトン分岐比を与え、あなた自身のキル条項がそれで発火してしまう。」

応答。そのとおりであり、グレードは変更される: レプトフォビアは電荷割り当てのツリーレベルの言明であって、厳密な言明ではない。ゲージ強度のクォーク結合を持つ四次元のレプトフォビク Z' に対して、一ループの Z' -ハイパーチャージ混合はフレーバーあたり 10^{-5} - 10^{-4} の程度のダイレプトン分岐比を与え、それがレプトン・コライダーあるいは FCC-hh のヌルを読むべき床である。ディリクレ・モードの上では、このループ自体がツリー結合と同じ未解決のカスケード深さにわたる重なり積分であり (O-KK-59)、したがって本論文はその床を印刷するのではなく登録し、あらゆるレプトンのキル条項 (P-KK-6, P-KK-10) は今や「登録された床を超えて」と読まれる。同じ混合は同じ床で $Z'_B \rightarrow \nu\bar{\nu}$ を養う — ダイレプトンの幅の傍らにある不可視幅であり、それとともに登録される。以前の改訂の条項は、文字どおりに読めば、標準モデルのループを幾何の反証として数えてしまうものであった; それはグレードの引き上げであり、撤回される。

反論 62 (O-KK-62) (電弱塔の懐疑論者)

「バルクは $SU(2)_L \times U(1)_Y$ も担う。それらの KK モードは八重項の境界値問題に従う。それらはどこにあり、なぜダイレプトン線が存在しないのか。」

応答。それらは八重項とともに位置する。破れていないバルク方向は T-KK-2 のステップ 3 のノイマン問題を担う; したがって最初の電弱 KK モードは各シナリオで g^* と縮退する — データがシナリオ B を選べば M_{lock} において — 八重項の端点振幅を伴い、 g_s の代わりに電弱結合を伴ってである。それらのフェルミオン幅は、八重項のそれとまったく同様にトップによって飽和される: Q_{3L} を $r=1.0$ に、 t_R を 4.5 に置くと、KK 光子のフェルミオン・チャンネルは、ボソン・チャンネルを数える前で、フレーバーあたり $\text{BR}(\ell\ell) \simeq 2.6 \times 10^{-3}$ を伴って $\Gamma/m \simeq 3.8\%$ を与える; 赤外局在ヒッグスは同程度あるいはより大きな幅で $W_L W_L$ (KK Z については Zh) を開く; したがって KK Z は Zh 主導である。表 19 のノイマン基準行からスケールすると、KK 光子は $\simeq 0.26$ fb で生成され、そのダイレプトン・レートはフレーバーあたり $\simeq 7 \times 10^{-4}$ fb である — この質量における公表されたダイレプトン制限より一桁半から二桁下である — そして KK Z の 0.2 fb 程度の Zh レートは、公表された重いベクトル三重項の制限から数倍以内に位置する。これらは本論文自身の基準規格化におけるモデル水準の見積もりであり、反論が議論すべき数値を持つように印刷されている; そしてそれらは、本論文が今や自身のものとして登録する二つの露出を伴う。第一に、ミューオン・コライダーでは同じレプトン結合が KK 光子と KK Z を $\sqrt{s} = M_{\text{lock}}$ における s チャンネル共鳴にする (P-KK-10, 再グレード)。第二に、より鋭い点として: 赤外局在ヒッグスに対する 3.85-TeV の KK Z および W の電弱精密測定への露出は $(v/M_{\text{lock}})^2$ ではなく、その因子を赤外重なり $\xi_{\text{IR}}^2 \sim 70$ で増強したものである; 本論文自身の入力では、塔を M_{lock} に置き完全なノイマン和をとると T パラメータは 1.7 であり、これは大域フィットの 0.00 ± 0.06 に対するものである — カストーディアル保護のないブレン・ヒッグス型ワープ塔は ~ 10 TeV より上になければならないという古典的な結果であり、ここでは一標準偏差で 20 TeV より上 (二および三標準偏差では 14.5 と 11.9 TeV) である。本論文はカストーディアル構造を導出せず、そしてコンパニオンは今や細谷ヒッグスの動径プロファイルを計算した (Arisaka, 2026, A9-SM): バルクのゼロモードは平坦であり電弱スケールを登録できない; したがって真空期待値定理は赤外に登録されたモードを読んでおり、バルクの代替 e^{2r} でもなお $T = 0.55$ を与える — コンパニオンの閉じた形における、階層性を保護するあらゆる単一指数プロファイルに対する

床である。したがって電弱塔は、計算された数値を伴う実装のキル級の露出であり、O-KK-68 として登録され、F-KK-2B の内部に隠されるのではなくその傍らの反証子台帳に置かれる。

反論 63 (O-KK-63) (フレーバーの懐疑論者)

「世代をまたぐ $-0.194, +1.0, +4.5$ という結合は非普遍的である。ツリーレベルの g^* 交換はフレーバー変換中性カレントを与え、 3.85 TeV における $\Delta F = 2$ の制限は致命的である。」

応答。本論文はここで一つの仮定を担っており、今それを述べる。最初の二世帯は一つの共通振幅とともに紫外端点に位置する; したがってそれら同士の間では結合は普遍的であり、任意の基底でフレーバー対角である; 非普遍性は第三世代に限定され、ツリーレベルのフレーバー破れはプロファイル基底と質量基底のあいだの回転を通じてのみ入り、第三世代を最初の二世帯に結ぶカビボ-小林-益川行列要素によって抑制される。それは、赤外局在したトップを持つあらゆるワープ構成が仮定するアラインメントであり、それを用いれば数値は次のとおりである: 左手型結合差 $\delta = (r_{Q_3} - \xi_{UV}) g_s = 1.19 g_s$ を CKM で回転させると $C_1^{bs} = (\delta V_{tb} V_{ts})^2 / 6 M_{\text{lock}}^2 = 2.5 \times 10^{-11} \text{ GeV}^{-2}$ が得られ、これは 10^2 TeV 程度の ΔM_s の制限に対してスケール $\Lambda \approx 200 \text{ TeV}$ に相当する; また $\text{Im } C_1^{sd} \leq (\delta V_{ts} V_{td})^2 / 6 M_{\text{lock}}^2 = 1.9 \times 10^{-15} \text{ GeV}^{-2}$ 、 $\Lambda \approx 2 \times 10^4 \text{ TeV}$ であり、 ϵ_K の制限の際にある — 拘束するチャンネルは ϵ_K と ΔM_s であって、 B_d 混合ではない。アラインメントが覆うのは左手型の回転のみである; 右手型のものは CKM によって拘束されず、そのとき D 中間子混合は、 t_R 結合 $4.5 g_s$ に対して $|(U_R)_{3u}(U_R)_{3c}| < 1.7 \times 10^{-3}$ を要求する。本論文はいずれのアラインメントも導出しない: それらは深さを固定する [Arisaka \(2026, A9-SM\)](#) の同じカスケード深さ補題であり、結合シートの第三の未解決項目として登録される; 二つのうちより鋭いのは U_R の制限である。

反論 64 (O-KK-64) (順序づけの監査人)

「あなたのパートン・ルミノシティは単一順序のように見える。 $q\bar{q} + \bar{q}q$ が和をとられていなければ、本論文のあらゆるクォーク始動レートは二倍だけ低い。」

応答。規約はマスター公式のところで表 18 のキャプションに述べてある: 両方の順序が和をとられており、したがって $\mathcal{L}_{u\bar{u}}$ は対称化されたルミノシティである。パイプラインは、 750 GeV における [Franceschini et al. \(2016\)](#) の基準係数、すなわち対称化されているものに対して、また順序の曖昧さを持たない公表されたランダル-サンドラム・グラビトンのレートに対して検証された。この検査は印刷された表のみからは再現できないので、パイプラインとは独立に読まれた第二の最低次のセット (CTEQ6L1、公開イベント生成器とともに配布されている表) を用いて実施された: 13 TeV で両方の順序を和すると $\sum_q \mathcal{L}_{q\bar{q}}(\tau = 0.0877) = 0.066$ であり、表に載せた 0.0596 に対比される。表の値は独立な値の 0.90 倍であり、パートン分布の世代間のぼらつきの内側にあり、単一順序の値の 1.8 倍である; したがって表はキャプションが述べており対称化されている。二倍のシナリオ — あらゆる $q\bar{q}$ レートが二倍になり、八重項が $\simeq 17 \text{ fb}$ となり、第 31.4 節の緊張が排除になるというもの — は閉じられた; 八重項の 8.7 fb は述べられた不確かさとともに立っている。

反論 65 (O-KK-65) (KK グルーオンの排除)

「あなたの八重項は 12 パーセント以内でバルク RS の KK グルーオンであり、しかも同じレートであり、CMS はそのベンチマークを 4.55 TeV まで排除している。なぜ本論文は端的に死んでいないのか。」

応答。排除と予言がまだ同じ数値ではないからであり、しかも本論文はどの数値が決めるのかを述べているからである。CMS の統合による 4.55 TeV は F-KK-2B に対する公表された最強の言明であり、そのようなものとして登録されている (第 31.4 節); それはベンチマークのレートに対する制限であり — 本論文の入力では 9.1 fb 、PDF バンド以内で八重項の 8.7 fb である — ベンチマークの PDF の世代と K 因子、および第 VI 部が導出する干渉の符号を持たないテンプレートを用いて計算されている; それらは、本論文自身の較正において八重項を、観測された制限より明らかに上でも下でもなく、その上に置くのと同じ項目である。本論文のラインシェイプを用いた再解釈が 3.85 TeV でベンチマークのレートを返すならば、八重項は排除され、実装は退く; 本論文はその帰結を論駁して回避しようとはせず、それを生み出す再解釈を求めるのであり、しかも答えが既に記録されたデータの中にあるかもしれないことを登録している。

反論 66 (O-KK-66) (グラビトン規格化の監査人)

「あなたは Λ_π を二通りに印刷しており、グラビトンの幅はどちらであるかに依存する。」

応答。二つのスケールが一つの名前で呼ばれていた。結合スケールは $\Lambda_\pi = \overline{M}_{\text{Pl}} e^{-K} = 1.535 \text{ TeV}$ であり、曲率単位に依存しない; 数値 $M_{\text{lock}}/x_1 = 1.005 \text{ TeV}$ は $(k/\overline{M}_{\text{Pl}})\Lambda_\pi$ であって、これが標準的な曲率単位を $k = 0.654 \overline{M}_{\text{Pl}}$ に固定する (T-KK-1 の $\frac{1}{2}M_{\text{Pl}}$ をベッセル零点で割ったもの)。モード規格化をスケール連鎖の独立な再導出と呼んだ文は恒等式であり、訂正される。グラビトンの $\Gamma/m = 6.3\%$ とそのレートは、公表されたスピン 2 テンプレートの規格化、すなわち $k = \overline{M}_{\text{Pl}}$ で印刷されている (第 31 節); 幾何自身の k では幅は $(k/\overline{M}_{\text{Pl}})^2$ としてスケールして $\simeq 2.7\%$ となり、あらゆる G_1 のレートは $\simeq 2.3$ で割られる。本論文は黙って選ぶのではなく、二つの読みを登録する: G_1 はいずれにおいても LHC で不可視であり (0.045 あるいは 0.02 fb)、85 TeV における FCC-hh でのレートはそれに応じて 90–210 fb である。

反論 67 (O-KK-67) (ウィルソン線スカラー)

「両端で $A_{B,\mu}$ にディリクレを課すと、区間ウィルソン線 $\int_0^K A_{B,r} dr$ がゲージ不変になる。それはあなたが一度も言及しない軽いスカラーである。」

応答。そのとおりであり、それは今や定理のところで述べられている (T-KK-2、ステップ 3')。ゲージ・パラメータが両端で固定されていると、区間を横切る $A_{B,r}$ の積分はゲージで消去できない: その揺らぎは実スカラーであり、赤外局在し (プロファイル e^{2r})、ツリーレベルでは質量ゼロであって、バリオンのカレントによってループで持ち上げられる — 細谷モードの区間版である。その質量と結合は、いずれもループ水準であり、いずれもバリオンのセクターの他のすべてと同じ未解決のカスケード深さによって定まるが、ここでは未解決として登録される; その存在は両端読みが含意する唯一の新しい軽い状態であり、赤外端のみの代替 — $r = K$ のみでディリクレ、 Z'_B は $1.0124 M_{\text{lock}}$ — はグラビトンからの 1.2% の分裂という代価でそれを回避する。本論文は両端読みを保持し、沈黙ではなくスカラーを印刷する。アノマリー・コンパニオンも同じ一步を踏み出した: そのアーベル境界条件の条項とモード解析は今や、 $U(1)_B$ と $U(1)_{Q_i}$ のいずれについても、区間ウィルソン線を、意図されたクラスにおける固定された背景データとして、その揺らぎ — プロファイル e^{2r} 、赤外重み付き — とともに登録しており、これはテンソルのベクトル・モードと円のホロノミー (Arisaka, 2026, A3-BI6) と並ぶ第三の未解決の露出である; この反論とその登録は一つの項目である。

反論 68 (O-KK-68) (電弱精密測定監査人)

「赤外局在ヒッグスを伴う 3.85-TeV の KK Z は T を 1 程度に与える。カストーディアル対称性がなければ、あなたの電弱塔は LHC が見る前に排除されている。」

応答。本論文自身の入力ではそのとおりであり、本論文はそう述べている (O-KK-62): 赤外重なり $\xi_{\text{IR}}^2 \sim 70$ が $(v/M_{\text{lock}})^2$ に掛かり、結果は数十分の一の制限に対して 1 程度の T パラメータである — カストーディアル保護のないブレン・ヒッグス型ワープ塔は $\sim 10 \text{ TeV}$ より上になければならないという古典的な言明である。それを変えたものが二つあり、コンパニオンは今や両方を計算した (Arisaka, 2026, A9-SM)。赤外に登録されない細谷ヒッグスの動径プロファイル: 標準的な計量の上では、コセットの A_θ ゼロモードは紫外重み付き測度 e^{-2r} を伴ってちょうど平坦であり、 $m_W \approx 2 \times 10^{15} \text{ GeV}$ を登録する — 平坦空間の細谷質量が e^{-K} ではなく $1/\sqrt{2K}$ で縮小されたものである — したがって真空期待値定理の $v = M_{\text{lock}} \sin \theta_H^*$ は赤外端に登録されたモードの読み出しであり、この逃げ道は閉じる。カストーディアル構造: バルク群 $SU(5) \times U(1)_B \times U(1)_{Q_i}$ は $SU(2)_R$ を含まず、円の $\mathbb{Z}_2$ パリティはそれを供給できない。完全なノイマン和では、閉じた形で $\sum_n \xi_n^2/m_n^2 = 17.0 e^{2K}/k^2$ であり (第一準位がそのうち 11.7 を担う)、塔を M_{lock} に置くと $T = 1.7$ を、2.46 TeV への自由場配置は 4.2 を、そしてバルク・プロファイル e^{2r} — 階層性を保護するもののうち赤外重みが最も小さく、コンパニオンの閉じた形の床であるもの — は 0.55 を与える; 大域フィットは $U = 0$ として 0.00 ± 0.06 を許すので (Particle Data Group, 2024)、これらの読みはそれぞれ二十八、七十、九標準偏差だけ離れて位置し、最初の電弱準位は一標準偏差で 20 TeV より上になければならない (二および三標準偏差では 14.5 と 11.9 TeV; バルク・プロファイルでは二および三標準偏差で 6–8 TeV) — そしてそれは、八重項が M_{lock} に位置する限り、バルク・ゲージ場の統一が許さない。し

たがってこの露出は、数値を伴ってキル・グレードで F-KK-2B の傍らに登録され、この反論とコンパニオンの未解決問題 O_{22} は一つの登録である。それを解消するであろうものは、コンパニオンの O_{22} が未解決のまま残している同定 — 246 GeV の場がどのモードであるか、 5_H の二重項はコンパニオンが計算した赤外に登録された動径プロファイルを持たないのであるが — あるいは、終端されたシームの上の曲率単位で 5 程度のゲージ運動項であり、後者はアノマリー・コンパニオンが未解決問題 O_{15} として登録しているもので、本論文のクラスター全体をスピン 2 アンカーも含めて 22 TeV へ移すという代価でこの緊張を閉じるであろう (T-KK-2、ステップ 6)。本論文は希望ではなく数値を印刷する; コンパニオンはまた、コセット・ウィルソン線の第一励起がグラビトンの位置に、すなわち M_{lock} の (3, 2) にあるカラーを持つスカラーとして位置することを記録しており、それは第 10.4 節のコセット段落と O-KK-69 が担う。シーム項の道筋は、こちら側で何を代価とするかとともに登録される: それがロックに保持する軽いモードは八重項であり、そのモードではダイジェット主導で幅は 1.2% であり、そしてそれは、表 21 の狭い $t\bar{t}$ およびダイジェットのアンカーによって、KK 光子のダイレプトン線とともに排除される (第 10.4 節のシーム段落); この逃げ道は 3.85 TeV に何も存在しない場合にのみ生き残るので、それと F-KK-2B は両立しない。コンパニオンの O_{22} とアノマリー・コンパニオンの O_{15} がその条項を担うこととする。

反論 69 (O-KK-69) (コセットの懐疑論者)

「あなたのクラスター表は八重項、グラビトン、バリオンのベクトル、そして $U(1)_{Q_i}$ ベクトルを配置しているが、12 個の $SU(5)$ コセット・ボソンについては何も述べていない。もしそれらがあなたの Z'_B と同様にディリクレであれば、それらはレプトクォークとして 3.85 TeV に位置する; もし細谷機構で持ち上げられているなら、それらは円のスケールにある。いずれにせよ本論文はどちらであるか、またそれが陽子崩壊に何をするかを述べるべきである。」

応答。陽子崩壊は答えに依存せず、本論文はその理由を述べている (第 10.4 節): X, Y は、コホートの中で果たされた標準模型コンパニオンの第一の仮説により境界ゼロモードを持たず、ゲージ化されたバリオン数はそれらの質量が何であれあらゆる $\Delta B \neq 0$ 演算子を禁じる。同じ定理がコライダーの問いに答える: ノイマンのコセット・ベクトルは端点のクォークを端点のレプトンに結合させるであろうが、それは定理が禁じる $\Delta B \neq 0$ の境界演算子である; したがってコセット方向は端点から脱結合しており — 両端ディリクレである — その第一準位はちょうど M_{lock} に位置し、端点クォークによっては生成されず、7.7 TeV より上で対生成される。ここで登録されるのは、系である配置ではなく、境界条件を所有する論文でそれを述べるためにアノマリー・コンパニオンの境界条件が担わねばならない条項である。

反論 70 (O-KK-70) (フレーバー理論家)

「あなたの信号カードは u, d, s, c に $r^L = \xi_{UV}$ を、第三世代の二重項に $r^L = 1.0$ を割り当てている。それはアップ質量基底における一つの対角行列 $\text{diag}(r_q, r_q, 1)$ であり、かつダウン質量基底における同じ行列である。CKM 行列が第三世代を混合するとき、この二つの言明がともに真であることはありえず、どちらを保持しても八重項にツリーレベルのフレーバー変換結合を与えてしまう。非対角の $b-s$ 成分を持つ 3.85 TeV のカラー八重項は $\Delta B = 2$ 演算子であり、 B_s 混合は測定されている。」

応答。この反論は述べられたとおり正しく、本論文の以前の版では登録されておらず、ここで解決を伴わずに登録される。電弱対称性の破れの前に一つの左手型クォーク二重項が存在するならば、二つの質量基底におけるその結合行列は次に従う

$$G_u^L V_{\text{CKM}} = V_{\text{CKM}} G_d^L, \quad (103)$$

そして両方の基底で独立に $\text{diag}(r_q, r_q, 1)$ を割り当てることはこれに違反する: PDG のヴォルフエンシュタイン・パラメータのもとで、式 (103) の最大の残差は 0.0499 である。この恒等式を回復するにはアラインメントを選ぶことが必要であり、いずれの選択も幾何からは従わない。アップ・アラインメント、すなわち $D = \text{diag}(r_q, r_q, 1)$ として $G_u^L = D$ かつ $G_d^L = V_{\text{CKM}}^\dagger D V_{\text{CKM}}$ とするものは、 $i \neq j$ に対して次を与える

$$(G_d^L)_{ij} = (1 - r_q) V_{ti}^* V_{tj}, \quad (104)$$

したがって g_s を単位として $|(G_d^L)_{bs}| = 0.0490$ である; ダウン・アラインメントは同じ問題をアップ・セクターへ移す。本論文が言えるのは、答えがどこから来なければならないか、そして何をしてはならないかである。答えは、標準模型コンパニオンが未解決のまま残しているフェルミオンごとの深さから来なければならない (第 10.4 節; カスケード深さ補題); なぜなら重なり r_f はフェルミオンがどこに位置するかによって固定されるのであって、それに付されたフレーバー・ラベルによってではなく、そして深さの割り当ては式 (103) を尊重するかしないかのいずれかだからである。事後に都合よくアラインメントを選ぶことによってこれを修復してはならず、それこそ本論文の姿勢全体が禁じる手である。二つのことがこの露出を和らげるが、いずれもそれを閉じはしない。第 10.4 節のプラトーの結果 — スロートの紫外側四分の三にわたって $\sqrt{K}f_1(r)$ が ξ_{UV} で平坦であること — は、最後の二 e-フォールドに達しない任意の深さに対して最初の二世代が四桁まで縮退していることを意味する; したがって残差はほとんど全面的に第三世代の成分によって担われる; また八重項の質量は誘起演算子を $1/M_{\text{lock}}^2$ で抑制する。いずれも B_s 制限の計算ではなく、本論文はその計算を提示しない。正直な言明はこうである: 表 19 のコライダー・ベンチマークは QCD 生成モデルであって、書かれたままでは完全なフレーバー・モデルではないこと、その完成は深さを所有するコンパニオンに負われていること、そして読者は、八重項の $t\bar{t}$ レート — これは ξ_{UV}^2 とトップ頂点に依存し、そのいずれにもアラインメントは触れない — を、この反論が開くフレーバーの問いとは切り離して保持してよいこと、である。

七十の反論に対し、答えが存在するところでは答え、存在しないところでは譲歩した — そのうち十二は、本論文自身による境界条件、較正、グレードの監査から生じたものであり、その譲歩とともに印刷されている: それは単一の文書が到達しうる限りで批判に耐える状態に最も近いものであり、自分自身の疑いがこのリストに欠けていることを見出した読者は、それを七十番目のものとみなして書き送るよう招かれている。残るのは記録そのものである — 本論文が拠って立つ著作であり、それぞれになぜかを説明する注が付されている。

第 XIV 部 参考文献

二つのグループに分けた引用著作 — GG-Theory コホートと外部文献 — であり、各項目は関連性の注とその最初の引用箇所を伴う

参考文献リストは二つのセクションに整理されている。**セクション A** は GG-Theory コホートの 18 編の姉妹論文を、プログラムの標準的な順序（憲法的な根、GG6 三部作、境界法則とその柱、三つの教科書的読み出し、キャップストーン、二つの現象論ブランチ、そして基礎ブランチ）で列挙する；コホートのあらゆる論文は本論文の本文で引用されている、というのもロック・クラスターは単一の演繹構造の内部に位置し、その判定はその全体に伝播するからである。**セクション B** は外部文献 — 理論的先行者、本論文が錨を下ろしている実験解析、統計的手法、そして LHC 後の情勢の戦略文書 — を第一著者のアルファベット順に列挙する。

各項目は、その著作が本論文に何を寄与し、どこで入るかを述べる**関連性**の段落を伴い、続いてその最初の引用箇所が示される。リストには本文で引用されていない項目は一つも含まれていない。

コホートのプレプリントはすべて <https://preprints.arisaka-gg.org/> で入手できる。外部文献は、与えられたとおりの出版済みまたはプレプリントの識別子のもとで引用されている。

A. Katsushi Arisaka による論文 (GG-Theory コホート)

Arisaka, K. (2026). *The GG-Constitution: Four Axioms and Seven Postulates of the GG-Theory Program, From Which GG-6, BI-6, OGN-5, and GDOS Descend as Theorems.* Arisaka-GG-A1-Constitution preprint. Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/a1-constitution/>. doi:10.5281/zenodo.22063867.

関連性. 本論文が許容性の規則を継承する基礎的な憲章である。ロック・クラスターはここでは、四つの公理と七つの要請 — とりわけ MSMF（連続的なつまみを持たないこと）と POS--MF/POS-7（反証可能性） — の下流の帰結として提示されているのであって、独立なコライダー・アンザッツとしてではない。主張の憲法的な由来、命名規約、あるいは事前宣言された反証子の規律が援用されるところではつねにこれを引用する。第 3 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *GG-Theory with GG-6: Geometry–Gauge Locking at the 6D Bulk (GG-6) at the Heart of Grand Geometric Theory (GG-Theory).* Arisaka-GG-A2-GG6 preprint. Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/a2-gg6/>. doi:10.5281/zenodo.22064298.

関連性. 本論文の幾何学的な舞台である。A2-GG6 は、定理 2 の標準的なスケール・プロファイル計量、定理 0 の強制されたバルク、非空間的なスケール (I_r) および位相 (S^1_θ) 方向、二塔規約（導出されたオフセットに置かれ単一生成から外された角度パートナー、 M_{lock} における観測可能な動径ロック・クラスター）、そしてここでのコライダー解析全体の基礎にある動径スペクトルのランダル–サンドラム読みのために引用する。エグゼクティブ・サマリーで最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *Anomaly Freedom of BI-6: The Modified Bianchi Identity (BI-6) for the Six-Force, Six-Dimensional Bulk (GG-6).* Arisaka-GG-A3-BI6 preprint. Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/a3-bi6/>. doi:10.5281/zenodo.22064300.

関連性. 単一テンソルのアノマリー恒等式から OGN-5 ディオファントス・カスケード $(M, N, L; J, K) = (1, 3, 5; 7, 35)$ の厳密な証明を供給する。スケールの深さを固定するロック整数 $K = LJ = 35$ — したがって定理 T-KK-1 の導出された質量 $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-35}$ — はそこで確立されている; 整数台帳がパラメータ・フリーな数の源であるところではつねにこれを引用する。第 2 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *From Euclid to GG-6: The Realization of Euclid's Elements in Six Dimensions — GU-5, OGN-5, and a Parameter-Free Reconstruction of Modern Physics.* Arisaka-GG-A4-Euclid preprint. Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/a4-euclid/>. doi:10.5281/zenodo.22064302.

関連性. 6D アインシュタイン–ヒルベルト簡約と、バルクの換算因子としての普遍定数 GU-5 の導出を所有する。とりわけ、バルク–プランク関係 $M_6 = \sqrt{2/\pi} M_{\text{Pl}}$ (定理 T-Euclid-6) と、相まって $M_{\text{lock}} = \frac{1}{2} M_{\text{Pl}} e^{-K}$ の因子 $\frac{1}{2}$ を供給し中心となる質量がフィットされた規格化を担わないことを保証する動径スケール・プロファイル積分 $\frac{1}{2}(1 - e^{-2K}) \rightarrow \frac{1}{2}$ のために、これを引用する。第 5.5 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *GDOS: Geometric Dynamics of Open Systems — 6D GG-6 Bulk Projected to 4D Boundary for Quantum Measurement, General Relativity, and QFT.* Arisaka-GG-A5-GDOS preprint. Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/a5-gdos/>. doi:10.5281/zenodo.22064304.

関連性. 第 16 節が扱って立つ開放系 (GDOS) の枠組みを供給する: コライダー事象は閉鎖系の観測量ではなく、散逸的な検出器と統計的再構成パイプラインを通じて 4D 境界へ射影された後にはじめて登録される 6D バルクの励起である。検出の開放系としての枠づけ (OGGEP/GDOS) のために引用するのであって、いかなるコライダーの数値のためでもない。第 3 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *The GRIP on GDOS — GRIP: the Geometric Engine of Symmetry Breaking, from the Big Bang to Mind.* Arisaka-GG-A6-GRIP preprint (the runtime definitions of GGA, GRIP-In, and GRIP-Out, and the two-regime figure). Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/a6-grip/>. doi:10.5281/zenodo.22064306.

関連性. トリガー、再構成、意思決定の開放系読みで用いられる GRIP (Gi-4) の四柱カスケード言語を提供する。第 16 節の検出を開放系とみなす見方のために GG-A5-GDOS と並べて引用される; ロック・クラスターの予言に定量的な入力に寄与しない。第 3 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *The Qi-4 Pillars — Qi-QUA, Qi-EP, Qi-CON, Qi-HAL: The Quantum-Information Backbone of GDOS.* Arisaka-GG-A7-Qi4 preprint. Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/a7-qi4/>. doi:10.5281/zenodo.22064308.

関連性. Arisaka (2026, A6-GRIP) の Gi-4 の柱とともに、境界法則 GDOS を強制する量子情報の柱である; プログラムの起源の物語 (第 XI 部) と、BI-6 恒等式で $U(1)_B$ と対を成す情報電荷 $U(1)_{Q_i}$ のために引用される。第 3 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *Quantum Mechanics Derived from GG-Theory as Projection from 6D Bulk to 4D Boundary.* Arisaka-GG-A8-QM preprint. Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/a8-qm/>. doi:10.5281/zenodo.22064310.

関連性. 測定を完結したランタイム事象として導出する (装置の準備 = 内因的な GRIP-Out; 登録 = GRIP-In 降下; 記録 = 停止) — 第 16 節でトリガーと再構成の連鎖に適用される解剖である。第 3 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *The Standard Model as Theorem of GG-Theory: Its 28 Parameters as Observations of One Six-Dimensional Geometry.* Arisaka-GG-A9-SM preprint.

Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/a9-sm/>.
doi:10.5281/zenodo.22064312.

関連性。スケール連鎖 $E_{\text{Pl}} \rightarrow E_{\text{GUT}} \rightarrow M_{\text{lock}} \rightarrow v$ と、中心部で用いられるロック・スケールの $\frac{1}{2}$ 規格化を所有する。決定的なことに、同じ M_{lock} から電弱真空期待値 $v = M_{\text{lock}}(2/5)^3 \approx 246 \text{ GeV}$ を導出する; これがコライダー試験にその異例の反証力を与える過剰拘束である: 誤ったロック・クラスターは電弱導出をも失脚させる。第 2 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *The Standard Cosmology as Theorem of GG-Theory: The Cosmic Inventory as Observations of One Six-Dimensional Geometry.* Arisaka-GG-A10-Cosmos preprint.

Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/a10-cosmos/>.
doi:10.5281/zenodo.22064314.

関連性。帰結三部作の宇宙論的メンバーである: 本論文がその動径ロック・スペクトルを LHC へ送るのと同じ六次元幾何が、A10 では宇宙の目録 ($\Omega_m \approx 1/\pi$) と導出された H_0 を固定する。コホート・マップにおいて Arisaka (2026, A8-QM) および Arisaka (2026, A9-SM) と並ぶ第三の教科書的読み出しとして引用される; ロック・クラスターについてのコライダーの判定は、電弱台帳へ伝播するのとまったく同様に A10 の幾何へ伝播する。第 3 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *The Geometric Inevitability of Cosmos, Life, and Mind: The Self-Referential Closure of the GG-Theory Program.* Arisaka-GG-A11-Origin preprint.

Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/a11-origin/>.
doi:10.5281/zenodo.22064319. 本論文のいかなる結果もそれに依存しない。

関連性。A シリーズのキャップストーンである: 本論文の反証子がデータへ露出させる憲法的な弧を閉じる論文である。コホート・マップで引用される; 第 3 節の共有された演繹の漏斗は、異なる積荷とともに A9、A10、A11 によって担われる; したがって 3.85 TeV における八重項の判定は、A11 が完成させる閉包のストレス試験でもある。第 3 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *Why Three Generations: A Three-Leg Derivation of $N_g = 3$ from BI-6, MSMF, and GDOS Morse Stability.* Arisaka-GG-P2-N3 preprint.

Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/p2-n3/>.
doi:10.5281/zenodo.22064323.

関連性。予言ブランチの第二論文である: 本論文のゲージ内容をロックするのと同じ BI-6 アノマリー構造からの、世代数の三脚導出である。コホート・マップで引用される; ここで八重項の幅と偏極を固定するトップクォークの局在帯 $r_{t_R} \in [4, 5]$ は、P2 が導出する三族構造を前提としている。第 7.1 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *The Electron as the Ground State of Nature: The Six Oldest Questions about the Electron, Closed and Fenced within GG-Theory.* Arisaka-GG-P3-Electron preprint.

Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/p3-electron/>.
doi:10.5281/zenodo.22064325.

関連性。予言ブランチの第三論文である: 幾何学的な基底状態としての電子である。コホート・マップで引用される; その UV 局在レプトン・プロファイルは、本論文のクラスターを實際上レプトフォビックにするのと同じ局在データである — 二つの論文は一つの幾何を質量の梯子の両端から読んでいる。第 7.1 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *The Real Geometry Beneath the Complex Numbers of Physics: Positive Frequency is Holomorphy — from Cardano's Cubics to Twistor Space, via the Sixth Dimension of GG-Theory.* Arisaka-GG-P4-Real preprint.

Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/p4-real/>.
doi:10.5281/zenodo.22064327.

関連性. 基礎ブランチの i の起源に関するメンバー論文である: 本論文のスペクトルが住む舞台の二つの実構造 — コンパクトな位相円と因果的な時計 — から、境界物理の唯一の虚数単位を導出する; したがって本論文の振幅とラインシェイプが当然視している干渉位相は、入力ではなく幾何の出力である。第 7.1 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *The Mirrors of Matter: Why Every Particle Has a Twin, Why Nature's Mirrors Break, and Why the Universe Is Made of Matter.* Arisaka-GG-P5-CPT preprint.

Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/p5-cpt/>.

doi:10.5281/zenodo.22064329.

関連性. 基礎ブランチの鏡と物質に関するメンバー論文である: 三つの実バルク因子の向きの反転としての C、P、T であり、連鎖の末尾に物質-反物質非対称性が置かれる。その日付入りのキル・リストは、本論文の HL-LHC ロック・クラスター判定を、同じ共有された幾何のコンパニオン・チャンネルとして名指ししている — 他の面が別の場所で決される一群の試験の、コライダー側の面である。第 7.1 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *The Proton as the Ground Geometric Attractor of Matter: The Eleven Questions of the Proton, Closed and Fenced within GG-Theory.* Arisaka-GG-P6-Proton preprint.

Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/p6-proton/>.

doi:10.5281/zenodo.22064331.

関連性. 兄弟にあたる常設の反証子であり、その関係の正直な記述は、入力ではなく兄弟であるということである。ロック・クラスターの導出で陽子を用いるものは何もなく、本論文の物理で陽子に依存するものも何もない。両者が共有するのは台帳である: 3.85 TeV に共鳴を置くのと同じ整数が、陽子が崩壊することをも禁じる; したがって枠組みはエネルギー軸の両端で同時に露出している — 予言された場所に現れねばならない共鳴と、決して現れてはならない崩壊である。この枠組みがどれだけの賭けているかを量る読者は、その双方を数えるべきである。コホート・マップで名簿水準で引用される。第 7.1 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *Symmetry, Conservation, and Geometry: Seven Steps from Noether, Bianchi, to Hopkins-Singer, and the Ledger the Open-System Turn Pays Out.* Arisaka-GG-W1-Symmetry preprint.

Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/w1-symmetry/>.

doi:10.5281/zenodo.22064340.

関連性. 本論文の中心的な否定的主張が必要とし、しかも自らは供給しない背景である。ここでの構造的な結果は不在である — 半径モジュライがないこと、ラディオンがないこと、ランドスケープがないこと、超対称性の要請がないこと — そしてそのそれぞれは仮定されるのではなく導出される; しかし不在が結果として読めるのは、保存則の言明が対称性から降りてくる必要はないことを既に受け入れている者に対してのみである。W1 は、まさにその一世紀にわたる転換、ネーターからコホモロジーへの転換についてのコホートの概観である。ロック・クラスターの連鎖が用いる数も定理も供給しない。第 5.5 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *The Circle That Remembers, the Interval That Forgets: GG-Theory and the Sixteen Problems of Particle Physics and Cosmology.* Arisaka-GG-W2-Holonomy preprint.

Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/w2-holonomy/>.

doi:10.5281/zenodo.22064342.

関連性. 本論文の位相円の機構が属する分類である。ロック・スペクトルはウィルソン線によってずらされる: コンパクトな角度のまわりの一定のポテンシャルであり、局所的には純ゲージであり、いかなる場の強さも変えず、それでもあらゆる荷電モードを動かすものである。それは対称性によるのではなくホロノミーによる保護と変位であり、それが W2 の主題である; そしてここでの半径モジュライの不在は、偶然ではなくその一例である。コホート・マップで名簿水準で引用され、また機構が使われる場所であるがゆえにウィルソン線のずれのところで名指しされる。第 5.3 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *The fifth force in GG-6: one prediction, $\eta = 0$ at any range and precision, and the*

instrument that tests it (MADO). Arisaka-GG-P7-5thF preprint, in preparation; the fifth-force companion of the Predictions branch.

関連性. 第五の力のコンパニオンである: 本論文の導出された g_B が供する判定は不在であり、任意の到達距離と任意の精度において $\eta = 0$ であって、それを試験する装置が名指しされている (MADO)。バリオン的セクターの実験室での露出が第五の力のものではなく八重項のものであると述べられるところではつねに引用される。第 9.2 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *The Kaxion: Cold Dark Matter as the Non-Spatial Compact-Angle Pseudoscalar of GG-6*. Arisaka-GG-C1-Kaxion preprint.

Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/c1-kaxion/>.

doi:10.5281/zenodo.22064333.

関連性. 暗黒物質のコンパニオンである: $8.1 \mu\text{eV}$ のカクシオンであり、本論文がその角度パートナーをクラスターより上の導出されたオフセットに、単一生成から外して置く (P-KK-7) のと同じコンパクトな θ 方向の上のテンソル残滓である。コホート・マップで引用される; 二つの論文は S_θ^1 の相補的な読み出しである — ハロスコープが残滓に耳を傾ける一方、LHC は選択則を試験する。第 7.1 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *The Hubble Tension in the Light of GG-Theory: The Hubble Constant as One Reading of a Derived Expansion History $H(t)$* . Arisaka-GG-C2-Hubble preprint.

Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/c2-hubble/>.

doi:10.5281/zenodo.22064336.

関連性. 帰結ブランチの第二論文である: 同じ幾何の内部でのハッブル緊張の、導出された H_0 による読みである。3.85 TeV でのコライダーにおける発見が間接的に補強するであろう、二つの現象論ブランチの天体物理側の腕の一つとして、コホート・マップで引用される。第 7.1 節で最初に引用。

Arisaka, K. (2026). *Black-Hole Entropy under GG-Theory: The GDOS Reading of the Horizon as an OGGE Port — with the Exact Bekenstein–Hawking $A/4G_N$ Derived from Induced Gravity*. Arisaka-GG-C3-BH preprint.

Preprint, available at <https://preprints.arisaka-gg.org/c3-bh/>.

doi:10.5281/zenodo.22064338.

関連性. 帰結ブランチの第三論文である: 地平線の熱力学であり、そのコライダー側の面が本論文の検出の SIP 読み (第 16 節) である同じ開放系射影のもとでのものである。コホート・マップで引用される; Arisaka (2026, C1-Kaxion) および Arisaka (2026, C2-Hubble) とともに、コライダーが到達できない舞台へ枠組みを運ぶ。第 7.1 節で最初に引用。

B. その他の文献

Agashe, K., Belyaev, A., Krupovnickas, T., Perez, G., & Virzi, J. (2008). LHC signals from warped extra dimensions. *Physical Review D*, 77, 015003. arXiv:hep-ph/0612015.

関連性. IR 局在したワープ共鳴の、トップおよび縦成分ボソンに富む信号と、UV/IR 結合階層とを確立する。読み出し II のみにおいて (仮定 B2、B4)、 R_f の見積もりに用いられる経験的な局在–結合対応のために引用される。初出は第 10.9 節。

Allanach, B. C., Odagiri, K., Parker, M. A., & Webber, B. R. (2000). Searching for narrow graviton resonances with the ATLAS detector at the Large Hadron Collider. *Journal of High Energy Physics*, 0009, 019. arXiv:hep-ph/0006114.

関連性. スピン 2 共鳴に対する、質量をもつベクトルの部分幅の訂正版 (Han, Lykken & Zhang, 1999 の誤植を修正したもの) と、第 31 節のワークブックがそれに対して検証されるベンチマークの $\sigma \times \text{BR}(e^+e^-)$ 表とを供給する。初出は第 31.2 節。

ATLAS Collaboration (Aad, G. et al.) (2012). Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B*, 716, 1–29. arXiv:1207.7214.

関連性. 125 GeV のヒッグス粒子の ATLAS による観測: 標準模型のリストの、未確認のまま残された最後の項目が、完成した。確認の時代を閉じる支柱として第 1 節において引用される — 1964 年に書き下された構造を完結させ、半世紀にして初めて、リストに次の項目がない状態を残した発見である。初出は第 I 部。

ATLAS Collaboration (2019). Search for high-mass dilepton resonances using 139 fb⁻¹ of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector. *Physics Letters B*, 796, 68–87. arXiv:1903.06248 [hep-ex].

関連性. 高質量のスピン 1 / スピン 2 共鳴に対する、公表されたもののうち最も強いクリーン・チャンネル制限である。我々はこれを、普遍的に結合するロック・クラスターに最も直接的な圧力をかける制限として引用し、また GG-6 の予言がそれを逃れるのは構造的な理由による — 相手方はレプトフォビックかつトップに富み、登録されたループ床の上でツリー・レベルでは $\text{BR}(Z'_B \rightarrow \ell^+\ell^-) = 0$ である — のであって、ダイレプトン制限が弱いからではない、という点を示すために引用する。初出は第 30 節。

ATLAS Collaboration (2024). A new ATLAS for the high-luminosity era.

Official ATLAS upgrade overview. <https://atlas.cern/>.

関連性. ロック・クラスター探索が依存する Phase-2 トラッカー、タイミング、トリガーのアップグレードを記録する。我々はこれを、HL-LHC の到達範囲と、クラスターを意識した、ブーストされたトップの、削減ストリーム解析の実現可能性とが論じられる箇所引用する。初出は第 32 節。

ATLAS Collaboration (2025). Search for $t\bar{t}$ resonances in final states with one or two leptons using 140 fb⁻¹ of pp collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV. arXiv:2512.17856 [hep-ex].

関連性. ロック・クラスターの優先的な発見チャンネルに対する、既存の最も関連の深い探索である。我々はこれを、専用のクラスターを意識した $t\bar{t}$ 共鳴の再解釈が拡張すべきテンプレートとして引用する。GG-6 のグラビトンとそのカラー八重項 / バリオンの相手方は、支配的にトップに富むからである。初出は第 10.4 節。

ATLAS Collaboration (2025). ATLAS expands its reach into the high-rate frontier.

Official ATLAS briefing on trigger-level analysis. <https://atlas.cern/>.

関連性. トリガー・レベル (データ・スカウティング) 解析を、利用可能な道具として確立する。我々はこれをトリガー・ロードマップの節において引用する。そこでは 3–6 TeV 領域に専用の削減フォーマット・ストリームが、クラスター化した信号に対する価値が高く費用の低い追加として提案されている。初出は第 35 節。

K. Benakli, M. D. Goodsell, and A. Goudeau (2026). An anomaly-free baryonic completion of the Standard Model.

arXiv:2607.12009 [hep-ph].

関連性. コホートが幾何学的に答える問いに対する、正統的な四次元の答えである: バリオン数を直接ゲージ化し、アノマリーを隔離されたカイラル部門によって相殺し、 Z' 質量をヒッグス機構で与えて走査する。ロック・スケールにおける最も近い競合として、比較の部において引用される: 彼らの非統一的なベンチマークは、ダイヤルで合わせた結合とともに 3.85 TeV に着地し、判別子はパターンである — クォーク普遍的な単独の線に対する、エキゾチックを伴わないトップ好性のクラスターである。初出は第 56 節。

CEPC Study Group (2025). CEPC Technical Design Report — Accelerator; and CEPC Technical Design Report — Reference Detector. IHEP, Beijing, completed October 2025.

関連性. 成熟した中国のヒッグス/ Z ファクトリー設計である。中国の第 15 次五カ年計画（2026 年 3 月）には採択されなかった; 2030 年前後の再提出が意図されている。第 IX 部の施設展望への状況入力である。初出は第 47 節。

Cepeda, M., et al. (2019). Report from Working Group 1: Standard Model physics at the HL-LHC and HE-LHC. *CERN Yellow Reports: Monographs*, CERN-2019-007. arXiv:1902.00134.

関連性. HL-LHC の射影に関する標準的な規約であり、第 41.1 節において採用された（そして統計、較正、理論の各類へと分解された）系統誤差半減シナリオを含む。初出は第 41.1 節。

CERN (2023). The High-Luminosity LHC: a new horizon for science and technology.

Official CERN HL-LHC flyer. <https://home.cern/>.

関連性. 14 TeV における実験あたり 3000 fb^{-1} という HL-LHC 目標の、公式な表明である。我々はこれを、加速器の反証子を決するデータセットとして引用する: スピン 1 クラスタは、この計画のうちに発見されるか、さもなければ現行の実装が排除されるかのいずれかである（スピン 2 アンカーは、その導出された結合においては 85 TeV の FCC-hh を待つ; 系 T-KK-2c)。初出は第 32 節。

CERN (2024). The Compact Linear Collider (CLIC).

Official CERN accelerator overview. <https://home.cern/>.

関連性. 将来加速器の展望において、パターン検証の間接的な電弱/ヒッグス結合の脚のために引用される。この脚は、段階的なレプトン加速器のエネルギーではクラスタの直接生成が到達不能である場合にも、なお情報を与える。初出は第 34 節。

CERN (2024). Muon Collider.

Official CERN accelerator overview. <https://home.cern/>.

関連性. マルチ TeV のミューオン加速器が与えるであろうラインシェイプとスピンの診断のために引用される — ハドロン加速器が完全には分解できない、ほぼ縮退した多場クラスタの、まさにその脱置み込みである。初出は第 34 節。

CERN (2025). LHC delivers a record number of particle collisions in 2025.

Official CERN news item, 9 December 2025. <https://home.cern/>.

関連性. 「今年がすでに意味を持ちうるのか」という問いに対する、積分ルミノシティの背景である。我々はこれを、ロック・スケールを現在検証可能な範囲の内に置く Run-3 データセットの規模のために引用する。初出は第 30 節。

CERN (2026). Accelerator Report: the 2026 run will be short but intense.

Official CERN news item, 12 March 2026. <https://home.cern/>.

関連性. LS3 に先立つ、圧縮された 2026 年の運転窓を確立する。我々はこれを、本論文が、本年におけるロック・クラスタの発見の梃子が、限られてはいるが真正に存在すると論じる箇所引用する。初出は第 30 節。

CERN (2026). CERN bids farewell to the LHC and enters Long Shutdown 3.

Official CERN press release, 29 June 2026. <https://home.cern/>.

関連性. Run 3 の公式な締めくくり（最後の衝突は 2026 年 6 月 14 日; 運転開始以来 $\approx 540 \text{ fb}^{-1}$ が供給された）と、表 21 および図 10 のテープ上ルミノシティ・モデルに用いられた、LS3 から HL-LHC への日程とである。初出は第 32.7 節。

Chivukula, R. S., Farzinnia, A., Foadi, R., & Simmons, E. H. (2012). Production of massive color-octet vector bosons at next-to-leading order. *Physical Review D*, 85, 054005. arXiv:1111.7261.

関連性. 質量をもつカラー八重項ベクトルの生成に対する完全な NLO 計算である（補正は最大 $\sim 30\%$ 、スケール依存性はパーセント水準まで低減される）; 第 VI 部および第 31 節の g^* レートに用いられる $K_{q\bar{q}} \simeq 1.3$ の出典である。初出は第 21 節。

CMS Collaboration (Chatrchyan, S. et al.) (2012). Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters B*, 716, 30–61. arXiv:1207.7235.

関連性. ヒッグス粒子の CMS による同時観測である。第 1 節において ATLAS 論文と並べて引用される; 著者はこの時代 CMS に在籍し (第 XI 部)、ヒッグスが標準模型を破るのではなく完成させるのを見ていた — 本論文の、事前登録された反証可能性への固執は、その経験に由来する。初出は第 I 部。

CMS Collaboration (2019). A new precision timing detector for the CMS HL-LHC upgrade (MTD).

Official CMS news item. <https://cms.cern/>.

関連性. 精密タイミングが、パイルアップのための道具から、高質量のブーストされたハドロン終状態に対する共鳴品質の変数へと格上げされる箇所で引用される — クラスターのラインシェイプを鋭くする具体的な方法である。初出は第 34 節。

CMS Collaboration (2020). High-mass dilepton resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV (CMS-EXO-19-019).

Official CMS public-results summary. <https://cms.cern/>.

関連性. ATLAS のダイレプトン制限に対応する CMS 版である; それと併せて、レプトフォビックで非普遍的なロック・クラスターは逃れるが一般の普遍的な共鳴は逃れられない、クリーン・チャンネル制限として引用される。初出は第 30 節。

CMS Collaboration (2020). Search for high mass dijet resonances with a new background prediction method in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Journal of High Energy Physics*, 05, 033. arXiv:1911.03947.

関連性. 137 fb^{-1} の狭幅ダイジェット制限 (σ_{BA}) であり、その観測曲線は図 9 に現れる; 第 31 節において八重項と Z'_B のハドロン・レートがそれに対して比較される、参照用のダイジェット制限である。初出は第 31.3 節。

CMS Collaboration (2024). Search for new physics in high-mass diphoton events at $\sqrt{s} = 13$ TeV (CMS-EXO-22-024).

arXiv:2405.09320 [hep-ex].

関連性. ダイフォトンのスピン 2 探索である; クリーンではあるが GG-6 にとっては副次的なチャンネルとして引用される: 幾何が軽い状態の結合を抑制するため、ダイフォトンはクラスターにとって発見チャンネルではなく傍証チャンネルである。初出は第 10.9 節。

CMS Collaboration (2024). High-mass diphoton search, public-results summary (CMS-EXO-22-024).

Official CMS public-results summary. <https://cms.cern/>.

関連性. ダイフォトン論文に付随する公開結果版であり、チャンネルごとの排除台帳において、幾何を意識した再解釈のための追跡可能なダイフォトン入力として引用される。初出は第 30 節。

CMS Collaboration (2024). Search for resonant Higgs-boson pair production in the $b\bar{b}b\bar{b}$ final state at $\sqrt{s} = 13$ TeV.

arXiv:2407.13872 [hep-ex].

関連性. スピン 2 グラビトンの hh 崩壊と、クラスターの IR 敏感なヒッグス部門とを探索 hh チャンネルである。我々はこれを、最良のスカラー傍証探索として、また複合チャンネルの GG-6 解析における、ブーストされた hh の脚のテンプレートとして引用する。初出は第 30 節。

CMS Collaboration (2024). Model-agnostic search for dijet resonances with anomalous jet substructure at $\sqrt{s} = 13$ TeV.

arXiv:2412.03747 [hep-ex].

関連性. クラスターのレプトフォビックなカラー八重項側に最も感度の高い、ブーストされたダイジェット／サブストラクチャー探索である。我々はこれを、 $U(1)_B$ の混入と KK グルーオンの相手方とが可視にな

るチャンネルとして、またクラスターを意識した（多重極）テンプレートの自然な受け皿として引用する。初出は第 10.4 節。

CMS Collaboration (2024). The CMS Upgrade Week: knowledge sharing within the collaboration.

Official CMS news item. <https://cms.cern/>.

関連性. CMS の Phase-2 アップグレード計画 — 新しいトラック、MIP タイミング検出器、高粒度カロリメトリ、そして Level-1 スカウティング・ストリーム — を、コラボレーションのアップグレード・ウィーク資料に提示されたとおりに伝える。本論文のトリガーおよび削減ストリームの提案（表 23）が依拠し、かつ第 VIII 部のブーストされたトップの性能仮定を保守的に保つ、検出器の能力のために引用される。初出は第 32 節。

CMS Collaboration (2025). How CMS records all 40 million events per second (Level-1 scouting).

Official CMS news item. <https://cms.cern/>.

関連性. CMS のデータ・スカウティング能力であり、トリガー・ロードマップにおいて、専用の削減フォーマット・ストリームが標準のトリガー予算を飽和させることなくクラスター化した高質量信号を捕捉することを可能にするであろう機構として引用される。初出は第 35 節。

Connes, A., & Lott, J. (1991). Particle models and noncommutative geometry. *Nuclear Physics B (Proceedings Supplements)*, 18(2), 29–47.

関連性. 非可換幾何による標準模型である：ゲージ構造とヒッグス構造が、真に非空間的な内部幾何のうちに符号化される。第 5.5 節の系譜において、非空間的な内部次元に向けた、先行する最も遠い一歩として引用される — GG-6 が異なるのは、その二つの内部方向を文字どおりのバルク座標とする点であり、これは Arisaka (2026, A2-GG6) の定理 0 によって強制される。初出は第 5.5 節。

Cowan, G. (1998). *Statistical Data Analysis*. Oxford University Press.

関連性. 素粒子物理学者にとって標準的な、最初の統計学の教科書である；付録 L の発見統計の講義と、第 VIII 部の形式論とに対して推奨される伴走書である。初出は第 XII 部。

Cowan, G., Cranmer, K., Gross, E., & Vitells, O. (2011). Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics. *European Physical Journal C*, 71, 1554. arXiv:1007.1727.

関連性. 発見統計の標準的な機構 — プロファイル尤度検定統計量、ウィルクスの漸近論、アシモフ・データセット、そして背景不確かさを伴う有意度の公式 — を一段ずつ導出したものであり、第 VIII 部のすべての射影に用いられる。初出は第 40 節。

Davoudiasl, H., Hewett, J. L., & Rizzo, T. G. (2000). Phenomenology of the Randall–Sundrum gauge hierarchy model. *Physical Review Letters*, 84, 2080–2083. arXiv:hep-ph/9909255.

関連性. ワープしたグラビトンの結合と生成断面積の、 $k/\bar{M}_{\text{Pl}}$ による標準的な規格化である。我々はこれを読み出し II のみにおいて（第 19 節、仮定 B1）、 $\kappa_{\text{eff}} \approx 1/\sqrt{K}$ がそれに対して較正されるバルク・グラビトンのテンプレートとして用いる — 外部のモデル・レベルの入力であり、GG-6-A の結果ではない。初出は第 19 節。

Dobrescu, B. A., & Yu, F. (2013). Coupling–mass mapping of dijet peak searches. *Physical Review D*, 88, 035021. arXiv:1306.2629.

関連性. レプトフォビクなバリオン的 Z' 状態に対する、標準的な幅と結合–質量の対応づけである；第 31 節は、 Z'_B レートの g_B^2 スケーリングと、八重項の幅の相互検証とに、その規約を用いる。初出は第 31.2 節。

Ellis, R. K., Stirling, W. J., & Webber, B. R. (1996). *QCD and Collider Physics*. Cambridge University Press.

関連性. 因子化、パートン・ルミノシティ、そしてハドロン加速器における共鳴生成についての、決定版の取り扱いである；付録 K の主要な伴走書であり、その主公式を全深度において導出している。初出は第 XII 部。

European Strategy Group (2025). European Strategy for Particle Physics: 2026 update milestone — FCC-ee recommended as the preferred next flagship collider.

Official CERN press release, December 2025. <https://home.cern/>.

関連性. 第 32.7 節で仮定される、LHC 以後の暦を固定する: 次の装置としての FCC-ee (ロック・スケールでは間接的) であり、3.85 TeV の最初の直接探査は FCC-hh へと繰り延べられる。初出は第 32.7 節。

European Strategy Group (2026). The European Strategy for Particle Physics — 2026 Update. Adopted unanimously by the CERN Council, Budapest, 22 May 2026.

関連性. CERN における次の旗艦加速器の優先選択肢として FCC-ee を名指しし、理事会の決定は 2028 年までに見込まれるとし、そしてミューオン加速器の R&D を優先する。第 IX 部の、LHC 以後の計画基準線である。初出は第 47 節。

FCC Collaboration (2018). FCC-hh: the Hadron Collider — Future Circular Collider Conceptual Design Report.

CERN. <https://fcc.web.cern.ch/>.

関連性. ロック・クラスターの回廊を、完全に地図化可能な部門へと変えるであろう 100 TeV の装置である: 最初のクラスター、動径方向の $n = 2$ (~ 7 TeV) および $n = 3$ (~ 10 TeV) の族、そして色を帯びた相手方が、いずれも到達範囲に入るであろう。長期展望の節において引用される。初出は第 10.9 節。

FCC Collaboration (2025). Future Circular Collider Feasibility Study Report, Volume 1.

arXiv:2505.00272 [physics.acc-ph].

関連性. 段階的な FCC のシナリオ (FCC-ee の物理は ~ 2047 年以降、FCC-hh は ~ 2074 年) であり、これが図 10 の右端と、 $\sigma(G_1) \approx 205$ fb が直接検証可能となる日付とを定める。初出は第 32.7 節。

Franceschini, R., et al. (2016). What is the $\gamma\gamma$ resonance at 750 GeV? *Journal of High Energy Physics*, 03, 144. arXiv:1512.04933.

関連性. 第 31 節のワークブックを検証するために用いられる、参照用の狭幅マスター公式とパートン・ルミノシティ係数 (ここでは 2–5% の精度で再現されている) であり、そこに引用された NLO K 因子とともに用いられる。初出は第 31.2 節。

Fukuda, Y. et al. (Super-Kamiokande Collaboration) (1998). Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Physical Review Letters*, 81, 1562–1567.

関連性. 大気ニュートリノ振動の発見である — 過去五十年における標準模型の建物の、確立された唯一の亀裂であり、そして際立って加速器の結果ではない。第 1 節において、規則を鋭くする例外として引用される: いかなる加速器も標準模型のリストに粒子を加えたことはなく、確認された唯一の標準模型を超える事実は、いかなる加速器スケールも指定しない — 本論文の導出された標的が満たす空白である。初出は第 I 部。

Goldberger, W. D., & Wise, M. B. (1999). Modulus stabilization with bulk fields. *Physical Review Letters*, 83, 4922–4925. arXiv:hep-ph/9907447.

関連性. ランダル・サンドラムのラジオンに対する標準的な安定化機構である: ポテンシャルがブレーン間隔を固定するバルク・スカラーである。表 2 において、あらゆる空間的余剰次元が負い、GG-6 が負わないものの象徴として引用される: スケール方向の長さは整数 $K = 35$ であり、したがって安定化すべきモジュライもラジオンも存在しない — 本論文はこの不在を、反証可能なヒッグス精密予言へと格上げする (第 IX 部)。初出は第 5.5 節。

Gross, E., & Vitells, O. (2010). Trial factors for the look elsewhere effect in high energy physics. *European Physical Journal C*, 70, 525–530. arXiv:1005.1891.

関連性. 探索範囲効果 (look-elsewhere) の厳密な (上向き交差による) 取り扱いである; 第 44.1 節は、それが検証する分解能セルの見積もりを用いて、事前登録された GG-6 の探索が支払わずに済む 76 倍の試行因子を定量化する。初出は第 44.1 節。

Halzen, F., & Martin, A. D. (1984). *Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics*. Wiley.

関連性. 断面積と崩壊の見積もりについての、平易な古典的出典である; 付録 K の例題へと入る、最も穏やかな完全な道筋である。初出は第 XII 部。

Han, T., Lykken, J. D., & Zhang, R.-J. (1999). On Kaluza–Klein states from large extra dimensions. *Physical Review D*, 59, 105006. arXiv:hep-ph/9811350.

関連性. 第 31 節の G_1 レートに用いられる、標準的なスピン 2 の部分幅公式である (質量をもつベクトルの多項式は [Allanach et al., 2000](#) から取る)。初出は第 31.2 節。

Hosotani, Y. (1983). Dynamical mass generation by compact extra dimensions. *Physics Letters B*, 126(5), 309–313.

関連性. 細谷機構である: コンパクトな方向のウィルソン線ホロノミーによるゲージ対称性の破れである。GG-6 においてこれは、数あるモデル構築の選択肢の一つではなく、現に働いている電弱機構である — 位相方向 S_θ^1 がウィルソン線 θ_H を供給し、その選択された値が [Arisaka \(2026, A9-SM\)](#) において $v = M_{\text{lock}}(2/5)^3$ を与える — したがって表 2 の比較行は、この機構をその源において評価している。初出は第 5.5 節。

Accettura, C., et al. (International Muon Collider Collaboration) (2024). Interim report for the International Muon Collider Collaboration. arXiv:2407.12450.

関連性. 第 IX 部で仮定される、段階的な $3 \rightarrow 10$ TeV 設計、電離冷却実証機のロードマップ、そして参照日程 (第 1 段階は 2050 年前後、10 TeV は 2070 年前後) である; 第 50.3 節の電弱線の検証は、この装置に対して定義される。初出は第 47 節。

Kaluza, T. (1921). Zum Unitätsproblem der Physik. *Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 966–972.

関連性. ゲージ構造を余剰座標から幾何学的に読み取りうるという着想の、歴史的な起源である。我々はこれを、非空間的な GG-6 の読みを位置づけるために引用する: GG-6 の方向は空間ではなくスケールと位相であるにもかかわらず、「KK」の系譜は発見可能性のために保持されている。初出は第 5 節。

Klein, O. (1926). Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie. *Zeitschrift für Physik*, 37, 895–906.

関連性. コンパクト化と、「カルツァークライン」にそのスペクトル的な意味を与える離散運動量塔とを導入した。我々はこれを、コンパクトな方向が離散スペクトルを生む標準的な機構のために引用する — GG-6 の動径クラスターの RG スケール・スロット起源と、我々が意図的に対比する先例である。初出は第 5 節。

Lillie, B., Randall, L., & Wang, L.-T. (2007). The bulk RS KK-gluon at the LHC. *Journal of High Energy Physics*, 0709, 074. arXiv:hep-ph/0701166.

関連性. ワープした KK グルーオンの参照計算である: そのトップに富む分岐パターン、広い幅、そして軽クォークが抑制された生成である。我々は読み出し II のみにおいて (仮定 B4) その結合比を借り、GG-6 のカラー八重項構造を $\sigma \times \text{BR}(t\bar{t})$ の概数へと変換する; 結果はモデル・レベルである。初出は第 19 節。

Maldacena, J. (1998). The large- N limit of superconformal field theories and supergravity. *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, 2, 231–252. arXiv:hep-th/9711200.

関連性. AdS/CFT 対応である: 境界理論の繰り込み群スケールが、バルクの動径座標として実現される — 双対性として。第 5.5 節において引用されるのは、GG-6 が同じ同定を双対的にではなく文字どおりに取るからである: 本論文のスロット共鳴は、その赤外スケールにおける境界理論の複合状態そのものであり、それゆえ「複合共鳴」というホログラフィックな言葉がロック・クラスターを正確に記述する。初出は第 5.5 節。

Mathews, P., & Ravindran, V. (2005). NLO-QCD corrections to dilepton production in the Randall–Sundrum model. arXiv:hep-ph/0506158.

関連性. LHC におけるスピン 2 (RS グラビトン) 生成に対する NLO K 因子である ($K \simeq 1.5\text{--}1.6$) ; 第 VI 部の G_1 レートに適用される $K_{gg} \simeq 1.6$ の出典である。初出は第 21 節。

Minkowski, H. (1908). Raum und Zeit. *Physikalische Zeitschrift*, 10, 75–88.

関連性. 最初の非空間的な幾何学的次元である: 時間が、時空へと融合された。第 5.5 節において、次元を空間的直観によってではなくその対称性生成子によって分類することを正当化する先例として引用される — その分類の下で、GG-6 のスケール方向と位相方向は、まさにミンコフスキーの意味において次元であり、いかなる意味においても空間的ではない。初出は第 5.5 節。

F. W. J. Olver, D. W. Lozier, R. F. Boisvert, and C. W. Clark (eds.). *NIST Handbook of Mathematical Functions*. Cambridge University Press, 2010. Companion online release: the NIST Digital Library of Mathematical Functions, <https://dlmf.nist.gov/>.

関連性. ベッセル関数 J_n 、 Y_n とその零点 x_n に対する、標準的な現代の参考文献である。これらは本論文の動径スペクトルの全体 — ロック質量、塔の比 x_2/x_1 と x_3/x_1 、そして重なり積分のモード分布 — を担う; 付録 J の境界値問題の講義において、この機構に初めて出会う読者に推奨される伴走書として引用される。初出は第 J 節。

Particle Data Group (Navas, S., et al.) (2024). Review of Particle Physics. *Physical Review D*, 110, 030001.

関連性. 測定された標準模型パラメータの、標準的な集成である。第 IX 部において GG-6 の構造的な値 $1/(\pi e) = 0.11710$ がそれに対して比較される、強結合の世界平均 $\alpha_s(M_Z) = 0.1180 \pm 0.0009$ のために — FCC-ee が決定的な検証へと変えるであろう単一の数である — また全編を通じて用いられるトップ質量と電弱入力の出典として引用される。初出は第 50.2 節。

Peskin, M. E., & Schroeder, D. V. (1995). *An Introduction to Quantum Field Theory*. Westview Press.

関連性. 標準的な大学院の場の理論の教科書である; 付録 J の KK 講義で仮定される、モード分解と有効ラグランジアンを供給する。初出は第 XII 部。

Pumplin, J., Stump, D. R., Huston, J., Lai, H.-L., Nadolsky, P., & Tung, W.-K. (2002). New generation of parton distributions with uncertainties from global QCD analysis. *Journal of High Energy Physics*, 0207, 012. arXiv:hep-ph/0201195.

関連性. 第 31 節のパートン・ルミノシティに用いられる CTEQ6 パートン分布である; CTEQ6M / CTEQ6L1 の広がり、引用された不確かさの帯の一部をなす。初出は第 31.2 節。

Randall, L., & Sundrum, R. (1999). A large mass hierarchy from a small extra dimension. *Physical Review Letters*, 83, 3370–3373. arXiv:hep-ph/9905221.

関連性. ワープした二ブレーン構成であり、そのベッセル根スペクトルと TeV スケール共鳴は、GG-6 のロック・クラスターの現象論的に最も近い類似物である。我々はこれを採点表の全体にわたって引用する: GG-6 はワープしたスロートの離散性を借りるが、その赤外スケールがフィットされた曲率ではなく導出済みである (整数 $K = 35$) 点、そしてそのクラスターが単一のグラビトン極ではなく多場である点において、決定的に異なる。初出は第 5 節。

Thomson, M. (2013). *Modern Particle Physics*. Cambridge University Press.

関連性. 実験を意識した現代的な概観である; 付録の講義が触れるすべての部門に対して推奨される最初の一読であり、この分野の検出器の側から書かれている — 本論文の序文が語りかける視点である。初出は第 XII 部。

Weyl, H. (1918). Gravitation und Elektrizität. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 465–480.

関連性。ワイルの原初の *Eichinvarianz* である: 接続としてのスケールの最初の幾何学化である。それは電磁気の理論としては失敗したが (アインシュタインの第二時計の反論)、GG-6 のスケール次元 I_r の祖型的な先例である — 第 5.5 節でたどられる系譜の 1918 年の半分であり、GG-6 がスケールをバルクの強制された非空間的次元へと格上げするときに完成する。初出は第 5.5 節。

Weyl, H. (1929). Elektron und Gravitation. I. *Zeitschrift für Physik*, 56, 330–352.

関連性。現代のゲージ理論の誕生である: ワイルによる、1918 年の着想の、局所的な位相 ($U(1)$) 不変性としての再解釈である。GG-6 の位相次元 S^1_θ は、この洞察を文字どおりに取ったものであり — $U(1)$ ファイバーが座標へと格上げされる — ワイルを二つの非空間的方向のただ一人の祖とする (第 5.5 節)。初出は第 5.5 節。