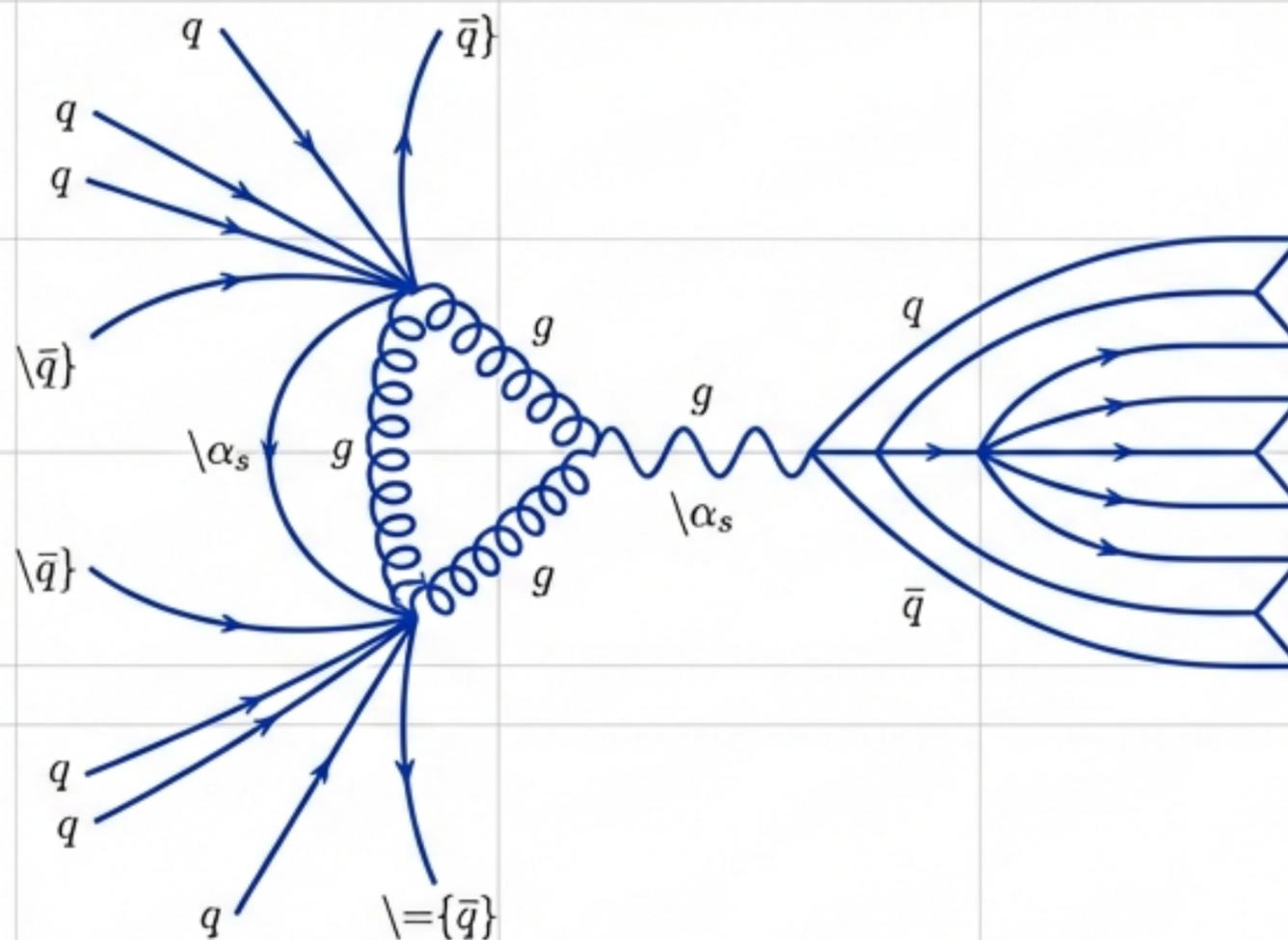
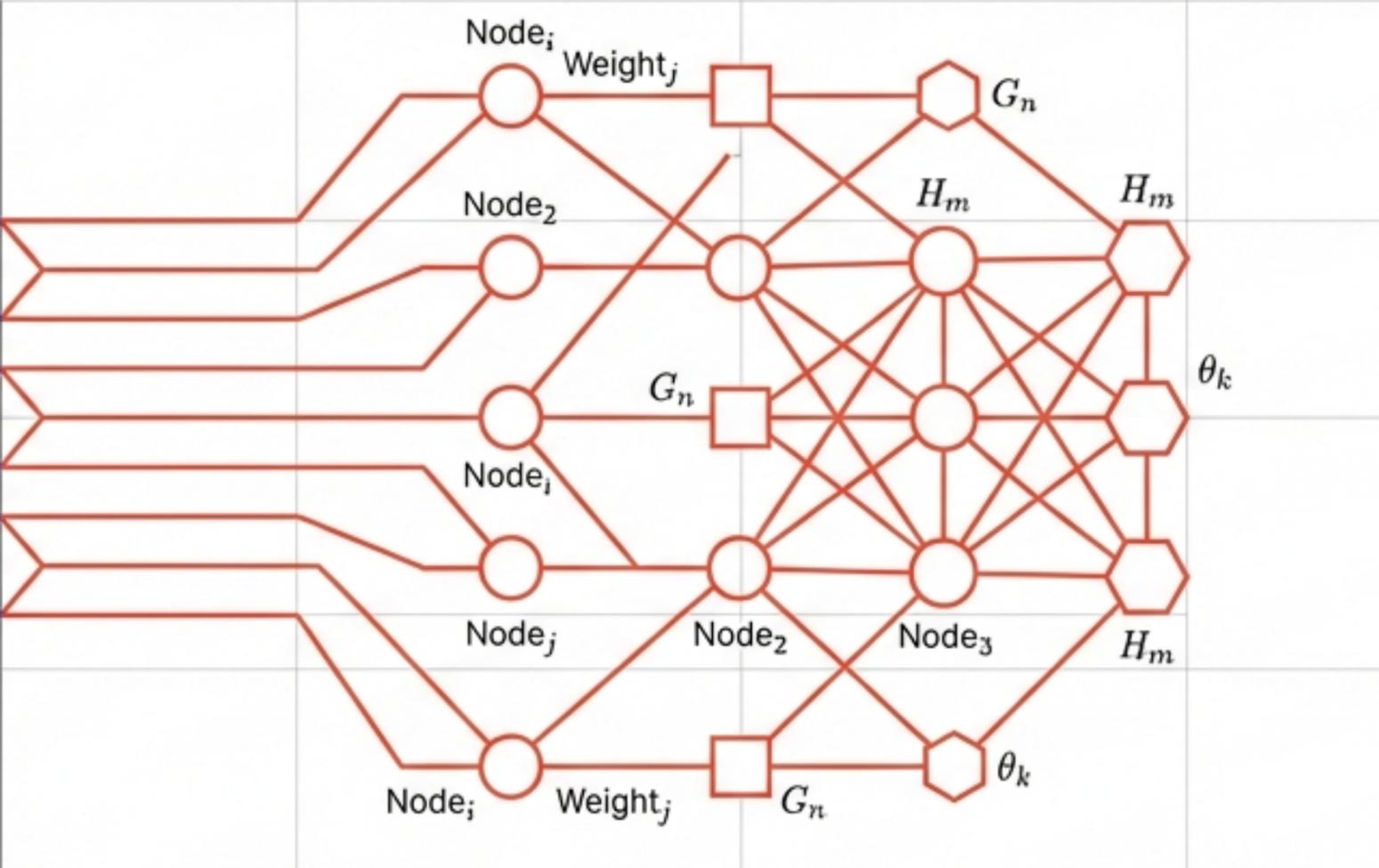


GPT-5.2と理論物理学：グルーオン単一マイナス振幅の導出

“ゼロ”のドグマを破る半共線領域の発見



Feynman Diagram: Representing gluon scattering amplitudes. Traditionally simpler in specific kinematic regions.



Digital Network: GPT-5.2 identified novel semi-collinear contributions, expanding the theoretical framework beyond established simplifications.

エグゼクティブサマリー

成果

従来「ゼロ」とされてきた単一マイナス (Single-Minus) グルーオン振幅において、特定の領域で非ゼロの閉形式を発見。

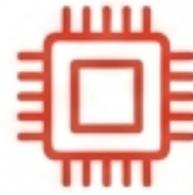
教科書の常識を覆す物理学的成果。

手法

人間とAIのハイブリッドアプローチ。



Human
(Calculation $n \leq 6$)



GPT-5.2 Pro
(Simplification & Conjecture)



AI Scaffold
(Formal Proof)



Human
(Verification)

結果

符号関数 (sign function) を用いた、驚くほど簡潔な数式 (Eq. 39)。

(Eq. 39)

(2, 2) Klein符号における「半共線領域 (Half-Collinear Regime)」での成立。

物理学の定説：「単一マイナス」は消える

MHV Amplitudes
(Known)

$(- + \dots +)$

Standard / Simple

Single-Minus
(The Anomaly)

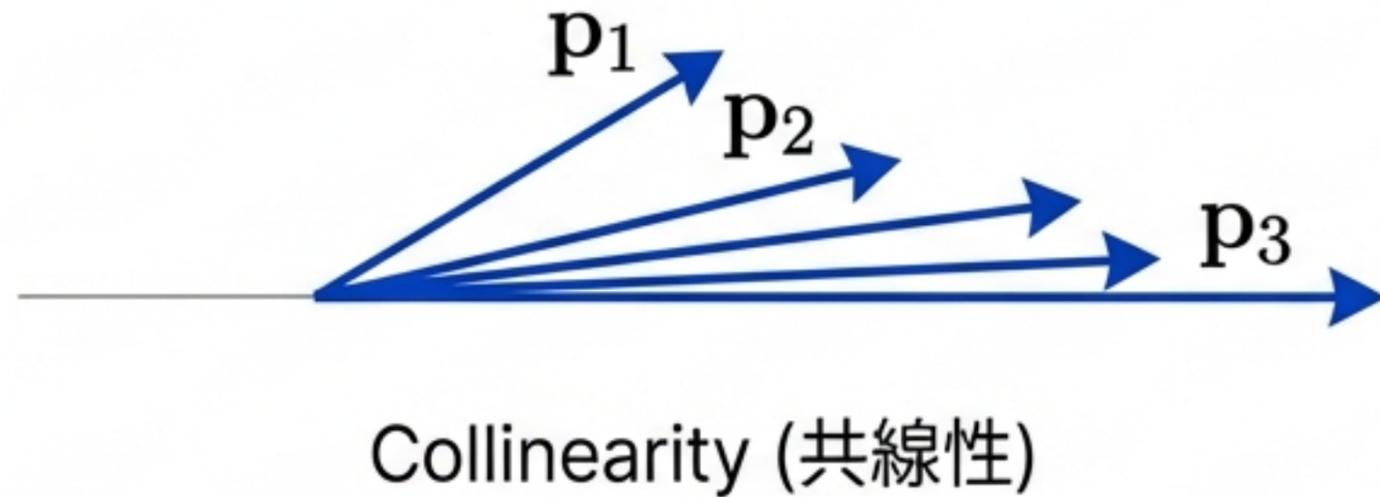
$(- + \dots +)$

$$A(1^-, 2^+, \dots, n^+) \approx 0$$



一般的な運動量 (General Momenta) の仮定下では、この振幅はゼロになると数十年間信じられてきた。標準的な議論が適用される限り、そこには「何もない」はずだった。

標準議論が破綻する場所：半共線領域

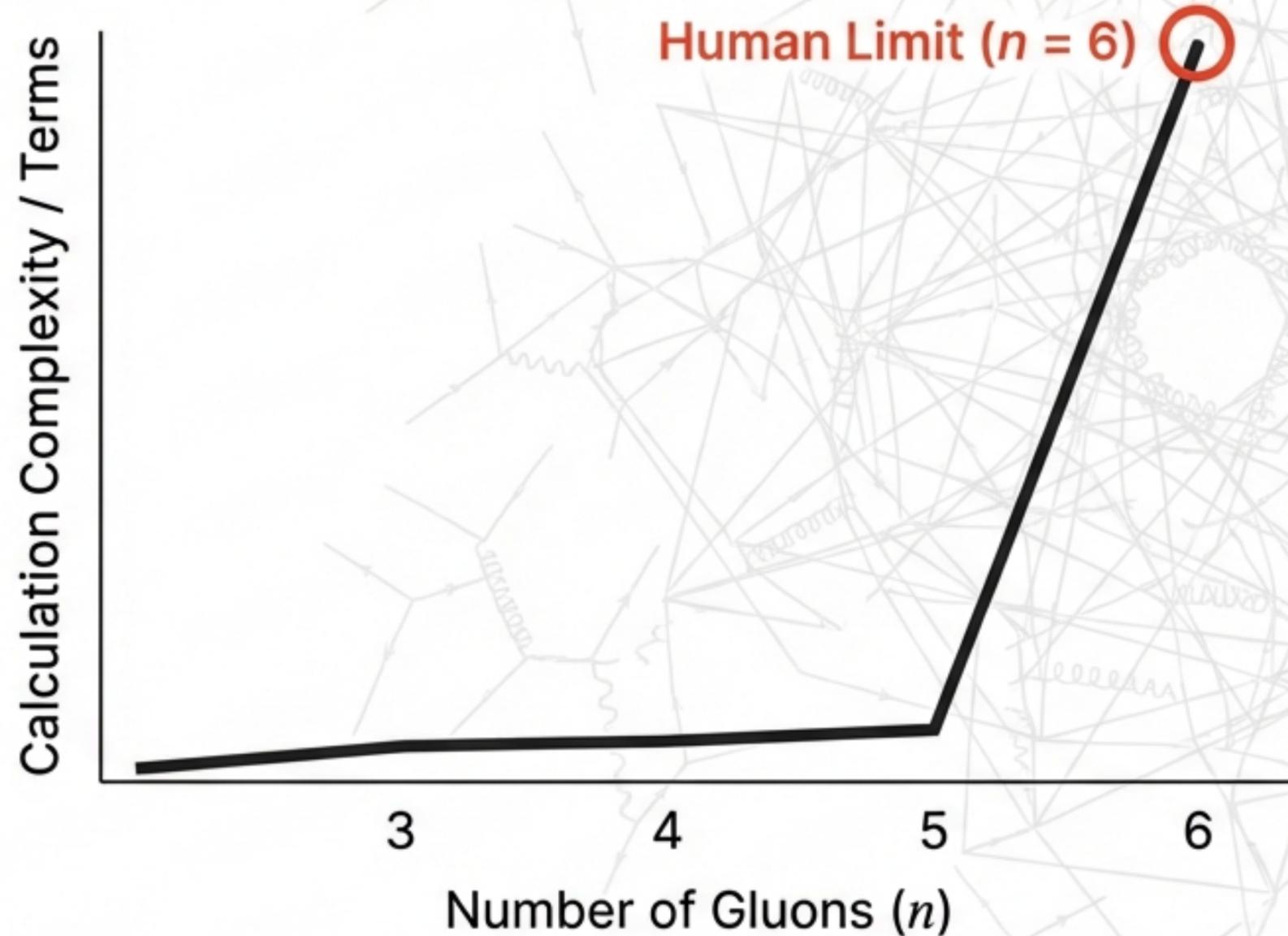


Half-Collinear Condition (半共線条件)

$$\langle ij \rangle = 0 \text{ for all } i, j \text{ but } [ij] \neq 0$$

- この条件は、通常のコフスキー空間（実運動量）では成立しない。
- (2, 2) Klein符号、あるいは複素運動量（Complex Momenta）の世界でのみ、数学が息を吹き返す。
- 振幅は通常関数ではなく、分布（distribution）としてこの領域に「支持」される。

人間の限界：超指数的な複雑性



$n=6$ の時点で、ファインマン図の展開は膨大となり、手計算の限界に達する。

研究チームは $n=3$ から $n=6$ までの「汚い」計算結果を持っていたが、そこから法則を見出すことは困難だった。

GPT-5.2 Proによるパターン認識と簡約

Human Calculation (Eq. 29-32)

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{[\exp(\alpha_b(t) - ei\omega_b t)]^2}{(2\exp(\alpha_b) - s\omega_b t)^2} + \frac{B_b(\tau) - \exp(i\omega_b t)}{(2\exp(i\omega_b t)^2 + B_b(\tau) - s\omega_b t)^2} + \dots \right. \\
 & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(\alpha_b) B_b(\tau) + \sin(\alpha_b(t) + \cos(\cos(i\omega_b t))}{3\pi(\cos \beta B_b(\tau) - 3\omega_b t)} + \\
 & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[\exp(\alpha_b(t) - ei\omega_b t)]^2}{(2\exp(\alpha_b) - s\omega_b t)^2} + \frac{B_b(\tau) - \exp(i\omega_b t)}{(2\exp(i\omega_b t)^2 + 5\exp(\alpha_b) - s\omega_b t)^2} + \dots \\
 & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(\alpha_b) B_b(\tau) + \sin(\alpha_b(t) + \cos(\cos(i\omega_b t))}{3\pi(\cos \beta B_b(\tau) - 3\omega_b t)} + \\
 & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(\alpha_b t) + \frac{\text{sgn}(\alpha_b) B_b(\tau) - \exp(i\omega_b t)}{(\exp(\alpha_b) (\omega - k)^2 (-2\pi n \theta_b) B_b(\tau) - 3\omega_b t)^2} + \\
 & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(\alpha_b) B_b(\tau) + \sin(i\omega_b t) + \exp(1\cos(i\omega_b t))}{3\pi(\cos 3B_b(\tau) - 3\omega_b t)} + \\
 & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(\alpha_b t) + \frac{B_b(\tau) - \exp(i\omega_b t)}{(\exp(i\omega_b t)^2 + 4\exp(\tau) - \cos(i\omega_b t))^2} + \dots \\
 & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(\alpha_b) B_b(\tau) + \sin(i\omega_b t) + \exp(\alpha_b) B_b(\tau) + \exp(\cos(i\omega_b t))}{2s\omega_b t (\omega - k)^2 (1 - 5B_b(\tau) - 3\omega_b t)^2} + \\
 & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(\alpha_b) B_b(\tau) + \sin(i\omega_b t) + \exp(1\cos(i\omega_b t))}{2\pi(\cos 3B_b(\tau) - 3\omega_b t)} + \dots
 \end{aligned}$$

AI Simplification (Eq. 35-38)

$$A_n = \sum_k \text{sgn}(\alpha_k) B_k(\tau) \exp(i\omega_k t)$$

AIは複雑な式の中に隠された構造を見抜き、人間が扱える形に「掃除」した。

推測された一般公式：Equation (39)

$$A_n = \sum (\text{Projection}) \times \text{sgn}(\alpha_k) \times \text{StrippedAmp}_k$$

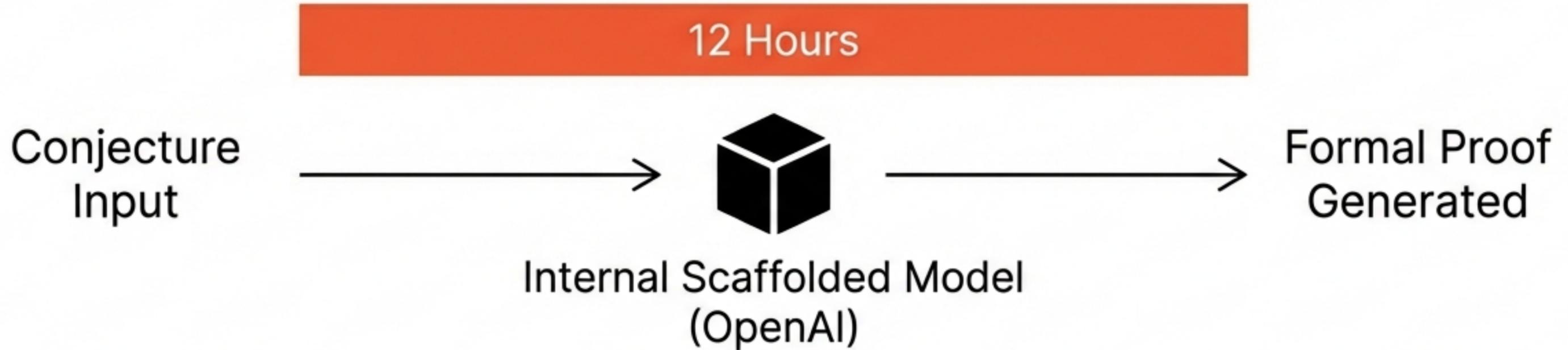
射影演算子
(Projection Operators)

符号関数 (Sign Function):
Values $\pm 1, 0$

Stripped Amplitude

GPT-5.2 Proは $n = 6$ までのデータから、全 n に対する一般公式を推測 (Conjecture) した。

12時間の形式的証明



- 推測だけでは科学ではない。OpenAIの内部スキャフォールドモデルが、約12時間の推論を経て形式的証明を生成した。
- モデルの詳細（名称、プロンプト、アーキテクチャ）は未公開（Black Box）。

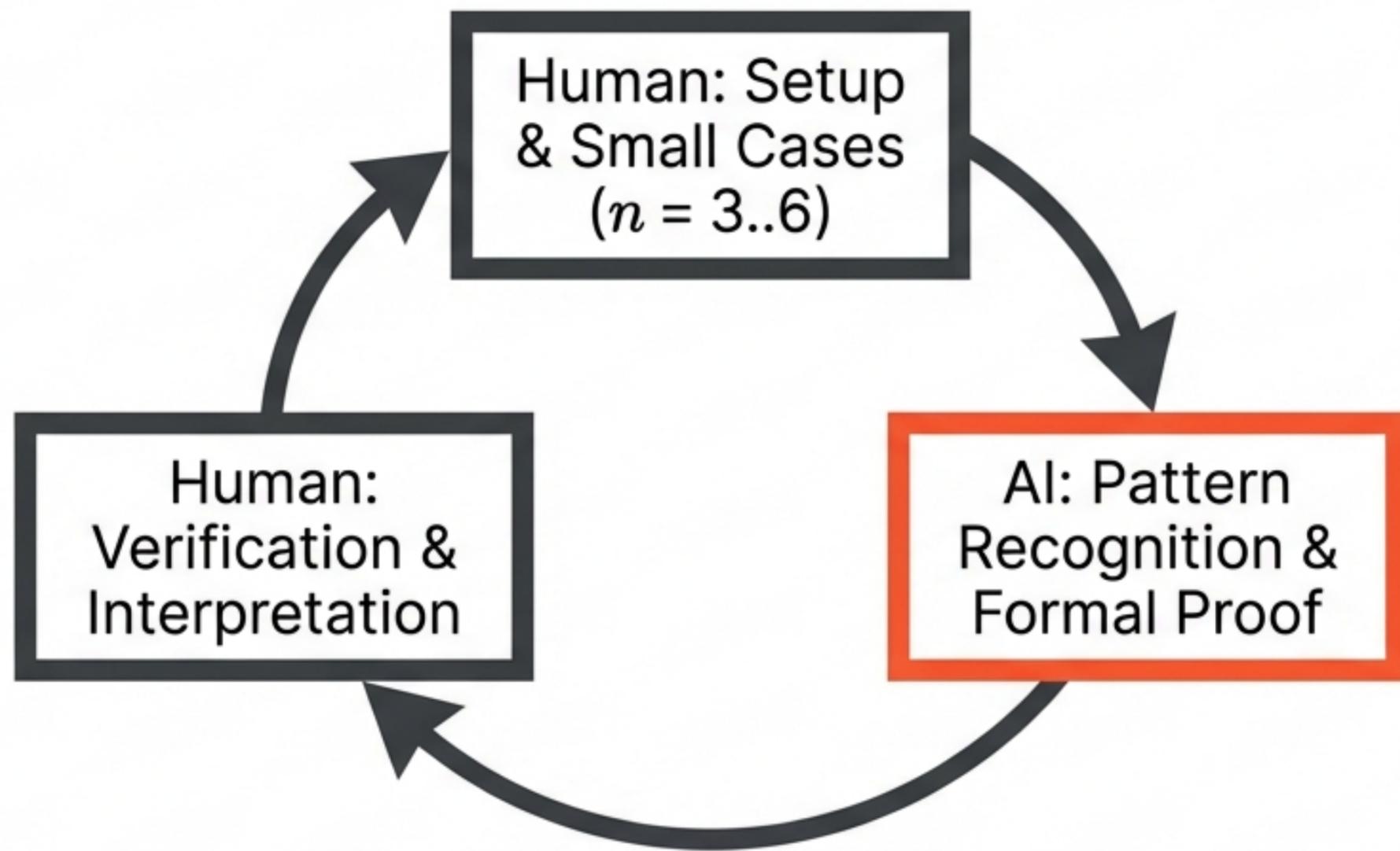
“内部モデルが自律的に証明を構築した”

人間による検証：物理法則との整合性

- ✓ Berends–Giele Recursion (ベレンツ-ギーレ再帰) - ファインマン図との等価性
- ✓ Soft Theorems (ソフト定理) - 極限での振る舞い
- ✓ Cyclicity & U(1) Decoupling (巡回対称性と非結合)

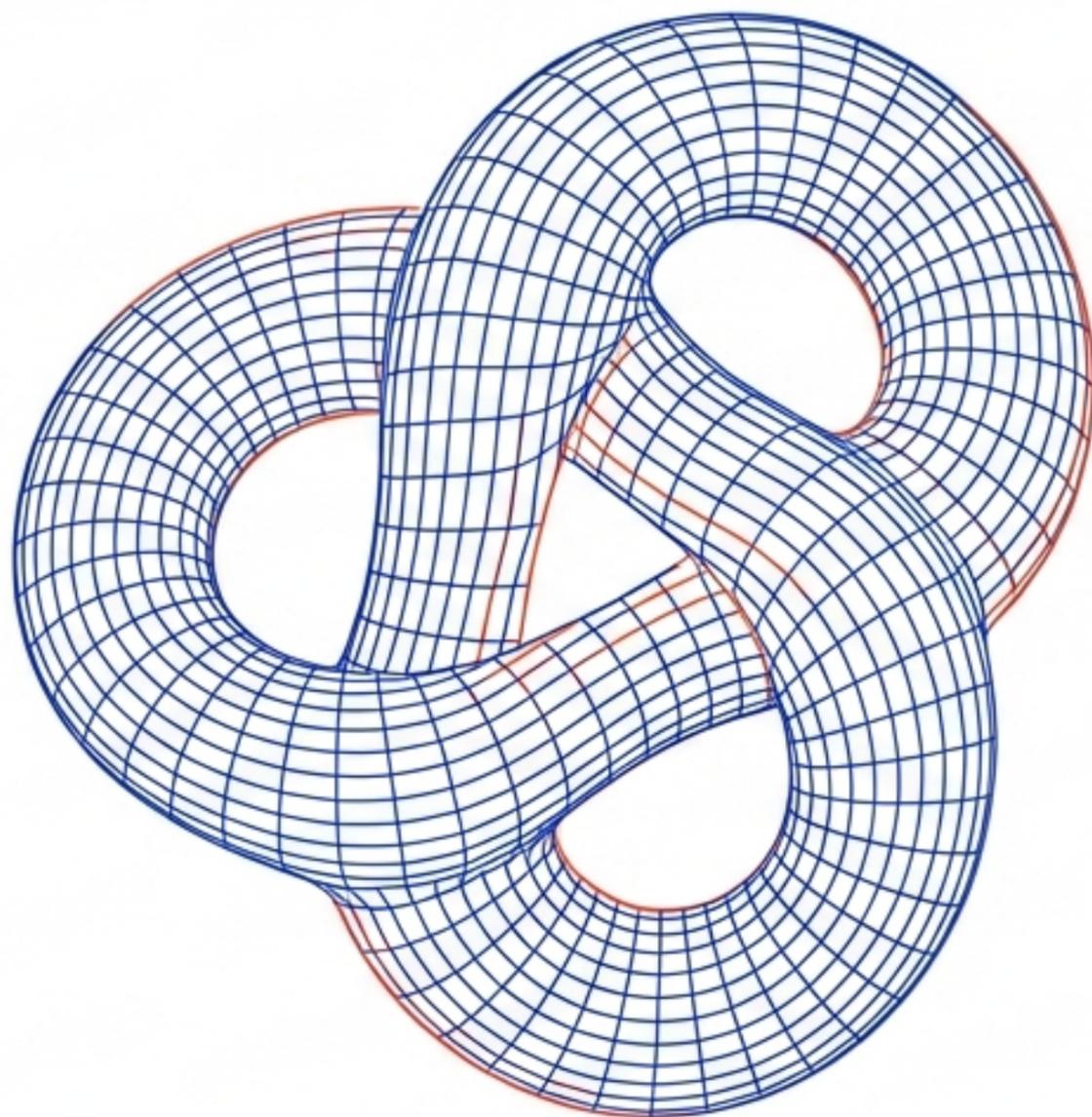
著者はAIの証明を鵜呑みにせず、既知の物理法則と照らし合わせて解析的に検証を行った。これが「**Ground Truth (真実)**」を保証する。

理論物理学の新しいテンプレート



“LLM主導の知見を検証するテンプレートを提示した”
— Nathaniel Craig

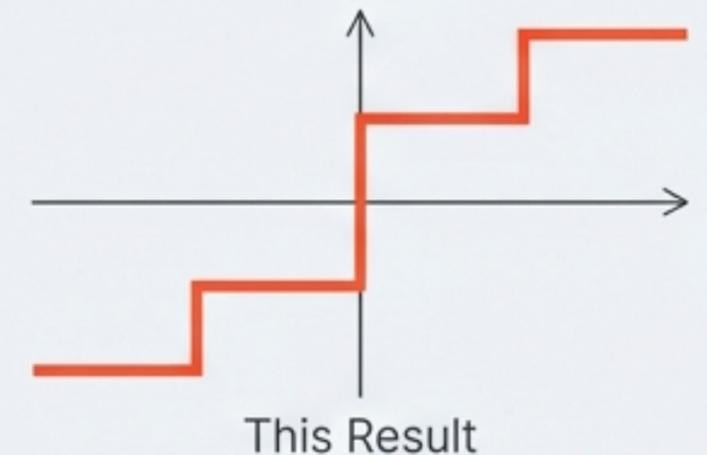
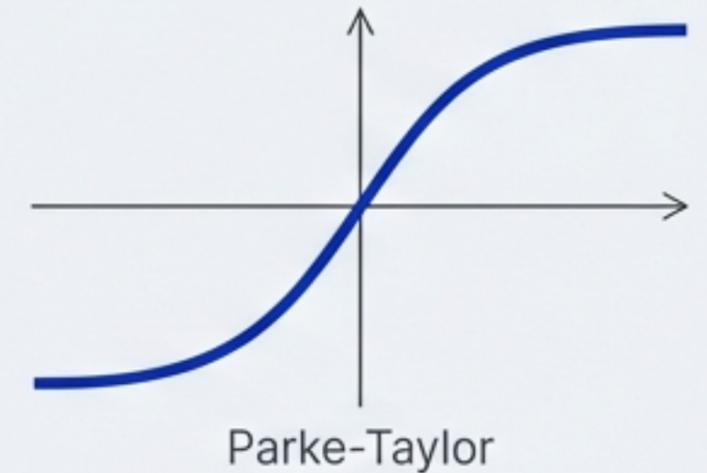
科学的意義：なぜこの発見が重要なのか



- ✓ **1. 解析接続 (Analytic Continuation)**
複素空間での振幅構造を理解することで、物理的な散乱の背後にある数学的真理に迫る。
- ✓ **2. 閉形式の存在 (Existence of Closed Form)**
Parke-Taylor公式以来の、「単純さ」の発見。
- ✓ **3. 重力への拡張**
論文著者は、この手法が重力子 (Graviton) へも拡張可能であることを示唆している。

既存の枠組みとの比較

Model	Feature	Regime
Parke-Taylor (MHV)	Smooth Functions (滑らか)	General Kinematics
This Result (Single-Minus)	Sign Functions / Piecewise Constant (符号関数 / 離散的)	Half-Collinear Regime



従来の公式が滑らかな関数であるのに対し、今回の発見は領域によって値がジャンプする「デジタル」な構造 ($\pm 1, 0$) を持つ。

限界と適用範囲



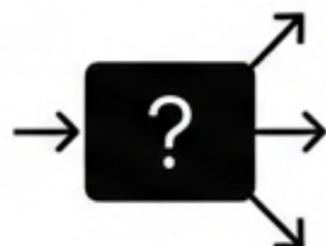
Unphysical Regime

(2,2) Klein符号は現実の時空ではない。LHC実験への直接適用は現時点では不可。



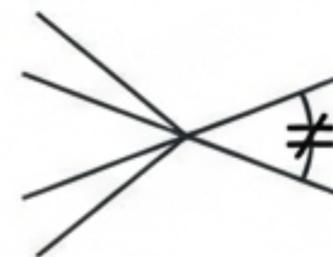
Opacity

AI推論プロセスの詳細（プロンプト等）は未公開。外部検証が必要。

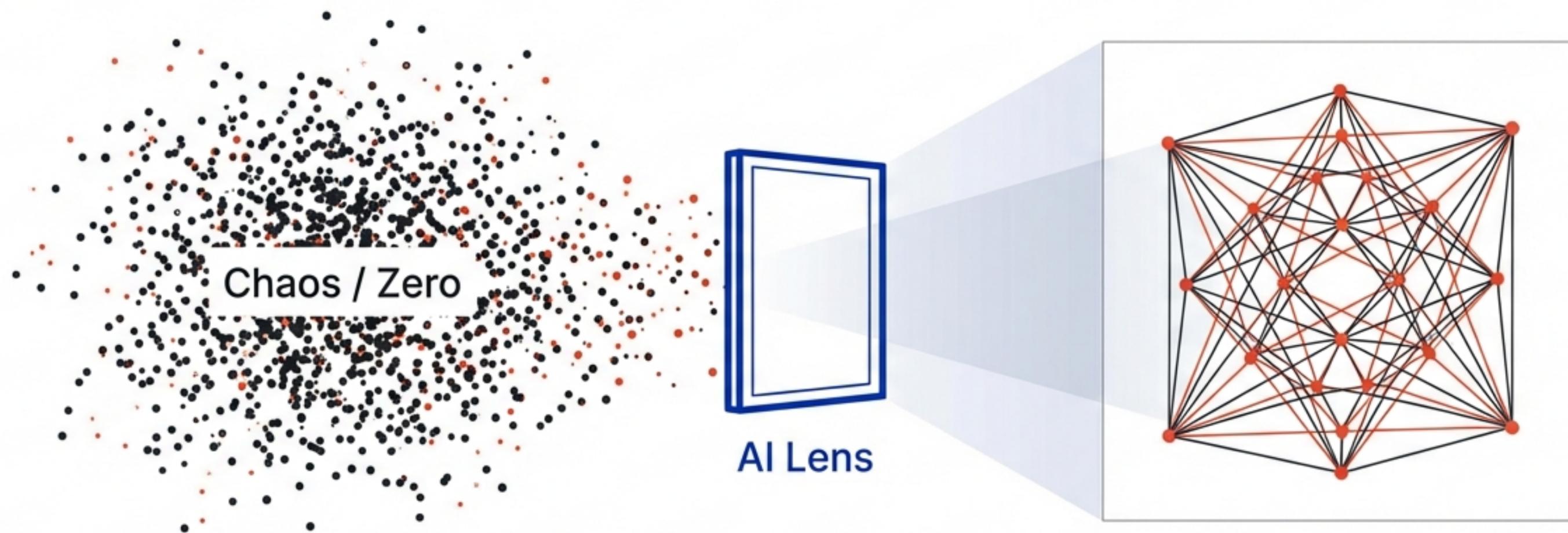


Dependence

半共線条件という特殊な「運動学的ローカス」に強く依存。



共生による発見：隠れた構造を可視化する



- AIは物理学者を置き換えたのではない。
- AIは「究極のパターン認識機」として振る舞い、人間が「ゼロ」だと思い込んでいた場所に潜む数学的エレガンスを発掘した。
- 計算の壁（Complexity）を突破するパートナーとしてのAI。

参考文献・ソース

****Primary Paper****: *Single-minus gluon tree amplitudes are nonzero*
(arXiv:2602.12176) - Guevara, Lupsasca,
Lupsasca, Skinner, Strominger, Weil.
****Source****: OpenAI Blog (Feb 13, 2026).



arXiv:2602.12176

Detailed derivation and proof available in the primary manuscript.