



# GPT-5.2が理論物理学の定説を覆した発見の意義：グルーオン散乱振幅の新公式

## 概要

2026年2月、OpenAIのGPT-5.2 Proが、素粒子物理学における約40年間の定説を覆す発見に貢献した。論文「Single-minus gluon tree amplitudes are nonzero」(arXiv: 2602.12176)において、教科書で「ゼロ」と教えられてきたシングルマイナス・グルーオンのツリーレベル散乱振幅が、特定の運動量領域（半コリニア領域）において非ゼロであることが証明された。この論文は、プリンストン高等研究所（IAS）、ハーバード大学、ケンブリッジ大学、ヴァンダービルト大学、そしてOpenAIの研究者の共同成果であり、GPT-5.2が公式の推測（conjecture）から形式的証明（formal proof）までを一貫して担った点が画期的である。[1][2][3][4]

---

## 物理学的背景：散乱振幅とグルーオン

### 散乱振幅とは何か

散乱振幅は、素粒子同士が衝突してどのような粒子が生まれるかの確率を計算するための中心的な量である。LHC（大型ハドロン衝突型加速器）での実験データ解析や、標準模型の予測計算において不可欠な概念であり、ファインマン図を用いて摂動的に計算される。標準模型のファインマン図展開から得られる理論予測は、実験値と14桁の精度で一致するという驚異的な成果を上げている。[5]

### グルーオンとヘリシティ

グルーオンは、クォーク間の「強い力」を媒介するゲージ粒子であり、量子色力学（QCD）によって記述される。光子と異なり、グルーオン自身が「色荷」を持つため、グルーオン同士が直接相互作用する特殊な性質を持つ。質量ゼロの粒子であるグルーオンは、運動方向に対するスピンの向き（ヘリシティ）として「+（正）」か「-（負）」のいずれかの状態を取る。散乱振幅を計算する際、各グルーオンにヘリシティを指定する必要がある。[1]

## 40年間の定説：「ゼロになる」振幅

1986年にParkeとTaylorが発見したMHV (Maximally Helicity Violating) 振幅の公式は、 $n$  個のグルーオンのうち2つだけが負ヘリシティで残りが正ヘリシティの場合に、驚くほどコンパクトな形で書けることを示した。この公式は散乱振幅研究の出発点となり、後にBCFW漸化式やアンブリチュードヘドロンの発見へとつながった。[6][7][8]

一方で、以下の2つのヘリシティ配置はツリーレベルで**ゼロになる**というのが教科書的な定説だった：[6][1]

- すべてのグルーオンが正ヘリシティの場合
- 1つだけ負ヘリシティで、残りすべてが正ヘリシティの場合 (シングルマイナス配置)

このゼロになる理由は、偏極ベクトルの参照スピノルを適切に選ぶことで、すべての寄与がキャンセルされるという「パワーカウンティング指数」に基づいていた。しかし、この議論は**運動量が一般的 (generic) な配置にある**という暗黙の前提に依存していた。[2][5]

---

## 今回の発見：何が覆されたのか

### 半コリニア (half-collinear) 領域の発見

今回の論文の核心は、上述の消滅定理が**結論として強すぎた**ことを示した点にある。標準的な議論が成り立たない「半コリニア領域」という特別な運動量空間の部分領域が発見された。半コリニア領域とは、すべてのスピノル角括弧  $\langle ij \rangle$  がゼロになるが、スピノル角括弧  $[ij]$  は非ゼロのまま残る領域である。[9][2][5]

この領域はクライン空間 (Klein space、符号  $(2, 2)$  の時空) または複素化された運動量において整合的に定義される[4]。通常のコリニア空間とは異なり、クライン空間ではこのような配置が数学的に矛盾なく存在する。従来の消滅の議論では、参照スピノル  $|r\rangle$  を適切に選ぶことで偏極ベクトル同士の縮約をゼロにできたが、半コリニア領域ではこの選択自体が特異的になり、議論の「抜け穴 (loophole)」が生じる[5][1]。

### 公式の構造：区分定数の整数値

発見された振幅は極めて独特な構造を持つ。半コリニア領域内で、ストリップト振幅は\*\*区分定数 (piecewise-constant) であり、各チェンバー (区画) 内で整数値 (+1、-1、または 0) \*\*のみを取る。特に、1つの負ヘリシティグルーオンが  $n-1$  個の正ヘリシティグルーオンに崩壊するR1領域では、論文の式(39)として以下の簡潔な一般公式が与えられた：[5][9]

この公式は  $n-2$  個の射影演算子の符号付き積として表現され、各因子は  $1/2(\pm 1 \pm 1) \in \{-1, 0, 1\}$  という値を取る。この「積の形」が、振幅が符号を変えるチェンバー境界 (余次元1の壁) を明示的に示す。[5]

## 厳密な検証

得られた公式は、以下の複数の独立した整合性条件によって検証されている：[2][5]

- **Berends-Giele漸化式**：多粒子ツリー振幅を再帰的に構成する標準手法による解析的検証
- **Weinbergのソフト定理**：粒子のエネルギーがゼロに近づく極限での振幅の振る舞いとの整合性
- **巡回対称性 (cyclicity)**
- **反射対称性**
- **Kleiss-Kuijf関係式**
- **U(1)デカップリング恒等式**

これらの条件は公式の直接的な見た目からは自明でないにもかかわらず、すべて満たされていることが確認された。[5]

---

## GPT-5.2が果たした役割：AIによる科学的発見の新モデル

### 4段階の協働プロセス

今回の研究では、人間の物理学者とAIが以下の4段階で協働した：[3][1][2]

ステップ	担当	内容
基底ケースの計算 (n=3~6)	人間の物理学者	手計算で非常に複雑な式を導出。n=6で既に32項に達する[5]
式の劇的な簡約化	GPT-5.2 Pro	超指数関数的に複雑な式を大幅にシンプルな形に変換 (式(29)~(32)→式(35)~(38)) [2][1]
一般公式の推測 (conjecture)	GPT-5.2 Pro	簡約化された式からパターンを発見し、任意のnに対して成り立つ一般公式 (式(39)) を提案[2][10]
形式的証明の生成	GPT-5.2 (スキヤフォールド版)	約12時間の自律的推論により、同じ公式に独立に到達し、形式的証明を完成[2][10]

### 従来のAI利用との本質的な違い

従来のAI支援科学では、AIは主にデータ解析、シミュレーション、文献検索といった「補助的」な役割に留まっていた。今回の研究でGPT-5.2が担ったのは、科学研究の核心的プロセスそのものである：[3][1]

- **パターン認識**：複雑な数式の中に隠れた規則性を見抜く
- **帰納的推論**：有限個の具体例から一般法則を予想する
- **演繹的推論**：数学的に厳密な証明を構成する

Nima Arkani-Hamed教授（プリンストン高等研究所）は、この種の高度に縮退した散乱過程の物理は「15年来気になっていたテーマ」であり、論文に示された驚くほどシンプルな表式を見て「興奮する」とコメントした。Nathaniel Craig教授（カリフォルニア大学サンタバーバラ校）は、この論文を「ジャーナルレベルの研究であり理論物理学のフロンティアを前進させるもの」「AI支援科学の未来を垣間見るもの」と評価している。[10][2]

---

## この発見の意義：3つの次元

### 1. 素粒子物理学における意義

散乱振幅の分野では、一見ゼロに見える振幅が実は非ゼロだったという発見は、その背後にある未知の数学的・物理的構造の存在を強く示唆する。歴史的に、1986年のParke-Taylor公式がMHV振幅の驚くべきシンプルさを明らかにし、それがBCFW漸化式（2005年）の発見、ツイスター理論との接続、そしてアンプリチュードヘドロノ（2013年）の発見へとつながった。今回のシングルマイナス振幅の発見も、同様に新しい理論的構造の入り口となる可能性がある。[7][8][1]

論文著者自身も「我々の表式はファインマン図展開の直接的な結果と比べて劇的な簡約化であるが、変数や基底のより巧みな選択によって、さらにシンプルな表式が得られる可能性は十分にある」と述べている。また、自己双対ヤン-ミルズ理論（SDYM）における長年のパズルを潜在的に解決する可能性も指摘されている。[5]

### 2. LHCなどの実験物理学への影響

LHCでのプロトン衝突実験では、グルーオン散乱はバックグラウンドノイズの主要な構成要素である。より精密な散乱振幅の計算が可能になれば、既知の標準模型の相互作用をより正確に差し引くことができ、暗黒物質や超対称性粒子などの「新物理学」のシグナルをよりクリアに検出できる可能性がある。半コリニア領域の物理的意味や、実際の衝突実験との関連性については今後の研究課題だが、理論的な基盤の拡張は実験データ解析の改善に直接貢献し得る。[11][12]

### 3. AI支援科学の新しいパラダイム

今回の成果は、AIが科学研究において「ツール」から「パートナー」へ移行する歴史的な転換点を示している。具体的に新しい点は以下の通り：[3]

- **仮説生成の自動化**：従来は人間の直観と経験に完全に依存していた「パターン発見 → 仮説立案」をAIが担った
- **証明能力の実証**：単なる推測ではなく、12時間の自律的推論による形式的証明の完成は前例のない成果[2]
- **共著者としてのAI**：OpenAIのKevin Weilが「OpenAIを代表して」共著者に名を連ねており、AIの貢献が公式に認められた[1][5]

---

## 今後の展開と残された課題

### 既に進行中の拡張

研究チームはGPT-5.2の協力のもと、以下の拡張を既に進めている：[10][2]

- **グルーオンから重力子 (graviton) への拡張**：重力を媒介する理論上の粒子に対して同様の計算が実行されている
- **超対称化 (supersymmetrization)**
- **セレスティアルホログラフィーとの接続**：振幅のメリン変換がローリセラ関数で記述される
- **S-代数や $Lw_{1,\infty}$ 代数との関係**

### 注意すべき点

- **プレプリント段階**：この論文は2026年2月時点でarXivのプレプリントとして公開されており、査読付きジャーナルへの採択はまだ行われていない[1]
- **OpenAI発の研究**：GPT-5.2の能力デモンストレーションとしての側面もあり、結果の物理的正当性とAIの貢献度は区別して評価する必要がある[1]
- **半コリニア領域の物理的実在性**：クライン空間や複素化運動量で定義されるこの領域が、実際の素粒子衝突実験でどの程度直接的に関連するかは未解明である[1][5]
- **AIの「理解」の問題**：GPT-5.2が物理学を「理解」しているかどうかは科学哲学的な議論の余地がある。パターン認識と形式的操作が「理解」に相当するかという問題は、今後のAI研究の重要なテーマとなる[1]

---

## 歴史的な文脈：散乱振幅研究の系譜

今回の発見を、散乱振幅研究の歴史的系譜の中に位置づけると、その意義がより明確になる。

年	出来事	意義
1986	Parke-Taylor公式の発見	MHV振幅の驚異的なシンプルさを発見。「教養ある推測」が出発点[6][8]
1988	Berends-Giele漸化式	ツリー振幅の再帰的構成法を確立。数値計算に広く応用[1][5]
2004	Witten のツイスター弦理論	散乱振幅とツイスター空間の接続を発見[7]
2005	BCFW漸化式	オンシェル漸化式による効率的な振幅計算法を確立[1]
2013	アンプリチュードヘドロンの発見	Arkani-HamedとTrnkaが散乱振幅の幾何学的構造を提唱[7][13]
2026	シングルマイナス振幅が非ゼロ	40年間ゼロとされた振幅の非自明な構造をAIが発見[2][5]

Parke-Taylor公式がMHV振幅の「不合理なほどのシンプルさ」を通じて場の理論の深い構造を暗示したように、今回発見されたシングルマイナス振幅の区分定数・整数値という構造も、まだ見えていない理論的枠組みの存在を示唆している。論文の著者たちが「この方法論からさらに興味深い洞察が得られることを期待する」と述べている通り、これは新たな理論的探究の出発点である。[5][1]

---

## References

1. [【解説】GPT-5.2が理論物理学の新発見に貢献](#) - この論文の最大の特徴は、AIモデル GPT-5.2 Pro が最終的な公式の予想 (conjecture) を行い、さらにその内部スキッチャフォルド版が約12時間の推論を経て形式 ...
2. [GPT-5.2 derives a new result in theoretical physics](#) - In a new preprint, GPT-5.2 proposed a formula for a gluon amplitude later proved by an internal Open...
3. [GPT-5.2 Derives New Result in Theoretical Physics - The Turning ...](#) - OpenAI's GPT-5.2 derived and proved a new formula for gluon scattering amplitudes. We analyze this h...
4. [\[2602.12176\] Single-minus gluon tree amplitudes are nonzero - arXiv](#) - Single-minus tree-level  $n$ -gluon scattering amplitudes are reconsidered. Often presumed to vanish, ...

5. [Single-minus gluon tree amplitudes are nonzero](#) - The key formula (39) for the amplitude in this region was first conjectured by GPT-5.2 Pro and then ...
6. [MHV amplitudes](#) - Work done in 1980s by Stephen Parke and Tomasz Taylor found that when considering the scattering of ...
7. [Amplituhedron](#) - Amplituhedron theory calculates scattering amplitudes without referring to such virtual particles. T...
8. [Retrospective: Lessons from the Past](#) - The importance of Parke-Taylor formula was not immediately recognized. Took about 20 years before it...
9. [Single-Minus Gluon Amplitudes Are Nonzero](#) - Paper: Single-minus gluon tree amplitudes are nonzero (2602.12176)  
Published: 12 Feb 2026.

Learn mo...

10. [OpenAI's GPT-5.2 discovers new physics formula for gluon interactions](#) - OpenAI's GPT-5.2 discovers new physics formula for gluon interactions
11. [GPT-5.2 Shatters Quantum Rules: Unexpected Gluon Collision ...](#) - GPT-5.2 confirms unexpected gluon collision, shattering quantum rules. Read the groundbreaking IAS-H...
12. [OpenAI's GPT-5.2 Makes Breakthrough Discovery in ...](#) - GPT-5.2 Pro conjectures groundbreaking formula for gluon scattering amplitudes previously thought im...
13. ["The Amplituhedron" by Nima Arkani-Hamed and Jaroslav Trnka ...](#)