

GPT-5.2 が 40 年の定説を覆した グルーオン散乱振幅の発見の全貌

— AI 支援科学研究の方法論的転換点 —

Claude Opus 4.6

作成日：2026年2月22日

主要情報源：OpenAI 公式発表、arXiv:2602.12176、Science 誌、Phys.org、The Quantum Insider

エグゼクティブサマリー

OpenAI の GPT-5.2 が、約 40 年間「ゼロである」と信じられてきたグルーオンの「単一マイナス」散乱振幅が、特定の運動学的領域（半共線的領域）において非ゼロであることを発見し、そのコンパクトな閉じた公式を推測・証明した^[1]。この発見は、ハーバード大学、プリンストン高等研究所（IAS）、ケンブリッジ大学、ヴァンダービルト大学の理論物理学者と OpenAI の共同研究として 2026 年 2 月に arXiv プレプリント（arXiv:2602.12176）で発表された^[2]。汎用大規模言語モデル（LLM）が理論物理学に独自の寄与を果たした初の事例として、科学研究における AI 活用の新たなパラダイムを提示している。

1. 「ゼロであるはず」が 40 年間覆されなかった理由

1.1 グルーオンと量子色力学（QCD）

グルーオンは強い核力を媒介するゲージボソンであり、クォーク同士を結びつけて陽子や中性子を形成する「糊」の役割を果たす。電磁気力を媒介する光子と異なり、グルーオンは自身も色荷を持つためグルーオン同士が相互作用する^[3]。この自己相互作用の確率を記述する数学的対象が「散乱振幅」であり、素粒子物理学の予測の中核をなす。

散乱振幅の計算にはファインマン図を用いるが、グルーオンの数 n が増えるにつれその数は超指数関数的に爆発する。 $n=4$ で 4 個、 $n=6$ で 220 個、 $n=10$ で 1000 万個以上のダイアグラムが

必要となる^[4]。

1.2 Parke-Taylor 公式と MHV 振幅

1986年、Parke と Taylor は驚くべき発見をした。「負のヘリシティのグルーオンが2つ、残りすべてが正のヘリシティ」という MHV (最大ヘリシティ違反) 配位の散乱振幅が、ファイマン図の膨大な和にもかかわらず、たった1項のエlegantな公式に帰着することを示した^[5]。この Parke-Taylor 公式は、ツイスター理論や BCFW 再帰関係、アンプリチュードヘドロンなど、数十年にわたる理論的革新の出発点となった。

一方、負のヘリシティが1つだけの「単一マイナス (single-minus)」配位については、標準的な教科書の議論によりツリーレベルで振幅がゼロとされてきた。この論証は、スピノルヘリシティ形式で参照スピノルを巧みに選択し、パワーカウンティングによって分子に十分な運動量因子がないことを示すものであり、約40年間疑問視されることなく受け入れられてきた^[6]。

2. 「半共線的領域」という抜け穴の発見

今回の論文「Single-minus gluon tree amplitudes are nonzero」の核心は、上記の「ゼロ証明」に隠れた前提条件の発見にある。標準的な論証は一般的 (generic) な粒子の運動量を暗黙に仮定していた。しかし研究チームは、運動量空間の中に「半共線的領域 (half-collinear regime)」と呼ばれる精密に定義された部分集合が存在し、そこでは標準的な論証が破綻することを突き止めた^{[2][7]}。

半共線的領域とは、すべての外線グルーオンの左手スピノル λ が互いに比例する ($|i\rangle \propto |j\rangle$) という特殊な運動学的配位である。この配位は通常の(1,3)ミンコフスキー時空では実現できないが、(2,2)クライン時空 (時間2次元+空間2次元) の実運動量や複素化された運動量では自然に成立する^[2]。この領域では角度括弧 $\langle ij \rangle$ がゼロとなるため、参照スピノルのトリックが使えず、パワーカウンティングの議論が崩壊する。

重要なのは、ツリーレベルの散乱振幅は運動学変数の有理関数であり、異なる時空の符号間で解析接続が可能な点である。実際、ウィッテンが2003年のツイスター弦理論の論文で「単一マイナス振幅はツイスター空間の一点に台を持つ」と示唆していたが、誰もフォローアップして実際の振幅を計算していなかった^[7]。

3. GPT-5.2 による公式導出のプロセス

この研究における人間と AI の役割分担は明確に段階化されており、今後の AI 支援科学研究のテンプレートとして注目されている^{[1][8]}。

3.1 第 1 段階：人間による理論的基盤構築（約 1 年間）

ハーバード大学の Andrew Strominger、ケンブリッジ大学の David Skinner、IAS の Alfredo Guevara が単一マイナス振幅の「ゼロ証明」の抜け穴を特定した。半共線的領域で Berends-Giele 再帰関係を適用し、 $n=3$ （1 項）、 $n=4$ （2 項）、 $n=5$ （8 項）、 $n=6$ （32 項）まで手計算で振幅を求めた。しかし式は超指数的に複雑化し、1 年以上の努力にもかかわらず簡約化に失敗した^{[8][9]}。

3.2 第 2 段階：GPT-5.2 Pro による簡約化と推測

Strominger の元大学院生である Alex Lupsasca が OpenAI for Science チームに参加し、この問題を最新の GPT-5.2 Pro でテストした。GPT-5.2 Pro は $n=4$ の式を約 20 分で簡約化し、次に $n=5$ 、 $n=6$ と進めた。 $n=6$ では 32 項の和をわずか数個の積に圧縮し 1 行のテキストに収めた^{[1][10]}。最後に「任意の n に対する一般化公式を推測せよ」と指示すると、GPT-5.2 Pro は 1~2 分で「明白な」一般公式を返した。これが論文の式(39)である。

式(39)は $(n-2)$ 個の因子の積で構成され、区分的定数で値は $\{-1, 0, +1\}$ のみを取る。Parke-Taylor 公式が MHV 振幅の階乗的複雑さを 1 項に帰着させたのと同様、この公式は単一マイナス振幅の超指数的複雑さを劇的に圧縮している^[2]。

3.3 第 3 段階：内部モデルによる証明（約 12 時間）

推測された公式は、OpenAI 内部の非公開モデル（研究者が私的に「SuperChat」と呼ぶ、スカフォールド構造を持つ GPT-5.2 の拡張版）に渡された。SuperChat は約 12 時間の連続自律推論の後、形式的証明を生成した^{[1][11]}。証明は 1 ページ未満で 3 段階からなり、最も創造的なステップは鳩の巣原理に類似した観察であった。

3.4 第 4 段階：人間による検証（約 1 週間）

研究チームは証明を分解し、すべての計算を手作業で確認した。Berends-Giele 再帰との整合

性、ワインバーグのソフト定理、巡回性、Kleiss-Kuijf 関係のすべてを満たすことを検証し、論文として執筆した^[2]。

4. 科学コミュニティの評価

専門家の反応は、この発見の二面性を正確に捕らえている。UCLA の Zvi Bern 教授は、アイデア自体は革命的ではないが機械がこれができることが革命的だと評し、物理的成果よりも方法的意義を強調した^[8]。IAS の Nima Arkani-Hamed 教授は 15 年前から気になっていた散乱過程について、ここまでシンプルな表現が見つかったことに興奮すると述べた^[9]。UC Santa Barbara の Nathaniel Craig 教授は査読誌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ていると断言した^[8]。

一方で慎重な意見も多い。Hugging Face の技術ブログで理論物理学者 David Louapre は、物理学的な枠組み（クライン符号への移行、半共線の領域、抜け穴の発見、再帰の設定など）はすべて人間の仕事であり、それがおそらく最も困難な部分だと指摘した^[12]。また、結果が適用されるのは(2,2)クライン時空の半共線の領域という測度ゼロの部分集合であり、「教科書物理学の全面的な書き換え」ではなくエッジケースの理解の精緻化である点にも留意が必要である^[12]。

5. AlphaFold や FunSearch との比較で見える位置づけ

AI による科学的発見の系譜の中で、この成果には 3 つの際立った特徴がある。第一に、汎用 LLM が理論物理学に独自の貢献をした初の事例であること。AlphaFold^[13]や GNoME^[14]は特定ドメイン向けに構築された専用システムだったが、GPT-5.2 は汎用モデルである。第二に、人間との協働プロセスが明確にテンプレート化されている点。第三に、影響範囲は先行事例と比較して限定的であることである^{[12][15]}。

項目	AlphaFold	FunSearch	GPT-5.2 グルーオン	備考
AI の種類	専用深層学習	LLM+評価器	汎用 LLM	初の汎用 LLM 事例
分野	構造生物学	組合せ数学	理論物理学	
自律度	高い	中程度	低～中	人間が誘導

影響範囲	分野全体を変革	特定問題	特殊な運動学領域	
査読状況	Nature 掲載×2	Nature 掲載	プレプリント	2026年2月時点

表1：AIによる科学的発見の比較

6. 知的財産・特許への示唆

GPT-5.2が公式を「推測」し内部モデルが「証明」したという事実は、知的財産法における根本的な問いを突きつける。特許法の世界では、AI発明者の適格性を問うDABUS訴訟が世界15ヶ国以上で争われたが、南アフリカを唯一の例外として全主要法域でAIは発明者になれないと判断されている^{[16][17]}。

日本でも知財高裁は2025年1月に「発明者は自然人でなければならない」と判示しつつ、立法的議論の必要性を示唆している^{[18][19]}。今回の論文は巧妙な妥協策を採用し、GPT-5.2は著者として記載されず、代わりにOpenAIの最高製品責任者Kevin Weilが「OpenAIを代表して」著者として名を連ねている^{[1][20]}。この「法人代理人」モデルは現行ルール内での創造的な対応といえるが、AIの科学的貢献が増大するにつれ、法的枠組みの改革への圧力は高まるだろう。

7. 結論：科学研究の「新しい分業」の始まり

この発見の最大の意義は、40年来の物理学的定説を覆したこと自体よりも、汎用AIが理論物理学の研究プロセスに実質的に参画できることを実証した点にある。人間が概念的枠組みと問題設定を提供し、AIがパターン認識・公式推測・形式証明を担い、人間が最終検証を行うという分業モデルは、理論物理学に限らず数学や化学など広範な基礎科学に応用可能である^[15]。

ただし、今回AIが担ったのは「退屈で高密度な計算作業の突破」であり、半共線的領域という抜け穴の発見や(2,2)クライン時空への着眼といった最も困難な概念的飛躍は人間の仕事だった^[12]。それでも、Stromingerが述べたように「人間だけでは永遠に解けなかったかもしれない」問題に対し、AIが決定的な突破口を開いたことは事実である^[8]。今後の重力子への拡張やSDYM理論への含意、さらには他の「教科書のゼロ」を再検証する動きが広がれば、この論文はAI支援科学の方法論的転換点として歴史に残る可能性がある。

参考文献

- [1] OpenAI, "GPT-5.2 derives a new result in theoretical physics," OpenAI Blog, February 2026.
<https://openai.com/index/new-result-theoretical-physics/>
- [2] A. Guevara, A. Lupsasca, D. Skinner, A. Strominger, K. Weil, "Single-minus gluon tree amplitudes are nonzero," arXiv:2602.12176, February 2026. <https://arxiv.org/abs/2602.12176>
- [3] M. Gell-Mann, "A schematic model of baryons and mesons," Physics Letters, Vol. 8, No. 3, pp. 214–215, 1964.
- [4] F. A. Berends and W. T. Giele, "Recursive calculations for processes with n gluons," Nuclear Physics B, Vol. 306, No. 4, pp. 759–808, 1988.
- [5] S. J. Parke and T. R. Taylor, "Amplitude for n-gluon scattering," Physical Review Letters, Vol. 56, No. 23, pp. 2459–2460, 1986.
- [6] L. J. Dixon, "Calculating scattering amplitudes efficiently," in TASI Lectures, hep-ph/9601359, 1996.
- [7] E. Witten, "Perturbative gauge theory as a string theory in twistor space," Communications in Mathematical Physics, Vol. 252, pp. 189–258, 2004.
- [8] A. Cho, "ChatGPT spits out surprising insight in particle physics," Science (AAAS), February 2026.
<https://www.science.org/content/article/chatgpt-spits-out-surprising-insight-particle-physics>
- [9] Phys.org, "Can a chatbot be a co-author? AI helps crack a long-stalled gluon amplitude proof," February 2026. <https://phys.org/news/2026-02-chatbot-author-ai-stalled-gluon.html>
- [10] The Quantum Insider, "AI Scientist Spots What Physicists Missed in Gluon Scattering," February 13, 2026.
<https://thequantuminsider.com/2026/02/13/ai-scientist-spots-what-physicists-missed-in-gluon-scattering/>
- [11] Ai505, "GPT-5.2 Just Solved a 40-Year Physics Problem in 12 Hours (And the Proof is on arXiv)," February 2026. <https://ai505.com/gpt-52-physics-discovery-arxiv-proof/>
- [12] D. Louapre, "Did GPT 5.2 make a breakthrough discovery in theoretical physics?," Hugging Face Blog, February 2026. <https://huggingface.co/blog/dlouapre/gpt-single-minus-gluons>
- [13] J. Jumper et al., "Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold," Nature, Vol. 596, pp. 583–589, 2021.
- [14] A. Merchant et al., "Scaling deep learning for materials discovery," Nature, Vol. 624, pp. 80–85, 2023.
- [15] XenoSpectrum, "AI が理論物理学の『発見者』へ。グルーオン散乱の新公式を自律証明した GPT-5.2 が示す、科学の劇的な加速," February 2026. <https://xenospectrum.com/gpt-5-2-theoretical-physics-gluon-discovery/>
- [16] IP STARS, "The latest news on the DABUS patent case," 2024.
<https://www.ipstars.com/NewsAndAnalysis/The-latest-news-on-the-DABUS-patent-case/Index/7366>
- [17] AIPPI, "AI as an Inventor of Patents? IP High Court Judgment and the 2025 IP Strategic Program," 2025.
<https://www.aippi.org/news/ai-as-an-inventor-of-patents-ip-high-court-judgment-and-the-2025-ip-strategic-program/>
- [18] 志賀国際特許事務所, "IP High Court Case Regarding Patent Inventorship: Patent Inventor Must Be Human," 2025. https://shigapatent.com/en/topics/iphc_dabus/
- [19] 内閣府知的財産戦略本部, "知的財産推進計画 2025," June 2025.
- [20] K. Weil (@kevinweil), "GPT 5.2 derived a new result in theoretical physics..." X (formerly Twitter), February 2026. <https://x.com/kevinweil/status/2022388305434939693>