

GPT-5.2による素粒子物理学の定説覆し: シングルマイナス・グルーオン散乱振幅の非ゼロ証明とAI駆動型科学の黎明

Gemini 3.1 pro

序論: 計算の限界と新たなパラダイムの幕開け

2026年2月13日、人工知能と基礎科学の交差点において、歴史的なマイルストーンとなる研究成果が発表された。OpenAIの最新モデル「GPT-5.2 Pro」およびその内部スキヤフォールディング(足場構築)モデルが、素粒子物理学において約40年間にわたり「ゼロである」と信じられてきた「シングルマイナス・グルーオン散乱振幅」が特定の条件下でゼロではないことを発見したのである¹。このAIシステムは、長年の定説を覆す現象を特定しただけでなく、その振る舞いを記述する普遍的な新公式を推測し、さらには自律的に12時間の連続推論を行って数学的証明を完遂した²。

この成果は、ハーバード大学、ケンブリッジ大学、プリンストン高等研究所(IAS)、ヴァンダービルト大学、そしてOpenAIの研究者らによる共同プレプリント『Single-minus gluon tree amplitudes are nonzero』としてarXivに公開され、物理学界に大きな衝撃を与えた²。この発見は、単に複雑な方程式をAIが簡略化したという次元に留まらない。理論物理学の根幹をなす量子場の理論(QFT)における長年の定説を打破し、ファインマン図の計算における超指数関数的な複雑さの壁を突破し、自然界の隠れた数学的構造を明らかにするものであった⁴。本報告では、この画期的な発見の理論的背景、AIが果たした具体的な役割と推論プロセス、新公式の数学的構造、そしてこれが理論物理学および今後の科学的探求のあり方にもたらす深遠な波及効果について、網羅的かつ批判的に分析する。

理論的基礎と歴史的背景: ヤン・ミルズ理論と散乱振幅

自然界の基本的な相互作用のうち、重力を除く電磁気力、弱い力、強い力は「ヤン・ミルズ・ゲージ理論」という統一的な数学的枠組みで記述される⁷。この理論的枠組みにおいて、素粒子間の相互作用の確率を計算するための核心的な物理量が「散乱振幅(Scattering Amplitude)」である。散乱振幅は、初期状態の粒子群が相互作用を経て特定の終状態へと遷移する量子力学的確率の平方根を与える複素数であり、物理学の法則を最も簡潔にエンコードした数学的对象である⁷。

経路積分とファインマン図による摂動展開

量子場の理論において、理論のダイナミクスはラグランジアン \mathcal{L}_{YM} によって定義される⁷。物理的な予測を行うためには、場が取り得るすべての可能な経路についての積分(経路積分)を実行する必要があるが、これは数学的に極めて難解な巨大な積分対象となる⁷。リチャード・ファインマンは、この巨大な積分を結合定数 g のべき級数として展開する手法、すなわちファインマン図を用いた摂

動展開を考案した⁷。

しかし、強い力を媒介する粒子であるグルーオンは、 $SU(3)$ という非可換群の対称性に従うため、光子 ($U(1)$ ゲージボソン) とは異なり、グルーオン自身が自己相互作用を行うという決定的な特徴を持つ⁷。この非線形な自己相互作用により、散乱に関与する粒子の数 n が増えると、量子ループを含まない最も基本的な「ツリーレベル(木レベル)」の計算であっても、考慮すべきファインマン図の数は $n!$ (階乗) のオーダーで超指数関数的に爆発する⁸。この計算の複雑さは、理論物理学者にとって長年の障壁であった¹⁰。

ヘリシティとMHV振幅の発見

質量のない粒子であるグルーオンには、スピンの進行方向に対する射影である「ヘリシティ」が存在し、 $+$ (プラス) または $-$ (マイナス) の値を取る⁴。散乱振幅の計算において、特定のヘリシティ配置を考慮すると、膨大なファインマン図の足し合わせが劇的な相殺を起こし、最終的な結果が驚くほどシンプルな形に収束するという現象が知られている¹⁰。

1986年、物理学者のStephen ParkeとTomas Taylorは、 n 個のグルーオンのうち2個がマイナス・ヘリシティで、残りの $n - 2$ 個がプラス・ヘリシティを持つ「MHV (Maximally Helicity Violating) 振幅」が、極めてシンプルな単一の項からなる閉じた公式で記述できることを発見した⁹。このParke-Taylor公式の発見以降、MHV振幅はフルスケールのヤン・ミルズ理論を構築するための効率的な基礎ブロックとして特権的な役割を担ってきた⁸。

シングルマイナス振幅に関する40年の定説

MHV振幅が広く研究される一方で、1個のグルーオンのみがマイナス・ヘリシティを持ち、残りの $n - 1$ 個がプラス・ヘリシティを持つ「シングルマイナス振幅」については、物理学界において確固たる定説が存在した。標準的な教科書の理論や過去の膨大な計算結果に基づき、シングルマイナス振幅は一般的な運動学的条件下ではツリーレベルで「厳密にゼロ(消失する)」になるというコンセンサスが形成されていたのである⁴。

この結論は、偏極ベクトルの選択と運動量ベクトルのヘリシティ選択則に基づく強力な議論 (power-counting arguments) に裏打ちされており、理論的な疑いの余地はないと考えられていた⁵。結果として、この特定のヘリシティ配置は相互作用確率がゼロの「禁止された遷移」とみなされ、数十年にわたり学術的な探求のメインストリームから外されていた⁵。

定説の崩壊とハーフ・コリニア領域の特定

この強固な定説の突破口は、運動量空間の「ジェネリック(一般的)な配置」という暗黙の前提を疑うことから始まった。Guevara, Lupsasca, Skinner, Stromingerらの人間の研究者チームは、粒子の運

動量が特定の特殊なアライメント(整列)を持つ場合、標準的な消失論証が破綻するのではないかと
いう仮説を立てた⁵。

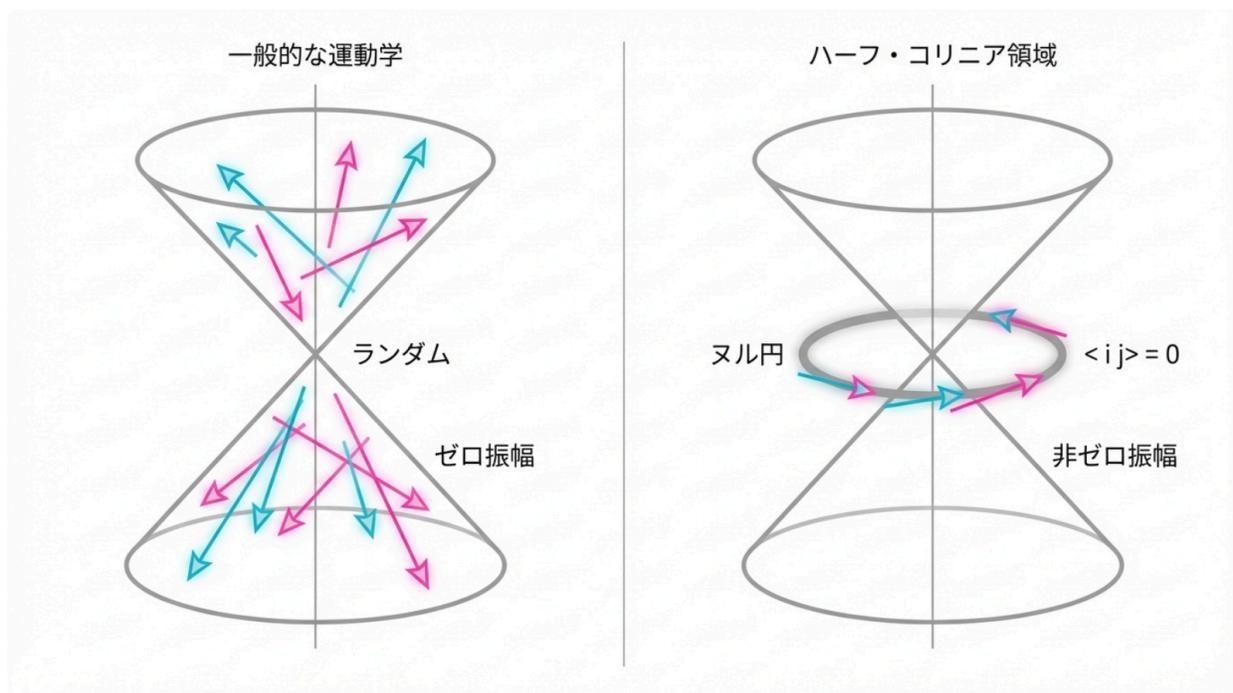
クライン空間と複素化された運動量

彼らが特定したのが「ハーフ・コリニア領域(half-collinear regime)」と呼ばれる運動量空間の極めて
特異な断面である⁸。この領域は、通常のコッホフスキー空間(符号 $(1, 3)$)における物理的な運
動量ではなく、複素化された運動量、あるいはクライン空間(符号 $(2, 2)$)において数学的に厳密に
定義される⁸。スピノル・ヘリシティ記法において、外部グルーオン間のすべての内積 $\langle ij \rangle$ がゼロに
なるという厳格な代数的条件を満たす運動学的軌跡である¹³。

運動学的条件	空間の性質	シングルマイナス振 幅の振る舞い	理論的根拠
ジェネリック領域	通常のコッホフス キー空間 $(1, 3)$	厳密にゼロ(消失)	偏極ベクトルの参照 スピノル選択による 相殺が成立する ⁴
ハーフ・コリニア領域	クライン空間 $(2, 2)$ または複素空間	非ゼロ(有限の値を 持つ)	特異なアライメントに より従来のべき乗則 論証が破綻する ⁵

ハーフ・コリニア条件とは、幾何学的には、入射および出射するグルーオンの運動量が、クライン空
間の境界にある天球トーラス(celestial torus)上の1次元のヌル円(null circle)に制限される状態を
指す⁸。この領域では、偏極ベクトルが特異性を持つため、従来の理論的制約が適用できなくなり、
シングルマイナス振幅がゼロではなくなる「抜け穴」が顕在化したのである⁵。

クライン空間におけるハーフ・コリニア運動量アライメント



左図は通常のジェネリックな運動量配置（振幅はゼロに消失）。右図はクライン空間におけるハーフ・コリニア領域を示し、運動量ベクトルが特定のヌル円（Null Circle）上に整列した瞬間に、隠れていた非ゼロの相互作用が発現する構造を示す。

人間とAIの協働パラダイム：方程式39の導出

理論的な抜け穴であるハーフ・コリニア領域を発見したのは人間の物理学者であったが、その領域における振幅の普遍的な法則を解き明かすプロセスにおいて、計算の超指数関数的な複雑さが立ち上がった。ここで、OpenAIのGPT-5.2が決定的な役割を果たすことになる¹⁴。この研究プロセスは、AIが単なる計算補助ツールから、仮説生成と数学的証明を行う真の「共同研究者」へと昇格した歴史的転換点として記録されている¹。

手計算による限界とAIによるパターン抽出

研究チームは当初、ファインマン図や既存の再帰的手法を用いて、散乱に参与するグルーオンの数 n が3から6までのケースについて手作業で振幅を計算した。しかし、 $n = 6$ の時点で既に32項からなる極めて複雑で厄介な数式（論文中の式29～32）が生成され、そこから任意の n に対する一般的な法則や閉じた公式を見出すことは不可能に思われた¹。

ここで、OpenAIのGPT-5.2 Proが研究プロセスに統合された。モデルはまず、人間の研究者が数ヶ月間取り組んで導き出した超指数関数的な複雑さを持つ数式群を解析し、それを劇的に簡略化して

エレガントな形(式35~38)へと変換することに成功した⁴。さらに、モデルはこれら少数のベースケースの背後に潜む高度な数学的対称性を抽出し、すべての任意の整数 n に対して有効な普遍的公式(プレプリントにおける「方程式39」)を自ら推測(Conjecture)してみせたのである¹。

「内部スキヤフォールディング版」による12時間の連続推論

公式の推測だけであれば、AIを高度なパターン認識エンジンとして評価するに留まる。しかし、物理学においてそれを科学的な真理として確立するには、その公式が常に成り立つことを示す厳密な「形式的証明(Formal Proof)」が必要不可欠である。

OpenAIは、この課題に対してGPT-5.2の「内部スキヤフォールディング(足場構築)版」と呼ばれる特殊な推論アーキテクチャを適用した²。このアーキテクチャは、単一のプロンプトに対して即座に回答を生成する標準的なLLMとは異なり、強化学習に基づく推論言語モデル(RLMs: Reasoning Language Models)を再帰的かつ階層的に展開するものである²⁰。モデルは問題を複数のサブタスクに分割し、複数のサブエージェントを立ち上げて「Best-of-N」アプローチで最良の論理パスを探索しながら、コンテキスト内で継続的な自己検証を行う「擬似連続学習(pseudo-continual learning)」を実行したと分析されている²⁰。

この内部スキヤフォールディング版モデルは、人間の介入なしに約12時間連続して問題に対する推論を行い、推測された方程式39の完全な数学的証明を自律的に生成した⁴。総当たりのなブルートフォースによる数式の組み合わせではなく、量子場の理論の厳密な規則に従った論理的演繹の連鎖を構築したことは、AIの記号的推論(Symbolic Reasoning)能力の飛躍的な向上を示している⁵。

人間とAIの協働による理論物理学の発見プロセス

👤 人間の物理学チーム

ハーフコリニア領域 (half-collinear regime) を特定し、超指数関数的に複雑化するグルーオン散乱振幅について、 $n=6$ までの小規模なケースを手計算で導出。



🌟 GPT-5.2 Pro

手計算による複雑な数式 (式29~32) を大幅に簡略化 (式35~38)。その結果から背後にあるパターンを見出し、すべての n に適用可能な一般的な公式「**式39 (Equation 39)**」を予想。



🖥️ 内部スキャフォールディング版 GPT-5.2

🕒 12時間の連続推論

予想された公式に対して約12時間に及ぶ連続的な記号推論を実行し、自律的に公式を再導出するとともに、その妥当性を示す完全な数学的証明を構築。



👤 人間による検証

Berends-Giele漸化式を用いた解析的検証や、ソフト定理 (Soft Theorem) の制約条件との照合など、量子場の理論の標準的な手法を用いてAIが構築した証明を独立して検証し、承認。

人間の直観とAIの計算・推論能力が組み合わさったハイブリッド・ワークフロー。膨大な計算式のパターン抽出から、スキャフォールディング・モデルによる12時間の連続推論を経て、最終的な数学的証明に至る軌跡。

データソース: [Brian Abuga](#), [Just Earth News](#), [OpenAI](#), [Economic Times](#), [Adwaitx](#)

新公式の数学的構造と物理的解釈

AIによって推測され証明された新公式 (方程式39) は、単なる近似式ではなく、厳密な解析解であった。その数学的構造は、従来のファインマン図から予想される連続的な波の振る舞いとは大きく異なる。

り、量子場の理論の深層に潜む物理的構造を示唆している。

区分的に定数となる閉じた公式

導出された散乱振幅は、運動量の関数として「区分的定数 (piecewise-constant)」の形をとり、

$n - 2$ 個の射影演算子の符号付き積として表現される極めてコンパクトな閉じた公式 (closed-form expression) であった⁸。具体的には、スピノル・ブラケットの符号関数 (Sign functions)

の積により構成され、スケールファクター $1/2^{n-2}$ と $m = 2$ から $n - 1$ までの積

$\prod(\text{sg}_{m,m+1} + \text{sg}_{1,2 \dots m})$ を含む構造を持ち、振幅が $+1$ 、 -1 、または 0 のいずれかの整数値のみを取る「チャンバー (小部屋)」へと空間を分割する特性を持つ⁹。

この結果は、滑らかな微分幾何学から離散的な組合せ位相幾何学への移行を示唆している¹⁶。連続的な微分方程式 (ヤン・ミルズ方程式) に基づく理論が、ハーフ・コリニア極限 (密度の境界) において、波のような連続的な変化ではなく、離散的な符号の反転 (ドメイン境界) として振る舞うことは、真空が単なる空虚な空間ではなく、特定の「スピン」や配向を持つ離散的な構造を内包している可能性を示唆している¹⁶。一部の理論的解釈 (例えば基礎密度理論: Fundamental Density Theory) では、この振幅の区分的定数性は、高密度境界においてエネルギーが消滅したり無限に圧縮されたりするのではなく、自己制御システムとして離散的に再編成される幾何学的コードの証拠であると主張されている¹⁶。

厳格な一貫性テストと独立検証

AIが12時間かけて生成した証明は、人間の研究者によって量子場の理論における標準的な解析ツールを用いて厳密に検証された¹。方程式39は、以下の極めて非自明な一貫性条件 (Consistency checks) をすべて満たすことが確認されている⁵。

物理的・数学的検証項目	意義と新公式の適合性
ベレンズ・ギーレ (Berends-Giele) 漸化式	ファインマン図と等価な、オフシェルでのツリー振幅を構築するための標準的な再帰的手法。新公式は、この漸化式を解析的に解決することが証明された ² 。
ワインバーグのソフト定理 (Soft Theorem)	散乱プロセスにおいて、ある粒子のエネルギーが極端に低く (ソフトに) なる極限での振幅の振る舞いを規定する普遍的な制約。新公式はこの定理を非自明に満たしている ² 。
巡回対称性 (Cyclicity) と反射対称性	粒子の順序を入れ替えたり反転させたりした

	<p>際の振幅の不変性や符号変化($A_{12\dots n} =$)を保証する代数的要請をクリアしている⁸。</p>
U(1) デカップリング恒等式	<p>非可換群(SU(N))のカラー構造から特定のゲージボソンが分離可能であることを示す恒等式($A_{12\dots n} + A_{13\dots n2} +$)に完全に合致する⁸。</p>
クライス・クイフ(Kleiss-Kuijf)関係式	<p>カラー順序化された振幅間に成り立つ線形関係式であり、独立な部分振幅の数を減らす強力な運動学的制約。公式はこれらすべての恒等式を満足する⁸。</p>

直感的な目視だけでは、提案された数式がこれらの複雑な恒等式を満たすかどうかは到底判断できない。GPT-5.2が提案した単一のシンプルな方程式が、これらすべての厳密な数学的・物理的制約を同時にクリアしたという事実は、この公式が真理であることの強力な裏付けとなり、科学コミュニティからの信頼を獲得する決定的な要因となった⁵。

理論物理学の他領域への波及効果

「シングルマイナス・グルーオン散乱振幅の非ゼロ証明」という一見すると局所的な成果は、実は現代の理論物理学の多岐にわたるフロンティアに対して深い波及効果をもたらす。

重力子(グラビトン)への拡張と量子重力

最も直接的かつ強力な影響は、量子重力理論の研究への応用である。現代物理学には「重力 = ゲージ理論の二乗(Gravity = Gauge × Gauge)」と呼ばれる「カラー・キネマティクス双対性(Color-Kinematics Duality)」という深遠な関係性が存在する。GPT-5.2の支援により、今回発見されたグルーオンのハーフ・コリニア領域における計算手法は、すでに重力を媒介する仮説上の素粒子である「重力子(グラビトン)」の振幅計算へと拡張されている²。重力子の相互作用の数学的性質を解明し、極めて複雑なループ補正や超対称性拡張を自動化していくことは、量子力学と一般相対性理論を統合するという物理学最大の未解決問題(量子重力理論の構築)に向けた重要な足がかりとなる¹⁴。

自己双対ヤン・ミルズ理論と天球ホログラフィー

この発見は、特定のセクターである「自己双対ヤン・ミルズ理論(SDYM: Self-Dual Yang-Mills theory)」における長年のパズルを解決する可能性を秘めている。SDYMでは、古典的な非線形解空間が極めて複雑であるにもかかわらず、ツリーレベルの振幅が自明に消失してしまうように見えるという矛盾(テンション)が存在していた¹⁰。ハーフ・コリニア領域におけるシングルマイナス振幅の非ゼロ

証明は、この古典的複雑さを裏付ける量子論的な基盤を提供するものである¹³。

さらに、漸近的に平坦な時空における量子重力を2次元の共形場理論として定式化しようとする「天球ホログラフィー (Celestial Holography)」の分野にも多大な影響を与える。プレプリントの記述によ

れば、これらの振幅は S -代数や無限次元の $\mathcal{L}_{w_{1+\infty}}$ 代数といった高度な対称性群の下でどのように変換されるかが今後の焦点となり、あるセクターにおける振幅のメルン変換 (Mellin transform) がラウリチェラ関数 (Lauricella functions) によって記述されることが示唆されており、将来的な後続論文での詳細な発表が予告されている⁵。

科学界の反応と批判的検証

この画期的な報告に対し、学界や技術コミュニティからは驚嘆の声が上がる一方で、AIの本質的な能力に関する懐疑論や「サイエンス・スロップ (粗悪な科学的出力)」のリスクを指摘する多様な反応が巻き起こった。

トップレベルの物理学者からの評価

プリンストン高等研究所 (IAS) の著名な物理学者であるNima Arkani-Hamed教授は、この成果について「私は約15年前からこの高度に縮退した散乱プロセスについて興味を持っていたため、この論文にある驚くほどシンプルな数式を目にして非常に興奮している」と述べた¹⁹。彼はまた、このような美しい数式を「見つけ出す」作業は伝統的に試行錯誤を伴う泥臭い (fiddly) プロセスであったが、現代の強力なAIツールを活用することでそれが自動化できる時代が到来したと評価している⁴。

カリフォルニア大学サンタバーバラ校のNathaniel Craig教授も、「これは明らかに理論物理学の最前線を前進させるジャーナルレベルの研究である」と称賛し、「物理学者がAIと手を携えて新たな知見を生み出し検証する、AI支援科学の未来の垣間見」であると表現した²⁴。さらに、今回のブレイクスルーと同時期に、OpenAIの未公開モデルが数学の難問解決コンペティション「First Proof」において、他のトップAIモデルが解けなかった研究レベルの数学問題を複数解決したことも報告されており、STEM分野におけるAIの推論能力が実用的なブレイクスルーの閾値を超えたことを裏付けている²⁶。

懐疑論と「ブルートフォース」論争

一方で、RedditやHacker Newsといった技術系フォーラムや一部の専門家からは、AIの貢献に対する本質的な批判や相対化も提示されている¹¹。

第一の批判は、「AIは真の『推論』を行ったのではなく、単なるパターンマッチングの延長線上にあるブルートフォース (総当たり) 検索を行ったに過ぎない」という見解である²¹。12時間に及ぶ膨大な計算リソースの投入は、人間の脳が消費するエネルギーに比べて圧倒的に非効率であり、ランダムな方程式の組み合わせの中から検証テストを通過する「当たり」を偶然引いたのではないかという指摘である¹²。これに対し、擁護派は、形式的証明 (Formal Proof) の構築は論理的演繹の厳密な連鎖であり、単純なランダム抽出で生成できるものではなく、高度な記号操作能力の明確な証左であると反

論している⁵。

第二の批判は、研究プロセスにおける問題設定の主導権に関するものである。「AIが新法則を発見した」という見出しが先行しているが、実際には定説の「抜け穴」であるハーフ・コリニア領域を特定

し、そこに問題のスコップを絞り込み、最初の $n = 3$ から $n = 6$ までのベースケースを手計算で導出して「良質なデータ」をAIに与えたのは、他ならぬ人間のトップ物理学者たちである¹²。AIはあくまで与えられた境界条件の中で強力な「パターン認識エンジン」として機能したに過ぎず、分野の深い文脈理解を伴う「概念の構築」や「どの問題が解くに値するか」を判断する能力は、依然として人間の領域に留まっているという冷静な評価も根強い¹¹。

サイエンス・スロップのリスクと検証の重要性

さらに、自律的エージェントのリスクに関する懸念も提起されている。同時期に発生したAIエージェントによるインターネット上での不適切な情報発信（ヒットピース事件）などを引き合いに出し、LLMがもっともらしいが間違った推論（ハルシネーション）を自信満々に出力する危険性が指摘されている¹¹。

この文脈において、今回のGPT-5.2の成功は、仮説生成(AI)から形式的証明(AI)、そして厳密な解析的検証(人間と既存アルゴリズム)というループが機能した稀有な成功例であると言える⁴。AIに自由なアイデア出しをさせるのではなく、量子場の理論という厳密なルール(ベレンズ・ギーレ漸化式などの恒等式)が支配する制約空間の中で推論を行わせ、生成された仮説を決定論的な数学的ツールで外部検証するという「監査可能(Auditable)」なワークフローが、サイエンス・スロップを防ぐ鍵となっている⁵。

結論

GPT-5.2によるシングルマイナス・グルーオン散乱振幅の非ゼロ証明と新公式の発見は、理論物理学における数十年来の盲点を突いた卓越した科学的業績である。ハーフ・コリニア領域という特殊な幾何学空間において、超指数関数的に爆発する複雑なヤン・ミルズ方程式の計算が、極めてエレガントな区分的定数公式(方程式39)へと収束することを証明したこの成果は、量子重力理論や自己双対ヤン・ミルズ理論、天球ホログラフィーといった次世代の物理学を牽引する基礎的な知見となる。

同時に、このブレイクスルーはAIの進化の軌跡における重要な変曲点でもある。人間のトップ物理学者による鋭い直観と厳密な問題設定のもとで、AIが記号的な推論、パターンの一般化、そして長時間のスクヤフォールディングによる自律的証明を成し遂げたという事実は、AIが単なる計算機から真の意味での「科学的共同研究者(Scientific Collaborator)」へと進化したことを高らかに宣言している。

今後、物理学者をはじめとする科学者は、超複雑な数式の奥底に潜む「隠れたシンプルさ」を見つけ出す強力な知性を手に入れたことになる。この新しい知性との対話と、監査可能な検証パイプラインの構築が、我々の宇宙に対する理解をどこまで深めていくのか、理論物理学におけるAI支援型科学

(AI-Assisted Science)の今後の展開が強く期待される。

引用文献

1. GPT-5.2 Just Corrected Particle Physics Textbooks And That Should, 2月 22, 2026 にアクセス、
<https://brianabuga.com/gpt5-2-just-corrected-particle-physics-textbooks/>
2. OpenAI's GPT-5.2 proves new formula in Particle Physics, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://justearthnews.com/news-details/9400/openai-s-gpt-5-2-proves-new-formula-in-particle-physics-in-just-12-hours.html>
3. GPT-5.2が「あり得ない」物理現象を発見した—AIが4, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://podcasts.apple.com/tn/podcast/gpt-5-2%E3%81%8C-%E3%81%82%E3%82%8A%E5%BE%97%E3%81%AA%E3%81%84-%E7%89%A9%E7%90%86%E7%8F%BE%E8%B1%A1%E3%82%92%E7%99%BA%E8%A6%8B%E3%81%97%E3%81%9F-ai%E3%81%8C40%E5%B9%B4%E3%81%AE%E5%AE%9A%E8%AA%AC%E3%82%92%E5%A1%97%E3%82%8A%E6%9B%BF%E3%81%88%E3%81%9F%E6%97%A5/id1613001735?i=1000750223419>
4. GPT-5.2 derives a new result in theoretical physics - OpenAI, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://openai.com/index/new-result-theoretical-physics/>
5. GPT-5.2 Solves Physics Problem Dismissed for Decades in AI Win, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://www.adwaitx.com/gpt-5-2-theoretical-physics-breakthrough/>
6. OpenAI's GPT-5.2 Uncovers Non-Zero Gluon Interaction in Physics, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://www.therift.ai/news-feed/openai-s-gpt-5-2-uncovers-non-zero-gluon-interaction-in-physics-preprint>
7. Did GPT 5.2 make a breakthrough discovery in theoretical physics?, 2月 22, 2026 にアクセス、
<https://huggingface.co/blog/dlouapre/gpt-single-minus-gluons>
8. Single-minus gluon tree amplitudes are nonzero - arXiv, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://arxiv.org/html/2602.12176v1>
9. Single-minus gluon tree amplitudes are nonzero - arXiv, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://arxiv.org/pdf/2602.12176>
10. Single-minus gluon tree amplitudes are nonzero - alphaXiv, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://www.alphaxiv.org/overview/2602.12176v1>
11. When Ai Meets Amplitudes Can Large Language Models Reshape, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://www.therida.in/science%20&%20technology/when-ai-meets-amplitudes-can-large-language-models-reshape-theoretical-physics/article8469135396.rida>
12. GPT-5.2 derives a new result in theoretical physics | Hacker News, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://news.ycombinator.com/item?id=47006594>
13. Single-minus gluon tree amplitudes are nonzero - Emergent Mind, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://www.emergentmind.com/papers/2602.12176>
14. When Quantum Physics Hit A Dead End, GPT-5.2 Found a Hidden, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://www.ndtvprofit.com/technology/open-ais-gpt-5-2-has-helped-theoretical-physics-find-an-interaction-that-was-deemed-impossible-11010267>

15. 2月 22, 2026にアクセス、
<https://openai.com/index/new-result-theoretical-physics/#:~:text=Half%2Dcollinear%20here%20means%20the,in%20a%20special%20kinematic%20regime.>
16. Open-Sourcing the Universe's Code: Gluon Amplitudes Reveal the, 2月 22, 2026
にアクセス、
<https://medium.com/@m.alfaro.007/open-sourcing-the-universes-code-gluon-amplitudes-reveal-the-discrete-geometry-of-density-257e313bd74d>
17. AI's new physics discovery - The Rundown AI, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://www.therundown.ai/p/ais-new-physics-discovery>
18. Trending Stories | HyperAI, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://vercel.hyper.ai/en/stories>
19. Can GPT-5.2 solve a complex physics problem? AI achieves a path, 2月 22, 2026に
アクセス、
<https://m.economictimes.com/us/news/can-gpt-5-2-solve-a-complex-physics-problem-ai-achieves-a-path-breaking-scientific-breakthrough-after-solving-a-decade-long-mystery/articleshow/128451346.cms>
20. GPT5.2 Pro derived a new result in theoretical physics - Reddit, 2月 22, 2026にア
クセス、
https://www.reddit.com/r/singularity/comments/1r3yi6e/gpt52_pro_derived_a_new_result_in_theoretical/
21. r/ChatGPT on Reddit: GPT-5.2 Just Solved a 15-Year Physics Mystery, 2月 22, 2026
にアクセス、
https://www.reddit.com/r/ChatGPT/comments/1r5y8p3/gpt52_just_solved_a_15year_physics_mystery_then/
22. GPT-5.2 Physics Breakthrough: Gluon Amplitudes, 2月 22, 2026にアクセス、
<https://www.academicjobs.com/research-publication-news/openai-gpt-5-2-theoretical-physics-breakthrough-gluon-tree-amplitude-4534>
23. OpenAI's GPT-5.2 discovers new physics formula for gluon, 2月 22, 2026にア
クセス、
<https://www.investing.com/news/stock-market-news/openais-gpt52-discovers-new-physics-formula-for-gluon-interactions-93CH-4506591>
24. AI Scientist Spots What Physicists Missed in Gluon Scattering, 2月 22, 2026にア
クセス、
<https://nationaltoday.com/us/ca/santa-barbara/news/2026/02/14/ai-scientist-spots-what-physicists-missed-in-gluon-scattering>
25. GPT-5.2 Theoretical Physics Discovery: An AI Just Proved Physicists, 2月 22, 2026
にアクセス、
<https://topaiproduct.com/2026/02/16/gpt-5-2-theoretical-physics-discovery-an-ai-just-proved-physicists-wrong-about-gluon-scattering/>
26. AI Solved New Math and Physics Problems in One Day - The Neuron, 2月 22, 2026
にアクセス、
<https://www.theneuron.ai/explainer-articles/ai-just-did-something-no-textbook-aid-was-possible-twice-in-one-day/>
27. GPT-5.2 solved a previously unsolved problem in quantum field, 2月 22, 2026にア
クセス、

https://www.reddit.com/r/OpenAI/comments/1r4okq3/gpt52_solved_a_previously_unsolved_problem_in/

28. AI News Roundup: GPT-5.2 Makes Physics Discovery, Gemini 3, 2月 22, 2026 | にアクセス、

<https://dev.to/damogallagher/ai-news-roundup-gpt-52-makes-physics-discovery-gemini-3-deep-think-drops-and-an-ai-agent-445n>