OpenAI「A step toward defining the Standard Model on a lattice」

深掘り調査レポート

― Craig 論文と GPT-6 Astra の寄与、専門家評価、今後の課題 ―

2026 年 11 月 16 日時点

Claude Fable 5.2

本文書は、2026 年 11 月 16 日に実施した調査の結果を、文中の上付き番号と文末の参考文献一覧で出典を示す形式にまとめたものである。「確認できた事実」と「分析・推論」を区別して記述し、出典を付していない記述は分析・推論であるか、出典を特定できなかった情報であり、後者はその旨を本文に明記した。参考文献の各項目には、本文書作成時の確認状況を付記している。

要点

(1) 記事は実在する（OpenAI 公式、2026 年 11 月 15 日付。同日開設の「サイエンスブログ」の最初のゲスト投稿）[1,2]。中身は、UCSB の物理学者 Nathaniel Craig が単著で 2026 年 10 月 6 日に投稿したプレプリント arXiv:2610.09093 の解説である [3]。主張の射程は、標準模型を含む非可換カイラルゲージ理論の「候補となる」非摂動的格子定義（有限格子間隔）にとどまり、「標準模型の格子定義問題を解決した」とは主張していない [3,4]。

(2) AI の寄与は大きいと自己申告されている。Craig が方針（格子の逐次細分化によって Lüscher の可換理論の構成を拡張する）を出し、GPT-6 Astra が具体的構成と詳細証明を主導し、Lean 4 での形式検証も実行したとされる [5,6]。ただし、この分担は OpenAI の訪問研究者である当事者が OpenAI の媒体で述べたものであり、独立した監査は存在しない。

(3) 専門家の初期評価は割れている。Edward Witten は後続論文（arXiv:2611.05051、2026 年 11 月 3 日）のアブストラクトで、Craig がそのためのアルゴリズムを記述したと認めたうえで、変種の構成を提示した [7]。一方、Peter Woit はブログ（10 月 8 日）で、Lüscher の仕事に対する控えめな前進にとどまると評した [5]。Witten 自身も、この方式は原理的には計算機に実装できるが、カイラル・フェルミオンの経路積分が正値でないためモンテカルロ法

では実行できないと指摘している [7,8]。連続極限、反射正値性、実際の数値シミュレーションは未解決で、独立した査読・検証はまだ出揃っていない。

1. 主要な確認事項

【確認できた事実】

- 記事の位置づけ：OpenAI は 2026 年 11 月 15 日にサイエンスブログを開設し、その最初のゲスト投稿が本記事である [2,9,10]。著者の Nathaniel Craig は OpenAI の訪問研究者で、UCSB（カリフォルニア大学サンタバーバラ校）の素粒子理論グループを率い、同校カブリ理論物理学研究所（KITP）の常任メンバーでもある [1]。
- 一次論文：arXiv:2610.09093「A gauge-invariant measure for lattice chiral fermions」（2026 年 10 月 6 日投稿、単著、主分類 hep-lat）[3]。アブストラクトは、標準模型を含む非可換カイラルゲージ理論のクラスについて、4 次元ユークリッド格子上のオーバーラップ・フェルミオンのゲージ不変な測度を非摂動的に構成したと述べ、結果を「candidate nonperturbative lattice definition of the Standard Model」と位置づけている [3]。論文上の所属は KITP、UCSB 物理学科、OpenAI の 3 つとされる。
- 11 月 15 日の記事は新しい成果の発表ではない。約 40 日前に公開済みのプレプリントについて、協働の経緯を説明したものである [2,10]。
- 検証手段は 3 つある。①Lean 4 による形式化（Zenodo で公開）[11]、②2 次元の類似理論での数値的照合 [12]、③格子場の理論の専門家 Maarten Golterman、Andreas Kronfeld、Yigal Shamir による非公式な精査 [2,6] である。③について CASRAI は、3 氏の質問が Craig の議論の評価に役立ったと書いており、3 氏の支持表明とは扱っていない [2]。いずれもプロジェクト側の報告で、正式な査読は未了である。
- 反響：Witten（arXiv:2611.05051、11 月 3 日）が Craig の仕事を前提にした変種を発表し [7]、Hsu（arXiv:2610.29019）も同じ変種を提案している [7,13]。Woit は 10 月 8 日にブログで評した [5]。

【分析・推論】

- 「解決」ではなく「一歩」というタイトルは、論文の主張内容と整合しており、OpenAI の過去の科学発表（Navier–Stokes、Yang–Mills）と比べると抑制的である。ただし記事末尾は、OpenAI 自身の未公開・未検証の Yang–Mills／QCD 存在証明を「欠けていたパズルのピース」と位置づけているとされる（記事全文を直接確認できていないため、この点は調査時の整理による）。この部分は射程が過大になりやすく、最も慎重に読むべき箇所である。
- 物理学的には、Lüscher（1998 年）の可換理論の構成を非可換・標準模型へ拡張するという、約 25 年停滞していた具体的課題での前進とみるのが妥当である。Witten が肯定的に引用したことは、正しさと新規性を示す有力な傍証になる。ただし、これは査読や完全な追試に代わるものではない。

2. 一次ソースの確認

2.1 記事の実在と書誌

【確認できた事実】

- タイトル・URL・日付は提示のとおり実在する。検索結果に表示される公式ページでは、分類「Science」、日付「November 15, 2026」と表示される [1]。リード文は、この記事がサイエンスブログ最初のゲスト投稿であり、Craig が訪問研究者として GPT-6 Astra と協働した経緯を語るものだと説明している [1]。
- 注意：openai.com は、調査時・本文書作成時のいずれもツールからの直接取得を受け付けなかった。記事本文は、検索エンジンに表示された公式ページの抜粋と、複数の報道による引用から再構成している。全文を逐語的には確認できていない。
- 同日付の「Our new blog for science」では、ブログの 3 つの柱が挙げられているとされる。①研究成果、②方法と実践ガイド（作業の検証方法や手法の限界を含む）、③研究者の視点、である [9]。方法面の記事を扱う点は報道でも確認できる [2]。

2.2 何を達成したと主張しているか

【確認できた事実】

- 論文の主結果は、SU(5)と $10 \oplus 5^{-}$（標準模型 1 世代分を含む）のオーバーラップ・フェルミオンについて、「許容的（admissible）」なゲージ場上でゲージ不変な測度を構成したことである[3,11]。admissible とは、プラケットが単位元に十分近いことを指し、その上限は体積に依存しないとされる。舞台は有限の周期的 4 次元格子である。構成した測度は、Lüscher の再構成定理が要求する滑らかさ、局所性、ゲージ不変性、積分可能性を満たすとされる[3]。さらに、標準模型ゲージ群の 4 通りの大域構造（$\Gamma = 1, Z_2, Z_3, Z_6$）すべてに制限でき[11]、一部の SU(N)族にも拡張されるとされる。
- 手法の核は、連続的な補間で細かい格子上のリンクを定義し、隣り合う格子間隔のカイラル射影子を比較することである。そこから指数的に局所的なカレントを構成し、それを積み上げて元の格子での位相規則を定める[3,4]。
- 記事中で Craig は、この構成を、実践上の答えというより原理上の答えに近いものと表現しているとされる。現実的な格子シミュレーションには相当な作業が残っており、有限格子間隔での反射正値性も検討課題として残る[4,10]。
- 年数の表記は 2 種類あり、意味が異なる。「50 年以上」は、標準模型の成立以来、非摂動的定義という基礎的問題が残り続けてきた期間を指す[1,10]。「25 年以上」は、Lüscher がより単純な理論について処方を与えて以降、完全な標準模型については未解決だったという個別の課題を指す[6]。一部の報道はこの 2 つを混同している。

2.3 使われた AI と、AI／人間の寄与の切り分け

【確認できた事実（当事者の申告）】

- モデルは GPT-6 Astra である。2026 年 9 月 3 日に発表された OpenAI の旗艦モデルで[14]、API のモデル ID は gpt-6-astra である[15]。
- 論文の謝辞は Woit のブログ（10 月 8 日）に引用されている。その内容は、GPT-6 Astra がこの結果に不可欠だったこと、Craig が細分化の手法で Lüscher の可換理論の結果を拡張する戦略を提案したこと、その戦略が Astra および外部専門家との数回の反復を経て、現在の

Astra 主導の証明に至ったこと、である [5]。謝辞はさらに、原稿が著者執筆の節と、Astra が作成した証明を大幅に書き直した部分とで構成されること、Lean 検証を含むテストは Craig らが提案して Astra が実行したこと、補足資料の一部は Astra が執筆したことを述べているとされる [5]。

- ブログでの説明では、Craig は自分の戦略が必要なすべてのケースで成り立つことを証明できていなかったとしている。Astra が担ったのは、力の場をより細かい格子へ載せる方法の提案、格子間の比較が収束することの証明、そして詳細証明の主導である [1,6]。
- Woit の観察：論文は本文 60 ページ＋付録 63 ページの計 123 ページで、大きな節は Astra 由来の文体、別の節は明らかに Craig の筆によるものだという。Craig はこれまで格子ゲージ理論の論文を書いたことがないとも Woit は述べている [5]。

2.4 検証方法

【確認できた事実（プロジェクト側の報告）】

- Lean 4 形式化は Zenodo で公開されている。対象は SU(5)構成と標準模型の 4 つの大域形への制限で、細分化カレントとフェルミオン測度を定義し、局所性、対称性、アノマリー、積分可能性の各性質を証明している [11]。形式化は 16 モジュールからなり [10]、エラーなくコンパイルされ、Lean のカーネルが標準的な基礎公理のみ・未証明箇所なしで証明を受理したとされる [16]。形式化の過程で証明の説明が 3 か所修正されたと Zenodo に記載があるとされる [11]。論文自身は、Lean 検証は物理学における最終判断ではない旨を注意しているとされる。
- 2 次元の類似カイラル SU(5)理論で、カレント、ゲージ応答、行列式位相を数値的に検証した記録が、別の Zenodo レコードとして公開されている [12]。
- 専門家による精査について、Craig は、Golterman、Kronfeld、Shamir が証明に目を通し、確信を深める鋭い質問をしてくれたと書いているとされる [2,6]。これは著者の記述であって、3 氏の独立した支持表明ではない。3 氏による公開の評価は確認できなかった。
- 未確認事項：論文第 12 節「Verification」と謝辞の全文は、原文を確認できていない（要約・引用ベース）。Lean 形式化の範囲が SU(N)一般化（第 11 節）にまで及ぶかどうかも、明示的には確認できていない。

2.5　関係者の発信

【確認できた事実（二次情報経由）】

・ Greg Brockman（OpenAI 社長）が、11 月 16 日 00:34 UTC に、OpenAI の投稿を「理論物理学のための GPT-6 Astra」という趣旨の一言を添えて引用したと報じられている（調査時に得た二次情報。報道元の特定と X 上の原投稿の確認はできていない）。

3. 物理学的背景：何が難しく、今回はどこに位置するか

3.1　なぜ「標準模型を格子上で定義する」ことが問題なのか

【確立した知見】

・ 標準模型の予言の多くは摂動論から得られる。しかし陽子質量のような非摂動的な量には、時空を格子に離散化する格子ゲージ理論が必要になる。強い力（QCD）では、これは大成功している。

・ 障害はカイラリティである。弱い力は左巻きと右巻きのフェルミオンを区別する。素朴に格子へ載せると、余計な「ダブラー」が現れて左右の数が揃ってしまう（フェルミオン・ダブリング）。Nielsen–二宮の定理によれば、並進不変・局所的などの穏当な仮定のもとで、「正しい連続極限」「ダブラーなし」「通常のカイラル対称性」の 3 つは同時に満たせない。

・ 回避策の系譜は次のとおり。Wilson 項（ダブラーに重い質量を与えるが、カイラル対称性を壊す）→ Kaplan のドメインウォール・フェルミオン → Narayanan–Neuberger のオーバーラップ → Ginsparg–Wilson 関係式を満たす Neuberger 演算子 → Lüscher による、格子上の厳密なカイラル対称性の発見（1998 年）。

・ ここで問題が移る。オーバーラップでは、ゲージ場に依存するカイラル射影子が積分すべきフェルミオン部分空間を決めるため、測度の「位相」に任意性が残る [17,18]。この位相を、局所性・滑らかさ・ゲージ不変性・大域的整合性（積分可能性。大域アノマリーが障害になりうる）を保ったまま一貫して選ぶことが核心である。言い換えれば、オーバーラップは困難を「カイラリティ」から「ゲージ不変な測度の構成」へ移し替えた [16]。

・ Lüscher はこれを可換（U(1)）理論について非摂動的に解き [17]、非可換については摂動論の全次数で解いた [18]。非摂動的な非可換への拡張は部分的成果にとどまっていた（Suzuki の実

表現、Kadoh–Kikukawa の電弱理論（条件付き）、Kikukawa の Spin(10)提案など）。Craig 論文は先行提案として約 60 件を挙げているとされる。

3.2 別系統のアプローチ

【確立した知見】

- 鏡像フェルミオン分離／対称的質量生成（SMG）：Eichten–Preskill（1986 年）に始まる。ダブラー（鏡像フェルミオン）を、対称性を破らない強い相互作用でギャップアウトさせる発想である [19]。Golterman–Petcher–Rivas らによって否定的な結果も出た。その後、Wen（SO(10)）[20]、Wang–Wen（標準模型の非摂動的定義の提案）[21]、Razamat–Tong「Gapped Chiral Fermions」、Tong による SMG の論考などで再燃した。Golterman–Shamir も、SMG パラダイムに対する制約を論じている [22]。
- 今回の Craig の仕事はこの SMG 系統ではない。Lüscher 流の「Ginsparg–Wilson／オーバーラップ＋ゲージ不変な測度」系統の延長である [3]。

3.3 今回の位置づけ：「解決」か「一歩」か

【分析・推論】

- 達成されたと主張されている範囲：有限格子間隔・有限体積・admissible なゲージ場という制約のもとで、標準模型を含む非可換カイラルゲージ理論の測度の存在を（構成的に）示した。これは Lüscher の可換理論の結果を非可換へ拡張したもので、具体的な未解決課題の前進にあたる。
- 残されている課題は次の 4 点である。

(1) 相互作用する連続極限の存在と性質（論文の数学的補遺自身が未解決と明記しているとされる）。

(2) 有限格子間隔での反射正値性。物理的なユニタリ量子論との対応に関わる。Woit のブログのコメント欄では、Lüscher 型の構成はゲージ場がある場合に反射正値性を破るという指摘が出ているとされる [5]。

(3) 実用的な数値計算。Witten は、この系統の構成は原理的には計算機に実装できるが、カイラル・フェルミオンの経路積分が正値でないため、モンテカルロ法では実行できないと述べている（符号問題）[7]。

(4) 正式な査読と第三者による追試。

・ 以上から、「解決」ではなく「一歩」という表現は正確だと判断する。特に、実際の電弱過程の非摂動計算がすぐに可能になるわけではない点は、報道で誤解されやすい。

4. 評価・反響

4.1 物理学者による評価

【確認できた事実】

・ **Edward Witten（プリンストン高等研究所）**、arXiv:2611.05051（2026 年 11 月 3 日）：アブストラクトで、Craig がそのためのアルゴリズムを最近記述したと認めている [7]。本文では、Craig がいくつかの新しいアイデアで困難を克服し、標準模型を包含するのに十分な一般性でカイラルゲージ理論の格子正則化を構成した、という趣旨を述べているとされる。そのうえで、格子ゲージ場を連続体に補間し、連続体のカイラル・フェルミオンに結合させる「変種」を提示した [7]。位相は η 不変量で定める [23]。連続補間の構成は、任意のコンパクトゲージ群と任意次元の多様体について論じられている [7]。同じ変種は Hsu も最近提案したと明記している [7]。Witten はこの論文で Claude Opus 5.5（Anthropic）による技術的支援を明記しており [24,25]、報道（二次情報）によると、Claude Opus 5.5 は、隣り合う格子セルの境界でゲージ場の拡張を滑らかにつなぐための座標写像の調整と、線形補間を用いる代替案を提案した [8]。

・ **Stephen Hsu**、arXiv:2610.29019：ゲージ場とヒッグス場を有限格子で正則化し、クォーク・レプトンは連続体の Weyl フェルミオンとして残す定式化を提案した [13]。

・ **Dorota Grabowska**、arXiv:2611.13886（11 月 10 日）：スラブ境界上のカイラルゲージ理論の格子ハミルトニアンを提示した（Hsu の論文を引用）[26]。この分野で後続論文が短期間に続いていることを示す一例である。Craig の測度と Hsu・Witten の構成を比較する論文（arXiv:2611.16544）も現れている [23]。

- **Peter Woit（コロンビア大学、ブログ「Not Even Wrong」）**：10 月 8 日の記事「AI and Chiral Fermions」で、Craig が OpenAI で 1 年間の訪問ポジションに就いていると紹介したうえで、人間と AI の協働としては興味深いと評価した [5]。一方で、成果は「a modest advance over Lüscher」であり、連続極限で望ましい性質をもつ理論の原理的な完全定義にはまだ遠く、実際の非摂動的電弱計算を可能にするものではないとみている [5]。さらに、1980〜90 年代に有望でないとして放棄されたプログラムに AI の火力を注いでも面白い結果にはつながりにくい、という懐疑も示した [5]。11 月 4 日には Witten 論文を好意的に紹介し [24]、11 月 11 日には OpenAI の Yang–Mills 証明の公開手法を「Publicity Stunt」と強く批判した [27]。
- **Craig が名前を挙げた 3 名**（Golterman、Kronfeld、Shamir）：公開の評価は確認できなかった。

4.2 メディア・SNS

【確認できた事実と評価】

- 英語圏では、AI・テック系ニュースサイトやアグリゲーター（MLQ.ai、AI Weekly、FourWeekMBA、CASRAI、DEV Community、Digg 等）が当日から翌日にかけて報じた [2,4,6,10,28,29]。多くは「候補であって完成した解ではない」という留保を正しく伝えている [4,6]。MLQ.ai は、日曜夕方（米国時間）の時点でプロジェクト外の物理学者の公開反応は見当たらないと報じた [28]（ただし Woit の 10 月の評価や Witten の論文は発表前から存在する）。
- 主要科学メディア（Quanta、Nature News、Science、Physics World、New Scientist）の本件記事は、11 月 16 日時点で確認できなかった。Scientific American と Science は、関連する Yang–Mills や Navier–Stokes の件を報じている [30,31,32]。
- Hacker News と Reddit について、本件単独のスレッドは確認できなかった（Woit の「The Yang-Mills Publicity Stunt」は Hacker News に投稿されている [33]）。daily.dev は、OpenAI 公式投稿への X 上の反応を「懐疑 65%」と集計している [34]。ただし、これは新モデルの要求などの無関係な投稿を含むアグリゲーターの自動分析であり、物理学的評価の指標としては信頼性が低い。

・ 日本語では、XenoSpectrum が詳しい解説記事を出している [35]。GIGAZINE、ITmedia、日経の本件記事は確認できなかった。

4.3 疑義・批判の整理

【分析・推論】

(1) **独立性**：寄与の配分は、OpenAI の訪問研究者が OpenAI の媒体で述べたものである。検証も Astra 自身が実行した Lean チェックが中心で、外部による再現は未報告である。

(2) **重複・先行性**：Witten 論文と Hsu 論文は、同じ「連続補間」の発想を共有している [7,13]。Witten は、Craig と Hsu の議論を少し拡張すれば自らの一般化も得られるだろうと書いているとされ、構成は比較的自然なものだったとも読める。ただし Witten は Craig の先行性を明確に認めており [7]、剽窃や重複を指摘する声は確認できなかった。

(3) **発表の仕方**：記事本体は抑制的である。しかし末尾で、未公開・一部未検証の OpenAI 内部の Yang–Mills／QCD 存在証明を「欠けていたパズルのピース」と結びつけ、連続極限の問題まで片付きつつあるかのような印象を与えているとされる。OpenAI の説明では、その存在証明が扱うのは標準模型そのものではなく、標準模型の力と粒子を含む最も単純な大統一理論型の「完成形」であり、通常の標準模型そのものは任意の短距離まで整合的に外挿できないとされる [36]。

5. 文脈・位置づけ

5.1 OpenAI の科学分野での一連の発表

【確認できた事実】

時期	出来事
2026 年 2 月	数学研究問題への「First Proof」（出典 URL を特定できず。調査時の記載による）。
2026 年 9 月 3 日	GPT-6 Astra を発表 [14]。

時期	出来事
2026 年 9 月 8 日	Navier–Stokes 存在・滑らかさ問題を（有限時間爆発の構成で）解決したと発表。Buckmaster 氏と Alpöge 氏の先行研究との関係をめぐって論争が起き、OpenAI は疑惑を否定した [31]。
2026 年 10 月	700 件超の AI 生成証明を 1 日で一斉公開し、「slop drop」と呼ばれた [30,32]。
2026 年 10 月 6 日	Craig 論文（本件）を arXiv に投稿 [3]。
2026 年 10 月 26 日	純 Yang–Mills 理論の存在証明（質量ギャップは含まない）と、QCD および標準模型の「完成形」の存在証明を発表 [36,37]。
2026 年 11 月 9〜10 日	David Gross が率いる 5 名の委員会が Lean 版を確認し公開。1,147 ページの文章版は未公開で、委員会自身も証明を完全には理解していないと認めた [30,37,38]。Woit は、Clay 研究所の問題が求める「存在」の基準を満たしていないと批判した [27]。
2026 年 11 月 15 日	サイエンスブログ開設と本記事 [1,9]。

Navier–Stokes の件については、調査時に次の情報も得られている。Quanta（2026 年 9 月 8 日）は、一般公開されていない先進モデル上で動く 1 万体の自律 AI エージェント群が特異点を発見したと報じた。Science は、発表の 2 日後に 1,000 人超の数学者が公開書簡に署名し、その後さらに約 6,000 人が加わったと報じた。9 月 11 日にはフィールズ賞受賞者 25 名が書簡を出して「severe misalignment」への懸念を表明し、証明は「読めない」との批判も受けた（Science、NPR、ABC）。ただし、これらの個別記事の URL は出典一覧に含まれておらず、本文書では未確認情報として扱う。

5.2 比較の視点

【分析・推論】

- Navier–Stokes や Yang–Mills の件は、「社内システムが自律的に解いた」型の発表だった。これに対して本件は、外部の著名な研究者が単著論文で主導し、AI を数学的共同研究者として使い、謝辞で寄与を詳細に開示するという、学術慣行に寄せた型である。プレプリントの

公開から 1 か月以上たってから解説し、限界も明示している。OpenAI が、論争を経て発表手法を修正しつつある兆候と読める。

【確認できた事実（他社の動向）】

- Witten の論文は Anthropic の Claude Opus 5.5 の支援を明記している [24,25]。そのため、同じ問題をめぐって競合する 2 社の AI が、それぞれ一流研究者の仕事に使われた形になっている。
- Google DeepMind では、Gemini Deep Think と木探索の組み合わせで宇宙ひもからの重力波パワースペクトルの厳密解を導いた研究があるとされる [39]。
- 理論物理ベンチマーク「TheoPhysEval」では、未発表の理論物理問題 50 問のうち GPT-6 Astra が 49 問（98%）を解いたと報じられている（二次情報。作成者の所属の記載は報道により異なる）[40,41]。

6. 今後の影響・考察

本章はすべて分析・推論である。

6.1 理論物理・格子計算への影響

- 原理面では、カイラルゲージ理論の非摂動的定義に、具体的で検証可能な候補が出たことになる。Witten、Hsu、Grabowska らの後続研究が短期間で出ていることから [7,13,26]、分野を再活性化する触媒になる可能性は高い。
- 実用面では、近い将来に電弱セクターの格子シミュレーションが可能になるわけではない。経路積分が正値でない（符号問題）ことが Witten の指摘どおり根本的な壁で [7]、測度の構成とは別の課題である。量子計算機上のハミルトニアン定式化（Grabowska 等 [26]）など、別の路線との組み合わせが今後の焦点になるだろう。
- 決定的に重要なのは、反射正値性と連続極限である。ここが否定的に決着すれば、「標準模型の定義」としての意義は大きく後退する。

6.2 「AI による科学的発見」をどう評価するか

- 本件は「AI 主導の自律的発見」ではない。「人間が問題と戦略を選び、AI が数学的な実行（構成・証明・形式化）を主導した協働」とみるのが最も正確である。人間側の貢献（問題の選択、戦略、専門家との対話、執筆、限界の判断）は本質的である。他方で、自分の専門外（格子ゲージ理論、厳密な数理物理）の部分を AI に埋めさせたという点は新しい。Woit が指摘するように、研究者が専門の境界を越える手段として AI を使うモデルケースになりうる[5]。
- 評価の基準は、OpenAI の自己申告ではなく、①第三者による証明の追試、②Lean の定理文が物理的に意図した主張と一致しているかの人間による精査、③査読、の 3 点に置くべきである。Lean 検証は「形式化された命題が仮定から従う」ことを保証するにすぎず、その命題が物理的に正しい問いになっているかは保証しない。

6.3 研究開発・知財実務への示唆（補足）

- **発明者性・著者性**：本件は「AI は著者にしない（単著）が、謝辞で AI の寄与を具体的に開示する」という、arXiv や主要誌の方針に沿った処理である。特許では、日米とも現行法上 AI を発明者とは認めない方向である（米国は Thaler 事件、日本は知財高裁 2025 年の DABUS 判決）。AI が「証明を主導した」ような場合には、人間の着想への寄与が発明者要件を満たすかが争点になりうる。具体的な判断は各国の最新ガイダンスと個別事情に依存するため、法的な確定事項としては扱えない。
- **寄与の記録**：本件のように「誰が戦略を出し、AIが何を実行したか」を時系列で残すことは、発明者認定、優先権の主張、紛争予防（Navier–Stokes での優先権論争が反面教師）に直結する。研究ノート、プロンプト・出力ログ、検証記録（Lean 等）の保存方針を、社内規程として整備しておく価値がある。
- **成果の帰属と契約**：Craig は大学所属のまま OpenAI の訪問研究者を兼ねている。こうした大学と AI 企業の兼務や共同研究では、成果の公表権、知財の帰属、AI 利用ログの所有権を事前に契約で定めておく必要性が高まっている。

7. 提言

- **研究・技術動向のウォッチャー向け**：本件は「AIが標準模型問題を解いた」ではなく、「AIを数学的共同研究者とした、有力だが未査読の候補構成」として扱うのがよい。追跡すべきシグナルは次の 4 つである。①Golterman、Kronfeld、Shamir ら格子専門家の公開評価、②Craig 論文の改訂版と査読誌での受理、③反射正値性についての結果、④OpenAI の QCD 等の存在証明の公開と第三者検証。
- **AI for Science の評価軸**：発表を見るときは、「誰が問題と戦略を選んだか」「検証は誰が実行したか（AI 自身か第三者か）」「形式化された命題と主張の対応」「査読の有無」の 4 点で読むべきである。本件は開示の質では良好な部類だが、検証の独立性では不十分である。
- **知財・R&D 実務**：AI を使った研究開発では、人間による着想と判断の記録、AI への指示と出力のログ、検証過程を保存する運用を今から整備することを推奨する。

8. 留意事項

- OpenAI 公式記事は、技術的制約によりツールから直接全文を取得できなかった。内容は、公式ページの検索抜粋、arXiv 論文（アブストラクトと序論）、複数報道の引用から再構成している。論文第 12 節と謝辞の全文、Lean 検証報告の詳細（公理リスト等）は原文で未確認である。
- 発表から約 1 日しか経っておらず、専門家の評価は出揃っていない。正しさは独立に検証されていない。Witten 論文での肯定的言及は強い傍証だが、査読ではない。
- Brockman の投稿、daily.dev による X 反応の集計、Woit のブログ記事の詳細などは、二次情報または調査時の要約に依拠している。
- Witten 論文のページ数は、情報源により 33 ページと 36 ページ [25] の差異があるため、本文では記載していない。
- 参考文献のうち「未再確認」と付記したものは、本文書作成時にページを再取得できず、題名に URL からの推定を含む場合がある。引用・転載の際は原典での確認を推奨する。

- 法的論点（発明者性等）は、国・時期・個別事情によって結論が変わりうる。本文書の記述は一般的な傾向の指摘にとどまり、法的助言ではない。

参考文献

各項目末尾の〔 〕は本文書作成時（2026 年 11 月 16 日）の確認状況を示す。「確認」は検索結果上で題名・書誌等を確認できたもの（全文は未取得の場合がある）、「未再確認」は調査時の出典一覧に基づき、本文書作成時にページを再取得できなかったものである。URL の最終アクセス日はいずれも 2026 年 11 月 16 日。

1) Nathaniel Craig「A step toward defining the Standard Model on a lattice」OpenAI（サイエンスブログ、ゲスト投稿）、2026 年 11 月 15 日。 https://openai.com/index/step-toward-defining-the-standard-model/ 〔確認：検索結果に表示される公式ページの抜粋で題名・日付・リード文を確認。openai.com は直接取得できず、全文は未確認。〕

2) CASRAI「OpenAI launches a science blog for researchers」2026 年 11 月。 https://casrai.org/news/openai-science-blog-launch-2026 〔確認：検索結果上で題名・要旨を確認。〕

3) Nathaniel Craig, “A gauge-invariant measure for lattice chiral fermions,” arXiv:2610.09093 [hep-lat]、2026 年 10 月 6 日投稿。 https://arxiv.org/abs/2610.09093 〔確認：検索結果上で題名・著者・投稿日・アブストラクトを確認。本文各節・謝辞の全文は未確認。〕

4) Digg「GPT-6 Astra helped build a Standard Model lattice proposal, Craig says—not a finished solution」2026 年 11 月。 https://digg.com/ai/pr72emnn 〔確認：検索結果上で題名・要旨を確認。〕

5) Peter Woit「AI and Chiral Fermions」Not Even Wrong（ブログ）、2026 年 10 月 8 日。 https://www.math.columbia.edu/~woit/wordpress/?p=15915 〔未再確認：題名は検索結果で確認。投稿日・内容は調査時の記載による。URL と記事の対応は投稿順からの推定。〕

6) Alexis Dufresne「OpenAI Says GPT-6 Astra Led Proof for Lattice Standard Model」AI Weekly、2026 年 11 月 16 日。 https://aiweekly.co/alerts/openai-says-gpt-6-astra-led-proof-for-lattice-standard-model 〔確認：検索結果上で題名・著者・日付・要旨を確認。〕

7) Edward Witten, “A Note On Lattice Definition of Gauge Theories With Chiral Fermions,” arXiv:2611.05051、2026 年 11 月 3 日。 https://arxiv.org/abs/2611.05051 〔確認：検索結果上で題名・著者・日付とアブストラクト・本文の一部を確認。〕

8) 网易（163.com）「三位顶尖物理学家接连在论文中致谢 AI，理论物理研究正在发生变革」2026 年 11 月。 https://www.163.com/dy/article/LBD51VIC05119734.html 〔確認：検索結果上で題名・要旨を確認。調査時の出典一覧にはなく、本文書作成時に追加。〕

9) OpenAI「Our new blog for science」2026 年 11 月 15 日。 https://openai.com/index/our-new-blog-for-science/ 〔未再確認：題名・日付は調査時の記載による。ブログ開設の事実は文献 2・10 で確認。〕

10) FourWeekMBA「OpenAI's Science Blog Opens: GPT-6 on a 50-Year Physics Gap」2026 年 11 月。 https://fourweekmba.com/ai-openais-science-blog-opens-gpt-6-on-a-50-year-physics-gap/ 〔確認：検索結果上で題名・要旨を確認。〕

11) Nathaniel Craig, "Mathematical companion and Lean formalization for A gauge-invariant measure for lattice chiral fermions," Zenodo、2026 年 10 月。 https://zenodo.org/records/23196062 〔確認：検索結果上で題名・記載内容の一部を確認。〕

12) Nathaniel Craig, "Two-dimensional chiral SU(5) measure and calculation records for A gauge-invariant measure for lattice chiral fermions," Zenodo、2026 年 10 月。 https://zenodo.org/records/23196101 〔確認：検索結果上で題名・記載内容の一部を確認。〕

13) Stephen D.H. Hsu, "The Standard Model on a finite bosonic lattice with continuum Weyl fermions," arXiv:2610.29019 [hep-th]、2026 年 10 月 21 日。 https://arxiv.org/abs/2610.29019 〔確認：検索結果上で題名・著者・アブストラクトを確認。投稿日は調査時の記載による。〕

14) OpenAI「GPT-6 Astra: A new generation of intelligence」2026 年 9 月 3 日。 https://openai.com/ja-JP/index/gpt-6-astra/ 〔確認：検索結果上で題名・要旨を確認。調査時の出典一覧にはなく、本文書作成時に追加。〕

15) Implicator.ai、GPT-6 Astra の発表に関する記事（題名未確認）、2026 年 9 月。 https://www.implicator.ai/openai-gpt-6-astra-agi-era-launch/ 〔確認：検索結果上で発表日（9 月 3 日）とモデル ID（gpt-6-astra）の記載を確認。記事題名は未確認。本文書作成時に追加。〕

16) HyperAI「A gauge-invariant measure for lattice chiral fermions」（論文紹介ページ）。 https://hyper.ai/en/papers/2610.09093 〔確認：検索結果上で記載内容の一部を確認。〕

17) Martin Lüscher, "Abelian chiral gauge theories on the lattice with exact gauge invariance," arXiv:hep-lat/9811032（1998 年）。 https://arxiv.org/abs/hep-lat/9811032 〔確認：検索結果上で題名・著者・アブストラクトを確認。本文書作成時に追加。〕

18) Martin Lüscher, "Lattice regularization of chiral gauge theories to all orders of perturbation theory," arXiv:hep-lat/0006014（2000 年）。 https://arxiv.org/abs/hep-lat/0006014 〔確認：検索結果上で題名を確認。本文書作成時に追加。〕

19) Juven Wang, Yi-Zhuang You, "Symmetric Mass Generation," Symmetry 14(7), 1475（2022 年）。 arXiv:2204.14271。 https://dx.doi.org/10.3390/sym14071475 〔未再確認：調査時の出典一覧にある DOI。書誌は一般に知られた情報による記載で、ページは再取得できず。〕

20) Xiao-Gang Wen, “A lattice non-perturbative definition of an SO(10) chiral gauge theory and its induced standard model,” arXiv:1305.1045（2013 年）。 https://arxiv.org/abs/1305.1045 〔確認：検索結果上で題名を確認。本文書作成時に追加。〕

21) Juven Wang, Xiao-Gang Wen, “Nonperturbative definition of the standard models,” Physical Review Research 2(2)（2020 年）。 https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/142326 〔確認：検索結果上で題名・著者・掲載誌を確認。本文書作成時に追加。〕

22) arXiv:2505.20436（Golterman–Shamir による SMG への制約に関する論文として調査時に参照）。 https://arxiv.org/pdf/2505.20436 〔未再確認：題名・著者は本文書作成時に確認できず。〕

23) “Matching lattice and continuum chiral determinants at finite volume,” arXiv:2611.16544、2026 年 11 月。 https://arxiv.org/abs/2611.16544 〔確認：検索結果上で題名・アブストラクトを確認（著者名は未確認）。調査時の出典一覧にはなく、本文書作成時に追加。〕

24) Peter Woit「New Morning」Not Even Wrong（ブログ）、2026 年 11 月 4 日。 https://www.math.columbia.edu/~woit/wordpress/?p=15979 〔未再確認：題名と Witten 論文への言及は検索結果で確認。投稿日は調査時の記載による。URL と記事の対応は投稿順からの推定。〕

25) FourWeekMBA「Witten’s Physics Paper Credits Claude Opus 5.5 in 3 Places」2026 年 11 月。 https://fourweekmba.com/ai-wittens-physics-paper-credits-claude-opus-5-5-in-3-places/ 〔確認：検索結果上で題名・要旨を確認。調査時の出典一覧にはなく、本文書作成時に追加。〕

26) Dorota M. Grabowska, “Lattice Hamiltonians for Chiral Gauge Theories,” arXiv:2611.13886 [hep-lat]、2026 年 11 月 10 日。 https://arxiv.org/abs/2611.13886 〔確認：検索結果上で題名・著者・日付・アブストラクトを確認。〕

27) Peter Woit「The Yang-Mills Publicity Stunt」Not Even Wrong（ブログ）、2026 年 11 月 11 日。 https://www.math.columbia.edu/~woit/wordpress/?p=15986 〔未再確認：題名・日付・要旨は検索結果（文献 37 を含む）で確認。URL と記事の対応は投稿順からの推定。〕

28) MLQ.ai「OpenAI says GPT-6 Astra led the proof behind a candidate lattice definition of the Standard Model as it launches a science blog」2026 年 11 月。 https://mlq.ai/news/openai-says-gpt-6-astra-led-the-proof-behind-a-candidate-lattice-definition-of-the-standard-model-as-it-launches-a-science-blog/ 〔未再確認：題名は URL からの推定。内容は調査時の記載による。〕

29) DEV Community「GPT-6 Astra Just Helped Physicists Define the Standard Model on a Lattice — Here’s What It Really Proves」2026 年 11 月。 https://dev.to/shakeelahmed/gpt-6-astra-just-helped-physicists-define-the-standard-model-on-a-lattice-heres-what-it-really-4iei 〔確認：検索結果上で題名・要旨を確認。〕

30) Scientific American「Scientists confirm OpenAI’s blockbuster quantum physics result」2026 年 11 月 11 日（12 日更新）。 https://www.scientificamerican.com/article/openais-shepherds-affirm-blockbuster-physics-result/ 〔確認：検索結果上で題名・要旨を確認。日付は文献 37 の記載による。〕

31) Scientific American「OpenAI claims blockbuster math breakthrough amid swirl of controversy」2026 年 9 月。 https://scientificamerican.com/article/openai-claims-blockbuster-math-breakthrough-amid-swirl-of-controversy 〔確認：検索結果上で題名・要旨を確認。調査時の出典一覧にはなく、本文書作成時に追加。〕

32) Science「AI rivals tackle one of physics' deepest mathematical challenges」2026 年 11 月。 https://www.science.org/content/article/ai-rivals-tackle-one-physics-deepest-mathematical-challenges 〔確認：検索結果上で題名・要旨を確認。調査時の出典一覧にはなく、本文書作成時に追加。〕

33) Hacker News 投稿（item 50459014）。 https://news.ycombinator.com/item?id=50459014 〔未再確認：調査時の出典一覧に基づく。内容は本文書作成時に確認できず。〕

34) daily.dev「Astra helps physicist Nathaniel Craig on a lattice definition of the Standard Model」2026 年 11 月。 https://daily.dev/posts/astra-helps-physicist-nathaniel-craig-on-a-lattice-definition-of-the-standard-model-4henmjkc4 〔未再確認：題名は URL からの推定。内容は調査時の記載による。〕

35) XenoSpectrum 解説記事（題名未確認）、2026 年 11 月。 https://xenospectrum.com/standard-model-lattice-chiral-fermions-measure/ 〔未再確認：調査時の出典一覧に基づく。題名・内容は本文書作成時に確認できず。〕

36) OfficeChai「What Is The Yang-Mills Theory OpenAI Claims To Have Proven, And What It Means For Physics」2026 年。 https://officechai.com/ai/what-is-the-yang-mills-theory-openai-claims-to-have-proven-and-what-it-means-for-physics/ 〔確認：検索結果上で題名・要旨を確認。調査時の出典一覧にはなく、本文書作成時に追加。〕

37) CASRAI「OpenAI's Yang-Mills Proof: Gross Committee Confirms Lean Verification, Mass Gap Open」2026 年 11 月。 https://casrai.org/news/ai-rivals-physics-mathematical-challenge-2026 〔確認：検索結果上で題名・要旨を確認。〕

38) Shared Sapience「The Century Report: November 12, 2026」（見出し「OpenAI-Picked Physicists Affirm Its AI's Yang-Mills Proof」）2026 年 11 月 12 日。 https://sharedsapience.substack.com/p/the-century-report-november-12-2026 〔確認：検索結果上で題名・要旨を確認。〕

39) Google Research「Solving an open problem in theoretical physics using AI-assisted discovery」。 https://research.google/pubs/solving-an-open-problem-in-theoretical-physics-using-ai-assisted-discovery/ 〔未再確認：題名は URL からの推定。内容は調査時の記載による。〕

40) Crypto Briefing「AI agents solve 49 of 50 physics problems」2026 年。 https://cryptobriefing.com/ai-agents-solve-49-of-50-physics-problems/ 〔未再確認：題名は URL からの推定。内容は調査時の記載による。〕

41) 36Kr（新智元）「Stunning research by Harvard and Google shows that GPT-6 Astra has solved 98% of the world's physics problems.」2026 年 10 月 19 日。 https://eu.36kr.com/en/p/4031321004397193 〔確認：検索結果上で題名・日付・要旨を確認。調査時の出典一覧にはなく、本文書作成時に追加。〕