ChatGPT

OpenAI「A step toward defining the Standard Model on a lattice」深掘り分析

エグゼクティブ・サマリー

2026年11月15日のOpenAI記事「A step toward defining the Standard Model on a lattice」は、Nathaniel Craig が2026年10月6日に公開したプレプリント **“A gauge-invariant measure for lattice chiral fermions”** を一般向けに解説したものです。中心的主張は、「標準模型そのものの連続極限を構成した」ことではなく、**4次元ユークリッド格子上で、標準模型を含む非可換カイラル・ゲージ理論について、overlap fermion のフェルミオン積分測度を非摂動的・ゲージ不変・滑らか・指数局所的に定める候補構成を与えた**、というものです。これが正しければ、Lüscher が1990年代末にアーベル理論で達成した「カイラル・フェルミオン測度の再構成」を、標準模型を含む重要な非可換理論へ非摂動的に拡張することになります。 [1]

したがって、見出しを「標準模型を格子上で定義した」と読むのは強すぎます。Craig自身も一貫して **candidate lattice definition**、「原理上の定義であって実用的計算法ではない」と表現しています。未解決なのは、有限格子間隔でのreflection positivity、実用的な数値アルゴリズム、許容条件（admissibility bound）の現実的な大きさ、切断された位相セクター間の残余位相、さらに最重要の**相互作用する標準模型そのものの連続極限の存在**です。 [2]

一方で、これは単なる概念提案でもありません。論文は、細分化された格子上のカイラル射影子を比較して得られる測度カレント

$$\mathfrak{L} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n$$

が収束し、指数局所性・ゲージ共変性・異常方程式・局所および大域integrabilityを満たすことを示す構成を提示しています。特に、**異常相殺が細格子極限で発散し得る項を消す仕組みとして直接使われる**点が重要です。 [3]

新規性の核心は「doublersを消す」ことではありません。それはoverlap/Ginsparg–Wilsonで既知です。核心はむしろ、**ゲージ場に依存して動くWeyl部分空間のGrassmann積分測度の位相を、非可換理論で全ての閉ループについて首尾一貫して固定すること**です。Narayanan–Neubergerのoverlap構成そのものが、早くから「実部は定義できるが位相には曖昧性がある」と認識していました。 [4]

2026年11月16日時点では、この結果は**arXivプレプリントであり、独立した査読を終えた確立済み定理とは言えません**。ただし、11月12日にはZhengwen Liuが、Craigの測度と別系統の連続Weyl determinant構成が、ある滑らかでギャップをもつ背景場族において連続極限で一致することを示す独立プレプリントを公開しており、少なくともCraig構成の一部の整合性に外部から数学的支持が現れ始めています。 [5]

AIの役割も例外的です。Craigの記述によれば、出発点の「refinementでLüscherを拡張する」という戦略は本人が提案し、GPT-6 Astra が細格子へのゲージ場の持ち上げ、収束の構造、詳細証明を主導しました。論文のLean形式化もAstraが実行し、16モジュールがLean 4のカーネルで受理されたとされています。ただし、この形式検証が保証するのは「形式化された仮定から形式化された結論が出ること」であり、物理的仮定の妥当性、形式化と自然言語論文の完全な同値性、reflection positivityや連続極限までは保証しません。 [2]

初学者向け：何がそんなに難しいのか

「格子に置く」だけでは標準模型にならない

QCDは格子理論が非常によく機能します。時空を格子間隔 a の点に離散化すれば、経路積分は有限自由度の数学的対象として扱いやすくなり、Monte Carlo計算も可能になります。しかし標準模型の弱い相互作用は**カイラル**です。左手型と右手型のフェルミオンが異なるゲージ表現を持ちます。QCDのようなベクトル型理論ではこの非対称性がありません。[6]

素朴な格子Dirac作用は運動量空間で

$$D_{\mathrm{naive}}(p) \sim \frac{i}{a}\sum_{\mu}\gamma_\mu \sin(ap_\mu)$$

となります。$\sin(ap_\mu)$ は $p_\mu = 0$ だけでなくBrillouin zoneの端でもゼロになるため、4次元では余分な低エネルギー・フェルミオンが出現します。これが**fermion doubling**です。Nielsen–Ninomiya theoremは、局所性・並進対称性・通常のカイラル反交換関係などを同時に要求すると、左手だけのWeyl粒子を有限格子上で単純に実現できず、正味のchiralityが打ち消されることを示します。[7]

Wilsonの方法は、

$$D_W(p) = \frac{i}{a}\sum_{\mu}\gamma_\mu \sin(ap_\mu) + \frac{1}{a}\sum_{\mu}[1-\cos(ap_\mu)]$$

という追加項でdoublersに $O(1/a)$ の質量を与えます。しかし、このWilson項は通常のカイラル対称性を壊します。[8]

Ginsparg–Wilson関係

$$\{\gamma_5, D\} = aD\gamma_5 D$$

は、「有限 a では通常とは少し変形されたカイラル対称性を持ち、$a \to 0$ で普通のカイラル対称性に戻る」という抜け道を与えました。GinspargとWilsonは1982年にこの構造を示し、Narayanan–Neubergerがoverlap fermionとして具体化しました。[9]

overlap Dirac operatorは概略

$$H = \gamma_5(aD_W - 1), \qquad D = \frac{1}{a}\left(1 + \gamma_5 \operatorname{sign} H\right)$$

で与えられます。ここから

$$\widehat{\gamma}_5 = \gamma_5(1 - aD), \qquad \widehat{P}_- = \frac{1-\widehat{\gamma}_5}{2}$$

を定義すると、有限格子間隔でもWeyl部分空間を厳密に切り出せます。[8]

ここまでで「左手粒子を作る」問題はかなり解決します。しかし**ゲージ場 U が変わると $\widehat{P}_-[U]$ 自体が変わる**ため、積分するWeyl部分空間そのものがゲージ場ごとに回転します。このため基底 $v_k(U)$ を選んで

$$\psi = \sum_k v_k(U) c_k$$

と書いたとき、Grassmann測度

$$\prod_k dc_k$$

の位相が基底選択に依存します。必要なのは単に「どの部分空間か」ではなく、その空間上の**determinant lineの位相を全ゲージ場空間にわたって矛盾なく縫い合わせること**です。[10]

なぜ「異常」がここで本質になるのか

連続理論でも、カイラル・フェルミオンの量子測度は古典的ゲージ対称性を自動では保存しません。triangle anomalyに対応する量が消えなければ、ゲージ対称性は量子論で破れ、理論は整合的に量子化できません。標準模型では、一世代のクォーク・レプトン全体を足し合わせることで $U(1)^3$、$SU(2)^2U(1)$、$SU(3)^2U(1)$ などの局所ゲージ異常が相殺されます。格子でもこの相殺が不可欠です。[11]

しかし「局所異常がゼロ」だけでは十分ではありません。ゲージ場空間で閉曲線を一周した後、Weyl基底が元に戻るときに非自明なdeterminant位相を得ることがあります。これがglobal anomalyの問題です。測度カレントを局所的に構成できても、**全ての閉ループでholonomyが正しく一致すること**を別途示す必要があります。Lüscherの再構成条件が局所異常方程式とglobal integrabilityの両方を要求する理由です。[12]

提案手法の数学的・物理的メカニズム

Craigのアイデアは、非可換ゲージ場を直接「ゼロ場まで縮める」のではなく、**同じ物理ゲージ場を、補助的にどんどん細かい格子で見直す**ことです。非可換理論では $A_\mu \to tA_\mu$ のような単純縮約をすると、

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + [A_\mu, A_\nu]$$

の微分項と交換子項が異なるスケーリングをするため、途中でadmissible領域を外れる可能性があります。これがLüscherのアーベル構成をそのまま非可換化できない大きな障害です。[8]

Craigは元のリンク U から局所的に滑らかな接続 $\nabla^0[U]$ を再構成し、それを

$$h_n = 3^{-n}$$

の格子にサンプリングして $F_{h_n}U$ を作ります。細格子plaquetteは面積則により

$$\|\mathcal{P}_h - 1\| \lesssim C\varepsilon h^2$$

へ近づきます。つまり細分化するほど、補助格子では場が局所的に「より滑らか」に見えます。[13]

次に、粗格子と細格子のWilson–Hermitian operatorを同じHilbert空間上で比較します。粗格子fermionを81個の子サイトへnorm-preservingにコピーし、余った自由度には γ_5 を作用させます。4次元で各方向を3分割するので $3^4 = 81$ です。[14]

補間は

$$H_{n,s} = (1-s)H(F_{h_{n+1}}U) + s\left[I_n H(U^{(n)}) I_n^\dagger + \gamma_5(1 - I_n I_n^\dagger)\right]$$

で定義されます。重要なのは、途中の $H_{n,s}$ が必ずしも実際のリンク変数から来るWilson operatorである必要がないことです。必要なのは**スペクトルギャップが閉じないこと**です。ギャップがあれば $\operatorname{sign} H_{n,s}$ と射影子が滑らかに変化します。Craigはこの補間全体でゼロ固有値を避けることを証明する、と主張しています。[15]

元のゲージリンクを微小変化させると、粗・細二つの射影子経路が「細い帯」を作ります。その帯上でprojector curvatureを積分して、各refinement stepの測度項 B_n を作ります。全測度項を

$$\boxed{\mathfrak{L} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n}$$

と定義します。[16]

直感的には、

$$e^{i \oint B_n} = \frac{\text{粗格子でのreturn phase}}{\text{次の細格子でのreturn phase}}$$

となります。したがって有限和では

$$e^{i \oint \sum_{n=0}^{N} B_n} = \frac{\mathcal{T}_0[\gamma]}{\mathcal{T}_{N+1}[\gamma]}.$$

中間格子の位相が**望遠鏡和（telescoping）**で全て消えます。もし最細格子側の位相が

$$\mathcal{T}_{N+1}[\gamma] \to 1$$

なら、元の格子で必要なreturn phaseが完全に再現されます。これが今回の構成の最も美しい部分です。[16]

問題は、格子を細かくすると1サイト当たりの効果は小さくなる一方、サイト数は h^{-4} で増えることです。ここで標準模型の**anomaly cancellation**が効きます。Craigはまず $SU(5)$ の一世代

$$R = \mathbf{10} \oplus \bar{\mathbf{5}}$$

で構成し、色traceの低次項が厳密に相殺されるため B_n が十分速く減衰し、無限和が収束すると論じます。これによりsmoothnessとexponential localityも得られます。[17]

局所異常方程式も望遠鏡型です。B_n を微小ゲージ変換方向で評価すると

$$\mathcal{A}_n - \mathcal{A}_{n+1}$$

が現れ、全 n を足すと中間の異常が消えます。細格子極限の異常がゼロへ行けば、

$$\nabla_\mu^* j_\mu = \mathcal{A}_{\text{original}}$$

というLüscherの要求するdivergence equationが得られます。[16]

global integrabilityについては、細格子のloop phaseを、荷電fermionが共役対をなす補助 $SU(3)$ 接続と比較します。その補助問題ではreturn phaseを $+1$ に固定でき、元の接続へ戻す補正がrefinementで消えることを使います。これによって任意の閉ループで必要なholonomyが再現される、というのが大域証明の骨格です。[18]

全体像を模式化すると次のようになります。

```
元の格子 U
    │
    ├── 接続 ∇⁰[U] を局所再構成
    │
    ├── F₁/₃ U
    │     │  projector比較 → B₀
    │
    ├── F₁/₉ U
    │     │  projector比較 → B₁
    │
    ├── F₁/₂₇ U
    │     │  projector比較 → B₂
    │
    └── ... → continuum-like auxiliary refinement

    𝔏 = B₀+B₁+B₂+...
              ↓
  anomaly cancellation ⇒ 収束・局所性
              ↓
      loop phase が telescoping
              ↓
 Lüscher reconstruction theorem
              ↓
 smooth + gauge-invariant fermion measure
```

ここで非常に重要なのは、**物理格子間隔 a を実際に0へ送っているわけではない**ことです。細分化 $h_n \to 0$ は測度を定義するための補助手段であり、物理的fermion operatorは元の $D[U]$ のままです。したがって、このrefinement極限と物理的continuum limit $a \to 0$ は別物です。 [8]

何が証明されたと主張され、何が未解決か

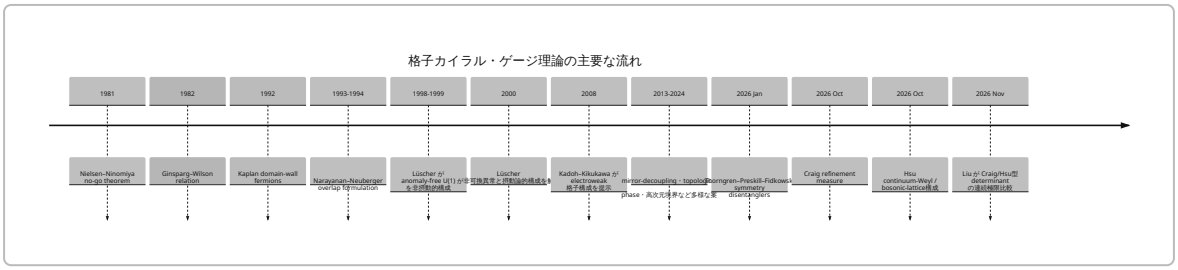
項目	現状	コメント
Nielsen–Ninomiya回避	既知	overlap/Ginsparg–Wilsonによる。今回の新規性ではない。 [9]
有限格子上のWeyl射影	既知	$\widehat{P}_-$ を用いる。 [8]
非可換理論の測度カレント	今回の中心的主張	refinement比較から構成。 [8]
カレントのsmoothness	論文中で証明主張	admissible領域上。 [16]
指数局所性	論文中で証明主張	anomaly cancellationが収束に重要。 [16]
gauge anomaly equation	論文中で証明主張	telescoping cancellationを利用。 [16]

項目	現状	コメント
infinitesimal integrability	論文中で証明主張	fine-lattice curvatureが消える。 [16]
global integrability	論文中で証明主張	補助 $SU(3)$ conjugate-pair構成を利用。 [18]
標準模型の4つのglobal gauge group	カバーすると主張	$\Gamma_{\mathrm{SM}} = 1, \mathbb{Z}_2, \mathbb{Z}_3, \mathbb{Z}_6$。 [18]
3世代	直ちに拡張可能と主張	一世代を複製。 [18]
reflection positivity	**未証明**	Craig自身が主要課題として列挙。 [19]
実用的Monte Carlo実装	**未達**	「principle rather than practice」。 [19]
最適admissibility bound	**未決定**	数値的に使える閾値は未提示。 [19]
disconnected sectors間の定数位相	**残る**	対称性・cluster decomposition等で拘束予定。 [20]
全異常消去非可換理論への一般化	**限定的**	追加の偶数多重度条件を必要とする。 [19]
標準模型そのもののinteracting continuum limit	**未解決**	格子上の候補定義とは別問題。 [21]

「証明」と言うときには二段階に分ける必要があります。第一に、Craig論文内部では数学的命題について詳細な証明が提示されています。第二に、学界全体としてその証明が正しいと合意されたわけではありません。2026年11月16日時点では公開から約6週間で、査読論文として確立した状態ではありません。OpenAI記事自身も「scientific dialogue among experts is required」と明記しています。 [22]

さらに、Lean形式化はかなり強い追加証拠ですが万能ではありません。論文によれば、$SU(5)$ 構成と標準模型への制限に関する16のLean 4モジュールが、標準公理のみ・未証明placeholderなしでkernelに受理されました。ただしCraig自身が、形式検証は「物理として正しいことの最終判定ではない」と注意しています。 [19]

先行研究との比較と歴史的位置づけ



Nielsen–Ninomiyaのno-go theoremは、「単一のWeyl fermionを最も素朴な条件の下で格子化する」ことが不可能であることを明確化しました。 [23]

Ginsparg–Wilsonは通常の $\{\gamma_5, D\} = 0$ を有限 a で変形し、連続極限で正しいchiralityを回復する道を開きました。Narayanan–Neubergerのoverlapは、この構造を具体的operatorとして実現しましたが、原論文自身がchiral determinantの**位相の曖昧性**を指摘しています。[9]

Lüscherは1998–99年、anomaly-free $U(1)$ Weyl theoryについて、全topological sectorを含む有限体積でexact gauge invarianceをもつ非摂動的格子構成を与えました。非可換理論については2000年前後に、異常の幾何学構造と摂動論の全次数での構成を示しましたが、一般の非可換理論に対する完全な非摂動的構成は残りました。[24]

Kadoh–Kikukawaは2008年にGlashow–Weinberg–Salam模型のexact gauge-invariant構成を提示しましたが、論文自身の範囲は、全 $SU(2)$ topological sectorsを扱いつつ $U(1)$ magnetic fluxをゼロに制限し、無限体積では摂動論の全次数を与えるというものでした。Craigの主張する新規性は、これより広いadmissible domain上でStandard Model measureのglobal integrabilityまで与える点にあります。[25]

別の系統として、domain-wall fermion、mirror fermion decoupling、higher-dimensional anomaly inflow、topological phase、symmetry disentanglerがあります。2026年のThorngren–Preskill–Fidkowskiは、not-on-site symmetryを有限深さ回路でon-site化してgaugingするHamiltonian的手法を提案し、3+1次元の $U(1)$ hyperchargeへの応用可能性を論じています。ただしCraigとは技術的発想がかなり異なります。[26]

さらに2026年10月のStephen Hsuは、**bosonic gauge/Higgs fieldsだけを有限格子に置き、Weyl fermionは連続のまま扱う**別構成を提示しました。これはNielsen–Ninomiyaを「有限次元Weyl格子fermionを最初から作らない」ことで回避する思想です。bosonic functional integralの有限性とexact gauge invarianceを特定のsmoothness条件で示しますが、bosonic continuum limitは未解決です。[27]

比較すると次のようになります。

手法	fermionの扱い	ゲージ不変性	非摂動性	主な未解決点
Wilson fermion	格子Dirac	容易	○	chiralityを明示的に破る
Domain wall	5次元境界mode	条件付き	○	mirror/bulk mode、計算量
Overlap + Lüscher U(1)	格子Weyl	exact	○	非可換一般化
Kadoh–Kikukawa EW	overlap	exact	部分的	flux等の制限
Symmetry disentangler	Hamiltonian	構成依存	○	4D full SMへの完成
Hsu 2026	fermionは連続	exact	○	bosonic continuum limit
Craig 2026	overlap fermion	exactと主張	○	RP、実装、continuum limit

Craig構成の特徴は、既存のoverlap/Lüscher枠組みを捨てずに、その「欠けていたmeasure phase」をrefinementの望遠鏡構造で埋める点です。これは新しいfermion discretizationを発明するというより、**既知の正しい局所chiralityと、未解決だった非可換measure geometryを接続する仕事**と理解するのが最も正確です。[8]

専門的評価、反論可能性、数値・実験的検証

現段階で最も重要な留保はreflection positivityです。ユークリッド格子理論から正定値Hilbert空間とunitary時間発展を再構成するには、Osterwalder–Schrader型のpositivityが中心的役割を果たします。free overlap fermionについてはreflection positivityが知られていますが、Craigが構成する**ゲージ場依存のchiral measureとadmissibility constraintを含む完全理論**については未証明です。 [28]

第二に、admissibility条件が強すぎる可能性があります。Craigの定理はplaquetteがidentityに十分近い領域で成立します。理論的にはvolume-independentな正の閾値が存在するとされますが、現実的Monte Carlo計算で典型的ゲージ場を過度に除外しないほど緩いかはまだ分かりません。論文自身が「optimal numerical admissibility bounds」の決定を今後の課題に挙げています。 [19]

第三に、構成は計算量の観点では重いです。元リンクから局所continuum connectionを再構成し、無限系列の補助格子、spectral sign、projector curvature、loop phaseを扱います。論文は固定格子でmeasure currentを多項式展開により任意精度で近似できること、誤差評価も与えていますが、これが標準的なHMCなどに組み込める効率的アルゴリズムになるかは全く別問題です。有限近似ではexact gauge invarianceやpath independenceが失われ得ることも論文自身が説明しています。 [29]

第四に、global argumentの表現論的範囲があります。標準模型はカバーされますが、一般の $SU(N_c)$ 理論ではcubic anomaly cancellationに加え、特定の $SU(2)$ subgroupでhalf-integer isospin表現が偶数多重度で現れるという十分条件を使います。これはCraigのglobal phase証明の技術的条件であって、異常のない全カイラル理論に本質的に必要と証明された条件ではありません。論文も別の議論ならより広いクラスへ拡張できる可能性を認めています。 [20]

外部評価はまだ極めて初期です。OpenAI記事ではMaarten Golterman、Andreas Kronfeld、Yigal Shamirが証明を読み、質問を通して構成の改善に寄与したとCraigが述べていますが、これは独立した査読承認とは異なります。 [22]

Peter Woitは2026年10月8日のブログで、この論文を従来のAI自動生成論文とは異なり、相当量の人間編集と専門家レビューを経た興味深い事例と評価しつつ、Craigが従来主に格子理論を専門にしていなかった点と、Astraが「数学者共同研究者」のような役割を担った点を注目しています。これは肯定的な技術的査読というより、AI研究方法論への評価です。 [30]

より重要なのはZhengwen Liuの2026年11月12日の独立プレプリントです。Liuは、一世代 $SU(5)$・平坦な4-torus・滑らかでDirac gapを保つ背景という限定条件の下で、Craigのoverlap measureと、continuum Weyl determinant / η-invariant型構成の相対weightが、局所Yang–Mills counterを差し引いた後にcontinuum limitで一致すると主張します。またCraigのreconstructionについて必要なboundsを証明し、数値背景でもphaseの二次収束を確認しています。これはCraig論文全体の証明ではありませんが、**異なる定式化が同じ連続物理へ向かうという非自明なcross-check**です。 [5]

実験的検証という意味では、これは直接新粒子や新予言を出す理論ではないため、LHCなどで「Craig measureを測定」することはできません。検証は主に数学・数値側になります。短期的に最も有効なのは、既知のchiral anomaly、index、baryon/lepton number violating background、topologically nontrivial gauge fieldで正しい結果を再現するか、別の正則化と同じuniversal continuum observablesへ収束するかを見ることです。Craigは2次元 $SU(5)$ toy modelでcurrent、gauge response、determinant phaseを直接比較するsupplementを用意しています。 [19]

数値検証のロードマップは、概念的には次の順序が自然です。

1. 小体積2D/4D背景で B_n のrefinement収束率を測る。
2. gauge variationに対して $\nabla^* j = \mathcal{A}$ を数値精度内で検証する。
3. 閉ループ上でprojector holonomyと $\exp(i \oint \mathfrak{L})$ が一致するか確認する。
4. nontrivial topologyでphase continuityを検証する。
5. Craig measureとHsu/η-invariant系のweightを同一背景で比較する。
6. 最終的にfermionic observablesを既知の摂動論・vectorlike limit・低エネルギー有効理論と照合する。

これらの方向の一部は、Craigの2D supplementとLiuの11月12日論文ですでに着手されています。[31]

AIの役割と、結果をどう位置づけるべきか

OpenAI記事とCraig論文の記述をそのまま整理すると、役割分担はかなり明瞭です。**研究上の問題設定と「refinementでLüscherのアーベル構成を非可換へ拡張する」という核となる戦略はCraig、人間の専門家が厳しいチェックと質問を行い、Astraが具体的なfine-grid construction、収束論、詳細証明を大規模に展開した**、という形です。[21]

論文は、Astraが作成した証明をCraigが大幅に書き直し、AstraがLean検証やsupplementの一部も担当したと明記しています。従来の「AIが文献検索・コード補助をした」というレベルより、はるかに深い数学的共同研究です。[19]

ただし、AIが関与したから証明の信頼性が上がるとも下がるとも、それだけでは言えません。評価すべきなのは、自然言語証明、形式証明、独立再導出、数値cross-check、外部専門家による検証が互いに整合するかです。この論文はその点を意識しており、Lean形式化、2D数値例、別構成との比較という複数の検証経路を用意しています。[19]

一方、OpenAI記事末尾で言及される「OpenAIのYang–Mills存在証明」については、2026年11月16日時点でOpenAI自身が学術コミュニティと検証中の成果として公表している段階です。OpenAIは、2026年9月に自然言語証明、10月16日にLean形式化を完了し、David Gross、Michael Douglas、Arthur Jaffe、Igor Klebanov、Nikita Nekrasovらによる学術的検証体制を組んだと述べています。したがって、これも既存の教科書的定理として扱うべきではなく、**極めて大きな主張が現在検証されている段階**と見るべきです。[32]

最もバランスのよい評価は、「標準模型の非摂動的定義問題が解決した」と断言することでも、「AIが書いた未査読論文だから無視できる」と退けることでもありません。現時点の技術的内容だけを見ると、Craigの結果は**長年明確に認識されてきた“overlap Weyl measureの非可換・大域位相問題”に、具体的で検証可能な解答候補を与えた**点でかなり重要です。しかも、標準模型のfermion contentでanomaly cancellationが単なる整合条件ではなく、refinement seriesの収束を担う計算上の機構として現れる点は概念的にも美しいです。[17]

ただし、物理理論として「完成」と呼ぶには、少なくともreflection positivity、数値実装、admissibility条件の実用性、連続極限、外部による証明再検証が必要です。Craig自身の表現どおり、現段階では「終点」よりも**有望な新しい出発点**と位置づけるのが妥当です。[21]

主要一次資料・参考文献

OpenAI, **“A step toward defining the Standard Model on a lattice”**, 15 Nov 2026.
https://openai.com/index/step-toward-defining-the-standard-model/
記事本体。主張、AIの役割、未解決点を確認する一次資料です。 22

Nathaniel Craig, **“A gauge-invariant measure for lattice chiral fermions”**, arXiv:2610.09093, 6 Oct 2026.
https://arxiv.org/abs/2610.09093
本件の中心論文です。 33

HTML全文：
https://arxiv.org/html/2610.09093v1
数式・証明構造・open problemsの確認に有用です。 8

P. H. Ginsparg and K. G. Wilson, **“A remnant of chiral symmetry on the lattice”**, Phys. Rev. D 25, 2649 (1982).
https://doi.org/10.1103/PhysRevD.25.2649
Ginsparg–Wilson関係の原典です。 34

R. Narayanan and H. Neuberger, **“Chiral Determinant as an Overlap of Two Vacua”**, Nucl. Phys. B 412 (1994) 574.
https://arxiv.org/abs/hep-lat/9307006
overlap構成とchiral determinantの位相問題の原典です。 35

M. Lüscher, **“Abelian chiral gauge theories on the lattice with exact gauge invariance”**, Nucl. Phys. B 549 (1999) 295.
https://arxiv.org/abs/hep-lat/9811032
今回のCraig構成が直接拡張しようとする基礎研究です。 36

M. Lüscher, **“Weyl fermions on the lattice and the non-abelian gauge anomaly”**, Nucl. Phys. B 568 (2000) 162.
https://arxiv.org/abs/hep-lat/9904009
非可換格子異常の幾何学を扱う主要一次資料です。 37

D. Kadoh and Y. Kikukawa, **“A construction of the Glashow–Weinberg–Salam model on the lattice with exact gauge invariance”**, JHEP 05 (2008) 095.
https://arxiv.org/abs/0709.3658
Craig以前の標準模型電弱sectorに対する代表的構成です。 38

H. B. Nielsen and M. Ninomiya, **“A no-go theorem for regularizing chiral fermions”**, Phys. Lett. B 105 (1981) 219.
https://doi.org/10.1016/0370-2693(81)91026-1
fermion doubling/no-go theoremの原典です。 39

R. Thorngren, J. Preskill, L. Fidkowski, **“Chiral Lattice Gauge Theories from Symmetry Disentanglers”**, JHEP 07 (2026) 271.
https://arxiv.org/abs/2601.04304
Craigとは異なるHamiltonian的アプローチです。 26

Stephen D. H. Hsu, **“The Standard Model on a finite bosonic lattice with continuum Weyl fermions”**, arXiv:2610.29019.
https://arxiv.org/abs/2610.29019
fermionを連続のまま残す独立アプローチです。 27

Zhengwen Liu, **“Matching lattice and continuum chiral determinants at finite volume”**, arXiv: 2611.16544, 12 Nov 2026.
https://arxiv.org/abs/2611.16544
Craig構成と別系統のchiral determinantを比較する、現時点で特に重要な独立cross-checkです。 5

OpenAI, **“Working with academic communities to build scientific understanding”**, 2026.
https://openai.com/index/building-scientific-understanding-with-academic-communities/
OpenAIが別途主張するYang–Mills/QCD存在証明の検証状況を確認する一次資料です。 32

---

1 6 21 22 A step toward defining the Standard Model on a lattice | OpenAI
https://openai.com/index/step-toward-defining-the-standard-model/

2 3 8 10 12 13 14 15 16 17 18 19 20 29 31 A gauge-invariant measure for lattice chiral fermions
https://arxiv.org/html/2610.09093v1

4 35 [hep-lat/9307006] Chiral Determinant as an Overlap of Two Vacua
https://arxiv.org/abs/hep-lat/9307006

5 Matching lattice and continuum chiral determinants at finite volume
https://arxiv.org/abs/2611.16544?utm_source=chatgpt.com

7 23 39 A no-go theorem for regularizing chiral fermions
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269381910261?utm_source=chatgpt.com

9 34 A remnant of chiral symmetry on the lattice | Phys. Rev. D
https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.25.2649

11 Gauge anomaly cancellations in SU(2)_L \times U(1)_Y Electroweak theory on the lattice
https://arxiv.org/abs/hep-lat/0005015?utm_source=chatgpt.com

24 36 [hep-lat/9811032] Abelian chiral gauge theories on the lattice with exact gauge invariance
https://arxiv.org/abs/hep-lat/9811032

25 38 [0709.3658] A construction of the Glashow-Weinberg-Salam model on the lattice with exact gauge invariance
https://arxiv.org/abs/0709.3658

26 Chiral Lattice Gauge Theories from Symmetry Disentanglers
https://arxiv.org/abs/2601.04304?utm_source=chatgpt.com

27 The Standard Model on a finite bosonic lattice with continuum Weyl fermions
https://arxiv.org/abs/2610.29019?utm_source=chatgpt.com

28 Reflection positivity of free overlap fermions
https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.82.114503?utm_source=chatgpt.com

30 AI and Chiral Fermions | Not Even Wrong
https://www.math.columbia.edu/~woit/wordpress/?p=15915&utm_source=chatgpt.com

32 Working with academic communities to build scientific understanding | OpenAI
https://openai.com/index/building-scientific-understanding-with-academic-communities/?utm_source=chatgpt.com

33 [2610.09093] A gauge-invariant measure for lattice chiral fermions
https://arxiv.org/abs/2610.09093

37 Weyl fermions on the lattice and the non-abelian gauge anomaly
https://arxiv.org/abs/hep-lat/9904009?utm_source=chatgpt.com