

複合粒子の性質を探る新しい計算手法を開発

—符号問題に阻まれた物理現象の解明に向けて—

概要

陽子や中性子はクォークという素粒子3つで構成された複合粒子ですが、その質量はそれぞれのクォーク質量を足したものと比べて百倍も重いことがわかっています。この大きな差は、クォークの間に働く大きな力によって生じます。これら複合粒子の質量はモンテカルロ法という計算手法で調べられ、加速器実験とよく一致する結果が得られています。この計算法は非常に良くできていますが、中性子星^{注1)}内部のような高密度状態には適用できないという弱点もあります。

京都大学基礎物理学研究所 伊藤悦子 准教授、松本祥 同特定研究員、谷崎佑弥 同助教の研究グループは、従来の手法とは異なるハミルトニアン形式^{注2)}という理論の表し方を用いて、複合粒子質量の新しい計算手法を開発しました。また、この手法を用いてシュウィンガー模型^{注3)}の解析を行い、モンテカルロ法が適用できない場合でも精度の良い結果が得られる事を示しました。この手法は量子コンピュータ^{注4)}にも適用できます。これが実現すれば、将来、素粒子の理論から中性子星の性質を解き明かすことが可能になると期待されています。

本研究成果は2024年9月24日に、イタリアの国際学術誌「*Journal of High Energy Physics*」にオンライン掲載されました。

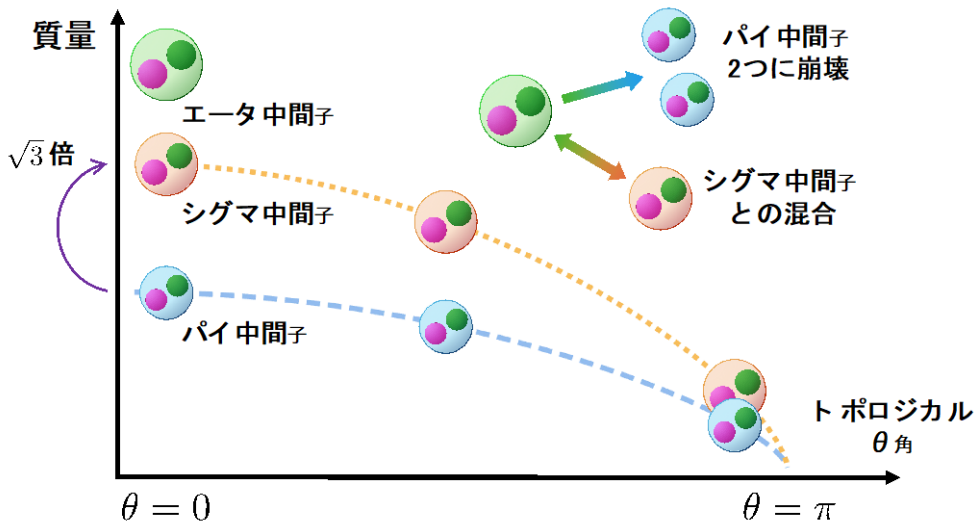


図 本研究によって確認されたシュウィンガー模型における複合粒子(パイ・シグマ・エータ中間子)の性質を模式的に表した。トポロジカル θ 角(背景電場)の大きさに依存して、粒子の質量が変化したり、他の粒子に崩壊したりする。

1. 背景

身の回りには原子は全て、電子・陽子・中性子という3種類の粒子の組み合わせでできています。このうち電子は「素粒子」、すなわち物質を構成する最も基本的な粒子だと考えられています。一方で、陽子と中性子はクォークというさらに小さい粒子が3つ集まってできており、ハドロンと呼ばれる複合粒子に分類されます。ハドロンには沢山の種類がありますが、加速器を使った実験ではそれらの質量を測ることができません。その質量はクォークたちの質量を単純に足し算したものよりずっと重い事が知られていますが、実際にどのくらい大きくなるのかを理論的に予想するにはクォークたちに働く力を正確に調べる必要があります。これまでの研究では、スーパーコンピュータを使って、モンテカルロ法という手法によって計算されてきました。その結果、クォークたちに働く力を記述する理論である量子色力学(QCD)^{注5)}から予言されるハドロン質量は、加速器実験の結果と高い精度で一致することがわかっています。

このモンテカルロ法は、現在、クォークやハドロンの性質を探る上で最も強力な計算手法ですが、適用可能な範囲に制限があります。例えば、ハドロンが高密度に詰まった状態では、シミュレーションがうまくいきません。これは中性子星の性質を調べようとする場合などで生じる困難であり、「符号問題^{注6)}」と呼ばれています。そのため近年、従来の計算手法に代わる新たな方法の開発が進められています。

2. 研究手法・成果

本研究グループはこれらハドロンの質量を計算する新たな手法を開発し、それが符号問題の生じる場合であっても適用可能であることを示しました。そのために本研究グループは、まず、理論を書き表す形式を従来のラグランジアン形式からハミルトニアン形式に変更することで、符号問題を避けてシミュレーションすることを考えました。そして、そのハミルトニアン形式で複合粒子の質量を計算する手法を開発しました。実際の計算では、テンソルネットワーク法^{注7)}という計算テクニックと組み合わせて、QCDを単純化したモデルであるシュウィンガーモデルの数値シミュレーションを行いました。

このシュウィンガーモデルには、パイ・シグマ・エータという3種類の複合粒子が存在します。これら複合粒子の質量は「トポロジカル θ 角^{注8)}」というパラメーターに応じて変化する事が、解析的な研究によって指摘されていました。我々の考えた新しい計算法によって、「シグマ中間子がパイ中間子のちょうど $\sqrt{3}$ 倍だけ重い事」や、トポロジカル θ 角を増やしても「この関係を保ったままシグマ中間子もパイ中間子も徐々に軽くなる事」などがわかりました。また、トポロジカル θ 角の効果がある場合、エータ中間子は安定に存在できずに他の複合粒子に崩壊する兆候も見えました。

このモデルを従来のモンテカルロ法で計算すると、トポロジカル θ 角が大きいときに符号問題が深刻になり、まともな結果が得られない事が知られていました。本研究で新たに開発した方法を用いることで、この問題を克服して精度の良い結果を得て、その性質をよく理解する事ができました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究により、我々の開発したハミルトニアン形式で有用な計算法を用いることで、従来法ではうまく計算できなかった領域まで、複合粒子の質量を精度良く計算できることが示されました。また我々の計算方法は、従来の計算手法では手も足も出なかった高密度下におけるQCDの計算にも応用が可能です。さらに、今回の計算法の検証ではテンソルネットワーク法という通常のコンピュータを用いた計算を行いました。量子コンピュータにも同様に実装できると考えています。この研究を進めていくと、これまで符号問題によって阻まれていた未知の物理現象を解明できるようになると期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は下記の助成金と研究機関による支援を受けて行われました。

- (1) 学術変革領域研究(A)「量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム」(領域代表者：高柳匡) D01 班: 「場の量子論のダイナミクスへの量子情報的アプローチ」JP21H05190(研究代表者：西岡辰磨)
- (2) JST さきがけ「符号問題が生じる場の理論の古典量子計算法の開発」JPMJPR2113 (研究代表者：伊藤悦子)
- (3) 科研費基盤研究(S)「QCD から解き明かす重クォークエキゾチック粒子の謎」JP23H05439 (研究代表者：土井 琢身)
- (4) 科研費基盤研究(B)「一般化された対称性にもとづく非摂動的な場の理論の研究」23K22489 (研究代表者：谷崎佑弥)
- (5) 京都大学基礎物理学研究所 重力量子情報研究センター

本研究の数値計算は、京都大学基礎物理学研究所と理化学研究所数理創造プログラムの計算機システムを使用して行われました。

<用語解説>

- 注1) 中性子星：太陽より 8~10 倍重い星が爆発した後に残る直径 20km 程の天体。主に中性子で構成されており、非常に密度が高い(1 立法 cm あたり約 10^9 トン)。巨大な原子核に例えられる。
- 注2) ハミルトニアン形式：ミクロな現象を記述する理論を定式化する方法の 1 つ。
- 注3) シュウィンガー模型：1 次元空間における電子の運動を記述する量子電磁気学。電子の間に働く力は、光子に対応する粒子によって媒介される。QCD とよく似た性質を持つ。
- 注4) 量子コンピュータ：量子力学における「重ね合わせ」や「量子もつれ」といった性質を利用して演算を行う装置。電子回路を用いた通常の計算機では時間のかかる計算を高速で処理できると期待されている。
- 注5) 量子色力学：Quantum ChromoDynamics を略して QCD とも呼ばれ、クォークの運動を記述する理論である。クォークの間にはグルーオンによって媒介される「強い相互作用」が働く。
- 注6) 符号問題：(重点サンプリング法に基づく)モンテカルロ法で積分値を評価する際、被積分関数の性質によって生じる計算量増大の問題。QCD における問題では体積を大きくしていくと計算量が多項式より早く増大していき、積分値を評価するのが非常に困難である事が知られる。
- 注7) テンソルネットワーク：物理量をテンソルの組み合わせで表現して実行する計算テクニック。行列の特異値分解のような情報圧縮を取り入れることで、精度を保ちつつ計算コストを削減する。
- 注8) トポロジカル θ 角：理論が連続的な変形(トポロジカルな変形)では変わらない性質を持つ場合にそれを特徴づける量。シュウィンガー模型の場合は背景電場という物理的な意味も持つ。

<研究者のコメント>

「ハミルトニアン形式の数値計算は符号問題がないという利点に動機付けされたアイデアですが、従来とは異なる視点から理論の性質を見直すという点でも有意義です。定式化を変えることで、これまで見ていなかった物理的性質を理解することができたりします。そして、そこから新しい研究のアイデアが生まれることもあります。この研究では、まさに研究分野の最前線を切り拓いているという実感を得ることができました。」

(松本)

<論文タイトルと著者>

タイトル：DMRG study of the theta-dependent mass spectrum in the 2-flavor Schwinger model
(DMRG で見る 2 フレーバー・シュウィンガー模型の質量スペクトルとその θ 依存性)

著者：Etsuko Itou, Akira Matsumoto, Yuya Tanizaki

掲載誌：*Journal of High Energy Physics* DOI：10.1007/JHEP09(2024)155