

量子キャッチボールの新たな仕組みを解明

—先鋭的理論で解明された3体核力と物質の安定性に関する40年以上の謎—

ポイント

- ① 3体核力は原子核や中性子星など様々な局面で重要な寄与を果たすが、その全容は未解明
- ② 先鋭的理論に基づいて、3体核力が物質を安定にする仕組みを世界で初めて解明
- ③ 宇宙物理、物性物理、量子情報、量子技術など分野を超えた将来研究・波及効果に期待

概要

原子核を構成する核子の間にはたらく力は、核子同士のキャッチボールに喩えられます。3つの核子間のキャッチボール(3体核力(※1))は、極微の原子核に留まらず中性子星のような天体に至るまで、物質の安定性に本質的な寄与を果たすことが知られています。その詳細な仕組みは長らく謎でした。40年以上前の先行研究による重要な示唆があるものの、3つの核子間のキャッチボールに関する知識が当時は乏しかったため、決定的な結論を導くことはできていませんでした。

本研究によってこの謎を解明することができました。3つの核子がキャッチボールをするとき、核子は量子力学に従い、いくつかの運動パターンだけが許されます。そして、特にそのうちの1つの運動パターンにおいて3つの核子がお互いを引きつけ合い、物質を安定化させているのです。

九州大学基幹教育院の福井徳朗助教、Università degli studi della CampaniaのGiovanni De Gregorio 研究員、Istituto Nazionale di Fisica NucleareのAngela Gargano研究員からなる国際研究グループは、3つの核子間のキャッチボールの仕組みを理論的に解き明かしました。これを可能にしたのが、先鋭的な核力理論(※2)とスーパーコンピュータを駆使したシミュレーションです。計算の結果、2つのボール(中間子(※3))を使って3つの核子がキャッチボールをすることで引力が働き、原子核中の核子をおとなしくさせている(励起しにくくしている)ことが示されました。

3つの核子が2つのボールを投げ合うと、核子対の反対称なスピン状態と対称なスピン状態(※4)が区別できなくなるという現象が起こります。この現象は、2つの核子がキャッチボールをする際には決して起こりません。そのため、これまで原子核物理の分野ではあまり注目されていませんでした。しかし、物性物理の分野では類似する現象が知られており、またこの現象は量子もつれ(※5)と密接に関わっています。したがって、将来的には量子技術などを含めた分野横断的な研究が期待されます。

本研究成果は学術誌「Physics Letters B」に2024年7月14日に掲載されました。



図1. 3体核力をキャッチボールで喩えた概念図

研究者からひとこと：

原子核を構成する核子はフェムトスケール(1フェムトメートル = 0.000000000000001メートル)という極微な世界の“住人”です。“性別”を持ち(陽子と中性子)、フィギュアスケーターのように“自転”をしながら(スピン)、規則正しく“走り回って”います(軌道運動)。そしてこのような動きと同時に、複数のボールを使って“キャッチボール”をしているのです(中間子の交換)。とても真似できそうにありません。

【研究の背景と経緯】

原子核を構成する複数の核子は2つの核子の間の相互作用(2体核力)のみならず、3つの核子の間の相互作用(3体核力)やより多くの核子の間の相互作用(多体核力)を通して、原子核を原子核足らしめています。先人たちの長年の研究により、2体核力の性質はある程度理解が深まりましたが、3体核力については多くの謎が残されています。特に、3体核力がどのように働いて原子核殻構造(※6)が発現・発達するのか、その詳細な仕組みは解明されていません。

この仕組みの解明に迫った先行研究が40年以上前にありました。しかし、先行研究では3体核力のある特定の性質のみに注目したこと、そして当時は信頼できる核力理論が確立していなかったことから、決定的な結論を導くことはできていませんでした。

【研究の内容と成果】

本研究の目的は上記の仕組みの解明であり、先行研究では果たせなかった決定的な結論を導くことです。そのために、先鋭的な核力理論を用いました。この理論によって信頼できる核力が確立したのは今世紀に入ってからのことであり、積年の課題に挑む機は熟していました。そして、我々は3体核力を“解剖”しました。具体的には、交換するパイ中間子の数で3体核力を分類し、それぞれを3つの核子のスピン(核子自身を回転軸にした自転に似た運動)および軌道運動(核子自身以外の特定の回転軸を中心とした回転運動)の組み合わせによってさらに分解しました。このようにして、3体核力の各要素のうち、どれが殻構造発達を引き起こしているのかを理論的に分析しました(図2参照)。

上記の手法と高性能なスーパーコンピュータによる原子核のシミュレーションの結果を図3に示します。縦軸は炭素12原子核に陽子を一つ付加したときのエネルギーであり、百万電子ボルト(MeV)単位で表しています。陽子のエネルギーは量子力学の法則により、内殻に対応するエネルギーと外殻に対応するエネルギーの2つに分かれます。このエネルギー間隔の大きさが殻構造の発達を特徴付ける物理量のひとつです。3体核力を無視した計算結果(図3の左)はエネルギー間隔が小さく、2つの殻が際立っておらず殻構造が曖昧と言えます。しかし、2つのパイ中間子を交換する1階の3体核力によって、この間隔はおよそ2.5倍増加します(図3の中央)。このときのエネルギー間隔は約7.5 MeVであり、安定な原子核における典型的なエネルギー間隔と整合します。エネルギー間隔が大きいことは、核子1つが励起するために必要なエネルギーが大きいことを意味するため、1階の3体核力は原子核を励起しにくくしていると言えます。また、全ての階数の3体核力を考慮して計算したエネルギー間隔はおよそ8.8 MeVであることから(図3の右)、1階の3体核力によるエネルギー間隔への寄与は全ての階数の3体核力による寄与のおよそ85%を占めていると結論づけることができます。

2つのパイ中間子を交換する1階の3体核力が重要であるという結論は、40年以上前の先行研究の主張と整合します。しかし、先行研究はこの3体核力の一要素の寄与のみ(図2の緑斜線の寄与のみ)を調べており、相互作用の強さは曖昧なままでした。これと対照的に、本研究では、図2のように3体核力をより完全な形で扱って各要素の寄与を個別に分析し、そして先鋭的理論によって2つのパイ中間子交換による3体核力の強さを精密に定量化しました。これらの点が先行研究との差異です。

【今後の展開】

2つのパイ中間子を交換する1階の3体核力は、殻構造の起源のみならず、原子核の一般的性質に重要な寄与を果たしうると考えられます。この3体核力は3つの核子系のスピンと軌道運動にある特別な働きをします。具体的には、3核子系を構成する部分2核子系の反対称なスピン状態と対称なスピン状態を混合させます。類似する現象は物性物理において知られていますが、この混合は2体核力では決して起こらないため、これまで原子核物理では注目されてきませんでした。また、スピン状態の混合とはすなわち、スピン状態が区別できない量子もつれと等価です。量子もつれは量子情報や量子技術の根幹をなす概念です。このような観点から、3体核力をきっかけに分野を超えた新たな研究が今後期待されま

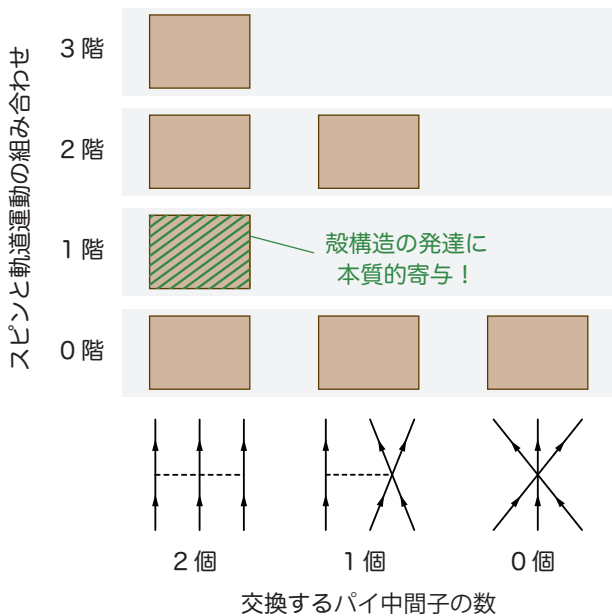


図2. 3体核力の“解剖図”。横方向には交換するパイ中間子の数で分類し、それぞれをファインマン図(核子の運動を矢印、中間子を点線)で表現した。縦方向の分類は3つの核子のスピンと軌道運動を「テンソルの階数」という数学の言葉を用いて分類した。本研究では、2つのパイ中間子を交換する1階の3体核力が、殻構造の発達に本質的に重要な寄与を果たしていることを発見した。

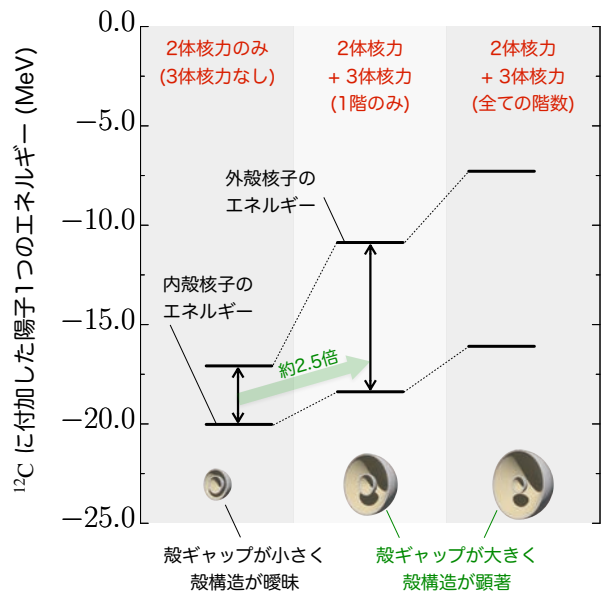


図3. 炭素12原子核に陽子一つを付加したときのエネルギーの計算結果。2体核力のみでは、内殻核子のエネルギーと外殻核子のエネルギーの間隔が小さいため、殻構造が未発達である。一方、1階の3体核力によってエネルギー間隔が約2.5倍増大し殻構造が顕著になることを、先鋭的核力理論を用いて世界で初めて解き明かした。また、1階の3体核力によるエネルギー間隔への寄与は全ての階数の3体核力による寄与のおよそ85%を占めている。発表論文では中性子のエネルギーや他の軽い核についても同様の結果を報告している。

【用語解説】

(※1) 3体核力

3つの核子の間にはたらく力で、3つの核子系の性質に影響を及ぼすだけでなく、多くの核子から成る多体系でも本質的な役割を果たす。近年の実験技術の向上と核力を記述する理論の発展を背景に、3体核力の重要性が次々と報告されており、3体核力は原子核研究のフロンティアのひとつである。

(※2) 先鋭的な核力理論

ここではカイラル有効場理論を指す。強い相互作用の基礎理論は量子色力学であるが、その低エネルギー有効理論と位置付けられる。2体核力だけでなく、多体核力をも整合して定義できる長所を持つ。

(※3) 中間子

核子間の力を媒介する粒子で、本稿ではボールになぞらえた。様々な種類の中間子が存在するが、本研究ではパイ中間子という最も軽い中間子を理論に取り入れている。

(※4) 反対称なスピン状態と対称なスピン状態

核子はスピン(自転運動に喩えられる)という極微な磁石の性質を持っている。核子対は、スピンの向き(自転の方向に類似)によって、スピン一重項と呼ばれる反対称な状態(核子の入れ替えに対して状態が変わる)とスピン三重項と呼ばれる対称な状態(核子の入れ替えに対して状態が変わらない)に分類される。核子間にはたらく最も基本的な力である2体核力は、スピン一重項と三重項を混ぜることはないが(核子対は常にどちらかの状態をとる)、パイ中間子を2個交換する3体核力が働くとスピン一重項と三重項が混ざる(どちらか一方の状態ではなくなる)。

(※5) 量子もつれ

ある量子状態と別の量子状態の重ね合わせで状態が記述されていることを量子もつれと呼ぶ。自転で喩えたスピンの説明すると、核子の自転の向きが右回りなのか左回りなのかが定まらない状態に対応する。(※4)の説明にも書いた通り、スピン一重項と三重項の混合も量子もつれである。量子情報や量子技術分野の基礎となる量子特有の性質である。

(※6) 原子核殻構造

原子における電子の殻構造と類似した原子核の存在形態のひとつ。量子力学の法則によって制限された核子の運動の軌道をいくつかの重なった殻として表現する。殻構造を特徴づける物理量はある軌道と別の軌道に属する核子のエネルギー間隔である。このエネルギー間隔が大きいと殻構造が発達しており、核子が励起しにくく安定な原子核であると言える。

【謝辞】

本研究はJSPS科研費 (JP21K13919, JP23KK0250) および、JST ERATO研究費 (JPMJER2304)の助成を受けたものです。

【論文情報】

掲載誌：Physics Letters B

タイトル：Uncovering the mechanism of chiral three-nucleon force in driving spin-orbit splitting

著者名：Tokuro Fukui, Giovanni De Gregorio, and Angela Gargano

DOI：[10.1016/j.physletb.2024.138839](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2024.138839)

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学基幹教育院 助教 福井徳朗 (フクイトクロウ)

TEL：092-802-6003

Mail：tokuro.fukui@artsci.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL：092-802-2130 FAX：092-802-2139

Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp