

PRESS RELEASE

2025 年 12 月 18 日
理化学研究所、立教大学
岐阜大学、福井大学

地球上にない二重超原子核の同定に四半世紀ぶりに成功 — 歴史上 2 例目の快挙、核力の理解から中性子星内部の謎に迫る —

概要

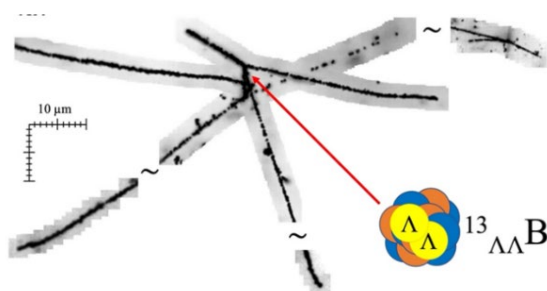
理化学研究所（理研）開拓研究所齋藤高エネルギー原子核研究室のヤン・ヘ国際プログラム・アソシエイト（研究当時）、齋藤武彦主任研究員、仲澤和馬客員主管研究員（岐阜大学教育学部招へい教員、福井大学附属国際原子力工学研究所客員教授）、立教大学大学院人工知能科学研究科の瀧雅人准教授、笠置歩助教（研究当時）らの国際共同研究グループは、大強度陽子加速器施設「J-PARC」^[1]において K 中間子^[2]ビームが照射された J-PARC E07 実験^[3]の写真フィルムデータを深層学習^[4]モデルを駆使して解析し、ハイペロン^[5]が二つ束縛された二重超原子核（ダブルハイパー核）^[6]の一種であるダブルラムダハイパー核^[7]の歴史上 2 例目の同定に成功しました。

本研究結果は、今後の二重超原子核の大量検出を通じた核力の研究を進める上で重要な布石となることが期待されます。

J-PARC E07 実験では、地球上に自然には存在しない超原子核（ハイパー核）^[6]を人工的に作り、ハイペロンの原子核中における振る舞いを解析することで、核力の理解だけでなく中性子星内部構造の謎をも解き明かそうとしています。

本研究は、深層学習を活用した特殊な写真フィルムの解析技術をダブルラムダハイパー核の生成・崩壊に伴う飛跡がつくる複雑な構造を検出できるように発展させることで、ホウ素 11 原子核^[8]に二つのラムダ粒子^[5]が束縛されたホウ素 13 ダブルラムダハイパー核生成の同定に成功しました。これは 2001 年に歴史上初めてダブルラムダハイパー核が同定されてから、およそ四半世紀を経ての歴史上 2 例目の快挙です。

本成果は科学雑誌『Nature Communications』オンライン版（12 月 12 日付）に掲載されました。



ダブルラムダハイパー核（ $^{13}_{\Lambda\Lambda}\text{B}$ ）生成・崩壊に伴う飛跡がつくる 3 分岐点を持つ事象

背景

私たちの身の周りの物質は、複数の原子が集まって生成されています。原子の基本となる原子核^[8]は陽子や中性子といったハドロンが集まって生成され、ハドロンは「クォーク」と呼ばれる素粒子から構成されています。原子核を生成する際にハドロン間に働く核力は、ハドロン同士が結合しつつも近づき過ぎてつぶれないよう反発するという絶妙なバランスを保っています。この核力の起源は物質や宇宙の生成の謎を解き明かす重要な鍵であり、解明のためにさまざまな実験、理論を通して長年にわたって研究が行われています。

核力の研究における対象の一つが超原子核（ハイパー核）と呼ばれる地球上に自然には存在しない原子核です。通常の原子核を構成する陽子と中性子はどちらもアップクォーク^[9]とダウルクォーク^[9]という2種類のクォークから構成されています。陽子や中性子のみから構成される原子核において陽子・中性子間に働く力である核力からクォークの種類による影響を切り分けることは困難です。一方、ハイパー核は、アップクォークやダウルクォークよりも重いストレンジクォーク^[9]を含むハイペロンという粒子を含んでいます。このハイペロンと陽子や中性子の間に働く力においては、通常の原子核では区別できなかったクォーク種による影響が観測できるため、核力をさらにハイペロンにまで拡張した枠組みから調べる手段として研究が進んできました。

実験によりごくまれにストレンジクォークが二つ含まれる二重超原子核（ダブルハイパー核）が生成されることがあります。例えば通常の原子核にハイペロンの一種であるラムダ粒子が二つ束縛されるとダブルラムダハイパー核が生成されます。このダブルラムダハイパー核ではラムダ粒子同士、つまりストレンジクォークを含むハイペロン間に働く力を測定することができます。アップ、ダウン、ストレンジという3種のクォークがつくる核力を統合的に調べる上で、ハイペロン同士の相互作用の理解は不可欠です。

さらに、ラムダ粒子同士の相互作用は通常では考えられないほど超高密度になる中性子星の内部構造の謎にも深い関わりがあります。超新星爆発後に生成される中性子星の中心部は、スプーン1杯で10億トンにもなるような超高密度になっていると考えられています。このような環境では、陽子、中性子だけではなく、ラムダ粒子を含むハイペロンが発生することが予想されており、ダブルラムダハイパー核中のようにラムダ粒子同士が力を及ぼし合っているはずです。従って、ダブルラムダハイパー核を通したラムダ粒子同士に働く力の理解は、地上での実験によって中性子星の内部構造の謎にも迫る原子核と天文をまたいだ研究対象といえます。

しかし、その生成の希少さと二つのラムダ粒子が連続して崩壊する構造の複雑さから、ダブルラムダハイパー核の検出は非常に困難です。現状唯一の直接検出方法は、写真フィルムにダブルラムダハイパー核の生成と崩壊に伴う飛跡を記録し、それを顕微鏡で読み取るという「写真乾板^[10]」を用いた手法です。これまで50年以上にわたりこの技術による探索が行われ、生成・崩壊に伴う飛跡によって三つの分岐点を持つ事象の候補が40例程度検出されています。しかし、「どのような種類の原子核に二つのラムダ粒子が束縛されていたか」という同

定解析では、考えられ得る全ての粒子と崩壊の組み合わせを考慮し、整合する候補を絞り込む必要があります。ほとんどの場合、複数の候補が残ってしまうため、歴史上で同定できたのはヘリウム原子核^[8]にラムダ粒子が二つ束縛されたヘリウム 6 ダブルラムダハイパー核の 1 例のみでした^{注 1)}。

注 1) H. Takahashi¹, J. K. Ahn, H. Akikawa, S. Aoki, K. Arai, S. Y. Bahk, K. M. Baik, B. Bassalleck, J. H. Chung et al., Observation of a $\Lambda\Lambda$ He Double Hypernucleus, *Phys. Rev. Lett.* 87, 212502 – Published 2 November, 2001, DOI: [10.1103/PhysRevLett.87.212502](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.212502)

研究手法と成果

国際共同研究グループでは、J-PARC E07 実験において、K 中間子ビームをダイヤモンド標的に当ててつくられたグザイマイナス粒子^[5]を写真乾板に照射し、グザイマイナス粒子が写真乾板（図 1 左上）中の原子核に吸収されてできるダブルラムダハイパー核の生成・崩壊が飛跡として記録されたデータを深層学習の技術を駆使して解析し、粒子の飛跡と三つの分岐点を持った事象を探索しました。光学顕微鏡による観察により粒子飛跡の 3 次元位置情報を 1 マイクロメートル (μm 、 $1\mu\text{m}$ は 100 万分の 1 メートル) 以下のスケールで測定可能で、この空間分解能により、ダブルラムダハイパー核の生成と崩壊に伴って放出される電荷を持った粒子の飛跡とそれらが形づくる三つの分岐点を持った事象を観測できます（図 1 右）。

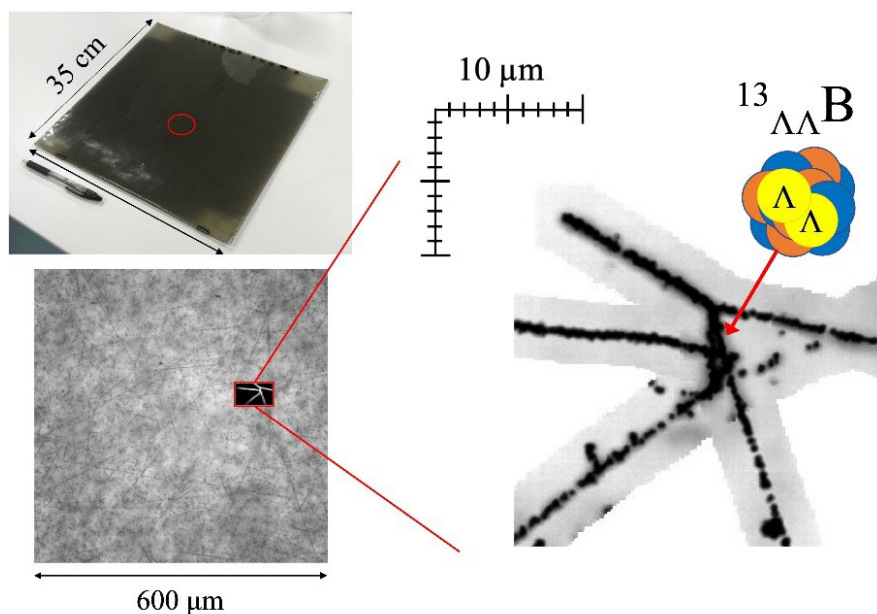


図 1 実験で使った写真乾板と光学顕微鏡で撮影した写真乾板の画像

J-PARC での実験で K 中間子ビームが照射された写真乾板（左上）と、光学顕微鏡によって撮影した拡大画像（左下）。拡大画像に写る黒い線は飛跡と呼ばれる荷電粒子が通った痕跡で、写真乾板 1cm^2 当たり約 100 万本の飛跡が記録されている。黒の背景に白く飛跡が強調されている部分が深層学習によってダブルラムダハイパー核事象の候補を捉えた場所。より高倍率な対物レンズを用いて観測することでダブルラムダハイパー核の生成・崩壊に関連する飛跡がつくる三つの分岐点を持つ事象が観測された（右）。 $^{13}\Lambda\Lambda\text{B}$ ：ホウ素 13 ダブルラムダハイパー核。

齋藤主任研究員らは深層学習を用いた画像中の物体検出技術によってハイパー核を検出する技術を開発し、それを用いたハイパー核の質量測定の結果を発表しています^{注2、3)}。本研究ではこの技術をさらに発展・改善させて、ダブルラムダハイパー核の生成(図2の①、②)、一つ目のラムダ粒子の崩壊(図2の③)、もう一つのラムダ粒子の π (パイ) 中間子^[11]などを放出する崩壊(図2の④)という特徴的な三つの分岐点を持つ事象を検出する物体検出モデルを作成しました。複雑な構造の検出が求められるため訓練に用いるデータやパラメータを試行錯誤した結果、開発した物体検出モデルはシミュレーションで生成した擬似事象に対して90%を超える検出効率を達成しました。

開発した物体検出モデルによって写真乾板画像の探索を行った結果、三つの分岐点を持つ多くの候補事象が検出されました。さらに、その中の1例について飛跡の長さや角度、太さといった情報を用いて運動学解析を行い、候補を絞り込んだところ、ホウ素11原子核に二つのラムダ粒子が束縛されたホウ素13ダブルラムダハイパー核の生成を同定しました。これは歴史上2例目のダブルラムダハイパー核の同定であり、およそ四半世紀ぶりの快挙です。また、世界で初めて核種の同定に成功したヘリウム原子核とは異なる原子核におけるラムダ粒子同士に働く力を測定できた重要な研究成果です。

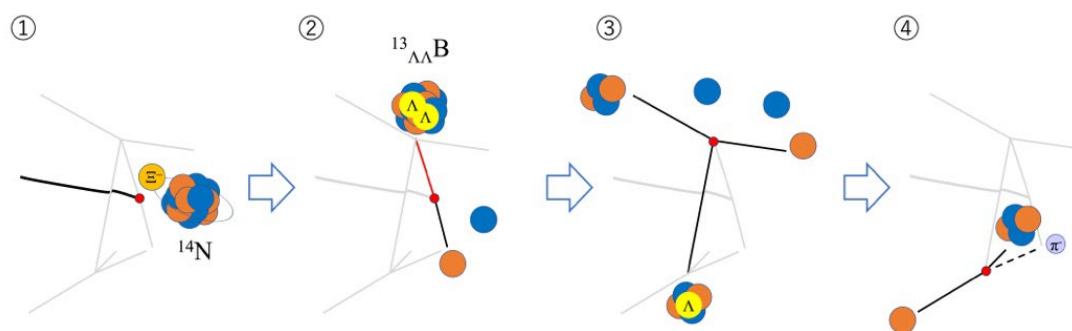


図2 同定したホウ素13ダブルラムダハイパー核の生成と崩壊の模式図

- ① 照射されたグザイマイナス (π^-) 粒子が写真乾板中の窒素14 (^{14}N) 原子核 (陽子 (オレンジの丸) 七つと中性子 (青色の丸) 七つが集まった原子核) に束縛される。
 - ② ホウ素13ダブルラムダハイパー核 ($^{13}_{\Lambda\Lambda}\text{B}$ 、黄色の丸はラムダ粒子) と陽子と中性子に崩壊する ($^{13}_{\Lambda\Lambda}\text{B}$ の生成)。
 - ③ ダブルラムダハイパー核のラムダ粒子のうち一つが崩壊して、一つのラムダ粒子を含むシングルラムダハイパー核と二つの荷電粒子 (左上のヘリウム原子核と右端の陽子)、そして複数の中性子が放出される。
 - ④ 残り一つのラムダ粒子を含むシングルラムダハイパー核が崩壊して三つの荷電粒子 (一つのヘリウム原子核と一つの陽子と一つの π 中間子) に崩壊する。
- ①~④の生成・崩壊について、考え得る全ての組み合わせを調査し、整合性を確認することで生成されたダブルラムダハイパー核の種類を同定することに成功した。オレンジの丸：陽子、青色の丸：中性子、黄色の丸：ラムダ粒子、薄紫の丸： π (パイ) 中間子、赤丸：反応点。中性子は電荷を持たないため、飛跡として観測されない。

注2) 2021年9月14日プレスリリース「ハイパー核の束縛エネルギー精密測定へ」

https://www.riken.jp/press/2021/20210914_3/

注3) 2025年8月29日プレスリリース「深層学習×写真フィルムでハイパー核の質量を測定」

https://www.riken.jp/press/2025/20250829_1/

今後の期待

深層学習による写真乾板を用いたダブルラムダハイパー核の探索によって、これまでの手法では検出することができていなかった生成・崩壊に伴う飛跡がつくる三つの分岐点を持った候補事象の発見と同定が可能であることが実証されました。新しいダブルラムダハイパー核の同定とその質量測定結果は他の候補事象の同定解析にも助けとなるでしょう。候補事象の検出は現在も進行しており、異なる原子核における二つのラムダ粒子の振る舞いや、ストレンジクォークを二つ持ったグザイ粒子^[5]と原子核の相互作用についても同時に探索を行う計画です。

今後、J-PARC E07 実験のデータ全体を探索することで 2,000 例以上の候補事象の検出と数百の同定が期待されます。まだその種類や性質がほとんど明らかになっていない二重超原子核の大量検出を通して核力の理解を深めるために、さらに技術の改善や拡張を進めます。

論文情報

<タイトル>

Artificial intelligence pioneers the double-strangeness factory

<著者名>

Yan He, Takehiko R. Saito, Hiroyuki Ekawa, Ayumi Kasagi, Yiming Gao, Kazuma Nakazawa, Christophe Rappold, Masato Taki, Yoshiki K. Tanaka, He Wang, Ayari Yanai, Junya Yoshida, Hongfei Zhang

<雑誌>

Nature Communications

<DOI>

[10.1038/s41467-025-66517-x](https://doi.org/10.1038/s41467-025-66517-x)

補足説明

[1] 大強度陽子加速器施設「J-PARC」

茨城県東海村に建設された、大強度陽子加速器と利用施設群の総称。高エネルギー加速器研究機構（KEK）と日本原子力研究開発機構（JAEA）が共同で運営している。加速器で加速した陽子を原子核標的に衝突させることで発生する二次粒子を用いて、物質・生命科学、原子核・素粒子物理学などの研究や産業利用を行っている。J-PARC は Japan Proton Accelerator Research Complex の略。

[2] K 中間子

中間子は、クォークと反クォークが一つずつ集まって構成される粒子。ストレンジクォーク（[9]参照）を含む中間子を K 中間子と呼ぶ。

[3] J-PARC E07 実験

J-PARC ハドロン施設で行われた国際共同実験の名称。高純度な K 中間子のビームをダイヤモンド標的に当て、そこでつくられるストレンジクォークを二つ持つグザイマ

イナス粒子（ Ξ^- 粒子）（[5]参照）を 1,500 枚の特殊な写真乾板に照射した。この実験の元々の目的は、グザイマイナス粒子が写真乾板中の原子核に吸収されてできるダブルラムダ核の生成・崩壊の様式を光学顕微鏡によって検出・観察し、種々のダブルラムダ核の質量を測定し、ラムダ粒子同士の間働く力を測定することであった。同時に K 中間子はさまざまなハイパー核を生成することができ、写真乾板に記録されている飛跡を利用して、今回の解析を行った。

[4] 深層学習

コンピュータを用いたデータ処理手法のうち、人間があらかじめ処理方法をプログラムするのではなく、大量のデータと正解例（教師データ）によってコンピュータに処理方法を構築させる技術。

[5] ハイペロン、ラムダ粒子、グザイマイナス粒子、グザイ粒子

通常の原子核を構成する陽子や中性子がアップクォーク（[9]参照）とダウルクォーク（[9]参照）のみで構成されているのに対して、次に重いストレンジクォーク（[9]参照）が含まれる粒子をハイペロンと呼ぶ。ハイペロンには、ストレンジクォークを一つ含むラムダ粒子（ Λ 粒子）やシグマ粒子（ Σ 粒子）、二つ含むグザイ粒子（ Ξ 粒子）、三つ含むオメガ粒子（ Ω 粒子）が存在する。グザイマイナス粒子（ Ξ^- 粒子）は、ストレンジクォーク二つとダウルクォーク一つから成る。

[6] 二重超原子核（ダブルハイパー核）、超原子核（ハイパー核）

超原子核とは、地球上に自然には存在しない原子核で、通常の原子核を構成する陽子と中性子の他に、ハイペロンと呼ばれるストレンジクォークを含む粒子が一つ以上含まれているエキゾチックな原子核、別称ハイパー核。ハイペロンを二つ含むエキゾチックな原子核を二重超原子核、別称ダブルハイパー核と呼ぶ。

[7] ダブルラムダハイパー核

ハイペロンの一種であるラムダ粒子が原子核に一つ束縛されるとシングルラムダハイパー核が生成され、一つの原子核に二つのラムダ粒子が束縛されるとダブルラムダハイパー核が生成される。

[8] ホウ素 11 原子核、原子核、ヘリウム原子核

原子核は原子の中心に存在し、陽子と中性子が集まって構成される。含まれる陽子の数によって名前や性質が異なり、最も軽いものが陽子一つから構成される水素原子核（H）、次に軽いのが陽子二つから構成されるヘリウム原子核（He）である。また中性子の数によって同じ原子核でも性質が異なり、同位体と呼ばれる。同位体は陽子と中性子を合わせた数を併記して区別され、例えばホウ素 11 原子核（ ^{11}B ）は陽子が五つ、中性子が六つで構成される。

[9] アップクォーク、ダウルクォーク、ストレンジクォーク

クォークは原子核を構成する基本素粒子で、現在知られている物質の最小単位。クォークには 6 種類あり、軽い方から、アップ、ダウン、ストレンジ、チャーム、ボトム、トップと名付けられている。それぞれのクォークには、質量がほぼ同じで、電荷の正負が逆になった反クォークが存在する。

[10] 写真乾板

電荷を持った粒子が通った痕跡を飛跡として記録できる特殊な写真フィルム。

[11] π (パイ) 中間子

パイ中間子は、原子核内で陽子と中性子を強く結び付ける力を媒介する粒子で電荷を持つパイプラス中間子、パイマイナス中間子、電荷を持たない中性パイ中間子の三つが存在する。パイマイナス中間子の静止質量は約 $139.570\text{MeV}/c^2$ (1MeV (メガ電子ボルト) は 100 万電子ボルト、 c : 光の速度。質量とエネルギーの等価式 $E=mc^2$ から、 m (質量) $=E$ (エネルギー) $/c^2$ となる) で、陽子の静止質量に対し 7 分の 1 程度である。ラムダ粒子やグザイ粒子が崩壊する際に放出されることがある。

国際共同研究グループ

理化学研究所 開拓研究所

齋藤高エネルギー原子核研究室

基礎科学特別研究員 (研究当時) 江川弘行 (エカワ・ヒロユキ)

(最先端研究プラットフォーム連携 (TRIP) 事業本部

研究 DX 基盤開発チーム 専門技術員)

客員主管研究員 仲澤和馬 (ナカザワ・カズマ)

(岐阜大学 教育学部 招へい教員、

福井大学附属国際原子力工学研究所 客員教授)

主任研究員 齋藤武彦 (サイトウ・タケヒコ)

研究員 田中良樹 (タナカ・ヨシキ)

大学院生リサーチ・アソシエイト 箭内彩里 (ヤナイ・アヤリ)

国際プログラム・アソシエイト (研究当時)

イーミン・ガオ (Yiming Gao)

国際プログラム・アソシエイト (研究当時)

エンチャン・リュウ (Enqiang Liu)

国際プログラム・アソシエイト (研究当時)

ヤン・ヘ (Yan He)

客員研究員 ヘ・ワン (He Wang)

東北大学 国際放射光イノベーション・スマート研究センター

准教授 吉田純也 (ヨシダ・ジュンヤ)

立教大学 大学院人工知能科学研究科

准教授 瀧 雅人 (タキ・マサト)

助教 (研究当時) 笠置 歩 (カサギ・アユミ)

Instituto de Estructura de la Materia (IEM)、CSIC (スペイン)

研究員 クリストフ・ラッポルド
 (Christophe Rappold)

研究支援

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費助成事業基盤研究 (A) 「ラムダ粒子間、グザイ-核子間相互作用の解明 (研究代表者: 仲澤和馬)」、同新学術領域研究 (研究

領域提案型)「ストレンジ・ハドロンクラスターで探る物質の階層構造(研究代表者:田村裕和)」、同研究活動スタート支援「高速軽量物体検出ネットワークによる写真乾板中のハイパー核事象リアルタイム探索(研究代表者:笠置歩)」、同若手研究「深層学習を用いた原子核乾板解析による ΛN 相互作用の基盤再構築(研究代表者:笠置歩)」による助成を受けて行われました。

発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。

理化学研究所 開拓研究所 齋藤高エネルギー原子核研究室

国際プログラム・アソシエイト(研究当時)

	ヤン・ヘ	(Yan He)
主任研究員	齋藤武彦	(サイトウ・タケヒコ)
客員主管研究員	仲澤和馬	(ナカザワ・カズマ)

(岐阜大学 教育学部 招へい教員、

福井大学 附属国際原子力工学研究所 客員教授)

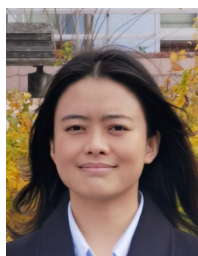
Tel: 048-467-9630 (齋藤) Fax: 048-467-9438 (齋藤)

Email: takehiko.saito ※ riken.jp (齋藤)

立教大学 大学院人工知能科学研究科

准教授 瀧 雅人 (タキ・マサト)

助教(研究当時) 笠置 歩 (カサギ・アユミ)



ヤン・ヘ



笠置 歩



齋藤武彦

<機関窓口> (注) メールアドレスの※マークは半角@に置き換えてください。

理化学研究所 広報部 報道担当

Tel: 050-3495-0247 Email: ex-press ※ ml.riken.jp

学校法人立教学院 企画部広報室

Tel: 03-3985-2202 Email: koho ※ rikkyo.ac.jp

岐阜大学 総務部 広報課

Tel: 058-293-3377 FAX: 058-293-2021 Email: kohositu ※ gifu-u.ac.jp

福井大学 経営企画部 広報課

Tel: 0776-27-9733 Email: sskoho-k ※ ad.u-fukui.ac.jp