

# 量子のだるま落としとして原子核を探るプロジェクトから初成果

## —炭素、酸素原子核に重陽子クラスターを発見—

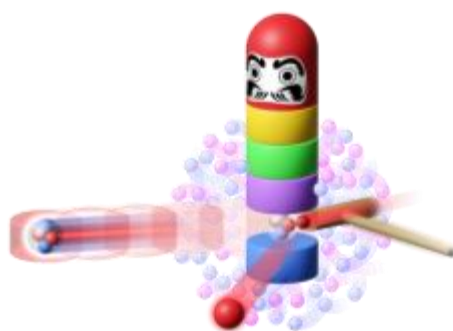
### 概要

理化学研究所（理研）仁科加速器科学研究センター核反応研究部の上坂友洋部長、久保田悠樹研究員、京都大学大学院理学研究科の銭廣十三准教授、辻峻太郎大学院生（研究当時）、大阪大学核物理研究センターの田中純貴助教、九州大学大学院理学研究院の緒方一介教授らの国際共同研究グループは、炭素 12 および酸素 16 という原子核の中に、陽子 1 個と中性子 1 個のペアが固まりになった重陽子クラスター<sup>[1]</sup>が、従来考えられていた以上に高い確率で存在することを発見しました。

原子核の内部では陽子と中性子がバラバラで一様に配置された液滴のような構造と考えられてきましたが、その一方、小さな固まり（クラスター）が存在する可能性（非一様性の発現）が示唆されていました。そこで、陽子を衝突させ核内部から「だるま落とし」のように粒子をたたき出すノックアウト反応<sup>[2]</sup>を利用して内部構造を調べる「おのころプロジェクト<sup>[3]</sup>」をスタートさせました。

国際共同研究グループは、「おのころプロジェクト」の初の成果として、陽子ビームにより炭素 12 および酸素 16 原子核から重陽子を取り出す実験を実施し、重陽子クラスターが少なくとも 30~40%以上の確率で存在することを明らかにしました。今回の成果は、原子核がどのような形で存在しているかという問いに対する新しい発見であり、安定性の起源やアルファ崩壊<sup>[4]</sup>の理解に貢献すると期待されます。「おのころプロジェクト」からは、アルファ・クラスター<sup>[5]</sup>や三重陽子クラスター<sup>[6]</sup>、ヘリウム 3 クラスター<sup>[6]</sup>に関する新たな実験データも得られており、原子核における非一様性が従来考えられていたよりはるかに多様な形で、かつより高い確率で発現している兆候が捉えられています。

本研究は、科学雑誌『*Progress of Theoretical and Experimental Physics*』オンライン版（5月1日付）に掲載されました。



量子のだるま落としとしてのノックアウト反応の概念図

### 背景

われわれの世界を見渡してみると、注目する対象や視野によって、異なった状態があることに気づきます。例えば私たちより上には大気という密度の低い気

体が存在する一方、足元を見ると大地という密度の高い固体が存在しています。場所によってその状態や構造が異なることを示す「非一様性」という言葉を用いると、われわれの世界は至るところ非一様性にあふれているといえます。宇宙スケールで見れば、星間ガスが重力により密集してできる非一様性が星の形成につながり、私たちの体内では微小な化学物質の濃淡に伴う非一様性が生命活動に本質的な役割を担っています。

このような非一様性の発現は、原子よりはるかに小さい量子の世界でも起こっているのでしょうか。原子の中心に存在し、その大きさが原子の10万分の1程度の原子核は、陽子と中性子から成る液体のような一様で均質な物質だとおおむね考えられています。一方、19世紀末に発見された放射線の一つであるアルファ線は、一様な陽子・中性子物質の中に、小さな固まりであるアルファ粒子（ ${}^4\text{He}$ 原子核）が分離され原子核外に放出されたものであり、非一様性の一つの現れと考えられています（図1）。アルファ粒子のように、原子核の中に析出した粒子は「クラスター」と呼ばれ、その研究は原子核物理学の中心テーマの一つとなってきました。有名な例を挙げると、炭素12原子核の励起状態に現れる「ホイル状態<sup>[7]</sup>」は、ほぼアルファ粒子三つでできており、宇宙での炭素合成に大変重要な役割を担っていることが知られています。

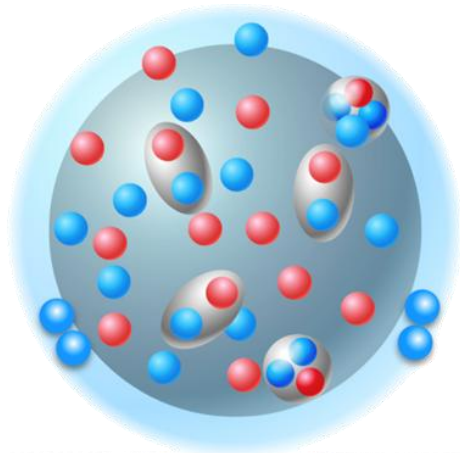


図1 原子核における非一様性発現の概念図

陽子（赤球）と中性子（青球）から成る一様で均質な物質と考えられていたが、むしろ、重陽子（赤球と青球各1個のペア）、アルファ粒子（ ${}^4\text{He}$ 原子核：赤球2個と青球2個）や三重陽子、ヘリウム3クラスターなどを内部に含む非一様性が発現すると考えられている。

国際共同研究グループは、陽子を用いて原子核内部からクラスターをたたき出すノックアウト反応を利用して、原子核内部での非一様性がどのように発現しているかを調べる「おのころプロジェクト」を2021年にスタートしました。プロジェクト名の「おのころ」は古事記にある国生み神話から採られています。国生み神話が語る、天の沼矛（あめのぬぼこ）から滴が落ちることにより、混沌（こんとん）とした海の中に日本最初の島であるおのころ島（淤能基呂島、自凝島とも表記されます）が生まれた伝説が、陽子と中性子より成る混沌とした（量子）液体から、「島」のような固まりであるクラスターが生じる現象に似通っていることから名付けられました。

おのころプロジェクトでは、しばしば「だるま落とし」に例えられるノックアウト反応が用いられています。だるま落としは、小さな木槌（きづち）を勢いよくピースに当てたたき出し、うまくいくと上に乗っていただるまがピースの無くなったことに気づかないかのようにそのままストンと下がる遊びです。ノックアウト反応は、高エネルギー粒子（今回は陽子）を原子核に「勢いよく」当て、そのピースであるクラスターをたたき出し、その性質を調べる手法です（図2）。

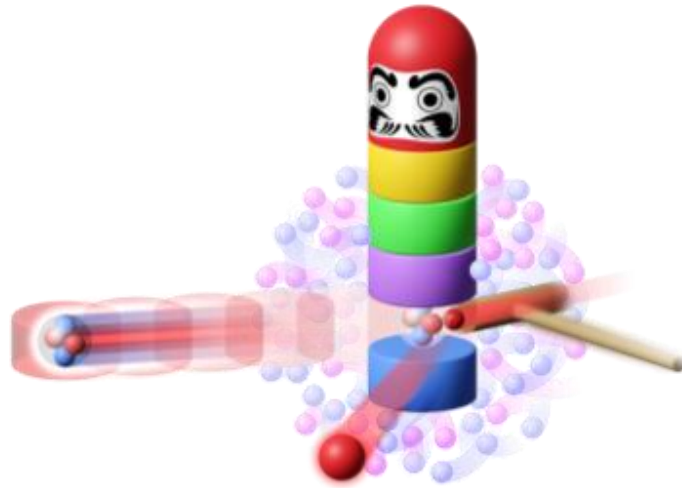


図2 ノックアウト反応は量子の「だるま落とし」

右側の木槌が陽子ビームに、たたき出されたピースがノックアウトされたクラスターに、残されただるまと他のピースが原子核の残りの部分に対応する。

ノックアウト反応は、日本が世界に誇る加速器施設である理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) <sup>[8]</sup> や大阪大学核物理研究センター・サイクロトロン施設 (RCNP) <sup>[9]</sup> のエネルギー領域である、核子当たり 200~400 メガ電子ボルト (MeV、1MeV は 100 万電子ボルト) において最も有効に用いることのできる手法です。これまで原子番号が 50 のスズ同位体でのアルファ・クラスターの発見<sup>注1)</sup> などでも用いられ、クラスター研究の有力手法と考えられています。おのころプロジェクトでは、ノックアウト反応をうまく使い、今までの常識と大きく異なる、中質量核でのクラスターや、アルファ粒子以外の重陽子、三重陽子などの新規クラスター探索に挑戦しています。

注1) 2021年1月21日プレスリリース「スズ原子核の表面でアルファ粒子を発見」

[https://www.riken.jp/press/2021/20210121\\_1/](https://www.riken.jp/press/2021/20210121_1/)

## 研究手法と成果

今回、国際共同研究グループは、RCNP の陽子ビームを用いて、炭素 12、酸素 16 原子核に対する重陽子ノックアウト反応実験を実施しました。RCNP では、AVF サイクロトロン、リングサイクロトロンを用いて陽子ビームを 226MeV (光速の約 60%) まで加速した後、炭素 12 標的と、酸素 16 を含むポリエステル膜標的に照射し、ノックアウト反応で生じる陽子と重陽子を分析しました

(図 3)。装置中央に置かれた炭素・酸素標的左方向に散乱される陽子の分析にはグランドライデン・スペクトロメータ（分光器）<sup>[10]</sup>を、同じく右方向に散乱される重陽子の分析には大口径スペクトロメータ<sup>[10]</sup>を用いることにより、高いエネルギー分解能での測定を可能としました。

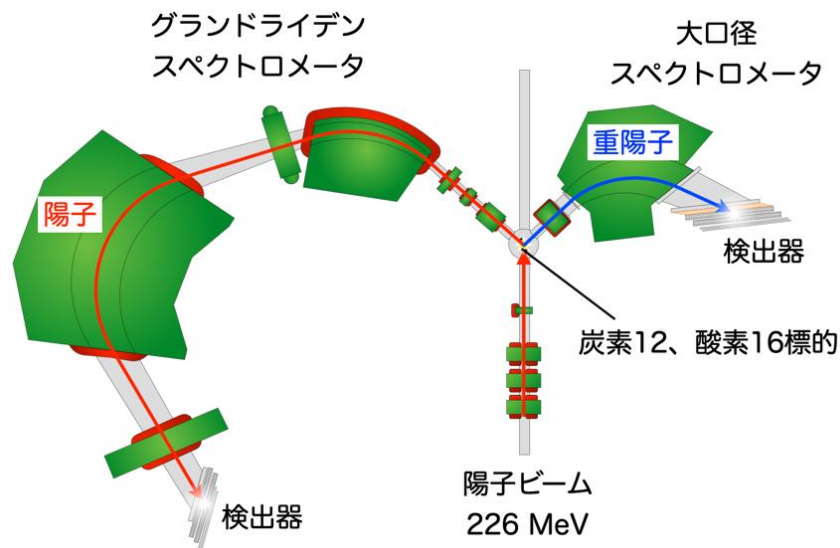


図 3 ノックアウト反応で生じる粒子の分析に用いた装置群

左側に散乱される陽子の分析にはグランドライデン・スペクトロメータ、右側に散乱される重陽子の分析には大口径スペクトロメータをそれぞれ用いた。

本研究で得られた実験データからは、重陽子クラスターの存在を示す顕著なピークが複数確認されました(図 4)。今回の研究では、その中から炭素 12、酸素 16 の、おのこの最も顕著なピークに焦点を絞り、ノックアウト反応に対する最先端理論計算と比較を行いました。その結果、炭素 12 と酸素 16 原子核中には、少なくともおのこの 1.6 個と 1.9 個の重陽子クラスターが存在することが明らかとなりました。これらの原子核の最外軌道に含まれ得る重陽子クラスター数は、炭素 12 の場合は最大で 4 個、酸素 16 の場合は最大で 6 個であることから、炭素 12 では 40%、酸素 16 では 32%の陽子と中性子の対が重陽子クラスターを形成していることを意味します。これまでの原子核物理学では、これほど多くの重陽子クラスターが存在していると考えられておらず、今回の発見は原子核における非一様性が従来考えられていたより多様な形で、かつより高い確率で発現していることを明らかにしました。

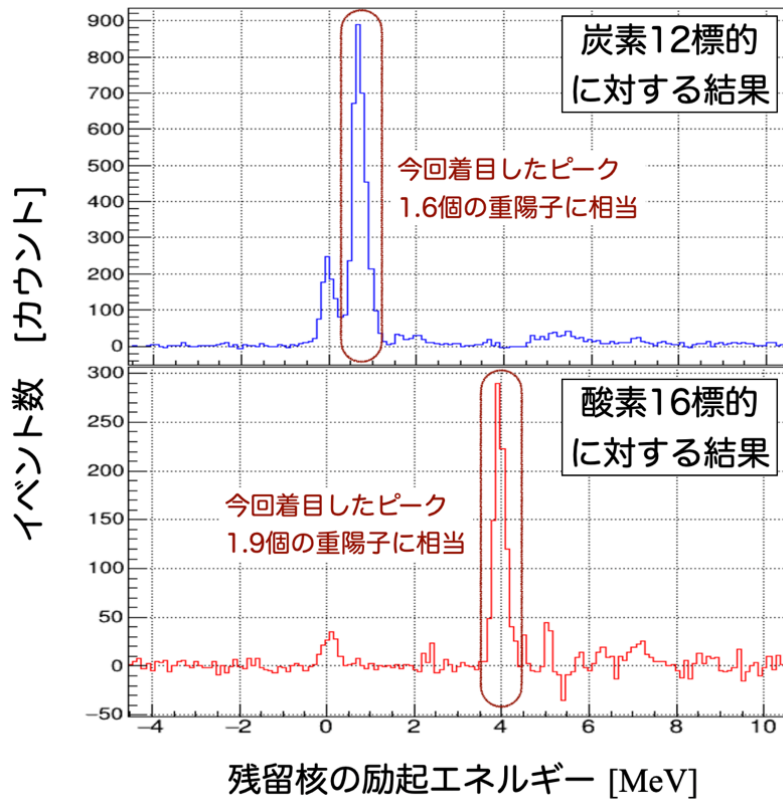


図4 炭素12および酸素16原子核に対する重陽子ノックアウト・スペクトル

横軸は重陽子を取り除くことにより生成された残留核ホウ素10および窒素14原子核の励起エネルギーであり、縦軸は計測したイベントの数を示す。赤で囲った部分が今回主として解析したピークであり、炭素12では1.6個、酸素16では1.9個の重陽子クラスター強度に対応する。

## 今後の期待

今回の研究は、原子核における非一様性の発現であるクラスター形成が、従来考えられていたよりはるかに多様な形で、かつより高い確率で起こっていることを明らかにしました。これらの発見は、原子核の存在形態に関する新しい見方を提供するものであり、アルファ崩壊や核分裂などわれわれの社会とも深く関係する原子核の崩壊過程の解明や、超新星爆発で生ずる低密度の原子核物質の理解にも大きな影響を与えると期待されます。

おのころプロジェクトでは、今回の結果に加え、同時に論文発表するカルシウム40原子核でのアルファ・クラスターを観測した実験<sup>[11]</sup>や、安定カルシウム同位体での三重陽子やヘリウム3クラスターの発見など、原子核のクラスター構造の未知の側面に光を当てるデータが得られています。

国際共同研究グループは、ノックアウト反応を用いた原子核クラスター研究を、地球上に自然には存在しない不安定原子核に拡張する試みを進めています。RIBFは、不安定原子核の生成とそれを用いた研究を世界的にリードする加速器施設です。国際共同研究グループは、不安定核のノックアウト反応研究に特化した新しい検出器システムTOGAXSI(図5)の建設を進めてきました。2025年6月には、最初の実験として、RIBFのSAMURAI磁気スペクトロメータに

TOGAXSI を設置し、中性子過剰カルシウム 52（原子番号 20、質量数 52）周辺原子核に対するデータ取得を行い、重陽子クラスター・三重陽子クラスター・ヘリウム 3 クラスター・アルファクラスターのデータ取得に初めて成功しました。

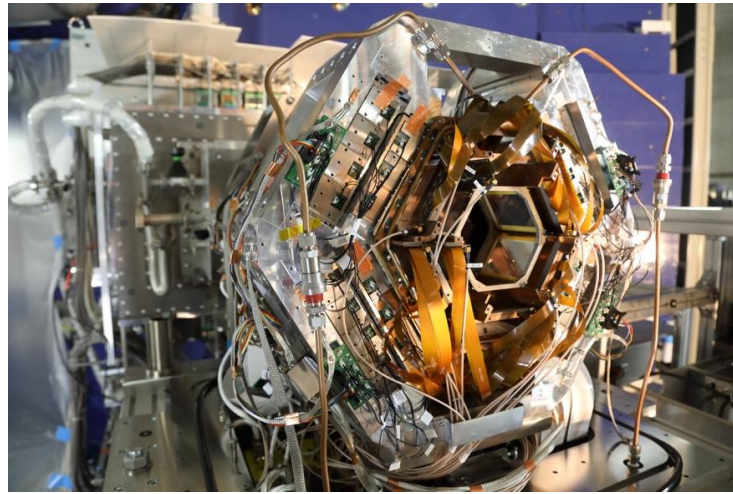


図 5 TOGAXSI 検出器アレイ

不安定核のノックアウト反応研究に特化した新しい検出器システム。

今後、研究対象を広げ、安定原子核から不安定原子核にわたる、広い質量領域のデータを取得し、原子核における非一様性発現機構解明に挑戦します。

## 論文情報

<タイトル>

Proton-induced deuteron knockout ( $p, pd$ ) on  $^{12}\text{C}$  and  $^{16}\text{O}$  at 226 MeV

<著者名>

CheongSoo Lee, Ryotaro Tsuji, Yuki Kubota, Yoshiki Chazon, Deuk Soon Ahn, Nori Aoi, Didier Beaumel, Jiawei Bian, Jiawei Cai, Fengyi Chen, Masanori Dozono, Fumitaka Endo, Serge Franchoo, Fumiya Furukawa, Tatsuya Furuno, Roman Gernhäuser, Kevin Insik Hahn, Koshi Higuchi, Yuto Hijikata, Yuya Honda, Byungsik Hong, Jongwon Hwang, Eiji Ideguchi, Gen Ikemizu, Azusa Inoue, Katsuhide Itsuno, Ryota Iwasaki, Ryo Kato, Takahiro Kawabata, Shoichiro Kawase, Keita Kawata, Mukul Khandelwal, Mingyu Kim, Sunji Kim, Nobuyuki Kobayashi, Qite Li, Yutian Li, Yifan Lin, Yukie Maeda, Yohei Matsuda, Riku Matsumura, Kenjiro Miki, Maoto Mitsui, Taichi Miyagawa, Nikhil Mozumdar, Motoki Murata, Tomoya Nakada, Hide Nakama, Geonhee Oh, Kazuyuki Ogata, Shoya Ogawa, Shingo Ogio, Shinsuke Ota, Stefanos Paschalis, Marina Petri, Thomas Pohl, Futa Saito, Soki Sakajo, Yohei Sasagawa, Takafumi Sato, Hiroaki Shibakita, Taeksu Shin, Hideya Sonoda, Taiki Sugiyama, Yumaro Suzuki, Junki Tanaka, Atsushi Tamii, Stefan Typel, Satoshi Umemoto, Cheng Wang, Xuan Wang, Wenhao Guo, Matthew Whitehead, Riku Yamamoto, Nobuhiro Yamasaki, Shunpei Yamazaki, Zaihong Yang, Takayuki Yano, Koki Yasumura, Kazuki Yoshida, Ryosuke Yoshida, Jichao Zhang, Kaijie Zhou, Juzo Zenihiro, and Tomohiro Uesaka

<雑誌>

*Progress of Theoretical and Experimental Physics*

<DOI>

[10.1093/ptep/ptag046](https://doi.org/10.1093/ptep/ptag046)

## 補足説明

### [1] 重陽子クラスター

重陽子は、陽子と中性子おのおの1個より成る最小の原子核。陽子二つや中性子二つと比べると安定であり、その安定化機構が一般の原子核の安定化機構と共通していると考えられている。原子核中の陽子と中性子が重陽子の固まりとなり、原子核の構成要素の一部となったものを重陽子クラスターという。

### [2] ノックアウト反応

原子核に高エネルギーの陽子や電子を衝突させ、原子核内部から粒子をたたき出すことにより、粒子の存在確率やその性質を調べる研究手法。ここ数年、ハロー核での中性子対相関研究<sup>注2)</sup>、テトラ中性子核生成<sup>注3)</sup>、原子核の分子構造研究<sup>注4)</sup>など、原子核の最先端研究で用いられている。

注2) 2020年12月17日プレスリリース「リチウム-11ハロー核内での中性子対相関に新たな発見」

[https://www.riken.jp/press/2020/20201217\\_2/](https://www.riken.jp/press/2020/20201217_2/)

注3) 2022年6月23日プレスリリース「4個の中性子だけでできた原子核を観測」

[https://www.riken.jp/press/2022/20220623\\_1/](https://www.riken.jp/press/2022/20220623_1/)

注4) 2023年12月6日プレスリリース「原子核の分子構造を発見」

[https://www.riken.jp/press/2023/20231206\\_1/](https://www.riken.jp/press/2023/20231206_1/)

### [3] おのころプロジェクト

2021年に開始した、ノックアウト反応を用いて原子核のクラスター構造を研究するプロジェクト。プロジェクト名の「おのころ」は古事記にある国生み神話から採られている。

### [4] アルファ崩壊

不安定原子核が自発的にアルファ粒子（ヘリウム4原子核）を放出して、陽子数と中性子数がそれぞれ二つ少ない原子核に変わる、放射性崩壊の一種。アルファ崩壊は核内に生成されたアルファ粒子が量子トンネル効果で原子核外に出る現象と解釈されている。

### [5] アルファ・クラスター

原子核の中で、陽子二つと中性子二つがアルファ粒子を形づくり、原子核の構成要素の一部となったものをアルファ・クラスターと呼ぶ。

### [6] 三重陽子クラスター、ヘリウム3クラスター

三重陽子は、トリチウムの原子核であり、陽子一つと中性子二つより成る。原子核の中で、陽子一つと中性子二つが三重陽子を形づくり、原子核の構成要素の一部となったものを三重陽子クラスターと呼ぶ。ヘリウム3はヘリウム同位体の一つであり、陽子二つと中性子一つより成る。原子核の中で、陽子二つと中性子一つがヘリウム3を形づくり、原子核の構成要素の一部となったものをヘリウム3クラスターと呼ぶ。

### [7] ホイル状態

炭素 12 原子核の励起状態の一つであり、主として三つのアルファ粒子で構成される状態。宇宙での炭素合成における必要性から、英国の天文学者であるフレッド・ホイによりその存在が理論的に予言され、後に実験的に確認された。

#### [8] RI ビームファクトリー (RIBF)

理化学研究所が所有する RI ビーム発生施設と独創的な基幹実験設備群で構成される重イオン加速器施設。RI ビーム発生施設は、2 基の線形加速器、5 基のサイクロトロンと超伝導 RI ビーム分離発生装置で構成される。世界最多となる約 4,000 種の RI を生成できる。

#### [9] 大阪大学核物理研究センター・サイクロトロン施設 (RCNP)

AVF サイクロトロン、リングサイクロトロンの二つの粒子加速器より成る施設。陽子ビームや重イオンビームを光速の 40~70%まで加速し、原子核物理学の基礎研究やイオンビーム・放射性同位元素の産業・医療応用が行われている。詳しくは下記サイトを参照。

大阪大学核物理研究センター <https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/>

#### [10] グランドライデン・スペクトロメータ (分光器)、大口径スペクトロメータ

大阪大学核物理研究センター・サイクロトロン実験施設の西実験室に建設された磁気分析装置。磁場内にイオンを通過させることにより、その軌道変化からイオンのエネルギーを精度よく決定する装置。グランドライデン・スペクトロメータは、世界最高分解能を持つ磁気分析装置である。大口径スペクトロメータは、グランドライデン・スペクトロメータより分解能は劣るものの、ワンショットで測定できる角度範囲とエネルギー範囲が大きいという特徴を持つ。本研究では二つのスペクトロメータの特徴を活用し、ノックアウト反応に適用している。

#### [11] カルシウム 40 原子核でのアルファ・クラスターを観測した実験

ノックアウト反応を用いてカルシウム 40 原子核内のアルファ・クラスターを観測し、最新の反応理論計算を用いて分析することより、そのクラスター形成率が 100MeV で行われた過去のデータと誤差の範囲で一致することを確認した研究<sup>注 5)</sup>。

注 5) Establishing the  $^{40}\text{Ca}(p,\alpha)$  reaction at 392 MeV under quasi-free scattering conditions, Riku Matsumura, Junki Tanaka, Kazuki Yoshida, Deuk Soon Ahn, Didier Beaumel, Jiawei Bian, Jiawei Cai, Yoshiki Chazono, Fengyi Chen, Masanori Dozono, Fumitaka Endo, Serge Franchoo, Tatsuya Furuno, Fumiya Furukawa, Roman Gernhäuser, Kevin Insik Hahn, Jongwon Hwang, Koshi Higuchi, Yuto Hijikata, Yuya Honda, Byungsik Hong, Eiji Ideguchi, Gen Ikemizu, Azusa Inoue, Katsuhide Itsuno, Ryota Iwasaki, Ryo Kato, Takahiro Kawabata, Shoichiro Kawase, Keita Kawata, Mukul Khandelwal, Mingyu Kim, Sunji Kim, Nobuyuki Kobayashi, Yuki Kubota, CheongSoo Lee, Yutian Li, Qite Li, Yifan Lin, Yukie Maeda, Yohei Matsuda, Kenjiro Miki, Maoto Mitsui, Taichi Miyagawa, Nikhil Mozumdar, Motoki Murata, Tomoya Nakada, Hide Nakama, Geonhee Oh, Kazuyuki Ogata, Shoya Ogawa, Shingo Ogio, Shinsuke Ota, Stefanos Paschalis, Marina Petri, Thomas Pohl, Futa Saito, Soki Sakajo, Yohei Sasagawa, Takafumi Sato, Hiroaki Shibakita, Hideya Sonoda, Taiki Sugiyama, Yumaro Suzuki, Atsushi Tamii, Ryotaro Tsuji, Stefan Typel, Satoshi Umemoto, Xuan Wang, Cheng Wang, Guo Wenhao, Matthew Whitehead, Riku Yamamoto, Nobuhiro Yamasaki, Shunpei Yamazaki, Zaihong Yang, Takayuki Yano, Kohki Yasumura, Ryosuke Yoshida, Jichao Zhang, Kaijie Zhou, Juzo Zenihiro, Tomohiro Uesaka, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*; Volume 2026, Issue 4, April 2026, 043D01, [10.1093/ptep/ptaq038](https://doi.org/10.1093/ptep/ptaq038)

## 国際共同研究グループ

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター 核反応研究部  
部長 上坂友洋 (ウエサカ・トモヒロ)  
(開拓研究所 上坂スピン・アイソスピン研究室 主任研究員)  
研究員 久保田悠樹 (クボタ・ユウキ)

(開拓研究所 上坂スピン・アイソスピン研究室 研究員)

京都大学 大学院理学研究科

准教授 銭廣十三 (ゼニヒロ・ジュウゾウ)  
大学院生 (研究当時) 辻 峻太郎 (ツジ・リョウタロウ)

大阪大学 核物理研究センター

助教 田中純貴 (タナカ・ジュンキ)  
助教 吉田数貴 (ヨシダ・カズキ)

韓国基礎科学研究院 重イオン加速器研究所

研究委員 李 清秀 (イ・チョンス)

九州大学 大学院理学研究院

教授 緒方一介 (オガタ・カズユキ)  
特任助教 茶園亮樹 (チャゾノ・ヨシキ)  
特任助教 小川翔也 (オガワ・ショウヤ)

埼玉大学 大学院理工学研究科

大学院生 松村理久 (マツムラ・リク)

宮崎大学 工学教育研究部

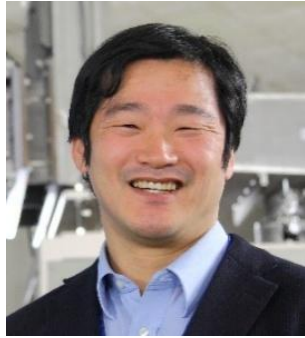
准教授 前田幸重 (マエダ・ユキエ)

## 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特別推進研究「核物質内ク  
ラスター生成機構の総合的解明 (研究代表者: 上坂友洋、JP21H04975)」、日中韓フ  
ォーサイト事業「二十一世紀の原子核物理」、韓国研究財団 (NRF) Top-Tier プロジェク  
トなどの支援により実施されました。

<発表者のコメント>

基礎物理学の世界では、場所や方向によってモノの在り方が変わらない性質を大切に  
します。このような特性は対称性、一様性 (場所に依らない)、等方性 (方向に依らな  
い) などと呼ばれており、実際物理法則は高い対称性を持っており、場所や方向に依っ  
ていません。しかし実際に私たちの周りの世界を見てみると、それはとても非対称で、  
非一様で、非等方に見えます。「おのころプロジェクト」では、私たちの世界の非一様  
性がどのようにして生まれたのかという疑問から、原子核というミクロな世界での非一  
様性の現れを探ろうとしています。今回初成果を報告できましたが、今後も多くの研究  
を行っていきたいと思っています。(上坂友洋)



上坂友洋



国際共同研究グループのメンバー（一部）