

PRESS RELEASE

2022年6月23日

理化学研究所、ダルムシュタット工科大学
東京大学大学院理学系研究科、東京工業大学

4個の中性子だけでできた原子核を観測

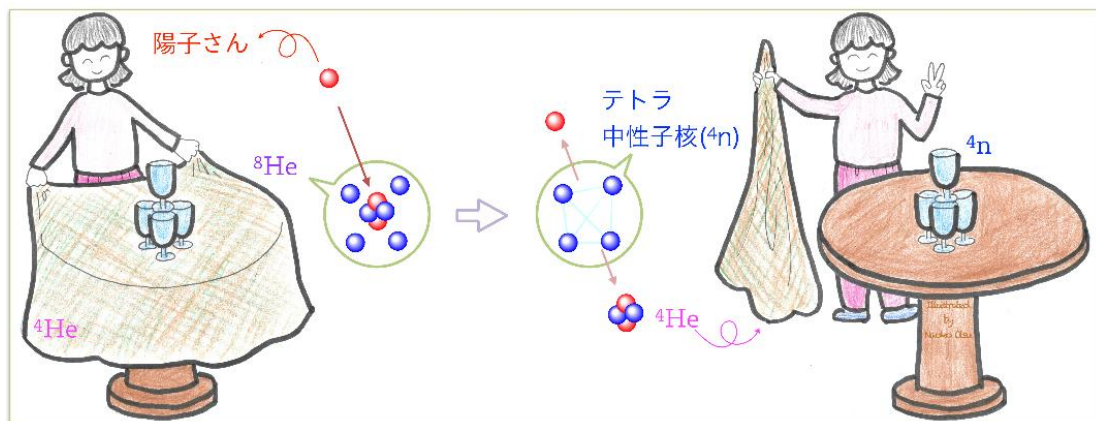
—テトラ中性子核の新たな証拠「原子番号ゼロの世界を開拓」—

理化学研究所（理研）仁科加速器科学研究センター多種粒子測定装置開発チームの天津秀暁チームリーダー、スピン・アイソスピン研究室のバレリー・パニン特別研究員（研究当時、現客員研究員）、ダルムシュタット工科大学のメイテル・デュア研究員、ステファノス・パシャリス研究員（研究当時）、トーマス・オウマン教授、東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センターの下浦享教授（研究当時）、東京工業大学理学院物理学系の中村隆司教授、近藤洋介助教らの国際共同研究グループは、理研の重イオン^[1]加速器施設「RI ビームファクトリー（RIBF）^[2]」の多種粒子測定装置「SAMURAI スペクトロメータ^[3]」を用いて、4個の中性子だけでできた原子核「テトラ中性子核」の観測に成功し、陽子を含まない複数個の中性子が原子核を構成して存在できる新たな証拠を得ました。

本研究成果は、陽子を1個も含まない、いわば「原子番号ゼロ」の奇妙な原子核を観測したもので、原子核、ひいては元素の安定性を決定づける「核力」のモデルを大きく変える可能性があり、さらには謎の多い超高密度天体である中性子星^[4]の理解にもつながると期待できます。

今回、国際共同研究グループは、RIBF で得られるヘリウム-8 (⁸He、陽子数 2、中性子数 6) のビームと陽子の散乱により、テトラ中性子核 (⁴n) を生成しました。実験を成功に導いたのは、⁸He から4個の中性を攪乱させることなく、ヘリウム-4 (⁴He、陽子数 2、中性子数 2) を瞬間的に抜き取る反応を用いるというアイデアです。この手法は、テーブルクロス (⁴He) の上に乗った4個のワイングラス (中性子) を壊すことなく、テーブルクロスを引き抜く様子に例えることができます。

本研究は、科学雑誌『Nature』オンライン版（6月22日付：日本時間6月23日）に掲載されます。



テトラ中性子核を生成する手法のイメージ

背景

全ての原子の中心にある原子核は、陽子と中性子から成る 1 フェムトメートル (fm、1fm は 1000 兆分の 1 メートル) 程度の極めて小さな粒子です。原子核は宇宙で観測できる物質の 99.97% の質量を担うことから、原子核を理解することは宇宙に存在する物質の成り立ちや起源を知る手がかりとなります。

通常の原子核は陽子の数と中性子の数がほぼ同じで、中性子だけでできた原子核は存在しないというのがこれまでの常識でした。単独の中性子は 15 分間で崩壊し、2 個の中性子系も単独では存在しないことが分かっています。そのため、3 個以上の中性子だけでできた原子核が存在できるのかという問いは物理学の大問題でした。

一方、宇宙には 10 の 57 乗個もの中性子を主成分とする「中性子星」が存在します。中性子星の構造を理解するには、複数の中性子間の「力」や「相関（関連性）」を知ることが鍵だと考えられています。このような背景から、3 個以上の中性子だけでできた原子核を実験室で生成することが物理学者の長年の夢でした。特に、中性子 4 個から成る「テトラ中性子核 (${}^4\text{n}$)」は約 60 年前から探索され続けてきました。

2015 年、理研の重イオン加速器施設「RI ビームファクトリー (RIBF)」の SHARAQ スペクトロメータ^[5]を用いて、テトラ中性子核の観測に初めて成功しました^{注)}。この報告は、世界中の物理学者たちに大きな衝撃を与え、活発な議論が行われました。しかしこの実験では、テトラ中性子核の生成が 4 事象のみであり、またテトラ中性子核が束縛状態^[6]と共鳴状態^[6]のどちらなのかを決めるのに、質量の精度が不足していました。そのため、この実験だけでは共鳴状態にあるテトラ中性子核の確定には至らず、新たな実験データが必要とされていました。

そこで本研究では、2015 年の実験とは異なる手法により、テトラ中性子核の生成・観測を目指しました。

注) 2015 年 12 月 22 日東京大学プレスリリース「テトラ中性子核を発見」
<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2015/60.html>

研究手法と成果

国際共同研究グループは、まず RIBF の加速器群を用いて、酸素-18 (${}^{18}\text{O}$) ビームを光速の約 60% に相当する核子当たり 250 メガ電子ボルト (MeV、1MeV は 100 万電子ボルト) まで加速し、それをベリリウム製の生成標的に照射することで、ヘリウム-8 (${}^8\text{He}$ 、陽子数 2、中性子数 6) の 2 次ビームを生成しました。超伝導 RI ビーム生成分離装置 BigRIPS^[7]を用いて ${}^8\text{He}$ 核ビームを分離・輸送し、多種粒子測定装置「SAMURAI スペクトロメータ」の標的位置に配置した二次標的である液体水素に照射しました (図 1)。

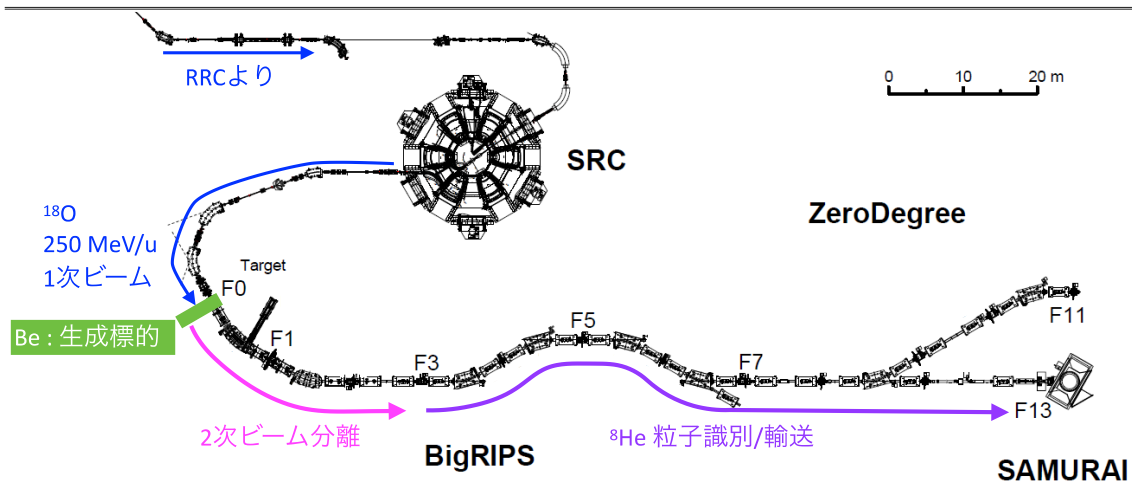


図1 RIBFのSRC-BigRIPSおよびSAMURAIの鳥瞰図

RRC（リングサイクロトロン）、SRC（超伝導リングサイクロトロン）で加速された1次ビームの ^{18}O ビームをベリリウム（Be）生成標的に照射し、2次ビームとして ^8He 核を生成した。この ^8He 核を、BigRIPS（超伝導RIビーム生成分離装置）を用いて分離し、ビームとしてSAMURAIスペクトロメータ（多種粒子測定装置）の標的位置に供給し、液体水素標的に照射した。

SAMURAIスペクトロメータと検出器群の概略を図2に示します。液体水素標的の直上流に設置されたビーム飛跡検出器により、BigRIPSから輸送された ^8He 核ビームの通過した位置と角度を決定しました。 ^8He 核と水素標的中の陽子（p）が衝突し、 ^8He 核から ^4He 核だけがたたき出される現象を観測しました。 ^8He 核内に残留する4個の中性子は、陽子と ^4He 核の衝突にはほとんど影響されずに通過し、陽子と ^4He 核、4個の中性子はほぼ前方に散乱されます。そのうち、陽子と ^4He 核の散乱角度は標的直下流に配置されたシリコントラッカー検出器により決定され、それぞれのエネルギー（質量）は広帯域磁気スペクトロメータであるSAMURAIにより高分解能で決定されます。

一方、四つの中性子は、シリコントラッカー検出器を通過し、かつSAMURAIの磁場でも偏向を受けることなく直進し、最前方角度に設置された中性子検出器群のNEBULA^[8]およびNeuLAND^[9]により部分的に検出されます。ただし、この中性子の情報は今回の結果には直接用いておらず、将来的により高精度の実験を行うための布石としています。

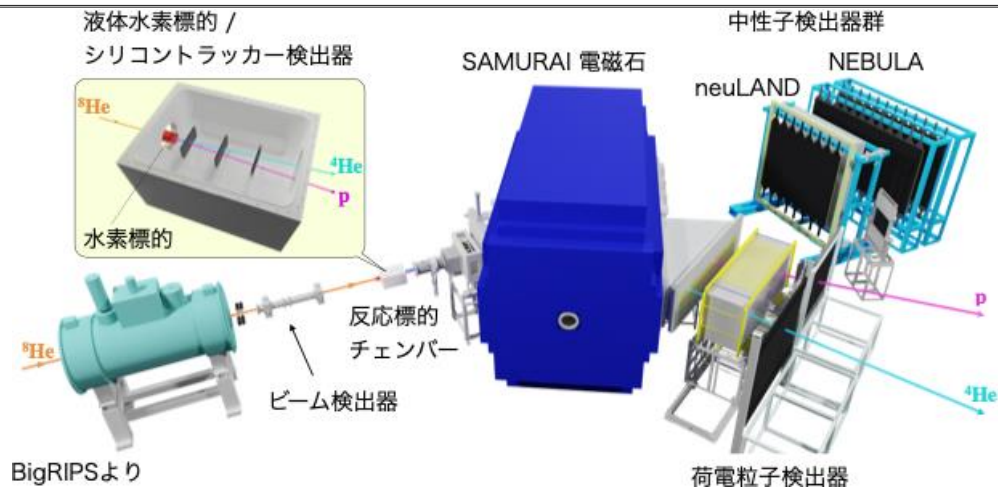


図 2 測定に用いられた SAMURAI スペクトロメータと検出器群の概略

BigRIPS から輸送された ^8He 核ビームの通過した位置と角度を、ビーム（飛跡）検出器により決定する。 ^8He 核と水素標的中の陽子 (p) が衝突し、 ^8He 核内の ^4He 核と陽子が散乱する。陽子と ^4He 核の散乱角度は、水素標的直下流のシリコントラッカー検出器により決定される。さらに、陽子と ^4He 核のエネルギーは SAMURAI により高分解能で決定される。一方 4 個の中性子は、シリコントラッカー検出器と SAMURAI を通過し、中性子検出器群の NEBULA および NeuLAND より部分的に検出される。

この実験を成功に導いた理由は、陽子と ^8He 核内の ^4He 核がほぼ正面衝突した事象を選択し、4 個の中性子を直接検出することなく、散乱で生じた高速陽子および減速された ^4He 粒子のエネルギーと飛跡測定だけから 4 中性子系の質量を決める方策をとったことにあります。この手法は、原子核物理分野では「欠損質量分光法^[10]」と呼ばれています。この反応で ^4He 核がたたき出される際、 ^8He 核内の残りの 4 個の中性子は、隠し芸のテーブルクロス引きのワイングラスに例えることができます。テーブルクロス (^4He) を瞬間的に上手に抜き去ると、4 個のワイングラス (テトラ中性子核) はほぼそのままの状態を保ちます。陽子と ^4He 核を正面衝突させ、最大エネルギーに移行させることにより、 ^8He 核から突然 ^4He 核がなくなったという状況を作り出したわけです。

得られた 4 個の中性子が持つエネルギー分布（質量分布に相当）を図 3 に示します。そのエネルギー（質量）は 4 個の中性子が結合して束縛状態を作るエネルギー閾値（下限）に比べ、わずかに高い領域 (2.37MeV) に幅の細い状態 (1.75MeV) として観測されました (図 3 赤線)。つまり、中性子 4 個分の質量よりわずかに重いところに鋭いピーク構造が発見されたのです。これにより、4 中性子系は束縛状態ではなく、共鳴状態にあることが確定し、4 中性子系が塊となったテトラ中性子核と見なせることが示されました。加えて、より高いエネルギーに広く連続状態も観測されました (図 3 青線)。

$^8\text{He}(p,p^4\text{He})$ 反応結果

とその解釈

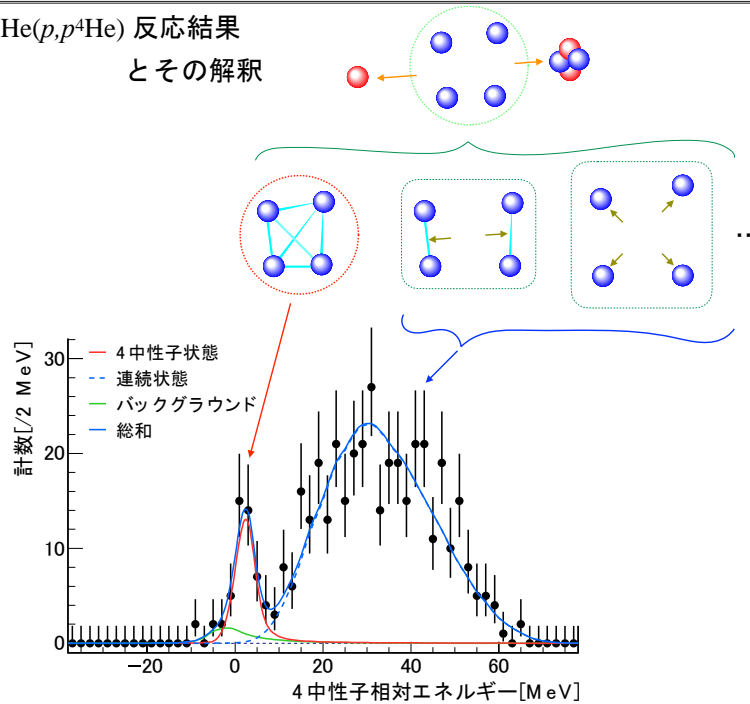


図3 測定で得られた4中性子系のエネルギー分布

赤線で示した狭い幅のピーク（ピーク位置 2.37MeV、幅 1.75MeV）が、今回テトラ中性子核と同定された共鳴状態に対応する。加えて、青線で2中性子ペアが相対運動量を持っているものや、4中性子が相対運動量を持っているものなどの重ね合わせと考えられる連続状態が示されている。

また今回、全く同じ実験セットアップで、2中性子系が残留する ^6He 核ビームでの測定も行っており、2中性子系のエネルギー分布が得られています。このエネルギー分布は、過去の実験データや中性子-中性子間力を用いた理論予言と形状が非常によく一致しており、今回の実験手法の信頼性の高さを示しています。

今後の期待

本成果は、60年の長きにわたり不明であった「テトラ中性子核」の存在について、高い統計的有意性を持った情報を与えることとなりました。最先端の原子核物理学理論も、このテトラ中性子核の状態を十分に説明することはできず、今回の結果は理論およびより基本的な核力研究に大きな波紋を投じるでしょう。

特に、ここ20年余りその重要性が指摘されている三体核力^[11]の研究を大きく前進させると考えられます。3個の中性子間に働く三体核力は、多数の中性子が相互作用し合って形成されている中性子星の構造形成に不可欠ですが、これまで実験的な情報はほとんどありませんでした。本成果により、今後、中性子間の三体核力の研究、ひいては中性子星の内部構造や形成過程の研究が発展するものと期待できます。

RIBFでは、本研究とは異なる手法で、4中性子系やより多くの中性子系、また非束縛状態の中性子過剰水素やヘリウム核などの核分光実験を継続して行って

います。今後は、例えば 4 中性子系が一度に崩壊して 4 個の中性子になるのか、あるいは 2 中性子系が 2 個に崩壊し、その後 4 個の中性子になるのかなど、崩壊過程を調べる予定です。

また、今回用いた手法をより重い中性子過剰核^[12]に適用することで、多くの少数核子系についても分光学的研究が推進されると期待できます。

論文情報

<タイトル>

Observation of a correlated free four-neutron system

<著者名>

M. Duer, T. Aumann, R. Gernhäuser, V. Panin, S. Paschalis, D. M. Rossi, N. L. Achouri, D. Ahn, H. Baba, C. A. Bertulani, M. Böhmer, K. Boretzky, C. Caesar, N. Chiga, A. Corsi, D. Cortina-Gil, C. A. Douma, F. Dufter, Z. Elekes, J. Feng, B. Fernández-Domínguez, U. Forsberg, N. Fukuda, I. Gasparic, Z. Ge, J. M. Gheller, J. Gibelin, A. Gillibert, K. I. Hahn, Z. Halász, M. N. Harakeh, A. Hirayama, M. Holl, N. Inabe, T. Isobe, J. Kahlbow, N. Kalantar-Nayestanaki, D. Kim, S. Kim, T. Kobayashi, Y. Kondo, D. Körper, P. Koseoglou, Y. Kubota, I. Kuti, P. J. Li, C. Lehr, S. Lindberg, Y. Liu, F. M. Marqués, S. Masuoka, M. Matsumoto, J. Mayer, K. Miki, B. Monteagudo, T. Nakamura, T. Nilsson, A. Obertelli, N. A. Orr, H. Otsu, S. Y. Park, M. Parlog, P. M. Potlog, S. Reichert, A. Revel, A. T. Saito, M. Sasano, H. Scheit, F. Schindler, S. Shimoura, H. Simon, L. Stuhl, H. Suzuki, D. Symochko, H. Takeda, J. Tanaka, Y. Togano, T. Tomai, H. T. Törnqvist, J. Tscheuschner, T. Uesaka, V. Wagner, H. Yamada, B. Yang, L. Yang, Z. H. Yang, M. Yasuda, K. Yoneda, L. Zanetti, J. Zenihiro, and M. V. Zhukov

<雑誌>

Nature

<DOI>

10.1038/s41586-022-04827-6

補足説明

[1] 重イオン

リチウムもしくは炭素より重い元素のイオンを重イオンという。イオン源により原子から電子を剥ぎ取ると、原子核の陽子数に比べて電子の数が少なくなり、全体としてプラスの電荷を持つことにより、加速器で電氣的に加速することが可能になる。

[2] RI ビームファクトリー (RIBF)

水素からウランまでの全元素の RI (放射性同位元素) を世界最大強度でビームとして発生させ、それを多角的に解析・利用することにより、基礎から応用にわたる幅広い研究と産業技術の飛躍的發展に貢献することを目的とする最先端加速器施設。施設は RI ビームを生成するために必要な加速器系、RI ビーム分離生成装置 (BigRIPS) で構成される RI ビーム発生系施設、および生成された RI ビームの多角的な解析・利用を

行う基幹実験装置群で構成される。これまで生成不可能だった RI も含めて、約 4,000 種類の RI を生成できると期待されている。

[3] SAMURAI スペクトロメータ

RIBF が誇る基幹実験装置群の一つ。大型超伝導双極電磁石と原子核反応を観測するための多様な検出器群から構成される広帯域大立体角磁気スペクトロメータ。RI ビームが標的と反応して発生した多種粒子の種類や運動量、軌跡を同時に測定することで、原子核の構造や反応を研究する。前方に放出された荷電粒子を複数同時計測することも可能である。さらに、中性子検出器 NEBULA により、反応前方方向に放出される複数の高エネルギー中性子を検出・分析できるという特長を持つ。

[4] 中性子星

太陽と同程度の質量を持ちながら、その半径が 10km 程度しかない超高密度天体であり、その主成分は中性子であると考えられている。中性子以外に 5% 程度の陽子やそれ以外のハドロンが混合していると考えられているが、詳細についてはまだ未解明で、多くの実験・理論研究が行われている。2017 年には二つの中性子星が衝突し合体する事象が重力波により観測され、大きな波紋を呼んだ。この中性子合体現象が、宇宙における鉄より重い元素の合成の場だと考えられている。

[5] SHARAQ スペクトロメータ

東京大学と理化学研究所が RIBF 内に共同建設した、RI ビームを用いた原子核を高分解能で分析する装置。四重極電磁石 3 台（うち 2 台は超伝導）、双極電磁石 2 台で構成される。

[6] 束縛状態、共鳴状態

原子核の束縛状態とは、エネルギー的にこれ以上陽子、もしくは中性子を放出することができない状態のことを指す。一方、エネルギー的には陽子、中性子を放出できる状態を非束縛状態という。非束縛状態の中でも、陽子や中性子などを放出するが、何らかの理由で放出する確率が低く、比較的長い寿命を持つ状態を共鳴状態と呼ぶ。寿命の長さや崩壊エネルギーの広がりには反比例し、エネルギースペクトルの中に、幅の狭いピークとして測定される。

[7] 超伝導 RI ビーム生成分離装置 BigRIPS

ウランやキセノンなどの重い原子核から酸素や重陽子などの軽い原子核までの広範囲の安定原子核を 1 次ビームとして生成標的に照射し、生成された大量の不安定核を集め、必要とする RI を分離し、RI ビームを供給する装置。RI の収集能力を高めるために、超伝導四重極電磁石が採用されており、ドイツの重イオン研究所 (GSI) など他の施設に比べて約 10 倍の収集効率を持つ。

[8] NEBULA

SAMURAI スペクトロメータの 0 度方向に配置された大容積中性子検出器群の一つ。12×12×180cm³ の角柱の形状をした中性子用シンチレーション検出器 120 本から成る。2 層ごとに荷電粒子除去用の 1cm の厚さの Veto シンチレーション検出器を配置している。厚さ方向の合計は 48cm。

[9] NeuLAND

大容積中性子検出器群の一つ。ドイツ GSI 研究所が開発および建設した、 $5 \times 5 \times 200 \text{cm}^3$ の角柱の形状をした中性子用シンチレーション検出器 320 本から成る。X 方向と Y 方向に、合計 8 層を密に配置している。ドイツとの協定により 2018 年まで SAMURAI 実験室に配置し実験に供用された。厚さ方向の合計は 40cm。

[10] 欠損質量分光法

入射粒子と出射粒子（複数の場合もある。今回は 2 粒子）のそれぞれのエネルギーと運動量を測定することで、反応によって反跳された粒子や、生成された粒子にどれだけのエネルギーと運動量が付与されたかを求めることができる。入射粒子と出射粒子の組み合わせをプローブと呼ぶ。反応前後でのエネルギーの欠損から、実際には測定していない粒子の励起エネルギーを同定できることから、欠損質量 (Missing mass) 分光と呼ばれる。

[11] 三体核力

相互作用は二つの粒子の間に働く二体力を基本とするが、第三番目の粒子の影響で粒子の状態が変化すると、二体力の組み合わせだけでは説明できなくなる。原子核を構成している核力は強い相互作用によって媒介されているが、構成要素である核子に励起状態が存在することから、三体核力を取り入れる必要があることが示されている。

[12] 中性子過剰核

安定同位体と比較して中性子を多く含んだ不安定核。ほとんどはベータ崩壊を起こし、原子番号が一つ大きな核種に壊変する。陽子と比べて中性子の分布が大きく広がった中性子ハローや、中性子だけで表面がつくられている中性子スキン、既知の魔法数の消滅や新魔法数の出現などの興味深い現象が見つかっている。

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

多種粒子測定装置開発チーム

チームリーダー

大津 秀暁 (オオツ・ヒデアキ)

スピン・アイソスピン研究室

特別研究員 (研究当時、現 客員研究員)

バレリー・パニン (Valerii Panin)

基礎科学特別研究員 (研究当時)

ザイホン・ヤン (Zaihong Yang)

室長

上坂 友洋 (ウエサカ・トモヒロ)

ダルムシュタット工科大学

研究員

メイテル・デュア (Meytal Duer)

研究員 (研究当時)

ステファノス・パシャリス

(Stefanos Paschalis)

教授

トーマス・オウマン (Thomas Aumann)

教授

アレキサンドラ・オバテリ

(Alexandre Obertelli)

東京大学 大学院理学系研究科	附属原子核科学研究センター
教授 (研究当時)	下浦 享 (シモウラ・ススム)
研究員 (研究当時)	ラッツロー・スタール (Laszlo Stuhl)
東京工業大学 理学院 物理学系	
特任助教 (研究当時)	梶野 泰宏 (トガノ・ヤスヒロ)
助教	近藤 洋介 (コンドウ・ヨウスケ)
教授	中村 隆司 (ナカムラ・タカシ)
東北大学	
教授 (研究当時)	小林 俊雄 (コバヤシ・トシオ)

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 仁科加速器科学研究センター

多種粒子測定装置開発チーム

チームリーダー

大津 秀暁 (オオツ・ヒデアキ)

スピン・アイソスピン研究室

特別研究員 (研究当時、現 客員研究員)

バレリー・パニン (Valerii Panin)

ダルムシュタット工科大学

研究員

メイテル・デュア (Meytal Duer)

研究員 (研究当時)

ステファノス・パシャリス (Stefanos Paschalis)

教授

トーマス・オウマン (Thomas Aumann)

東京大学 大学院理学系研究科

附属原子核科学研究センター

教授 (研究当時)

下浦 享 (シモウラ・ススム)

東京工業大学 理学院 物理学系

教授

中村 隆司 (ナカムラ・タカシ)

助教

近藤 洋介 (コンドウ・ヨウスケ)



大津 秀暁

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

E-mail : ex-press[at]riken.jp

東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室

E-mail : kouhou.s[at]gs.mail.u-tokyo.ac.jp

東京工業大学 総務部 広報課

E-mail : media[at]jim.titech.ac.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。
