

# スズ原子核の表面でアルファ粒子を発見

## —中性子星の構造とアルファ崩壊の謎に迫る—

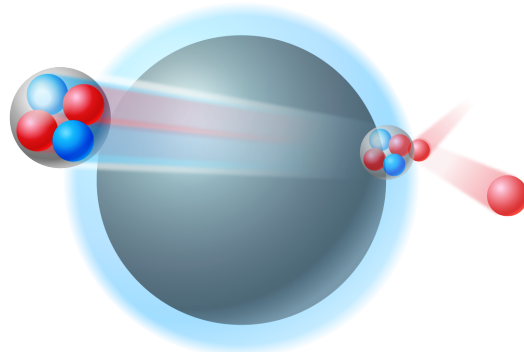
理化学研究所（理研）仁科加速器科学研究センタースピンのアイソスピン研究室のザイホン・ヤン基礎科学特別研究員（研究当時）、上坂友洋室長、ドイツ・ダルムシュタット工科大学の田中純貴特別研究員（研究当時）、大阪大学核物理研究センター（RCNP）の民井淳准教授、京都大学理学研究科の銭廣十三准教授ら、宮崎大学、東北大学、大阪市立大学、日本原子力研究開発機構の国際共同研究グループ\*は、RCNP サイクロトロン<sup>[1]</sup>施設の高分解能磁気分析装置<sup>[2]</sup>を用いた実験により、スズ（Sn）同位体<sup>[3]</sup>の原子核表面に存在するアルファ粒子、つまりヘリウム-4 原子核（ ${}^4\text{He}$ 、陽子数 2、中性子数 2）を発見しました。

本研究成果は、中性子星<sup>[4]</sup>の質量と大きさの関係を与えるパラメータの決定に影響を与え、かつアルファ崩壊<sup>[5]</sup>の原理解明につながる発見であり、原子核物理学全領域の研究開発に貢献することが期待できます。

これまで、重い原子核の表面にアルファ粒子が存在することは理論的な仮説に過ぎず、その当否は不明のままでした。

今回、国際共同研究グループは、RCNP サイクロトロンで得られる 4 億電子ボルトの陽子ビームを四つのスズ標的（ ${}^{112}\text{Sn}$ 、 ${}^{116}\text{Sn}$ 、 ${}^{120}\text{Sn}$ 、 ${}^{124}\text{Sn}$ ）に入射し、アルファ粒子をたたき出す「ノックアウト反応<sup>[6]</sup>実験」を行いました。たたき出されたアルファ粒子と散乱された陽子を高精度で分析した結果、アルファ粒子がスズ原子核の表面に存在する証拠を得たと結論づけました。

本研究は、科学雑誌『*Science*』の掲載に先立ち、オンライン版（1 月 14 日：日本時間 1 月 15 日）に掲載されました。



原子核表面のアルファ粒子とノックアウト反応の概念図（赤球が陽子、青球が中性子）

## ※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

スピン・アイソスピン研究室

基礎科学特別研究員（研究当時） ザイホン・ヤン（Zaihong Yang）

（現 大阪大学 核物理研究センター 特任研究員）

室長 上坂 友洋 （うえさか ともひろ）

ドイツ・ダルムシュタット工科大学

特別研究員（研究当時） 田中 純貴 （たなか じゅんき）

（現 理研仁科加速器科学研究センター スピン・アイソスピン研究室

特別研究員）

研究員 シュテファン・ティペル（Stefan Typel）

教授 トーマス・オーマン（Thomas Aumann）

大阪大学 核物理研究センター

准教授 民井 淳 （たみい あつし）

助教 小林 信之 （こばやし のぶゆき）

准教授 緒方 一介 （おがた かずゆき）

（大阪市立大学大学院理学研究科とのクロスアポイントメント）

京都大学 理学研究科

准教授 銭廣 十三 （ぜにひろ じゅうぞう）

宮崎大学 工学教育研究部 工学基礎教育センター

准教授 前田 幸重 （まえだ ゆきえ）

東北大学 サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター（CYRIC）

助教 松田 洋平 （まつだ ようへい）

東北大学 大学院理学研究科

助教 三木 謙二郎 （みき けんじろう）

日本原子力研究開発機構

博士研究員 吉田 数貴 （よしだ かずき）

本研究は、理化学研究所、ドイツ・ダルムシュタット工科大学、ドイツ・GSI 研究所、大阪大学核物理研究センター、中国・北京大学、フランス・IJC 研究所、京都大学、東京大学、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター、東北大学理学部、宮崎大学、大阪市立大学、日本原子力研究開発機構、ドイツ・HIC-FAIR に所属する 34 名の研究者が参加する国際共同研究グループにより行われました。この国際共同研究グループは、理化学研究所、ドイツ・ダルムシュタット工科大学、ドイツ・GSI 研究所、大阪大学核物理研究センターによって共同で率いられました。また、中国・北京大学、フランス・IJC 研究所、京都大学、東京大学、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター、東北大学理学部、宮崎大学は実験遂行に貢献しました。さらに、ドイツ・ダルムシュタット工科大学の理論部、大阪大学核物理研究センターの理論部、大阪市立大学、日本原子力研究開発機構は実験結果の理論解析に貢献しました。

## 研究支援

本研究は、ドイツの Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) -Project-ID 279384907-SFB 1245 (領域代表者：トーマス・オーマン)、BMBF (project 05P19RDFN1) (領域代表者：トーマス・オーマン)、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金基盤研究 (C)「多重ノックアウト反応で解き明かす原子核の独立粒子描像の崩れと多核子相関の全貌 (研究代表者：緒方一介)」による支援を受けて行われました。

## 1. 背景

原子核は陽子と中性子 (合わせて核子と呼ぶ) で構成されています。原子核物理学では「陽子と中性子のどのような組み合わせが原子核を作り得るのか」という基本問題に取り組んでいます。原子核の中では、基本的に陽子や中性子はばらばらに存在しますが、陽子や中性子が大きな粒子の塊 (クラスター) を作る現象も知られています。このクラスターの中で最も有名なのがヘリウム-4 原子核 ( ${}^4\text{He}$ 、陽子数 2、中性子数 2) つまり「アルファ粒子」であり、「アルファクラスター<sup>[7]</sup>」とも呼ばれています。

アルファ粒子を放出するアルファ崩壊は、19 世紀末に最初に発見された放射能の一つであり、現在では原子核の基礎研究から医療応用まで広く研究されています。1920 年代、ロシアの理論物理学者ジョージ・ガモフは、アルファ崩壊について、原子核内で生成されたアルファ粒子が量子トンネル効果<sup>[8]</sup>により原子核の外へ放出されるとする理論を作り上げ、これによりアルファ崩壊の寿命を説明することに成功しました。しかし、アルファ粒子が重い原子核中でどのようにして生成されるか、その原理は現在に至るまで完全には解明できていません。

本研究の共同研究者でもあるドイツの理論物理学者シュテファン・ティペルは、2014 年に新しく理論を構築し、原子核の表面でアルファ粒子の生成が発達することを予言しました<sup>注 1)</sup>。この理論によると、アルファ粒子は標準原子核密度<sup>[9]</sup> (飽和密度) ではあまり発達せず、その 1/10 程度の低密度領域で発達します。原子核表面にはこれと同等の低密度領域が存在するため、アルファ粒子が生成されることとなります。また、アルファ粒子の生成に原子核表面の陽子に対する中性子の比率が深く関係していることも、この理論の重要な帰結です。陽子よりも中性子が多い (中性子過剰な) 原子核ほど、表面の中性子比率が大きいいため、陽子と中性子を同数持つアルファ粒子の生成は抑制されるとティペルの理論は予言しています (図 1)。

この原子核表面での中性子比率の一つの指標に、「中性子スキン<sup>[10]</sup>」の厚さがあります。中性子スキンの厚さは、中性子星の質量と大きさの関係を与えるパラメータの決定に用いられており、全世界で中性子スキンの厚さを決める研究が行われています。そのため、もしアルファ粒子生成の有無が確認されれば、中性

子星の研究にも大きな影響を与えます。

このように、原子核表面でのアルファ粒子の生成は、アルファ崩壊から中性子星の構造解明まで、原子核物理学が関わる多くの重要な課題に関係しています。しかし、これまで原子核表面におけるアルファ粒子生成は理論的な仮説に過ぎず、その当否は不明のままでした。そこで共同研究グループは、スズ (Sn、陽子数 50) 同位体の表面にアルファ粒子が存在するかどうかを調べました。

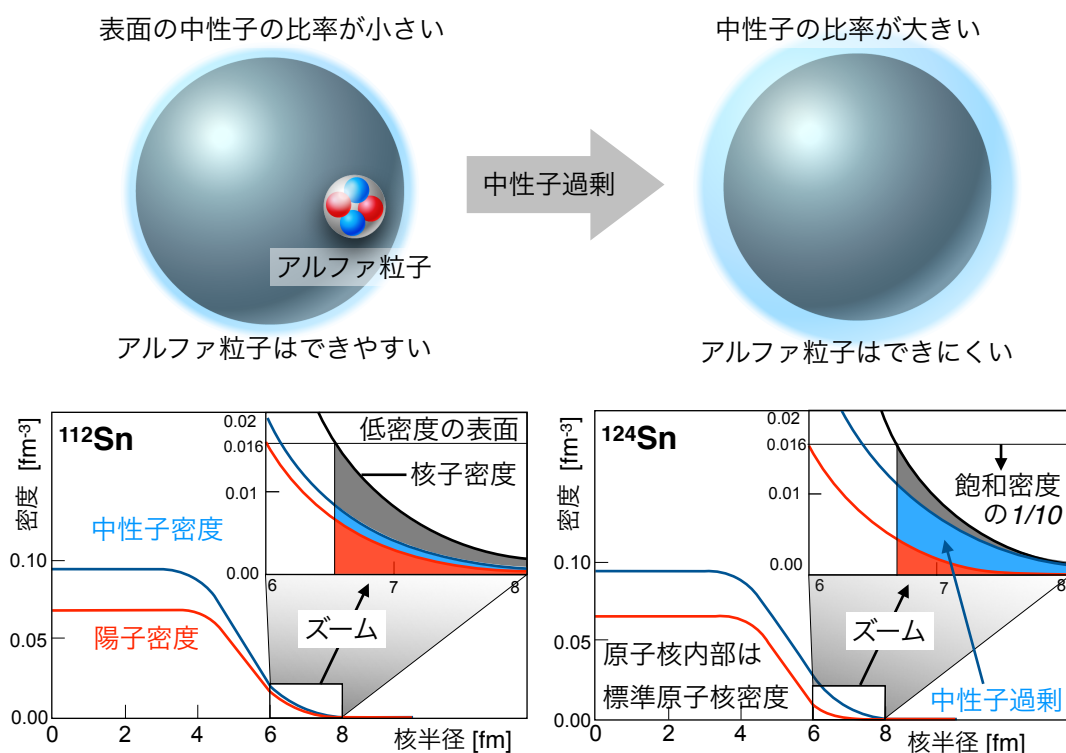


図1 アルファ粒子のできやすさ (上) とスズ同位体における陽子密度と中性子密度の分布

上段：原子核表面の中性子と陽子の比率が同程度であるとアルファ粒子は生成されやすいが、中性子過剰な原子核では表面の中性子比率が大きいためアルファ粒子は生成されにくい。

下段：スズ-112 ( $^{112}\text{Sn}$ 、陽子数 50、中性子数 62) とスズ-124 ( $^{124}\text{Sn}$ 、陽子数 50、中性子数 74) を比較する。青線は中性子密度、赤線は陽子密度を示し、右上には核表面 6~8 フェムトメートル (fm、1fm は 1000 兆分の 1 メートル) の領域がズームされている。標準原子核密度の約 1/10 以下の低密度領域に注目すると、スズ-124 の方が中性子過剰であるために、表面に中性子スキンが形成される。アルファ粒子の生成には陽子と中性子が同数必要であるため、陽子密度と中性子密度が比較的近い  $^{112}\text{Sn}$  の方がアルファ粒子の生成数が多いと予想された。

注 1) S. Typel, Neutron skin thickness of heavy nuclei with  $\alpha$ -particle correlations and the slope of the nuclear symmetry energy. *Phys. Rev. C* 89, 064321 (2014).

## 2. 研究手法と成果

国際共同研究グループは、大阪大学核物理研究センター（RCNP）のサイクロトロン加速器を用いて、陽子ビームを光速の約70%に相当する4億電子ボルトまで加速し、標的のスズ-112 ( $^{112}\text{Sn}$ 、中性子数62)、スズ-116 ( $^{116}\text{Sn}$ 、中性子数66)、スズ-120 ( $^{120}\text{Sn}$ 、中性子数70)、スズ-124 ( $^{124}\text{Sn}$ 、中性子数74)にそれぞれ照射しました。スズ原子核には最も多くの安定な同位体があり、同位体によるアルファ粒子生成数の違いを観察するのに適しています。

測定装置の概略図を図2に示します。陽子ビームを用いた「ロックアウト反応」により、スズ同位体標的中のアルファ粒子をたたき出しました。ロックアウト反応は、スズ原子核内でのアルファ粒子の運動に関する情報を取り出すことのできる優れた方法です。たたき出されたアルファ粒子の運動量は高分解能磁気分析装置の「大口径スペクトロメータ」により、散乱された陽子の運動量は「グランドライデン・スペクトロメータ」により分析しました。

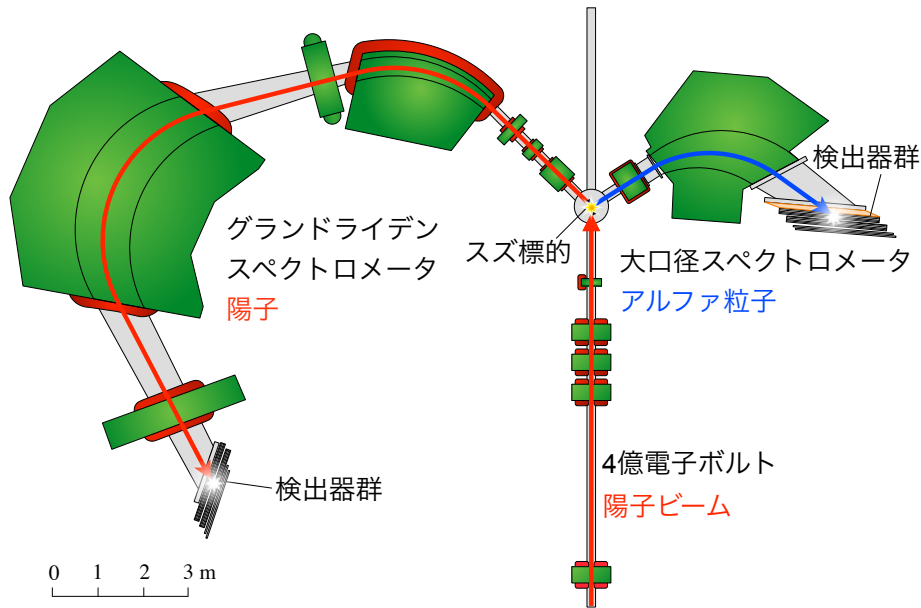


図2 本研究に用いた実験セットアップ

陽子ビームとスズ標的とのロックアウト反応により生じる、散乱陽子とロックアウトアルファ粒子を検出した。サイクロトロン加速器で4億電子ボルトに加速された陽子ビーム（赤線）がスズ標的で反応を起こし、散乱された陽子（赤線）はグランドライデン・スペクトロメータを用いて、たたき出されたアルファ粒子（青線）は大口径スペクトロメータを用いてその運動量を決定した。

アルファ粒子をたたき出すことで、スズ原子核は陽子数と中性子数がそれぞれ二つ少ないカドミウム（Cd）原子核に変換します。図3左に、陽子ビームと $^{112}\text{Sn}$ 原子核とのロックアウト反応後に生成された $^{108}\text{Cd}$ （陽子数48、中性子数60）原子核の励起エネルギー・スペクトルを示します。このスペクトルを導出する上で、グランドライデン・スペクトロメータと大口径スペクトロメータの持つ

高い分解能が大きく寄与しました。このグラフに見られる鋭いピークは、 $^{112}\text{Sn}$  原子核表面から確かにアルファ粒子がたたき出され、残った  $^{108}\text{Cd}$  原子核が最もエネルギーの低い基底状態にあることを示しています。

このピークに着目して、四つのスズ同位体原子核の表面におけるアルファ粒子の生成量を算出しました。図 1 に示した理論予想によると、アルファ粒子生成量は中性子数が多いスズ同位体ほど少なくなります。図 3 右に、アルファ粒子生成量のスズ原子核の中性子数に対する依存性の理論予想（赤線）と実験結果（黒丸）を示します。実験結果ではアルファ粒子生成量は中性子数が多い原子核ほど減少しており、まさに理論予想の原子核表面のアルファ粒子の特徴を示しています。このことが決定打となり、原子核表面に存在するアルファ粒子を発見したと結論付けました。

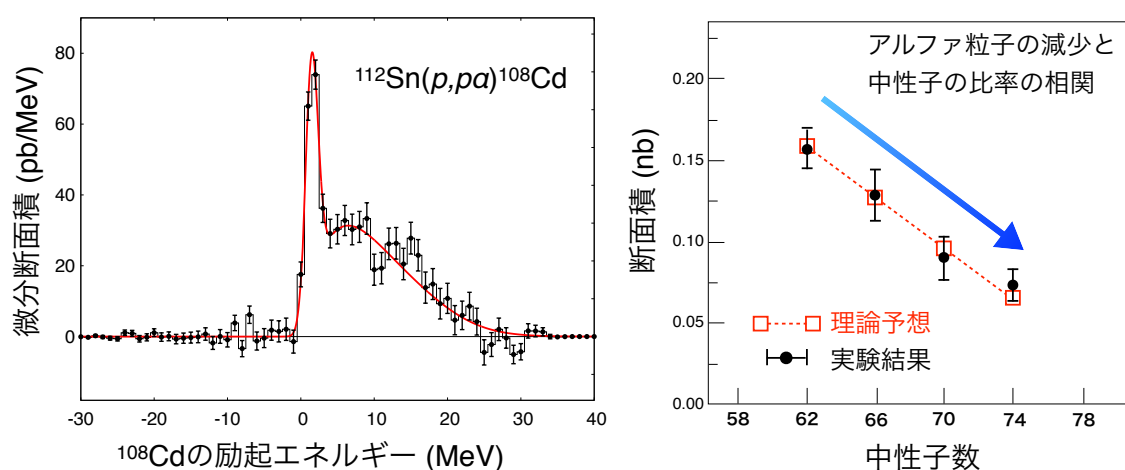


図 3 原子核内のアルファ粒子生成を示す実験結果(左)と同位体依存性の実験結果と理論予想

左：測定した陽子とアルファ粒子の運動量から構築した  $^{108}\text{Cd}$  原子核の質量スペクトル。鋭いピークは、 $^{112}\text{Sn}$  原子核の表面からアルファ粒子がたたき出されたことを示す。その右側のエネルギーが大きい領域に連続的に分布する構造は、 $^{112}\text{Sn}$  原子核のさらに内部からアルファ粒子がたたき出されたものと考えられる。

右：理論予想と実験結果の比較。縦軸は断面積と呼ばれる測定量であり、おおよそ Sn 原子核の表面にあるアルファ粒子の数に比例している。中性子数 62 の  $^{112}\text{Sn}$  原子核の表面にあるアルファ粒子の数は、中性子数 74 の  $^{124}\text{Sn}$  原子核のおよそ 2 倍であり、おおよそその間にある中性子数 66 の  $^{116}\text{Sn}$  原子核や中性子数 70 の  $^{120}\text{Sn}$  原子核はスムーズに変化していることから、実験結果と理論予想は一致したといえる。

本研究は、重い原子核表面のアルファ粒子を直接「観た」初めての実験です。原子核はサイズが 1000 兆分の 1 メートルの極微の世界のため、アルファ粒子を直接「観る」ことはできませんが、ノックアウト反応を介して直接たたき出すことで、アルファ粒子の発達度合いとその中性子比率に関する情報を引き出すことに成功しました。

### 3. 今後の期待

今回発見した重い原子核表面におけるアルファ粒子の存在は、従来の重い原子核の描像に変更を迫るものといえます。アルファ粒子生成の有無は、中性子星の質量と大きさの関係決定に重要な中性子スキンの厚さに影響を与えることから、本成果は中性子星構造の研究に大きな影響を与えると考えられます。

また、アルファ崩壊の謎を解く最後の鍵である原子核内におけるアルファ粒子生成に重要なヒントを与えます。今後の研究の進展により、アルファ崩壊が完全に理解されると期待できます。

さらに今後、大阪大学核物理研究センター（RCNP）サイクロトロン施設や理化学研究所 RI ビームファクトリーなどを用いた実験研究により、原子核内でのアルファ粒子や他のクラスター生成の研究が進展することで、中性子星構造や原子核構造・崩壊に関する新たな発見が期待できます。

### 4. 論文情報

<タイトル>

Formation of  $\alpha$  clusters in dilute neutron-rich matter

<著者名>

J. Tanaka, Z.H. Yang, S. Typel, et al.

<雑誌>

*Science*

<DOI>

10.1126/science.abe4688

### 5. 補足説明

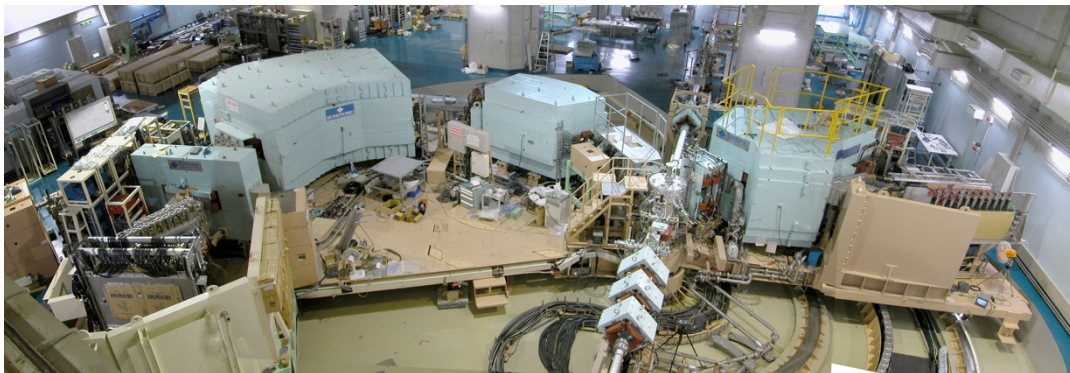
[1] サイクロトロン

陽子などのイオンを加速するための円形加速器。大阪大学核物理研究センター（RCNP）のサイクロトロン施設には、リングサイクロトロン（写真）と AVF サイクロトロンの 2 種類があり、陽子ビームを最大で光速の 70% まで加速できる（そのときのエネルギーは 4 億電子ボルト）。この施設は、国際共同利用・共同研究拠点として原子核科学および加速器を利用した応用研究を推進するために全国、全世界の研究者に開かれている。研究者からの提案に基づいて、原子核物理、基礎物理、原子核工学、核化学、核医学などさまざまな分野における研究が行われている。



## [2] 高分解能磁気分析装置

イオンビームと原子核標的との散乱で発生する、電荷を持った粒子の放出角度と運動量を高精度で測定する装置。磁場中に粒子を通すことで軌道を曲げ、運動量を分析する。RCNP は、世界最高性能を誇る「グランドライデン」(写真左側)と「大口径」(同右側)のダブルアーム・スペクトロメータを持ち、超精密測定・低バックグラウンドのイオン散乱実験で世界をリードしている。



## [3] 同位体

原子核を構成する陽子の数が同じであっても中性子の数が異なる原子核を同位体という。陽子の数は元素名に対応しており、陽子 50 個の場合、元素名はスズ (元素記号: Sn) である。原子核の表記では元素記号の左上に質量数を書くことで同位体を区別しており、例えば、質量数が 112 と 124 のスズは  $^{112}\text{Sn}$ 、 $^{124}\text{Sn}$  と書ける。スズの同位体は、質量数が 112 から 124 まで多く存在することが知られており、中性子スキンとアルファ粒子の関係性を調べる今回の研究に最適であった。

## [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 程度しかない奇妙な天体である。中性子星の主成分は中性子であり、中性子のほかに 5%程度の陽子やその他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あり、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初めて観測され、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] アルファ崩壊

不安定原子核が自発的にアルファ粒子を出して、陽子数と中性子数がそれぞれ二つ少ない、より安定な原子核に変わる放射性崩壊の一種である。アルファ崩壊は、理論的には量子トンネル効果でうまく説明できる。

#### [6] ノックアウト反応

高エネルギーで反応粒子と原子核を衝突させ、原子核から陽子や中性子、クラスター粒子などをたたき出す反応。陽子や電子が反応粒子として用いられることが多く、今回の実験では陽子を用いた。

#### [7] 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ある確率でアルファ粒子の塊となり、部分系「クラスター」を構成したもの。軽い原子核においては、その存在が理論・実験的に予言・実証されてきたが、重い原子核では現在までよく分かっていなかった。今回の発見で、スズ原子核ではアルファクラスターが存在することが実験的に実証された。

#### [8] 量子トンネル効果

アルファ崩壊を理論的に説明する量子力学的効果。原子核の電荷が作るクーロンポテンシャルという壁の中に閉じ込められたアルファ粒子は、古典力学的には、壁を乗り越えて原子核の外側に飛び出し、アルファ崩壊することはできない。しかし、量子力学的には、アルファ粒子は原子核の外側に染み出て、ある確率でトンネルをくぐり抜けるようにポテンシャル障壁を透過してアルファ崩壊を起こす。

#### [9] 標準原子核密度

安定な原子核は、その種類に依らず一定の密度  $3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$  を持っている。これを標準原子核密度、または飽和原子核密度と呼ぶ。身の回りの物質の密度は  $1 \text{ g/cm}^3$  程度であり、それに比べると原子核の中は  $10^{14}$  倍という非常に高い密度であるといえる。

#### [10] 中性子スキン

中性子過剰な原子核の中性子密度が、陽子密度に比べて半径の大きな分布を持つためにできる、原子核表面付近の層状中性子構造（中性子膜）のこと。

## 6. 発表者

<発表者>

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター スピン・アイソスピン研究室  
基礎科学特別研究員（研究当時） ザイホン・ヤン（Zaihong Yang）  
（現 大阪大学 核物理研究センター 特任研究員）  
室長 上坂 友洋（うえさか ともひろ）

ドイツ・ダルムシュタット工科大学  
特別研究員（研究当時） 田中 純貴 （たなか じゅんき）  
（現 理研仁科加速器科学研究センター スピン・アイソスピン研究室 特別研究員）

大阪大学 核物理研究センター  
准教授 民井 淳 （たみい あつし）  
准教授 緒方 一介 （おがた かずゆき）  
（大阪市立大学大学院理学研究科とのクロスアポイントメント）

京都大学 理学研究科  
准教授 銭廣 十三（ぜにひろ じゅうぞう）

宮崎大学 工学教育研究部 工学基礎教育センター  
准教授 前田 幸重（まえだ ゆきえ）

東北大学 サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター（CYRIC）  
助教 松田 洋平（まつだ ようへい）

東北大学 大学院理学研究科  
助教 三木 謙二郎（みき けんじろう）

日本原子力研究開発機構  
博士研究員 吉田 数貴（よしだ かずき）



左より、ザイホン・ヤン、上坂友洋、田中純貴、民井淳、銭廣十三