

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料
〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間：2021～2025
課題番号：21H04975
研究課題名：核物質内クラスター生成機構の総合的解明
研究代表者氏名（ローマ字）：上坂 友洋 (UESAKA Tomohiro)
所属研究機関・部局・職：国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・主任研究員
研究者番号：60322020

研究の概要：

本研究では、陽子や中性子が「クラスター」構造を形成する機構を、ノックアウト反応と呼ばれる研究手法を用いて解明する。国内の3加速器施設、理研RIBF、量研機構HIMAC、大阪大学RCNPで測定する実験データを、本研究で開発する新しい反応理論により解析し、原子核内のクラスター存在度を決定する。その結果を核物質・核構造理論を用いて分析し、核物質内クラスター生成機構解明につなげる。

研究分野： 原子核物理学

キーワード： クラスター、原子核物質、ノックアウト反応、アルファ崩壊、陽子中性子相関

1. 研究開始当初の背景

物質内でのサブシステム発現は物理学の広い分野に関わる現象である。原子核におけるサブシステムは「クラスター」と呼ばれ、過去特に注目されてきたアルファ・クラスター(${}^4\text{He}$ 原子核)はアルファ崩壊や恒星進化に関わるトリプル・アルファ反応など自然界における重要なプロセスに大きな影響を与えている。過去20年で原子核理論・大規模計算の発展や実験手法の進展によりクラスター構造の研究が大きく進んだが、その研究対象は主として質量数30以下の軽い原子核に限定されてきた。

一方、無限原子核物質中でのクラスター形成の理論研究が最近大きく進み、標準原子核密度(0.17 核子/ fm^3)の $1/10$ 以下の低密度領域でクラスターが大きく発達し、そのクラスター形成率は中性子-陽子非対称度に依存していることが理論的に予言されるようになった。このような現象は重い原子核の表面に生じる低密度領域でも起こるとS. Typelが予言し、その予言は、私達のグループが錫同位体内の α クラスターに対して行った実験により確かめられた。

2. 研究の目的

原子核物質は一般に、サブシステム発現により一様性を破る指向を内在しているのか？本研究では、広い質量領域の原子核に対してノックアウト反応という手法を適用し、原子核世界での一様性の破れであるアルファ粒子や重陽子などのクラスター発現機構の研究を行なうことにより、この問いに答えていくことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題では、我々のグループが開発し上記の錫同位体実験にも適用したクラスター・ノックアウト反応による手法を更に発展させ、これを用いてカルシウムから超鉛領域に至る重い原子核中での $d, t, {}^3\text{He}, \alpha$ クラスター存在率を実験的に決定する。その実験データと理論との比較から核物質中でのクラスター形成仮説を検証することを通じて、クラスター生成機構の総合的解明を目指す。

具体的には、日本を代表する加速器施設である理研RIBF、量研機構HIMAC、阪大RCNPサイクロトロン施設の各々特徴あるビームを用いたクラスターノックアウト反応実験を実施し、その断面積データと理論計算との比較からカルシウム(原子番号20)から超鉛元素(原子番号 ≥ 82)の安定・不安定同位体内での $d, t, {}^3\text{He}, \alpha$ クラスター存在率を決定する。阪大RCNPサイクロトロン施設では、250MeV陽子ビームと両アーム磁気スペクトロメータを用いた高分解能順運動学実験を実施し、理研RIBF及び量研機構HIMACでは核子当たり250MeVの重イオンビームを用いた逆運動学実験を実施する。後者の逆運動学実験に用いる、クラスターノックアウト反応実験に特化したTOGAXSI検出器アレイを本課題で建設する。これらの3つの加速器施設での実験研究を組み合わせることにより、広い質量領域、安定核と不安定核に跨る広いアイソスピン(中性子過剰度)領域の研究を可能とするとともに、高分解能測定と広い運動学条件をカバーす

る測定の組み合わせによる複眼的な研究を実現する。

並行して、反応理論の信頼性向上のため、クラスターノックアウト反応理論の高度化を行う。クラスターノックアウト反応は、広く用いられている核子ノックアウト反応の自然な拡張であるが、本研究が求める信頼性を達成するためには、クラスターが複合粒子であることに起因する効果を正しく採り入れる必要がある。そのような効果の中で最も重要なものが、分解効果である。ノックアウト反応の標準理論である歪曲波インパルス近似(DWIA)理論に、分解効果を採り入れる理論枠組みである連続状態離散化チャンネル結合(CDCC)法を組み合わせた CDCCIA 法を新たに開発し、実験データの解析に適用する。

上記の過程を経て得られたクラスター存在率と、異なる仮説に基づく核構造理論計算との比較を通じた仮説検証を行い、重い原子核内でのクラスター形成機構を解明する。更に Typel らが既に開発を進めている有限原子核と核物質をつなぐ理論を用い、核物質内でのクラスター形成機構の理解につなげる。

4. これまでの成果

優れた理論研究が多くなされる一方、汎用性の高い実験手法の欠如により発展が制限されていたクラスター研究に、本課題はノックアウト反応という汎用性・生産性の高い研究手法を持ち込んだ。これを契機として、中重核におけるクラスター構造を研究する機運が高まり、国内外の研究集会でのテーマとして採り上げられつつある。その一つの表れが 2022 年に京大基礎物理学研究所が開催した長期滞在型ワークショップ“Mean-field and Cluster in Nuclear Systems 2022”でノックアウト反応を用いたクラスター研究が主要テーマの一つとして取り上げられたことである。ここでは、分担者の緒方が取りまとめを行い、同じく銭廣が本研究課題に関する招待講演を行った。また 2022 年 9 月に開催された、原子核物理学分野で最も重要な会議である第 28 回原子核物理学国際会議(INPC2022)では、代表者の上坂がクラスター物理に関する招待プレナリ講演を行った。

2021-2022年には、シリコンストリップ検出器と GAGG:Ce シンチレーション検出器の 100—230 MeV 陽子及び α 粒子検出における性能評価を実施し、両検出器が本課題で要求する性能を十分満たしていることを確認した。これをもとに、クラスターノックアウト反応に特化した TOGAXSI 検出器アレイの建設を開始した。これまで建設された検出器アレイに比べ、クラスターノックアウト反応の運動学に対応する広い角度アクセプタンスと、高い分解能を併せ持つ TOGAXSI は複数の反応チャンネルを同時に研究できる装置として不安定核研究分野からの関心を集めている。

クラスターノックアウト反応理論の研究では、束縛エネルギーが小さい、脆いクラスターのノックアウト反応を記述する新反応模型 CDCCIA (連続状態離散化チャンネル結合インパルス近似)を開発した。これを重陽子ノックアウト反応に適用した最初の結果を *Physical Review C* 誌に発表した。緒方、吉田、茶園、小川らの反応理論研究と、国内外の実験グループとの議論及び共同研究が始まりつつある。

5. 今後の計画

TOGAXSI 検出器アレイは、2023 年夏に暫定セットアップを完成させ、同アレイと理研 RIBF の中性子過剰カルシウム同位体(原子番号 20, $^{50-52}\text{Ca}$) ビームを用いて、クラスターノックアウト反応データを取得する。また、阪大 RCNP サイクロトロン施設の陽子ビームを用い安定カルシウム同位体($^{40-48}\text{Ca}$) に対するデータを取得する。これらのデータを DWIA 及び CDCCIA 理論計算を用いて解析し、広い同位体チェーンに渡るカルシウム同位体内のクラスター生成率を決定する。

2024 年度以降、TOGAXSI の最終セットアップを完成させ、これを錫同位体(原子番号 50)、超鉛領域重元素(原子番号 82 以上)実験に順次適用し、同様の解析を経て、クラスター生成率を決定する。

得られたクラスター生成率の結果を、核構造理論・核反応理論と比較することにより、本課題の最終目的である原子核・核物質におけるクラスター生成機構の総合的解明を進める。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

Yoshiki Chazono, Kazuki Yoshida, Kazuyuki Ogata, “Importance of deuteron breakup in deuteron knockout reaction”, *Physical Review C* **106**, 064613 (2022).

7. ホームページ等

現在準備中