



研究課題名 核物質内クラスター生成機構の総合的解明

理化学研究所・開拓研究本部・主任研究員

うえさか ともひろ

上坂 友洋

研究課題番号： 21H04975

研究者番号： 60322020

研究期間： 令和3年度～令和7年度 研究経費（期間全体の直接経費）： 490,900千円

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

【研究の背景・目的】

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(^4He 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 氏らが予言し、その予言は、私達のグループが行った実験により確かめられた。

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、ノックアウト反応という手法を用い、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い、この問いに答えていく。

【研究の方法】

私達のグループが開発してきたクラスター・ノックアウト反応による手法を用いて、カルシウムから鉛同位体に至る重い原子核中での $d, t, ^3\text{He}, \alpha$ クラスター存在比を決定し、クラスター発現機構の解明を行なう。

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、広い質量領域に渡る安定原子核と不安定原子核に対するクラスターノックアウト反応断面積を決定する。

阪大 RCNP では、陽子ビームと双腕磁気スペクトロメータを活用し、安定原子核に対して順運動学でのノックアウト反応実験を実施し、高いエネルギー分解能でのデータを取得する。

理研 RIBF と量研機構 HIMAC では、各々大強度不安定核ビーム、安定重イオンビームを活用した逆運動学でのノックアウト反応実験を実施する。逆運動学実験では、 $d, t, ^3\text{He}, \alpha$ の全てのクラスターに対し同時に測定を行え、かつ広い運動学領域を覆うことができるというメリットがある。

本研究では RIBF と HIMAC で用いる逆運動学ノッ

クアウト反応実験に特化した検出器アレイを、 $100\mu\text{m}$ ピッチのシリコン・ストリップ検出器と、国産で優れた時間応答を持つ GAGG:Ce シンチレータを用いて製作する。

得られた断面積からクラスター存在率を導出するために、インパルス近似に基づくクラスターノックアウト反応理論を高度化する。特に弱束縛粒子である重陽子のノックアウト反応において重要となる分解効果を、連続状態離散化チャネル結合法を用いて精密に取り扱う理論を開発する。

実験データと反応理論を合わせて得られるクラスター存在率を、核構造理論、核物質理論と比較することにより、核物質中でのクラスター形成仮説を検証するとともに、その機構を明らかにする。

【期待される成果と意義】

本研究では、下記の成果が得られると期待される。

- ・重い原子核での表面 α 形成の確立と、それに基づく α 崩壊の完全解明
 - ・重陽子クラスター発見とテンソル力効果の解明
 - ・重い原子核における $t/^3\text{He}$ クラスター存在比とその中性子過剰度依存性決定
 - ・クラスターノックアウト反応による分光研究の確立
 - ・以上を通じた核物質内クラスター形成の総合的解明
- この研究により、クラスター形成が全ての原子核で普遍的に起こる現象であるということを明確にできると考える。原子核物理学分野で大きな成功を収めている独立粒子描像と、概念的に大きく異なるクラスター形成描像はどのように矛盾なく理解できるのか？この問に対する答えは、原子核の新しく、望むらくは「正しい」描像を得るきっかけを与えるものになると、私達は考えている。

核物質中でのクラスター形成は、超新星爆発中に生じる低密度核物質のニュートリノ応答や、また中性子星の内殻に存在すると考えられている原子核パスタの構造にも大きく影響を与えると考えられるため、宇宙物理学にもインパクトを与える。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ J. Tanaka, Z.H. Yang, S. Typel, K. Ogata, T. Uesaka, J. Zenihiro et al., "Formation of α clusters in dilute neutron-rich matter", *Science* 371, 260 (2021).
- ・ 緒方一介、上坂友洋、「不安定核から粒子をたたき出す—ノックアウト反応で見える新たな核構造」、日本物理学会誌 第76巻9号掲載予定。

【ホームページ等】

現在準備中。