

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01928

研究課題名（和文）無反跳反応で探る核子対凝縮相の素励起モード

研究課題名（英文）Study of elementary excitations in the nucleon pair condensation using the recoilless nuclear reaction

研究代表者

堂園 昌伯（Masanori, Dozono）

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：60616259

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：自然界に存在する豊かな物質は、多様な「相」により生み出されており、その発現機構を探るのは物質科学の重要な目的の一つである。このような例のうち、原子核の核子対凝縮では、発現すれば現れるはずの二種類の素励起モードのうち、一つが実験的に確立していないという根本的な問題を抱えている。本研究では、残る一つのモードである「対振動」の存在を確定するため、対振動の最高感度測定を可能とする「( $^6\text{He}$ )反応」を着想し、そのための測定手法を確立した。また、実証実験を行った結果、新反応の対振動測定に対する有効性が示された。これにより、対振動の本格的な測定に向けて目処がついたといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で確立した手法により、原子核の対振動の実態が明らかになれば、核子対凝縮のヒッグスモードに関する議論が初めてできるようになり、凝縮の発現機構の理解が一步進む。さらに、そこから核子対凝縮の性質も定量化できる可能性があり、理論モデルの精緻化を促すと予想され、例えば中性子星の内部構造の理解にもつながる。

研究成果の概要（英文）：A new method, the ( $^6\text{He}$ ) reaction, has been established to study pair vibration in nuclei, which is a key to understand the mechanism of nucleon pair condensation. The first proof-of-principle experiment has demonstrated that the ( $^6\text{He}$ ) reaction is quite an efficient probe to pair vibration components. Systematic studies of pair vibrations in superfluid nuclei are now feasible with the experimental method established in this work.

研究分野：原子核物理実験

キーワード：対相関 対振動 対凝縮 核子対移行反応

## 1. 研究開始当初の背景

「自発的対称性の破れ」は、様々な物理現象を普遍的に貫く概念である。図 1 に示すように、ある秩序変数に対して対称性が破れると、系にはそれを回復しようとして特徴的な揺らぎ(素励起モード)が生じる。一つは秩序変数の振幅方向の振動、もう一つは位相の振動である。エネルギーゼロで運動が可能な位相モード(南部・ゴールドストーン(N-G)モード)に対して、ポテンシャルの壁を駆け上がる振幅モードは、素粒子物理において近年観測されたヒッグス粒子と類似の概念であり、「ヒッグスモード」と呼ばれる。その存在は、超伝導体において約 50 年前に予言されていたものの、実際に観測されたのは近年のことであり、また、超伝導の性質を探る新しい方法を与えるものとして世界的に注目されている。

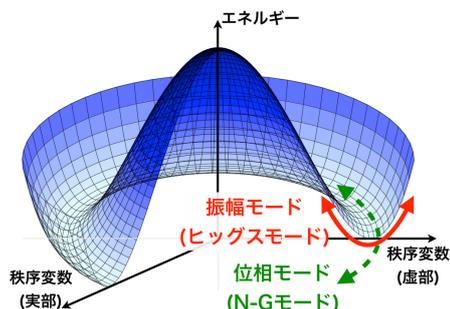


図 1: 「自発的対称性の破れ」の概念図。

一方で、原子核がフェルミ粒子である核子から構成されることに着目すると、原子核における超流動/超伝導(核子対凝縮)が考えられる。有限量子系である原子核では、粒子数の異なる原子核がゲージ空間における回転バンド構造(対回転)を示し、これが N-G モードに対応する。実際、中性子数が偶数の多くの原子核では、基底状態がこのような回転スペクトルを示し、その状態間では強い中性子対移行反応が観測されている。一方で、もう一つの揺らぎであるヒッグスモードに対応したモードは、対回転バンドより上のエネルギー領域に対振動として現れると考えられているが、確立はしていない。状態の候補は低エネルギー領域にいくつか見つかっているものの圧倒的に情報が不足し、ヒッグスモードとの関連性も不明瞭である。このように、「核子対凝縮相のヒッグスモードとは何か?」という、凝縮の発現機構に関わる根本的な問題が、学術的問いとして残っている。

## 2. 研究の目的

本研究の最終目標は、核子対凝縮のヒッグスモードとして考えられている対振動の存在を確定することである。そこで、これまで探索が行われてきた低励起エネルギー領域だけでなく、高励起での存在が予言されている高励起対振動も探索対象とする。というのも、これらの状態は、ヒッグスモードが原子核特有の効果(殻や変形の効果)により分散していると予想されるからである。分布全体で和則を考えることでそのような効果を打ち消し、初めてヒッグスモードの議論ができると考えている。

目的のためには広いエネルギー領域にわたる探索が必要であるが、従来用いられてきた反応 [(p,t)反応] では、数 MeV の低励起領域までしかアプローチできなかった。したがって、高励起領域にも感度のある新しい反応手法が必須である。そこで、反応手法の確立および実現を本研究の主目的に設定した。具体的には、新手法「 $(\alpha, {}^6\text{He})$ 反応」である。これを典型的な超流動原子核である  ${}^{120}\text{Sn}$  標的に適用する実験を行い、反応の有効性を調べる。

## 3. 研究の方法

対振動は、原子核内で核子対がコヒーレントに生成・消滅するようなモードであるため、原子核から核子対を除去する(あるいは付加する)核子対移行反応を用いると励起されやすい。特に無反跳条件(運動量移行がゼロ)で核子対を移行することができれば、励起断面積が最も大きくなる。つまり対振動を最高感度で測定できるため、特に物理的バックグラウンドが大きくなる高励起領域では必要不可欠な条件である。無反跳条件は、対除去反応において適切にビームエネルギーを選ぶことで実現できるが、従来の (p, t) 反応ではそのエネルギーが低く、高励起エネルギー領域までアプローチできないのが問題であった。そこで、新たな反応プローブとして、 $(\alpha, {}^6\text{He})$  反応を着想した。この反応の特徴は  ${}^6\text{He}$  粒子が持つ中性子対の弱束縛性である。これにより無反跳条件を高いビームエネルギーで実現し、高励起領域の対振動成分にもアプローチできる。

この着想を得て、 $(\alpha, {}^6\text{He})$  反応を用いた実証実験を計画した。実験は、東北大 CYRIC および阪大 RCNP にて行った。図 2 に、阪大 RCNP での実験セットアップを示す。AVF サイクロトロンから得られたエネルギー 100 MeV の  $\alpha$  粒子ビームを  ${}^{120}\text{Sn}$  標的に照射した。反応により放出された  ${}^6\text{He}$  粒子は Grand Raiden スペクトロメータで磁気分析された後、プラスチックシンチレータで粒子識別が行われ、ガス位置検出器(VDC)で運動量ベクトルが決定された。得られた運動量ベクトルから質量欠損法により残留核の励起エネルギースペクトルを得た。角度の測定範囲は 2.5 度から 11 度で、スペクトロメータを回転させることで角度を変更した。

実験的には、検出する  ${}^6\text{He}$  粒子のエネルギーが低いため、焦点面周りの物質量を低減し、エネルギー損失や多重散乱の効果を最小化する必要があった。そこで、(1) ガス検出器用のガスを  $\text{He}+\text{CH}_4$  (50:50) に変更する、(2) 2 台の VDC の間をヘリウムガスで満たす、などの工夫を行った。また、運動学条件的に弾性散乱イベントが近くに到来するため、このイベントを止めるためのストッパーを検出器直前に設置し、バックグラウンドの低減に努めた。

#### 4. 研究成果

図 3 に実験結果を示す。 ${}^{120}\text{Sn}(\alpha, {}^6\text{He})$  反応により得られた  ${}^{118}\text{Sn}$  の励起エネルギースペクトルである。角度設定の異なる二つのスペクトルを示しているが、角度分布の特徴から、対回転および対振動成分は赤のスペクトルにおいて増大される。実際に、基底状態に存在する対回転 (PR) や低励起の対振動 (PV) はそのように見えていることが分かる。この特徴を利用することにより、5 MeV 付近に新しい対振動成分を発見した。このことから  $(\alpha, {}^6\text{He})$  反応が対振動の測定に有効なプローブであることを実証した。現在は、対振動の全貌を明らかにするための、より高励起領域の解析も進んでおり、近く結果をまとめ、論文へ投稿する予定である。

以上により、本研究の主目的として設定した、 $(\alpha, {}^6\text{He})$  反応の手法としての確立を達成した。これにより、最終目標である対振動の性質を明らかにする研究に目処がついたと言える。本研究で得られた成果を足がかりに、今後、本格的な研究を展開していく予定である。

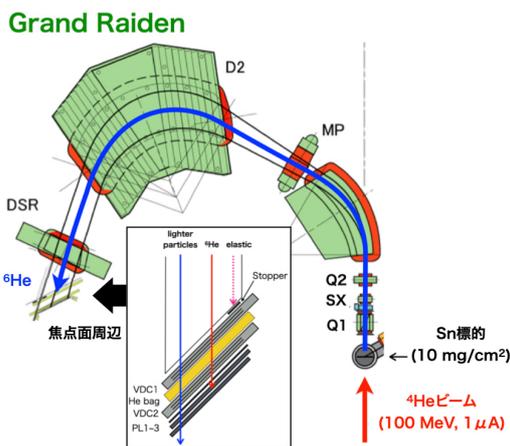


図 2 : 阪大 RCNP での本実験セットアップ。

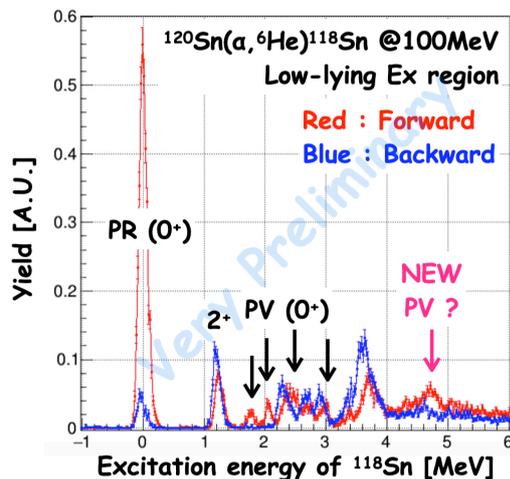


図 3 : 100 MeV での  ${}^{120}\text{Sn}(\alpha, {}^6\text{He}){}^{118}\text{Sn}$  反応実験の結果。二つの角度設定のデータの差から対振動成分を見分ける。その結果、5 MeV 付近に新たな対振動成分を発見した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 8件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Masanori Dozono
2. 発表標題 Measurement of highly-excited neutron-pair vibration
3. 学会等名 RCNP Workshop "Microscopic approach from pair correlation to pair condensation" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堂園昌伯
2. 発表標題 Parity-transfer reaction for study of spin-dipole 0- mode
3. 学会等名 RCNP研究会「原子核におけるスピン自由度が織り成すダイナミクス」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池水玄、伊津野勝英、堂園昌伯、大田晋輔、他、RCNP-E585 collaboration
2. 発表標題 $^{120}\text{Sn}(\alpha, ^6\text{He})$ 反応による $^{118}\text{Sn}$ 原子核の対振動モードの探索
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊津野勝英、池水玄、堂園昌伯、大田晋輔
2. 発表標題 多重極展開法の $(\alpha, ^6\text{He})$ 反応への適用
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Masanori Dozono
2. 発表標題 Measurement of highly-excited neutron-pair vibration
3. 学会等名 RCNP Workshop "Microscopic approach from pair correlation to pair condensation" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堂園昌伯
2. 発表標題 Parity-transfer reaction for study of spin-dipole 0- mode
3. 学会等名 RCNP研究会「原子核におけるスピン自由度の織り成すダイナミクス」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masanori Dozono
2. 発表標題 Searching for highly-excited pair vibration modes in tin isotopes using alpha-induced pair-transfer reactions
3. 学会等名 YIPQS long-term workshop "Mean-field and Cluster Dynamics in Nuclear Systems 2022 (MCD2022)" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堂園昌伯
2. 発表標題 核子対移行反応で探る対凝縮相の素励起モード
3. 学会等名 RCNP研究会「原子核反応研究の最近の話題と展望」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堂園昌伯
2. 発表標題 ( $\alpha$ , $^6\text{He}$ )反応を用いたヒッグス応答の研究
3. 学会等名 RCNP研究会「微視的系と巨視的系における核子対凝縮相」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masanori Dozono
2. 発表標題 Experimental studies of pairing correlation/vibration
3. 学会等名 JSPS/NRF/NSFC A3 Foresight Program "Nuclear Physics in the 21st Century"
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Dozono
2. 発表標題 Probing exotic structures of highly excited nuclei: OEDO-SHARAQ activities
3. 学会等名 RIBF Users Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堂園昌伯
2. 発表標題 ( $^4\text{He}$ , $^6\text{He}$ )反応による錫同位体の対振動状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------