

機関番号： 14301  
 研究種目： 若手研究(B)  
 研究期間： 2009～2010  
 課題番号： 21740171  
 研究課題名(和文) ノックアウト反応を用いた原子核におけるクラスター相関の発現機構の  
 解明  
 研究課題名(英文) Study of cluster correlation in atomic nuclei using knock-out  
 reaction  
 研究代表者  
 川畑 貴裕 (KAWABATA TAKAHIRO)  
 京都大学・大学院理学研究科・准教授  
 研究者番号： 80359645

## 研究成果の概要(和文)：

本研究では、ノックアウト反応を用いて原子核におけるクラスター相関を研究することを目的とする。そこで、ノックアウト粒子検出のための半導体検出器を整備し、その性能を京都大学タンデムバンデグラフ型加速器施設においてテストした。さらに、この検出器を用いて大阪大学核物理研究センターのサイクロトロン施設において、ノックアウト反応と同じ $\alpha$ クラスター移行反応である $^{16}\text{O}(d, ^6\text{Li})$ 反応の測定を実施した。また、400MeV  $\alpha$ ビームを用いて、 $^{24}\text{Mg}$ を標的とした $\alpha$ 非弾性散乱の精密測定を行い、歪曲波ボルン近似に基づいて多重極展開解析を実施しクラスター状態の候補を発見した。

## 研究成果の概要(英文)：

We proposed to study the cluster correlation in the atomic nuclei by means of the alpha knock-out reaction. For this purpose, we developed a Si counter telescope to detect knocked-out alpha particles, and tested its performance at the Tandem-Van de Graff accelerator facility. Using this Si counter telescope, we measured  $^{16}\text{O}(d, ^6\text{Li})$  reaction which is the alpha transfer reaction analogous to the alpha knock-out reaction at Research Center for Nuclear Physics, Osaka University. We also measured alpha inelastic scattering from  $^{24}\text{Mg}$  at 400 MeV. We performed the multipole decomposition analysis on the basis of the distorted-wave Born-approximation calculation, and found several candidates for the well-developed alpha cluster states.

## 交付決定額

(金額単位：円)

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2009 年度 | 2,100,000 | 630,000 | 2,730,000 |
| 2010 年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 総計      | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野： 原子核物理学(実験)

科研費の分科・細目： 物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード： 実験核物理、クラスター構造、半導体検出器

## 1. 研究開始当初の背景

クラスター相関の発現と消失は、自然界の

様々な階層において観測される普遍的な現象であり、各階層におけるクラスター相関は、

それぞれの階層におけるダイナミクスによって支配されている。各階層におけるクラスター相関の発現と消失は、一種の相転移であり、そのメカニズムを解明することは、その階層におけるダイナミクスを理解する上で非常に重要である。

例えば、自然界における最小のクラスター構造であるハドロンでは、カラー閉じ込めの機構から生じる強い空間的相関によってクォークがハドロン内部に閉じ込められている。しかし、高温高密度の状態ではクォークとグルーオンが閉じ込めから開放されて相関を消失し、クォークグルーオンプラズマを生成すると考えられており、カラー閉じ込めの消失とクォークグルーオンプラズマ生成の過程は量子色力学に基づくクォークとグルーオンのダイナミクスを理解する鍵となる。

核子の集合である原子核の場合、多くの核の基底状態では、核子が平均ポテンシャル中を独立に運動すると考える平均場模型が有効であり、外見上は、クラスター相関を消失している。しかし、ある種の励起状態においてはクラスター相関が発現して空間的に発達し、核構造を劇的に変化させることが知られている。カラー閉じ込めがビッグバン直後のような高温高密度の極限状態においてのみ消失するのに対し、原子核におけるクラスター相関は、わずか数 MeV 程度の励起によって容易に発現と消失を繰り返す点において特徴的であり、原子核におけるクラスター相関の発現と消失の機構を明らかにすることは、有限量子多体系である原子核のダイナミクスを理解する上で避けては通れない重要な課題である。

近年、申請者らは原子核における空間的に発達したクラスター状態が単極子励起によって強く励起されることを見出し、単極子遷移の測定が原子核におけるクラスター相関の研究に有効な手法であることを提唱した。空間的に発達したクラスター状態が、コンパクトな平均場の基底状態から直接反応によって強く励起されるという申請者らの主張は、波動関数の空間的構造が大きく異なる状態間の遷移が、単純な一粒子オペレータによって強く励起されることを意味しており、感覚的には受け入れ難いものであった。しかし、その後、T. Yamada と H. Horiuchi らによる理論研究により、平均場模型が有効とされる基底状態であっても、その波動関数には空間的に発達したクラスター状態の成分が含まれており、このクラスター状態の成分に単極子遷移オペレータを作用させることによって空間的に発達したクラスター状態を強く励起できることが提案された。

過去には、 $\alpha$  ピックアップ反応や  $\alpha$  ノックアウト反応等の実験がなされ、原子核の基底

状態にも  $\alpha$  クラスターが相当の確率で存在することが確認されているが、Baymann Bohr の定理によれば、SU(3)の極限において空間的にコンパクト化したクラスター模型の波動関数は、平均場模型から得られる波動関数と数学的に等価であり、基底状態に  $\alpha$  クラスターが存在すること自体は平均場模型の範疇で記述できる。例えば、殻模型は比較的大きな  $\alpha$  クラスターの分光学的因子を与えることが知られている。しかし、T. Yamada と H. Horiuchi らの指摘によると、Baymann Bohr の定理から導かれるような潜在的な  $\alpha$  クラスターの存在だけでは、申請者らの実験で観測された強い単極子励起を説明することはできず、基底状態においてもクラスター相関が発現し、空間的に発達したクラスター構造をもつ成分が波動関数に含まれていなければならない。つまり、申請者らの観測結果は、外見上、クラスター相関を消失していると考えられてきた基底状態に、クラスター相関が部分的に発現していることを間接的に示すものである。

原子核の基底状態に平均場と多核子相関という二つの相反する描像が実際に共存しているとすれば、基底状態におけるクラスター相関は、原子核におけるクラスター相関の発現と消失の機構を明らかにする上で絶好の研究対象となる。そこで、申請者はノックアウト反応を用いて原子核の基底状態におけるクラスター相関を直接的に研究することを着想した。

## 2. 研究の目的

本研究では、ノックアウト反応等、各種核反応の精密測定を実施して、原子核の基底状態におけるクラスター相関を研究し、原子核におけるクラスター相関の発現と消失の機構を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

ノックアウト  $\alpha$  粒子検出のための半導体検出器の調達と整備を行ったあと、京都大学タンデムバンデグラフ型加速器施設において、この半導体検出器の性能評価実験を行う。

半導体検出器のエネルギーおよび時間分解能が要求される性能を満たすことを確認したうえで、これを大阪大学核物理研究センターへ移設し、各種核反応による原子核のクラスター相関の研究を行う。

測定終了は、直ちにデータ解析を行う。磁気スペクトロメータおよび半導体検出器のアクセプタンスを考慮した詳細なシミュレーションを行い、系統誤差の低減に努める。

さらに、測定された反応断面積から、歪曲波ボルン近似 (DWBA) 計算を用いて原子核

構造についての情報を抽出する。DWBA 計算の実施にあたっては、国内外の核反応理論研究者の協力を仰ぎつつ、DWBA 計算の信頼性向上に努める。

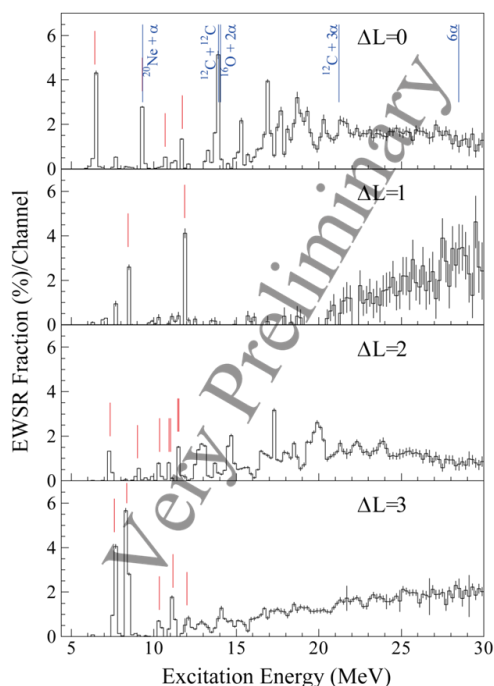
得られた知見をもとに、国内外の核構造理論研究者と情報交換しつつ、原子核におけるクラスター相関の発現と消失の機構の解明を行う。そして、得られた成果について論文を執筆し、国際的な学術雑誌において発表する。

#### 4. 研究成果

平成 21 年度にノックアウト粒子検出のための半導体検出器を整備し、その性能を京都大学タンデムバンデグラフ型加速器施設において性能テストを実施した。p+p 弾性散乱を測定し、エネルギーおよび時間分解能が要求性能を満たしていることを確認した。

さらに、この検出器を用いて大阪大学核物理研究センターのサイクロトロン施設において、ノックアウト反応と同じ $\alpha$ クラスター移行反応である  $^{16}\text{O}(d, ^6\text{Li})$  反応の測定を実施した。

平成 22 年度には、阪大学核物理研究センターのリングサイクロトロン施設において加速された 400MeV  $\alpha$  ビームを用いて、 $^{24}\text{Mg}$  を標的とした $\alpha$ 非弾性散乱の精密測定を実施した。このデータに対して DWBA 計算に基づく多重極展開解析を行った結果を下図に示す。 $\Delta L=0$  と示された単極子励起強度分布をみると、 $\alpha$ 崩壊閾値近傍にいくつかの  $0^+$  状態が観測されており、これらの状態はクラスター状態の候補と考えられる。



さらに、これらのクラスター状態の微視的構造を明らかにするために、 $\alpha$ 非弾性散乱と励起状態からの崩壊粒子の同時計測を実施した。これら状態の崩壊モードを決定しつつ、クラスター模型計算との詳細な比較を行った結果、 $^{16}\text{O}$  コアを持つ  $2\alpha$  凝縮状態の候補であることが突き止められた。

今後は、これらの実験結果を基に、国内外の核構造理論研究者と情報交換しつつ、原子核におけるクラスター相関の発現と消失の機構の解明をすすめる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1.  $\alpha$  resonance structure in  $^{11}\text{B}$  studied via resonant scattering of  $^7\text{Li}+\alpha$   
H. Yamaguchi, T. Hashimoto, S. Hayakawa, D. N. Binh, D. Kahl, and S. Kubono, Y. Wakabayashi, T. Kawabata, T. Teranishi  
Phys. Rev. C **83**, 034306 (2011).

[学会発表] (計 12 件)

1. Search for Alpha Condensed State in  $^{24}\text{Mg}$   
T. Kawabata  
Invited Talk at International EFES-IN2P3 conference on Many body correlations from dilute to dense nuclear systems (MBC2011), Feb. 15—18, 2011, Insitute Henri Poincare, Paris, France.
2. Alpha Inelastic Scattering and Cluster Structures in Neutron-Rich Nuclei  
T. Kawabata  
Oral Presentation at SAMURAI Workshop –Towards first experiments–, Nov. 22—23, 2010, RIKEN, Wako, Saitama, Japan
3. Alpha Inelastic Scattering and Cluster Structures in  $^{24}\text{Mg}$   
T. Kawabata  
Oral Presentation at International Symposium on New Faces of Atomic Nuclei, Okinawa Institute of Science and Technology, Nov. 15—17, 2010, Onna, Okinawa, Japan.
4. Alpha Inelastic Scattering and  $\alpha$  Condensed State  
T. Kawabata  
Oral Presentation at Workshop on Clustering and Nucleon Correlations, Sep. 30—Oct. 1, 2010, Sapporo, Hokkaido, Japan.
5. Search for Cluster State by Isoscalar Inelastic

- |   |  |
|---|--|
| <p>Scattering<br/> <u>T. Kawabata</u><br/>         Oral Presentation at the RCNP Workshop on Physics in Heavy Ion Accumulator Ring, Sep. 24—25, 2010, RCNP, Osaka, Japan.</p> <p>6. Nuclear Reaction and Hoyle State<br/> <u>T. Kawabata</u><br/>         Oral Presentation at the RCNP Workshop on Nuclear Reaction, Aug. 2—4, 2010, RCNP, Osaka, Japan.</p> <p>7. Alpha Inelastic Scattering and Cluster Structures in <math>^{13}\text{C}</math> and <math>^{24}\text{Mg}</math><br/> <u>T. Kawabata</u><br/>         Invited Talk at the 2nd Workshop on State of the Art in Nuclear Cluster Physics (SOTANCP2), May. 25—28, 2010, Brussels, Belgium.</p> <p>8. Alpha inelastic scattering and cluster structures in light stable and unstable nuclei<br/> <u>T. Kawabata</u><br/>         Oral Presentation at the 4th LACM EFES JUSTIPEN Workshop, March 15--17, 2010, Oak Ridge, Tennessee, USA.</p> <p>9. Alpha inelastic scattering and cluster structures in light nuclei<br/> <u>T. Kawabata</u><br/>         Invited Talk at the 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, Nov. 9--13, 2009, Tsukuba, Ibaraki, Japan.</p> <p>10. Alpha inelastic scattering and cluster structures in light stable and unstable nuclei<br/> <u>T. Kawabata</u><br/>         Invited Talk at Workshop on Nuclear Physics with New-Generation Fast Rare Isotope Beams, Oct. 13, 2009, Waikoloa, Hawaii, USA.</p> <p>11. Alpha inelastic scattering and cluster structures in light nuclei<br/> <u>T. Kawabata</u><br/>         Oral Presentation at the 12th International Conference on Nuclear Reaction Mechanism, June 15--19, 2009, Villa Monastero, Varenna, Italy.</p> <p>12. Alpha inelastic scattering and cluster structures in light nuclei<br/> <u>T. Kawabata</u><br/>         Invited Talk at the 3rd International Conference on "Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions (COMEX3)", June 2--5, 2009, Mackinac Island, Michigan, USA.</p> | <p>〔図書〕（計 0 件）</p> <p>〔産業財産権〕<br/>         ○出願状況（計 0 件）</p> <p>○取得状況（計 0 件）</p> <p>〔その他〕<br/>         ホームページ等<br/>         なし</p> <p>6. 研究組織<br/>         (1) 研究代表者<br/>         川畑 貴裕 (KAWABATA TAKAHIRO)<br/>         京都大学・大学院理学研究科・准教授<br/>         研究者番号： 80359645</p> <p>(2) 研究分担者<br/>         なし</p> <p>(3) 連携研究者<br/>         なし</p> |
|---|--|