

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 9 月 1 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400284

研究課題名(和文) 散乱半径法を用いたクラスター状態の半径異常増大現象の実証的解明

研究課題名(英文) Studies of nuclear radius in cluster states by method of scattering radius

研究代表者

伊藤 誠 (Ito, Makoto)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：30396600

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：軽い核の励起状態には、粒子をサブユニットとしたクラスター状態が発現する。その典型例は $^{12}\text{C}$ の「 $3\alpha$ クラスター状態」である。 $3\alpha$ 状態の核半径は、基底状態よりも顕著に増大すると考えられているが、その寿命は約 $10^{-10}$ 秒～ $10^{-11}$ 秒であるため、核半径の実験的測定は絶望的であった。

本研究では、核反応の空間サイズを特徴づける「散乱半径法」の定式化と $^{12}\text{C}$ への非弾性散乱へ適用を行い、終状態に生成される $3\alpha$ 状態の核半径の評価を行った。散乱半径は終状態が生成される空間半径を表すものであり、終状態の核半径を反映する。本研究により、 $3\alpha$ 状態の核半径は基底状態よりも約1fm程度増大していることを実証した。

研究成果の概要(英文)：In light nuclear systems, it is well known that alpha cluster structures appear in excited states. One of characteristic properties in the alpha cluster structures is a prominent extension of the matter radius. Typical example is the  $3\alpha$  structure in  $^{12}\text{C}$ . The matter radii of the  $3\alpha$  state is expected to be prominently enhanced in comparison to the matter radius of the ground state but the direct measurement of the  $3\alpha$  radius is completely impossible because of its short life time.

In this study, we have formulated a method of scattering radius, which characterizes a spatial size for final state productions in nuclear reactions. The scattering radius is sensitive to the matter radius of the final state produced by the nuclear reaction. We have applied this method to the alpha +  $^{12}\text{C}$  inelastic scattering, which goes to the  $3\alpha$  state in  $^{12}\text{C}$ . We have confirmed that the matter radius of the  $3\alpha$  state is enhanced by about 1 fm in comparison to the ground  $^{12}\text{C}$  nucleus.

研究分野：理論核物理

キーワード：核半径 クラスター構造 核反応 チャンネル結合法

1. 研究開始当初の背景

(1) これまでの核半径研究

原子核は陽子、中性子と呼ばれる「核子」が複数自己束縛した有限量子多体系である。天然に存在する原子核は、陽子と中性子がほぼ同数結合しており、通常はエネルギー的に最低の「基底状態」にある。基底状態にある原子核には「密度の飽和性」が存在し、その密度半径(核半径)はおおよそ質量数の3分の1乗に比例することが既に知られている。

一方、20世紀後半から「不安定核」と呼ばれる短寿命核の研究が進展してきており、そこではいわゆる飽和性を破った核半径の異常増大現象が報告されてきている。不安定核の核半径研究は現在も世界的に精力的に進展しているが、それらは全て崩壊寿命がミリ秒(～10<sup>-3</sup>秒)程度のものに限られていた。

(2) クラスタ構造と核半径

原子核系に全束縛エネルギーの数%程度の励起エネルギーを与えることにより、一塊の原子核が複数のサブユニットに解離し、それらが弱く結合した「クラスタ状態」が発現する。特に粒子(<sup>4</sup>He原子核)は非常に硬く不活性であるため、粒子をサブユニットとした「クラスタ構造」が軽い原子核に系統的に発現することが明らかになっている。最も有名なクラスタ構造は<sup>12</sup>Cにおける3構造、<sup>16</sup>O= +<sup>12</sup>C、<sup>20</sup>Ne= +<sup>16</sup>O等であり、最近は多重粒子に解離した<sup>16</sup>O=4、<sup>20</sup>Ne=5等の研究が進展している。

クラスタ構造の一つの特徴は、その半径の異常な増大にある。クラスタ状態にあるサブユニットは非常に緩く結合しているため、それらの相対運動の波動関数はトンネル効果により遠方にまで広がる。その結果、核半径は基底状態のそれを大きく超えて増大する。これまでの理論研究によれば、クラスタ状態の半径は基底状態の1.5～2倍程度に増大することが予想されている。しかしながら、クラスタ状態の寿命は10<sup>-10</sup>～10<sup>-20</sup>秒であるため、その核半径の実験的測定はほぼ絶望的な状況であった。

(3) 核反応によるクラスタ核半径研究

クラスタ状態の核半径の直接測定は不可能であるが、クラスタ状態を終状態として励起する核反応、例えば<sup>12</sup>Cを例にとると、陽子(p)を衝突させ、<sup>12</sup>Cを3状態へ励起させる非弾性散乱、p+<sup>12</sup>C → p+3の反応断面積の散乱角度分布から3状態の半径増大を実証しようとする試みがなされてきている。

実際、散乱陽子の角度分布の振る舞いが、3状態の半径増大を反映していると指摘している研究がいくつか存在しているが、断面積と3半径の対応関係は明白ではなく、3状態の半径増大を裏付けるには至っていない状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、クラスタ状態が励起される非弾性散乱に対して、申請者が考案した「散乱半径法」を適用し、クラスタ状態の半径増大現象を非弾性散乱の断面積と密接に関係づけて実証することが目的である。この散乱半径法では、まず二体散乱系(図1)について軌道角運動量Lで部分波分解されたシュレディンガー方程式を解いて、各部分波の断面積(L)を計算する。次に(L)を重みとして入射粒子の軌道角運動量の平均値L<sub>AV</sub>を算出し、図2に示した衝突係数R<sub>SC</sub>とL<sub>AV</sub>の関係、L<sub>AV</sub>=k・R<sub>SC</sub>の関係に従って散乱半径R<sub>SC</sub>を導出する(ここでkは入射粒子の波数を示す)。

この散乱半径法をクラスタ構造が既に確立された<sup>12</sup>C=3系の非弾性散乱に適用し、クラスタ状態を励起する反応チャンネルの散乱半径を定量的に評価する。また同時に通常の集団運動状態である、回転・振動励起の反応チャンネルについても散乱半径を計算し、両者の比較を通して、クラスタ励起に伴う散乱半径の増大を明らかにする。

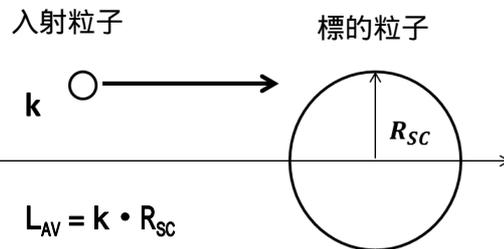


図1：散乱半径 R<sub>sc</sub> の模式図

また近年、天然の原子核に中性子が過剰に束縛した「中性子過剰核」の研究が精力的に進められているが、クラスタ状態に余剰中性子を付与した場合、中性子の一粒子運動とクラスタの相対運動の結合により、様々な「化学結合的構造」が発現することが明らかになってきている。とりわけ主に2をコアとして持つBe同位体において研究が進展してきており、様々な化学結合構造の変化、またそれに伴う半径の増大現象が理論的に予想されている。そこで同様の散乱半径法による分析を中性子過剰核の反応にも適用し、半径増大現象をより系統的に実証することが本研究の主たる目的である。

3. 研究の方法

本研究の遂行にあたっては、「微視的チャンネル結合法」と呼ばれる精密な核反応断面積計算が基盤となる。この微視的チャンネル結合計算には、以下の4つの主要プロセスが存在する：(1) クラスタ励起する標的原子核の内部波動関数の構造計算、

(2) 内部波動関数から反応系の二体相互作用を構築、(3) 構築された二体相互作用を入力とし反応計算、(4) 反応断面積の実験との比較、散乱半径の評価。主に クラスター状態が発現する典型的な核である  $^{12}\text{C}$  について上記の計算・分析を進めてきた。

#### (1) 内部波動関数の準備

$^{12}\text{C}$  は微視的 3 クラスター模型によって得られた精密な内部波動関数が既に存在しており、クラスター状態のみならず基底状態、回転・振動状態の性質をも同時に記述することに成功している。しかもこの内部波動関数は反応計算に適した形で整備されている。

更に中性子過剰核の分析を進めるべく、 $^{10}\text{Be}$  系の内部波動関数の計算を行う。 $^{10}\text{Be}$  は 2 つの 粒子をコアとしてその周囲で余剰 2 核子が化学結合をつくる描像が良く成立している。そこで、様々な化学結合構造を記述可能な「一般化二中心クラスター模型」を適用し、これらの内部波動関数の計算を進める。この一般化二中心クラスター模型は申請者が独自に開発を進めた模型であり、これまで主に Be 同位体の構造転移を系統的に再現することに成功を収めている。この模型を用いて、 $^{10}\text{Be}=2 + 2\text{N}$  の内部波動関数を準備する。

#### (2) 二体相互作用の構築

準備した標的核の内部波動関数を用いて、衝突核 - 標的核の二体相互作用を構築する。衝突粒子としては陽子(p)、 $\alpha$  粒子、 $^{16}\text{O}$  を想定し、 $p + ^{12}\text{C}$ 、 $\alpha + ^{12}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  といった反応系の相互作用を構築する。ここで二体相互作用は有効核子間力を内部波動関数で畳み込むことにより計算される。この手法は「微視的畳み込み模型」と呼ばれる手法であり、反応する原子核間の相互作用を核子レベルの相互作用から微視的に構築するものである。

#### (3) 微視的な反応計算

次に微視的畳み込み模型により構築された二体相互作用を入力として、二体反応の多段階遷移を記述するチャンネル結合方程式を正確に解き、 $^{12}\text{C}$  が種々の励起状態へ励起する非弾性散乱の反応断面積を計算する。また、計算された反応断面積と実験データの比較を行い、実験データを再現する最適な相互作用パラメータを探索する。

#### (4) 部分波分析と散乱半径の評価

理論計算が実験データを再現することを確認した後、反応断面積を部分波分解し、散乱半径を評価する。特に、3 回転状態と通常の回転状態を生成する反応に注目し、それらの比較分析を行う。

これら一連の分析を  $p + ^{12}\text{C}$ 、 $\alpha + ^{12}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$  系に適用し、3 半径増大をプローブする最適な実験条件についても系統的に議論する。

#### 4. 研究成果

これまで、主に  $\alpha + ^{12}\text{C}$  非弾性散乱に注目した分析を進めてきた。具体的には、反応の終状態として  $^{12}\text{C}$  が基底状態のまま回転励起する「基底回転状態」と 3 構造を保ちながら回転運動する「3 回転状態」の二つの励起状態に注目し、それらを生成する反応断面積の分析を進めてきた。

図 2 には  $\alpha + ^{12}\text{C}$  系の反応断面積の角度分布が示されている。実線は終状態に 3 回転状態を励起する散乱、点線は基底回転状態を生成する散乱である。実線は点線に比べて広がりが狭く、また前方シフトしている。終状態として生成される 2 種類の回転状態は核半径が顕著に異なるため、その違いが角度分布の広がりやに反映されていると考えられる。

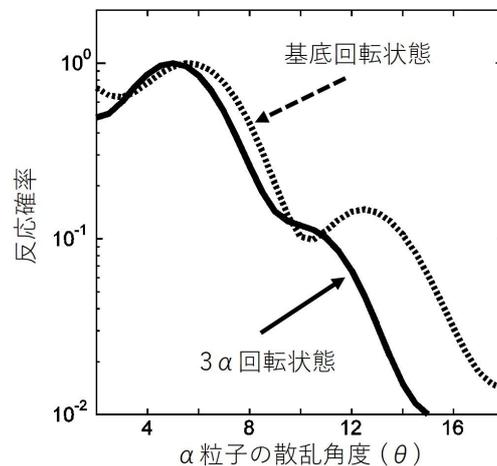


図2:  $\alpha + ^{12}\text{C}$  衝突における 粒子の放出角度分布。点線が  $^{12}\text{C}$  の基底回転状態を生成する分布、実線は 3 回転状態生成の分布を表す。

次に、図 2 に示した角度分布を衝突 粒子の軌道角運動量  $L$  で部分波分解し、その分布関数の比較を行った。その結果が図 3 に示されている。白丸-点線は基底回転状態、黒丸-実線は 3 回転状態の反応断面積の部分波分解の結果である。3 回転のピーク位置は基底回転のそれに比べて高い角運動量側にシフトしており、また分布の広がりがも増大していることが理解できる。図 1 に示した単純な古典的關係、 $L=kR_{\text{SC}}$  に基づけば、このシフトは 3 回転状態を生成する散乱半径( $R_{\text{SC}}$ )は、基底回転状態のそれよりも広がっていることを意味している。

図 2 に示した散乱角度についての分布(分布)では、3 回転状態(実線)の分布が狭くなっており、一方、図 3 に示した軌道角運動量に関する分布( $L$  分布)ではその逆の關係が確認できる。これは散乱角度( $\theta$ )と角運動量( $L$ )の間の不確定性關係  $L \sim \hbar / \sin \theta$  によるものである。

基底回転状態、3 回転状態を生成する反応の違いは終状態の核半径のみであるため、3 回転状態を生成する反応確率の空間(図2)での狭い(L 空間(図3)での広い)分布は、3 状態の核半径増大に起因している。この半径増大を定量的に評価するため、L 空間での強度分布(図3)に散乱半径法を適用し、その生成半径(散乱半径)を評価すると、3 状態の核半径は基底状態よりも 1fm 以上増大していることが明らかになった。

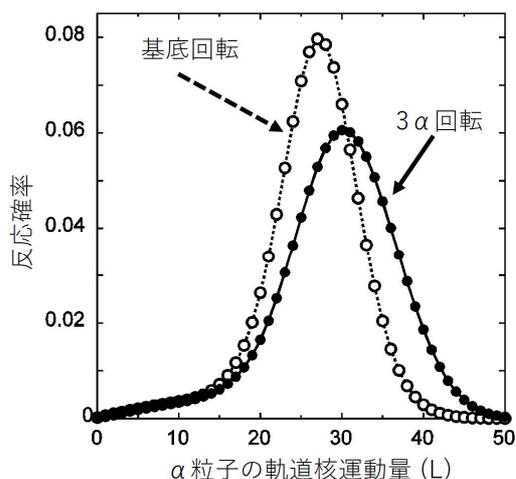


図 3:  $+^{12}\text{C}$  反応確率の軌道角運動量分布。点線が基底回転状態、実線が 3 回転状態の分布を表す。

更に、同様な計算を陽子衝突( $p+^{12}\text{C}$ )、酸素衝突( $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$ )に対しても行い、 $+^{12}\text{C}$  系と比較したところ、3 回転状態の半径増大をプループするには  $+^{12}\text{C}$  が最適であることが判明した。

これらの成果は、短寿命な 3 回転状態の核半径の下限値を定量的に評価した世界初の研究成果である。申請者は 2016 年 6 月にイタリアで開催されたクラスター国際会議、9 月にオーストラリアで開催された INPC2016、更に国内で開催された 2 回の日本物理学会において口頭発表しており、既に一定の評価を得ている。更に成果をまとめた論文を *Physical Review* に現在投稿中である。

本研究の遂行により、クラスター状態の核半径増大を実験的にプループする手法、核半径の下限値を評価する分析手法が確立された。ここでの提唱された「散乱半径法」の分析は非常に単純で、基底回転状態と回転状態の散乱角度分布と軌道角運動量分布の比較を行うものである。原子核の基底状態、クラスター状態はともに回転状態を常に伴うため、この分析手法は、一般のクラスター生成反応に適用可能である。従って、散乱半径法を幅広く適用することにより「超短寿命 クラスター状態の核半径研究」という新たな研究領域を開拓できると期待できる。現在、 $^{10}\text{Be}=\alpha+2\text{N}$  系の分析を開始している。

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 25 件)

Makoto Ito, 「**Evidence of enhanced radius of Hoyle rotational state in  $^{12}\text{C}$  inelastic scattering**」, *Journal of Physics of Conference Series*, 査読有, 印刷中 (2017).

Makoto Ito, 「**Sign of Enhanced Three a Matter radius in  $+^{12}\text{C}$** 」, *Proceedings of Science*, 査読有, 印刷中 (2017).

R. Otani, M. Iwasaki, M. Ito, 「**Microscopic Coupled-channels Studies of a cluster structures in  $^{19}\text{Ne}$** 」, *Proceedings of Science*, 査読有, 印刷中 (2017).

M. Tomita, M. Iwasaki, R. Otani, K. Horio, M. Ito, 「**Analysis of proton +  $^{12}\text{C}$  scattering by microscopic coupled channels calculations**」, *Physical Review C*, 査読有, 89, 024609 (1-10)(2015). DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.92.024609>

M. Iwasaki, R. Otani, Y. Takenaka, M. Ito, 「**Extended completeness relation and the strength function in the absorbing boundary condition**」, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 査読有, 2015, 023D01 (1-22) (2015). DOI:<http://dx.doi.org/10.1093/ptep/ptu179>

R. Otani, R. Kageyama, M. Iwasaki, M. Kudo, M. Tomita, M. Ito 「 **$\alpha + ^{15}\text{O}$  cluster structure in  $^{19}\text{Ne}$  and**

resonant  $\alpha$  scattering」, Physical Review C, 査読有, 90, 034316 (1-6) (2014). DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.90.034316>

M. Ito, K. Ikeda

「Unified studies of chemical bonding structures and resonant scattering in light neutron-excess systems,  $^{10,12}\text{Be}$ 」, Reports of Progress in Physics, 査読有, 77, 096301 (1-46) (2014). (Invited Review Article) DOI:<http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/77/9/096301>

Y. Takenaka, R. Otani, M. Iwasaki, K. Mimura, M. Ito, 「Gaussian expansion methods under the absorbing boundary condition」, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 2014, 113D04 (1-22) (2014). DOI:<http://dx.doi.org/10.1093/ptep/ptu135>

M. Tomita, M. Iwasaki, R. Otani, M. Ito, 「Measure of the spatial size for the monopole excitation in proton scattering」, Physical Review C, 査読有, 89, 034619 (1-13) (2014). DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.89.034619>

〔学会発表〕(計 61 件)

伊藤誠

「アルファクラスター構造と非弾性散乱」日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学豊中キャンパス (大阪府)、2017 年 3 月 17 ~ 20 日

梅原基、中尾慎人、園田翔太、江幡修一郎、伊藤誠、「folding model による 弾性散乱の研究」日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学豊中キャンパス(大阪府)、2017 年 3 月 17 ~ 20 日

中尾慎人、梅原基、園田翔太、伊藤誠、江幡修一郎、「 $^{18}\text{O}$ - $^{18}\text{Ne}$  系における クラスター構造の研究」日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学豊中キャンパス(大阪府)、2017 年 3 月 17 ~ 20 日

M. Nakao, H. Umehara, S. Sonoda, S. Ebata, M. Ito  
「Cluster structure and Coulomb shift in two-center mirror systems」International Conference on Heavy-Ion Collision at Near-Barrier Energies (FUSION17), Tasmania, Hobart, Australia, 20-24 February 2017.

伊藤誠、「低エネルギー核反応とクラスター構造の統一研究」大阪市大研究会「クラスター・平均場の両側面から見る原子核構造の多様性とそのダイナミクス」, 大阪市立大学学術情報総合センター(大阪府)、2017 年 1 月 19, 20 日

中尾慎人、梅原基、園田翔太、伊藤誠、江幡修一郎、「 $^{14}\text{C}$  弾性散乱と  $^{18}\text{O}$  の クラスター構造の研究」大阪市大研究会「クラスター・平均場の両側面から見る原子核構造の多様性とそのダイナミクス」, 大阪市立大学学術情報総合センター(大阪府)、2017 年 1 月 19, 20 日

M. Nakao, H. Umehara, S. Sonoda, S. Ebata, M. Ito  
「elastic scattering and Coulomb shift in  $^{18}\text{O}$  and  $^{18}\text{Ne}$ 」International Workshop on "Nuclear

Cluster Physics (WNCP2016)", KGU  
Kannai Media center, Kanagawa, Japan,  
14-17 November 2016.

M. Ito, M. Iwasaki, R. Otani, M.  
Tomita

「Nuclear radius of  $3\alpha$  cluster states and  
inelastic scattering」

International Workshop on "Nuclear  
Cluster Physics (WNCP2016)", KGU  
Kannai Media center, Kanagawa, Japan,  
14-17 November 2016.

M. Ito, M. Iwasaki, R. Otani, M.  
Tomita

「Sign Of Enhanced Three Alpha Matter  
Radius In Alpha +  $^{12}\text{C}$  Inelastic  
Scattering」

The 26th International Nuclear Physics  
Conference (INPC17), Adelaide  
Convention Centre, Adelaide, Australia,  
11-16 September 2016.

R. Otani, M. Iwasaki, M. Ito

「Microscopic Coupled-channels Studies  
of a cluster structures in  $^{19}\text{Ne}$ 」

The 26th International Nuclear Physics  
Conference (INPC17),  
Adelaide Convention Centre, Adelaide,  
Australia, 11-16 September 2016.

M. Ito, M. Iwasaki, R. Otani, M.  
Tomita

「Spatial size of inelastic scattering and  
radii of excited state」

International Mini-Workshop on Nuclear  
Clustering (MWNC2016), Accelerator  
Building, Peking University, Beijing,  
China, 2-3 July 2016.

M. Ito, R. Otani, M. Iwasaki, M.  
Tomita, 「Sign of enhanced radius of

Hoyle rotational state in  $\alpha + ^{12}\text{C}$  inelastic  
scattering」

The 11th International Conference on  
"Clustering Aspects of Nuclear Structure  
and Dynamics (Cluster16)", Complesso  
dei Ss. Marcellino e Festo Conference  
Center of the University of  
Napoli Federico II, Italy, 23-27 May  
2016.

R. Otani, M. Iwasaki, M. Ito,

「Cluster structures in unbound states  
of  $^{19}\text{Ne}$ 」, 3rd International Workshop  
"Nuclear Physics and Astrophysics  
(IWA3)", al-Farabi Kazakh National  
University, Almaty, Kazakhstan, 14-16  
April 2016.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

伊藤誠 (Ito, Makoto)

関西大学 システム理工学部 教授

研究者番号 : 30396600

##### (4) 研究協力者

上村 正康 (Kamimura, Masayasu)

江幡 修一郎 (Ebata, Syuuichiro)

富田 昌志 (Tomita, Masashi)

岩崎 正昂 (Iwasaki, Masataka)

大谷 嶺詩 (Otani, Reiji)

景山 理都 (Kageyama, Rito)

工藤 幹久 (Kudo, Mikihiisa)

竹中 直人 (Takenaka, Naoto)

三村 晃太郎 (Mimura, Koutaro)

堀尾 啓太 (Horio, Keita)

梅原 基 (Umehara, Hajime)

園田 翔太 (Sonoda, Shota)

中尾 慎人 (Nakao, Makoto)