

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18740129
 研究課題名（和文） 軽い中性子過剰核の分子的構造と核反応機構の統一的研究
 研究課題名（英文） Unified studies of molecular structures and reaction mechanism
 In light neutron-excess systems
 研究代表者 伊藤 誠 (ITO MAKOTO)
 独立行政法人理化学研究所・中務原子核理論研究室・基礎科学特別研究員
 研究者番号：30396600

研究成果の概要：

近年の加速器施設の発展により、「不安定核」と呼ばれる天然には存在しない元素を人工的に合成することが可能となった。通常不安定核は最低エネルギー状態、つまり温度が完全に冷え切った状態として存在する。本研究では、不安定核であるBe同位体に注目し、その超高温状態における内部構造と反応機構に関する理論的分析を進めた。その結果、この同位体では、2つの⁴He原子核を芯として、それらの間で中性子がボンドになる「化学結合様構造」が形成されることが明らかになった。今回の分析では、これまでの予想をはるかに越えた多様な化学結合状態が得られ、更にそれらが⁴He+⁸He→⁶He+⁶He反応で強く形成されることを予言した。この理論計算の後、反応確率の測定がフランスGANIL研究所で実際に行われている。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 18 年度	1,000,000	0	1,000,000
平成 19 年度	800,000	0	800,000
平成 20 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	270,000	2,970,000

研究分野：数物系科学

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：原子核(理論)、クラスター構造、化学結合、共鳴反応、非断熱遷移

1. 研究開始当初の背景

1999年のPhysical Review Letter誌に掲載された衝撃的な論文により、中性子過剰核研究の新たな展開が始まっていた。それは、中性子過剰核¹²Beにおいて、励起エネルギーが10～25MeVという高励起領域に⁶He+⁶He、 α +⁸He(α は α 粒子)へ強く崩壊する共鳴状態が確認されたというものである。その後の実験によって、他のBe同位体においても、同様な共鳴状態が観測されており、⁶Heや⁸He

を構成単位とする、『Heクラスター構造』がBe同位体の高励起状態に系統的に存在するのではないかと期待されている。

近年、中性子過剰核の研究は世界的規模で精力的に進められてきているが、その多くは低励起状態に関する内容が主であった。とりわけ質量数が30程度までの軽い中性子過剰核においては、コアとなる原子核が複数に解離し、過剰中性子がそれらの周りに広がる『分子軌道構造』に着目した研究が進められ

ている。しかしながら、分子軌道状態よりも高い励起状態における中性子過剰核の存在形態、及びそれらの核反応過程における励起のメカニズムについては、まだ本格的な理論研究がなされておらず、その理論的な解明は、原子核物理学上の大きな課題の一つであった。

2. 研究の目的

実験で存在が示唆されているこうした He クラスター状態は、分子軌道状態とは対照的な『原子軌道状態』に対応しており、こうした一つの系での大きな構造変化について、核構造サイドと核反応サイドの両方からのアプローチを持って、統一的な研究を行うことは非常に重要な課題である。

これまでの国内における理論研究では、『反対称化分子動力学』や『分子軌道法』に基づいた『核構造サイド』からの研究がなされており、低励起領域の『分子軌道構造』を記述するのに大きな成功を収めている。しかしながら、高励起状態に関して、崩壊幅、反応機構にまで踏み込んだ『核反応サイド』からの研究は全くなされていない。

一方、海外の理論研究では、 ${}^6\text{He}$ 、 ${}^8\text{He}$ の安定な原子軌道状態を仮定し、それらの間の核反応を取り扱うという『核反応サイド』からの分析はなされているが、そうしたアプローチでは逆に『核構造サイド』から示唆される低励起状態の記述は不十分であった。

本研究は、分子軌道と He クラスターの両方を包括した『一般化二中心クラスター模型』を駆使し、Be 同位体を中心とした軽い中性子過剰核の分子軌道構造から原子軌道構造への構造転移と、それらが核反応過程において励起される反応機構を統一的に明らかにしようとするものである。

3. 研究の方法

本研究で用いる『一般化二中心クラスター模型』は、『(2つのコア核)+(過剰中性子)系』を系統的に取り扱うことが可能であり、研究開始時点で ${}^{10}\text{Be} = \alpha + \alpha + \text{N} + \text{N}$ 系に適用され、その有効性がある程度示されている。

この模型では、まず2つの不活性なコア核に対して、過剰中性子を各コア周りでの一粒子軌道に配置した原子軌道状態を考える。次に、それらについて全核子間の反対称化とパリティ、角運動量射影を正確に行ったものを多体系の基底関数とし、2核子間力からなる微視的な多体ハミルトニアン固有値問題を解く。この模型は、コア核同士が接近した場合には、過剰中性子が2つのコア全体に広がった分子軌道状態を生成し、またそれらが離れた漸近領域では、過剰中性子が各々のコア核の周りに局在化した2つの孤立系の原子核の直積状態へ自然に移行してゆく模型で

ある。

ここで、漸近領域の直積状態とは、各々の原子核が孤立系のスピン・パリティを持ち、それらが互いに相対角運動量で結合した『弱結合状態』を正確に表しており、また一方、分子軌道状態は、2つの原子核が個性を失って、非常に強い相関を持ちながら結合している、いわゆる『強結合状態』に対応している。この『一般化二中心クラスター模型』により、初めて弱結合状態と強結合状態を同時に首尾一貫して取り扱うことが可能となった。

また漸近領域の『弱結合状態』は、核反応におけるチャンネル波動関数に正確に一致するため、吸収境界条件の基底ハミルトニアンに対角化を行えば、共鳴状態の崩壊エネルギーと崩壊幅の計算が可能であり、また反応の入射チャンネルと放出チャンネルを指定し、核反応の境界条件を課せば、衝突等の反応断面積の計算も可能である。従って、本研究では、共鳴状態に対し『核構造と反応の両サイド』からの統一的な分析を行うことが可能であり、この点はこれまでの核構造研究にはない、特筆すべき特徴である。

この模型を用いて、Be 同位体の中性子過剰核の基底状態及び励起状態のエネルギー、崩壊幅を計算し、また励起エネルギーやスピンの変化に伴った『分子軌道構造』から『原子軌道構造』への構造転移を分析した。同時に、反応断面積の計算を行うことにより、共鳴状態の持つ内部構造と、それらが核反応過程を通じて共鳴現象として観測される機構について、最新の実験データとの比較、または理論的予測を行った。

4. 研究成果

これらの手法をまず ${}^{10}\text{Be}$ へ適用した。 ${}^{10}\text{Be}$ はこれまで様々な理論計算がなされており、今回の計算と既存の計算結果と整合性を確認する上で重要な研究対象である。計算の結果、低励起状態では、2つの α 粒子の周りで過剰中性子が π^- 、 σ^+ 等の共有結合軌道を占有する分子軌道状態が安定となることが確認され、既存の理論計算、また実験結果を定性的に再現することが確認された。

更に、非束縛領域では、共有結合状態と $\alpha+{}^6\text{He}$ 状態が混在することが明らかになり、また $\alpha+{}^6\text{He}$ の非弾性散乱において、Landau-Zener (L-Z) 遷移が強く起こる可能性を指摘した。原子核系でのL-Z遷移は、安定核系において古くより議論されていたが、未だその観測の確証は得られていない。従ってこの成果は、中性子過剰な原子核系でのL-Z遷移の観測可能性を新たに指摘するものである。

開発した一連の手法により、共有1原子間の構造転移と反応機構にまたがる統一研究が世界で初めて可能になり、その実質的な適

用例として $^{12}\text{Be} = \alpha + \alpha + 4\text{N}$ 系の計算を進めた。その結果、高励起領域では、 $\alpha + ^8\text{He}$ 、 $^5\text{He} + ^7\text{He}$ 、 $^6\text{He} + ^6\text{He}$ といった原子的な状態に加え、原子価結合と共有結合の中間的な構造を持つ全く新しい超変形状態が発現し、それらが同じ励起エネルギー領域に共存することが明らかになった。更に $\alpha + ^8\text{He} \rightarrow ^6\text{He} + ^6\text{He}$ 反応の断面積計算を行い、GANIL研究所(仏)で計画されている散乱実験に対する理論的予測も行っている。

なお、これらの成果の一部は、アメリカ物理学会(APS)が刊行するWEB広報誌『Physical Review Focus』に掲載され、APS Journalのトップページで広報された。Focus誌は、APSが刊行する物理学全分野への広報誌であり、純粋な低エネルギー核理論研究の成果としては、Focusへの掲載はこれまでに例が無い。従ってこの掲載は、核理論分野のみならず、物理学全分野を横断する成果として非常に大きな意義をもつものである。

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 13 件)

(1) 査読付原著論文

- ① M. Ito and N. Itagaki, “**Covalent isomeric state in ^{12}Be induced by two-neutron transfers**”, Physical Review C 78 (2008), 011602(R) (1-5).
- ② N. Itagaki, M. Ito, M. Milin, T. Hashimoto, H. Ishiyama, H. Miyatake, “**Coexistence of $\alpha + \alpha + n + n$ and $\alpha + t + t$ cluster structures in ^{10}Be** ”, Physical Review C 67 (2008), 067301 (1-4).
- ③ M. Ito, N. Itagaki, H. Sakurai, K. Ikeda, “**Coexistence of covalent superdeformation and molecular resonances in an unbound region of ^{12}Be** ”, Physical Review Letters 100 (2008), 182502 (1-4).
- ④ M. Ito, “**Non-adiabatic dynamics in ^{10}Be with the microscopic $\alpha + \alpha + \text{N} + \text{N}$ model**”, Phys. Lett. B636 (2006) p. p. 293-298.

(2) 国際会議抄録

- ① M. Ito, “**Degenerating clusters in an unbound region of ^{12}Be** ”, Journal of Modern Physics A (2009), in press (Proceeding of the KGU Autumn School of Nuclear Physics”, 9-10 October, 2008, KGU Kannai Media Center, Kanto Gakuin University (KGU), Yokohama (Japan)).

- ② M. Ito, N. Itagaki, “**Unified studies of the exotic structures in ^{12}Be and the $\alpha + ^8\text{He}$ slow scattering**”, AIP Conference Proceeding (2009), in press (Proceeding of the International Conference on New Aspects of Heavy Ion Collisions near the Coulomb Barrier (FUSION08)”, 22-26 September, 2008, Chicago History Museum, Chicago (USA)).
- ③ M. Ito, N. Itagaki, “**Covalent, Ionic, and Atomic Structures in ^{12}Be** ”, Mod. Phys. Lett. A (2008), in press (Proceeding of the Fourth Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics 2008 (APFB08), 19-23 August, 2008, Universitas Indonesia, Depok (Indonesia)).
- ④ M. Ito, N. Itagaki, “**Unified studies of nuclear reactions and exotic structures in ^{12}Be** ”, Jour. of Mod. Phys. E Vol.12, No.10, 2061 (2008) (Proceeding of the State of Art in Nuclear Cluster Physics (SOTANC08), 13-16 May, 2008, Institut Interdisciplinaire Hubert Curien Department de Recherches Subatomiques (France)).
- ⑤ M. Ito, N. Itagaki, H. Sakurai, K. Ikeda, “**Exotic molecular states in the highly-excited states of $^{10,12}\text{Be}$** ”, Jour. of Phys. : Conf. Ser. 111 (2008) 012010 (Proceeding of the 9th International conference on Clustering Aspects of Nuclear structure and Dynamics (Cluster07)”, 3-7 September, 2007, Stratford Upon Avon, Birmingham (United Kingdom)).
- ⑥ M. Ito, N. Itagaki, “ **$\alpha + ^6, ^8\text{He}$ resonant scattering and exotic structures in $^{10,12}\text{Be}$** ”, AIP Conference Proceeding 1016 (2008), p. p.199-204 (Proceeding of the 10th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG07)”, 4 - 7 December, 2007, Sapporo, Hokkaido (Japan)).
- ⑦ M. Ito “**Non-adiabatic dynamics in the $\alpha + \alpha + \text{N} + \text{N}$ system**”, Mod. Phys. Lett. A21 (2006) p. p. 2429-2438 (Proceeding of the Osaka Spring Workshop on Cluster Condensation and Nucleon).
- ⑧ M. Ito “**Coexistence of the molecular and atomic orbitals in ^{10}Be** ”, Jour. of Phys. : Conf. Ser. Vol.49 (2006) p. p. 206-207 (Proceeding of the International Symposium on Structure

of Exotic Nuclei and Nuclear Forces (Senuf06)”, 9–12 March, Koshiba-Hall, Hongo, Tokyo University (Japan)).

- ⑨ M. Ito “**Unified studies of the structure changes and the nuclear reactions in ^{10}Be** ”, AIP Conference Proceeding 853 (2006) p.p.396–401 (Proceeding of the International Conference on Reaction Mechanisms and Nuclear Structure at the Coulomb Barrier (Fusion06)”, 19 - 23 March, 2006, San Servolo, Venezia (Italy)).

[学会発表] (計 37 件)

(1) 国際会議

- ① M. Ito, “**Unified studies of structures and reactions in light neutron excess systems**”, First EMMI-EPES Workshop on Neutron-Rich Nuclei (EENEN09), 9-11 February, 2008, GSI Darmstadt (Germany).
- ② M. Ito, “**Exotic structures in ^{12}Be and the $\alpha+^8\text{He}$ resonant scattering**”, The International workshop on Unbound Nuclei”, 3-5 November, 2008, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa, Pisa (Italy).
- ③ M. Ito, “**Unified description of structures and reactions based on microscopic models**”, The YIPQS international molecule workshop on Alpha- and Dineutron-Correlation in Nuclear Many-Body Systems”, 6-24 October, 2008, Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), Kyoto University, Kyoto (Japan).
- ④ M. Ito, N. Itagaki “**Formation of the loose clusters in an unbound region of ^{12}Be** ”, The KGU Autumn School of Nuclear Physics”, 9-10 October, 2008, KGU Kannai Media Center, Kanto Gakuin University (KGU), Yokohama (Japan).
- ⑤ M. Ito, N. Itagaki, “**Unified studies of the exotic structures in ^{12}Be and the $\alpha+^8\text{He}$ slow scattering**”, The International Conference on New Aspects of Heavy Ion Collisions near the Coulomb Barrier (FUSION08)”, 22-26 September, 2008, Chicago History Museum, Chicago (USA).
- ⑥ M. Ito, N. Itagaki, “**Covalent, Ionic, and Atomic Structures in ^{12}Be** ”, The Fourth Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics 2008 (APFB08)”, 19-23 August, 2008, Universitas Indonesia, Depok (Indonesia).
- ⑦ M. Ito, N. Itagaki, “**Formation of the loose clusters in an unbound region of ^{12}Be** ”, HOKUDAI-TOROJIN-JUSTIPEN-EPES workshop on Perspectives in Resonances and Continua on nuclei”, 21-25 July, 2008, Ohnuma International Seminar House, Ohnuma (Japan)
- ⑧ M. Ito, N. Itagaki, “**Unified studies of nuclear reactions and exotic structures in ^{12}Be** ”, State of Art in Nuclear Cluster Physics (SOTANC08)”, 13-16 May, 2008, Institut Interdisciplinaire Hubert Curien Department de Recherches Subatomiques (France).
- ⑨ M. Ito, N. Itagaki, “**Covalent, Atomic and Ionic Configurations in $^{10,12}\text{Be}$** ”, The INT workshop on Correlations in Nuclei : From Di-Nucleons to Clusters, Insutitute for Nuclear Theory (INT), Seattle, Washington (United States), 26 - 29 November, (2007).
- ⑩ M. Ito, N. Itagaki, H. Sakurai, K. Ikeda, “**Exotic molecular structures in highly-excited states of $^{10,12}\text{Be}$** ”, The 9th International conference on Clustering Aspects of Nuclear structure and Dynamics (Cluster07), 3 - 7 September, 2007, Stratford Upon Avon, Birmingham (United Kingdom).
- ⑪ M. Ito, N. Itagaki, “**Neutron-rich He-cluster structures in highly excited states of ^{12}Be** ”, The International symposium on Nuclear Structure : New Pictures in the Extended Isospin Space (NS07)”, 11 - 14 June, 2007, YITP, Kyoto (Japan).
- ⑫ M. Ito, “**Exotic molecular states in the $\alpha+^6,^8\text{He}$ resonant scattering**”, The 5th International workshop on the Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2007), 30 May - 2 June, 2007, RIKEN, Saitama (Japan).
- ⑬ M. Ito, N. Itagaki, “**Molecular Resonances in $^{10,12}\text{Be}$** ”, ECT* Workshop on Many-body Open Quantum Systems : From Atomic Nuclei to Quantum Dots”, 14 - 18 May, 2007, ECT*, Trento (Italy).
- ⑭ M. Ito, N. Itagaki, “**Molecular Resonances in $^{10,12}\text{Be}$** ”, RCNP Workshop on Cluster condensation and Tensor correlation in nuclei”, 22 - 23 March, 2007, RCNP, Osaka university (Japan).
- ⑮ M. Ito, K. Yabana, “**Absorbing-kernels to study resonances in the generator coordinate method**”, The 2nd

German-Japanese Workshop on Nuclear structure and Astrophysics”, 4-7 October, 2006, RIKEN (Japan).

- ⑩ M. Ito, “Non-adiabatic dynamics in the $\alpha+\alpha+N+N$ system”, Osaka Spring Workshop on Cluster Condensation and Nucleon Correlation in Nuclei”, 26-28 April, 2006, RCNP, Osaka university (Japan).

(2) 国内会議(主要な発表)

- ① 伊藤 誠, “ $\alpha+^8\text{He}$ 共鳴散乱と ^{12}Be の高励起状態”, 第五回 停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究会, 大阪大学豊中キャンパス, 12月(2008)
- ② 伊藤 誠, “軽い中性子過剰核の構造と反応の統一研究”, 少数粒子系物理の現状と今後の展開, 大阪大学 RCNP, 12月(2008)
- ③ 伊藤 誠, 板垣 直之, ” 軽い中性子過剰核の構造と反応の統一的研究”, 北大核物理の歴史と展望, 北海道大学, 11月(2008)
- ④ 伊藤 誠, 板垣 直之, “ ^{12}Be における単極遷移”, 日本物理学会分科会, 山形大学, 9月(2008)
- ⑤ 伊藤 誠, 板垣 直之, “ ^{12}Be の連続エネルギー状態の構造と反応”, 原子核の分子的構造と低エネルギー反応, 京都大学基礎物理学研究所, 7月(2008)
- ⑥ 伊藤 誠, ” 中重核及び不安定核における敷居値則と分子的構造”, 原子核の分子的構造と低エネルギー反応, 京都大学基礎物理学研究所, 7月(2008)
- ⑦ 伊藤 誠, 板垣 直之, “ $\alpha+^8\text{He}$ 低エネルギー反応における共鳴現象”, 日本物理学会第63回年次大会, 近畿大学, 3月(2008)
- ⑧ 伊藤 誠, “高励起領域における軽い中性子過剰核の構造・反応の統一研究”, 原子核・ハドロン物理:横断研究会, 高エネルギー加速器研究機構, 11月(2007)
- ⑨ 伊藤 誠, 板垣 直之, 櫻井 博義, 池田清美, “連続エネルギー領域における ^{12}Be の分子的構造”, 日本物理学会分科会, 北海道大学 9月(2007)
- ⑩ 伊藤 誠, “一般二中心クラスター模型による ^{12}Be の構造研究”, 日本物理学会, 首都大学東京, 3月(2007)
- ⑪ 伊藤 誠, “拡張されたクラスター模型による軽い中性子過剰核の研究”, 少数核子系とバリオン間相互作用, 大阪大学 RCNP, 3月(2007)
- ⑫ 伊藤 誠, “一般二中心クラスター模型による ^{12}Be の構造研究”, 核子多体系におけるクラスター現象, 大阪大学RCNP, 2月(2007)

- ⑬ 伊藤 誠, “一般二中心クラスター模型による ^{10}Be の構造と反応の統一的研究”, 現代の原子核物理 - 多様化し進化する原子核の描像 -, 高エネルギー加速器研究機構, 8月(2006)

- ⑭ 伊藤 誠, “微視的核構造模型による低エネルギー核反応研究の最近の進展”, 原子核クラスター物理の現状と展望, 基礎物理学研究所, 12月(2006)

- ⑮ 伊藤 誠, “反応理論模型(全体討論)”, 原子核クラスター物理の現状と展望, 基礎物理学研究所, 12月(2006)

その他、招待セミナー講演6件

[その他]

WEBでの報道記事(計2件)

- ① M. Ito, N. Itagaki, “Nuclear Chemistry”, Physical Review Focus, Vol. 22, Story 4 (25 July, 2008), <http://focus.aps.org/story/v22/st4>, Coverage by American Physical Society
- ② M. Ito, N. Itagaki, H. Sakurai, K. Ikeda, “Miniscule Nuclear Molecule”, RIKEN RESEARCH Vol. 3 No. 10, (2008), <http://www.rikenresearch.riken.jp/japan/research/517/> Coverage by RIKEN

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 誠 (ITO MAKOTO)

独立行政法人理化学研究所 仁科加速器研究センター 中務原子核理論研究室

研究者番号: 30396600