

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2012

課題番号：21740211

研究課題名（和文）

中性子過剰核における化学結合状態の共存現象

研究課題名（英文）Coexistence phenomena of chemical-bonding-like structures  
in neutron excess systems

研究代表者

伊藤 誠（ ITO MAKOTO ）

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：30396600

研究成果の概要（和文）：一般化二中心クラスター模型を軽い中性子過剰系である  $^{12}\text{Be} = \alpha + \alpha + 4\text{N}$  系に適用し、励起状態の内部構造の研究を行った。一般化二中心クラスター模型は 2 コアの周りでの余剰中性の「イオンの配位」、「原子的配位」、「共有構造的配位」を包括して取り扱うことが可能な模型である。模型を適用した結果、 $\alpha$  崩壊の閾値より下の束縛領域では共有結合構造が安定となるが、閾値上の非束縛領域では  $\alpha + ^8\text{He}$ ,  $^6\text{He} + ^6\text{He}$ , and  $^5\text{He} + ^7\text{He}$  といった、イオン、原子的構造が主に発現することが明らかになった。同じ非束縛領域には、イオン、原子構造に加え、原子結合と共有結合の中間的な構造を持つ「超変形状態」の形成が指摘されている。また、非束縛領域に発現する様々な化学結合状態は殆ど同じ励起エネルギーを持っていることが判明した。これらの結果は、一般の中性子過剰系の励起状態には、余剰中性子の結合構造が異なるものがいくつも存在しうるが、それらは強い縮退性を持って共存しうる可能性を示唆している。

研究成果の概要（英文）：The generalized two-center cluster model (GTCM), which can treat covalent and atomic configurations in general two center systems, is applied to the light neutron-excess system,  $^{12}\text{Be} = \alpha + \alpha + 4\text{N}$ . The intrinsic structure of the excited energy levels is investigated. We found that, in an unbound region, the ionic structures of  $\alpha + ^8\text{He}$  and  $^5\text{He} + ^7\text{He}$ , the atomic structure of  $^6\text{He} + ^6\text{He}$  are generated although the covalent structures are dominant in the bound region. An exotic superdeformation, which has a hybrid configuration of both the covalent and He-dimer structures, is also realized in the same energy region. The level scheme of these unbound states reveals a strong degenerate feature with a considerable mixture of the different configurations. The present result strongly suggests that such a degenerate feature can be generalized to general neutron-excess systems in the lighter mass region.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
総計	4,000,000	1,200,000	5,200,000

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：中性子過剰核、クラスター構造、化学結合、共鳴反応、チャンネル結合計算

### 1. 研究開始当初の背景

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いる。とりわけ質量数が30程度までの理論研究においては、全系が複数のコア核に解離し、それらが過剰中性子を共有する『共有結合構造』に基づいた分析が主に進められてきている。その典型例は Be、B 同位体であり、非束縛な  ${}^8\text{Be}=\alpha+\alpha$  をコア核として、その周りで過剰中性子が  $\pi^-$ 、 $\sigma^+$  等の共有結合軌道を形成していると考えられている。共有結合構造は主に基底状態近傍の低励起領域で成立する描像と考えられているが、粒子崩壊の閾値を超えた高励起領域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生成機構等についての理論研究は、十分に進展していない状況であった。

一方、高励起状態に関する実験的研究は、1990年代終盤頃から Be 同位体の実験データが発表され始め、その後現在までに C、O、Ne 同位体領域まで実験データが蓄積されて来ている。現在まで Be 同位体のデータが最も豊富に得られており、例えば  ${}^{12}\text{Be}$  においては、励起エネルギーが10~25MeVという高励起領域に  ${}^6\text{He}+{}^6\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}+{}^8\text{He}$  へ強く崩壊する共鳴状態が多数確認されている。これらの共鳴状態は、共有結合とは顕著に異なる『原子結合 ( ${}^6\text{He}+{}^6\text{He}$ )』、あるいは『イオン結合 ( ${}^4\text{He}+{}^8\text{He}$ )』構造に対応しているため、 ${}^{12}\text{Be}$  において劇的な構造変化が発現していることが予想されていた。

### 2. 研究の目的

先行研究及び最近の実験結果が示唆するように、Be 同位体では、二つの  $\alpha$  粒子の周りで過剰中性子が様々な化学結合構造を形成しており、それらが励起エネルギーの変化に伴い構造転移していることが予想される。

本研究では、実験データが最も豊富な  ${}^{12}\text{Be}=\alpha+\alpha+4\text{N}$  系に着目し、それらに発現が予想される化学結合的構造の発現機構、及び励起エネルギーの変化に伴う構造転移の様相を明らかにすることを目的とするものである。また粒子崩壊の閾値上に発現する共鳴状態については、散乱問題、特に多核子移行反応の問題を解き、化学結合状態の反応過程における形成・崩壊機構の分析も進めている。つまり、本研究は Be 同位体における化学結合構造とその形成崩壊の反応ダイナミクスを統一的に解明することを主たる目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究で採用される「一般化二中心クラスター模型」は、二中心系の周りでの中性子のイオン、原子、共有結合構造を統一的に記述可能であり、更に原子軌道状態から共有結合状態への転移といった、反応現象をも包括して分析が可能な模型である。

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)+(過剰核子)系』を系統的に取り扱うことが可能であり、既に  ${}^{12}\text{Be}=\alpha+\alpha+4\text{N}$  系に適用され、その有効性が示されている。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、その混合係数とコア核間距離を変分パラメータとして微視的な多体ハミルトニアン固有値問題を解く。

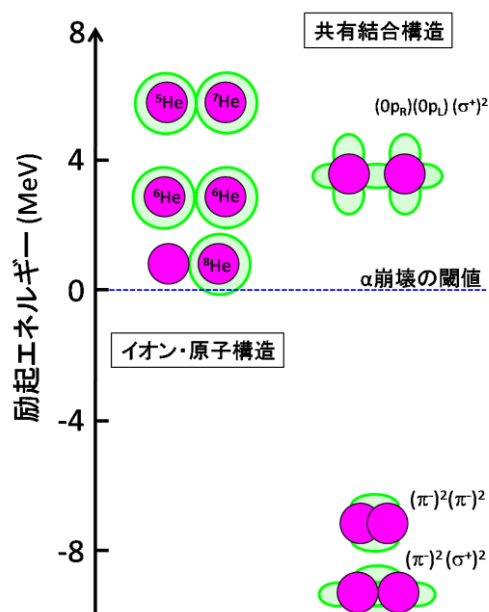
この模型はコア核同士が接近した場合には、過剰中性子が2つのコア全体に広がった共有結合構造を生成し、またそれらが離れた漸近領域では、過剰中性子が各々のコア核の周りに局在化した原子的、またはイオンの構造へ滑らかに連結する。

また漸近領域の状態には散乱の境界条件を自然に課すことができるので、原子・イオン配位から共有結合状態への生成反応確率の計算も直接可能となる。従って本研究では、『構造転移と反応機構』の両サイドからの統一的な分析を通して実験データと理論の密接な比較が可能であり、この点は、国内外におけるこれまでの核理論研究にはない独創的な研究手法である。

### 4. 研究成果

これまで偶 Be 同位体に対してこの模型を適用し、低励起領域から高励起領域に渡る化学結合構造の転移現象を系統的に研究してきた。 ${}^{12}\text{Be}$  についての結果を図1に示す。 ${}^{12}\text{Be}$  の低励起領域では共有結合(図1点線下)を基盤とした中性子のスピン三重項相関により  $N=8$  の魔法数が破れることを明らかにし、 $\alpha$  崩壊の閾値上の領域では、原子、イオン、共有結合に対応する様々なクラスター構造(図1点線上)が形成され、それらが強い縮退傾向を伴って発現する事を明らかにした。また基底状態から励起状態への単極遷移を計算し、

単極遷移の強度が通常の前場描像の予想よりも数倍増大すること、更に二中性子移行反応、 $\alpha + {}^8\text{He} \Rightarrow {}^6\text{He} + {}^6\text{He}$  を通して  $\alpha$  閾値上の共有結合状態が強く励起されることを明らかにした。



今回の研究は主に Be 同位体に焦点を当てているが、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{16}\text{O}$  等の励起状態にも  $\alpha$  コアを構成要素とした「 $\alpha$  クラスタ状態」の存在が知られており、それらに余剰中性子を付与した C、O 同位体の励起状態にも同様な化学結合とその構造転移現象が予測される。従って、Be 同位体で探求した化学結合構造の共存現象は、軽い中性子過剰系により広く普遍的に存在する可能性が高いと思われる。

## 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 15 件)

1.M. Ito and H. Otsu, "Studies of Light Neutron-Excess Systems from M. Ito and H. Otsu Bounds to Continuum", Few-Body Systems, inpress (2013), DOI: 10.1007/s00601-013-0632-2 査読有.

2.M. Ito and H. Otsu, "Studies of light neutron-excess systems from bounds to continuum", AIP Conference Proceedings 1491, 325-328 (2012), <http://dx.doi.org/10.1063/1.4764268>

査読有.

3.M. Ito and H. Otsu, "Studies of light neutron-excess systems from bound states to continuum", Journal of Physics: Conference Series, 436, 012027 (2012) DOI: 10.1088/1742-6596/436/1/012027 査読有.

4.Makoto Ito, "Formations of loose clusters in an unbound region of  ${}^{12}\text{Be}$ ", Phys. Rev. C85, 044308 (2012), DOI: 10.1103/PhysRevC.85.044308 査読有.

5.Makoto Ito, "Studies of light neutron-excess systems from bounds to continuum", The proceeding of "French-Japanese workshop on Nuclear Structure Problems(RIKEN) (2012) 査読無.

6.M. Ito, N. Itagaki and K. Ikeda, "Cluster correlations for low-lying intruder states of  ${}^{12}\text{Be}$ ", Physical Review C85, 014302 (2012), DOI: 10.1103/PhysRevC.85.014302 査読有.

7.Makoto Ito, "Studies of light neutron-excess systems from bounds to continuum", EPJ Web of Conference, DOI:10.1051/epjconf/20111707003 (2011) 査読有.

8.Makoto Ito and Daisuke Suzuki, "Resonance extractions in the  $\alpha + {}^8\text{He}$  slow scattering", Physical Review C84, 014608 (2011), 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevC.84.014608

9.Makoto Ito, "Monopole excitation induced by adiabatic conjunctions in light neutron-Excess  ${}^{10,12}\text{Be}$  system", 素粒子論研究, Vol.8, 基研研究会「大振幅集団運動の理論」報告巻 119 A101 査読無. (2011)

10.M. Ito, "Asymmetric Clusters in  ${}^{14}\text{Be}$ ", International Journal of Modern Physics E, Vol.20, p.p.870-873 (2011) 査読有.

11.Makoto Ito, "Imprint of adiabatic structures in excitations of  ${}^{12}\text{Be}$ ", Physical Review C83, 044319 (2011), DOI: 10.1103/PhysRevC.83.044319 査読有.

12.M. Ito and D. Suzuki, "Study on the  $\alpha + {}^8\text{He}$  resonant scattering", AIP conference

proceedings Vol. 1269, p.p. 372-374 (2010) 査読有.

13. M. Ito, "Asymmetric Clusters in even Be isotopes", Modern Physics Letters A Vol.25, p.p.1862-1865 (2010) 査読有.

14. M. Ito and D. Suzuki, "Exotic Cluster Structures excited by two neutron transfers", The proceeding of "Hadron and Nuclear Physics (HNP09)", World Scientific, 221 (2010) 査読無  
DOI: 10.1142/9789814313933\_0030

15. M. Ito, "Formation of Degenerating Clusters in the  $\alpha$ + $^8\text{He}$  Slow Scattering", AIP Conference Proceedings Vol. 1165, 293 -298 (2009) 査読有.

[学会発表] (計 34 件)

1. 伊藤誠 「一般化二中心クラスターモデルによる  $^{18}\text{O}$  の構造研究」日本物理学会 第 68 回 年次大会, 2013 年 3 月 26 日~2013 年 03 月 29 日, 広島大学.

2. M. Ito and H. Otsu, "Studies of cluster structures in sd-shell region", RIBF-ULIC-miniWS "Alpha cluster structure on unstable nuclei revealed by newly constructed SAMURAI spectrometer", RIKEN Nishina Center for Accelerator based Science, RIKEN, Japan, 5 March, 2013.

3. M. Ito, "Cluster structures and reaction dynamics in neutron-excess systems", The 4th international conference on Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions" (COMEX4), 22-26 October, 2012, Kanagawa, Japan.

4. M. Ito, "Studies of light neutron-excess systems from bounds to continuum", 10th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (Cluster12), Debrecen, Hungary, 24-18 September 2012. (INVITED)

5. M. Ito, "Unified studies of molecular structures and reactions in light neutron-excess systems", ULB Nuclear Theory seminar, ULB, Brussels, Belgium. 18 September, 2012.

6. 伊藤誠, 大津秀暁 「直交条件モデルによる  $^{28}\text{Ne}$  の  $\alpha$  クラスター構造の研究」日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 09 月 11 日~

2012 年 9 月 14 日, 京都産業大学.

7. 伊藤誠 「閾値近傍における化学結合様クラスター構造」日本物理学会 2012 年秋季大会 シンポジウム講演, 2012 年 09 月 11 日~2012 年 9 月 14 日, 京都産業大学(招待講演).

8. Makoto Ito, "Studies of light neutron-excess systems from bounds to continuum", The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20), Fukuoka, Japan, 20-25 August, 2012.

9. M. Ito and H. Otsu, "Cluster structures in neutron-rich systems", RCNP 研究会「原子核の閾値近傍における共鳴現象と反応ダイナミクス」2012 年 7 月 18 日~2012 年 07 月 20 日 大阪大学 核物理研究センター (RCNP).

10. Makoto Ito, "Studies of light neutron-excess systems from bounds to continuum", International conference on "Nuclear Structure and Dynamics (NSD12)", Opatija, Croatia, 9-12 July, 2012.

11. M. Ito and H. Otsu, "Mechanism of  $\alpha$  + $^{24}\text{O}$  cluster structure on highly excited region on  $^{28}\text{Ne}$ , (Importance and possibility of measurement)", RIBF-ULIC-miniWS "Alpha cluster structure on unstable nuclei revealed by newly constructed SAMURAI spectrometer", RIKEN Nishina Center for Accelerator based Science, RIKEN, Japan, 19 April, 2012.

12. Makoto Ito, "Hybrid structure of clusters and valence neutrons in light neutron-rich nuclei", International Molecule Workshop, Nuclear Forces and Neutron-rich matter, YITP, Kyoto, Japan, 12 March, 2012. (INVITED)

13. 伊藤誠 「Be 同位体の励起状態とアイソスカラー単極遷移」基研研究会 E0, E1 励起を通じて探る原子核の低い励起エネルギーのエキゾチックな構造, 2011 年 12 月 7~9 日 京都大学 基礎物理学研究所.

14. Makoto Ito, "Studies of light neutron-excess systems from bounds to continuum", YIPQS Long-term workshop on "Dynamics and Correlations in Exotic Nuclei (DCEN2011)", YITP, Kyoto University, 20 September-28 October, 2011

(INVITED).

15. Makoto Ito, “**Studies of light neutron-excess systems from bounds to continuum**”, RCNP mini workshop, “Experimental approach to Cluster Structures in Nuclei, RCNP, Osaka, Japan, 18 October 2011. (INVITED)

16. Makoto Ito, “**Studies of light neutron-excess systems from bounds to continuum**”, YKIS 2011 Symposium on “Frontier Issues in Physics of Exotic Nuclei (YKIS2011)”, YITP, Kyoto University 11-15 October 2011.

17. 伊藤誠「**軽い中性子過剰核の準束縛クラスター構造**」RCNP 研究会 クラスターガス状態探索のための研究戦略会議, 2011年9月7~8日 大阪大学 核物理研究センター (RCNP) (招待講演).

18. Makoto Ito, “**Studies of light neutron-excess systems from bounds to continuum**”, 5th Asia-Pacific conference on “Few-body Problems in Physics (APFB2011)”, Seoul, Korea, 22-26 August, 2011.

19. Makoto Ito, “**Exotic structures in light neutron-excess systems from bounds to continuum**”, Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics, the University of Manchester, Manchester, UK, 8-12 August, 2011

20. Makoto Ito, “**Studies of light neutron-excess systems from bounds to continuum**”, The 5th international conference on Fusion11, Saint-Malo, France, 2-6 May 2011

21. 伊藤誠「**Be 同位体の連続エネルギー状態**」日本物理学会第66回年次大会 2011年3月28日 新潟大学五十嵐キャンパス.

22. M. Ito, “**Unified studies of even Be isotopes from bounds to continuum**”, French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems, RIKEN Nishina Center for Accelerator based Science, RIKEN, Japan, 13 January 2011.

23. M. Ito, “**Unified studies of neutron-excess systems from bounds to continuum**”, University of Aizu-Justipen-EFES symposium on

“Cutting Edge Physics of Unstable Nuclei”, Fukushima, Japan, 10-13 November 2010.

24. 伊藤誠「**軽い中性子過剰核の低エネルギー反応ダイナミクス**」基研研究会「大振幅集団運動の微視的理論」2010年10月24~26日 京都大学 基礎物理学研究所

25. 伊藤誠「 **$^{14}\text{Be}$  の連続エネルギー状態**」日本物理学会 2010年秋季大会 2010年9月13日 九州工業大学戸畑キャンパス.

26. M. Ito, “**Unified studies of reactions and structures in light neutron-excess systems**”, Japan-Italy EFES workshop on Correlations in Reactions and continuum, TRINO Italy, 6-8 September 2010 (INVITED).

27. 伊藤誠「**中性子過剰核におけるモノポール遷移の増大現象**」RCNP 研究会「不安定核や高運動量移行を用いた核反応機構の研究」2010年8月2~4日 大阪大学 核物理研究センター(RCNP).

28. M. Ito, “**Asymmetric Clusters in  $^{14}\text{Be}$** ”, International workshop on “State of the Art in Nuclear Cluster Physics (SOTANC2010)”, Brussels, Belgium 25-28 May 2010.

29. 伊藤誠「**偶 Be 同位体の励起構造の分析**」, 日本物理学会第65回年次大会, 2010年3月23日, 岡山大学.

30. Makoto Ito, “**Studies on the  $\alpha + ^8\text{He}$  resonant scattering**”, International conference on “Origin of Matter and Evolution of the Galaxies (OMEG10)”, Osaka University, Osaka, 8-10 March 2010.

31. Makoto Ito, “**Asymmetric Clusters in even Be isotopes**”, International conference on “Forefronts of researches in exotic nuclear Structures (Niigata2010)”, Tokamachi, Niigata, 1-4 March 2010.

32. Makoto Ito, “**Exotic Cluster Structures excited by two neutron transfers**”, International conference on “Hadron and Nuclear Physics (HNP09)”, Osaka University, Japan 16-19 November 2009.

33. Makoto Ito, “**Exotic clusters in an unbound region of light neutron-rich**

systems”, 第三回日米合同物理学会 (HAW09), Waikoloa, Hawaii, USA, 13-17 October 2009 (INVITED).

34. Makoto Ito, “**Formation of Degenerating Clusters in the  $\alpha+^8\text{He}$  Slow Scattering**”, International conference on "Nuclear Structure and Dynamics (NSD09)", Dubrovnik, Croatia, 4-8 May 2009 (INVITED).

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・准教授

研究者番号 : 30396600