

平成 22 年 5 月 10 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19540295

研究課題名 (和文) 有限原子核におけるクラスター・ガスの状態

研究課題名 (英文) Cluster-gas-like states in finite nuclei

研究代表者

堀内 昶 (HORIUCHI HISASHI)

大阪大学・核物理研究センター・協同研究員

研究者番号：60027349

研究成果の概要 (和文)：16O 核での 0+状態に対して 4  $\alpha$  の直交条件模型計算を行って 6 番目の 0+状態が 4  $\alpha$  のボーズ凝縮的な状態であるとの予言を行った。計算された 6 つの 0+状態の実験データと対応も良好である。4  $\alpha$  の THSR 波動関数を用いた生成座標法により共鳴状態境界条件を取り入れた計算によっても、4  $\alpha$  のボーズ凝縮的な状態が得られ、それが 4  $\alpha$  の直交条件模型計算の結果と整合性が高いことを示した。クラスター・ガスの状態と基底状態の間の単極遷移が大きいことを説明した。

研究成果の概要 (英文)：Orthogonality condition model calculation of 4 alpha clusters was performed for 0+ states of 16O. The 6<sup>th</sup> 0+ state was predicted as a 4 alpha Bose condensed state. Reproduction of data was good. GCM calculation with 4 alpha THSR wave functions incorporating resonance boundary condition also yielded 4 alpha Bose condensed state which has good correspondence with OCM result. Explanation was made about the large monopole strength between cluster-gas states and ground state. .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,200,000	360,000	1,530,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,390,000

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

## 1. 研究開始当初の背景

30 年以上以前に研究代表者は 12C 核の第 2 の 0<sup>+</sup>状態 (Hoyle 状態) が 3 つの  $\alpha$  クラスターのガスの状態であることを見つけた。その後の 1970 年代のクラスター模型研究もその見解を支持した。2000 年頃に至って代表者は、そのガスの状態は実は 3 つの  $\alpha$  粒

子のボーズ凝縮状態的な構造を有するという重要な概念的進展に到達した。Hoyle 状態以外の 12C 核の研究も進み、また 11B 核での 2  $\alpha$  + t のガスの構造の研究も進んでいた。更に 16O 核の実験的研究が 4  $\alpha$  凝縮状態を求めて進められる状況であった。

## 2. 研究の目的

原子核の気体状態は核物理の重要な研究テーマであるが、本研究計画はその独創的な目的として核子ガスでなくてクラスター・ガスの状態の研究を設定した。核子ガスの状態はその高い励起エネルギーのために物性的な研究対象であるが、クラスター・ガスの状態は低い励起エネルギーに現出し分光学的な精密研究の対象である。代表的研究としては $^{16}\text{O}$ 核の $4\alpha$ 問題の研究の本格化を行い、その研究では共鳴状態の境界条件も正しく取り扱う。また $^{13}\text{C}$ における $3\alpha+n$ のガスの構造も研究する。

## 3. 研究の方法

$4\alpha$ の直交条件モデルによる4体問題を解いて $^{12}\text{C}+\alpha$ 構造状態の再現も含めて $4\alpha$ ガス状態を統一的な視点で研究する。他方、完全に微視的な研究として $4\alpha$ のTHSR波動関数に基づく研究も行う。また、共鳴状態の境界条件を正當に扱うために代表者達の開拓した「拡張されたACCC法」を用いた研究を行う。更に、重心座標を排除して内部座標のみによる1体密度行列の理論を不確定性を排除した形で発展させて、ボーズ凝縮の度合いを計算する。

## 4. 研究成果

(1)  $4\alpha$ の直交条件モデル(OCM)による4体問題を解いて $0+$ 状態を先ずは研究した。励起エネルギーが15MeV付近の6番目の $0+$ までの6個の $0+$ 状態が実験の6個の状態の実験データを良く再現することが示された。2重閉殻構造の基底状態、 $^{12}\text{C}+\alpha$ 構造を持つことが知られている2番目、3番目の状態も、その構造認識が確認された。更に、4番目と5番目の $0+$ 状態が $^{12}\text{C}+\alpha$ 構造を持つことを始めて提唱・予言した。6番目の $0+$ 状態が $4\alpha$ のボーズ凝縮状態の成分を60%ほど含む状態であることが計算結果として示された。実験データを全て再現し、既に知られている準位構造を再現した上での $4\alpha$ ガス状態の存在予言であるのでその信頼性は高い。

(2)  $4\alpha$ のTHSR波動関数を用いて相対ガウス関数のサイズ・パラメーターを生成座標とするHill-Wheeler方程式を解いた。4つの $0+$ 状態を得たが、4番目の $0+$ 状態は「拡張されたACCC法」によって共鳴状態の境界条件を正しく扱って計算した。10年前の論文では共鳴状態の境界条件を扱わなかったので4番目の $0+$ 状態を得ることが出来なかったものである。得られた4番目の $0+$ 状態は $4\alpha$ のガスのボーズ凝縮状態の性格が他の3個の状態に比べて顕著であって、 $4\alpha$ のガスのボーズ凝縮状態の存在を強く支持する結果となっている。この4番目の $0+$ 状態

は「 $4\alpha$ OCM」での6番目の $0+$ 状態に対応しており、したがって実験的に観測されている6番目の $0+$ 状態に対応するものとみなせる。

(3) 計算の結果として得られた波動関数がボーズ凝縮波動関数の成分をどれほどの割合で有しているかは1体密度行列の固有値の大きさから計算される。この1体密度行列は重心座標を除去して内部座標だけを用いて計算されるものである。内部座標としてはヤコビ座標が用いられる場合が多かったが、内部座標として別の座標系を用いると得られる密度行列がヤコビ座標によるものと異なるので、ヤコビ座標を用いて得られた密度行列は一意的なものではないとする主張の論文が発表されたりもした。このような誤った見解を正す理論を発表した。1体密度行列の座標に直交する座標が内部座標として採用されるべきであって、その場合は得られる密度行列は一意的となり、それはヤコビ座標により計算される密度行列に等しいことを証明したのである。

(4) クラスター・ガスの状態の研究にとって重要な実験観測量は基底状態からの電気的単極遷移の強度である。この強度は $^{12}\text{C}$ のHoyle状態の場合には大きい値を持っていて1核子の単極遷移強度ほどの大きさがある。また $^{16}\text{O}$ での6番目の $0+$ 状態の場合も1核子強度程度の大きさがある。更に言えることは、 $^{16}\text{O}$ の励起状態で $^{12}\text{C}+\alpha$ 構造を持つ状態の単極遷移強度の測定値も大きくて1核子の単極遷移強度程度の大きさがある。クラスター構造を表現する波動関数はShell Modelの表示では多粒子-多孔の配位の波動関数の重ねあわせであるので、基底状態からクラスター状態への単極遷移強度が1核子強度程度の大きさを有することは一見したところでは不可解である。この謎を解き明かす理論を構築し発表した。この理論の重要な要点は基底状態の波動関数の性格の2重性である。この2重性はBayman-Bohr定理として以前から知られているもので、SU(3)殻モデルの波動関数はクラスターモデルの波動関数の形でも同時に表現できるというものである。この事実を用いると、クラスター状態への単極励起は基底状態に内在するクラスター相対運動自由度の励起ということとなるのである。

(5)  $3\alpha+n$ の微視的波動関数の性質の研究を行った。 $3\alpha$ の状態として $^{12}\text{C}$ の基底状態に対応する波動関数を採用した場合とHoyle状態に対応する波動関数の場合を比較した。基底状態の場合には中性子が遠方ではS波がP波よりエネルギーが低くても、核半径ほどの近距離以内ではPauli-Blockingの

ためにP波がS波よりもエネルギーが低くなる。基底状態の代わりにHoyle状態を採用しても、中性子が遠方ではS波がP波よりエネルギーが低くても、核半径ほどの近距離以内ではPauli-BlockingのためにP波がS波よりもエネルギーが低くなるのが明らかにされた。この計算結果は密度が希薄なHoyle状態でも外部中性子に対する反対称化の効果は基底状態と外部中性子の間の反対称化の効果に近いことを示している。

(6) クラスタ・ガスの状態、とりわけボーズ凝縮の状態についてのこれまでの研究のレビューを幾編か発表した。この中で基本的と思われる項目を採り上げてその解説を行った。例えばボーズ凝縮的な状態の崩壊幅は高い励起エネルギーであるにも拘わらず、決して大きくなることはないことなどを説明した。

#### 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 10 件)

- ① Y. Funaki, H. Horiuchi, W. von Oertzen, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki, T. Yamada, 「Concepts of nuclear alpha-particle condensation」、Physical Review C、査読有、80 巻、2009、pp. 064326, 1 - 14.
- ② T. Yamada, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki, 「Internal One-Particle Density Matrix for Bose Einstein Condensates with Finite Number of Particles in a Harmonic Potential Field」、Physical Review C、査読有、79 巻、2009、pp. 054314, 1 - 11.
- ③ T. Yamada, Y. Funaki, H. Horiuchi, K. Ikeda, A. Tohsaki, 「Monopole excitation to cluster states」、Progress of Theoretical Physics、査読有、120 巻、2008、pp. 1139-1167.
- ④ T. Yamada, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki, 「Criterion for Bose-Einstein condensation in traps and self-bound systems」、Physical Review A、査読有、78 巻、2008、pp. 035603-035606.
- ⑤ Y. Funaki, T. Yamada, H. Horiuchi, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki, 「Alpha-particle condensation in 160 studied with a full four-body OCM calculation」、Physical Review Letters、査読有、101 巻、2008、pp. 082502-082505.
- ⑥ Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki, T. Yamada, 「Density-induced suppression of the alpha-particle condensate in nuclear matter and the structure of alpha-cluster

states in nuclei」、Physical Review C、査読有、77 巻、2008、pp. 064312, 1 - 6.

- ⑦ Y. Taniguchi, M. Kimura, Y. Kanada-En'yo, H. Horiuchi, 「Clustering and triaxial deformations of 40Ca」、Physical Review C、査読有、76 巻、2007、pp. 044317, 1 - 10.
- ⑧ T. Wakasa, E. Ihara, K. Fujita, Y. Funaki, K. Hatanaka, H. Horiuchi, M. Itoh, J. Kamiya, G. Roepke, H. Sakaguchi, N. Sakamoto, Y. Sakemi, P. Schuck, Y. Shimizu, M. Takashina, S. Terashima, A. Tohsaki, M. Uchida, H. P. Yoshida, and M. Yosoi, 「New candidate for an alpha cluster condensed state in 160(alpha, alpha') at 400 MeV」、Physics Letters B、査読有、635 巻、2007、pp. 173 - 177.
- ⑨ Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki, T. Yamada, 「Alpha particle condensation in nuclear systems」、Nuclear Physics News、査読有、17 巻、2007、pp. 11 - 18.

[学会発表] (計 19 件)

- ① 船木靖郎 (登壇者)、「共鳴の条件を取り入れた 160 における 4  $\alpha$  凝縮状態へのアプローチ」、日本物理学会第 65 回年会、2010 年 3 月 20 日、岡山大学津島キャンパス。
- ② 東崎昭弘 (登壇者)、「(3  $\alpha$ ) -  $\alpha$  系の微視的研究」、日本物理学会第 65 回年会、2010 年 3 月 20 日、岡山大学津島キャンパス。
- ③ Y. Funaki (登壇者)、「Alpha particle clustering in nuclei and 4-alpha particle condensation in 160」、12th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms、June 16, 2009、Varenna, Italy.
- ④ H. Horiuchi、「Structure change from shell-mode-like ground state to cluster states」、12th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms、June 18, 2009、Varenna, Italy.
- ⑤ 東崎昭弘 (登壇者)、「微視的アルファ凝縮波動関数の性質」、日本物理学会第 64 回年会、2009 年 3 月 28 日、立教大学。
- ⑥ 山田泰一 (登壇者)、「軽い核におけるモノポール遷移とクラスター構造」、日本物理学会第 64 回年会、2009 年 3 月 28 日、立教大学。
- ⑦ Y. Funaki (登壇者)、「Alpha-cluster states and 4 alpha-particle Bose condensate in 160」、KGU Yokohama Autumn School of Nuclear Physics、October 9, 2008、Kanto Gakuin University, Yokohama.
- ⑧ A. Tohsaki (登壇者)、「Microscopic wavefunction of alpha condensation」、KGU Yokohama Autumn School of Nuclear Physics、October 9, 2008、Kanto Gakuin University,

Yokohama.

⑨ T. Yamada (登壇者)、「Alpha clustering and monopole strengths in light nuclei」、KGU Yokohama Autumn School of Nuclear Physics、October 9, 2008、Kanto Gakuin University, Yokohama.

⑩ Y. Funaki (登壇者)、「Alpha-particle condensed state in 160」、Franco-Japanese Symposium “New Paradigms in Nuclear Physics”、October 1, 2008、Paris, France.

⑪ 東崎昭弘 (登壇者)、「共鳴群法による核子・アルファ凝縮状態系の研究」、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 20 日、山形大学小白川キャンパス。

⑫ 船木靖郎 (登壇者)、「 $\alpha$ 凝縮模型、直交条件模型を用いた 160 の 4  $\alpha$ 凝縮状態系の研究」、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 20 日、山形大学小白川キャンパス。

⑬ Y. Funaki (登壇者)、「Present status of alpha-particle condensate states in self-conjugate 4n nuclei」、Workshop on the status of art in nuclear cluster physics、May 14, 2008、Strasbourg, France.

⑭ 船木靖郎 (登壇者)、「160 における 4  $\alpha$ クラスター凝縮状態」、日本物理学会第 63 回年会、2008 年 3 月 23 日、近畿大学本部キャンパス。

⑮ 東崎昭弘 (登壇者)、「アルファ凝縮と核子」、日本物理学会第 63 回年会、2008 年 3 月 23 日、近畿大学本部キャンパス。

⑯ 東崎昭弘 (登壇者)、「アルファ凝縮と核子の相互作用」、日本物理学会第 62 回年会、2007 年 9 月 21 日、北海道大学札幌キャンパス。

⑰ 船木靖郎 (登壇者)、「160 の励起状態に現れるクラスター構造」、日本物理学会第 62 回年会、2007 年 9 月 21 日、北海道大学札幌キャンパス。

⑱ H. Horiuchi、「Outlook and future perspectives」、9th International Cluster Conference、September 7, 2007、Stratford upon Avon, England.

⑲ Y. Funaki (登壇者)、「Alpha cluster states and 4 alpha-particle Bose condensates in 160」、9th International Cluster Conference、September 4, 2007、Stratford upon Avon, England.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：

番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

堀内 昶 (HORIUCHI HISASHI)  
大阪大学・核物理研究センター・協同研究員  
研究者番号： 60027349

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

