

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 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22540280

研究課題名（和文） クラスタ・ガスの状態の普遍性確立の追究

研究課題名（英文） Investigation for establishment of universality of cluster-gas-like states

研究代表者

堀内 昶 (HORIUCHI HISASHI)

大阪大学・核物理研究センター・招聘教授

研究者番号：60027349

研究成果の概要（和文）： ^{16}O で THSR 関数により 4α 凝縮状態の存在をより確固とした。 ^{16}O のアイソスカラー単極強度関数の 15MeV 以下の領域の微細構造を再現した。「 $^{12}\text{C}(\text{Hoyle})+\alpha$ 」構造の回転帯について研究を複素回転法の使用も含めて進めた。 ^{20}Ne の反転 2 重項回転帯の個々の状態が単一の THSR 関数で表現できることを発見した。これはクラスタ・ガス状態と基底状態との密接な関係を示すものである。

研究成果の概要（英文）：The existence of the 4α -condensate state has been confirmed by the calculation with THSR function. The fine structure of the isoscalar monopole strength function below 15MeV has been reproduced. The studies of the rotational band with “ $^{12}\text{C}(\text{Hoyle})+\alpha$ ” structure have been advanced, which include those by the use of complex scaling method. We have found each state of the inversion-doublet bands can be described by a single THSR function. It indicates an intimate relation between cluster-gas states and the ground state.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：クラスタ・ガスの状態、ボーズ凝縮状態、THSR 波動関数、ホイル状態

1. 研究開始当初の背景

(1) 有限原子核にはクラスタ・ガスの状態が存在するという考えの歴史を辿ると、「 ^{12}C 核の第二の 0^+ 状態 (Hoyle 状態と称されている) は 3 個の α クラスタがガスの構造を形成している状態である」ということを始めて解明した研究代表者の研究 (H.Horiuchi Prog.Theor. Phys. **51**, 1266 (1974)) に始まる我国の 3α クラスタ構造

の理論研究の 1970 年代における重要な諸業績に行き着く。その中でも特に RGM や BrinkGCM などの完全微視的な 3α 模型計算は ^{12}C 核の 10MeV ほどまでの励起エネルギー領域でのアイソスピン $T=0$ の状態に関する実験データの殆ど全てを良く再現するものであって、そのような理論研究が示す大きな信頼性の上に立って Hoyle 状態のガスの構造が示されていたのである。

(2) 2000年代に入って、 ^{12}C 核の Hoyle 状態のクラスター・ガスの構造が実は3個の α クラスターのボーズ凝縮的な状態であるとする考えを研究代表者などが提唱するに至って (A.Tohsaki, H.Horiuchi, P.Schuck, G.Roepke, Phys. Rev. Lett. **87**, 192501 (2001))、クラスター・ガスの状態は ^{12}C 核に限らずに原子核一般に存在するという考えが形成された。この革新的にして独創的な考えは、理論・実験の両面において国内外に大きな反響を生んだ。Hoyle 状態が3個の α クラスターのボーズ凝縮的な状態であることを端的に表す THSR 波動関数はたった1つだけで 3α RGM 波動関数や 3α Brink GCM 波動関数との二乗Overlapを計算するとほぼ100%であることも、研究代表者たちの研究グループによって発見され、2003年の論文で発表された (Y.Funaki, A.Tohsaki, H.Horiuchi, P.Schuck, G.Roepke Phys.Rev. C **67** (2003), 051306(R))。

(3) クラスター・ガスの状態の理論的研究を本格的に開始するものとしての科研費による研究計画は2007年度から2009年度の3年間の研究代表者による研究計画として採択され多大の成果を挙げて来た。成果の代表的なものとしては、(イ) 4α OCM の半微視的計算 (Y.Funaki, T.Yamada, H.Horiuchi, G.Roepke, P.Schuck, A.Tohsaki, Phys. Rev. Letters **101**(2008), 082502) と 4α THSR 波動関数による計算を開始し、 4α のボーズ凝縮状態の候補が 4α 閾値近傍に期待されることを示した、(ロ) 計算で得られた波動関数に含まれているボーズ凝縮波動関数の成分を1体密度行列の固有値の大きさから議論する為に、1体密度行列の座標に直交する内部座標を採用すれば密度行列は一意的となることを示した (T.Yamada, Y.Funaki, H.Horiuchi, G.Roepke, P.Schuck, A.Tohsaki, Phys. Rev. C **79** (2009), 054314)、(ハ) 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という一見したところでは不可解な実験事実を基底状態波動関数の有している2重性 (Duality) (Bayman-Bohr 定理) によって説明した (T. Yamada, Y. Funaki, H. Horiuchi, K. Ikeda, A. Tohsaki, Prog. Theor. Phys. **120** (2008), 1139)、(ニ) クラスター・ガスの状態、とりわけボーズ凝縮的な状態についてのこれまでの研究のレビュー論文を幾編か発表した。そのレビュー論文の中では、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 (Y. Funaki, H. Horiuchi, W. von Oertzen, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki, T. Yamada Phys. Rev. C **80** (2009), 064326; Y. Funaki,

H.Horiuchi, G.Roepke, P.Schuck, A.Tohsaki, T.Yamada, Nucl. Phys. News **17**(04) (2007), p.11)。

2. 研究の目的

(1) 本研究計画の目的は、上記の2007年度から2009年度の科研費による研究計画から得られた成果の上に立って、クラスター・ガスの状態の研究を更に推し進め、この新奇な状態が普遍的に存在するものであることを確固とした認識として確立することである。

(2) 上記の目的を達成するための具体的な研究の取り組みの中心は4個の α クラスターのガスの状態を同定するという研究である。既に ^{12}C 核においては Hoyle 状態が3個の α クラスターのボーズ凝縮的なガスの状態であることはほぼ確立しているため、 4α のガスの状態が同定されるならば、それはクラスター・ガスの状態が広範囲な核種領域に存在するのだという認識の確立に多大の貢献をすることになるわけである。

3. 研究の方法

(1) ^{16}O 核においては 4α OCM の半微視的計算と 4α THSR 波動関数による計算とを行った。採用する部分波の数を徐々に増やした。また最初は $J^\pi = 0^+$ の状態の研究から始めてその後 2^+ などの高いスピンの状態の研究を行った。

(2) 「 $^{12}\text{C}(\text{Hoyle}) + \alpha$ 」構造準位の研究などでは、拡張された ACCC 法や複素 Scaling 法を用いて共鳴状態を扱った。高い励起エネルギー領域の状態を研究するので、多くのクラスター分解チャンネルが開いているために、大量にして高精度の計算が要求される。

(3) 準位エネルギーや崩壊準位幅の研究に加えて、アイソスカラー単極励起強度関数の実験データの分析も行った。 4α 凝縮状態は6番目の 0^+ 状態であるが、6本の 0^+ 状態の全てを再現した 4α OCM 計算の結果を用いた。準位エネルギーには実験値を用いるが崩壊準位幅には計算値を用いる。

(4) 負パリティ状態を扱うためにクラスター間距離パラメーターを THSR 関数に組み込んだ関数、Hybrid-Brink-THSR 波動関数、を導入した。THSR 波動関数は正パリティの状態しか扱えないために、負パリティの状態も扱える Brink 波動関数との融合 (Hybrid) を行ったものである。具体的に言えば、クラスター間の相対距離のパラメーターが波動関数に導入されたものである。クラスター間相対距離パラメーターを導入して負パリティ状態を作り、それを規格化した後で、相対距離がゼロの極限の波動関数を作ることが出来るが、この極限波動関数はエネルギーミナムを与える波動関数として最も重要な役

割を果たすものになっている。

4. 研究成果

(1) 4α OCM と 4α THSR の両方の計算が 4α 凝縮状態の存在を示すことを確認した。その状態は ^{16}O の 15MeV 近傍に観測されている 6 番目の $0+$ 状態に対応すると主張した。 4α 凝縮状態であるとみなされた準位のエネルギーと崩壊準位幅は理論により良く再現された。(雑誌論文⑨)

(2) 4α OCM 計算は $^{12}\text{C}+\alpha$ 構造のクラスター状態であると従来見なされて来た諸状態の存在とその性格を再現し保証した。そして更に、新たなタイプの $^{12}\text{C}+\alpha$ 構造を有しているとの Assignment も行った。再現された準位についても Assign された準位についても、励起エネルギーと崩壊準位幅の実験データは理論により良く再現された。

(3) 「 $^{12}\text{C}(\text{Hoyle})+\alpha$ 」構造の回転帯準位の存在を予言した。この回転帯準位が 4α 直線鎖回転帯であろうとされてきた観測された準位群と同じであるのか異なるのかは今後の課題である。(学会発表④)

(4) アイソスカラー単極励起強度関数の実験データの分析を行い、15MeV 以下の励起エネルギー領域における微細構造が 4α OCM の計算結果を用いることにより、良く再現できることを示した。この微細構造の理論的再現は従来の理論計算ではことごとく失敗していたものであった。この研究は、アイソスカラー単極励起強度関数という観測量がクラスター構造の研究にとって重要であることを始めて実証したものであった。(雑誌論文③)

(5) 3α の BrinkGCM 計算による直線鎖波動関数は、単一の THSR 波動関数との二乗 Overlap が殆ど 100%であることを発見した。この発見は、直線鎖状態は実は 1次元ボーズ凝縮ガスの状態であるという驚くべき事実を発見したことを意味する。この発見は、 ^{12}C の Hoyle 状態が単一の THSR 波動関数で記述されるという事実との深い関連を示唆するだけでなく、以下に報告する ^{20}Ne の反転二重項回転帯準位の各々が単一の THSR 波動関数で記述されるという事実との深い関連をも示唆するものである。

(6) ^{20}Ne 核の基底回転帯と負パリティの第一回転帯から成る反転 2 重項回転帯の準位の各々がそれぞれの単一の THSR 波動関数で表現されるという大発見を行った。(雑誌論文②)。反転 2 重項をなす回転帯が存在するという実験事実は、パリティを破った Intrinsic State が存在するということを意味し (H.Horiuchi and K.Ikeda, Prog.Theor. Phys. 40 (1968), 277)、それは、クラスターが空間的に局在しているということを示す確固たる証拠であると考えられて来たもの

である。このことに基づいて、一般的に、クラスター構造においてはクラスターは空間的に局在していると見なされてきた。ところが、 ^{20}Ne 核の反転 2 重項回転帯の準位のおのが、クラスターが空間非局在であることを表している単一の THSR 波動関数によって記述されるという発見は、従来の空間局在のクラスター描像を転覆するものであり、空間非局在のクラスター運動という新概念を導入させるものであったのである。(学会発表①、②、③)

空間非局在のクラスター運動を表しているにも拘わらず、THSR 波動関数が反転 2 重項回転帯の実験データを再現しているのは何故であるかという重要問題が存在する。この一見矛盾に見える問題の解答は、クラスター間パウリ排除律の働きにより解決される。クラスター間パウリ排除律は 2 つのクラスターが近接することを妨げる為に、2 体クラスター系に於いては、実質的には 2 つのクラスターが空間的に局在することとなるのである。実際に、THSR 波動関数による核子密度分布を計算するとクラスターの空間局在が明瞭に現れるのである。従来も、クラスター間パウリ排除律がクラスターの空間的局在に対して重要な役割を果たしていることは認識されていたが、空間局在の内容にはクラスター間力の効果も重要な役割があると思われていた。THSR 波動関数によって空間局在が見事に再現されるという発見は、クラスターの空間的局在がクラスター間パウリ排除律によって全面的に支配されていることを示したのである。(学会発表①)

この新概念の下ではクラスター・ガスの状態が基底状態からどのように形成されるかの力学機構について新しい理解が可能となった。つまり、クラスター・ガスの状態というのはクラスター状態として特殊なものではなく、むしろクラスター動力学にとって本質的で基礎的な状態であるという認識が獲得されたのである。

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 14 件)

① M. Kimura¹, Y. Taniguchi, Y. Kanada-En'yo, H. Horiuchi, K. Ikeda; Prolate, oblate, and triaxial shape coexistence, and the lost magicity of $N=28$ in 43S ; Phys. Rev. C 87 (2013), 011301(R), pp. 1-5; 査読有。

② B. Zhou, Z. Z. Ren, C. Xu, Y. Funaki, T. Yamada, A. Tohsaki, H. Horiuchi, P. Schuck, G. Roepke; New concept for the ground state band in ^{20}Ne within a microscopic cluster model; Physical Review C 86 (2012), 014301,

pp. 1 - 8 ; 査読有。

③ T. Yamada, Y. Funaki, T. Myo, H. Horiuchi, K. Ikeda, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki; Isoscalar monopole excitations in 160: alpha-cluster states at low energy and mean-field-type states at higher energy; Physical Review C 85 (2012), 034315, pp. 1 - 14 ; 査読有。

④ T. Yamada, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki; Nuclear alpha-particle condensates; Lecture Notes in Physics 848 (2012), pp. 229 - 298 ; 査読有。

⑤ H. Horiuchi, K. Ikeda, K. Kato; Recent developments in nuclear cluster physics; Progress of Theoretical Physics Supple. 192 (2012), pp. 1 - 238 ; 査読有。

⑥ H. Horiuchi; Coexistence of cluster and mean-field dynamics and duality of many-nucleon wave function; Romanian Journal of Physics 57 (2012), pp. 227 - 246 ; 査読有。

⑦ H. Horiuchi; Concluding remarks; Journal of Physics Conference Series 321 (2011), pp. 012042 - 012047 ; 査読有。

⑧ H. Horiuchi; Overview on the cluster structure and the alpha condensation; Acta Physica Polonica B 42 (2011), pp. 735 - 745 ; 査読有。

⑨ Y. Funaki, T. Yamada, A. Tohsaki, H. Horiuchi, G. Roepke, P. Schuck; Microscopic study of 4 alpha-particle condensation with inclusion of resonances; Physical Review C 82 (2010), 024312, pp. 1 - 15 ; 査読有。

⑩ Y. Taniguchi, Y. Kanada-En'yo, M. Kimura, K. Ikeda, H. Horiuchi, E. Ideguchi; Triaxial superdeformation in 40Ar; Physical Review C 82 (2010), 011302(R), pp. 1 - 5 ; 査読有。

⑪ H. Horiuchi; Coexistence of cluster states and mean-field-type states; Lecture Notes in Physics, 818 (2010), pp. 57 - 108 ; 査読有。

⑫ H. Horiuchi; Coexistence of cluster states and mean-field-type states; Journal of Physics G: Nuclear Physics 37 (2010), 064021, pp. 1-13 ; 査読有。

⑬ Y. Funaki, M. Girod, H. Horiuchi, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki, T. Yamada; Open problems in alpha particle condensation; Journal of Physics G: Nuclear Physics 37 (2010), 064012 ; 査読有。

⑭ H. Horiuchi; Structure change from shell-model-like ground state to cluster states; CERN-Proceedings-2010-001 (2010), pp. 47-54 査読有。 .

[学会発表] (計 15 件)

① H. Horiuchi; Non-localized clustering versus localized clustering ; RIKEN HPCI international workshop on large-scale computations for nuclear alpha particle condensation, 2012年11月13日, Nishina Center, RIKEN, (Japan).

② H. Horiuchi; Recent Development in Nuclear Cluster Theory; 10th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, 2012年9月24日, Debrecen (Hungary).

③ B. Zhou, (Z. Z. Ren, C. Xu, Y. Funaki, T. Yamada, A. Tohsaki, H. Horiuchi, P. Schuck, G. Roepke) ; New concept for the ground-state band in ²⁰Ne within a microscopic cluster model; 日本物理学会、2012年9月13日、京都産業大学。

④ 船木靖郎, (山田泰一, 堀内昶, 東崎昭弘, P. Schuck, G. Roepke) ; ¹⁶O 核に現れる $\alpha +$ Hoyle 状態と 4α 凝縮状態 ; 日本物理学会、2012年9月13日、京都産業大学。

⑤ H. Horiuchi; Cluster-Gas States in Light Nuclei; 13th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, 2012年6月11日, Varenna (Italy).

⑥ 山田泰一, (船木靖郎, 明孝之, 堀内昶, 池田清美, G. Roepke, P. Schuck, 東崎昭弘) ; ¹⁶O 核におけるアイソスカラー型単極子励起とクラスター構造; 日本物理学会、2012年3月24日、関西学院大学。

⑦ 東崎(鈴木)昭弘, (船木靖郎, 堀内昶, ピーター・シュック, ゲルト・レプケ, 山田泰一) ; (3α)- α 系の微視的研究(V); 日本物理学会、2012年3月24日、関西学院大学。

⑧ H. Horiuchi; Coexistence of cluster and mean-field dynamics and duality of many-nucleon wave function; 2nd International Symposium on Frontiers in Nuclear Physics, 2011年11月2日, Beijing (China).

⑨ 東崎(鈴木)昭弘, (船木靖郎, 堀内昶, ピーター・シュック, ゲルト・レプケ, 山田泰一) ; (3α)- α 系の微視的研究(IV); 日本物理学会、2011年9月17日、弘前大学。

⑩ H. Horiuchi; Concluding Remarks; International EFES-IN2P3 Conference on Many Body Correlations from Dilute to Dense Nuclear Systems, 2011年2月18日, Paris (France).

⑪ H. Horiuchi; Coexistence of cluster

states and mean-field-type states; International Symposium on Nuclear Physics in Asia, 2010年10月14日, Beijing (China).

⑫ H.Horiuchi ; Janus nature of the nucleus ; Workshop on Clustering and Nucleon Correlations ; 2010年9月30日、Sapporo, (Japan).

⑬ 船木靖郎, (山田泰一, 堀内昶, G. Roepke, P. Schuck, 東崎昭弘) ; 4α 直交条件模型を用いた ^{16}O のクラスター構造研究 ; 日本物理学会、2010年9月14日、九州工業大学。

⑭ 東崎(鈴木)昭弘, (船木靖郎, 堀内昶, 山田泰一, ピーター・シュック, ゲルド・レプケ) ; $(3\alpha)-\alpha$ 系の微視的研究 II ; 日本物理学会、2010年9月14日、九州工業大学。

⑮ H.Horiuchi; Overview on the cluster structure and alpha condensation; Zakopane Conference on Nuclear Physics --Extremes of Nuclear Landscape-- ; 2010年9月3日, Zakopane (Poland).

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・招聘教授
研究者番号 : 60027349

(3) 連携研究者

鈴木 昭弘 (SUZUKI AKIHIRO)

大阪大学・核物理研究センター・特任教授
研究者番号 : 20021173

山田 泰一 (YAMADA TAIICHI)

関東学院大学・工学部・教授

研究者番号 : 70200722

船木 靖郎 (FUNAKI YASURO)

独立行政法人理化学研究所・肥山ストレンジネス核物理研究室・協力研究員

研究者番号 : 00435679