

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400256

研究課題名(和文)「非局在クラスタリング」による通常クラスター構造の理解とクラスター・ガス構造

研究課題名(英文) Understanding of normal cluster structure by "nonlocalized clustering" and cluster-gas structure

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：空間非局在クラスター波動関数であるTHSR(Tohsaki-Horiuchi-Schuck-Roepke)波動関数が単一であらゆる種類のクラスター状態を良く表現することを確証することが本研究の基礎であるが、それは幾つかの代表的なクラスター状態に対して成功裡に行われた。THSR波動関数は2つ以上のContainerを表現する関数形へと一般化された。扱ったクラスター状態はHoyle状態、そのBreathing励起状態、3 弯曲腕状態、3 と4 の直線鎖状態、中性子過剰核の9Beと10Beの基底と励起状態などである。

研究成果の概要(英文)：The basic aim of this research project was to certificate that a single THSR (Tohsaki-Horiuchi-Schuck-Roepke) wave function which describes spatially nonlocalized clustering can well describe all sorts of cluster states. This aim was achieved successfully for several representative cluster states. The THSR wave function was generalized so as to express the more than one containers. The cluster states which were studied were Hoyle state, breathing excited state of the Hoyle state, 3-alpha bent-arm states, 3-alpha and 4-alpha linear-chain states, the ground and excited states of neutron-rich nuclei 9Be and 10Be, and so on.

研究分野：原子核物理学理論

キーワード：空間非局在クラスター状態 THSR波動関数 Container Hoyle状態 3 弯曲腕状態 中性子過剰核 直線鎖状態 Breathing励起

1. 研究開始当初の背景

原子核のクラスター構造に於いては、クラスターが幾何学的配位をとって局在すると考えるのが以前から基本的な考えであった。クラスター模型の代表である Brink 模型はその典型であり、例えば ${}^6\text{Li}$ と ${}^{16}\text{O}$ の 2 体クラスター系では、模型波動関数 ψ は局在すると ${}^6\text{Li}$ と ${}^{16}\text{O}$ の間の距離 R で規定される。 ψ によるエネルギー変分計算はエネルギー最小値を $R=3\sim 4\text{fm}$ に対して与える。つまりクラスターが空間局在することを支持するのである。ところが代表者の研究グループは、この Brink 模型による議論は誤りであって局在クラスターの考えは支持されないことを証明したのである。 ψ に於いてはクラスター間相対運動はガウス波束 $\exp[-\frac{1}{2}\mu(r-R)^2]$ で表わされるのであるが、その拡がりパラメーター σ は変分パラメーターではなくて固定値 σ_0 を持つ。代表者たちが証明したことは、 σ を変分パラメーターとして変分を行うと最小エネルギーを与える σ は σ_0 よりもずっと小さい値をとり、その値に対しては $R=0$ の時が最小エネルギーを与えるということであった。つまり、クラスターは局在していないのことが分かったのである。この発見により、クラスター構造に対する従来の基本的考えの変更という大きな研究目的の研究計画の構築へと向かうこととなった。

2. 研究の目的

クラスターが幾何学的配位をとって局在するとするのが、クラスター構造に対する従来の基本的考えであるが、これを逆転して大変革して「非局在クラスター構造」という新概念に基づいたクラスター構造の研究を確立するのがこの研究計画の目的であった。その為に、(イ)旧概念により説明されたクラスター状態を新概念を用いて記述し直すとともに(ロ)新概念によって新たなクラスター構造の研究を推進した。核構造の新たな形態である「クラスター・ガス構造」は勿論、非局在クラスター構造であるので、新概念による通常クラスター構造の研究はクラスター・ガス構造の研究に重要な新視点を与えるもので、この新視点の研究も研究計画の重要な目的であった。旧概念により説明されて来たクラスター構造は多種多様であるが、代表的とされる空間局在のクラスター構造を選んで取り上げて、その構造を 1 つ 1 つ、新概念を用いて記述するという形の研究を推進することとした。

3. 研究の方法

具体的な研究対象として、 ${}^{16}\text{O} + {}^4\text{He}$ 構造の正負パリティ回転帯、 ${}^{12}\text{C}$ の Hoyle 状態などの 3 構造状態、直線鎖構造、中性子過剰の Be 同位体核などを、代表的なクラスター構造として取り上げて、非局在クラスターの THSR 波動関数で解析して Brink 波動関数による解析と比較検討した。多様

なクラスター構造を記述するのであるから、空間非局在のクラスター波動関数としての THSR 波動関数もその関数形を、複数の拡がりパラメーターの関数形へと拡張した。THSR 波動関数による核子密度は 2 体クラスター系の場合は空間局在したクラスターを示すが、これはクラスター間パウリ排他律によるものであり、THSR 波動関数とクラスター局在との関連を核子全反対称化の観点からより深く研究した。特に直線鎖構造の本質を非局在クラスター構造との関連で研究した。また、新概念に基づいた形で新たなクラスター構造の研究を推進する為に、Hoyle 状態の Breathing 励起状態を取り上げて、拡張した THSR 波動関数を用いて追究し、その中でクラスターの空間局在構造の 3 弯曲腕状態についても研究した。

4. 研究成果

空間非局在クラスター波動関数の THSR 波動関数が単一であらゆる種類のクラスター状態を良く表現することを確認することが本研究の中心であるが、それは幾つかの代表的なクラスター状態に対して成功裡に行われた。実際の研究は THSR 波動関数の拡がりパラメーターに関する生成座標法計算を実行することにより行われたのであるが、その結果として得られたエネルギー固有波動関数が実は単一の THSR 波動関数で極めて良く近似されることが確かめられたのである。その過程で THSR 波動関数は 2 つ以上の Container を表現する関数形へと一般化された。扱ったクラスター状態は Hoyle 状態、その Breathing 励起状態、3 弯曲腕状態、3 と 4 の直線鎖状態、中性子過剰核の ${}^9\text{Be}$ と ${}^{10}\text{Be}$ の基底と励起状態などであった。この研究成果の重要な利用の例として、クラスター状態をも扱える Ab initio 計算理論として最近開発した「テンソル最適化反対称分子動力学」に於いては THSR 波動関数をクラスター状態記述に適用することとなっている。

この研究成果が示したことは、拡張された THSR 波動関数はあらゆるクラスター状態を良く記述するとの考えが益々確認されたことであり、そのことはクラスター構造が「非局在クラスター動力学とクラスター間パウリ排他律」を基盤として形成されているという新しい認識を与えることとなった。その認識の上に立って、クラスター状態が殻模型的構造を持つ基底状態から始まって、励起エネルギーの上昇に伴って、次々と形成されていく動力的過程の解明が次の大きな研究課題となっている。

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 11 件)

- (1) C. Xu, Z. Ren, G. Roepke, P. Schuck, Y. Funaki, H. Horiuchi, A. Tohsaki, T. Yamada, B. Zhou, Alpha-decay width of ^{212}Po from a quartetting wave function approach, *Physical Review C* 93, 査読有, 2016, 011306(R), pp.1-5.
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.011306
- (2) T. Myo, H. Toki, K. Ikeda, H. Horiuchi, T. Suhara, Tensor-optimized antisymmetrized molecular dynamics in nuclear physics, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2015, 査読有, 2015, 073D02, pp.1-38. DOI: 10.1093/ptep/ptv087
- (3) M. Lyu, Z. Ren, B. Zhou, Y. Funaki, H. Horiuchi, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki, C. Xu, T. Yamada, Investigation of ^9Be from a nonlocalized clustering concept, *Physical Review C* 91, 査読有, 2015, 014313, pp.1-9. DOI: 10.1103/PhysRevC.91.014313
- (4) Y. Funaki, H. Horiuchi, A. Tohsaki, Cluster models from RGM to alpha condensation and beyond, *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 82, 査読有, 2015, pp.78-132, DOI: 10.1016/j.pnnp.2015.01.001
- (5) H. Horiuchi, Present status of nuclear cluster physics (Theory), *Journal of Physics Conference Series* 569, 査読有, 2015, 012001, pp.1-7.
DOI: 10.1088/1742-6596/569/1/012001
- (6) G. Roepke, P. Schuck, Y. Funaki, H. Horiuchi, Z. Ren, A. Tohsaki, C. Xu, T. Yamada, B. Zhou, Nuclear clusters bound to doubly magic nuclei: The case of ^{212}Po , *Physical Review C* 90, 査読有, 2014, 034304, pp.1-19, DOI: 10.1103/PhysRevC.90.034304
- (7) B. Zhou, Y. Funaki, A. Tohsaki, H. Horiuchi, Z. Ren, The container picture with two-alpha correlation for the ground state of ^{12}C , *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2014, 査読有, 2014, 101D01, pp.1-7. DOI: 10.1093/ptep/ptu127
- (8) B. Zhou, Y. Funaki, H. Horiuchi, Z. Ren, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki, C. Xu, T. Yamada, Nonlocalized cluster dynamics and nuclear molecular structure, *Physical Review C* 89, 査読有, 2014, 034319, pp.1-23. DOI: 10.1103/PhysRevC.89.034319
- (9) T. Suhara, Y. Funaki, B. Zhou, H. Horiuchi, A. Tohsaki, One-Dimensional alpha Condensation of alpha-Linear-Chain States in ^{12}C and ^{16}O , *Physical Review Letters* 112, 査読有, 2014, 062501, pp.1-5.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.062501
- (10) B. Zhou, Y. Funaki, H. Horiuchi, Z. Ren, G. Roepke, P. Schuck, A. Tohsaki, C. Xu, T. Yamada, Nonlocalized clustering: A new concept in nuclear cluster structure physics, *Physical Review Letters* 110, 査読有, 2013, 262501, pp.1-5.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.262501
- (11) H. Horiuchi, Recent developments in nuclear cluster theory, *Journal of Physics Conference Series* 436, 査読有, 2013, 012003, pp.1-7.
DOI: 10.1088/1742-6596/436/1/012003
- 〔学会発表〕(計8件)
- (1) 明孝之(須原唯広、土岐博、堀内昶、池田清美) テンソル最適化反対称化分子動力学による軽い核におけるテンソル相関の多体項の効果、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日、東北学院大学泉キャンパス(宮城県仙台市)
- (2) 須原唯広(明孝之、土岐博、堀内昶、池田清美) テンソル最適化反対称化分子動力学による ^4He の励起状態、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日、東北学院大学泉キャンパス(宮城県仙台市)
- (3) 山田泰一(明孝之、須原唯広、土岐博、堀内昶、池田清美) テンソル最適化反対称化分子動力学に依拠した変分法による非相対論的核物質の研究、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日、東北学院大学泉キャンパス(宮城県仙台市)
- (4) 土岐博(明孝之、須原唯広、堀内昶、池田清美) テンソル最適化反対称化分子動力学(TOAMD)による相対論的核物質、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日、東北学院大学泉キャンパス(宮城県仙台市)
- (5) 明孝之(須原唯広、土岐博、堀内昶、池田清美) テンソル最適化反対称化分子動力学による軽い核の記述、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月25日、大阪市立大学杉本キャンパス(大阪府大阪市)
- (6) 須原唯広(明孝之、土岐博、堀内昶、池田清美) テンソル最適化反対称化分子動力学を用いた p 殻核の研究、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月25日、大阪市立大学杉本キャンパス(大阪府大阪市)
- (7) 土岐博(明孝之、須原唯広、堀内昶、池田清美) テンソル最適化反対称化分子動力学(TOAMD)による相対論的核物質、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月25日、大阪市立大学杉本キャンパス(大阪府大阪市)
- (8) 須原唯広(船木靖郎、周波、堀内昶、東崎昭弘) ^{12}C 、 ^{16}O のリニアチェーン構造における一次元凝縮、日本物理学会第69回年次大会、2014年3月30日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)

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

船木 靖郎 (FUNAKI Yasuro)
理化学研究所・仁科加速器研究センター・
研究員
研究者番号：00435679

鈴木(東崎) 昭弘 (SUZUKI(TOHSAKI) 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・理工学部・教授
研究者番号：70200722