

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015 ~ 2017

課題番号：15K05072

研究課題名 (和文) 酸素16生成の鍵-炭素12+ 閾値近傍状態の構造研究-

研究課題名 (英文) A key to produce 16O--Structure study of states close to 12C+ threshold

研究代表者

鈴木 宜之 (SUZUKI, YASUYUKI)

新潟大学・自然科学系・名誉教授

研究者番号：70018670

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 3,600,000 円

研究成果の概要 (和文) : 相関ガウス関数法を用いて原子核のクラスター状態に代表される強い多体相関記述の一連の研究を進め、宇宙核物理に関する研究成果も多数得た。芯核とのパウリ原理を考慮しつつ、芯核周りの4核子の殻模型状態とクラスター状態を同時に記述し得る方法の定式化を行い、挑戦的な5体計算の計算コードを開発することができた。しかしながら、必要とされる模型空間が非常に大きいため、波動関数の完全な収束を得るためにはさらなる実行時間が必要である。より効率的な計算アルゴリズムの検討も含め、研究期間終了後も引き続き検討を続け、12C+ 放射性捕獲反応の信頼のおける評価を行いたい。

研究成果の概要 (英文) : We have developed a series of studies using correlated Gaussians in order to describe many-particle correlated motion like nuclear clustering. With this method we have published a number of papers including nuclear astrophysical research. Especially we have developed a computer code based on a framework of a core nucleus plus a few valence nucleons. This is important to reliably calculate the rate of 12C+ radiative capture reactions to produce 16O. However, the elimination of Pauli-forbidden configurations costs expensive configuration space. We think further development in theory and computer resources is needed to select important basis functions.

研究分野：原子核理論

キーワード：nuclear clustering astrophysical reactions correlated Gaussians

## 1. 研究開始当初の背景

星の中における元素の生成過程において、酸素16は鍵となる原子核で、炭素12原子核の生成後、引き続いて $\alpha$ 粒子(ヘリウム原子核)を捕獲し生成される。この主要な過程は良く知られた放射性捕獲反応と呼ばれるもので、 $\alpha$ 粒子と炭素原子核が極低エネルギーの連続状態からクーロン障壁を通過し、ガンマ線を放出しつつ酸素16原子核基底状態へと遷移する。このような反応率は極めて小さく、実験的検証は困難なため、信頼における理論計算が望まれている。

水素-水素(pp)鎖反応ないし炭素12-酸素14-酸素16(CNO)サイクルによる水素燃焼からヘリウム4が生成され、さらに3個の $\alpha$ 粒子からHoyle共鳴状態を経由して炭素12原子核( $^{12}\text{C}$ )ができることは良く知られている。この反応率の計算はクーロン3体問題特有の難しさがあり、この数年諸グループによって取り上げられ、いろいろな方法で計算された。本研究課題では水素、ヘリウムに次いで多い元素である酸素16原子核生成の機構に関係する。酸素16生成の放射捕獲 $^{12}\text{C}+\alpha$ 反応は、炭素12原子核生成のように共鳴状態を経由して反応が起こるのではなく、通常の連続状態から電気双極子(E1)及び電気四重極子(E2)の $\gamma$ 線を放出し、酸素16の基底状態に遷移する過程である。理論上の課題はこのようなE1、E2反応率を高精度で決定することである。それは $^{12}\text{C}+\alpha$ の閾値近傍の束縛状態と連続状態を統一的に扱うことに対応するが、そのような理論計算は未だ成されていない。とりわけE1遷移の理論的扱いが難しい課題となっている。

## 2. 研究の目的

酸素16原子核生成の鍵となる放射性捕獲 $^{12}\text{C}+\alpha$ 反応の高精度記述のため、 $^{12}\text{C}+\alpha$ 閾値近傍束縛状態を $^{12}\text{C}+2$ 中性子+2陽子の5

体系で記述する。信頼性の高い確率論的変分法を用いて、高精度波動関数を求め、 $^{12}\text{C}+\alpha$ 閾値近傍状態の統一的理解を目指す。2中性子と2陽子の対称性を課さないことによるアイソスピンの混合を考慮する。

## 3. 研究の方法

酸素16原子核系における $^{12}\text{C}+\alpha$ 近傍状態を $^{12}\text{C}+4$ 核子の5体系で記述する。4核子の芯核から受けるパウリ排他律を考慮しながら、4個の核子群の運動の配位空間を制限しない第一原理的アプローチを用いる。広大な配位空間における数値計算は、格子点を用いた通常の対角化法は無力であるが、本研究課題では乱数を用いた確率論的変分法により最適な配位を選定することで、現実的に計算を実行する。4核子が $\alpha$ 粒子を生成したり、それから壊れたりする過程をできるだけ偏見なく取り入れることを目指す。

## 4. 研究成果

### (1) 成果概要

途中結果を含む関連の研究成果は12本の雑誌論文、1件の著書、12件の国内・国際会議口頭発表等、多数発表された。本研究課題で用いられた相関ガウス関数法による、原子核のクラスター状態に代表される、原子核内の強い多体相関記述についての一連の研究に関する総説が出版された。原子核における $\alpha$ クラスターの発現について、何故その理論的記述が難しいかを定量的に示し、その成果は共著書の一章としてまとめられた(著書①)。また、本計画に密接に関連した宇宙核物理に関する研究成果も多数得られた。以下により具体的な内容を示す。

## (2) 主な成果と研究の現状

研究期間を通じての大きな成果は、芯核とのパウリ原理を考慮しつつ、芯核周りの4核子の殻模型状態とクラスター状態を同時に記述し得る方法の定式化を行ったことである。また、殻模型状態とクラスター状態の関係を定量化し、従来の方法による計算の問題点を明らかにした（著書①）。また、局在した原子核クラスター状態を記述する新たな方法の提案を行い、それらは原著論文①としてまとめられ、そこでは  $4\alpha$  直鎖状態への応用を通じてその有用性が議論された。

芯核との直交条件付5体系の高精度記述については検討中であるが、挑戦的な5体計算の計算コードは既に開発済みである。残すところは実際の数値計算の実行とその評価である。現在、確率論的変分法による5体波動関数の最適化を行っている。必要とされる模型空間が非常に大きいため、波動関数の完全な収束を得るためにはさらなる実行時間が必要である。より効率的な計算アルゴリズムの検討も含め、研究期間終了後も引き続き検討を続け、 $^{12}\text{C}+\alpha$  放射性捕獲反応の信頼のおける評価を行いたい。

## (3) 関連の成果

### ①ニュートリノ原子核反応の高精度記述

我々の宇宙にある元素の合成過程において、恒星内での超新星爆発におけるニュートリノ原子核反応は決定的な役割を成すことが知られているが、 $^{12}\text{C}+\alpha$  放射性捕獲反応同様、反応率が極端に小さいため、実験による検出が難しく、系統的な反応率の評価は理論計算に頼らざるを得ない。理論的にニュートリノ反応は放射捕獲反応の逆反応に対応する（ただし包括的反応）もので、E1やそれに類似した遷移で記述される。精密な構造・反応理論による第一原理的記述によって、信頼のおける反応率の評価を行

った。このようにして得られた精密ニュートリノ原子核反応率は宇宙において最も激しい爆発的天体現象の一つである超新星爆発機構の理解に大きく貢献することが期待されている。成果は総説論文④として発表された。

### ②全反応断面積系統解析による E1励起と核構造との関係

重い標的原子核による高エネルギー原子核衝突の系統的な分析を行った。鉛、錫のような大きな電荷を持つ原子核を標的核とした全反応断面積は、入射原子核（カルシウム、ニッケル、錫）の E1励起強度に強く依存することを示した。通常全反応断面積は半径に関する量として知られているが、特に比較的エネルギーの低い原子核衝突では入射原子核の低励起 E1 遷移強度に感度があり、直接測定が難しい不安定原子核の励起強度を観測するための有力な観測量であることが示された（論文②）。

また、中性子星の性質、非対称核物質の状態方程式を理解するために重要である不安定原子核における中性子スキン厚を、具体的に決定する方法についての検討を行った。中性子半径及び陽子半径の差によって定義される中性子スキン厚を、全反応断面積や荷電変化断面積の系統的解析によって、それらとの関係を見出した。（論文⑥、⑦、⑫）。

### ③トリプル $\alpha$ 反応による $^{12}\text{C}$ 原子核の生成

この反応は2個の  $\alpha$  粒子が共鳴をもつことと、3  $\alpha$  粒子がお互いのクーロン相互作用により遠方でも相互作用をするために理論的に扱いが難しいものとして有名である。とりわけ、閾値近傍のホイール共鳴を正しく記述できるかどうかも重要

である。3体問題の特化した超球座標法を用いて精密な計算を行った。既存の計算の中でも最も精密な反応率を与えることができたと思っている。(論文⑧、⑩)

#### 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 12件)

- 1 Y. Suzuki, W. Horiuchi, Correlated-Gaussian approach to linear-chain states: Case of four-alpha particles, Phys. Rev. C 95, 044320-1-12 (2017), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.95.044320
- 2 W. Horiuchi, S. Hatakeyama, S. Ebata, Y. Suzuki, Low-lying electric dipole strengths of Ca, Ni, and Sn isotopes imprinted on total reaction cross sections, Phys. Rev. C 96, 024605-1-11 (2017), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.96.024605
- 3 W. Horiuchi, Y. Suzuki, Alpha clustering near nuclear surface and harmonic-oscillator excitations, J. Phys. G: Conf. Ser. 863, 012007-1-5 (2017), 査読有, DOI: 10.1088/1742-6596/863/1/012007
- 4 S.X. Nakamura, H. Kamano, Y. Hayato, M. Hirai, W. Horiuchi, S. Kumano, T. Murata, K. Saito, M. Sakuda, T. Sato, Y. Suzuki, Towards a unified model of neutrino-nucleus reactions for neutrino oscillation experiments, Rep. Prog. Phys. 80, 056301-1-38 (2017), 査読有, DOI: 10.1088/1361-6633/aa5e6c
- 5 W. Horiuchi, Y. Suzuki, Five-body

calculation with Pauli constraint for shell- and cluster-structure in 160, EPJ Web of Conf. 113, 06018-1-4 (2016), 査読有, DOI: 10.1051/epjconf/201611306018

- 6 Y. Suzuki, W. Horiuchi, S. Terashima, R. Kanungo (他30名), Parameter-free calculation of charge-changing cross section at high energy, Phys. Rev. C 94, 011602-1-5 (2016), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.94.011602
- 7 R. Kanungo, W. Horiuchi, G. Hagen, G.R. Jansen, P. Navratil (他30名), Proton distribution radii of 12-19C illuminate features of neutron halos, Phys. Rev. Lett. 117, 102501-1-6 (2016), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.102501
- 8 H. Suno, Y. Suzuki, P. Descouvemont, Precise calculation of the triple-alpha reaction rates using the transmission-free complex absorbing potential method, Phys. Rev. C 94, 054607-1-14 (2016), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.94.054607
- 9 C. Nakamoto, Y. Suzuki, Quark-Pauli effects in three octet-baryons, Phys. Rev. C 94, 035803-1-9 (2016), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.94.035803
- 10 W. Horiuchi, S. Hatakeyama, S. Ebata, Y. Suzuki, Extracting nuclear sizes of medium to heavy nuclei from total reaction cross sections, Phys. Rev. C 93, 044611-1-16 (2016), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.93.044611

- 11 H. Suno, Y. Suzuki, P. Descouvemont, Triple-alpha continuum structure and Hoyle resonance of  $^{12}\text{C}$  using the hyperspherical slow variable discretization, Phys. Rev. C 91, 014004-1-9 (2015), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.91.014004
- 12 Y. Suzuki, Adiabatic hyperspherical approach to large-scale nuclear dynamics, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 043D05-1-20 (2015), 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptv052

[学会発表] (計 10件)

- 1 W. Horiuchi, S. Hatakeyama, S. Ebata, Y. Suzuki, Structure of unstable nuclei studied with total reaction cross sections, The international Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2017 (ISPUN2017), Halong City, Vietnam, 2017.9.25-30.
- 2 堀内渉, T. Neff, H. Feldmeier, 鈴木宜之, 精密少数体波動関数にみる多核子相関, 基研研究会「核力に基づく核構造、核反応物理の展開」, 京都大学基礎物理学研究所, 2017.3.27-29
- 3 鈴木宜之, 堀内渉,  $4\alpha$  線形鎖状構造, 基研研究会「核力に基づく核構造、核反応物理の展開」, 京都大学基礎物理学研究所, 2017.3.27-29
- 4 Y. Suzuki, Triple-alpha reactions at low temperatures, ECT\* workshop 'Three-body systems in reactions with rare isotopes', ECT\*, Trento, Italy, 2016, 10.3-7.
- 5 鈴木宜之, 全反応断面積及び荷電変化断面積による核半径, 日本物理学会

2016年秋季大会, 宮崎大学木花キャンパス, 2016.9.21-24

- 6 W. Horiuchi, Y. Suzuki, Alpha-clustering near nuclear surface and harmonic-oscillator excitations, 11th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (Cluster' 16), University of Naples, Naples, Italy, 2016.5.23-27
- 7 堀内渉, 全反応断面積による陽子・中性子半径の研究, RCNP研究会「全反応断面積に及び荷電変化断面積による陽子・中性子半径研究の現状と展望」, 大阪大学核物理研究センター, 2016.1.12-13
- 8 堀内渉, 全反応断面積を用いた重い原子核の中性子スキン厚の導出, 日本物理学会 2015年秋季大会, 大阪市立大学杉本キャンパス, 2015.9.25-28
- 9 堀内渉, ヘリウム同位体の励起と核子相関, 日本物理学会 2015年秋季大会, 大阪市立大学杉本キャンパス, 2015.9.25-28
- 10 W. Horiuchi, Y. Suzuki, Few-body calculation with Pauli constraint for shell- and cluster-structure in  $^{16}\text{O}$ , The 21st International Conference on Few-Body Problems in Physics, Chicago, USA, 2015.5.18-22

[図書] (計 1件)

- 1 Y. Suzuki, W. Horiuchi, Clustering in light nuclei with the correlated Gaussian approach, World Scientific Review Volume

“Emergent Phenomena in Atomic Nuclei from Large-scale Modeling: Asymmetry-Guided Perspective”, Chapter 7, 199-227 (2017), edited by K. Launey, 査読有 DOI: 10.1142/9789813146051\_0007

〔その他〕

ホームページ等

北海道大学原子核理論研究室

<http://nucl.sci.hokudai.ac.jp/tnpl/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 宜之 (SUZUKI, Yasuyuki)

新潟大学・自然科学系・名誉教授

研究者番号：70018670

### (2) 研究分担者

堀内 渉 (HORIUCHI, Wataru)

北海道大学・理学研究院・講師

研究者番号：00612186