

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800121

研究課題名(和文) 第一原理計算による不安定核・宇宙核反応の研究

研究課題名(英文) Ab initio calculation for unstable nuclei and astrophysical reactions

研究代表者

堀内 渉 (Horiuchi, Wataru)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00612186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：原子核は核力によって束縛する、多数の核子(陽子、中性子の総称)からなる量子力学的多体系である。本研究では核子系のダイナミクスを精密に記述し、未知の原子核の予言や宇宙核物理に必要な反応率の信頼のおける評価を目指した。実施された3年間で研究は大きく進展し、その成果は14編の原著論文及び総説、13件の国内外学会における招待講演によって成された。特に精密波動関数を用いた原子核構造、反応研究に大きな進展があり、原子核における殻的・分子的状态の統一的記述や、不安定原子核の励起応答、実験の困難なニュートリノ-原子核反応等を非経験的に記述することに成功した。

研究成果の概要(英文)：An atomic nucleus is composed of nucleons (proton and neutron) interacting with the nuclear force that belongs to the 'strong' interaction. Structure and reactions involving many nucleons are studied with precise many-body wave functions. We published 14 original and review papers and gave 13 invited talks in international and domestic meetings. Successful works are highlighted as follows: a unified description of both shell- and cluster-configurations in oxygen 16, nuclear responses of unstable neutron-rich nuclei, and application to neutrino-nucleus reactions.

研究分野：原子核理論

キーワード：原子核構造 原子核反応 核力 不安定原子核 宇宙核物理 量子力学的多体問題

1. 研究開始当初の背景

原子核は自然界の4つの力の一つ「強い相互作用」に属する核力によって束縛する、多数の核子(陽子、中性子の総称)からなる量子力学的多体系である。核力から出発した核子多体系の記述は原子核物理学における長年の夢である。核力を用いて非経験的に得られた結果は、信頼性と予言力を持つ。しかし扱うべき核力は短距離斥力、テンソル力といった特徴を持ち、そのことが多体の方程式の解をより複雑にしている。

現実的核力を用いた第一原理計算は困難で、ファデーエフ法等の少数粒子系計算は現在のところ4体系程度しか扱えない。最先端の構造計算は12核子系まで到達していて、他の追従を許さない状況にある。閉殻を仮定しない殻模型は有効相互作用を用いることでより重い系に対し一定の成果を挙げているが、模型空間の制限からクラスター(分子的)状態を記述するのは困難である。

殻的、クラスターの状態といった一見異なった、しかし相補的な配位を包括的に記述することは挑戦的であるが、原子核の励起構造を含めた深い理解には必要不可欠である。それらの状態の共存・競合機構を偏見なしに記述し、ドリップ線(原子核の存在限界)原子核の分光学的性質に至るまで分析可能な理論が必要とされている。

2. 研究の目的

本研究では第一原理計算による未知の原子核の予言、宇宙核物理で必要な反応率の信頼のおける評価を行う。近年の目覚ましい実験技術の発展により、今まで到達し得なかった陽子・中性子数のバランスが崩れた不安定同位体を作ることが可能になってきた。それらは「安定」原子核と異なった性質を示すことが明らかになってきて、そのような未知の原子核の性質や、原子核の存在限界を知るには現実的核力から出発した非経験的手法による解析が唯一の方法である。また、我々の元素の組成を決める宇宙核反応の実験は難しく、精度のよい見積の為にはそのような理論に頼らざるを得ないが、安定核から不安定核まで取り扱える理論は未だ確立していない。そこで多くの核子を含んだ系を非経験的に記述する理論を確立し、それを応用するのが本研究の目的である。

3. 研究の方法

原子核の持つ多様な性質、とりわけ軽い核の励起状態に見られるクラスター及び殻構造の共存・競合や、核子が芯核の周りを臈雲のように分布するハロー構造に代表されるドリップ線近傍核に特異な現象を包括的にかつ信頼のおける相互作用から記述したい。核子多体系の全情報は多体波動関数に含まれている。そのため波動関数を可能な限り精度よく求めることを考える。本研究では強く相関した系を記述する強力な手法である波

動関数の相関基底関数展開法を進展させ、不安定原子核の性質や宇宙核物理に重要な物理量の解析を行った。

4. 研究成果

実施された3年間で研究は大きく進展し、その成果は14編の原著論文及び総説、13件の国内外学会における招待講演によって成された。特に精密波動関数を用いた原子核構造、反応研究に大きな進展があり、原子核の殻的・分子的状态の統一的記述や、不安定原子核の励起応答、実験の困難なニュートリノ-原子核反応等を非経験的に記述することに成功した。新たな課題も見つかり、これらの成果を基としてさらなる研究の発展が期待される。以下に主な成果の概要を示す。

(1) 酸素16の低励起状態における殻的・クラスター的状态の統一的記述

長年の未解決問題の一つとして、 ^{16}O の不思議な 0^+ と呼ばれる低励起状態の理論的記述の問題がある。第一励起状態は炭素12と(ヘリウム4原子核)のクラスター状態が発達していると考えられていて、炭素12の第一励起状態(3 クラスター状態)が星の中の元素合成で重要な寄与を成すように、微視的理解が必要とされてきた。このような殻模型的な基底状態と一見異なった描像が共存する系を統一的に扱うのは困難であり、現行の大規模計算を持ってしても基底状態と同時に再現することは成されていない。ここでは クラスターを仮定しない炭素12と4核子の5体模型による解析を行い、基底状態と第一励起状態のエネルギーは実験と矛盾なく得た。基底状態は炭素12の周りを粒子が独立に運動する殻模型の構造が主であるが、励起状態は良く発達した クラスター状態であることが示された。また、現在の大規模計算の問題点を指摘した。

(2) 多核子相関の調和振動子主量子数による定量化

殻模型は標準的な微視的原子核模型で、波動関数は1粒子調和振動子の反対称化積によるスレーター行列式で表現される。近年芯核を仮定しない殻模型による第一原理計算が発展しているが、核力の高運動量成分を取り込むには多数の配位を混合する必要がある。本研究は精密波動関数を求める上で強力な方法の一つである相関ガウス基底+グローバルベクトル法に対し、波動関数に含まれる調和振動子量子数を計算する方法を開発し、4核子以下の系の精密多体波動関数の主量子数分布を調べた。核力に特徴的な短距離斥力、テンソル力は高い主量子数として現れ、またクラスター状態については分布が極端に広がり、そのような配位を殻模型計算に取

り込むことの難しさを示した。

(3) 不安定原子核ヘリウム6のソフト双極子励起構造の解明

ヘリウム6は自然に存在する通常のヘリウム原子核より2つ中性子が余分に束縛された系である。ヘリウム6はヘリウム4原子核を芯として周りに2つの中性子が大きく拡がって分布するハロー構造を持つと考えられていて、ソフトモードと呼ばれる芯核と2価中性子間の振動モードの存在が、中性子過剰原子核特有の現象として予想されていた。通常ヘリウム4芯核を仮定した3体計算での記述が行われているが、本研究ではモデルを仮定しない6体計算の立場から電気双極子励起機構を研究し、低励起状態は価中性子の励起が主のソフトモードであることを示した。

(4) ニュートリノ - 原子核反応への応用

現在、重力崩壊型の超新星爆発シナリオによれば、最終段階で鉄の芯が溶け、大量のニュートリノ()が放出される。それらが物質にどれだけエネルギーを置いていくかが問題で、現行のシミュレーションでは観測から予想される爆発エネルギーを再現しない。そのため - 原子核反応の正確な見積もりが必要となってくるが、反応率が極めて小さいため、実験で確かめることが難しい。そのような場合、信頼の出来る核構造理論からの評価は不可欠である。得られた第一原理波動関数を用い、星の最終段階に外側に大量に分布すると考えられている - ヘリウム4反応の評価を行った。

(5) 不安定原子核のスキン厚測定法の提案

近年の実験技術の発展により、陽子、中性子数が大きく異なった不安定核原子核が作ることができるようになってきた。安定核での常識が覆され、エキゾチックな現象が次々と観測されている。安定原子核では陽子・中性子半径はほぼ等しいことが知られているが、中性子過剰核では中性子スキンと呼ばれる中性子が陽子の外に張り出す構造が現れる。このようなスキン厚の系統性の理解は不安定原子核構造の理解だけでなく中性子星の物性の解明につながる。

系統的な構造計算と反応理論に基づいた解析を実行し、中性子スキン厚の現実的な測定法を提案した。アイデアは核子-核子散乱断面積のエネルギー依存性を利用することにある。核子-核子相互作用は高エネルギーでは陽子・中性子に等しく作用するが、低エネルギーでは中性子により感度がある。陽子標的による全反応断面積を低・高エネルギーの2点で測定することで、陽子・中性子半径を同時に決定できることを示した。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計25件)

W. Horiuchi, S. Hatakeyama, S. Ebata, Y. Suzuki, Extracting nuclear sizes of medium to heavy nuclei from total reaction cross sections, Phys. Rev. C、査読有、93、2016、044611-1-16
DOI: 10.1103/PhysRevC.93.044611

H. Matsubara (他36名、12番目)、Nonquenched Isoscalar Spin-M1 Excitations in sd-Shell Nuclei, Phys. Rev. Lett.、査読有、115、2015、102501-1-6
DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.102501

T. Neff, H. Feldmeier, W. Horiuchi, Short-range correlations in nuclei with similarity renormalization group transformations, Phys. Rev. C、査読有、92、2015、024003-1-12
DOI: 10.1103/PhysRevC.92.024003

S. Terashima, I. Tanihata, R. Kanungo, A. Estrade, W. Horiuchi (他31名)、Proton radius of ^{14}Be from measurement of charge changing cross sections ”、Prog. Theor. Exp. Phys.、査読有、2014、01D02-1-7
DOI: 10.1093/ptep/ptu134

A. Estrade, R. Kanungo, W. Horiuchi (他32名)、Proton Radii of $^{12-17}\text{B}$ Define a Thick Neutron Radius in ^{17}B , Phys. Rev. Lett.、査読有、113、2014、132501-1-5
DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.132501

W. Horiuchi and Y. Suzuki, Harmonic-oscillator excitations of precise few-body wave functions, Phys. Rev. C、査読有、90、2014、034001-1-8
DOI: 10.1103/PhysRevC.90.034001

T. Inakura, W. Horiuchi, Y. Suzuki, T. Nakatsukasa, Mean-field analysis of ground and low-lying electric dipole strength in ^{22}C , Phys. Rev. C、査読有、89、2014、064316-1-8
DOI: 10.1103/PhysRevC.89.064316

D. Mikami, W. Horiuchi, Y. Suzuki, Electric dipole response of ^6He : Halo-neutron and core excitations, Phys. Rev. C、査読有、89、2014、064303-1-11
DOI: 10.1103/PhysRevC.89.064303

W. Horiuchi, Y. Suzuki, T. Inakura, Probing neutron-skin thickness with total reaction cross sections, Phys. Rev. C、査読有、89、2014、011601(R)-1-5
DOI: 10.1103/PhysRevC.89.011601

W. Horiuchi, Y. Suzuki, Correlated-basis description of α -cluster and delocalized 0^+ states in ^{16}O , Phys. Rev. C, 査読有、89、2014、011304(R)-1-5
DOI: 10.1103/PhysRevC.89.011304

W. Horiuchi, Y. Suzuki, Tests of a deformable core plus few-nucleon model, Few-Body Syst., 査読有、55、2014、121-133
DOI: 10.1007/s00601-013-0762-6

J. Mitroy, S. Bubin, W. Horiuchi (他7名)、Theory and application of explicitly correlated Gaussians, Rev. Mod. Phys., 査読有、85、2013、693-749
DOI: 10.1103/RevModPhys.85.693

W. Horiuchi, Y. Suzuki, Spin-dipole strength functions of ^4He with realistic nuclear forces, Phys. Rev. C, 査読有、87、2013、034001-1-16
DOI: 10.1103/PhysRevC.87.034001

[学会発表](計29件)

W. Horiuchi, Precise Solution of Few-Body Systems with Correlated Gaussian Method, 2015年12月5-6日、The Second Myanmar-Japan Symposium(招待講演)、Patheingyi (Myanmar)

W. Horiuchi, T. Murata, T. Sato, Y. Suzuki, Ab initio few-body approach to neutrino-nucleus reactions(招待講演)、2015年12月1-3日、新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会、ニューウェルシティ湯河原(静岡県熱海市)

W. Horiuchi, Harmonic-oscillator excitations of precise few-body wave functions, 2015年10月12-16日、The long term workshop “Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics”(招待講演)、京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市)

堀内渉、ヘリウム同位体の励起と核子相関、2015年9月25-28日、日本物理学会2015年秋季大会(シンポジウム講演)、大阪市立大学杉本キャンパス(大阪府大阪市)

W. Horiuchi, Neutron-proton correlations in ^4He , 2015年7月6-9日、The 2nd International Workshop & 12th RIBF Discussion on Neutron-Proton Correlations(招待講演)、Hong Kong (China)

W. Horiuchi, Y. Suzuki, Five-body

calculation with Pauli constraint for shell- and cluster-structure in ^{16}O , 2015年5月18-22日、The 21st International Conference on Few-Body Problems in Physics, Chicago (USA)

W. Horiuchi, Electric dipole response of ^6He ; Halo-neutron and core excitations, 2015年1月6-23日、International Molecular-type Workshop “Structure and reactions of light exotic nuclei”(招待講演)、京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市)

W. Horiuchi, Electroweak responses of helium isotopes, 2014年11月5-6日、Workshop on neutrino nuclear responses for neutrino studies in nuclei(招待講演)、大阪大学核物理研究センター(大阪府茨木市)

W. Horiuchi, D. Mikami, Y. Suzuki, Microscopic study of soft and giant dipole resonances in ^6He , 2014年10月7-11日、Forth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, Hawaii (USA)

W. Horiuchi, Probing neutron-skin thickness of unstable nuclei with total reaction cross sections, 2014年9月8-13日、International Symposium on Exotic Nuclei(招待講演)、Kaliningrad (Russia)

W. Horiuchi, Dynamics of nuclear four- and five-body systems with correlated Gaussian method, 2014年5月26-30日、3rd International Workshop on “State of the Art of Cluster Physics”(招待講演)、関東学院大学(神奈川県・横浜市)

W. Horiuchi, Correlated-basis approach to nuclear four- and five-body problems, 2014年4月7-11日、The Sixth Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics 2014(招待講演)、Hahndorf (Australia)

W. Horiuchi, Ab-initio few-body calculations for neutrino-nucleus reactions, 2014年3月5-6日、新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」C02 班主催研究会「低エネルギーニュートリノ - 原子核反応と天体現象への応用」(招待講演)、IPC 生産性国際交流センター(神奈川県三浦郡葉山町)

W. Horiuchi, Probing halo and skin structure of unstable nuclei with total

reaction cross sections、2014年2月3-7日、Workshop on Threshold Physics at the Neutron Drip Line (招待講演)、Darmstadt (Germany)

W. Horiuchi、Response functions of ${}^4\text{He}$ with the correlated Gaussian method、2013年10月6-10日、Workshop on Inelastic reactions in light nuclei(招待講演)、Jerusalem (Israel)

W. Horiuchi、Y. Suzuki、Tensor correlations probed by electroweak responses、The 25th International Nuclear Physics Conference 2013、2013年6月2-7日、Florence (Italy)

[図書](計1件)

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: a Symmetry-guided Perspective”, 2016、Chapter 7, 173-197

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀内 渉 (HORIUCHI, Wataru)

北海道大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号：00612186