

令和元年6月11日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05367

研究課題名(和文) 2重スピン・アイソスピン励起状態の理論的研究

研究課題名(英文) Theoretical study of double spin-isospin excitation

研究代表者

佐川 弘幸 (SAGAWA, HIROYUKI)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・客員主管研究員

研究者番号：50178589

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、重イオン2重電荷交換反応により明らかになる、2重アイソスピン相似状態、2重ガモフテラー励起や2重スピン双極子励起状態などのスピンアイソスピン励起を理論的に研究した。微視的理論として、ハートリフォックボゴリウボフ(HFB)理論及び準粒子乱雑位相近似(QRPA)モデルを基に、2重電荷交換反応で観測される集団励起状態を記述する理論的枠組みを構築した。さらに、和則を用いた1重および2重スピンアイソスピン励起の研究から、2重崩壊に関する定量的な基準値の確定を目指した。また2重巨大ガモフテラー励起及び2重アイソスピン同位体を統一的に研究し荷電非対称力の存在を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピン、アイソスピンは量子多体系としての原子核構造を紐解く最も重要な概念である。その最先端の研究課題の2重ガモフテラー励起状態及び2重スピン双極子励起状態は新しい集団励起状態として注目されているとともに、ニュートリノの質量を決める零ニュートリノ型2重崩壊と相補的な関係にあり、非常に弱い遷移確率の2重崩壊と非常に大きな確率遷移を持つ巨大スピンアイソスピン励起を同じ理論モデルで定量的に解析することにより、原子核物理だけでなく素粒子物理や宇宙物理にも大きなインパクトを持つ研究である。

研究成果の概要(英文)：In this project, I studied spin-isospin excitations such as double isobaric analogue state, double Gamow-Teller state and spin-dipole excitations induced by heavy ion charge exchange reactions. As theoretical models, I adopt Hartree-Fock-Bogolyubov theory and quasi-particle random phase approximation and applied to collective excitations revealed by double charge exchange reactions. I studied further the single and double charge exchange excitations by the sum rule method in order to establish a quantitative transition strength of double beta decay matrix elements. I discussed also in a unified way between double Gamow-Teller and double isobaric analogue states and examine the effect of charge symmetry breaking and charge independent breaking forces.

研究分野：原子核理論

キーワード：ガモフテラー状態 崩壊 アイソスピン同位体 荷電非保存力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2重電荷交換反応(Double Charge Exchange Reaction, DCEX)は、1970年代からパイオンを用いた2重荷電が行われてきた。その中で、2重アイソスピン相似状態や2重双極子型巨大共鳴などが明らかにされている。一方、近年の不安定ビームや重イオンを用いる加速器技術や測定器技術の大きな進歩により2重電荷交換反応の精度の良い観測可能性が大きく開かれた。特に、重イオンビームを用いた反応により、最近2重ガモフ-テラー励起状態やテトラニュートロン状態の観測が報告されている。一方、2重電荷交換反応によって明らかにされる物理を探る理論的枠組みは、核反応理論も核構造もまだほとんど未開発の状態であった。我々は、これまでに発展させてきた、対相関も取り入れたエネルギー密度関数を用いた平均場近似としてのハートリ-フォック-ボゴリユウポフ(HFB)理論及び準粒子乱雑位相近似(quasi-particle random phase approximation, QRPA)モデルを基礎として、新しい理論枠組みを構築し、2重電荷交換反応で励起される状態を記述するプログラム作成に取り組む。この応用として、軽い核から中重核また重い核を含む広い領域での2重ガモフ-テラー励起状態や2重アイソスピン相似状態や2重スピン双極子励起状態などのスピン-アイソスピン励起を理論的に研究することを目的とした。

2. 研究の目的

この研究では、軽い核から中重核また重い核を含む広い領域での2重ガモフ-テラー励起状態や2重アイソスピン相似状態や2重スピン双極子励起状態などのスピン-アイソスピン励起を理論的に研究する。特に、 t_1 型及び t_2 型荷電交換による1重及び2重スピン-アイソスピン励起状態を自己無撞着(self-consistent)HFB+電荷交換(charge exchange)QRPA理論(CXQRPA)により計算し、アイソスピン5重項の対称性を検証する。また複合領域にわたる課題として、2重ガモフ-テラー励起状態及び2重スピン双極子励起状態はニュートリノの質量を決める零ニュートリノ型2重崩壊と相補的な関係にあり、非常に弱い遷移確率の2重崩壊と非常に大きな確率遷移を持つ巨大スピン-アイソスピン励起を同じ理論モデルで定量的に解析することにより、原子核物理だけでなく素粒子物理や宇宙物理にも大きなインパクトを持つ研究を目的とする。現在、2重電荷交換反応の実験は、日本の理化学研究所仁科センターや大阪大学核物理学研究センターまた世界的にはアメリカのミシガン州立大学の超伝導サイクロトロン研究所、イタリアのカタニアINFN-LNS研究所、フランス、カーンのGanil研究所などで現在活発な研究活動が進められ、かつより進展した将来計画も検討されている。理論的な取り組みは、2重崩壊が中心で、アメリカのミシガン州立大学、イェール大学、北カロライナ大学でまたドイツのダームシュタットのGSI研究所、チュービンゲン大学またイタリアのミラノ大学、中国の四川大学などで広範囲に行われている。日本でも東京大学や東京工業大学のグループが行っている。一方、2重ガモフ-テラー励起状態を含む2重巨大共鳴の理論的な取り組みはほとんどされていない状態であり、本研究の取り組みのもたらす意義は大きい。研究代表者は過去に、1重電荷交換反応で明らかにされる原子核構造の理論的研究に取り組み、国内外の実験研究者や理論研究者と共に世界的レベルの先駆的研究を行ってきた。具体的には、ガモフ-テラー励起状態の和則の減少に対するテンソル力の効果、スピン双極子状態の和則からの中性子スキンの導出、アイソベクトル型スピン零次極遷移の理論的予言などで多くの業績を残している。これらの業績は多くの国際会議の招待講演並びにレビュー論文として発表されている。これらの研究成果を踏まえ、新しい形の2重電荷交換反応によるスピン-アイソスピン励起の研究の発想に至った。

3. 研究の方法

相関相互作用を取り入れたSkyrme型エネルギー密度関数を用いたHFBおよびnon-charge exchange QRPAプログラム及びsingle charge exchange QRPA (CXQRPA)プログラムを開発する。Skyrme型エネルギー密度関数に基づくnon-charge exchange QRPA及びsingle CXRPAのプログラムはすでに開発済みである。平成28年度には既存のプログラムを発展させ、2重電荷交換反応励起状態へのQRPAモデルの計算機アルゴリズムおよびプログラムの作成。対相関を取り入れた自己無撞着(self-consistent)なHFBプログラムを基礎に、2重電荷

交換反応に応用可能なQRPA 及びCXQRPA コードを作成した。また2重電荷交換反応励起状態計算コードの2重スピンアイソスピン励起状態への応用として、まず2重閉殻の ^{48}Ca に応用し、対相関のない原子核での2重ガモフ-テラー相似状態に応用し、プログラムの有効性を確立した。さらにこの原子核の2重スピン双極子励起を計算し、2重巨大共鳴の存在を探り、最近重イオン2重核子移行反応の実験の結果と比較している。この研究には、2重スピンアイソスピン励起状態を記述する複合的計算機プログラム製作が重要な役割を果たす。我々のこれまでの経験でプログラム作成に十分対応可能と考えられるが、プログラムの作成上の問題や高速化の問題には、internet での国際研究network により、当該研究community からのサポートを得る体制を構築した。また研究の理論計算で予言された物理量の実験的な検証の可能性も、理化学研究所や大阪大学核物理研究センターの原子核実験研究者との共同体制で検討した。現在までも、研究代表者と海外共同研究者は相互研究所訪問やe-mail やSkype 等のnetwork を利用し綿密な打ち合わせを行い、機能的な研究体制を構築し成果を上げてきている。当該研究にあたって、そのようなnetwork を最大限に利用し、世界の最先端の研究者や若手のactive な研究者とともに研究を進めた。また、この国際性豊かな研究グループに、大学院生も随時参加することにより、国際性のある研究者育成の観点からも有益な研究を行なった

4. 研究成果

本研究では、重イオン2重電荷交換反応により明らかになる、2重アイソスピン相似状態、2重ガモフテラー励起や2重スピン双極子励起状態などのスピンアイソスピン励起を理論的に研究した。微視的理論として、ハートリフォックポゴリュウボフ(HFB)理論及び準粒子乱雑位相近似(QRPA)モデルを基に、2重電荷交換反応で観測される集団励起状態を記述する理論的枠組みを構築した。さらに、和則を用いた1重および2重スピンアイソスピン励起の研究から、2重崩壊に関する定量的な基準値の確定を目指した。また2重巨大ガモフテラー励起及び2重アイソスピン同位体を統一的に研究し荷電非対称力の存在を検証した。この研究では、まず2重電荷交換反応励起状態計算コードへのアイソスカラー型対相関とテンソル力の導入と $N=Z$ 核の2重スピンアイソスピン励起状態への応用を行なった。近年 $N=Z$ 近傍核のスピンアイソスピン励起状態へのアイソスカラー型スピン3重項対相関とテンソル力の重要性が指摘されており、2重崩壊への影響も大きいことが知られている。平成28年度に2重電荷交換反応励起状態計算コードを開発したが、さらに計算コードにこのアイソスカラー型対相関及びテンソル相互作用を組み入れた。その計算コードにより、2重ガモフテラー励起及び2重スピン双極子励起へのアイソスカラー型対相関の効果、またアイソベクトル対相関との競合やテンソル力との共存過程を調べた。この研究は、いくつかのrefereed journalに論文として掲載された。

平成29年度には、2ニュートリノ型及び零ニュートリノ型2重ベータ崩壊の遷交換列の実験に裏付けられた計算として、まず、2ニュートリノ型2重ベータ崩壊の遷交換列を2重ガモフテラー励起と同じプログラムで計算した。特に ^{48}Ca の実験データと理論計算の比較から、我々のモデルでの統一的な記述の可能性や有効相互作用の検証、対相関の強度に対する実験的な情報を得た。そのようなデータを基に、2重ガモフテラー励起や2重スピン双極子励起を計算し零ニュートリノ型2重ベータ崩壊の遷移確率の精密な計算を実行している。平成30年度は、平成28年、29年度の研究を継続すると共に、アイソスピン同位状態の励起エネルギーの対する、荷電非対称力及び荷電非独立力の効果を検証した。1重電荷交換反応によるアイソスピン励起状態であるアイソスピン同位状態は、symmetry energyとの関係が議論されているが、我々は荷電非対称力及び荷電非独立力の効果、現実的な相互作用を用いて検討しその重要性を指摘した。この研究結果は、Physical Review Lettersの掲載された。3年間の研究の成果は、27件の学術論文として世界のトップレベルの研究雑誌に発表された。また国際会議で多くの招待講演を含む30件の学会発表を行なった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計27件)

1. Spin singlet and spin triplet pairing correlations on shape evolution in sd-shell

N = Z Nuclei, Phys. Rev. C 97, 024320 (2018) pp.1-11 [査読あり]

Eunja Ha, Myung-Ki Cheoun and H. Sagawa

2. Spectroscopy of nuclei around ^{100}Sn populated via two-neutron knockout reactions

Phys. Rev. C 97, 044321 (2018) pp.1-6, [査読あり]A. Corsi, H. Sagawa (fifth author) et al.

3. The nuclear symmetry energy and the breaking of the isospin symmetry:

how do they reconcile with each other ? [査読あり]Phys. Rev. Lett. 120, 202501 (2018) pp.1-6

X. Roca-Maza, G. Colo and H. Sagawa

4. Neutron-proton Pairing Correlations and Deformation for N = Z Nuclei in pf-shell

by the deformed BCS and HFB approach [査読あり]

Phys. Rev. C97, 064322 (2018) pp.1-14. Eunja Ha, Myung-Ki Cheoun, H. Sagawa, and W. Y. So

5. Gamow-Teller transitions from high-spin isomers in N=Z nuclei[査読あり]

Phys. Rev. C98, 014311 (2018) p.1-6 .H. Z. Liang, H. Sagawa, M. Sasano, T. Suzuki, and M. Honma

6. Isoscalar and Isovector spin response in sd-shell nuclei[査読あり]

Phys. Rev. C98, 054333 (2018) pp.1-13 H. Sagawa and T. Suzuki

7. Effect of tensor and pairing correlations on bubble structure of sd-shell nuclei

[査読あり]

Eur. Phys. J. A (2018) 54: 193 pp.1-8, Kun Yu, Ji-Wei Cui, Xian-Rong Zhou and H. Sagawa

8. New concept for pairing anti-halo effect as a localized wave packet of quasi-particle

Phys. Rev. C 95, 024304 (2017) pp. 1-5, [査読あり] K. Hagino and H. Sagawa

9. Beyond mean-field description of Gamow-Teller resonances and beta-decay

Journal of Physics: Conference Series 966, 012046 (2018) pp. 1-6[査読あり]

Y. Niu, G. Colo, E. Vigezzi, C. L. Bai and H. Sagawa

10. Role of deformation in odd-even staggering in reaction cross sections for

$^{30,31,32}\text{Ne}$ and $^{36,37,38}\text{Mg}$ isotopes, Phys. Rev. C96, 064311 (2017) (2017) pp. 1-6

[査読あり]Y. Urata, K. Hagino and H. Sagawa

11. Interplay between isoscalar and isovector correlations in neutron-rich nuclei

Phys. Rev. C96, 064312 (2017) pp.1-7, [査読あり] I. Hamamoto and H. Sagawa

12. Isovector spin-singlet (T=1, S=0) and isoscalar spin-triplet (T=0,S=1) pairing

interaction and spin-isospin response[査読あり]

Physics Scripta 91, 083011, pp.1-23 (2016) (Memorial issue of 50th anniversary of

Novel Prize for Bohr-Mottelson), H. Sagawa, C. L. Bai and G. Colo

13. Three-body model study of ^{26}O , Phys. Rev. C93, 034330, pp.1-12 (2016).

[査読あり]K. Hagino and H. Sagawa

14. Three-body model for isoscalar spin-triplet neutron-proton pair in ^{102}Sb

Phys. Rev. C93, 064319 , pp.1-10 (2016), [査読あり]Y. Tanimura and H. Sagawa

15. Exotic structure of medium-heavy hypernuclei in Skyrme Hartree-Fock model

Phys. Rev. C94, 024331, pp.1-10 (2016), [査読あり]Xian-Rong Zhou, E. Hiyama and H. Sagawa

16. Fully self-consistent study of charge-exchange resonances and the impact on the

symmetry energy parameters, Phys. Rev. C94, 044313, pp. 1-8 (2016) [査読あり]

X. Roca-Maza, Li-Gang Cao, G. Colo, H. Sagawa

17. Delta (1232) effects in density-dependent relativistic Hartree-Fock theory and

neutron stars, Phys. Rev. C94, 045803 (2016), pp.1-13. [査読あり]

Zhen-Yu Zhu, Ang Li, Jin-Niu Hu and H. Sagawa

18. Effect of isoscalar spin-triplet pairings on spin-isospin responses in sd-shell nuclei
Phys. Rev. C94, 041303(R) pp.1-6 (2016), [査読あり] H. Sagawa, T. Suzuki, and M. Sasano

19. Mean field approaches for Xi-hypernuclei and current experimental data
Phys. Rev. C 94, 064319 (2016) pp.1-7. [査読あり] T. T. Sun, E. Hiyama, H. Sagawa and H.-J. Schulz

20. Sum rules of Double Gamow Teller states, Phys. Rev. C94, 064325 (2016) pp.1-4. [査読あり]
H. Sagawa and T. Uesaka

21. Quasi-particle random phase approximation with quasi-particle-vibration
coupling: application to the Gamow-Teller response of a superfluid nucleus ^{120}Sn
Phys. Rev. C 94, 064328 (2016) pp.1-16., [査読あり]

Y. Niu, G. Colo, E. Vigezzi, C. L. Bai and H. Sagawa

その他 6 編。

[学会発表](計 30 件)

1. "EoS from terrestrial experiments: static and dynamic polarizations of nuclear density"
the Xiamen-CUSTIPEN Workshop on the EOS of Dense Neutron-Rich Matter in the Era of Gravitational
Wave Astronomy, Jan. 3-7 2019, Xiamen, China (invited talk) H. Sagawa

2. "The nuclear symmetry energy and the breaking of isospin symmetry"
International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions 2018 (invited talk)
(December 3rd -7th, Omiya, Japan) H. Sagawa

3. "Recent progress in quests of Spin and Spin-isospin excitations "
COMEX6 (Collective Motions in Exotic Nuclei) (invited talk),
(October 29-November 2, Cape Town , South Africa) H. Sagawa

4. "IS and IV pairing correlations and its Phase transition"
Symposium on Recent advances on proton-neutron pairing
and quartet correlation in nuclei(invited talk)
(Saclay, France, September 4-8, 2018) H. Sagawa

5. "Quenching of Isoscalar and Isovector spin response in sd-shell nuclei"
Nuclear Structure and Related Topics 2018 (NSRT08) (invited talk)
Burgus, Bulgaria, June 4-9, 2018) H. Sagawa

6. "Recent topics of spin and spin-isospin excitations"
CUSTIPEN symposium 2018 (invited talk) (Chengdu, China, May 14-18, 2018) H. Sagawa

7. "Current Topics of Spin-Isospin Response"
IVth Topical Workshop on Modern Aspects of in Nuclear Structure (invited talk)
(Bormio, Italy, February 19-25 2018) H. Sagawa

8. "Microscopic models for Spin, Isospin and Spin-Isospin Responses"
Yukawa Institute of Theoretical Physics (YITP) school
"Recent Progress of Nuclear Structure and Reaction Physics" (invited talk)
(Kyoto, Japan, December 18-22, 2017) H. Sagawa

9. "The nuclear symmetry energy and the breaking of isospin symmetry"
Workshop on "Nuclear matter in neutron stars" (December 1-3, 2017 RIKEN, Japan) H. Sagawa

10. "Spin and Spin-Isospin Responses and Isoscalar Spin-triplet Pairing"

Int. Symposium on Physics of Unstable Nuclei (ISPUN) 2017 (invited talk)

(Ha Long Bay, Vietnam, September 25-30, 2017) H. Sagawa

11. "Spin and Spin-Isospin Responses in N=Z nuclei and Isoscalar Spin-triplet Pairing"

Interdisciplinary symposium on modern density functional theory

(June 19-23, 2017, RIKEN, Japan) H. Sagawa

12 "Three-body model for nuclei near and beyond drip line"

- Ischia Nuclear Structure workshop--- (invited talk) (Ischia, Italy, May 15-19 , 2017) H. Sagawa

13. "Three-body model for nuclei near and beyond drip line"

Workshop of Microscopic model for nuclear structure (invited talk)

(Yukawa-hall, Kyoto University, December 21, 2016) H. Sagawa

14. "Isoscalar pairing and spin-isospin response"

(1st RIKEN-Tsukuba-CNS workshop, Dec. 12-15, 2016, Japan) H. Sagawa

15. "Three-body model for nuclei near and beyond drip line"

XXIII Nuclear Physics Workshop (invited talk) (Kazimierz, Poland, September 17- October 1, 2016)

H. Sagawa and K. Hagino

16. Nuclear correlations studied by Spin-Isospin response : Fall JSPS meeting (invited talk)

iyazaki, Japan, September 21-24, 2016), H. Sagawa

17. " Gamow-Teller transitions and Isoscalar pairing",

Workshop on proton-neutron and alpha-correlations (invited talk) (Kyoto, Japan, June 27th 2016)

H. Sagawa

18. "New Mass Model FRDM 2012 and Symmetry Energy"

International Conference NIC (Nuclei in Cosmos) 2016 (Niigata, Japan, June 19-24, 2016)

H. Sagawa and P. Moller

その他の講演 1 2 回。

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6 . 研究組織

(1)研究分担者 0名

(2)研究協力者

研究協力者氏名 : Gianluca Colo

ローマ字氏名 : ジャンルカ コロ

研究協力者氏名 : Chun Lin Bai

ローマ字氏名 : チュンリンバイ

研究協力者氏名 : LiGang Cao

ローマ字氏名 : リガンカオ

研究協力者氏名 : Xavi Roca-Moza

ローマ字氏名 : シャビイロカマザ