

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400263

研究課題名(和文) 微視的粒子回転子模型を用いたハイパー核の集団運動の研究

研究課題名(英文) Low-lying collective excitations of hypernuclei with microscopic particle-rotor model

研究代表者

萩野 浩一 (Hagino, Kouichi)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：20335293

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：原子核に 粒子を付加すると、原子核の構造が大きな影響を受けて変化する可能性が指摘されている。このようなハイパー核における 粒子の不純物効果のうち、低励起エネルギー領域に現れる原子核の集団運動に対する効果を明らかにした。この目的のために、平均場理論に基づく微視的な方法を開発し、微視的粒子回転子模型と名付けた。この方法を比較的軽い質量領域から重い質量領域におけるハイパー核に系統的に適用し 粒子の付加による原子核の低励起スペクトル及び電磁遷移強度の変化の様子を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：It has been pointed out that the nuclear structure may be largely influenced by putting a Lambda particle into a nucleus. Among such impurity effect of Lambda particle, we have investigated an impact on low-lying collective motions of atomic nuclei, such as rotational and vibrational motions. For this purpose, we have developed a microscopic approach, which we have named the microscopic particle-rotor model, based on the mean-field approximation. We have systematically applied this approach to several hypernuclei, from relatively light to heavy mass regions, and have clarified the changes in the low-lying spectrum and electromagnetic transition strengths of atomic nuclei due to the addition of a Lambda particle.

研究分野：原子核理論物理学

キーワード：ハイパー核 集団励起 励起スペクトル 平均場理論 生成座標法 電磁遷移強度 相対論的密度汎関数法 結合チャンネル法

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、ハイパー核の実験的研究(特に線分光実験)は、主として p 殻領域と呼ばれる質量数が 16 程度以下の比較的軽い領域が対象になっていた。しかしながら、次のステップとして sd 殻領域と呼ばれる質量数が 17 から 40 程度のより重い質量領域の研究が始まるようになっていた。このような比較的重い原子核の構造を特徴づけているものの一つが低励起エネルギー領域における集団運動であるが、粒子を付加するとそれがどのように変化するのか(すなわち、粒子の不純物効果)を明らかにし、ハイパー核の集団運動を探求することが求められていた。

2. 研究の目的

粒子の不純物効果のうち、本研究では低励起エネルギー領域に現れる回転運動や表面振動運動などの原子核の集団運動に対する効果を明らかにすることを目的とした。この目的のために、原子核の基底状態の記述で成功を収めている平均場理論に基づき、ハイパー核の回転運動及び表面振動運動の双方を同時に取り入れて記述できる微視的な方法を開発した。この開発された枠組みを比較的軽い質量領域から重い質量領域におけるハイパー核に系統的に適用し、粒子の付加による原子核の低励起スペクトル及び電磁遷移強度の変化を統一的に理解することを試みた。

3. 研究の方法

ハイパー核の低励起エネルギー状態を記述するために、生成座標法を用いた新たな方法を開発した。生成座標法は複数個のスレーター行列式を重ね合わせることで原子核の状態を記述する方法であり、角運動量射影及び粒子数射影と組み合わせることにより、偶々核の原子核の回転・振動運動状態を効率よく記述することができる。本研究では、偶々核の芯核に粒子が結合したハイパー核を考えた。芯核の低励起状態を生成座標法を用いて記述した上で、それらの状態に結合する粒子に対する結合チャンネル方程式を解くことによってハイパー核全体のスペクトルを構築した。このようにして得られたハイパー核の低励起状態間の電磁遷移強度を求めた。この方法を広い質量領域にわたるハイパー核に適用し、ハイパー核の低励起集団運動を系統的に記述する試みを行った。

4. 研究成果

(1) 原子核に粒子を付加したハイパー原子核の低励起状態の構造を記述するために、新しい微視的な方法を開発し微視的粒子回転子模型と名付けた。これまで、変形した原子核を剛体の回転子として記述しそこに外殻粒子を結合させる粒子回転子模型が知られていたが、本研究で開発した方法では回転子の部分を「拡張した平均場理論」に基づいて微視的に記述する。その際に、生成座標法を用いて平均場のゆらぎを取り入れ、さらに角運動量射影及び粒子数射影を施し平均場近似で自発的に破れた対称性を回復させる。これにより、平均場理論に基づきハイパー核の励起スペクトルを初めて微視的に構築できるようになった。

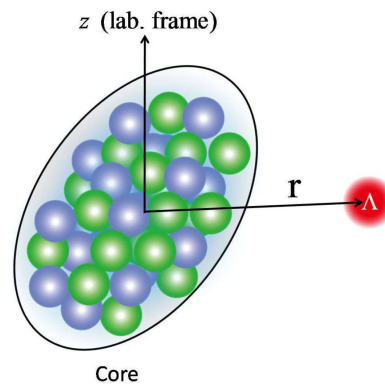


図 1. 微視的粒子回転子模型の模式図。芯核の様々な状態に粒子の運動が結合し、ハイパー核全体の状態を形成する。

(2) 微視的粒子回転子模型をまず ${}^{\Lambda}\text{Be}$ ハイパー核に適用し、このハイパー核の励起スペクトルの構造を議論した。その際、芯核の記述に相対論的エネルギー密度汎関数を用いた。この模型を用いて ${}^{\Lambda}\text{Be}$ ハイパー核の励起スペクトルの再現に成功するとともに、アルファ・クラスター模型を用いた先行研究と定性的に同じ結果を得ることを見出した。

(3) 微視的粒子回転子模型を系統的に ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$, ${}^{21}_{\Lambda}\text{Ne}$, ${}^{31}_{\Lambda}\text{Si}$, ${}^{155}_{\Lambda}\text{Sm}$ ハイパー核に適用し、方法の妥当性を確かめるとともに、励起スペクトルの詳細な構造を議論した。また、一連の Sm アイソトープのハイパー核にも微視的粒子回転子模型を適用し、ハイパー核の低励起集団運動に対する芯核の形状変化の効果を明らかにした。Sm アイソトープは、中性子数の増加とともに、球形から変形状態へ変化することが知られている。これに粒子を付加させたのが Sm アイソトープのハイパー核であるが、芯核が球形、変形のいずれの場合にもハイパー核の基底状態は単純な構造をしており、主に芯核の基底状態に

s $_{1/2}$ 軌道の 粒子が結合している状態とな
 っていることを明らかにした。また、負パ
 リティ状態の場合、芯核が球形の場合は芯核の
 集団励起状態に p $_{3/2}$ または p $_{1/2}$ 軌道の
 粒子が単純に結合している状態になっ
 ているものが、芯核の変形が大きくなるとともに
 これらの配位が強く混合していくことを明
 らかにした。

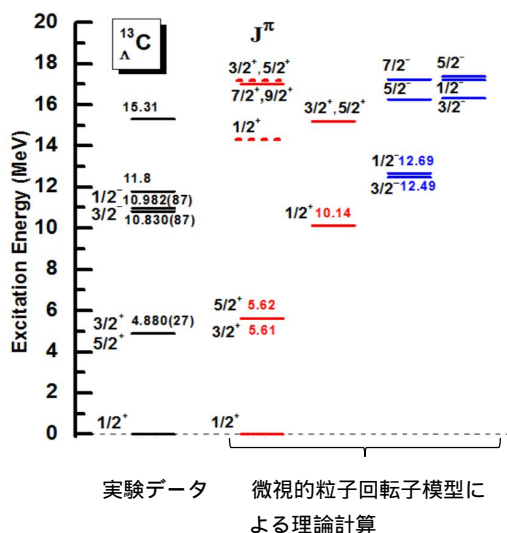


図 2 . ¹³_ΛC ハイパー核 (¹²C+_Λ) のス
 ペクトル。J^π は各状態の角運動
 量 (J) とパリティ(π)を表す。

(4) 微視的粒子回転子模型を ³⁰Si 及び
³¹ Si 核に適用して、ハイパー核の変形に対
 する平均場の揺らぎの効果を議論した。平均
 場近似による先行研究において、オプレート
 形に変形した ³⁰Si 核に 粒子を付加すると、
 変形が消失して球形のハイパー核となるこ
 とが示唆されていた。しかしながら、微視的
 粒子回転子模型を用いて平均場近似を越え
 る効果を取り入れると、核変形の消失は起こ
 らず、³¹ Si ハイパー核も変形をある程度保
 つことを明らかにした。

(5) 微視的粒子回転子模型に基づく計算
 における、核子 ハイペロン相互作用の高次
 項の果たす役割を明らかにした。これには、
 有限レンジの効果及びテンソル力の効果が
 含まれる。実験データの再現性に関しては、
 これらの高次項を取り入れない簡単な相互
 作用による計算と同程度のものが得られる
 が、芯核の励起状態に 粒子が結合してで
 けるスピン 2 重項のエネルギー差が相互作
 用の高次項に敏感であることを明らかにし
 たりわけ、テンソル相互作用のために、¹³_ΛC 核
 における 1/2⁻ 状態と 3/2⁻ 状態のエネル
 ギー差が縮まり、さらに 3/2⁺ 状態と 5/2⁺
 状態のエネルギー差が広がることを明らか

た。

(6) 平均場近似を基本にしてハイパー核
 の励起状態を記述する別の方法である生成
 座標法を ²¹_ΛNe ハイパー核に適用し、微視
 的粒子回転子模型との比較を行った。どち
 らの方法も定性的に同じ結果を導くことを
 確認した。生成座標法は微視的粒子回転子
 模型と相補的な関係にあり、この方法を用
 いるとハイパー核の集団励起に対する直感
 的な理解が得られることを指摘した。

(7) 相対論的集団ハミルトニアン法を
^{25,27}_ΛMg, ³¹_ΛSi ハイパー核に適用し、 粒
 子の付加による芯核の電磁遷移強度の変
 化を議論した。 粒子を s 軌道に付加する
 場合と p 軌道に付加する場合で不純物効
 果は大きく異なることを平均場理論の観
 点から明らかにした。

(8) 関連研究として、微視的粒子回転
 子模型において計算される芯核の集団励
 起状態を重イオン核融合反応の計算のイ
 ンプットとして用いる、半微視的結合チ
 ャンネル法を開発した。この計算ではこ
 れまで取り入れていない集団振動励起
 状態の非調和性を考慮することができる。
 この方法をまず ⁵⁸Ni+⁵⁸Ni 系の核融合反
 応に適用し、方法の有効性を確かめると
 ともに、振動励起の非調和性を考慮する
 ことにより実験データの再現性が増すこ
 とを明らかにした。さらに、同じ方法を
¹⁶O+²⁰⁸Pb 系の核融合反応にも適用し、
²⁰⁸Pb 核の八重極振動の非調和性を考
 慮すると、これまで再現が難しかった
 実験データをきれいに説明できることを
 指摘した。

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 10 件)

H. Mei, K. Hagino, J.M. Yao, and T. Motoba,
 Low-energy hypernuclear spectra with
 microscopic particle-rotor model with relativistic
 point coupling hyperon-nucleon interaction,
 Phys. Rev. C93 (2016) 044307/1-11.
 10.1103/PhysRevC.93.044307

(査読有)

J.M. Yao and K. Hagino,
 Anharmonicity of multi-octupole-phonon
 excitations in 208Pb: analysis with

multi-reference covariant density functional theory and subbarrier fusion of $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$,
Phys. Rev. C94 (2016) 011303(R)/1-5.
10.1103/PhysRevC.94.011303
(査読有)

K. Hagino and J.M. Yao,
Present status of coupled-channels calculations for heavy-ion subbarrier fusion reactions,
EPJ Web of Conferences 117 (2016) 08003/1-10.
epjconf/201611708003
(査読有)

K. Hagino, N. Rowley, and J.M. Yao,
Recent developments in heavy-ion fusion reactions around the Coulomb barrier,
EPJ Web of Conferences 122 (2016) 07002/1-10.
epjconf/201612207002
(査読有)

K. Hagino and J.M. Yao,
Structure of hypernuclei in relativistic approaches,
Int. Rev. of Nucl. Phys. 10 (2016) 263-303.
(査読有)

H. Mei, K. Hagino, and J.M. Yao,
Generator coordinate method for hypernuclear spectroscopy with a covariant density functional,
Phys. Rev. C93 (2016) 011301(R)/1-5.
10.1103/PhysRevC.93.011301
(査読有)

H. Mei, K. Hagino, J.M. Yao, and T. Motoba,
Microscopic study of low-lying spectra of Lambda hypernuclei based on a beyond-mean-field approach with covariant energy density functional,
Phys. Rev. C91 (2015) 064305/1-16.
10.1103/PhysRevC.91.064305
(査読有)

K. Hagino and J.M. Yao,
Semi-microscopic modelling of heavy-ion fusion reactions with multi-reference covariant density functional theory,
Phys. Rev. C91 (2015) 064606/1-11.
10.1103/PhysRevC.91.064606
(査読有)

W.X. Xue, J.M. Yao, K. Hagino, Z.P. Li, H. Mei, and Y. Tanimura,
Triaxially deformed point-coupling model for

Lambda hypernuclei: a quantitative analysis of hyperon impurity effect on nuclear collective properties,
Phys. Rev. C91 (2015) 024327/1-13.
10.1103/PhysRevC.91.024327
(査読有)

H. Mei, K. Hagino, J.M. Yao, and T. Motoba,
Microscopic particle-rotor model for low-lying spectrum of Lambda hypernuclei,
Phys. Rev. C90 (2014) 064302/1-6.
10.1103/PhysRevC.90.064302
(査読有)

[学会発表] (計 8 件)

K. Hagino,
Semi-microscopic modelling of heavy-ion fusion reactions,
Workshop on Low-Energy Nuclear Reaction Theory (LENRT),
2017年2月15日, キャンベラ (オーストラリア)

K. Hagino,
Application of beyond-mean-field approach to hypernuclei and heavy-ion fusion reactions,
YITP Molecule workshops on recent progress in nuclear structure physics 2016,
2016年12月21日, 京都大学 (京都府京都市)

K. Hagino,
Beyond-mean-field theory for multi-octupole excitations in ^{208}Pb and subbarrier fusion of $^{16}\text{O} + ^{208}\text{Pb}$,
Tsukuba CCS-RIKEN joint workshop,
2016年12月12日, 理化学研究所 (埼玉県和光市)

K. Hagino,
Recent developments in heavy-ion fusion reactions around the Coulomb barrier,
The 5th international workshop on compound-nuclear reactions and related topics,
2015年10月21日, 東京工業大学 (東京都目黒区)

K. Hagino,
Beyond-mean-field approach to low-lying spectra of Lambda hypernuclei,
The 12th international conference on hypernuclear and strange particle physics,
2015年9月10日, 東北大学 (宮城県仙台市)

K. Hagino,

Present status of coupled-channels calculations
for heavy-ion fusion reactions,
Nucleus-nucleus 2015,
2015年6月25日, カタニア (イタリア)

萩野浩一,

Microscopic particle-rotor model for
low-lying spectrum of Lambda hypernuclei,
日本物理学会秋季大会,
2014年10月9日, ワイコロア (アメリカ)

Mei Hua,

Microscopic particle-rotor model for
low-lying spectrum of Lambda hypernuclei,
第13回 CNS 国際サマースクール,
2014年8月21日, 東京大学原子核研究セン
ター (埼玉県和光市)

[その他]

ホームページ等

<http://www.nucl.phys.tohoku.ac.jp/~hagino>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

萩野 浩一 (HAGINO, Kouichi)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 20335293

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

ヤオ ジアンミン (YAO, Jiangming)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 60722832

(4) 研究協力者

なし