

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17671

研究課題名(和文)HyperAMDによるハイパー核構造の解明とバリオン間三体力の効果

研究課題名(英文)Hypernuclear structure and effects of baryon three-body force with HyperAMD

研究代表者

井坂 政裕(Isaka, Masahiro)

大阪大学・核物理研究センター・特別研究員(PD)

研究者番号：40708434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：ハイパー核は、通常の原子核にラムダ粒子等の異種粒子(バリオン)が加わった原子核であり、実験研究の進展により様々なハイパー核が生成可能になりつつある。バリオン間三体力は、中性子星の研究からその存在が示唆されている。本研究では、バリオン間三体力が存在する場合、その効果がハイパー核のエネルギーにどのように影響を与えるかを理論的に予言し、将来のハイパー核生成実験でどのように観測可能であるのか明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A hypernucleus is a nucleus composed of an ordinary nucleus and other baryon (s) such as Lambda particles, which can be produced by accelerator experiments. Recently, studies on neutron stars indicate and predict the existence of the baryon three-body force. In the present study, we have investigated the effects by the baryon three-body force on the energies of hypernuclei, assuming the existence of that force. If it exists, we expect that such effects can be measured/confirmed by forthcoming experiments of hypernuclei in near future.

研究分野：原子核理論

キーワード：ハイパー核 バリオン間相互作用 バリオン間三体力

### 1. 研究開始当初の背景

ハイパー核は、通常の原子核に s クォークを含むバリオン(ハイペロン、粒子がその代表例)が加わったバリオン多体系である。ハイパー核物理は、“バリオン間相互作用を理解すること”と、“バリオン多体系の性質(構造)を理解すること”を大きな目的としている。従来のハイパー核物理においては、質量数の小さな(軽い)ハイパー核の研究が中心になされてきた。今後は、我が国の大強度陽子加速器施設(J-PARC)や米国 Jefferson 研究所(JLab)等での実験により、質量数 10-50 程度の *p-sd-pf* 殻ハイパー核の生成が可能になる。これらのハイパー核の研究を通して、ハイパー核の構造の理解とハイペロンを含むバリオン間の相互作用の理解がさらに大きく進展するものと期待される。

なかでも特に相互作用に関しては、*p-sd-pf* 殻ハイパー核の系統的な分光実験によって、バリオン間三体力の情報を引き出すことができる可能性がある。ハイペロンを含むバリオン間三体力は、特に中性子星において重要な役割を果たし、中性子星の最大質量の問題にも密接に関連する。こうした三体力は、ハイパー核生成実験の観測量である粒子の束縛エネルギー( $B$ )の大きさに影響を及ぼすと考えられる。今後、JLab におけるハイパー核生成実験で精密に  $B$  が測定されることで、ハイパー核を通してバリオン間三体力の性質を調べることが現実的課題になる。そこで、実験に先駆けて  $B$  におけるバリオン間三体力の効果を理論的に評価し、*p-sd-pf* 殻ハイパー核の  $B$  の予言を行うことが理論研究の大きな課題であった。こうした効果は、*p-sd-pf* 殻ハイパー核が持つ様々な構造を通してより顕著に現れると期待される。しかし、従来の多くのハイパー核の理論研究では、核構造をあらかじめ仮定しているため、*p-sd-pf* 殻領域のハイパー核の構造や  $B$  を理論的に予言するには不十分であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ハイパー核が持つ様々な構造を明らかにするとともに、ハイパー核の定量的な構造計算に基づきハイペロンを含むバリオン間三体力のハイパー核における効果を理論的に解明することである。特に、将来の JLab 等の実験で生成可能な *p-sd-pf* 殻領域のハイパー核を対象とし、ハイパー核の粒子の束縛エネルギー( $B$ )の理論的予言を行い、 $B$  におけるバリオン間三体力の効果を明らかにすることが課題である。

### 3. 研究の方法

ハイパー核束縛エネルギー  $B$  におけるバリオン間三体力の効果を明らかにするためには、まず *p-sd-pf* 殻領域のハイパー核が持つ様々な構造を適切に記述することが不可欠である。そこで、本研究では、ハイパー核に拡張した反対称化分子動力学 (HyperAMD)

法をハイパー核に適用することで、核の様々な構造を記述する。HyperAMD 法はハイパー核の構造モデルの一つであり、研究代表者がこれまでの研究で開発・発展させてきた。HyperAMD は、クラスター構造や四重極変形等の特定の構造を仮定することなくハイパー核の構造を記述することが可能である。本研究では、ハイパー核を球形と仮定した計算も行い、それと比較することで、核構造が  $B$  に及ぼす影響を明らかにする。

HyperAMD によるハイパー核構造計算においては、粒子・核子間 ( $N$ ) 相互作用モデルとして、Nijmegen ポテンシャルから得られた YNG 相互作用を用いる。バリオン間三体力を含む YNG 相互作用と含まない YNG 相互作用の結果を比較することにより、三体力効果を理論的に明らかにする。また、 $N$  相互作用にはいくつか未解明の点があり、それに応じて Nijmegen ポテンシャルにも性質の異なる数種類がある。本研究では、三体力効果の相互作用モデル依存性についても明らかにするため、性質の異なる数種類の相互作用を用いた結果の比較も行う。

### 4. 研究成果

本研究では、*p-sd-pf* 殻ハイパー核が持つ様々な構造を明らかにした上で、それらを通してバリオン間三体力の効果がどのように  $B$  の系統的データに影響するのかを明らかにした。

まず、ハイパー核構造の例として、(分子的な)クラスター状態と(原子的な)平均場構造が歪んだ変形状態との2つに着目した。具体的成果を以下の(1)及び(2)で述べる。

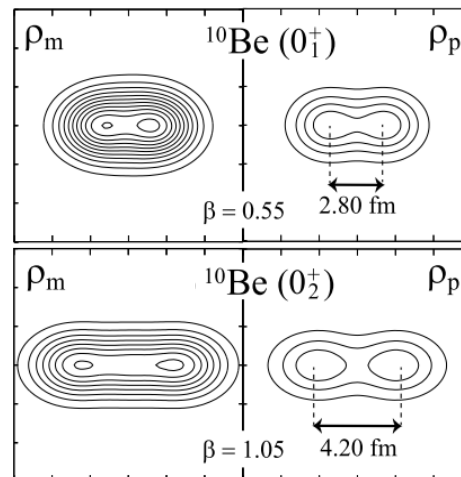


図1 本研究により得られた  $^{10}\text{Be}$  原子核の基底状態  $0^+_1$  と励起状態  $0^+_2$  の密度分布。左図は核子(陽子 + 中性子)全体の密度分布を示し、右図は陽子の密度分布を示す。右図中の矢印と数値は、2 クラスターの中心間の距離を示している。 $0^+_1$  状態と  $0^+_2$  状態との比較から、2 クラスター構造の発達度合いに違いが見られる。図中の  $\beta$  は、核子分布全体の変形度合い(四重極変形度)を表す。

(1) Be ハイパー核の 2 クラスター構造(雑誌論文 )

${}^9\text{Be}$  及び  ${}^{10}\text{Be}$  原子核は 2 つの 粒子と余剰中性子からなるクラスター構造を持つことが知られている。さらに、両者とも、余剰中性子の軌道の違いにより、2 クラスター構造がより発達した励起状態が基底状態近傍に存在することが知られている(図 1)。

本研究では、これらに 粒子が加わった  ${}^{10}\text{Be}({}^9\text{Be}+)$  及び  ${}^{11}\text{Be}({}^{10}\text{Be}+)$  ハイパー核を対象とし、 粒子によるクラスター構造の変化や 粒子の束縛エネルギー( $B$ )が、2 クラスター構造の発達具合によってどのように異なるのかを明らかにした。その結果、以下の 2 点がわかった。

発達したクラスター構造を持つ励起状態の方が 粒子によってクラスター間距離が大きく収縮するものの、ハイパー核においても基底状態と励起状態のクラスター構造の発達具合の違いが残ること。

2 クラスター構造の発達具合に応じて 粒子の束縛エネルギー( $B$ )が異なるため、励起スペクトルが変化すること。

これらのうち、 は、ハイパー核構造研究における主要課題の一つである、 粒子による核構造の変化(不純物効果)の理解に大いに寄与するものである。同時に、不純物効果が起こるにも関わらず、ハイパー核において元の状態の構造の違いが残ることから、 粒子をプローブとして構造変化の違いを見ることが可能であることを示唆する結果である。

に関しては、核のクラスター構造の違いが 粒子の束縛エネルギー( $B$ )にどのような違いをもたらすのかを示す典型例である。

(2) Ar ハイパー核の超変形状態(雑誌論文 )

変形状態の極端な例として、変形の軸の比がおおよそ 2 : 1 である超変形状態に着目した。具体的には、Ar ハイパー核の超変形状態と変形が比較的小さな基底状態において、粒子の束縛エネルギー( $B$ )の違いを調べた。その結果、超変形状態のほうが  $B$  の値は小さいこと、つまり、変形が大きくなるにつれて  $B$  の値が減少するという結果が得られた。この傾向は、研究代表者がこれまでの研究で調べた、Ca 等の他のハイパー核とも共通した傾向である。一方、Ar ハイパー核については相対論的平均場(RMF)計算に基づく理論的予言もあり、本研究とは異なる  $B$  の傾向を示している。RMF 計算では、Ar ハイパー核の超変形状態において密度分布が HyperAMD 計算のものとは異なっており、その違いが  $B$  の違いとして現れているものと考えられる。

上記(1)及び(2)で着目したクラスター構造や核の変形は大きく異なった構造であるが、 $p$ - $sd$ - $pf$  殻領域のハイパー核にはこうした構造が現れる。そこで、次は、これらを含む核の構造が  $B$  の系統的データにどのように

影響を与えるのかを明らかにした(雑誌論文 )。その上で、バリオン間三体力の効果がどのように  $B$  の系統的データに現れるのかを明らかにした(雑誌論文 )。これらについて具体的成果を以下で述べる。

(3)雑誌論文 では、 $B$  の系統的な実験データを再現する上で、核構造を適切に記述することが極めて重要であることを示した。本論文では質量数 9 から 59 までの広い質量数領域で系統的に HyperAMD による核構造計算を行い、 粒子の束縛エネルギー( $B$ )を求めた。その際に、ハイパー核を球形と仮定した計算も実施し、芯核の変形を適切に記述した場合の結果と共に、計算結果を既存の  $B$  の実験データと比較した。その結果、 $B$  の実験データを再現するためには、ハイパー核基底状態の四重極変形をよく記述することが不可欠であることを示した(図 2)。このことは、JLab 等で得られる実験データと理論計算とを比較してバリオン間三体力の情報を引き出す際には、ハイパー核の構造を十分に記述した理論計算を行う必要があることを示すものである。

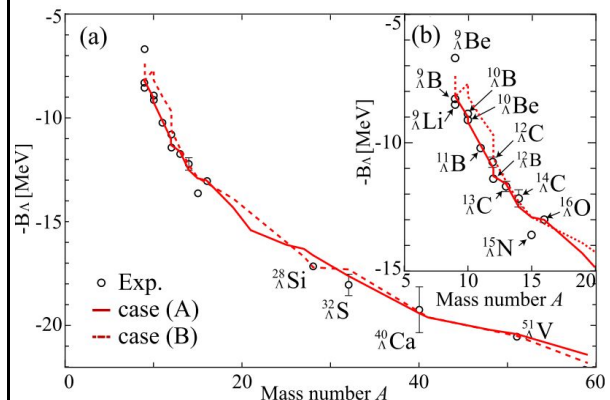


図 2 粒子の束縛エネルギー( $B$ )の実験データと計算結果との比較。横軸はハイパー核の質量数である。白丸が実験データを示す。実線(case(A))が芯核の変形を適切に記述した結果を示すのに対し、破線(case(B))はハイパー核が球形であることを仮定した場合の結果を示す。右上(b)は、実験データが豊富にある質量数 10 程度の領域の拡大図である。

(4)雑誌論文 では、バリオン間三体力の  $B$  における効果と、その相互作用模型に対する依存性を明らかにした。  $N$  相互作用については、 粒子と核子の散乱実験が難しいことから、ハイパー核の実験情報を通してその性質が調べられてきた。これまでに  $N$  相互作用の大部分の性質は明らかにされたものの、特に  $N$  2 体相互作用の odd 状態の相互作用の性質には確定できない部分が残っており、それが相互作用模型の不定性の原因となっている。そこで、本研究では、odd 状態相互作用が大きく異なる相互作用模型を用いて上記(3)と同様の分析を行い、その影響を明

らかにした。さらに、バリオン間三体力を加えた場合についても B を系統的に求め、バリオン間三体力の B に対する効果とその相互作用模型依存性を調べた。その結果、バリオン間三体力を加えたことによる効果が B の系統的データに影響を与えることを示した。さらに、相互作用模型依存性の分析から、バリオン間三体力の効果は、基となる N 体相互作用模型の性質によって異なることを示した。後者の模型依存性については、その違いは主に odd 状態の相互作用の性質の違いに起因している。このことから、将来、粒子と核子の散乱実験等で N 相互作用の odd 状態相互作用の性質がわかれば、JLab 等での B の系統的データからバリオン間三体力の情報を引き出すことが可能であることを示している。

上で述べたように、(3)及び(4)については、将来 B の系統的実験データが得られた場合、それとの比較により、バリオン間三体力についてどのような情報を得ることが可能であり、情報を得るために何が今後の課題であるのかを示したことが大きな成果である。このように、本研究の成果は、将来の JLab 等におけるハイパー核の生成・分光実験の計画と密接に関連し、実験に先駆けて理論的分析や予言を行ったものである。

#### 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8件)

M. Isaka, Y. Yamamoto, Th.A. Rijken, Effects of a hyperonic many-body force on B values of hypernuclei, Physical Review C, 査読有, 95巻, 2017年, 044308

DOI: 10.1103/PhysRevC.95.044308

M. Isaka, Y. Yamamoto, Th.A. Rijken, Competing effects of nuclear deformation and density dependence of the LambdaN interaction in B\_Lambda values of hypernuclei, Physical Review C, 査読有, 94巻, 2016年, 044310

DOI: 10.1103/PhysRevC.94.044310

M. Isaka, M. Kimura, E. Hiyama, H. Sagawa, Superdeformation of Ar hypernuclei, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 103D02巻, 2015年, 1-9ページ

DOI: 10.1093/ptep/ptv138

M. Isaka, M. Kimura, Impurity effects of the Lambda particle on the 2alpha cluster states of 9Be and 10Be,

Physical Review C, 査読有,

92巻, 2015年, 044326

DOI: 10.1103/PhysRevC.92.044326

[学会発表](計21件)

井坂政裕, Lyu Mengjiao, 明孝之, 土岐博, 池田清美, 堀内昶, 須原唯広, 山田泰一、高運動量成分を取り入れたAMDによる核力を用いたs殻核の研究、日本物理学会第73回年次大会、2018年、東京理科大学

M. Isaka, Impurity effects in hypernuclei with antisymmetrized molecular dynamics, International workshop on Hadron and Nuclear Physics 2017 (HNP2017), 2017年、理研

M. Isaka, Alpha cluster structure and its modification in p-shell hypernuclei, Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNC2017), 2017年、北海道大学

井坂政裕, AMD計算による軽いハイパー核の構造について、第4回ストレンジネス核物理を考える会、2017年、理研

井坂政裕, ハイパー核構造研究とハイペロンによる impurity effects, RCNP 研究会『核子・ストレンジネス多体系におけるクラスター現象』, 2017年、大阪大学

井坂政裕, ハイパー核構造研究の展開と核子・ハイペロン多体系の物理、RIBF 理論若手放談会『エキゾチック核物理の広がり』, 2017年、理研神戸

井坂政裕, Competing effects of nuclear deformation and hyperonic many-body force on Lambda binding energy, J-PARC 素粒子原子核セミナー、2017年、KEK 東海キャンパス

井坂政裕, 明孝之, 土岐博, 池田清美, 堀内昶, 須原唯広, テンソル最適化反対称化分子動力学によるハイパー核研究、日本物理学会第72回年次大会、2017年、大阪大学

井坂政裕, Hypernuclear structure with antisymmetrized molecular dynamics, Strangeness Nuclear Physics 2017 (SNP2017), 2017年、大阪電通大学

井坂政裕, Alpha cluster structure in p-shell Lambda hypernuclei with antisymmetrized molecular dynamics, Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNC2016), 2016年、関東学院大学

井坂政裕, 山本安夫, Th.A. Rijken, ハイパー核束縛エネルギーにおける多体力の効果、日本物理学会2016年秋季大会、2016年、宮崎大学

井坂政裕, Many-body force effects on hypernuclei with antisymmetrized molecular dynamics, The 10th APCTP-BLTP/JINR-RCNP-RIKEN Joint Workshop on Nuclear and Hadronic Physics, 2016年、理研

井坂政裕, Many-body force effects on

hypernuclear Lambda binding energy with antisymmetrized molecular dynamics、J-PARC Workshop 2016: From Exotic hadrons to QGP、2016 年、Inha Univ., Incheon, Korea

井坂政裕、Effects of  $\Lambda$ -NN three-body force in  $B_{\Lambda}$  values of hypernuclei、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年、東北学院大学

井坂政裕、AMD Calculation of Medium/Heavy Hypernuclei with the NN Three-Body Force in the Nijmegen Potential、Hypernuclear 2016、2016 年、Thomas Jefferson Lab., VA, USA

井坂政裕、Hypernuclear structure with antisymmetrized molecular dynamics、8th Japan-Italy symposium、2016 年、理研

井坂政裕、Effects of LNN three-body force in  $B_{\Lambda}$  values of hypernuclei、The 31th Reimei Workshop on Hadron Physics in Extreme Conditions at J-PARC、2016 年、JAEA

井坂政裕、Hypernuclear structure with antisymmetrized molecular dynamics、KEK 理論センター研究会「原子核・ハドロン物理の課題と将来」、2015 年、KEK つくばキャンパス

井坂政裕、Impurity effects in deformed/clustering hypernuclei with antisymmetrized molecular dynamics、Symposium on 'Quarks to Universe in Computational Science (QUCS2015)」、2015 年、奈良春日野国際フォーラム

井坂政裕、反対称化分子動力学に基づくハイパー核生成反応の分析、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年、大阪市立大学

- ② 井坂政裕、Impurity effects in hypernuclei、The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015)、2015 年、東北大学

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井坂 政裕 (ISAKA, Masahiro)

大阪大学・核物理研究センター・日本学術振興会特別研究員(PD)

研究者番号：40708434