

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 26 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540284

研究課題名（和文） ダブルストレンジネスをもつハイパー核生成理論の
p 殻から s d 殻領域への展開研究課題名（英文） Production theory extended from p-shell to sd-shell
hypernuclei with double strangeness

研究代表者

元場 俊雄（MOTOBA TOSHIO）

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：90121863

研究成果の概要（和文）：

^{12}C を標的とした (K-,K+) 反応による Ξ ハイパー核生成率は、 ΞN 相互作用のスピン依存性が大きいことを明らかにした。この不定性を避けつつ Ξ 粒子の束縛状態を研究するには sd 殻領域の奇 Z 標的を選ぶことの重要性を示唆した。また、コア励起を含めて sd 殻前半に適用可能な殻模型コードを開発し、いくつかの Λ ハイパー核の構造計算を先行して実行した。得られた波動関数を用いて (K-, π^-) 反応、(π^+ , K+) 反応、および (γ , K+) 反応の散乱断面積を DWIA 法で計算し理論的励起関数を求めた。米国 Jefferson 研のデータをうまく説明できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

(K-,K+) reaction cross section with the ^{12}C target was successfully calculated in DWIA, suggesting that the Ξ -hypernuclear excitation function is sensitively dependent on the spin-spin property of the Ξ -N interaction. The shell-model code has been extended to treat typical sd-shell hypernuclei by including the core-excited configurations. Structures of $^{19-20}_{\Lambda}\text{F}$ and $^{19-20}_{\Lambda}\text{Ne}$ have been analyzed and the wave functions are used to estimate the excitation spectra of the (K-, π^-), (π^+ , K+) and (γ , K+) reactions. The predictions for p-shell and heavier Λ -hypernuclei ($^{28}_{\Lambda}\text{Al}$, $^{40}_{\Lambda}\text{K}$ and $^{52}_{\Lambda}\text{Ti}$) are in good agreement with the experimental data from the Jefferson Laboratory.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：物理学，素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：理論核物理，ハイパー核，ダブルストレンジネス，ハイパー核生成

1. 研究開始当初の背景

ハイパー核とは通常の原子核にストレンジネスを持ったハイペロン (Λ , Σ , Ξ 等) という新粒子

が混入したものである。特に最近では、天然に存在する安定な原子核に比べて、中性子数(陽子数)が異常に多い中性子(陽子)過剰核の研究が実験的にも理論的にも盛んに行われており、以前の常識では考えられなかったような新たな原子核の存在様式が明らかになってきた。これらの知見自身が宇宙の元素合成のシナリオを正確に理解する上で不可欠なものとなっている。特に、核子とハイペロン粒子との相互作用という未知の核力の性質を探求することのできる物理系としてハイパー原子核物理学の役割は極めて大きい。特にストレンジネス -2 の核力(Ξ -N、 Λ - Λ など)の解明は最も望まれている課題であり、 Ξ ハイパー核の探索は、建設中の我が国のJ-PARC施設の中でも優先度の最も高いプロジェクトのひとつである。

現在茨城県東海村に建設中のJ-PARCでは、大強度のKビームを用いた(K^- , K^+)反応による Ξ ハイパー核の生成実験が高い優先度で計画されている。この実験は2009年度から実行に移されると期待されるが、 Ξ ハイパー核生成スペクトルの理論的予測は、実験遂行上はもちろんのこと、実験結果の解析においても極めて有用と考えている。特に、我が国におけるハイパー核研究においては、理論研究と実験研究が密接に協力してきた歴史があり、ストレンジネス -2 の分野においても世界をリードできる条件がある。

2. 研究の目的

(1) p殻領域 Ξ ハイパー核の系統的理論計算

まずp殻領域の Ξ ハイパー核の典型的な構造について、利用可能な Ξ N相互作用を用いて殻模型計算を実行する。また、 Ξ ハイパー核の生成励起関数を予測する場合、必然的に Ξ 状態の幅が問題となるが、これは Ξ N- Λ 間の転換相互作用によるものであり、 Λ - Λ 配位との混合計算を実行する計画である。

(2) sd殻領域にも適用可能な計算コードの開発

sd軌道に核子6個程度にハイペロンを結合させた全配位を採用し、また内部コアの励起配位も取り込んだ計算コードを開発する。まずsd殻 Λ ハイパー核の場合に計算実行し、(K^- , π^-)反応、(π^+ , K^+)反応、および(γ , K^+)反応の散乱断面積をDWIA法で計算する。

(3) (K^- , K^+)反応断面積のDWIA計算

微視的波動関数を使って(K^- , K^+)反応の生成断面積を理論的に予測する。 Ξ ハイパー核を生成する反応の予備的計算結果によれば、相互作用モデルによってスピン・アイソスピン依存性が大幅に違うので、それらがもたらす構造の違いは大きいこと、また生成反応のスペクトルも大きく異なるので、来るべきJ-PARCでの実験と比較することのできる理論的予測を複数のケースについて提出する。同時に相互作用の検討を進める。これにより、ストレンジネス $S=-2$ を持ったハイパー核の多様な存在形態について明らかにし、それを通して $S=-2$ を持った粒子である Ξ 粒子と核子間の相互作用、 Λ - Λ 間の相互作用についての情報を引き出すことを研究課題とする。

3. 研究の方法

殻模型をはじめとする微視的な核構造解析の手法に十分な経験を有しており、p殻とsd殻領域の計算については Λ ハイパー核の計算で実績をもっている。まずsd殻領域の Λ ハイパー核の殻模型計算を典型例をとりあげて、その構造を親核の構造とハイペロンの結合として表現することにより分析する。そして得られた微視的な波動関数を用いて、まず(K^- , π^-)反応、(π^+ , K^+)反応、および(γ , K^+)反応の散乱断面積をDWIA法で計算し、理論的励起関数を求める。これらはJ-PARCやJefferson米国立研での実験や結果の解析に不可欠である。

この Λ ハイパー核の解析における経験を Ξ ハイパー核生成の(K^- , K^+)反応に適用することは、直接的に応用可能である。とくに Ξ 粒子の束縛状

態が予想されるsd殻領域で理論解析を進める。

4. 研究成果

(1) p殻領域の Ξ ハイパー核については、標的核 ^{12}C の場合の殻模型波動関数を使って生成断面積を算定した。この間、新たに利用可能となったNi_jmegenグループ等の ΞN 相互作用ESC08を用いて殻模型計算を実行し、その微視的波動関数を使って (K, K^+) 反応による生成断面積を算定した。励起関数は、相互作用のスピン・アイソスピン依存性が大幅に違うので、レベル構造および生成反応スペクトルも大きく異なることを明らかにした。相互作用に依存する新奇な励起関数の予測は来るべき実験との比較においてチェックされよう。

(2) p殻の計算コードをsd核に拡張し、まず $S=-1$ のsd殻領域の典型ハイパー核として $A=18, 19, 20$ のFとNeハイパー核のレベル構造を調べた。Ni_jmegenの相互作用を用いた、この領域の詳細な計算は初めてであり、 (K, π) 反応、 (π, K) 反応、および $(e, e'K)$ 反応の励起関数の理論計算に取り掛り、的計算結果を国際会議などで発表した。特に、コア励起などを効果的に取り入れての計算を実行できるようになり、理論予測を最終化する段階に至っている。なお、これらの計算のうち、 $(e, e' K)$ 反応の励起関数の計算評価が残されている。他方、より重いsd, pf殻の典型例については、米国Jlab国立研の (e, e', K^+) 実験に対応して、 ^{28}Al , ^{40}Ca , ^{52}Cr を標的とした (γ, K^+) 反応計算の理論結果をまとめて論文発表した。 ^{19}F に対する試行計算とともに、これらは従来空白に近いsd殻領域の Λ ハイパー核に対する研究を進めるために貢献した。

(3) sd殻の Λ ハイパー核に応用した計算は、陽子数が奇数である安定標的核を選べば、 $(K-, K^+)$ 反応にも適用できるので、拡張計算プログラムを完成させた。来るべきJ-PARCでの実験

を想定して、 Ξ 粒子の結合エネルギーが小さい場合でもsd殻領域の標的を選ぶことにより、 (K, K^+) 反応の強度関数の計算は進行中である。奇数Zの典型標的核として ^{19}F をとりあげ、 Ξ ハイパー核構造の特徴について殻模型による構造分析を試みているが、これまでのところ採用すべき $S=-2$ のNi_jmegen相互作用が落ち着くのを待つこと、また構造計算で芯励起の取扱いについて Λ ハイパー核の場合に習熟する必要があるため、 Ξ ハイパー核の本格計算の前に Λ 核に集中した。sd殻の Λ と Ξ ハイパー核ともに適用できる殻模型計算コード、および多次元波動関数の場合の (K, K^+) 反応の計算コードを完成させた。

これらの成果に基づき、そして実験的にも理論的にも重要な課題として浮上してきたsd殻領域の Λ ハイパー核の構造分析自身優先的に実行した。すなわち課題パート2として、まずsd殻領域の代表的 Λ ハイパー核の殻模型計算を質量数18-20について芯励起モードを含めた構造計算を実行し、それらの微視的波動関数を用いて (K, π) 、 (π, K^+) 反応の強度関数を計算した。前者の反応では励起される状態の入射粒子運動量依存性が強いことを明らかにした。

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 15件)

- ① P. Bydzovsky, M. Sotona, T. Motoba, K. Itonaga, K. Ogawa, O. Hashimoto, Electromagnetic production of medium-mass Λ -hypernuclei, Nucl. Phys. A 881 (2012) 199-217. 査読有。
- ② A. Umeva, T. Harada, T. Motoba, Structure and production of typical sd-shell hypernuclei in shell-model calculations, Journal of physics: Conference Series 312 (2011) 022024.1-6
- ③ A. Umeva and T. Harada, Doublet-spacing enhancement caused by $\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$ coupling in $_{\Lambda}\text{-Li}$ hypernuclear isotopes, Phys.

- Rev. C 83 (2011) 034310. 査読有.
- ④ M. Motoba and S. Sugimoto, Structure and production of p-shell Ξ -hypernuclei, Nuclear Physics A 835 (2010) 223-230. 査読有.
 - ⑤ Y. Yamamoto, T.A. Rijken, and T.Motoba, G-matrix approach to hyperon-nucleon systems, Prog. Theor. Phys. Suppl. 185 (2010) 72-105.
 - ⑥ E. Hiyama, M. Kamimura, Y.Yamamoto, T. Motoba, T. Rijken, $S=-1$ hypernuclear structure, Prog. Theor. Phys. Suppl. 185 (2010) 106-151.
 - ⑦ E. Hiyama, M. Kamimura, Y. Yamamoto, T.Motoba, T.Rijken, $S=-2$ hypernuclear structure, Prog. Theor. Phys. Suppl. 185 (2010) 152-196.
 - ⑧ T. Motoba, K. Itonaga, and Y. Yamamoto, (π^+, K^+) reaction spectroscopy of heavy hypernuclei, Prog. Theor. Phys. Suppl. 185 (2010) 197-223.
 - ⑨ T. Motoba, P. Bydzovsky, M. Sotona, and K. Itonaga, Spectroscopy of electro- and photo-production of hypernuclei, Prog. Theor. Phys. Suppl. 185 (2010) 224-251.
 - ⑩ T. Motoba and K. Itonaga, Hypernuclear weak decays, Prog. Theor. Phys. Suppl. 185 (2010) 252-298.
 - ⑪ T. Harada, Y. Hirabayashi, and A. Umeva, Production of doubly strange hypernuclei via Ξ^- doorways in the O-16 (K^-, K^+) reaction at 1.8 GeV/c, Phys. Lett. B 690 (2010) 363. 査読有.
 - ⑫ A. Umeva and T. Harada, Shell-model study of Σ^- -mixing in neutron-rich Λ -Li hypernuclei, Nucl. Phys. A 835 (2010) 426-429. 査読有.
 - ⑬ A. Umeva, T. Motoba, T. Harada, Shell-Model Calculations for sd -Shell Hypernuclei, Proc. RCNP Workshop on Hadrons and Nuclear Physics (HNP09), (2010)
 - ⑭ T. Motoba, S. Sugimoto, E. Hiyama, Y. Yamamoto, T. Rijken, M. Kamimura, Structure and production of p-shell Ξ -hypernuclei predicted with Realistic interactions, Nucl. Phys. A, P ANIC08 (2009) 453-455. 査読有.
 - ⑮ E. Hiyama, Y.Yamamoto, T. Motoba, and M. Kamimura, Structure of $A=7$ iso-triplet Λ hypernuclei studied with the four-body cluster model, Physical Review C 80 (2009) 054321. 査読有.

[学会発表] (計 9件)

- ① 梅谷篤史, 元場俊雄, 原田融, 殻模型波動関数を用いた質量数20のラムダハイパー核の生成反応研究, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年 3月 25日,

関西学院大学 (西宮市)

- ② T. Motoba, Electro/photo-production hypernuclear spectroscopy, Mini-workshop on strangeness nuclear physics (2011. 11. 28, Nuclear Physics Institute, Rez, Prague (Czech Rep))
- ③ T. Motoba, Theory of strangeness production on nuclei, ECT* Workshop on Strange Hadronic Matter (2011. 09. 26, Toronto (Italy))
- ④ T. Motoba, Production of medium and heavy hypernuclei, Future Prospect of Hadron Physics at J-PARC (2011. 02. 09. いばらき量子ビーム研究センター(東海村))
- ⑤ A. Umeva, T. Motoba, and T. Harada, Structures and productions of typical sd-shell hypernuclei in shell-model calculations, International Nuclear Physics Conference (INPC2010, Jul. 4-9, UBC, Vancouver)
- ⑥ T. Motoba, Structure and production of p-shell Ξ -hypernuclei, 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, (2009.09.17), Tokai, Ibaraki Pref.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

元場 俊雄 (MOTOBA TOSHIO)
大阪電気通信大学・工学部・教授
研究者番号：9 0 1 2 1 8 6 3

(2) 研究分担者

梅谷 篤史 (UMEYA ATSUSHI)
日本工業大学・工学部・講師
研究者番号：2 0 4 5 4 5 8 0
原田 融 (HARADA TORU)
大阪電気通信大学・工学部・教授
研究者番号：7 0 2 3 8 1 8 7

(3) 連携研究者

研究者番号：