少数粒子系計算法の確立とストレンジネス核物理、エキゾチック原子分子への応用

1. 研究組織

(1) 研究責任者氏名：肥山詠美子
所属機関・部局・職名：奈良女子大学・理学部・助教授
(2) 研究従事者氏名：根村英克
所属機関・部局・職名：理化学研究所・岩崎先端中間子研究室・基礎特別研究員
(3) 研究従事者氏名：上村正康
所属機関・部局・職名：理化学研究所・岩崎先端中間子研究室・研究嘱託
(4) 共同従事者氏名：木野康志
所属機関・部局・職名：東北大学大学院・理学研究科・助教授
(5) 共同従事者氏名：山中信弘
所属機関・部局・職名：東京大学・理学部・早野研究室・PD

2. この 6 年間の研究と成果の総説

(1) 軽いハイパー核の少数多体系問題に基づく構造研究
ハイパー核原子物理学の中心課題の一つは、ハイペロン– 核子間 (YN)、ハイペロン– ハイペロン (YY) 間相互作用を統一的に理解することである。この目的は、核力の理解だけに絞られた通常原子物理学の研究とは大いに異なるところである。しかし、ハイパー核分野では、YN、YY 散乱データの極端な少なさのために、これまでに提案されてきた YN、YY 相互作用は多くの不定性を含んでいる。その中でも $\Lambda N - \Sigma N$ 変換相互作用の情報は皆無に等しい。近年、YN 相互作用の決定のためには、$\Lambda N - \Sigma N$ 結合に関する情報が必要不可欠であるという認識は急速に高まり、実験・理論の両面からのこの研究の早急な実行が強く要求されている。実験においては、近年 Ge 検出器を用いたガンマ線分光技術が発展し、それにより、軽いハイパー核の詳細な構造、それに基づく YN 相互作用の解明が可能になった。さらには、ダブルラムダハイパー核の探索実験により、新しいダブルラムダハイパー核が発見され、そのことが皆無に等しい YY 相互作用の解明の足がかりとなっている。実験のこういった状況下で、理論側に要求されることは、s 殻から p 殻ハイパー核の系統的な構造の精密理論計算と直結した YN 相互作用の妥当性の検討・改良である。特に、近年関心の高まっている $\Lambda N - \Sigma N$ 結合を含む相互作用をを用いたハイパー核の構造研究が要求されている。
この状況下で、報告者はこれまでに以下の研究を行なった。
(i)$\Lambda N - \Sigma N$ 結合を含めた s 殻ハイパー核の構造研究この研究により、s 殻ハイパー核が束縛するためには、$\Lambda N - \Sigma N$ 結合が非常に重要であることを指摘した。
(ii) p 殻ダブルラムダハイパー核、${}^{6}_{\Lambda\Lambda}\mathrm{He}$ を $\alpha + \Lambda + \Lambda$ の 3 体問題、${}^{7}_{\Lambda\Lambda}\mathrm{Li}$, ${}^{7}_{\Lambda\Lambda}\mathrm{He}$, ${}^{8}_{\Lambda\Lambda}\mathrm{Li}$, ${}^{9}_{\Lambda\Lambda}\mathrm{Li}$, ${}^{9}_{\Lambda\Lambda}\mathrm{Be}$, ${}^{10}_{\Lambda\Lambda}\mathrm{Be}$ を $\alpha + x(= n, p, d, t, {}^{3}\mathrm{He}, \alpha) + \Lambda + \Lambda$ の 4 体問題に基づき、J-PARC での実験に先駆けたエネルギーレベルの予言と波動関数の算出を行った。また、KEK-E373 で発見された ${}^{10}_{\Lambda\Lambda}\mathrm{Be}$ (デマチヤナギイベント) が励起状態の発見であることを指摘した。
(iii) テンソル力を含んだ $\Lambda N - \Sigma N$ 結合を直接扱った ${}^{5}_{\Lambda}\mathrm{He}$ の第一原理計算の結果から，α 粒子と Λ 粒子が結合するためには，テンソル力による $\Lambda N - \Sigma N$ 結合が非常に重要であることが明らかとなった．さらに，この効果のために，コア原子核 $({}^{4}\mathrm{He})$ の中の核子-核子の二体相関が大きな影響を受け，その内部エネルギーは，真空中での値 (約 28MeV) から大きく変化することがわかった．

(2) エキゾチック原子分子における組替え散乱反応研究

「時間依存組替えチャネル結合法 (TDCRC 法)」を用いて、エキゾチック原子分子分野における組替え散乱の計算コードの開発を行なった。この TDCRC 法は、木野・山中らにより開発された「時間依存チャネル結合法 (TDCC 法)」よりも多様な 3 体組替え反応に適応可能な汎用コードである。さらに下記の 3 つの課題に TDCRC 法による計算コードを適用し、取り組んだ。この 3 つの課題は、理論計算が困難なために、今までなされてこなかったか、あるいは理論計算がなされていたとしても、実験値と大きな食い違いを残したままの未解決の課題であった。

(i) 反陽子と Ps (ポジトロニウム：電子と陽電子の束縛状態) 衝突による反水素 ($\bar{\mathrm{H}}$) 生成の断面積

(ii) 反陽子と水素原子衝突による Pn (プロトニウム : 陽子と反陽子の束縛状態) 生成の断面積

(iii) ミュオンヘリウム原子と水素原子の衝突によるミュオンの移行反応 (ミュオン再活性化)

(iv) ミュオン触媒核融合においてミュオンあたりの核融合数を制限する大きな要因は、核融合によって生じたヘリウム原子核によるにミュオンの付着である。核融合後ヘリウム原子核は MeV オーダーの運動エネルギーを持つためこれに付着したミュオンは周囲の水素原子に衝突し、ヘリウム原子核からはぎ取られる (ミュオン再活性化と呼ぶ)。現在ミュオン再活性化に関する精密な計算がないため、ミュオン活性化後のミュオン付着率に理論と実験値で大きな食い違いがある。これらの計算を行なった。

3. 当該年度の実施報告の詳細

(a) カスケードハイパー核の 3 体・ 4 体構造研究 (肥山・上村)

(b) 多チャネル・テンソル力結合を考慮した第一原理計算に基づくダブルラムダハイパー核の構造の研究 (根村)

(a) の研究に関しては肥山・上村によってなされた。平成 1 6 年度にカスケードハイパー核、$NN\Xi$、及び、$NNN\Xi$ の 3 体・ 4 体構造の準備的計算を行った。最近提案された現実的相互作用を用いると束縛状態として存在する可能性を指摘した。

(b) の本研究課題における根村の担当領域は、第一原理的計算に基づいた YY 相互作用の解明である。対象とする核種は最近 KEK-PS E373 グループによってエネルギーの測定が行われた ${}^{\ \ 6}_{\Lambda\Lambda}\mathrm{He}$ (Nagara event) である。${}^{\ \ 6}_{\Lambda\Lambda}\mathrm{He}$ はこれまでにエネルギーの測定された $S=-2$ 核の中では最も軽い核である。${}^{\ \ 6}_{\Lambda\Lambda}\mathrm{He}$ を 6 体系として扱い、6 体問題を解いた。この際、$\Lambda N-\Sigma N$ 及び、$\Lambda\Lambda-N\Xi-\Sigma\Sigma$ 結合をすべてあからさまに取り扱うことにより、粒子変換相互作用の妥当性を議論した。

(c)「ガウス型基底関数による組替えチャネル結合法」により、ミュオン分子 4 体共鳴状態の精密計算

ミュオン触媒核融合反応における律速過程はミュオン分子 $dt\mu$ 生成過程である。この生成過程は水素分子の振動回転励起過程と共鳴して起こるため、$dt\mu$ のエネルギー準位を 0.1 meV 以上の精度で決める必要がある。$dt\mu$ 三体系の全エネルギーは 2.7 keV あるため、この三体系を 8 桁以上の有効数字で計算する必要がある。実際の計算では、純クーロン三体系の計算の他に相対論、QED 等の補正が必要である。本研究では、補正計算のうち $dt\mu$ 三体系の周りをまわる電子の影響による補正を計算した。

4. 業績リスト

(a) 口頭発表

(1) "Three- and four-body structures of $S = -2$ hypernuclei"
E. Hiyama
International Conference on Low Energy Antiproton Physics, Bonn, Germany, May, 2005

(2) "Few-body aspects of strangeness nuclear physics"
E. Hiyama
3th Asis-Pacific conferecne on Few-body Problem in Physics , Nakhon Ratchasima, Thailand, July, 2005.

(3)""Five-body calculation of resonance and scattering states of pentaquark system"
E. Hiyama
International workshop on Critical Stability of Few-Body Quantum Systems, Dresden, Germany, October, 2005.

(4)"Three- and four-body structure of light hypernuclei"
International Workshop on Hypernuclei with Heaby Ion Beams, GSI, Darmstadt, Germany, June, 2005.

(5)"Three- and four-body structure of light hypernuclei"
The workshop on Nuclear/Hadron Physics at the Jefferson Laboratory and J-PARC, Second Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physics Society and the Physical Society of Japan, Maui, U.S.A., September, 2005.

(b) Proceedings

(1) *H. Nemura*
The 19th European Few-Body Conference on Problems in Physics (EFB 19), Groningen, The Netherlands, August 23-27 (2004), AIP Conf. Proc. 768 (2005) pp.284
Exotic Structures of Light Hypernuclei

(2) *H. Nemura*
The International Workshop on Strangeness Nuclear Physics, Osaka University, Osaka, Japan, July 29-31, (2004), to be published by World Scientific, Singapore
Few-Body Systems with Strangeness

(3) *H. Nemura*
The Third Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, July 26-30, (2005), to be published by World Scientific, Singapore
Full Coupling Dynamics of Doubly Strange Hypernuclei

(c) 査読付き論文

H. Nemura, S. Shinmura, Y. Akaishi and Khin Swe Myint
Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 202502
Fully Coupled Channel Approach to Doubly Strange s-Shell Hypernuclei