

# 実施報告書

## 1. 研究組織

	氏名	所属機関・部局	職名
研究責任者	ねむらひでかつ	理化学研究所 仁科加速器研究センター	
	根村英克	岩崎先端中間子研究室	基礎科学特別研究員

## 2. 当該年度の実施報告の詳細

課題名「ストレンジネスを持ったエキゾチックな少数多体系の高精度構造計算」

(英文課題名) “Precise calculations of exotic few-body systems including strangeness”

原子核・ハドロンの研究における大きな目標のひとつは、強い相互作用の理解である。具体的には、核力をストレンジネスを含んだ領域にまで拡張し、ハイペロン核子や、ハイペロンハイペロン相互作用までも含んだ、バリオンバリオン相互作用の統一的理解を目指すことである。

中性子星のような高密度状態では、その内部にハイペロンが混ざることによって系がより安定化することが予想される。また、核力には、強い斥力芯が存在することが実験から分かっているが、その起源が何であるかはまだ明らかではない。核力を、ストレンジネスを含んだバリオン間相互作用へと拡張し、斥力芯のフレーバ依存性を調べることは、H-dibaryon 粒子の存在などとも関連して、興味深い課題である。我々の世界を、強い相互作用の立場から、正確に理解するためには、ストレンジネスまでも含んだバリオンバリオン相互作用の理解が、避けては通れない重要な課題である。

近年、KEK を始めとする国内外の実験の目覚ましい発展によって、この分野の研究は、急速に進展しつつある。たとえば、高精度のガンマ線検出器によるラムダハイパー核の精密分光実験や、シグマハイパー核の発見、ダブルラムダハイパー核の発見などを挙げることができる。

ハイパー核の研究は、(特にストレンジネス  $S = -2$  領域を中心として) J-PARC において早期に行なわれる実験の計画が進行中であり、グザイハイパー核や、ダブルラムダハイパー核が発見されることが期待されている。そのような複合系としてのハイパー核のデータから、バリオン間相互作用の情報を正確に引き出すためには、少数多体系の精密な計算方法を確立し、理論的な研究を進めておくことが、重要な課題である。

核力及び通常核の研究では、二体の核力ポテンシャルだけでなく、三核子力が必要であることが知られており、中間状態に  $\Delta$  粒子を含むような励起状態からの寄与が、その起源と考えられている。ハイパー核においても、例えば4体のラムダハイパー核 ( ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ ,  ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ ) では中間状態に  $\Sigma$  粒子を含んだ励起状態を繰り込んだ結果として  $\Lambda NN$  3体力の重要性が指摘されており、これと関連する中性子過剰ハイパー核実験が、J-PARC において計画されている。一般に、ストレンジネスを含んだ原子核では、 $\Lambda N - \Sigma N$  のエネルギー差が約 80 MeV、 $\Lambda\Lambda - N\Sigma$  のエネルギー差が約 30 MeV であるように、 $NN - N\Delta$  のエネルギー差 (約 300 MeV) に比べて非常に小さいことが特徴である。そのため、3体力に関しても、新しい形の3体力が出現する。

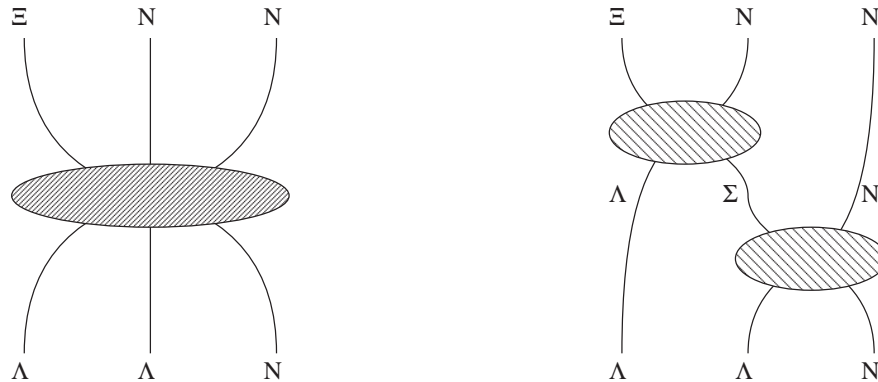


図 1: ダブルラムダ核, あるいはグザイ核において出現する,  $N\Lambda\Lambda - NN\Xi$  結合チャネル三体力 (左図) と, その主要な起源である中間状態に  $\Sigma$  粒子を含んだ三粒子系の結合チャネル過程 (右図)

本年度は, 八重項バリオン間の結合チャネルをすべて直接扱った, マルチストレンジネスハイパー核である  ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{H}-{}_{\Xi}^5\text{H}-{}_{\Lambda\Sigma}^5\text{H}-{}_{\Sigma\Sigma}^5\text{H}$  および  ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{He}-{}_{\Xi}^5\text{He}-{}_{\Lambda\Sigma}^5\text{He}-{}_{\Sigma\Sigma}^5\text{He}$  についての 5 体の精密な構造計算を行なった. 具体的には, 本年度における新しい結果として, 以下の 2 点を挙げる事ができる.

- ストレンジネス  $S = -2$  を持った軽いハイパー核における, 新しいタイプの 3 体力が重要であることを指摘した.
- 現在利用可能なラムダハイパー核, ダブルラムダハイパー核の実験データと矛盾しないポテンシャルのもとで, グザイ核状態を, 複素スケーリング法によって求めることに成功した.

以下では, これら二つの成果について説明する.

## 2-1. $N\Lambda\Lambda - NN\Xi$ 三体力の出現

八重項バリオン間の結合チャネルをすべて考慮した計算では, 図 1 の右側のような, 中間に  $\Lambda\Sigma N$  の励起状態を経由するような,  $N\Lambda\Lambda - NN\Xi$  の結合チャネルとしての三体力が存在する. 我々の計算ではこういったさまざまなチャネル間の結合がすべて模型空間の中に含まれているのに対して, 他のグループによってなされている計算では, 例えばグザイハイパー核の計算において, 実際扱っているのは  $\Xi$  粒子のチャネルのみである場合や, せいぜい下に開いている  $\Lambda\Lambda$  のチャネルまでを模型空間としているものしか見られない. そのような計算では, 我々が図に示したような, 中間に  $\Sigma$  粒子を含む励起状態を経由する多体の効果は取り入れられないので, 少数多体系の精密計算としての立場では, 図 1 の左側にしめしたような新しい形の三体力を, 新たに導入する必要があることを, 初めて指摘した.

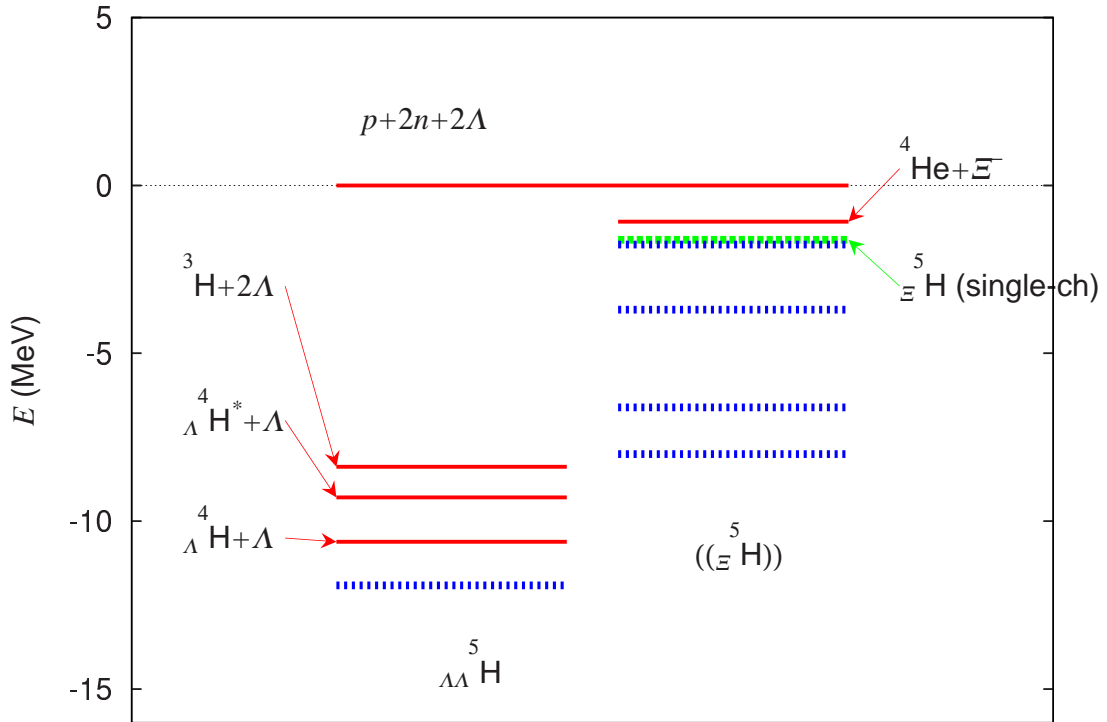


図 2:  ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{H}$ - ${}_{\Lambda\Sigma}^5\text{H}$ - ${}_{\Sigma\Sigma}^5\text{H}$  のチャンネルをすべて取り入れた 5 体計算によって得られたエネルギー固有値のうち、 ${}^4\text{He}+\Xi^-$  の閾値よりも下に現れた状態を青い点線で示してある。赤い実線は、2 体、3 体もしくは 5 体の閾値であり、縦軸のエネルギーは  $p+2n+2\Lambda$  の閾値を基準 (0 MeV) としてある。

## 2-2. グザイ核研究の展開

まず、前年度までに得られた結果のなかで、本年度のグザイ核の研究に関連する部分について、簡単にまとめる。これまでに、バリオン数  $B=5$ 、ストレンジネス  $S=-2$  であるハイパー核 ( ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{H}$ ,  ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{He}$ ) の基底状態を求めた。上の三体力の項でも述べたように、この計算では、バリオン間のポテンシャルとして、 $\Lambda N-\Sigma N$  や  $\Lambda\Lambda-N\Xi-\Sigma\Sigma$  だけでなく、 $\Lambda\Sigma-N\Xi$  などの、八重項バリオン間の結合チャンネルをすべて扱った、5 体の精密な構造計算を行っている。具体的に取り入れたチャンネルを示すと、 ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{H}$ - ${}_{\Xi}^5\text{H}$ - ${}_{\Lambda\Sigma}^5\text{H}$ - ${}_{\Sigma\Sigma}^5\text{H}$  および  ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{He}$ - ${}_{\Xi}^5\text{He}$ - ${}_{\Lambda\Sigma}^5\text{He}$ - ${}_{\Sigma\Sigma}^5\text{He}$  である。図 2 に、 ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{H}$ - ${}_{\Xi}^5\text{H}$ - ${}_{\Lambda\Sigma}^5\text{H}$ - ${}_{\Sigma\Sigma}^5\text{H}$  の場合に得られたエネルギーの値を青い点線で図示した。エネルギーの値は、 $p+2n+2\Lambda$  の閾値を基準 (0 MeV) としている。図の左側寄りの、 $E$  の値が約  $-12$  MeV 付近の青い点線が、 ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{H}$  ハイパー核の基底状態として得られたものである。また、今回の変分計算において、ハミルトニアン行列要素を対角化して得られたエネルギー固有値のうち、 ${}^4\text{He}+\Xi^-$  の閾値よりも下にあるものを、図中の右側寄りの青い点線で示した。これらは一般に連続状態なので、本来は連続的なスペクトルになるべきであるが、今回の計算で用いた模型空間における離散的な状態として得られている。図中の赤い実線は、いくつかの閾値エネルギーである。ここに示したような、離散化された連続状態のいくつかの波動関数を調べると、

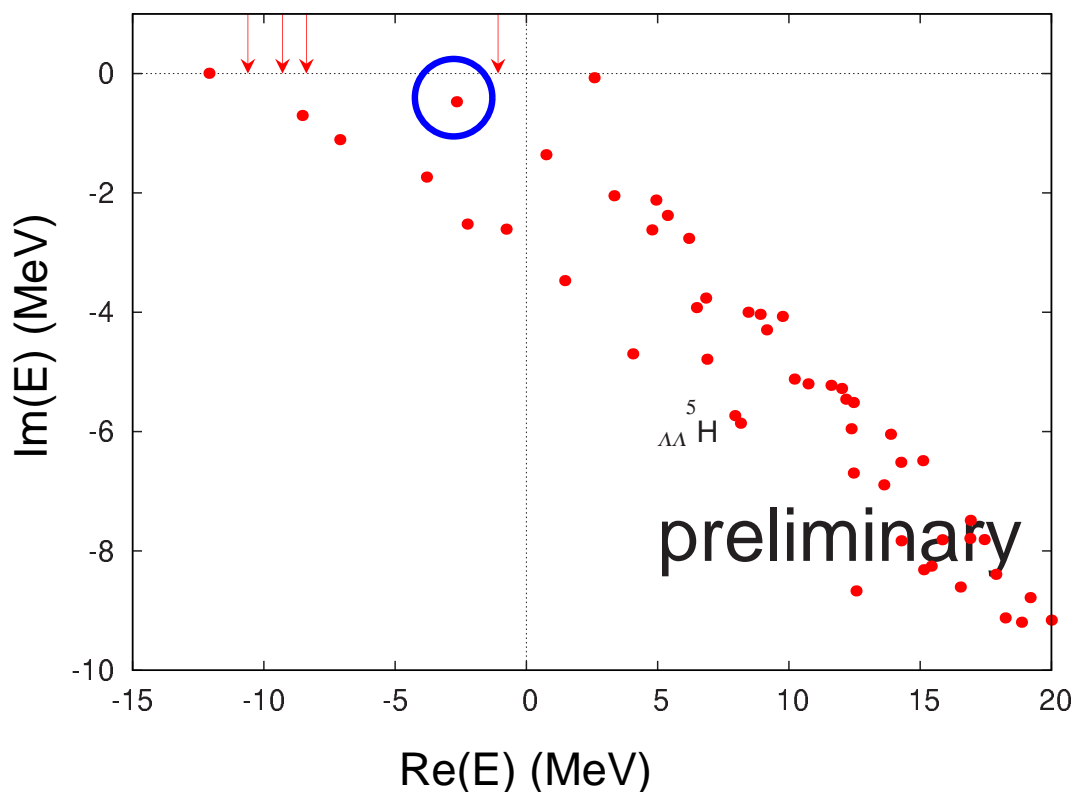


図 3:  ${}^5_{\Lambda\Lambda}H$ - ${}^5_{\Xi}H$ - ${}^5_{\Lambda\Sigma}H$ - ${}^5_{\Sigma\Sigma}H$  系の結合チャネル計算における、複素スケーリング法によって粒子間の相対座標を複素平面上へ  $\theta = 0.19$  rad 回転させたときのエネルギー固有値。横軸がエネルギーの実部を、縦軸が虚部を表している。

大きな  $\Xi$  成分を持った状態があることがこれまでにわかっていた。

本年度は、これらの離散化された連続状態に対して、複素スケーリング法を用いて、これらの中にグザイ核状態と呼べるものがあるかどうかを、より精密に調べた。

図 3 に、複素スケーリング法によって得られたエネルギー固有値を、横軸に実部、縦軸に虚部の値としてプロットしたものを示す。左上に描かれている四本の矢印は、図 2 の中でも同じく矢印で示されている、 ${}^4_{\Lambda}H + \Lambda$ 、 ${}^4_{\Lambda}H^* + \Lambda$ 、 ${}^3H + 2\Lambda$ 、 ${}^4He + \Xi^-$  の閾値エネルギーに、それぞれ対応している。

もっとも左側の、エネルギーの実軸上に乗っている赤い点が、 ${}^5_{\Lambda\Lambda}H$  の基底状態である。このエネルギーの値は、複素スケーリング法における座標の複素平面への回転に対して不変である。いっぽう、それ以外のエネルギー固有値のほとんどは、座標の複素平面への回転に対して連続状態として振る舞っており、これらの状態はグザイ核状態とは見なされないが、図中で、青い円で囲ったエネルギー固有値は、座標の回転に対して停留点として振る舞っており、この状態はグザイ核状態 ( ${}^4He$  と  $\Xi^-$  が結合した状態) であることがわかった。

3. 口頭研究発表，発表論文（査読），国際会議のプロシーディング論文，その他投稿中の論文のリスト

3-1. 口頭研究発表

1. H. Nemura, “ $\Lambda\Lambda$ - $N\Xi$ - $\Lambda\Sigma$ - $\Sigma\Sigma$  Coupled-Channel Calculations of Doubly Strange Hypernuclei”, The International Nuclear Physics Conference (INPC2007), Tokyo, Japan, June 3-8, 2007.
2. H. Nemura, “A new three-baryon-force in  $\Lambda\Lambda$ hypernuclei”, The International Symposium on New Facet of Three nucleon Force — 50 years of Fujita-Miyazawa Three Nucleon Force — (FM50), Tokyo, Japan, October 29-31, 2007.
3. 根村 英克「ストレンジネス少数系の精密計算による研究」，理研 RIBF ミニワークショップ「不安定核・ストレンジハドロン原子核の合同理論研究会— 軽いエキゾチック系の構造を中心として—」理化学研究所，2007年7月17日．
4. 根村 英克「軽い $\Xi$ ハイパー核の研究」，KEK 研究会『原子核・ハドロン物理:横断研究会』，高エネルギー加速器研究機構，2007年11月19-21日．
5. 根村 英克「ハイパー核の大規模計算」，日本物理学会 第63回年次大会，近畿大学，2008年3月23-26日．

3-2. 国際会議のプロシーディング論文

1. H. Nemura, “Light  $\Lambda\Lambda$  Hypernuclei”, Proceedings of the IX International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, edited by Josef Pochodzalla and Thomas Walcher, (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2007), pp.133-139.
2. H. Nemura, “A new three-baryon-force in  $\Lambda\Lambda$ hypernuclei”, Proceedings of the International Symposium on New Facet of Three nucleon Force — 50 years of Fujita-Miyazawa Three Nucleon Force — (FM50), edited by H. Sakai *et al.*, AIP Conf. Proc. No. 1011 (AIP, New York 2008), pp. 129-134.