

# 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、バリオン間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ので、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間相互作用の理解が、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。

さらに、現在建設がすすめられている J-PARC では、 $(K^-, K^+)$  反応を用いて、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。

本年度は、八重項バリオン間の結合チャン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  ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{H}-{}_{\Sigma}^5\text{H}-{}_{\Lambda\Sigma}^5\text{H}-{}_{\Sigma\Sigma}^5\text{H}$  および  ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{He}-{}_{\Sigma}^5\text{He}-{}_{\Lambda\Sigma}^5\text{He}-{}_{\Sigma\Sigma}^5\text{He}$  についての、5 体系の精密な構造計算を行なった。

この研究は、他のグループによってなされているハイパー核の構造計算と比べて、以下のような特徴がある。

- 5 粒子系が持つ自由度を完全に考慮した、非相対論的量子力学の枠組での、第一原理計算である。
- ストレンジネス  $S = -2$  の系を扱うにあたって、バリオン間の 2 体相互作用として、可能なバリオンのチャンネルをすべて考慮した計算である。具体的には、ハイペロン-ハイペロン相互作用として、 ${}^1S_0$  および  ${}^3S_1$  における、 $\Lambda\Lambda - N\Xi - \Lambda\Sigma - \Sigma\Sigma$  間の可能なあらゆる結合をあらわに含んだものを用いる。(表 1 参照) 即ち、他のグループの研究では、 $\Lambda\Lambda$

の単一チャンネルのみや，結合チャンネルの効果を近似的に繰り込んでしまった， $N\Xi$  の単一チャンネルのみを採り入れた計算が行なわれているだけであるのに対して，本研究では， $S$ -波において可能なあらゆるチャンネルを直接扱っている．

本研究で行なった，ダブルラムダ核，グザイ核の精密構造計算のそれぞれについて，他の研究グループに比べて，我々のように，圧倒的に精密に解くことの意義・重要性と，現在の結果について，以下にまとめる．

## 2-1. ダブルラムダ核研究の展開

これまでの，ストレンジネス  $S = -1$  を持った軽いラムダハイパー核の研究によって， $\Lambda N - \Sigma N$  結合が重要であることが明らかとなっている [1, 2, 3, 4, 5]．さらに， $S = -2$  を持ったダブルラムダ核においては， $\Lambda\Lambda - N\Xi - \Sigma\Sigma$  結合に焦点を当てた議論が展開されている [6, 7, 8]．しかしながら，これらのダブルラムダ核の研究では， $S = -1$  において議論された  $\Lambda N - \Sigma N$  結合の重要性には，ほとんど触れられていない．

ダブルラムダ核の研究目的の一つは， $\Lambda\Lambda$  相互作用に関する情報を引き出すことにあるが，少数粒子系の問題として扱う場合には，インプットとして  $\Lambda N$  相互作用を仮定する必要がある．そして， $\Lambda N$  相互作用に関する現在の我々の知識は全く不十分である．最近のダブルラムダ核の研究 [9] でも触れられているように，例えば， ${}_{\Lambda\Lambda}^4\text{H}$  のエネルギーの計算値に対する  $\Lambda N$  相互作用の影響は， $\Lambda\Lambda$  相互作用からの影響に比べてはるかに大きい（粗く見積もって， $\Lambda N$  からの寄与は， $\Lambda\Lambda$  からの寄与の約 4 倍である）．

従って，ダブルラムダ核の研究を始めるにあたっては， $\Lambda N$  ポテンシャルを如何にして決めるかが重要な問題となる．とりわけ重要なのは， $\Lambda N$  ポテンシャルのスピンの依存性である．従来，この部分は  ${}_{\Lambda}^4\text{H}$ ,  ${}_{\Lambda}^4\text{He}$  の  $0^+ - 1^+$  のエネルギーレベルの差から決定されると考えられてきたが， ${}_{\Lambda}^5\text{He}$  の anomaly の問題や， $\Lambda N - \Sigma N$  結合の重要性などが指摘され，現在ではこれは正しくないことが明らかとなりつつある．加えて，実は，ダブルラムダ核中での  $\Lambda N$  ポテンシャルの  $\sigma \cdot \sigma$  項の代数的構造は， ${}_{\Lambda}^5\text{He}$  中での  $\Lambda N$  ポテンシャルの  $\sigma \cdot \sigma$  項の代数的構造と本質的に同じであることに注目すれば，ダブルラムダ核（例えば  ${}_{\Lambda\Lambda}^4\text{H}$ ）に用いるべき  $\Lambda N$  ポテンシャルは，（その部分系である  ${}_{\Lambda}^3\text{H}$  を再現するだけでは十分でなく，むしろ） ${}_{\Lambda}^5\text{He}$  のエネルギーを再現できるようなものでなくてはならない．すなわち，ダブルラムダ核（例えば  ${}_{\Lambda\Lambda}^4\text{H}$ ）を少数粒子系として第一原理的手法に基づいて研究を進めるためには， ${}_{\Lambda\Lambda}^4\text{H}$  の 4 体計算だけで

表 1: ストレンジネス  $S = -2$  における，パリティ正状態での可能なバリオンチャンネルをスピン ( ${}^1S_0$ ,  ${}^3S_1$ ) とアイソスピン ( $I = 0, 1, 2$ ) で分類したもの．本研究では，これらをすべて近似せず，直接扱った 5 体問題を解いている．

	${}^1S_0$	${}^3S_1$
$I = 0$	$\Lambda\Lambda - N\Xi - \Sigma\Sigma$	$N\Xi$
$I = 1$	$N\Xi - \Lambda\Sigma$	$N\Xi - \Lambda\Sigma - \Sigma\Sigma$
$I = 2$	$\Sigma\Sigma$	

は研究を閉じることができず、 ${}^5_{\Lambda}\text{He}$  の 5 体計算が必要となる。そして、 ${}^5_{\Lambda}\text{He}$  anomaly[10, 11] を解決する鍵は、 $\Lambda N - \Sigma N$  結合を正しく考慮することにあるので、 $\Lambda N$  相互作用は、むしろ  $\Sigma N$  チャンネルとの結合を直接含んだ  $YN$  相互作用と考えるべきである。加えて Nagara イベント [12] から示唆される  $\Lambda\Lambda$  相互作用の強さを、 $\Xi$  や  $\Sigma$  の自由度を考慮して評価する必要があるので、 ${}^4_{\Lambda\Lambda}\text{H}$  の 4 体計算や、 ${}^5_{\Lambda\Lambda}\text{H}$  (および  ${}^5_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ ) の 5 体計算の中で用いる  $\Lambda\Lambda$  ポテンシャルの妥当性を、現在利用可能な実験データから検証するには、 ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$  の 6 体計算を行なう必要がある。[13]

このように、 $S = -1, -2$  に関する現在の我々の知識を踏まえれば、 $S = -2$  を持ったダブルラムダ核に対する第一原理的アプローチでは、八重項バリオン間のチャンネル結合のすべてを考慮することが、本質的に重要である。とりわけ、バリオンの混合に焦点を当てるのであれば、 $\Lambda\Lambda - N\Xi - \Sigma\Sigma$  結合だけでなく、 $\Lambda N - \Sigma N$  結合を考慮した枠組で、研究を行なうべきである。

## 2-2. グザイ核研究の展開

$N\Xi$  相互作用については、いまのところ、実験的にはほとんど何もわかってない。また、 $N\Xi$  系は強い相互作用によって  $\Lambda\Lambda$  系と結合できるので、 $\Xi$  ハイパー核は、強い相互作用のもとで安定には存在できず、もし存在するとしても、幅を持った、準安定な状態として存在すると考えられる。

とりわけ、J-PARC においてグザイ核探索実験が早期に行なわれることが計画されており、現在の、きわめて限られた、バリオン間相互作用に関する我々の知識から、どのような  $\Xi$  ハイパー核が、どの程度の幅を持って存在するかを調べることは、重要である。

現在の計算の結果を、表 2 に示す。これらは、それぞれ、 ${}^5_{\Lambda\Lambda}\text{H}-{}^5_{\Xi}\text{H}-{}^5_{\Lambda\Sigma}\text{H}-{}^5_{\Sigma\Sigma}\text{H}$  および  ${}^5_{\Lambda\Lambda}\text{He}-{}^5_{\Xi}\text{He}-{}^5_{\Lambda\Sigma}\text{He}-{}^5_{\Sigma\Sigma}\text{He}$  について、 $\alpha + \Xi$  の閾値よりもエネルギーの低い状態として得られたものについて、基底状態を  $n = 0$  とし、第  $n$  励起状態まで、そのエネルギーと、 $\Lambda\Lambda$  および  $\Xi$  状態の期待値を示している。

本研究の結果の重要な点を以下にまとめる:

- ${}^5_{\Lambda\Lambda}\text{He}$  の基底状態において、非常に大きな  $\Xi$  の期待値 (11.5%) が得られた。この結果は、将来、 $(K^-, K^+)$  反応<sup>1</sup> によって、ダイレクトにダブルラムダ核を生成するような反応過程が実現する可能性を示唆するものであり、J-PARC などのマルチストレンジネスハイパー核生成実験の本格的な開始にとって、きわめて重要である。
- いくつかの励起状態において、大きな  $\Xi$  状態の期待値が得られた。これは、 ${}^5_{\Lambda\Lambda}\text{H}-{}^5_{\Xi}\text{H}-{}^5_{\Lambda\Sigma}\text{H}-{}^5_{\Sigma\Sigma}\text{H}$  および  ${}^5_{\Lambda\Lambda}\text{He}-{}^5_{\Xi}\text{He}-{}^5_{\Lambda\Sigma}\text{He}-{}^5_{\Sigma\Sigma}\text{He}$  について、グザイハイパー核が準安定状態として存在する可能性を強く示唆している。ただし、より正確なエネルギーと幅の決定には、複素スケールリング法などの適用が必要であることも注意しておく。

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

<sup>1</sup>あるいは、さらに将来的には、 $(K^-, K^0)$  反応も含む。

### 3-1. 口頭研究発表

1. H. Nemura, “*Light  $\Lambda\Lambda$  Hypernuclei*”, The IX International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, Mainz, Germany, October 10-14, 2006. (招待講演)
2. 根村 英克, 「ハイパー核の楽しい少数多体計算」, 特定領域研究『サマースクールハイパー核実践講座——あなたにも計算できる——』, KEK, 2006年7月24-27日.
3. 根村 英克, 「ハイパー核の少数多体系の構造研究」, KEK 研究会『現代の原子核物理——多様化し進化する原子核の描像——』, KEK, 2006年8月1-3日.
4. 根村 英克, 「確率論的変分法と複素スケーリング法による  $\Xi$  ハイパー核の研究」, 『ストレンジネスとエキゾティクス・理論の課題』研究会, 志摩ビーチホテル, 三重県鳥羽市, 2007年3月1-3日.
5. 根村 英克, 「軽いダブルストレンジ核の研究」, RCNP『少数核子系とバリオン間相互作用』研究会, 大阪大学核物理研究センター, 2007年3月6-7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, to be published in Eur. Phys. J..

## 参考文献

- [1] K. Miyagawa, H. Kamada, W. Glöckle and V. Stoks, Phys. Rev. C **51**, 2905 (1995).
- [2] Y. Akaishi, T. Harada, S. Shinmura and Khin Swe Myint, Phys. Rev. Lett. **84**, 3539 (2000).
- [3] E. Hiyama *et al.*, Phys. Rev. C **65**, 011301 (2001).
- [4] A. Nogga, H. Kamada and W. Glöckle, Phys. Rev. Lett. **88**, 172501 (2002).

表 2:  ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{H}$  および  ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{He}$  の基底状態 ( $n = 0$ ) と,  $\alpha + \Xi$  閾値以下に得られた励起状態での, エネルギーの値および  $\Lambda\Lambda$ ,  $\Xi$  成分の期待値.

$n$	$E({}_{\Lambda\Lambda}^5\text{H})$	$P_{\Lambda\Lambda}$	$P_{\Xi}$	$n$	$E({}_{\Lambda\Lambda}^5\text{He})$	$P_{\Lambda\Lambda}$	$P_{\Xi}$
0	-10.84 MeV	95.8%	0.2%	0	-4.64 MeV	85.5%	11.5%
1	-6.93 MeV	97.3%	0.1%	1	-1.44 MeV	33.0%	65.5%
2	-5.54 MeV	98.5%	0.0%	2	-0.21 MeV	78.1%	21.0%
3	-2.67 MeV	72.8%	25.7%				
4	-1.16 MeV	42.2%	56.8%				

- [5] H. Nemura, Y. Akaishi, Y. Suzuki, Phys. Rev. Lett. **89**, 142504 (2002).
- [6] Khin Swe Myint, S. Shinmura and Y. Akaishi, Eur. Phys. J. A **16**, 21 (2003).
- [7] D. E. Lanskoy and Y. Yamamoto, Phys. Rev. C **69**, 014303 (2004).
- [8] T. Yamada, Phys. Rev. C **69**, 044301 (2004).
- [9] I. N. Filikhin and A. Gal, Phys. Rev. Lett. **89**, 172502 (2002).
- [10] B. F. Gibson and E. V. Hungerford III, Phys. Rep. **257**, 349 (1995).
- [11] R. H. Dalitz, R. C. Herndon and Y. C. Tang, Nucl. Phys. **B47**, 109 (1972).
- [12] H. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**, 212502 (2001).
- [13] H. Nemura, S. Shinmura, Y. Akaishi and Khin Swe Myint, Phys. Rev. Lett. **94**, 202502 (2005).