

# ハドロン間相互作用の統一的理解と少数多体問題の観点によるエキゾチック原子核の構造研究

## Study of hadron-hadron interaction and structure of exotic nuclei from view points of few-body problem

(物理学会推薦)

代表研究者	理化学研究所	肥山 詠美子	RIKEN	Emiko HIYAMA
共同研究者	京大基礎物理学研究所	兵藤 哲雄	Yukawa Institute for Theoretical Physics	Tetsuo HYODO
	理化学研究所	池田 陽一	RIKEN	Yoichi IKEDA

One of the important purpose in nuclear physics is to understand baryon-baryon interaction in unified way. In particular, current interesting issue is to get information about hyperon-nucleon, hyperon-hyperon and anti-K-nucleon interactions. For this purpose, we studied light K-nucleus(  $\bar{K}pp$ ),  ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$  and  ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$  systems using chiral SU(3) effective interaction. As a result, we obtained weakly bound state for  $\bar{K}pp$  three-body system. Also, for  ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$  and  ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$ , we found that chiral effective model is applicable for  ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$ , but it was difficult to reproduce the data for  ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$ .

### 研究目的

原子核分野の大きな目的の一つは、強い相互作用をする粒子（ハドロン）間の相互作用を広く理解することであり、近年の最重要課題、かつ緊急課題は、ハイペロン-ハイペロン間相互作用の決定、反K中間子-核子間相互作用の相互作用の決定である。この課題達成のために、J-PARC 施設において、ストレジネスを2つ含んだ原子核であるダブルハイパー核 (E07@J-PARC)、及び反K中間子を直接原子核に付加したエキゾチック原子核の候補である、反K中間子原子核の生成実験 (E15, E27@J-PARC) が計画されている。そこで、我々は、(1)ラムダ-ラムダ相互作用、 $\Lambda$ -核子間相互作用、反K中間子-核子(KbarN)間相互作用の理論的構築、(2)構築された相互作用を使用したダブルハイパー核、及び反K中間子原子核の少数多体系に基づいた精密構造計算、(3)来るべき実験結果と比較することによる構築された相互作用の妥当性の検討を、ハドロン間相互作用研究の第一

人者であるミュンヘン工科大学の Weise 教授のグループと共同研究を行うことにより、原子核研究の目的であるハドロン間相互作用の統一的理解を目指した。

### 研究経過

反K中間子原子核が存在するか否かは KbarN 相互作用の理解が必要不可欠である。これを成し遂げるため SIDDHARTA グループによる K 中間子水素原子の最新の実験データの理論的解析を行なった。カイラル有効場の理論(最低次+NLO)に基づき、KbarN 相互作用を世界に先駆けて構築した。また、 ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$  と  ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$  について、カイラル有効相互作用を用いてその束縛エネルギーを求める。カイラル有効相互作用は、

$$U_{\Lambda}(\mathbf{r}) = U_{\sigma}(\mathbf{r}) - \frac{1}{2M_{\Lambda}} \nabla \cdot \mathbf{R}(\rho_N) \nabla - D(\rho_N)(\nabla^2 \rho_N(\mathbf{r}))$$

のように表現できる。

ここで、 $U_{\sigma}(\mathbf{r}) = U_0(\rho_N(\mathbf{r})/\rho_0)$

$[1+0.351(\rho_N(\mathbf{r})/\rho_0)^{1/3}-0.359(\rho_N(\mathbf{r})/\rho_0)^{2/3}-0.033(\rho_N(\mathbf{r})/\rho_0)]$ で表すことができる。

ここで  $\rho_N(\mathbf{R})$  は、これらの2つのハイパー核におけるコア原子核、 ${}^8\text{Be}$ ,  ${}^{12}\text{C}$  の密度分布であり、この密

度分布が必要となるため、最初に、 $^8\text{Be}$  と  $^{12}\text{C}$  を  $2^4\text{He}, 3^4\text{He}$  クラスタに基づいた計算を行い、その計算から得られた密度分布を用いて、カイラル有効相互作用を得た。得られた結果の考察は以下の通りである。

### 考察

まず、反K中間子原子核については、以下の通りになった。最新の実験である SIDDHARTA 実験データは、カイラル有効場の理論が持つパラメータの制限を強く与えることができたため、閾値下のエネルギー領域への外挿の不定性が大きく軽減され、KbarN 相互作用のアイソスピン I=0 成分の情報は確定した。これにより  $\Lambda$  (1405) 粒子の構造に関する情報がより精密に決定された。さらに、最低次の KbarN 相互作用による K-pp の少数系精密計算で、3 体系はかなり浅い束縛状態になることに加え、E15@J-PARC 実験においてピークとして観測される可能性が低いことを指摘した。一方で I=1 成分は現存のデータによる制限があまり強くないことが理解された。そこで、固定重心近似の範囲で K-重陽子散乱長を計算し、将来得られる K 中間子重水素の実験結果に備えた。さらに最低次+NLO の KbarN 相互作用による精密な少数系計算を行うために、カイラル有効場の理論と等しい予言を行なうことができる KbarN ポテンシャル模型を現在構築中である。このポテンシャルと用いることで、エキゾチック原子核のさらなる精密な構造研究が可能となることが期待される。

次に、カイラル有効相互作用を用いた  $^9_{\Lambda}\text{Be}$  及び  $^{13}_{\Lambda}\text{C}$  の計算を行った。これらの実験値は存在しており、 $^9_{\Lambda}\text{Be}$  は 6.64 MeV ( $^8\text{Be}+\Lambda$  の閾値からみて)、 $^{13}_{\Lambda}\text{C}$  は 11.7 MeV ( $^{12}\text{C}+\Lambda$  の閾値からみて)であり、これらの値を再現するように前述のカイラル有効相互作用の D パラメータを決める。D パラメータは  $33\sim 35\text{MeV}\cdot\text{fm}^5$  の範囲で決めるべきであることが知られている。 $^9_{\Lambda}\text{Be}$  はこの範囲で実験値を再現することができなかった。一方、 $^{13}_{\Lambda}\text{C}$  はこの範囲で決定することができた。このことから、カイラル有効相互作用は、質量数 12 くらいのハイパー核には、適用可能であるが、それよりも軽いハイパー核になると適用は困難であることが分かった。現在、この研究については、Progress of Theoretical and Experimental

Physics に投稿中である。今後は、このカイラル有効相互作用を S=-2 セクターであるグサイハイパー核に適用する予定である。現在、 $^{12}_{\Xi}\text{Be}({}^{11}\text{B}+\Xi)$  グサイハイパー核の生成実験が東海村にある J-PARC 実験施設で計画中であり、実験に先駆けた束縛エネルギーの予言が必要不可欠である。報告者らは次にこの研究に着手することを考えている。この研究により、今後のグサイハイパー核の研究の発展に大きく貢献することが期待される。

### 研究の発表

口頭発表

1. *Meson-baryon interactions and baryon resonances*, Tetsuo Hyodo, XIV International Conference on Hadron Spectroscopy (hadron2011), キュンストラウハウス, ミュンヘン, 2011 年 6 月 16 日 (招待講演)
2. *Antikaon-nucleon dynamics and its application to few-body systems*, Tetsuo Hyodo, The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20), 福岡国際会議場, 2012 年 8 月 24 日 (招待講演)
3. *Kaonic hydrogen and chiral SU(3) dynamics*, Yoichi Ikeda, International Workshop on Strangeness Nuclear Physics, Aug. 27 -- 29, 2012, Neyagawa, Osaka, Japan. (招待講演)
4. *Recent developments in antikaon-nucleon dynamics*, Tetsuo Hyodo, The 11th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2012), Cosmocaixa, バルセロナ, 2012 年 10 月 4 日 (招待講演)
5. *Recent progress on anti-kaon - nucleon interactions and dibaryon resonances*, Yoichi Ikeda, Recent progress in hadron physics, ヨンセイ大, 2013 年 2 月 18-20 日 (招待講演)
6. "Structure of S=-1 and S=-2 hypernuclei", SNP12-International Workshop on Strangeness Nuclear Physics 2012, E. Hiyama, Osaka, JAPAN, August 27-29, 2012 (招待講演)
7. "Few-body aspects of hypernuclear physics", VIII Tours Symposium on Nuclear Physics and astrophysics, E. Hiyama, September 2-7, 2012, Black Forest, Germany (招待講演)
8. "S=-1 and S=-2 light Hypernuclear structure" 11th International Conference on Hypernuclear and Strange

Particle Physics (HYP2012), E. Hiyama, Barcelona, Spain, 2012, October 1-5 (招待講演)

誌上発表

1. *Improved constraints on chiral SU(3) dynamics from kaonic hydrogen*, Yoichi Ikeda, Tetsuo Hyodo, Wolfram Weise, Phys. Lett. B 706, 63-67 (2011)
  2. *Chiral SU(3) theory of antikaon-nucleon interactions with improved threshold constraints*, Yoichi Ikeda, Tetsuo Hyodo, Wolfram Weise, Nucl. Phys. A 881, 98-114 (2012)
  3. *K中間子水素原子X線精密分光実験の拓く物理*, 岡田信二, 早野龍五, 兵藤哲雄, 池田陽一, 日本物理学会誌 第 68 巻第 1 号 29 (2013)
- 'Alpha-clustered hypernuclei and chiral SU(3) dynamics, E. Hiyama, Y. Funaki, N. Kaiser and W. Weise, to be submitted to Progress of Theoretical and Experimental Physics, arXiv nucl-th:1307.6902