

研究種目： 学術創成研究費

研究期間： 2004 ~ 2008

課題番号： 16GS0201

研究課題名（和文） 電子線ビームによるハイパー原子核分光研究の展開

研究課題名（英文） Exploring hypernuclear spectroscopy by electron beams

研究代表者

橋本 治 (Osamu Hashimoto)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50092292

## 研究成果の概要：

高分解能散乱ラムダハイパー核分光システム（HKS-HES）を製作し米国ジェファーソン国立研究所（JLab）に設置して 500 keV (FWHM) 以下の最高質量分解能を実現し、電子ビームによる高質分光研究に初めて成功した。その結果、拡張された核力で束縛されたラムダハイパー核の構造に関する研究および原子核中に存在するストレンジ・クォークの物理の新時代を創出するとともに、ラムダ粒子・核子相互作用における荷電対称性の破れのテストにも大きな成果が得られた。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	76,000,000	22,800,000	98,800,000
2005年度	83,700,000	25,110,000	108,810,000
2006年度	87,000,000	26,100,000	113,100,000
2007年度	90,700,000	27,210,000	117,910,000
2008年度	77,800,000	23,340,000	101,140,000
総計	415,200,000	124,560,000	539,760,000

研究分野：数物系科学

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：ストレンジネス、ハイパー核、電磁相互作用、 $(e, e' K^+)$ 反応、 $K^0$ 中間子

## 1. 研究開始当初の背景

ストレンジ・クォークを含むハイパー原子核は、ハドロン多体系の研究にとって不可欠な役割を果たす。本研究に先立ち、我々は新しい研究手法である電子線を用いたハイパー核精密反応分光という創始すると同時に、中性 $K$ 中間子を閾値領域で電磁生成することに成功している。国際競争の厳しいこの分野で日本がリードを保つためには、この機を逃さずこれまでの経験を生かしてストレンジネスの電磁生成という新しい研究分野を速やかに展開することが必要であった。

## 2. 研究の目的

本研究は、ストレンジ・クォークをもつ重粒子としては最も安定な $\Lambda$ ハイペロンが原子核に束縛された状態である $\Lambda$ ハイパー核を $(e, e' K^+)$ 反応によって最高質量分解能で測定し（1）原子核深部に深く束縛された $\Lambda$ ハイペロンの性質、（2） $\Lambda$ ハイパー核の構造、（3） $\Lambda$ 核子間相互作用を明らかにすることを第1の研究の柱とする。また、第2の柱として、 $\Lambda$ ハイペロンおよびストレンジネスの電磁生成素過程を電荷の関与しない特異的な生成チャンネルである $\gamma + n \rightarrow \Lambda + K^0$ 反応を通じて究明する。この2本の研究の柱のもと、

ストレンジネス核物理研究を大きく展開することが本プログラムの目的である。

### 3. 研究の方法

本グループが主導して米国ジェファーソン研究所 (JLab) において実施し成功させた  $(e, e' K^+)$  反応による開拓的研究をさらに展開するため、新規に設計・製作した電子線を用いたハイパー核実験に最適化した高分解能散乱電子スペクトロメータ (HES) と本プログラムに先立ち製作し JLab に既設の高分解能 K 中間子検出器 (HKS) とを組み合わせ、高性能の電子線ビームによるハイパー核分光実験用スペクトロメータシステムを完成・設置した。(図1、2) 特に、JLab で得られる GeV 連続電子線ビームを活用また HES の性能を最大限に引き出すため我々が考案した傾斜法を採用し、電磁相互作用に起因する大量のバックグラウンドを抑制することに高効率高分解能分光実験を実現した。その結果、軽いハイパー核から  $A=50$  領域の中重ハイパー核まで広い質量領域において質の高い精密  $\Lambda$  ハイパー核分光に成功した。

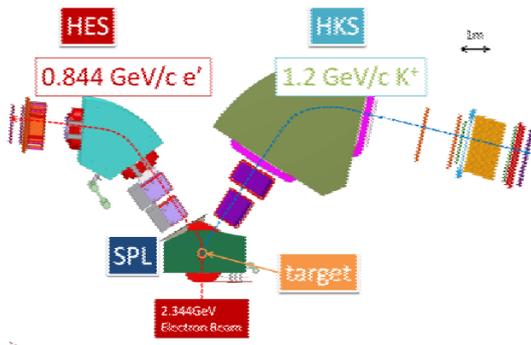


図1 JLab Hall C に設置した HKS/ HES スペクトロメータシステム概念図

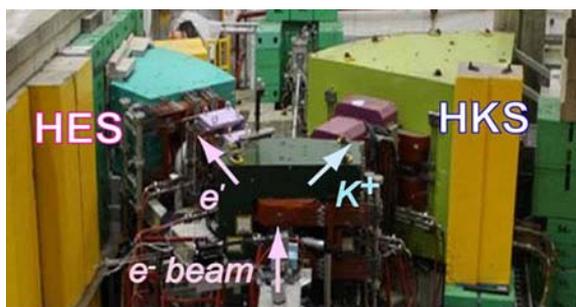


図2 JLab Hall C に建設・設置した HKS/ HES スペクトロメータのビーム上流からの写真

一方、東北大学核理研において、重陽子 (中性子) を標的として閾値領域における中性 K 中間子の光生成実験を推進するため、 $2\pi$  の立体角を擁する中性 K 中間子スペクトロメータ (NKS2) を製作・設置した。(図3) 液体重水素ターゲットにエネルギーが標識化された 1 GeV 領域の光子ビームを照射することにより

生成されるストレンジネス量子数をもつ  $\Lambda, K^0$  等の重粒子および中間子からの崩壊粒子である  $(p, \pi^+)$  を検出し、それらの微分断面積、崩壊 4 粒子相等の測定を通じてストレンジネス生成過程を明らかにした。



図3 東北大学原子核理学研究施設 (現電子光学センター) に建設・設置した中性 K 中間子スペクトロメータ (NKS2) の写真

### 4. 研究成果

#### (1) $^{12}\Lambda\text{B}$ ハイパー核精密分光

2000年に実施した第一世代  $(e, e' K^+)$  ハイパー核実験により反応分光によるハイパー核のエネルギー分解能初めて 1 MeV を切って実現できることを初めて示したが、本研究ではさらに分解能を 2 倍近く改善し、500keV (FWHM) 以下の最高分解能を達成した。これにより、 $\Lambda$  粒子が s および p 軌道に束縛されている状態を観測するとともに、 $\Lambda$  粒子を束縛しているコア核 ( $^{12}\text{B}$ ) の励起状態を同定することに成功した。(図4)

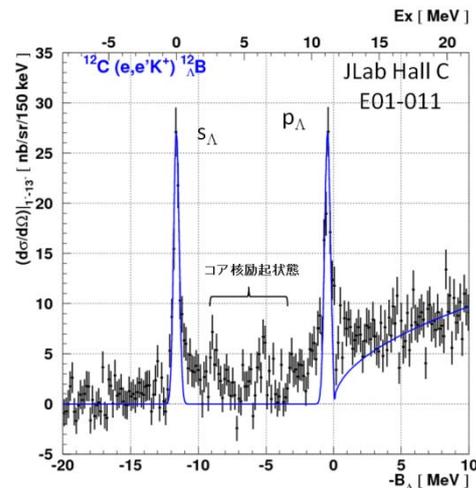


図4  $^{12}\text{C}(e, e' K^+)^{12}\Lambda\text{B}$  反応によって得られたハイパー核質量スペクトル。(JLab E01-011 実験)

#### (2) $^7\Lambda\text{He}$ ハイパー核による $\Lambda\text{N}$ 相互作用にお

### ける荷電対称性の破れの研究

従来、エマルジョンによる観測しかデータがなかった中性子過剰ハイパー核である ${}^7_{\Lambda}\text{He}$ の高精度質量を決定することにはじめて成功した。陽子をターゲットする素過程において生成される既知の $\Lambda$ 、 $\Sigma$ 粒子質量を基準として信頼度の高いハイパー核質量を決定できる $(e, e' K^+)$ 反応の特徴を生かしたものである。このデータを原子核乾板によって決定された基底状態質量と最近測定された $\gamma$ 線データとの組み合わせによって得られる ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ ハイパー核アイソスピン1基底状態の質量、原子核乾板によって決定されている ${}^7_{\Lambda}\text{Be}$ ハイパー核のアイソスピン3重項ラムダハイパー核( ${}^7_{\Lambda}\text{He}$ ,  ${}^7_{\Lambda}\text{Li}$ ,  ${}^7_{\Lambda}\text{Be}$ )の束縛エネルギーを比較することにより、アイソスピン1状態における $\Lambda$ 核子間相互作用ポテンシャルの荷電対称性の破れについて議論を行った。

最近、肥山らはクラスターモデルによる精密少数多体計算との比較によりこの荷電対称性の破れに関する解析を行っている。しかしながら、アイソスピン1/2である4体系ラムダハイパー核( ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ ,  ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ )の束縛エネルギーデータをもとに現象論的に導入されたこの理論モデルでは、 $\Lambda\text{N}$ 間相互作用ポテンシャルの荷電対称性の破れ(CSB)の効果は本研究で得られた ${}^7_{\Lambda}\text{He}$ 実験結果と逆符号であることが示された。(図5)

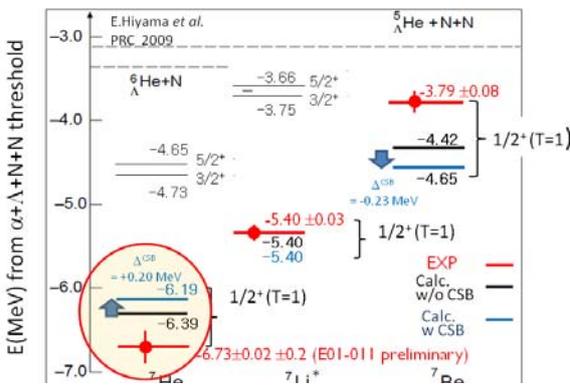


図5  $A=7$ ,  $T=1$  のハイパー核の束縛エネルギーを $\alpha\text{-}\Lambda\text{NN}$ をゼロとしてプロットした。CSBを入れない計算結果(黒)にCSB効果を取り入れると(青)、実験結果(赤)とのずれが大きくなる。

本研究で測定された相対軌道核運動量0のみならず1の成分も含まれる $A=7$ 体系ラムダハイパー核の精密束縛エネルギーは、 $\Lambda$ 核子間相互作用に関する荷電対称性の破れに関する研究を進めるものであり理論家からも大きな注目を浴びている。CSB項の研究に大きなインパクトを与えるデータであり、バリオン力の荷電対称性の破れに関する貴重な情報である。

### (3)p-シェル領域より重い ${}^{28}_{\Lambda}\text{Al}$ , ${}^{52}_{\Lambda}\text{V}$ ハイパー核の分光

新スペクトロメータシステムと新たに考案された傾斜法を駆使することにより、 $(e, e' K^+)$ 反応を用いてp-shell領域より重いハイパー核 ${}^{28}_{\Lambda}\text{Al}$ を $(e, e' K^+)$ 反応を用いて精密分光することに初めて成功した。 $\Lambda$ がs, p, d軌道に入った状態が観測された。(図6)

理論予想よりも深く束縛されている基底状態に関しては現在、理論家とも協力して、その起源について、詳細な計算との比較・検討を行っている。

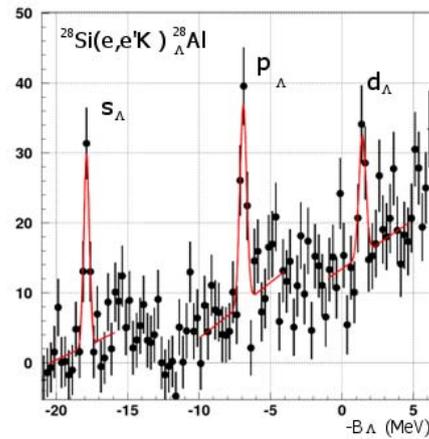


図6 初めて得られた ${}^{28}_{\Lambda}\text{Al}$ のスペクトラム

さらに、2009年夏にはHKSと組み合わせ、 $(e, e' K^+)$ ハイパー核分光に特化したスペクトロメータシステムとしてHall C実験室に設置を完了した。このスペクトロメータを用いて、2009年秋に、 $(e, e' K^+)$ ハイパー核分光第3世代実験が実施され、軽いハイパー核である ${}^7_{\Lambda}\text{He}$ から質量数 $\sim 50$ 領域の中重ハイパー核( ${}^{52}_{\Lambda}\text{V}$ )までの広い質量領域で質の高いハイパー核スペクトルを収集することに成功した。その結果、 ${}^7_{\Lambda}\text{He}$ から ${}^{52}_{\Lambda}\text{V}$ に至る広い質量領域の詳細なデータ解析及び理論計算との比較研究が発展している。

### (4)光子ビームによる中性K中間子およびハイペロン生成

本研究の第2の柱である中性K中間子の電磁生成機構に関する研究では、東北大学原子核理学研究施設に設置したNKSスペクトロメータを用いて初めて生成閾値近傍での中性K中間子生成微分断面積を測定し、その結果を、主としていわゆるKaon-MAIDおよびSaclay-Lyonモデルの予言との比較を通じて、その生成機構が研究された。(図7)

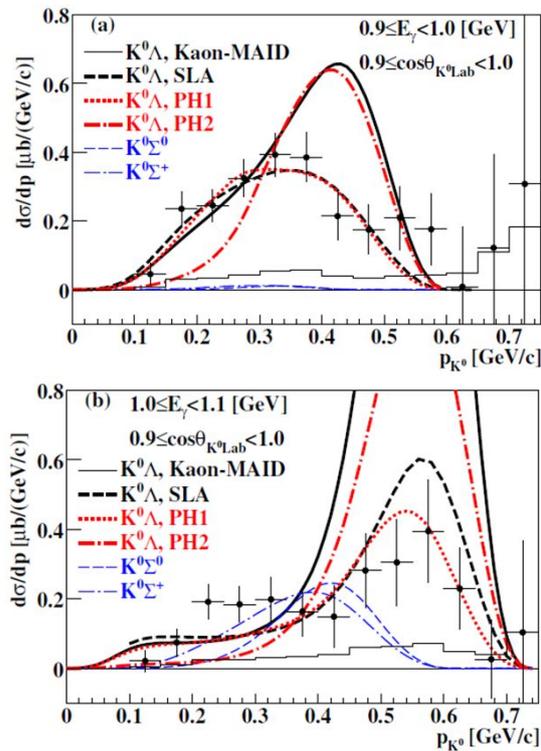


図7 (a) : 光子エネルギーが低い場合 ( $0.9 < E < 1.0 \text{ GeV}$ ) の生成微分断面積、(b) : 光子エネルギーが高い場合 ( $1.0 < E < 1.1 \text{ GeV}$ ) の生成微分断面積、Modern Physics Letters A, Volume24, Issues: 11-13(2009) pp. 1017-1022, Phys. Rev. C78 014001-1-10 (2008)

引き続き、本研究で開発した第2世代中性子K中間子スペクトロメータ(NKS2)によるデータ収集を実施し、超前方領域を含む広い運動学的範囲のデータを得るとともに、 $\Lambda$ 粒子の運動量分布測定および $\Lambda K^0$ 崩壊に伴う4粒子同時測定にも成功した。本研究ではさらに質の高い4粒子崩壊チャンネルや $\Lambda$ の偏極に関する情報を得て電磁相互作用によるストレンジネス生成素過程を明らかにすることを目標に、 $K^0, \Lambda$ 生成点近傍軌道の精密に測定するため高位置分解能崩壊点検出器を新たに導入した。現在、質の高い第2期のデータ収集が行われている。

これらの研究で、初めて閾値領域における $K^0$ 電磁生成微分断面積の測定に成功し、光子ビームによる中性K中間子生成過程に関する研究が進捗するとともに、アップグレードした中性K中間子スペクトロメータを用いて角度前方領域まで測定されたユニークな高統計データをもとに電磁相互作用によるストレンジネス生成機構が明らかにされつつある。

## 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21件)

① **Hypernuclear Spectroscopy at JLab Hall C**, O.Hashimoto et al. (95名中 OH1 番目, SNN13, YF4, HK6, MK7, KM9, SK19) Nuclear Physics A 835 (2010) 121-128. (査読有)

② **Photoproduction of neutral kaons on a liquid deuterium target in the threshold region**, K.Tsukada, et. al, (28名中 OH6 番目 SNN 15番目, YF4 番目, HK10 番目, KM11 番目), Physical Review C78 (2008) 014001 (査読有)

③ **Hypernuclear spectroscopy using the ( $e, e' K^+$ ) reaction**, L.Yuan et al. (69人中 OH31 番目, SNN 49番目, FY 24番目, TT60 番目), Phys. Rev. C 73 (2006) 044607. (査読有)

④ **Spectroscopy of  $\Lambda$  hypernuclei**

O.Hashimoto and H.Tamura, Progress in Particle and Nuclear Physics, 57 (2006) 564-653 (査読有)

[学会発表] (計83件)

① **( $e, e' K^+$ ) spectroscopy at JLab Hall-C** O.Hashimoto, 10<sup>th</sup> International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, Invited Talk,

“Hyp X”, September 15, 2009, Tokai, Ibaraki, Japan

② **Recent results of the JLab Hall C hypernuclear experiment E01-011**,

O.Hashimoto, HYP2006 (XI International Conf. on Hypernuclear and Strange Particle Physics), Invited Talk Oct. 10, 2006, Mainz, GERMANY

③ **Future Hypernuclear Experiments at JLab**,

S.N.Nakamura, HYP2006 (XI International Conf. on Hypernuclear and Strange Particle Physics), Invited Talk Oct. 12, 2006, Mainz, GERMANY,

[図書] (計1件)

① **Strangeness in Nuclear and Hadronic Systems --SENDAI08--**

K.Maeda, S.N.Nakamura, H.Tamura and O.Hashimoto ed.

World Scientific Publishing Co., Singapore, 総ページ数 445.

[その他]

ホームページ等

[http://lambda/strangeness/gakujujsusous  
ei-j.html](http://lambda/strangeness/gakujujsusous<br/>ei-j.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本 治 (Osamu Hashimoto)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：50092292

### (2) 研究分担者

中村 哲 (Satoshi N Nakamura)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：50280722

### (3) 連携研究者

前田 和茂 (Kazushige Maeda)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：20125652

高橋 俊行 (Toshiyuki Takahashi)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子  
原子核研究所 物理第3系・准教授  
研究者番号：50281960

藤井 優 (Yuu Fujii)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：30302079

金田 雅司 (Masashi Kaneta)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：00400226

神田 浩樹 (Hiroki Kanda)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：40321971

加藤 静吾 (Seigo Kato)  
山形大学・理学部・教授  
研究者番号：70013422