

平成22年 5月31日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005～2009

課題番号：17070006

研究課題名（和文） マルチストレンジネス多体系の分光

研究課題名（英文） Spectroscopy of Multi-Strangeness Many-Body Systems

研究代表者

永江 知文 (NAGAE TOMOFUMI)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50198298

研究成果の概要（和文）：通常の原子核にはないストレンジネスという新しい量子数をもった原子核（ハイパー核）を、加速器を用いて生成しその性質を調べることにより新しい核力の情報を引き出せる。本研究では、その中でもこれまでに見つかっていないグザイ・ハイパー核と呼ばれるストレンジネスを複数含む原子核を調べるために、世界最高のエネルギー分解能を持つ分析器系を製作し、十分な性能が達成されていることを確認することに成功した。

研究成果の概要（英文）：New experimental information on the generalized nuclear force with strangeness degrees of freedom can be obtained by investigating the structure of hypernuclei, nuclei with strangeness. In this research, we extract spectroscopic information on  $\Xi$  hypernuclei which have not been observed. A new magnetic spectrometer system has been constructed and the good performance of the spectrometer has been confirmed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	12,900,000	0	12,900,000
2006年度	51,600,000	0	51,600,000
2007年度	88,500,000	0	88,500,000
2008年度	77,900,000	0	77,900,000
2009年度	17,900,000	0	17,900,000
総計	248,800,000	0	248,800,000

研究分野：原子核物理学実験

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：実験核物理、量子ビーム、ハイパー核、ストレンジネス核物理

## 1. 研究開始当初の背景

通常の原子核は陽子と中性子という核子から成り、クォークのレベルで考えるとアップとダウンという二種類の軽いクォークから構成されている。これに3番目に軽いクォーク、ストレンジ・クォークを含む粒子（ハイペロン粒子など）を注入し、できあがったハ

イパー核の構造を研究することにより、ハイペロン粒子と核子との間の相互作用を研究できる。これまでに、ストレンジ・クォークを1個含んだ $\Lambda$ （ラムダ）ハイペロンが結合した $\Lambda$ ハイパー核については、多くの研究が行われてきているが、ストレンジ・クォークが2個含まれるマルチストレンジネスのハ

ハイパー核の研究は、まだまだ未開拓の領域であった。その中で、ストレンジ・クォークを1個含む $\Lambda$ ハイペロンが2個入った二重 $\Lambda$ ハイパー核に関しては、原子核乾板を用いた実験によって数例の事象が観測されている。このうち「長良事象」と呼ばれる事象においては、 ${}_{\Lambda\Lambda}{}^6\text{He}$ という二重 $\Lambda$ ハイパー核の同定に成功し、その束縛エネルギーも測定された。しかし、2個のストレンジ・クォークを1個の粒子のなかに含む $\Xi$ （グザイ）ハイペロンについては、果たして原子核と束縛状態を形成できるのかどうか分かっていなかった。実験的には、これまでに限られた統計精度と充分ではないエネルギー分解能による測定が、我が国の高エネルギー加速器研究機構の陽子シンクロトン加速器施設や米国のブルックヘブン国立研究所のAGS陽子加速器施設において行われてきた。エネルギー分解能が10 MeV程度と非常に悪かったために、 $\Xi$ ハイパー核の束縛状態を、実験的なピークとして観測することには成功しなかったが、得られた励起エネルギースペクトルの解析により、 $\Xi$ ハイパー核は存在している可能性が高く、14 MeV程度の引力を感じているのではないかと推定された。

そこで、我々は、大強度陽子加速器施設J-PARCにおいて得られる大強度のK中間子ビームを利用することにより統計精度を向上させるとともに、充分なエネルギー分解能を備えたビームラインスペクトロメーターと散乱粒子用のSKS+スペクトロメーターを構築することとした。これにより、過去の実験で示唆されるように $\Xi$ ハイパー核が存在しているとすれば、束縛状態をはっきりとしたピークとして分離観測することが可能となり、また、その幅（転換幅）の情報も引き出すことが可能となる。これらの実験情報は、 $\Xi$ ハイペロンと核子の間の核力によって生じている $\Xi$ 粒子と原子核との間のポテンシャルの実部と虚部の大きさを与えるものとなる。

## 2. 研究の目的

(1) (K,K<sup>+</sup>)反応を用いて $\Xi$ ハイパー核の分光学的研究を行い、 $\Xi$ 粒子と核子の間の相互作用に関する情報を得る。これは、これまで実験情報がほとんどない $\Xi$ 粒子と核子との相互作用について、新しい知見を与えるものである。

(2)  $\Xi$ ハイパー核の束縛エネルギーの大きさは、 $\Xi$ 粒子と原子核とのポテンシャルの実部の情報を与え、 $\Xi$ 粒子と核子間の引力と強さを導くことが可能である。 $\Xi$ 粒子は、原子核中では強い相互作用により $\Xi\text{N}\rightarrow\Lambda\Lambda$ へと転換される。束縛状態のエネルギー幅の測定は、この転換幅の情報を与え、 $\Xi\text{N}\rightarrow\Lambda\Lambda$ 相互作用の大きさを導くことが可能となる。

(3) このようなストレンジネス量子数-2をもった $\Xi$ ハイパー核のようなハドロン多体系の研究は、ストレンジネスがそれ以上に含まれるマルチストレンジネス多体系の研究への大きな足がかりを与えるものである。そのようなマルチストレンジネス多体系が出現する研究対象として注目されているのが、中性子星のコア部で実現されていると推定される高密度核物質中でのハイペロン化現象である。 $\Xi$ 粒子は、負電荷を持ったハイペロン粒子として、重要な役割を果たすと考えられており、 $\Xi$ ハイパー核の分光的研究から、そのような高密度核物質の研究へ定量的な情報を与えることが期待される。

## 3. 研究の方法

本研究では、(K,K<sup>+</sup>)反応による $\Xi$ ハイパー核スペクトロスコピーを2.5 MeV以下の従来にはない高エネルギー分解能で行う。そのためには、入射K中間子の運動量を $\Delta p/p=2\cdot 3\times 10^{-4}$ で測定するためのビームラインスペクトロメーター系と、既存のSKSスペクトロメーターを(K,K<sup>+</sup>)反応に対応させつつ運動量分解能 $\Delta p/p=1\times 10^{-3}$ を維持するための更新・改善が必要である。また、ビーム強度の増大によるトリガー事象の高計数率化や、ビームライン飛跡検出器の高計数率化などに対応するために、検出器系の更新・増強が必要とされる。

そこで、我々は、大強度陽子加速器施設J-PARCのハドロン実験施設内にK1.8と呼ばれるK中間子用のビームラインとこれに必要な検出器系の設計・開発・製作に取り組んだ。このビームラインでは、そのままでは百倍以上の強度をもつ $\pi$ 中間子ビームのためK中間子を用いた実験は困難である。そのため $\pi$ 中間子ビームを抑制するように、ビームライン中に二段の静電型質量分離装置を装備している。これにより実験標の上では、Kと $\pi$ の比は1以上となるように設計されている。大強度ビームの運動量を分析するために、高計数率に耐えうる飛跡検出器とその読み出し回路系を開発した。

実験標的で散乱されて出てくるK<sup>+</sup>中間子の運動量は、SKS+スペクトロメーターによって解析する。スペクトロメーターの入り口部分に新しい飛跡検出器系を整備する。また、多重ヒット対応の回路系を開発する。

## 4. 研究成果

### (1) J-PARC K1.8 ビームラインの建設

大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロン実験室内に K1.8 ビームラインを建設した。このビームラインは、最高ビーム運動量が 2.2 GeV/c であり、本研究のために必要な 1.8 GeV/c 程度の K 中間子ビームのために最適化された二次粒子ビームラインである。ビーム

ラインの電磁石磁場により運動量が選別され、これに加えて静電型の質量分離装置を二段備えることにより、高い  $K/\pi$  比を実現するものである。

ビームラインの最下流部には、四重極電磁石 4 組と双極電磁石 1 台からなるビーム運動量分析用のスペクトロメーター系が設置されている (図 1)。その前後には、高計数率に耐える飛跡検出器 BC1, 2 と BC3, 4 を開発・製作した。

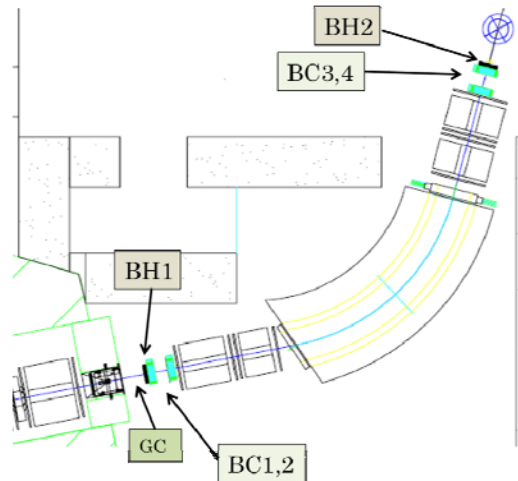


図 1 K1.8 ビームラインスペクトロメーター

BC1, 2 は、開発した陽極ワイヤー間隔 1mm の多線式比例計数チェンバー (MWPC) である。

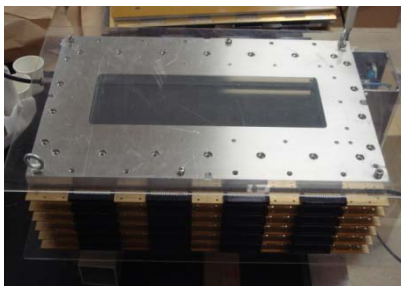


図 2 1mm ピッチ MWPC(BC1,2 用)

一面当たり 256 本のワイヤーから成る陽極面を 6 面もっているものが 2 組あり、スペクトロメーターへの入射位置と方向を精度良く測定する。読み出し回路は、今回新たに開発した COPPER システムの MWPC エンコーダー回路を使用する。この回路系は、100 MHz のサンプリングでマルチヒット対応となっている。

スペクトロメーター下流の飛跡検出器部分では、上流の BC1, 2 部分に比べて計数率が数分の一に下がるので、3mm のドリフト距離を持つ陽極ワイヤー面から構成される高計数率用のドリフトチェンバーを開発・製作した。従来のものよりワイヤー間隔が狭くなるた

め、放電対策等を施してある。

また、ビーム粒子の識別のために、トリガー用のプラスチックシンチレーター・ホドスコープ 2 組 (BH1, BH2) とガスチェレンコフ検出器 (GC) を製作した。GC (図 3) は、ビーム中の電子/陽電子を識別するためのものである。99.5%以上の検出効率を持つことが確認できている。

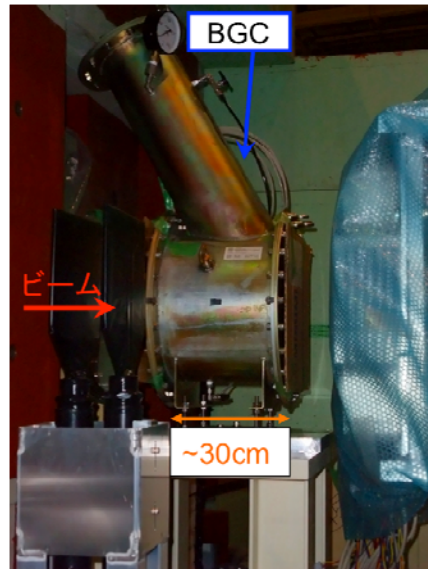


図 3 ガスチェレンコフ検出器

最終的なビーム粒子の識別は、BH1 と BH2 との間の飛行時間 (TOF) 測定によって行う。図 4 には、この方法により  $\pi$  中間子、K 中間子、陽子をはっきりと識別できている様子を示す。

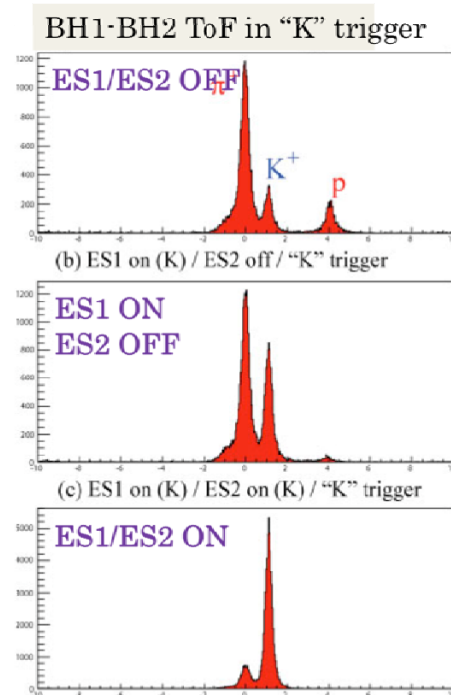


図 4 ビーム粒子の識別の様子

図の上段は、静電型質量分離装置が2段ともオフの場合、中段は片方のみがオンの場合、下段は両方がオンの場合を示している。静電型質量分離装置が十分に機能していることが実際に確認できた。

## (2) SKS+スペクトロメーターの建設

( $K^-, K^+$ ) 反応によって前方に放出される  $K^+$  中間子の運動量を分析するために SKS+スペクトロメーター (図5) を建設した。既存の SKS スペクトロメーターの前に小型の双極型電磁石を1台製作した。また、その前後に設置する飛跡検出器系を開発・製作した。

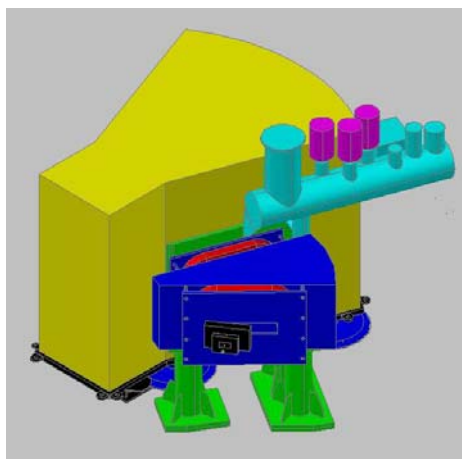


図5 SKS+スペクトロメーター



図6 SKS+用大型飛跡検出器

スペクトロメーターは、2009年に実験現場に設置が開始され、秋までには検出器を含めて準備が整った。まず、ビームを使った運動量分解能の性能試験を行い、ほぼ予定通りの性能を達成できていることが確認できた。その後、実際の反応を使って、2台のスペクトロメーター全体のエネルギー分解能の性能評価を行った。結果として、ほぼ設計通りの分解能を確認することに成功し、( $K^-, K^+$ ) 反応に対して 2.5 MeV のエネルギー分解能が達成できることを示した。

(3)  $\Xi$  ハイパー核と二重  $\Lambda$  ハイパー核の分光理論班との研究協力によりマルチストレンジネス多体系の分光について、以下のような新たな研究の展開の方向が明らかになってきた。

- ①  $\Xi$  ハイパー核分光に関しては、 $\Xi$  粒子と核子との相互作用に強いアイソスピン依存性があることが理論的に示唆された。一方、この意味で、アイソスピンに依存しない部分の引力の強さを知ることが重要であることが認識され、その研究のために  $^{10}\text{B}(K^-, K^+)$  反応や  $^7\text{Li}(K^-, K^+)$  反応の測定が興味深いことが分かってきた。
- ②  $\Xi N - \Lambda - \Lambda$  間の結合が強い場合には、( $K^-, K^+$ ) 反応により、直接二重  $\Lambda$  ハイパー核を励起する確率が大きくなることが理論計算によって示された。これは、二重  $\Lambda$  ハイパー核の励起状態の分光学的研究を初めて可能とするもので、将来、非常に重要な研究課題となることが予想される。

## 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8件)

- ① T. Nagae, “Strangeness nuclear physics and J-PARC”, Int. Jour. Of Mod. Phys. E, 18 (2009) 査読有り, 1206-1214.
- ② M. Agnello, T. Nagae, et al., “Correlated  $\Lambda t$  pairs from the absorption of  $K^-$  at rest in light nuclei”, Phys. Lett. B, 669 (2008) 査読有り, 229-234.
- ③ T. Nagae, “The J-PARC project”, Nucl. Phys. A, 805 (2008) 査読有り, 486-493.
- ④ K. Miwa, T. Nagae, T. Takahashi, et al., “Search for  $\Theta^+$  via  $K^+p \rightarrow \pi^+ X$  reaction with a 1.2-GeV/c  $K^+$  beam”, Phys. Rev. C, 77 (2008) 査読有り, 045203-1-11.
- ⑤ K. Aoki, T. Takahashi, T. Nagae, et al., “Elastic and Inelastic scattering of  $\pi^+$  and  $\pi^-$  on  $^{12}\text{C}$  at 995 MeV/c”, Phys. Rev. C, 76 (2007) 査読有り, 024610-1-13.
- ⑥ T. Nagae, “Progress in hypernuclear physics at KEK”, Nucl. Phys. News, 16 (2006) 査読無し, 19-26.

[学会発表] (計10件)

- ① 木内隆太 for K1.8実験グループ&ハドロンビームライングループ、「J-PARC K1.8 ビームラインと SKS スペクトロメーターのコミッショニング I」、日本物理学会第65回年次大会、2010年3月20日、岡山大

学

- ② 杉村仁志 for K1.8 実験グループ&ハドロンビームライングループ、「J-PARC K1.8 ビームラインと SKS スペクトロメーターのコミッショニング II」、日本物理学会第65回年次大会、2010年3月20日、岡山大学
- ③ 白鳥昂太郎 for K1.8 実験グループ&ハドロンビームライングループ、「J-PARC K1.8 ビームラインと SKS スペクトロメーターのコミッショニング III」、日本物理学会第65回年次大会、2010年3月20日、岡山大学
- ④ 高橋智則、高橋俊行、他、「J-PARC K1.8 ビームライン ハイパー核・ハドロン実験のためのデータ収集系」、日本物理学会第65回年次大会、2010年3月23日、岡山大学
- ⑤ 足立智 for K1.8 実験グループ、「J-PARC K1.8 ビームラインでの粒子識別」、日本物理学会第65回年次大会、2010年3月21日、岡山大学
- ⑥ 永江知文、” Strangeness Nuclear Physics at the J-PARC era” , 日米合同原子核分科物理学会、2009年10月14日、ハワイ島
- ⑦ 森津学、永江知文、高橋俊行、他、「J-PARC における  $\Xi$  ハイパー核分光実験に用いるハニカムドリフトチェンバーの開発」、日本物理学会第64回年次大会、2009年3月28日、立教大学
- ⑧ 高橋智則、永江知文、高橋俊行、他、「J-PARC K1.8 ビームスペクトロメーター用 MWPC の性能評価(2)」、日本物理学会秋季大会、2008年9月21日、山形大学
- ⑨ 岡村敦史、永江知文、高橋俊行、他、「J-PARC 実験に用いられる 3 mm ドリフトチェンバーの性能評価」、日本物理学会第63回年次大会、2008年3月24日、近畿大学
- ⑩ 高橋智則、高橋俊行、永江知文、他、「J-PARC K1.8 ビームスペクトロメーター用 MWPC の性能評価」、日本物理学会第62回年次大会、2007年9月22日、北海道大学

[図書] (計1件)

T. Nagae, IOS Press, Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi” Course CLXVII, (2008), p.145-158.

[その他]

ホームページ等

<http://nexus.kek.jp/Tokutei/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

永江 知文 (NAGAE TOMOFUMI)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50198298

### (2) 研究分担者

高橋 俊行 (TAKAHASHI TOSHIYUKI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：50281960

### (3) 連携研究者

野海 博之 (NOUMI HIROYUKI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教授

研究者番号：10222192

(H17-H19)

関本 美知子 (SEKIMOTO MICHIKO)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助手

研究者番号：50206637

(H17-H19)

仲澤 和馬 (NAKAZAWA KAZUMA)

岐阜大学・教育学部・助教授

研究者番号：60198059

(H17-H18)

### 研究協力者

木内隆太 (KEK 研究員 (科研費))、高橋智則

(東京大学大学院 院生)、岡村敦史、森津学、

足立智、杉村仁志 (京都大学大学院 院生)