

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02186

研究課題名(和文) アクティブ標的を用いたS=-2ハイパー核の精密分光

研究課題名(英文) High-resolution spectroscopy of S=-2 hypernuclei with active target

研究代表者

永江 知文 (Nagae, Tomofumi)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：50198298

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,400,000円

研究成果の概要(和文)：ストレンジネス量子数-2をもつ原子核について(K-, K+)反応を用いて探索を行った。既存の磁気スペクトロメーターを使って取得した6 MeVのエネルギー分解能を持つ実験データの解析をすすめることにより、グザイ・ハイパー核の束縛状態を観測することに成功した。この結果は、分解能14 MeVで以前に取られた米国ブルックヘブン研究所の結果と一致している。一方、分解能が三倍近く改善したことにより、昔のデータでは観測できなかった二重ラムダハイパー核の励起状態と考えられる励起も観測された。よりエネルギー分解能を向上するためのアクティブ標的の開発にも成功し、2 MeVでの新しい実験データの取得を準備している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通常物質はアップとダウンという二種類のフレーバーのクォークから形成されている。ところが、中性子星と呼ばれる超高密度の星のコア部では、ストレンジネスという三番目に軽いフレーバーを含む物質が重要な役割を果たしていると考えられている。大強度陽子加速器J-PARCではそのような物質の研究が進められている。観測が進められる中性子星連星合体からの重力波は、中性子星の内部構造を明らかにしてくれると期待されている。また、この合体事象は鉄より重い重元素の合成が起きているサイトとしても注目されている。スーパーコンピューターを駆使した大規模計算と組み合わせると我が国で高密度ハドロン物質の研究が切り拓かれている。

研究成果の概要(英文)：New hypernuclear systems with strangeness -2 were searched for with the (K-, K+) reaction. From the data analysis of already existing spectrometer with the energy resolution of 6 MeV, we succeeded to observe a Xi bound state. It is consistent with the previous measurement at BNL with the energy resolution of 14 MeV. In addition, we also observed an experimental signature of possible excitation of an excited level of a double-lambda hypernucleus. It was observed because of the great improvement of the energy resolution. We have succeeded to develop an active fiber target system, and are waiting for a new measurement with 2 MeV resolution.

研究分野：原子核物理学実験

キーワード：ハイパー核 ストレンジネス J-PARC 原子核実験

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ストレンジネス量子数(S)が-1のハイパー核には、ハイパー核が存在しこれまでに40種類程度がみついている。その一体平均ポテンシャルの深さは約30 MeVであり、粒子のスピン依存項についてもハイパー核線分光によりp-殻領域で系統的な測定が行われ明かにされた。もう一つのS=-1のハイパー核は、ハイパー核であるが、種類しか見つかっていない。ストレンジネスS=-2のハイパー核には、ハイパー核と二重ハイパー核の二種類の存在が考えられるが、これまでに核種までが同定されたのは、長良事象と呼ばれる ${}^6\text{He}$ と木曾事象とよばれるハイパー核の1事象ずつである。これらは、ハイブリッド・エマルジョン法と呼ばれる手法により発見された。粒子を原子核乾板中に静止させて、その高い飛跡識別能力により10  $\mu\text{m}$ オーダーでの飛跡測定により弱い相互作用によるカスケード崩壊を観測するものである。残念ながら高統計での測定には向いていない。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は(K, K<sup>+</sup>)直接反応によりハイパー核の束縛状態を50-100事象生成してピークとして観測することにある。ストレンジネスS=-2の粒子の生成断面積は小さいため、大強度のK中間子ビームが不可欠である。茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設J-PARCのハドロン実験ホールには、二段の静電セパレータとビームライン・スペクトロメーターを有するK1.8ビームラインがあり、世界最高性能を持つビーム施設である。ハイパー核の束縛状態のピークの位置とその幅の測定は、それぞれ、原子核ポテンシャルの実部の深さと虚部の大きさを決定することに対応する。Nの系はの系と同じストレンジネス-2の系であり、強い相互作用による結合効果により虚部(幅)を生じさせる。

(2) 本研究では、アクティブファイバー標的と高分解能磁気スペクトロメーターを組み合わせることにより2 MeVのエネルギー分解能を達成することを目的とする。これによりポテンシャルの実部に対して0.1 MeV程度の精度、虚部に対して1 MeV程度の精度での測定を目指す。

### 3. 研究の方法

(K<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>)反応の反応点周りを直径3mmのシンチレーションファイバー約1000本から成るアクティブファイバー標的(図1)を開発する。K<sup>-</sup>ビーム進行方向から見て50mm x 100mmの断面を覆い、厚さ方向に100mmの厚さを持つ。ファイバー中を通過する際にファイバー中でエネルギー損失を起こし、そのばらつきがエネルギー分解能を悪化させる。そこで、一本一本のファイバーでのエネルギー損失の量を事象毎に読み出し、これにより補正をかけることでエネルギー損失のばらつきによる分解能の悪化を抑える。

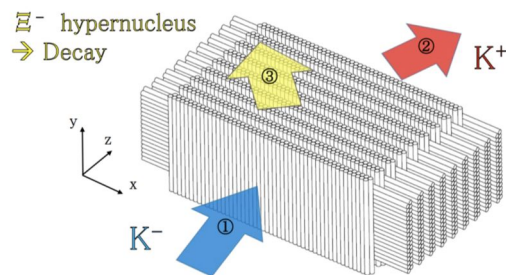


図1 アクティブファイバー標的の概念図。

(2) 本研究では、アクティブファイバー標的と高分解能磁気スペクトロメーターを組み合わせることにより2 MeVのエネルギー分解能を達成することを目的とする。これによりポテンシャルの実部に対して0.1 MeV程度の精度、虚部に対して1 MeV程度の精度での測定を目指す。

### 4. 研究成果

(1) シンチレーションファイバー1本あたりのエネルギー分解能の直接測定  
大阪大学核物理研究センターの295 MeVと64.6 MeVの陽子ビームを用いて、ファイバー1本あたりのエネルギー損失量をグランド・ライデン・スペクトロメーターを使って1ビーム毎に測定することにより、ファイバーのもつエネルギー分解能を測定した。結果は約10%であることが判明した。この性能が達成できれば、磁気スペクトロメーターの運動量分解能と合わせて、全体で2 MeVのエネルギー分解能が達成できることをシミュレーションにより示すことができた。

(2) マルチ・ファイバーでの総合ビーム試験  
東北大学の電子光物理学研究センターの800 MeVの陽電子ビームを用いて300本のファイバーからなるアクティブ標的を製作し、シンチレーション光量のばらつき、検出効率、位置精度、などの性能を、実機と同じ読み出し回路系を用いて評価を行った。シンチレーションファイバー毎の性能のばらつきは小さく、検出効率も95%以上であることが判明した。しかし、一部、検出効率の低い部分が存在しており、原因を追求しているところである。

(3) 機械学習を用いた運動量飛跡解析アルゴリズムの開発  
本研究では磁気スペクトロメーターとして新たにS-2Sと呼ばれるスペクトロメーターを建設してきた。大立体角を覆うために間口の大きな電磁石が必要であった。このため磁場分布を精密に測定するとともに、三次元磁場計算コードによって再現できるように計算の入力パラメーター

を調整した。そうやって得られた計算磁場分布を出発点として、運動量を再構成する関数を機械学習により探す方法を開発した。これまでに、我々が使用する二台の磁気スペクトロメーターの設計運動量分解能を再現するような関数を学習させることに成功している。次のステップとして、実験で使用するエネルギー較正用データを学習させて、どこまで分解能を向上できるかをスタディしている。

(4) 粒子生成断面積の入射運動量依存性の測定

素過程の  $K^-p \rightarrow K^+ \Lambda^-$  反応の断面積は、1960年代の泡箱を使用した実験データしかなく、統計誤差の大きな実験データしかなかった。その中でも大ざっぱに言って 1.8 GeV/c 付近が収量の最大とされてきた。今回、これを二桁近く統計で上回る測定を行い (図2 参照) 確かに 1.8 GeV/c が最大であることを確認することに成功した。また、1.8 GeV/c での実験データについては、前方の広い角度範囲で高統計での測定を行うこともできた。

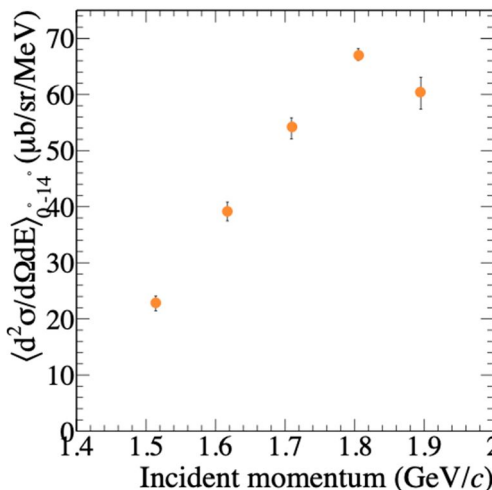


図2 生成断面積の入射運動量依存性。

(5)  $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$  反応による  $^{12}\text{Be}$  ハイパー核の束縛状態の観測

既存の磁気スペクトロメーターSKS を使って取得した  $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$  反応の実験データの解析を進めた。この測定では SKS の運動量分解能によって限定されるためエネルギー分解能は 6 MeV と予想される。これでも、米国ブルックヘブン研究所(BNL)で、今までに取得されたベストの測定データの 14 MeV という性能と比較すると三倍近い改善となっている。そのデータ解析の結果を図3に示す。粒子の束縛エネルギーが -20 MeV から +20 MeV の範囲で、BNL でのデータと比較するとほとんど同じ形をしていることがわかった。図3より、束縛エネルギー領域に一つピークがあることが見てとれる。束縛エネルギーは約 5 MeV である。 $(K^-, K^+)$  反応により ハイパー核を生成する際にはアイソスピン 1 の状態を生成する。そのためアイソスピン 0 の状態の方がこれより深い束縛状態として存在している可能性がある。また、非束縛領域にも一つ励起状態と見られるピークが存在している。これについては、理論的には  $^{11}\text{B}$  のコア原子核の励起状態と s-軌道にある  $\Lambda$  粒子とが結合した配位と考えられる。2つのピーク位置の開き具合は、核子のスピンと粒子のスピンとの結合の強さの情報を与えてくれる。

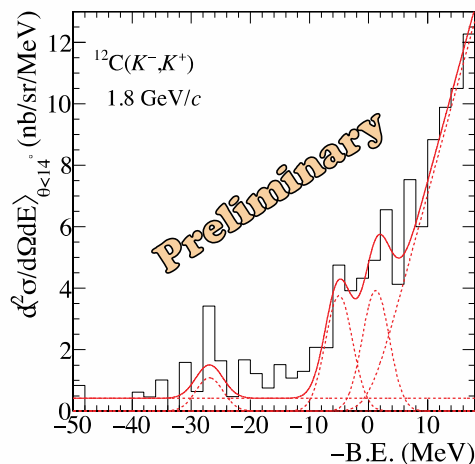


図3  $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$  反応の励起エネルギー スペクトル

(6) N- $\Lambda$  結合による二重 ハイパー核の直接励起の存在

同じく、図3の実験データでは、束縛エネルギーが 27 MeV 付近に構造が見てとれる。統計的には 2 程度の有意性である。ところが、この束縛エネルギーの位置は、N- $\Lambda$  相互作用による混合を考慮した理論計算で予想される  $^{10}\text{Be}(gs) + s + p$  配位と考えるとそのピーク位置は上手く説明が付く。また、ハイパー核の束縛状態の生成の大きさとの相対強度も、この解釈と矛盾してはいないようである。この解釈が正しいとすると、世界で初めて二重 ハイパー核の励起状態を観測したことになる。これは、今後のストレンジネス-2 の束縛系の研究に新しい道を切り拓くものと期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

|   |                          |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名<br>T. Nagae et al.   | 4. 巻<br>2130             |
| 2. 論文標題<br>Observation of a Xi bound state in the $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)$ reaction at 1.8 GeV/c   | 5. 発行年<br>2019年          |
| 3. 雑誌名<br>AIP Conference Proceedings  | 6. 最初と最後の頁<br>020015(10) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/1.5118383   | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する             |
| 1. 著者名<br>Gogami Toshiyuki, Nagae Tomofumi、他50名   | 4. 巻<br>18               |
| 2. 論文標題<br>Spectroscopy of Nuclei with Multi-Strangeness by Using New S-2S Spectrometer at J-PARC   | 5. 発行年<br>2017年          |
| 3. 雑誌名<br>JPS Conference Proceedings  | 6. 最初と最後の頁<br>011031-1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7566/JPSCP.18.011031   | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>該当する             |
| 1. 著者名<br>Kanatsuki Shunsuke, Amano Nobuaki, Ekawa Hiroyuki, Gogami Toshiyuki, Hirose Erina, Ichikawa Yudai, Kato Seigo, Moritsu Manabu, Nagae Tomofumi, Takahashi Hitoshi, Takahashi Toshiyuki, Takenaka Kohei | 4. 巻<br>17               |
| 2. 論文標題<br>Construction Status of a New Spectrometer "S-2S" for Spectroscopy of Multi-Strangeness Systems at J-PARC   | 5. 発行年<br>2017年          |
| 3. 雑誌名<br>JPS Conference Proceedings  | 6. 最初と最後の頁<br>033008-1-2 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7566/JPSCP.17.033008   | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-                |
| 1. 著者名<br>T. Nagae, et al.  | 4. 巻<br>281              |
| 2. 論文標題<br>Search For A Bound State In The $^{12}\text{C}(\text{K}^-, \text{K}^+)\text{X}$ Reaction At 1.8 GeV/c  | 5. 発行年<br>2017年          |
| 3. 雑誌名<br>PoS   | 6. 最初と最後の頁<br>038-1-6    |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.22323/1.281.0038   | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する             |

[学会発表] 計20件(うち招待講演 6件/うち国際学会 11件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Nagae   |
| 2. 発表標題<br>Recent Progress on Strangeness Nuclear Physics at J-PARC     |
| 3. 学会等名<br>Congress of Canadian Association of Physicists (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Nagae  |
| 2. 発表標題<br>Status and future perspectives of hypernuclear physics    |
| 3. 学会等名<br>HADRON2019, 16-21 Aug., 2019, Guilin, China (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Gogami et al.  |
| 2. 発表標題<br>Study of the baryon interaction by Xi-hypernuclear spectroscopy with the (K-,K+) reaction |
| 3. 学会等名<br>INPC2019, 29-July - 2-Aug., 2019, Glasgow, UK (国際学会)                                      |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Nagae  |
| 2. 発表標題<br>Progress in Strangeness Nuclear Physics at J-PARC   |
| 3. 学会等名<br>Asia Pacific Physics Conference (APPC14), 17-22 Nov., 2019, Kuching, Malaysia (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Harada et al.   |
| 2. 発表標題<br>New generation S=-2 spectroscopy opened with active fiber target |
| 3. 学会等名<br>INPC2019, 29-July - 2-Aug., 2019, Glasgow, UK (国際学会)             |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>原田健志                         |
| 2. 発表標題<br>J-PARC E70実験のためのアクティブ標的の性能評価 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2019年秋季大会             |
| 4. 発表年<br>2019年                         |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>原田健志、他 1 2 名                   |
| 2. 発表標題<br>J-PARC E70実験のためのアクティブ標的の性能評価II |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第 7 5 回年次大会             |
| 4. 発表年<br>2020年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>原田健志、他 1 2 名                   |
| 2. 発表標題<br>J-PARC E70実験のためのアクティブ標的の性能評価II |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第 7 5 回年次大会             |
| 4. 発表年<br>2020年                           |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Nagae  |
| 2. 発表標題<br>Observation of a Xi bound state in the $^{12}\text{C}(K^-,K^+)$ reaction at 1.8 GeV/c |
| 3. 学会等名<br>HYP2018 (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Nagae                             |
| 2. 発表標題<br>Xi-hypernuclei at J-PARC             |
| 3. 学会等名<br>Few-Body 22 conference (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年                                 |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Nagae  |
| 2. 発表標題<br>Recent progress at J-PARC: Xi-hypernuclei                     |
| 3. 学会等名<br>Joint meeting between APS and JPS DNP (HAW2018) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>七村拓野                               |
| 2. 発表標題<br>J-PARC E70実験のためのアクティブファイバー標的の設計と開発 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第74回年次大会                     |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Nanamura   |
| 2. 発表標題<br>Development of the S-2S spectrometer and the fiber target for high-resolution spectroscopic study of the Xi-hypernuclei |
| 3. 学会等名<br>Joint meeting between APS and JPS DNP (HAW2018) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>越川亜美                           |
| 2. 発表標題<br>アクティブ標的のためのシンチレーティングファイバーの性能評価 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第73回年次大会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>S. Kanatsuki   |
| 2. 発表標題<br>Spectroscopic study of Xi hypernucleus by using the $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$ reaction at J-PARC |
| 3. 学会等名<br>Joint meeting between APS and JPS DNP (HAW2018) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>七村拓野、永江知文、金築俊輔、市川真也、越川亜美、他 5 名 |
| 2. 発表標題<br>S-2S D1 電磁石の磁場測定 (2)           |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2017年秋季大会               |
| 4. 発表年<br>2017年                           |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>金築俊輔 for the J-PARC E05 Collaboration           |
| 2. 発表標題<br>(K-,K+)反応を用いた ハイパー核分光実験J-PARC E05 pilot run (3) |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2017年秋季大会                                |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>金築俊輔  |
| 2. 発表標題<br>(K-,K+)反応を用いた ハイパー核文既往実験J-PARC E05 のpilot run (2) |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2016秋季大会                                   |
| 4. 発表年<br>2016年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Nagae Tomofumi  |
| 2. 発表標題<br>Search for a Xi bound state in the $^{12}\text{C}(K^-,K^+)$ reaction at 1.8 GeV/c |
| 3. 学会等名<br>INPC2016 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2016年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>七村拓野、後神利志、永江知文、金築俊輔、成木恵、他 11名 |
| 2. 発表標題<br>S-2S D1電磁石の磁場測定               |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第72回年次大会               |
| 4. 発表年<br>2017年                          |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|               | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)       | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------|---------------------------------|-----------------------|----|
| 研究<br>協力<br>者 | 後神 利志<br><br>(Gogami Toshiyuki) |                       |    |