

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24244038

研究課題名(和文) Hダイバリオンの研究

研究課題名(英文) Study of H-dibaryon

研究代表者

今井 憲一 (IMAI, KENICHI)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・客員研究員

研究者番号：70025493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,800,000円

研究成果の概要(和文)：この研究の目的は新しいタイプの3次元飛跡検出器(TPC)を開発して、未発見の粒子であるHダイバリオンの探索実験を行うことである。この粒子はK中間子と原子核の反応で生成されラムダ粒子などの短寿命の粒子に複雑に崩壊すると考えられる。これらの崩壊粒子を精密かつ高効率で測定するには標的を内蔵し高強度のビームで動作するTPCが理想的である。我々は新しいガス増幅部(GEM)を持つプロトタイプのTPCを制作し、高強度のビームでTPCの動作を研究し1MHzの強度のビームでも問題なく動作させることに成功した。この研究に基づいて実際の実験のためのTPCを設計製作し、J-PARCにおける実験の準備を整えた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to search for H-dibaryon by developing and constructing a new type pictorial detector (TPC). The H-dibaryon is produced in K-nucleus reaction and decays to several particles including short-life hyperons. In order to detect these particles, a TPC which has a target inside and can be operated at high intensity beams is an ideal detector. We have made a proto-type TPC with a newly developed GEM and succeeded to operate the TPC up to 1 MHz beam intensity without any problem. Based on this study, we have constructed a full-size TPC which made the H-dibaryon search experiment possible and ready at J-PARC.

研究分野：原子核物理学

キーワード：飛跡検出器 ダイバリオン ストレンジネス

## 1. 研究開始当初の背景

クォークからなるハドロンとしてはクォーク反クォーク対からなるメソンと、クォーク 3 個からなるバリオンが知られているが、それ以外のハドロンはエキゾチックハドロンと呼ばれその存在はよくわかっていない。H ダイバリオンは  $uudds$  の 6 個のクォークからなる安定な粒子として 1976 年にその存在が予言された。それ以来われわれを含む多くの実験が行われたが見つからなかった。しかし近年原理計算である格子 QCD による二つの大規模計算により、さらにこの H ダイバリオンの存在があらためて示唆され、再び大きな注目を浴びることとなった。それによるとその質量は強い相互作用による 2 つの粒子への崩壊の閾値近くである。またわれわれは以前の実験で、2 個の粒子生成の測定で閾値近くに共鳴状態の存在を示唆するデータを得ていた。しかし残念ながら当時実験に用いたビーム強度が弱く、統計的にはその存在を確証できるものではなかった。

しかし J-PARC が建設され大強度のビーム利用が可能となり、シート状の電子増幅器 (GEM) などの検出器技術の進歩と相まって、従来よりはるかに高精度、高統計の H ダイバリオン探索実験が可能になった。また B-factory と呼ばれる高統計の電子陽電子衝突実験により 4 つのクォークからなると考えられるエキゾチックハドロンの存在が明らかとなった。これによりエキゾチックハドロンの研究が世界的に注目されるようになり、H ダイバリオンの存否を実験的に明らかにすることが強く求められている。

また最近太陽質量の 2 倍の質量をもつ中性子星が発見され、核物理に大きなインパクトを与えた。この質量を粒子などのハイペロンを含む核子多体系として説明することは極めて困難であり、内部が s クォークを含むクォーク物質になっているとするのが最も考えやすい。H ダイバリオンは s クォークを含むクォーク物質の最も基本的なものとかんがえられ、この粒子を発見することの意義はこれまでにまして大きくなったといえる。なぜなら密度 (圧力) 極限の物質の存在形態を知ることにはなんとといっても物理学の最も重要な課題の一つであるからである。

## 2. 研究の目的

この研究は Time Projection Chamber (TPC) を用いた大立体角のスペクトロメーターを製作し、J-PARC の大強度 K 中間子ビームを用いて、H ダイバリオンを探索し、その存否を明らかにすることを目的とする。同時に  $\Xi$  粒子と原子核との散乱を測定し、ストレンジネス ( $s$ ) = -2 の核力についても研究する。

H ダイバリオンはその質量が閾値以下なら  $\Lambda p\pi$ -に、閾値以上なら 2 個の粒子に崩壊するので、これらの粒子を検出して同定する。

粒子は数 cm の飛程でさらに  $p\pi$ -の二つの粒子に崩壊する。これを高分解能かつ高効率で測定するには、H ダイバリオンを生成するためのダイヤモンド標的を内蔵する 3 次元の飛跡検出器が理想的である。TPC はまさにそのような検出器である。しかし標的を内蔵かつ大強度のビームが貫通するという TPC はいまだかつて存在しない。したがってこの研究の最も大きな目的は、まずこのような新しい性能の TPC を開発することにある。このような TPC を製作できれば、超伝導磁石とあわせて、粒子など標的まわりの多粒子を観測できる大立体角スペクトロメーターを建設し、J-PARC において H ダイバリオンの探索実験にすすむことができる。

## 3. 研究の方法

3 次元飛跡検出器である Time Projection Chamber (TPC) と超伝導磁石を軸として高い運動量分解能を持つ大立体角のスペクトロメーターを製作する。これを用いて J-PARC の大強度 K 中間子ビームを用いた ( $K^-$ ,  $K^+$ ) 反応からの粒子や  $\Xi$  粒子などの数 cm の飛行距離のハイペロンを測定することで、H ダイバリオンの探索を行い、 $\Xi N$  などの  $S=-2$  の核力の研究を行う。そのため 1MHz の大強度ビームを受けることのできる標的の内蔵型 TPC スペクトロメーターを開発製作する。このスペクトロメーターと KURAMA などの既存の前方粒子測定用のスペクトロメーターを組み合わせることで、研究目的を達成する。

H ダイバリオンはもし存在すれば原子核標的からの ( $K^-$ ,  $K^+$ ) 反応、( $K^-$ ( $pp$ )- $\rightarrow$  $K^+$ H)、で作られる。しきい値に近い束縛状態であれば、ハイペロンと同じような寿命で弱い相互作用で崩壊すると考えられ、予定されている実験条件では数 cm のオーダーの飛行距離で崩壊する。測定が容易な崩壊は  $H \rightarrow \Sigma p$ ,  $\Lambda p\pi$  の二つであり、この崩壊モードを可視的に測定できる検出器が有効である。この場合はかつての  $\Omega$ -粒子発見のようにこれらの崩壊モードを 1 事象でも見つければ H ダイバリオンの発見ということになる。(実際に確定されるには数事象必要であるが。)

原子核 ( $^3\text{He}$ ) からの ( $K^-$ ,  $K^+$ ) 反応、( $K^-$ ( $pp$ )- $\rightarrow$  $K^+$ H)、での H 生成の断面積は C.Dover の計算では  $0.2\mu\text{b}/\text{sr}$  と見積もられている。後で述べる標的の内蔵型 TPC スペクトロメーターと J-PARC の K 中間子ビームを使うと約 1 カ月で約 20 個の  $H \rightarrow \Lambda p\pi$  の崩壊事象が見つかる計算となる。実際に用いる炭素原子核ではさらに生成断面積は大きくなる。この H ダイバリオンの質量は  $\Lambda\Lambda$  のしきい値に近いので、 $\Lambda\Lambda$  の不変質量分布の測定にその影響が正しく現れることになり、さらなる確認となる。

H ダイバリオンがしきい値の上 ( $\Lambda\Lambda(2230\text{MeV})$  から  $\Xi N(2260\text{MeV})$  の質量あ

たり)に存在すれば、(K-,K+)反応で生成される $\Lambda\Lambda$ の不変質量分布に共鳴のするどいピークが現れるはずである。したがって $\Lambda\Lambda$ の不変質量スペクトルを高い分解能と統計で測定することで H ダイバリオン共鳴を探索できる。もし KEK-PS で見つかったピーク構造が H 共鳴であれば、シミュレーション計算によると、計画している実験では図1のようにはっきりと確認できると考えられる。

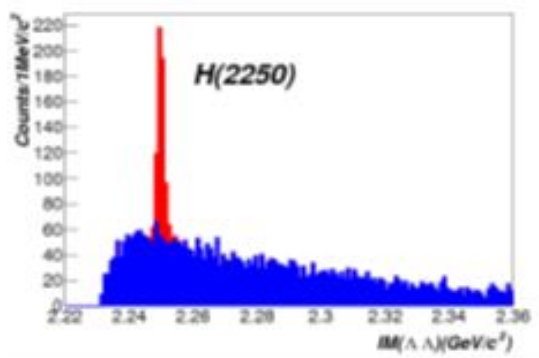


図1 .H ダイバリオンが共鳴状態として存在したとき期待される の不変質量分布

Time Projection Chamber (TPC)は荷電粒子の飛跡を3次元で測定できるガス検出器である。すでに歴史は長いが、標的内蔵タイプはわれわれが SPring-8 での実験のために製作したのが初めてである。SPring-8 ではガンマ線ビームであり、ビームは検出されないが、K中間子ビームは荷電粒子であり、1MHzでTPCを働かせるのは極めて野心的な試みである。しかしTPCはゲートグリッドを設けることで、カメラのシャッターのように、データとしてほしい事象、つまりトリガーのかかった時のみガス増幅ができるという特徴的な動作が可能である。そのためガス増幅自身のレートは高くないので、このような高い強度のビームが検出器内部に突入しても動作すると考えられる。

ビームが強いので多くの飛跡が検出されてしまうが、反応の起こる確率は厚い標的を使ったとしても10%以下であるので、どの飛跡が測定すべきものかは、3次元なので十分判別できると考えられる。RHICのSTARグループのTPCは“QGP”からの何千という飛跡を見ることに成功している。かつて泡箱という飛跡検出器が素粒子実験の主役であった時期があった。そこでは数十個のビーム粒子が同時に検出器に入りそのうちの1~2個が標的と反応するのを写真にとって人間が見て判別するというものであった。標的内蔵TPCはこれと似た画像データを、5桁大きなビーム強度でとれる“現代の泡箱”である。

このTPCは磁場中で作動し、粒子の飛跡を検出し、その軌跡から運動量を測定する。また飛跡の濃さ(エネルギー損失)から粒子

の速度を求めて粒子の種類を区別することができる。それによりHダイバリオンの崩壊事象を同定することができる。

ここでは直径50cm高さ50cmの有感領域を持つ標的内蔵型TPCを製作する。飛跡に沿ったガス分子の電離によってできた電子は電場と磁場によってTPCの端面に移動する。端面にGEMと呼ばれる微小の穴が無数にあいたうすいシート状の電子増幅器を3段ならべて電子を増幅し、細かく細分化したパッド電極で信号を受ける。その信号の大きさおよび到達時間から粒子の3次元飛跡を測定する。

まずTPCにどこまで強いビームをいれられるかを調べるためにプロトタイプのTPCを製作して、検出器としての性能を研究する。実際に、ビーム強度依存性を調べるために加速器からの電子ビームや陽子ビームを用いた実験を行う。その結果に基づいて、GEMの種類や配置および信号を受けるパッドのサイズなどのTPCのパラメータを決定して実機的设计製作を行う。平行してTPCを入れる超伝導ヘルムホルツ磁石の設計製作を行い、大立体角スペクトロメータを完成させ、Hダイバリオン探索実験にすすむ。

#### 4. 研究成果

(1) J-PARCでのHダイバリオン探索の実験計画の策定を行い、J-PARC課題審査委員会にてE42として採択された(責任者: J.K.Ahn, 今井)。有感領域が直径50cm、高さ50cmで、ダイヤモンド標的を内蔵した約6000個の読み出しパッドを持つTPCを用いることによって、J-PARCではHダイバリオンが2個の粒子に崩壊した場合、1MeVというかつてない高い質量分解能で、かつ過去の実験に比べて100倍のデータを得ることができると示したことが評価された。その後TPCを含む実験装置の設計がすすむに従い、シミュレーションの精度もあがってきたが、採択当初の見込みをむしろうまわる結果となっている。

(2) 上記と同じ実験装置(HypTPC)を用いた核子の励起状態の測定についての実験提案を行い、J-PARC課題審査委員会にてE45として採択された(責任者: K.Hicks, 佐甲)。核子の励起状態の研究はよく水素原子の励起状態の研究になぞらえられ、核子の構造研究には重要な役割を持っている。この装置を使うと、その研究に必要な $\pi p$ 反応のなかでも1950年代の泡箱時代のデータしかない3粒子の終状態の反応を圧倒的な精度で測定することができる。標的を液体水素に、ビームを中間子にかえることで、核子の励起状態を従来に比べて飛躍的に精密かつシステムチックに研究することができることをしめした意義は大きい。この実験装置が大強度のビームで3次元の粒子の飛跡をとらえる点がユニークであるために、応用範囲が広いことも明らかとなった。今後発展しうる実験装置を開

発した意義は大きいと考える。

(3) プロトタイプの GEM を使った TPC を製作し、東北大学の電子ビームや大阪大学の陽子ビームを用いて、特にその強度を変えて TPC の動作を研究した。その結果 1MHz のビーム強度までは位置分解能や検出効率の劣化がないことを確かめた。(図 2) (論文 6)

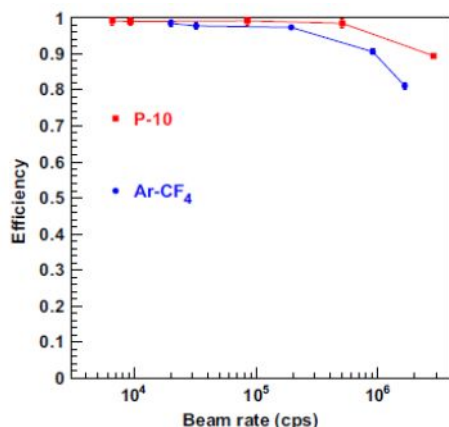


図 2. TPC の検出効率のビーム強度依存性。P10 ガスでは 1MHz までは検出効率は 90% 以上である。

この成功は GEM を使うことでイオンフィードバックを少なくしたことが功を奏した。これにより J-PARC で期待される 1MHz の K 中間子ビームを使う H ダイバリオン探索実験の基本的アイデアが実証され、HypTPC が実現できる見通しを得た。また GEM についてもその耐久性をテストし、大強度ビームのもとでも数か月の使用に耐えることを確かめ、実際の実験に使えることを証明した。

さらに 10MHz のビームでも位置分解能などに影響はあるが TPC として動作することを確認できた。これはさらなる先端的検出器としての TPC 開発研究のきっかけを与える成果といえよう。

(4) プロトタイプの TPC の研究結果と検出器のシミュレーション計算に基づいて、実際に実験に用いる TPC を設計し、製作した。ダイヤモンド標的を囲む円周型のパッド構造を持ち、パッドのサイズはテスト実験の結果とシミュレーションにより幅 2.5mm とした。(図 3) また GEM は 3 層構造とし、電極を分割することで放電破壊による影響を極力抑えるようにした。

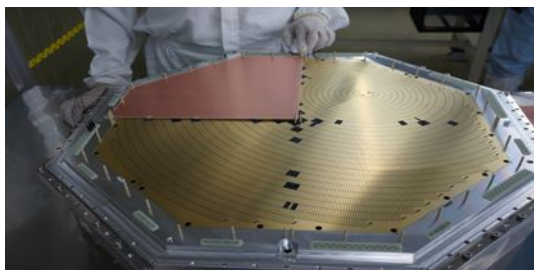


図 3 . TPC の信号読み取りの約 6000 個の 2.5mm 幅のパッド電極構造。その上に四半部分の GEM が見える。

パッドの数は約 6000 個近くとなり、読み出し回路はかなり大規模になった。フランスで開発した GET と呼ばれる回路システムを導入することで開発期間を抑えて、この研究期間内に全システムを完成したことは大きな成果である。また読み出し速度は約 1KHz で実験の要請を満たすものである。

この完成した TPC については放射線源や宇宙線を用いたテストを行い、エネルギー分解能や位置分解能について満足すべき結果を得ており、研究目的のカギとなる成果を達した。

(5) TPC を入れる超伝導ヘルムホルツ磁石を設計し、製作した。この磁石については韓国の共同研究者の協力を得て、TPC の有感領域にできるだけ均一な磁場を与える磁石の設計を行った。製作した磁石の最大磁場は 1.5T で H ダイバリオン探索実験に必要な 1T を超えている。

(6) K+中間子をとらえる前方の KURAMA スペクトロメーターも必要である。先行するダブルハイパー核探索実験にも必要であり、付属の飛跡検出器や飛行時間差検出器などを整備し、これを完成させた。

これらの結果、大強度ビームに対応する TPC などを作成して、H ダイバリオン探索実験の準備がすべて整ったことは重要な成果である。さらに加えて世界でもユニークな実験装置を完成させたことで、特に J-PARC のような大強度のビームを使ったハドロン物理研究の飛躍的な進展が期待できる。この研究の大きな成果である。

## 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 35 件)すべて査読有り

- (1) Measurement of 3-body hadronic reactions with HypTPC at J-PARC, S.H. Hwang, Y. Han, S. Hasegawa, Y. Ichikawa, K. Imai, H. Sako, S. Sato, H. Sugimura, K. Tanida, JPS Conf. Proc. 8, 022008-1-6, (2015). DOI: 10.7566/JPSCP.8.022008
- (2) Searching for the H-dibaryon in J-PARC with a large acceptance hyperon spectrometer, Y. Han, S. Hasegawa, S.H. Hwang, Y. Ichikawa, K. Imai, H. Sako, S. Sato, H. Sugimura, K. Tanida, JPS Conf. Proc. 8, 021002-1-5, (2015). DOI: 10.7566/JPSCP.8.021002
- (3) The first evidence of a deeply bound state of  $\Xi^{-14}\text{N}$  system, K.Nakazawa, K. Imai, (24 人中 6 番目) et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 3,

033D02-1-11, (2015).  
DOI: 10.1093/ptep/ptv008

- (4) Observation of the K-pp-like structure in the  $d(\pi^+, K^+)$  reaction at 1.69 GeV/c, Y. Ichikawa, K. Imai (44人中13番目), H. Sako (28番目), S. Sato (30番目), et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 021D01-1-8, (2015)  
DOI: 10.1093/ptep/ptv002
- (5) Search for H-dibaryon at J-PARC with a large acceptance TPC, H. Sako, H. Sugimura, S. Hasegawa, S. H. Hwang, Y. Ichikawa, K. Imai, R. Kiuchi, S. Sato, K. Shirotori, EPJ Web Conf. 66, 09015-1-4, (2014).  
DOI: 10.1051/epjconf/20146609015
- (6) Development of a prototype GEM TPC with a gating grid for an H-dibaryon search experiment at J-PARC H. Sako, H. Sugimura, S. Hasegawa, S. H. Hwang, Y. Ichikawa, K. Imai, R. Kiuchi, S. Sato, K. Shirotori, Nucl. Instrum. Meth. A763, 65-81 (2014).  
DOI: 10.1016/j.nima.2014.06.007
- (7) Development of a silicon micro-strip detector for tracking high intensity secondary beams, R. Kiuchi, S. Hasegawa, Y. Ichikawa, K. Imai, H. Sako, S. Sato, H. Sugimura, K. Tanida, Nucl. Instrum. Meth. A763, 399-403 (2014).  
DOI: 10.1016/j.nima.2014.06.060
- (8) Inclusive spectrum of the  $d(\pi^+, K^+)$  reaction at 1.69 GeV/c, Y. Ichikawa, K. Imai (44人中13番目), H. Sako (28番目), S. Sato (30番目), et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 101D03-1-8 (2014).  
DOI: 10.1093/ptep/ptu128
- (9) Search for  ${}^6\text{H}_\Lambda$  hypernucleus by the  ${}^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$  reaction at  $p=1.2$  GeV/c, H. Sugimura, K. Imai (66人中22番目), H. Sako (44番目), S. Sato (48番目) et al., Phys. Lett. B729, 39-44 (2014).  
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.12.062
- (10) Intensity Frontier of Accelerator for Nuclear Physics, K. Imai, Rev. Acc. Sci. Tech. 06, 30002-1-18 (2013).  
DOI: 10.1142/S1793626813300028
- (11) Search for the Theta+ pentaquark via the  $\pi^- p \rightarrow K^- X$  reaction at 1.92 GeV/c K. Shirotori, K. Imai (68人中21番目), H. Sako (45番目), S. Sato (48番目) et al., Phys. Rev. Lett. 109, 132002-1-5. (2012).  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.132002

〔学会発表〕 (計 14 件)

- (1) H. Sako, Baryon spectroscopy and studies of extreme dense matter at J-PARC, 2015 HaPhy-HIM joint meeting on experimental and theoretical physics, 2015.8.10, Daejeon (Korea).
- (2) K. Hosomi, H. Sako, K. Imai, Physics with HypTPC at J-PARC, The 10<sup>th</sup> international workshop on the physics of excited nucleons, 2015.5.25-28. Osaka University (Suita, Osaka).
- (3) H. Sako, Baryon spectroscopy with  $(\pi, 2\pi)$  reactions at J-PARC E45, The international workshop on partial wave analysis for hadron spectroscopy, 2015.4.13, Ashburn (USA).
- (4) K. Imai, Nuclear Matter with Strangeness International School on Neutron Star Matter, 2014, 3, 4-7. Kyoto University (Kyoto, Kyoto).
- (5) S. H. Hwang, K. Imai, H. Sako, Development of Hyperon Time Projection Chamber (HypTPC) for the H-dibaryon Search Experiment at J-PARC, 12<sup>th</sup> Asia-Pacific Physics Conference APPC12), 2013. 6. 14 – 29, Makuhari Messe (Chiba, Chiba).
- (6) K. Imai, Possible physics program with a large acceptance hyperon spectrometer (HypTPC) at J-PARC International workshop on strangeness nuclear physics, 2012.8.27-29. Osaka Electro-Communication University (Neyagawa, Osaka).
- (7) K. Imai, Hadron Physics at J-PARC ECT Workshop on Strange Hadronic Matter, 2011.9.26-30, Trento (Italy).

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ  
<http://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/hadron/research.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

今井 憲一 (IMAI Kenichi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・先端基礎研究センター・客員研究員

研究者番号：70025493

### (2) 研究分担者

佐甲 博之 (SAKO Hiroyuki)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：40282298

佐藤 進 (SATO Susumu)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・先端基礎研究センター・研究副主幹

研究者番号：70302346