

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287057

研究課題名(和文) 低エネルギー反陽子陽子反応におけるエキゾチック粒子探索

研究課題名(英文) Search for the exotic hadron state via low energy antiproton proton reaction

研究代表者

大西 宏明(Hiroaki, Ohnishi)

東北大学・電子光理学研究センター・教授

研究者番号：60360517

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：反陽子陽子消滅反応において、その衝突エネルギーが二重中間子生成閾値エネルギー近傍での生成断面積の異常な増大が報告されている。これは、未知の粒子、中間子中間子レゾナンス状態などの生成の証拠ではないかと期待されている。本研究では、陽子反陽子反応での二重中間子生成断面積の測定から、中間子中間子レゾナンス状態を含む未知のエキゾチック粒子探索を目的としたものである。本研究を遂行するための実験をJ-PARC K1.8BRビームラインで行うために必要となる、実験標的近傍飛跡検出器(Z vertex chamber)を製作し、全ての実験準備は完了した状態である。

研究成果の概要(英文)：It is well known that an anomalous enhancement has been observed in the double phi meson production near its threshold energy. The reason of this enhancement is not clearly known yet, however some theorist predict that it might be caused by an exotic hadron production, such as a phi-phi molecular state. To understand if this is the case we need to perform a precise measurement of the double phi production cross section in the pbar-p annihilation at the double phi meson production threshold energy.

This measurement is planned to be performed at the J-PARC K1.8BR beamline utilizing the E15 spectrometer, which is already constructed. For this project, we are constructing a dedicated new charged particle tracking detector and a z-vertex chamber, which will be installed just around the target to improve the accuracy of the interaction vertex determination by a factor three. The preparation of detectors have been completed to date.

研究分野：ハドロン物理

キーワード：エキゾチックハドロン

## 1. 研究開始当初の背景

ビッグバン直後、素粒子クォークやレプトン、強い相互作用を担うグルーオンが生成される。この時、宇宙は非常に高温で、数多くのクォークやグルーオンが自由に飛び回る、クォーク・グルーオンプラズマ(QGP)が生成される。その後、QGP膨張に伴い宇宙は冷え、陽子、中性子に代表されるハドロンが生成される。この時、クォーク、グルーオンという自由度は、ハドロン内部に閉じ込められる。ここでは、グルーオンを直接介在する裸の強い力が中和され、世界を“核子”(陽子および中性子)という新しい自由度により記述することが可能になる。さらにビッグバンから3分後には核子が集まり原子核が形成される。この宇宙の進化の過程のなかの第一歩といえる。「素粒子であるクォーク、グルーオンからハドロンへ」の過程がどのように進んで行くのかを解明することがハドロン物理の目標であると言える。

最近、通常のハドロン(クォーク3つからなるバリオン、およびクォーク・反クォークからなる中間子)の枠を超えたエキゾチックハドロンが相次いで報告されている。バリオンに関しては SPring-8/LEPS実験(Phys. Rev. Lett. 91, 012002(2003))、Phys. Rev. C 79, 025210 (2009) および欧州合同原子核研究機構(CERN) LHCb実験(Phys. Rev. Lett. 115, 072001(2015))により、2種類の幅の狭いペンタクォーク候補(最低でも5つのクォークから構成されているハドロン)が示唆された。また、KEKB/Belle実験で発見された $Z(4430)^+$ は、その崩壊過程から最低でも4つのクォークから構成されるテトラクォーク候補として注目を集めた(Phys. Rev. Lett. 100, 142001 (2008))。一方で、ストレンジクォークを一個持つバリオン励起状態(1405)は通常のバリオンとして説明

できないものとして知られている。その質量が反K中間子と核子の質量閾値に近いことから中間子・バリオン分子状態と考えられているが、解釈は確立していない。

これら、マルチクォーク状態や、中間子・バリオン分子状態といったエキゾチックハドロンは、QGPからハドロン生成、またハドロンから原子核が生成される過程において数多く出現していたことが予想される。すなわち、宇宙の進化、QGPからハドロン、そして原子核生成の過程における重要な情報を持っていると考えられる。

さてここで、“ハドロンの複合状態”の存否に関する世界的な動向を確認する。注目すべきは、中国BESII 実験やKEK/Belle 実験において、中間子-中間子(Phys. Rev. Lett. 96, 162002 (2006))や中間子-中間子(Phys. Rev. Lett. 108, 232001 (2012))といった“中間子 中間子に強く結合するレゾナンス状態”が発見されたことである。このことは、中間子-中間子という新しいハドロンの存在形態の可能性を示す重要なヒントと言える。

## 2. 研究の目的

本研究は、低エネルギー反陽子 陽子反応で生成されるグルーオンリッチな環境下でのエキゾチックハドロン探索を目的としたものである。特に、未だその生成過程が明確にされていない、低エネルギー反陽子 陽子反応下での二つの 中間子( )生成過程の背後に、未知のハドロンレゾナンスが存在しているかどうかについての探索を行う。

## 3. 研究の方法

反陽子 陽子消滅反応の中でも奇妙な過程と言われる  $p\bar{p}$  反応に注目し、そのダブル 中間子生成閾値エネルギー近傍の生成断面積の測定を行う。また、重水素

など軽い原子核標的での測定も行い、生成過程の原子核依存性も測定する。

本研究は、茨城県東海村、大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロン実験ホール・K1.8BR 実験施設において、既存の J-PARC E15 実験用の大立体角スペクトロメータを用いて行う(図1)。測定する具体的な反応及び、検出方法の概略を図2に示す。K1.8 ビームラインにより選別された 0.8 - 1.1 GeV/c 大強度反陽子ビームを E15 スペクトロメータ中心に設置する水素標的に照射する。反応により生成される2つの中間子は、すぐにその主要崩壊モードである  $K+K-$  ペアに崩壊する。この崩壊した  $K+K-$  ペアを捕まえ、不変質量分布及び、系の初期状態全エネルギーに対する質量欠損から二重生成の識別を行う。図3として予想される不変質量と質量欠損の相関図を示す。正しい  $K+K-$  ペアが検出できた場合、質量欠損の分布の中間子質量に当たる所に明確な2重中間子生成の信号を得ることが期待できる。本測定では、入射反陽子の運動量を変化させ、個々の入射運動量における2重中間子生成の生成断面積の測定を行う。この結果を最新の理論的な成果 (Phys. Rev.C90,048201(2014)) などと比較することで、生成閾値近傍でレゾナンスのようなエキゾチックハドロンが生成されているかどうかを検証する。

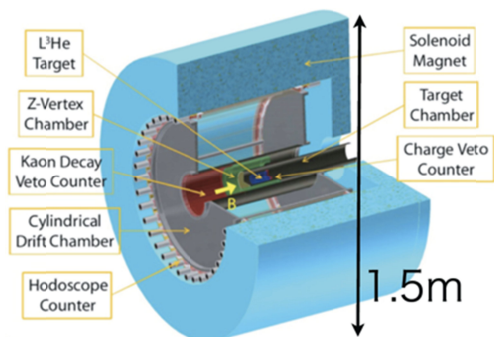


図1 : J-PARC E15 スペクトロメーター

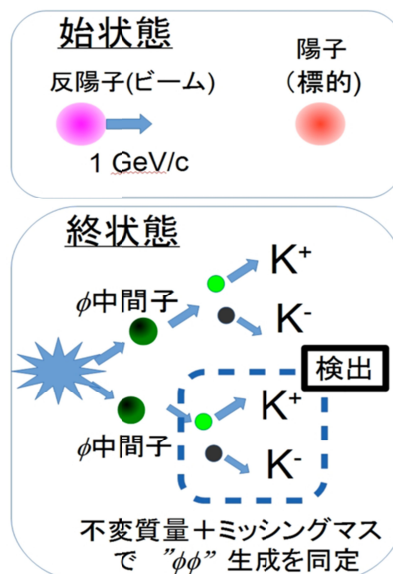


図2 : 実験のコンセプト

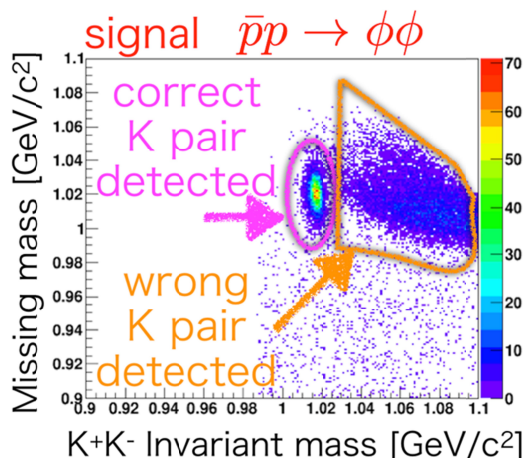


図3 : 検出した  $K+K-$  の4元運動量から求めた不変質量と質量欠損の相関図

#### 4. 研究成果

先に述べたとおり、本研究は既存の J-PARC E15 スペクトロメータを基盤設備として研究を展開する。E15 スペクトロメータはこれまで十分な成果を出してきた。その一例として、E15 スペクトロメータにおける粒子識別能力を図4として示す。十分パイ中間子や K 中間子が識別できていることがわかる。

さて、図1の通り、E15 スペクトロメータでは、標的での反応で生成された粒子は円筒形飛跡検出器(CDC)により識別、CDCが収められているソレノイド電磁石の磁場情報と合わせることで、生成粒子の運動量解析、反応点の同定、粒子識別を行なっている。本研究では、このE15 スペクトロメータに加え、標的周辺の飛跡検出器分解能の向上を目的とした Z vertex chamber

の製作を行った。本新規検出器は、CDC の最大の弱点と言えるビーム軸方向の分解能を1 cm 数 mm へ向上させる事を目的としたものである。製作した Z vertex chamber の写真を図5として示す。本検出器信号読み出し用の回路はE15 実験 CDC 用にされたものを基本として新設した。

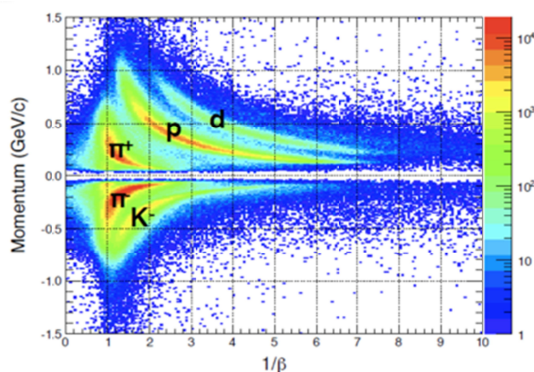


図4 : E15 スペクトロメーターによる粒子識別



図5 : 製作した Z vertex chamber

これまでに、Z vertex chamber の基本特性の検証は終了した。また、本研究は、2017年9月に行われた国際会議HADRON2017で招待講演を受けるなど、研究成果に対する注目は高い。さらに、最近の、ペンタクォーク粒子や、テトラクォーク粒子の発見など、ハドロン物理分野においてエキゾチックハドロンへの注目が集まっている。しかしながら、本研究ための実験ビームタイムは、J-PARC における遅い取り出し実験時間の短さ、提案されている実験の多さなどの影響で未だ獲得には至っていない。本研究成果を元に、ビームタイム獲得、及び、2重中間子生成閾値近傍でのエキゾチック粒子探索実験を推進し、その存否を明らかにする予定である。

## 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 3 件 )

Y. Sada, ..., H. Ohnishi 他  
( 4 2 番目 / 7 1 人 )

“Structure near K-+p+p threshold in the in-ight  $^3\text{He}(K^-, p)n$  reaction.”  
Prog. Theor. Exp. Phys, 2016(5): 051D01, 2016.  
査読あり

N. Tomida, N. Tran, M. Niiyama, H. Ohnishi, N. Muramatsu.  
“Performance of TOF-RPC for the BGOegg experiment ”  
JINST 11 (2016) no.11, C11037  
査読あり

T. Hashimoto, ..., H. Ohnishi 他  
( 4 2 番目 / 7 1 名 )  
“Search for the deeply bound K- p p state from the semi-inclusive forward-neutron spectrum in the in-ight K- reaction on helium-3”,  
Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 061D01 (2015)  
査読あり

[ 学会発表 ] ( 計 1 2 件 )

大西宏明 ( 招待講演 )  
「Experiments on meson in nucleus」  
Hadron physics with high-momentum hadron beams at J-PARC in 2015,  
2015年03月13日、  
高エネルギー加速器研究機構

大西宏明 ( 招待講演 )  
「Hadron physics at J-PARC」  
The 2nd International Symposium on Science at J-PARC 2014,  
2014年07月12日、Tsukuba International Congress Center (EPOCHAL TSUKUBA)

大西宏明 ( 招待講演 )  
「Hadron physics with K- at J-PARC」  
Workshop on Physics with Neutral Kaon Beam at JLab(KL2016),  
2016年02月01日、  
Jefferson 研究所( 米国 Newport News, VA )

大西宏明 (招待講演)  
「Overview of Hadron physics」  
International workshop on physics at  
the extended hadron experimental  
facility of J-PARC  
2016年03月05日  
KEK 東海キャンパス(茨城県 東海村)

大西宏明 (招待講演)  
「ハドロンは如何に形成されているか  
高エネルギー 2次ビームによる探求」  
日本物理学会 第71回年次大会(シン  
ポジウム講演)  
2016年03月22日  
東北学院大学(宮城県 仙台市)

大西宏明 (招待講演)  
「Hadron Physics at J-PARC K10 beam  
line」  
The 34th Reimei Workshop "Physics of  
Heavy-Ion Collisions at J-PARC"  
2016年08月08日  
KEK 東海キャンパス(東海村/茨城県)

大西宏明 (招待講演)  
「ハドロン物理@J-PARC」  
Flavor Physics Workshop 2016  
2016年10月26日  
岩室温泉ゆもとや(新潟市/新潟県)

大西宏明 (招待講演)  
「Recent results of the experiment to  
search for KNN bound state at J-PARC」  
International Workshop "Excited  
Hyperons in QCD Thermodynamics at  
Freeze-Out"  
2016年11月16日  
Jefferson Lab (Newport News, VA, USA)

大西宏明 (招待講演)  
「J-PARC Hadron Hall Extension」  
The international workshop on future  
potential of high intensity  
accelerators for particle and  
nuclear physics  
(HINT2016)  
2016年12月05日  
茨城量子ビーム研究センター(東海村  
/茨城県)

大西宏明 (招待講演)  
「Search for meson bound states」  
XVII INTERNATIONAL CONFERENCE ON  
HADRON SPECTROSCOPY AND STRUCTURE  
2017年、スペイン

大西宏明 (招待講演)  
「Quark correlation and Cluster」  
日本物理学会 2017 秋季大会、シンポジ  
ウム「Clustering as a window on the  
hierarchical structure of quantum  
systems」  
2017年9月  
宇都宮大学

大西宏明 (招待講演)  
「Charmonium in nucleus at J-PARC」  
International workshop on the  
project for the extended hadron  
experimental facility of J-PARC  
2017年3月  
KEK 東海キャンパス(茨城県 東海村)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.lns.tohoku.ac.jp/hadron/mbr/ohnishi/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大西宏明(Ohnishi, Hiroaki)  
東北大学・電子光理学研究センター・  
教授  
研究者番号: 60360517

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

佐久間史典(Sakuma, Fuminori)  
開拓研究本部 岩崎中間子科学研究室・  
専任研究員  
研究者番号: 10455347

馬越(Ma, Yue)

開拓研究本部 岩崎中間子科学研究室・  
専任研究員  
研究者番号: 80639576

### (4) 研究協力者

なし