

令和 2 年 7 月 9 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05384

研究課題名(和文) 電磁放射によるエキゾチックハドロンの構造研究

研究課題名(英文) structure of exotic hadrons by radiative decay

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 原子力科学研究所 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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：通常のパリオンはクォーク3つで構成されるが、それでは説明できないハイペロン共鳴があり、エキゾチックハドロンと呼ばれている。しかしその構造はよくわかっていない。本研究ではその構造研究のためにその電磁崩壊を測定することを提案し、シミュレーションによりその実現可能性を調べるとともに、そのための線検出器の開発研究を行った。鉛シンチレターの積層による線位置検出器を製作しその性能を調べ、既設のTPCスペクトロメーターと組み合わせることで所期の目標を達成することができることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エキゾチックハドロンはハドロン物理学の大きな研究テーマである。その存在はほぼ確かだが、その存在の根拠となる理論は明確でなく、さらにはその構造についても実験的な知見はまだほとんどない。原子核やハドロンの構造の研究については線分光が極めて有効であったことがよく知られている。本研究はエキゾチックハドロンの有力候補であるハイペロン共鳴について初めて線崩壊を測定することを提案し、その実現可能性をシミュレーションによりあきらかにした。さらにそのための線位置検出器の開発研究を行い、実際に実験可能なことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Ordinary baryons consist of three quarks. Some hyperon resonances can not be explained by this three quark picture and are called exotic hadrons. The structure of exotic hadron is not known and hot topics in hadron physics. We proposed to study their structure by their radiative decay, and carried out the simulation study of its measurement. According to the simulation, we have designed a gamma ray position detector and developed the detector and studied its performance. We have found we can measure the radiative decay together with the existing hyperon spectrometer.

研究分野：原子核物理学

キーワード：エキゾチックハドロン 電磁崩壊 ガンマ線検出器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ハイペロン共鳴のなかで (1405) や $\Xi(1690)$ は通常のクォーク模型では説明がつかず、そのほかさまざまな実験で、通常のハドロンではないエキゾチックハドロンであろうと考えられてきた。しかしその決定的証拠はなく、その構造はさらに全くわかっていない。一方われわれはエキゾチックハドロンであると考えられる H ダイバリオンやハイペロン共鳴などの研究のために TPC と超伝導磁石からなるハイペロンスペクトロメーターの建設をすすめてきて、J-PARC において最初の実験が認められた。一方エキゾチックハドロンの有力候補である (1405) の電磁崩壊の理論計算が報告された。それによると電磁崩壊分岐比はその構造に大きく依存する。そこでこのスペクトロメーターに 線検出器を付与することにより、この電磁崩壊分岐比の測定が可能ではないかと考えるに至り、この科研費の申請を行った。

2. 研究の目的

研究の最終目的は、ハイペロン共鳴の電磁崩壊分岐比を測定することにより、それらの構造を明らかにして、それらがエキゾチックハドロンか否かを明らかにすることである。原子核やハドロンの 線分光はこれまで、それらの構造の研究に威力を発揮してきたことはよく知られている。エキゾチックハドロンは現在ハドロン物理の大きな研究テーマであり、その存在はメソンではどうやら確かであるがバリオンはまだ不確定である。 (1405) や $\Xi(1690)$ などのハイペロン共鳴はその質量がクォーク模型と大きく異なっており、有力なエキゾチックバリオンの候補である。これらの電磁崩壊分岐比はいまだ測定されておらず、その構造を明らかにするためにその測定が待たれている。

われわれが建設をすすめてきた TPC ハイペロンスペクトロメーターは Λ や Ξ などのハイペロンを測定するための高性能の装置である。これに 線位置検出器を加えることにより、 (1405) や $\Xi(1690)$ などの電磁崩壊からの 線を検出することができるはずである。この研究の直接的な目的は、以下の二つである。

(1) まずどのような 線検出器を用いれば電磁崩壊分岐比の測定が可能かを、シミュレーション計算で検討し、 線検出器を設計する。

(2) 線検出器のサンプルを製作してその性能を調べる。

これらによって J-PARC において (1405) や $\Xi(1690)$ などの電磁崩壊測定が実現可能なことを明らかにする。

3. 研究の方法

エキゾチックバリオンの候補である (1405) は主に $\Sigma\pi$ に強い相互作用で崩壊する。電磁崩壊過程、 $(1405) \rightarrow \Lambda\gamma$ はその約 1% 程度の確率であると考えられ、測定は簡単ではない。このためにまず (1405) を大量に生成する必要がある。 (1405) は J-PARC K1.8 ビームラインを用いると、 $\pi^- + p \rightarrow K^0 + (1405)$ 反応を用いて大量に作るができる。この反応の断面積はすでに知られていてその数は 1 か月で 10^6 個を超えると考えられる。われわれが建設してきたハイペロンスペクトロメーターは標的内蔵型のユニークな TPC (Time Projection Chamber) とそれを囲む Helmholtz 型の超伝導磁石からなっている。この実験では標的には 5 cm の液体水素を使う。このスペクトロメーターは Λ をその $-p$ 崩壊で測定し K^0 をその $-+$ 崩壊から検出する。標的内蔵の TPC なので、ほぼ 4 の立体角でこれらを効率よく検出できることがこのスペクトロメーターの大きな特徴である。このスペクトロメーターでは (1405) の $\Sigma\pi$ への強い相互作用による崩壊は比較的容易に測定できるが、 (1405) の電磁崩壊は崩壊確率が小さく、バックグラウンドがあって測定は困難である。このバックグラウンドを抑えるには 線検出器がどうしても必要となる。

さらに $\Xi(1690)$ についても、同じ検出器システムでも測定が可能かどうか検討した。この場合は J-PARC 2GeV/c の K-ビームを用いて $K-p \rightarrow K+\Xi(1690)$ 反応で $\Xi(1690)$ を生成できる。断面積は正確にはデータがなくよくわからないが、近い運動量での過去の実験結果から、 10^5 程度生成できると考えられる。 $\Xi(1690)$ は ΛK 、 ΣK に強い相互作用で崩壊する。シミュレーションの結果このすべての崩壊モードをハイペロンスペクトロメーターで測定できると考えられる。さらに 線位置検出器を用いれば $\Xi(1690) \rightarrow \Xi\gamma$ の電磁崩壊も測定できる考えられる。

まずは、この J-PARC 1.4GeV/c の $-$ ビームとハイペロンスペクトロメーターという組み合わせで、 $\pi^- + p \rightarrow K^0 + (1405)$ 反応と、引き続き電磁崩壊 $(1405) \rightarrow \Lambda\gamma$ のシミュレーションを行った。その一例を図 1 に示す。終状態の 4 つ荷電粒子と 線が示されている。荷電粒子は TPC で粒子の同定が行われその運動量が測定される。 線はその位置が TPC と超伝導磁石の間に置かれる 線位置検出器で測定される。このように終状態のすべての粒子を測定することで、バックグラウンドの少ない測定を行うことができる。その際 線の位置分解能がどの程度必要かを、このシミュレーションを用いて調べた。その結果中心から 35 cm の 線検出器の位置で 2 cm 幅の検出器を円筒状に 100 本強配置すればよいことがわかった。

つぎにこの指針に沿ってこの検出器の開発研究を行った。問題は配置できる空間が狭いことで、動径方向の厚さを 3 cm 程度にする必要がある。十分な立体角を確保するため長さは 80 cm となる。そこで結局鉛 (またはタングステン) とプラスチックシンチレーターのサンドイッチ構造の検出器が最適であると考えた。狭い間隙で高い検出効率を確保するため 3 層からなる鉛シンチレーター検出器を製作した。

シンチレーターからの光の読み出しには、磁場中であることや空間が少ないことから MPC(Micro Pixel Counter)を採用することとした。また読み出しは直接 MPC をシンチレーターにカップルするものと波長変換ファイバーを用いるものと 2 例を製作した。MPC の読み出しのために小さなプリント基板を設計製作した。

製作した鉛シンチレーター検出器と MPC 読み出し基板を図 2 に示す。放射線源を用いてこの検出器のテストを行い、検出器として作動することを確認した。(図 3) これらの結果をもとに、実際のハイパロンスペクトロメーターに実装するための 線検出器全体の設計を行なった。

4. 研究成果

(1)

エキゾチックバリオンの候補である、 $\Lambda(1405)$ や $\Xi(1690)$ の構造を明らかにし、バリオンにもエキゾチックバリオンが存在することを明らかにするために、これらの電磁崩壊分岐比の測定を提案した。これらの測定について J-PARC で利用可能なビームを用いて、われわれが建設したハイパロンスペクトロメーターに 線位置検出器を付加した場合についてシミュレーションを行なった。その結果 $\Lambda(1405)$ や $\Xi(1690)$ のこれまで未測定 of 電磁崩壊分岐比の測定が可能であることを明らかにした。とくに $\Lambda(1405)$ の場合について詳細なシミュレーションを行い、線位置検出器の必要な仕様を決定した。

(2)

上記の仕様に基づいて、2x3x80cm の鉛シンチレーターサンドイッチ 3 層構造の 線検出器の開発研究を行った。サンプル検出器と MCP による読み出し回路を製作し、放射線源によるテストを行い、実際の実験に使用可能なことを確認した。

これらの研究により、J-PARC において $\Lambda(1405)$ や $\Xi(1690)$ などのエキゾチックバリオンと考えられる粒子の電磁崩壊比測定が、十分可能であることを示したことがこの研究の大きな成果である。

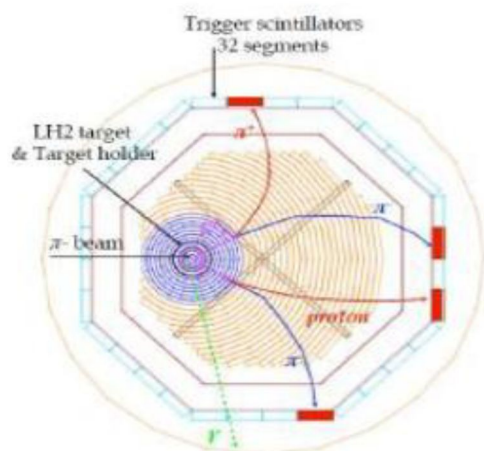


図 1 TPC での $\Lambda(1405)$ 電磁崩壊

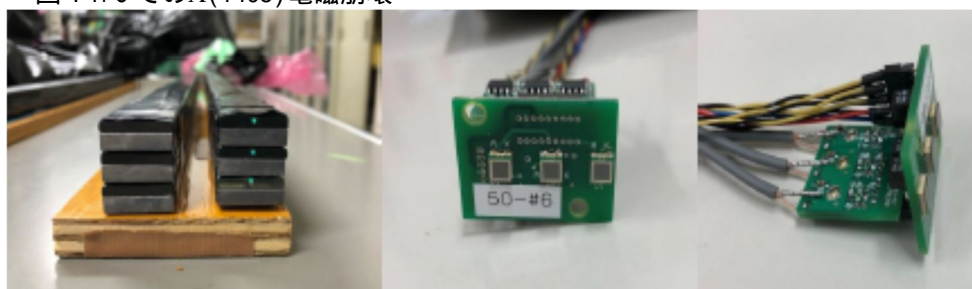


図 2 線位置検出器とその読み出し回路



図 3 オシロスコープでの 線検出器からのシグナル

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 2件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名 H.Ekawa, S.Hasegawa, K.Imai et al., | 4. 巻 2019-2 |
| 2. 論文標題 Observation of a Be double hypernucleus in the J-PARC E07 experiment | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics. | 6. 最初と最後の頁 201D02-1-7 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/pty149 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 該当する |
| 1. 著者名 S.H,Hwang, K.Imai | 4. 巻 17 |
| 2. 論文標題 Measurement of Radiative Decay of Lambda(1405) by using Hyperon Spectrometer at J-PARC | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 JPS Conf. Proc. | 6. 最初と最後の頁 033010-1-2 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.17.033010 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |
| 1. 著者名 S.B.Yang, S.Hasegawa, K.Imai et al., | 4. 巻 120 |
| 2. 論文標題 The First Determination of the Level Structure of an sd-shell Hypernucleus $^{19}\text{F}(\Lambda)$ | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett. | 6. 最初と最後の頁 132505-1-5 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.120.132505 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 - |
| 1. 著者名 S.Y.Ryu, K.Imai et al., | 4. 巻 116 |
| 2. 論文標題 Interference effect between ϕ and $L(1520)$ in $g\text{-}p \rightarrow K^+K^+p$ reaction near threshold | 5. 発行年 2016年 |
| 3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett. | 6. 最初と最後の頁 232001 1-6 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.116.232001 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス 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 該当する |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kenichi IMAI |
| 2. 発表標題 Possible extension of J-PARC E42/45 experiment and upgrade of HypTPC spectrometer |
| 3. 学会等名 Korea-Japan joint workshop on J-PARC hadron physics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kenichi Imai |
| 2. 発表標題 Summary |
| 3. 学会等名 14th Int. Conf. on Meson-Nucleon Physics and structure of Nucleon (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 KENICHI IMAI |
| 2. 発表標題 Hadron physics with neutrino beams |
| 3. 学会等名 J-PARC Symposium (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 長谷川 勝一 (Hasegawa Shoichi) (90391333) | 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 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主幹 (82110) | |