

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400300

研究課題名(和文) 偏極HD標的を用いた光生成反応によるバリオン分光

研究課題名(英文) Baryon spectroscopy studied by the photoproduction reaction with a polarized HD target

研究代表者

與曾井 優 (YOSOI, Masaru)

大阪大学・核物理研究センター・教授

研究者番号：80183995

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：偏極観測の測定により、生成率の小さい状態についても干渉項を通してその効果を調べることが可能になる。本研究では、SPring-8のレーザー電子光施設において中間子光生成反応の二重偏極観測を測定し、バリオン共鳴状態のスペクトロスコピーを行うことを目的として、実験に必要な偏極HD標的の開発を行った。装置の故障等もあり、研究期間内でのビーム照射実験までは至らなかったが、偏極度44%で緩和時間が約8ヶ月の標的作成に成功し、標的の製造から実験までの過程で必要な5つのクライオスタットすべてを稼働させることができた。これにより、2016年度に実験可能なところまで、ほぼ準備は整った。

研究成果の概要(英文)：Measurements of the polarization observables enable us to study the states which have small production rates by means of the interference effects. In this research, we have developed polarized HD targets for making the baryon spectroscopy through the measurements of double polarization observables in meson photoproductions at the laser electron-photon facility at SPring-8. Although, unfortunately, due to troubles of some devices etc., we did not reach the photoproduction experiment with polarized HD target, we have succeeded in producing the target with the polarization of 44% and the relaxation time of about 8 months, and have successfully operated five cryostats which are needed to produce the target, transport and serve it to the experiment. Now we are almost ready to perform the double polarization experiments in the fiscal year of 2016.

研究分野：原子核ハドロン物理学

 キーワード：偏極HD標的 レーザー電子光ビーム LEPS SPring-8 中間子光生成 二重偏極観測 バリオン分光  
NMR

1. 研究開始当初の背景

SPring-8 のレーザー電子光施設 (LEPS) における光核反応実験において、反ストレンジ・クォークを含む幅の狭いバリオン共鳴 (後に $\Theta^+$ と命名) を示唆する初めてのデータが得られた。これは、5クォーク状態の証拠としてハドロン物理学の分野に一大旋風を巻き起こしたが、その後の世界中の多くの施設での追試で、ポジティブな結果とネガティブな結果が相次いで報告され、その存在の確証はまだ得られておらず、 $\Theta^+$ の有無の確定は焦眉の課題となっていた。LEPS ではその後行われた重水素標的からのデータにおいても、 $\gamma + d \rightarrow K^- + K^+ + p + n$  反応の  $K^+n$  不変質量に有意に $\Theta^+$ のピークが見えており、更に、2006年~2007年においてはビーム増強を行って、以前の実験の2.6倍統計精度のデータを取得した。解析の結果、ピークの有意性は以前より減少したが、新たに重陽子中の陽子による反応をトリガー用の検出器情報から除去する解析方法を見出し、再び顕著な $\Theta^+$ のピークが得られた。存在確立のためには更なる統計精度の向上が必要であるが、一方、次のステップとしてスピン・パリティの情報も得ようとする、これまで測定できなかった偏極標的を用いた偏極観測の測定が必要となる。また、通常の高ペロン共鳴状態においても、最近、LEPSにおける $\Lambda(1405)$ の光生成測定において、断面積に顕著な光子ビームエネルギーに対する依存性が観測され、また、 $\Lambda(1520)$ のエネルギー依存性に  $E_\gamma=2$  GeV 付近にバンプ構造が見えているなど、高ペロン共鳴状態はまだ良く理解されていない部分が残っている。

一般に偏極観測は、断面積が小さくてバックグラウンドに埋もれてしまうような場合にも干渉項を通して、散乱振幅の小さい状態の効果を見ることが出来る。特に  $K$  中間子と核子 ( $N$ ) の質量和の閾値を超える光生成反応に対しては、反  $K$  中間子を  $K^{\text{bar}}$  と表すと、 $\gamma + N \rightarrow \phi + N$  も  $\gamma + N \rightarrow K + Y^*$  及び  $\gamma + N \rightarrow K^{\text{bar}} + \Theta^+$ 、更には非共鳴的な  $\gamma + N \rightarrow K + K^{\text{bar}} + N$  も終状態は  $KK^{\text{bar}}N$  である。従って、バックグラウンドの上のピークを選択してから偏極観測を求めるのではなく、 $KK^{\text{bar}}N$  測定に対する偏極観測の質量依存性を終状態の各2体の不変質量に対して見る方が干渉効果に敏感である。理論アプローチとして、Roberts は現象論的ラグランジアンを用いて、 $\gamma N \rightarrow KK^{\text{bar}}N$  反応における各種偏極観測を計算しているが、 $\gamma p \rightarrow nK^+ K^{\text{bar}}$  の例を図1に示す。ここに、 $P_z^\circ$  は円偏光ビームと  $z$  方向に偏極したターゲットを用いた二重偏極観測である。もし $\Theta^+$ が存在すれば、 $M_{NK}$  分布に対して顕著にその影響が見られる。また、同じ計算によると、 $\Lambda(1405)$ は  $K^{\text{bar}}N$  閾値以下にもかかわらず、その結合定数等のパラメータが仮想的な $\Lambda^*$ 中間状態を通して閾値近傍の偏極観測に敏感であることが示されている。

LEPS では先ず、 $\phi$ 中間子光生成による核内ストレンジネス成分の抽出を目的として、偏極標的の開発が開始された。本研究開始時において、重水素化水素 (HD) を高磁場、極低温中に保持して静的に偏極させ、更に十分なエイジング期間を経て偏極を凍結させるということに一応成功していたが、緩和時間が約 100 日と短い等、更なる開発を必要としていた。

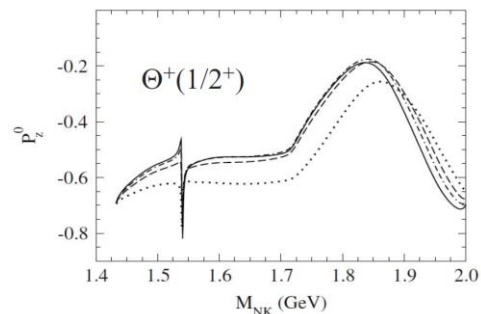


図1 ビーム・ターゲット二重偏極量の  $NK$  不変質量依存性 (Phys. Rev. C73(2006) 035215)

2. 研究の目的

本研究においては、先ず開発中の偏極 HD 標的の製作技術を確立し、長期の光ビーム照射実験に使える十分な偏極度と長い緩和時間を有する標的を作成する。更に、作成された偏極標的を SPring-8 まで運搬して LEPS において光ハドロン反応実験に供するために必要な、2 台の標的引き抜き用クライオスタット、運搬用クライオスタット、及び標的用クライオスタットを整備し、稼働させる。LEPS の円偏光した光ビームと偏極 HD 標的を用いて、終状態が  $KK^{\text{bar}}N$  となる反応の二重偏極観測を測定し、ストレンジネスを含むバリオンのスペクトロスコピーを行い、 $\Theta^+$  や  $K^{\text{bar}}N$  閾値近傍の高ペロン共鳴に対して、偏極観測を通して質量分布にその構造が現れるかを調べ、二重偏極観測が断面積の小さい共鳴状態にたいして有効な分光ツールとなり得るかを検証する。

3. 研究の方法

SPring-8 での中間子光生成反応の検出装置としては、既に順調に稼働している LEPS の前方スペクトロメータ系を用いるため、二重偏極実験に必要な装置開発としては偏極標的の開発が主である。偏極標的としては大阪大学核物理研究センターで開発が進められてきた偏極重水素化水素 (HD) 標的を用いる。偏極 HD 標的のメリットは炭素や窒素などの重い元素を含んでいないために、これまで用いられてきた動的偏極による標的 (ブタノール等) に比べてバックグラウンドが小さいこと、及び偏極凍結後に長い緩和時間が得られることである。偏極標的プロジェクトの具体的概要は、以下のようである。

イ) 直径 3 cm、長さ 5 cm の高純度固体 HD 標的を偏極標的製作用希釈冷凍機に装着

し、極低温 (15 mK) まで冷却して 17 T の高磁場をかけることによって偏極させる。その際に、HD の偏極促進のために 0.01% 程度オルソ H<sub>2</sub> を混入させる。

- ロ) オルソ H<sub>2</sub> がパラ H<sub>2</sub> に完全に 転換するまで長時間 (~3 ヶ月) その状態で保持 (エイジング) する。
  - ハ) エイジング後、磁場及び温度を実験で使用する条件 (1 T, 300 mK) にして、NMR 法により標的の偏極度と緩和時間を測定する。
  - 二) 製作した偏極標的をヘリウム液化温度以下に保ち、適度な外部磁場 (~1 T) をかけることにより偏極を保持したまま、標的引き抜き装置により標的運搬用クライオスタットに移し、120 km 以上離れた SPring-8 に運搬する。
  - ホ) 別の標的引き抜き装置により、標的を運搬用クライオスタットから標的用クライオスタットに組み込む。
  - へ) NMR により随時偏極度をモニターしながら、LEPS での二重偏極実験を遂行する。
- 図 2 に偏極 HD 標的システムの概念図を示す。

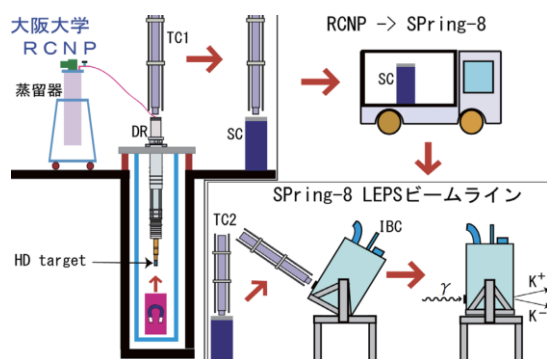
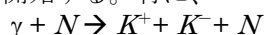


図 2 偏極 HD 標的プロジェクトにおける装置の構成。DR: Dilution Refrigerator、TC1(2): Transfer Cryostat、SC: Storage Cryostat、IBC: In-beam Cryostat

偏極 HD 標的の準備が整い次第、LEPS 前方スペクトロメータを用いた光ハドロン反応の測定を開始する。特に、



反応に注目して、二重偏極観測法の測定を行なう。

#### 4. 研究成果

研究経過としては、それまで整備してきた偏極 HD 標的プロジェクトのための基本設備 (高純度ガス蒸留器、偏極標的製作用希釈冷凍機、2 台の標的引き抜き装置、運搬用クライオスタット、及び標的用クライオスタット) のチェックと偏極 HD 標的の試作及びその偏極度と緩和時間の測定を順次行っていたが、本研究開始前には 40% の偏極度が得られていた HD 標的の偏極度が再現されないとか、正常に動作していた標的用クライオスタットが必要温度まで冷却できなくなるな

どの不具合、故障が生じ、その原因究明と修理に多くの時間を要することとなった。以下、各装置開発における内容を中心に、各々の成果を述べる。

(1) 初年度に、先ず偏極標的製作用希釈冷凍機を用いて偏極 HD 標的の作成を 2 回行った。第 1 回目の試作においては、我々が開発した高分解能ガス分析装置を用いて、不純物として僅かに必要なオルソ水素の量を適量とされる 0.1% に精度良く混入し、53 日の偏極凍結時間を経た後偏極度の測定を行ったが、約 18% という低い値しか得られなかった。原因としては新規製作した標的セルの熱伝導不足が考えられたため、標的セル内への熱伝達用高純度アルミワイヤーの接着方法を圧着型から低温ハンダ付けに変更し、本数も増やして第 2 回目の試作を行った。その結果偏極度は約 40% 以上に改善した。その際に到達温度が 25 mK と高かったため、2014 年度は先ず HD 標的セルを装着せずに希釈冷凍機の単体試験を行い、その原因が、希釈冷凍機の性能劣化によるものかどうかを確かめた。その結果、到達温度は約 12 mK であり、希釈冷凍機本体には問題が無いことを確認した。世界的な液体ヘリウム供給不足もあって次の試作までは時間が開いてしまったが、最終的に、実験時の条件である 300mK、1 T の温度、磁場の下で、偏極度 44%、緩和時間 約 8 ヶ月の偏極 HD 標的の作成に成功した (図 3)。この偏極度は 2015 年度の試作においても再現できていることを確認した。まだ、期待される偏極度の 6 割程度であるが、実験には十分供せる標的作成の技術が確立した。

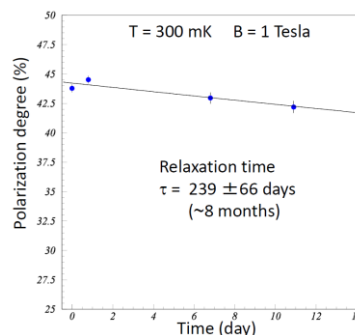


図 3 偏極 HD 標的の偏極度と緩和時間

(2) SPring-8 において使用する標的引き抜き装置は、運搬用クライオスタットからは垂直方向に引き抜き、標的用クライオスタットには水平方向に挿入するという複雑な機構を擁しているため、偏極保持磁場用のニホウ化マグネシウム超伝導コイルに電流を流すことになかなか成功していなかったが、コイル部分への冷却伝導効率を上げる工夫を施すことによって、磁場生成に成功した。但し、2015 年度の試験時において水平から垂直に回転させるための架台の駆動ギアが破損したため、ギアを介さずにインバータ制御のモーター直結方式に変更した。これにより、標

的引き抜き装置を安定に動作することができるようになった。

(3) 初年度に行った標的用クライオスタットの運転テストの際、電流導入部分の高温超電導線の焼損が起り、部品交換をして修理を行った。しかし、その後の冷却試験において必要な温度まで到達しないという状態が続き、原因究明に時間を費やした。最終的に希釈冷凍機の混合室に連結するガスラインの銅パイプが緑青で一部詰まっている(図4)のを発見し、その部分のパイプを交換することによって、ようやく元の冷却能力に戻すことができた。以上により、現在、本研究に必要な5つのクライオスタットすべてが正常に稼働する状態となっている。残念ながら、本研究期間中のビーム照射実験には間に合わなかったが、今後できるだけ早期に偏極HD標的を用いたLEPS実験を開始するための準備が、ほぼ整った。

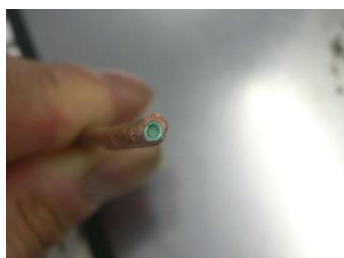


図4 標的用クライオスタットの不具合の原因となった緑青によるパイプの詰り

(4) 製作されたHD標的の偏極度が温度から期待される値の6割程度しかない原因を解明するため、若手研究(B)(偏極HD標的製造期間最適化のための17T用周波数掃引型NMRシステムの開発:代表 太田岳史)による研究と共同でHD標的の17Tの磁場中での偏極成長過程をモニターするシステムを開発し、僅かに付加されたオルソ水素の触媒効果によって偏極成長時の緩和時間は数時間であることを初めて観測した。その結果、偏極度の低い原因がオルソ水素濃度不足に依るものではなく、標的セル内の固体HDの温度が、測定している冷却ヘッドの温度に達していないことによるものであることがほぼ判明した。これにより、今後の偏極度の向上や凍結に必要なエイジング期間の短縮に向けた開発の可能性が開けた。

(5) LEPS前方スペクトロメータを用いて既に取得されている水素、重水素標的からのデータ解析を進め、論文として公表した(論文①~③)。特に、論文①では $\gamma + p \rightarrow K^- + K^+ + p$ 反応を解析し、運動学的に $\phi$ 中間子生成と $\Lambda(1520)$ 生成が重なる領域においてはそれぞれの過程が干渉している効果が断面積に現れることを初めて示し、今後進めて行く予定の、偏極観測における干渉効果の研究に対して重要な知見を与えた。

## 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)

- ① S.Y. Ryu, H. Kohri, T. Ohta, M. Yosoi 他 (全72名)、Interference Effect between  $\phi$  and  $\Lambda(1520)$  Production Channels in the  $\gamma p \rightarrow K^+ K^- p$  Reaction near Threshold, Phys. Rev. Lett. 116、査読有、2016、pp.232001\_1-6  
DOI:10.1103/PhysRevLett.116.232001
- ② Y. Morino, M. Yosoi, H. Kohri, T. Ohta, 他 (全50名)、Backward-angle Photoproduction of  $\omega$  and  $\eta'$  Mesons from Protons in the Photon Energy Range from 1.5 to 3.0 GeV, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015、査読有、2015、pp.013D01\_1-11  
DOI:10.1093/ptep/ptu167
- ③ A.O. Tokiyasu, H. Kohri, T. Ohta, M. Yosoi 他 (全72名)、Search for the  $K^- pp$  Bound State via  $\gamma d \rightarrow K^+ \pi^- X$  Reaction at  $E_\gamma = 1.5 - 2.4$  GeV, Phys. Lett. B728、査読有、2014、616-621  
DOI:10.1016/j.physletb.2013.12.039

[学会発表] (計 3件)

- ① T. Ohta、Development of 17T-NMR system for measurement of polarized HD and  $^3\text{He}$  targets、2015年9月15日、ルール大学、ボーフム(ドイツ)
- ② H. Kohri、Photoproduction of  $N^*$  and related topics at LEPS/LEPS2、2015年5月26日、大阪大学銀杏会館(大阪府、吹田市)
- ③ M. Yosoi、Hadron Physics Experiments at LEPS and LEPS2、2013年10月1日、CNRS Auditorium、パリ(フランス)

[その他]

ホームページ:

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-b/HD/>

## 6. 研究組織

- (1)研究代表者  
與曾井 優 (YOSOI Masaru)  
大阪大学・核物理研究センター・教授  
研究者番号: 80183995
- (2)研究分担者  
なし
- (3)連携研究者  
郡 英輝 (KOHRI Hideki)  
大阪大学・核物理研究センター・講師  
研究者番号: 40448022
- (4)研究協力者  
太田 岳史 (OHTA Takeshi)  
大阪大学・核物理研究センター・研究員  
研究者番号: 20727408