

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18340064

研究課題名（和文） ペンタクォーク粒子ハイパー核の探索

研究課題名（英文） Search for the pentaquark-particle hypernuclei

研究代表者

與曾井 優 (YOSOI MASARU)

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号：80183995

研究成果の概要：物質の新存在形態であるペンタクォーク粒子 $\Theta^+$ の発見は、ハドロン物理学における近年の最も重要な成果の1つである。本研究では $\Theta^+$ と核子との相互作用を調べるために原子核を標的とする光核反応を用いて、 $\Theta^+$ が核に束縛する状態の探索を行った。実験はSPring-8のレーザー電子光施設で行い、大立体角の3次元飛跡検出器とガス液化クライオスタットを新たに導入して、ヘリウム標的に対してビーム光子数 $4.6 \times 10^{12}$ 個のデータを取得した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2007年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：原子核・ハドロン物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ペンタクォーク、ハイパー核、タイムプロジェクション・チェンバー (TPC)、ガス液化クライオスタット、レーザー電子光、SPring-8、LEPS、光核反応実験

## 1. 研究開始当初の背景

SPring-8のレーザー電子光施設 (LEPS) における反ストレンジネスクォークを含む幅の狭いバリオン共鳴 (後に $\Theta^+$ と命名) の発見 (Nakano 他、Phys. Rev. Lett. 91 (2003)012002) は、初めての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センセーションを巻き起こした。世界中の多くの施設で追試が為されてその存在はほぼ確定されたかに見えたが、その後の高エネルギー実験データや米国ジェファーソン研究所の新たな統計精度の良いデータではその

確証が得られず、その存在の有無も含めて共鳴幅及びスピン・パリティの決定は焦眉の課題であり、世界中でそのための種々の実験が進行・計画中である。

一方、 $\Theta^+$ の構造についてはカイラルソリトン模型から $K\pi N$ 束縛状態とするものまで種々あり、仮に幅やスピン・パリティが判ったとしても一義的に模型が選択されるわけではない。本研究で主題とする $\Theta^+$ 束縛原子核の探索は $\Theta^+$ と核子の相互作用についての情報をもたらすことから、それを通して $\Theta^+$ の性質に新たな知見を与えることができる。

また、もし束縛状態が存在すれば、近年研究が進展している通常のハイパー核やダブルハイパー核に加えて、新たに  $S=+1$  ハイパー核のスペクトロスコピーの世界を研究することとなり、ハドロン物理学の新たな分野を開拓する端緒となる。

理論計算としては、例えば Cabrera 等の結果 (Phys. Lett. B608(2005)231) によると、 $\Theta^+$  が崩壊モードである  $KN$  以外に 3 体  $K\pi N$  と相関が強ければ  $\Theta^+ N$  相互作用が強い引力となり、且つパウリ禁止則が効いて幅の狭い束縛状態を作り得るということが示唆されている。それを受けて Nagahiro 等は  $^{12}\text{C}(K^+, \pi^+)$  反応による  $\Theta^+$  ハイパー核の生成スペクトルと断面積を計算している (Phys. Lett. B620(2005)125)。実験上は、 $\Theta^+$  束縛原子核探索の標的としては、計算の為されている炭素 12 より、すべての核子が同じ  $1s$  状態にいたるためどの核子から  $\Theta^+$  が生成されたかに終状態は依存しないこと、及び大きな核子分離エネルギー ( $\sim 20$  MeV) が  $\Theta^+$  の運動エネルギーと相殺して束縛されやすいと考えられることから、ヘリウム 4 原子核が適している。

GeV 光子とヘリウム 4 との反応としては、過去に  $\pi^0$  生成を測定した例があるだけで  $K$  中間子や  $\phi$  等のベクター中間子生成を測定した例はない。光子のエネルギーがさらに高くなると原子核全体と反応するコヒーレントな過程の寄与が大きくなってしまい、生成粒子の原子核束縛状態や  $\phi$  中間子準自由散乱のようなインコヒーレントな過程を見るにはエネルギー領域としても SPring-8/LEPS での測定は適している。

## 2. 研究の目的

本研究では、最近発見されたストレンジネス  $S=+1$  のペンタクォーク粒子と核子との間の相互作用を調べるため、閾値近傍での GeV 光子ビームによる原子核標的からの  $K^*$  等  $S=-1$  の中間子光生成もしくは  $\Lambda(1520)$  等のハイペロン光生成を通して  $\Theta^+$  粒子が核内に束縛された  $S=+1$  ハイパー核の探索を目的とする。標的としては既に理論計算が為されている炭素 12 と核子自身が最も深く束縛されていてエキゾチックな粒子が入りこんだ時に束縛し易いと考えられるヘリウム 4 を用いる。

また同時に、ヘリウム 4 原子核は核子同士が非常に密に接近した原子核であることから、種々のベクトル中間子をインコヒーレント過程 (核内の個々の核子と独立に反応を起こす過程) において測定し、生成断面積や偏極観測の運動量移行依存性を自由核子による光生成データと比較して核媒質内での核子形状変化についての知見を得る。

## 3. 研究の方法

これまで我々の LEPS 実験においては、光子と核子との反応による  $\Theta^+$  生成以外に光子と重陽子との反応による前方  $\Lambda(1520)$  放出を伴う  $\Theta^+$  生成が見つかった。前者は最前方においても移行運動量があまり小さくならないのに対し、後者は、例えば  $\gamma + p \rightarrow K^+ + \Lambda(1520)$ 、 $K^+ + n \rightarrow \Theta^+$  という 2 段階過程によるソフトな  $K^+$  中間子の吸収によるものが主と考えられ、生成された  $\Theta^+$  と残った核子との運動量整合性が良く、より結合し易いので有望である。

本研究では、SPring-8/LEPS でのマルチ GeV 偏極光子ビームを用いて原子核標的との光反応実験を行う。特に前方にハイペロンが出る、 $\gamma + {}^4\text{He}(\text{or } {}^{12}\text{C}) \rightarrow \Lambda^{(*)} + X$  反応における欠損質量スペクトルから  $X(S=+1)$  の  $(A-1)$  体バリオン系中に  $\Theta^+(1540)$  の束縛状態を探索する。実際、図 1 に示すように LEPS のエネルギー範囲で上記反応の運動量移行は数百 MeV/c 以下と非常に小さく、所謂マジックモーメントに近い。核内核子との準自由過程で生成された束縛されない  $\Theta^+$  は  $X$  の励起スペクトルの中で連続状態にフェルミ運動で拡がった幅の広い山となり、束縛状態の位置と幅にもよるが実験的に区別可能である。その際、種々のバックグラウンドを落とすために  $X$  からの崩壊粒子を同時に測定する。

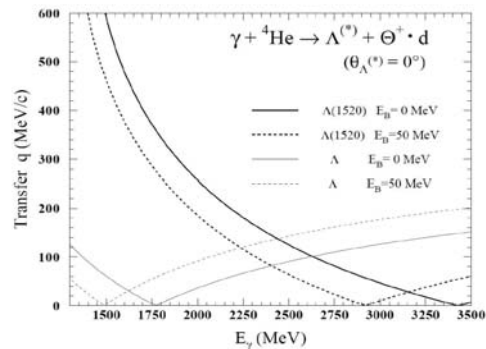


図 1  $\gamma + {}^4\text{He} \rightarrow \Lambda^{(*)} + X$  反応の運動学

測定に必要な装置としては、標的を除けば既設の前方用スペクトロメータに加えて標的回りの大立体角飛跡検出器 (タイムプロジェクトン・チェンバー (TPC)) であり、更に前方放出粒子の運動量分解能向上のために TPC 下流にバックアップ用のドリフトチェンバーを設置する。

前方スペクトロメータ系は電子・陽電子除去のためのエアロジェル・チェレンコフ検出器、軌道解析用の 3 台のマルチワイヤー・ドリフトチェンバー、及び飛行時間測定のため

のシンチレータホドスコープからなり、一台目と二台目のドリフトチェンバーの間にギャップが 55 cm の双極電磁石が置かれていて運動量を分析することができる。既に液体水素標的等による測定においてこの部分の手法は確立している。

TPC はボア径 60 cm の超電導ソレノイド磁石に入れて使用することによって飛跡の曲率から運動量を求め、また、損失エネルギーから粒子識別を行う。液体標的用に内径 10 cm の中空領域をもつ有感領域の長さ 70 cm のものを製作する。

具体的研究内容は以下のようである。

(1) 先ず、SPRING-8/LEPS の 1.5 GeV-2.4 GeV のレーザー電子光と既設の前方スペクトロメータを用いて既に得られている陽子、重陽子からの各種光生成データをもとに解析ツールの整備を行い、 $\Theta^+$  や  $\Lambda^*$  の解析を行う。また、その解析を踏まえ理論予測を加えて、ヘリウム 4 標的、炭素 12 標的に対する  $\Theta^+$  ハイパー核生成に対するシミュレーションを行い、更にはベクトル中間子光生成に対するコヒーレント及びインコヒーレント過程に対する簡単な Glauber 計算等を行って、検出器配置や標的厚についての評価をする。

(2) 製作中の液体標的用のタイムプロジェクション・チェンバー (TPC) を完成させ、内径 60 cm の超電導ソレノイド磁石に入れて宇宙線及び LEPS の GeV ガンマ線ビームを用いて性能試験を行い、最適な動作パラメータを決定する。並行して粒子軌跡の解析プログラムの整備を行い TPC を用いた実験の測定手法を確立する。

(3) 液体ヘリウムの外部からの注入を必要としないガス液化型液体ヘリウム標的システムを開発する。そのために冷凍能力が高く、最低到達温度が 3.6 K 以下の冷凍機を導入し、テストベンチを用いて試験を行った後、最適なクライオスタットを製作し、TPC に適合する約 15 cm 長の標的セルを設計する。尚、この標的はヒーター温度の調節のみで液体水素、液体重水素標的にも使える汎用ガス液化型クライオ標的とする。

(4) 大きさの制約から TPC の粒子識別能力及び運動量分解能は必ずしも十分ではないので、前方にバックアップ用のドリフトチェンバーを設置し、また飛行時間法による速度測定が可能ないように TPC 回りに置く分割型シンチレータを製作する。

(5) 標的及び検出器の準備が整った後、先ず自由核子からの  $\Theta^+$  探索を目的とした液体水素及び液体重水素標的を用いた実験を行う。また、その実験を通じて、解析プログラムの整備を行い、TPC を用いた実験の測定手法を確立する。尚、炭素標的については液体標的セル回りの真空容器として炭素ファイバー樹脂 (CFRP) を用いているので、一部、同時に

測定できる。

(6) 液体水素、重水素標的による実験が終了後、標的をヘリウム原子核標的に変更して、本研究の主題であるペンタクォーク・ハイパー核の探索を開始する。実験と並行しながらデータ解析を進め、 $\Theta^+$  ハイパー核の存在の有無について順次精度を上げて調べていく。

#### 4. 研究成果

研究経過としては、第 1、2 年度の研究でペンタクォーク粒子ハイパー核探索実験に用いる、寒剤不要のガス液化型クライオ標的、及びタイムプロジェクション・チェンバーを中心とする検出器系の準備が整い、第 3 年度には SPRING-8 のレーザー電子光実験施設を用いて、液体水素、液体重水素標的に対して GeV 光核反応の測定を順に行い、本研究の主題であるヘリウム標的を用いた実験も開始した。但し、共同利用施設を用いる実験であるため実験時期は他の実験との兼ね合いもあり、液体ヘリウム標的を用いた測定は本研究期間内には終了せず、翌平成 21 年度前半まで継続して行い、実験終了後は集中してデータ解析を進めている。

以下に研究方法で挙げた具体的内容に沿って、各々の成果を述べる。

(1) 前方スペクトロメータを用いて既に得られている水素、重水素標的からのデータ解析を進め、 $\Theta^+$  や  $\Lambda^*$  光生成の結果を論文として公表した (論文①～④)。中でも、論文③では重水素標的を用いて  $\Theta^+$  の光生成反応を行い、前方に放出される  $K^+ K^-$  を検出し、最小運動量スペクテーター近似という斬新な解析手法を導入して高い有意さをもって  $\Theta^+$  の存在の証拠を示した。また、論文②ではハイペロン励起状態  $\Lambda(1520)$  の水素標的と重水素標的からの光生成を比較して、中性子からの  $\Lambda(1520)$  生成が強く抑制されていることを初めて見出し、ベクトル  $K$  中間子交換の寄与が小さい等、その生成機構に重要な知見を与えた。いずれも本研究の主題であるペンタクォーク・ハイパー核探索に対して、重要な結果を提供している。

(2) 本研究に必要な大立体角 3 次元飛跡検出器である TPC を完成させ、内径 60 cm の超電導ソレノイド磁石に入れて宇宙線及びレーザー電子光ビームによる性能試験を行い動作パラメータ等の最適化を行った。位置分解能としては目標値の 200  $\mu\text{m}$  がほぼ達成できた。図 2 に TPC のイベントディスプレイの例を示す。(標的は濃い筒状の部分の先端部にあり、ガンマ線と標的との反応によって 3 つの荷電粒子が放出されているのが分かる。)

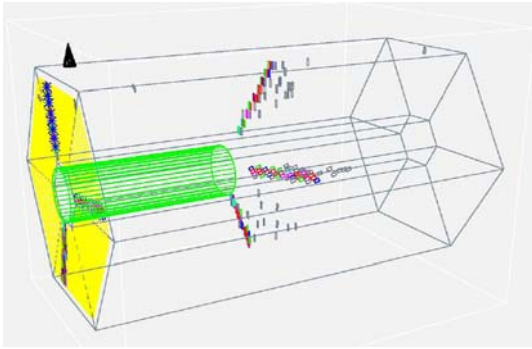


図2 TPCのイベントディスプレイ

(3) 光ビームを用いた実験は反応機構が簡単なことから理論上の不定性は少ないが、相互作用が小さいために測定に時間がかかる。従って、液体ヘリウムを標的とする場合、頻繁な液体ヘリウムの注入を必要としないガス液化クライオスタットが長期の実験を行う上で必要不可欠である。図3に製作したガス液化クライオ標的の模式図を示す。TPC内に挿入するために70cmのノーズを持つ構造となっている。使用した冷凍機(RDK-408D2)は4.2Kで1Wの冷却能力を有し、先ず冷凍機真下の液溜めにおいてガスを液化し、そこから細い銅パイプで液をノーズの先の標的セルまで導く。標的セルはカプトン膜による長さ15cmのカプセル状であり、太い銅パイプを介して冷凍機で冷却されている。標的から放出される荷電粒子のエネルギー損失を小さくするために標的回りの真空チェンバーは炭素ファイバー繊維(CFRP)を用いている。また、この先端は測定における炭素標的としての役割も持つ。本クライオ標的システムはヒーターによる温度調節のみで液体水素、液体重水素標的にも使用でき、実際、平成19年1月から平成21年7月まで順調に稼動して、3種類の標的に対する測定が行われた。

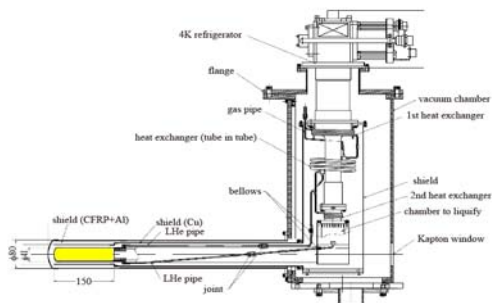


図3 ガス液化クライオ標的

(4) 測定器系として、既に完成しているTPCに加えバックアップ用ドリフトチェンバー(有感領域φ600、YY' UU' VV'の6面構造)

を開発し、また、分割型両端読み出しのトリガーシンチレータを製作した。これにより、前方放出粒子の運動分解能の向上と飛行時間測定による粒子識別能力の向上を図った。図4にTPCや新ドリフトチェンバーに既設の前方スペクトロメータを含めた実験セットアップの模式図を示す。

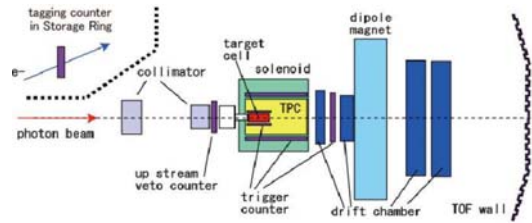


図4 実験セットアップ

(5) 既設の前方スペクトロメータ系に加えてTPCにより検出立体角が広がったことから、反応機構と崩壊様式を同時に押える測定が可能となった。そこで、自由核子からの $\Theta^+$ 探索を主題として液体水素、重水素標的を用いた実験を行った。

先ず、深紫外レーザーを用いたより高エネルギー(3 GeV)のレーザー電子光ビームの実用試験も兼ねて、陽子からの $K^*(892)$ 中間子光生成による $\Theta^+$ の探索を目的とした測定を行った。残念ながらビーム強度は2.4 GeVビームに比べて一桁小さく、全光子数は $10^{12}$ 個以下であったが、この実験を通じて新たな測定システムに対する解析プログラムの開発・整備を行い、検出器系に問題の無いことを確認した。

次に、レーザーを通常の高出力紫外レーザーに変更し、前方測定において $\Theta^+$ が見つかっている重陽子標的に対して、特に崩壊粒子の不変質量から $\Theta^+$ が同定できるかを調べる実験を行った。また、比較のために水素標的に対しても測定を行った。それぞれ、全光子数は $1.6 \times 10^{12}$ 個と $2.0 \times 10^{12}$ 個であり、積分ルミノシティにして共に $0.65 \text{ pb}^{-1}$ である。これは反応断面積で10 nbあれば5000個以上の事象が起きていることになり、バックグラウンドとの兼ね合いではあるが、少なくともこの程度の断面積までのアップ・リミットを導出することができる。

(6) 基礎データとなる液体水素、重水素標的による実験の後、標的を液体ヘリウムに変更し、本研究の主題であるペンタクォーク・ハイパー核の探索実験を行った。1.5 GeV ~ 2.4 GeVの全ビーム光子数は $4.6 \times 10^{12}$ 個であり、積分ルミノシティは $0.68 \text{ pb}^{-1}$ である。データは垂直偏光ビームと水平偏光ビームでそれぞれ半々づつ収集しており、断面積以外に偏極観測量も導出可能である。

(5)、(6)で得られた実験データに対する解析は順調に進んでいるが、まだ、検出器の細かい較正等が済んでおらず、物理データとしては非常にテンポラリーであるので、現時点で報告することは差し控えたい。従って、本成果報告は、非常に中間報告的なものにならないを得ないが、最終的な結果を得るまでにはしばらくの時間が必要であり、その後の論文公表をもって最終報告としたい。

#### 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 7件)

- ① H. Kohri, T. Nakano, T. Hotta, M. Yosoi 他 55 名、Near-Threshold  $\Lambda(1520)$  Production by the  $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda(1520)$  Reaction at Forward  $K^+$  Angles、Physical Review Letters 104、2010、査読有、pp.0172001\_1-5
- ② N. Muramatsu, J.Y. Chen, T. Nakano, T. Hotta, M. Yosoi 他 50 名、Near-Threshold Photoproduction of  $\Lambda(1520)$  from Protons and Deuterons、Physical Review Letters 103、2009、査読有、pp.012001\_1-5
- ③ T. Nakano, N. Muramatsu, T. Hotta, M. Yosoi 他 52 名、Evidence for the  $\Theta^+$  in the  $\gamma d \rightarrow K^+ K^- pn$  reaction by detecting  $K^+ K^-$  pairs、Physical Review C79、査読有、2009、pp.025210\_1-15
- ④ M. Niiyama, H. Fujimura, T. Nakano, T. Hotta, M. Yosoi 他 36 名、Photoproduction of  $\Lambda(1405)$  and  $\Sigma^0(1385)$  on the proton at  $E_\gamma=1.5-2.4$  GeV、Physical Review C78、査読有、2008、pp.035202\_1-10
- ⑤ Y. Maeda, T. Hotta and M. Yosoi、New liquid target system for the time projection chamber experiment at SPring-8/LEPS facility、RCNP Annual Report 2007、査読無、2008、p11
- ⑥ Y. Nakatsugawa for LEPS collaboration、 $\Theta^+$  photoproduction accompanied by  $K^-$  at SPring-8/LEPS、RCNP Annual Report 2007、査読無、2008、p13
- ⑦ M. Yosoi、On the LEPS new beamline、Proceedings of the International Workshop on “Quark Nuclear Physics”、査読無、2006、pp.147-153

[学会発表] (計 4件)

- ① Y. Nakatsugawa、Photoproduction of  $\Lambda(1405)$  and  $\Sigma(1385)$  on the proton at

$E_\gamma=1.5-3.0$  GeV at SPring-8/LEPS、日本物理学会 合同核物理分科会、2009年10月、ハワイ ハワイ島

- ② 中津川 洋平、SPring-8/LEPSにおける $\Theta^+$ 光生成実験のための Time Projection Chamber の性能評価、日本物理学会、2008年3月、近畿大学
- ③ 中津川 洋平、SPring-8/LEPSにおける $\Theta^+$ 光生成実験のための Time Projection Chamber の性能評価、日本物理学会、2007年3月、首都大学東京
- ④ 與曾井 優、Pentaquark hypernucleus and multi-quark states beyond 5、RCNP研究会「LEPS2 ビームラインによるクォーク核物理の新展開」、2007年1月、大阪大学

#### 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・准教授

研究者番号：80183995

(2) 研究分担者

中野 貴志 (NAKANO TAKASHI)

大阪大学・核物理研究センター・教授

研究者番号：80212091

堀田 智明 (HOTTA TOMOAKI)

大阪大学・核物理研究センター・助教

研究者番号：30332745

(3) 連携研究者

なし

(2) 研究協力者

前田 嘉一

大阪大学・核物理研究センター・特任研究員

研究者番号：70448025

中津川 洋平

大阪大学・核物理研究センター・教務補佐員