

氏名・(本籍)	なか ばやし ただし 中 林 匡
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2287号
学位授与年月日	平成18年9月15日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)物理学専攻
学位論文題目	H,D(γ, η)反応によるW=1500~1700 MeV領域の核子共鳴の研究
論文審査委員	(主査) 教授 笠木 治郎太 教授 清水 肇, 橋本 治 助教授 白井 淳平, 萩野 浩一

論 文 目 次

第1章 序論

- 1.1 背景
- 1.2 η 中間子光生反応
- 1.3 本研究の目的

第2章 ハドロン物理, 核子共鳴

- 2.1 クォーク模型, フレーバーSU(3)対象性
- 2.2 量子色力学, カラーSU(3)対象性
- 2.3 バリオンの共鳴状態と核子共鳴N
- 2.4 核子共鳴の光励起
- 2.5 カイラル対象性
- 2.6 $N(1535)S_{11} \rightarrow \eta N$ 結合
- 2.7 カイラルクォークソリトン模型

第3章 擬スカラー中間子の光生成

- 3.1 擬スカラー中間子の光生成と核子共鳴
- 3.2 共鳴状態と角度分布

第4章 η 中間子光生成反応実験

- 4.1 η 中間子光生成と核子共鳴

第5章 実験

- 5.1 GeV- γ ビームライン
- 5.2 タギングシステム(STB-Tagger II)
- 5.3 ビームプロファイルカウンター(BPC)
- 5.4 CsI 多重検出器(SCISSORS II)
- 5.5 固体水素標的
- 5.6 データ収集系

第6章 データ解析

- 6.1 $\gamma\gamma$ 不変質量解析 I
- 6.2 $\gamma\gamma$ 不変質量解析におけるアクシデンタルバックグラウンドの差引
- 6.3 クラスタに対するイベント選別
- 6.4 $\gamma\gamma$ 不変質量解析 II
- 6.5 γ 中間子収量のTDCカット依存性
- 6.6 空標的(empty target)ラン
- 6.7 CsI 多重検出器のアクセプタンス
- 6.8 断面積の導出
- 6.9 誤差の評価

第7章 解析結果

- 7.1 $\gamma p \rightarrow \eta X$ 反応の解析結果
- 7.2 $\gamma p \rightarrow \eta p$ 反応の解析結果
- 7.3 $\gamma p \rightarrow \eta \pi N$ 反応の解析結果
- 7.4 $\gamma d \rightarrow \eta X$ 反応の解析結果
- 7.5 $\gamma d \rightarrow \eta pn$ 反応の解析結果

第8章 水素標的データの解析結果に関する議論

- 8.1 アソイバー模型 $\sim \eta$ -MAID
- 8.2 $\gamma p \rightarrow \eta p$ 反応の解析結果に関する議論
- 8.3 $\gamma p \rightarrow \eta \pi N$ 反応の解析結果に関する議論

第9章 重水素標的データの解析結果に関する議論

- 9.1 重陽子内核子の運動量分布
- 9.2 $\gamma d \rightarrow \eta pn$ 反応の全段面積に於ける共鳴状態の寄与
- 9.3 $\gamma d \rightarrow \eta pn$ 反応角度分布の解析結果
- 9.4 角度分布の多重極解析, 核子共鳴の寄与

第10章 観測された核子共鳴に関する議論

- 10.1 Narrow Resonance
- 10.2 核子共鳴状態

第11章 結論

論文内容要旨

1GeV 領域のハドロン物理は、ハドロン内部のクォークの力学を解明し、観測されるハドロンの性質を理解する為に様々な手法で研究が行われてきた。このエネルギー領域では量子色力学(QCD)の摂動論的手法が使えない為に、種々の有効模型で現象が記述される。このような模型で計算されたハドロン共鳴の属性 \sim スピン・パリティ, 質量や、動的性質 \sim 共鳴形式の励起強度, 崩壊振幅等の観測量を実験と比較する事によって模型の検証が行われ、ハドロン構造の理解が成されてきた。

中間子の光生成反応は、反応終状態のバリオン共鳴の崩壊振幅の他に、初期状態に於ける共鳴形成の振幅の情報が得られる事から理論・実験両面から大きな関心が寄せられている。

η 中間子はアイソスカラーであるため、反応中間状態にあるアイソスピン $I=1/2$ の N^* だけを抽出でき

る非常に有効な研究手段である。1990年代前半以降 $\gamma p \rightarrow \eta p$ 反応に関する幾つかの詳細な実験データが提出され、陽子励起による質量 $W=1500\sim 3000$ MeV の第二共鳴領域以降の N^* に関する豊富な情報が得られている。一方で $\gamma n \rightarrow \eta n$ 反応に関しては第二共鳴領域までの実験データしか得られておらず、中性子励起の N^* の光励起強度はよく分かっていない状況である。

そこで本研究では、中性子励起による第二～第三共鳴領域の N^* を系統的に調べることを目的として、 $\gamma d \rightarrow \eta p n$ 反応の測定を行った。この反応過程は二つの観点から非常に重要である。第一に、フレーバーSU(3)対称性の元では陽子から励起抑制される N^* の存在が知られている。従って、このような N^* の光励起強度、崩壊分岐比を中性子標的によって測定できるという事が挙げられる。第二に、励起された N^* がバリオン反10重項メンバー N_{10} の候補である可能性を調べることができるとい事が挙げられる。Diakonov 等のカイラルクォークソリトンモデルでは中性子の光励起強度が陽子に比べて非常に大きく、 ηN 結合の強い N_{10} の存在が予言されており、近年発見されたペンタクォーク状態の有無を別の事件的観点から探ることができる。そこで $\gamma d \rightarrow \eta p n$ 反応断面積の導出を行ない、全断面積及び角度分布の解析によって N^* の共鳴パラメータの導出を行った。

また、重水素標的の実験データと比較する為に水素標的による $\gamma p \rightarrow \eta p$ 反応測定を行い、第三共鳴領域に於ける N^* の寄与を調べ既存のデータとの比較を行った。一方で、 $\gamma N \rightarrow \eta \pi N$ 反応は、単一の N^* 励起を測定する際のバックグラウンドとなり、原子核標的 $A(\gamma, \eta)$ 反応のデータを解釈する上で重要な反応過程となる。従って原子核中に於ける N^* の性質を理解する為の基礎データとする目的で $\gamma p \rightarrow \eta \pi N$ 反応断面積の導出を行った。

実験は東北大学原子核理学研究施設で行った。1.2GeV ストレッチャー・ブースターリング (STBリング) に蓄積した電子ビームの周回軌道に、炭素繊維の制動放射発生器 (ラジエータ) を挿入することによって光子ビームを生成させた。光子のエネルギーは、232チャンネルのファイバーシンチレータから成るエネルギー標識化装置 STB Tagger II によって決定した。実験に使用した光子の寝るぎは $E_\gamma = 0.6 \sim 1.15$ GeV、強度は $I_\gamma \sim 20$ MHz である。

生成した光子ビームは空気中を約10m飛行し、GeV- γ 照射室の真空系に入り、ラジエータから17mの地点に設置された厚さ80mmの固体水素・重水素標的に照射する。標的中で生成した η 中間子の同定は、 $\gamma\gamma$ 崩壊チャンネルを CsI 多重 γ 線検出器群 SCISSORS II により測定し、 $\gamma\gamma$ 不変質量解析によって行った。実験に使用した光子エネルギー領域では、終状態に η 中間子が存在する反応チャンネルとして $\gamma N \rightarrow \eta N$ 二体反応の他に、 $\gamma N \rightarrow \eta \pi N$ 三体反応も含まれている。本実験では終状態の η 中間子のみの測定を行っている為、この二つの反応経過を分離しなければならない。そこで二体反応の選別は重心系の運動量分布を利用して行った。

水素標的の実験データから、 $\gamma p \rightarrow \eta p$ 二体反応及び $\gamma p \rightarrow \eta \pi N$ 三体反応に対する角度分布と全断面積を導出した。三体反応に対しては更に、終状態の陽子を同定することによって $\gamma p \rightarrow \eta \pi^0 p$ 反応の全断面積の導出も行った。

$\gamma p \rightarrow \eta p$ 反応断面積の解析結果から、第三共鳴領域で主な寄与をする N^* として GRAAL のデータが支持する三番目の S_{11} 状態の可能性は除去された。 η -MAID の共鳴パラメータセットを用いたアイソバー模型の計算結果は、 $820 < E_\gamma < 880$ MeV 領域に於ける全断面積の測定結果を僅かに過大評価しているが、大域的にみると実験データをよく説明しているという事が確認できた。

$E_\gamma > 930$ MeV 領域では $\gamma p \rightarrow \eta \pi N$ 反応の寄与が非常に重要である。運動量分布に対して位相空間体積の計算を比較することによって $\gamma p \rightarrow \eta \pi N$ あるいは $\gamma p \rightarrow \pi N(1535)S_{11} \rightarrow \eta \pi N$ 反応過程に加えて、 γ

$p \rightarrow \eta \Delta(1232)P_{33} \rightarrow \eta \pi N$ という sequential 崩壊過程の観測を示唆する結果が得られた。これは中間状態に $\Delta^* \rightarrow \Delta(1232)\eta$ という遷移をする共鳴状態が在ることを示唆している。このような Δ^* として $D_{33}(1700)$ が大きな寄与をしているという事が最近の理論計算で指示されている。これらの反応に対する角度分布・全断面積の測定は本研究が初めてのものである。 $\gamma p \rightarrow \eta \pi N$ 反応全断面積は E_γ に依存して線型に増加し、 $E_\gamma \sim 1.15$ GeV に於いて二体反応 $\gamma p \rightarrow \eta p$ の全断面積と同程度の大きさになることが確認された。また $\gamma p \rightarrow \eta \pi^0 p$ 反応と $\gamma p \rightarrow \eta \pi^+ n$ 反応の断面積比は $0.5 \sim 1.0$ という結果が得られた。

重水素標的の実験データからは、 $\gamma d \rightarrow \eta p n$ 反応の角度分布及び全断面積の導出を行った。中性励起の N^* の寄与を調べる為、アイソバー模型との比較を行った。全断面積の実験データには、 $E_\gamma \sim 1010$ MeV ($W \sim 1665$ MeV) 近傍にバンプ構造が観測された。中性子から強く光励起されると考えられる $D_{13}(1675)$ 及び $P_{13}(1720)$ をバックグラウンドとして全断面積のフィッティングを行った。統計学的検定を行った結果、既知の N^* だけで実験データを説明する場合の信頼度は27%であり、データを良く説明するには不十分であると考えられた。一方で $\Gamma \sim 10$ MeV という非常に幅の狭い N^* の存在を仮定し、実験データを説明する場合には統計的信頼度が98%に向上した。従って $E_\gamma \sim 1010$ MeV に非常に鋭い共鳴幅をもつ N^* の存在を示唆する結果が得られたが、これは先の水素標的のデータでは観測されておらず中性子特有の状態であることが結論された。

このように、(1)共鳴幅が狭く、(2)中性子でのみ強く光励起される、という二点を考慮すると我々が角度分布の多重極解析によって、励起された N^* の寄与、及び今回新たに観測された幅の狭い共鳴のスピンのバリエーション J^π を調べた。その結果、幅の狭い共鳴状態は $J^\pi = 1/2^+$ あるいは $J^\pi = 1/2^-$ であるという結論が得られた。統計学的検定の結果、パリティの S_{11} を仮定した方が信頼度が高いという結論が得られたが、決定的な結論を下すまでには至らなかった。この幅の狭い共鳴状態の J^π を確定する為に、バックグラウンドとしての既知の N^* の共鳴パラメータを制度良く決定することが望まれる。

論文審査の結果の要旨

$W=1500\sim 1700$ MeV 領域のバリオン共鳴状態は、近年、陽子の光反応による精密データが得られ等、クォーク・ハドロン核物理分野において活発な研究が行われている。特に、最近発見されたペンタクォーク状態については、中性子の光励起反応においても幅の狭い共鳴として観測されている可能性が示され、中性子光反応の精度の良い測定が強く求められている。本論文は、 $H,D(\gamma,\eta)$ 反応に関して光子エネルギー600 から 1150 MeV にわたり統計精度の高い計測を行い、陽子・中性子の光吸収共鳴状態を、 η 中間子放出チャンネルを通じて詳細に研究することにより、この励起エネルギー領域の S_{11} 、 D_{13} 共鳴等の性質を調べると共に、核子共鳴ペンタクォーク状態の性質について論じたものである。

本論文において、著者は、固体水素・重水素標的を開発し $H,D(\gamma,\eta)$ 反応からの η 中間子の角度分布、励起関数の詳細な解析に耐え得るような高統計の実験データの取得を目指した。原子核理学研究施設で行われた実験においては、1.2 GeV STB リングに設置されたガンマ線ビームコース、光子標識化装置、固体水素標的、CsI 多重検出器群等、必要な実験装置と方法の開発を行い、統計精度の高い $H,D(\gamma,\eta)$ 反応データの計測に成功した。

測定された $H(\gamma,\eta)$ 反応断面積に関しては、既報告のデータ及びモデル計算との詳細な比較検討がなされ、その結果、このエネルギー領域の陽子励起関数は、 $S_{11}(1535)$ と $S_{11}(1650)$ の二つの共鳴の干渉により良く理解することが可能で、これ以外の S_{11} 共鳴は必要とされないことが明らかになった。また、本実験により初めて測定された $D(\gamma,\eta)$ 反応データに関しては、入射ガンマ線が、重陽子中で運動している陽子及び中性子と独立に反応とするインパルス近似を用い、アイソバー模型に基づいた解析がなされた。その結果、狭い幅の共鳴が $W=1670$ MeV に中性子励起共鳴として存在することを明確にした。この共鳴は、幅が 10 MeV 以下と非常に小さいため通常のクォーク模型で予想される状態ではないこと、陽子励起では全く観測されないこと、更に、角度分布の解析は、共鳴のスピン・パリティを $1/2^+$ 或いは $1/2^-$ のいずれとしても矛盾しないことから、最近 $S=1$ 状態に発見された $\Theta^+(1540)$ と同じ、SU(3) 反 10 重項分類に属するペンタクォーク状態であると同定された。また、中性子励起関数に関しては、陽子励起に見られた $S_{11}(1535)$ と $S_{11}(1650)$ 共鳴以外に、新たに同定されたペンタクォーク状態のみならず、 $D_{13}(1675)$ 共鳴が無視できない役割を担っていることを指摘した。これらは、詳細な定量的検討に基づき導かれた帰結であり、このエネルギー領域の核子共鳴状態の理解の進展に大きく貢献した。

このように本論文は、 $H,D(\gamma,\eta)$ 反応を光子エネルギー1.15 GeV までに亘り高統計で測定した初めての実験であり、従来のクォーク模型からはエキゾチックな状態と考えられるペンタクォーク状態を中性子励起共鳴の中に確定するとともに、これまで知られていなかった中性子励起共鳴の性質について新たな重要な知見をもたらしている。以上のことは、著者が自立して研究活動を行うのに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。従って、中林匡提出の論文は、博士(理学)の学位論文として合格と認める。