

様々な中間子光生成反応実験による、非摂動 QCD の枠組みでのバリオン共鳴の研究
Studies of baryon resonances in the non-perturbative QCD by various meson photoproductions
at the SPring-8/LEPS facility

研究代表者	岐阜大学	住浜 水季	Gifu University	Mizuki Sumihama
協同研究者	大阪大学	堀田 智明	Osaka university	Tomoaki Hotta
	大阪大学	依田 哲彦	Osaka university	Tetsuhiko Yorita
	大阪大学	村松 憲仁	Osaka university	Norihito Muramatsu
	大阪大学	中野 貴志	Osaka university	Takashi Nakano
	オハイオ大学	Kenneth Hicks	Ohio University	

Study of baryon excited states (resonances) is important and interesting to understand a quark picture of baryons. The constituent quark model in which a baryon consists of three constituent quarks has been very successful in describing the ground state of the flavor SU(3) octet and decuplet baryons. However, there are still many missing baryon resonances, especially around 2000 MeV. To explain such high-mass resonances, a modification of the constituent quark model or a new dynamics to describe the inside structure of baryons may be required. The search of high-mass resonances by using photoproduction of various mesons will provide important information on a quark structure of baryons.

The $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ and $\gamma p \rightarrow \eta p$ reactions have been studied by using linearly polarized photons at the SPring-8/LEPS facility with the photon energy of 1.5–3.0 GeV. The large bump structures were observed above 2 GeV in both η and π^0 photoproduction. It is inferred that this unique structure in η photoproduction is due to a baryon resonance with a large $s\bar{s}$ component which strongly couples to the ηN channel, and the bump structure in π^0 photoproduction is due to a high-spin resonance. These data will be useful to establish new baryon resonances and give a new insight to understand the quark structure of baryons.

研究目的

メソン粒子は2つの、バリオン粒子は3つの構成子クォークでできているとする‘構成子クォークモデル’は、アップ (u) , ダウン (d) , ストレンジ (s) クォークからなる基底状態のバリオン・メソンを非常によく説明している。構成子クォークモデルはハドロン粒子の特性を最も簡単に

記述するために導入された描像で、幾つかの粒子の質量や磁気モーメントで、その予言値と実験値の良好一致を示している。

しかし構成子クォークとは、ハドロンの中に閉じ込められた‘裸の’クォークに、仮想グルーオンや、クォーク-反クォーク対がまとっている状態であり、その構成子クォークを基本的な素粒子

とする描像に限界が見えている。例えば、構成子クォークモデルで予言された粒子のうち 1700 MeV 以下の質量をもつ共鳴（励起）状態については、実験で発見され、その性質（質量、幅、スピン、カップリングなど）が明らかになっているが、1700 MeV 以上の重たい励起状態はほとんど発見されていない。1700 MeV 以上というと、陽子や中性子の約 2 倍の質量であり、3 つの u, d クォークのみ (uuu, uud, udd, ddd) で構成されるには重いと考えられる。

このような重たい励起状態も含め、ハドロンの内部構造を正しく記述するには構成子クォークを基本粒子とした描像は適当ではなく、それにまつている仮想グルーオンやクォーク-反クォーク対の役割が無視できない、あるいは、より正しくハドロンを記述する新しいクォーク描像が要求されると考える。

そこで、ハドロンのクォーク描像をより正確に理解する上で、重たい励起状態を実験的に解明することは重要である。その内部構造によっては、特異な性質を示し、たとえば、ある特定の反応機構で見えやすい、見えにくいと言ったことからその内部構造に関する情報が得られるのではないかと考える。そこで、1 つの反応だけでなく、様々な反応を同じ実験で測定し、それらを比較検討することでより充実した情報を引き出すことが本研究の狙いである。

本研究では、光子ビームを用いた π^0 , η , η' , ω , ρ , ϕ 中間子生成反応を用い、未だ発見されていないバリオンを 2000 MeV 前後の高いエネルギー領域で探索し、ハドロンのクォーク描像のより深い理解へと繋げることを目的とする。この目的のために、光子ビームのエネルギーをこれまでの、2.4 GeV から 3.0 GeV にまで引き上げ比較的観測しやすい π^0 と η 中間子生成反応を調べた。さらに、標的周りに新たにプラスチックシンチレーション

カウンターを設置することで、バックグラウンドレベルをどの程度下げられるか検討した。以上 2 点について報告したい。

研究経過と考察

(1) 実験方法について

本研究は、西播磨の大型放射光施設スプリングエイトにて行われた。この実験施設は 8 GeV の電子ビームを用いた放射光施設である。その中の LEPS ビームラインでは、8 GeV の電子ビームに向けてレーザーを入射し、逆コンプトン散乱にて得られた高エネルギー・高偏極光子ビームを用いて基礎物理の研究が行われている。光子ビームのエネルギーは 1.5 GeV - 2.4 GeV であったが、最大値を 3 GeV まで上げた。このエネルギーはバリオンの質量に換算すると、1.9 GeV - 2.55 GeV であり、重たいバリオンの探索実験に適している。

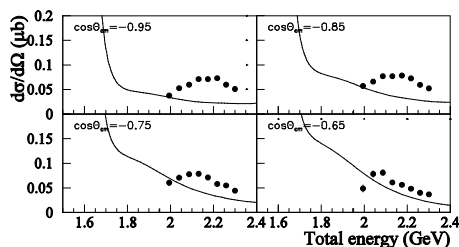
本実験では直線偏極光子ビームを液体水素標的（陽子標的）に照射し、 $\gamma p \rightarrow px$ (x は π^0 , η , η' , ω , ρ , ϕ 中間子) 反応を測定する。前方に散乱された陽子を磁気スペクトロメーターで検出する。陽子のエネルギー・運動量と、光子ビームのエネルギーより質量欠損を計算し、残りの粒子を特定する。以上の方法で中間子光生成反応を識別して、微分断面積と空間的非対称度 (photon asymmetry) の測定を行った。

このような方法では、観測したい中間子生成反応以外の多重 π 中間子反応 ($\gamma p \rightarrow p\pi\pi$, $p\pi\pi\pi$, $p\pi\pi\pi\pi$) も混じる。そこで、標的周囲にプラスチックカウンターを設置し、荷電粒子 (π^+ または π^-) を検出することで、崩壊粒子に荷電粒子を含む反応と、中性粒子のみを含む反応とを識別する。この方法でよりバックグラウンドの少ない反応識別を行うことができた。

(2) η 中間子光生成反応

これまでに得られた実験データの解析を行いバリオンの励起状態に関する情報が得られることを

確認した。 η 中間子光生成反応の測定を行い、バリオン粒子と考えられる構造を 2150MeV に観測した。その反応微分断面積の結果を Fig.1 に示す。



横軸は全エネルギー（バリオン励起状態の質量に

Fig. 1. Differential cross sections for η photoproduction as a function of the total energy. Closed plots are data from the present study. (サイズ 4cm x 6.5cm)

当たる) 黒い点が本研究の実験結果である。どの角度領域でも、はっきりと膨らみが見られることがわかる。黒線は 2150MeV 近傍に粒子がない時の良く知られた機構のみを考慮した理論計算 (SAID) である。この理論計算からもわかるように、このような大きな膨らみは、共鳴以外の機構で説明するのは難しい。そこに何か新しい粒子 (励起状態) が存在すると解釈できる。このバリオン粒子によると考えられる構造は、同時に測定された π^0 中間子、 ω 中間子、 η' 中間子生成反応では観測されなかった。 η 中間子はストレンジー反ストレンジクォーク対を多く含む最も軽い中間子である。その η 中間子生成反応でのみ良く観測されており (強くカップルする)、他の反応では見えないこと、2150MeV と非常に重たい粒子であることから、u, d 構成子クォークのほかに、さらに重たいストレンジー反ストレンジクォーク対を含む粒子である可能性が高い。このような粒子の存在は、構成子クォークモデルの修正・拡張、又は新しいクォーク描像の発展に大いに役立つと考える。

さらに、微分断面積だけでなく photon

asymmetry という物理量の測定は、この粒子の特性を知る上で重要である。これは直線偏極光子ビームの偏極面に対する生成面の空間的非対称度を表す量である。反応断面積の角度分布と、photon asymmetry から、バリオン共鳴のスピンのみならず、反応機構に関する情報を得ることができる。

この測定はバックグラウンドを極力減らさなければ、正しく得ることができない。 η 中間子は、その約 3 分の 2 が中性粒子に崩壊するので、標的を囲むようにプラスチックシンチレーターを置き、荷電粒子が来ないことを条件に実験を行うことで、バックグラウンドを減らし、 η 中間子を測定することができる。この条件のもと得られたスペクトルでは、S/N が向上し、Fig. 2 に示すように、 η 中間子の photon asymmetry を観測することができた。完全にバックグラウンドを取り除いたわけではないので、今後、残ったバックグラウンドによる寄与を考慮し、角度・エネルギー依存性を求める必要があるが、この実験結果から η 中間子の photon asymmetry は符号がプラスで、大きな絶対値を持つことが分かった。

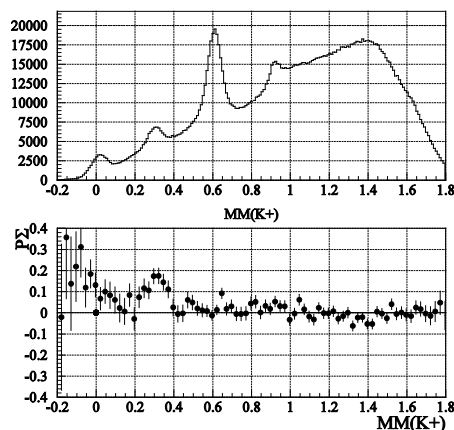


Fig. 2. Missing mass spectrum of protons (top) and photon asymmetries (bottom). (サイズ 6.5cm x 6.5cm)

(3) π^0 中間子光生成反応

最大エネルギーをこれまでの 2.4 GeV から 3 GeV 上げて実験を行った結果、 π^0 中間子光生成反応にもバリオン粒子と考えられる構造を 2400 MeV 近傍に観測した。得られた微分断面積を Fig. 3 に示

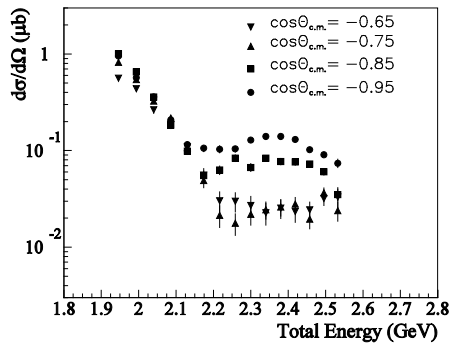


Fig. 3. Differential cross sections for π^0 photoproduction as a function of the total energy. (サイズ 5cm x 6.5cm)

す。これまでの 2.4 GeV までの実験データから、微分断面積が 2.1 GeV まで急激に減少していること、2.1 GeV 以降でその減少が終わっていることが分かっていた。このような非常に強いエネルギー依存性は、これまでの理論では説明できず、その要因が明らかではなかった。さらに、photon asymmetry でもこれまでの理論では説明できない強い角度依存性が観測された。強い角度依存は高スピンの共鳴状態ではしか作れないので、高スピンの粒子の存在が示唆されたことになると考えた。

そこで、さらに光子ビームの最大エネルギーを 3 GeV 上げて実験を行い、データを得ることでこの未解決の構造に関する新たな情報が得られると考えた。そして、Fig 3 のような構造を発見した。

2.1 GeV までの急激な減少については、まだ分かっていないが、2.1 GeV 以上に観測された構造はバリオン共鳴によるものと考えられる。バリオン共鳴であるとすると、2400 MeV と非常に重たい粒子

であり、このよう粒子が、u, d 構成子クォークのみで説明できるのかが、今後の論点になるであろう。

また、2.1 GeV 以上で微分断面積の角度依存をみると、後方ほど大きくなっている、つまり後方ピークを作っていることがわかる。近年、数 GeV のエネルギー領域で、様々な中間子生成反応の実験が世界的に行われ、幾つかの反応で前方ピークが観測されている。これは、t-チャンネルの中間子交換機構の寄与が 2 GeV 以上のエネルギー領域で支配的になるからと考えられている。一方で後方でのデータは少なく、このように明らかに後方ピークが観測されたのは初めてである。u-channel の核子交換機構による寄与が支配的になっているとも考えられる。今後の理論的解明に期待したい。

まとめと展望

これまでの研究により中間子光生成反応の実験は、重たいバリオン粒子の探索に有益であることがわかった。 η 、 π^0 中間子光生成反応の微分断面積では膨らみ構造が観測され、これは未だ確立されていない共鳴状態に依るものであると考えられる。また、標的の周りにプラスチックシンチレーターを設置したことでバックグラウンドとシグナルの比が改善し photon asymmetry も測定可能であることがわかった。今後解析を進め新しいバリオン共鳴の確立に繋げたい。さらに、他の η' 、 ω 、 ρ 、 ϕ 中間子生成反応についても、同様に解析をすすめ、バリオン共鳴の発見に繋がる成果を挙げたい。それには、プラスチックシンチレーターだけでなく、粒子識別のできるシリカエアロジェルカウンタやカロリメーターを設置することも考えている。

2000 MeV 近傍のエネルギー領域では、これまでに確立された励起状態がほとんどない。このような重たい励起状態の探索実験をして、新たな励起状態を確立することは、バリオンの内部構造を理

解するために非常に重要である。より綿密にバリオンの内部構造を記述する構成子クォークモデルに代わる新しい理論が生まれるかもしれないからである。本研究ではそのことを示せた。今後、実験だけでなく理論研究も進められることを期待する。

研究発表

口頭発表

M. Sumihama, *et al.*, ‘Baryon resonances’, HIDA workshop, 28-30, November 2009, Takayama, Japan

M. Sumihama, *et al.*, ‘Backward-meson photoproduction at SPring-8/LEPS’ Baryon’ 10 7-11, December, 2010, Osaka, Japan

M. Sumihama, *et al.*, ‘Status and plan of LEPS’, 28-1, February, March, 2011, RIKEN, Japan

誌上発表

M. Sumihama, *et al.*, (LEPS Collaboration), Physical Review C80, 052201(R) (2009).