

(論文内容の要旨)

本申請論文は $\Lambda(1405)$ と $\Sigma^0(1385)$ の光生成実験とその結果について述べたものである。 $\Lambda(1405)$ と $\Sigma^0(1385)$ はともに u, d, s クォークを含むハイペロン共鳴であるが、その内部構造の理解は大きく異なっている。 $\Sigma^0(1385)$ は3つのクォークから構成されていることが確立しているのに対し、 $\Lambda(1405)$ は3クォーク状態なのか、メソン・バリオン分子状態なのか、40年もの長い間議論が続いてきた。また、 $\Lambda(1405)$ はその不変質量分布の形が反応の初状態や終状態によって変化すると報告されている等、質量分布のピーク位置や幅などの基本的な情報にも未だ議論が残っており、より高精度の実験データが求められていた。

申請者は、SPring-8 逆コンプトン γ 線 ビームラインからの 1.5-2.4 GeV の高エネルギー γ 線を用いて、 $\Lambda(1405)$ の不変質量分布と、 $\Lambda(1405)$ 、 $\Sigma^0(1385)$ 生成の微分断面積を測定した。 $\Lambda(1405)$ の光生成の断面積は世界で初めての測定データである。 $\Lambda(1405)$ と $\Sigma^0(1385)$ の質量差はそれぞれの自然幅に比べて小さいため $\gamma p \rightarrow K^+ X$ 反応のミッシングマス分布からはこれらを分離することはできない。そこで、本研究では新たに製作した標的內蔵型のタイムプロジェクトンチェンバーを用い、ハイペロン共鳴の崩壊で生じる粒子を測定することで $\Lambda(1405)$ と $\Sigma^0(1385)$ とを区別した。標的には CH_2 と炭素を用い、得られたスペクトルの差から CH_2 標的中の水素からの寄与を抽出した。終状態が $K^+ \Lambda \pi^0$ のイベントから $\Sigma^0(1385)$ 生成反応の収量を計測し、 $\Sigma^0(1385) \rightarrow \Sigma^\pm \pi^\mp$ 崩壊の分岐比とシミュレーションから求めた検出器のアクセプタンスとを用いて、 $\Lambda(1405) \rightarrow \Sigma^\pm \pi^\mp$ モードへの混入量を見積もり、 $\Lambda(1405)$ と $\Sigma^0(1385)$ の生成比を測定した。生成比は二つの光子エネルギー領域 $1.5 < E_\gamma < 2.0$ GeV、 $2.0 < E_\gamma < 2.4$ GeV で、それぞれ、 $\Lambda(1405)/\Sigma^0(1385) \sim 0.5$ 、 0.07 と得られた。

これらの生成比と、液体水素標的を用いた測定データの $\gamma p \rightarrow K^+ X$ 反応のミッシングマス分布から $\Lambda(1405)$ と $\Sigma^0(1385)$ の生成微分断面積の絶対値を得た。生成微分断面積は、重心系での K^+ の散乱角度 $0.8 < \cos\Theta < 1.0$ 、光子エネルギー $1.5 < E_\gamma < 2.0$ GeV、 $2.0 < E_\gamma < 2.4$ GeV の二つの領域で測定した。 $\Sigma^0(1385)$ の生成断面積は $1.5 < E_\gamma < 2.0$ GeV で $d\sigma/d(\cos\Theta) \sim 0.80 \mu\text{b}$ 、 $2.0 < E_\gamma < 2.4$ GeV で $\sim 0.87 \mu\text{b}$ と得られた。これは有効ラグランジアンを用いた理論予想と一致している。一方、 $\Lambda(1405)$ の生成断面積は $1.5 < E_\gamma < 2.0$ GeV で $0.43 \mu\text{b}$ 、 $2.0 < E_\gamma < 2.4$ GeV では 95% の信頼度で $0.19 \mu\text{b}$ 以下となった。このように、 $\Lambda(1405)$ の生成断面積は $\Sigma^0(1385)$ に比べて高エネルギー側で大きく減少していることを観測した。これは、二つのハイペロン共鳴の生成メカニズムや形状因子が大きく異なることを示している。特に、 $\Lambda(1405)$ の生成断面積の減少は運動量移行量の違いからは説明できず、 $\Lambda(1405)$ の生成には他の特殊な反応メカニズムが寄与していることを示唆している。

また、 Σ 粒子と π 中間子との不変質量から $\Lambda(1405)$ の質量分布を測定し、 Σ 粒子と π 中間子の電荷の組み合わせ ($\Sigma^- \pi^+$ 若しくは、 $\Sigma^+ \pi^-$) によって不変質量分布の形が大きく異なることを確認した。これは Σ 粒子と π 中間子の散乱振幅のアイソスピン 1 と 0 の項の間の干渉の効果が非常に強い事を示している。また、得られた不変質量分布の形は過去の測定データとも異なっており、アイソスピン干渉項が、 $\Lambda(1405)$ と π 中間子の間の角度に依存していることが明らかになった。これらの新しいデータの解釈については理論家による検討が現在すすんでいる。

(論文審査の結果の要旨)

本申請論文は、SPring-8 の逆コンプトン γ 線ビームを用いて行われた $\Lambda(1405)$ と $\Sigma^0(1385)$ の光生成実験に関するものである。 $\Lambda(1405)$ というハイペロンの励起状態は古くから、通常の 3 クォーク状態という解釈がうまくいかず、K-p などのメソンとバリオンの束縛状態かもしれないといわれてきた。この粒子の構造は、最近話題になっている K 中間子原子核の存在とも密接に関係しており注目されている。

$\Lambda(1405)$ を同定するためには、missing mass を測定するだけでは不十分で、その崩壊粒子である Σ^+ と π^- を測定する必要がある。そのために申請者は Time Projection Chamber という 3 次元の飛跡検出器を作り上げた。これは技術的にも高度なものであり、しかも標的臓型は世界でも初めての試みである。フラッシュ ADC を含む信号処理回路を含めてすべてを設計製作し、長期にわたる実験で安定に動作させたことは、申請者の実験技術のレベルの高さをしめすものとして評価に値する。

論文では Time Projection Chamber の性能などをふくめ実験装置について詳述されており、その後にデータ解析とその結果が述べられている。データ解析では、前方の磁気スペクトロメーターと標的臓型 Time Projection Chamber のデータから終状態が $K+\Lambda\pi$ と $K+\Sigma\pi$ の事象を同定することで、 $\Lambda(1405)$ と $\Sigma^0(1385)$ の生成を分離して同定することに成功している。光生成反応で $\Lambda(1405)$ を分離して同定したのははじめてのことである。

その結果の第一のものは、 $\Lambda(1405)$ の不変質量分布が $\Sigma+\pi^-$ と $\Sigma-\pi+$ 崩壊で大きく異なることを見出したことである。これは $I=0$ と $I=1$ の振幅の干渉項が非常に大きいことを示す新しい発見であり、注目すべき結果である。さらに $\Sigma^0(1385)$ も同時に測定したことで、 $\Lambda(1405)$ へのその振幅の寄与も正確に補正でき、観測された違いにくらべてその寄与が無視できるほど小さいことも明らかにした。

第二は、 $\Lambda(1405)$ と $\Sigma^0(1385)$ の光生成断面積とその比をはじめて求めたことである。それによると、閾値にちかい低エネルギー領域 (1.5~2.0 GeV) では両者の断面積もそう大きく変わらず、ともに理論予測に近い。しかしより高いエネルギー (2.0~2.4 GeV) では $\Lambda(1405)$ の断面積だけが極めて小さくなっていることを明らかにした。このことは $\Lambda(1405)$ の構造か光生成反応メカニズムに特異性があることを示しているように思われる。

これらの結果はいずれも $\Lambda(1405)$ が通常のバリオンと異なるという点についての新しい知見を与えたものとして高く評価できる。またこのデータは理論家にも注目されてさまざまな理論的検討が現在行われている。このようにこの申請論文は、 $\Lambda(1405)$ の測定を通じて最近注目されているエキゾチックハドロンと QCD の物理に対して、新たな知見を与えたといえる。

なおこの論文の主要な部分は Physical Review 誌に公表されている。

よって本申請論文は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容と関連研究分野に関する試問を行った結果、合格と認めた。