

論文の内容の要旨

論文題目 Search for Θ^+ pentaquark via the $\pi^-p \rightarrow K^-X$ reaction using 1.92 GeV/c π beam at J-PARC

(J-PARC における 1.92 GeV/c π 中間子ビームを用いた $\pi^-p \rightarrow K^-X$ 反応によるペンタクォーク Θ^+ 探索)

氏名 高橋智則

強い相互作用の基礎理論である量子色力学は、低エネルギー領域における多様な現象については直接計算が難しく、ハドロンの質量や量子数を理解するためにクォークモデルや有効理論が用いられてきた。クォークモデルではハドロンを構成する価クォークの数に制限はなく、現実に観測されているバリオン (qqq)、メソン ($q\bar{q}$) 以外にテトラクォーク ($qq\bar{q}\bar{q}$)、ペンタクォーク ($qqqq\bar{q}$)、ダイバリオン ($qqqqqq$)、価グルーオンで構成されるグルーボール (gg, ggg) やハイブリッド ($q\bar{q}g, qq\bar{q}g$) などが存在する可能性を否定しない。これらエキゾチックハドロンと呼ばれる粒子の探索はクォークの閉じ込めや強い相互作用の性質を理解するのに重要である。

Diakonov らはカイラルソリトンクォークモデルに基づいて、バリオン反 10 重項のメンバーとして $uudds$ のクォーク構成をもつとされるペンタクォーク Θ^+ が質量約 1530 MeV/ c^2 、幅 15 MeV/ c^2 以下で存在する可能性を示し、2003 年に LEPS グループによってその存在が報告された。LEPS の報告後に多くの実験でその存在が確認されたが、一方で存在に否定的な結果を示す実験報告も行われ、状況は混沌としており、様々な反応機構を使って Θ^+ の存否を確認するのが重要である。また、 Θ^+ が存在するならばその特徴として質量幅が狭いことが挙げられ、これまでの実験や理論研究から Θ^+ の幅は 1 MeV/ c^2 以下とされており、幅の測定は量子数の決定とともにエキゾチックハドロンの構造などハドロン物理に対する新たな知見をもたらすことが期待される。

Θ^+ を生成するにあたり、高エネルギーの実験では通常の高エネルギーに比べて生成断面積が抑制されることが Titov らにより示唆されており、 Θ^+ の生成閾値近傍の低エネルギーの実験が適している。これまでに行われた低エネルギーの実験からの結論として、CLAS グループが行った光入射反応 $\gamma p \rightarrow \bar{K}^0 K^0 \Theta^+$ と、中間子ビームを使った 2 つの KEK の実験 (KEK-PS E552 の $\pi^-p \rightarrow K^- \Theta^+$ および KEK-PS E559 の $K^+p \rightarrow \pi^+ \Theta^+$) において Θ^+ の生成が確認できなかったことから核子 (N)- K^* - Θ^+ の結合定数 $g_{NK^*\Theta}$ は $g_{NK^*\Theta} \sim 0$ とされている。また、LEPS、CLAS で調べられた $\gamma d \rightarrow \Theta^+ K^- p$ の反応の実験結果に関して、LEPS が肯定的な一方で CLAS は否定的であることから両実験の検出器のアクセプタンスの違いを元に Θ^+ 生成は角度依存性が強いことが議論されている。

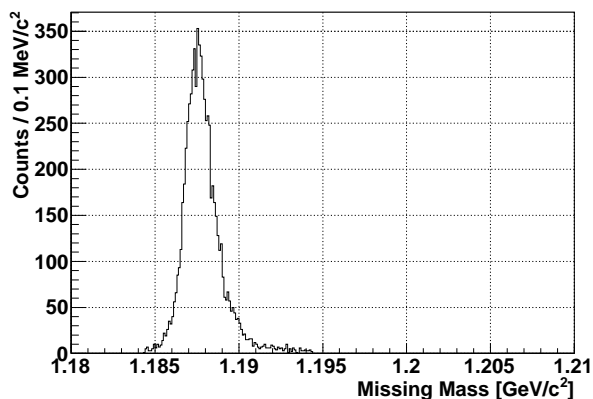


Figure 1: $p(\pi^+, K^+)X$ 反応による Σ^+ 質量分布。

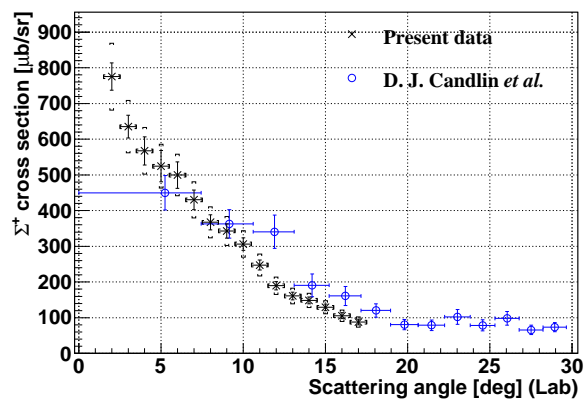


Figure 2: Σ^+ 反応の生成微分断面積の文献 (青) との比較。黒*印が実験データ。

中間子ビームを使った実験のうちの一つ、KEK-PS E522 実験ではポリエチレンを標的とした $\pi^- p \rightarrow K^- X$ 反応でビーム運動量 1.92 GeV/c のときのミッシングマス分布中に統計的有意度 2.6σ でバンプ構造が観測された。我々は KEK-PS E522 以上の高統計・高分解能で $\pi^- p \rightarrow K^- X$ 反応のミッシングマス分布測定を行い、この反応での Θ^+ の存否を確認することを目的とし、J-PARC 50 GeV 陽子シンクロトロンハドロン実験施設 K1.8 ビームラインにおいて、J-PARC E19 実験を行った。なお、E19 実験は J-PARC ハドロン実験施設における最初の物理実験である。

2010 年 10–11 月に行われたデータ収集では質量厚さ 0.86 g/cm² の液体水素標的に運動量 1.92 GeV/c の π^- ビームを 7.8×10^{10} 個照射した。ビームと散乱粒子の運動量解析はそれぞれ $\Delta p/p \sim 10^{-3}$ の高分解能をもつ K1.8 ビームスペクトロメータおよび SKS を用いた。スペクトロメータに使われる検出器群は J-PARC の $10^7/\text{spill}$ の大強度二次粒子ビームに対応可能なように開発が行われた。ただし、J-PARC 50 GeV メインリングからの遅い取出しは、稼動間も無いためビームスピルの時間構造が悪く、この時点での duty factor は $\sim 16\%$ であり、ワイヤーチェンバー保護のためにデータ取得はビーム強度を $\sim 1 \text{ M } \pi/\text{spill}$ に制限して行われた。

両スペクトロメータのキャリブレーションのために運動量 $\sim 1.37 \text{ GeV}/c$ の π^\pm ビームを用いて $\pi^\pm p \rightarrow K^\pm \Sigma^\pm$ 反応による Σ^\pm ハイペロン生成のデータを取得し、また、ビームスペクトロメータと SKS に同じ運動量のビームを通過させるビームスルーのデータについても運動量 0.75 – 0.95 GeV/c の範囲で取得した。キャリブレーションの後、 Σ^\pm のミッシングマス分解能として $1.84 \pm 0.02 \text{ MeV}/c^2$ (FWHM) が得られ、質量決定の正確度を $1.7 \text{ MeV}/c^2$ 、 Θ^+ に対しての分解能を $1.7 \pm 0.3 \text{ MeV}/c^2$ (FWHM) と推定した。例として $p(\pi^+, K^+)X$ 反応による Σ^+ 質量分布を Fig. 1 に示す。

反応断面積を計算するために検出器の検出効率や解析効率を求め、ビーム π 中間子、散乱 K 中間子および全体の解析効率はそれぞれ $83.6 \pm 0.2\%$ 、 $49.2 \pm 2.3\%$ 、 $41.1 \pm 2.2\%$ と見積った。SKS の立体角を Geant4 によるモンテカルロシミュレーションで見積り、本実験で得られた Σ^\pm ハイペロンの生成微分断面積がエラーの範囲内で文献値を再現できることを確認した。 Σ^+ の生成微分断面積に関して Fig. 2 に示す。

本実験で得られたビーム運動量 1.92 GeV/c での $\pi^- p \rightarrow K^- X$ 反応のミッシングマス分布を Fig. 3 の黒 + 印として示す。Figure 3 には Geant4 モンテカルロシミュレーションで見積った 4 種類のバックグラウンド過程およびそれらの和の寄与も一緒に示す。実験室系での散乱角 $2^\circ - 18^\circ$ に対して、 $\pi^- p \rightarrow K^- X$ 反応の角度平均をした微分断面積スペクトルは Fig. 4 のとおりであった。1.51–1.55

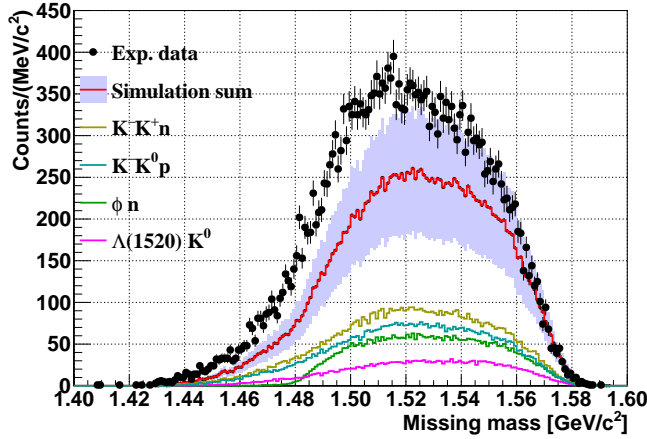


Figure 3: ビーム運動量 1.92 GeV/c での $\pi^-p \rightarrow K^-X$ 反応のミッシングマス分布 (黒 + 印)。Geant4 モンテカルロシミュレーションで見積ったバックグラウンド過程の寄与も一緒に示す。

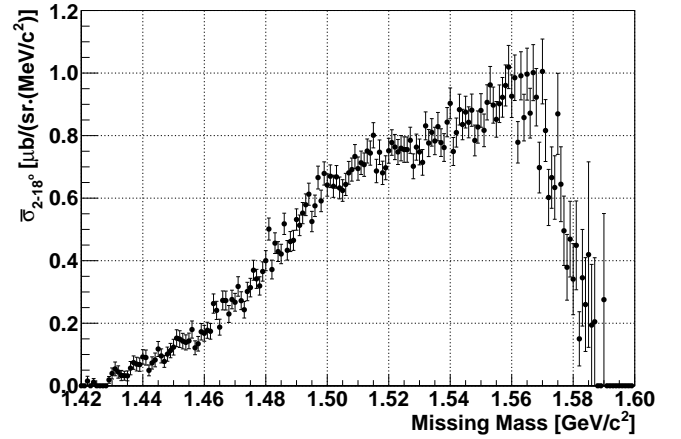


Figure 4: 実験室系散乱角 $2^\circ - 18^\circ$ で角度平均した $\pi^-p \rightarrow K^-X$ 反応のミッシングマス分布。

GeV/c² の領域には Θ^+ とされるピーク構造は見られなかった。

微分断面積分布を 3 次関数のバックグラウンドと質量分解能に相当する FWHM 1.7 MeV/c² のガウシアンでフィットした。フィットの一例を Fig. 5(左) に示す。バックグラウンドの分を差し引いたスペクトルを Fig. 5(右) に示す。このスペクトルの各ビンに対して微分断面積の上限値 (90% C.L.) を求めると、Fig.5(右) の実線が描け、1.50–1.56 GeV/c² の質量領域で 0.27 $\mu\text{b}/\text{sr}$ の上限値を得た。

— 既に E19 が公表している解析結果と今回の解析の違い —

K1.8 スペクトロメータの運動量分解能の見積りに関して設計値が得られていると仮定していたのに対して、今回の解析ではより現実的に設計値以外の値も取り得ることを許して両スペクトロメータの分解能を見積った結果、 Σ^\pm に対して K1.8 スペクトロメータの分解能は $\Delta p_{\text{Beam}}/p = 4.5 \times 10^{-4} \rightarrow 9.3 \times 10^{-4}$ 、SKS の分解能は $\Delta p_{\text{SKS}}/p = 3.2 \times 10^{-3} \rightarrow 2.1 \times 10^{-3}$ を得た。また、ビーム π^- のトラック解析を改善することに重点を置き、ビーム π^- 、散乱 K^- 解析効率はそれぞれ 68.5 \rightarrow 83.6%、56.0 \rightarrow 49.2% となり、全体の解析効率は 38.4 \rightarrow 41.1% と改善した。

— 他の実験との比較 —

ハドロン相互作用に関する有効ラグランジアンを使った理論計算の枠組みでは、 Θ^+ の生成断面積は Θ^+ の質量幅 Γ_Θ に比例する。メソンビームによる反応のダイアグラムにおける不確定要素には Θ^+ のスピン・パリティ ($J^P = 1/2^\pm, 3/2^\pm$)、 $NK\Theta^+$ の結合定数の大きさ ($g_{NK\Theta} \propto \Gamma_\Theta^{1/2}$) および結合のスキーム (pseudoscalar (PS), pseudovector (PV))、form factor のタイプ (static type F_s , covariant type F_c) があり、 J^P 、PS/PV、 F_c/F_s の組み合わせに応じて 12 通りの可能性がある。兵藤らの計算した $\Gamma_\Theta = 1 \text{ MeV}/c^2$ に対する断面積を元に、 π -induced 反応の本実験および K -induced 反応の KEK-PS E559 で得られた Θ^+ の生成微分断面積の上限値を Θ^+ の質量幅の上限値に換算し、 Θ^+ の存在を報告している DIANA との比較を行った。

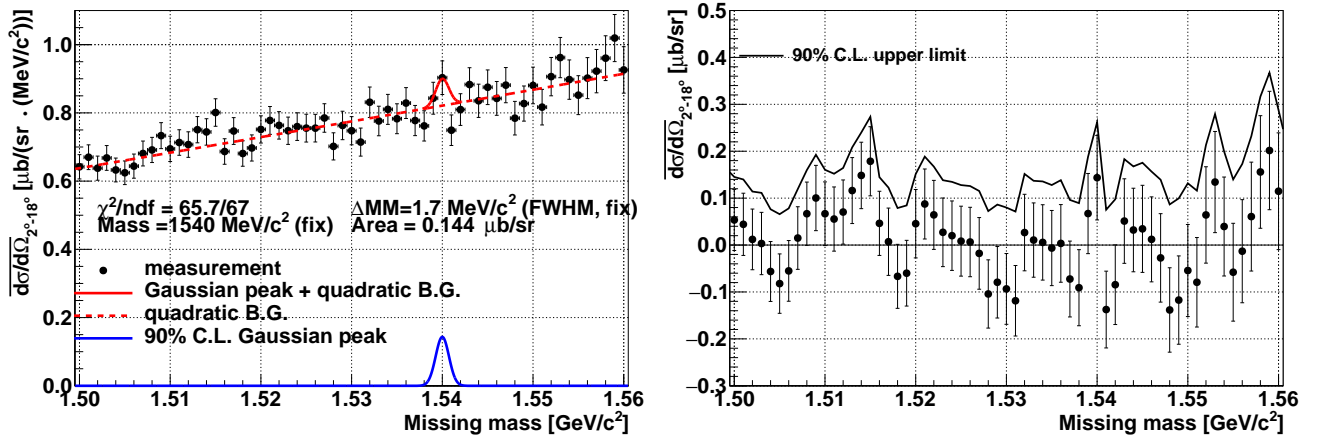


Figure 5: (左): 実験室系散乱角 2° – 18° で角度平均した $\pi^-p \rightarrow K^-X$ 反応の微分断面積 (*印)。赤線は質量分解能 $1.7 \text{ MeV}/c^2$ (FWHM) のガウシアンが2次関数の形をしたバックグラウンド上にあると仮定してフィットしたもの。青線は90% C.L. 上限値に相当する幅 $1.7 \text{ MeV}/c^2$ のピーク。(右): 3次関数のバックグラウンドを差し引いた Θ^+ 生成微分断面積 (*印) とその上限値 (実線, 90% C.L.)。

4通りのスピン・パリティに対して幅の上限値が最大となる coupling scheme と form factor の組み合わせを選んだ場合、 $J^P = 1/2^+, 1/2^-, 3/2^+, 3/2^-$ に対しての Γ_{Θ} の上限値 (90% C.L.) として、 π -induced のデータからは 0.72、3.1、0.060、0.38 MeV、 K -induced のデータからは 1.1、10、0.32、0.0012 MeV、 π -induced と K -induced を組合せた場合 0.41、2.5、0.060、0.0012 MeV を得た。 $J^P = 3/2^{\pm}$ に対しての理論計算は断面積が大きくなるにもかかわらず実験で Θ^+ が観測できてないことや、 π -induced のデータおよび K -induced のデータから推定された幅の上限値が $0.1 \text{ MeV}/c^2$ 以下と狭く、DIANA グループが $K^+Xe \rightarrow K_s^0 p Xe'$ 反応の $K_s^0 p$ の不変質量で測定した Θ^+ の質量幅 $0.36 \pm 0.11 \text{ MeV}$ とも矛盾するためスピン $3/2$ の可能性は除外されると考えられる。 $J^P = 1/2^+$ のときの Γ_{Θ} の上限値 (90% C.L.) は、本実験単独のデータでは 0.72 MeV、 $1/2^-$ のとき 3.1 MeV、KEK-PS E559 のデータと併せると $J^P = 1/2^+$ のとき 0.50 MeV、 $1/2^-$ のとき 2.5 MeV を得た。なお、これは Θ^+ のスピン・パリティが $1/2^+$ であれば Belle が報告した 0.64 MeV の上限値を更新する値である。

メソンビーム入射による反応と光入射反応を比較するために、兵藤らと同じ枠組みで計算された Nam らの理論計算を元に LEPS グループが $\gamma d \rightarrow K^- \Theta^+$ 光入射反応で測定した $12 \text{ nb}/\text{sr}$ を質量幅に換算した。この計算は、重水素中の核子のフェルミ運動量分布については分布の 99% までを考慮して $0\text{--}125 \text{ MeV}/c$ 、向きは入射光子に平行・反平行の2通りについて行った。LEPS のデータに対応する幅の下限値はスピン・パリティ $1/2^+$ に対して $\sim 20\text{--}30 \text{ MeV}$ 、 $1/2^-$ に対して $\sim 150 \text{ MeV}$ となり、LEPS によって測定されたスペクトルよりも非常に大きく現実的ではない。スピン・パリティ $3/2^+$ に対しては $\sim 2.3 \text{ MeV}$ 、 $3/2^-$ に対して $\sim 0.3 \text{ MeV}$ と見積られ、LEPS のデータは Θ^+ がスピン $3/2$ であることを支持している。一方、メソンビーム入射による実験で得られた生成断面積の上限値は、スピン $3/2$ の場合の生成に期待される水準を既に排除しており、可能な Θ^+ のスピンは $1/2$ だけとなる。従って現段階における理論モデルは、メソンビーム入射反応と光入射反応の両者をも無矛盾に説明できていないといえる。