

■ 研究紹介

Θ^+ 粒子の発見

大阪大学核物理研究センター

中野 貴志

nakano@rcnp.osaka-u.ac.jp

2003年10月10日

1. はじめに

レーザー電子光 (LEPS) グループは、大型放射光施設 SPring-8 で反ストレンジクォークを含むバリオン (Z バリオン) の探索を行った [1]。 Z バリオンは、主に 60 年代から 70 年代初頭にかけて主に 1700 MeV 以上の比較的質量が大きい領域で精力的に探索され、存在を示唆する実験結果も出たが、確定的な証拠は得られず、その存在が疑問視されていた [2]。ところが最近、カイラルソリトンモデルを使った理論で、非常に軽く (1530 MeV) かつ幅の狭い (~ 15 MeV) Z バリオンが予言された [3]。この粒子は、 Θ^+ 粒子と呼ばれ、反 10 重項のメンバーが作る正三角形のウェイトダイアグラムの頂点に位置する $S = +1$ で電荷が +1 の粒子である。このことから Θ^+ が二つずつの u および d クォークと反 s クォークの計 5 個のクォークで構成されていることがわかる。QCD は、このような 5 クォーク状態を禁止しない、そればかりか白色のハドロンは、1 個の場合を除いて、任意の個数のクォークからできてよいはずである。しかしながら、現在のところ実験で観測されているハドロンは、メソンならば 2 クォーク (一方は反クォーク)、バリオンならば 3 クォークの状態として解釈できる。2 または 3 以外のクォークで構成されている粒子はエキゾチック粒子と呼ばれるが、エキゾチックであると断言できる粒子はこれまで見つかっていなかった。メソン-バリオン共鳴状態の可能性のある $\Lambda(1405)$ を例にとると、この状態は、クォークの構成として $uuds\bar{u}$ でも uds でも可能であ

る。今回、発見された Θ^+ は構成要素に \bar{s} を含むため 3 クォークでは構成することができず、このような曖昧さがない。5 クォーク状態あるいは pentaquark と呼ばれる所以である。

2. LEPS での発見

レーザー電子光ビームとは、3.5 eV の紫外レーザーを SPring-8 の 8 GeV 蓄積ビームに照射し、逆コンプトン散乱させることによって得られる高偏極光ビームである。最高エネルギーは 2.4 GeV で 1.5 GeV 以上のエネルギー領域では散乱電子のエネルギーを測定することにより 15 MeV の分解能 (σ) でイベント毎に標識化できる。もっとも今回の Θ^+ の探索では偏極していることはあまり重要ではなく、光ビーム中に含まれる低エネルギーのバックグラウンドが少ないという、もう一つのレーザー電子光ビームの特徴が役に立った。従来の引き出し電子ビームの制動放射による光ビームは光の強度がエネルギーの逆数に比例して大きくなるため、ビームとまったく同じ方向には検出器を設置できない。一方、エネルギー分布がフラットに近い LEPS では、ビームの正面に検出器が設置してある。このことが今回の発見を可能にした。

図 1 に LEPS 検出器を示す。検出器は、上流から標的、スタートカウンター (SC) と呼ばれる厚さ 5 mm のプラスチックシンチレータ、屈折率が 1.03 のエアロジェルチェレンコフ検出器 (AC)、シリコンストリップ検出器 (SSD)、ドリフトチェンバー (DC1)、双極

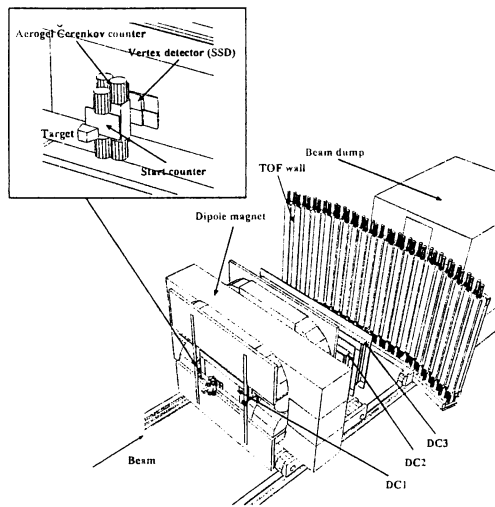


図 1. LEPS での実験で用いられた荷電粒子検出器。

電磁石、DC2、DC3、そして最後に TOF カウンターというシンプルな構成になっている。運動量分解能は 1 GeV の荷電粒子に対して約 6 MeV、TOF の時間分解能は約 150 psec、質量の分解能は 1 GeV の K 中間子に対して約 30 MeV であった。AC によって 0.6 GeV 以上の π 中間子がオンラインで除去されているためすべての運動量領域で K と π の分離は極めてよい。

長さ 5 cm の液体水素標的 (LH_2) を用いた実験は、2000 年の 12 月に始まったが、最初から、 Θ^+ を探索することを目指していたわけではない。水素(陽子)標的によるファイ ϕ 中間子生成反応 $\gamma p \rightarrow \phi p \rightarrow K^+ K^- p$ の精密測定が中心課題であった。測定のバックグラウンドとなる荷電 π 中間子をオンラインの段階で除去していたため、陽子を標的とする Θ^+ 生成反応としてはもっとも単純な $\gamma p \rightarrow K^0 \Theta^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- K^+ n$ 反応や $\gamma p \rightarrow \Theta^+ K^- \pi^+ K^+$ 反応に対するアクセプタンスは、非常に小さかった。契機となったのは、水素標的のすぐ下流に設置されたプラスチックシンチレーターに含まれる炭素原子核中の反応 $\gamma n \rightarrow K^- \Theta^+ \rightarrow K^- K^+ n$ を解析することを思いついたことである。検出器は荷電 K 中間子の測定に最適化してあるので、この反応に対する検出効率は非常に高い。

まず、図 2 に示すように SC が発生源の $K^+ K^-$ イベント

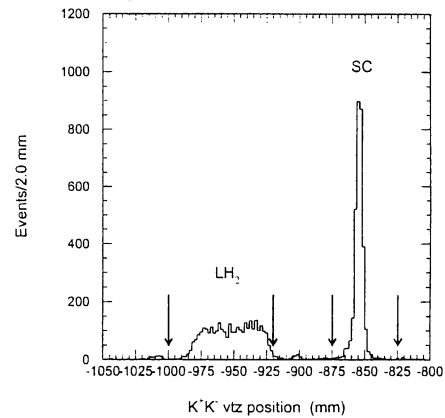


図 2. ビームに沿った方向の K 中間子対の生成点の分布。矢印は SC または LH_2 イベントを選択する際の cut point を示す。(論文 [1] より転載)

ントを選び出す。次に $\gamma N \rightarrow K^+ K^- X$ 反応の missing mass (M_X) を計算し、 M_X が 0.9 GeV 以上で 0.98 以下のイベントを選ぶ。この時点で約 1800 個の K 中間子対生成イベントの内、約 85% は $\gamma N \rightarrow \phi N \rightarrow K^- K^+ N$ 反応によるバックグラウンドである。これらは、 K 中間子対の不変質量が、 ϕ の質量である 1019 MeV のピークになるので簡単に取り除くことができる。最後に、SC 中の陽子との反応 $\gamma p \rightarrow K^- K^+ p$ による寄与は、すぐ下流の SSD で陽子が見つからないことを要求して取り除く。残った事象 (signal sample: 109 イベント) に対して、始状態の光子エネルギーと終状態の K^- 中間子運動量の情報から、エネルギー-運動量保存則を用い、missing mass として nK^+ 系の質量を計算する。幅の狭い Θ^+ があれば、質量分布に鋭いピークが現れるはずである。しかしながら、炭素原子核中の中性子は動いている(フェルミ運動している)ので、始状態のエネルギー-運動量は正確にはわからない。中性子が静止していると仮定して nK^+ 系の不変質量を求めると、このフェルミ運動の影響で 50 MeV 程度の測定誤差が生じる。これを補正するために、同じ静止中性子の仮定をして求めた終状態の中性子質量の真の値から

のズレを nK^+ 系の質量測定値に加えた。具体的に式で表すと、

$$M_{nK^+} = MM_{\gamma K^-} - MM_{\gamma K^+K^-} + M_N \quad (1)$$

となる。 M_{nK^+} は補正後の nK^+ 系の質量、 $MM_{\gamma K^-}$ と $MM_{\gamma K^+K^-}$ は、反応 $\gamma N \rightarrow K^-X$ と反応 $\gamma N \rightarrow K^+K^-X$ の missing mass、 M_N は核子の質量である。この補正の有効性を確かめるために、同様にフェルミ運動の影響を受ける SC 中の反応 $\gamma n \rightarrow K^+\Sigma^- \rightarrow K^+\pi^-n$ を解析した。補正の結果、 Σ^- の質量分解能として約 18 MeV が得られ、その値はモンテカルロシミュレーションで再現することができた。同じシミュレーションプログラムを使って Θ^+ の質量は約 20 MeV の精度で測定できることがわかった。

こうして求められた nK^+ 系の不変質量分布を図 3 に実線で示す。質量が 1.54 GeV のところにピークが認められるが、それが検出器のアクセプタンスや解析上の cut の影響でないことを示す必要がある。そのために同時に測定された LH₂ 中の反応 $\gamma p \rightarrow K^+K^-p$ イベントに対し、signal sample の選択条件とほぼ同じ条件を課すことにより background sample を選んだ。図 3 中の点線は、background sample の pK^+ 系の質量分布を質量が 1.59 GeV 以上の領域で signal sample の nK^+ 系の質量分布に fit したものである。 nK^+ 系のみに見られるピークの中心値は 1540 ± 10 MeV、崩壊幅の上限値は 25 MeV 以下 (90% C.L.)、ピークの統計的信頼度は 4.6σ であった。

3. 他の実験グループによる検証

LEPS の実験結果の統計的信頼度 4.6σ は、過去の歴史に照らせば、結果が「偶然」あるいは「実験の誤り」でないと言い切れるほど高くはない。 Θ^+ が新粒子として確立するためには他の実験グループによる検証が必要である。

ロシアの ITEP 研究所では、DIANA グループが 1986 年にキセノン (Xe) を密封した泡箱に K^+ ビームを照射した実験データの再解析を行った [4]。Xe 中で減速

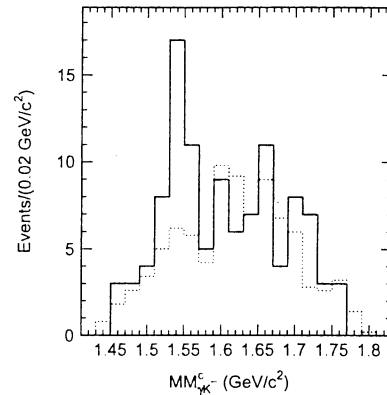


図 3. LEPS で測定された $\gamma n \rightarrow K^-K^+n$ 過程での nK^+ 系の不変質量分布。点線は $\gamma p \rightarrow K^-K^+p$ 過程での pK^+ 系の不変質量分布。(論文 [1] より転載)

して約 500 MeV になった K^+ 中間子の荷電交換反応 $K^+Xe \rightarrow K^0pXe'$ を同定し、 K^0p 系の不変質量分布を求めた結果、中心値が 1539 MeV で、統計的信頼度が 4.4σ の鋭いピークがあることを発見した。ピーク幅から得られた崩壊幅の上限値は 9 MeV である。この結果は LEPS の発表の直後に公表されたが、その時点では DIANA グループは LEPS の結果を知らなかったということだ。

アメリカのジェファーソン研究所の CLAS グループは、1999 年に行われた液体重水素標的を用いた実験の再解析を行った [5]。 $\gamma d \rightarrow K^+K^-pn$ 反応の終状態に現れるすべての荷電粒子の運動量を測定することにより、フェルミ運動の影響を受けることなく中性子の運動量を決定することができる。その上で、 nK^+ 系の質量を求め、中心値が 1542 MeV で幅が 21 MeV、信頼度 5.3σ のピークを確認した。ピーク幅は、測定誤差にほぼ等しい。同グループは水素を標的とする実験の再解析も行い、 $\gamma p \rightarrow K^-K^+\pi^+n$ 反応の nK^+ の不変質量分布に約 5σ のピークを確認している。

そして、最近ドイツの ELSA 研究所の SAPHIR グループも、過去の $\gamma p \rightarrow K^0K^+n$ 反応データを解析し

て、質量が 1540 MeV で信頼度が 4.8σ のピークを確認した [6]。崩壊幅の上限値は 25 MeV であった。

個々の実験の統計的信頼度は、 $4-5\sigma$ と依然確定的ではないが、すべての実験が同じ中心値のピークを偶然観測する確率は極めて低い。新粒子の存在自体は、実験的に確立しつつあると言える。

4. 今後の展開

実験によって確認されたピークの位置と幅はカイラルソリトンモデルによる予言と極めてよく一致する。しかしながら、このピークが完全に確立しても、それによってこのモデルの正しさが証明されたことにはならない。今年の夏以降、様々な理論モデルによって実験で観測された Θ^+ ピークに対する新たな解釈が提唱されている [7, 8, 9, 10]。カイラルソリトンモデルでは、 Θ^+ のスピン・パリティは $\frac{1}{2}^+$ だが、これらの新モデルでは、スピン・パリティは必ずしも $\frac{1}{2}^+$ ではない。これらのモデルを検証し、 Θ^+ の正体を解明するためには、

1. 崩壊幅の精密測定。
2. スピンとパリティの決定。
3. 他の反 10 重項のメンバーの探索。

などが必要になってくるであろう。 Θ^+ の研究を契機として今後いっそうエキゾチックハドロンやマルチクォークの物理が進展することを期待する。

参考文献

- [1] T. Nakano *et al.* (LEPS collaboration), Phys. Rev. Lett. 91, 012002 (2003).
- [2] Particle Data Group, Phys. Lett. B170, 289 (1986).
- [3] D. Diakonov, V. Petrov and M. Polyakov, Z. Phys. A359, 305 (1997).
- [4] V.V. Barmin *et al.* (DIANA collaboration), hep-ex/0304040
- [5] S. Stepanyan *et al.* (CLAS collaboration), hep-ex/0307018;
S. Stepanyan, Talk given at the Conference on the Intersection of Particle and Nuclear Physics, <http://www.cipanp2003.bnl.gov>, New York, May 2003.
- [6] J. Barth *et al.* (SAPHIR collaboration), hep-ex/0307083
- [7] Fl. Stancu and D. O. Riska, hep-ph/0307010.
- [8] S. Capstick, P. Page, and W. Roberts, hep-ph/0307019
- [9] A. Hosaka, hep-ph/0307032
- [10] R.L. Jaffe and F. Wilczek, hep-ph/0307341.