

# SPRING-8レーザー電子光施設におけるペンタクォークの発見



研究ノート

中野貴志\*

Observation of Pentaquark at LEPS/SPRING-8

Key Words : Laser-Electron Photon, Pentaquark

## 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター・レーザー電子光グループ(名大, 山形大, 甲南大, 東北大, 及び京大等との共同研究グループ)は日本原子力研究所, 及びJASRIと協力して, レーザー電子光を用いた原子核・素粒子物理研究を目的とするプロジェクトを大型放射光施設SPRING-8で推進しています. 本稿では, 実験施設の紹介とペンタクォーク粒子 $\Theta^+$ の発見について述べます.<sup>[1]</sup>

## 2. ペンタクォークとは?

クォーク(q)は, 物質を構成する最小の基本粒子だと考えられています. クォークには, アップ(u), ダウン(d), ストレンジ(s), チャーム(c), ボトム(b), トップ(t)の6種類があり, それぞれが赤, 青, 緑の色電荷を帯びています. クォークの反粒子である反クォーク( $\bar{q}$ )は, 赤, 青, 緑の補色の色電荷を持ちます. 量子色力学(QCD)によると, 色電荷を帯びたクォークは, 単独では自由に空間を飛びまわらず, 色電荷が“白色”に中和された複合粒子だけが決まった質量をもった粒子として存在できます. 3つのクォーク(qqq)で構成されるバリオンは, 3原色の混合により白色になり, メソン( $q\bar{q}$ )は, 色と補色の混合により白色になります. その他にも原理的には,  $qqq\bar{q}$ ,  $qqqq\bar{q}$ による白色の状態が可能で,

理論的には2以上の全ての数のマルチクォーク状態があり得ます. しかしながら, クォークの数が4以上の粒子(エキゾチック粒子)は30年以上に及ぶ様々な実験によっても発見されることはなかったのです.

曖昧さ無くエキゾチック粒子の存在を示すことは, 一般には困難です. クォークはハドロンの中に閉じ込められているため, 実験で測定できるのはハドロンの質量や, 電荷, それにバリオン数といったハドロンの性質に限られるからです. しかしながら, 今回発見されたバリオンは, 反ストレンジクォークを含み, かつ, クォークと反クォークの数の差が3だとわかったので, 構成要素の数は, 最小でもuuddsの5つになります. 今回発見された粒子が5クォーク粒子或いはペンタクォーク(pentaquark)粒子と呼ばれる所以です.

## 3. レーザー電子光実験施設(LEPS)

今回の実験では, レーザー電子光ビームという新しい技術を使った光ビームを用いました. レーザー電子光とは, レーザー光線が電子ビームによって跳ね返された結果得られる高エネルギー光ビームです. SPRING-8では, 8GeVの蓄積電子ビームに3.5eV(波長350nm)の紫外レーザー光を正面衝突させることによって, 最高エネルギーが2.4GeV, 強度が毎秒 $2\sim 3\cdot 10^6$ のレーザー電子光を得ることができます.

レーザー電子光の発生には, 極めて軌道の安定した大強度蓄積電子ビームが必要です. また, 高いエネルギーのレーザー電子光を発生させるためには, 電子ビームのエネルギーが高いことが本質的に重要です. このことは, これまで世界最高エネルギーを誇っていたESRF(蓄積電子ビームエネルギー6GeV)のGRAAL施設におけるレーザー電子光の最高エネルギーが1.5GeVであり, 2.4GeVの6/8倍よりかなり低いことから明らかです. レーザー電子光の優



\* Takashi NAKANO  
1961年12月生  
1991年京大(院)・理学研究科・博士  
後期課程修了  
現在, 大阪大学・核物理研究センター,  
教授, 理学博士, 原子核物理学  
TEL 06-6879-8938  
FAX 06-6879-8899  
E-Mail nakano@rcnp.osaka-  
u.ac.jp

れた特徴としては、1)直線及び円偏光したレーザー光を用いることにより、簡単にスピンの偏極した高エネルギー光ビームを得ることができること、2)原子核・素粒子実験にとってバックグラウンドの源となる低エネルギー(～100MeV以下)の成分が光ビーム中に極めて少ないこと、3)光ビームの指向性がよく、超前方の測定に適したコンパクトな検出器系が使用できることなどがあります。

レーザー電子光を発生させるためには、電子ビームとレーザー光を衝突させる必要があります。我々はSPring-8の62本のビームラインの内の1本のビームラインをレーザー電子光専用ビームライン(BL33 LEP)として使っています。実験ホール内には、図1に示されるように、「レーザーハッチ」と「実験ハッチ」と呼ばれる二つの光学ハッチが設置されています。レーザーハッチ内には、レーザー発振器とレーザー光学系に加え、スイープマグネットが収納されています。スイープマグネットにより、レーザー電子光ビーム中の電子・陽電子バックグラウンドを取り除きます。

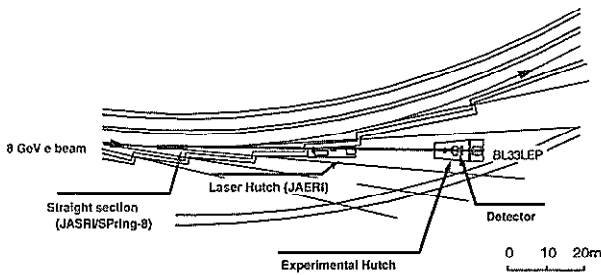


図 1

図2は、クォーク核分光装置と呼ばれる実験装置で、実験ハッチ内に配置されています。クォーク核分光装置は、プラスチック蛍光検出器、双極電磁石、シリコンストリップ検出器、ドリフトチェンバー、飛行時間測定(TOF)装置などで構成されており、2GeVまでの $\pi$ 中間子とK中間子を分離し、それらの運動量を1%の精度で測定することができます。

レーザー電子光のエネルギーと方向の間には対応関係があるのですが、実験に使われる1GeV以上の光は超前方領域に集中するので、方向とエネルギーの対応関係を用いてレーザー電子光のエネルギーを決定することは事実上不可能です。そのため、レーザー電子光のエネルギーは、レーザー光に散乱された反跳電子のエネルギーを測定することによって求

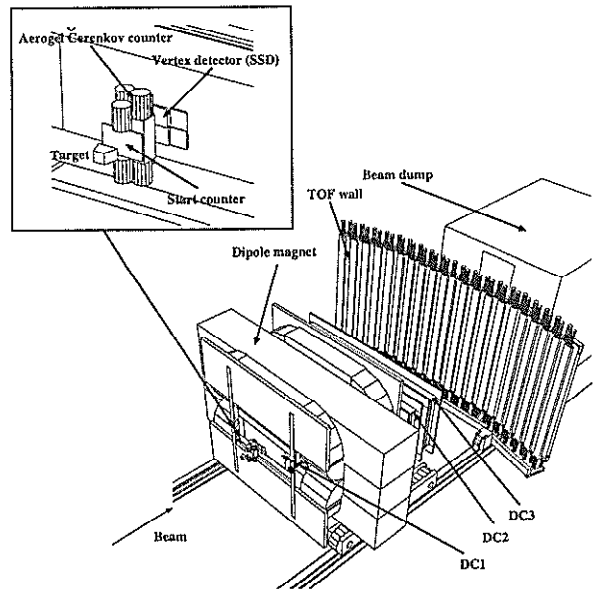


図 2

めます。反跳電子のエネルギーは、偏向電磁石の下流に設置されたタギング検出器で30MeVのエネルギー分解能(半値幅)で測定されます。

#### 4. ペンタクォークの発見

LEPSでの実験は、最初から、 $\Theta^+$ を探索することを目指していたわけではありません。水素(陽子:p)標的による $\phi$ 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した。発見の契機となったのは、水素標的のすぐ下流に設置されたプラスチック

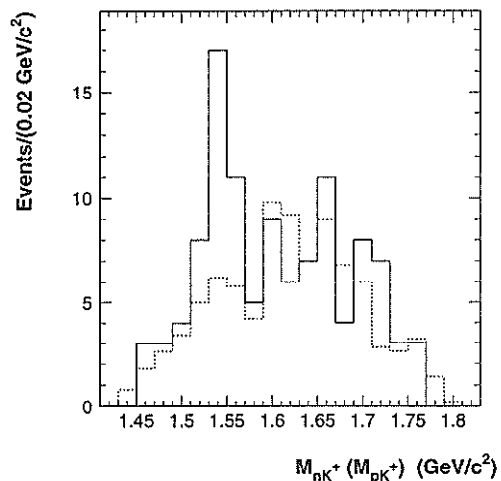


図 3

蛍光検出器を構成する炭素原子核中の中性子(n)による反応 $gn \rightarrow \Theta^+ K^- \rightarrow nK^+ K^-$ を解析することを思いついたことです。

まず、 $K^+$ を捕まえることにより生成されたものが反ストレンジクォーク( $\bar{s}$ )を含むことを確認します。次に、 $K^-$ の運動量(エネルギー)を測定し、エネルギーと運動量の保存則を用いたミッシング質量法により、 $nK^+$ 系の質量(重さ)を計算します。そのスペクトルが、図3に示すもので、 $1540 \pm 10 \text{ MeV}$ のところに幅が $25 \text{ MeV}$ 以下のピークとして $\Theta^+$ が観測されました。この実験では、 $\gamma$ 線のバックグラウンドが少ないため、0度にも検出器をおくことができたこと、そのためにビームの中に入れたプラスチック蛍光検出器中の炭素原子核が中性子のターゲットとなったということが大きなポイントになっています。また、0度近傍のデータであったため、中性子の炭素原子核中でのフェルミ運動も工夫によりほぼ消すように解析ができ、よい質量分解能が得られたことにもよります。

LEPSの実験結果の統計的信頼度 $4.6\sigma$ は、高エネルギー物理学実験の経験則にてらせば、結果が“偶然”或いは“実験の誤り”でないと言いきれるほど高くはありません。このデータが2002年のPANIC国際会議で発表されると、すぐに米国ジェフアーソン研究所をはじめ、ロシア、ドイツなど四つの研究所で追試が行われ、幸いにも存在が確認されました。その後も、多くの実験グループから確認の報告が相次いでいます。

この発見は、これまでハドロンは2個または3個のクォークでのみ作られていると考えざるを得なかったものが、さらに多くのクォークでできた粒子が存在することを示唆することになりました。この発見を契機として、今後、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します。

#### 参考文献

- [1] T. Nakano *et al.* (LEPS Collaboration),  
Phys. Rev. Lett. 91 012002 (2003).

この記事をお読みになり、著者の研究室の訪問見学をご希望の方は、当協会事務局へご連絡ください。事務局で著者と日程を調整して、おしらせいたします。

申し込み期限：本誌発行から2か月後の月末日

申し込み先：生産技術振興協会 tel 06-6395-4895 E-mail [seisan@maple.ocn.ne.jp](mailto:seisan@maple.ocn.ne.jp)

必要事項：お名前、ご所属、希望日時(選択の幅をもたせてください)、複数人の場合はそれぞれのお名前、ご所属、代表者の連絡先

著者の都合でご希望に沿えない場合もありますので、予めご了承ください。