

ノート

■クォーク5個から出来ている新粒子 (バリオン) 発見 — SPring-8の世界最高エネルギーの逆コンプトンガンマ線を使って検出—

逆コンプトンガンマ線核分光研究グループ(平成14年度終了) ■藤原 守■

Discovery of New Baryon with Five Quarks — Evidence for a New Class of Subatomic Particle has been Found with Inverse Compton Gamma-rays at SPring-8 —

Mamoru Fujiwara

Research Group for Inverse Compton Gamma-ray Spectroscopy

Evidence for a narrow $S=+1$ baryon in photoproduction of K mesons from neutron has been searched for at SPring-8. For this purpose, both K^+ and K^- at forward angles in the $\gamma n \rightarrow K^+ K^- n$ reaction on ^{12}C has been measured. A sharp baryon resonance peak has been observed at 1.54 GeV with a width smaller than 25 MeV/c². The new resonance can be interpreted as a molecular meson-baryon resonance or as an exotic 5-quark state (pentaquark baryon)

1. はじめに

自然が階層構造をしていることは良く知られている。物質を構成している基本要素は原子であり、原子はさらに細かく分類され、中心にある原子核とそれを取り巻き周囲する電子から構成されている。原子核は、陽子と中性子から出来ており、強い力で互いに引き付けられている。1930年代に知られていた素粒子は光、電子、陽子、中性子であり、極わずかな少数の素粒子で世界が統一的に理解できると思われていた。その後、現在に至るまでにいろいろな“素粒子”が発見されたが、そのほとんどは6種類のクォークから3個を選んで組み合わせる「バリオン」か、2個を組み合わせる「中間子」である。

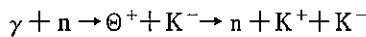
質量の軽いハドロンはuクォーク、dクォーク、sクォークの2個、3個を組み合わせる数十の種類に分類される。クォーク1個と反クォーク1個の対はスピンの整数の「中間子」である。湯川粒子と呼ばれるパイ中間子はudの、K中間子はus、dsのクォーク・反クォークの組み合わせとして理解されている。「バリオン」

」は3個のクォークからなり、スピンは半整数である。

ここで未解決な素朴な疑問が起こる。ハドロンは2個のクォークからなる中間子と、3個のクォークの「バリオン」以外に、4個、5個のものは無いのだろうか？理論はその存在を禁止してはいない。このような素朴な疑問から出発して、まず、4個クォークからなるハドロンの探索が行われた。これはバリオニウム探索と呼ばれ、クォーク2個と反クォーク2個からなる粒子発見に向けて、1970年代から1990年にかけて世界で異常なほどの熱心な探索実験が行われたが、発見と否定の繰り返しで実験証拠が確定しないまま、現在では、バリオニウム探索熱は冷めてしまった¹⁾。

5個のクォークからなる奇妙な粒子はどうか？ロシアの理論家D. Diakonovらはこのような奇妙な粒子の存在の可能性を1984年に論じているが²⁾、バリオニウム探索熱に取り付かれた実験屋の大半は誰も熱心に相手をしなかった。1997年になって、Diakonovらは、クォーク4個と反クォーク1個のuuddsの配位をもつ新しいバリオン Θ^+ が1530 MeVにシャープなピーク

として存在する事を示した論文を発表した³⁾。Diakonov は熱心に世界の実験屋に発見の可能性を説いていた。SPring-8 では液体水素ターゲットに逆コンプトンガンマ線を照射し、ファイ粒子発生の実験データを集積していた。LEPS グループは液体水素ターゲットのすぐ後におかれたシンチレータに含まれる炭素原子核中の中性子からの、以下の光反応



に注目し、バリオン共鳴の存在を示すシャープな不変質量のピークが得られるかどうかの探索を行った⁴⁾。このノートでは、SPring-8 で行われた中性子ターゲットによる光核反応で見つかった新しいバリオン共鳴についての解説を試みる。

2. 実験

SPring-8でのLEPSスペクトロメータは平成12年以来、データ取得を開始しており、前方でのファイ中間子測定に好都合なこの実験装置では、炭素原子核を含むシンチレータからの信号として約4千万個の反応事象を得ており、その中から、8千個の K^+K^- 中間子発生事象を選び、 Θ^+ 探索を行った。これらの解析では、中野貴志、村松憲仁、K. Hicks、R. Zegersらが注意深い事象選別をしたデータ解析を遂行した。

最初の事象選別はシンチレータから来た事象と水素ターゲットから来た事象を区別することであった。これは問題なくクリア出来た。次の問題は、非共鳴領域からのファイ中間子発生を区別出来るかどうかであったが、これはファイ中間子に対応する事象を除くことで選別された。¹²Cや¹Hからの $\gamma p \rightarrow K^+K^-$ 反応事象はターゲット直後に置かれたシリコン位置検出器によって反跳陽子を測定することによって大半が取り除かれ、最終的に約100個の“候補事象”が選別された。

次の問題は原子核中で動いている中性子の運動学的効果をどのように消去するかであった。これを評価するために、我々は、 $\gamma n \rightarrow K^+\Sigma^- \rightarrow K^+\pi^-n$ 反応事象を利用して、フェルミ運動効果が補正できることも示した。また、この補正によって $\gamma p \rightarrow K^+\Lambda(1520) \rightarrow K^+K^-p$ 反応事象が混入していない事も確かめられた。最終的に選別され $\gamma n \rightarrow \Theta^+ + K^- \rightarrow n + K^+ + K^-$

反応事象として残った不変質量スペクトルを図1に示す。1.54GeVにあるピーク幅は25MeVより狭いものと結論づけられている。

1.54GeVにあるバリオン共鳴ピークは、アメリカのジェファーソン研究所のCLASスペクトロメータでも探索解析が進められ、 $\gamma p \rightarrow \pi^+K^+K^-n$ 反応では1.537GeVに、 $\gamma d \rightarrow pK^+K^-n$ 反応では1.547GeVにその共鳴ピークが観測され、追認された。

2003年5月に行われたニューヨークの国際会議では、SPring-8での結果、ジェファーソン研究所での結果が共に発表され、世界的にも、1.54GeVにある共鳴ピークの存在が認められた⁵⁾。また、ロシアのITEP研究所から発見を追認する報告も寄せられている。

3. 新しいバリオン共鳴発見の波紋

今回の実験では、約2GeVのレーザー電子光を炭素原子核に当て、核反応で生成される正負の電荷を持つ2個のK中間子を同時測定した。原子核内の中性子が光を吸収した結果、まず負K中間子と新粒子が同時生成され、更に新粒子が中性子と正K中間子に崩壊して

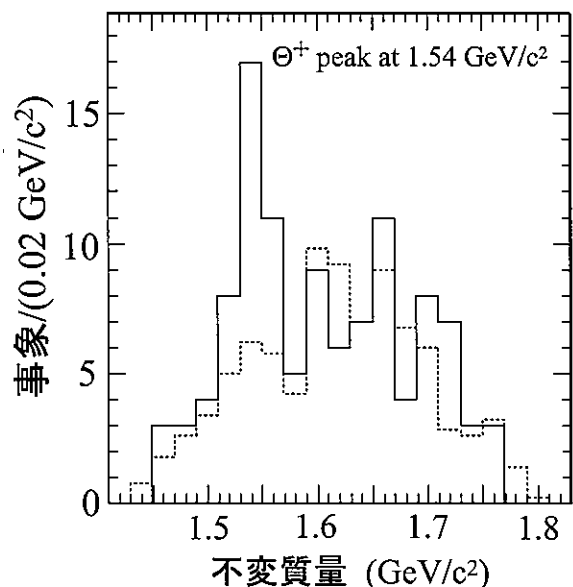


図1 $\gamma + n \rightarrow n + K^+ + K^-$ 反応から得られた、不変質量スペクトル。1.54 GeVにある新しいバリオン共鳴ピークが観測された。点線は液体水素ターゲットからのバックグラウンド。

いることを確認した。確認された粒子は1個の反sクォークと2個ずつのu、dクォークで構成される全く新しいタイプの粒子となる可能性が極めて大きい。図2にDiakonovらが1997年の論文²⁾で示した5個のクォークから構成される新しいバリオン共鳴ダイアグラムを示す。1.54GeVの共鳴のストレンジネスはS=+1である事は決定できたが、実験からはスピン・パリティは未決定であり、これらの決定は今後の課題である。また、共鳴が3個のクォークと1個の中間子の共鳴状態であることも完全には否定できない。例えば、 $\Lambda(1405)$ は3個のudsの配位をもつ状態なのか、陽子と K^- からなる分子的共鳴状態なのかのホットな議論もあるように、今回の実験では、 Θ^+ が中性子と K^+ 中間子の共鳴であることも実験的には否定できない。LEPSグループでは新粒子の性質を詳しく調べる実験を早期に開始すべく実験計画を立てている。

Diakonovは、実験と理論から予想された、その幅の狭さと、エネルギーの一致から、今回、見つかった共

鳴はクォーク5個から構成されるピラミッド模式図(図2)ではもっともエネルギーの低い Θ^+ 粒子に対応すると考えている。また、図2の模式図に示された、他の粒子共鳴の探索実験も、すでに開始されている。例えば、フランス・放射光施設(ESRF)のGRAAL実験施設では、N(1710)共鳴と呼ばれるuuds \bar{s} の共鳴を η 中間子を測定することにより探索し、崩壊モードが理論予想のようにになっているとの報告もある⁶⁾。

前にも述べたように、現在までに確立されたハドロンは反クォークとクォークからなる中間子、3個のクォークからなるバリオンのみである。2個の反クォークと2個クォークからなるバリオンウム探索が、ほぼ挫折状態にある中で、5個のクォークからなる共鳴エネルギーが理論予想とほぼ一致したところに観測されたことで、物理のフロンティアであるクォーク物理の理論発展にとっての大きなインパクトとなっている。

参考文献

- 1) 「バリオンウムとは何か—クォークがつくる不思議な粒子—」中村健蔵 著 丸善出版
- 2) D. Diakonov and V. Petrov, Baryons as solitons, preprint LNPI-967 (1984), published in Elementary particle, Moscow, Energoatomizdat (1985) Vol. 2 p.50 (in Russian).
- 3) D. Diakonov, V. Petrov, M. Polyakov, Z. Phys. A **359** (1997) 305.
- 4) T. Nakano, et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 012002 (2003)
- 5) S. Stepanyan et al., hep-ex/0307018.
- 6) V. Kouznetsov, presentation at the conference "Electromagnetic interactions of nuclei at low and medium energies" 16 - 18 April 2003, Moscow.

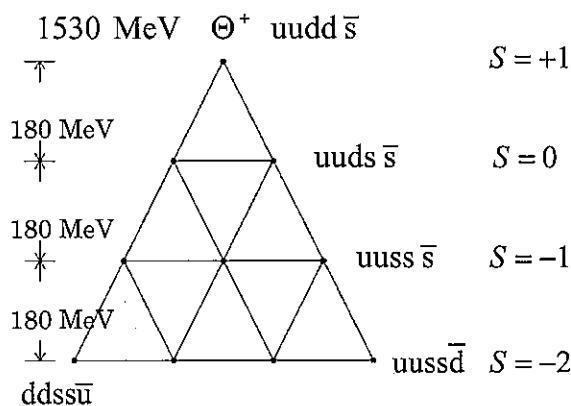


図2 5個のクォークからなると考えた時のクォーク配位。 Θ^+ 粒子はピラミッドの頂点に位置する。

