

## ■ レーザー電子光でのファイ中間子発生： 核子の内部は照らせるか？

逆コンプトンガンマ線核分光研究グループ ■藤原 守■

φ Meson Photoproduction by Laser-Electron-Photons:  
Can we see the inside of nucleon?

Mamoru FUJIWARA

Research Group for Inverse Compton Gamma-ray Spectroscopy

Compton back-scattering of a laser light by the electrons circulating in Synchrotron Radiation facility SPring-8 was used to provide high energy photons (Laser-Electron-Photons) in the energy range of 1.5-2.4GeV. Recently, we first confirmed the φ meson photoproduction.

### 1 はじめに

原子核を構成する基本要素は陽子と中性子である。陽子と中性子は原子核の構成要素なのでまとめて核子と呼ぶ。原子核中の核子は湯川博士の予言したパイ中間子などの交換によって発生する強い力で結合している。ウラン核分裂などの原子力エネルギーは、数十億年以上も前に、超新星爆発によって原子核合成が行われ、その爆発エネルギーの一部を重い原子核に強い力のポテンシャルエネルギーとして蓄えたエネルギーを人類が利用しているものである。原子力利用が開始されすでに約60年が経過した。原子核構造の研究はまだ道半ばとはいえ、さまざまな原子核の特性やその利用方法が調べられ上げられた。

陽子と中性子は、それぞれ、我々の生活に密着した活躍をしている。陽子の核磁気共鳴を利用したMRI技術による医療診断はX線トモグラフィによる診断にとって変わろうとしている。また、中性子は広く物質構造の解明を通じて、エレクトロニクス、医学、工学などに貢献している。

さて、今や誰でも知っているこの基本粒子、陽子や中性子の構造はどうなっているのか聞かれると、われわれ科学者の答えは、はなはだ心もとない。陽子や中

性は半径  $10^{-15}$  m 程度の大きさを持っていることはすでに40年前に実験的に証明されていた。当然、そのなかに何か小さなものが詰まっている筈であろうとは小学生でも抱く疑問である。最初の答えは、スタンフォード大学の高エネルギー電子と陽子を散乱させた実験から得られた。どうも陽子の中には3つのもの、それは現在の言葉でいえばクォークと呼ばれるものが詰まっていることがわかったのである。これらの科学的発見は1960年代のことである。1980年代になって、混沌の時代がやって来た。これまで陽子と中性子はアップとダウンと呼ばれるクォークから出来ていたと信じていた我々の物質観の変更を余儀なくさせられる実験が現れて来たのである。

従来の常識では、陽子の場合にはスピン1/2のアップ・クォーク2個とダウン・クォーク1個の合計3個で核子のスピン1/2を作り、それぞれ  $939\text{MeV}/c^2$  の陽子質量の1/3の静止質量を持つという説明が広く受け入れられて来た。しかし、1970年代の電子散乱の実験によれば、クォークの担っているエネルギー（静止質量＋運動エネルギー）は陽子質量の約1/2程度で、あとはクォークを結びつけている力の源であるグルーオンが約1/2を運んでいると示唆された。一方、量子色力学（Quantum Chromodynamics:QCD）によれば、アップ、

ダウン・クォークは点として取り扱えるが、質量は5-10MeV/c<sup>2</sup>程度の軽さであるとして良いとのこと。それでは、残りの大半の陽子質量エネルギーに対応するものは何が担うのか？グルーオンが無数のクォークと反クォークになって担うのか、それとも150MeV/c<sup>2</sup>と予想されるストレンジ・クォークと反ストレンジ・クォーク対が陽子中にあるのだろうか？

1970年代の実験解析結果<sup>1,2)</sup>はストレンジ・クォークの寄与が驚くほど大きいということであった。この結果は最近のCERNやスタンフォードでの実験でも確認されている。ストレンジ・クォークが陽子中にどれだけあるかは諸説あり、ストレンジ・クォークと反ストレンジ・クォーク対はないと主張する科学者、また10-30%はあると主張する科学者、諸説飛び交うなかで、新しい実験事実を提示することが求められている。しかし、最近の実験結果、理論を総合してみると核子中にはストレンジ・クォークと反ストレンジ・クォーク対はかなりの割合であるのではないかという説が有力になって来ている。

一つの有力な手法は、核子から $\phi$ 中間子を光で叩き出すことである。 $\phi$ 中間子は純粋にストレンジ・クォークと反ストレンジ・クォーク対からなることがわかっているので、何らかの方法で核子中からのファイ中間子放出が確認されれば、核子中のストレンジ・クォークの存在と割合がわかるという理屈である。

Spring-8での逆コンプトンガンマ線<sup>3)</sup>は、世界最高エネルギーの光子ビームであり、レーザーがもっている光の偏光の性質をそのまま引継ぎ、直線偏光、円偏光ビームが得られる。陽子ターゲットを偏極させ、かつ、ガンマ線も偏極させると偏極完全実験が可能である。 $\phi$ 中間子が核子の外で出来たのか、または核子中のストレンジ・クォークと反ストレンジ・クォーク対を叩き出したのかは、この二つの過程の干渉効果が現れる偏極測定量を精密に測定することによって決定できる。

上に述べたような研究動機で、我々の研究グループは西播磨大型放射光施設Spring-8で逆コンプトン・ガンマ線を創り出し、1.5-3.5 GeV光の照射によって生成される $\phi$ 中間子(1.019 GeV)を観測することによって、核子中のクォーク構造を探ろうとしている。ガンマ線ビームは計画当初の予想どおりになっていることが確かめられた。最近の話題は、ようやく $\phi$ 中間子が

観測されたことである<sup>4)</sup>。研究全体としては一里塚をようやく越えた段階であるが、その実験結果と意味について解説を加える。

## 2 $\phi$ 中間子発生の観測

実験は平成12年6月から実質的にスタートし、さまざまな初期調整、改良の後に、最大 $2.5 \times 10^6$ /秒、ターゲットでの大きさ1cm以下の逆コンプトン・ガンマ線を用いた長期実験が夏休み前、および、秋にかけて行われた。実験装置は主に電荷を持つ粒子(K中間子、パイ中間子、陽子など)を曲げる分析磁石とその曲線軌道を追跡するための位置検出器、飛行時間を決定するためのTOFカウンターからなる。実験によるデータ取得と並行し、データ解析班はデータ解析プログラムの開発、問題点の洗い出し、データ取得の方法へのフィードバックなどを行った。

バックグラウンドを低減する、さまざまな解析を加えて、最終的に $\phi$ 中間子発生の証拠となるK中間子が確認された。我々のグループにとっての記念的なスペクトルを図1に示す。

図1(a)はポリエチレン標的(CH<sub>2</sub>)に逆コンプトンガンマ線を照射し、LEPS磁気分析器で測定した発生荷電粒子の質量スペクトルである。まず目につく大きなピークは高エネルギー・ガンマ線で反跳された陽子である。また陽子が<sup>12</sup>C原子核中を走り中性子を伴って出てきた重陽子(deuteron)も観測された。また、中性子を2個、引っ掛けて出てきた三重水素原子核(triton)も観測された。陽子の次に多く観測されたものはパイ中間子である。正の電荷と負の電荷のパイ中間子両方がほぼ同じ収量で観測された。 $\pi^+$ 中間子は $\gamma + p \rightarrow \pi^+ + n$ 、また $\pi^-$ 中間子は $\gamma + n \rightarrow \pi^- + p$ 反応で出来る。ポリエチレン標的の場合、陽子は8個、中性子は6個なのでさまに荷電対称的にパイ中間子は発生していることがわかった。

さて、肝心のK中間子の場合はどうか？ $K^+$ 中間子が $K^-$ 中間子に比べて圧倒的に多い。 $K^+$ は $\gamma + p \rightarrow K^+ + \Delta$ 、または $\gamma + p \rightarrow K^+ + \Sigma^0$ 反応によってストレンジ・クォーク発生を伴う反応が知られている。 $K^+$ 粒子が多く観測されるのはそのためである。求める $\phi$ 中間子発生は $\gamma + p \rightarrow \phi + p$ で $\phi$ 中間子が発生し、その直後にストレンジ・クォークと反ストレンジ・

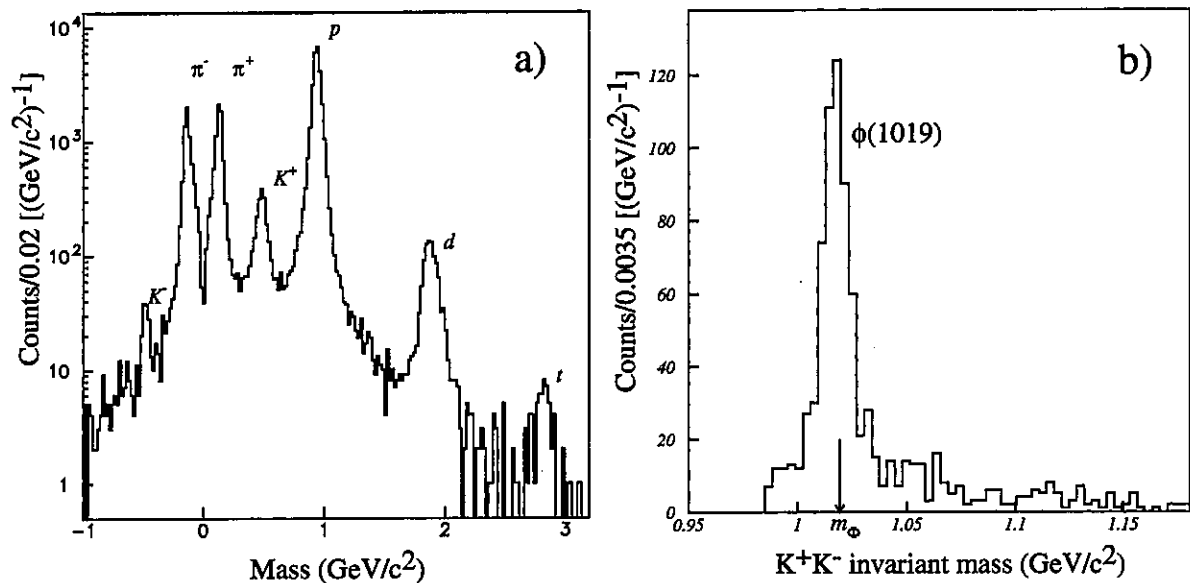


図1. (a)1.5-2.4GeVの高エネルギーガンマ線をポリエチレンターゲット(CH<sub>2</sub>)に照射し、光核反応で発生した荷電粒子の質量識別スペクトル。ピークはそれぞれ左からK<sup>-</sup>、π<sup>-</sup>、π<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、陽子、重陽子、トリトンが発生している事象。(b)k<sup>-</sup>とk<sup>+</sup>中間子の同時事象を観測し、エネルギーと運動量から得られた質量スペクトル。ピークはφ中間子に対応し、その質量は1019MeV/c<sup>2</sup>。

クォーク対が真空からアップ・クォークと反アップ・クォーク対を発生し、K<sup>+</sup>とK<sup>-</sup>粒子を発生する事象を観測する必要がある。そのためにはK<sup>-</sup>粒子とK<sup>+</sup>粒子が同時計測していることを確かめ、かつφ中間子の質量に対応するエネルギーに質量スペクトルのピークが現れる必要がある。さらにバックグラウンドを低減し、同時計測で得られたφ中間子発生を確かに確認した証拠を図1(b)に示す。φ中間子は我々のLEPSスペクトロメータでは確かに1019MeVに観測され、かつその崩壊幅(4.458 ± 0.032MeV)とほぼ同じの分解能(約6 MeV)で測定された。

### 3 次のステップは？

これらの当面の仕事は、φ中間子発生の断面積のエネルギー依存性を精密の1.5GeVから3 GeVまでわたって精密測定することである。また、直線偏極したガンマ線反応による偏極現象としてすでにΛ、Σ<sup>0</sup>粒子発生に伴うK<sup>+</sup>中間子の空間非対称性の観測も行われた。さらに近未来のステップとして、偏極水素ターゲットを持ち込み、偏極ガンマ線と偏極ターゲットによるφ中間子発生の偏極量観測する計画がアメリカ、フランス、日本の国際協力が進みつつある。これは、クォークとグルーオンの渦巻く核子の世界を覗ける観測となる。現在、いろいろな実験・研究能力をもつ科学者グループが努力を傾注し、偏極ガンマによる測定を進めている。

これとは別に、円偏極したガンマ線を作れるのは逆

コンプトン・ガンマ線以外にはあり得ない特徴であることに注目し、このことを利用した新しい実験ビームラインで世界最高の大強度低エネルギーガンマ線ビームを実現し、天体核物理の研究、パリティの破れの実験なども行えるかどうかを検討されはじめています。

### 参考文献

- 1) T.P. Cheng, R. Dashen, Phys. Rev. Lett. 26(1971)594.
- 2) J. Gasser, H. Leutwyler, Phys. Rep. 87(1982)77.
- 3) コンプトンガンマ線とはレーザー光が高エネルギー電子と正面衝突することによって跳ね返され、かつローレンツ効果によりエネルギーが増幅された高エネルギー光子ビーム。
- 4) M. Fujiwara, Nuclear Physics News, 43(11)2001.