

## 陽子のスピンはどのように構成されているか

柴 田 利 明

### 1. はじめに

陽子はスピン  $1/2$  を持っている。スピンというのは粒子自身が持っている角運動量で、プランク定数  $h$  を単位として量子化されている。  $0h$ ,  $1/2h$ ,  $1h$  などという、決まった値をとる。冒頭に  $1/2$  と書いたのは、  $1/2h$  という意味である。スピン  $1/2$  を持つ粒子は、ほかに電子などが知られている。陽子のスピンの  $1/2$  であることはよく確立した事実で、例えば医療診断のための MRI（磁気共鳴画像診断装置）もこのことを利用している。

一方で、陽子は素粒子ではない、つまり内部構造を持っていることもわかっている。陽子は今から約 140 億年前の宇宙創成の極く初期に、まだ 1 ミリ秒もたたないうちに生成されたが、どのようにして陽子のスピン  $1/2$  が作られたのだろうか。

陽子は基本的にクォーク 3 個から成り立っていると考えることができる。そして、クォークのスピンが  $1/2$  であることも実験により確立している。それでは、3 個のクォークのスピン合成によって陽子のスピンができるとすると、どのような描像になるだろうか。図 1 のように、2 個のクォークのスピンが平行で、1 個のクォークのスピンがそれらに反平行ならば、合成されたスピンは

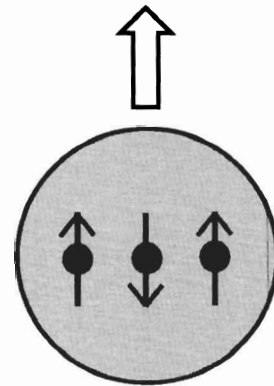


図 1 クォーク 3 個から成る陽子の描像。この描像ではクォークのスピン合成によって陽子のスピン  $1/2$  が作られる。

$1/2$  である。クォーク模型が 1960 年代に成立して以来、このような描像が信じられてきた。しかし、EMC（ヨーロッパ・ミュオン共同実験グループ）がジュネーブの CERN（欧州合同原子核研究所）で行った実験の結果が 1988 年に発表され<sup>1)</sup>、転機が訪れることとなった。

### 2. EMC の実験と「陽子のスピンの問題」

陽子の内部を調べる代表的な方法は、散乱実験である。図 2 のように、たいへんエネルギーの高いミュオンビームや電子ビームを陽子にぶつけ、その散乱を調べれば陽子の自身を「見る」ことができる。ミュオンとは、電子と性質が似ているが質量が 200 倍も大き

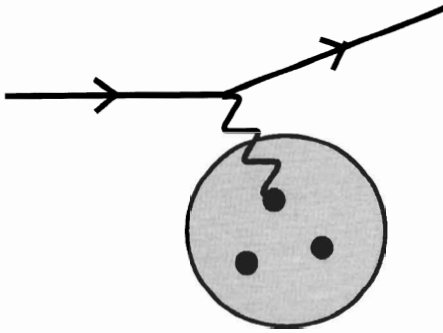


図2 電子ないしミューオンの散乱によって陽子の内部にあるクォークを調べることができる。電磁相互作用なので光子(波線)が交換される。

い粒子である。ミューオンのスピンは電子のスピンと同じく  $1/2$  である。散乱によって内部構造を調べる方法は、物理学ではいろいろな場合に用いられる。この場合は、空間的な分解能がたいへんよい電子顕微鏡とみなすこともできる。

EMCの実験では、高エネルギーのミューオンビームが用いられた。ミューオンビームの進行方向にスピンが平行あるいは反平行なミューオンビームをつくって実験が行われた。

一方、標的となる陽子も偏極した、つまりスピンの方向がそろったものが使われた。そのようにして散乱実験を行った結果、陽子のスピンに対するクォークスピンの寄与は、およそ12%程度でしかない、ということが明らかになった。これは「陽子のスピンの問題」と呼ばれている。

EMCの実験の特徴は、それ以前に行われたアメリカのSLAC(スタンフォード線型加速器センター)での実験に比べビームのエネルギーが高かったので、運動学的な測定領域を広げることができたことにあった。その後、陽子のスピンの研究には広い関心もたれている。CERNでは、これまでに行われた実験から数千篇の論文が発表されているが、このEMCの論文はその中で被引用数が多い論文として知られている。世界の粒子加

速器を用いた素粒子実験の論文全体の中でも5指に入り、陽子スピンに対する関心が高いことを示している。

### 3. EMC以降の展開

物理学の歴史上、スピンはいろいろな局面に現れてその後の物理学の進展に決定的な役割を果たしたが、陽子のスピンの問題も、EMC以降、素粒子物理学の主要なテーマの一つとなって世界の代表的な研究所のほぼすべてで実験が行われている。

CERNでは、EMCの後継グループであるSMCによって実験が続けられ、EMCの結果が確認された。更に、陽子のみならず中性子のスピンについてもクォークスピンの寄与の研究が行われた。SLACでも再実験が行われた。これらを総合すると、陽子や中性子のスピンに対するクォークスピンの寄与は20-30%であった。

これらの結果が示唆する陽子の内部の描像は、図1のようなクォークが三つだけある状態ではなく、図3のようにクォークとグルーオンが飛び回っている状態である。グルーオンとは糊の粒子という意味で、クォークとクォークの相互作用を媒介する粒子である。グルーオンは短時間、クォークと反クォークの対に乖離し、またグルーオンに戻る。反クォークは、クォークの反粒子である。陽子

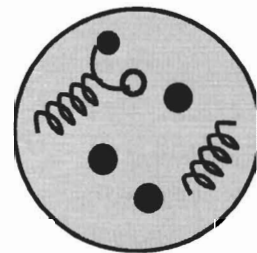


図3 陽子の内部には、クォークや反クォークやグルーオンがある。グルーオンはクォーク・反クォークの対になったり、また元に戻ったりする。

の内部には、クォークと反クォークとグルーオンが存在することになる。

ドイツのハンブルクにある DESY (ドイツ電子シンクロトロン研究所) では、国際共同実験 HERMES が 1995 年から行われている。それ以前の実験は、散乱されたミュオンないし電子ビームを測定するのが主な実験手法であったが、HERMES グループは、散乱の際に発生するハドロン (パイ中間子やその仲間) も同時に計測する測定器を建設した。クォークには種類があって、u (アップ), d (ダウン), s (ストレンジ) など呼ばれている。これらやその反クォークのスピンの寄与を、理論的な強い仮定をせずに分離して抽出することが行われた。

これに関連して、クォークが元になってハドロンが発生する過程は、電子-陽電子衝突型の実験で詳しく調べることができ、つくばの KEK-Bfactory などで行われている。

#### 4. 軌道角運動量の寄与

陽子のスピンは  $1/2$  であるから、 $1/2 =$  (クォークのスピンの寄与) + (グルーオンのスピンの寄与) + (クォークやグルーオンの軌道角運動量の寄与), という足し算が成り立っていないからである。

軌道角運動量は、クォークやグルーオンが陽子という狭い空間の中で飛び回っているために生ずるものである。太陽のまわりを回る惑星の角運動量と同様に運動学的な起源のものだが、陽子のスピンに対する寄与をすることがありうる。

HERMES は、横偏極の陽子標的を用いた実験も行った。横偏極の標的とは、電子ビームの進行方向に対し垂直な方向にスピンが向いた標的を意味する。それにより得られるデータから、クォークの軌道角運動量が陽子

のスピンに寄与するかどうかを判定することができる。実際に、クォークの軌道角運動量の寄与があることを示唆するデータが得られている。

次に述べる COMPASS も、横偏極の標的による実験を行っている。

#### 5. グルーオンのスピンの寄与

CERN では、現在 COMPASS と呼ばれる国際共同実験が進行中で、グルーオンスピンの陽子や中性子のスピンに対する寄与を測定している。グルーオンは光子などと同じくスピンの  $1$  の粒子である。これまでに得られた結果は、グルーオンのスピンの寄与は小さいことを示唆している。

アメリカの BNL (ブルックヘブン国立研究所) では加速した陽子と陽子の正面衝突型の実験が進行中である。偏極した陽子ビームが使われている。このような高エネルギーでは、図 4 のように、陽子ビームはクォークやグルーオンの束とみなすことができる。両側から飛んで来たこれらの粒子のうち、グルーオンとグルーオンの衝突、グルーオンとクォークの衝突などが起きる。

グルーオンとクォークが衝突してクォークと光子になる過程を測定すると、グルーオンのスピンの陽子スピンに対する寄与を調べる

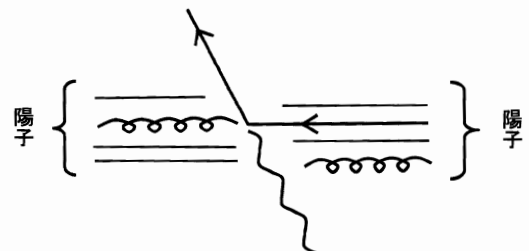


図 4 高エネルギーの陽子と陽子の衝突型実験では、陽子ビームはクォークとグルーオンの束とみなすことができる。この図ではグルーオン(らせん)とクォーク(直線)が衝突し、クォークと光子(波線)になっている。

ことができる。この場合の光子は高エネルギーなので、ガンマ線とも呼ばれる。

現在までに、パイ中間子の生成について、陽子ビームの偏極度の影響が調べられた。このパイ中間子の一部はグルーオン同士の衝突によって発生したものである。これによってもグルーオンのスピンの寄与が研究できる。

## 6. 今後の展望

国外の実験施設を用いた国際共同実験では従来から日本人研究者が主要な役割を果たしている。

日本国内の施設では、SPring-8, KEK-

Bfactory, および東海村に建設中の J-PARC などで関連した実験が進行中ないしは計画中である。理論的な研究も盛んに行われている。「陽子のスピンの問題」が契機となって、スピンの観点から量子色力学の研究がなされており、この分野の今後の発展が楽しみである。

### ■ 参考文献 ■

- 1) J. Ashman et al., EMC, Phys. Lett. B 206 (1988) 364, Nucl. Phys. B 328 (1989) 1

**柴田 利明** (しばた・としあき)  
東京工業大学大学院理工学研究科 教授,  
理化学研究所客員主管研究員