

特集：量子色力学—中間子論を源として

## 総論

### 中間子論から量子色力学へ

山田 作 衛

湯川博士による中間子の予言以来、70年にわたる原子核・素粒子の研究は近年格段に発展した。現在の理解では、中間子も陽子や中性子も本当の素粒子ではなく、もっと小さなクォークと呼ばれる素粒子でできている。そこではカラー力と呼ばれる力が働いており、その法則の量子色力学も進歩した。しかしながら、疑問や課題も多々残っていて、さまざまな方向から解決への努力が続いている。以下で核力と量子色力学に関わるいろいろな研究が語られるので、まず湯川理論に始まる発展の大筋を述べたい。

#### 幕開けからクォーク模型まで

中性子が見つかった後、陽子と中性子を結びつけ原子核を作る力が何であるか、世界の研究者が注目した。当時知られていた電磁力と重力は、遠くまで効果が及ぶものだった。一方、陽子や中性子間の引力は原子核程度の近距離のみで働き、陽子間の電気的な反発力を凌ぐ強い力である。湯川博士の発想は、電磁力が光子の交換に起因するように、核力もやはり未知の粒子が媒介すると考え、力の到達距離からその質量を、力の強さから陽子・中性子との結合定数を求めた。電磁力が無限の遠くまで及ぶのは光子に質量がないため

で、有限の質量を持った粒子に起因する力はその質量に応じた近距離力となる。原子核の大きさに相当する質量は電子と陽子の質量の中間にあるので、中間子と呼ばれる新しい素粒子が核力の源として1935年に予言された。

紆余曲折を経て、予言から12年後に宇宙線中に予言通りの中間子が見つかり、湯川博士が日本で初めてのノーベル賞受賞に輝いた。宇宙線の研究では、その後も新たに別の中間子や、陽子・中性子（併せて核子と呼ばれる）の仲間である重粒子が次々と見つかり、高エネルギーの加速器による研究が始まると、さらに共鳴状態と呼ばれる短寿命の新粒子が続々と発見された。素粒子の仲間は百種を越え、素粒子とは呼べないくらいに増した。

こうした新粒子に係わる反応で素粒子の本質を探るのはなかなか難しかった。電磁反応を計算する際には有効な近似方法が、核力の場合にはその反応の強さ故に使えなかったし、粒子の性質と強い力の反応が絡み合う複雑さもあった。

それでも新粒子を理解するためにさまざまな試みが提案されたが、その一つに、中間子や重粒子の特性に基づいた、原子の周期律表に相当する素粒子の分類があった。坂田博士を中心にした名古屋グループなどにより、3種類の基本粒子で重粒子と中間子を構成する

複合模型が考えられた。最終的にSU(3)という群を用いたグループ分けが成功し、基礎となる3種類の粒子(クォークと名付けられた)の組み合わせで、当時知られていた共鳴状態を含む全ての中間子と重粒子を整理できた。中間子はクォークと反クォークの対であり、重粒子は3個のクォークで出来ていると考えられ、素粒子反応の選択則もクォークの組み替えの可否で説明された。核子間の中間子の交換は、クォーク模型ではクォーク1個ずつの入れ替えと見なせる。

しかし問題もあった。クォークの電荷が陽子の電荷の(2/3)とか(-1/3)とかの半端な値と結論されたが、そのような粒子は実験では見つからなかった。さらに、一部の粒子の特性にも矛盾が生じた。全く同じタイプの3個のクォークから出来る重粒子は、パウリの排他原理に従わないような組み合わせとなったが、これは観測に反する結論だった。

このような問題を解決したのが、南部博士などが提案した新しい自由度、「色」の導入で、それぞれのクォークに赤、青、緑と呼ばれる3色あると考える。「色」と言っても、目に見えるような色ではなく、3色を同等に組み合わせたり、あるいは色とその反色を合わせると色の効果が消える(すなわち白になる)のが光の3原色に似ていることから付けられた呼称である。中間子と重粒子はまとめてハドロンと呼ばれ、内部のクォークは白色になるような色の組み合わせになっていると考えられた。何らかの理由でクォークの色はハドロンの中に閉じこめられ、自由に飛び回れないとすれば、半端な電荷を持ったクォークが見つからないのも説明できる。また、特性がまったく同じ3個のクォークでも、異なった3色が同等に入る組み合わせならパウリの排他原理に従った。

このようにつじつまは合わせられたが、未知の自由度や電荷も持つクォークにはどこか

収まりの悪さが残り、単に分類のために便利な仮想的粒子と見る研究者が多かった。

色に対して、粒子の整理に導入された当初の3種の区別は、(これも化学的な香りとは関係ないが)「香」と呼ばれるようになり、後に増えて、今では6種類知られている。そのうち原子核中の陽子や中性子を作っているのは、基本的にはアップとダウンと呼ばれる二つの香りのクォークである。

### 深非弾性散乱と量子色力学

ハドロン同士を反応させる実験に相俟って、上述の分類学はじめ、さまざまな現象論的研究が進展したが、並行して標的に粒子を当てその跳ね返り方を観測する、ラザフォード以来の伝統的な手法でハドロンの構造を探る研究も行われた。高エネルギー電子やニュートリノのビームが使えるようになって、新しい切り口の実験が可能となり、実験の分解能はビームのエネルギーに比例して向上した。電子を用いたとき反応を起こす力は強い力ではなく、主に電磁力であり、朝永博士などの活躍で理論的な基盤も確立していたので、曖昧さを残さずに標的の構造を抽出できた。

1960年代にスタンフォードの線形電子加速器センターで行われた電子・陽子散乱が新しい展開の始まりだった。標的の陽子が破壊され多数の中間子が飛び出す非弾性度の高い現象(深非弾性散乱と呼ばれる)の散乱された電子だけに注目し、ファインマンが陽子の構成要素としてパートンというアイデアを提案した。深非弾性散乱を構造のないパートンと電子との電磁力による弾性散乱と考えると、反応したパートンの陽子中での運動量分布が測定できる。この描像でいくつかの重要な結果が導かれた。まず電子と散乱するパートンは陽子の中でほぼ自由に運動していると

考えられること、またパートンの運動量分布は電子のエネルギーを変えてもほぼ一定であり、パートン運動量の総和は陽子の運動量の約半分であることなどである。ニュートリノによる深非弾性散乱も含めたその後の詳しい研究で、深非弾性散乱を起こすパートンを、分類学で提案されたクォークと見なせることが分かった。

陽子の中にクォークがあるなら、クォークを結びつけている力は何だろう。その力は、陽子の半径を超えるような距離では強くなり、陽子の中ではクォークが結合しつつも自由に動き回れる程度に弱い、漸近的自由と呼ばれる特性を持たなくては行けない。一昨年のノーベル物理学賞を受けた、ポリツァー、グロス、ウィルチェックの3博士が謎を解いた。素粒子分類学で導入されたクォークの色を替える働きをする粒子を導入し、その交換がクォーク間引力を生み出すと考えた。新粒子は、クォークを結びつけるという意味でグルーオンと名付けられ、力の法則は量子色力学 (Quantum Chromo-Dynamics, 略して QCD) と名付けられた。グルーオンは色と反色の組み合わせさった色荷を持ち、クォークに結合するとその色を変化させる。完成している量子電磁力学を参考に形成されたが、電荷が1種類 (プラスとマイナスをまとめて1種類と見なす) であるのに対して、量子色力学ではそれが3色あるためその数学は複雑で、力の性質も全く違った。電荷がない光同士に力は働かないが、色荷があるグルーオンとグルーオンの間では、やはりグルーオンが媒介する引力が働く。そのため、電荷間の電場が広がってクーロンの法則に従うのに対し、クォーク間のカラー力の場合は距離が離れても広がらない。力線がいわば紐状に保たれるので、二つのクォークが離れても力は弱くならず、両者を完全に引き離すには無限のエネルギーが必要となる。つまり、自

由なクォークは作れない。

また、陽子中にはグルーオンも存在するはずだから、クォークの運動量の総量が陽子の運動量の半分であることも納得できた。電荷を持たないグルーオンは電子散乱では見えないので、それが残り半分を担っているとして勘定が合う。

### クォークと量子色力学の確立

以来、さまざまの実験で量子色力学の考え方が、検証されてきた。最近の話題は別稿を見ていただくとして、まず、深非弾性散乱でパートンの運動量分布がより精密に調べられ、グルーオンを含む高次の効果で、クォークの運動量分布が観測精度を上げるにつれて変化の様子が確認された。最後の決めては、新しい実験手法として1970年代に発展した電子・陽電子衝突実験だった。高エネルギーでの電子・陽電子対消滅でハドロンが発生する過程は、まずクォーク対が真空中から作られ、それがハドロンに姿を変えるものと理解でき、反応確率などがうまく再現できた。70年代末にドイツの DESY で PETRA が稼働し、反応エネルギーが増すと、作られたハドロンは逆方向に飛び出す2組みの粒子束として観測され、直接的な証拠となった。ハドロンジェットと呼ばれるこの現象は、クォーク間にのびたグルーオンの力の紐がクォーク・反クォーク対を創生してちぎれるのを繰り返し、結果として親のクォークの方向に多くのハドロンが飛び出したものと解釈できた。更に、ジェットが3本ある現象も見られ、これはクォークからグルーオンが一つ放射される高次の効果で説明されて、その頻度から QCD の結合定数を決定できた。

こうした展開と前後して、同年代には4番目と5番目の香りを持つクォークで出来た新粒子が見つかったこともあり、単独では見つ

からなくともクォークやグルーオンが素粒子であると多くの研究者が受け入れ、量子色力学がその力の法則と認められた。結合定数がエネルギーの増加に伴って予測どおりに減少することも確かめられた。

1980年代には、我が国の電子・陽電子衝突装置のトリスタンで、4本のハドロンジェット事象が観測された。これは主に、クォークから放出されたグルーオンが二つのグルーオンに分かれる、もっと高次の補正に由来する現象と理解され、グルーオンの間でも力が働く量子色力学の特徴を確認した観測である。

### 現在の課題

こうして量子色力学の正しさが確かめられ、素粒子の標準模型と呼ばれる理論体系の重要な部分となった。その後の研究で理論・実験の両面でさらに精度を増してはいるが、まだ課題は残っている。検証実験のほとんどは、クォークやグルーオンがその姿を保って反応している高いエネルギーでの現象をハドロンジェットとして識別している。このような漸近的自由の領域をはずれると、現象は急速に複雑になり、理論との比較も難しくな

る。実験解析には昔ながらのハドロン現象論の助けを借りることも多い。QCD理論の枠組みが出来上がっても、結合定数が大きいところでは摂動近似が使えず、全く新しい計算手法が必要である。精密に計算できる現象は限られ、現象論を交えて計算できることでも実験との比較は単純ではない。理論家の努力が今も精力的に続けられる所以である。

実験研究も多方面で進められている。自由なクォークが核子・中間子、原子核へと変化する過程を、さまざまな手法で探る努力である。それは宇宙誕生直後の混沌とした高エネルギーの状態から物質が生まれた過程の研究とも言える。核子や原子核中のクォーク・反クォーク・グルーオンの振る舞いを詳細に探る研究や、原子核衝突によって高温状態を作り自由なクォークの集団を探ろうという研究、原子核に新しい要素を組み込み、自然界にはない新しい状態を作って調べる試みなど、素粒子、原子核の両分野の活動が多彩であり、建設中のJ-PARCにも大きな期待が寄せられている。

山田 作衛 (やまだ・さくえ)

東京大学名誉教授、高エネルギー加速器研究  
機構名誉教授、総合研究大学院大学名誉教授