

原子核の量子色力学

土 岐 博

1. 原子核で働く力を与えるパイ中間子

創立間もない大阪帝国大学の理学部で、湯川は原子核に働く力を研究していた。重力以外に電磁気力しか知らない時期に、原子核の大きさ程度の距離でしか働かない力を媒介する粒子（ボソン）は陽子と電子の中間の重さを持つ必要があった。その後、宇宙線の中に見つかった中間子はパイ中間子と名づけられた¹⁾。

このパイ中間子は有限の質量を持つ以外に擬スカラー粒子であり、核子とはスピン相互作用する。原子核を結びつける粒子は核子のスピンのフリップすることにより力が働く。このパイ中間子と核子の相互作用はアイソスピンが1で擬スカラー粒子の性質を持つ理論として湯川理論が出てすぐに定式化された。しかし、このパイ中間子がもたらす力を扱って原子核を作る試みは、近年まで行われなかった。

最近までは原子核物理はパイ中間子を直接扱うことなく発展していった。即ち、原子核の構造はシェルモデル的であり、シェル内の核子に働く相互作用を原子核の低い励起状態のスペクトルを再現する有効相互作用を導入することにより記述し、加速器実験とあいまって原子核の構造に対する理解が深まっていった。

2. カイラル対称性の申し子であるパイ中間子

量子色力学ではクォークの質量は核子（陽子・中性子）の質量に比べて無視できるほどに小さい。従って、カイラル対称性が近似的に成り立っている。さらに、パイ中間子の質量も陽子の質量と比べると圧倒的に小さい。この近似的に成り立っているカイラル対称性がグルオンの非摂動的な働きにより自発的に破れるとクォークが大きな質量を持ち、その一方で、パイ中間子はほぼゼロに近い質量を持つことになる（ゴールドストーン南部ボソン）。この事実と最初から少しカイラル対称性が破れていることから実験によるパイ中間子の質量を説明できる。核子が大きな質量を持っているのは、内部構造を形成するクォークが大きな質量を獲得したことによると考えられている²⁾。

3. パイ中間子の原子核での働き

パイ中間子は原子核内で重要な役割を果たしている。陽子と中性子からなる重水素が束縛するのはパイ中間子の交換力による。最近では核子数が10くらいまでの原子核での第一原理の計算が行われ、3体力までを含むハミルトニアンにより、原子核の基底状態と低

い励起状態はほぼ完全に再現されることが示された。さらには、パイ中間子は全体のほぼ80%の引力を与えることがわかった。

パイ中間子の交換力は非相対論的には近似的にテンサー力で表現される。最近はこのテンサー力の働きの重要性が各所で指摘されている。He 4の構造は単純なシェルモデル的な構造ではなくテンサー力が重要な役割を果たしている。その証拠がHe 4と中性子の散乱の位相差に現れている。つまりスピン軌道力に対応する効果を生み出すことが示されている。最近ではLi 11のハロー構造もテンサー力が重要な働きをしており、中性子二つが角運動量が0の状態に入っている構造が基底状態に50%の寄与をしていることが話題になっている。

4. パイ中間子をあらわに使う 原子核を作る

原子核のように核子やパイ中間子の運動エネルギーが10 MeV くらいの低エネルギースケールではクォークは核子の中に閉じ込められておりクォークは個々には原子核の構造に影響を与えない。むしろ、核子とパイ中間子を扱うラグランジアンで核子の多体系である原子核を表現することが適当である。最近になって、核子とパイ中間子の相互作用を与えるカイラル対称性をもったゲルマン・レビーのラグランジアンを使って原子核を作る試みがなされるようになった。

質量が40~60 くらいの中性子数と陽子数が等しい原子核の計算を行うと、原子核を作ることが出来ることがわかった。さらには、パイ中間子は必要なスピン軌道力の半分くらいは出すことが可能であることがわかった。その意味では原子核のマジック数を出すのにパイ中間子は重要な役目を果たしている可能性も高い。

5. 原子核をパイ中間子のハリネズミ構造で表現する

核子をハリネズミ構造で表現する試みは1942年のパウリの研究がある。その後、スキルムやウィッテンなどが研究をし、最近の五つのクォークの新粒子の予言にも重要な武器となった。

パイ中間子が原子核内でも重要な役割を果たしているのなら、原子核でもハリネズミ構造が存在している可能性が大いにある。実際、原子核での球形近似でパリティを混合する計算では、パイ中間子の引力を十分に取り扱えないことが最近の研究から明らかになってきている。現在はハリネズミ構造を仮定した研究が始まっている。

6. 湯川理論による原子核

湯川理論は1935年に原子核を構成する理論として提唱されている。しかし、その性質がアイソベクターで擬スカラー粒子であることによりその取り扱いが難しく、直接原子核を構成する議論は最近までなかった。ハドロン物理でのパイ中間子の重要性や原子核物理でのテンサー力(パイ中間子交換力)の研究からやっと多くの研究者が原子核でのパイ中間子の役割を直接扱う研究が始まった。まさしく、湯川理論が湯川生誕100年の今戻ってきた様相を呈している。

■ 参 考 文 献 ■

- 1) H. Yukawa, Proc. Phys. Math. Soc. Jpn. 17 (1935) 48
- 2) Y. Nambu and G. Jona-Lasinio, Phys. Rev. 122 (1961) 345

土 岐 博 (とき・ひろし)
大阪大学核物理研究センター センター長