

K中間子と陽子2つからなる“奇妙な”原子核

岩崎 雅彦 (理化学研究所開拓研究本部・仁科加速器科学研究センター masa@riken.jp)

佐久間史典 (理化学研究所開拓研究本部・仁科加速器科学研究センター sakuma@ribf.riken.jp)

山我拓巳 (理化学研究所開拓研究本部 takumi.yamaga@riken.jp)

密度は物質が占める体積でその質量を割ったものである。この意味で、原子核は我々が知る安定で最大密度を誇る『物質』であり、その値は金などの一般的な意味での高密度物質と比較しても13桁も高い。

この原子核は、陽子と中性子から構成される。さらに、核中の陽子、中性子(総称して核子と呼ばれる)はクォークで構成される複合粒子(ハドロン)である。

原子核の構造がこのように2段階で説明される理由は、原子核が単なるクォーク集合体ではなく、内部に階層構造を持つからである。全てのクォークはそれぞれ3つの異なる『色電荷』を持っていて、3つの違う色電荷のクォークの組みあわせ(無色)だけが核子を作る。これが、量子色力学(QCD)の『クォーク閉じ込め機構』である。原子核は、この無色の核子が集まって構成される。原子核中の核子間距離に比べて核子内の閉じ込めの(色電荷を持つクォークが自由に振る舞える)空間サイズは小さく、核子は原子核内でも粒子として振る舞う。

しかし、この核子の粒子性は実はそれほど強固なものではない。十分に原子核密度を上げられれば、核子間距離が閉じ込めサイズを下回ることで核子は粒子性を失い、核物質はクォークが閉じ込めから解放された、全く新しい『クォーク物質相(カラー超伝導相)』に相転移すると考えられている。

さて、クォーク複合粒子には、陽子や中性子などの3つのクォークでできた核子の仲間(バリオン)以外にも、クォークと反クォークで構成され、反クォークの反色電荷とクォークの色電荷とで無色となる中間

子がある。では、中間子を粒子としての個別性を保ったまま、原子核中に埋め込めるだろうか? 中間子はボゾンであり核子はフェルミオンなので、その間にはパウリ原理が働かない。従って、そのような状態があれば中間子が空間的に核子と重なり、反クォーク・クォークの入り混じる「奇妙な量子状態」が発現する。中間子を粒子として核内に内包したこのような状態は、「カラーによるクォーク閉じ込め機構」や「クォーク物質の相転移」を研究する絶好の舞台となろう。そこでは、核媒質中という極めて高い密度環境下でのクォーク複合粒子である中間子や核子の粒子としての性質、その物質密度依存性などを直接調べられるだろう。

我々はその手始めに、K中間子ビームをヘリウム3原子核に照射することで、K中間子を内包する原子核として最も単純な K^- と二個の陽子 p が束縛した“ K^-pp ”状態を作りだした。その全束縛エネルギーは約50 MeVにも達し、通常原子核の約10倍近く強く結合する束縛状態であることが分かった。一方でK中間子自体の質量(エネルギー)と比較すると束縛エネルギーは高々約10%に留まるので、依然としてこの系はカラーで閉じ込められたクォーク複合粒子である K^- 、 p 、 p の3つの粒子が束縛した状態と考えるのが自然である。また、生成断面積の運動量移行依存性から、生成された状態の空間サイズは非常に小さい(~ 0.5 fm)可能性が示された。

今後その基本性質を解明し、量子色力学が綾なすクォーク複合粒子(ハドロン)の物質階層構造・粒子性の謎に迫りたい。

—Keywords—

K中間子:
クォーク(q)は3つの「世代」に分類され、各世代には2種のクォーク(u , d など)がある。中間子は反クォーク(\bar{q})と q が対 $\bar{q}q$ になったもの。K中間子は \bar{q} か q のいずれかが、第2世代のストレンジと名付けられたクォーク(s)である4つ(K^+ , K^0 , \bar{K}^0 , K^-)の中間子の総称。

原子核密度:
原子核は液体のような性質を持ち、中性子星内部のように強力な重力の助けがなければ圧縮できないと思われている。ただし、核子が最も強く束縛したヘリウム4原子核の中心密度は通常核の2倍近くあり、原子核密度は束縛エネルギーにも依存する。

ヘリウム3原子核:
自然界に多く存在するヘリウム原子核は陽子2個と中性子2個からなる(ヘリウム4)。ヘリウム3原子核は、ヘリウム4の安定な同位体であり、陽子2個と中性子1個からなる。ヘリウム3の核内中性子を K^- に置換する反応では、K中間子が束縛することで発生する余剰エネルギーを置換された中性子に運動エネルギーとして担わせることができるので、ヘリウム3原子核は“ K^-pp ”を生成する最も理想的な原子核標的である。