

ストレンジクォークと量子色力学

今 井 憲 一

1. はじめに

湯川理論に登場する原子核を構成する陽子や中性子さらに核力に関与する π 中間子などは、アップ (u) とダウン (d) クォークから構成されている。1950年代に発見されたK中間子や Λ 粒子はストレンジ (s) クォークを含む。陽子や Λ 粒子のようなバリオンは3個のクォークで、中間子はクォーク反クォーク対で構成されるとする構成子クォーク模型は、このようなストレンジクォークを含む粒子の発見によってはじめて確立したことはよく知られている。3個のストレンジクォークからなる Ω^- の存在の予言と発見はその象徴である。その後、南部によって色電荷の自由度が導入され、クォークの世界の力学としての量子色力学の確立にいたるのである。その意味でもストレンジクォークと量子色力学は当初から深いつながりがあるといえるだろう。

その後発見された、チャーム (c)、ボトム (b)、トップ (t) と呼ばれるクォークは非常に質量が重い。それに比べると、uとdクォークは裸の質量が数 MeV/c^2 でsクォークは約 $100 \text{MeV}/c^2$ と比較的軽くて、これら3個のクォークの世界では $\text{SU}_c(3)$ 対称性が比較的良好に成り立っている。当初のクォーク模型の成功はその結果でもある。したがっ

て陽子や中性子あるいは原子核といった通常の物質の世界を考えていくときにも、ストレンジクォークまで含めて考えていくほうがより一般性のある理解を得ることができると考えられる。たとえば湯川のはじめた核力の理論を量子色力学から理解しようとする、ストレンジクォークを含む $\text{SU}_c(3)$ の世界で考えたほうが、実験的な情報も増えて理解が深まる。さらに通常の原子核の世界を拡張したストレンジクォークを含んだ核物質の世界も考えることができる。実際ストレンジクォークを含む原子核であるハイパー核が高エネルギー研などで多くつくられ研究されている。量子色力学との関係では、そのようなストレンジクォークを含んだ物質世界ではクォーク物質ともいふべき状態が実現されるとの予測がある。

2. クォークの閉じ込めと色磁気力

低エネルギー領域でのクォークの世界の理論としての量子色力学の特徴は、クォークの閉じ込めと色磁気相互作用であろう。電荷をもつ電子と陽子が結合する水素原子と比べて大きく異なるのは、どうしても色電荷をもつクォークの結合体を解離してクォークを単独に取り出せないことと、スピンによるエネルギーの違いが大きいことである。いくら高いエネルギーで陽子を壊してもクォークは出て

こない。原子で見られるスピンの違いによる微細構造は、クォーク系ではとても微細構造と呼べない大きさとなる。

閉じ込めの機構は南部による“ひも”の考えで定性的に理解され、現象論的なポテンシャルを与えることはできる。しかし第一原理から完全に理解されているとはいえず、いまだ量子色力学の大きな課題である。理論的にはクォーク3体系のバリオンと2体系のメソン以外にも、全体として“無色”でさえあれば4体、5体や6体あるいはそれ以上の多体系があってもよいことになっている。不思議なことにこれらはなかなか見つからず、そのうちにエキゾチックハドロンと呼ばれてながく注目され探索されてきたがまだ100%確立したものがない。クォーク5体系であるペンタクォークが発見されたとして最近大きな話題になったのは、このような状況の反映である。

電磁相互作用と際立って異なるのは、スピンに依存する“色”磁気相互作用が際立って大きいことである。したがってハドロンはスピンによって質量が大きく異なる。s軌道に3個のクォークの入ったバリオンにはスピン1/2の陽子などのバリオン(8重項)とスピン3/2の Δ などのバリオン(10重項)があるが、その質量差は約300 MeV/c²ある。メソンも含めてこの差は量子色力学の色磁気相互作用によるものとしてよく説明できることが知られている。R. Jaffeはこの色磁気相互作用がクォーク6体系にどう働くかを調べた。その結果、SU_c(3)の対称性のもとではスピン0のssuuddのクォークからなる系は、クォーク6体系ではこの色磁気相互作用が全体として引力的に働き、安定な粒子として存在できるとしてHダイバリオンと名づけた¹⁾(図1)。もしそうだとストレンジクォークを含むクォーク物質の世界が広がる可能性がある。クォーク星が存在するかもし

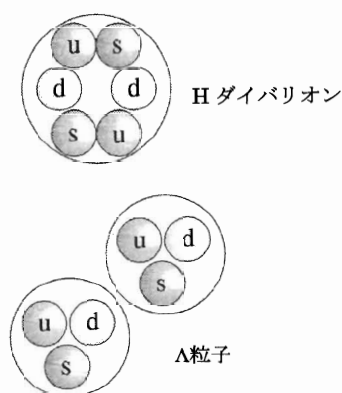


図1 ssuuddクォーク6体系は色磁気相互作用と対称性から2個の Λ 粒子でいるよりもHダイバリオンのほうが安定であると予想され、ストレンジクォークを含む新しい物質の存在を示唆した。

れないということにもなる。一方この色磁気相互作用は2核子系をクォーク6体系とみなすと斥力を与え、核力のハードコアとして現象論的に知られている近距離斥力を自然に説明することができる。実際クォーク模型と共鳴群法を使って核力を計算するとこのハードコアが現れる。核力のハードコアの存在は核子多体系としての原子核の安定性を保証するものであり、きわめて重要な性質である。湯川が始めた核力の研究と量子色力学は具体的にはここで初めてつながることにもなる。

sクォーク1個のクォーク6体系も色磁気力は斥力的であるため、通常のハイパー核は原子核の中に Λ 粒子が存在するという立場で理解できると考えられる。実際この立場で多くのハイパー核の実験データを説明できる。最近田村らによって成功したハイパーボール検出器によるハイパー核の γ 線分光からは、ハイパー核力ともいべき ΛN 間の相互作用がそのスピン依存性を含めて詳細にわかってきた。とくにスピン軌道力が通常の核力に比べ二桁ちかく小さいことは驚きである²⁾。これらの研究は核力を量子色力学から理解するうえでも重要なステップとなろう。

3. H ダイバリオンとダブルハイパー核の探索

筆者らはH ダイバリオンの発見を陰に陽に目指して、Brookhaven 研究所の K 中間子ビームで計4回 (E813, E836, E886, E906), KEK の K 中間子ビームで計4回 (E176, E224, E373, E522) 実験を行った。Brookhaven 研究所では主にカウンターで、KEK では原子核乾板や scintillating fiber などの新しい visual な検出器を開発して実験を行った。H ダイバリオンは $K^-(pp) \rightarrow K^+H$ や $\Xi^-d \rightarrow nH$ 反応で探索し、原子核乾板ではストレンジクォーク2個を含む Ξ^- 粒子を核に吸収させてダブルハイパー核を探索した。その結果はすでに論文に報告されているが、残念ながら2個の Λ 粒子より軽い安定な H ダ

イバリオンの発見には至らなかった。そのかわり、ダブルハイパー核の弱崩壊をいくつか発見した。そのなかでも岐阜大学での原子核乾板の解析で発見された事象は、かつて坂東が“ラムファ”となづけたダブルハイパー核 (${}^6\text{He}_{\Lambda\Lambda}$) であることがわかり、“Nagara 事象”と呼ばれて多くの注目を集めた³⁾。図2に原子核乾板でとらえたラムファの生成と崩壊のようすを示す。ラムファの飛跡が確認されその π 中間子崩壊が観測されている。もし H ダイバリオンが2個の Λ 粒子より軽いと、2個の Λ 粒子を含むダブルハイパー核は強い相互作用で瞬時に H ダイバリオンを放出してしまいこのような π 中間子崩壊は観測されないことになる。したがってこの事象から軽い安定な H ダイバリオンの存在は否定されることになる。

H ダイバリオンについては、Jaffe 以来多

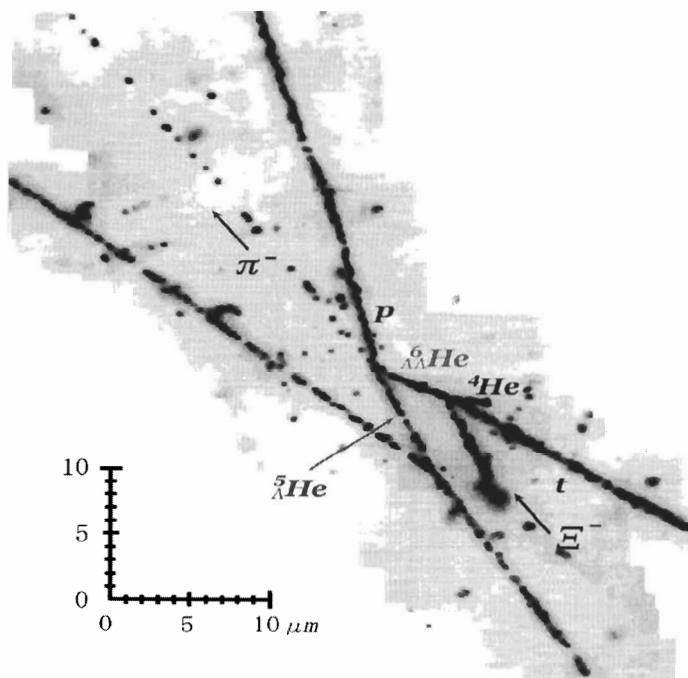


図2 原子核乾板にとらえられたダブルハイパー核“ラムファ” (${}^6\text{He}_{\Lambda\Lambda}$) の生成と崩壊。 Ξ^- 粒子が静止吸収されたところからラムファが飛び出し、ダブルハイパー核であることを示す連続崩壊が観測される。崩壊粒子の飛跡の長さからラムファの質量が精密に決定された。

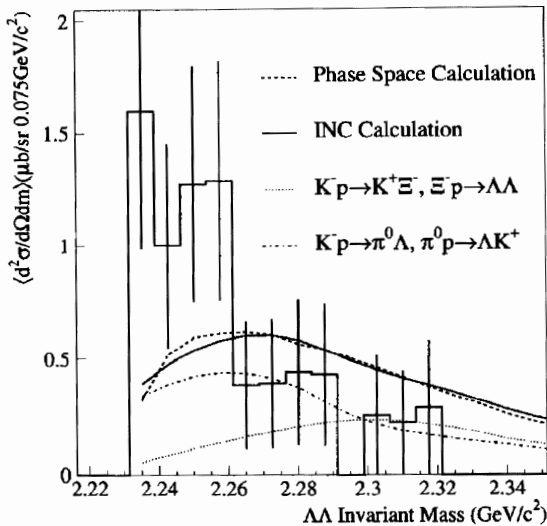


図3 $K^-C \rightarrow K^+\Lambda\Lambda$ 反応で測定された $\Lambda\Lambda$ 不変質量分布. phase space や核内カスケード計算 (INC) と比べると閾値付近にピークがあるように見える.

くの理論家が主に量子色力学の有効理論を使ってその質量の計算をしている. なかには安定でなく $\Lambda\Lambda$ より重い共鳴であるとする計算もある. そこで筆者らは Scintillating fiber 検出器を標的として使って $K^-C \rightarrow K^+\Lambda\Lambda$ 反応で生成される $\Lambda\Lambda$ の不変質量分布を調べた⁴⁾. 図3にその結果を示すが, ちょうど $\Lambda\Lambda$ の閾値付近にピークがある. この段階では統計が十分とはいえないので, 最近 KEK でこのピークを確認するための実験 (E 522) を行った. 結果はまだ論文発表するにいたっていないが同様のピークを見出している⁵⁾. 閾値にあるため $\Lambda\Lambda$ の終状態相互作用による可能性は完全には否定できないが, ラムファの束縛エネルギーを再現する $\Lambda\Lambda$ 相互作用のいくつかのモデルを使った計算ではこのピークを再現できないので, H ダイバリオン共鳴の可能性もある. もし H ダイバリオン共鳴の質量が $\Lambda\Lambda$ に近いと, 実はダブルハイパー核のなかのストレンジクォークは2個の Λ としてだけでなく H として存在する確率も無

視できないかもしれない. これらのことを明らかにするには, もっとたくさんダブルハイパー核をつくりその構造を調べる必要があるし, その崩壊もさらに詳しく調べたい. そこで筆者らは, これまでの十倍のダブルハイパー核を発見する実験を計画し, そのために原子核乾板の自動解析の高効率化や高速化などに取り組んでいる. 日本で発見された原子核は少ないが, ダブルハイパー核についてはすべて日本で発見してそのミニチャートを作りたいと思っている.

紙数がつきたので省略するが, ストレンジクォークと量子色力学との関係では, 話題のペンタクォーク Θ^+ や筆者らが SPring-8 で研究している Λ (1405) の構造も, クォーク閉じ込めとクォーク多体系の存在様式を問う注目すべきテーマである. いずれも現在 KEK も含めて研究が続いている段階であり, 近く結論を得ることができると考えている.

核子や中間子そして核力や原子核を量子色力学から理解していく上で, ストレンジクォークとそれを含むハドロンや原子核のはたす役割は大きい. さいわい大量の K 中間子ビームを供給できる J-PARC が東海村に建設中であり, ストレンジクォークを含むハドロンと原子核の研究が今後大いに進展することが期待できる.

■ 参 考 文 献 ■

- 1) R. Jaffe, Phys. Rev. Lett. 38, 195 (1977).
- 2) H. Aikawa et al., Phys. Rev. Lett. 88, 82501 (2002).
- 3) H. Takahashi et al., Phys. Rev. Lett. 87, 212502 (2001).
- 4) J.K. Ahn et al., Phys. Lett. B 444, 267 (1998).
- 5) C.J. Yoon, K. Imai et al., PANIC05 Conference (SantaFe Oct. 2005).

今井 憲一 (いまい・けんいち)
京都大学大学院理学研究科 教授