

エキゾチックハドロンの発見とその解明

物質世界を構成する最も基本的な粒子であるクォークは単体では存在できず、複合粒子として「ハドロン粒子」に閉じ込められる。これまでに数百種類に及ぶハドロン粒子が知られているが、それらは全てクォーク 3 個でできたバリオン (qqq) とクォークと反クォークの対で構成されるメソン ($q\bar{q}$) に分類され、このハドロン描像は「クォーク模型」として長く受け入れられてきた。ところが、クォークに働く「強い相互作用」の基礎理論である量子色力学 (QCD) は、バリオンとメソン以外の構造を持つハドロン粒子 - 例えば 4 クォーク状態 ($qq\bar{q}\bar{q}$) や 5 クォーク状態 ($qqqq\bar{q}$) - の存在を禁止していない。こうしたエキゾチックなハドロン粒子の存在は長く議論され、多くの探索実験も行われてきたが、なかなか確たる証拠は得られなかった。

ところが、2003 年に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の B ファクトリー実験 (Belle 実験) において、3872 メガ電子ボルトの質量に幅の狭い共鳴状態が発見されて状況は一変した。X(3872) と命名されたこの粒子の質量は、チャーム-反チャーム・クォークメソン ($c\bar{c}$) を仮定してクォーク模型から予想される質量とは大きく異なるが、チャーム・クォークを含むメソンである D 中間子 ($c\bar{u}$) 2 個分の質量に近いので、4 クォーク状態として解釈され注目を浴びた。さらに 2008 年には Z(4430)⁺ と呼ばれる電荷を持つ同様の粒子を発見した (図)。電荷を有するこの粒子は、決して $c\bar{c}$ の組み合わせでは構成できず、 $c\bar{c}u\bar{d}$ など少なくとも 4 個のクォークを構成子として含むことが確実である。2011 年には、ボトム・クォークを含む 2 種類の 4 クォーク状態である $Z_b(10610)^+$ および $Z_b(10650)^+$ 、2013 年には Z(3895)[#] など、これまでにおよそ 20 種類ものエキゾチックハドロンの発見が相次いでいる。また、これらの発見の幾つかは LHC 実験などの他の実験においても再確認され、4 クォーク状態の存在は確実となった。

このような実験結果を説明するため、理論研究者は様々なアイデアを提案してきた。そこには以下のような背景がみられる。我々はハドロン粒子というクォーク-グルーオン複合系を通して実験事実を分析しなければならないので、ハドロン粒子に関する現象論的な考察が必要不可欠である。しかし、QCD における「色の閉じ込め」のため基本粒子のクォークとグルーオンは直接には観測できない。実際、クォークとグルーオンからハドロン粒子が出来上がる機構の解明は、ハドロン物理が展開されるような低エネルギーにおける (QCD の) 強結合性のために、非摂動的な場の理論という非常にチャレンジングな問題である。第一原理計算である格子 QCD 計算においても、エキゾチックハドロンのような共鳴状態や不安定状態の記述は未だ難しい課題として残されている。

エキゾチックハドロンの正体について、様々な可能性が研究されてきた。代表的なものの一つは、4 個あるいは 5 個のクォークが空間的にコンパクトにまとまったマルチクォーク構造 (テトラクォークあるいはペンタクォーク) であり、もう一つは、いくつかのハドロンが緩く束縛して複合的なハドロン状態をつくるとするハドロン分子構造である。本論

文では主に後者による最近の理論研究を紹介した。後者の大きな特徴は、(i) 構成要素が観測可能なハドロンであること、(ii) QCD のカイラル対称性と重いクォーク対称性に基づいたハドロン低エネルギー有効理論を基礎としていること、(iii) 質量閾近傍のいくつかのエキゾチックハドロンの性質を自然に説明することが可能である、ということである。実際に、 $X(3872)$, $Z_b(10610)^+$, $Z_b(10650)^+$ などの質量や崩壊チャンネルは、ハドロン分子構造によってある程度説明することができる。一方で、 $X(3872)$ では、クォーク成分の直接的な混合を考慮することで、さらに詳しい性質を議論することができる。しかし、QCD に基づいた確固とした定量的な記述には至っていないのが現状である。

エキゾチックハドロンの構造は、クォークの閉じ込め問題と深く関わっている。また、クォーク-グルーオン複合系であるハドロン粒子は、環境（温度やバリオン数密度など）が変われば性質も変わる。したがって、エキゾチックハドロンの研究は、超高温や超高密度などの極限状況における、ハドロン物質からクォーク-グルーオン物質への相転移にも関連するテーマである。

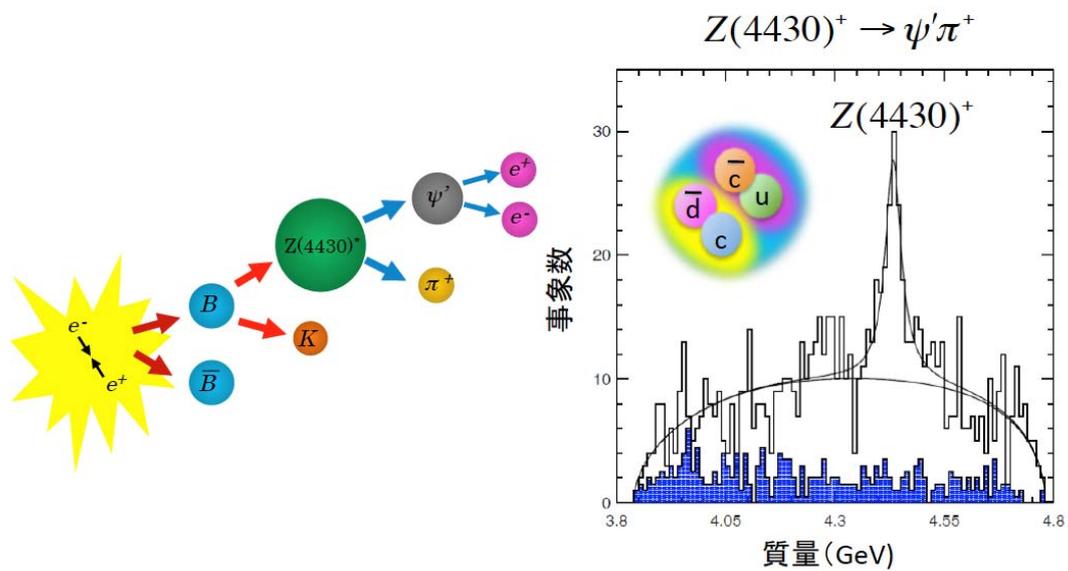
今後これらの問題に決着をつけるためには、ハドロン相互作用を QCD に基づいて構築することが重要である。そのための一つの有効なアプローチは、格子 QCD に基づいた HAL QCD の方法であろう。これが日本の研究グループによって開発され、核力の構築で成功を収めたことはよく知られている。信頼できるハドロン相互作用を基盤に、粒子の種類や数が変わることをあらわに扱うハドロン有効理論と実験データとの比較によって、エキゾチックハドロンを含む多くの共鳴状態の解明が進むと期待できる。そのときには、長年の課題であるハドロン複合性の問題にも決着がつくにちがいない。QCD によるクォーク-グルーオン複合系の問題を正しく扱うことは、ハドロン物理の問題の解決に繋がるというだけでなく、広く現代物理学の基礎としてのゲージ理論による物質世界の理解にも役立つはずである。

原論文

(2016年6月2日公開済み)

Exotic hadrons with heavy flavors: X , Y , Z , and related states,
Atsushi Hosaka, Toru Iijima, Kenkichi Miyabayashi, Yoshihide Sakai, and
Shigehiro Yasui, Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 062C01 (2016),
doi: 10.1093/ptep/ptw045

<情報提供：飯嶋 徹 (名古屋大学 教授)>



図： Belle 実験で $Z(4430)^+$ が生成される反応の模式図。 $Z(4430)^+$ は、電子-陽電子衝突で大量に生成される B 中間子の崩壊中に発見された。右のヒストグラムは、B 中間子の崩壊で放出された荷電パイ中間子 (π^+) とプサイプライム中間子 (ψ') の親粒子の質量推定値の分布を示したもの。4.4 ギガ電子ボルト (GeV) 付近のピークが $Z(4430)^+$ の信号を示す。