

新しいハドロンの存在形態：エキゾチックな多クォーク状態

Keyword: エキゾチックハドロンの

1. ハドロンの構造：クォーク模型から QCD へ

強い相互作用をする粒子のことをハドロンとよぶ。ハドロンはスピンが半整数のバリオン（重粒子）とスピンが整数のメソン（中間子）に分類される。現在観測されているバリオンはおよそ 140 種類、メソンはおよそ 180 種類ある。およそ半世紀前の 1964 年にゲルマンは次々に発見されるハドロンの構造を理解するためにフレーバー SU(3) 3 重項表現に属するスピン 1/2 の粒子であるクォーク (q) とその反粒子である反クォーク ($\bar{q}$) を導入し、バリオンとメソンの配位はそれぞれ (qqq) および ($q\bar{q}$) であるとした。¹⁾

その後、クォーク間の相互作用を記述する理論の研究が進められ、カラー SU(3) ゲージ理論である量子色力学 (QCD) が強い相互作用を記述する理論として確立した。²⁾

ハドロンのクォーク描像が確立してからすでに 50 年以上経つが、(qqq) および ($q\bar{q}$) 以外の構造を持つハドロンは殆ど発見されていなかった。最近になってチャームクォークやボトムクォークを含む 4 クォーク ($q\bar{q}q\bar{q}$) 状態が多数発見され始めたので、その現状を解説する。

2. ハドロンの QCD による描像

摂動論的な領域では数 MeV の質量を持つ u, d クォークは、低エネルギーでは、カイラル対称性の自発的破れにともなって、 $M_{ud} \sim m_\rho/2 \sim m_\rho/3 \sim 350\text{--}400$ MeV の質量を持つ準粒子として振る舞い、この準粒子を構成クォークとよぶ。ハドロンは構成クォークが残留相互作用によって結合した状態と考えられる。残留相互作用としては、閉じ込め力、カラークーロン力、スピン・スピン相互作用、軌道・スピン相互作用等が考えられる。

南部・ゴールドストーンボゾンである π 中間子のチャンネルには構成クォーク間に強い引力が働き、カイラル極限では質量が 0 のクォーク・反クォークの束縛状態となると考えられる。 π 中間子が実際に持っている小さな質量は u, d クォークがもともと持っている数 MeV の質量に起因する。

一方、重いクォークと重い反クォークの束縛系であるクォークonium は QCD の非相対論的有效場理論である NRQCD を用いて記述される。NRQCD に関しては学会誌の駒氏の解説記事³⁾ がわかりやすい。また、重い (反)クォークを 1 つ含む中間子系に関しても有効場理論である HQET⁴⁾ で解析されている。これらの系では、有効場の理論で、詳細に相互作用の分類等が議論されているが、本質

的には、軽い構成クォーク間に働く残留相互作用の形と大きな違いはない。基底状態や低い励起状態のハドロンの性質は、このような描像でよく理解されている。

3. エキゾチックハドロンとは

エキゾチックハドロンとは、クォーク・反クォーク構造を持つ中間子、3 クォーク構造を持つ重粒子および、核子の多体系である原子核以外の構造を持つハドロンのことをいう。ここでいうクォークは構成クォークを意味する。具体的には、グルーオンだけを成分に持つグルーボール、クォークとグルーオン成分を陽に含むハイブリッド状態、マルチクォーク状態のテトラクォーク状態 ($q\bar{q}q\bar{q}$) とペンタクォーク状態 ($qqq\bar{q}q$) 等が考えられる。 $(q\bar{q}q\bar{q})$ 状態に関しては、グルーオン交換による相互作用でコンパクトにまとまった状態をテトラクォーク状態、($q\bar{q}$) でカラーシングレットの中間子をつくり、2 つの中間子が π 中間子交換力等の相互作用で弱く結合した状態をハドロニック分子状態とよんでいるが、どちらもエキゾチックハドロンである。

準粒子である構成クォークは、多数の $u\bar{u}$ ペア、 $d\bar{d}$ ペアおよびグルーオン成分を含んだ状態であると考えられ、また、QCD においてはクォーク数は保存数ではないので、ハドロンがエキゾチックな構造をしているかどうかを決定することは簡単ではない。

同じような意味で、陽子は構成クォークの立場では、3 つの構成クォークが軌道角運動量 0 の状態でスピン 1/2 の構成クォーク 3 個のスピンが 1/2 に合成されて、陽子のスピン 1/2 となっていると考えられるが、場の演算子として陽子のスピンを考えるとクォークのスピンからの寄与は約 1/3 であることが測定されている。⁵⁾

4. エキゾチックな粒子 X(3872) の発見

2003 年に Belle 実験で $X(3872)$ が $B^\pm \rightarrow J/\psi \pi^\pm K^\pm$ 崩壊において $J/\psi \pi^\pm \pi^\mp$ の不変質量のピーク構造として発見された。⁶⁾ その後この状態は BABAR, CDF, D0, LHCb, BESIII 実験においても観測されている。LHCb により量子数も決定され $J^{PC} = 1^{++}$ である。 $X(3872)$ の $J/\psi \pi^\pm \pi^\mp$ 崩壊モードは $X(3872)$ が $J/\psi \rho$ の共鳴状態の成分を含むことを示し、 ρ 中間子はアイソベクトル状態なので、 $c\bar{c}$ 成分だけでなく $u\bar{u}$ および $d\bar{d}$ 成分も含まれていることが明白で、エキゾチックハドロンであると考えられる。崩壊モードとしては $J/\psi \omega$,

表1 $Z_c(4430)^+$ 以降に発見された電荷またはアイソスピンを持ったチャーモニウムおよびボトモニウム様状態.

名前	質量 [MeV]	幅 [MeV]	J^P	反応	崩壊モード	実験グループ (年)
$Z_c(4050)^+$	$4051 \pm 14^{+20}_{-41}$	82^{+21+47}_{-17-22}	$?$	$\bar{B}^0 \rightarrow \chi_{c1}(1P) K^- \pi^+$	$\chi_{c1}(1P) \pi^+$	Belle (2008)
$Z_c(4250)^+$	$4248^{+44+180}_{-29-35}$	$177^{+54+316}_{-39-61}$	$?$	$\bar{B}^0 \rightarrow \chi_{c1}(1P) K^- \pi^+$	$\chi_{c1}(1P) \pi^+$	Belle (2008)
$Z_b(10610)^{\pm}$	10607.2 ± 2.0	18.4 ± 2.4	1^+	$Y(5S) \rightarrow \pi^+ \pi^- Y(1, 2, 3S)$	$Y(1, 2, 3S) \pi^{\pm}$	Belle (2012)
				$Y(5S) \rightarrow \pi^+ \pi^- h_b(1, 2P)$	$h_b(1, 2P) \pi^{\pm}$	
$Z_b(10610)^0$	$10609 \pm 4 \pm 4$	18.4 (input)	1^+	$Y(5S) \rightarrow \pi^0 \pi^0 Y(2, 3S)$	$Y(2, 3S) \pi^0$	Belle (2013)
$Z_c(3900)^{\pm}$	3888.7 ± 3.4	35 ± 7	1^+	$Y(4260) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$	$J/\psi \pi^{\pm}$	BESIII (2013)
				$\psi(4160) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$	$J/\psi \pi^{\pm}$	Belle (2013)
				$Y(4260) \rightarrow (D\bar{D}^*)^{\pm} \pi^{\mp}$	$(D\bar{D}^*)^{\pm}$	CLEO-c (2013)
$Z_c(4020)^{\pm}$	$4022.9 \pm 0.8 \pm 2.7$	$7.9 \pm 2.7 \pm 2.6$	$?$	$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- h_c$	$h_c \pi^{\pm}$	BESIII (2014)
$Z_c(4025)^{\pm}$	$4026.3 \pm 2.6 \pm 3.7$	$24.8 \pm 2.6 \pm 7.7$	$?$	$Y(4260) \rightarrow (D^* \bar{D}^*)^{\pm} \pi^{\mp}$	$(D^* \bar{D}^*)^{\pm}$	BESIII (2013)
$Z_c(4200)^+$	4196^{+31+17}_{-29-13}	$370^{+70+70}_{-70-132}$	1^+	$\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K^- \pi^+$	$J/\psi \pi^+$	BESIII (2014)

$D^0 \bar{D}^{*0}$ も観測されており, $J/\psi \omega$ はアイソスカラー状態なので, $X(3872)$ はアイソスピンが大きく混ざった状態と考えられ, とても珍しい状態である. 観測された質量が 3871.69 ± 0.17 MeV と $D^0 \bar{D}^0$ の閾値 3729.68 MeV より 142 MeV も高いのに $X(3872)$ 状態の幅は 1.2 MeV 未満と非常に細く, なぜこのように細い崩壊幅を持つのかも興味を持たれている. また, $X(3872)$ の質量は $D^0 \bar{D}^{*0}$ の閾値 3871.8 MeV よりわずか 0.11 MeV 低いだけなので, $X(3872)$ は $D^0 \bar{D}^{*0}$ のハドロニック分子状態ではないかという議論も盛んにされている. 最近の $X(3872)$ の構造に関する理論的な研究については論文7, 8やそこに引用されている論文を参照のこと. $X(3872)$ の発見をきっかけとして, エキゾチックハドロン物理研究の時代に入ってしまったと言ってもよいのではないと思う.

5. 次々と発見される4クォーク状態

電荷は保存量なので, 例えば $+e$ の電荷を持つチャーモニウム様状態はその最小のクォーク成分が $c\bar{c}u\bar{d}$ となり, 明らかなエキゾチックハドロンである. 電荷を持ったチャーモニウム様状態 $Z_c(4430)^+$ が $\bar{B}^0 \rightarrow \psi(2S) K^- \pi^+$ 崩壊における $\psi(2S) \pi^+$ の不変質量のスペクトル観測で2008年にBelle実験によって発見され,⁹⁾ 2014年にLHCb実験でも確認された.¹⁰⁾ LHCbで観測された質量は $4475 \pm 7^{+15}_{-25}$ MeV, 幅は $172 \pm 13^{+37}_{-34}$ MeV である.

この後発見された電荷またはアイソスピンを持ったチャーモニウム及びボトモニウム様状態 ($q\bar{q}q\bar{q}$) を, 発見された順に表1にまとめた. 一つの実験グループでのみでしか発見されていない状態も多いので, そのような状態に

ついては, 他の実験グループによる確認が望まれる.

現在, 各状態についての構造の検討が理論的に繰り返られている. 観測された $Z_b(10610)$ ($Z_b(10650)$) の質量は $B\bar{B}^*(B^* \bar{B}^*)$ の閾値の数 MeV 上であり, これらの状態は $B\bar{B}^*(B^* \bar{B}^*)$ のハドロニック分子状態ではないかと議論されている. 同様に $Z_c(3900)$ ($Z_c(4025)$) の質量は $D\bar{D}^*(D^* \bar{D}^*)$ の閾値より約 10 MeV 上であり, これらの状態もハドロニック分子状態ではないかと議論されている. 個々の状態を個別に理解するのではなく, すべての状態を統一的に理解することが重要である. そのためには, 新たなエキゾチックハドロンの発見, 個々の状態の種々の崩壊モード, スピンやパリティ, 生成率等の測定が待たれる. エキゾチックハドロンの研究によりQCDの理解がさらに深まることが期待される.

参考文献

- 1) M. Gell-Mann: Phys. Lett. **8** (1964) 214.
- 2) H. Fritzsch, M. Gell-Mann and H. Leutwyler: Phys. Lett. **47B** (1973) 365.
- 3) 駒 佳明, 駒 美保: 日本物理学会誌 **67** (2012) 325.
- 4) N. Isgur and M. Wise: Phys. Lett. B **232** (1989) 113; *ibid.* B **237** (1990) 527.
- 5) 柴田利明: 日本物理学会誌 **67** (2012) 738.
- 6) S. K. Choi, *et al.* (Belle Collaboration): Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 262001.
- 7) N. Brambilla, *et al.*: Eur. Phys. J. C **71** (2011) 1534.
- 8) M. Takizawa and S. Takeuchi: Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 0903D01; S. Takeuchi, K. Shimizu and M. Takizawa: *ibid.* (2014) 123D01.
- 9) S. K. Choi, *et al.* (Belle Collaboration): Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 1462001.
- 10) R. Aaij, *et al.* (LHCb Collaboration): Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 222002.

瀧澤 誠 (昭和薬科大学)

(2015年7月22日原稿受付)