ハドロンの複合性と
低エネルギー普遍性

兵藤 哲雄

京都大学 基礎物理学研究所

2017, Mar. 16th

ハドロンの分類

観測されているハドロン

PDG2016：http://pdg.lbl.gov/

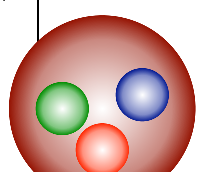
p	$1/2^+$	****
n	$1/2^+$	****
$N(1440)$	$1/2^+$	****
$N(1520)$	$3/2^-$	****
$N(1535)$	$1/2^-$	****
$N(1650)$	$1/2^-$	****
$N(1675)$	$5/2^-$	****
$N(1680)$	$5/2^+$	****
$N(1700)$	$3/2^-$	***
$N(1710)$	$1/2^+$	****
$N(1720)$	$3/2^+$	****
$N(1860)$	$5/2^+$	**
$N(1875)$	$3/2^-$	***
$N(1880)$	$1/2^+$	**
$N(1895)$	$1/2^-$	**
$N(1900)$	$3/2^+$	***
$N(1990)$	$7/2^+$	**
$N(2000)$	$5/2^+$	**
$N(2040)$	$3/2^+$	*
$N(2060)$	$5/2^-$	**
$N(2100)$	$1/2^+$	*
$N(2120)$	$3/2^-$	**
$N(2190)$	$7/2^-$	****
$N(2220)$	$9/2^+$	****
$N(2250)$	$9/2^-$	****
$N(2300)$	$1/2^+$	**
$N(2570)$	$5/2^-$	**
$N(2600)$	$11/2^-$	***
$N(2700)$	$13/2^+$	**

$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****
$\Delta(1600)$	$3/2^+$	***
$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****
$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****
$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*
$\Delta(1900)$	$1/2^-$	**
$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****
$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****
$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***
$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***
$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**
$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****
$\Delta(2000)$	$5/2^+$	**
$\Delta(2150)$	$1/2^-$	*
$\Delta(2200)$	$7/2^-$	*
$\Delta(2300)$	$9/2^+$	**
$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*
$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*
$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**
$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****
$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**
$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**
Λ	$1/2^+$	****
$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	****
$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	****
$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	***
$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	****
$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	****
$\Lambda(1710)$	$1/2^+$	*
$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	***
$\Lambda(1810)$	$1/2^+$	***
$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	****
$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	****
$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	****
$\Lambda(2000)$		*
$\Lambda(2020)$	$7/2^+$	*
$\Lambda(2050)$	$3/2^-$	*
$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****
$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***
$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*
$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***
$\Lambda(2585)$		**

Σ^+	$1/2^+$	****
Σ^0	$1/2^+$	****
Σ^-	$1/2^+$	****
$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****
$\Sigma(1480)$		*
$\Sigma(1560)$		**
$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*
$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	*
$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***
$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	****
$\Sigma(1690)$		**
$\Sigma(1730)$	$3/2^+$	*
$\Sigma(1750)$	$1/2^-$	***
$\Sigma(1770)$	$1/2^+$	*
$\Sigma(1775)$	$5/2^-$	****
$\Sigma(1840)$	$3/2^+$	*
$\Sigma(1880)$	$1/2^+$	**
$\Sigma(1900)$	$1/2^-$	*
$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****
$\Sigma(1940)$	$3/2^+$	*
$\Sigma(1940)$	$3/2^-$	***
$\Sigma(2000)$	$1/2^-$	*
$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****
$\Sigma(2070)$	$5/2^+$	*
$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	**
$\Sigma(2100)$	$7/2^-$	*
$\Sigma(2250)$		***
$\Sigma(2455)$		**
$\Sigma(2620)$		**
$\Sigma(3000)$		*
$\Sigma(3170)$		*

Ξ^0	$1/2^+$	****
Ξ^-	$1/2^+$	****
$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****
$\Xi(1620)$		*
$\Xi(1690)$		***
$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***
$\Xi(1950)$		***
$\Xi(2030)$	$\geq \frac{5}{2}^?$	***
$\Xi(2120)$		*
$\Xi(2250)$		**
$\Xi(2370)$		**
$\Xi(2500)$		*
Ω^-	$3/2^+$	****
$\Omega(2250)^-$		***
$\Omega(2380)^-$		**
$\Omega(2470)^-$		**

Λ_c^+	$1/2^+$	****
$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***
$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***
$\Lambda_c(2765)^+$		*
$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***
$\Lambda_c(2940)^+$		***
$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****
$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$	***
$\Sigma_c(2800)$		***
Ξ_c^+	$1/2^+$	***
Ξ_c^0	$1/2^+$	***
$\Xi_c'^+$	$1/2^+$	***
$\Xi_c'^0$	$1/2^+$	***
$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$	***
$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$	***
$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$	***
$\Xi_c(2930)$		*
$\Xi_c(2970)$		***
$\Xi_c(3055)$		***
$\Xi_c(3080)$		***
$\Xi_c(3123)$		*
Ω_c^0	$1/2^+$	***
$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$	***
Ξ_{cc}^+		*
Λ_b^0	$1/2^+$	***
$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$	***
$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$	***
Σ_b	$1/2^+$	***
Σ_b^*	$3/2^+$	***
Ξ_b^0, Ξ_b^-	$1/2^+$	***
$\Xi'_b(5935)^-$	$1/2^+$	***
$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$	***
$\Xi_b^*(5955)^-$	$3/2^+$	***
Ω_b^-	$1/2^+$	***
$P_c(4380)^+$		*



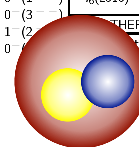
バリオン~150種類

LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$)	$I^G(J^{PC})$		$I^G(J^{PC})$
• $\pi^\pm$	$1^-(0^-)$	• $\rho_3(1690)$	$1^+(3^{--})$
• π^0	$1^-(0^{-+})$	• $\rho(1700)$	$1^+(1^{--})$
• η	$0^+(0^{-+})$	$a_2(1700)$	$1^-(2^{++})$
• $f_0(500)$	$0^+(0^{++})$	• $f_0(1710)$	$0^+(0^{++})$
• $\rho(770)$	$1^+(1^{--})$	$\eta(1760)$	$0^+(0^{-+})$
• $\omega(782)$	$0^-(1^{--})$	• $\pi(1800)$	$1^-(0^{-+})$
• $\eta'(958)$	$0^+(0^{-+})$	$f_2(1810)$	$0^+(2^{++})$
• $f_0(980)$	$0^+(0^{++})$	$X(1835)$	$?^?(0^{-+})$
• $a_0(980)$	$1^-(0^{++})$	$X(1840)$	$?^?(?^{??})$
• $\phi(1020)$	$0^-(1^{--})$	$a_1(1420)$	$1^-(1^{++})$
• $h_1(1170)$	$0^-(1^{+-})$	• $\phi_3(1850)$	$0^-(3^{--})$
• $b_1(1235)$	$1^+(1^{+-})$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^{-+})$
• $a_1(1260)$	$1^-(1^{++})$	• $\pi_2(1880)$	$1^-(2^{-+})$
• $f_2(1270)$	$0^+(2^{++})$	$\rho(1900)$	$1^+(1^{--})$
• $f_1(1285)$	$0^+(1^{++})$	$f_2(1910)$	$0^+(2^{++})$
• $\eta(1295)$	$0^+(0^{-+})$	$a_0(1950)$	$1^-(0^{++})$
• $\pi(1300)$	$1^-(0^{-+})$	• $f_2(1950)$	$0^+(2^{++})$
• $a_2(1320)$	$1^-(2^{++})$	$\rho_3(1990)$	$1^+(3^{--})$
• $f_0(1370)$	$0^+(0^{++})$	• $f_2(2010)$	$0^+(2^{++})$
$h_1(1380)$	$?^-(1^{+-})$	$f_0(2020)$	$0^+(0^{++})$
• $\pi_1(1400)$	$1^-(1^{-+})$	• $a_4(2040)$	$1^-(4^{++})$
• $\eta(1405)$	$0^+(0^{-+})$	• $f_4(2050)$	$0^+(4^{++})$
• $f_1(1420)$	$0^+(1^{++})$	$\pi_2(2100)$	$1^-(2^{-+})$
• $\omega(1420)$	$0^-(1^{--})$	$f_0(2100)$	$0^+(0^{++})$
$f_2(1430)$	$0^+(2^{++})$	$f_2(2150)$	$0^+(2^{++})$
• $a_0(1450)$	$1^-(0^{++})$	$\rho(2150)$	$1^+(1^{--})$
• $\rho(1450)$	$1^+(1^{--})$	• $\phi(2170)$	$0^-(1^{--})$
• $\eta(1475)$	$0^+(0^{-+})$	$f_0(2200)$	$0^+(0^{++})$
• $f_0(1500)$	$0^+(0^{++})$	$f_J(2220)$	$0^+(2^{++}$ or $4^{++})$
$f_1(1510)$	$0^+(1^{++})$	$\eta(2225)$	$0^+(0^{-+})$
• $f'_2(1525)$	$0^+(2^{++})$	$\rho_3(2250)$	$1^+(3^{--})$
$f_2(1565)$	$0^+(2^{++})$	• $f_2(2300)$	$0^+(2^{++})$
$\rho(1570)$	$1^+(1^{--})$	$f_4(2300)$	$0^+(4^{++})$
$h_1(1595)$	$0^-(1^{+-})$	$f_0(2330)$	$0^+(0^{++})$
• $\pi_1(1600)$	$1^-(1^{-+})$	• $f_2(2340)$	$0^+(2^{++})$
$a_1(1640)$	$1^-(1^{++})$	$\rho_5(2350)$	$1^+(5^{--})$
$f_2(1640)$	$0^+(2^{++})$	$a_6(2450)$	$1^-(6^{++})$
• $\eta_2(1645)$	$0^+(2^{-+})$	$f_6(2510)$	$0^+(6^{++})$
• $\omega(1650)$	$0^-(1^{--})$	THER LIGHT	
• $\omega_3(1670)$	$0^-(3$	tates	
• $\pi_2(1670)$	$1^-(2$		
• $\phi(1680)$	0^-		

STRANGE ($S = \pm1$, $C = B = 0$)	$I(J^P)$
• $K^\pm$	$1/2(0^-)$
• K^0	$1/2(0^-)$
• K^0_S	$1/2(0^-)$
• K^0_L	$1/2(0^-)$
$K^*_0(800)$	$1/2(0^+)$
• $K^*(892)$	$1/2(1^-)$
• $K_1(1270)$	$1/2(1^+)$
• $K_1(1400)$	$1/2(1^+)$
• $K^*(1410)$	$1/2(1^-)$
• $K^*_0(1430)$	$1/2(0^+)$
• $K^*_2(1430)$	$1/2(2^+)$
$K(1460)$	$1/2(0^-)$
$K_2(1580)$	$1/2(2^-)$
$K(1630)$	$1/2(?^?)$
$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$
• $K^*(1680)$	$1/2(1^-)$
• $K_2(1770)$	$1/2(2^-)$
• $K^*_3(1780)$	$1/2(3^-)$
• $K_2(1820)$	$1/2(2^-)$
$K(1830)$	$1/2(0^-)$
$K^*_0(1950)$	$1/2(0^+)$
$K^*_2(1980)$	$1/2(2^+)$
• $K^*_4(2045)$	$1/2(4^+)$
$K_2(2250)$	$1/2(2^-)$
$K_3(2320)$	$1/2(3^+)$
$K^*_5(2380)$	$1/2(5^-)$
$K_4(2500)$	$1/2(4^-)$
$K(3100)$	$?^?(?^{??})$
CHARMED ($C = \pm1$)	
• $D^\pm$	$1/2(0^-)$
• D^0	$1/2(0^-)$
• $D^*(2007)^0$	$1/2(1^-)$
• $D^*(2010)^\pm$	$1/2(1^-)$
• $D^*_0(2400)^0$	$1/2(0^+)$
$D^*_0(2400)^\pm$	$1/2(0^+)$
• $D_1(2420)^0$	$1/2(1^+)$
$D_1(2420)^\pm$	$1/2(?^?)$
$D_1(2430)^0$	$1/2(1^+)$
• $D^*_2(2460)^0$	$1/2(2^+)$
• $D^*_2(2460)^\pm$	$1/2(2^+)$
$D(2550)^0$	$1/2(?^?)$
$D^*_J(2600)$	$1/2(?^?)$
$D^*(2640)^\pm$	$1/2(?^?)$
$D(2740)^0$	$1/2(?^?)$
$D(2750)$	$1/2(3^-)$

CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm1$)	$I(J^P)$
• $D_s^\pm$	$0(0^-)$
• $D_s^{*\pm}$	$0(?^?)$
• $D^*_{s0}(2317)^\pm$	$0(0^+)$
• $D_{s1}(2460)^\pm$	$0(1^+)$
• $D_{s1}(2536)^\pm$	$0(1^+)$
• $D_{s2}(2573)$	$0(2^+)$
• $D^*_{s1}(2700)^\pm$	$0(1^-)$
$D^*_{s1}(2860)^\pm$	$0(1^-)$
$D^*_{s1}(2860)^\pm$	$0(3^-)$
$D_{sJ}(3040)^\pm$	$0(?^?)$
BOTTOM ($B = \pm1$)	
• $B^\pm$	$1/2(0^-)$
• B^0	$1/2(0^-)$
• $B^\pm/B^0$ ADMIXTURE	
• $B^\pm/B^0/B^0_s/b$-baryon ADMIXTURE	
V_{cb} and V_{ub} CKM Matrix Elements	
• B^*	$1/2(1^-)$
• $B_1(5721)^+$	$1/2(1^+)$
• $B_1(5721)^0$	$1/2(1^+)$
$B^*_J(5732)$	$?(?^?)$
• $B^*_2(5747)^+$	$1/2(2^+)$
• $B^*_2(5747)^0$	$1/2(2^+)$
$B_J(5840)^+$	$1/2(?^?)$
$B_J(5840)^0$	$1/2(?^?)$
• $B_J(5970)^+$	$1/2(?^?)$
• $B_J(5970)^0$	$1/2(?^?)$
BOTTOM, STRANGE ($B = \pm1$, $S = \mp1$)	
• B^0_s	$0(0^-)$
• B^*_s	$0(1^-)$
• $B_{s1}(5830)^0$	$0(1^+)$
• $B^*_{s2}(5840)^0$	$0(2^+)$
$B^*_{sJ}(5850)$	$?(?^?)$
BOTTOM, CHARMED ($B = C = \pm1$)	
• B_c^+	$0(0^-)$
$B_c(2S)^\pm$	$0(0^-)$

$c\overline{c}$	$I^G(J^{PC})$
• $\eta_c(1S)$	$0^+(0^{-+})$
• $J/\psi(1S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{c0}(1P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{c1}(1P)$	$0^+(1^{++})$
• $h_c(1P)$	$?^?(1^{+-})$
• $\chi_{c2}(1P)$	$0^+(2^{++})$
• $\eta_c(2S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\psi(2S)$	$0^-(1^{--})$
• $\psi(3770)$	$0^-(1^{--})$
• $\psi(3823)$	$?^?(2^{--})$
• $X(3872)$	$0^+(1^{++})$
• $X(3900)$	$1^+(1^{+-})$
• $X(3915)$	$0^+(0/2^{++})$
• $\chi_{c2}(2P)$	$0^+(2^{++})$
$X(3940)$	$?^?(?^{??})$
• $X(4020)$	$1(?^?)$
• $\psi(4040)$	$0^-(1^{--})$
$X(4050)^\pm$	$?(?^?)$
$X(4055)^\pm$	$?(?^?)$
• $X(4140)$	$0^+(?^{?+})$
• $\psi(4160)$	$0^-(1^{--})$
$X(4160)$	$?^?(?^{??})$
$X(4200)^\pm$	$?(1^+)$
$X(4230)$	$?^?(1^{--})$
$X(4240)^\pm$	$?^?(0^-)$
$X(4250)^\pm$	$?(?^?)$
• $X(4260)$	$?^?(1^{--})$
$X(4350)$	$0^+(?^{?+})$
• $X(4360)$	$?^?(1^{--})$
• $\psi(4415)$	$0^-(1^{--})$
• $X(4430)^\pm$	$?(1^+)$
• $X(4660)$	$?^?(1^{--})$
$b\overline{b}$	
• $\eta_b(1S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\Upsilon(1S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{b0}(1P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{b1}(1P)$	$0^+(1^{++})$
• $h_b(1P)$	$?^?(1^{+-})$
• $\chi_{b2}(1P)$	$0^+(2^{++})$
$\eta_b(2S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\Upsilon(2S)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon(1D)$	$0^-(2^{--})$
• $\chi_{b0}(2P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{b1}(2P)$	$0^+(1^{++})$
$h_b(2P)$	$?^?(1^{+-})$
• $\chi_{b2}(2P)$	$0^+(2^{++})$
• $\Upsilon(3S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{b1}(3P)$	$0^+(1^{++})$
• $\Upsilon(4S)$	$0^-(1^{--})$
• $X(10610)^\pm$	$1^+(1^+)$
• $X(10610)^0$	$1^+(1^+)$
$X(10650)^\pm$	$?^+(1^+)$
• $\Upsilon(10860)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon(11020)$	$0^-(1^{--})$



メソン~210種類

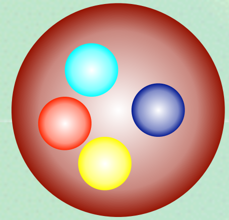
~ 360種類全てが単一のQCDラグランジアンから出てくる。

qqq/qq̄で記述される量子数のみ（自明ではない！）。

qqq/q$\bar{q}$で記述できない状態

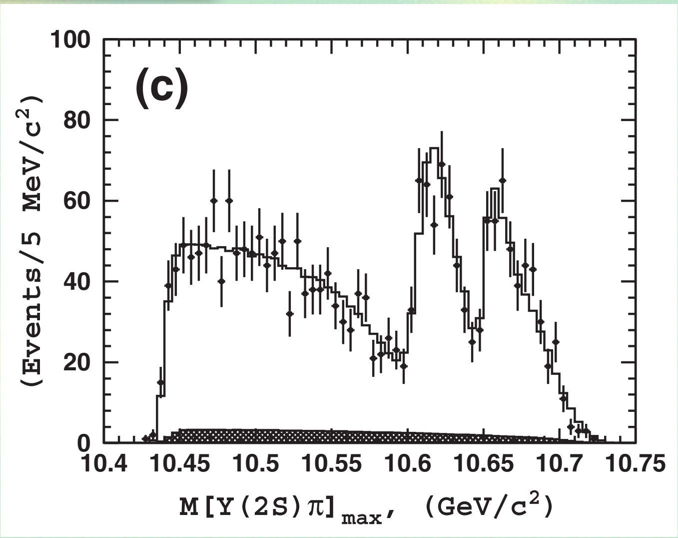
テトラクォーク候補(Belle)

：$Z_b(10610)$, $Z_b(10650)$



$\Upsilon(5S) \longrightarrow \pi^{\pm} + Z_b$

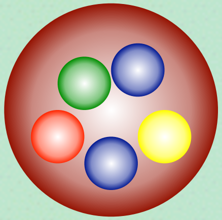
↳ $\Upsilon(nS)(b\bar{b}) + \pi^{\mp}(u\bar{d}/d\bar{u})$



A. Bondar, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 108, 122001 (2012)

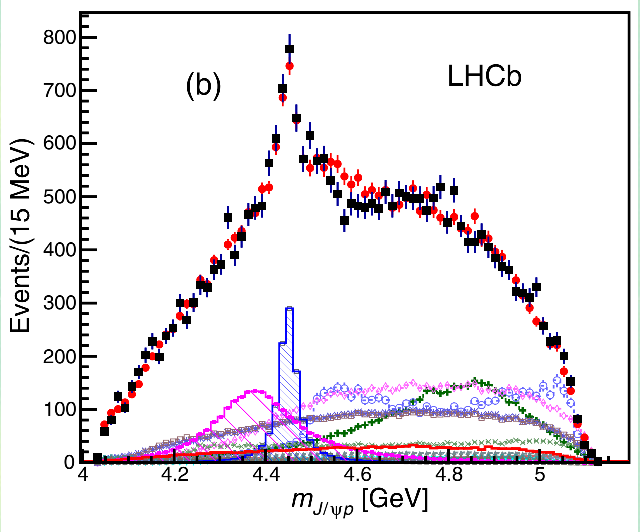
ペンタクォーク候補(LHCb)

：$P_c(4450)$, $P_c(4380)$



$\Lambda_b \longrightarrow K^- + P_c$

↳ $J/\psi(c\bar{c}) + p(uud)$

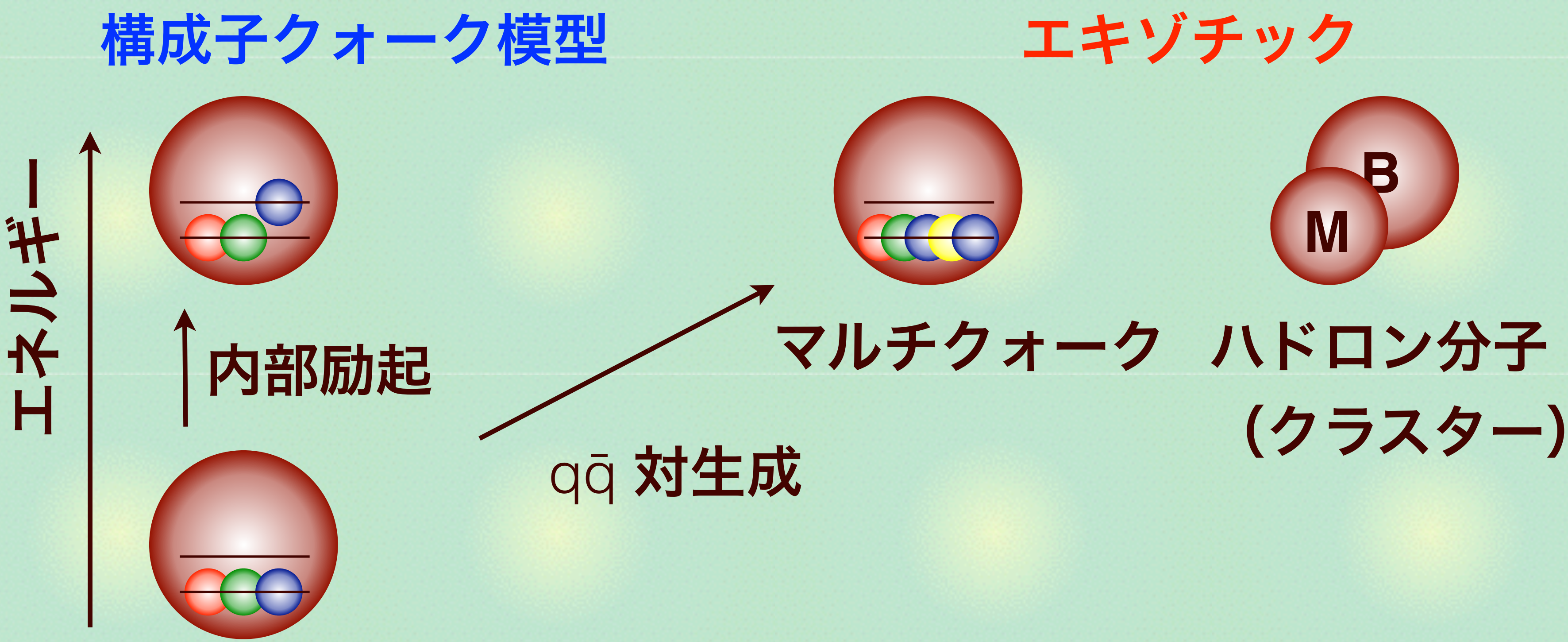


R. Aaij, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 115, 072001 (2015)

ごく少数しか発見されていない。なぜ少ないのか？

様々なハドロン励起

励起状態の記述（バリオンの例）



qqq以外のエキゾチック構造をどのように判別するか？

- 反クォークの存在：”価クォーク数”の非保存
- カラー閉じ込め：クォークは漸近状態ではない

ハドロンの複合性

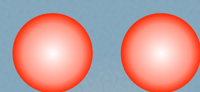
複合性 X：ハドロン波動関数の２ハドロン部分空間への射影

S. Weinberg, Phys. Rev. 137, B672 (1965);
T. Hyodo, Int. J. Mod. Phys. A 28, 1330045 (2013)

$$\hat{1} = \hat{P}_{\text{two-body}} + \hat{P}_{\text{others}}, \quad \hat{P}_{\text{two-body}} = \int \frac{d^3\boldsymbol{p}}{(2\pi)^3} |\,\boldsymbol{p}\,\rangle\langle\,\boldsymbol{p}\,|$$

$$X = \langle\, B\,|\hat{P}_{\text{two-body}}|\, B\,\rangle$$

複合性



２体成分の割合

$$Z = \langle\, B\,|\hat{P}_{\text{others}}|\, B\,\rangle$$

“一粒子性”

(その他すべて)

- **定量的なクラスター性の指標** $X+Z=1, \; 0<X<1$
- **束縛状態の** (X, Z) **は確率として解釈可能 <— 波動関数の規格化**
- **漸近状態（ハドロン）で定義：QCDでwell defined**

低エネルギー普遍性

２体系の普遍性：ユニタリー極限

E. Braaten, H.-W. Hammer, Phys. Rept. 428, 259 (2006)

1) s波の短距離相互作用

2) 散乱長：$|a| \gg r_s$：相互作用距離

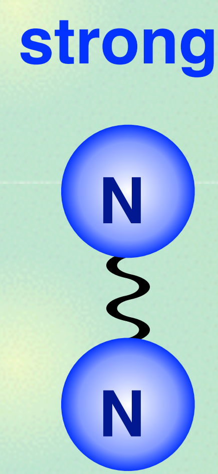
- 系はスケール不変
- $a > 0$ で浅い束縛状態が存在

$$B_2 = \frac{1}{ma^2}\left[1 + \mathcal{O}\left(\frac{r_s}{a}\right)\right]$$

例：核子と^{4}He原子

	N [MeV]	^{4}He [mK]
B_2	**2.22**	**1.31**
$1/ma^2$	**1.41**	**1.12**

vdW



^{4}He

安定状態の弱束縛関係式

s波弱束縛状態 ($R \gg R_{typ}$) の複合性 $0<X<1$

S. Weinberg, Phys. Rev. 137, B672 (1965);
T. Hyodo, Int. J. Mod. Phys. A 28, 1330045 (2013)

$$a_0 = R\left\{\frac{2X}{1+X} + \mathcal{O}\left(\frac{R_{\rm typ}}{R}\right)\right\}, \quad r_e = R\left\{\frac{X-1}{X} + \mathcal{O}\left(\frac{R_{\rm typ}}{R}\right)\right\}$$

a_0：散乱長, r_e：有効レンジ, $R = (2\mu B)^{-1/2}$：波動関数の広がり

R_{typ}：相互作用の典型的長さスケール

- 重陽子はNN複合状態（$a_0 \sim R \gg r_e$）<— $X \sim 1$

核力や波動関数を知らなくても観測可能量から構造が分かる。

B—> 0 極限は完全に複合的： $X = 1$（スケール不変性：$a_0=R$）

T. Hyodo, Phys. Rev. C90, 055208 (2014)

- 弱束縛関係式：スケール不変性の破れと複合性の関係

応用例

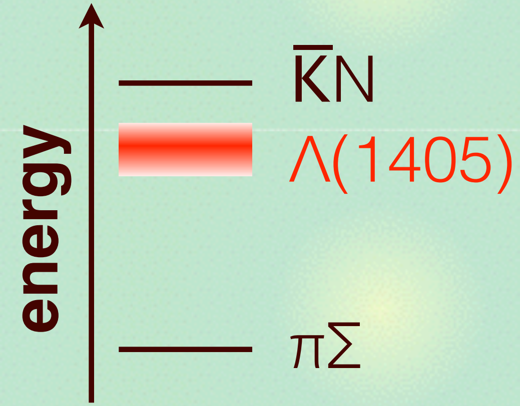
準束縛状態（崩壊の効果込み）の弱束縛関係式 X <-- (E_{QB}, a_0)

Y. Kamiya, T. Hyodo, Phys. Rev. C93, 035203 (2016), PTEP 2017 023D02 (2017)

$$a_0 = R\left\{\frac{2X}{1+X} + \mathcal{O}\left(\left|\frac{R_{\rm typ}}{R}\right|\right) + \sqrt{\frac{\mu'^3}{\mu^3}}\,\mathcal{O}\left(\left|\frac{l}{R}\right|^3\right)\right\}, \quad R = \frac{1}{\sqrt{-2\mu E_{QB}}}, \quad l \equiv \frac{1}{\sqrt{2\mu\nu_0'}}$$

Λ(1405)：$\bar{K}$N閾値近傍の共鳴状態

R.H. Dalitz, S.F. Tuan, Phys. Rev. Lett. 425 (1959)

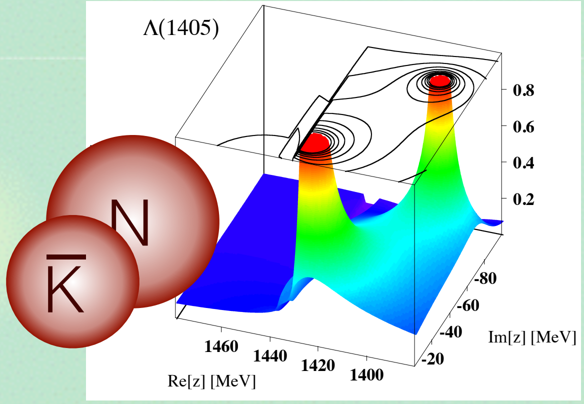


- 複素固有エネルギーと$\bar{K}$N散乱長の決定

Y. Ikeda, T. Hyodo, W. Weise, Phys. Lett. B706, 63 (2011)

- E_{QB} = -10 -26i **MeV,** a_0 = 1.39-0.85i **fm**

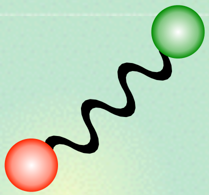
- $X_{\bar{K}N}$ =1.2 + 0.1i



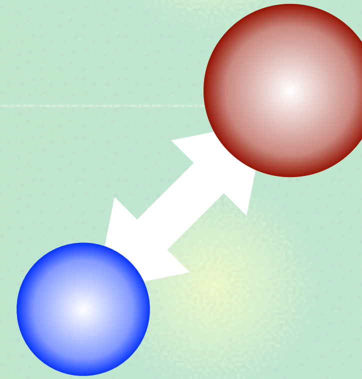
Λ(1405)の（閾値に近い）状態は$\bar{K}$N複合的

３体系へ

２体系での低エネルギー普遍性：ユニタリー極限

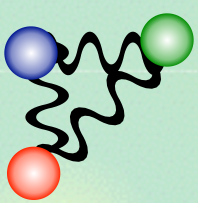


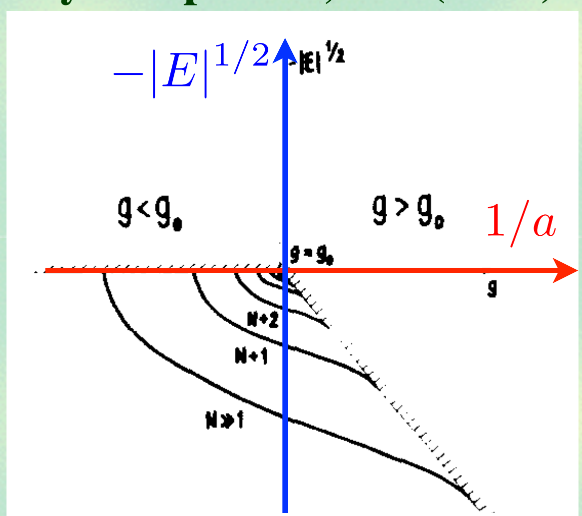
スケール不変性
弱束縛関係式



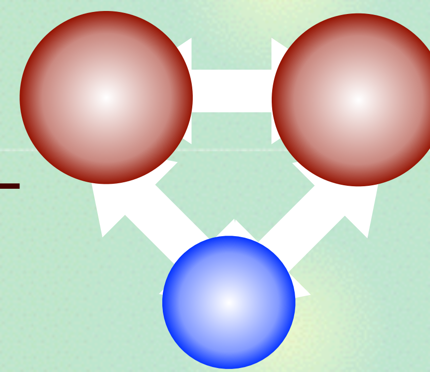
３体系での低エネルギー普遍性

V. Efimov, Phys. Lett. B 33, 563 (1970)
E. Braaten, H.-W. Hammer, Phys. Rept. 428, 259 (2006)

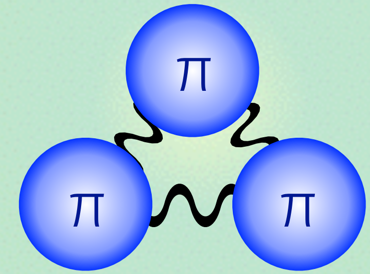




エフィモフ効果



πππ系の普遍性

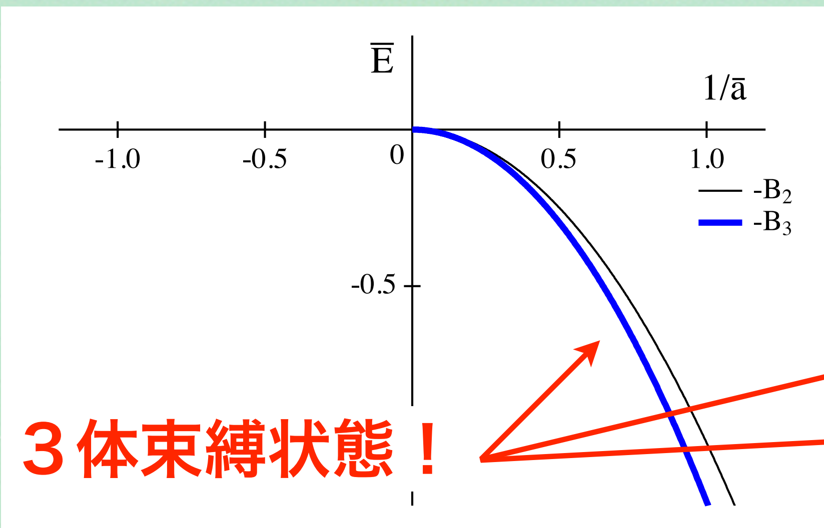


普遍性の発現：散乱長の調整

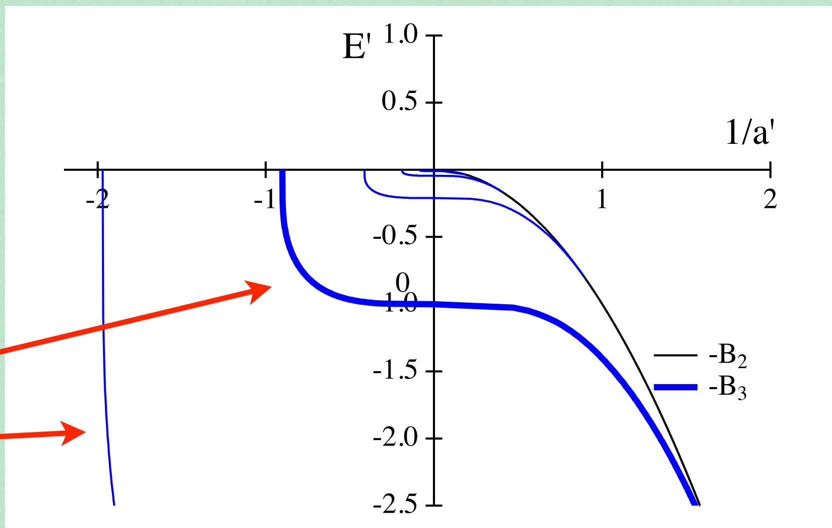
T. Hyodo, T. Hatsuda, Y. Nishida, Phys. Rev. C89, 032201(R) (2014)

- ππ 散乱長 <–クォーク質量m_q、カイラル対称性の回復に依存

アイソスピン対称($\pi^0\pi^0\pi^0$-$\pi^0\pi^-\pi^+$)　アイソスピンの破れ($\pi^0\pi^0\pi^0$)



３体束縛状態！



１つの束縛状態　エフィモフ効果（無限個の状態）

- 物理系への示唆：核媒質中でのσとπ^*の同時ソフト化？

メソンと２中性子系の普遍性

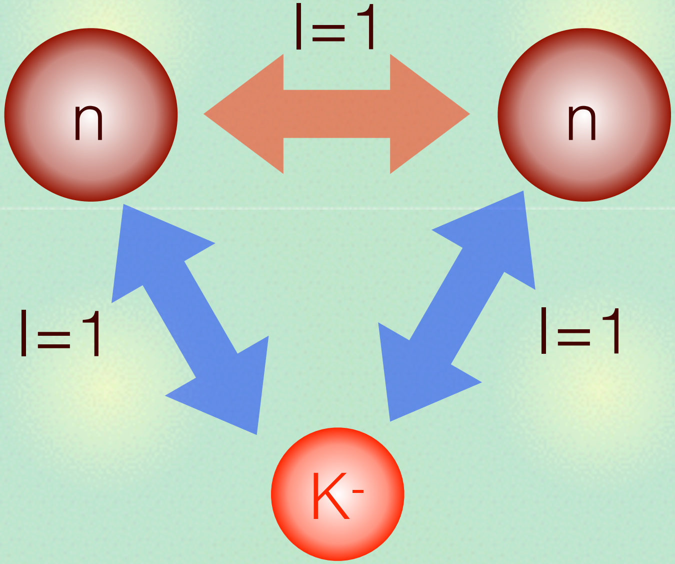
K^-nn/D^0nn 系（J=0, I=3/2, I_3=-3/2）≠ K^-pp (I=1/2)

U. Raha, Y. Kamiya, S.-I. Ando, T. Hyodo, in preparation

- **全ての相互作用がアイソスピン** I=1 **(no** Λ(1405)**)**

エフィモフ効果に有利

- **結合チャンネルがない**
- **クーロン相互作用がない**
- a_{nn} ~ -20 fm ≫ r_s ~ O(1) fm



結果

- **２体**K^-n**系：**m_s**増加（**m_K ~ 1337 **MeV）でユニタリー極限**
- **３体**K^-nn**系：**K^-n**がユニタリー極限のときにエフィモフ効果**
- **物理系への示唆：３体共鳴状態？**

まとめ

- 複合性X：ハドロン構造の漸近状態による**定量的**なクラスター性の指標

- 低エネルギー普遍性：系の微視的な詳細に依存しない帰結、**階層を超えて**適用可能

- ２体系：複合性の弱束縛関係式、Λ(1405)の構造

- ３体系：理想化された３ハドロン系（$\pi^0\pi^0\pi^0$, K^-nn）でのエフィモフ効果