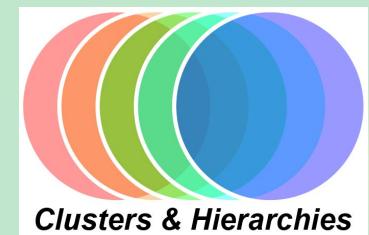


ハドロン共鳴状態と その構造



兵藤 哲雄

東京都立大学



2021, Aug. 10th 1

目次



講義 1：導入

- エキゾチックハドロンの現状
- カイラル対称性と有効場の理論



講義 2：共鳴状態の記述

- ハミルトニアンの固有状態
- 散乱理論と散乱振幅の極



講義 3： $\Lambda(1405)$ 共鳴の構造

- $\bar{K}N$ 散乱振幅と共に鳴状態
- ハドロンの複合性

参考文献



教科書、レビュー論文など（講義全体）

J.R. Taylor, Scattering Theory (Wiley, New York, 1972)

S. Scherer and M. R. Schindler, A Primer for Chiral Perturbation Theory (Springer, Berlin, 2012)

兵藤哲雄,日本物理学会誌 75巻8号478 (2020)

T. Hyodo, M. Niiyama, Prog. Part. Nucl. Phys. 120, 103868 (2021)



集中講義資料（主に講義2の内容）

https://www.comp.tmu.ac.jp/hyodo/lecture_e.html#lec4

<https://www.comp.tmu.ac.jp/hyodo/2020Tokuron.html>



原著論文（講義3の内容）

Y. Ikeda, T. Hyodo, W. Weise, PLB 706, 63 (2011); NPA 881, 98 (2012)

Y. Kamiya, T. Hyodo, PRC93, 035203 (2016); PTEP2017, 023D02 (2017)

観測されているハドロン (2018)

Particle Data Group (PDG) 2018年版

<http://pdg.lbl.gov/>

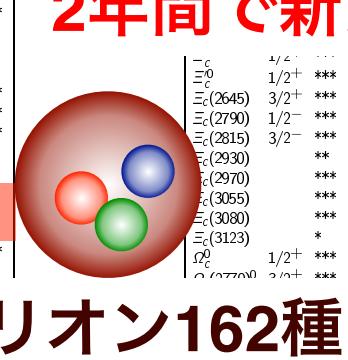
p	$1/2^+$	****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****	Σ^+	$1/2^+$	****	Ξ^0	$1/2^+$	****	Λ_c^+	$1/2^+$	****
n	$1/2^+$	****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$	***	Σ^0	$1/2^+$	****	Ξ^-	$1/2^+$	****	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***
$N(1440)$	$1/2^+$	****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$	***	Σ^-	$1/2^+$	****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***
$N(1520)$	$3/2^-$	***	$\Delta(1700)$	$3/2^-$	***	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****	$\Xi(1620)$	*		$\Lambda_c(2765)^+$	*	
$N(1535)$	$1/2^-$	***	$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*	$\Sigma(1480)$	*		$\Xi(1690)$	***		$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***
$N(1650)$	$1/2^+$	***	$\Delta(1900)$	$1/2^-$	**	$\Sigma(1560)$	**		$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***	$\Lambda_c(2940)^+$	***	
$N(1675)$	$5/2^-$	****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*	$\Xi(1950)$	***		$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****
$N(1680)$	$5/2^+$	****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	*	$\Xi(2030)$	$\geq \frac{5}{2}^?$	***	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$	***
$N(1685)$	*		$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***	$\Xi(2120)$	*		$\Sigma_c(2800)$	***	
$N(1700)$	$3/2^-$	***	$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	***	$\Xi(2250)$	**		$\Xi_c^-(1840)$	$1/2^+$	***
$N(1710)$	$1/2^+$	***	$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**	$\Sigma(1690)$	**		$\Xi(2370)$	**		$\Xi_c^0(1840)$	$1/2^+$	***
$N(1720)$	$3/2^+$	****	$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****	$\Sigma(1730)$	$3/2^+$	*	$\Xi(2500)$	*		$\Xi_c^+(1840)$	$1/2^+$	***
$N(1860)$	$5/2^+$	**	$\Delta(2000)$	$5/2^+$	**	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$	***	Ξ_c^0	$1/2^+$	***	$\Xi_c^0(2645)$	$3/2^+$	***
$N(1875)$	$3/2^-$	***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$	*	$\Sigma(1770)$	$1/2^+$	*	Ω^-	$3/2^+$	****	$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$	***
$N(1880)$	$1/2^+$	**	$\Delta(2200)$	$7/2^-$	*	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$	***	$\Omega(2250)^-$	***		$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$	***
$N(1895)$	$1/2^-$	**	$\Delta(2300)$	$9/2^+$	**	$\Sigma(1840)$	$3/2^+$	*	$\Omega(2380)^-$	**		$\Xi_c(2930)$	*	
$N(1900)$	$3/2^+$	***	$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$	**	$\Omega(2470)^-$	**		$\Xi_c(2980)$	***	
$N(1990)$	$7/2^+$	**	$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*	$\Sigma(1900)$	$1/2^-$	*	$\Xi_c(2980)$	***		$\Xi_c(3055)$	***	
$N(2000)$	$5/2^+$	**	$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****	$\Xi_c(3080)$	***		$\Xi_c(3123)$	*	
$N(2040)$	$3/2^+$	*	$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****	$\Sigma(1940)$	$3/2^+$	*	$\Xi_c(3123)$	*		Ω_c^0	$1/2^+$	***
$N(2060)$	$5/2^-$	**	$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**	$\Sigma(1940)$	$3/2^-$	***	$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$	***	$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$	***
$N(2100)$	$1/2^+$	*	$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**	$\Sigma(2000)$	$1/2^-$	*	Ξ_{cc}^+	*		$\Xi_c(2980)$	***	
$N(2120)$	$3/2^-$	**	$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****	$\Xi_c(2980)$	***		Ξ_{cc}^0	*		$\Xi_c(3080)$	***	
$N(2190)$	$7/2^-$	****	Λ	$1/2^+$	****	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$	*	$\Xi_c(3123)$	*		$\Xi_c(3123)$	*	
$N(2220)$	$9/2^+$	****	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	***	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	**	$\Xi_c(3123)$	*		$\Xi_c(3123)$	*	
$N(2250)$	$9/2^-$	****	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	***	$\Sigma(2100)$	$7/2^-$	*	$\Xi_c(3123)$	*		$\Xi_c(3123)$	*	
$N(2300)$	$1/2^+$	**	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	***	$\Sigma(2250)$	***		$\Xi_c(3123)$	*		$\Xi_c(3123)$	*	
$N(2570)$	$5/2^-$	**	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	***	$\Sigma(2455)$	**		$\Xi_c(3123)$	*		$\Xi_c(3123)$	*	
$N(2600)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	***	$\Sigma(2620)$	**		$\Xi_c(3123)$	*		$\Xi_c(3123)$	*	
$N(2700)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(1710)$	$1/2^+$	*	$\Sigma(3000)$	*		$\Xi_c(3123)$	*		$\Xi_c(3123)$	*	
$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	***	$\Lambda(1810)$	$1/2^+$	***	$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	****	Ξ_b^0	$1/2^+$	***	$\Lambda_b^0(5912)^0$	$1/2^-$	***
$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	****	$\Lambda(1840)$	$5/2^-$	***	$\Lambda(1850)$	$3/2^+$	***	$\Lambda_b^0(5920)^0$	$3/2^-$	***	$\Lambda_b^0(5920)^0$	$3/2^-$	***
$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	****	$\Lambda(1900)$	*		Σ_b^0	$1/2^+$	***	Σ_b^0	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(5935)^-$	$1/2^+$	***
$\Lambda(2000)$	*		$\Lambda(2020)$	$7/2^+$	*	Ξ_b^0	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(5945)^0$	$3/2^+$	***	$\Xi_b^0(5945)^0$	$3/2^+$	***
$\Lambda(2050)$	$7/2^+$	*	$\Lambda(2050)$	$3/2^-$	*	Ξ_b^0	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(5955)^-$	$3/2^+$	***	$\Xi_b^0(5955)^-$	$3/2^+$	***
$\Lambda(2100)$	$1/2^-$		$\Lambda(2110)$	$1/2^-$		Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ω_b^-	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(5955)^0$	$3/2^+$	***
$\Lambda(2325)$	$1/2^-$		$\Lambda(2350)$	$1/2^-$		Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
$\Lambda(2585)$	$3/2^-$	*				Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*
						Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	$1/2^+$	*	Ξ_b^-	<	

観測されているハドロン (2020)

Particle Data Group (PDG) 2020年版

<http://pdg.lbl.gov/>

p	$1/2^+$	****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****	Σ^+	$1/2^+$	****	Ξ^0	$1/2^+$	****	Ξ_{cc}^{++}	***	
n	$1/2^+$	****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$	****	Σ^0	$1/2^+$	****	Ξ^-	$1/2^+$	****	Λ_b^0	$1/2^+$	***
$N(1440)$	$1/2^+$	****	$\Delta(1620)$	$1/2^+$	***	Σ^-	$1/2^+$	****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****	Λ_b^0	$1/2^+$	***
$N(1520)$	$3/2^-$	****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****	$\Xi(1620)$	*		$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$	***
$N(1535)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*	$\Xi(1690)$	***		$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$	***
$N(1650)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$	***	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	*	$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***	$\Lambda_b(6146)^0$	$3/2^+$	***
$N(1675)$	$5/2^-$	****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***	$\Xi(1950)$	***		$\Lambda_b(6152)^0$	$5/2^+$	***
$N(1680)$	$5/2^+$	****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	****	$\Xi(2030)$	$\geq \frac{5}{2}^?$	***	Σ_b^-	$1/2^+$	***
$N(1700)$	$3/2^-$	***	$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$	***	$\Xi(2120)$	*		Σ_b^0	$3/2^+$	***
$N(1710)$	$1/2^+$	****	$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***	$\Sigma(1775)$	$5/2^+$	****	$\Xi(2250)$	**		$\Xi_b(6097)^+$	***	
$N(1720)$	$3/2^+$	****	$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**	$\Sigma(1780)$	$3/2^+$	*	$\Xi(2370)$	**		$\Xi_b(6097)^-$	***	
$N(1860)$	$5/2^+$	**	$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$	**	$\Xi(2500)$	*		Ξ_b^0 , Ξ_b^-	$1/2^+$	***
$N(1875)$	$3/2^-$	***	$\Delta(2000)$	$5/2^+$	**	$\Sigma(1900)$	$1/2^+$	**	Ξ_b^0	$1/2^+$	***	Ξ_b^0 , Ξ_b^-	$1/2^+$	***
$N(1880)$	$1/2^+$	***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$	*	$\Sigma(1910)$	$3/2^-$	***	Ω^-	$3/2^+$	****	$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$	***
$N(1895)$	$1/2^-$	****	$\Delta(2200)$	$7/2^-$	***	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****	$\Omega(2012)^-$?	***	$\Xi_b(5955)^0$	$3/2^+$	***
$N(1900)$	$3/2^+$	****	$\Delta(2300)$	$9/2^+$	**	$\Sigma(1940)$	$3/2^+$	*	$\Omega(2250)^-$	***		$\Xi_b(6227)^-$	***	
$N(1990)$	$7/2^+$	**	$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*	$\Sigma(2010)$	$3/2^-$	*	$\Omega(2380)^-$	**		Ω_b^-	$1/2^+$	***
$N(2000)$	$5/2^+$	**	$\Delta(2390)$	$7/2^+$	****	$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****	$\Omega(2470)^-$	**		Ω_b^-	$1/2^+$	***
$N(2040)$	$3/2^+$	*	$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$	*				$P_c(4312)^+$	*	
$N(2060)$	$5/2^+$	***	$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	*				$P_c(4312)^+$	*	
$N(2100)$	$1/2^+$	***	$\Delta(2750)$	$13/2^-$	***	$\Sigma(2100)$	$7/2^-$	*				$P_c(4380)^+$	*	
$N(2120)$	$3/2^-$	***	$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**	$\Sigma(2160)$	$1/2^-$	*				$P_c(4440)^+$	*	
$N(2190)$	$7/2^+$	***				$\Sigma(2230)$	$3/2^+$	*				$P_c(4457)^+$	*	
$N(2220)$	$9/2^+$	****	Λ	$1/2^+$	****	$\Sigma(2250)$	***		$\Lambda_c(2860)^+$	$3/2^+$	***	$\Lambda_c(2860)^+$	$3/2^+$	***
$N(2250)$	$9/2^-$	****	Λ	$1/2^-$	**	$\Sigma(2455)$	***		$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***	$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***
$N(2300)$	$1/2^+$	**	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	***	$\Sigma(2620)$	***		$\Lambda_c(2940)^+$	$3/2^-$	***	$\Lambda_c(2940)^+$	$3/2^-$	***
$N(2570)$	$5/2^-$	**	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	***	$\Sigma(2900)$	*		$\Sigma_c(2250)$	$1/2^+$	***	$\Lambda_c(2980)^+$	$1/2^+$	***
$N(2600)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	****	$\Sigma(2955)$	*		$\Sigma_c(2765)^+$	*		$\Lambda_c(2765)^+$	*	
$N(2700)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	***	$\Sigma(2955)$	*		$\Lambda_c(2860)^+$	$3/2^+$	***	$\Lambda_c(2860)^+$	$3/2^+$	***
			$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	***				$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***	$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***
			$\Lambda(1710)$	$1/2^+$	***				$\Lambda_c(2940)^+$	$3/2^-$	***	$\Lambda_c(2940)^+$	$3/2^-$	***
			$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	***				$\Lambda_c(2980)$	$1/2^+$	***	$\Lambda_c(2980)$	$1/2^+$	***
			$\Lambda(1810)$	$1/2^+$	***				$\Lambda_c(2970)$	***		$\Lambda_c(2970)$	***	
			$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	***				$\Lambda_c(2970)$	***		$\Lambda_c(3055)$	***	
			$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	***				$\Lambda_c(3080)$	***		$\Lambda_c(3123)$	*	
			$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	***				$\Lambda_c(3123)$	*				
			$\Lambda(2000)$	$1/2^-$	*									
			$\Lambda(2050)$	$3/2^-$	*									
			$\Lambda(2070)$	$3/2^+$	*									
			$\Lambda(2080)$	$5/2^-$	**									
			$\Lambda(2085)$	$7/2^+$	**									
			$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****									
			$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***									
			$\Lambda(2325)$											
			$\Lambda(2350)$											
			$\Lambda(2355)$											
			$\Lambda(2585)$											



LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$)		STRANGE ($S = \pm 1, C = B = 0$)		CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm 1$)		$c\bar{c}$ continued $F(JPC)$	
$F(JPC)$	$F(JPC')$	$F(JPC)$	$F(JPC')$	$F(JPC)$	$F(JPC')$	$F(JPC)$	$F(JPC')$
$\pi^\pm(0^-)$	$\pi^\pm(0^-)$	$\pi^\pm(0^-)$	$\pi^\pm(0^-)$	K^\pm	$K^\pm(0^-)$	D_s^\pm	$D_s^\pm(0^-)$
η^0	$\eta^0(0^-)$	$\eta(0^-)$	$\eta(0^-)$	K^0	$K^0(0^-)$	D_s^+	$D_s^+(0^-)$
η	$\eta(0^-)$	$\eta(0^-)$	$\eta(0^-)$	K_S^0	$K_S^0(0^-)$	D_{s1}^+	$D_{s1}^+(0^-)$
$\rho_0(500)$	$\rho_0(0^-)$	$\rho(0^-)$	$\rho(0^-)$	$\rho(1700)$	$\rho(1700)$	D_{s1}^0	$D_{s1}^0(0^-)$
$\omega(770)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1700)$	$\omega(1700)$	D_{s1}^+	$D_{s1}^+(0^-)$
$\omega(782)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1710)$	$\omega(1710)$	D_{s2}^0	$D_{s2}^0(0^-)$
$\eta'(958)$	$\eta'(0^-)$	$\eta'(0^-)$	$\eta'(0^-)$	$\eta'(1760)$	$\eta'(1760)$	D_{s2}^+	$D_{s2}^+(0^-)$
$\rho_0(980)$	$\rho_0(0^-)$	$\rho(0^-)$	$\rho(0^-)$	$\rho(1800)$	$\rho(1800)$	D_{s3}^0	$D_{s3}^0(0^-)$
$\chi_{c1}(980)$	$\chi_{c1}(0^-)$	$\chi_{c1}(0^-)$	$\chi_{c1}(0^-)$	$\chi_{c1}(1810)$	$\chi_{c1}(1810)$	D_{s3}^+	$D_{s3}^+(0^-)$
$\omega(1020)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\chi_{c1}(1835)$	$\chi_{c1}(1835)$	D_{s4}^0	$D_{s4}^0(0^-)$
$\eta_1(1170)$	$\eta_1(0^-)$	$\eta_1(0^-)$	$\eta_1(0^-)$	$\eta_1(1850)$	$\eta_1(1850)$	D_{s4}^+	$D_{s4}^+(0^-)$
$b_1(1235)$	$b_1(1^-)$	$b_1(1^-)$	$b_1(1^-)$	$b_1(1870)$	$b_1(1870)$	D_{s5}^0	$D_{s5}^0(0^-)$
$f_0(1285)$	$f_0(0^-)$	$f_0(0^-)$	$f_0(0^-)$	$f_0(1910)$	$f_0(1910)$	D_{s5}^+	$D_{s5}^+(0^-)$
$\omega(1295)$	$\omega(0^-)$	$\omega(0^-)$	$\omega(0^-)$	$\omega(1950)$	$\omega(1950)$	D_{s6}^0	$D_{s6}^0(0^-)$
$\chi_{c2}(1300)$	$\chi_{c2}(0^-)$	$\chi_{c2}(0^-)$	$\chi_{c2}(0^-)$	$\chi_{c2}(1950)$	$\chi_{c2}(1950)$	D_{s6}^+	$D_{s6}^+(0^-)$
$\omega(1320)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1970)$	$\omega(1970)$	D_{s7}^0	$D_{s7}^0(0^-)$
$f_0(1370)$	$f_0(0^-)$	$f_0(0^-)$	$f_0(0^-)$	$f_0(1990)$	$f_0(1990)$	D_{s7}^+	$D_{s7}^+(0^-)$
$\pi_1(1400)$	$\pi_1(1^-)$	$\pi_1(1^-)$	$\pi_1(1^-)$	$\pi_1(2010)$	$\pi_1(2010)$	D_{s8}^0	$D_{s8}^0(0^-)$
$\eta_2(1415)$	$\eta_2(0^-)$	$\eta_2(0^-)$	$\eta_2(0^-)$	$\eta_2(2020)$	$\eta_2(2020)$	D_{s8}^+	$D_{s8}^+(0^-)$
$\chi_{c1}(1420)$	$\chi_{c1}(1^-)$	$\chi_{c1}(1^-)$	$\chi_{c1}(1^-)$	$\chi_{c1}(2050)$	$\chi_{c1}(2050)$	D_{s9}^0	$D_{s9}^0(0^-)$
$f_0(1420)$	$f_0(0^-)$	$f_0(0^-)$	$f_0(0^-)$	$f_0(2100)$	$f_0(2100)$	D_{s9}^+	$D_{s9}^+(0^-)$
$\omega(1420)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(2100)$	$\omega(2100)$	D_{s10}^0	$D_{s10}^0(0^-)$
$f_0(1430)$	$f_0(2^-)$	$f_0(2^-)$	$f_0(2^-)$	$f_0(2150)$	$f_0(2150)$	D_{s10}^+	$D_{s10}^+(0^-)$
$\chi_{c1}(1450)$	$\chi_{c1}(1^-)$	$\chi_{c1}(1^-)$	$\chi_{c1}(1^-)$	$\chi_{c1}(2150)$	$\chi_{c1}(2150)$	D_{s11}^0	$D_{s11}^0(0^-)$
$\eta_2(1475)$	$\eta_2(0^-)$	$\eta_2(0^-)$	$\eta_2(0^-)$	$\eta_2(2200)$	$\eta_2(2200)$	D_{s11}^+	$D_{s11}^+(0^-)$
$\omega(1490)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(2250)$	$\omega(2250)$	D_{s12}^0	$D_{s12}^0(0^-)$
$\omega(1495)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(2250)$	$\omega(2250)$	D_{s12}^+	$D_{s12}^+(0^-)$
$\omega(1500)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(2250)$	$\omega(2250)$	D_{s13}^0	$D_{s13}^0(0^-)$
$\omega(1520)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(2250)$	$\omega(2250)$	D_{s13}^+	$D_{s13}^+(0^-)$
$\omega(1560)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(1^-)$	$\omega(2250)$	$\omega(2250)$	D_{s14}^0	$D_{s14}^0(0^-)$
$\omega_2(1650)$	$\omega_2(0^-)$	$\omega_2(0^-)$	$\omega_2(0^-)$	$\omega_2(2250)$	$\omega_2(2250)$	D_{s14}^+	$D_{s14}^+(0^-)$
$\omega_3(1670)$	$\omega_3(0^-)$	$\omega_3(0^-)$	$\omega_3(0^-)$	$\omega_3(2250)$	$\omega_3(2250)$	D_{s15}^0	$D_{s15}^0(0^-)$
						D_{s16}^0	$D_{s16}^0(0^-)$
						D_{s17}^0	$D_{s17}^0(0^-)$
						D_{s18}^0	$D_{s18}^0(0^-)$
						D_{s19}^0	$D_{s19}^0(0^-)$
						D_{s20}^0	$D_{s20}^0(0^-)$
						D_{s21}^0	$D_{s21}^0(0^-)$
						D_{s22}^0	$D_{s22}^0(0^-)$

QCDとカラーの閉じ込め

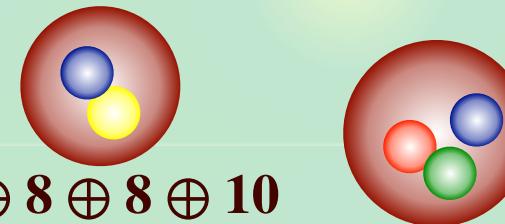
QCDラグランジアン：カラー-SU(3)ゲージ対称性

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G^{a,\mu\nu} + \bar{q}_{i,f}(i\gamma^\mu(D_\mu)_{ij} - m_f \delta_{ij})q_{j,f}$$

- クォーク $q_{i,f}$ ：カラー 3 
- 反クォーク $\bar{q}_{i,f}$ ：カラー $\bar{3}$ 
- グルーオン A_μ^a ：カラー 8

カラーの閉じ込め：カラー1重項状態のみ観測可能

- メソン $q\bar{q}$: $3 \otimes \bar{3} = \mathbf{1} \oplus \mathbf{8}$
- バリオン qqq : $3 \otimes 3 \otimes 3 = \mathbf{1} \oplus \mathbf{8} \oplus \mathbf{8} \oplus \mathbf{10}$
- なぜ $3, 8, 10, \dots$ 状態は禁止されるのか？



実験事実であり、QCDからは理解されていない

エキゾチックハドロン（よくある説明）

メソン、バリオン以外のカラー1重項は？

- $qq\bar{q}\bar{q}$, $qqq\bar{q}\bar{q}$, $q\bar{q}g$, gg , ...
- エキゾチックハドロン

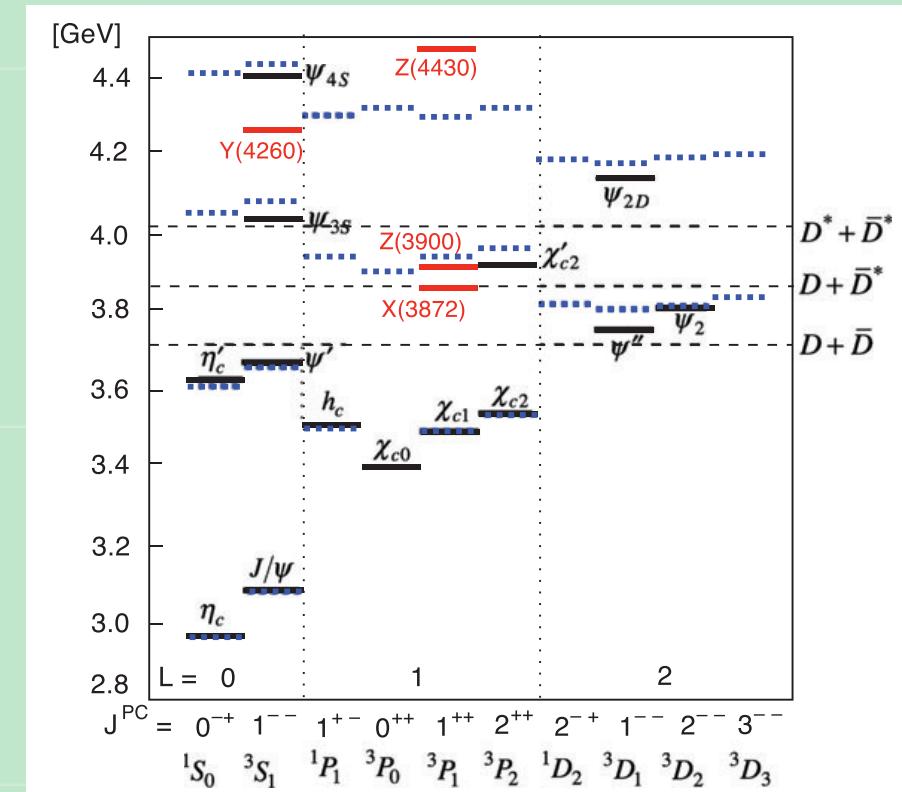
$\sim q\bar{q}$, qqq 以外の状態

- どのようにして**同定**するか？

よくある判定方法

- 構成子クォーク模型
- エキゾチックハドロン

～クォーク模型に合わない状態



チャーモニウム

A. Hosaka *et al.*, PTEP 2016, 062C01 (2016)

問題点：クォーク模型はQCDではない

対称性によるエキゾチックハドロンの分類1

QCDの空間対称性

- パリティ $Z_2 : r \rightarrow -r$

- 回転 $SO(3) : r \rightarrow Rr$

→ ハドロンはスピン・パリティ J^P で分類される。

QCDの内部対称性

- 位相変換 $U(1)_V : q \rightarrow e^{i\theta}q, \bar{q} \rightarrow e^{-i\theta}\bar{q}$

→ ハドロンはバリオン数 B で分類される。

$B = 0$ 状態：メソン、 $B = 1$ 状態：バリオン

保存量子数による状態の定義

- 注意：保存されるのは $n_q - n_{\bar{q}}$

→ $q\bar{q}$ と $qq\bar{q}\bar{q}$ は B では区別できない

対称性によるエキゾチックハドロンの分類2

フレーバー対称性

- アイソスピン $SU(2)$: $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \rightarrow U \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$

→ ハドロンはアイソスピン I (電荷 Q) で分類される

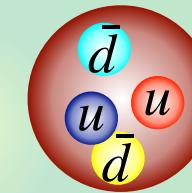
u, d クォークのみで構成されるメソンの $I(q, \bar{q} : I = 1/2)$

- $q\bar{q}$: $I = 0, 1$

$q\bar{q}$ 対消滅できない

- $qq\bar{q}\bar{q}$: $I = 0, 1, 2$

- $qqq\bar{q}\bar{q}\bar{q}$: $I = 0, 1, 2, 3$



→ $I \geq 2$ のメソン (電荷 $|Q| \geq 2$) は $q\bar{q}$ でない: エキゾチック !

保存量子数による状態の定義

$SU(3)$ への拡張: エキゾチックネス

対称性によるエキゾチックハドロンの分類3

エキゾチックハドロンは保存量子数で分類される

バリオン $B = 1$

- $J^P = 1/2^+, I = 1/2$
- $J^P = 3/2^+, I = 3/2$
- $J^P = 1/2^-, I = 0, S = -1$
- ...

メソン $B = 0$

- $J^P = 0^-, I = 1$
- $J^P = 1^-, I = 1$
- $J^P = 0^-, I = 1/2, S = \pm 1$
- ...

- $J^P = 1/2^+, I = 0, S = +1$
- ...

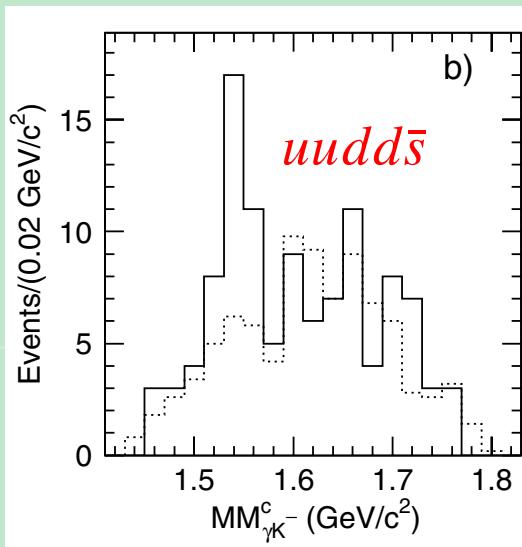
- $J^P = 0^-, I = 2$
- ...

量子数エキゾチックハドロン ($\bar{q}q, qqq$ 以外の状態)

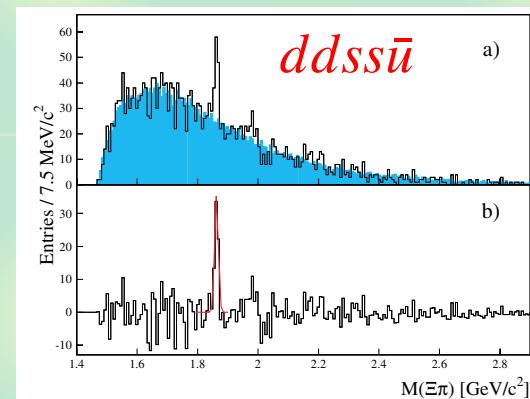
実験でのエキゾチックハドロン1

量子数エキゾチック候補

$\Theta^+(S = +1, B = 1)$ T. Nakano *et al.* (LEPS), PRL 91, 012002 (2003)

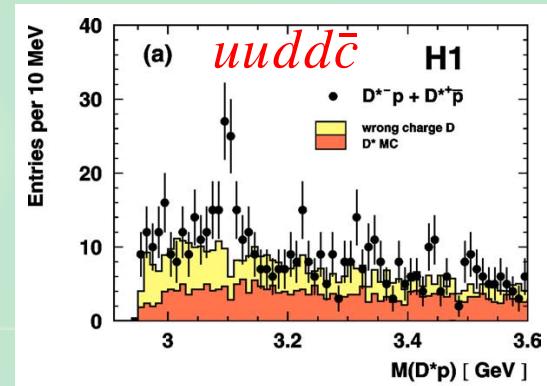


$\Xi^{--}(Q = -2, B = 1)$



C. Alt *et al.* (NA49), PRL 92, 042003 (2004)

$\Theta_c(C = -1, B = 1)$



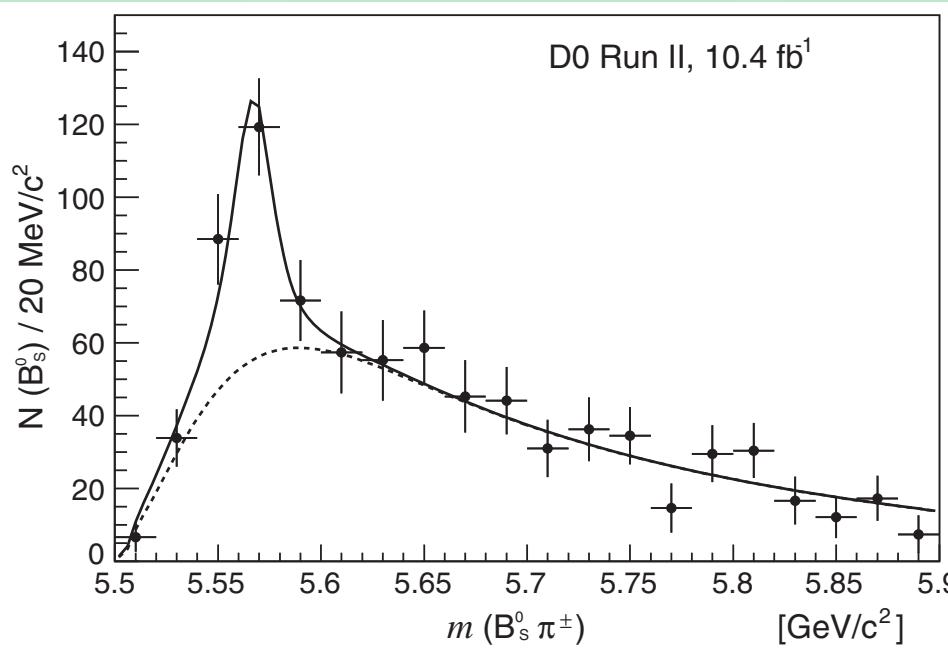
A. Aktas *et al.* (H1), PLB 588, 17 (2004)

- $q\bar{q}$ 対消滅がない (genuine exotic)

- その後、高統計の実験により排除された (PDGに掲載なし)

実験でのエキゾチックハドロン2

新しい候補1 $X(5568)^{\pm}$ V.M. Abazov *et al.* (D0), PRL 117, 022003 (2016)



- $B_s\pi^{\pm}$ に崩壊
- 量子数 $B = +1, S = +1, I = 1$
- クオーク組成は $\sim b u d \bar{s}$
- PDGに掲載済 (ただしLHCb、CMSなどでは観測されず)

$X(5568)^{\pm}$

$I(J^P) = ?(?)$

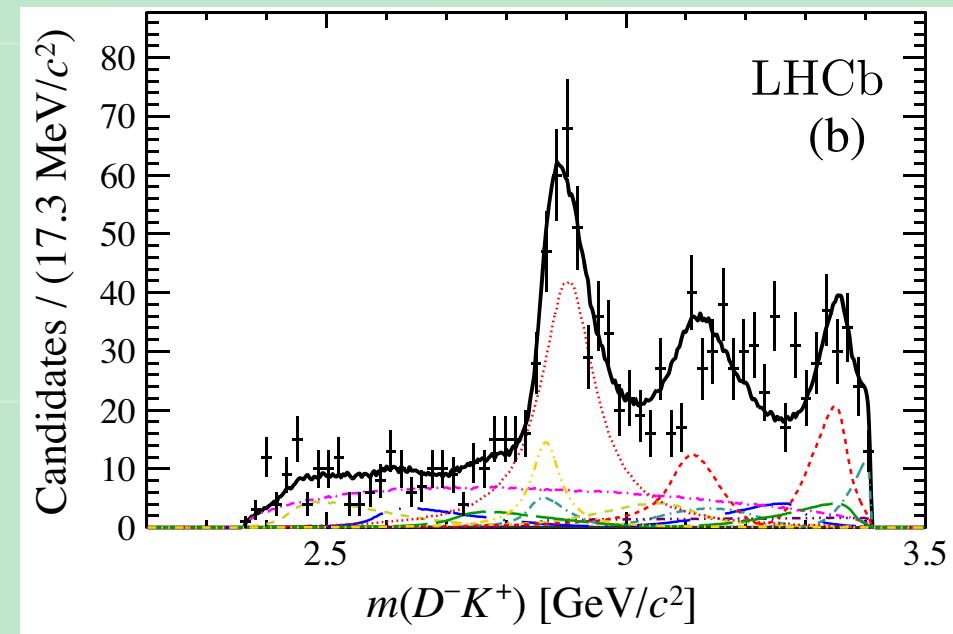
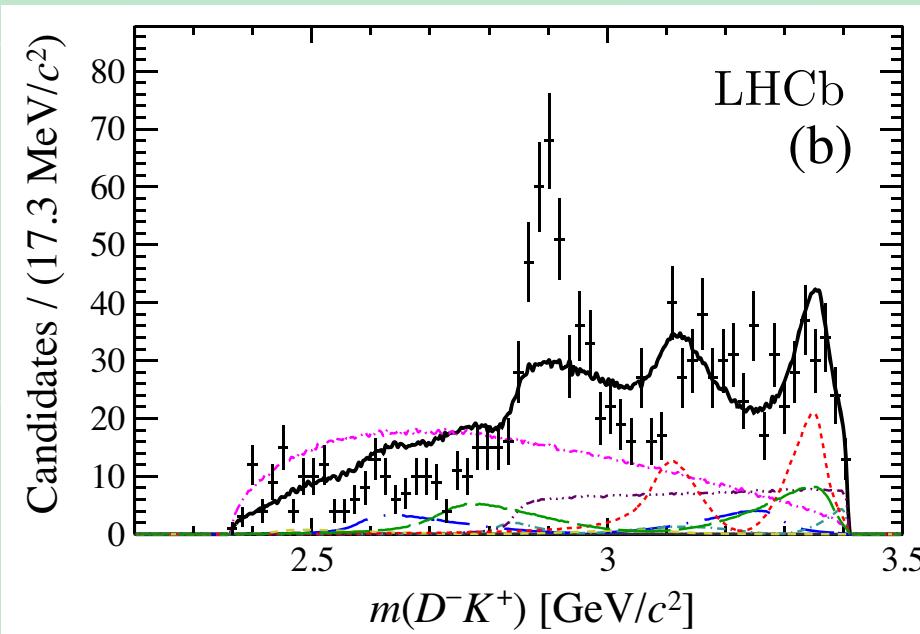
OMITTED FROM SUMMARY TABLE

Seen as a peak in the $B_s\pi^{\pm}$ mass spectrum with a significance of more than 3σ by ABAZOV 16E and ABAZOV 18A in inclusive $p\bar{p}$ collisions at 1.96 TeV. Not seen by AAIJ 16AI, AABOUD 18L, AALTONEN 18A, and SIRUNYAN 18J. Needs confirmation.

実験でのエキゾチックハドロン3

新しい候補2 $X(2900)$

R. Aaij *et al.* (LHCb), PRD 102, 112003 (2020)



- $D^- K^+$ に崩壊
- 量子数 $C = -1, S = +1$
- クオーク組成は $\sim ud\bar{c}\bar{s}$
- 2021 update でPDGに掲載

$X_0(2900)$

$I(J^P) = ?(0^+)$

OMITTED FROM SUMMARY TABLE

An exotic state with minimal quark content $\bar{c}d\bar{s}u$. Observed by AAIJ 20AI using full amplitude analysis of $B^+ \rightarrow D^+ D^- K^+$ decays.

実験でのエキゾチックハドロン4

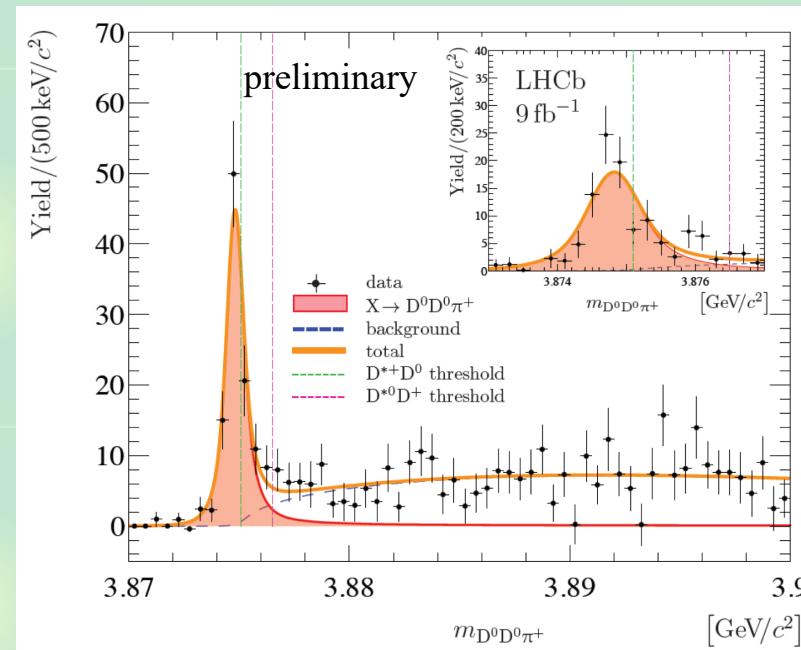
新しい候補3 T_{cc}

- $D^0 D^0 \pi^+$ に崩壊
- 量子数 $C = +2$
- クオーク組成は $\sim ud\bar{c}\bar{c}$
- PDG未掲載

J^{PC} エキゾチック

- $\pi_1(1400), \pi_1(1600)$ は $J^{PC} = 1^{-+}$: $\bar{q}q$ では作れない
- PDG掲載済

Talk by L. An @ HADRON2021 (31 Jun. 2021)

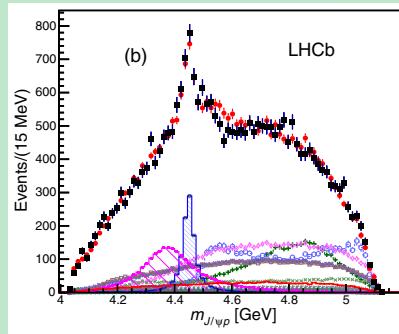


量子数がエキゾチックなハドロンは数個/370 : 非常にまれ
→ 実験事実であり、QCDから理解されていない

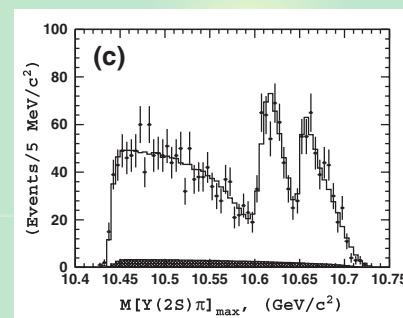
クオーコニウムを含むエキゾチック

ペントアクォーク P_c, P_{cs}, \dots 、テトラクォーク $X, Y, Z_c, Z_b, Z_{cs}, \dots$?

$P_c \sim \bar{c}cuud$ R. Aaij, et al., Phys. Rev. Lett. 115, 072001 (2015)



$Z_b \sim \bar{b}b\bar{u}d$ A. Bondar, et al., Phys. Rev. Lett. 108, 122001 (2012)



...

- $\bar{c}c, \bar{b}b$ は原理的には対消滅できる

→ フレーバー量子数はエキゾチックでない

$P_c \sim \bar{c}cuud \sim uud \sim N, \quad Z_b \sim \bar{b}b\bar{u}d \sim \bar{u}d \sim b_1(J^{PC} = 1^{+-})$

- OZI則： $\bar{c}c, \bar{b}b$ 対を含むことはほぼ確実 (J/ψ は ω と区別可能)

→ 量子数エキゾチックを理解するための手がかり

実験でのエキゾチックハドロンの現状

数字：PDG2020に掲載されている数

バリオン(162)

- $p, n, \Lambda, \Sigma, \dots$
- $\Lambda(1405)$
- ...

クォーコニウムを含む
エキゾチック(~15)

- $Z_c(3900), \dots Z_b(10610), \dots$

- $\pi_1(1400), \pi_1(1600)$
- $X(5568)^\pm, X(2600), T_{cc}$

メソン(209)

- π, K, η, \dots
- ...

- P_c, P_{cs}, \dots

量子数エキゾチック(3)

講義 1 のまとめ（前半）

- ハドロンは保存量子数で分類したとき、量子数がエキゾチックなハドロンは $\sim 3/370$
- 実験事実であり、QCDから理解されていない
- クオーコニウムを含むエキゾチック (P_c, Z_c, Z_b, \dots)などを手がかりにして、理由を解明したい
- 量子数が通常のメソン、バリオンも $q\bar{q}, qqq$ とは限らない？ → 講義 3 の内容へ

目次



講義 1：導入

- エキゾチックハドロンの現状

- カイラル対称性と有効場の理論



講義 2：共鳴状態の記述

- ハミルトニアンの固有状態

- 散乱理論と散乱振幅の極



講義 3： $\Lambda(1405)$ 共鳴の構造

- $\bar{K}N$ 散乱振幅と共に鳴状態

- ハドロンの複合性

量子力学の対称性

対称性：物理系（ハミルトニアン）を不变に保つ変換

- 理論が解けなくとも分かる性質がある
 - 既知の情報から予言ができる

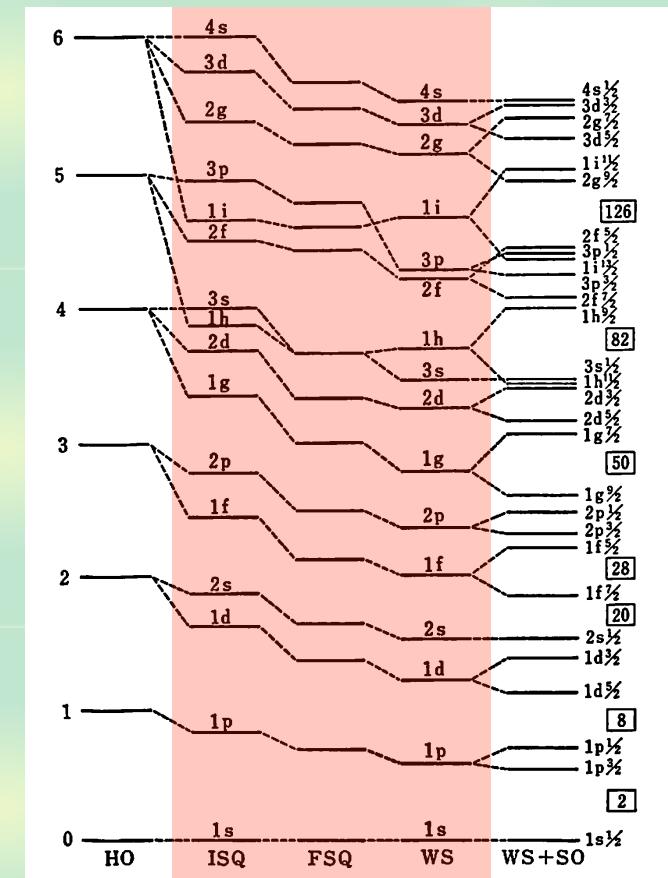
例) 中心力ポテンシャル

$$V(\mathbf{r}) = V(|\mathbf{r}|)$$

- 特定の方向がない：回転対称性 $SO(3)$

回転対称性の帰結

- 角運動量 ℓ が保存
 - エネルギーは磁気量子数 m に依らない
 - $2\ell + 1$ 個の固有状態が縮退



QCDとアイソスピン対称性

QCDラグランジアン ($m_u = m_d \equiv m$)

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{q}(i\gamma^\mu D_\mu)q - m\bar{q}q + (\text{gluons, heavy quarks})$$

運動項 質量項

- 軽いクォーク場

$$q = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \bar{q} = (\bar{u} \quad \bar{d}) = q^\dagger \gamma^0$$

フレーバー $\text{SU}(2)_V$ (アイソスピン) 変換 : $U^\dagger U = 1, \det U = 1$

$$q \rightarrow Uq, \quad \bar{q} \rightarrow \bar{q}U^\dagger$$

U は時空によらずカラー、スピノルの空間ではスカラー

→ \mathcal{L}_{QCD} には $\text{SU}(2)_V$ 対称性がある

$$\bar{q}q \rightarrow \bar{q}U^\dagger Uq = \bar{q}q$$

カイラル変換

クォーク場を右巻き q_R と左巻き q_L に分解 : $P_{R,L} = (1 \pm \gamma_5)/2$

$$q = q_R + q_L, \quad q_R = P_R q, \quad q_L = P_L q$$

$$\bar{q} = \bar{q}_R + \bar{q}_L, \quad \bar{q}_R = \bar{q} P_L, \quad \bar{q}_L = \bar{q} P_R$$

- カイラル $SU(2)_R \otimes SU(2)_L$ 変換 $R^\dagger R = L^\dagger L = 1$

$$q_R \rightarrow R q_R, \quad \bar{q}_R \rightarrow \bar{q}_R R^\dagger, \quad q_L \rightarrow L q_L, \quad \bar{q}_L \rightarrow \bar{q}_L L^\dagger$$

運動項：右巻きと左巻きが独立 \rightarrow カイラル対称性がある

$$\bar{q}_R (i\gamma^\mu D_\mu) q_R + \bar{q}_L (i\gamma^\mu D_\mu) q_L$$

質量項：右巻きと左巻きが混ざる \rightarrow カイラル対称性を破る

$$-m\bar{q}_R q_L - m\bar{q}_L q_R, \quad \bar{q}_R q_L \rightarrow \bar{q}_R R^\dagger L q_L \neq \bar{q}_R q_L$$

- ただし $R = L$ のとき不变 $\rightarrow SU(2)_V$ は破らない

カイラル対称性と自発的破れ

u, d クォーク質量はハドロンスケールに比べて十分小さい

→ 近似的に質量項がないものとみなせる

→ QCDラグランジアンは近似的にカイラル対称性を持つ

自発的破れの秩序変数：**カイラル凝縮**

$$\langle \bar{q}q \rangle \equiv \langle 0 | \bar{q}q | 0 \rangle$$

- $|0\rangle$: **QCD真空**
- 演算子 $\bar{q}q = \bar{q}_L q_R + \bar{q}_R q_L$ は対称性を破る
- ハドロンの世界では $\langle \bar{q}q \rangle \neq 0$ であることが知られている

$$\text{SU}(2)_R \otimes \text{SU}(2)_L \rightarrow \text{SU}(2)_V$$

カイラル対称性はQCD真空によって**自発的に**破れている

自発的破れの帰結1：NGボソン

無質量の南部ゴールドストーン（NG）ボソンの出現

Y. Nambu and G. Jona-Lasinio, Phys. Rev. 122, 345 (1961); Phys. Rev. 124, 246 (1961),
 J. Goldstone, Nuovo Cim. 19, 154 (1961),
 J. Goldstone, A. Salam and S. Weinberg, Phys. Rev. 127, 965 (1962)

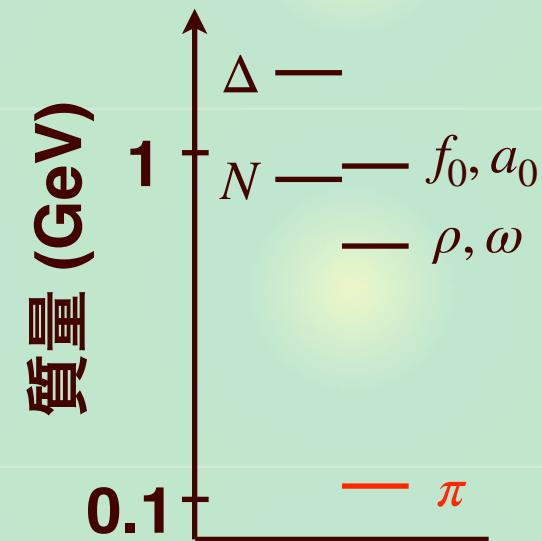
- n_{NG} : NGボソンの数、 n_{BS} : 破れた対称性の数

$$n_{NG} = n_{BS}$$

- $SU(2)_R \otimes SU(2)_L \rightarrow SU(2)_V$ の場合 $n_{BS} = 3$

- π はアイソスピン $I = 1$: 3成分

- π は他のハドロンに比べて軽い



補足）相対論的共変性がない場合

H. Watanabe and H. Murayama, Phys. Rev. Lett. 108, 251602 (2012),
 Y. Hidaka, Phys. Rev. Lett. 110, 091601 (2013)

$$n_I + 2n_{II} = n_{BS}$$

自発的破れの帰結2：低エネルギー一定理

低エネルギー一定理：カイラル対称性が支配する物理量の関係式

- カレント代数の方法を用いて導出された

Gell-Mann Oakes Renner 関係式

M. Gell-Mann, R.J. Oakes, B. Renner, Phys. Rev. 175, 2195 (1968)

$$m_\pi^2 f_\pi^2 = - m \langle \bar{q} q \rangle + \dots$$

- π 質量がクォーク質量、カイラル凝縮、 π 崩壊定数 f_π で決まる

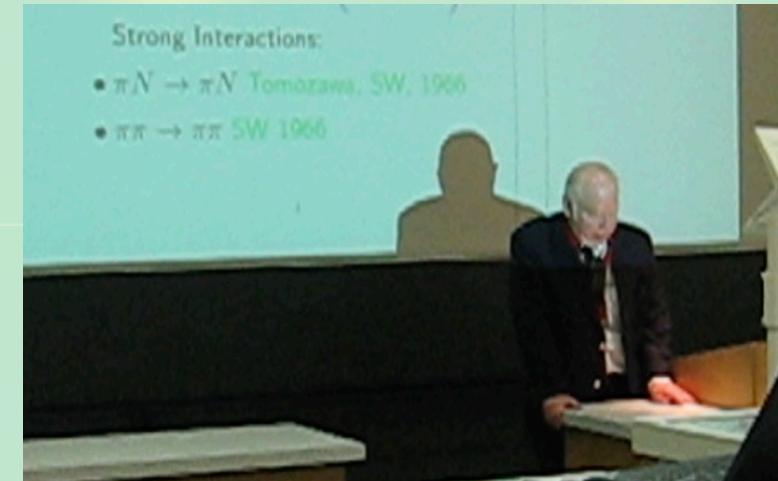
Weinberg-Tomozawa 定理

S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 17, 616 (1966),

Y. Tomozawa, Nuovo Cim. A46, 707 (1966)

$$a \propto \frac{m_\pi}{f_\pi^2} \left(I(I+1) - \frac{11}{4} \right) + \dots$$

- $\pi\pi$ 散乱長、 πN 散乱長が f_π などで決まる



What hath Weinberg wrought – カイラル摂動論

カイラル摂動論 (Chiral Perturbation theory、ChPT)

- 原理の確立

S. Weinberg, Physica A 96, 327 (1979)

- 実際のハドロンへ応用

J. Gasser, H. Leutwyler, Nucl. Phys. B 250, 465 (1985), ...

- 核力への応用

S. Weinberg, Phys. Lett. B 251, 288 (1990), ...



理論の構成方法

- 1) 有効ラグランジアンを作る
- 2) ファインマン図のパワーカウンティング
- 3) 次数毎にくりこみを行う
- 4) 低エネルギー定数を決定する

Jul. 6, 2009

有効ラグランジアンの構成

対称性の尊重

- QCDでのクォークのカイラル変換： (R, L)
- (R, L) での π 場の変換性を決定（非線形表現）
- 変換の下で不变な最も一般的なラグランジアン：無限個の項

ラグランジアンの微分展開

- 微分の数が少ない項が低エネルギーで支配的

$$\mathcal{L}_{\text{ChPT}}^\pi = \mathcal{L}^{(2)}(\pi) + \mathcal{L}^{(4)}(\pi) + \mathcal{L}^{(6)}(\pi) + \dots$$

↓

LO	NLO	NNLO
-----------	------------	-------------

ファインマン図のカウンティング：有限個の図による摂動計算

- LOが低エネルギー定理、高次項はその補正
- 次数毎に (order by order) くりこみ可能

低エネルギー一定数

低エネルギー一定数：ラグランジアン各項の係数

- くりこみ後、何らかの実験データと比較して決定
- 摂動の次数をあげると数が増える

$$\mathcal{L}_{\text{ChPT}}^\pi = \mathcal{L}^{(2)}(\pi) + \mathcal{L}^{(4)}(\pi) + \mathcal{L}^{(6)}(\pi) + \dots$$

2個 12個 94個

同じ定数が様々な過程に寄与：一度決めたら他を予言できる

例）崩壊定数 f_π

- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ の弱崩壊で決定
- Weinberg-Tomozawa定理で散乱長を予言

摂動の次数の低エネルギー一定数より多くのデータが必要

核子場

核子場 N の導入

- (R, L) での N の変換性を決定（非線形表現）
- 変換の下で不变な最も一般的なラグランジアンを作る
- 核子数は保存量なので、核子数毎にラグランジアンを構成

核子数 1 の系の低エネルギー展開

- γ_μ があるため奇数次項が許される

$$\mathcal{L}_{\text{ChPT}}^{\pi N} = \mathcal{L}^{(1)}(\pi, N) + \mathcal{L}^{(2)}(\pi, N) + \mathcal{L}^{(3)}(\pi, N) + \dots$$

- パワー・カウンティングの問題

$$p_\pi^\mu = (\sqrt{m_\pi^2 + p^2}, p), \quad p_N^\mu = (\sqrt{M_N^2 + p^2}, p)$$

- 運動量が小さくても核子のエネルギーは小さくない?
→ いくつかの手法で解決できる

核力の記述

核子数2の系

- 0次の項からはじまる

$$\mathcal{L}_{\text{ChPT}}^{NN} = \mathcal{L}^{(0)}(N) + \mathcal{L}^{(2)}(N) + \mathcal{L}^{(4)}(N) + \dots$$

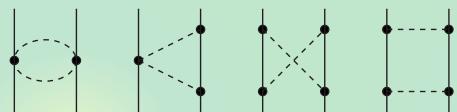
- カウンティングを整理し、 $\mathcal{L}_{\text{ChPT}}^\pi$, $\mathcal{L}_{\text{ChPT}}^{\pi N}$ と合わせると

Leading order



$\rightarrow \pi$ 交換 + 接触項 (短距離の物理)

Next-to-leading order



E. Epelbaum, H.W. Hammer, U.G. Meissner, Rev. Mod. Phys. 81, 1773 (2008)

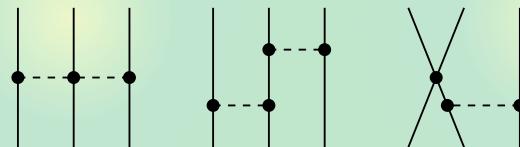
重陽子の存在：再総和が必要

多体力

核子数3の系

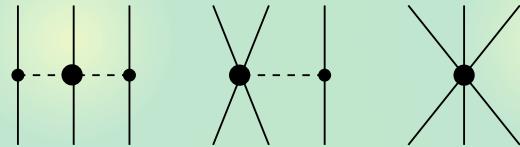
- 2体力と同じ枠組みで計算可能

Next-to-leading order



→ 2体力のoff-shell成分とキャンセル

Next-to-next-to-leading order



- 3体力は N^2LO から始まる（2体力はLO）

→ 核力の主要な部分は2体力

- 4体力、5体力はさらに抑制される

講義1 のまとめ（後半）



QCDのカイラル対称性と自発的破れ

- QCDは近似的にカイラル対称性を持つ
- 南部ゴールドストーンボソン π の出現
- 低エネルギー一定理がハドロンの性質を規定



カイラル摂動論（カイラルEFT）

- 低エネルギー一定理を自然に満たす枠組み
- 次数を上げることで精度を向上できる
- 核力の多体力も整合的に取り扱える