散乱理論の共鳴状態と ハドロン物理での応用





兵藤 哲雄

東京都立大学



<u>2022, Aug. 4th</u>





観測されているハドロン(2020)

Particle Data Group (PDG) 2020版

http://pdg.lbl.gov/

											1		
p	1/2+ ****	<i>∆</i> (1232)	3/2+ **	**	Σ^+	$1/2^{+}$	****	Ξ^0	$1/2^{+}$	****	\equiv^{++}_{cc}		***
n	1/2+ ****	$\Delta(1600)$	3/2+ **	**	Σ^0	$1/2^{+}$	****	Ξ-	$1/2^{+}$	****	_		
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 **	**	Σ(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- **	*	$\Sigma(1620)$	$1/2^{-}$	*	$\Xi(1820)$	$3/2^{-}$	***	Λ _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+ ****	⊿(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^*	3/2+	***
N(1710)	1/2+ ****	$\Delta(1930)$	5/2- **	*	$\Sigma(1775)$	5/2-	****	Ξ(2250)		**	$\Sigma_{b}(6097)^{+}$		***
N(1720)	3/2+ ****	⊿(1940)	3/2 **		$\Sigma(1780)$	3/2+	*	Ξ(2370)		**	$\Sigma_{b}(6097)^{-}$		***
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+ **		$\Sigma(1900)$	$1/2^{-}$	**				$\Xi_{b}^{\prime}(5935)^{-}$	$1/2^{+}$	***
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 ****	<i>∆</i> (2200)	7/2- **	*	$\Sigma(1915)$	5/2+	****	$\Omega(2012)^{-}$?-	***	$\Xi_{b}(5955)^{-}$	3/2+	***
N(1900)	3/2+ ****	<i>∆</i> (2300)	9/2+ **		Σ(1940)	3/2+	*	$\Omega(2250)^{-}$		***	$\Xi_{b}(6227)$		***
N(1990)	7/2+ **	<i>∆</i> (2350)	5/2 *		$\Sigma(2010)$	3/2-	*	$\Omega(2380)^{-}$		**	Ω_{h}^{-}	$1/2^{+}$	***
N(2000)	5/2+ **	<i>∆</i> (2390)	7/2+ *		$\Sigma(2030)$	7/2+	****	$\Omega(2470)^{-}$		**	Ŭ		
N(2040)	3/2+ *	<i>∆</i> (2400)	9/2 **		$\Sigma(2070)$	5/2+	*				$P_{c}(4312)^{+}$		*
N(2060)	5/2 ***	<i>∆</i> (2420)	11/2+ **	**	$\Sigma(2080)$	3/2+	*	Λ_c^+	$1/2^{+}$	****	$P_{c}(4380)^{+}$		*
N(2100)	1/2+ ***	$\Delta(2750)$	13/2- **		Σ(2100)	7/2-	*	$\Lambda_{c}(2595)^{+}$	$1/2^{-}$	***	$P_{c}(4440)^{+}$		*
N(2120)	3/2 ⁻ ***	<i>∆</i> (2950)	15/2+ **		Σ(2160)	$1/2^{-}$	*	$\Lambda_{c}(2625)^{+}$	3/2-	***	$P_{c}(4457)^{+}$		*
N(2190)	7/2 ****				Σ(2230)	3/2+	*	$\Lambda_{c}(2765)^{+}$		*			
N(2220)	9/2+ ****	Λ	1/2+ **	**	Σ(2250)		***	$\Lambda_{c}(2860)^{+}$	3/2+	***			
N(2250)	9/2 ****	Λ	1/2- **		Σ(2455)		**	$\Lambda_{c}(2880)^{+}$	$5/2^{+}$	***			
N(2300)	1/2+ **	A(1405)	1/2- **	**	Σ(2620)		**	$\Lambda_{c}(2940)^{+}$	3/2-	***			
N(2570)	5/2- **	A(1520)	3/2 **	**	Σ(3000)		*	$\Sigma_{c}(2455)$	$1/2^{+}$	****			
N(2600)	11/2- ***	A(1600)	1/2+ **	**	Σ(3170)		*	$\Sigma_{c}(2520)$	3/2+	***			
N(2700)	13/2+ **	A(1670)	1/2- **	**				$\Sigma_{c}(2800)$		***			
		A(1690)	3/2 **	**				Ξ_c^+	$1/2^{+}$	***			
		Λ(1710)	1/2 *					Ξ_c^0	$1/2^+$	****			
		A(1800)	1/2- **	*				$\Xi_c^{\prime+}$	$1/2^{+}$	***			
		A(1810)	1/2+ **	*				$=_{c}^{0}$	$1/2^{+}$	***			
		A(1820)	5/2+ **	**				$\Xi_{c}(2645)$	3/2+	***			
		A(1830)	5/2- **	**				$\Xi_{c}(2790)$	$1/2^{-}$	***			
		/(1890)	3/2 **	ተተ				$\Xi_{c}(2815)$	$3/2^{-}$	*		_	
		A(2000)	1/2 *					$\Xi_c(2930)$					
		/1(2050)	3/2 *					$\Xi_{c}(2970)$					
		/(20/0)	3/2 *					$\Xi_{c}(3055)$					
		/(2080)	5/2 *					$\Xi_{c}(3080)$					
		/1(2085)	7/2 **					$\Xi_{c}(3123)$		*			
		/(2100)	1/2 **	**				Ω_c^0	$1/2^{+}$	***			
		/(2110)	5/2 **	*				0 (0770)0	2 / <u>0</u> +	***			
		/(2325)	3/2 *	÷.		-						_	
		/I(2350) A(2505)	9/2 **	÷.		IX					.16	Π	大百百
		/1(2000)	**			7 🔪					~ I ()	U	TH
						•	-	-	-			-	
								34c(3120)~		****	1		L I

Γ		LIGHT UNI	FLAVORED		STRAM	IGE	CHARMED,	STRANGE	c7 continued		
		P(PC)	_ <i>B</i> _ 0)	$P(P^{C})$	(3 = ±1, C) (P)	(c = 3 -	(P)	(07770)	7 (5)	
	+	1=(0=)	(1(70)	$1 = (0 = \pm)$	V [±]	1(0(0=)	D [±]	n(5)	 ψ(3/70) ψ(2000) 	$0^{-}(1^{-})$	
	• π ⁺	1(0) 1-(0-+)	 π₂(16/0) μ(1600) 	$1^{-}(2^{-})$	• K-	1/2(0)	• D ₅	0(0)	• $\psi_2(3823)$	0(2)	
	• #0	$1(0^{+})$	 φ(1680) φ(1600) 	0(1)	• K ⁰	1/2(0)	• D ₅ ⁺⁺	0(?`)	• $\psi_3(3842)$	0(3)	
	• η - f (Γοο)	$0^{+}(0^{+})$	 ρ₃(1090) (1700) 	$1^{+}(3^{-})$	• A 5	1/2(0)	• $D_{s0}(2317)^{-1}$	0(0)	χ ₀₀ (3000)	$0^{+}(1^{+}^{+})$	
	• /0(300)	$1^{+}(1^{-})$	 ρ(1700) ε (1700) 	$1^{-}(0^{+}^{+})$	• NY	1/2(0)	• $D_{s1}(2460)^{\perp}$	0(1)	$ \chi_{c1}(3012) $	1+(1+-)	
	• p(110)	$1^{-1}(1^{-1})$	• $a_2(1700)$ • $f_2(1710)$	$0^{+}(0^{+}^{+})$	• K ₀ (700)	1/2(0 ')	 D_{s1}(2536)[±] 	0(1)	• X(3915)	$(1)^{1}$	
	• w(102)	$0^{+}(0^{-}+)$	• <i>I</i> ₀ (1710)	$0^{+}(0^{-}+)$	• K*(892)	$\frac{1}{2(1-1)}$	• D ₅₂ (2573)	$0(2^{+})$	• X (3930)	$0^{+}(2^{+}+)$	
	• £(980)	$0^{+}(0^{+}^{+})$	• = (1800)	1-(0-+)	• K ₁ (1270)	$\frac{1}{2(1^+)}$	• $D_{s1}^*(2700)^+$	$0(1^{-})$	X(3940)	7?(7??)	
	• a(980)	$1^{-}(0^{+}^{+})$	6(1810)	$0^{+}(2^{+}+)$	• $N_1(1400)$	$\frac{1}{2(1^{-1})}$	$D_{s1}^{*}(2860)^{\pm}$	$0(1^{-})$	• X(4020) [±]	$1^{+}(?^{?-})$	
	 <i>a</i>(1020) 	$\hat{0} = (1)$	X(1835)	$2^{?}(0^{-+})$	• K (1410)	$\frac{1}{2}(1)$	$D_{53}^{*}(2860)^{\perp}$	0(3)	• \u020)	$\hat{0} = (1 - \hat{1})$	
	• h (1170)	$0^{-}(1^{+}-)$	• da(1850)	$0^{-}(3^{-})$	$-K^{*}(1430)$	1/2(0)	$D_{sJ}(3040)^{\perp}$	0(?`)	$X(4050)^{\pm}$	$1^{-}(?^{?+})$	
	• b (1235)	1+(1+-)	• m(1870)	$0^{+}(2^{-}+)$	• (1450)	1/2(2)	BOTT	OM	X(4055)±	$1^{+}(?^{?-})$	
	• a1(1260)	$1^{-(1++)}$	 π2(1880) 	1-(2-+)	Ka(1590)	$\frac{1}{2}(0^{-})$	(B =	±1)	$X(4100)^{\pm}$	$1^{-(???)}$	
	• fs(1270)	$0^{+}(2^{+}+)$	p(1900)	1+(1)	K(1630)	$\frac{1}{2}(2^{2})$	$\bullet B^{\pm}$	$1/2(0^{-})$	• χ _{c1} (4140)	$0^{+(1^{++})}$	
	 f₁(1285) 	$0^{+}(1^{++})$	$f_2(1910)$	$0^{+}(2^{++})$	K (1650)	$\frac{1}{2(1+1)}$	• B ⁰	$1/2(0^{-1})$	 ψ(4160) 	$0^{-}(1^{-})$	
	 η(1295) 	$0^{+}(0^{-+})$	$a_0(1950)$	$1^{-}(0^{++})$	• K*(1680)	$1/2(1^{-1})$	• B^{\pm}/B^0 AD	MIXTURE	X(4160)	? [?] (? ^{??})	
	 π(1300) 	$1^{-}(0^{-+})$	 f₂(1950) 	0+(2++)	• K ₂ (1770)	$1/2(2^{-1})$	• $B^{\pm}/B^0/B_5^0$	/b-baryon	$Z_{c}(4200)$	$1^{+}(1^{+})$	
	• a ₂ (1320)	$1^{-}(2^{++})$	 a₄(1970) 	$1^{-}(4^{++})$	 K[*]₃(1780) 	$1/2(3^{-1})$	ADMIXTUF	E	 ψ(4230) 	$0^{-}(1^{})$	
	• f ₀ (1370)	$0^{+}(0^{++})$	$\rho_3(1990)$	1+(3)	 K₂(1820) 	$1/2(2^{-1})$	triv Element	s CKIVI IVIA-	$R_{c0}(4240)$	$1^{+}(0^{})$	
	 π₁(1400) 	$1^{-}(1^{-+})$	$\pi_2(2005)$	$1^{-}(2^{-+})$	K(1830)	1/2(0-)	• B*	1/2(1-)	$X(4250)^{\pm}$	$1^{-}(?^{+})$	
	 η(1405) 	$0^+(0^-+)$	 f₂(2010) 	$0^+(2^{++})$	$K_0^*(1950)$	$1/2(0^{+})$	 B₁(5721)⁺ 	$1/2(1^+)$	$\psi(4260)$	$0^{-}(1^{-})$	
	• h1(1415)	$0^{-}(1^{+})$	$f_0(2020)$	$0^+(0^++)$	$K_{2}^{*}(1980)$	1/2(2+)	 B₁(5721)⁰ 	$1/2(1^+)$	• $\chi_{c1}(4274)$	$0^{+}(1^{++})$	
	$a_1(1420)$	1(1+)	• f ₄ (2050)	$0^{+}(4^{++})$	 K[*]₄(2045) 	$1/2(4^+)$	$B_{j}^{*}(5732)$?(??)	X (4350)	$0^{-}(2^{-})$	
	• /1(1420)	$0^{-}(1^{-})$	$\pi_2(2100)$	$1(2^{-1})$	$K_2(2250)$	$1/2(2^{-})$	 B[*]₂(5747)⁺ 	$1/2(2^+)$	• $\psi(4300)$	0(1)	
	• ω(1420) €(1430)	$0^+(2^++)$	f0(2100) fc(2150)	$0^+(0^+)$	$K_3(2320)$	1/2(3+)	• $B_2^*(5747)^0$	1/2(2+)	ψ(4350) • ψ(4415)	$0^{-}(1^{-})$	
	• a (1450)	$1^{-}(0^{++})$	a(2150)	$1^{+}(1^{-})$	$K_{5}^{*}(2380)$	$1/2(5^{-})$	B _J (5840) ⁺	$1/2(?^{\prime})$	• Z-(4430)	$1^{+}(1^{+}-)$	
	• a(1450)	$1^{+}(1^{-})$	ρ(2130) φ(2170)	$0^{-}(1^{-})$	K4(2500)	$1/2(4^{-})$	B _J (5840) ⁰	$1/2(?'_{2})$	× o(4500)	$0^{+}(0^{+}^{+})$	
	• n(1475)	$0^{+}(0^{-}+)$	fo(2200)	$0^{+}(0^{+}+)$	K(3100)	?'(?'')	• B _J (5970) ⁺	1/2(?')	 ψ(4660) 	$0^{-}(1^{-})$	
	 f₀(1500) 	$0^{+}(0^{+}+)$	$f_1(2220)$	$0^{+}(2^{++})$	CHARN	4FD	• B _J (5970) ⁰	1/2(?!)	$\chi_{c0}(4700)$	0+(0++)	
	$f_1(1510)$	$0^{+}(1^{++})$	5()	or 4 + +)	(C = ±	=1)	BOTTOM. S	STRANGE		-	
	 f'₂(1525) 	$0^{+}(2^{++})$	η(2225)	$0^+(0^{-+})$	 D[±] 	$1/2(0^{-})$	$(B = \pm 1,$	$S = \mp 1$)	b b	b an a d states)	
	f ₂ (1565)	0+(2++)	ρ ₃ (2250)	1+(3)	• D ⁰	$1/2(0^{-1})$	• B ⁰ _c	0(0-)	(+ possibly in	JHQQ States)	
	ρ (1570)	1+(1)	 f₂(2300) 	0+(2++)	 D*(2007)⁰ 	$1/2(1^{-1})$	• B ² _c	$0(1^{-})$	 η_b(1S) 	0+(0 - +)	
	$h_1(1595)$	0-(1+-)	f ₄ (2300)	$0^{+}(4^{++})$	 D*(2010)[±] 	$1/2(1^{-})$	$X(5568)^{\pm}$?(? [?])	• 7(15)	$0^{-}(1^{-})$	
	 π₁(1600) 	$1^{-}(1^{-+})$	$f_0(2330)$	$0^+(0^{++})$	 D[*]₀(2300)⁰ 	1/2(0+)	 B₅₁(5830)⁰ 	0(1+)	• $\chi_{b0}(1P)$	$0^{+}(0^{++})$	
	• a ₁ (1640)	$1^{-}(1^{++})$	 f₂(2340) 	$0^+(2^+)$	$D_0^*(2300)^{\pm}$	$1/2(0^{+})$	 B[*]₅(5840)⁰ 	0(2+)	• $\chi_{b1}(1P)$	$0^{-}(1^{+})$	
	$t_2(1640)$		$\rho_5(2350)$	$1^{+}(5^{-})$	 D₁(2420)⁰ 	$1/2(1^+)$	$B_{s,J}^{*}(5850)$?(? [?])	• ng(1P)	$0^{+}(2^{+}^{+})$	
	• η ₂ (164)		6(2510)	0.(0)	$D_1(2420)^{\pm}$	1/2(?')	DOTTOM (n (25)	$0^{+}(0^{-}+)$	
	• w(1		OTHER	LIGHT	$D_1(2430)^0$	$1/2(1^+)$	(B = C:	= ±1)	• T(25)	$0^{-}(1^{-})$	
	• #3		her St	ates	• $D_2(2460)^0$	1/2(2+)	• B ⁺	-/	• T ₂ (1D)	$\tilde{0} - (21)$	
					 D[*]₂(2460)[±] 	1/2(2+)	• D _c D (0C)+	0(0)	• Y to (2P)	$0^{+}(0^{+}+)$	
		-			D(2550) ⁰	1/2(?')	$D_{C}(23)^{-}$	0(0)	• χ _{b1} (2P)	$0^{+}(1^{++})$	
					$D_{J}^{*}(2600)$	1/2(?)	<i>c</i> 7	,	$h_{h}(2P)$	$0^{-(1+-)}$	
					D*(2640)±	1/2(?)	(+ possibly no	n-qq states)	 χ_{b2}(2P) 	$0^{+}(2^{++})$	
					D(2/40) ⁰	1/2(?*)	 η_c(1S) 	$0^{+}(0^{-+})$	• Υ(3S)	0-(1)	
					D(2000)0	1/2(3)	 J/ψ(1S) 	$0^{-}(1^{-})$	• χ _{b1} (3P)	0+(1++)	
					D(3000) ⁰	1/2((.)	• ~_0(1P)	0+(0++)	• χ _{b2} (3P)	0+(2++)	
							$_{c1}(1P)$	0+(1++)	 <i>γ</i>(4S) 	0-(1)	
		/ /	1 💊 .			JEE	c(1P)	0-(1+-)	• Z _b (10610)	$1^+(1^+)$	
		K ' /			/] []	I AEE	: _@ (1P)	$0^+(2^{++})$	• Z _b (10650)	$1^{+}(1^{+})$	
		•					c(25)	0+(0 +)	/(10/53)	$f(1^{-})$	
						_	- (25)	0-(1)	 7 (10860) 20(11020) 	0(1)	
		1			1		1		• / (11020)	υ(L)	

観測されているハドロン(2022)

Particle Data Group (PDG) 2022版

http://pdg.lbl.gov/

	1.0-	****	A (1000)	a /a+		1 /0+ *****	4+	1 /0+ +++++++	40	1/0+ +***	1		LIGHT UN	FLAVORED		STR/	NGE	CHARMED, S	TRANGE	<i>c</i> c cont	inued
p	1/2+	****	$\Delta(1232)$	3/2' **** 2/2+ ****	Σ^{\top}	1/2 ****	// _C	1/2 ****	/16 A (E010)0	1/2 ***			(S = C)	= B = 0)	IG(IPC)	$(S = \pm 1, 0)$	E = B = 0	$(C = \pm 1, S)$ (+ possibly pop	$= \pm 1$) $a\bar{a}$ states)		16(PC)
// N(1440)	1/2 -	****	$\Delta(1600)$	3/2 *****	Σ° Σ-	1/2 ****	/l _c (2595) ⁺	1/2 ***	/\b(5912)°	1/2 ***		+	P(JC)	(1.000)	P(J C)	+	1(5)		(f)	 ψ₂(3823) ψ₂(3823) 	$0^{-}(2^{-})$
N(1440)	3/2-	****	$\Delta(1020)$ $\Delta(1700)$	2/2 ****	Z (1295)	2/2+ ****	$\Lambda_{C}(2025)^{+}$	3/2 ****	A (6146)0	3/2 ***		• π [±] • π ⁰	1 (0) 1 - (0 - +)	 π₂(16/0) φ(1690) 	$1^{-}(2^{-+})$ $0^{-}(1^{})$	• K ⁻	1/2(0)	 D[±]_c 	0(0-)	 ψ₃(3842) χ_m(3860) 	$0^{+}(0^{+}+)$
N(1520)	3/2	****	$\Delta(1700)$ $\Delta(1750)$	1/2 *	Z(1505)	3/2 *	$\Lambda_{c}(2705)^{+}$		/16(0140)°	3/2 ***		• η	$0^{+}(0^{-}+)$	 φ(1000) φ₃(1690) 	$1^{+}(3^{-})$	• K&	1/2(0)	• D_s^*±	0(??)	 χ_{c1}(3872) 	$0^{+}(1^{++})$
N(1550)	1/2	****	A(1000)	1/2 ***	$\Sigma(1500)$	1/2 *	$\Lambda_{c}(2000)^{+}$	5/2 ***	76(0102)-	1/2+ ***		 f₀(500) 	0+(0++)	 ρ(1700) 	1+(1)	• КŽ	1/2(0-)	 D[*]₅₀(2317)[±] 	0(0+)	• Z _c (3900)	$1^{+}(1^{+})$
N(1675)	5/2-	****	$\Delta(1905)$	5/2+ ****	$\Sigma(1020)$ $\Sigma(1660)$	1/2 ***	$\Lambda_{c}(2000)^{+}$	3/2 ***	Σ_b	2/2+ ***		 ρ(770) 	$1^+(1^{})$	 a₂(1700) 	$1^{-}(2^{++})$	• K ₀ (700)	1/2(0+)	 D_{\$1}(2460)[±] D_{\$1}(2506)[±] 	$0(1^+)$	• χ _{c0} (3915)	$0^{+}(0^{++})$
N(1680)	5/2+	****	A(1010)	1/2+ ****	$\Sigma(1670)$	3/2 ****	$\Gamma_{C}(2940)$	3/2 1/2 ⁺ ****	$\sum_{b}^{2} (6007)^{-1}$	- J/∠ ···· + ***		 ω(782) π'(958) 	$0^{+}(0^{-}+)$	• f ₀ (1710) X(1750)	$\frac{0}{(0+1)}$	 K*(892) K (1270) 	$1/2(1^{-})$	 D_{\$1}(2536)[±] D[*] (2573) 	$0(1^+)$ $0(2^+)$	• χ _{c2} (3930) χ(3940)	7?(7??)
N(1700)	3/2-	***	$\Delta(1920)$	3/2+ ***	$\Sigma(1070)$	1/2 ***	$\Sigma_{C}(2433)$	3/2+ ***	$\Sigma_{b}(6097)^{-1}$	- ***		 f₀(980) 	$0^{+}(0^{+}^{+})$	$\eta(1760)$	0+(0 - +)	• $K_1(1270)$ • $K_1(1400)$	$\frac{1/2(1^+)}{1/2(1^+)}$	$D_{s1}(2590)^+$	0(0-)	• X(4020) [±]	1+(??-)
N(1710)	1/2+	****	$\Delta(1920)$	5/2 ***	$\Sigma(1775)$	5/2 ****	$\Sigma(2320)$	3/2 ***	=-	1/2+ ***		 a₀(980) 	$1^{-}(0^{++})$	 π(1800) 	1-(0-+)	• K*(1410)	1/2(1-)	 D[*]_{s1}(2700)[±] 	0(1-)	• ψ(4040)	0-(1)
N(1720)	$\frac{1}{2}$	****	$\Delta(1930)$	3/2- **	$\Sigma(1780)$	3/2+ *	=+	1/2+ ***	-b =0	1/2 ***		 φ(1020) μ (1170) 	$0^{-}(1^{-})$	f2(1810)	$0^+(2^++)$	• K ₀ (1430)	1/2(0+)	$D_{s1}^{*}(2860)^{\pm}$	0(1-)	X(4050) [±]	$1^{-}(?^{!+})$ $1^{+}(?^{?-})$
N(1860)	5/2+	**	$\Delta(1950)$	7/2+ ****	$\Sigma(1880)$	1/2+ **	-c =0	1/2+ ****	$=_{\tilde{b}}$	- 1/2+ ***		• h1(1170) • h (1235)	$1^{+}(1^{+})$	×(1835) ・か(1850)	$(0^{-})^{-}$	 K[*]₂(1430) 	$1/2(2^+)$	 D[*]₅₃(2860)[±] 	0(3 ⁻)	$X(4055)^{-}$ $X(4100)^{\pm}$	$1^{-}(?^{?})$
N(1875)	3/2-	***	$\Delta(2000)$	5/2 ⁺ **	$\Sigma(1900)$	1/2- **	-c = -c + -c	1/2 ***	$=_{b}(3933)$	1/2 ***		• a1(1260)	$1^{-}(1^{++})$	 η₂(1850) η₂(1870) 	$0^{+}(2^{-+})$	• A (1460) K ₂ (1580)	1/2(0)	$\chi_0(2900)$ $\chi_1(2900)$	$\frac{2}{7(1^{-1})}$	• χ _{c1} (4140)	$0^{+}(1^{++})$
N(1880)	1/2+	***	$\Delta(2150)$	1/2 *	$\Sigma(1910)$	3/2 ***	-c =0	1/2 ***	$=_{b}(5945)^{\circ}$	- 2/2+ ***		• f ₂ (1270)	$0^{+}(2^{+}^{+})$	 π₂(1880) 	1-(2-+)	K(1630)	1/2(??)	D _{sJ} (3040) [±]	0(??)	• ψ(4160)	$0^{-}(1^{-})$
N(1895)	1/2-	****	$\Delta(2200)$	7/2- ***	$\Sigma(1915)$	5/2+ ****	-c = (064E)	2/2+ ***	$=_{b}(5955)$	- 2/2 ***		• f ₁ (1285)	$0^+(1^{++})$	$\rho(1900)$	$1^{+}(1^{})$	• K ₁ (1650)	1/2(1+)	POTTO	 NA	X(4160)	?!(?!!) 1+(1+-)
N(1900)	3/2+	****	$\Delta(2300)$	9 [′] /2 ⁺ **	Σ(1940)	3/2+ *	$=_{C}(2043)$ = (2790)	3/2 ***	$=_{b}(6100)$	- ***		 η(1295) π(1300) 	$1^{-}(0^{-+})$	$T_2(1910)$ $a_0(1950)$	$1^{-}(0^{+})$	 K*(1680) K (1770) 	$1/2(1^{-})$	(B = ±	1)	∠ _C (4200) • ψ(4230)	$0^{-}(1^{-})$
N(1990)	7/2+	**	$\Delta(2350)$	5/2- *	$\Sigma(2010)$	3/2- *	$=_{C}(2150)$ = (2015)	2/2 ***	$= (6227)^{0}$) ***		 a2(1320) 	$1^{-}(2^{++})$	 f₂(1950) 	$0^{+}(2^{+}+)$	 K[*]₂(1770) K[*]₂(1780) 	$\frac{1}{2(2^{-})}$	 <i>B</i>[±] 	$1/2(0^{-})$	R _{c0} (4240)	1+(0)
N(2000)	5/2+	**	<i>∆</i> (2390)́	7/2+ *	Σ(2030)	7/2+ ****	= (2013)	3/2 **	_p(0221)	1/2+ ***		• f ₀ (1370)	$0^{+}(0^{+}^{+})$	 ∂₄(1970) 	$1^{-}(4^{++})$	 K₂(1820) 	1/2(2-)	• B ⁰	1/2(0 ⁻)	$X(4250)^{\pm}$	1-(??+)
N(2040)	3/2+	*	$\Delta(2400)$	9/2 **	Σ(2070)	5/2+ *	$=_{c(2930)}$	**	0.(6316)-	- *		• $\pi_1(1400)$	$1^{-}(1^{-}+)$	$\rho_3(1990)$	$1^+(3^{})$ $1^-(2^{-+})$	K(1830)	$1/2(0^{-})$	 B[±]/B⁰ ADM B[±]/B⁰/B⁰/B⁰/B⁰/B⁰/B⁰/B⁰/B⁰	IXTURE	• χ _{c1} (4274) χ(4250)	$0^+(1^{++})$ $0^+(2^{?+})$
N(2060)	5/2-	***	$\Delta(2420)$	11/2+ ****	Σ(2080)	3/2+ *	$=_{c}(2970)$	1/2+ ***	32 ₀ (0310)	- *		 η(1405) h (1415) 	$0^{-}(1^{+})$	π ₂ (2005) • f ₂ (2010)	$0^{+}(2^{++})$	$K_0^*(1950)$	$1/2(0^+)$		Haryon	∧(4300) • ψ(4360)	$0^{-}(1^{-})$
N(2100)	$1/2^{+}$	***	$\Delta(2750)$	13/2- **	Σ(2100)	7/2- *	$=_{c}(2055)$	***	D ₆ (6340)-	- *		• f1(1420)	$0^+(1^++)$	f ₀ (2020)	$0^{+}(0^{+}+)$	 K₂(1980) K*(2045) 	$\frac{1}{2(2^+)}$	V _{cb} and V _{ub} (CKM Ma-	• ψ(4415)	0 - (1)
N(2120)	3/2-	***	⊿(2950)	15/2 ⁺ **	Σ(2110)	1/2- *	$=_{c}(3080)$	***	Q ₆ (6350) ⁻	- *		 ω(1420) 	0-(1)	 f₄(2050) 	0+(4++)	$K_{2}(2250)$	1/2(4)	• B*	$1/2(1^{-})$	• Z _c (4430)	$1^{+}(1^{+})$
N(2190)	$7/2^{-}$	****			Σ(2230)	3/2+ *	$\Xi_{c}(3123)$	*	320(0000)			$f_2(1430)$	$0^+(2^{++})$ $1^-(0^{++})$	$\pi_2(2100)$	$1^{-}(2^{-+})$	K ₃ (2320)	1/2(3+)	• B ₁ (5721)	$1/2(1^+)$	$\chi_{c0}(4500)$	$0^+(0^{++})$ $0^+(2^{2+})$
N(2220)	9/2+	****	Λ	1/2+ ****	Σ(2250)	**	Ω^0_{α}	1/2+ ***	$P_{c}(4312)^{+}$	+ *		• $\rho(1450)$ • $\rho(1450)$	$1^{+}(1^{-})$	fo(2100)	$0^{+}(2^{+}+)$	K ₅ (2380)	1/2(5-)	$B_{J}^{*}(5732)$?(?*) 1./2(2 ⁺)	• \u00eb(4660)	$0^{-}(1^{-})$
N(2250)	9/2-	****	A(1380)	1/2 **	_		_					_					$\frac{1}{2(4^{-})}$	 B₂(5840) 	$1/2(2^{?})$ $1/2(?^{?})$	χ _{c1} (4685)	$0^+(1^{++})$
N(2300)	$1/2^{+}$	**	A(1405)	1/2- **		: 88 -	乙立	C+_	1- :	224 F				- L W		S 🔊	:(:)	• B _J (5970)	1/2(??)	χ _{c0} (4700)	0+(0++)
N(2570)	$5/2^{-}$	**	A(1520)	3/2- **			(»Ŧ	П/-	60 1				• / \				:MED +1)	BOTTOM ST	RANGE	bZ	;
N(2600)	11/2	- ***	A(1600)	1/2 ***													1/2(0-)	$(B = \pm 1, S)$	= ∓1)	(+ possibly no	n qq states)
N(2700)	13/27	⊤ * *	/(16/0)	1/2 **	1 -0	1 /0+ ++++							×				1/2(0-)	• B_{S}^{0}	0(0-)	 η_b(1S) 	0+(0 - +)
			/(1690)	3/2 ****	<u> </u>	1/2 ****	$\Omega_{c}(3120)^{0}$	***				$h_1(1595)$	$0^{-}(1^{+-})$	$\rho_3(2250)$	$1^+(3^{})$	 D*(2007)⁰ 	$1/2(1^{-})$	• B [*] _s	$0(1^{-})$	• 7(15)	$0^{-}(1^{-})$ $0^{+}(0^{+}+)$
			/(1/10)	1/2 *	=	2/2+ ****						• $\pi_1(1600)$ • $\pi_1(1640)$	$1^{-}(1^{+})$	• $I_2(2300)$ $f_4(2300)$	$0^{+}(2^{+})$	 D*(2010)[±] D*(2000) 	$1/2(1^{-})$ $1/2(0^{+})$	X (5568) [±] ■ B . (5920) ⁰	((?))	• χ _{b1} (1P)	$0^{+}(1^{++})$
			/(1000)	1/2 ***	=(1530)	3/2 *	Ξ_{cc}^+	*				$f_2(1640)$	$0^{+}(2^{+}+)$	f ₀ (2330)	$0^{+}(0^{+}+)$	• D ₀ (2300) • D ₁ (2420)	$1/2(0^{+})$ $1/2(1^{+})$	 B_c(5840)⁰ 	$0(2^+)$	 h_b(1P) 	$0^{-}(1^{+})$
			A(1920)	1/2 ****	=(1620)	***	Ξ_{cc}^{++}	***				 η₂(1645) 	0+(2 - +)	 f₂(2340) 	0+(2++)	 D₁(2430)⁰ 	1/2(1+)	B* (5850)	?(??)	• $\chi_{b2}(1P)$	$0^{+}(2^{++})$
			A(1920)	5/2 5/2 ****	=(1050)	2/0- ***						 ω(1650) ω(1670) 	0	$\rho_5(2350)$	$1^{+}(5^{})$	• D ₂ (2460)	1/2(2+)	B _{sJ} (6063) ⁰	0(?')	η _b (25) • γ(25)	$0^{-}(0^{-})$
			A(1890)	3/2+ ****	=(1020)	3/2 ***						• w3(16/		2510)	$0^{+}(6^{+}+)$	$D_0(2550)^0$	$1/2(0^{-})$	<i>B_{sJ}</i> (6114) ⁹	0(?:)	 <i>Υ</i>₂(1D) 	$0^{-}(2^{-})$
			A(2000)	1/2 *	=(2030)	> 5? ***								3-0)	U (U)	D (2600)*	1/2(1) 1/2(7?)	BOTTOM, CH	ARMED	• χ _{b0} (2P)	0+(0++)
			$\Lambda(2050)$	3/2 *	=(2030)	- 2 *			_ ($D_2(2740)^0$	1/2(2-)	(B=C=	±1)	 χ_{b1}(2P) μ (2P) 	$0^{+}(1^{+})$
			$\Lambda(2070)$	3/2+ *	=(2120)	**										 D[*]₃(2750) 	1/2(3-)	• B _c • B (26)±	$0(0^{-})$	• 116(2P)	$0^{+}(2^{+})$
			A(2080)	5/2 *	=(2230)	**										$D_1^*(2760)^0$	1/2(1-)	• <i>D_C(23)</i>	(0)	 Υ(35) 	$0^{-}(1^{-})$
			$\Lambda(2085)$	7/2+ **	=(2500)	*										D(3000) ⁰	1/2(?*)	CC (⊥ possibly pop	and states)	• χ _{b1} (3P)	0+(1++)
			$\Lambda(2100)$	7/2 ****	=(2500)													(+ possibly hore	$\pm (0 = \pm)$	• χ _{b2} (3P)	$0^{+}(2^{++})$
			A(2110)	5/2 ⁺ ***	Ω^{-}	3/2+ ****												• J/ψ(15) 0	-(1)	• 7 (45) • 7 ₅ (10610)	$1^{+}(1^{+})$
			A(2325)	3/2- *	$\Omega(201)$									-)(1P) 0	+(0++)	 Z_b(10650) 	$1^{+}(1^{+})$
			A(2350)	9/2+ ***	$\Omega(225)$	1 1/1			4 -	FI A			1 1	1 .			FIC	[1P] 0	$^{+(1++)}$	$\gamma(10753)$	$?'(1^{})$
			A(2585)	*	Ω(238)	/ \ ' /		· / •	J7 /	【】不日	3		κ •	/ `_	/ ~'	71	一不日	(1 <i>P</i>) 0	(1 +)	 7(10860) 7(11020) 	0 (1) 0 - (1)
					Ω(247(⁴				-	EI							F I.	2 (25) 0	+`(o¯ +)	- /(11020)	~ (1)
																		25) 0	(1^{-})	UTH	<u>*</u>
									1		J							• \phi(3770) 0	-(1)	Further Stat	8

全ての~380種のハドロンはQCDから生じている

エキゾチックハドロン

テトラクォーク T_{cc} の観測

LHCb collaboration, Nature Phys. 18, 7, 751 (2022); Nature Commun. 13, 1, 3351 (2022)



 $Q_1 Q_2 q_1 q_2$

D⁰D⁰^m+に崩壊:不安定状態の内部構造?

強い相互作用で不安定なハドロン

安定な/不安定なハドロン

http://pdg.lbl.gov/

p	$1/2^{+}$	****	<i>∆</i> (1232)	3/2+	****	Σ^+	$1/2^{+}$	****	Λ_{c}^{+}	$1/2^{+}$	****	Λ_{b}^{0}	$1/2^{+}$	***
n	$1/2^{+}$	****	$\Delta(1600)$	3/2+	****	Σ^0	1/2+	****	Ac(2595)+	1/2-	***	Ab(5912)0	1/2	***
N(1440)	$1/2^{+}$	****	⊿(1620)	$1/2^{-}$	****	Σ^{-}	1/2+	****	$\Lambda_{c}(2625)^{+}$	3/2-	***	$\Lambda_{b}(5920)^{0}$	3/2-	***
N(1520)	3/2-	****	⊿(1700)	3/2-	****	$\Sigma(1385)$	3/2+	****	$\Lambda_{c}(2765)^{+}$	÷	*	$\Lambda_{b}(6146)^{0}$	3/2+	***
N(1535)	$1/2^{-}$	****	⊿(1750)	$1/2^{+}$	*	$\Sigma(1580)$	3/2-	*	$\Lambda_{c}(2860)^{+}$	$3/2^{+}$	***	$\Lambda_{b}(6152)^{0}$	5/2+	***
N(1650)	$1/2^{-}$	****	⊿(1900)	$1/2^{-}$	***	Σ(1620)	$1/2^{-}$	*	$\Lambda_{c}(2880)^{+}$	5/2+	***	Σ_b	$1/2^{+}$	***
N(1675)	5/2-	****	⊿(1905)	5/2+	****	$\Sigma(1660)$	1/2+	***	$\Lambda_{c}(2940)^{+}$	3/2-	***	Σ_{h}^{*}	3/2+	***
N(1680)	$5/2^{+}$	****	⊿(1910)	$1/2^{+}$	****	Σ(1670)	3/2-	****	$\Sigma_{c}(2455)$	$1/2^{+}$	****	$\Sigma_{b}(6097)^{+}$		***
N(1700)	3/2-	***	⊿(1920)	3/2+	***	$\Sigma(1750)$	$1/2^{-}$	***	$\Sigma_{c}(2520)$	3/2+	***	$\Sigma_{b}(6097)^{-}$		***
N(1710)	$1/2^{+}$	****	⊿(1930)	5/2-	***	Σ(1775)	5/2-	****	$\Sigma_{c}(2800)$		***	$\overline{\Xi}_{h}^{-}$	$1/2^{+}$	***
N(1720)	3/2+	****	⊿(1940)	3/2-	**	$\Sigma(1780)$	3/2+	*	Ξ_c^+	$1/2^{+}$	***	ΞÕ	$1/2^{+}$	***
N(1860)	5/2+	**	⊿(1950)	7/2+	****	$\Sigma(1880)$	$1/2^{+}$	**	=0	$1/2^{+}$	****	$\Xi_{b}^{\prime}(5935)^{-}$	$1/2^{+}$	***
N(1875)	3/2-	***	⊿(2000)	5/2+	**	Σ(1900)	$1/2^{-}$	**	$=^{i_+}$	$1/2^{+}$	***	$\Xi_{b}(5945)^{0}$	3/2+	***
N(1880)	$1/2^{+}$	***	⊿(2150)	$1/2^{-}$	*	Σ(1910)	3/2-	***	="0	$1/2^{+}$	***	$\Xi_{b}(5955)^{-}$	3/2+	***
N(1895)	1/2-	****	⊿(2200)	7/2-	**	Σ(1915)	5/2+	****	$\Xi_{c}(2645)$	3/2+	***	$\Xi_{b}(6100)^{-}$	3/2-	***
N(1900)	3/2+	****	$\Delta(2300)$	9/2+	*ok	Σ(1940)	3/2+	*	$\Xi_{c}(2790)$	$1/2^{-}$	***	Ξ _b (6227)-		***
N(1990)	7/2+	**	$\Delta(2350)$	5/2-	*	$\Sigma(2010)$	3/2-	*	$\Xi_{c}(2815)$	3/2-	***	$\Xi_b(6227)^0$		***
N(2000)	5/2+	**	$\Delta(2390)$	7/2+	*	$\Sigma(2030)$	7/2+	****	$\Xi_{c}(2923)$		**	Ω_{b}^{-}	$1/2^{+}$	***
N(2040)	3/2+	*	⊿(2400)	9/2-	*ok	$\Sigma(2070)$	5/2+	*	$\Xi_{c}(2930)$		**	$\Omega_{b}(6316)^{-}$		*
N(2060)	5/2-	***	⊿(2420)	11/2+	****	$\Sigma(2080)$	3/2**	*	$\Xi_{c}(2970)$	$1/2^{+}$	***	$\Omega_{b}(6330)^{-}$		*
N(2100)	1/2+	***	⊿(2750)	13/2-	**	$\Sigma(2100)$	7/2-	*	$\Xi_{c}(3055)$		***	$\Omega_{b}(6340)^{-}$		*
N(2120)	3/2-	***	⊿(2950)	15/2+	**	$\Sigma(2110)$	1/2-	*	$\Xi_{c}(3080)$		***	$\Omega_{b}(6350)^{-}$		*
N(2190)	1/2-	****	4	1 /0+		$\Sigma(2230)$	3/2**	*	$\Xi_{c}(3123)$		*			
N(2220)	9/2*	****	//	1/2 '	****	$\Sigma(2250)$		**	Ω_c^0	$1/2^{+}$	***	$P_{c}(4312)^{+}$		*
N(2250)	9/2-	****	/(1380)	1/2	**	$\Sigma(2455)$		÷.	$\Omega_{c}(2770)^{0}$	3/2+	***	$P_{c}(4380)^{+}$		*
N(2300)	1/2 -	**	/(1405)	1/2	****	$\Sigma(2620)$		Ĵ	$\Omega_{c}(3000)^{0}$		***	$P_{c}(4440)^{+}$		*
N(2570)	5/2	**	/(1520)	3/2	slokskok	$\Sigma(3000)$		Ĵ	$\Omega_{c}(3050)^{0}$		***	$P_{c}(4457)^{+}$		*
N(2600)	11/2	- **	A(1670)	1/2	***	2(3170)		Ť	$\Omega_{c}(3065)^{0}$		***			
N(2100)	13/2 '		A(1600)	2/2-	****	=0	1/2+	****	$\Omega_{c}(3090)^{0}$		***			
			A(1710)	1/2+	*		1/2+	****	$\Omega_{c}(3120)^{0}$		***			
			A(1800)	1/2	***	=(1530)	3/2+	****						
			A(1810)	1/2+	***	=(1500) =(1620)	3/2	*	$=_{cc}^{+}$		*			
			A(1820)	5/2+	****	=(1020) =(1690)		***	\equiv_{cc}^{++}		***			
			A(1830)	5/2-	****	=(1000)	3/2-	***						
			/(1890)	3/2+	****	=(1020) =(1950)	5/2	***						
			A(2000)	1/2-	*	=(2030)	> 5?	***						
			A(2050)	3/2-	*	=(2120)	- 2	*						
			A(2070)	3/2+	*	=(2120) =(2250)		**						
			A(2080)	5/2-	*	=(2230) =(2370)		**						
			/(2085)	7/2+	**	=(2500)		*						
			/(2100)	7/2-	****	_(2000)								
			/(2110)	5/2+	***	Ω^{-}	$3/2^{+}$	****						
			A(2325)	3/2-	*	$\Omega(201)$	0, -							
			/(2350)	9/2+	***	$\Omega(225)$	1 11							17
			/(2585)	5,-	*	$\Omega(238)$	/ \			- - -	/ _	-17		不由
			()			Ω(247	7 🔖						U	IE
						(_
I														

l		LIGHT UN	FLAVORED		STRAN	IGE	CHARMED,	STRANGE	cc continued		
		(S = C =	= B = 0)	IG (PC)	(S = ±1, C =	= B = 0)	$(C = \pm 1, S)$ (+ possibly po	$5 = \pm 1$) -aa states)		$P(\mathcal{P}^{L})$	
	+	$P(f^{\circ})$		10(3.0)	1.11	I(J)	(1 possibily no.	1(P)	 ψ₂(3823) 	0-(2)	
	• π^{\pm}	$1^{-}(0^{-})$ $1^{-}(0^{-}+)$	• π ₂ (1670)	$1^{-}(2^{-+})$	• K=	$1/2(0^{-})$	• D [±]	0(0-)	• \$\psi_3(3842) (2960)	$0^{-}(3^{-})$	
	• π-	$1(0^{-1})$	• φ(1680)	1+(3)	• KQ	$1/2(0^{-})$	• D ^{*±}	$0(7^{?})$	χ _{c0} (3872)	$0^{+}(1^{+}+1)$	
	• fa(500)	$0^{+}(0^{+}^{+})$	• p3(1050) • p(1700)	$1^{+}(1^{-})$	• K9	$1/2(0^{-})$	 D[*]₂₀(2317)[±] 	0(0+)	• Z _c (3900)	$1^{+}(1^{+}-)$	
	 ρ(770) 	$1^{+}(1^{-})$	• a)(1700)	$1^{-}(2^{++})$	• K ₂ (700)	1/2(0+)	• D ₅₁ (2460) [±]	$0(1^+)$	• χ _{c0} (3915)	$0^{+}(0^{+}+)$	
	• ω(782)	$0^{-}(1^{-})$	• f ₀ (1710)	0+(0++)	• K*(892)	$1/2(1^{-})$	• D ₅₁ (2536) [±]	0(1+)	• χ _{c2} (3930)	$0^{+(2^{+}+)}$	
	 η'(958) 	$0^{+}(0^{-}+)$	X(1750)	?-(1)	• K1(1270)	1/2(1+)	 D[*]₅₂(2573) 	0(2+)	X(3940)	?!(?!!)	
	• f ₀ (980)	0+(0++)	η (1760)	0+(0 - +)	• K1(1400)	1/2(1+)	D ₅₀ (2590)+	0(0-)	 X(4020)[±] 	$1^{+}(?^{!-})$	
	• a ₀ (980)	$1^{-}(0^{++})$	 π(1800) 	$1^{-}(0^{-+})$	• K*(1410)	1/2(1-)	• D _{s1} (2700) [±]	$0(1^{-})$	 ψ(4040) ψ(4050)[±] 	$0^{-}(1^{-})$	
	 φ(1020) μ (1170) 	$0^{-}(1^{-})$	f2(1810)	$0^+(2^+)$	• K ₀ (1430)	1/2(0+)	$D_{s1}^{*}(2860)^{\pm}$	$0(1^{-})$	X(4050) [±]	$1^{-}(?^{+})$ $1^{+}(?^{-})$	
	• h1(11/0)	0(1') 1+(1+-)	X(1835)	(0) (0) (0) (0) (0) (0) (0) (0) (0) (0)	• K ₂ (1430)	1/2(2+)	• D ₅₃ (2860) [±]	0(3-)	X(4055) ⁻ X(4100)±	$1^{+}(?^{+})$ $1^{-}(?^{?})$	
	• 2 (1260)	$1^{-}(1^{+})$	• $\varphi_3(1000)$	$0^{+}(2^{-}+)$	• K (1460)	1/2(0-)	X ₀ (2900)	?(0 ⁺)	• V ~ (4140)	$0^{+}(1^{+})$	
	• fp(1270)	$0^{+}(2^{+}+)$	• mp(1890)	$1^{-}(2^{-}+)$	K ₂ (1580)	$\frac{1}{2(2)}$	$\lambda_1(2900)$	(1) (2 [?])	• \u03cb(4160)	$0^{-}(1^{-}-)$	
	• f ₁ (1285)	$0^+(1^{++})$	ρ(1900)	1+(1)	• K ₁ (1650)	$\frac{1}{2(1^+)}$	D _s J(3040)	U(:)	X(4160)	? [?] (???)	
	 η(1295) 	0+(0 - +)	f ₂ (1910)	0 ⁺ (2 ⁺ +)	• K*(1680)	$1/2(1^{-})$	BOTT	0M	$Z_{c}(4200)$	$1^{+}(1^{+})$	
	 π(1300) 	$1^{-}(0^{-+})$	a ₀ (1950)	$1^{-}(0^{++})$	• K ₂ (1770)	1/2(2-)	(B = :	±1)	 \$\psi(4230)\$ 	0_(1)	
	• a ₂ (1320)	$1^{-}(2^{++})$	 f₂(1950) 	0+(2++)	• K ₃ (1780)	1/2(3-)	• B [±]	1/2(0-)	$R_{c0}(4240)$	$1^{+}(0^{})$	
	• f ₀ (1370)	$0^+(0^++)$	 a₄(1970) 	$1^{-}(4^{++})$	 K₂(1820) 	1/2(2-)	• B0	1/2(0-)	X(4250)±	$1^{-}(?^{+})$	
	• π ₁ (1400)	1(1 +) 0+(0 - +)	$\rho_3(1990)$	$1^{+}(3^{})$	K(1830)	1/2(0-)	 B[±]/B^o ADI B[±]/B⁰/B⁰ 	/IIXTURE	• $\chi_{c1}(4274)$ $\chi_{(4250)}$	$0^{+}(1^{+})$	
	• h (1405)	$0^{-}(1^{+})$	π ₂ (2005) • fs(2010)	0+(2++)	$K_0(1950)$	1/2(0+)		E	• #(4360)	$0^{-}(1^{-})$	
	• f1(1420)	$0^+(1^++)$	£(2020)	$0^{+}(0^{+}+1)$	• K ₂ (1980)	1/2(2+)	V_{cb} and V_{ub}	CKM Ma-	• \u03cb(4415)	$0^{-}(1^{-}-1)$	
	 ω(1420) 	$0^{-}(1^{-}-)$	• f4(2050)	$0^{+}(4^{+}+)$	• K [*] ₄ (2045)	1/2(4 ')	 B* 	s 1/2(1)	• Z _c (4430)	$1^{+}(1^{+})$	
	$f_2(1430)$	$0^{+}(2^{+}+)$	π2(2100)	1-(2-+)	K ₂ (2250)	$\frac{1}{2(2^+)}$	• B ₁ (5721)	$1/2(1^+)$	$\chi_{c0}(4500)$	$0^{+}(0^{+})^{+}$	
	• a ₀ (1450)	$1^{-}(0^{++})$	f ₀ (2100)	0+(0++)	K_(2320)	$1/2(5^{-1})$ $1/2(5^{-1})$	B [*] ₁ (5732)	?(??)	X(4630)	0 ⁺ (? ^{?+})	
	 ρ(1450) 	1+(1)	f ₂ (2150)	0+(2++)	K ₄ (2500)	$1/2(3^{-})$	 B[*]₂(5747) 	$1/2(2^+)$	 ψ(4660) 	$0^{-}(1^{-})$	
	 η(1475) 	$0^+(0^-+)$	ρ(2150)	1+(1)	K(3100)	??(??)	B _J (5840)	1/2(??)	$\chi_{c1}(4685)$	$0^+(1^{++})$	
	• $f_0(1500)$	$0^{+}(0^{+})$	 φ(21/0) ξ (2000) 	$0^{-}(1^{-})$	CLUD		• <i>B</i> J(5970)	1/2(??)	$\chi_{c0}(4700)$	0 ' (0 ' ' ')	
	f' (1525)	$0^+(2^++)$	$f_0(2200)$ $f_1(2220)$	$0^+(0^+)$	CHARN (C = +	1ED -1)	BOTTOM	TRANGE	b	Б	
	6(1565)	$0^+(2^++)$	1)(2220)	(r_4^{++})	(C = 1	1/2(0=)	$(B = \pm 1, 3)$	5 = ∓1)	(+ possibly no	on qq states)	
	p(1570)	$1^{+}(1^{-})$	η(2225)	$0^{+}(0^{-}+)$	• D ⁰	$1/2(0^{-1})$	• B _c ⁰	0(0-)	• $\eta_b(1S)$	$0^{+}(0^{-+})$	
	h1(1595)	$0^{-}(1^{+})$	ρ ₃ (2250)	1+(3)	• D*(2007) ⁰	1/2(1-)	• B [*] _c	$0(1^{-1})$	 <i>Υ</i>(15) 	$0^{-}(1^{-})$	
	 π1(1600) 	$1^{-}(1^{-}+)$	 f₂(2300) 	0+(2++)	 D[*](2010)[±] 	1/2(1-)	$X(5568)^{\pm}$?(??)	 χ_{b0}(1P) 	$0^{+}(0^{++})$	
	• a ₁ (1640)	$1^{-}(1^{++})$	f ₄ (2300)	0+(4++)	• D ₀ (2300)	1/2(0+)	 B_{s1}(5830)⁰ 	$0(1^+)$	• $\chi_{b1}(1P)$	$0^{+}(1^{+})$	
	$f_2(1640)$	$0^+(2^{++})$	f ₀ (2330)	$0^+(0^{++})$	• D1(2420)	1/2(1+)	 B[∗]₅₂(5840)⁰ 	0(2+)	• $n_b(1P)$	0(1')	
	 η₂(1645) (1(50)) 	$0^+(2^-+)$	• t ₂ (2340)	$0^+(2^+)$	 D₁(2430)⁰ 	1/2(1+)	$B_{sJ}^{*}(5850)$?(??)	• $\chi_{b2}(1P)$ m(2S)	$0^{+}(0^{-}+)$	
	• w(1650)		$p_5(2330)$	2?(??)	• D ₂ (2460)	1/2(2+)	B _{sJ} (6063) ⁰	0(?!)	• r(25)	$0^{-}(1^{-})$	
	• #3(10)		2510)	$0^{+}(6^{+}^{+})$	D ₀ (2550) ⁰	1/2(0)	B _{sJ} (6114) ^o	0(?)	 <i>T</i>₂(1D) 	$0^{-}(2^{-}-)$	
			540)	0 (0)	$D_{1}^{*}(2600)^{+}$	1/2(1)	BOTTOM, C	HARMED	 χ_{b0}(2P) 	$0^{+}(0^{+}+)$	
					D-(2040)-	$\frac{1}{2}(2^{-1})$	(B = C =	= ±1)	 χ_{b1}(2P) 	$0^{+}(1^{++})$	
_					• D=(2750)	$\frac{1}{2}(2^{-})$	• B_{c}^{+}	0(0-)	• h _b (2P)	$0^{-}(1^{+})$	
		7			D (2760) ⁰	1/2(1-)	 B_c(2S)[±] 	0(0-)	• $\chi_{b2}(2P)$	$0^{+}(2^{++})$	
					D(3000)0	$1/2(?^{?})$	cī.		• 7(35)	$0^{-}(1^{-})$	
							(+ possibly nor	n−qq states)	• χ _{b1} (3P)	$0^{+}(2^{+}+)$	
							• $\eta_c(1S)$	$0^{+}(0^{-}+)$	• T(45)	0-(1)	
							 J/ψ(1S) 	0 - (1)	• Z _b (10610)	1+(1+-)	
			•)(1P)	$0^{+}(0^{+}+)$	• Z _b (10650)	1+(1+-)	
		1 1				13	1(1P)	$0^+(1^{++})$	r(10753)	??(1)	
				/!	710	1 7 8	(1P)	$0^{-}(1^{+-})$	 <i>γ</i>(10860) 	0-(1)	
		`			2 I U	774	$_2(1P)$	$0^+(2^++)$	 <i>Υ</i>(11020) 	0-(1)	
	-	-	-	_	•		(25)	$0^{-}(0^{-+})$	OTH	IFR	
		j	1		I		e 25)	$0^{-}(1^{-})$	Further Sta	tes	

6

ほとんどのハドロンは不安定:共鳴状態の記述が必要



- E > 0 の状態を実現する方法
- 1) 形状(ポテンシャル)共鳴
 - 1 チャンネル問題 (P)
 - ポテンシャル障壁で E > 0
 - トンネル効果で崩壊
- 2) フェッシュバッハ共鳴
 - チャンネル結合問題 (P+Q)
 - *Q*の束縛状態だが *E_P* > 0
 - チャンネル遷移で崩壊
- 起源が異なる両者を区別する方法?







共鳴状態の特徴づけ

共鳴状態の定義

- 1) 複素エネルギー固有状態: $H|R\rangle = E_R|R\rangle, E_R \in \mathbb{C}$
- 2) 散乱振幅、S行列の極



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

- 1) と 2) はヨスト関数を介して等価
- 理論的に不定性のない定義



ハミルトニアンの"固有状態"としての共鳴状態

- 複素エネルギー

G. Gamow, Z. Phys. 51, 204 (1928)

Zur Quantentheorie des Atomkernes. Von G. Gamow, z. Zt. in Göttingen. Mit 5 Abbildungen. (Eingegangen am 2. August 1928.) Um diese Schwierigkeit zu überwinden, müssen wir annehmen, daß die Schwingungen gedämpft sind, und E komplex setzen:

$$E = E_0 + i \frac{h \lambda}{4 \pi}$$

wo E_0 die gewöhnliche Energie ist und λ das Dämpfungsdekrement (Zerfallskonstante). Dann sehen wir aber aus den Relationen (2a) und (2b),

- 時間依存性:存在確率が時間とともに減少

 $\psi = \Psi(q) \cdot e^{+\frac{2\pi i E}{\hbar}t} \propto e^{+2\pi i E_0 t/\hbar} e^{-(\lambda/2)t}, \quad |\Psi|^2 \propto e^{-\lambda t}$



エルミート演算子の固有値は実数では?

- 固有値が実数なのはヒルベルト空間(~2乗可積分な関数空間) $\left| |\psi(\mathbf{r})|^2 d^3 r < \infty \right|$
- 定義域を拡張すると複素固有値を持つことができる



球対称短距離カポテンシャル V(r) のシュレディンガー方程式 $\left[-\frac{\nabla^2}{2\mu} + V(r)\right]\psi_{\ell,m}(\mathbf{r}) = E\psi_{\ell,m}(\mathbf{r}), \quad \psi_{\ell,m}(\mathbf{r}) = \frac{u_\ell(r)}{r}Y_\ell^m(\hat{\mathbf{r}})$

- 散乱波動関数 (E > 0、連続固有値)の $r \to \infty$ での漸近形 $u_{\ell}(r;p) \xrightarrow[r \to \infty]{} \frac{l}{2} [J_{\ell}(p)\hat{h}_{\ell}^{-}(pr) - J_{\ell}(-p)\hat{h}_{\ell}^{+}(pr)], \quad p = \sqrt{2\mu E}$ $\sim \frac{i}{2} [J_{\ell}(p)e^{-ipr} - J_{\ell}(-p)e^{+ipr}]$ 内向き波 外向き波 E $J_{\ell}(-p)e^{+ipi}$ $J_{\ell}(p)e$ - 内向き波の振幅: ヨスト関数 V(r) $J_{\ell}(p) = 1 + \frac{2\mu}{p} \int_{0}^{\infty} dr \ \hat{h}_{\ell}^{+}(pr)V(r)u_{\ell}(r;p)$

11





- 波動関数が2乗可積分:境界条件 $u(r \rightarrow \infty) = 0$ $-> J_{\ell}(i\kappa) = 0$:外向き境界条件(内向き波が消える)

物理的な散乱の運動量 p は実数 -> 束縛状態は p を純虚数に解析接続したヨスト関数のゼロ点



- 共鳴解:運動量 *p* を複素数に解析接続した解 - 複素 *p* 平面の下半面(Im *p* < 0)に存在
 - $p = p_R ip_I, \quad p_R, p_I > 0$

- 波動関数の振る舞い

$$u_{\ell}(r;p)
ightarrow - rac{iJ_{\ell}(p)}{2} e^{ipr} \propto e^{ip_{R}r} e^{+p_{l}r}$$
振動 増大
—> $r
ightarrow \infty$ で振動しながら発散する
通常の規格化ができない

波動関数が2乗可積分でないので複素固有値が許される





13

散乱理論の共鳴状態

部分波 c のS行列とヨスト関数

 $s_{\ell}(p) = \frac{J_{\ell}(-p)}{J_{\ell}(p)}$ ~ 内向き振幅で規格化した外向き振幅

- 散乱無し(素通り)の場合 $s_{\ell}(p) = 1$
- 散乱振幅:正味の散乱の情報

$$f_{\ell}(p) = \frac{s_{\ell}(p) - 1}{2ip} = \frac{J_{\ell}(-p) - J_{\ell}(p)}{2ipJ_{\ell}(p)}$$

離散固有状態の条件:ヨスト関数のゼロ点 $J_{\ell}(p) = 0$

- *p* はS行列、散乱振幅の極

$$|s_{\ell}(p)| = \left| \frac{J_{\ell}(-p)}{J_{\ell}(p)} \right| \to \infty, \quad |f_{\ell}(p)| = \left| \frac{J_{\ell}(-p) - J_{\ell}(p)}{2ipJ_{\ell}(p)} \right| \to \infty$$

共鳴状態の記述

ここまでのまとめ



Schrödinger eq. + outgoing b.c. at energy $E (p = \sqrt{2\mu E})$ - bound states (E < 0) $p = i\kappa$ $(\kappa > 0)$ - resonances $(E \in \mathbb{C})$ $p \in \mathbb{C}$ $(\operatorname{Im} p < 0)$

 $\Leftrightarrow \qquad \fbox{zero of Jost function} \\ \swarrow_{\ell}(p) = 0 \qquad \Leftrightarrow \qquad$

pole of s-matrix/ scattering amplitude

$$|f_{\ell}(p)| \to \infty$$
$$|s_{\ell}(p)| \to \infty$$

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





ハドロン質量スケーリング

- ハドロン質量 m_H が外部パラメーター x に依存して変化 <u>T. Hyodo</u>, PRC90, 055208 (2014)
 - クォーク質量: $x = m_q$ (カイラル摂動論)
 - カラー数: $x = 1/N_c$ (large Nc)
 - 温度、密度: $x = T, \mu$

2体閾値を超えると何が起こる?





チャンネル結合ハミルトニアン(離散固有状態+散乱状態)

$$\begin{pmatrix} M_0 & \hat{V} \\ \hat{V} & \frac{p^2}{2\mu} \end{pmatrix} |\Psi\rangle = E |\Psi\rangle, \quad |\Psi\rangle = \begin{pmatrix} c(E) |\psi_0\rangle \\ \chi_E(p) |p\rangle \end{pmatrix}$$



- 散乱振幅の解析解

 $f(\boldsymbol{p},\boldsymbol{p}',E) = -\frac{4\pi^2 \mu \langle \boldsymbol{p} | \hat{V} | \psi_0 \rangle \langle \psi_0 | \hat{V} | \boldsymbol{p}' \rangle}{E - M_0 - \Sigma(E)} \sim \sum \left\{ + \right\} = \left\{ - \left\{ + \right\} \right\} = \left\{ + \right\} = \left\{$

- 自己エネルギー (E > 0で虚部を持つ)

$$\Sigma(E) = \int \frac{\langle \psi_0 | \hat{V} | \boldsymbol{q} \rangle \langle \boldsymbol{q} | \hat{V} | \psi_0 \rangle}{E - q^2 / (2\mu) + i0^+} d^3 \boldsymbol{q} \sim \checkmark$$

固有エネルギー:散乱振幅の極(自己無撞着な解) $E_h = M_0 + \Sigma(E_h)$

E

0

0

結合が弱いとき:摂動展開

$$E_{h} = M_{0} + \Sigma(M_{0}) = M_{0} + \int \frac{|\langle \psi_{0} | \hat{V} | \boldsymbol{q} \rangle|^{2}}{M_{0} - q^{2}/(2\mu) + i0^{+}} d^{3}q$$

- $M_0 < 0$ の場合:基底状態に対する2次の摂動 $\Sigma(M_0) < 0 \Rightarrow E_h < M_0$
- $M_0 > 0$ の場合:崩壊により不安定、複素エネルギー $\Sigma(M_0) \in \mathbb{C} \implies E_h \in \mathbb{C}$

- 閾値直上 $(E_h = 0)$ に解を持つ条件
 - 摂動は不可、fullな自己無撞着の式で
 - $0 = M_0 + \Sigma(0) \quad \Rightarrow \quad M_0 = -\Sigma(0)$

Eh

閾値近くの振る舞い

- 固有エネルギーが閾値を超える際の M₀ 依存性
- $E_h = 0 \, \mathcal{O} \, M_0 = \Sigma(0) \, \mathcal{D} \, \delta M < 0 \, \mathcal{J} \, \delta \mathcal{J} \, E_h$

 $E_h = -\Sigma(0) + \delta M + \Sigma(E_h)$

- δM が十分小さいとき $E_h = \frac{1}{1 - \Sigma'(0)} \delta M, \quad \Sigma'(E) = \frac{d\Sigma(E)}{dE}$



 $Z = \frac{1}{1 - \Sigma'(E_h)} = |\langle \Psi | \psi_0 \rangle|^2$

$$E_h \propto \begin{cases} \mathcal{O}(\delta M^2) & \ell = 0\\ \delta M & \ell \neq 0 \end{cases}$$



 $\leftarrow \delta M \longrightarrow M_0$ $-\Sigma(0)$

Compositeness theorem

波動関数くりこみが $Z = 0 \Leftrightarrow$ 複合性が X = 1 $1 = |\langle \Psi | \psi_0 \rangle|^2 + \int d^3 q |\langle \Psi | q \rangle|^2$ 複合性 X

- *E_h* = 0 状態の波動関数



-> 複合成分の重みが無限に大きく有限の $|\langle \Psi | \psi_0 \rangle|^2$ の割合が0

散乱長の発散、低エネルギー普遍性

E. Braaten, H.-W. Hammer, Phys. Rept. 428, 259 (2006); P. Naidon, S. Endo, Rept. Prog. Phys. 80, 056001 (2017)

ヨスト関数との関係

ヨスト関数のp = 0まわりでの展開

$$\begin{split} J_{\ell}(p) &= 1 + \alpha_{\ell} + \beta_{\ell} p^2 + \mathcal{O}(p^4) + i[\gamma_{\ell} p^{2\ell+1} + \mathcal{O}(p^{2\ell+3})] \\ &= \begin{cases} 1 + \alpha_{\ell} + i\gamma_{\ell} p + \mathcal{O}(p^2) & \ell = 0\\ 1 + \alpha_{\ell} + \beta_{\ell} p^2 + \mathcal{O}(p^3) & \ell \neq 0 \end{cases} \end{split}$$

固有状態はヨスト関数のゼロ点: $J_{\ell}(p) = 0$

-
$$E_h = 0$$
 のためには $1 + \alpha_\ell = 0$

- $\ell = 0$ ($\ell \neq 0$)の p = 0のゼロは1位のゼロ(2位のゼロ)

R.G. Newton, J. Math. Phys. 1, 319 (1960)

閾値近傍の $E_h = p^2/2\mu$ の振る舞い $1 + \alpha_\ell \sim \delta M \Rightarrow E_h \propto \begin{cases} -\delta M^2 & \ell = 0 \\ \delta M & \ell \neq 0 \end{cases}$



一般的な閾値近傍の振る舞い

閾値近傍のスケーリング



23



より広い *6M* でのスケーリング



- 閾値近傍の振る舞いは単純な摂動論が破綻し非摂動的

- s波の束縛状態は直接共鳴に遷移せず、virtual状態を経由する₂₄

3体束縛状態では

s波束縛状態が3体閾値を超える場合

T. Hyodo, T. Hatsuda, Y. Nishida, PRC89, 032201 (2014)



- Efimov状態は直接共鳴に遷移する





