

<u>池田陽一 (大阪大学 核物理研究センター)</u>

素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム

@筑波大学東京キャンパス (2月16日, 17日)

HAL QCD (Hadrons to Atomic nuclei from Lattice QCD)

S. Aoki, D. Kawai, T. Miyamoto, K. Sasaki (YITP, Kyoto Univ.)

T. Doi, T. Hatsuda, T. Iritani (RIKEN)

T. Inoue (Nihon Univ.)

Y. Ikeda, N. Ishii, K. Murano (RCNP, Osaka Univ.)

S. Gongyo (Univ. Tours)

H. Nemura (Univ. Tsukuba)

Hadrons to Atomic nuclei

from Lattice QCD

ポスト「亰」重点課題 ⑨

宇宙の基本法則と進化の解明

実験で報告されているハドロンたち

3	1/2+ ****	A(1232)	3/2+		5-+	1/2+		=0	1/2+		A+	1/2+		1	LIGHT UN	IFLAVORED		STRA	NGE	CHARMED, 1	STRANGE	c	C
2	1/2+ ****	A(1600)	3/2+		20	1/2+		=	1/2+		A_(2595)+	1/2-	***		(S = C	= B = 0	C. 00.	(\$= ±1, C	= B = 0	(C = 5 =	±1)	2000 C	P(Jr.
([1440]	1/2+ ****	A(1620)	1/2-		5-	1/2+		= E(1530)	3/2+		A.(2625)+	3/2-	***		$P(P^{L})$		$P(P^{c})$		(\mathcal{F})		l(F)	 η_c(15) 	0+(0-
(1520)	3/2- ****	A(1700)	3/2-		Σ(1385)	3/2+		E(1620)	~		A.(2765)+	212		• 2 *	$1^{-}(0^{-})$	 ρ₃(1690) 	1+(3)	• K [±]	$1/2(0^{-})$	• D_5	0(0-)	 J/ψ(15) 	0-(1-
(1535)	1/2- ****	A(1750)	1/2+		Σ(1480)	1.26		Ξ(1690)			A.(2880)+	5/2+		• π ⁰	$1^{-}(0^{-+})$	 ρ(1700) 	1+(1)	• K [#]	$1/2(0^{-})$	• D,**	0(?7)	 χ_{c0}(1P) 	0+(0+
(1650)	1/2- ****	A(1900)	1/2-		Σ(1560)			=(1820)	3/2-		A.(2040)+	5/2		• 7)	$0^{+}(0^{-+})$	$a_2(1700)$	$1^{-}(2^{++})$	• K ⁸ ₃	$1/2(0^{-})$	 D[*]_{c0}(2317)[±] 	0(0+)	 χ_{c1}(1P) 	0+(1+
(1675)	5/2- ****	A(1905)	5/2+		T(1580)	3/2-		E(1950)	-/-		T.(2455)	1/2+		 fg(500) 	$0^{+}(0^{++})$	 fg(1710) 	0+(0++)	• K ⁰ _L	$1/2(0^{-})$	· D ₁₁ (2460)±	0(1+)	 h_c(1P) 	? ^f (1 +
(1680)	5/2+ ****	A(1910)	1/2+		T(1620)	1/2-		E(2030)	> 57		Σ-(2520)	3/2+	***	 ρ(770) 	$1^{+}(1^{-})$	$\eta(1760)$	0+(0-+)	K*(800)	$1/2(0^+)$	 D_{s1}(2536)[±] 	0(1+)	 χ_{c2}(1P) 	0+(2+
(1700)	3/2- ***	Δ(1920)	3/2+		Σ(1660)	1/2+		=(2120)			T.(2800)	-/-		 ω(782) 	0-(1)	 π(1800) 	$1^{-}(0^{-+})$	 K*(892) 	$1/2(1^{-})$	 D₁₂(2573) 	$0(2^+)$	 η_c(25) 	0+[0-
(1710)	1/2+ ****	A(1930)	5/2-	***	Σ(1670)	3/2-		=(2250)			=+	1/2+	***	 η'(958) 	$0^{+}(0^{-+})$	f2(1810)	0+(2++)	• K:(1270)	1/2(1+)	· D; (2700)=	0(1-)	• \$(25)	0-(1
(1720)	3/2+ ****	A(1940)	3/2-	**	Σ(1690)	- / -		=(2370)			=0	1/2+		 f₀(980) 	$0^{+}(0^{++})$	X(1835)	? [?] (0 - +)	 K₁(1400) 	$1/2(1^+)$	D; (2860)=	0(1-)	 - ψ(3770) 	0-(1
(1860)	5/2+ **	A(1950)	7/2+		Σ(1730)	3/2+		E(2500)			=c =r+	1/2+		 a₀(980) 	$1^{-}(0^{++})$	X(1840)	? [?] (? ^{??})	 K*(1410) 	$1/2(1^{-})$	D: (2860)=	0(3-)	 ψ(3823) 	?!(2 -
(1875)	3/2- ***	A(2000)	5/2+	**	T(1750)	1/2-		=(*****)			-c =0	1/2		 φ(1020) 	0-(1)	$a_1(1420)$	$1^{-}(1^{++})$	 K:(1430) 	$1/2(0^+)$	D. (3040)±	0(7?)	 X(3872) 	0+(1
(1880)	1/2+ **	A(2150)	1/2-		T(1770)	1/2+		Q-	3/2+		= (n((r))	1/2		 b₁(1170) 	0-(1+-)	 \$\phi_3\$(1850) 	0-(3)	• K;(1430)	$1/2(2^+)$	= jj(seriej	ef.)	 X(3900) 	$1^{+}(1$
(1895)	1/2- **	A(2200)	7/2-		E(1775)	5/2-		£2(2250)-	0		$=_{c}(2045)$	3/2		 b₁(1235) 	$1^{+}(1^{+}-)$	$\eta_2(1870)$	0+(2-+)	K(1460)	$1/2(0^{-1})$	BOTT	OM	 X(3915) 	0+(0/3
(1900)	3/2+ ***	A(2300)	9/2+	**	Σ(1B40)	3/2+		£2(2380)-		**	$=_{c}(2190)$ = (2015)	1/2		 a₁(1260) 	$1^{-}(1^{++})$	 π₂(1880) 	$1^{-}(2^{-+})$	K ₂ (1580)	1/2(2-)	(B = :	±1)	 x_{c2}(2P) 	0+(2)
(1990)	7/2+ **	A(2350)	5/2-		Σ(1880)	1/2+		£2(2470)-		**	$=_{C}(2815)$ $\equiv (2020)$	5/2		 f2(1270) 	$0^{+}(2^{++})$	ρ(1900)	1+(1)	K(1630)	1/2(77)	• B [±]	$1/2(0^{-})$	X(3940)	31(311
(2000)	5/2+ **	A(2390)	7/2+	•	Σ(1900)	1/2-					$=_{C}(2930)$ = (3020)			 f₁(1285) 	$0^{+}(1^{++})$	f2(1910)	0+(2++)	K (1650)	1/2(1+)	• B ⁰	$1/2(0^{-})$	 X(4020) 	$1(?^{!})$
(2040)	3/2+ +	A(2400)	9/2-		Σ(1915)	5/2+					=(2910)			 η(1295) 	$0^{+}(0^{-+})$	$a_0(1950)$	1-(0++)	• K*(1680)	1/2(1-)	 B[±]/B⁰ ADI 	IDCTURE	 ψ(4040) 	0-(1
(2060)	5/2- **	A(2420)	11/2+		Σ(1940)	3/2+					$=_{c}(3055)$			 π(1300) 	$1^{-}(0^{-+})$	 6(1950) 	0+(2++)	· K ₂ [1770]	$1/2(2^{-1})$	 B[±]/B⁰/B⁰_s/ 	b baryon	$X(4050)^{\pm}$?(? ^f)
(2100)	1/2+ *	A(2750)	13/2-		Σ(1940)	3/2-					$=_{c}(3080)$			 ⇒2(1320) 	$1^{-}(2^{++})$	p3(1990)	1+(3)	• K;(1780)	1/2(3-)	ADMIXTUR	E	$X(4055)^{\pm}$	7(7')
(2120)	3/2- **	A(2950)	15/2+	••	X(2000)	1/2-					====(3123)	1.01		 f₀(1370) 	$0^{+}(0^{++})$	 f₂(2010) 	0+(2++)	• K ₁ (1820)	$1/2(2^{-})$	Veb and Vub	CKM Ma-	 X(4140) 	0+(7)
(2190)	7/2- ****				E(2030)	7/2+					M ² c	1/2		b1(1380)	?-(1+-)	f ₁ (2020)	0+(0++)	K(1830)	1/2(0-)	• B*	1/2(1-)	• \$\pp\(4160)	0-(1
(2220)	9/2+ ****	Λ	1/2+	****	E(2070)	5/2+					12[2770]*	3/21		 π1(1400) 	$1^{-}(1^{-+})$	 a₄(2040) 	$1^{-}(4^{++})$	K:(1950)	1/2(0+)	· B1(5721)+	1/2(1+)	X(4160)	32(32
(2250)	9/2- ****	A(1405)	1/2-	****	E(2080)	3/2+					=+			 η(1405) 	$0^{+}(0^{-+})$	 f₄(2050) 	0+(4++)	K:(1980)	1/2(2+)	· B1(5721)0	1/2(1+)	X(4200)±	?(1+)
(2300)	1/2+ **	A(1520)	3/2-	••••	Σ(2100)	7/2-					-ce			 f₁(1420) 	$0^{+}(1^{++})$	π ₂ (2100)	$1^{-}(2^{-+})$	· K:(2045)	1/2(4+)	B*(5732)	7(7?)	X(4230)	? (1
(2570)	5/2- **	A(1600)	1/2+	***	Σ(2250)	12012					A	1/2+		 ω(1420) 	0-(1)	f ₀ (2100)	0+(0++)	K (2250)	1/2(2-)	· 8:(5747)+	1/2(2+)	$X(4240)^{\pm}$?!(0-
(2600)	11/2- ***	A(1670)	1/2-		T(2455)						A. (5012)0	1/2-		f2(1430)	$0^{+}(2^{++})$	f2(2150)	0+(2++)	K-(2320)	1/2(3+1)	· B*(5747)	1/2(2+)	X(4250)±	7(7)
(2700)	13/2+ **	A(1690)	3/2-	****	I (2620)						A. (5020)0	3/2-		 a₀(1450) 	$1^{-}(0^{++})$	p(2150)	1+(1)	K*(2380)	1/2(5-)	B (5840)+	1/2077)	 X(4260) 	7 (1 -
		A(1710)	1/2+	•	Σ(3000)						T.	1/2+		 ρ(1450) 	$1^{+}(1^{-})$	 φ(2170) 	0-(1)	K.(2500)	1/2(4-)	B (5840) ⁰	1/2(7?)	X(4350)	0+(?:
		A(1800)	1/2-	***	Σ(3170)						20	3/2+		 η(1475) 	$0^{+}(0^{-+})$	f _I (2200)	0+(0++)	AC(3100)	77(777)	• B (5970)+	1/2(7?)	 X(4360) 	?"(1-
		A(1810)	1/2+	***	N 8						=0 =-	1/2+		 f₀(1500) 	$0^{+}(0^{++})$	f _J (2220)	0+(2++	11(3100)	. (.)	· B (5970)0	1/2(7?)	 ψ(4415) 	0-(1
		A(1820)	5/2+	****							-0, -0 =((5025)-	1/2		f_(1510)	$0^{+}(1^{++})$	and the second	or 4 + +)	CHAR!	MED		-/-(-)	• X(4430) [±]	?(1+)
		A(1830)	5/2-	••••							= (E04E)0	2/2+		 I'₂(1525) 	$0^{+}(2^{++})$	η(2225)	0+(0-+)	(C = :	±1)	BOTTOM, S	TRANGE	• X(4660)	7"(1 -
		A(1890)	3/2+	••••			-				=0(0940)- =+(E0EE)-	3/2+		6(1565)	0+(2++)	$\rho_3(2250)$	1+(3)	• D [±]	$1/2(0^{-})$	$(B = \pm 1, \pm 1)$	$5 = \mp 1$]		
		A(2000)		•							= (0900)	3/2	***	ρ(1570)	1+(1)	 f₂(2300) 	0+(2++)	• D ³	$1/2(0^{-})$	• B ⁰ ₅	0(0-)	00	att ca
		A(2020)	7/2+	•							120	1/2.		h1(1595)	0-(1+-)	f ₄ (2300)	0+(4++)	 D*(2007)⁰ 	$1/2(1^{-})$	• B;	$0(1^{-})$	• 76(15)	0.10
		A(2050)	3/2-	•		(P (4380)+	et - 1		 π1(1600) 	$1^{-}(1^{-+})$	f _l (2330)	0+(0++)	 D[*](2010)[±] 	$1/2(1^{-})$	 B_{c1}(5830)⁰ 	$0(1^+)$	• /(15)	0 (1
		A(2100)	7/2-	****							P. (4450)*	41 - 1		$a_1(1640)$	$1^{-}(1^{++})$	 f₂(2340) 	0+(2++)	 D[*]₀(2400)⁰ 	$1/2(0^+)$	 B[*]₁₂(5840)³ 	0(2+)	• Xas(1P)	0.10
		A(2110)	5/2+	•••							1 5(4450)		22	f2(1640)	0+(2++)	ρ ₅ (2350)	1+(5)	$D_0^*(2400)^{\pm}$	$1/2(0^+)$	B*, (5850)	?(??)	• Xot (1P)	27(1)
		A(2325)	3/2-	•										 η₂(1645) 	0+(2-+)	a ₆ (2450)	1-(6++)	 D₁(2420)⁰ 	$1/2(1^+)$		LIA DA APP	• no(1P)	010
		A(2350)	9/2+	••••										 ω(1650) 	0-(1)	f ₆ (2510)	0+(6++)	$D_1(2420)^{\pm}$	1/2(??)	BOTTOM, C	HARMED	• X02(1P)	0.15
		A(2585)		••			_							 ω₃(1670) 	0-(3)	OTHE	RLIGHT	$D_1(2430)^0$	$1/2(1^+)$	(a = c -	* ±4)	7/6(25)	0-10
			-	_	_	~								 π₂(1670) 	$1^{-}(2^{-+})$	Further Se	tates	 D[*]₂(2460)⁰ 	$1/2(2^+)$	• B;	0(0-)	· 7(10)	0 (1
	Po	rti 1	-10		ata	6	101	n (20	16				• \$(1680)	0-(1)	a under 50		 D[*]₂(2460)[±] 	$1/2(2^+)$	$B_c(25)^{\pm}$	0(0-)	· · (1D)	0 (2
		C C C C		-				י א י	20	±0,								D(2550)8	1/2(??)			* Xos(2P)	0+0
							. n I	h1		. /								D*(2600)	1/2(??)			+ (2P)	27(1
	ľ	ΙΤΤΡ	://	W	<u>vw - p</u>		.	<u>DL.(</u>	0									D*(2640)±	1/2(77)			· (2.0)	0+0
	_									-								D(2740)8	1/2(??)			- T(15)	0-0
																		D(2750)	1/2(3-)			· · (30)	0+0
																		D(3000)*	1/2(??)			• T(AS)	0-0
																		2001000				• Y(10510)3	1+0
																						• X(10510)*	1.11
																		L				• X[10510]*	1.0
_	· \ /	1 %	1.8		,		har		= -	<u> </u>		- =-			7							A(10650)-	0-0
																						 110860 	0 1
(Ŧ	・とん	. ~	7) M	nr	nu/ur	nr	Dai	())7	- -	ᡏ᠆ᢩᠯ	\mathbb{N}	" Ξг	」一下	(ご オノ	ら (白	田ブ	(++)	\)				. 70110000	0-0

実験で報告されているハドロンたち

	1/2+ ****	A(1232)	3/2+ ++++	5+	1/2+ ****	=0	1/2+ ++++	A ⁺	1/2+			LIGHT UN	IFLAVORED	2	STRA	NGE	CHARMED,	STRANGE	c	C
n	1/2+ ****	Δ(1600)	3/2+ +++	T ⁰	1/2+ ****	-	1/2+ ****	A-(2595)+	1/2-			(S = C	= B = 0	61.00	(5 = ±1, C	$= \beta = 0$	(C = 5 -	+ ±1)	1000 C	$P(I^{n})$
N(1440)	1/2+ ****	A(1620)	1/2- ****	Σ	1/2+ ****	E(1530)	3/2* ****	A-(2625)+	3/2-			P(J*)		P(J*C)		(2)		(7)	 η_c(15) 	0+(0-+)
N(1520)	3/2- ****	Δ(1700)	3/2- ****	Σ(1385)	3/2* ****	Ξ(1620)	•	Ac[2765]+			• 22	1-(0-)	 ρ₃(1690) 	1+(3)	• K [±]	$1/2(0^{-})$	• D_5	0(0_)	 J/ψ[15] 	0-(1)
N(1535)	1/2- ****	A(1750)	1/2+ *	Σ(1480)	•	E(1690)	••••	$\Lambda_{c}(2880)^{+}$	5/2+	***	• π^0	1-(0-+)	 ρ(1700) 	1+(1)	• K ^a	$1/2(0^{-})$	• D ₃ ^{•±}	0(?1)	 χ_{c0}(1P) 	0+(0++)
N(1650)	1/2- ****	A(1900)	1/2- **	Σ(1560)		Ξ(1820)	3/2- ***	$\Lambda_{c}(2940)^{+}$		•••	• 1)	0.[0-1]	$\partial_2(1700)$	1-(2++)	• K3	$1/2(0^{-})$	 D[*]_{\$0}(2317)[±] 	0(0+)	 Xc1(1P) 	$0^{+}(1^{+})$
N(1675)	5/2- ****	A(1905)	5/2+ ****	$\Sigma(1580)$	3/2- *	$\Xi(1950)$		$\Sigma_{c}(2455)$	1/2+	••••	• f ₀ (500)	0+(0++)	 f₀(1710) 	0+(0++)	• K [*] _L	1/2(0-)	 D₅₁(2460)[±] 	0(1+)	• he[1P]	?*(1 + -)
N(1680)	5/2+ ****	$\Delta(1910)$	1/2+ ****	$\Sigma(1620)$	1/2- *	Ξ(2030)	≥ 57 ***	$\Sigma_{c}(2520)$	3/2+	***	 ρ(770) 	1+(1)	η(1760)	0+(0-+)	K [*] ₀ (800)	$1/2(0^+)$	 D₅₁(2536)[±] 	0(1+)	• χ _{c2} (1P)	0+(2++)
N(1700)	3/2- ***	$\Delta(1920)$	3/2+ ***	$\Sigma(1660)$	1/2+ ***	Ξ(2120)	•	$\Sigma_{c}(2800)$		***	 ω(782) ω(782) 	0-(1)	• ±(1800)	1-(0-+)	• K*(892)	$1/2(1^{-})$	 D_{\$2}(2573) 	$0(2^{+})$	• ne(25)	0-(0)
N(1710)	1/2+ ****	$\Delta(1930)$	5/2- ***	$\Sigma(1670)$	3/2- ****	E(2250)	••	Ξ_c ⁺	1/2+	•••	• 17 (958)	0-(0-)	F2(1810)	37(0 - +)	 K₁(1270) 	1/2(1+)	 D[*]_{\$1}(2700)[±] 	0(1-)	• \$(25)	0-(1)
N(1720)	3/2* ****	∆(1940)	3/2 **	$\Sigma(1690)$		$\Xi(2370)$		\equiv_c^0	1/2+	•••	• fg[960]	1=(0++)	X(1835) X(1840)	27(277)	• K1[1400]	$1/2(1^+)$	$D_{s1}^{*}(2860)^{\pm}$	$0(1^{-})$	• \$(3170)	7?(2)
N(1860)	5/2* **	∆(1950)	7/2+ ****	$\Sigma(1730)$	3/2* *	Ξ(2500)		$\Xi_c^{\prime+}$	1/2+	•••	• d0(900)	0-(1)	A(1040)	1=(1++)	• K*(1410)	1/2(1-)	$D_{g1}^{*}(2860)^{\pm}$	0(3-)	• ¥(3872)	0+(1++)
M(1875)	3/2- ***	Δ(2000)	5/2+ **	$\Sigma(1750)$	1/2- ***	-		===	1/2+	•••	• 0 (1170)	0-(1+-)	an(1420)	0-(3)	• K [[1430]	1/2(0 *)	$D_{gJ}(3040)^{\pm}$	0(?:)	• X(3900)	1+(1+-)
M(1880)	1/2" **	A(2150)	1/2 *	$\Sigma(1770)$	1/2* *	12-	3/2+ ****	$\Xi_{c}(2645)$	3/2+	***	• h (1235)	1+(1+-)	75(1870)	0+(2-+)	• K2[1430]	1/2[2 ·]	BÖTT	OM	• X(3915)	0+(0/2++)
W(1895)	1/2 **	A(2200)	7/2 *	2 (1775)	5/2	12(2250)		$\Xi_{c}(2790)$	1/2-	••••	• a (1260)	1-(1++)	• Ta(1880)	1-(2-+)	A (1460)	1/2(0)	(8 =	±1)	• x (2P)	$0^{+}(2^{+})$
M(1900)	3/2 ***	A(2300)	9/2 *	Z(1890)	3/2* **	0(2470)-		$\Xi_{c}(2815)$	3/2-	••••	• 6(1270)	0+(2++)	a(1900)	1+(1)	K(1630)	1/2(2)	• B±	$1/2(0^{-1})$	X(3940)	77(7?7)
M(2000)	5/2+ **	A(2300)	7/2+ +	Σ(1000) Σ(1000)	1/2 *	17[2470]		$\equiv_{c}(2930)$		•	 6 (1285) 	0+(1++)	6(1910)	0+(2++)	K (1650)	1/2(1+)	• B ⁰	1/2(0-)	• X(4020)	1(??)
M(2040)	3/2+ +	A(2400)	9/2- **	Σ(1915)	5/2+ ****			$\Xi_{c}(2970)$			 ŋ(1295) 	0+(0-+)	a ₀ (1950)	1-(0++)	• K*(1680)	1/2(1-)	• B±/B0 ADI	MIXTURE	• \$\$(4040)	0-(1)
N(2060)	5/2- **	A(2420)	11/2+ ****	Σ(1940)	3/2+ *			$\Xi_{c}(3055)$			 π(1300) 	1-(0-+)	· f2(1950)	0+(2++)	• K (1770)	1/2(2-)	 B[±]/B⁰/B⁰_c 	b baryon	$X(4050)^{\pm}$?(??)
N(2100)	1/2+ *	A(2750)	13/2- **	Σ(1940)	3/2- ***			$=_{c}(3080)$			 ⇒₂(1320) 	$1^{-}(2^{++})$	ρ ₃ (1990)	1+(3)	• K;(1780)	1/2(3-)	ADMIXTUR	E	$X(4055)^{\pm}$	7(7?)_
N(2120)	3/2- **	A(2950)	15/2+ **	E(2000)	1/2- •			=====(3123)	1.01		 f₀(1370) 	$0^{+}(0^{++})$	 f₂(2010) 	0+(2++)	• K ₂ (1820)	$1/2(2^{-})$	Vab and Vab	CKM Ma-	 X(4140) 	0+(7+)
N(2190)	7/2- ****			Σ(2030)	7/2+ ****			0 (2770)0	3/2+		b ₁ (1380)	?-(1+-)	f _E (2020)	0+(0++)	K(1830)	$1/2(0^{-})$	• B*	1/2(1-)	• \$\pp\(4160)	0-(1)
N(2220)	9/2+ ****	Λ	1/2+ ****	Σ(2070)	5/2+ *			melanol	312		 π1(1400) 	$1^{-}(1^{-+})$	• J ₄ (2040)	1-(4 + +)	K_a(1950)	1/2(0+)	 B₁(5721)⁺ 	1/2(1+)	X(4160)	5:(5.1)
N(2250)	9/2- ****	A(1405)	1/2" ****	Σ(2080)	3/2+ **			=+			 η(1405) 	0+(0-+)	 f₄(2050) 	0+(4++)	K;(1980)	$1/2(2^+)$	 B₁(5721)⁰ 	$1/2(1^+)$	X(4200)=	?(1+)
N(2300)	1/2+ **	A(1520)	3/2- ****	Σ(2100)	7/2- *			-06			 6(1420) 	0+(1++)	π ₂ (2100)	1-(2-+)	 K[*]₄(2045) 	$1/2(4^+)$	B* (5732)	7(7?)	X(4230)	?*(1 -)
N(2570)	5/2- **	A(1600)	1/2+ ***	$\Sigma(2250)$				Λ_{n}^{0}	1/2+	•••	 ω(1420) 	0-(1)	f ₀ (2100)	0-(0)	K2(2250)	$1/2(2^{-})$	 B[*]₂(5747)⁺ 	$1/2(2^+)$	X(4240)*	101
N(2600)	11/2- ***	A(1670)	1/2- ****	Σ(2455)				$\Lambda_{p}(5912)^{0}$	1/2-	***	P2(1430)	0-(2++)	12(2150)	0*(2**)	K ₃ (2320)	$1/2(3^+)$	 B[*]₂(5747)⁸ 	$1/2(2^+)$	X(4250)-	20
N(2700)	13/2+ **	Л(1690)	3/2- ****	$\Sigma(2620)$				$\Lambda_{b}(5920)^{0}$	3/2-	***	• a ₀ (1450)	1+(1)	$\rho(2150)$	0-(1)	K [*] ₅ (2380)	$1/2(5^{-})$	B ₁ (5840) ⁺	1/2(??)	• X(4250) X(4350)	0+(2?+)
		Λ(1710)	1/2+ •	Σ(3000)	•			Σ_{D}	$1/2^{+}$	•••	• p(1450)	0+(0-+)	• 0(2170) 6(2200)	0 (1)	K4(2500)	$1/2(4^{-})$	B ₁ (5840) ⁰	1/2(??)	• X(4350)	7?(1)
		A(1800)	1/2- ***	Σ(3170)	•			I.0	3/2+	••••	• 6(1500)	0+(0++)	£.(2220)	0+(2++	K(3100)	? ¹ (? ¹¹)	 B_J(5970)⁺ 	1/2(?)	 m)(4415) 	0-(1)
		A(1820)	1/2 ****					Ξ_{0}^{0}, Ξ_{0}^{-}	1/2+	•••	6(1510)	0+(1++)	()(2220)	or 4 + +1	CHAR	MED	 B_J(5970)⁰ 	1/2(71)	• X(4430)*	7(1+)
		A(1830)	5/2- ****					≡ ^r ₀ (5935) [−]	$1/2^+$	•••	 ('_(1525)) 	0+(2++)	n(2225)	0+(0-+)	(C =	±1)	BOTTOM. S	STRANGE	• X(4660)	7?(1)
		A(1890)	3/2+ ****					$\Xi_0(5945)^0$	3/2+	***	6(1565)	$0^+(2^{++})$	p3(2250)	1+(3)	• D±	1/2(0=)	$(B = \pm 1, 1)$	5 = ∓1)		
		A(2000)	•					Ξ <u>*</u> (5955)-	3/2+	•••	p(1570)	1+(1)	 f₂(2300) 	0+(2++)	• D ¹¹	1/2(0-)	• B ⁰	0(077)	6	b
		A(2020)	7/2+ *					Ω_0^-	1/2+	••••	b1(1595)	0-(1+-)	f ₄ (2300)	0+(4++)	 D*(2007)⁰ 	1/2(1-)	• B.	0(1-)	• no(15)	0+(0-+)
		A(2050)	3/2" *)	D (ADDOD)			 π1(1600) 	1-(1-+)	f _l (2330)	0+(0++)	 D*(2010)[±] 	$1/2(1^{-})$	 B_{r1}(5830)⁰ 	0(1+)	• T(15)	0-(1)
		A(2100)	7/2- ****)	P (4450)	81 - 3		$a_1(1640)$	$1^{-}(1^{++})$	 6(2340) 	0+(2++)	 D[*]₀(2400)⁰ 	$1/2(0^+)$	· B: (5840) ⁰	0(2+)	 Xos(1P) 	0+(0++)
		A(2110)	5/2+ ***					P c[4400]		22	6(1640)	0+(2++)	ρ ₅ (2350)	1+(5)	$D_{0}^{*}(2400)^{\pm}$	$1/2(0^+)$	B*, (5850)	7(7?)	 Xot(1P) 	0+(1++)
		A(2325)	3/2- *								 η₂(1645) 	0+(2-+)	$a_6(2450)$	$1^{-}(6^{++})$	 D₁(2420)⁰ 	$1/2(1^+)$			• ha[1P]	n+(n++)
		A(2350)	9/2+ ***								 ω(1650) 	0-(1)	f ₆ (2510)	0+(6++)	$D_1(2420)^{\pm}$	1/2(??)	BOTTOM, C	HARMED	• X02(1P)	0 (2 -)
-		A(2585)		-							 ω₃(1670) 	0 (3)	OTHE	R LIGHT	$D_1(2430)^0$	$1/2(1^+)$	(0 - C		- T(25)	0-(1)
	-				6		3646				• T2(16/0)	1 (2 -)	Further S	tates	 D₂(2460)⁰ 	$1/2(2^+)$	· B	0(0)	• T(1D)	0-(2)
	Pa	rti	cle D)ata	Gro	ud (2016				• \$(1000)	0 (1)			 D[*]₂(2460)[±] 	$1/2(2^+)$	D ₍ (25)-	0(0)	• Yas(2P)	0+(0++)
															D(2550)*	$1/2(?^{+})$			• Xo: (2P)	$0^{+}(1^{++})$
		h++n	• / / \AAA	<u> </u>	nda l	h] ($D_{j}^{*}(2600)$	1/2(?*)			$h_0(2P)$	7?(1+-)
				<u> </u>	Jugi										D*(2640)=	1/2(7')			 x₀₂(2P) 	0+(2++)
															D(2740)-	1/2(?*)			 T(35) 	0-(1)
															D(2150)	1/2(3)			 Xol (3P) 	$0^{+}(1^{++})$
															D(3000)	1/2(:)			• T(45)	0-(1)
																			 X(10610)³ 	$1^{+}(1^{+})$
															L				• X(10510) ^a	1+(1+)
<u>_</u> ¬/	יר יר			ا <u>سمب</u> ا	<u></u>	1 . 1.	–			—		ヘイエ い			,				X(10650)*	0-(1-)
9 4	ヨレノ不		1/E H	(F	田伊	1,7	こしいそ	ד' ד'	₩Ţ	-	・ 糸勺五() 柿田 岱	田 ~	1()0	6				• 7(10860)	0 (1)
רע י					」フィン		トマ・ン		11	J	• // J - /	ノモノ	次 []	107			1		• 7 [11020]	a (r)
									_	_										

実験で報告されているハドロンたち



Z_c(3900)とは?



- π+/-J/ψ不変質量分布にピーク (cc^{bar} ud^{bar}: テトラクォークの候補)
- M ~ 3900, F ~ 60 MeV (Breit-Wigner) --> ピーク位置はD^{bar}D*しきい値の少し上
- スピン・パリティはJ^P=1⁺ <--> S波の中間子散乱状態と結合

★ <u>模型によるZ_c(3900)の構造の解析</u>





✓ テトラクォーク候補 Z_c(3900)

✔ 格子QCDでどうやってエキゾチックハドロンを解析するか?

✓ チャンネル結合HAL QCD法

√ Zc(3900)の解析

✔ 実験との比較

✔ まとめと展望

- Y. Ikeda et al., (HAL QCD), PRL117, 242001 (2016).
- 池田陽一,初田哲男,土井琢身,青木慎也,理研+京大プレスリリース (http://www.riken.jp/pr/press/2016/20161214_1/)



格子QCDによるエキゾチックハドロンの解析



共鳴状態を探る一般的な方法

QCDに基づく(局所的な実エネルギー上での)S行列が得られると…



<u>束縛状態 (1st sheet)</u>

- S行列の極の位置 --> 束縛エネルギー
- 留数 --> 散乱状態との結合の大きさ

<u>共鳴状態 (2nd sheet)</u>

- S行列を2nd sheetに解析接続
- S行列の極の位置 --> 共鳴のエネルギー
- 留数 --> 散乱状態との結合の大きさ、部分崩壊幅

共鳴状態を探る格子QCDを使った方法

QCDに基づく(局所的な実エネルギー上での)S行列 <-- 格子QCDから導く

S行列を求める2つの理論的に等価な方法

▶ Lüscher法: 時間相関 --> 相互作用エネルギー --> S行列

(チャンネル結合散乱ではS行列の関数形を仮定しないといけない)

▶ HAL QCD法: チャンネル結合散乱問題も解くことができる

S行列の解析性は一意的に決まる **(一致の定理)**



S(W

<u>束縛状態 (1st sheet)</u>

- S行列の極の位置 --> 束縛エネルギー
- 留数 --> 散乱状態との結合の大きさ

<u>共鳴状態 (2nd sheet)</u>

- S行列を2nd sheetに解析接続
- S行列の極の位置 --> 共鳴のエネルギー
- 留数 --> 散乱状態との結合の大きさ、部分崩壊幅

HAL QCD法 s行列を正しく表現する"ポテンシャル"を求める

◆ HAL QCD法: 時間相関に加えて<mark>空間相関</mark>も測定する

$$\langle 0|\phi_1(ec x+ec r, au)\phi_2(ec x, au)\Phi^\dagger(0)|0
angle=\sqrt{Z_1Z_2}\sum_n A_n oldsymbol{\psi_n}(ec r)e^{-oldsymbol{W_n} au}$$



Ishii, Aoki, Hatsuda, PRL99, 02201 (2007). Aoki, Hatsuda, Ishii, PTP123, 89 (2010). Ishii et al. (HAL QCD), PLB712, 437(2012).

☆ 南部-Bethe-Salpeter (NBS) 波動関数: ψn(r)



▶ 相互作用レンジ外 (r>|R|) において**Helmholtz方程式を満たす**

$$\Big(
abla^2+ec k_n^2\Big)\psi_n(ec r)=0~~(|ec r|>R)$$

HAL QCD法 s行列を正しく表現する"ポテンシャル"を求める

✦ HAL QCD法: 時間相関に加えて<mark>空間相関</mark>も測定する

$$\langle 0|\phi_1(ec{x}+ec{r}, au)\phi_2(ec{x}, au)\Phi^\dagger(0)|0
angle=\sqrt{Z_1Z_2}\sum_n A_n \psi_n(ec{r})e^{-W_n au}$$



Ishii, Aoki, Hatsuda, PRL99, 02201 (2007). Aoki, Hatsuda, Ishii, PTP123, 89 (2010). Ishii et al. (HAL QCD), PLB712, 437(2012).

★ NBS波動関数 (r<|R|) --> "ポテンシャル U(r,r')"

$$igg(
abla^2 + ec k_n^2 ig) \psi_n(ec r) = 2 \mu \int dec r' U(ec r, ec r') \psi_n(ec r')$$

- U(r,r')はS行列を再現する
- 非相対論的近似は必要ない (U(r,r')は全ての2PIの寄与を含む)
- U(r,r')はエネルギー非依存 (新たなチャンネルが開くまで)



チャンネル結合HAL QCD法

✦ HAL QCD法: 時間相関に加えて<mark>空間相関</mark>も測定する

$$\langle 0|\phi_1^a(ec{x}+ec{r}, au)\phi_2^a(ec{x}, au)\Phi^\dagger(0)|0
angle=\sqrt{Z_1^aZ_2^a}\sum_n A_n\psi_n^a(ec{r})e^{-W_n au}igg|$$

Ishii, Aoki, Hatsuda, PRL99, 02201 (2007). Aoki, Hatsuda, Ishii, PTP123, 89 (2010). Ishii et al. (HAL QCD), PLB712, 437(2012).

★ 空間相関-->チャンネルごとに波動関数が定義できる: ψ⁰ₙ(r)

$$\Big(
abla^2+(ec{k}_n^a)^2\Big)\psi_n^a(ec{r})=2\mu^a\sum_b\int dec{r}'U^{ab}(ec{r},ec{r}')\psi_n^b(ec{r}')$$

★ チャンネル結合ポテンシャル Uªb(r,r'):

- U^{ab}(r,r')はチャンネル結合散乱のS行列を再現する
- U^{ab}(r,r')は**エネルギー非依存** (新しいチャンネルが開くまで)
- 非相対論近似は必要なく、U^{ab}(r,r')は全ての2PIの寄与を含む

ch3

★ 実際の計算は時間依存チャンネル結合HAL QCD法を利用 (talk by 石井さん)

Full details, Aoki et al. (HAL QCD), PTEP 2012, 01A105 (2012); Proc. Jpn. Acad., Ser. B, 87 (2011).

Z_c(3900) in I^G(J^{PC})=1+(1+-) -- πJ/ψ - ρη_c - D^{bar}D*チャンネル結合 --

Y. Ikeda et al., [HAL QCD], PRL117, 242001 (2016).



Nf=2+1 full QCD

- Iwasaki gauge
- clover Wilson quark
- 32^3 x 64 lattice



Relativistic Heavy Quark (charm)

• remove leading cutoff errors $O((m_c a)^n)$, $O(\Lambda_{QCD} a)$, ...

→ We are left with O(($a\Lambda_{QCD}$)²) syst. error (~ a few %)

 $\frac{\text{light meson mass (MeV)}}{m_{\pi}=411(1), 572(1), 701(1)}$ $m_{\rho}=896(8), 1000(5), 1097(4)$

 $\frac{\text{charm meson mass (MeV)}}{m_{\eta c}=2988(1), \ 3005(1), \ 3024(1)} \\ m_{J/\psi}=3097(1), \ 3118(1), \ 3143(1) \\ m_D=1903(1), \ 1947(1), \ 2000(1) \\ m_{D^*}=2056(3), \ 2101(2), \ 2159(2) \\ \end{cases}$

3x3 ポテンシャル行列 (πJ/ψ - ρη_c - D^{bar}D*)



3x3 ポテンシャル行列 (πJ/ψ - ρη_c - D^{bar}D*)



3x3 ポテンシャル行列 (πJ/ψ - ρη_c - D^{bar}D*)





S波のπJ/ψ - pŋc - D^{bar}D*チャンネル結合散乱

➡ Z_c(3900) --> πJ/ψ & D^{bar}D*で発見されているため、2体散乱が最も理想的な散乱実験

<u>1.2体散乱の不変質量分布の形</u>

散乱される粒子数 <-- 散乱振幅の虚部 $N_{
m sc} \propto ({
m flax}) \cdot \sigma(W) \propto {
m Im} f(W)$

<u>2. S行列の極の位置</u>

- ▶チャンネル結合S行列の複素エネルギー平面への解析接続
- ▶ Z_c(3900)の構造を解明
- m_π=410MeVの計算結果のみ示す (これらの物理量のクォーク質量依存性は弱い)



πJ/ψとD^{bar}D*の不変質量分布 (2体散乱)

πJ/ψ不変質量分布

● D^{bar}D*不変質量分布



✔ D^{bar}D*しきい値近傍での不変質量分布の急激な立ち上がり

➡ 強いV^{πJ/ψ, DbarD*}による効果 (黒-->V^{πJ/ψ, DbarD*}=0としたとき)

πJ/ψ不変質量分布のピーク (Breit-Wignerの形をしていない)

✓ Z_c(3900)は共鳴状態? --> S行列の極の位置から決定する

S行列の極の位置 (πJ/ψ:2nd, pŋc:2nd, D^{bar}D*:2nd)



- "仮想状態 (virtual state)"に対応する極が見つかる
- ●大きな虚部を持ち(実エネルギー軸から離れている)、散乱の物理量に影響を及ぼさない
- Z_c(3900)は共鳴状態ではなくV^{πJ/ψ,DbarD*}により強調された「しきい値効果」

実験データとの比較: -- Y(4260)の3体崩壊のスペ<u>クトル --</u>



Y(4260)の3体崩壊

 $d\Gamma_{Y\to\pi+f} = (2\pi)^4 \delta(W_3 - E_{\pi}(\vec{p}_{\pi}) - E_f(\vec{q}_f)) d^3 p_{\pi} d^3 q_f |T_{Y\to\pi+f}(\vec{p}_{\pi}, \vec{q}_f; W_3)|^2$



✔ Y(4260) --> ππJ/ψ崩壊データにフィットしてパラメータを決定

✔ Y(4260) --> πD^{bar}D*崩壊のスペクトルを予言 -->実験と比較

3体崩壊の不変質量分布 (相対論的運動学での計算)



Y. Ikeda et al., [HAL QCD], PRL117 & in preparation



●理論の予言値と実験データは良く一致する

● V^{πJ/ψ, DbarD*}=0(破線)のとき、ピークは現れない

結論: Z_c(3900)は強いV^{πJ/ψ, DbarD*}により 強調された「しきい値効果」

まとめと展望

◆ <u>チャンネル結合HAL QCD法</u>

- ▶ 同時刻NBS波動関数からS行列を再現する"ポテンシャル"を導出
- ▶ チャンネル結合系へ応用できる強みがある

📌 テトラクォーク候補 Zc(3900)の解析

- ▶ Z_c(3900)は強いV^{DbarD*, πJ/ψ}により強調された「しきい値効果」
 - S行列の極の位置の解析
 - Y(4260)の3体崩壊の実験データが非常に良く再現される
 - V^{DbarD*, πJ/ψ}=0とするとピークは現れない

🔷 将来計画

- ▶ 紹介した方法は様々なエキゾチックハドロンの候補へそのまま適応できる
 - Hダイバリオン, P_c(4450), X(3872), ...
 - エキゾチックハドロン in 原子核

Thank you for your attention !!

