フェムトスコピーによる ハドロン間相互作用の研究







東京都立大学





導入:ハドロン物理とフェムトスコピー 🎽 ハドロン相関関数とエキゾチックハドロン - K⁻p相関と A(1405) Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020) - DD* / DD* 相関と T_{cc} / X(3872) Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022) ◇ ハドロン・原子核相関関数とハイパー核物理 - Λα 相関と核媒質中の Λ A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation まとめ

導入:ハドロン物理とフェムトスコピー

観測されているハドロン(2020)

Particle Data Group (PDG) 2020版

http://pdg.lbl.gov/

				Ι.								
р	1/2+ ****	Δ(1232)	3/2+ ****	Σ^+	1/2+	****	=0	$1/2^{+}$	****	$=_{cc}^{++}$		***
n	1/2+ ****	$\Delta(1600)$	3/2+ ****	Σ ^u	$1/2^{+}$	****	<i>=</i> -	$1/2^{+}$	****	.0		
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+ ****	Σ(1660)	$1/2^{+}$	***	$\Xi(1950)$	_	***	$\Lambda_b(6152)^0$	5/2+	***
N(1680)	5/2+ ****	<i>∆</i> (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_{h}^{*}	3/2+	***
N(1710)	1/2+ ****	$\Delta(1930)$	5/2- ***	$\Sigma(1775)$	5/2-	****	$\Xi(2250)$		**	$\Sigma_{b}(6097)^{+}$		***
N(1720)	3/2+ ****	$\Delta(1940)$	3/2 **	$\Sigma(1780)$	3/2+	*	=(2370)		**	$\Sigma_{b}(6097)^{-}$		***
N(1860)	5/2+ **	$\Delta(1950)$	7/2+ ****	Σ(1880)	1/2+	**	=(2500)		*	=0. =- '	$1/2^{+}$	***
N(1875)	3/2- ***	A(2000)	5/2+ **	Σ(1900)	1/2-	**	=(2000)			$= \frac{D}{2}, \frac{D}{2}$	$\frac{1}{2^{+}}$	***
N(1880)	1/2+ ***	$\Delta(2150)$	1/2 *	$\Sigma(1910)$	3/2-	***	0-	$3/2^{+}$	****	= B(0000)	2/2+	***
N(1895)	1/2 ****	$\Delta(2200)$	7/2 ***	$\Sigma(1915)$	5/2+	****	$\Omega(2012)^{-1}$	7-	***	$=_{b}(3943)$	3/2+	***
N(1900)	3/2+ ****	A(2300)	9/2+ **	Σ(1940)	3/2+	*	0(2250)-	•	***	$=_{b(3333)}$	3/2	***
N(1990)	7/2+ **	A(2350)	5/2 *	$\Sigma(2010)$	3/2-	*	0(2380)-		**	=b(0221)	1/0+	***
N(2000)	5/2+ **	A(2300)	7/2+ *	Σ(2010)	7/2+	****	0(2470)-		**	d ₇₆	1/Z '	2444
N(2000)	3/2+ *	A(2400)	9/2- **	$\Sigma(2000)$	5/2+	*	32(2410)			P (4212)+		*
N(2040)	5/2 5/2 ***	A(2400)	>/∠ ** 11/0+ ****	Z (2010)	3/2+	*	A+	$1/2^{+}$	****	$P_{C}(4312)^{+}$		*
N(2000)	1/2 ***	A(2420)	12/2 ***	Z (2000) Σ(2100)	3/2	*	^{1}C	1/2	***	$P_{c}(4380)^{+}$		*
N(2100)	2/2 ***	$\Delta(2750)$	15/2 **	Z(2100)	1/2		$\Lambda_{C}(2595)^{+}$	2/2-	***	$P_{c}(4440)^{+}$		-
N(2120)	3/2 ****	<u>Д(2950)</u>	15/2 ***	Z (2100)	2/2	*	$\Lambda_{C}(2025)^{+}$	5/2	*	$P_{c}(4457)^{+}$		*
N(2190)	1/2 ****	4	1/0+ ****	Z (2230)	3/21	~ ~~~	$n_{c}(2705)^{+}$	2/0+	****			
N(2220)	9/2 ****	1	1/2 **	2 (2250)		***	$\Lambda_{c}(2800)^{+}$	3/2 '	***			
N(2250)	9/2 ****	/1	1/2 **	Σ(2455)		**	$\Lambda_{c}(2880)^{+}$	5/2	***			
N(2300)	1/2 **	/(1405)	1/2 ****	$\Sigma(2620)$		**	/ _c (2940) ⁺	3/2	***			
N(2570)	5/2- **	/(1520)	3/2 ****	Σ(3000)		*	$\Sigma_{c}(2455)$	1/2+	****			
N(2600)	11/2- ***	/(1600)	1/2" ****	Σ(3170)		*	$\Sigma_{c}(2520)$	3/2+	***			
N(2700)	13/2+ **	/(1670)	1/2- ****				$\Sigma_{c}(2800)$		***			
		A(1690)	3/2 ****				Ξ_c^+	$1/2^{+}$	***			
		A(1710)	1/2+ *				$=_{c}^{0}$	$1/2^{+}$	****			
		A(1800)	1/2 ***				$\Xi_{c}^{\prime+}$	$1/2^{+}$	***			
		<i>I</i> (1810)	1/2+ ***				<u>=</u> 0	$1/2^{+}$	***			
		A(1820)	5/2+ ****				$\Xi_{c}(2645)$	3/2+	***			
		A(1830)	5/2- ****				$\Xi_{c}(2790)$	$1/2^{-}$	***			
		A(1890)	3/2+ ****				$\Xi_{c}(2815)$	3/2-	*			
		A(2000)	$1/2^{-}$ *				=(2930)	-/ -				
		A(2050)	3/2 *				=.(2970)					
		A(2070)	3/2+ *				=.(3055)					
		A(2080)	5/2 *				=_(3080)					
		A(2085)	7/2+ **				$=_{C}(3000)$ = (3123)		*			
		A(2100)	7/2- ****				-2(3123)	1/2+	***			
		1(2110)	5/2+ ***				² C	2/2+				
		1(2325)	3/2- *									
		A(2350)	9/2+ ***		11		ساس ا			10	•	17
		A(2585)	/ - **		1			- V	/ ~	っちん		不臣
		1.(2000)			/ N	-					U	
							_					
				1			320(3120)~		-111-	1		

Γ				STRAM	IGE	CHARMED,	STRANGE	CT continued		
		P(PC)	_ <i>B</i> _ 0)	$P(P^{C})$	(3 = ±1, C) (P)	(c = 5	(P)		r(3)
	±	1=(0=)	(1(70)	$1 = (2 - \pm)$. V±	1/2(0=)	- D‡	0(0-)	• \u03c0 (3770)	0(1)
	• π • =0	$1^{-}(0^{-}+)$	• π2(10/0) • 4(1690)	$1(2^{-1})$	• K0	$\frac{1}{2}(0^{-1})$	• D _s	0(0)	• \phi_2(3823)	$0^{-}(2^{-})$
	• # -	$0^{+}(0^{-}+)$	• φ(1000) • φ(1600)	$1^{+}(3^{-})$	• K ⁰	$1/2(0^{-})$	• D ₅	0(?)	• \$3(3042) X-0(3960)	$0^{+}(0^{+}+)$
	• £(500)	$0^{+}(0^{+})$	• p3(1050)	1+(1)	• K0	$\frac{1}{2}(0^{-})$	$ D_{s0}(2517) $	$0(0^{+})$	• X = (3872)	$0^{+}(1^{+}+)$
	• a(770)	1+(1)	• $p(1700)$	$1^{-}(2^{+})$	• K*(700)	1/2(0+)	• D ₅₁ (2460) ⁺	$0(1^+)$	• Z ₁ (3900)	$1^{+}(1^{+}-)$
	• w(782)	$0^{-}(1^{-})$	• $f_2(1700)$	0+(0++)	• K*(900)	1/2(0.)	• D ₅₁ (2550)=	$0(1^{+})$	• X(3915)	$\hat{0} + \hat{0} + \hat{1}$
	• n/ (958)	$0^{+}(0^{-}+)$	n(1760)	$0^{+}(0^{-}+)$	• K (052)	$\frac{1}{2(1+1)}$	• D ₅₂ (2373) • D* (2700)±	$0(2^{-})$	• Y co (3930)	$0^{+}(2^{+}+)$
	• fa(980)	$0^{+}(0^{+}+)$	 π(1800) 	1-(0-+)	• K (1400)	$\frac{1}{2(1^+)}$	$D_{s1}(2100)^{\pm}$	0(1-)	X(3940)	? [?] () ^{??})
	• a)(980)	$1^{-(0++)}$	£(1810)	$0^{+}(2^{+}+)$	• K*(1410)	$1/2(1^{-1})$	$D_{s1}(2000)^{\pm}$	0(2-)	 X(4020)[±] 	$1^{+}(?^{-})$
	 \$\overline(1020)\$ 	$0^{-(1^{-})}$	X(1835)	??(0 - +)	 K[*]₅(1430) 	$1/2(0^{+})$	$D_{53}(2000)$	0(3)	 ψ(4040) 	$0^{-}(1^{-})$
	 h₁(1170) 	$0^{-(1^{+}-)}$	 φ₃(1850) 	0-(3)	 K[*]₃(1430) 	$1/2(2^+)$	D _s J(3040)	0(;)	X(4050) [±]	$1^{-}(?^{\prime+})$
	 b₁(1235) 	$1^{+}(1^{+})$	 η₂(1870) 	$0^{+}(2^{-+})$	K(1460)	$1/2(0^{-1})$	BOTT	OM	X(4055)±	$1^+(?^{\prime-}_{22})$
	• a1(1260)	$1^{-}(1^{++})$	 π₂(1880) 	$1^{-}(2^{-+})$	K)(1580)	$1/2(2^{-1})$	(B =	±1)	X(4100)±	$1^{-}(?'')$
	• f ₂ (1270)	$0^{+}(2^{++})$	ρ (1900)	1+(1)	K(1630)	$1/2(?^{?})$	• B [±]	$1/2(0^{-})$	• $\chi_{C1}(4140)$	$0^{+}(1^{++})$
	• f ₁ (1285)	$0^+(1^{++})$	$f_2(1910)$	$0^+(2^{++})$	$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$	• B ⁰	$1/2(0^{-})$	 ψ(4160) 	$0^{-}(1^{-})$
	 η(1295) 	0+(0-+)	$a_0(1950)$	$1^{-}(0^{++})$	 K*(1680) 	$1/2(1^{-})$	• B [±] /B ⁰ AD	MIXTURE	X(4160)	?:(?::)
	 π(1300) (1300) 	$T_{-}(0_{+})$	 t₂(1950) 	$0^{+}(2^{++})$	• K ₂ (1770)	$1/2(2^{-})$	$\bullet B^{\pm}/B^0/B^0_{S}$	/b-baryon	$Z_{c}(4200)$	$1^{+}(1^{+})^{-}$
	 a₂(1320) f (1270) 	1(2 + 7)	• a ₄ (1970)	$1^{-}(4^{+})^{+})$	• K ₃ (1780)	1/2(3 ⁻)	V and V	CKM M2	• \u03c0 (4230)	0(1)
	• $T_0(1370)$	$1^{-}(1^{-}+)$	ρ ₃ (1990) - (2005)	$1^{-}(3^{-})$	• K ₂ (1820)	1/2(2-)	trix Element	S	X(4240) X(4250)±	$1^{-}(0^{-})$
	• n(1400)	0+(0-+)	π2(2005) • €(2010)	1(2 + 1)	K(1830)	1/2(0 ⁻)	• B*	$1/2(1^{-})$	∧(4250) ⊕(4260)	$\frac{1}{0-(1-1)}$
	• h (1405)	$0^{-}(1+-)$	• I2(2010) £(2020)	$0^{+}(0^{+}^{+})$	$K_0^*(1950)$	$1/2(0^{+})$	• B ₁ (5721) ⁺	$1/2(1^+)$	• $\chi_{=1}(A274)$	$0^{+}(1^{+})$
	a (1420)	$1^{-}(1^{++})$	• £(2050)	$0^{+}(4^{+}+)$	$K_{2}^{*}(1980)$	1/2(2+)	• B ₁ (5721) ⁰	1/2(1+)	X(4350)	$0^{+}(7^{?+})$
	• f ₁ (1420)	$0^{+}(1^{+})$	$\pi_{2}(2100)$	$1^{-}(2^{-+})$	 K₄(2045) 	1/2(4+)	B [*] _J (5732)	?(?*)	 ψ(4360) 	$0^{-}(1^{-})$
	 ω(1420) 	$0^{-}(1^{-})$	fb(2100)	$0^{+}(0^{+}+)$	$K_2(2250)$	$1/2(2^{-})$	• B ₂ (5/4/) ⁺	$1/2(2^{+})$	ψ(4390)	$0^{-}(1^{-})$
	£(1430)	$0^{+}(2^{+}+)$	fs(2150)	$0^{+}(2^{+}+)$	K ₃ (2320)	1/2(3+)	• B ₂ (5/4/) ⁰	1/2(2 ')	 ψ(4415) 	$0^{-(1^{-})}$
	• a)(1450)	$1^{-}(0^{++})$	p(2150)	1+(1)	K ₅ (2380)	1/2(5)	B _J (5840) ⁺	1/2(?)	• Z _c (4430)	$1^{+}(1^{+})$
	 ρ(1450) 	$1^{+}(1^{-})$	 φ(2170) 	$0^{-}(1^{-})$	K4(2500)	1/2(4)	B _J (5840) ⁰	1/2(?)	$\chi_{c0}(4500)$	$0^{+}(0^{+}+)$
	 η(1475) 	0+(0-+)	f ₀ (2200)	0+(0++)	V(2100)	i.(i)	• B (5970)	1/2(?)	 ψ(4660) 	0-(1)
	 f₀(1500) 	0+(0++)	f _J (2220)	0+(2++	CHARM	1ED	• <i>BJ</i> (3910)-	1/2(!')	χ _{c0} (4700)	0+(0++)
	$f_1(1510)$	$0^+(1^{++})$		or 4 + +)	(C = ±	=1)	BOTTOM, S	STRANGE	4	T
	• $f'_2(1525)$	$0^{+}(2^{++})$	η(2225)	0+(0-+)	 D[±] 	1/2(0-)	$(B = \pm 1,$	$S = \mp 1$)	(+ possibly n	o on-aa states)
	$f_2(1565)$	$0^+(2^{++})$	$\rho_3(2250)$	$1^+(3^{})$	• D ⁰	1/2(0-)	• B ⁰ _s	0(0-)	(16)	0+(0-+)
	$\rho(1570)$	$1^+(1^-)$	• t ₂ (2300)	$0^{+}(2^{++})$	 D*(2007)⁰ 	$1/2(1^{-})$	• B [*] _S	$0(1^{-})$	• $\eta_{b}(13)$	$0^{-}(0^{-})$
	$h_1(1595)$	$0^{-}(1^{-})$	$f_4(2300)$	$0^+(4^{++})$	 D*(2010)[±] 	$1/2(1^{-})$	$X(5568)^{\pm}$?(?')	• 7 (13)	$0^{+}(0^{+}^{+})$
	• π ₁ (1600)	$1^{-}(1^{+})$	I0(2330)	$0^+(0^{++})$	• D ₀ (2300) ⁰	1/2(0+)	 B₅₁(5830)⁰ 	$0(1^+)$	• Xm(1P)	$0^{+}(1^{+})$
	• a1(1040) • (1640)	$0^{+}(0^{+}^{+})$	• I2(2340) ~(2250)	1+(5)	$D_0^*(2300)^{\pm}$	1/2(0 ⁺)	• B [*] ₅₂ (5840) ⁰	0(2+)	• $h_{\ell}(1P)$	$0^{-}(1^{+}-)$
	ng(1645)		$f_{5}(2500)$	$0^+(6^{++})$	• D ₁ (2420) ⁰	$1/2(1^+)$	$B_{sJ}^{*}(5850)$?(?')	• Ym(1P)	$0^{+}(2^{+}+)$
	• w(16		(2010)	0(0)	$D_1(2420)^{\pm}$	1/2(?)	BOTTOM. (HARMED	η _b (25)	0+(0-+)
	• up		OTHER	R LIGHT	D1(2430)	1/2(1 ')	(B = C)	= ±1)	• T(25)	$0^{-(1^{-}-)}$
			ner St	ates	 D₂(2400)² D[*](2460)[±] 	1/2(2+)	• B_{c}^{+}	0(0-)	 <i>γ</i>₂(1D) 	0-(2)
					$-D_2(2400)^-$	1/2(2')	B-(25)±	0(0-)	• χ _{b0} (2P)	0+(0++)
		-			D(2550)°	$\frac{1}{2}(?)$	D((20)	0(0)	 χ_{b1}(2P) 	$0^{+}(1^{++})$
					D*(200)±	$\frac{1}{2}(2)$	CT		h _b (2P)	0-(1+-)
					D(2740)P	1/2(??)	(+ possibily no	n⊢qq states)	• $\chi_{b2}(2P)$	0+(2++)
					D*(2750)	$\frac{1}{2}(3^{-1})$	• $\eta_c(1S)$	0+(0 - +)	• 7(35)	$0^{-}(1^{})$
					D(3000)9	1/2(7?)	 J/ψ(1S) 	$0^{-}(1^{-})$	• χ _{b1} (3P)	$0^{-}(1^{++})$
					5(5000)	-/-(.)	• ~ (1P)	$0^{+}(0^{++})$	• $\chi_{b2}(3P)$	0'(2'')
							$c_1(1P)$	$0^{-}(1^{++})$	• 7 (45)	$0 (1^{-})$
	• • •		🔨 /	• •	7 1 1		c(1P)	0 (1 -)	 Z_b(10010) Z_c(10650) 	(1 + (1 + -))
						小甲	(2(1P))	$0 \cdot (2 + 1)$ 0 + (0 - +)	 Zb(10050) 20(10752) 	$\frac{1}{2}(1-1)$
	-	· /					(25)	$0 \cdot (0 \cdot)$ 0 - (1)	• 7(10860)	(1 - 1)
							(22)	ο (1)	• 7(11020)	$0^{-}(1^{-}-1)$
					1				. ()	- (-)

3/2 **** =0 ρ₃(2250) A(1690) $1/2^{+}$ h1(1595) 1+(3 $0^{-}(1$ D*(2007)^C $\Omega_{c}(3120)^{0}$ *** $1/2^{+}$ 1/2+ * **** A(1710) Ξ- π₁(1600) $1^{-}(1^{-}+)$ • f₂(2300) $0^{+}(2^{++})$ D*(2010) 0+(4++ 3/2+ a1(1640) f4(2300) A(1800) 1/2 *** $\Xi(1530)$ **** $1^{-}(1$ D^{*}₀(2300) 0+(2f₀(2330) $0^{+}(0^{+})$ $f_2(1640)$ A(1810) 1/2+ *** $\Xi(1620)$ D1(2420) =++ *** • f₂(2340) η₂(1645) 0+(2- $0^{+}(2^{++})$ D₁(2430) A(1820) 5/2+ **** Ξ(1690) *** ω(1650) ρ₅(2350) 1+(5- D^{*}₂(2460) A(1830) 5/2 **** Ξ(1820) $3/2^{-}$ *** ω₃(16) $D_{\rm b}(2550)^{(1)}$

LIGHT UNFLAVORED STRANGE CHARMED, STRANGE $c\overline{c}$ continued $f^{c}(f^{C})$ 1/2+ **** 3/2+ **** 1/2+ **** 1/2+ **** 1/2+ *** $\Delta(1232)$ Σ^+ Λ_{h}^{0} (S = C = B = 0) $(S = \pm 1, C = B = 0)$ $(C = \pm 1, S = \pm 1)$ 1/2+ **** 3/2+ **** Σ^0 1/2+ **** possibly non-gg states Ab(5912)0 1/2- *** $\Delta(1600)$ Ac(2595)+ 1/2- *** $P(f^{C})$ $I^{G}(J^{PC})$ (J^P) $\psi_{2}(3823)$ $0^{-}(2)$ I(P)1/2+ **** N(1440) 1/2+ **** $\Delta(1620)$ 1/2- **** Σ-Ac(2625)+ 3/2- *** $\Lambda_b(5920)^0 3/2^-$ *** ψ₃(3842) 0⁻(3 $1^{-}(0^{-})$ 1/2(0 π₂(1670) $1^{-}(2)$ • π⁰ • D_{s}^{\pm} 3/2 **** 3/2 **** 3/2+ **** Ab(6146)0 3/2+ K⁰ 1/2(0-) $0(0^{-})$ $\chi_{c0}(3860) 0^+(0^+$ N(1520) $\Delta(1700)$ Σ(1385) *** $1^{-}(0)$ \$\$\dots\$\$ (1680) $0^{-}(1)$ $\Lambda_{c}(2765)^{+}$
 ρ₃(1690)
 $0^{+}(0)$ $1^{+}(3)$ • K& $1/2(0^{-})$ D_s^{*d} $0(?^{2})$ $\chi_{c1}(3872) 0^+(1)$ Ac(2860)+ 3/2+ *** Ab(6152)0 5/2+ *** N(1535) 1/2- **** $\Delta(1750)$ 1/2+ * Σ(1580) $3/2^{-}$ f₀(500) 0+(0+
 ρ(1700)
 1+(1 • K9 1/2(0- D^{*}₅₀(2317)[±] 0(0+) • $Z_c(3900) = 1^+(1^-)$ **** N(1650) $1/2^{-}$ *∆*(1900) 1/2 *** Σ(1620) $1/2^{-}$ * $\Lambda_c(2880)^+ 5/2^+ ***$ 1/2+ *** Σ_b 1/2(0⁺) • D₅₁(2460)[±] ρ(770) $1^{+}(1)$ $1^{-}(2^{+})$ $0(1^+)$
*χ*_{c0}(3915) 0⁺(0⁺⁻
 a)(1700) K^{*}₀(700) 3/2+ *** 5/2- **** 5/2+ **** 1/2+ *** $\Delta(1905)$ Σ(1660) Ac(2940)+ 3/2- *** N(1675) Σ* • χ_{C2}(3930) 0⁺(2⁺ χ(3940) ?[?](?[?]) ω(782) $0^{-}(1$ • f₀(1710) $0^{+}(0^{+})^{+}$ 1/2(1⁻) • D₅₁(2536)[±] $0(1^+)$ K*(892) 1/2+ **** 5/2+ **** 1/2+ **** N(1680) △(1910) Σ(1670) 3/2- **** $\Sigma_{c}(2455)$ $\Sigma_{b}(6097)^{-1}$ *** η'(958) 0+(0 1/2(1+) • D*2(2573) X(3940) $0(2^{+})$ • $K_1(1270)$ 3/2+ *** f₀(980) 0+(0+ X(4020)[±] 1⁺(?^{?-}) 1/2- *** $\eta(1760)$ $0^{+}(0)$ N(1700) 3/2- *** $\Delta(1920)$ 3/2+ *** $\Sigma(1750)$ $\Sigma_{c}(2520)$ $\Sigma_{b}(6097)$ *** K₁(1400) $1/2(1^{+})$ • \u00eb(4040) 1/2+ *** a₀(980) $1^{-}(0^{+}$ π(1800) $1^{-}(0^{-}$ K*(1410) $1/2(1^{-})$ D^{*}_{s1}(2700)[±] $0(1^{-})$ $0^{-}(1)^{-}$ 1/2+ **** 5/2- *** 5/2- **** N(1710) $\Delta(1930)$ $\Sigma(1775)$ *** $\Sigma_{c}(2800)$ X(4050)± $1^{-}(?^{?})$
 \u00e9
 $0^{-}(1$ fs(1810) $0^{+}(2^{-})$ $D_{s1}^{*}(2860)^{\pm}$ 3/2+ **** 1/2+ *** K^{*}₀(1430) $1/2(0^{+})$ $0(1^{-})$ 3/2- ** Σ(1780) 3/2+ * N(1720) ∆(1940) 1/2+ *** X(4055) ± 1+(??- h₁(1170) X(1835) ??(0 $0^{-}(1$ K⁻₂(1430) 1/2(2+ D^{*}₅₃(2860)[±] 0(3-) 1/2+ ** 1/2+ **** 5/2+ ** 7/2+ **** N(1860) $\Delta(1950)$ $\Sigma(1880)$ $X(4100)^{\pm}$ 1⁻(???) b₁(1235) 1+(1+ φ₃(1850) $\Xi_{h}^{\prime}(5935)^{-} 1/2^{+}$ *** 0-(3- K(1460) 1/2(0-5/2+ ** 3/2- *** $1/2^{-}$ ** a(1260) $1^{-}(1$ η₂(1870) $0^{+}(2)$ • χ_{c1} (4140) 0⁺(1⁺ N(1875) $\Delta(2000)$ $\Sigma(1900)$ 1/2+ *** $K_2(1580)$ 1/2(2- $X_1(2900)$ Ξ_b(5945)⁰ 3/2⁺ *** 1/2+ *** fs(1270) $0^{+}(2$ π₂(1880) $1^{-}(2)$
 ¹/₂(4160)
 ${}^{0^{-}(1^{-})}_{?(???)}$ $1/2^{-}$ * *** $D_{sJ}(3040)^{\pm}$ 0(?[?]) N(1880) $\Delta(2150)$ $\Sigma(1910)$ $3/2^{-}$ =~0 K(1630) $1/2(?^{(+)})$ 1/2+ *** Ξ_b(5955)- 3/2+ *** X(4160) f₁(1285) $0^{+}(1^{-})$ ρ(1900) $1^{+}(1)$ 5/2+ **** K₁(1650) 1/2(1+ 1/2- **** 7/2 *** N(1895) $\Delta(2200)$ $\Sigma(1915)$ BOTTOM *Ξ_c*(2645) 3/2+ *** - 3/2- n(1295) $Z_{c}(4200)$ $1^{+}(1)$ $0^{+}(0)$ f₂(1910) 0+(2+ K*(1680) 1/2(1-N(1900) 3/2+ **** $\Delta(2300)$ 9/2+ ** 3/2+ * Σ(1940) $(B = \pm 1)$ $\Xi_{c}(2790)$ 1/2- *** $\Xi_{b}(6227)$ *** π(1300) $1^{-}(0$ $a_0(1950)$ $1^{-}(0^{-})$ ψ(4230) $0^{-}(1$ K₂(1770) $1/2(2^{-})$ 7/2+ ** $R_{\rm m}(4240)$ 1⁺(0 N(1990) $\Delta(2350)$ 5/2 * $\Sigma(2010)$ 3/2-<u>=_(28</u>15) a)(1320) $1^{-}(2^{-})$ fs(1950) $0^{+}(2^{+})$ 1/2(0)3/2 *** *** Eb(6227) K^{*}₃(1780) $1/2(3^{-})$ B⁰ $1/2(0^{-1})$ $X(4250)^{\pm} 1^{-}(?^{+})$ N(2000) 5/2+ ** 7/2+ * $\Sigma(2030)$ $7/2^{+}$ **** fs(1370) $0^{+}(0^{+})$ a₄(1970) $1^{-}(4^{+})$ $\Delta(2390)$ $1/2(2^{-})$ K₂(1820) -(2923) ** Ω_{h}^{-} 1/2+ *** • $\chi_{c1}(4274) = 0^+(1^{++})^+$ X(4350) = 0^+(?^{+})^+ π₁(1400) $1^{-}(1$ $\rho_3(1990)$ 1+(3) B[±]/B⁰ ADMIXTURE 9/2- ** $5/2^{+}$ 1/2(0-N(2040) 3/2+ * Σ(2070) K(1830) ∆(2400) $\Xi_{c}(2930)$ ** η(1405) 0+(0 $1^{-}(2)$ B[±]/B⁰/B⁰/b-baryon $\pi_2(2005)$ 5/2- *** 3/2+ * $K_0^*(1950)$ $1/2(0^+$ 11/2+ **** N(2060) ∆(2420) $\Sigma(2080)$ 1/2+ *** ADMIXTURE $\Xi_{c}(2970)$ $2_{b}(6330)$ h₁(1415) 0-(1 $f_2(2010)$ $0^{+}(2^{+})$ tb(4360) $0^{-}(1)$ • K3(1980) $1/2(2^+$ V_{cb} and V_{ub} CKM Ma-1/2+ *** 13/2- ** 7/2 * N(2100) $\Delta(2750)$ $\Sigma(2100)$ f₁(1420) $0^{+(1)}$ $f_0(2020)$ $0^{+}(0^{+})$ ψ(4415) $0^{-}(1$ $\Xi_{c}(3055)$ *** $\Omega_{b}(6340)$ K^{*}₄(2045) 1/2(4+ trix Elements • B* 3/2- *** $0^{+}(4^{-})$ $1^{+(1)}$ N(2120) *∆*(2950) 15/2+ ** Σ(2110) $1/2^{-}$ * ω(1420) $0^{-}(1$ f₄(2050) Z_c(4430) $1/2(1^{-1})$ $\Xi_{c}(3080)$ *** 2.(6350) $K_2(2250)$ $1/2(2^{-1})$ fs(1430) $0^{+}(2^{+})$ $\pi_2(2100)$ $1^{-}(2^{-})$ K₃(2320) B₁(5721) $1/2(1^+)$ $\chi_{c0}(4500) 0^+(0^+)$ 7/2- **** 3/2+ * N(2190) $\Sigma(2230)$ $1/2(3^+$ $\Xi_{c}(3123)$ * a₀(1450) f₀(2100) $0^{+}(0^{-})$ $1^{-}(0)$ B*(5732) ?(?7) 9/2+ **** 1/2+ **** N(2220) $\Sigma(2250)$ K₅(2380) 1/2(5 Λ 1/2+ *** $P_{c}(4312)^{+}$ £(2150) $0^{+}(2)$ ψ(4660) $0^{-}(1$ B^{*}₂(5747) $1/2(2^+)$ 9/2- **** /(1380) 1/2 ** 1/2(4-N(2250) $\chi_{c1}(4685) = 0^+(1$ 1/2(?? B₁(5840) ??)?? N(2300) 1/2+ ** *N*(1405) $1/2^{-}$ * 2年間で新たに発見されたハド $\chi_{c0}(4700) = 0^+(0^+$ 1/2(?? • Bj(5970) 5/2- ** A(1520) $3/2^{-}$ *9 :MED N(2570) bЪ BOTTOM, STRANGE ± 1) 11/2- *** A(1600) $1/2^{+}$ *여 N(2600) possibly non-qq states $(B = \pm 1, S = \pm 1)$ 1/2(0)A(1670) 1/2- ** N(2700) 13/2+ ** 0+0 $\eta_b(1S)$ B⁰_S $0'0^{-}$ $1/2(0^{-})$
\(\text{15}\) $0^{-}(1$ • B. $0(1^{-})$ $1/2(1^{-})$
 χ_{b0}(1P)
 $0^{+}(0^{-})$ X(5568)± ?(?[?]) 1/2(1)• $\chi_{b1}(1P)$ 0+(1- $1/2(0^{+}$ B_{\$1}(5830)⁰ $0(1^+)$ h_b(1P) 0-(1+- B^{*}₂₂(5840)⁰ $0(2^{+})$ $1/2(1^+)$ $0^{+}i2^{+}$ • χ_{b2}(1P) $B_{s,l}^{*}(5850)$?(?[?]) 1/2(1 0+(0 $n_{b}(2S)$ $1/2(2^{+})$ r(25) $0^{-}(1$ $1/2(0^{-})$ B. (6114)0 \$\mathcal{T}_2(1D)\$ A(1890) 3/2+ **** **Ξ(1950**) *** 2510) 0+(6+- $0^{-}(2)$ D*(2600) 1/2(1-BOTTOM, CHARMED $0^{+}(0)$

観測されているハドロン(2022)

Particle Data Group (PDG) 2022版

 $\geq \frac{5}{2}$?

3/2+

*

**

**

 $\Xi(2030)$

Ξ(2120)

Ξ(2250)

Ξ(2370)

Ξ(2500)

Ω(201)

Ω(225)

Ω(238)

Ω(247)

 Ω^{-}

A(2000)

A(2050)

A(2070)

A(2080)

A(2085)

A(2100)

A(2110)

A(2325)

A(2350)

A(2585)

 $1/2^{-}$ *

3/2 *

3/2+ *

5/2- *

7/2+ **

7/2 ****

5/2+ ***

9/2+ ***

3/2 *

導入:ハドロン物理とフェムトスコピー

http://pdg.lbl.gov/

D*(2640)

 $D_2(2740)^6$

D^{*}₃(2750)

:(2760

D(3000)0

メソン~210種

1/2(??)

1/2(2-

 $1/2(3^{-})$

1/2(1

1/2(??)

 $(B = C = \pm 1)$

possibly non-gg states)

 $0^{+}(0)$

0+(0+

 $0^{-}(1$

B_c(2S)[±]

• η_c(15)

J/ψ(1S)

(1P) $0^{+}(1)$

(1P)

 $_{2}(1P)$ 0+(2+

(25) 0+(0-

2.51 $0^{-}(1$

ψ(3770)

 $0(0^{-})$

 $0(0^{-})$

0-(1 - -)

χ_{b1}(2P)

h_b(2P)

χ_i(2P)

• T(35)

χ_{b1}(3P

• x_Po(3P)

Υ(45)

 $0^{-}(1^{+}) \bullet \gamma(10860) 0^{-}(1$

 $0^{+}(1)$

0+(2

 $0^{-}(1$

 $0^{+}(1^{+})$

 $0^{+}(2^{+})$

 $0^{-}(1$

• $Z_b(10610)$ 1⁺(1⁺⁻

 $^+) \bullet Z_b(10650) 1^+(1^+)$

⁺) • $\gamma(11020)$ 0⁻(1

Further State

 $0^{-}(1^{+})$

全ての~380種のハドロンはQCDから生じている

バリオン~170種

導入 : ハドロン物理とフェムトスコピー 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?

よノ	1	ド		ン	•					
Σ^+	1/2+	****	Λ_c^+	1/2+	****	Λ ⁰ _b	1/2+	***		
Σ-	$1/2^+$ $1/2^+$	****	$\Lambda_c(2595)^+$ $\Lambda_c(2625)^+$	$\frac{1}{2^{-}}$ $\frac{3}{2^{-}}$	***	$\Lambda_b(5912)^0$ $\Lambda_b(5920)^0$	$\frac{1}{2^{-}}$ $3/2^{-}$	***		• 7

強い相互作用で不安定なハドロン

http://pdg.lbl.gov/

						1			1						1
р	1/2+	****	⊿(1232)	3/2+	****	Σ^+	1/2+	****	Λ_c^+	$1/2^{+}$	****	Λ_b^0	$1/2^{+}$	***	
п	$1/2^{+}$	****	$\Delta(1600)$	3/2+	****	Σ^0	1/2+	****	$\Lambda_{c}(2595)^{+}$	$1/2^{-}$	***	$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^{-}$	***	
N(1440)	1/2+	****	$\Delta(1620)$	1/2-	****	Σ-	1/2+	****	$\Lambda_{c}(2625)^{+}$	3/2-	***	$\Lambda_b(5920)^0$	3/2-	***	
N(1520)	3/2-	****	$\Delta(1700)$	3/2-	****	$\Sigma(1385)$	3/2+	****	$\Lambda_{c}(2765)^{+}$		*	$\Lambda_b(6146)^0$	3/2+	***	
N(1535)	$1/2^{-}$	****	$\Delta(1750)$	1/2+	*	$\Sigma(1580)$	3/2-	*	$\Lambda_{c}(2860)^{+}$	3/2+	***	$\Lambda_b(6152)^0$	5/2+	***	
N(1650)	$1/2^{-}$	****	$\Delta(1900)$	1/2-	***	$\Sigma(1620)$	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_{b}^{*}	3/2+	***	
N(1680)	5/2+	****	⊿(1910)	1/2+	****	$\Sigma(1670)$	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-	****	$\Sigma_{c}(2800)$		***	Ξ_{h}^{-}	$1/2^{+}$	***	
N(1720)	3/2+	****	⊿(1940)	3/2-	*ok	$\Sigma(1780)$	3/2+	*	Ξ_c^+	$1/2^{+}$	***	<u>=0</u>	$1/2^{+}$	***	
N(1860)	5/2+	**	Δ (1950)	7/2+	****	$\Sigma(1880)$	$1/2^{+}$	**	=0	$1/2^{+}$	****	$\Xi_{b}^{\prime}(5935)^{-}$	$1/2^{+}$	***	
N(1875)	3/2-	***	$\Delta(2000)$	5/2+	*ok	Σ(1900)	$1/2^{-}$	**	='+	$1/2^{+}$	***	=(5945) ⁰	3/2+	***	
N(1880)	$1/2^{+}$	***	$\Delta(2150)$	$1/2^{-}$	*	Σ(1910)	3/2-	***	='0	1/2+	***	$=_{6}(5955)$	3/2+	***	
N(1895)	$1/2^{-}$	****	<i>∆</i> (2200)	7/2-	***	Σ(1915)	5/2+	****	$=_{c}(2645)$	3/2+	***	$=_{b}(6100)^{-1}$	3/2-	***	
N(1900)	3/2+	****	$\Delta(2300)$	9/2+	**	Σ(1940)	3/2+	*	$=_{2}(2790)$	1/2-	***	$=_{b}(6227)$ -	5/2	***	
N(1990)	7/2+	**	$\Delta(2350)$	5/2-	*	$\Sigma(2010)$	3/2-	*	=(2815)	3/2-	***	$= (6227)^{0}$		***	
N(2000)	5/2+	**	$\Delta(2390)$	7/2+	*	Σ(2030)	7/2+	****	= (2013)	5/2	**	Ω^{-}	1/2+	***	
N(2040)	3/2+	*	$\Delta(2400)$	9/2-	**	$\Sigma(2070)$	5/2+	*	$=_{C(2923)}$		**	^{32}b	1/2	*	
N(2060)	5/2-	***	$\Delta(2420)$	11/2+	****	Σ(2080)	3/2+	*	$=_{C}(2930)$	1/2+	***	32b(0310) -		*	
N(2100)	1/2+	***	$\Delta(2750)$	13/2-	**	$\Sigma(2100)$	7/2-	*	$=_{C}(2970)$ = (2055)	1/2.	***	326(0330) =		*	
N(2120)	3/2-	***	$\Delta(2950)$	15/2+	**	$\Sigma(2110)$	1/2-	*	= (2000)		***	326(0340)		*	
N(2190)	7/2-	****	_()	,-		$\Sigma(2230)$	3/2+	*	$=_{C}(3080)$		*	12b(0350)			
N(2220)	9/2+	****	Λ	1/2+	****	$\Sigma(2250)$	-/ -	**	$=_{C(3123)}$	1 /0+	***	D (4212)+		*	
N(2250)	9/2-	****	/(1380)	1/2-	xok	$\Sigma(2455)$		*	12°	1/2 '	444	$P_{C}(4312)^{+}$		*	
N(2300)	1/2+	**	/(1405)	1/2-	****	$\Sigma(2620)$		*	32 _c (2770)°	3/2 '	***	$P_{C}(4300)^{+}$		*	
N(2570)	5/2-	**	A(1520)	3/2-	****	$\Sigma(3000)$		*	12 _c (3000)°		***	$P_{C}(4440)^{+}$		*	
N(2600)	11/2-	***	/(1600)	1/2+	****	$\Sigma(3170)$		*	$12_{c}(3050)^{\circ}$		***	$P_{c}(4457)^{+}$			
N(2700)	13/2	+ **	A(1670)	1/2-	****	2(01:0)			$\Omega_{c}(3065)^{\circ}$		***				
11(2100)	10/2		A(1690)	3/2-	****	=0	$1/2^{+}$	****	12 _c (3090) ^o		***				
			A(1710)	1/2+	*	=-	1/2+	****	$\Omega_{c}(3120)^{\circ}$		***				
			/(1800)	1/2-	***	=(1530)	3/2+	****	-+		÷				
			A(1810)	1/2+	***	=(1620)	0, -	*	=		· · · ·				
			/(1820)	5/2+	****	=(1690)		***	$=_{cc}^{++}$		***				
			A(1830)	5/2-	****	=(1820)	3/2-	***							
			/(1890)	3/2+	****	=(1020)	5/2	***							
			A(2000)	1/2-	*	=(2030)	> 5?	***							
			A(2050)	3/2-	*	=(2000)	- 2	*							
			A(2070)	3/2+	*	=(2120) =(2250)		**							
			A(2080)	5/2-	*	=(2230) =(2270)		**							
			A(2085)	7/2+	**	=(2570) =(2500)		*							
			/(2100)	7/2-	****	_(2300)									
			A(2110)	5/2+	**	0-	3/2+	****							
			A(2325)	3/2-	*	0(201)	5/2								•
			A(2350)	9/2+	**	0(225								1=	•
			A(2585)	5/2	*	0(238	/ X			•	1 ~	.17	n	大戸	ĩ l
			71(2000)			0(247	7 🔪					' /	U	ΤΞ	
						32(271)		-	-			_	-		-
						1			I			1			1

導入:ハドロン物理とフェムトスコピー

安定な「不安定な

LIGHT UNFLAVORED			STRAM	GE	CHARMED,	STRANGE	cc continued		
(S = C)	= B = 0)	GL PC	$(S = \pm 1, C =$	= B = 0)	$(C = \pm 1, (\perp possibly p))$	$S = \pm 1$) $\gamma_{D_{\alpha}} a \overline{a} \text{ states}$)		$P(\mathcal{P}^{\mathbb{C}})$	
$P(f^{c})$		P(J C)		()	(⊤ possibly n	I(P)	 ψ₂(3823) 	0-(2)	
• π^{\pm} 1 ⁻ (0 ⁻)	• π ₂ (1670)	$1^{-}(2^{-+})$	• K [±]	1/2(0 ⁻)	. D [±]	0(0=)	 ψ₃(3842) 	$0^{-}(3^{-})$	
• π^0 1 ⁻ (0 ⁻ +)	 φ(1680) (#680) 	$0^{-}(1^{-})$	• K ⁰	1/2(0-)	• D _S	0(0)	$\chi_{c0}(3860)$	$0^{+}(0^{+})$	
• η 0'(0')	 ρ₃(1690) (1700) 	$1^+(3^-)$	• KS	1/2(0)	• D _s D = (0017)		• $\chi_{c1}(3872)$	1+(1+-)	
• $f_0(500)$ 0 (0 + +)	• ρ(1700)	$1^{-}(1^{-})$	• KY	1/2(0)	• D _{s0} (2317)	0(0)	• 2 _c (3900)	$a^{+}(a^{+}+)$	
• $\rho(110)$ 1 (1) • $\omega(792)$ 0 – (1 – –)	• <u>a2(1700)</u> • <u>6(1710)</u>	$1(2 \cdot \cdot)$	• K ₀ (700)	1/2(0 ')	 D₅₁(2400) D₂(2526) 	0(1+)	• X = (3930)	$0^{+}(2^{+}+)$	
$n'(958) 0^+(0^-+)$	×(1750)	7-(1)	• K (892)	$\frac{1}{2(1+)}$	 D_{S1}(2500) D[*] (2573) 	0(2+)	X(3940)	7?(7??)	
• $f_{0}(980) = 0^{+}(0^{+}+)$	n(1760)	0+(0-+)	• K1(1270)	$\frac{1}{2(1^+)}$	$D_{52}(2513)$	+ 0(0=)	• X(4020) [±]	$1^{+}(?^{?}-)$	
• $a_0(980)$ 1 ⁻ (0 ⁺⁺)	 π(1800) 	$1^{-}(0^{-}+)$	• K*(1410)	$\frac{1}{2(1-)}$	• D ₋₁ (2700)	⊧ 0(1−)	 ψ(4040) 	$0^{-}(1^{-})$	
• $\phi(1020) = 0^{-}(1^{-})$	£(1810)	$0^{+}(2^{+}+)$	• Ka(1430)	$1/2(0^+)$	D= (2860)	⊧ 0(1=)	X(4050)±	$1^{-}(?^{?+})$	
• h1(1170) 0-(1+-)	X(1835)	??(<u>)</u> - +)	• K_{a}(1430)	$1/2(2^+)$	• D=(2860)	± 0(3)	X(4055) [±]	$1^{+}(??^{-})$	
• b1(1235) 1+(1+-)	 φ₃(1850) 	0-(3)	• K(1460)	1/2(0-)	X ₀ (2900)	?(0+)	$X(4100)^{\pm}$	$1^{-}(?'')$	
• $a_1(1260) = 1^-(1^{++})$	 η₂(1870) 	0+(2 - +)	K ₂ (1580)	1/2(2-)	X1(2900)	?(1-)	• χ _{c1} (4140)	$0^{+}(1^{++})$	
• $f_2(1270) = 0^+(2^{++})$	 π₂(1880) 	1-(2-+)	K(1630)	1/2(??)	DsJ(3040)	± 0(??)	 ψ(4160) 	$0^{-}(1^{-})$	
• $f_1(1285) = 0^+(1^{++})$	$\rho(1900)$	1+(1)	• K1(1650)	1/2(1+)	DOT	T-04.4	X(4160)	?:(?::)	
• η(1295) 0 ⁺ (0 ⁻ +)	$f_2(1910)$	$0^+(2^++)$	• K*(1680)	$1/2(1^{-})$	BOT (8-	+1)	$Z_{c}(4200)$	$1^{(1+-)}$	
• \(\pi(1300) 1^-(0^-+))	$a_0(1950)$	$1^{-}(0^{++})$	• K ₂ (1770)	1/2(2-)	(D =	1/2(0=)	• \$\phi(4230) P. (4240)	1+(0)	
• $a_2(1320) = 1 + (2^{++})$	• t ₂ (1950)	1 = (a + +)	• $K_3^*(1780)$	1/2(3-)	• B ⁻	$1/2(0^{-})$	$K_{C0}(4240)$	$1^{-}(0^{+})$	
$\bullet_{10}(1370)$ $0^{-1}(0^{-1})$	• 44(1970)	1 + (2)	• $K_2(1820)$	1/2(2-)	 B[±]/B⁰ ΔΓ 		A(4230)	0+(1++)	
$v_1(1405)$ $0^+(0^-+)$	p3(1990)	$1^{-}(3^{-}+)$	K(1830)	1/2(0)	• B± /B ⁰ /B ⁰	/h-hanon	X(A350)	$0^{+}(2^{?+})$	
• $h(1415) = 0^{-}(1^{+}-)$	fs(2000)	$0^{+}(2^{+}+)$	K ₀ (1950)	1/2(0+)	ADMIXTU	RE	• ± (4360)	$0^{-}(1^{-})$	
• $f_1(1420) = 0^+(1^{++})$	£(2020)	$0^{+}(0^{+}+)$	• K ₂ (1980)	1/2(2+)	V _{cb} and V _u	6 CKM Ma-	• \u03cb(4415)	$0^{-}(1^{-}-1)$	
• $\omega(1420) 0^{-}(1^{-})$	• fa(2050)	$0^{+}(4^{+}+)$	• K ₄ (2045)	1/2(4 ')	trix Elemen	$\frac{1}{2}(1^{-})$	• Z _c (4430)	$1^{+}(1^{+})$	
$f_{0}(1430) = 0^{+}(2^{+}+)$	$\pi_2(2100)$	$1^{-}(2^{-}+)$	K ₂ (2250)	1/2(2)	• B ₁ (5721)	$\frac{1}{2}(1^{+})$	$\chi_{c0}(4500)$	$0^{+}(0^{+}+)$	
• a ₀ (1450) 1 ⁻ (0 ⁺⁺)	f ₀ (2100)	$0^{+}(0^{+}+)$	K*(2220)	1/2(5)	B*(5732)	7(??)	X(4630)	0+(??+)	
 ρ(1450) 1⁺(1) 	$f_2(2150)$	$0^{+}(2^{++})$	K (2500)	$\frac{1}{2}(3)$	 B[*]₂(5747) 	$1/2(2^+)$	 ψ(4660) 	0-(1)	
• η(1475) 0 ⁺ (0 ⁻⁺)	ρ (2150)	1+(1)	K(3100)	7?(7??)	B1(5840)	$1/2(?^{?})$	$\chi_{c1}(4685)$	$0^+(1^{++})$	
• $f_0(1500) = 0^+(0^{++})$	 φ(2170) 	0-(1)	/(3100)	: (;)	• B ₁ (5970)	$1/2(?^{?})$	$\chi_{c0}(4700)$	$0^{+}(0^{++})$	
$f_1(1510) 0^+(1^{++})$	f ₀ (2200)	$0^+(0^{++})$	CHARM	1ED	DOTTOM	CTDANCE	Ь	5	
• $f'_2(1525) = 0^+(2^++)$	tj(2220)	$0^+(2^++)$	(C = ±	1)	BOTTOM,	$S = \pm 1$	(+ possibly no	, xn-qq states)	
$f_2(1565) = 0^+(2^{-1})$	(2225)	ar 4 + +)	• D [±]	1/2(0-)		0(0=)	• ns(15)	0+(0-+)	
$\rho(1570) = 1^{-1}(1^{-1})$	η(2225) (2250)	1+(2)	• D ⁵	1/2(0-)	• D _S	0(0)	• T(15)	$0^{-}(1^{-})$	
$m_1(1595) = 0 = (1 - +)$	p3(22.30)	$0^+(2^++)$	• D*(2007) ⁰	1/2(1-)		2(22)	• Yto(1P)	0+(0+1)	
$a_1(1000) = 1^{-}(1^{+}+)$	$f_2(2300)$	$0^{+}(4^{+})$	• D*(2010)-	1/2(1) $1/2(0^{\pm})$	A (5900)	$O(1^{\pm})$	• $\chi_{b1}(1P)$	$0^{+}(1^{+}+)$	
$f_6(1640) = 0^+(2^++)$	fa(2330)	$0^{+}(0^{+}+)$	• D ₀ (2500)	$\frac{1}{2(0^{+})}$	 B[*] (5840)⁽¹ 	0(2+)	• $h_b(1P)$	$0^{-(1+-)}$	
• $\eta_2(1645) = 0^+(2^{-+})$	• f5(2340)	$0^{+}(2^{+}+)$	• D ₁ (2420)	$\frac{1}{2(1^+)}$	B* (5850)	7(7?)	 χ_{b2}(1P) 	$0^{+}(2^{+}+)$	
• ω(1650)	ρ ₅ (2350)	1+(5)	• D:(2460)	$1/2(1^{+})$ $1/2(2^{+})$	B. (6063)	0(?)	$\eta_b(2S)$	0+(0 - +)	
• ω ₃ (167 ²)	X(2370)	??(???)	Db(2550)0	1/2(0-)	B. (6114)	0(??)	 <i>γ</i>(25) 	0-(1)	
	2510)	0+(6++)	D*(2600)0	1/2(1-)			• $\Upsilon_2(1D)$	0 (2)	
			D*(2640)±	1/2(??)	BOTTOM,		 <i>χ</i>_{b0}(2P) 	$0^+(0^{++})$	
			$D_2(2740)^0$	1/2(2-)	(0=0		• χ _{b1} (2P)	$0^{+}(1^{+}^{+})$	
			 D[*]₃(2750) 	1/2(3-)	• B ⁺ _C	0(0)	• n _b (2P)	$0^+(2^++)$	
			$D_1^*(2760)^0$	1/2(1-)	• $B_c(25)^{\perp}$	0(0)	· 2(35)	$0^{-}(1^{-})$	
			D(3000) ⁰	1/2(??)	Ċ	6	• YM(3P)	$0^+(1^++)$	
					(+ possibly no	on-qq states)	• XID(3P)	$0^+(2^++)$	
					 η_c(1S) 	$0^{+}(0^{-}+)$	• T(45)	0-(1)	
			I		 J/ψ(1S) 	0-(1)	• Z _b (10610)	$1^+(1^+)$	
					$_{0}(1P)$	0+(0++)	• Z _b (10650)	$1^+(1^+)$	
				1=	(1P)	$0^+(1^+)$	<i>î</i> (10753)	?!(1)	
		/~/) T [기지부	(1P)	$0^{-}(1^{+-})$	 <i>↑</i>(10860) 	0-(1)	
			2 I U	773	$_{2}(1P)$	$0^+(2^++)$	• γ(11020)	0-(1)	
· · ·	-	_			25)	$0^{-}(1^{-})$	OTH	IFR	

ほとんどのハドロンは不安定:ハドロン散乱中の共鳴状態

導入:ハドロン物理とフェムトスコピー

散乱実験とフェムトスコピー

従来の方法:散乱実験

Y. Ikeda, T. Hyodo, W. Weise, PLB 706, 63 (2011)

- 統計精度が良くない(低エネルギー)
- 限られた系:*NN*, *ΛN*, *πN*, *KN*, *KN*, ····
- ヘビー (c, b) ハドロン: ほぼ不可能
- フェムトスコピー:相関関数 ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020)
- 高い<mark>精度(</mark>*k*⁰n カスプが見える)
- 様々な系:ΛΛ, ΝΞ, ΝΩ, *φN*, *K*Λ, *DN*, …
- <mark>ヘビーハドロン</mark>:可能!







- 定義

$$C(q) = \frac{N_{K^-p}(p_{K^-}, p_p)}{N_{K^-}(p_{K^-})N_p(p_p)}$$
 (相互作用/量子統計が無ければ = 1)

- 理論:Koonin-Pratt 公式

S.E. Koonin PLB 70, 43 (1977); S. Pratt, PRD 33, 1314 (1986) $C(q) \simeq \int d^3 r S(r) |\Psi_q^{(-)}(r)|^2$

ソース関数 <u>S(r)</u>(放出源)<—> 波動関数 Ψ^(–)(r)(相互作用)

導入:ハドロン物理とフェムトスコピー

波動関数の振る舞いと相関関数



相関の定性的な振る舞いは相互作用の性質を反映

^{導入:ハドロン物理とフェムトスコピー} 強い引力で束縛状態がある場合相関関数



束縛状態がある場合は相関の振る舞いがソースサイズ依存

導入:ハドロン物理とフェムトスコピー

チャームセクターの実験データ

観測されたチャームを含む相関関数:DN, Dπ, DK

ALICE collaboration, PRD 106, 052010 (2022);

Talk by F. Grosa @ Quark Matter 2022



チャーム系で散乱データを得る唯一の方法(統計はまだ低い)



🗳 導入:ハドロン物理とフェムトスコピー
🗳 ハドロン相関関数とエキゾチックハドロン
- K ⁻ p 相関と A(1405)
<u>Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020)</u>
- DD* / DD̄* 相関と T _{cc} / X(3872)
<u>Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022)</u>
🗳 ハドロン・原子核相関関数とハイパー核物理
- Λα 相関と核媒質中の Λ
A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation
◎ まとめ

A(1405) と *KN* 散乱

∧(1405) は標準的な描像で記述できない ―> エキゾチック候補

N. Isgur and G. Karl, PRD18, 4187 (1978)



チャンネル結合散乱での共鳴状態

- MB状態との結合:カイラルSU(3)動力学

永江知文、兵藤哲雄「K中間子原子核の物理」(共立出版)





*Ē***N 閾値**

 $\Lambda(1405)$

 $\pi\Sigma$ 閾値

ネルギ

 $\Lambda(1405) \ 1/2^{-1}$

A(1380) 1/2⁻⁻



PDGの2020年の更新

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

Z.H. Guo, J.A. Oller, PRC87, 035202 (2013); × M. Mai, U.G. Meißner, EPJA51, 30 (2015) ■ ○

- Particle Listing section:

Citation: P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020)

Citation: P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020)

new

 $J^P = \frac{1}{2}^{-1}$

$$(J^P) = 0(\frac{1}{2}^-)$$
 Status: ****



Re z [MeV]

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

- "A(1405)"の極は1405 MeVではなく~1420 MeVに位置する

Status: **

- Lower pole : 新しい two-star 共鳴 A(1380)



K⁻p 散乱の全断面積

<u>Y. Ikeda, T. Hyodo, W. Weise, PLB 706, 63 (2011)</u>

- 古い泡箱のデータ
- 統計精度、解像度が良くない
- <u>K⁰n</u> 閾値カスプは見えない



$K^{-}p$ 相関関数

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020)

- 高い**精度(***k*⁰*n* カスプが見える)
- <u>k⁰n 閾値下のエネルギーでのデータ</u>

-> A(1405)の理論に関する重要な制限





s波Schrödinger方程式



 $\begin{pmatrix} \chi_{K^-p}(r) \\ \chi_{\bar{K}^0n}(r) \\ \vdots \end{pmatrix} \propto \begin{pmatrix} \#e^{-iqr} + \#e^{iqr} \\ \#e^{-iq_2r} + \#e^{iq_2r} \\ \vdots \end{bmatrix}$ 内向き + 外向き

- $\bar{K}^0 n, \pi^+ \Sigma^-, \pi^0 \Sigma^0, \pi^- \Sigma^+, \pi^0 \Lambda$ からの遷移が $\chi_i(r) i \neq K^- p$ に含まれる



チャンネル結合と相関関数

チャンネル結合Koonin-Pratt公式

R. Lednicky, V.V. Lyuboshitz, V.L.Lyuboshitz, Phys. Atom. Nucl. 61, 2950 (1998); J. Haidenbauer, NPA 981, 1 (2019);

Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020)

$$C_{K^{-p}}(\boldsymbol{q}) \simeq \int d^3 \boldsymbol{r} \, S_{K^{-p}}(\boldsymbol{r}) \left| \Psi_{K^{-p},\boldsymbol{q}}^{(-)}(\boldsymbol{r}) \right|^2 + \sum_{i \neq K^{-p}} \omega_i \int d^3 \boldsymbol{r} \, S_i(\boldsymbol{r}) \left| \Psi_{i,\boldsymbol{q}}^{(-)}(\boldsymbol{r}) \right|^2$$

家(n, \pi^+ \Sigma^-, \pi^0 \Sigma^0, \pi^- \Sigma^+, \pi^0 \Lambda \Delta \Bogo B

- ω_i : *K*⁻*p* に対するチャンネル *i* の重み



チャンネル結合効果は小さいソースで顕著

カイラルSU(3)動力学による相関関数

波動関数 $\Psi_{i,q}^{(-)}(\mathbf{r})$: チャンネル結合京都 $\bar{R}N$ - $\pi\Sigma$ - $\pi\Lambda$ ポテンシャル

K. Miyahara, T. Hyodo, W. Weise, PRC98, 025201 (2018)

- ソース関数 S(r): ガウシアン, R ~ 1 fm <-- K⁺p データ
- 重み $\omega_{\pi\Sigma} \sim 2$:統計模型による見積もり



Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020)

ALICEの相関関数データをよく再現する





サイズ Rの大きいソースで相関が抑制 <-- 理論の予言

ソースサイズ依存性の体系的な研究

pp, p-Pb, Pb-Pb衝突での相関関数

ALICE collaboration, EPJC 83, 340 (2023)

$$C_{K^{-p}}(\boldsymbol{q}) \simeq \int d^3 \boldsymbol{r} \, S_{K^{-p}}(\boldsymbol{r}) \, |\Psi_{K^{-p},\boldsymbol{q}}^{(-)}(\boldsymbol{r})|^2 + \sum_{i \neq K^{-p}} \omega_i \int d^3 \boldsymbol{r} \, S_i(\boldsymbol{r}) \, |\Psi_{i,\boldsymbol{q}}^{(-)}(\boldsymbol{r})|^2$$



*k*⁰*n* チャンネルの強度を増加させる必要がある



🍑 導入:ハドロン物理とフェムトスコピー ↓ バドロン相関関数とエキゾチックハドロン - K⁻p相関と A(1405) Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020) - DD* / DD* 相関と T_{cc} / X(3872) Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022) 🎽 ハドロン・原子核相関関数とハイパー核物理 - Λα 相関と核媒質中の Λ A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation まとめ



 $D^0D^0\pi^+$ スペクトル中で T_{cc} が観測される

LHCb collaboration, Nature Phys., 18, 751 (2022); Nature Comm., 13, 3351 (2022)

field/(200 keV/ c^2

3.874

3.89

 $m_{{\rm D}^0{\rm D}^0\pi^+}$

3.876

 $[\text{GeV}/c^{2}]$

3.9 [GeV/ c^2]

2.2

LHCb

 $9\,{\rm fb}^{-1}$

3.88

Data

 $T_{cc}^+ \rightarrow D^0 D^0 \pi^+$

 $D^{*+}D^0$ threshold

D^{*0}D⁺ threshold

 $m_{\mathrm{D}^0\mathrm{D}^0\pi^+}$

Background Total

- DD* 閾値近傍にピーク
- $Fr \Delta C = +2 : \sim cc\bar{u}\bar{d}$

- 準位構造

 $\begin{array}{c} \text{Yield}/(500\,\text{keV}/c^2) \\ \textbf{0} \\ \textbf{$ エネルギー (MeV) 30 20 $D^+D^{*0}(3876.51)$ 10 $D^0 D^{*+}(3875.10)$ 3875 T_{cc} 3.87 $D^0 D^+ \pi^0 (3869.45)$ 3870 $D^0 D^0 \pi^+ (3869.25)$

- 非常に小さい(few MeV ~ keV)エネルギースケールを含む

DD*/DD
^{*}相関と T_{cc}/X(3872)



23



チャームを含むハドロン相関の初めての観測

ALICE collaboration, PRD 106, 052010 (2022)



エキゾチック量子数を持つ束縛状態 D⁻p ~ cduud を示唆?
チャームを含むハドロン相関は観測可能

DD*/DD * ポテンシャル

チャンネル結合ポテンシャル

$$V_{DD^*/D\bar{D}^*} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} V_{I=1} + V_{I=0} & V_{I=1} - V_{I=0} \\ V_{I=1} - V_{I=0} & V_{I=1} + V_{I=0} + V_c \end{pmatrix} \frac{D^0 D^{*+} / \{D^0 \bar{D}^{*0}\}}{D^+ D^{*0} / \{D^+ D^{*-}\}}$$

$$\uparrow \{D^+ D^{*-}\} \ \mathsf{List} \ \mathsf$$

- I = 0: 1レンジガウス型ポテンシャル、I = 1 は無視 $V_{I=0} = V_0 \exp\{-m_{\pi}^2 r^2\}, V_{I=1} = 0$ $\uparrow \pi$ 交換に基づくレンジ

 $V_0 \in \mathbb{C} < -$ 散乱長 (ハドロン分子描像)

- T_{cc} : $a_0^{D^0 D^{*+}} = -7.16 + i1.85$ fm :LHCbの解析

LHCb collaboration, Nature Comm., 13, 3351 (2022)

- X(3872): $a_0^{D^0 \bar{D}^{*0}} = -4.23 + i3.95 \text{ fm} (a_0 = -i/\sqrt{2\mu E_h} < -\text{PDGO} E_h)_{25}$

*DD** ~ *T_{cc}* チャンネル

D^0D^{*+} 、 D^+D^{*0} 相関関数 ($cc\bar{u}\bar{d}$ エキゾチックチャンネル)

Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022)



- 両方のチャンネルで束縛状態の性質(ソースサイズ依存性)
- *D*⁰*D*^{*+}で強いシグナル、*D*⁺*D*^{*0} 相関は比較的小さいシグナル
- *D*⁰*D*^{*+} 相関中に弱い *D*⁺*D*^{*0} 閾値カスプ (*q* ~ 52 MeV)

<u>DD</u>* ~ X(3872) チャンネル

$D^{0}\bar{D}^{*0}$ 、 $D^{+}\bar{D}^{*-}$ 相関関数 ($c\bar{c}q\bar{q}$ チャンネル)

Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022)



- *D*⁰*D*^{*0} 相関に束縛状態の性質
- D⁰D^{*0} 相関中に強い D⁺D^{*-} 閾値カスプ (q~126 MeV)
- *D*+*D*^{*-} 相関:クーロン引力が支配的



🍑 導入:ハドロン物理とフェムトスコピー 🍑 ハドロン相関関数とエキゾチックハドロン - K⁻p相関と A(1405) Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020) - DD* / DD* 相関と T_{cc} / X(3872) Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022) ハドロン・原子核相関関数とハイパー核物理 - Λα 相関と核媒質中の Λ A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation まとめ





中性子星中のハイペロンパズル

- 高密度で ANN 3体力による斥力

D. Gerstung, N. Kaiser, W. Weise, EPJA 55, 175 (2020)

実験で検証する方法は? - 重イオン衝突での **A directed flow**

Y. Nara, A. Jinno, K. Murase, A. Ohnishi, PRC 106, 044902 (2022)

∧-原子核の相関関数で検証できないか?

- 重い原子核は生成が困難
- *α* の強い束縛 —> 高い中心密度 ≥ 2ρ₀

高密度での斥力効果を Λα 相関関数で検証する可能性





Λα ポテンシャル

- ∧ ハイパー核のSkyrme-Hartree Fockポテンシャル
 - LY4:現象論的なポテンシャル

D.E. Lanskoy, Y. Yamamoto, PRC 55, 2330 (1997)

- Chi3:_{ANN} 3体力を含むカイラルEFTに基づくポテンシャル

A. Jinno, K. Murase, Y. Nara, A. Ohnishi, arXiv:2306.17452 [nucl-th]

- どちらも C から Pb までのハイパー核データを再現する



- Chi3:中心で斥力的







相関関数の結果





- 束縛状態の性質(小さい q でdip)
- 高密度での斥力の効果: R = 3 fm ではほとんど見えない
- R = 1 fm で少し相関を強める



🧉 高エネルギー衝突実験での相関関数はエキゾチッ クハドロン・原子核の相互作用の研究に有用 - A(1405) と KN 相互作用の精密な検証 Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020) - (準) 束縛状態 T_{cc} / X(3872) の性質を反映 <u>Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022)</u> $\Lambda \alpha$ 相関 - ハイパー核物理への展望 A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation