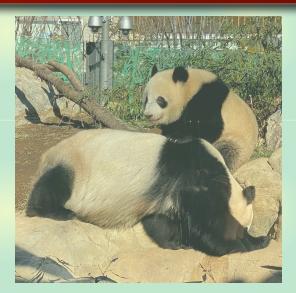
フェムトスコピーによる ハドロン間相互作用の研究







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/

		-							1			1		
p	-/	***	∆(1232)	3/2+	****	Σ^+	$1/2^{+}$	****	<u>=</u> 0	$1/2^{+}$	****	\equiv_{cc}^{++}		***
n	-/	***	$\Delta(1600)$	3/2+	****	Σ^0	$1/2^{+}$	****	Ξ-	$1/2^{+}$	****			
N(1440)		***	<i>∆</i> (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	***	⊿(1750)	$1/2^{+}$	*	Σ(1580)	3/2-	*	$\Xi(1690)$		***	$\Lambda_b(5920)^0$	3/2-	***
N(1650)	1/2 **	***	<i>∆</i> (1900)	$1/2^{-}$	***	Σ(1620)	$1/2^{-}$	*	$\Xi(1820)$	$3/2^{-}$	***	$\Lambda_b(6146)^0$	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)	$1/2^{+}$	****	Σ(1670)	$3/2^{-}$	****	$\Xi(2030)$	$\geq \frac{5}{2}$?	***	Σ _b	$1/2^{+}$	***
N(1700)	3/2- **	**	<i>∆</i> (1920)	3/2+	***	Σ(1750)	$1/2^{-}$	***	$\Xi(2120)$	-	*	Σ_{b}^{*}	3/2+	***
N(1710)	1/2+ **	***	$\Delta(1930)$	5/2-	***	Σ(1775)	5/2-	****	Ξ(2250)		**	$\Sigma_{b}(6097)^{+}$		***
N(1720)		***	<i>∆</i> (1940)	3/2-	**	Σ(1780)	3/2+	*	Ξ(2370)		**	$\Sigma_{b}(6097)^{-}$		***
N(1860)	5/2+ **	k ($\Delta(1950)$	7/2+	****	Σ(1880)	$1/2^{+}$	**	$\Xi(2500)$		*	Ξ_{b}^{0}, Ξ_{b}^{-}	$1/2^{+}$	***
N(1875)	3/2- **	**	<i>∆</i> (2000)	5/2+	**	Σ(1900)	$1/2^{-}$	**				$\Xi'_{h}(5935)^{-}$	$1/2^{+}$	***
N(1880)	1/2+ **	**	<i>∆</i> (2150)	$1/2^{-}$	*	Σ(1910)	$3/2^{-}$	***	Ω^{-}	$3/2^{+}$	****	$\Xi_{b}(5945)^{0}$	3/2+	***
N(1895)	1/2 **	***	$\Delta(2200)$	7/2-	***	Σ(1915)	5/2+	****	$\Omega(2012)^{-}$?-	***	$\Xi_{b}(5955)^{-}$	3/2+	***
N(1900)	3/2+ **	***	$\Delta(2300)$	9/2+	**	Σ(1940)	3/2+	*	$\Omega(2250)^{-}$		***	$\Xi_{b}(6227)$	'	***
N(1990)	7/2+ **	k ($\Delta(2350)$	5/2-	*	$\Sigma(2010)$	3/2-	*	$\Omega(2380)^{-}$		**	Ω_{h}^{-}	$1/2^{+}$	***
N(2000)	5/2+ **	k ($\Delta(2390)$	7/2+	*	$\Sigma(2030)$	7/2+	****	$\Omega(2470)^{-}$		**	D	-, -	
N(2040)	3/2+ *		$\Delta(2400)$	9/2-	**	Σ(2070)	5/2+	*	. ,			$P_{c}(4312)^{+}$		*
N(2060)	5/2- **	**	$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****	Σ(2080)	3/2+	*	Λ_c^+	$1/2^{+}$	****	$P_{c}(4380)^{+}$		*
N(2100)	1/2+ **	**	$\Delta(2750)$	$13/2^{-}$	**	$\Sigma(2100)$	7/2-	*	$\Lambda_{c}(2595)^{+}$	$1/2^{-}$	***	$P_{c}(4440)^{+}$		*
N(2120)	3/2- **	**	$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**	$\Sigma(2160)$	$1/2^{-}$	*	$\Lambda_{c}(2625)^{+}$	3/2-	***	$P_{c}(4457)^{+}$		*
N(2190)		***	. ,			Σ(2230)	3/2+	*	$\Lambda_{c}(2765)^{+}$		*	,		
N(2220)		***	Λ	$1/2^{+}$	****	Σ(2250)	<i>'</i>	***	$\Lambda_{c}(2860)^{+}$	$3/2^{+}$	***			
N(2250)		***	Λ	$1/2^{-}$	**	Σ(2455)		**	$\Lambda_{c}(2880)^{+}$		***			
N(2300)	1/2+ **	k	A(1405)	$1/2^{-}$	****	Σ(2620)		**	$\Lambda_{c}(2940)^{+}$	3/2-	***			
N(2570)	5/2- **	k (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+ **	k (A(1670)	$1/2^{-}$	****	. ,			$\Sigma_{c}(2800)$		***			
. ,	,		A(1690)	3/2-	****				Ξ_c^+	$1/2^{+}$	***			
			A(1710)	$1/2^{+}$	*				ΞŎ	$1/2^{+}$	****			
			A(1800)	$1/2^{-}$	***					$1/2^{+}$	***			
			A(1810)	$1/2^{+}$					=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)	$1/2^{-}$	*				$\Xi_c(2930)$	5/2				
			A(2050)	3/2-	*				$\Xi_c(2970)$					
			A(2070)	3/2+	*				$\Xi_c(3055)$					
			A(2080)	5/2-	*				$\Xi_c(3080)$					
			A(2085)	7/2+	**				$\Xi_c(3123)$		*			
			A(2100)	$7/2^{-}$	****					$1/2^{+}$	***			
			A(2110)	5/2+	***				Ω_{c}^{0}	2/2+	***			
			A(2325)	3/2-	*			_						
			A(2350)	9/2+	***		11			i 💊 i		4 0	2	
			A(2585)		**		/ \	•	ノオ			J I h		┣
			. ,			▲	-				-			
									142(3120)~					

		FLAVORED = $B = 0$)		STRA (S = ±1, C		CHARMED,		c₹ cor	tinued $F(f^{C})$
	$P(P^C)$		$f^{c}(f^{PC})$	(5 - ±3,6	1(P)	(0 - 5	(P)	 ψ(3770) 	0-(1)
• π^{\pm} • π^{0}	$1^{-}(0^{-})$ $1^{-}(0^{-}+)$	• $\pi_2(1670)$	$1^{-}(2^{-+})$ $0^{-}(1^{})$	• K [±] • K ⁰	$1/2(0^{-})$ $1/2(0^{-})$	• D _S [±]	0(0) 0(? [?])	 ψ₂(3823) ψ₃(3842) 	$0^{-}(2^{-})^{-}(3^{-})^{-}$
• π• • η	$0^{+}(0^{-+})$	 φ(1680) ρ₃(1690) 	$1^{+}(3^{-})$	• K ⁰	$1/2(0^{-})$ $1/2(0^{-})$	 D_s^{*±} D_{s0}[*](2317)[±] 		• $\psi_3(3042)$ $\chi_{c0}(3860)$	
 f₀(500) 	$0^{+}(0^{++})$	 ρ(1700) 	1+(1)	• KŸ	1/2(0-)	 • D_{\$1}(2460)[±] 		• $\chi_{c1}(3872)$	0+(1++)
 ρ(770) 	1+(1)	• a ₂ (1700)	$1^{-}(2^{++})$	• K_0^*(700)	1/2(0+)	• D _{s1} (2536) [±]	0(1+)	• Z _c (3900)	$1^{+}(1^{+})$
 ω(782) η'(958) 	$0^{-}(1^{-})$ $0^{+}(0^{-})$	 f₀(1710) η(1760) 	$0^+(0^{++})$ $0^+(0^{-+})$	• K*(892)	$1/2(1^{-})$	• $D_{52}^{*}(2573)$	0(2+)	 X(3915) χ_C(3930) 	$0^+(0/2^{++})$ $0^+(2^{++})$
• f ₀ (980)	$0^{+}(0^{+}+)$	• $\pi(1700)$	$1^{-}(0^{-+})$	 K₁(1270) K₁(1400) 	$1/2(1^+)$ $1/2(1^+)$	 D[*]₅₁(2700)[±] D[*]₅₁(2960)[±] 		• <u>X(3940)</u> X(3940)	??(???)
• a ₀ (980)	1-(0++)	f2(1810)	$0^{+}(2^{+}+)$	• K*(1410)	$1/2(1^{-})$ $1/2(1^{-})$	$D_{S1}^{*}(2860)^{\pm}$ $D_{S3}^{*}(2860)^{\pm}$		• X(4020) [±]	$1^{+}(?'^{-})$
 φ(1020) 	0-(1)	X(1835)	? [?] (0 ⁻⁺)	 K[*]₀(1430) 	1/2(0+)	D _{s3} (2000) [±]		• \varphi(4040)	0-(1)
 h1(1170) h(1225) 	$0^{-}(1^{+})$ $1^{+}(1^{+})$	• $\phi_3(1850)$	$0^{-}(3^{-})$ $0^{+}(2^{-})$	• K ₂ *(1430)	1/2(2+)	BOTT		X(4050) [±] X(4055) [±]	$1^{-(?^{?+})}$ $1^{+(?^{?-})}$
 b1(1235) a1(1260) 	$1^{-}(1^{+})$	 η₂(1870) π₂(1880) 	$1^{-}(2^{-+})$	K(1460)	$1/2(0^{-})$	(B =		$X(4000)^{\pm}$	$1^{-}(??)$
 f₂(1270) 	$0^+(2^++)$	$\rho(1900)$	1+(1)	$K_2(1580)$ K(1630)	$\frac{1}{2(2^{-})}$ $\frac{1}{2(?^{?})}$	• B [±]	1/2(0-)	 χ_{c1}(4140) 	
• f ₁ (1285)	0+(1++)	f ₂ (1910)	0+(2++)	$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$	• B ⁰	$1/2(0^{-})$	• \(\phi(4160)	$0^{-}(1^{-})$
 η(1295) (1200) 	$0^{+}(0^{-+})$	$a_0(1950)$	$1^{-}(0^{++})$	• K*(1680)	$1/2(1^{-})$	 B[±]/B⁰ AD B[±]/B⁰ AD 		X(4160)	$\frac{1}{??(??)}$
 π(1300) ∂₂(1320) 	$1^{-}(0^{-+})$ $1^{-}(2^{++})$	 f₂(1950) a₄(1970) 	$0^+(2^{++})$ $1^-(4^{++})$	 K₂(1770) 	1/2(2-)	 B[±]/B⁰/B⁰_s ADMIXTUE 		$Z_c(4200)$ • $\psi(4230)$	$1^+(1^+)^-$ $0^-(1^-)^-$
• f ₀ (1370)	$0^{+}(0^{++})$	$\rho_3(1990)$	$1^{+}(3^{-})$	 K₃(1780) K₂(1820) 	$1/2(3^{-})$ $1/2(2^{-})$	V _{cb} and V _{ut}	, CKM Ma-	$R_{c0}(4240)$	
 π₁(1400) 	1-(1-+)	π ₂ (2005)	1-(2-+)	K(1830)	1/2(2)	trix ⊟emen • B*	ts 1/2(1)	X(4250)±	$1^{-}(?^{+})$
 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) a₁(1420) 	$0^{-}(1^{+})$ $1^{-}(1^{+})$	$f_0(2020)$ • $f_4(2050)$	$0^+(0^{++})$ $0^+(4^{++})$	$K_{2}^{*}(1980)$	1/2(2+)	• B ₁ (5721) ⁰	$1/2(1^+)$	• χ _{c1} (4274) X(4350)	$0^+(1^{++})$ $0^+(?^{?+})$
• $f_1(1420)$	$0^{+}(1^{++})$	$\pi_2(2100)$	$1^{-}(2^{-+})$	 K[*]₄(2045) 	1/2(4+)	$B_{j}^{*}(5732)$?(? [?])	 ψ(4360) 	$0^{-}(1^{-})$
 ω(1420) 	0-(1)	f ₀ (2100)	$0^{+}(0^{++})$	$K_2(2250)$ $K_3(2320)$	$\frac{1}{2(2^{-})}$ $\frac{1}{2(3^{+})}$	 B[*]₂(5747)⁺ B[*]₂(5747)⁰ 	1/2(2 ⁺) 1/2(2 ⁺)	$\psi(4390)$	0-(1)
f ₂ (1430)	0+(2++)	$f_2(2150)$	0+(2++)	K [*] ₅ (2380)	1/2(5)	$B_1(5840)^+$	$1/2(2^{\circ})$ $1/2(?^{\circ})$	 ψ(4415) 	0-(1)
 a₀(1450) a(1450) 	$1^{-}(0^{+}+)$ $1^{+}(1^{-}-)$	$\rho(2150)$	$1^+(1^-)$ $0^-(1^-)$	K4(2500)	$1/2(4^{-})$	B _J (5840) ⁰	$1/2(?^{?})$	 Z_c(4430) χ_{c0}(4500) 	$1^+(1^+)^-$ $0^+(0^+)^+$
 ρ(1450) η(1475) 	$0^{+}(0^{-}+)$	 φ(2170) f₀(2200) 	$0^{+}(0^{++})$	K(3100)	? [?] (? ^{??)}	• B _J (5970) ⁺	$1/2(?^{?})$	 <i>χ</i>_{c0}(4500) <i>ψ</i>(4660) 	$0^{-}(1^{-})$
 f₀(1500) 	0+(0++)	$f_{l}(2220)$	0+(2++)	CHARM	1ED	⁰ (5970)رB • B	1/2(??)	χ _{c0} (4700)	
f ₁ (1510)	0+(1++)		or 4 + +)	(C = =	=1)	BOTTOM,			Б
• f'_2(1525)		$\eta(2225)$	$0^+(0^{-+})$	• D [±]	$1/2(0^{-})$	$(B = \pm 1,$			ion-q q states)
$f_2(1565)$ $\rho(1570)$	$0^+(2^{++})$ $1^+(1^{})$	ρ ₃ (2250) • f ₂ (2300)	$1^+(3^{})$ $0^+(2^{++})$	• D ⁰ • D*(2007) ⁰	$1/2(0^{-})$	• B ⁰ _s	$0(0^{-})$	 η_b(15) 	0+(0 - +)
h1(1595)	$0^{-}(1^{+})$	$f_4(2300)$	$0^{+}(4^{++})$	• D*(2007) ^o • D*(2010) [±]	$1/2(1^{-})$ $1/2(1^{-})$	• B [*] _S X(5568) [±]	$0(1^{-})$?(? [?])	• T(15)	0-(1)
 π1(1600) 	$1^{-}(1^{-+})$	f ₀ (2330)	0+(0++)	 D[*]₀(2300)⁰ 	$1/2(0^+)$	• B _{s1} (5830) ⁰	0(1 ⁺)	• $\chi_{b0}(1P)$	0+(0++)
 a1(1640) 	$1^{-}(1^{++})$	 f₂(2340) 	$0^+(2^{++})$	$D_0^*(2300)^{\pm}$	1/2(0+)	 B[*]₅(5840)⁰ 	0(2+)	• $\chi_{b1}(1P)$	$0^+(1^{++})$ $0^-(1^{+-})$
f ₂ (1640) • η ₂ (1645)	otio++)	$\rho_5(2350)$ $f_6(2510)$	$1^{+}(5^{})$ $0^{+}(6^{++})$	 D₁(2420)⁰ 	$1/2(1^+)$	$B_{sJ}^{*}(5850)$?(? [?])	• $h_b(1P)$ • $\chi_{b2}(1P)$	$0^{+}(2^{++})$
• η2(104 • ω(16			. ,	$D_1(2420)^{\pm}$ $D_1(2430)^0$	$\frac{1/2(?^{?})}{1/2(1^{+})}$	BOTTOM, (HARMED	$\eta_b(25)$	0+(0-+)
• <i>w</i> 3			RLIGHT	• D ₁ (2450) ⁻	$1/2(1^{+})$ $1/2(2^{+})$	(B = C		 <i>Υ</i>(25) 	0-(1)
		her St	ates	 D²₂(2460)[±] 	1/2(2+)	• B_{c}^{+}	0(0^)	• $\Upsilon_2(1D)$	$0^{-}(2^{-})$ $0^{+}(0^{+})$
				D(2550) ⁰	$1/2(?^{?})$	$B_c(2S)^{\pm}$	0(0-)	• $\chi_{b0}(2P)$ • $\chi_{b1}(2P)$	$0^{+}(0^{+})^{+}$
				$D_{J}^{*}(2600)$	1/2(?')	Cl		$h_b(2P)$	$0^{-}(1^{+})$
				D*(2640) [±] D(2740) ⁰	$1/2(?^{?})$ $1/2(?^{?})$	(+ possibly no		• χ _{b2} (2P)	$0^{+}(2^{++})$
				$D_{3}^{(2740)}$	1/2(:) 1/2(3 ⁻)	• $\eta_c(1S)$	0+(0 - +)	• T(35)	$0^{-}(1^{})$
				D(3000) ⁰	1/2(??)	 J/ψ(1S) ν_m(1P) 	$0^{-}(1^{-})$ $0^{+}(0^{+})$	 χ_{b1}(3P) χ_{b2}(3P) 	$0^+(1^{++})$ $0^+(2^{++})$
		•		• • •		(1P)	$0^{+}(0^{+})^{+}$	 <i>χ</i>_{B2}(SF) <i>Υ</i>(4S) 	$0^{-}(1^{-})$
	1 1				17		$0^{-}(1^{+-})$	 Z_b(10610) 	$1^+(1^{+-})$
	K L			210	不由	$_{C2}(1P)$	0+(2++)	• Z _b (10650)	
	- 🥒				"]王	c(25)	$0^{+}(0^{-+})$	 <i>γ</i>(10753) <i>γ</i>(10860) 	$?^{?}(1^{})$ $0^{-}(1^{})$
		_		_	_	(25)	0-(1)	 <i>γ</i>(10860) <i>γ</i>(11020) 	
								. (- (-)

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) $\Delta(1910)$ 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⁺(?²) 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) $\Delta(2150)$ $\Sigma(1910)$ $3/2^{-}$ ΞÖ 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) $\Sigma(2230)$ $1/2(3^+$ $\Xi_{c}(3123)$ * a₁(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
\Tau_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-qq 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)

\(\frac{4}{5}\)

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

 $0^{+}(1)$

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

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

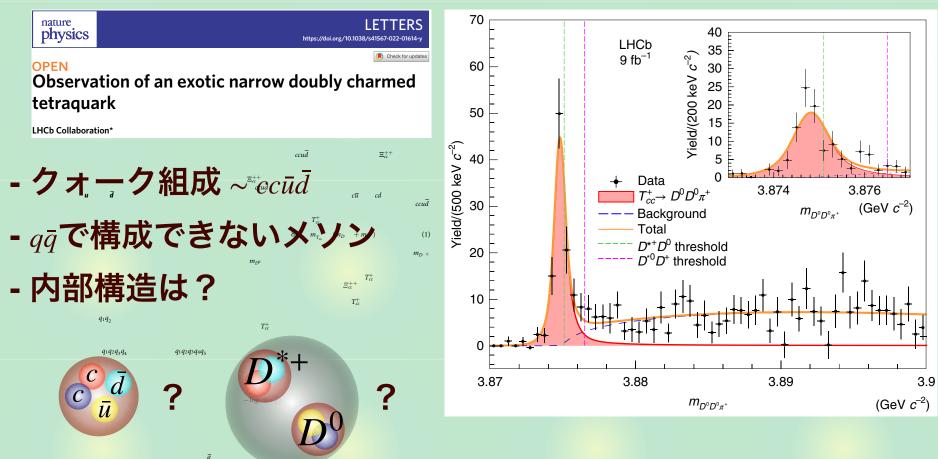
全ての~380種のハドロンはQCDから生じている

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?

なノ	1	ド		ン	•					
Σ^+ Σ^0	1/2+	****	Λ_c^+	1/2+	****	Λ_b^0	1/2+	***		Γ
Σ^0	1/2+	****	$\Lambda_{c}(2595)^{+}$	1/2 3/2	***	$\Lambda_b (5912)^0$ $\Lambda_b (5920)^0$	$1/2^{-}$	***		
Σ^{-}	$1/2^{+}$	****	$\Lambda_{c}(2625)^{+}$	3/2-	***	$\Lambda_b(5920)^0$	3/2-	***		

強い相互作用で不安定なハドロン

http://pdg.lbl.gov/

				T			•		
p 1/2 ⁺ ****	∆(1232) 3/2 ⁺ **	** Σ ⁺	1/2+ ****	Λ_c^+	$1/2^{+}$	****	Λ_{b}^{0}	1/2+ ***	
n 1/2 ⁺ ****	∆(1600) 3/2 ⁺ **	** Σ ⁰	1/2+ ****	$\Lambda_{c}(2595)^{+}$	1/2-	***	$\Lambda_{b}(5912)^{0}$	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-**	** Σ(1385)	3/2+ ****	$\Lambda_{c}(2765)^{+}$, i	*	$\Lambda_{b}(6146)^{0}$	3/2+ ***	
N(1535) 1/2- ****	△(1750) 1/2 ⁺ *	Σ(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- *	$\Lambda_{c}(2880)^{+}$		***	Σ_b	1/2+ ***	
N(1675) 5/2- ****	△(1905) 5/2+ **	** Σ(1660)	1/2+ ***	$\Lambda_{c}(2940)^{+}$	3/2-	***	Σ_{b}^{*}	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+ **	 Σ(1750) 		$\Sigma_{c}(2520)$	3/2+	***	$\Sigma_{b}(6097)^{-}$	***	
N(1710) 1/2 ⁺ ****	⊿(1930) 5/2 ⁻ **	* <i>Σ</i> (1775)	5/2- ****	$\Sigma_{c}(2800)$		***	Ξ_b^-	1/2+ ***	
N(1720) 3/2 ⁺ ****	△(1940) 3/2- **	Σ(1780)		Ξ_c^+	$1/2^{+}$	***	$=_{b}^{0}$	1/2+ ***	
N(1860) 5/2 ⁺ **	⊿(1950) 7/2 ⁺ **	** Σ(1880)	1/2+ **	= = = + c	$1/2^{+}$	****		1/2+ ***	
N(1875) 3/2 ⁻ ***	∠(2000) 5/2 ⁺ **	Σ(1900)	1/2- **	='+	$1/2^{+}$	***		3/2+ ***	
N(1880) 1/2 ⁺ ***	△(2150) 1/2 ⁻ *	Σ(1910)		=_0^	1/2+	***		3/2+ ***	
N(1895) 1/2 ****	⊿(2200) 7/2 ⁻ **	* Σ(1915)		$\Xi_{c}(2645)$	3/2+	***		3/2- ***	
N(1900) 3/2 ⁺ ****	⊿(2300) 9/2 ⁺ **	Σ(1940)		$\Xi_{c}(2790)$	$1/2^{-}$	***	$\Xi_b(6227)^-$	***	
N(1990) 7/2 ⁺ **	⊿(2350) 5/2 ⁻ *	Σ(2010)	3/2- *	$\Xi_{c}(2815)$	3/2-	***	$\Xi_b(6227)^0$	***	
N(2000) 5/2 ⁺ **	∠(2390) 7/2 ⁺ *	Σ(2030)	7/2+ ****	$\Xi_{c}(2923)$	2/2	**		1/2+ ***	
N(2040) 3/2 ⁺ *	⊿(2400) 9/2 ⁻ **	Σ(2070)		$\Xi_{c}(2930)$		**	$\Omega_{b}(6316)^{-}$	*	
N(2060) 5/2 ⁻ ***	△(2420) 11/2 ⁺ **	** Σ(2080)	3/2+ *	$\Xi_{c}(2970)$	$1/2^{+}$	***	$\Omega_{b}(6330)^{-1}$	*	
N(2100) 1/2 ⁺ ***	△(2750) 13/2-**	Σ(2100)	7/2- *	$\Xi_{c}(3055)$	-/-	***	$\Omega_{b}(6340)^{-1}$	*	
N(2120) 3/2 ⁻ ***	∠(2950) 15/2 ⁺ **	Σ(2110)		$\Xi_{c}(3080)$		***	$\Omega_{b}(6350)^{-1}$	*	
N(2190) 7/2 ⁻ ****		Σ(2230)	3/2+ *	$\Xi_{c}(3123)$		*	D(0000)		-
N(2220) 9/2 ⁺ ****		** Σ(2250)	**	Ω_{C}^{0}	$1/2^{+}$	***	$P_{c}(4312)^{+}$	*	
N(2250) 9/2 ****		Σ(2455)	*	$\Omega_{c}(2770)^{0}$		***	$P_{c}(4380)^{+}$	*	
N(2300) 1/2 ⁺ **	<i>I</i> (1405) 1/2 [−] **	- (-0-0)	*	$\Omega_{c}(3000)^{0}$	0, -	***	$P_{c}(4440)^{+}$	*	
N(2570) 5/2 ⁻ **	A(1520) 3/2 ⁻ **	2(3000)	*	$\Omega_{c}(3050)^{0}$		***	$P_{c}(4457)^{+}$	*	
N(2600) 11/2 ⁻ ***	A(1600) 1/2 ⁺ **	2(010)	*	$\Omega_{c}(3065)^{0}$		***	,		
N(2700) 13/2 ⁺ **	∧(1670) 1/2 ⁻ **			$\Omega_{c}(3090)^{0}$		***			
	∧(1690) 3/2 ⁻ **	_	1/2+ ****	$\Omega_{c}(3120)^{0}$		***			
	A(1710) 1/2 ⁺ *	<u> </u>	1/2+ ****						
	∧(1800) 1/2 ⁻ **	-(1000)		Ξ_{cc}^+		*			
	∧(1810) 1/2 ⁺ **	-(-0-0)		\equiv_{cc}^{cc}		***			
	A(1820) 5/2 ⁺ **	-(1050)		CC					
	A(1830) 5/2 ⁻ **	-(1020)							
	A(1890) 3/2 ⁺ **								
	A(2000) 1/2 ⁻ *	E(2030)	- 4						
	A(2050) 3/2 ⁻ *	Ξ(2120)							
	A(2070) 3/2 ⁺ *	Ξ(2250)							
	A(2080) 5/2 ⁻ *	Ξ(2370)							
	∧(2085) 7/2 ⁺ **		*						
	∧(2100) 7/2 ⁻ **		o contra services						
	A(2110) 5/2 ⁺ **		3/2+ ****	I					
	A(2325) 3/2 ⁻ *	Ω(201)	11 -				_		-
	A(2350) 9/2 ⁺ **	* Ω(225)			• 💊 -		-17	うせ	5
	A(2585) *	Ω(238	バリ				~ /	しれ生	
		Ω(2470		•					-
				1			1		1
L									-

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		STRANGE		CHARMED, STRANGE		cc continued		
		= B = 0)	C. PC.	(S = ±1, C		$(C = \pm 1,$			$P(P^{C})$
	$F(f^{C})$		$I^{G}(J^{PC})$		<i>l(J^P)</i>	(+ possibly no	I(f)	 ψ₂(3823) 	0-(2)
• π [±] • π ⁰	$1^{-}(0^{-})$ $1^{-}(0^{-}+)$	• π ₂ (1670)	$1^{-}(2^{-+})$	• K [±]	1/2(0 ⁻)	 <i>D</i>[±]_S 	0(0-)	 ψ₃(3842) (2000) 	$0^{-}(3^{-}))$ $0^{+}(0^{+})$
• π ⁵ • η	1(0 +) $0^+(0^-+)$	 φ(1680) ρ₃(1690) 	$0^{-}(1^{-})$ $1^{+}(3^{-})$	• <i>K</i> ⁰ • <i>K</i> &	$1/2(0^{-})$ $1/2(0^{-})$	• D _S • D _S ^{*±}	0(0 [°])	$\chi_{c0}(3860)$ • $\chi_{c1}(3872)$	$0^{+}(1^{++})$
• f ₀ (500)	$0^+(0^++)$	 ρ₃(1090) ρ(1700) 	$1^{+}(3^{-})$	• K9	$1/2(0^{-})$ $1/2(0^{-})$	 D[*]₅₀(2317)[±] 	0(0+)	• Z _c (3900)	$1^{+}(1^{+}-)$
 ρ(770) 	1+(1)	• a>(1700)	$1^{-}(2^{++})$	• K ₀ (700)	1/2(0+)	 D₅₁(2460)[±] 	$0(1^+)$	 <i>χ</i>_{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)	??(^{???})
• $f_0(980)$	$0^+(0^{++})$ $1^-(0^{++})$	$\eta(1760)$	$0^{+}(0^{-}+)$ $1^{-}(0^{-}+)$	• K ₁ (1400)	1/2(1+)	$D_{s0}(2590)^+$	0(0-)	 X(4020)[±] ψ(4040) 	$1^{+}(?^{?-})$
 ∂0(980) φ(1020) 	$0^{-}(1^{-})$	 π(1800) f₂(1810) 	$1^{-}(0^{-+})$ $0^{+}(2^{++})$	• K*(1410)	$\frac{1/2(1^{-})}{1/2(0^{+})}$	 D[*]₅₁(2700)[±] D[*]₅₁(2860)[±] 	$0(1^{-})$ $0(1^{-})$	• ψ(4040) X(4050) [±]	$0^{-}(1^{-})$ $1^{-}(?^{+})$
 h1(1170) 	$0^{-}(1^{+})$	X(1835)	??(0-+)	• K ₀ (1430) • K ₂ (1430)	$1/2(0^{+})$ $1/2(2^{+})$	$D_{S1}^{*}(2860)^{\pm}$ • $D_{S3}^{*}(2860)^{\pm}$		X(4055) [±]	$1^{+(??-)}$
• b1(1235)	1+(1+-)	 \$\phi_3(1850)\$ 	0-(3)	• K(1460)	1/2(2*)	$X_0(2900)$?(0+)	X(4100)±	$1^{-}(?')$
• a1(1260)	$1^{-}(1^{++})$	 η₂(1870) 	0+(2-+)	K ₂ (1580)	1/2(2-)	X1(2900)	?(1-)	• χ _{c1} (4140)	$0^{+}(1^{++})$
 f₂(1270) 	$0^+(2^{++})$	 π₂(1880) 	1-(2-+)	K(1630)	1/2(??)	D _{sJ} (3040) [±]		 ψ(4160) 	$0^{-}(1^{-})$
• f ₁ (1285)	$0^+(1^{++})$	$\rho(1900)$	$1^{+}(1^{})$	• K ₁ (1650)	1/2(1+)	BOTT	04	X(4160)	??(???)
 η(1295) = (1200) 	$0^{+}(0^{-}+)$ $1^{-}(0^{-}+)$	$f_2(1910)$ $a_0(1950)$	$0^{+(2^{+}+)}$ $1^{-}(0^{+}+)$	• K*(1680)	1/2(1-)	(B =		$Z_c(4200)$ • $\psi(4230)$	$1^{+}(1^{+})$ $0^{-}(1^{-})$
 π(1300) ∂₂(1320) 	$1^{-}(2^{++})$	• f2(1950)	$0^{+}(2^{++})$	• $K_2(1770)$	$1/2(2^{-})$ $1/2(3^{-})$	• B [±]	1/2(0-)	$R_{c0}(4230)$	$1^{+}(0^{-})$
• f ₀ (1370)	0+(0++)	 ∂4(1970) 	$1^{-}(4^{++})$	• K ₃ (1780) • K ₂ (1820)	1/2(3) $1/2(2^{-})$	• B ⁰	1/2(0-)	X(4250)±	1-(??+)
• π ₁ (1400)	1-(1-+)	ρ ₃ (1990)	1+(3)	K(1830)	1/2(2)	 <i>B</i>[±]/<i>B</i>⁰ ADI 		• χ _{c1} (4274)	$0^+(1^{++})$
 η(1405) 	0+(0 - +)	$\pi_2(2005)$	1-(2-+)	K ₀ (1950)	$1/2(0^+)$	 B[±]/B⁰/B⁰_s 	/b-baryon	X(4350)	0+(??+)
• h1(1415)	$0^{-}(1^{+-})$	• f ₂ (2010)	$0^{+}(2^{++})$	• K ₂ (1980)	1/2(2+)	ADİMIX'TÜ V _{cb} and V _{ub}		 ψ(4360) ψ(4415) 	$0^{-}(1^{-})$
• $f_1(1420)$	$0^+(1^+)^+$ $0^-(1^-)^-$	$f_0(2020)$	$0^{+}(0^{+}+)$ $0^{+}(4^{+}+)$	 K₄(2045) 	1/2(4+)	trix Element	S	 ψ(4415) Z_c(4430) 	$0^{-}(1^{-})$ $1^{+}(1^{+})$
• $\omega(1420)$ $f_2(1430)$	$0^{+}(2^{+})$	 f₄(2050) π₂(2100) 	$1^{-}(2^{-+})$	K ₂ (2250)	1/2(2-)	• B*	$1/2(1^{-})$	$\chi_{c0}(4450)$	$0^{+}(0^{+}^{+})$
• a ₀ (1450)	$1^{-}(0^{++})$	f ₀ (2100)	$0^{+}(0^{+}+)$	K ₃ (2320)	1/2(3+)	 B₁(5721) B[*]₁(5732) 	$\frac{1/2(1^+)}{?(?^?)}$	X(4630)	0+(??+)
 ρ(1450) 	1+(1)	f ₂ (2150)	$0^{+}(2^{+}+)$	K [*] ₅ (2380)	1/2(5-)	• B ₂ (5747)	1/2(2+)	 ψ(4660) 	$0^{-}(1^{-})$
 η(1475) 	0+(0-+)	ρ (2150)	1+(1)	K ₄ (2500) K(3100)	$\frac{1/2(4^{-})}{?^{?}(?^{??})}$	B _J (5840)	1/2(??)	χ _{c1} (4685)	$0^+(1^{++})$
• f ₀ (1500)	$0^{+}(0^{+}^{+})$	 φ(2170) 	$0^{-}(1^{-})$			• B _J (5970)	1/2(??)	_{χc0} (4700)	0+(0++)
$f_1(1510)$ • $f'_2(1525)$	$0^+(1^{++})$ $0^+(2^{++})$	$f_0(2200)$ $f_1(2220)$	$0^{+}(0^{++})$ $0^{+}(2^{++})$	CHARN (C = ±		BOTTOM, S	STRANGE	b	Б
fy(1565)	$0^{+}(2^{+})$	1)(2220)	$ar 4^{++}$	• D [±]	1/2(0-)	$(B = \pm 1,$		(+ possibly no	on <i>qq</i> states)
ρ(1570)	$1^{+}(1^{-}-)$	η(2225)	0+(0-+)	• D ⁰	$1/2(0^{-})$ $1/2(0^{-})$	• B ⁰ _s	0(0-)	• $\eta_b(1S)$	0+(0-+)
h1(1595)	$0^{-(1+-)}$	ρ ₃ (2250)	1+(3)	• D*(2007) ⁰	1/2(1-)	• B_{s}^{*}	$0(1^{-})$	• <i>T</i> (1 <i>S</i>)	0-(1)
 π1(1600) 	1-(1-+)	• f ₂ (2300)	0+(2++)	 D[*](2010)[±] 	1/2(1-)	$X(5568)^{\pm}$?(??)	• $\chi_{b0}(1P)$	$0^{+}(0^{+}+)$ $0^{+}(1^{+}+)$
• a1(1640)	$1^{-}(1^{++})$	$f_4(2300)$	$0^+(4^{++})$	• D ₀ *(2300)	1/2(0+)	 B_{s1}(5830)⁰ 	$0(1^+)$	 χ_{b1}(1P) h_b(1P) 	$0^{-}(1^{+})$
$f_2(1640)$ • $\eta_2(1645)$	$0^+(2^{++})$ $0^+(2^{-+})$	f ₀ (2330) • f ₂ (2340)	$0^+(0^{++})$ $0^+(2^{++})$	• D1(2420)	1/2(1+)	 B[*]₅₂(5840)⁰ B[*] (5850) 	0(2 ⁺) ?(? [?])	• $\eta_{b(1P)}$ • $\chi_{b2}(1P)$	$0^{+}(2^{++})$
 <i>η</i>₂(1645) <i>ω</i>(1650) 		$\rho_5(2350)$	$1^{+}(5^{-}-)$	 D₁(2430)⁰ D₅(2460) 	$1/2(1^+)$ $1/2(2^+)$	$B_{s,l}^{*}(5850)$ $B_{s,l}(6063)^{0}$?(?`) 0(? [?])	$\eta_{b}(25)$	0+(0-+)
 ω₃(167²) 		X(2370)	· (??;)?	$D_2(2400)$ $D_1(2550)^0$	$1/2(2^{-1})$ $1/2(0^{-1})$	$B_{s,l}(6005)^{-1}$ $B_{s,l}(6114)^{0}$	0(??)	• T(25)	0-(1)
	-	2510)	0+(6++)	D*(2600) ⁰	$1/2(0^{-})$			 <i>\(\Tau_2(1D)\)</i> 	$0^{-}(2^{-})$
				D [*] (2640)±	1/2(??)	BOTTOM, C (B = C		• $\chi_{b0}(2P)$	$0^{+}(0^{+}+)$ $0^{+}(1^{+}+)$
				$D_2(2740)^0$	1/2(2-)	• B ⁺ _C	0(0-)	 χ_{b1}(2P) h_b(2P) 	$0^{-}(1^{+})$
	-			 D₃(2750) 	1/2(3-)	 <i>B_c</i>(2<i>S</i>)[±] 	0(0)	 <i>χ</i>_{b2}(2P) 	$0^{+}(2^{+})$
				$D_1^*(2760)^0$	$1/2(1^{-})$			• T(35)	$0^{-}(1^{-})$
				D(3000) ⁰	1/2(??)	c c (+ possibly no)		• χ _{b1} (3P)	0+(1++)
						-	$0^{+}(0^{-}+)$	• χ _{b2} (3P)	$0^{+}(2^{++})$
	_					 η_c(1S) J/ψ(1S) 	$0^{-}(0^{-})$ $0^{-}(1^{-})$	 <i>γ</i>(45) <i>ζ</i>(10610) 	$0^{-}(1^{-})$ $1^{+}(1^{+})$
		•		ı		(12)	$0^{+}(0^{+}^{+})$	• $Z_b(10610)$ • $Z_b(10650)$	$1^{+}(1^{+})$ $1^{+}(1^{+})$
					-		$0^+(1^++)$	$\gamma(10753)$?(1)
		/ `		210	143	[1 <i>P</i>)	$0^{-}(1^{+})$	 <i>γ</i>(10860) 	0-(1)
	ヽ _		\sim		175	$_2(1P)$	$0^+(2^{++})$	 <i>γ</i>(11020) 	0-(1)
			-				$0^+(0^-+)$	OTH	IFR
		I		1		2S) •ψ(3770)	$0^{-}(1^{-})$ $0^{-}(1^{-})$	Further Sta	
							0 (1)		

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

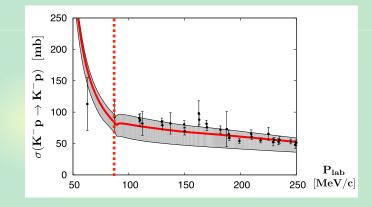
導入:ハドロン物理とフェムトスコピー

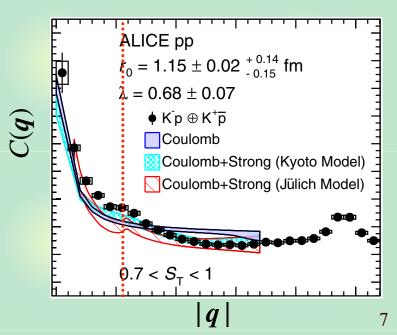
散乱実験とフェムトスコピー

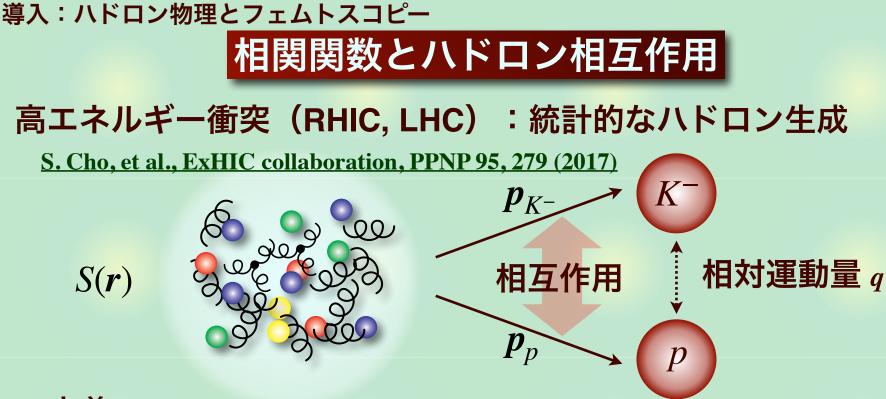
従来の方法:散乱実験

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>*k̄⁰n* 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)

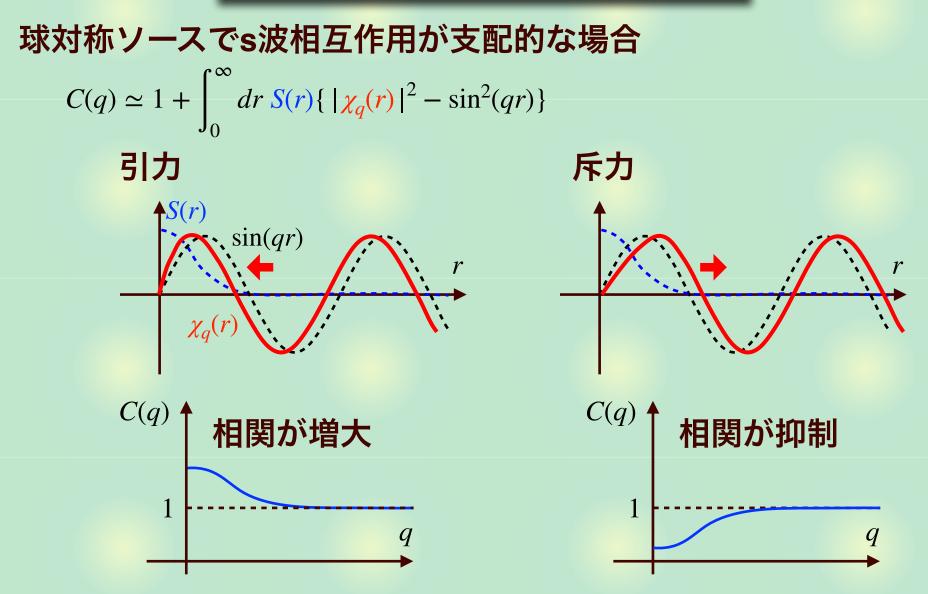
- 理論:Koonin-Pratt 公式

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)

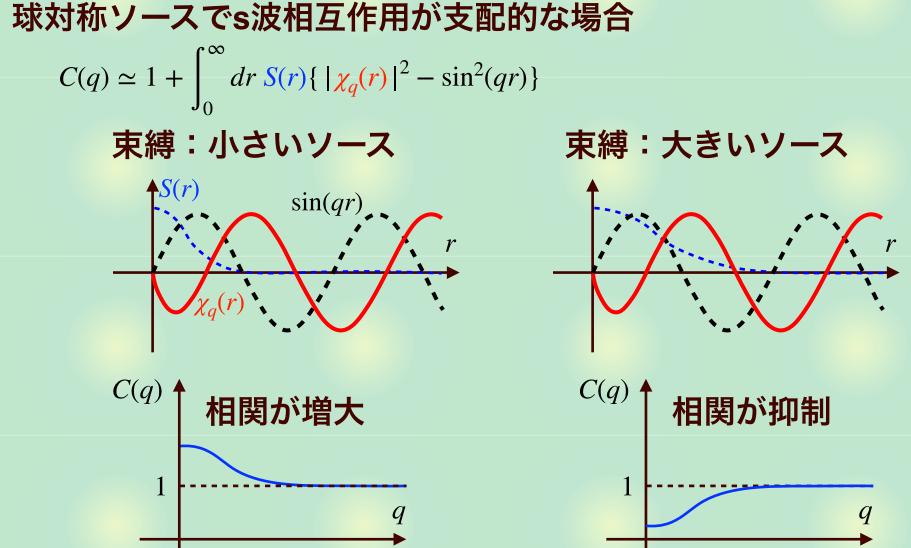
導入:ハドロン物理とフェムトスコピー

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

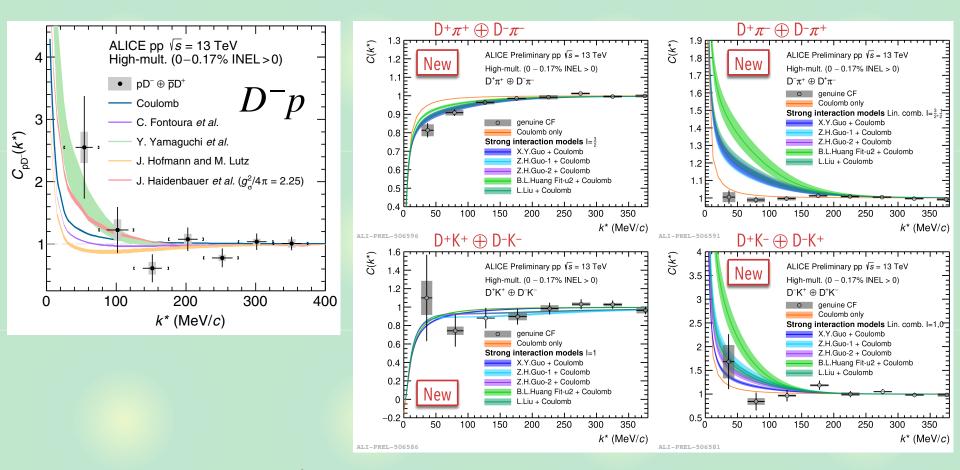
導入:ハドロン物理とフェムトスコピー

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)

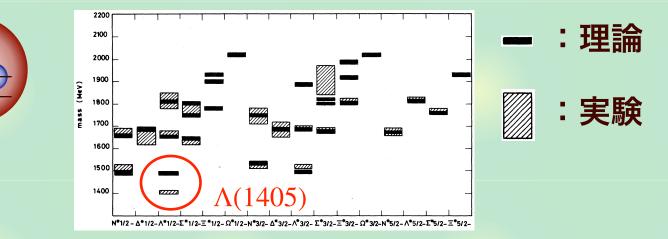


🍦 導入:ハドロン物理とフェムトスコピー
🗳 ハドロン相関関数とエキゾチックハドロン
- K ⁻ p相関と A(1405)
Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, PRL124, 132501 (2020)
- DD* / DD̄* 相関と T _{cc} / X(3872)
Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, EPJA58, 131 (2022)
 バドロン・原子核相関関数とハイパー核物理 - Λα 相関と核媒質中の Λ
A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi,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

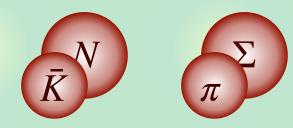
N. Isgur and G. Karl, PRD18, 4187 (1978)



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:

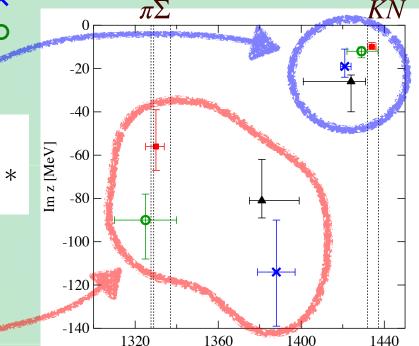
Citation: P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020)

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: **

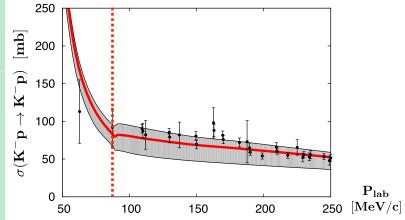
- Lower pole : 新しい two-star 共鳴 A(1380)



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

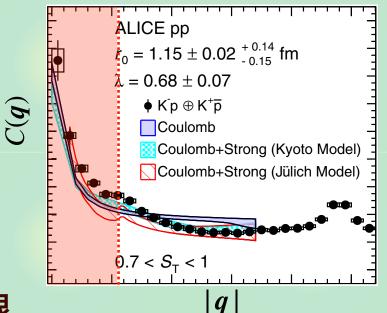


$K^{-}p$ 相関関数

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020)

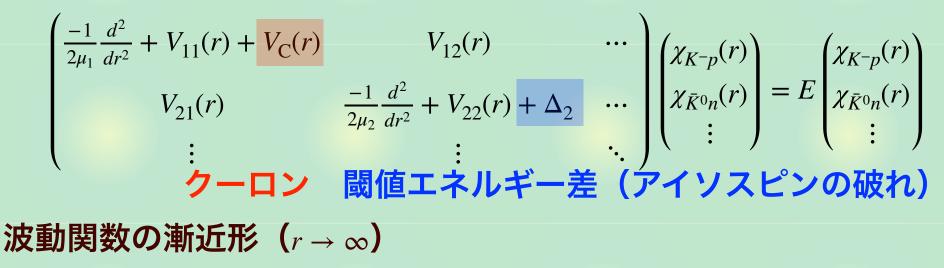
- 高い**精度(***k*⁰*n* カスプが見える)
- <u>k⁰n 閾値下のエネルギーでのデータ</u>

-> A(1405)の理論に関する重要な制限



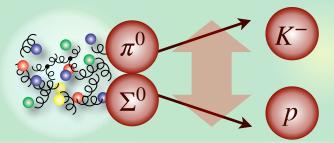


s波Schrödinger方程式



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

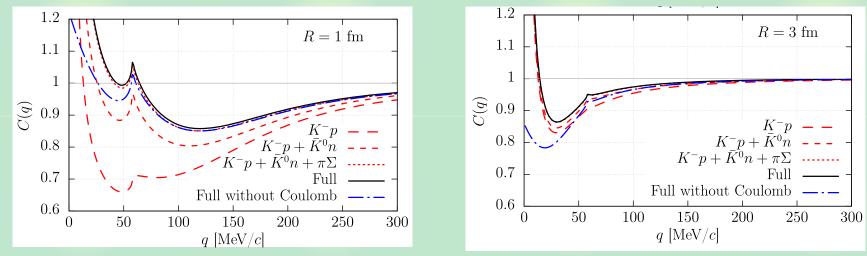
R. Lednicky, V.V. Lyuboshitz, V.L.Lyuboshitz, Phys. Atom. Nucl. 61, 2950 (1998); J. Haidenbauer, NPA 981, 1 (2019);

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



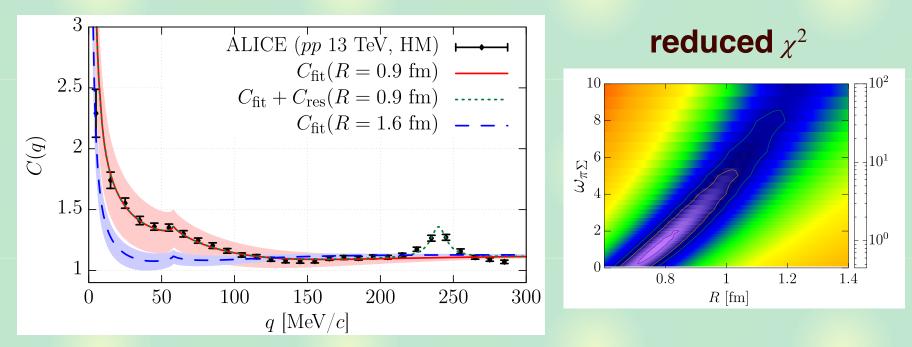
チャンネル結合効果は小さいソースで顕著

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)

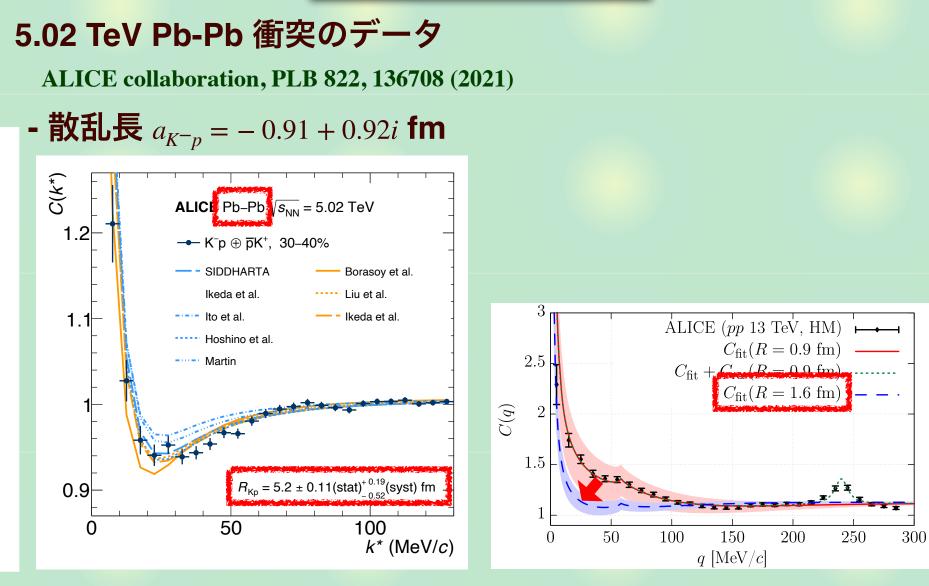
- ソース関数 S(r): ガウシアン, R ~ 1 fm <-- K⁺p データ
- 重み $\omega_{\pi\Sigma} \sim 2$:統計模型による見積もり



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





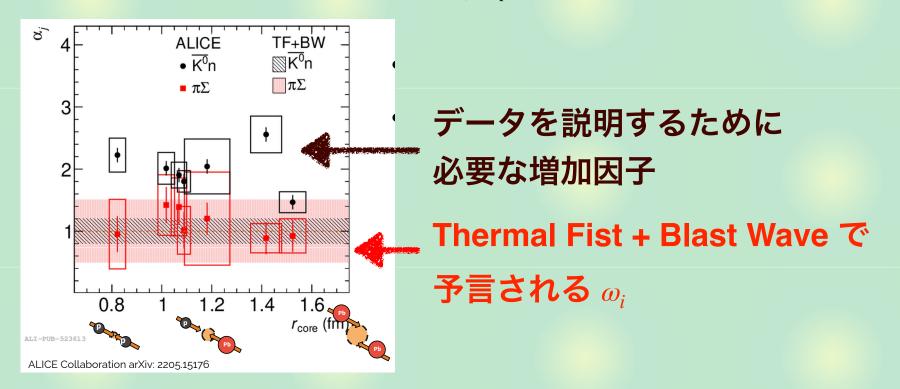
サイズ Rの大きいソースで相関が抑制 <-- 理論の予言

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

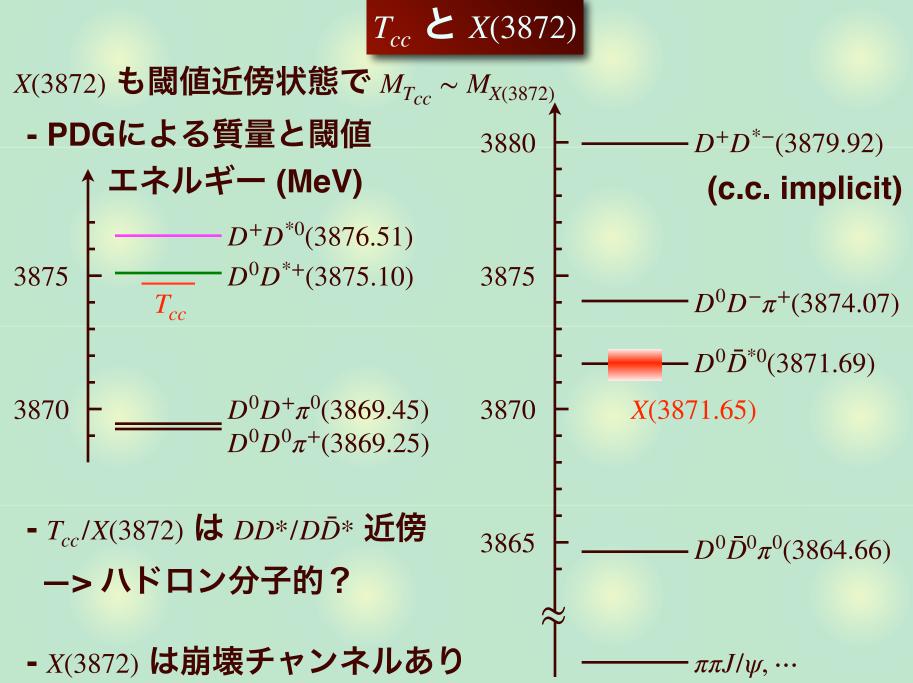
- DD* 閾値近傍にピーク
- $\mathcal{F} \mathcal{P} \mathcal{L} C = +2 : \sim cc\bar{u}\bar{d}$

- 準位構造

 $\begin{array}{c} \text{Yield}/(500\,\text{keV}/c^2) \\ \textbf{10} \\ \textbf{1$ 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)

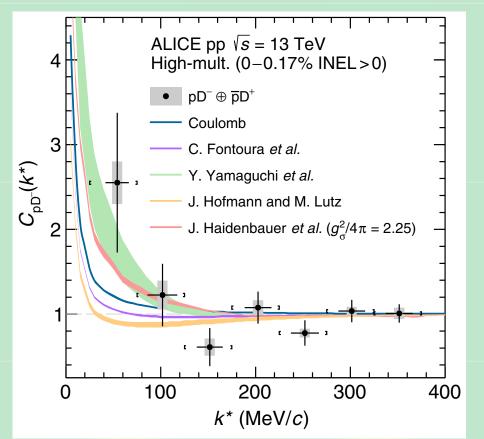


23



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

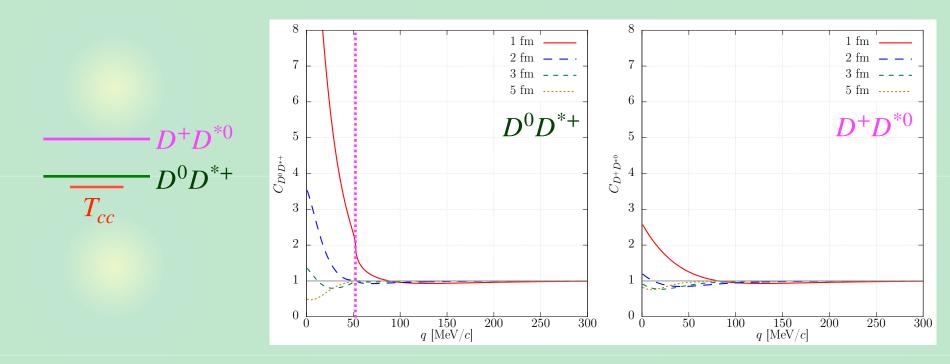
LHCb collaboration, Nature Comm., 13, 3351 (2022)

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

$DD^* \sim T_{cc}$ 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)

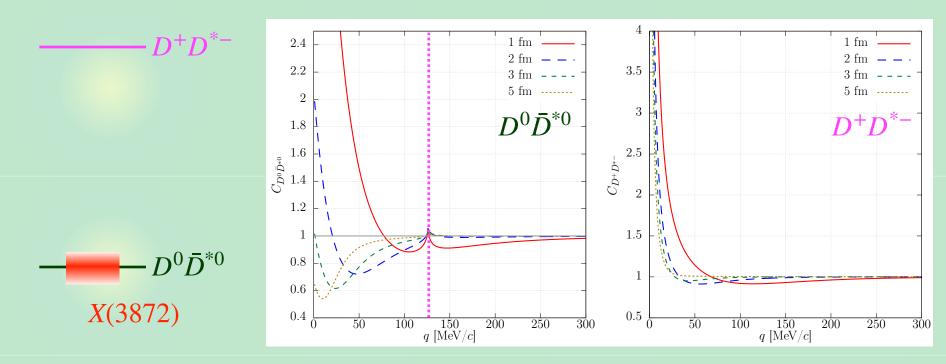


- 両方のチャンネルで束縛状態の性質(ソースサイズ依存性)
- *D*⁰*D*^{*+}で強いシグナル、*D*⁺*D*^{*0} 相関は比較的小さいシグナル
- *D*⁰*D*^{*+} 相関中に弱い *D*⁺*D*^{*0} 閾値カスプ (*q* ~ 52 MeV)

<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)

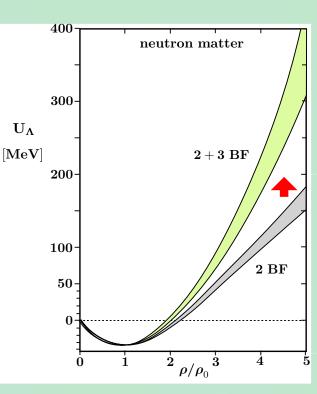
実験で検証する方法は? - 重イオン衝突での **A directed flow**

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

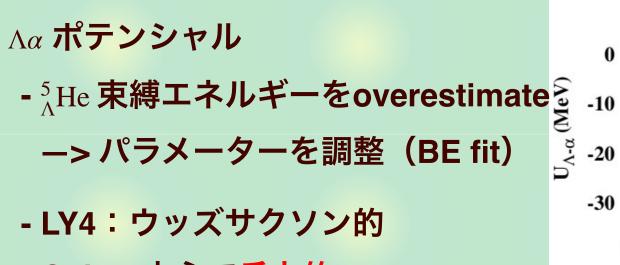
- ∧ ハイパー核のSkyrme-Hartree Fockポテンシャル
 - LY4:現象論的なポテンシャル

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

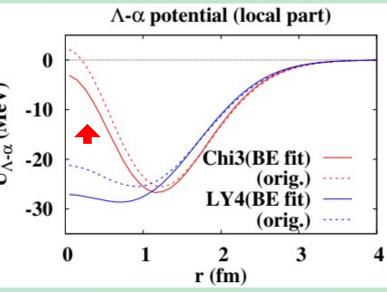
- Chi3:_{ANN} 3体力を含むカイラルEFTに基づくポテンシャル

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

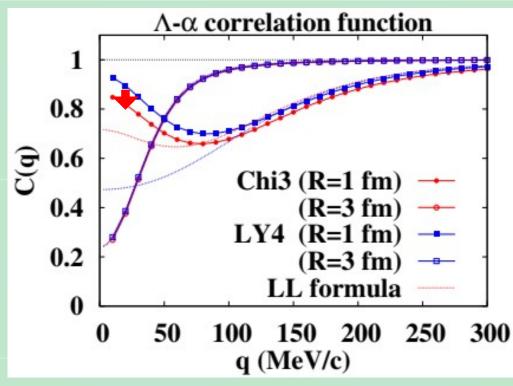






相関関数の結果





- 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