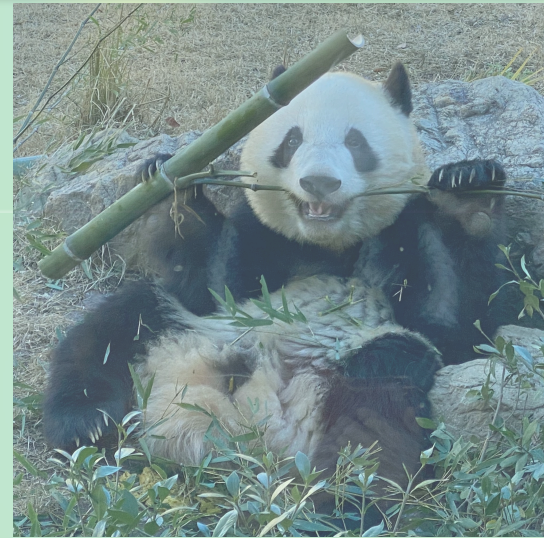


フェムトスコピーによる ハドロン間相互作用の研究



兵藤 哲雄

東京都立大学

目次

 導入：ハドロン物理とフェムトスコーピー ハドロン相関関数とエキゾチックハドロン

- K^-p 相関と $\Lambda(1405)$

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

- $DD^* / D\bar{D}^*$ 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

- $\Lambda\alpha$ 相関と核媒質中の Λ

A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation

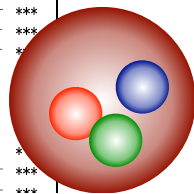
 まとめ

観測されているハドロン(2020)

Particle Data Group (PDG) 2020版

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

p	$1/2^+$ ****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$ ****	Σ^+	$1/2^+$ ****	Ξ^0	$1/2^+$ ****	Ξ^{++}	***
n	$1/2^+$ ****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$ ****	Σ^0	$1/2^+$ ****	Ξ^-	$1/2^+$ ****	Ξ^{*+}	***
$N(1440)$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$ ****	Σ^-	$1/2^+$ ****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$ ****	Λ_b^0	$1/2^+$ ***
$N(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$ ****	$\Xi(1620)$	*	$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$ ***
$N(1535)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$ *	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$ *	$\Xi(1690)$	***	$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$ ***
$N(1650)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$ ***	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$ *	$\Xi(1820)$	$3/2^-$ ***	$\Lambda_b(6146)^0$	$3/2^+$ ***
$N(1675)$	$5/2^-$ ****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$ ****	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$ ***	$\Xi(1950)$	***	$\Lambda_b(6152)^0$	$5/2^+$ ***
$N(1680)$	$5/2^+$ ****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$ ****	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$ ****	$\Xi(2030)$	$\geq 5/2^?$ ***	Σ_b	$1/2^+$ ***
$N(1700)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(1920)$	$3/2^+$ ***	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$ ***	$\Xi(2120)$	*	Σ_b^0	$3/2^+$ ***
$N(1710)$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1930)$	$5/2^-$ ***	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$ ****	$\Xi(2250)$	***	$\Sigma_b(6097)^+$	***
$N(1720)$	$3/2^+$ ****	$\Delta(1940)$	$3/2^-$ **	$\Sigma(1780)$	$3/2^+$ *	$\Xi(2370)$	**	$\Sigma_b(6097)^-$	***
$N(1860)$	$5/2^+$ **	$\Delta(1950)$	$7/2^+$ ****	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$ **	$\Xi(2500)$	*	Ξ_b^0, Ξ_b^-	$1/2^+$ ***
$N(1875)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(2000)$	$5/2^+$ **	$\Sigma(1900)$	$1/2^-$ **	$\Xi_b(5935)$	$1/2^+$ ***	$\Xi_b(5935)$	$1/2^+$ ***
$N(1880)$	$1/2^+$ ***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$ *	$\Sigma(1910)$	$3/2^-$ ***	$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$ ***	$\Xi_b(6227)$	***
$N(1895)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(2200)$	$7/2^-$ **	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$ ****	$\Xi_b(5955)$	$3/2^+$ ***	Ω_b	$1/2^+$ ***
$N(1900)$	$3/2^+$ ****	$\Delta(2300)$	$9/2^+$ **	$\Sigma(1940)$	$3/2^+$ **	$\Xi_b(6227)$	***		
$N(1900)$	$7/2^+$ **	$\Delta(2350)$	$5/2^-$ *	$\Sigma(2010)$	$3/2^-$ **	$\Omega(2380)$	**		
$N(2000)$	$5/2^+$ **	$\Delta(2390)$	$7/2^+$ *	$\Sigma(2030)$	$7/2^+$ ****	$\Omega(2470)$	-		
$N(2040)$	$3/2^+$ *	$\Delta(2400)$	$9/2^-$ **	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$ *			$P_c(4312)^+$	*
$N(2060)$	$5/2^-$ ***	$\Delta(2420)$	$11/2^+$ ****	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$ *	Λ_c^+	$1/2^+$ ****	$P_c(4380)^+$	*
$N(2100)$	$1/2^+$ ***	$\Delta(2750)$	$13/2^-$ **	$\Sigma(2100)$	$7/2^-$ *	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$ ***	$P_c(4440)^+$	*
$N(2120)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(2950)$	$15/2^+$ **	$\Sigma(2160)$	$1/2^-$ *	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$ **	$P_c(4457)^+$	*
$N(2190)$	$7/2^-$ ****			$\Sigma(2230)$	$3/2^+$ *	$\Lambda_c(2765)^+$	*		
$N(2220)$	$9/2^+$ ****	Λ	$1/2^+$ ****	$\Sigma(2250)$	***	$\Lambda_c(2860)$	$3/2^+$ ***		
$N(2250)$	$9/2^-$ ****	Λ	$1/2^-$ **	$\Sigma(2455)$	**	$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$ ***		
$N(2300)$	$1/2^+$ **	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma(2620)$	**	$\Lambda_c(2940)^+$	$3/2^-$ ***		
$N(2570)$	$5/2^-$ **	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(3000)$	*	$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$ ****		
$N(2600)$	$11/2^-$ ***	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$ ****	$\Sigma(3170)$	*	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$ ***		
$N(2700)$	$13/2^+$ **	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$ ****			$\Sigma_c(2800)$	***		
		$\Lambda(1690)$	$3/2^-$ ****			Ξ_c^+	$1/2^+$ ***		
		$\Lambda(1710)$	$1/2^+$ *			Ξ_c^0	$1/2^+$ ****		
		$\Lambda(1800)$	$1/2^-$ ***			Ξ_c^+	$1/2^+$ ***		
		$\Lambda(1810)$	$1/2^+$ ****			Ξ_c^0	$1/2^+$ ***		
		$\Lambda(1820)$	$5/2^+$ ****			Ξ_c^+	$1/2^+$ ***		
		$\Lambda(1830)$	$5/2^-$ ****			$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$ ***		
		$\Lambda(1890)$	$3/2^+$ ****			$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$ ***		
		$\Lambda(2000)$	$1/2^-$ *			$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$ **		
		$\Lambda(2050)$	$3/2^-$ *			$\Xi_c(2930)$	***		
		$\Lambda(2070)$	$3/2^+$ *			$\Xi_c(2970)$	***		
		$\Lambda(2080)$	$5/2^-$ *			$\Xi_c(3055)$	***		
		$\Lambda(2085)$	$7/2^+$ **			$\Xi_c(3080)$	***		
		$\Lambda(2100)$	$7/2^-$ ****			$\Xi_c(3123)$	***		
		$\Lambda(2110)$	$5/2^+$ ***			Ω_c^0	$1/2^+$ ****		
		$\Lambda(2325)$	$3/2^-$ *			Ω_c^0	$3/2^+$ ****		
		$\Lambda(2350)$	$9/2^+$ **						
		$\Lambda(2585)$	**						



バリオン~160種

LIGHT UNFLAVORED ($S=C=B=0$)		STRANGE ($S=\pm 1, C=B=0$)		CHARMED, STRANGE ($C=S=\pm 1$)		cc continued $F_c(F_c)$	
$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$
π^\pm	$1^-(0^-)$	$\pi_2(1670)$	$1^-(2^-)$	K^\pm	$1/2(0^-)$	D_s^\pm	$0^-(1^-)$
π^0	$1^-(0^-)$	$\rho(1680)$	$0^-(1^-)$	K^0	$1/2(0^-)$	D_s^0	$0^-(2^-)$
η	$0^+(0^-)$	$\rho_3(1690)$	$1^-(3^-)$	K_S^0	$1/2(0^-)$	$D_{s1}^0(2317)^0$	$0^+(0^-)$
$\eta(500)$	$0^+(0^+)$	$\rho(1700)$	$1^-(1^-)$	K_L^0	$1/2(0^-)$	$D_{s1}(2460)^0$	$0^+(0^+)$
$\eta(770)$	$1^+(1^-)$	$\omega(1700)$	$1^-(2^-)$	$K_S^*(700)$	$1/2(0^+)$	$D_{s1}(2536)^0$	$0^+(1^+)$
$\omega(782)$	$0^-(1^-)$	$\phi(1710)$	$0^+(0^+)$	$K^*(892)$	$1/2(1^-)$	$D_{s2}^*(2573)$	$0^+(2^+)$
$\eta(980)$	$0^+(0^+)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^+)$	$K_S^*(1270)$	$1/2(1^+)$	$D_{s2}^*(2700)$	$0^+(1^-)$
$\eta(980)$	$0^+(0^+)$	$\pi(1800)$	$1^-(0^-)$	$K_S^*(1400)$	$1/2(1^+)$	$D_{s3}^*(2860)$	$0^+(1^-)$
$\phi(1020)$	$0^-(1^-)$	$\phi(1810)$	$0^+(2^+)$	$K^*(1410)$	$1/2(1^-)$	$D_{s3}^*(2860)^0$	$0^+(3^-)$
$\phi(1470)$	$0^-(1^-)$	$X(1835)$	$?^-(0^-)$	$K_S^*(1430)$	$1/2(0^+)$	$D_{s3}(3040)$	$0^?(2^-)$
$h_1(1235)$	$1^+(1^+)$	$\omega_3(1850)$	$0^-(3^-)$	$K_S^*(1430)$	$1/2(2^+)$	BOTTOM	
$\omega(1235)$	$1^+(1^+)$	$\eta_2(1870)$	$0^-(2^-)$	$K(1460)$	$1/2(0^-)$	$(B = \pm 1)$	
$\omega(1370)$	$1^+(1^+)$	$\eta_2(1880)$	$1^-(2^-)$	$K(1580)$	$1/2(2^-)$	B^+	$1/2(0^-)$
$\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	$\rho(1900)$	$1^+(1^-)$	$K(1630)$	$1/2(2^-)$	B^0	$1/2(0^-)$
$\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	$\rho(1910)$	$0^+(2^+)$	$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$	B^+ / B^0 ADMIXTURE	
$\omega(1430)$	$0^+(2^+)$	$\rho(1925)$	$0^+(2^+)$	$K_1(1680)$	$1/2(1^+)$	ADDMIXTURE	
$\omega(1430)$	$0^+(2^+)$	$\rho(1950)$	$0^+(2^+)$	$K_1(1700)$	$1/2(2^-)$	V_{cb} and V_{cb} CKM Matrix Elements	
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(1970)$	$0^+(2^+)$	$K_2^*(1780)$	$1/2(3^-)$	B^+	$1/2(1^-)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho_3(1990)$	$1^-(3^-)$	$K_2^*(1820)$	$1/2(2^-)$	B^0	$1/2(1^-)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho_3(2005)$	$1^-(2^-)$	$K(1830)$	$1/2(0^-)$	B_c^+	$1/2(1^-)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2010)$	$0^+(2^+)$	$K_2^*(1950)$	$1/2(0^+)$	$B_1(5721)^+$	$1/2(1^+)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2020)$	$0^+(0^+)$	$K_2^*(1980)$	$1/2(2^+)$	$B_2^+(5721)^0$	$1/2(1^+)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2050)$	$0^+(4^+)$	$K_1^*(2045)$	$1/2(4^+)$	$B_3(5732)$	$?^?(?)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2100)$	$1^-(2^-)$	$K_2^*(2250)$	$1/2(2^+)$	$B_2^*(5747)^+$	$1/2(2^+)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2100)$	$0^+(0^+)$	$K_2^*(2320)$	$1/2(3^+)$	$B_3^*(5747)^0$	$1/2(2^+)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2150)$	$0^+(2^+)$	$K_2^*(2350)$	$1/2(5^-)$	$B_3(5840)^+$	$1/2(2^+)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2150)$	$1^-(1^-)$	$K_2^*(2500)$	$1/2(4^-)$	$B_3(5840)^0$	$1/2(2^+)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2170)$	$0^-(1^-)$	$K(2600)$	$1/2(2^-)$	$B_3(5970)^+$	$1/2(2^+)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2200)$	$0^+(0^+)$	$K(3100)$	$?^?(2^?)$	$B_3(5970)^0$	$1/2(2^+)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2220)$	$0^+(2^+)$	CHARMED		BOTTOM, STRANGE	
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2220)$	$0^+(0^+)$	$(C = \pm 1)$		$(B = \pm 1, S = \pm 1)$	
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2250)$	$1^-(3^-)$	D^+	$1/2(0^-)$	$b\bar{b}$	
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2300)$	$0^+(2^+)$	D^0	$1/2(0^-)$	(+ possibly non- $q\bar{q}$ states)	
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2300)$	$0^+(4^+)$	D^+	$1/2(1^-)$	B_c^+	$0^-(0^-)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2300)$	$0^+(0^+)$	D^0	$1/2(1^-)$	B_c^0	$0^-(0^-)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2300)$	$0^+(2^+)$	D^+	$1/2(1^+)$	$X(5568)^+$	$?^?(?)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2340)$	$0^+(2^+)$	$D_1^0(2300)^0$	$1/2(0^+)$	$B_{cb}(5630)^0$	$0^+(1^+)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2350)$	$1^-(5^-)$	$D_1^+(2300)^+$	$1/2(0^+)$	$B_{cb}^*(5640)^0$	$0^+(2^+)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$	$\rho(2510)$	$0^+(6^+)$	$D_1^+(2420)^+$	$1/2(1^+)$	$B_{cb}^*(5650)$	$?^?(?)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$			$D_1^+(2420)^0$	$1/2(1^+)$	BOTTOM, CHARMED	
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$			$D_1^+(2430)^+$	$1/2(1^+)$	$(B = C = \pm 1)$	
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$			$D_1^+(2460)^+$	$1/2(2^+)$	$(+ possibly non-q\bar{q} states)$	
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$			$D_1^+(2550)^+$	$1/2(2^+)$	B_c^+	$0^-(0^-)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$			$D_1^+(2600)^+$	$1/2(2^+)$	$B_c(2S)^+$	$0^-(0^-)$
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$			$D_1^+(2640)^+$	$1/2(2^+)$	cc	
$\omega(1450)$	$1^+(0^+)$			$D_1^+(2740)^+$	$1/2(2^+)$	$(+ possibly non-q\bar{q} states)$	
$\omega(1450)$							

観測されているハドロン(2022)

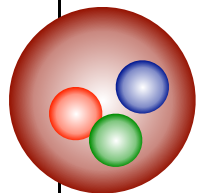
Particle Data Group (PDG) 2022版

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

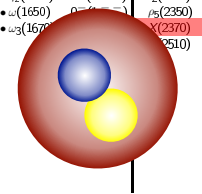
p	n	Δ	Σ^+	Σ^0	Σ^-	Λ^+	Λ^0	Λ_b^0
$1/2^+$	$1/2^+$	$3/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
****	****	****	****	****	****	****	****	****
$\Delta(1232)$	$\Delta(1600)$	$\Delta(1620)$	$\Sigma(1385)$	$\Sigma(1580)$	$\Sigma(1620)$	$\Sigma(1660)$	$\Sigma(1670)$	$\Sigma(1750)$
$3/2^+$	$1/2^-$	$3/2^-$	$3/2^+$	$3/2^-$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
****	****	****	****	****	****	****	****	****
$N(1440)$	$N(1520)$	$N(1535)$	$N(1650)$	$N(1675)$	$N(1680)$	$N(1700)$	$N(1710)$	$N(1720)$
$1/2^+$	$3/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$5/2^-$	$5/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
****	****	****	****	****	****	****	****	****
$N(1860)$	$N(1875)$	$N(1880)$	$N(1895)$	$N(1900)$	$N(1900)$	$N(1910)$	$N(1910)$	$N(1910)$
$5/2^+$	$3/2^-$	$1/2^+$	$1/2^-$	$1/2^+$	$1/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
****	****	****	****	****	****	****	****	****
$N(2100)$	$N(2120)$	$N(2190)$	$N(2200)$	$N(2250)$	$N(2300)$	$N(2570)$	$N(2600)$	$N(2700)$
$1/2^+$	$3/2^-$	$7/2^+$	$9/2^+$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^+$	$1/2^+$	$13/2^+$
****	****	****	****	****	****	****	****	****
$\Lambda(1380)$	$\Lambda(1405)$	$\Lambda(1520)$	$\Lambda(1600)$	$\Lambda(1670)$	$\Lambda(1690)$	$\Lambda(1710)$	$\Lambda(1800)$	$\Lambda(1810)$
$1/2^-$	$1/2^-$	$3/2^-$	$1/2^+$	$1/2^-$	$3/2^-$	$1/2^+$	$1/2^-$	$1/2^-$
****	****	****	****	****	****	****	****	****
$\Lambda(1820)$	$\Lambda(2050)$	$\Lambda(2070)$	$\Lambda(2080)$	$\Lambda(2085)$	$\Lambda(2100)$	$\Lambda(2110)$	$\Lambda(2325)$	$\Lambda(2350)$
$5/2^+$	$3/2^-$	$3/2^+$	$5/2^-$	$7/2^+$	$7/2^-$	$5/2^+$	$3/2^-$	$9/2^+$
****	****	****	****	****	****	****	****	****
$\Lambda(2585)$								
$1/2^-$								

LIGHT UNFLAVORED ($S=C=B=0$)		STRANGE ($S=\pm 1, C=B=0$)		CHARMED, STRANGE ($C=\pm 1, S=\pm 1$) (+ possibly non-q \bar{q} states)		$c\bar{c}$ continued $\bar{c}c$	
$F(J^PC)$	$F^*(J^PC)$	$F(J^PC)$	$F^*(J^PC)$	$F(J^PC)$	$F^*(J^PC)$	$F(J^PC)$	$F^*(J^PC)$
π^\pm	$1^-(0^-)$	$\pi_2(1670)$	$1^-(2^-+)$	K^\pm	$1/2(0^-)$	D_s^\pm	$0^-(0^-)$
π^0	$1^-(0^-)$	$\rho(1630)$	$0^-(1^-)$	K_S^0	$1/2(0^-)$	$D_s^{*\pm}$	$0^-(0^-)$
η	$0^-(0^-)$	$\rho(1690)$	$1^+(3^-)$	K_L^0	$1/2(0^-)$	D_{s1}^\pm	$0^-(0^-)$
$\eta(500)$	$0^+(0^+)$	$\rho(1700)$	$1^+(1^-)$	K_S^0	$1/2(0^-)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$\eta(770)$	$1^+(1^-)$	$\omega(1700)$	$1^-(2^+)$	$K^*(700)$	$1/2(0^+)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$\omega(782)$	$0^-(1^-)$	$\phi(1710)$	$0^+(0^+)$	$K^*(892)$	$1/2(1^-)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$\eta(958)$	$0^+(0^+)$	$\chi(1750)$	$?(1^-)$	$K_1^*(1270)$	$1/2(1^+)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$\eta(980)$	$0^+(0^+)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^+)$	$K_1^*(1400)$	$1/2(1^+)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$\eta(980)$	$1^+(0^+)$	$\pi(1800)$	$1^-(0^+)$	$K^*(1410)$	$1/2(1^-)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$\phi(1020)$	$0^-(1^-)$	$\phi(1810)$	$0^+(2^+)$	$K_1^*(1430)$	$1/2(0^+)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$h_1(1170)$	$0^-(1^-)$	$\chi(1835)$	$?(0^+)$	$K_2^*(1430)$	$1/2(2^+)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$b_1(1235)$	$1^+(1^+)$	$\phi_3(1850)$	$0^-(3^-)$	$K_1^*(1460)$	$1/2(0^-)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$a_1(1260)$	$1^-(1^+)$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^+)$	$K_2^*(1580)$	$1/2(2^-)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$f_1(1270)$	$0^+(2^+)$	$\eta_2(1880)$	$1^-(2^+)$	$K_1(1630)$	$1/2(2^?)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$f_1(1285)$	$0^+(1^+)$	$\rho(1900)$	$1^-(1^-)$	$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$\eta(1295)$	$0^-(0^+)$	$f_2(1910)$	$0^+(2^+)$	$K^*(1680)$	$1/2(2^-)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$a_0(1300)$	$1^-(0^+)$	$a_0(1950)$	$1^-(0^+)$	$K_2^*(1770)$	$1/2(2^-)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$a_0(1320)$	$1^-(0^+)$	$f_0(1950)$	$0^+(2^+)$	$K_3^*(1780)$	$1/2(2^-)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$f_0(1370)$	$0^+(2^+)$	$a_0(1970)$	$1^-(4^+)$	$K_1(1820)$	$1/2(0^+)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$\eta_1(1400)$	$1^-(0^+)$	$\eta_3(1990)$	$1^+(3^-)$	$K_1(1830)$	$1/2(0^+)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$\eta_1(1405)$	$0^-(1^+)$	$\eta_2(2005)$	$1^-(2^+)$	$K_1^*(1930)$	$1/2(1^+)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$h_1(1415)$	$0^-(1^+)$	$f_0(2010)$	$0^+(2^+)$	$K_2^*(1980)$	$1/2(2^+)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$f_1(1420)$	$0^+(1^+)$	$f_0(2020)$	$0^+(0^+)$	$K_2^*(2045)$	$1/2(4^+)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	$\phi(2050)$	$0^+(4^+)$	$K_3^*(2250)$	$1/2(2^-)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$f_1(1430)$	$0^+(2^+)$	$\eta_2(2100)$	$1^-(2^+)$	$K_3(2330)$	$1/2(1^+)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$a_0(1450)$	$1^-(0^+)$	$f_0(2100)$	$0^+(0^+)$	$K_3^*(2380)$	$1/2(5^-)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
$a_0(1450)$	$1^+(1^-)$	$f_0(2150)$	$0^+(0^+)$	$K_3^*(2380)$	$1/2(4^-)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$
					$?(2^?)$	D_{s1}^{*0}	$0^+(0^+)$

2年間で新たに発見されたハドロン



バリオン~170種



メソン~210種

全ての~380種のハドロンはQCDから生じている

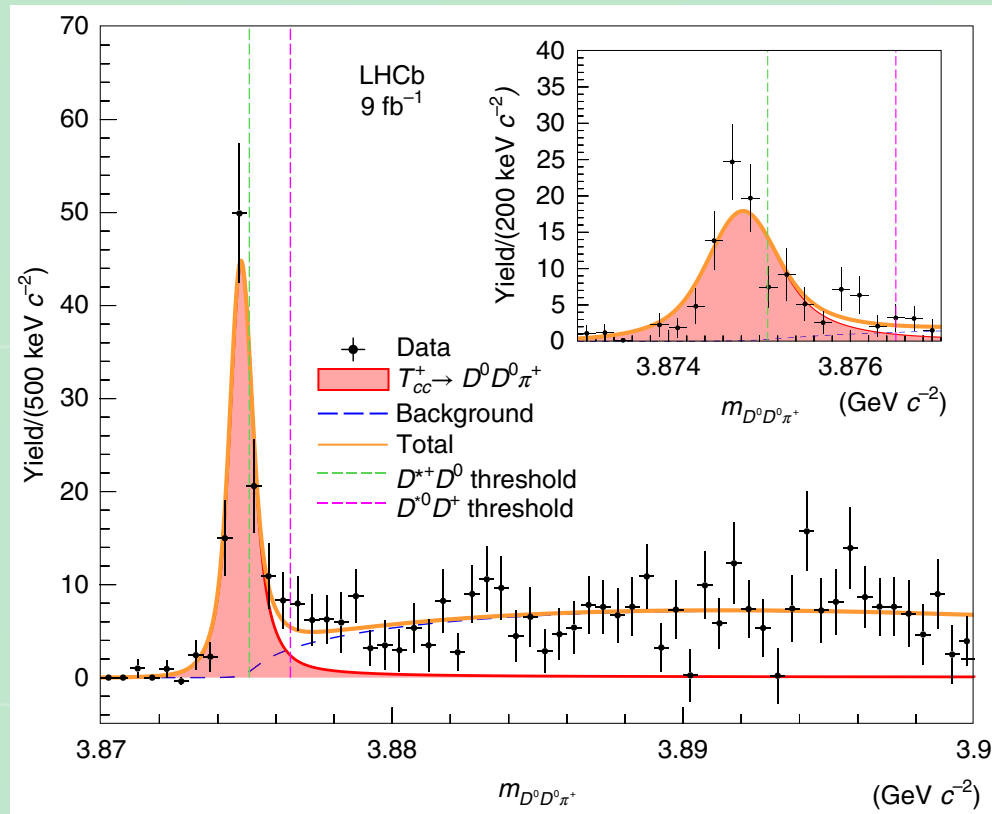
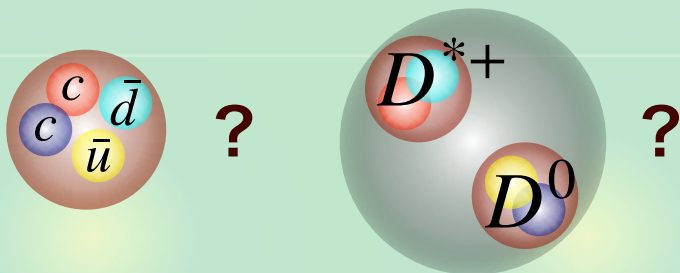
エキゾチックハドロン

テトラクォーク T_{cc} の観測

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



- クォーク組成 $\sim cc\bar{u}\bar{d}$
- $q\bar{q}$ で構成できないメソン
- 内部構造は？



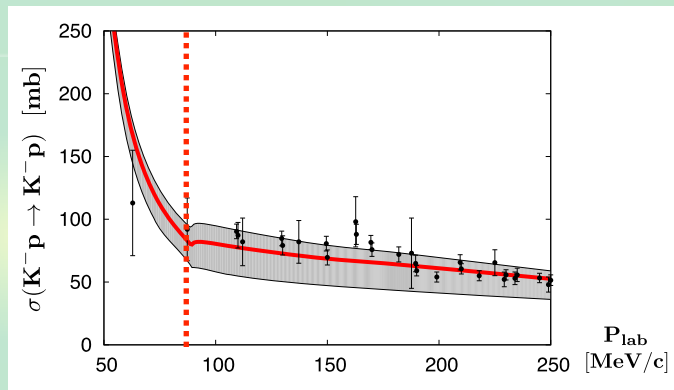
$D^0 D^0 \pi^+$ に崩壊：不安定状態の内部構造？

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)

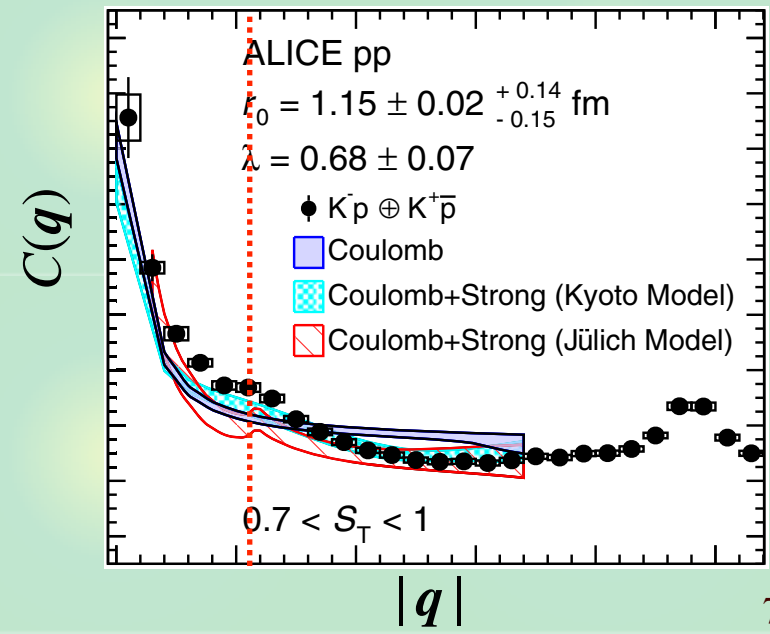
- 統計精度が良くない（低エネルギー）
- 限られた系： $NN, \Lambda N, \pi N, KN, \bar{K}N, \dots$
- ヘビー（ c, b ）ハドロン：ほぼ不可能



フェムトスコピー：相関関数

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020)

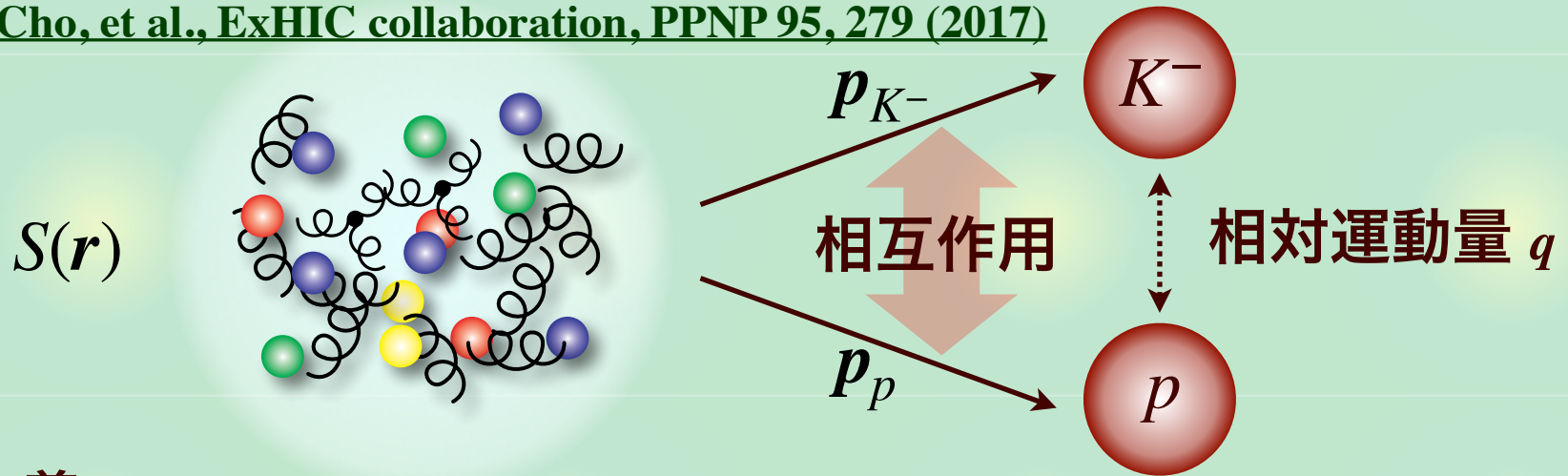
- 高い精度（ $\bar{K}^0 n$ カスプが見える）
- 様々な系： $\Lambda\Lambda, N\Xi, N\Omega, \phi N, \bar{K}\Lambda, DN, \dots$
- ヘビーハドロン：可能！



相関関数とハドロン相互作用

高エネルギー衝突 (RHIC, LHC) : 統計的なハドロン生成

S. Cho, et al., ExHIC collaboration, PPNP 95, 279 (2017)



- 定義

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

- 理論：Koonin-Pratt 公式

S.E. Koonin PLB 70, 43 (1977); S. Pratt, PRD 33, 1314 (1986)

$$C(q) \simeq \int d^3\mathbf{r} S(\mathbf{r}) |\Psi_q^{(-)}(\mathbf{r})|^2$$

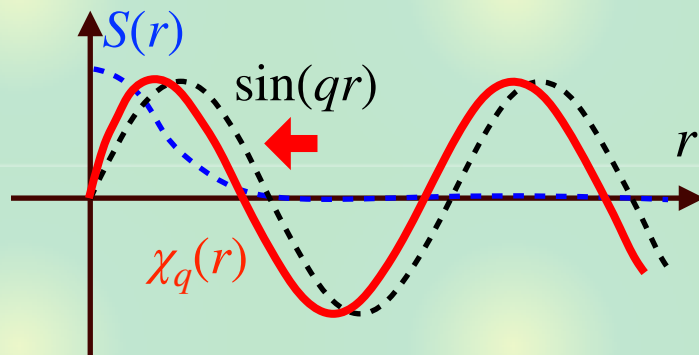
ソース関数 $S(\mathbf{r})$ (放出源) \leftrightarrow 波動関数 $\Psi_q^{(-)}(\mathbf{r})$ (相互作用)

波動関数の振る舞いと相関関数

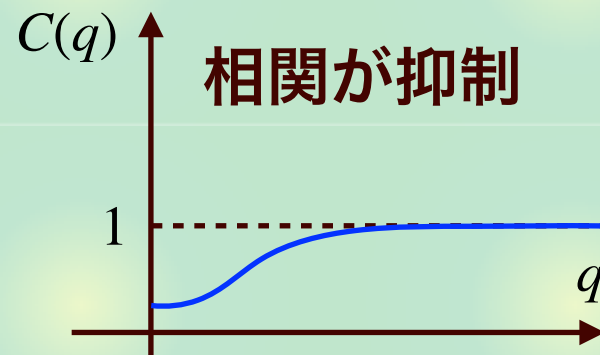
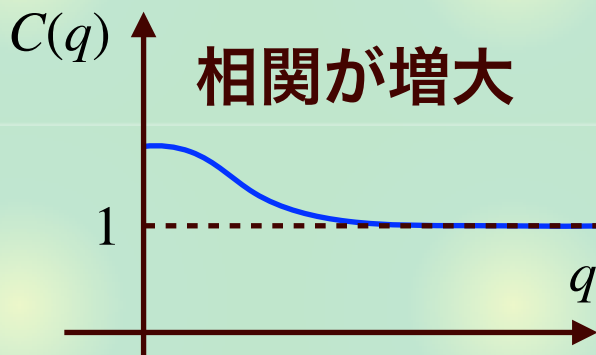
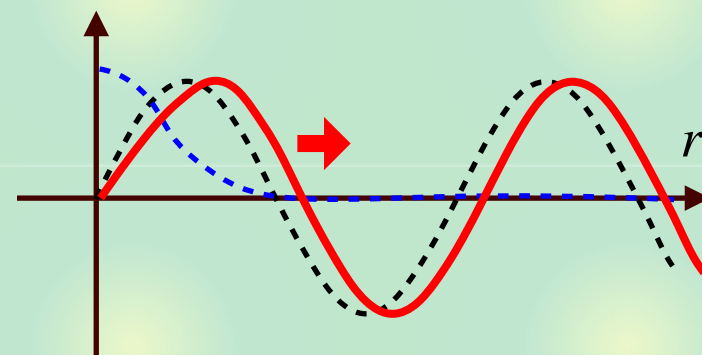
球対称ソースでs波相互作用が支配的な場合

$$C(q) \simeq 1 + \int_0^{\infty} dr S(r) \{ |\chi_q(r)|^2 - \sin^2(qr) \}$$

引力



斥力



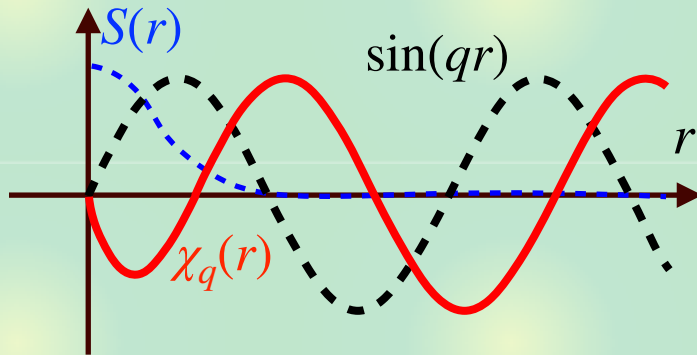
相関の定性的な振る舞いは相互作用の性質を反映

強い引力で束縛状態がある場合相関関数

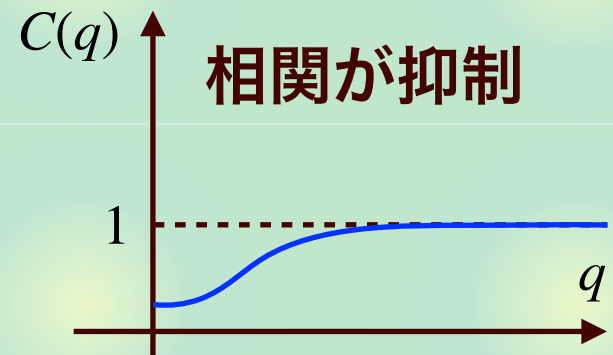
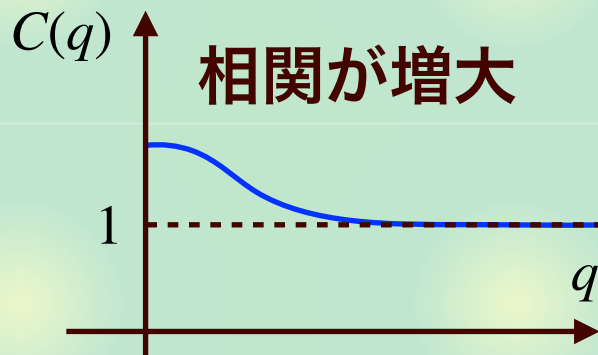
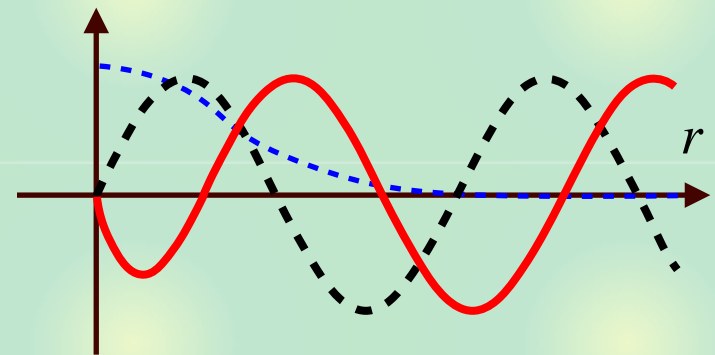
球対称ソースでs波相互作用が支配的な場合

$$C(q) \simeq 1 + \int_0^\infty dr S(r) \{ |\chi_q(r)|^2 - \sin^2(qr) \}$$

束縛：小さいソース



束縛：大きいソース



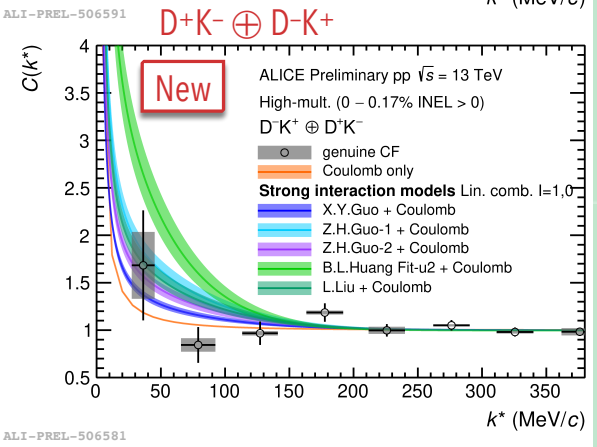
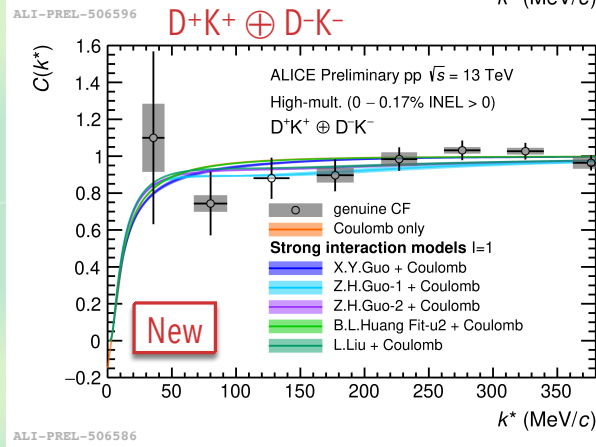
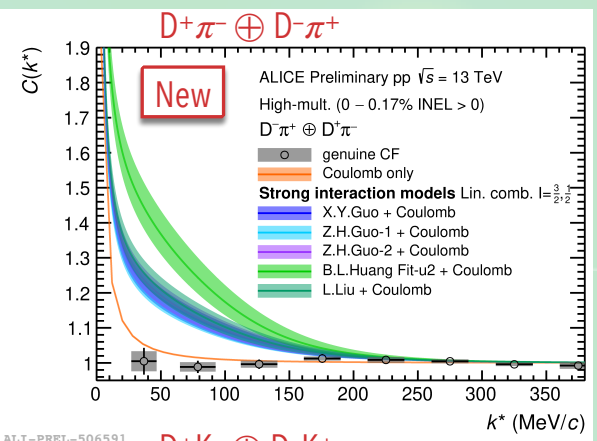
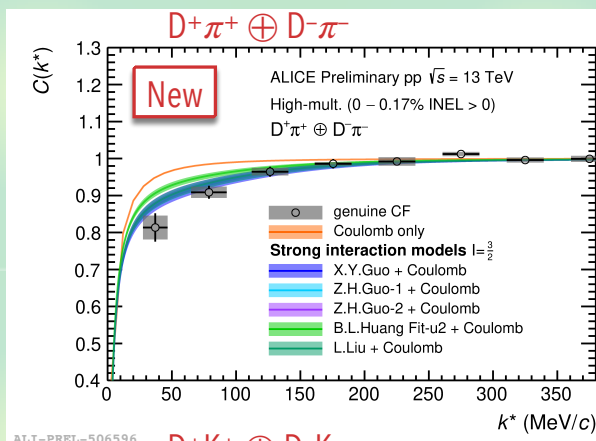
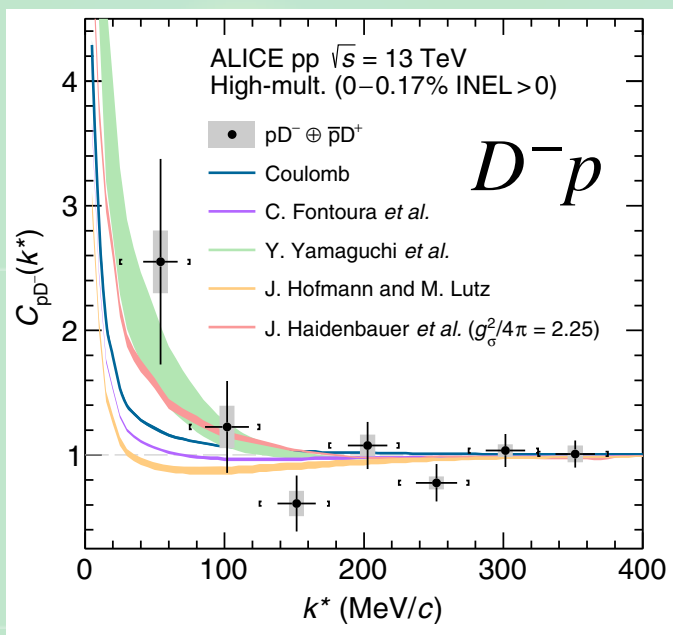
束縛状態がある場合は相関の振る舞いがソースサイズ依存

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： $DN, D\pi, DK$

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)

目次

📌 導入：ハドロン物理とフェムトスコープ

📌 ハドロン相関関数とエキゾチックハドロン

- K^-p 相関と $\Lambda(1405)$

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

- $DD^* / D\bar{D}^*$ 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

- $\Lambda\alpha$ 相関と核媒質中の Λ

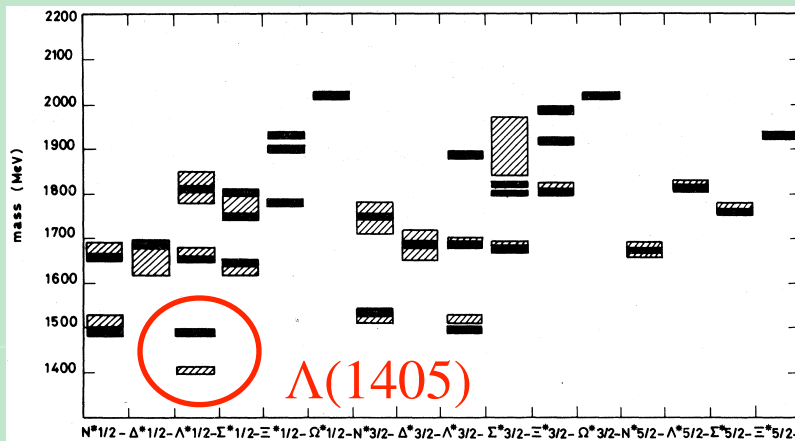
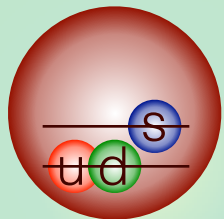
A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation

📌 まとめ

$\Lambda(1405)$ と $\bar{K}N$ 散乱

$\Lambda(1405)$ 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)

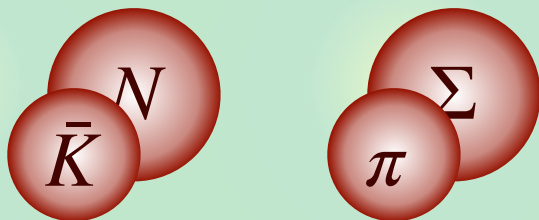
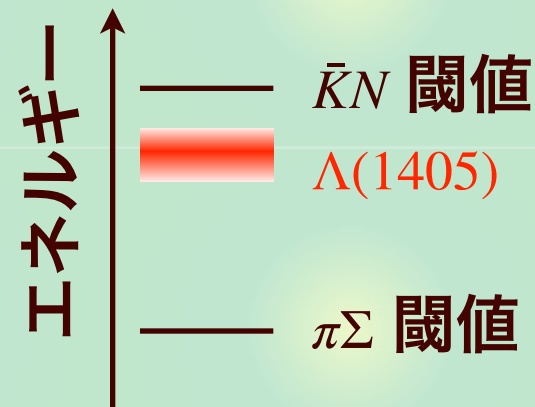


— : 理論
 ▨ : 実験

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)



PDGの極の位置

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)

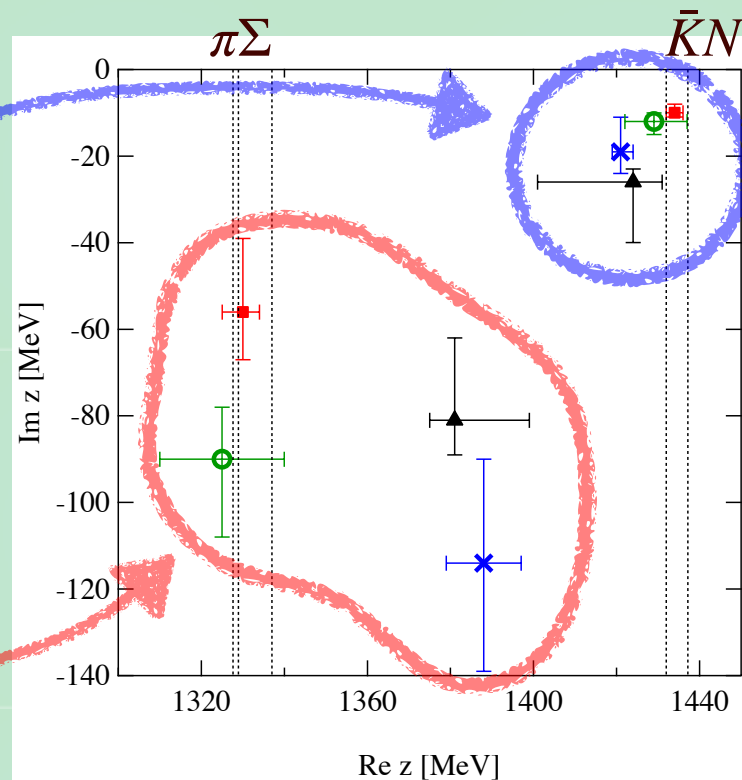
$\Lambda(1405) \ 1/2^-$

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

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

$\Lambda(1380) \ 1/2^-$

$J^P = \frac{1}{2}^-$ Status: **
new!



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

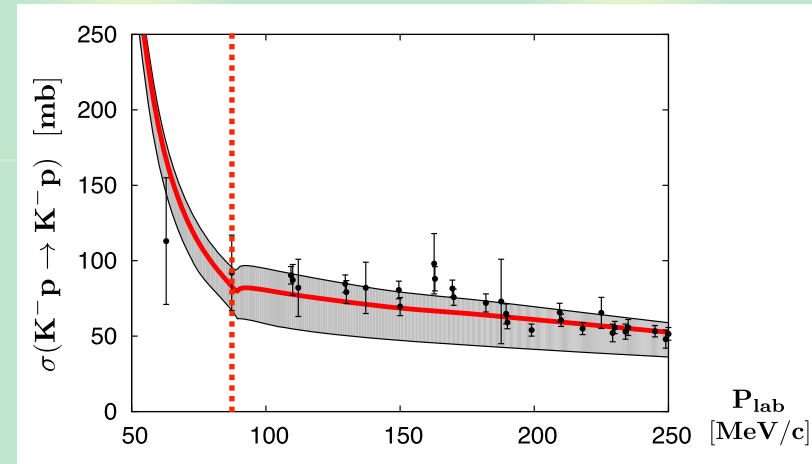
- “ $\Lambda(1405)$ ” の極は1405 MeVではなく ~ 1420 MeVに位置する
- Lower pole : 新しい two-star 共鳴 $\Lambda(1380)$

K^-p 相関の実験データ

K^-p 散乱の全断面積

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

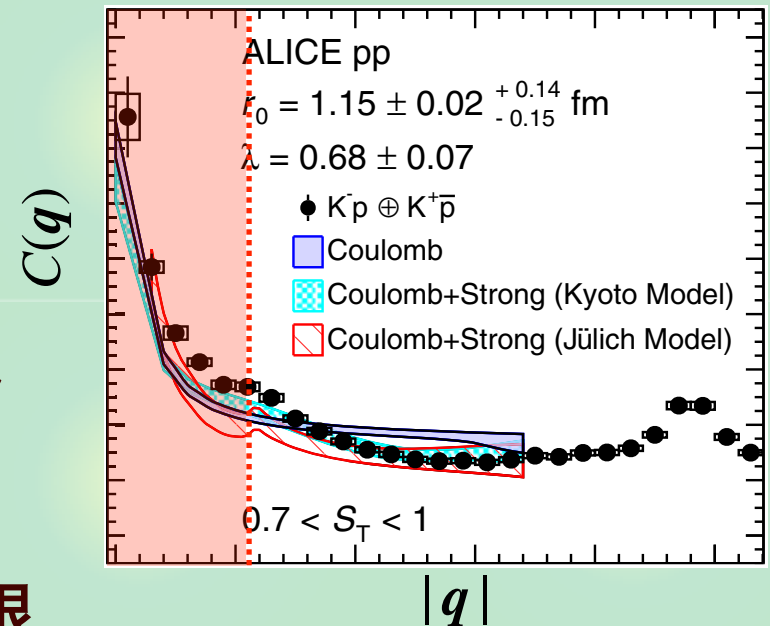
- 古い泡箱のデータ
- 統計精度、解像度が良くない
- \bar{K}^0_n 閾値カスプは見えない



K^-p 相関関数

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020)

- 高い精度 (\bar{K}^0_n カスプが見える)
- \bar{K}^0_n 閾値下のエネルギーでのデータ



→ $\Lambda(1405)$ の理論に関する重要な制限

チャンネル結合効果

s波Schrödinger方程式

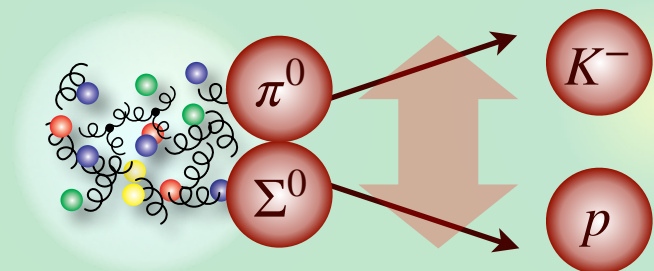
$$\begin{pmatrix} \frac{-1}{2\mu_1} \frac{d^2}{dr^2} + V_{11}(r) + V_C(r) & V_{12}(r) & \cdots \\ V_{21}(r) & \frac{-1}{2\mu_2} \frac{d^2}{dr^2} + V_{22}(r) + \Delta_2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi_{K^-p}(r) \\ \chi_{\bar{K}^0n}(r) \\ \vdots \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} \chi_{K^-p}(r) \\ \chi_{\bar{K}^0n}(r) \\ \vdots \end{pmatrix}$$

クーロン 閾値エネルギー差 (アイソスピンの破れ)

波動関数の漸近形 ($r \rightarrow \infty$)

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

- $\bar{K}^0n, \pi^+\Sigma^-, \pi^0\Sigma^0, \pi^-\Sigma^+, \pi^0\Lambda$ 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);

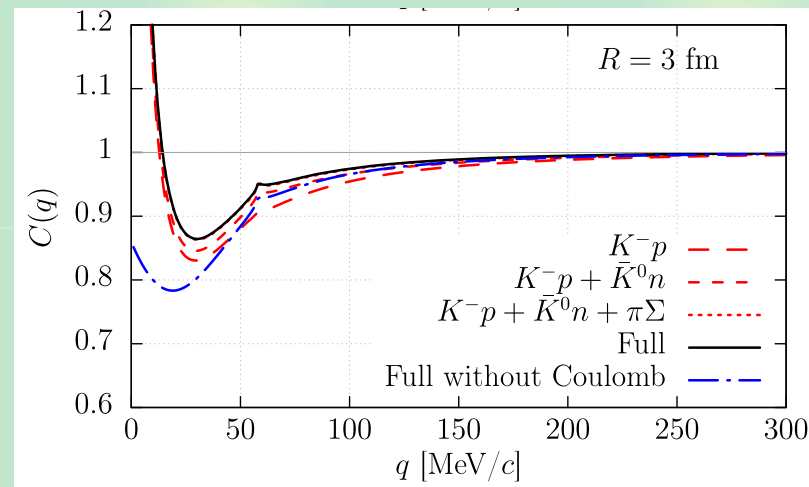
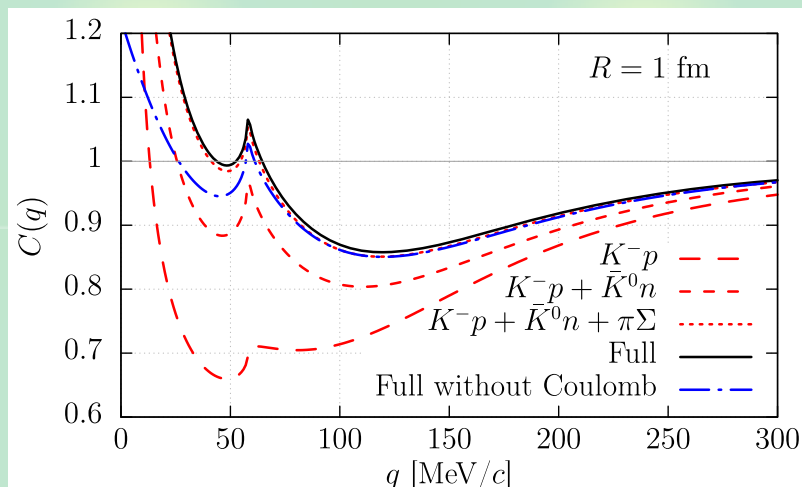
J. Haidenbauer, NPA 981, 1 (2019);

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

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

- $\bar{K}^0 n, \pi^+ \Sigma^-, \pi^0 \Sigma^0, \pi^- \Sigma^+, \pi^0 \Lambda$ からの遷移

- ω_i : K^-p に対するチャンネル i の重み



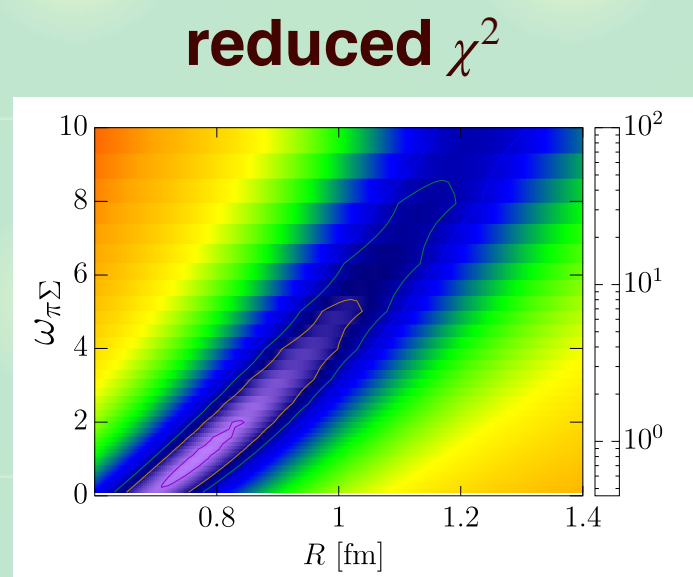
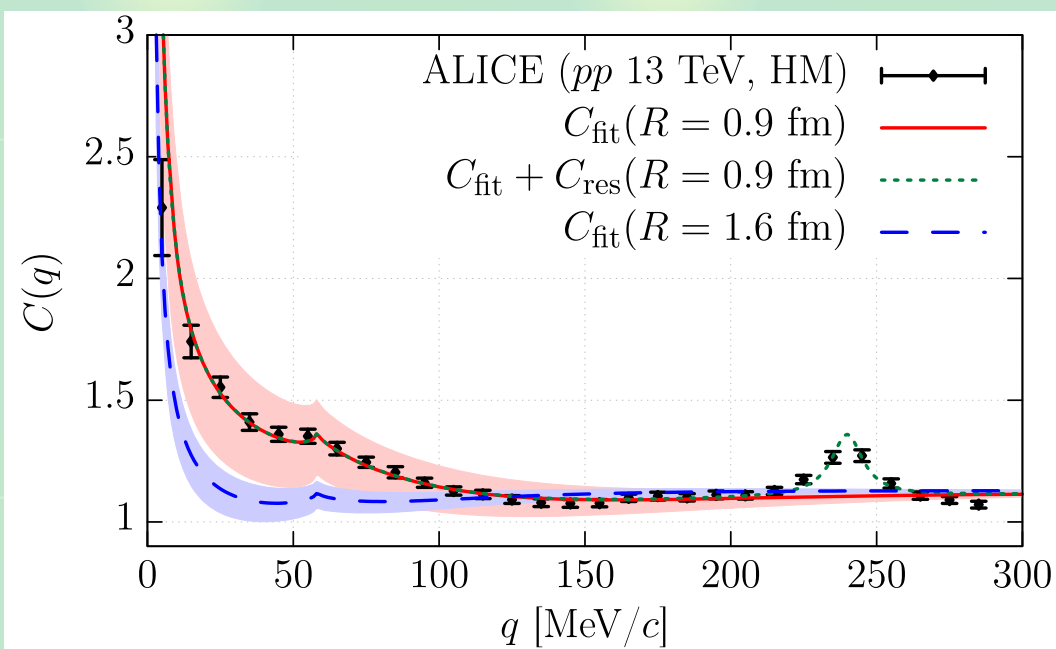
チャンネル結合効果は小さいソースで顕著

カイラルSU(3)動力学による相関関数

波動関数 $\Psi_{i,q}^{(-)}(r)$: チャンネル結合京都 $\bar{K}N-\pi\Sigma-\pi\Lambda$ 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, $R \sim 1$ fm $\leftarrow K^+p$ データ
- 重み $\omega_{\pi\Sigma} \sim 2$: 統計モデルによる見積もり



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

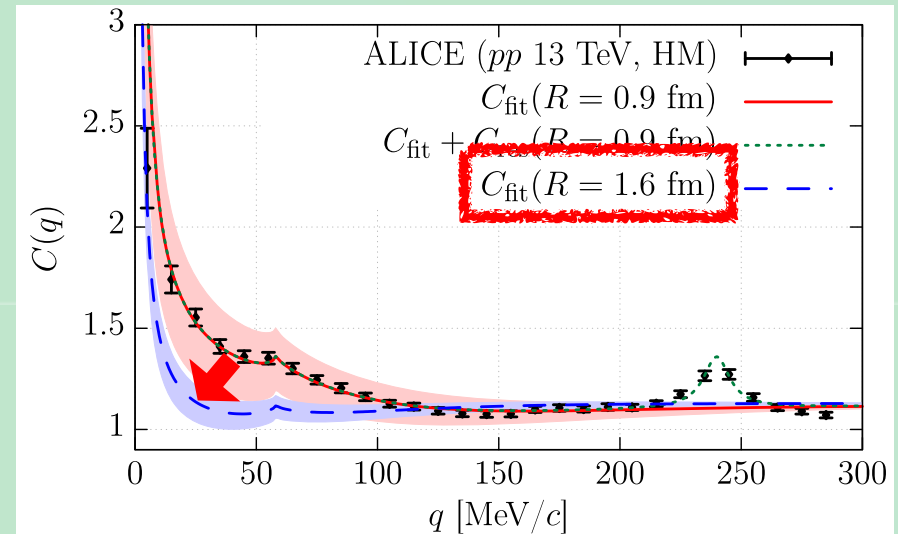
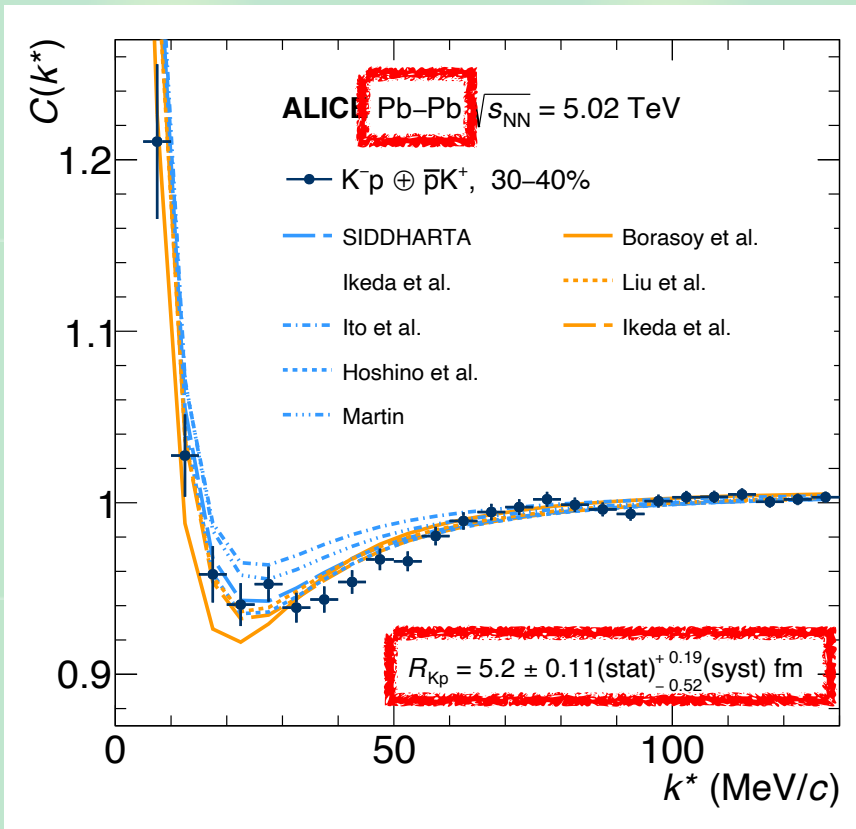
ALICEの相関関数データをよく再現する

ソースサイズ依存性

5.02 TeV Pb-Pb 衝突のデータ

ALICE collaboration, PLB 822, 136708 (2021)

- 散乱長 $a_{K^-p} = -0.91 + 0.92i$ fm



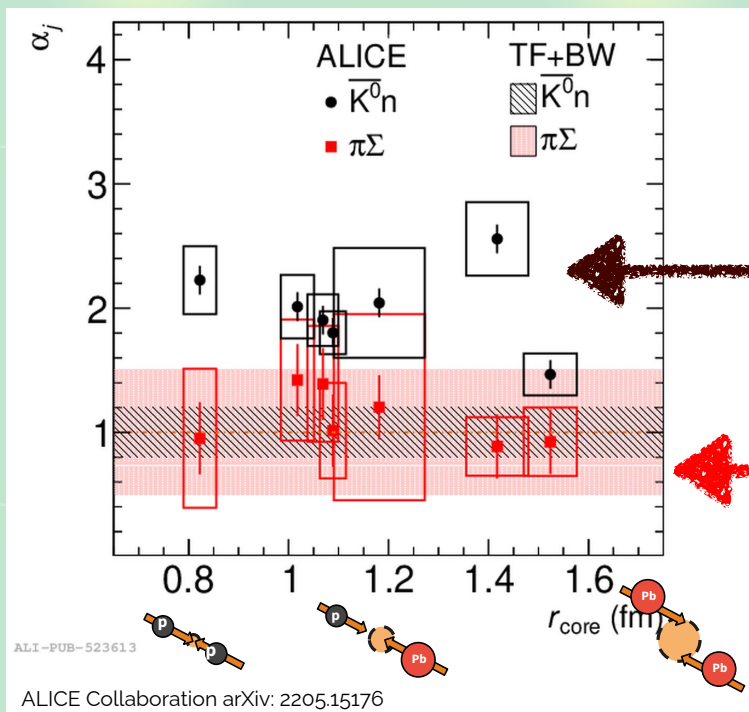
サイズ R の大きいソースで相関が抑制 ← 理論の予言

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)

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



データを説明するために
必要な増加因子

Thermal Fist + Blast Wave で
予言される ω_i

\bar{K}^0n チャンネルの強度を増加させる必要がある

目次

📌 導入：ハドロン物理とフェムトスコープ

📌 ハドロン相関関数とエキゾチックハドロン

- K^-p 相関と $\Lambda(1405)$

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

- $DD^* / D\bar{D}^*$ 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

- $\Lambda\alpha$ 相関と核媒質中の Λ

A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation

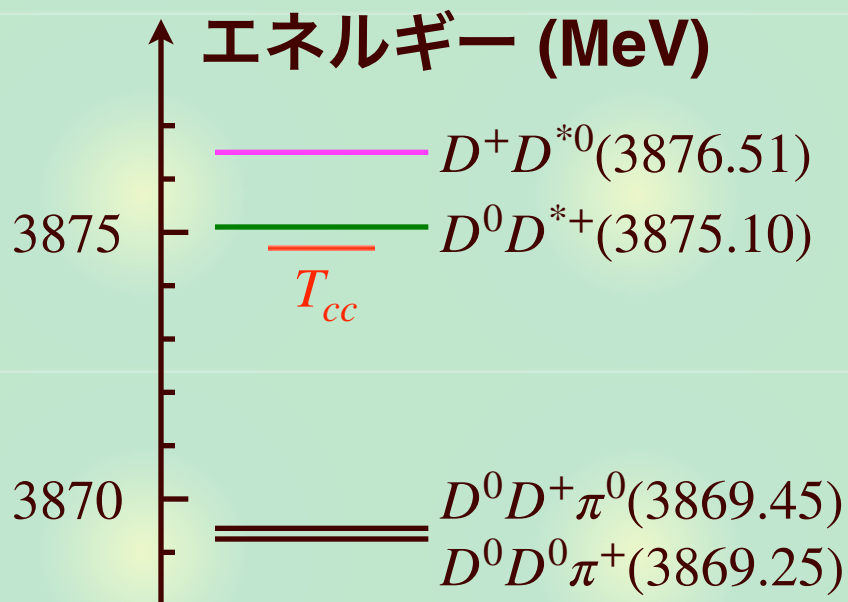
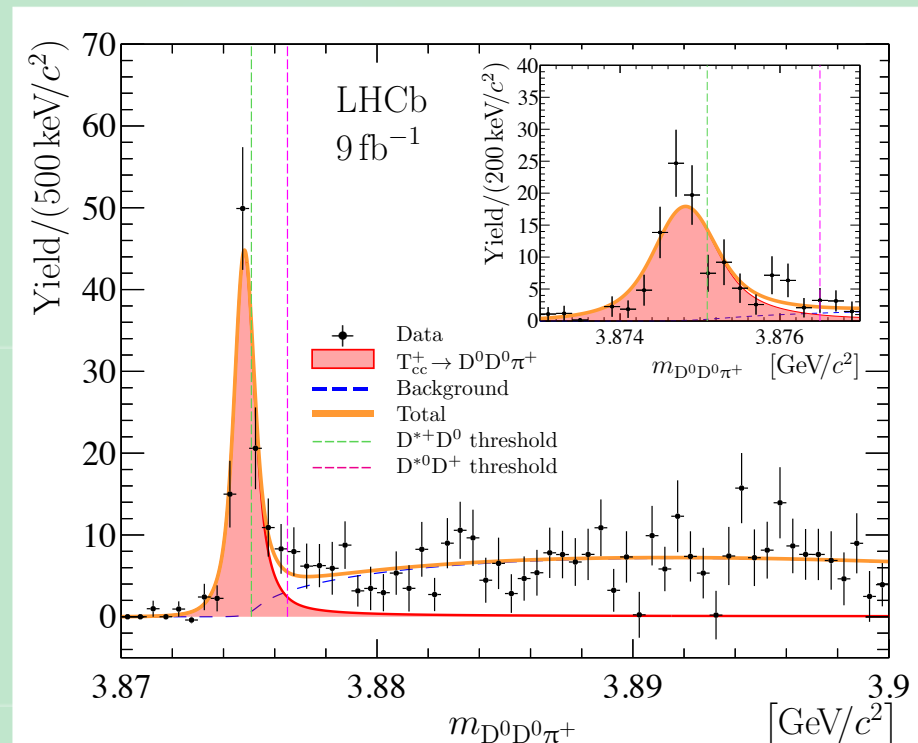
📌 まとめ

T_{cc} の観測

$D^0D^0\pi^+$ 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)

- DD^* 閾値近傍にピーク
- チャーム $C = +2$: $\sim cc\bar{u}\bar{d}$
- 準位構造

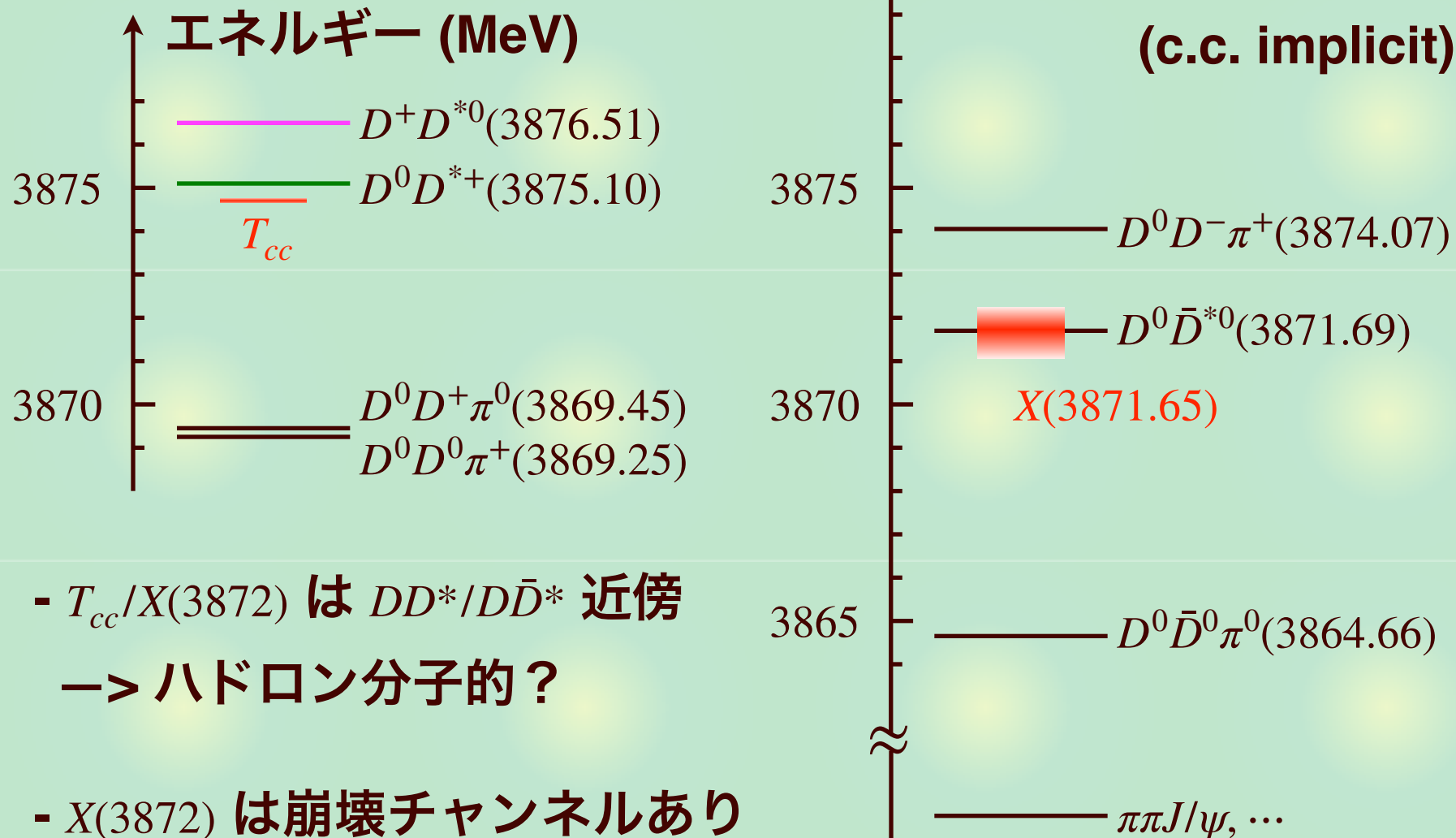


- 非常に小さい (few MeV ~ keV) エネルギースケールを含む

T_{cc} と $X(3872)$

$X(3872)$ も閾値近傍状態で $M_{T_{cc}} \sim M_{X(3872)}$

- PDGによる質量と閾値



- $T_{cc}/X(3872)$ は $DD^*/D\bar{D}^*$ 近傍

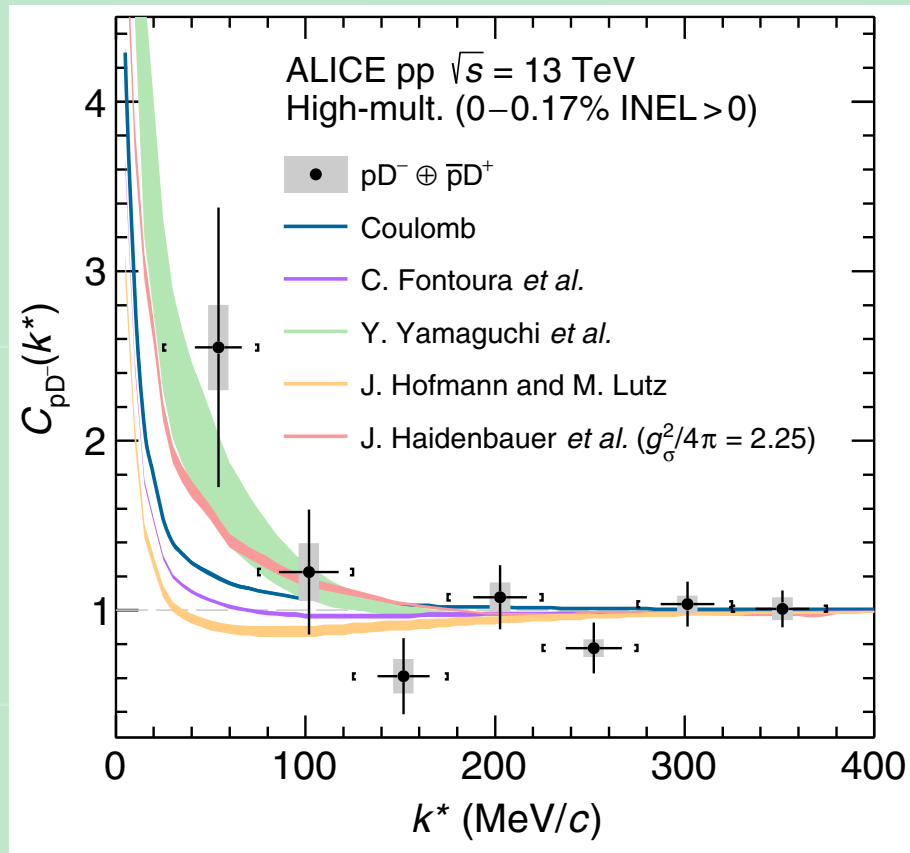
→ ハドロン分子的？

- $X(3872)$ は崩壊チャンネルあり

D^-p 相関の測定

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 $D^-p \sim \bar{c}duud$ を示唆？

チャームを含むハドロン相関は観測可能

$DD^*/D\bar{D}^*$ ポテンシャル

チャンネル結合ポテンシャル

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

↑ $\{D^+ D^{*-}\}$ にはクーロン

- $I=0$: 1レンジガウス型ポテンシャル、 $I=1$ は無視

$$V_{I=0} = V_0 \exp\{-m_\pi^2 r^2\}, \quad V_{I=1} = 0$$

↑ π 交換に基づくレンジ

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

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

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

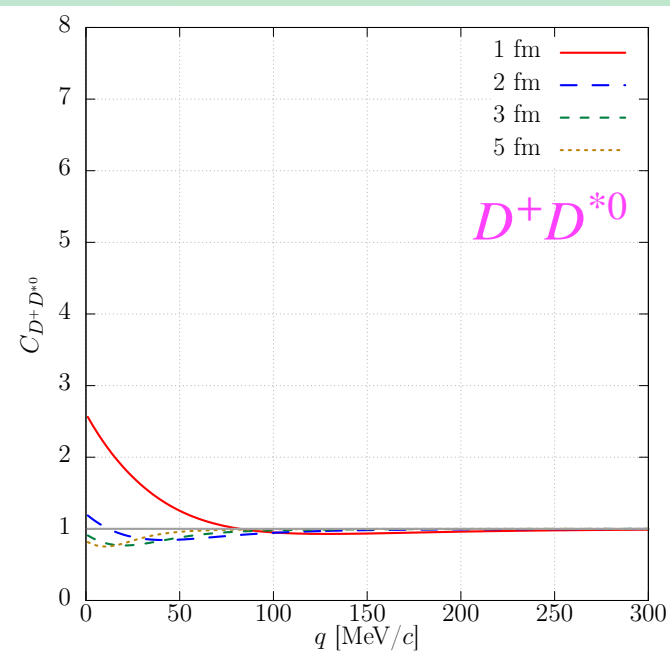
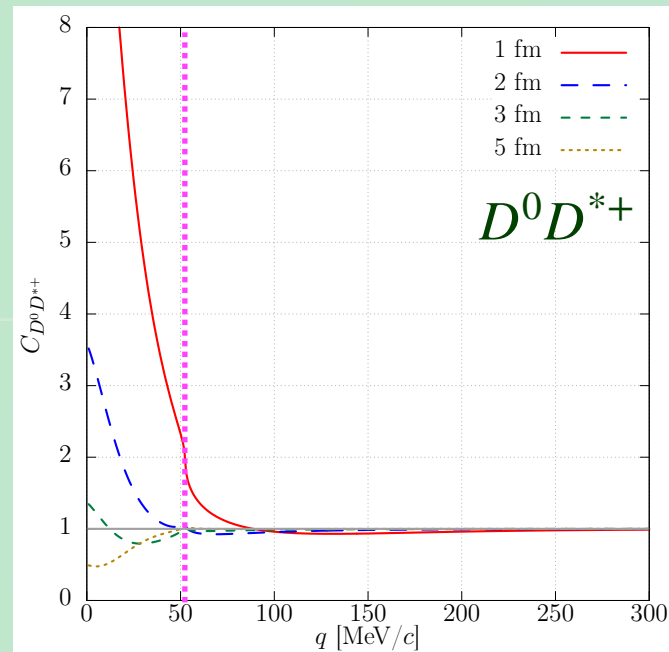
- $X(3872) : a_0^{D^0 \bar{D}^{*0}} = -4.23 + i3.95 \text{ fm} (a_0 = -i/\sqrt{2\mu E_h} \leftarrow \text{PDGの } E_h)$

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

D^+D^{*0}
 D^0D^{*+}
 T_{cc}



- 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^0D^{*+} で強いシグナル、 D^+D^{*0} 相関は比較的小さいシグナル
- D^0D^{*+} 相関中に弱い D^+D^{*0} 閾値カスプ ($q \sim 52$ MeV)

$D\bar{D}^* \sim X(3872)$ チャンネル

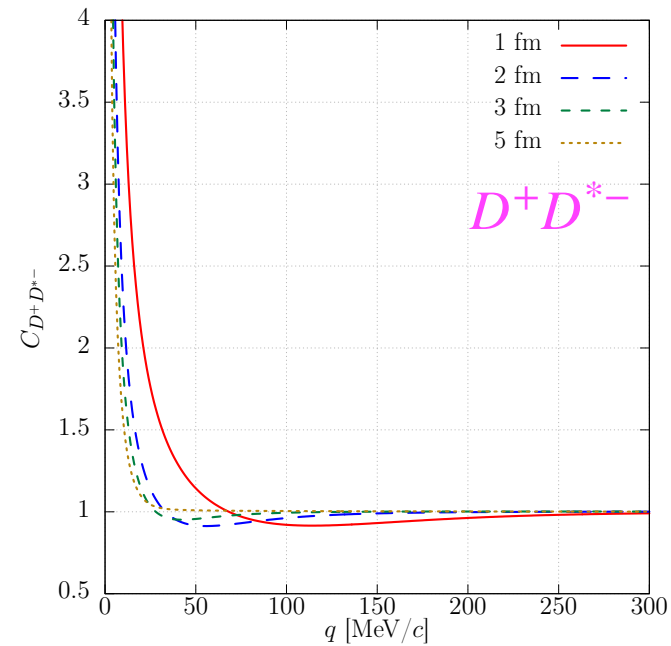
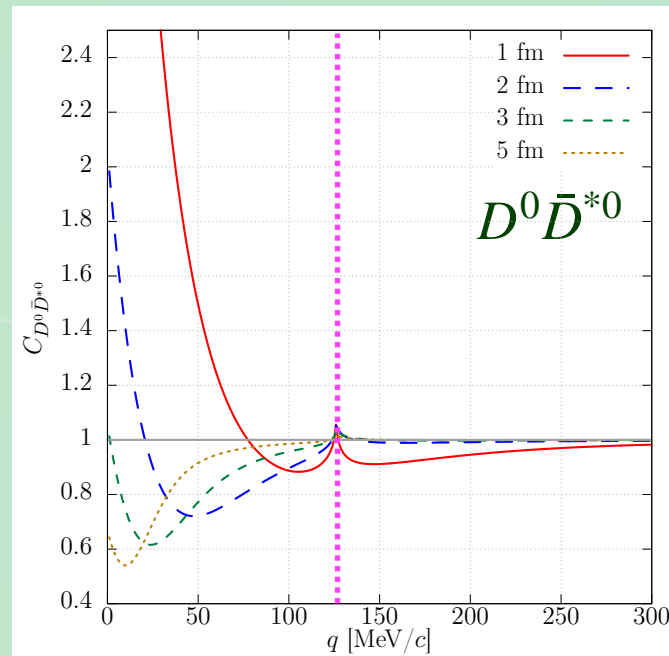
$D^0\bar{D}^{*0}$ 、 $D^+\bar{D}^{*-}$ 相関関数 ($c\bar{c}q\bar{q}$ チャンネル)

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

————— $D^+\bar{D}^{*-}$

—  — $D^0\bar{D}^{*0}$

$X(3872)$



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

目次

📌 導入：ハドロン物理とフェムトスコープ

📌 ハドロン相関関数とエキゾチックハドロン

- K^-p 相関と $\Lambda(1405)$

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

- $DD^* / D\bar{D}^*$ 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

- $\Lambda\alpha$ 相関と核媒質中の Λ

A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation

📌 まとめ

動機：高密度での斥力

中性子星中のハイペロンパズル

- 高密度で ΛNN 3体力による斥力

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

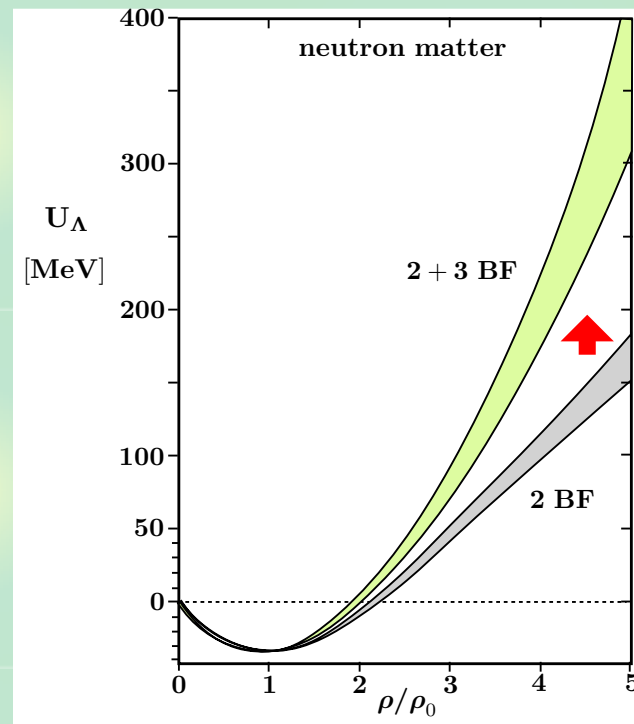
実験で検証する方法は？

- 重イオン衝突での Λ directed flow

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

Λ -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 \rightarrow 高い中心密度 $\gtrsim 2\rho_0$



高密度での斥力効果を $\Lambda\alpha$ 相関関数で検証する可能性

$\Lambda\alpha$ ポテンシャル

Λ 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 : ΛNN 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

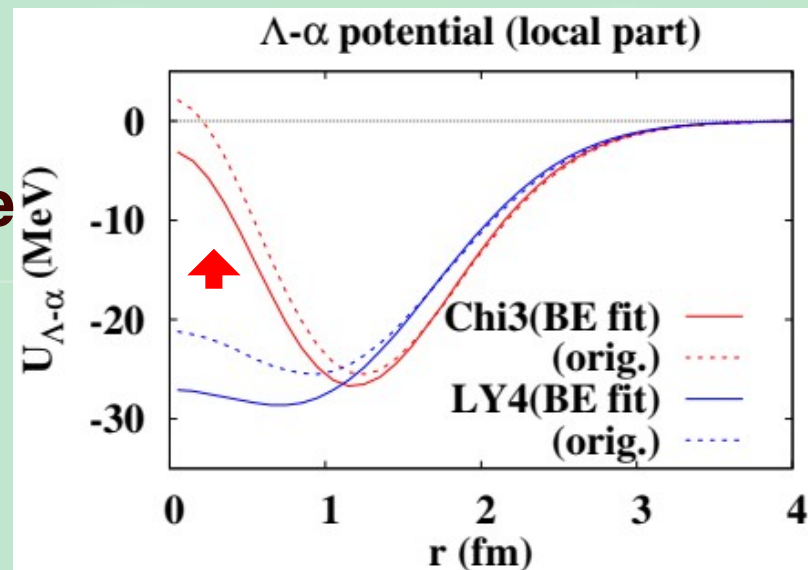
$\Lambda\alpha$ ポテンシャル

- ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ 束縛エネルギーを overestimate

→ パラメーターを調整 (BE fit)

- LY4 : ウッズサクソンの

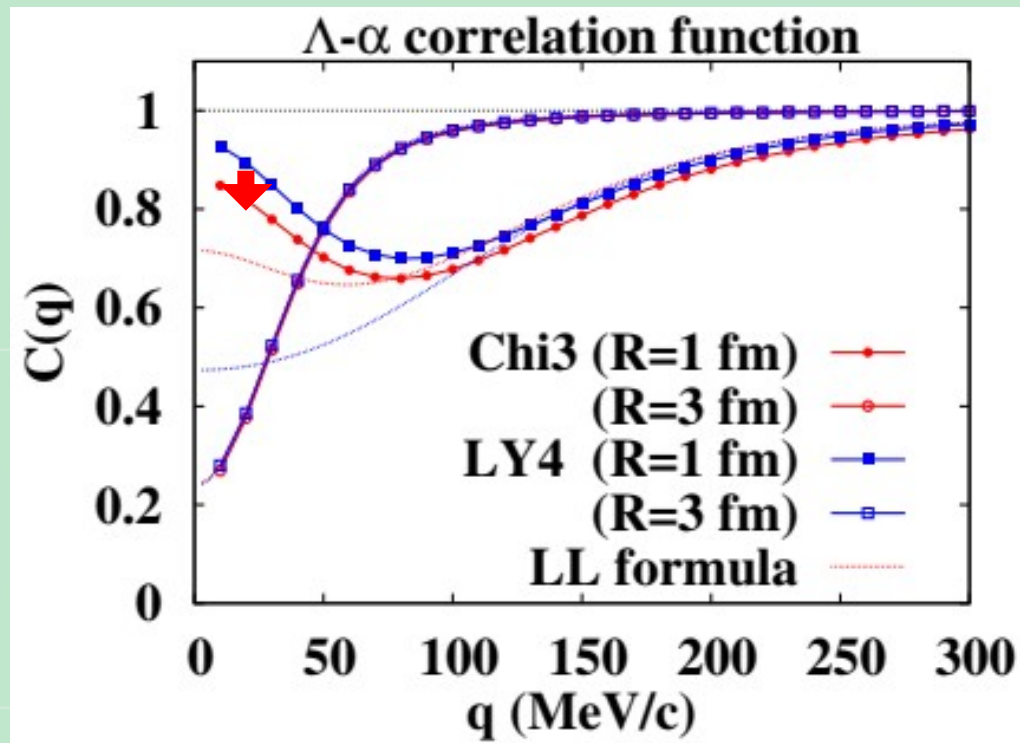
- Chi3 : 中心で斥力的



$\Lambda\alpha$ 相関関数

相関関数の結果

A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation



- 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

まとめ

📌 高エネルギー衝突実験での相関関数はエキゾチック
クハドロン・原子核の相互作用の研究に有用

📌 K^-p 相関

- $\Lambda(1405)$ と $\bar{K}N$ 相互作用の精密な検証

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

📌 $DD^* / D\bar{D}^*$ 相関

- (準) 束縛状態 $T_{cc} / X(3872)$ の性質を反映

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

📌 $\Lambda\alpha$ 相関

- ハイパー核物理への展望

A. Jinno, Y. Kamiya, T. Hyodo, A. Ohnishi, in preparation