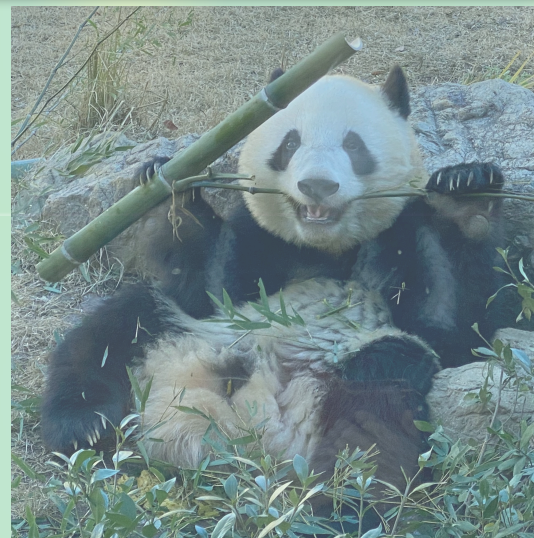


フェムトスコピーで探る 強い相互作用の世界



兵藤 哲雄

東京都立大学



2023, Dec. 7th

目次

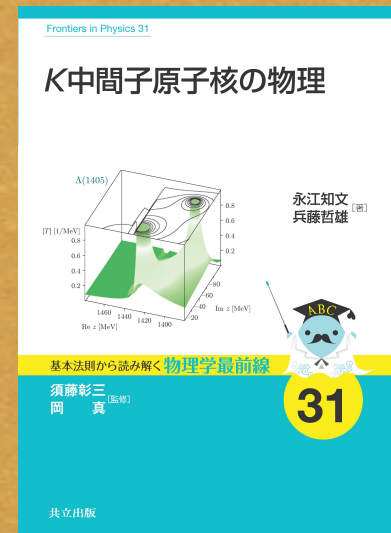


導入：強い相互作用とハドロン
- ハドロン物理の難しさ/面白さ

ハドロン物理とフェムトスコーピー
- ハドロン間相互作用の解明

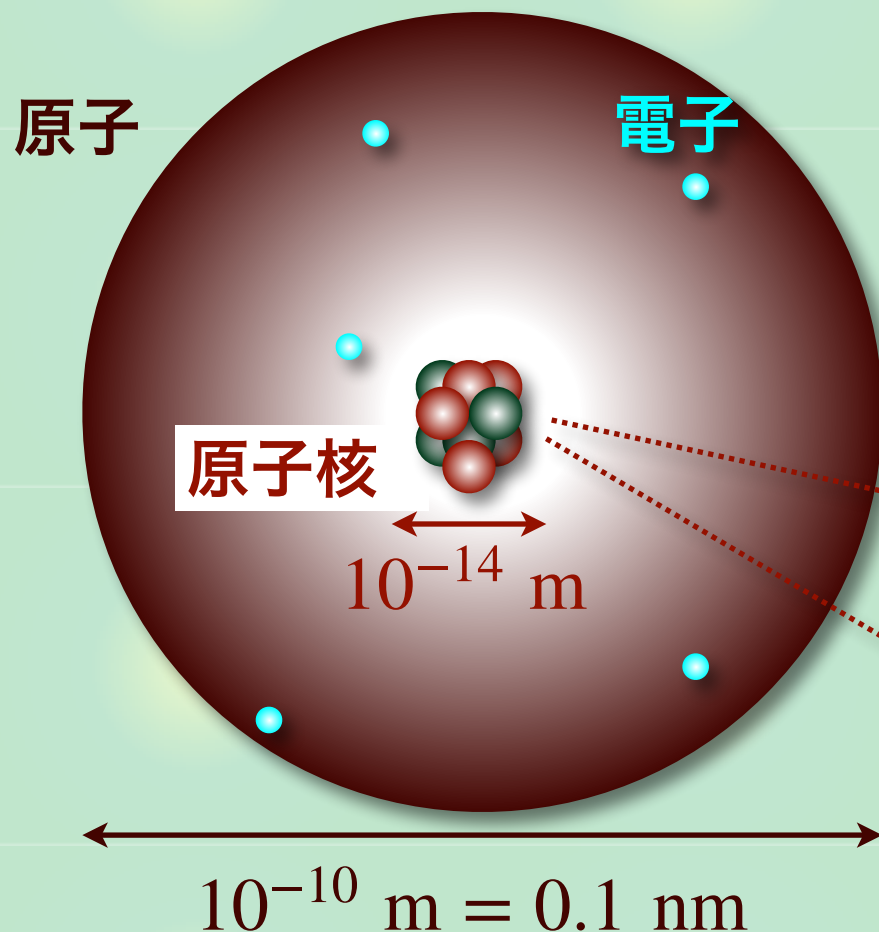
フェムトスコーピーの応用
- K^-p 相互作用と $\Lambda(1405)$ 共鳴

まとめ



参考：永江知文、兵藤哲雄「K中間子原子核の物理」（共立出版）

原子、原子核、ハドロン、クォーク



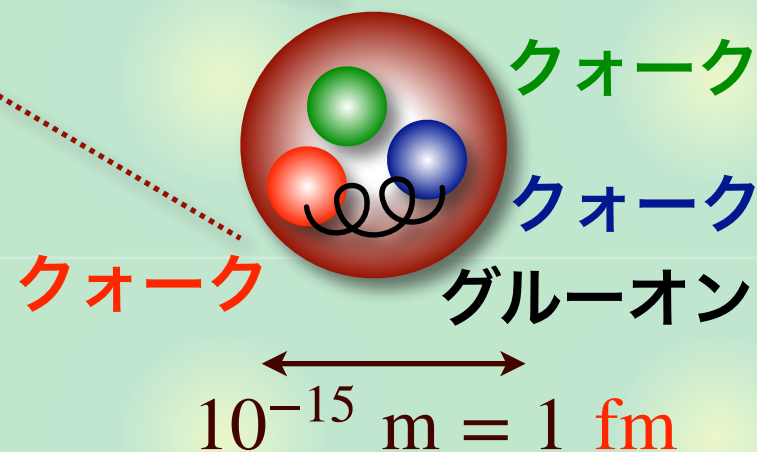
マイクロ $\mu = 10^{-6}$

ナノ $\text{n} = 10^{-9}$

ピコ $\text{p} = 10^{-12}$

フェムト $\text{f} = 10^{-15}$

アト $\text{a} = 10^{-18}$



ハドロン：陽子、中性子など、スケールは**フェムトメートル**

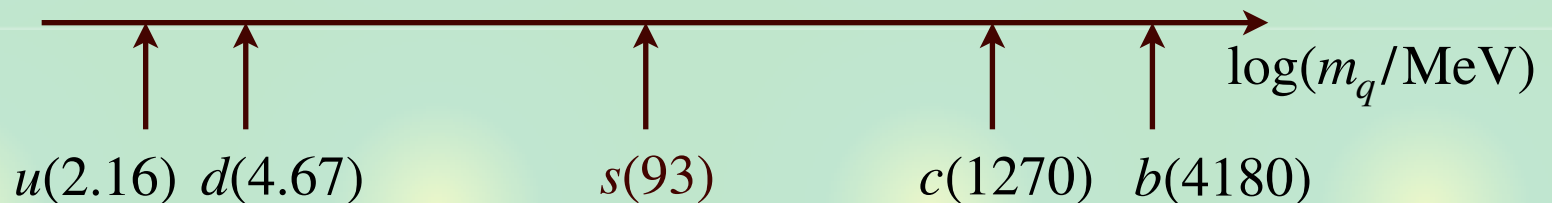
クォークとは

クォークはカラー（色電荷）を持つ ← 南部さん

- カラー：（スピンのような）内部自由度
- クォーク：赤、青、緑 ● ● ●
- 反クォーク：反赤、反青、反緑 ● ● ●

クォークはフレーバーを持つ

- クォークの種類 (u, d, s, c, b, t)
- フレーバー毎に質量が大きく異なる



- トップ (t) クォークはハドロンを作らない

ハドロンとは

ハドロン：クォーク、グルーオンの自己束縛系（複合状態）

- 現在までに約380種が観測されている

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 ⁻ ****	$\Xi(2030)$	$\geq \frac{5}{2}^?$ ***	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 ⁻ **	$\Xi_b(5935)^0$	1/2 ⁺ ***	$\Xi_b(5935)^0$	1/2 ⁺ ***
$N(1880)$	1/2 ⁺ ***	$\Delta(2150)$	1/2 ⁻ *	$\Sigma(1910)$	3/2 ⁻ ***	$\Xi_b(5945)^0$	3/2 ⁺ ***	$\Xi_b(5945)^0$	3/2 ⁺ ***

バリオン：陽子、中性子など

LIGHT UNFLAVORED ($S=C=B=0$)		STRANGE ($S=\pm 1, C=B=0$)		CHARMED, STRANGE ($C=S=\pm 1$)		cc continued $P(P^C)$	
$P(P^C)$	$P(P^C)$	$P(P^C)$	$P(P^C)$	$P(P^C)$	$P(P^C)$	$P(P^C)$	$P(P^C)$
π^\pm	1 ⁻ (0 ⁻)	$\pi_2(1670)$	1 ⁻ (2 ⁻)	K^\pm	1/2(0 ⁻)	D_s^\pm	0 ⁻ (1 ⁻)
π^0	1 ⁻ (0 ⁻)	$\phi(1680)$	0 ⁻ (1 ⁻)	K^0	1/2(0 ⁻)	D_s^\pm	0 ⁻ (2 ⁻)
η	0 ⁺ (0 ⁺)	$\rho_3(1690)$	1 ⁺ (3 ⁻)	K_S^0	1/2(0 ⁻)	D_{s1}^\pm	0 ⁺ (3 ⁻)
$\eta(500)$	0 ⁺ (0 ⁺)	$\rho(1700)$	1 ⁺ (1 ⁻)	K_L^0	1/2(0 ⁻)	$D_{s1}(2317)^\pm$	0 ⁺ (0 ⁺)
$\eta(770)$	1 ⁺ (1 ⁻)	$a_2(1700)$	1 ⁺ (2 ⁺)	$K_2^0(700)$	1/2(0 ⁺)	$D_{s1}(2460)^\pm$	0 ⁺ (1 ⁺)
$\omega(782)$	0 ⁺ (1 ⁻)	$\phi(1710)$	0 ⁺ (0 ⁺)	$K^*(892)$	1/2(1 ⁻)	$D_{s1}(2536)^\pm$	0 ⁺ (1 ⁺)
$\eta(958)$	0 ⁺ (0 ⁺)	$\eta(1760)$	0 ⁺ (0 ⁺)	$K_2^*(1270)$	1/2(1 ⁻)	$D_{s1}(2666)^\pm$	0 ⁺ (1 ⁺)
$\phi(980)$	0 ⁺ (0 ⁺)	$\eta(1800)$	1 ⁺ (0 ⁺)	$K_2^*(1400)$	1/2(1 ⁻)	$D_{s1}(2700)^\pm$	0 ⁺ (1 ⁺)
$a_0(980)$	1 ⁺ (0 ⁺)	$\chi(1835)$	2 ⁺ (0 ⁺)	$K_2^*(1430)$	1/2(1 ⁻)	$D_{s1}(2866)^\pm$	0 ⁺ (1 ⁺)
$\phi(1020)$	0 ⁺ (1 ⁻)	$\chi(1835)$	2 ⁺ (0 ⁺)	$K_2^*(1430)$	1/2(1 ⁻)	$D_{s1}(3040)^\pm$	0 ⁺ (1 ⁺)
$h_1(1170)$	0 ⁺ (1 ⁺)	$\phi_3(1850)$	0 ⁺ (3 ⁻)	$K_2^*(1430)$	1/2(2 ⁺)	BOTTOM ($B=\pm 1$)	
$h_1(1235)$	1 ⁺ (1 ⁺)	$\eta_2(1870)$	0 ⁺ (2 ⁺)	$K(1460)$	1/2(0 ⁻)	B^+	1/2(0 ⁻)
$a_2(1260)$	1 ⁺ (1 ⁺)	$\eta_2(1880)$	1 ⁺ (2 ⁺)	$K_2^*(1530)$	1/2(2 ⁺)	B^0	1/2(0 ⁻)
$\phi(1270)$	0 ⁺ (2 ⁺)	$\rho(1900)$	1 ⁺ (1 ⁻)	$K(1630)$	1/2(2 ⁺)	B^+	1/2(0 ⁻)

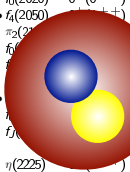
メソン： π 中間子など

$N(189)$	$3/2^-$	*	$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**	$\Sigma(2400)$	$5/2^-$	*	Λ_c^+	$1/2^+$	****	$P_c(4312)^+$	*
$N(190)$	$5/2^-$	***	$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	*	Λ_c^0	$1/2^+$	****	$P_c(4380)^+$	*
$N(199)$	$1/2^+$	***	$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**	$\Sigma(2100)$	$7/2^-$	*	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^+$	****	$P_c(4440)^+$	*
$N(200)$	$3/2^-$	***	$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**	$\Sigma(2160)$	$1/2^-$	*	$\Lambda_c(2625)^+$	$1/2^+$	****	$P_c(4457)^+$	*
$N(2040)$	$7/2^-$	****				$\Sigma(2230)$	$3/2^+$	*	$\Lambda_c(2720)^+$	$1/2^+$	****		
$N(2190)$	$9/2^+$	****	Λ	$1/2^+$	****	$\Sigma(2250)$		***	$\Lambda_c(2720)^0$	$1/2^+$	****		
$N(2220)$	$9/2^+$	****	Λ	$1/2^-$	**	$\Sigma(2455)$		**	$\Lambda_c(2720)^-$	$1/2^+$	****		
$N(2250)$	$1/2^+$	**	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	****	$\Sigma(2620)$		**	$\Lambda_c(2720)^+$	$1/2^+$	****		
$N(2300)$	$5/2^-$	**	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(3000)$		*	$\Lambda_c(2720)^0$	$1/2^+$	****		
$N(2570)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	****	$\Sigma(3170)$		*	$\Lambda_c(2720)^-$	$1/2^+$	****		
$N(2600)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	****				$\Lambda_c(2720)^+$	$1/2^+$	****		
$N(2700)$			$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	****				$\Lambda_c(2720)^0$	$1/2^+$	****		
			$\Lambda(1710)$	$1/2^+$	*				$\Lambda_c(2720)^-$	$1/2^+$	****		
			$\Lambda(1800)$	1									
			$\Lambda(1810)$	1									
			$\Lambda(1820)$	5									
			$\Lambda(1830)$	5									
			$\Lambda(1890)$	3									
			$\Lambda(2000)$	$1/2^-$	*				$\Xi_c(2930)$		**		
			$\Lambda(2050)$	$3/2^-$	*				$\Xi_c(2970)$		***		
			$\Lambda(2070)$	$3/2^+$	*				$\Xi_c(3055)$		***		
			$\Lambda(2080)$	$5/2^-$	*				$\Xi_c(3080)$		***		
			$\Lambda(2085)$	$7/2^+$	**				$\Xi_c(3123)$		*		
			$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****				Ω_c^+	$1/2^+$	***		
			$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***				$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$	***		
			$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*				$\Omega_c(3000)^0$		***		
			$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***				$\Omega_c(3050)^0$		***		
			$\Lambda(2585)$		**				$\Omega_c(3065)^0$		***		
									$\Omega_c(3090)^0$		***		
									$\Omega_c(3120)^0$		***		

3クォーク qqq

3クォーク qqq

メソン： π 中間子など

<ul style="list-style-type: none"> $\eta(1405)$ $0^-(0^-)$ $h_1(1415)$ $0^-(1^-)$ $a_1(1420)$ $1^-(1^-)$ $f_1(1420)$ $0^+(1^-)$ $\omega(1420)$ $0^-(1^-)$ $f_2(1430)$ $0^+(2^-)$ $a_1(1450)$ $1^-(0^-)$ $f_2(1450)$ $1^-(1^-)$ $f_2(1475)$ $0^+(0^-)$ $f_0(1500)$ $0^+(0^+)$ $f_2(1510)$ $0^+(1^-)$ $f_2'(1525)$ $0^+(2^+)$ $f_2(1565)$ $0^+(2^+)$ $f_0(1570)$ $1^-(1^-)$ 	<ul style="list-style-type: none"> $f_2(2010)$ $0^+(2^+)$ $f_0(2020)$ $0^+(0^+)$ $f_4(2050)$ $4^-(4^-)$ $f_2(2100)$ $2^-(2^-)$ $f_2(2160)$ $2^-(2^-)$ $\eta(2225)$ $1^-(3^-)$ $\eta(2250)$ $1^+(3^-)$ $f_2(2300)$ $0^+(2^+)$ 	<ul style="list-style-type: none"> $K_2^*(1950)$ $1/2(0^+)$ $K_2^*(1980)$ $1/2(2^+)$ $K_2^*(2045)$ $1/2(4^+)$ $K_2^*(2250)$ $1/2(2^-)$ $K_2^*(2320)$ $1/2(3^+)$ $K_2^*(2330)$ $1/2(5^-)$ $K_2^*(2380)$ $1/2(4^-)$ $K_2^*(3100)$ $2^-(2^?)$ 	<ul style="list-style-type: none"> $B_s(5721)^+$ $1/2(1^+)$ $B_s(5721)^0$ $1/2(1^+)$ $B_s^*(5732)$ $2^-(2^?)$ $B_s^*(5747)^+$ $1/2(2^+)$ $B_s^*(5747)^0$ $1/2(2^+)$ $B_s(5840)^+$ $1/2(2^?)$ $B_s(5840)^0$ $1/2(2^?)$ $B_s(5970)^+$ $1/2(2^?)$ $B_s(5970)^0$ $1/2(2^?)$ 	<ul style="list-style-type: none"> $\psi(4260)$ $0^-(1^-)$ $\chi_{c1}(4274)$ $0^+(1^-)$ $\chi(4350)$ $0^+(2^+)$ $\psi(4360)$ $0^-(1^-)$ $\psi(4390)$ $0^-(1^-)$ $\psi(4415)$ $0^-(1^-)$ $Z_c(4430)$ $1^+(1^-)$ $\chi_{c0}(4500)$ $0^+(0^+)$ $\psi(4660)$ $0^-(1^-)$ $\chi_{c0}(4700)$ $0^+(0^+)$ 			
<div>  </div>					CHARMED ($C = \pm 1$)	BOTTOM, STRANGE ($B = \pm 1, S = \pm 1$)	$b\bar{b}$ (+ possibly non- $q\bar{q}$ states)
					<ul style="list-style-type: none"> D^{*-} $1/2(0^-)$ D^0 $1/2(0^-)$ $D^{*+}(2007)^0$ $1/2(1^-)$ 	<ul style="list-style-type: none"> B_s^{*0} $0(0^-)$ B_s^- $0(1^-)$ 	<ul style="list-style-type: none"> $\psi(15)$ $0^-(1^-)$

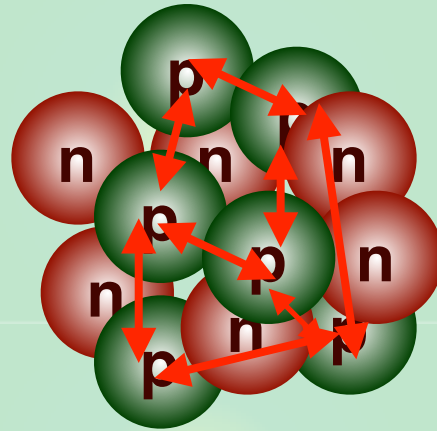
クォーク反クォーク $q\bar{q}$

<ul style="list-style-type: none"> $\omega(1415)$ $0^-(1^-)$ $\eta(1415)$ $0^-(1^-)$ $\eta(1415)$ $0^-(1^-)$ $\eta(1415)$ $0^-(1^-)$ 	Further States	<ul style="list-style-type: none"> $D_s^*(2460)^0$ $1/2(2^+)$ $D_s^*(2460)^+$ $1/2(2^+)$ $D(2550)^0$ $1/2(2^?)$ $D(2600)$ $1/2(2^?)$ $D^*(2640)^+$ $1/2(2^?)$ $D(2740)^0$ $1/2(2^?)$ $D_s^*(2750)$ $1/2(3^-)$ $D(3000)^0$ $1/2(2^?)$ 	($D = C = S = 0$)	<ul style="list-style-type: none"> B_c^{*-} $0(0^-)$ $B_c(2S)^+$ $0(0^-)$ 	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)	($D = C = S = 0$)
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------

原子核と強い相互作用

原子核：陽子、中性子の自己束縛系（勝手に分解しない）

- 例) ^{12}C (炭素)



- 陽子 (proton) : 電荷 $Q = +1$
- 中性子 (neutron) : 電荷 $Q = 0$

陽子間の電磁気力は**斥力**

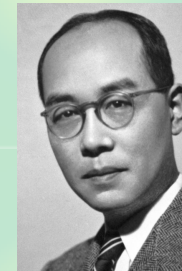
- **強い相互作用** : 電磁気力に打ち勝って原子核を束縛させる力

核力のメカニズム

核力は π 中間子の交換で媒介される

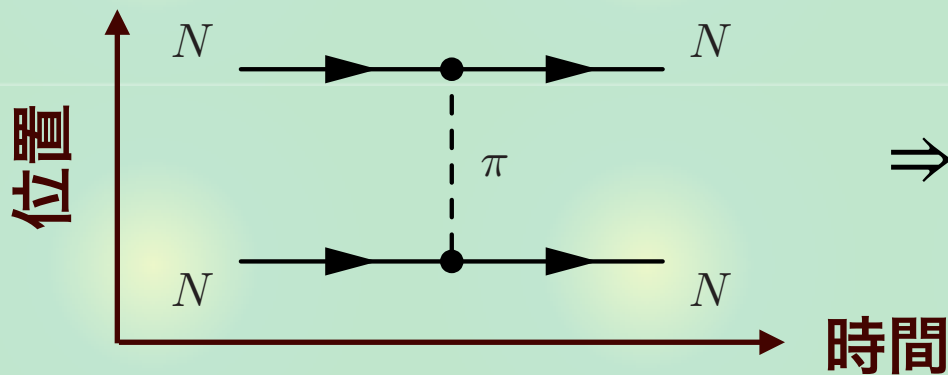


(1949年)



<https://www.nobelprize.org>

- ファインマン図による表現



$$\Rightarrow F \sim \frac{g^2}{4\pi} \frac{\exp\{-\mu r\}}{r^2}$$

- **短距離力**：距離 ~ 1 fm 以上ではほとんどゼロ（指数関数的）
- **非中心力**：距離 r だけでなく角度などに依存する

重力、電磁気力とは全く性質が異なる

4つの相互作用と素粒子標準理論

自然界には4つの基本相互作用が存在

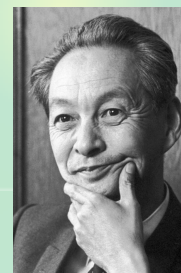
- 重力：ニュートン力学 → 一般相対性理論

標準理論

- 電磁気力：マクスウェル方程式 → 量子電磁力学 (QED)



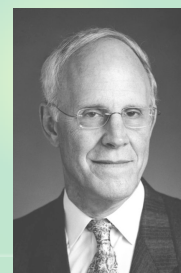
(1965年)



- 強い相互作用：量子色力学 (QCD)



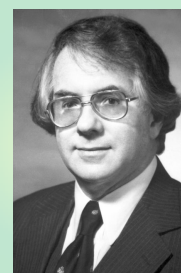
(2004年)



- 弱い相互作用：電弱統一理論

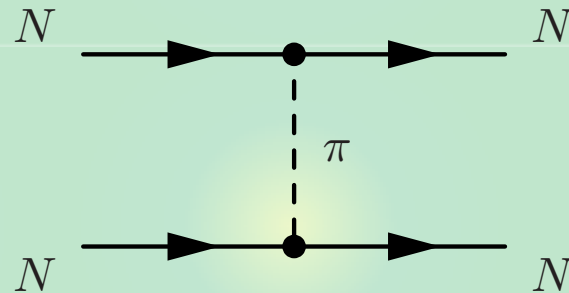
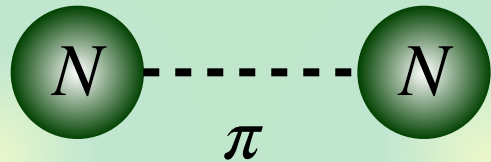


(1979年)

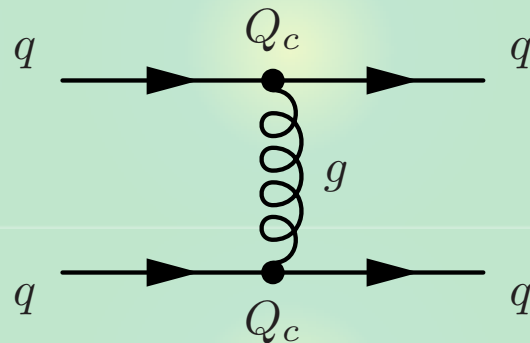
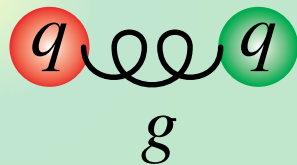


核力とQCDの相互作用

核力：核子間の強い引力



強い相互作用：クォーク・グルーオン間のQCD相互作用



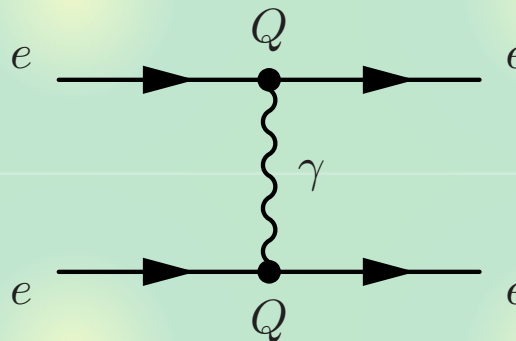
- 核子や中間子もクォーク・グルーオンからできている
- 強い核力の起源もQCDの相互作用

電磁相互作用の基礎理論

量子電磁力学 Quantum Electrodynamics, QED

$$\mathcal{L}_{\text{QED}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \bar{e}(i\gamma^\mu D_\mu - m)e$$

- 電子 e と光子 γ の理論
- 量子効果を含めて電磁相互作用の全てを記述
- 光子は電荷を持たない：光子間は相互作用しない



The diagram shows two horizontal lines representing electrons (e) moving from left to right. Each line has an arrow pointing right and is labeled with e at both ends. A vertical wavy line, representing a photon (γ), connects the two electron lines. The top vertex is labeled Q and the bottom vertex is labeled Q . The wavy line is labeled γ in the middle. To the right of the diagram is an arrow pointing to the equation $F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{r^2}$.

$$\Rightarrow F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{r^2}$$

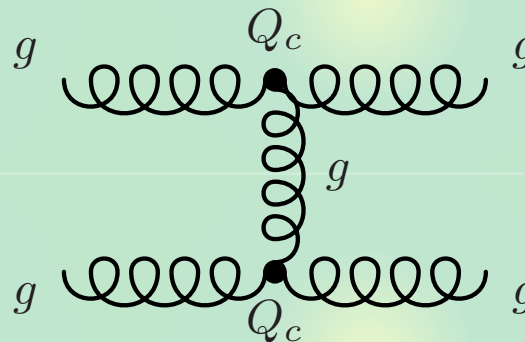
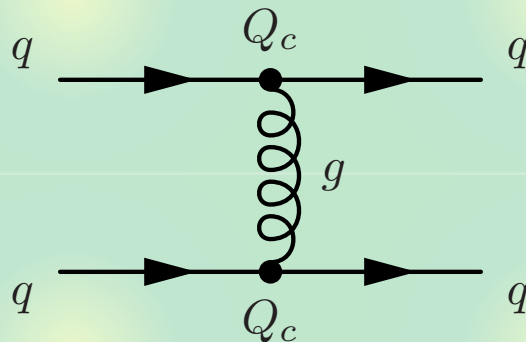
- 電子間の相互作用：クーロン力 (+量子効果)

強い相互作用の基礎理論

量子色力学 Quantum Chromodynamics, QCD

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{a,\mu\nu} + \bar{q}_{i,f} (i\gamma^\mu (D_\mu)_{ij} - m_f \delta_{ij}) q_{j,f}$$

- クォーク q とグルーオン g の理論
- 量子効果を含めて強い相互作用の全てを記述
- クォークとグルーオンはカラー電荷(a, i, j)を持つ

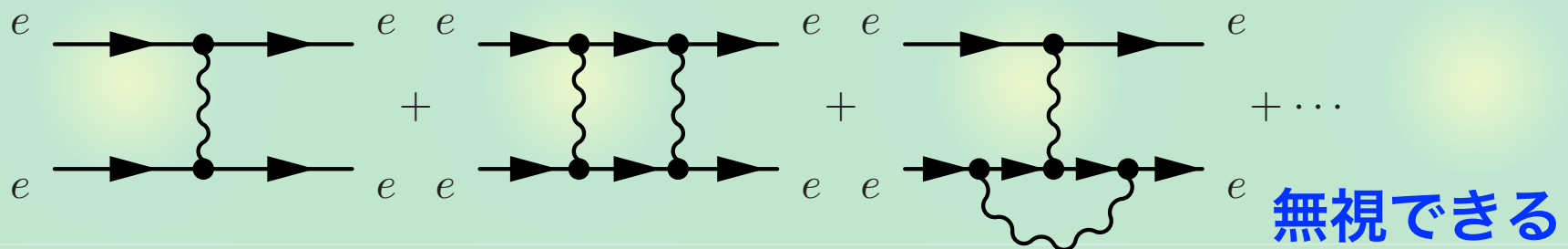


- グルーオン間も相互作用する

量子効果の計算

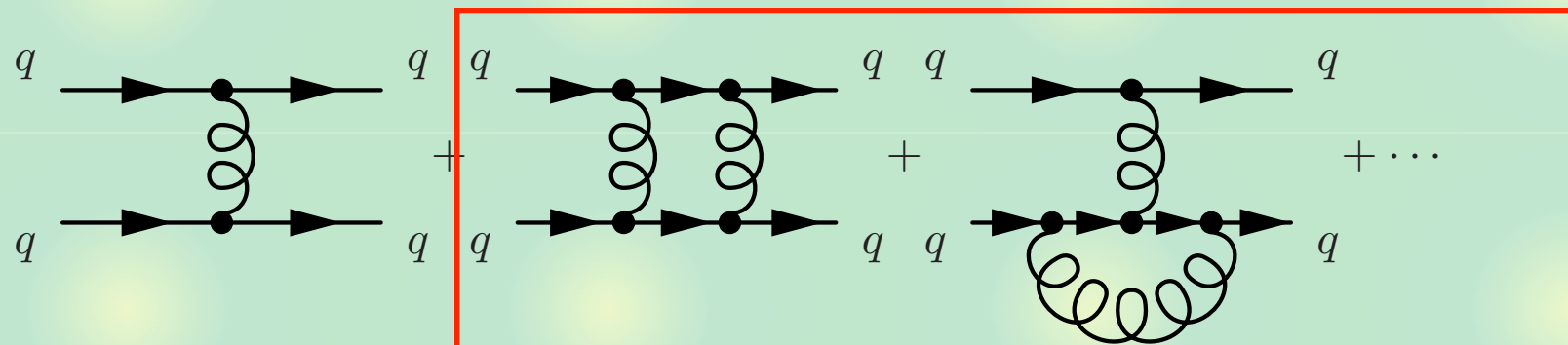
同じ始状態・終状態のファインマン図を足す（無限個）

- 電磁相互作用：量子効果が小さい（有限個の計算でOK）



- 強い相互作用：量子効果が“強い”

“強い”ので無視できない！



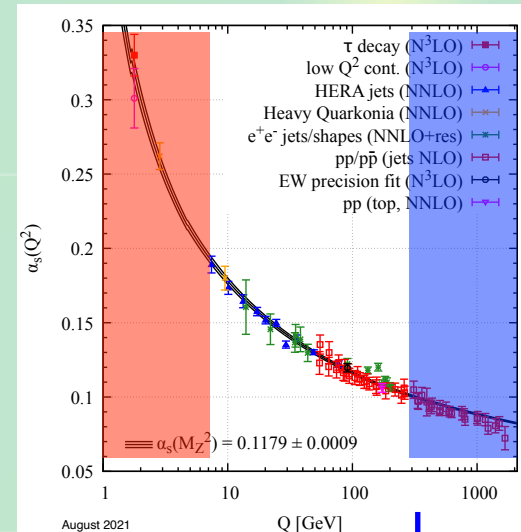
- 理論が分かっているのに解けない（標準理論でQCDだけ）

分かっているのに解けないとは？

漸近自由性

- **高エネルギー**：結合定数小（計算可能）
- **低エネルギー**：結合定数大（計算不可能）

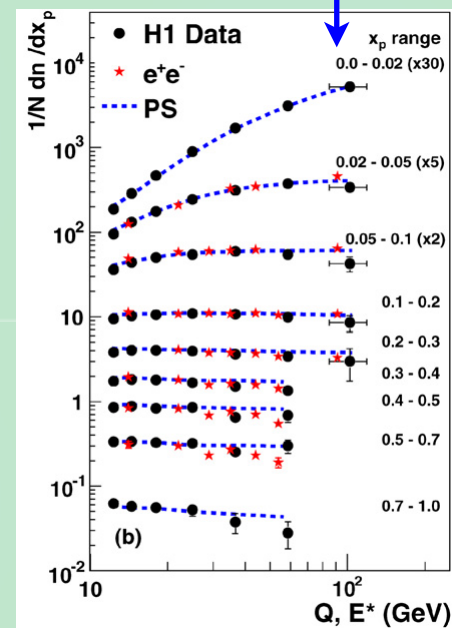
<http://pdg.lbl.gov/>



深非弾性散乱（高エネルギー電子陽子散乱）

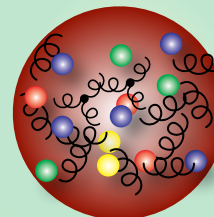
- スケーリングの破れがQCDで説明される
- QCDは**高エネルギー実験で検証**されている

F.D. Aaron *et al.* (H1 collaboration), PLB 654, 148 (2007)



ハドロン物理

- **低エネルギー**なので計算できない



目次



導入：強い相互作用とハドロン

- ハドロン物理の難しさ/面白さ

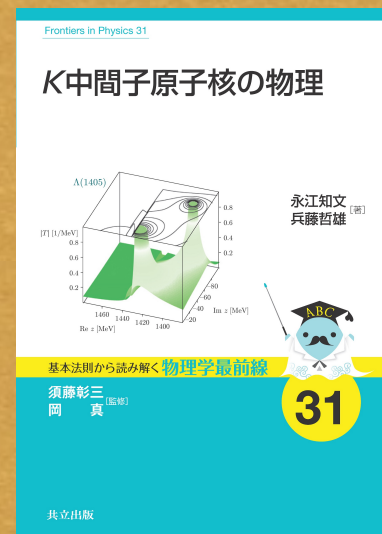
ハドロン物理とフェムトスコーピー

- ハドロン間相互作用の解明

フェムトスコーピーの応用

- K^-p 相互作用と $\Lambda(1405)$ 共鳴

まとめ



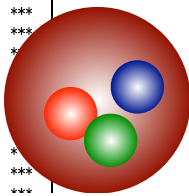
参考：永江知文、兵藤哲雄「K中間子原子核の物理」(共立出版)

観測されているハドロン(2020)

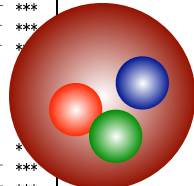
Particle Data Group (PDG) 2020版

<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	$1/2^+$ ***
$N(1520)$	$3/2^-$	****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****	$\Xi(1620)$	*		$\Lambda_b(5920)^0$	$1/2^-$ ***
$N(1535)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*	$\Xi(1690)$	***		$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$ ***
$N(1650)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$	***	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	*	$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***	$\Lambda_b(6146)^0$	$3/2^+$ ***
$N(1675)$	$5/2^-$	****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***	$\Xi(1950)$	*		$\Lambda_b(6152)^0$	$5/2^+$ ***
$N(1680)$	$5/2^+$	****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	****	$\Xi(2030)$	$\geq \frac{5}{2}?$	***	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^-	$1/2^+$ ***
$N(1875)$	$3/2^-$	***	$\Delta(2000)$	$5/2^+$	**	$\Sigma(1900)$	$1/2^-$	**	Ω^-	$3/2^+$	****	$\Xi_b(5935)^-$	$1/2^+$ ***
$N(1880)$	$1/2^+$	***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$	*	$\Sigma(1910)$	$3/2^-$	***	$\Omega(2012)^-$	$?^-$	****	$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$ ***
$N(1895)$	$1/2^-$	****	$\Delta(2200)$	$7/2^-$	***	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****	$\Omega(2250)^-$	***		$\Xi_b(5955)^-$	$3/2^+$ ***
$N(1900)$	$3/2^+$	****	$\Delta(2300)$	$9/2^+$	**	$\Sigma(1940)$	$3/2^+$	*	$\Omega(2380)^-$	***		$\Xi_b(6227)$	***
$N(1990)$	$7/2^+$	**	$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*	$\Sigma(2010)$	$3/2^-$	*	$\Omega(2470)^-$	**		Ω_b^-	$1/2^+$ ***
$N(2000)$	$5/2^+$	**	$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*	$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****				$P_c(4312)^+$	*
$N(2040)$	$3/2^+$	*	$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$	*	Λ_c^+	$1/2^+$	****	$P_c(4380)^+$	*
$N(2060)$	$5/2^-$	***	$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	*	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***	$P_c(4440)^+$	*
$N(2100)$	$1/2^+$	***	$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**	$\Sigma(2100)$	$7/2^-$	*	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***	$P_c(4457)^+$	*
$N(2120)$	$3/2^-$	***	$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**	$\Sigma(2160)$	$1/2^-$	*	$\Lambda_c(2765)^+$	*			
$N(2190)$	$7/2^-$	****				$\Sigma(2230)$	$3/2^+$	*	$\Lambda_c(2860)^+$	$3/2^+$	***		
$N(2220)$	$9/2^+$	****	Λ	$1/2^+$	****	$\Sigma(2250)$	***		$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***		
$N(2250)$	$9/2^-$	****	Λ	$1/2^-$	**	$\Sigma(2455)$	**		$\Lambda_c(2940)^+$	$3/2^-$	***		
$N(2300)$	$1/2^+$	**	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	****	$\Sigma(2620)$	**		$\Lambda_c(2940)^+$	$3/2^-$	***		
$N(2570)$	$5/2^-$	**	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(3000)$	*		$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****		
$N(2600)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	****	$\Sigma(3170)$	*		$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$	***		
$N(2700)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	****				$\Sigma_c(2800)$	***			
			$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	****				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	$1/2^+$	***		
			$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	****				$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$	***		
			$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	****				$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$	***		
			$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	****				$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$	***		
			$\Lambda(2000)$	$1/2^-$	*				$\Xi_c(2930)$	*			
			$\Lambda(2050)$	$3/2^-$	*				$\Xi_c(2970)$	*			
			$\Lambda(2070)$	$3/2^+$	*				$\Xi_c(3055)$	*			
			$\Lambda(2080)$	$5/2^-$	*				$\Xi_c(3080)$	*			
			$\Lambda(2085)$	$7/2^+$	**				$\Xi_c(3123)$	*			
			$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****				Ω_c	$1/2^+$	***		
			$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***				$\Omega_c(2720)$	$3/2^+$	***		
			$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*								
			$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***								
			$\Lambda(2585)$		**								



バリオン~160種



バリオン~160種

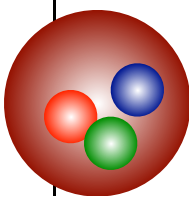
LIGHT UNFLAVORED ($S=C=B=0$)		STRANGE ($S=\pm 1, C=B=0$)		CHARMED, STRANGE ($C=S=\pm 1$)		cc continued $P_c(P_c)$	
$P(P_c)$	$P(P_c)$	$P(P_c)$	$P(P_c)$	$P(P_c)$	$P(P_c)$	$P(P_c)$	$P(P_c)$
π^\pm	$1^-(0^-)$	$\pi_2(1670)$	$1^-(2^-)$	K^\pm	$1/2(0^-)$	D_s^\pm	$0(0^-)$
π^0	$1^-(0^-)$	$\phi(1680)$	$0^-(1^-)$	K^0	$1/2(0^-)$	D_s^0	$0(0^-)$
η	$0^+(0^-)$	$\eta_3(1690)$	$1^+(3^-)$	K_S^0	$1/2(0^-)$	$D_{s1}^{*0}(2317)^\pm$	$0(0^+)$
$\eta(500)$	$0^+(0^+)$	$\eta_1(1700)$	$1^+(1^-)$	K_L^0	$1/2(0^-)$	$D_{s1}^0(2460)^\pm$	$0(1^+)$
$\eta(770)$	$1^+(1^-)$	$\phi_2(1700)$	$1^+(2^+)$	$K_S^0(700)$	$1/2(0^+)$	$D_{s1}^0(2536)^\pm$	$0(1^+)$
$\omega(782)$	$0^-(1^-)$	$\eta(1710)$	$0^+(0^+)$	$K^*(892)$	$1/2(1^-)$	$D_{s1}^0(2573)$	$0(2^+)$
$\eta(958)$	$0^+(0^-)$	$\eta_1(1760)$	$0^+(0^-)$	$K_S^*(1270)$	$1/2(1^+)$	$D_{s1}^0(2700)^\pm$	$0(1^-)$
$\eta(980)$	$0^+(0^+)$	$\eta_1(1800)$	$0^+(0^+)$	$K_S^*(1400)$	$1/2(1^+)$	$D_{s1}^0(2860)^\pm$	$0(1^-)$
$\eta(980)$	$1^-(0^+)$	$\eta_3(1810)$	$0^+(2^+)$	$K^*(1410)$	$1/2(1^-)$	$D_{s3}^0(2860)^\pm$	$0(3^-)$
$\eta(1020)$	$0^-(1^-)$	$X(1835)$	$0^+(2^+)$	$K_S^0(1410)$	$1/2(1^-)$	$D_{s1}^0(3040)^\pm$	$0(2^+)$
$\eta_1(1070)$	$0^-(1^+)$	$\phi_3(1850)$	$0^-(3^-)$	$K_S^0(1430)$	$1/2(0^+)$	BOTTOM ($B=\pm 1$)	
$\eta_1(1235)$	$1^+(1^+)$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^+)$	$K^*(1430)$	$1/2(2^+)$	B^{*-}	$1/2(0^-)$
$\phi_1(1260)$	$1^+(1^+)$	$\eta_2(1880)$	$1^-(2^-)$	$K(1460)$	$1/2(0^-)$	B^0	$1/2(0^-)$
$\phi_2(1270)$	$0^+(2^+)$	$\phi_1(1900)$	$1^+(1^-)$	$K_S(1560)$	$1/2(2^-)$	B^-/B^0 ADMIXTURE	
$\phi_1(1285)$	$0^+(1^+)$	$\phi_2(1910)$	$0^+(2^+)$	$K(1630)$	$1/2(2^?)$	V_{cb} and V_{ub} CKM Matrix Elements	
$\phi_1(1295)$	$0^-(0^-)$	$\phi_1(1950)$	$1^+(0^+)$	$K_S(1650)$	$1/2(1^+)$	B^+	$1/2(1^-)$
$\phi_1(1300)$	$1^-(0^-)$	$\phi_2(1950)$	$0^+(2^+)$	$K^*(1680)$	$1/2(1^-)$	$B_S^+(5721)^\pm$	$1/2(1^+)$
$\phi_2(1320)$	$1^-(2^+)$	$\phi_1(1970)$	$1^-(4^+)$	$K_S^*(1700)$	$1/2(3^-)$	$B_L^+(5721)^\pm$	$1/2(1^+)$
$\phi_3(1370)$	$0^+(0^+)$	$\eta_3(1990)$	$1^+(3^-)$	$K_S^*(1820)$	$1/2(2^-)$	$B_T^+(5732)$	$?(2^?)$
$\eta_1(1400)$	$1^-(1^+)$	$\eta_2(2005)$	$1^-(2^+)$	$K(1830)$	$1/2(0^+)$	$B_S^0(5747)^\pm$	$1/2(2^+)$
$\eta_1(1405)$	$0^-(0^-)$	$\phi_3(2010)$	$0^+(2^+)$	$K_S^0(1950)$	$1/2(0^+)$	$B_T^0(5747)^\pm$	$1/2(2^+)$
$\eta_1(1415)$	$0^-(1^+)$	$\phi_2(2020)$	$0^+(0^+)$	$K_S^0(1980)$	$1/2(2^+)$	$B_L^0(5840)^\pm$	$1/2(2^?)$
$\eta_1(1420)$	$1^-(1^+)$	$\phi_1(2050)$	$0^+(4^+)$	$K_S^0(2045)$	$1/2(4^+)$	$B_T^0(5840)^\pm$	$1/2(2^?)$
$\phi_1(1425)$	$0^+(1^+)$	$\phi_2(2100)$	$1^-(2^-)$	$K_S^0(2250)$	$1/2(2^-)$	$B_S^0(5840)^\pm$	$1/2(2^+)$
$\phi_2(1430)$	$0^+(1^+)$	$\phi_3(2100)$	$0^+(0^+)$	$K(2320)$	$1/2(3^+)$	$B_T^0(5840)^\pm$	$1/2(2^+)$
$\phi_3(1440)$	$0^+(2^+)$	$\phi_1(2150)$	$0^+(2^+)$	$K_S^0(2380)$	$1/2(5^-)$	$B_L^0(5840)^\pm$	$1/2(2^?)$
$\phi_1(1450)$	$1^-(0^+)$	$\phi_2(2150)$	$1^+(1^-)$	$K_S^0(2500)$	$1/2(4^-)$	$B_T^0(5970)^\pm$	$1/2(2^?)$
$\phi_1(1450)$	$1^-(1^+)$	$\phi_1(2170)$	$0^-(1^-)$	$K(3100)$	$0^?(2^?)$	$B_L^0(5970)^\pm$	$1/2(2^?)$
$\phi_1(1475)$	$0^+(0^+)$	$\phi_2(2200)$	$0^+(0^+)$	CHARMED ($C=\pm 1$)		BOTTOM, STRANGE ($B=\pm 1, S=\pm 1$)	
$\phi_2(1500)$	$0^+(0^+)$	$\phi_3(2220)$	$0^+(2^+)$	D^{*-}	$1/2(0^-)$	$b\bar{b}$ (+ possibly non- $\gamma\gamma$ states)	
$\phi_1(1510)$	$0^+(1^+)$	$\eta(2225)$	$0^-(0^+)$	D^0	$1/2(0^-)$	B_S^0	$0(0^-)$
$\phi_2(1525)$	$0^+(2^+)$	$\eta_3(2250)$	$1^+(3^-)$	D^0	$1/2(0^-)$	B_T^0	$0(1^-)$
$\phi_3(1555)$	$0^+(2^+)$	$\phi_3(2300)$	$0^+(2^+)$	$D^0(2007)^0$	$1/2(1^-)$	$X(5568)^\pm$	$?(2^?)$
$\phi_1(1570)$	$1^-(1^+)$	$\phi_2(2300)$	$0^+(4^+)$	$D^0(2010)^\pm$	$1/2(1^-)$	$B_S^0(5830)^0$	$0(1^+)$
$\phi_1(1595)$	$0^-(1^-)$	$\phi_1(2300)$	$0^+(0^+)$	$D_S^0(2300)^\pm$	$1/2(0^+)$	$B_T^0(5830)^0$	$0(2^+)$
$\eta_1(1600)$	$1^-(1^-)$	$\phi_2(2330)$	$0^+(0^+)$	$D_S^0(2300)^\pm$	$1/2(0^+)$	$B_S^0(5850)$	$?(2^?)$
$\phi_1(1640)$	$1^-(1^+)$	$\phi_3(2340)$	$1^+(5^-)$	$D_S^0(2420)^0$	$1/2(1^+)$	BOTTOM, CHARMED ($B=C=\pm 1$)	
$\phi_3(1640)$	$0^+(2^+)$	$\phi_2(2350)$	$0^+(6^+)$	$D_S^0(2420)^\pm$	$1/2(2^+)$	B_c^{*+}	$0(0^-)$
$\eta_2(1645)$	$0^-(2^+)$			$D_S^0(2460)^0$	$1/2(2^+)$	$B_c(2S)^\pm$	$0(0^-)$
$\phi_1(1650)$	$0^-(1^+)$			$D_S^0(2460)^\pm$	$1/2(2^+)$	cc (+ possibly non- $\gamma\gamma$ states)	
$\phi_2(1650)$	$0^-(2^+)$			$D^0(2550)^0$	$1/2(2^?)$	$\eta_c(1S)$	$0^+(0^+)$
$\phi_3(1650)$	$0^-(2^+)$			$D^0(2640)^\pm$	$1/2(2^?)$	$J/\psi(1S)$	$0^-(1^-)$
$\phi_1(1650)$	$0^-(2^+)$			$D^0(2740)^0$	$1/2(2^?)$	$\chi_{c0}(1P)$	$0^+(0^+)$
$\phi_2(1650)$	$0^-(2^+)$			$D_S^0(2750)$	$1/2(3^-)$	$\chi_{c1}(1P)$	$0^+(1^+)$
$\phi_3(1650)$	$0^-(2^+)$			$D(3000)^0$	$1/2(2^?)$	$\chi_{c2}(1P)$	$0^+(2^+)$
						$\chi_{c3}(1P)$	$0^-(1^-)$
						$\chi_{c0}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c1}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c2}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c3}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c4}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c5}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c6}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c7}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c8}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c9}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c10}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c11}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c12}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c13}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c14}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c15}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c16}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c17}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c18}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c19}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c20}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c21}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c22}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c23}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c24}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c25}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c26}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c27}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c28}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c29}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c30}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c31}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c32}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c33}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c34}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c35}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c36}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c37}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c38}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c39}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c40}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c41}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c42}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c43}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c44}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c45}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c46}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c47}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c48}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c49}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c50}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c51}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c52}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c53}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c54}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c55}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c56}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c57}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c58}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c59}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c60}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c61}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c62}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c63}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c64}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c65}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c66}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c67}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c68}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c69}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c70}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c71}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c72}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c73}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c74}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c75}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c76}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c77}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c78}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c79}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c80}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c81}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c82}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c83}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c84}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c85}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c86}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c87}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c88}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c89}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c90}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c91}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c92}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c93}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c94}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c95}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c96}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c97}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c98}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c99}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c100}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c101}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c102}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c103}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c104}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c105}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c106}(2P)$	$0^-(1^+)$
						$\chi_{c107}(2P)$	$0^-(1^+)$

Particle Data Group (PDG) 2022版

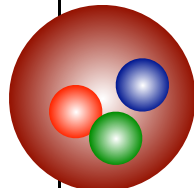
<http://pdg.lbl.gov/>

n	$1/2^+$ ****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$ ****	Σ^+	$1/2^+$ ****	Λ_c^+	$1/2^+$ ****	Λ_b^0	$1/2^+$ ****
$N(1440)$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$ ****	Σ^0	$1/2^+$ ****	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$ ***	$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$ ***
$N(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$ ****	Σ^-	$1/2^+$ ****	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$ ****	$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$ ****
$N(1535)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$ ****	$\Lambda_c(2765)^+$	*	$\Lambda_b(6146)^0$	$3/2^+$ ****
$N(1650)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$ *	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$ *	$\Lambda_c(2860)^+$	$3/2^+$ ***	$\Lambda_b(6152)^0$	$5/2^+$ ****
$N(1675)$	$5/2^-$ ****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$ *	$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$ ***	Σ_b	$1/2^+$ ***
$N(1680)$	$5/2^+$ ****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$ ****	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$ ***	$\Lambda_c(2940)^+$	$3/2^-$ ****	Σ_b^*	$3/2^+$ ***
$N(1700)$	$3/2^-$ ****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$ ****	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$ ****	$\Sigma_b(6097)^+$	***
$N(1710)$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1920)$	$3/2^+$ ****	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$ ****	$\Sigma_b(6097)^-$	***
$N(1720)$	$3/2^+$ ****	$\Delta(1930)$	$5/2^-$ ***	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$ ****	$\Sigma_c(2800)$	***	Ξ_b	$1/2^+$ ***
$N(1860)$	$5/2^+$ **	$\Delta(1940)$	$3/2^-$ **	$\Sigma(1780)$	$3/2^+$ *	Ξ_c^0	$1/2^+$ ***	Ξ_b^0	$1/2^+$ ***
$N(1875)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(1950)$	$7/2^+$ ****	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$ **	Ξ_c^+	$1/2^+$ ****	$\Xi_b(5935)^-$	$1/2^+$ ***
$N(1880)$	$1/2^+$ ***	$\Delta(2000)$	$5/2^+$ **	$\Sigma(1900)$	$1/2^-$ **	Ξ_c^0	$1/2^+$ ***	$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$ ***
$N(1895)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(2150)$	$1/2^-$ *	$\Sigma(1910)$	$3/2^-$ **	Ξ_c^+	$1/2^+$ ***	$\Xi_b(5955)^-$	$3/2^+$ ***
$N(1900)$	$3/2^+$ ****	$\Delta(2200)$	$7/2^-$ ***	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$ ****	Ξ_c^0	$1/2^+$ ***	$\Xi_b(6100)^-$	$3/2^-$ ****
$N(1900)$	$3/2^+$ ****	$\Delta(2300)$	$9/2^+$ **	$\Sigma(1940)$	$3/2^+$ *	$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$ **	$\Xi_b(6227)^-$	***
$N(1990)$	$7/2^+$ **	$\Delta(2350)$	$5/2^-$ *	$\Sigma(2010)$	$3/2^-$ *	$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$ ***	$\Xi_b(6227)^0$	***
$N(2000)$	$5/2^+$ **	$\Delta(2390)$	$7/2^+$ *	$\Sigma(2030)$	$7/2^+$ ****	$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$ ***	$\Xi_b(6227)^0$	***
$N(2040)$	$3/2^+$ *	$\Delta(2400)$	$9/2^-$ **	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$ *	$\Xi_c(2923)$	**	Ω_b^-	$1/2^+$ ***
$N(2060)$	$5/2^-$ ****	$\Delta(2420)$	$11/2^+$ ****	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$ *	$\Xi_c(2930)$	**	$\Omega_b(6316)^-$	*
$N(2100)$	$1/2^+$ ***	$\Delta(2750)$	$13/2^-$ **	$\Sigma(2100)$	$7/2^-$ *	$\Xi_c(2970)$	$1/2^+$ ***	$\Omega_b(6330)^-$	*
$N(2120)$	$3/2^-$ ****	$\Delta(2950)$	$15/2^+$ **	$\Sigma(2110)$	$1/2^-$ *	$\Xi_c(3055)$	***	$\Omega_b(6340)^-$	*
$N(2190)$	$7/2^-$ ****			$\Sigma(2230)$	$3/2^+$ *	$\Xi_c(3080)$	***	$\Omega_b(6350)^-$	*
$N(2220)$	$9/2^+$ ****	Λ	$1/2^+$ ****	$\Sigma(2250)$	**	$\Xi_c(3123)$	*		
$N(2250)$	$9/2^-$ ****	$\Lambda(1380)$	$1/2^-$ ****	Ξ^0	$1/2^+$ ****	Ω_c^0	$1/2^+$ ***	$P_c(4312)^+$	*
$N(2300)$	$1/2^-$ **	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$ **	Ξ^-	$1/2^+$ ****	$\Omega_c(3120)^0$	***		
$N(2570)$	$5/2^-$ **	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$ **	$\Xi(1530)$	$3/2^+$ ****	Ξ_c^+	*		
$N(2600)$	$1/2^-$ ****	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$ **	$\Xi(1620)$	*	Ξ_c^0	***		
$N(2700)$	$13/2^+$ **	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$ **	$\Xi(1690)$	***	Ξ_c			
		$\Lambda(1690)$	$3/2^-$ ****	Ξ^-	$1/2^+$ ****				
		$\Lambda(1710)$	$1/2^+$ *	$\Xi(1530)$	$3/2^+$ ****				
		$\Lambda(1800)$	$1/2^-$ ***	$\Xi(1620)$	*				
		$\Lambda(1810)$	$1/2^+$ ***	$\Xi(1690)$	***				
		$\Lambda(1820)$	$5/2^+$ ****	$\Xi(1820)$	***				
		$\Lambda(1830)$	$5/2^-$ ****	$\Xi(1950)$	$3/2^-$ ***				
		$\Lambda(1890)$	$3/2^+$ ****	$\Xi(2030)$	$\geq 5/2^?$ ***				
		$\Lambda(2000)$	$1/2^-$ *	$\Xi(2120)$	*				
		$\Lambda(2050)$	$3/2^-$ *	$\Xi(2250)$	**				
		$\Lambda(2070)$	$3/2^+$ *	$\Xi(2370)$	**				
		$\Lambda(2080)$	$5/2^-$ *	$\Xi(2500)$	*				
		$\Lambda(2085)$	$7/2^+$ **						
		$\Lambda(2100)$	$7/2^-$ ****						
		$\Lambda(2110)$	$5/2^+$ ***	Ω^-	$3/2^+$ ****				
		$\Lambda(2325)$	$3/2^-$ *	$\Omega(201)$					
		$\Lambda(2350)$	$9/2^+$ ***	$\Omega(225)$					
		$\Lambda(2585)$	*	$\Omega(238)$					
				$\Omega(247)$					

2年間で新たに発見



バリオン~170種



バリオン~170種

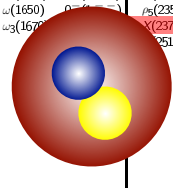
LIGHT UNFLAVORED (S = C = B = 0)			STRANGE (S = ±1, C = B = 0)			CHARMED, STRANGE (C = ±1, S = 0) (± possibly non-q7 states)			cē continued f(C)		
f(C)	f(C)	f(C)	f(C)	f(C)	f(C)	f(C)	f(C)	f(C)	f(C)	f(C)	f(C)
• π [±] (1 ⁰ -)	• π ₂ (1670) 1 ² (-2 ⁺)	• K [±] 1/2(0 ⁻)	• D _s [±] (0 ⁰)	• D _s [±] (0 ⁰)	• D _s [±] (0 ⁰)	• D _s [±] (0 ⁰)	• D _s [±] (0 ⁰)	• D _s [±] (0 ⁰)	• ω ₂ (3823) 0 ² (-)	• ω ₂ (3823) 0 ² (-)	• ω ₂ (3823) 0 ² (-)
• π ⁰ (1 ⁰ +)	• ρ(1680) 0 ¹ (-)	• K ⁰ 1/2(0 ⁻)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₃ (3842) 0 ³ (-)	• ω ₃ (3842) 0 ³ (-)	• ω ₃ (3842) 0 ³ (-)
• η (0 ¹ 0 ⁺)	• ρ ₃ (1690) 1 ¹ (3 ⁻)	• K _S ⁰ 1/2(0 ⁻)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₄ (3860) 0 ⁴ (0 ⁺)	• ω ₄ (3860) 0 ⁴ (0 ⁺)	• ω ₄ (3860) 0 ⁴ (0 ⁺)
• f ₀ (500) 0 ² (0 ⁺)	• ρ ₁ (1700) 1 ¹ (-)	• K _L ⁰ 1/2(0 ⁻)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₅ (3872) 0 ⁵ (1 ⁺)	• ω ₅ (3872) 0 ⁵ (1 ⁺)	• ω ₅ (3872) 0 ⁵ (1 ⁺)
• ρ(770) 1 ¹ (1 ⁻)	• a ₂ (1700) 1 ² (2 ⁺)	• K _S ⁰ (700) 1/2(0 ⁻)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• Z ₄ (3900) 1 ¹ (1 ⁺)	• Z ₄ (3900) 1 ¹ (1 ⁺)	• Z ₄ (3900) 1 ¹ (1 ⁺)
• ω(782) 0 ² (1 ⁻)	• f ₂ (1710) 0 ² (0 ⁺)	• K _L ⁰ (892) 1/2(1 ⁻)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₆ (3915) 0 ⁶ (0 ⁺)	• ω ₆ (3915) 0 ⁶ (0 ⁺)	• ω ₆ (3915) 0 ⁶ (0 ⁺)
• η'(958) 0 ² (0 ⁺)	• X(1750) ? (1 ⁻)	• K _S ⁰ (1270) 1/2(1 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₇ (3930) 0 ⁷ (2 ⁺)	• ω ₇ (3930) 0 ⁷ (2 ⁺)	• ω ₇ (3930) 0 ⁷ (2 ⁺)
• f ₀ (980) 0 ² (0 ⁺)	• η(1760) 0 ² (0 ⁺)	• K _S ⁰ (1400) 1/2(1 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₈ (3955) 0 ⁸ (2 ⁺)	• ω ₈ (3955) 0 ⁸ (2 ⁺)	• ω ₈ (3955) 0 ⁸ (2 ⁺)
• a ₀ (980) 1 ¹ (0 ⁺)	• π(1800) 1 ¹ (0 ⁺)	• K _L ⁰ (1410) 1/2(1 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₉ (3990) 0 ⁹ (2 ⁺)	• ω ₉ (3990) 0 ⁹ (2 ⁺)	• ω ₉ (3990) 0 ⁹ (2 ⁺)
• ρ(1020) 0 ² (1 ⁻)	• f ₂ (1810) 0 ² (2 ⁺)	• K _S ⁰ (1430) 1/2(1 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₁₀ (4020) 1 ¹ (2 ⁺)	• ω ₁₀ (4020) 1 ¹ (2 ⁺)	• ω ₁₀ (4020) 1 ¹ (2 ⁺)
• h ₁ (1170) 0 ² (1 ⁺)	• X(1835) ? (0 ⁺)	• K _S ⁰ (1430) 1/2(2 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₁₁ (4040) 1 ¹ (2 ⁺)	• ω ₁₁ (4040) 1 ¹ (2 ⁺)	• ω ₁₁ (4040) 1 ¹ (2 ⁺)
• h ₂ (1235) 0 ² (1 ⁺)	• ω ₂ (1850) 0 ² (3 ⁻)	• K _L (1460) 1/2(0 ⁻)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₁₂ (4050) 1 ¹ (2 ⁺)	• ω ₁₂ (4050) 1 ¹ (2 ⁺)	• ω ₁₂ (4050) 1 ¹ (2 ⁺)
• h ₁ (1260) 1 ¹ (1 ⁺)	• η ₂ (1870) 0 ² (2 ⁺)	• K _S (1530) 1/2(2 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₁₃ (4140) 0 ¹ (1 ⁺)	• ω ₁₃ (4140) 0 ¹ (1 ⁺)	• ω ₁₃ (4140) 0 ¹ (1 ⁺)
• f ₂ (1270) 0 ² (2 ⁺)	• π ₂ (1880) 1 ¹ (2 ⁺)	• K _L (1630) 1/2(2 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₁₄ (4160) 0 ¹ (1 ⁻)	• ω ₁₄ (4160) 0 ¹ (1 ⁻)	• ω ₁₄ (4160) 0 ¹ (1 ⁻)
• f ₂ (1285) 0 ² (1 ⁺)	• ρ(1900) 1 ¹ (1 ⁻)	• K _S (1650) 1/2(2 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₁₅ (4160) 0 ¹ (2 ⁺)	• ω ₁₅ (4160) 0 ¹ (2 ⁺)	• ω ₁₅ (4160) 0 ¹ (2 ⁺)
• η(1295) 0 ² (0 ⁺)	• f ₂ (1910) 0 ² (2 ⁺)	• K _L (1680) 1/2(1 ⁻)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₁₆ (4200) 1 ¹ (2 ⁺)	• ω ₁₆ (4200) 1 ¹ (2 ⁺)	• ω ₁₆ (4200) 1 ¹ (2 ⁺)
• π(1300) 1 ¹ (0 ⁺)	• a ₄ (1950) 1 ¹ (0 ⁺)	• K _S (1770) 1/2(2 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₁₇ (4230) 0 ¹ (1 ⁻)	• ω ₁₇ (4230) 0 ¹ (1 ⁻)	• ω ₁₇ (4230) 0 ¹ (1 ⁻)
• a ₂ (1320) 1 ² (2 ⁺)	• f ₂ (1950) 0 ² (2 ⁺)	• K _S (1780) 1/2(3 ⁻)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₁₈ (4240) 1 ¹ (0 ⁺)	• ω ₁₈ (4240) 1 ¹ (0 ⁺)	• ω ₁₈ (4240) 1 ¹ (0 ⁺)
• f ₀ (1370) 0 ² (0 ⁺)	• a ₄ (1970) 1 ¹ (4 ⁺)	• K _L (1820) 1/2(2 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₁₉ (4250) 1 ¹ (2 ⁺)	• ω ₁₉ (4250) 1 ¹ (2 ⁺)	• ω ₁₉ (4250) 1 ¹ (2 ⁺)
• π ₃ (1400) 1 ¹ (1 ⁻)	• ρ ₃ (1990) 1 ¹ (3 ⁻)	• K _L (1830) 1/2(0 ⁻)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₂₀ (4272) 0 ¹ (2 ⁺)	• ω ₂₀ (4272) 0 ¹ (2 ⁺)	• ω ₂₀ (4272) 0 ¹ (2 ⁺)
• η(1405) 0 ² (0 ⁺)	• π ₂ (2005) 1 ¹ (2 ⁺)	• K _S (1950) 1/2(0 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₂₁ (4350) 0 ¹ (2 ⁺)	• ω ₂₁ (4350) 0 ¹ (2 ⁺)	• ω ₂₁ (4350) 0 ¹ (2 ⁺)
• h ₁ (1415) 0 ² (1 ⁺)	• f ₂ (2100) 0 ² (0 ⁺)	• K _L (1980) 1/2(2 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω(4360) 0 ¹ (1 ⁻)	• ω(4360) 0 ¹ (1 ⁻)	• ω(4360) 0 ¹ (1 ⁻)
• f ₁ (1420) 0 ² (1 ⁺)	• f ₆ (2020) 0 ² (0 ⁺)	• K _S (2045) 1/2(4 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω(4415) 0 ¹ (1 ⁻)	• ω(4415) 0 ¹ (1 ⁻)	• ω(4415) 0 ¹ (1 ⁻)
• ω(1420) 0 ² (1 ⁻)	• f ₂ (2050) 0 ² (4 ⁺)	• K _S (2250) 1/2(2 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• Z ₄ (4430) 1 ¹ (1 ⁺)	• Z ₄ (4430) 1 ¹ (1 ⁺)	• Z ₄ (4430) 1 ¹ (1 ⁺)
• ω ₁ (1420) 0 ² (2 ⁺)	• a ₄ (2150) 1 ¹ (2 ⁺)	• K _S (2320) 1/2(3 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₂₂ (4500) 0 ¹ (0 ⁺)	• ω ₂₂ (4500) 0 ¹ (0 ⁺)	• ω ₂₂ (4500) 0 ¹ (0 ⁺)
• a ₀ (1450) 1 ¹ (0 ⁺)	• f ₆ (2100) 0 ² (0 ⁺)	• K _S (2380) 1/2(5 ⁻)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₂₃ (4630) 0 ¹ (1 ⁺)	• ω ₂₃ (4630) 0 ¹ (1 ⁺)	• ω ₂₃ (4630) 0 ¹ (1 ⁺)
• a ₁ (1450) 1 ¹ (1 ⁺)	• f ₆ (2150) 0 ² (0 ⁺)	• D _s (2400) 1/2(4 ⁺)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• D _s ⁰ (0 ⁰)	• ω ₂₄ (4700) 0 ¹ (0 ⁺)	• ω ₂₄ (4700) 0 ¹ (0 ⁺)	• ω ₂₄ (4700) 0 ¹ (0 ⁺)

見たハドロン

• h ₁ (1595) 0 ² (1 ⁺)	• π ₃ (2250) 1 ¹ (3 ⁻)	• D [*] (2007) ⁰ 1/2(0 ⁻)
• π ₁ (1600) 1 ¹ (1 ⁺)	• f ₂ (2300) 0 ² (2 ⁺)	• D [*] (2010) [±] 1/2(1 ⁻)
• a ₁ (1640) 1 ¹ (1 ⁺)	• f ₄ (2300) 0 ² (4 ⁺)	• D _s ² (2300) 1/2(0 ⁺)
• f ₂ (1640) 0 ² (1 ⁺)	• f ₆ (2300) 0 ² (0 ⁺)	• D _s ² (2420) 1/2(0 ⁺)
• f ₂ (1645) 0 ² (2 ⁺)	• f ₂ (2340) 0 ² (2 ⁺)	• D _s ² (2430) 1/2(1 ⁺)
• ω(1650) 0 ² (1 ⁻)	• η ₂ (2350) 1 ¹ (5 ⁻)	• D _s ² (2460) 1/2(2 ⁺)
• ω ₃ (1670) 0 ³ (1 ⁺)	• X(2370) ? (1 ⁺)	• D _s ² (2550) 1/2(0 ⁻)
	• f ₂ (2510) 0 ² (6 ⁺)	• D _s ² (2600) 1/2(1 ⁻)
		• D _s ² (2640) 1/2(2 ⁺)
		• D _s ² (2740) 1/2(2 ⁺)
		• D _s ² (2750) 1/2(3 ⁻)
		• D _s ² (2760) 1/2(1 ⁻)
		• D(3000) [±] 1/2(1 ⁻)

メソン~210種

MED ±1			BOTTOM, STRANGE (B = ±1, S = ±1)			BOTTOM, CHARMED (B = C = ±1)			cē (+ possibly non-q7 states)		
1/2(0 ⁻)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)
1/2(1 ⁻)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ⁰ (0 ⁰)	• B _s ^{0</}



メソン~210種

全ての ~380種のハドロンはQCDから生じている

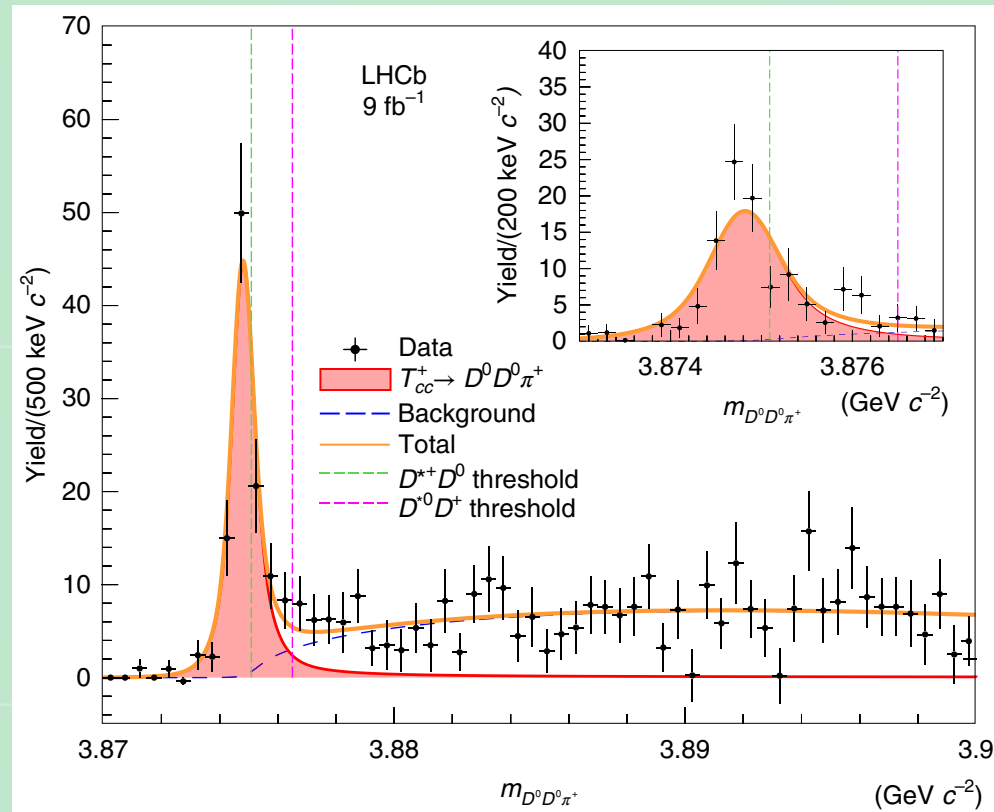
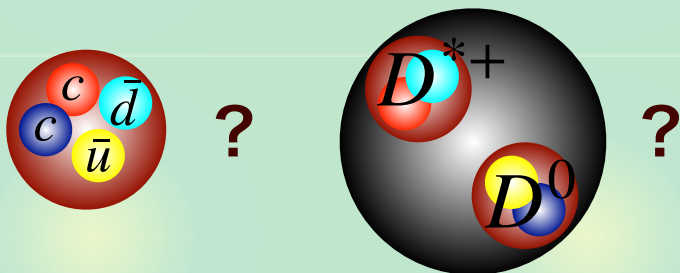
エキゾチックハドロン

テトラクォーク粒子 T_{cc} の観測

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



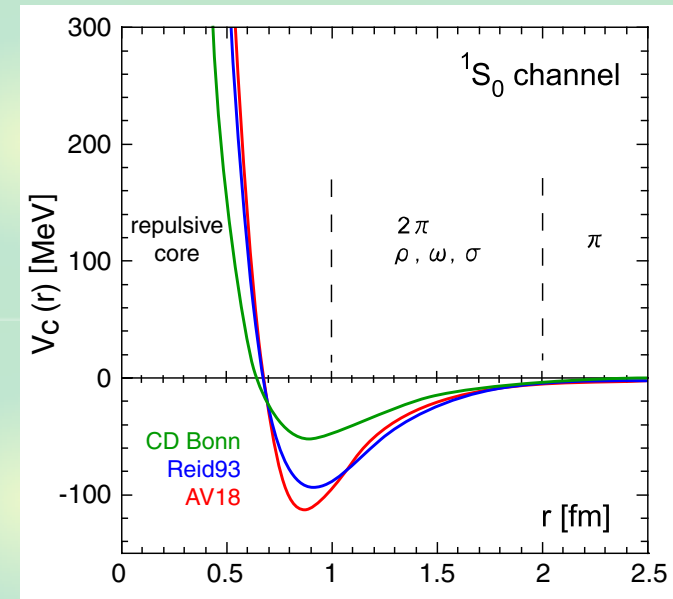
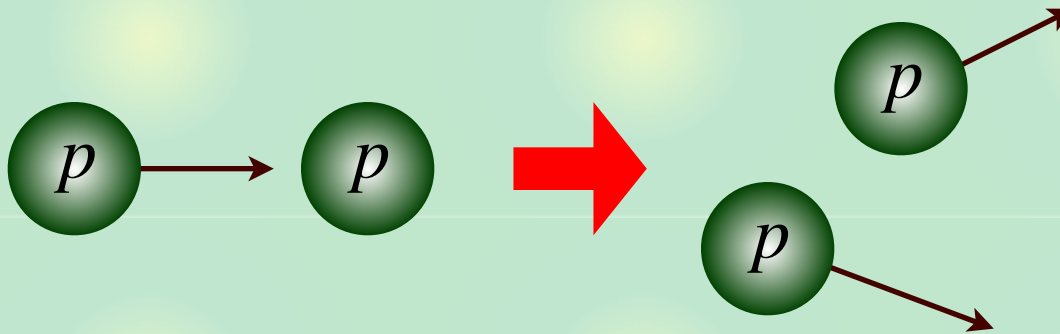
- クォーク組成 $\sim cc\bar{u}\bar{d}$
- $q\bar{q}$ で構成できないメソン
- 内部構造は？

 $D^{*+} D^0$ 分子状態：ハドロン間の相互作用？

ハドロン間相互作用

核力の研究

- 散乱実験を行いデータを再現する相互作用を構築する



N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, PRL99, 022001 (2007)

他のハドロン間の相互作用は？

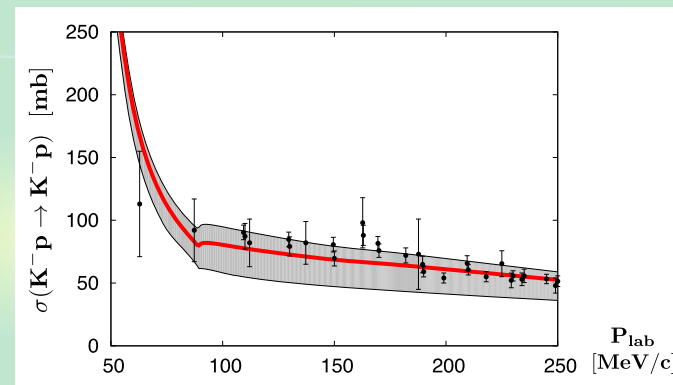
- 標的は安定粒子、ビームは電荷を持っている必要がある
- 散乱では限られたハドロン対の相互作用しか調べられない

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)

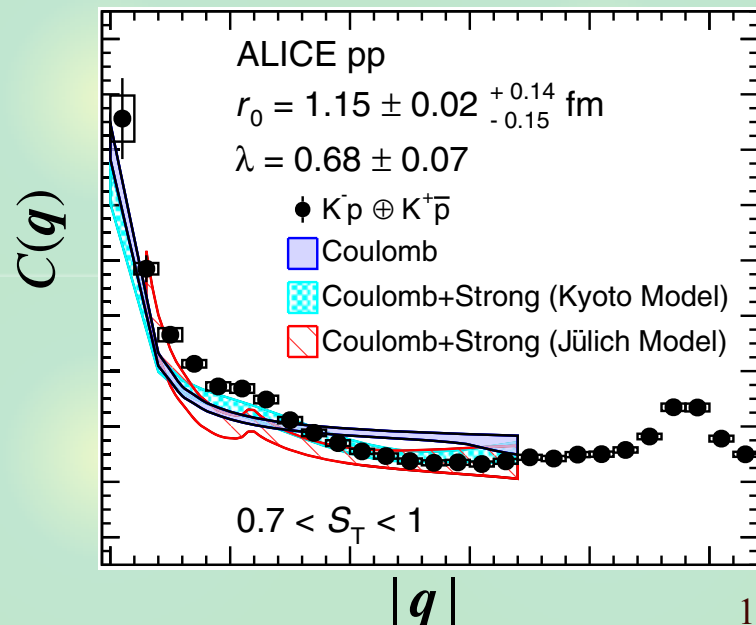
- 統計精度が良くない（低エネルギー）
- 限られた系： $NN, \Lambda N, \pi N, KN, \bar{K}N, \dots$
- ヘビー（ c, b ）ハドロン：ほぼ不可能



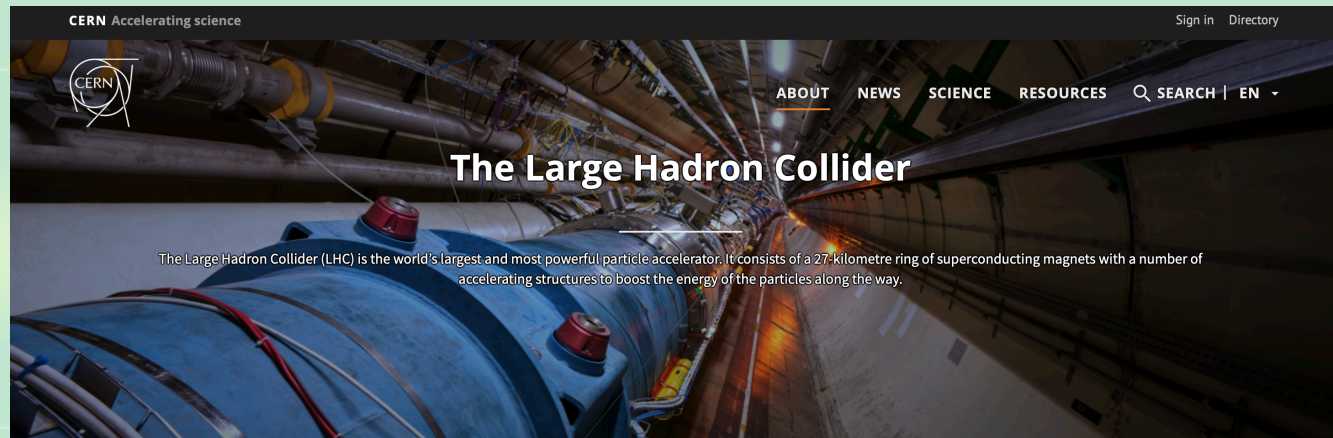
フェムトスコピー：相関関数

ALICE collaboration, PRL 124, 092301 (2020)

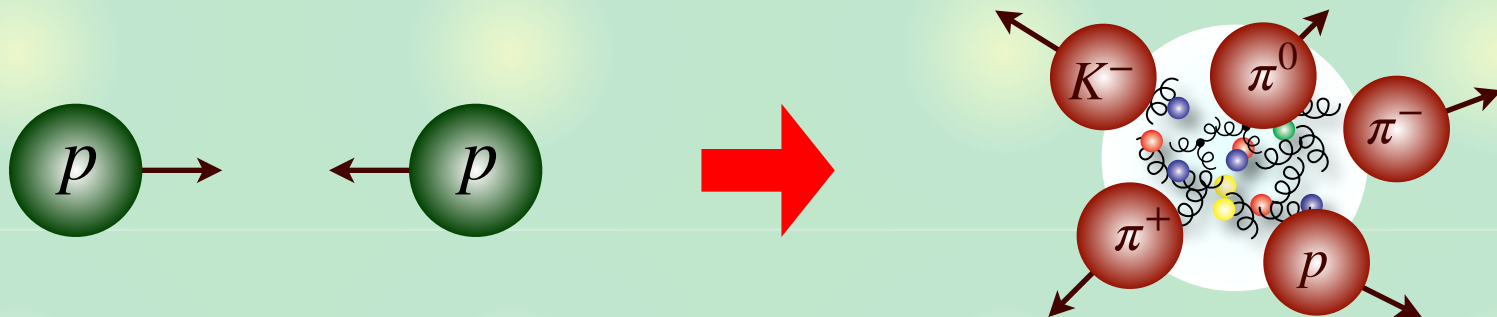
- 高い**精度**
- **様々**な系： $\Lambda\Lambda, N\Xi, N\Omega, \phi N, \bar{K}\Lambda, \textcolor{red}{DN}, \dots$
- **ヘビーハドロン**：可能！



高エネルギー衝突実験LHC (Large Hadron Collider)



<https://www.home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>

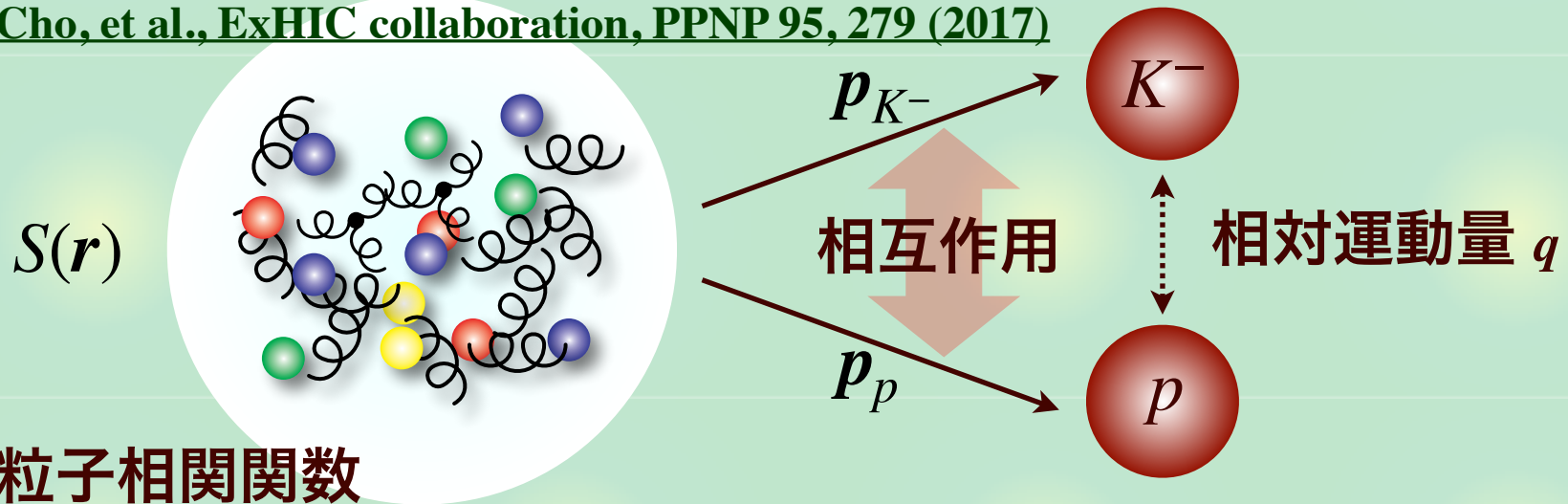


- 光速の99.999999%に加速した陽子や原子核を衝突させる
- 衝突エネルギーを転換し多数のハドロンを生成

相関関数とハドロン相互作用

高エネルギー衝突の統計的なハドロン生成

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



- 2粒子相関関数

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

- 計算方法：Koonin-Pratt 公式

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

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

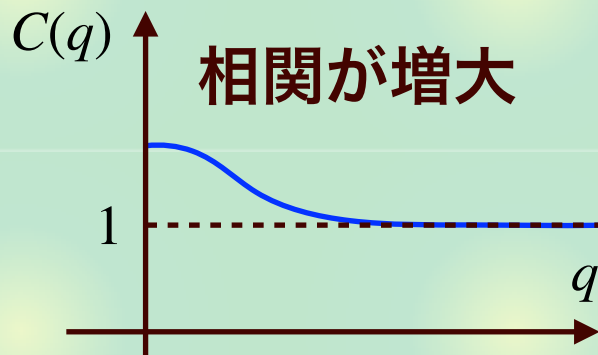
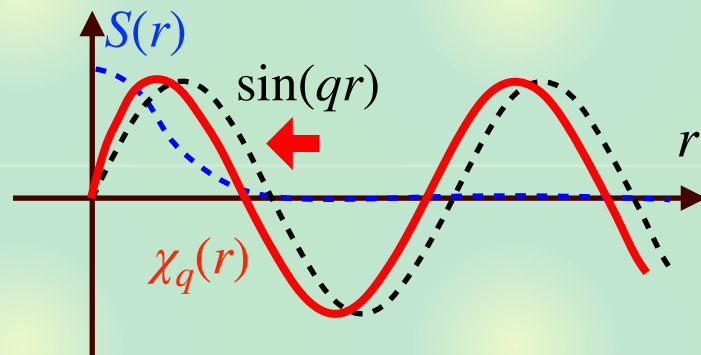
ソース関数 $S(r)$ (放出源) \longleftrightarrow 波動関数 $\Psi_q^{(-)}(r)$ (相互作用)

波動関数の振る舞いと相関関数

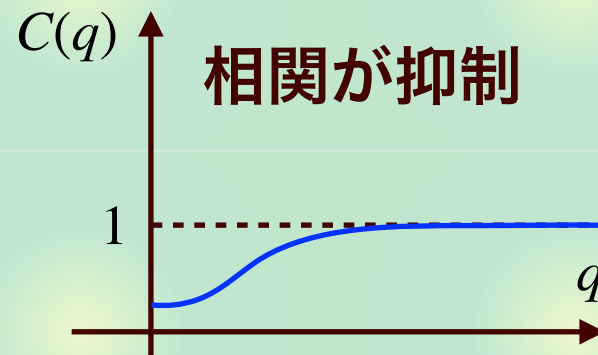
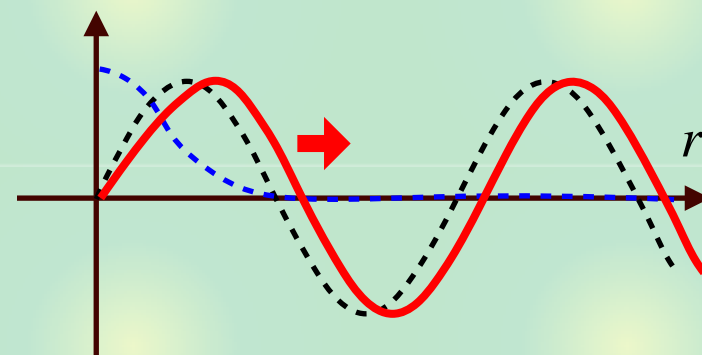
球対称ソースでs波相互作用が支配的な場合

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

引力



斥力



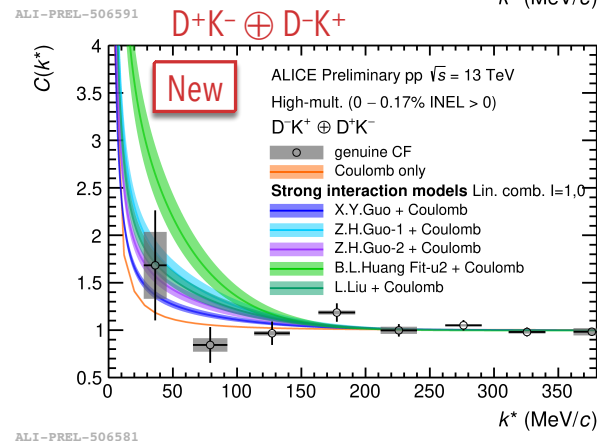
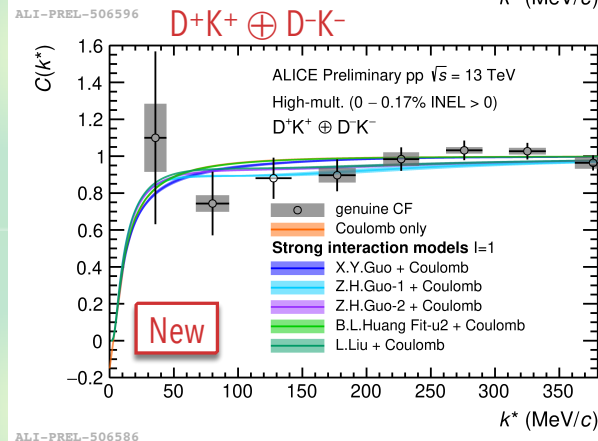
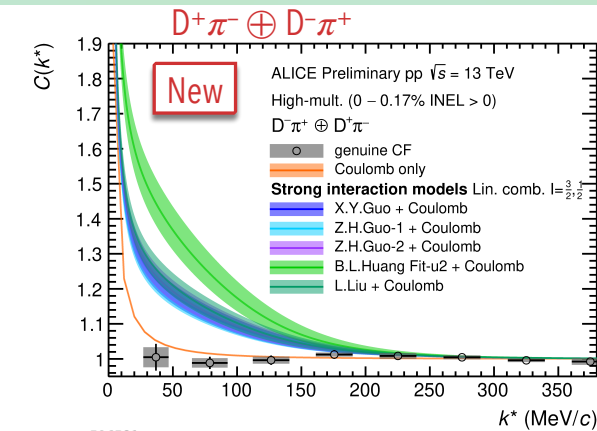
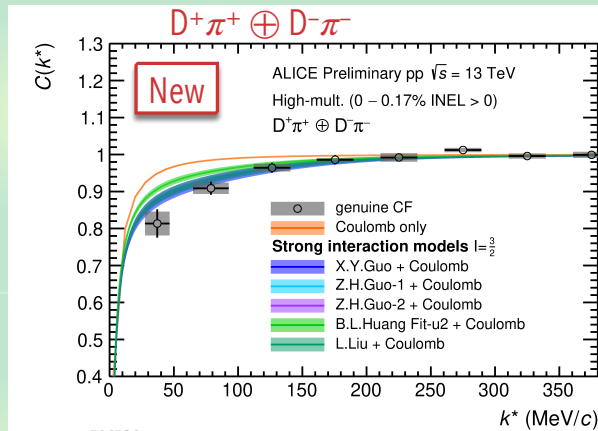
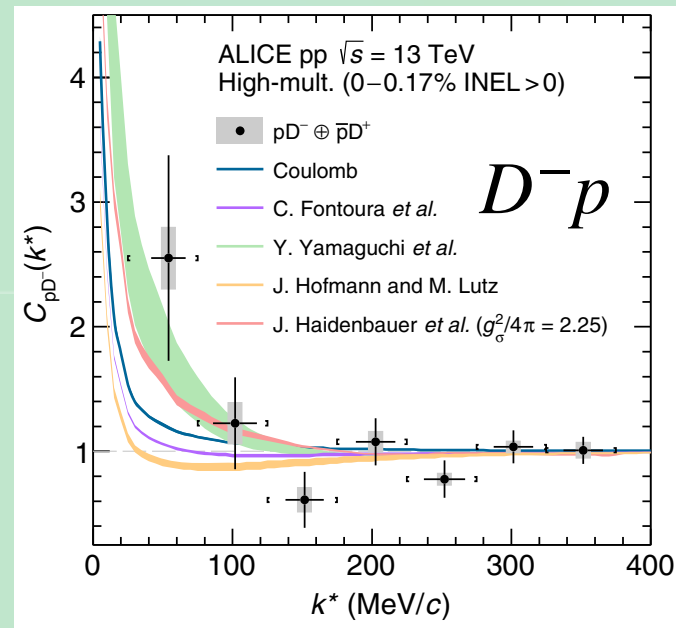
相関の定性的な振る舞いは**相互作用の性質**を反映

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：強い相互作用とハドロン

- ハドロン物理の難しさ/面白さ

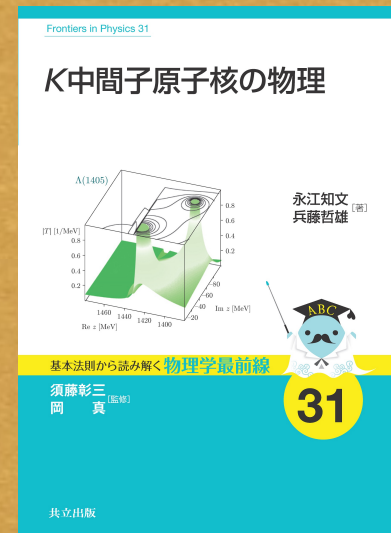
ハドロン物理とフェムトスコピー

- ハドロン間相互作用の解明

フェムトスコピーの応用

- K^-p 相互作用と $\Lambda(1405)$ 共鳴

まとめ



参考：永江知文、兵藤哲雄「K中間子原子核の物理」（共立出版）

π 中間子とカイラル対称性

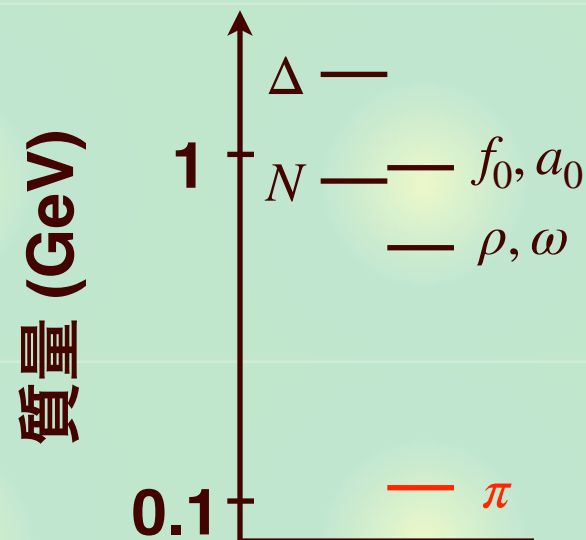
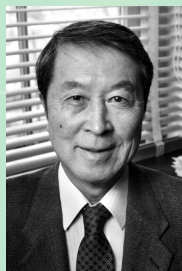
多数のハドロンの中で π 中間子だけ有意に軽い

- カイラル対称性の自発的破れ
- 無質量のNambu-Goldstone粒子の出現

Y. Nambu and G. Jona-Lasinio, Phys. Rev. 122, 345 (1961); Phys. Rev. 124, 246 (1961)



(2008年)



ハドロンの表記と K 中間子

陽子 p と中性子 n のクォーク組成

$$p \sim uud, \quad n \sim udd \quad \text{まとめて } N \text{ と表記 (核子)}$$

3種の π 中間子とクォーク組成

$$\pi^+ \sim u\bar{d}, \quad \pi^0 \sim \frac{u\bar{u} - d\bar{d}}{\sqrt{2}}, \quad \pi^- \sim d\bar{u} \quad \text{まとめて } \pi \text{ と表記 (} \pi \text{ 中間子)}$$

K 中間子 : π の u, d クォークを s クォークに置き換えた粒子

$$\bar{K}^0 \sim s\bar{d}, \quad K^- \sim s\bar{u}$$

$$K^+ \sim u\bar{s}, \quad K^0 \sim d\bar{s}$$

まとめて \bar{K} と表記、 s を含む

\bar{K} 中間子 (反 K 中間子)

まとめて K と表記、 \bar{s} を含む

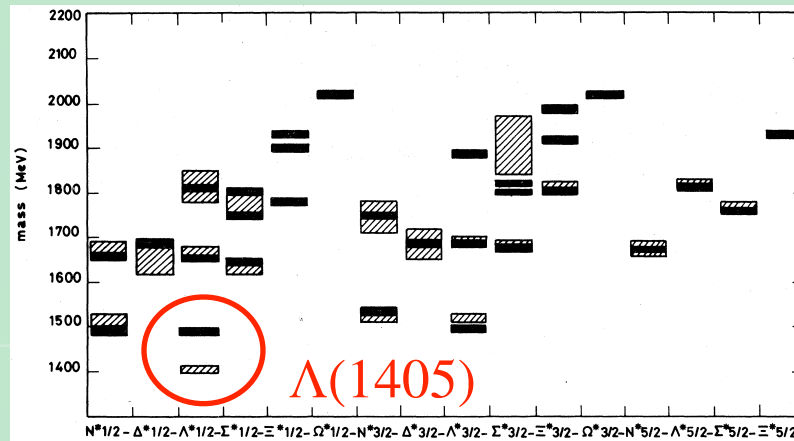
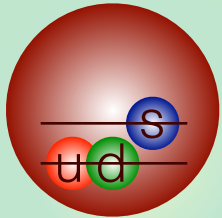
K 中間子

例) $\bar{K}N$ は K^-p や \bar{K}^0n を意味する

$\Lambda(1405)$ 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)

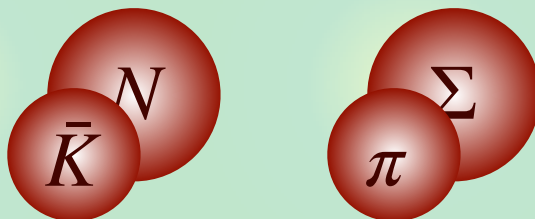
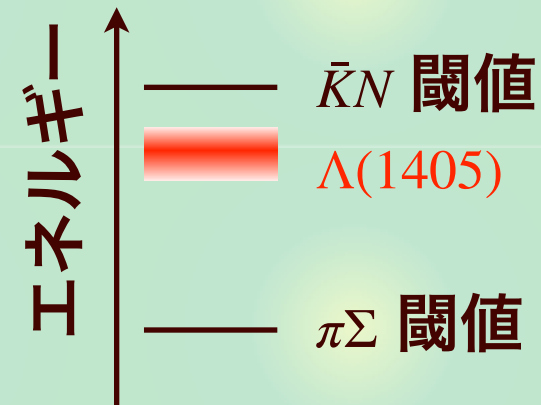


— : 理論
 : 実験

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)

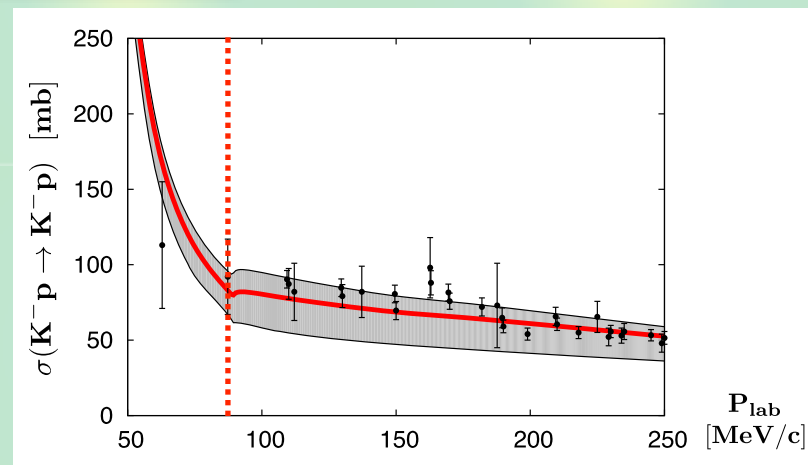


K^-p 相関の実験データ

K^-p 散乱の全断面積

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

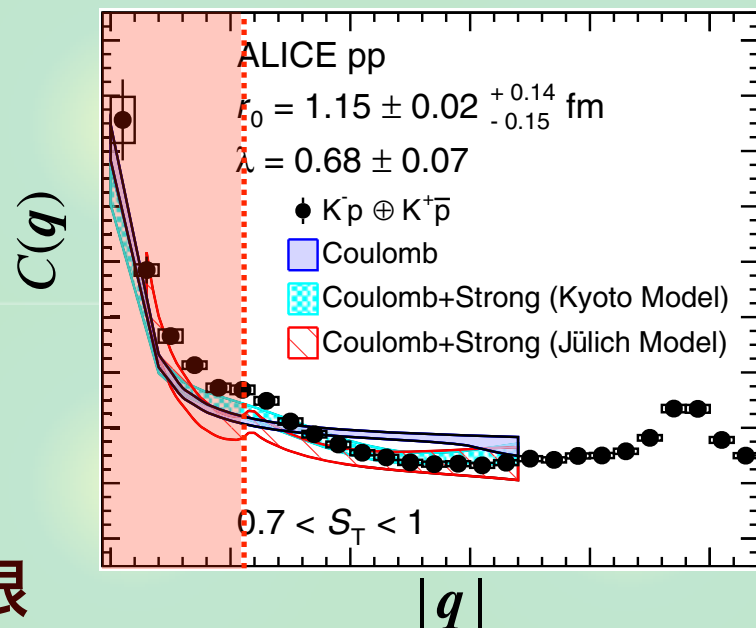
- 古い泡箱のデータ
- 統計精度、解像度が良くない
- \bar{K}^0_n 閾値カスプは見えない



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

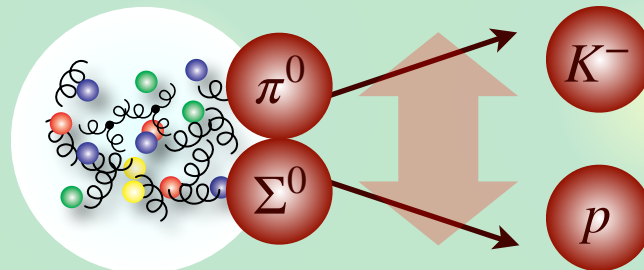
$$\begin{pmatrix} \frac{-1}{2\mu_1} \frac{d^2}{dr^2} + V_{11}(r) + V_C(r) & V_{12}(r) & \cdots \\ V_{21}(r) & \frac{-1}{2\mu_2} \frac{d^2}{dr^2} + V_{22}(r) + \Delta_2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi_{K^-p}(r) \\ \chi_{\bar{K}^0 n}(r) \\ \vdots \end{pmatrix} =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

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 ($r \rightarrow \infty$)

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

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

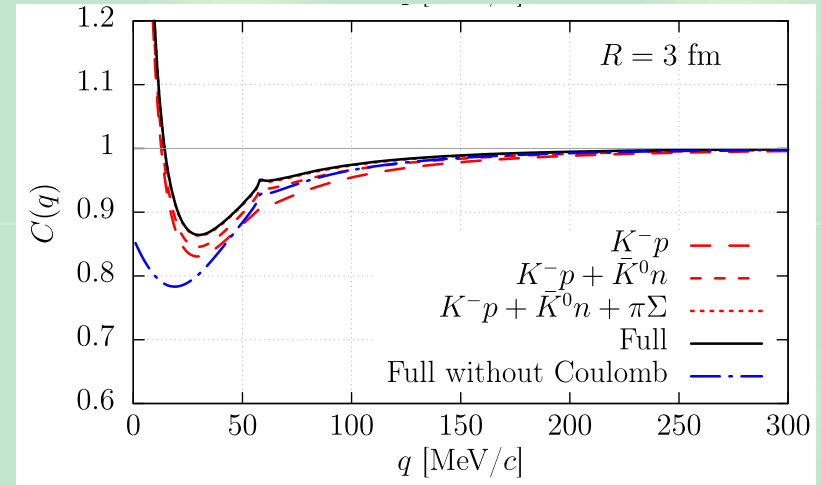
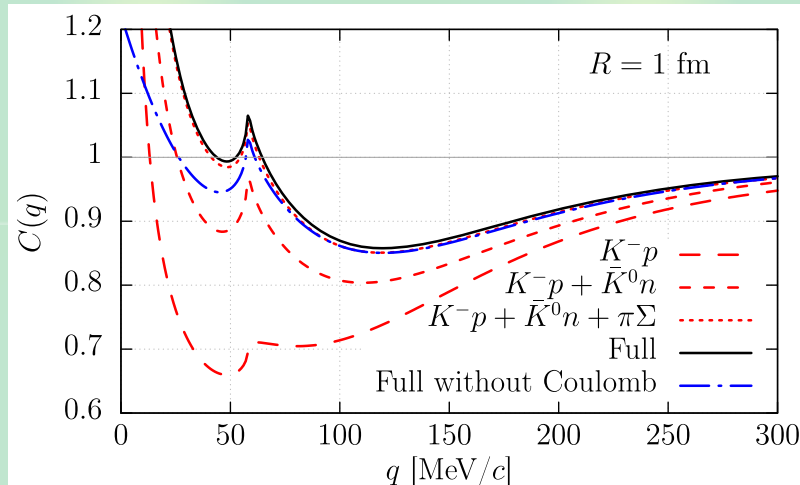
R. Lednicky, V.V. Lyuboshitz, V.L. Lyuboshitz, Phys. Atom. Nucl. 61, 2950 (1998);

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

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

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

- $\bar{K}^0 n, \pi^+ \Sigma^-, \pi^0 \Sigma^0, \pi^- \Sigma^+, \pi^0 \Lambda$ からの遷移
- ω_i : K^-p に対するチャンネル i の重み



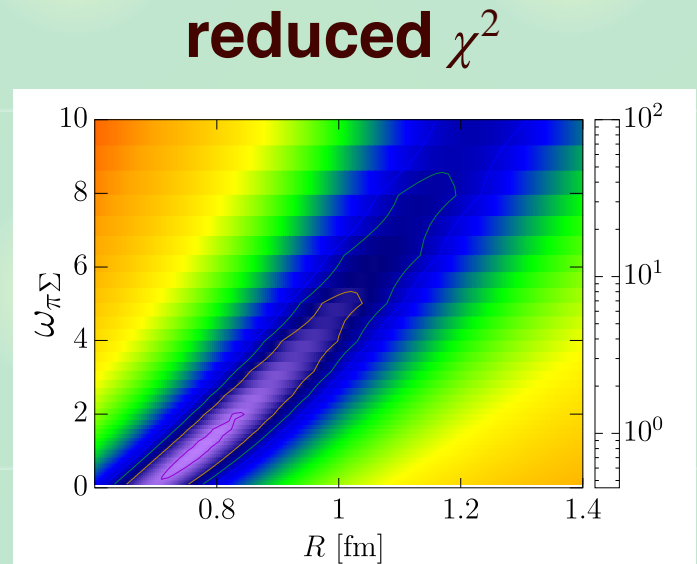
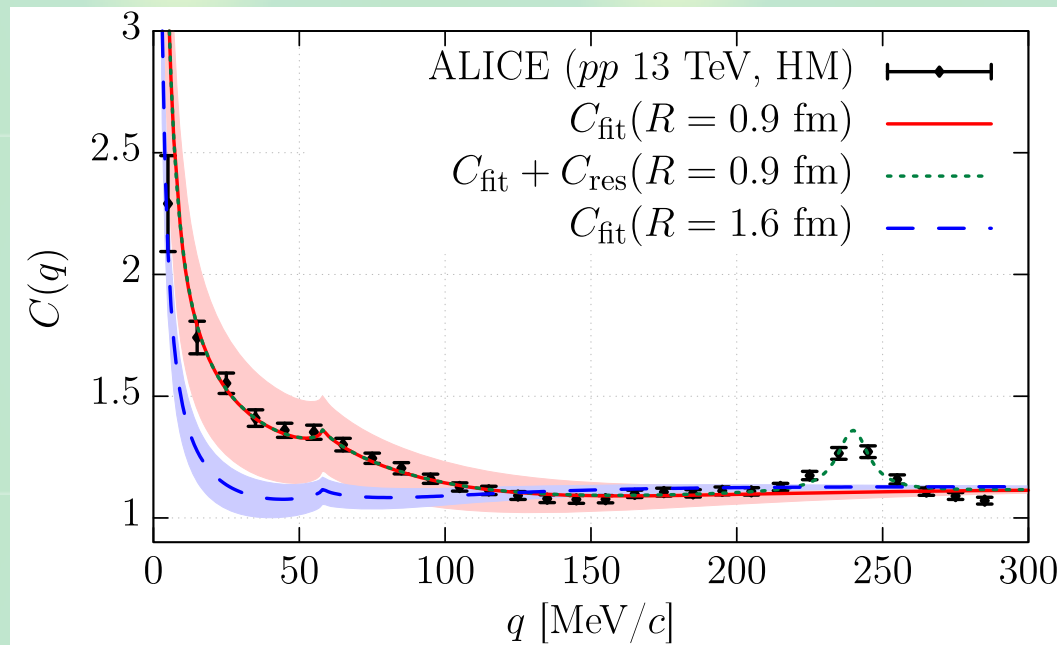
チャンネル結合効果は小さいソースで顕著

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)

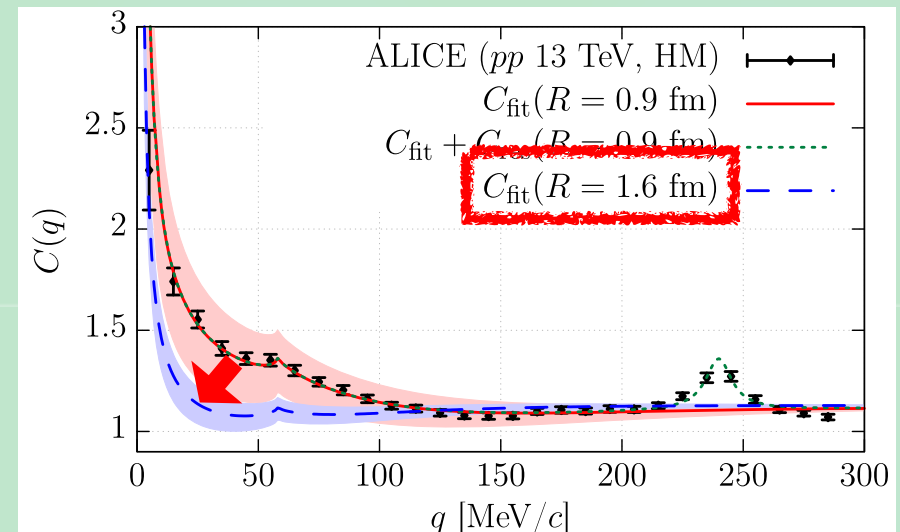
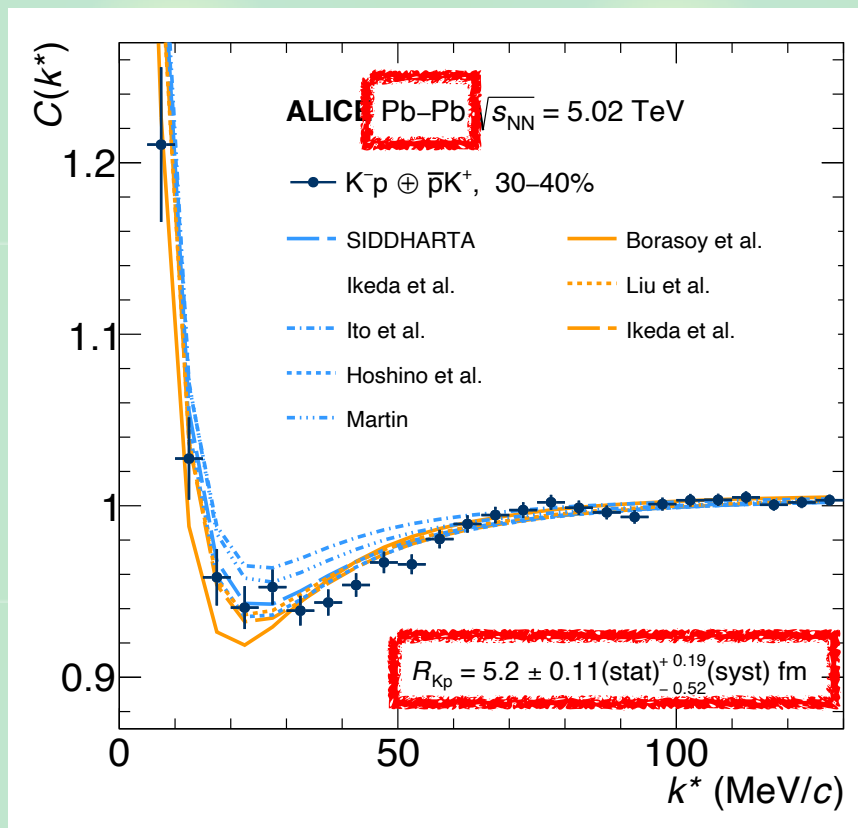
ALICEの相関関数データをよく再現する

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



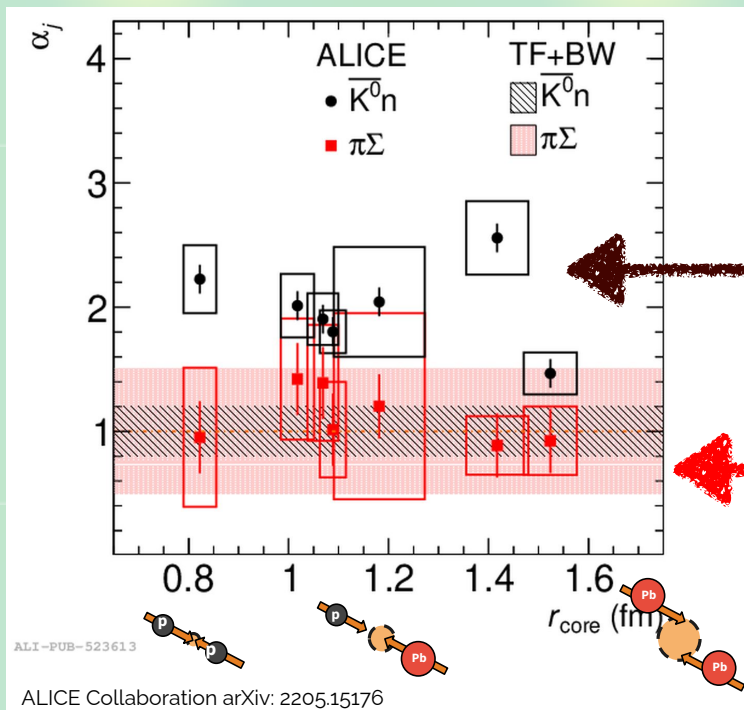
サイズ R の大きいソースで相関が抑制 ← 理論の予言

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)

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



データを説明するために
必要な増加因子

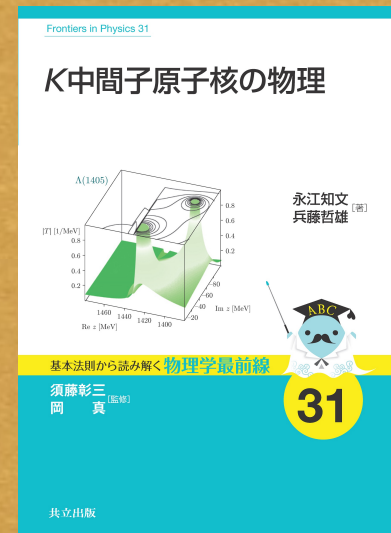
理論的に予想される ω_i の値

$\pi\Sigma$ 相互作用はOK

\bar{K}^0n チャンネルの相互作用を改善する余地がある？

まとめ

- 強い相互作用：QCD（クォーク・グルーオンの理論）から多様なハドロンの性質が生じる
- フェムトスコピー：従来不可能だったハドロン間相互作用が検証可能に
- 実際の K^-p 相互作用の研究に応用され新たな情報が得られている



参考：永江知文、兵藤哲雄「K中間子原子核の物理」（共立出版）