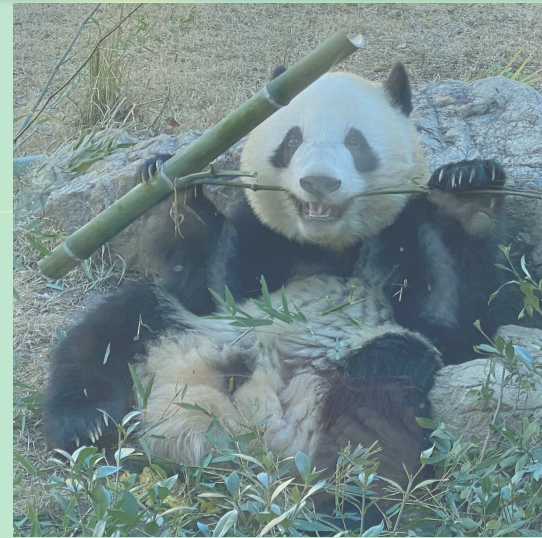


# ハドロン共鳴状態の構造




兵藤 哲雄

東京都立大学

2023, Nov. 10th 1

# 目次



## 導入：ハドロン物理と共鳴状態




## 共鳴状態の記述



## 束縛状態から共鳴状態への遷移

[T. Hyodo, PRC90, 055208 \(2014\);](#)


[T. Hyodo, T. Hatsuda, Y. Nishida, PRC89, 032201 \(2014\)](#)



## 共鳴状態の構造

[T. Hyodo, PRL111, 132002 \(2013\);](#)




[T. Kinugawa, T. Hyodo, in preparation](#)



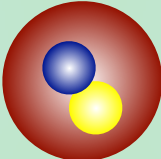
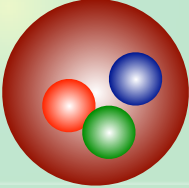
## 関連する話題

# ハドロンとは

強い相互作用をする素粒子：クォーク、グルーオン

- クォーク  $q_i$  : カラー 3 
- 反クォーク  $\bar{q}_i$  : カラー  $\bar{3}$  
- グルーオン  $A_\mu^a$  : カラー 8 

ハドロン：カラー白色の複合系

- メソン  $q\bar{q}$  :  $3 \otimes \bar{3} = \mathbf{1} \oplus \mathbf{8}$  
- バリオン  $qqq$  :  $3 \otimes 3 \otimes 3 = \mathbf{1} \oplus \mathbf{8} \oplus \mathbf{8} \oplus \mathbf{10}$  

クォークは電磁氣的電荷、弱電荷も持つ

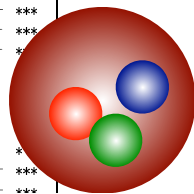
→ ハドロンには自然界の**4つの相互作用全て**がはたらく

# 観測されているハドロン(2020)

Particle Data Group (PDG) 2020版

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

$p$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$ ****	$\Sigma^+$	$1/2^+$ ****	$\Xi^0$	$1/2^+$ ****	$\Xi^{++}$	***
$n$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$ ****	$\Sigma^0$	$1/2^+$ ****	$\Xi^-$	$1/2^+$ ****	$\Xi^{*+}$	***
$N(1440)$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma^-$	$1/2^+$ ****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$ ****	$\Lambda_b^0$	$1/2^+$ ***
$N(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$ ****	$\Xi(1620)$	*	$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$ ***
$N(1535)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$ *	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$ *	$\Xi(1690)$	***	$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$ ***
$N(1650)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$ ***	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$ *	$\Xi(1820)$	$3/2^-$ ***	$\Lambda_b(6146)^0$	$3/2^+$ ***
$N(1675)$	$5/2^-$ ****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$ ****	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$ ***	$\Xi(1950)$	$\geq 3/2^?$ ***	$\Lambda_b(6152)^0$	$5/2^+$ ****
$N(1680)$	$5/2^+$ ****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$ ****	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$ ****	$\Xi(2030)$	$\geq 3/2^?$ ***	$\Sigma_b$	$1/2^+$ ****
$N(1700)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(1920)$	$3/2^+$ ***	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$ ***	$\Xi(2120)$	*	$\Sigma_b^0$	$3/2^+$ ****
$N(1710)$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1930)$	$5/2^-$ ****	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$ ****	$\Xi(2250)$	**	$\Sigma_b(6097)^+$	***
$N(1720)$	$3/2^+$ ****	$\Delta(1940)$	$3/2^-$ **	$\Sigma(1780)$	$3/2^+$ *	$\Xi(2370)$	**	$\Sigma_b(6097)^-$	***
$N(1860)$	$5/2^+$ **	$\Delta(1950)$	$7/2^+$ ****	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$ **	$\Xi(2500)$	*	$\Xi_b^0, \Xi_b^-$	$1/2^+$ ****
$N(1875)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(2000)$	$5/2^+$ **	$\Sigma(1900)$	$1/2^-$ **	$\Xi_b(5935)^-$	$1/2^+$ ***	$\Xi_b(5935)^+$	$1/2^+$ ***
$N(1880)$	$1/2^+$ ***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$ *	$\Sigma(1910)$	$3/2^-$ ***	$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$ ****	$\Xi_b(5955)^-$	$3/2^+$ ****
$N(1895)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(2200)$	$7/2^-$ **	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$ ****	$\Xi_b(5955)^+$	$3/2^+$ ****	$\Omega_b$	$1/2^+$ ****
$N(1900)$	$3/2^+$ ****	$\Delta(2300)$	$9/2^+$ **	$\Sigma(1940)$	$3/2^+$ **	$\Xi_b(6227)$	**	$P_c(4312)^+$	*
$N(1900)$	$7/2^+$ **	$\Delta(2350)$	$5/2^-$ *	$\Sigma(2010)$	$3/2^-$ **	$\Omega(2012)^-$	$7^-$ ***	$P_c(4380)^+$	*
$N(2000)$	$5/2^+$ **	$\Delta(2390)$	$7/2^+$ *	$\Sigma(2030)$	$3/2^-$ **	$\Omega(2250)^-$	**	$P_c(4440)^+$	*
$N(2040)$	$3/2^+$ *	$\Delta(2400)$	$9/2^-$ **	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$ *	$\Omega(2380)^-$	**	$P_c(4457)^+$	*
$N(2060)$	$5/2^-$ ***	$\Delta(2420)$	$11/2^+$ ****	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$ *	$\Omega(2470)^-$	**	$\Lambda_c^+$	$1/2^+$ ****
$N(2100)$	$1/2^+$ ***	$\Delta(2750)$	$13/2^-$ **	$\Sigma(2100)$	$7/2^-$ *	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$ ***	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$ ***
$N(2120)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(2950)$	$15/2^+$ **	$\Sigma(2160)$	$1/2^-$ *	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$ **	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$ **
$N(2190)$	$7/2^-$ ****			$\Sigma(2230)$	$3/2^+$ *	$\Lambda_c(2765)^+$	*	$\Lambda_c(2765)^+$	*
$N(2220)$	$9/2^+$ ****	$\Lambda$	$1/2^+$ ****	$\Sigma(2250)$	***	$\Lambda_c(2860)^+$	$3/2^+$ ***	$\Lambda_c(2860)^+$	$3/2^+$ ***
$N(2250)$	$9/2^-$ ****	$\Lambda$	$1/2^-$ **	$\Sigma(2455)$	**	$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$ ***	$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$ ***
$N(2300)$	$1/2^+$ **	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma(2620)$	**	$\Lambda_c(2940)^+$	$3/2^-$ **	$\Lambda_c(2940)^+$	$3/2^-$ **
$N(2570)$	$5/2^-$ **	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(3000)$	*	$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$ ****	$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$ ****
$N(2600)$	$11/2^-$ ***	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$ ****	$\Sigma(3170)$	*	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$ ***	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$ ***
$N(2700)$	$13/2^+$ **	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$ ****			$\Sigma_c(2800)$	***	$\Sigma_c(2800)$	***
		$\Lambda(1690)$	$3/2^-$ ****			$\Xi_c^+$	$1/2^+$ ***	$\Xi_c^+$	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(1710)$	$1/2^+$ *			$\Xi_c^0$	$1/2^+$ ****	$\Xi_c^0$	$1/2^+$ ****
		$\Lambda(1800)$	$1/2^-$ ***			$\Xi_c^+$	$1/2^+$ ***	$\Xi_c^+$	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(1810)$	$1/2^+$ ****			$\Xi_c^0$	$1/2^+$ ***	$\Xi_c^0$	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(1820)$	$5/2^+$ ****			$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$ ***	$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(1830)$	$5/2^-$ ****			$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$ ***	$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$ ***
		$\Lambda(1890)$	$3/2^+$ ****			$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$ **	$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$ **
		$\Lambda(2000)$	$1/2^-$ *			$\Xi_c(2930)$		$\Xi_c(2930)$	
		$\Lambda(2050)$	$3/2^-$ *			$\Xi_c(2970)$		$\Xi_c(2970)$	
		$\Lambda(2070)$	$3/2^+$ *			$\Xi_c(3055)$		$\Xi_c(3055)$	
		$\Lambda(2080)$	$5/2^-$ *			$\Xi_c(3080)$		$\Xi_c(3080)$	
		$\Lambda(2085)$	$7/2^+$ **			$\Xi_c(3123)$		$\Xi_c(3123)$	
		$\Lambda(2100)$	$7/2^-$ ****			$\Omega_c^0$	$1/2^+$ ****	$\Omega_c^0$	$1/2^+$ ****
		$\Lambda(2110)$	$5/2^+$ ****			$\Omega_c^+$	$1/2^+$ ****	$\Omega_c^+$	$1/2^+$ ****
		$\Lambda(2325)$	$3/2^-$ *						
		$\Lambda(2350)$	$9/2^+$ **						
		$\Lambda(2585)$	**						



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 $F_c(F_c)$	
$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$
$\pi^\pm$	$1^-(0^-)$	$\pi_2(1670)$	$1^-(2^-)$	$K^\pm$	$1/2(0^-)$	$D_s^\pm$	$0^-(1^-)$
$\pi^0$	$1^-(0^-)$	$\rho(1680)$	$0^-(1^-)$	$K^0$	$1/2(0^-)$	$D_s^0$	$0^-(2^-)$
$\eta$	$0^+(0^-)$	$\rho_3(1690)$	$1^-(3^-)$	$K_S^0$	$1/2(0^-)$	$D_{s1}(2317)^0$	$0^+(0^-)$
$\eta(500)$	$0^+(0^+)$	$\rho(1700)$	$1^-(1^-)$	$K_L^0$	$1/2(0^-)$	$D_{s1}(2460)^0$	$0^+(0^+)$
$\eta(770)$	$1^+(1^-)$	$\omega(1700)$	$1^-(2^-)$	$K_S^*(700)$	$1/2(0^+)$	$D_{s1}(2536)^0$	$0^+(1^+)$
$\omega(782)$	$0^+(1^-)$	$\phi(1710)$	$0^+(0^+)$	$K^*(892)$	$1/2(1^-)$	$D_{s2}(2573)$	$0^+(2^+)$
$\eta(980)$	$0^+(0^+)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^+)$	$K_1^*(1270)$	$1/2(1^+)$	$D_{s2}(2700)^0$	$0^+(1^+)$
$\eta(980)$	$0^+(0^+)$	$\pi(1800)$	$1^-(0^-)$	$K_1^*(1400)$	$1/2(1^+)$	$D_{s3}(2860)^0$	$0^+(1^+)$
$\phi(980)$	$0^+(0^+)$	$\xi(1810)$	$0^+(2^+)$	$K^*(1410)$	$1/2(1^-)$	$D_{s3}(2860)^+$	$0^+(2^+)$
$\phi(1020)$	$0^-(1^-)$	$\chi(1835)$	$?^-(0^-)$	$K_1^*(1430)$	$1/2(0^+)$	$D_{s3}(3040)^0$	$0^?(2^+)$
$h_1(1170)$	$0^+(1^+)$	$\omega_3(1850)$	$0^-(3^-)$	$K_1^*(1430)$	$1/2(2^+)$		
$h_1(1235)$	$1^+(1^+)$	$\eta_2(1870)$	$0^-(2^-)$	$K(1460)$	$1/2(0^-)$	BOTTOM ( $B=S=1$ )	
$a_1(1260)$	$1^-(1^+)$	$\eta_2(1880)$	$1^-(2^-)$	$K(1580)$	$1/2(2^-)$	$B^+$	$1/2(0^-)$
$f_2(1270)$	$0^+(2^+)$	$\rho(1900)$	$1^-(1^-)$	$K(1630)$	$1/2(2^-)$	$B^0$	$1/2(0^-)$
$f_2(1285)$	$0^+(1^+)$	$\rho(1910)$	$0^+(2^+)$	$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$	$B^+$ / $B^0$ ADMIXTURE	$1/2(1^-)$
$\eta(1295)$	$0^+(0^+)$	$\phi(1950)$	$1^-(0^+)$	$K_1(1680)$	$1/2(1^-)$	$B^+$ / $B^0$ / $\eta_b$ baryon ADMIXTURE	$1/2(1^+)$
$\eta(1300)$	$1^-(0^+)$	$f_2(1950)$	$0^+(2^+)$	$K_1^*(1770)$	$1/2(2^-)$	$V_{cb}$ and $V_{cb}$ CKM Matrix Elements	$1/2(1^+)$
$a_2(1320)$	$0^+(2^+)$	$a_1(1970)$	$0^+(2^+)$	$K_1^*(1780)$	$1/2(3^-)$	$B^+$	$1/2(1^-)$
$\eta(1370)$	$0^+(0^+)$	$\rho_3(1990)$	$1^-(3^-)$	$K_1^*(1820)$	$1/2(2^-)$	$B^0$	$1/2(1^-)$
$\eta(1400)$	$1^-(1^-)$	$\eta_2(2005)$	$1^-(2^-)$	$K(1830)$	$1/2(0^-)$	$B_c^+$	$1/2(1^-)$
$\eta(1405)$	$0^+(0^+)$	$f_2(2010)$	$0^+(2^+)$	$K_1^*(1950)$	$1/2(0^+)$	$B_1(5721)^+$	$1/2(1^+)$
$h_1(1415)$	$0^+(1^+)$	$\phi(2020)$	$0^+(0^+)$	$K_1^*(1980)$	$1/2(2^+)$	$B_1^0(5721)^0$	$1/2(1^+)$
$a_1(1420)$	$1^-(1^+)$	$f_4(2050)$	$0^+(4^+)$	$K_1^*(2045)$	$1/2(4^+)$	$B_2(5732)$	$?^?(2^+)$
$f_1(1420)$	$0^+(1^+)$	$\pi_2(2100)$	$1^-(2^-)$	$K_1^*(2250)$	$1/2(2^+)$	$B_2^+(5747)^+$	$1/2(2^+)$
$\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	$\phi(2100)$	$0^+(0^+)$	$K_1^*(2320)$	$1/2(3^+)$	$B_2^0(5747)^0$	$1/2(2^+)$
$f_3(1430)$	$0^+(2^+)$	$f_2(2150)$	$0^+(2^+)$	$K_1^*(2380)$	$1/2(5^-)$	$B_3(5840)^+$	$1/2(2^+)$
$a_1(1450)$	$1^-(0^+)$	$\rho(2150)$	$1^-(1^-)$	$K_1^*(2500)$	$1/2(4^-)$	$B_3(5840)^0$	$1/2(2^+)$
$\rho(1475)$	$1^+(1^+)$	$\phi(2170)$	$0^-(1^-)$	$K(2500)$	$1/2(2^-)$	$B_3(5970)^+$	$1/2(2^+)$
$\phi(1500)$	$0^+(0^+)$	$\phi(2200)$	$0^+(0^+)$	$K(3100)$	$?^?(2^?)$	$B_3(5970)^0$	$1/2(2^+)$
$f_1(1510)$	$0^+(1^+)$	$f_1(2220)$	$0^+(2^+)$	CHARMED ( $C=\pm 1$ )		BOTTOM, STRANGE ( $B=S=1, S=\pm 1$ )	
$f_1(1525)$	$0^+(2^+)$	$\eta(2225)$	$0^-(0^-)$	$D^+$	$1/2(0^-)$	$B_c^0$	$0^-(0^-)$
$f_2(1565)$	$0^+(2^+)$	$\rho_3(2250)$	$1^-(3^-)$	$D^0$	$1/2(0^-)$	$B_c^+$	$0^-(0^-)$
$\rho(1570)$	$1^+(1^-)$	$f_2(2300)$	$0^+(2^+)$	$D^+$ (2007)	$1/2(1^-)$	$B_c^+$	$0^-(0^-)$
$h_1(1595)$	$0^+(1^+)$	$f_4(2300)$	$0^+(4^+)$	$D^0(2010)^0$	$1/2(1^-)$	$X(5568)^+$	$?^?(2^?)$
$\pi_1(1600)$	$1^-(1^+)$	$f_2(2330)$	$0^+(0^+)$	$D_1^+(2300)^+$	$1/2(0^+)$	$B_{cb}(5630)^0$	$0^+(1^+)$
$a_1(1640)$	$1^-(1^+)$	$f_2(2340)$	$0^+(2^+)$	$D_1^0(2300)^0$	$1/2(0^+)$	$B_{cb}^+(5640)^+$	$0^+(2^+)$
$f_3(1640)$	$0^+(0^+)$	$\rho_3(2350)$	$1^-(3^-)$	$D_1(2420)^0$	$1/2(1^-)$	$B_{cb}^+(5650)$	$?^?(2^?)$
$\rho(1645)$	$1^+(1^+)$	$f_2(2510)$	$0^+(6^+)$	$D_1(2430)^0$	$1/2(1^+)$	BOTTOM, CHARMED ( $B=C=1$ )	
$\omega(1650)$	$0^-(1^-)$			$D_1(2460)^0$	$1/2(2^+)$	BOTTOM, CHARMED ( $B=C=1$ )	
$\omega(1650)$	$0^-(1^-)$			$D_1(2460)^0$	$1/2(2^+)$	BOTTOM, CHARMED ( $B=C=1$ )	
$\omega(1650)$	$0^-(1$						



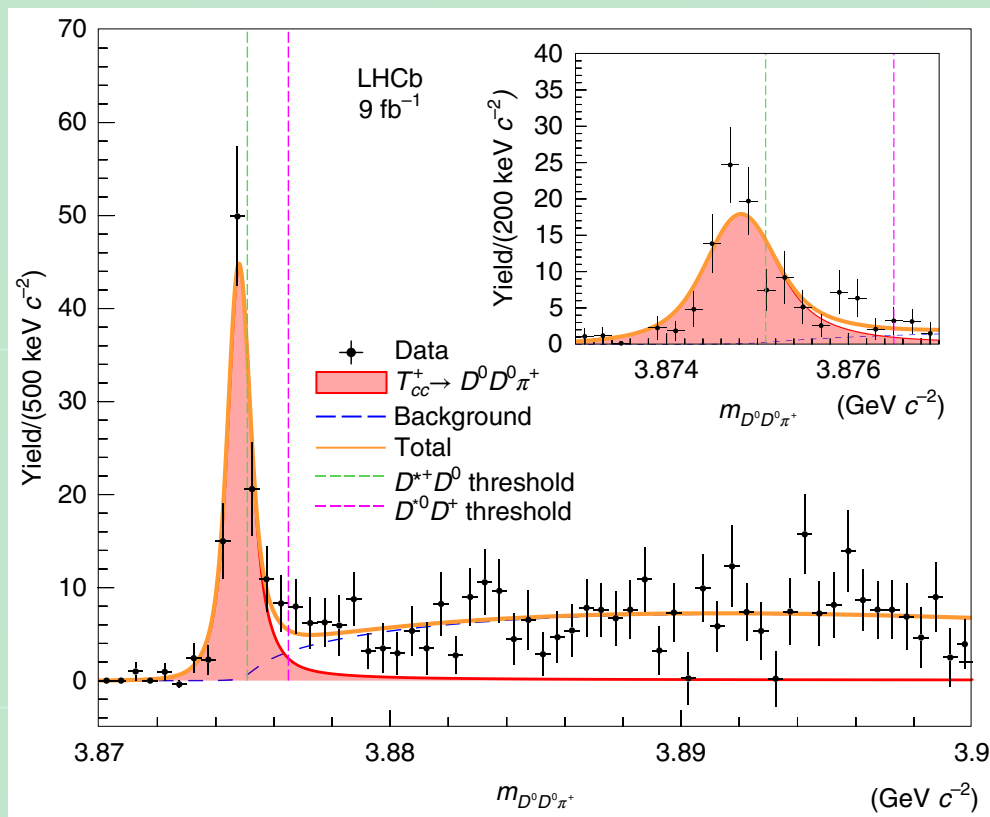
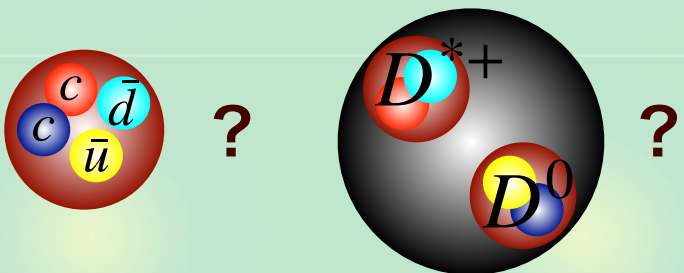
# エキゾチックハドロン

## 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？



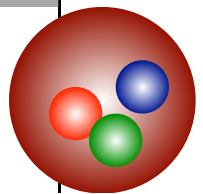
$D^0 D^0 \pi^+$  に崩壊：不安定状態の内部構造？

# 強い相互作用で不安定なハドロン

## 安定な/不安定なハドロン

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

$p$	$n$	$\Delta$	$\Sigma$	$\Sigma^+$	$\Sigma^0$	$\Sigma^-$	$\Lambda^+$	$\Lambda^0$	$\Lambda^+$	$\Lambda^0$
$1/2^+$	$1/2^+$	$\Delta(1232)$	$3/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
$3/2^+$	$3/2^+$	$\Delta(1600)$	$3/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
$1/2^+$	$1/2^+$	$\Delta(1620)$	$1/2^-$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
$3/2^+$	$3/2^+$	$\Delta(1700)$	$3/2^-$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
$1/2^+$	$1/2^+$	$\Delta(1750)$	$1/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
$1/2^-$	$1/2^-$	$\Delta(1900)$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$
$5/2^-$	$5/2^-$	$\Delta(1905)$	$5/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
$5/2^+$	$5/2^+$	$\Delta(1910)$	$1/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
$3/2^+$	$3/2^+$	$\Delta(1920)$	$3/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
$1/2^+$	$1/2^+$	$\Delta(1930)$	$5/2^-$	$5/2^-$	$5/2^-$	$5/2^-$	$5/2^-$	$5/2^-$	$5/2^-$	$5/2^-$
$3/2^+$	$3/2^+$	$\Delta(1940)$	$3/2^-$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
$5/2^+$	$5/2^+$	$\Delta(1950)$	$7/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
$3/2^+$	$3/2^+$	$\Delta(2000)$	$5/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
$1/2^+$	$1/2^+$	$\Delta(2150)$	$1/2^-$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
$1/2^+$	$1/2^+$	$\Delta(2200)$	$7/2^-$	$5/2^+$	$5/2^+$	$5/2^+$	$5/2^+$	$5/2^+$	$5/2^+$	$5/2^+$
$3/2^+$	$3/2^+$	$\Delta(2300)$	$9/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
$7/2^+$	$7/2^+$	$\Delta(2350)$	$5/2^-$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
$5/2^+$	$5/2^+$	$\Delta(2390)$	$7/2^+$	$7/2^+$	$7/2^+$	$7/2^+$	$7/2^+$	$7/2^+$	$7/2^+$	$7/2^+$
$3/2^+$	$3/2^+$	$\Delta(2400)$	$9/2^-$	$5/2^+$	$5/2^+$	$5/2^+$	$5/2^+$	$5/2^+$	$5/2^+$	$5/2^+$
$5/2^-$	$5/2^-$	$\Delta(2420)$	$11/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
$1/2^+$	$1/2^+$	$\Delta(2750)$	$13/2^-$	$7/2^-$	$7/2^-$	$7/2^-$	$7/2^-$	$7/2^-$	$7/2^-$	$7/2^-$
$3/2^-$	$3/2^-$	$\Delta(2950)$	$15/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
$7/2^-$	$7/2^-$	$\Lambda$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
$9/2^+$	$9/2^+$	$\Lambda(1380)$	$1/2^-$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
$9/2^-$	$9/2^-$	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$
$1/2^+$	$1/2^+$	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
$5/2^-$	$5/2^-$	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
$11/2^-$	$11/2^-$	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$	$1/2^-$
$13/2^+$	$13/2^+$	$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
		$\Lambda(1710)$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
		$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
		$\Lambda(1810)$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
		$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
		$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	$3/2^-$	$3/2^-$	$3/2^-$	$3/2^-$	$3/2^-$	$3/2^-$	$3/2^-$
		$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
		$\Lambda(2000)$	$1/2^-$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
		$\Lambda(2050)$	$3/2^-$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
		$\Lambda(2070)$	$3/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
		$\Lambda(2080)$	$5/2^-$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
		$\Lambda(2085)$	$7/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
		$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
		$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
		$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$	$3/2^+$
		$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$
		$\Lambda(2585)$	*	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$	$1/2^+$



バリオン~170種

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 $\bar{c}c$ ( $J^P$ )		
$F(J^P)$	$F'(J^P)$	$F(J^P)$	$F'(J^P)$	$F(J^P)$	$F'(J^P)$	$F(J^P)$	$F'(J^P)$	
$\pi^\pm$	$1^-(0^-)$	$\pi_2(1670)$	$1^-(2^{++})$	$K^\pm$	$1/2^-(0^-)$	$\psi_2(3823)$	$0^-(2^-)$	
$\pi^0$	$1^-(0^-)$	$\rho(1680)$	$0^-(1^{--})$	$K^0$	$1/2^-(0^-)$	$\psi_2(3842)$	$0^-(3^-)$	
$\eta$	$0^-(0^-)$	$\rho(1690)$	$1^+(3^{--})$	$K_S^0$	$1/2^-(0^-)$	$\chi_{c0}(3860)$	$0^+(0^+)$	
$\eta(500)$	$0^+(0^+)$	$\rho(1700)$	$1^+(1^{--})$	$K_L^0$	$1/2^-(0^-)$	$\chi_{c1}(3872)$	$0^+(1^+)$	
$\eta(770)$	$1^+(1^-)$	$\omega_2(1700)$	$1^-(2^{++})$	$K_S^{\prime 0}$	$1/2^-(0^-)$	$Z_c(3900)$	$1^+(1^+)$	
$\omega(782)$	$0^-(1^-)$	$\phi(1710)$	$0^+(0^+)$	$K^*(892)$	$1/2^-(1^-)$	$\chi_{c0}(3915)$	$0^+(0^+)$	
$\eta(958)$	$0^+(0^+)$	$\chi(1750)$	$7^-(1^{--})$	$K_1^*(1270)$	$1/2^+(1^-)$	$\chi_{c2}(3930)$	$0^+(2^+)$	
$\eta(980)$	$0^+(0^+)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^+)$	$K_1^*(1400)$	$1/2^+(1^-)$	$\chi(4020)^\pm$	$1^+(?^-)$	
$\eta(980)$	$0^+(0^+)$	$\pi(1800)$	$1^-(0^+)$	$K^*(1410)$	$1/2^+(1^-)$	$\chi(4040)$	$0^-(1^-)$	
$\phi(1020)$	$0^-(1^-)$	$\phi(1810)$	$0^+(2^{++})$	$K_2^*(1430)$	$1/2^+(0^+)$	$\chi(4050)^\pm$	$1^+(?^+)$	
$h_1(1170)$	$0^-(1^-)$	$\chi(1835)$	$1/2^+(2^+)$	$K_2^*(1430)$	$1/2^+(2^+)$	$\chi(4055)^\pm$	$1^+(?^+)$	
$b_1(1235)$	$1^+(1^+)$	$\phi_3(1850)$	$0^-(3^-)$	$K(1460)$	$1/2^-(0^-)$	$\chi(4100)^\pm$	$1^+(?^+)$	
$a_1(1260)$	$1^-(1^+)$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^+)$	$K_2(1580)$	$1/2^-(2^-)$	$\chi_1(4140)$	$0^+(1^+)$	
$a_1(1260)$	$1^-(1^+)$	$\eta_2(1880)$	$1^-(2^+)$	$K(1630)$	$1/2^?(2^?)$	$\chi(4160)$	$0^-(1^-)$	
$f_1(1270)$	$0^+(2^+)$	$\rho(1900)$	$1^+(1^-)$	$K_1(1650)$	$1/2^?(2^?)$	$\chi(4160)$	$?^?(?^?)$	
$f_1(1285)$	$0^+(2^+)$	$f_2(1910)$	$0^+(2^{++})$	$K^*(1680)$	$1/2^-(2^-)$	$Z_c(4200)$	$1^+(1^+)$	
$\eta(1295)$	$0^-(0^-)$	$a_0(1950)$	$0^+(0^+)$	$K_2(1770)$	$1/2^-(2^-)$	$B_c(4230)$	$0^-(1^-)$	
$\pi(1300)$	$1^-(1^+)$	$a_0(1950)$	$0^+(0^+)$	$K_2(1780)$	$1/2^-(2^-)$	$B_c(4240)$	$1^+(0^-)$	
$a_2(1320)$	$1^-(2^+)$	$a_0(1950)$	$0^+(2^{++})$	$K_2(1820)$	$1/2^-(3^-)$	$B_c(4250)^\pm$	$1^+(?^+)$	
$f_1(1370)$	$0^+(2^+)$	$a_0(1970)$	$1^-(4^{++})$	$K_1(1820)$	$1/2^-(2^-)$	$B_c(4274)$	$0^+(1^+)$	
$\pi_1(1400)$	$1^-(1^+)$	$\rho_3(1990)$	$1^+(3^-)$	$K(1830)$	$1/2^-(0^-)$	$B_c(4300)$	$0^+(?^+)$	
$\eta(1405)$	$0^-(1^-)$	$\Omega_b(6315)$	$1^-(2^+)$	$K_1^*(1950)$	$1/2^+(1^-)$	$B_c(4360)$	$0^+(?^+)$	
$h_1(1415)$	$0^-(1^-)$	$\Omega_b(6330)$	*	$K_2(1980)$	$1/2^+(2^+)$	$V_b$ and $V_{cb}$	$0^-(1^-)$	
$f_1(1420)$	$0^+(2^+)$	$\Omega_b(6340)$	*	$K_2(1980)$	$1/2^+(2^+)$	$B_c$ Elements	$\chi(4415)$	$0^-(1^-)$
$\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	$\Omega_b(6350)$	*	$K_2(2045)$	$1/2^+(4^+)$	$B_c$	$Z_c(4430)$	$1^+(1^+)$
$f_1(1430)$	$0^+(2^+)$	$P_c(4312)^+$	*	$K_2(2250)$	$1/2^-(2^-)$	$B_1(5721)$	$\chi(4500)$	$0^+(0^+)$
$a_0(1450)$	$1^-(0^+)$	$P_c(4380)^+$	*	$K_3(2320)$	$1/2^+(3^+)$	$B_2(5732)$	$\chi(4630)$	$0^+(?^+)$
$\eta(1450)$	$1^-(1^+)$	$P_c(4440)^+$	*	$K_3(2330)$	$1/2^-(3^-)$	$B_2(5747)$	$\chi(4660)$	$0^-(1^-)$
$f_1(1500)$	$0^+(2^+)$	$P_c(4457)^+$	*	$K_3(2900)$	$1/2^-(4^-)$	$B_1(5840)$	$\chi(4665)$	$0^+(1^+)$
$f_1(1510)$	$0^+(2^+)$			$K(3100)$	$?^?(?^?)$	$B_1(5970)$	$\chi(4700)$	$0^+(1^+)$
$f_2(1525)$	$0^+(2^+)$							
$f_2(1565)$	$0^+(2^+)$							
$\phi(1570)$	$1^-(1^-)$							
$h_1(1595)$	$0^-(1^-)$							
$\pi_1(1600)$	$1^-(1^+)$							
$a$								

# 目次



導入：ハドロン物理と共鳴状態



共鳴状態の記述



束縛状態から共鳴状態への遷移

[T. Hyodo, PRC90, 055208 \(2014\);](#)

[T. Hyodo, T. Hatsuda, Y. Nishida, PRC89, 032201 \(2014\)](#)



共鳴状態の構造

[T. Hyodo, PRL111, 132002 \(2013\);](#)

[T. Kinugawa, T. Hyodo, in preparation](#)



関連する話題



# ガモフ理論

## ハミルトニアンとしての“固有状態”としての共鳴状態

### - 複素エネルギー

G. Gamow, Z. Phys. 51, 204 (1928)

Zur Quantentheorie des Atomkernes.

Von G. Gamow, z. Zt. in Göttingen.

Mit 5 Abbildungen. (Eingegangen am 2. August 1928.)

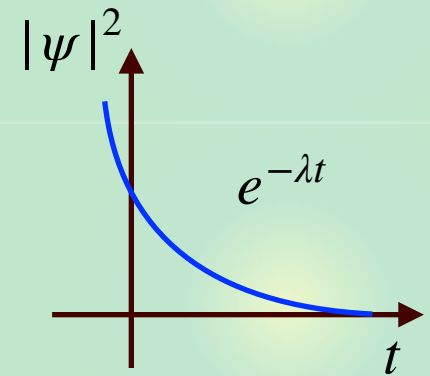
Um diese Schwierigkeit zu überwinden, müssen wir annehmen, daß die Schwingungen gedämpft sind, und  $E$  komplex setzen:

$$E = E_0 + i \frac{\hbar \lambda}{4\pi},$$

wo  $E_0$  die gewöhnliche Energie ist und  $\lambda$  das Dämpfungsdekrement (Zerfallskonstante). Dann sehen wir aber aus den Relationen (2a) und (2b),

### - 時間依存性：存在確率が時間とともに減少

$$\psi = \Psi(q) \cdot e^{+ \frac{2\pi i E}{\hbar} t}, \quad \propto e^{+2\pi i E_0 t / \hbar} e^{-(\lambda/2)t}, \quad |\psi|^2 \propto e^{-\lambda t}$$



## エルミート演算子の固有値は実数では？

### - 固有値が実数なのはヒルベルト空間（～2乗可積分な関数空間）

$$\int |\psi(\mathbf{r})|^2 d^3 r < \infty$$

### - 定義域を拡張すると複素固有値を持つことができる

# 散乱波動関数

球対称短距離力ポテンシャル  $V(r)$  のシュレディンガー方程式

$$\left[ -\frac{\nabla^2}{2\mu} + V(r) \right] \psi_{\ell,m}(\mathbf{r}) = E\psi_{\ell,m}(\mathbf{r}), \quad \psi_{\ell,m}(\mathbf{r}) = \frac{u_{\ell}(r)}{r} Y_{\ell}^m(\hat{\mathbf{r}})$$

- 散乱波動関数 ( $E > 0$ 、連続固有値) の  $r \rightarrow \infty$  での漸近形

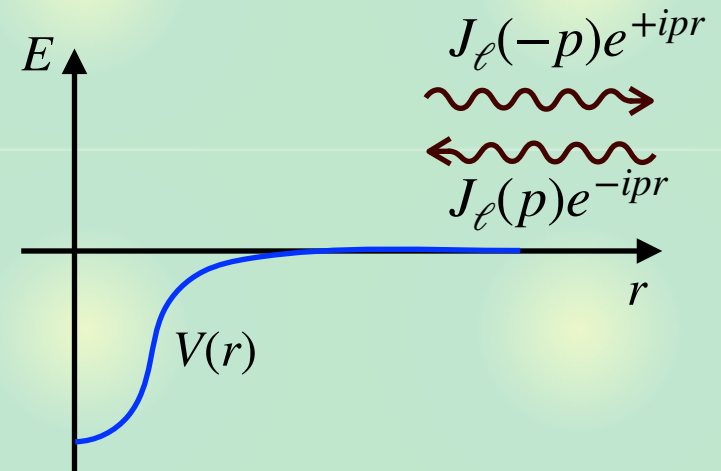
$$u_{\ell}(r;p) \xrightarrow{r \rightarrow \infty} \frac{i}{2} [J_{\ell}(p)\hat{h}_{\ell}^{-}(pr) - J_{\ell}(-p)\hat{h}_{\ell}^{+}(pr)], \quad p = \sqrt{2\mu E}$$

$$\sim \frac{i}{2} [J_{\ell}(p)e^{-ipr} - J_{\ell}(-p)e^{+ipr}]$$

内向き波      外向き波

- 内向き波の振幅：ヨスト関数

$$J_{\ell}(p) = 1 + \frac{2\mu}{p} \int_0^{\infty} dr \hat{h}_{\ell}^{+}(pr)V(r)u_{\ell}(r;p)$$



# 束縛状態

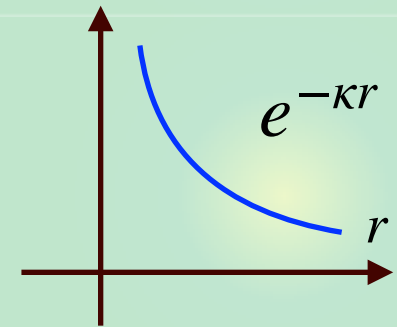
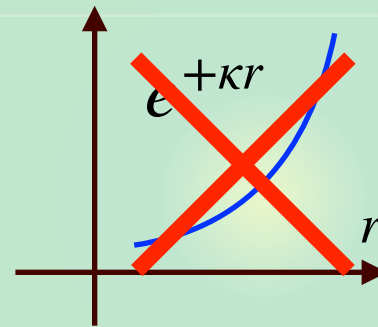
束縛解 ( $E < 0$ 、離散固有値)

- 運動量  $p = \sqrt{2\mu E}$  は純虚数

$$p = i\kappa, \quad \kappa = \sqrt{2\mu|E|} > 0$$

- 波動関数の  $r \rightarrow \infty$  での漸近形

$$u_\ell(r; i\kappa) \sim \frac{i}{2} [J_\ell(i\kappa)e^{+\kappa r} - J_\ell(-i\kappa)e^{-\kappa r}]$$



- 波動関数が2乗可積分：境界条件  $u(r \rightarrow \infty) = 0$

→  $J_\ell(i\kappa) = 0$ ：外向き境界条件（内向き波が消える）

物理的な散乱の運動量  $p$  は実数

→ 束縛状態は  $p$  を純虚数に解析接続したヨスト関数のゼロ点

# 共鳴状態

共鳴解：運動量  $p$  を複素数に解析接続した解

- 複素  $p$  平面の下半面 ( $\text{Im } p < 0$ ) に存在

$$p = p_R - ip_I, \quad p_R, p_I > 0$$

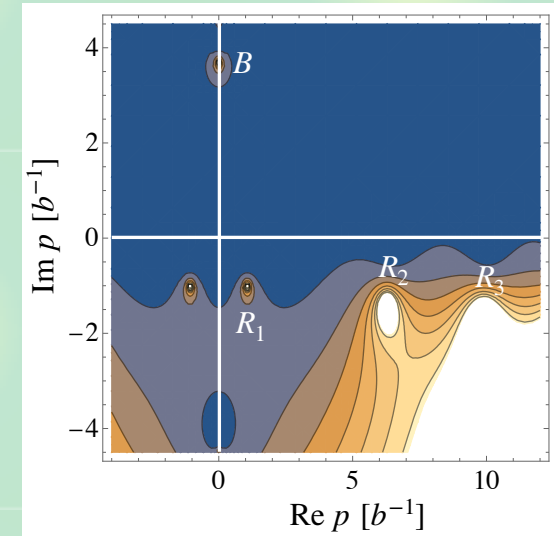
- 波動関数の振る舞い

$$u_\ell(r; p) \rightarrow -\frac{iJ_\ell(p)}{2} e^{ipr} \propto e^{ip_R r} e^{+p_I r}$$

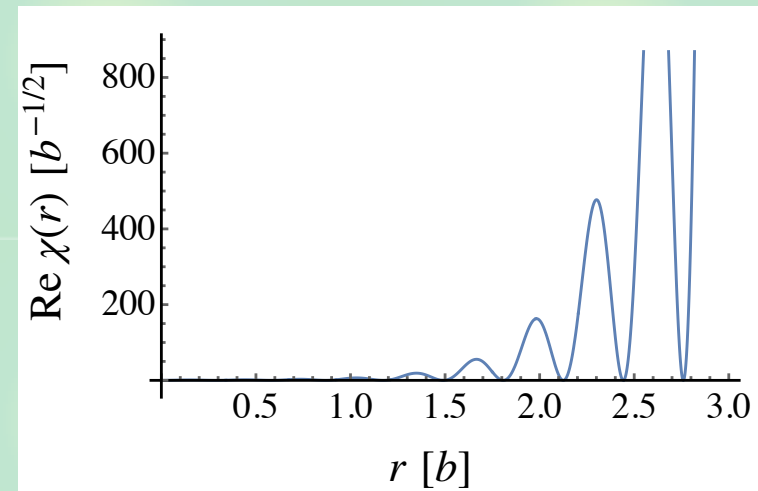
振動 増大

→  $r \rightarrow \infty$  で振動しながら発散する  
通常規格化ができない

波動関数が2乗可積分でないので複素固有値が許される



引力井戸型ポテンシャルの例



# 散乱理論の共鳴状態

## 部分波 $\ell$ のS行列とヨスト関数

$$s_\ell(p) = \frac{J_\ell(-p)}{J_\ell(p)} \sim \text{内向き振幅で規格化した外向き振幅}$$

- 散乱無し（素通り）の場合  $s_\ell(p) = 1$

## 散乱振幅：正味の散乱の情報

$$f_\ell(p) = \frac{s_\ell(p) - 1}{2ip} = \frac{J_\ell(-p) - J_\ell(p)}{2ipJ_\ell(p)}$$

離散固有状態の条件：ヨスト関数の**ゼロ点**  $J_\ell(p) = 0$

-  $p$  はS行列、散乱振幅の**極**

$$|s_\ell(p)| = \left| \frac{J_\ell(-p)}{J_\ell(p)} \right| \rightarrow \infty, \quad |f_\ell(p)| = \left| \frac{J_\ell(-p) - J_\ell(p)}{2ipJ_\ell(p)} \right| \rightarrow \infty$$

# ここまでのまとめ



## 共鳴状態の特徴づけ（束縛状態の自然な拡張）

- 複素エネルギー固有状態
- 散乱振幅、S行列の極

外向き波のみのシュレディンガー  
方程式の固有状態  $E$  ( $p = \sqrt{2\mu E}$ )

- 束縛状態 ( $E < 0$ )

$$p = i\kappa \quad (\kappa > 0)$$

- 共鳴状態 ( $E \in \mathbb{C}$ )

$$p \in \mathbb{C} \quad (\text{Im } p < 0)$$



ヨスト関数の零点

$$\mathcal{L}_\ell(p) = 0$$




S行列、散乱振幅の極


$$|f_\ell(p)| \rightarrow \infty$$

$$|s_\ell(p)| \rightarrow \infty$$

永江知文、兵藤哲雄「K中間子原子核の物理」（共立出版）

## 目次

 導入：ハドロン物理と共鳴状態

 共鳴状態の記述

 束縛状態から共鳴状態への遷移

[T. Hyodo, PRC90, 055208 \(2014\);](#)

[T. Hyodo, T. Hatsuda, Y. Nishida, PRC89, 032201 \(2014\)](#)

 共鳴状態の構造

[T. Hyodo, PRL111, 132002 \(2013\);](#)

[T. Kinugawa, T. Hyodo, in preparation](#)

 関連する話題

# ハドロン質量スケーリング

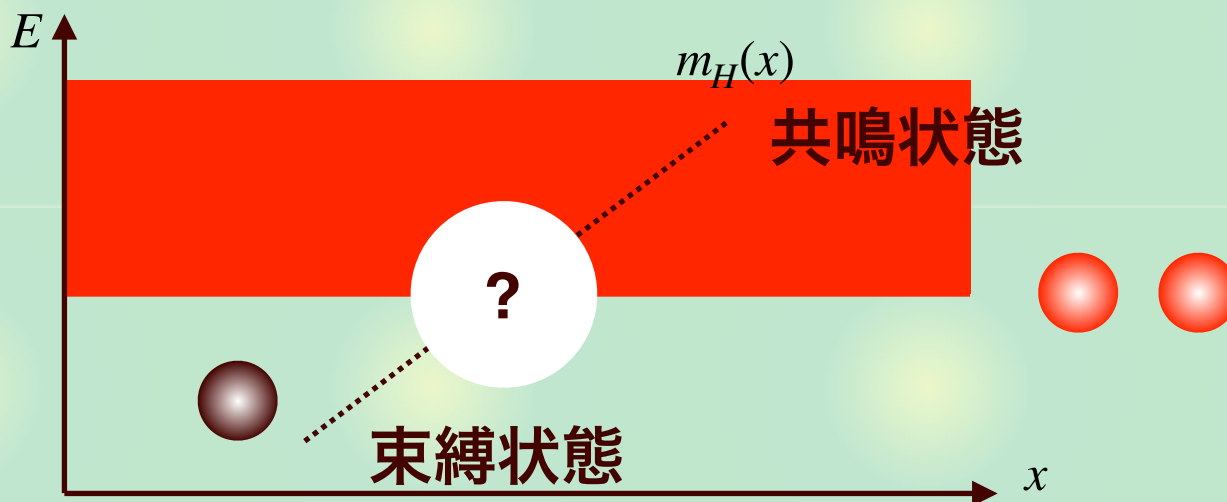
ハドロン質量  $m_H$  が外部パラメーター  $x$  に依存して変化

T. Hyodo, PRC90, 055208 (2014)

- クォーク質量 :  $x = m_q$  (カイラル摂動論)
- カラー数 :  $x = 1/N_c$  (large  $N_c$ )
- 温度、密度 :  $x = T, \mu$

2体閾値を超えると何が起こる？

c.f. フェッシュバッハ共鳴

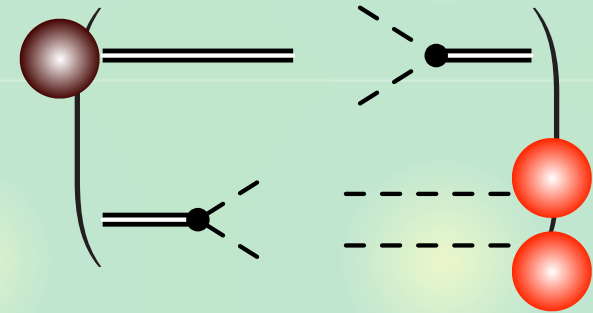




# 定式化

チャンネル結合ハミルトニアン（離散固有状態＋散乱状態）

$$\begin{pmatrix} M_0 & \hat{V} \\ \hat{V} & \frac{p^2}{2\mu} \end{pmatrix} |\Psi\rangle = E |\Psi\rangle, \quad |\Psi\rangle = \begin{pmatrix} c(E) |\psi_0\rangle \\ \chi_E(\mathbf{p}) |\mathbf{p}\rangle \end{pmatrix}$$



- 散乱振幅の解析解

$$f(\mathbf{p}, \mathbf{p}', E) = - \frac{4\pi^2 \mu \langle \mathbf{p} | \hat{V} | \psi_0 \rangle \langle \psi_0 | \hat{V} | \mathbf{p}' \rangle}{E - M_0 - \Sigma(E)} \sim \text{Diagrammatic expansion}$$

- 自己エネルギー（ $E > 0$ で虚部を持つ）

$$\Sigma(E) = \int \frac{\langle \psi_0 | \hat{V} | \mathbf{q} \rangle \langle \mathbf{q} | \hat{V} | \psi_0 \rangle}{E - q^2/(2\mu) + i0^+} d^3q \sim \text{Diagrammatic representation}$$

固有エネルギー：散乱振幅の極（自己無撞着な解）

$$E_h = M_0 + \Sigma(E_h)$$

# 一般的な閾値近傍の振る舞い

## 閾値近傍のスケーリング ( $\delta M : M_0$ の変化)

-  $\delta M > 0$

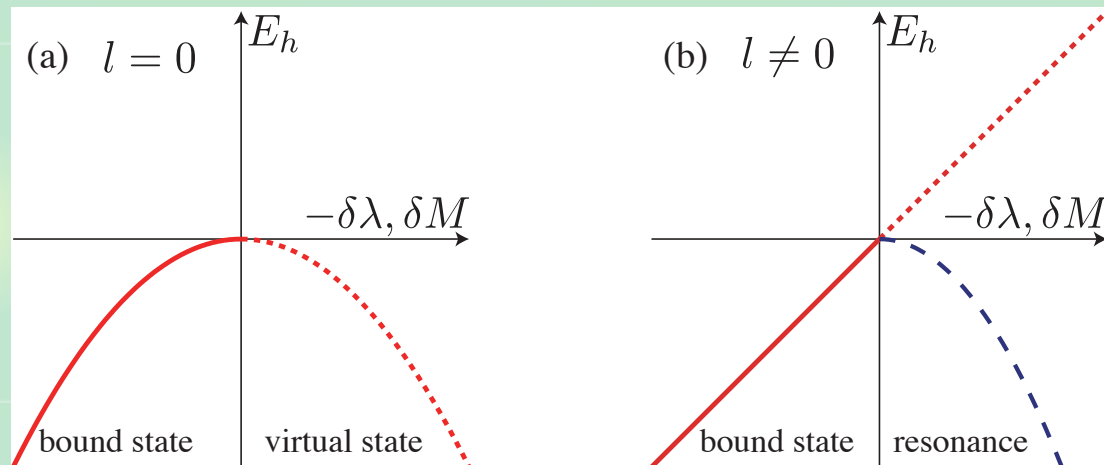
$$E_h \propto \begin{cases} -\delta M^2 & \ell = 0 \\ \delta M & \ell \neq 0 \end{cases}$$

-  $\delta M < 0$

$$E_h \propto -\delta M^2 \quad \ell = 0$$

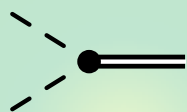
$$\text{Re } E_h \propto \delta M \quad \ell \neq 0$$

$$\text{Im } E_h \propto -\delta M^{\ell+1/2} \quad \ell \neq 0$$

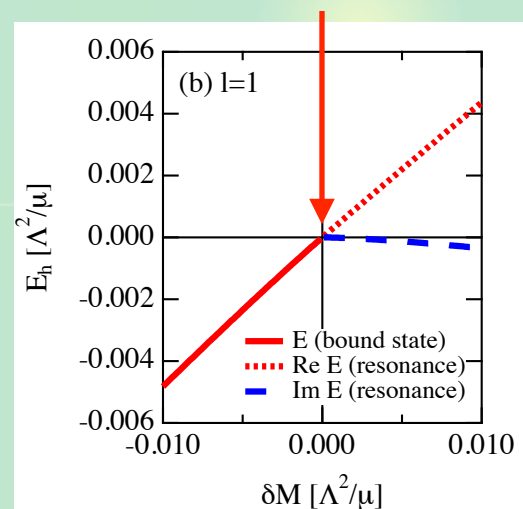
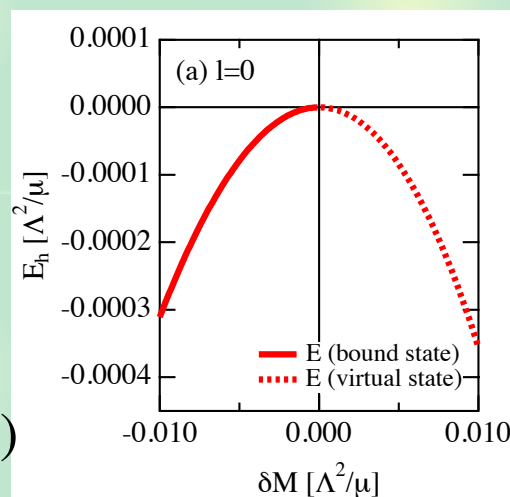


傾き：波動関数くりこみZ

## 数値計算



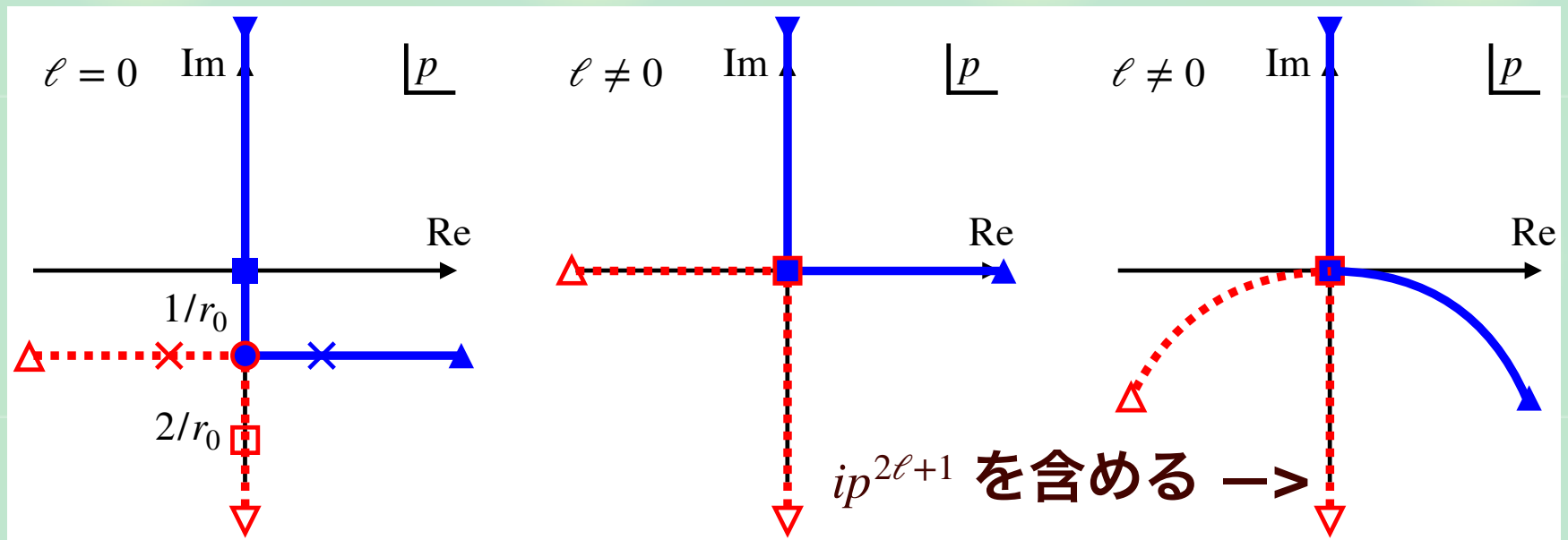
$$\langle \mathbf{q} | \hat{V} | \psi_0 \rangle = g_\ell |\mathbf{q}|^\ell \Theta(\Lambda - |\mathbf{q}|)$$



## 極の振る舞い

## 閾値近傍の極：有効レンジ展開

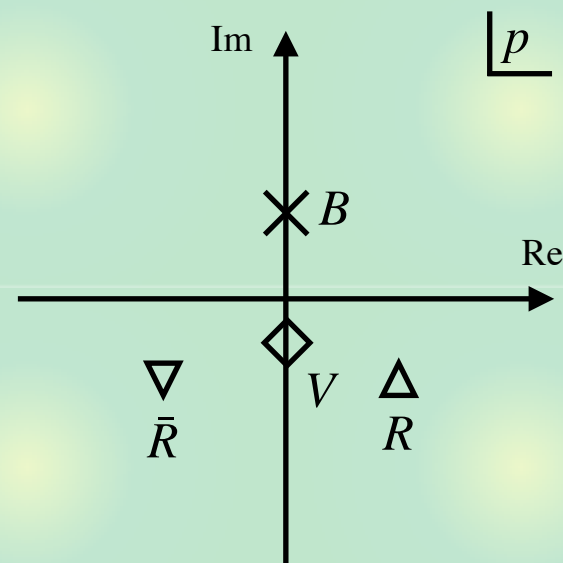
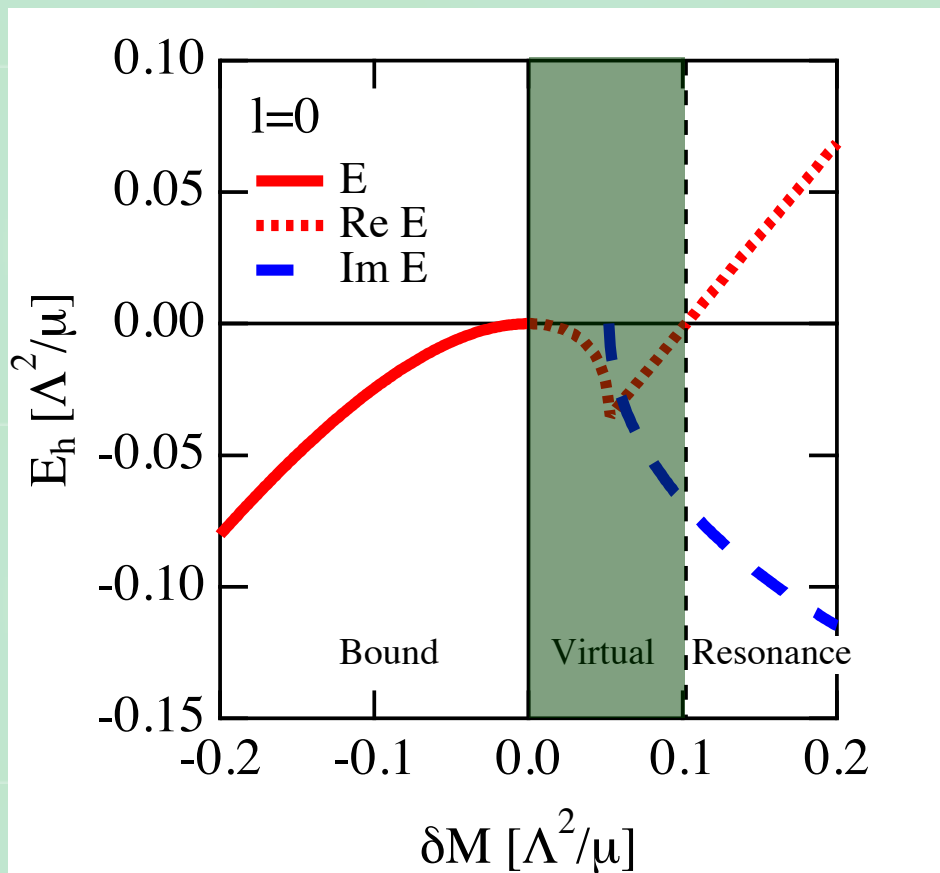
$$f_\ell(p) = \frac{p^{2\ell}}{-\frac{1}{a_\ell} + \frac{r_\ell}{2}p^2 + \dots - ip^{2\ell+1}} \Rightarrow \begin{cases} 0 = -\frac{1}{a_0} - ip + \frac{r_0}{2}p^2 & \ell = 0 \\ 0 = -\frac{1}{a_\ell} + \frac{r_\ell}{2}p^2 & \ell \neq 0 \end{cases}$$



- p波以上の束縛状態は直接共鳴に遷移する
- s波の束縛状態は直接共鳴に遷移せず、virtual状態を経由する

# s波の共鳴状態

## 数値計算

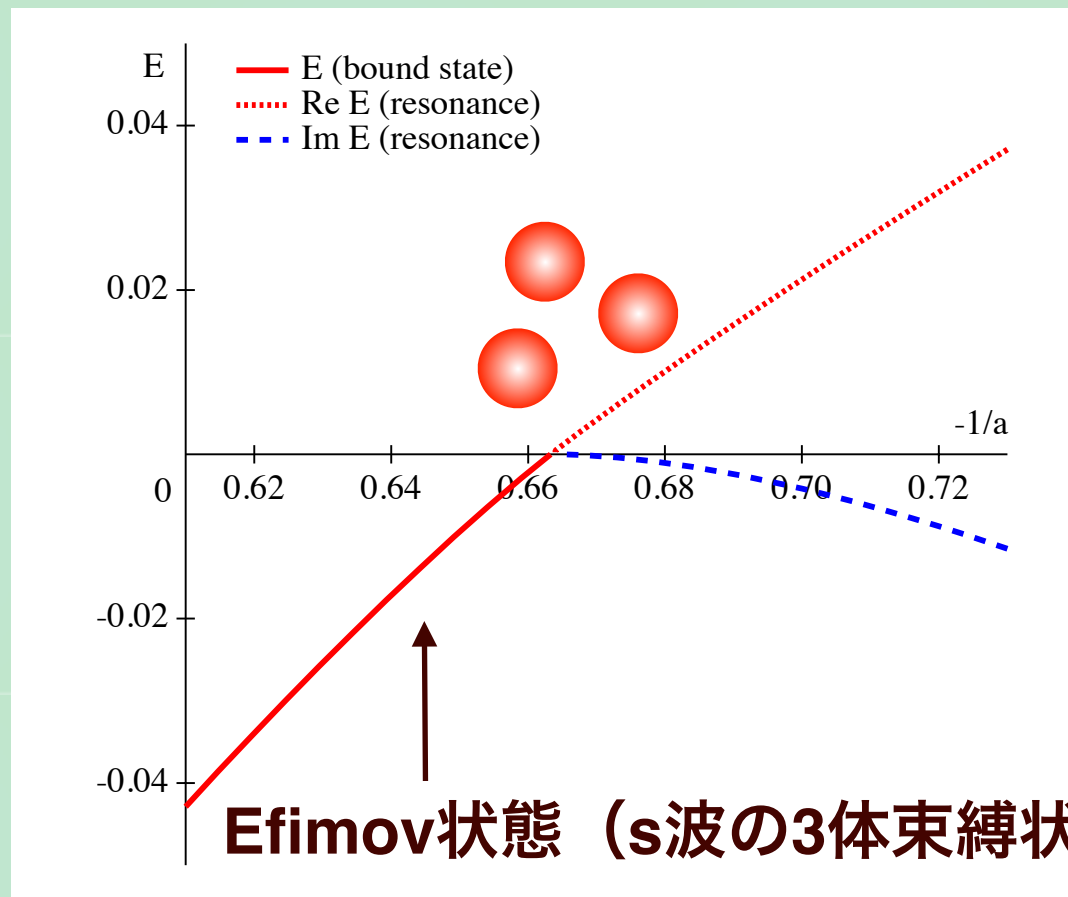


- 閾値近傍の振る舞いは単純な摂動論が破綻し非摂動的
- s波の束縛状態は直接共鳴に遷移せず、virtual状態を経由する

# 3体束縛状態では

## s波束縛状態が3体閾値を超える場合

T. Hyodo, T. Hatsuda, Y. Nishida, PRC89, 032201 (2014)



- Efimov状態は直接共鳴に遷移する

# 目次



導入：ハドロン物理と共鳴状態



共鳴状態の記述



束縛状態から共鳴状態への遷移

T. Hyodo, PRC90, 055208 (2014);

T. Hyodo, T. Hatsuda, Y. Nishida, PRC89, 032201 (2014)



共鳴状態の構造

T. Hyodo, PRL111, 132002 (2013);

T. Kinugawa, T. Hyodo, in preparation



関連する話題