

ハドロンの共鳴状態の物理



兵藤 哲雄

京都大学 基礎物理学研究所

2015, Nov. 24th 1

目次



イントロダクション

- ハドロンの構造とエキゾチック状態
- ハドロン物理における共鳴状態



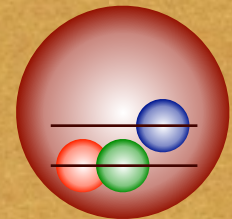
閾値近傍のハドロン共鳴状態の複合性

[T. Hyodo, Int. J. Mod. Phys. A 28, 1330045 \(2013\)](#)

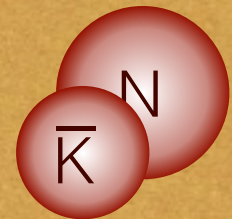
[T. Hyodo, Phys. Rev. Lett. 111, 132002 \(2013\)](#)

- 有効場の理論による弱束縛関係式
- 不安定状態への拡張
- ハドロン物理への応用： $\Lambda(1405)$

[Y. Kamiya, T. Hyodo, arXiv:1509.00146 \[hep-ph\]](#)



or

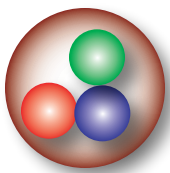


ハドロンの分類

観測されているハドロン

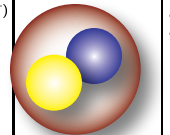
PDG2015 : <http://pdg.lbl.gov/>

p	$1/2^+$ ****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$ ****	Σ^+	$1/2^+$ ****	Ξ^0	$1/2^+$ ****	Λ_c^+	$1/2^+$ ****
n	$1/2^+$ ****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$ ***	Σ^0	$1/2^+$ ****	Ξ^-	$1/2^+$ ****	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$ ***
$N(1440)$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$ ****	Σ^-	$1/2^+$ ****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$ ****	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$ ***
$N(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$ ****	$\Xi(1620)$	*	$\Lambda_c(2765)^+$	*
$N(1535)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$ *	$\Sigma(1480)$	*	$\Xi(1690)$	***	$\Lambda_c(2940)^+$	$5/2^+$ ***
$N(1650)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$ **	$\Sigma(1560)$	**	$\Xi(1820)$	$3/2^-$ ***	$\Lambda_c(2940)^+$	***
$N(1675)$	$5/2^-$ ****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$ ****	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$ **	$\Xi(1950)$	*	$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$ ****
$N(1680)$	$5/2^+$ ****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$ ****	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$ *	$\Xi(2030)$	$\geq 5/2^?$ ***	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$ ****
$N(1685)$	*	$\Delta(1920)$	$3/2^+$ ***	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$ ***	$\Xi(2120)$	*	$\Sigma_c(2800)$	***
$N(1700)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(1930)$	$5/2^-$ ***	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$ ****	$\Xi(2250)$	**	Ξ_c	$1/2^+$ ***
$N(1710)$	$1/2^+$ ***	$\Delta(1940)$	$3/2^-$ ***	$\Sigma(1690)$	**	$\Xi(2370)$	**	Ξ_c^0	$1/2^+$ ***
$N(1720)$	$3/2^+$ ****	$\Delta(1950)$	$7/2^+$ ****	$\Sigma(1730)$	$3/2^+$ **	$\Xi(2500)$	*	Ξ_c^+	$1/2^+$ ***
$N(1860)$	$5/2^+$ **	$\Delta(2000)$	$5/2^+$ **	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$ ***			Ξ_c^0	$1/2^+$ ***
$N(1875)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$ *	$\Sigma(1770)$	$1/2^+$ **	Ω^-	$3/2^+$ ****	Ξ_c^+	$1/2^+$ ***
$N(1880)$	$1/2^+$ **	$\Delta(2200)$	$7/2^-$ *	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$ ****	$\Omega(2250)^-$	***	Ξ_c^0	$1/2^+$ ***
$N(1895)$	$1/2^-$ **	$\Delta(2300)$	$9/2^+$ **	$\Sigma(1840)$	$3/2^+$ **	$\Omega(2380)^-$	**	Ξ_c^+	$1/2^+$ ***
$N(1900)$	$3/2^+$ ***	$\Delta(2350)$	$5/2^-$ **	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$ **	$\Omega(2470)^-$	**	Ξ_c^0	$1/2^+$ ***
$N(1990)$	$7/2^+$ **	$\Delta(2390)$	$7/2^+$ *	$\Sigma(1900)$	$1/2^-$ *			Ξ_c^+	$1/2^+$ ***
$N(2000)$	$5/2^+$ **	$\Delta(2400)$	$9/2^-$ **	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$ ****			Ξ_c^0	$1/2^+$ ***
$N(2040)$	$3/2^+$ **	$\Delta(2420)$	$11/2^+$ ****	$\Sigma(1940)$	$3/2^+$ **			Ξ_c^+	$1/2^+$ ***
$N(2060)$	$5/2^-$ **	$\Delta(2750)$	$13/2^-$ **	$\Sigma(1940)$	$3/2^-$ ***			Ξ_c^0	$1/2^+$ ***
$N(2100)$	$1/2^+$ *	$\Delta(2950)$	$15/2^+$ **	$\Sigma(2000)$	$1/2^-$ *			Ξ_c^+	$1/2^+$ ***
$N(2120)$	$3/2^-$ **			$\Sigma(2030)$	$7/2^+$ ****			Ω_c^0	$3/2^+$ ***
$N(2190)$	$7/2^-$ ****	Λ	$1/2^+$ ****	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$ *			Ω_c^+	$3/2^+$ ***
$N(2220)$	$9/2^+$ ****	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$ **			Ξ_{cc}^+	*
$N(2250)$	$9/2^-$ ****	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(2100)$	$7/2^-$ **				
$N(2300)$	$1/2^+$ **	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$ **	$\Sigma(2250)$	***			Λ_b^0	$1/2^+$ ***
$N(2570)$	$5/2^-$ **	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma(2455)$	**			$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$ ***
$N(2600)$	$11/2^-$ ***	$\Lambda(1690)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(2620)$	**			$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$ ***
$N(2700)$	$13/2^+$ **	$\Lambda(1710)$	$1/2^+$ *	$\Sigma(3000)$	**			Σ_b	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(1800)$	$1/2^-$ ***	$\Sigma(3170)$	*			Σ_b^+	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(1810)$	$1/2^+$ ***					Ξ_b^-	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(1820)$	$5/2^+$ ****					Ξ_b^0	$1/2^+$ ***
		$\Lambda(1830)$	$5/2^-$ ****					Ξ_b^+	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(1890)$	$3/2^+$ ****					Ξ_b^0	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(2000)$	*					Ξ_b^+	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(2020)$	$7/2^+$ *					Ξ_b^0	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(2050)$	$3/2^-$ *					Ξ_b^+	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(2100)$	$7/2^-$ ****					Ξ_b^0	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(2110)$	$5/2^+$ ***					Ξ_b^+	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(2325)$	$3/2^-$ *					Ξ_b^0	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(2350)$	$9/2^+$ ***					Ξ_b^+	$3/2^+$ ***
		$\Lambda(2585)$	**					Ξ_b^0	$3/2^+$ ***



バリオン~150種類

LIGHT UNFLAVORED (S=C=B=0)		STRANGE (S=±1, C=B=0)		CHARMED, STRANGE (C=S=±1)		$c\bar{c}$ $F_c(F_c)$	
$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$
π^\pm	$1^-(0^-)$	$\rho(1680)$	$0^-(1^-)$	K^{*2}	$1/2(0^-)$	D_s^{*2}	$0(0^-)$
π^0	$1^-(0^+)$	$\rho(1690)$	$1^+(3^-)$	K^{*0}	$1/2(0^-)$	D_s^{*0}	$0(0^-)$
η	$0^+(0^+)$	$\rho(1700)$	$1^+(1^-)$	K^*_8	$1/2(0^-)$	D_s^{*8}	$0(0^-)$
$f_0(500)$	$0^+(0^+)$	$\rho(1700)$	$1^-(2^+)$	K^*_1	$1/2(0^-)$	$D_{s1}(2317)^{\pm}$	$0(0^+)$
$\rho(770)$	$1^+(1^-)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^+)$	$K^*_0(800)$	$1/2(0^+)$	$D_{s1}(2460)^{\pm}$	$0(1^+)$
$\omega(782)$	$0^-(1^-)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^+)$	$K^*(892)$	$1/2(1^-)$	$D_{s1}(2536)^{\pm}$	$0(1^+)$
$\eta(958)$	$0^+(0^+)$	$\pi(1800)$	$1^-(0^+)$	$K^*_1(1200)$	$1/2(1^+)$	$D_{s1}(2700)^{\pm}$	$0(1^-)$
$f_0(980)$	$0^+(0^+)$	$f_0(1810)$	$0^+(2^+)$	$K^*_1(1400)$	$1/2(1^+)$	$D_{s1}(2860)^{\pm}$	$0(0^?)$
$a_0(980)$	$1^-(0^+)$	$X(1835)$	$?^?(2^+)$	$K^*(1410)$	$1/2(1^-)$	$D_{s1}(3040)^{\pm}$	$0(0^?)$
$\phi(1020)$	$0^-(1^-)$	$X(1840)$	$?^?(2^?)$	$K^*_0(1430)$	$1/2(0^+)$		
$h_1(1170)$	$0^-(1^+)$	$\omega(1850)$	$0^-(3^-)$	$K^*_2(1430)$	$1/2(2^+)$		
$b_1(1235)$	$1^-(1^+)$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^+)$	$K(1460)$	$1/2(0^-)$		
$a_1(1260)$	$1^-(1^+)$	$\pi_2(1880)$	$1^-(2^+)$	$f_0(1580)$	$1/2(2^-)$		
$f_2(1270)$	$0^+(2^+)$	$\rho(1900)$	$1^+(1^-)$	$K(1630)$	$1/2(2^?)$		
$f_1(1285)$	$0^+(1^+)$	$f_0(1910)$	$0^+(2^+)$	$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$		
$\eta(1295)$	$0^+(0^+)$	$f_0(1950)$	$0^+(2^+)$	$K^*(1680)$	$1/2(1^-)$		
$\pi(1320)$	$1^-(0^+)$	$\rho_3(1990)$	$1^+(3^-)$	$K^*_0(1770)$	$1/2(2^-)$		
$a_2(1320)$	$1^-(2^+)$	$f_0(2010)$	$0^+(2^+)$	$K^*_3(1780)$	$1/2(3^-)$		
$f_0(1370)$	$0^+(0^+)$	$f_0(2020)$	$0^+(0^+)$	$K^*_0(1820)$	$1/2(2^-)$		
$h_1(1380)$	$?^-(1^+)$	$a_1(2040)$	$1^-(4^+)$	$K(1830)$	$1/2(0^-)$		
$\pi_1(1400)$	$1^-(1^+)$	$f_0(2050)$	$0^+(4^+)$	$K^*_1(1950)$	$1/2(0^+)$		
$\eta(1405)$	$0^+(0^+)$	$f_0(2100)$	$1^-(2^+)$	$K^*_2(1980)$	$1/2(2^+)$		
$f_1(1420)$	$0^+(1^+)$	$f_0(2100)$	$0^+(0^+)$	$K^*_1(2045)$	$1/2(4^+)$		
$\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	$f_2(2150)$	$0^+(2^+)$	$K^*_2(2250)$	$1/2(2^-)$		
$f_2(1430)$	$0^+(2^+)$	$\rho(2150)$	$1^-(1^-)$	$K^*_3(2380)$	$1/2(5^-)$		
$a_1(1450)$	$1^-(0^+)$	$f_0(2200)$	$0^+(0^+)$	$K^*_0(2500)$	$1/2(2^-)$		
$\rho(1450)$	$1^+(1^-)$	$f_1(2220)$	$0^+(0^+)$	$K(3100)$	$?^?(2^?)$		
$\eta(1475)$	$0^+(0^+)$	$\eta(2225)$	$0^+(0^+)$				
$f_0(1500)$	$0^+(0^+)$	$f_3(2250)$	$1^+(3^-)$				
$f_1(1510)$	$0^+(1^+)$	$f_0(2300)$	$0^+(2^+)$				
$f_2(1525)$	$0^+(2^+)$	$f_0(2300)$	$0^+(4^+)$				
$f_3(1565)$	$0^+(2^+)$	$f_0(2330)$	$0^+(0^+)$				
$\rho(1570)$	$1^+(1^+)$	$f_0(2340)$	$0^+(2^+)$				
$h_1(1595)$	$0^-(1^+)$	$\rho_3(2350)$	$1^+(5^-)$				
$\pi_1(1600)$	$1^-(1^+)$	$a_1(2450)$	$1^-(6^+)$				
$a_1(1640)$	$1^-(1^+)$	$f_0(2510)$	$0^+(6^+)$				
$f_2(1640)$	$0^+(2^+)$						
$\eta_2(1645)$	$0^+(2^-)$						
$\omega(1650)$	$0^-(1^-)$						
$\omega_3(1670)$	$0^-(3^-)$						
$\pi_2(1670)$	$1^-(2^+)$						



メソン~200種類

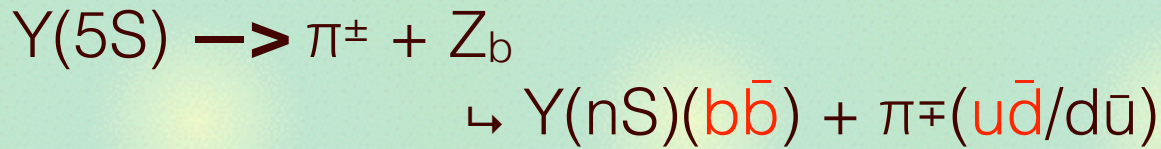
~ 350種類全てが単一のQCDラグランジアンから出てくる。

qqq/qq̄で記述される量子数のみ (自明ではない!)。

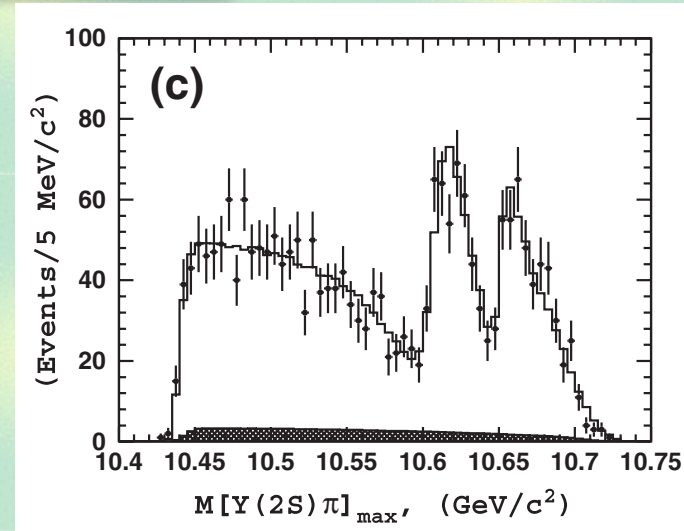
qqq/qq̄で記述できない状態

テトラクォーク候補(Belle)

: $Z_b(10610)$, $Z_b(10650)$

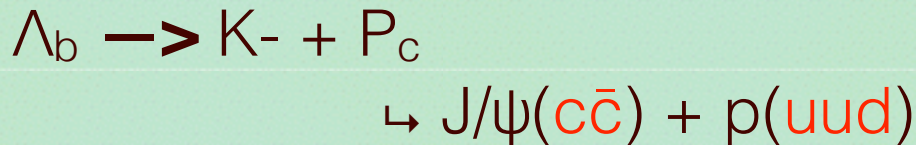


A. Bondar, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 108, 122001 (2012)

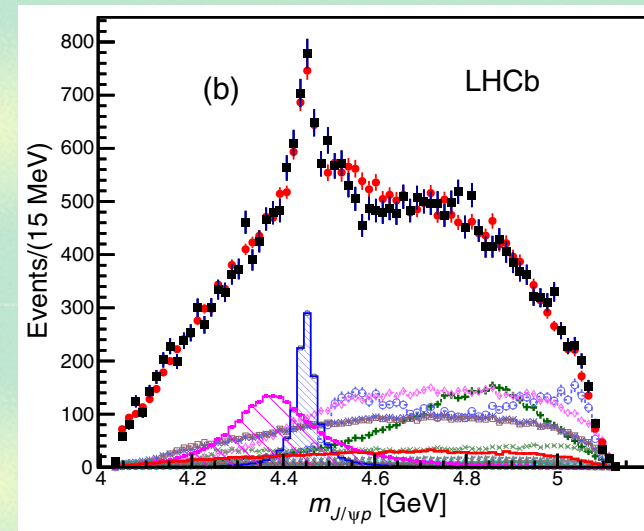


ペンタクォーク候補(LHCb)

: $P_c(4450)$, $P_c(4380)$



R. Aaij, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 115, 072001 (2015)



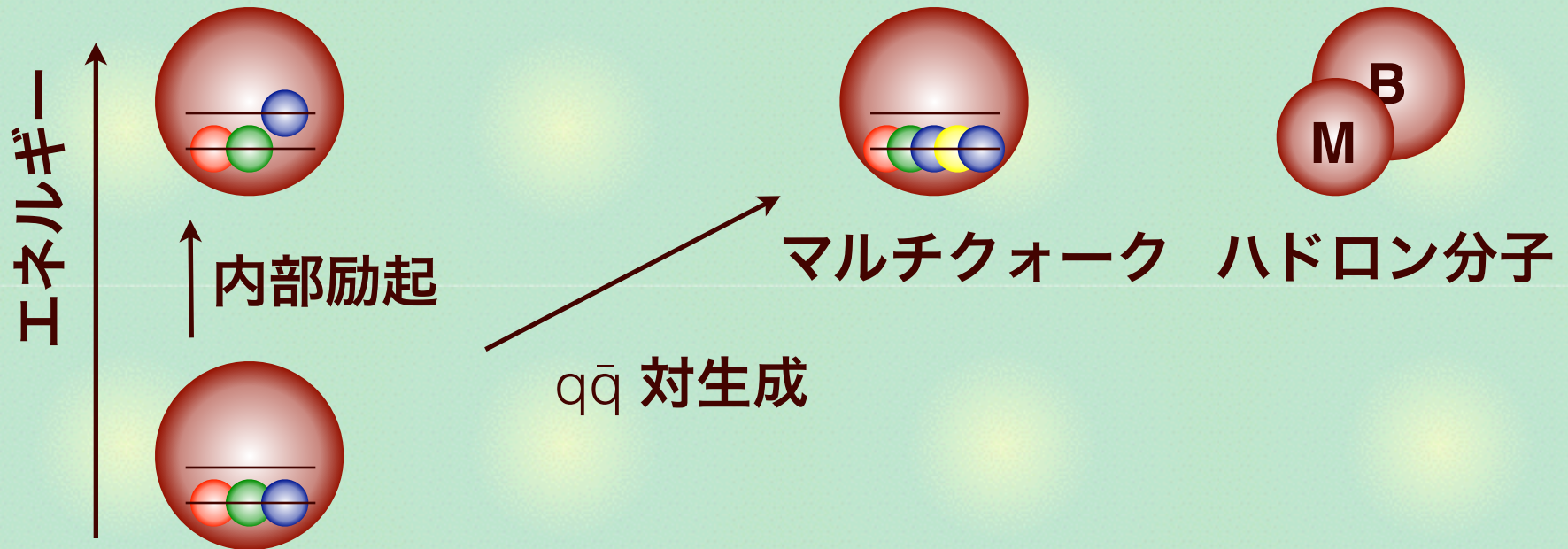
ごく少数しか発見されていない。なぜ少ないのか？

様々なハドロン励起

励起状態の記述（バリオンの例）

構成子クォーク模型

エキゾチック



QCDでは qqq 以外の構造が自然にあらわれる。

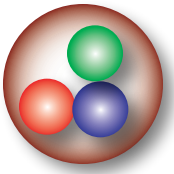
- qqq 構造とエキゾチック構造の重ね合わせ
→ **どのように判別**するか？

強い相互作用で不安定な状態

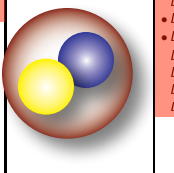
励起ハドロンの性質

PDG2015 : <http://pdg.lbl.gov/>

ρ	$1/2^+$ ****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$ ****	Σ^+	$1/2^+$ ****	Ξ^0	$1/2^+$ ****	Λ_c^+	$1/2^+$ ****
n	$1/2^+$ ****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$ ***	Σ^0	$1/2^+$ ****	Ξ^-	$1/2^+$ ****	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$ ***
$N(1440)$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$ ****	Σ^-	$1/2^+$ ****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$ ****	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$ ****
$N(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$ ****	$\Xi(1620)$	*	$\Lambda_c(2765)^+$	*
$N(1535)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$ *	$\Sigma(1480)$		$\Xi(1690)$	*	$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$ ***
$N(1650)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$ **	$\Sigma(1560)$	**	$\Xi(1820)$	$3/2^-$ ***	$\Lambda_c(2940)^+$	***
$N(1675)$	$5/2^-$ ****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$ ****	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$ **	$\Xi(1950)$		$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$ ****
$N(1680)$	$5/2^+$ ****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$ ****	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$ *	$\Xi(2030)$	$\geq 5/2^?$ ***	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$ ****
$N(1685)$	*	$\Delta(1920)$	$3/2^+$ ***	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$ ***	$\Xi(2120)$	*	$\Sigma_c(2800)$	***
$N(1700)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(1930)$	$5/2^-$ **	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$ **	$\Xi(2250)$	**	Ξ_c^+	$1/2^+$ ****
$N(1710)$	$1/2^+$ ***	$\Delta(1940)$	$3/2^-$ **	$\Sigma(1690)$	***	$\Xi(2370)$	**	Ξ_c^0	$1/2^+$ ****
$N(1720)$	$3/2^+$ ****	$\Delta(1950)$	$7/2^+$ ****	$\Sigma(1730)$	$3/2^+$ *	$\Xi(2500)$	*	Ξ_c^-	$1/2^+$ ****
$N(1860)$	$5/2^+$ **	$\Delta(2000)$	$5/2^+$ **	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$ ***			Ξ_c^+	$1/2^+$ ****
$N(1875)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$ *	$\Sigma(1770)$	$1/2^+$ *	Ω^-	$3/2^+$ ****	Ξ_c^0	$1/2^+$ ****
$N(1880)$	$1/2^+$ **	$\Delta(2200)$	$7/2^-$ *	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$ ****	$\Omega(2250)$	***	$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$ ****
$N(1895)$	$1/2^-$ **	$\Delta(2300)$	$9/2^+$ **	$\Sigma(1840)$	$3/2^+$ **	$\Omega(2380)$	**	$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$ ****
$N(1900)$	$3/2^+$ ***	$\Delta(2350)$	$5/2^-$ **	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$ **	$\Omega(2470)$	**	$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$ ****
$N(1990)$	$7/2^+$ **	$\Delta(2390)$	$7/2^+$ *	$\Sigma(1900)$	$1/2^-$ *			$\Xi_c(2930)$	**
$N(2000)$	$5/2^+$ **	$\Delta(2400)$	$9/2^-$ **	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$ ****			$\Xi_c(2980)$	**
$N(2040)$	$3/2^+$ *	$\Delta(2420)$	$11/2^+$ ****	$\Sigma(1940)$	$3/2^+$ *			$\Xi_c(3055)$	***
$N(2060)$	$5/2^-$ **	$\Delta(2750)$	$13/2^-$ **	$\Sigma(1940)$	$3/2^-$ ***			$\Xi_c(3080)$	**
$N(2100)$	$1/2^+$ *	$\Delta(2950)$	$15/2^+$ **	$\Sigma(2000)$	$1/2^-$ **			$\Xi_c(3123)$	**
$N(2120)$	$3/2^-$ **			$\Sigma(2030)$	$7/2^+$ ****			Ω_c^0	$1/2^+$ ****
$N(2190)$	$7/2^-$ ****	Λ	$1/2^+$ ****	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$ **			$\Omega_c(2770)^0$	$3/2^+$ ****
$N(2220)$	$9/2^+$ ****	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$ **			Ξ_{cc}^+	*
$N(2250)$	$9/2^-$ ****	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(2100)$	$7/2^-$ **			Λ_b^0	$1/2^+$ ***
$N(2300)$	$1/2^+$ **	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$ **	$\Sigma(2250)$	***			$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$ ***
$N(2570)$	$5/2^-$ **	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma(2455)$	**			$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$ ***
$N(2600)$	$11/2^-$ ***	$\Lambda(1690)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(2620)$	**			Σ_b	$1/2^+$ ****
$N(2700)$	$13/2^+$ **	$\Lambda(1710)$	$1/2^+$ *	$\Sigma(3000)$	*			Σ_b^-	$3/2^+$ ****
		$\Lambda(1800)$	$1/2^-$ ***	$\Sigma(3170)$	*			Ξ_b^0, Ξ_b^-	$1/2^+$ ****
		$\Lambda(1810)$	$1/2^+$ ***					Ξ_b', Ξ_b''	$1/2^+$ ****
		$\Lambda(1820)$	$5/2^+$ ****					$\Xi_b(5935)$	$1/2^+$ ****
		$\Lambda(1830)$	$5/2^-$ ****					$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$ ****
		$\Lambda(1890)$	$3/2^+$ ****					$\Xi_b(5955)$	$3/2^+$ ****
		$\Lambda(2000)$	*					Ω_b	$1/2^+$ ****
		$\Lambda(2020)$	$7/2^+$ *						
		$\Lambda(2050)$	$3/2^-$ *						
		$\Lambda(2100)$	$7/2^-$ ****						
		$\Lambda(2110)$	$5/2^+$ ***						
		$\Lambda(2325)$	$3/2^-$ *						
		$\Lambda(2350)$	$9/2^+$ ***						
		$\Lambda(2585)$	**						



LIGHT UNFLAVORED (S=C=B=0)		STRANGE (S=±1, C=B=0)		CHARMED, STRANGE (C=S=±1)		$c\bar{c}$ $F_c(F_c)$	
$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$	$F_c(F_c)$
π^\pm	$1^-(0^-)$	$\rho(1680)$	$0^-(1^-)$	K^{*2}	$1/2^-(0^-)$	D_s^{*2}	$0^-(0^-)$
π^0	$1^-(0^-)$	$\rho(1690)$	$1^+(3^-)$	K^{*0}	$1/2^-(0^-)$	D_s^{*0}	$0^-(0^-)$
η	$0^+(0^+)$	$\rho(1700)$	$1^+(1^-)$	K^{*8}	$1/2^-(0^-)$	D_s^{*8}	$0^-(0^-)$
$\omega(500)$	$0^+(0^+)$	$\rho(1710)$	$0^+(0^+)$	K^{*8}	$1/2^-(0^-)$	D_s^{*8}	$0^-(0^-)$
$\rho(770)$	$1^+(1^-)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^+)$	$K_0^*(800)$	$1/2^-(0^-)$	$D_{s1}(2317)^{\pm}$	$0^+(0^+)$
$\omega(782)$	$0^-(1^-)$	$\eta(1770)$	$0^+(0^+)$	$K^*(892)$	$1/2^-(1^-)$	$D_{s1}(2460)^{\pm}$	$0^+(1^+)$
$\eta(958)$	$0^+(0^+)$	$\eta(1800)$	$1^-(0^+)$	$K_0^*(1270)$	$1/2^-(1^-)$	$D_{s1}(2536)^{\pm}$	$0^+(1^+)$
$\eta(980)$	$0^+(0^+)$	$\eta(1810)$	$0^+(2^+)$	$K_0^*(1400)$	$1/2^-(1^-)$	$D_{s1}(2700)^{\pm}$	$0^+(1^-)$
$\omega(980)$	$1^-(0^+)$	$\eta(1840)$	$?^?(2^?)$	$K^*(1410)$	$1/2^-(1^-)$	$D_{s1}(2860)^{\pm}$	$0^?(2^?)$
$\omega(1020)$	$0^-(1^-)$	$X(1840)$	$?^?(2^?)$	$K_0^*(1430)$	$1/2^-(0^-)$	$D_{s1}(3040)^{\pm}$	$0^?(2^?)$
$h_1(1170)$	$0^-(1^+)$	$\omega_3(1850)$	$0^-(3^-)$	$K_2^*(1430)$	$1/2^-(2^+)$	BOTTOM (B=±1)	
$b_1(1235)$	$1^-(1^+)$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^-)$	$K(1460)$	$1/2^-(0^-)$	B^*	$1/2^-(0^-)$
$\omega(1260)$	$1^-(1^+)$	$\rho_2(1880)$	$1^-(2^+)$	$K_0^*(1580)$	$1/2^-(2^+)$	B^0	$1/2^-(0^-)$
$f_2(1270)$	$0^+(2^+)$	$\rho(1900)$	$1^+(1^-)$	$K(1630)$	$1/2^-(2^+)$	B^{\pm}/B^0	ADMIXTURE
$f_1(1285)$	$0^+(1^+)$	$f_0(1910)$	$0^+(2^+)$	$K_0^*(1650)$	$1/2^-(2^+)$	$B^{\pm}/B^0/B^{\pm}/b$ -baryon	ADMIXTURE
$\eta(1295)$	$0^+(0^+)$	$f_0(1950)$	$0^+(2^+)$	$K^*(1680)$	$1/2^-(1^-)$	V_{cb} and V_{cb}	KM Matrix Elements
$f_0(1370)$	$0^+(0^+)$	$f_0(1990)$	$1^+(3^-)$	$K_0^*(1770)$	$1/2^-(1^-)$	B^*	$1/2^-(1^-)$
$h_1(1380)$	$1^-(1^+)$	$f_0(2010)$	$0^+(2^+)$	$K_0^*(1780)$	$1/2^-(3^-)$	$B_1(5721)^{\pm}$	$1/2^-(1^+)$
$\pi_1(1400)$	$1^-(1^+)$	$f_0(2020)$	$0^+(0^+)$	$K_0^*(1820)$	$1/2^-(2^+)$	$B_1(5721)^0$	$1/2^-(1^+)$
$\eta(1405)$	$0^+(0^+)$	$a_0(2040)$	$1^-(4^+)$	$K_0^*(1830)$	$1/2^-(0^-)$	$B_1(5721)^{\pm}$	$1/2^-(1^+)$
$f_1(1420)$	$0^+(1^+)$	$\rho_2(2100)$	$1^-(2^+)$	$K_0^*(1950)$	$1/2^-(0^-)$	$B_1(5732)$	$2^?(2^?)$
$\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	$f_0(2100)$	$0^+(0^+)$	$K_2^*(1980)$	$1/2^-(2^+)$	$B_2^*(5747)^{\pm}$	$1/2^-(2^+)$
$f_2(1430)$	$0^+(2^+)$	$f_2(2150)$	$0^+(2^+)$	$K_1^*(2045)$	$1/2^-(4^+)$	$B_2^*(5747)^0$	$1/2^-(2^+)$
$a_1(1450)$	$1^-(0^+)$	$\rho(2150)$	$1^-(1^-)$	$K_0^*(2250)$	$1/2^-(2^+)$	$B_2^*(5747)^0$	$1/2^-(2^+)$
$\rho(1450)$	$1^-(1^-)$	$f_0(2200)$	$0^+(0^+)$	$K_1^*(2320)$	$1/2^-(3^+)$	$B(5970)^{\pm}$	$?^?(2^?)$
$\eta(1475)$	$0^+(0^+)$	$f_2(2220)$	$0^+(2^+)$	$K_0^*(2380)$	$1/2^-(5^-)$	$B(5970)^0$	$?^?(2^?)$
$f_0(1500)$	$0^+(0^+)$	$\eta(2225)$	$0^+(0^+)$	$K_0^*(2500)$	$1/2^-(4^-)$	BOTTOM, STRANGE (B=±1, S=±1)	
$f_1(1510)$	$0^+(1^+)$	$\rho_3(2250)$	$1^+(3^-)$	$K_1^*(3100)$	$?^?(2^?)$	B_c^0	$0^-(0^-)$
$f_2(1525)$	$0^+(2^+)$	$f_0(2300)$	$0^+(2^+)$	CHARMED (C=±1)		B_c^{\pm}	$0^-(1^-)$
$f_1(1565)$	$0^+(2^+)$	$f_0(2300)$	$0^+(4^+)$	D^{*2}	$1/2^-(0^-)$	$B_c^{\pm}(5830)^0$	$0^+(1^+)$
$\omega(1570)$	$1^-(1^+)$	$f_0(2330)$	$0^+(0^+)$	D^0	$1/2^-(0^-)$	$B_c^0(5840)^0$	$0^+(2^+)$
$h_1(1595)$	$0^-(1^+)$	$f_0(2340)$	$0^+(2^+)$	$D^*(2007)^{\pm}$	$1/2^-(1^-)$	$B_c^{\pm}(5850)$	$?^?(2^?)$
$\pi_1(1600)$	$1^-(1^+)$	$\rho_3(2350)$	$1^+(5^-)$	$D^-(2010)^{\pm}$	$1/2^-(1^-)$	BOTTOM, CHARMED (B=C=±1)	
$a_1(1640)$	$1^-(1^+)$	$a_1(2450)$	$1^-(6^+)$	$D_0^*(2400)^0$	$1/2^-(0^-)$	B_c^{\pm}	$0^-(0^-)$
$f_2(1640)$	$0^+(2^+)$	$f_0(2510)$	$0^+(6^+)$	$D_0^*(2400)^{\pm}$	$1/2^-(0^-)$	$B_c(2S)^{\pm}$	$?^?(2^?)$
$\eta_2(1645)$	$0^+(2^+)$			$D_1(2420)^0$	$1/2^-(1^+)$		
$\omega(1650)$	$0^-(1^-)$			$D_1(2420)^{\pm}$	$1/2^-(2^+)$		
$\omega_3(1670)$	$0^-(3^-)$			$D_1(2430)^0$	$1/2^-(1^+)$		
$\rho_3(1670)$	$1^-(2^+)$			$D_2^*(2460)^0$	$1/2^-(2^+)$		
				$D_2^*(2460)^{\pm}$	$1/2^-(2^+)$		
				$D(2550)^0$	$1/2^-(0^-)$		
				$D(2550)^{\pm}$	$1/2^-(0^-)$		
				$D(2600)$	$1/2^?(2^?)$		
				$D(2640)^{\pm}$	$1/2^?(2^?)$		
				$D(2750)$	$1/2^?(2^?)$		

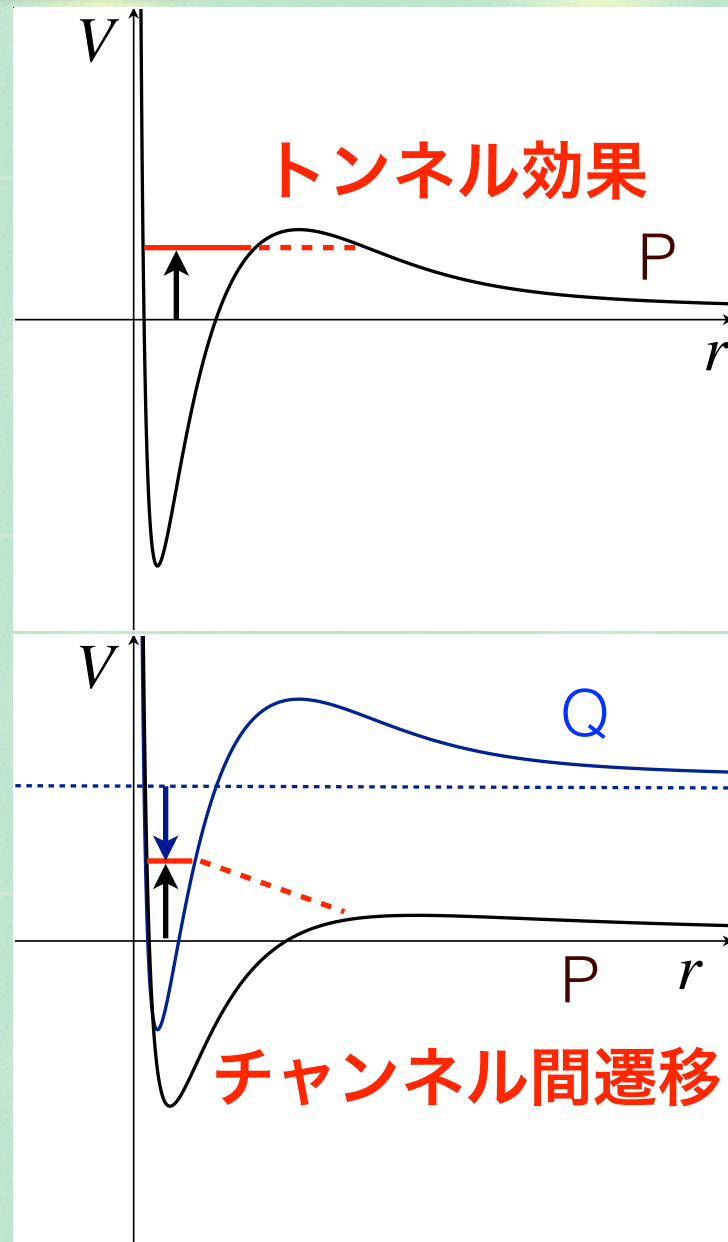
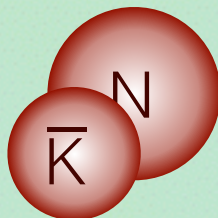


- 強い相互作用で安定／不安定
- 励起状態のほとんどが不安定：ハドロン散乱の共鳴状態

量子力学の共鳴状態

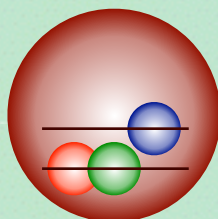
1) ポテンシャル共鳴

- 1チャンネル (P)
- ポテンシャル障壁： $E > 0$
- トンネル効果で不安定
- (Pチャンネルの複合状態)



2) フェッシュバッハ共鳴

- チャンネル結合問題 (P+Q)
- Qの束縛状態 $E_Q < 0$, $E_P > 0$
- チャンネル間遷移で不安定
- (P以外の寄与："素粒子"状態)



共鳴状態の難しさ

ハミルトニアンとしての“固有状態”としての共鳴状態

- エネルギーを複素数に

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 λ das Dämpfungsdekrement (Zerfallskonstante). Dann sehen wir aber aus den Relationen (2a) und (2b),

- 波動関数が遠方で発散：通常規格化ができない

$$\langle R | R \rangle = \int d\mathbf{r} |\psi_R(\mathbf{r})|^2 \rightarrow \infty$$

bi-orthogonal basis (Gamow vector) で規格化可能

N. Hokkyo, Prog. Theor. Phys. 33, 1116 (1965)

T. Berggren, Nucl. Phys. A 109, 265 (1968)

$$|\tilde{R}\rangle = |R^*\rangle, \quad \langle \tilde{R} | R \rangle = \int d\mathbf{r} [\psi_R(\mathbf{r})]^2 < \infty$$

- 演算子の期待値 (例： $\langle r^2 \rangle$) が複素数 \rightarrow 解釈？

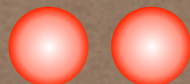
ハドロンの複合性

多様な励起ハドロンの内部構造を判別したい。

閾値近傍の束縛状態に対する弱束縛関係式

S. Weinberg, Phys. Rev. 137, B672 (1965)

複合的 ×



閾値チャンネルの
複合粒子

or

“素粒子的” Z



それ以外の成分の寄与



観測可能量

有効場の理論を用いて不安定状態へ拡張し、解釈可能な方法でハドロン共鳴の複合性を調べる。

安定状態の弱束縛関係式

s波弱束縛状態 ($R \gg R_{\text{typ}}$) の複合性 $0 < X < 1$

S. Weinberg, Phys. Rev. 137, B672 (1965);

T. Hyodo, Int. J. Mod. Phys. A 28, 1330045 (2013)

$$a_0 = R \left\{ \frac{2X}{1+X} + \mathcal{O}\left(\frac{R_{\text{typ}}}{R}\right) \right\}, \quad r_e = R \left\{ \frac{X-1}{X} + \mathcal{O}\left(\frac{R_{\text{typ}}}{R}\right) \right\}$$

a_0 : 散乱長, r_e : 有効レンジ

$R = (2\mu B)^{-1/2}$: 半径 (波動関数の広がり)

R_{typ} : 相互作用の典型的長さスケール

- 重陽子はNN複合状態 ($a_0 \sim R \gg r_e$) $\leftarrow X \sim 1$

核力や波動関数を知らなくても**観測可能量から構造**が分かる。

問題点：

- 不安定状態に拡張できない

有効場の理論

閾値近傍に束縛状態のある低エネルギー散乱の記述

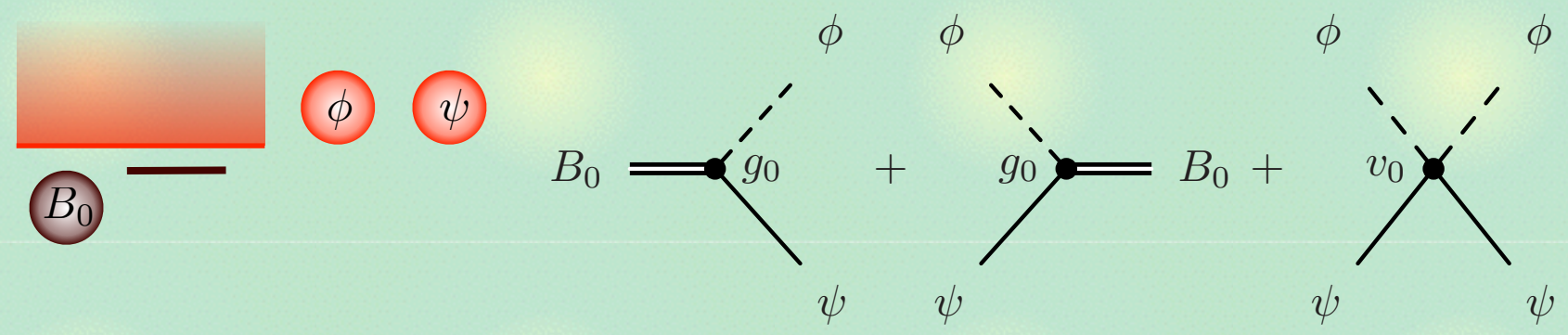
- 接触相互作用の非相対論的QFT

D.B. Kaplan, Nucl. Phys. B494, 471 (1997)

E. Braaten, M. Kusunoki, D. Zhang, Annals Phys. 323, 1770 (2008)

$$H_{\text{free}} = \int d\mathbf{r} \left[\frac{1}{2M} \nabla \psi^\dagger \cdot \nabla \psi + \frac{1}{2m} \nabla \phi^\dagger \cdot \nabla \phi + \frac{1}{2M_0} \nabla B_0^\dagger \cdot \nabla B_0 + \nu_0 B_0^\dagger B_0 \right],$$

$$H_{\text{int}} = \int d\mathbf{r} \left[g_0 \left(B_0^\dagger \phi \psi + \psi^\dagger \phi^\dagger B_0 \right) + v_0 \psi^\dagger \phi^\dagger \phi \psi \right]$$



- **カットオフ**： $\Lambda \sim 1/R_{\text{typ}}$ (本来の相互作用の長さスケール)

- 相互作用が点状に見える低エネルギー $p \ll \Lambda$ で有効

複合性と”素粒子性”

固有状態：

$$H_{\text{free}}|B_0\rangle = \nu_0|B_0\rangle, \quad H_{\text{free}}|\mathbf{p}\rangle = \frac{p^2}{2\mu}|\mathbf{p}\rangle$$

$$(H_{\text{free}} + H_{\text{int}})|B\rangle = -B|B\rangle$$

- 束縛状態 $|B\rangle$ の規格化 + 完全性関係式

$$\langle B|B\rangle = 1, \quad 1 = |B_0\rangle\langle B_0| + \int \frac{d\mathbf{p}}{(2\pi)^3} |\mathbf{p}\rangle\langle \mathbf{p}|$$

- 複合性と素粒子性

$$1 = Z + X, \quad \underbrace{Z \equiv |\langle B_0|B\rangle|^2}_{\text{“素粒子性”}}, \quad \underbrace{X \equiv \int \frac{d\mathbf{p}}{(2\pi)^3} |\langle \mathbf{p}|B\rangle|^2}_{\text{複合性}}$$

“素粒子性”



複合性



Z, X : 非負実数 \rightarrow 確率として解釈できる。

弱束縛関係式

ΨΦ散乱振幅（厳密な結果）

$$f(E) = -\frac{\mu}{2\pi} \frac{1}{[v(E)]^{-1} - G(E)}$$

$$v(E) = v_0 + \frac{g_0^2}{E - \nu_0}, \quad G(E) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\Lambda dp \frac{p^2}{E - p^2/(2\mu) + i0^+}$$

複合性 X は $v(E)$ と $G(E)$ でかける。一般にはくりこみ依存。

T. Sekihara, T. Hyodo, D. Jido, PTEP2015, 063D04 (2015)

T. Hyodo, arXiv:1511.00870 [hep-ph]

$$X = \{1 + G^2(-B)v'(-B) [G'(-B)]^{-1}\}^{-1}$$

散乱長を $1/R$ で展開：主要項の係数が X で表現できる！

$$a_0 = -f(E=0) = R \left\{ \frac{2X}{1+X} + \mathcal{O}\left(\frac{R_{\text{typ}}}{R}\right) \right\}$$

くりこみ不変

X ← (B, a₀) : R が R_{typ} より十分大きいとき

不安定状態への拡張

崩壊チャンネルを導入

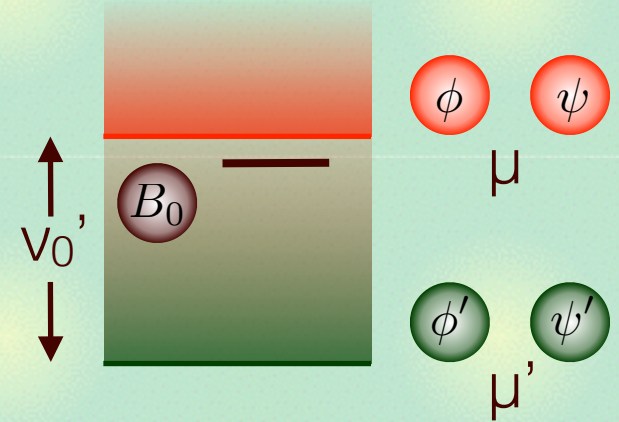
$$H'_{\text{free}} = \int d\mathbf{r} \left[\frac{1}{2M'} \nabla \psi'^{\dagger} \cdot \nabla \psi' - \nu_{\psi} \psi'^{\dagger} \psi' + \frac{1}{2m'} \nabla \phi'^{\dagger} \cdot \nabla \phi' - \nu_{\phi} \phi'^{\dagger} \phi' \right],$$

$$H'_{\text{int}} = \int d\mathbf{r} \left[g'_0 \left(B_0^{\dagger} \phi' \psi' + \psi'^{\dagger} \phi'^{\dagger} B_0 \right) + v'_0 \psi'^{\dagger} \phi'^{\dagger} \phi' \psi' + v_0^t (\psi^{\dagger} \phi^{\dagger} \phi' \psi' + \psi'^{\dagger} \phi'^{\dagger} \phi \psi) \right],$$

準束縛状態：固有値が複素数

$$H = H_{\text{free}} + H'_{\text{free}} + H_{\text{int}} + H'_{\text{int}}$$

$$H|QB\rangle = E_{QB}|QB\rangle, \quad E_{QB} \in \mathbb{C}$$



一般化された関係式：閾値エネルギー差の補正項

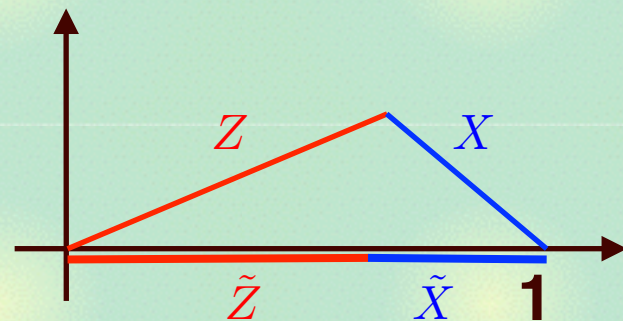
$$a_0 = R \left\{ \frac{2X}{1+X} + \mathcal{O} \left(\left| \frac{R_{\text{typ}}}{R} \right| \right) + \sqrt{\frac{\mu'^3}{\mu^3}} \mathcal{O} \left(\left| \frac{l}{R} \right|^3 \right) \right\}, \quad R = \frac{1}{\sqrt{-2\mu E_{QB}}}, \quad l \equiv \frac{1}{\sqrt{2\mu\nu'_0}}$$

$X \leftarrow (E_{QB}, a_0)$: $|R|$ が (R_{typ}, l) より十分大きいとき

複素数と解釈

不安定状態の規格化 $\rightarrow Z$ と X は複素数

$$Z + X = 1, \quad Z, X \in \mathbb{C}$$



解釈できる量を定義（実軸への射影）

$$\tilde{Z} \equiv \frac{1 - |X| + |Z|}{2}, \quad \tilde{X} \equiv \frac{1 - |Z| + |X|}{2}, \quad U \equiv \frac{|Z| + |X| - 1}{2}$$

解釈の不定性

- 確率として解釈できる条件

$$\tilde{Z} + \tilde{X} = 1, \quad \tilde{Z}, \tilde{X} \in [0, 1]$$

- $U=0$ の極限で束縛状態の場合に一致

c.f. 他の提案：スペクトル関数の積分 / 実部をとる / 位相変換

V. Baru, *et al.*, Phys. Lett. B 586, 53 (2004)

F. Aceti, *et al.*, Eur. Phys. J. A 50, 57 (2014)

Z.H. Guo, J.A. Oller, arXiv:1508.06400 [hep-ph]

応用例

一般化された弱束縛関係式 $X \leftarrow (E_{QB}, a_0)$

$$a_0 = R \left\{ \frac{2X}{1+X} + \mathcal{O}\left(\left|\frac{R_{\text{typ}}}{R}\right|\right) + \sqrt{\frac{\mu'^3}{\mu^3}} \mathcal{O}\left(\left|\frac{l}{R}\right|^3\right) \right\}, \quad R = \frac{1}{\sqrt{-2\mu E_{QB}}}, \quad l \equiv \frac{1}{\sqrt{2\mu\nu'_0}}$$

- $\Lambda(1405)$ ポール位置と $\bar{K}N$ 散乱長の決定

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

- $E_{QB} = -10 - 26i$ MeV \rightarrow $|R| \sim 2$ fm \rightarrow 補正項は小さい

$\left|\frac{R_{\text{typ}}}{R}\right| \lesssim 0.12, \quad \left|\frac{l}{R}\right|^3 \lesssim 0.16$ \leftarrow $\pi\Sigma$ 閾値とのエネルギー差
 \nwarrow ベクトルメソン交換

Ref.	E_{QB} (MeV)	a_0 (fm)	$X_{\bar{K}N}$	$\tilde{X}_{\bar{K}N}$	U	$ r_e/a_0 $
[43]	$-10 - i26$	$1.39 - i0.85$	$1.2 + i0.1$	1.0	0.5	0.2
[44]	$-4 - i8$	$1.81 - i0.92$	$0.6 + i0.1$	0.6	0.0	0.7
[45]	$-13 - i20$	$1.30 - i0.85$	$0.9 - i0.2$	0.9	0.1	0.2
[46]	$2 - i10$	$1.21 - i1.47$	$0.6 + i0.0$	0.6	0.0	0.7
[46]	$-3 - i12$	$1.52 - i1.85$	$1.0 + i0.5$	0.8	0.6	0.4

\uparrow
 解析による違い
 \downarrow

$\Lambda(1405)$ は $\bar{K}N$ 複合状態 \leftarrow 観測可能量

まとめ

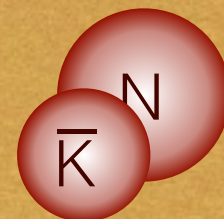
📌 閾値近傍の束縛状態の複合性は観測可能量（散乱長と束縛エネルギー）のみで決定される。

S. Weinberg, Phys. Rev. 137, B672 (1965)

📌 有効場の理論を用いることで弱束縛関係式を不安定状態に一般化できる。

$$a_0 = R \left\{ \frac{2X}{1+X} + \mathcal{O} \left(\left| \frac{R_{\text{typ}}}{R} \right| \right) + \sqrt{\frac{\mu'^3}{\mu^3}} \mathcal{O} \left(\left| \frac{l}{R} \right|^3 \right) \right\}, \quad R = \frac{1}{\sqrt{-2\mu E_{QB}}}, \quad l \equiv \frac{1}{\sqrt{2\mu\nu'_0}}$$

📌 散乱長とポール位置の精密な決定から $\Lambda(1405)$ が $\bar{K}N$ 複合状態であることが示される。



Y. Kamiya, T. Hyodo, arXiv:1509.00146 [hep-ph]