

# 動力学的観点からみた ハドロン構造の研究



兵藤 哲雄

東工大

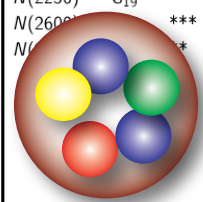
# ハドロン励起状態

## 観測されているハドロン(PDG06)

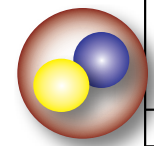
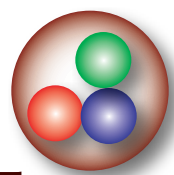
構成的クォーク模型は体系的にスペクトルを再現

構成的クォーク模型での記述が難しい粒子を調べたい  
エキゾチックな新粒子

LIGHT UNFLAVORED (S = C = B = 0)			STRANGE (S = ±1, C = B = 0)		BOTTOM (B = ±1)								
$\rho(J^{PC})$			$\rho(J^{PC})$		$\rho(J^{PC})$								
$p$	$P_{11}$ ****	$\Delta(1232)$	$P_{33}$ ****	$\Lambda$	$P_{01}$ ****	$\Sigma^+$	$P_{11}$ ****	$\Xi^0$	$P_{11}$ ****	$K^*$ (892)	$1/2(1^-)$	$B^\pm$	$1/2(0^-)$
$n$	$P_{11}$ ****	$\Delta(1600)$	$P_{33}$ ***	$\Lambda(1405)$	$S_{01}$ ****	$\Sigma^0$	$P_{11}$ ****	$\Xi^-$	$P_{11}$ ****	$K_1(1270)$	$1/2(1^+)$	$B^0$	$1/2(0^-)$
$N(1650)$	$D_{15}$ ****	$\Delta(1905)$	$F_{35}$ ****	$\Lambda(1800)$	$S_{01}$ ***	$\Sigma(1580)$	$D_{13}$ *	$\Xi(1950)$	$D_{13}$ ***	$K_1(1400)$	$1/2(1^+)$	$B^\pm/B^0$ ADMIXTURE	$1/2(0^-)$
$N(1675)$	$D_{15}$ ****	$\Delta(1910)$	$F_{31}$ ****	$\Lambda(1810)$	$P_{01}$ ***	$\Sigma(1620)$	$S_{11}$ **	$\Xi(2030)$	$S_{11}$ **	$K^*(1410)$	$1/2(1^-)$	$B^\pm/B^0/B_s^0/b$ -baryon ADMIXTURE	$1/2(0^-)$
$N(1680)$	$F_{15}$ ****									$K_2^*(1430)$	$1/2(2^+)$	$B^*$	$1/2(1^-)$
										$K_2^*(1430)$	$1/2(2^+)$	$B_s^*(5732)$	$?(?)$
										$K(1460)$	$1/2(0^-)$	BOTTOM, STRANGE (B = ±1, S = ∓1)	
												$B_s^0$	$0(0^-)$
$N(2100)$	$P_{11}$ *	$\Delta(2350)$	$D_{35}$ *	$\Lambda(2350)$	$H_{09}$ ***	$\Sigma(1915)$	$F_{15}$ ****	$\Sigma(2470)$	$F_{15}$ ****	$K_2^*(1780)$	$1/2(3^-)$	$\Lambda_c^+$	$0^+(0^-)$
$N(2190)$	$G_{17}$ ****	$\Delta(2390)$	$F_{37}$ *	$\Lambda(2585)$	**	$\Sigma(1940)$	$D_{13}$ ***	$\Lambda_c^+(2593)^+$	****	$K_2(1820)$	$1/2(2^-)$	$\Lambda_c^+$	$0^+(1^+)$
$N(2200)$	$D_{15}$ **	$\Delta(2400)$	$G_{39}$ **			$\Sigma(2000)$	$S_{11}$ *	$\Lambda_c^+(2625)^+$	****	$K(1830)$	$1/2(0^+)$	$\Lambda_c^+$	$0^+(2^+)$
$N(2220)$	$H_{19}$ ***	$\Delta(2420)$	$H_{3,11}$ ****			$\Sigma(2030)$	$F_{17}$ ****	$\Lambda_c^+(2765)^+$	*	$K_2^*(1950)$	$1/2(0^+)$	$\Lambda_c^+$	$0^+(2^+)$
$N(2250)$	$G_{19}$ ****	$\Delta(2750)$	$I_{3,13}$ **			$\Sigma(2070)$	$F_{15}$ *	$\Lambda_c^+(2880)^+$	**	$K_2^*(2045)$	$1/2(2^+)$	$\Lambda_c^+$	$0^+(2^+)$
$N(2600)$	***	$\Delta(2950)$	$K_{3,15}$ **			$\Sigma(2080)$	$P_{13}$ **	$\Sigma_c(2455)$	****	$K_2(2250)$	$1/2(2^+)$	$\Sigma_c$	$0^+(2^+)$
$N(2600)$	*					$\Sigma(2100)$	$G_{17}$ *	$\Sigma_c(2520)$	****	$K_2(2380)$	$1/2(5^-)$	$\Sigma_c$	$0^+(0^-)$
		$\Theta(1540)^+$ *				$\Sigma(2250)$	***	$\Sigma_c(2800)$	****	$K_4(2500)$	$1/2(4^-)$	$\Sigma_c$	$0^+(2^+)$
						$\Sigma(2455)$	**	$\Xi_c^+$	****	$K(3100)$	$?(?)$	$\Xi_c^+$	$0^+(2^+)$
						$\Sigma(2620)$	**	$\Xi_c^0$	****	CHARMED (C = ±1)		$\Xi_c^0$	$0^+(2^+)$
						$\Sigma(3000)$	*	$\Xi_c^+$	****	$D^\pm$	$1/2(0^-)$	$\Xi_c^+$	$0^+(1^-)$
						$\Sigma(3170)$	*	$\Xi_c^0$	****	$D^0$	$1/2(0^-)$	$\Xi_c^0$	$0^+(1^-)$
								$\Xi_c^+$	****	$D^*(2007)^0$	$1/2(1^-)$	$\Xi_c^+$	$0^+(1^-)$
								$\Xi_c^0$	****	$D^*(2010)^\pm$	$1/2(1^-)$	$\Xi_c^0$	$0^+(1^-)$
								$\Xi_c^+$	****	$D_c^+(2400)^\pm$	$1/2(0^+)$	$\Xi_c^+$	$0^+(2^+)$
								$\Xi_c^0$	****	$D_c^0(2400)^\pm$	$1/2(0^+)$	$\Xi_c^0$	$0^+(2^+)$
								$\Xi_c^+$	****	OTHER LIGHT		$\Xi_c^+$	$0^+(2^+)$
								$\Xi_c^0$	****	Further States		$\Xi_c^0$	$0^+(2^+)$
								$\Xi_c^+$	****	$D_1(2420)^\pm$	$1/2(1^+)$	$\Xi_c^+$	$0^+(2^+)$
								$\Xi_c^0$	****	$D_1(2430)^\pm$	$1/2(1^+)$	$\Xi_c^0$	$0^+(2^+)$
								$\Xi_c^+$	****	$D_2^*(2460)^0$	$1/2(2^+)$	$\Xi_c^+$	$0^+(2^+)$
								$\Xi_c^0$	****	$D_2^*(2460)^\pm$	$1/2(2^+)$	$\Xi_c^0$	$0^+(2^+)$
								$\Xi_c^+$	****	$D^*(2640)^\pm$	$1/2(2^?)$	$\Xi_c^+$	$0^+(2^+)$
								$\Xi_c^0$	****	CHARMED, STRANGE (C = S = ±1)		$\Xi_c^0$	$0^+(2^+)$
								$\Xi_c^+$	****	$D_s^\pm$	$0(0^-)$	$\Xi_c^+$	$0^+(1^-)$
								$\Xi_c^0$	****	$D_s^*$	$0(0^-)$	$\Xi_c^0$	$0^+(1^-)$
								$\Xi_c^+$	****	$D_s^*(2460)^\pm$	$0(0^-)$	$\Xi_c^+$	$0^+(1^-)$
								$\Xi_c^0$	****	$D_{s1}^*(2460)^\pm$	$0(0^-)$	$\Xi_c^0$	$0^+(1^-)$
								$\Xi_c^+$	****	$D_{s1}^*(2460)^\pm$	$0(0^-)$	$\Xi_c^+$	$0^+(1^-)$
								$\Xi_c^0$	****	$D_{s2}^*(2573)^\pm$	$0(0^-)$	$\Xi_c^0$	$0^+(1^-)$
								$\Xi_c^+$	****			NON-q $\bar{q}$ CANDIDATES	



~  $\frac{1}{300}$ !



バリオン~130種類

メソン~160種類

## 量子色力学(QCD)

強い相互作用はQCDで記述される。

場の量子論：一般に解けない（解を書き下せない）。

-> 結合定数による摂動展開をする。

電磁相互作用、弱い相互作用：OK!

強い相互作用（QCD）では・・・

高エネルギー領域：摂動的QCD OK!

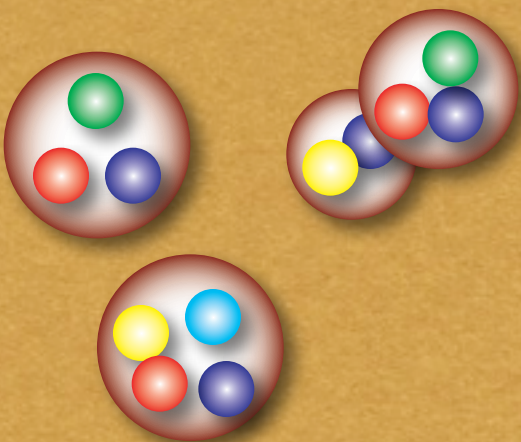
低エネルギー領域：我々の真空、ハドロン物理

1. カイラル対称性の自発的破れ

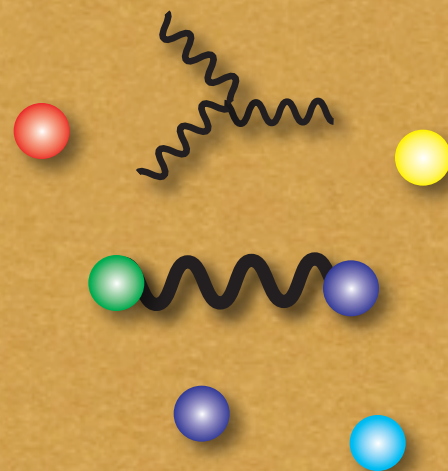
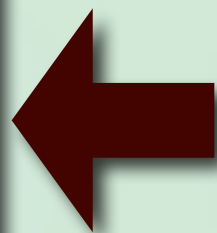
2. カラーの閉じ込め

QCDでそのままハドロン物理はできない！！

# 研究の方針



多様なハドロン現象



根底にあるQCD



## カイラル対称性とその破れ



# カイラル対称性と低エネルギー定理

カイラル対称性はQCDの（近似的）対称性で、かつ観測されるハドロンの相互作用などを支配する。

--> 対称性を通じてQCDとハドロン現象が関連する。

低エネルギー定理：QCD以前のカレント代数

例： $\pi$ -ハドロン散乱長（閾値での散乱振幅）

--> Weinberg-Tomozawa定理

Y. Tomozawa, *Nuovo Cim.* 46A, 707 (1966); S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.* 17, 616 (1966)

$$a_T = -\frac{m_\pi}{2\pi f_\pi^2} \left(1 + \frac{m_\pi}{m_t}\right)^{-1} [T(T+1) - T_t(T_t+1) - 2]$$

$\pi N$  ( $\pi\pi$ ) 散乱長の実験値をよく再現

## 有効ラグランジアン

### Weinbergの”定理”

S. Weinberg, *Physica A* 96, 327 (1979)

対称性の許す最も一般的なラグランジアンを用いた場の理論は、低エネルギー定理を満たす振幅を導く。

クォークの理論(QCD) --> ハドロン自由度の**有効理論**  
考えている物理に最も適したモード（素励起）を選択

### カイラル摂動論(chiral perturbation theory)

J.Gasser and H. Leutwyler, *Nucl. Phys. B*250, 465 (1985); *ibid*, 517; *ibid*, 539.

ラグランジアンと散乱振幅に対する

systematicな低エネルギー（と $m_q$ ）展開

=> オーダー毎繰り込み可能、低エネルギー定理の補正<sub>6</sub>

# 動力学的な側面：散乱理論

## 散乱理論の必要性

散乱S行列：ユニタリー（確率の保存）

摂動論は一般にユニタリー性を破る

--> カイラル摂動論（ボルン近似）から

カイラル動力学（Lippmann-Schwinger方程式）へ

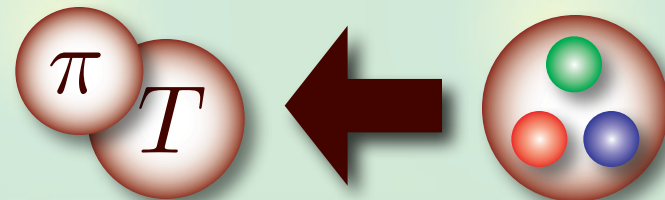
$$T = \frac{1}{1 - VG} V$$

相互作用が強い引力（KN相互作用など）の場合、

**非自明な束縛／共鳴状態の出現** -> ハドロン共鳴

多くのハドロン励起状態を再現

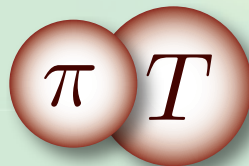
ハドロン分子的な構造？



# なぜエキゾチックハドロンは観測されないのか？

T. Hyodo, D. Jido, A. Hosaka, Phys. Rev. Lett. 97, 192002 (2006); *ibid*, D 75, 034002 (2007)

ハドロン-NGボソン2体系



カイラル対称性

s波の低エネルギー相互作用

$$V_{\alpha} = -\frac{\omega}{2f^2} C_{\alpha,T} \quad C_{\text{exotic}} = 1$$

散乱理論

束縛状態を作る臨界結合定数




$$C_{\text{crit}} = \frac{2f^2}{m[-G(M_T + m)]}$$

物理的なハドロン：  $C_{\text{exotic}} < C_{\text{crit}}$

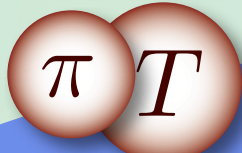
➡ SU(3)極限でエキゾチックハドロンは存在しない！



## まとめ

-  ハドロン物理の目的は、多様なハドロン現象を、根底にあるQCDから理解することである。
-  対称性を指針にして、有効自由度（ハドロン）に基づいて研究。
-  励起状態をハドロン散乱の中の共鳴状態として記述（動力的側面）。

# 具体的な研究の広がりと方向性



## ハドロン構造

large Nc 解析

電磁形状因子

波動関数の繰込定数

エキゾチック  
ハドロン

$\bar{K}N(\pi \Sigma)$ 相互作用

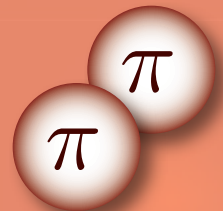
$\bar{K}$ 原子核 ( $\Lambda^*$ 核)

少数核子系、  
核子多体系へ

$\Lambda(1405)$

シグマメソン  
ソフト化

$a_0-f_0$



メソン系へ

