

ハドロン共鳴の 内部構造



兵藤 哲雄

東工大

研究対象：ハドロン励起状態

観測されているハドロン

全てはQCD（強い相互作用）で記述される

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
エキゾチックな新粒子
を調べたい

ρ	P_{11}	****	$\Delta(1232)$	P_{33}	****	Λ	P_{01}	****	Σ^+	P_{11}	****	Ξ^0	P_{11}	****
n	P_{11}	****	$\Delta(1600)$	P_{33}	***	$\Lambda(1405)$	S_{01}	****	Σ^0	P_{11}	****	Ξ^-	P_{11}	****
$N(1675)$	D_{15}	****	$\Delta(1905)$	F_{35}	****	$\Lambda(1800)$	S_{01}	***	$\Sigma(1580)$	D_{13}	*	$\Xi(1950)$		***
$N(1680)$	F_{15}	****	$\Delta(1910)$	P_{31}	****	$\Lambda(1810)$	P_{01}	***	$\Sigma(1620)$	S_{11}	**	$\Xi(2030)$		***
$N(1700)$	D_{13}	***	$\Delta(1920)$	P_{33}	***	$\Lambda(1820)$	F_{35}	****	$\Sigma(1660)$	P_{11}	***	$\Xi(2120)$		*
$N(2100)$	P_{11}	*	$\Delta(2350)$	D_{35}	*	$\Lambda(2350)$	H_{09}	***	$\Sigma(1915)$	F_{15}	****	$\Omega(2470)^-$		**
$N(2190)$	G_{17}	****	$\Delta(2390)$	F_{37}	*	$\Lambda(2585)$		**	$\Sigma(1940)$	D_{13}	***	Λ_c^+		****
$N(2200)$	D_{15}	**	$\Delta(2400)$	G_{39}	**				$\Sigma(2000)$	S_{11}	*	$\Lambda_c(2593)^+$		***
$N(2220)$	H_{19}	****	$\Delta(2420)$	$H_{3,11}$	****				$\Sigma(2030)$	F_{17}	****	$\Lambda_c(2625)^+$		***
$N(2250)$	G_{19}	****	$\Delta(2750)$	$I_{3,13}$	**				$\Sigma(2070)$	F_{15}	*	$\Lambda_c(2765)^+$		*
$N(2600)$		***	$\Delta(2950)$	$K_{3,15}$	**				$\Sigma(2080)$	P_{13}	**	$\Lambda_c(2880)^+$		**
$N(2700)$		*							$\Sigma(2100)$	G_{17}	*	$\Lambda_c(2880)^+$		**
									$\Sigma(2100)$	G_{17}	*	$\Lambda_c(2880)^+$		**
									$\Sigma(2250)$		***	$\Sigma_c(2455)$		****
									$\Sigma(2455)$		**	$\Sigma_c(2520)$		***
									$\Sigma(2620)$		**	$\Sigma_c(2800)$		***
									$\Sigma(3000)$		*	Ξ_c^+		***
									$\Sigma(3170)$		*	Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
												Ξ_c^+		***
												Ξ_c^0		***
			</											

ハドロン共鳴状態の構造

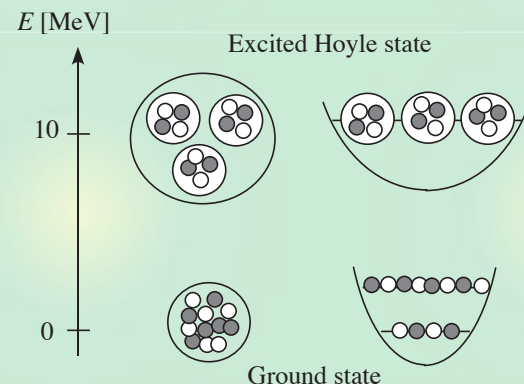
例) バリオン励起状態



励起状態：散乱中での共鳴状態、2ハドロン状態へ崩壊

閾値近傍では基底状態と異なる構造？

c.f. ^{12}C Hoyle状態



ハドロン共鳴の研究方法

ハドロン散乱振幅：**観測量**を実験と比較できる、複素エネルギー平面に解析接続することで**共鳴状態の情報**を引き出せる。

なるべく一般的な原理に基づいて解析的に振幅を記述したい。

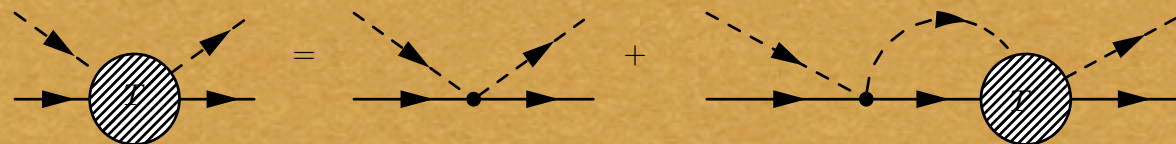
カイラル対称性

QCD（基礎理論）の対称性 -->

低エネルギー定理：ハドロン間相互作用

散乱理論

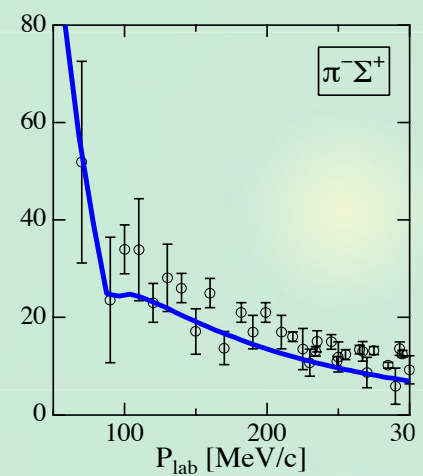
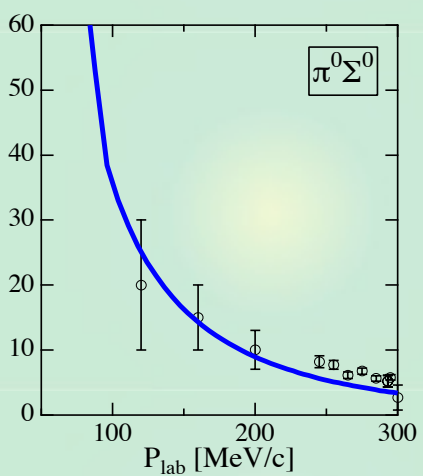
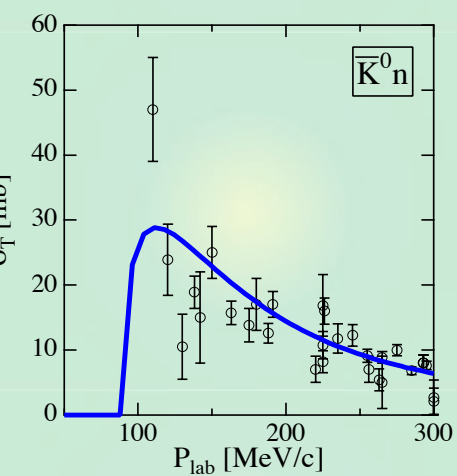
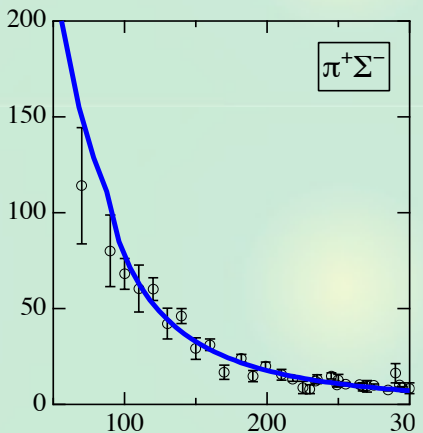
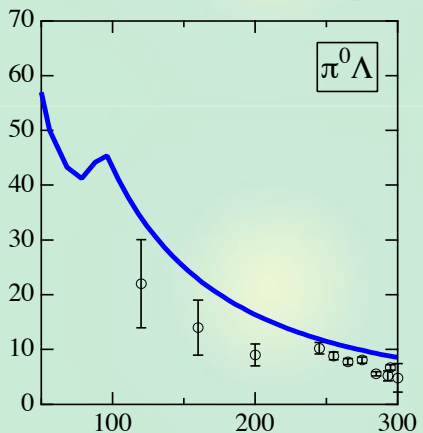
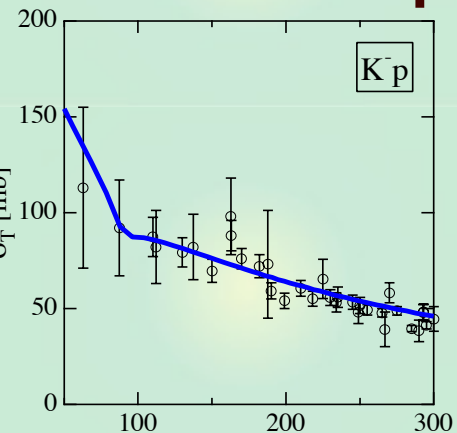
ユニタリー性（確率の保存） --> 散乱方程式



--> カイラルユニタリーモデル

例) $\bar{K}N$ 散乱データとの比較

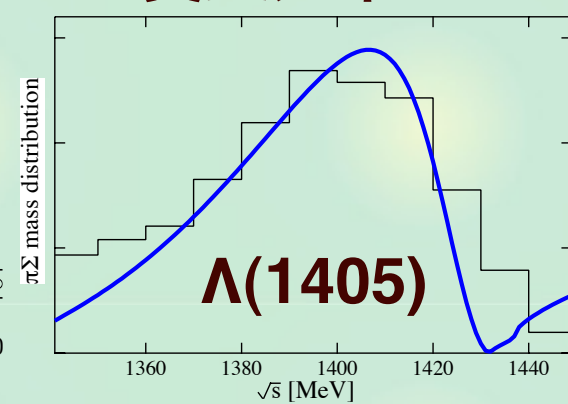
K-p散乱の全断面積



閾値分岐比

	γ	R_c	R_n
exp.	2.36	0.664	0.189
theo.	1.80	0.624	0.225

$\pi\Sigma$ 質量分布



T. Hyodo, S.I. Nam, D. Jido, A. Hosaka, Phys. Rev. C68, 018201 (2003);

T. Hyodo, S.I. Nam, D. Jido, A. Hosaka, Prog. Theor. Phys. 112, 73 (2004)

$\bar{K}N$ 閾値の上下のエネルギーで実験と良い一致

どのような内部構造があるのか？

状態を一般的に書くと

$$|R\rangle = \text{3クォーク} + \text{5クォーク} + \text{ハドロン分子} + \dots$$

The diagram illustrates the general decomposition of a state $|R\rangle$. It is shown as a sum of three terms: 3クォーク (3 quarks), 5クォーク (5 quarks), and ハドロン分子 (hadron molecules). Each term is represented by a sphere containing smaller colored spheres (quarks) or labeled spheres (M and B for meson and baryon). The 3クォーク term shows three quarks (red, green, blue) inside a sphere. The 5クォーク term shows five quarks (red, green, blue, blue, yellow) inside a sphere. The ハドロン分子 term shows two spheres labeled M and B.

カイラルユニタリーモデルでは

$$|R\rangle = \text{ハドロン分子} + \text{その他}$$

The diagram illustrates the decomposition of a state $|R\rangle$ in the chiral unitary model. It is shown as a sum of two terms: ハドロン分子 (hadron molecules) and その他 (other). The ハドロン分子 term is represented by two spheres labeled M and B. The その他 term is represented by a single sphere with a question mark.

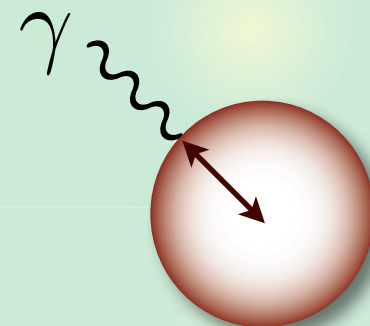
繰り込み条件を利用した解析でハドロン分子状態の分離は可能。
さらに構造を解析するには工夫が必要。

内部構造の研究の例

例1) 形状因子 (Form Factor) を計算

電磁的大きさ: 内部構造を直接反映した物理量

← 光子ビームを使った実験の可能性

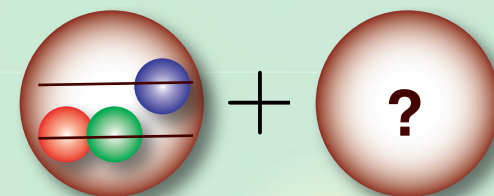


T. Sekihara, T. Hyodo, D. Jido, Phys. Lett. B669, 133-138 (2008); in preparation

例2) 内部パラメーターを変えた時の応答

カラー数 N_c を変化させて共鳴の性質を調べる。

スケーリング則との比較で3クォーク状態を分離



T. Hyodo, D. Jido, L. Roca, Phys. Rev. D77, 056010 (2008); Nucl. Phys. A809, 65-87 (2008)

例3) 外部パラメーターを変えた時の応答

カイラル対称性を部分的に回復させてみる --> 次で少し詳しく

T. Hyodo, D. Jido, T. Kunihiro, in preparation

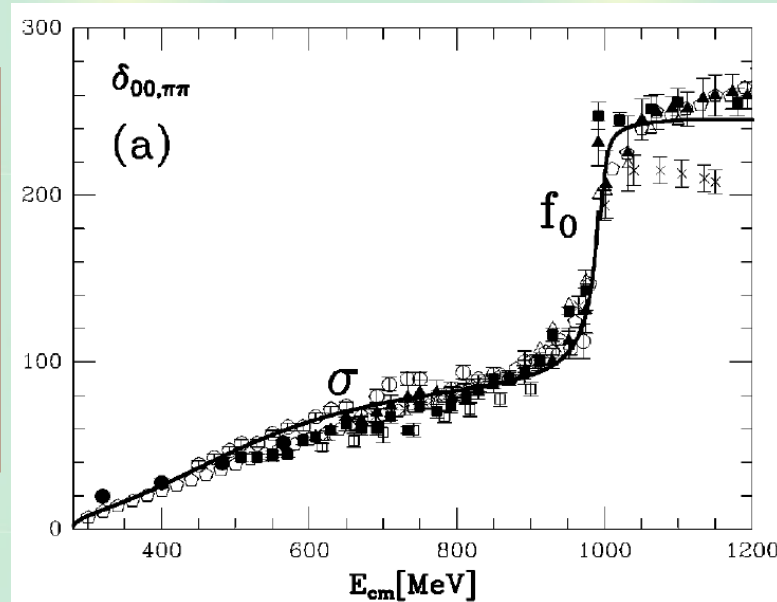
シグマ中間子

$f_0(600)$ or $\sigma : J^P = 0^+, I = 0$

質量 : 400-1200 MeV

幅 : 600-1000 MeV

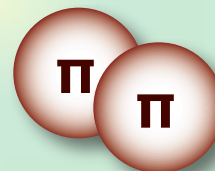
崩壊モード : $\sigma \rightarrow \pi\pi$, $\sigma \rightarrow \gamma\gamma$



σ 中間子は

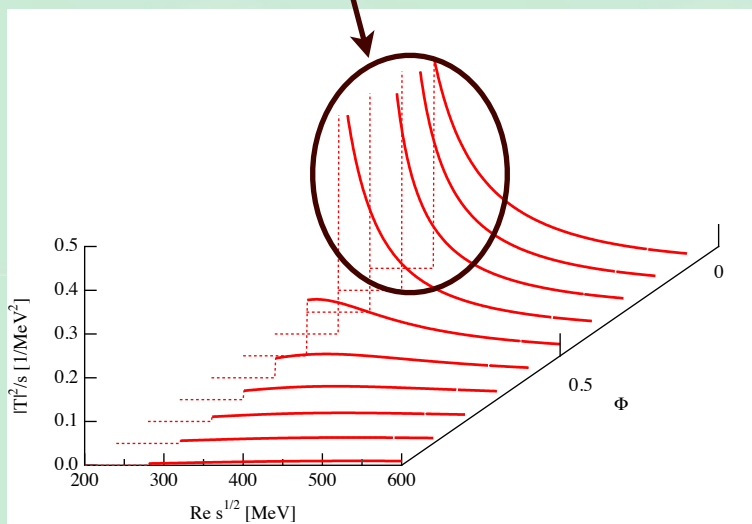
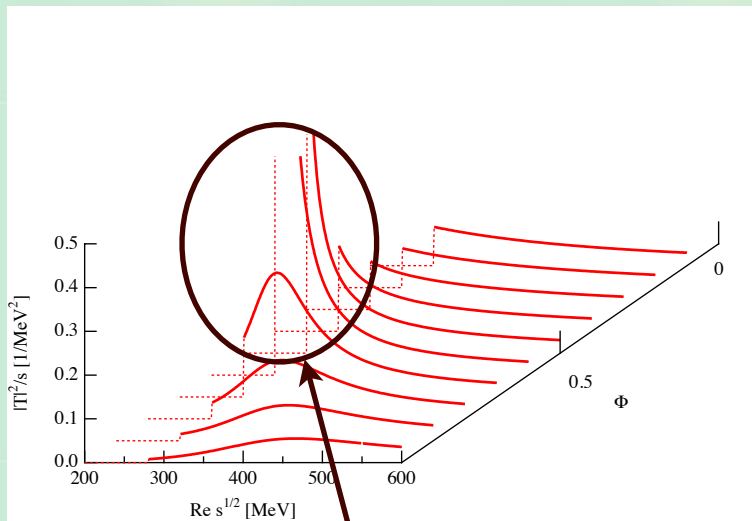
- QCDの最もエネルギーの低い共鳴状態
- カイラル対称性の破れに伴うハドロンの質量生成に寄与
- 現象論的核力の引力成分を与える

構造として：カイラルパートナー or π - π 分子共鳴

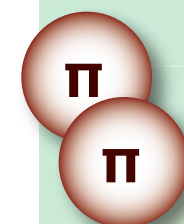
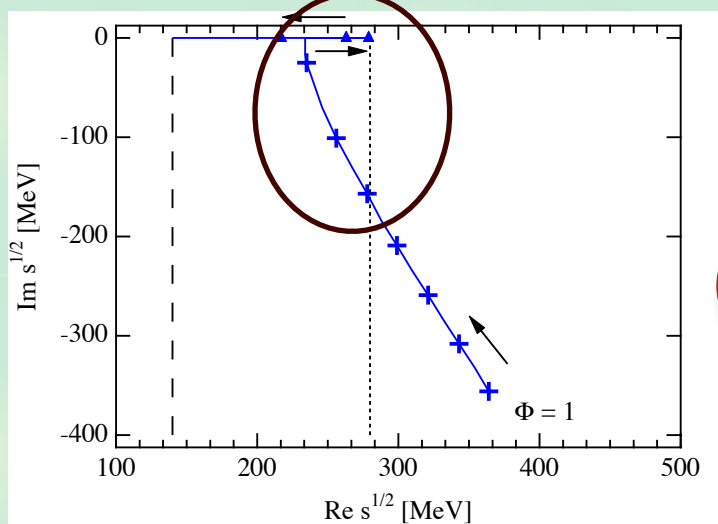
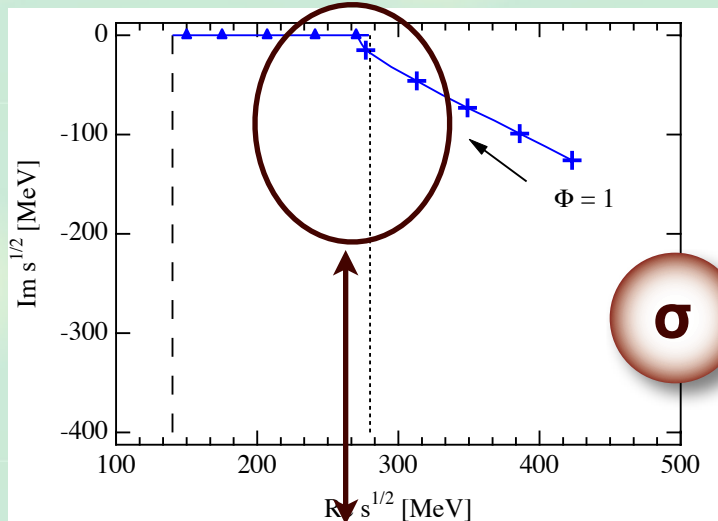


シグマ中間子のスペクトル変化

スペクトル変化



ポール位置の軌跡



構造の違いがスペクトル変化に定性的な違いを与える

まとめ

- 多様なハドロン励起状態を散乱振幅の**共鳴**として扱い、その**内部構造**を調べたい。
- カイラル対称性** + **散乱理論** --> ハドロン散乱振幅
例) K-p散乱と $\Lambda(1405)$ 共鳴
- 単にモデルによる質量、幅を実験値と比較するのではなく、**環境の変化に対する応答**を調べたり、**内部構造を反映する**ような物理量を計算する必要がある。
例) σ メソンのソフト化
- 共鳴状態 (不安定粒子) を取り扱う理論的枠組みの構築