

# カイラル動力学と ハドロン間相互作用



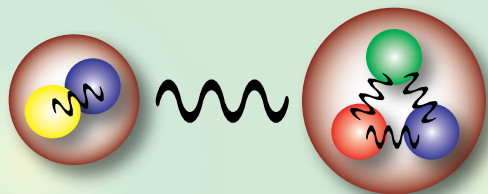
兵藤 哲雄

東京工業大学 理工学研究科

# ハドロン間相互作用とハドロン構造

ハドロン間相互作用： $\bar{K}N$ 相互作用

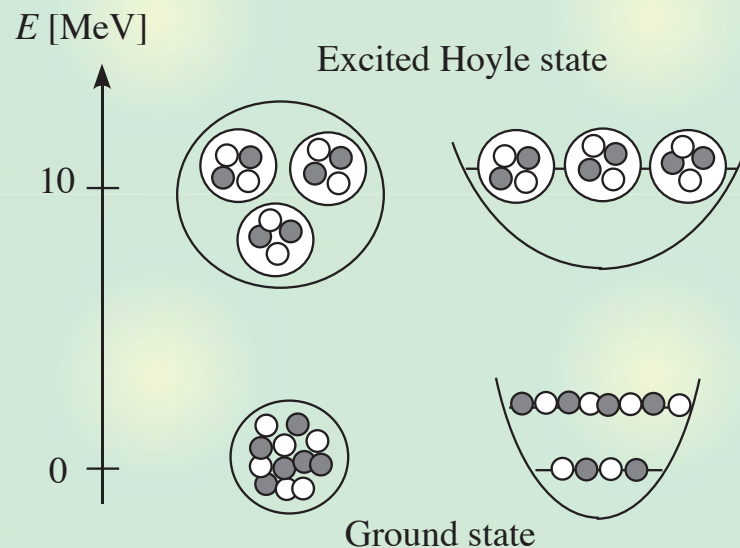
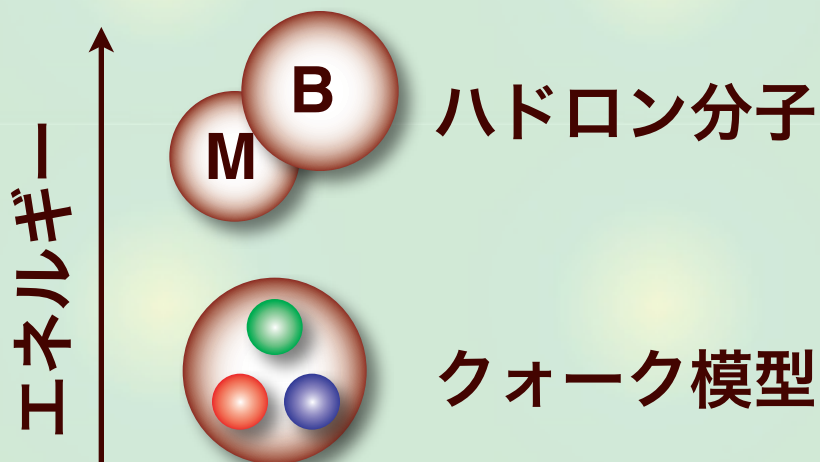
起源は強い相互作用(QCD)



実験で観測できる、ハドロン自身もQCD起源、反粒子の存在

相互作用が十分強い場合、共鳴状態を生成： $\Lambda(1405)$


閾値近傍：基底状態と異なる構造？






## カイラル動力学

- ・ 低エネルギー定理とハドロン相互作用
- ・ S行列のユニタリー性と散乱振幅



## $\bar{K}N$ 散乱と $\Lambda(1405)$ 共鳴



## $\bar{K}N$ 相互作用と $\Lambda(1405)$ 共鳴の構造

- ・  $\bar{K}N$  1 チャンネル有効相互作用と少数系 $\bar{K}$ 原子核
- ・ 動力的状態かCDD極（クォーク起源）か？
- ・ カラー数 $N_c$ 依存性とクォーク構造
- ・ 電磁氣的性質と内部構造



## まとめ

## ハドロン物理におけるカイラル対称性の破れ

カイラル対称性：QCDのラグランジアンが無質量極限で持つ  
対称性の自発的破れの帰結（ハドロン現象にあらわれる）：

### - Nambu-Goldstone (NG) ボソンの出現

$$m_\pi \sim 140 \text{ MeV}$$

### - ハドロン質量の生成

$$M_p \sim 1 \text{ GeV} \sim 3M_q, \quad M_q \sim 300 \text{ MeV} \quad v.s. \quad m_q \sim 3-7 \text{ MeV}$$

### - ハドロンとNGボソンの相互作用を規定

低エネルギー定理  $\leftarrow$  カレント代数の方法

体系的な低エネルギー展開：カイラル摂動論（ChPT）

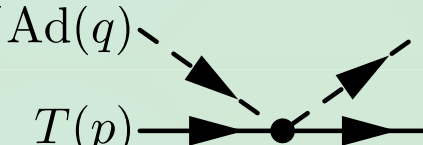
## カイラル対称性とその破れ

$$SU(3)_R \otimes SU(3)_L \rightarrow SU(3)_V$$

基礎理論であるQCD  $\Leftrightarrow$  観測される多様なハドロン現象

# s波の低エネルギー相互作用

## NGボソン(Ad)-標的ハドロン(T)散乱に対する低エネルギー定理

$$\alpha \left[ \begin{array}{c} \text{Ad}(q) \\ T(p) \end{array} \right] = \frac{1}{f^2} \frac{p \cdot q}{2M_T} \langle \mathbf{F}_T \cdot \mathbf{F}_{\text{Ad}} \rangle_\alpha + \mathcal{O} \left( \left( \frac{m}{M_T} \right)^2 \right)$$


## s波へ射影 : Weinberg-Tomozawa項

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

$$V_{ij} = -\frac{C_{ij}}{4f^2} (\omega_i + \omega_j) \quad \pi \text{のエネルギー}$$

**$\pi$ 崩壊定数 ( $g_V=1$ )**

$$C_{ij} = \sum_{\alpha} C_{\alpha, T} \left( \begin{array}{cc|c} 8 & T & \alpha \\ I_{M_i}, Y_{M_i} & I_{T_i}, Y_{T_i} & I, Y \end{array} \right) \left( \begin{array}{cc|c} 8 & T & \alpha \\ I_{M_j}, Y_{M_j} & I_{T_j}, Y_{T_j} & I, Y \end{array} \right)$$

$$C_{\alpha, T} = \langle 2\mathbf{F}_T \cdot \mathbf{F}_{\text{Ad}} \rangle = C_2(T) - C_2(\alpha) + 3$$

標的の群論的性質とフレーバーSU(3)対称性が符号と強さを決定

低エネルギー定理 : カイラル摂動論の主要項に対応

# カイラル動力学：概観

## ハドロン-NGボソン散乱と共鳴状態の記述

### - 相互作用 <-- カイラル対称性

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

### - 散乱振幅 <-- 多チャンネルでのユニタリー性

R.H. Dalitz, T.C. Wong, G. Rajasekaran, *Phys. Rev.* 153, 1617 (1967)

$$T = \frac{1}{V^{-1} - G}$$

### 摂動 -> 散乱方程式へ：相互作用が強い、共鳴が存在

N. Kaiser, P. B. Siegel, W. Weise, *Nucl. Phys.* A594, 325 (1995);

E. Oset, A. Ramos, *Nucl. Phys.* A635, 99 (1998);

J. A. Oller, U. G. Meissner, *Phys. Lett.* B500, 263 (2001);

M.F.M. Lutz, E. E. Kolomeitsev, *Nucl. Phys.* A700, 193 (2002); .... many others

メソン-バリオン散乱、メソン-メソン散乱、重いクォークを含む  
セクターでの散乱と共鳴状態の性質を非常に良く記述する

# ユニタリー性と散乱振幅

ユニタリー性：光学定理

$$\text{Im} [T^{-1}(s)] = \frac{\rho(s)}{2} \quad \text{2体散乱の位相体積}$$

分散関係を使ってユニタリー性と無矛盾な振幅の一般形を書く

$$T^{-1}(\sqrt{s}) = \sum_i \frac{R_i}{\sqrt{s} - W_i} + \tilde{a}(s_0) + \frac{s - s_0}{2\pi} \int_{s_+}^{\infty} ds' \frac{\rho(s')}{(s' - s)(s' - s_0)}$$

$R_i, W_i, a$  は散乱理論では決まらない ← カイラル相互作用

分散積分 = ループ関数  $G$  とみなし、残りの寄与を  $V^{-1}$  とする。

$$T(\sqrt{s}) = \frac{1}{V^{-1}(\sqrt{s}) - G(\sqrt{s}; a)} \quad \text{散乱振幅}$$

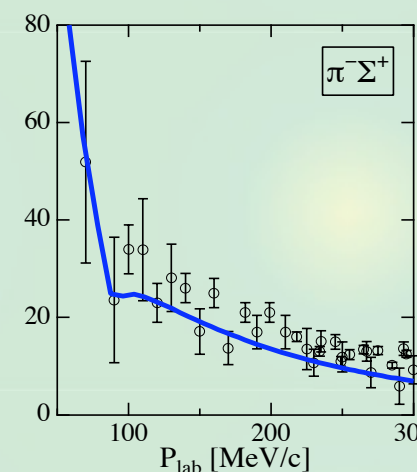
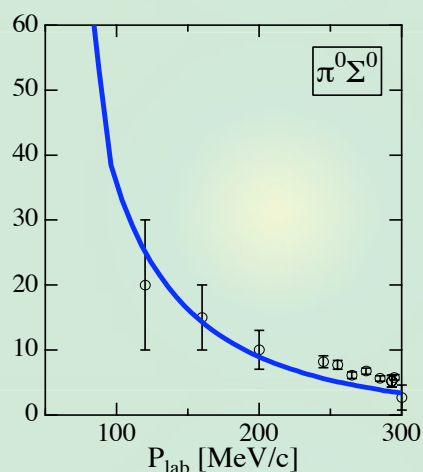
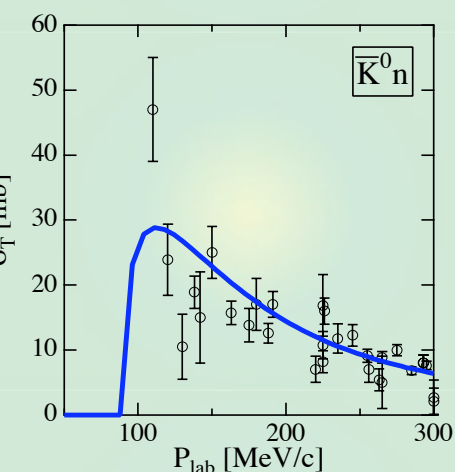
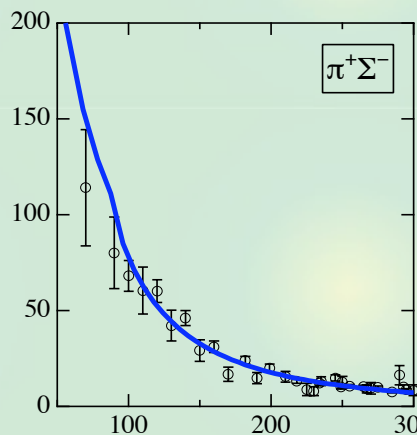
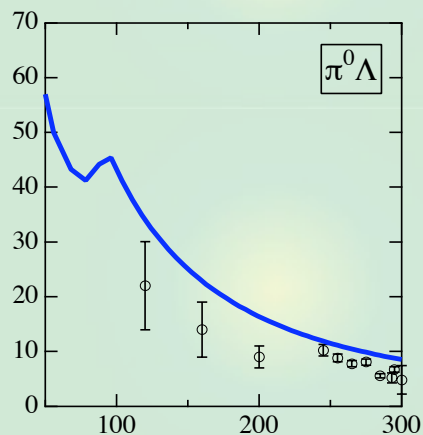
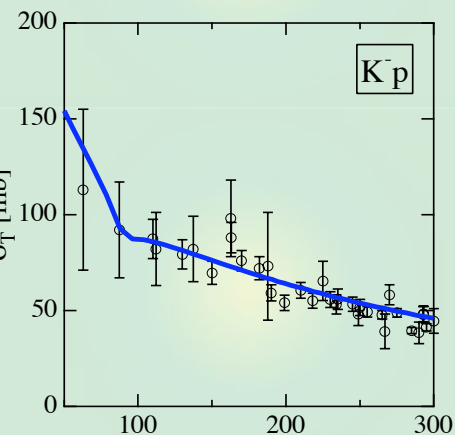
$V$  の決定： $T$  を低エネルギー展開してカイラル摂動論と比較

$$T^{(1)} = V^{(1)}, \quad T^{(2)} = V^{(2)}, \quad T^{(3)} = V^{(3)} - V^{(1)}GV^{(1)}, \dots$$

カイラル対称性 + ユニタリー性と無矛盾な散乱振幅  $T$

# $\bar{K}N$ 散乱：実験データとの比較

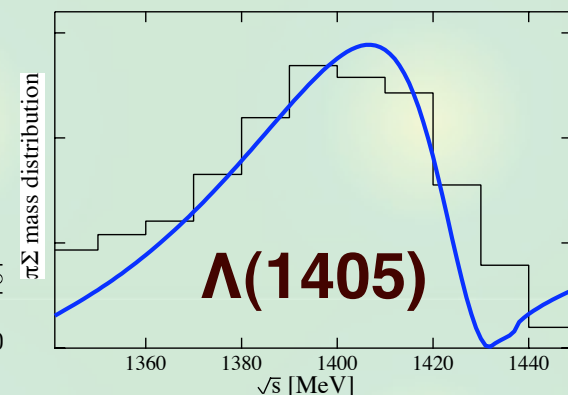
## K-p散乱の全断面積



## 閾値分岐比

	$\gamma$	$R_c$	$R_n$
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)

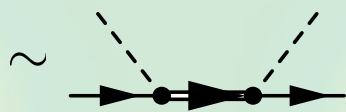
$\bar{K}N$ 閾値の上下のエネルギーで実験と良い一致



# 1つの共鳴に2つの極

複素エネルギー平面上の散乱振幅の極：共鳴状態

$$T_{ij}(\sqrt{s}) \sim \frac{g_i g_j}{\sqrt{s} - M_R + i\Gamma_R/2}$$

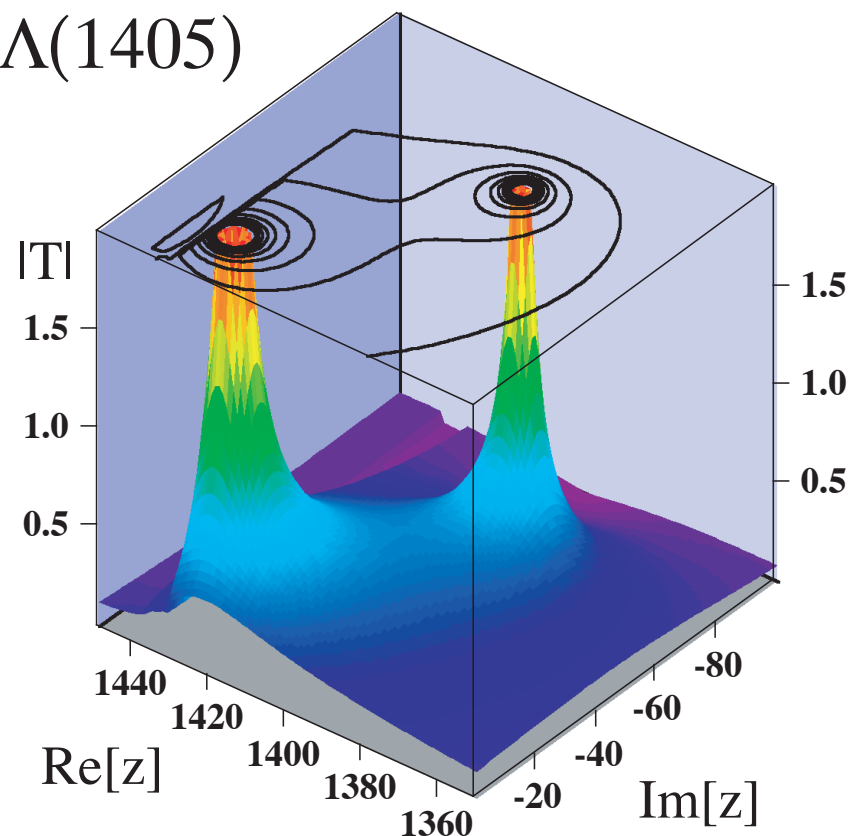


実部	質量
虚部	崩壊幅/2
留数	結合定数

2つの極(状態)  $\leftarrow$  2つの引力

物理的な“ $\Lambda(1405)$ ”が2つの  
状態の重ね合わせである可能性

$\Lambda(1405)$



D. Jido, J.A. Oller, E. Oset, A. Ramos, U.G. Meissner, Nucl. Phys. A 723, 205 (2003);  
T. Hyodo, W. Weise, Phys. Rev. C 77, 035204 (2008)

# $\bar{K}N$ 散乱と $\Lambda(1405)$

$\Lambda(1405) : J^P = 1/2^-, I = 0$

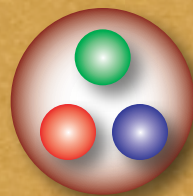
(PDG)

質量 :  $1406.5 \pm 4.0$  MeV、崩壊幅 :  $50 \pm 2$  MeV

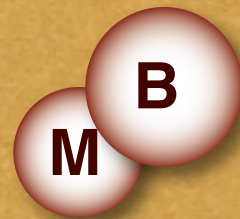
崩壊モード :  $\Lambda(1405) \rightarrow (\pi\Sigma)_{I=0}$  **100%**

構成的クォーク模型

p波励起  $\sim 1600$  MeV?



N. Isgur, G. Karl, PRD18, 4187 (1978)



チャンネル結合

散乱方程式

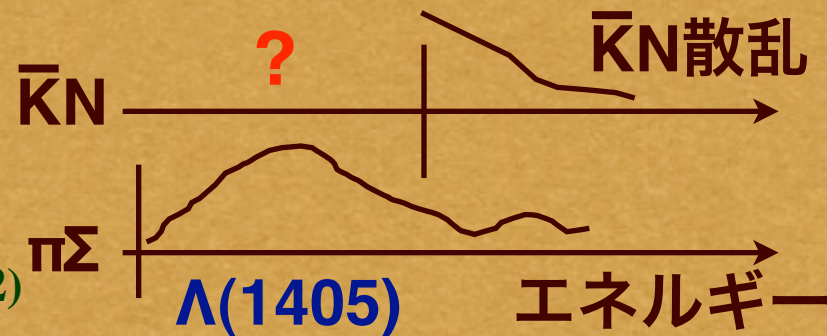
R.H. Dalitz, T.C. Wong,  
G. Rajasekaran, PR153, 1617 (1967)

閾値以下の $\bar{K}N$ 相互作用

-->  $\bar{K}N$ ポテンシャル、 $\bar{K}$ 原子核

Y. Akaishi, T. Yamazaki, PRC65, 044005 (2002)

Talk by 池田さん (このあと)



## カイラル動力学に基づく有効相互作用

カイラル動力学の枠組みを少数 $\bar{K}$ 原子核へ応用

### - 1チャンネル $\bar{K}N$ ポテンシャル

T. Hyodo, W. Weise, Phys. Rev. C 77, 035204 (2008)

1) 多チャンネル散乱を $\bar{K}N$ チャンネルのみのBS方程式へ変形  
厳密に $\pi\Sigma$ チャンネルの自由度を消去

2) シュレディンガー方程式と局所的ポテンシャルで近似

有効 $\bar{K}N$ 相互作用：引力的、現象論的ポテンシャルより弱い

K-pp系への応用（現実的核力を用いた変分計算）

A. Doté, T. Hyodo, W. Weise, Nucl. Phys. A 804, 197 (2008); Phys. Rev. C 79, 014003 (2009)

束縛、 $B \sim 20$  MeV  $\Gamma \sim 40-70$  MeV

なぜ相互作用が弱いのか？  $\leftarrow \Lambda(1405)$ の構造と $\pi\Sigma$ 相関

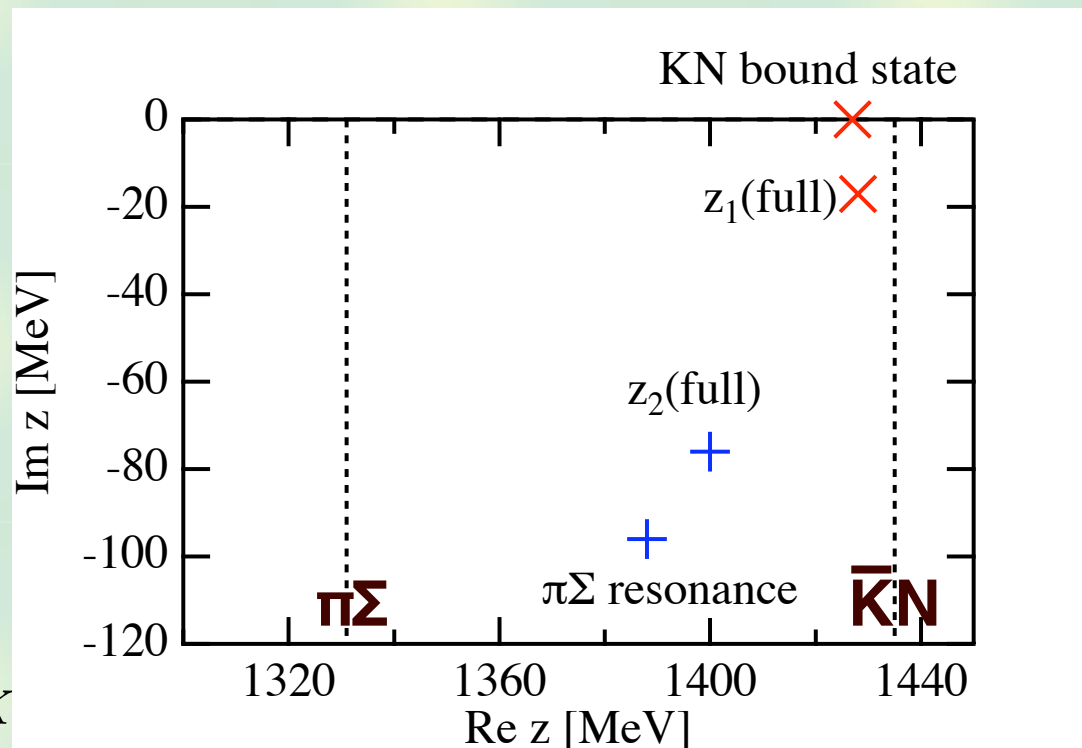
## 2ポール構造の起源

## カイラル相互作用

$$V_{ij} = -C_{ij} \frac{\omega_i + \omega_j}{4f^2}$$

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} \bar{K}N & \pi\Sigma \\ 3 & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\sqrt{\frac{3}{2}} & 4 \end{pmatrix}$$

$$\omega_i \sim m_i, \quad 3.3m_\pi \sim m_K$$



2チャンネルにある引力 --> 2つの状態

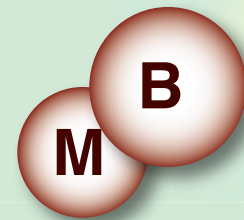
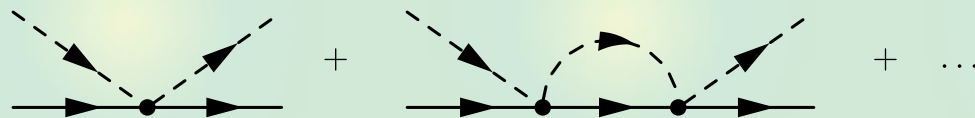
( $\pi\Sigma$ 共鳴：エネルギー依存性、相対論的／非相対論的運動学)

$\pi\Sigma$ の強い相関が $\Lambda(1405)$ の構造に関与し、結果的に $\bar{K}N$ の相対的な寄与を弱めている。

## 動的状態とCDD極の寄与

相互作用の情報（ポテンシャル）と散乱の実験データ（断面積など）がある場合の2体散乱での共鳴状態の分類

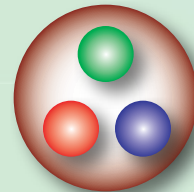
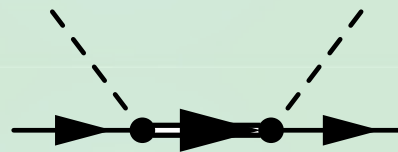
(a) 動的な状態：2体の分子的状态、準束縛状态、



... 今の場合にはメソン-バリオンの分子的状态

(b) CDD極の寄与：独立粒子、散乱以外の動力学で生成、

L. Castillejo, R.H. Dalitz, F.J. Dyson, Phys. Rev. 101, 453 (1956)



... 今の場合には3クォーク状态など

カイラル動力学での共鳴 -> (a) 動的な状態？

# CDD極の寄与と共鳴の性質

カイラル動力学モデルでの散乱振幅

$$T = \frac{1}{\boxed{V^{-1}} - \boxed{G}} \quad \mathbf{V} : \text{相互作用、} \mathbf{G} : \text{ループ関数}$$

$V$ の中に（のみ）CDD極の寄与が入ることが知られていた。

繰り込みの解析より $G$ にもCDD極の寄与があることを指摘し、

**ループ $G$ からCDD極を排除する「自然な繰り込み」を提案した。**

T. Hyodo, D. Jido, A. Hosaka, Phys. Rev. C78, 025203 (2008)

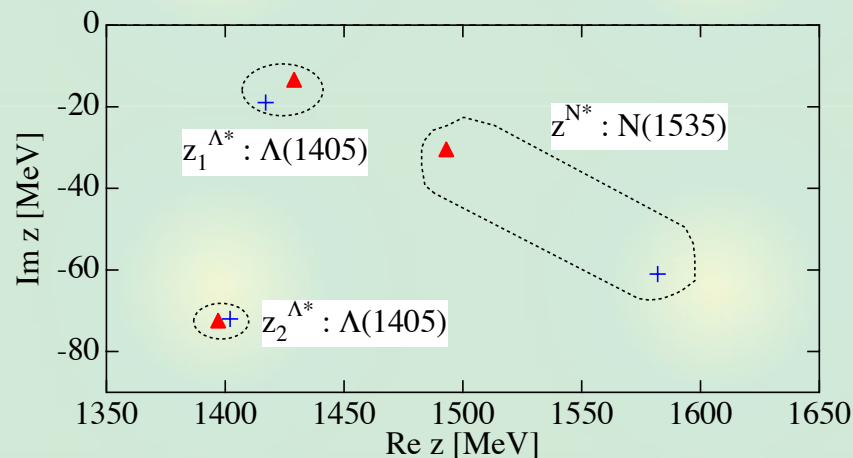
現象論的な振幅とCDD極を完全に排除した振幅を比較

$\bar{K}N$ 散乱の $\Lambda(1405)$ ：ほぼ同じ

--> 動的成分が支配的

$\pi N$ 散乱の $N(1535)$ ：ズレが生じる

--> 動的 + CDD極



# $N_c$ スケーリングとクォーク構造

$N_c$  : QCDのカラーの数

ハドロンの有効理論において、クォーク構造の情報を担う

一般的な議論から物理量の $N_c$ 依存性が知られているので、  
模型に $N_c$ 依存性を導入し共鳴の性質の応答を調べる。

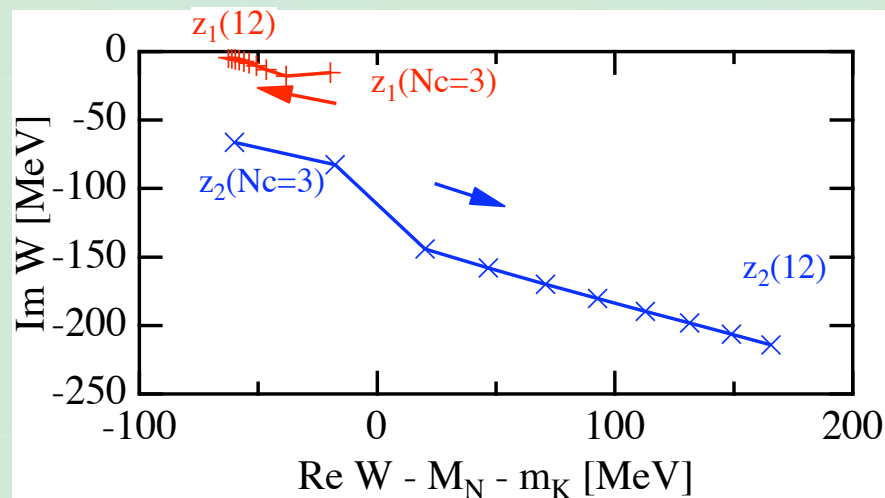
J.R. Pelaez, Phys. Rev. Lett. 92, 102001 (2004)

qqqバリオンの $N_c$ スケーリング

$$M_R \sim \mathcal{O}(N_c), \quad \Gamma_R \sim \mathcal{O}(1)$$

カイラル動力学の結果

$$\Gamma_R \neq \mathcal{O}(1)$$



-->  $\Lambda(1405)$ は非-qqq成分が支配的。有力な候補として動的状態

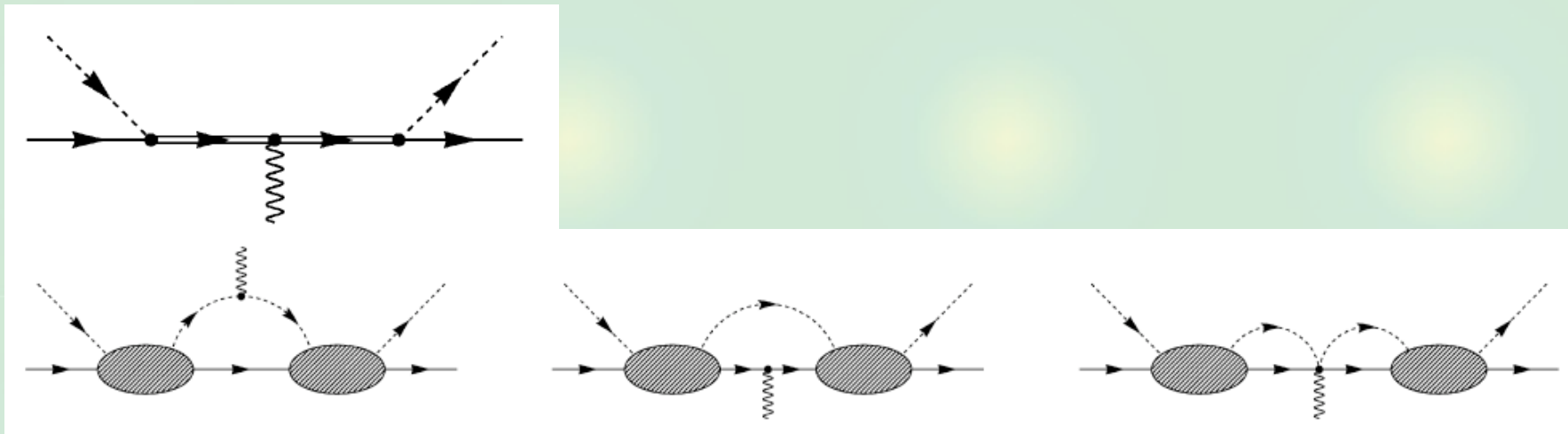
T. Hyodo, D. Jido, L. Roca, Phys. Rev. D77, 056010 (2008);

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

## 電磁氣的性質の測定

電磁氣的な性質：内部構造を反映

← 光子を結合させた振幅を評価し、形状因子などを引き出す



平均 2 乗半径の結果

$$|\langle r^2 \rangle_E| = 0.33 \text{ [fm}^2\text{]}$$

$\Lambda(1405)$ の大きな電磁氣的サイズ c.f. 中性子：-0.12 [fm<sup>2</sup>]

--> メソン-バリオン分子的な描像を支持

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

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



## まとめ：カイラル動力学

QCDのカイラル対称性の要求する低エネルギー相互作用とS行列のユニタリー性を考慮したカイラル動力学の枠組みを解説した。

- 📌 カイラル対称性を通じて、観測されるハドロン現象を、基礎理論であるQCDと関連させて理解できる。
- 📌 カイラル動力学：  
カイラル相互作用 + チャンネル結合ユニタリー条件  
=> メソン-バリオン散乱とバリオン共鳴の統一的記述  
e.g.  $\bar{K}N$ 散乱における $\Lambda(1405)$ 共鳴
- 📌 最近の発展：  
有効相互作用の導出、共鳴状態の内部構造の解明

## まとめ： $\bar{K}N$ 相互作用

カイラル動力学に基づき1チャンネル $\bar{K}N$ 相互作用を構築した。

📌 カイラル低エネルギー定理： $\bar{K}N$ チャンネルと $\pi\Sigma$ チャンネルの両方に強い引力

=> 2つのポール構造の起源

📌  $\bar{K}N$ チャンネルの共鳴は1420 MeV付近にあらわれる

=> 弱い $KN$ 有効相互作用

T. Hyodo, W. Weise

📌  $\bar{K}NN$ 3体系への応用（変分計算）

=>  $\sim 20$  MeVの束縛、幅は広い

A. Dote, T. Hyodo, W. Weise

📌 より低いエネルギー領域では $\pi\Sigma$ の取り扱いが不可欠

## まとめ： $\Lambda(1405)$ 共鳴の構造

カイラル動力学に基づく3種の解析で $\Lambda(1405)$ の構造を調べた。



動的状態かCDD極の寄与か？

=> メソン-バリオン成分が支配的 [T. Hyodo, D. Jido, A. Hosaka](#)



$N_c$ スケーリングの研究

=>  $qqq$ 成分はほとんどない [T. Hyodo, D. Jido, L. Roca](#)



電磁氣的性質の研究


=> 電磁氣的なサイズは大きい [T. Sekihara, T. Hyodo, D. Jido](#)

## まとめ： $\Lambda(1405)$ 共鳴の構造


カイラル動力学に基づく3種の解析で $\Lambda(1405)$ の構造を調べた。

 動的状態かCDD極の寄与か？


=> メソン-バリオン成分が支配的 [T. Hyodo, D. Jido, A. Hosaka](#)

 Ncスケーリングの研究

=> qq $\bar{q}$ 成分はほとんどない [T. Hyodo, D. Jido, L. Roca](#)

 電磁氣的性質の研究

=> 電磁氣的なサイズは大きい [T. Sekihara, T. Hyodo, D. Jido](#)

 3種の独立な解析が矛盾なく $\Lambda(1405)$ の  
メソン-バリオン分子的な構造を示唆している。

