

# カイラル対称性が描くエキゾチックハドロン

--  $\Lambda(1405)$ 粒子とその周辺 --



**兵藤 哲雄**

**東京工業大学 理工学研究科**

[http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~hyodo/publication/10\\_02Handai.pdf](http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~hyodo/publication/10_02Handai.pdf)

supported by Global Center of Excellence Program  
“Nanoscience and Quantum Physics”

2011, Jan. 28th 1

# ハドロン物理 in 物理学

## 東工大物理学科の研究室

物性物理学専攻（25）：半導体、ナノサイエンス、

基礎物理学専攻（19）

基礎物理学・実験（11）

基礎物理学・理論（8）

素粒子理論（2）：物質の起源、究極理論、

原子核理論（3）

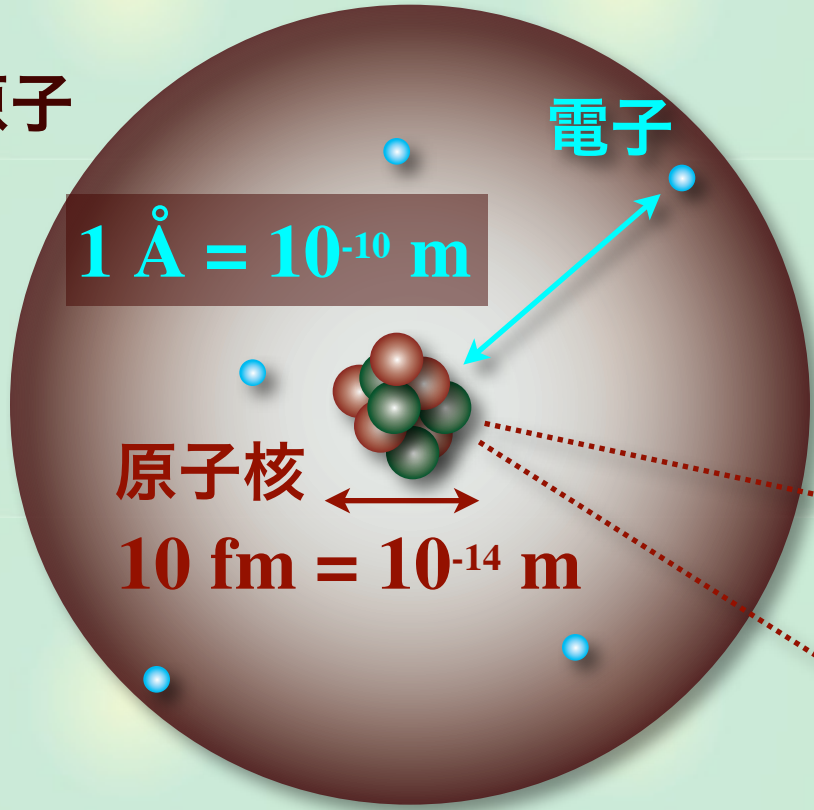
原子核物理学

ハドロン物理学

宇宙理論（3）：初期宇宙、恒星の構造、

# ハドロン物理 in 原子核物理学

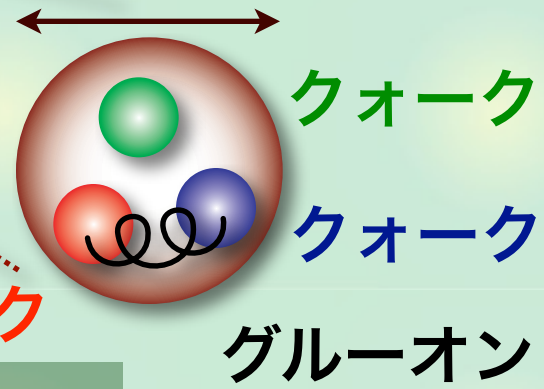
原子



## ハドロン物理学

ハドロン（核子など）の構造を  
ミクロなレベルから理解する

1 fm = 10<sup>-15</sup> m



## 原子核物理学

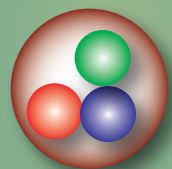
原子核の構造を核子（陽子＋中性子）間の  
相互作用から理解する

# ハドロンの分類とミクロな理論

ハドロン：強い相互作用をする粒子

## バリオン（重粒子）

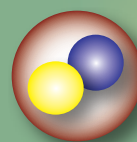
陽子、中性子、 $\Lambda$ 粒子、、、、



クォーク3つで構成

## メソン（中間子）


$\pi$ 中間子、K中間子、、、、




クォークと  
反クォークで構成

ミクロな基礎理論：クォークとグルーオンの量子色力学 QCD

## クォーク

物質を構成する粒子   
カラー（赤,青,緑）と  
フレーバー（6種）を持つ

## グルーオン

力を媒介する粒子   
カラー（8色）を持つ  
自身と相互作用する

# 自然界の力とQCD

素粒子標準理論：重力以外の力を量子ゲージ理論で記述する

参考：長島順清「素粒子標準理論と実験的基礎」朝倉書店(1999)

電磁相互作用+弱い相互作用  
-->ワインバーグ・サラム理論



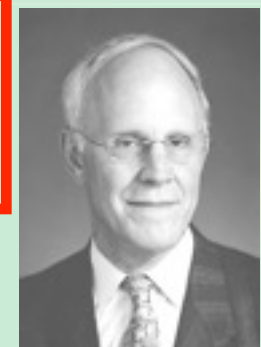
(1979年)



強い相互作用  
-->量子色力学 QCD



(2004年)



小林益川行列



(2008年)



ヒッグス粒子 (未発見)

# QCDと電磁気学

## 量子色力学 QCD

--> クォークがグルーオンを交換して相互作用する

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \bar{q}_\alpha (i\gamma^\mu D_\mu^{\alpha\beta} - m\delta^{\alpha\beta}) q_\beta$$

↑ ↑

グルーオン クォーク

色自由度

**色の自由度**を無くせば、量子電磁力学 QED

--> 電子が光子を交換して相互作用する

$$\mathcal{L}_{\text{QED}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{e}(i\gamma^\mu D_\mu - m)e$$

**量子効果**を無くせば、古典電磁気学

--> マクスウェル方程式

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \dots$$

高  
：  
難  
度

## 低エネルギーのQCDの難しさ

強い相互作用はQCDで記述される

場の量子論：一般解を書き下せない

-> 結合定数による摂動展開をする（量子電磁力学）

QCDは漸近自由性をもつ

高エネルギー領域：結合定数が小さくなり**摂動展開可能**

1. 深非弾性散乱でのスケール不変性（第0近似）
2. スケール不変性の破れ（最低次のQCD効果）

低エネルギー領域：**非摂動的効果**

1. カイラル対称性の自発的破れ：**真空の変化**
2. カラー閉じ込め：**クォークが単体で観測できない**

低エネルギーの物理は基礎理論から理解されていない！

# ハドロン物理の研究対象

## カラー閉じ込め：ヤンミルズ方程式と質量ギャップ問題

<http://www.claymath.org/millennium/>

**Yang-Mills Existence and Mass Gap:** *Prove that for any compact simple gauge group  $G$ , quantum Yang-Mills theory of  $\mathbb{R}^4$  exists and has a mass gap  $\Delta > 0$ .*

解ければ100万ドル ~ 8283万5千円

カラー閉じ込め

核子構造

核力の起源、核構造

格子QCD

高温/高密度、QGP

ハドロン動力学、  
ハドロン構造

カイラル相転移

ストレンジネス



# ハドロンの多様な性質

## 観測されているハドロンの表 (Particle Data Group)

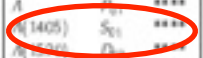
<http://pdg.lbl.gov/>

様々な質量、崩壊幅、崩壊モード

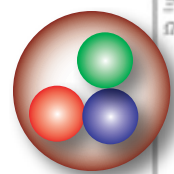
粒子の内部構造

ハドロン間の相互作用

$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$	$\rho$
$\Lambda(1405)$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$
$\Lambda(1600)$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$
$\Lambda(1670)$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$
$\Lambda(1690)$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$
$\Lambda(1800)$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$	$S_{11}$
$\Lambda(1830)$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$
$\Lambda(1890)$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$	$P_{11}$
$\Lambda(2000)$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$\Lambda(2020)$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$
$\Lambda(2100)$	$G_{17}$	$G_{17}$	$G_{17}$	$G_{17}$	$G_{17}$	$G_{17}$	$G_{17}$	$G_{17}$	$G_{17}$	$G_{17}$	$G_{17}$
$\Lambda(2130)$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$	$F_{15}$
$\Lambda(2325)$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$	$D_{13}$
$\Lambda(2350)$	$H_{19}$	$H_{19}$	$H_{19}$	$H_{19}$	$H_{19}$	$H_{19}$	$H_{19}$	$H_{19}$	$H_{19}$	$H_{19}$	$H_{19}$
$\Lambda(2585)$	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

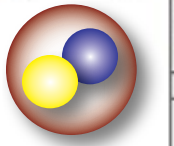


$\Lambda(1405)$



バリオン~130種類

LIGHT UNFLAVORED (S=C=B=0)		STRANGE (S=-1, C=B=0)		CHARMED, STRANGE (C=S=+1)		$\tau$	
$J^P$	$J^P$	$J^P$	$J^P$	$J^P$	$J^P$	$J^P$	$J^P$
$\Lambda(1405)$	$\Lambda(1600)$	$\Lambda(1670)$	$\Lambda(1690)$	$\Lambda(2325)$	$\Lambda(2350)$	$\Lambda(1405)$	$\Lambda(1405)$
$\Lambda(1600)$	$\Lambda(1670)$	$\Lambda(1690)$	$\Lambda(1700)$	$\Lambda(1800)$	$\Lambda(1800)$	$\Lambda(1800)$	$\Lambda(1800)$
$\Lambda(1800)$	$\Lambda(1830)$	$\Lambda(1890)$	$\Lambda(2000)$	$\Lambda(2020)$	$\Lambda(2020)$	$\Lambda(2020)$	$\Lambda(2020)$
$\Lambda(2020)$	$\Lambda(2100)$	$\Lambda(2130)$	$\Lambda(2325)$	$\Lambda(2350)$	$\Lambda(2350)$	$\Lambda(2350)$	$\Lambda(2350)$
$\Lambda(2350)$	$\Lambda(2585)$						



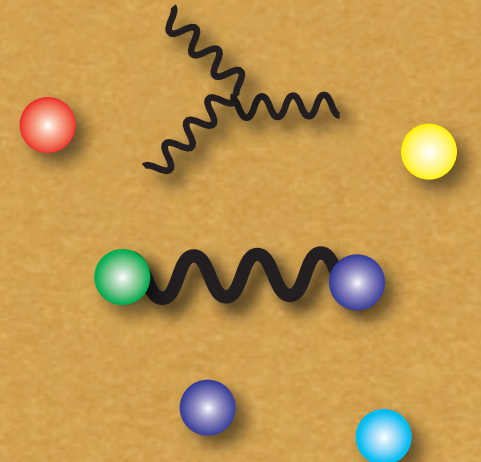
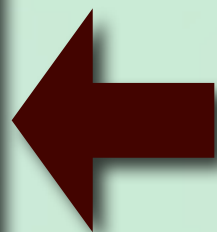
メソン~160種類

### 全てが単一のQCDラグランジアンから出てくる！！

# ハドロン物理の研究




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




## 導入

- ・ ハドロン物理とは？
- ・ 低エネルギーQCDの難しさと多彩なハドロン動力学



## 通常ハドロンとクォーク模型

- ・ 構成的クォーク模型（3クォーク描像）
- ・ エキゾチックハドロン



## $\Lambda(1405)$ の構造

- ・ カイラル動力学模型（メソン-バリオン描像）
- ・ 相対論的重イオン衝突を利用した構造の検証



## まとめ

# 構成的クォーク模型

一旦QCDを忘れて、直感的にハドロンを非相対論的なクォークの束縛系とする描像で考える

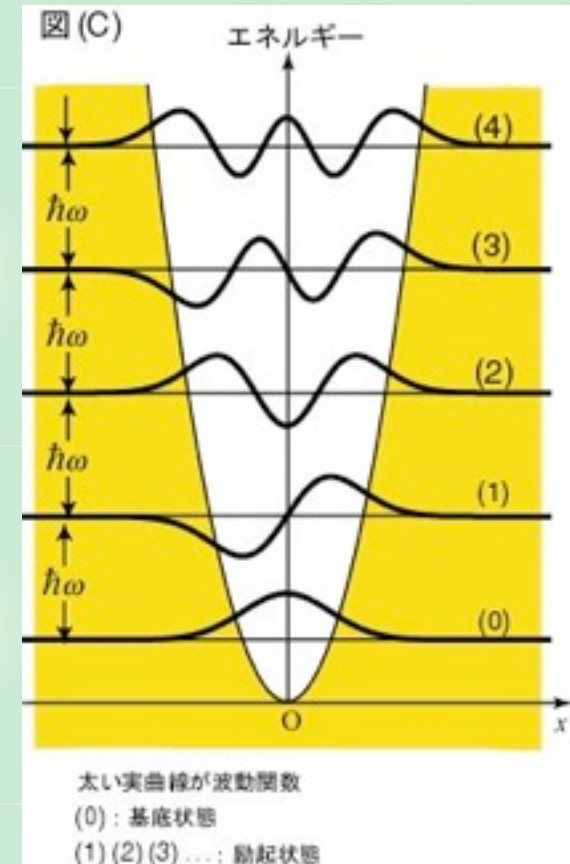
調和振動子などの平均一体ポテンシャルにクォークを閉じ込める (バリオンの場合)

$$\mathcal{H} = \sum_{i=1,2,3} \left( \frac{\mathbf{p}_i^2}{2m_i} + \frac{m_i \omega^2}{2} \mathbf{x}_i^2 \right)$$

空間波動関数 (エネルギー準位) は主量子数 $n$ と角運動量 $l$ で決まる

$$\psi_{nl} = \prod_i f_{n_i l_i}^i(\mathbf{x}_i)$$

$$n = \sum_i n_i, \quad l = \sum_i l_i$$



[http://www.kutl.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld2/2Part3/2P31/energy\\_eigenvalue.htm](http://www.kutl.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld2/2Part3/2P31/energy_eigenvalue.htm)

## クォークの内部自由度

クォークは座標以外に内部自由度（色、香り、スピン）を持つ

$$\Psi = \psi_{nl} \cdot \psi_c \cdot \psi_f \cdot \psi_s$$

クォークはフェルミ粒子：同じ準位を2つ占有できない

--> 粒子の入れ替えに対して**完全反対称**

空間：基底状態（ $l=0$ ）は**完全対称**

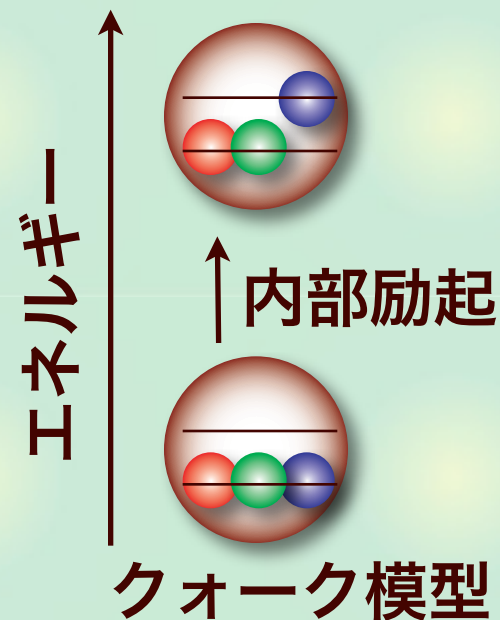
$$\psi_{00} = f_{00}(\mathbf{x}_1) f_{00}(\mathbf{x}_2) f_{00}(\mathbf{x}_3)$$

カラー：**完全半対称**（白色）

--> スピン・フレーバー：**完全対称**

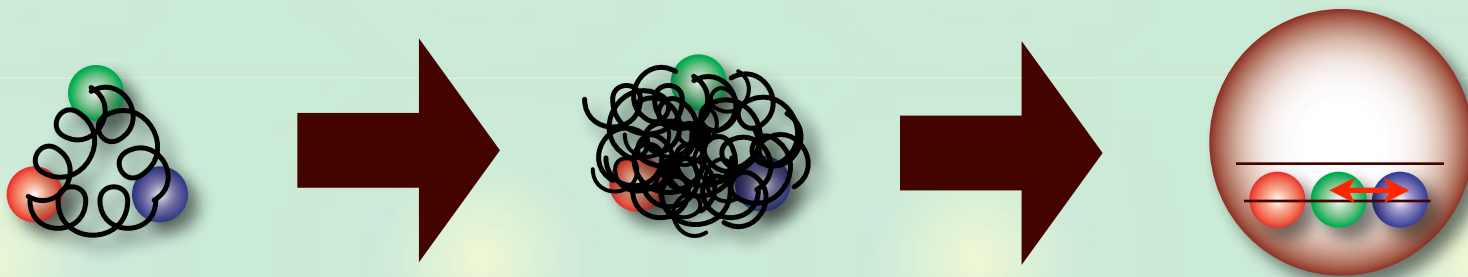
励起状態：クォークを $l=1$ の軌道に上げる

$$\psi_{01} = f_{00}(\mathbf{x}_1) f_{00}(\mathbf{x}_2) f_{01}(\mathbf{x}_3)$$



# 構成的クォーク模型の残留相互作用

QCD：クォーク間でグルーオンを交換



クォーク模型：閉じ込めポテンシャル

非摂動相互作用が閉じ込めポテンシャルを作ると考える

それでも残ったクォーク間の相関：**残留相互作用**

例) カラーสปิน相互作用 (1グルーオンの交換)

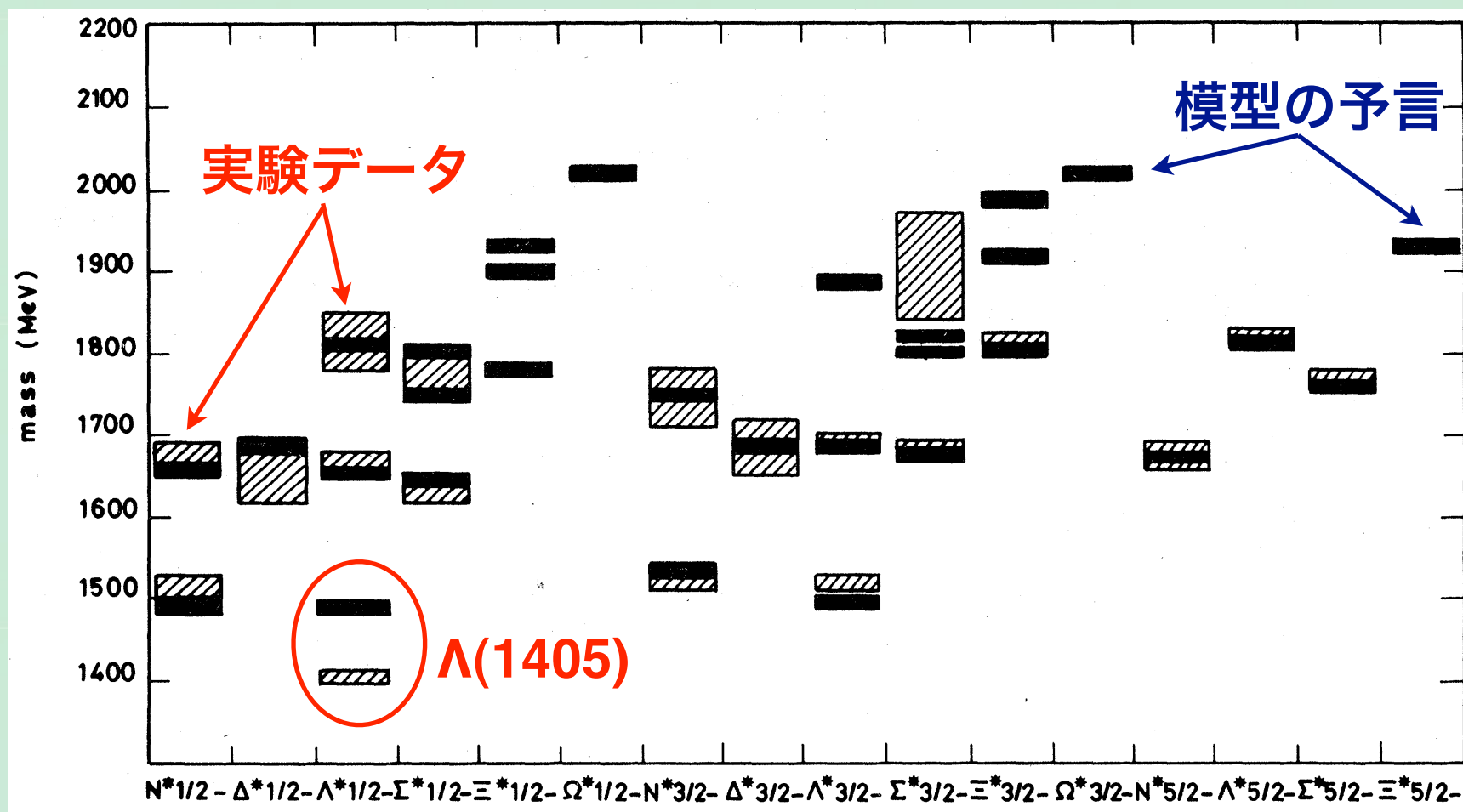
$$\mathcal{H}_{cs} = -\frac{f_{cs}}{m_i m_j} (\lambda_i^c \cdot \lambda_j^c) (\sigma_i \cdot \sigma_j)$$

対称性で決めた波動関数に、**摂動**として取り入れる

# 実験との比較

## バリオン励起状態のスペクトル (カラーสปิน相互作用)

N. Isgur and G. Karl, Phys. Rev. D18, 4187 (1978)



模型の予言と実験データが幅広く一致

## エキゾチックハドロン

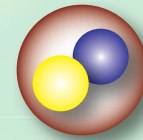
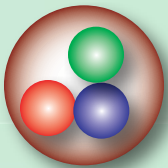
クォーク模型：対称性から決まる波動関数＋残留相互作用の摂動

--> ハドロンの性質をよく再現

--> 通常ハドロンの主要な構造

バリオン：3クォーク

メソン：クォーク反クォーク対

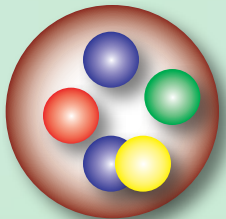


上記の分類にあてはまらないもの、その他の構造

--> **エキゾチックハドロン**

条件：カラー白色（クォークの閉じ込め）

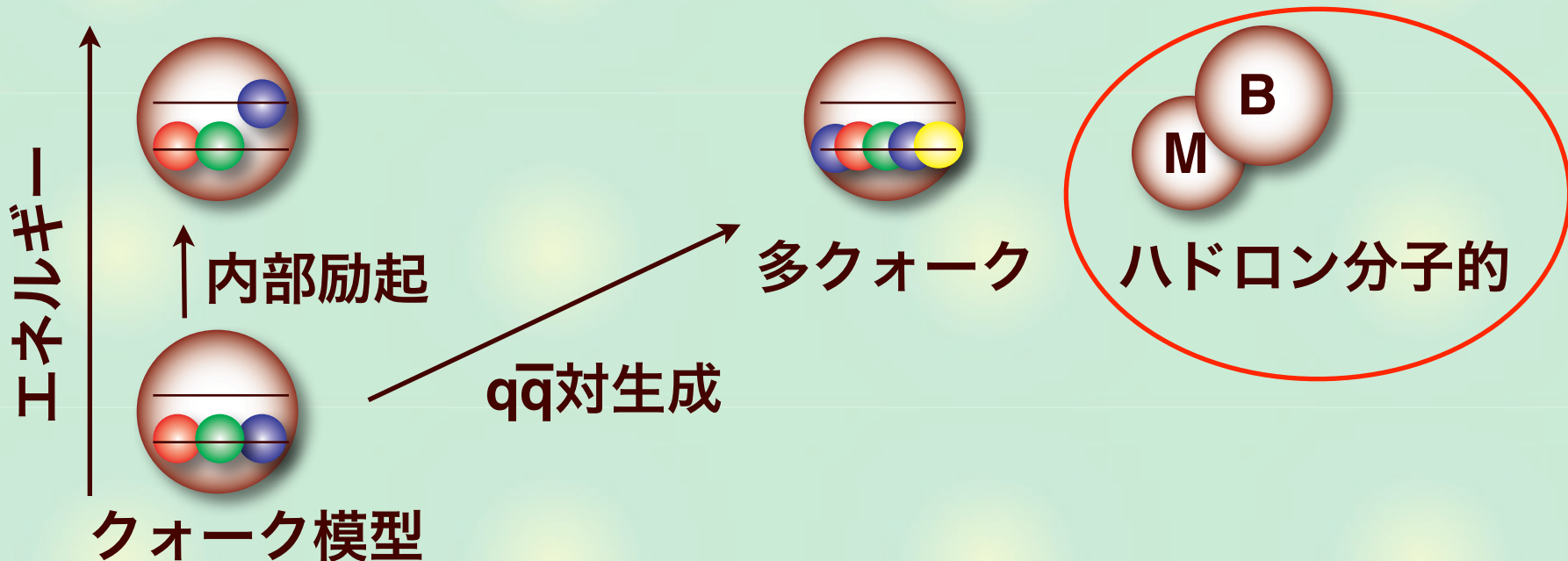
例) 4クォーク＋反クォーク





# ハドロン共鳴状態と分子的構造

## 通常ハドロン以外の構造



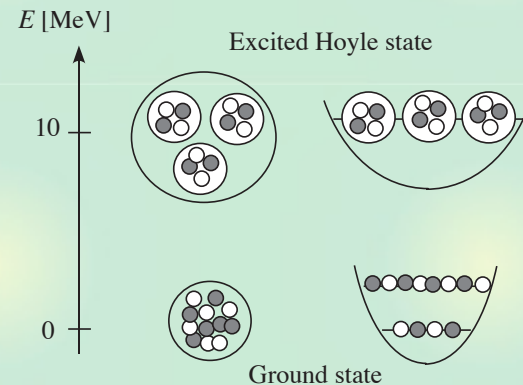
励起状態：2ハドロン状態へ崩壊

閾値近傍では基底状態と異なる構造？

--> ハドロン間の相互作用？

--> カイラル対称性

## $^{12}\text{C}$ Hoyle状態



# カイラル対称性

## カイラル対称性の自発的の破れ

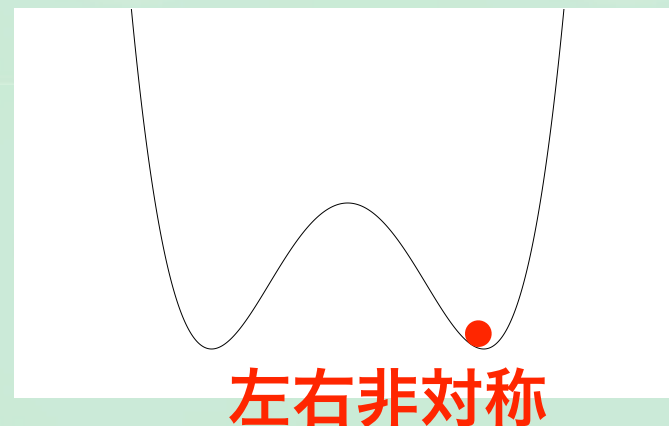
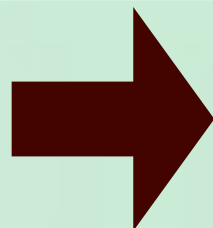


(2008年)



## カイラル対称性

- 無質量フェルミオンの持つ対称性
- 右巻き粒子と左巻き粒子が独立に変換する
- 低エネルギー真空で自発的に破れている



# カイラル対称性 (少し詳しく)

フェルミオンのラグランジアン：運動項 + 質量項

$$\mathcal{L} = \bar{q}i\gamma^\mu\partial_\mu q - \bar{q}mq$$

クォーク場を右巻き(R)と左巻き(L)に分ける

$$q = q_R + q_L, \quad q_R = \begin{pmatrix} \chi_R \\ 0 \end{pmatrix}, \quad q_L = \begin{pmatrix} 0 \\ \chi_L \end{pmatrix}$$

$$\bar{q} = \bar{q}_R + \bar{q}_L, \quad \bar{q}_R = (0 \quad \chi_R^\dagger), \quad \bar{q}_L = (\chi_L^\dagger \quad 0)$$

転置ではなく  
RとLが反転

$$\gamma^\mu\partial_\mu = \begin{pmatrix} 0 & \frac{\partial}{\partial t} - \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\nabla} \\ \frac{\partial}{\partial t} + \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\nabla} & 0 \end{pmatrix}, \quad m = \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix}$$

非対角

対角

ラグランジアンが右巻き、左巻き成分へ分解される

$$\mathcal{L} = \bar{q}_R i\gamma^\mu\partial_\mu q_R + \bar{q}_L i\gamma^\mu\partial_\mu q_L - \bar{q}_R m q_L - \bar{q}_L m q_R$$

# ハドロン物理におけるカイラル対称性の破れ

破れているのになぜ重要なのか？

カイラル対称性の自発的破れの帰結（ハドロン物理）：

- ゼロ質量南部ゴールドストーン (NG) ボソンの出現

$$m_\pi \sim 140 \text{ MeV}, \quad M_N \sim 940 \text{ MeV}$$

- ハドロン質量の生成

$$M_N \sim 940 \text{ MeV} \sim 3M_q \quad \Rightarrow \quad M_q \sim 300 \text{ MeV}$$

元の質量  $m_q \sim 3 \text{ MeV}$

- ハドロンとNGボソンの相互作用を規定

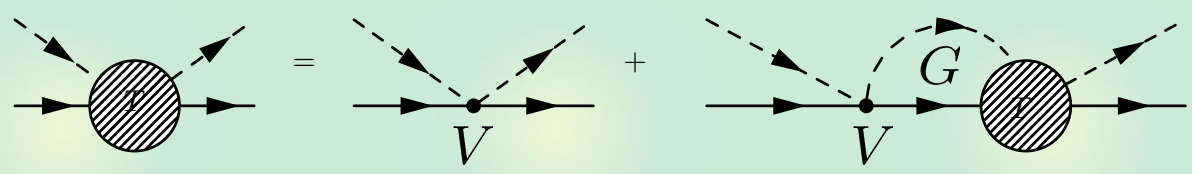


# カイラル動力学模型

相互作用（ポテンシャル）が決まったので散乱方程式を解く  
 リップマンシュヴィンガー方程式

$$T = V + VGT$$

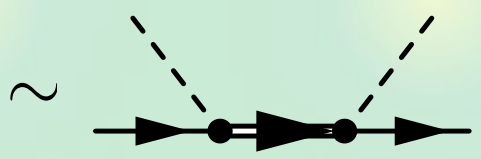
$$\Rightarrow T = \frac{1}{1 - VG}V$$



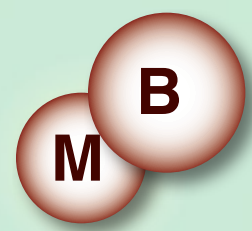
散乱振幅  $T \rightarrow$  観測量：散乱断面積、位相のずれ、、、

複素エネルギー平面上の  $T$  の極：共鳴状態

$$T(W) \sim \frac{g^2}{W - M_R + i\Gamma_R/2}$$

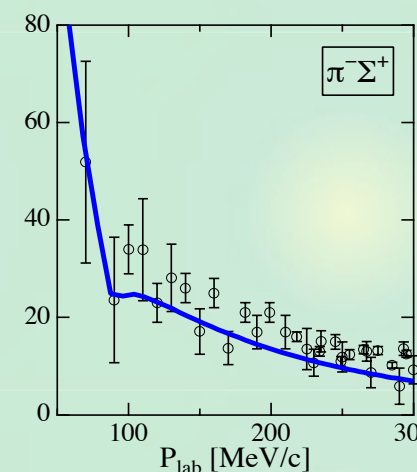
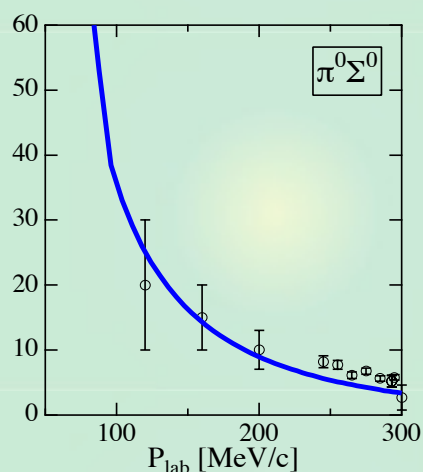
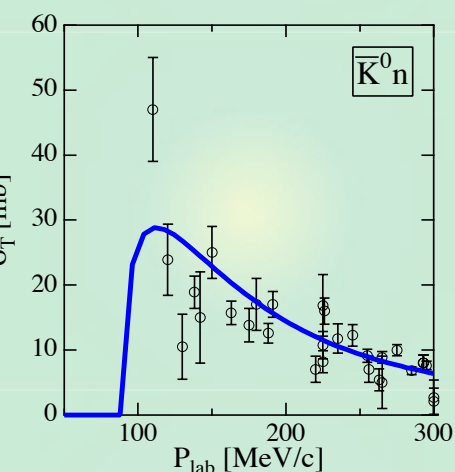
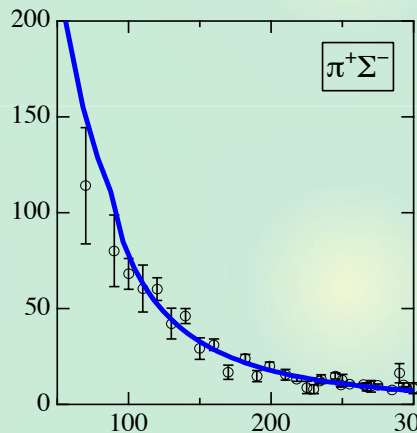
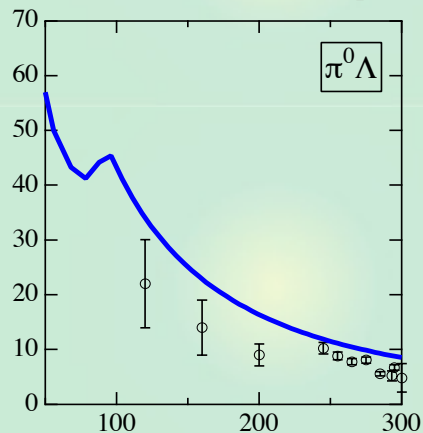
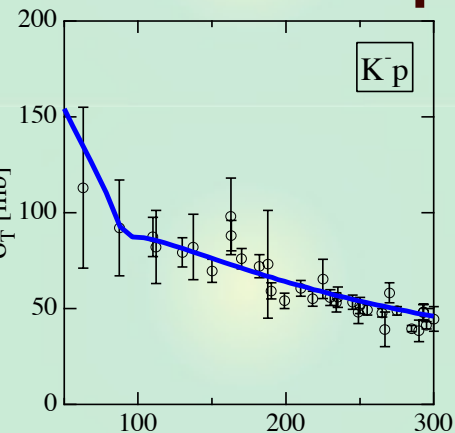


実部	質量 $M_R$
虚部	崩壊幅 $\Gamma_R/2$
留数	結合定数 $g$



# カイラル動力学模型と実験データとの比較

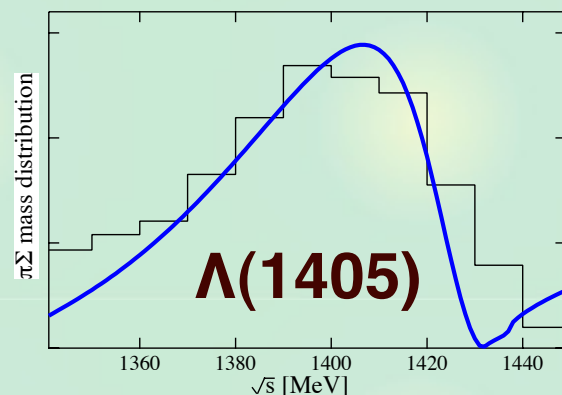
## K-p散乱の全断面積



## 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

$\Lambda(1405)$ の場合：

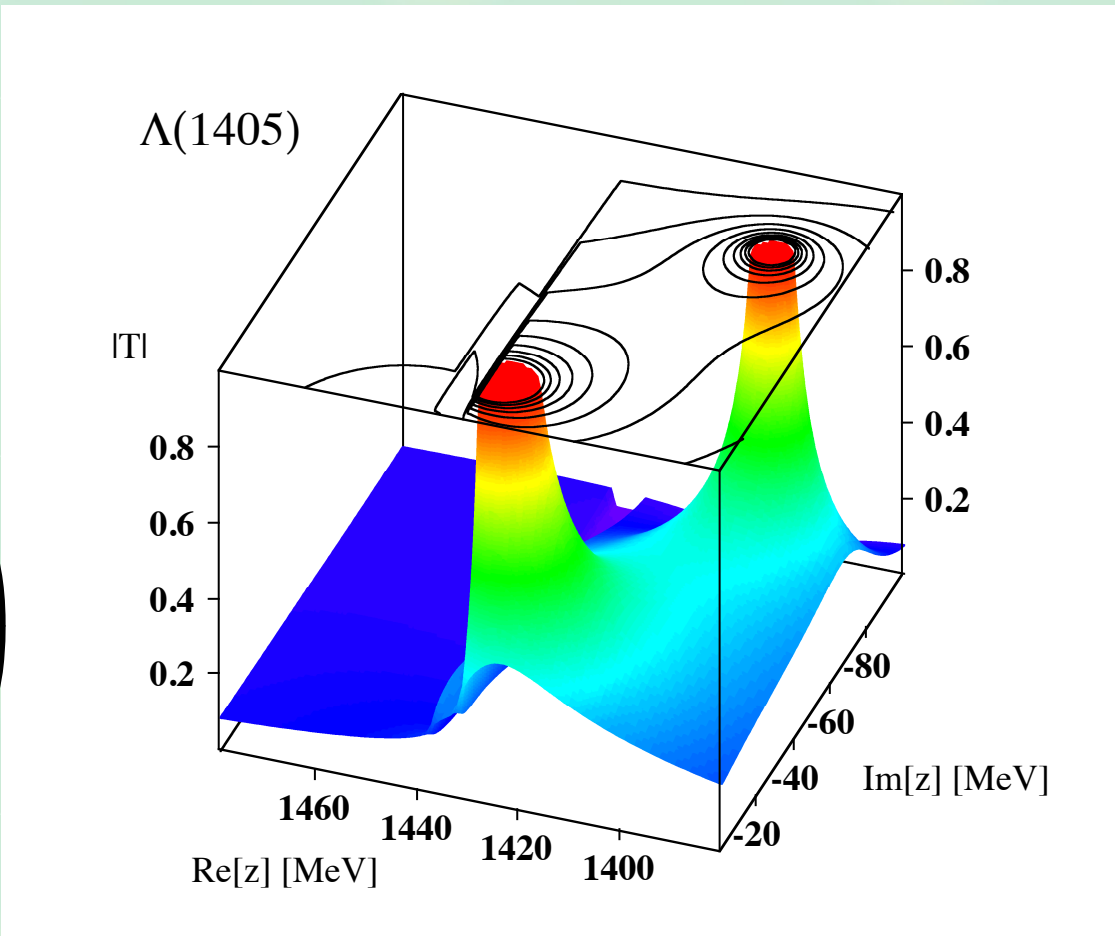
同じ量子数の極が2つ生成

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

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

物理的な“ $\Lambda(1405)$ ”は

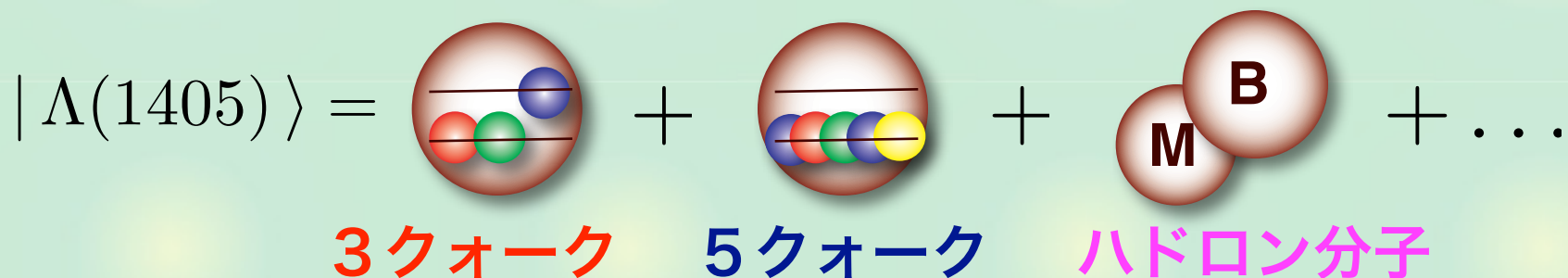
2つの状態の重ね合わせ？



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)

# 構造の解明に向けて

## $\Lambda(1405)$ の構造



(a) 3クォーク：クォーク模型に基づく構造（軌道角運動量1）

(b) 5クォーク：クォーク模型に基づく構造（軌道角運動量0）

(c) ハドロン分子：カイラル動力学模型に基づく構造

量子力学 --> 可能な状態の重ね合わせ

どのようにして構造の違い／主要な成分を**実験で観測**するか？



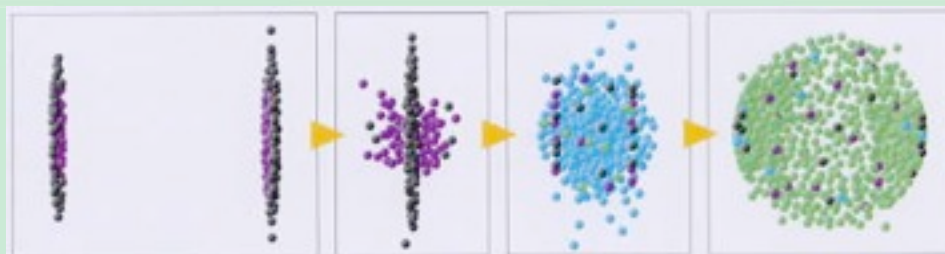
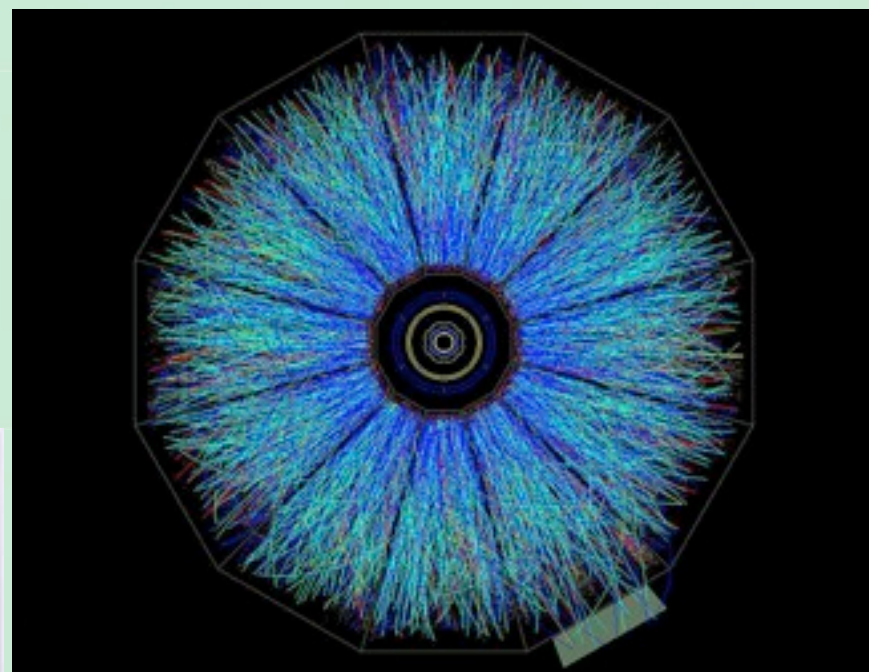
# 相対論的重イオン衝突

高エネルギーで原子核2つを衝突させる

--> クォークとグルーオンのプラズマ



多数のハドロンを観測する



# ハドロン生成量と構造

## 相対論的重イオン衝突でのハドロン生成量を計算

Multi-quark hadrons from Heavy Ion Collisions

Sungtae Cho,<sup>1</sup> Takenori Furumoto,<sup>2,3</sup> Tetsuo Hyodo,<sup>4</sup> Daisuke Jido,<sup>2</sup> Che Ming Ko,<sup>5</sup> Su Houng Lee,<sup>2,1</sup>  
Marina Nielsen,<sup>6</sup> Akira Ohnishi,<sup>2</sup> Takayasu Sekihara,<sup>2,7</sup> Shigehiro Yasui,<sup>8</sup> and Koichi Yazaki<sup>2,3</sup>

(ExHIC Collaboration)

<sup>1</sup>*Institute of Physics and Applied Physics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*

<sup>2</sup>*Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan*

<sup>3</sup>*RIKEN Nishina Center, Hirosawa 2-1, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

<sup>4</sup>*Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Meguro 152-8551, Japan*

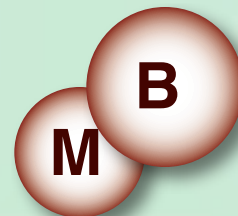
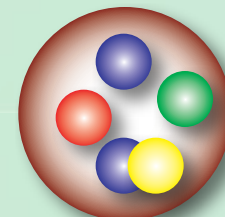
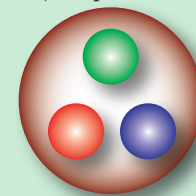
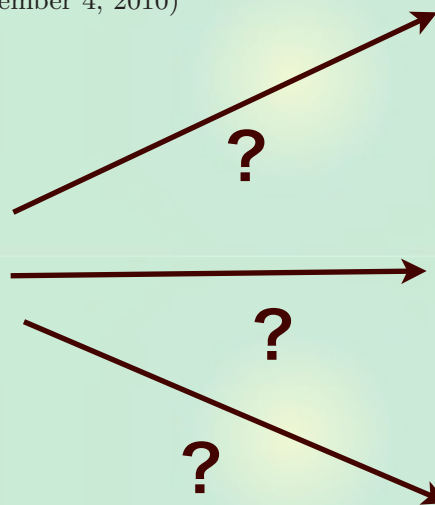
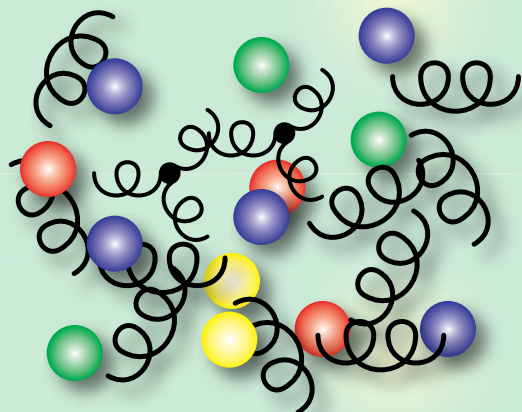
<sup>5</sup>*Cyclotron Institute and Department of Physics and Astronomy,  
Texas A&M University, College Station, Texas 77843, U.S.A.*

<sup>6</sup>*Instituto de Física, Universidade de São Paulo, C.P. 66318, 05389-970 São Paulo, SP, Brazil*

<sup>7</sup>*Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan*

<sup>8</sup>*Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator  
Research Organization (KEK), 1-1, Oho, Ibaraki 305-0801, Japan*

(Dated: November 4, 2010)

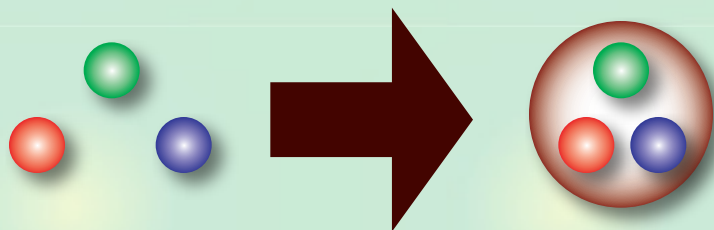


構造の違いが生成量にあらわれる？

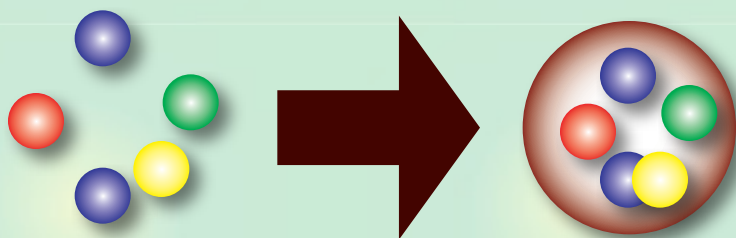
# 生成量の計算結果

相対論的重イオン衝突でのハドロン生成量を計算

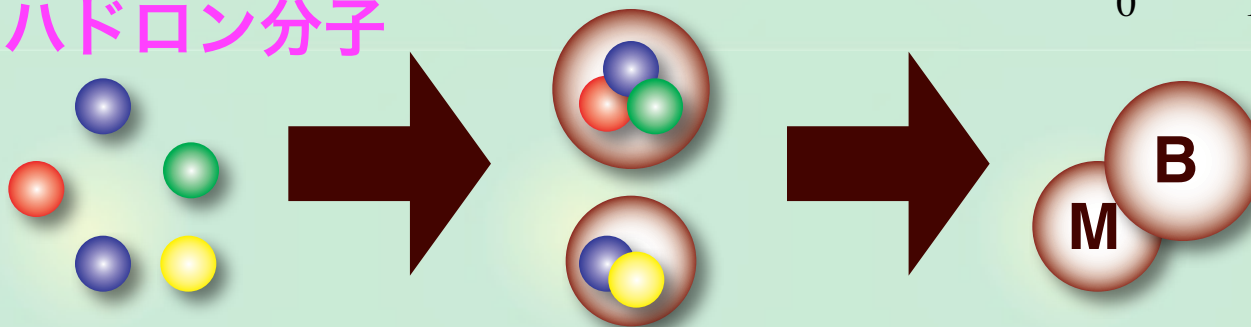
(a) 3クォーク



(b) 5クォーク



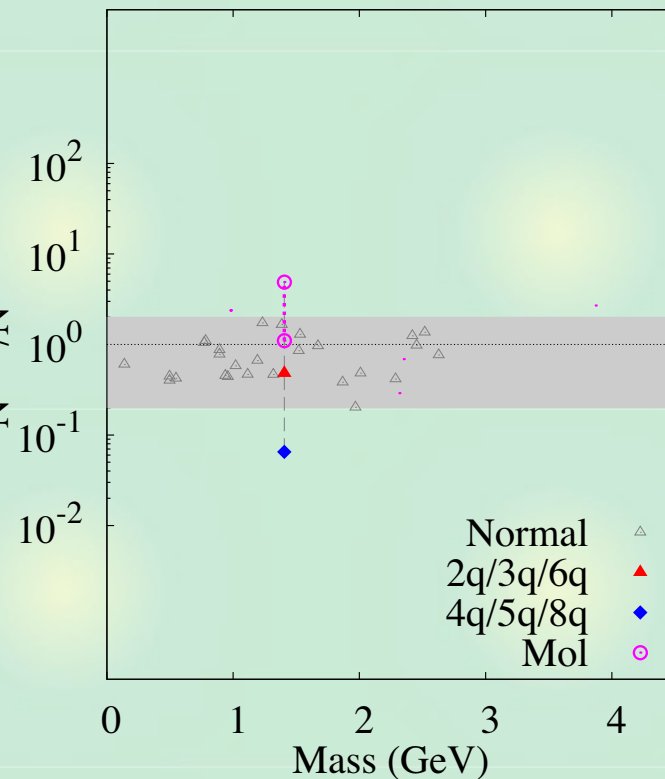
(c) ハドロン分子



生成量

$N^{\text{coal}}/N^{\text{stat}}$

Coal. / Stat. ratio at RHIC



構造の違いが生成量にあらわれる：観測で決定できる？

## まとめ

# ハドロン物理の概観とエキゾチックハドロンの構造を議論した

## 導入

ハドロン物理：低エネルギーQCDを理解する

## 通常ハドロンと構成的クォーク模型

構成的クォーク模型：バリオンの3クォーク構造

## $\Lambda(1405)$ の構造

カイラル対称性：ハドロン間の相互作用を規定

カイラル動力学模型： $\Lambda(1405)$ のハドロン分子的構造

検証方法：重イオン衝突での生成量