

# ハドロン構造研究の新展開



兵藤 哲雄

京都大学 基礎物理学研究所

2016, Oct. 4th

# 目次



## 導入：原子核・ハドロン物理

- ハドロン物理とは？



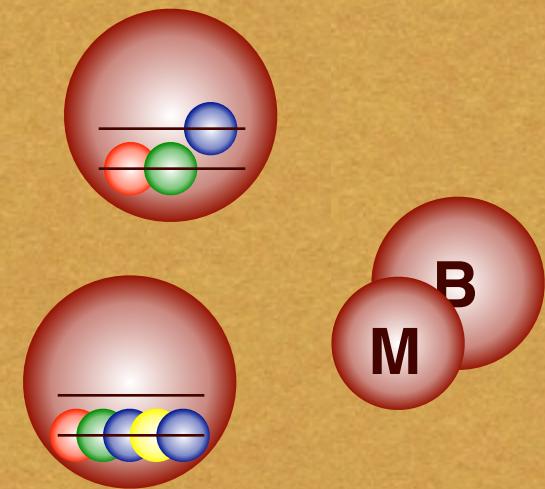
## 観測されているハドロンの分類

- エキゾチックハドロン



## ハドロン構造の研究

- 標準的な構造：クォーク模型



- より複雑な構造

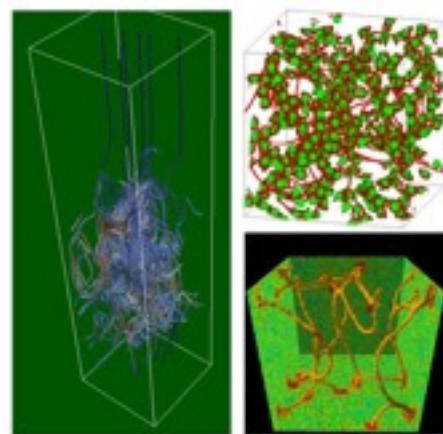
- 相対論的重イオン衝突を利用した検証

# 原子核物理学 in 理論物理学

## 量子物性理論



## 統計物理・ダイナミクス



## 素粒子

超弦理論、ヒッグス、  
統一理論、、、

原子核・ハドロン  
強い相互作用(QCD)  
の物理

## 宇宙

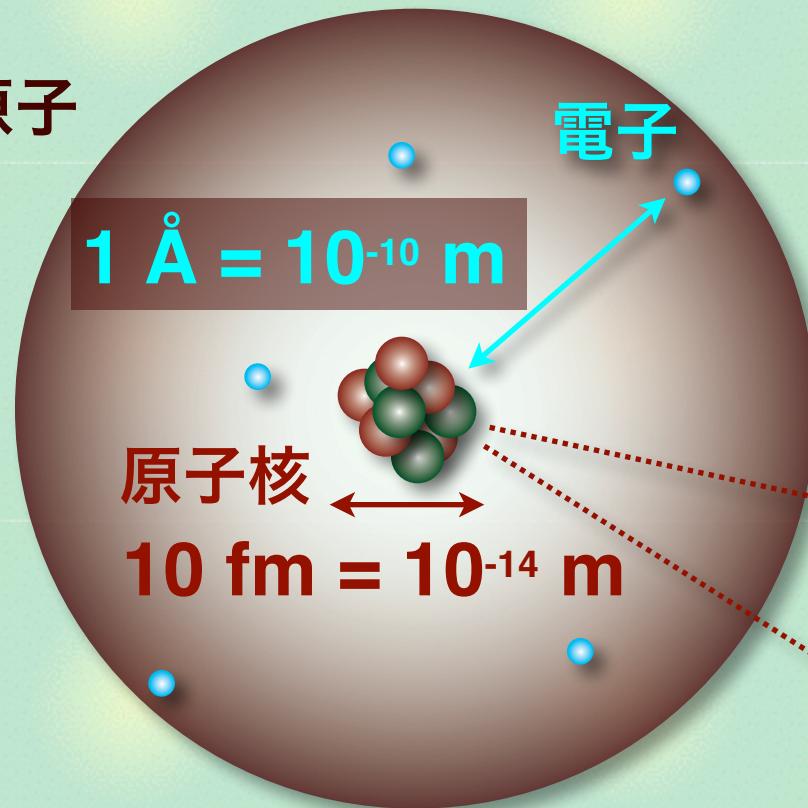
初期宇宙、暗黒物質、ブ  
ラックホール、重力波

物理学第1分野

物理学第2分野

# 原子、原子核、ハドロン

原子

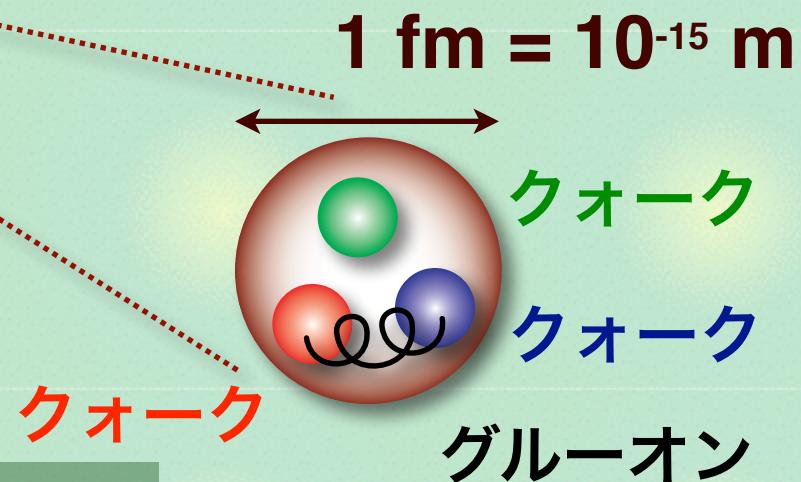


原子核物理学

原子核(多体系)の性質を核子(陽子 + 中性子)間の相互作用から理解する

ハドロン物理学

ハドロン(核子など)の性質を  
QCDから理解する

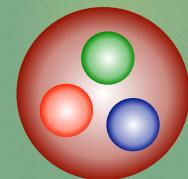


## ハドロンの分類とミクロな理論

ハドロン：観測可能な強い相互作用をする粒子

### バリオン（重粒子）

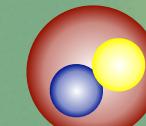
陽子、中性子、 $\Lambda$ 粒子、、、



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

自分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

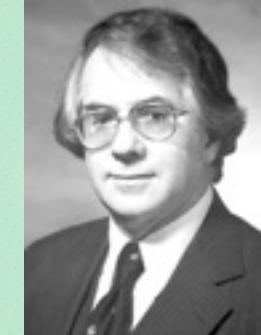
参考：長島順清「素粒子標準理論と実験的基礎」朝倉書店(1999)

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)

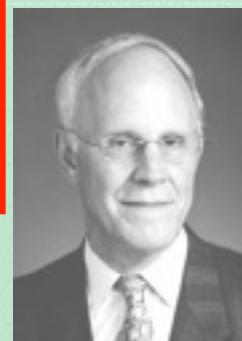


強い相互作用

-->量子色力学 QCD



(2004年)



ヒッグス粒子



(2013年)



# QCDと電磁気学

## 量子色力学 QCD：クォークとグルーオンの理論

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

↑ グルーオン      ↑ クォーク      ↑ 色自由度

The diagram illustrates the QCD Lagrangian. It shows a gluon-gluon interaction term where two gluons (represented by red arrows) interact via the field strength tensor \$G\_{\mu\nu}^{\alpha}\$. It also shows a quark-gluon interaction term where a quark (blue arrow) interacts with a gluon via the covariant derivative \$D\_{\mu}^{\alpha\beta}\$.

非可換ゲージ理論 → グルーオンの自己相互作用

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）

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

## 低エネルギーQCDの難しさ

強い相互作用はQCDで記述される

場の量子論は一般解を描き下せない

→ 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

→ 深非弾性散乱でのスケーリングとその破れ：QCDの検証

低エネルギー領域：**非摂動的效果**

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！

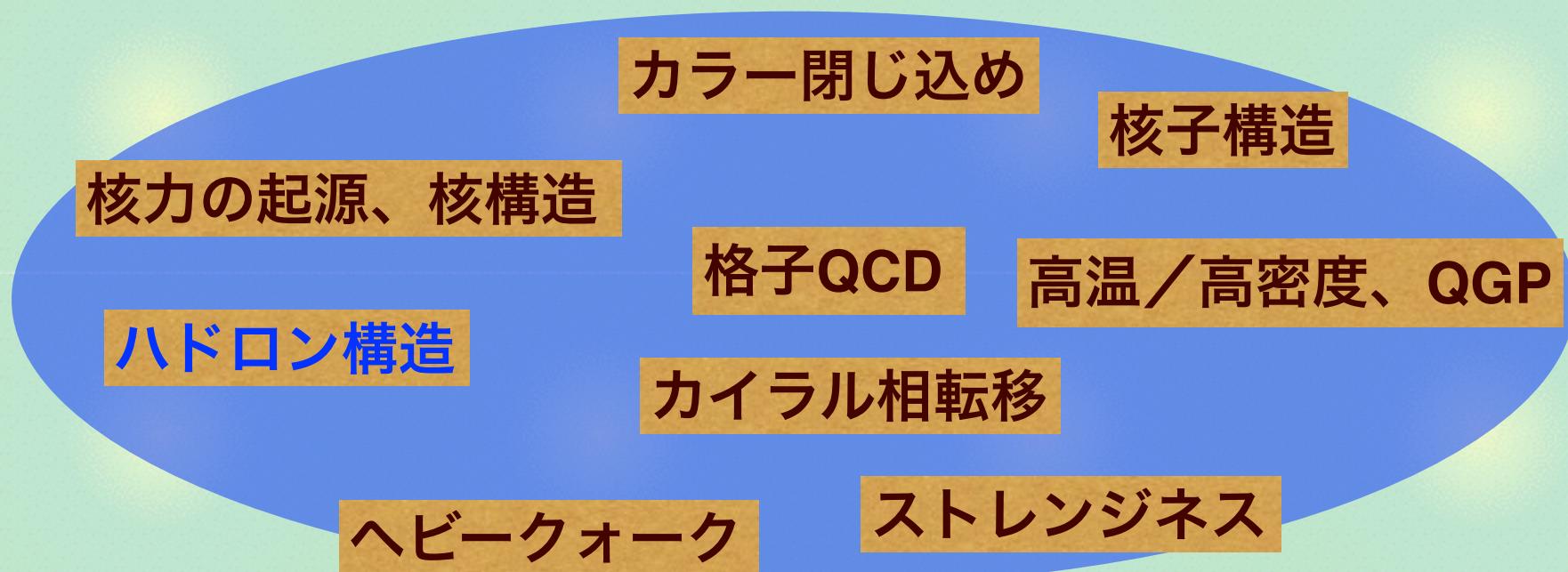
## ハドロン物理の研究対象

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-problems>

**Yang–Mills Existence and Mass Gap.** *Prove that for any compact simple gauge group  $G$ , a non-trivial quantum Yang–Mills theory exists on  $\mathbb{R}^4$  and has a mass gap  $\Delta > 0$ . Existence includes establishing axiomatic properties at least as strong as those cited in [45, 35].*

解ければ100万ドル～1億210万円



# ハドロンの多様な性質

## 観測されているハドロン

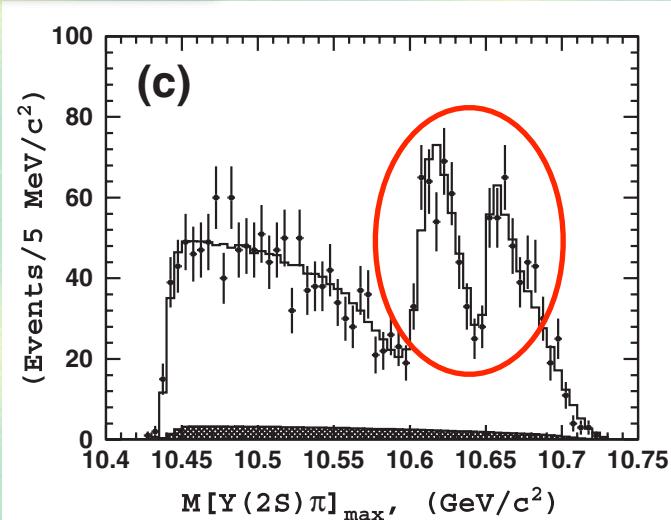
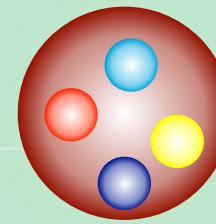
$p$	$1/2^+$	****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****	$\Sigma^+$	$1/2^+$	****	$\Xi^0$	$1/2^+$	****	$\Lambda_c^+$	$1/2^+$	****
$n$	$1/2^+$	****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$	***	$\Sigma^0$	$1/2^+$	****	$\Xi^-$	$1/2^+$	****	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***
$N(1440)$	$1/2^+$	****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****	$\Sigma^-(1385)$	$3/2^+$	****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***
$N(1520)$	$3/2^-$	***	$\Delta(1700)$	$3/2^-$	***	$\Sigma^-(1385)$	$3/2^+$	****	$\Xi(1620)$	*		$\Lambda_c(2765)^+$	*	
$N(1535)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*	$\Sigma(1480)$	*		$\Xi(1690)$	*		$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***
$N(1650)$	$1/2^-$	****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$	**	$\Sigma(1560)$	**		$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***	$\Lambda_c(2940)^+$	*	
$N(1675)$	$5/2^-$	***	$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*	$\Xi(1950)$	*		$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****
$N(1680)$	$5/2^+$	***	$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	*	$\Xi(2030)$	$\geq \frac{5}{2}^+$	***	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$	***
$N(1685)$	*		$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***	$\Xi(2120)$	*		$\Sigma_c(2800)$	*	
$N(1700)$	$3/2^-$	***	$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	***	$\Xi(2250)$	**		$\Xi_c^+(2645)$	$3/2^+$	***
$N(1710)$	$1/2^+$	***	$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**	$\Sigma(1690)$	**		$\Xi(2370)$	**		$\Xi_c^-(2790)$	$1/2^-$	***
$N(1720)$	$3/2^+$	***	$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****	$\Sigma(1730)$	$3/2^+$	*	$\Xi(2500)$	*		$\Xi_c^+(2815)$	$3/2^-$	***
$N(1860)$	$5/2^+$	***	$\Delta(2000)$	$5/2^+$	***	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$	***	$\Xi(2680)$	*		$\Xi_c^-(2930)$	*	
$N(1875)$	$3/2^-$	***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$	*	$\Sigma(1770)$	$1/2^+$	*	$\Omega^-$	$3/2^+$	****	$\Xi_c^+(2980)$	*	
$N(1880)$	$1/2^+$	**	$\Delta(2200)$	$7/2^-$	*	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$	****	$\Omega(2250)^-$	***		$\Xi_c^-(3055)$	*	
$N(1895)$	$1/2^-$	**	$\Delta(2300)$	$9/2^+$	**	$\Sigma(1840)$	$3/2^+$	*	$\Omega(2380)^-$	**		$\Xi_c^+(3080)$	*	
$N(1900)$	$3/2^+$	***	$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$	**	$\Omega(2470)^-$	***		$\Xi_c^-(3123)$	*	
$N(1990)$	$7/2^+$	**	$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*	$\Sigma(1900)$	$1/2^-$	*	$\Omega_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_c^+(2770)^0$	$3/2^+$	***
$N(2000)$	$5/2^+$	**	$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****	$\Sigma(1940)$	$3/2^+$	*	$\Xi_c^-(2800)$	*	
$N(2040)$	$3/2^+$	*	$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****	$\Sigma(1940)$	$3/2^+$	*	$\Omega(2100)$	*		$\Xi_c^+(2930)$	*	
$N(2060)$	$5/2^-$	**	$\Delta(2750)$	$13/2^-$	**	$\Sigma(1940)$	$3/2^-$	***	$\Omega(2230)$	*		$\Xi_c^-(2980)$	*	
$N(2100)$	$1/2^+$	*	$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**	$\Sigma(2000)$	$1/2^-$	*	$\Omega_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_c^+(2770)^0$	$3/2^+$	***
$N(2120)$	$3/2^-$	**	$\Delta(2950)$	$15/2^+$	**	$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****	$\Xi_c^-(2770)^0$	*		$\Xi_c^+(2770)^0$	$3/2^+$	***
$N(2190)$	$7/2^-$	****	$\Lambda$	$1/2^+$	****	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$	*	$\Xi_c^+$	*		$\Xi_c^-(2800)$	*	
$N(2220)$	$9/2^+$	****	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	****	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$	**	$\Xi_c^0$	*		$\Xi_c^+(2850)$	*	
$N(2250)$	$9/2^-$	****	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(2100)$	$7/2^-$	*	$\Xi_{cc}^+$	*		$\Xi_c^-(2900)$	*	
$N(2300)$	$1/2^+$	**	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	***	$\Sigma(2250)$	*		$\Lambda_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_c^+(2980)$	*	
$N(2570)$	$5/2^-$	**	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	****	$\Sigma(2455)$	**		$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_c^-(3055)$	*	
$N(2600)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(2620)$	*		$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$	***	$\Xi_c^+(3080)$	*	
$N(2700)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(1710)$	$1/2^+$	*	$\Sigma(3000)$	*		$\Sigma_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_c^-(3123)$	*	
$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	***	$\Lambda(1810)$	$1/2^+$	***	$\Sigma(3170)$	*		$\Sigma_b^0$	$3/2^+$	***	$\Xi_c^+(2770)^0$	$3/2^+$	***
$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	****	$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	****	$\Lambda(1840)$	$3/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_c^-(2770)^0$	*	
$\Lambda(1850)$	$3/2^+$	***	$\Lambda(1860)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(1870)$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_c^+(2800)$	*	
$\Lambda(1870)$	$7/2^+$	*	$\Lambda(1880)$	$1/2^+$	***	$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_c^-(2850)$	*	
$\Lambda(1900)$	$5/2^-$	***	$\Lambda(1920)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(1940)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_c^+(2900)$	*	
$\Lambda(1920)$	$7/2^+$	*	$\Lambda(1940)$	$1/2^+$	*	$\Lambda(1960)$	$1/2^+$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_c^-(2955)^-$	$3/2^+$	***
$\Lambda(1940)$	$5/2^+$	***	$\Lambda(1960)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(1980)$	$3/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(5945)^0$	$3/2^+$	***
$\Lambda(1960)$	$1/2^+$	*	$\Lambda(1980)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(2000)$	*		$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(5955)^-$	$3/2^+$	***
$\Lambda(2020)$	$7/2^+$	*	$\Lambda(2040)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	$1/2^+$	***
$\Lambda(2050)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(2100)$	$7/2^+$	*	$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	$1/2^+$	***
$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	*	$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***	$\Lambda(2120)$	$3/2^+$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2140)$	$9/2^+$	****	$\Lambda(2160)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(2180)$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2180)$	$5/2^-$	***	$\Lambda(2200)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(2220)$	$5/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2220)$	$9/2^+$	****	$\Lambda(2240)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(2260)$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2260)$	$5/2^-$	***	$\Lambda(2280)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(2300)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2300)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(2320)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(2340)$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2340)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(2360)$	$1/2^+$	*	$\Lambda(2380)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2380)$	$5/2^+$	***	$\Lambda(2400)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(2420)$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2420)$	$7/2^+$	*	$\Lambda(2440)$	$1/2^+$	*	$\Lambda(2460)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2460)$	$5/2^-$	***	$\Lambda(2480)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(2500)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2500)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(2520)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(2540)$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2540)$	$7/2^+$	*	$\Lambda(2560)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(2580)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2580)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(2600)$	$1/2^+$	*	$\Lambda(2620)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2620)$	$5/2^-$	***	$\Lambda(2640)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(2660)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2660)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(2680)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(2700)$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2700)$	$7/2^+$	*	$\Lambda(2720)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(2740)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2740)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(2760)$	$1/2^+$	*	$\Lambda(2780)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2780)$	$5/2^-$	***	$\Lambda(2800)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(2820)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2820)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(2840)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(2860)$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2860)$	$7/2^+$	*	$\Lambda(2880)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(2900)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2900)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(2920)$	$1/2^+$	*	$\Lambda(2940)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2940)$	$5/2^-$	***	$\Lambda(2960)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(2980)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(2980)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(3000)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(3020)$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(3020)$	$7/2^+$	*	$\Lambda(3040)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(3060)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(3060)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(3080)$	$1/2^+$	*	$\Lambda(3100)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(3100)$	$5/2^-$	***	$\Lambda(3120)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(3140)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(3140)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(3160)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(3180)$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(3180)$	$7/2^+$	*	$\Lambda(3200)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(3220)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(3220)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(3240)$	$1/2^+$	*	$\Lambda(3260)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(3260)$	$5/2^-$	***	$\Lambda(3280)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(3300)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(3300)$	$11/2^-$	***	$\Lambda(3320)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(3340)$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0$	$1/2^-$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(3340)$	$7/2^+$	*	$\Lambda(3360)$	$3/2^-$	*	$\Lambda(3380)$	$1/2^-$	*	$\Xi_b^0$	$1/2^+$	***	$\Xi_b^0(2770)^0$	*	
$\Lambda(3380)$	$13/2^+$	**	$\Lambda(3400)$	$1/2^+$	*	$\Lambda(3420)$	$1/2^-$							

# qqq/qで記述できない状態

## テトラクォーク候補(Belle)

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

$Y(5S) \rightarrow \pi^\pm + Z_b$   
 $\hookrightarrow Y(nS)(b\bar{b}) + \pi^\mp(u\bar{d}/d\bar{u})$

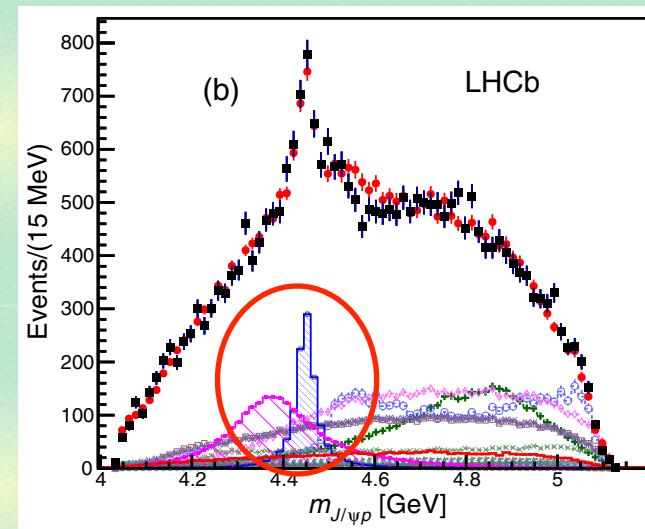
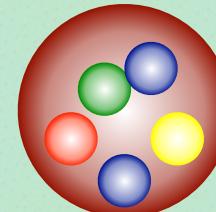


A. Bondar, et al., Phys. Rev. Lett. 108, 122001 (2012)

## ペンタクォーク候補(LHCb)

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

$\Lambda_b \rightarrow K^- + P_c$   
 $\hookrightarrow J/\psi(c\bar{c}) + p(uud)$

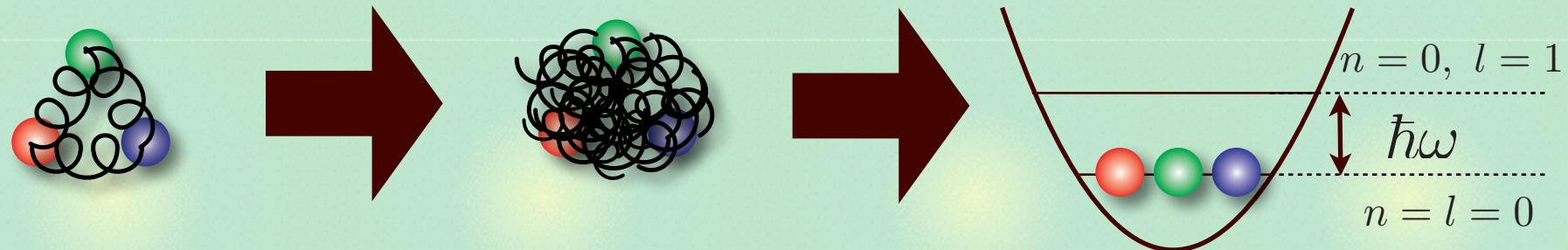


R. Aaij, et al., Phys. Rev. Lett. 115, 072001 (2015)

ごく少数(8/350)しか発見されていない。なぜ少ないのか？

# 構成子クオーク模型

QCDからクオーク模型へ：平均一体ポテンシャル



調和振動子などの閉じ込めポテンシャルに  
3つのクオークを閉じ込める（バリオンの場合）

$$\mathcal{H} = \sum_{i=1,2,3} \left( \frac{\hbar^2 p_i^2}{2m_i} + \frac{m_i\omega^2}{2} x_i^2 \right)$$

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

$$\psi_{nl} = \prod_i f_{n_i l_i}(x_i), \quad n = \sum_i n_i, \quad l = \sum_i l_i,$$

# クォークの内部自由度

クォークの波動関数：空間と内部自由度（色、香り、 спин）

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

クォークはフェルミ粒子：同じ準位を同じ状態が占有できない  
 → 粒子の入れ替えに対して完全反対称

空間：基底状態 ( $|l=0\rangle$ ) は完全対称

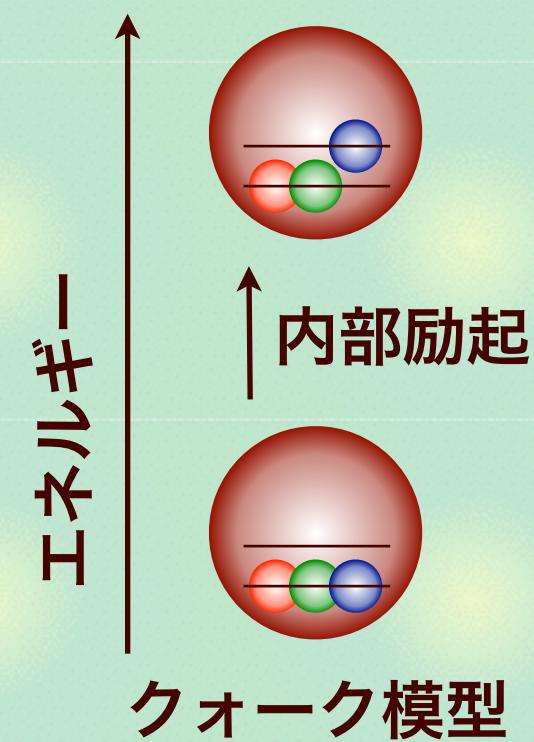
$$\psi_{00} = f_{00}(x_1) f_{00}(x_2) f_{00}(x_3)$$

カラー：完全半対称（白色）

→ スピン・フレーバー：完全対称

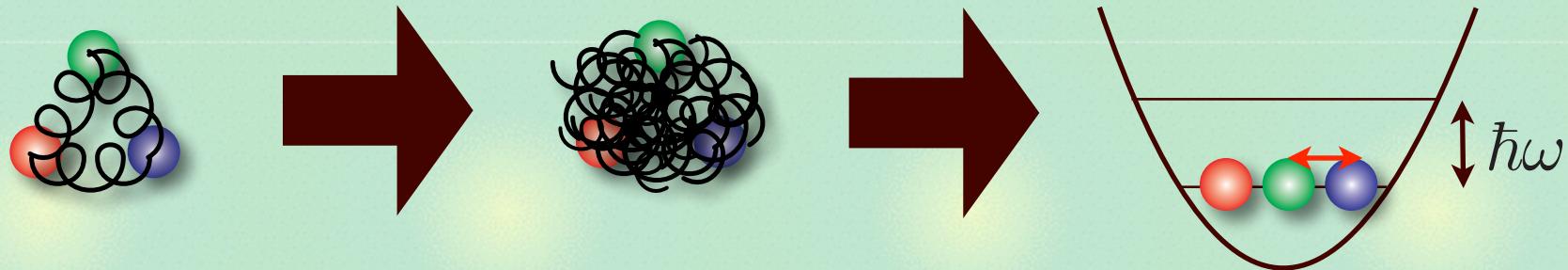
励起状態：クォークを  $|l=1\rangle$  の軌道に上げる

$$\psi_{01} = f_{00}(x_1) f_{00}(x_2) f_{01}(x_3)$$



# 構成子クオーク模型

QCDからクオーク模型へ：閉じ込めポテンシャル



平均一体ポテンシャル以外のクオーク間の相関：**残留相互作用**

例) カラースピン相互作用（1グルーオンの交換）

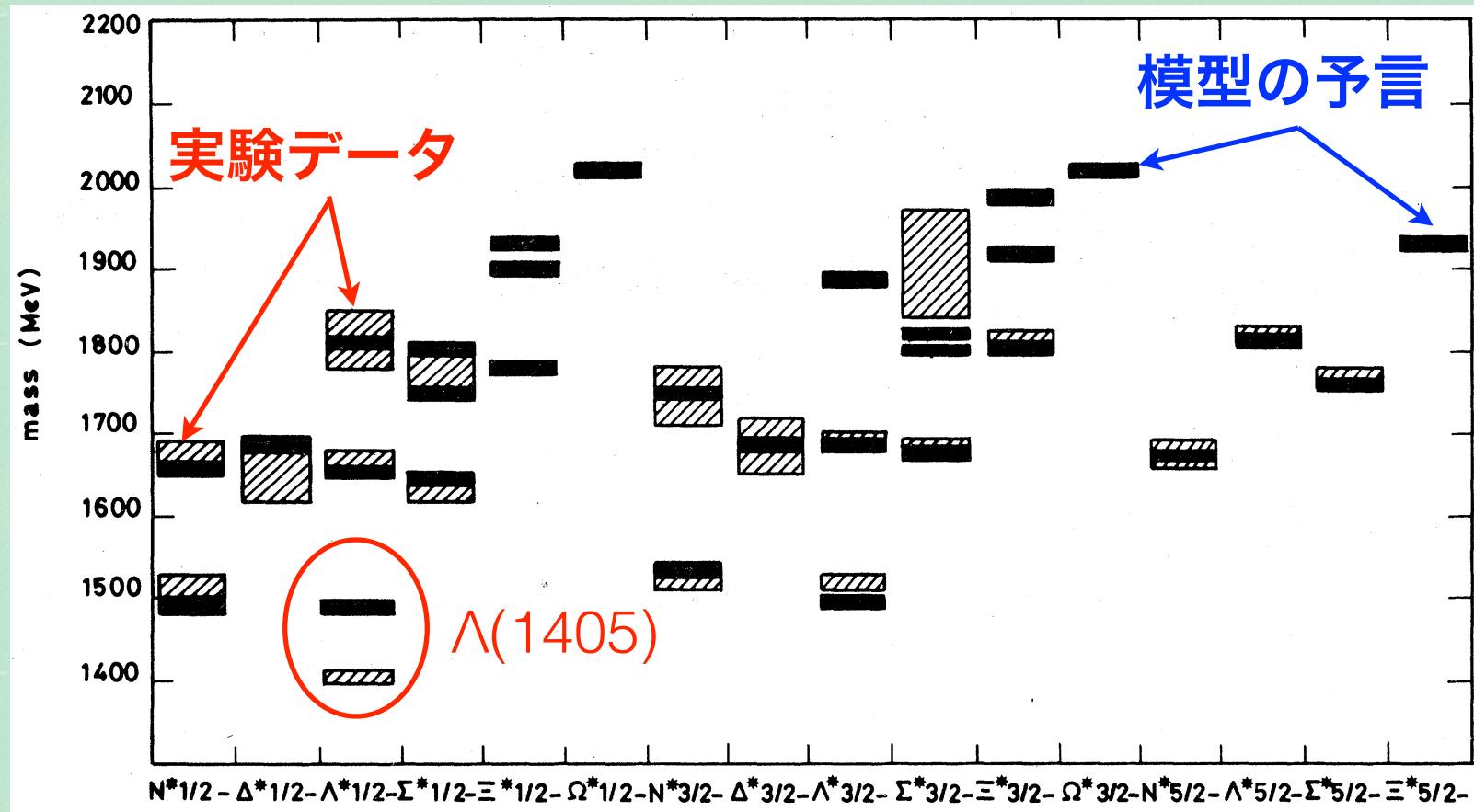
$$\mathcal{H}_{cs} = -\frac{f_{cs}}{m_i m_j} (\lambda_i^c \cdot \lambda_j^c) (\sigma_i \cdot \sigma_j)$$

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

## バリオン第一励起状態（負パリティ）のスペクトル

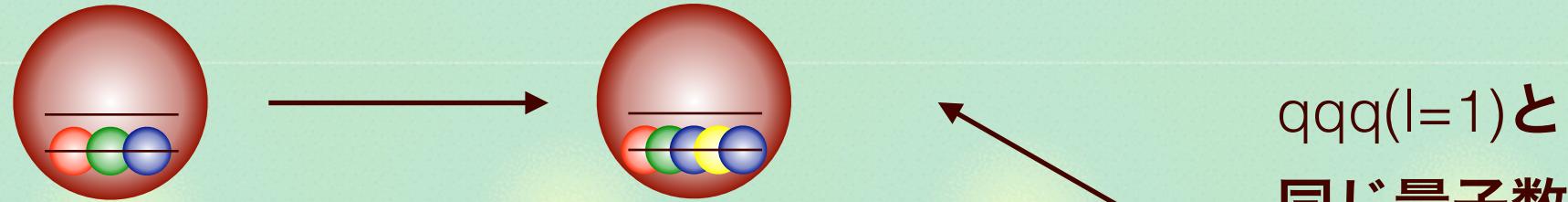
N. Isgur and G. Karl, Phys. Rev. D18, 4187 (1978)



模型の予言と実験データが幅広く一致：qqq構造が支配的  
 再現できない状態： $\Lambda(1405)$ は別の内部構造？

# 様々なハドロン励起

$q\bar{q}$ 対生成による励起：マルチクォーク状態



- クォーク間の相互作用で束縛
- $\bar{q}$ は $q$ と反対のパリティ： $qqqq\bar{q}(\ell=0)$

中間子生成による励起：ハドロン分子状態



- ハドロン間の相互作用で束縛
- 最も軽い擬スカラー中間子（南部ゴールドストーンボソン）

通常ハドロンの中にもエキゾチックハドロン的な構造？

# 構造の解明に向けて

## $\Lambda(1405)$ の可能な構造

$$|\Lambda(1405)\rangle = \text{3クォーク} + \text{5クォーク} + \text{ハドロン分子} + \dots$$

3クォーク      
 5クォーク      
 ハドロン分子

(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：ハドロン間相互作用に起因する構造

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？

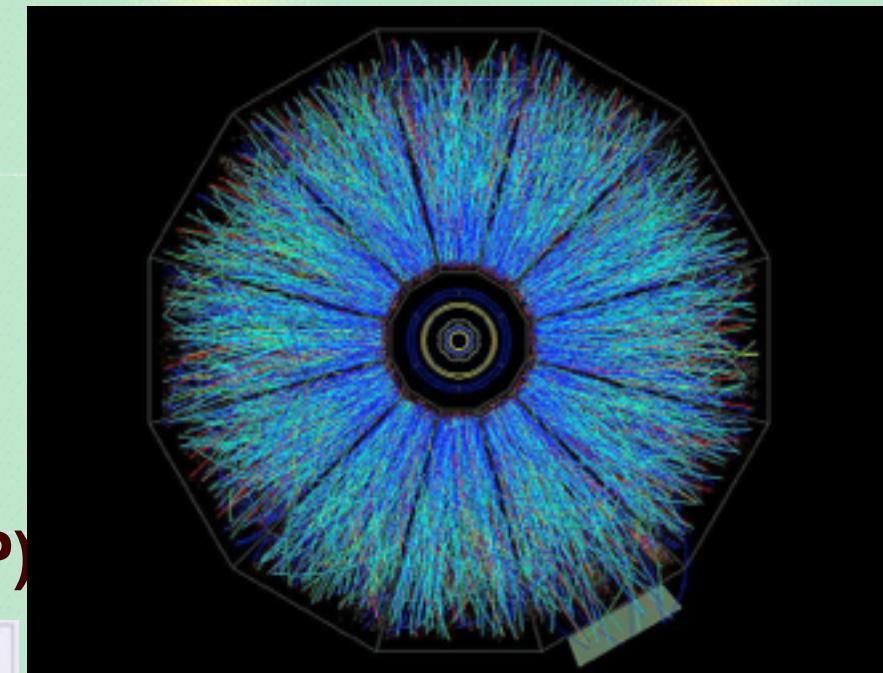
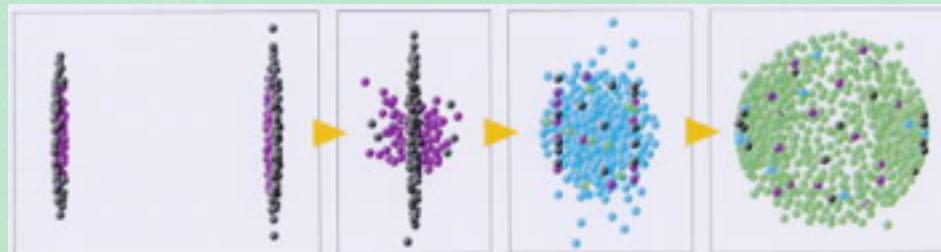
# 相対論的重イオン衝突

高エネルギーで原子核2つを衝突させる

K. Yagi, T. Hatsuda and Y. Miake, *Quark-Gluon Plasma*, Cambridge (2005)



クォークグルーオンプラズマ(QGP)



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

S. Cho, et al., Phys. Rev. Lett. 106, 212001 (2011); Phys. Rev. C 84, 064910 (2011).

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

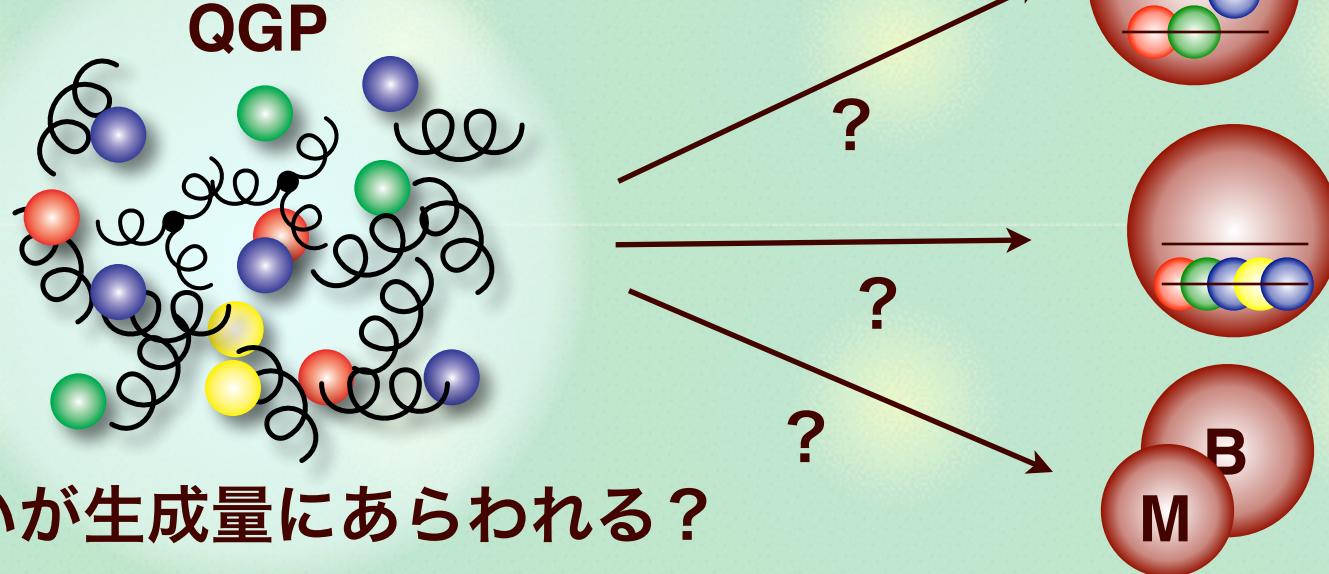
<sup>5</sup> Cyclotron Institute and Department of Physics and Astronomy,  
Texas A&M University, College Station, Texas 77843, U.S.A.

<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

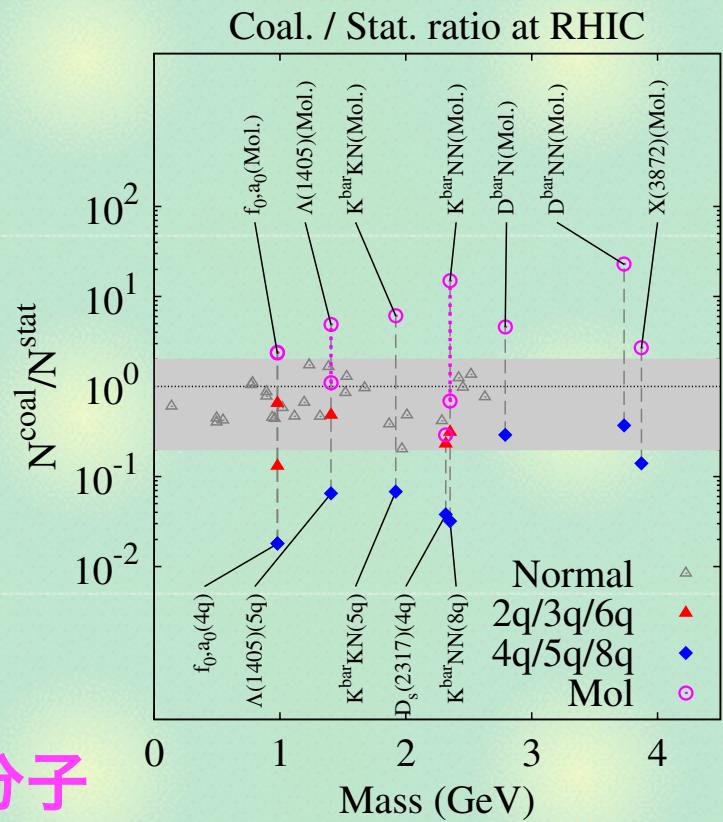
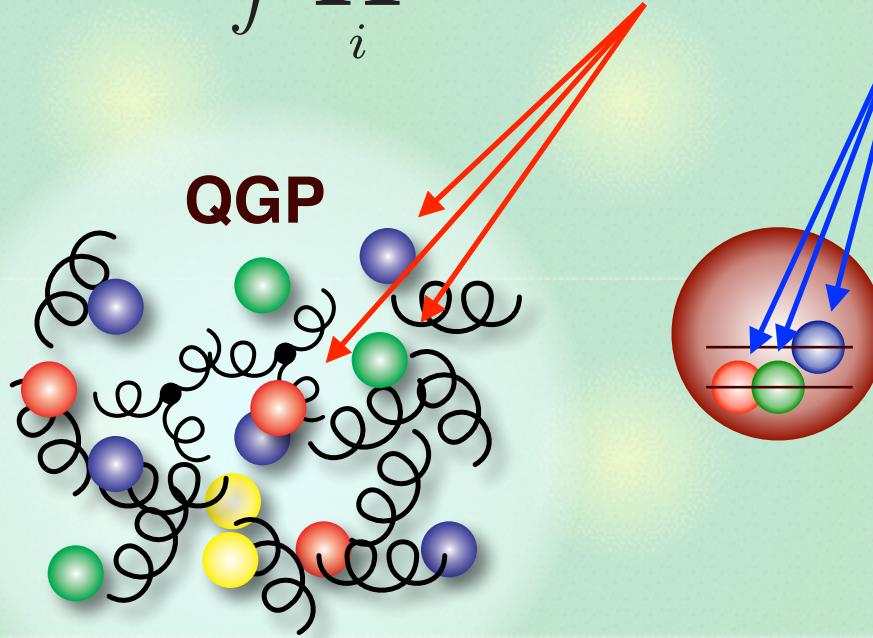
(Dated: November 4, 2010)



# 生成量の計算結果

**Coalescence model : ソースと状態の波動関数の重なりを評価**

$$N^{\text{coal}} \sim \int \prod_i dp_i dx_i f(x_i, p_i) f^W(x_1, \dots, x_n : p_1, \dots, p_n)$$



マルチクォーク << 通常 << ハドロン分子

構造の違い → 生成量：実験で決定できる？

# まとめ

ハドロンの多彩な構造とその検証方法を議論した



導入：原子核・ハドロン物理

- ハドロン物理：低エネルギーQCDを理解する



観測されているハドロンの分類

- エキゾチックハドロンはなぜ少ない？



ハドロン構造の研究

- ハドロンは多様な構造を持つ

- 重イオン衝突の生成量で構造を検証する

