

# 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？



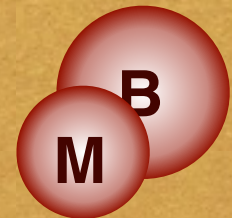
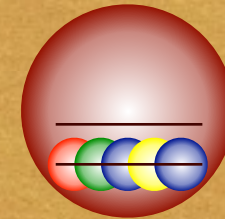
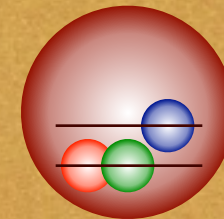
## 観測されているハドロンの分類

- 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

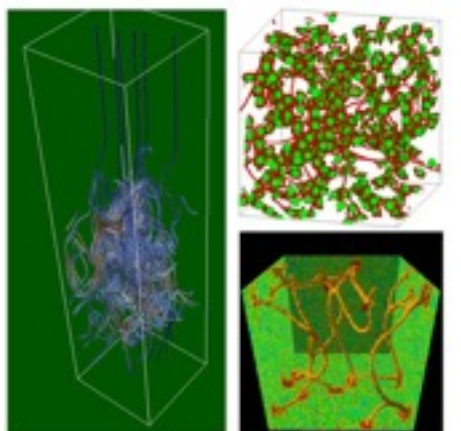


# 原子核物理学 in 理論物理学

## 量子物性理論



## 統計物理・ダイナミクス



物理学第1分野

## 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

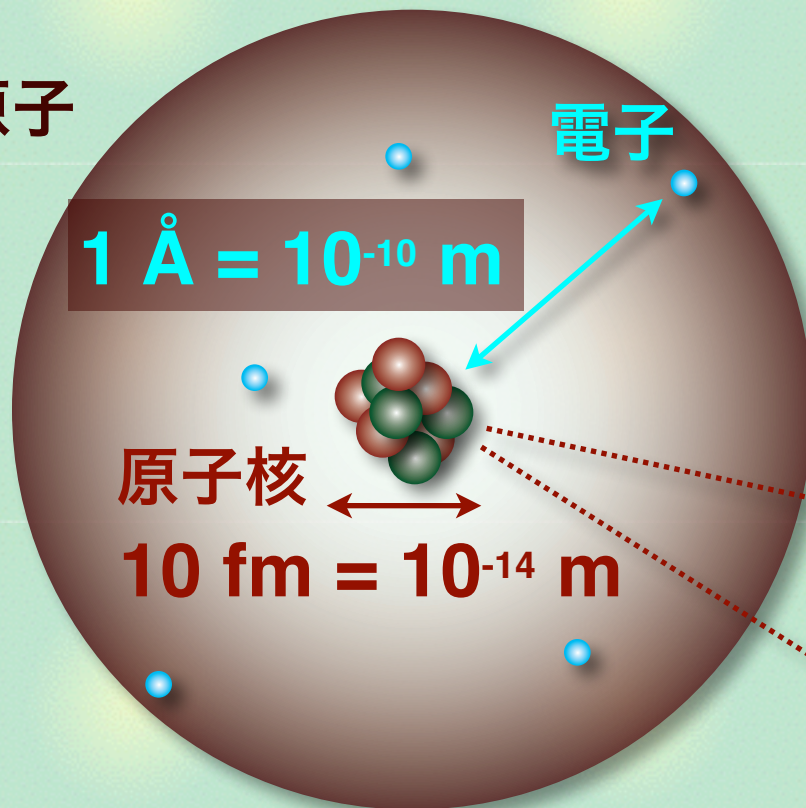
## 宇宙

初期宇宙、暗黒物質、ブ  
ラックホール、重力波

物理学第2分野

# 原子、原子核、ハドロン

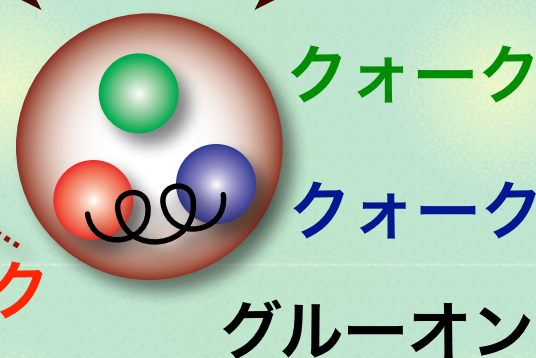
原子



## 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

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



## 原子核物理学

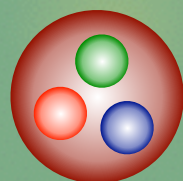
原子核(多体系)の性質を核子(陽子+  
中性子)間の相互作用から理解する

## 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）

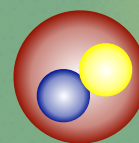
陽子、中性子、 $\Lambda$ 粒子、、、、



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

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

グルーオン                      クォーク                      色自由度

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)

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



高  
難易度 (複雑さ)

## 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-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

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

ハドロン構造

カイラル相転移

ヘビークォーク

ストレンジネス



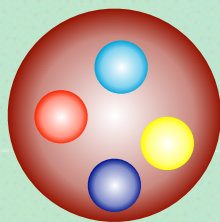
qqq/qq̄で記述できない状態

テトラクォーク候補(Belle)

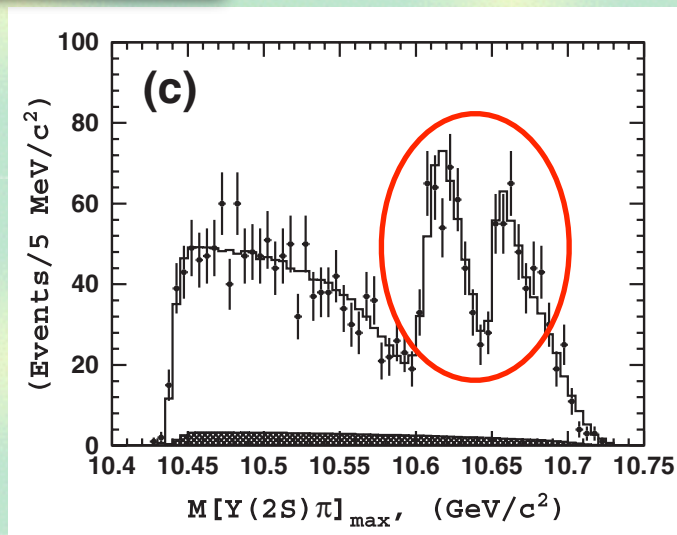
:  $Z_b(10610)$ ,  $Z_b(10650)$

$Y(5S) \rightarrow \pi^\pm + Z_b$

$\hookrightarrow Y(nS)(b\bar{b}) + \pi^\mp(u\bar{d}/d\bar{u})$



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

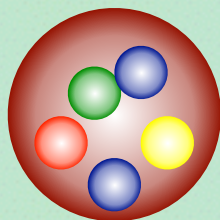


ペンタクォーク候補(LHCb)

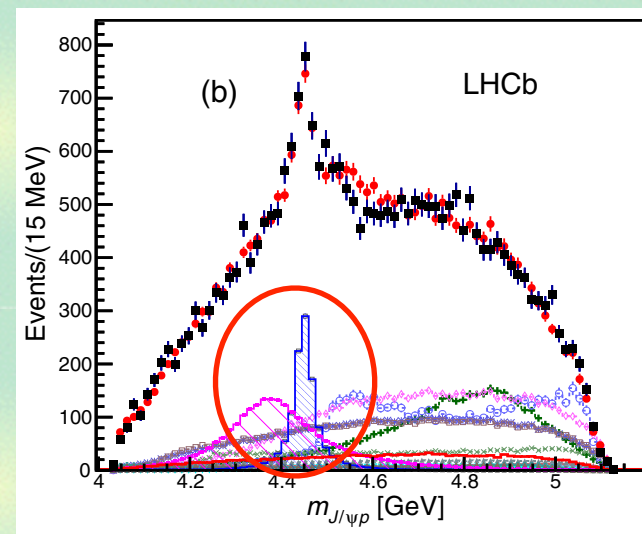
:  $P_c(4450)$ ,  $P_c(4380)$

$\Lambda_b \rightarrow K^- + P_c$

$\hookrightarrow J/\psi(c\bar{c}) + p(uud)$



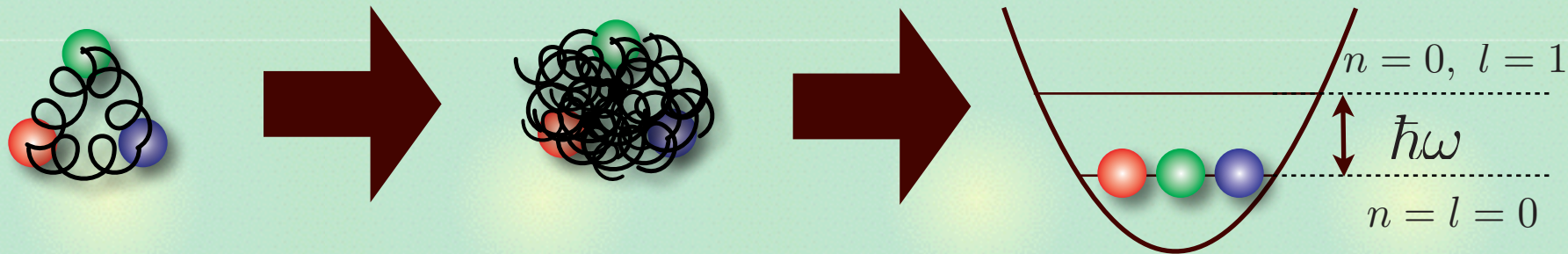
R. Aaij, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 115, 072001 (2015)



ごく少数(8/350)しか発見されていない。なぜ少ないのか？

# 構成子クォーク模型

QCDからクォーク模型へ：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)

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

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

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

# 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、スピン）

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

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（ $l=0$ ）は**完全対称**

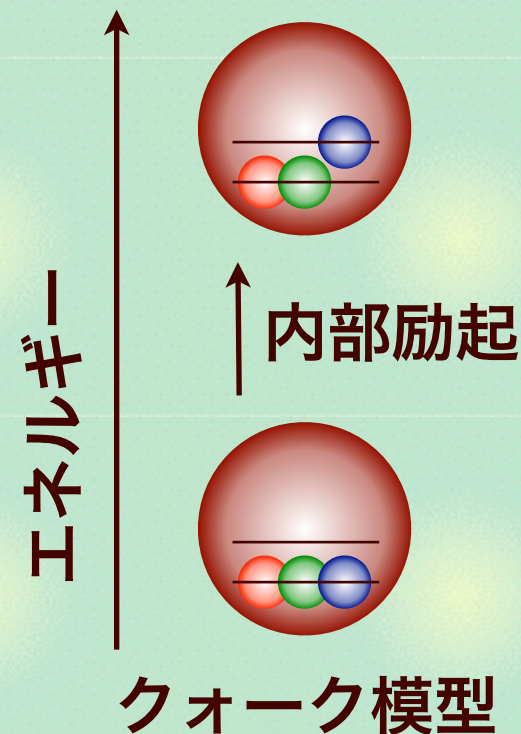
$$\psi_{00} = f_{00}(\mathbf{x}_1) f_{00}(\mathbf{x}_2) f_{00}(\mathbf{x}_3)$$

カラー：**完全半対称**（白色）

→ スピン・フレーバー：**完全対称**

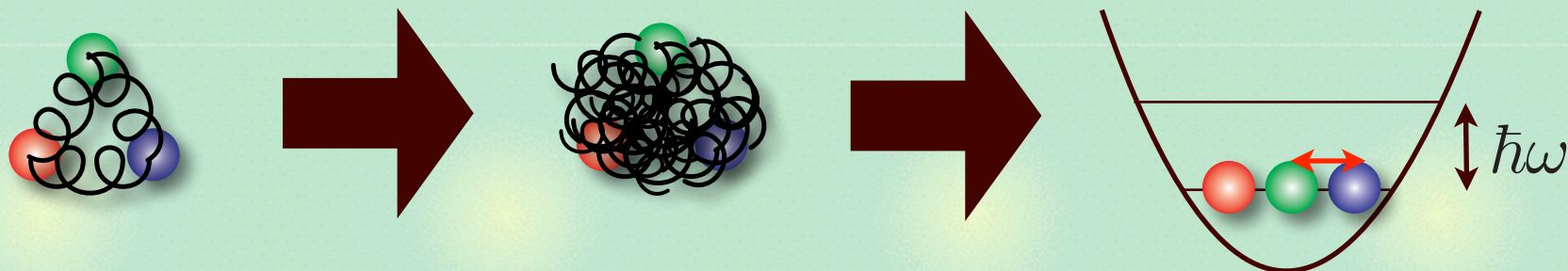
励起状態：クォークを $l=1$ の軌道に上げる

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



# 構成子クォーク模型

QCDからクォーク模型へ：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)

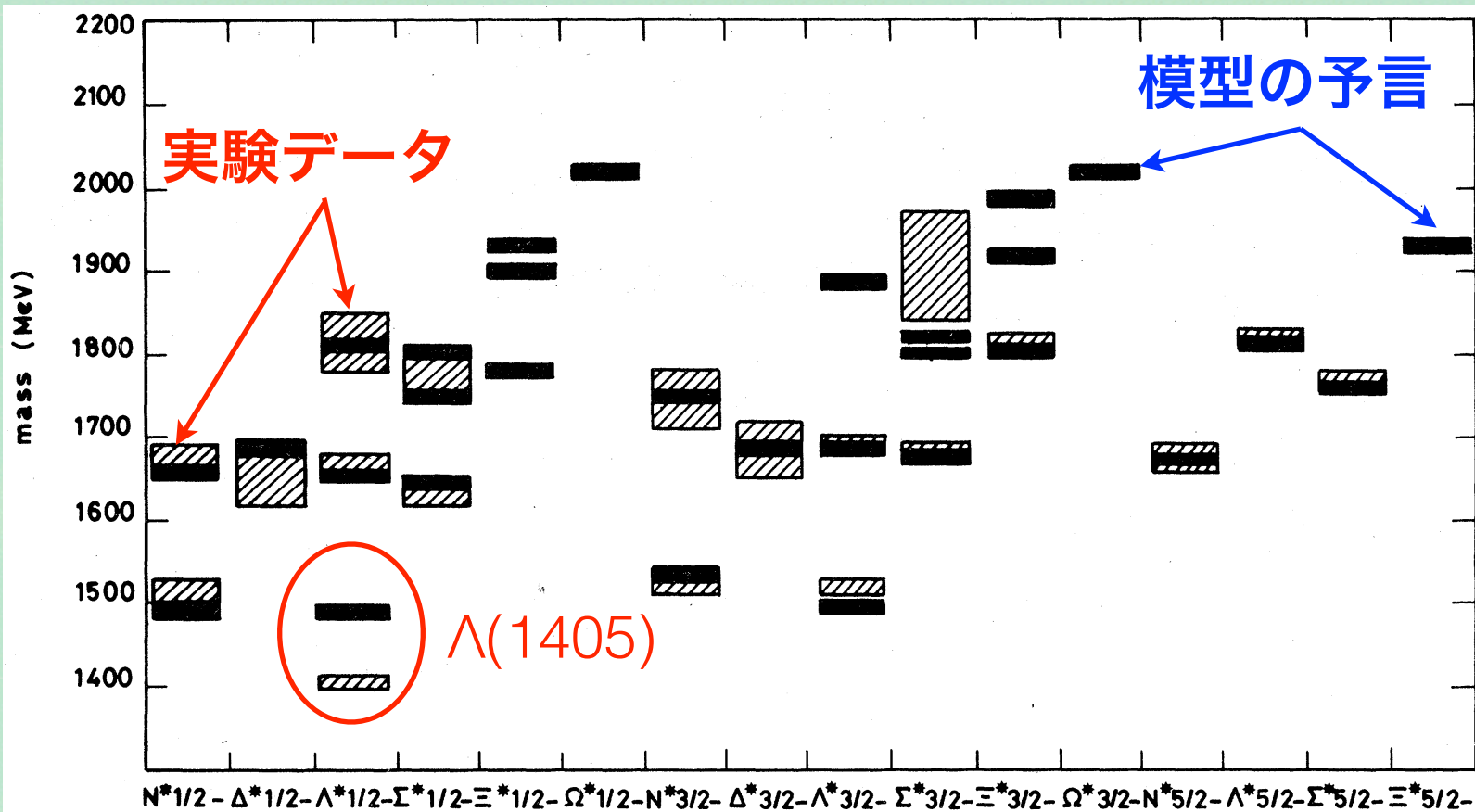
$$\mathcal{H}_{cs} = -\frac{f_{cs}}{m_i m_j} (\lambda_i^c \cdot \lambda_j^c) (\sigma_i \cdot \sigma_j)$$

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？

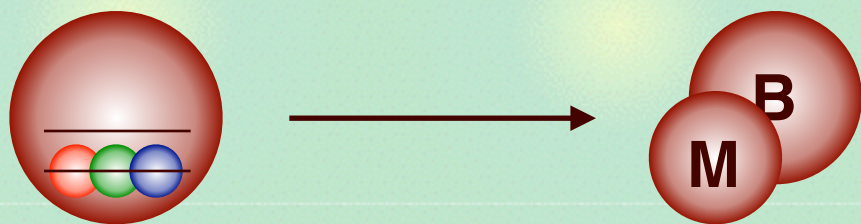
# 様々なハドロン励起

$q\bar{q}$ 対生成による励起：マルチクォーク状態



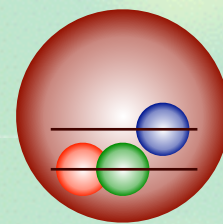
- クォーク間の相互作用で束縛
- $\bar{q}$ は $q$ と反対のパリティ： $qqqq\bar{q}(l=0)$

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）

$qqq(l=1)$ と  
同じ量子数



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

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

The diagram illustrates the decomposition of the  $\Lambda(1405)$  state into three possible configurations:

- 3クォーク (3 quarks):** A large red sphere containing three smaller spheres (red, green, blue) on two horizontal lines, representing a baryon.
- 5クォーク (5 quarks):** A large red sphere containing five smaller spheres (red, green, blue, yellow, blue) on two horizontal lines, representing a pentaquark.
- ハドロン分子 (hadron molecule):** Two separate red spheres, one labeled 'M' and one labeled 'B', representing a molecule of two hadrons.

(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

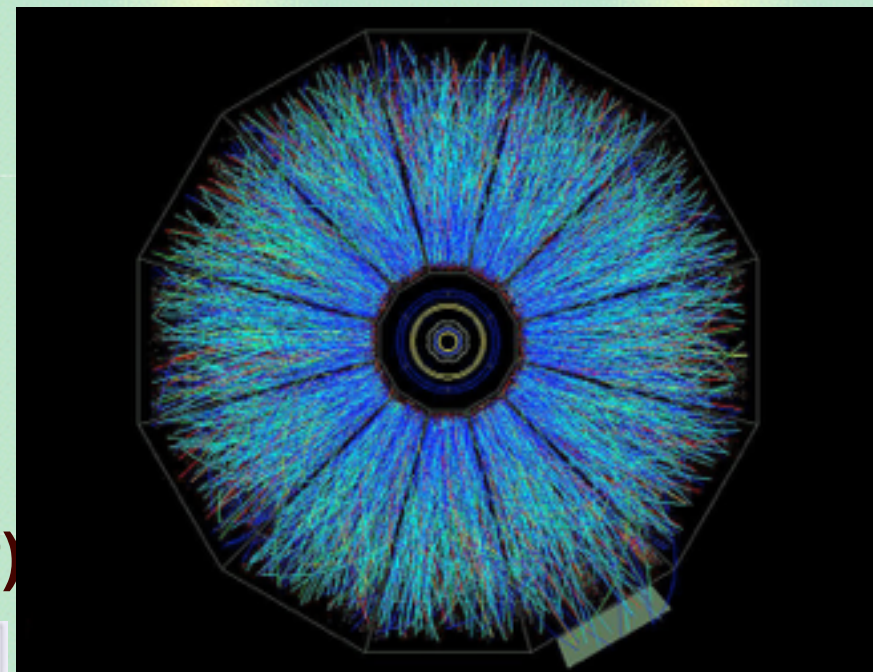
量子力学 → 可能な状態の重ね合わせ

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？

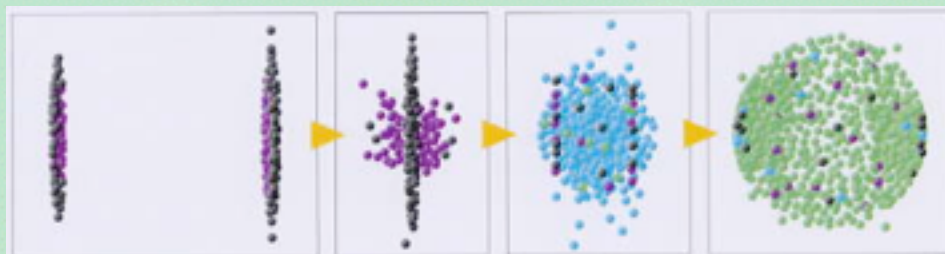
# 相対論的重イオン衝突

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

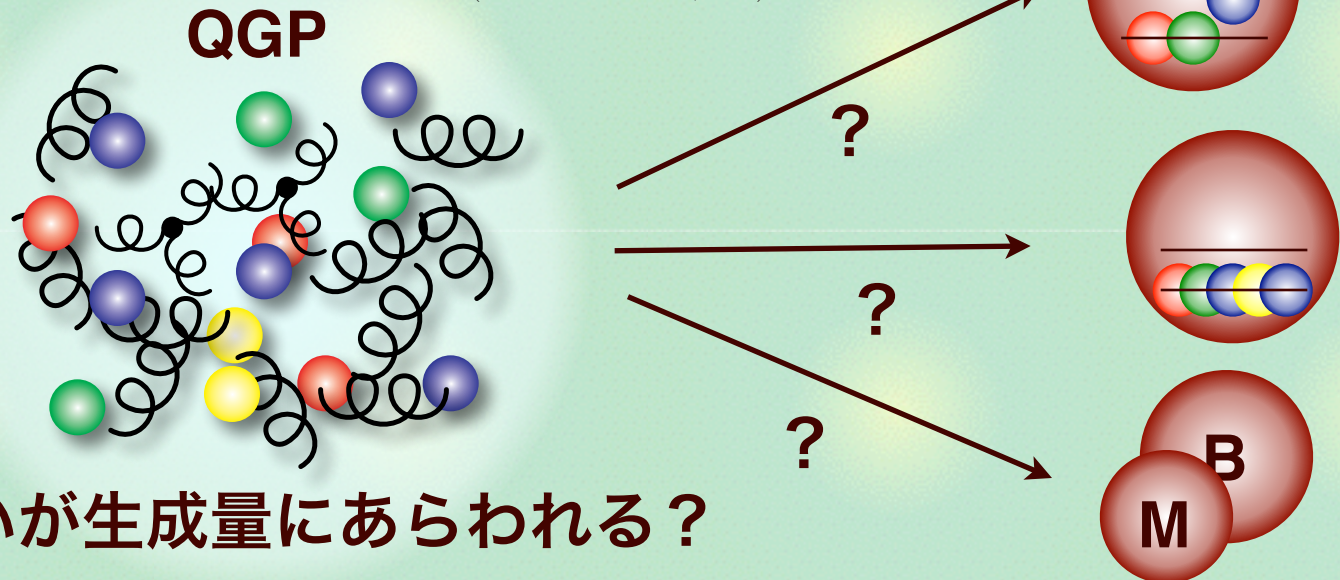
<sup>5</sup>Cyclotron Institute and Department of Physics and Astronomy,  
Texas A&M University, College Station, Texas 77843, U.S.A.

<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)

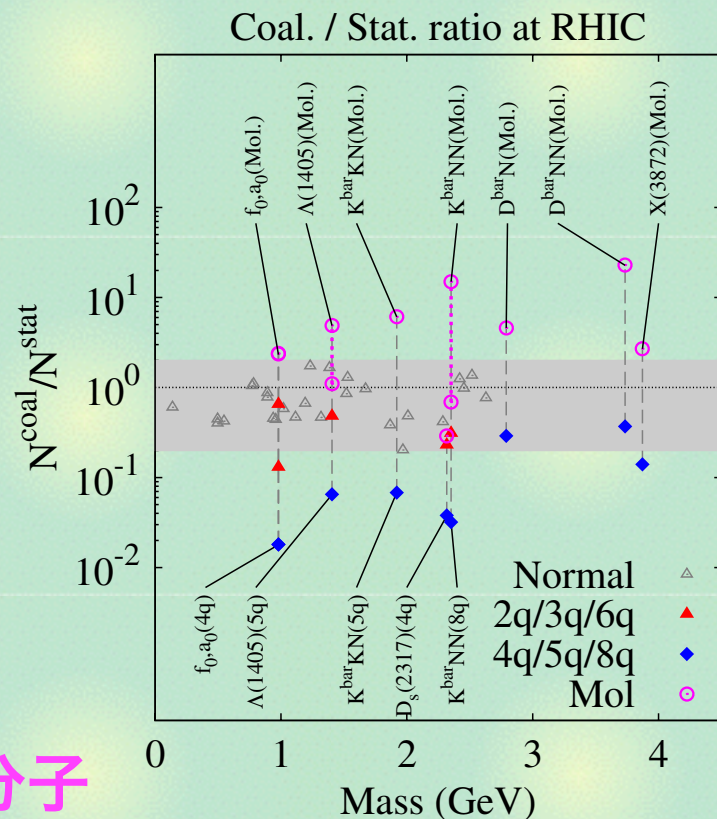
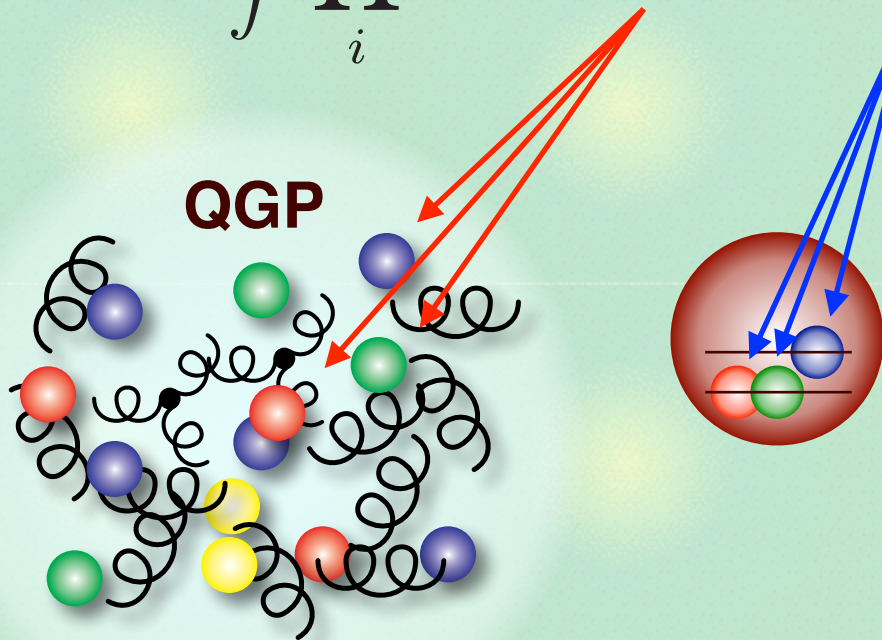


構造の違いが生成量にあらわれる？

# 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

$$N^{\text{coal}} \sim \int \prod_i dp_i dx_i f(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}_i) f^W(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n : \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n)$$



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



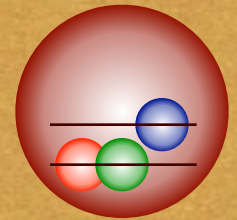
## 導入：原子核・ハドロン物理

- 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

