

# ハドロン励起状態の 多様性とその検証



兵藤 哲雄

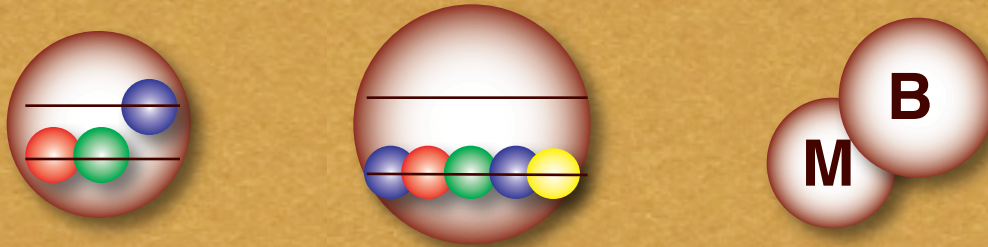
東京工業大学 理工学研究科



## 目次

 導入 バリオン励起状態の構造

- ・ 構成子クォーク模型 (3クォーク)
- ・ エキゾチック構造 (5クォーク、ハドロン分子)

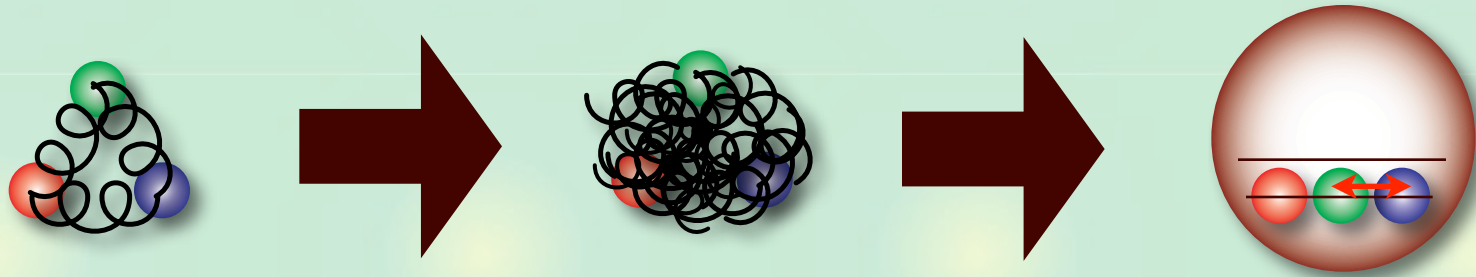
  $\Lambda(1405)$ の構造の実験的検証

- ・ 相対論的重イオン衝突の生成量

 まとめ

# 構成子クォーク模型

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)

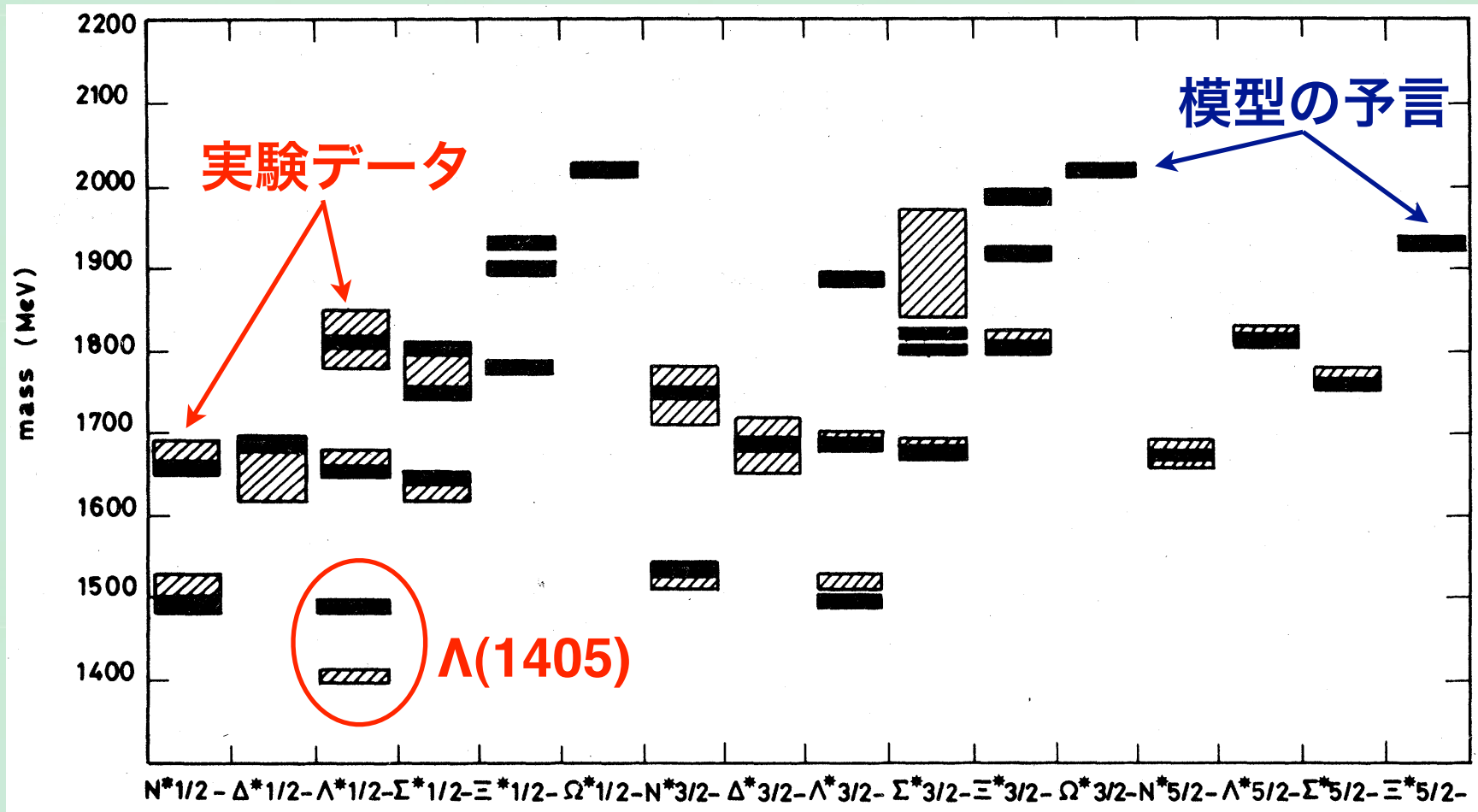
$$\mathcal{H}_{cs} = -\frac{f_{cs}}{m_i m_j} (\lambda_i^c \cdot \lambda_j^c) (\sigma_i \cdot \sigma_j)$$

対称性で決めた波動関数 --> バリオン基底状態をよく記述

# 励起状態の実験との比較

## 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

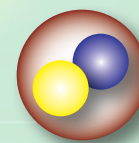
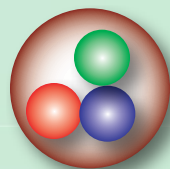
クォーク模型：対称性から決まる波動関数＋残留相互作用の摂動

--> 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

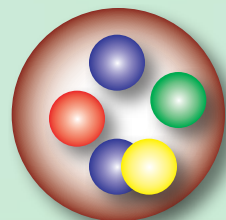


上記の分類にあてはまらないもの、その他の構造

--> **エキゾチックハドロン**

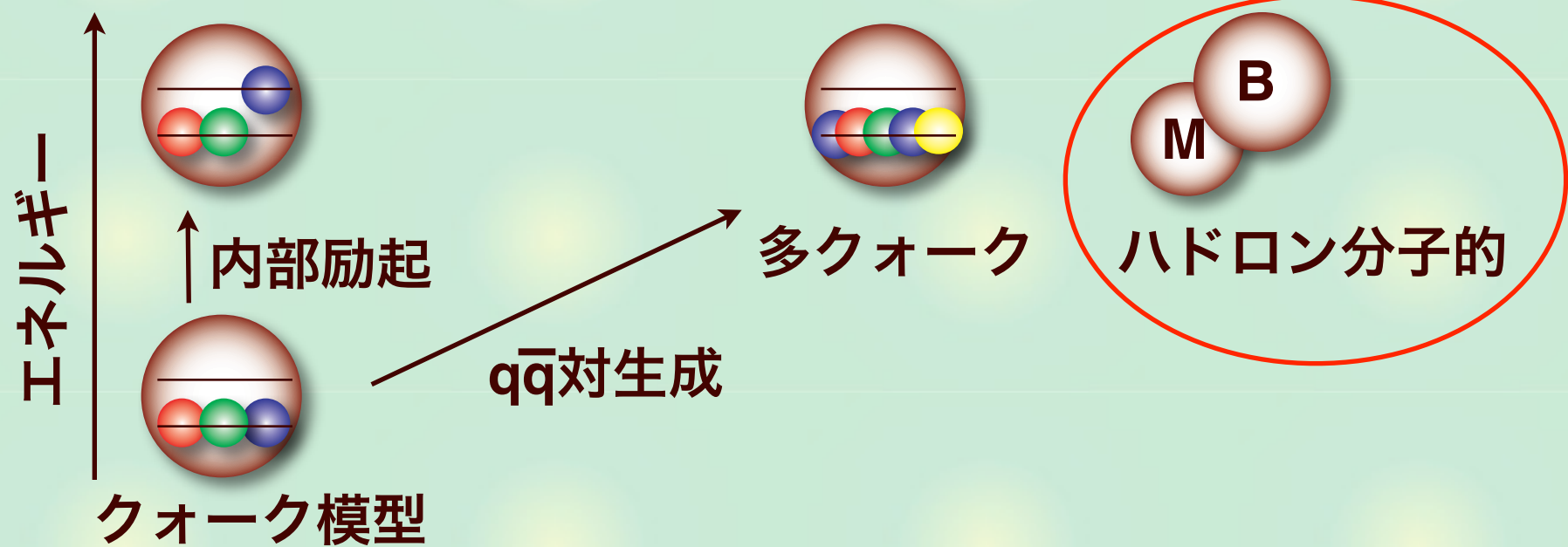
条件：カラー白色

例) 4クォーク＋反クォーク (ペンタクォーク)



# 閾値付近の分子的構造

通常ハドロン以外の構造

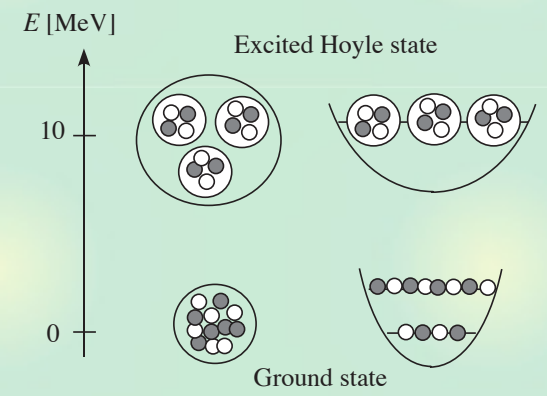


励起状態：2ハドロン状態へ崩壊

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

## <sup>12</sup>C Hoyle状態



# カイラル動力学模型

## ハドロン分子を記述する模型：カイラル動力学

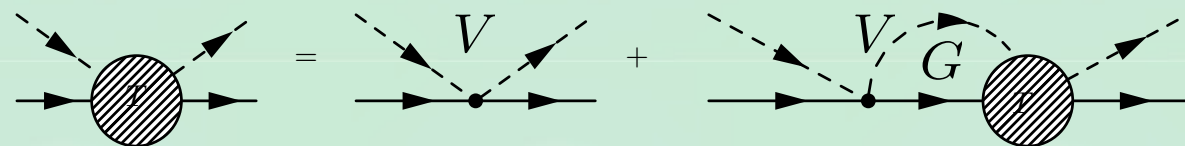
T. Hyodo, D. Jido, Prog. Part. Nucl. Phys. 67, 55 (2012)

兵藤哲雄、慈道大介「カイラル動力学とK中間子を含むハドロン分子的状态」

日本物理学会誌 第67巻第4号 226 (2012)

### リップマンシュヴィンガー方程式

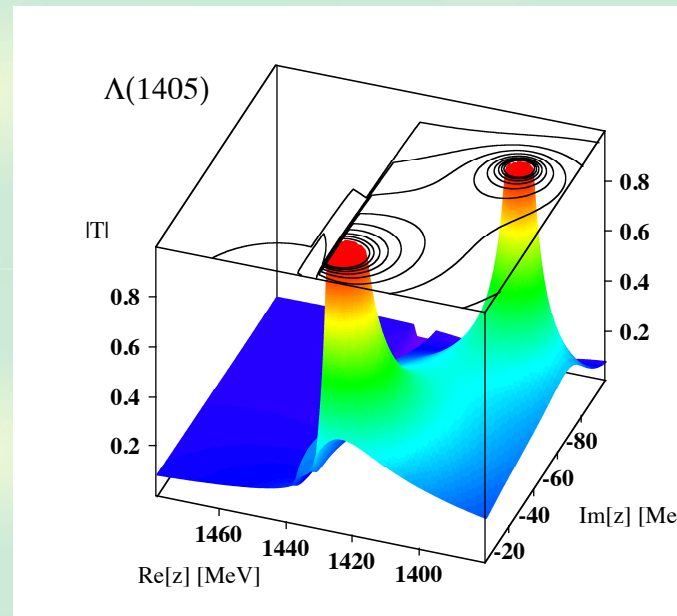
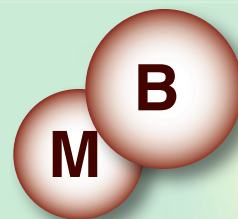
$$T = V + VGT$$



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

### 散乱振幅 T

--> 散乱断面積、位相のずれ、  
共鳴状態

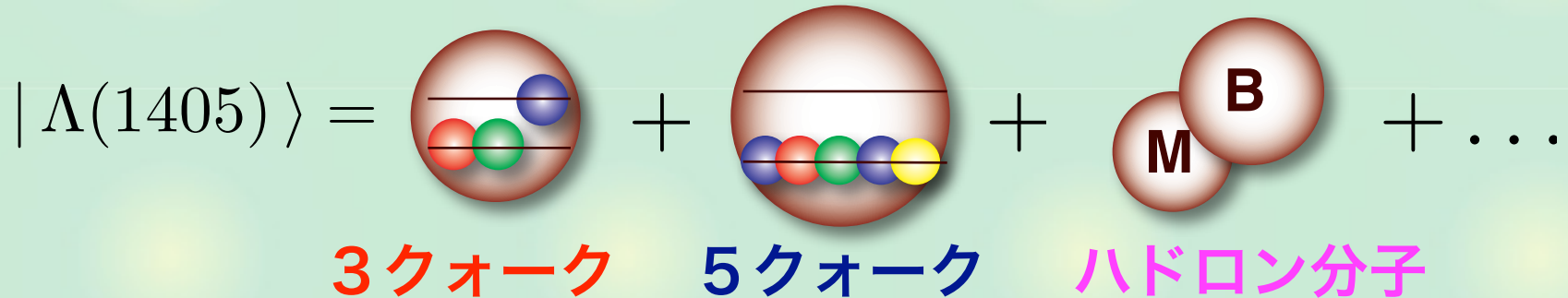


**Λ(1405)：メソンとバリオンの分子的状态**



# 構造の解明に向けて

$\Lambda(1405)$ の構造： $J^P=1/2^-$



(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？

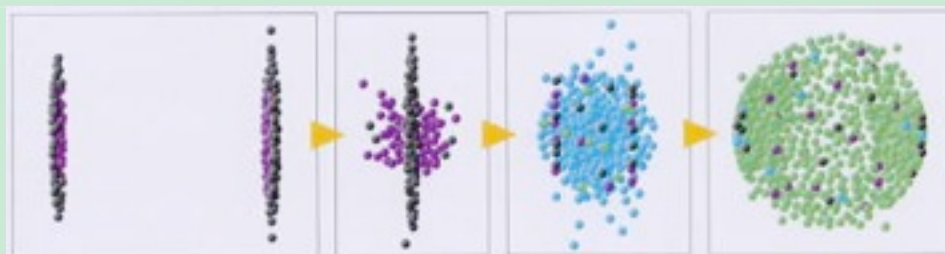
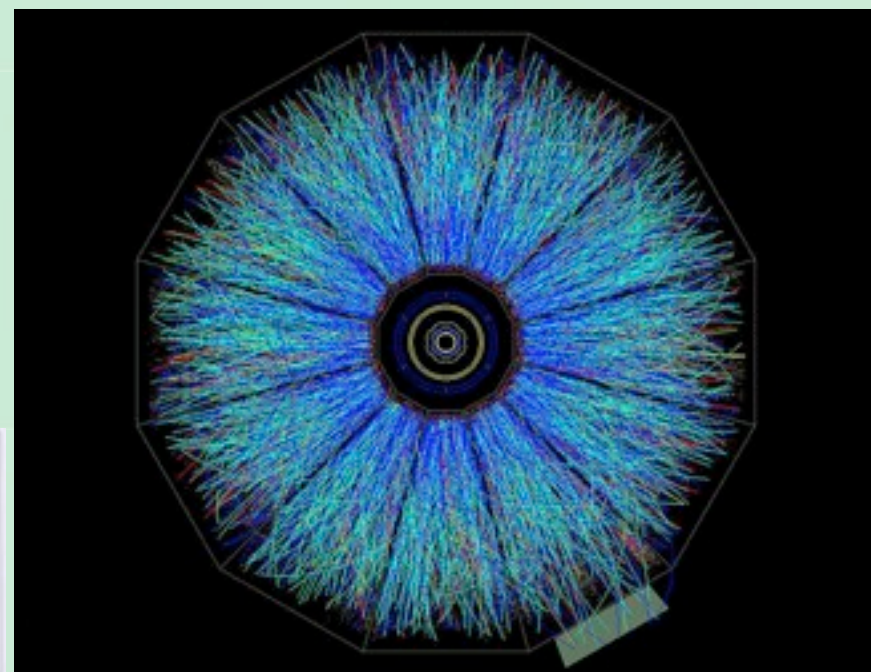
# 相対論的重イオン衝突

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



# ハドロン生成量と内部構造

## 相対論的重イオン衝突でのハドロン生成量を計算

PRL 106, 212001 (2011)

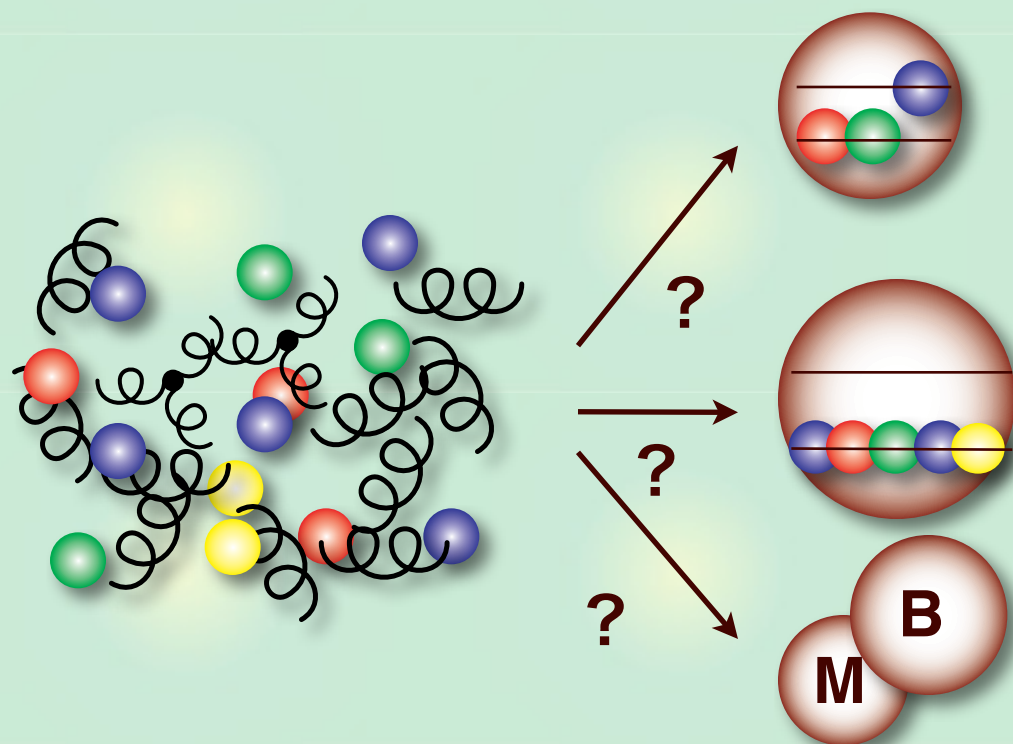
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
27 MAY 2011

### Identifying Multiquark 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 Houn Lee,<sup>1,2</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)



### 統計模型

- 熱平衡
- 通常ハドロンを記述

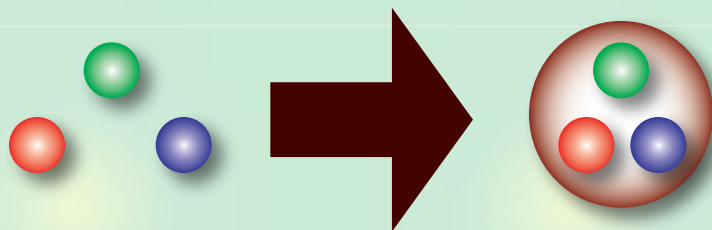
### コアレッセンス模型

- 波動関数の重なり
- 内部構造を反映

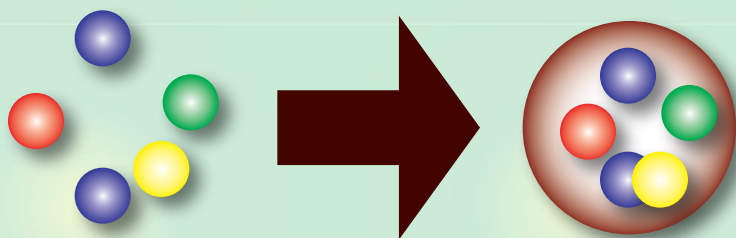
# 生成量の計算結果

ハドロン生成量をコアレッセンスモデルで計算し統計モデルと比較

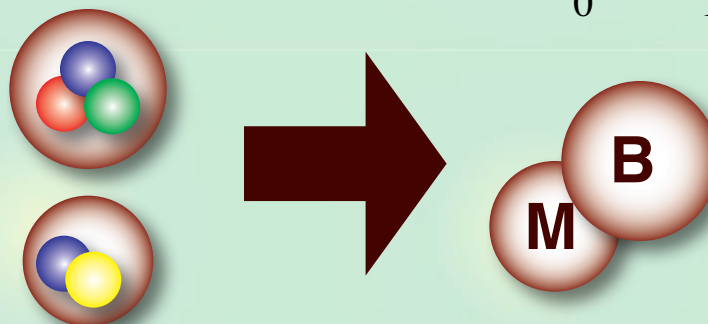
(a) 3クォーク



(b) 5クォーク



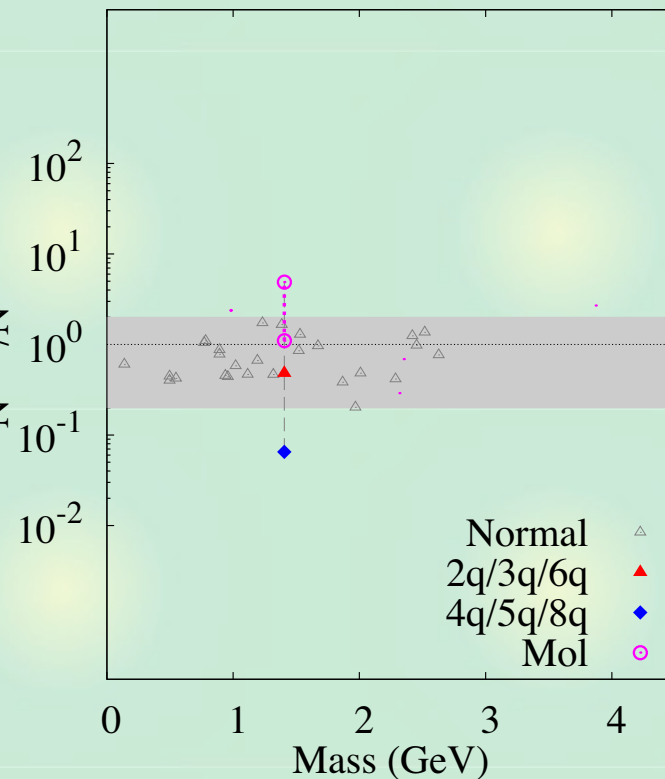
(c) ハドロン分子



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

## ハドロン励起状態の構造とその検証方法を議論した

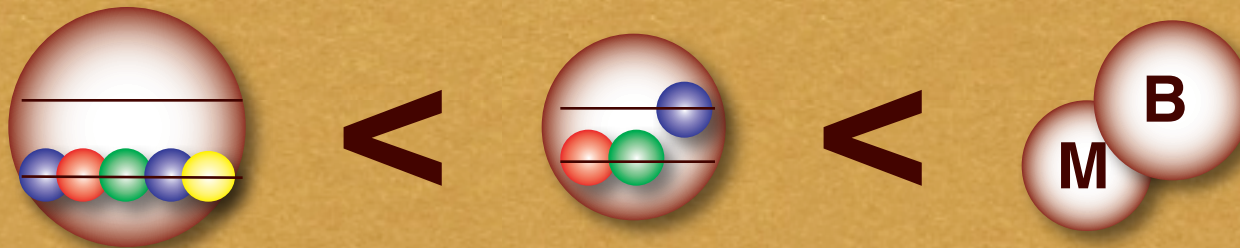
📌 ハドロン物理の目的：低エネルギーQCDを理解する

📌 バリオン励起状態：3クォーク、5クォーク、ハドロン分子などの多様な構造が可能

T. Hyodo, D. Jido, Prog. Part. Nucl. Phys. 67, 55 (2012)

兵藤哲雄、慈道大介、日本物理学会誌 第67巻第4号 226 (2012)

📌 重イオン衝突での生成量：内部構造を反映



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