

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

低エネルギーのQCDの難しさ／面白さ

強い相互作用はQCD（クォーク、グルーオン）で記述される

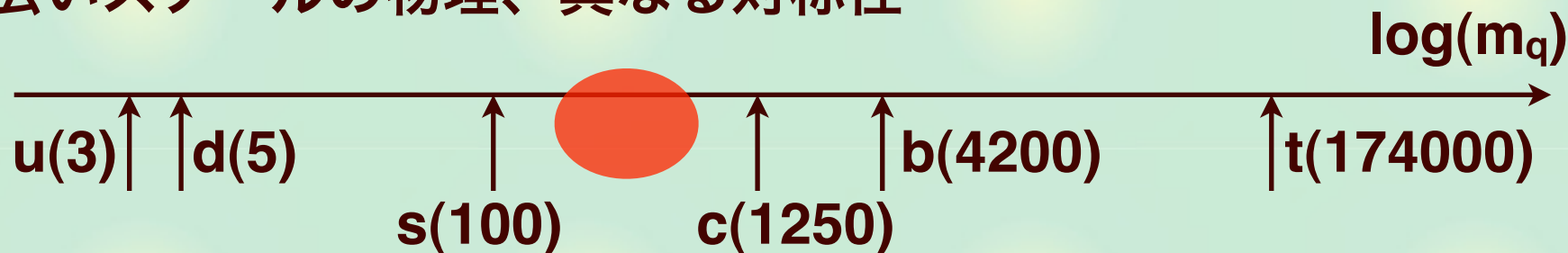
$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \bar{q}_{\alpha} (i\gamma^{\mu} D_{\mu}^{\alpha\beta} - m\delta^{\alpha\beta}) q_{\beta}$$

色自由度

QCDは漸近自由性をもち、低エネルギーでは**非摂動的**

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：観測される自由度は**ハドロン**

幅広いスケールの物理、異なる対称性



カイラル対称性

m_q で展開

重クォーク対称性

$1/m_q$ で展開

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 $\Delta > 0$.*

カラー閉じ込め

高温／高密度物質

核力の起源、核構造

重イオン衝突、QGP

核子構造

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

カイラル相転移

ハドロン動力学、
ハドロン構造

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)

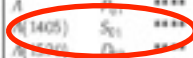
<http://pdg.lbl.gov/>

様々な質量、崩壊幅、崩壊モード

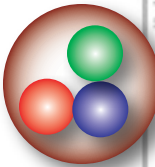
粒子の内部構造

ハドロン間の相互作用

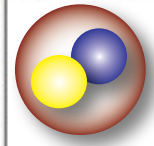
Baryons										Mesons										
P_{11}	$\Delta(1232)$	P_{33}	$\Sigma(1385)$	Σ^*	$\Lambda(1520)$	$\Lambda(1670)$	$\Lambda(1690)$	$\Lambda(1820)$	$\Lambda(2130)$	$\Lambda(2280)$	LIGHT UNFLAVORED ($S=C=B=0$)		STRANGE ($S=-1, C=B=0$)		CHARMED, STRANGE ($C=S=+1$)		$c\tau$			
P_{11}	$\Delta(1232)$	P_{33}	$\Sigma(1385)$	Σ^*	$\Lambda(1520)$	$\Lambda(1670)$	$\Lambda(1690)$	$\Lambda(1820)$	$\Lambda(2130)$	$\Lambda(2280)$	$P(1^0)$	$P(1^+)$	$P(1^0)$	$P(1^+)$	D^*	D_s^*	D^*	D_s^*	$P(1^0)$	$P(1^+)$
$\Lambda(1405)$																				
$\Lambda(1600)$																				
$\Lambda(1670)$																				
$\Lambda(1690)$																				
$\Lambda(1800)$																				
$\Lambda(1830)$																				
$\Lambda(1890)$																				
$\Lambda(2000)$																				
$\Lambda(2020)$																				
$\Lambda(2100)$																				
$\Lambda(2130)$																				
$\Lambda(2325)$																				
$\Lambda(2350)$																				
$\Lambda(2585)$																				



$\Lambda(1405)$



バリオン~130種類



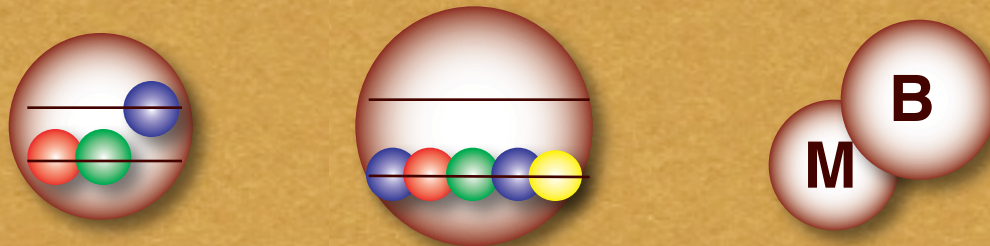
メソン~160種類

全てが単一のQCDラグランジアンから出てくる

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)

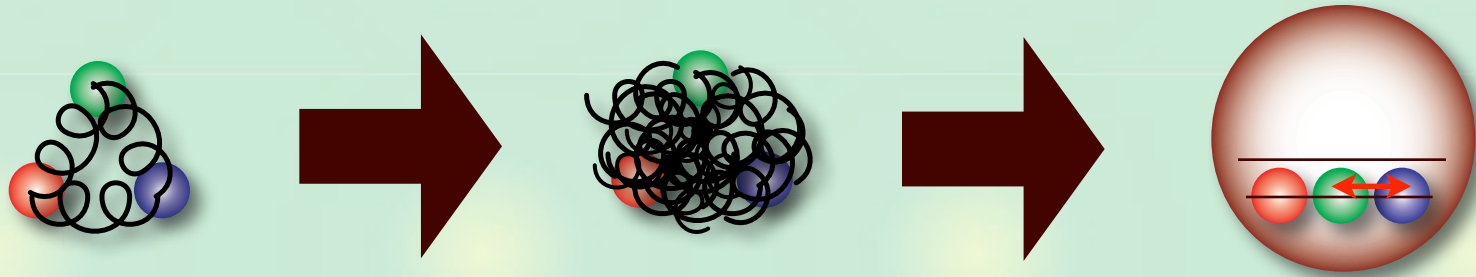
 $\Lambda(1405)$ の構造の実験的検証

- ・ 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)

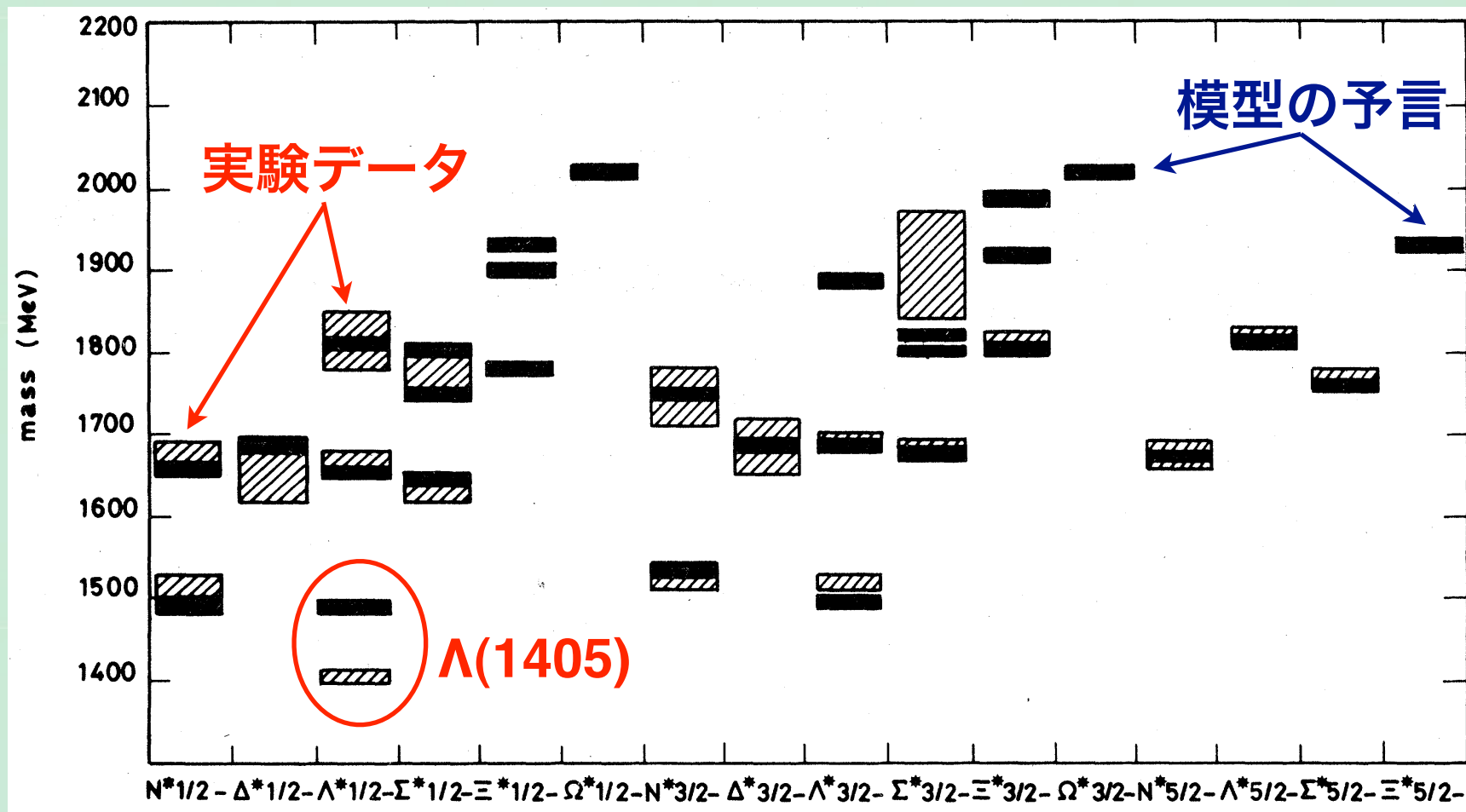
$$\mathcal{H}_{cs} = -\frac{f_{cs}}{m_i m_j} (\lambda_i^c \cdot \lambda_j^c) (\sigma_i \cdot \sigma_j)$$

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

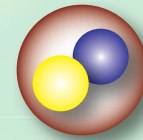
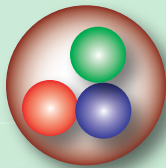
クォーク模型：対称性から決まる波動関数＋残留相互作用の摂動

--> 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

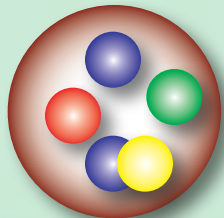


上記の分類にあてはまらないもの、その他の構造

--> **エキゾチックハドロン**

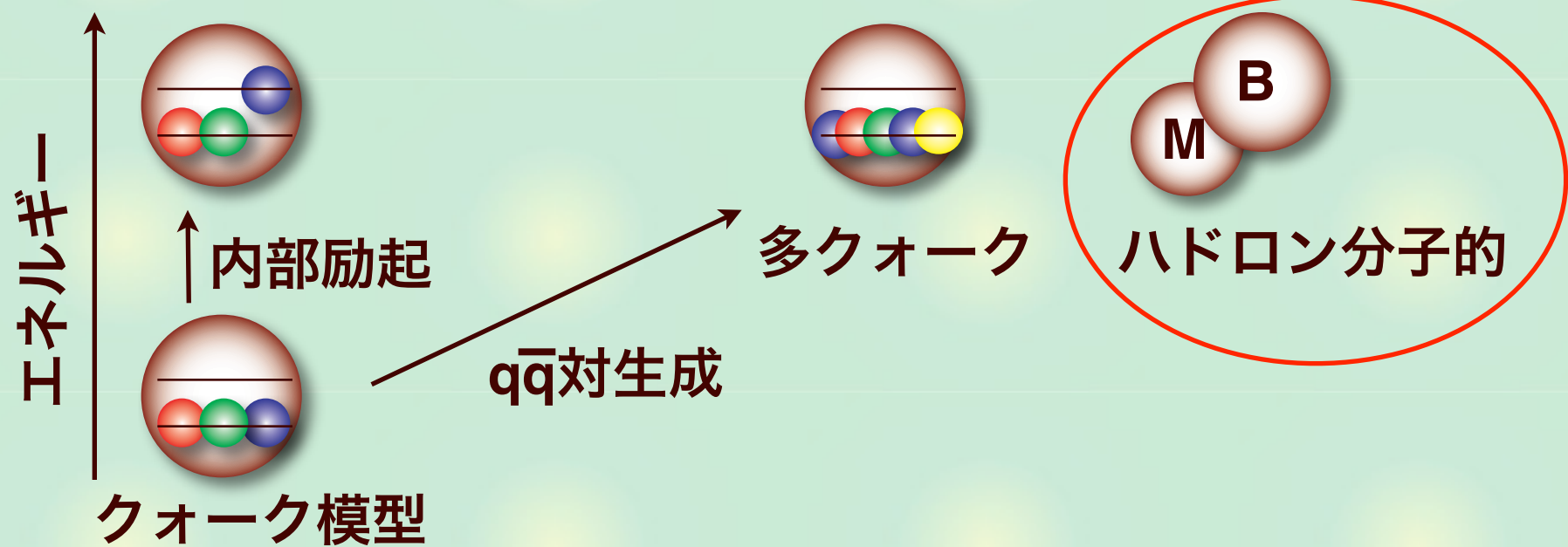
条件：カラー白色

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

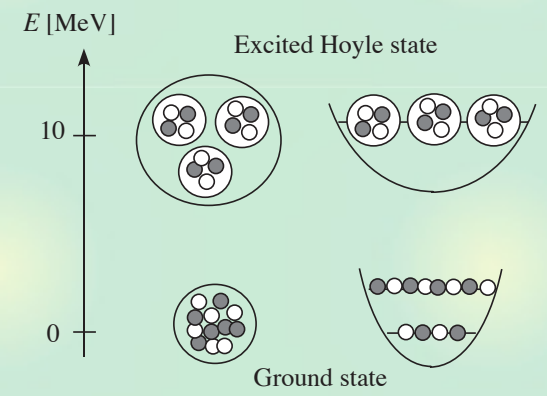


励起状態：2ハドロン状態へ崩壊

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

¹²C 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

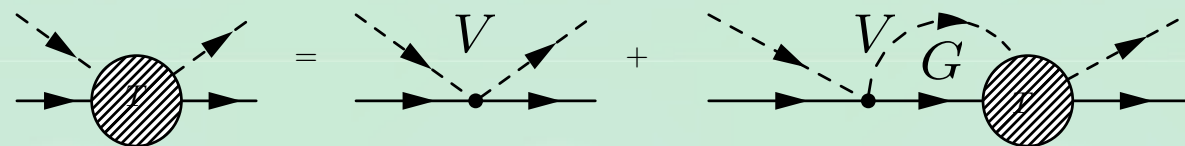
T. Hyodo, D. Jido, Prog. Part. Nucl. Phys. 67, 55 (2012)

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 4月号掲載予定

リップマンシュヴィンガー方程式

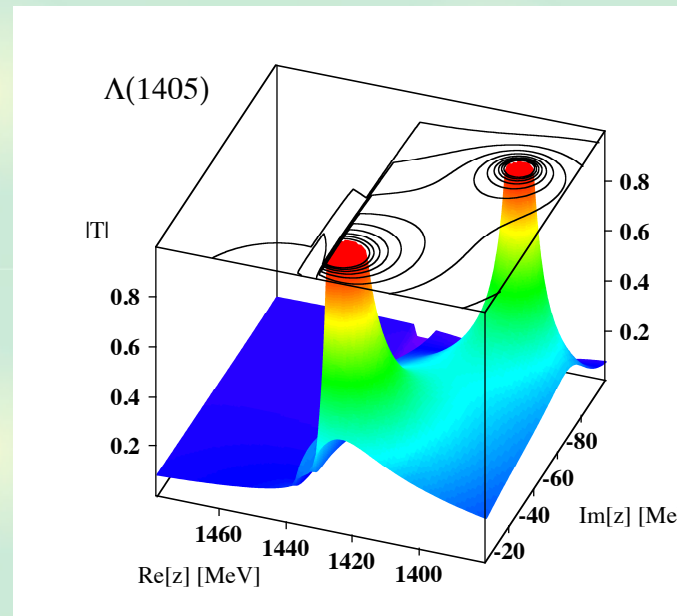
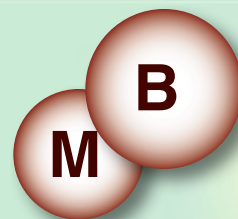
$$T = V + VGT$$



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

散乱振幅 T

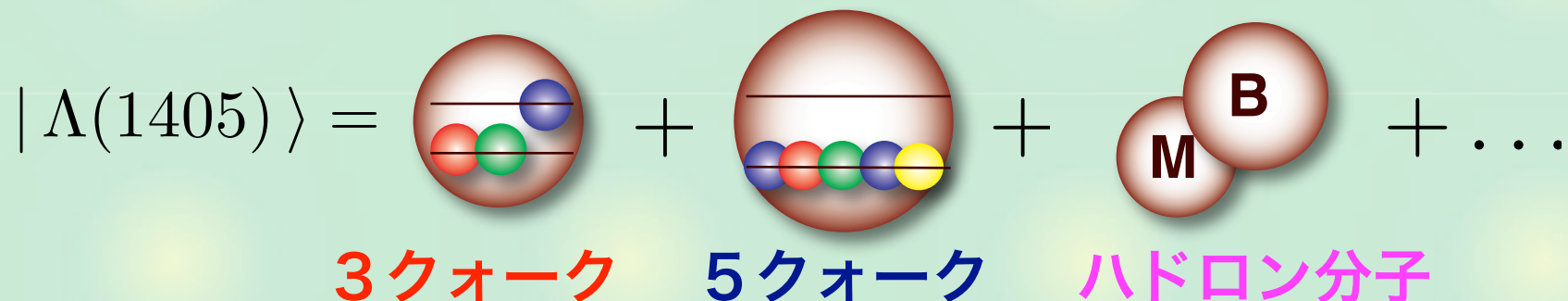
--> 散乱断面積、位相のずれ、
共鳴状態



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 \rightarrow 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？

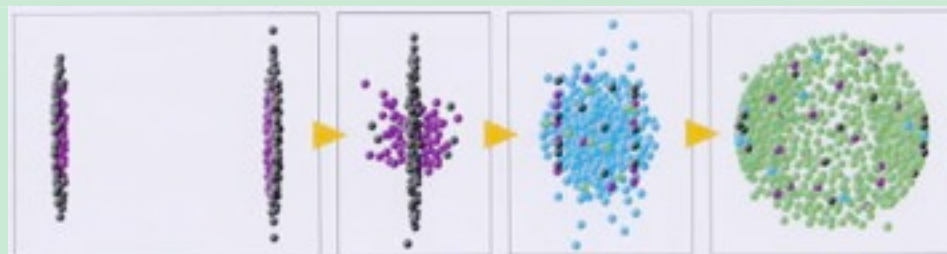
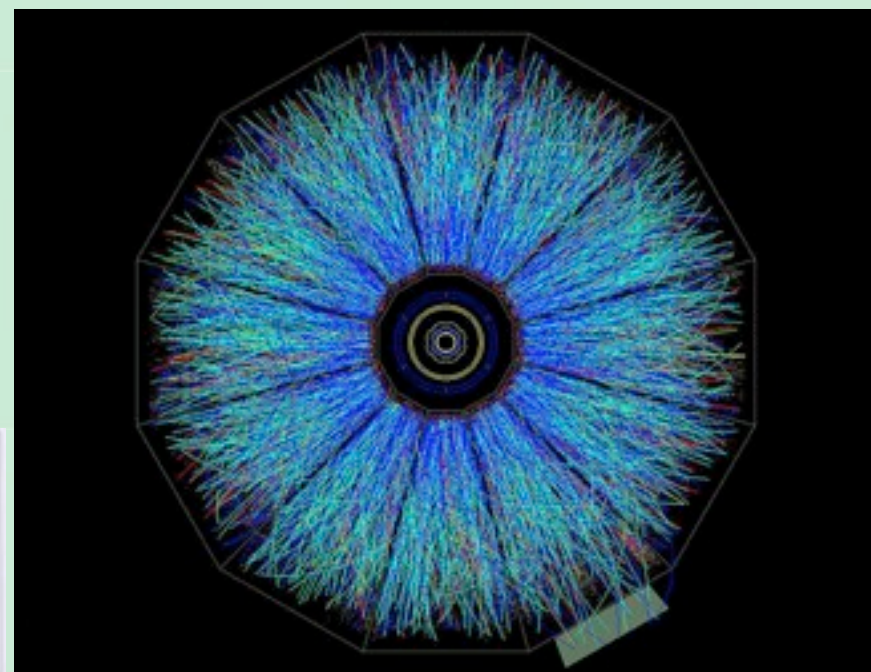
相対論的重イオン衝突

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)

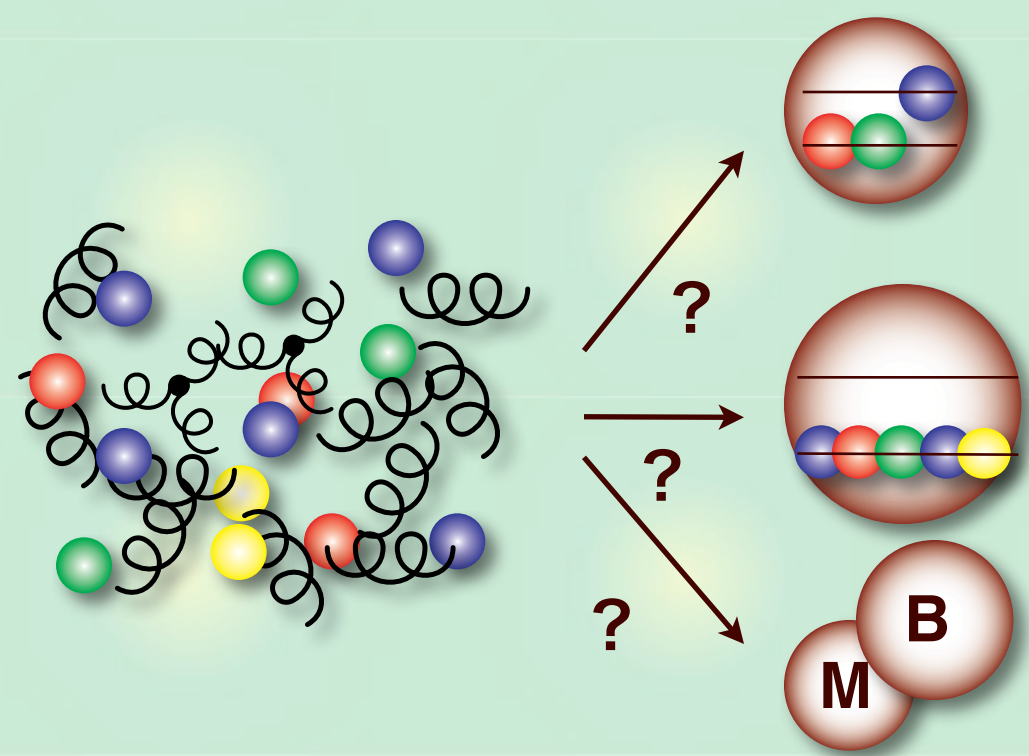
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
27 MAY 2011

Identifying Multiquark Hadrons from Heavy Ion Collisions

Sungtae Cho,¹ Takenori Furumoto,^{2,3} Tetsuo Hyodo,⁴ Daisuke Jido,² Che Ming Ko,⁵ Su Houn Lee,^{1,2}
Marina Nielsen,⁶ Akira Ohnishi,² Takayasu Sekihara,^{2,7} Shigehiro Yasui,⁸ and Koichi Yazaki^{2,3}

(ExHIC Collaboration)



統計模型

- 熱平衡
- 通常ハドロンを記述

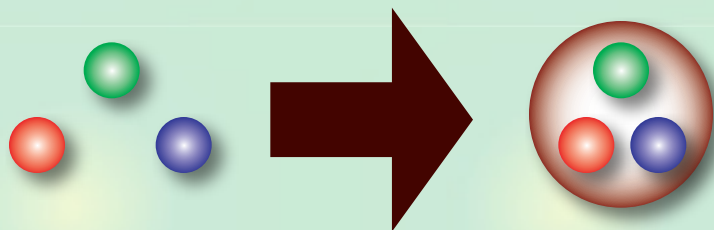
コアレスセンス模型

- 波動関数の重なり
- 内部構造を反映

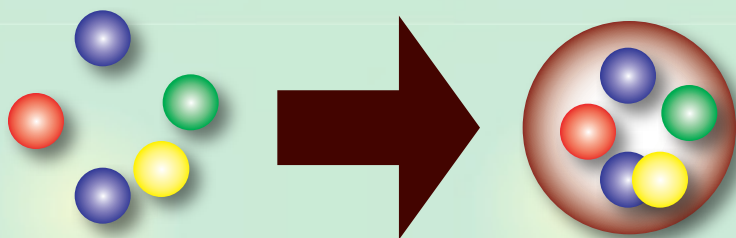
生成量の計算結果

相対論的重イオン衝突でのハドロン生成量を計算

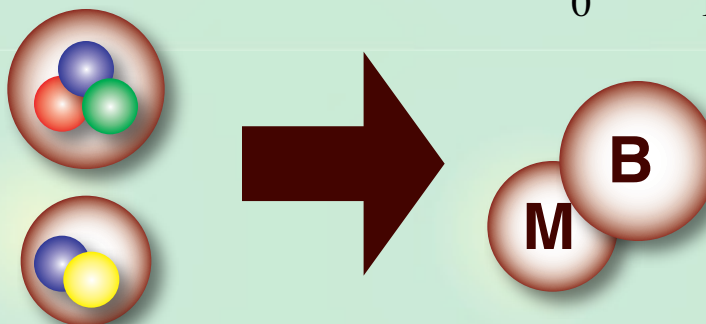
(a) 3クォーク



(b) 5クォーク



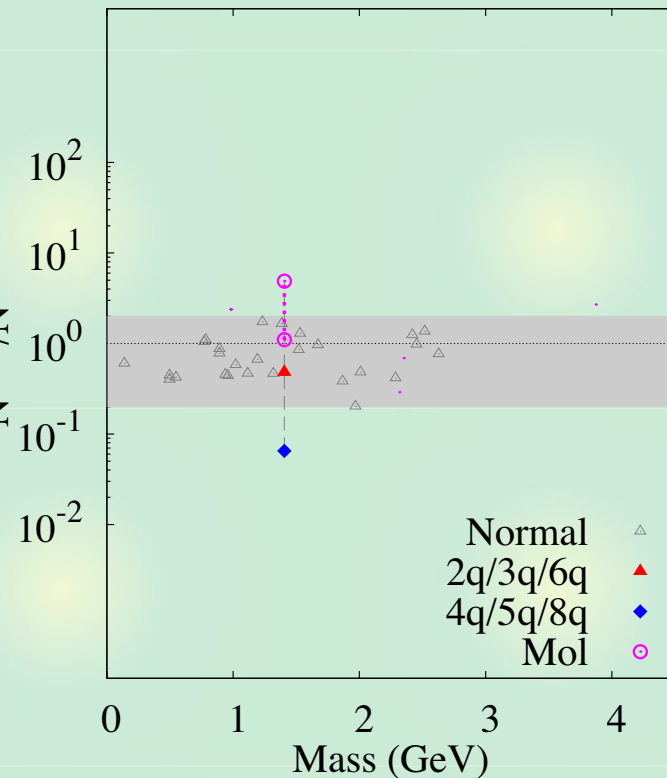
(c) ハドロン分子



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

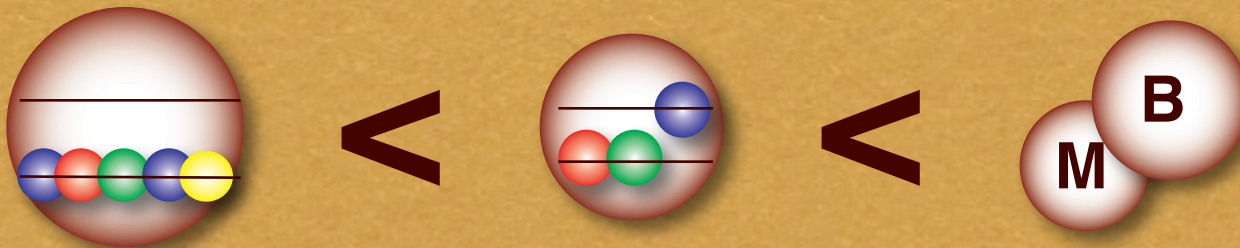
ハドロン励起状態の構造とその検証方法を議論した

📌 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)

📌 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)