

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？



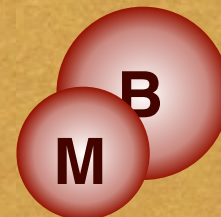
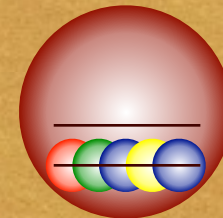
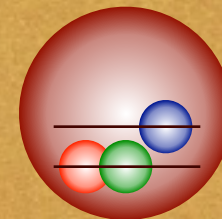
観測されているハドロンの分類

- 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

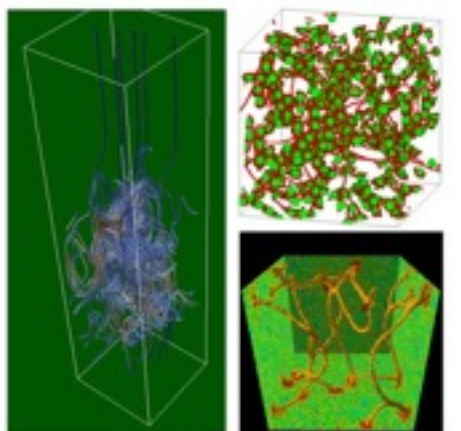


原子核物理学 in 理論物理学

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

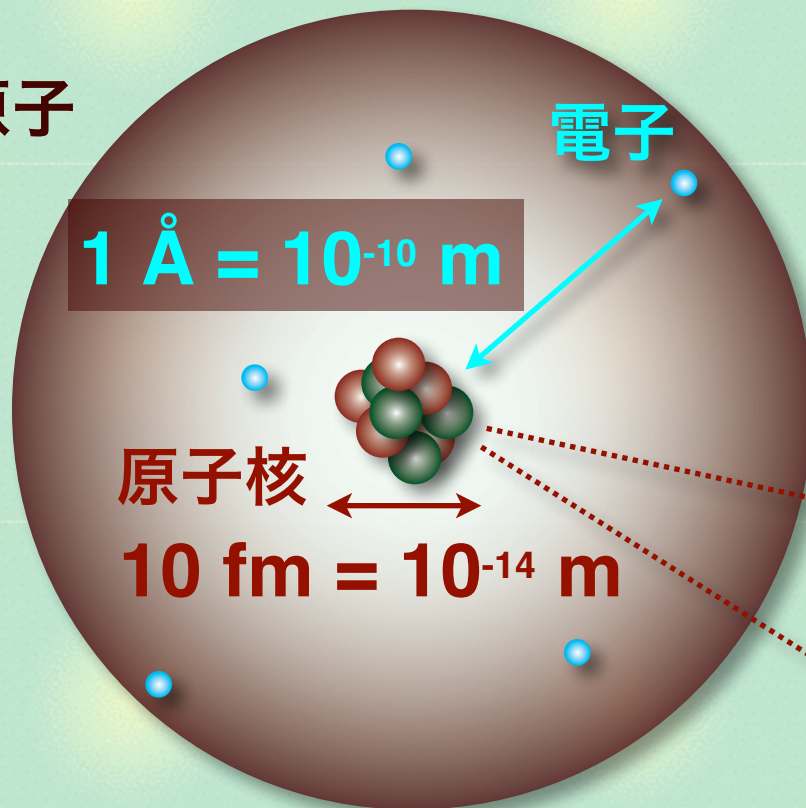
宇宙

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

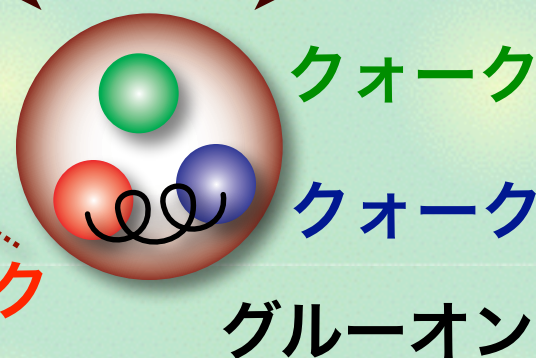
原子



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 = 10⁻¹⁵ m



原子核物理学

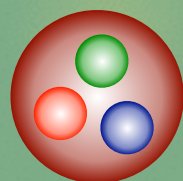
原子核(多体系)の性質を核子(陽子+
中性子)間の相互作用から理解する

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）

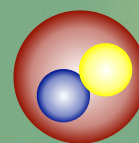
陽子、中性子、 Λ 粒子、、、



クォーク3つで構成

メソン（中間子）

π 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）

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

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～1億138万円

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

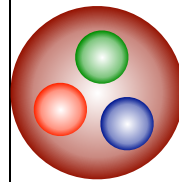
ストレンジネス

ハドロンが多様な性質

観測されているハドロン

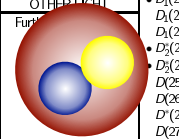
PDG2015 : <http://pdg.lbl.gov/>

p	$1/2^+$ ****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$ ****	Σ^+	$1/2^+$ ****	Ξ^0	$1/2^+$ ****	Λ_c^+	$1/2^+$ ****
n	$1/2^+$ ****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$ ***	Σ^0	$1/2^+$ ****	Ξ^-	$1/2^+$ ****	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$ ***
$N(1440)$	$1/2^+$ ****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$ ****	Σ^-	$1/2^+$ ****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$ ****	$\Lambda_c(2765)^+$	$3/2^-$ ***
$N(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$ ****	$\Xi(1620)$	*	$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$ ***
$N(1535)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$ *	$\Sigma(1480)$	**	$\Xi(1690)$	**	$\Lambda_c(2940)^+$	**
$N(1650)$	$1/2^-$ ****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$ **	$\Sigma(1560)$	**	$\Xi(1820)$	**	$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$ ****
$N(1675)$	$5/2^-$ ****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$ ****	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$ *	$\Xi(1950)$	**	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$ ****
$N(1680)$	$5/2^+$ ****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$ ****	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$ *	$\Xi(2030)$	$\geq 3/2^?$ ***	$\Sigma_c(2800)$	**
$N(1685)$	*	$\Delta(1920)$	$3/2^+$ ***	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$ ***	$\Xi(2120)$	*		
$N(1700)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(1930)$	$5/2^-$ ***	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$ ****	$\Xi(2250)$	**		
$N(1710)$	$1/2^+$ ***	$\Delta(1940)$	$3/2^-$ **	$\Sigma(1690)$	**	$\Xi(2370)$	**		
$N(1720)$	$3/2^+$ ****	$\Delta(1950)$	$7/2^+$ ****	$\Sigma(1730)$	$3/2^+$ *	$\Xi(2500)$	*		
$N(1860)$	$5/2^+$ **	$\Delta(2000)$	$5/2^+$ **	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$ ***				
$N(1875)$	$3/2^-$ ***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$ *	$\Sigma(1770)$	$1/2^+$ *	Ω^-	$3/2^+$ ****		
$N(1880)$	$1/2^+$ **	$\Delta(2200)$	$7/2^-$ *	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$ ****	$\Omega(2250)^-$	***		
$N(1895)$	$1/2^-$ **	$\Delta(2300)$	$9/2^+$ **	$\Sigma(1840)$	$3/2^+$ *	$\Omega(2380)^-$	**		
$N(1900)$	$3/2^+$ ***	$\Delta(2350)$	$5/2^-$ *	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$ **	$\Omega(2470)^-$	**		
$N(1990)$	$7/2^+$ **	$\Delta(2390)$	$7/2^+$ *	$\Sigma(1900)$	$1/2^-$ *				
$N(2000)$	$5/2^+$ **	$\Delta(2400)$	$9/2^-$ **	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$ ****				
$N(2040)$	$3/2^+$ *	$\Delta(2420)$	$11/2^+$ ****	$\Sigma(1940)$	$3/2^+$ *				
$N(2060)$	$5/2^-$ **	$\Delta(2750)$	$13/2^-$ **	$\Sigma(1940)$	$3/2^-$ ***				
$N(2100)$	$1/2^+$ *	$\Delta(2950)$	$15/2^+$ **	$\Sigma(2000)$	$1/2^-$ *				
$N(2120)$	$3/2^-$ **			$\Sigma(2030)$	$7/2^+$ ****				
$N(2190)$	$7/2^-$ ****	Λ	$1/2^+$ ****	$\Sigma(2070)$	$5/2^+$ *				
$N(2220)$	$9/2^+$ ****	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma(2080)$	$3/2^+$ **				
$N(2250)$	$9/2^-$ ****	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(2100)$	$7/2^-$ *				
$N(2300)$	$1/2^+$ **	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$ ***	$\Sigma(2250)$	***				
$N(2570)$	$5/2^-$ **	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$ ****	$\Sigma(2455)$	**				
$N(2600)$	$11/2^-$ ***	$\Lambda(1690)$	$3/2^-$ ****	$\Sigma(2620)$	**				
$N(2700)$	$13/2^+$ **	$\Lambda(1710)$	$1/2^+$ *	$\Sigma(3000)$	*				
		$\Lambda(1800)$	$1/2^-$ ***	$\Sigma(3170)$	*				
		$\Lambda(1810)$	$1/2^+$ ***						
		$\Lambda(1820)$	$5/2^+$ ****						
		$\Lambda(1830)$	$5/2^-$ ****						
		$\Lambda(1890)$	$3/2^+$ ****						
		$\Lambda(2000)$	*						
		$\Lambda(2020)$	$7/2^+$ *						
		$\Lambda(2050)$	$3/2^-$ *						
		$\Lambda(2100)$	$7/2^-$ ****						
		$\Lambda(2110)$	$5/2^+$ ***						
		$\Lambda(2325)$	$3/2^-$ *						
		$\Lambda(2350)$	$9/2^+$ ***						
		$\Lambda(2585)$	**						



バリオン~150種類

LIGHT UNFLAVORED (S=C=B=0)		STRANGE (S=±1, C=B=0)		CHARMED, STRANGE (C=S=±1)		$c\bar{c}$ $f\bar{f}$	
$F(J^{PC})$		$F_c(J^{PC})$		$F_c(J^{PC})$		$F_c(J^{PC})$	
π^\pm	$1^-(0^-)$	$\rho(1680)$	$0^-(1^-)$	K^\pm	$1/2^-(0^-)$	D_s^\pm	$0^-(1^-)$
π^0	$1^-(0^-)$	$\omega(1680)$	$0^-(1^-)$	K^0	$1/2^-(0^-)$	D_s^0	$0^-(1^-)$
η	$0^-(1^-)$			K^*	$1^-(1^-)$		
$\eta(980)$	$0^-(1^-)$			K^*_2	$1^-(2^-)$		
$\eta(1300)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(1430)$	$1^-(2^-)$		
$\eta(1700)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(1460)$	$1^-(2^-)$		
$\eta(1900)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(1680)$	$1^-(2^-)$		
$\eta(2100)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(1690)$	$1^-(2^-)$		
$\eta(2300)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(1770)$	$1^-(2^-)$		
$\eta(2400)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(1820)$	$1^-(2^-)$		
$\eta(2500)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(1830)$	$1^-(2^-)$		
$\eta(2600)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(1950)$	$1^-(2^0)$		
$\eta(2700)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(1980)$	$1^-(2^+)$		
$\eta(2800)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(2045)$	$1^-(2^+)$		
$\eta(2900)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(2100)$	$0^-(0^+)$		
$\eta(3000)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(2150)$	$0^-(0^+)$		
$\eta(3100)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(2250)$	$1^-(2^-)$		
$\eta(3200)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(2300)$	$1^-(2^3)$		
$\eta(3300)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(2380)$	$1^-(2^5)$		
$\eta(3400)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(2450)$	$1^-(2^4)$		
$\eta(3500)$	$0^-(1^-)$			$K^*_2(3100)$	$1^-(2^?)$		
$\eta(3600)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(3700)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(3800)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(3900)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(4000)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(4100)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(4200)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(4300)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(4400)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(4500)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(4600)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(4700)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(4800)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(4900)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(5000)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(5100)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(5200)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(5300)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(5400)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(5500)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(5600)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(5700)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(5800)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(5900)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(6000)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(6100)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(6200)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(6300)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(6400)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(6500)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(6600)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(6700)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(6800)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(6900)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(7000)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(7100)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(7200)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(7300)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(7400)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(7500)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(7600)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(7700)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(7800)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(7900)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(8000)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(8100)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(8200)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(8300)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(8400)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(8500)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(8600)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(8700)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(8800)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(8900)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(9000)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(9100)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(9200)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(9300)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(9400)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(9500)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(9600)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(9700)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(9800)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(9900)$	$0^-(1^-)$						
$\eta(10000)$	$0^-(1^-)$						



メソン~200種類

~ 350種類全てが単一のQCDラグランジアンから出てくる
ほとんどがqqq/qq̄で記述される量子数 (自明ではない!)

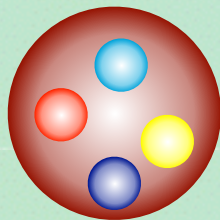
qqq/qq̄で記述できない状態

テトラクォーク候補(Belle)

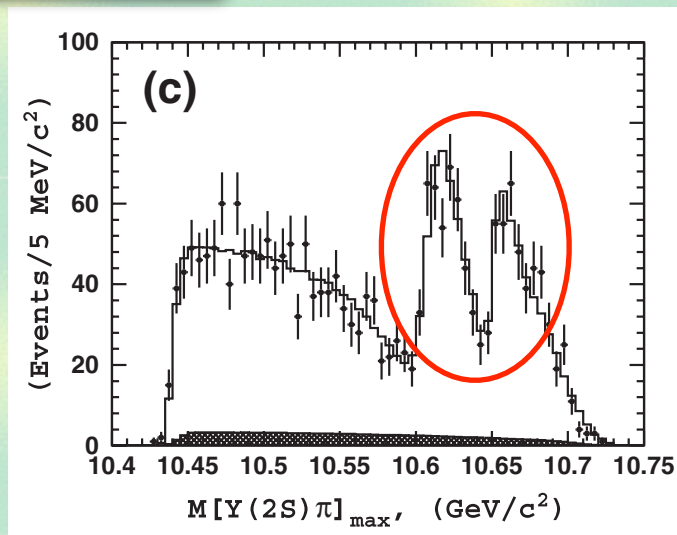
: $Z_b(10610)$, $Z_b(10650)$

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

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



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

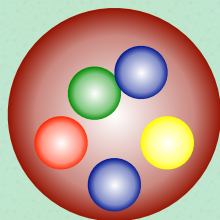


ペンタクォーク候補(LHCb)

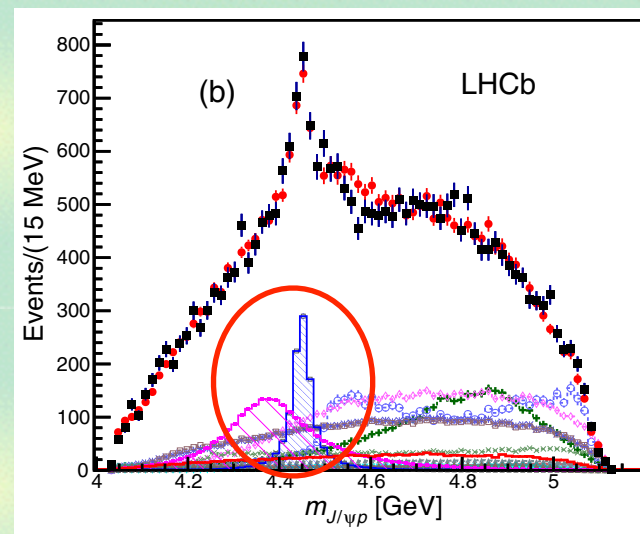
: $P_c(4450)$, $P_c(4380)$

$\Lambda_b \rightarrow K^- + P_c$

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



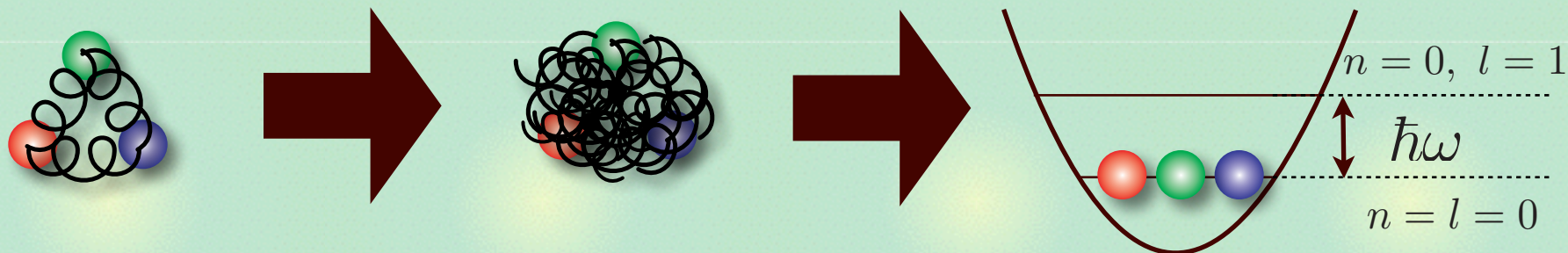
R. Aaij, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 115, 072001 (2015)



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**

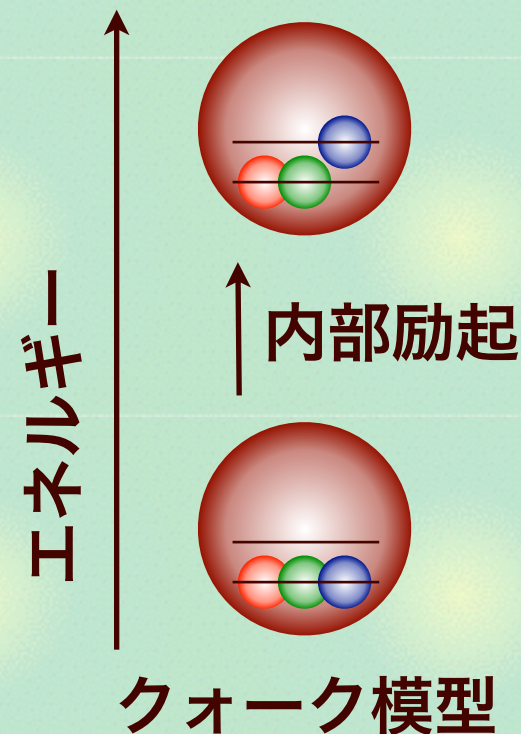
$$\psi_{00} = f_{00}(\mathbf{x}_1) f_{00}(\mathbf{x}_2) f_{00}(\mathbf{x}_3)$$

カラー：**完全半対称**（白色）

→ スピン・フレーバー：**完全対称**

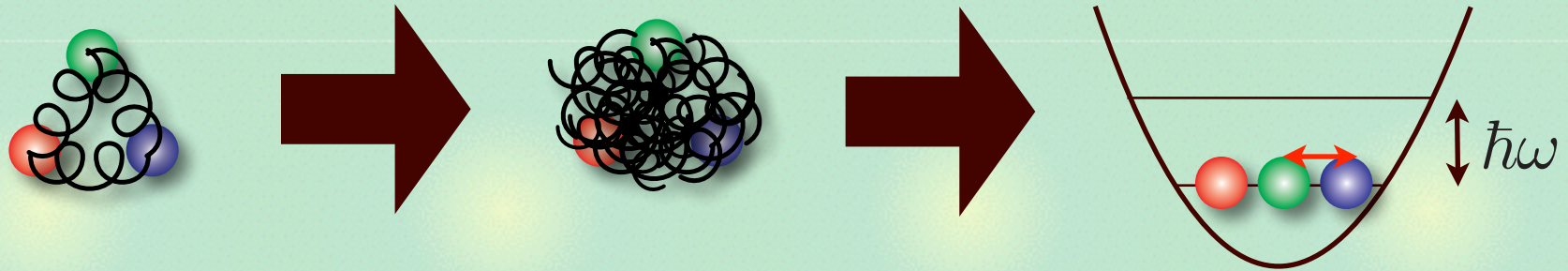
励起状態：クォークを $l=1$ の軌道に上げる

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



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)

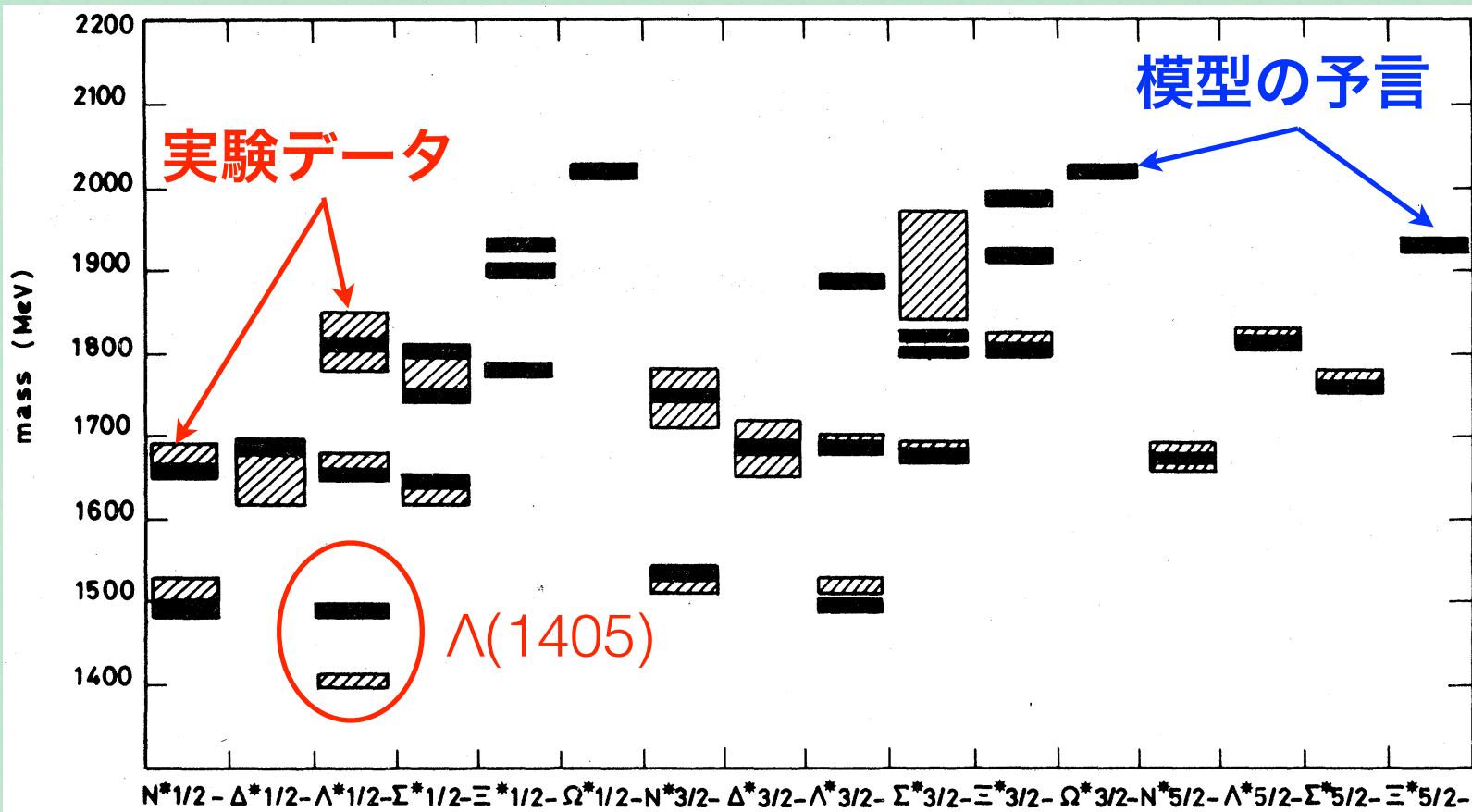
$$\mathcal{H}_{cs} = -\frac{f_{cs}}{m_i m_j} (\lambda_i^c \cdot \lambda_j^c) (\sigma_i \cdot \sigma_j)$$

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？

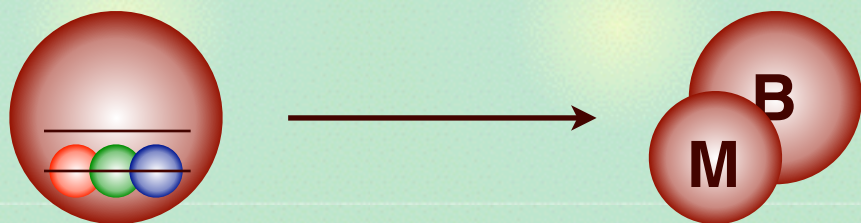
様々なハドロン励起

$q\bar{q}$ 対生成による励起：マルチクォーク状態



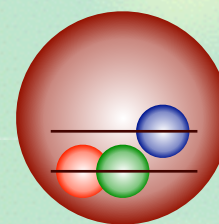
- クォーク間の相互作用で束縛
- \bar{q} は q と反対のパリティ： $qqqq\bar{q}(l=0)$

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）

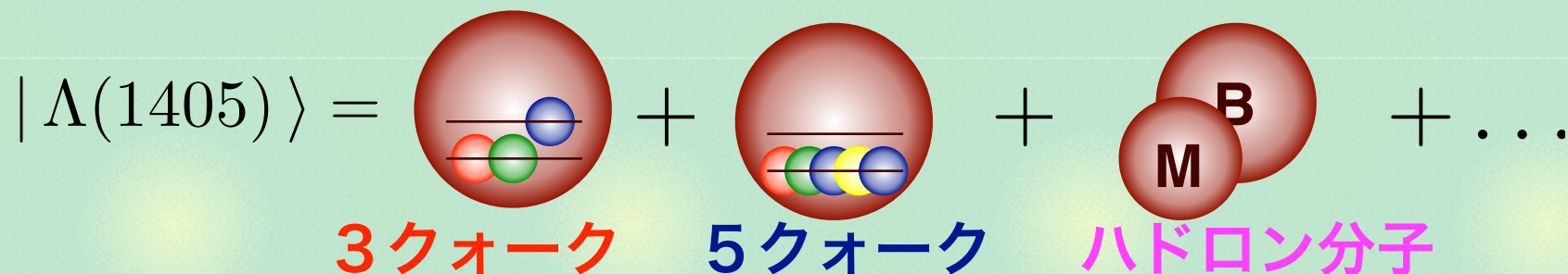
$qqq(l=1)$ と
同じ量子数



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



(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

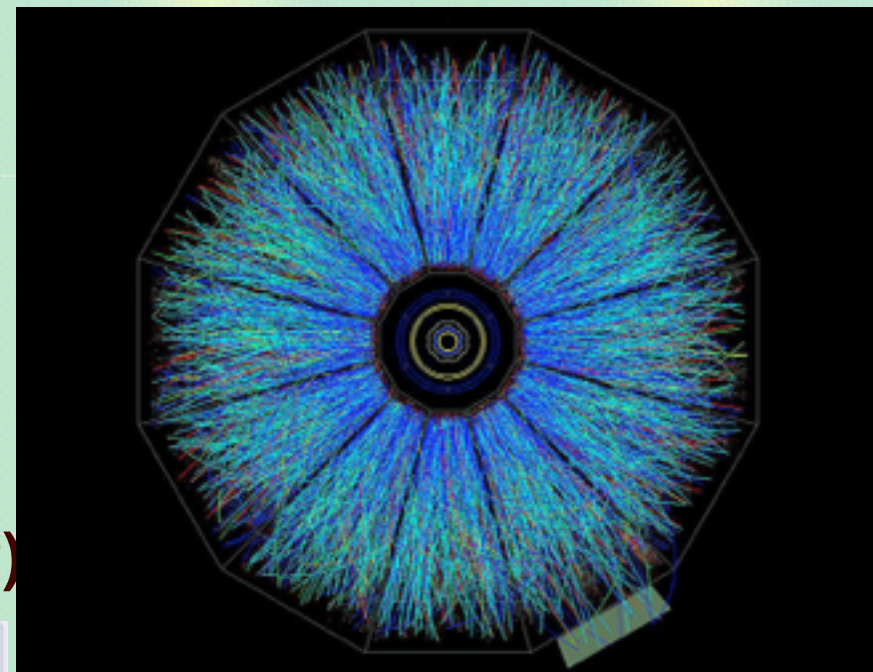
量子力学 → 可能な状態の重ね合わせ

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？

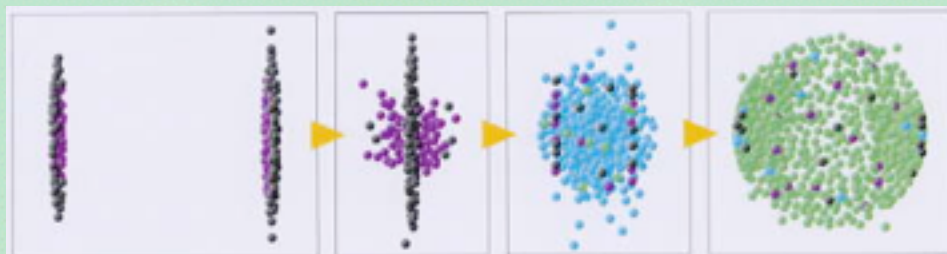
相対論的重イオン衝突

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

¹*Institute of Physics and Applied Physics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*

²*Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan*

³*RIKEN Nishina Center, Hirosawa 2-1, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

⁴*Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Meguro 152-8551, Japan*

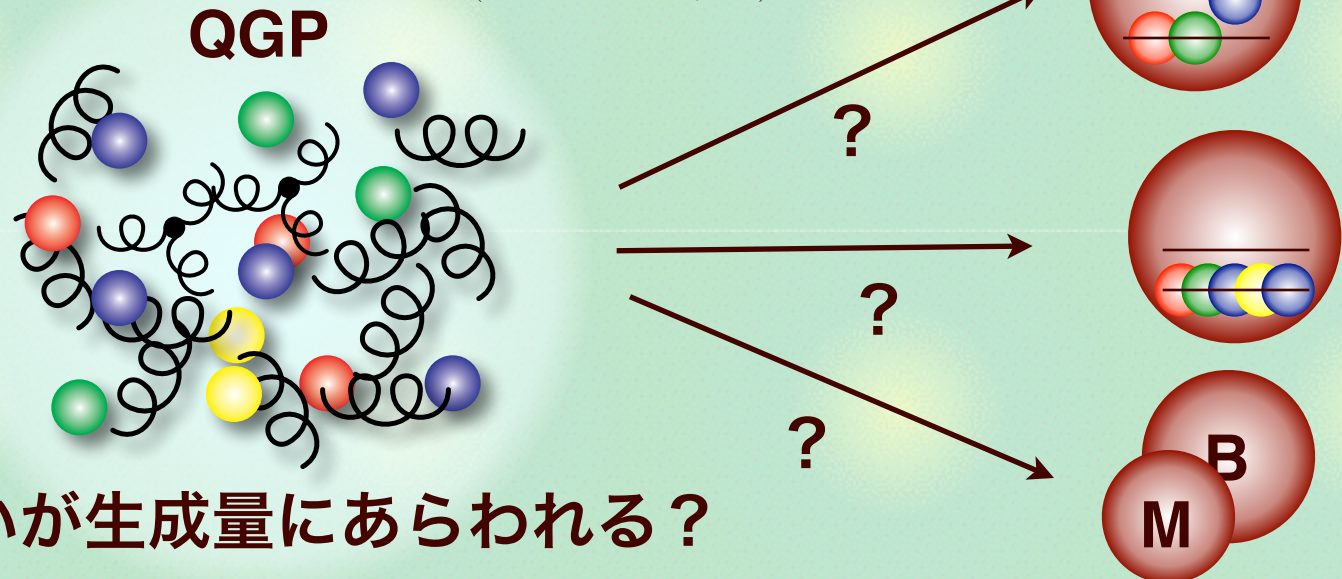
⁵*Cyclotron Institute and Department of Physics and Astronomy,
Texas A&M University, College Station, Texas 77843, U.S.A.*

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

⁷*Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan*

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

(Dated: November 4, 2010)

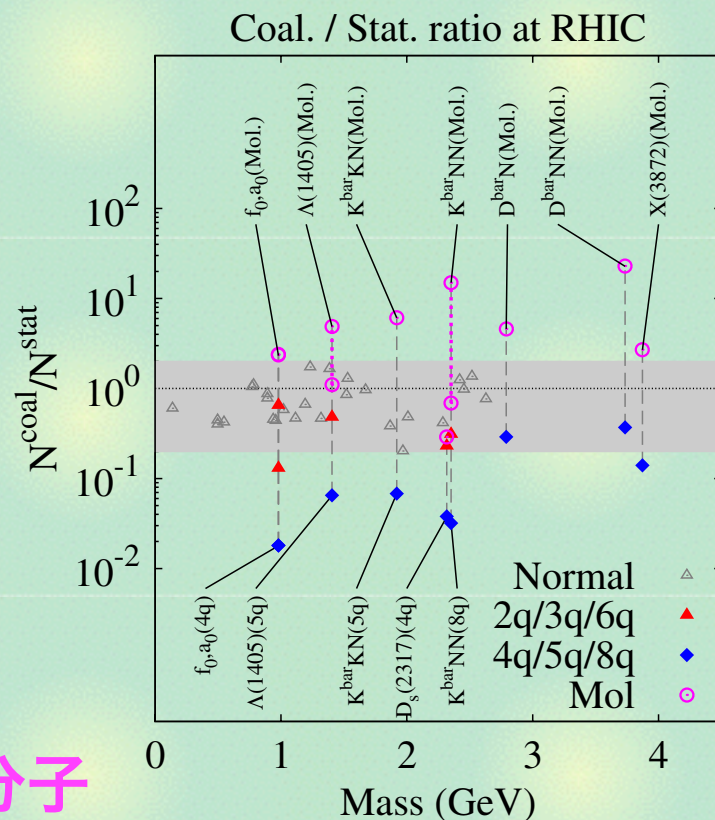
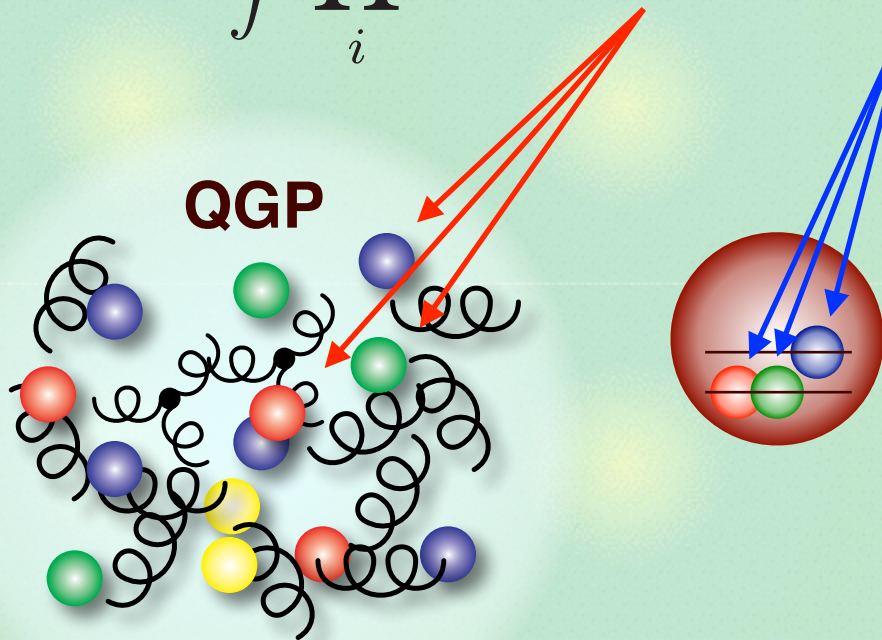


構造の違いが生成量にあらわれる？

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



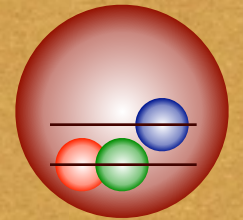
導入：原子核・ハドロン物理

- 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

