

ハドロン物理の将来

大西 宏明
理化学研究所
仁科加速器研究センター

石川貴嗣(東北大)、板橋健太(理研)、内田誠(東工大)
江角晋一(筑波大)、大西宏明(理研)、小沢恭一郎(KEK)
慈道大介(京大)菅谷頼仁(阪大)、住浜水季(岐阜大)
成木恵(KEK)、新山雅之(京大)、武藤亮太郎(KEK)
森野雄平(阪大)安井繁宏(KEK)
世話人:中野貴志(阪大)

QCDとハドロン

- QCD : 強い相互作用の基礎理論
(quark - gluon の相互作用を記述)
- QCD の特徴の一つ
 - » 漸近的自由性
(2004, ノーベル賞 D.J. Gross, H. D. Politzer, F. Wilczek)
→ quark-quark, gluon 間相互作用(結合定数)
がエネルギースケールが大きくなる
につれ弱くなる (摂動計算可能)
 - » 反対に エネルギースケールが小さい場合
真空を変えてしまうくらいの強結合を示す
(摂動計算では取り扱えない世界)

ハドロン物理の課題

低エネルギーQCDが織りなす世界の解明

カラー対称性
(カラー閉じ込め)

QCD の持つ対称性

カイラル対称性
ダイナミカルな質量
の獲得

フレーバー対称性から
重いクォーク対称性へ

ハドロン物理の課題

低エネルギーQCDが織りなす世界の解明

- Exotic hadrons を軸にしたハドロンの多様な存在形態: カラー閉じ込めの物理 (カラー対称性)
- 核物質中メソンを通じた質量獲得機構の解明 (カイラル対称性)
- フレーバーフロンティアの拡張
ストレンジネス→チャーム、ボトムへの展開 (フレーバー対称性から重いクォーク対称性へ)

ハドロン物理研究拠点



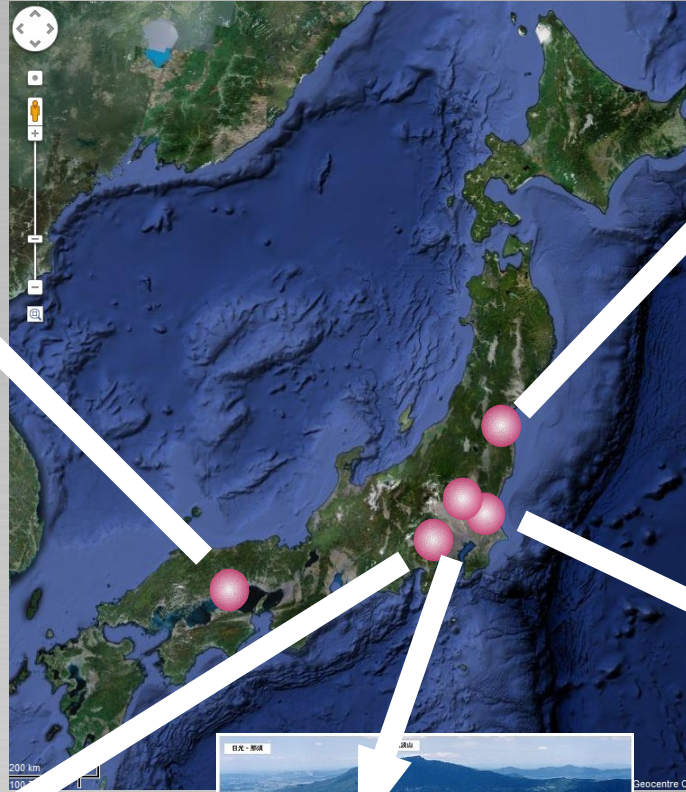
LESP / SPring-8
upto 2.9 GeV : γ beam



ELPH/Tohoku Univ.
Upto 1.2 GeV : γ beam



RIKEN/RIBF
Deuteron :
Td = 500 MeV



KEKB:B meson decay



J-PARC Hadron hall
Secondary : $\pi^\pm, K^\pm, p, \bar{p}$:
< 2 GeV/c
primary proton : 30 GeV

Exotic hadrons を軸にした
ハドロンの多様な存在形態：
カラー閉じ込めの物理
(カラー対称性)

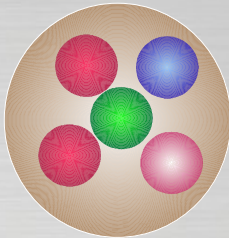
Constituent Quark Model

- Ground state baryon spectrumはよく表現
 - ≫ $\Lambda(1405)$ をはじめ、説明できない粒子が多数存在
- 予言はあるが確認されていないExcited state多数

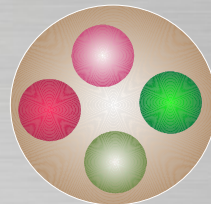
Exotic Hadron

- 通常の quark model では説明できないハドロン
 - ≫ メソン($\bar{q}q$)でも バリオン(qqq)でも表現出来ない？

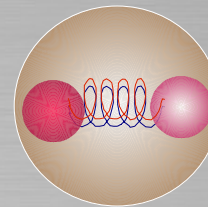
Penta quark



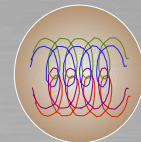
Tetra quark



$\bar{q}q$ -g ハイブリッド



グルーボール



- Penta, Tetra quark状態をはじめとする未知のexotic state があるかも？

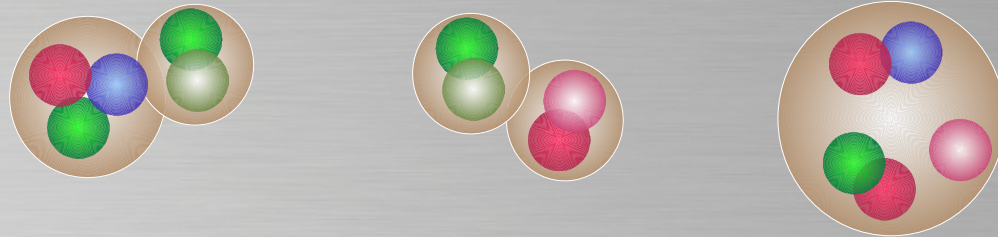
ハドロン構成の謎 → Exotic hadron

- Constituent Quark model で表現できない
ハドロンの存在 → model が間違ってるだけ？

新しい可能性

Constituent quark を越える新しい自由度？

- Meson-Baryon, Meson-Meson 分子
- di-quark structure in exotic hadron



新しい謎

Exoticsは 通常ハドロンに比べ存在しにくいのか？

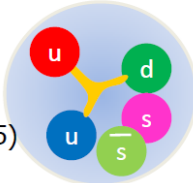
どのような Exotics は存在できるのか？

ハドロン内有効自由度？ → カラー閉じ込め。

Excited baryons

- Exotic particle としての Excited baryon
 - » Baryon 中の $\langle \bar{q}q \rangle$ 成分
 - » Penta quark?

uud[$\bar{s}\bar{s}$] : $S_{11}(1535)$ → strong coupling to ηN
uud[$\bar{d}\bar{d}$] : $P_{11}(1440)$
uds[$\bar{u}\bar{u}$] : $\Lambda^*(1405)$

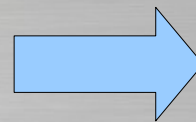


$N^*(1535)$ *B. S. Zou, NPA790, 110c*

2

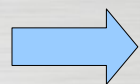
Photon beamを使って展開

LEPS/Spring-8
ELPH/Tohoku Univ.



LEPS2へ

S=-2 バリオンの spectroscopy



J-PARC high momentum K- beam 10

Exotic particle from HI collisions

PRL 106, 212001 (2011)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
27 MAY 2011

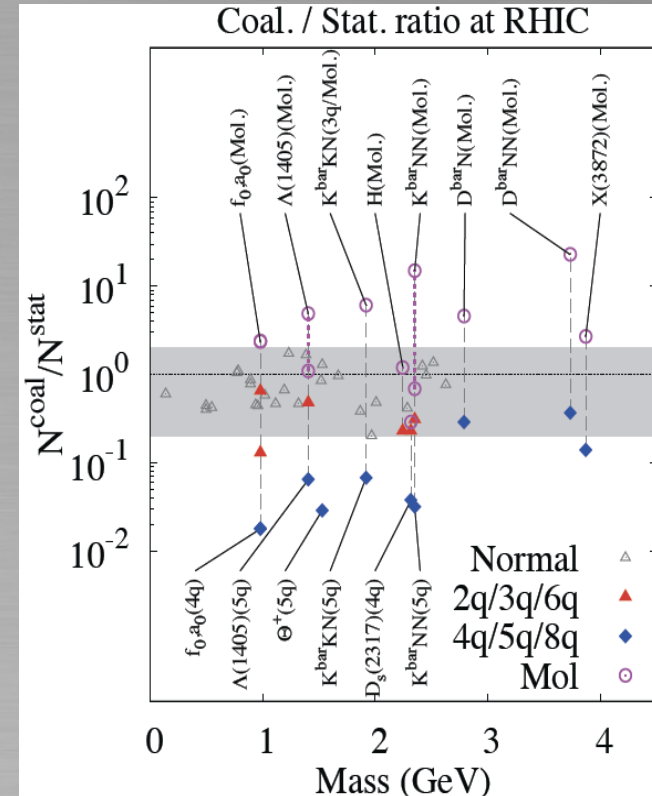
Identifying Multiquark Hadrons from Heavy Ion Collisions

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)

Published in Phys.Rev.Lett.106:212001,2011.

- 高エネルギー重イオン衝突で作られたされる大量の粒子の中から Exotic particle をさがす
- 生成比から Exotic particle の内部構造 (quark の数、ハドロン-ハドロン分子状態など)

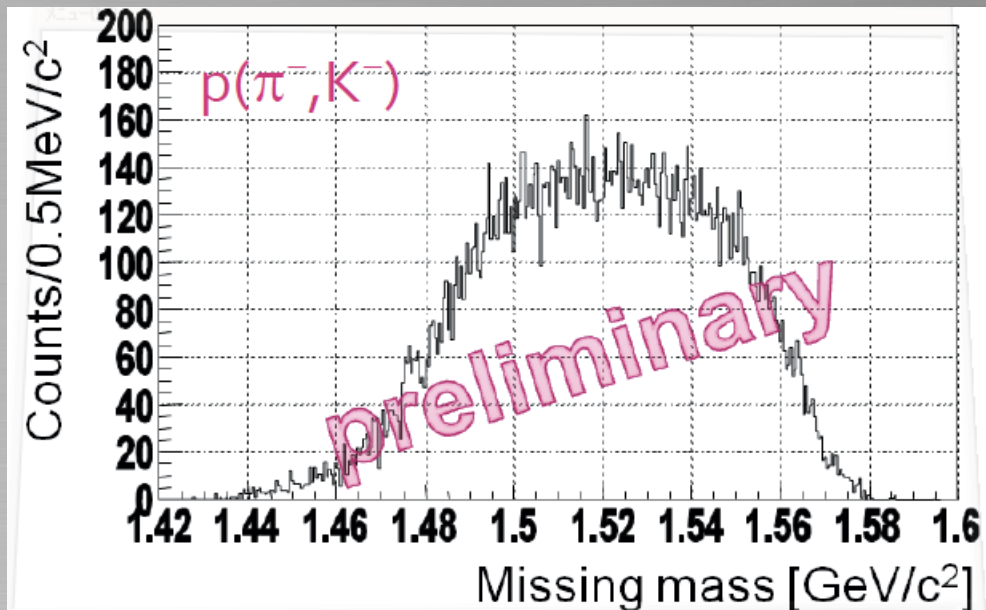
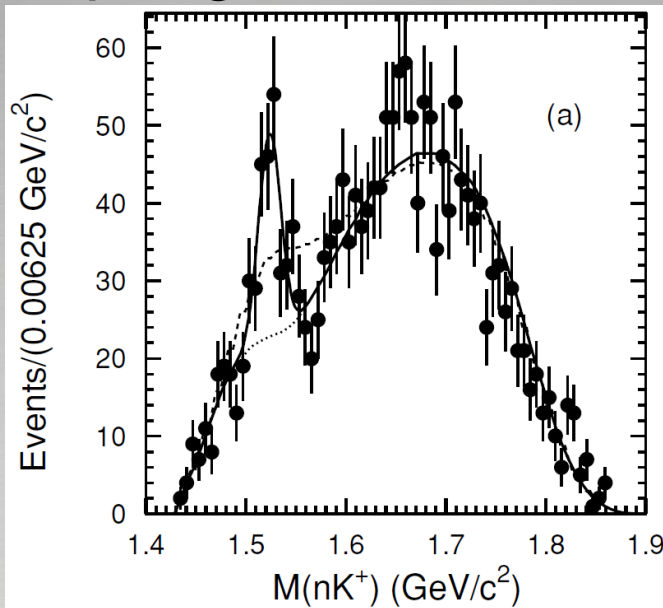


➡ RHIC、LHC へ

新しいハドロン (Θ^+)

Spring-8 : LEPS

J-PARC : E19



$\gamma d \rightarrow K^+ K^- p n$ 反応

$p(\pi^-, K^-)$ 反応

↓
決着を付けるべき問題

ペンタクォークの存否・量子数の決定

LEPS2 実験

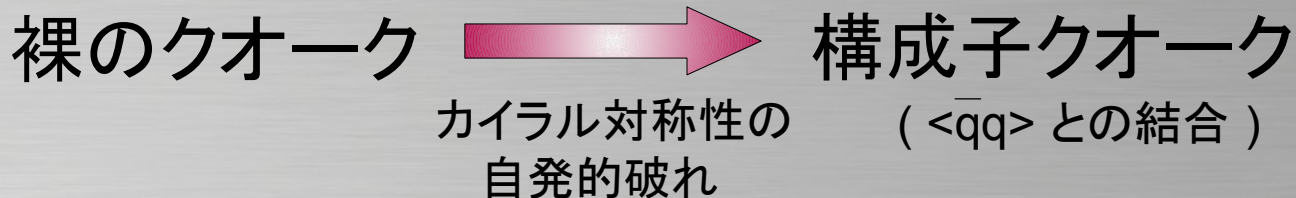
J-PARC における Θ^+ 直接生成実験へ
 $K^+ + n \rightarrow \Theta^+ \rightarrow K_s^0 p$ (J-PARC LOI)

核物質中メソンを通じた
質量獲得機構の解明
(カイラル対称性)

ハドロン質量獲得

• ハドロンの形成過程

- › 裸のクォークはカイラル対称性の破れによって、ダイナミカルに質量を獲得
- › ダイナミカルなクォーク(構成子クォーク)が集まってハドロンを形成



核物質中の中間子

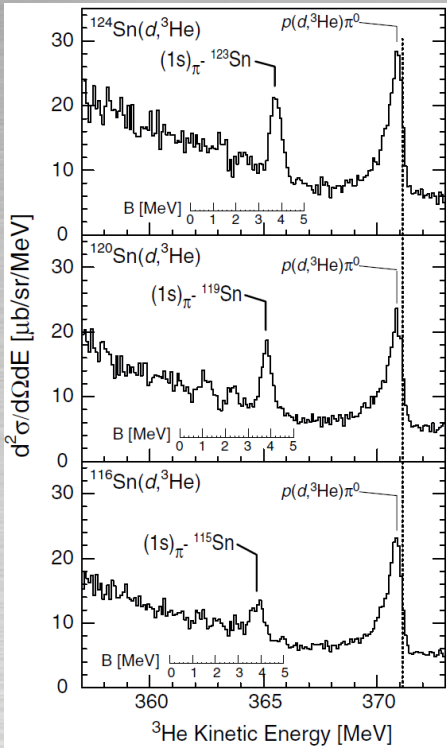
→ カイラル対称性の自発的破れを見る

核物質中での $\langle \bar{q}q \rangle$ \neq 真空中の $\langle \bar{q}q \rangle$

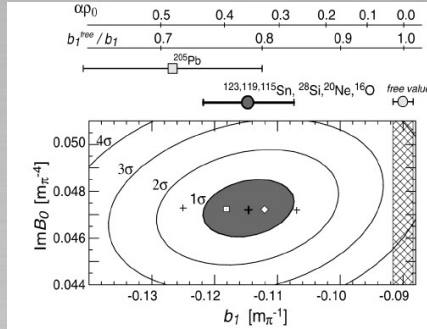
原子核中の中間子

• π 中間子アトム

• ϕ 中間子 mass shift

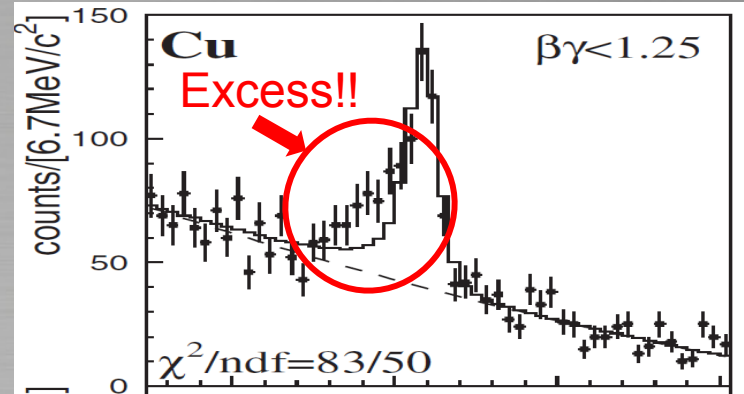


K. Suzuki et al. Phys. Rev. Lett 92(2004)072302



$$\frac{\langle \bar{q}q \rangle_\rho}{\langle \bar{q}q \rangle_0} \approx 1 - \frac{\sigma_N}{m_\pi^2 f_\pi^2} \rho,$$

$$R(\rho) = \frac{b_1^{\text{free}}}{b_1^*(\rho)} \approx \frac{f_\pi^*(\rho)^2}{f_\pi^2} \approx 1 - \alpha \rho.$$



R. Muto et al. Phys. Rev. Lett 98(2007)042581

原子核中で ϕ 中間子の質量が軽くなった？
 → 自発的に破れているカイラル対称性が
 原子核で部分的に回復した証拠？

原子核中の $\langle \bar{q}q \rangle$ を測定？

高統計・systematic study 次世代実験へ

RIBF, J-PARC

対称性の回復を系統的に調べる

- 中間子-原子核束縛状態の探索
 - ≫ 核内ストレレンジネス
 - ≫ K 中間子原子核 (K -pp...) J-PARC E15
 - ≫ double Kaonic nucleus (K - K -pp) J-PARC LoI
 - ≫ 核内ベクトル中間子
 - ≫ ω 中間子原子核 J-PARC E26
 - ≫ ϕ 中間子原子核 J-PARC E29
 - ≫ 核子と $N(1535)$ のカイラル対称性
 - ≫ η 中間子原子核 J-PARC LoI
 - ≫ $U_A(1)$ anomaly
 - ≫ η' 中間子原子核

フレーバーフロンティアの拡張

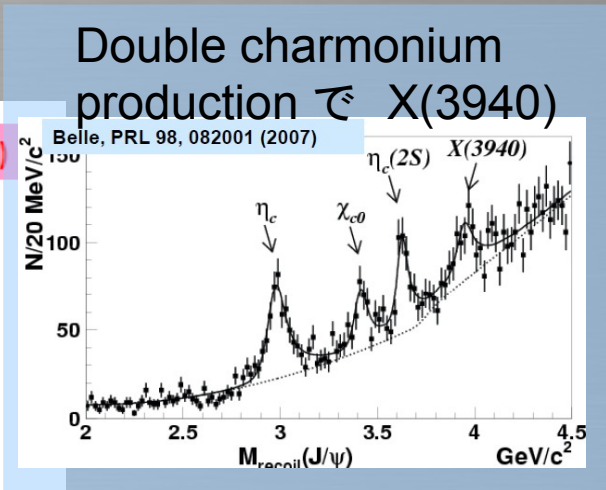
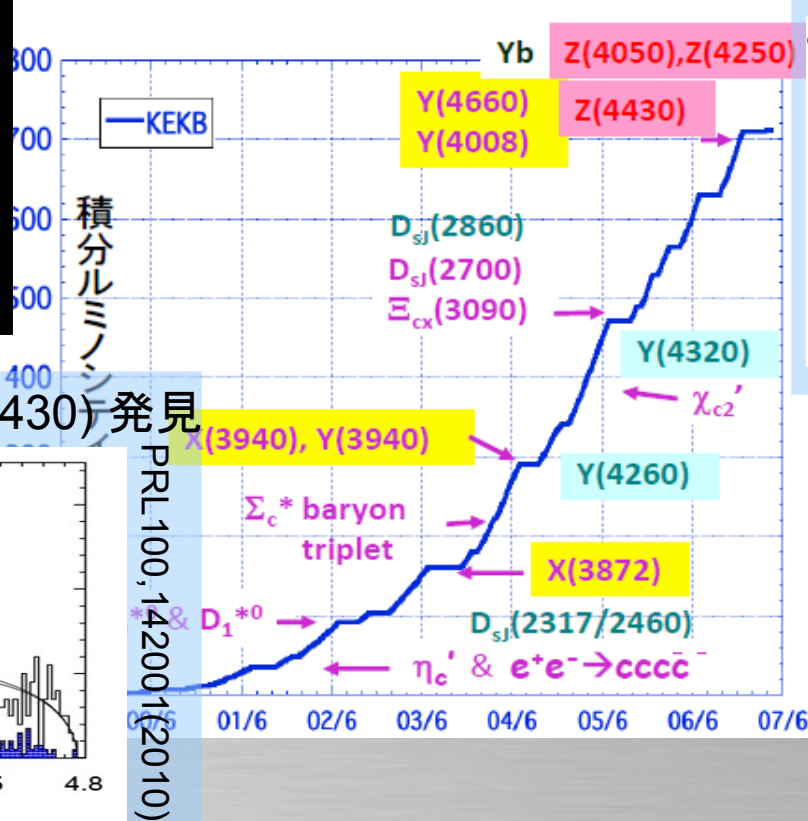
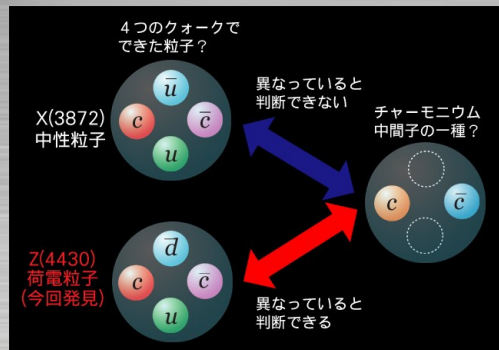
ストレンジネス から
チャーム、ボトムへの展開
(フレーバー対称性から
重いクォーク対称性へ)

charm, bottom のセクターが light quarks と
どう「違う」のか？

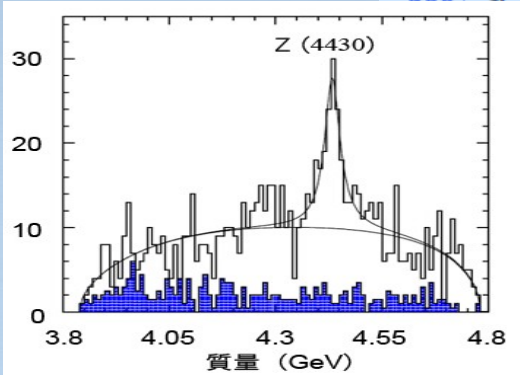
light と heavy 双方の動力学を理解

フレーバーフロンティアの拡張

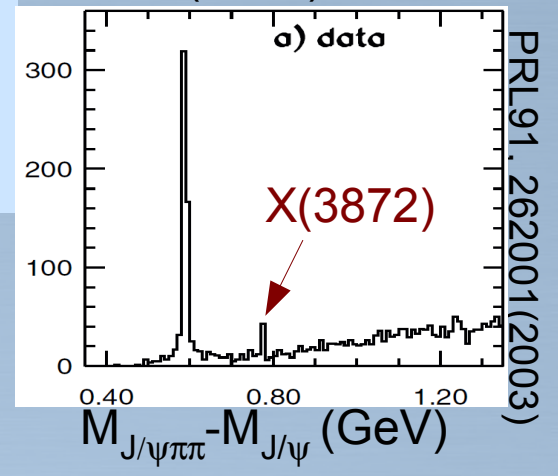
• Belle での 新発見



B → ψ' πK 崩壊での Z(4430) 発見



B → J/ψ π+π- K 崩壊の中に X(3872) 発見



チャーム、ボトムクォークを含む
多くの tetra quark 候補が見つかる

→ 系統的な理解はこれから進んでいく

Charm を見ることの意義

- Strangeness → charm ただの拡張ではない
 - » Color magnetic interaction は $1/m$ で suppress (QCD から)
 - SU(3) : $m_u \sim m_d \sim m_s$ なので区別ない
 - charm → charmに関する相互作用が Suppress

Charm quarkを使って

SU(3)の世界をより深く知る！ (例: カラー相関)

- Charmonium-原子核反応 (J/ψ 原子核)
 - グルーオン交換で束縛
 - 原子核中のグルーオンダイナミクスを探る！

ハドロン物理にとって重要な事

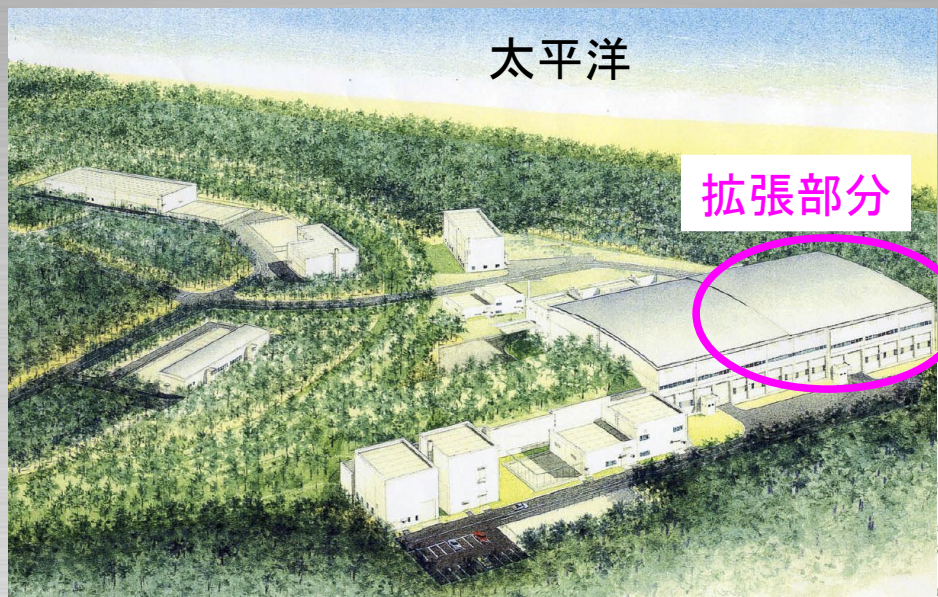
- ”ハドロン”を理解するために必要不可欠なもの
 - ≫ 反応機構 = unique であるか自明ではない
 - ≫ 生成する為の入射粒子 (γ or π) で違う様相を示す
 - ≫ 重いクォークの生成を理解するにはQCDが必要
- 同じ現象を違う角度から多面的に観測
 - ≫ 多彩なビーム ($\gamma, \pi, K, p, \bar{p}$)
 - ≫ 多彩な観測量: 質量、幅、分岐比、
スピン・パリティ決定、生成過程の解明
 - ≫ 大立体、高分解能大型検出器

ハドロン物理にとって重要な事

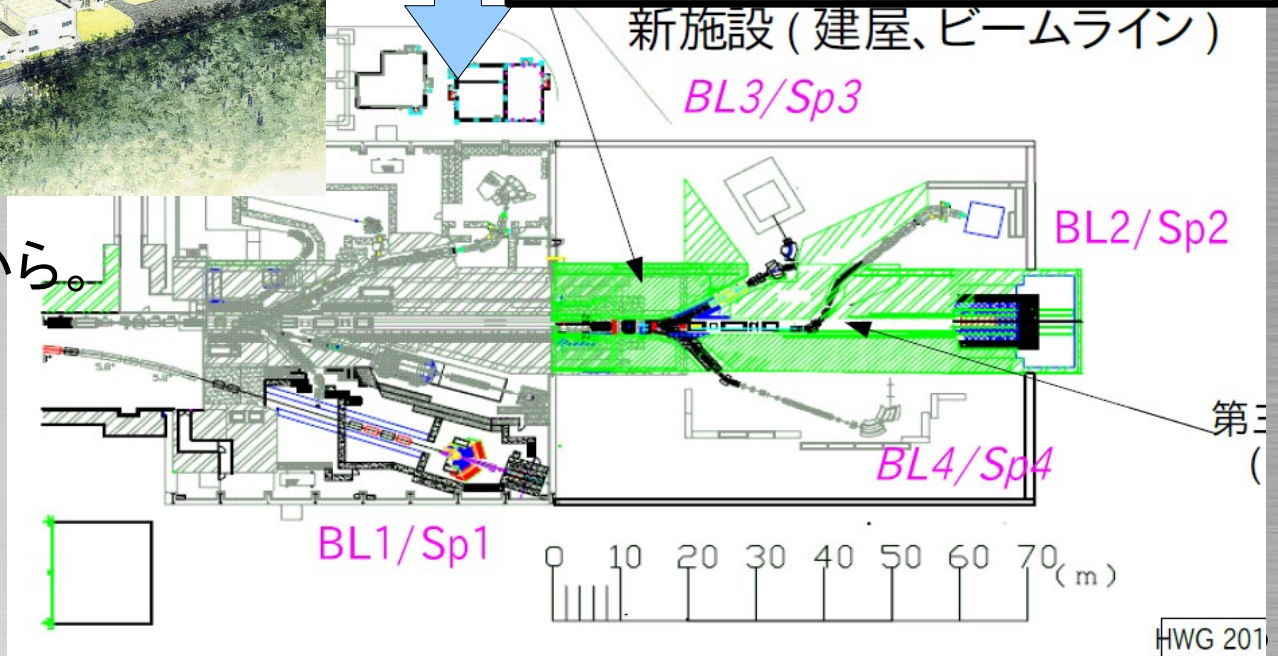
- さらに強力な理論—実験の協力関係
 - » QCD → ハドロン どのようにつながるか？
の枠組み
- 大型将来計画としての最重要課題
 - » LEPS2 spectrometer の完成、実験開始
 - » 大立体角spectrometer を使った γ induced 実験
 - » J-PARC ハドロンホール 拡張
 - » 大強度 π, K, p, \bar{p} 利用可能 ビームラインの建設
 - » 新型 spectrometer

J-PARC ハドロンホール拡張

● 理研・JPARC 連携センター構想



- 現在の施設をほぼ2倍
- 2次粒子生成標的を2個新設(計3個に)
- 新規ビームライン、大型スペクトロメータ建設



具体的デザインはこれから。
コミュニティー全体で

プロジェクト総額
~100億円

LEPS / ELPH / Belle / LEPSII / Belle II

Exotic hadron

カラー対称性
(カラー閉じ込め)

カイラル対称性
ダイナミカルな質量
の獲得

フレーバーフロンティア

Exotic hadron
w/ C or B quarks
charm in nuclei,

核物質中の中間子

J-PARC / RIBF

Belle / Belle II / J-PARC₂₃

ハドロン物理の課題

低エネルギーQCDが織りなす世界の解明

- Exotic hadrons を軸にしたハドロンの多様な存在形態: カラー閉じ込めの物理 (カラー対称性)

LEPS/LEPS2/ J-PARC

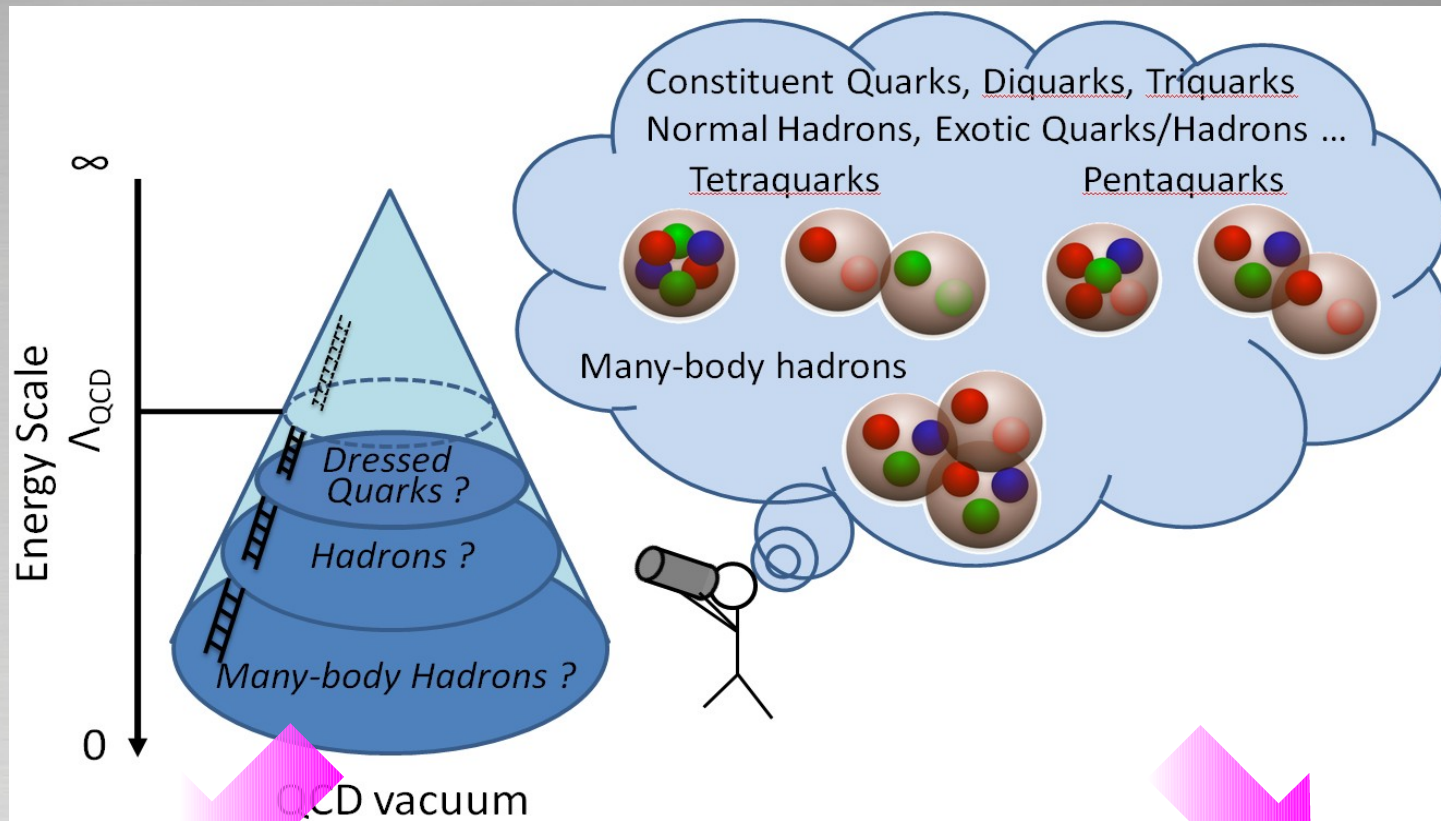
- 核物質中メソンを通じた質量獲得機構の解明 (カイラル対称性)

J-PARC

- フレーバーフロンティアの拡張
ストレンジネス→チャーム、ボトムへの展開

Belle/Belle II/J-PARC

まとめ：ハドロン物理って何？



密度・温度
を変える

フレーバー
を変える

まとめ:ハドロン物理

- ハドロン自身、またはその相互作用を記述する有効自由度は何であるのか？
- その有効自由度とQCDとの間の関係はどのようにしているのか？
 - » ハドロンの中に新たな階層が存在するのか？
 - » 階層形成が如何に行われているのか？
- そのような階層構造が「密度・温度」あるいは「フレーバー」によってどのように変化するのか？

クォーク → ハドロン → ハドロン多体系

これまでWG議論に参加していただいた
みなさま、ありがとうございました

今後もよろしくお願いいたします

おわり