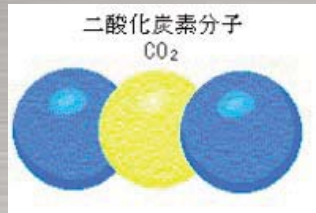


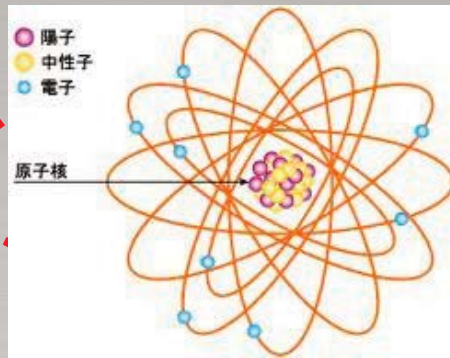
ハドロン物理の将来

石川貴嗣(東北大)、板橋健太(理研)、江角晋一(筑波大)
大西宏明(理研)、小沢恭一郎(東大)、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)

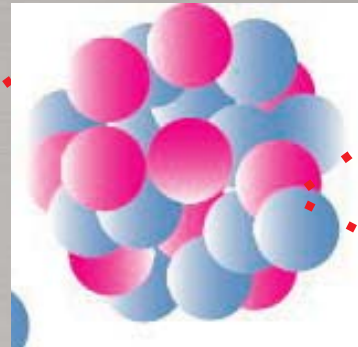
物質の階層構造



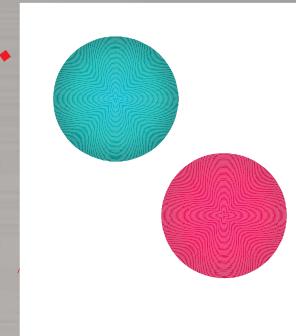
分子 $\sim 10^{-7} \text{ cm}$



原子 $\sim 10^{-8} \text{ cm}$



原子核 $\sim 10^{-12} \text{ cm}$



陽子、中性子、
中間子(ハドロン)
 $\sim 10^{-13} \text{ cm}$



クォーク
 $\sim 10^{-16} \text{ cm}$

- ハドロン

- ≫ 強い相互作用をする粒子

- ≫ “クォーク” を構成要素として持つ多体系

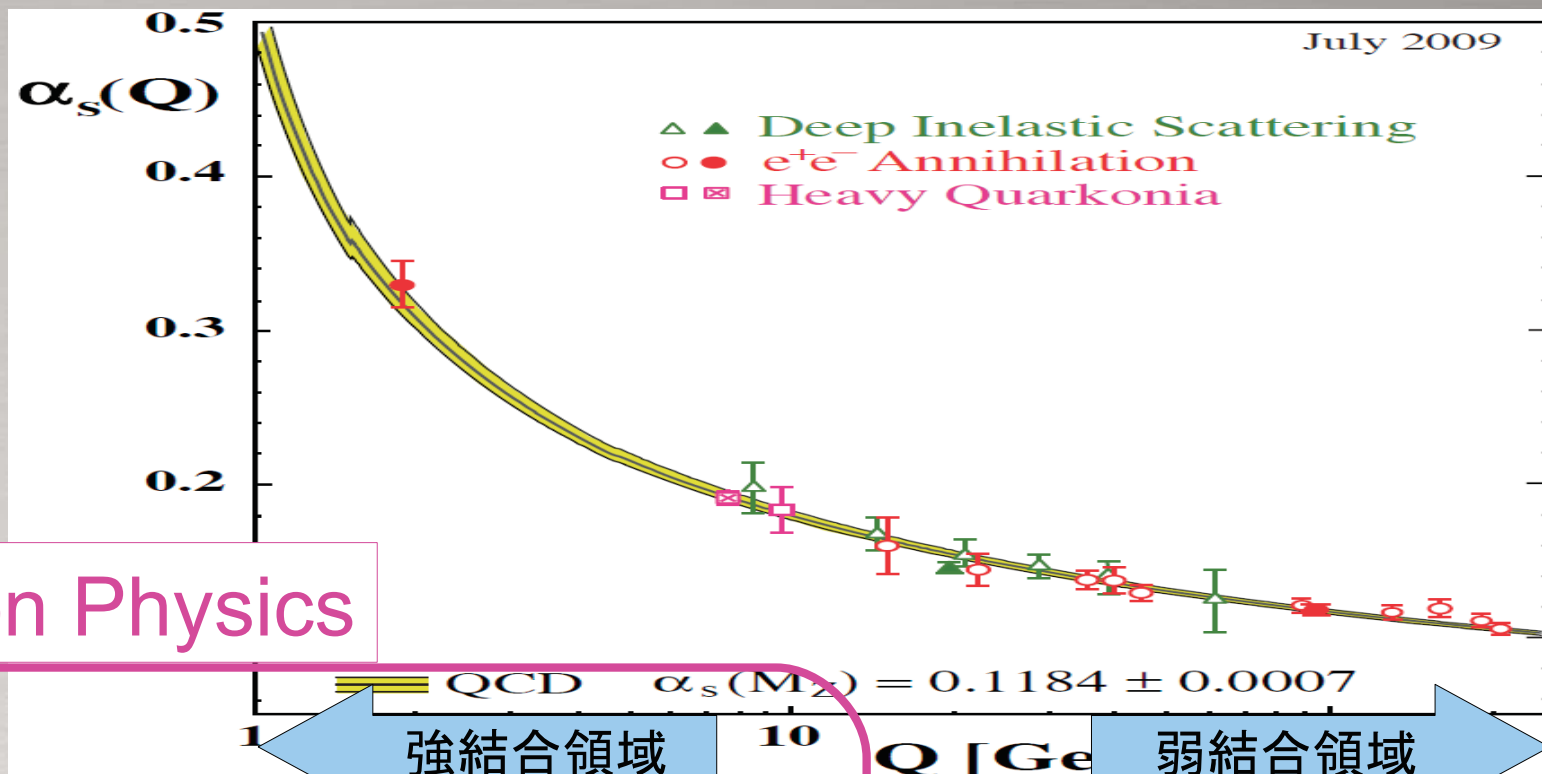
- ≫ メソン : $\bar{q}q$

- ≫ バリオン : qqq

- ハドロンの構成子 “quark(-gluon)” の相互作用は QCD で記述される (基礎理論は確立している)

QCDが許す物質の存在形態

- 強い相互作用結合定数



Hadron Physics

非摂動

閉じ込め、カイラル対称性の破れ
Quark-Gluon複合体のダイナミクス

LatticeQCD and/or 現象論
での理解

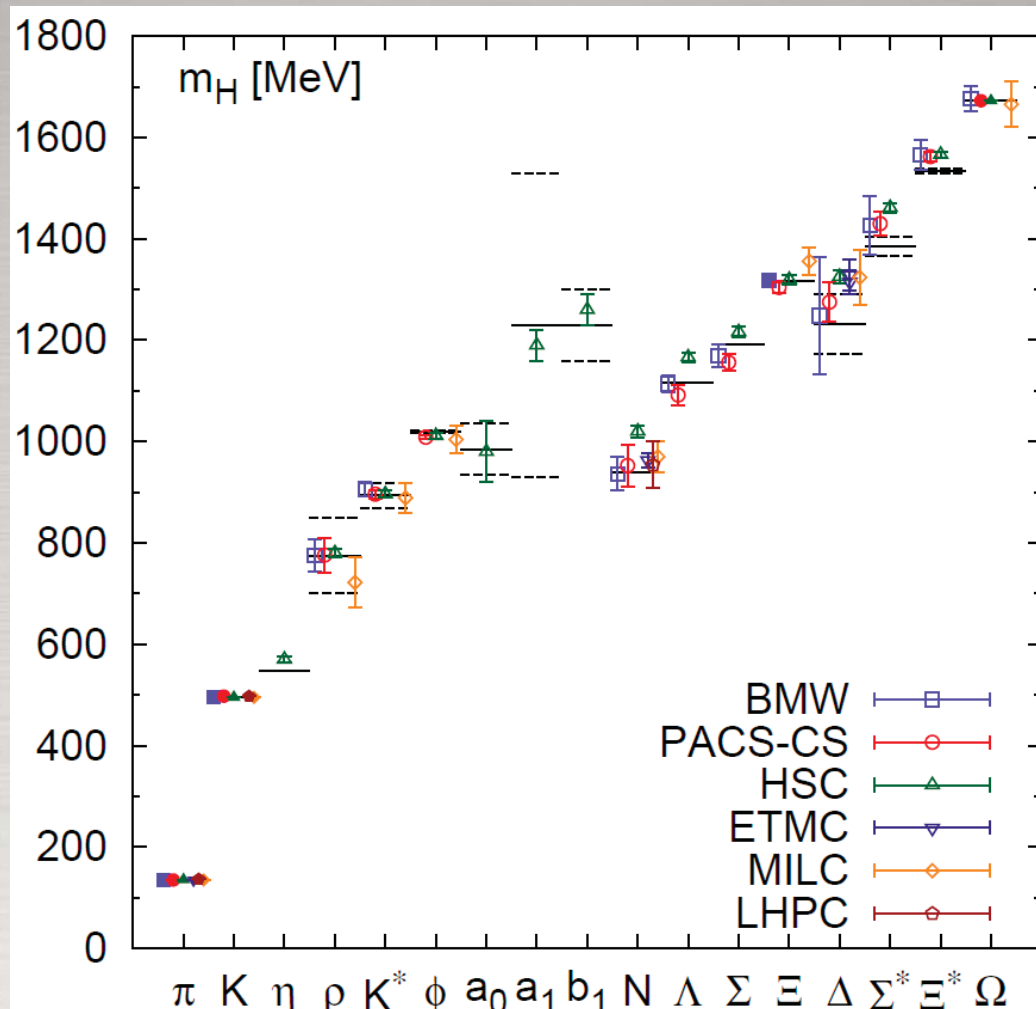
摂動論適用可能

Quark-Gluon のダイナミクス

pQCDによる理解

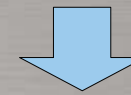
Hadron Spectrum in LQCD

- 最近のLatticeQCDの計算結果



E. E. Scholz, PoS LAT2009,
005 (2009), 0911.2191.

QCDからスタート



ハドロンスペクトルをよく再現

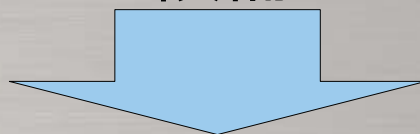
ハドロンのは”わかった”
と言っていいのか？
(ハドロン物理は終わった？)

QCD は正しかった。。。
それがハドロン物理の目標？

ハドロン物理

- Key question :

- » ハドロンを記述する有効自由度(Building block)は何？
 - » Constituent quarkモデルの成功(少なくとも基底状態)
 - » 一方、Lambda(1405)に代表される励起状態についてはハドロン分子的状态の方が適当？
 - » tetra-,penta- quark 候補 ハドロンの発見



ハドロンの中に階層構造(有効自由度)が存在するのか？
どのようにQCDから有効自由度が作られるのか？
ハドロンにおけるクォークの正体(≠裸のクォーク)

クォーク-グルーオンから

ハドロンができる"物理"を知りたい！

ハドロン物理

● 背後に潜む物理

» ハドロン質量獲得

= "閉じ込め" と "クオーク凝縮 ($\langle \bar{q}q \rangle$) " の関係は？

» 媒質（原子核）中のハドロン質量（メソン質量減少）

» 核物質中 pion decay constant の変化（pionic atom）

» 閉じ込めスケール？

» ハドロンの大きさ？

light ($\pi, K \dots$) v.s. Heavy ($B, J/\psi \dots$) で違いがある？

» Exotic hadron は本当に存在？ その大きさは？

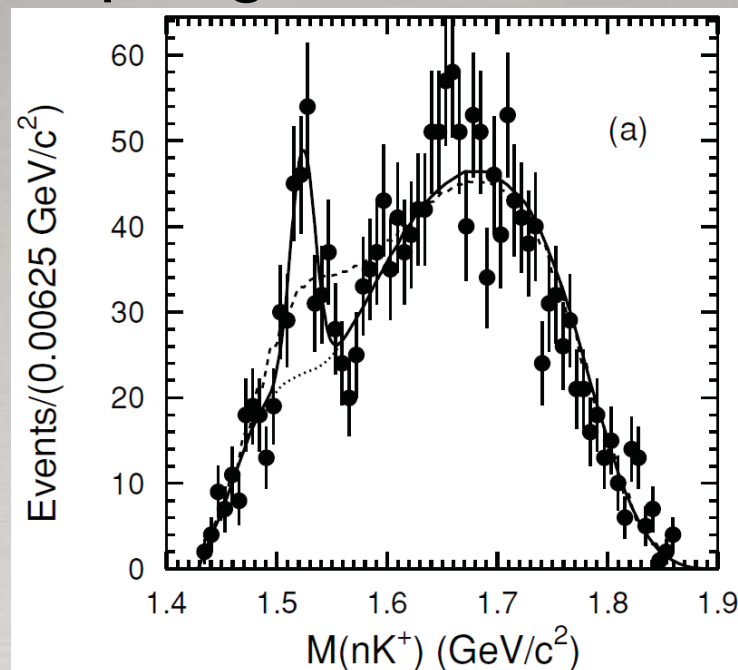
» ハドロン内部 = クオーク多体系

» ハドロン内部でクオーク-クオーク相関がある？

最近の研究成果と 近未来（+7年）への展望

新しいソhadron (Θ^+)

Spring-8 : LEPS



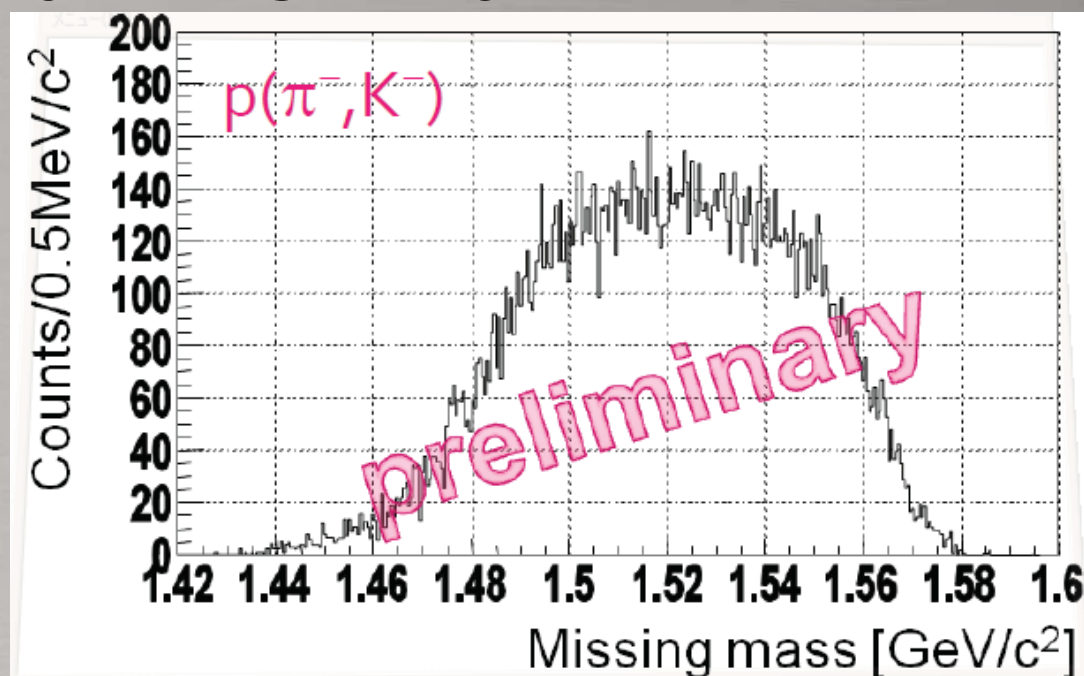
PRC 79,025210(2009)

$\gamma d \rightarrow K^+ K^- p n$ 反応

高統計データが
近々出てくる

LEPS2 での
高精度実験へ

J-PARC : E19

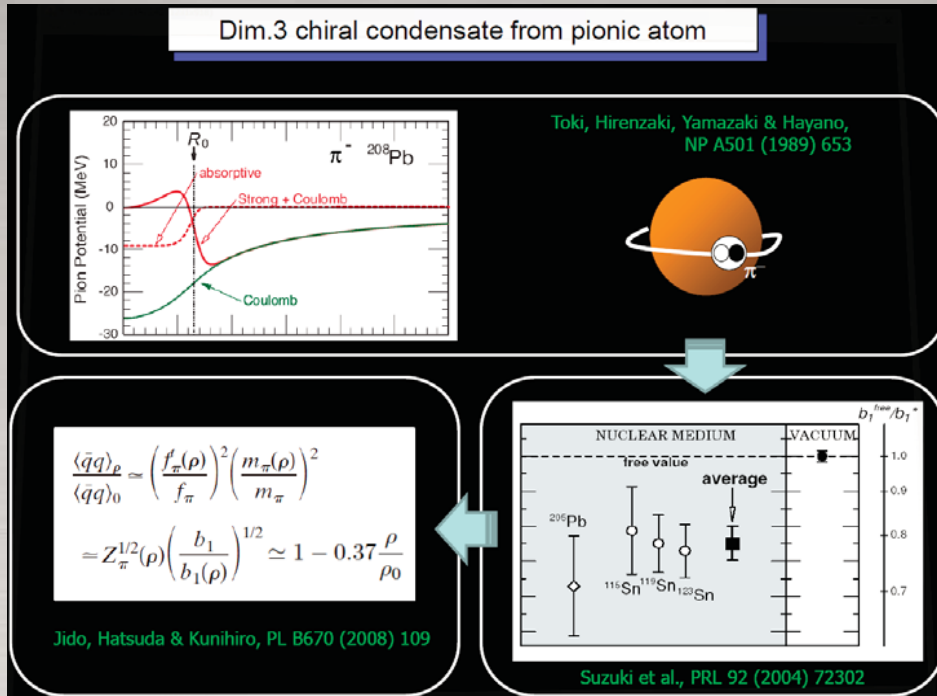


$p(\pi^-, K^-)$ 反応

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

核物質中 中間子

• Pionic atom の大成功



➡ RIBF で新展開 (NP0802-RIBF54)
精密測定、Systematic studyへ

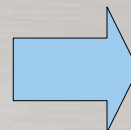
Pionic atom に続け！

多彩なメソンを原子核に束縛させる

K-pp (J-PARC E15, E27)

ω (J-PARC E26), ϕ (J-PARC E29)

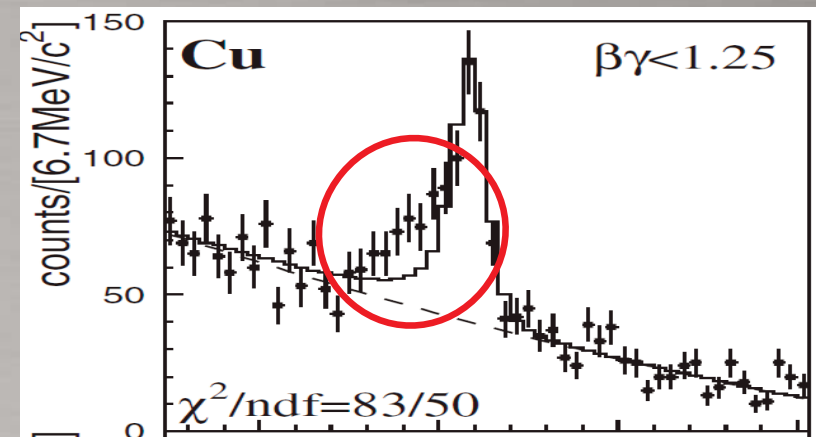
η (J-PARC LOI), η'



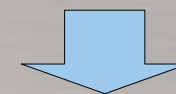
• 核内ベクターメソン

» KEK PS E325

» 原子核内の ϕ が軽くなる



大統計・systematic study を
J-PARCで！ (J-PARC E16)



J-PARC で展開する
新しい物理へ

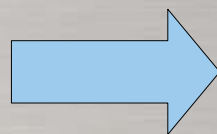
Excited baryons

- Constituent quark model
 - » grand state baryon spectrumはよく表現
 - » Excited state 見つかってないものの多数
 - » Penta quark状態、メソン-バリオン共鳴をはじめ exotic state があるかも



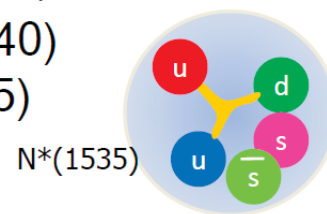
Photon beamを使って展開

LEPS/Spring-8
ELPH/Tohoku Univ.



LEPS2へ

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



B. S. Zou, NPA790, 110c

Exotic particle from HI collisions

PRL 106, 212001 (2011) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 27 MAY 2011

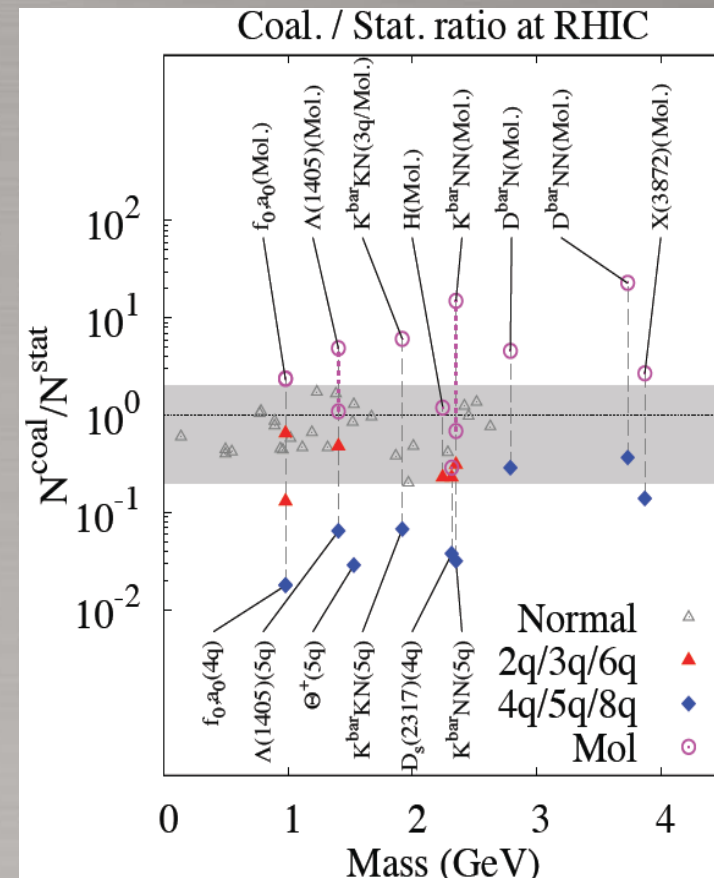
Identifying Multiquark Hadrons from Heavy Ion Collisions

Sungtae Cho,¹ Takenori Furumoto,^{2,3} Tetsuo Hyodo,⁴ Daisuke Jido,² Che Ming Ko,⁵ Su Houng 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.

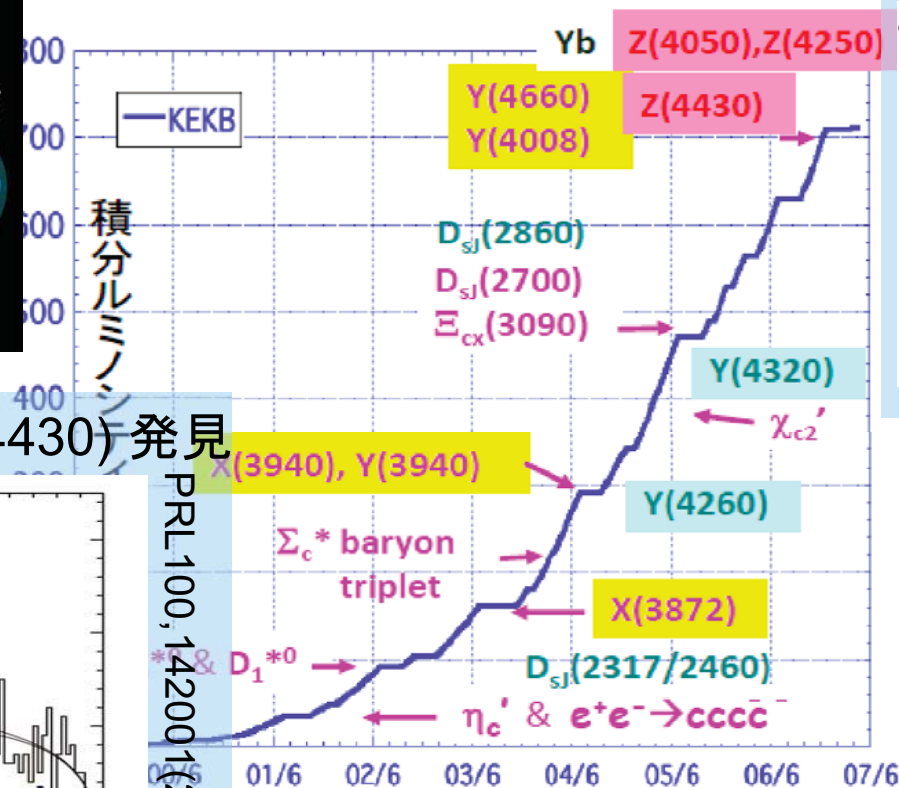
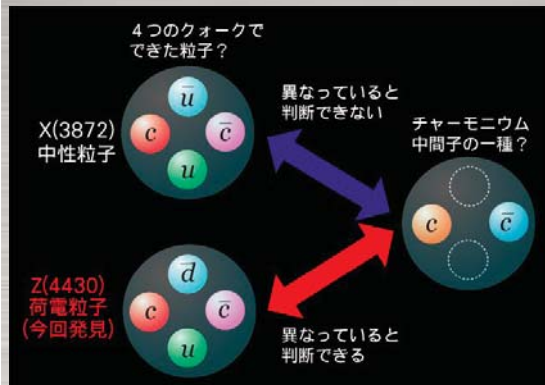
- 高エネルギー重イオン衝突で作
りだされる大量の粒子の中から
Exotic particleをさがす
- 生成比から Exotic particle の内部構造
(quark の数、ハドロン-ハドロン分子状態など)



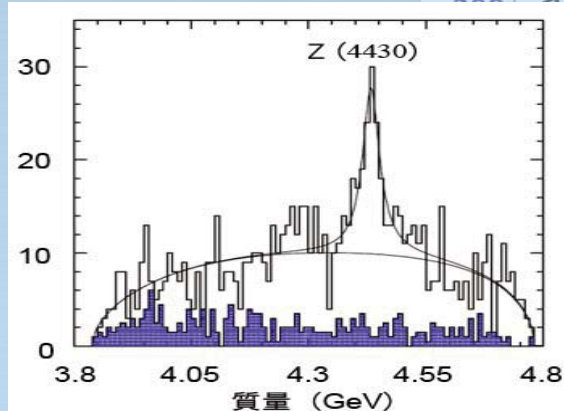
➡ RHIC、LHC へ

Exotic particle in Belle

- 圧倒的大統計、大立体角、高分解能実験の特徴を生かした新種ハドロンの探索

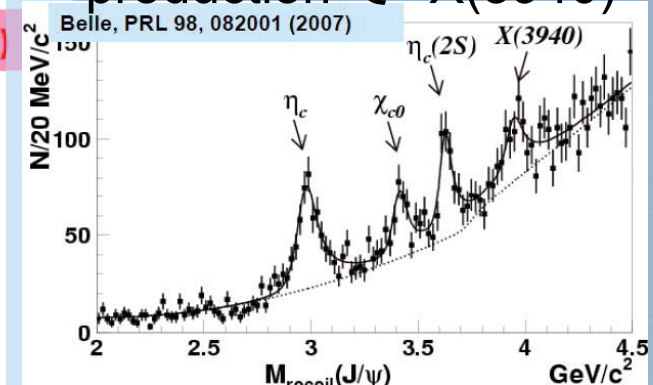


B → ψ' π K 崩壊でのZ(4430)発見

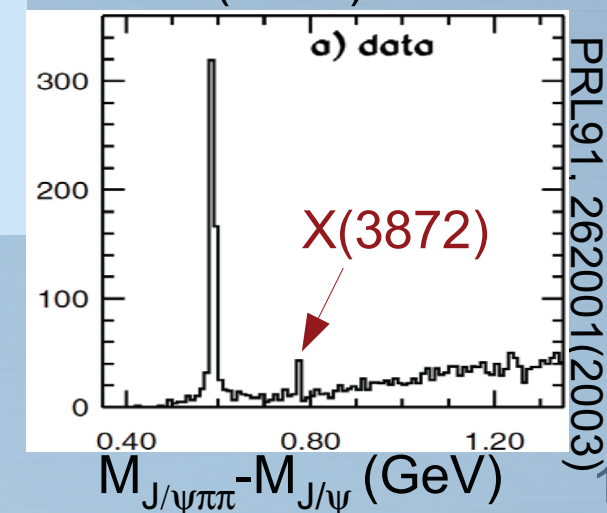


PRL100, 142001(2010)

Double charmonium production で X(3940)



B → J/ψ $\pi^+\pi^-$ K 崩壊の中にX(3872)発見

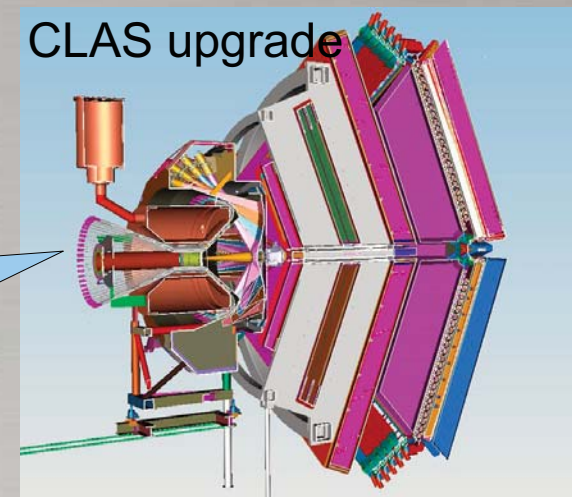
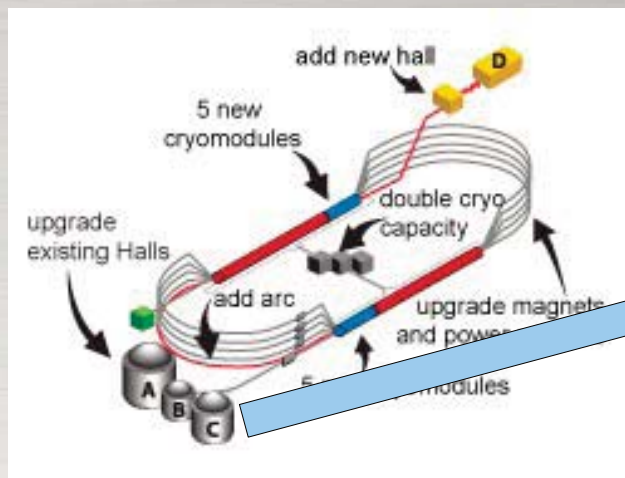


まだまだ解析すべきデータはたくさんある
Belle II へと続く！

世界の動向

国外プロジェクト

- Jefferson Lab. CEBAF 12 GeV upgrade, 建設完了、2015年
 - **Quark Confinement** - With the upgrade, physicists plan to address one of the great mysteries of modern physics - why quarks only exist together, and never alone.
 - **The Fundamental Structure of Protons and Neutrons** - The upgrade will enable scientists to map in detail the distributions of quarks in space and momentum, culminating in tomography measurements that will constitute a three-dimensional picture of the internal structures of protons and neutrons.
 - **The Physics of Nuclei** - The upgrade will allow researchers to illuminate the role of quarks in the structure and properties of atomic nuclei, and how these quarks interact with a dense nuclear medium.
 - **Tests of the Standard Model** - An upgraded facility will allow physicists to study the limits of the "Standard Model," a theory that describes the fundamental particles and their interactions.



国外プロジェクト

- GSI-FAIR

Research programmes at FAIR

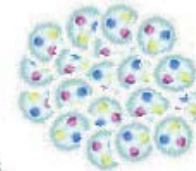
Beams of antiprotons: hadron physics
quark-confinement potential
search for gluonic matter and hybrids
nucleon structure, double hypernuclei



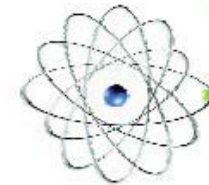
Rare isotope beams: nuclear structure and nuclear astrophysics
nuclear structure far off stability
nucleosynthesis in stars and supernovae



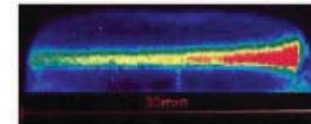
Nucleus-nucleus collisions: compressed baryonic matter
baryonic matter at highest densities (neutron stars)
phase transitions and critical endpoint
in-medium properties of hadrons



Atomic physics, FLAIR, and applied research
highly charged atoms
low energy antiprotons
radiobiology



Short-pulse heavy ion beams: plasma physics
matter at high pressure, densities, and temperature
fundamentals of nuclear fusion



Accelerator physics
high intensive heavy ion beams
dynamical vacuum
rapidly cycling superconducting magnets
high energy electron cooling

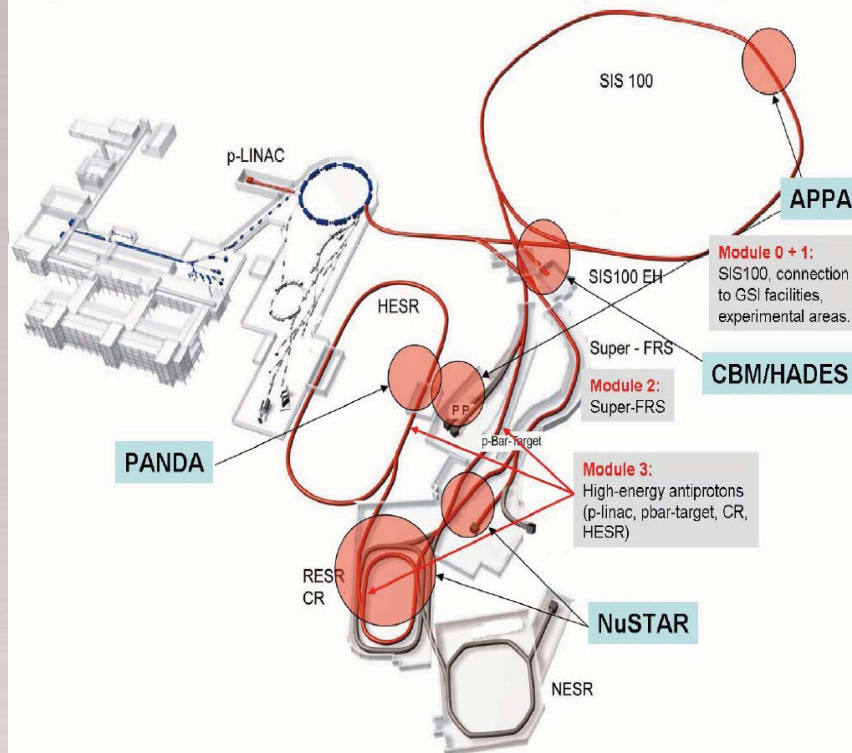


Peter Senger, GSI and Univ. Frankfurt

国外プロジェクト

- GSI-FAIR

Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR)



primary beams

- $5 \times 10^{11}/s$; 1.5-2 GeV/u; $^{238}\text{U}^{28+}$
- factor 100-1000 increased intensity
- $4 \times 10^{13}/s$ 90 GeV protons
- $10^{10}/s$ ^{238}U 35 GeV/u (Ni 45 GeV/u)

secondary beams

- rare isotopes 1.5 - 2 GeV/u;
- factor 10 000 increased intensity
- antiprotons 3(0) - 30 GeV

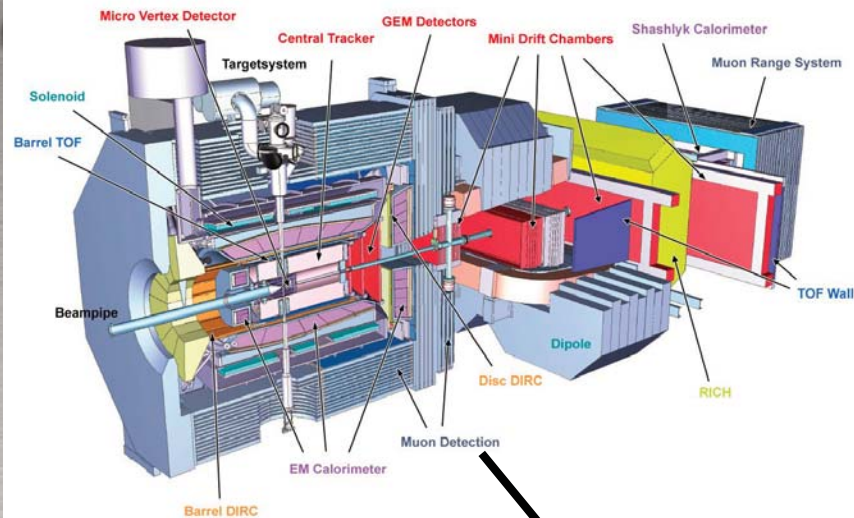
storage and cooler rings

- beams of rare isotopes
- e – A Collider
- 10^{11} stored and cooled antiprotons
- 0.8 - 14.5 GeV

accelerator technical challenges

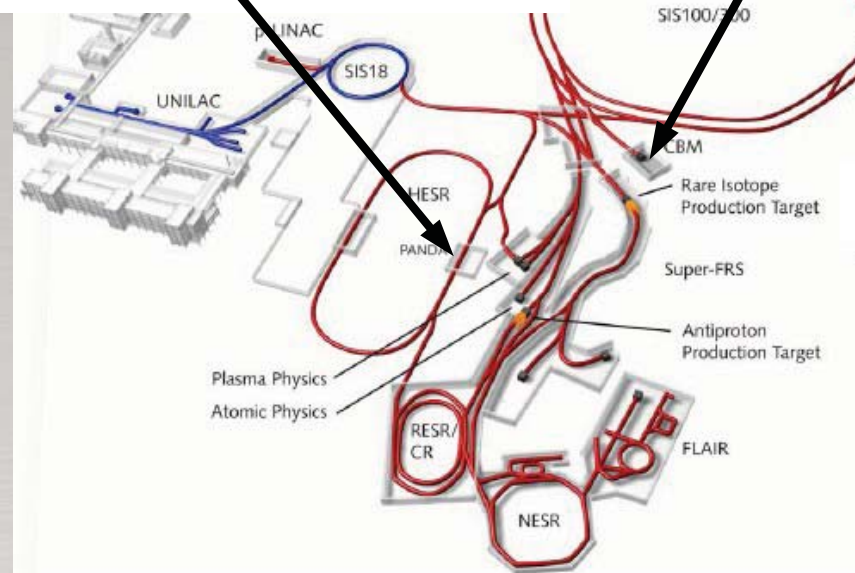
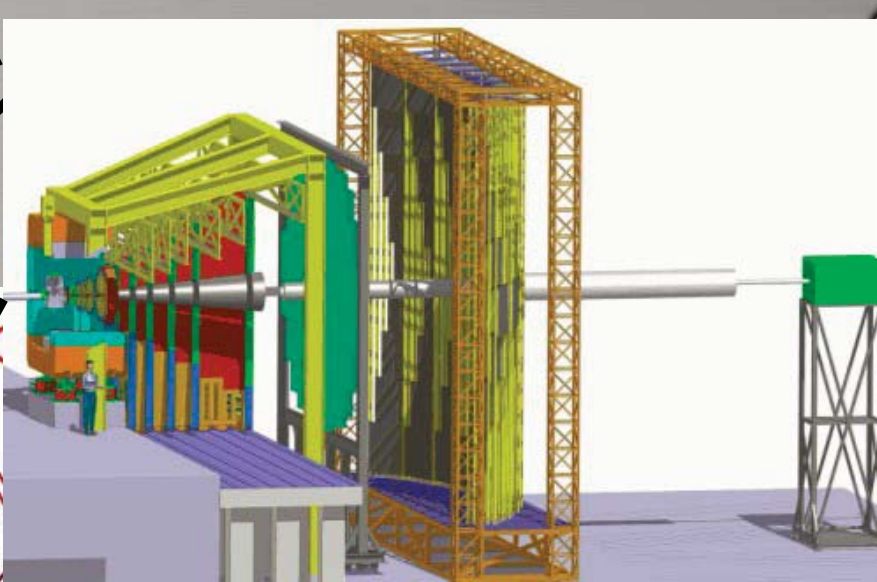
- Rapidly cycling superconducting magnets
- high energy electron cooling
- dynamical vacuum, beam losses

Peter Senger, GSI and Univ. Frankfurt



プロシ

ton and I



- factor 100-1000 increased intensity
- $4 \times 10^{13}/s$ 90 GeV protons
- $10^{10}/s$ ^{238}U 35 GeV/u (Ni 45 GeV/u)

secondary beams

- rare isotopes 1.5 - 2 GeV/u;
- factor 10 000 increased intensity
- antiprotons 3(0) - 30 GeV

storage and cooler rings

- beams of rare isotopes
- e - A Collider
- 10^{11} stored and cooled antiprotons
- 0.8 - 14.5 GeV

accelerator technical challenges

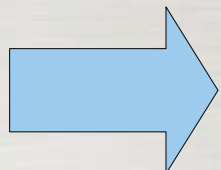
- Rapidly cycling superconducting magnets
- high energy electron cooling
- dynamical vacuum, beam losses

Peter Senger, GSI and Univ. Frankfurt

未来（＋7年以降）への展望

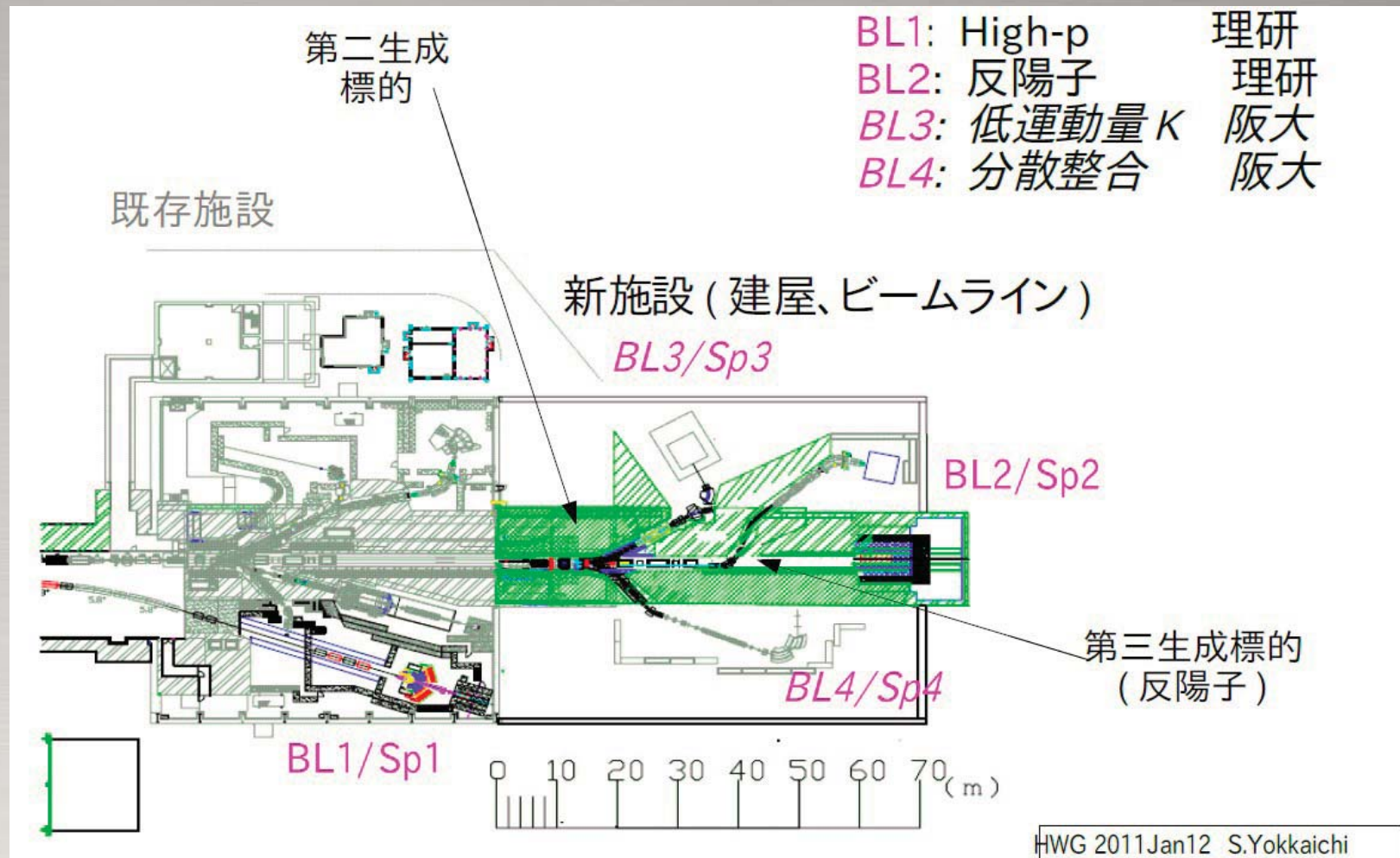
次世代ハドロン物理 にとって重要な事

- ストレンジネス → チャーム への展開
 - » Belle Hadron Physics で得た見地をベース
 - » QCDから出発したハドロン物理を展開
 - » J/psiをつかったgluonの物理
 - » チャームエキゾチックハドロンの生成の物理
 - » フレーバーの違い
 - (chiral対称性 v.s heavy quark対称性)
 - » 重いクォークをアンカーにチャームハドロンの中の軽いクォーク相関を見る (チャームエキゾチックハドロン)
 - » 原子核中のチャームメソン (媒質効果)



J-PARC 拡張計画は最重要課題 19

理研J-PARC連携センター



- 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

まとめ

- ハドロン物理の大目標

- » クォーク-グルーオンからハドロンができる機構をいろんなハドロンを使って解明する

- » Exotic hadron

- » Hadron を記述する有効自由度／準粒子描像の確立

- » ハドロン内 クォーク相関

- » 通常、Exotic ハドロンの大きさ？

- » 原子核内中間子

- » カイラル対称性 → hadron 質量

- » 重いクォーク (charm/bottom quark) を通してハドロン物理におけるQCDの役割を探り、ストレンジネスからチャーム/ボトムハドロン物理を包括的に理解する

まとめ

- これまで（+今後 7 年）の研究展開
 - » γ beam での物理 => SPring-8 LEPS/LEPS2
ELPH
 - » penta-, $\Lambda(1405)$, N^* resonance ...
 - » Hadron beamでの物理 => J-PARC, RIBF
 - » Pionic atom, meson in nuclei, penta-, $\Lambda(1405)$...
 - » Belle での 共鳴状態探索
 - » さらなる Exotic state の探索

まとめ

- 大型将来計画としての最重要課題
 - » J-PARC ハドロンホール 拡張
- ハドロン物理に必要なもの
 - » 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（Belleみたいなもの）
 - » 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
 - » 物質存在のスケールによる階層性はどのように存在
するのか？

