

# フレーバーで探るハドロンの新しい 存在形態: 実験

中野貴志(阪大RCNP)

「J-PARCで展開される将来の物理」研究会

2011年6月10日～11日@KEK

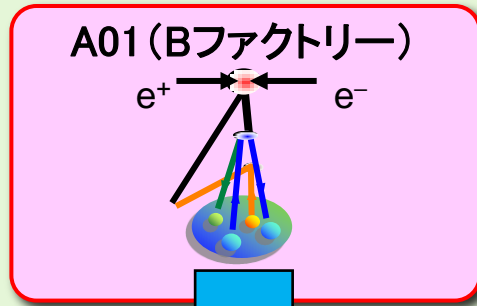


# 「多彩なフレーバーでさぐる新しいハドロン存在形態の包括的研究」

世界をリードする素粒子原子核分野の実験・理論研究者が、「ハドロン」という共通のキーワードを得て結集、その境界領域に新しいハドロン物理学を創成する。

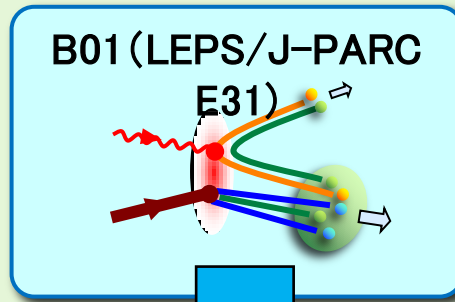
E01 (理論研究) QCDに基づく統一的な理解+実験への予言

クォークがどのように質量を獲得し、どのような形態でハドロンに閉じ込められるのかを探る



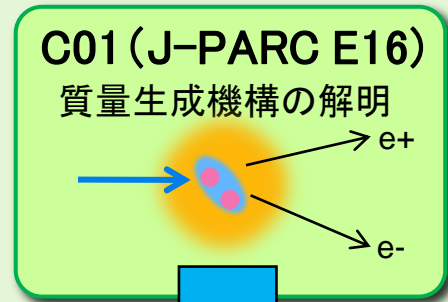
A01 (Bファクトリー)

$e^+$   $e^-$



B01 (LEPS/J-PARC E31)

$\gamma$   $q$



C01 (J-PARC E16)

質量生成機構の解明

$e^+$

$e^-$



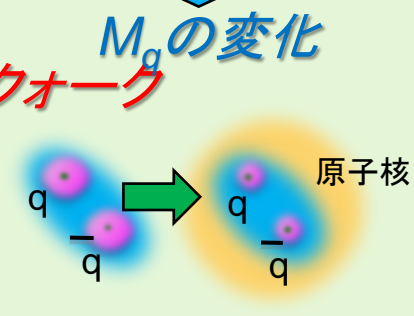
$q q \bar{q} \bar{q}$  ハイブリッド

$c, b$ -クォーク



$q q q q \bar{q}$

$u, d, s$ -クォーク



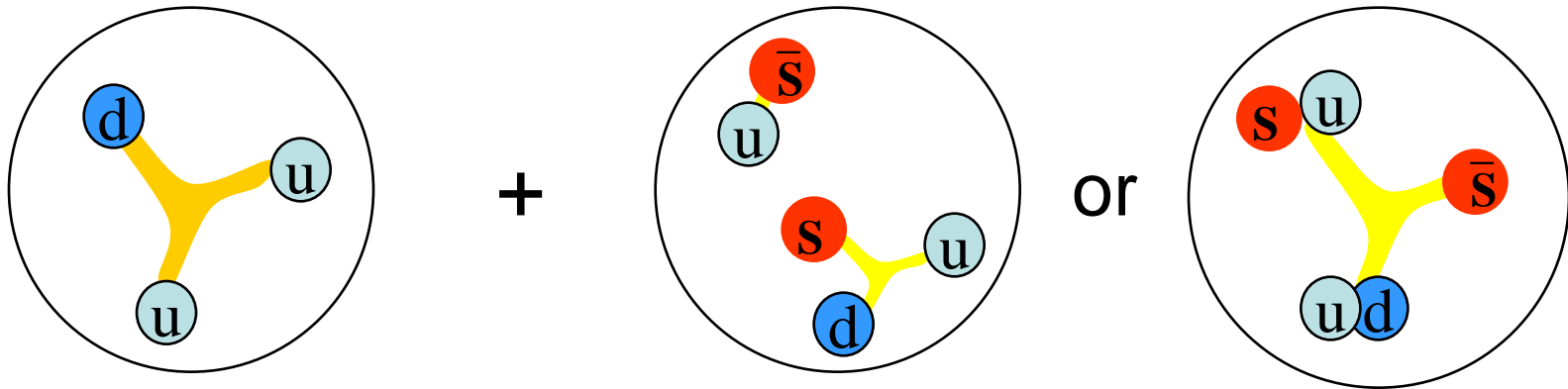
$M_q$  の変化

原子核

多彩なフレーバーと密度を変数とした(マルチ)クォーク物質の豊富なデータ

D01 (検出器): 将来の加速器増強に向けて必要となる検出器共同開発

# What are effective degrees of freedom ?



**Meson cloud picture:** Thomas, Speth, Weise, Oset, Jido, Brodsky, Ma, ...  
 $|p\rangle \sim |uud\rangle + \varepsilon_1 |n(udd)\pi^+(\bar{d}u)\rangle$   
 $+ \varepsilon_2 |\Delta^{++}(uuu)\pi^-(\bar{u}d)\rangle + \varepsilon' |\Lambda(uds)K^+(\bar{s}u)\rangle + \dots$

**Di-quark cluster (5-quark) picture:** Zou, Riska, Jaffe, Wilczek  
 $|p\rangle \sim |uud\rangle + \varepsilon_1 |[ud][ud]\bar{d}\rangle + \varepsilon_2 |[ud][us]\bar{s}\rangle + \dots$

クォークの数は数えることができるか、  
数えることに意味はあるか。

Constituent Quarkは、どれくらい良い近似  
か。

$\pi$ 、K中間子は、ハドロンの構成要素にな  
れるか。

ダイクォークは、準粒子としてふるまう  
か。

# ハドロンのクォーク構造

メソンの構造はカラーの数に依らない.

$$r\bar{r} + g\bar{g} + b\bar{b}$$

バリオンの構造はカラーの数 3 を反映する.

$$rgb + gbr + brg - grb - rbg - bgr$$

## 強いダイクォーク相関

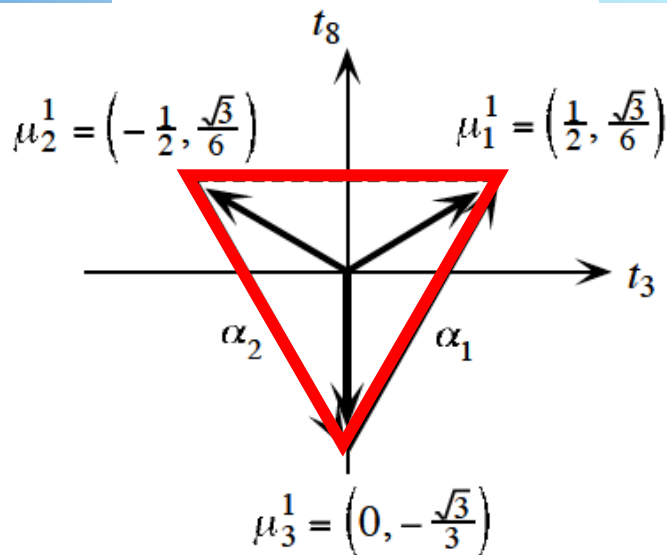
$$v_0 \frac{(\lambda_i \cdot \lambda_j)(\vec{s}_i \cdot \vec{s}_j)}{m_i m_j}$$

スピン=0で引力.

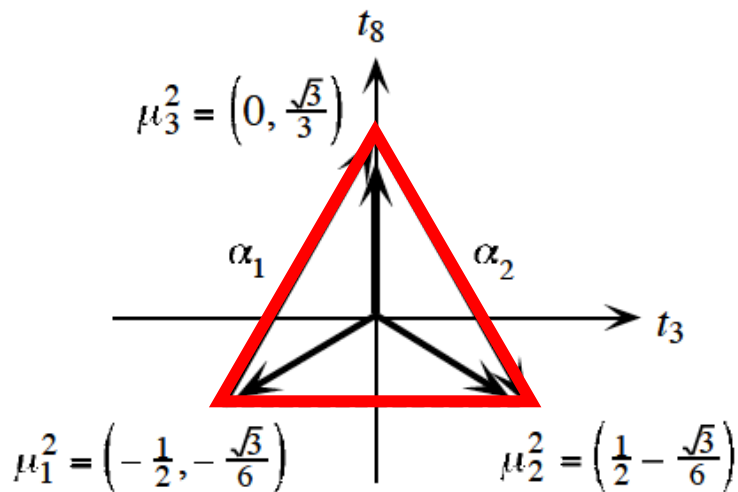
軽いクォーク程、大きな引力.

# ストレンジネスを導入すると何が 変わるか？

3(基本)表現



3(基本\*)表現



クォーク



反クォーク



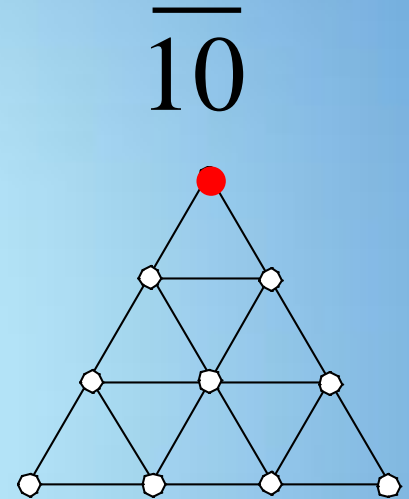
ダイクォーク

カラーの面でもフレーバーの面でもダイクォーク  
は反クォークのようにふるまう。

反クォーク～ダイクォークが良い  
近似ならば

$$\overline{sss} \rightarrow (ud)(ud)\overline{s}$$

$$\overline{uds} \rightarrow (ds)(su)(ud)$$





# さらに重いクォークを持ち込むと 何が変わるか？

カラー・スピノ力が弱い.

重いクォーク（反クォーク）～ダイクォーク.

運動エネルギーが小さい.

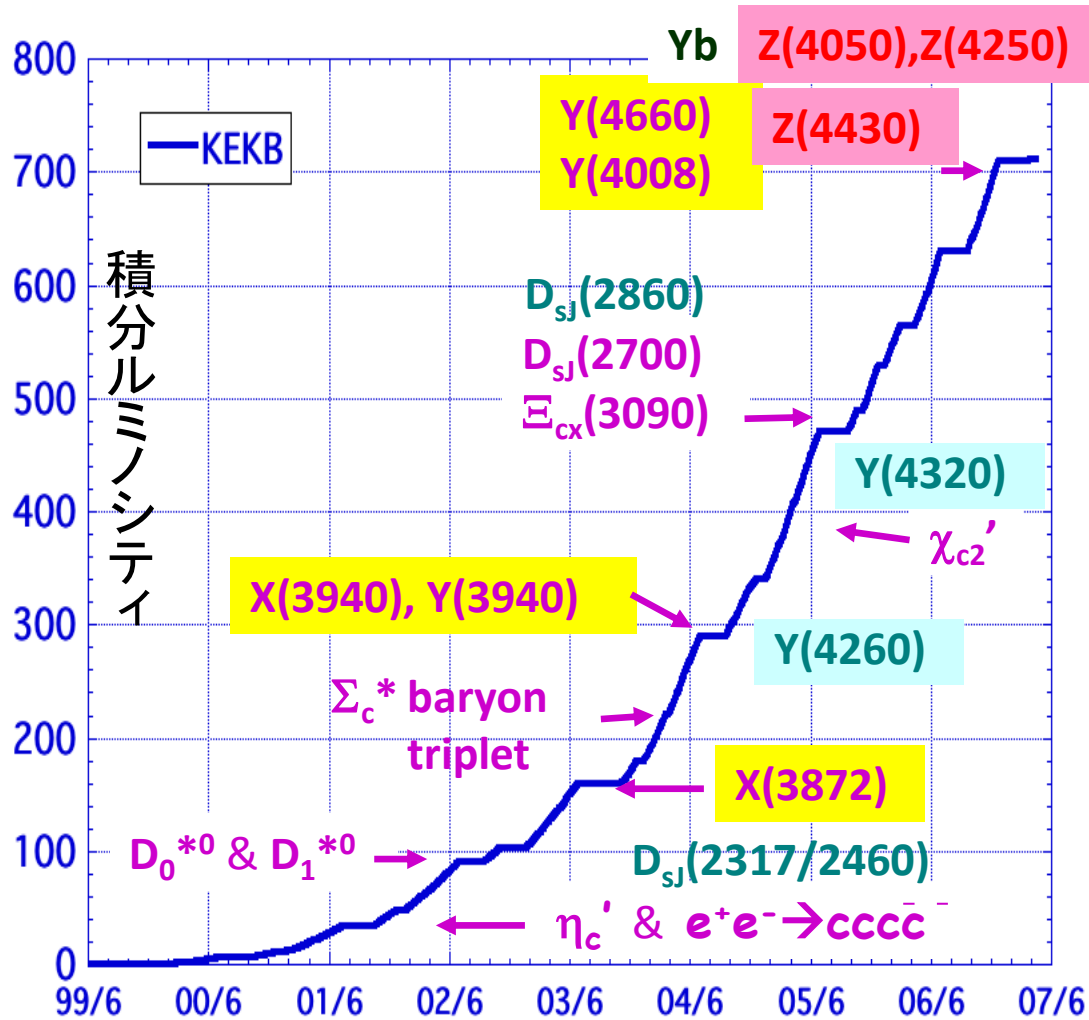
ハドロン物理としてはより単純.

エキゾチックハドロンにはより有利.

# KEKBでのハドロン物理

- 圧倒的な統計量
  - New particles, rare events, high precision
- 高いエネルギー
  - Heavy quark hadrons
- 大きなアクセプタンス
  - Multi-particle final state
- 優れた運動量分解能とPID能力
  - Invariant mass analysis, short lived particles
- 核物理分野からの参加
  - Nuclear Physics Consortium

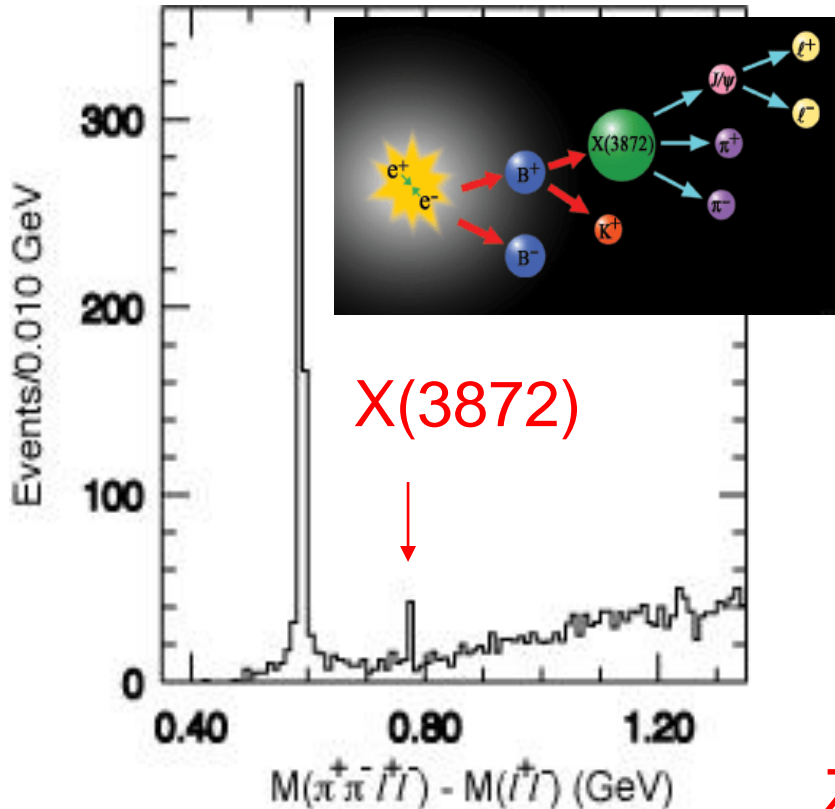
# Bファクトリーで発見された新共鳴粒子



# B中間子崩壊での発見

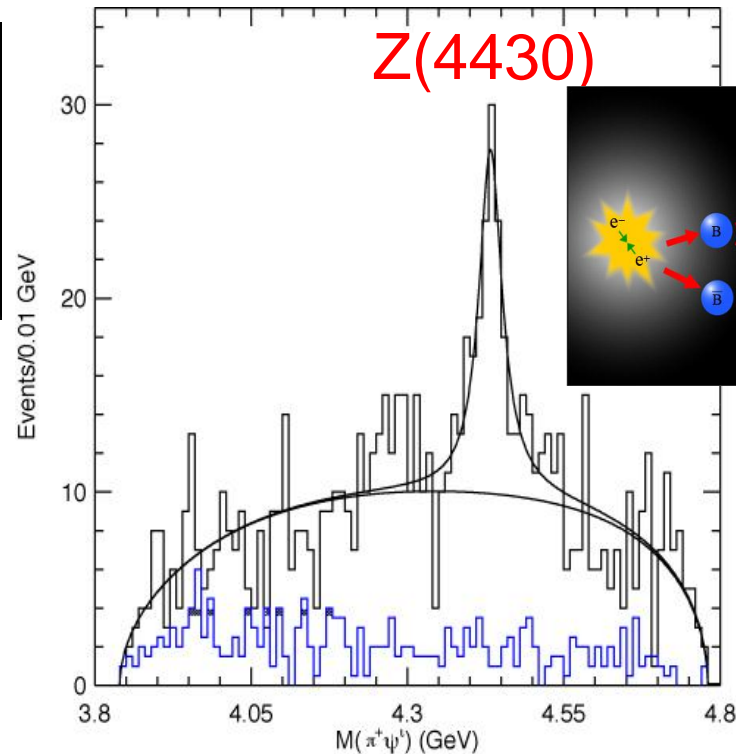
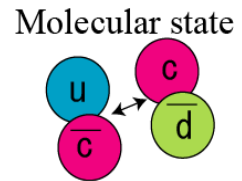
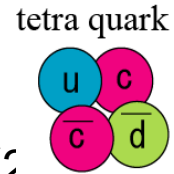
B → J/ψ π<sup>+</sup> π<sup>-</sup> K過程  
におけるX(3872)の  
発見

PRL91,262001(2003)



B → ψ' π<sup>+</sup> K過程におけ  
るZ(4430)の発見

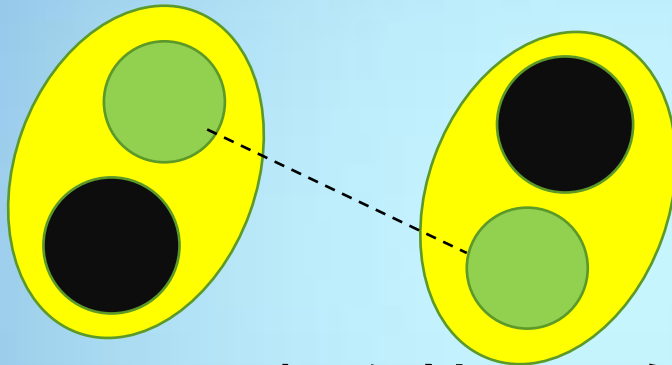
PRL100,142001(2008)



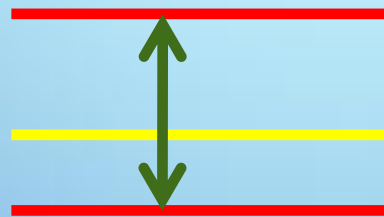
Z<sub>b</sub>(10610) <http://jp.arxiv.org/abs/1105.4583>

# 分子共鳴状態から何が学べるか？

## 軽いクォークと $\pi$ 中間子の結合



同じ量子数を持つ閾値より上の状態との混合



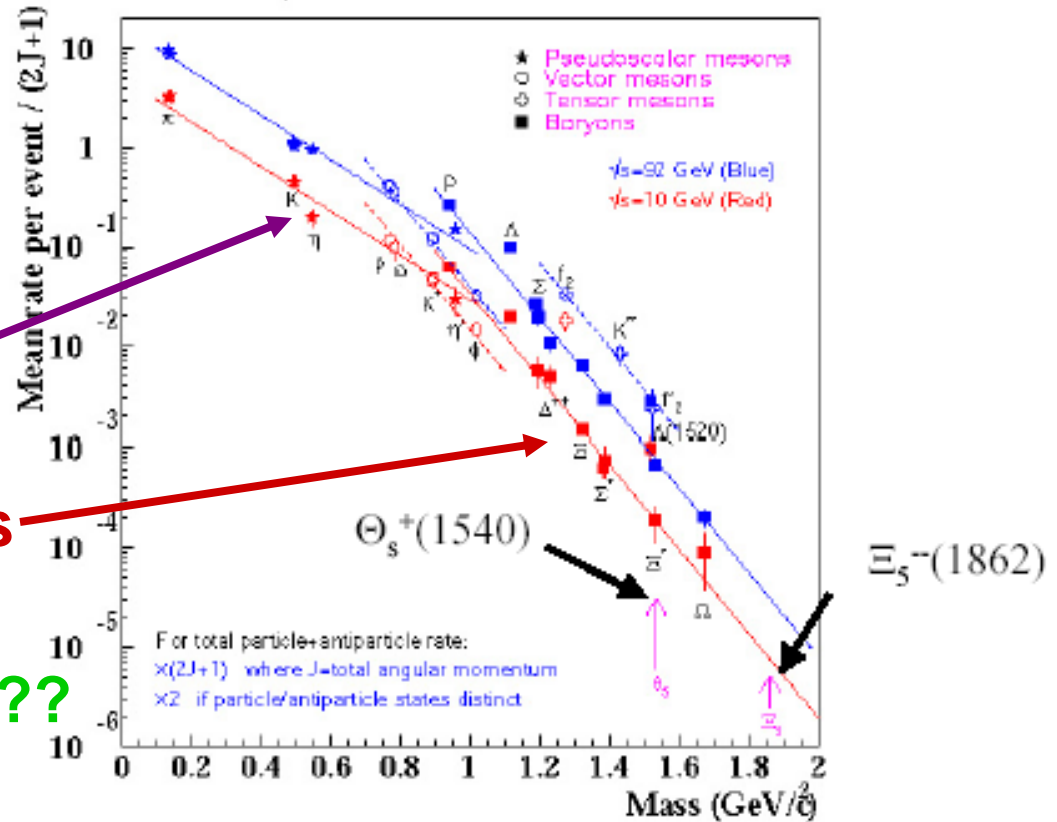
Particle-Particle threshold



**BABAR**

# Hadron Rate in $e^+e^- \rightarrow \text{Hadron}$

Hadron production in  $e^+e^- \rightarrow \text{Hadrons}$



Slope for mesons

Slope for baryons

Slope for pentaquarks??

Assuming the Pentaquark production is the same as baryon production we expect the total production of  $\Theta_s^+$ ,  $\Xi_5^-$  per event continuum to be  $\Theta_s^+ = 7 \times 10^{-4}$ ,  $\Xi_5^- = 3. \times 10^{-5}$

# 不安定なハドロンの生成率

- Tetra-quark や meson-meson resonance 候補の生成率は他の meson と比べてどれくらい小さいか？
- Penta-quark や meson-baryon resonance 候補の生成率は他の Baryon と比べてどの程度小さいか？
  - $\Lambda(1405)$  と  $\Lambda(1520)$  の生成率の比は？
- Grueball 候補はどのような生成率を示すか？

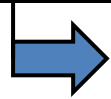
# J-PARC/LEPSでのハドロン物理



# J-PARC E31: Spectroscopic study of hyperon resonances below $K^{\text{bar}}N$ threshold

$\Lambda(1405)$  :  $J^P = \frac{1}{2}^-$ ,  $I = 0$ ,  $M_{\Lambda(1405)} < M_{K^{\text{bar}}N}$ , lightest in neg. parity baryons  
 Meson-Baryon aspect (or exotic quark config.) of  $\Lambda(1405)$  is suggested, but has yet to be settled...

- ✓ **Attractive**  $K^{\text{bar}}N$  int. from Low-E K-p scattering data, and **Repulsive** Kaonic H X-ray E shift at 1s region, M. Iwasaki *et al.*, PRL78('97)3067  
 -> "true 1s state" bound deeply due to **strongly attractive**  $K^{\text{bar}}N$  int.



$\Lambda(1405)$  may be **deeply bound**  $K^{\text{bar}}N(I=0)$  state?

Y. Akaishi and T. Yamazaki, PRC65('02)044005; PLB535('02)70.

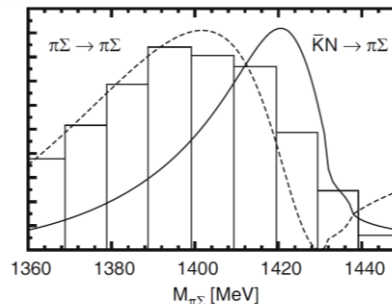
- ✓ ChUM claims Two Poles at  $\Lambda(1405)$

D. Jido *et al.*, NPA725('03)185

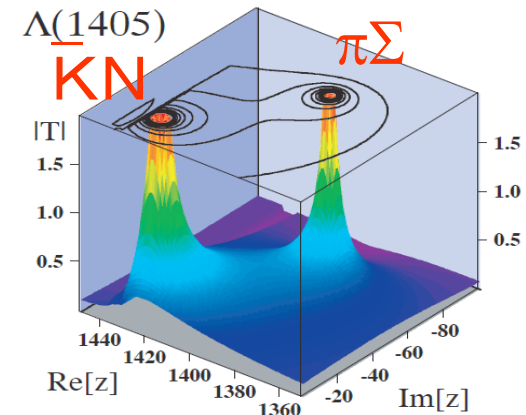
## $K^{\text{bar}}N$ scatt. below $K^{\text{bar}}N$ threshold

Employ  $d(K^-, n)\Lambda^*$

- ✓ Isospin state must be ID in the final states



Eur. Phys. J. A42('09)257

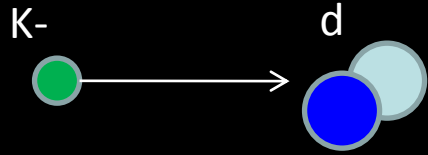


ChU model, T. Hyodo

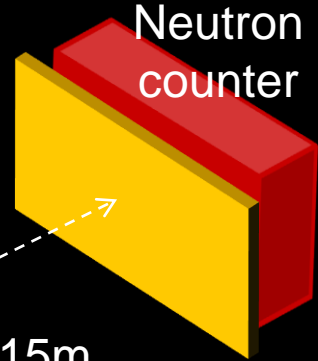
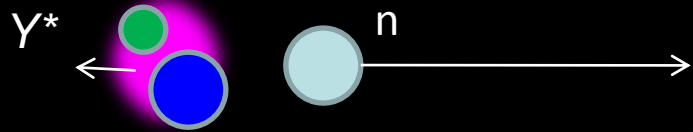
$\Lambda(1405)$	S-wave, $I=0$	$\pi^0 \Sigma^0$ , $\pi^{+/-} \Sigma^{-/+}$
Non-resonant	S-wave, $I=1$	
$\Sigma^*(1385)$	P-wave, $I=1$	$\pi^0 \Lambda$ , $\pi^{+/-} \Sigma^{-/+}$

Particle-Particle thresholdより質量  
が軽い状態をどうやって作るか？

# $\Lambda(1405)$ Spectroscopy via the $(K^-,n)$ reaction on Deuteron



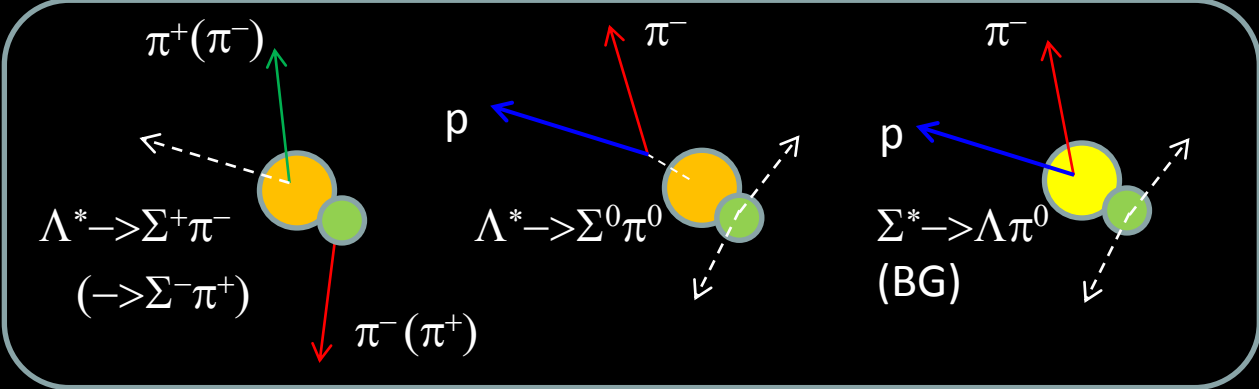
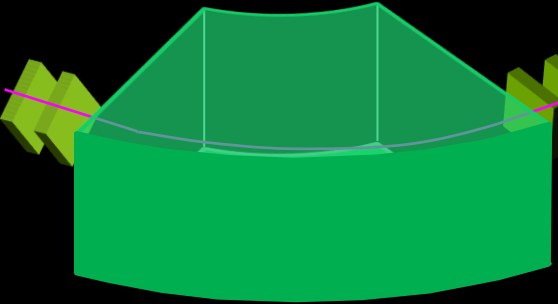
Missing Mass ( $Y^*$ ) Spectrum in  $d(K^-,n)$   
w/ Identifying the final state.



TOF ~ 15m

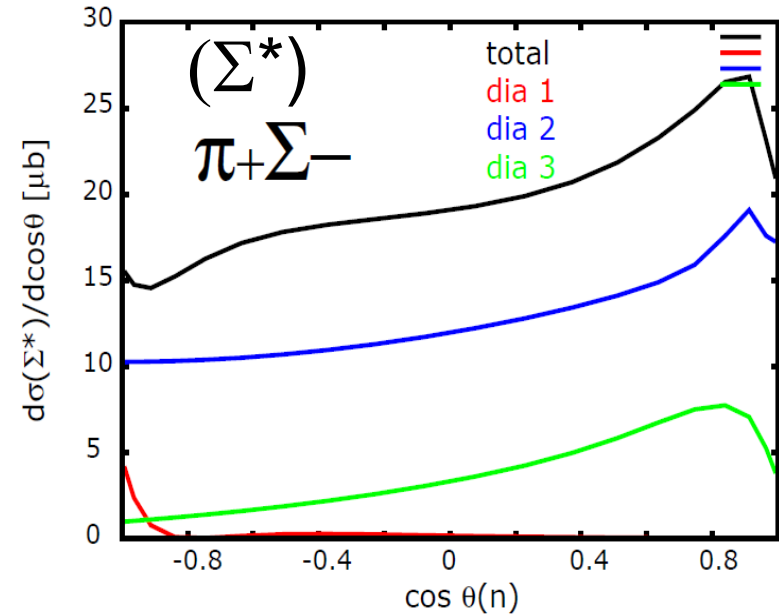
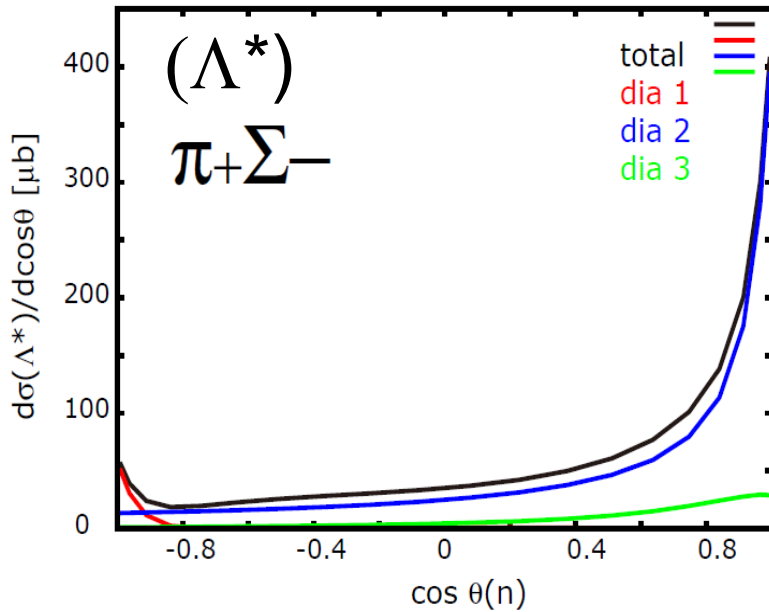
CDS  
(Solenoid Field 0.5T)

Beam Sweeper  
(Ushiwaka)

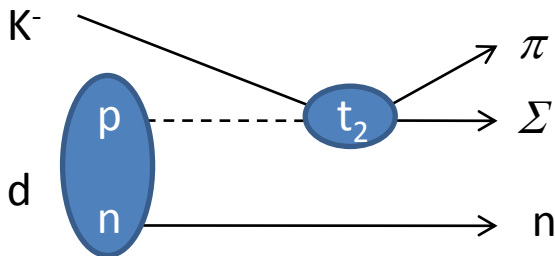


S-wave  $K^{\text{bar}}N$  scattering is enhanced at  $\theta_n = 0$  degree.

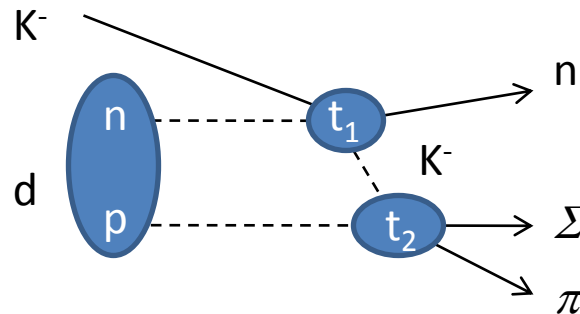
$d(K^-,n)\pi^+\Sigma^-$  at  $p_K=800$  MeV/c J. Yamagata-Sekihara, T. Sekihara, and D. Jido



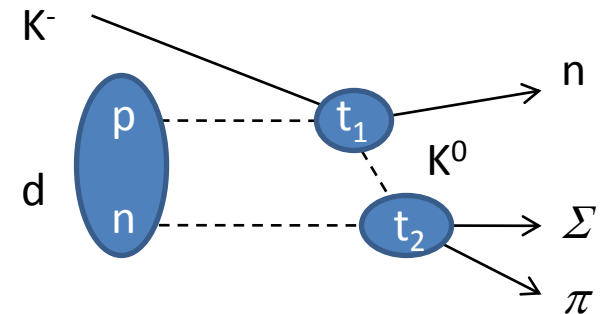
dia.1:small



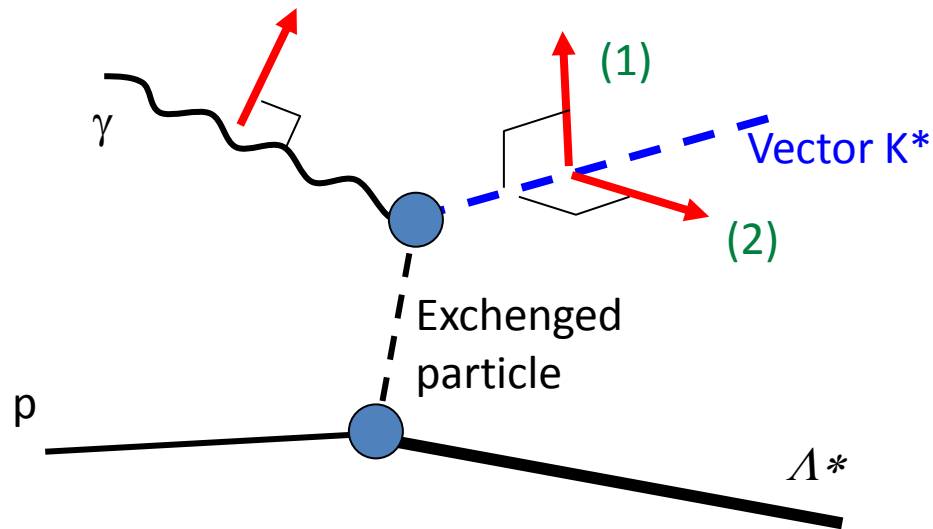
dia.2:dominant



dia.3:Interference



# LEPS/LEPS2での実験



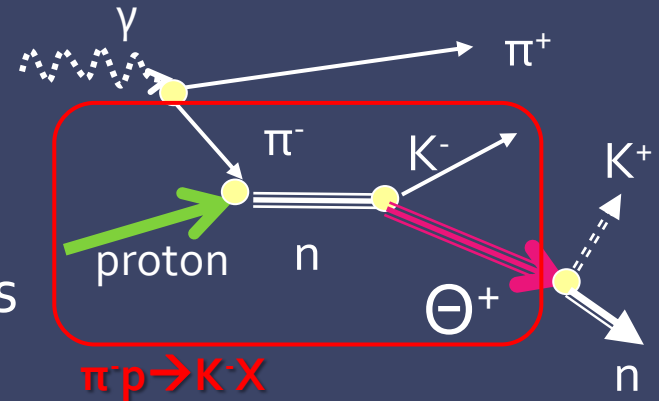
- (1) Natural parity
- (2) Unnatural parity

- 高エネルギー化
  - 大強度化
  - 大立体角化
- LEPS2

ペンタクォーク  $\Theta^+$

# Search for Pentaquark $\Theta^+$ in $\pi^-p \rightarrow K^-X$ reaction

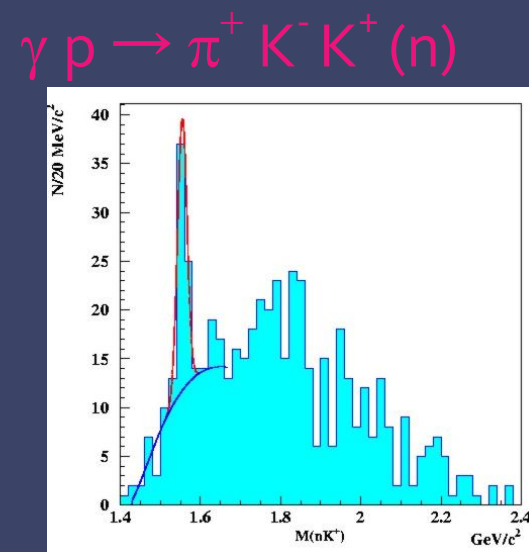
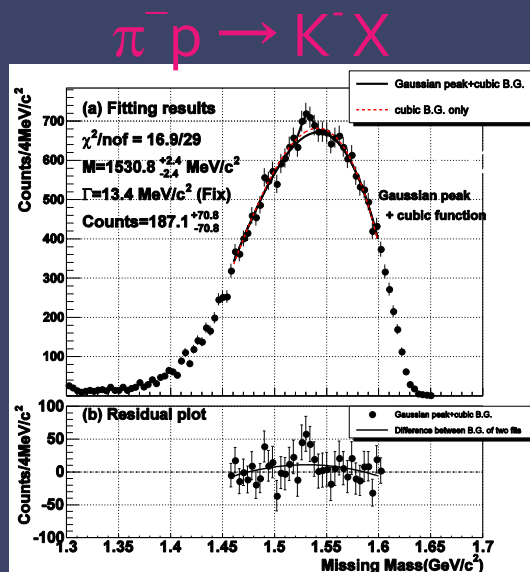
- no angular dependence
- sizable cross section
  - $\sigma(\pi^-p \rightarrow K^- \Theta^+) \propto \Gamma_{\Theta^+}$
- strongly related to two positive results



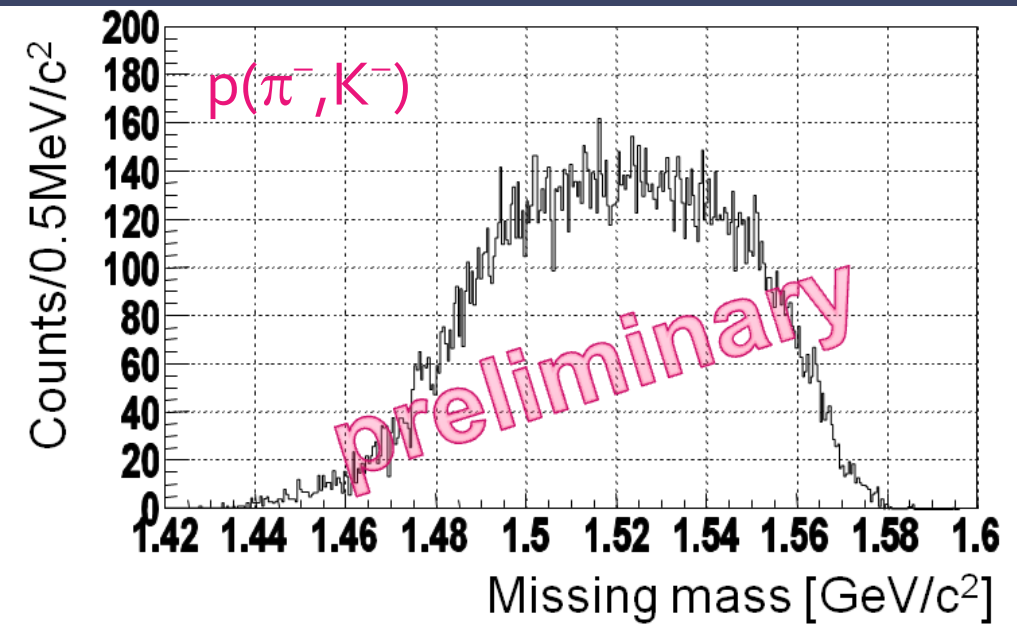
## KEK-PS E522 experiment

$\Theta^+$  search via  $\pi^-p \rightarrow K^-X$

- K2 beamline + KURAMA
- $p_{\text{beam}} : 1.87, 1.92 \text{ GeV}/c$
- $\Delta M = 13.4 \text{ MeV}$  (FWHM)
- peak structure was observed only at  $p_{\text{beam}} = 1.92 \text{ GeV}/c$



# Missing Mass Spectrum

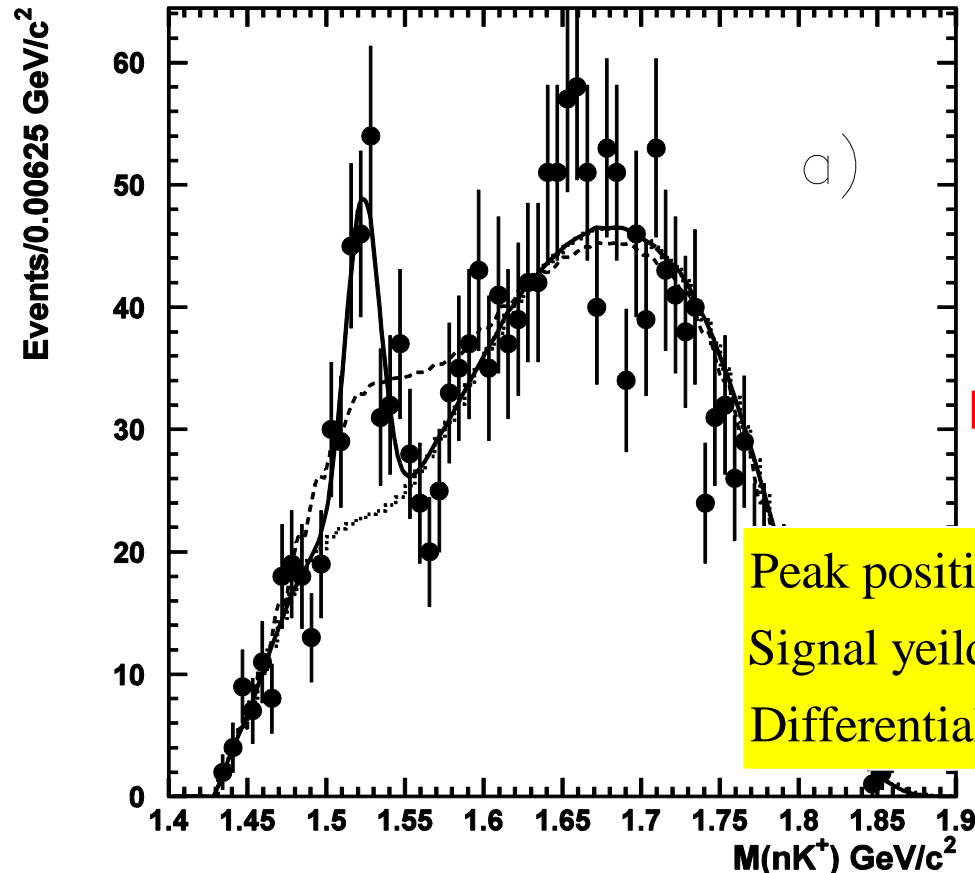


- #beam  $7.8 \times 10^{10}$
- #target  $5.3 \times 10^{23} / \text{cm}^2$
- acceptance 0.1sr
- efficiency 0.10
  - worse than 0.25 (at proposal)  
← vertex cut & multi-track
- mass resolution 1.5MeV(FWHM)
  - better than 2.5MeV (at proposal)  
 $\sqrt{(1.5/2.5)} / \sqrt{(0.1/0.25)} \sim 1.2$   
→ can keep the sensitivity under the current spectrometer performance.

- no significant structure has been observed.
- upper limit with current statistics :  $0.3 \sim 0.4 \mu\text{b}$  (90%C.L.)  
(very preliminary) cf.  $3.9 \mu\text{b}$  (KEK-PS E522)



# $\Theta^+$ result from LEPS



PRC 79, 025210 (2009)

Peak position:  $1.527 \pm 0.002 \text{ GeV}/c^2$   
Signal yeild:  $116 \pm 21$  events  
Differential cross-section:  $12 \pm 2 \text{ nb}/\text{sr}$

High statistics data ( $\sim \times 3$ ) was collected in 2006-2007 with the same experimental setup.

Blind analysis is under way to check the  $\Theta^+$  peak

# $\Theta^+$ search experiment at J-PARC

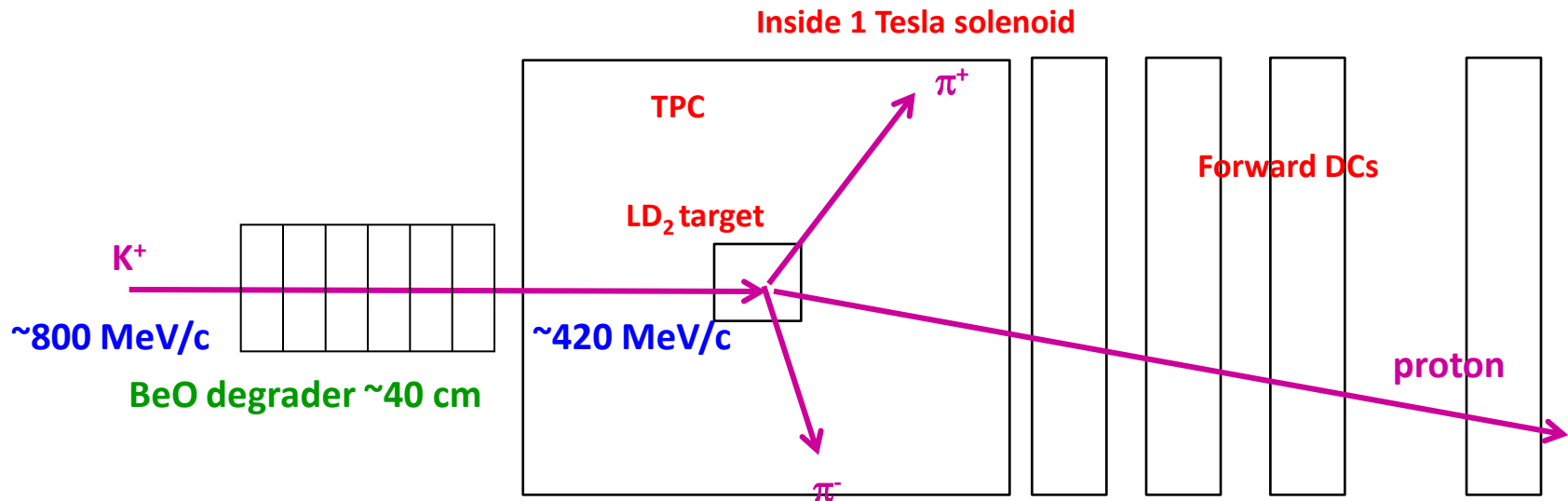
- Reverse reaction of the  $\Theta^+$  decay using a low energy  $K^+$  beam gives an unambiguous answer.



- Cross-section depends on only the spin and the decay width.

$$\sigma = \frac{\pi}{8k^2} (2J + 1) \int \frac{\Gamma^2}{(E - M)^2 + \Gamma^2 / 4} dE \Rightarrow 26.4 \Gamma \text{ mb/MeV} \quad \text{for } J = \frac{1}{2}$$

CEX ( $K^+ n \rightarrow K_S^0 p$ )  $\sim 7 \text{ mb}$



J-PARC/LEPSでハドロン物理を本格的に展開するために何が必要か？

まずは、ビームのバラエティと強度！



# Main Detector Setup

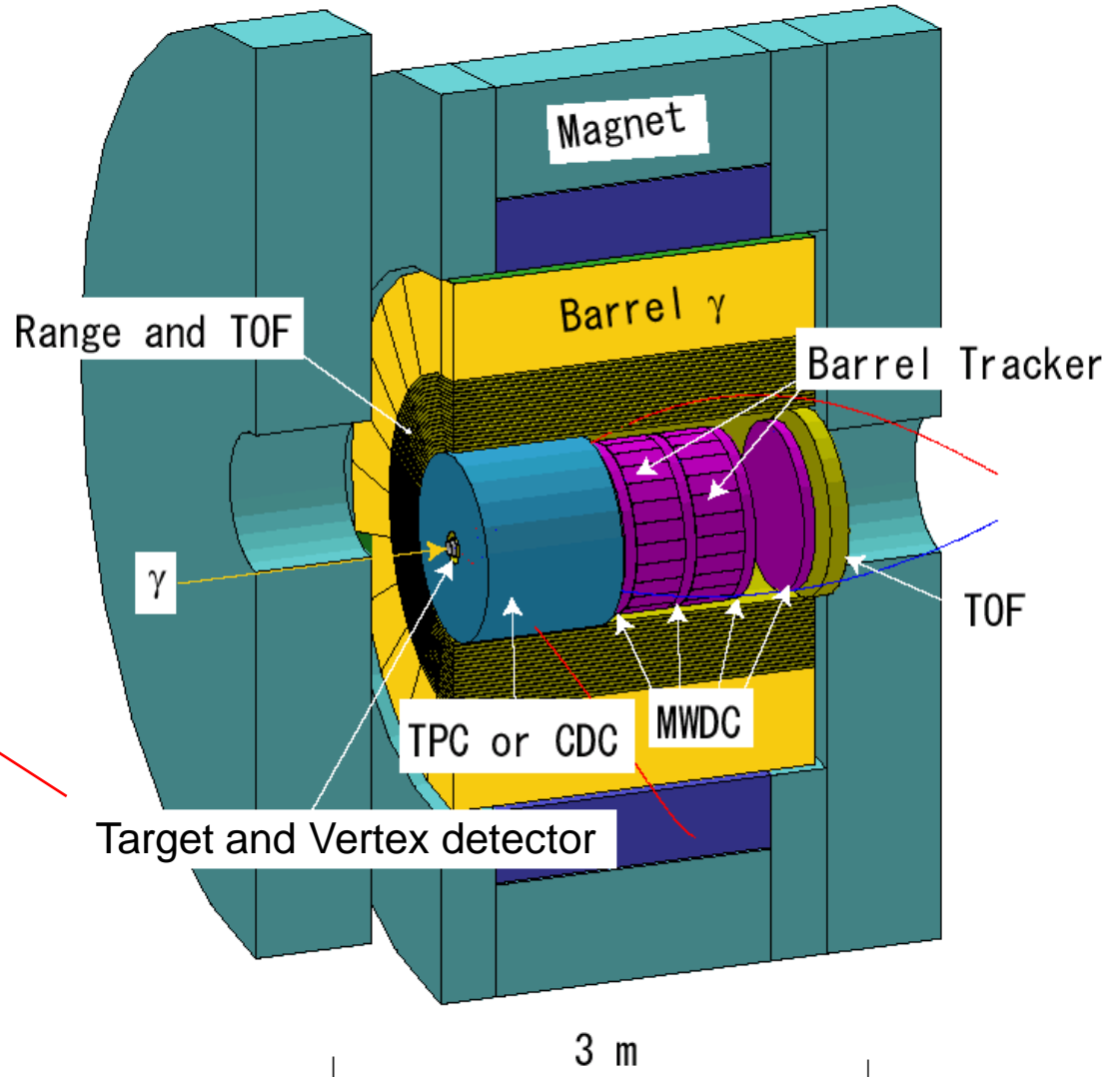
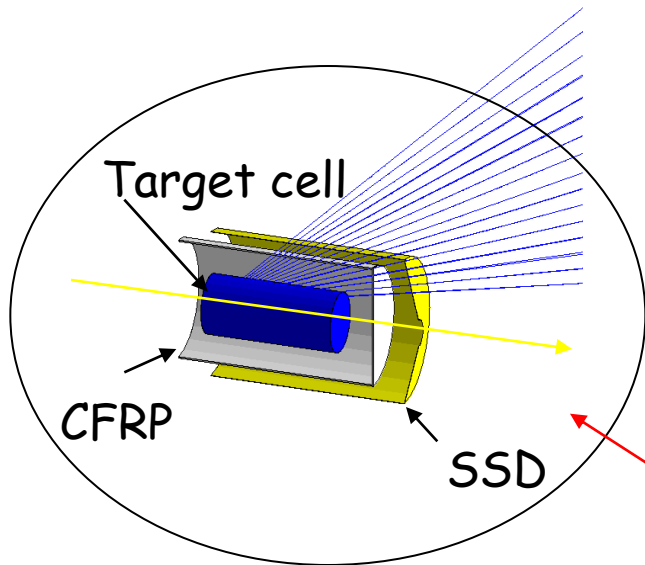
## E949 Solenoid Magnet

size:  $\phi 5\text{m} \times 3.5\text{m}$

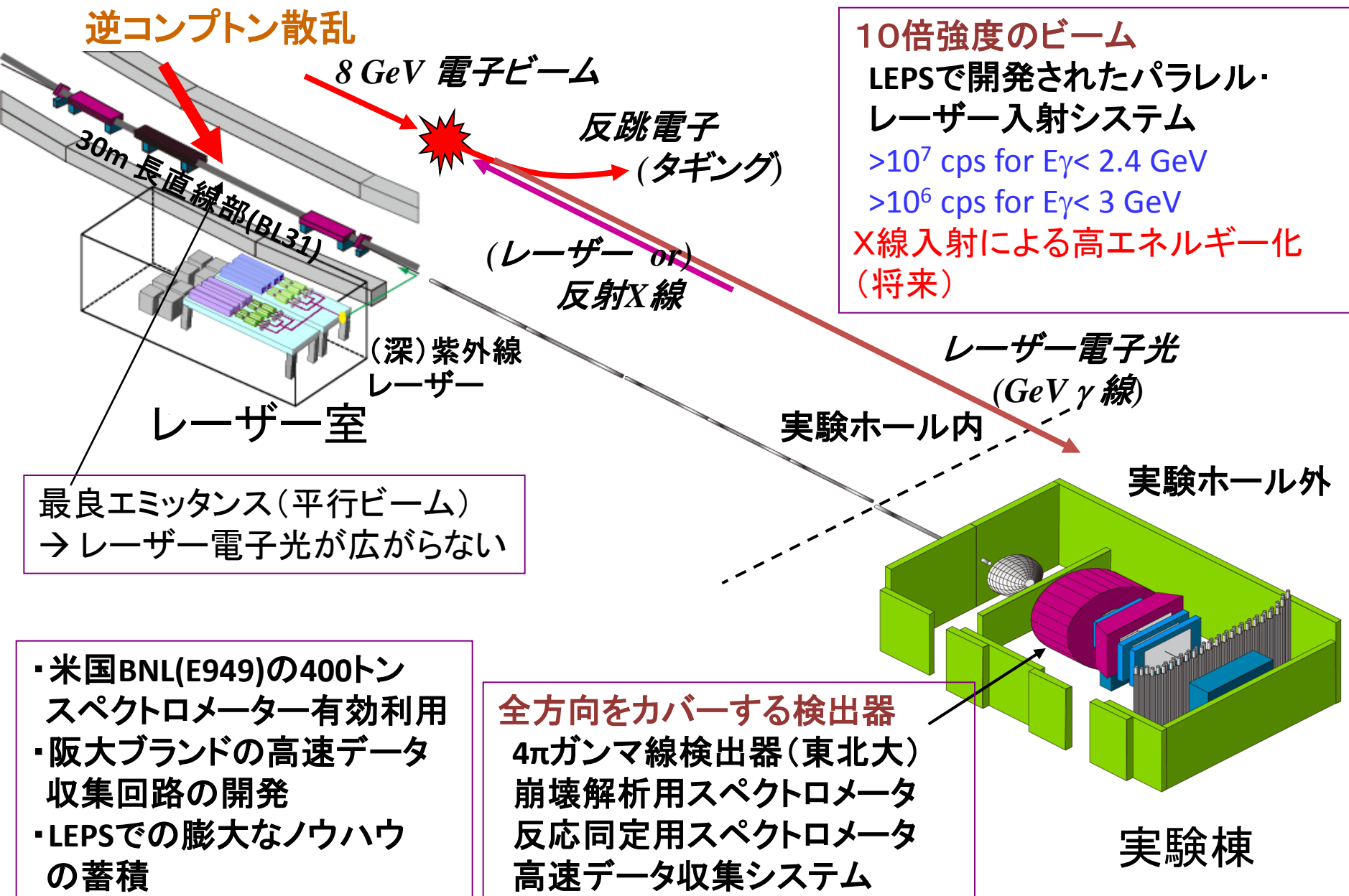
weight:  $\sim 400\text{ t}$

Field: 1.0 T

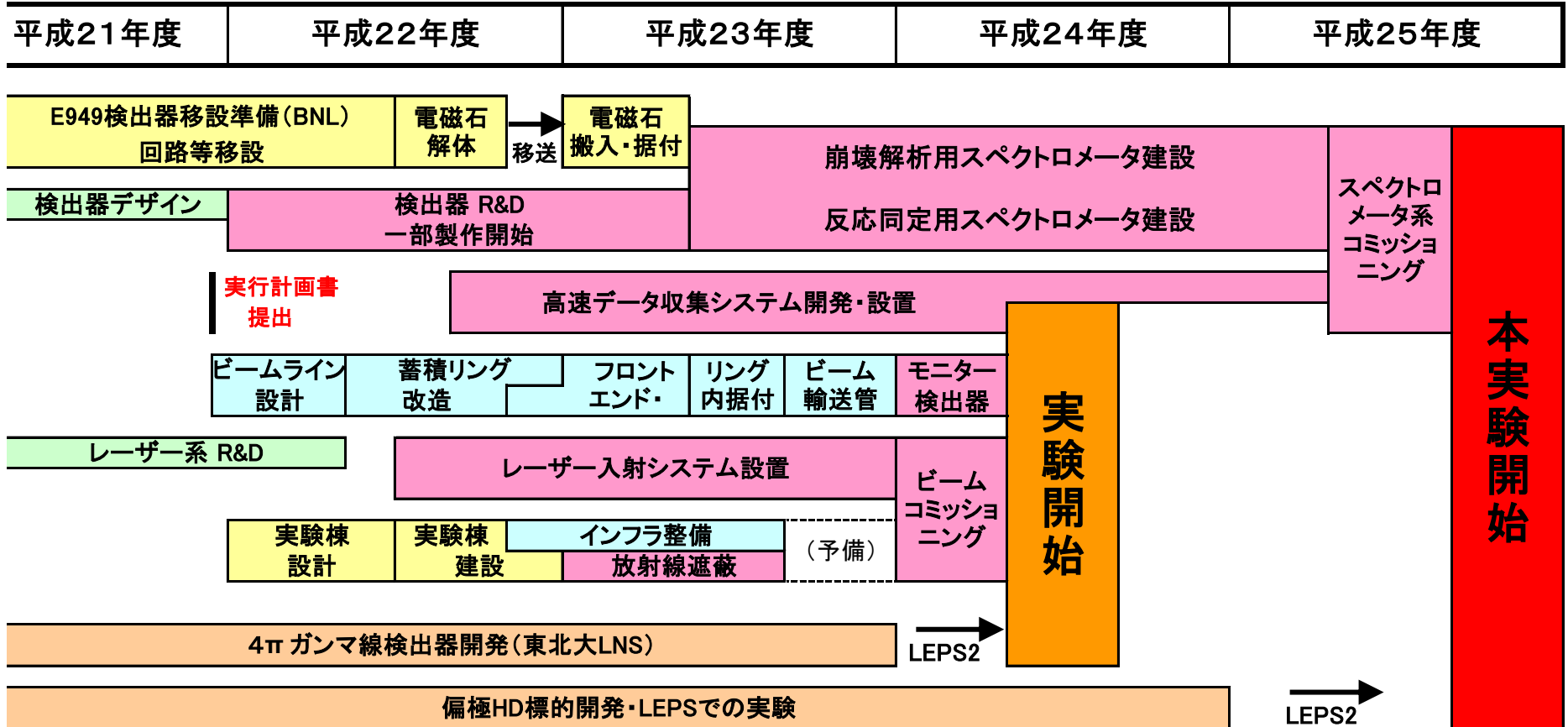
(1.1 MW at 4400 A)



# Schematic view of the LEPS2 facility



# LEPS2 スケジュール



反射X線入射システムの R&D

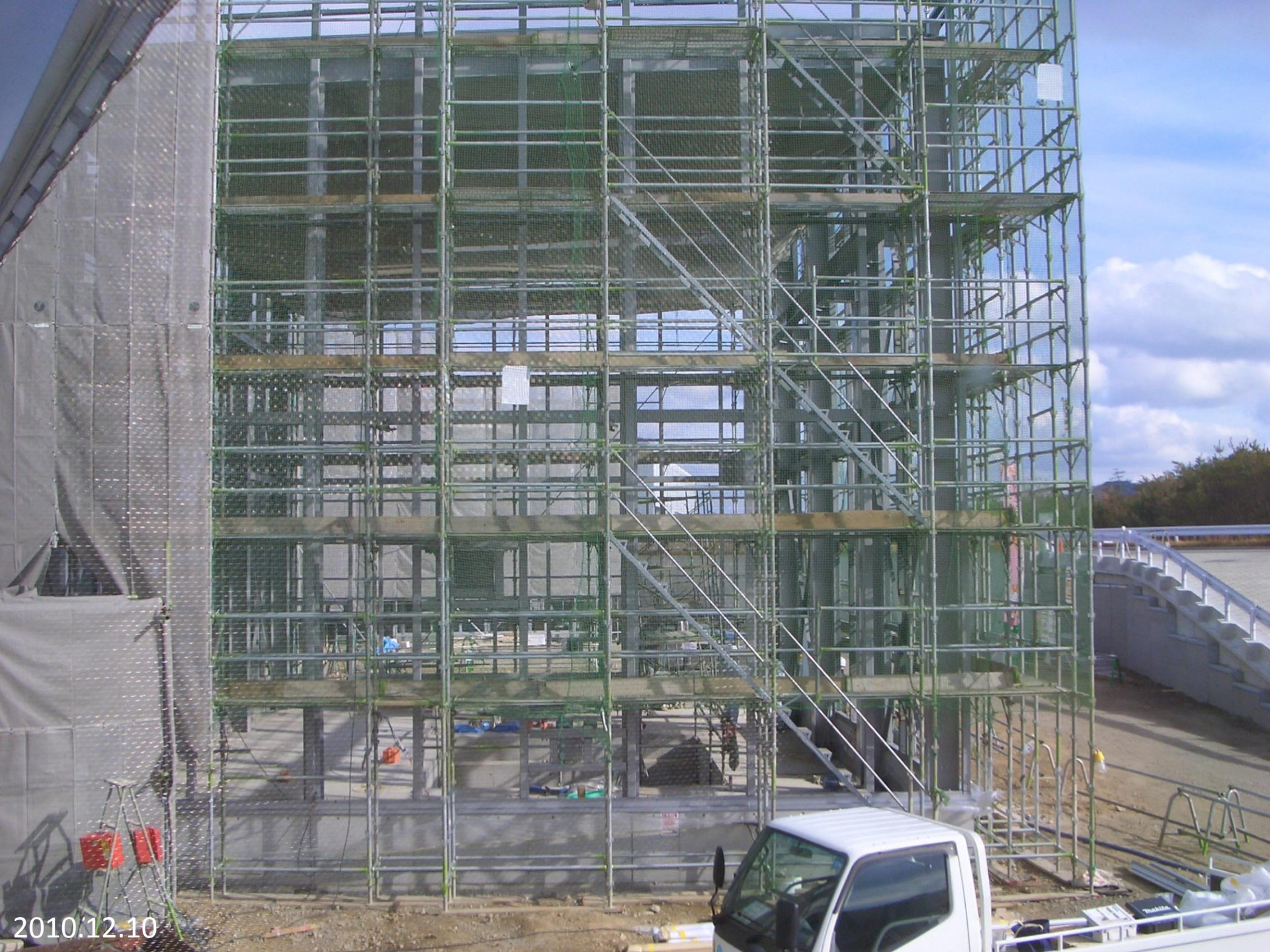
LEPSの改良(東北大・電子光)





2010.10.11





2010.12.10





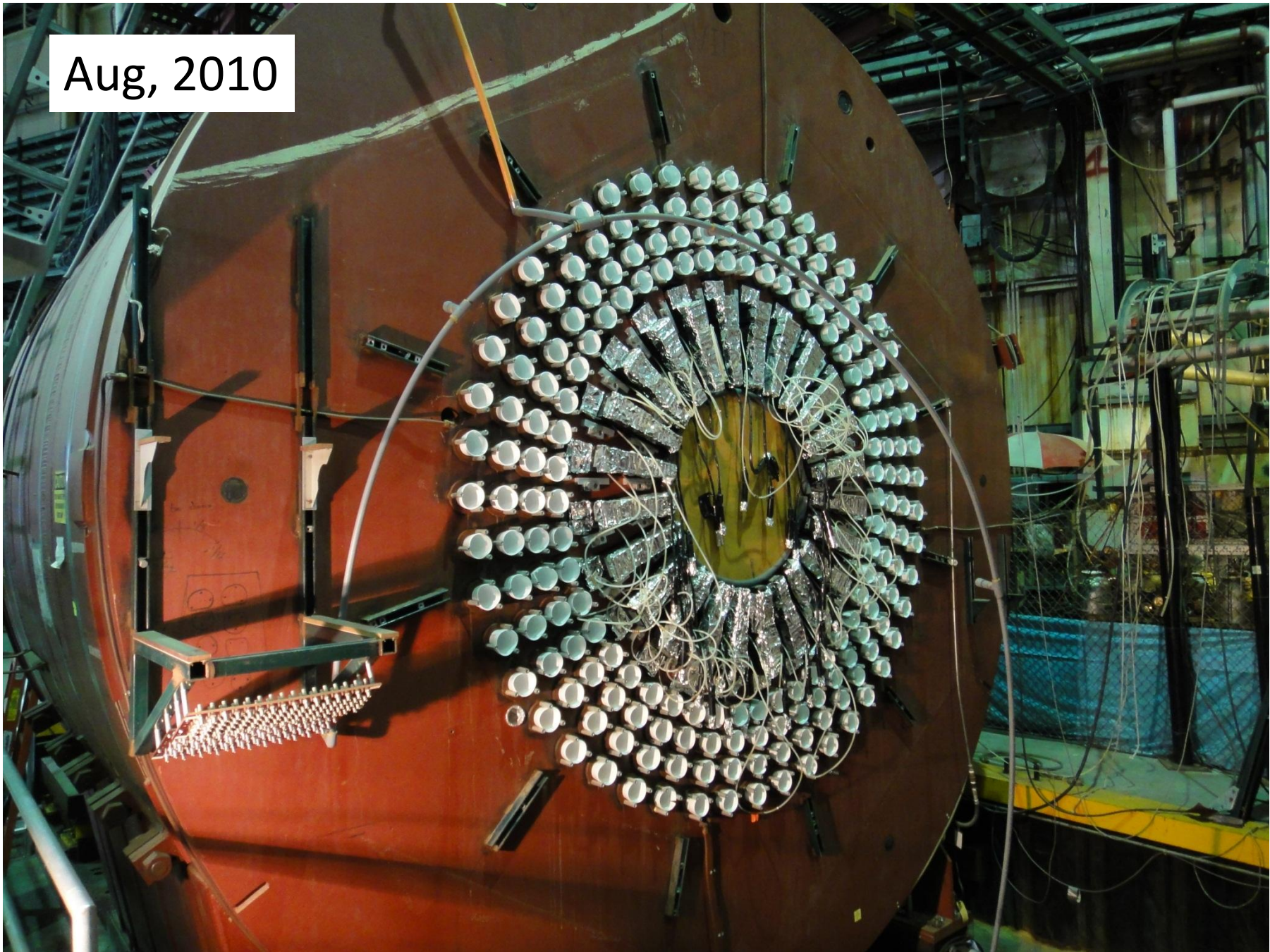
2011.1.31





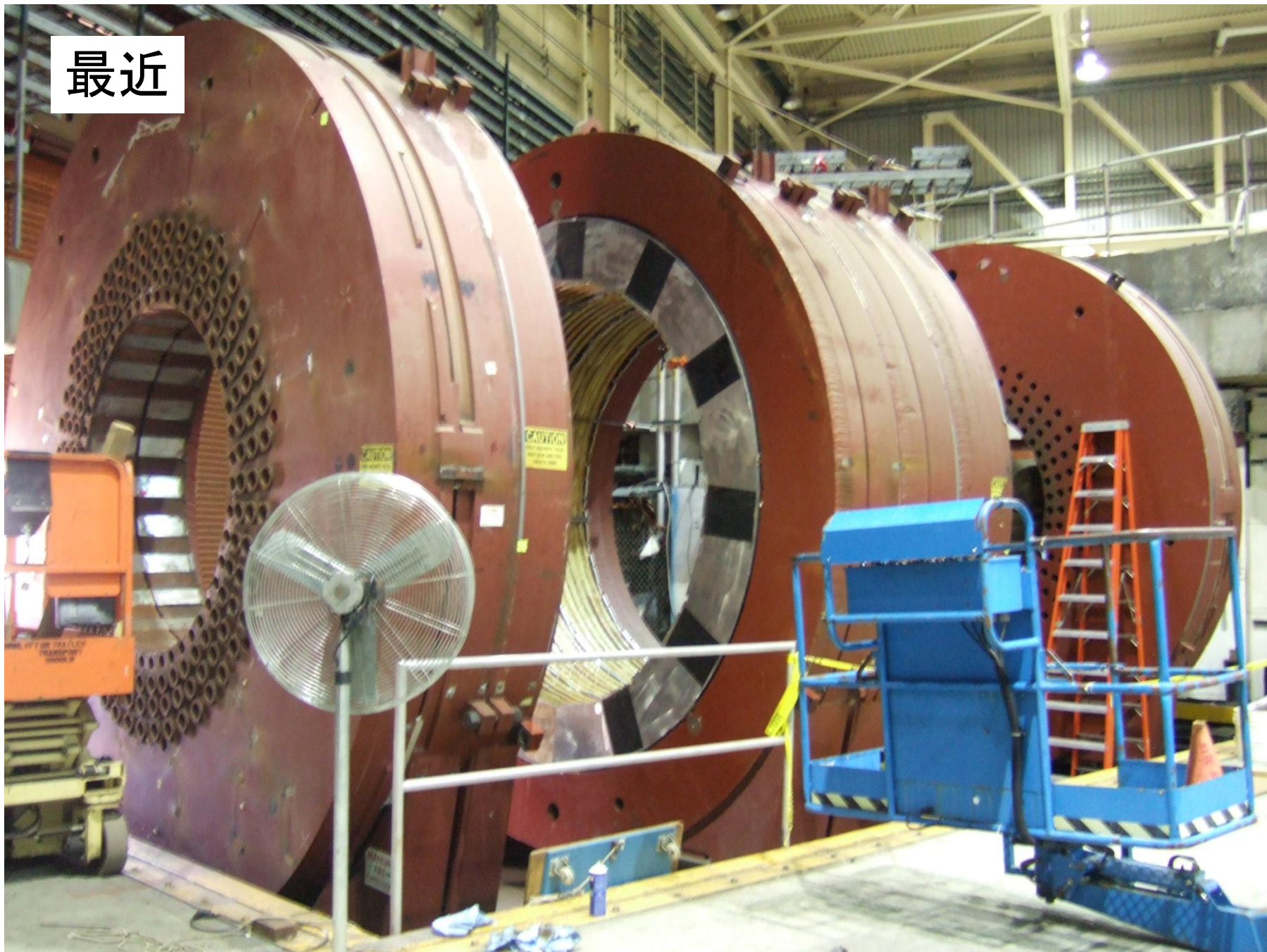


Aug, 2010





最近



# 多彩なフレーバーでハドロンを 研究する利点

ハドロン内のクォーク間の相関の強さを  
コントロールすることができる。

一つの発見が他の発見を促す。

人・アイデア・技術の交流が進む。

# 理論に期待すること

個々の事象の解釈より、大きな絵を.

個々の結果の説明より、次のアイデアを.

格子QCDによる厳密解に期待.

広いコミュニティを結びつけるグループの役割を.