

# ハドロン実験ホール拡張の 概要

---

澤田真也

2015年10月20日

「原子核物質中のハドロン研究III」研究会

@KEK東海キャンパス

# 内容

- ハドロン実験ホール拡張計画の概要
  - 全体概要
  - 素粒子物理
  - 原子核・ハドロン物理
- コスト
- 推進体制
- スケジュール

# ハドロン実験ホール



56 m

**K1.8**

- $< 2.0 \text{ GeV/c}$
- $\sim 10^6 \text{ K}^-/\text{spill}$

**KL**

- 16 deg extraction
- $\sim 2.1 \text{ GeV/c K}^0$

**K1.8BR**

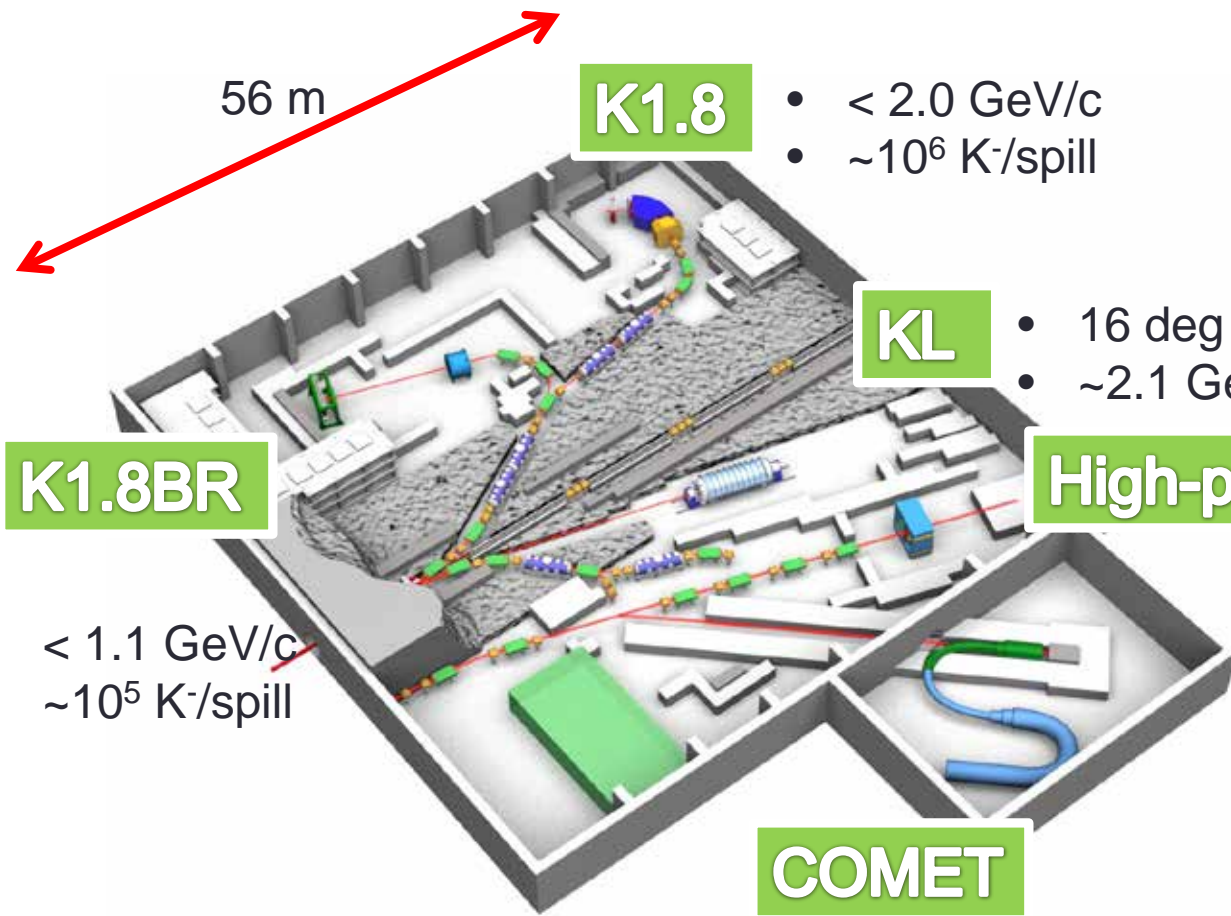
- $< 1.1 \text{ GeV/c}$
- $\sim 10^5 \text{ K}^-/\text{spill}$

**High-p**

- 30 GeV proton
- $< 31 \text{ GeV/c}$  unseparated 2ndary beams (mostly pions),  $\sim 10^7/\text{spill}$

**COMET**

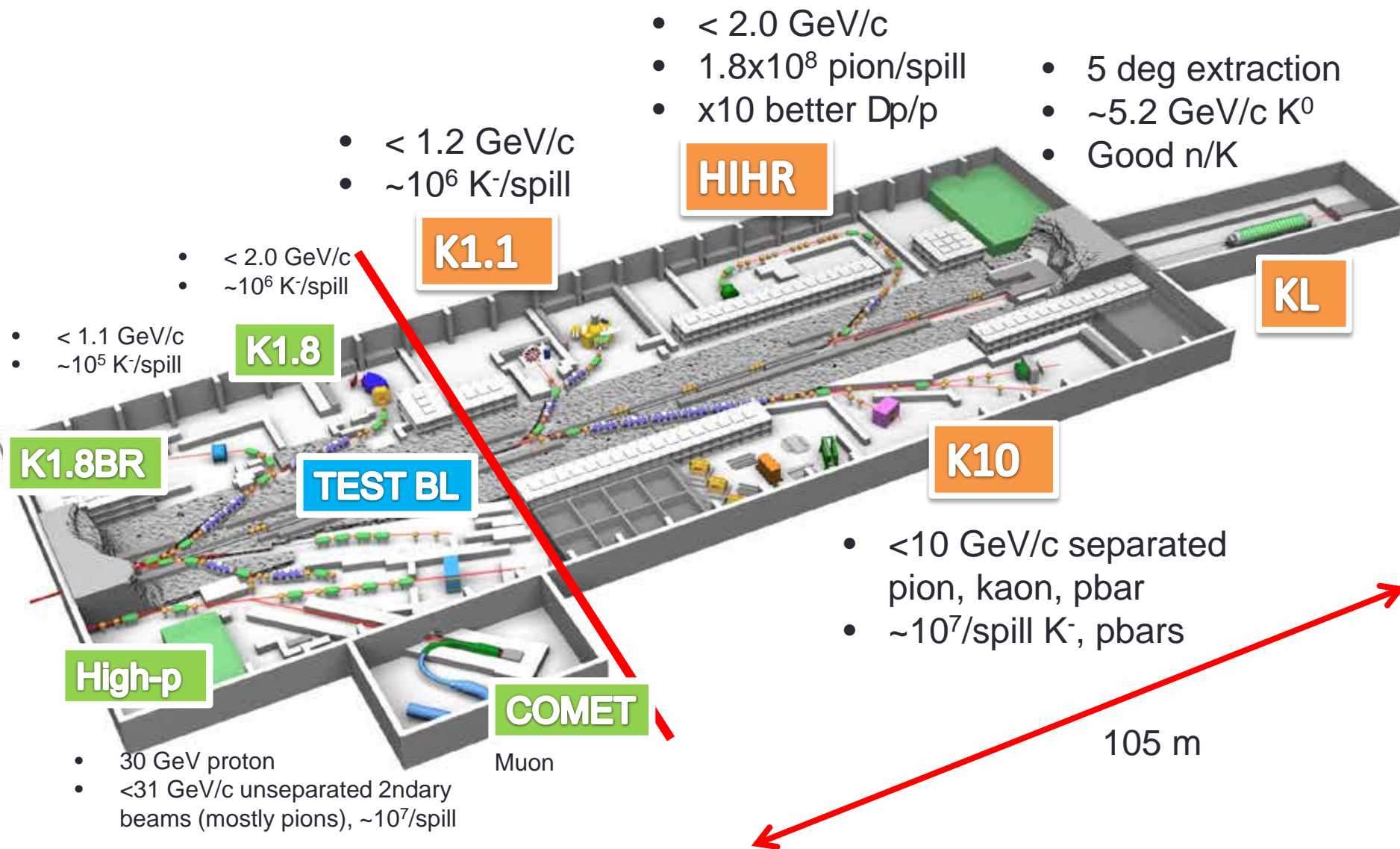
Muon



# なぜ拡張するのか？

1. 物理に最適化した新たなビームライン
  - 新KLビームライン
  - 大強度高分解能(HIHR)ビームライン
2. 新たな種類のビームの提供
  - K10ビームライン: 2 - 10 GeV/c のK、 $\pi$ 、反陽子
3. S=-1のストレンジネス核物理を更に展開できるビームライン
  - K1.1ビームライン

# 拡張ハドロン実験ホール



# ハドロン実験ホール拡張

ストレンジネス核物理  
ハドロン多体系の理解

「ハイペロンファク  
トリー (S=-1)」

ハイペロンを使ってバリオン  
間力(核力)と核内バリオン  
の性質を解明する。

「ハイパー核顕微鏡」

ハイパー核のエネルギー準  
位の密度依存性を精密に測  
定して、重い中性子星が存  
在する謎を解く。

素粒子物理

「CP非保存の発見  
から“測定”へ」

KL:100個のCP非保存事象  
を捉え、標準理論を超えて  
物質優勢宇宙の謎に迫る

「ハイペロンファク  
トリー (S=-2)」

K1.8

K1.1

HIHR

KL

K10

ハドロンを支配する実質的  
自由度を解明する。

High-p

COMET

ハドロン物理  
クォーク多体系の理解



# 素粒子物理

- 中性K中間子の稀な崩壊(数百億回に一度)を測定する実験  
CP対称性を破る稀崩壊を 100個 捉え、物質優勢宇宙の謎に迫る
- 高エネルギー物理学将来計画小委員会答申(2012年)
  - Kaon実験  
KOTO実験を超え、標準模型に対して10%程度の新物理からの寄与を探索するためには、J-PARCハドロン実験ホールの拡張を伴う新規ビームラインの建設と測定器の大幅な改造が必要である。実験ホールの拡張は原子核実験分野の将来計画とも連携して検討すべき課題である。



# J-PARCでの標準模型を超える物理の探索

W. Altmannshofer, A.J. Buras, S. Gori, P. Paradisi and D.M. Straub

	AC	RVV2	AKM	$\delta$ LL	FBMSSM	LHT	RS
$D^0 - \bar{D}^0$	★★★	★	★	★	★	★★★	?
$\epsilon_K$	★	★★★	★★★	★	★	★★	★★★
$S_{\psi\phi}$	★★★	★★★	★★★	★	★	★★★	★★★
$S_{\phi K_S}$	★★★	★★	★	★★★	★★★	★	?
$A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma)$	★	★	★	★★★	★★★	★	?
$A_{7,8}(B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-)$	★	★	★	★★★	★★★	★★	?
$A_9(B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-)$	★	★	★	★	★	★	?
$B \rightarrow K^{(*)} \nu \bar{\nu}$	★	★	★	★	★	★	★
$B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★	★
$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$	★	★	★	★	★	★★★	★★★
$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	★	★	★	★	★	★★★	★★★
$\mu \rightarrow e \gamma$	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★
$\tau \rightarrow \mu \gamma$	★★★	★★★	★	★★★	★★★	★★★	★★★
$\mu + N \rightarrow e + N$	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★
$d_n$	★★★	★★★	★★★	★★	★★★	★	★★★
$d_e$	★★★	★★★	★★	★	★★★	★	★★★
$(g-2)_\mu$	★★★	★★★	★★	★★★	★★★	★	?

モデル依存性の少ない実験

→モデル選択性の高い実験

海外での先行実験 (CERN NA62)

拡張で精度が上がる実験 (KOTO→KOTO2)

ハドロンホールでの先行実験 (COMET)

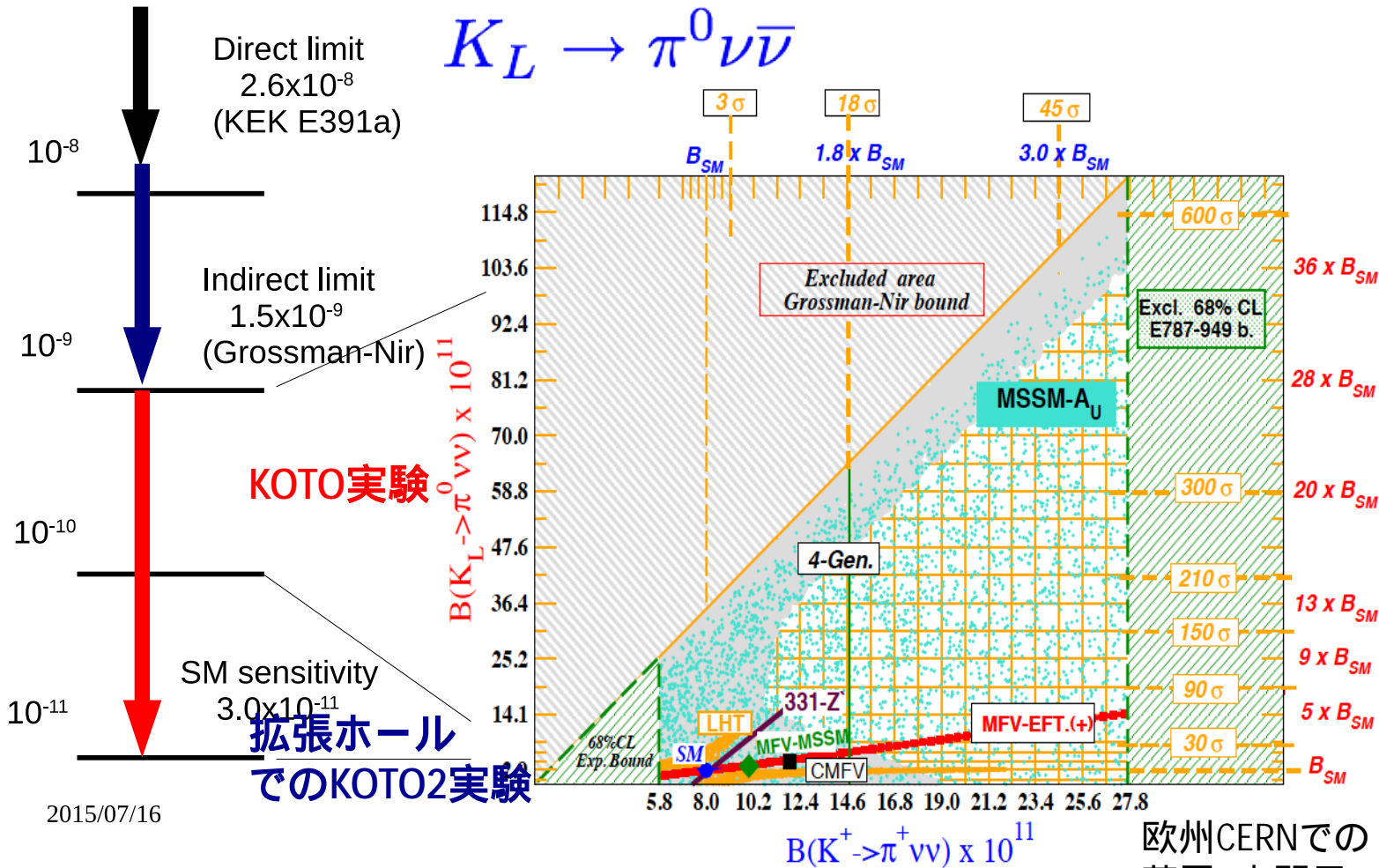
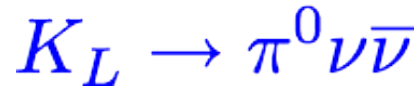
MLFで準備中の実験 (Muon g-2/EDM)

標準模型のほころびの発見 → 標準模型を超える物理モデルの選択

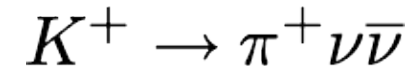


# J-PARCでの標準模型を超える物理の探索

J-PARCでの KOTO実験  
中性K中間子の稀な崩壊

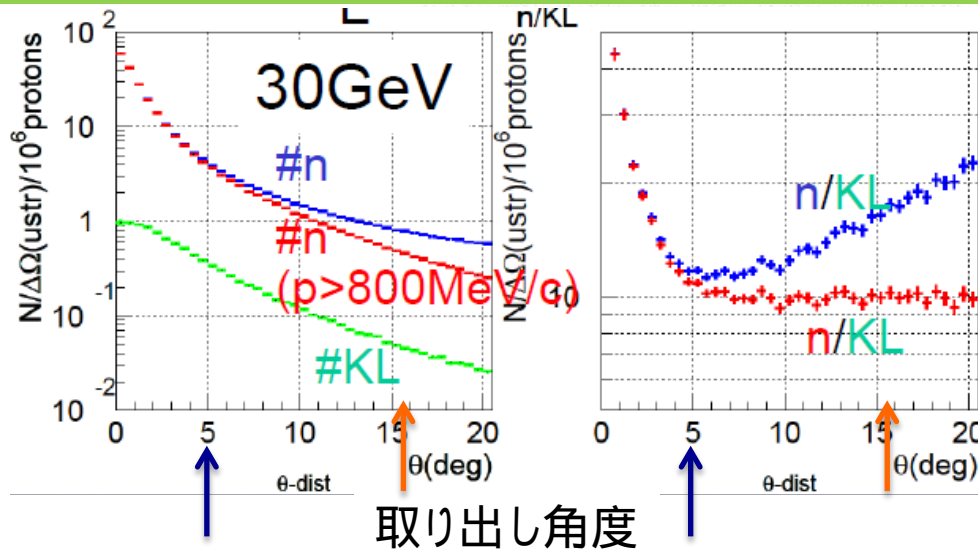


欧州CERNでの NA62実験  
荷電K中間子の稀な崩壊

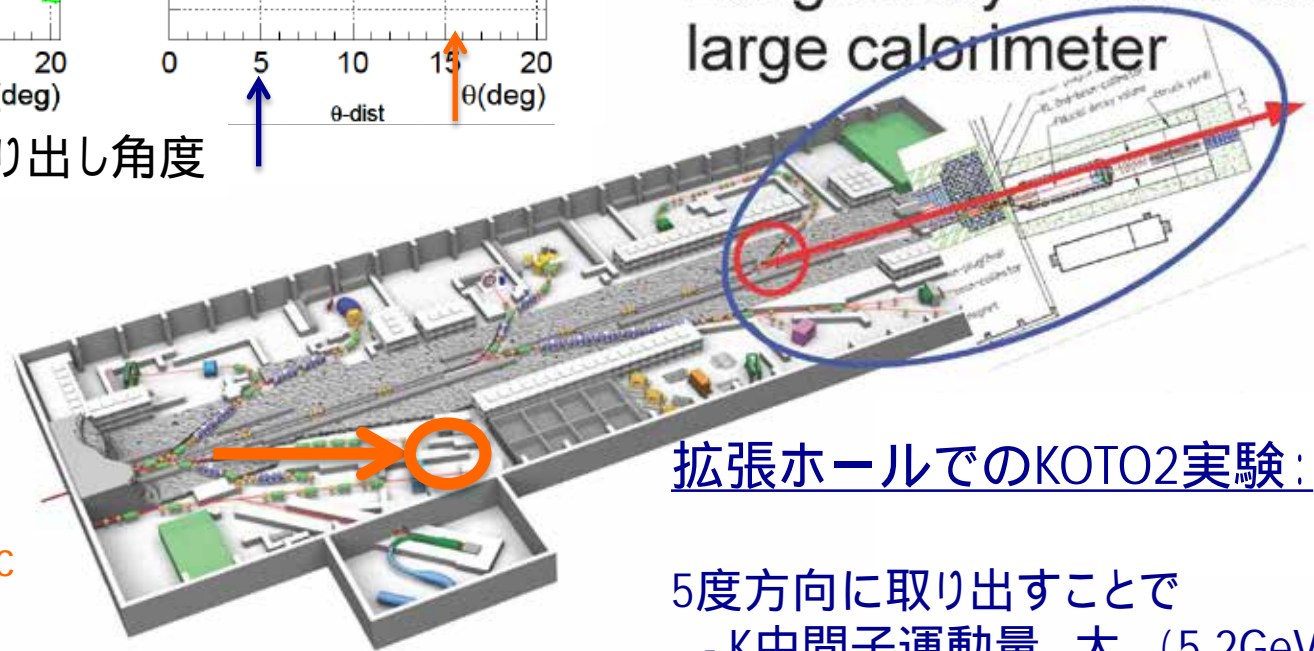


標準模型のほころびの発見 → 標準模型を超える物理モデルの選択

# J-PARCでのK中間子稀崩壊実験の展開



- 5度の取り出し角度
- Just behind dump
  - ~50m from target
- Long decay volume and large calorimeter



## 拡張ホールでのKOTO2実験:

- 5度方向に取り出すことで
- K中間子運動量 大 ( $5.2\text{GeV}/c$ )
  - 中性K中間子強度 増 ( $\times 6$ )
  - 中性子の割合が最小 ( $n/KL=30$ )

新しい実験エリアに  
大型の測定器の設置が可能に

現在のKOTO実験:  
陽子ビームに対して  
16度方向に取り出す  
- K中間子運動量  $2.1\text{GeV}/c$



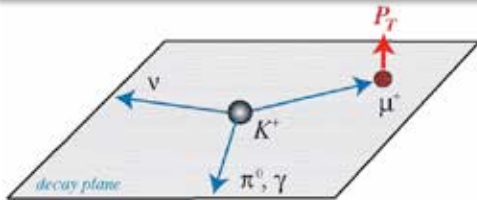
# 時間反転対称性の破れ探索

宇宙における粒子と反粒子の巨大なアンバランス  
極めて大きな CP の破れを示唆



CPT 対称性から時間反転対称性(T 対称性)の測定が重要

$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$  崩壊における  $\mu^+$  垂直偏極測定



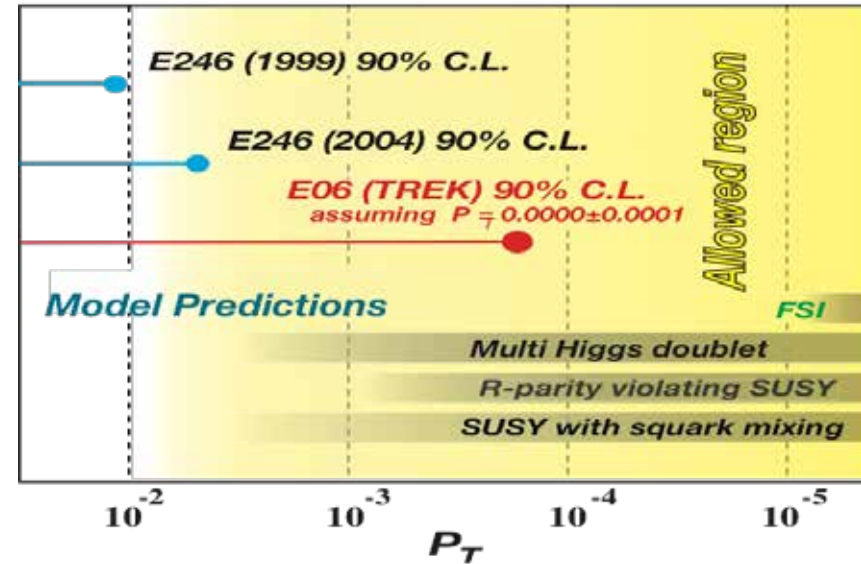
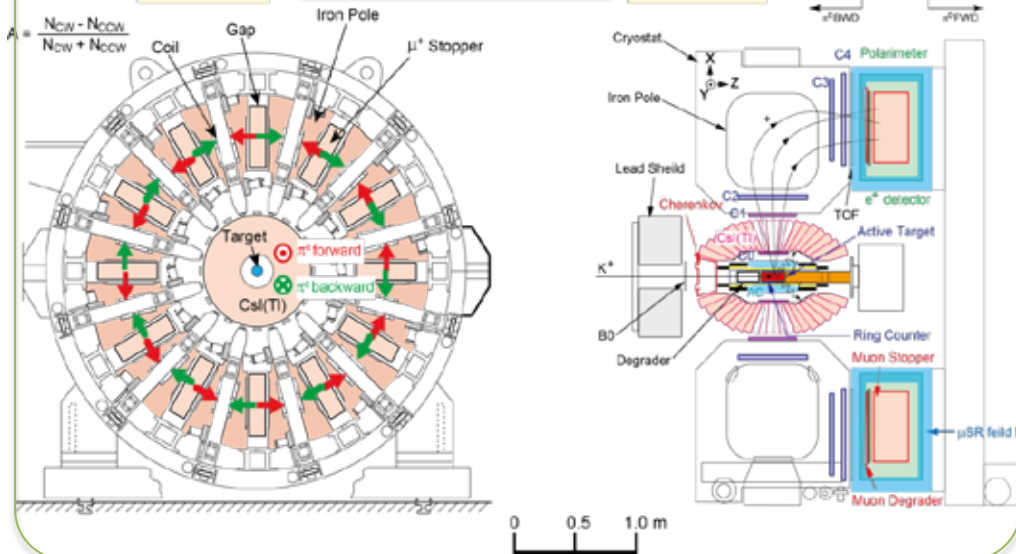
$$P_T = \frac{d_m \cdot (P_{p^0, g} \cdot P_{\mu^+})}{|P_{p^0, g} \cdot P_{\mu^+}|}$$

$P_T$  は T-odd 量

TREK 検出器

End view

Side view



K 静止法を用いた高精度実験  
低運動量、大強度ビーム  
K1.1BR ビームライン

LHC や B 施設で発見されていない新しい物理現象を、J-PARC では T 対称性の破れとして観測

$P_T \sim 10^{-4}$  精度の測定による新物理の探索



# 原子核・ハドロン物理

- 原子核物理：「日本の核物理の将来」(2012年)
- 核物理委員会・核理論委員会で作成・承認(2011年1月)：  
学術会議「理工学・夢ロードマップ」



# 拡張計画：原子核・ハドロン物理の重要課題

- わずか数種のクォークから多様な宇宙物質が生まれる仕組みを解明する -

クォークからハドロン→原子核→中性子星を再構築

## 1. 最初の“物質”：ハドロンは如何に形成されるか？

- ハドロン内の有効自由度(準粒子)の働きを探る
- 環境によるハドロンの構造変化を調べる

**K10**

クォーク

QCD

有効自由度(準粒子)

ハドロン

バリオン間力(二体力、三体力)

原子核

ハイパー核

## 2. 原子核は如何に形成されるか？

- 拡張された核力：バリオン間力の確立
- 宇宙最高密度の物質：中性子星の謎を解明する

**K1.1**

**HIHR**

高密度核マター

高密度ハイペロンマター

中性子星の謎

原子→分子→物質、人、星、宇宙

# K10で展開する物理

## ハドロンを記述する有効自由度の確立

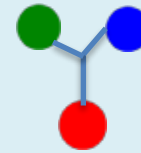
→重いクォークを導入し、ハドロン内クォーク相関を調べる

クォーク間相互作用はクォークの質量に反比例  
重いクォーク1つ入れることで残りのクォーク相関が見える

励起エネルギー、生成率、崩壊幅の測定

【研究例】

$p(K^-, K^+)X^*$ ,  $p(K^-, K^0 K^+)W^*$  生成



$qqq$



ダイクォーク



$Qqq$



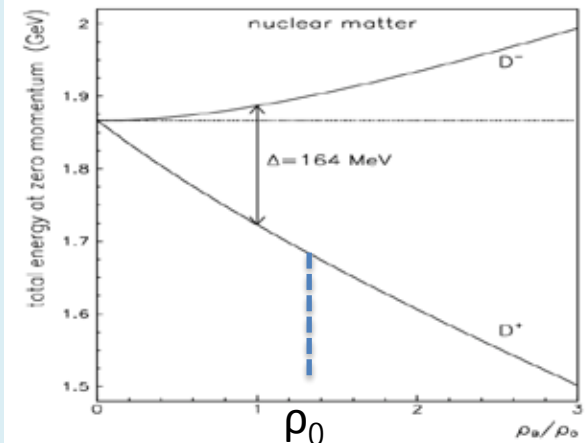
$QQq$

## 環境によるハドロンの振舞い変化

核内チャームハドロン (Heavy-Light quark system)  
を使った核物質中でのカイラル対称性自発的破れ  
部分的回復の実験的検証

核物質中で $D^+$ 中間子の質量が軽くなる ( $\sim 10\%$ )

【研究例】反陽子-原子核反応で起こる、素過程: 反陽子-陽子からの $D^+D^-$ 生成を測定。  
原子核中で $D^+$ 中間子の質量が軽くなる影響で、 $D^+D^-$ 生成閾値以下の  
生成断面積が急激に増大する (約10倍の増加)



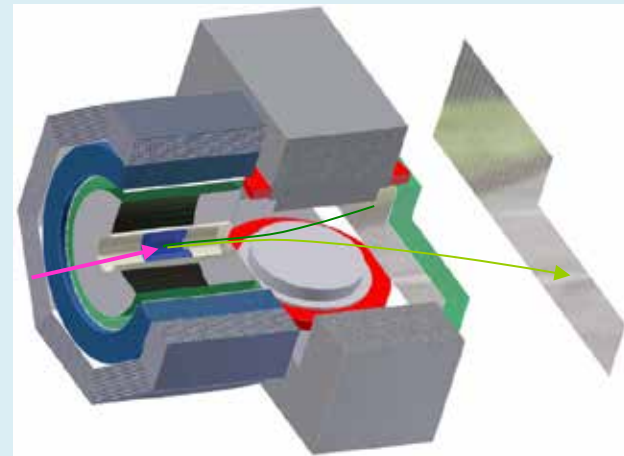
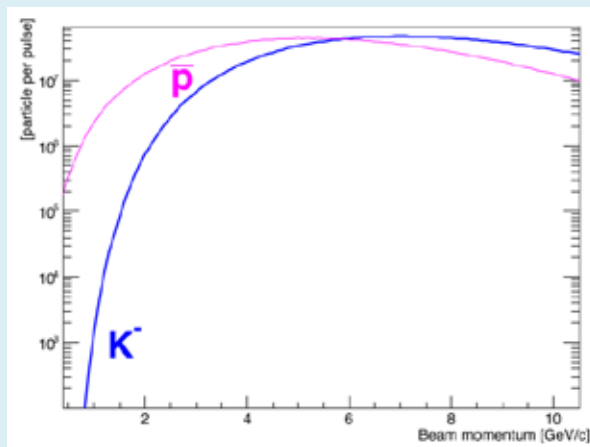
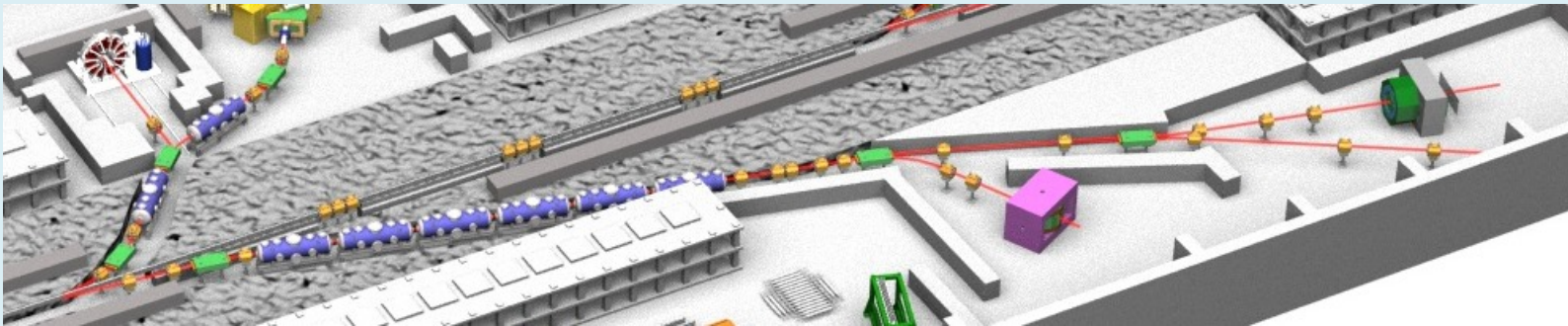


# K10で展開する物理

- チャームクォークを生成させるためには、10 GeV/c 程度の反陽子ビームが必要
  - 反陽子ビーム強度 10M/pulse @100kW

必用な実験装置：

反応で生成される2次粒子すべてを捕まえるための  
大型ソレノイド電磁石を中心とした大立体角スペクトロメーター



# K1.1 beam line = L, S ハイペロンファクトリー で展開する物理 (二本柱)

K1.1ラインの大強度K中間子ビームで作られる多量のハイペロンを用いて初めて可能に

## バリオン間力模型の構築

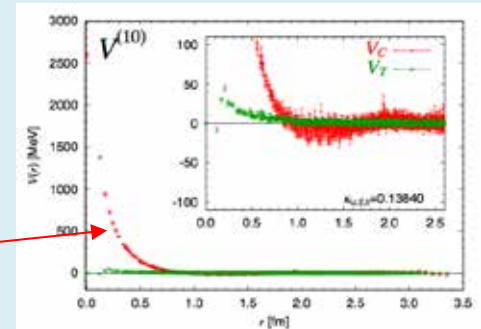
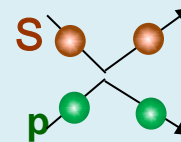
## ハイペロン散乱実験

これまでにない  $\Sigma^\pm p$ ,  $\Lambda p$  散乱の断面積、偏極量データの獲得

【研究例】  $\Sigma^+ p$  散乱実験による

「斥力芯の起源 = クォーク間パウリ効果」の検証

バリオン間力のクォークモデルで予想、Lattice 計算で再現、  
実験的検証を待つばかり



## 環境によるバリオンの構造変化

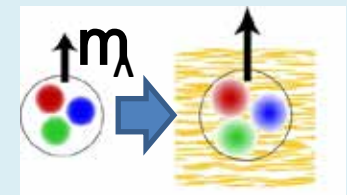
## ハイパー核精密分光実験

エネルギー準位、ガンマ遷移の速さ、弱崩壊率の測定

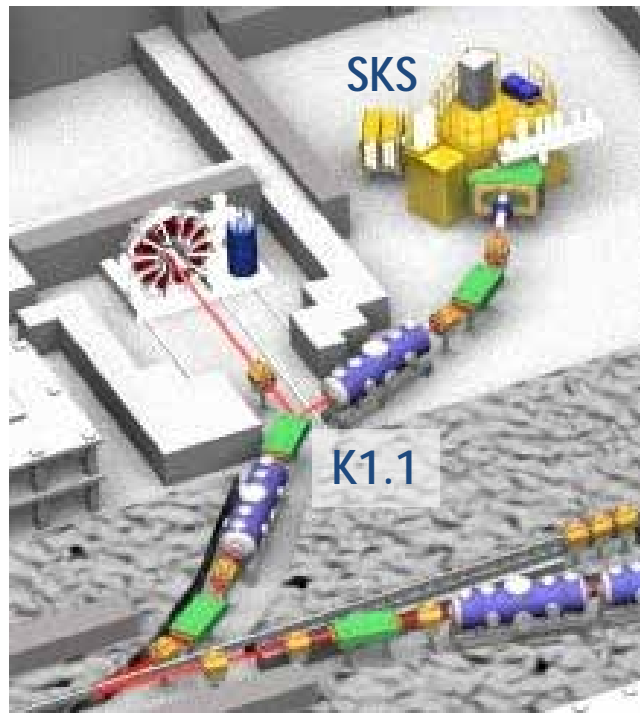
【研究例】  $\gamma$ 線測定による核内 $\Lambda$ の磁気モーメント変化の観測

核内での構成子クォーク質量の減少  $\rightarrow$  バリオン磁気モーメント増加 をとらえる

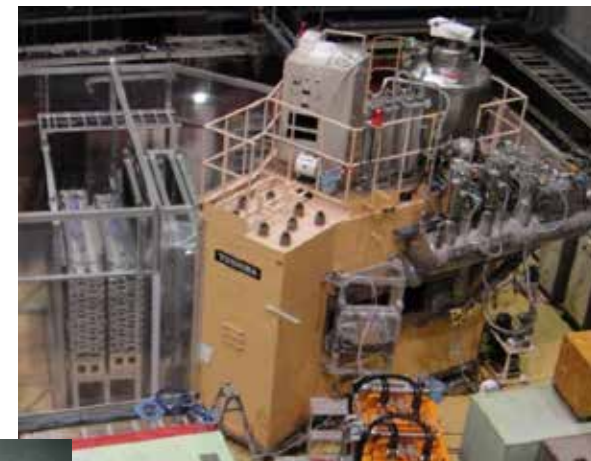
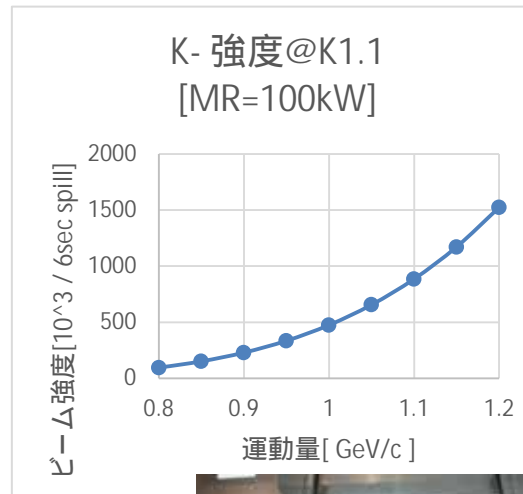
- 核内に束縛されたハイペロンの性質変化からカイラル対称性の部分的回復を検証
- 核内深部に入っていけるハイペロンを用いて初めて可能に



# K1.1 beam line = L, S ハイペロンファクトリー で展開する物理



- 1.2 GeV/c までの荷電 $\pi$ 中間子、K中間子、反陽子
- ビーム強度:  $\sim 10^6$  /spill (K/ $\pi \sim 1$ )
- 現ハドロンホールから移設



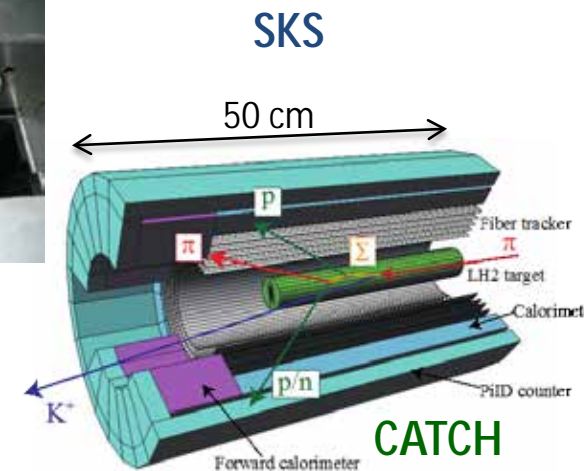
これまでに開発されたハイパー核・  
ハイペロン散乱研究の手法を生かす

充実した特色ある実験装置

- 大立体角磁気スペクトロメータ SKS (既存)
- ハイパー核用大型Ge検出器群 Hyperball-J (既存)
- ハイペロン散乱検出器 CATCH (製作中)
- 弱崩壊粒子検出器、高エネルギー光子検出器 (製作予定)



Hyperball-J

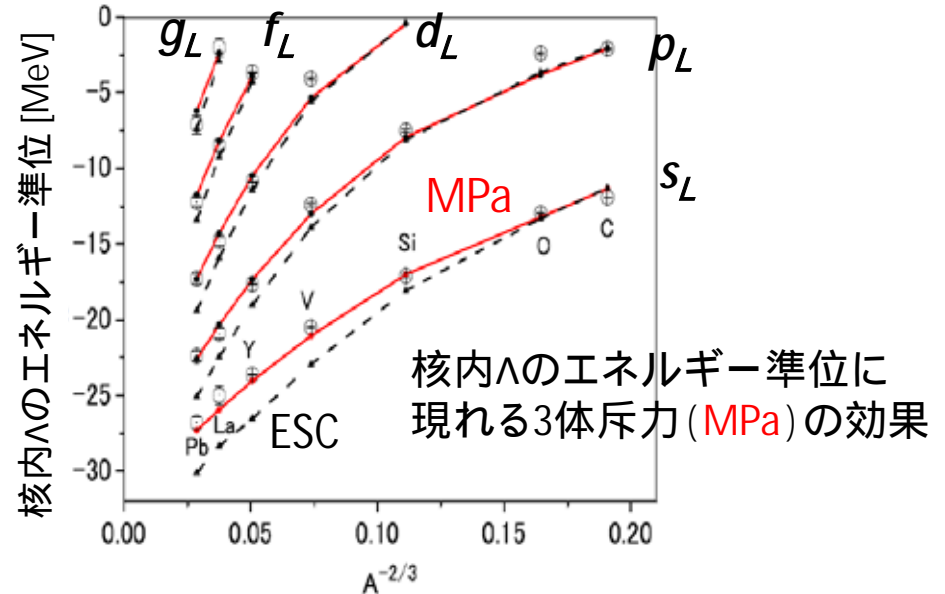
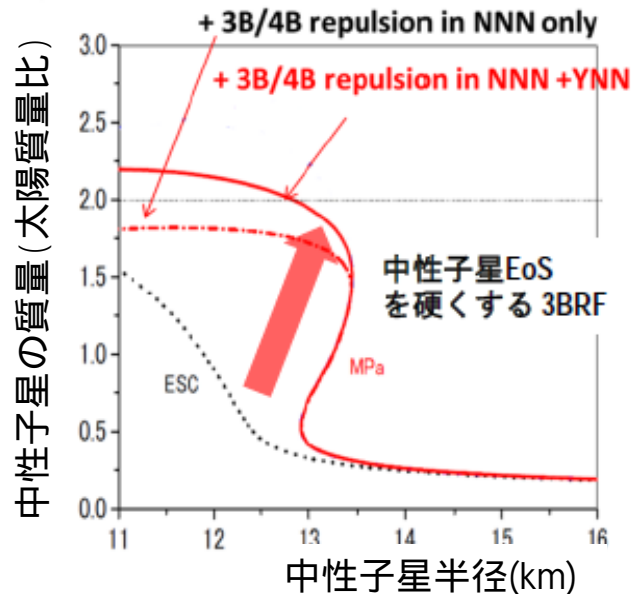


## 中性子星の謎を解明

→我々の理解を超えた重い中性子星の発見！

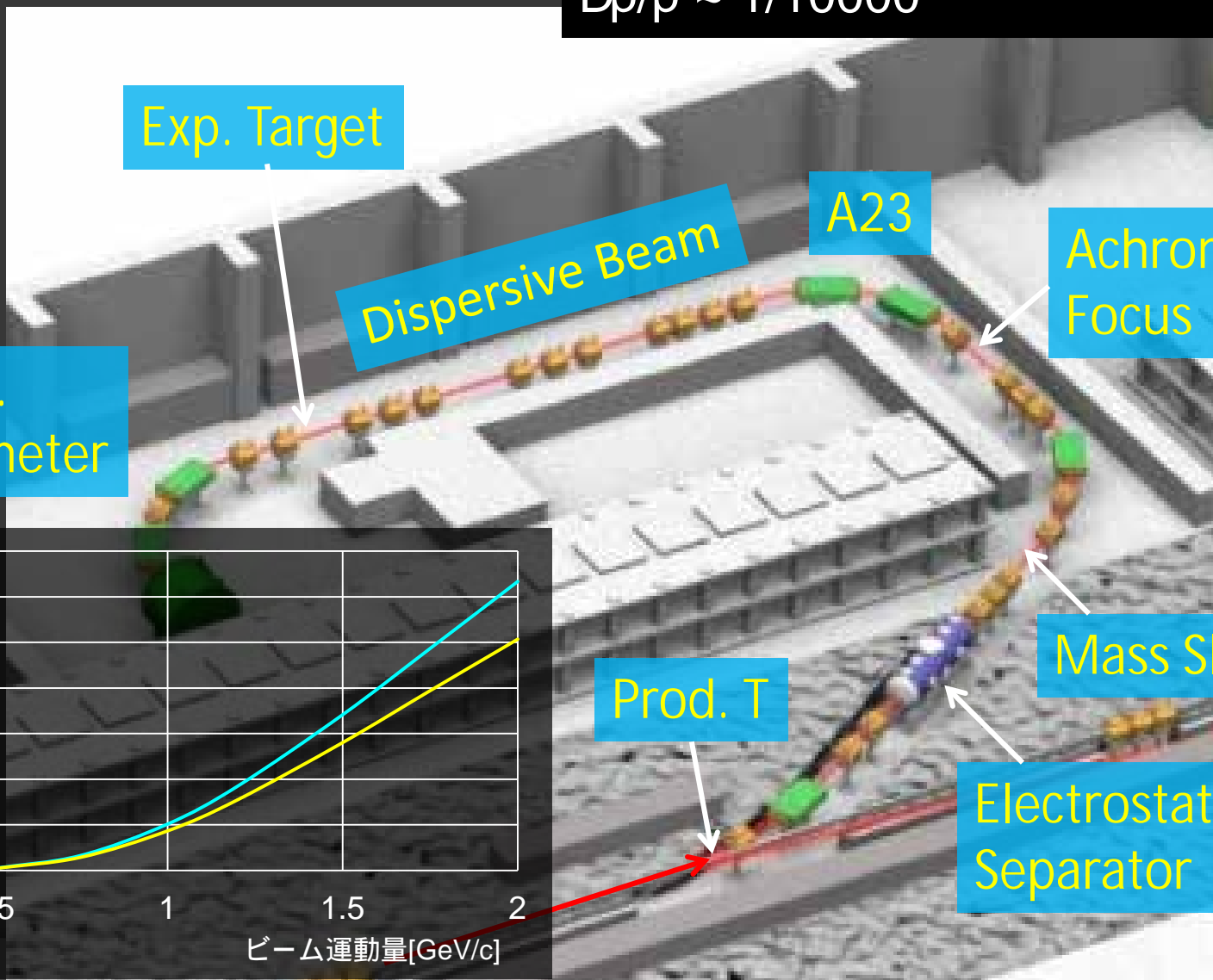
## 高分解能ハイパー核分光実験

- 重い中性子星を支えるにはハイペロンを含めた3体斥力(高密度での斥力)が必要
- 密度依存性を測定して3体斥力を実証する
  - 核内 $\Lambda$ のエネルギー準位を広い質量領域(平均密度 $0.5-0.8r_0$ の核物質中)で精密に測定
    - 重い中性子星の問題を解決するには $2.5r_0$ 付近での斥力が重要。
- 数100keVの分解能が必須
  - 運動量分散整合イオン光学技術を用いたビームラインとスペクトロメータ(HIHR)
- 大強度ビームを活用する
  - 従来の強度を一桁上回るビーム( $\sim 180\text{Mpion/spill}$ )

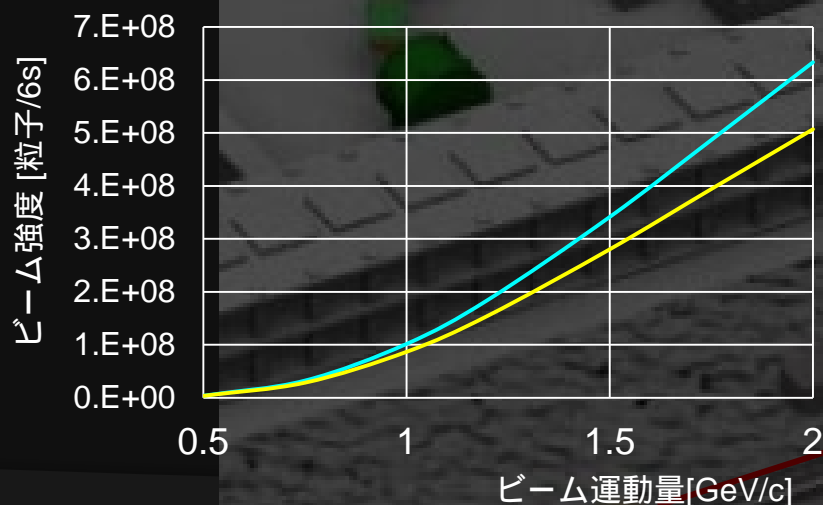


# HIHR Line J-PARC ExHH

Intensity:  $\sim 1.8 \times 10^8$  pion/pulse  
(1.2 GeV/c, 50 m, 1.4msr\*%,  
100kW, 6s spill, Pt 60mm)  
 $D_p/p \sim 1/10000$

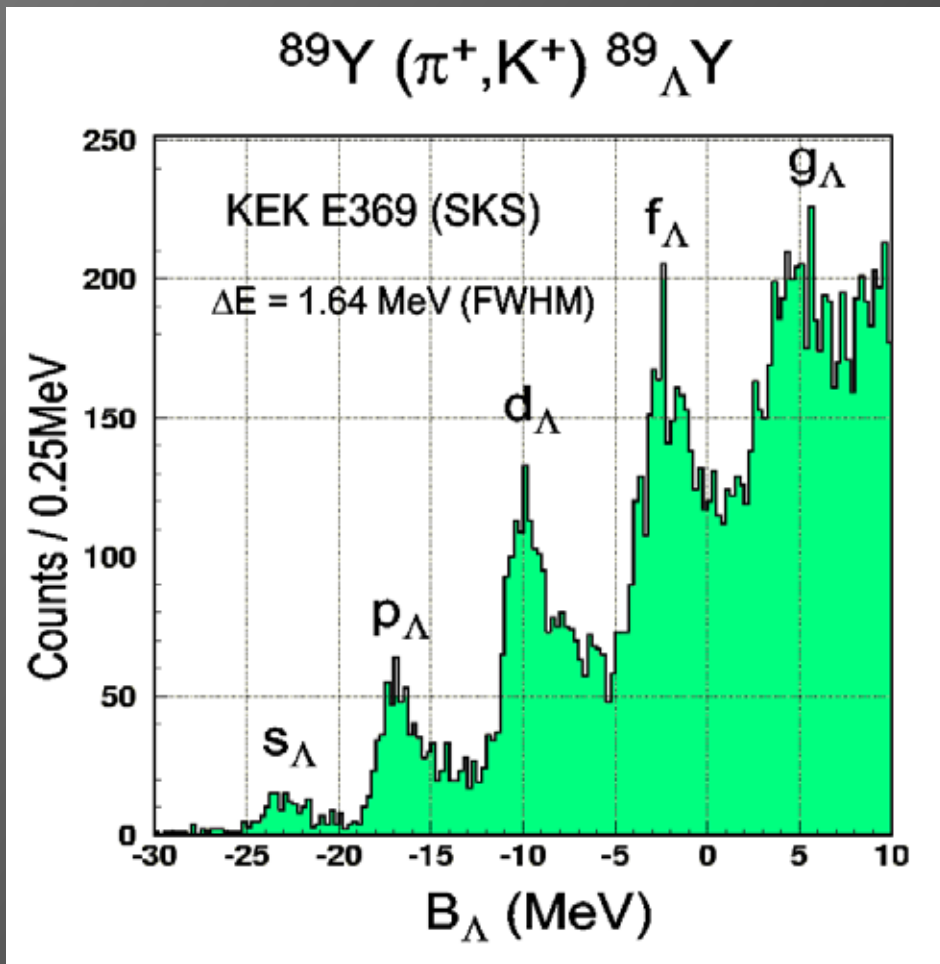


High Res.  
Spectrometer

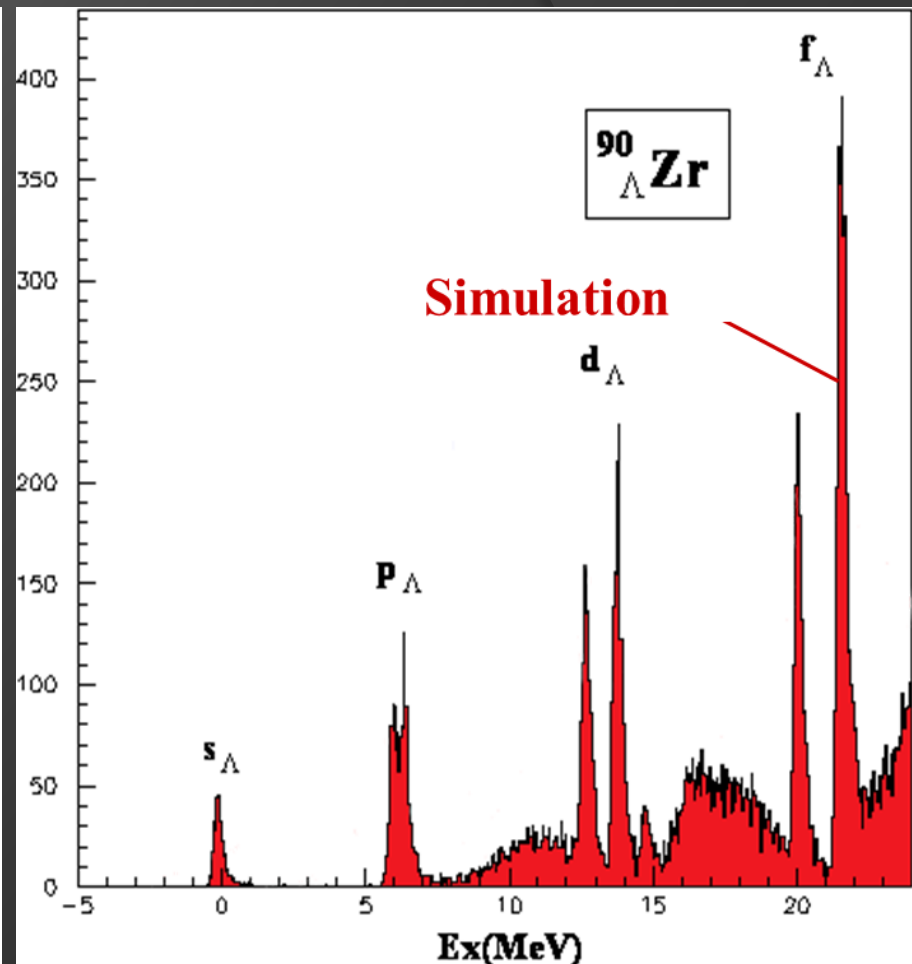




# ハイパー核 $B_{\Lambda}$ の予想スペクトラム



KEK-PS E369 (SKS)



J-PARC 拡張ホールでの予想図



# コスト

- ハドロン実験施設拡張 137億円
  - 現行ハドロン実験施設の建設コストをもとにスケール
  - 最近のコスト変化等を取り込んだ改訂作業を行う
- 測定器整備 30億円
- Cf.)
  - ミュオン電子転換過程探索実験 40億円
  - ミュオン異常磁気能率/電気双極子能率測定実験 31億円

計画番号	学術領域番号	計画名称	計画の概要	学術的な意義	社会的価値	計画期間	所要経費(億円)	主な実施機関と実行組織
80	23-2	J-PARC実験施設の高度化による物質の起源の解明 Elucidation of the origin of matter with an upgrade of the J-PARC experimental facility	J-PARC大強度陽子ビームを最大限に活用し研究成果創出の為、ハドロン実験施設の拡張整備を行いミュオン電子転換実験やハドロン実験を行う。更に物質生命科学実験施設にミュオン $g-2$ /EDM実験を実現する。	世界最大級の大強度二次粒子ビーム(主にミュオンおよびK中間子)を用いて、物質優勢宇宙の理解の鍵となる粒子・反粒子の間の非対称性と、強い力による物質の形成を精査することで、物質の起源に迫ることが出来る。	宇宙と物質の起源の探究は、人類共通の知的資産を産み、社会の多分野発展の重要な基盤・原動力となる。世界最先端の基礎科学が日本で発展する姿を若者と共有し、将来の科学水準向上と社会の活力の向上に資する。	ミュオン実験(COMETと $g-2/\mu$ EDM): H29-H38建設と運転 ハドロン施設拡張: H30-H39建設と運転	ハドロン施設拡張137、測定器整備30、ミュオン電子転換過程探索実験40、ミュオン異常磁気能率/電気双極子能率測定実験31、運転経費152/年	KEK素粒子原子核研究所のJ-PARCハドロン実験施設を建設運用しているグループを中心に機構内外(理化学研究所仁科加速器センター、大阪大学核物理研究センター)と連携して実施する。

# 最近の動き

- 学術会議大型計画: マスタープラン2014
  - 「J-PARC実験施設の高度化による物質の起源の解明」(総額238億円)が重点大型研究計画27件の一つとして選定された。
- 核物理の将来 / 高エネルギー物理の将来計画
- KEKロードマップ
  - 「ハドロン実験施設では、現行および新1次陽子ビームラインによる実験を着実に進めるとともに、ハドロン実験施設の拡張を目指す。」
- 素粒子原子核研究計画委員会
  - 3計画(ILC、ハドロン実験ホール拡張、ニュートリノの将来計画)は日本の素粒子・原子核コミュニティの長期戦略において、今後計画実施が承認されるべき最優先計画である。
  - 拡張計画の実施のための物理研究の観点からの条件は、提案とおりに2018年頃には整うことが強く期待されている。
  - 素核研と関係大学、理研仁科センター、核物理研究センター等国内主要研究機関との間に早期に研究協定等を結び強力な研究体制を可能な限り早い機会に整えること。
- 核物理コミュニティから、コミュニティとして建設要員を含むマンパワーの提供を行い(主要大学、理研、阪大核物理研究センター)KEK/J-PARCと一致協力して計画を進める旨の意思表示が行われている。

# J-PARC-KEK: 大強度フロンティア 年次計画(平成25-34年度)

年次計画	H24 (2012)	H25 (2013)	H26 (2014)	H27 (2015)	H28 (2016)	H29 (2017)	H30 (2018)	H31 (2019)	H32 (2020)	H33 (2021)	H34 (2022)
加速器の高度化 (MRの増強)		750kWの達成					ビーム強度のさらなる増強(RM)				
			4.2	26.8	29.0						
ニュートリノ振動実験							次世代ニュートリノ実験(RM)				
ハドロン実験		高運動量ビームライン					ハドロンホール拡張(RM)				
		5.0	8.2	6.8			18.0	41.0	43.0	33.0	1.0
ミューオン素粒子実験		$\mu$ 電子転換実験-I					$\mu$ 電子転換実験-II $g_\mu$ -2/ $\mu$ EDM実験(RM)( )				
	COMET g-2	2.4	7.0	10.3		14.0 7.5	15.0 14.3	11.0 9.3	( )	( )米国との競争関係から 平成29年度から開始予定	

## 費用概算

ホール拡張:	137億
測定器拡充:	30億
COMET-II:	40億
$g$ -2/ $\mu$ EDM:	31億
合計	238億

米国  $g$ -2

(~2016)

GSI-FAIR (ハドロン実験施設)

(~2018)

Mu2e実験

(2021)

**学術会議: 次期大型計画  
プロジェクトへの応募**

# 建設に向けたマイルストーン

- 検討委員会(二週に一度)を継続
  - 文書化作業の継続
  - 建設費等の精査(役務、気密強化費)

並行して:

- X-2 [2016] 年度  
施設の基本設計の実施  
(KEK施設部との連携強化)



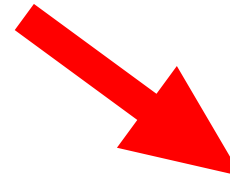
概算要求readyの状態へ

- X-1 [2017] 年度  
6月:文科省への概算要求  
(可能ならば現地調査等を前倒し)



- X [2018] 年度  
新年度予算執行開始、建設開始

2016年夏  
ビームライン  
(+物理)のLOI  
とりまとめ



- 研究会
  - 国際ワークショップ
  - 施設、ビームライン、  
フロアレイアウトの確立
- ↓ - Authorization

# ハドロン実験ホール拡張

ストレンジネス核物理  
ハドロン多体系の理解

「ハイペロンファク  
トリー (S=-1)」

ハイペロンを使ってバリオン  
間力(核力)と核内バリオン  
の性質を解明する。

「ハイパー核顕微鏡」

ハイパー核のエネルギー準  
位の密度依存性を精密に測  
定して、重い中性子星が存  
在する謎を解く。

素粒子物理

「CP非保存の発見  
から“測定”へ」

KL:100個のCP非保存事象  
を捉え、標準理論を超えて  
物質優勢宇宙の謎に迫る

「ハイペロンファク  
トリー (S=-2)」

K1.8

K1.1

HIHR

KL

K10

ハドロンを支配する実質的  
自由度を解明する。

High-p

COMET

ハドロン物理  
クォーク多体系の理解