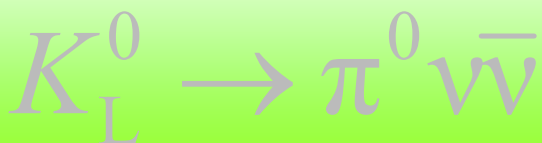


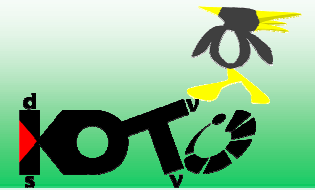
# K<sup>0</sup>TO実験( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験)と 京都K中間子グループの活動

物理学第二教室 教室発表会  
2011年3月10日

高エネルギー物理学研究室  
前田陽祐(D1)



# K中間子グループの概要



J-PARC K<sup>0</sup>TO experiment

## ニュートリノグループ

スタッフ：中家, 南野, 市川  
ポスドク：池田  
博士課程学生：中島\*, 松岡, 久保, 大谷, 家城, 村上  
修士課程学生：高橋<sub>将</sub>, 鈴木, 山内, 木河

## CdTeグループ

平木

\*：教務補佐員

## K中間子グループ

スタッフ：南條  
博士課程学生：塩見, 河崎, 増田, 内藤, 前田, 森井\*, 横山  
修士課程学生：高橋<sub>剛</sub>

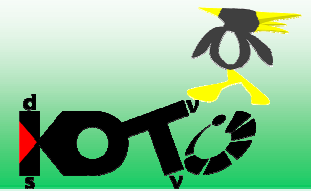
9月より  
KEKへ転出

## ATLASグループ

来年度より発足

→学生主体となって研究を進めている

# $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊



J-PARC KOTO experiment

◇ direct CP violation

◇  $\text{Br} \propto \eta^2$

◇ clean process

◇ 理論からくる不定性は 数%

◇ probe of new physics

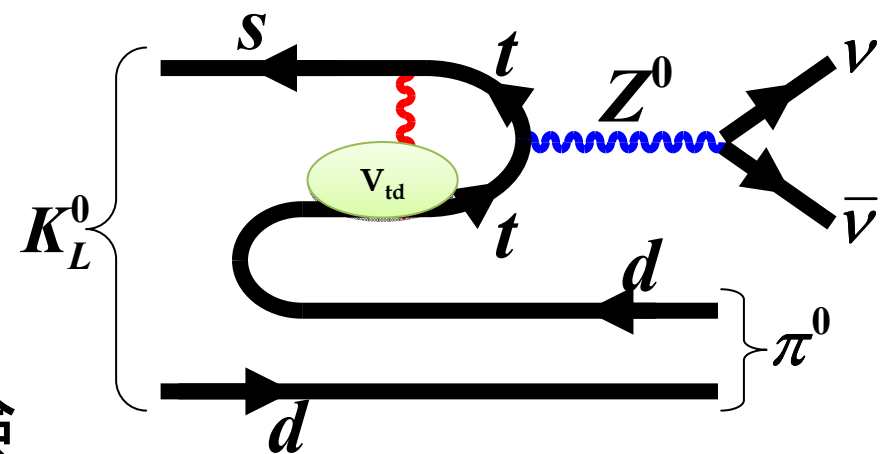
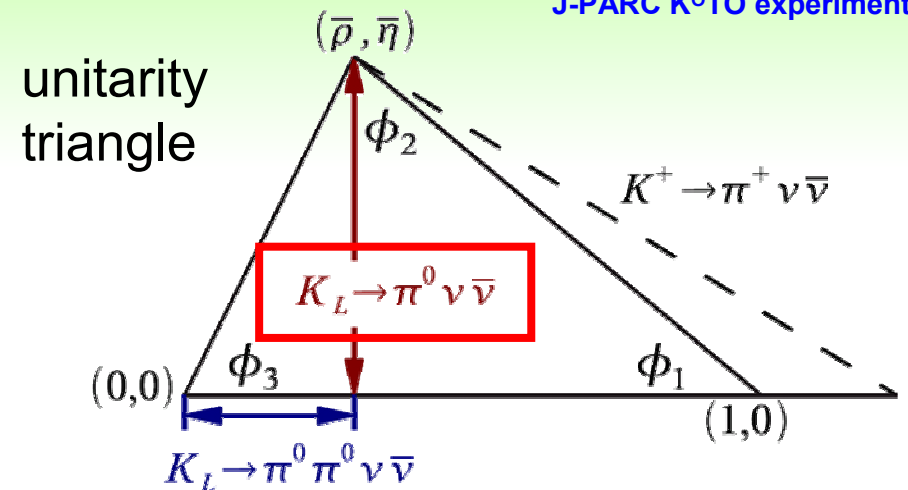
◇ ループを含んだ崩壊

→ 標準理論の検証,  
新物理の探索

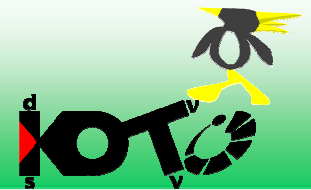
◇ 非常にchallengingな実験

◇ 標準理論による予言 :  $\text{Br} = (2.43 \pm 0.39) \times 10^{-11}$

◇ 始状態, 終状態ともに中性で検出が困難



# K<sup>0</sup>TO実験(J-PARC E14実験)



J-PARC K<sup>0</sup>TO experiment

## ◇世界初の崩壊事象の観測を目指す

◇茨城県東海村の世界最大強度の陽子ビームを用いる。

→ K0 at Tokai

◇KEK-PS E391a実験を受け継ぎ  
ビームライン, 検出器をupgrade



## ◇K<sup>0</sup>TO collaboration

◇5ヶ国, 約60名の  
研究者が参加

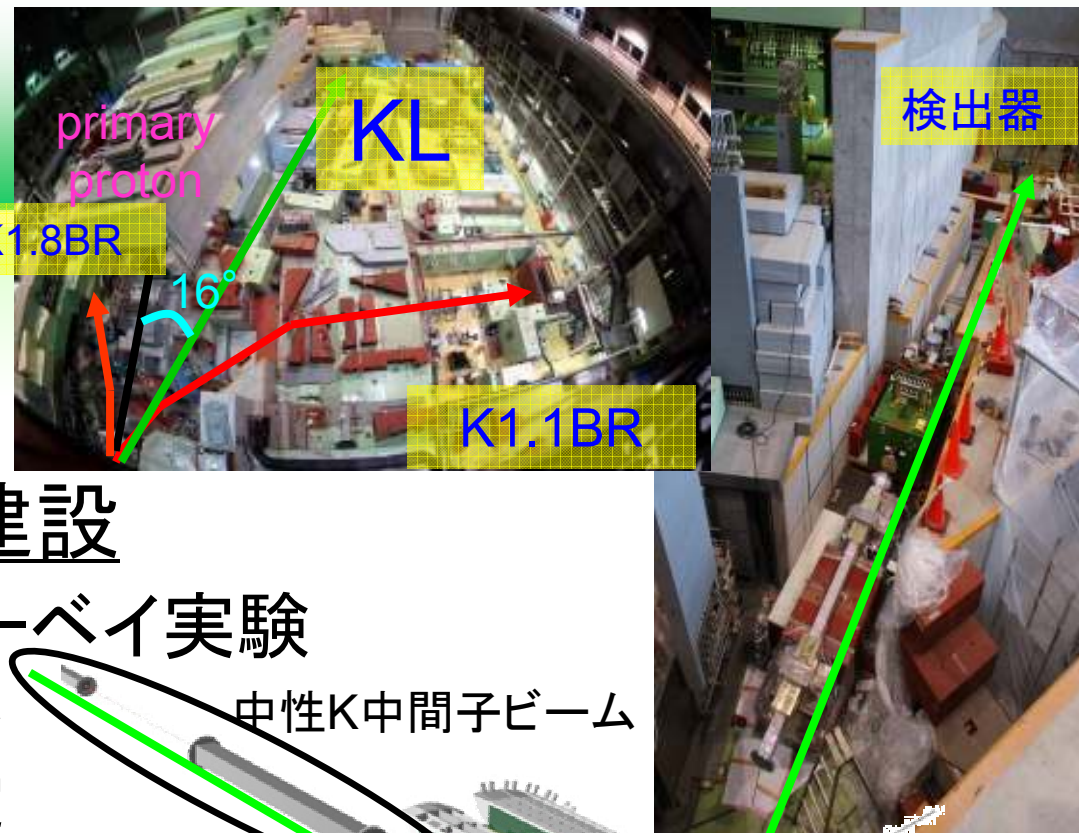
◇米国, ロシア, 台湾, 韓国,  
山形大, KEK, 防衛大, 京大, 阪大, 佐賀大



collaboration meeting @KEK  
(20<sup>th</sup> Feb, 2011)

# 実験スケジュール

◇ 2006年 プロポーザル提出



◇ 2009年 ビームライン建設

◇ 9月完成 → ビームサーベイ実験

→ コリメータアラインメント

→ K中間子生成数の測定

中性K中間子ビーム

◇ 2010年 カロリーメータ建設

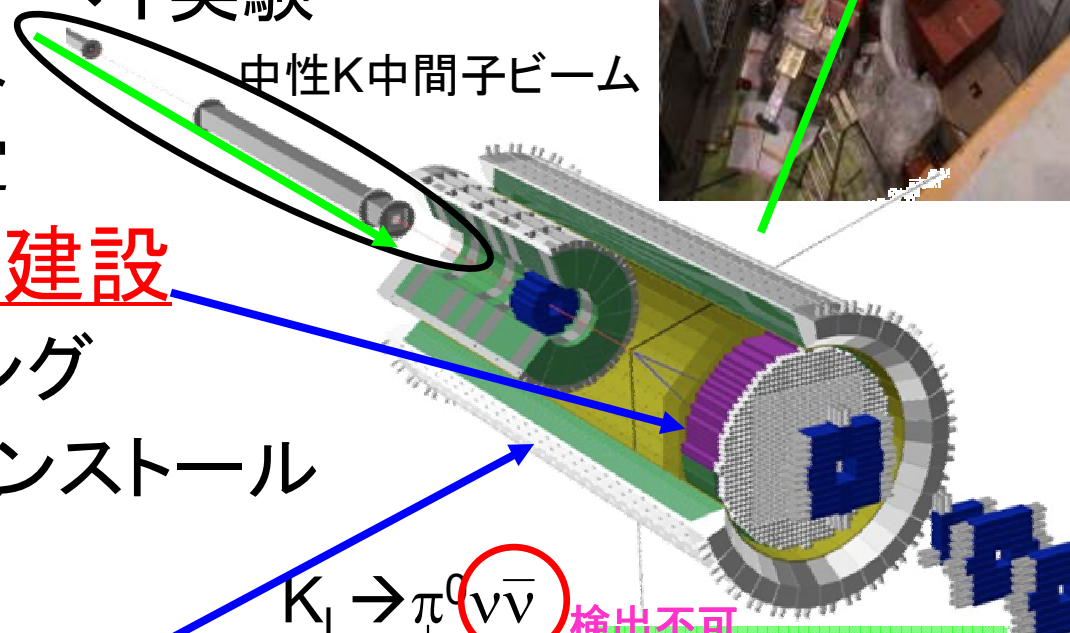
◇ 純CsI結晶のスタッキング

◇ PMTベースの量産, インストール

◇ ビーム粒子の測定

◇ 2011年 veto検出器建設

◇ 2012年~ 物理ラン



$$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$$

検出不可

→ veto検出器で何も ないことを保証

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

カロリーメータで検出

# 2009年 ビームサーベイ実験

$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$$



# コリメータアライメント

◇ GOHMON - Graphical Online High-flux beam Monitor

◇ シンチレーションファイバーを  
敷き詰めた検出器

◇ スピル毎のビーム形状を瞬時に表示

◇ 1mmの精度でコリメータをalign可能

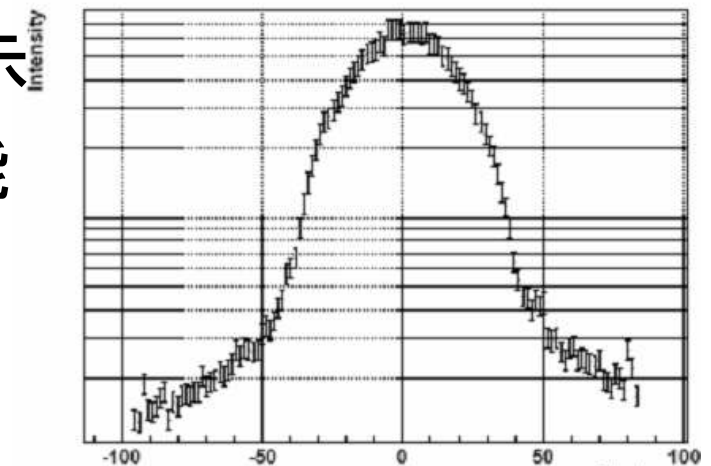
◇ 検出器upgrade

◇ 読み出し回路の最適化

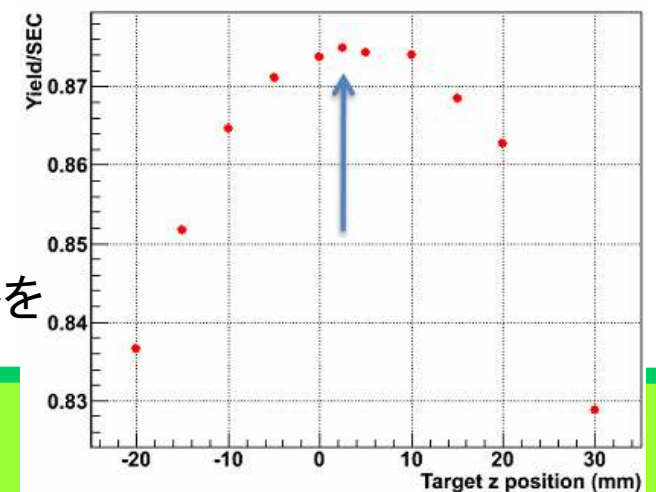
◇ 本年度のビームタイムについても  
正しくコリメータをアラインする  
ことに成功



X-profile



Rotation scan



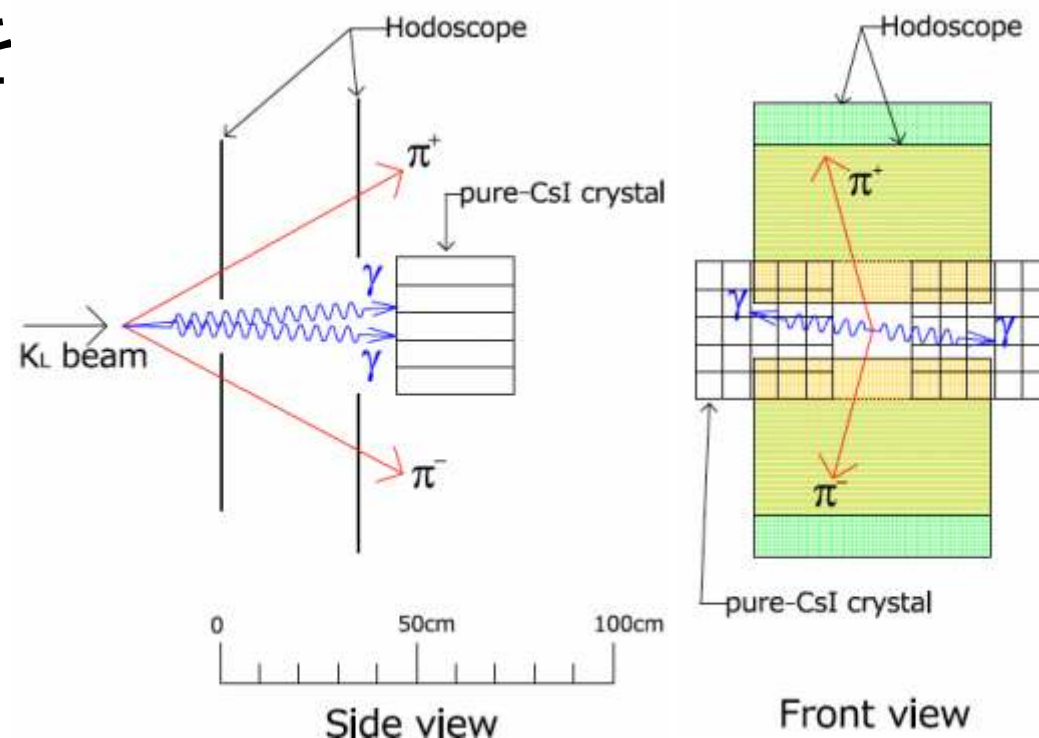
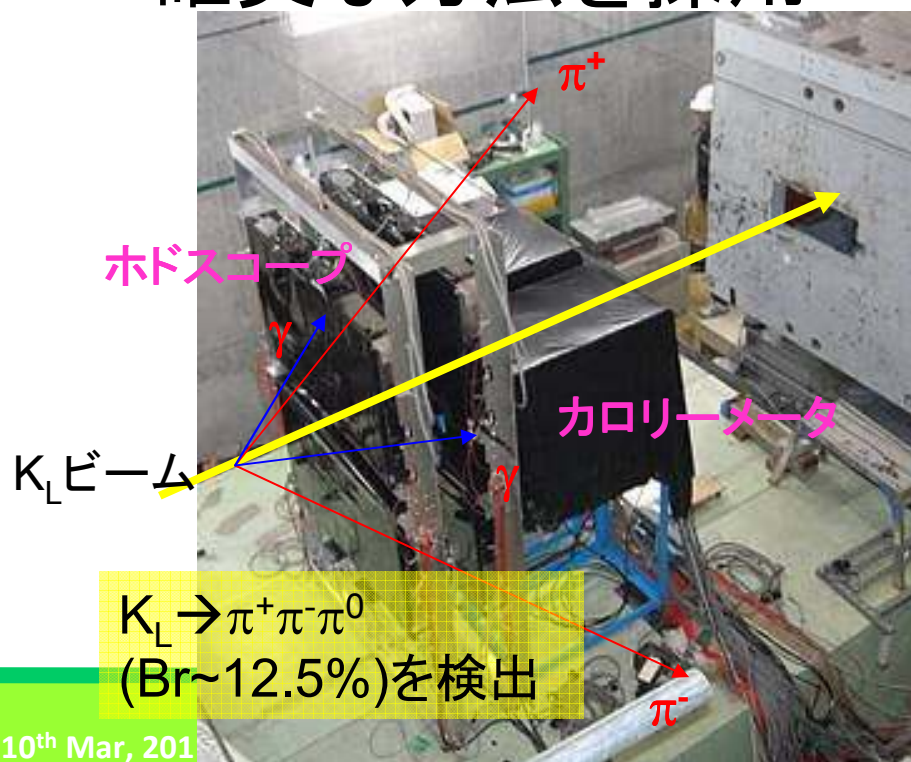
コリメータをターゲットを  
中心に回転

# K中間子生成数測定実験



J-PARC KOTO experiment

- ◇ 2009年にビームラインが完成  
→ 最重要課題としてK中間子生成数測定を実施
- ◇ マグネット, チェンバーを使わないシンプル且つ  
確実な方法を採用



hodoscope : 1cm幅のシンチレータストリップ  
→  $\pi^+\pi^-$ をトラッキング  
calorimeter : 7cm x 7cm x 30cm pure CsI crystal  
→  $\pi^0$ からの2 $\gamma$ を検出



# K中間子生成数測定実験 – 解析結果



◇ 系統誤差や運動量分布を評価

◇ K中間子生成数 ( $/(2 \times 10^{14} \text{P.O.T.})$ )

◇ Ni Target :

$$(1.83 \pm 0.038_{\text{stat.}} \pm 0.13_{\text{syst.}}) \times 10^7$$

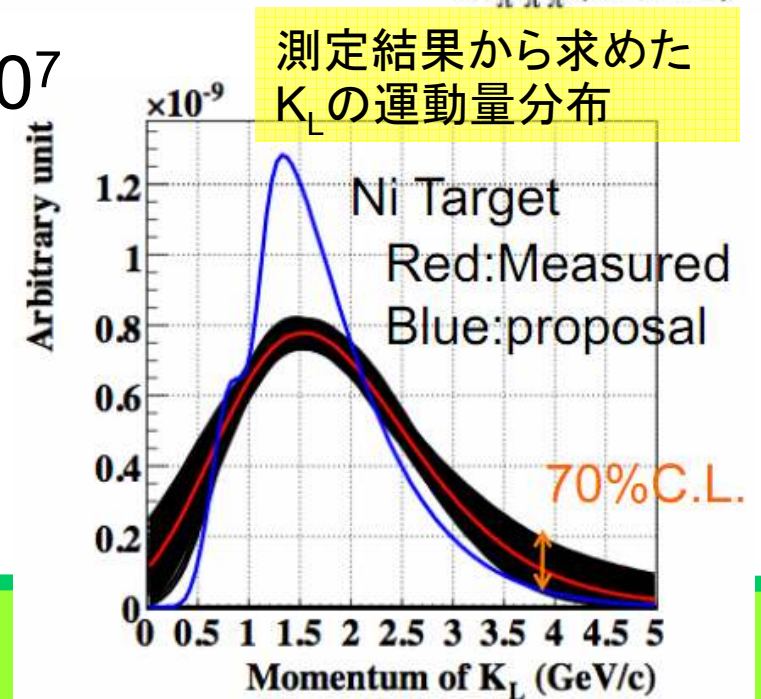
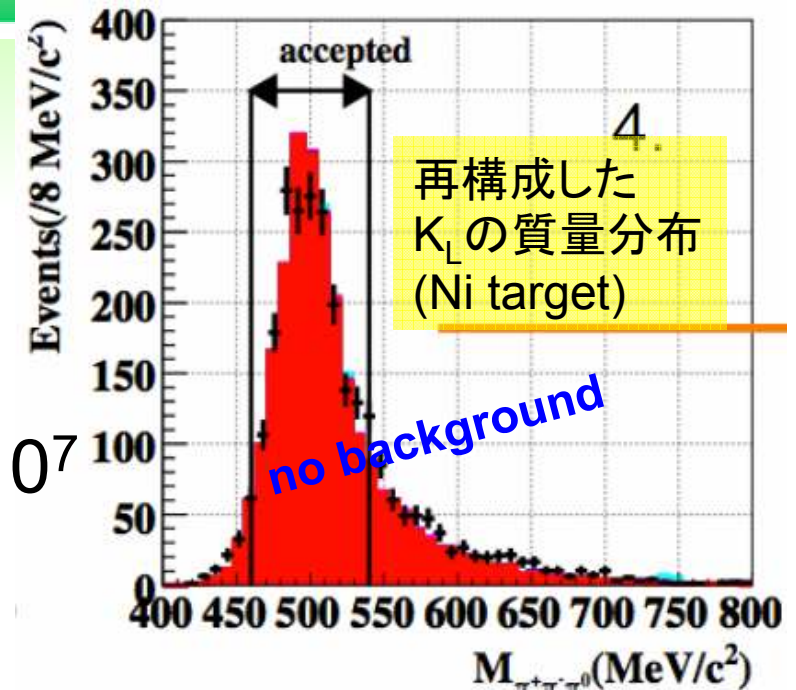
プロポーザルの  
約2.3倍!!

◇ Pt Target :

$$(3.73 \pm 0.080_{\text{stat.}} \pm 0.25_{\text{syst.}}) \times 10^7$$

→ 10%よりよい精度でK中間子の生成数を測定することに成功!!

2010年7月  
ICHEP @Parisにて  
結果を発表

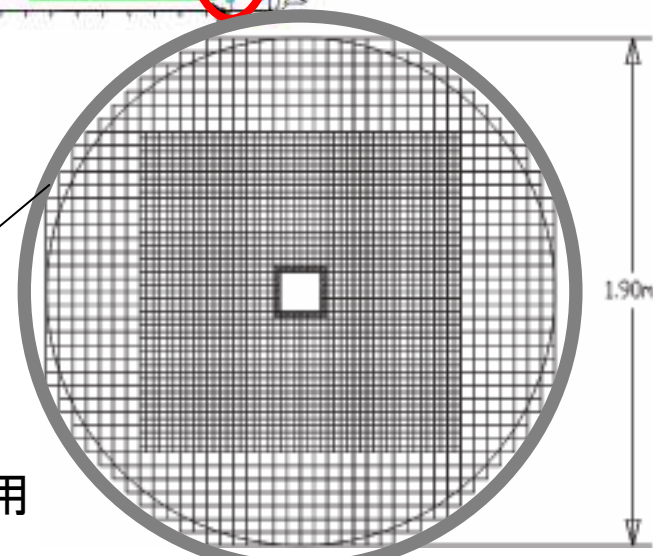
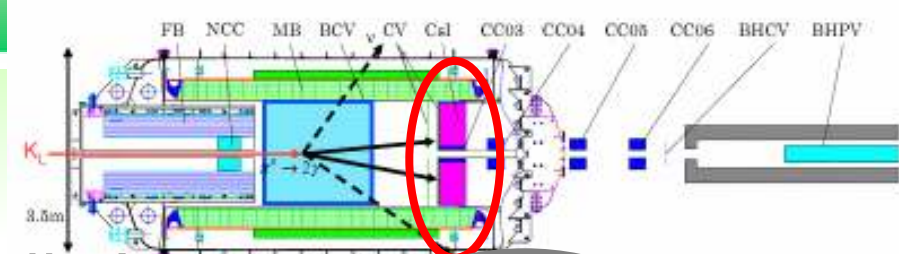


# メインカロリメータ建設

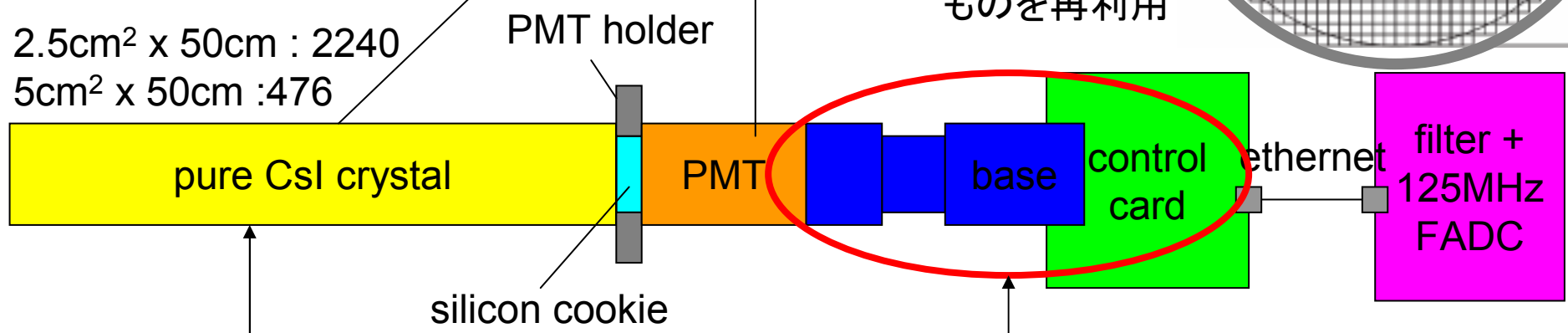
$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$$

# KOTO実験 メインカロリメータシステム

- ◇  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  を検出する
- ◇ 約3000本の純CsI結晶より構成
  - ◇ 米国FermilabのKTeV実験で使われた結晶, PMTを再利用



シリンダー  
: E391aの  
ものを再利用



スタッキングに  
京都グループも貢献

京都グループで新規開発, 製作



# CsI結晶スタッキング

◇2007-2008にFermilabよりCsI結晶を輸送

◇ビームサーベイ終了後(2010年5月)より建設開始

◇乾燥室を設置し, 湿度を~15%に.

◇シリンダーの歪み等と格闘...

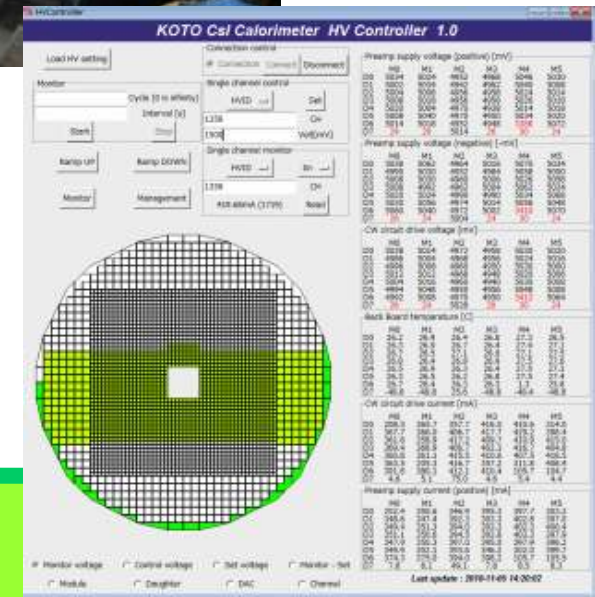
→先月結晶のstacking完了!!



# カロリメータ用PMTベースの製作



- ◇ K<sup>0</sup>TO実験用にCW型低消費電力、低ノイズのPMTベースを開発
  - ◇ KTeVとのエネルギーの違い
  - ◇ 真空中での使用
- ◇ 学部生アルバイトを起用し、約3000本の組み立て、全数検査に成功
  - 現在インストール中
- ◇ 全チャンネルの高電圧コントロールシステムの開発





# 秋のビームタイムに於ける性能評価



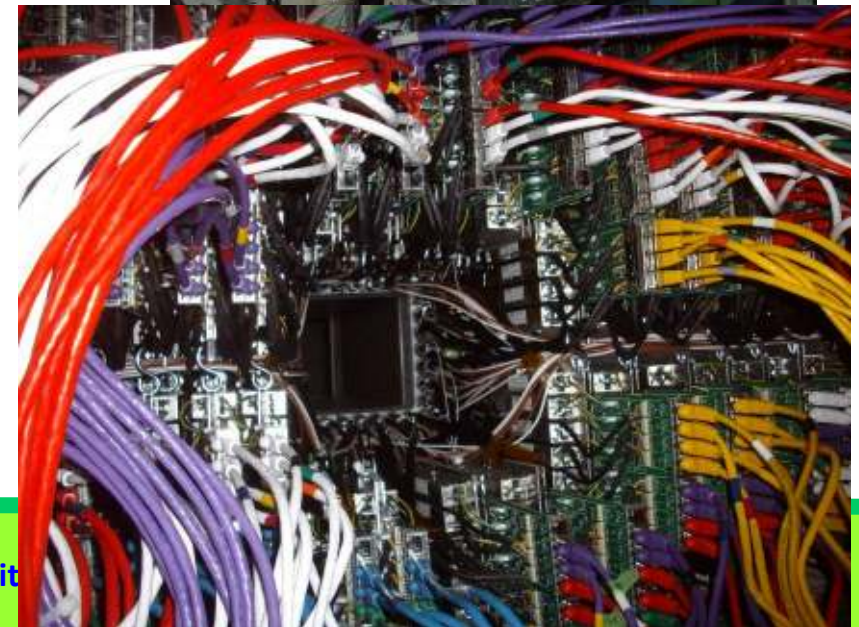
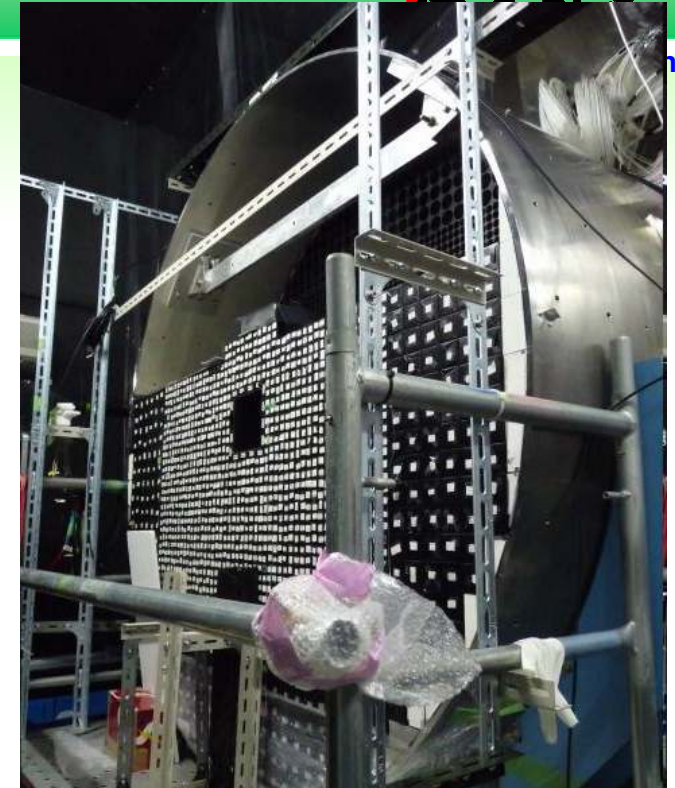
◇結晶を途中まで積んだ状態でビームを用いたテスト

◇多チャンネル( $O(1000)$ )の動作  
(HVの供給, 信号読み出し)  
→no dead channel!!

◇AI targetで生成した $\pi^0$ による  
calibration

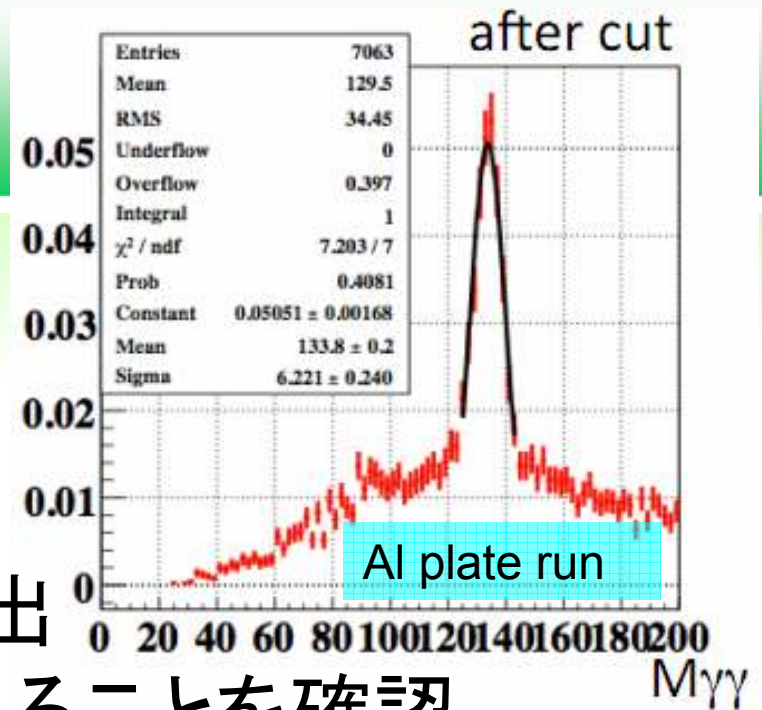
◇ $K_L \rightarrow 3\pi^0$ による $K_L$ の再構成

◇timingの情報の解析



# $\pi^0$ in Al target & $K_L \rightarrow 3\pi^0$

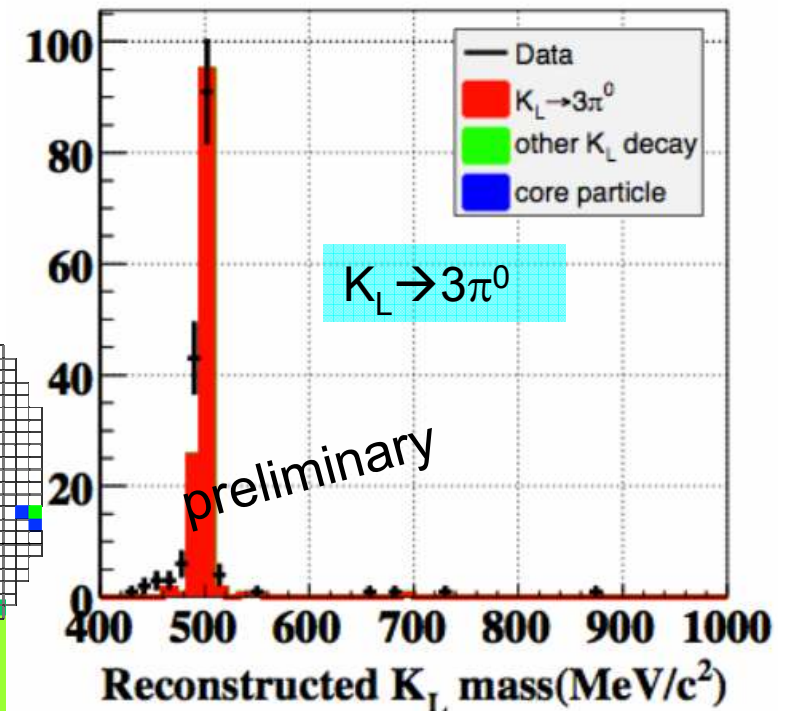
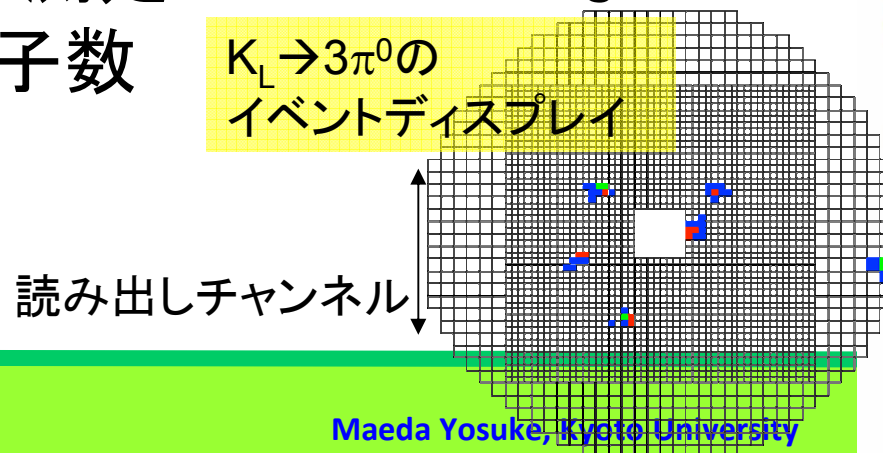
- ◇ アルミターゲットを設置し、中性子との相互作用で生じた  $\pi^0$  を検出
  - $\pi^0$  の質量の場所にピークを検出
  - 正しくcalibrationが行われていることを確認



- ◇  $K_L \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$  から  $K_L$  を再構成

- ◇  $K_L$  の質量にピークを検出

- ◇ 去年の測定とconsistentな  $K$  中間子数





# timing resolutionの評価

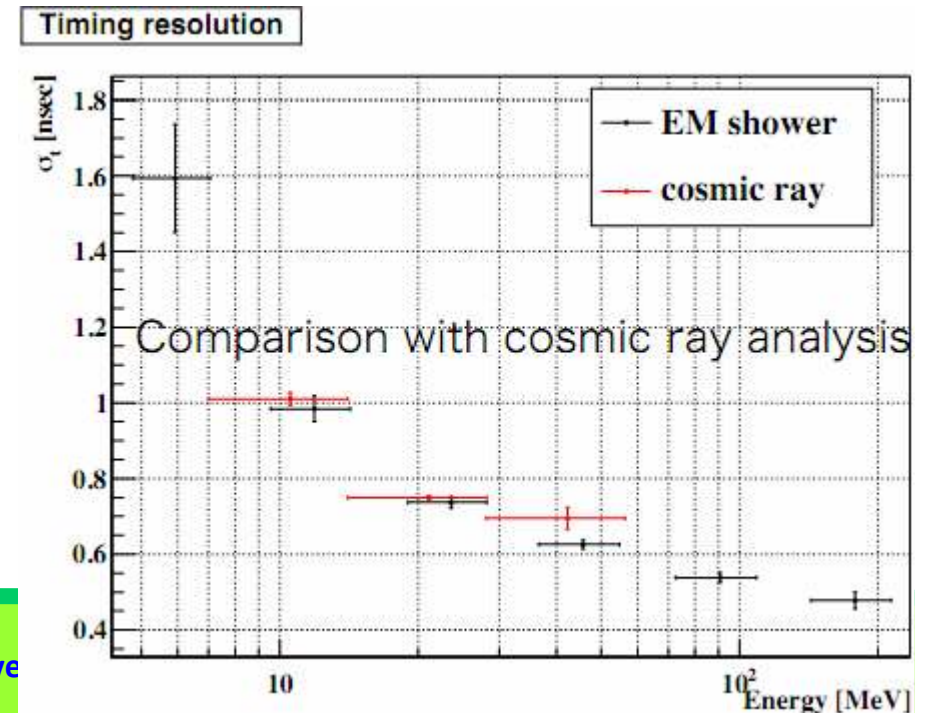
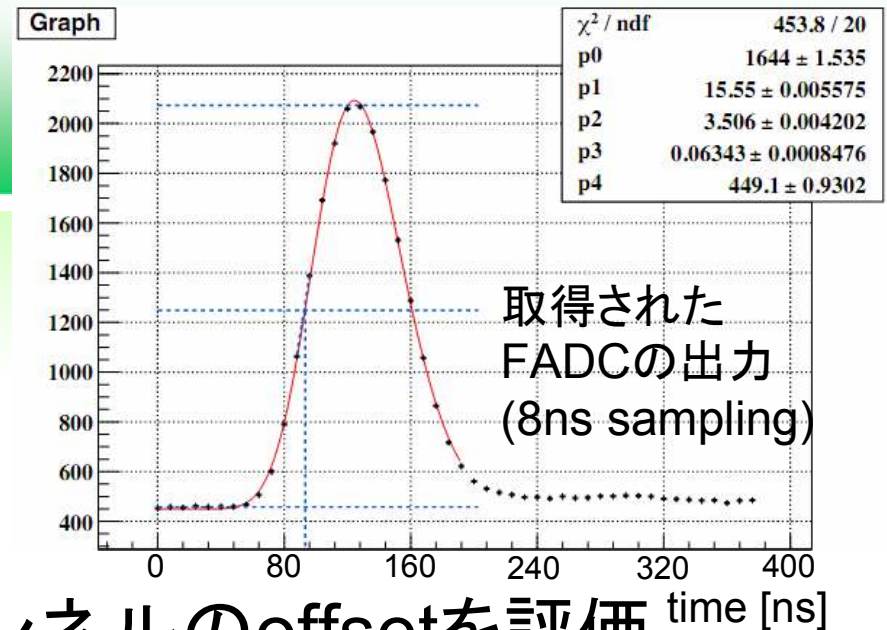
◇ calibration用のレーザー,  
宇宙線,  $e^{+/-}$ シャワーの  
データの時間情報を解析

◇ 宇宙線のデータにより各チャンネルのoffsetを評価

◇ constant fractionにより時間分解能を評価

→ 0.88ns @10MeV (~MIP)  
(宇宙線データ)

◇ 想定通りの時間分解能を  
有することを確認



# ビーム粒子の測定

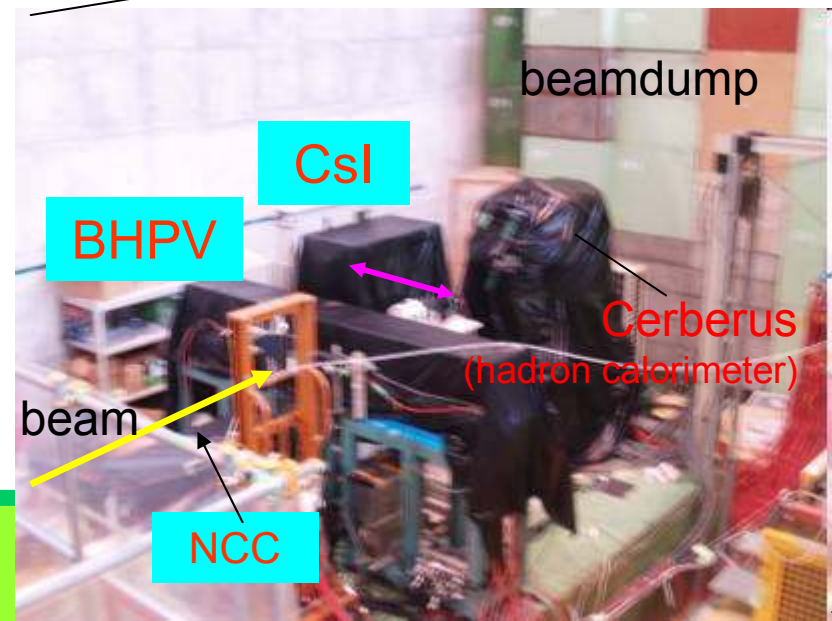
$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$$

# ビーム粒子のフラックス, エネルギー測定



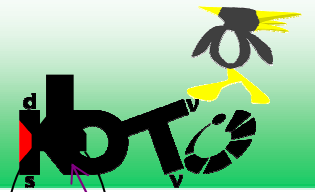
J-PARC KOTO experiment

- ◇ビーム中に残存する中性子, 光子を測定
  - ◇ビームについてのよりよい理解
- ◇アクシデンタルhitを軽減するため, 100Wの低強度runを実施(通常3kW)





# ビーム光子の測定

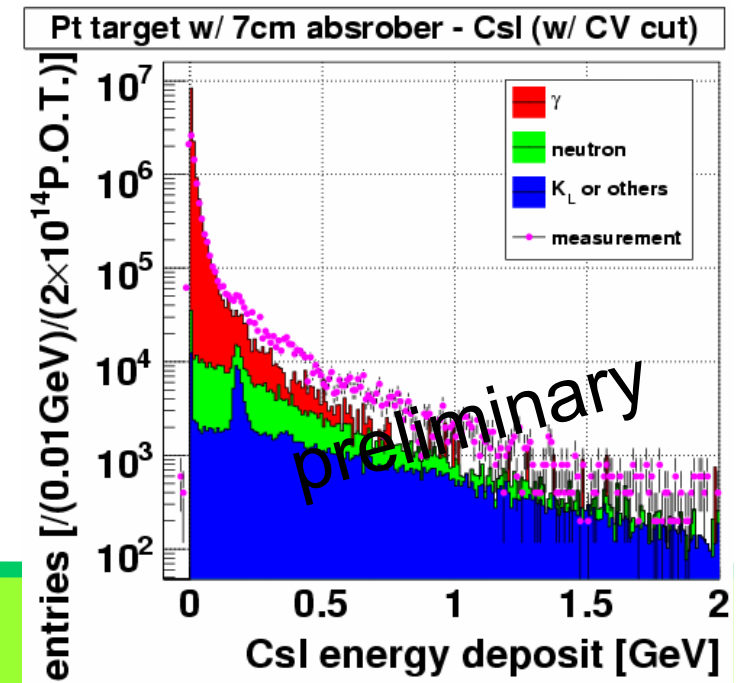
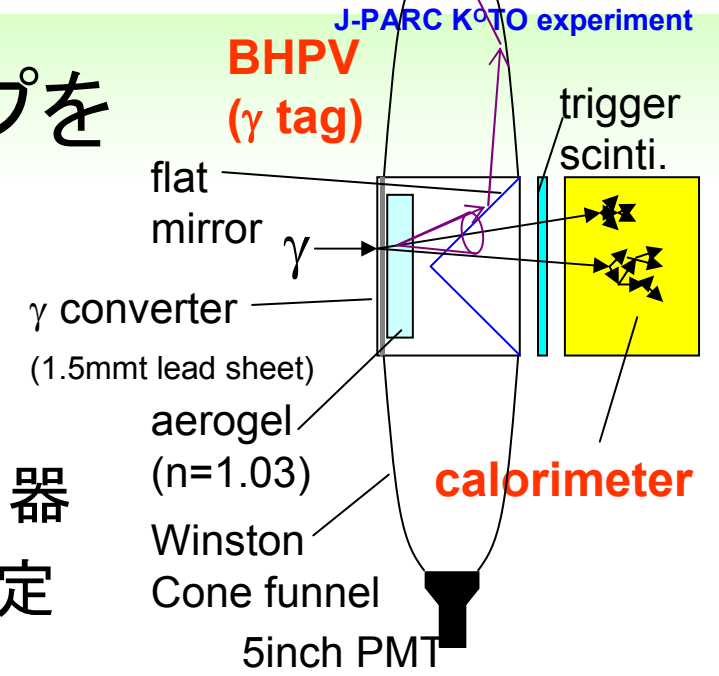


◇本実験で用いる検出器プロトタイプを用いた測定

◇Beam Hole Photon Veto (BHPV)

- ◇鉛 $\gamma$ 線コンバータ + エアロジェルによる中性子に不感なCerenkov型光子検出器
- ◇最下流の $\gamma$ 線veto検出器として設置予定
- ◇カロリメータを配置して $\gamma$ のエネルギーを測定

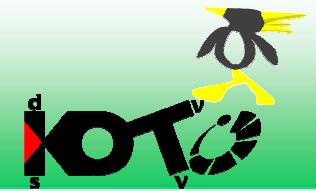
◇MCに近いエネルギー分布を観測  
→概ね理解できている



# 2011年 検出器建設に向けて

$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$$

# 本実験のための検出器R&D



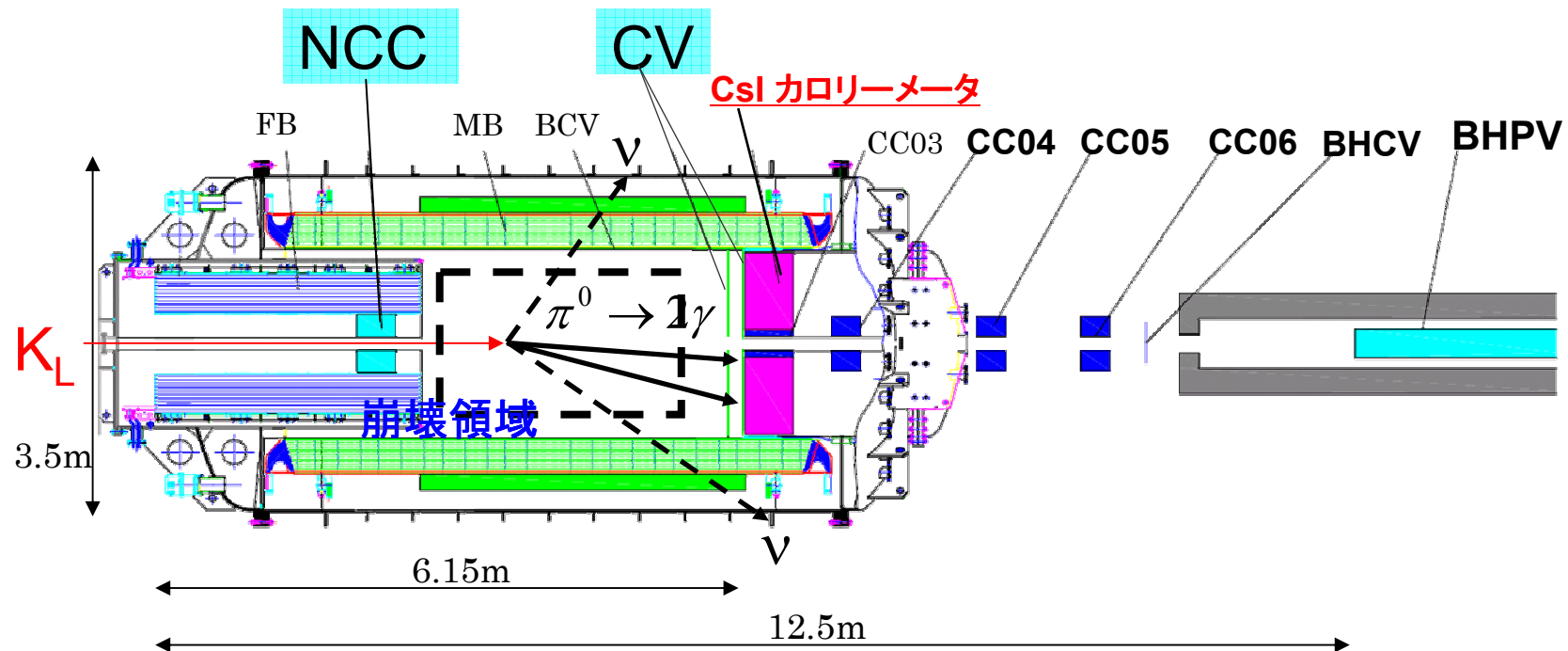
J-PARC K<sup>0</sup>TO experiment

◇ Neutron Collar Counter (NCC)

◇ Charged Veto (CV)

→ 先行実験(E391a)でのバックグラウンド源

→ 実験の成否を分ける検出器



# Neutron Collar Counter (NCC)



## ◇ 上流部に設置する検出器

◇ 検出器上流部での  
 $K_L \rightarrow 2\pi^0, 3\pi^0$ によるBGを抑制

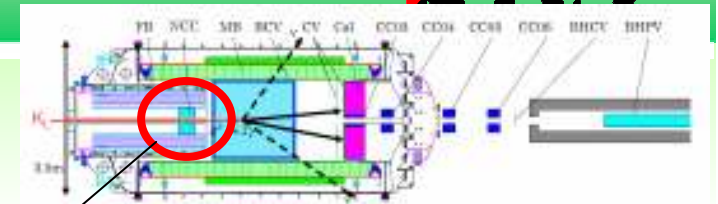
◇ 検出器とハロー中性子の相互作用  
による $\pi^0$ の生成が問題となる

→ 純CsI結晶による不感領域のない検出器

→ 読み出しをビーム方向に分割

◇ ハロー中性子を直接検出し,  
モニター

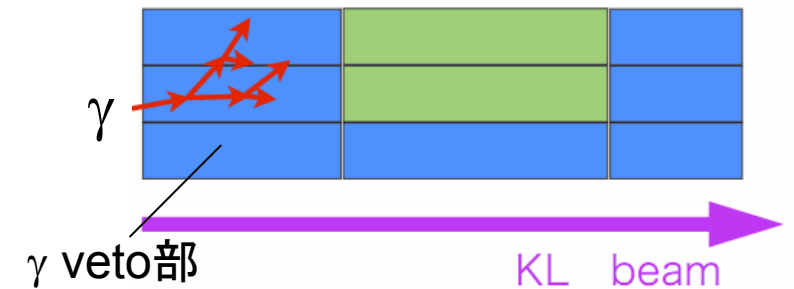
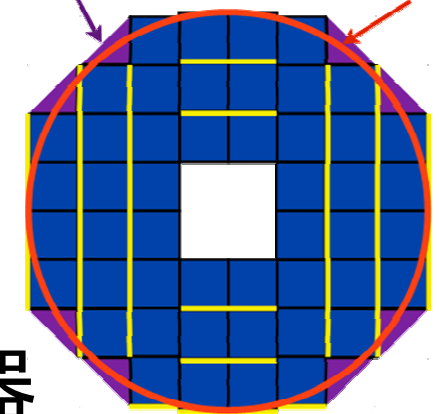
◇ 波長変換ファイバーによる読み出し



NCC

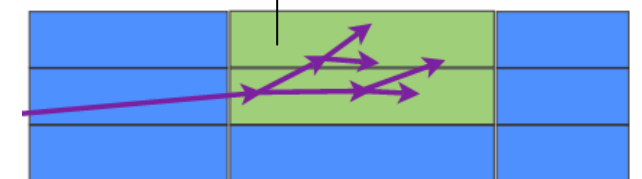
deformed crystal

R=27cm



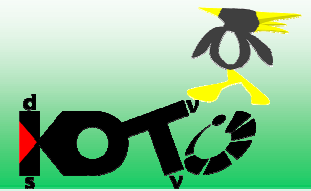
中性子測定部

halo  
neutron



KL beam

# 実機製作に向けたstudy



J-PARC K<sup>0</sup>TO experiment

## ◇プロトタイプモジュールを用いたビームテスト

- ◇K1.1BRテストビームラインでハドロンに対する応答を測定  
→MCをチューン

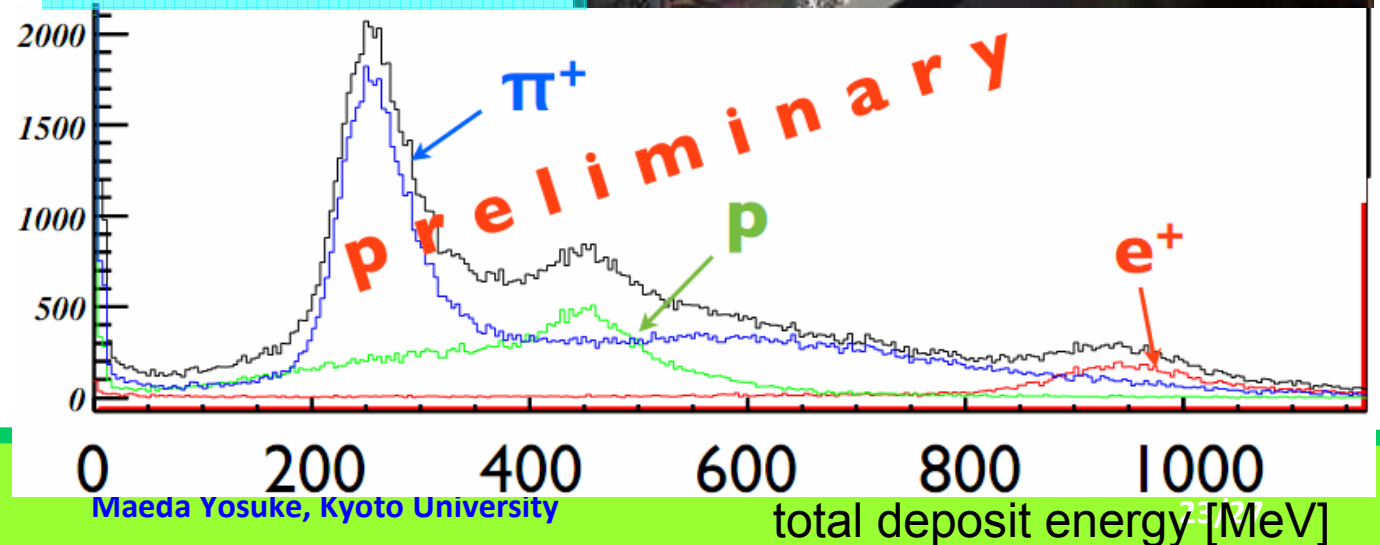
## ◇現状

- ◇使用するCsI結晶の選定,加工  
(既に半数を終了)

→来年度よりモジュール製作を開始

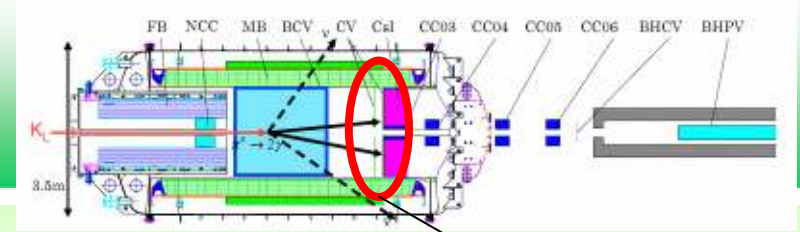


1GeV/cの各荷電粒子に対する応答





# Charged Veto (CV)



◇メインカロリメータを覆うように設置

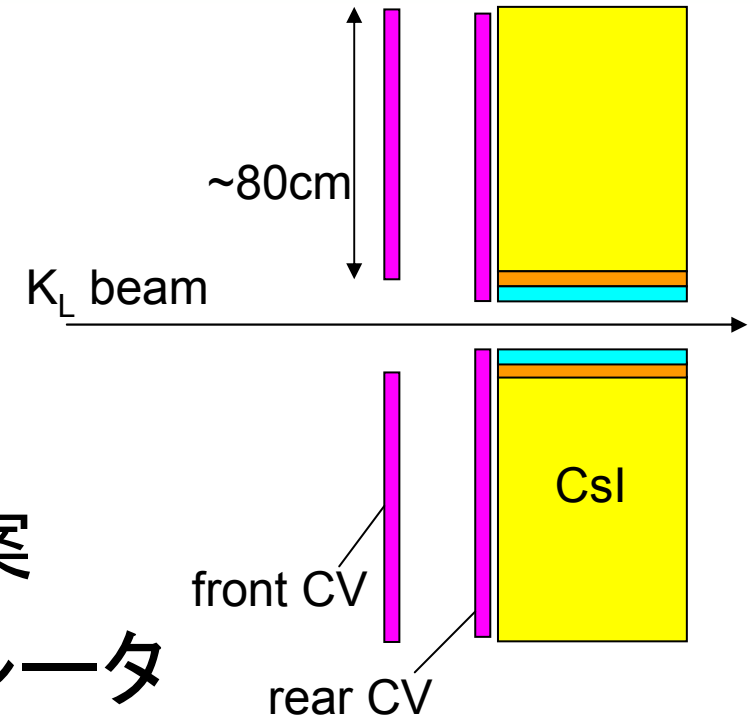
◇荷電を含む $K_L$ 崩壊事象を排除

◇NCCと同様, ハロー中性子との相互作用による $\pi^0$ や $\eta$ の生成が問題となる

→ハロー中性子との相互作用を小さくするため,新しい構造を考案

◇薄い(3mm)プラスチックシンチレータ + 波長変換ファイバー読み出し → 大面積をカバー

◇MPPCによる読み出し → 十分な光量を獲得



# 実機製作に向けたstudy

## ◇K<sup>o</sup>TO実験CV用 MPPCの開発

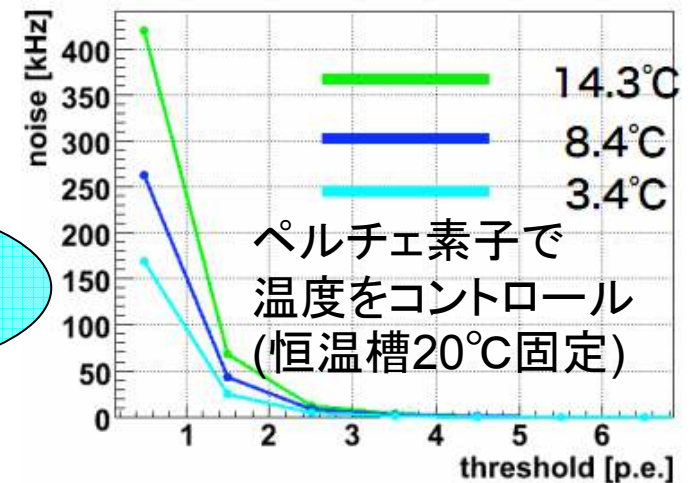
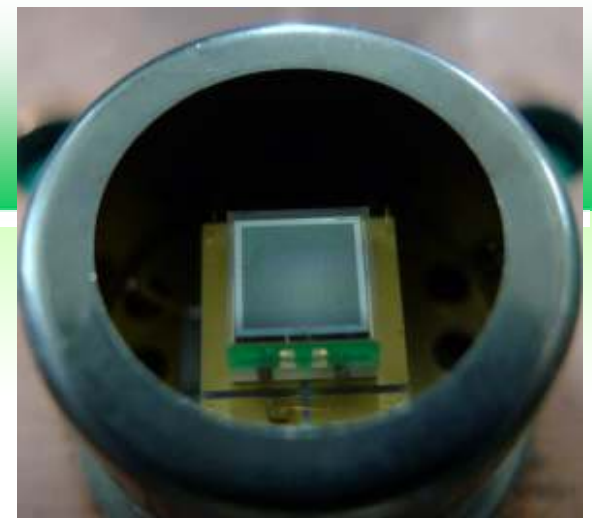
◇3mm角受光面 + ペルチェ素子による冷却システム → 5°Cで動作させる

◇浜松ホトニクスと共同開発

→問題なく冷却出来ている  
(ノイズを軽減)

→既にプレ量産に入っている

常温ではノイズが多すぎる

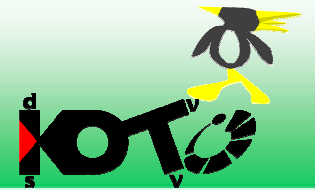


## ◇シンチレータの性能評価

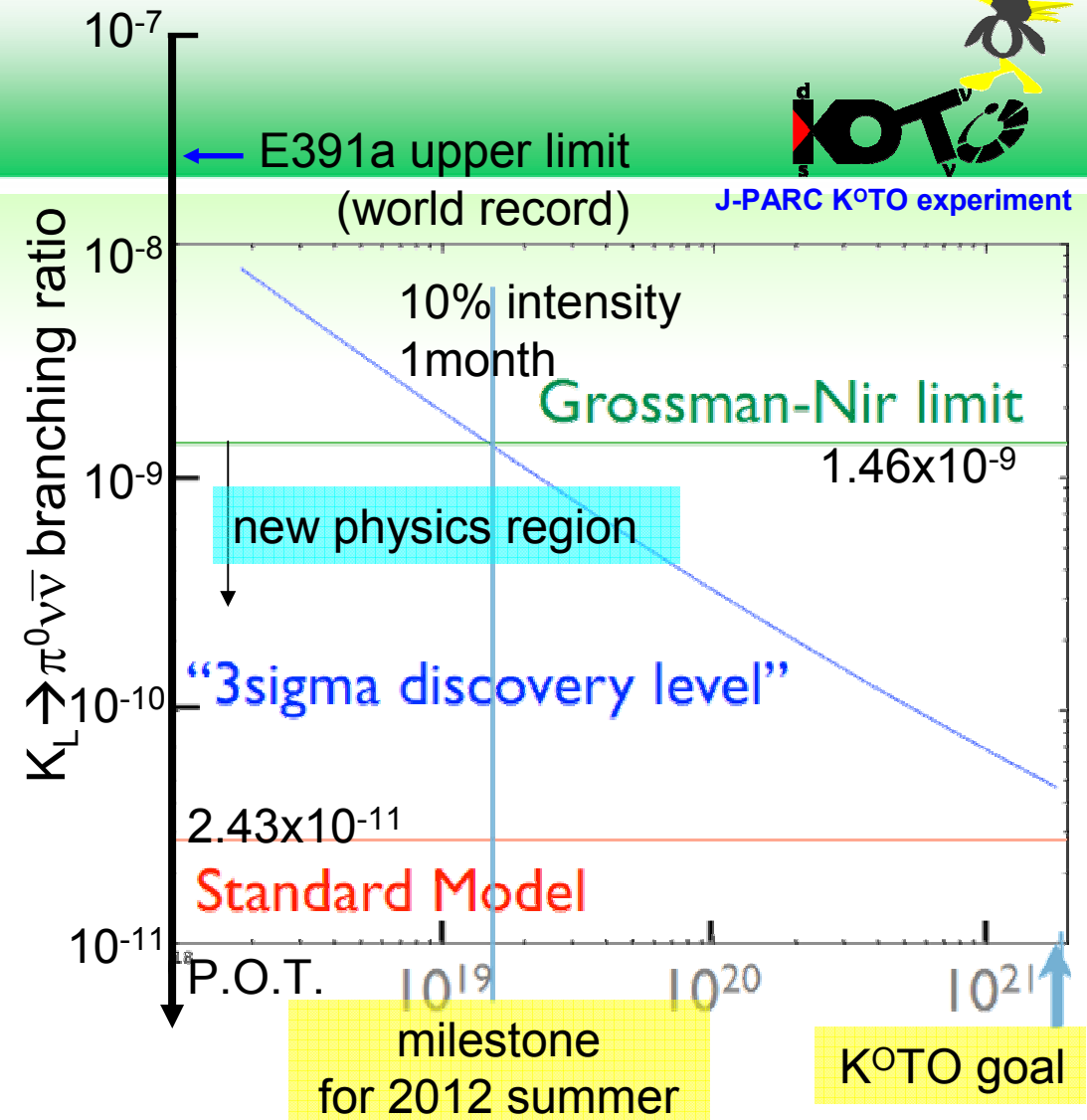
◇e<sup>+</sup>ビームを用いて光量や時間分解能, 対消滅による不感率を評価 → 全て要求を満たしている

→実機量産のための準備を進めている

# 今後の展望



- ◇ 2011年4月
  - ◇ カロリーメータ  
全システムの性能評価
- ◇ ~10月
  - ◇ 全検出器建設
- ◇ 12月~2012年2月
  - ◇ 全検出器を配置して  
エンジニアリング
- ◇ 2012年春
  - ◇ Grossman-Nir limitを越える感度での崩壊事象の探索
    - ◇  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比測定結果からの間接的な制限
    - ◇ LHCやsuper Bと共に,新しい物理を探索していく



- ◇ 京都K中間子グループは $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の探索を通じたCP対称性の破れと標準理論を越えた物理の研究を行っている。
- ◇  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の世界初観測を目指し, J-PARC K<sup>0</sup>TO実験を推進し, 主導的な役割を果たしている。
- ◇ 本年はカロリメータ建設について, CsI結晶のスタッキングや読み出し, コントロール系の整備を行った。また, 実際にビームに対しても, 問題なく動作していることを確認した。
- ◇ K中間子の生成数測定やコリメータアラインメント, 光子, 中性子の測定等, ビームの性能評価を行った。
- ◇ 来年度の全検出器建設に向け, この実験の鍵となる検出器の製作を進めている。
- ◇ 2012年春から物理ランを開始し, 新物理の探索を目指す。

# backup slides

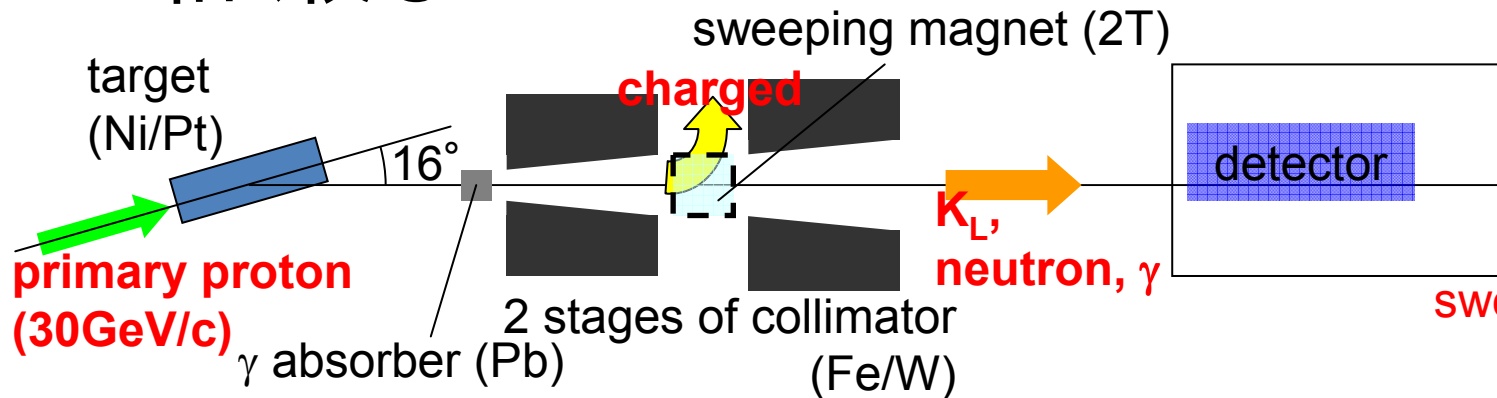
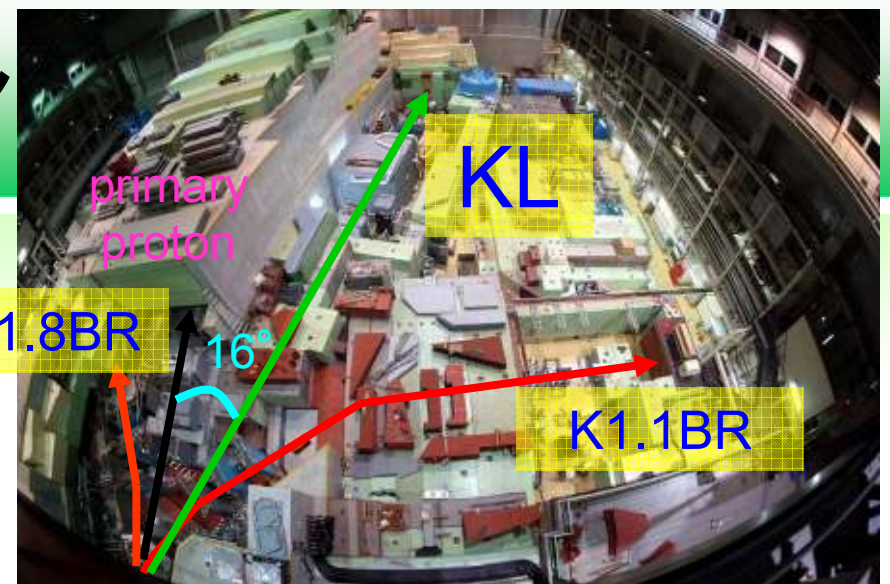
\*実験原理  
(ビームライン, 信号事象, バックグラウンド)

$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$$



# 実験原理 – ビームライン

◇ターゲット(Ni/Pt)からの生成する中性の二次粒子をコリメータで細く絞る.

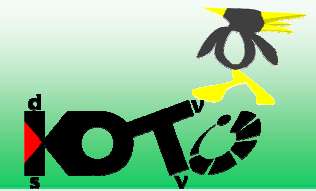


→長いビームライン(~20m):

短寿命粒子( $K_S, \Lambda \dots$ )を排除

→細く絞ることで( $\sim 8 \mu\text{str}$ ) $K_L$ の崩壊点を制限

# 実験原理 – 信号事象の同定

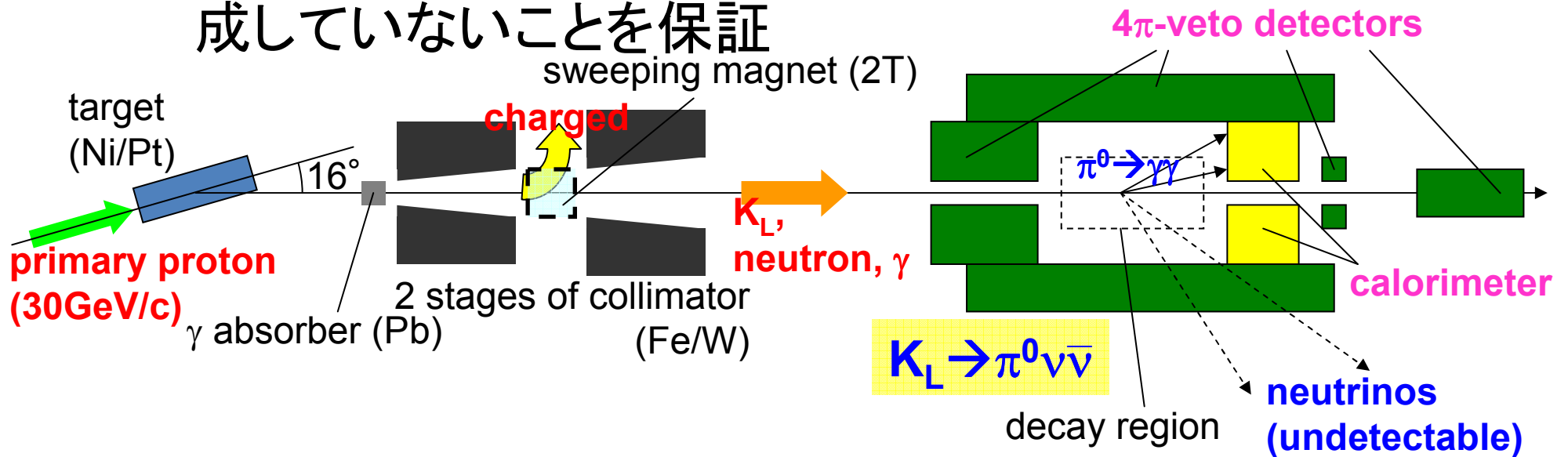


J-PARC KOTO experiment

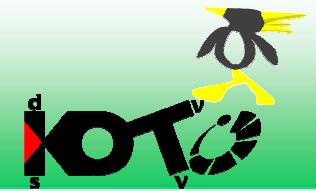
## ◇ $\pi^0$ & nothing

◇  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  をカロリメータで検出

◇ 全崩壊領域を検出器で覆い,  $\pi^0$  以外の粒子が何も生成していないことを保証



# 実験原理 – バックグラウンド事象

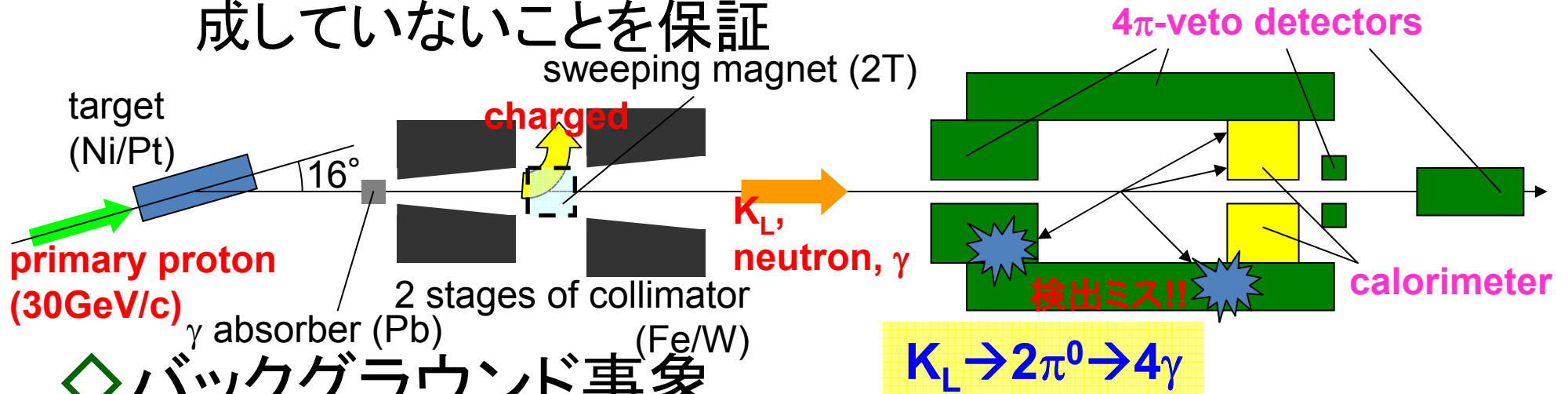


J-PARC KOTO experiment

## ◇ $\pi^0$ & nothing

◇  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  をカロリメータで検出

◇ 全崩壊領域を検出器で覆い,  $\pi^0$  以外の粒子が何も生成していないことを保証

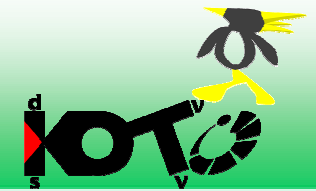


## ◇ バックグラウンド事象

◇  $K_L \rightarrow 2\pi^0 (\rightarrow 4\gamma)$  : miss  $2\gamma$

◇ halo neutron : 検出器と相互作用して  $\pi^0$  を生成

# 実験原理 – バックグラウンド事象

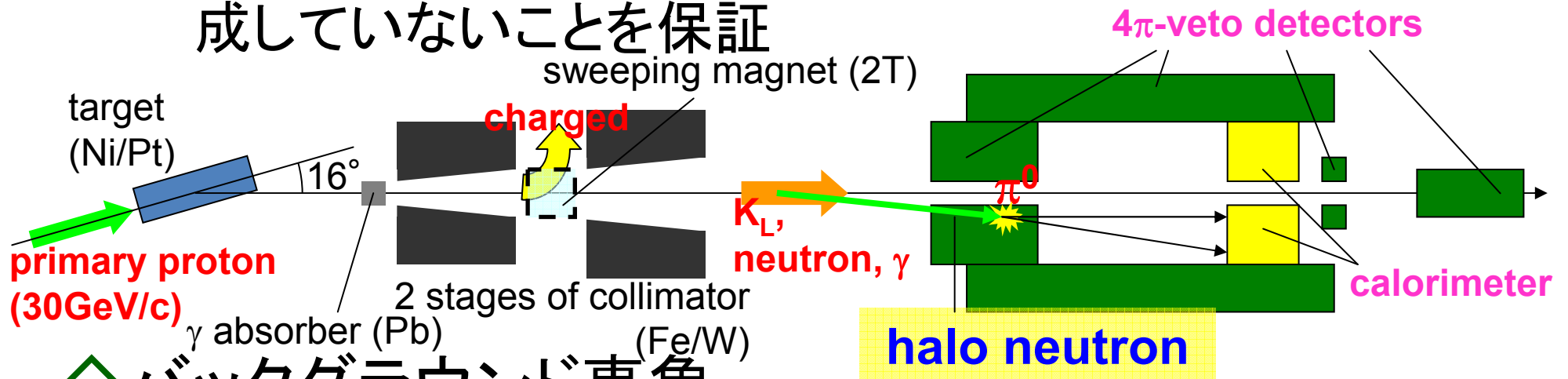


J-PARC KOTO experiment

## ◇ $\pi^0$ & nothing

◇  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  をカロリメータで検出

◇ 全崩壊領域を検出器で覆い,  $\pi^0$  以外の粒子が何も生成していないことを保証



## ◇ バックグラウンド事象

◇  $K_L \rightarrow 2\pi^0 (\rightarrow 4\gamma)$  : miss 2γ

◇ halo neutron : 検出器と相互作用して  $\pi^0$  を生成

先行実験(E391a)での最大のBG

## ◇高性能なビーム

◇十分な $K_L$ の数 →  $K_L$ の生成数を測定

◇ハローの少ないビーム

→ コリメータアライメント

→ ハローの元となるビームコア中の粒子の測定

## ◇高性能な検出器

◇高いエネルギー分解能, 位置分解能で $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ を検出

→ カロリメータ建設

◇高いefficiency

→ バックグラウンド源となる検出器の改良



# CsI結晶stacking完了まで...

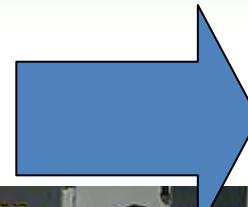


store in dry room  
and test light yield  
@Osaka Univ.



KTeV calorimeter  
@Fermilab, US

unstacking  
and shipping to Japan



KTeV  
Kaons at the Tevatron

Fermilab

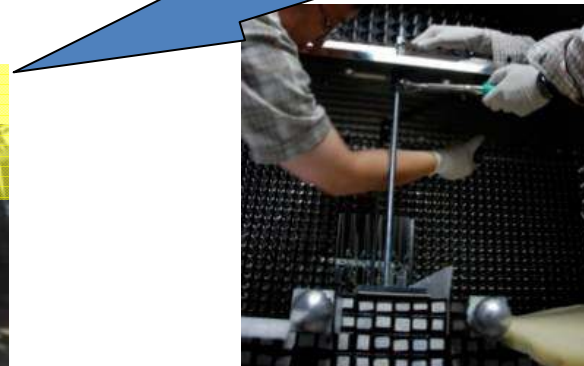
2007-2008

Feb 2011

complete!!

May 2010

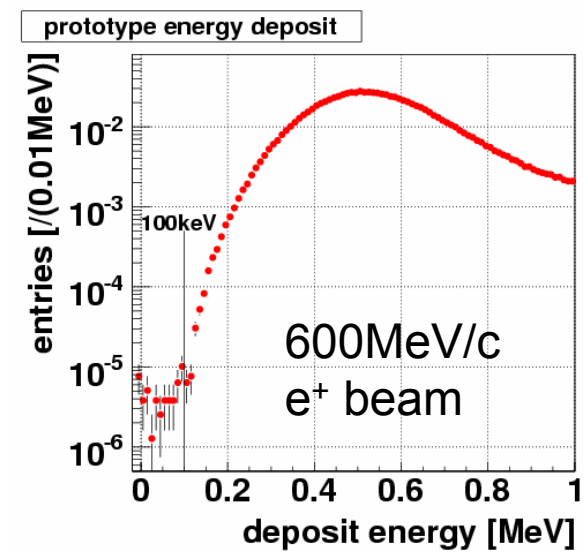
start to stack  
crystals @J-PARC



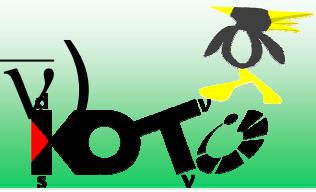
upgrade





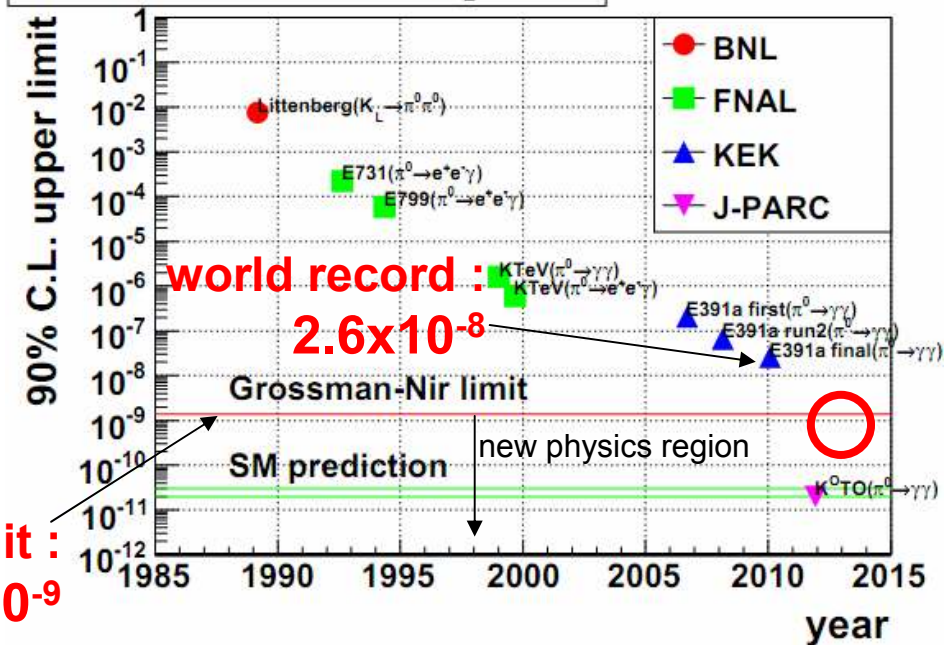


# history of upper limit for $\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$



J-PARC K<sup>0</sup>TO experiment

history of upper limit of  $\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$



Grossman-Nir limit :  $1.4 \times 10^{-9}$