

# K<sub>L</sub>崩壊実験用角度検出 カロリメータと光検出器

防衛大 応用物理学科

松村 徹

次世代光センサーに関するワークショップ @ KEK  
(2005.12.26)

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

目的：  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の分岐比を測定し、  
標準模型を超える新しい物理の探索

$\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \sim (3.0 \pm 0.6) \times 10^{-11}$  (標準模型)

$\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 5.9 \times 10^{-7}$  (現在の上限: KTeV 1999)

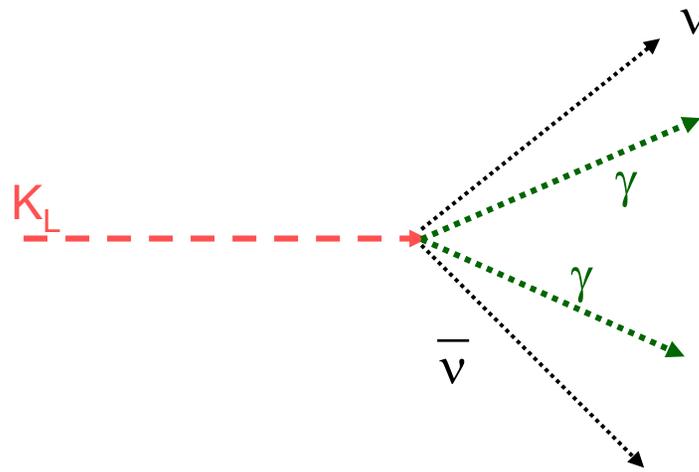
**KEK E391a** 2004年2月 ~ 2005年12月

- 実験手法の確立と上限値の更新

**J-PARC -  $K_L$**

- $K_L$ 崩壊事象の観測 (~100事象)

# $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊のイベント識別方法



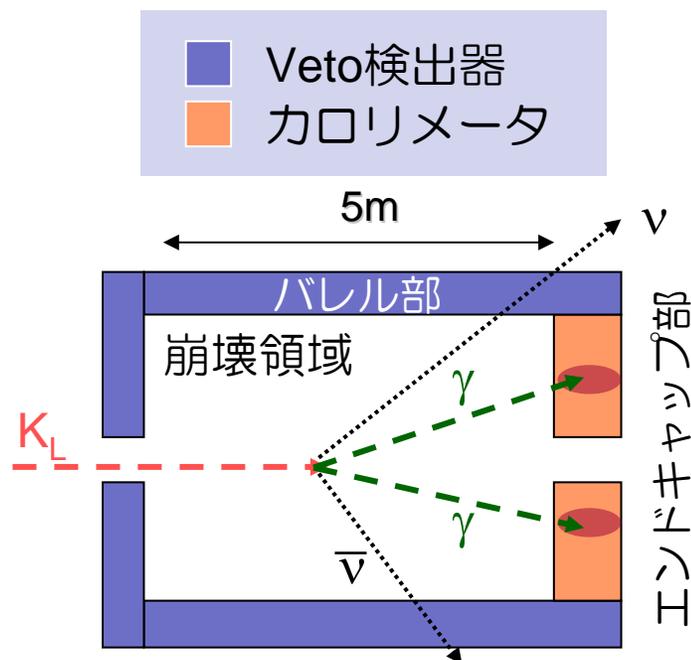
## イベント識別

- $\pi^0$  の崩壊に伴う2個のガンマ線が検出
- 他の粒子生成信号が非検出

## 実験セットアップ

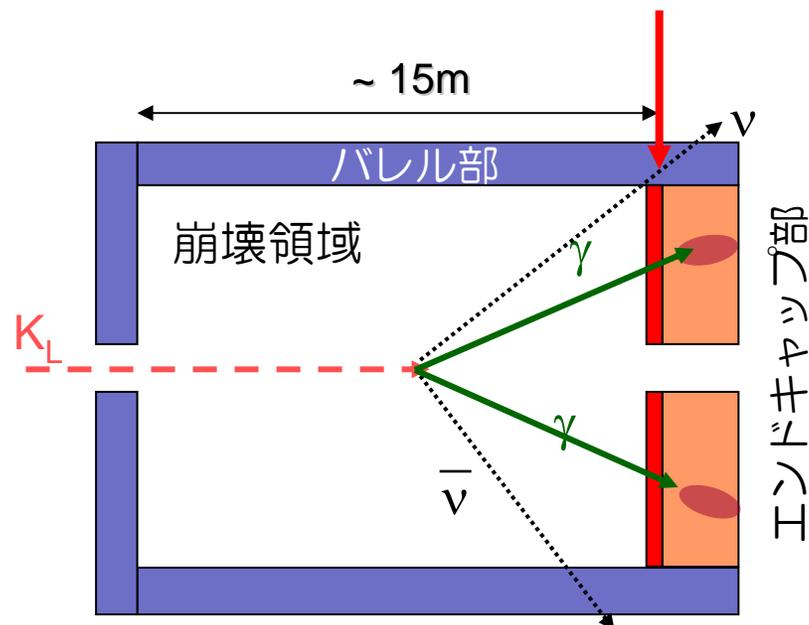
- 電磁カロリメータ と  $4\pi$ -veto検出器

# $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 実験 基本セットアップ



KEK E391a実験

## 角度検出型カロリメータの導入



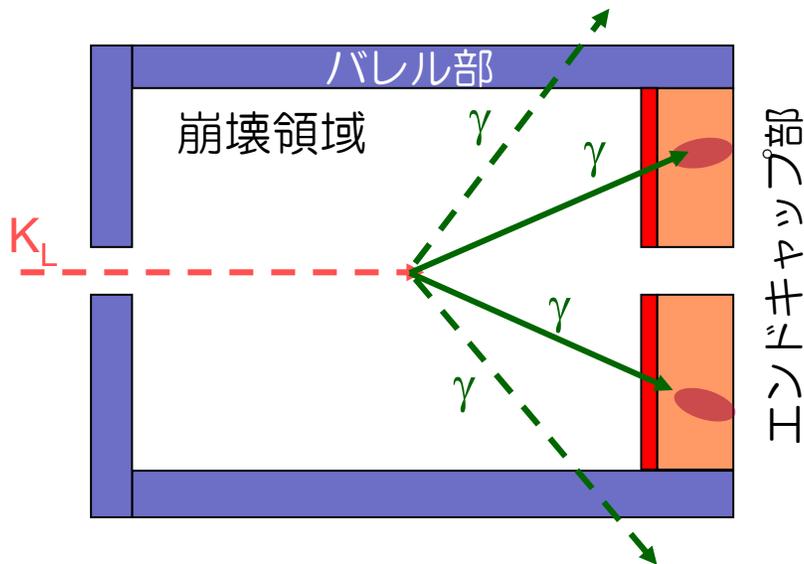
J-PARC実験 (案)

## 角度検出型カロリメータに対する要請 1

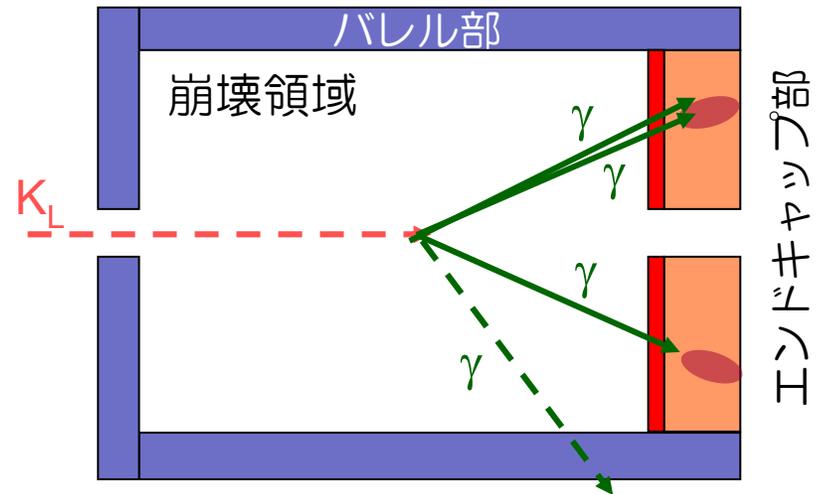
- エネルギーの測定、入射位置の測定
- 入射角度の測定 (崩壊位置の測定)

# 主バックグラウンド $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$ ( $Br \sim 9 \times 10^{-4}$ )

cf.  $Br(K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}) \sim 3 \times 10^{-11}$  (標準模型)



2個のガンマ線をロス



1個のガンマ線をロス、  
かつ2個のガンマ線が融合

## 角度検出カロリメータに対する要請2

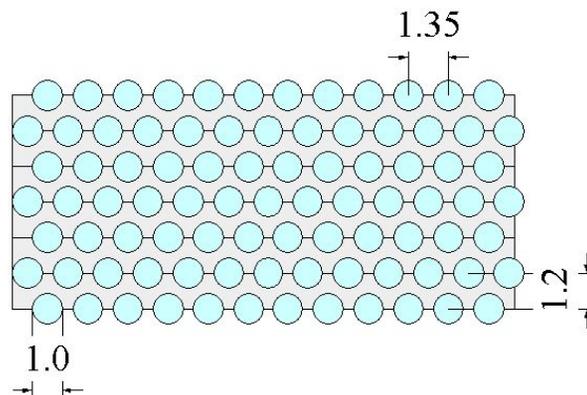
- 近接ガンマ線に対する高い分離能力

cf. E391aのCsIモジュール 70x70 mm

# 角度検出カロリメータの候補

## スパゲッティ型カロリメータ (SPACAL)

構成要素：シンチレーティングファイバ と 鉛



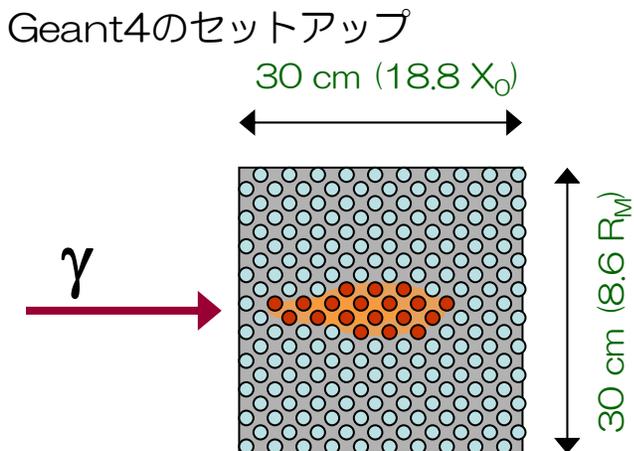
溝付き鉛板とファイバーの積層  
ファイバー径 1 mm $\phi$   
ファイバー間隔 1.35 mm

個々のファイバーを独立に読み出すことにより、  
ガンマ線のエネルギー、入射位置、入射角度を計測できる

### 今回の発表内容

- シミュレーションによるSPACALの一般的な性能
- J-PARC でのセットアップ
- 光検出器の検討事項

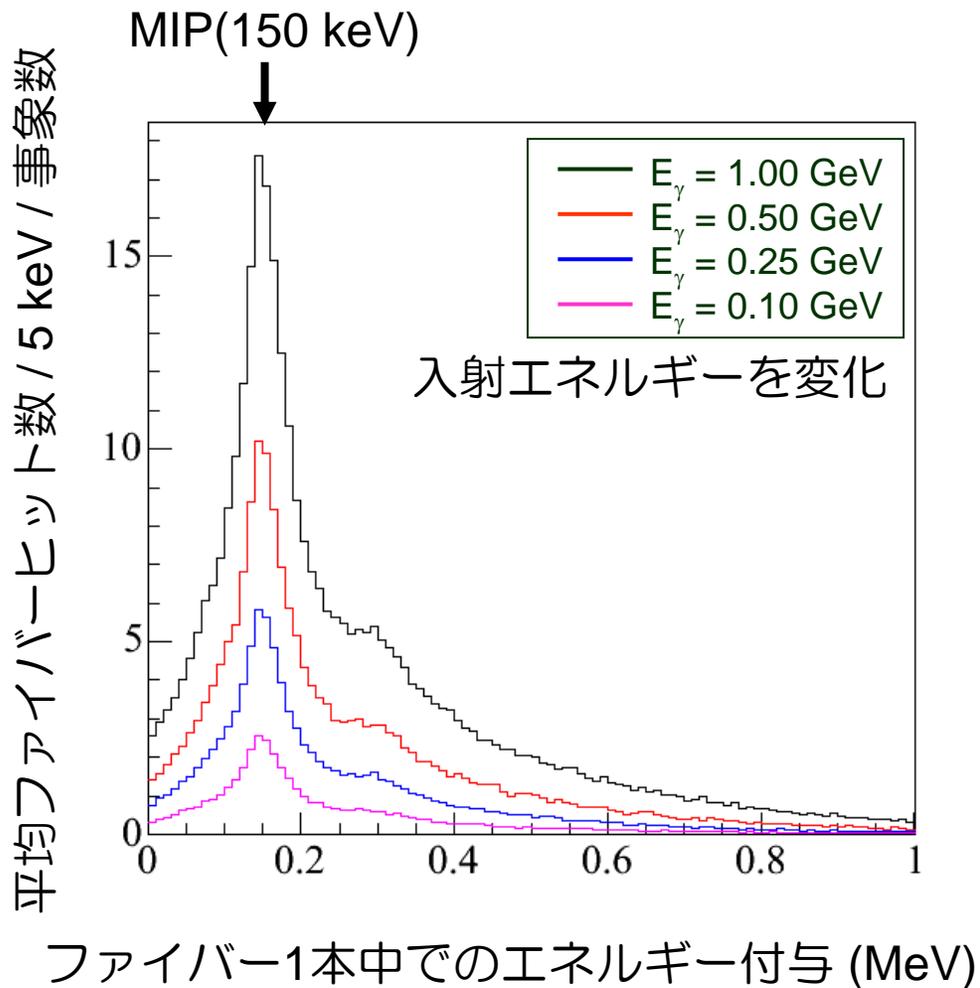
# 個々のファイバー内でのエネルギー付与



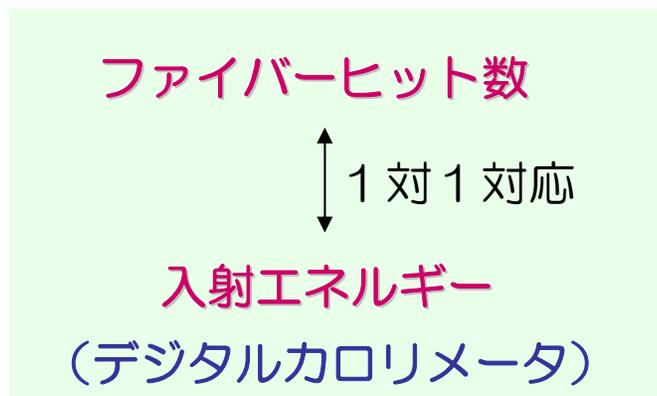
入射エネルギーが変化しても  
分布自体はほとんど変化せず、  
ファイバーヒット数が増減



入射エネルギーの情報は、  
ヒットしたファイバーの本数で  
デジタル化されている。



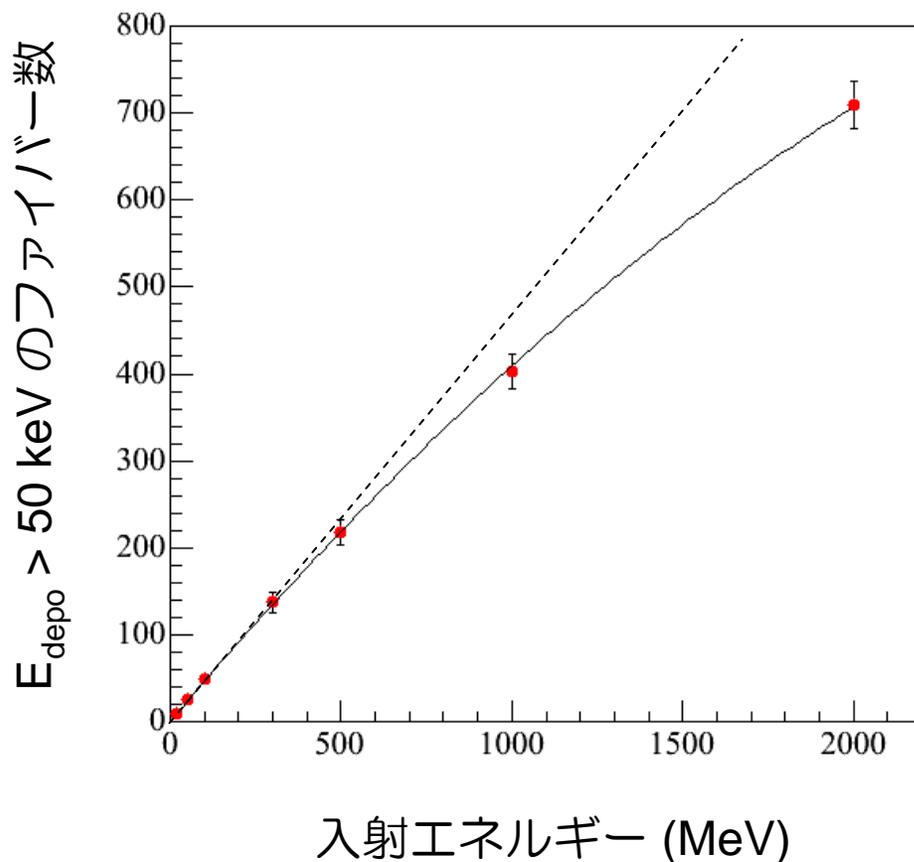
# ファイバーヒット数 vs 入射エネルギー



6ビット (=64 ch) 以上の  
読み出し分解能があれば  
エネルギー分解能の劣化は無い



例えば、CCD (分解能7~8ビット)  
などで、個々のファイバーを  
一度に読み出すことも可能

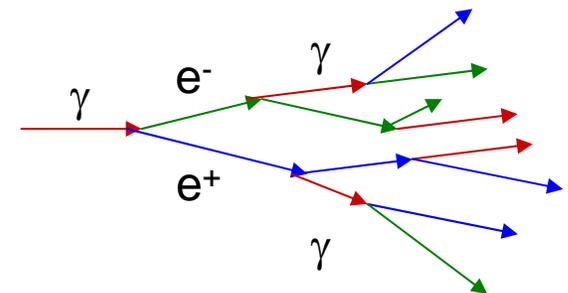
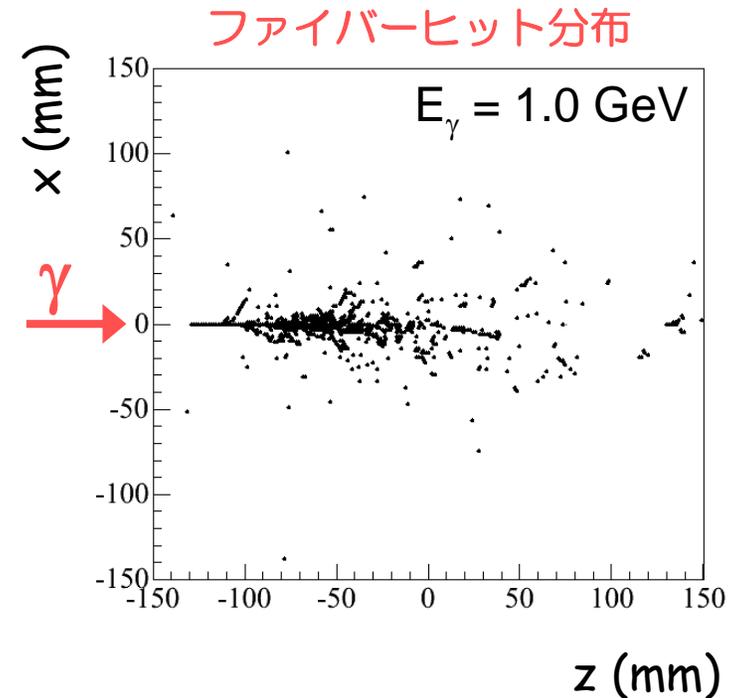


# 入射角度の計算

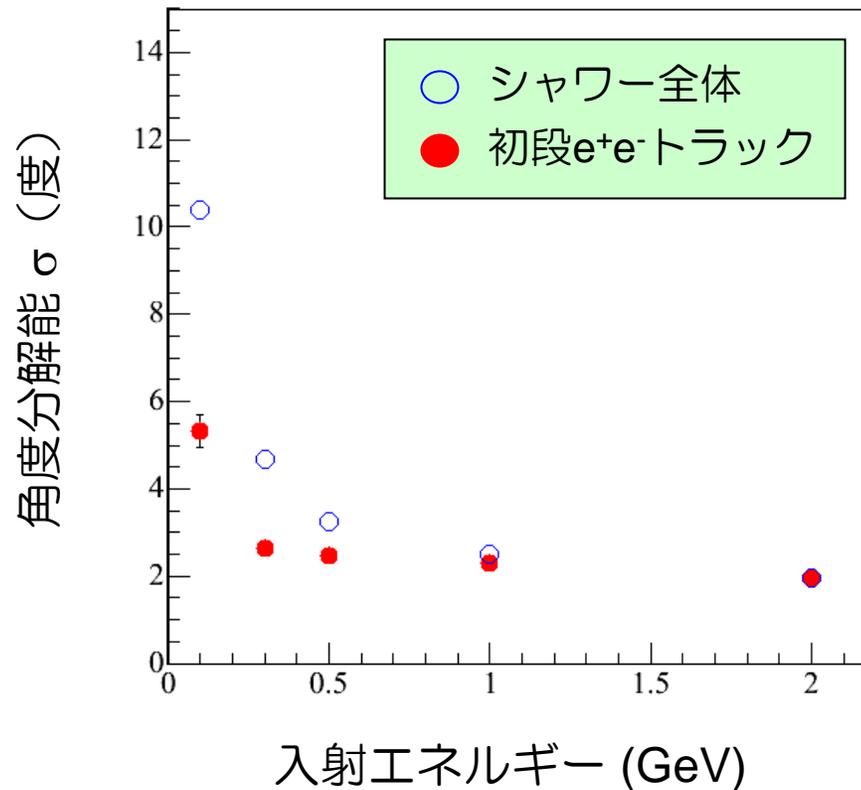
- シャワープロファイル全体の情報  
✗ 多重散乱による角度情報のぼやけ
- シャワー初段の  $e^+e^-$  トラックの情報  
○ 最良の入射角度情報

## アルゴリズム (概略)

1. ヒット位置のクラスター化
2. クラスターサイズの小さいものを除去
3. 検出器表面に最も近いクラスター内に含まれる、 $1X_0$  範囲のファイバーの取得

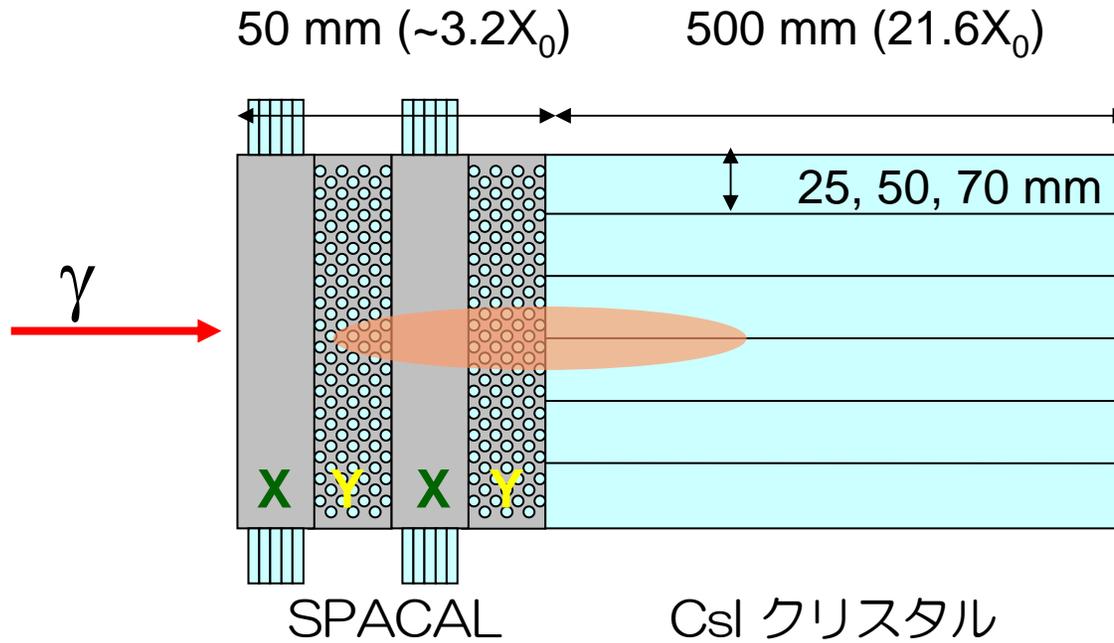


# 入射角度分解能



シャワー全体からの算定 → シャワー粒子統計数が支配的  
初段トラックからの算定 → ファイバー幾何学的配置が支配的

# J-PARC実験でのセットアップ(案)



- SPACAL中で10本以上ファイバーが光る確率  $\sim 90\%$
- CsIだけの場合と比べた分解能の劣化

$\sigma_E/E@1.0\text{GeV} : 1.5\% \rightarrow 2\%$

$\sigma_E/E@0.1\text{GeV} : 6.5\% \rightarrow 10\%$

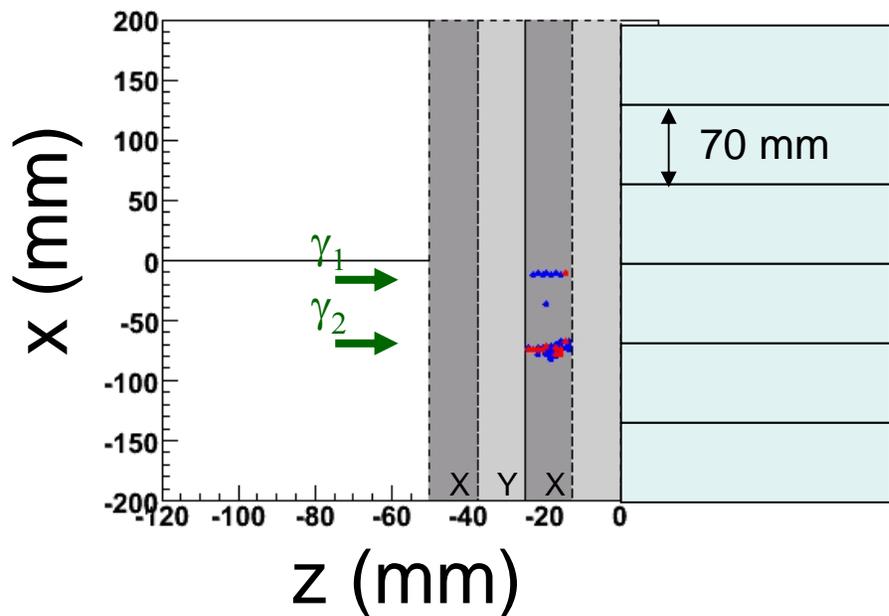
# イベントディスプレイ

## 2個の光子を入射

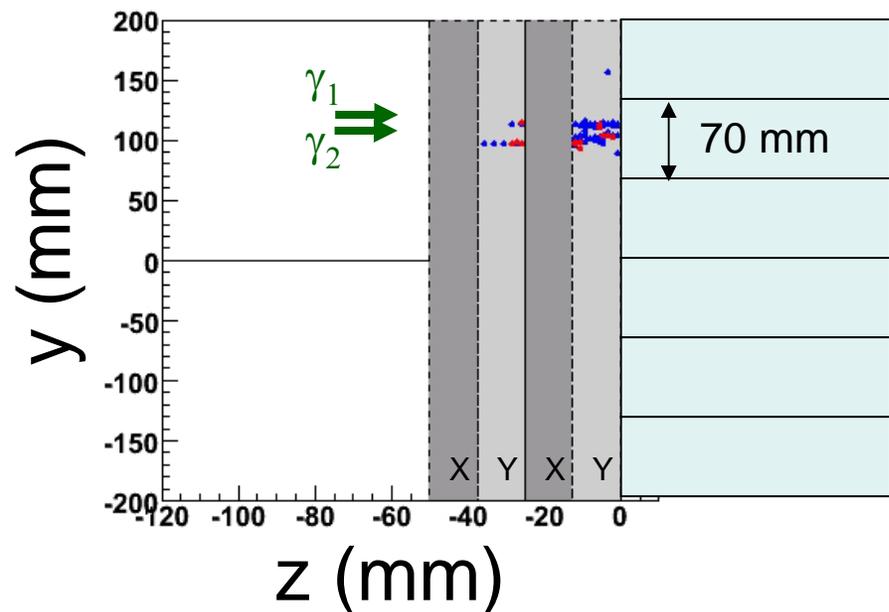
$$E_{\gamma_1} = E_{\gamma_2} = 0.3 \text{ GeV}$$
$$R_{12} = 65 \text{ mm}$$

20 mm 程度まで  
ほぼ100%分離可能  
(トラッキング法による)

### SPACAL上でのヒット分布



E391a CsI (70x70mm<sup>2</sup>)



E391a CsI (70x70mm<sup>2</sup>)

# コスト

仮に 3m x 3m x 5cm (3.2X<sub>0</sub>) の SPACAL を製作しようとする . . .

## •ファイバー

4mファイバー 88,000本 → ~ 3500万円  
(両端読み出しチャンネル数 176,000 ch)

## •溝付き鉛板

成型のための初期投資 : ~ 300万円  
材料費(純鉛板) : ~ 1000万円

+ 176,000チャンネル分の読み出し装置

高速で安価な読み出し方法の選択が重要

# 読み出し方法

- II.+CCDによる読み出し

- 良い点：容易に多チャンネル読み出し可(6000ch/1台)
- 悪い点：読み出しスピードが遅い(30Hz)

小型試作機の読み出しに利用 → ビームテスト



イメージンテンシファイア  
+ CCD

- マルチアノードPMTによる読み出し

- 良い点：多チャンネル読み出しの実績あり(K2K他多数)
- 悪い点：コスト高め (~3000円/ch)



256ch MAPMT

- MPPC (SiPM) による読み出し

- 良い点：単価が安い(?)、高圧電源必要なし、  
省スペース化可能、(磁場に影響されない)
- 悪い点：現在開発段階、多チャンネル読み出し実績無し  
ノイズレートが高い



1x1 mm<sup>2</sup>

実用化されればかなり魅力的 → サンプルのテスト希望

# まとめ

J-PARC  $K_L$  稀崩壊実験のための角度検出カロリメータとして、スパゲッティ型カロリメータを検討している

- スパゲッティ型カロリメータの特徴と性能
  - 光子のエネルギー、入射位置、入射角度が測定可能
  - 入射エネルギーとファイバーヒット数が一対一対応
  - 角度分解能：2度程度
- J-PARC実験でのセットアップと検討事項
  - CsIの前面に  $3.2X_0$  厚程度のSPACALをXY方向に配置
    - エネルギー分解能の劣化：1GeVで1%未満
    - 2光子分離能力： $\sim 20\text{mm}$
  - 10万本程度のファイバーをどう個々に読み出すか
    - MPPC読み出しを候補とし、サンプルのテスト希望