

# 中性 K 中間子崩壊による 擬スカラー粒子の探索

山形大学大学院  
クォーク核物理学研究室  
佐々木 隆浩

# 背景 (Hyper CP 実験)

- Hyper CP 実験において  $\Sigma^+ \rightarrow p\mu^+\mu^-$

崩壊が 3 events 観測された

$\mu^+\mu^-$  の不変質量分布は 3 events 全てが

$m_{\mu^+\mu^-} \sim 214.3 \text{ MeV}$  付近 (Phys.Rev.Lett. **94** 2005)

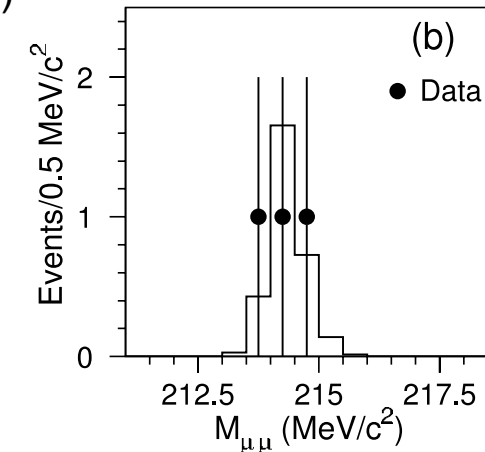
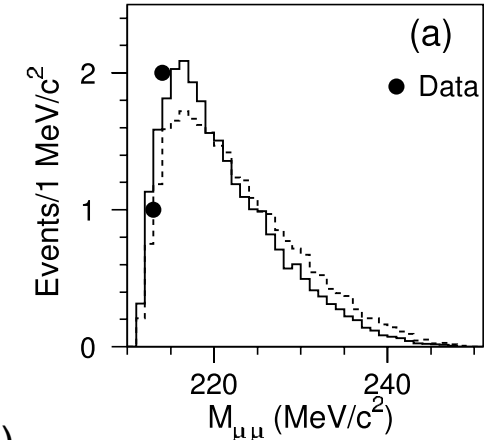
★ 新粒子 (X) の存在を示唆

→ 超対称性粒子

→ 擬スカラー粒子の可能性が高い

実験結果 BR : Branching Ratio (分岐比)

$$\Sigma^+ \rightarrow pX \rightarrow p\mu^+\mu^- : BR = 3.1 \times 10^{-8}$$



# 背景 (E391a 実験)

- 新粒子 X は K 中間子崩壊でも観測される可能性がある
- 新粒子 X が擬スカラーだとすると  $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 X$  崩壊が存在すると予測される

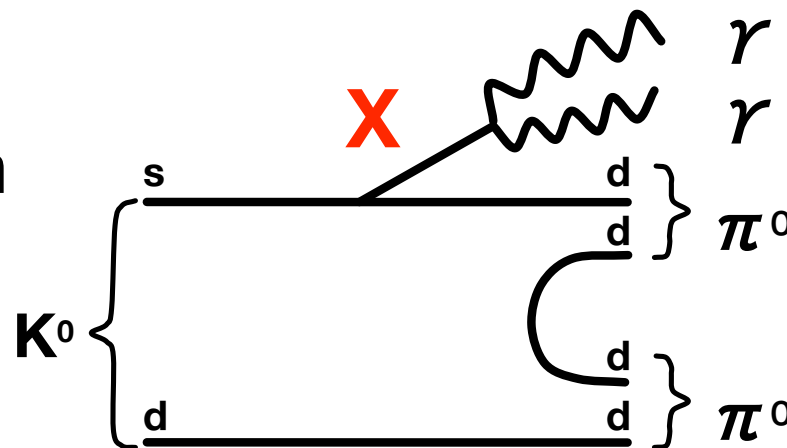
理論による予測 (hep-ph / 0509147)

$$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 X \quad (X \rightarrow \mu^+ \mu^-) : BR \sim 5 \times 10^{-8}$$

$$or \quad (X \rightarrow \gamma \gamma) : BR < 5 \times 10^{-4}$$

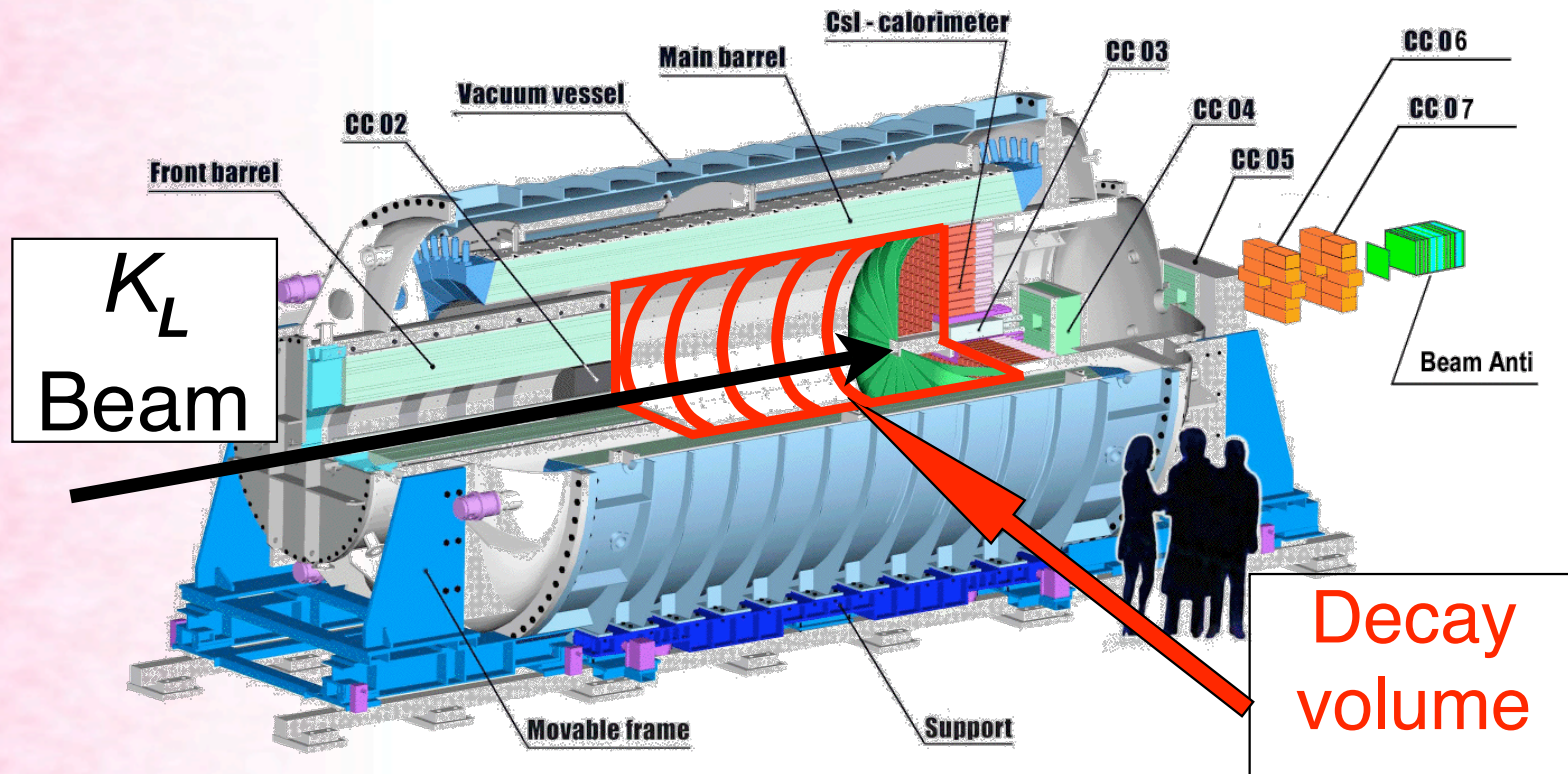
4桁  
大きくなる  
可能性

Feynman  
diagram



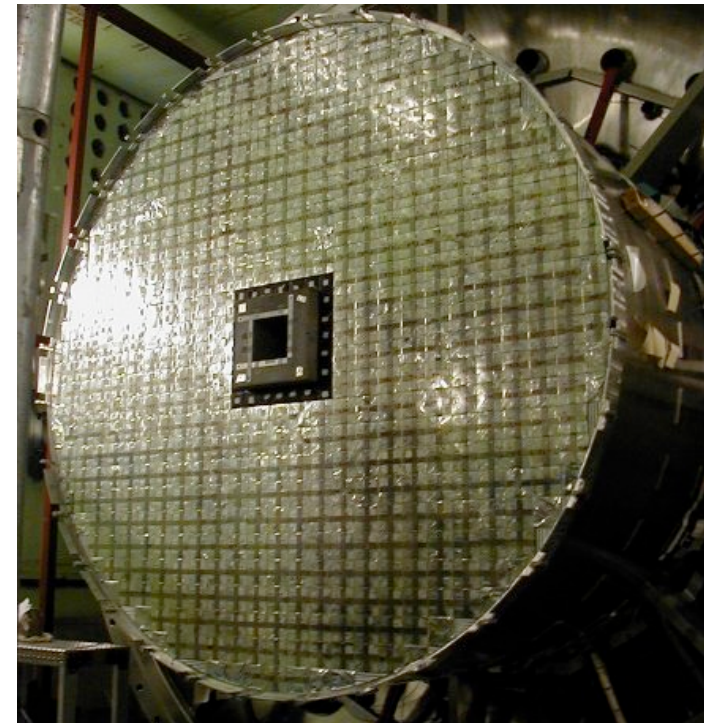
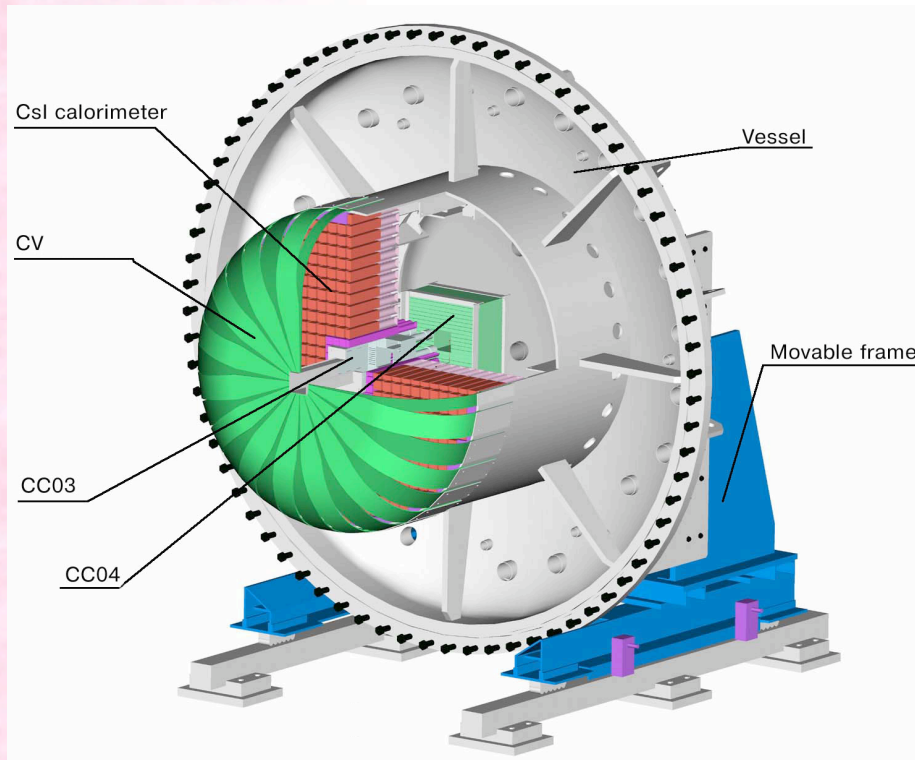
# E391a 実験

- $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の分岐比測定実験
  - KEK-PS 12GeV において 2004/02 ~ 2005/12 に実施
  - CP対称性の破れの大きさの測定
  - $K_L$  in-flight decay の $\gamma$ 線を CsI 検出器で測定



# CsI 検出器

- $\gamma$  線を CsI 結晶で検出する
- CsI (pure)  $70 \times 70 \times 300 \text{ mm}^3$  ( $16.2 X_0$ ) 576本
- エネルギー分解能  $\sigma / E = 2.0 \sim 2.5 \% (1\text{GeV})$



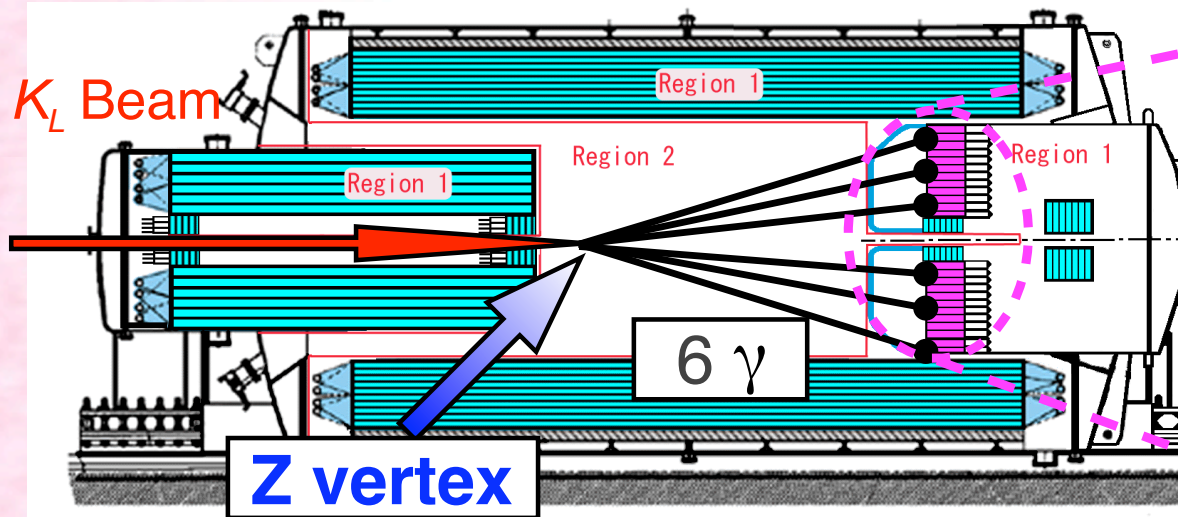
# K 中間子イベント

- $6\gamma$  が CsI に Hit した event を選別する
- $\pi^0$  の寿命が短い ( $\tau \sim 8.4 \times 10^{-17}$  s) ために  $\pi^0$  の崩壊点を  $K_L$  の崩壊点として  $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 X$  イベントを再構成する
  - 2個の  $\pi^0$  で崩壊点を決める (X の質量を free に出来る)

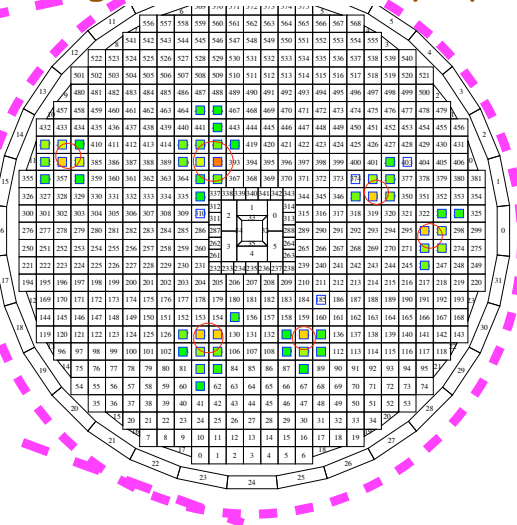
測定値 :  $\gamma$  Energy  
 $\gamma$  Hit Position

再構成

知りたい値  
 $K_L$  崩壊点 (Z vertex)

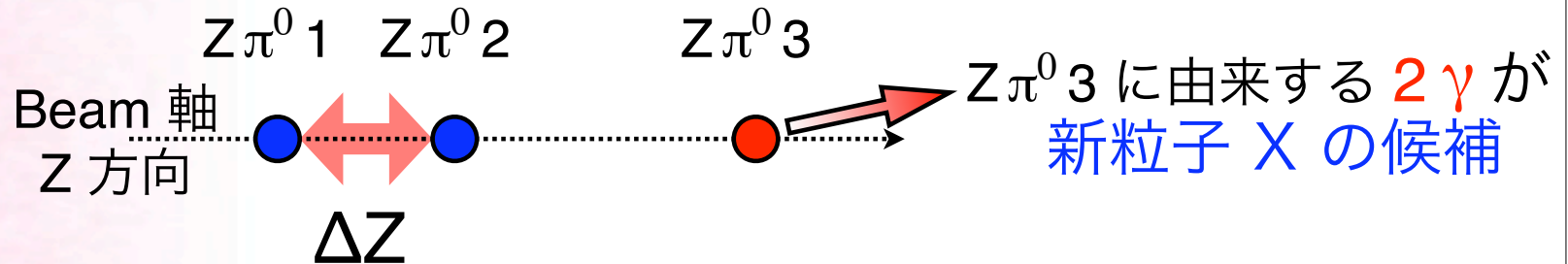


6gamma event display



# K 中間子イベントの再構成

- 6  $\gamma$  を 3 組の 2  $\gamma$  に分ける (組み合わせは 15 通り)
- 2  $\gamma$  を  $\pi^0$  に由来すると仮定して崩壊点  $Z_{\pi^0 1} \sim 3$  を決める

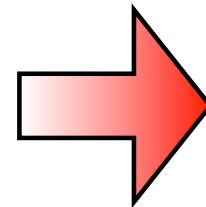


$\Delta Z = |Z_{\pi^0 1} - Z_{\pi^0 2}|$  を最小にする組み合わせ (Best)  
2番目に小さな組み合わせ (2nd) を探す

$$Z_{vertex} = \frac{Z_{\pi^0 1} + Z_{\pi^0 2}}{2}$$

2個の  $\pi^0$  の平均を崩壊点とする

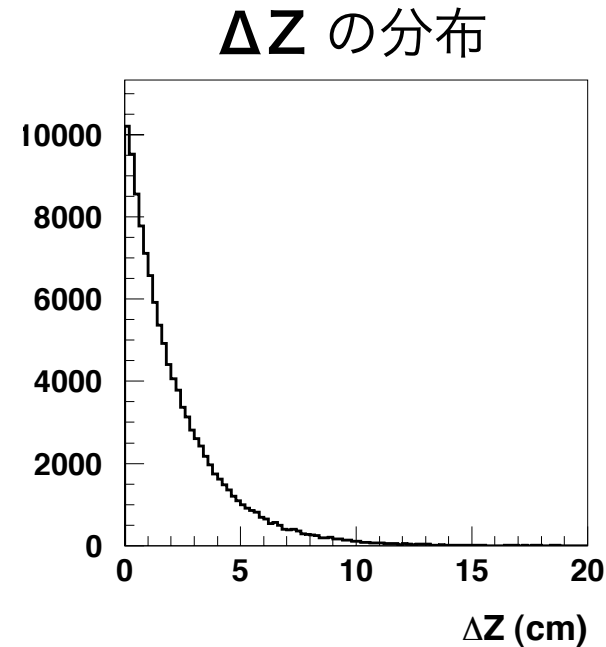
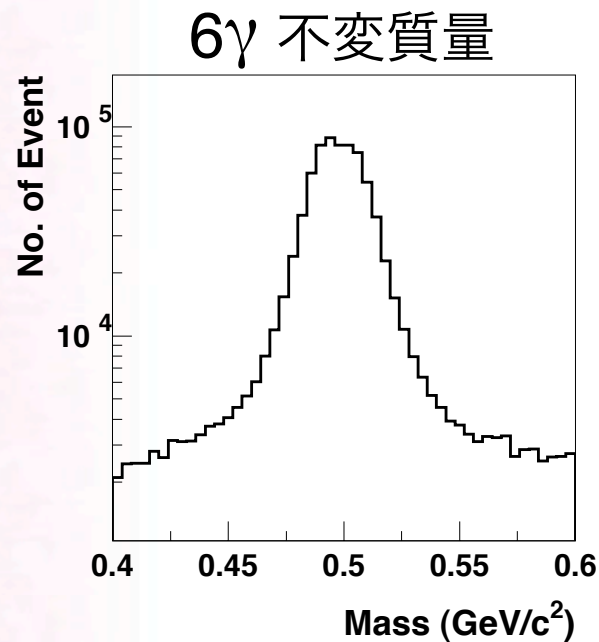
$\pi^0 \pi^0 \gamma \gamma$  の Kinematics から  
6 $\gamma$  の不変質量を構成する

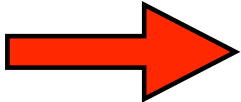


$$M_{6\gamma} = \sqrt{E^2 + p^2}$$

# 再構成による分布

## 実験 Data



- 6 $\gamma$  の不変質量分布は  $K_L$  の質量 (PDG : 0.497 GeV) 付近に peak
- $\Delta Z$  が小さい   $2\pi^0$  の位置が正確である




# モンテカルロシミュレーション

## 1. $\langle 2\pi^0 X \text{ MC} \rangle$ : Signal Event を評価

X の質量を 214.3 MeV と仮定して  $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 X$  ( $X \rightarrow \gamma\gamma$ )  
シミュレーション

## 2. $\langle 3\pi^0 \text{ MC} \rangle$ : Background を評価

実際の実験を想定した  $3\pi^0$  シミュレーション

( $3\pi^0$  も  $6\gamma$  に崩壊するため 再構成がうまくいかないときに  
Background になる)  ミスコンビネーション

### ■ $\langle 2\pi^0 X \text{ MC} \rangle$ と $\langle 3\pi^0 \text{ MC} \rangle$ を比較

→ Signalを残しつつ Background を取り除く  
カット条件の探索(ミスコンビネーションの除去)

### ■ $\langle 3\pi^0 \text{ MC} \rangle$ と $\langle \text{実験 Data} \rangle$ の比較

→ 解析の検証

# 解析に用いた Data set

## ☆ $2\pi^0 X$ MC ( Signal )

- \*  $5 \times 10^7 K_L$  generate  
(without Accidental event)
- \* Parameters
  - $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 X$   
三体崩壊 (Simple Phase Space)  
X の質量を 214.3 MeV に設定
  - $X \rightarrow \gamma\gamma$   
BR : 100%

## ★ $3\pi^0$ MC (Background)

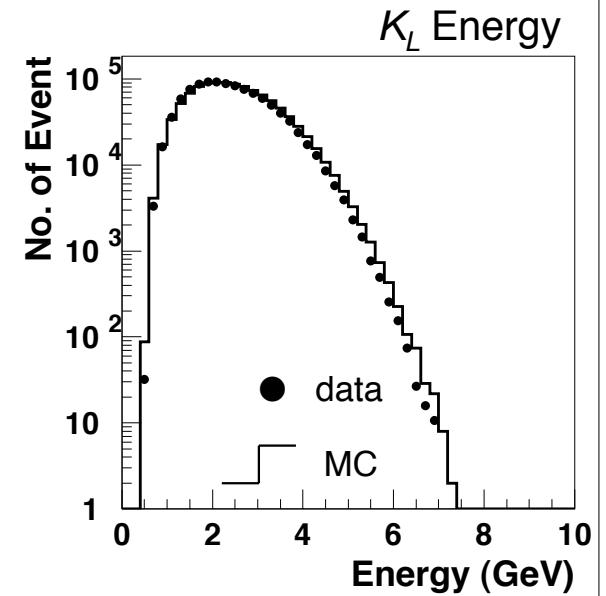
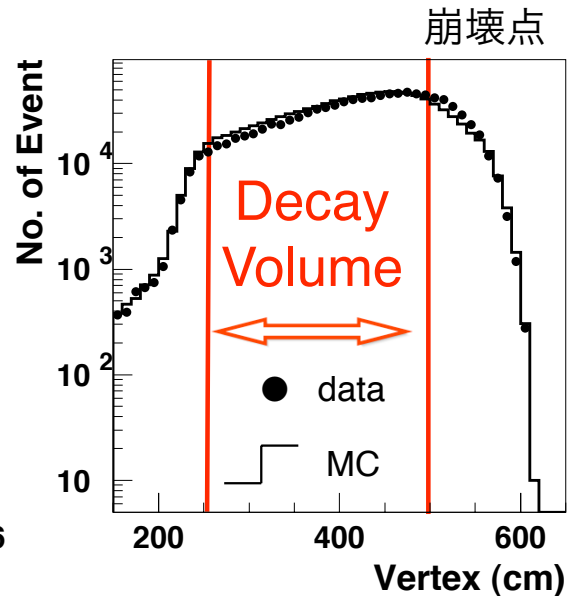
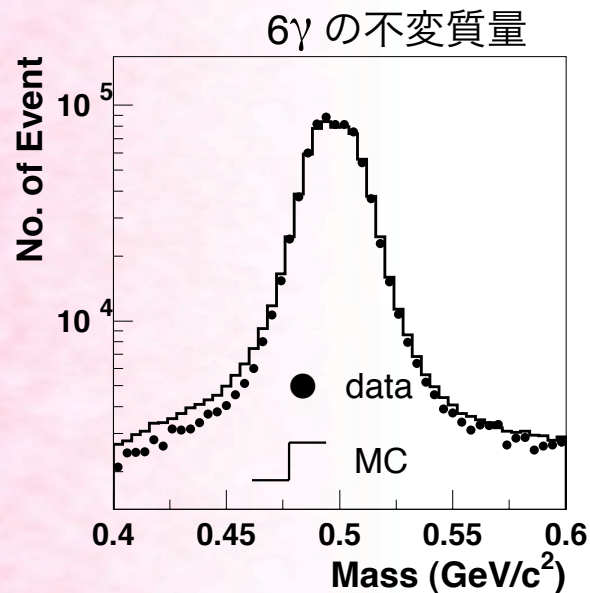
- \*  $5 \times 10^9 K_L$  generate  
( with Accidental event)
- \* Data と同じ条件の  
シミュレーション
  - $K_L \rightarrow 3\pi^0$   
BR : 100%

★ 実験 Data 10 run (全体の 0.5%)

E391a run-I Data (Apr / 2004 )

# $K_L$ の分布

- $K_L$  の分布を比較することによって MC の正しさを検証する (実験 Data と  $3\pi^0$  MC を比較)
- $6\gamma$  の不変質量分布は  $K_L$  の質量付近で一致
- Z vertex は Decay Volume ( 280 ~ 500 cm ) の範囲で一致
- Energy も一致



# $K_L$ の入射数 ( $N_{KL}$ ) を見積もる

$$N_{K_L} = \frac{N_{Data:accept}}{Acceptance_{3\pi^0 MC} \times BR_{3\pi^0}} = 4.47 \times 10^9$$

- N Data : accept = 95864 events (実験 Data  $K_L$  の数)
- $Acceptance_{3\pi^0 MC} = \frac{N_{3\pi^0:accept}}{N_{generate}} = \frac{509635 \text{ events}}{5.0 \times 10^9}$   
→  $3\pi^0$  MC generate 数 より求められる
- BR  $3\pi^0 = 21.05 \%$  (PDG)
- **3  $\pi^0$  MC と実験 Data の統計量の比較**  
 $N_{KL} (3\pi^0 MC)$  は  $N_{KL} (Data/10 \text{ run})$  の **5.32 倍**

# カット条件

◆再構成時に **Signalを残しつつBackgroundを取り除く**  
ためのカット条件(ミスコンビネーションの除去)

- **Zvertex** 280 ~ 500 cm (崩壊測定領域)
- **$\Delta Z(2nd)$**  > 10.5 cm
- $P_T$  (運動量重心) < 0.011 GeV/c

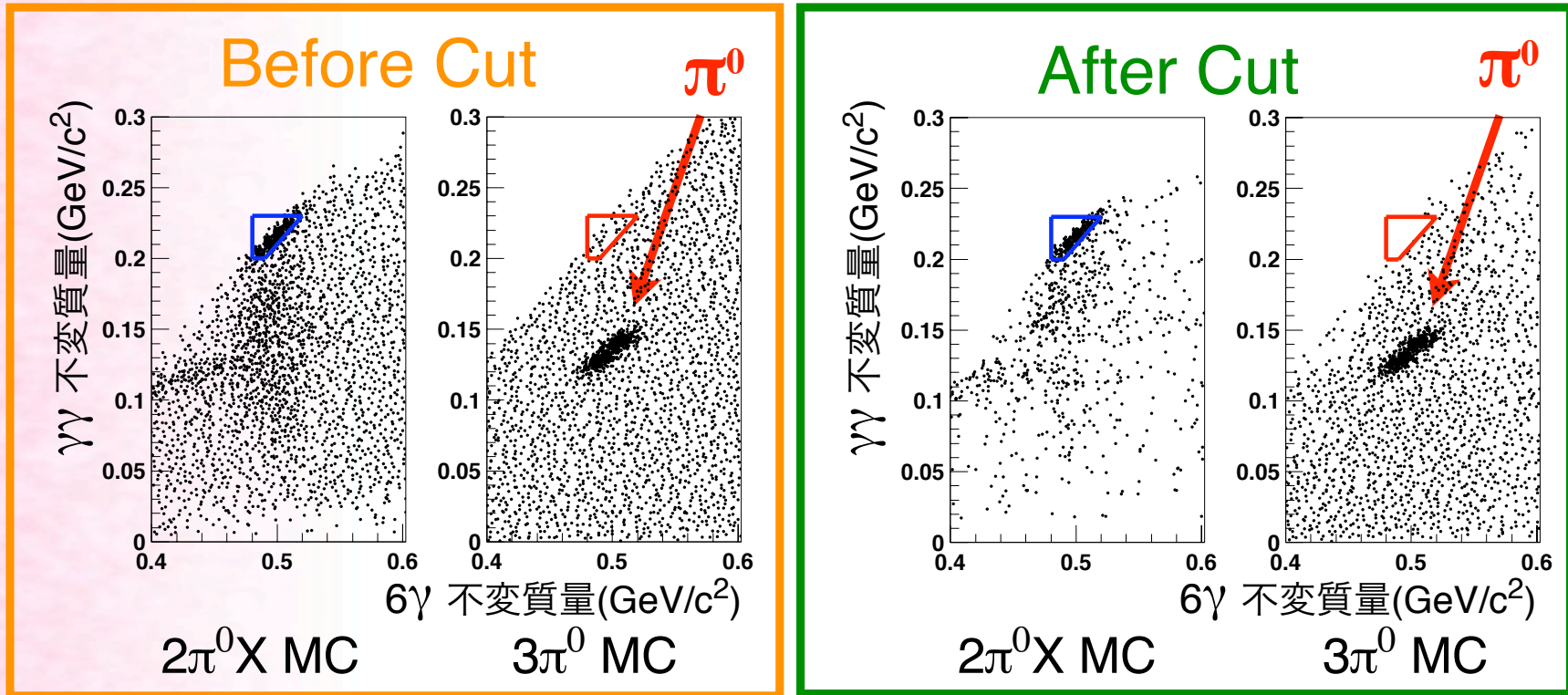
- $\sigma^2 < 0.067 \text{ GeV}^2$   $\rightarrow \sigma^2 = (\langle E \rangle - E_\gamma)^2$
- $\gamma$  Position (20~R~90cm)

R: Beam 中心からの距離

$\gamma$  Energy  
の平均

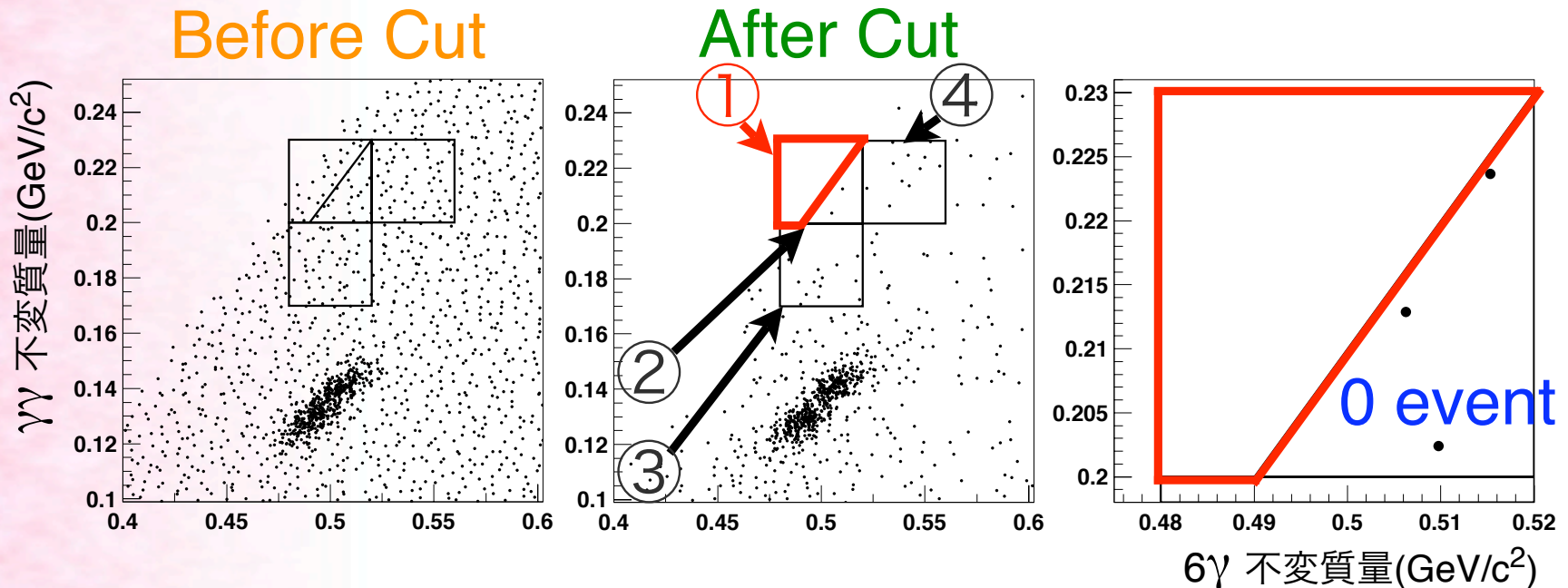
$\pi^0$  に由来する最も  
エネルギーの低い  $\gamma$

# Signal, Backgroundの比較



	Before Cut	After Cut
$2\pi^0 X$ MC (Signal)	4339	357
$3\pi^0$ MC (Bg)	1198	0

# 実験Dataのイベント数



実験 Data 0 event  $\longrightarrow$  MC と一致

① Signal 領域

②～④ Side band 領域 ( $3\pi^0$ (MC)とDataでイベント数を比較)

★ 全ての領域でイベント数が Consistent !

# 解析結果

- Acceptance ( $2\pi^0 X$  MC) =  $\frac{N \text{ accept } 357 \text{ events ( After Cut )}}{N \text{ generate } 5.0 \times 10^7 \text{ events}}$

$$= 7.14 \times 10^{-6}$$

- Single Event Sensitivity (SES)

$$= \frac{1}{N_{KL} \times \text{Acceptance}(2\pi^0 X (MC))}$$

$$= 3.13 \times 10^{-5}$$

- **Upper Limit** ( 90% Confidence Level)

$$= \text{SES} \times 2.3$$

$$= \mathbf{7.2 \times 10^{-5}}$$

理論による予測

$$\mathbf{BR < 5.0 \times 10^{-4}}$$



# まとめと今後の課題

- $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 X$  ( $X \rightarrow \gamma\gamma$ ) 崩壊の探索を行った
- Signalを残しBackgroundをより取り除くカット条件を決めた
- $3\pi^0$  MC と実験 Data を比較したところ すべての実験結果は consistent であった
- Acceptance ( $2\pi^0 X$  MC) =  $7.14 \times 10^{-6}$
- Upper Limit  $7.2 \times 10^{-5}$  (90% C.L.)

世界最高感度！

## ～ 今後の課題

Xの質量が214.3 MeV 以外の質量領域を探る

$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma\gamma$  直接崩壊の探索

新しいカット条件を加え Upper Limit を改善する



**Backup Slide**

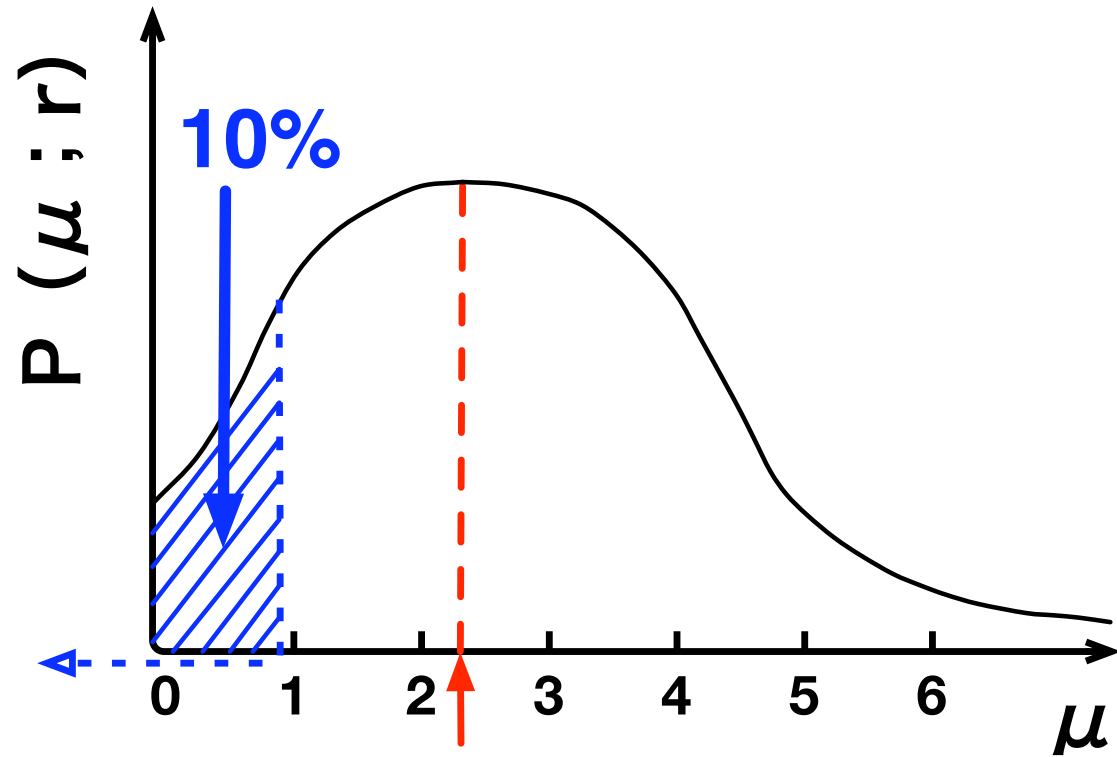
# 90% Confidence Level

90% の信頼性  
= 10% の不確かさ

ポワソン分布  $P(\mu; r) = \frac{\mu^r}{r!} e^{-\mu}$



$\mu = 2.3$  の時  
1 以下である割合が  
10% なので事象数が  
0 event の時の 90%  
Confidence Level は  
事象数が 2.3 の時の  
値となる

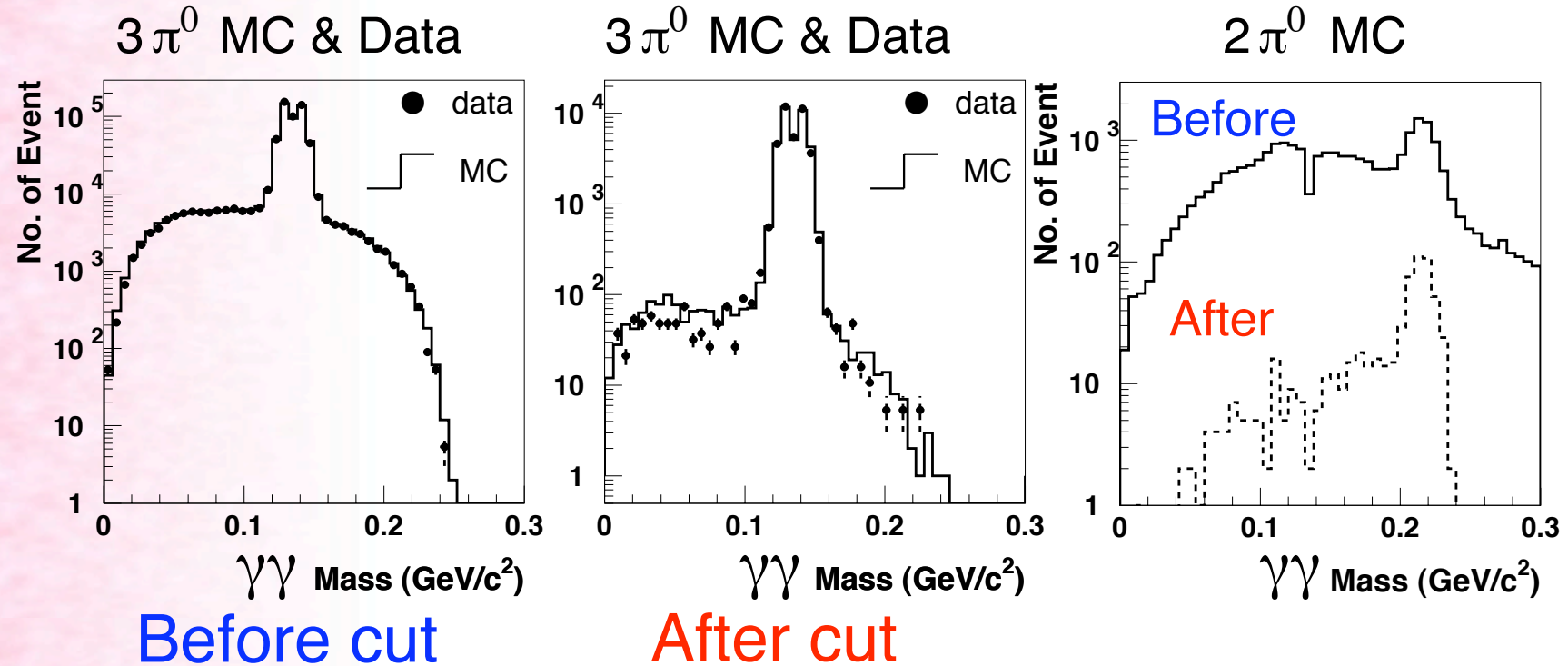


$\mu = 2.3$

$\mu$  : 平均反応数

$P$  :  $r$  回 反応が起きる確率

# $K_L$ on mass の時の mass X



100% の BR で崩壊すれば X の質量の位置に peak が見えるが 今の BR では見えない

# Background Estimation

	Before Cut		After Cut	
	$3\pi^0$ MC	Data	$3\pi^0$ MC	Data
①	$225.4 \pm 15.0$	225	0	$<0.4^*$
②	$567.3 \pm 23.8$	582	$5.5 \pm 2.3$	3
③	$2685.5 \pm 51.8$	2598	$19.9 \pm 4.5$	17
④	$795.9 \pm 28.2$	741	$13.4 \pm 3.7$	12

( \* 90% Confidence Level )

# 中性 K 中間子崩壊による 擬スカラー粒子の探索

山形大学大学院  
クォーク核物理学研究室  
佐々木 隆浩

## Contents

背景

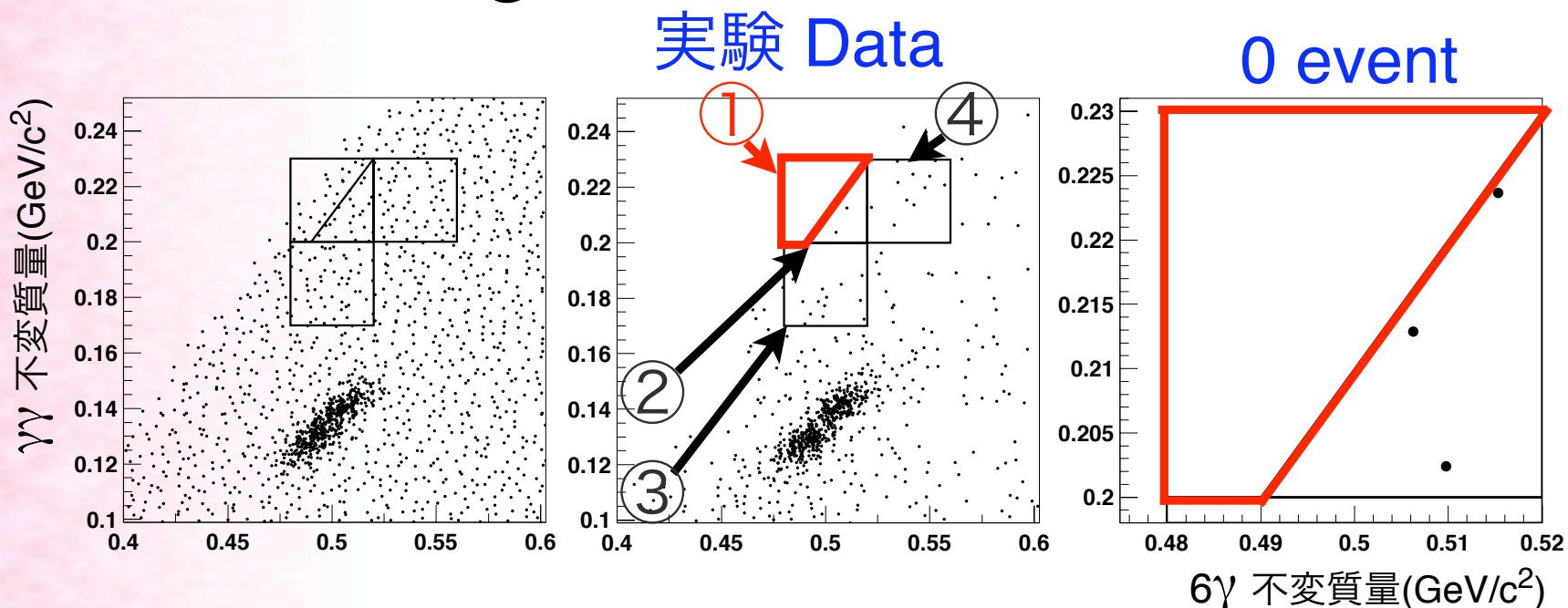
E391a 実験

解析

Signal/Background 比較

結果と今後の課題

# Background Estimation



$3\pi^0$  (MC) 7 events / 2.06 = 3.4 events

実験 Data 3 events  $\longrightarrow$  MC と一致

① Signal 領域

②~④ Side band 領域 ( $3\pi^0$  (MC) と Data で比較)

★ It is consistent