

J-PARC KOTO実験 最初の物理結果までの道のり

京大 前田 陽祐 for the KOTO collaboration
2015年2月11日

第21回 ICEPPシンポジウム 於 白馬

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

Maeda Yosuke, Kyoto University



KOTO実験

- ◆ KOTO = K^0 at TOKai

茨城県東海村J-PARCでの
中性K中間子稀崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0 \bar{\nu} \nu$ 探索実験

- ◆ $K_L \rightarrow \pi^0 \bar{\nu} \nu$ 崩壊 ($\text{Br} \sim 10^{-11}$)

- ◆ CP violation

- ◆ $s \rightarrow d$ 遷移：

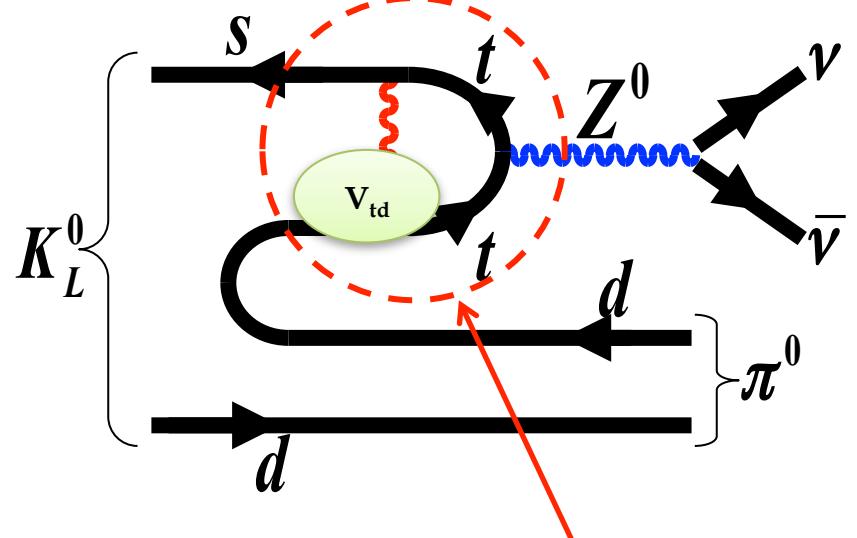
標準理論では強く抑制

- ◆ 理論的不定性が小さい

→ 新物理に高い感度をもつ

- ◆ KOTO実験で世界初観測を目指す

- ◆ 現在の上限値($< 2.6 \times 10^{-8}$)を3桁更新



ループダイヤグラム
→ 未知の粒子が寄与
出来る可能性

signal & background

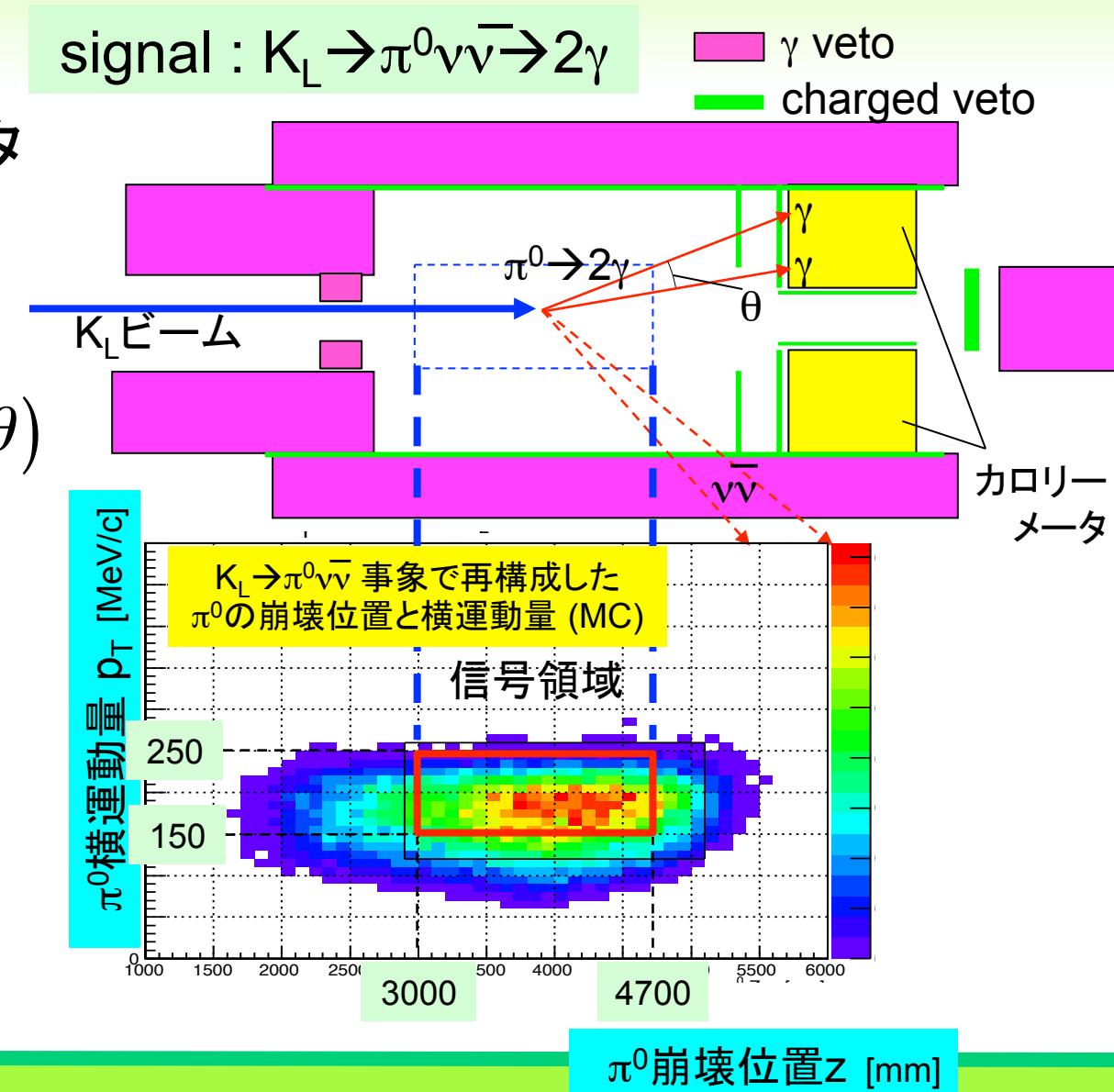


◆ signal 事象

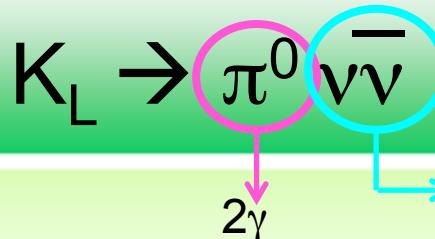
◆ “ π^0 & nothing”
= 電磁力口リー メータ
+ 4 π veto

◆ 質量を仮定して
2 γ から π^0 を再構成

$$M_{\pi^0}^2 = 2E_{\gamma_1}E_{\gamma_2}(1 - \cos\theta)$$



signal & background



◆ signal 事象

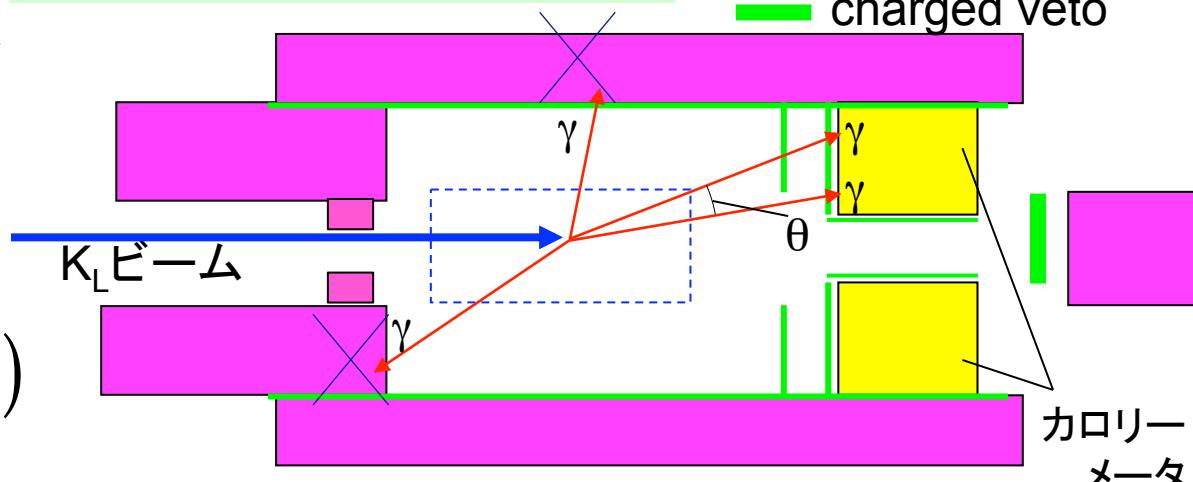
- ◆ “ π^0 & nothing”
= 電磁力口ロリーーメータ
+ 4γ veto

- ◆ 質量を仮定して
 2γ から π^0 を再構成

$$M_{\pi^0}^2 = 2E_{\gamma_1}E_{\gamma_2}(1 - \cos\theta)$$

BG : $K_L \rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$

γ veto
charged veto

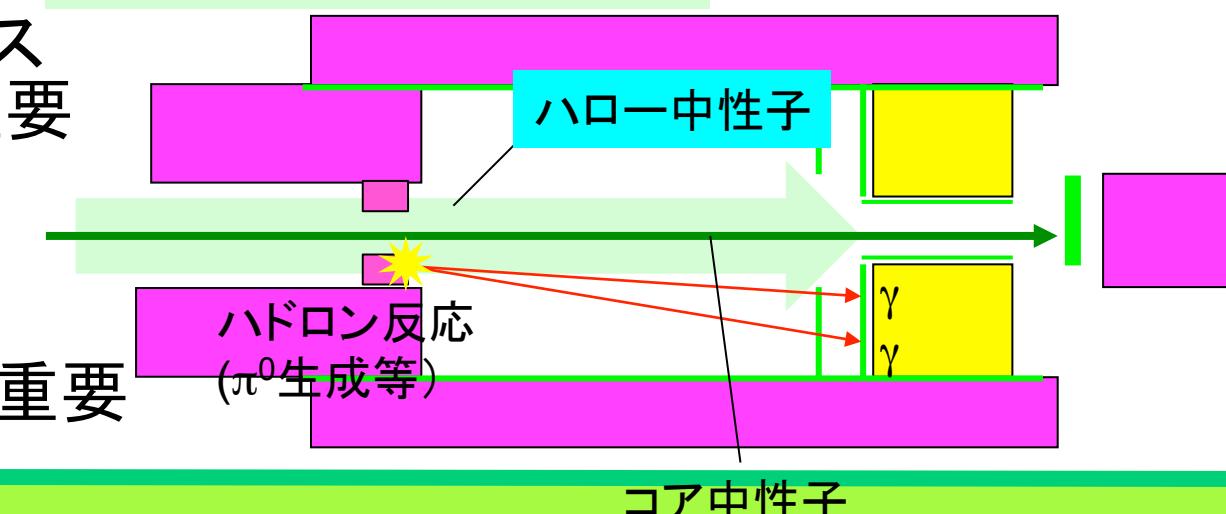


◆ background 事象

- ◆ K_L 中間子由来:
余剰粒子の検出ミス
→ 検出器理解が重要

- ◆ 中性子由来:
中性子が2つの
シャワーを作る
→ ビームの理解が重要

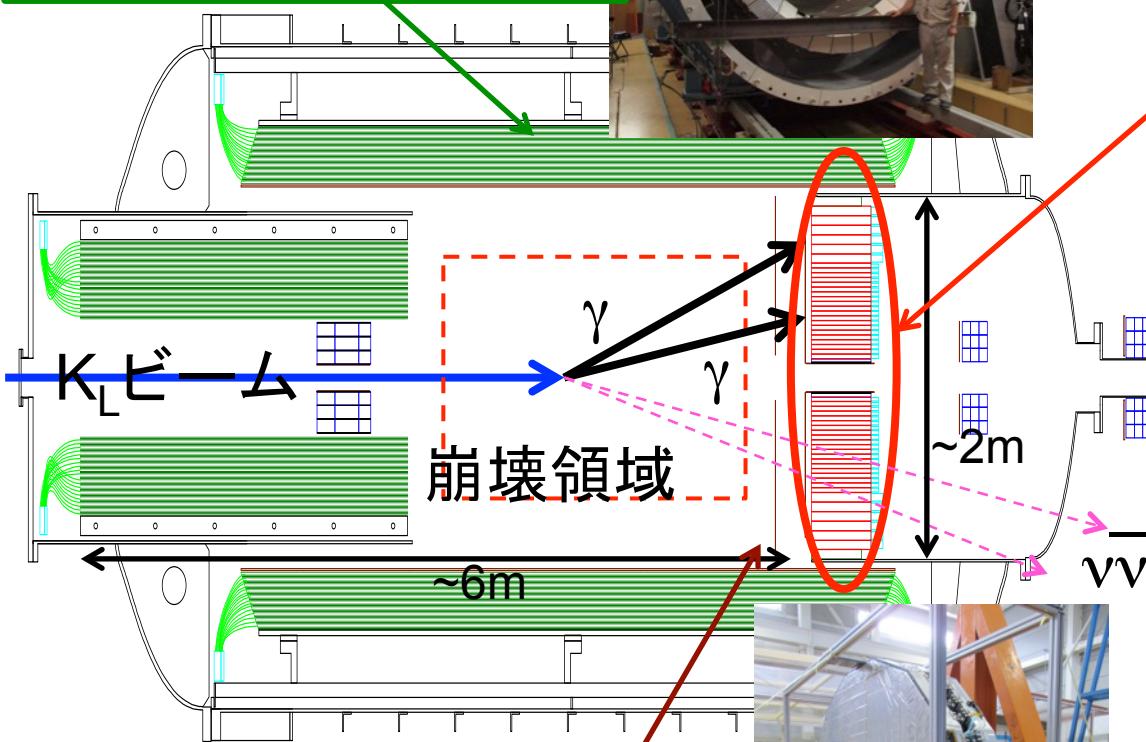
BG : ハロー中性子



検出器

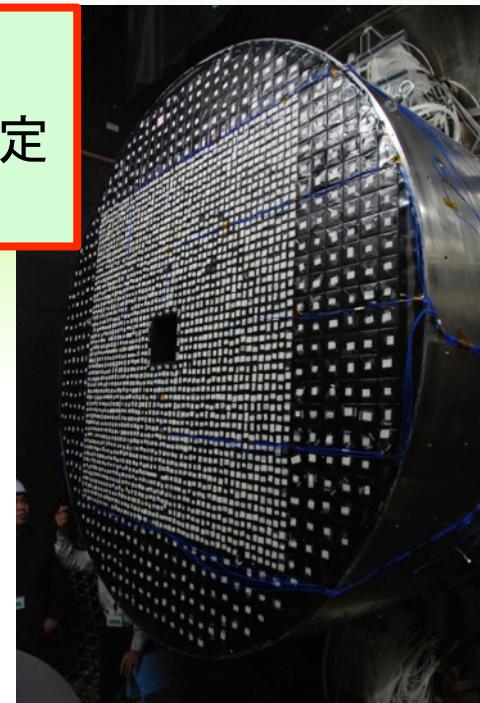
メインバレル(MB)

- *横方向に逃げた γ のveto
- *鉛/シンチのサンドイッチカロリーメータ



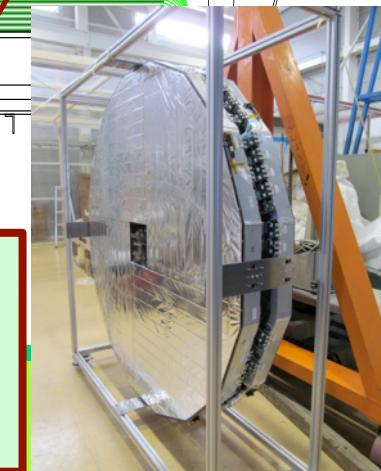
電磁カロリーメータ

- * γ のhit位置, エネルギーを測定
- *約3000本の純CsI結晶



荷電粒子検出器(CV)

- *荷電粒子を含む事象をveto
- *3mmプラスチックシンチレータ



ビームホール光子検出器

- *ビーム中に逃げた γ をveto
- *鉛/エアロジェルにより中性子不感

Univer

物理ランまでの道のり

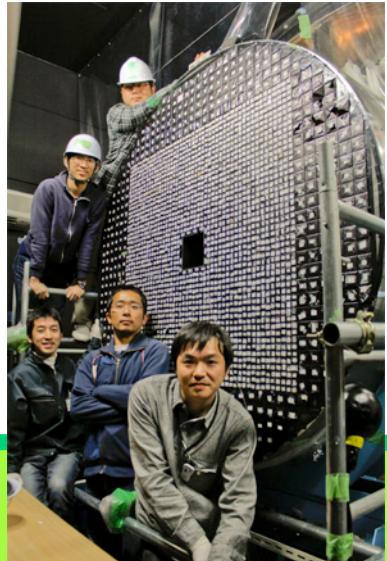


2006
proposal

2009
J-PARC始動
KOTOビームライン完成
→ビームサーベイ実験



2013
第一回物理ラン
→ハドロン事故



2011
カロリーメータ
結晶積層完了
→東日本大震災

Earthquake (2011.3.11)



2014
最初の物理結果を発表

データ解析

施設改修,
検出器アップグレード

2004, 2005
E391a実験
@KEK PS

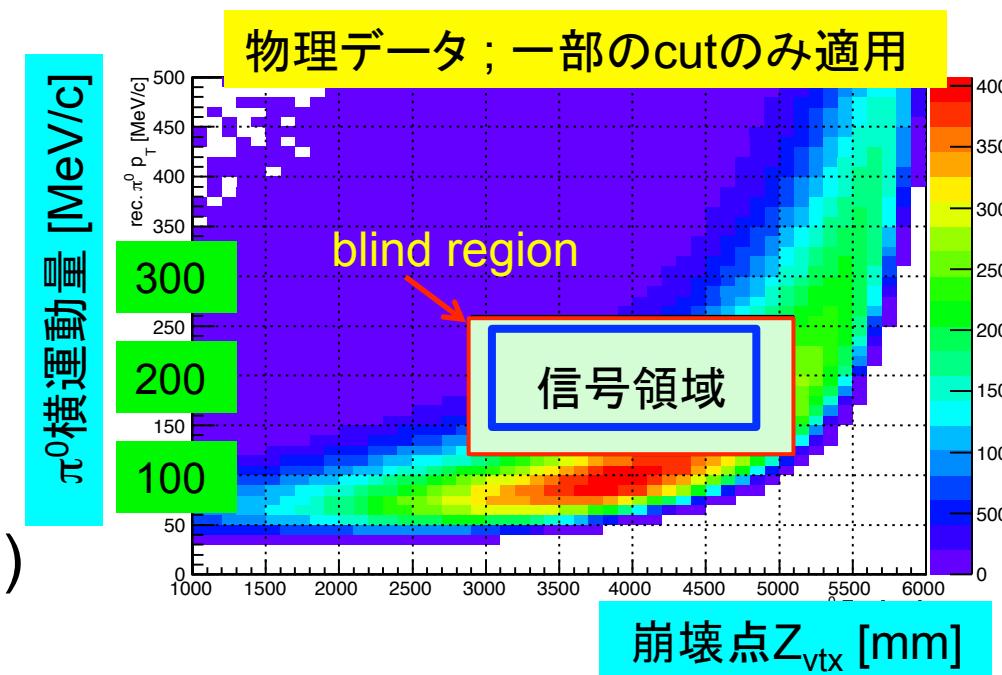
解析の手順

◆データ

- ◆2013年5月19-23日 (~100hのデータ)
- ◆ビーム強度 : 24kW, 金ターゲット

◆解析の流れ

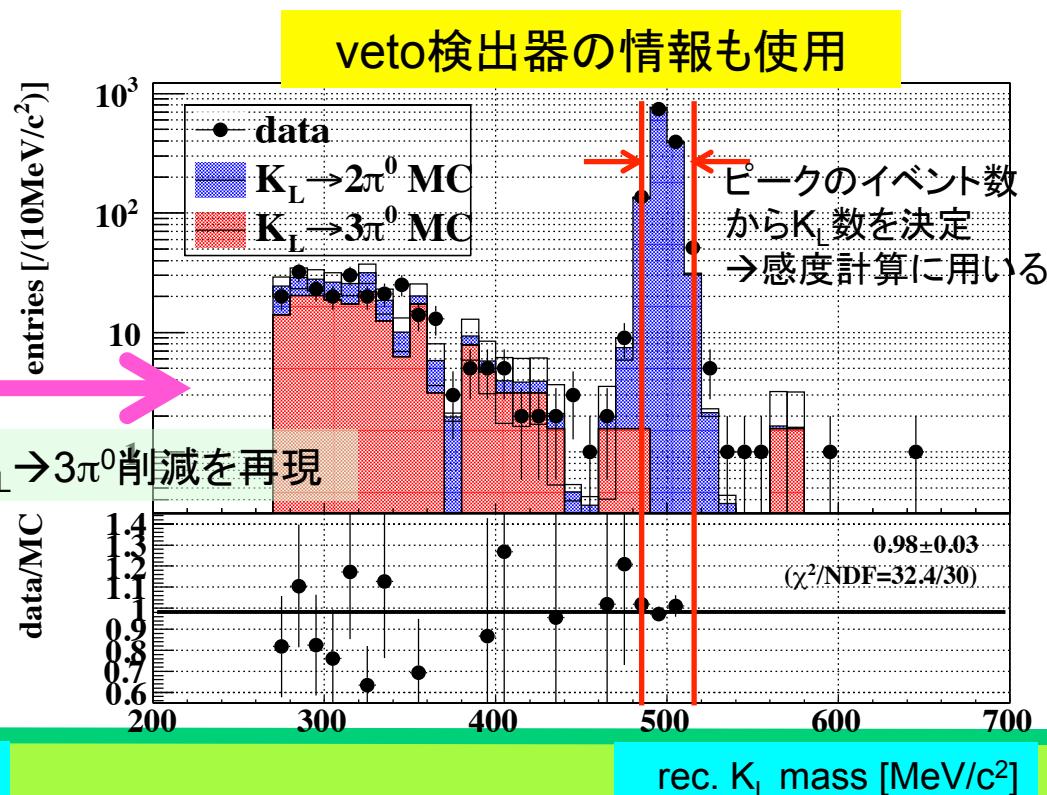
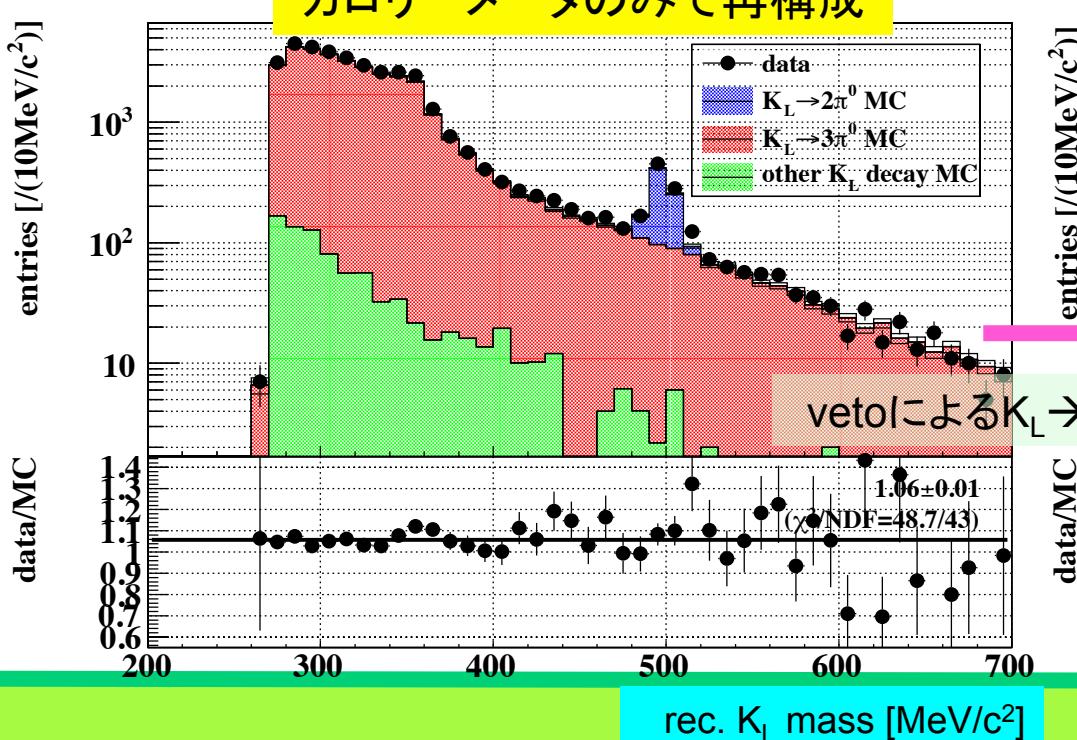
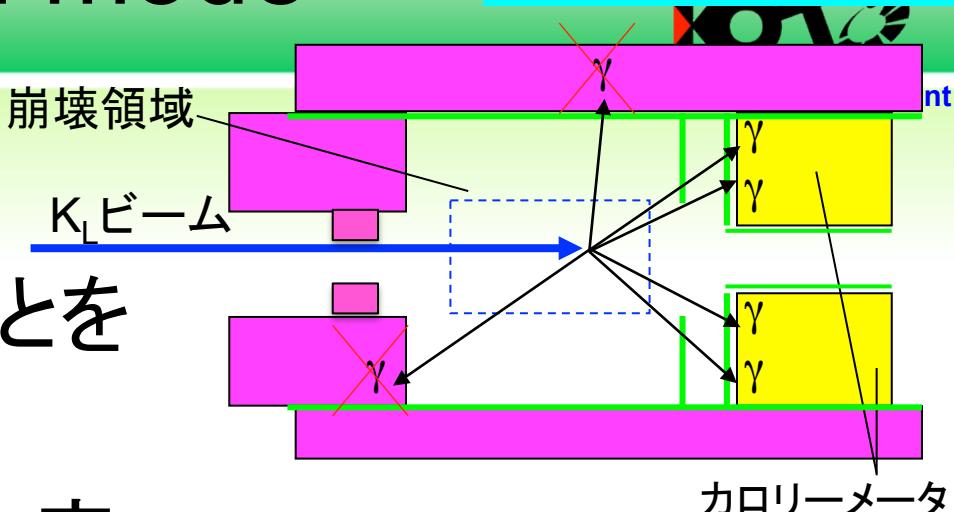
- ◆キャリブレーションモード ($K_L \rightarrow 3\pi^0, 2\pi^0, 2\gamma$)による検出器と K_L ビームの理解
- ◆背景事象の見積もりと事象選択の最適化
 - ◆信号領域のデータを隠して解析(blind analysis)
 - ◆cutベースの解析
- ◆boxを開け, 中のイベント数を数える



analysis of calibration mode

$K_L \rightarrow 3\pi^0$: br=19.25%
 $K_L \rightarrow 2\pi^0$: br=0.09%

- ◆ $K_L \rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$ を再構成.
- ◆ MCがデータを再現することを確認.
- ◆ K_L の数をこのデータから決定.



K中間子バックグラウンド(BG)



K_L の崩壊モード

iment

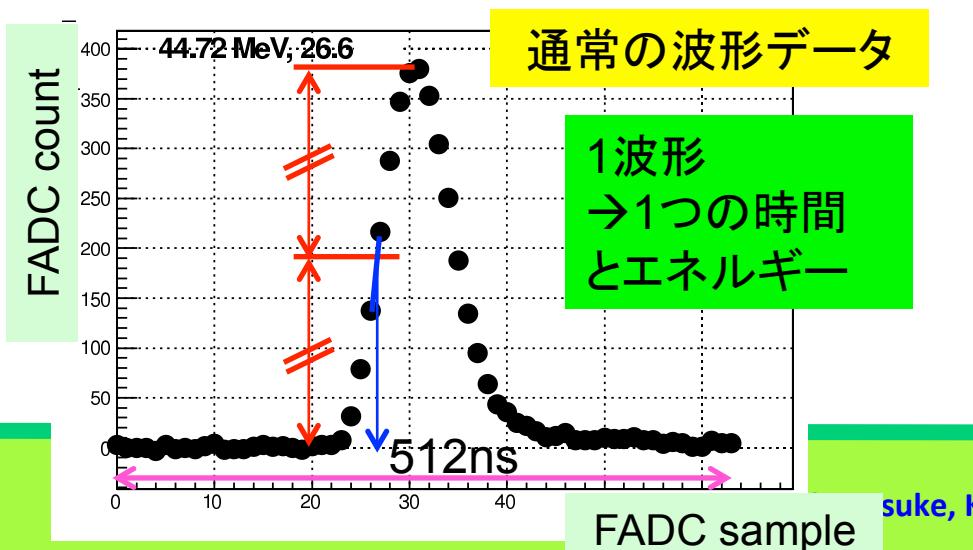
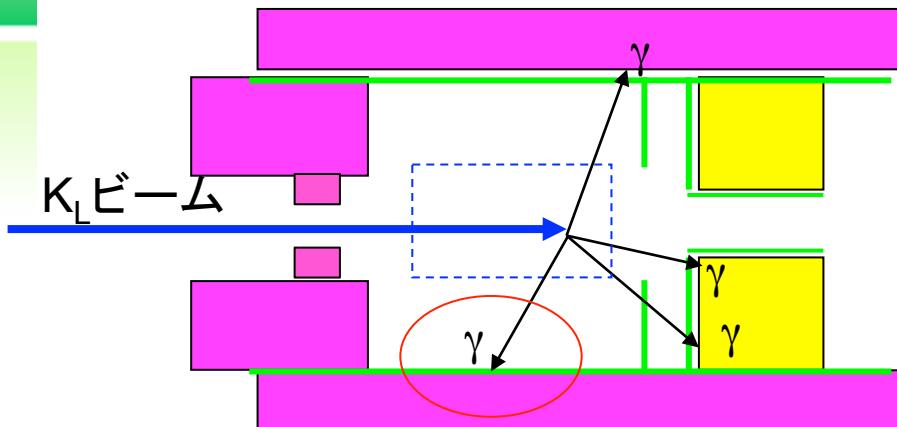
	分岐比(br)
$K_L \rightarrow \pi e\nu$	40.6%
$K_L \rightarrow \pi \mu \nu$	27.0%
$K_L \rightarrow 3\pi^0$	19.5%
$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	12.5%
$K_L \rightarrow 2\pi^0$	8.6×10^{-4}
$K_L \rightarrow 2\gamma$	5.5×10^{-4}

- ◆シミュレーション(MC)を用いる
- ◆各モードに応じた見積もりが必要
 - ◆分岐比の大きいモード($br > 10\%$)は十分なMCの生成が困難
- ◆バックグラウンドのメカニズム
 - ◆偶発事象のパイルアップ
 - ◆ $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$: 下流での荷電 π^\pm 反応
 - ◆ $K_L \rightarrow 3\pi^0$: カロリーメータ周りの不感物質
 - ◆ $K_L \rightarrow \pi e\nu, \pi \mu \nu$: 荷電粒子検出器の不感率
 - ◆ $K_L \rightarrow 2\gamma$: 真空膜での K_L の散乱
- ◆ $K_L \rightarrow 2\pi^0$ は直接大統計サンプルを生成して見積もり

パイルアップ起源のBG

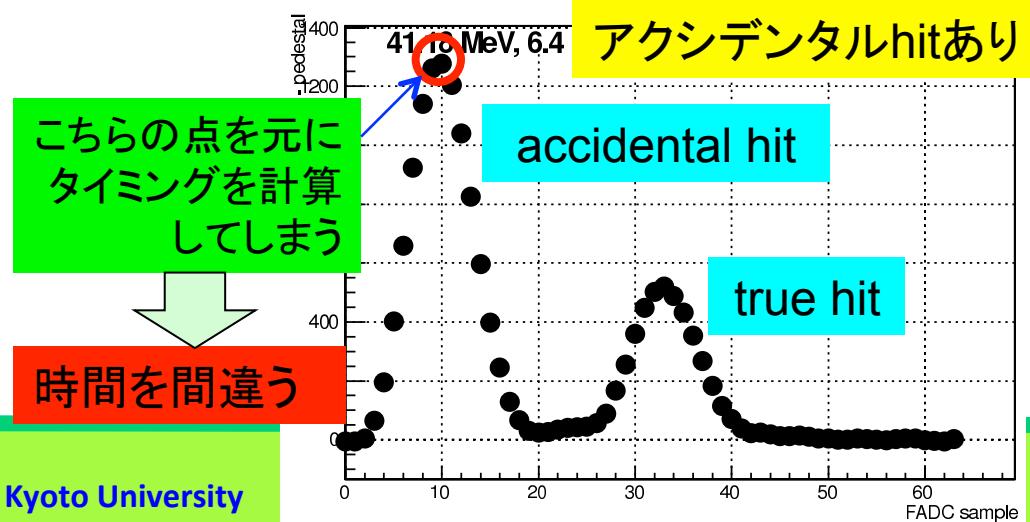
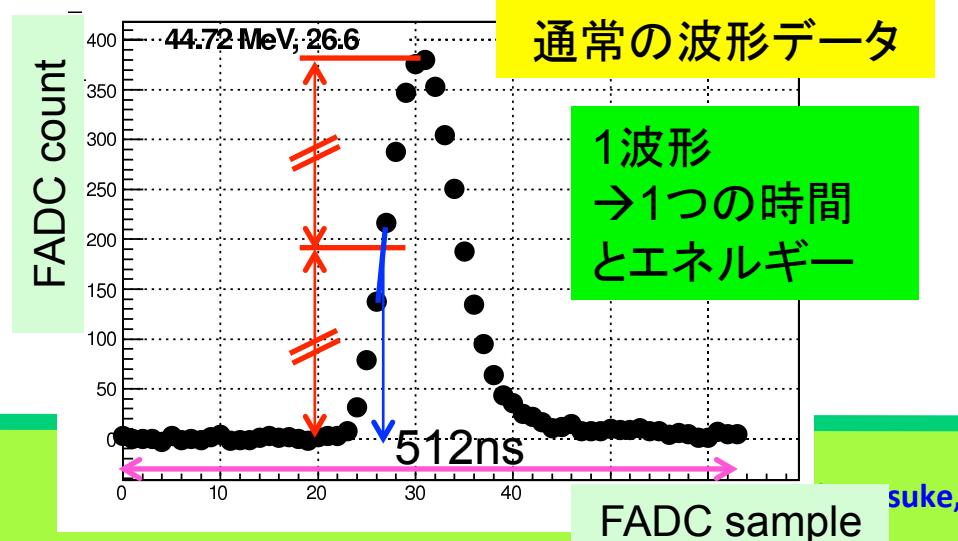
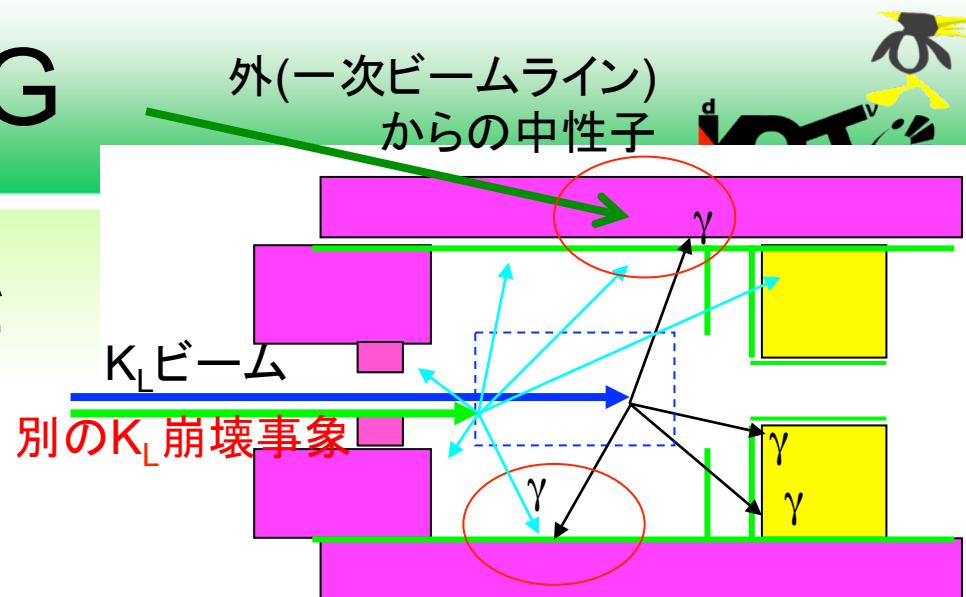


- ◆ veto判定にはエネルギーとタイミングの両方を用いる
- ◆ 偶発事象による検出ミス
 - ◆ 時間計算方法を改善
 - ◆ 半値時間(Constant Fraction) → ピーク時間に変更
 - ◆ 複数ピークの場合：大きい方 → 基準値に近い方を採用
 - ◆ 波形シミュレーションを行い見積もり：[0.016±0.016イベント](#)
- ◆ 今後は波形fitを行うことで更に背景事象を削減



パイルアップ起源のBG

- ◆ veto判定にはエネルギーとタイミングの両方を用いる
- ◆ 偶発事象による検出ミス
 - ◆ 時間計算方法を改善
 - ◆ 半値時間(Constant Fraction) → ピーク時間に変更
 - ◆ 複数ピークの場合：大きい方 → 基準値に近い方を採用
 - ◆ 波形シミュレーションを行い見積もり：[0.016±0.016イベント](#)
- ◆ 今後は波形fitを行うことで更に背景事象を削減

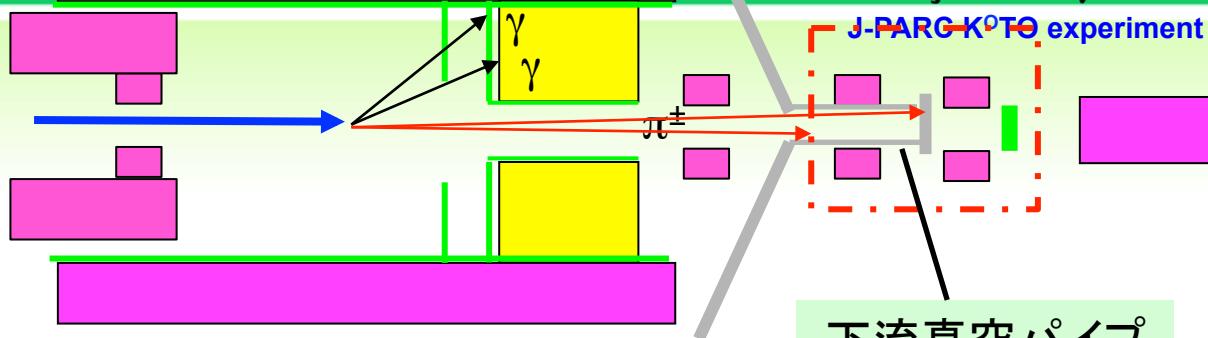


$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$

分岐比 : 12.54%



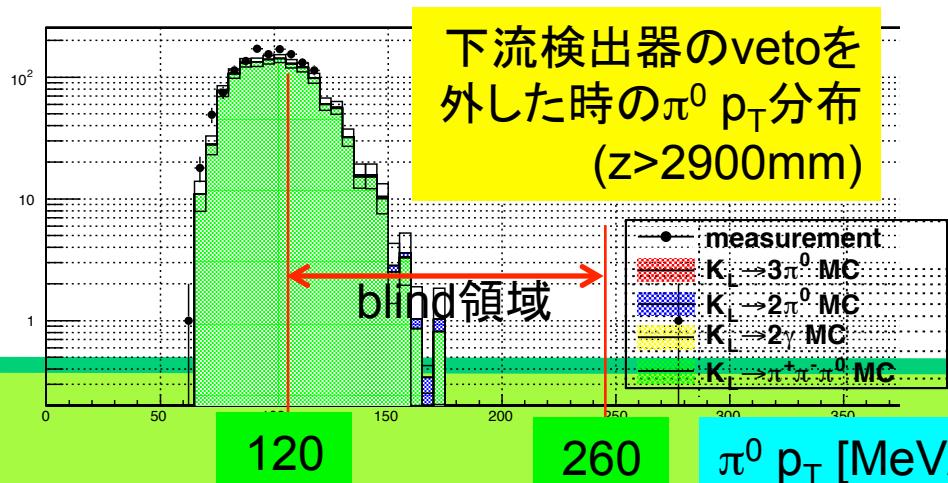
- ◆ Q値が小さく荷電πが前方に出やすい。
→ π^\pm を下流検出器で検出出来ないとBGに。



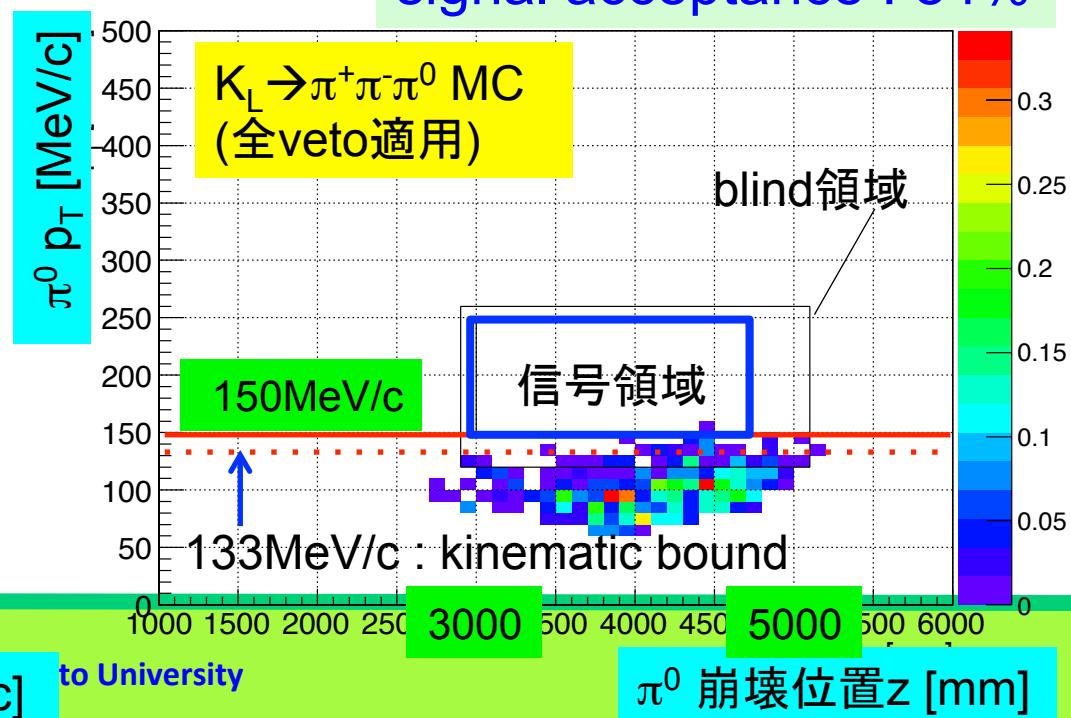
- ◆ π^\pm の下流部での反応のみを見ることでシミュレーション時間を短縮

◆ 下流検出器のvetoを緩めた時のイベントをリサイクル。

- ◆ π^0 横運動量(p_T)閾値を150MeV/cとすることで,
0.0016±0.0016 イベントに。



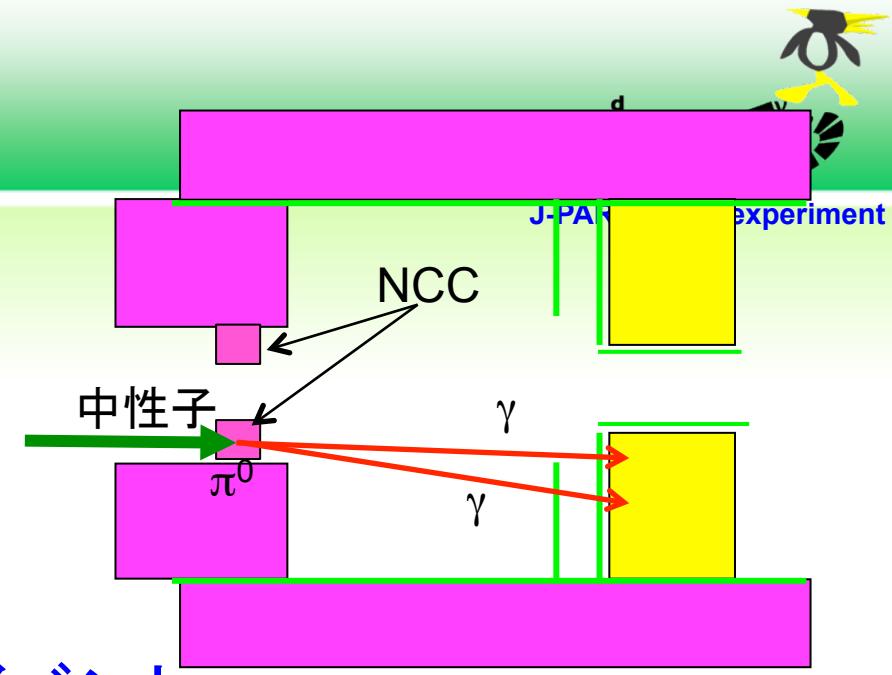
>130MeV/c → >150MeV/c
BG : 1/100以下
signal acceptance : 84%



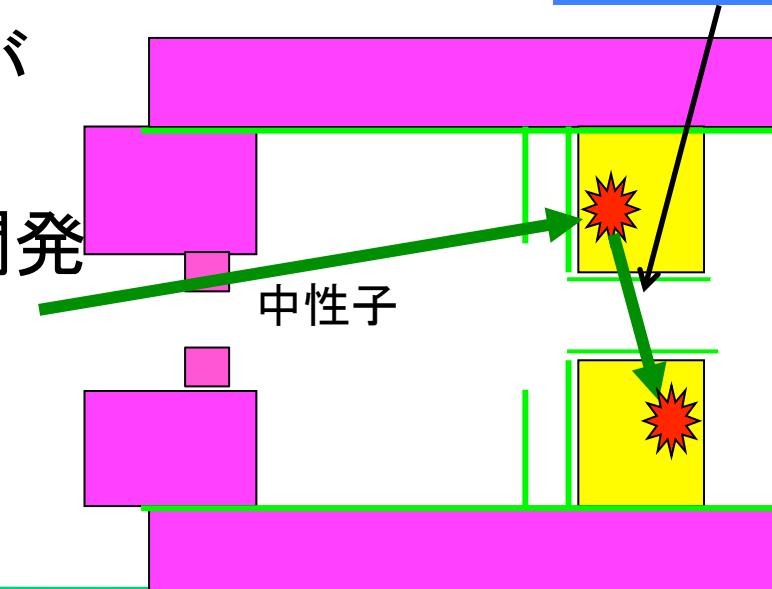
中性子BG



- ◆ 2つのメカニズム
- ◆ 上流部中性子反応イベント
 - ◆ 上流部検出器(NCC)に中性子が当たり、 π^0 等を生成
 - ◆ MCで見積もり：0.06±0.06 イベント
- ◆ ハドロンクラスターイベント
 - ◆ カロリーメータに直接中性子が入射し、2クラスターを形成
 - ◆ Neural Netを用いたカットを開発
 - ◆ ビーム中にアルミ標的を挿入して取得したデータで見積もり：0.18±0.15 イベント



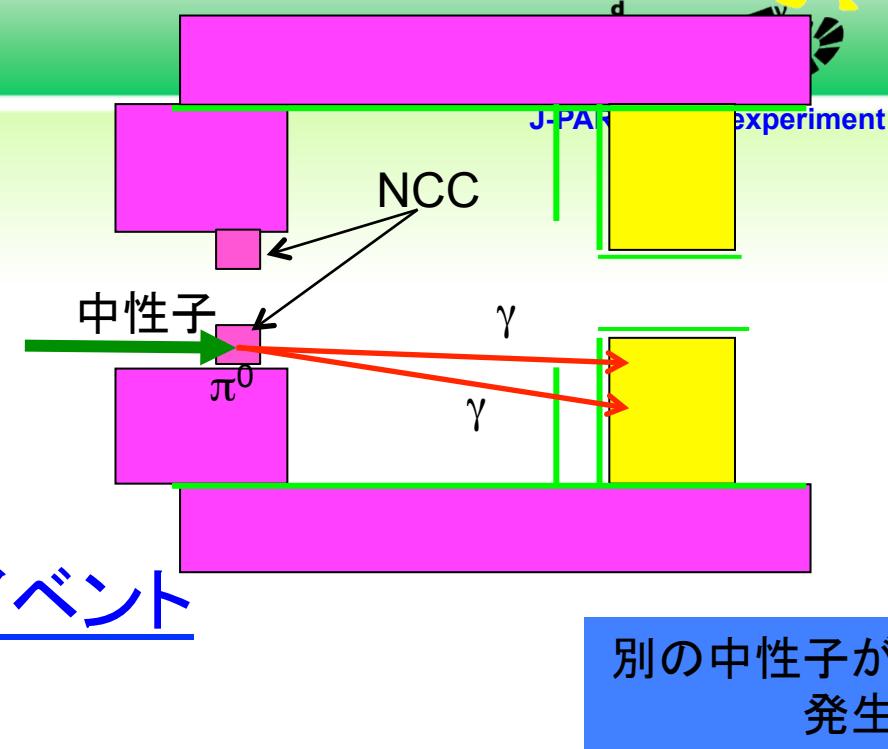
別の中性子が
発生



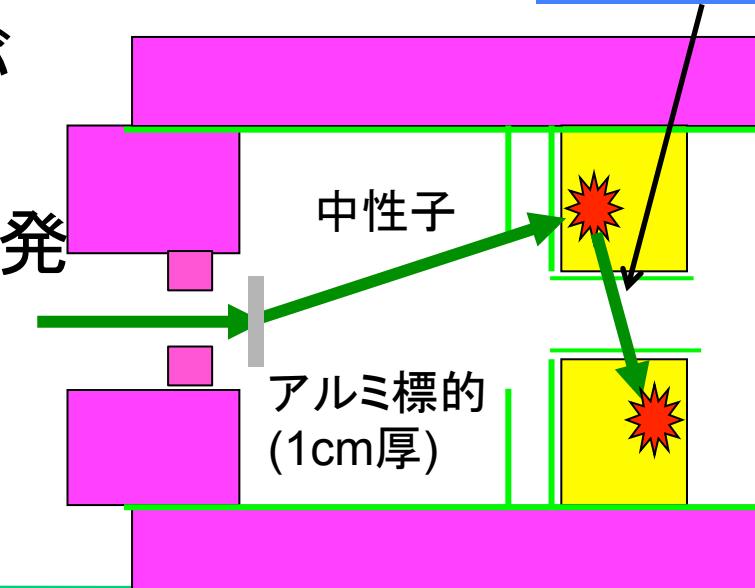
中性子BG



- ◆ 2つのメカニズム
- ◆ 上流部中性子反応イベント
 - ◆ 上流部検出器(NCC)に中性子が当たり、 π^0 等を生成
 - ◆ MCで見積もり：0.06±0.06 イベント
- ◆ ハドロンクラスターイベント
 - ◆ カロリーメータに直接中性子が入射し、2クラスターを形成
 - ◆ Neural Netを用いたカットを開発
 - ◆ ビーム中にアルミ標的を挿入して取得したデータで見積もり：0.18±0.15 イベント



別の中性子が
発生



結果

◇ 実験感度(Single Event Sensitivity) : 1.29×10^{-8}

◇ 先行実験(E391a) : 1.11×10^{-8}

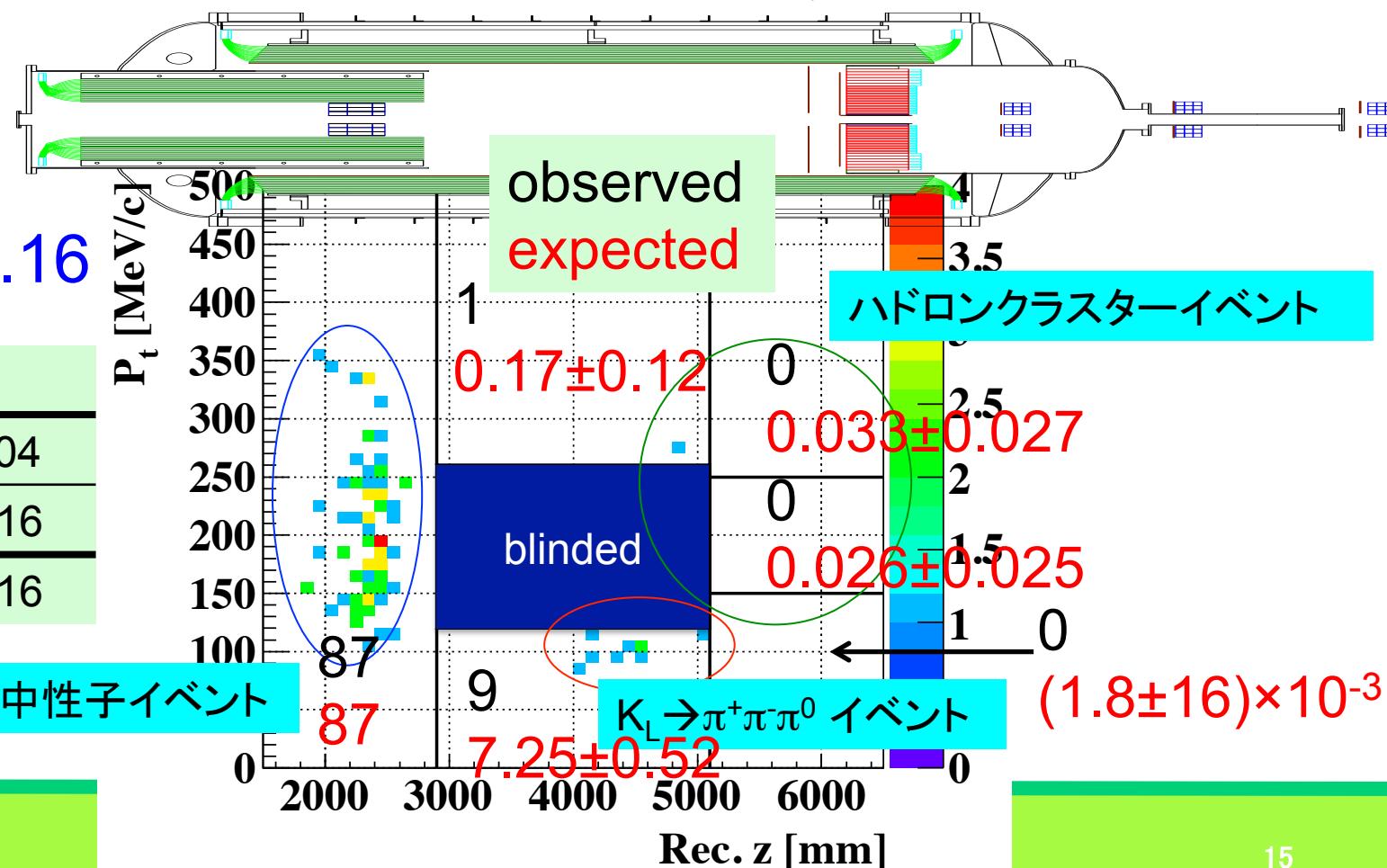
◇ 100時間のデータで同じレベルの感度

◇ BG数

◇ 合計

0.36 ± 0.16

	BG数
KL起源	0.11 ± 0.04
中性子起源	0.24 ± 0.16
合計	0.36 ± 0.16



結果

◇ 実験感度(Single Event Sensitivity) : 1.29×10^{-8}

◇ 先行実験(E391a) : 1.11×10^{-8}

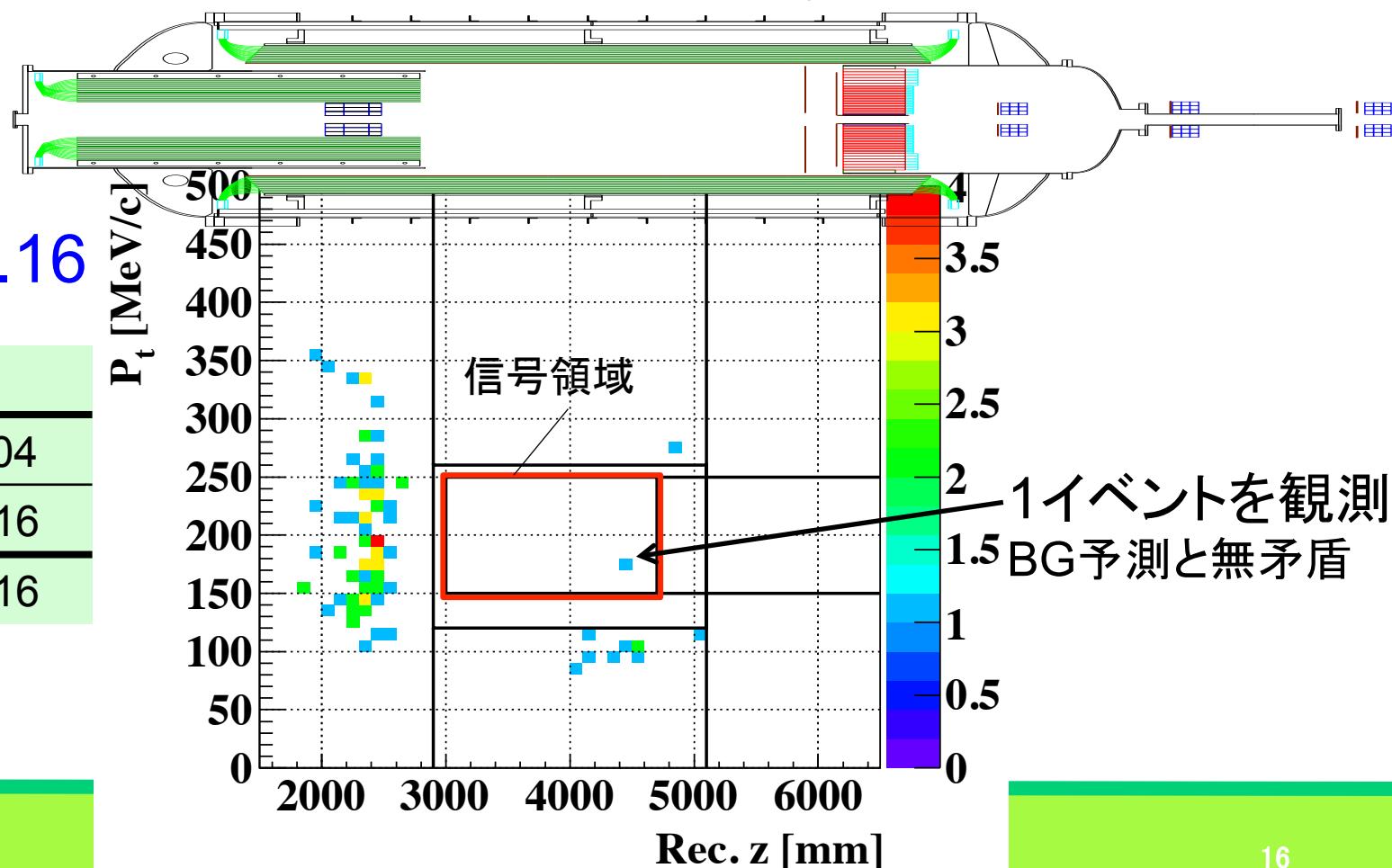
◇ 100時間のデータで同じレベルの感度

◇ BG数

◇ 合計

0.36 ± 0.16

	BG数
KL起源	0.11 ± 0.04
中性子起源	0.24 ± 0.16
合計	0.36 ± 0.16



まとめと今後の展望



- ◆ KOTO実験はproposal提出から7年の準備期間を経て、2013年5月に最初の物理ランを行った。
- ◆ 100時間という短いデータ取得期間で、先行実験と同レベルの感度を達成。

- ◆ 新物理へのアプローチとしてはこれからが本番。
- ◆ 本解析で得られた知見を元に、各種アップグレードを行っている。
 - ◆ K_L BG : 下流部のveto強化 等
 - ◆ 中性子 BG : ビームプロファイルモニターの追加 等

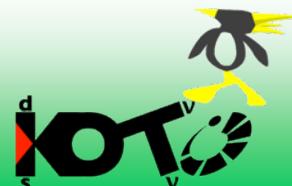
backup slides

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

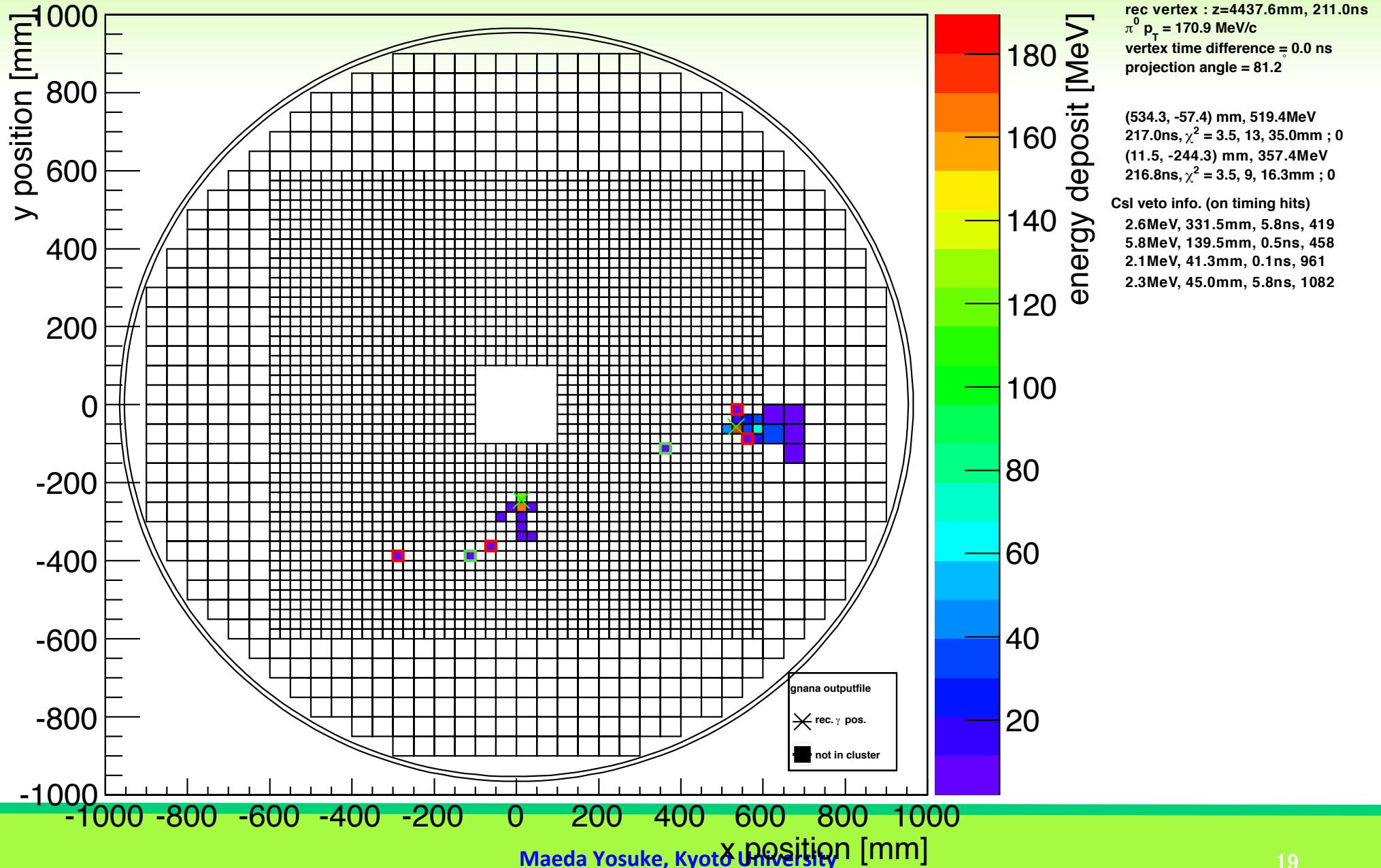
Maeda Yosuke, Kyoto University



The remaining event



event display - CsI energy (run00016887_node014_file6_g2ana.root node14 DstEntryID : 10974)

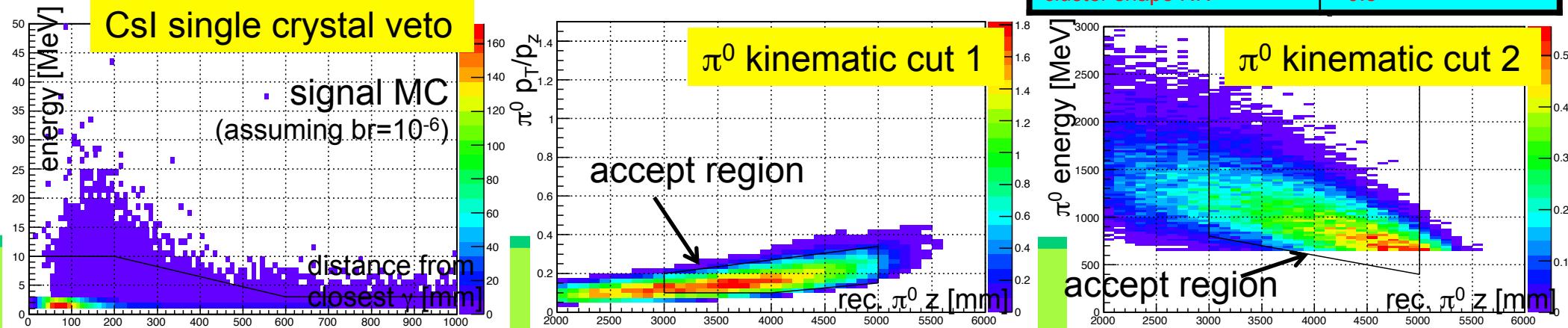


kinematic cut set

◆ extra cluster

- ◆ cluster with energy < 20 MeV (collateral cluster)
- ◆ veto if exists and its vertex time is within $\pm 10\text{ns}$ from event vertex time

◆ CsI single crystal veto and π^0 kinematic cut

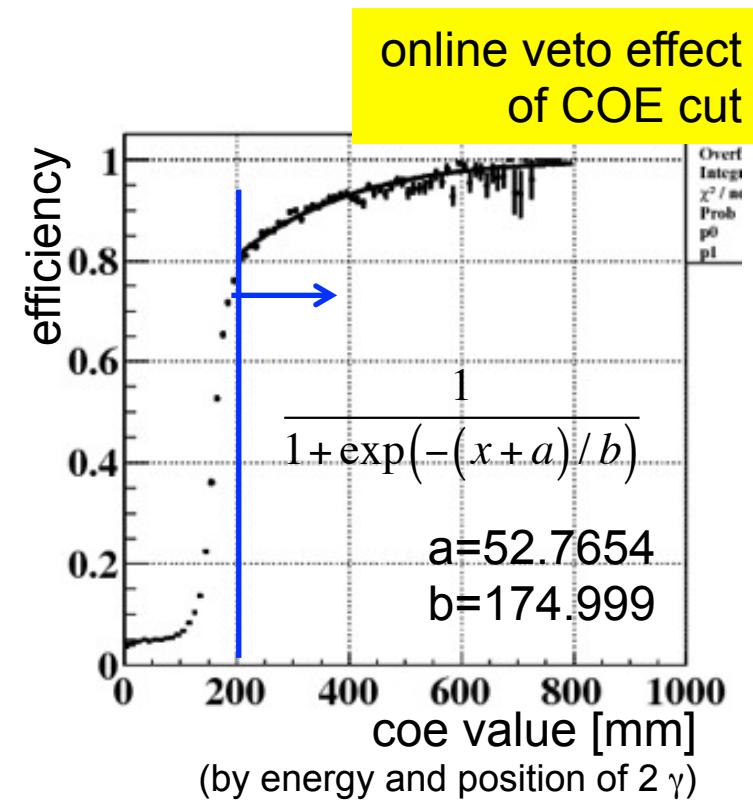


variable	cut value
2 γ total energy	>650MeV
extra cluster	> $\pm 10\text{ns}$
E0	>2500MeVdeg
cluster distance	>300mm
γ energy	>100MeV, <2000MeV
γ position	>150mm (XY), <850mm (R)
energy ratio	>0.2
shape χ^2 (new definition)	<4.6
projection angle	<150deg
COE	>200mm (R)
vertex time difference	< $\pm 2\text{ns}$
π^0 kinematic cut	default
cluster size	>4
cluster RMS	>10mm
CsI single crystal veto	<10MeV (200mm) - 3MeV (600mm)
min. distance from dead ch	>53mm
kinematic NN	>0.67
cluster shape NN	>0.8

COE cut

◆ COE

- ◆ effect of online veto is slightly remaining even after requiring large COE
- ◆ loss is estimated
- ◆ $>180\text{mm} \rightarrow >200\text{mm}$
 - ◆ add weight according to the COE value



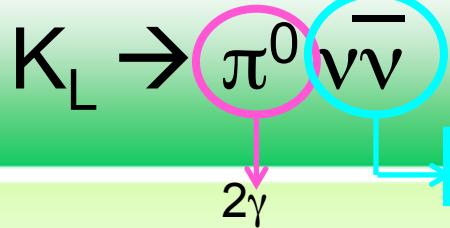
veto cut set



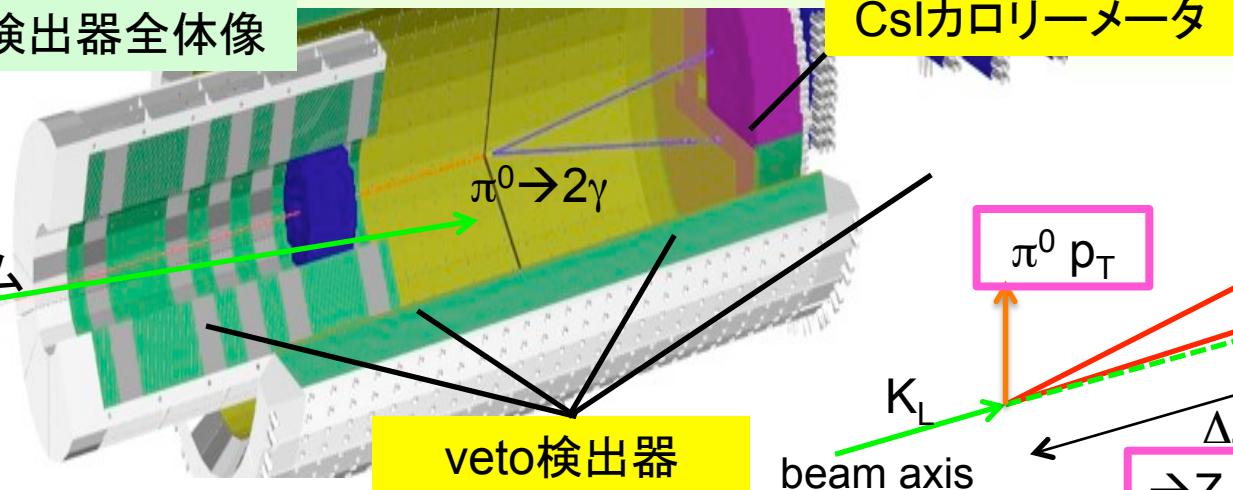
◆ veto energy definition

- ◆ max. energy among modules whose timing is within veto window (except BHPV)
- ◆ in case of BHPV, coincidence among neighboring modules are searched and the number of coin. modules whose timing is in veto window is used for veto decision

variable	cut value
CC03-06	<3MeV (± 15 ns)
CC04-06 scinti	<1MeV (± 15 ns)
CBAR	<2MeV (± 30 ns)
FBAR, NCC	<2MeV (± 20 ns)
OEV	<2MeV (± 10 ns)
CV	<0.2MeV (± 40 ns)
BCV	<1MeV (± 30 ns)
LCV	<0.6MeV (± 15 ns)
BHCV	<0.3MeV (± 7.5 ns)
BHPV	<3modules (± 7.5 ns)
online veto (only for MC)	CV, CBAR, NCC, CC03



KOTO検出器全体像



CsIカロリーメータ

K_L ビーム

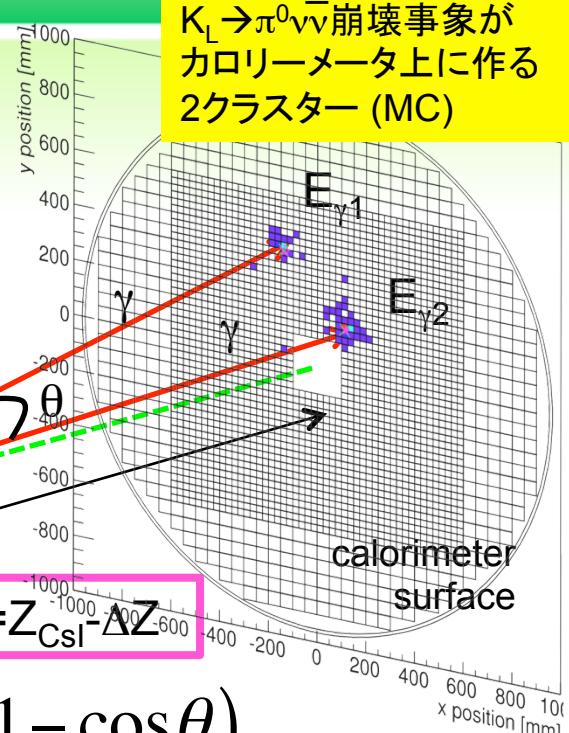
veto検出器

K_L
beam axis

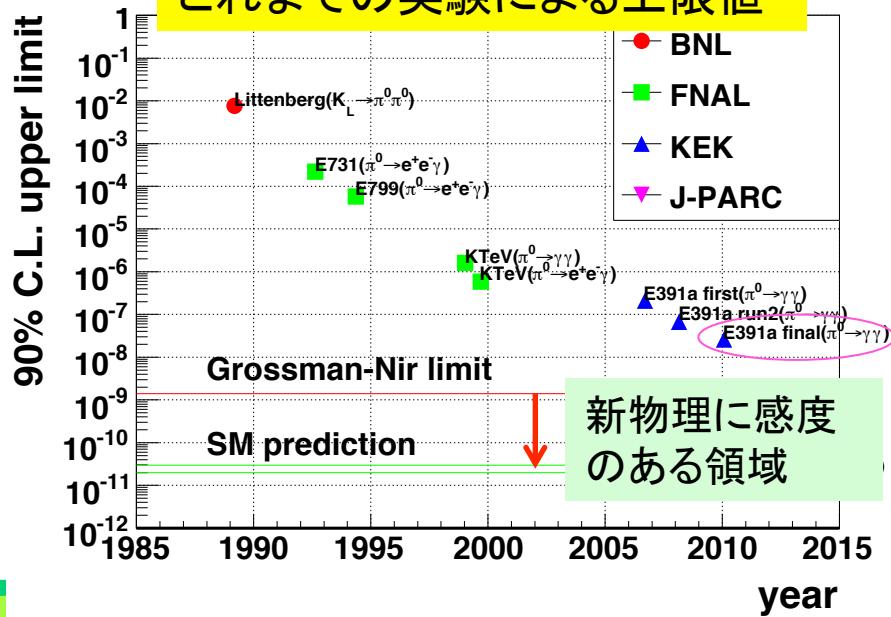
$\pi^0 p_T$

ΔZ

$$\rightarrow Z_{\text{vtx}} = Z_{\text{CsI}} - \Delta Z$$



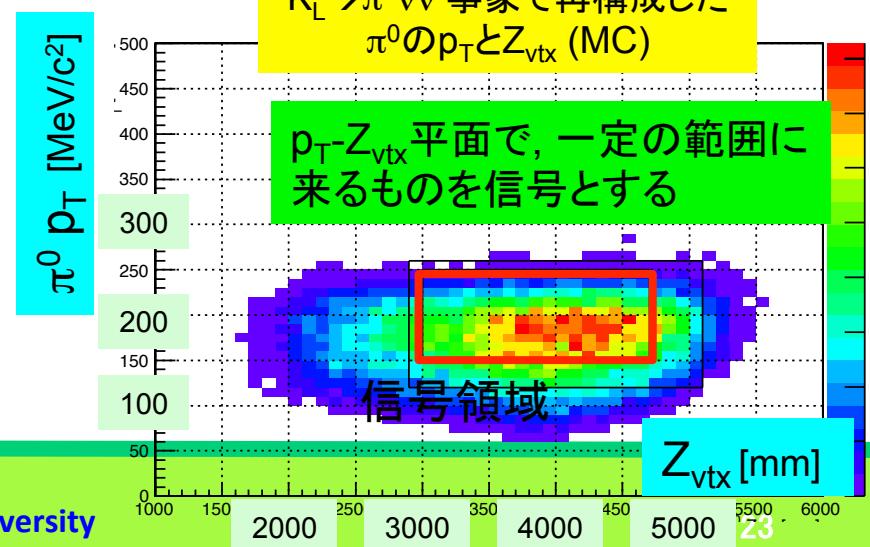
これまでの実験による上限値



$$M_{\pi^0}^2 = 2E_{\gamma_1}E_{\gamma_2}(1 - \cos\theta)$$

$K_L \rightarrow \pi^0 \bar{v}v$ 事象で再構成した
 π^0 の p_T と Z_{vtx} (MC)

p_T - Z_{vtx} 平面で、一定の範囲に
来るものを信号とする





MC simulation

仮定した関数形

$$A \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{(\sigma_0 + a(x-\mu))^2}\right)$$

- ◆ データは 125MHz FADC で波形を取得
→ simulation 上でも波形を考慮

◆ 波形生成

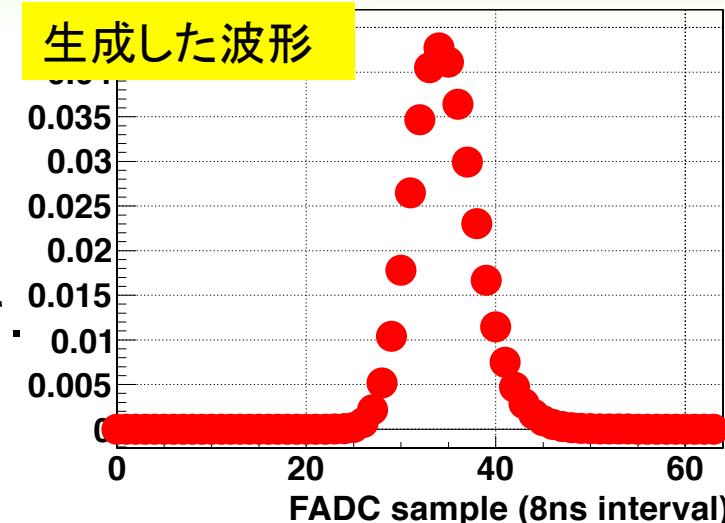
- ◆ Geant のステップ毎のエネルギー、時間情報を波形に変換し、足しあわせ。

◆ 検出器応答

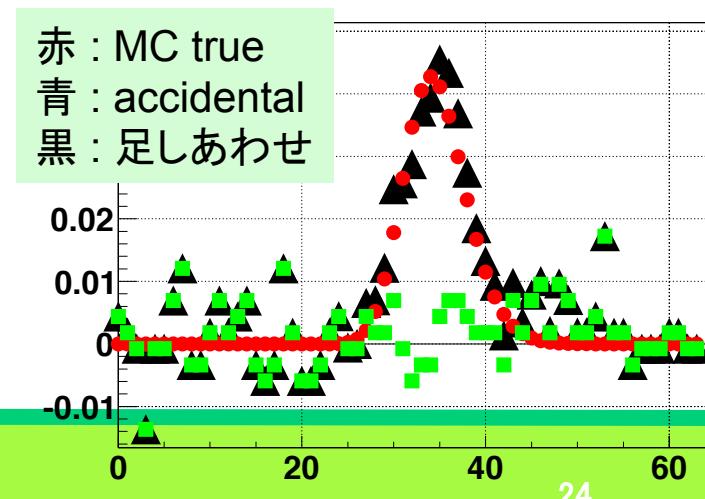
- ◆ 出力の位置依存性や光の伝播、光子数の統計揺らぎ等を考慮

◆ アクシデントル hit

- ◆ ランダムトリガーでの波形データを、生成した波形に overlay
→ ノイズや偶発的 hit を再現



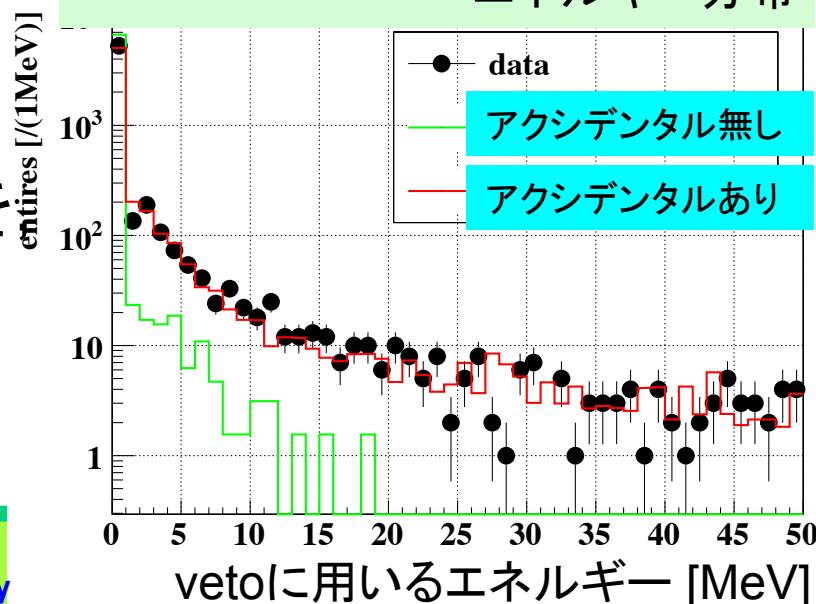
アクシデントル hit を足しあわせ



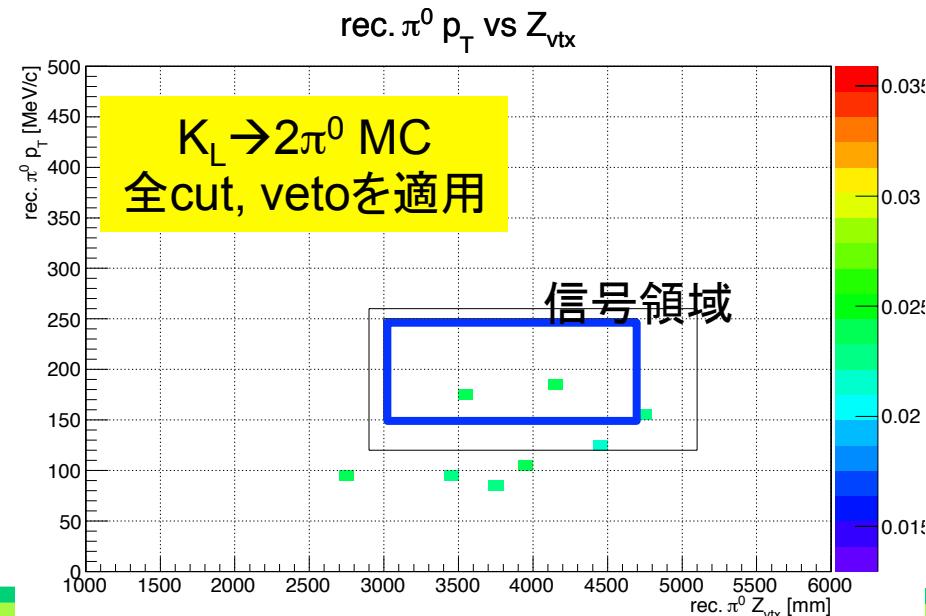
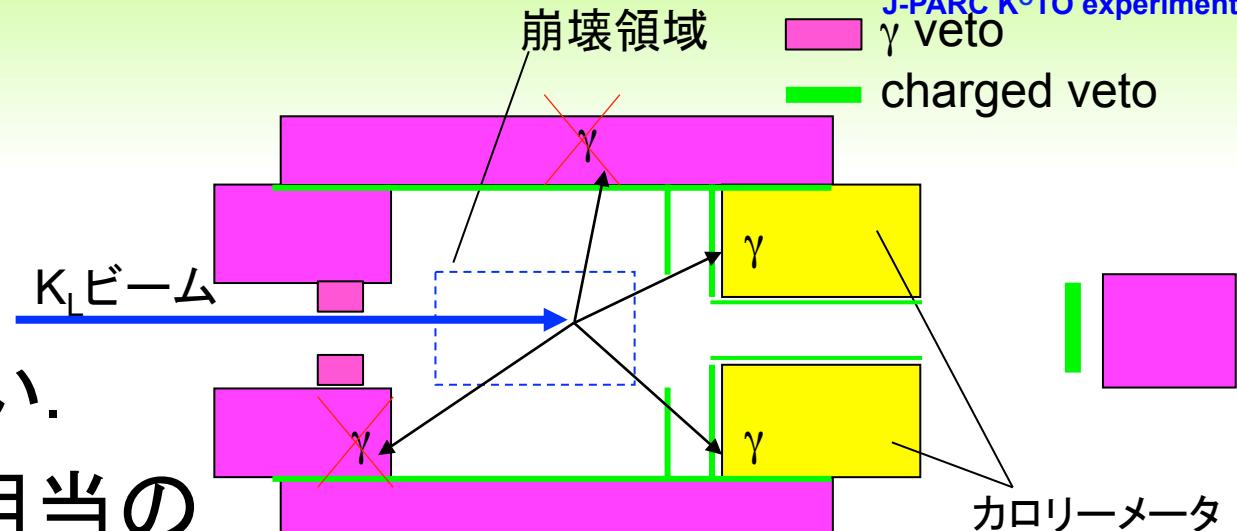
MC simulation

- ◆ データは125MHz FADCで波形を取得
→ simulation上でも波形を考慮
- ◆ 波形生成
 - ◆ Geantのステップ毎のエネルギー、
時間情報を波形に変換し、足しあわせ。
- ◆ 検出器応答
 - ◆ 出力の位置依存性や光の伝播、
光子数の統計揺らぎ等を考慮
- ◆ アクシデンタルhit
 - ◆ ランダムトリガーでの波形データを
生成した波形にoverlay
→ ノイズや偶発的hitを再現

あるveto検出器(Front Barrel)での
エネルギー分布



- ◇ 終状態は主に 4γ
- ◇ vetoに使える γ が2本のみ
→ BGになりやすい.
- ◇ データの約40倍相当のMCサンプルを生成
- ◇ 結果
 - ◇ (0.047 ± 0.033) イベント相当が信号領域に残る
 - ◇ 十分小さい

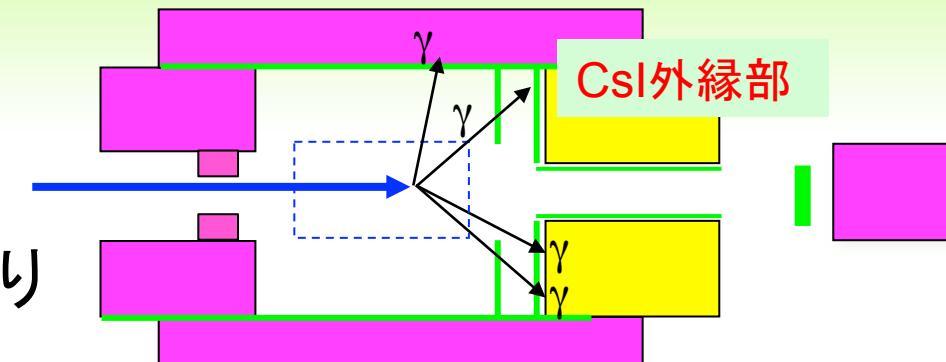


$K_L \rightarrow 2\pi^0$: MCで残っているイベント



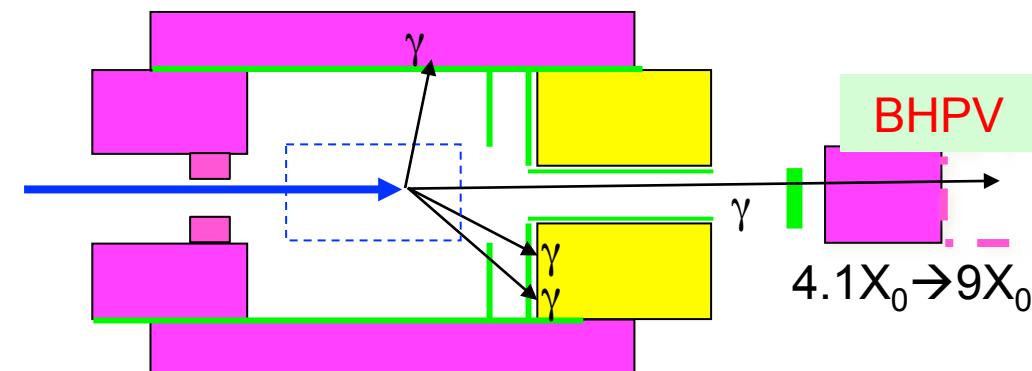
◆ CsI外縁部構造体

- ◆ 不感物質が多く、 γ に対する不感率が大きい
- ◆ veto検出器の低閾値化により殆どのイベントは除去可能
(γ 検出器 : $2\text{MeV} \rightarrow 1\text{MeV}$ 等)



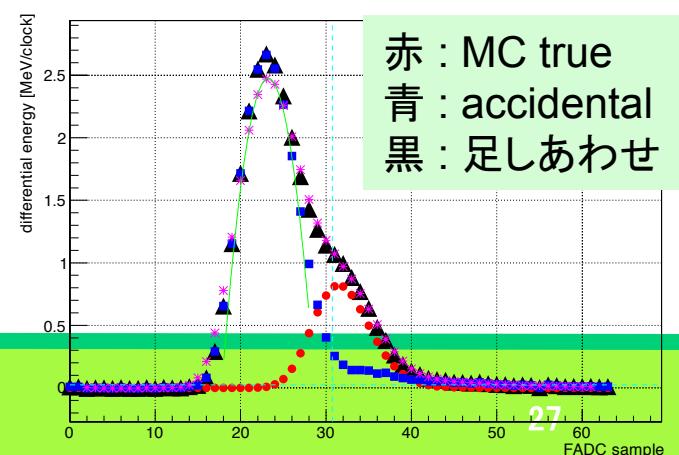
◆ ビームホールに抜けた γ

- ◆ BHPVの放射長が短い
- ◆ モジュールを増やし、十分な放射長を確保
(現状は約半数のみ設置)

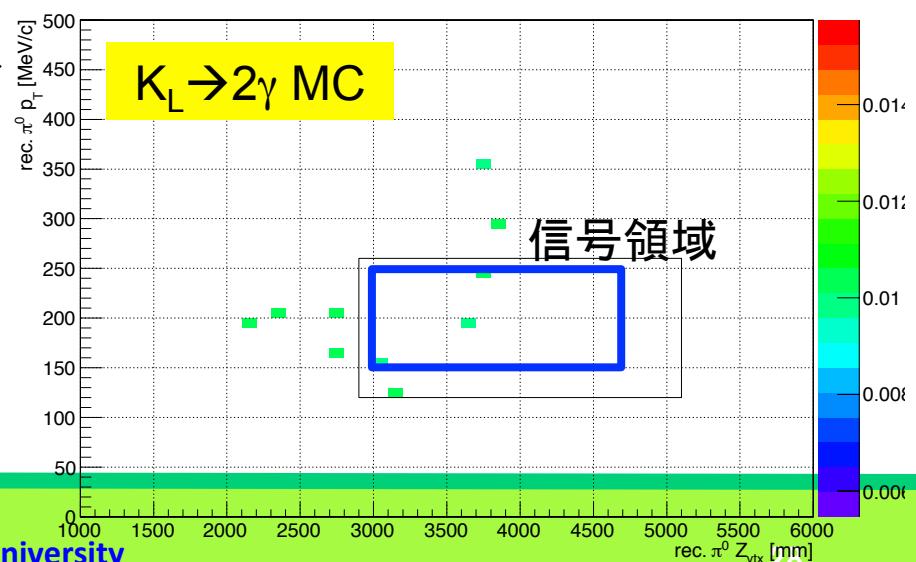
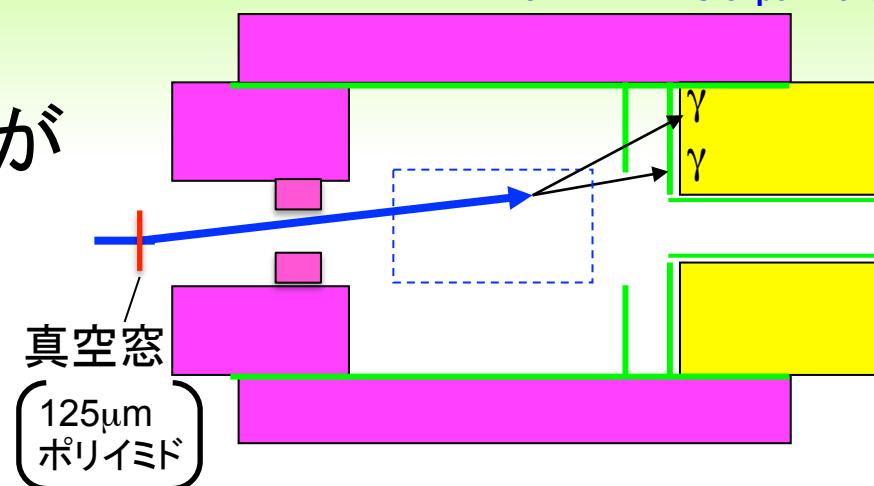


◆ アクシデンタルhitによるBG

- ◆ タイミングがずれ、vetoし損ねる
- ◆ 次の講演にて詳述

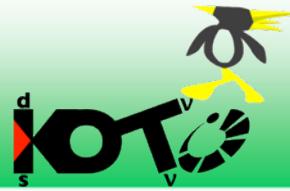


- ◆ 終状態が信号事象と同じ
"2 γ & nothing"だが、横運動量がないので通常BGにならない
- ◆ しかし上流真空窓での散乱で
横運動量を持った K_L が2 γ に
崩壊するとBGとなりうる。
- ◆ 真空窓で散乱したものについてのみ
 $K_L \rightarrow 2\gamma$ 崩壊をsimulationすることで統計を稼ぐ
- ◆ データの約90倍の統計
 - ◆ (0.030±0.018)イベント相当が
信号領域に残る
 - ◆ 真空窓の低物質量化や等で
削減可能

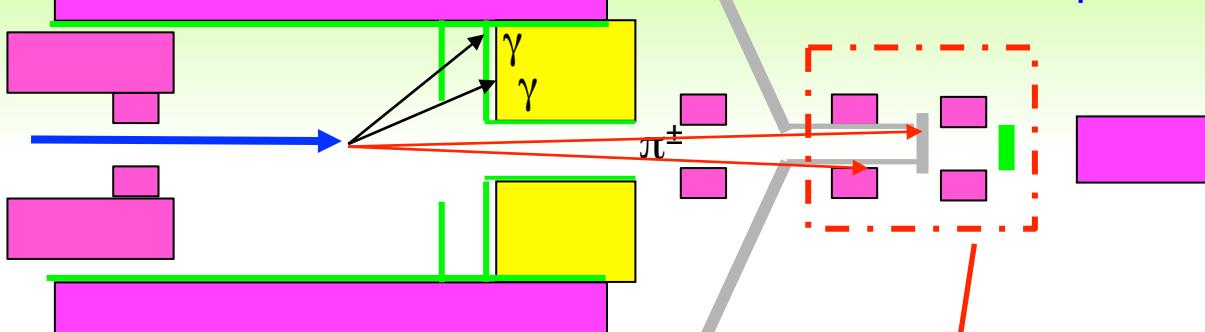


$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$

分岐比 : 12.54%



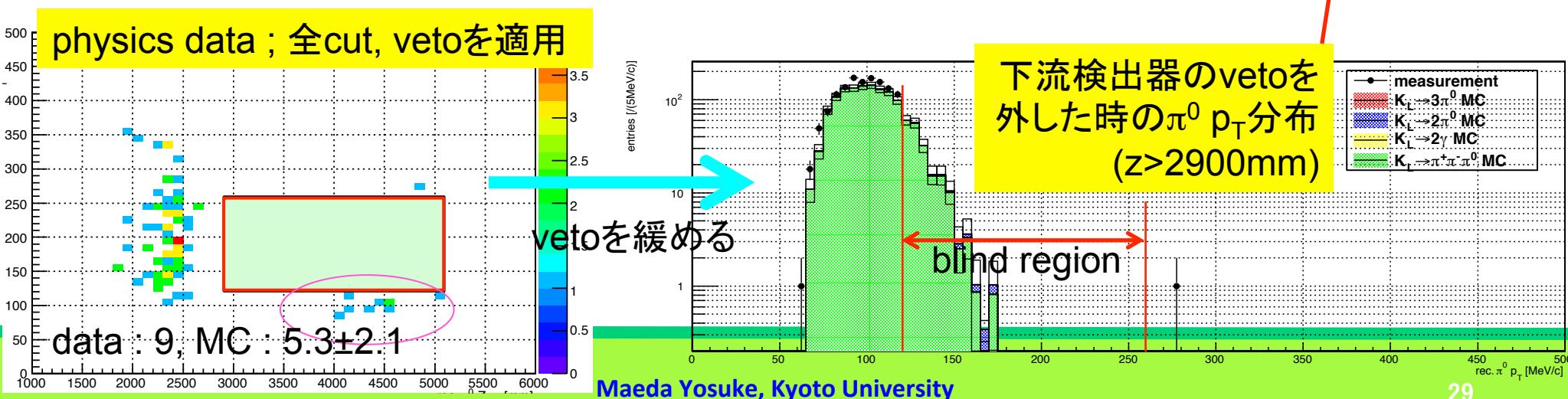
◆ Q値が小さいため、崩壊粒子が前方に放出されやすい



→ π^\pm の両方がカロリーメータ下流に抜け、検出されないとBGとなりうる。

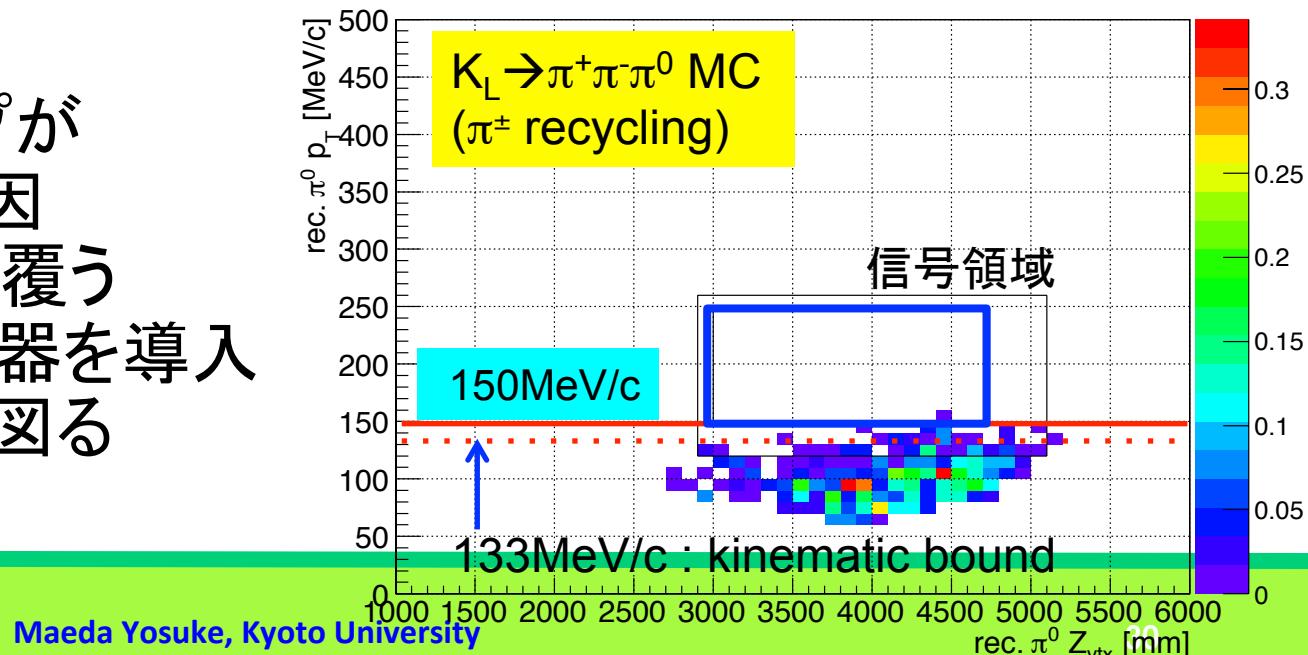
◆ low p_T のイベントは、この崩壊で説明される

◆ 運動力学的制限より、高い p_T を持てない

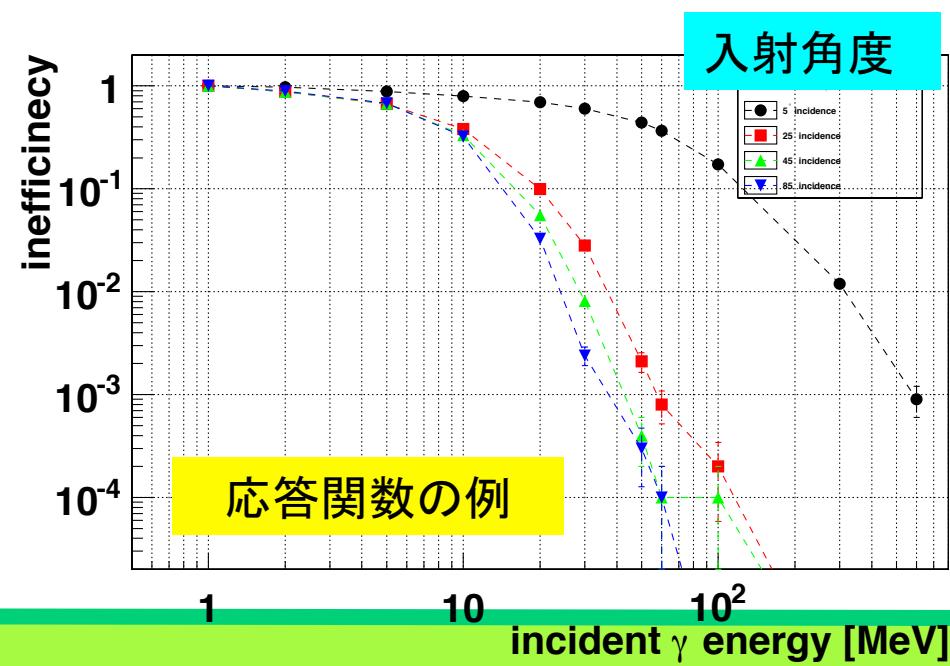


- ◆ 下流検出器のvetoを外したときにBGとなるイベントについて、下流に抜けた π^\pm のみを繰り返しsimulationし、統計を稼ぐ
- ◆ データの500倍程度の統計
 - ◆ p_T 閾値を150MeV/cとすることでBGを無視出来るレベルまで低減可能
 - ◆ 0.0016イベント相当が信号領域に残る
 - ◆ 下流ビームパイプが不感率増大の原因
→ビームパイプを覆うシンチレータ検出器を導入することで削減を図る

>130MeV/c → >150MeV/c
 BG : 1/100以下
 signal acceptance : 84%

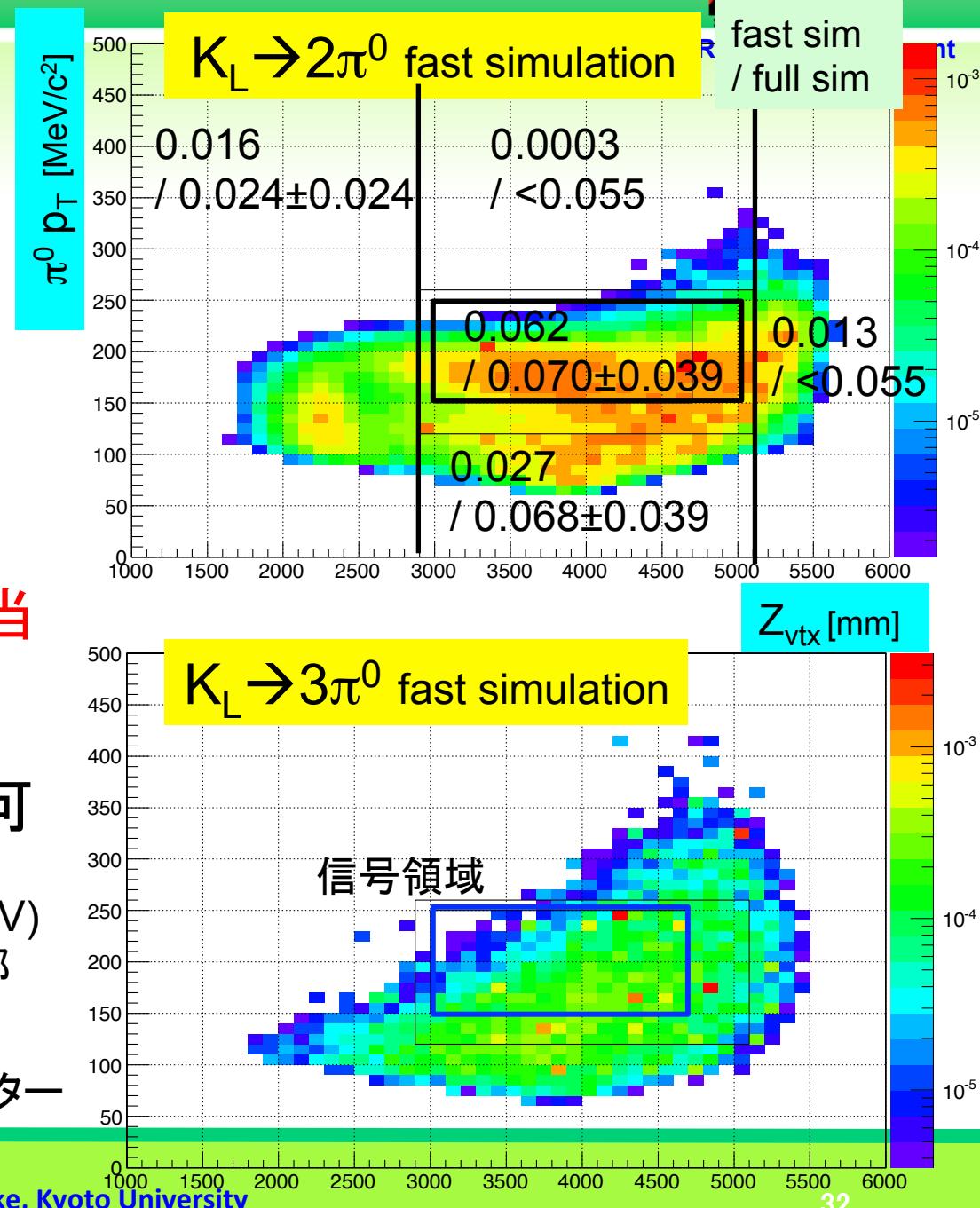
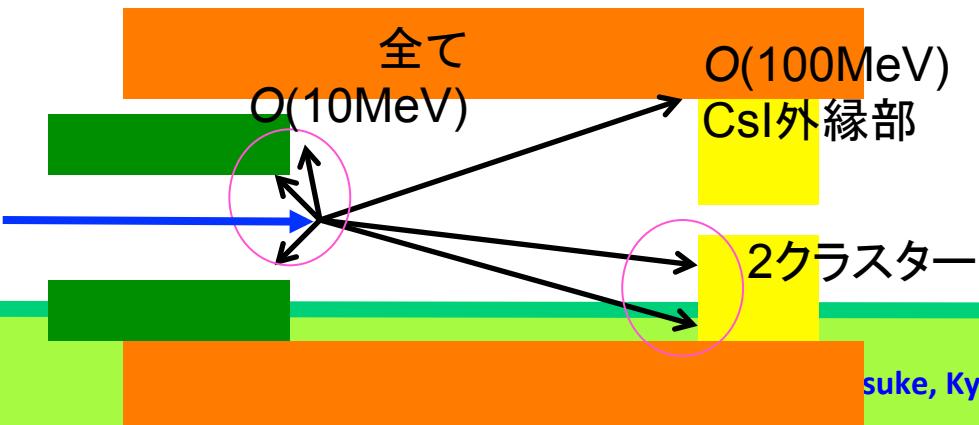


- ◆ 終状態が 6γ で余剰粒子の数が多いが、分岐比も大きい。
- ◆ 十分な統計のfull simulationを作るのは困難
→ 各検出器の応答をweightで評価することで高統計なMCサンプルを得る(fast simulation)
 - ◆ 検出器応答は、入射 γ の位置、角度、エネルギーの関数で、検出器毎にsimulationを行い決定



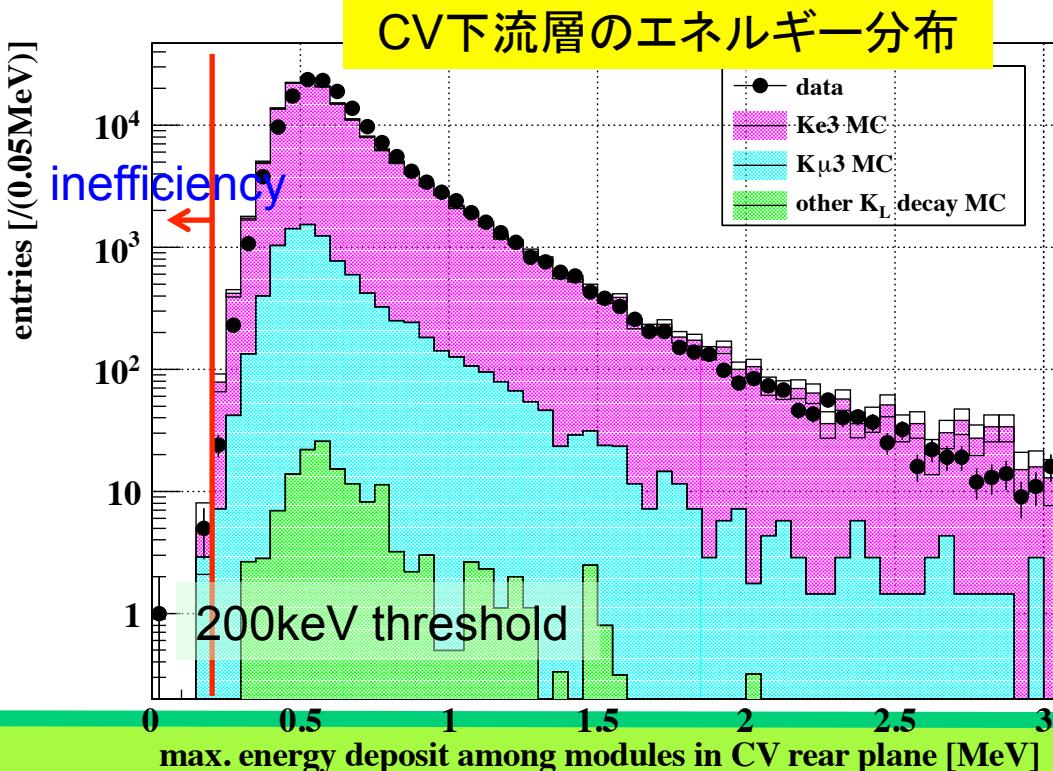
$K_L \rightarrow 3\pi^0$ fast simulation

- ◆ $K_L \rightarrow 2\pi^0$ モードで full sim. の結果と比較
 - ◆ consistentな結果が得られている
- ◆ $K_L \rightarrow 3\pi^0$ モードのBG
 - ◆ データの半数の統計
 - ◆ 信号領域のBG数 **0.022±0.004** イベント相当
 - ◆ カロリーメータ外縁部が半数以上を占める
→ 低閾値化で更に削減可



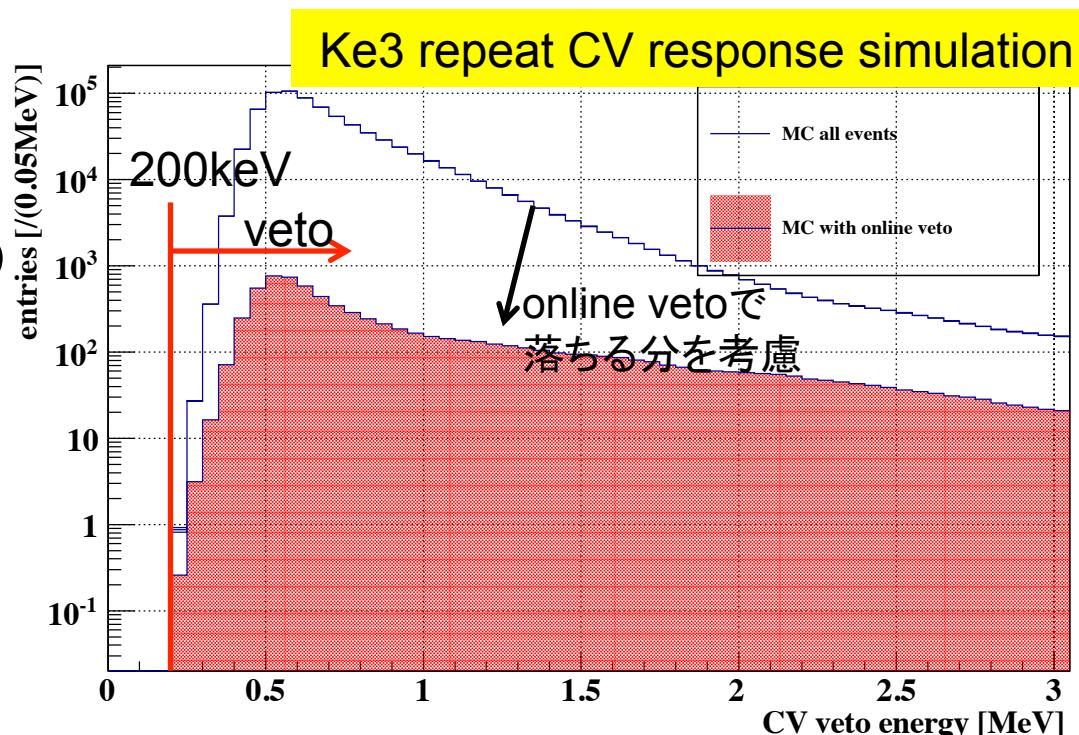
semi-leptonic崩壊

- ◇ $K_L \rightarrow \pi e \nu$ ($Ke3$, ~40%),
 $K_L \rightarrow \pi \mu \nu$ ($K\mu3$, ~27%)
 - ◇ 2つの荷電粒子の両方をCVで
 検出し損ねると, 2γ と誤認し,
 BGとなる
 - ◇ CVの不感率がポイント
 (光子数統計による不感率)
 - ◇ データで評価
 - ◇ CV以外のvetoを全て適用
 - ◇ CV上流層に200keV以上の
 エネルギーデポジットが
 あることを要求
 - ◇ 不感率(=閾値以下のイベントの割合)
 - ◇ データ : $(3.45 \pm 1.41) \times 10^{-5}$
 - ◇ MC : $(2.91 \pm 1.72) \times 10^{-5}$
 (200keV threshold)
- MCはCVの不感率をよく再現



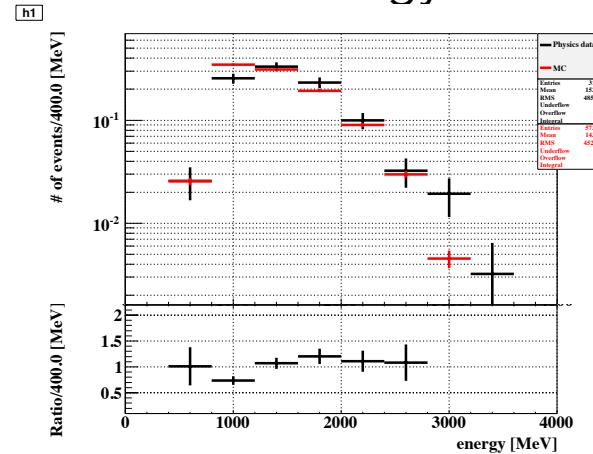
semi-leptonic崩壊

- ◆ CVのvetoと一部の運動力学的cutを外し, 残るイベントについてCVの検出器応答のsimulationを繰り返し行うことでBGを評価
 - ◆ 閾値200keVで完全に落とせている
 - ◆ BG上限値
 $<0.008 \text{ (90\% C.L.)}$
 - ◆ $K\mu 3$ はこの1/10程度の寄与
 - ◆ カロリーメーターでのクラスター形状のcutがよく効くため

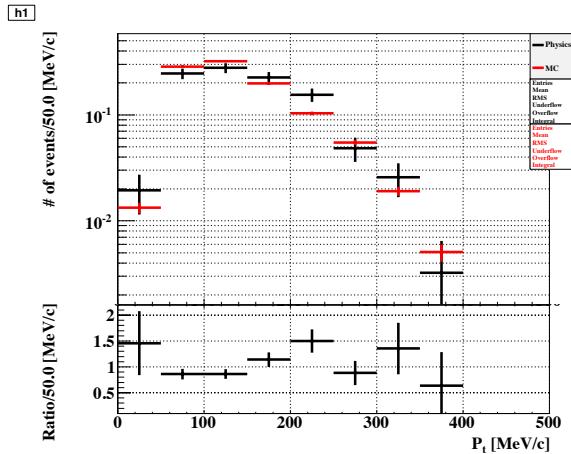


NCC Events

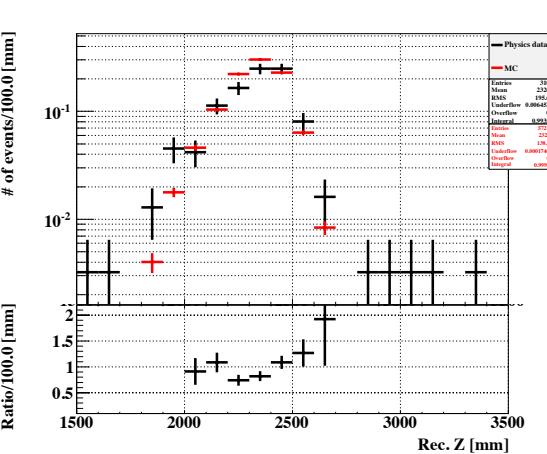
- w/ loose kinematical cut
- Total energy



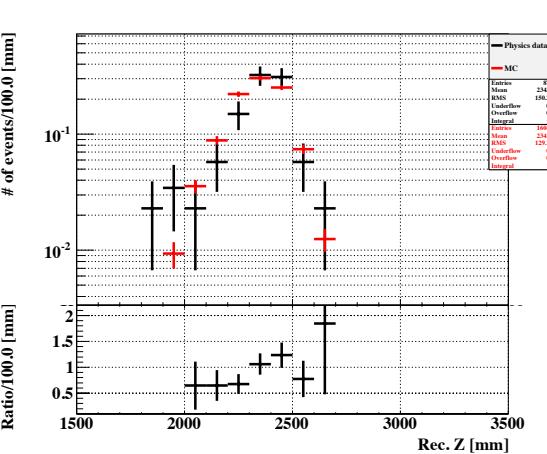
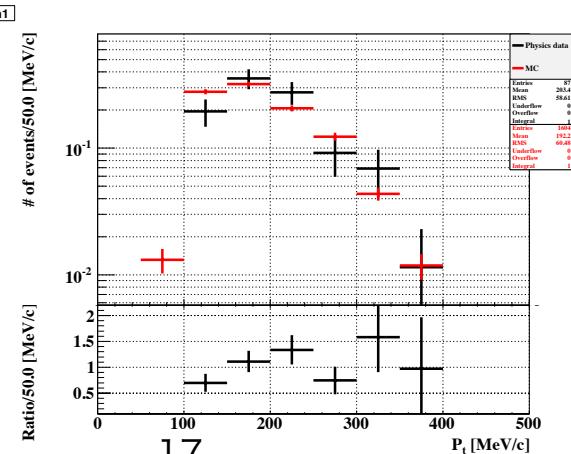
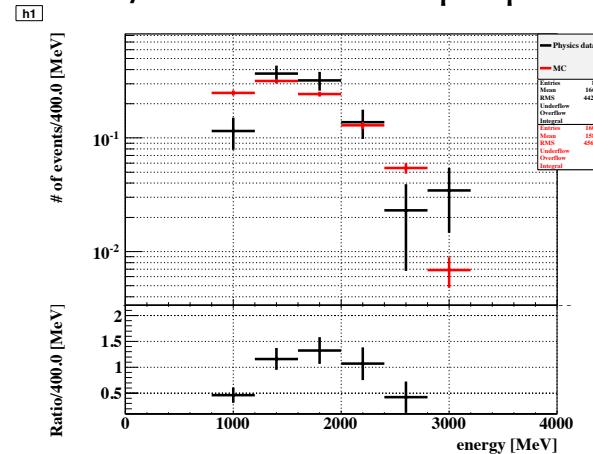
- Pi0 Pt



- Rec. Z



- w/ all cut except pt and z.

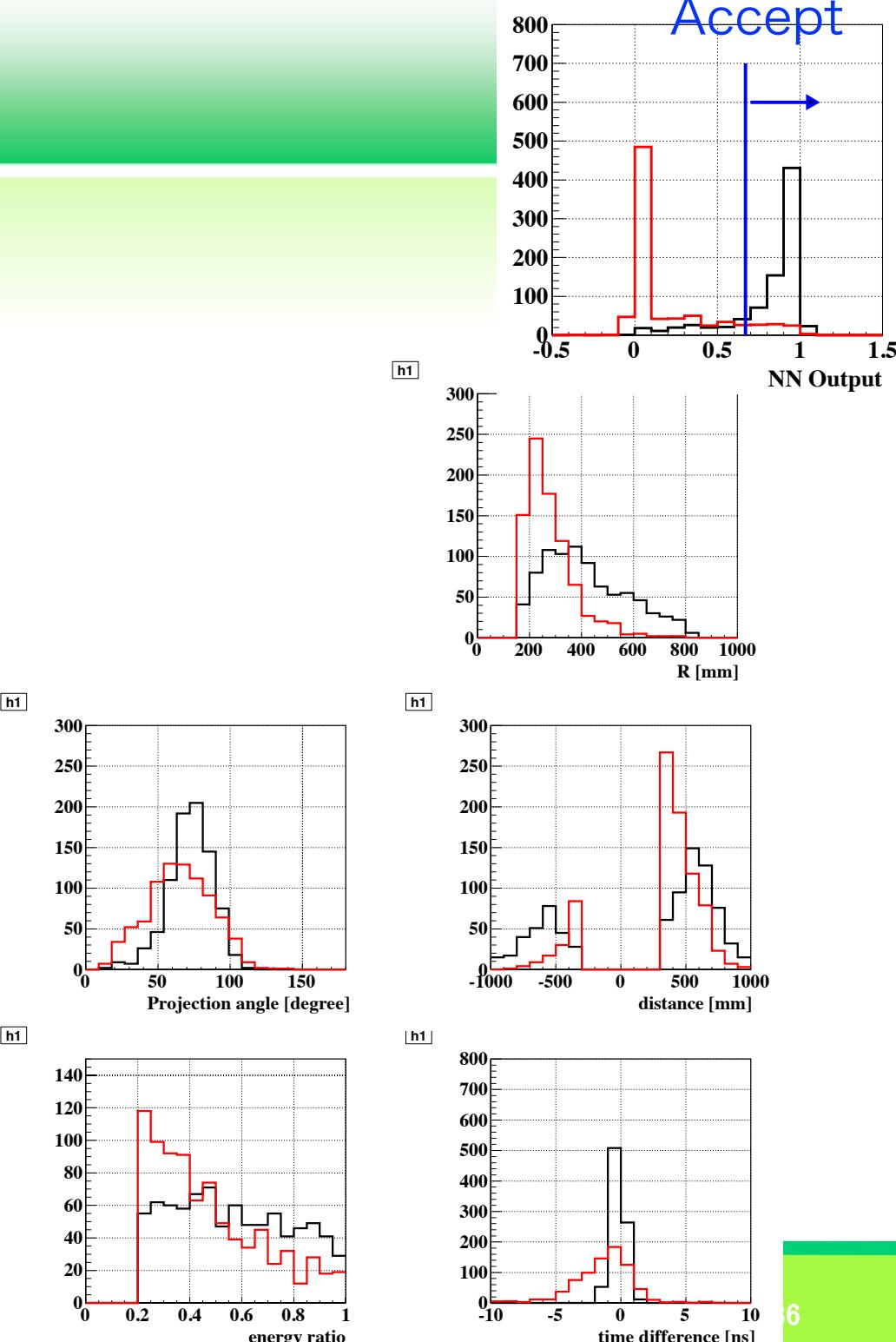


Neural Net Cut – 1

◆ kinematic NN

5 input parameters

- Hit position of a cluster with higher energy.
- Angle between two clusters on the CsI calorimeter
- Distance between two clusters
- Energy ratio between two clusters (E_{\min}/E_{\max})
- Time difference between two clusters



Neural Net Cut – 2

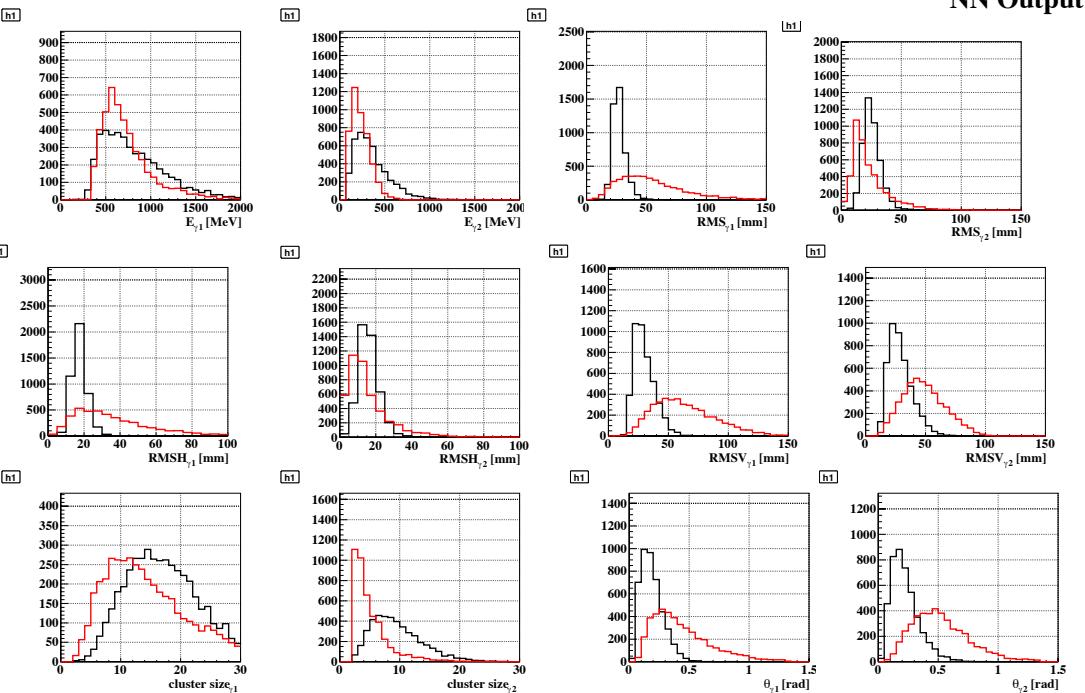
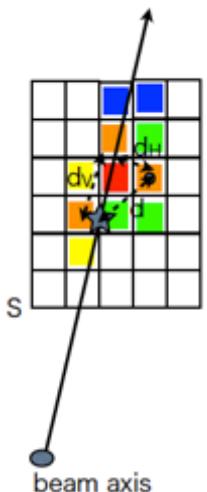
◆shape NN

- 12 input variables
 - gamma energies($E_{\gamma 1}, E_{\gamma 2}$)
 - Angles of two gammas to the beam axis($\theta_{\gamma 1}, \theta_{\gamma 2}$)
 - Three types of RMS
 - RMS,RMSV,RMSH

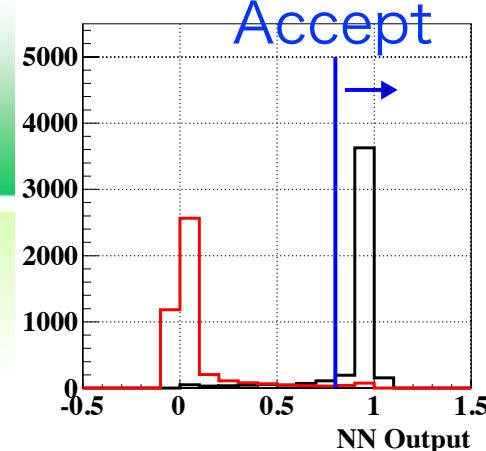
$$RMS^2 = \frac{\sum(d_i^2 \times E_i)}{\sum E_i}$$

$$RMSV^2 = \frac{\sum(d_{Vi}^2 \times E_i)}{\sum E_i}$$

$$RMSH^2 = \frac{\sum(d_{Hi}^2 \times E_i)}{\sum E_i}$$



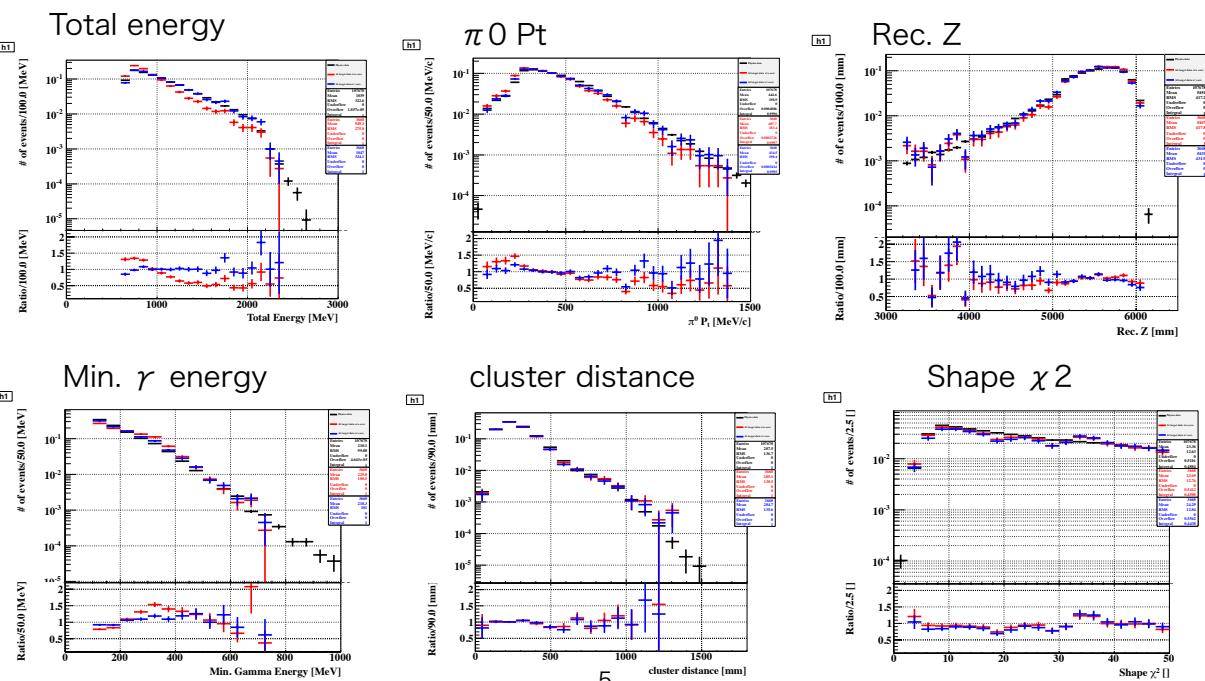
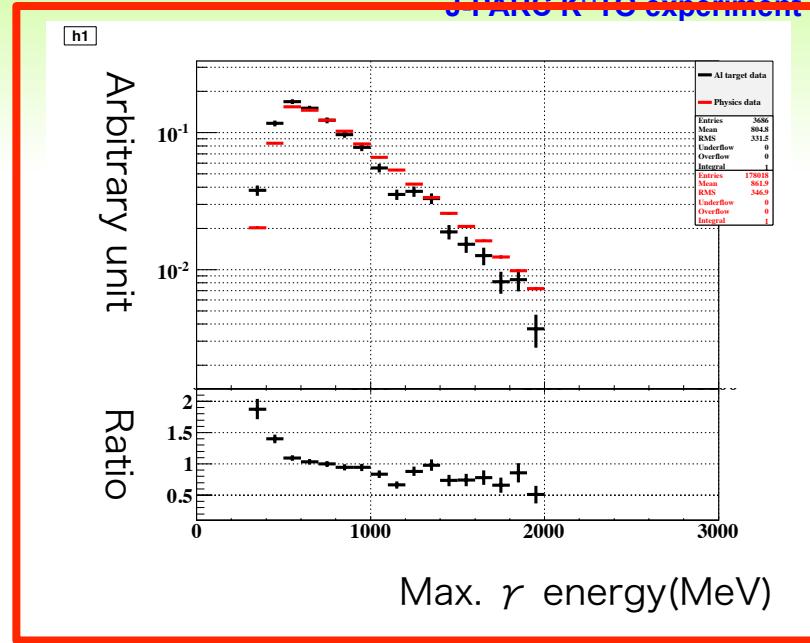
Black:signal MC
Red:AI target data



ハドロンクラスターBG

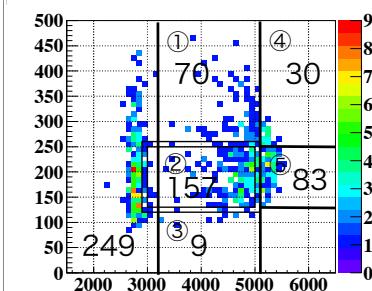


- ◆ アルミターゲットのデータを大きい方のエネルギーの分布が物理データに合うように補正.
- ◆ shape cut, NN cutのrejection powerを求めておき、補正したアルミターゲットのデータに適用.

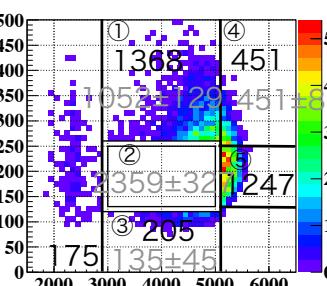


- w/o chi2, nn cut
Al target

physics

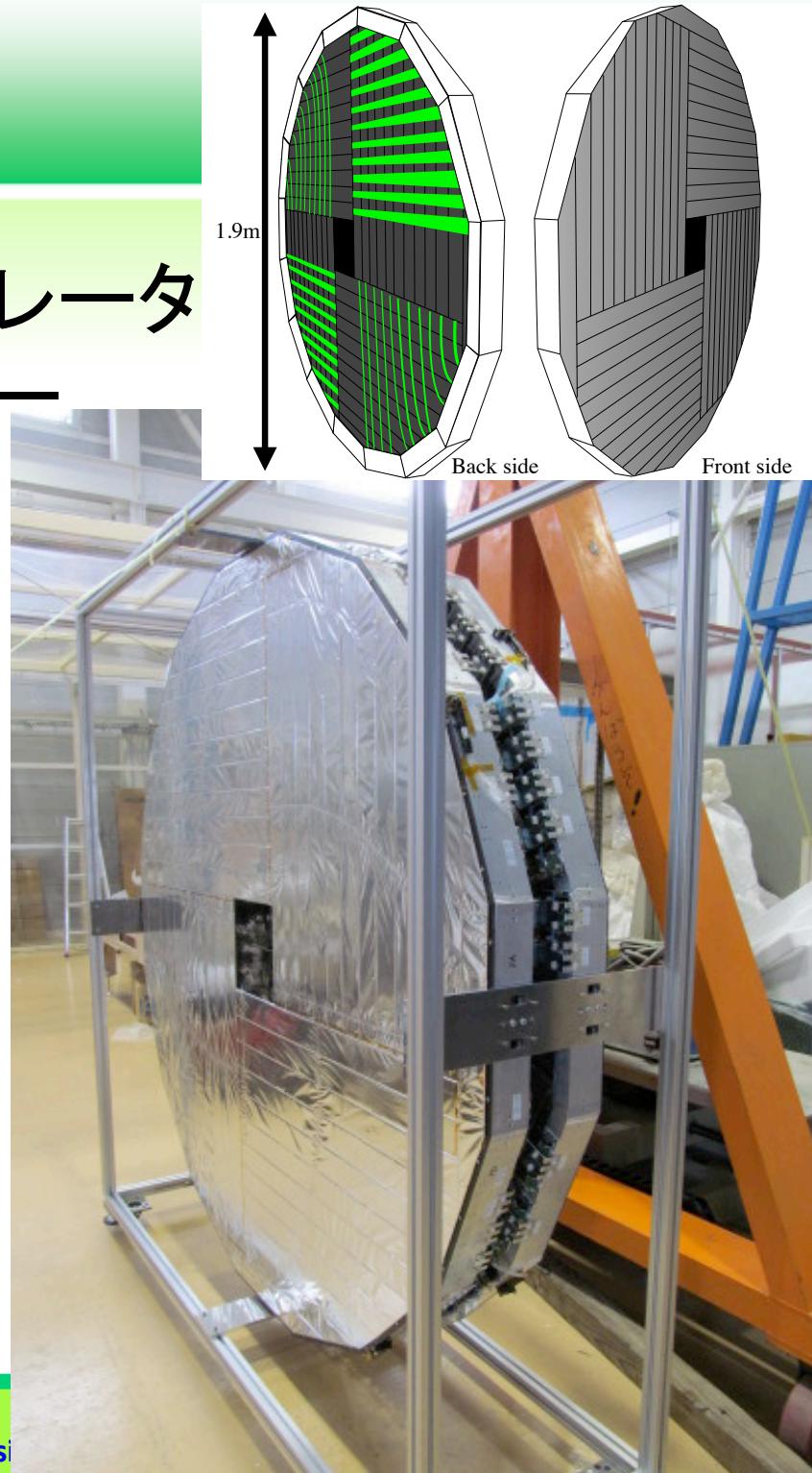
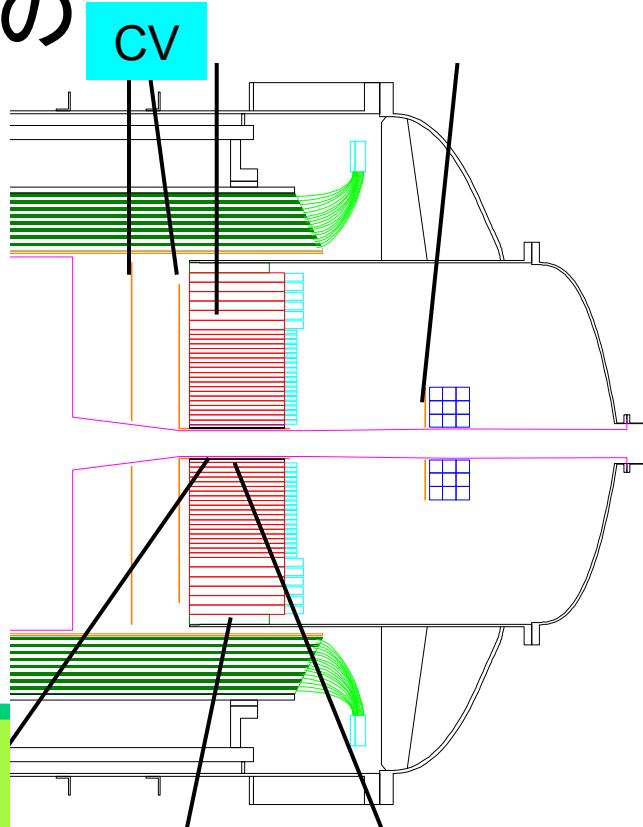


sity



荷電粒子検出器(CV)

- ◆ 3mm厚のプラスチックシンチレータ (BC404)+ 波長変換ファイバー (Y11-350)を直径2mの円内に敷き詰め
- ◆ front/rearの2層構造



2013年5月ランでのデータ収集状況



◇ 統計量

- ◇ ビーム強度24kW K_L ビーム
- ◇ 5日間データ取得

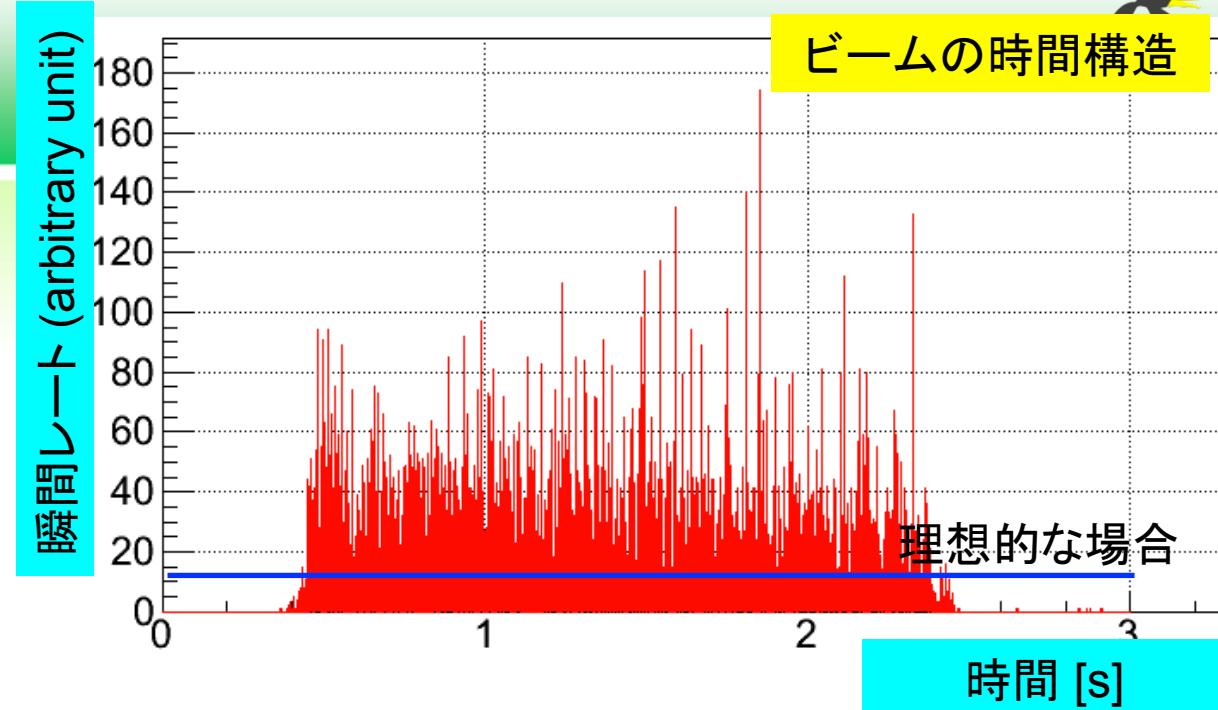
◇ 検出器

- ◇ 一部veto検出器は段階的に増強
 - ◇ Main Barrel : 内側にモジュールを追加予定
 - ◇ BHCV : プラスチックシンチレータ → ガス検出器
 - ◇ BHPV : 予定のモジュール数($\times 2$)に増やす
- ◇ カウンティングレート
 - ◇ ビームの時間構造が一様でない事より約2倍の瞬間レート.
 - ◇ 外からのactivity(一次ビームラインからの散乱粒子)で Main Barrel等の検出器で想定の10倍程度のレートに.

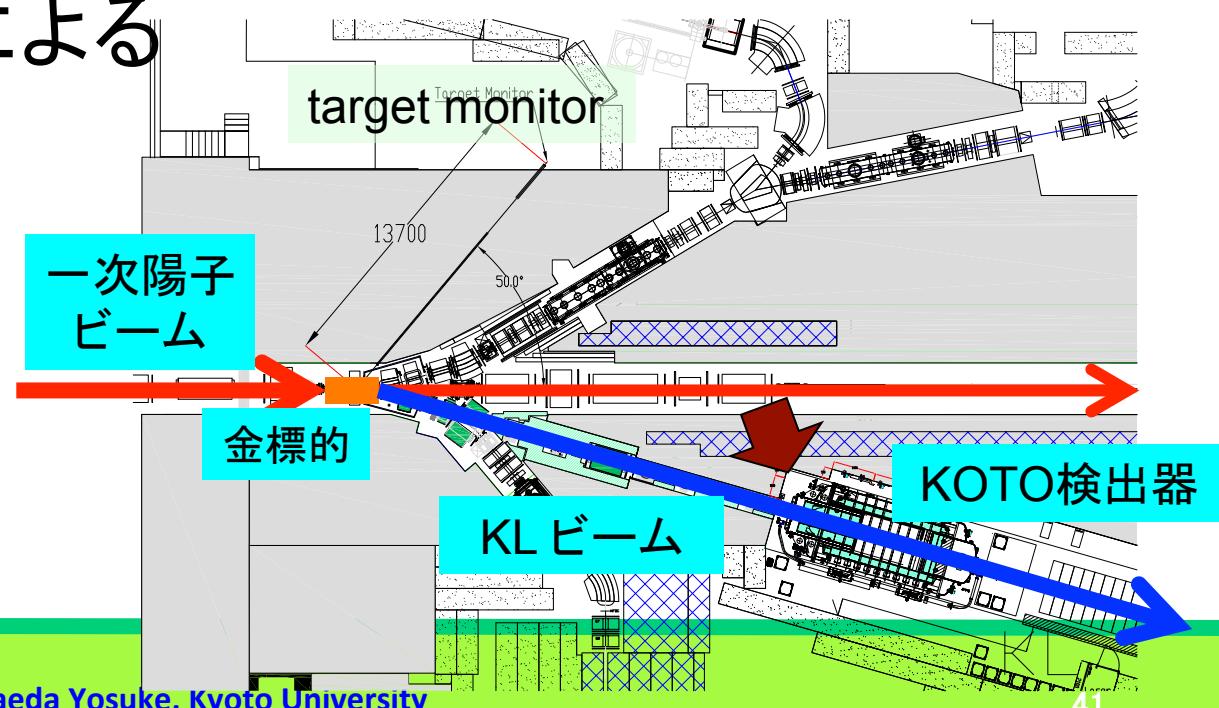
高レート環境

◆ビームの時間構造

◆平均して理想的な場合の2倍の瞬間レート



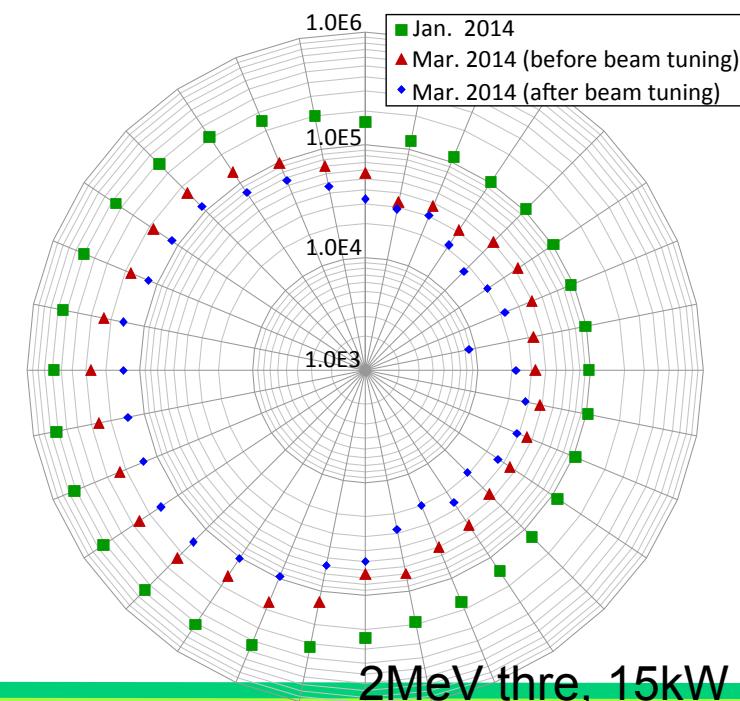
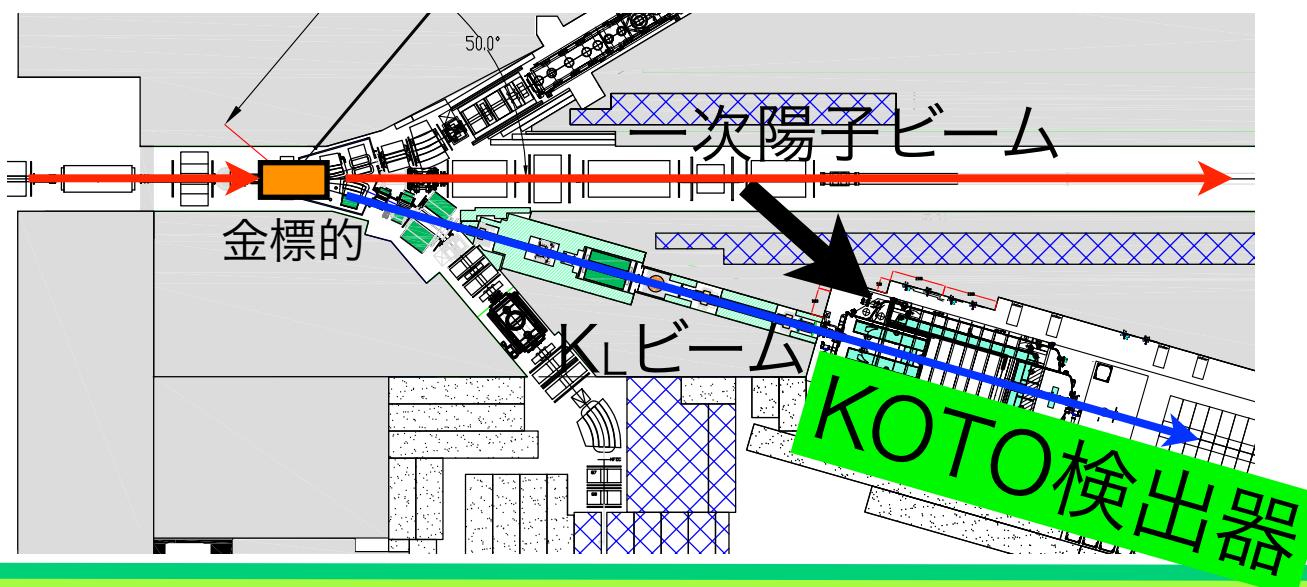
◆外からのactivityによるレートの上昇



一次ビームラインからの影響



- ◇シールドの弱い部分から、一次ビームからの散乱粒子が検出器に入り、カウントレートがオーダー上がっている。
- ◇水タンクを設置することで軽減



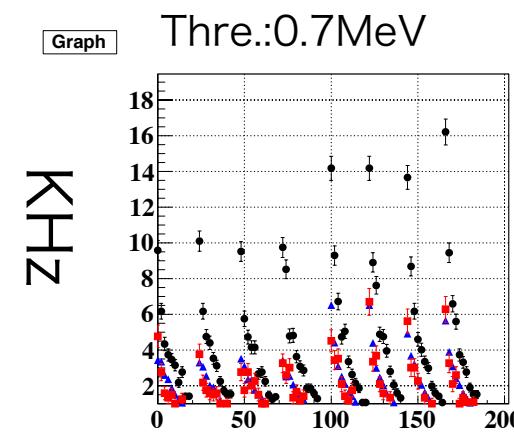
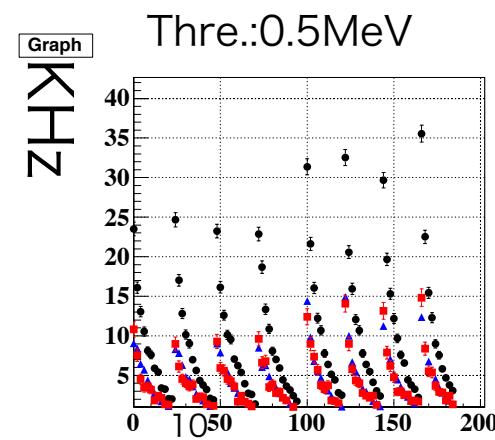
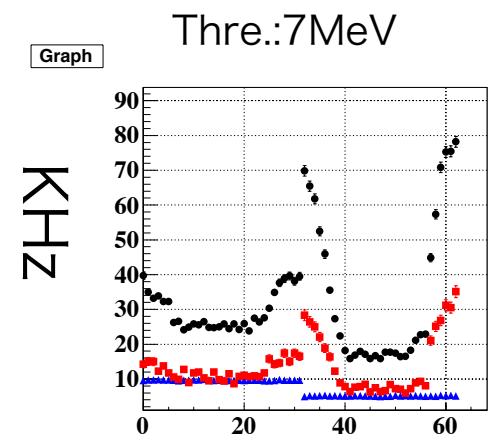
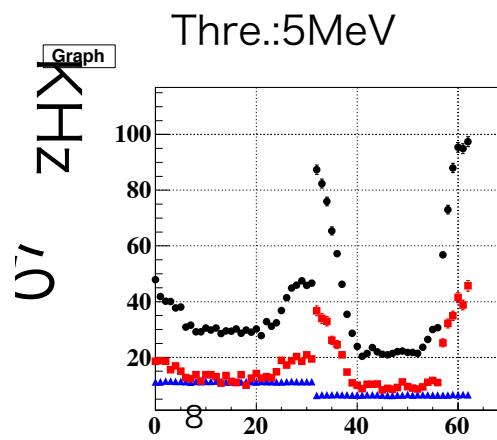
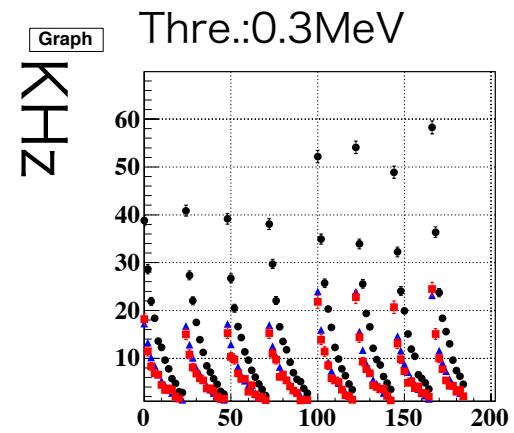
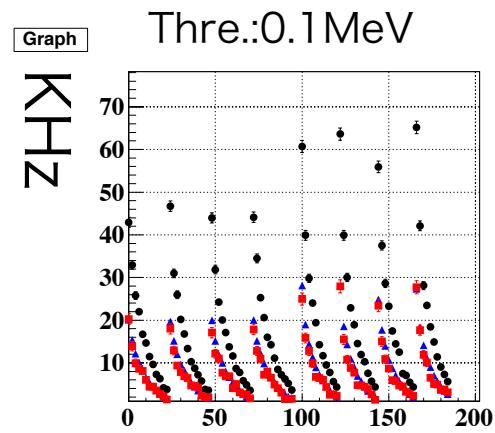
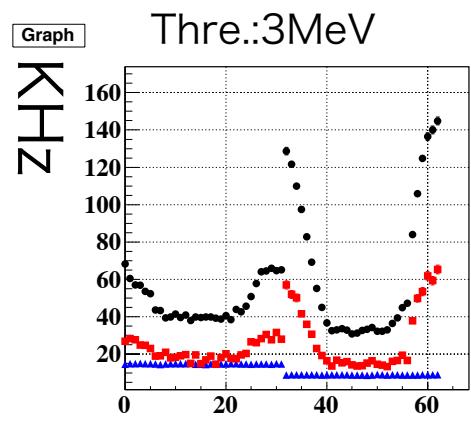
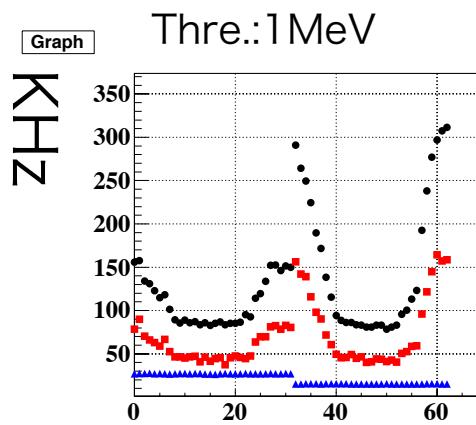
detector counting rate



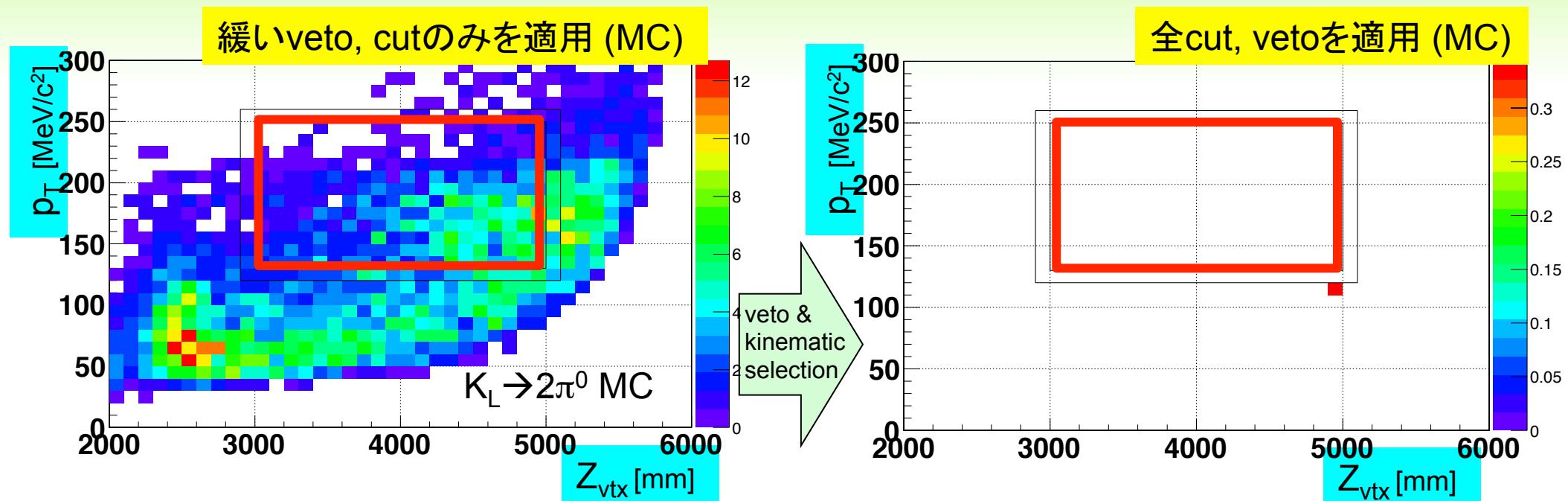
◆ MB

CV

black : rate by TMon trigger
red : rate by clock trigger
blue : MC



レートの影響を考慮しないsimulation

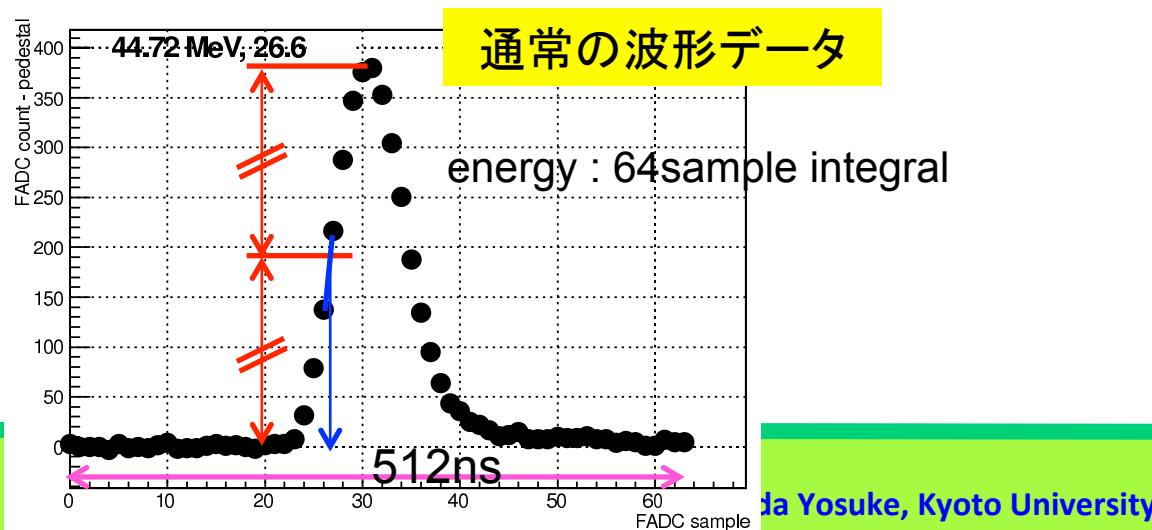


統計量：データの約3倍

- ◇全ての事象選択を行った結果
→信号領域にイベントは残らず
veto検出器のinefficiencyは低く抑えられている

accidental hitによるmasking effect

- ◆ データは125MHz FADC + shaper で波形を取得
→ 1イベントに1波形を想定



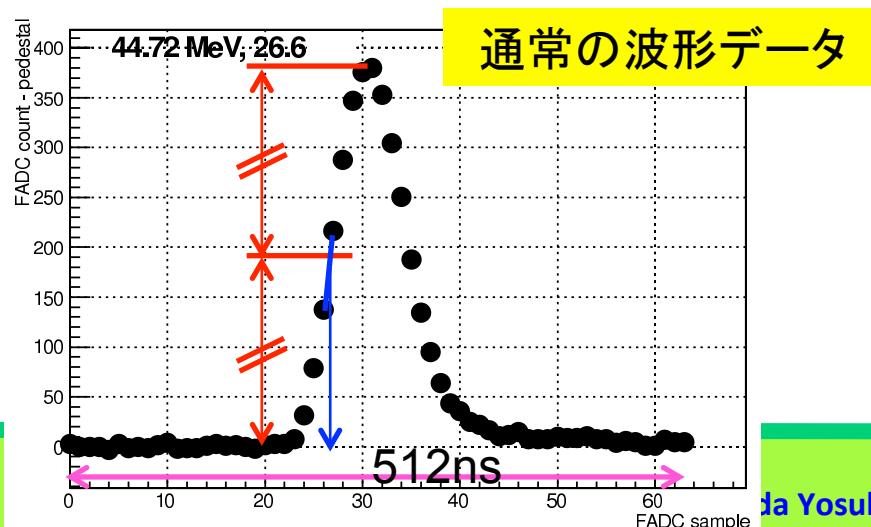
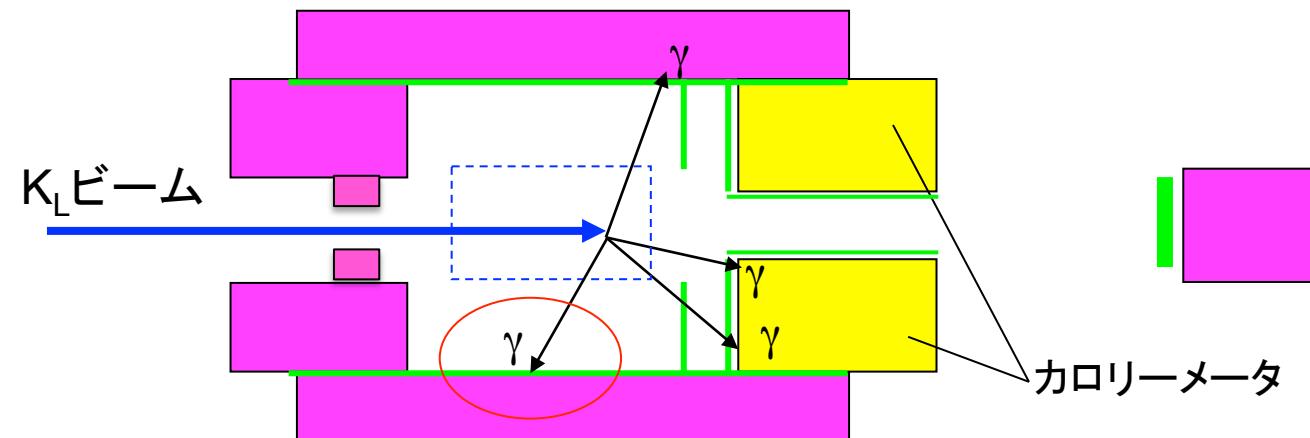
accidental hit

- ◆ データは125M
→ 1イベントに1

- ◆ 高レート環境 → アクシデンタルhitが発生

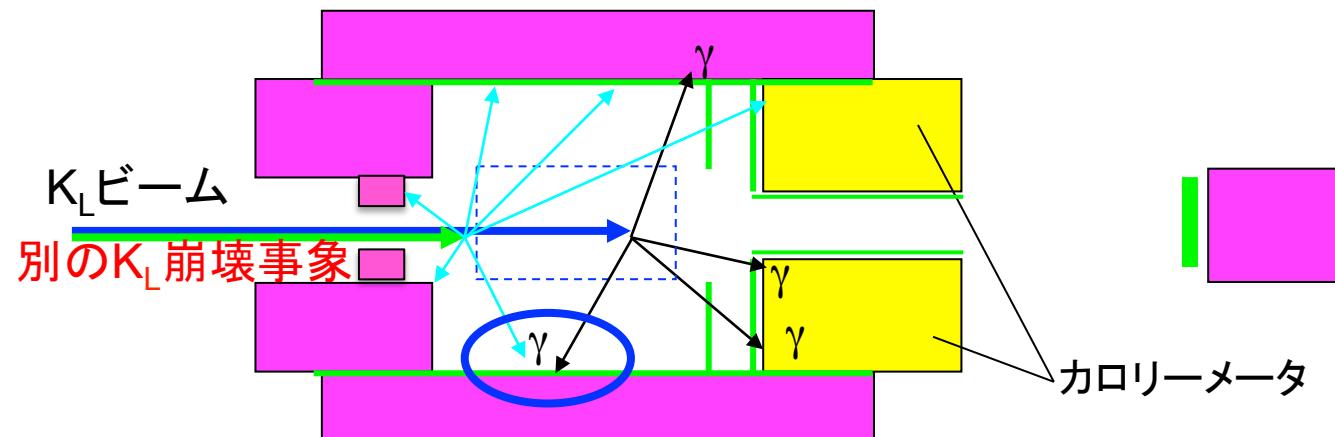
- ◆ タイミングが誤って計算され, vetoし損ねてしまうことにより inefficiency が発生 (**masking effect**)

- ◆ 例えば, single rate 10kHz
→ 0.5%の確率で500nsにアクシデンタルhitが混入



accidental hit

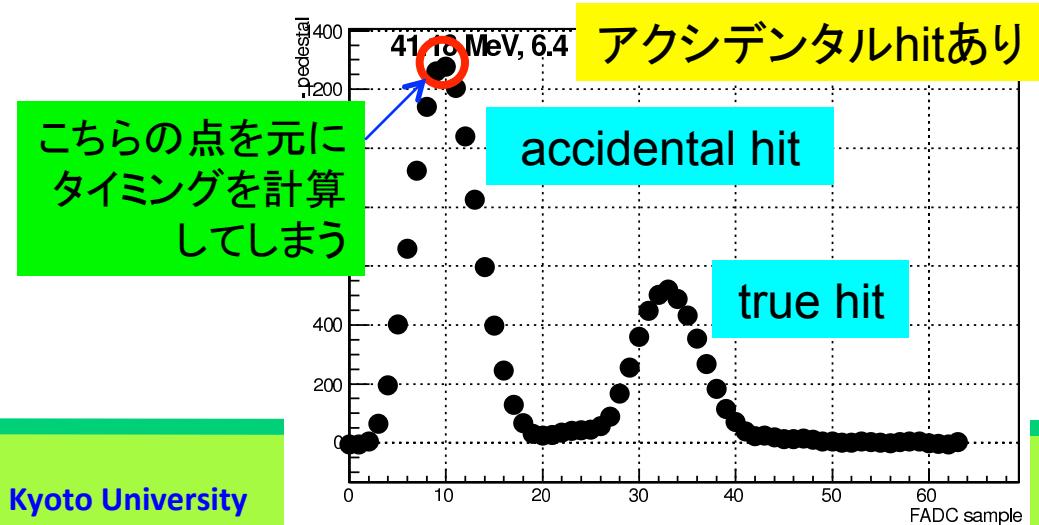
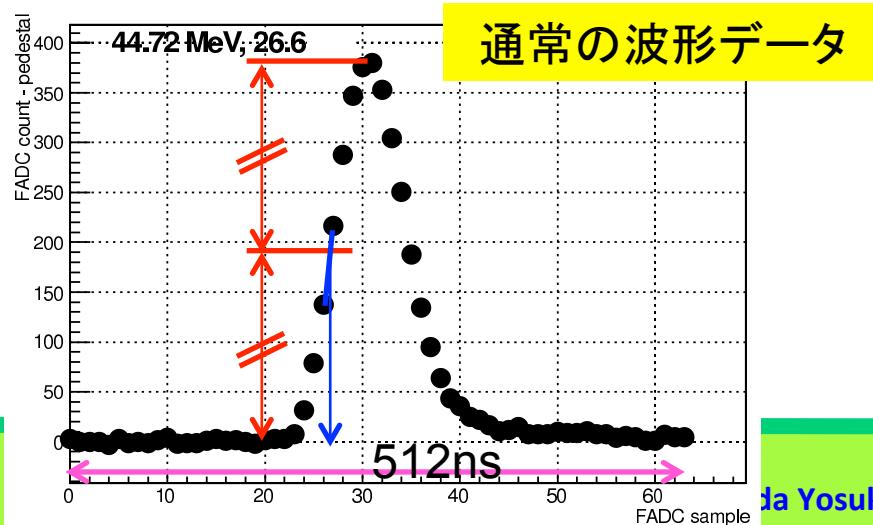
- ◆ データは125M
→ 1イベントに1



- ◆ 高レート環境 → アクシデンタルhitが発生

◆ タイミングが誤って計算され, vetoし損ねてしまうことによりinefficiencyが発生(**masking effect**)

◆ 例えば, single rate 10kHz
→ 0.5%の確率で500nsにアクシデンタルhitが混入



MCに於ける波形simulation

◆ MCもデータと同じ波形解析

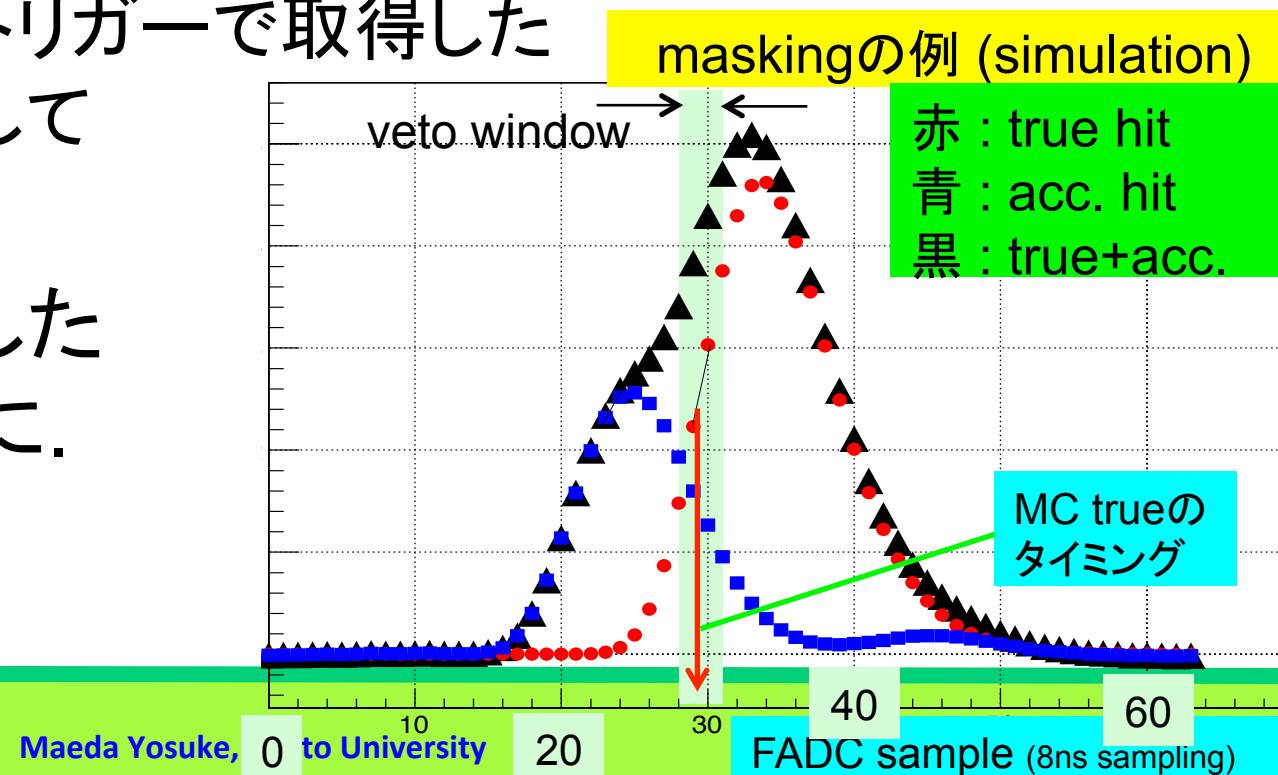
◆ trueのhit情報から擬似的に波形を生成.

- ◆ asymmetric gaussianの波形を仮定
- ◆ 積分値がenergy depositを表すよう規格化し, timingの分だけずらす.

$$A \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{(\sigma_0 + a(x - \mu))^2}\right)$$

◆ アクシデンタルトリガーで取得したデータを波形として足し合わせ.

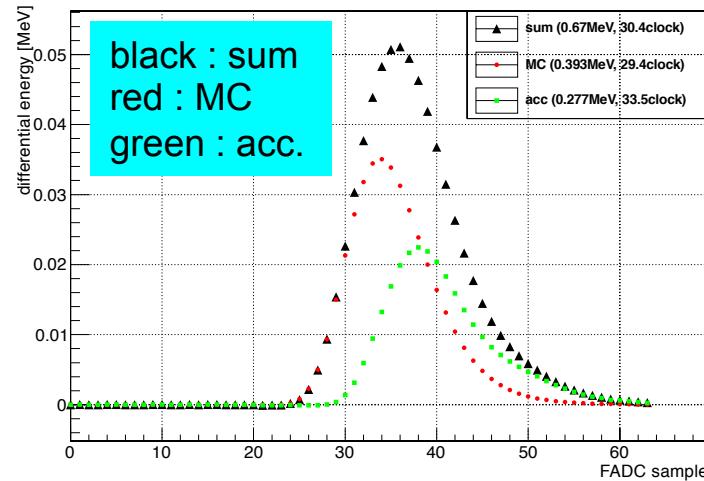
→より現実を反映した simulationが可能に.



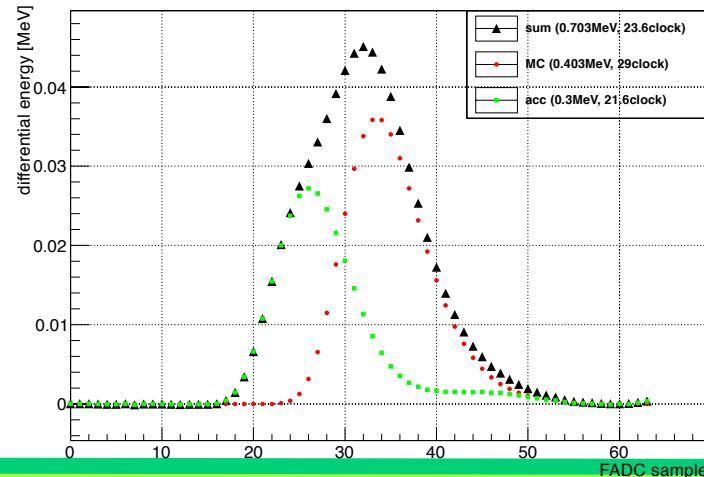
波形generation

◆CVの場合

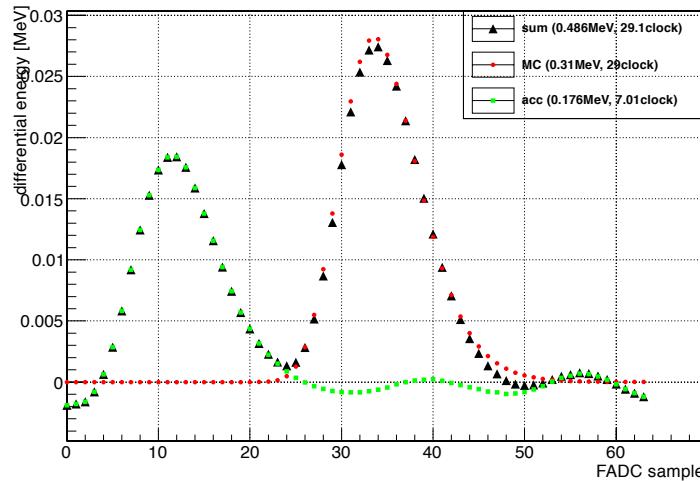
ModID : 174, AccidentalEntryNo : 34817



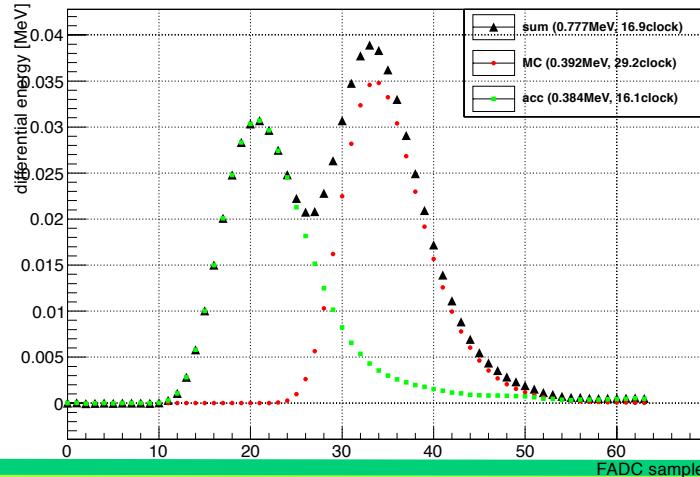
ModID : 102, AccidentalEntryNo : 47036



ModID : 76, AccidentalEntryNo : 38098



ModID : 102, AccidentalEntryNo : 38015



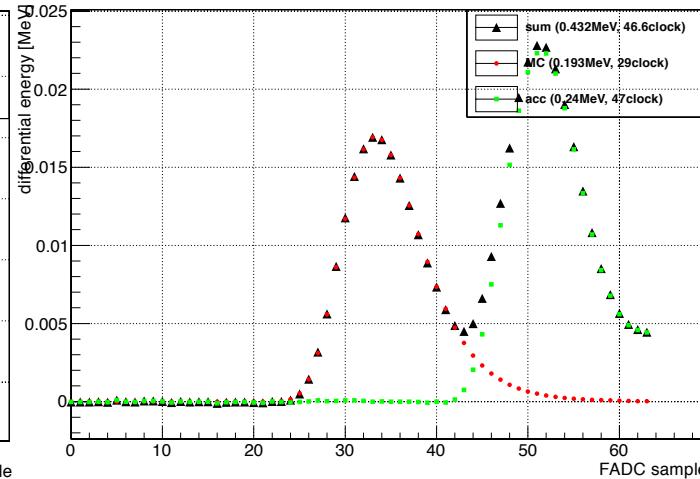
$$A \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{(\sigma_0 + a(x-\mu))^2}\right)$$

$$\mu = 36.024\text{ns}$$

$$\sigma_0 = 48.30$$

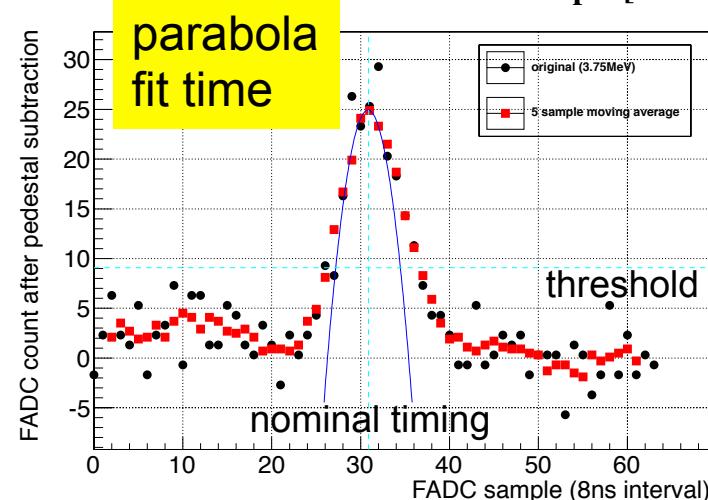
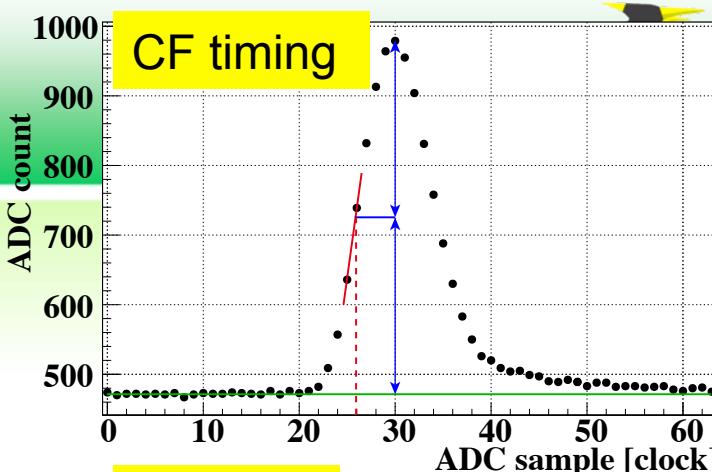
$$a = 0.1512 \pm 0.01953$$

ModID : 2, AccidentalEntryNo : 14858

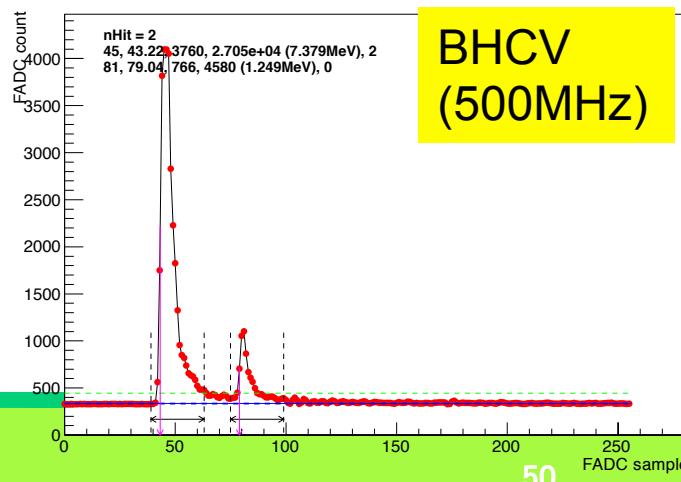


waveform analysis

- ◆ detectors with 125MHz FADCs
 - ◆ one energy and timing for each event and each channel
 - ◆ energy : integration of 64 sample
 - ◆ timing :
 - ◆ CF timing for CsI
 - ◆ parabola fit timing for veto detectors
 - ◆ 3 points around the peak are fitted by parabola function
 - ◆ more robust to pulse-overlapping than CF timing
 - ◆ more accidental loss
- ◆ detectors with 500MHz FADCs
 - ◆ Multi-hits are considered.
 - ◆ Data production of latest version (pro4) has completed.



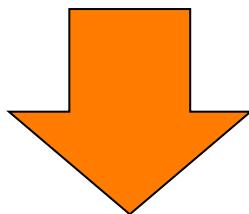
BHCV ch6, SpillNo:0, EventNo:29 - run00016800



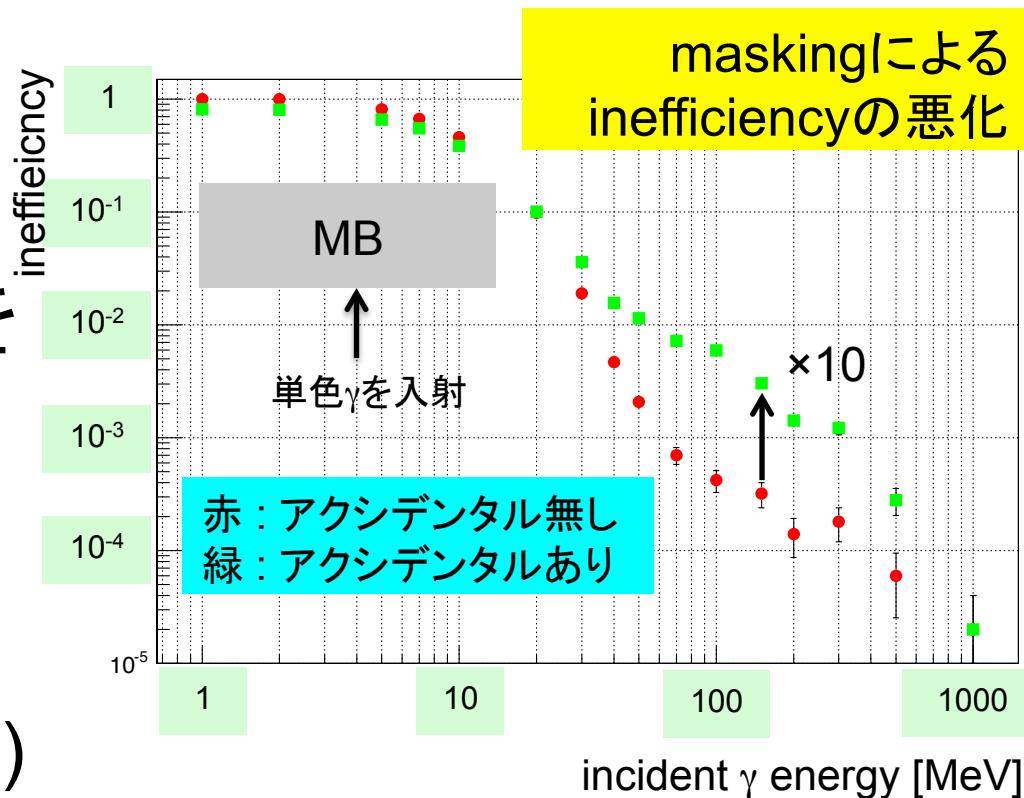
estimation of BG due to masking effect



- ◆ 単一 γ MC+データからのアクシデンタルhitを考慮
→ 10倍程度のinefficiencyの悪化が見込まれる。



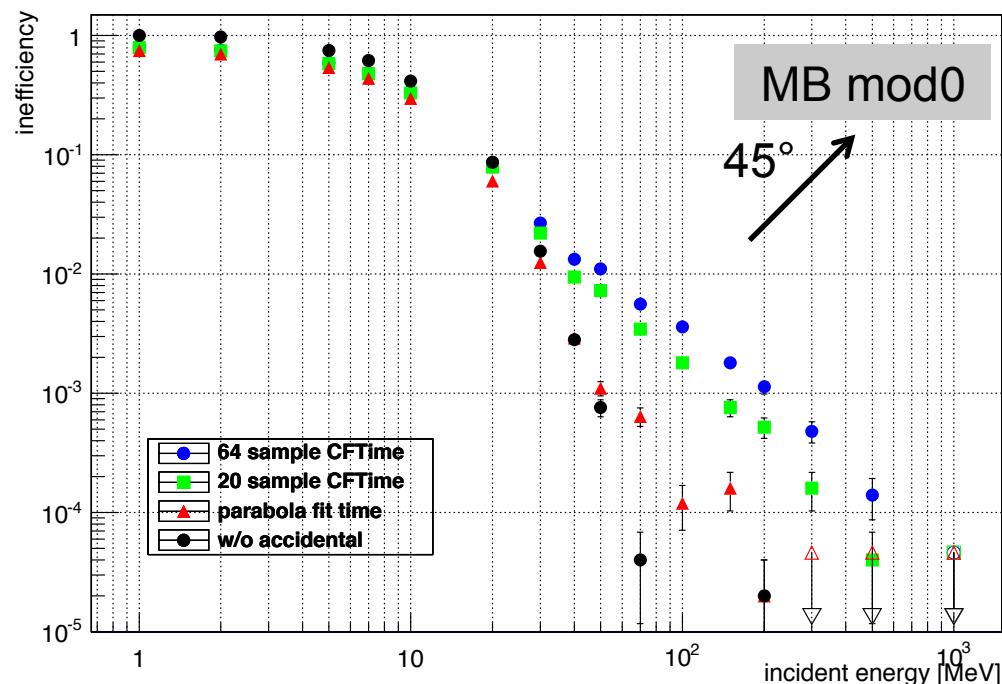
- ◆ 高レート環境での影響を考慮した解析が必要
 - ◆ 波形解析の導入
 - ◆ MC : 波形simulation
 - ◆ ハード面での改善 (将来)



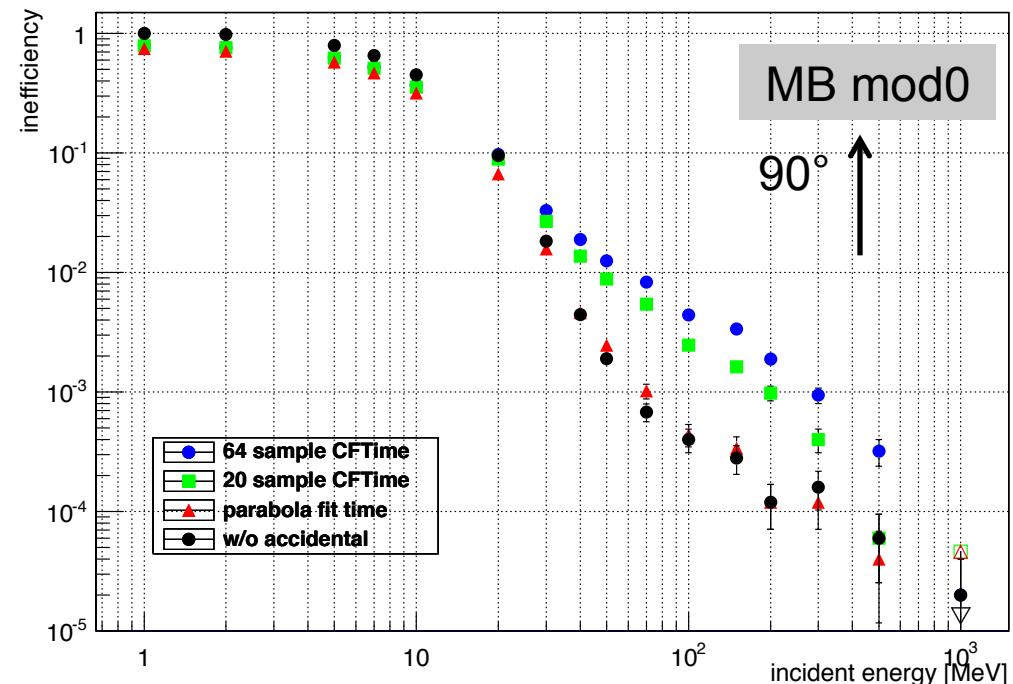
MB inefficiency function

- ◆ MB inefficiency to mono-energy γ is checked again w/ waveform simulation
 - ◆ almost same inefficiency is achieved w/ parabola fitting method.

MB inefficiency function (45 incident, w/ BCV, 2MeV thre., w/ accidental)



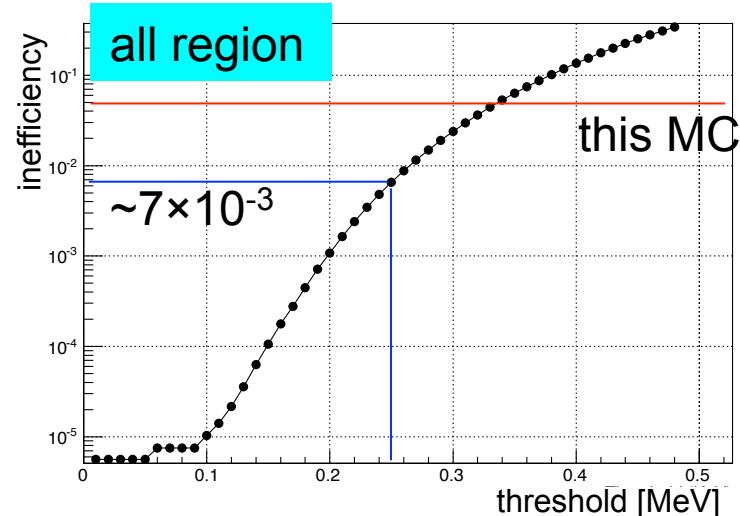
MB inefficiency function (90 incident, w/ BCV, 2MeV thre., w/ accidental)



comparison w/ Jun2012 run

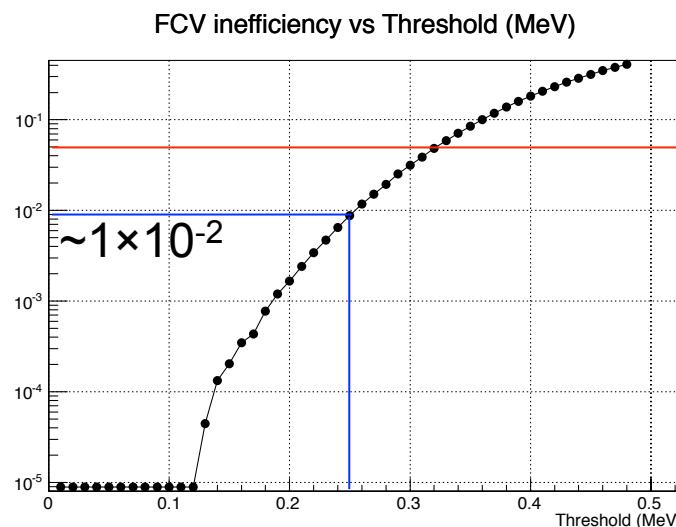


◆ compare inefficiency w/ result of Jun2012 run

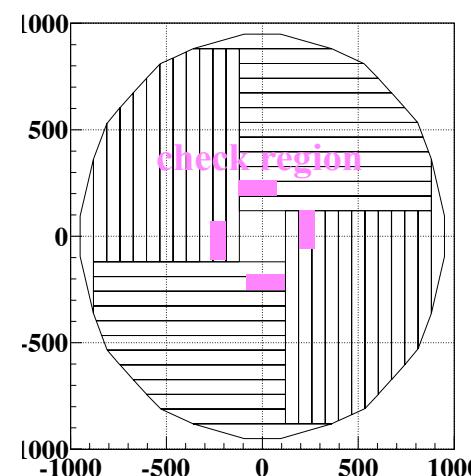
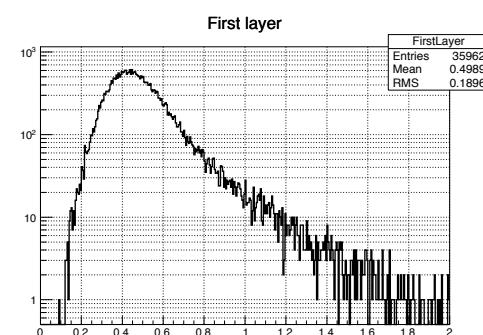
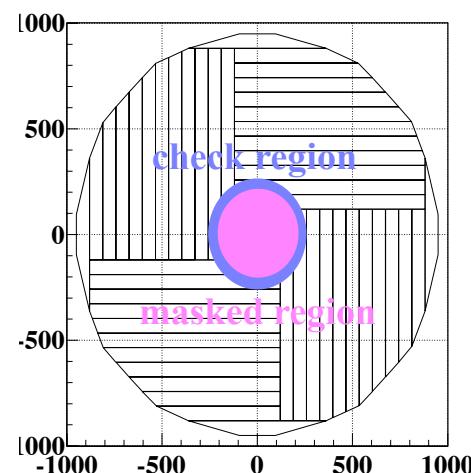


Jun2012 ineff.

front plane
no timing cut



study by D. Naito

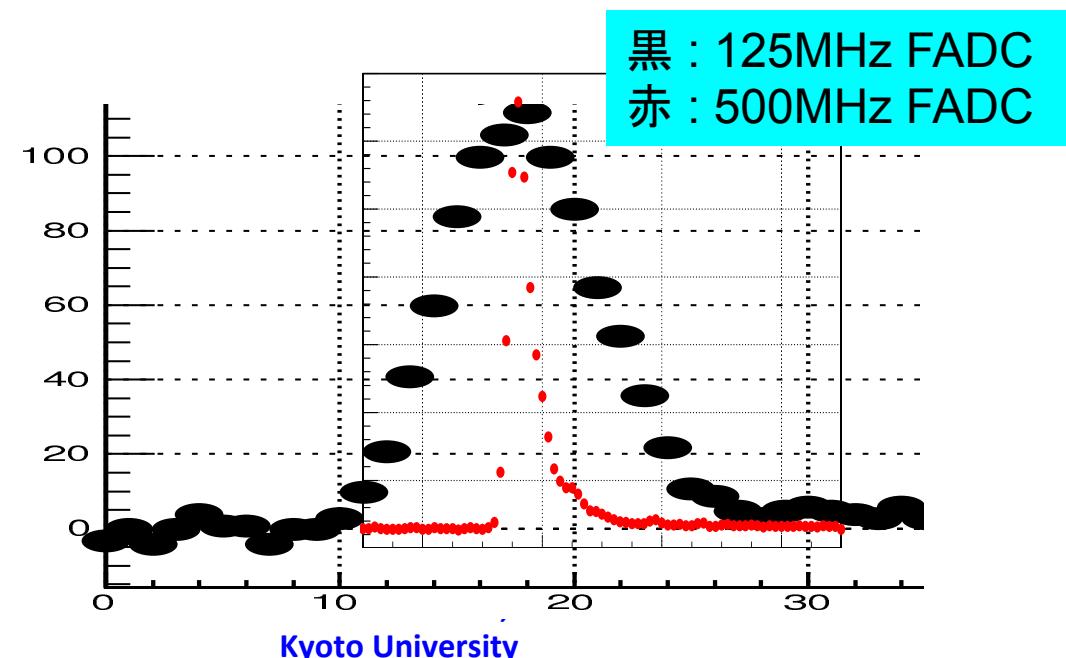
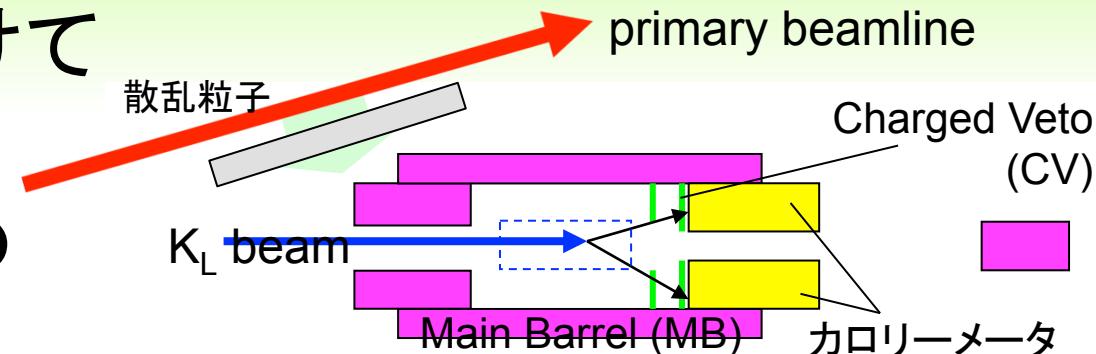


prospect (ii)

◇ 次回の物理ランに向けて

◇ シールドの強化により
1次ビームラインからの
activityを軽減

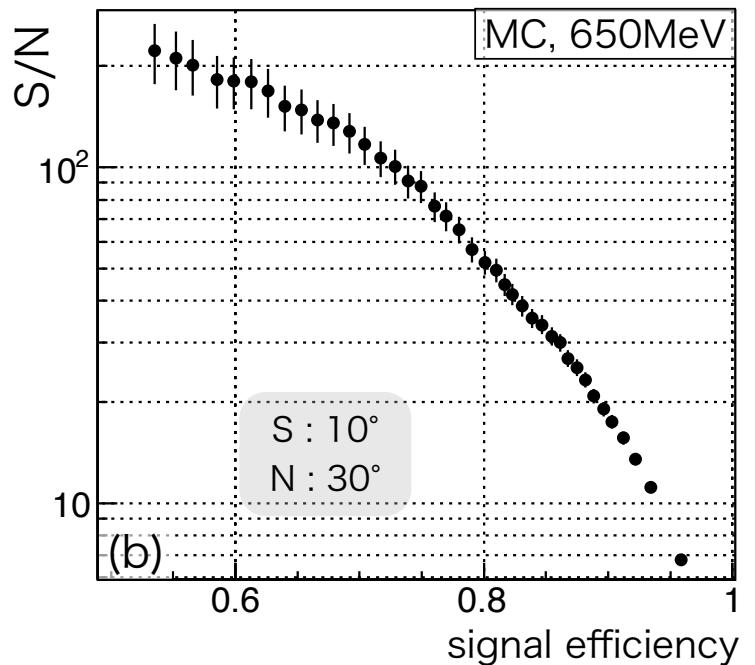
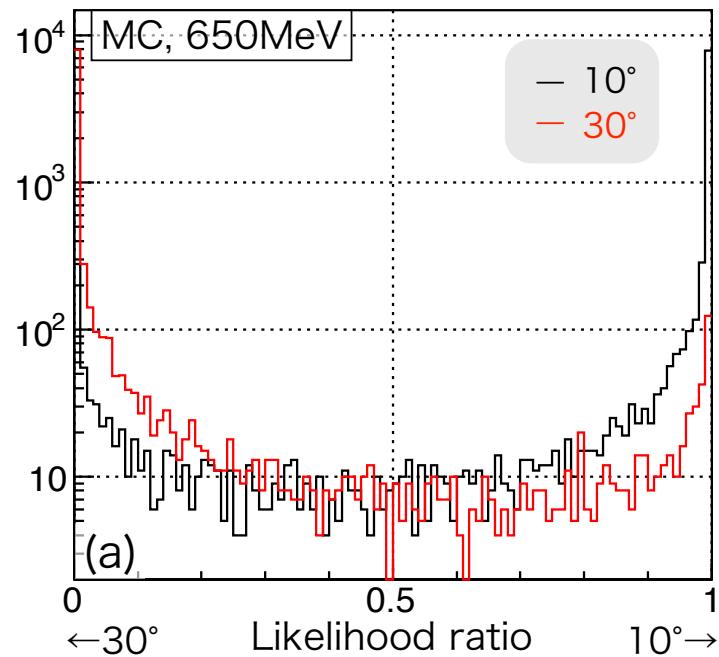
◇ 500MHz FADCにより
波形をshapingせず
読み出すことも検討



γ incident angle discrimination

$$L_i = \prod_{j;\gamma} \prod_{x,y} \prod_{k;\text{row}} P(e_k | E_j, d_k, \theta_{ij}, \phi_{ij}) ,$$

$$\text{Likelihood Ratio} = \frac{L_{\text{signal}}}{L_{\text{signal}} + L_{\text{background}}} .$$



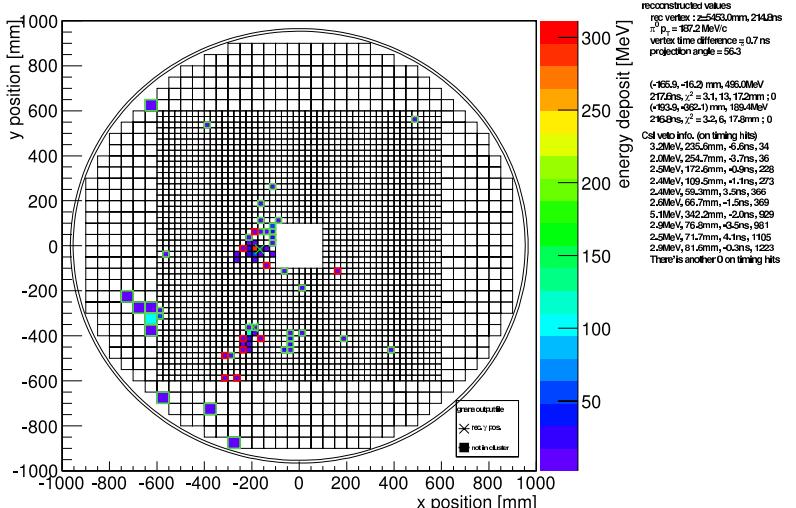
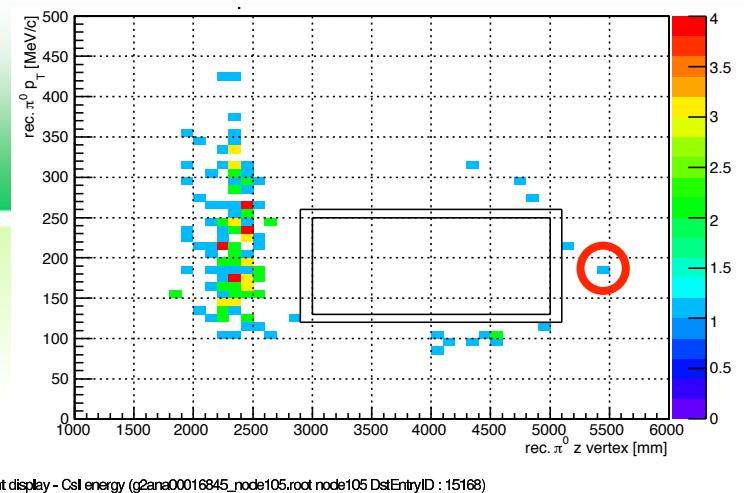
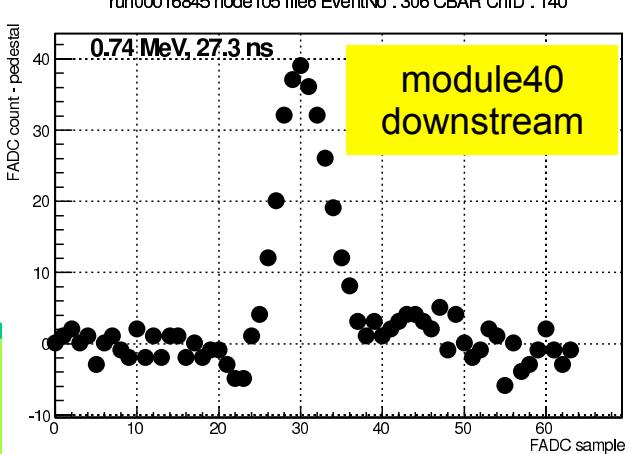
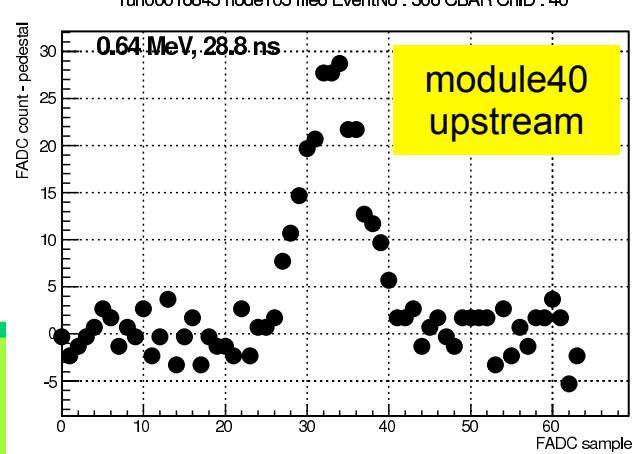
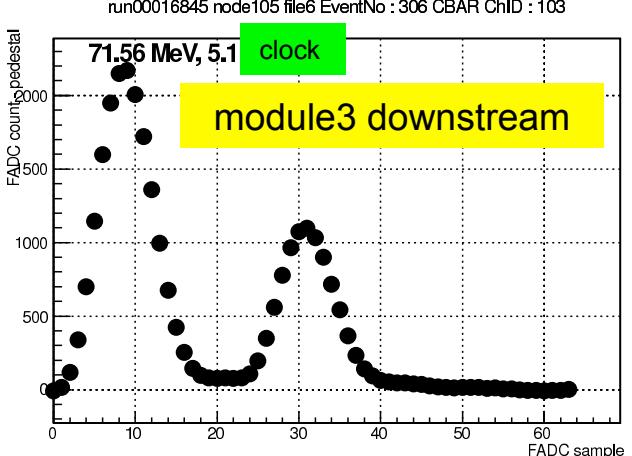
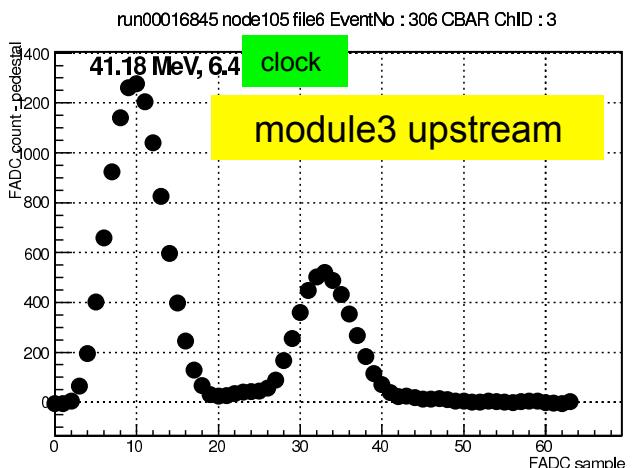
from PhD thesis by E. Iwai

masking event

◆ run00016845, node105, file6

EventID 306 (DstEntryID : 15168)

◆ Hit in MB mod3 is masked.

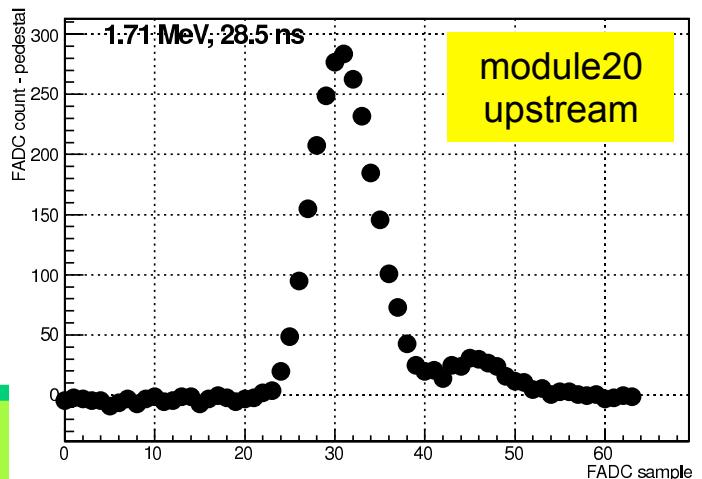


*module40 have hits w/o masking, but its energy is too small

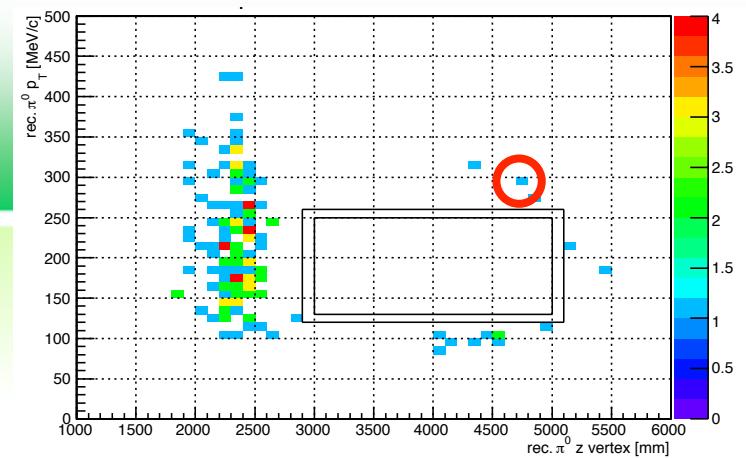
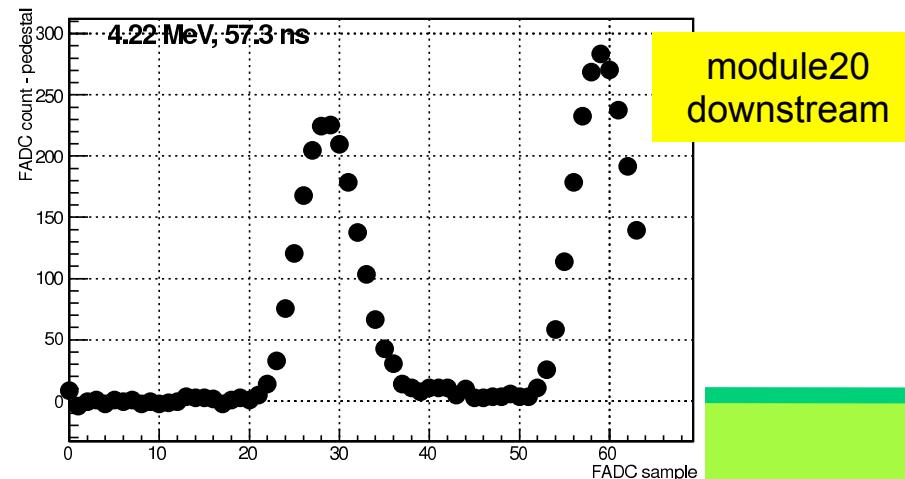
masking event

- ◆ run00016897, node014, file6
- EventID 484 (DstEntryID : 15640)
- ◆ Hit in BCV mod20

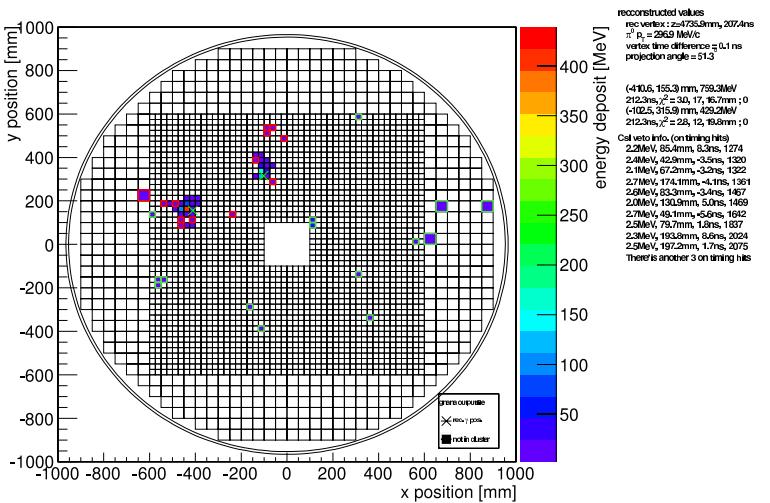
run00016897 node014 file6 EventNo : 484 BCV ChID : 20



run00016897 node014 file6 EventNo : 484 BCV ChID : 120



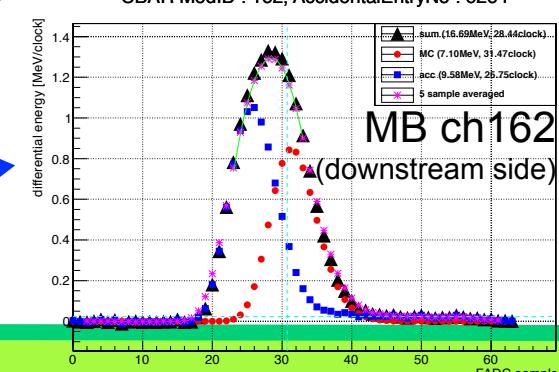
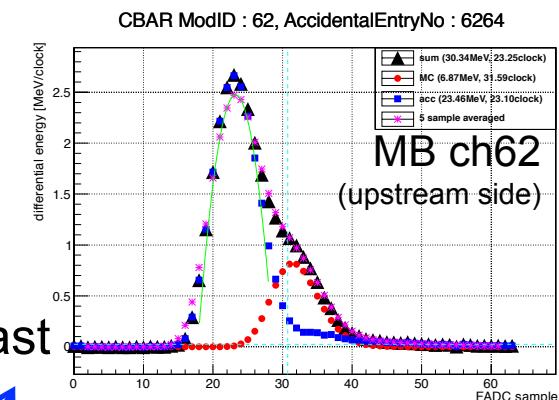
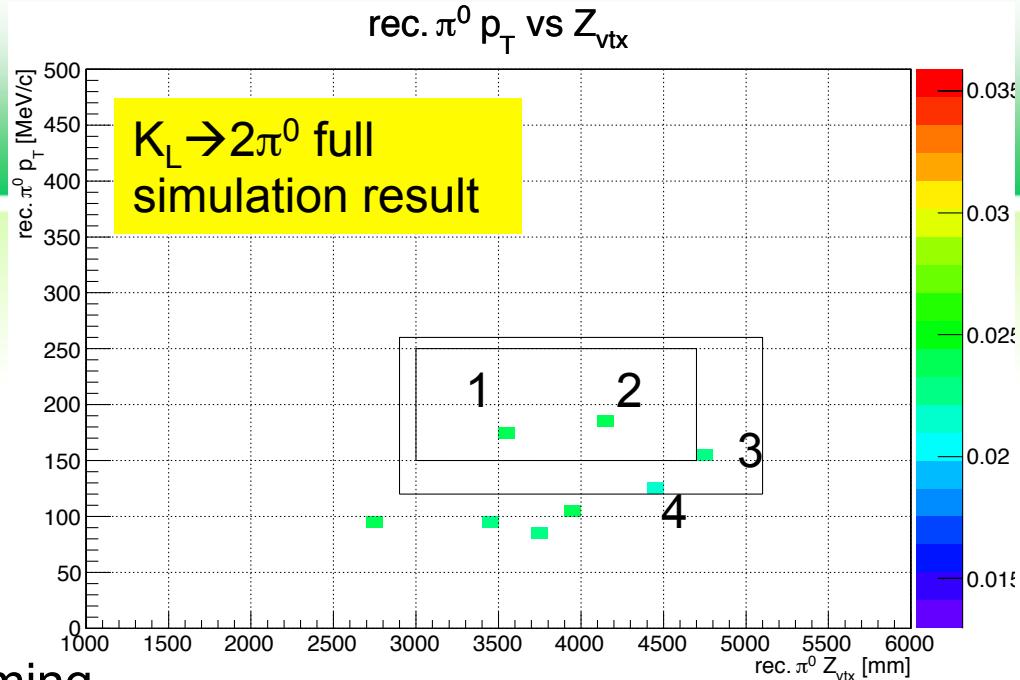
event display - Csi energy (g2ana00016897_node014.DstEntryID : 15640)



$K_L \rightarrow 2\pi^0$

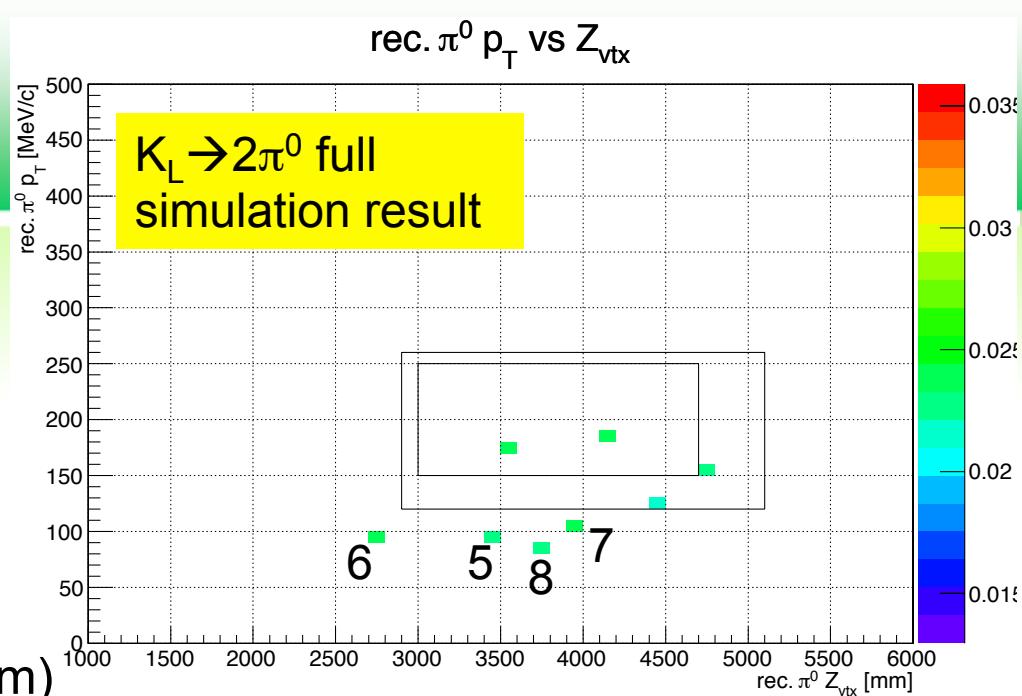
◇ with accidental

- ◇ 1. MB_(24.1MeV)-COVER(362MeV)
 - ◇ even pair
 - ◇ 1.09MeV E_{dep} in MB (w/o acc.)
- ◇ 2. MB_(12.6MeV)-COVER(464MeV)
 - ◇ even pair
 - ◇ no visible energy within veto timing
(2.0MeV E_{dep} 38ns from the nominal timing while the veto window is ± 30 ns)
- ◇ 3. MB_(25.3MeV)-BHPV(3.6GeV)
 - ◇ odd pair
 - ◇ 1.97MeV E_{dep} in MB (w/o acc.)
 - ◇ γ on BHPV : converted at the 2nd module from the last
(x=-61.4mm, y=-92.8mm)
- ◇ 4. masking (MB_(67.0MeV)-COVER(139.8MeV))
 - ◇ even pair
 - ◇ 14.0MeV E_{dep} in MB w/o accidental ;
but the timing is shifted due to the accidental hit and not used in veto



$K_L \rightarrow 2\pi^0$

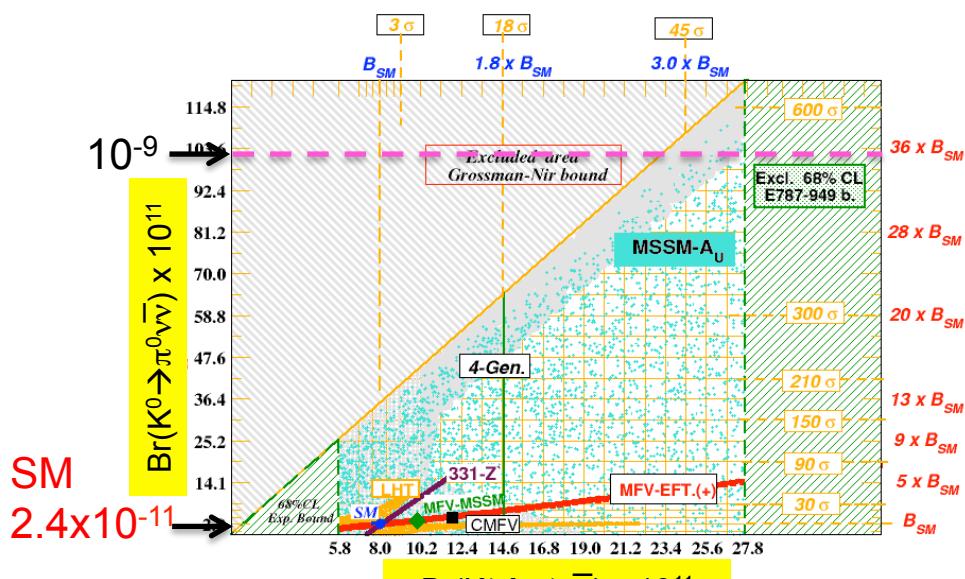
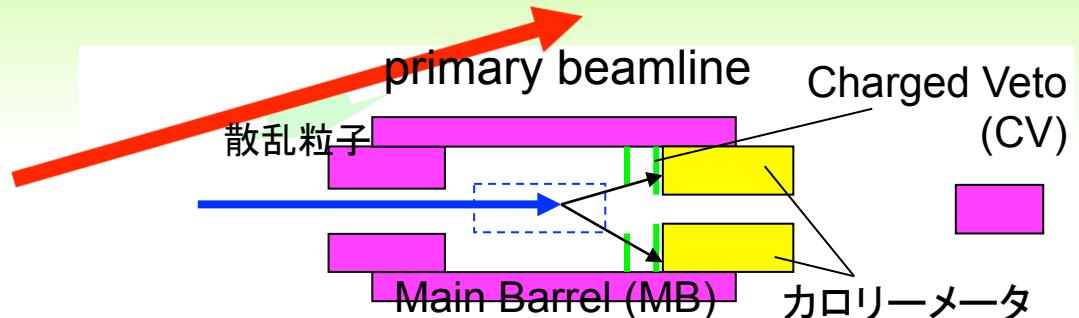
- ◇ w/ accidental outside the blind region
 - ◇ 5. MB_(32.3MeV)-BHPV_(1.8GeV)
 - ◇ odd pair
 - ◇ 1.1MeV E_{dep} in MB
 - ◇ BHPV γ (x,y,z) = (-107.2, 61.5, 16.0m)
 - ◇ 6. FB_(77.6MeV)-COVER_(93.7MeV)
 - ◇ even pair
 - ◇ 1.6MeV E_{dep} in FB
 - ◇ 7. MB_(83.4MeV)-COVER_(103.6MeV)
 - ◇ even pair
 - ◇ masking event (13.7MeV E_{dep} w/o accidental)
 - ◇ 8. MB_(23.8MeV)-BHPV_(2.5GeV)
 - ◇ odd pair
 - ◇ 1.5MeV E_{dep} in MB
 - ◇ BHPV γ (x,y,z) = (-97.1, -152.2, 14.6m)



single event sensitivity



- ◆ full cut : 16239.5685
 - ◆ S.E.S. = 1.283e-8
- ◆ $pT > 130\text{MeV}/c$: 19279.99
 - ◆ $(>150\text{MeV}/c) / (>130\text{MeV}/c)$ = 0.8423
- ◆ MB, FB 1MeV threshold : 12344.6
 - ◆ $(1\text{MeV thre.}) / (2\text{MeV thre.})$ 0.7601

◆d

<http://www.lnf.infn.it/wg/vus/content/Krare.html>
