

# J-PARC KOTO実験の CsIカロリメータ両読み手法による 中性子背景事象削減能力の評価

2020/02/17 ICEPPシンポジウム

大阪大学 山中卓研究室 博士前期課程2年

大杉 真優

# KOTO実験

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

- CP対称性を破る
- 標準理論で予測される分岐比  $\rightarrow 3 \times 10^{-11}$  と小さい
- 理論的不定性が小さい

分岐比が標準理論からずれている

$\rightarrow$  新物理へのつながり

# KOTO検出器

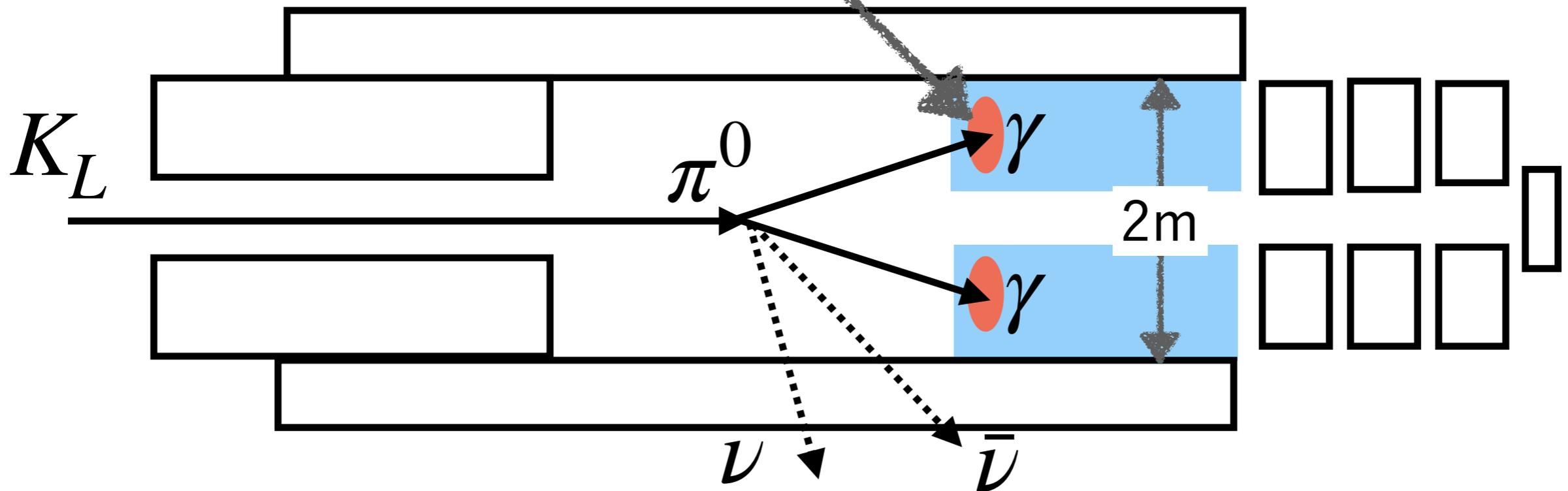
$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の信号

$2\gamma$  + nothing

CsIカロリメータ

全立体角を覆う  
veto検出器で保証

KOTO検出器

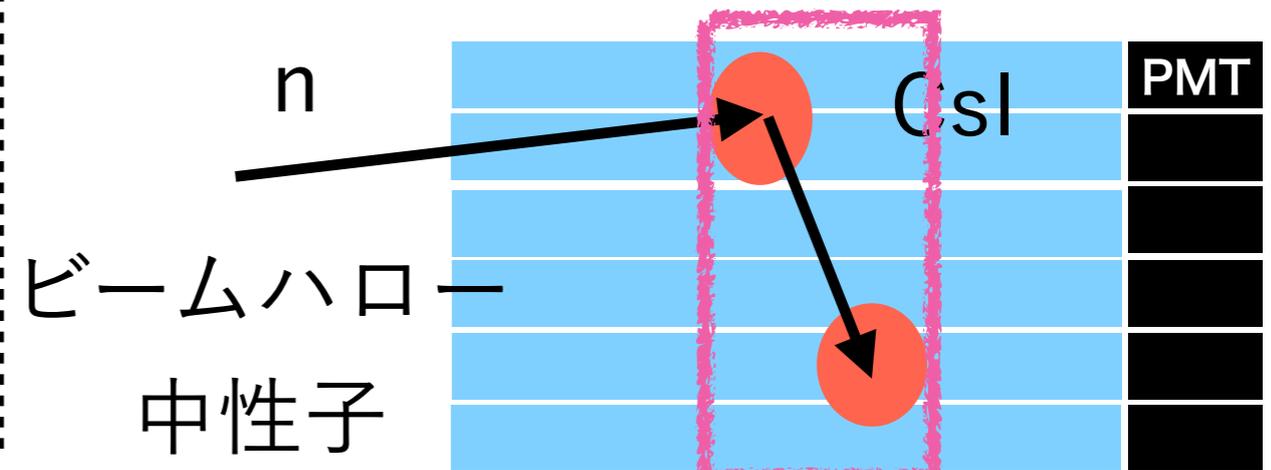
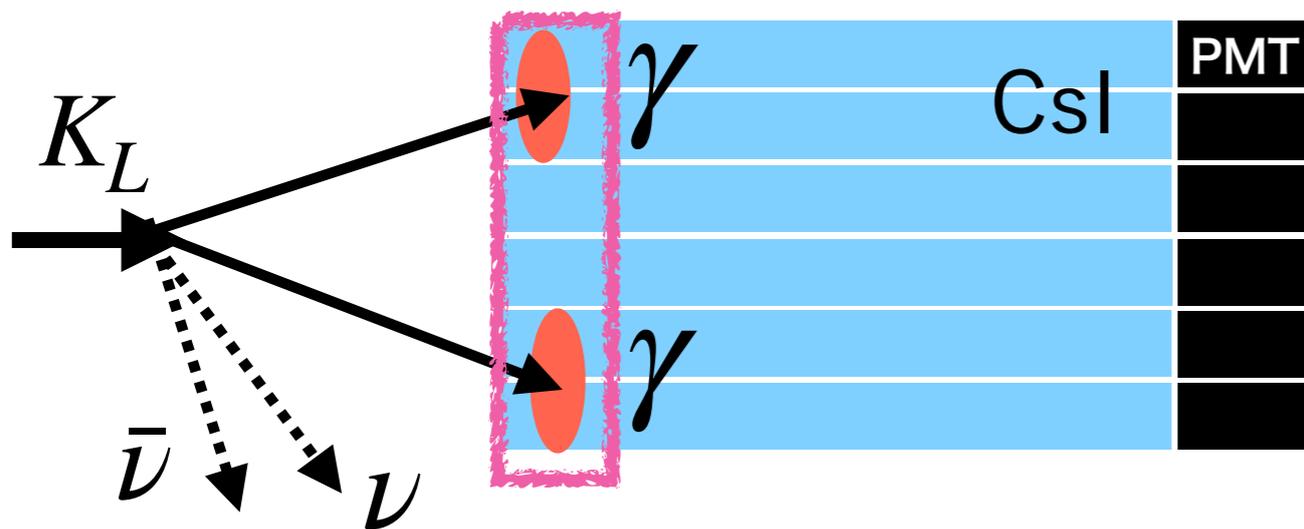


# 中性子背景事象

分岐比の小さい事象の探索 → 背景事象の抑制が重要

信号事象 ( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ )

中性子背景事象



二つのシャワー 信号事象と区別できない場合がある

最新の解析では**最大**の背景事象

→ 標準理論感度で信号事象の10倍予測される

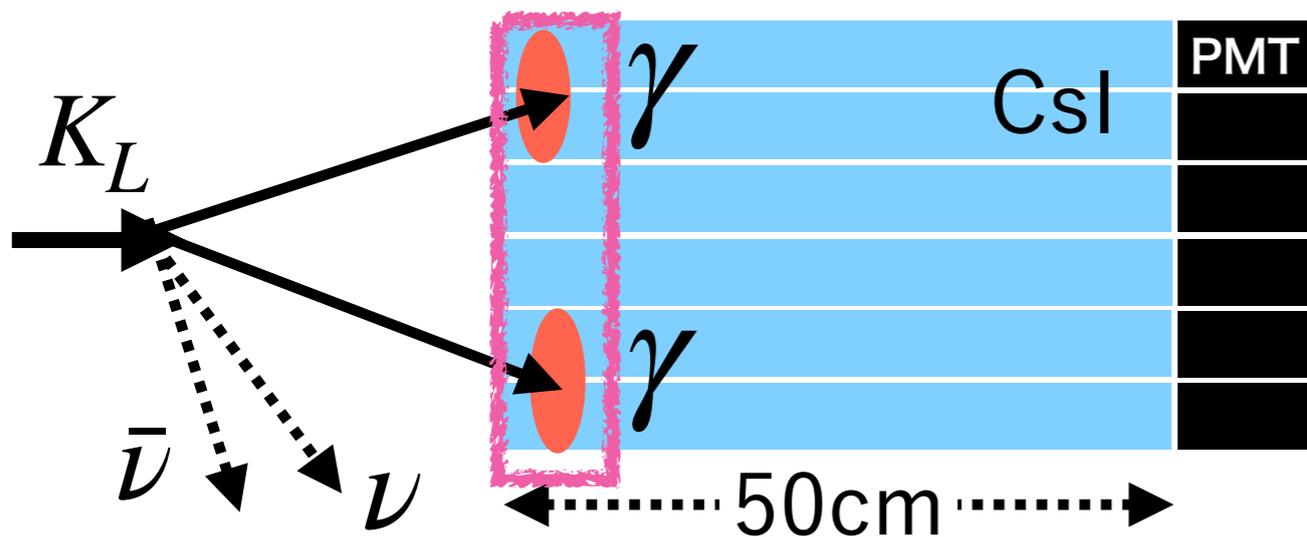
現状：波形, クラスタ形状 → 0.25倍

新しいカットで背景事象をさらに**0.1倍**にする必要

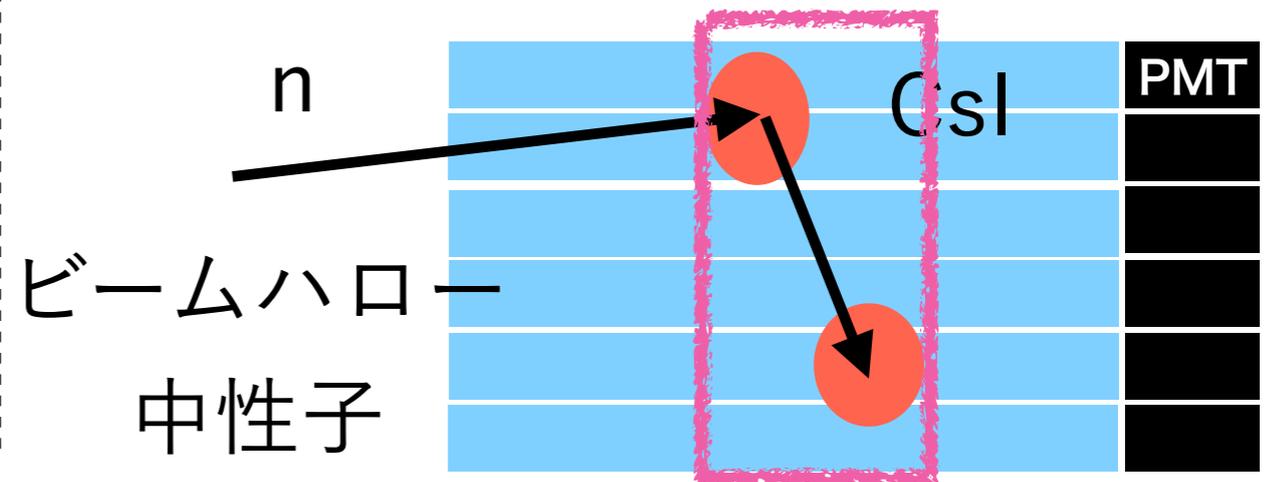
# 中性子背景事象

分岐比の小さい事象の探索 → 背景事象の抑制が重要

信号事象 ( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ )



中性子背景事象



相互作用の**深さ**で識別

放射長(2cm)に従い相互作用

**上流**で相互作用

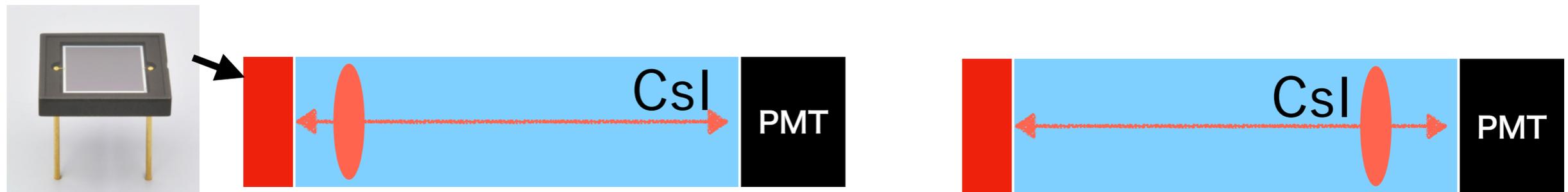
相互作用長(40cm)に従い相互作用

**下流**で相互作用

# CsIの両読み手法

CsIカロリメータの改良：上流面に光検出器(MPPC)を取り付ける

半導体光検出器 (MPPC)



浅い



$$\Delta T = T_{\text{MPPC}} - T_{\text{PMT}}$$

<

深い



$$T_{\text{MPPC}} - T_{\text{PMT}}$$

➡  $\Delta T = T_{\text{MPPC}} - T_{\text{PMT}}$

➡ 深さを表す

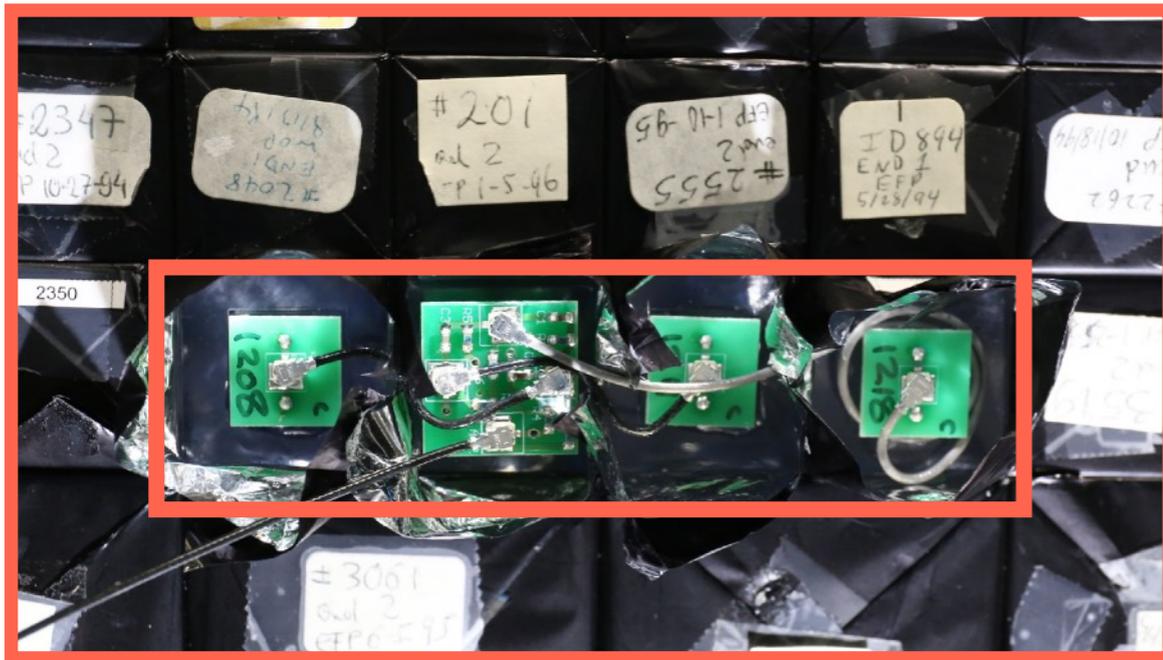
➡  $\Delta T$ を使って  $\gamma$ 線と中性子を識別

# インストール

2018年9月~12月:

CsIカロリメータの約2700個の結晶に4080個MPPCを取り付け  
読み出し回路への配線

MPPC接着後のCsI結晶



2019年2月~4月: ビームを受け, データ取得

↑ このデータを用いて解析

# 研究の目的

## $\Delta T$ による中性子背景事象削減能力を見積もる

### 先行研究と異なる点

- 初測定

CsIカロリメータ改良後にKOTO実験で取得したデータ

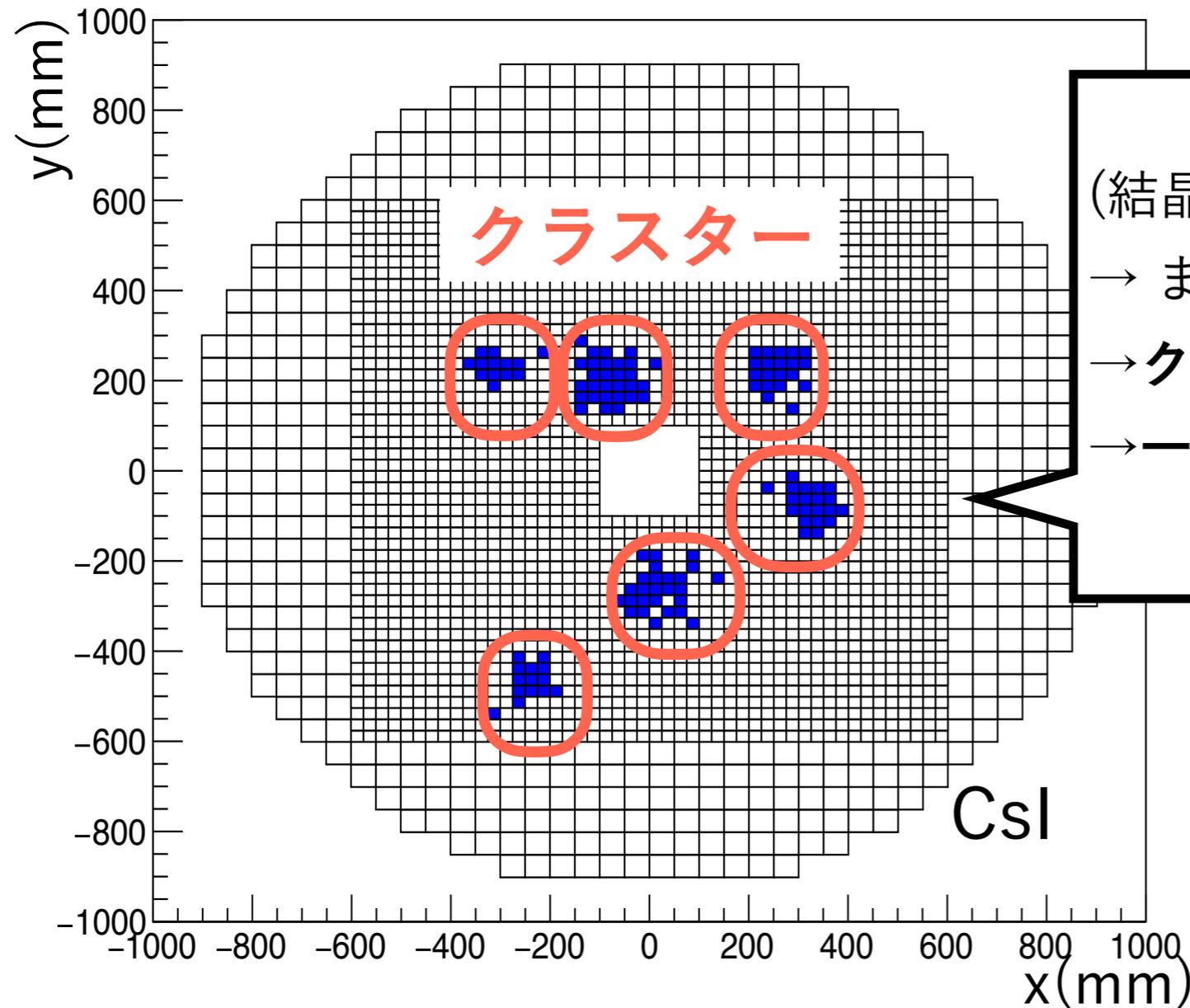
- 中性子背景事象を削減する他のカットとの相関

# 削減能力評価の流れ

- 評価に用いたサンプルの選び方、妥当性の評価
  - $\gamma$ 線サンプル：信号事象( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ )に対する性能評価
  - 散乱中性子サンプル：中性子背景事象に対する性能を評価
- $\Delta T$ による中性子削減能力の評価
  - $\Delta T$ によるカット単体の場合
  - 既存の中性子カットとの相関を考慮した場合

# クラスター

## イベントディスプレイ



(結晶のエネルギー > 3MeV) + 近く の場所  
→ まとめる  
→ クラスター  
→ 一つのシャワーからできた

信号事象は二つのクラスターを持つ  
→ 2クラスター単位の解析

# $\gamma$ 線サンプル

- $\gamma$ 線サンプル

$K_L \rightarrow 3\pi^0 (\rightarrow 6\gamma)$  のデータ

終状態が  $\gamma$  線のみ

分岐比が大きい (20%)

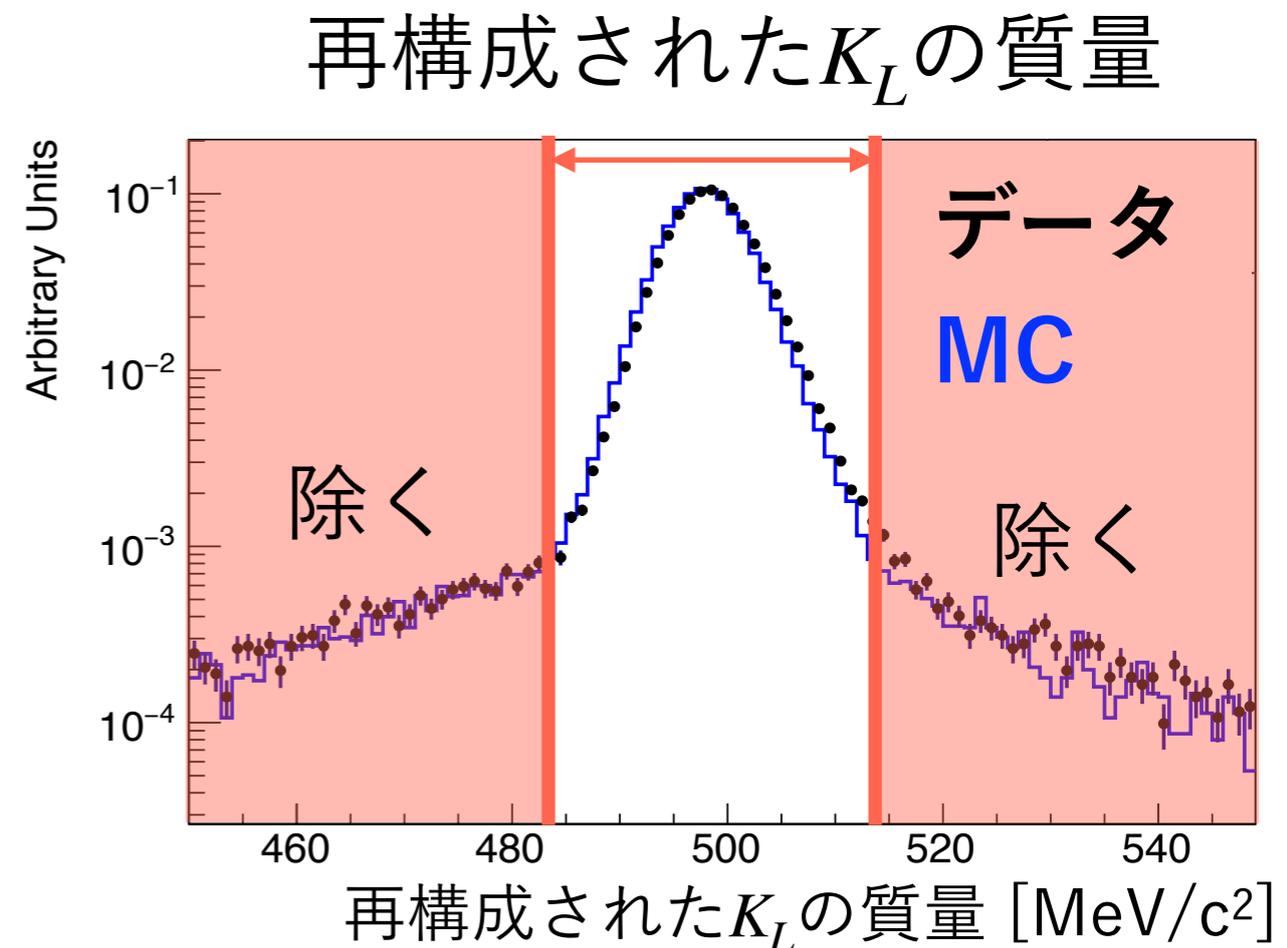
- 事象の妥当性

事象選別後に  $K_L$  の質量を再構成

$K_L \rightarrow 3\pi^0$  を選べた

→  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  を  $\gamma$  線サンプルとして用いる

→  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  の1事象に対して、3個の  $\gamma$  線サンプルを取得

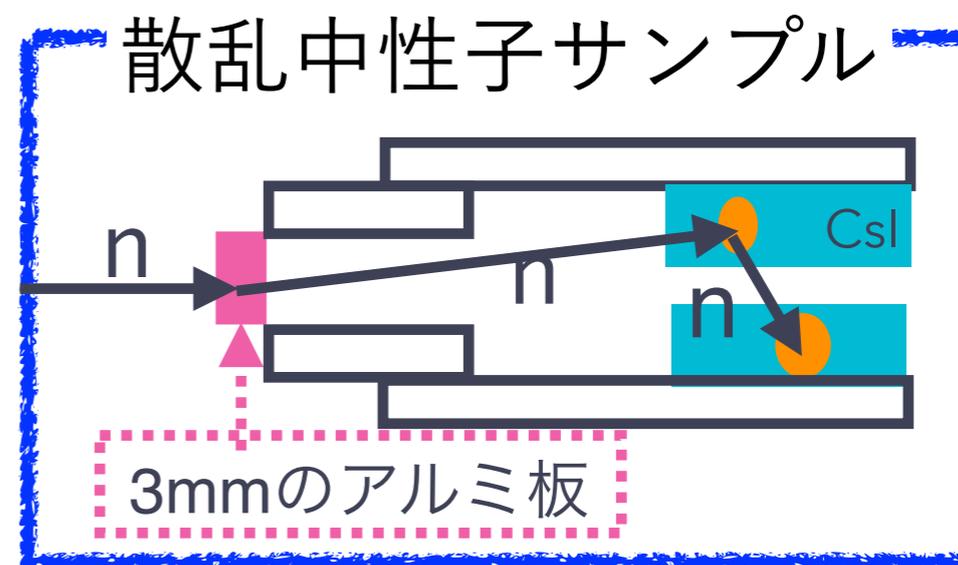
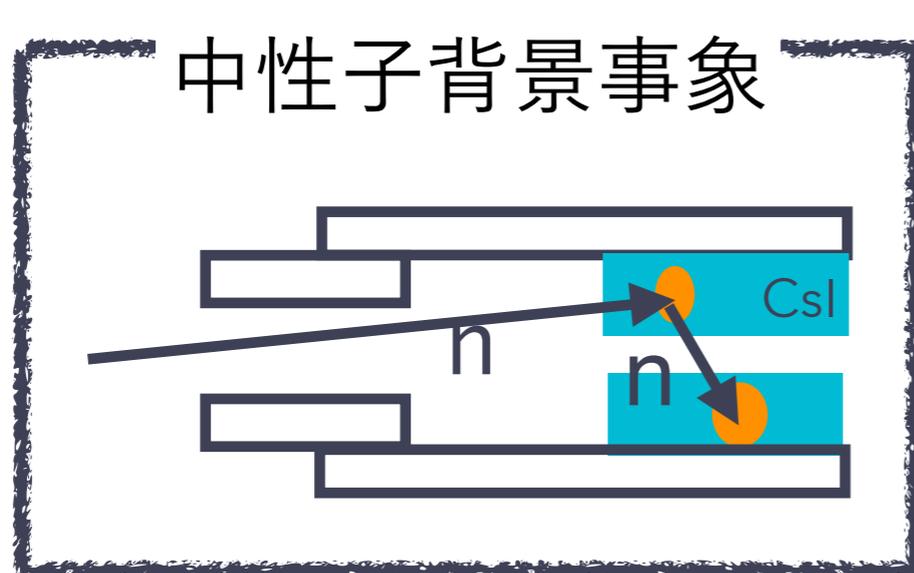


# 散乱中性子サンプル

- 散乱中性子サンプル

特別なランを行なってサンプルを取得

検出器上流にアルミ板を置く → ビーム中の中性子を積極的に散乱

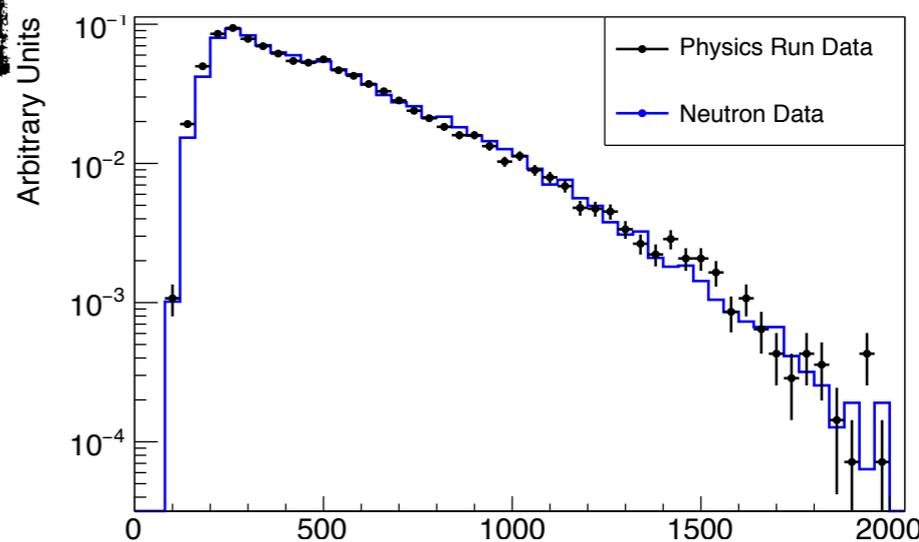


- 事象の妥当性

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  探索で問題となる

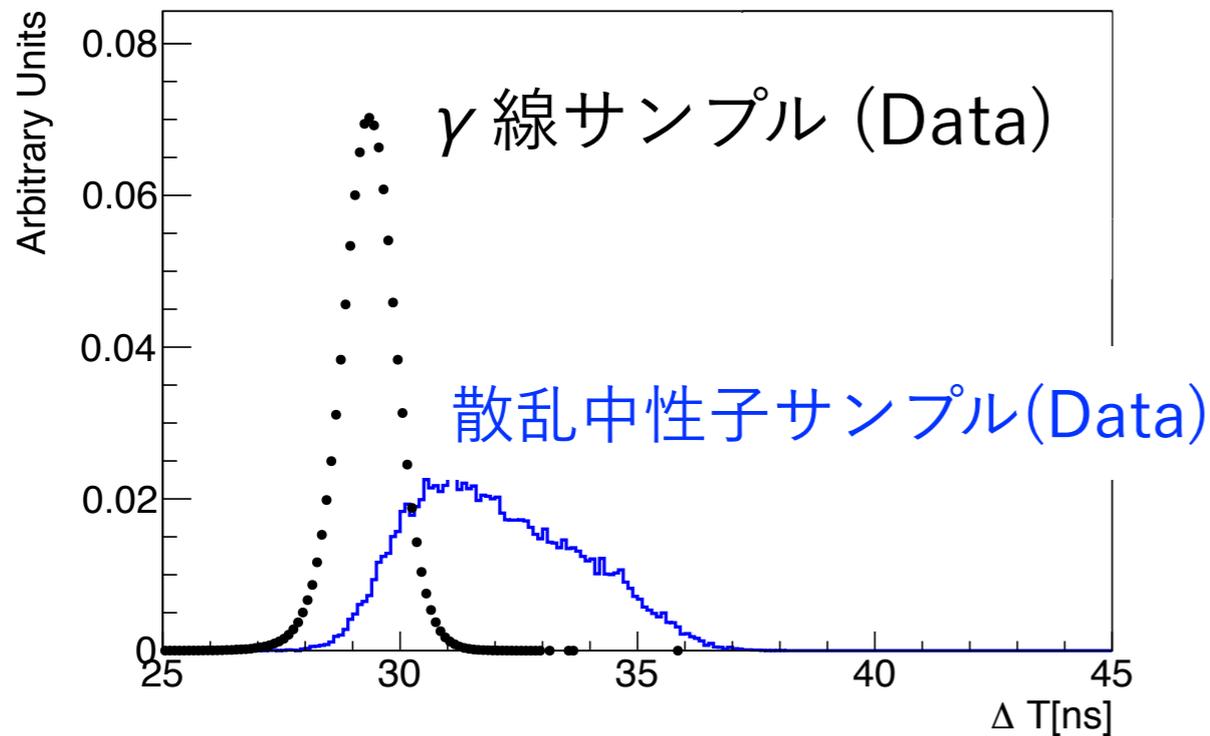
中性子背景事象と分布が一致

クラスターエネルギー

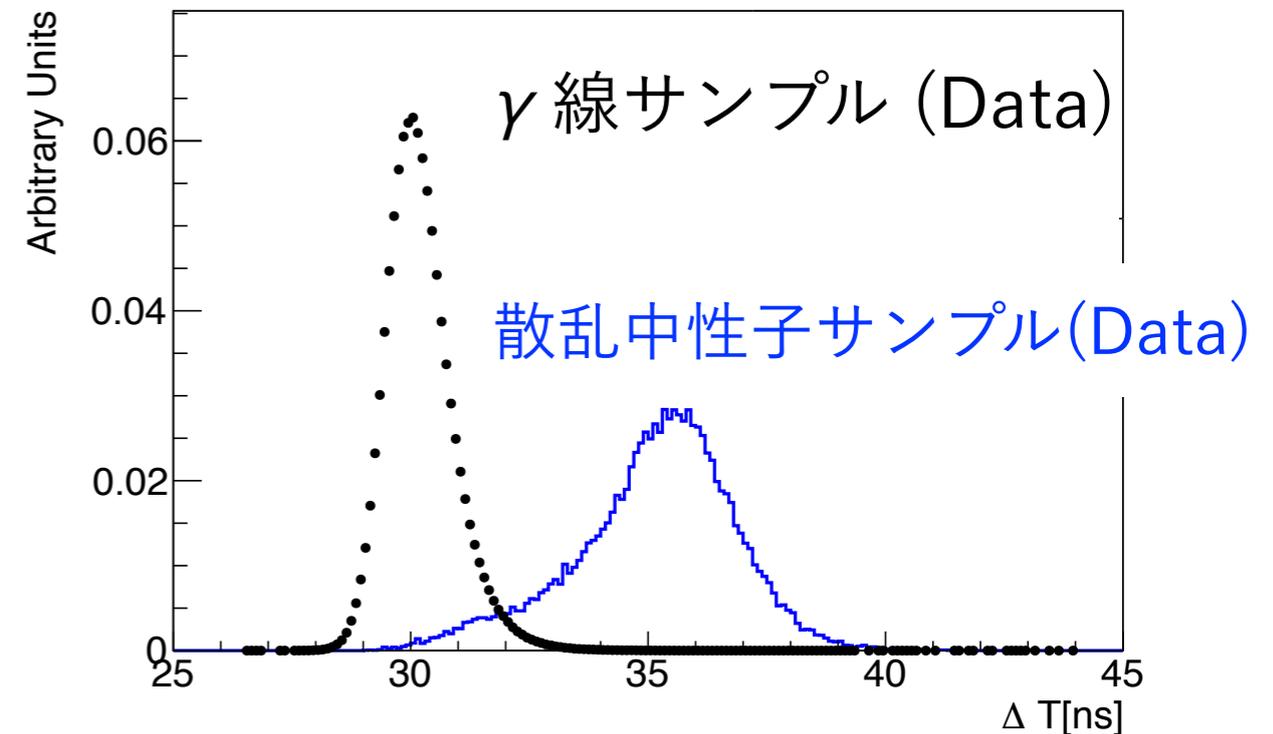


# $\Delta T$ 分布

$\Delta T$ が小さい方のクラスター



$\Delta T$ が大きい方のクラスター

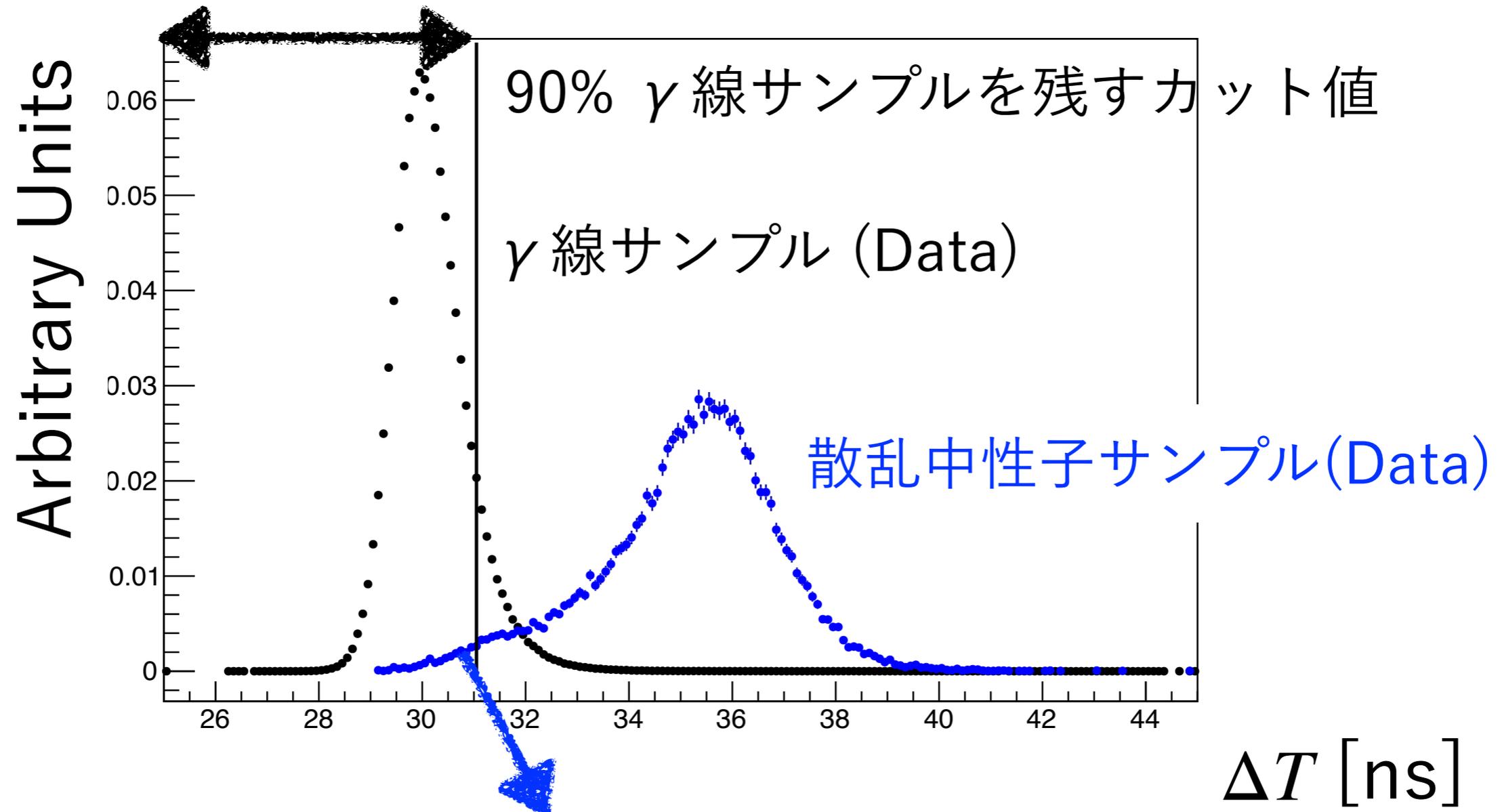


より削減能力の高い、

$\Delta T$  が大きい方のクラスターを使ってカットする

# ΔTカットの削減能力

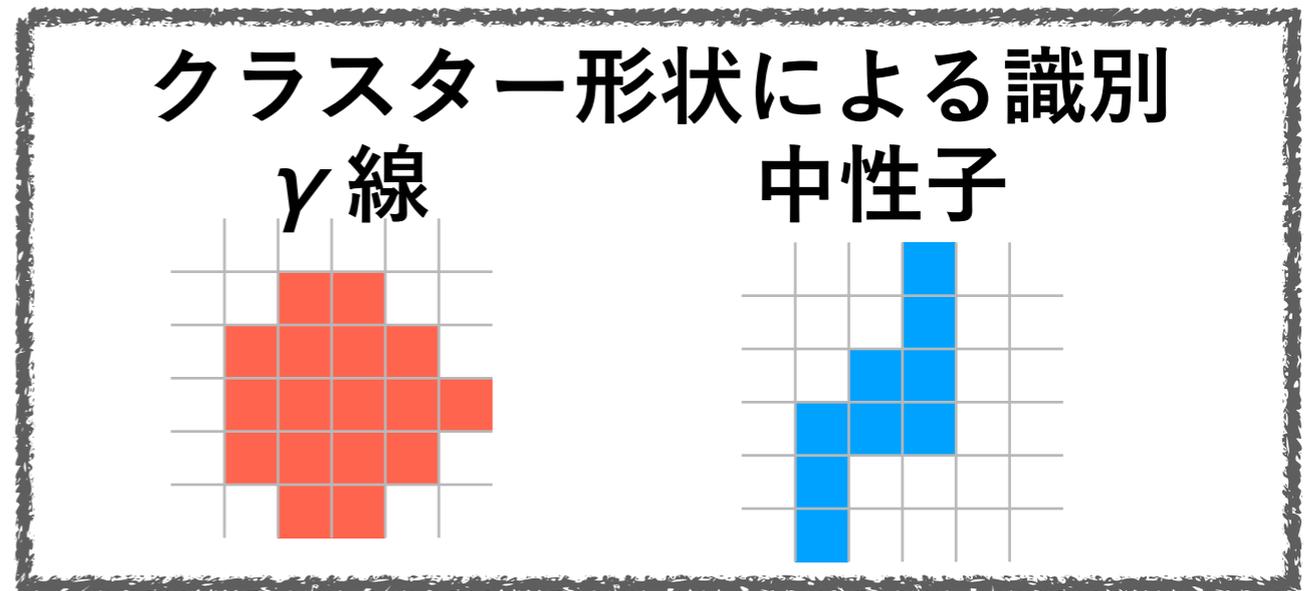
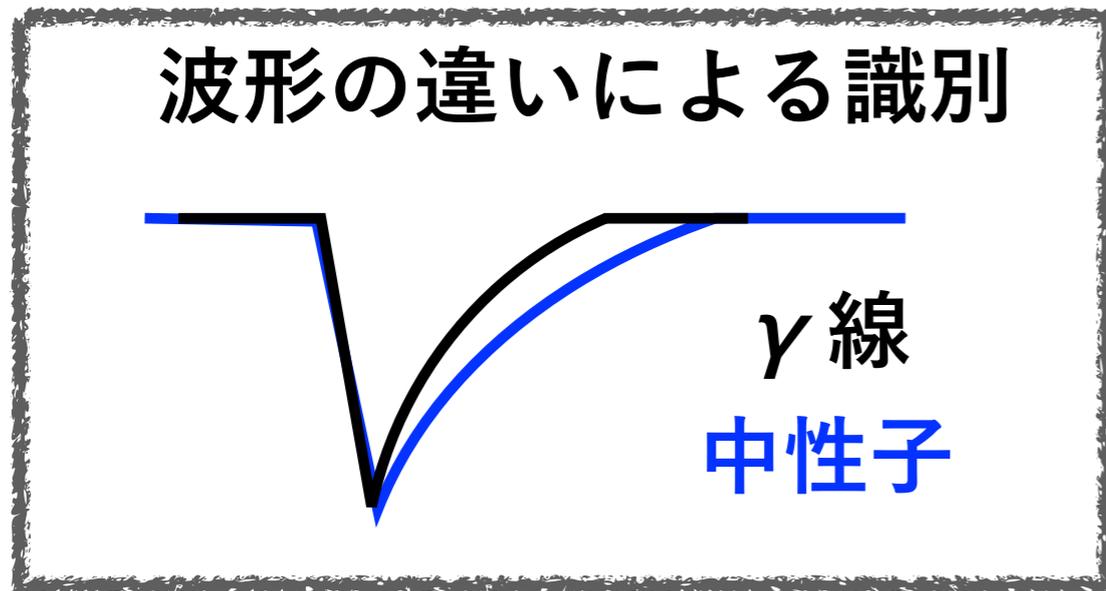
ΔTが大きい方のクラスターのΔT分布



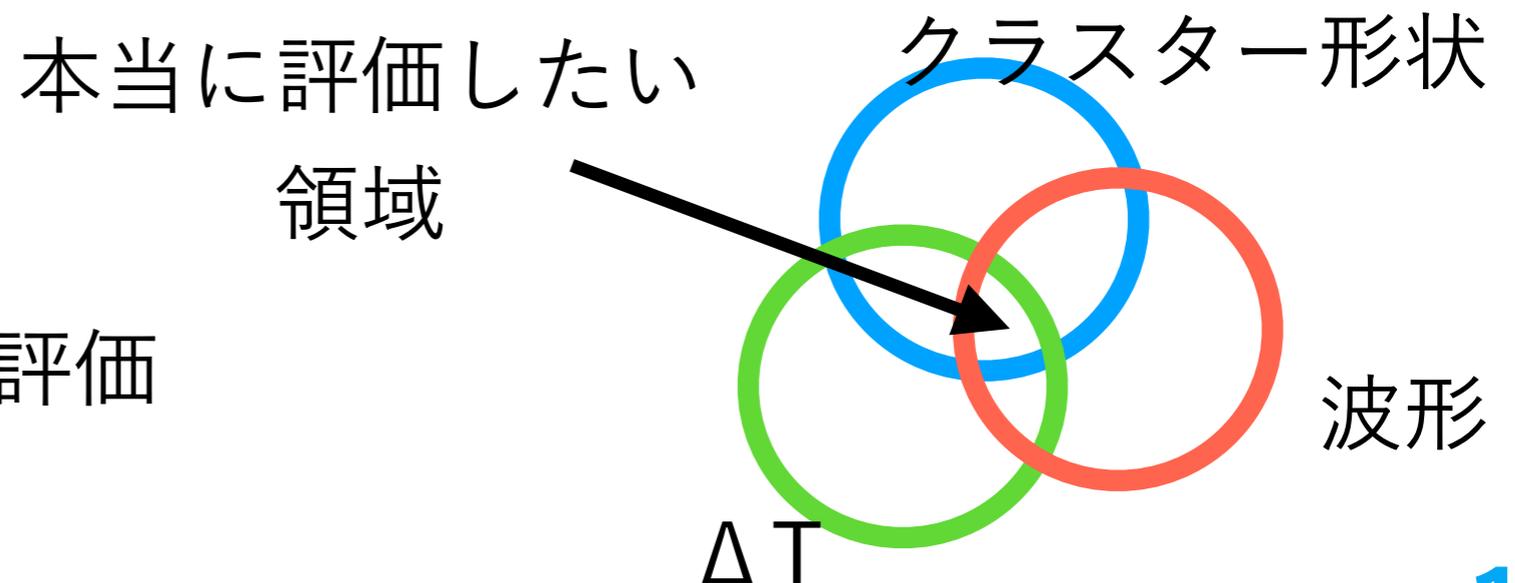
- 中性子サンプル  $(2.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$  倍に削減
- 要求性能 (0.1倍) を達成

# 他のカットとの相関

- 他に中性子背景事象を削減するカット
- これまでの説明  
→ 多くの中性子サンプルを用いるために使わなかった

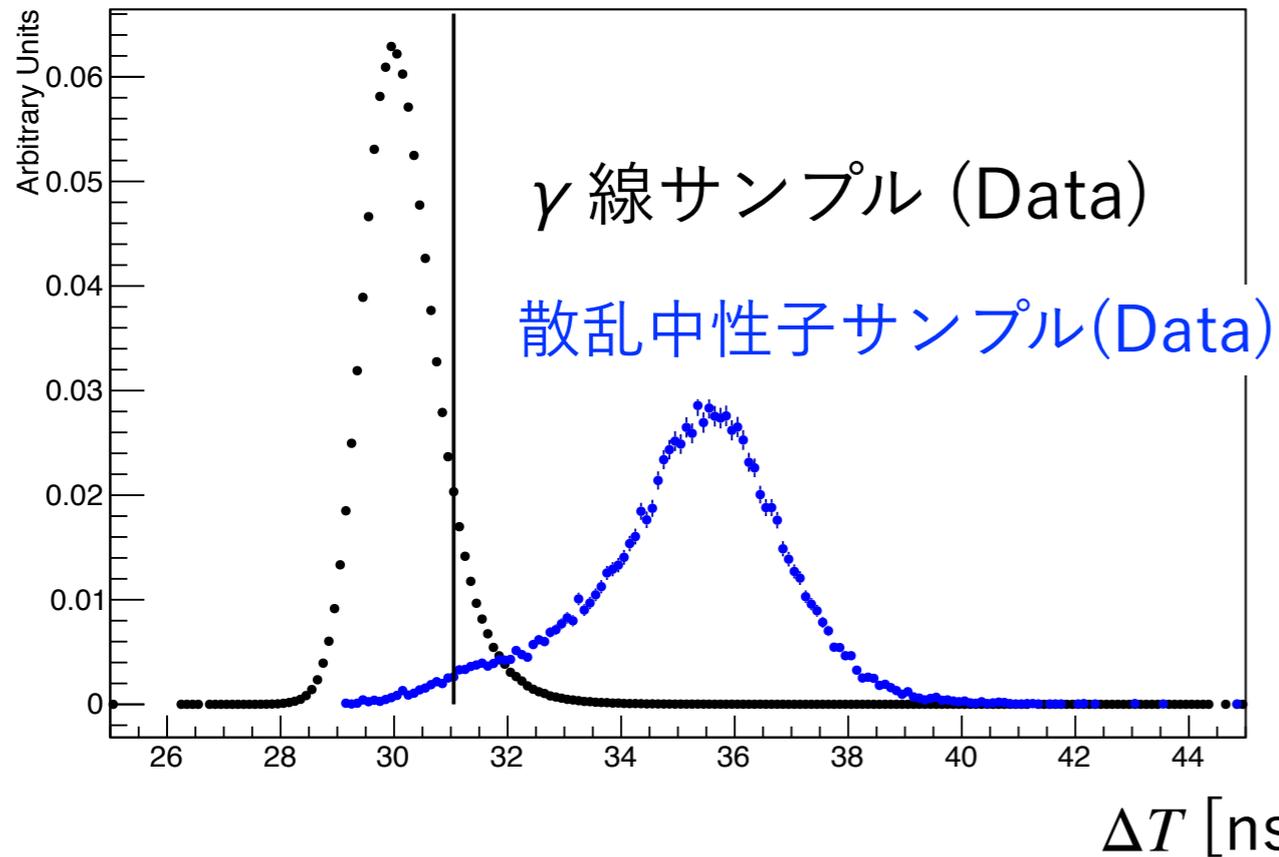


- 相関を考慮した  
より現実的な削減能力の評価

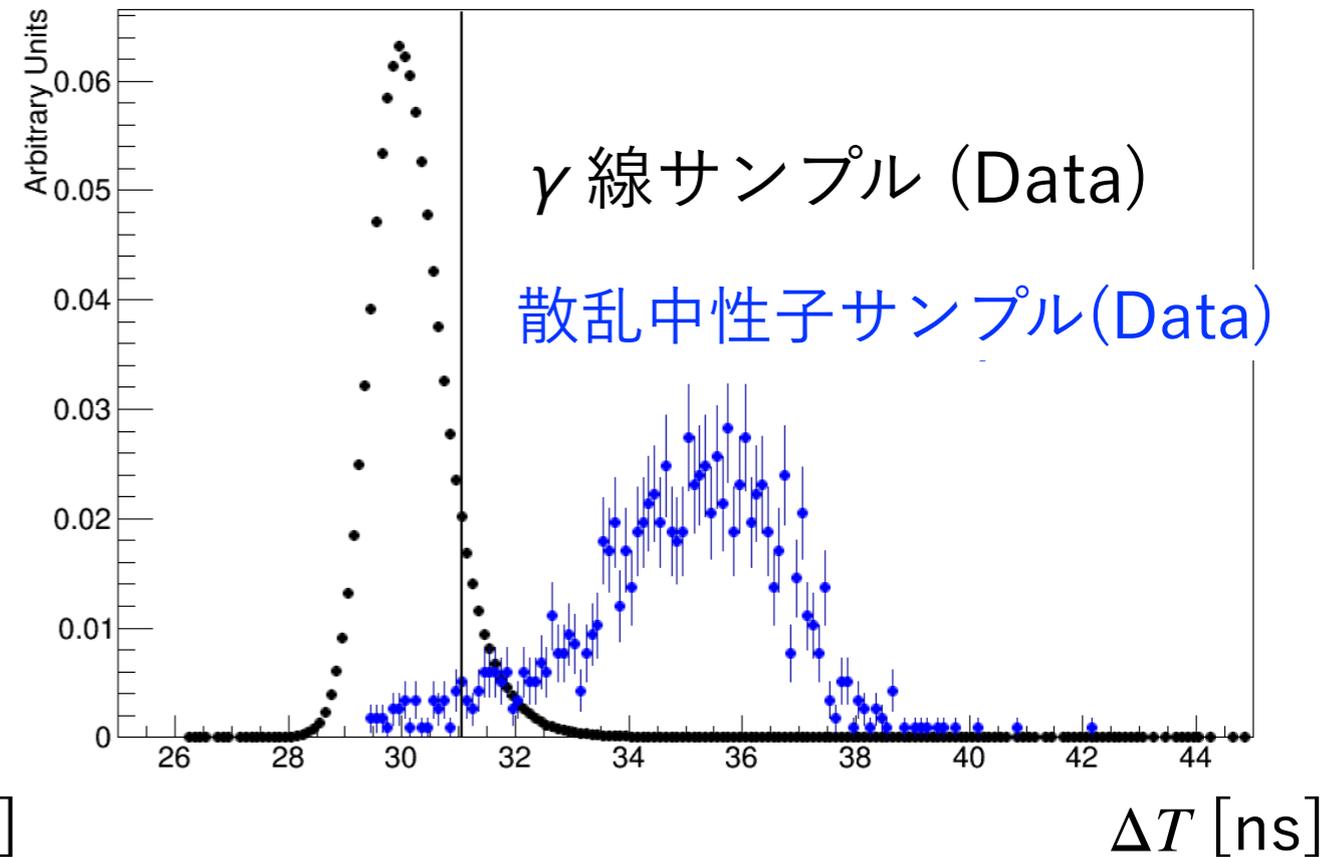


# 波形カットとの相関

波形カットをかける前



波形カットをかけた後



ΔTカット単体での中性子の削減性能

$$(2.1 \pm 0.1) \times 10^{-2} \text{倍}$$

(w/ 90% γ線サンプル)

$$(4.0 \pm 0.6) \times 10^{-2} \text{倍}$$

(w/ 90% γ線サンプル)

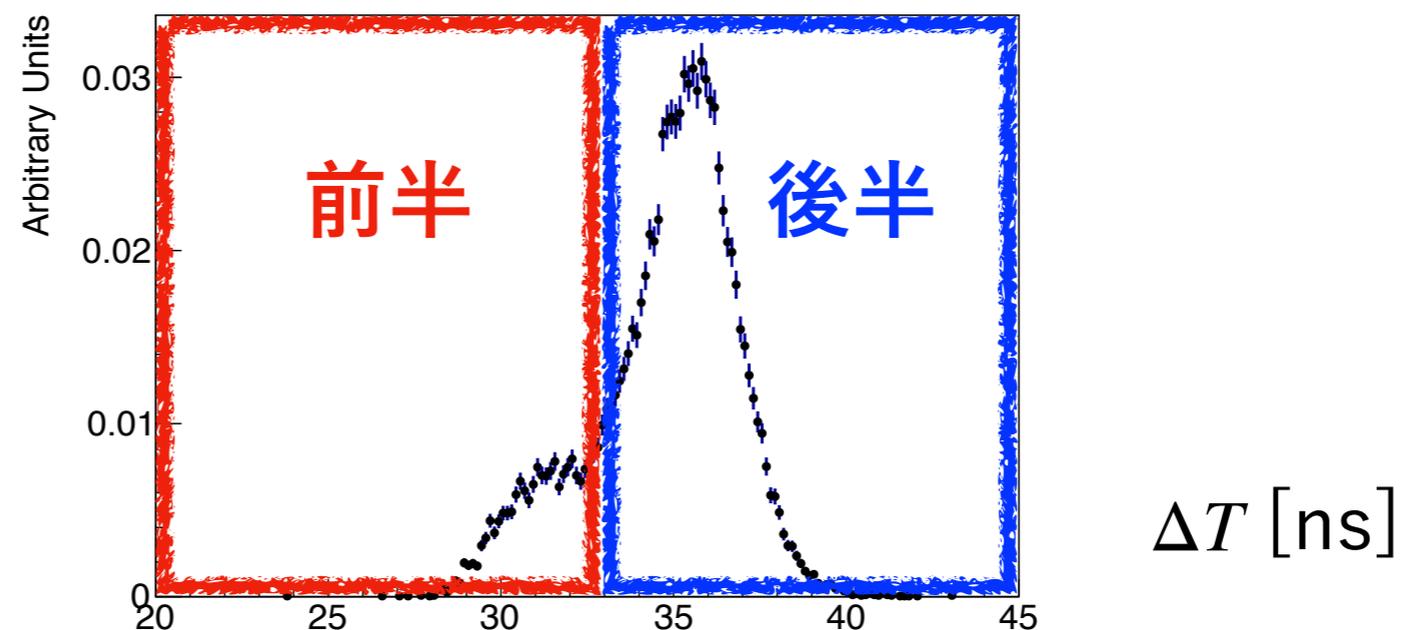
**要求性能 (0.1倍)を達成**

# クラスター形状カットとの相関(1)

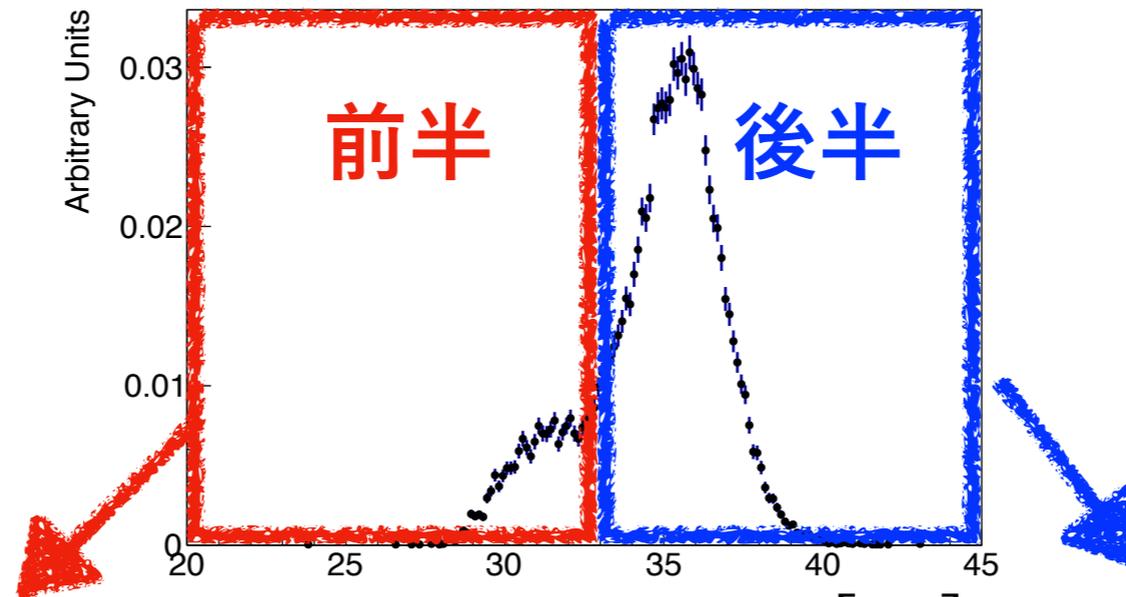
- クラスター形状カットは削減能力が高い  $\sim 10^{-5}$
- カット後に残る中性子サンプル  $\sim 1$  事象
- 相関を求めるには不足

**戦略：  $\Delta T$  分布を前半後半に分ける**  
**前半後半でクラスター形状カットの性能が違うか？**

エネルギーが大きい方のクラスターの  $\Delta T$  分布

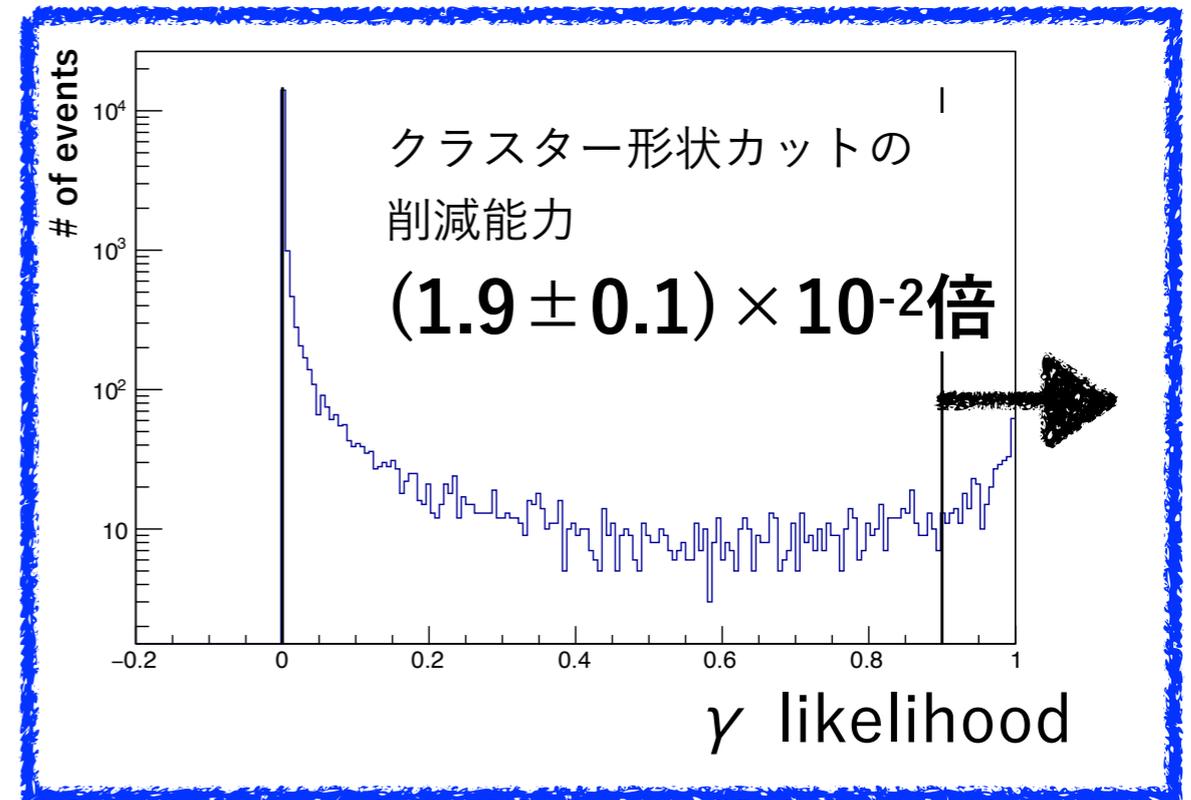
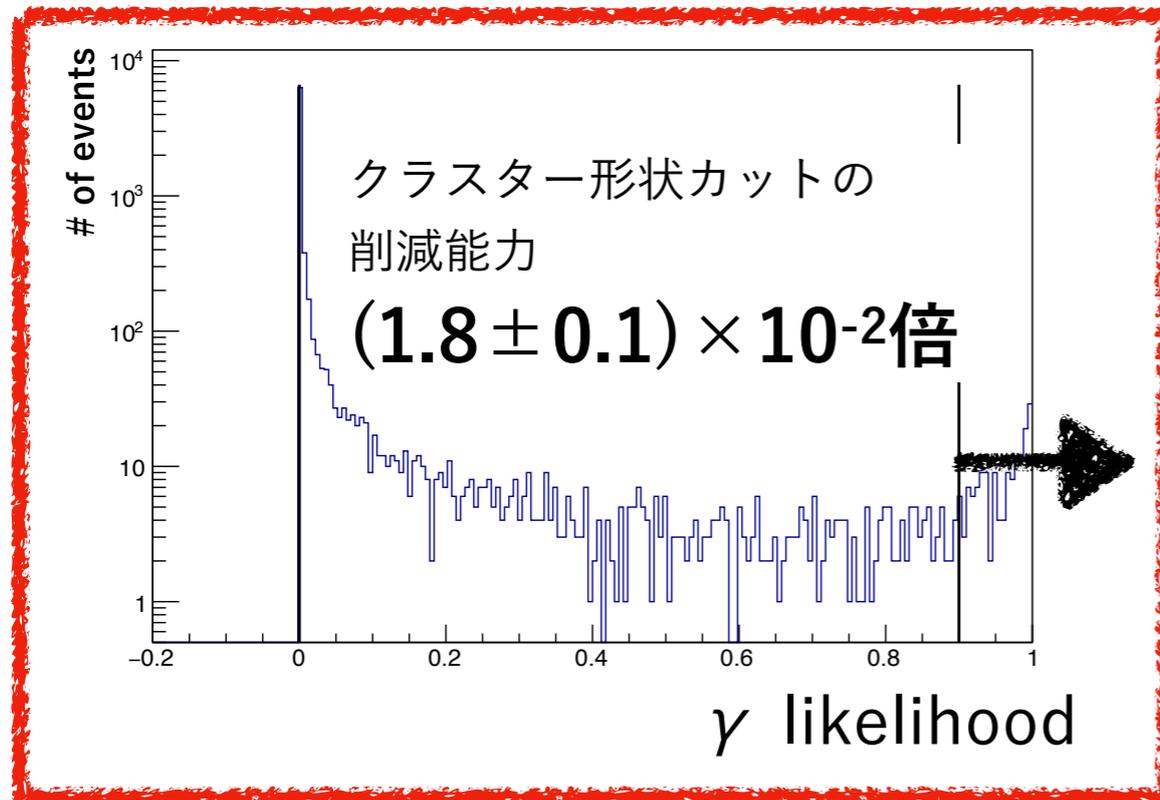


# クラスター形状カットとの相関(2)



クラスター形状

$\Delta T$  [ns] クラスター形状



$\Delta T$ カットとクラスター形状カットとの相関はない

# 信号事象数に対する背景事象数

- $\Delta T$ カットなし

中性子背景事象数  $\rightarrow$  信号事象数の 10倍 予測



- $\Delta T$ カットあり

中性子背景事象数  $\rightarrow$  信号事象数の 0.5倍 予測

# 信号事象数に対する背景事象数

- $\Delta T$ カットなし

中性子背景事象数  $\rightarrow$  信号事象数の 10倍 予測

0.05倍

$\sim (\text{中性子削減能力}) \times (\text{信号事象の削減})$

$\sim 0.04 \times (1/0.9)$

- $\Delta T$ カットあり

中性子背景事象数  $\rightarrow$  信号事象数の 0.5倍 予測

- 中性子背景数を  $\Delta T$ がなかった時に予測された値と比較して

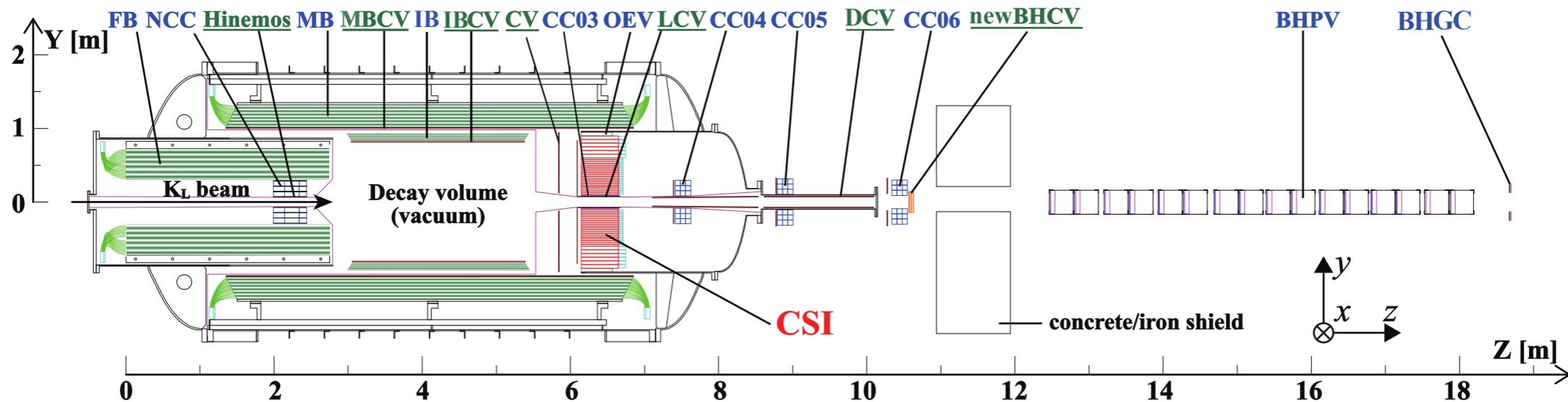
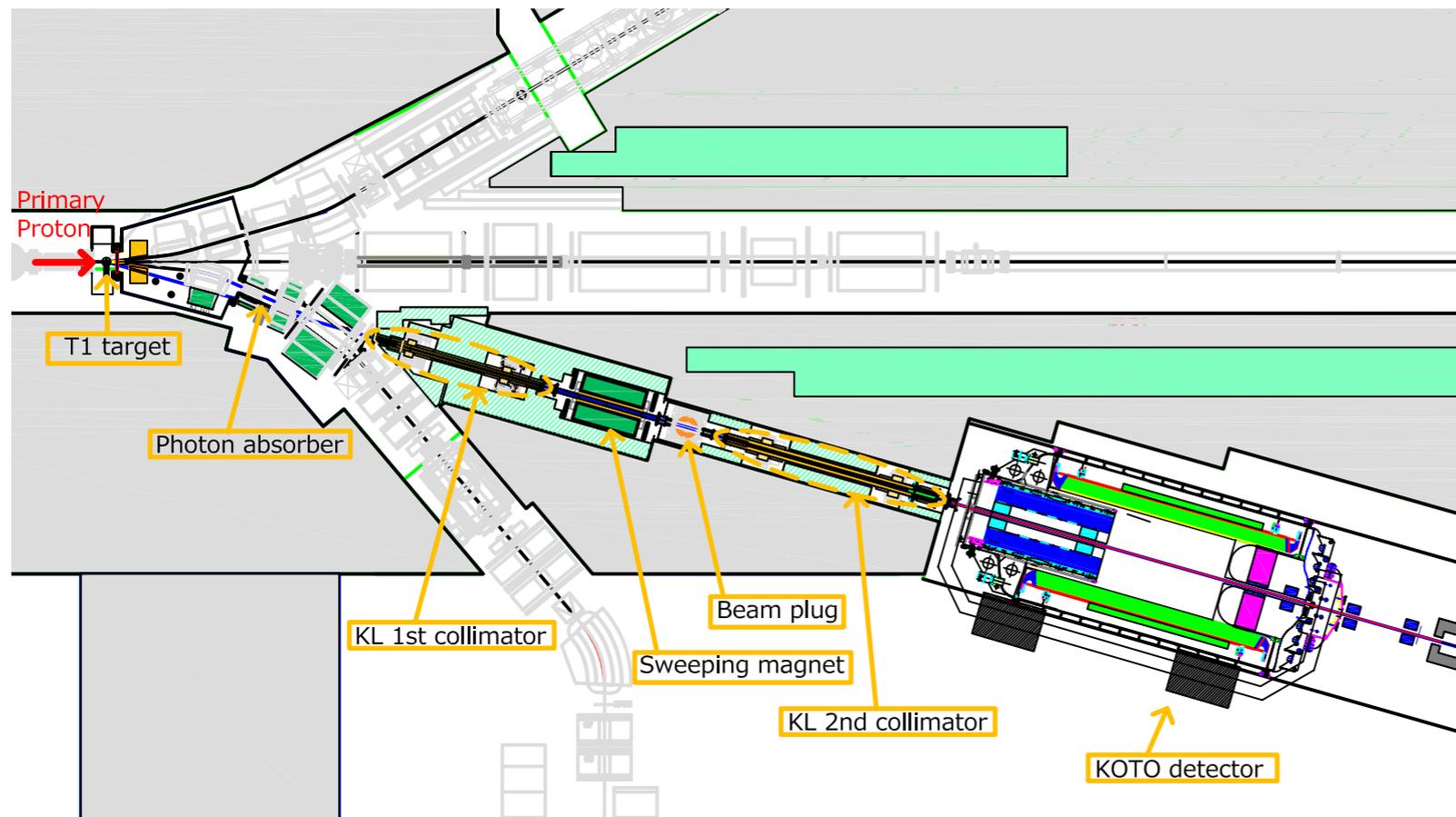
0.05倍に削減した

# 結論

- Cslカロリメータの上流に光検出器を取り付け、カロリメータを両読みにする作業を行なった。
- $\Delta T$ によって中性子背景事象は  $(2.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$ 倍
- 中性子背景事象を削減する他のカットとの相関を考慮
  - 削減能力は  $(4.0 \pm 0.6) \times 10^{-2}$ 倍
  - 目標性能(0.1倍)を達成
- 予測される、信号事象数：中性子背景事象数 = **1 : 0.5**  
 **$\Delta T$ カットがない場合に予測された値から0.05倍に削減した**
- 中性子背景事象を十分に削減した

# Backup

# KOTO実験 検出器



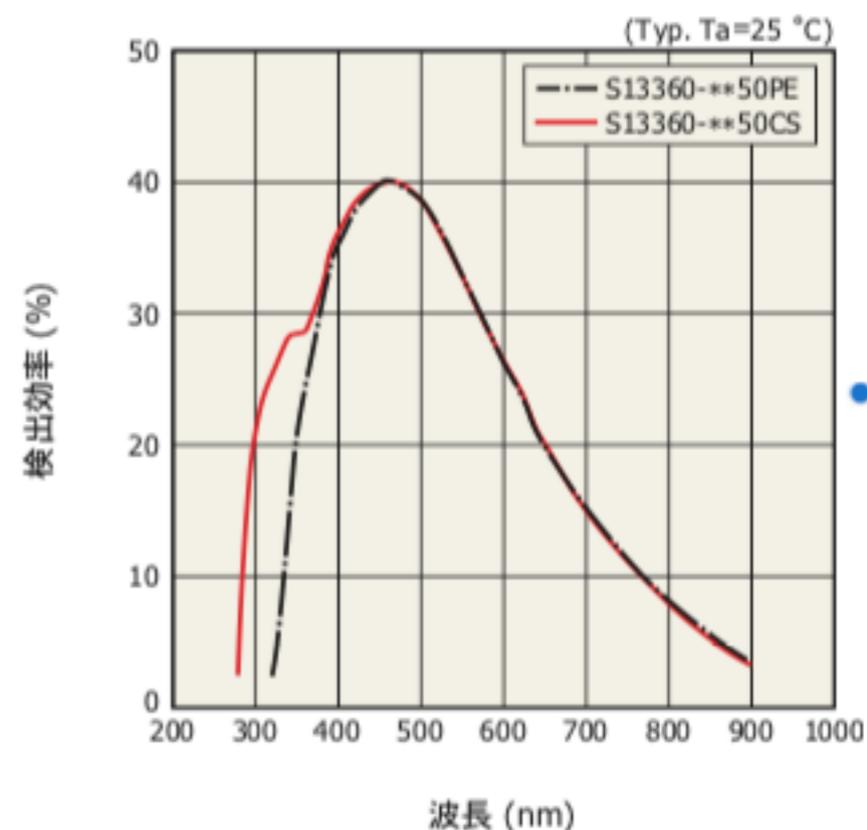
# MPPCの仕様



## MPPC (S13360-6050CS)

有効受光面サイズ	$6 \times 6 \text{ mm}^2$
ピクセル数	14400
ピクセルピッチ	$50 \mu\text{m}$
ダークレート (>0.5 photo electrons)	2 MHz (typ.)
感度波長範囲	270 – 900 nm
増幅率	$1.7 \times 10^6$
降伏電圧 ( $V_{BR}$ )	$(53 \pm 5) \text{ V}$
推奨動作電圧	$(V_{BR} + 3) \text{ V}$
推奨動作電圧の温度計数 $\Delta TV_{OP}$	54 (mV/°C)

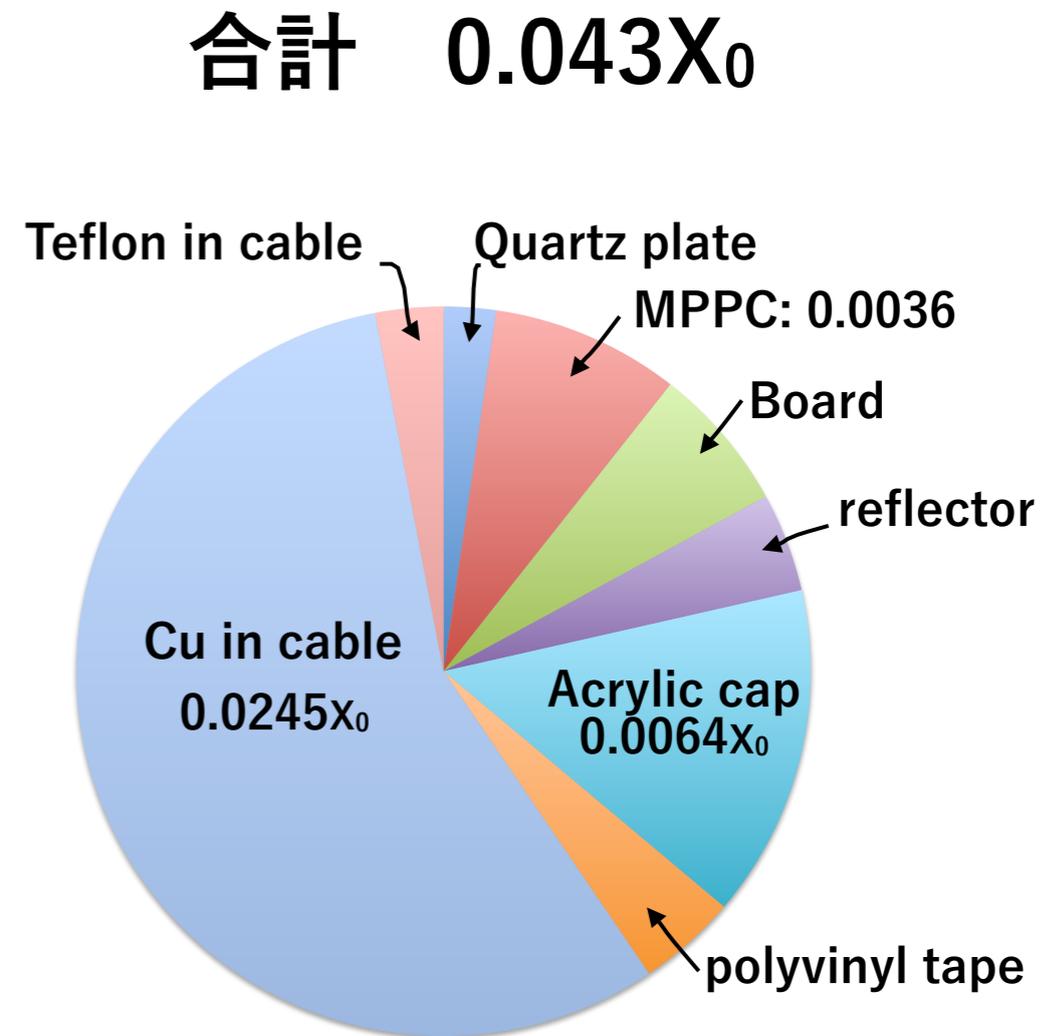
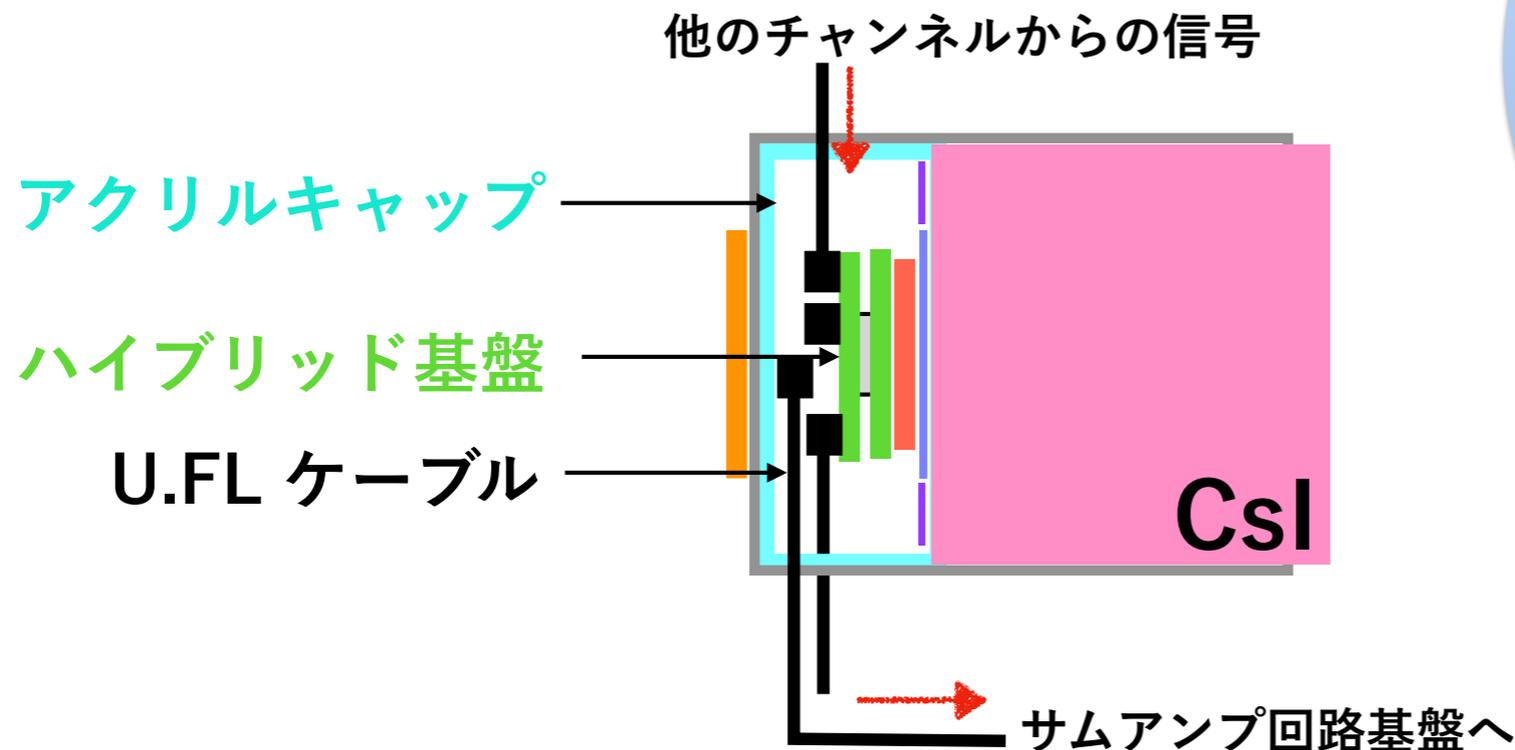
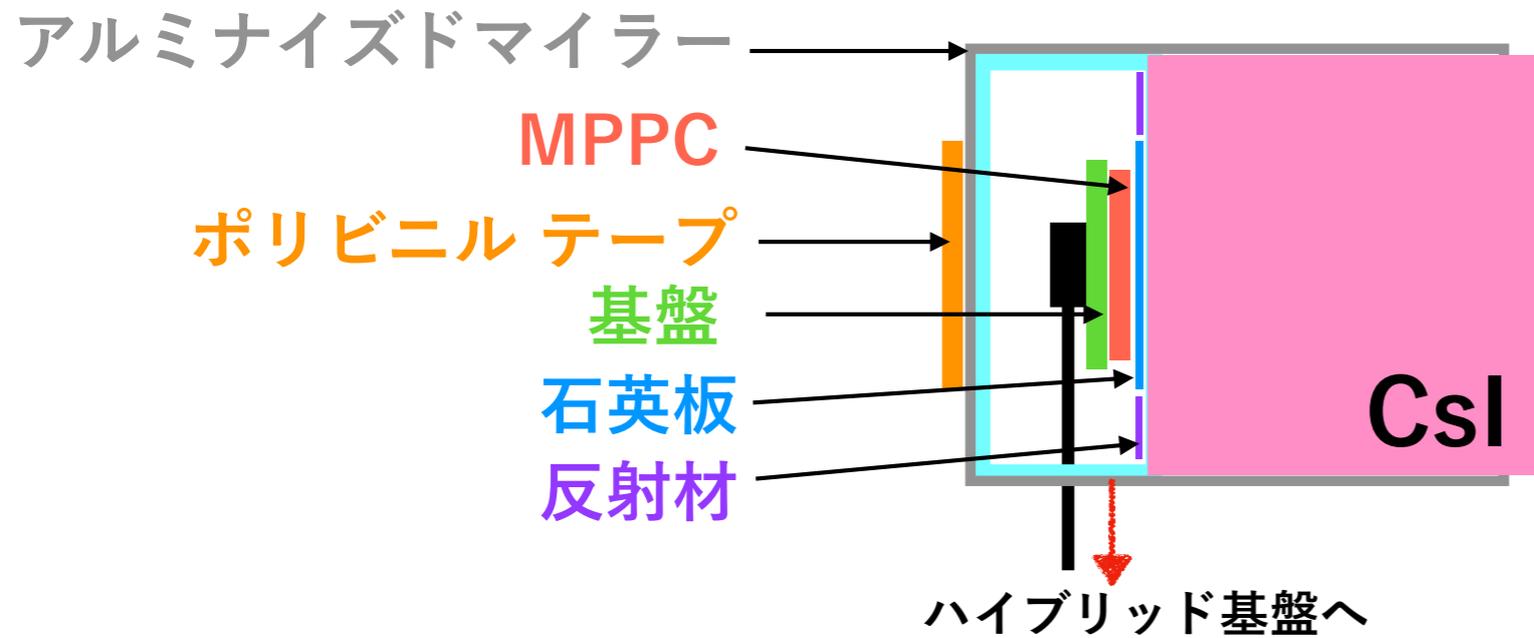
窓材がシリコン樹脂のため、エポキシ樹脂のMPPCと比較して短波長にも感度がある



**使用したMPPC**

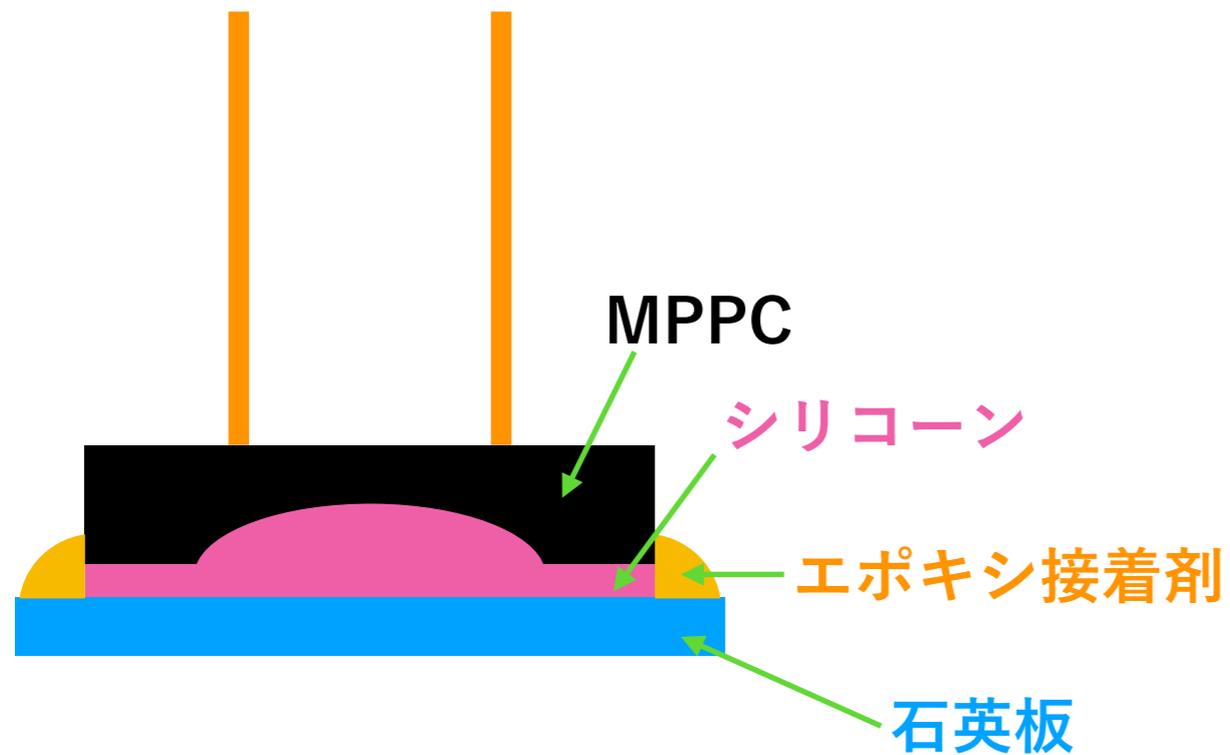
**窓材がエポキシ樹脂のMPPC**

# インストール後の物質質量

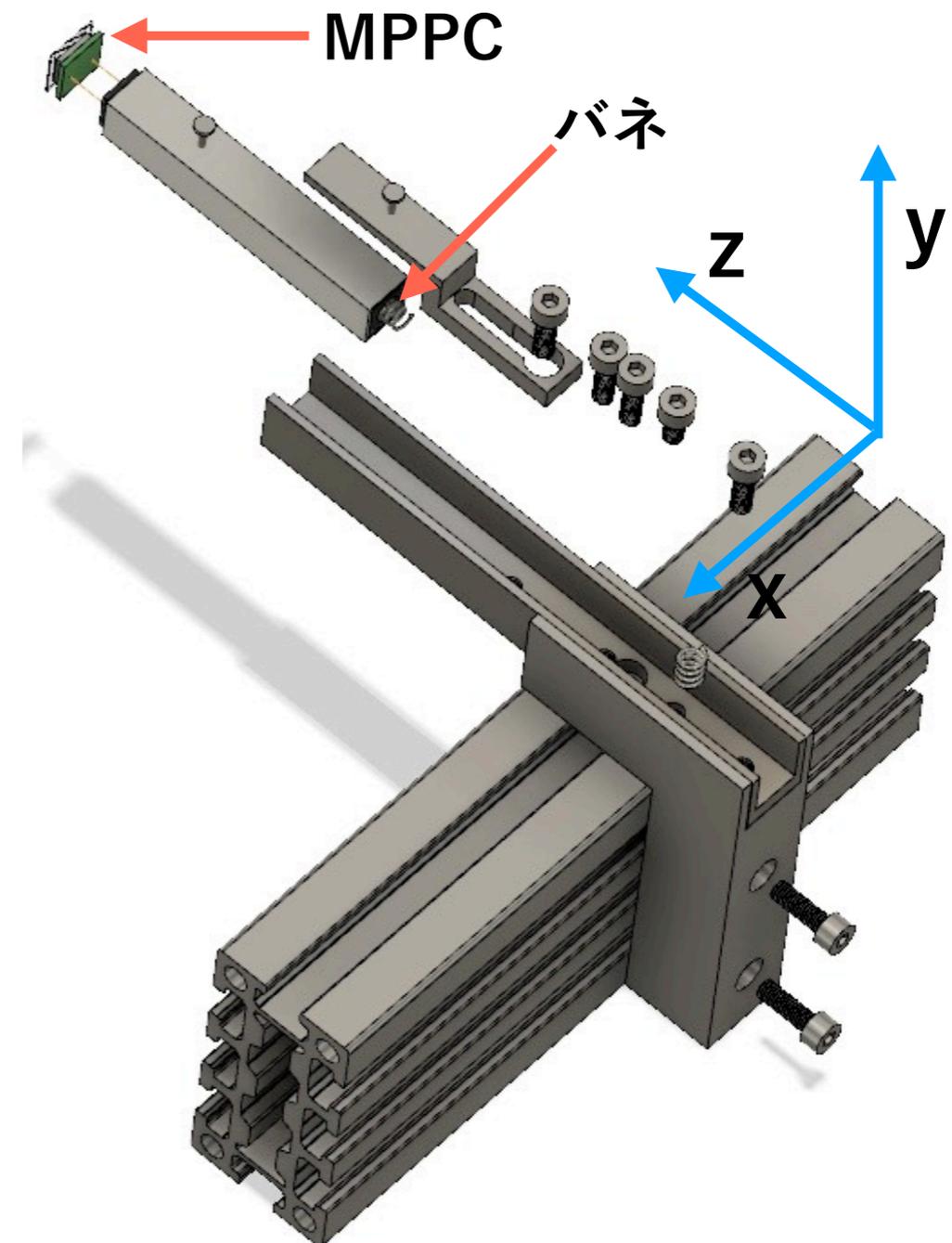


# 接着手法

MPPC表面が窪んでいるので  
石英板に接着



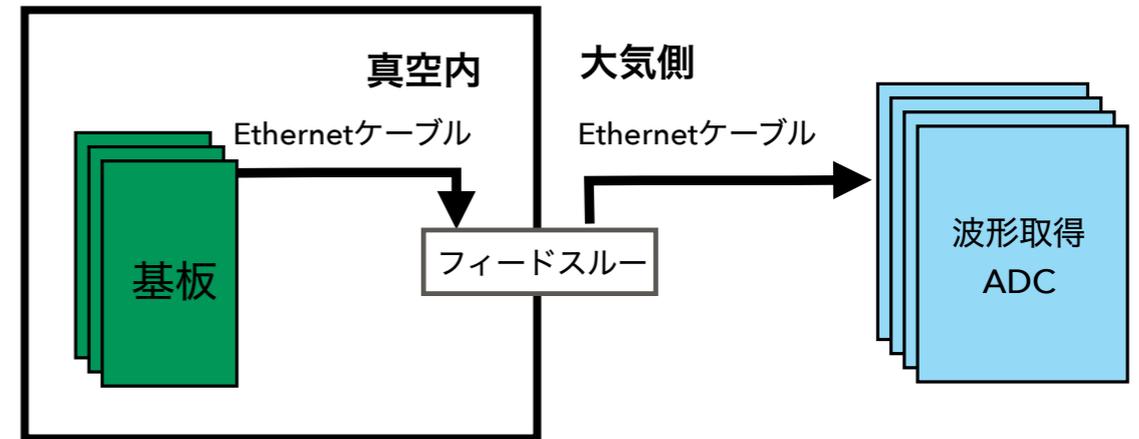
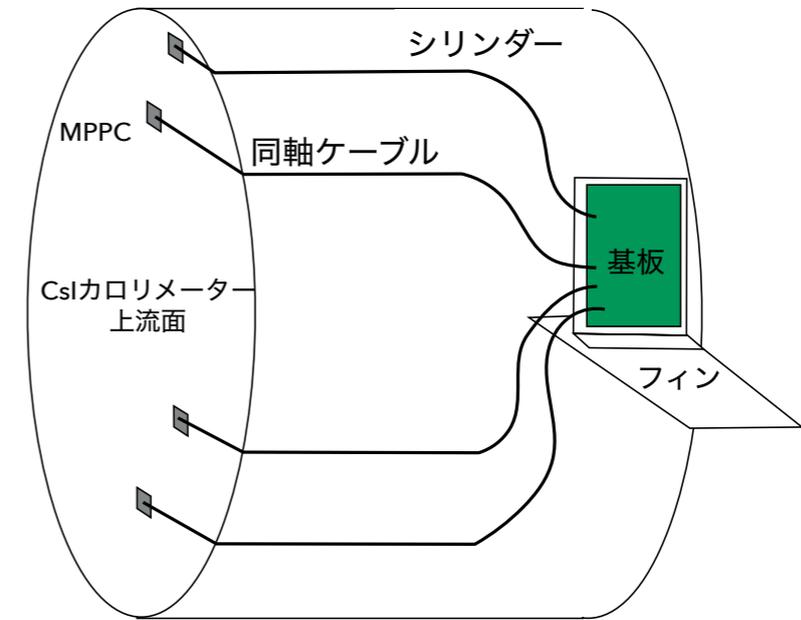
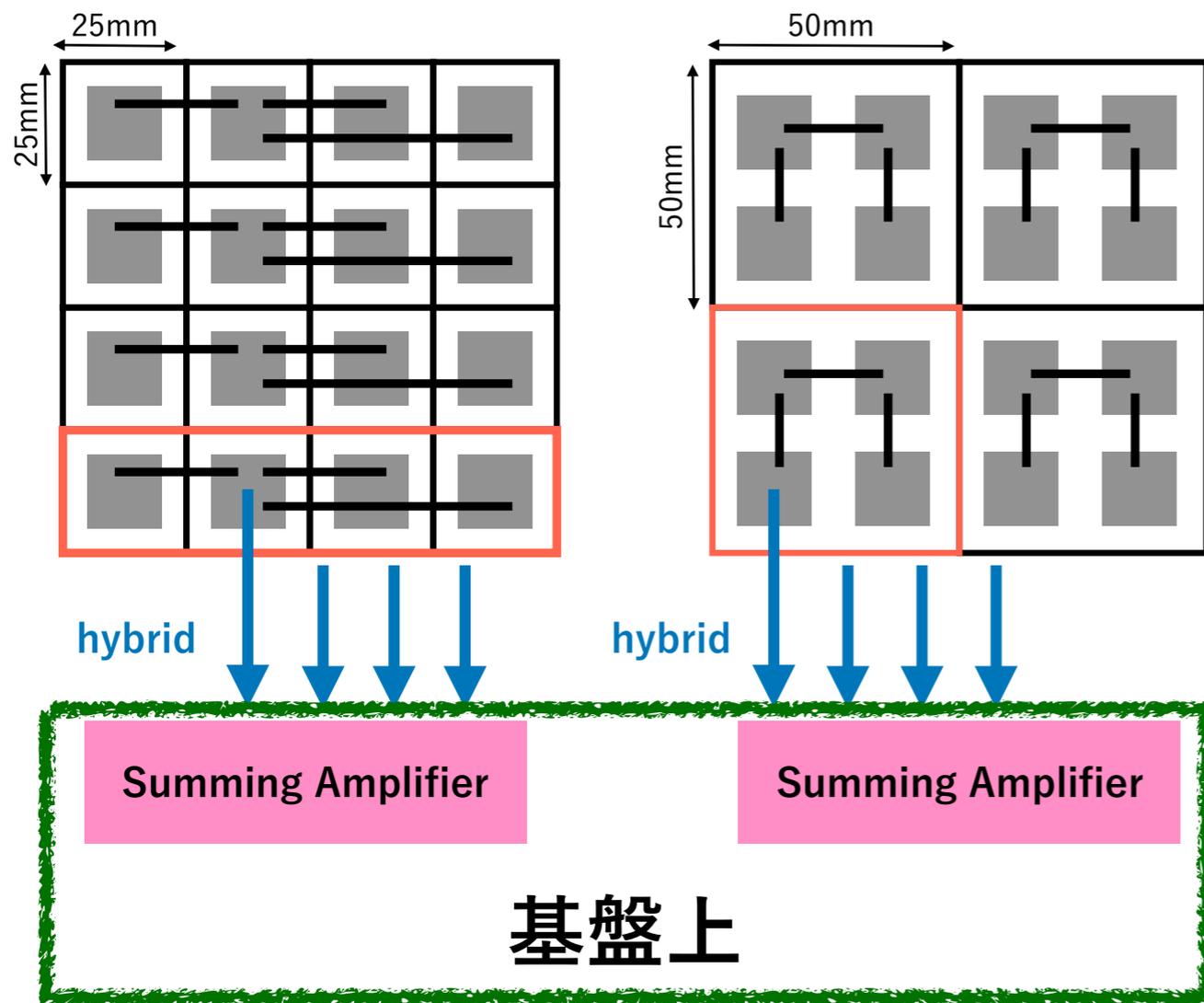
治具を使ってCsl表面に接着



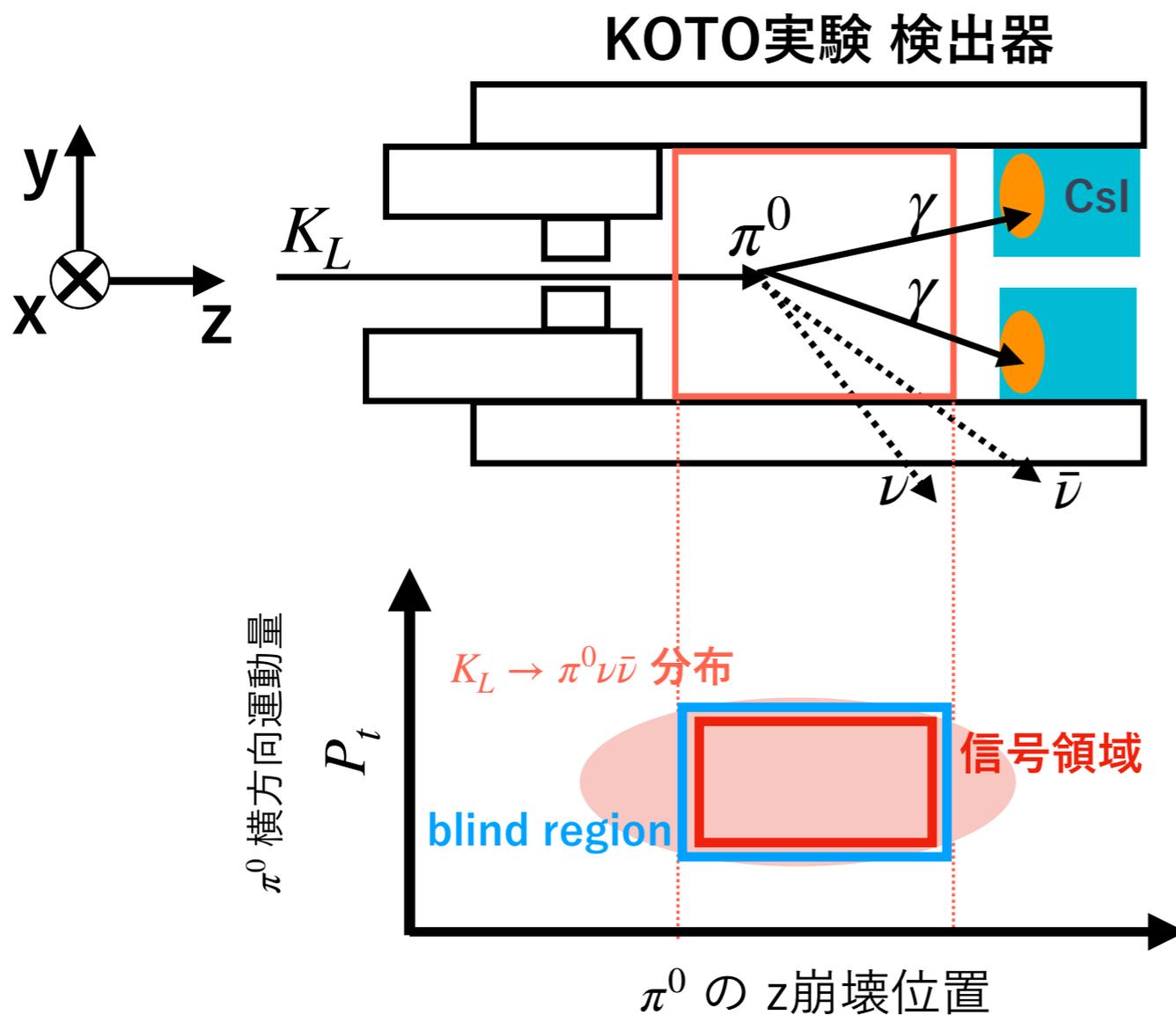
# MPPCの回路

項目	直列接続	ハイブリッド接続	並列接続
基板実装	容易	並列回路よりも複雑	複雑
印加電圧	高い	低い	低い
パイルアップ確率	低い	低い	低い
時間分解能	小さい	小さい	大きい
放射線損傷によるゲインの不揃い	発生しない	発生しない	発生しない

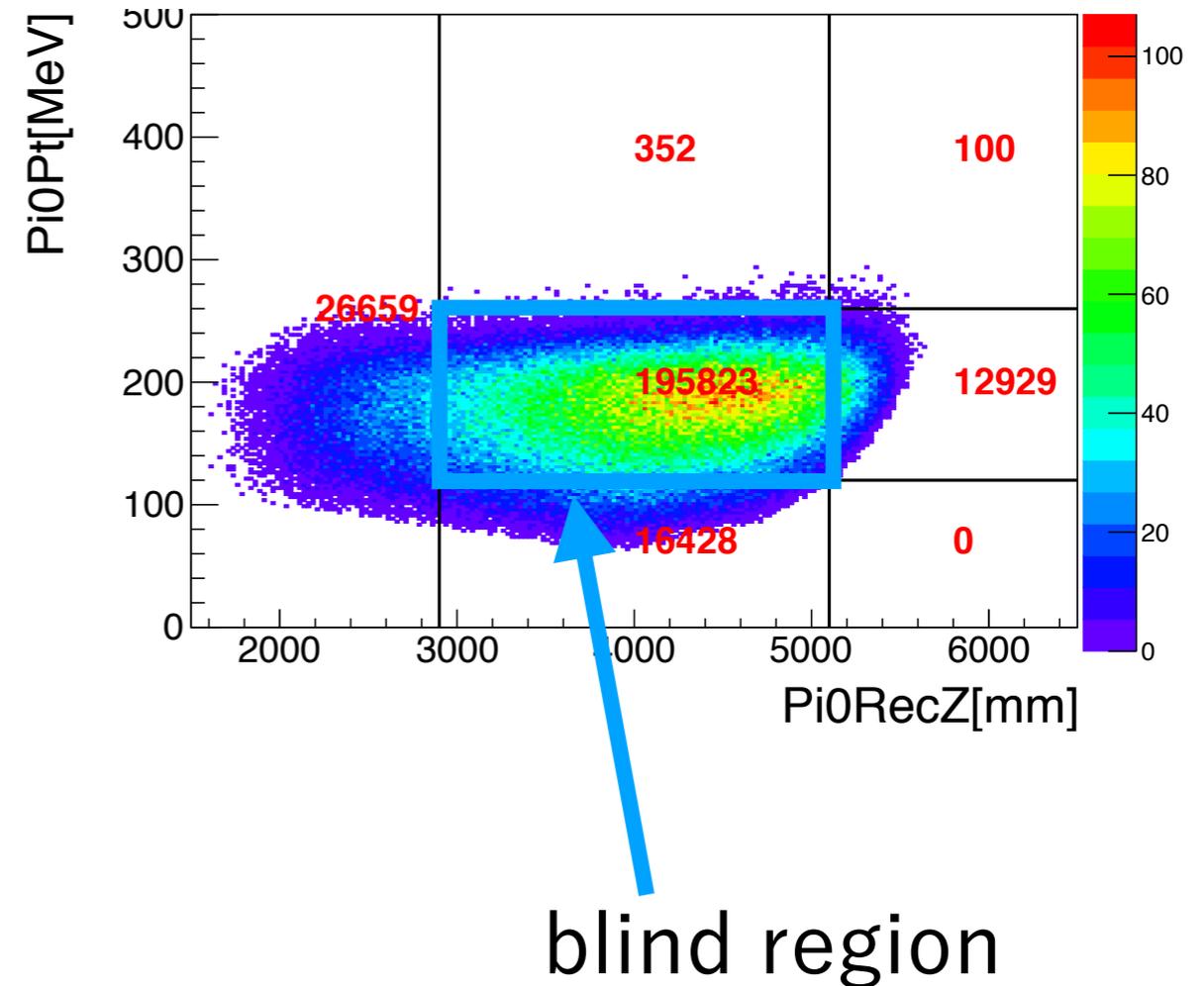
# MPPCへの配線



# 解析手法



信号事象の  $P_t - Z_{\text{vtX}}$  分布 (MC)

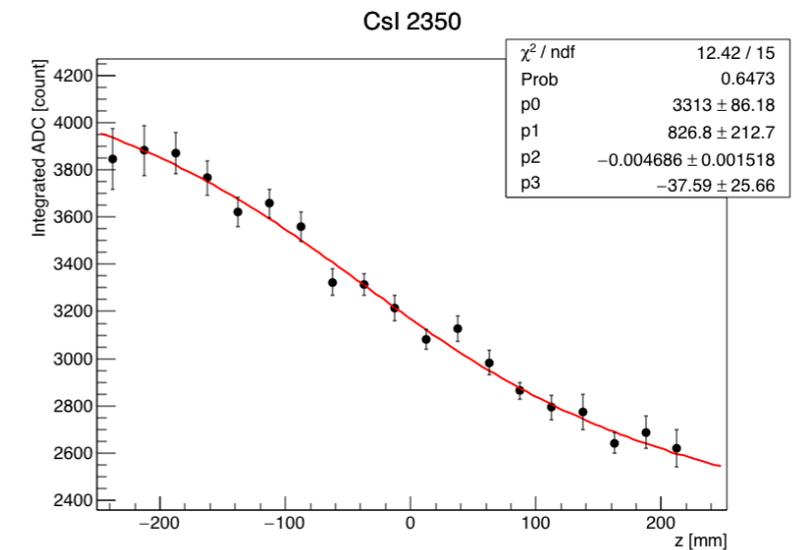
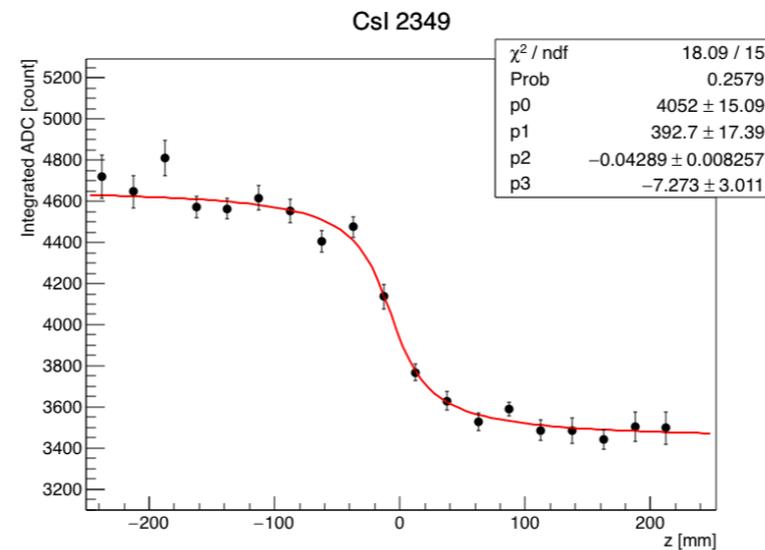
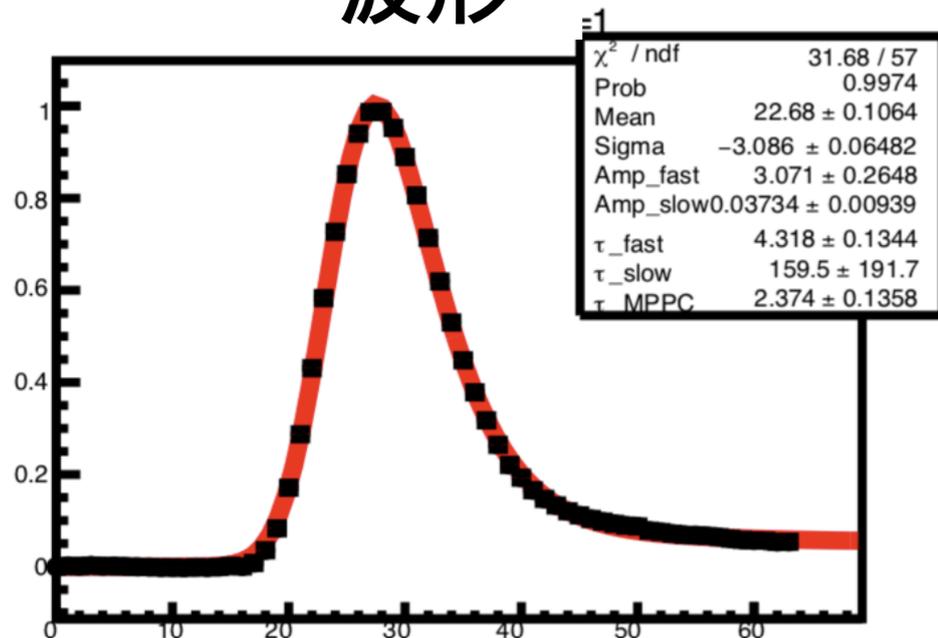


- ① 検出器に囲まれた領域で崩壊する
- ②  $\nu$ が運動量を持ち去る  $\rightarrow \pi^0$ の  $P_t$ が比較的高い  
 $\rightarrow$  信号領域を定義

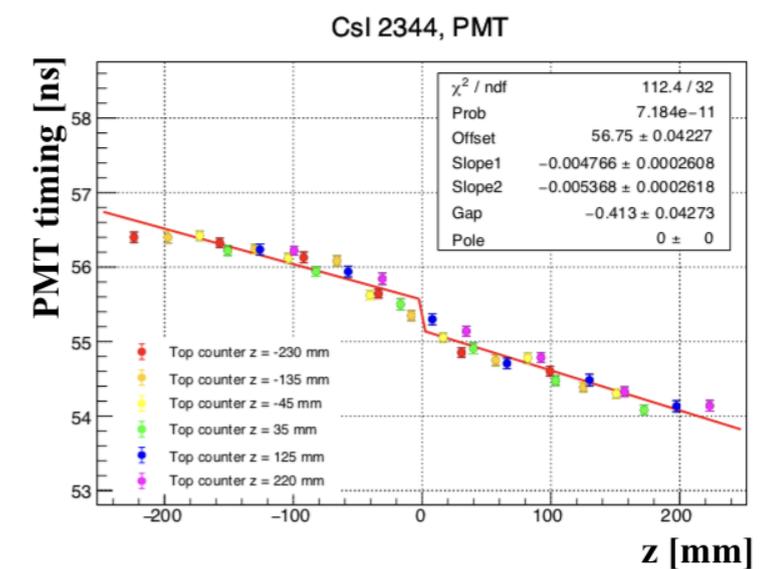
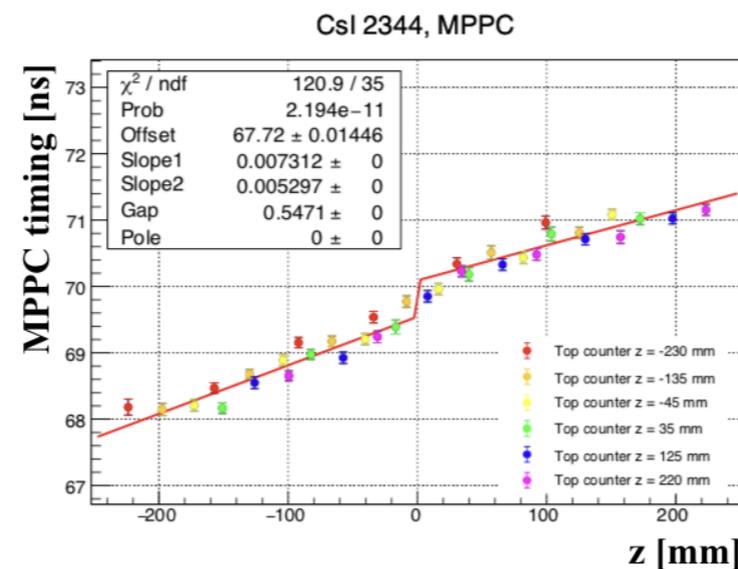
# 宇宙線測定で得た物理量

## ヒットz位置と光量の相関

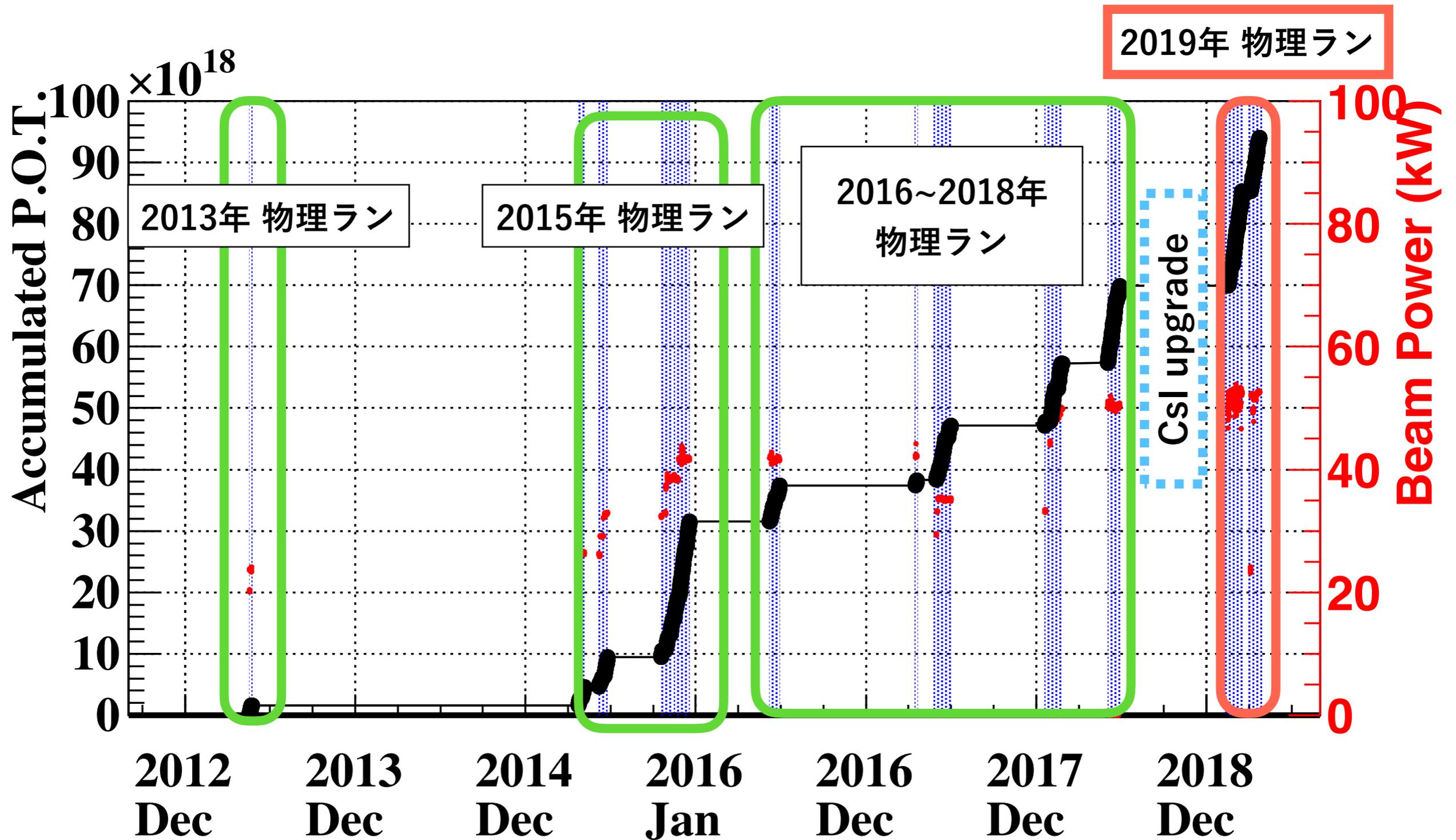
### 波形



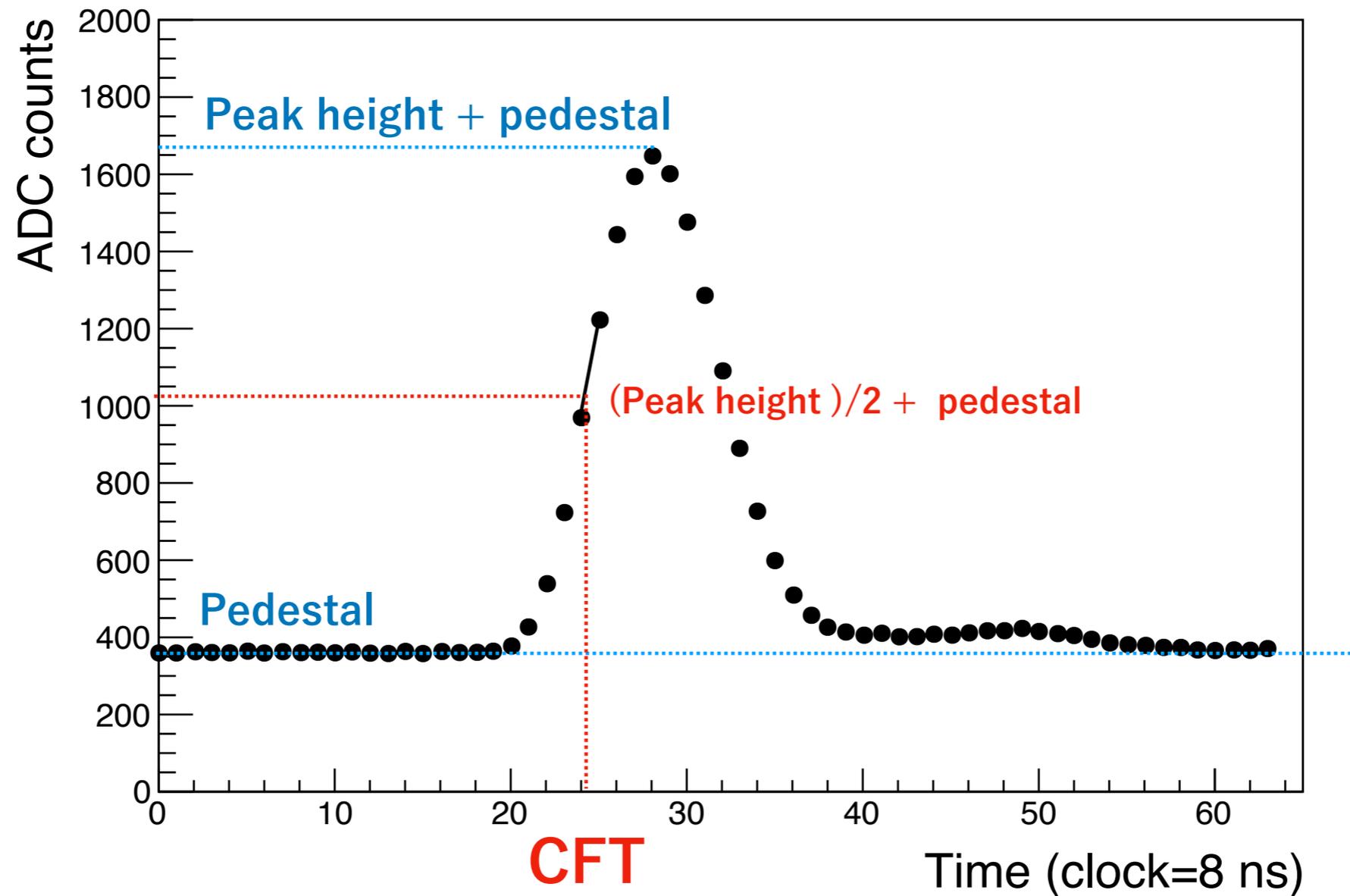
## ヒットz位置と検出時間の相関



# POT



# 波形解析

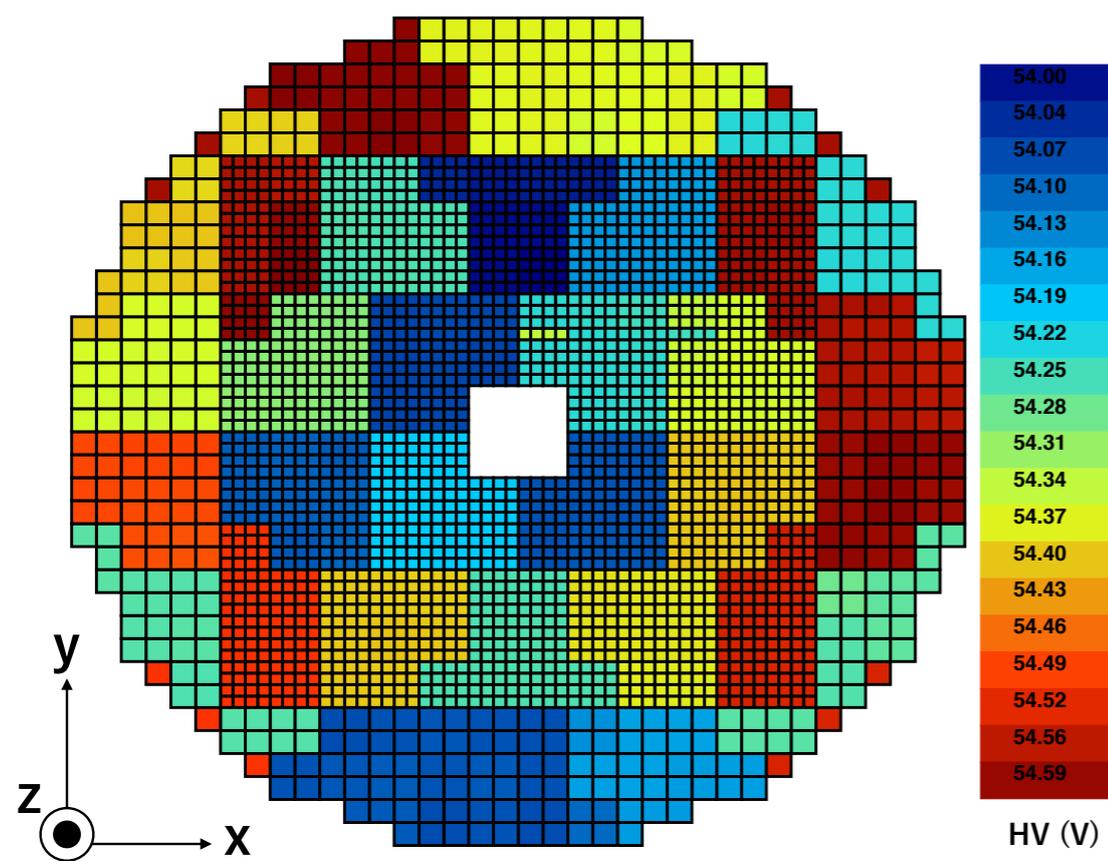


ペDESTAL：64点ある波形のデータ点のうち、最初の10点と最後の10点のうち標準偏差の小さい方の平均

時間：波形の立ち上がり部分で、波高の1/2の高さに対応する時間。

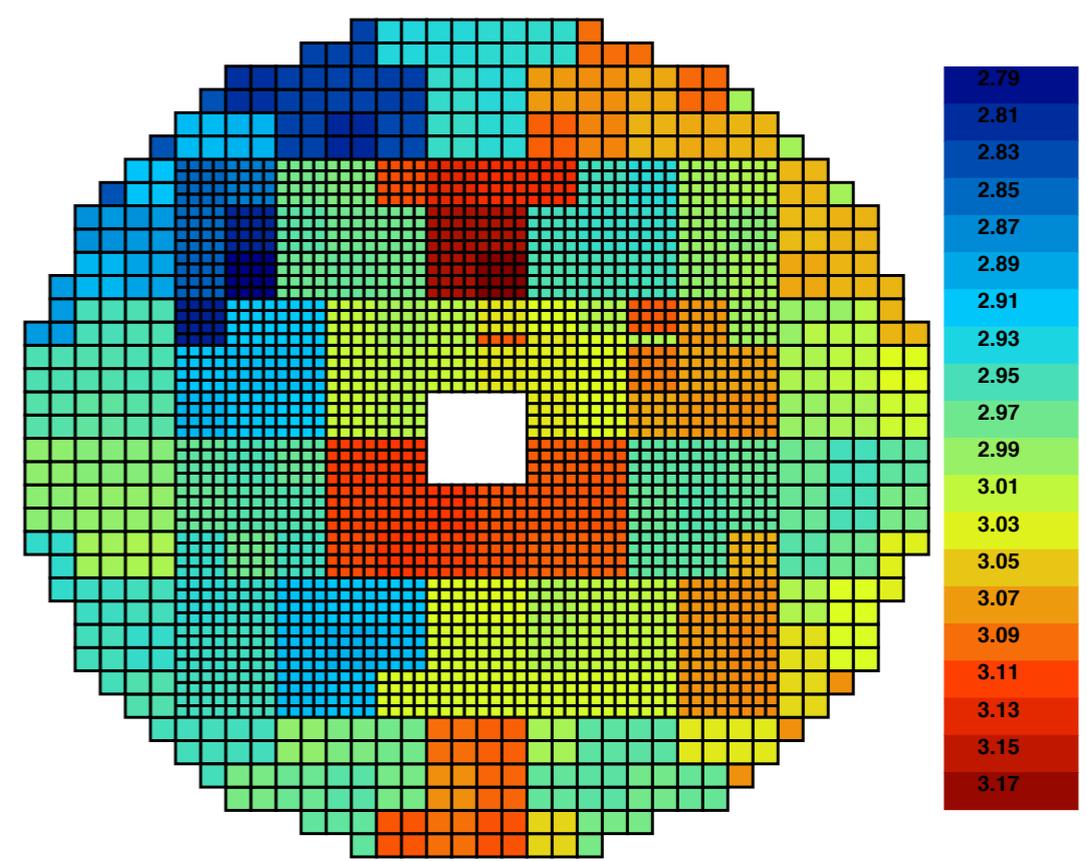
# MPPCへの印加電圧

## 印加電圧



54.0~54.5 V

## オーバー電圧



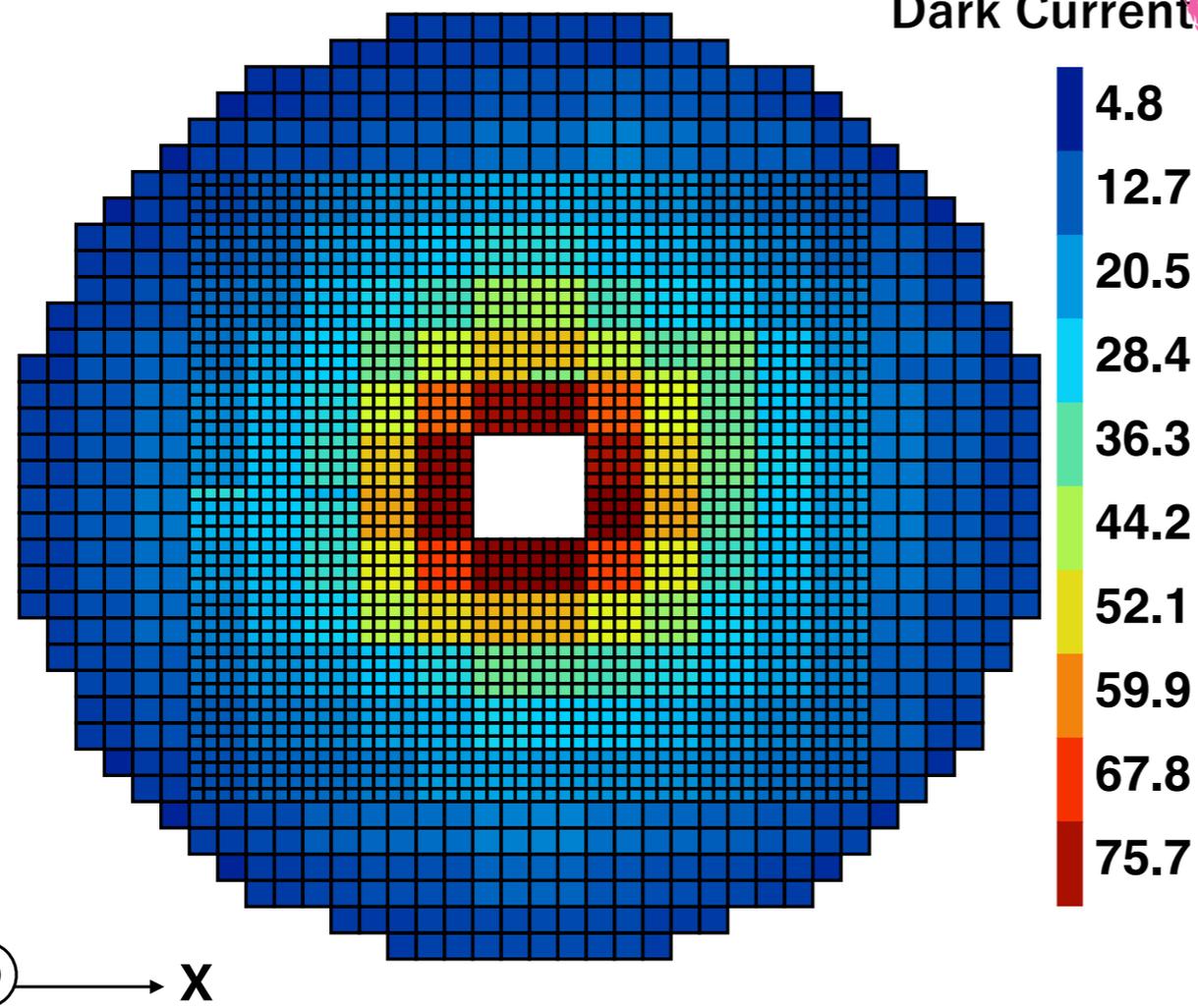
2.8~3.2 V

# 暗電流

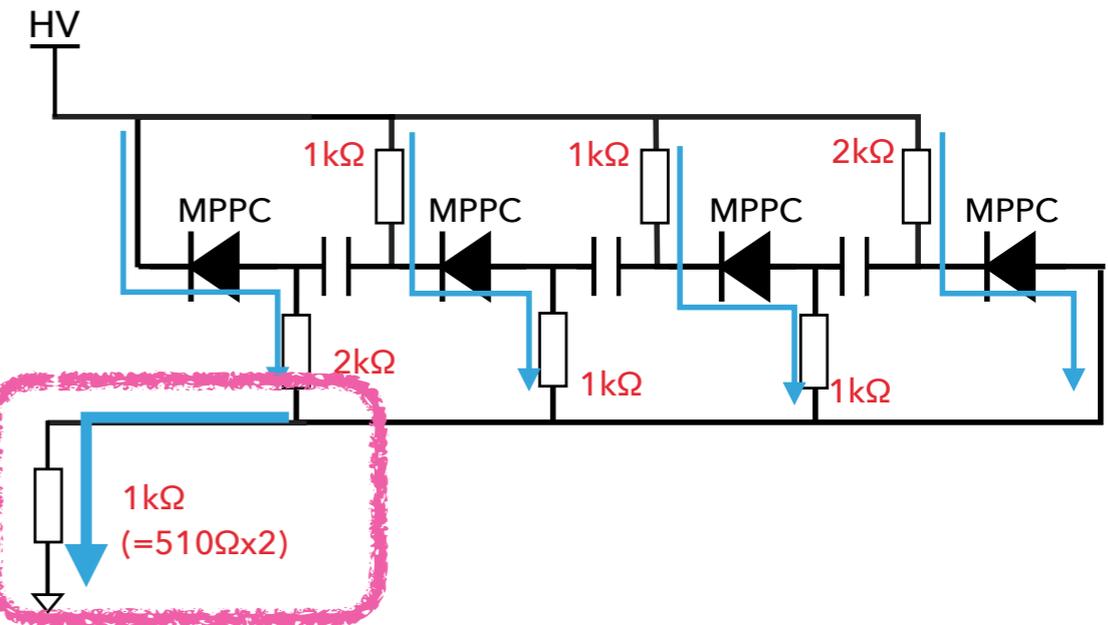
データ取得前の暗電流  $\sim 0 \mu A$

データ取得後半での暗電流

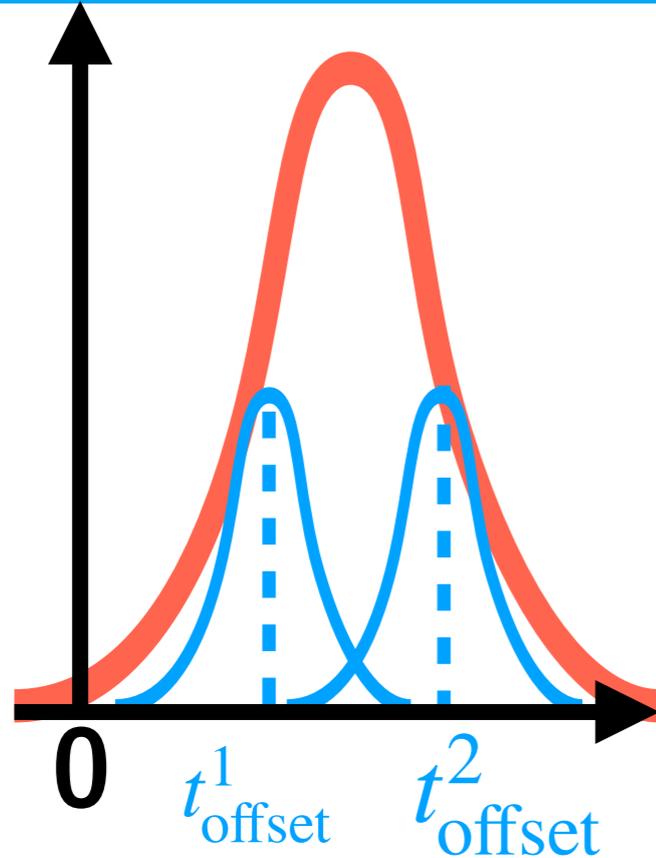
Dark Current ( $\mu A$ )



暗電流によるオーバー電圧減少



# 時間較正

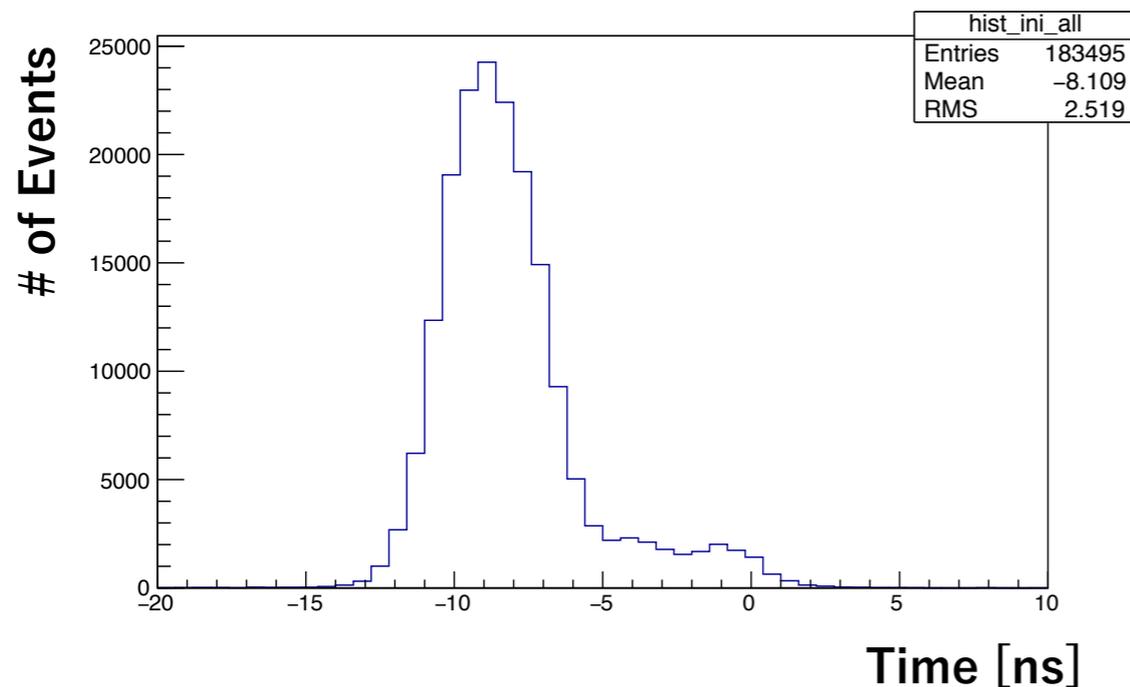


$\gamma$  線サンプルの  $\Delta T$  分布を使う

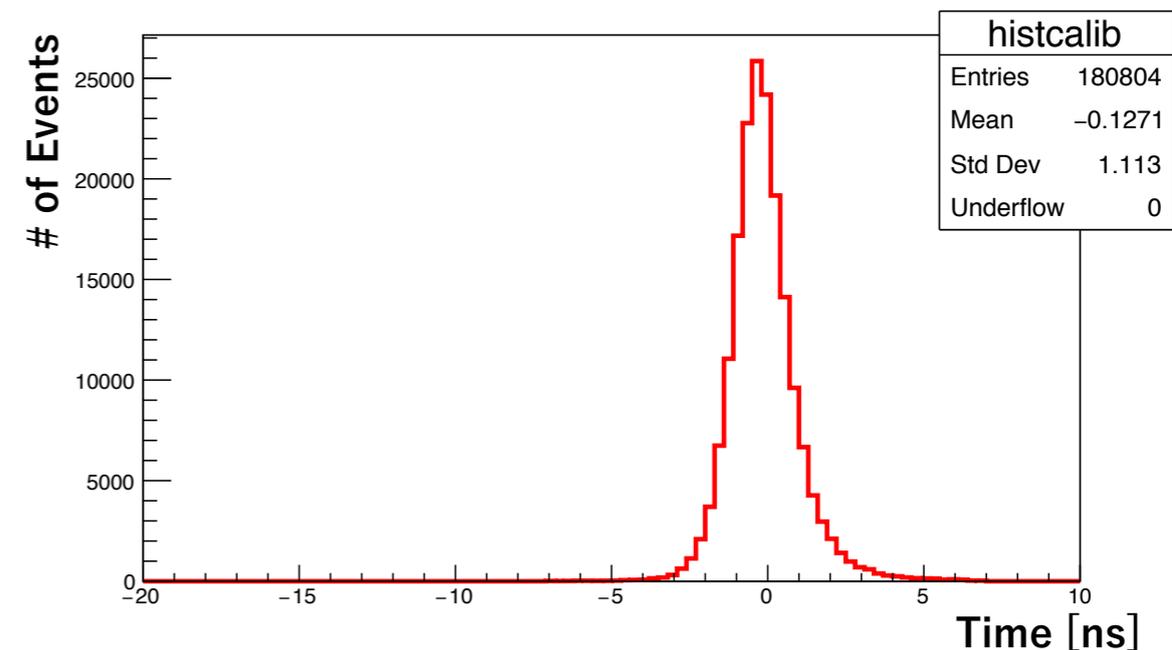
MPPCのチャンネルごとの  $\Delta T$  分布のオフセット  $\rightarrow t_{\text{offset}}^{\text{channel}}$

$t_{\text{offset}}^{\text{channel}}$  を差し引くことで時間較正

## 時間較正前の $\Delta T$ 分布

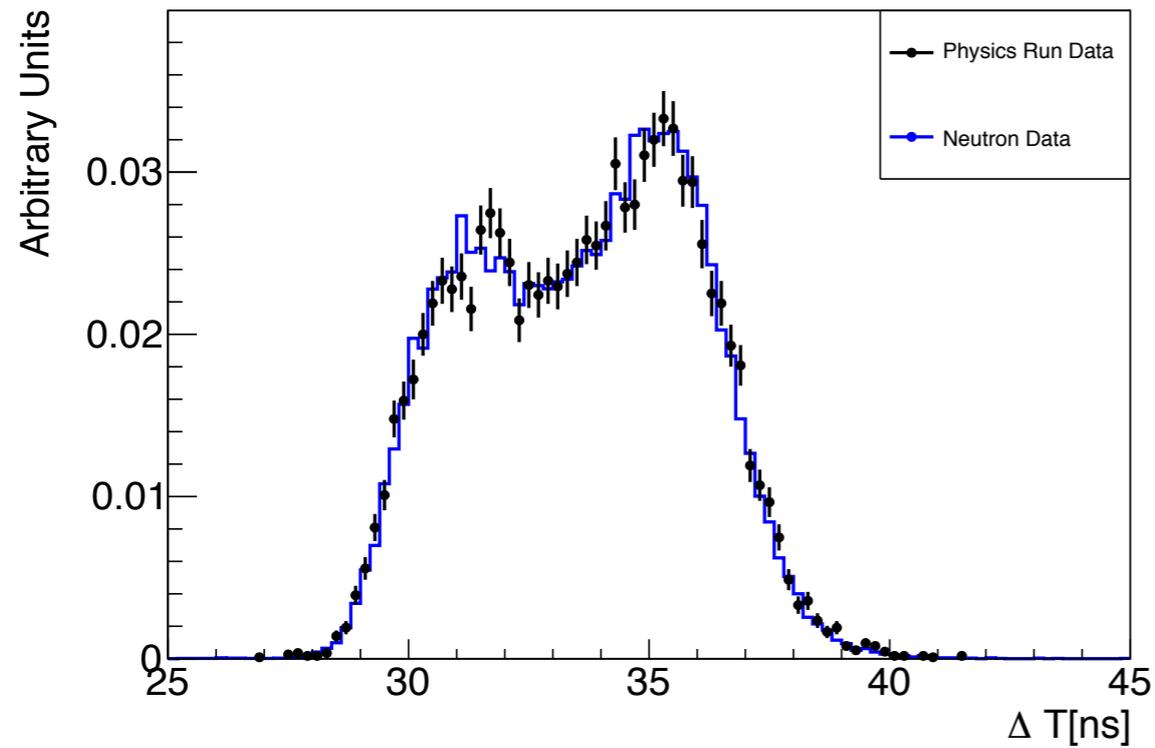


## 時間較正後の $\Delta T$ 分布



# $\Delta T$ 分布の比較

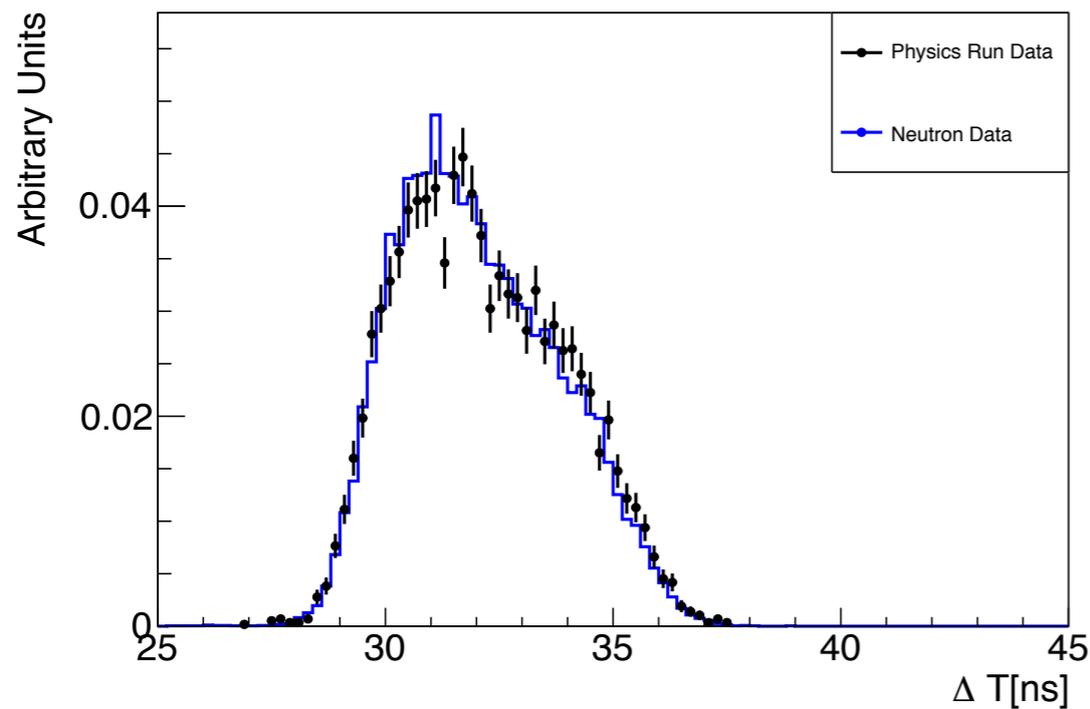
両方のクラスター



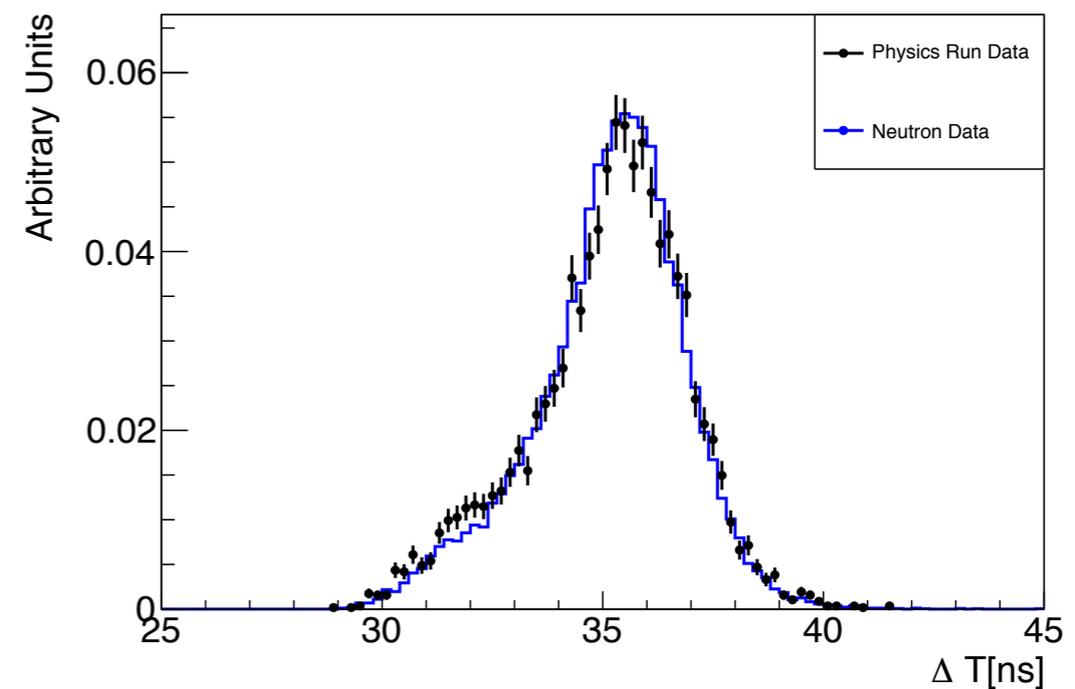
中性子背景事象

散乱中性子サンプル

●  $\Delta T$ が小さい方のクラスター

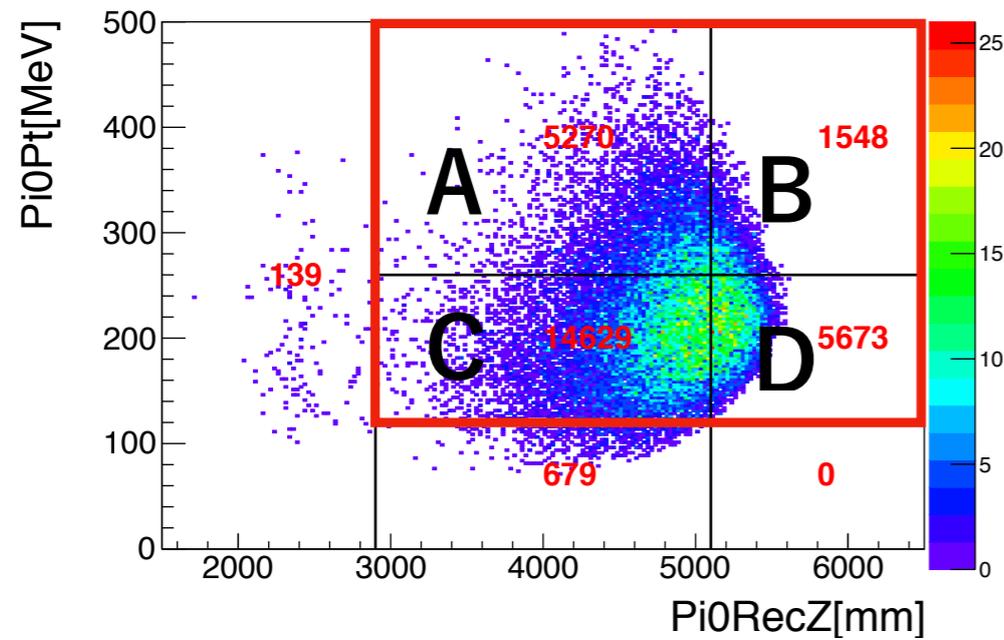


$\Delta T$ が大きい方のクラスター

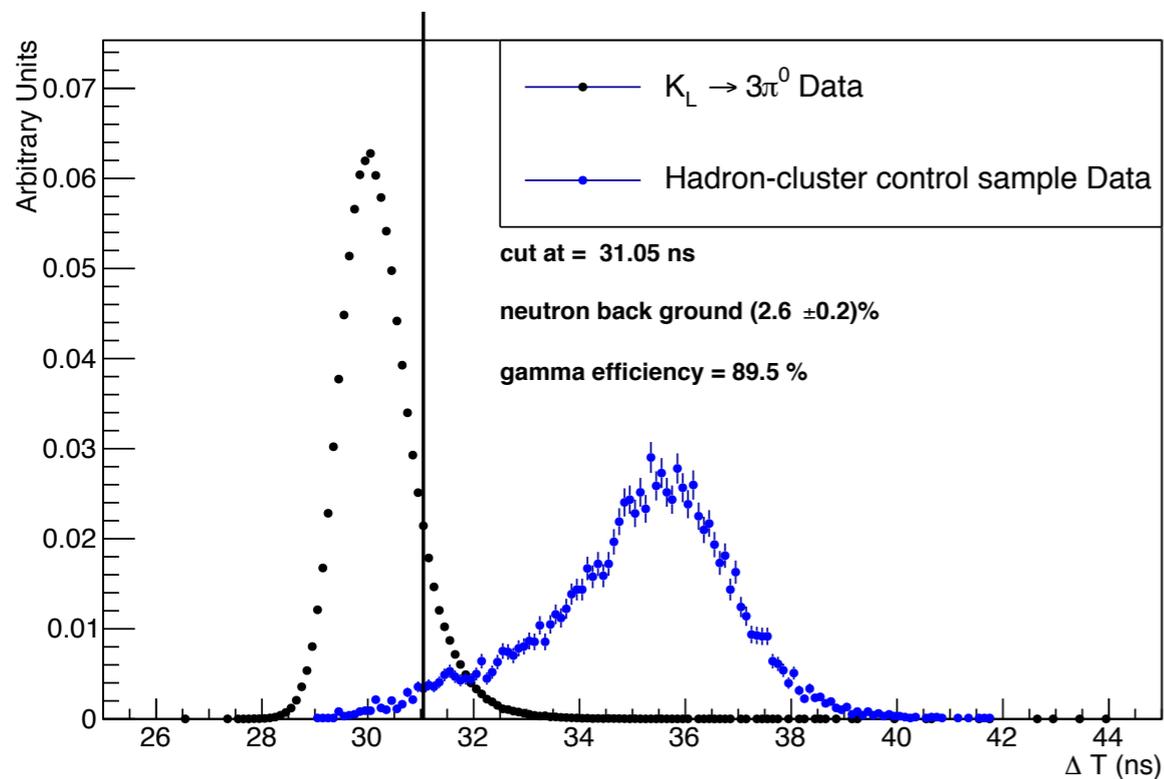


# 中性子背景事象に対する削減能力

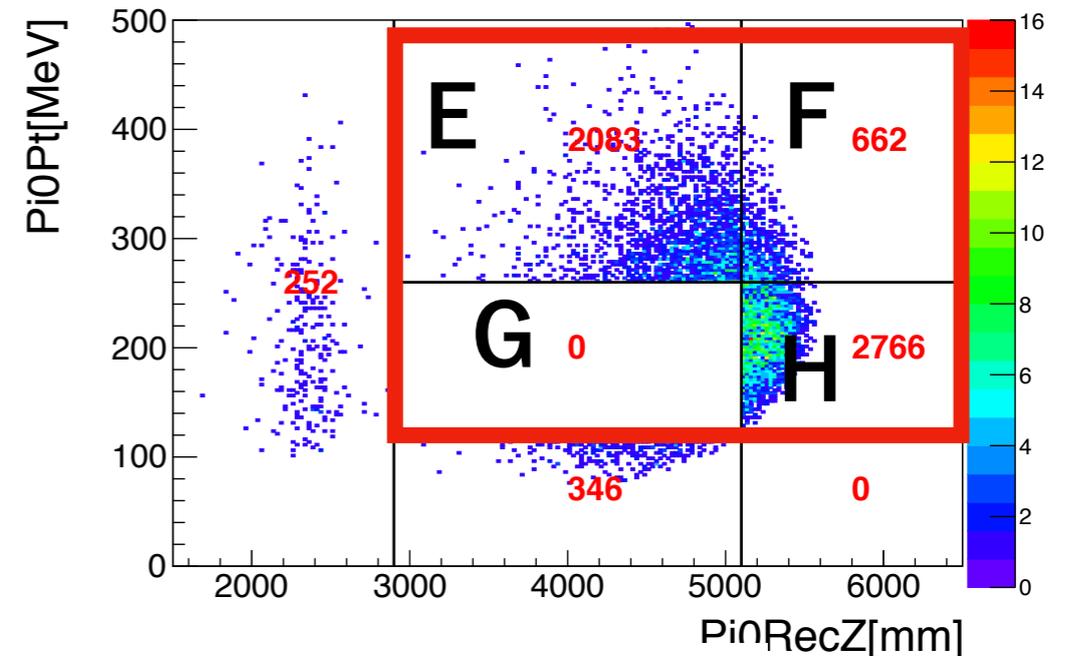
## 散乱中性子サンプル



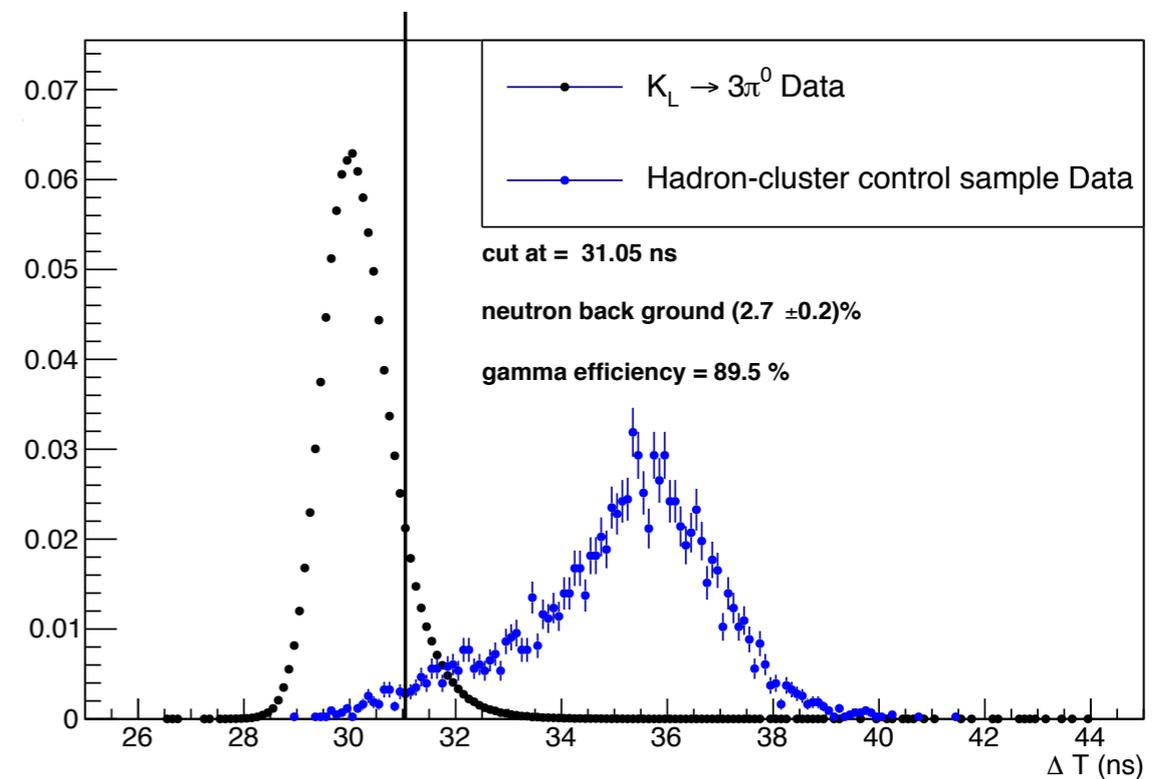
### A+B+D 領域



## 中性子背景事象



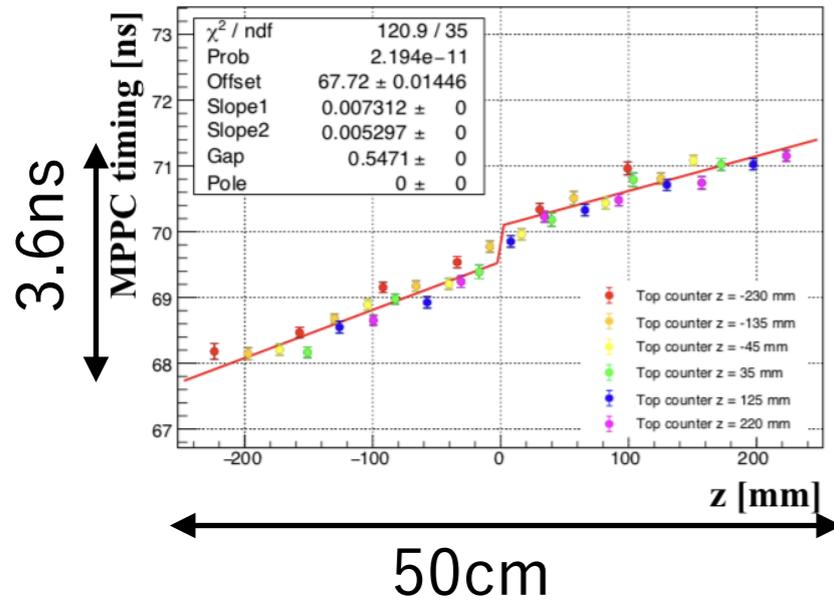
### E+F+H 領域



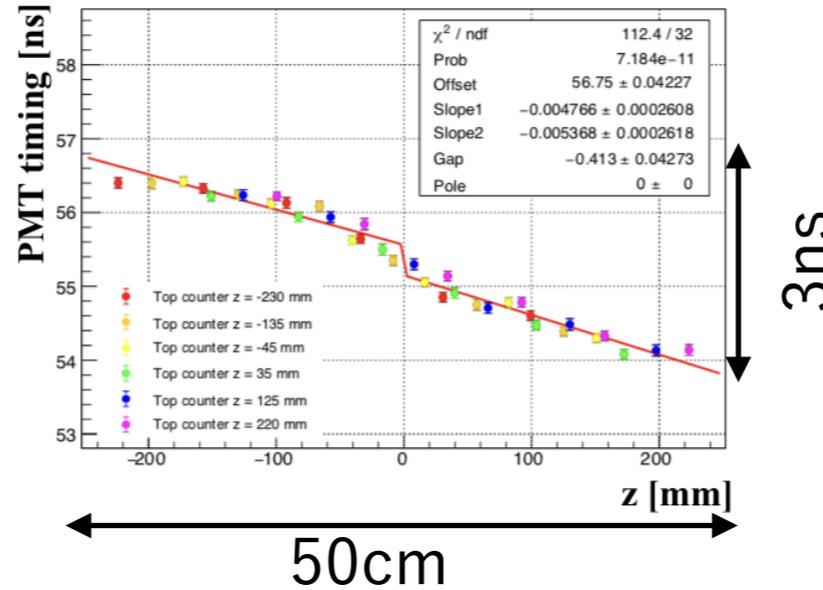
# ΔT分布の幅

## ヒットz位置と検出時間

MPPC



PMT



1m → 6~7ns

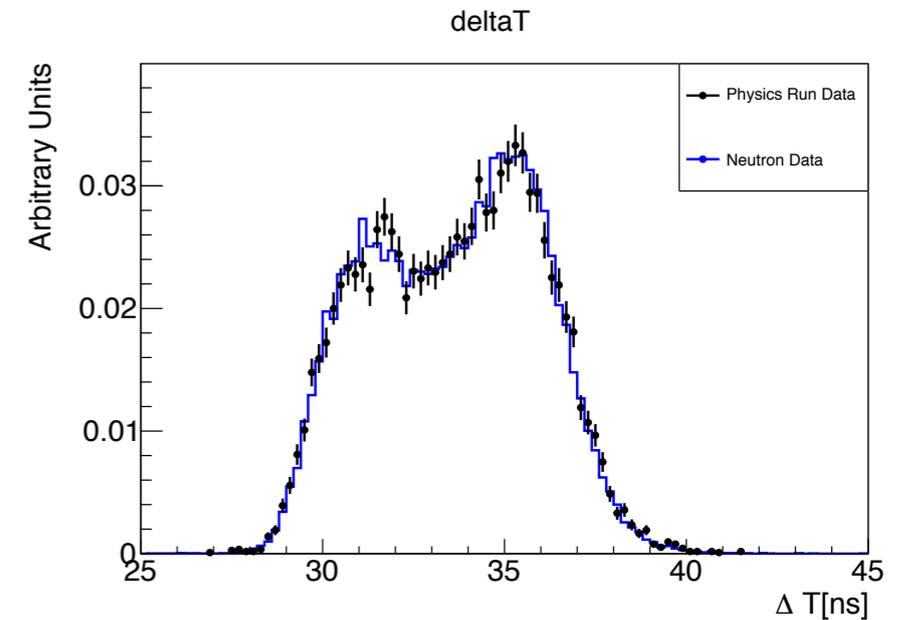
$(1.7 \sim 1.4) \times 10^8 \text{ [m/s]}$   
 →  $(0.55 \sim 0.48) * c$



$$\begin{aligned} \Delta T &= T_{\text{MPPC}} - T_{\text{PMT}} \\ &= 0 - (3 \text{ ns}) \\ &= -3 \text{ ns} \end{aligned}$$

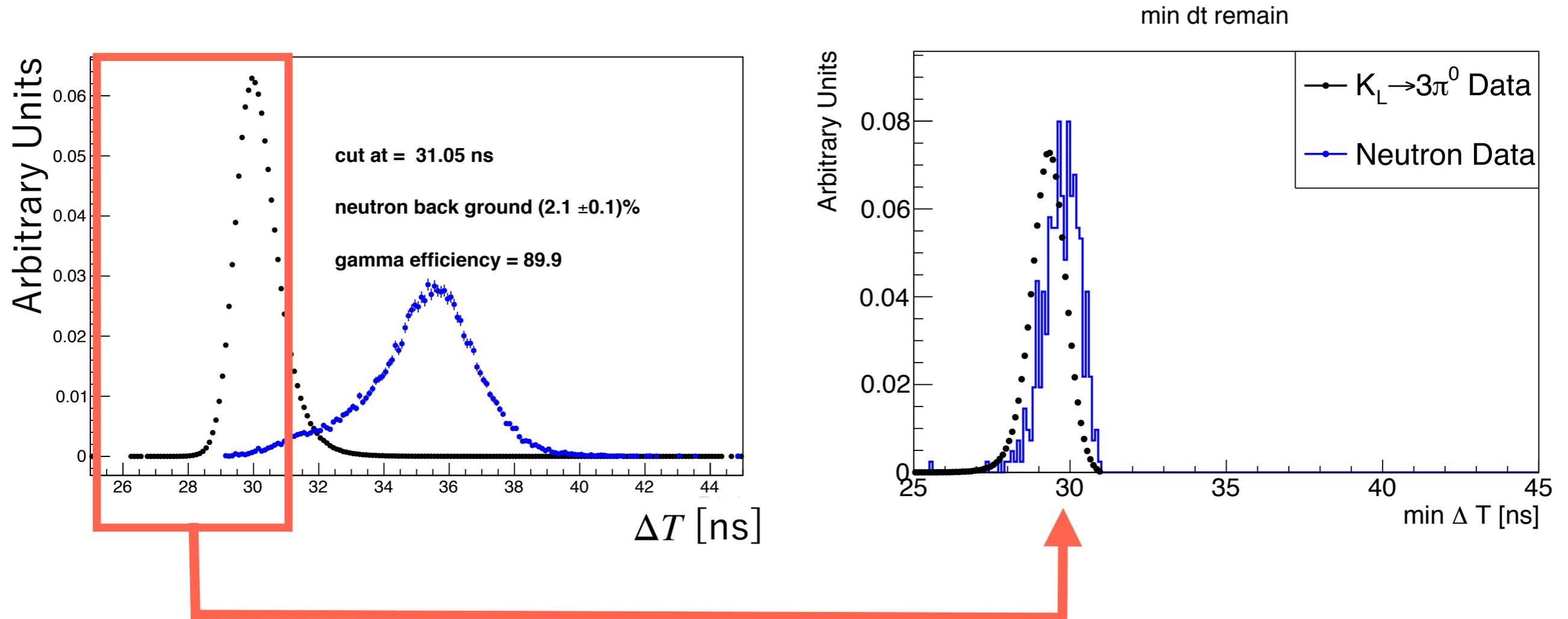


$$\begin{aligned} \Delta T &= T_{\text{MPPC}} - T_{\text{PMT}} \\ &= 3.5 \text{ ns} - 0 \\ &= 3.5 \text{ ns} \end{aligned}$$



分布の幅 ~ 6.5 ns + 結晶ごとの伝搬速度の違いなど

# $\Delta T$ カットで残った事象に対する分布



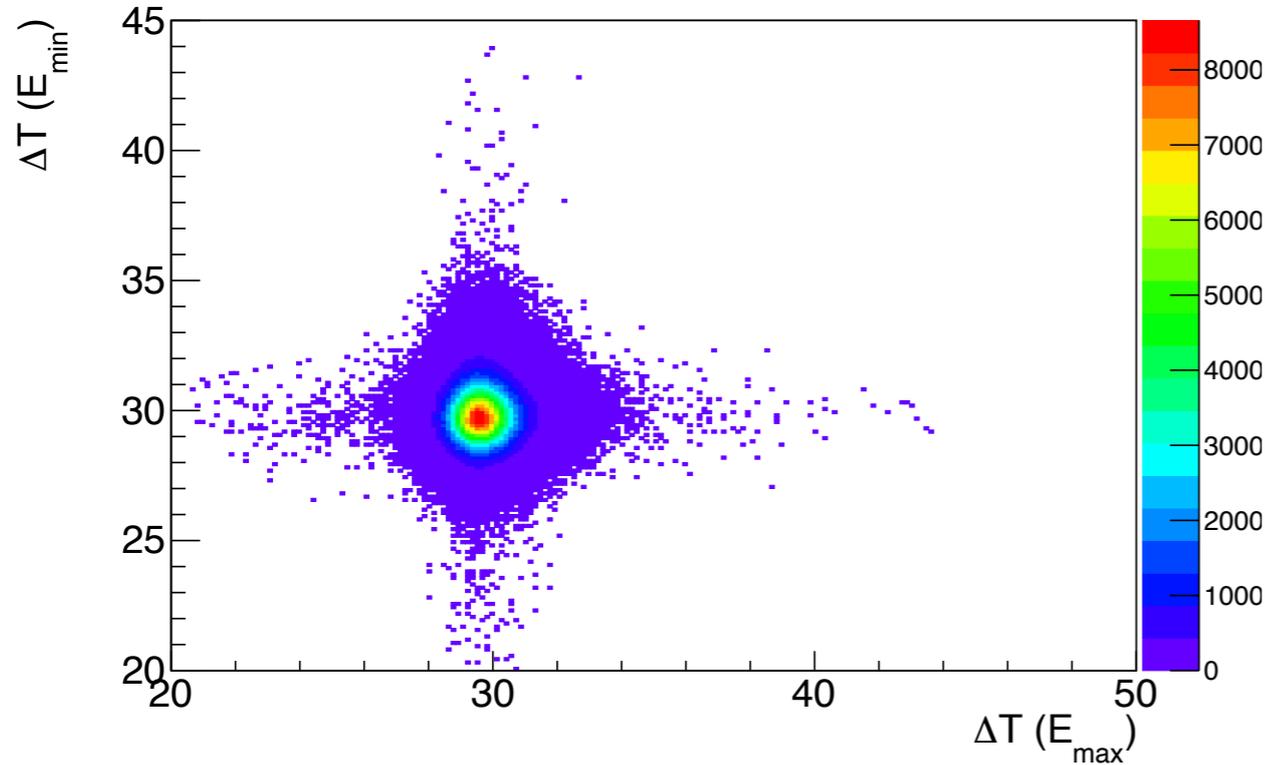
残った事象の小さい方の  $\Delta T$  分布

$\Delta T$  カットでカットできなかった散乱中性子サンプルは、小さい方の  $\Delta T$  分布でもカットできない

# $\Delta T$ のクラスター間の相関

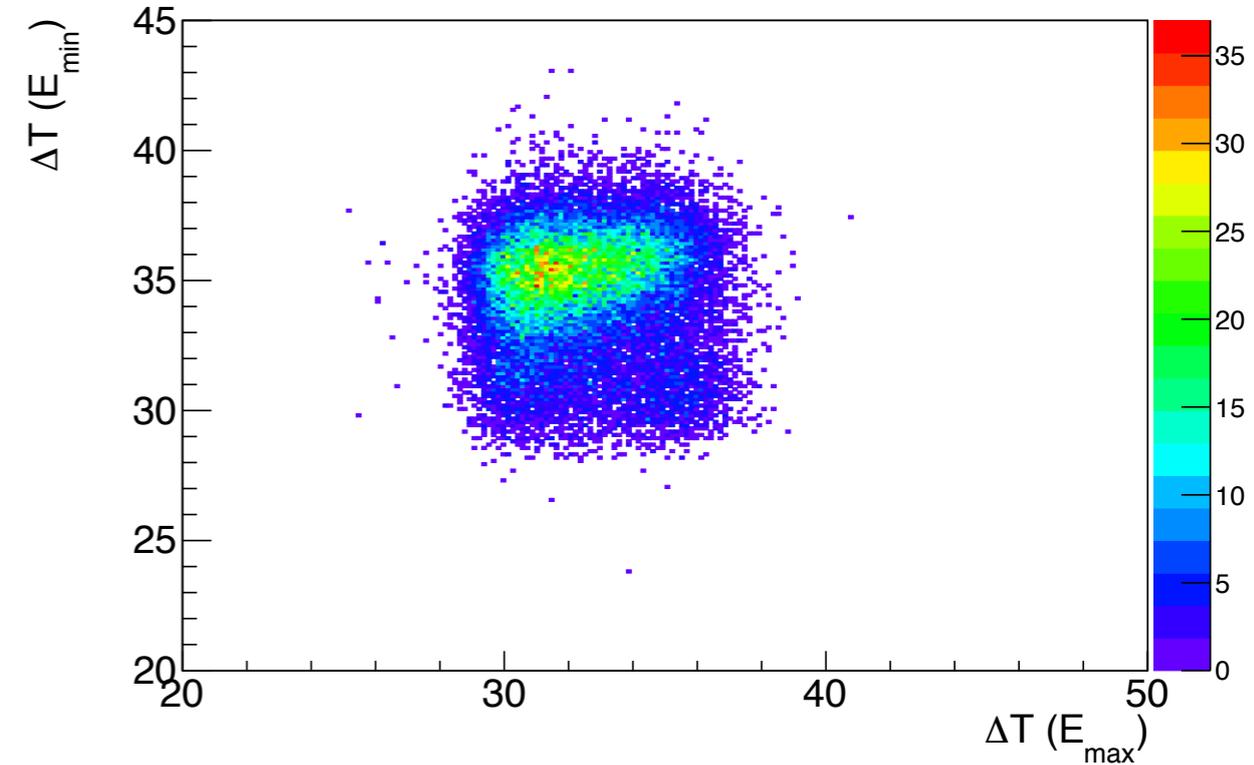
エネルギーの小さい方のクラスター

$\gamma$ 線サンプル



エネルギーの大きい方のクラスター

散乱中性子サンプル

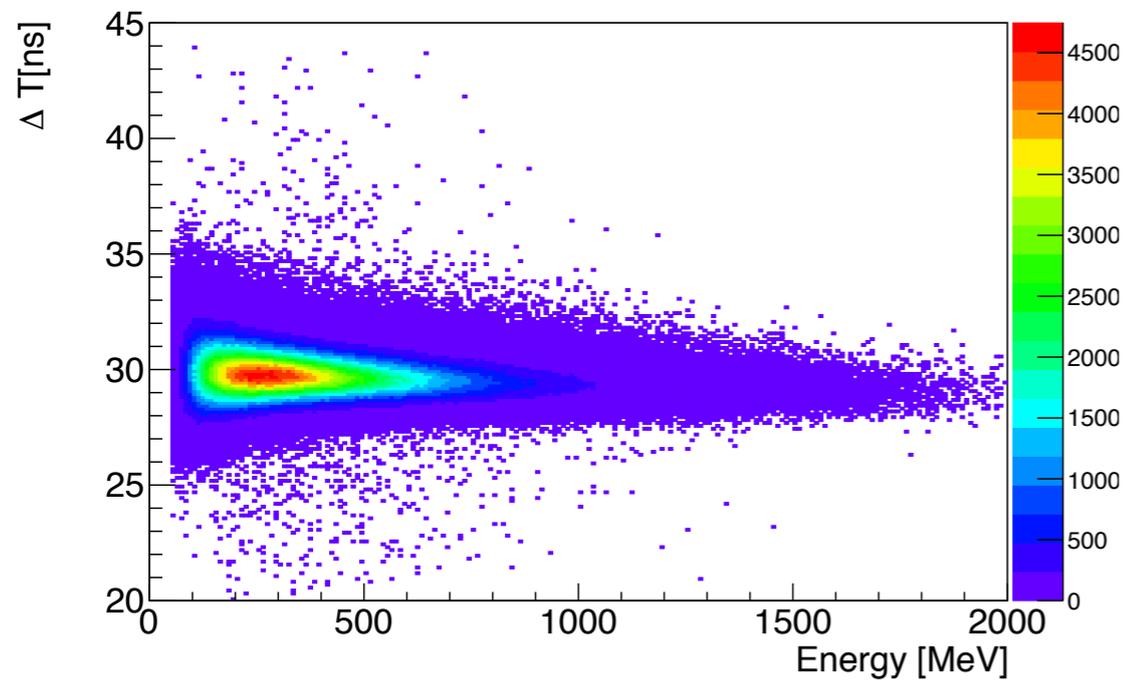


両方のクラスター共に $\sim 30\text{ns}$

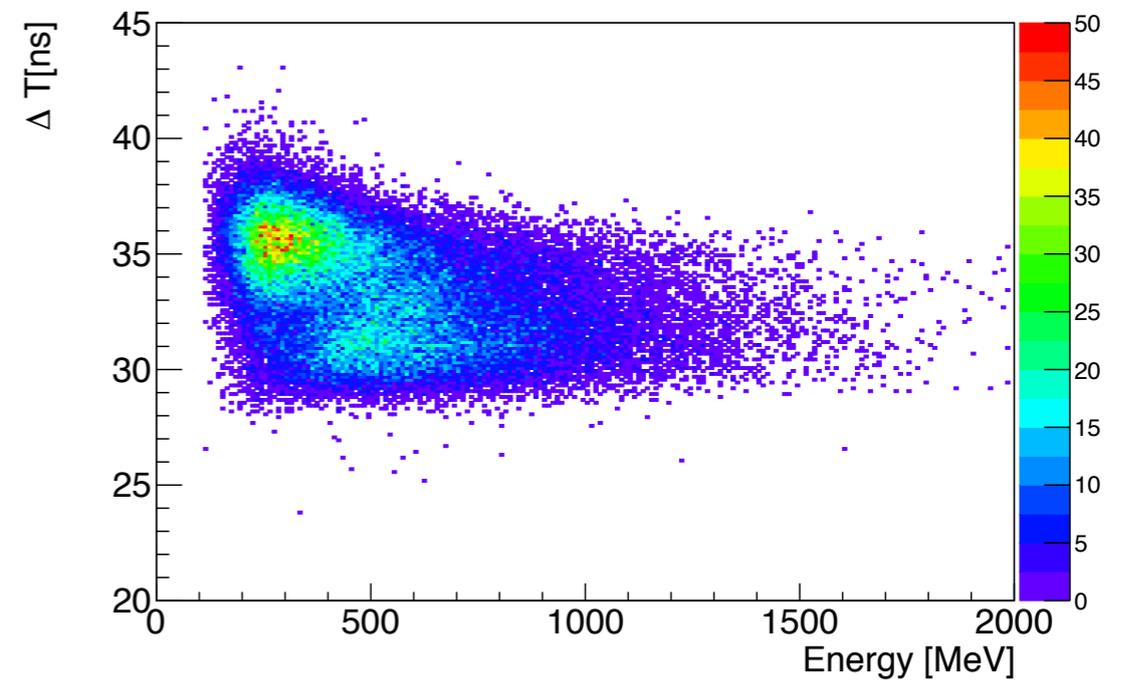
エネルギーの低いクラスターは  
 $\Delta T$ が小さくなりがち

# エネルギーと $\Delta T$ の相関

$\gamma$ 線サンプル

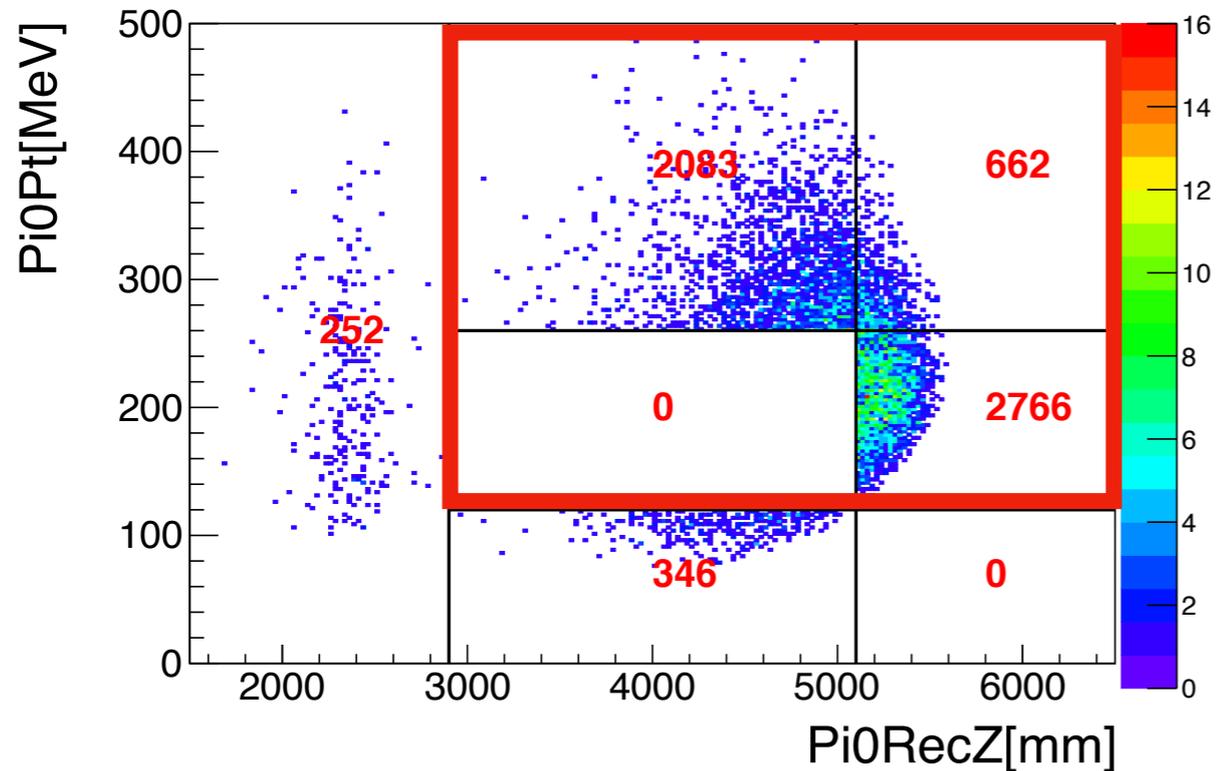


散乱中性子サンプル

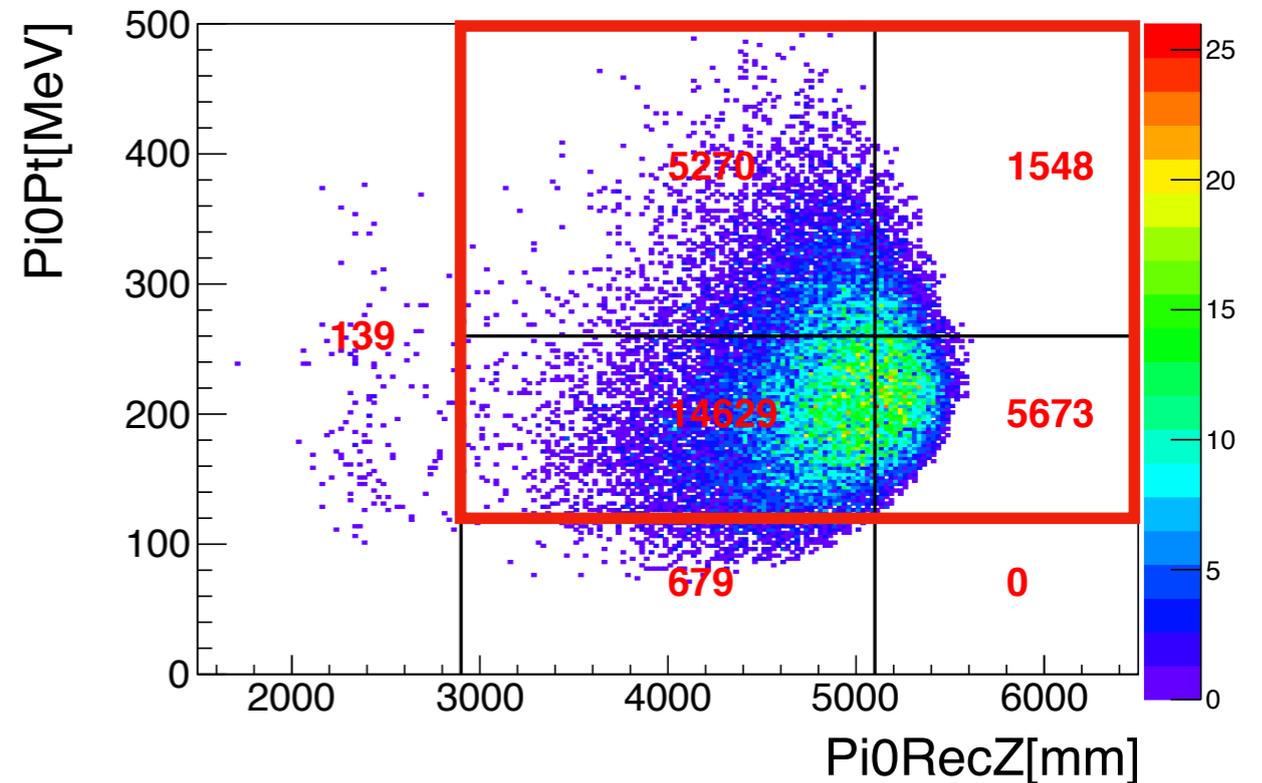


# 事象数

## 中性子背景事象



## 散乱中性子サンプル



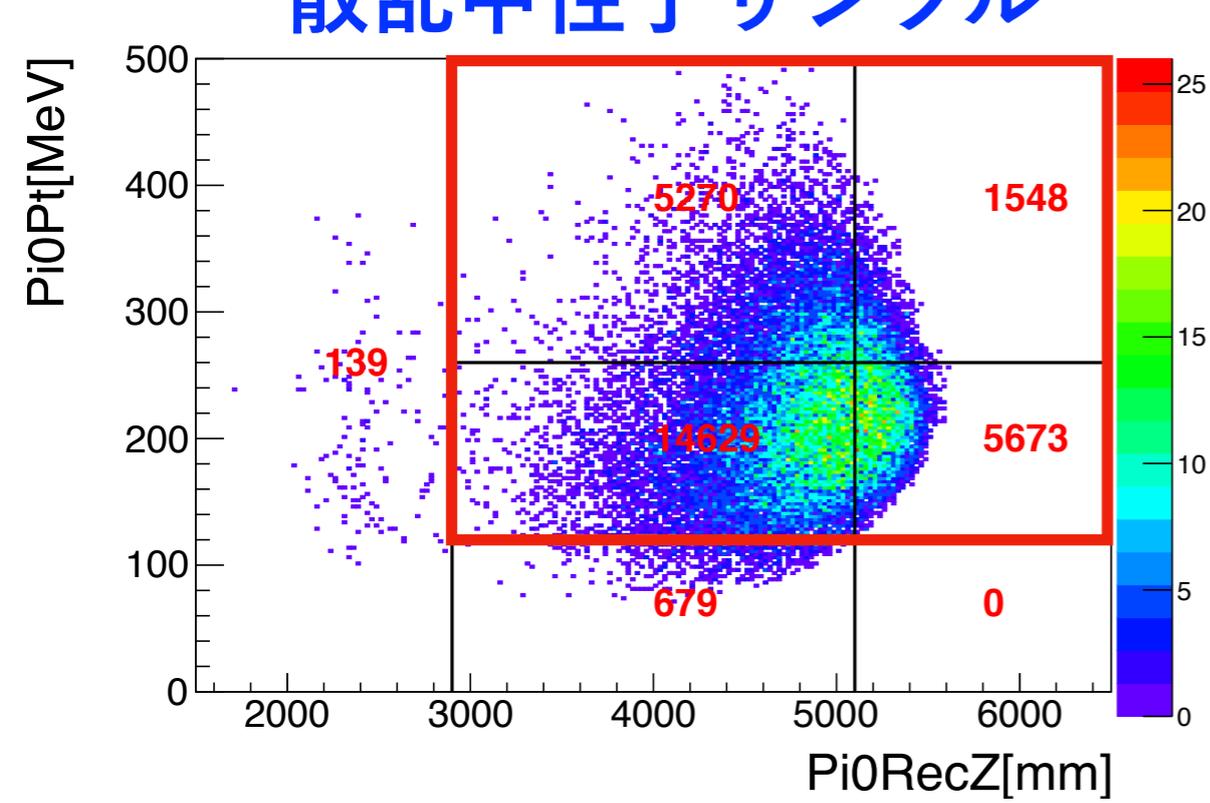
赤枠内のみ使用

事象数 = 5511

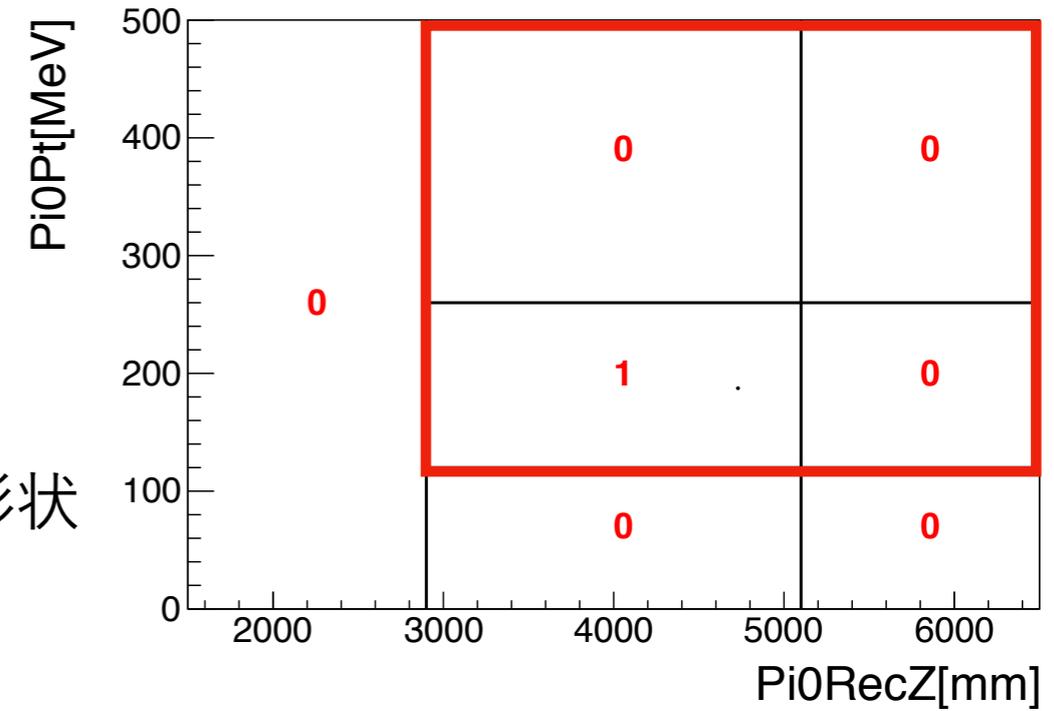
事象数 = 27120

# カット後の事象

## 散乱中性子サンプル

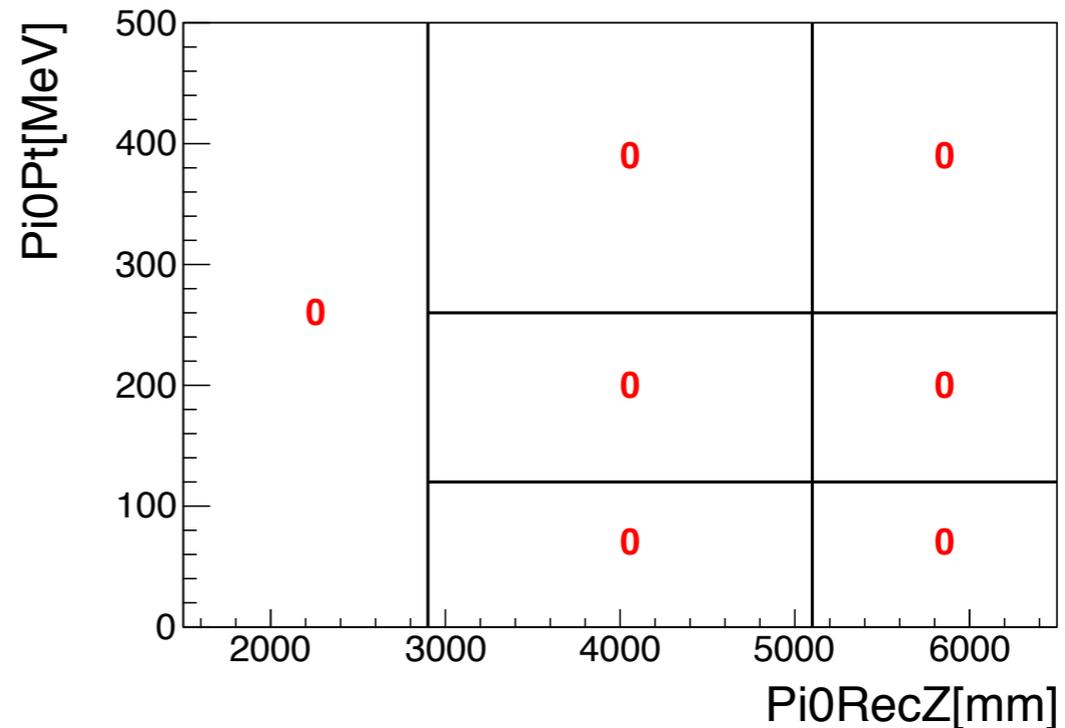


波形  
クラスター形状



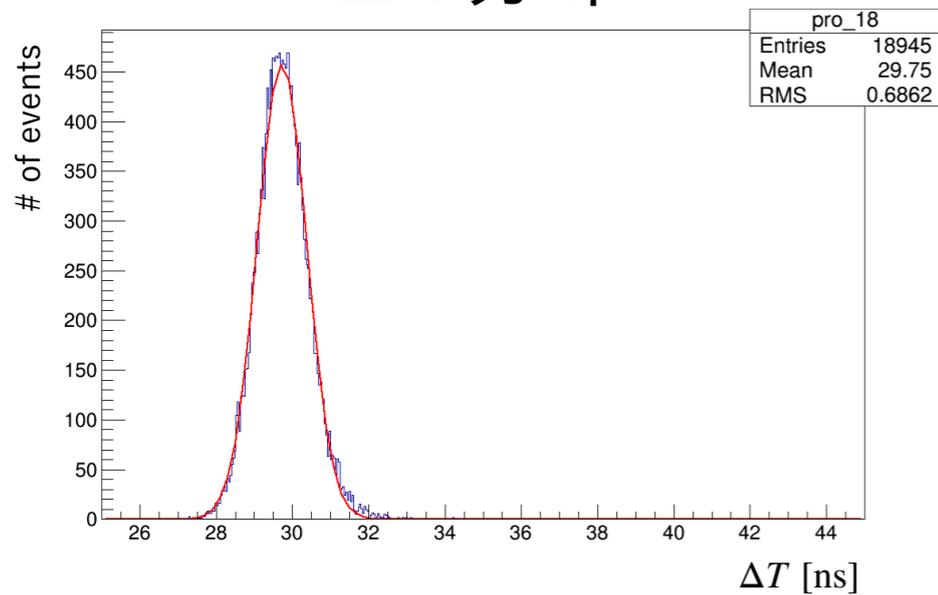
$\Delta T$  カット

PTZ (wdT\_wCSDDL\_wFPSD)

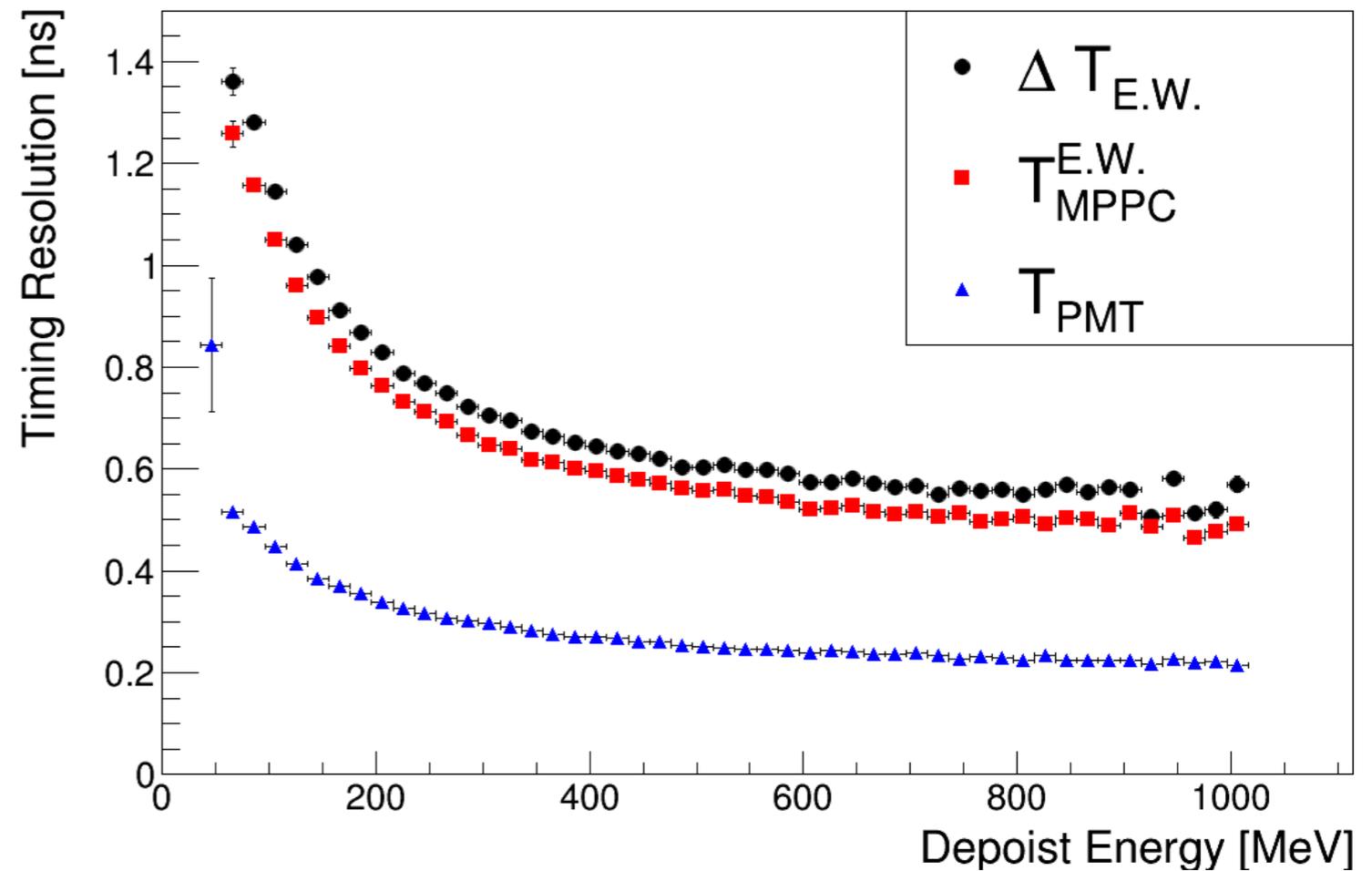


# 時間分解能

$\gamma$  線サンプルの  
 $\Delta T$ 分布



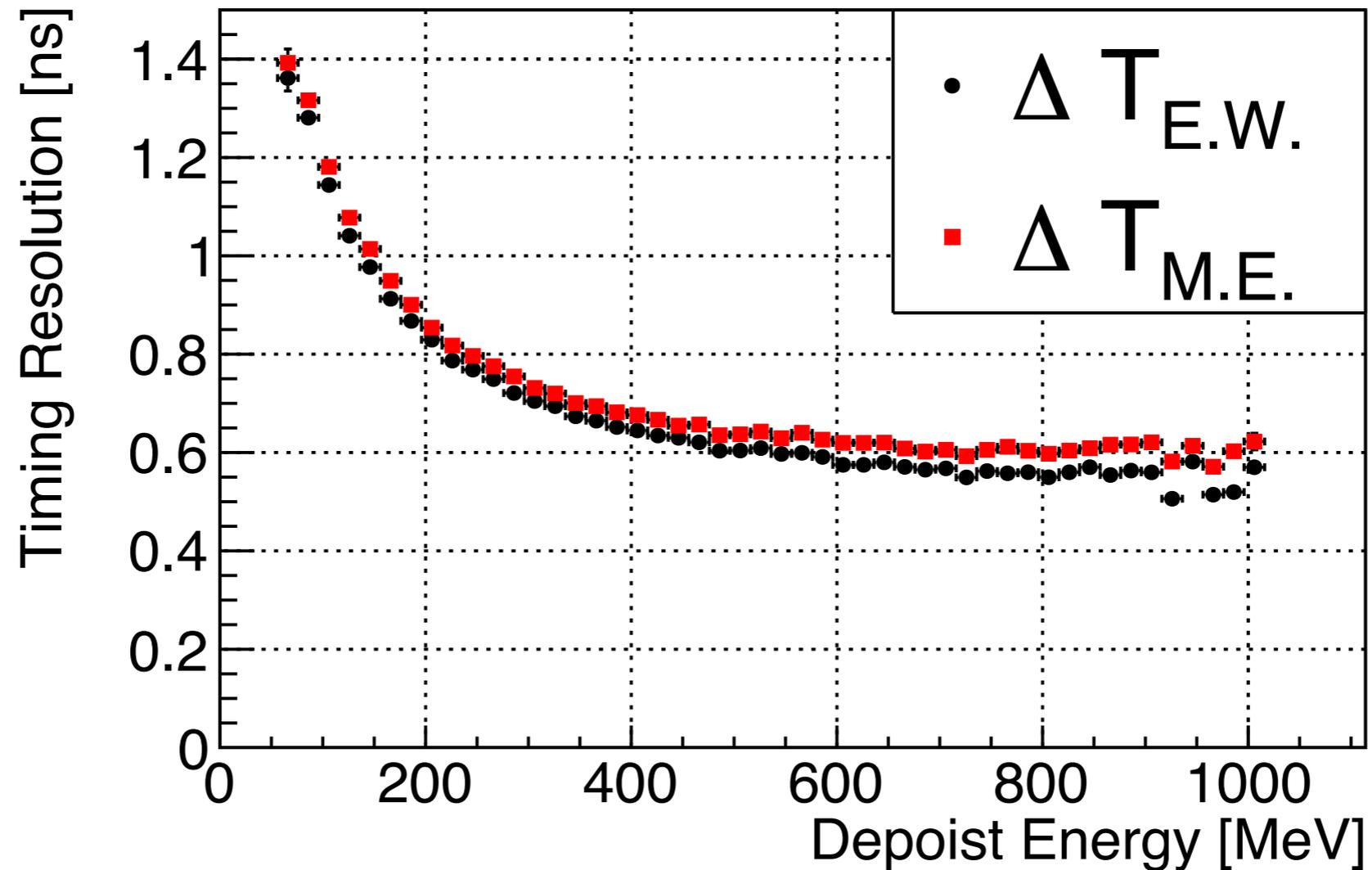
時間分解能



Gaussianでフィット

→  $\sigma$  を時間分解能とした

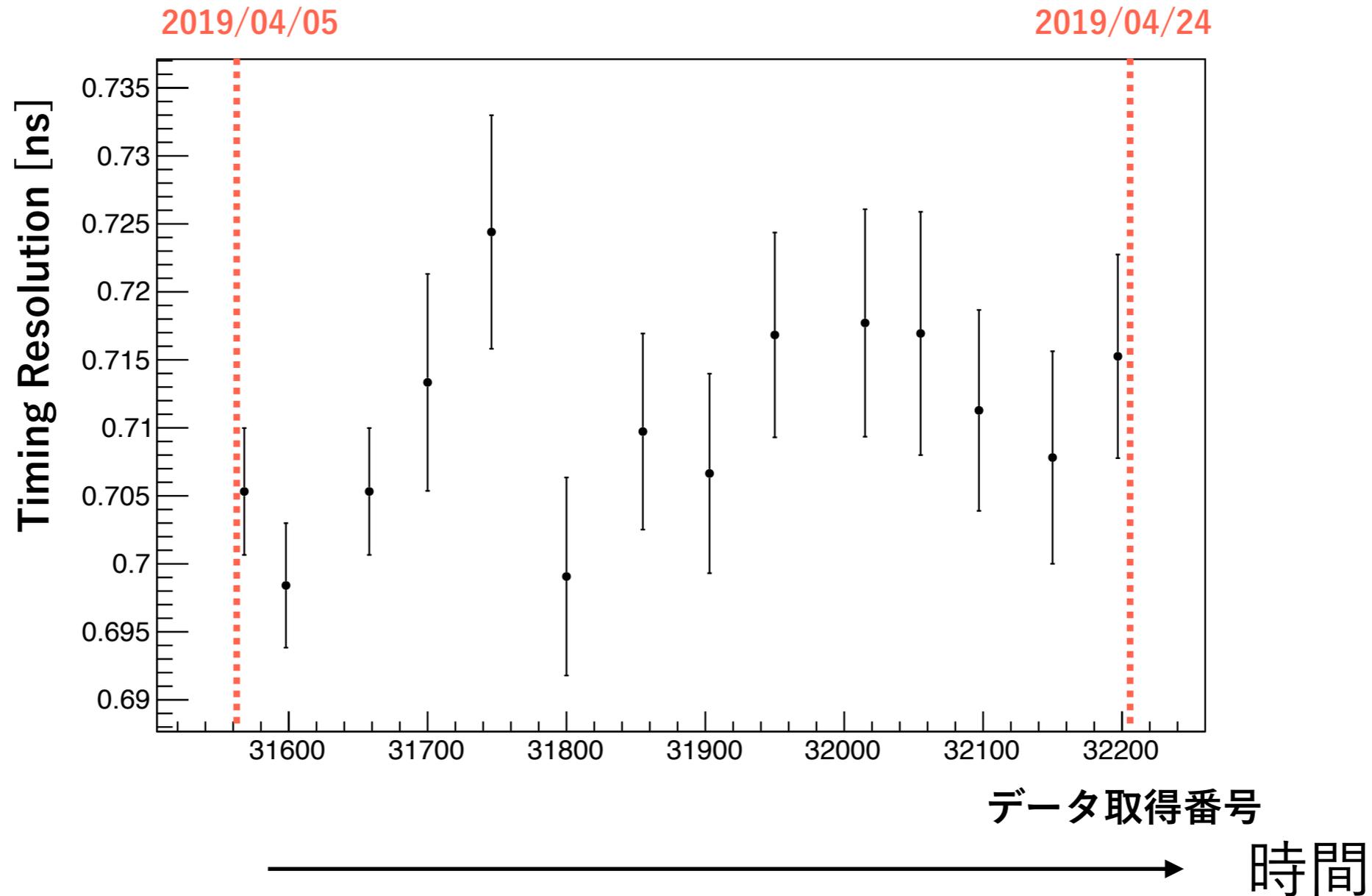
# 時間分解能



$\Delta T_{E.W.}$ : エネルギーで加重平均した時間

$\Delta T_{M.E.}$ : 最も高いエネルギーが落とされた結晶の時間

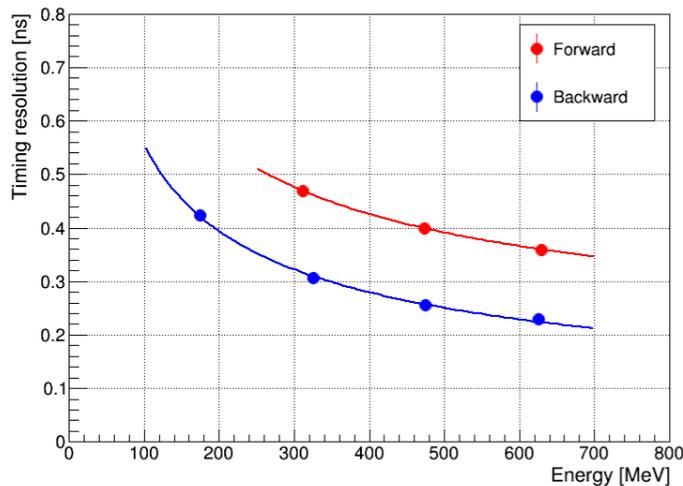
# 時間分解能の時間変化



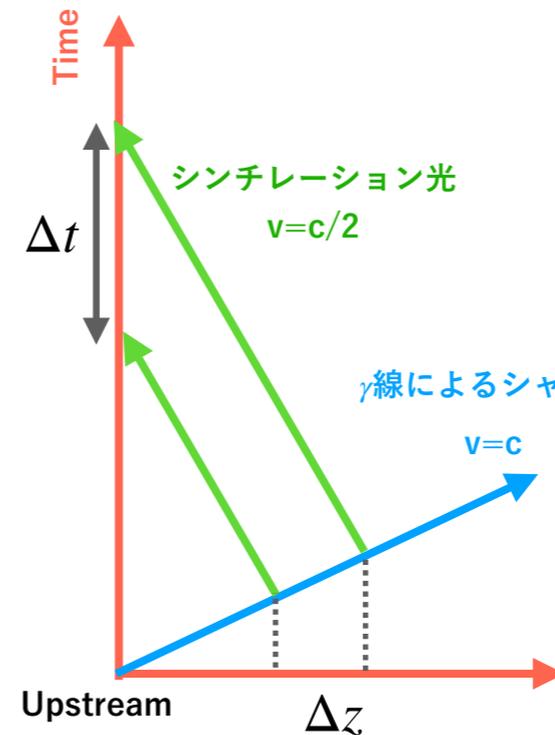
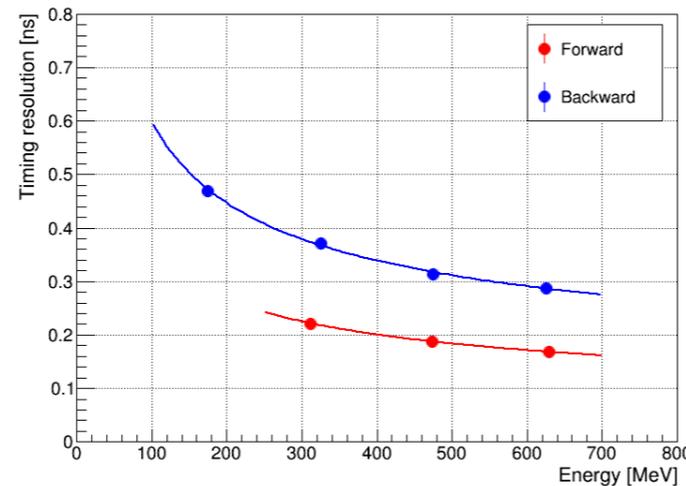
時間分解能の時間変化は誤差の範囲内だった

# 上下流の位置分解能の差

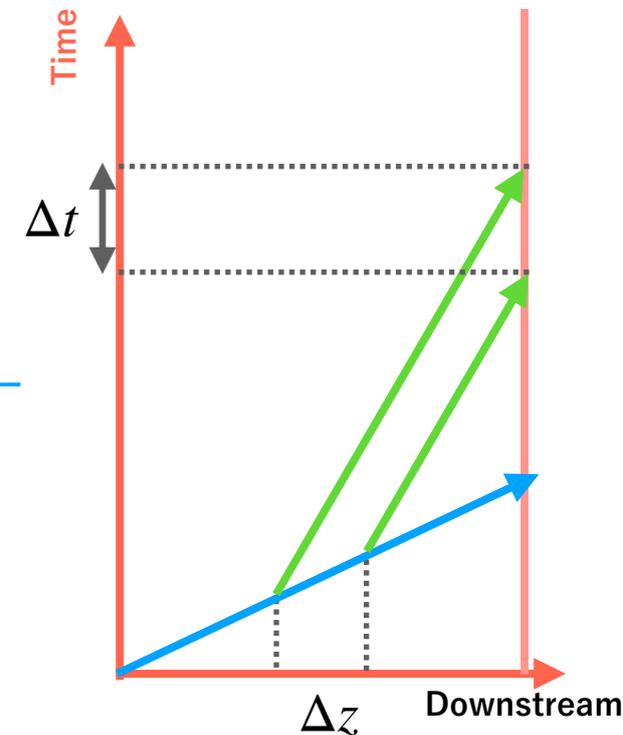
MPPCの時間分解能



PMTの時間分解能



$$\text{Upstream } \Delta t = 3 \frac{\Delta z}{c}$$

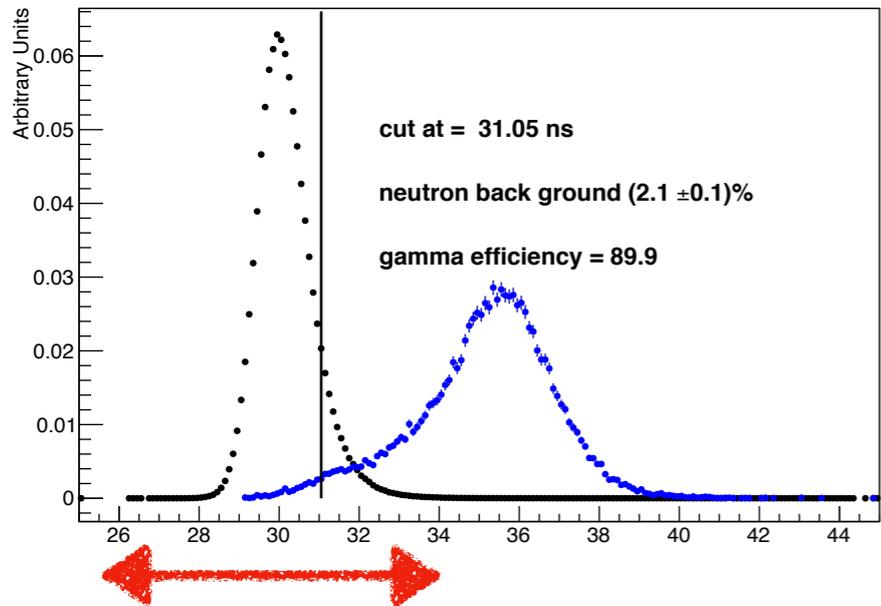


$$\text{Downstream } \Delta t = \frac{\Delta z}{c}$$

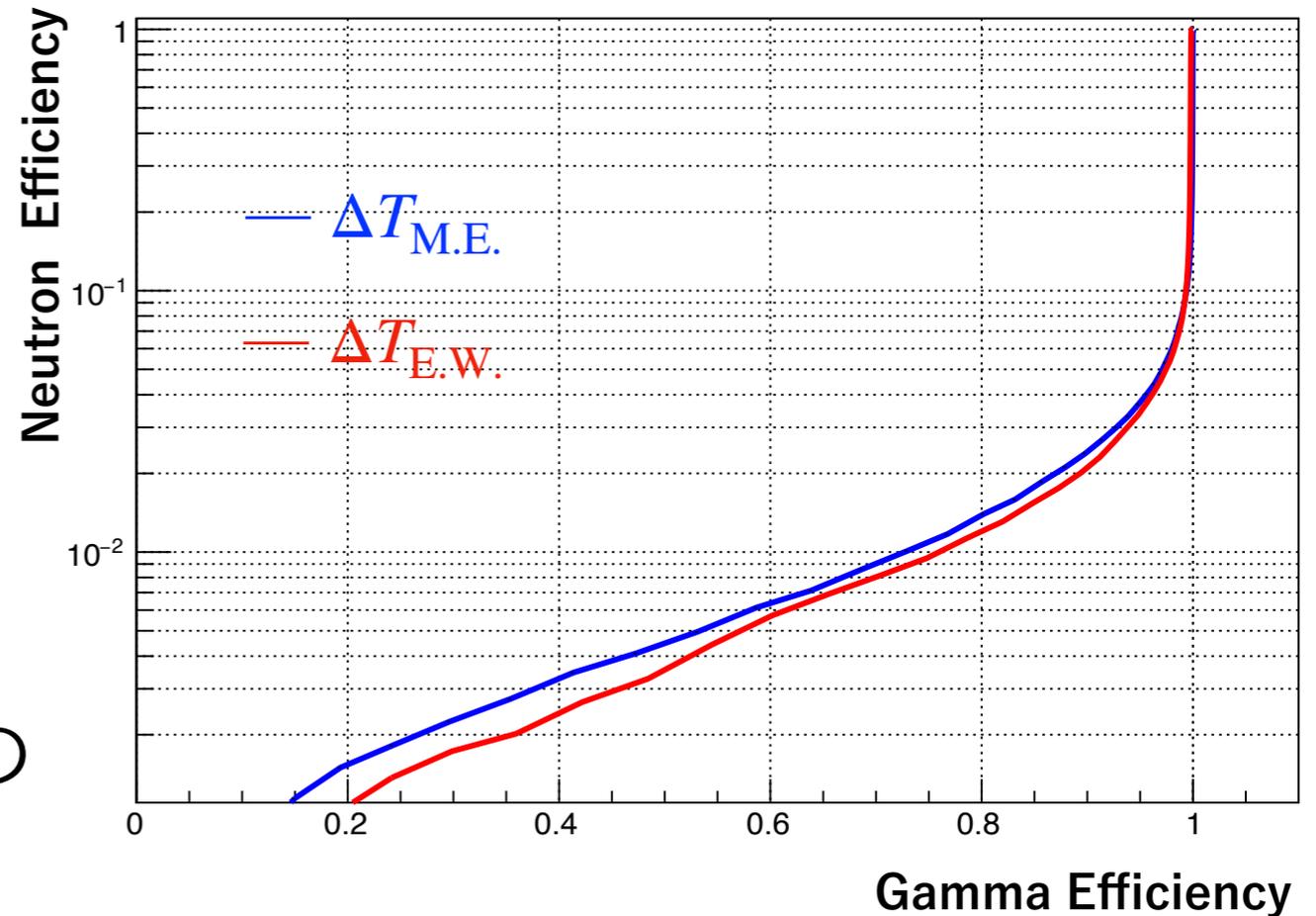
シャワーの発展方向と光子の伝搬方向が逆  
→時間分解能が悪化

# $\Delta T$ カットのEfficiency

$\Delta T$ が大きい方のクラスターの $\Delta T$ 分布



カット位置を変える  
→  $\gamma$ 線と散乱中性子サンプルの  
efficiencyを評価



$\Delta T_{M.E.}$ : 最も高いエネルギーが落とされた結晶の時間

$\Delta T_{E.W.}$ : エネルギーで加重平均した時間

# 信号事象に対する中性子背景事象の数

- ① 波形カット、クラスター形状カット、 $\Delta T$ カットによる削減能力を見積もる
- ②  $\Delta T$ 
  - (a) blind region内の事象数を見積もる
  - (b) blind region内の探索感度を見積もる
- ③ 探索感度が( $3 \times 10^{-11}$ )での事象数を見積もる

# 削減能力

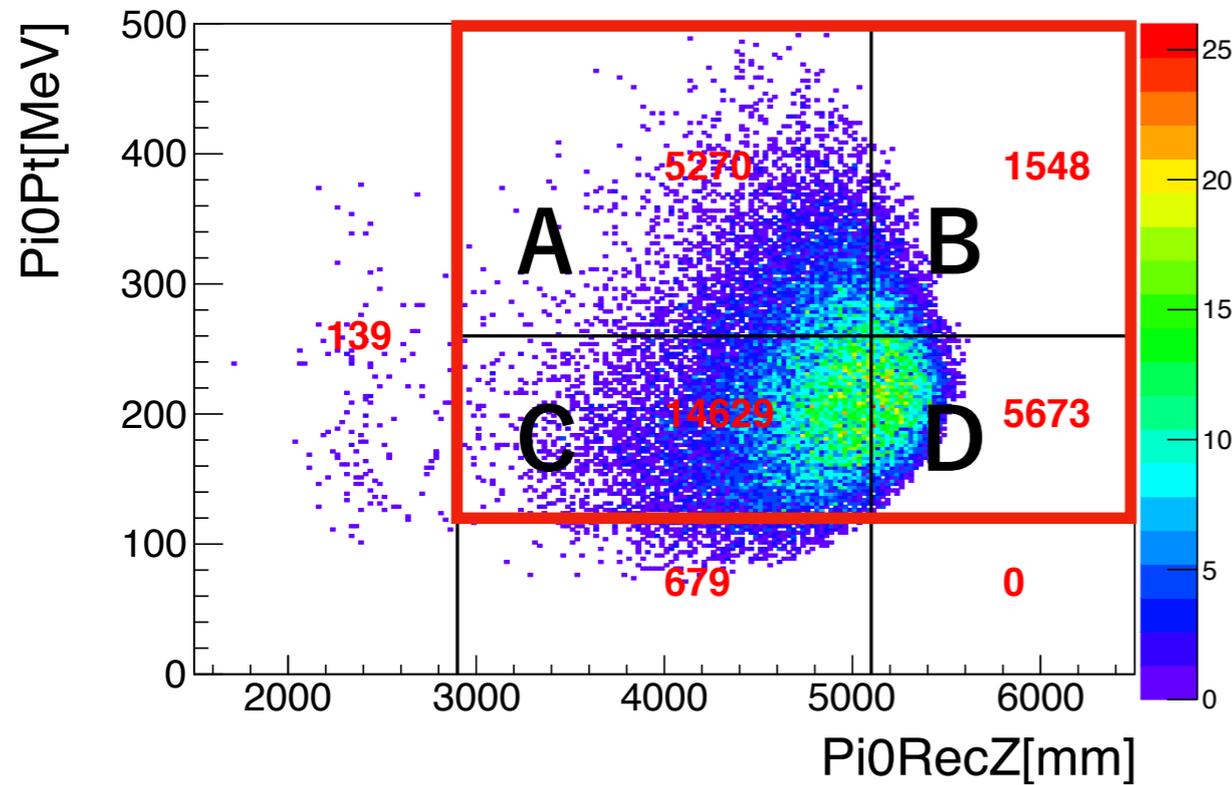
①

- 波形カット、クラスター形状カットの削減能力  $(3.1 \pm 3.1) \times 10^{-5}$ 
  - カット後に残る事象数=1
  - 散乱中性子でなく散乱 $K_L$ の寄与による事象数=1.1
  - 合計の事象数 = 27120
  - Feldman-Cousin法を使って計算
- $\Delta T$ カットの削減能力  $(4.0 \pm 0.6) \times 10^{-2}$ 倍
- 波形カット、クラスター形状カット、 $\Delta T$ カットによる削減能力  $(1.2 \pm 1.2) \times 10^{-6}$

# 残る事象数

① (a)

散乱中性子サンプル



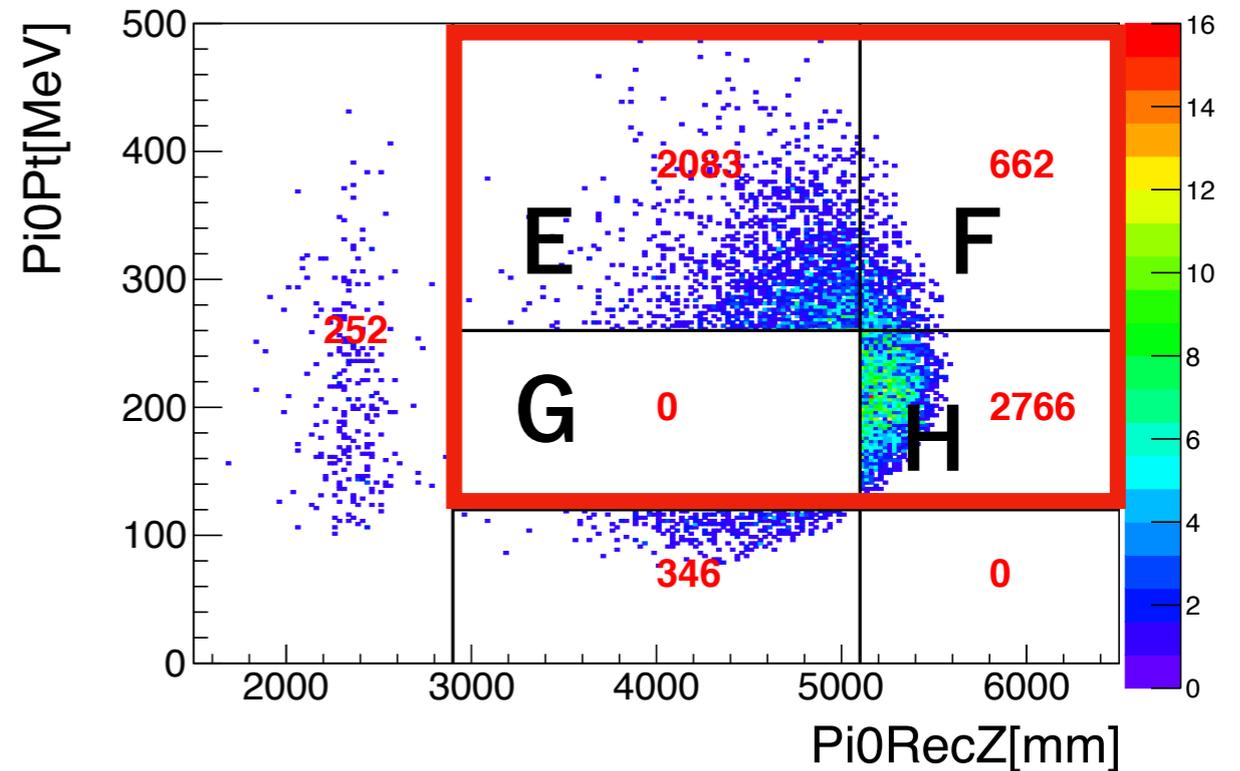
$$A+B+D = 12491$$

$$(E+F+H)/(A+B+D) = 0.44$$

$$G = 0.44 * C = 6437 \pm 80$$

$$G * (1.2 \pm 1.2) \times 10^{-6} = (7.7 \pm 7.7) \times 10^{-3}$$

中性子背景事象



$$E+F+H = 5511$$

カット後にGに残る事象

# 信号事象に対する中性子背景事象の数

① (b)

$$\text{SES} = \frac{1}{(\text{検出器領域に入社したKLの数}) \times P_{\text{decay}} \times A_{\text{signal}}}$$

金標的に陽子を当てた数(POT)に比例する

$$\rightarrow 4.2 \times 10^7 / (2 \times 10^{14} \text{ POT})$$

$A_{\text{signal}}$ はいくつかの要素に分けられる

$$A_{\text{signal}} = A_{\text{geom.}} \times A_{\text{kine cuts}} \times A_{\text{veto}} \times A_{\text{neutron cuts}}$$

$$P_{\text{decay}} \times A_{\text{geom.}} \times A_{\text{kine cuts}} \times A_{\text{veto}} = 4.9 \times 10^{-8}$$

$$A_{\text{neutron cuts}} = 0.8 \times 0.89 \times 0.9$$

$$\text{SES} = 1.9 \times 10^{-9}$$

# 標準理論感度での背景事象数

標準理論感度での中性子背景事象数

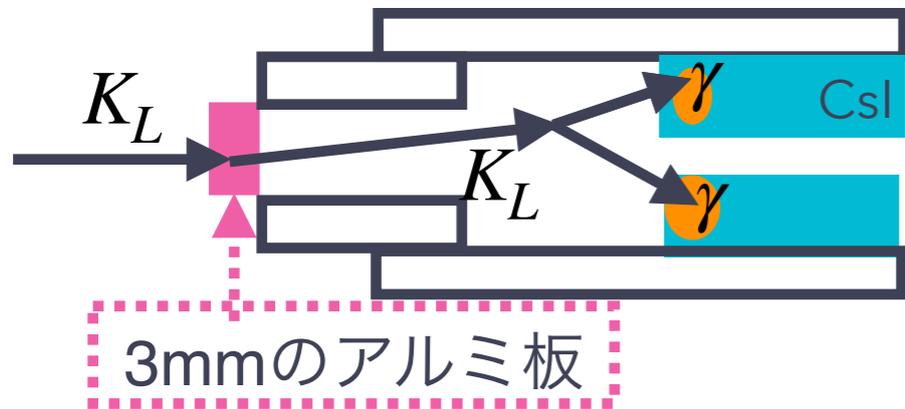
$$\begin{aligned} &= \frac{\text{標準理論感度}}{\text{今回使ったデータでの探索感度}} \times \text{今回使ったデータでの中性子背景事象数} \\ &= 1.9 \times 10^{-9} / 3 \times 10^{-11} = 63.3 \quad (7.7 \pm 7.7) \times 10^{-3} \\ &= \mathbf{(0.5 \pm 0.5) \text{ 事象}} \end{aligned}$$

2015年データの結果から予測：(10 ± 7) 事象

標準理論感度での背景事象数は2015年の0.05倍

# 散乱中性子サンプル中の $K_L$ 混入

散乱された $K_L$

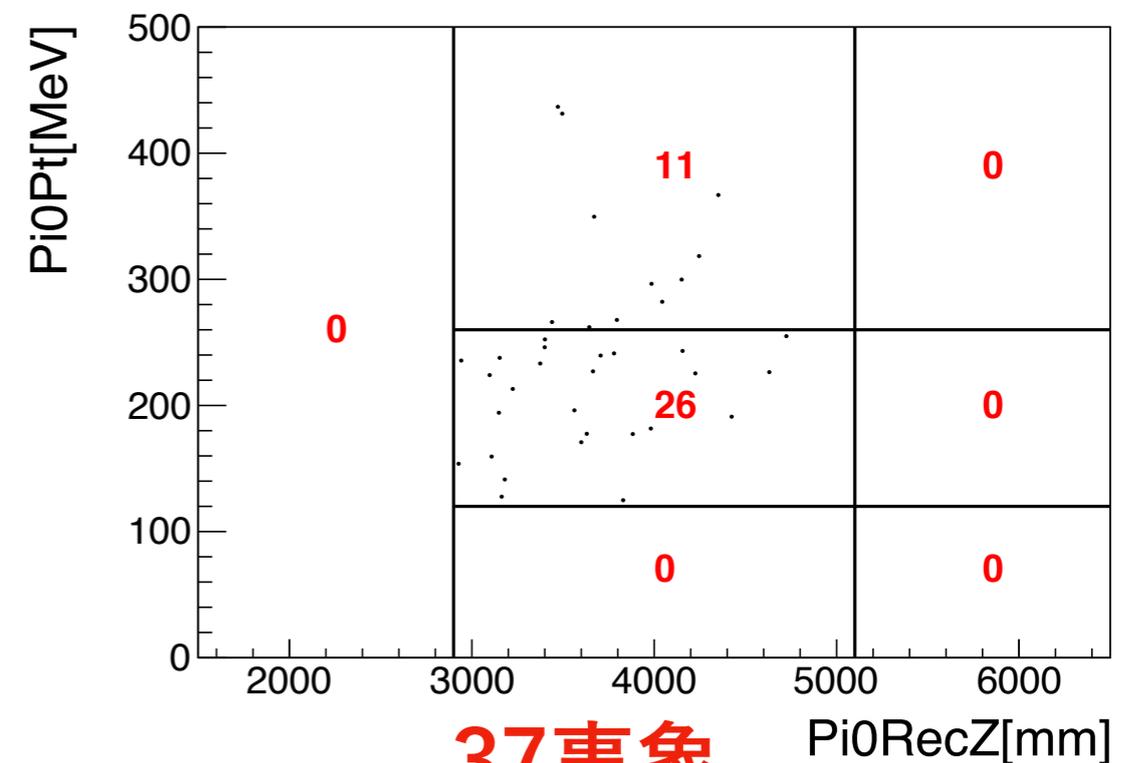


散乱させた $K_L$ が二つの $\gamma$ 線に崩壊する

- 横方向運動量 ( $P_t$ ) を持つ
- 二つのクラスターを作る

信号事象と見分けがつかない可能性

カット後の散乱 $K_L$ 事象(MC)

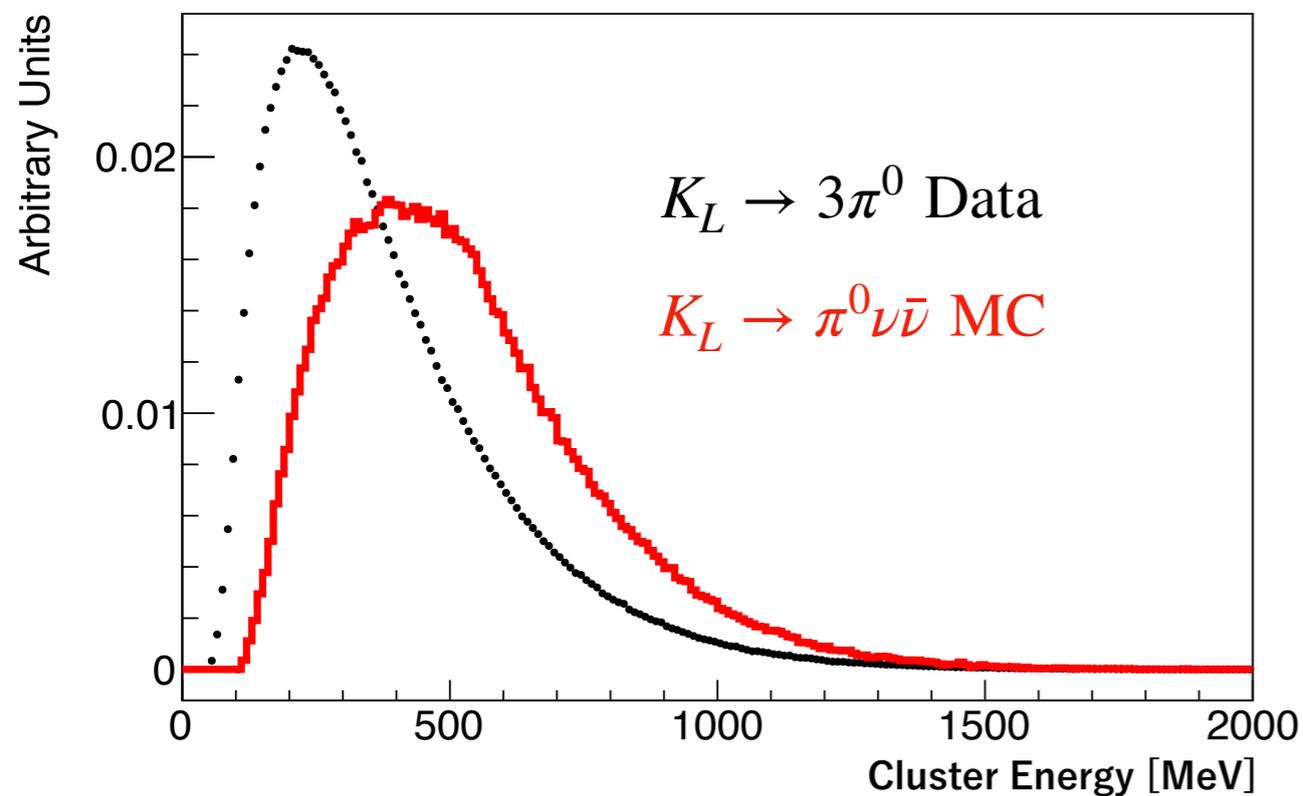


散乱中性子サンプル中への混入  
( $1.1 \pm 0.2$ )事象

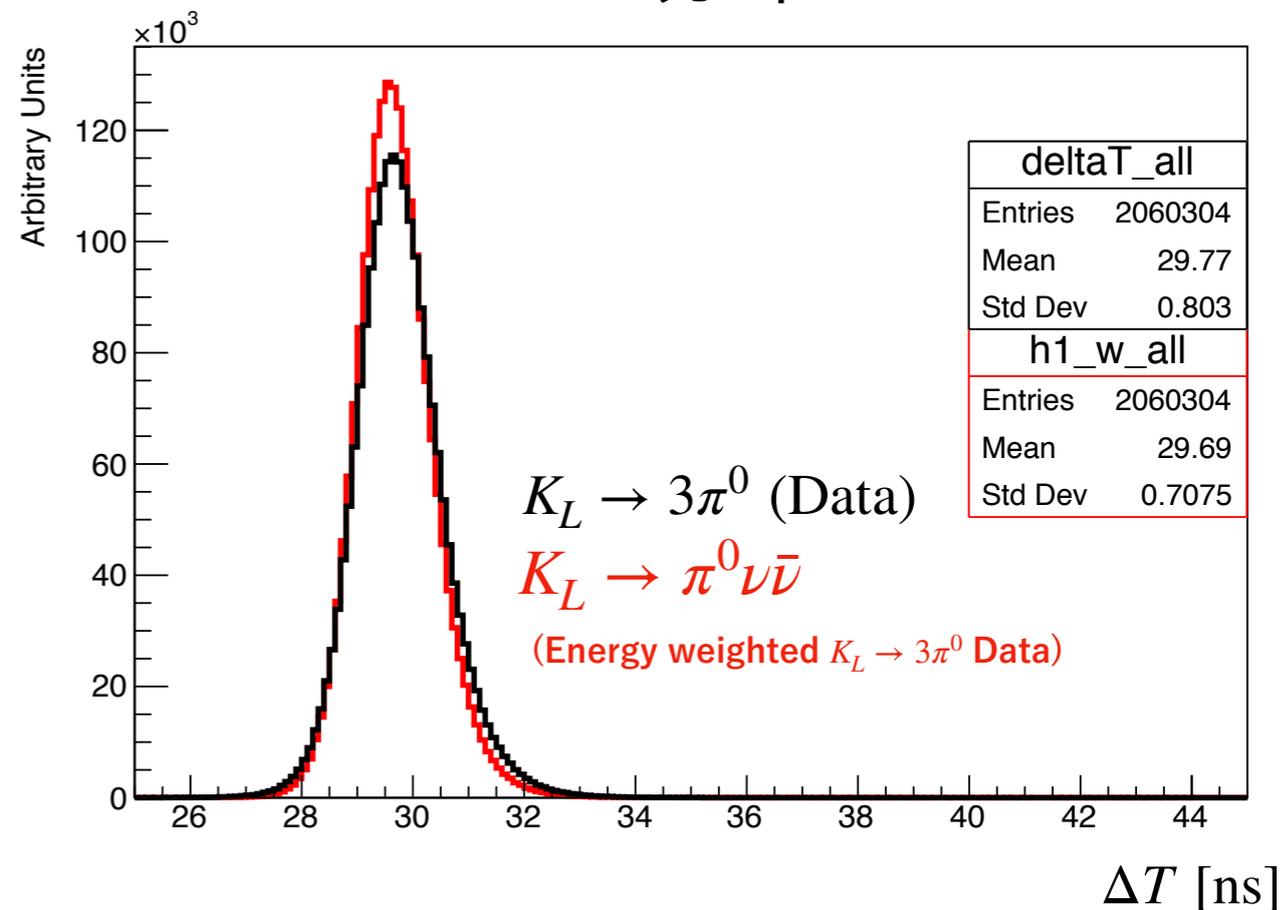
データの35倍の統計のMC

# 信号事象 ( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ) の $\Delta T$ 分布

## クラスターエネルギー分布



## $\Delta T$ 分布

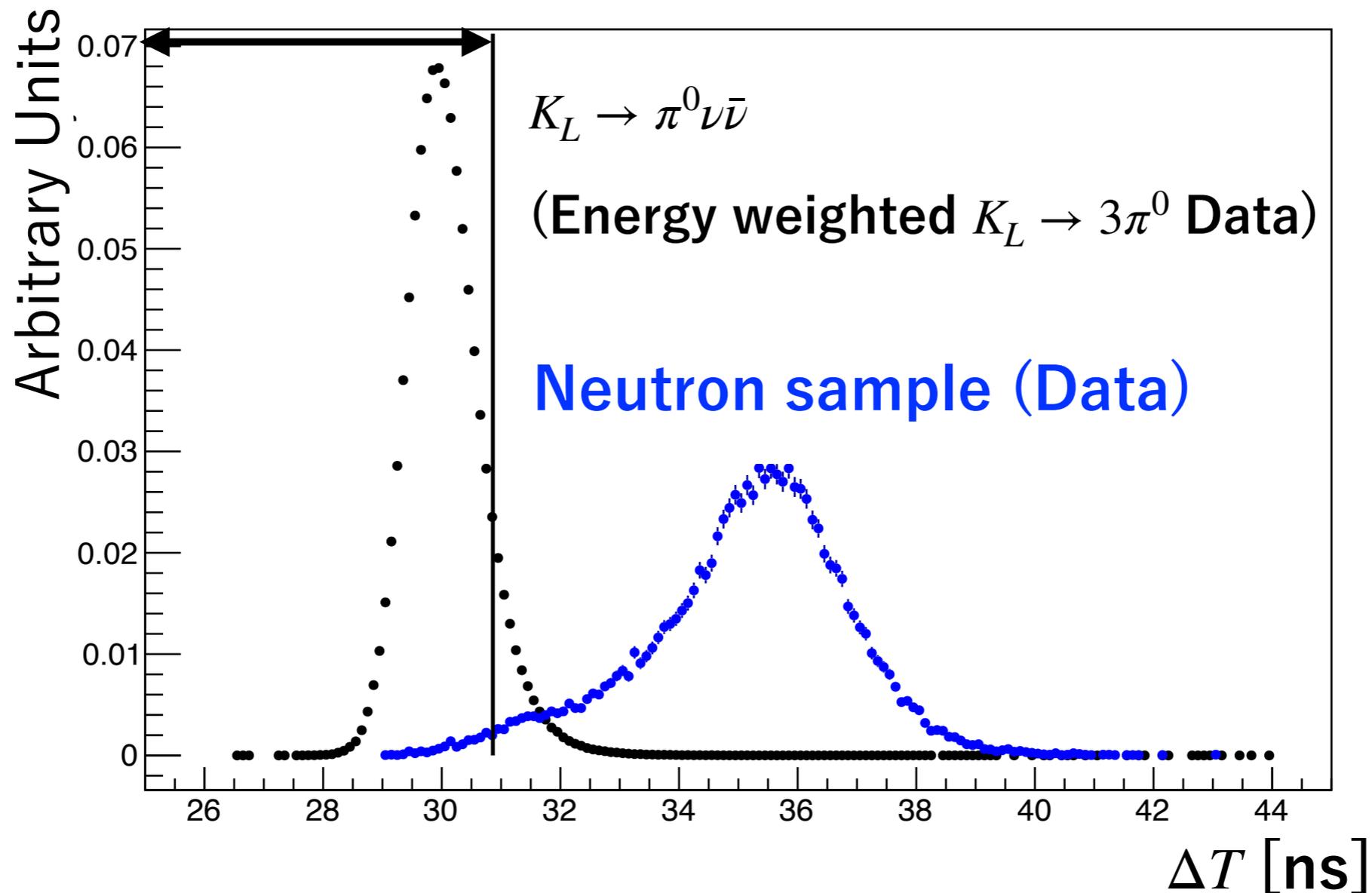


エネルギーによって、 $\Delta T$  分布の幅は変わる

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の  $\Delta T$  分布を  $K_L \rightarrow 3\pi^0$  をエネルギー加重平均をして求めた

# $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ に対する性能評価

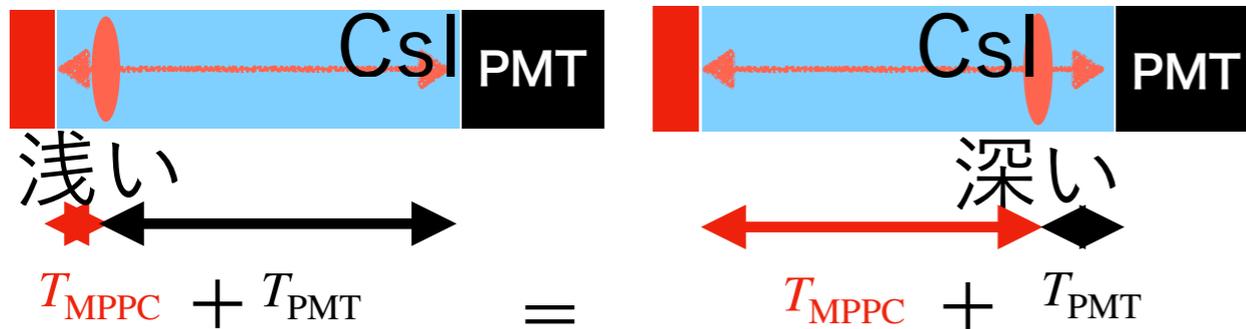
$\Delta T$ が大きい方のクラスターの $\Delta T$ 分布



90%の信号事象( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ )を残して、  
散乱中性子を $(1.6 \pm 0.1) \times 10^{-2}$ まで削減できる  
( $K_L \rightarrow 3\pi^0$ の場合： $(2.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$ )

# MPPPCとPMTの平均時間(2)

$$T_{\text{inv}} = \frac{T_{\text{MPPC}} + T_{\text{PMT}}}{2}$$

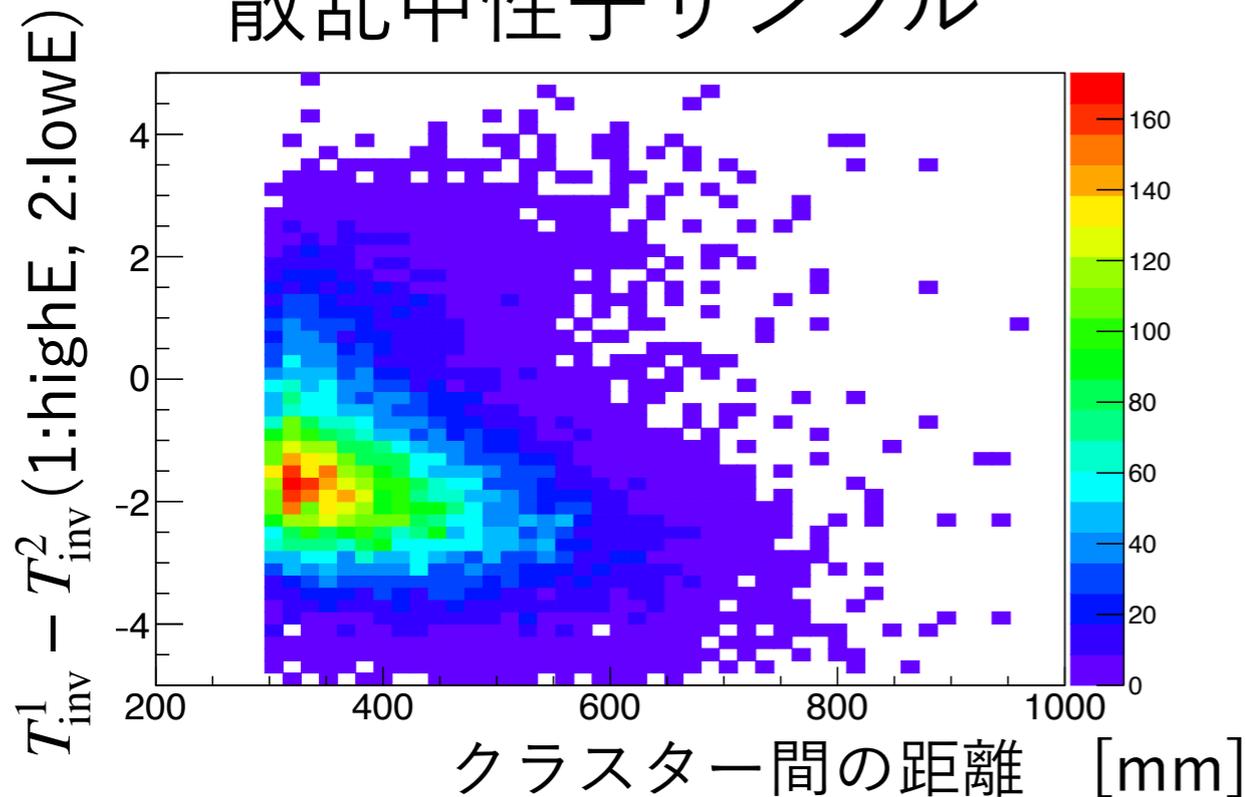


$T_{\text{inv}}$  : 深さに関係ない時間

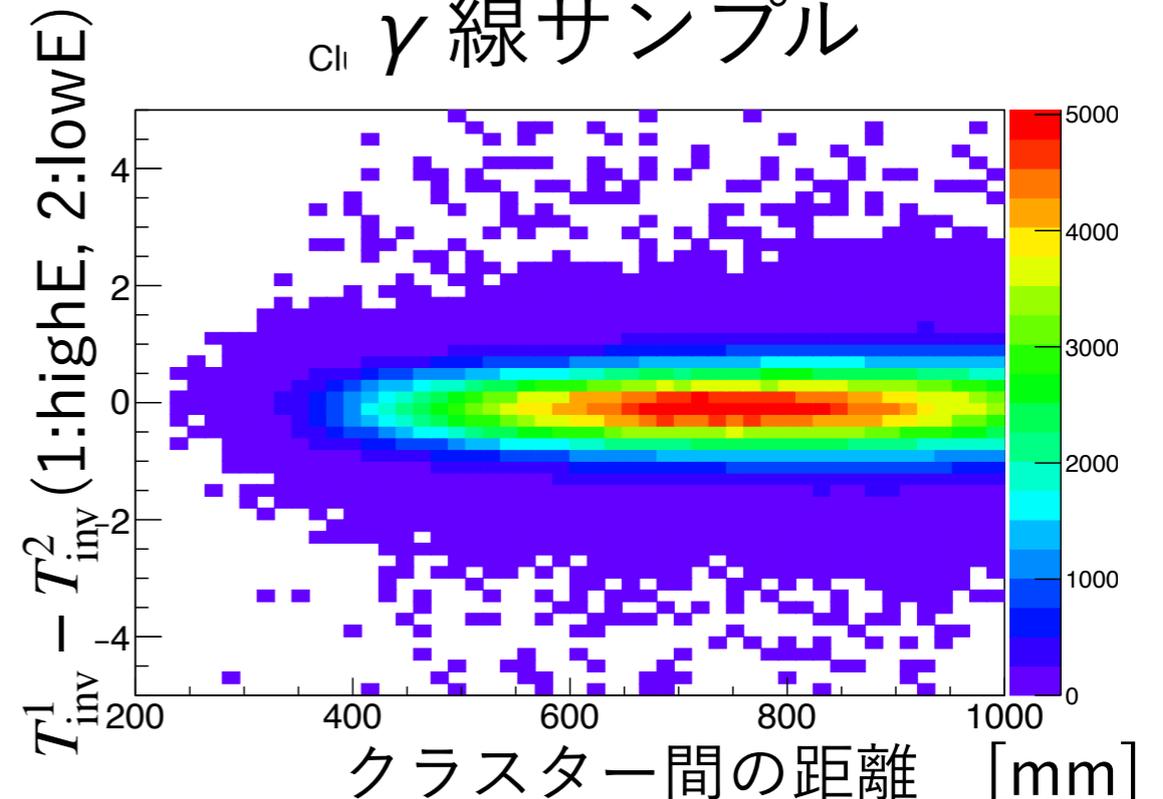
$$T_{\text{inv}}^1 - T_{\text{inv}}^2 \text{ (1:highE, 2:lowE)}$$

散乱中性子サンプルでは、  
クラスター間の**TOF**を表す

散乱中性子サンプル

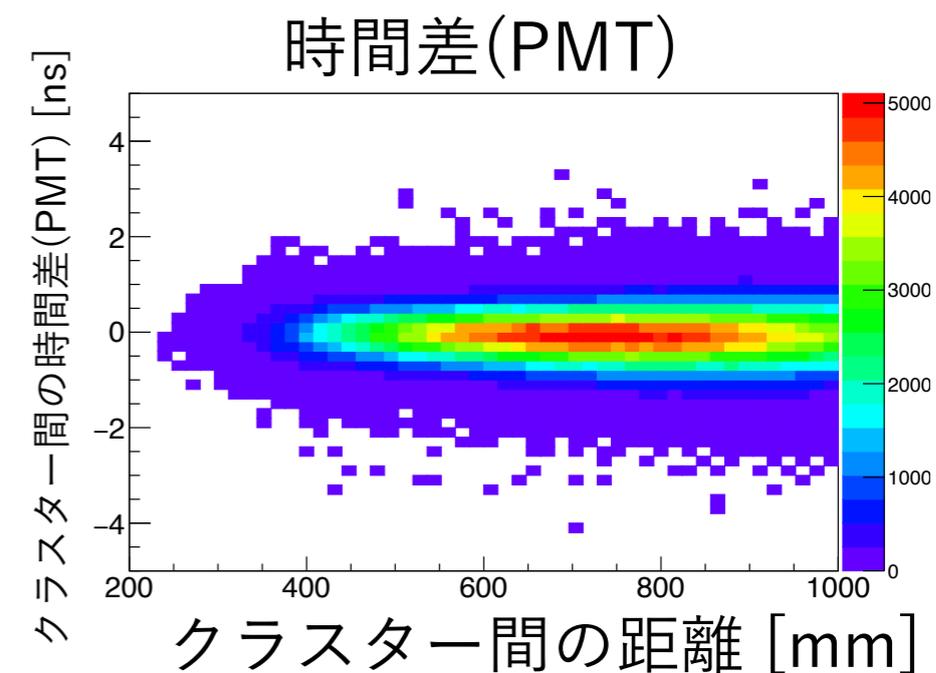
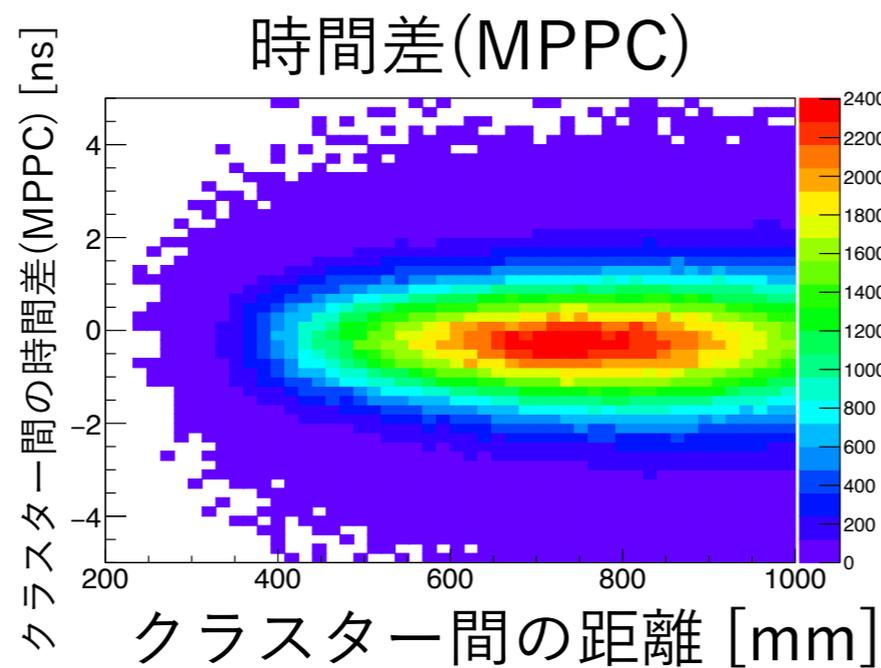


$\text{Cl}$   $\gamma$  線サンプル

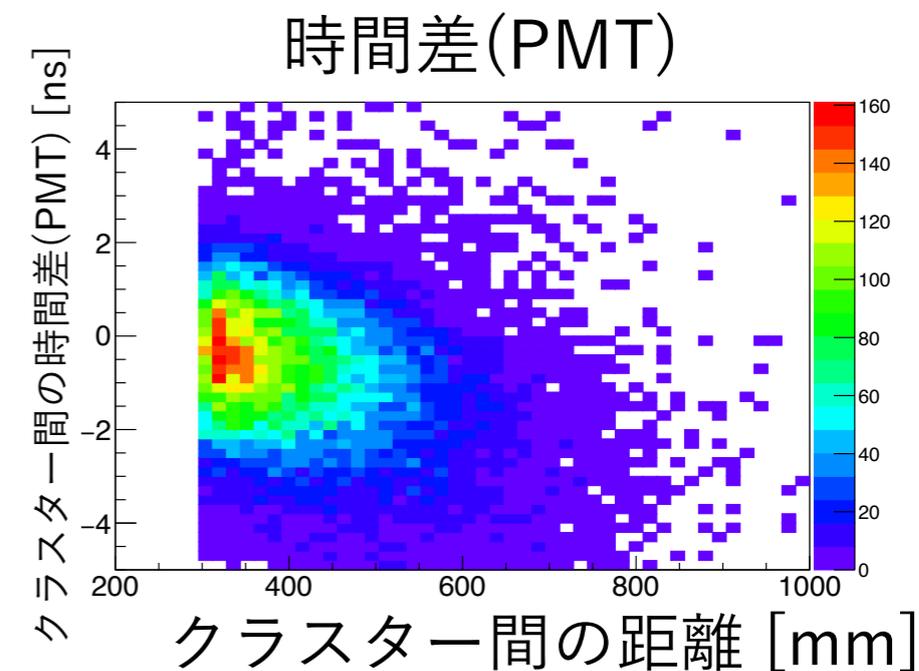
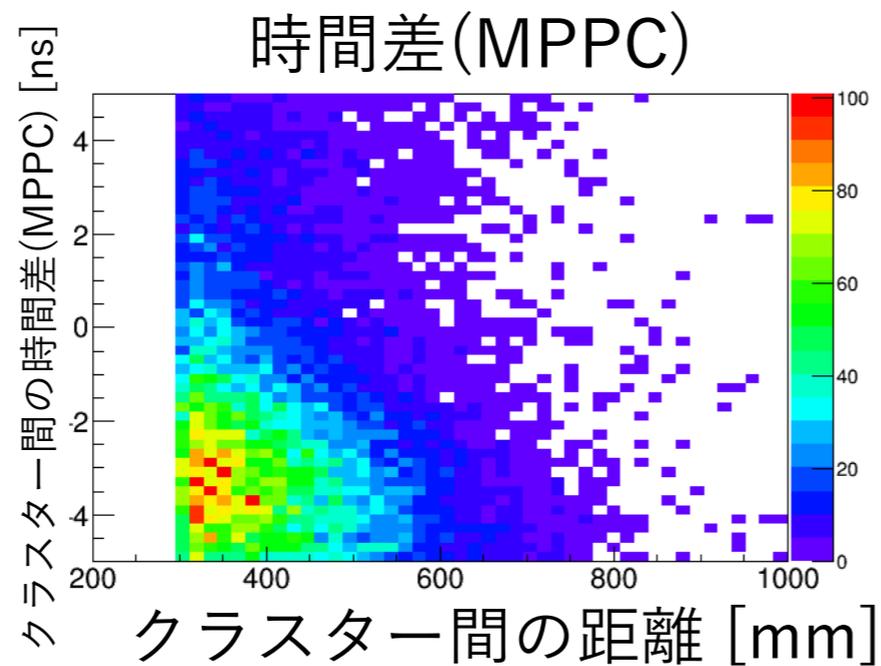


# MPPPC時間差とPMT時間差

γ線サンプル

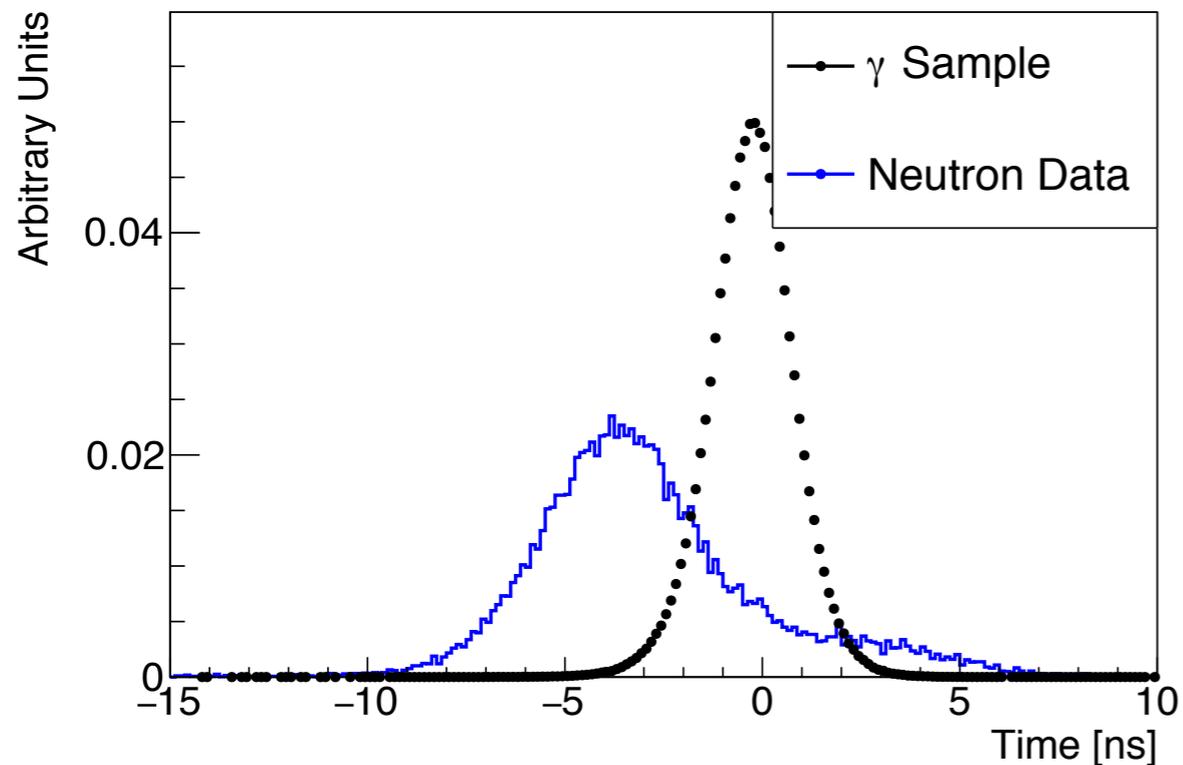


散乱中性子  
サンプル

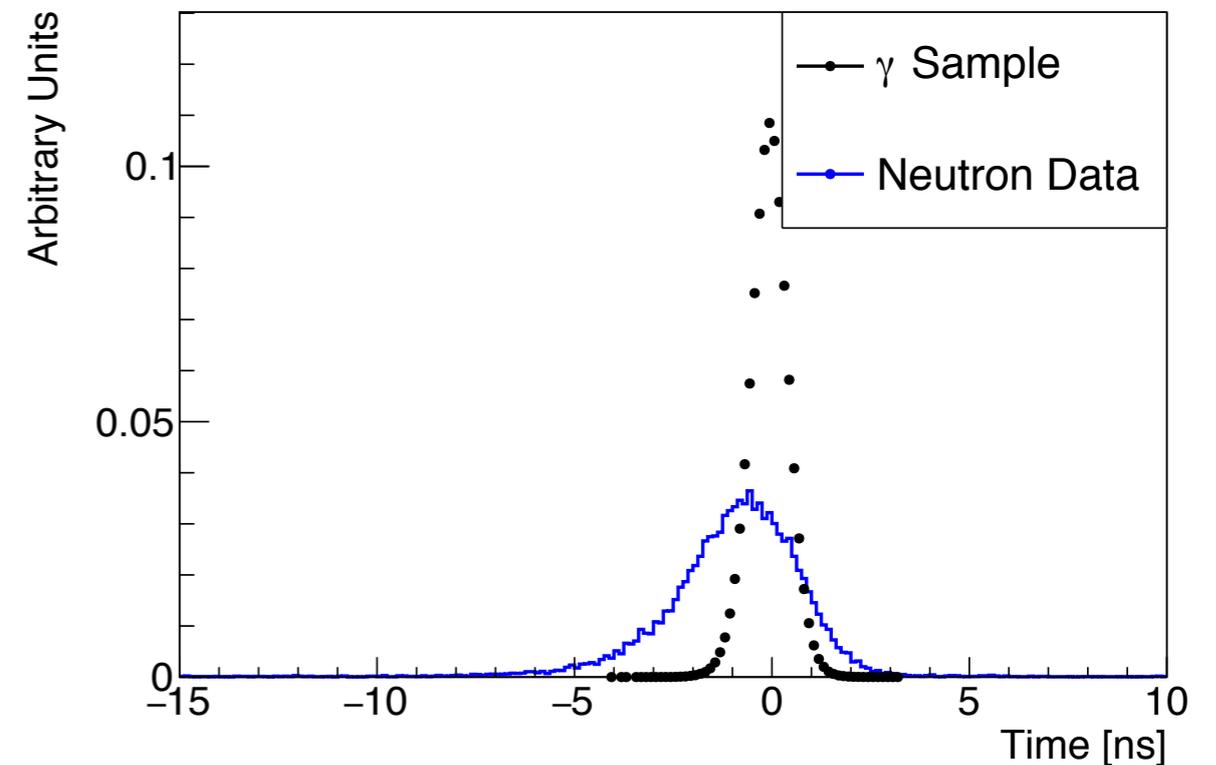


# クラスター間の時間差

MPPCで測定した  
二つのクラスター間の時間差

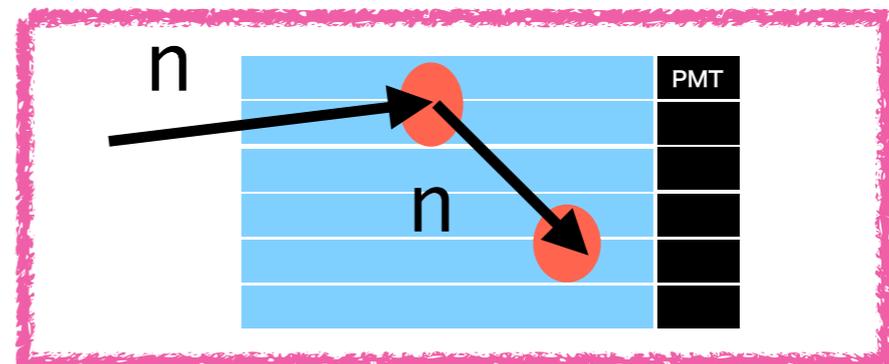
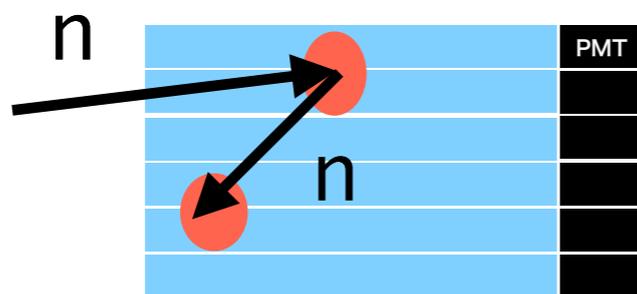


PMTで測定した  
二つのクラスター間の時間差



散乱中性子サンプルでは

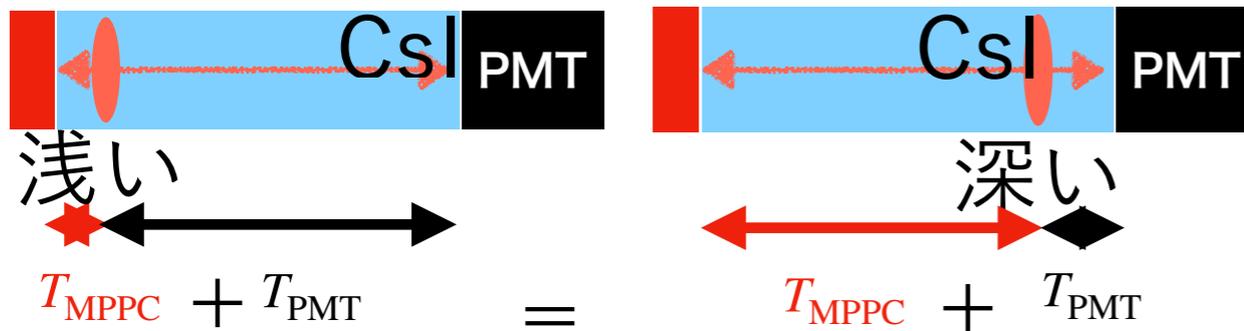
MPPCで測定したクラスター間の時間差が大きい



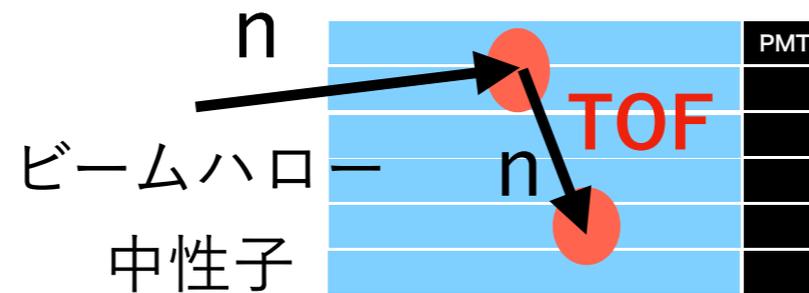
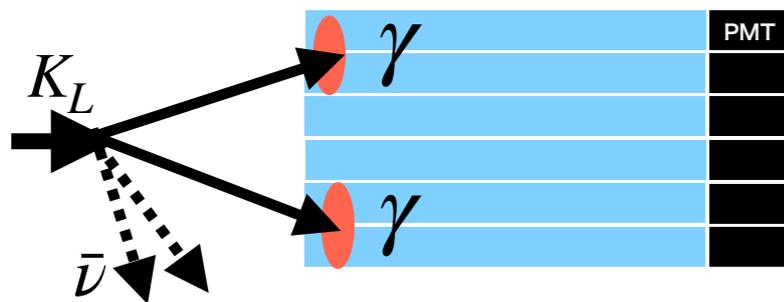
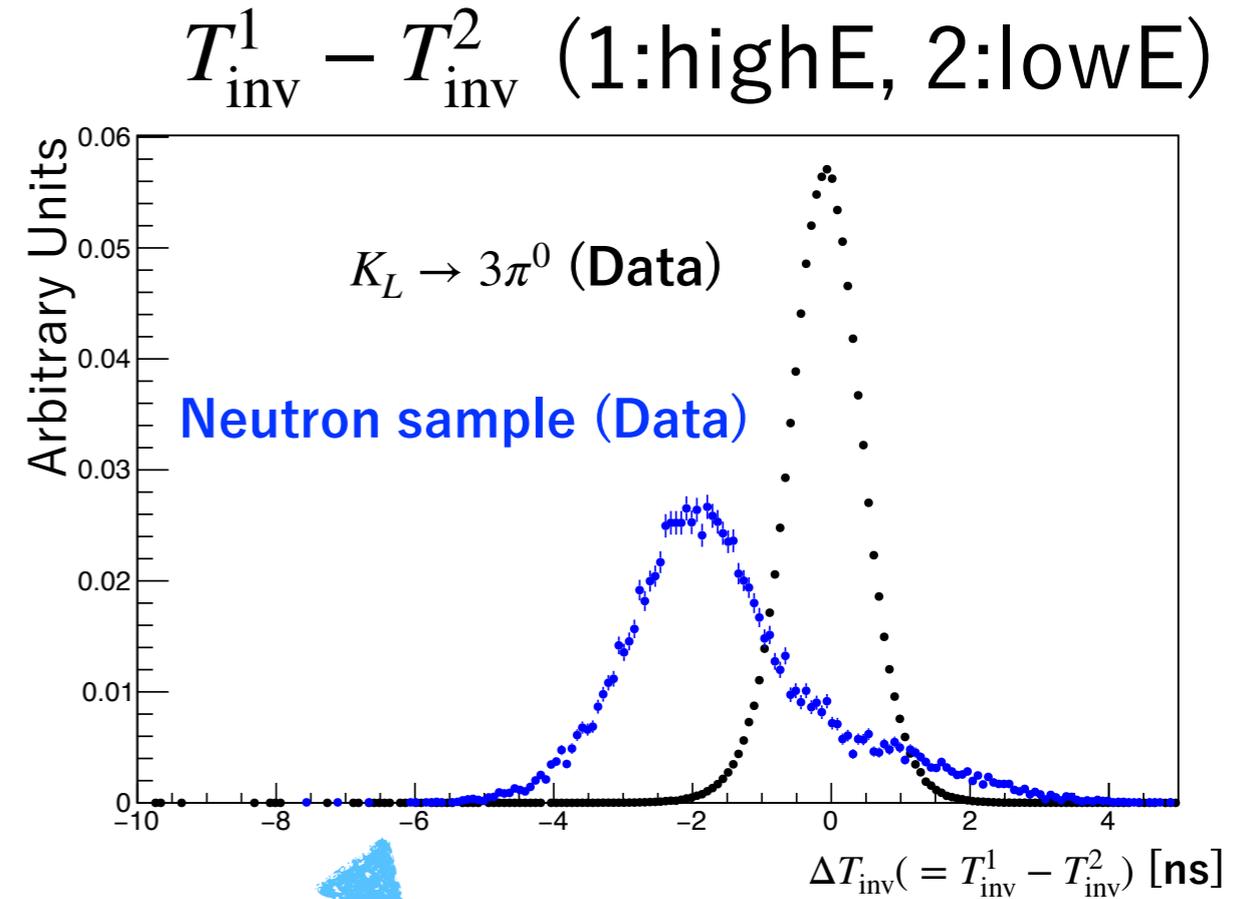
二次中性子が下流に飛ぶ事象が多い

# MPPPCとPMTの平均時間

$$T_{\text{inv}} = \frac{T_{\text{MPPC}} + T_{\text{PMT}}}{2}$$

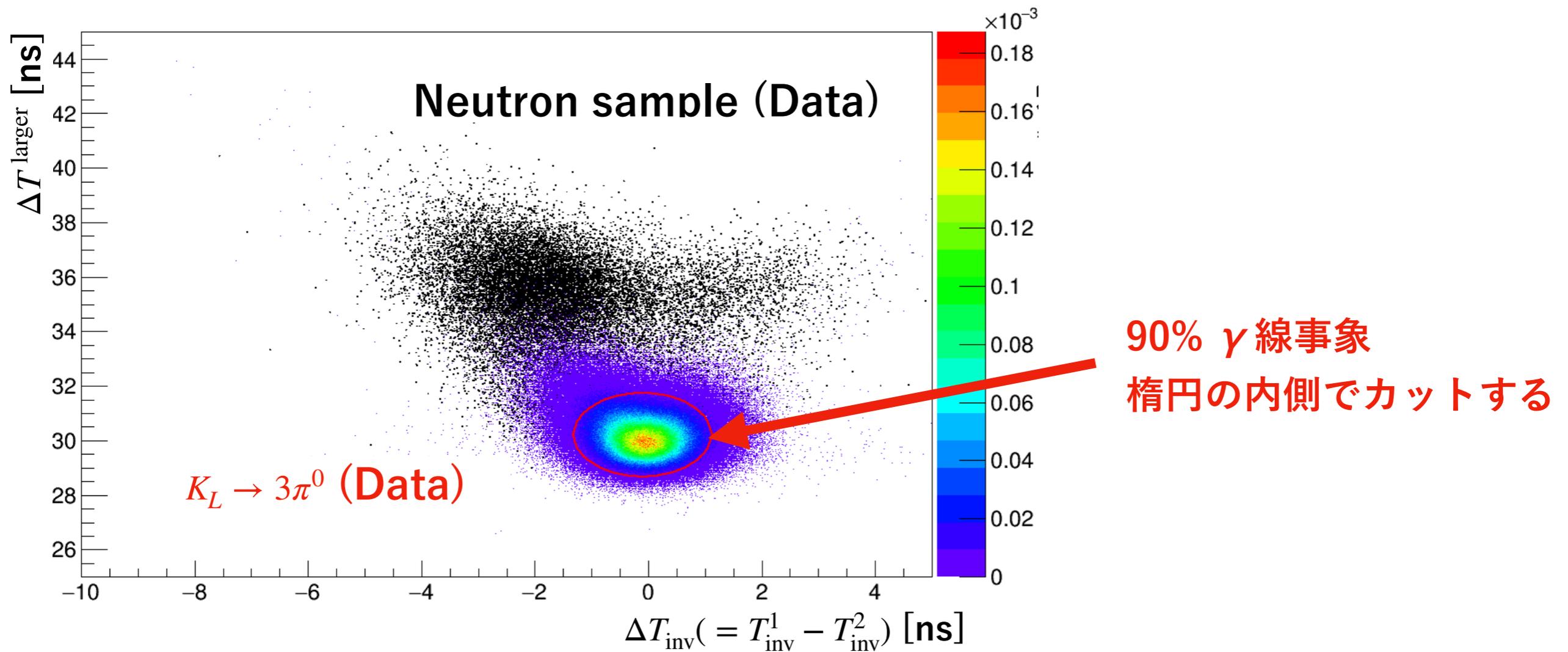


$T_{\text{inv}}$  : 深さに関係ない時間



散乱中性子サンプルでは、クラスター間のTOFの影響が見えるはず

# $\Delta T$ と $\Delta T_{inv}$ による削減能力

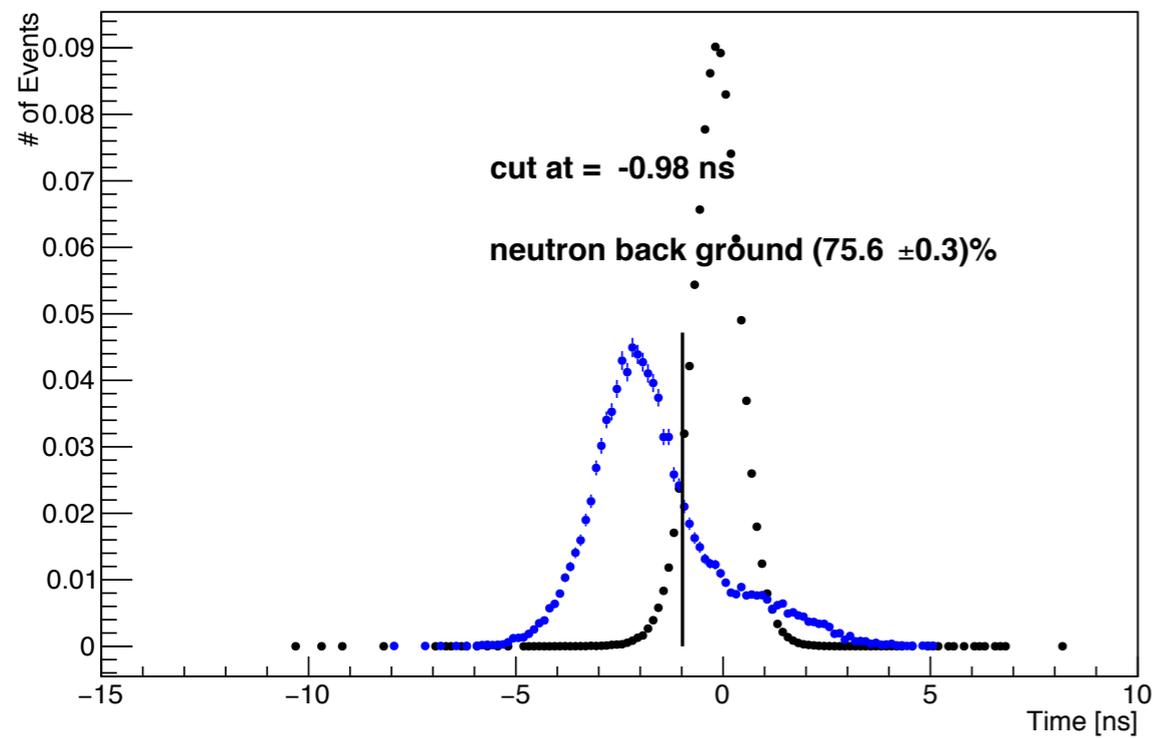


$\Delta T$ カットと $\Delta T_{inv}$ 削減能力:  $(1.6 \pm 0.1) \times 10^{-2}$  倍

$\Delta T$ カットのみ 削減能力:  $(2.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$

# $\Delta T_{inv}$ vs クラスタ間の時間差

$\Delta T_{inv}$



クラスタ間の時間差(MPPC)

