

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

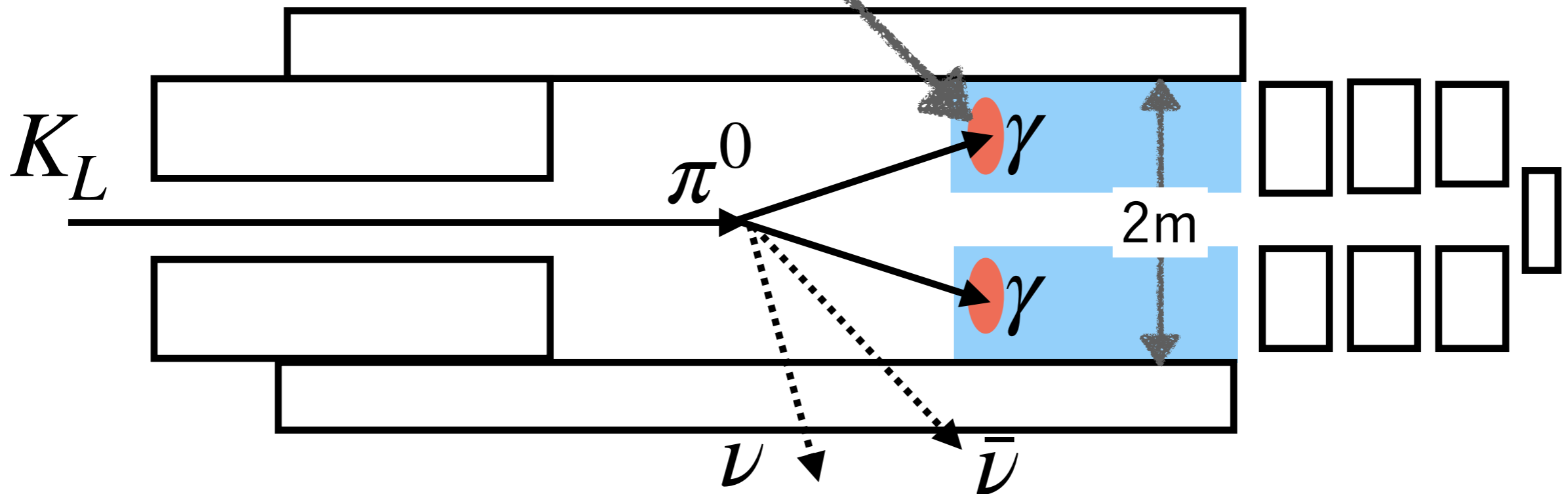
$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の信号

2γ + 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

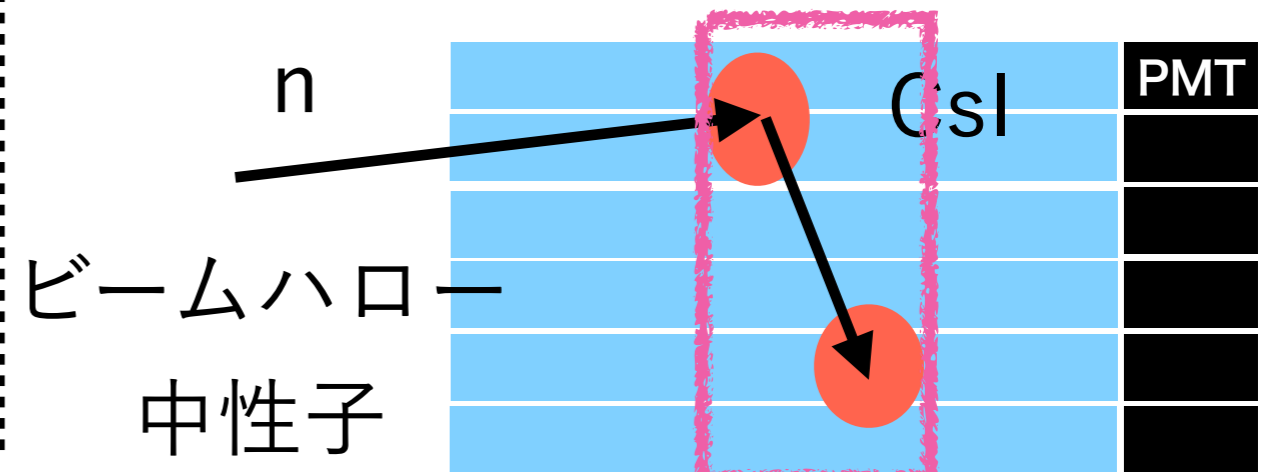
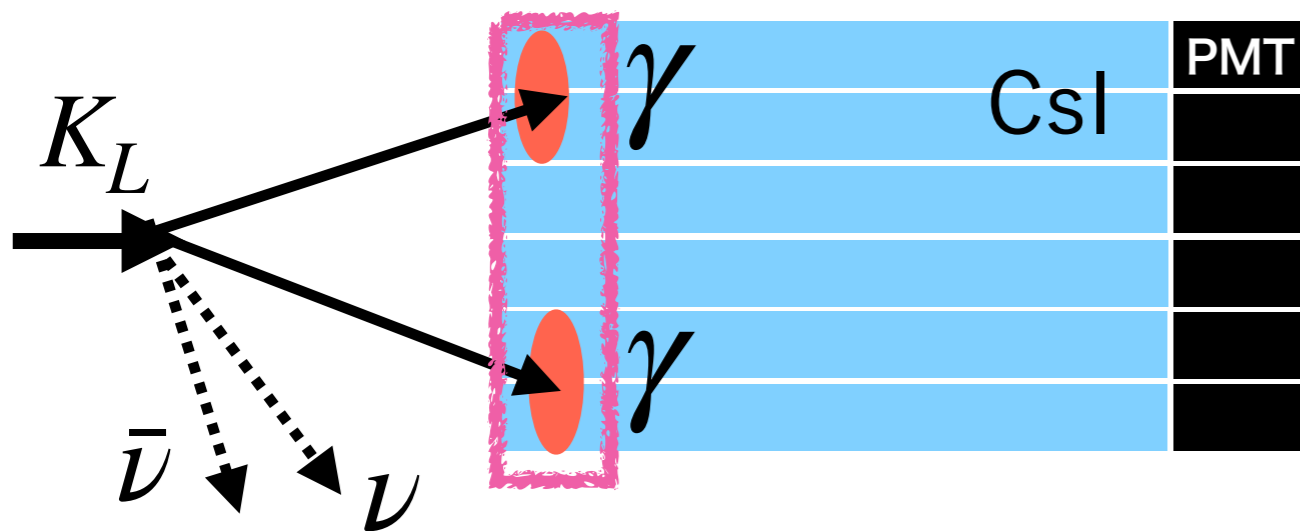


中性子背景事象

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

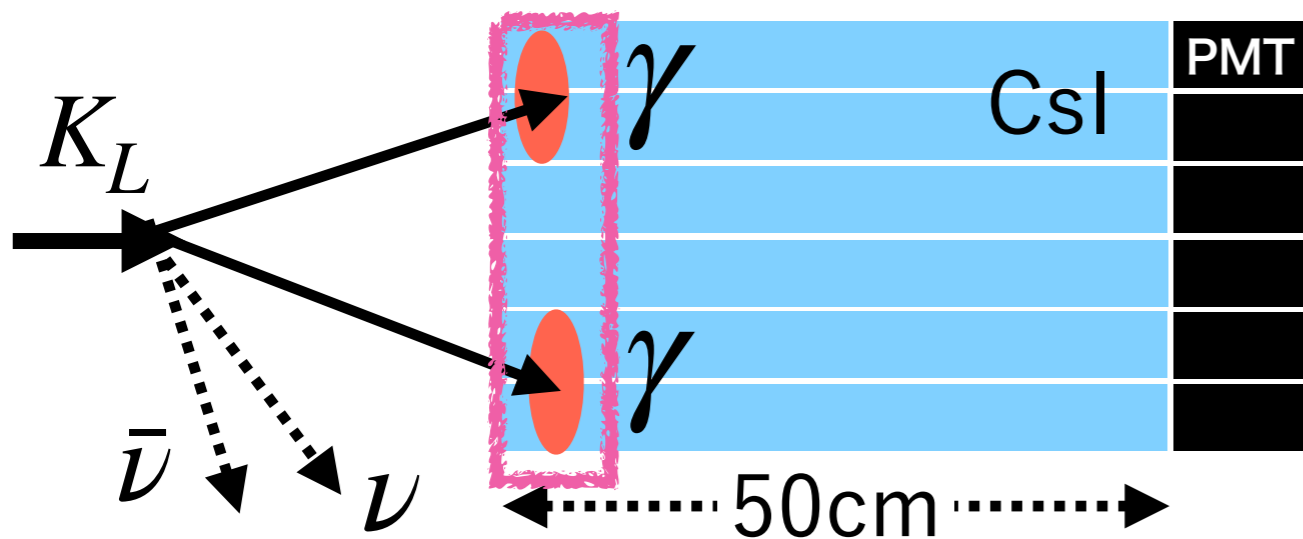
現状：波形, クラスタ形状 → 0.25倍

新しいカットで背景事象をさらに**0.1倍**にする必要

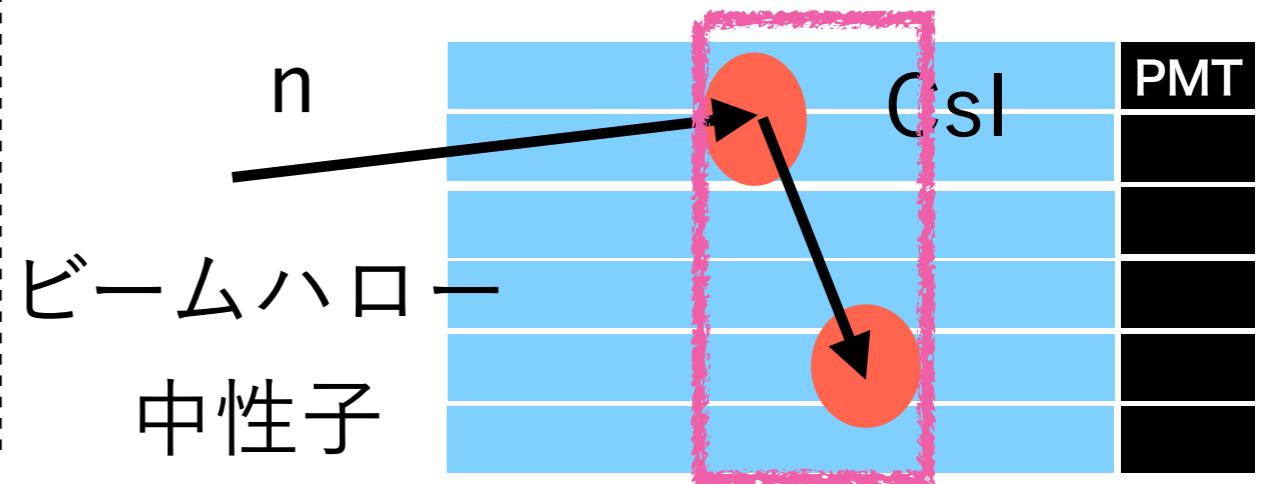
中性子背景事象

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)



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

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

\blackrightarrow 深さを表す

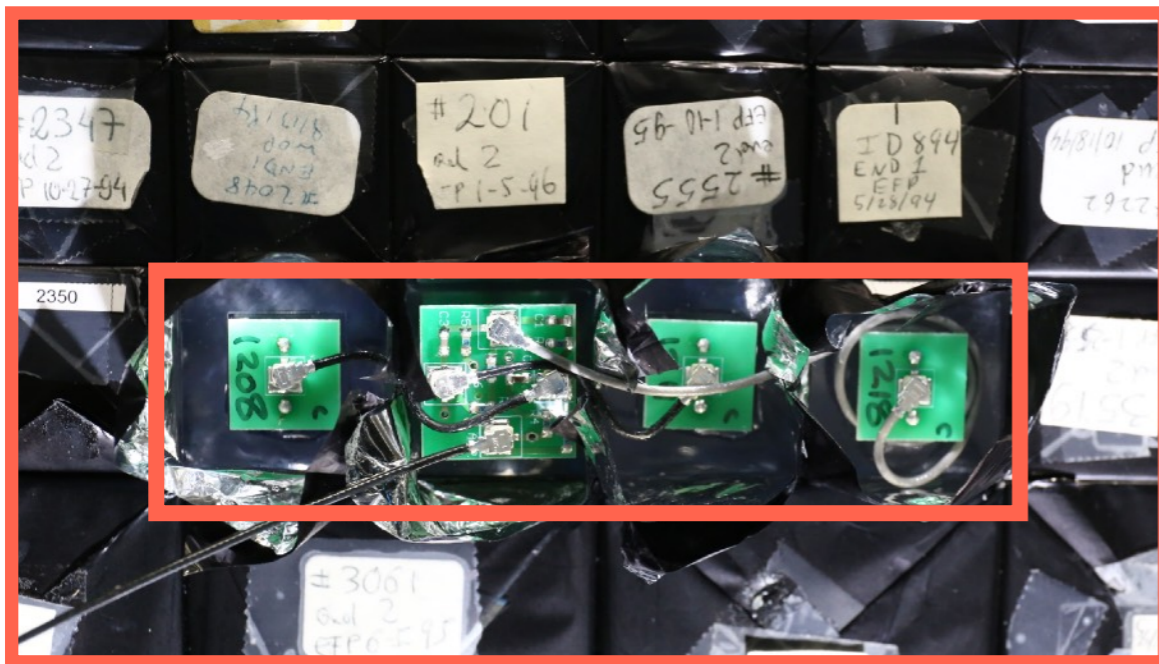
\blackrightarrow ΔT を使って γ 線と中性子を識別

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

ΔT 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

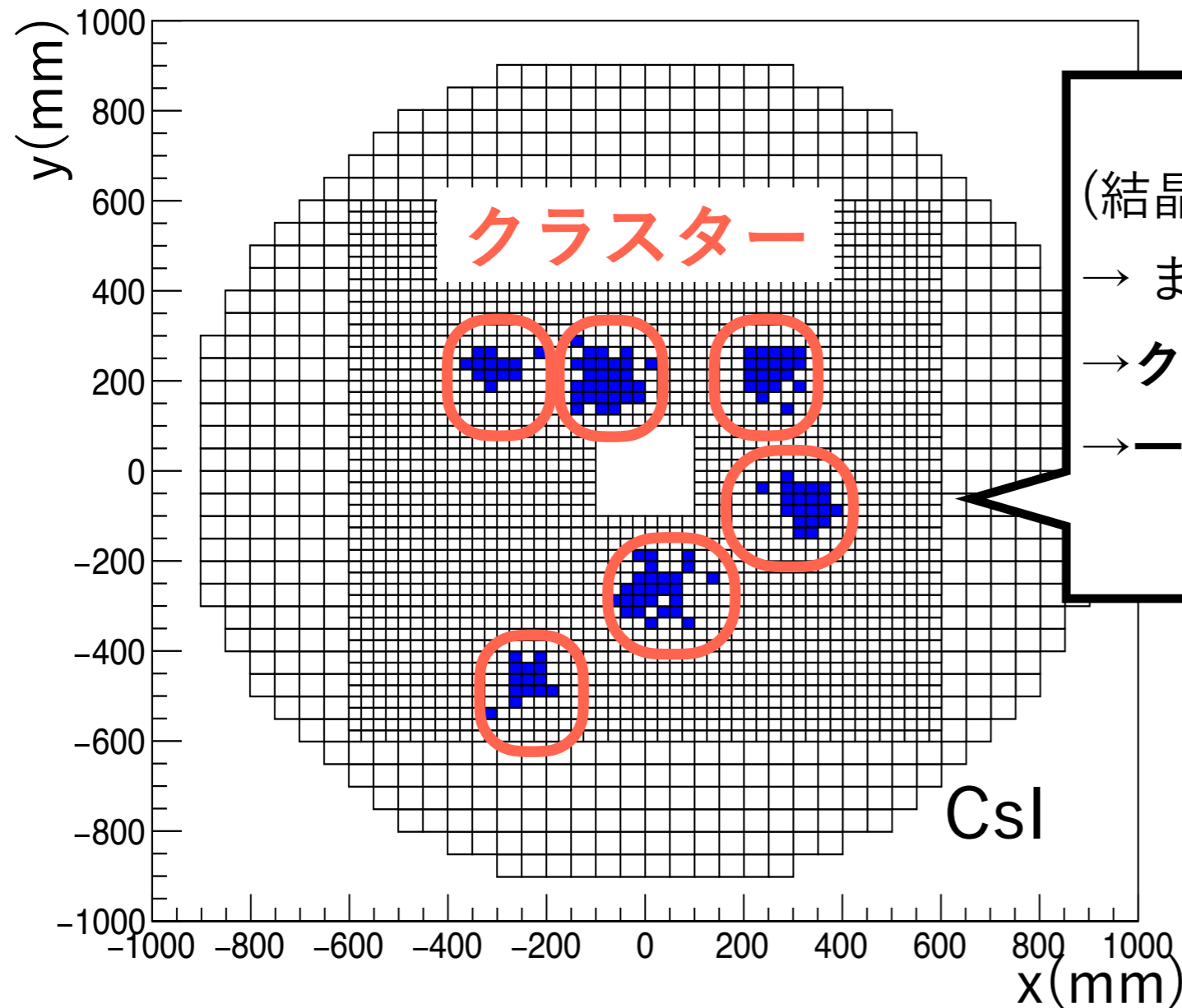
- 中性子背景事象を削減する他のカットとの相関

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
 - γ 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
- ΔT による中性子削減能力の評価
 - ΔT 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

γ 線サンプル

- γ 線サンプル

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

終状態が γ 線のみ

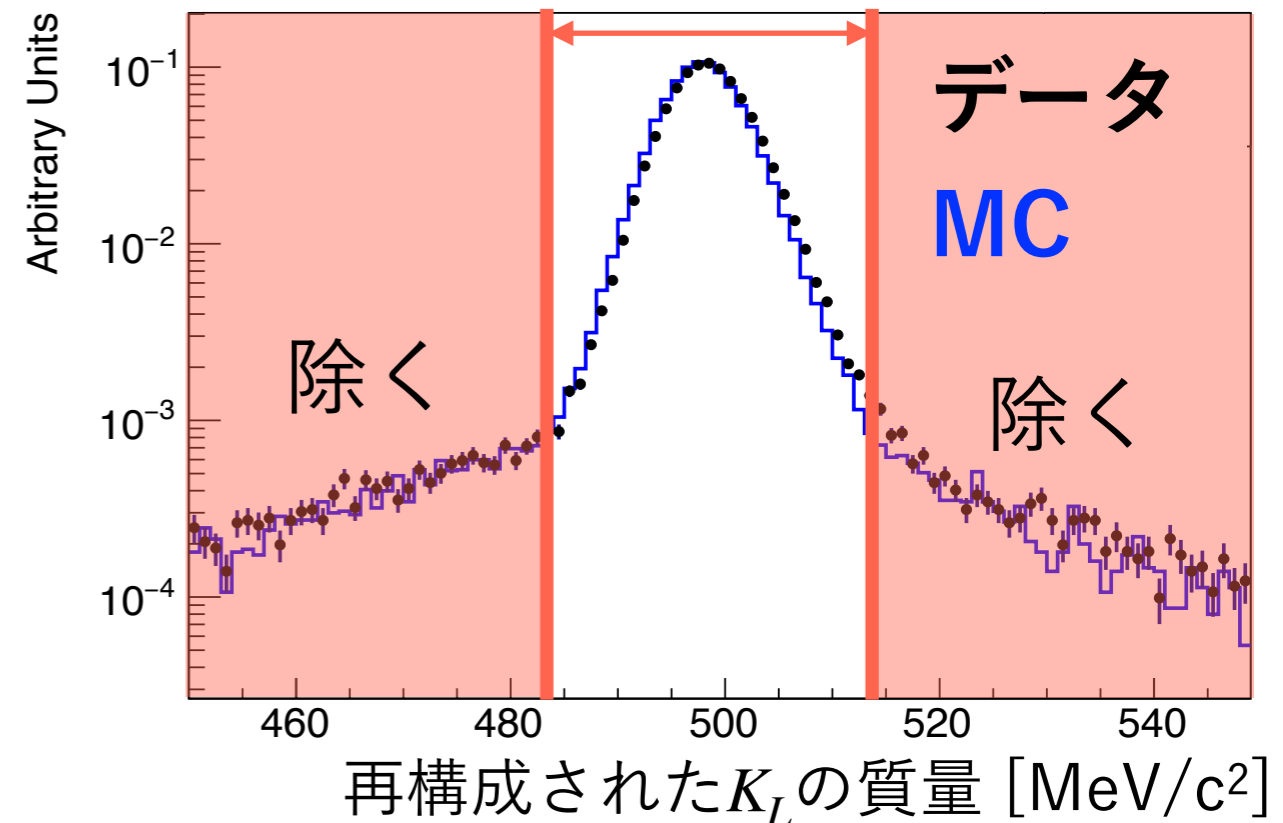
分岐比が大きい (20%)

- 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

再構成された K_L の質量



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

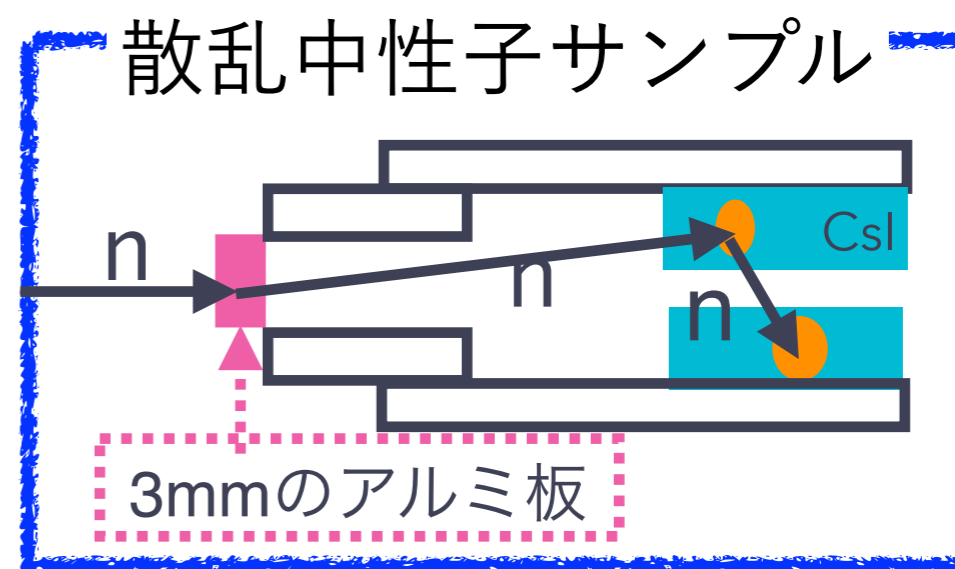
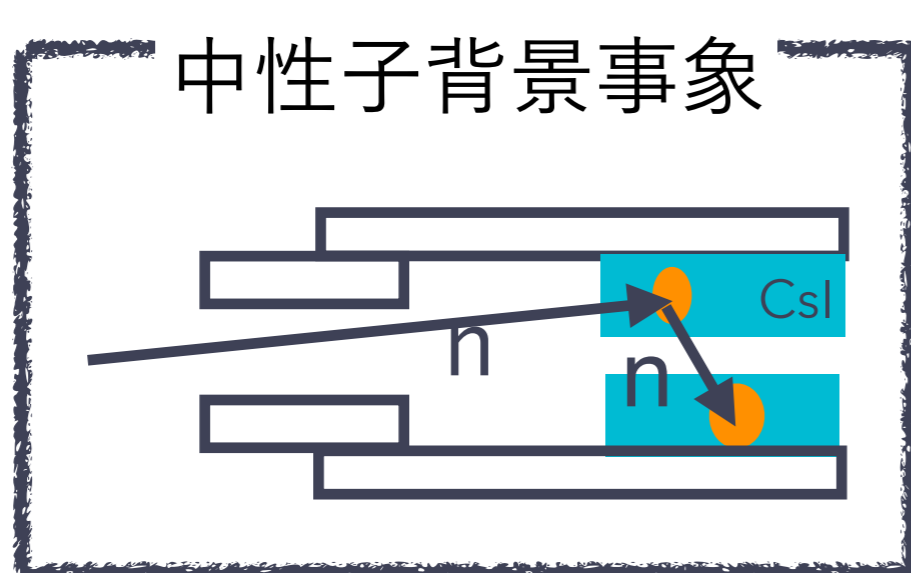
→ $K_L \rightarrow 3\pi^0$ の1事象に対して、3個の γ 線サンプルを取得

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

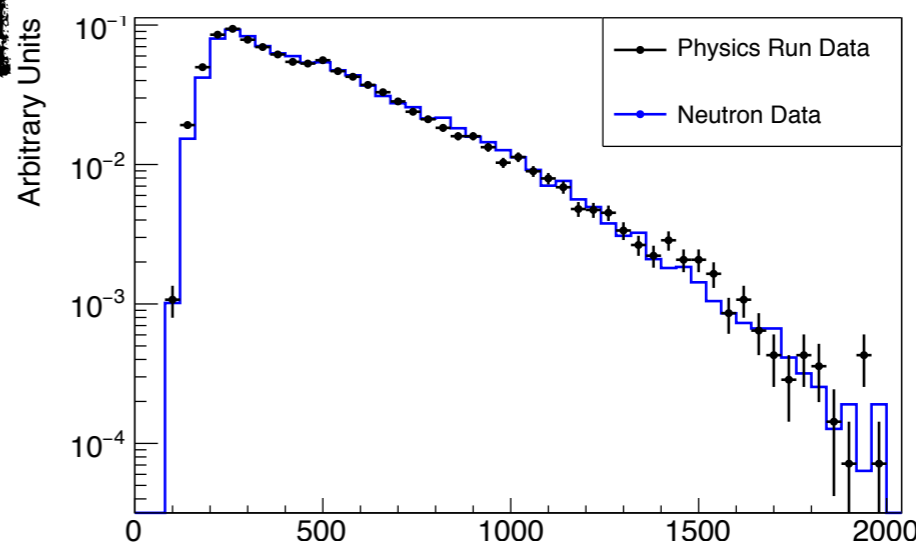


- 事象の妥当性

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

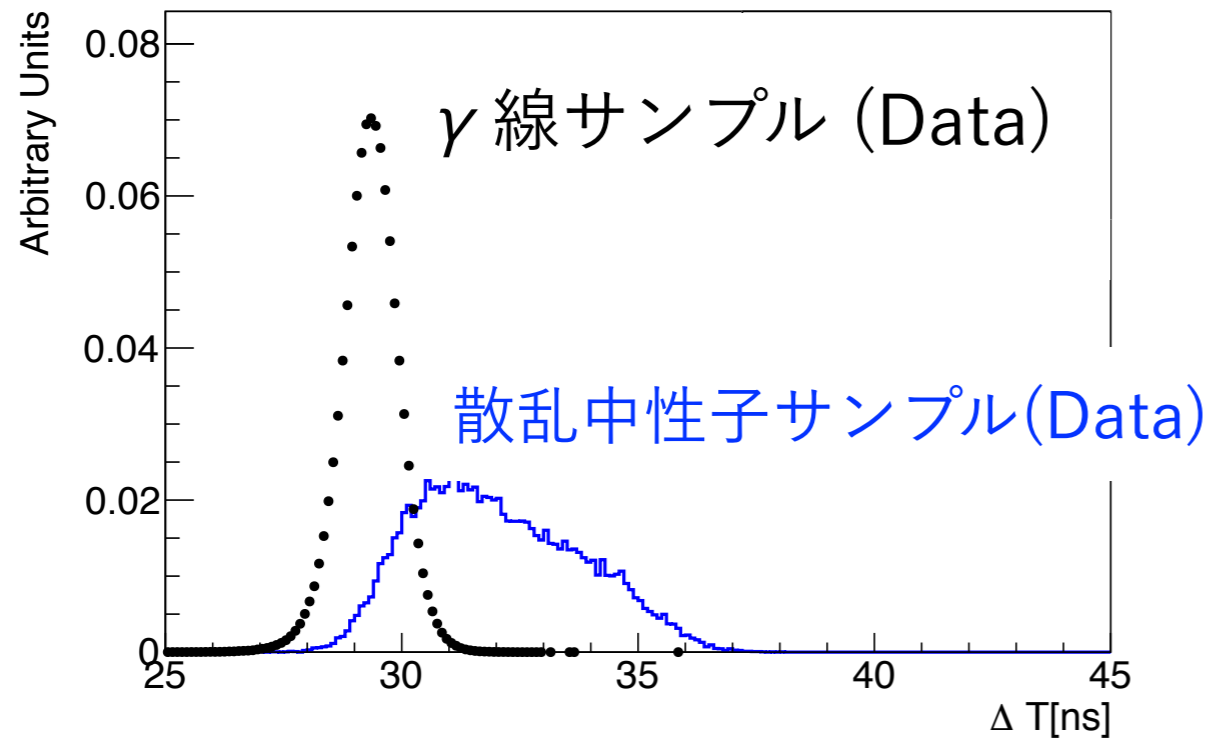
中性子背景事象と分布が一致

クラスターエネルギー

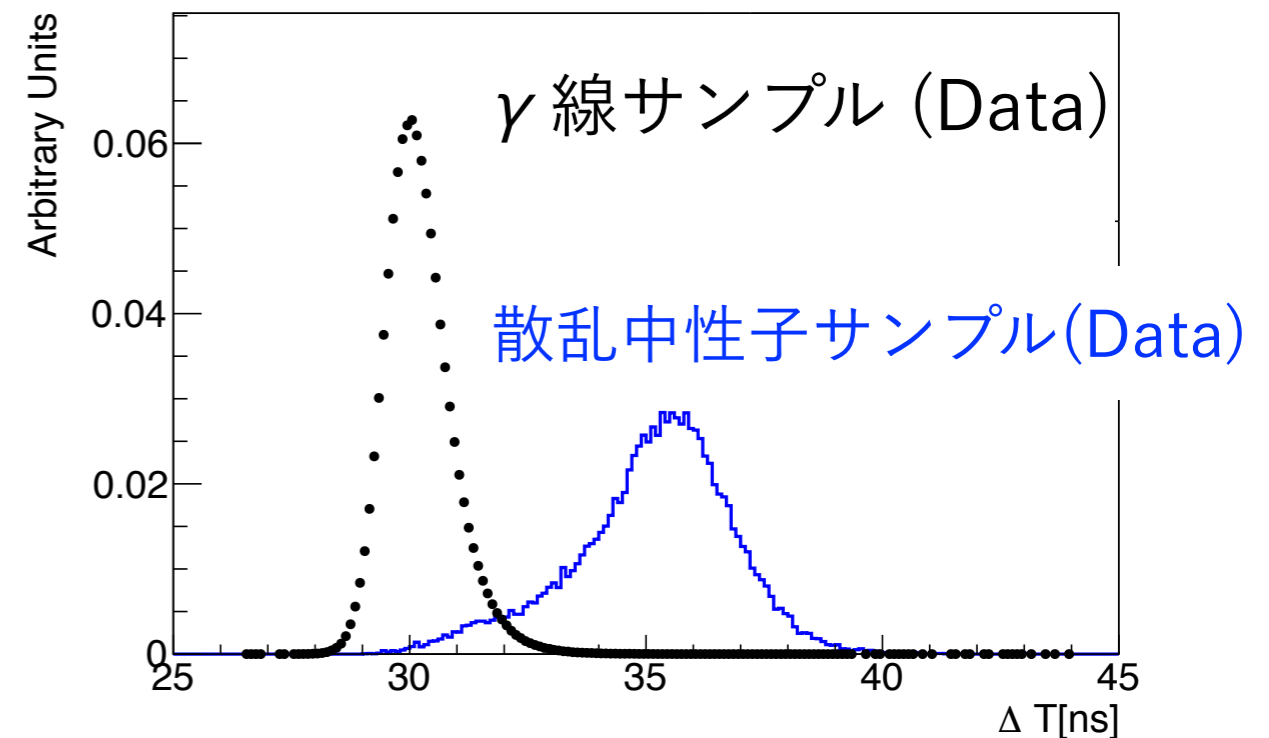


ΔT 分布

ΔT が小さい方のクラスター



ΔT が大きい方のクラスター

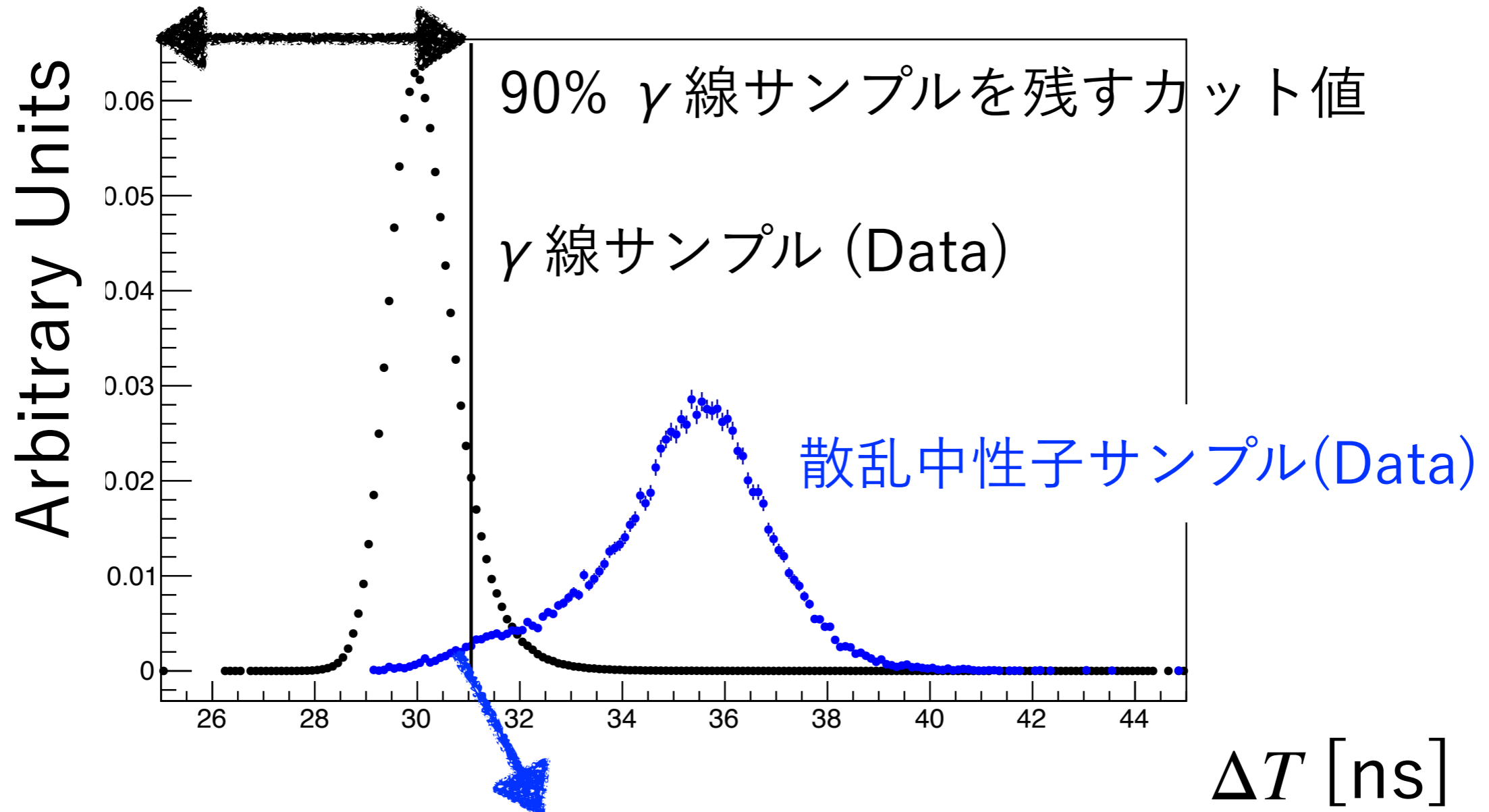


より削減能力の高い、

ΔT 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

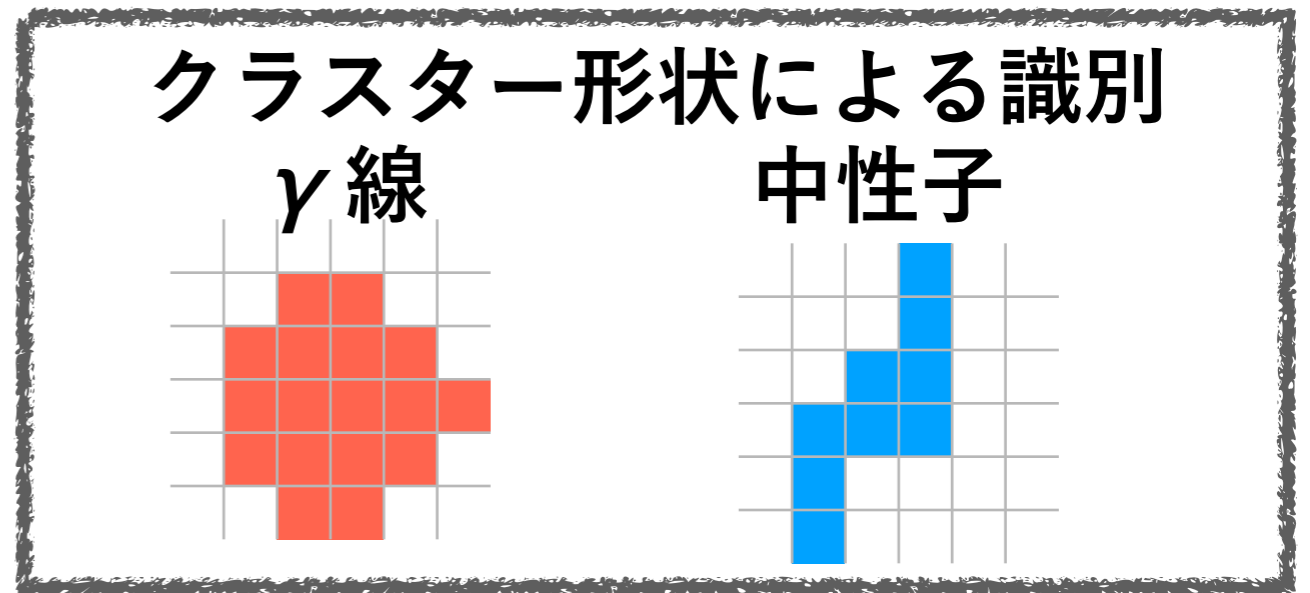
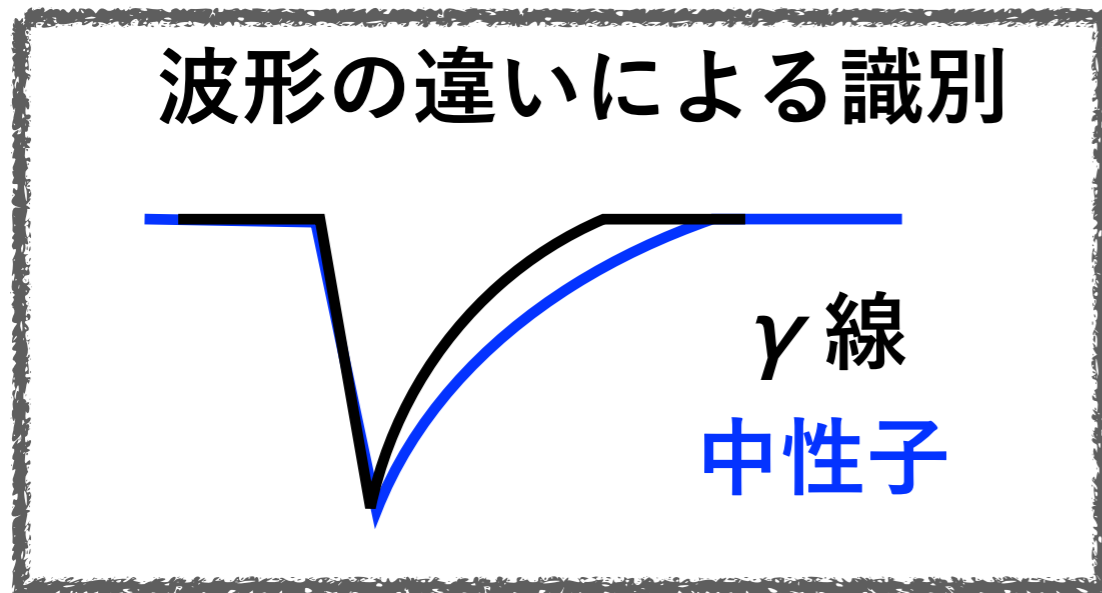
ΔTが大きい方のクラスターのΔT分布



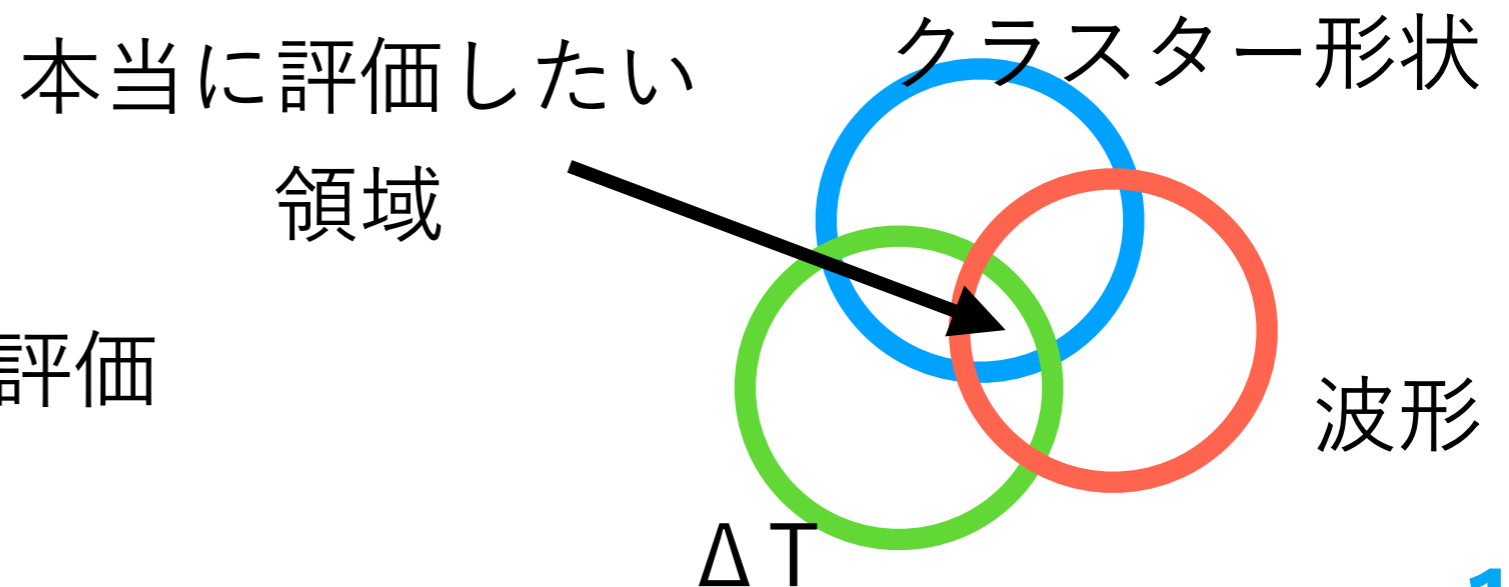
- 中性子サンプル $(2.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$ 倍に削減
- 要求性能 (0.1倍) を達成

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

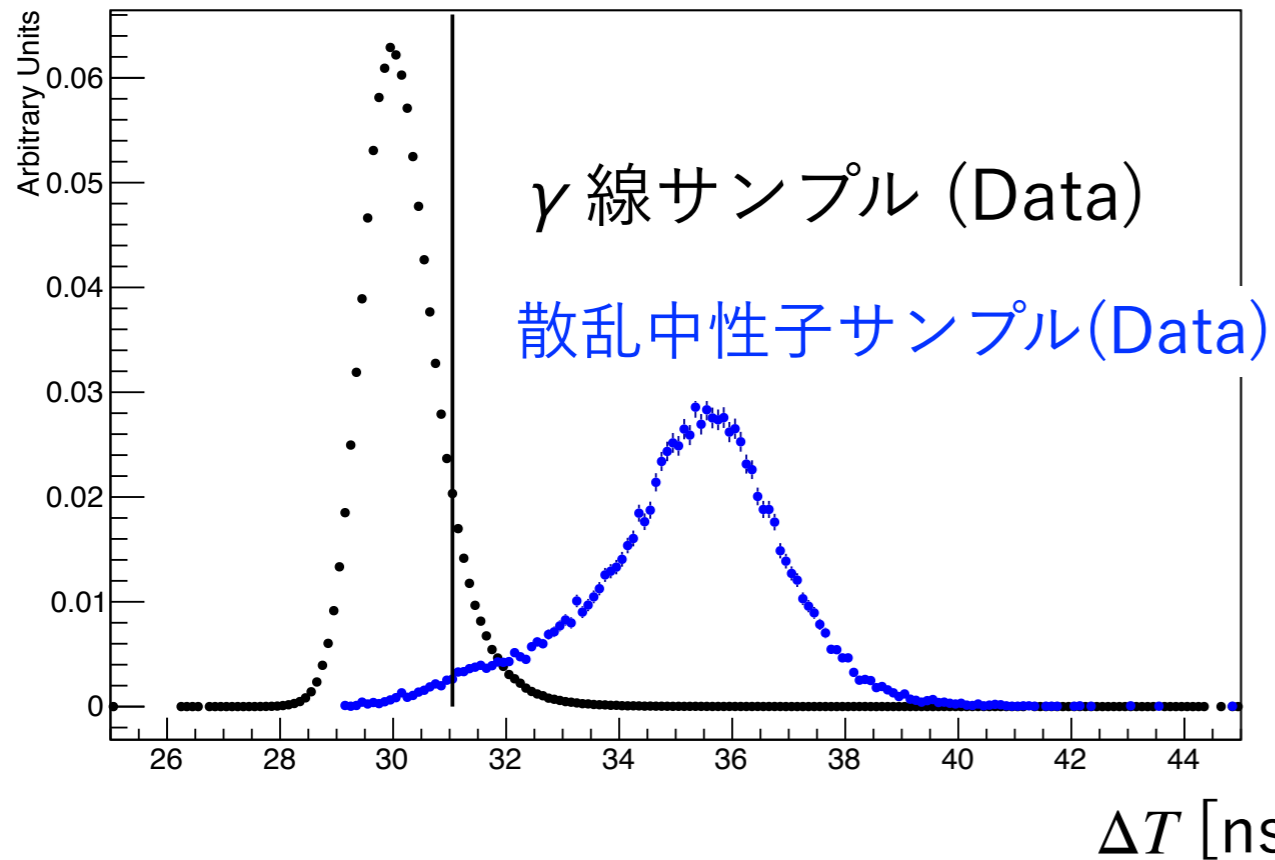


- 相関を考慮した
より現実的な削減能力の評価

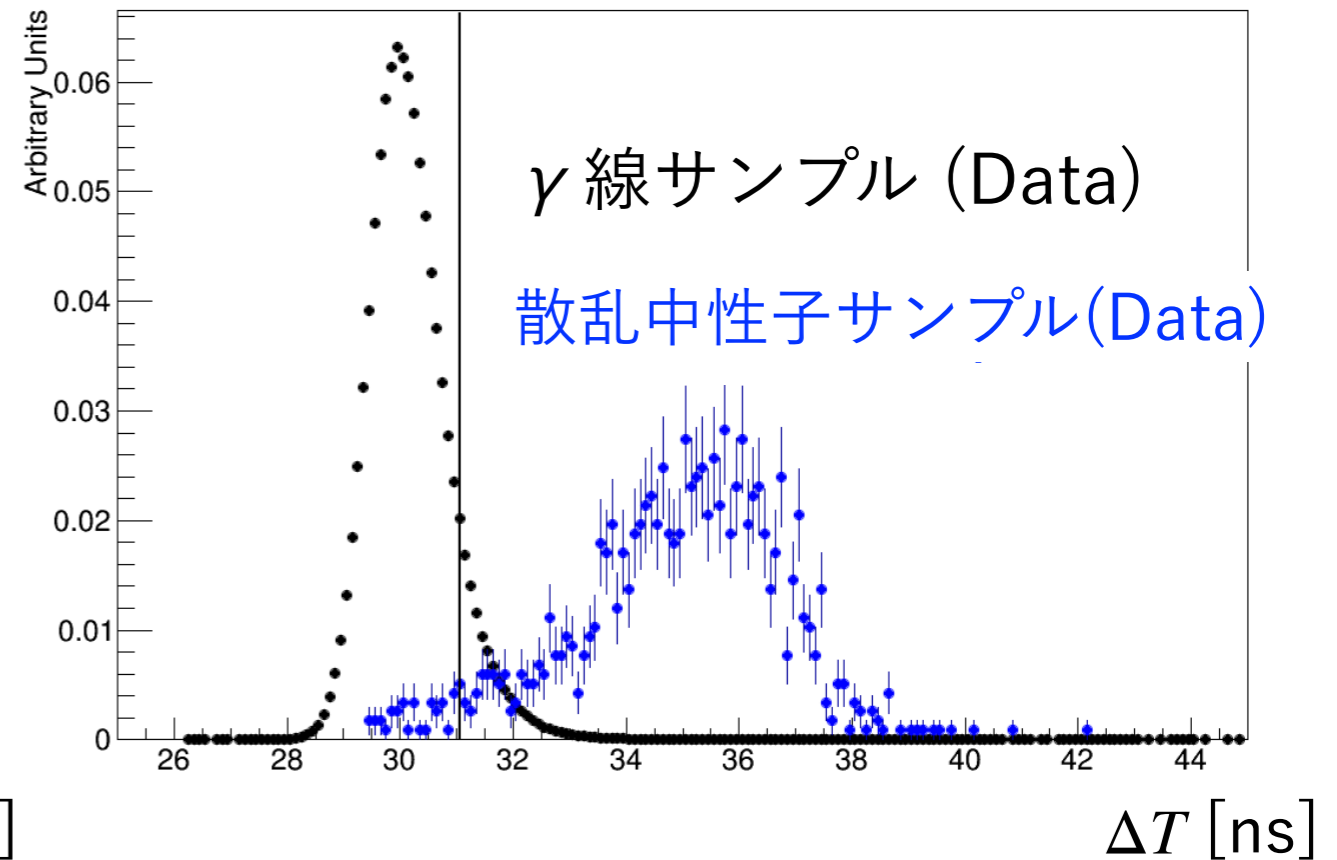


波形カットとの相関

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)

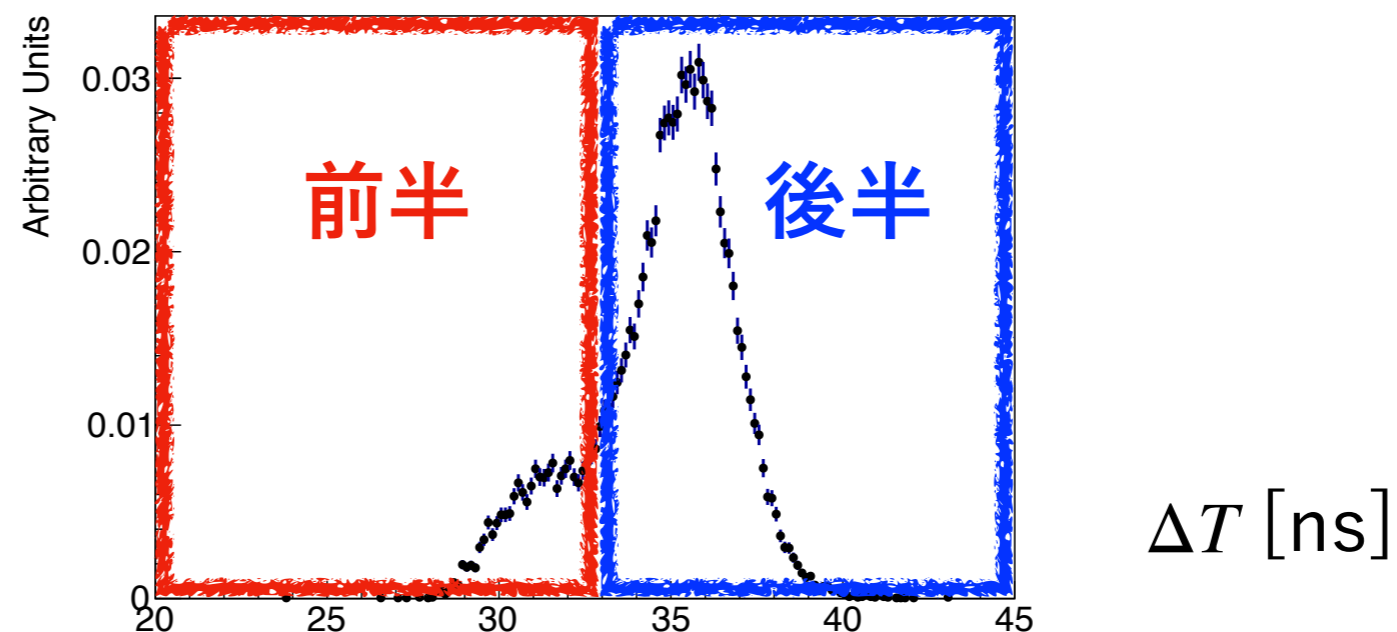
要求性能 (0.1倍) を達成

クラスター形状カットとの相関(1)

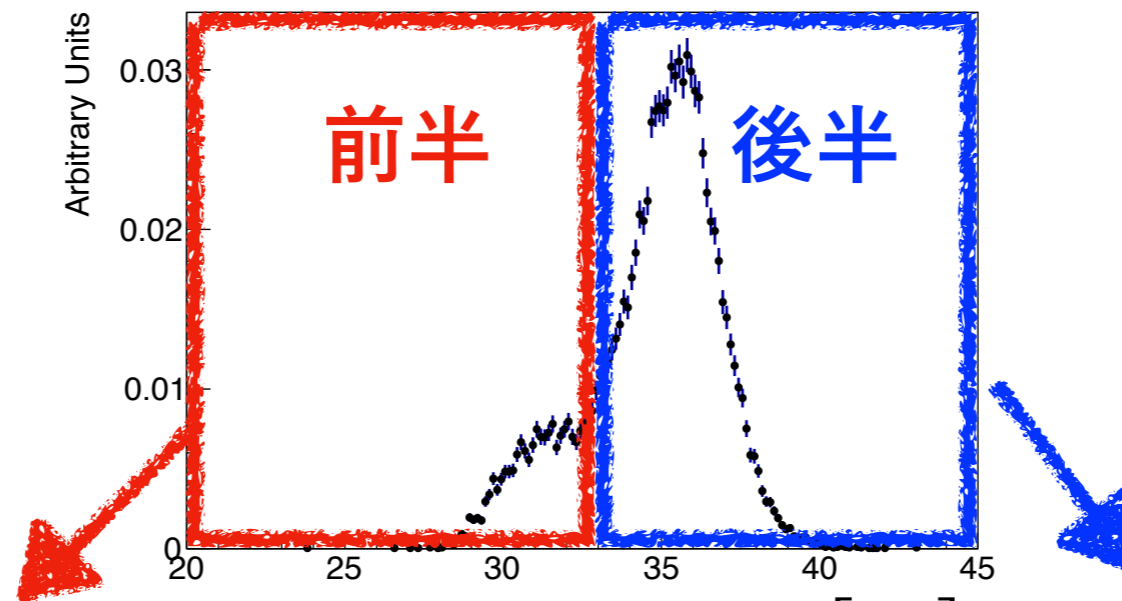
- クラスター形状カットは削減能力が高い $\sim 10^{-5}$
- カット後に残る中性子サンプル ~ 1 事象
- 相関を求めるには不足

戦略： ΔT 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 ΔT 分布

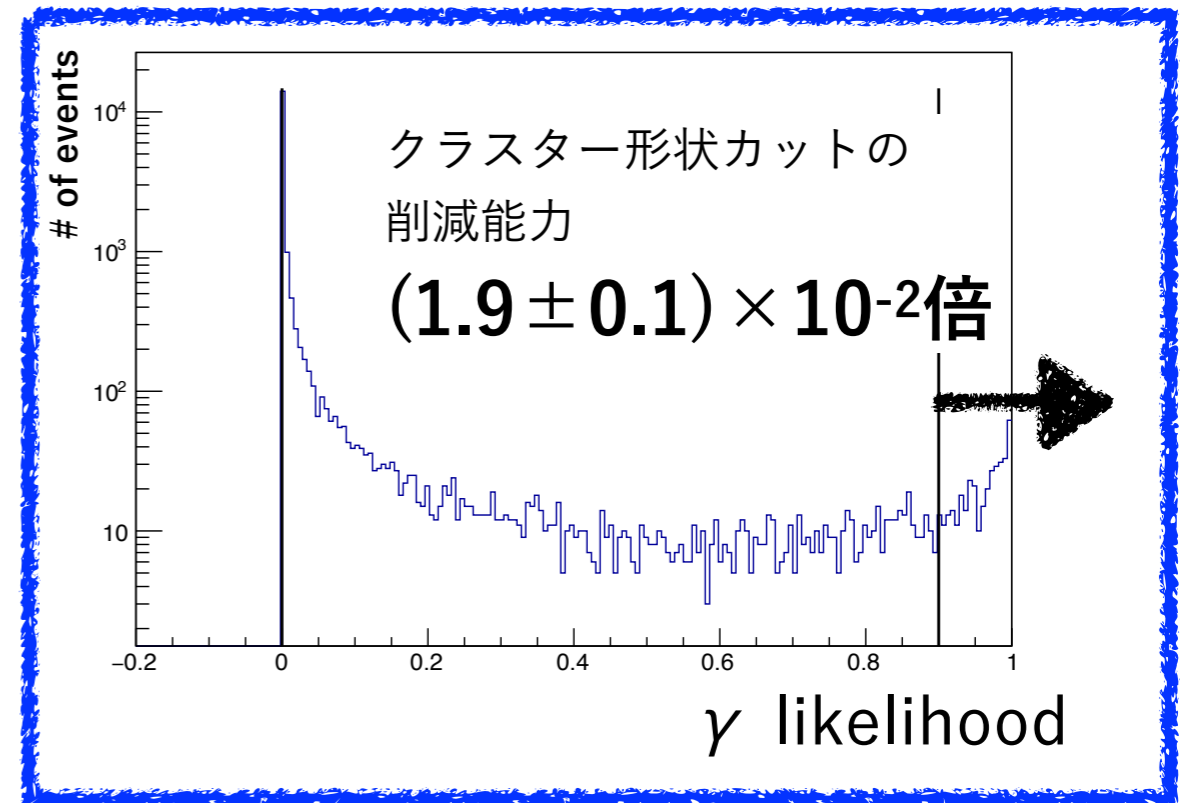
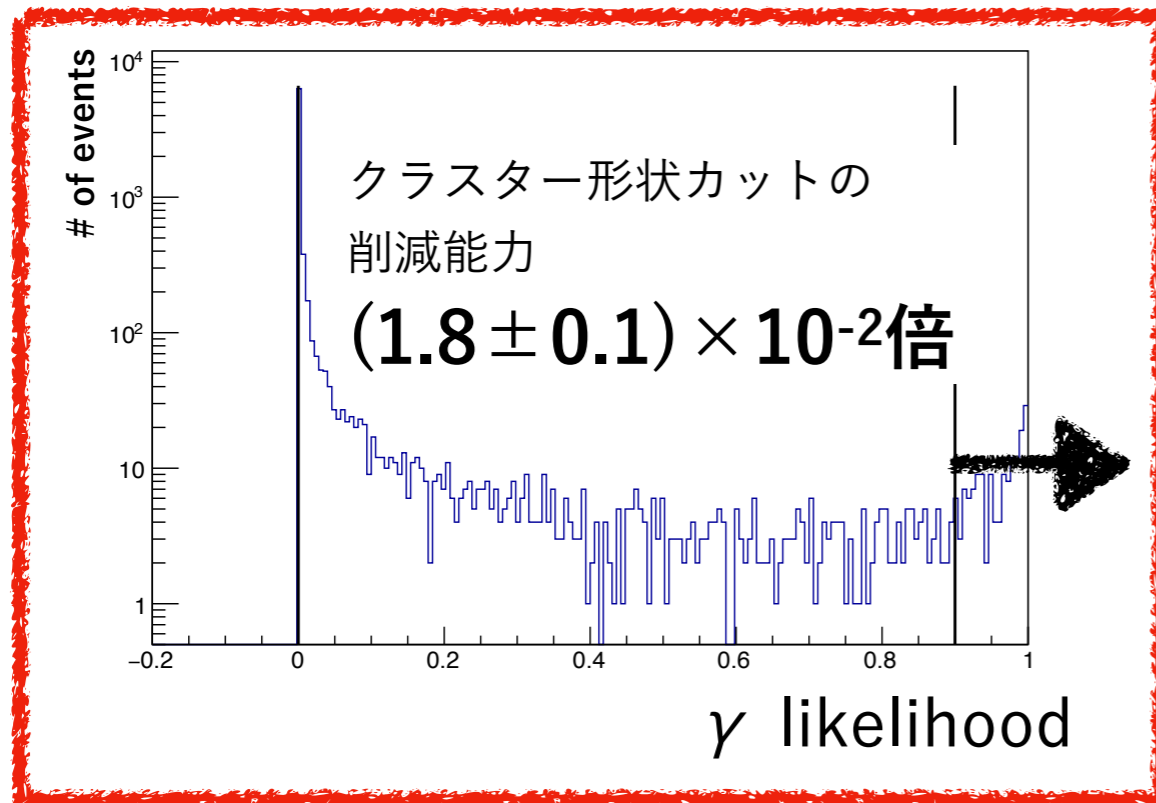


クラスター形状カットとの相関(2)



クラスター形状

ΔT [ns] クラスター形状



ΔT 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

- ΔT カットなし

中性子背景事象数→信号事象数の10倍予測



- ΔT カットあり

中性子背景事象数→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

- ΔT 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

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

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

- ΔT 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 ΔT がなかった時に予測された値と比較して

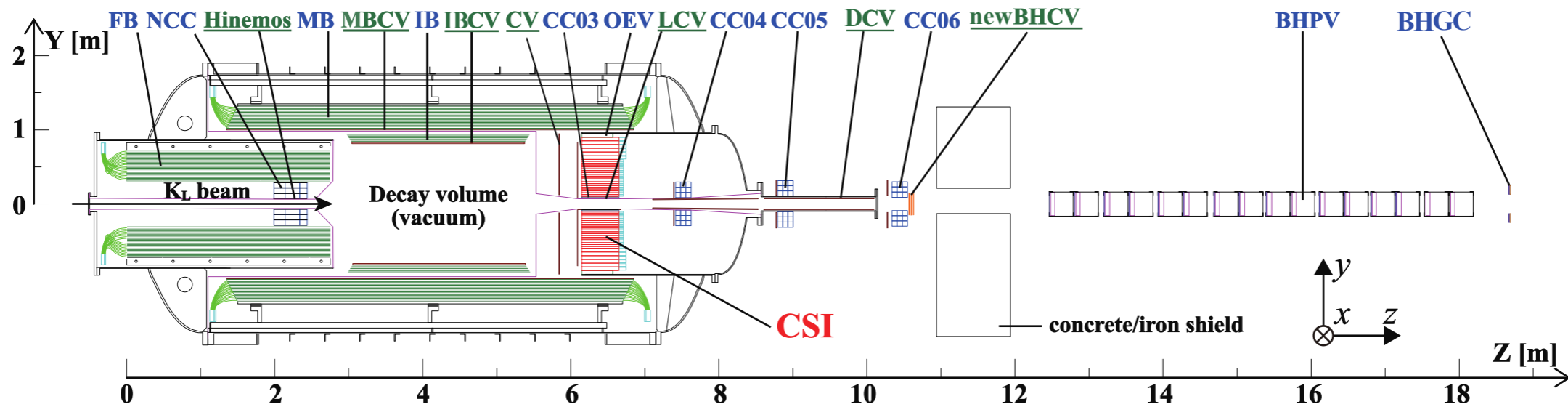
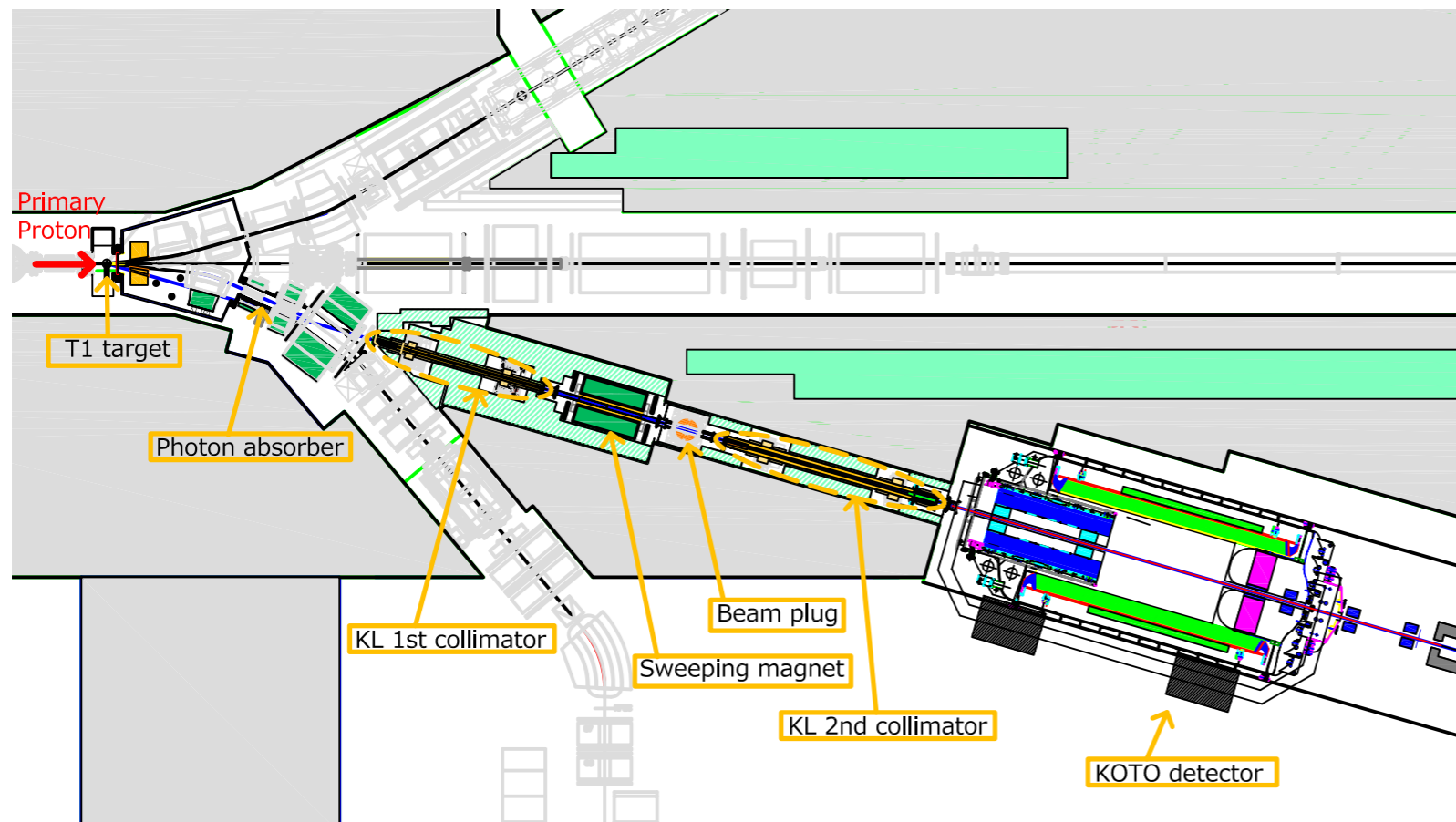
0.05倍に削減した

結論

- CsI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。
- ΔT 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**
 ΔT 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



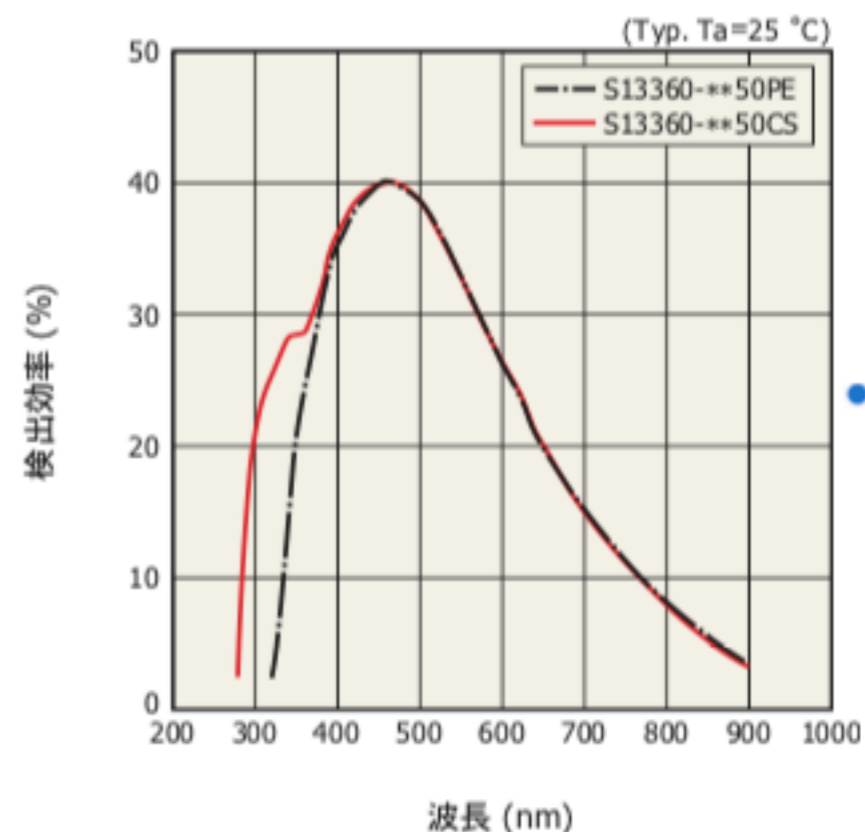
MPPCの仕様



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	1.7×10^6
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 ΔTV_{OP}	54 (mV/°C)

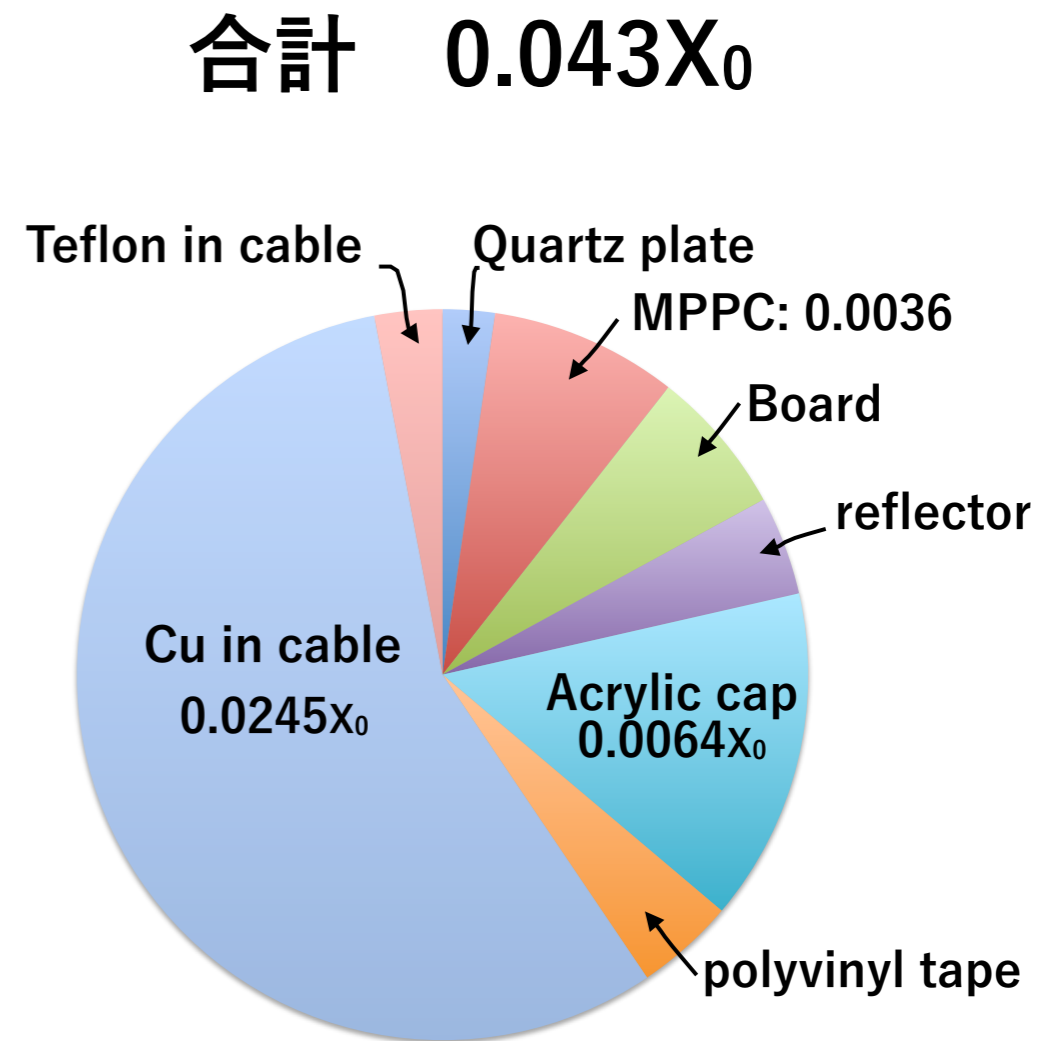
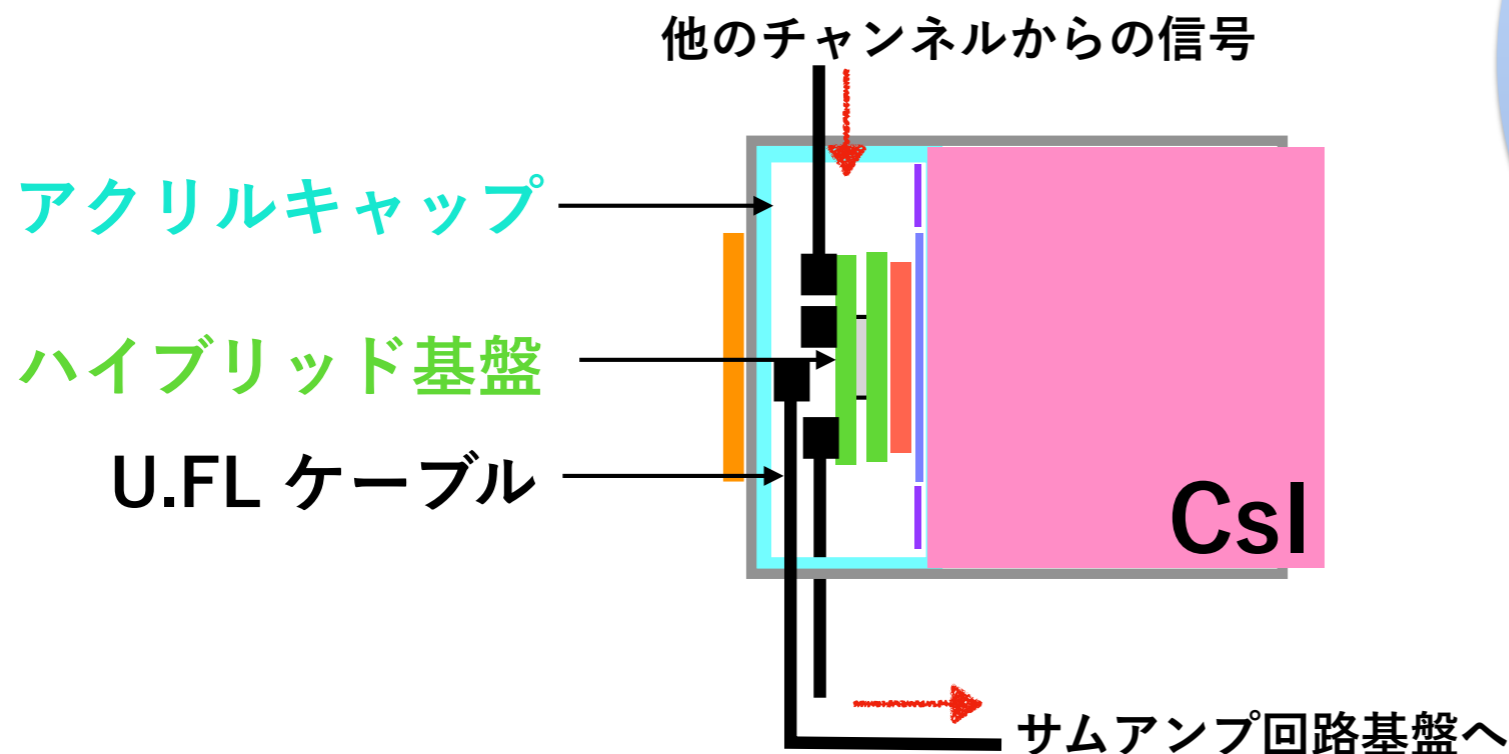
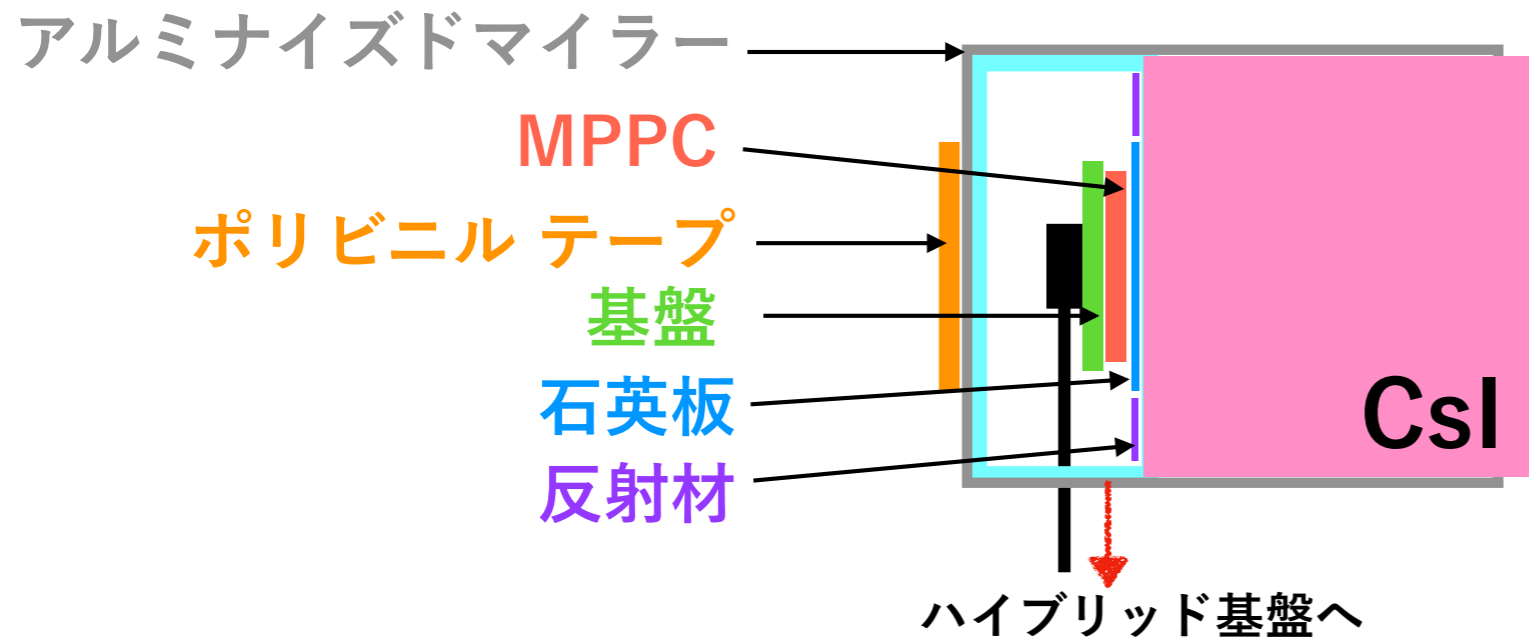
窓材がシリコン樹脂のため、エポキシ樹脂のMPPCと比較して短波長にも感度がある



使用したMPPC

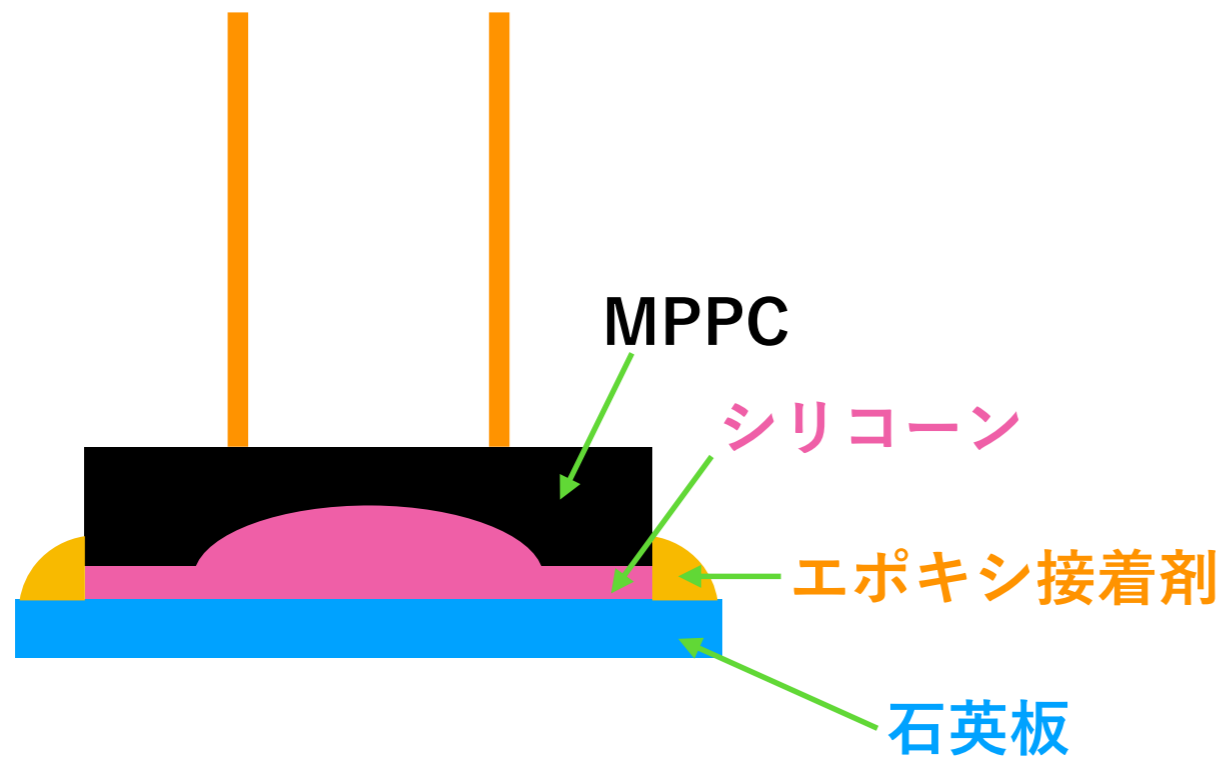
窓材がエポキシ樹脂のMPPC

インストール後の物質質量

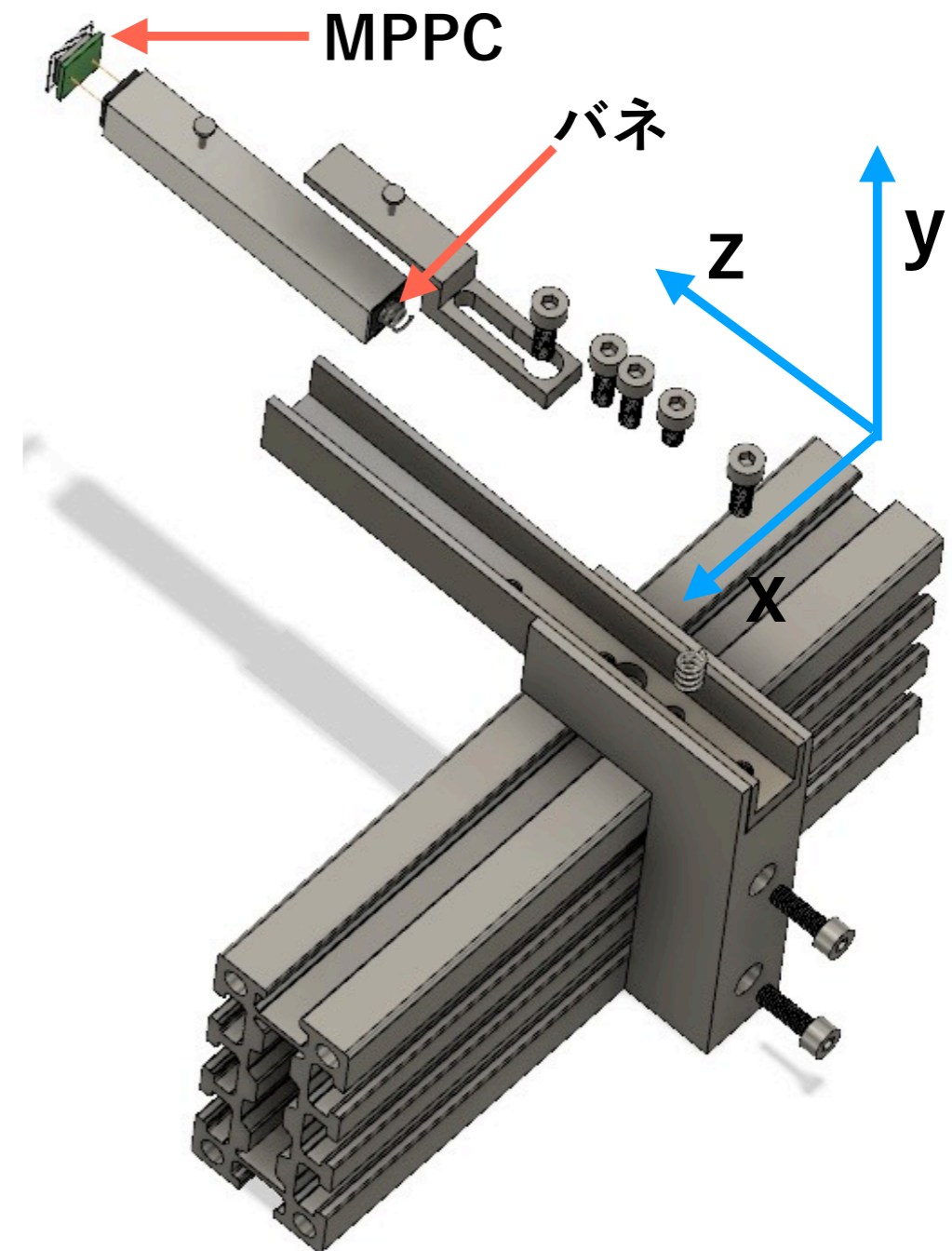


接着手法

MPPC表面が窪んでいるので
石英板に接着



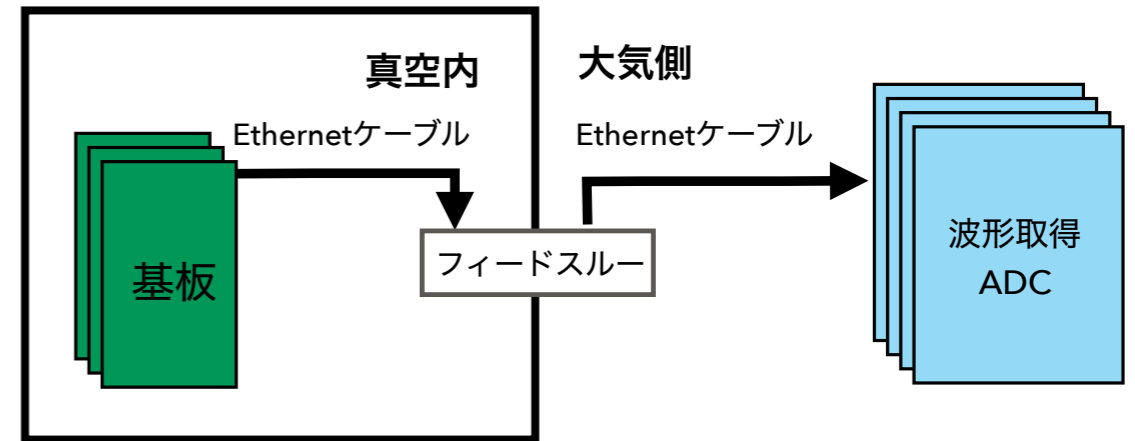
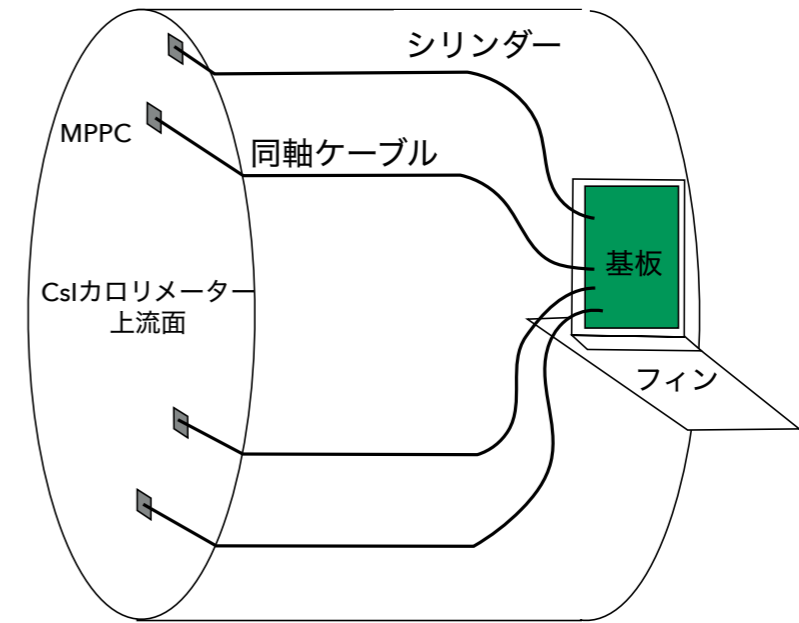
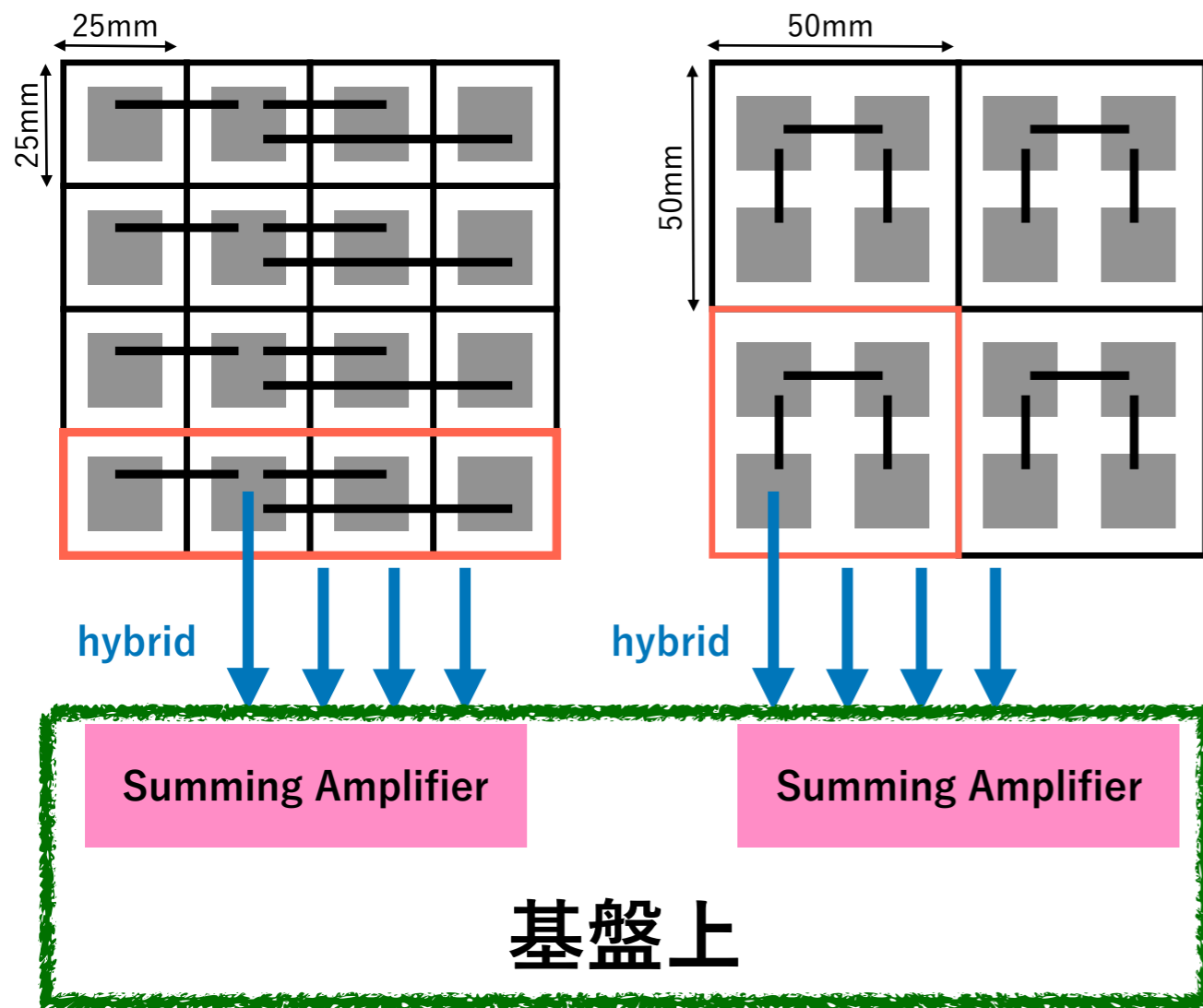
治具を使ってCsl表面に接着



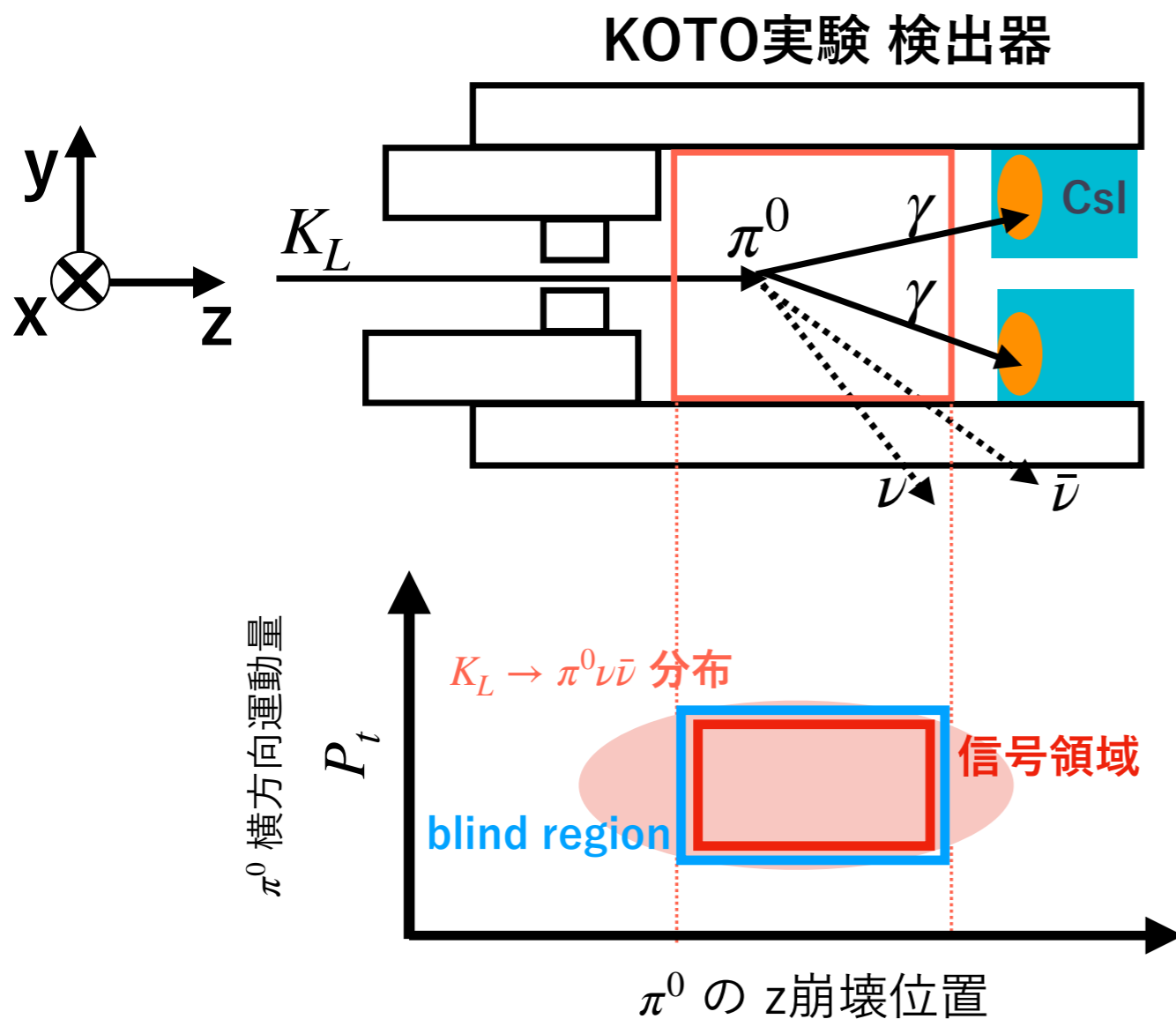
MPPCの回路

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

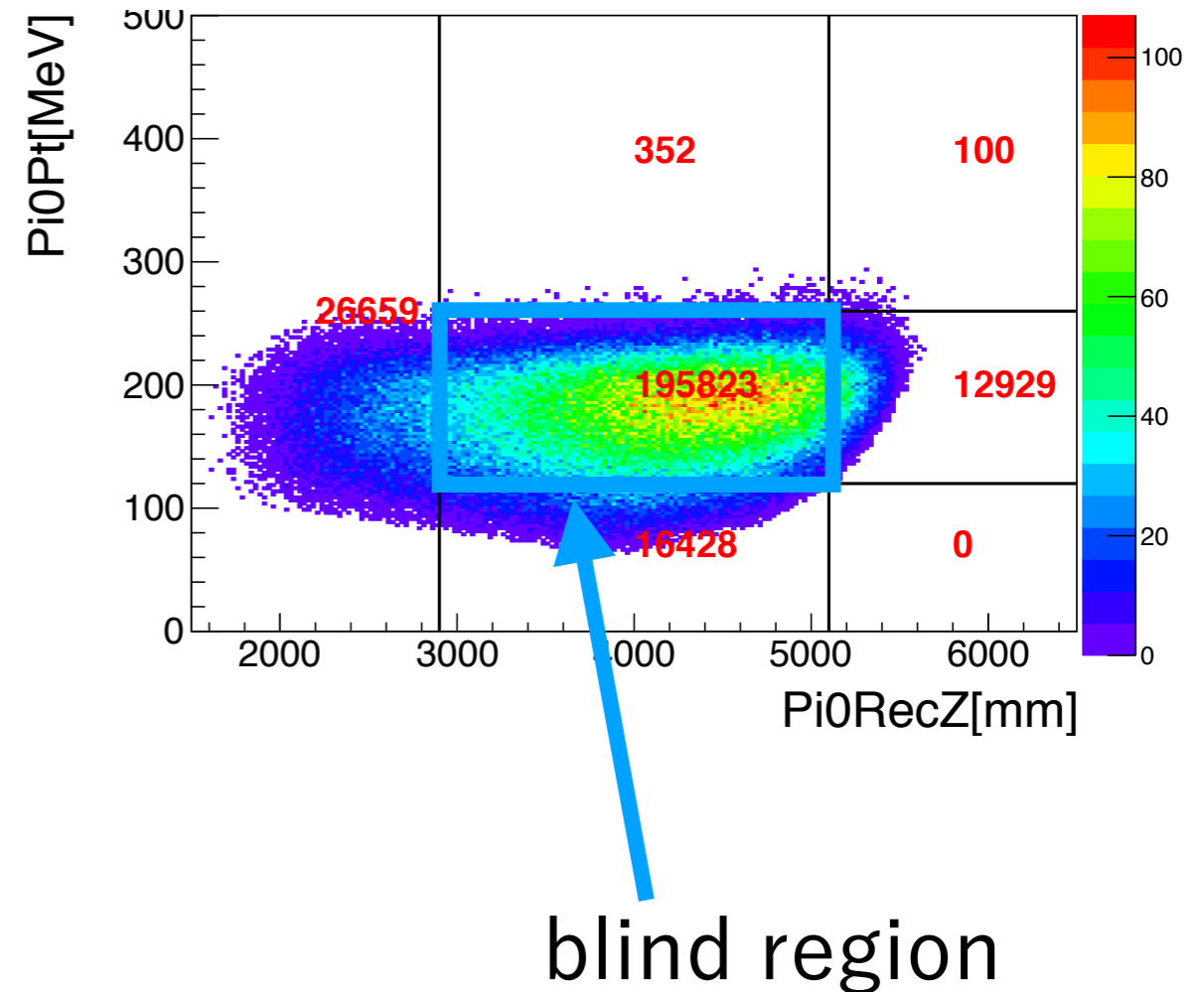
MPPCへの配線



解析手法



信号事象の $P_t - Z_{\text{vtX}}$ 分布 (MC)

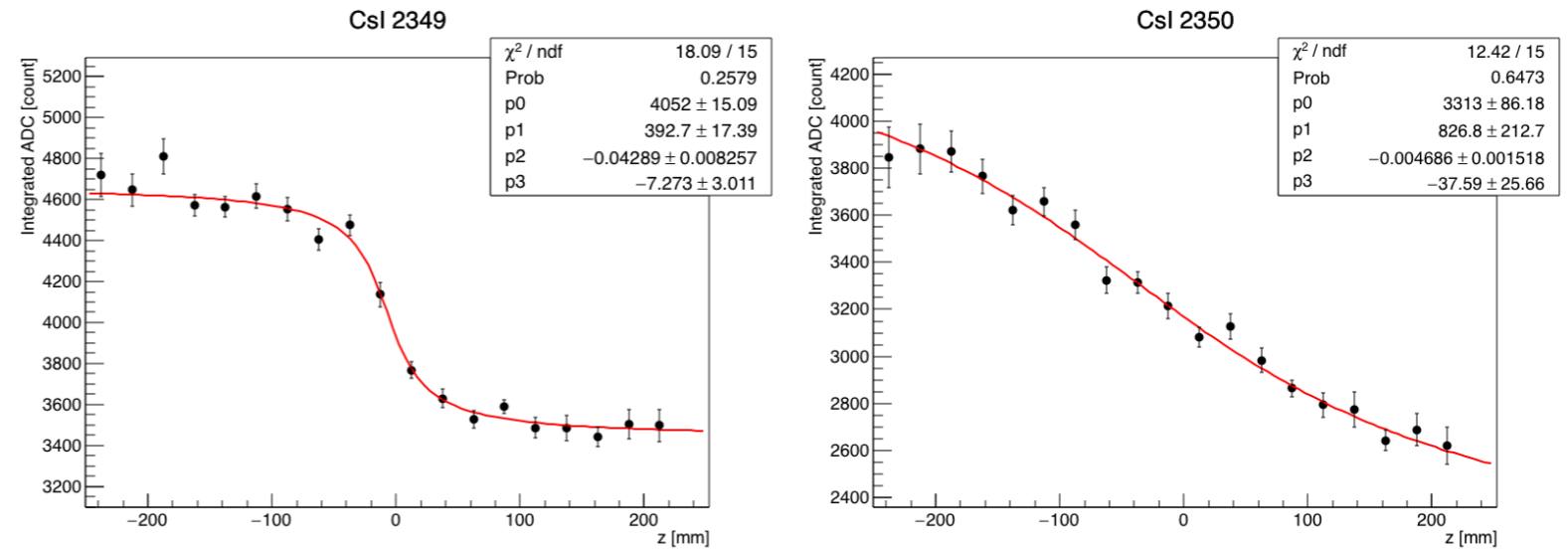
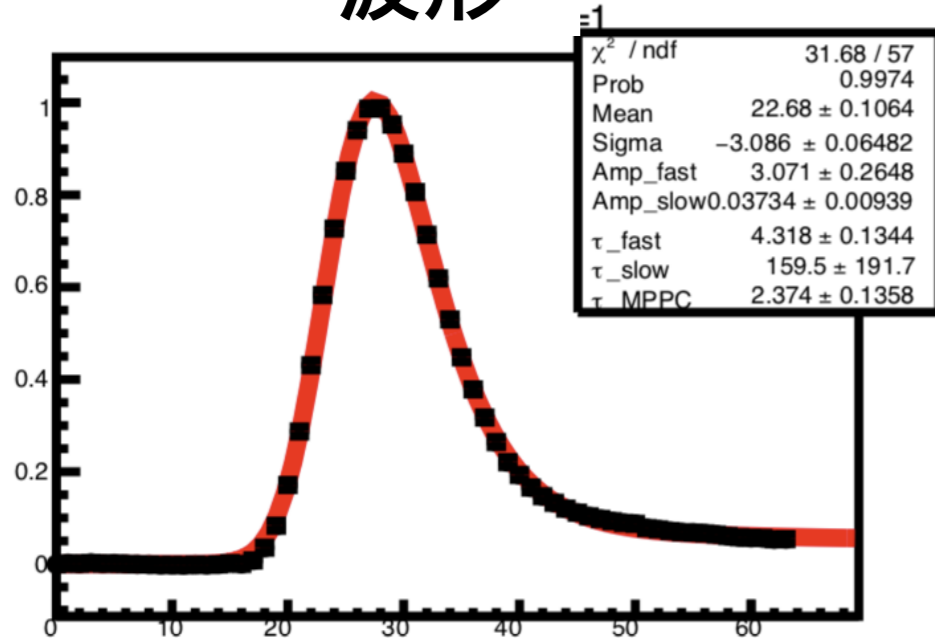


- ① 検出器に囲まれた領域で崩壊する
- ② ν が運動量を持ち去る $\rightarrow \pi^0$ の P_t が比較的高い
 \rightarrow 信号領域を定義

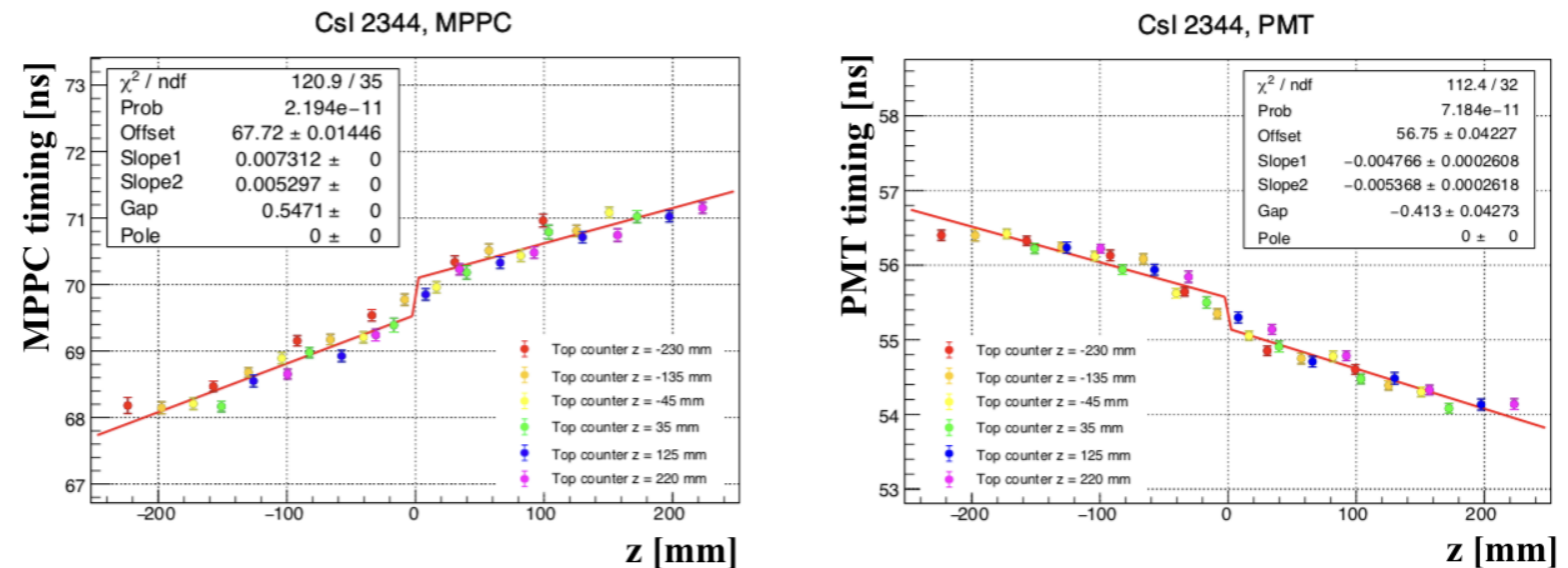
宇宙線測定で得た物理量

ヒットz位置と光量の相関

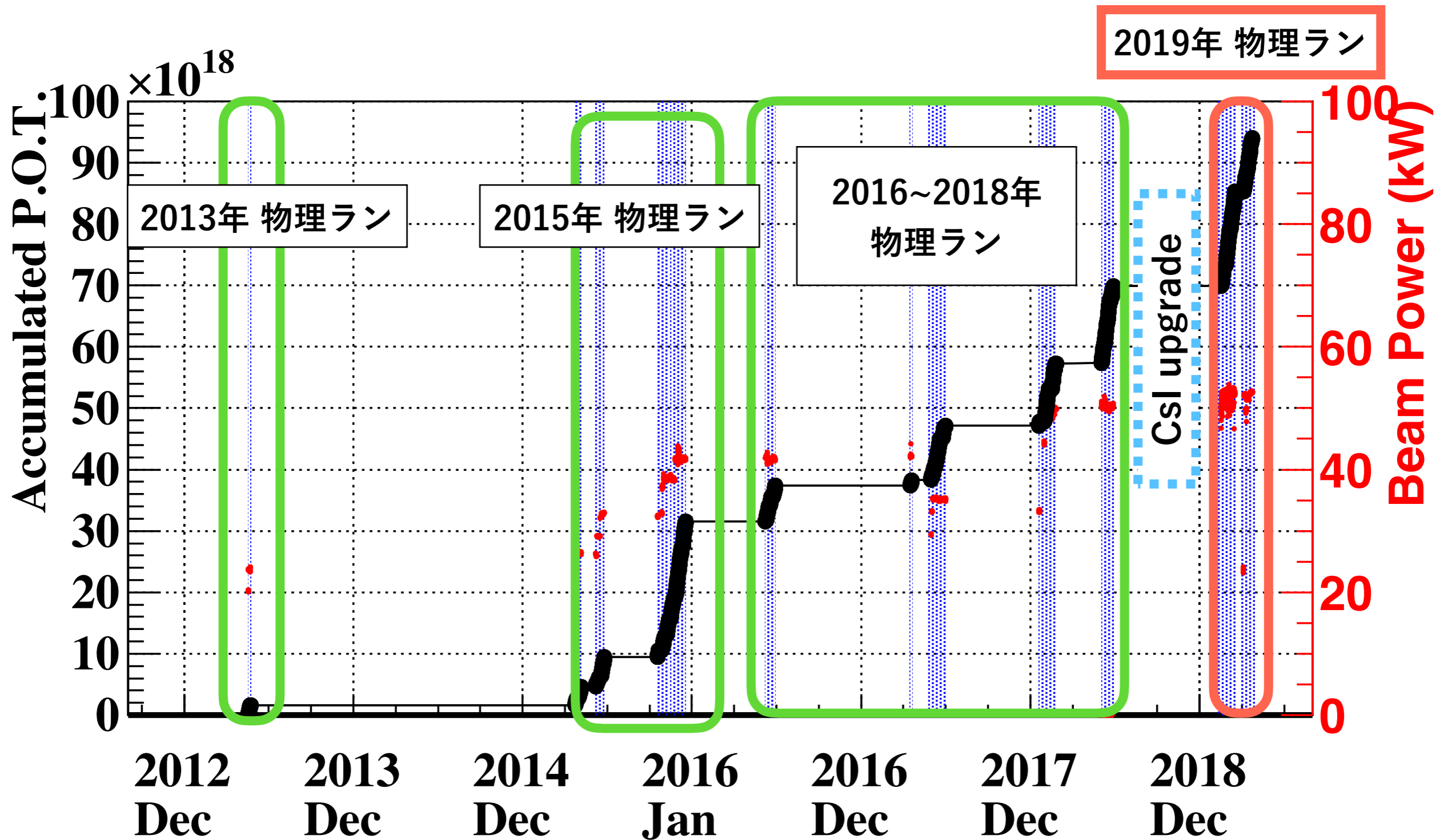
波形



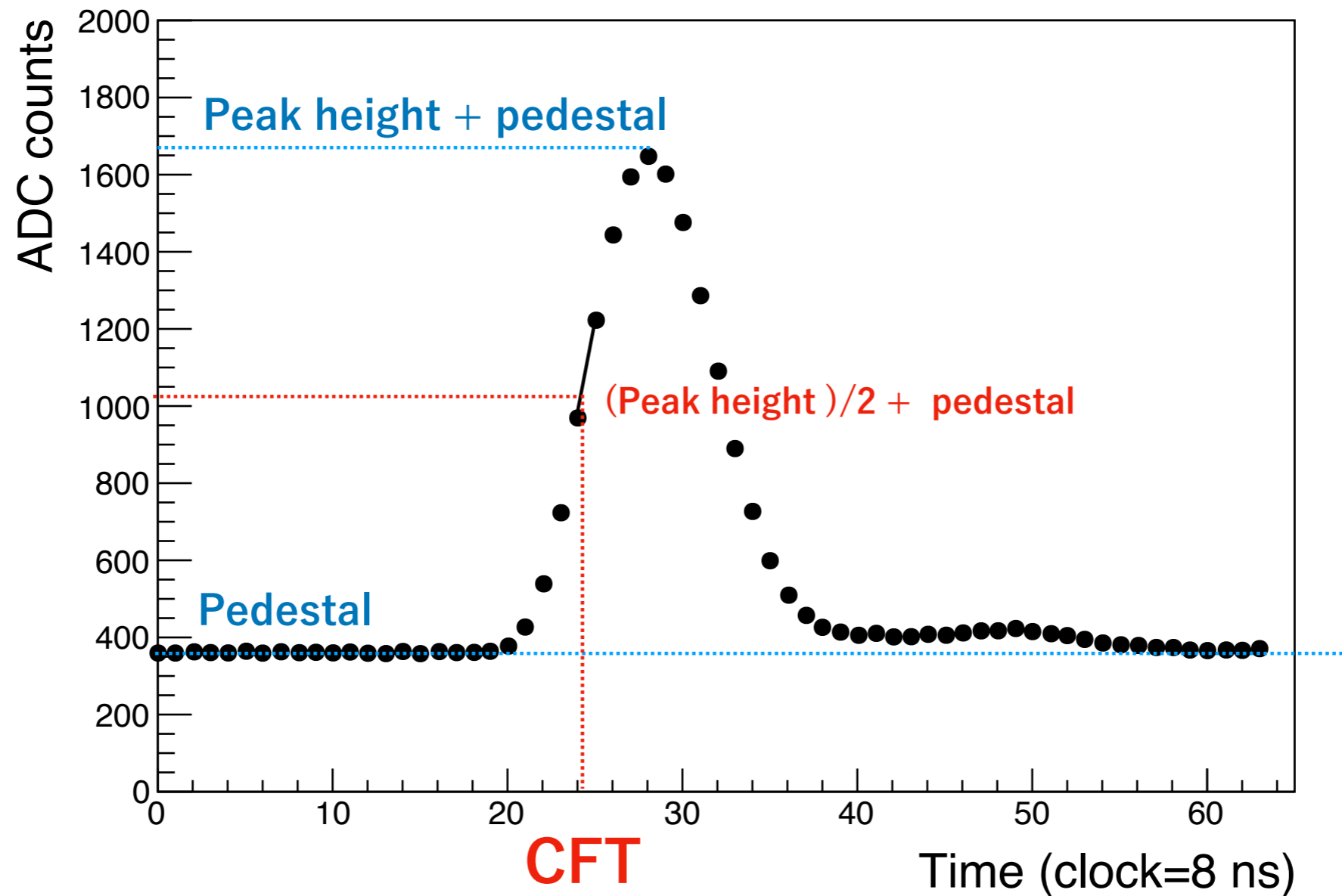
ヒットz位置と検出時間の相関



POT



波形解析

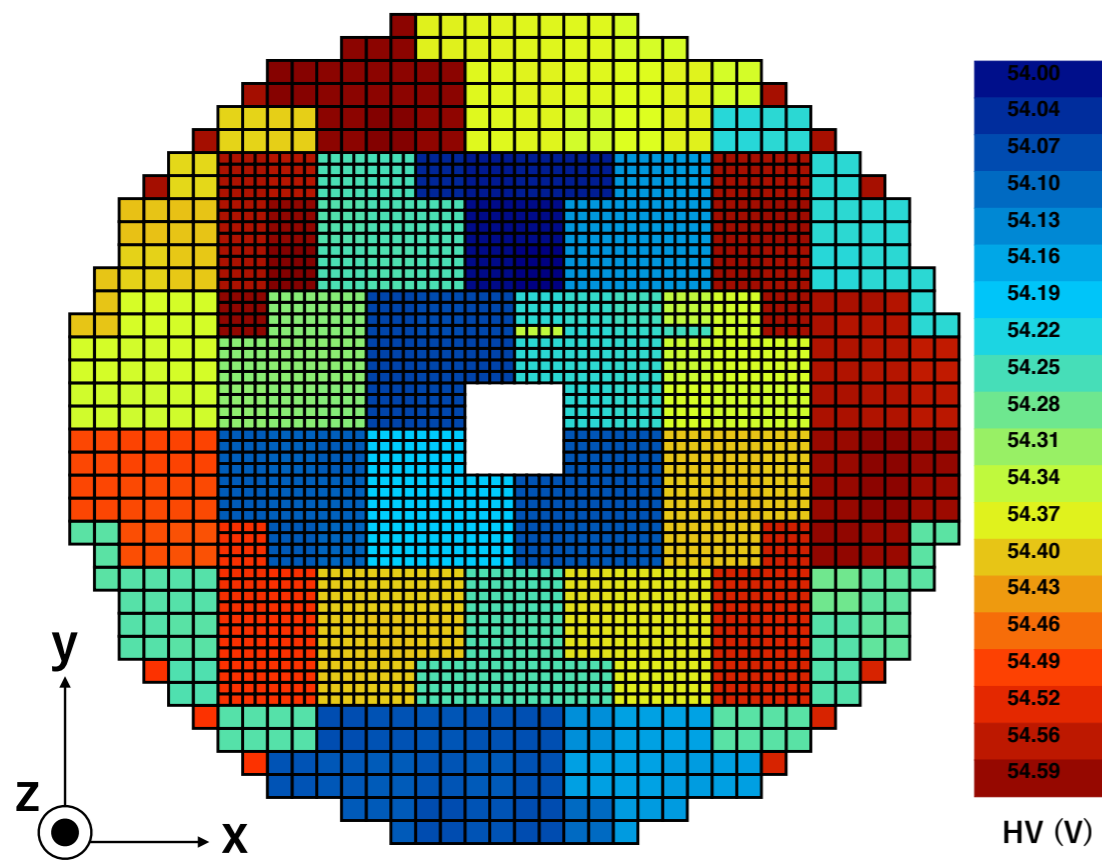


ペデスタル：64点ある波形のデータ点のうち、最初の10点と最後の10点のうち標準偏差の小さい方の平均

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。

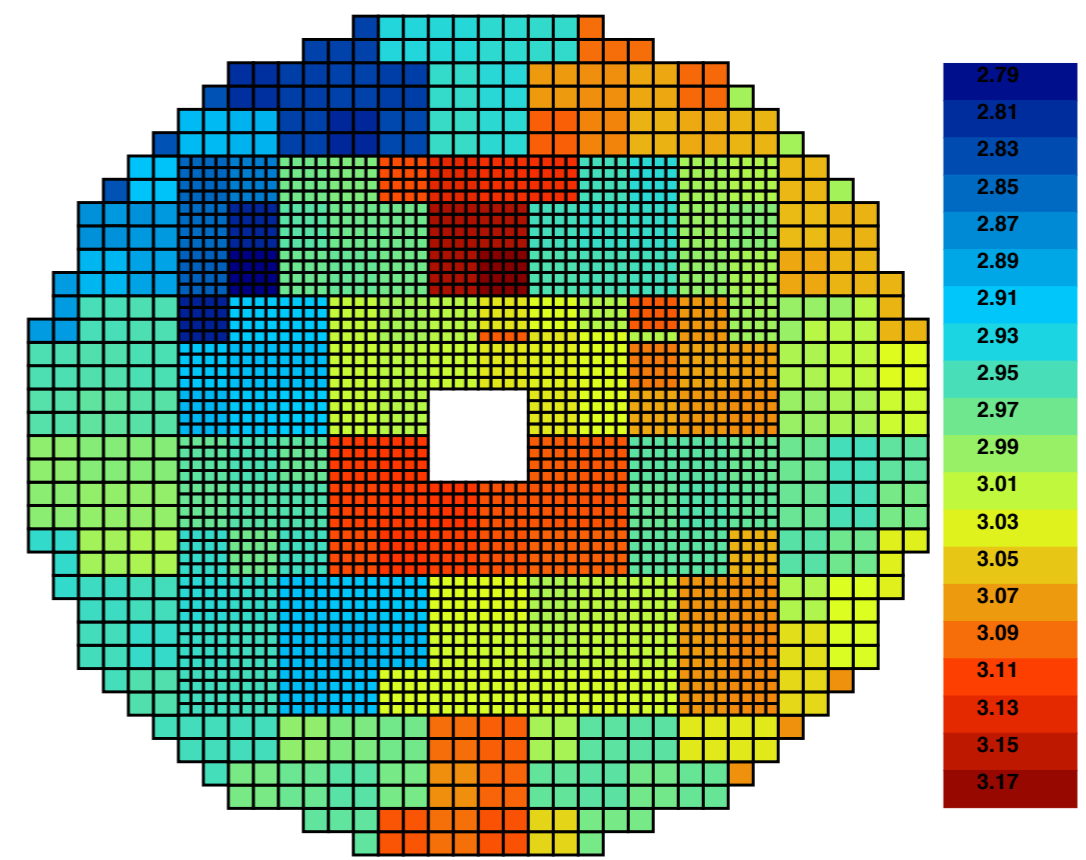
MPPCへの印加電圧

印加電圧



54.0~54.5 V

オーバー電圧



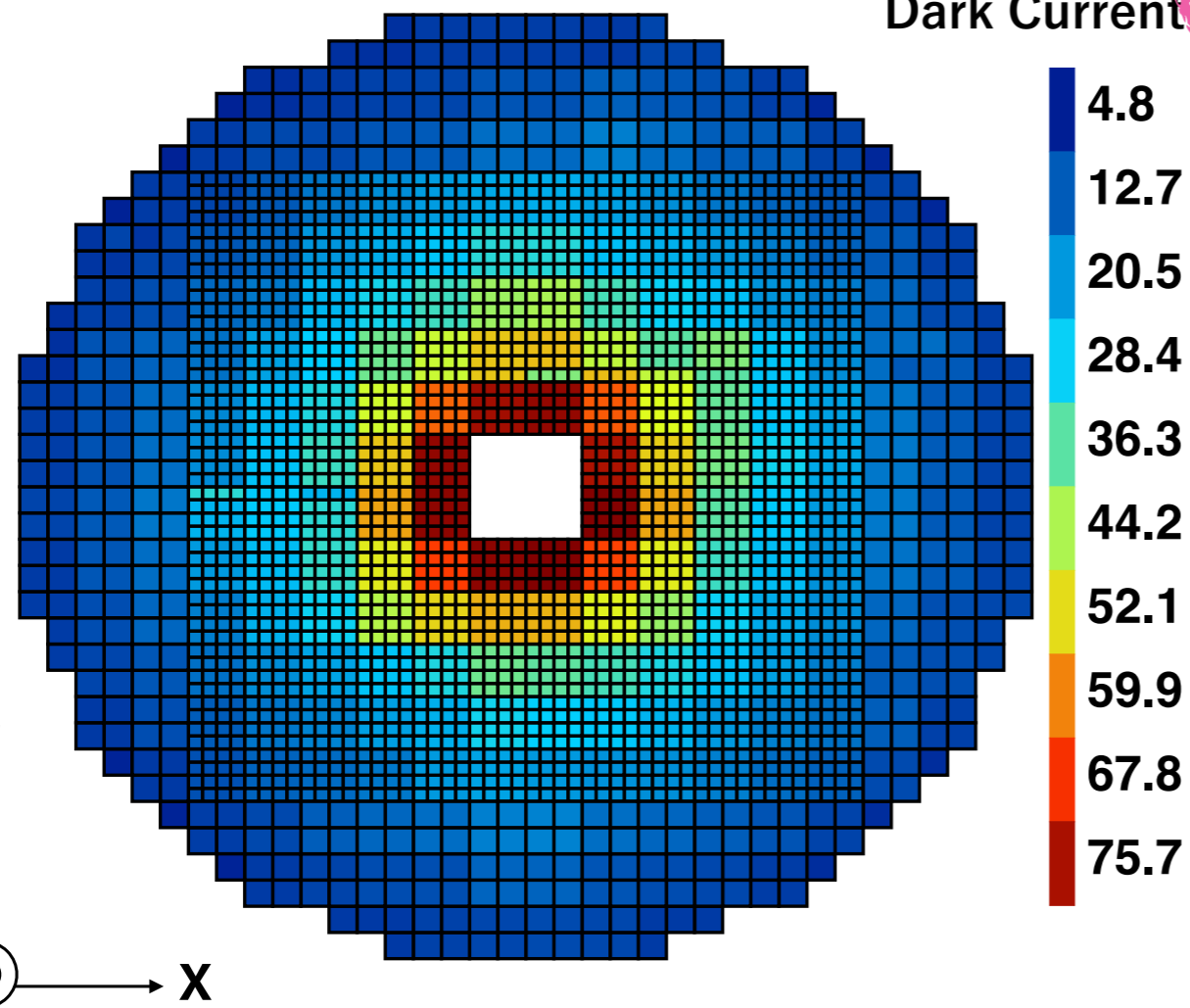
2.8~3.2 V

暗電流

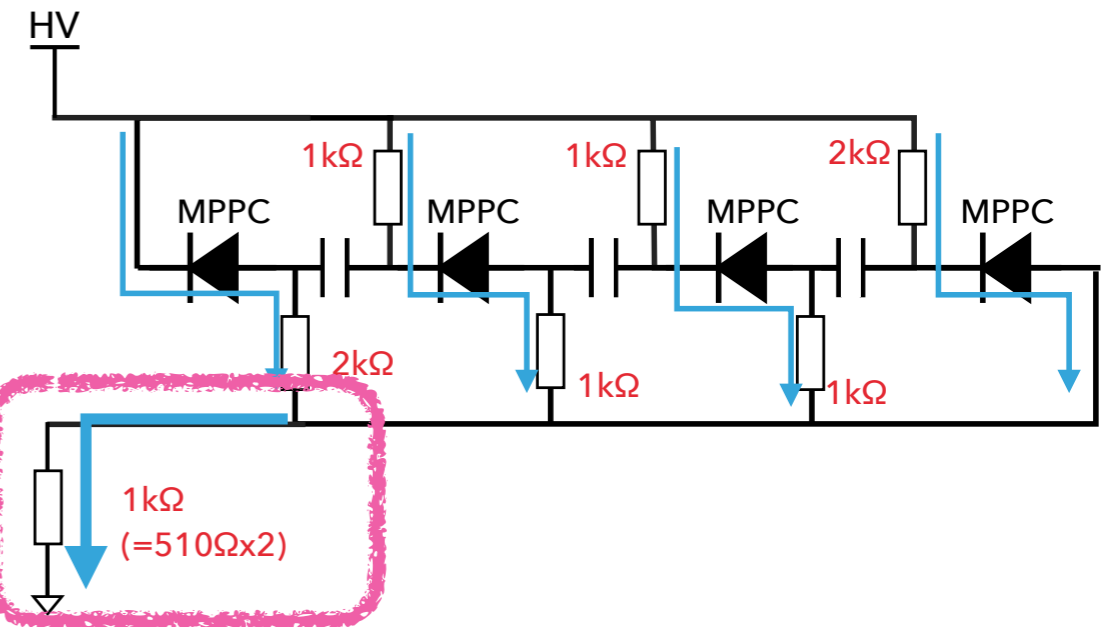
データ取得前の暗電流 $\sim 0 \mu A$

データ取得後半での暗電流

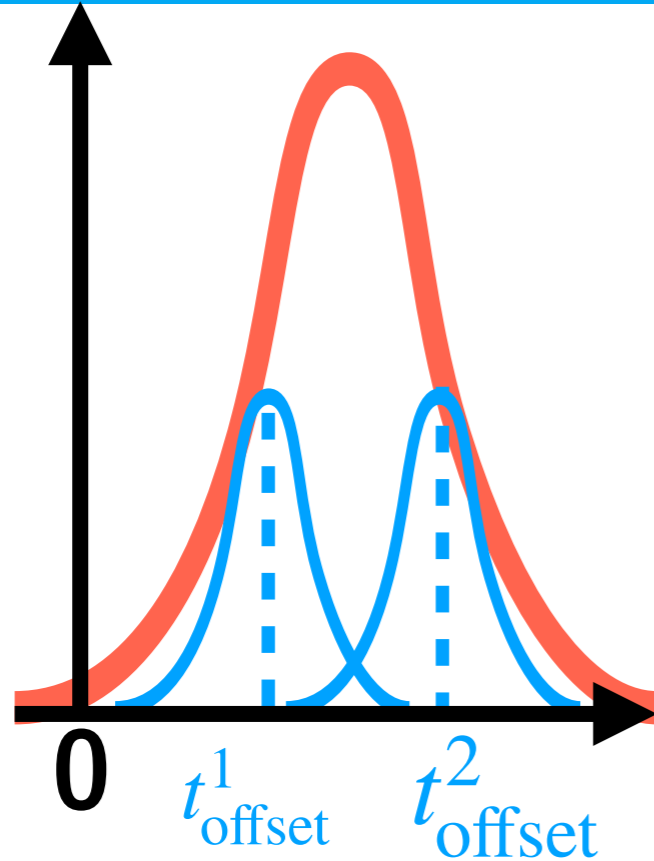
Dark Current (μA)



暗電流によるオーバー電圧減少



時間較正

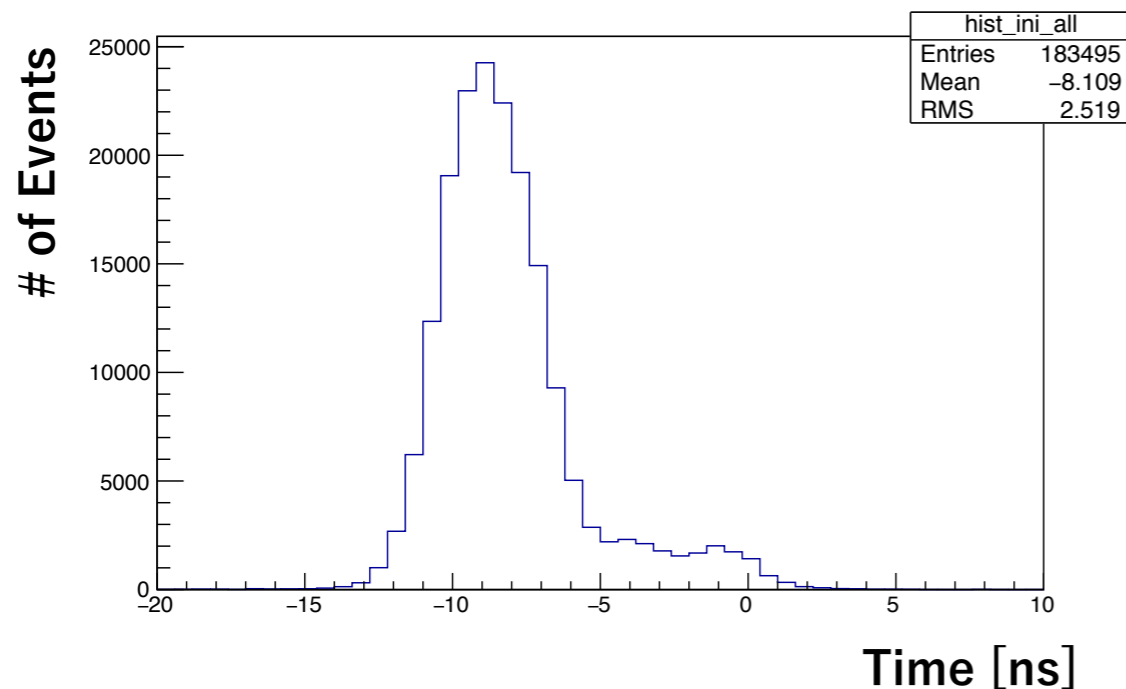


γ 線サンプルの ΔT 分布を使う

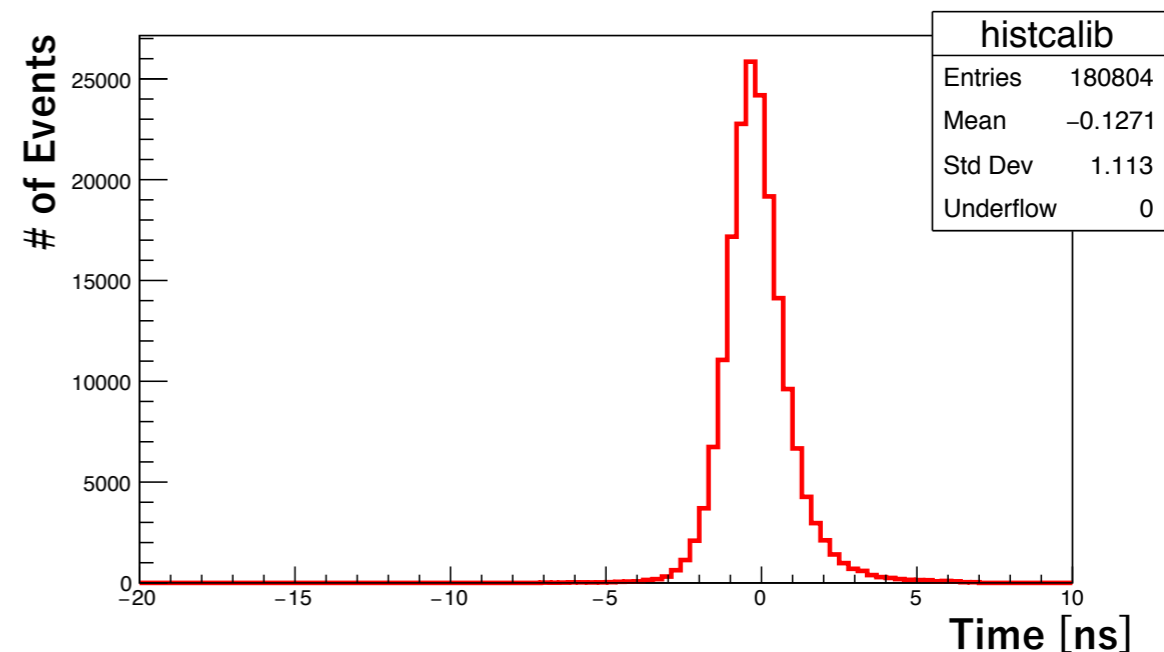
MPPCのチャンネルごとの ΔT 分布のオフセット $\rightarrow t_{\text{offset}}^{\text{channel}}$

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

時間較正前の ΔT 分布

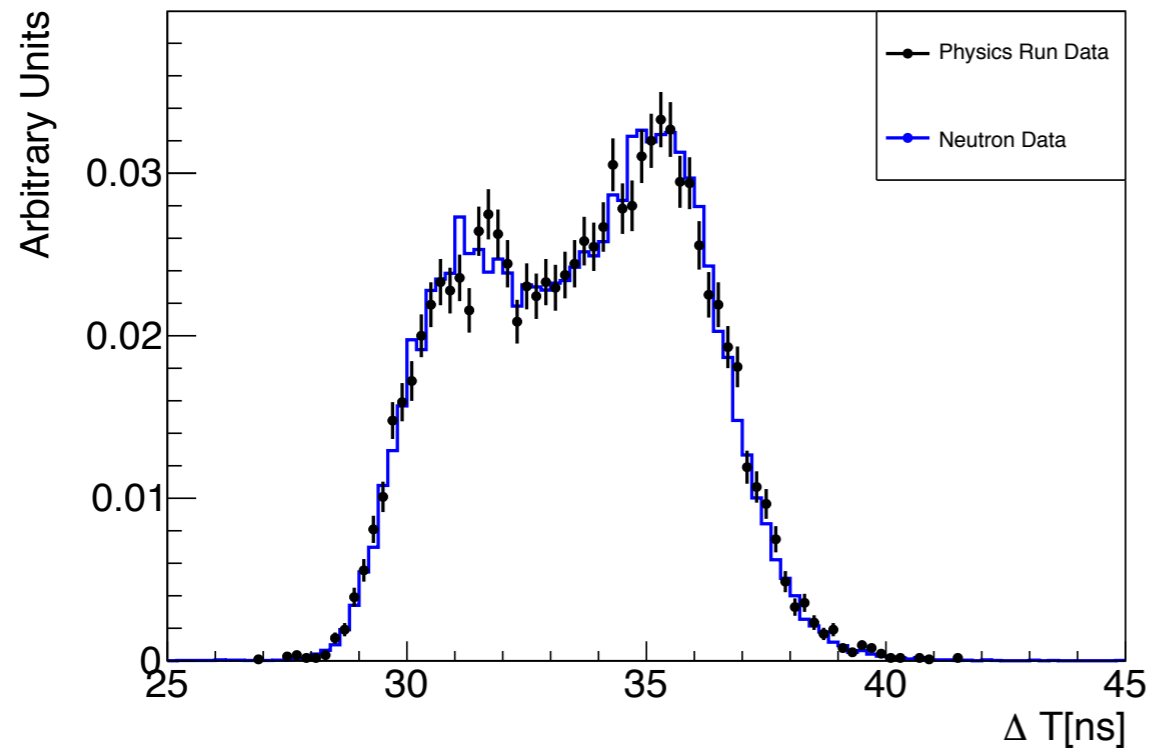


時間較正後の ΔT 分布



ΔT 分布の比較

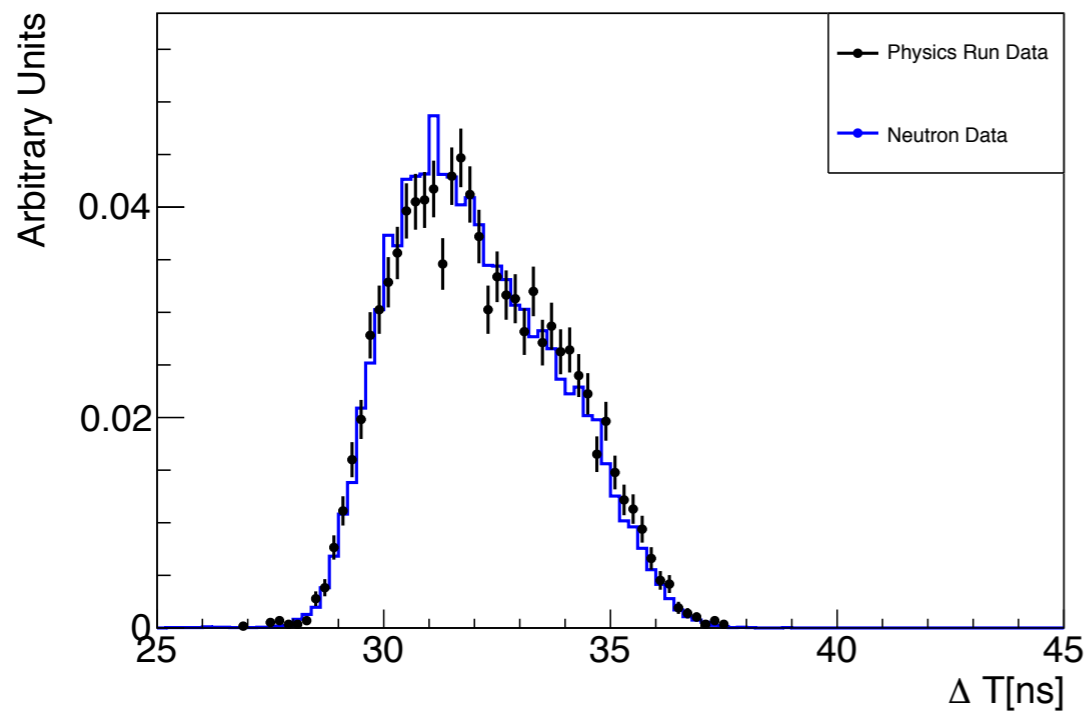
両方のクラスター



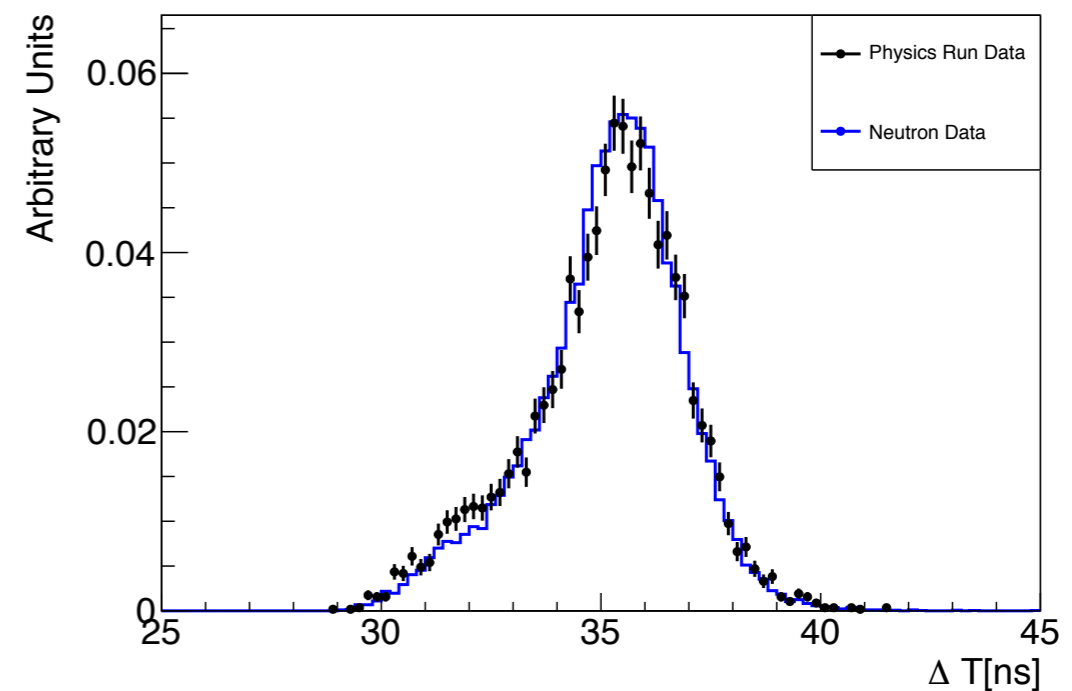
中性子背景事象

散乱中性子サンプル

● ΔT が小さい方のクラスター

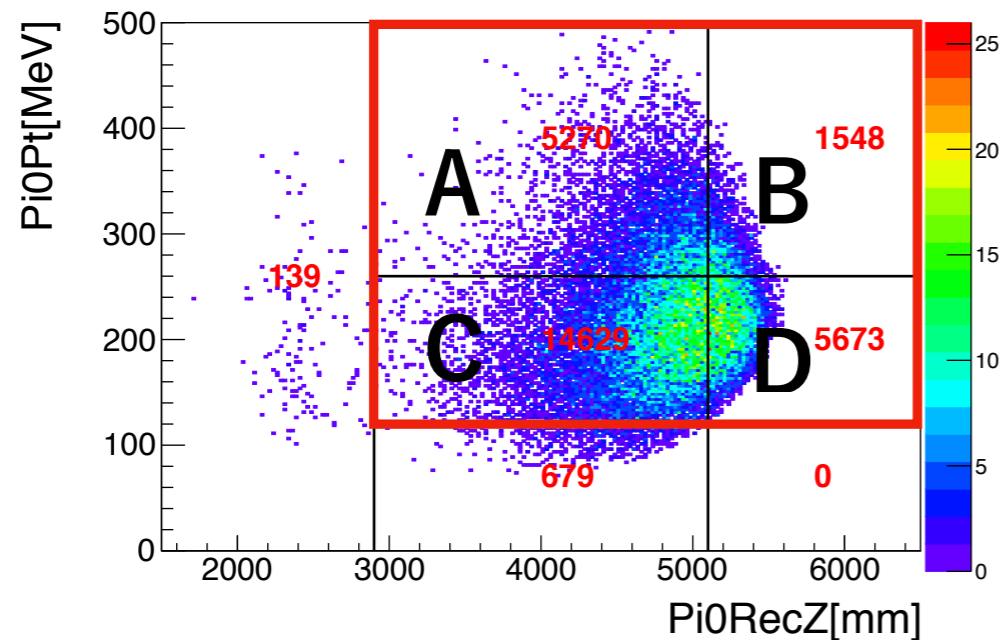


ΔT が大きい方のクラスター

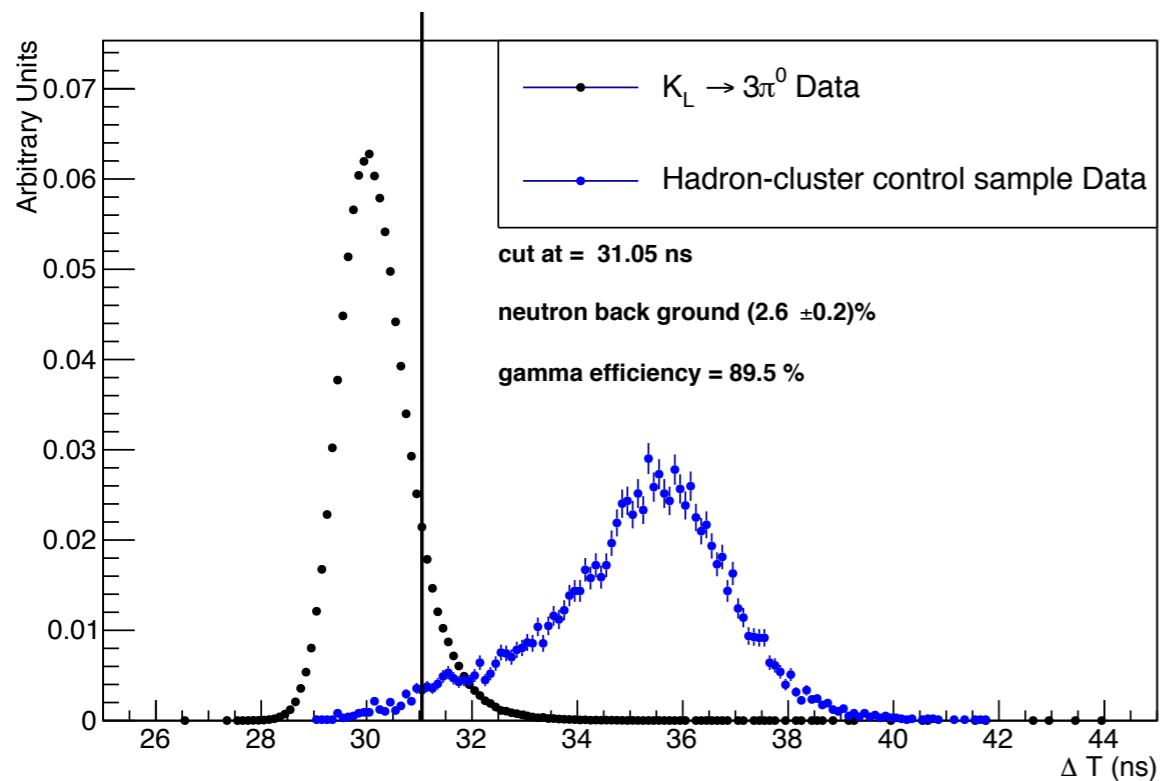


中性子背景事象に対する削減能力

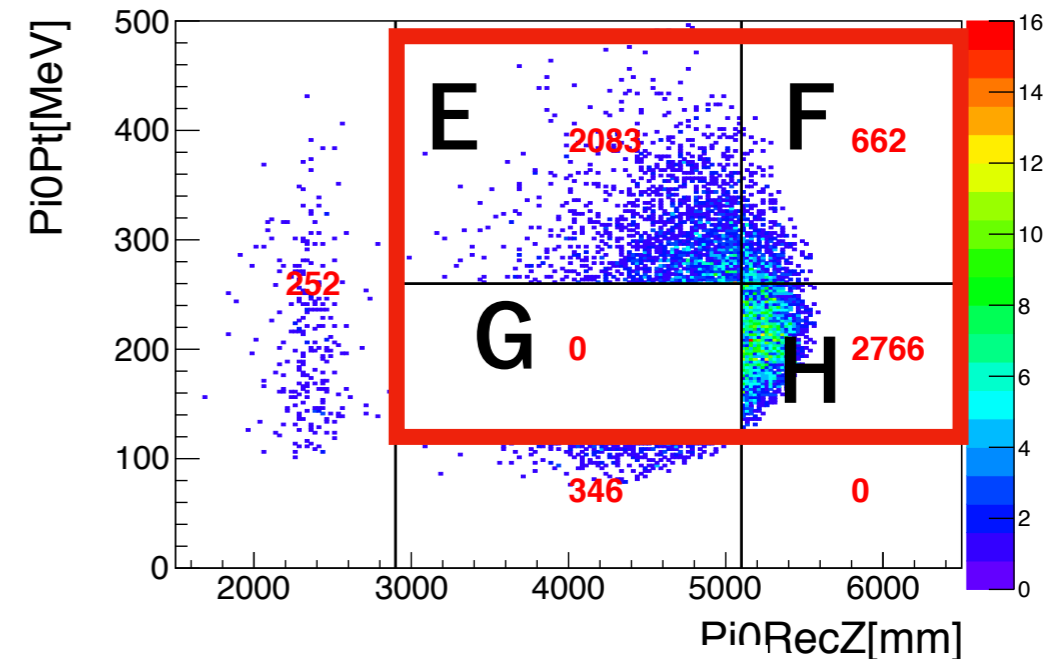
散乱中性子サンプル



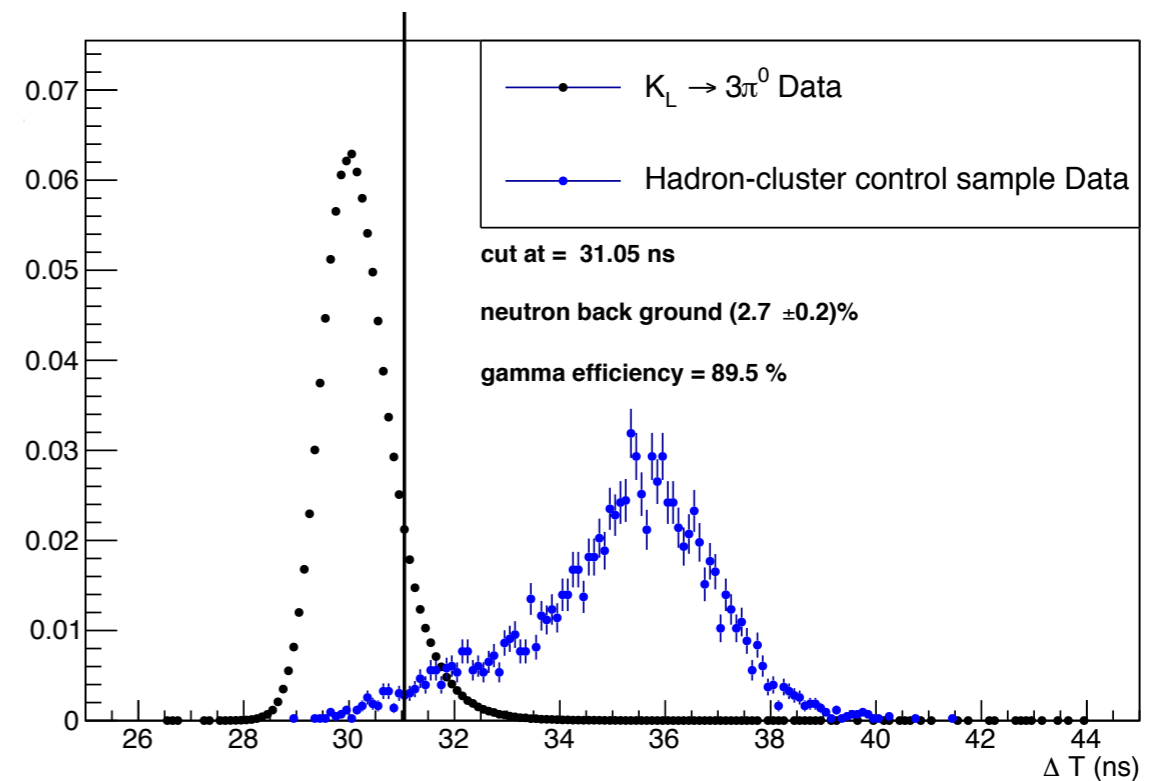
A+B+D 領域



中性子背景事象



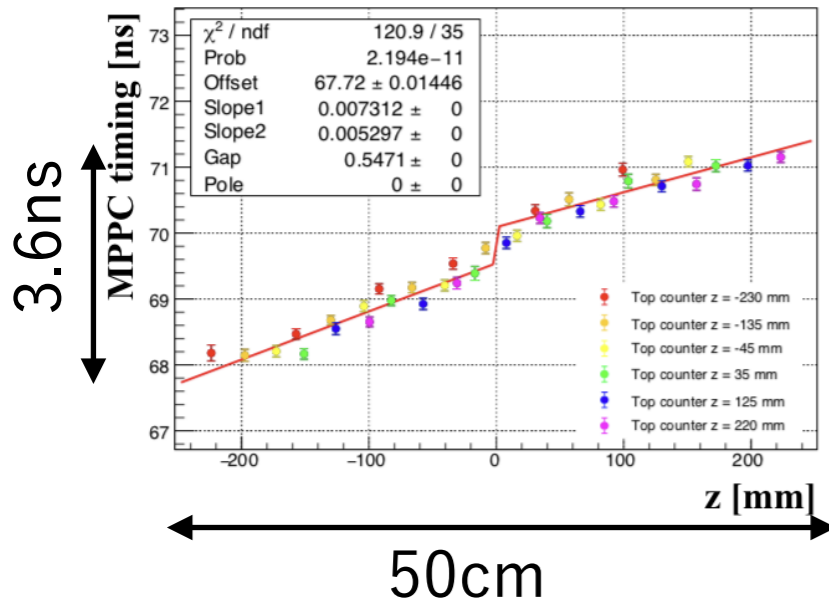
E+F+H 領域



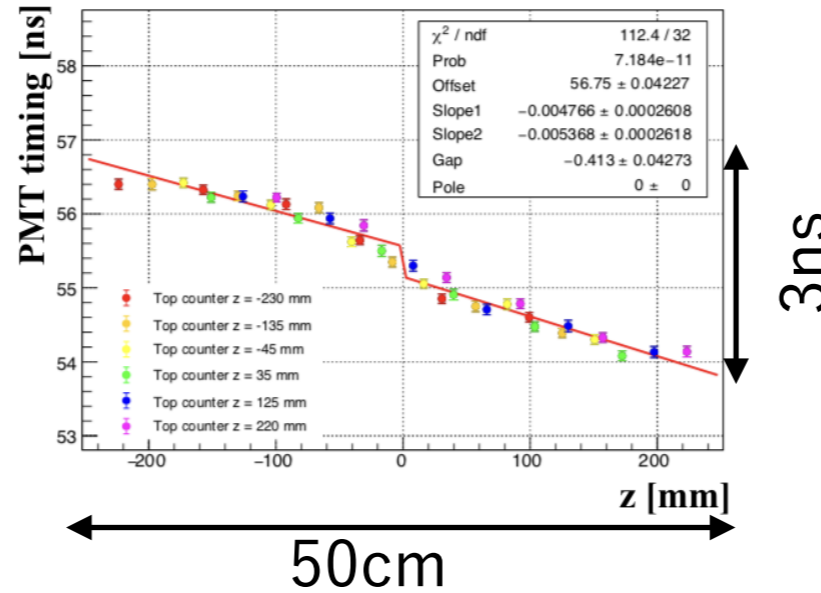
ΔT分布の幅

ヒットz位置と検出時間

MPPC

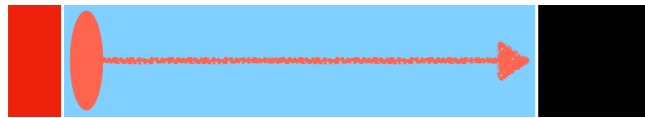


PMT

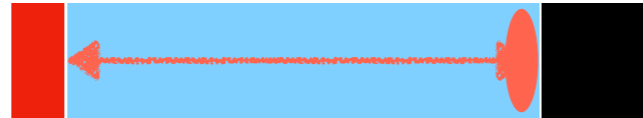


1m → 6~7ns

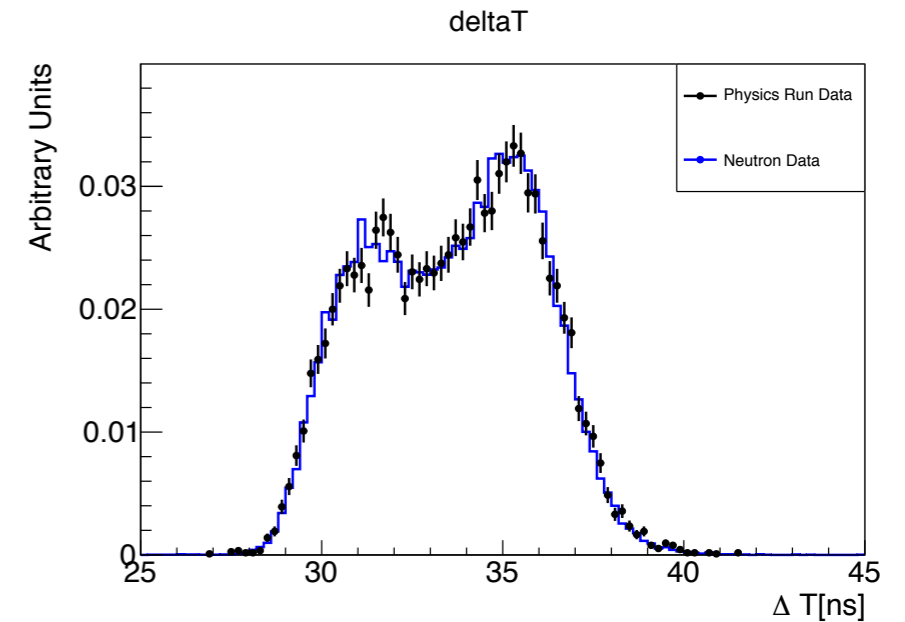
$(1.7 \sim 1.4) \times 10^8$ [m/s]
→ $(0.55 \sim 0.48) * c$



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

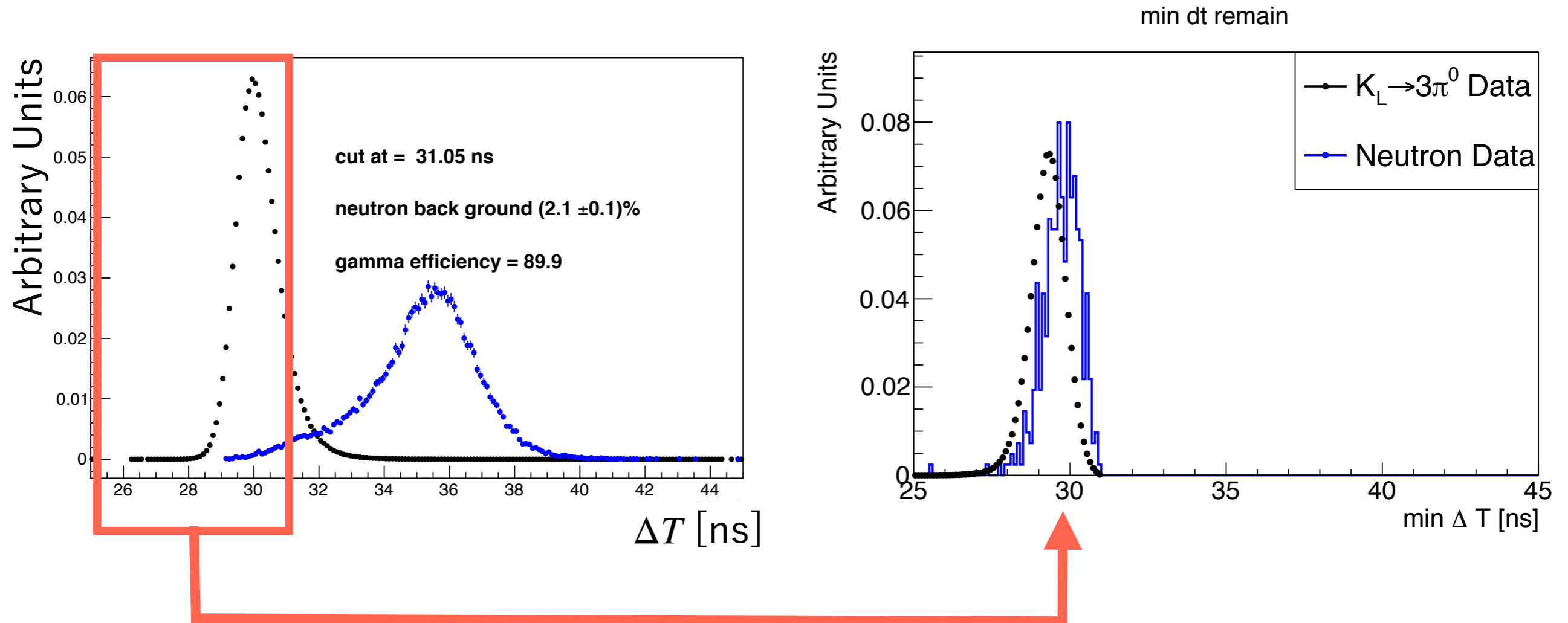


$$\begin{aligned} \Delta T &= T_{\text{MPPC}} - T_{\text{PMT}} \\ &= 3.5 \text{ ns} - 0 \\ &= 3.5 \text{ ns} \end{aligned}$$



分布の幅 ~ 6.5 ns + 結晶ごとの伝搬速度の違いなど

ΔT カットで残った事象に対する分布



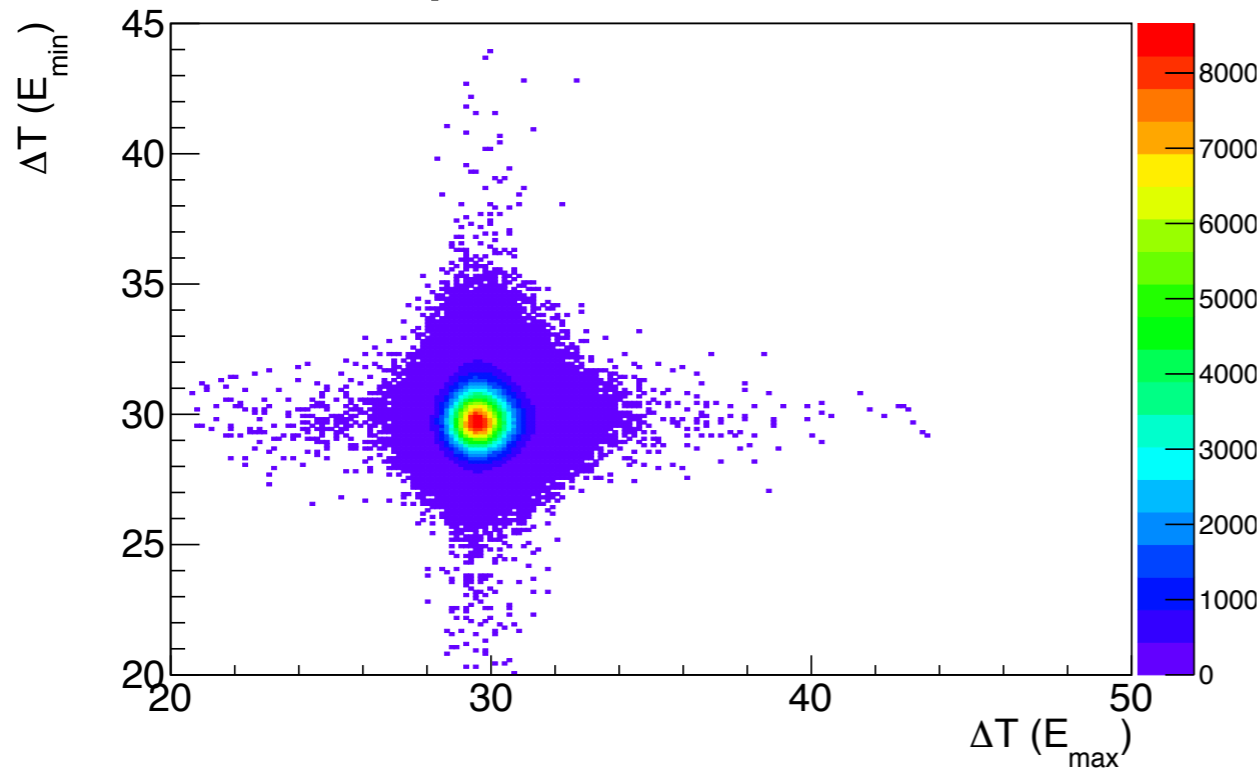
残った事象の小さい方の ΔT 分布

ΔT 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 ΔT 分布でもカットできない

ΔT のクラスター間の相関

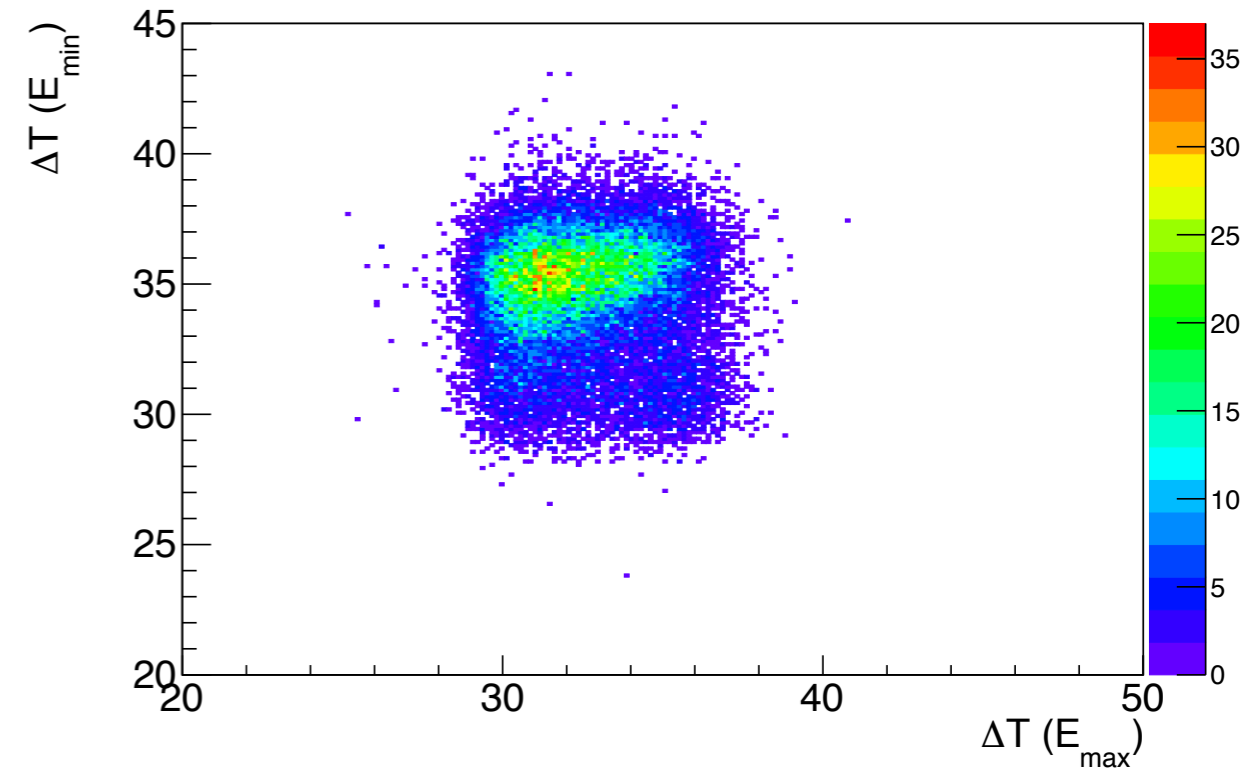
エネルギーの小さい方のクラスター

γ 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

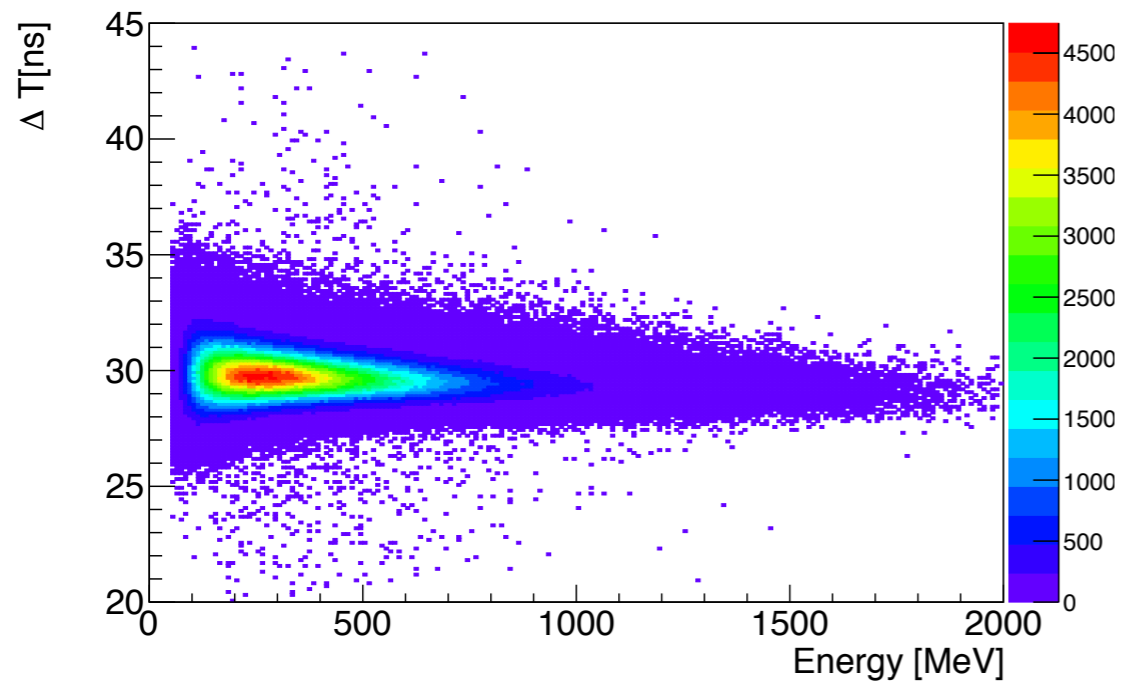


両方のクラスター共に $\sim 30\text{ns}$

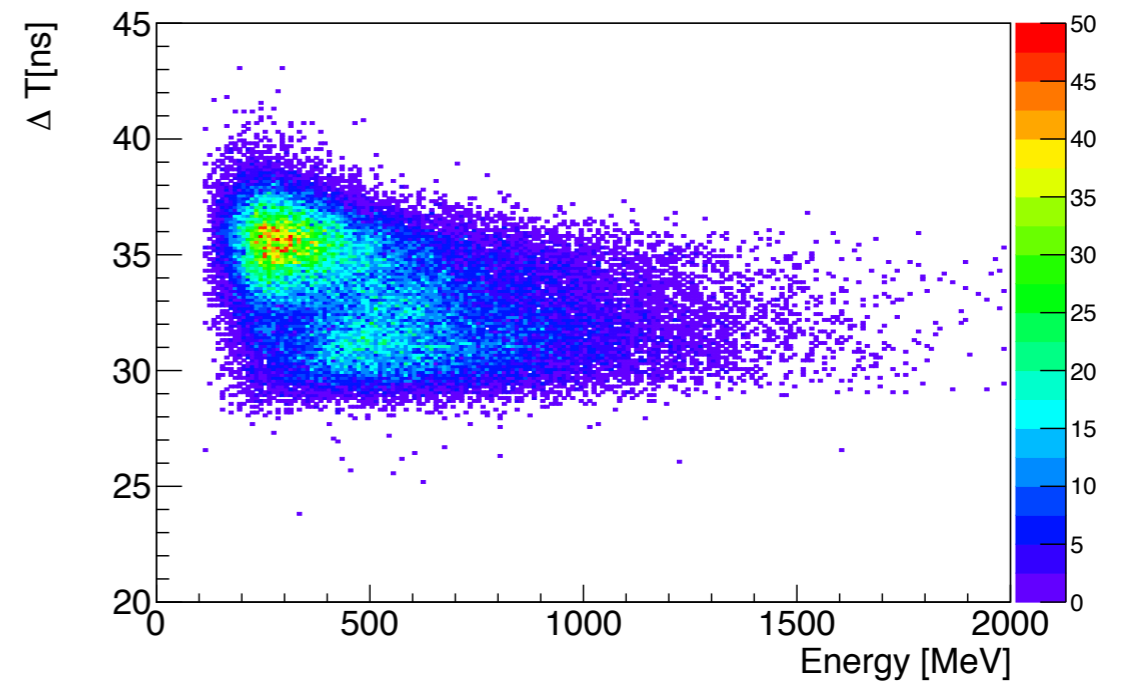
エネルギーの低いクラスターは
 ΔT が小さくなりがち

エネルギーと ΔT の相関

γ 線サンプル

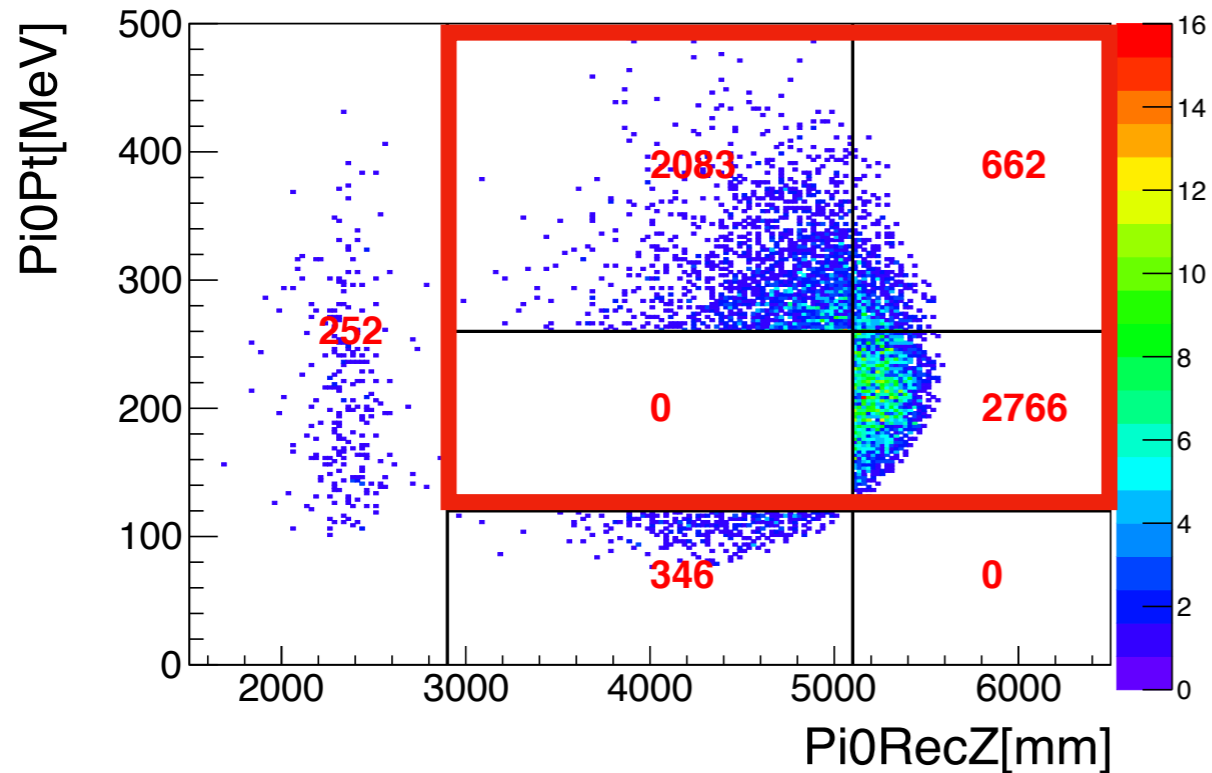


散乱中性子サンプル

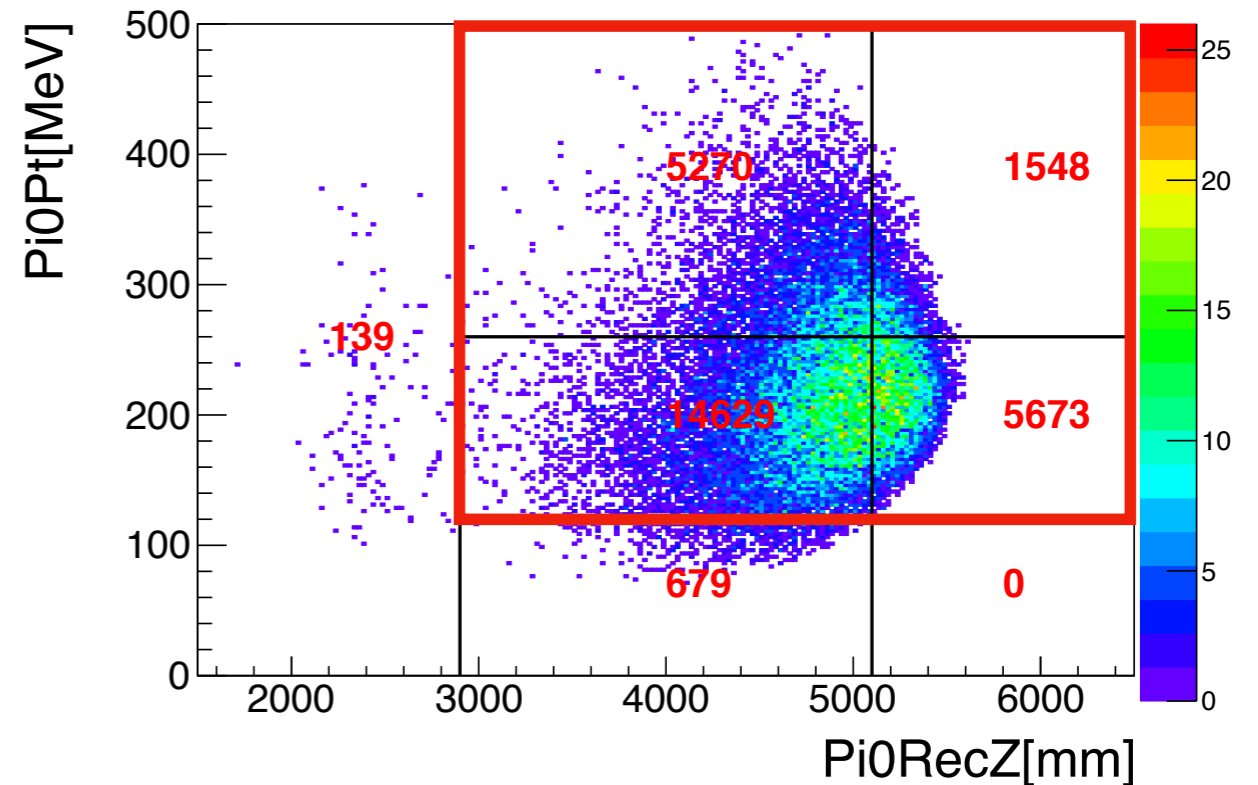


事象数

中性子背景事象



散乱中性子サンプル



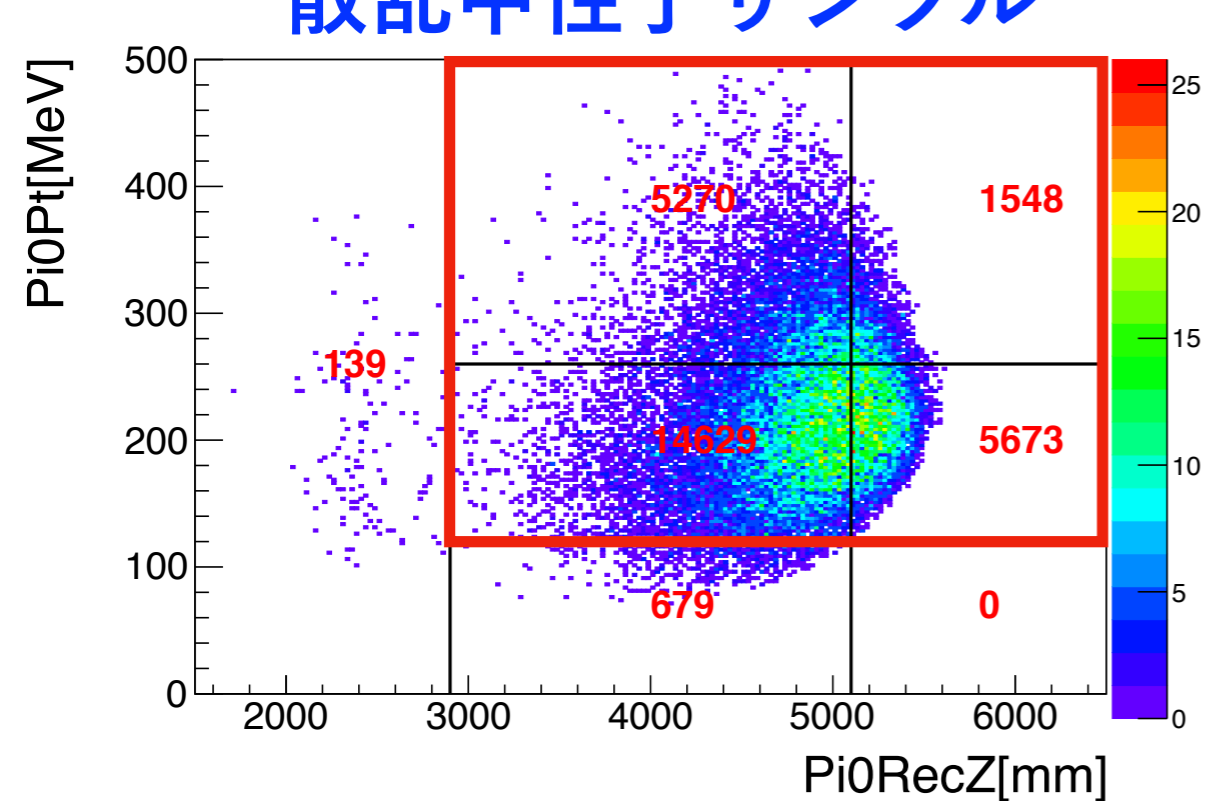
赤枠内のみ使用

事象数 = 5511

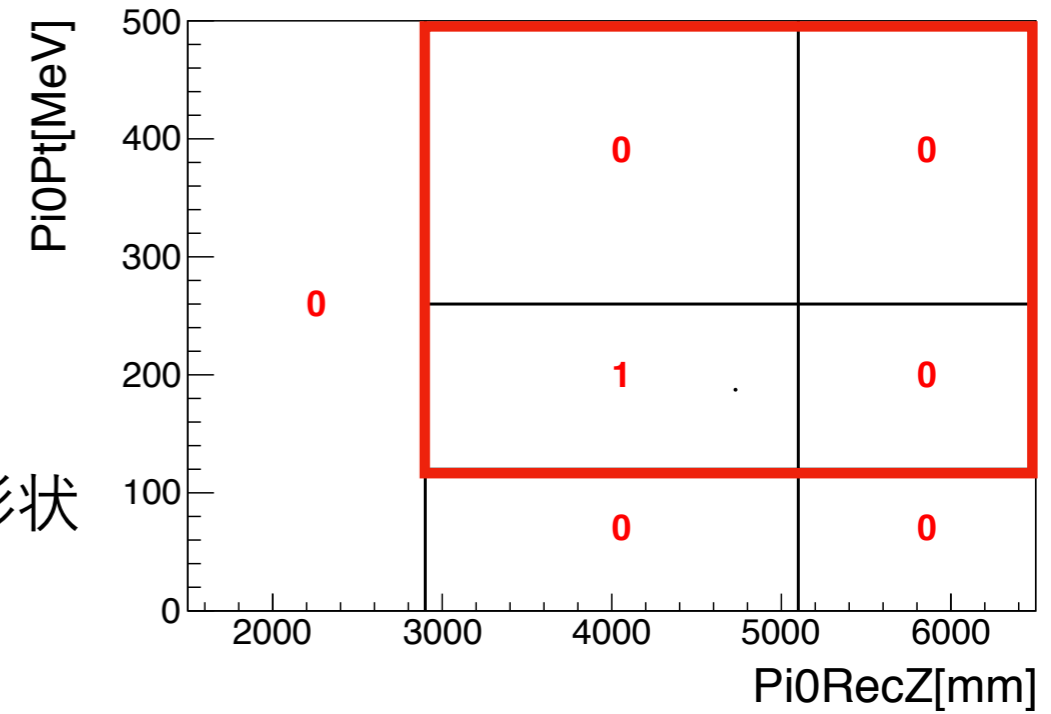
事象数 = 27120

カット後の事象

散乱中性子サンプル

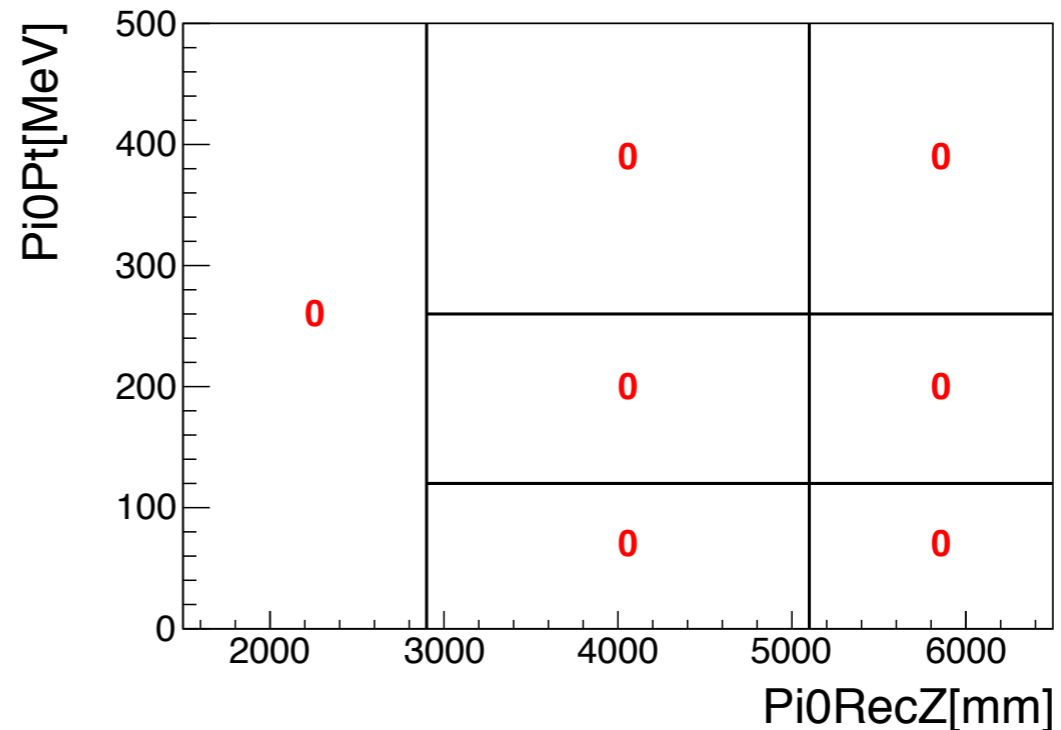


波形
クラスター形状



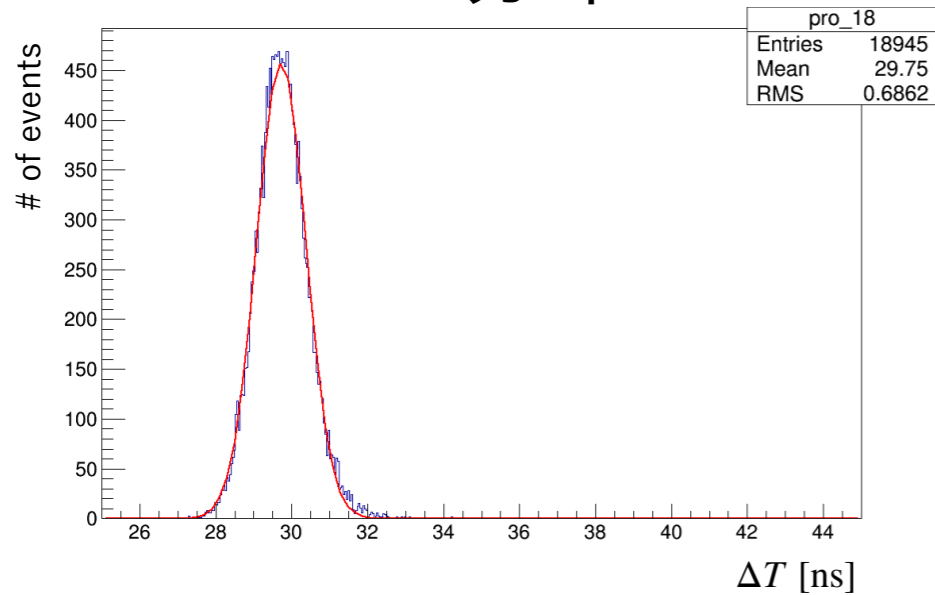
ΔT カット

PTZ (wdT_wCSDDL_wFPSD)

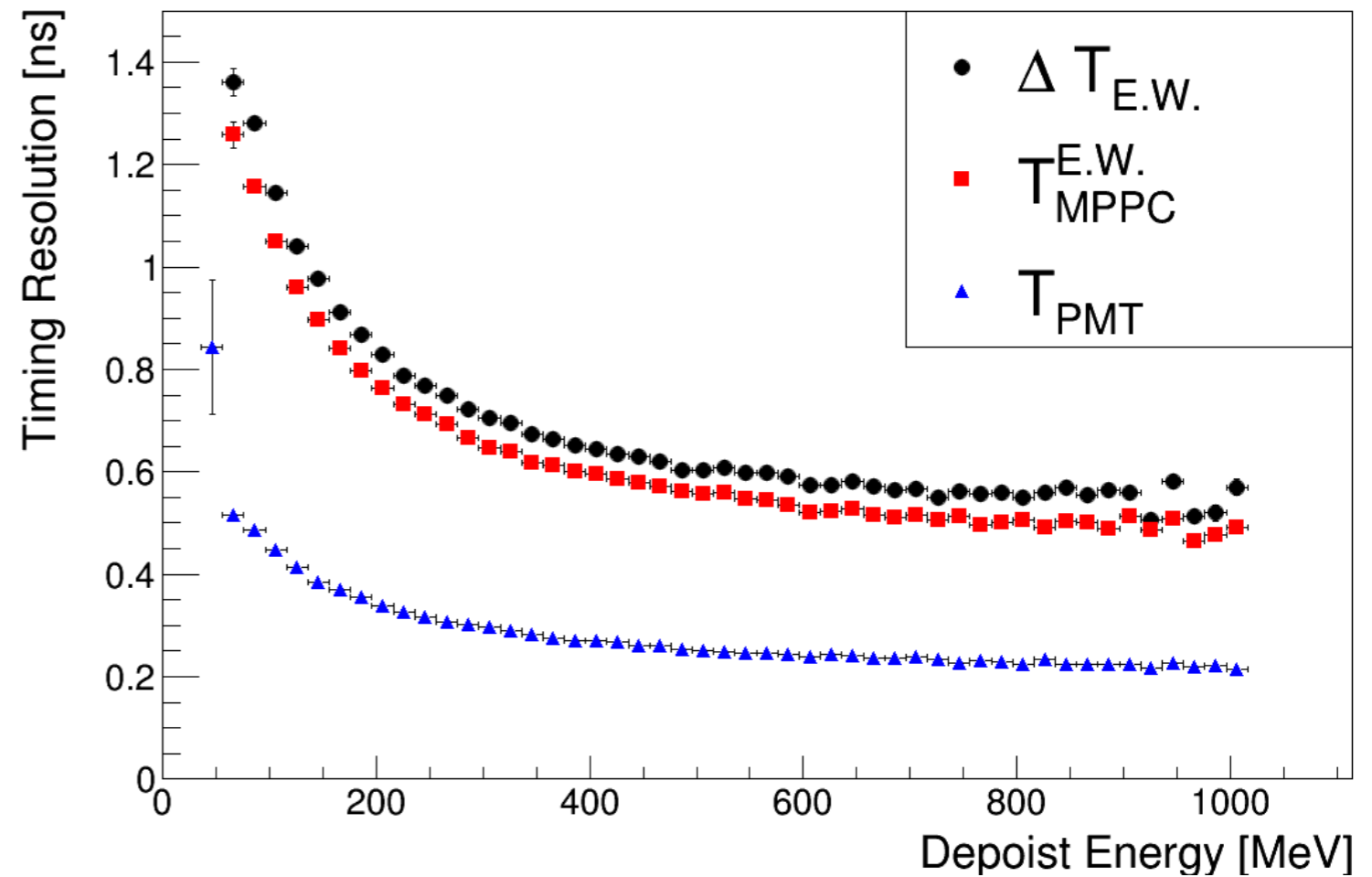


時間分解能

γ 線サンプルの
 ΔT 分布



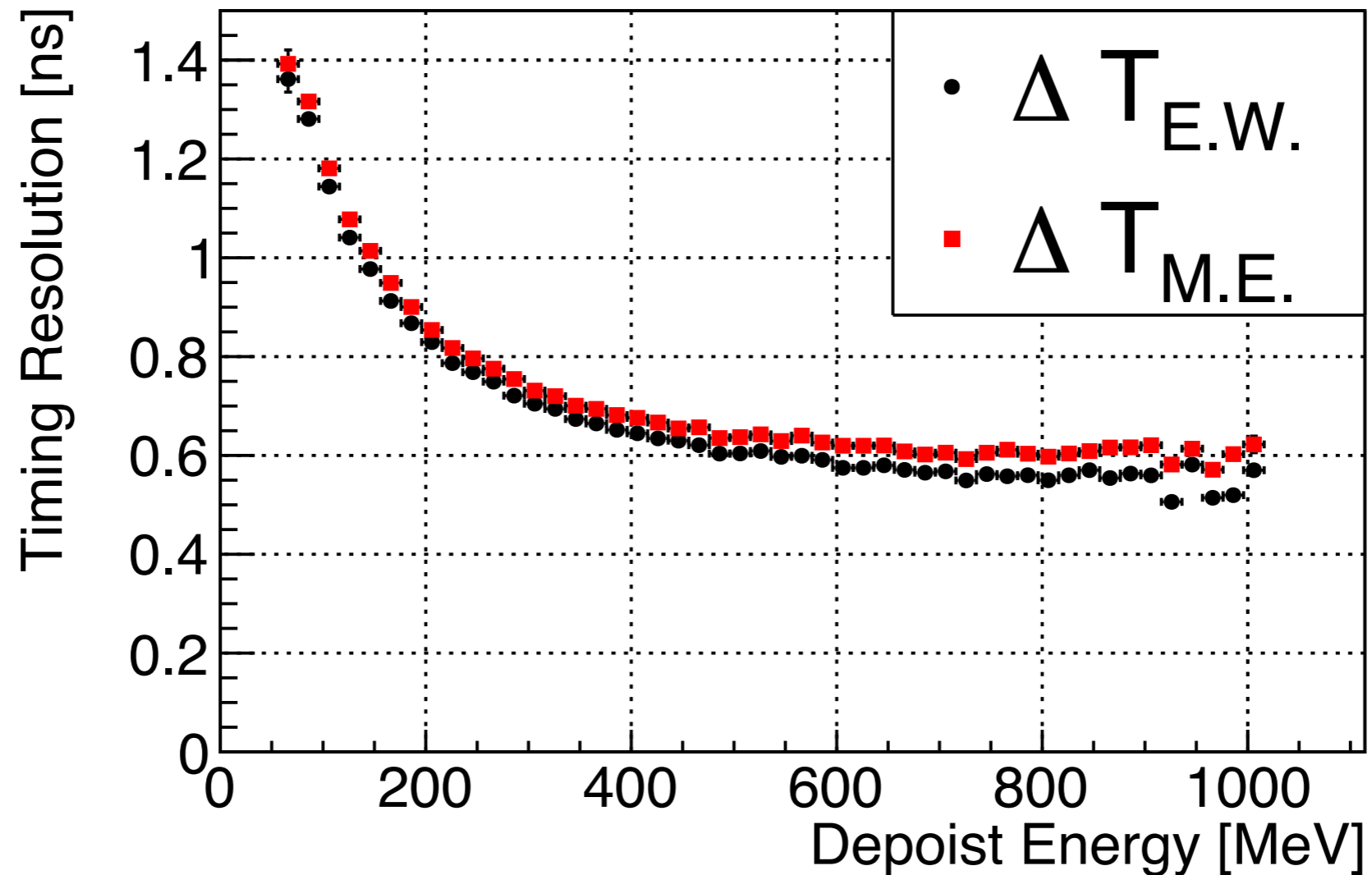
時間分解能



Gaussianでフィット

→ σ を時間分解能とした

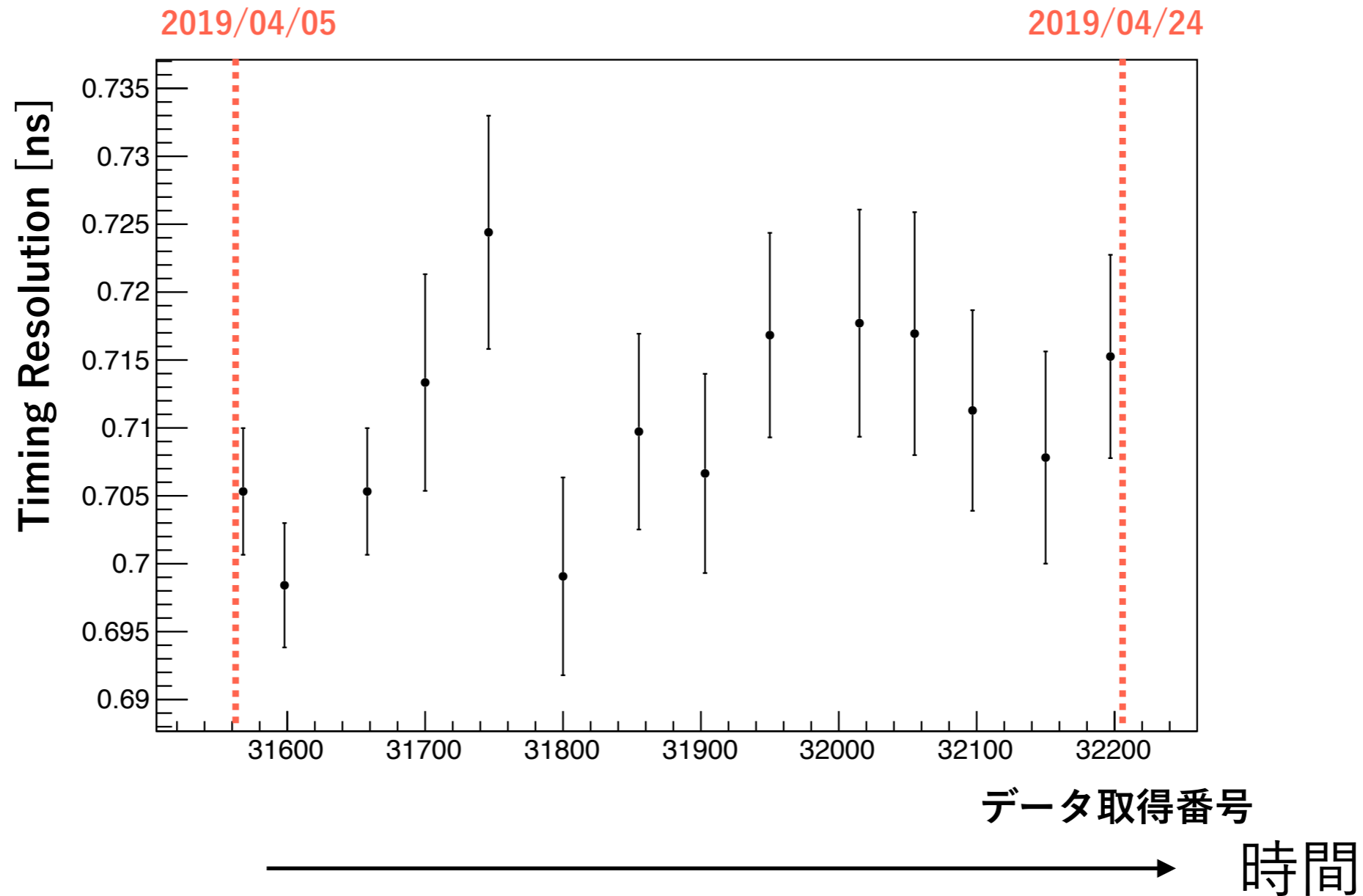
時間分解能



$\Delta T_{E.W.}$: 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

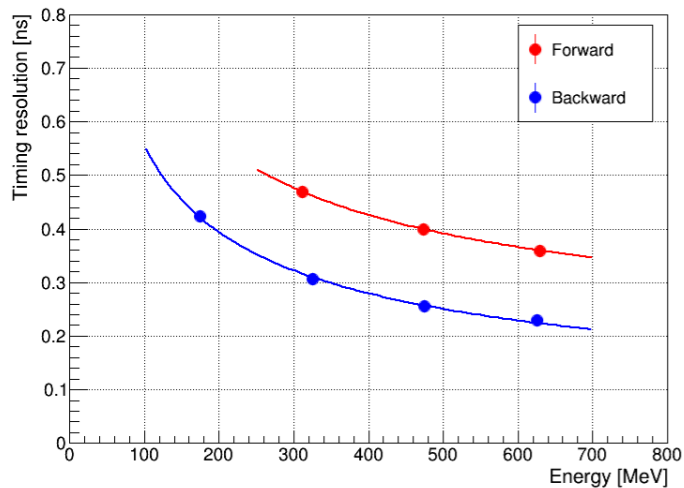
時間分解能の時間変化



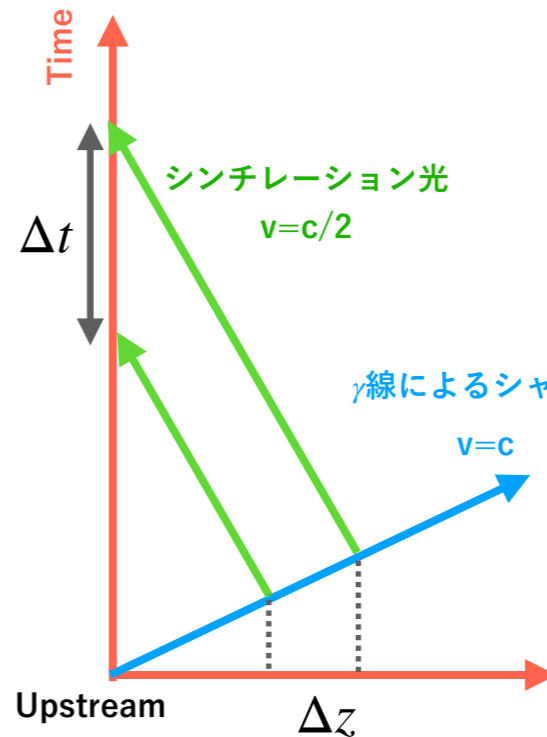
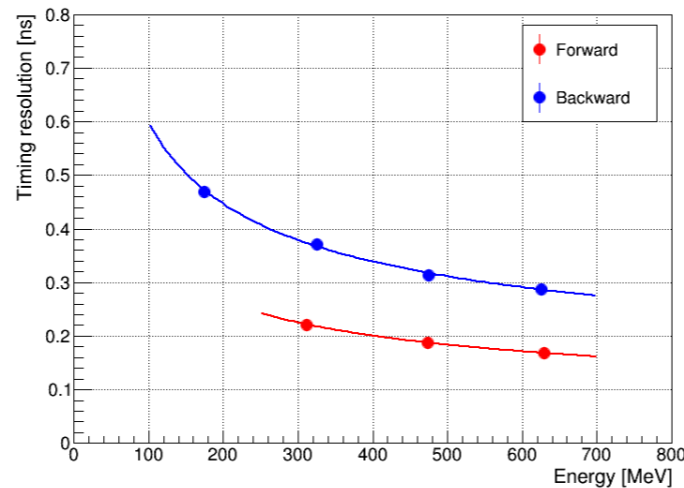
時間分解能の時間変化は誤差の範囲内だった

上下流の位置分解能の差

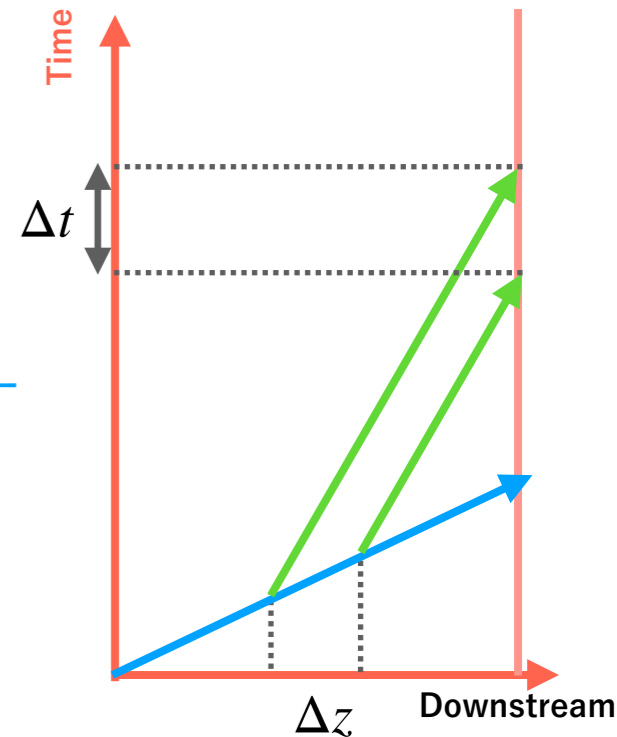
MPPCの時間分解能



PMTの時間分解能



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

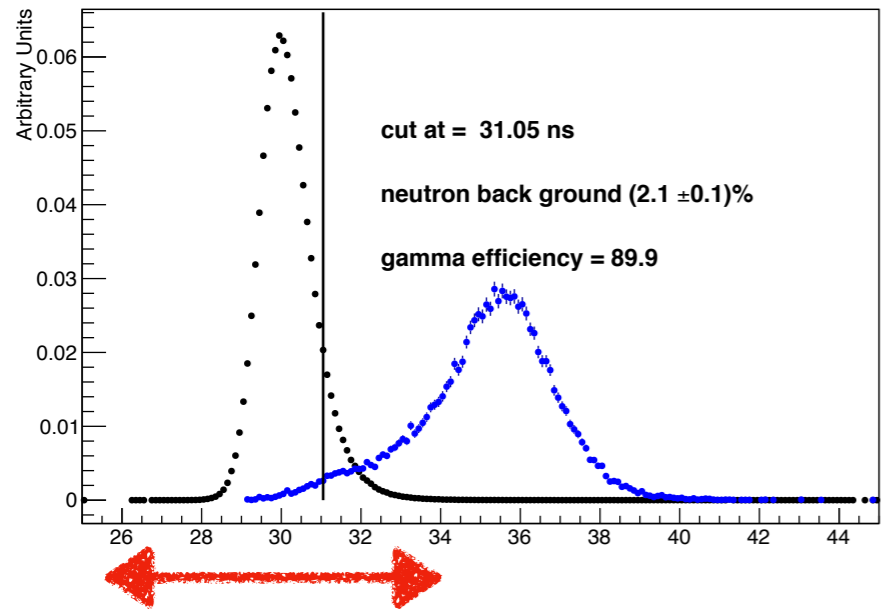


Downstream $\Delta t = \frac{\Delta z}{c}$

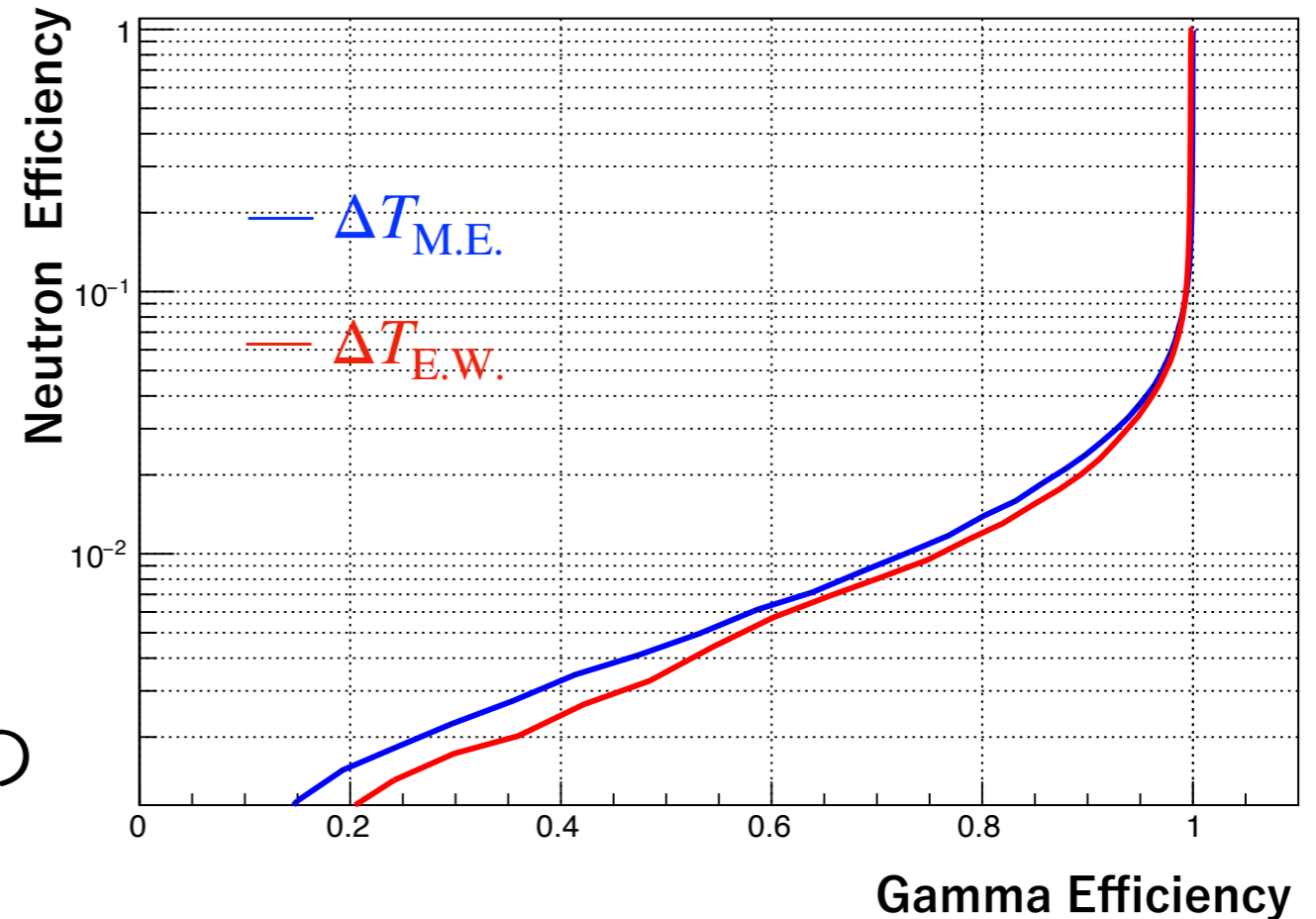
シャワーの発展方向と光子の伝搬方向が逆
 →時間分解能が悪化

ΔT カットのEfficiency

ΔT が大きい方のクラスターの ΔT 分布



カット位置を変える
→ γ 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、 ΔT カットによる削減能力を見積もる
- ② ΔT
 - (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 (3×10^{-11}) での事象数を見積もる

削減能力

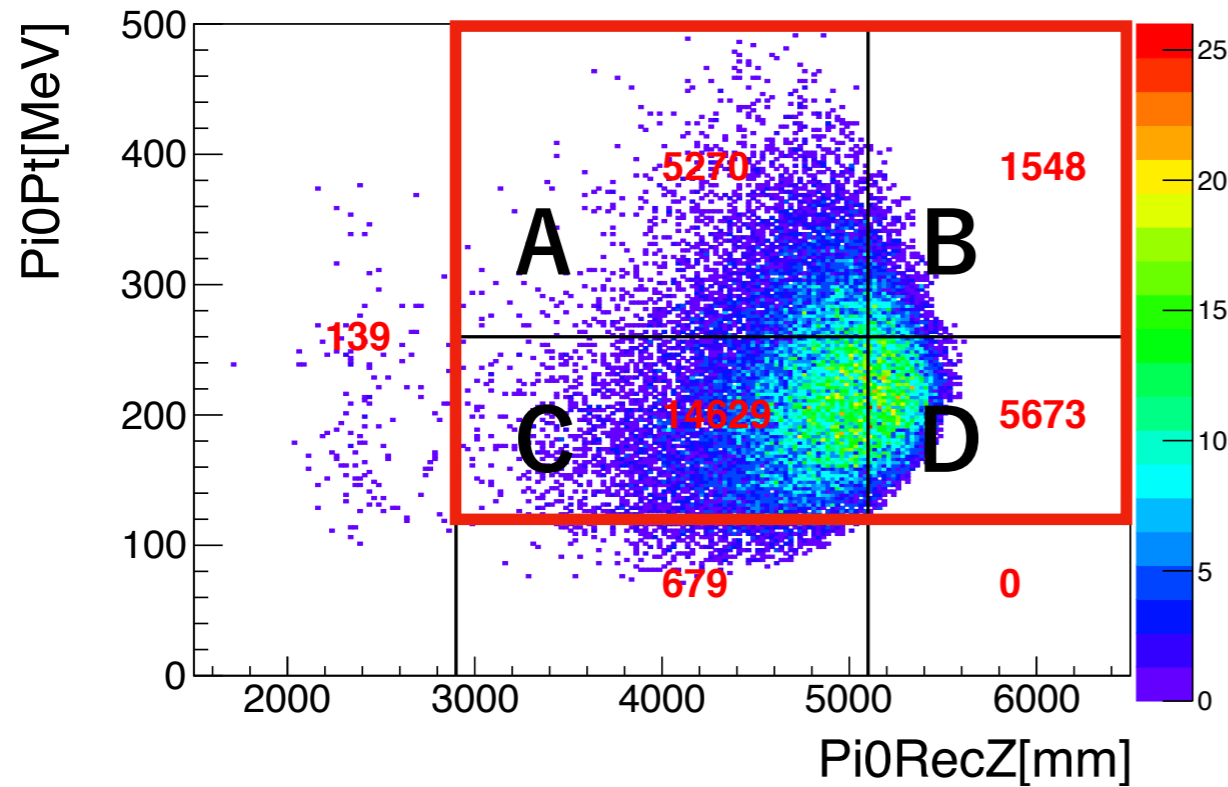
①

- 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
- ΔT 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、 ΔT 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



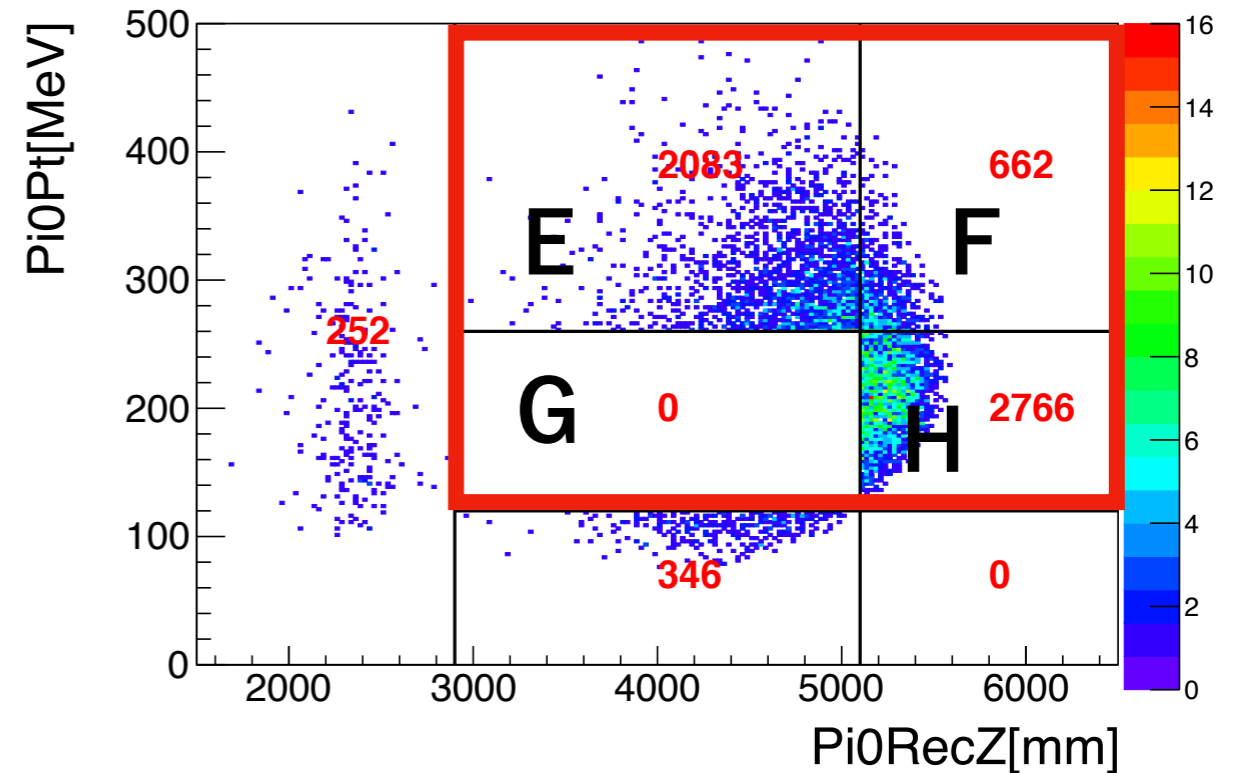
$$A+B+D = 12491$$

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

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

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

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_{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

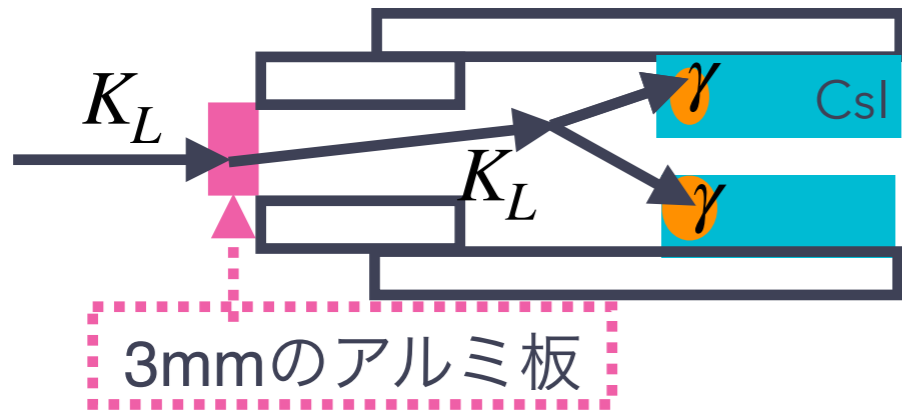
$$\begin{aligned} &= \frac{\text{標準理論感度}}{\text{今回使ったデータでの探索感度}} \times \text{今回使ったデータでの中性子背景事象数} \\ &= 1.9 \times 10^{-9} / 3 \times 10^{-11} = 63.3 \quad (7.7 \pm 7.7) \times 10^{-3} \\ &= \mathbf{(0.5 \pm 0.5) \text{ 事象}} \end{aligned}$$

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

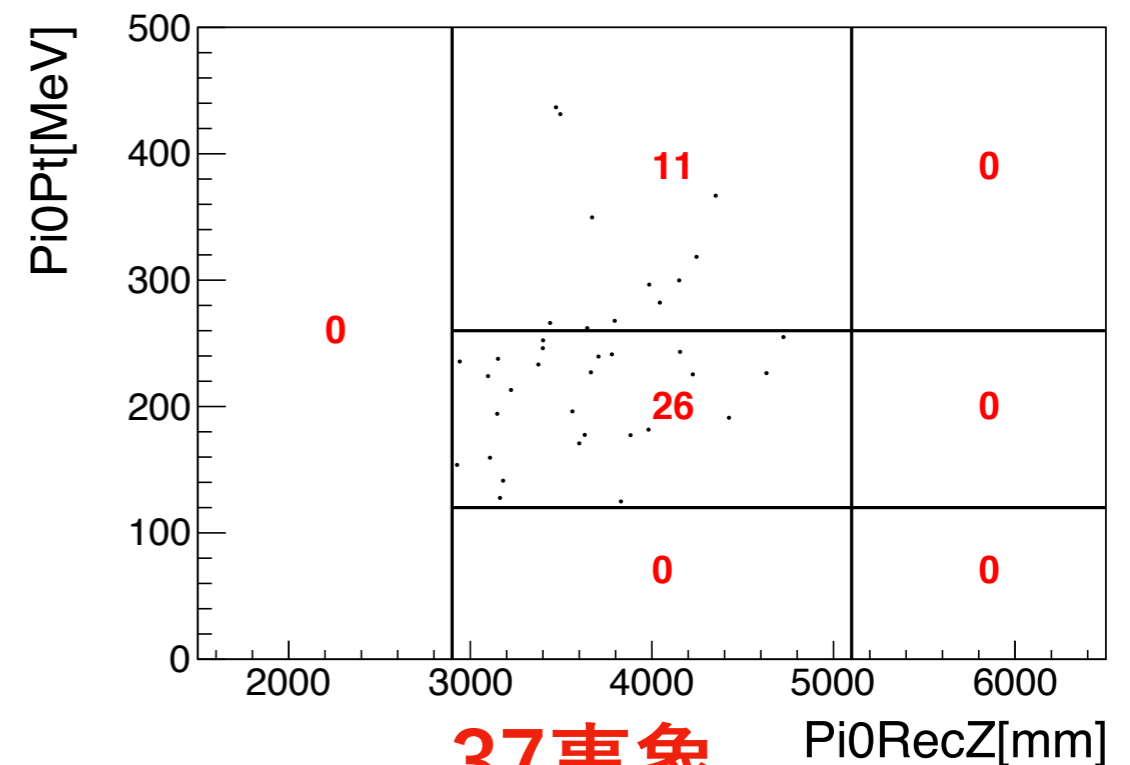


散乱させた K_L が二つの γ 線に崩壊する

- 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)



37事象

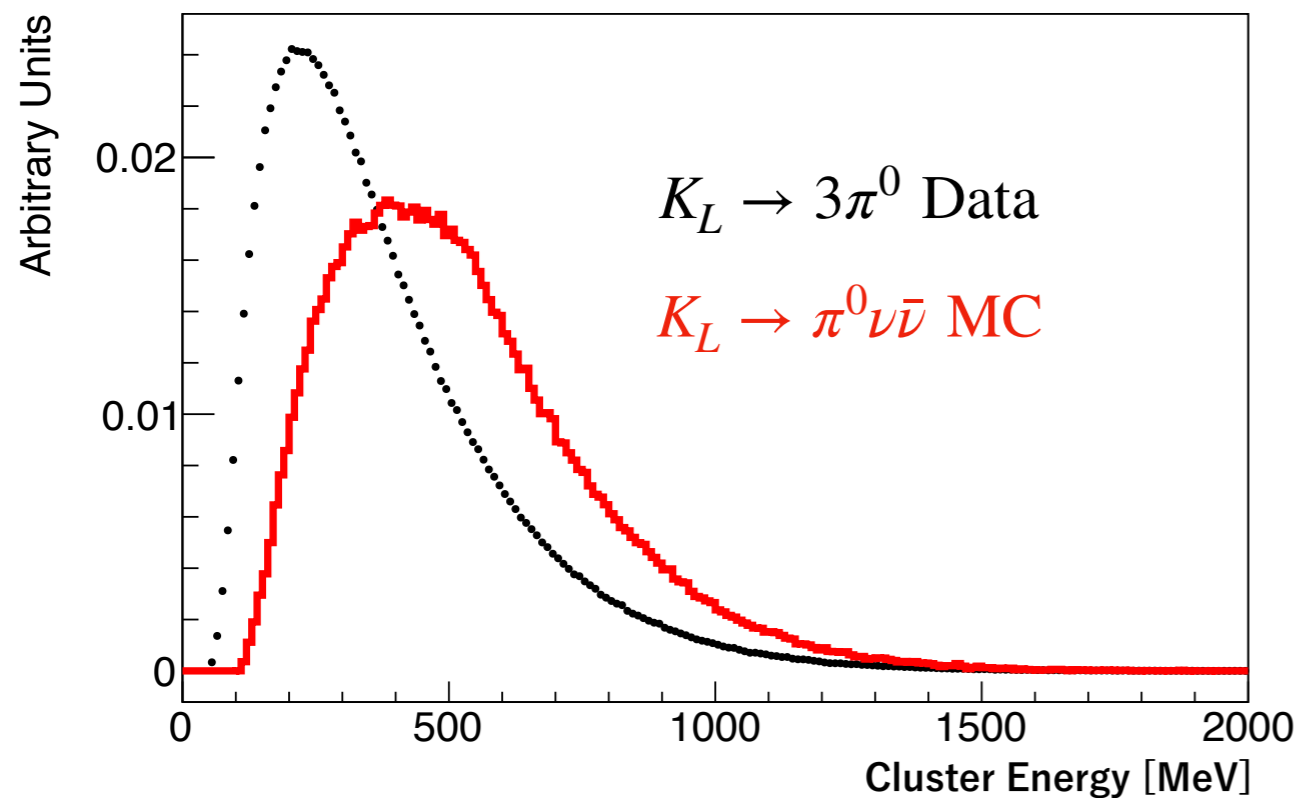
散乱中性子サンプル中への混入

(1.1 ± 0.2)事象

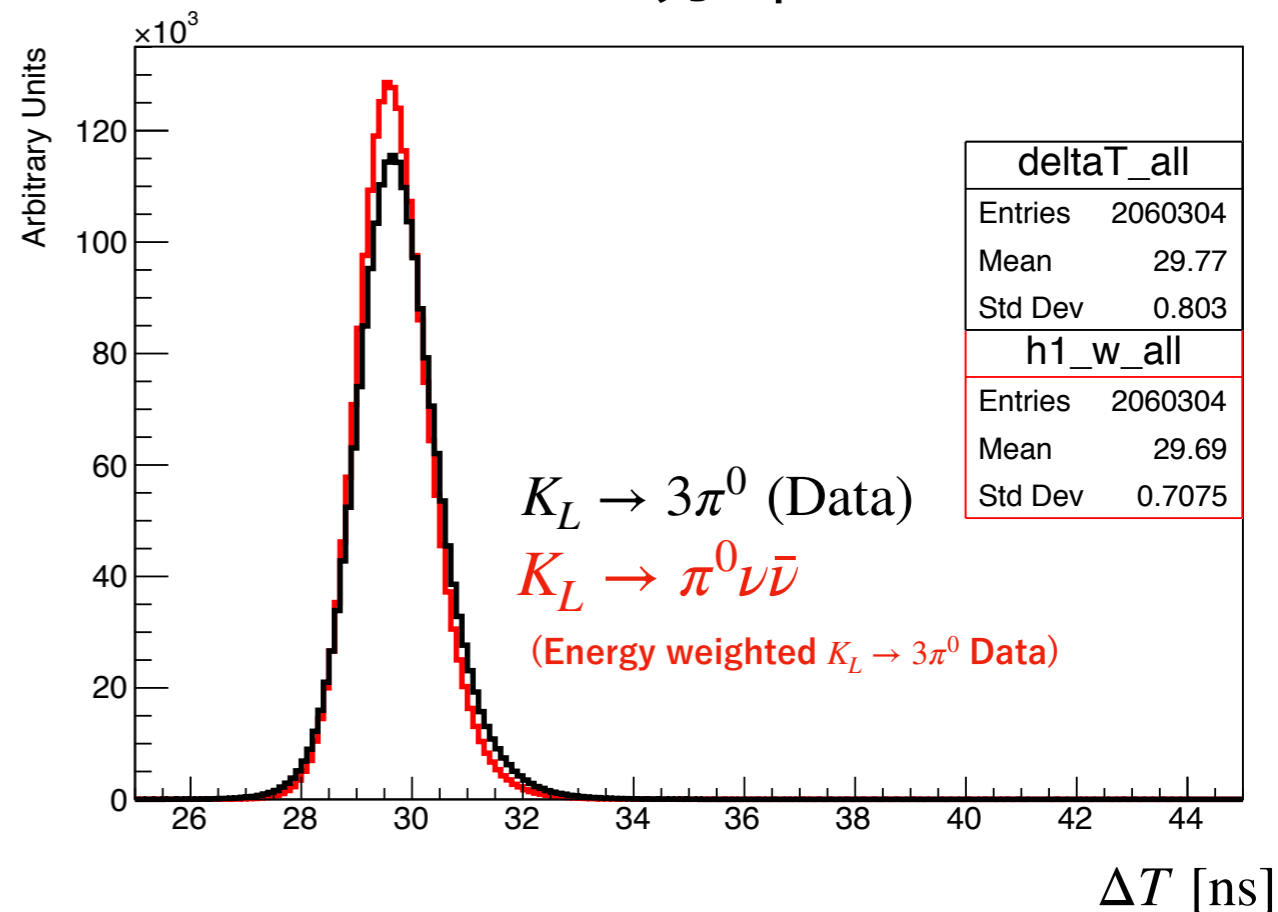
データの35倍の統計のMC

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

クラスターエネルギー分布



ΔT 分布

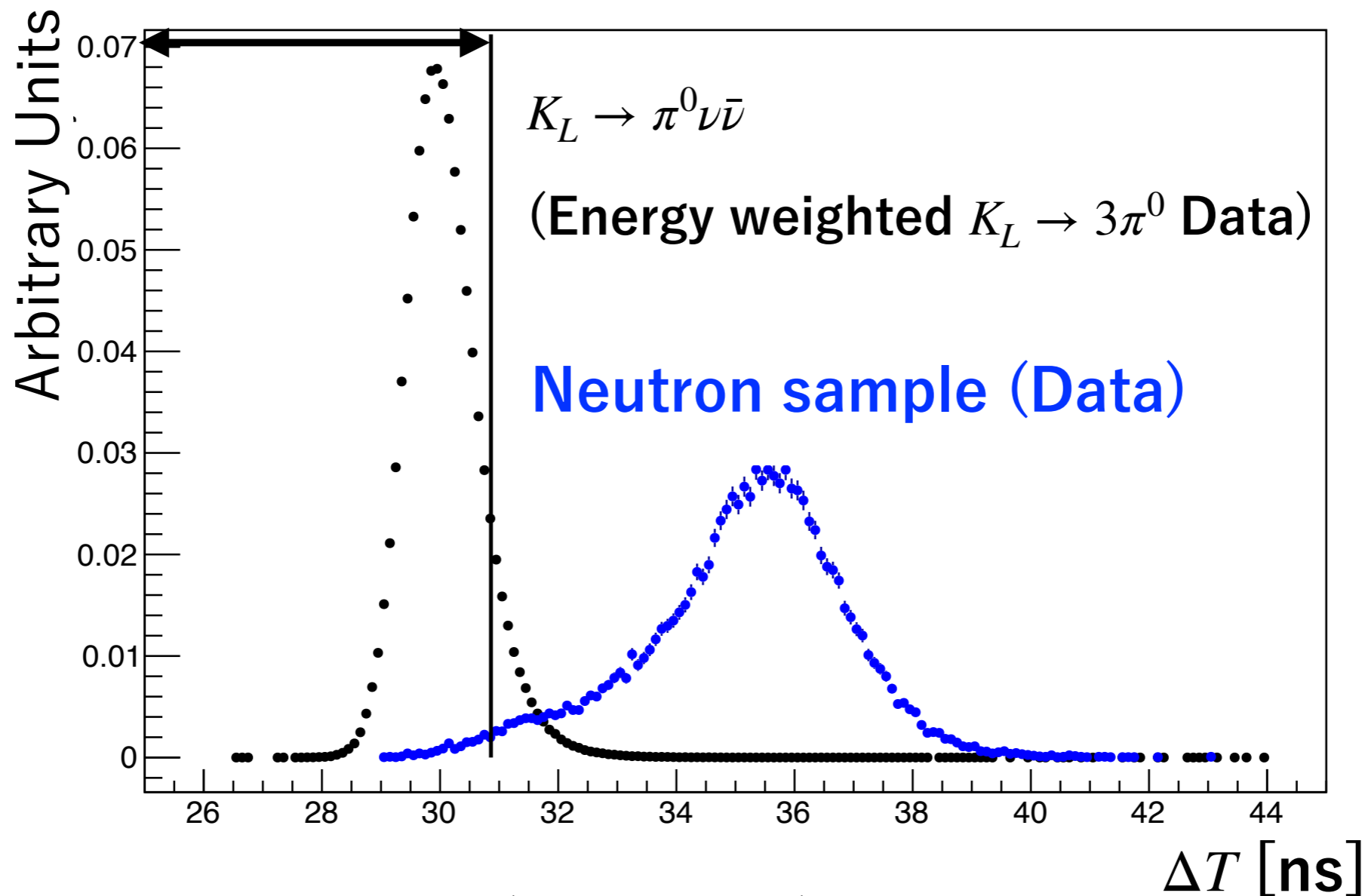


エネルギーによって、 ΔT 分布の幅は変わる

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

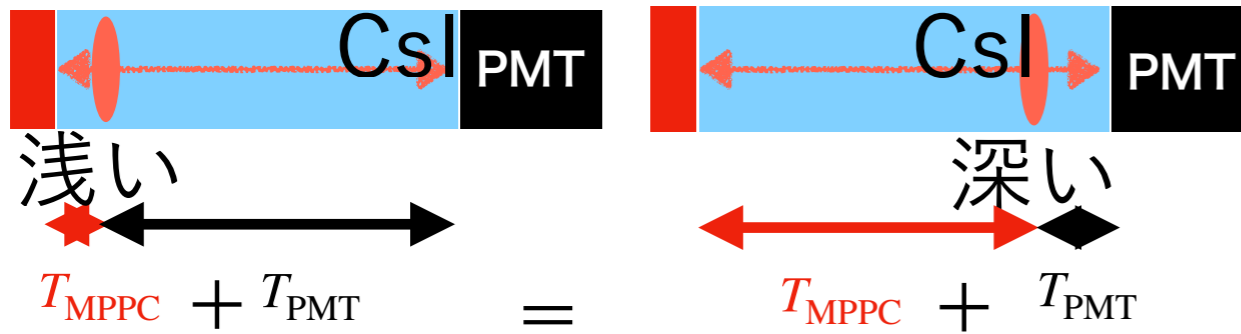
ΔT が大きい方のクラスターの ΔT 分布



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)

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

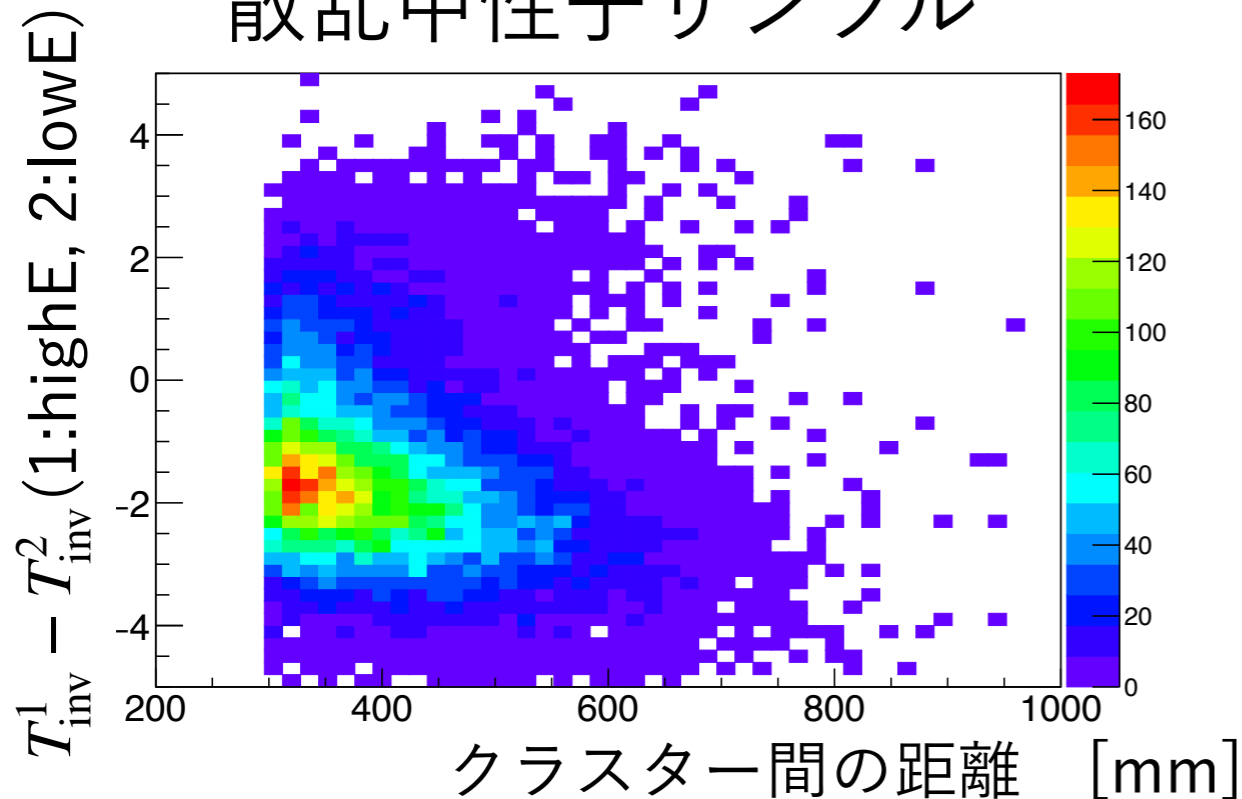


T_{inv} : 深さに関係ない時間

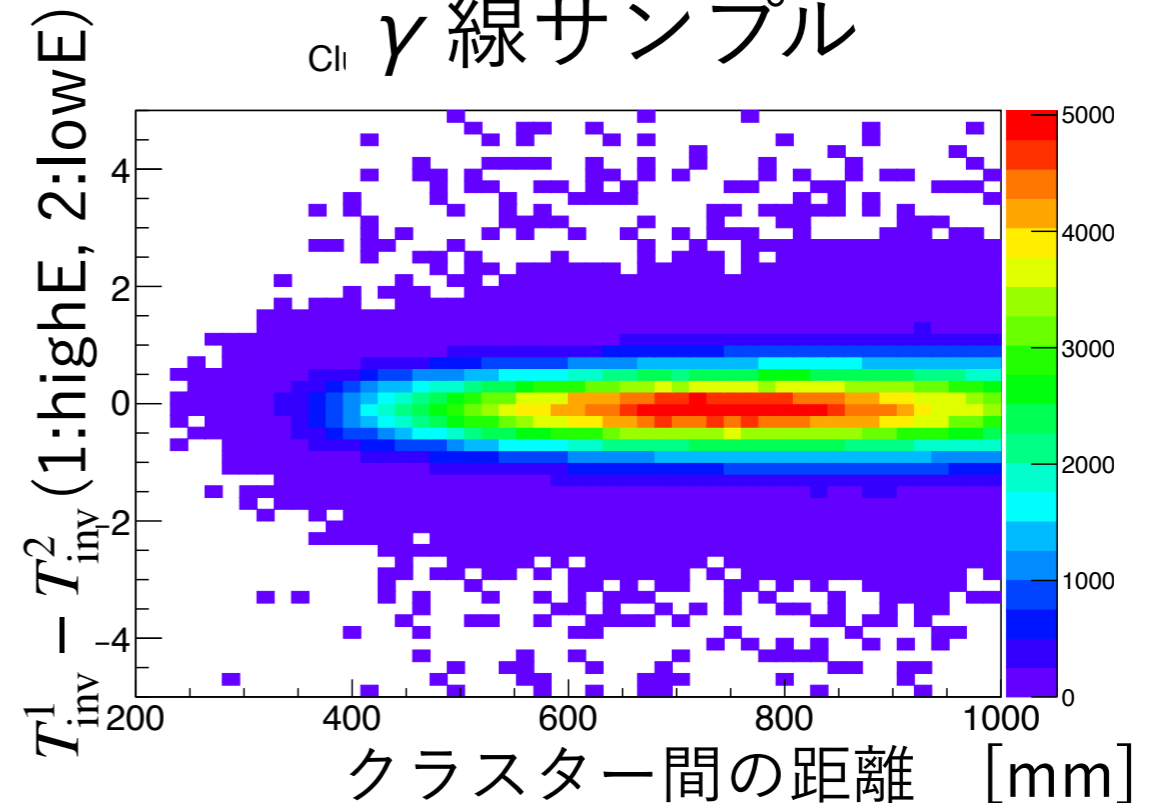
$$T_{\text{inv}}^1 - T_{\text{inv}}^2 \text{ (1:highE, 2:lowE)}$$

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

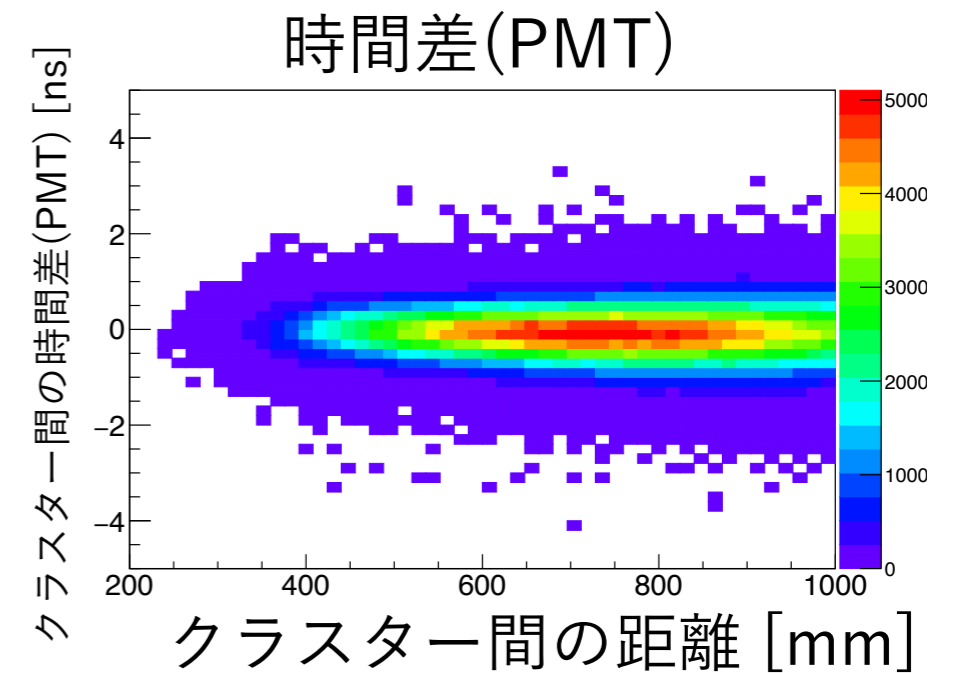
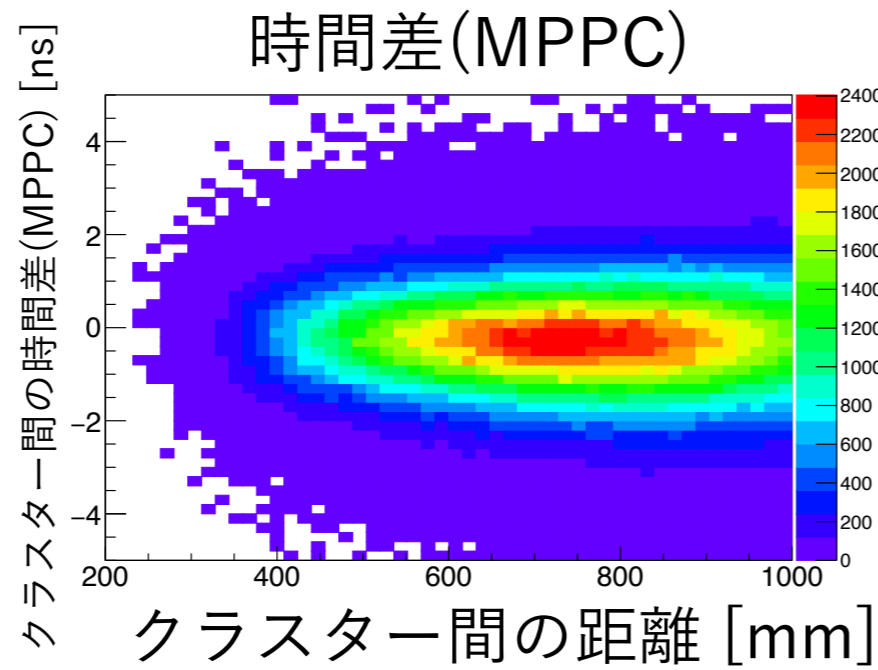


^{235}U γ 線サンプル

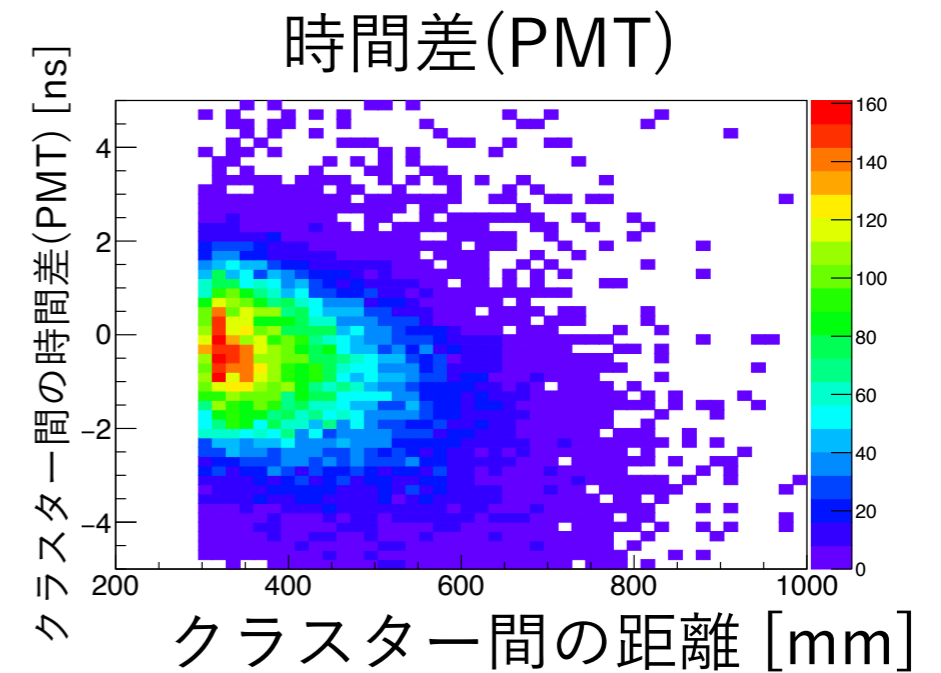
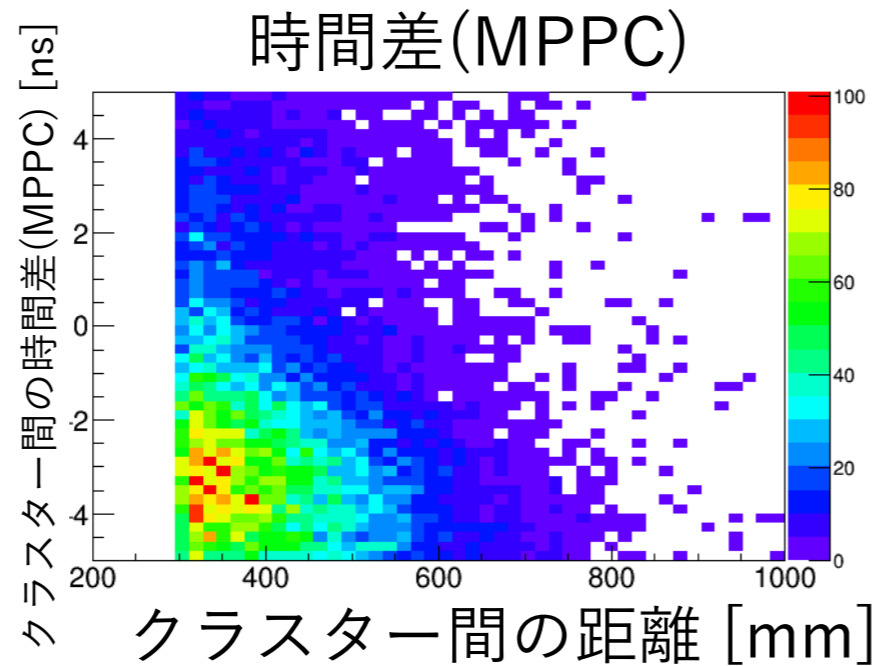


MPPPC時間差とPMT時間差

γ線サンプル

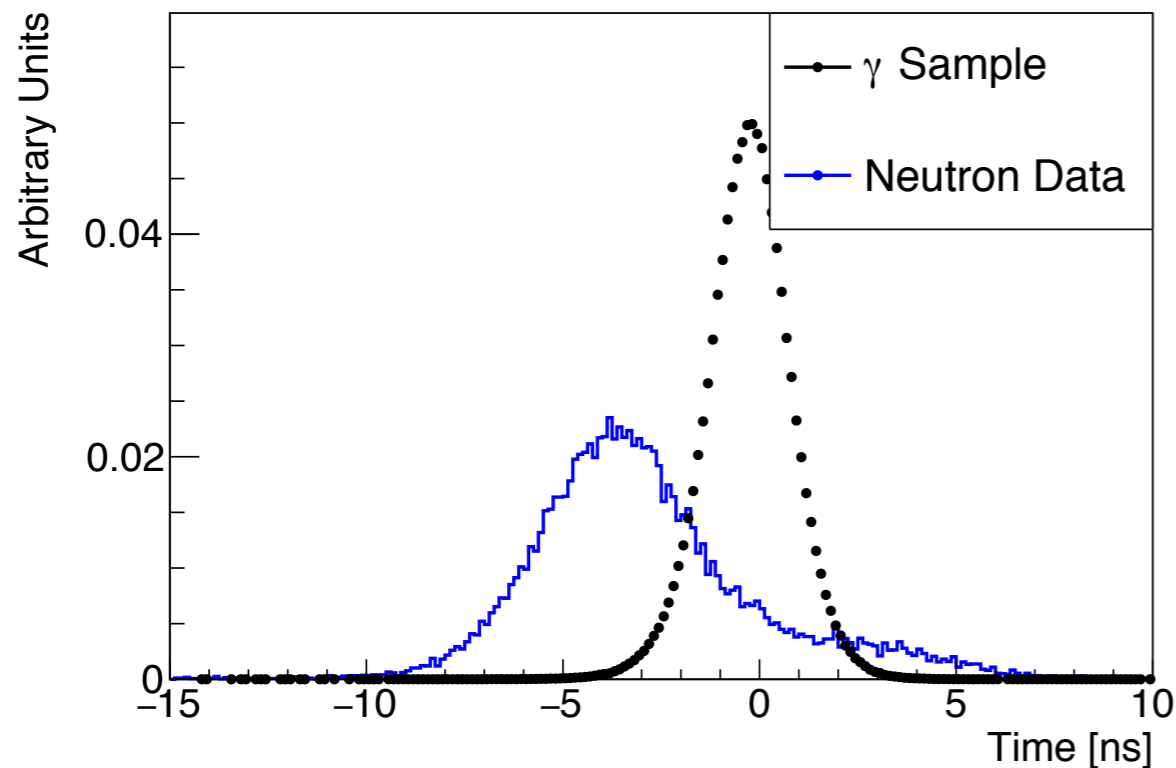


散乱中性子
サンプル

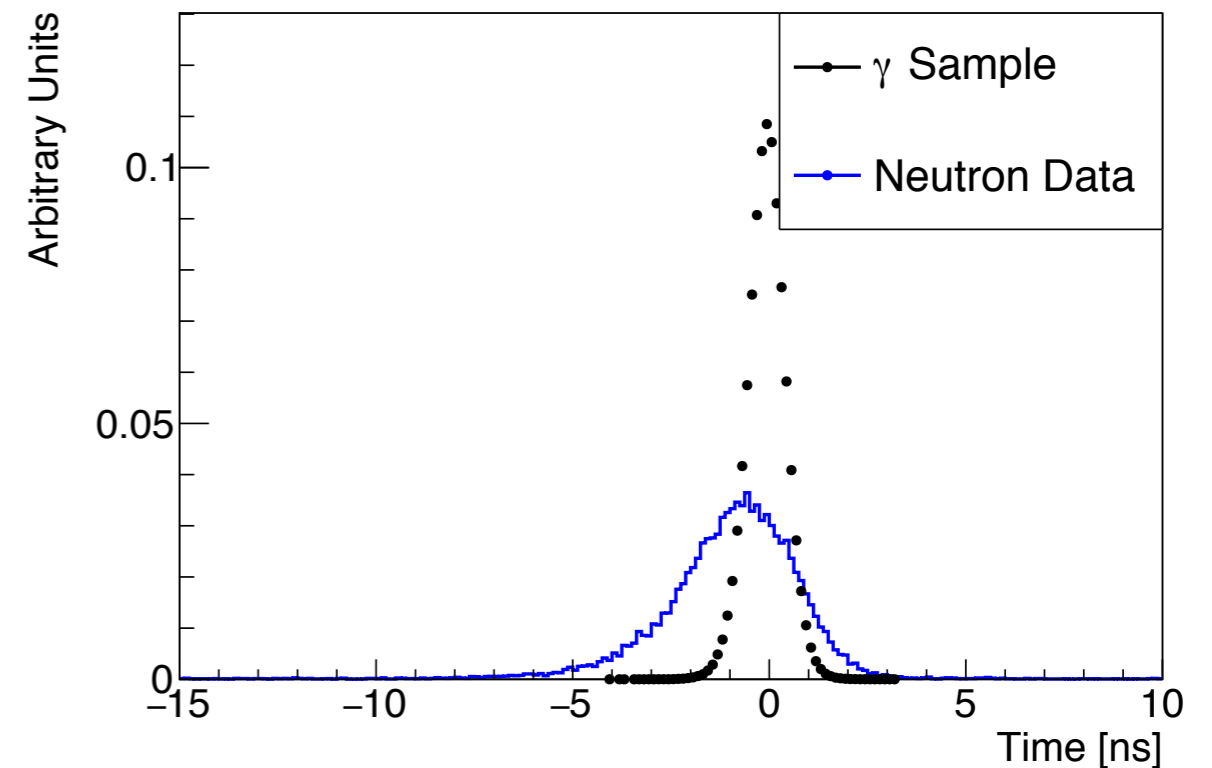


クラスター間の時間差

MPPCで測定した
二つのクラスター間の時間差

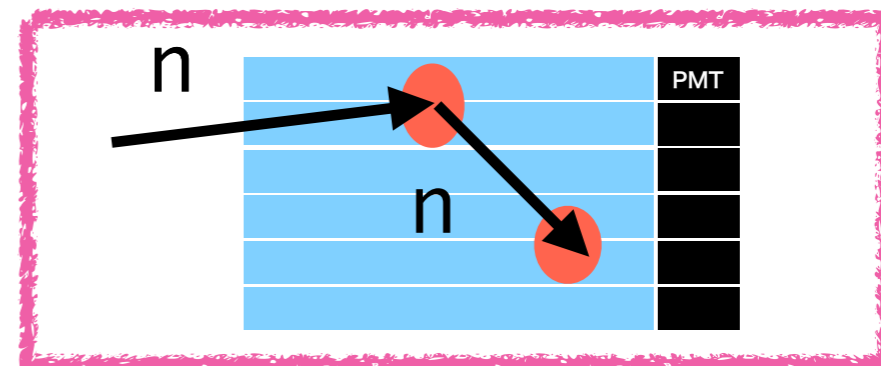
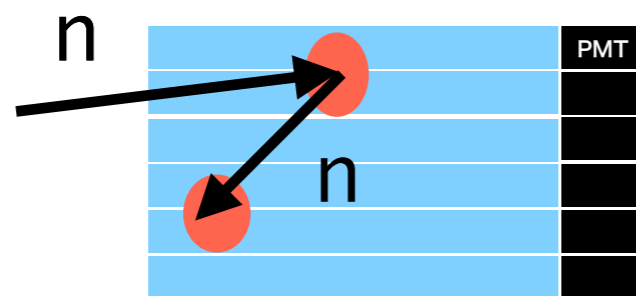


PMTで測定した
二つのクラスター間の時間差



散乱中性子サンプルでは

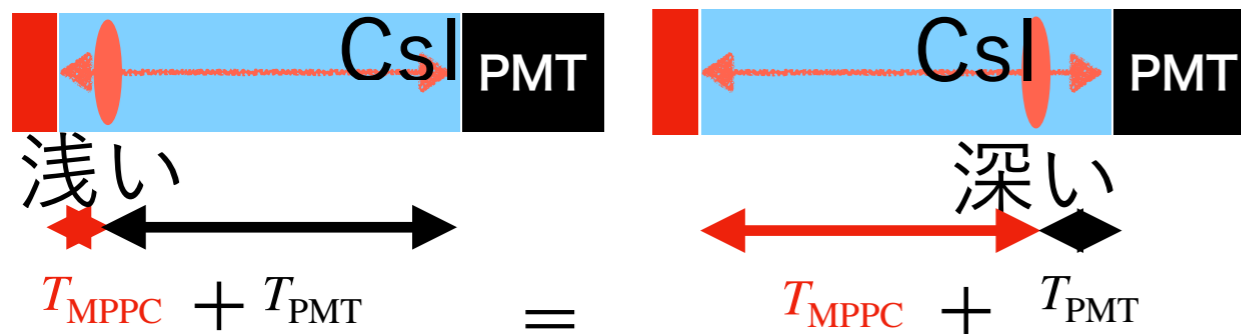
MPPCで測定したクラスター間の時間差が大きい



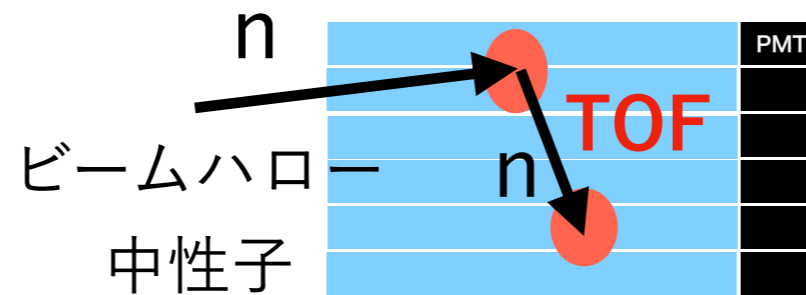
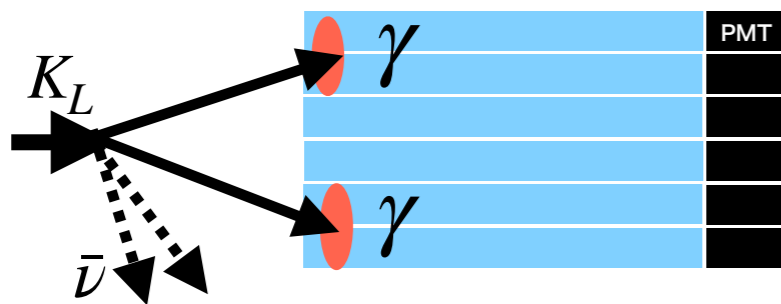
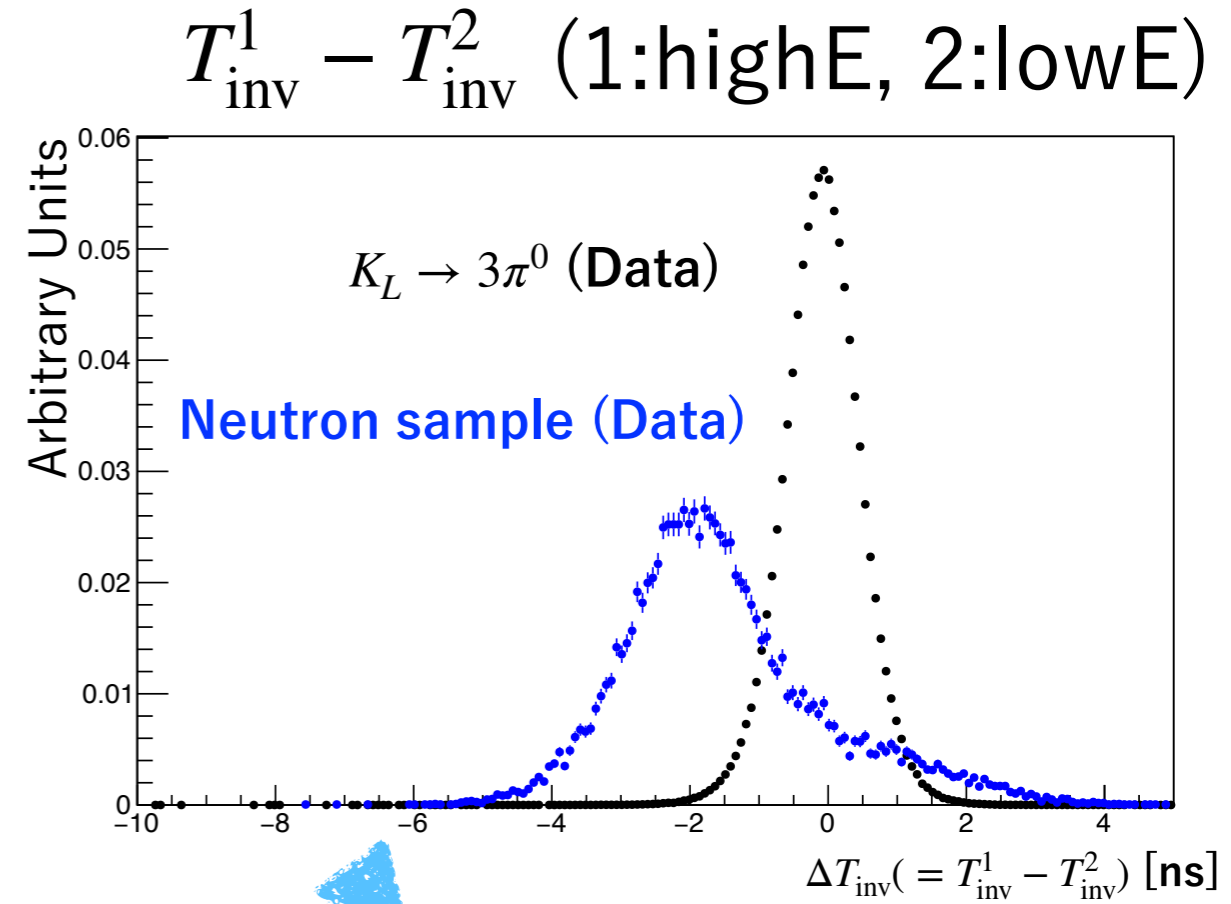
二次中性子が下流に飛ぶ事象が多い

MPPPCとPMTの平均時間

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

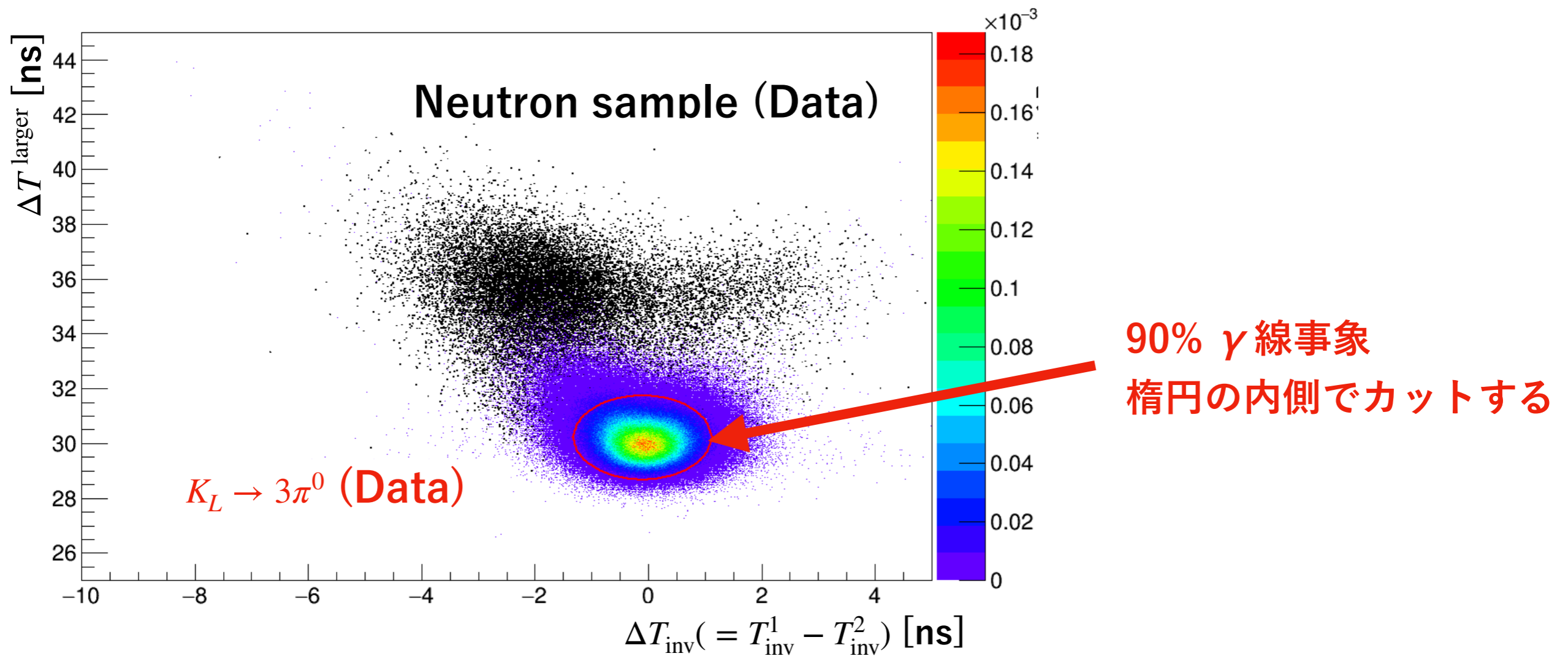


T_{inv} : 深さに関係ない時間



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

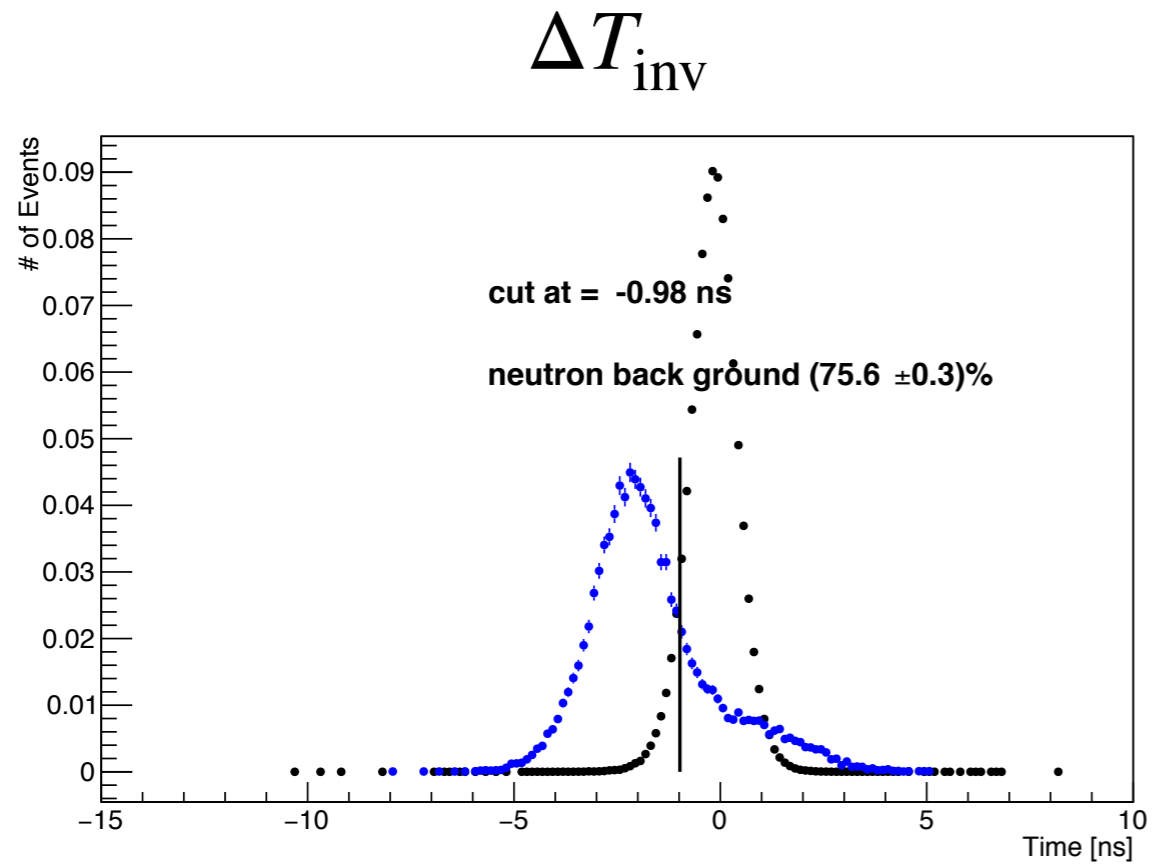
ΔT と ΔT_{inv} による削減能力



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

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

ΔT_{inv} vs クラスター間の時間差



クラスター間の時間差(MPPC)

