

# プリシャワー検出器の検討と シリコンピクセル検出器の性能評価

奈良女子大学大学院人間文化総合科学研究科

博士前期課程数物科学専攻

高エネルギー物理学研究室

田頭陽菜

2023年度修士論文審査会

2024/2/16

# 目次

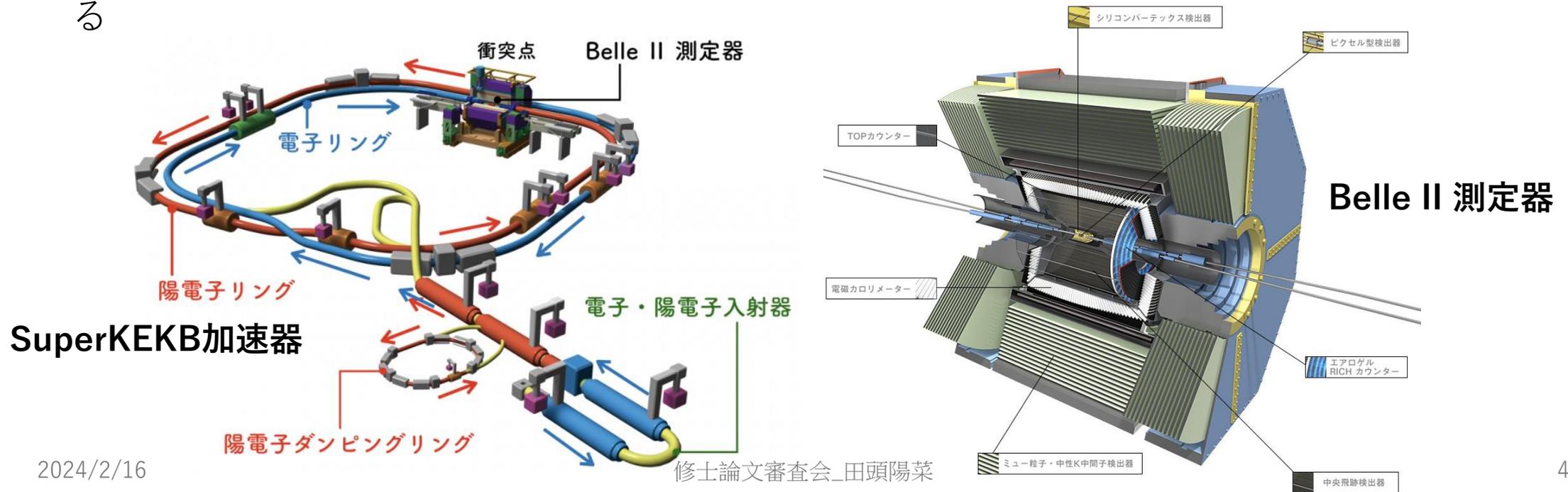
- **序論**
  - Belle II実験
- **プリシャワー検出器**
  - 構造
  - Geant4でのシミュレーションについて
- **DuTiP**
  - 構造
  - 検出効率について
- **まとめと今後**

# 目次

- **序論**
  - Belle II実験
- **プリシャワー検出器**
  - 構造
  - Geant4でのシミュレーションについて
- **DuTiP**
  - 構造
  - 検出効率について
- **まとめと今後**

# Belle II実験

- SuperKEKB加速器とBelle II測定器で構成されている実験
- 7GeVの電子と4GeVの陽電子を高頻度で衝突させる
- 測定器は衝突点を囲むように配置されている
- 衝突から生じるB中間子・反B中間子から粒子・反粒子の対称性の破れや新物理を探索している

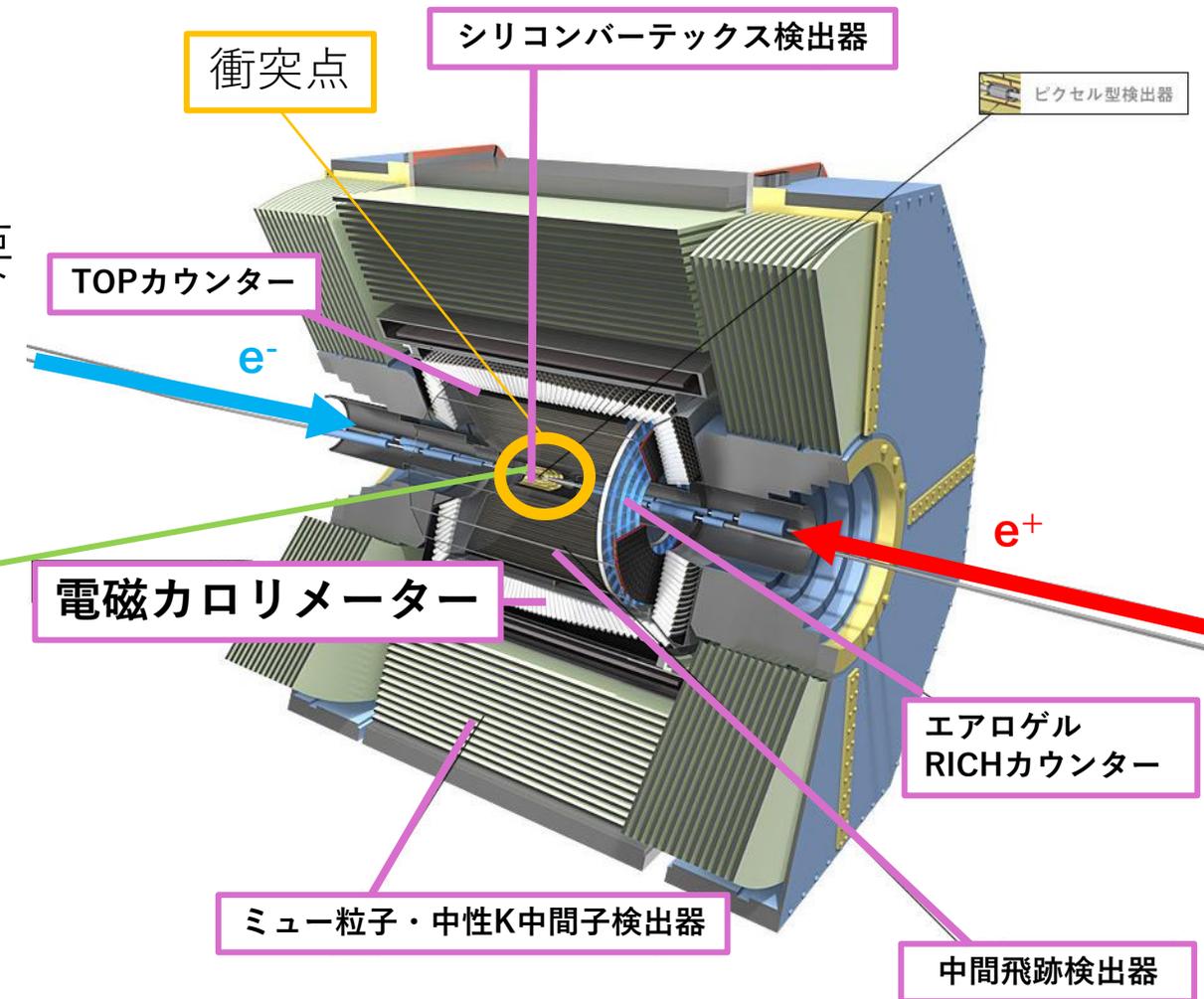


# Belle II測定器

- 衝突で様々な粒子が生成されるため、それらの識別やエネルギー測定が必要
- 役割の異なる複数の検出器で構成

## ピクセル型検出器

- 崩壊点に最も近い位置に存在する半導体検出器
- 荷電粒子の通過位置を検出する
- 最も小さいピクセルが  $55 \times 50 \mu\text{m}^2$

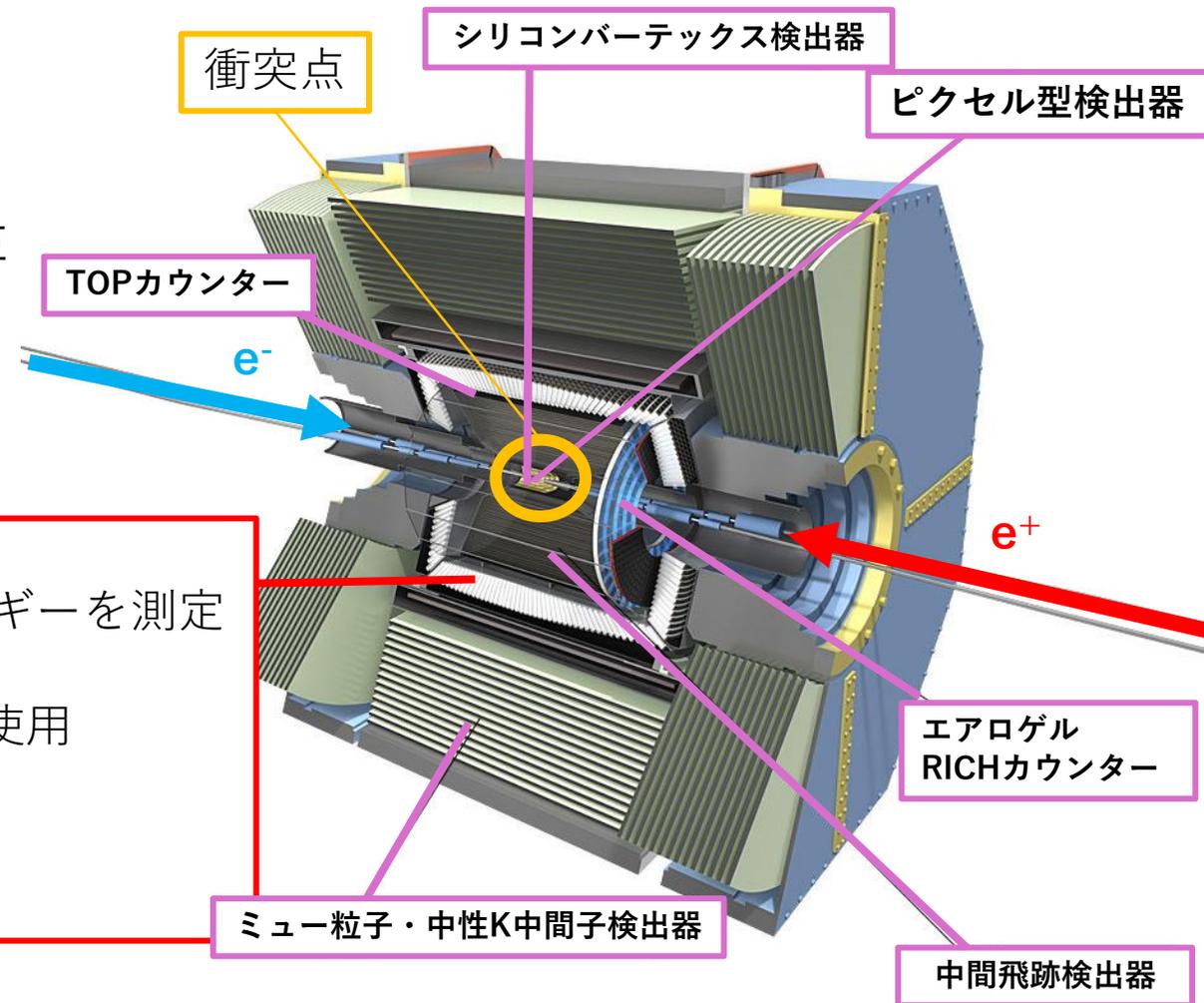


# Belle II測定器

- 衝突で様々な粒子が生成されるため、それらの識別やエネルギー測定が必要
- 役割の異なる複数の検出器で構成

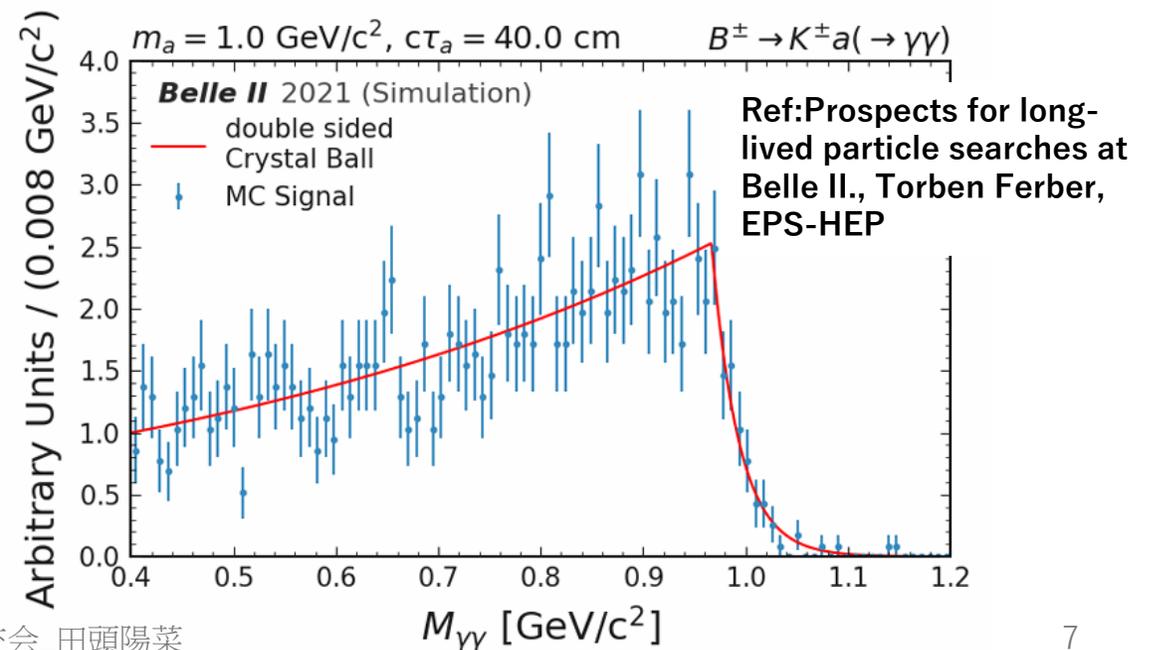
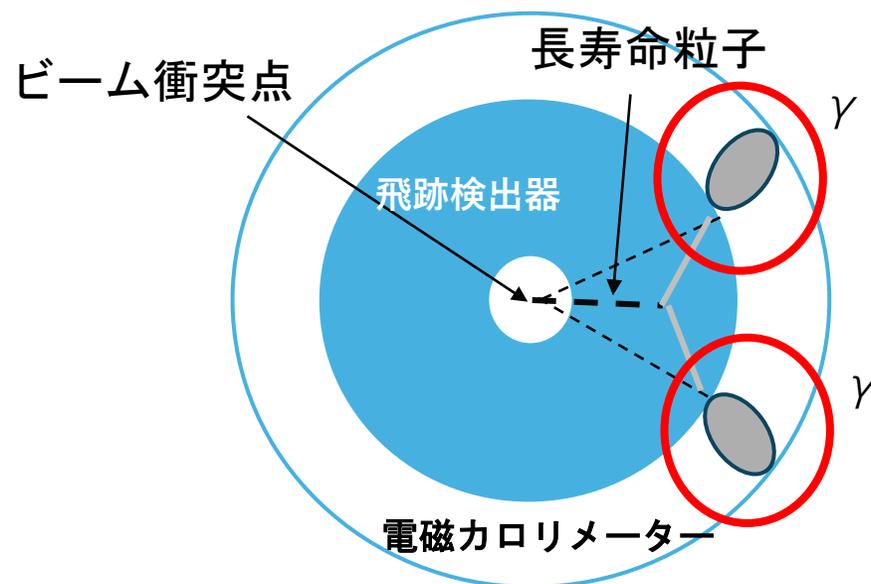
## 電磁カロリメーター

- 電磁シャワーを利用して電子・陽電子・ $\gamma$ 線のエネルギーを測定
- CsI(Tl)シンチレーター結晶を採用
- $5.5 \times 5.5 \times 30 \text{cm}^3$ の大きさを持つカウンターを8736本使用
- 数十MeV~7GeVと広い範囲でエネルギー測定が可能
- エネルギー分解能 (Bhabha散乱で1.8%) が高い
- 粒子の到来方向への感度は乏しい



# Belle II実験での暗黒物質探索

- $\gamma$  対になる暗黒物質をAxion-Like-Particle(ALP)と呼ぶ
  - ALPの中には崩壊するまでに数十cm程度飛行する長寿命粒子となるものがあり得る
  - Belle II実験においてALPが電磁カロリメーターに到達する前に崩壊すると電磁カロリメーターで検出できる
  - 中性粒子のため飛跡が見えず、運動量ベクトルは衝突点と結ぶしかない
- 実際の崩壊位置は衝突点ではなく、運動量ベクトルの方向を誤るため、再構成した質量が非常に広く分布する



# 研究動機

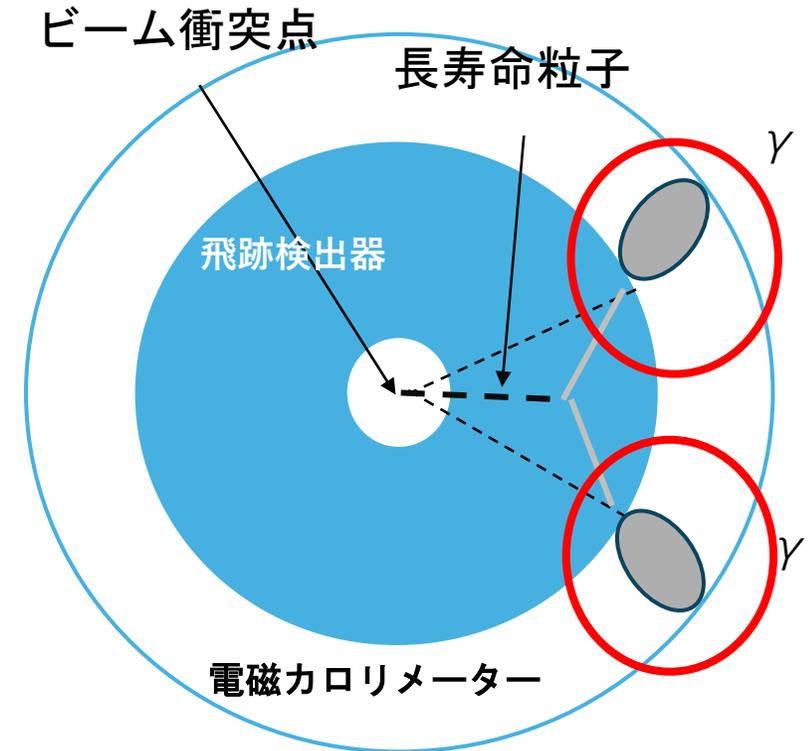
現在の電磁カロリメーターは $\gamma$ 線の到来方向への感度は乏しい。

これを改良できれば

- 衝突点以外のところから来る**ビームバックグラウンド $\gamma$ 線を識別・低減するのに効果的**
- 生成後に数十cm走ってから $\gamma$ 対に崩壊する**Axion-Like-Particleの質量の再構成を改善できる**



既存の電磁カロリメーター前方に $\gamma$ 線の到来方向に感度を持つ検出器（プリシャワー検出器）を置いて解決を図れないか検討



# 目次

- **序論**
  - Belle II実験
- **プリシャワー検出器**
  - 構造
  - Geant4でのシミュレーションについて
- **DuTiP**
  - 構造
  - 検出効率について
- **まとめと今後**

# プリシャワー検出器

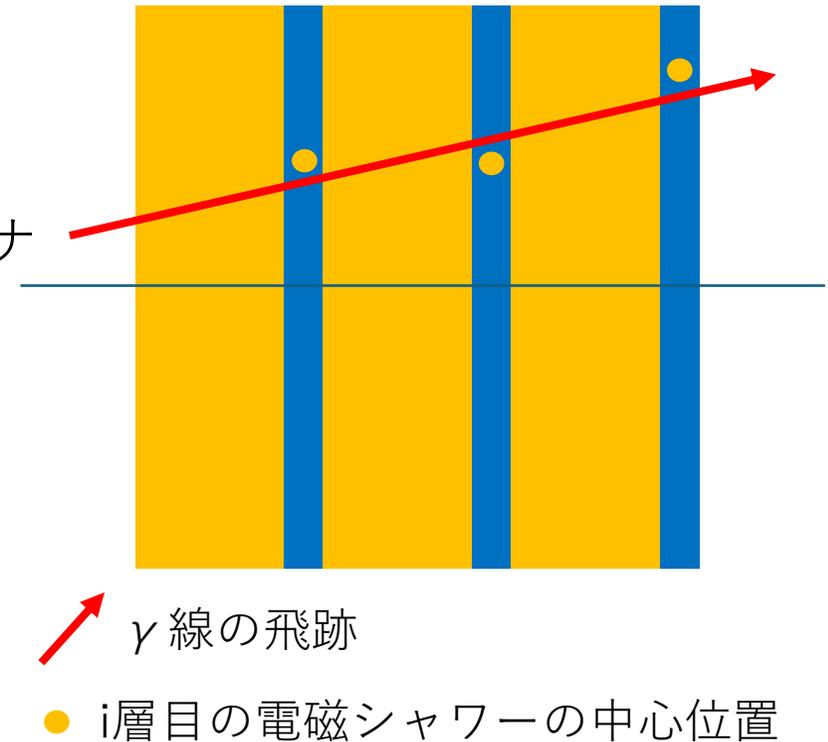
- エネルギー損失を測定する**アクティブ吸収層**、電子・陽電子の通過位置を検出する**トラッキング層**を合わせて1層とした3層で構成
- エネルギー50MeV~100MeVの $\gamma$ 線では $3X_0$ のうちに全吸収されるものもあるため、**吸収層はアクティブである必要がある**
  - 既に開発が進んでいるタングステンや鉛を使ったタイプでは吸収層でエネルギーが測定できず、低エネルギー $\gamma$ 線への感度も必要なBelle II実験の環境には不適
- 右図を基本形として粒子が入射したときに起こす相互作用をモンテカルロ法で扱うソフトウェアであるGEANT4でシミュレーションを行った



検出器を横から見た図  
橙色：BGO結晶（厚み11.2mm =  $1X_0$ ）  
青色：ピクセル型Si検出器（厚み0.3mm）  
断面：1辺5.5cmの正方形  
（Belle IIのカロリメーターを構成するカウンター1本と同じ断面積）

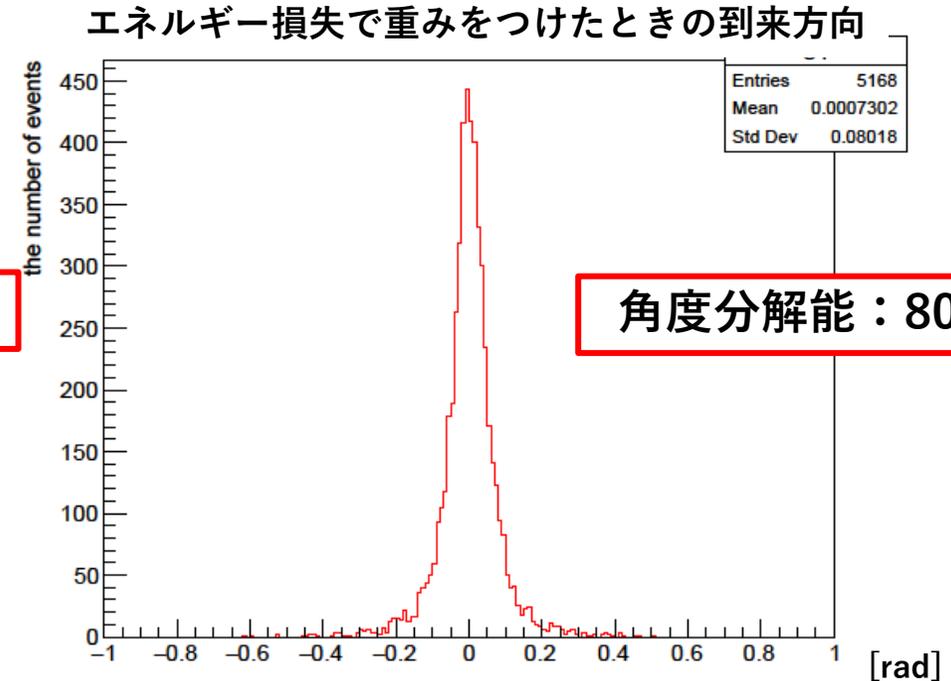
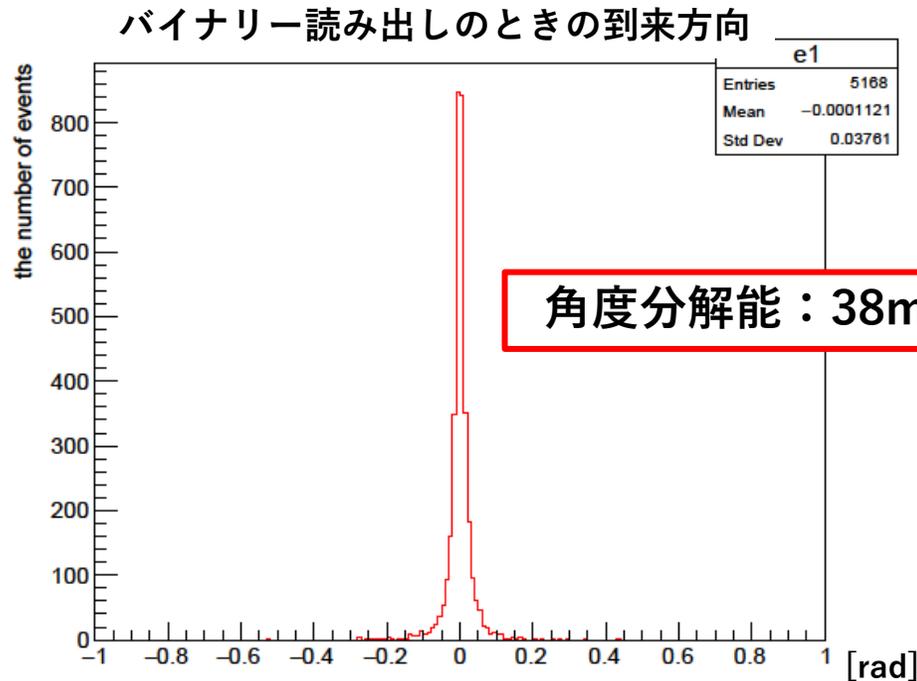
# GEANT4シミュレーションによる $\gamma$ 線到来方向の角度分解能の見積もり方法

- ヒット情報から、各層で電磁シャワーの中心位置を算出する
  - エネルギー損失の値で重みをつけて計算する方法
  - エネルギー損失の値で重みをつけず計算する方法（バイナリー読み出し）
- 電磁シャワーの中心を結ぶように最小二乗法を用いて $\gamma$ 線の到来方向を再構成する
- その結果のベクトル成分  $(x,y)$  を表す分布のroot mean squareを到来方向の角度分解能と定義する



# GEANT4シミュレーションによる $\gamma$ 線到来方向の角度分解能の見積もり結果

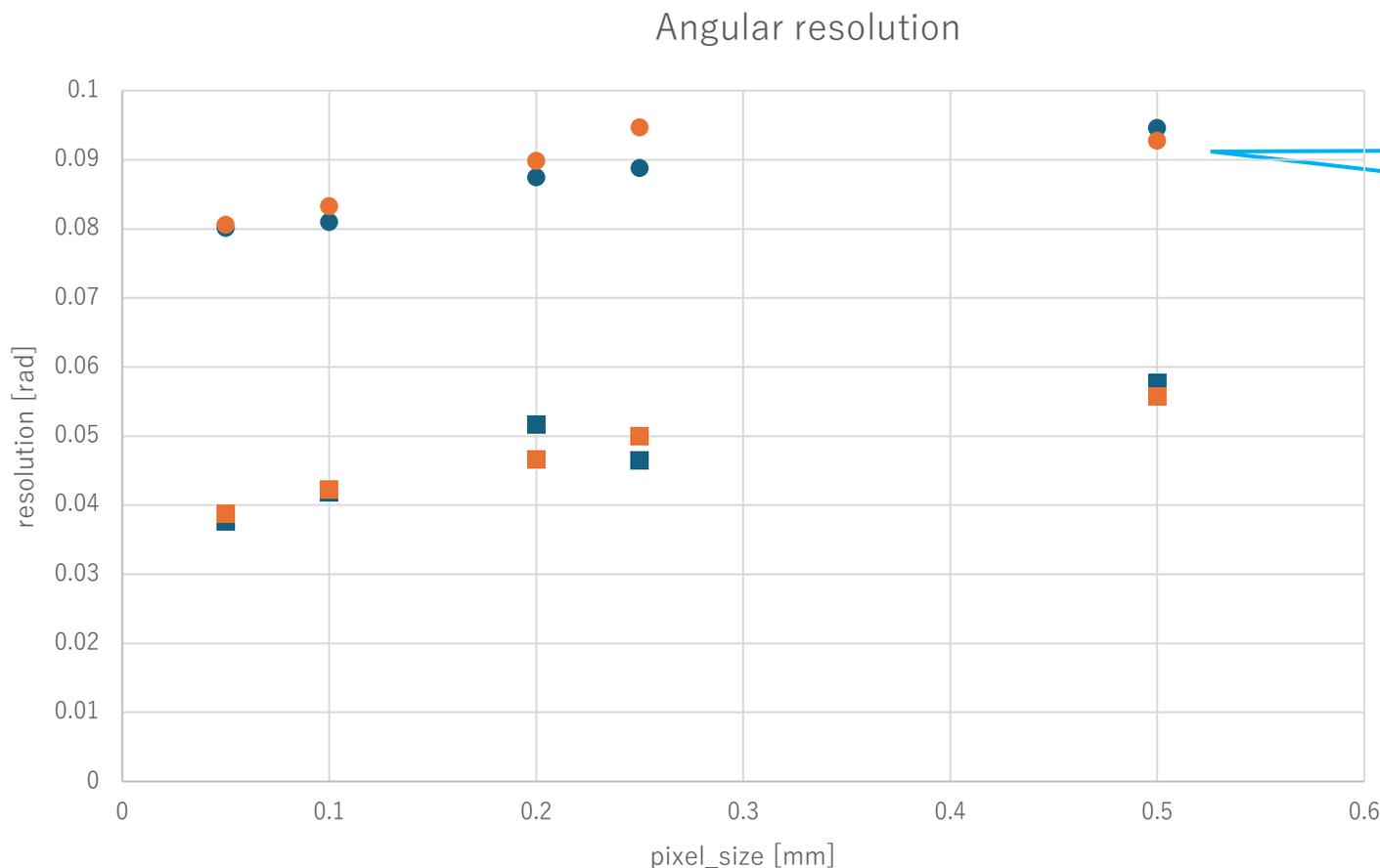
入射エネルギー：1000MeV、ピクセル角：50 $\mu$ m  
10000回、プリシャワー検出器中央に垂直入射



- バイナリー読み出しの方が角度分解能が良くなることがわかった
- エネルギー損失で重みをつける方が分解能が低いのは、ランダウ分布するエネルギー損失のふらつきの影響を受けるためと思われる

# ピクセルサイズと角度分解能の関係

Geant4でのシミュレーション



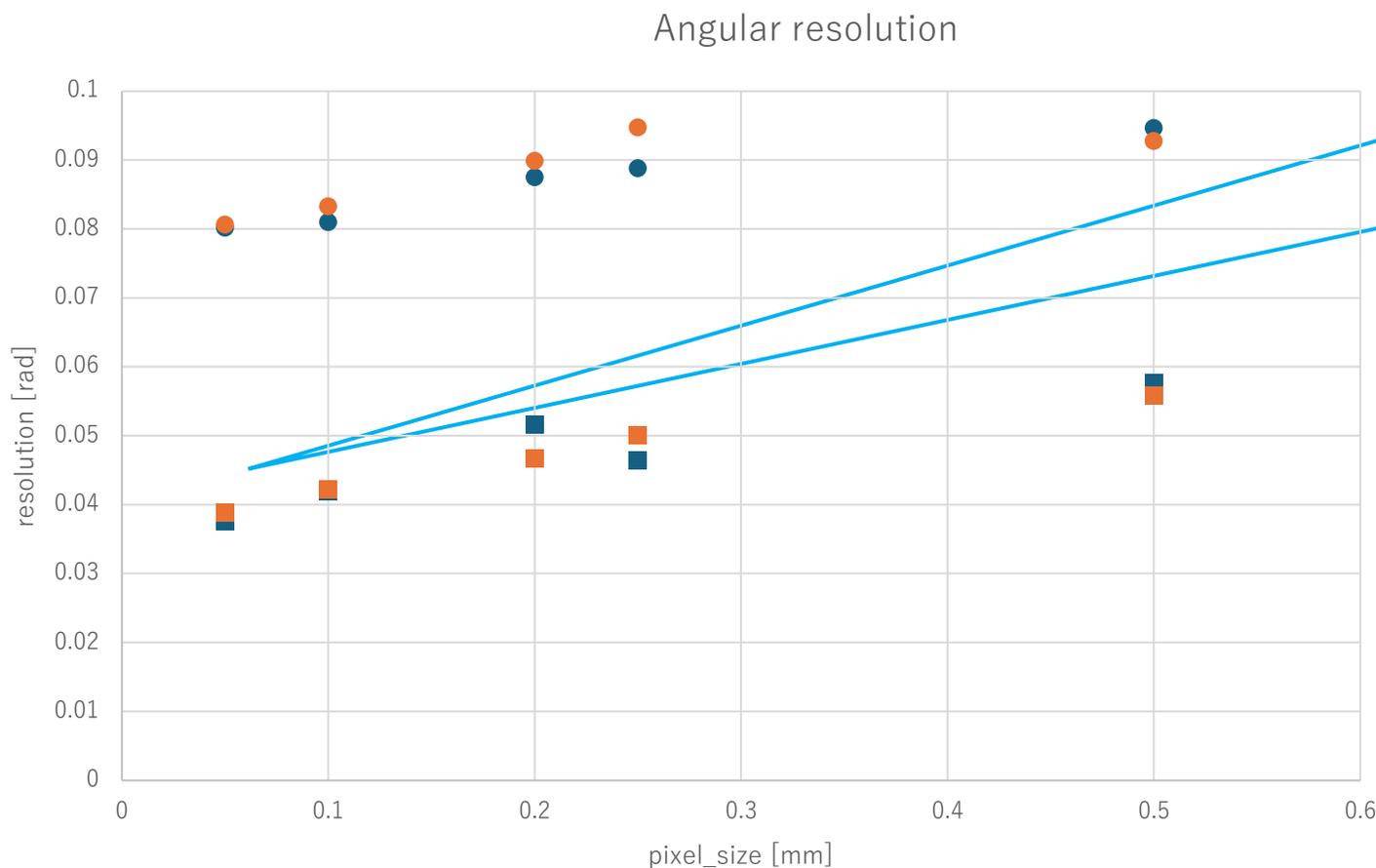
0.5mmくらいまで大きくすると角度分解能が良くないと予想される

条件

- Edepread\_x-axis 入射粒子：gamma
- Edepread\_y-axis イベント数：10000
- binary\_x-axis 入射エネルギー：1000MeV
- binary\_y-axis 入射位置：プリシャワー検出器中央
- 入射方向：垂直
- 磁場：なし
- エネルギー損失の閾値：50KeV

# ピクセルサイズと角度分解能の関係

Geant4でのシミュレーション



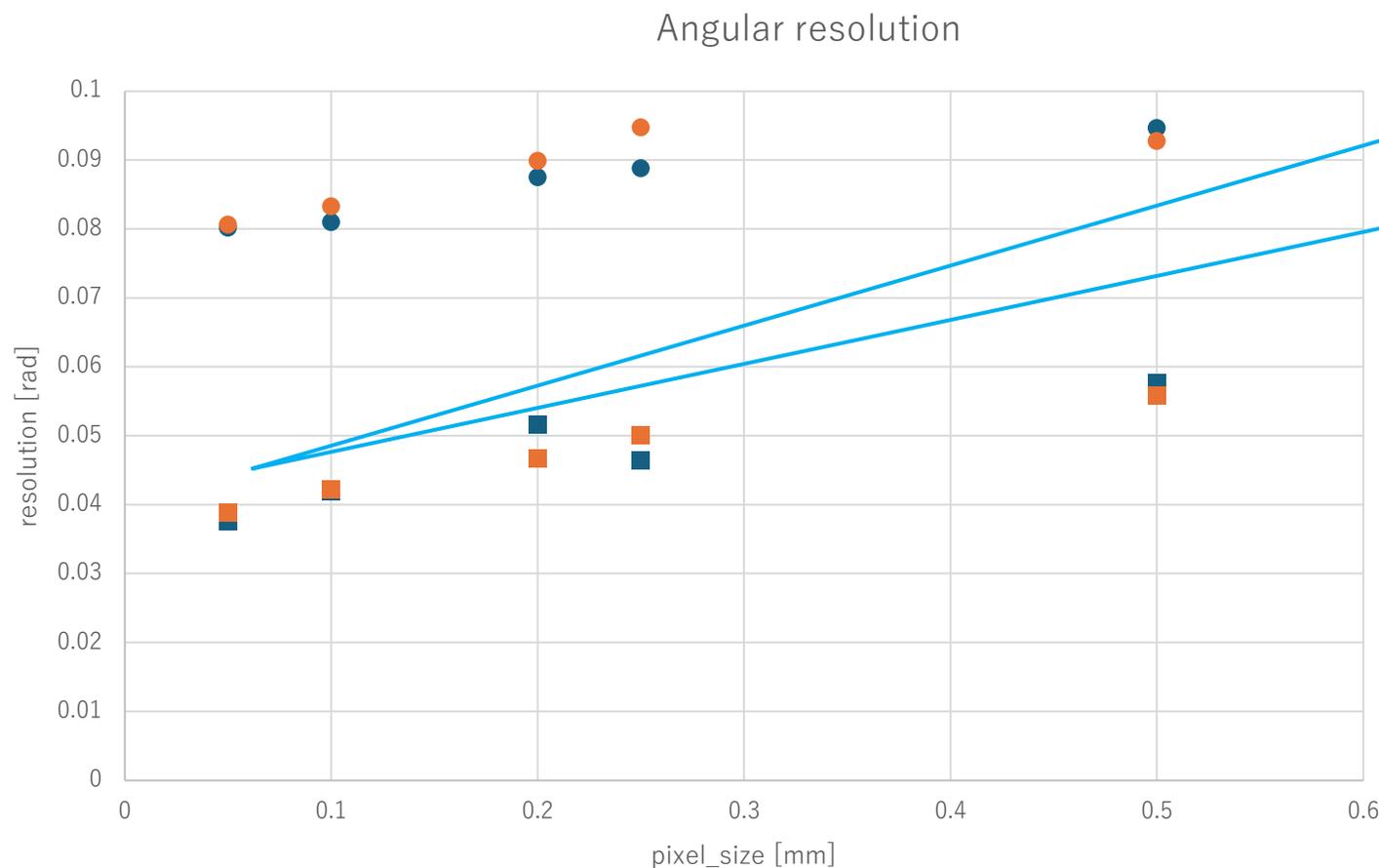
- 50 $\mu\text{m}$ のピクセル検出器かつバイナリー読み出しの場合、40mrad程度の角度分解能が期待できる。
- 50 $\mu\text{m}$ ：崩壊点検出器に求めるものとほとんど同じ

条件

- Edepread\_x-axis 入射粒子：gamma
- Edepread\_y-axis イベント数：10000
- binary\_x-axis 入射エネルギー：1000MeV
- binary\_y-axis 入射位置：プリシャワー検出器中央
- 入射方向：垂直
- 磁場：なし
- エネルギー損失の閾値：50KeV

# ピクセルサイズと角度分解能の関係

Geant4でのシミュレーション



- 50 $\mu\text{m}$ のピクセル検出器かつバイナリー読み出しの場合、40mrad程度の角度分解能が期待できる。
- 50 $\mu\text{m}$ ：崩壊点検出器に求めるものと同ほとんど同じ



- Belle II実験崩壊点検出器のアップグレード向けに開発中のDuTiPセンサーの性能評価を行う

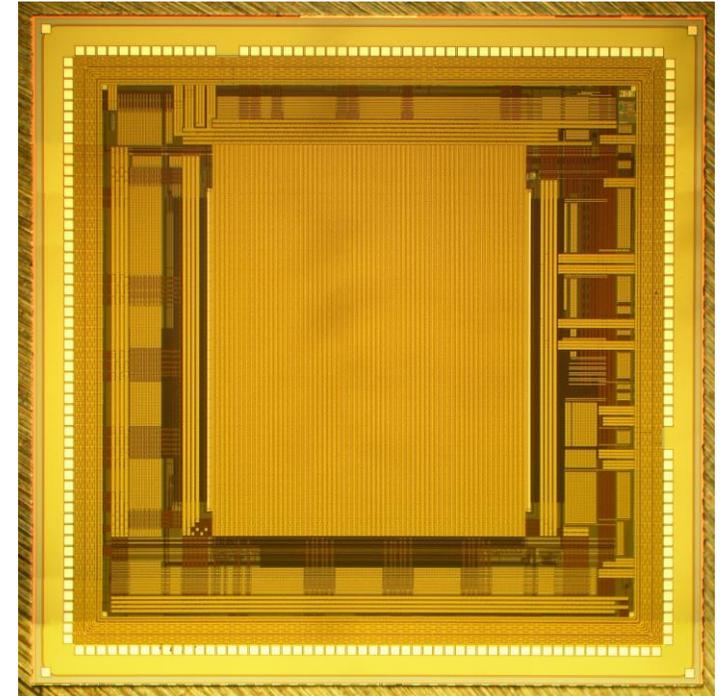
# 目次

- **序論**
  - Belle II実験
- **プリシャワー検出器**
  - 構造
  - Geant4でのシミュレーションについて
- **DuTiP**
  - 構造
  - 検出効率について
- **まとめと今後**

# DuTiP1

- DuTiP : **D**ual **T**imer **P**ixel
- SOI技術を使用して開発された
- SOI : 同一チップ上にセンサー層と回路層が形成されているモノリシック構造を持つ
- ピクセル内にデジタル化に使う2つの7bitタイマーが存在
  - **1つのタイマーが動作中でも次のヒットを検出できる**ことが可能で、高レートに耐える
- 回路部分はアナログ部分が1/4、デジタル部分が3/4
- アナログ回路はALPIDEチップのアンプをSOIプロセスに焼き直したものを使用
  - 低消費電力で動かすことが可能
  - 各電圧値をユーザーが最適化させる必要がある

DuTiP1

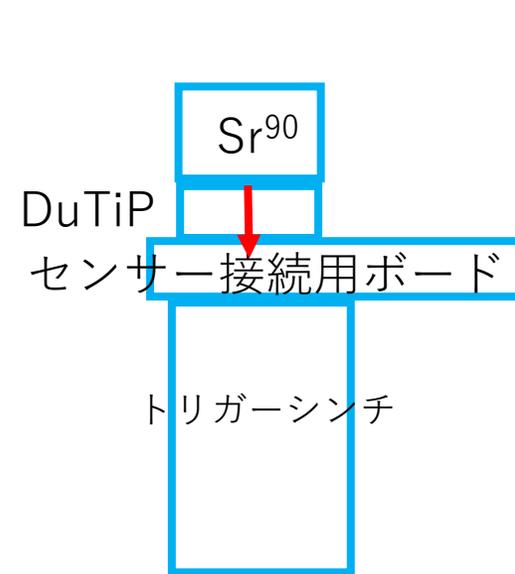
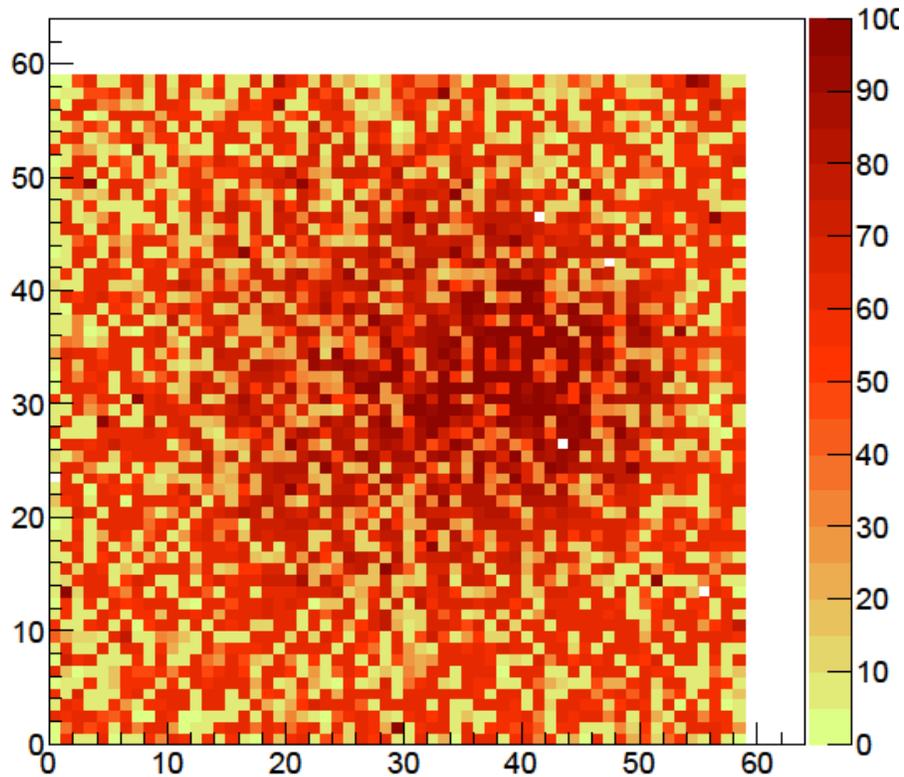


チップサイズ	6.0mm*6.0mm
有感領域	2.9mm*2.9mm
ピクセルアレイ	64*64
ピクセルサイズ	45μm*45μm
厚み	310μm
読み出し方法	バイナリー

# $\beta$ 線照射の結果

ビームテストを行う前に荷電粒子検出の試験を行い、ヒットの検出が可能であることを確認した

hist\_pre\_hit1



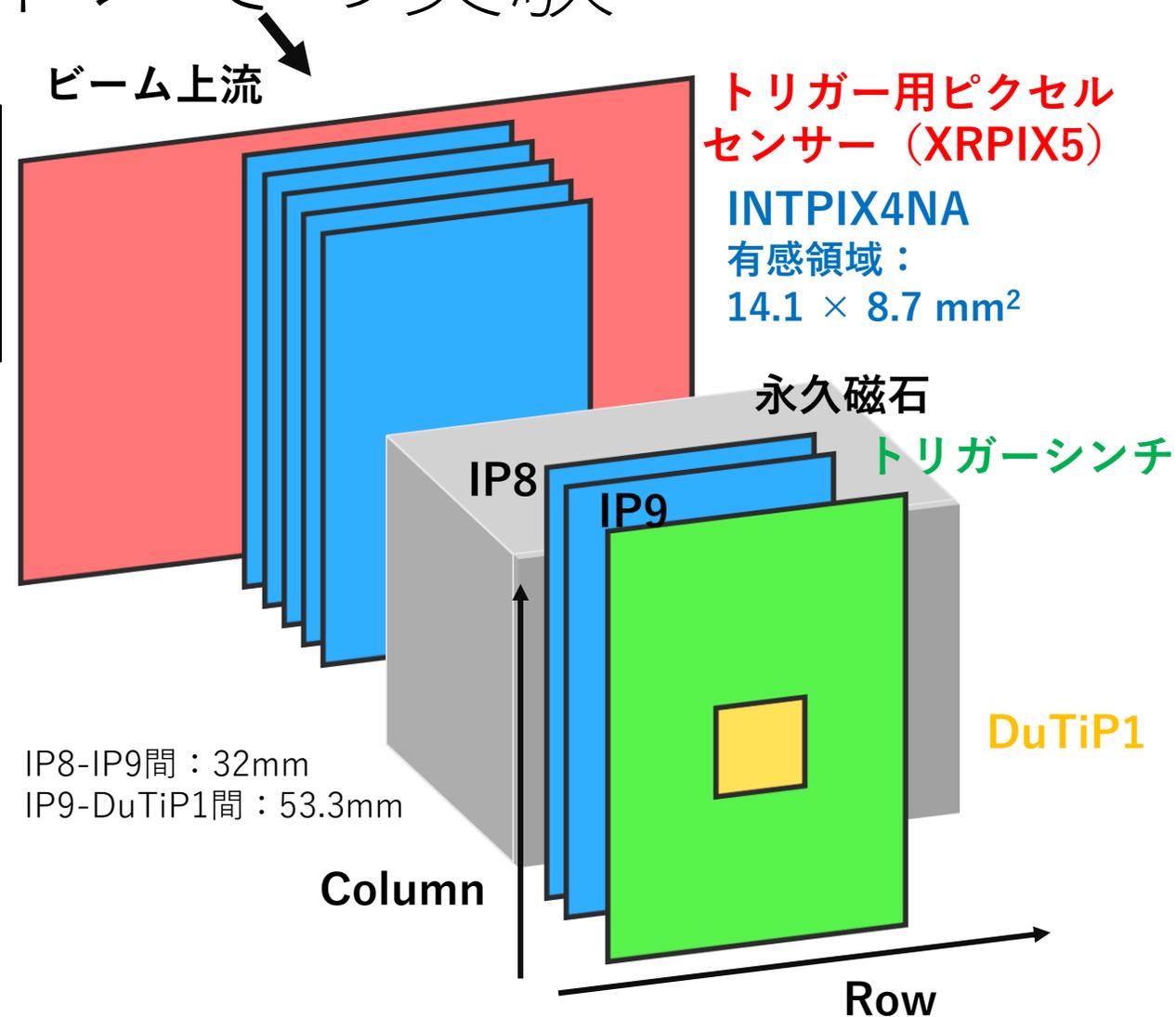
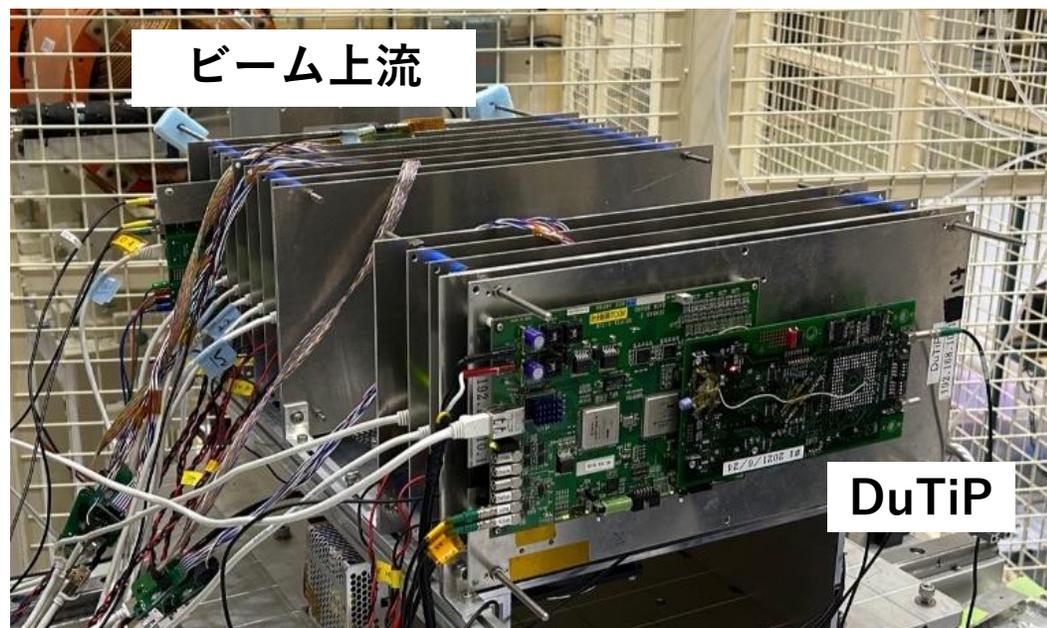
**トリガーシンチ**

$\phi = 1.5\text{mm}$ のコリメーターがついた  
 $\phi = 1$ インチの光電子増倍管

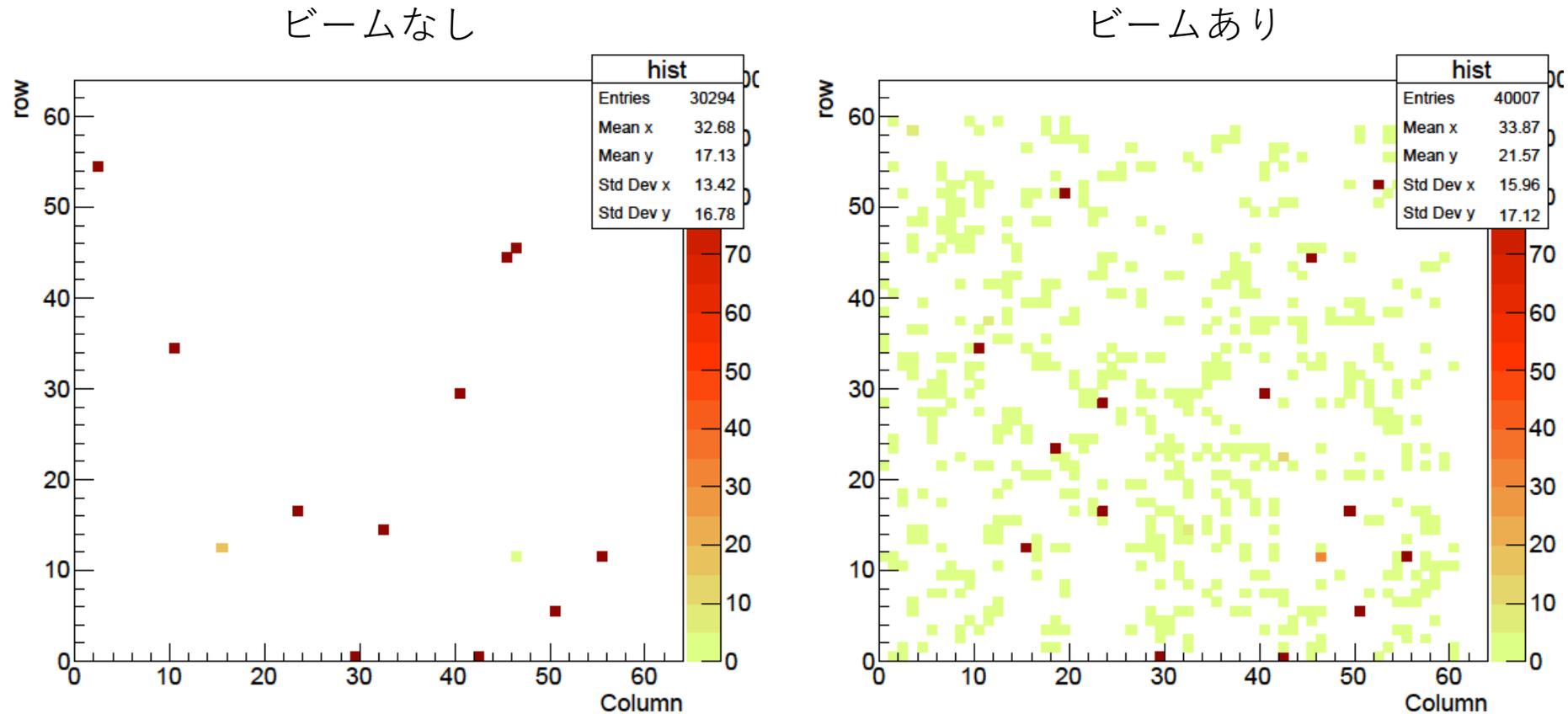


# KEKテストビームラインでの実験

- 電子ビームが入射
- 解析には**4GeV**, 永久磁石なし, トリガー: XRPIX5のRunのみを使用
- 1Run = 10000イベント
- DuTiP1の動作を決めるFWは18.75MHzクロックで動作

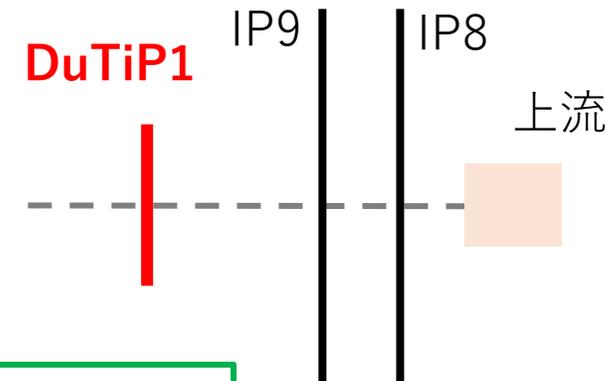


# 電子ビームの有無によるピクセルヒット



ビームを当てたときは、それに対応して鳴っているピクセルのヒットが記録されていることがわかった。

# 検出効率算出の順序



INTPIX4NAとDuTiP1は独立のデータ収集システム  
同一の荷電粒子を検出できているか確認のためヒット相関図を作成

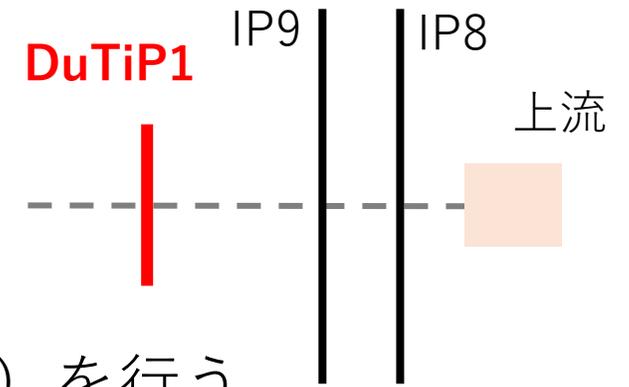


センサー間の中心位置は厳密に同じではない  
→**中心位置の相対的なずれの補正が必要**  
ヒット相関図に対し $y=a+bx$ でfitすることで位置補正を行う

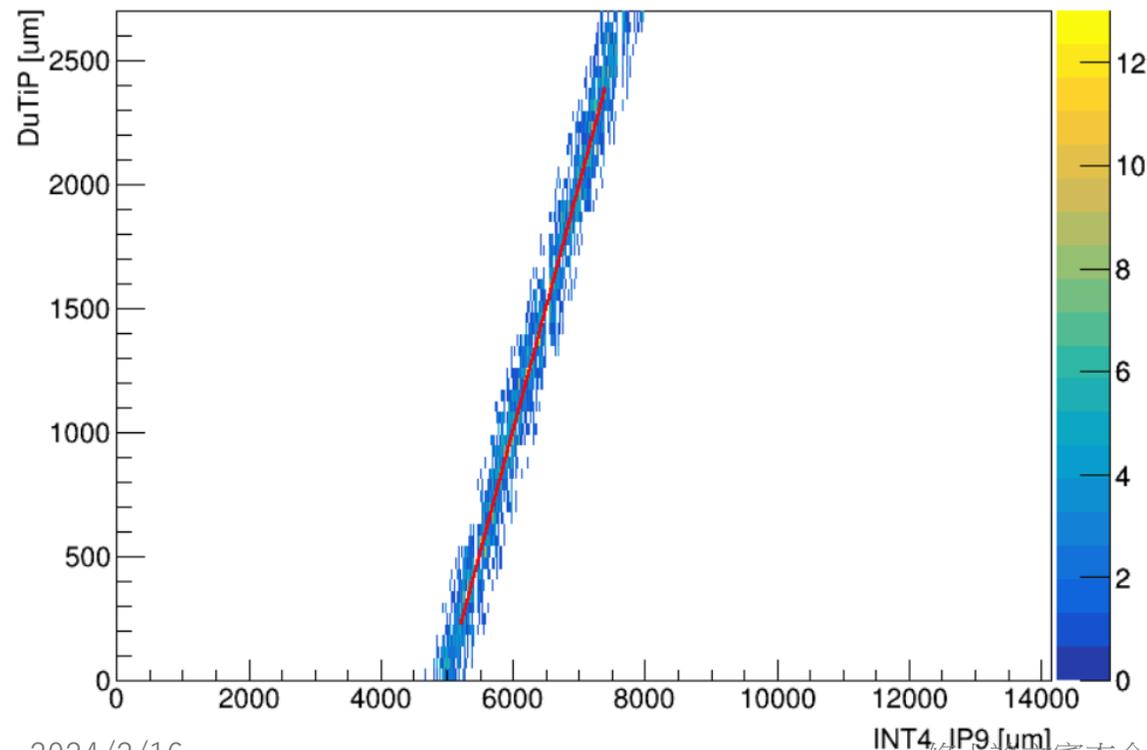


IP8, IP9のヒット情報からDuTiP1でのヒットの有無を確認する  
→この回数を元に検出効率を計算する (詳細は後述)

# 位置補正について



- ヒット相関図から並進方向の位置補正（アライメント）を行う
  - IP8-IP9, IP8-DuTiP1の組み合わせでも同様のプロットを作成し、位置補正を行ったIP9-DuTiP1のヒット相関（垂直方向）



センサー間のアライメントの結果 [um]

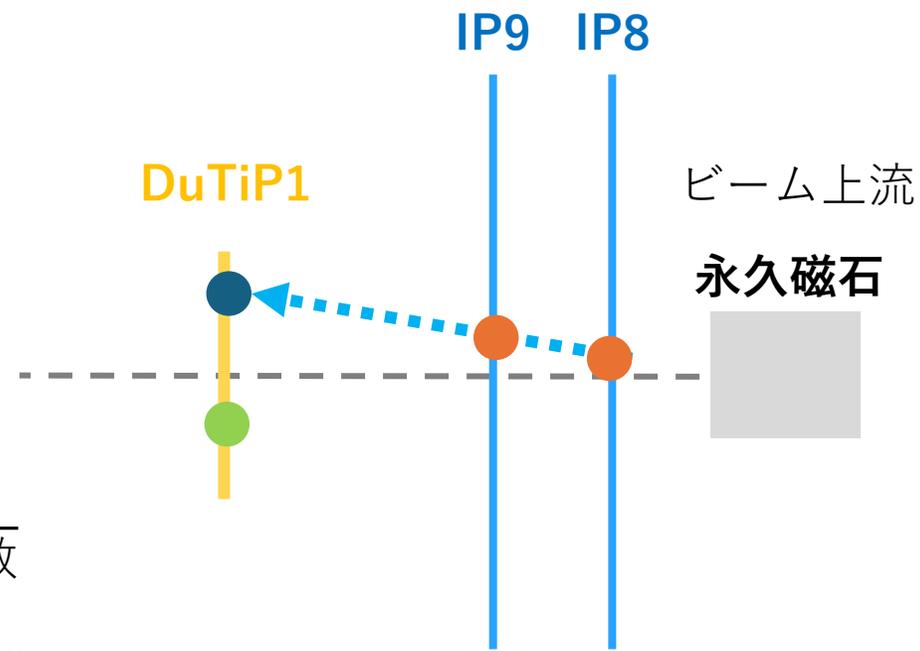
方向	IP8-IP9	IP8-DuTiP1	IP9-DuTiP1
垂直方向	-303.8	-5276.3	-4967.3
誤差	2.2	56.9	37.9
水平方向	-152.9	-2771.4	-2671.0
誤差	3.1	51.8	35.2

この結果を元にセンサー間のずれを補正した

# 検出効率の算出方法

- アライメント後のIP8, IP9のヒット情報からDuTiP1のヒット位置を外挿する
- 以下の式で検出効率を算出する

$$\text{検出効率}[\%] = \frac{\text{実際にDuTiP1上でヒットが見られたイベント数}}{\text{外挿した位置がDuTiP1の有感領域にあったイベント数}}$$



- : INT4でのヒット位置
  - : DuTiPに外挿したヒット位置
  - : 実際のDuTiPでのヒット位置
- ※わかりやすいように外挿したヒット位置と実際のヒット位置を大きくずらしている

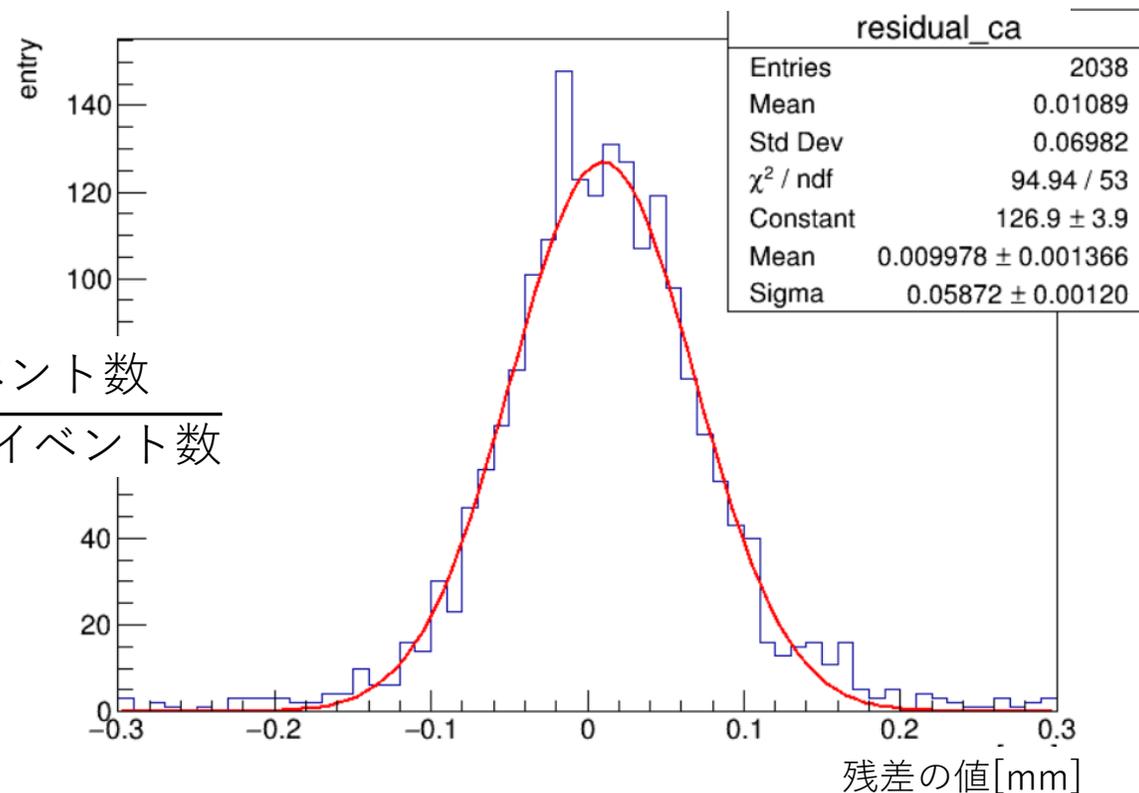
# 検出効率の算出方法

- アライメント後のIP8, IP9のヒット情報からDuTiP1のヒット位置を外挿する
- 以下の式で検出効率を算出する

$$\text{検出効率}[\%] = \frac{\text{実際にDuTiP1上でヒットが見られたイベント数}}{\text{外挿した位置がDuTiP1の有感領域にあったイベント数}}$$

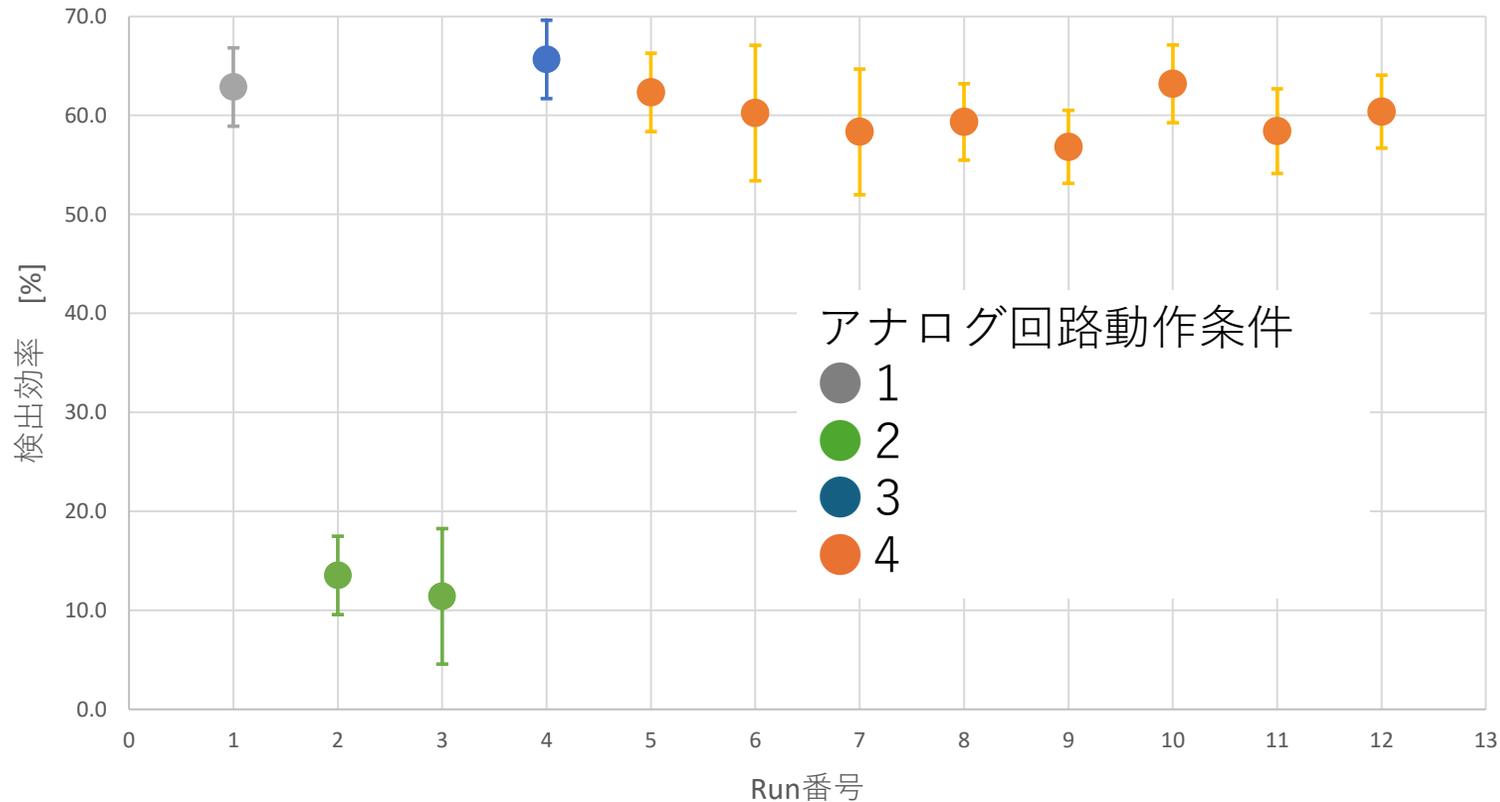
- 分子の条件は外挿した位置とヒット位置の残差分布のmean  $\pm$  3sigmaまでをヒットとしてみなす
- アナログ回路の電圧値を変えつつ12回データ収集を行った

外挿した位置とヒット位置の残差分布



# 結果

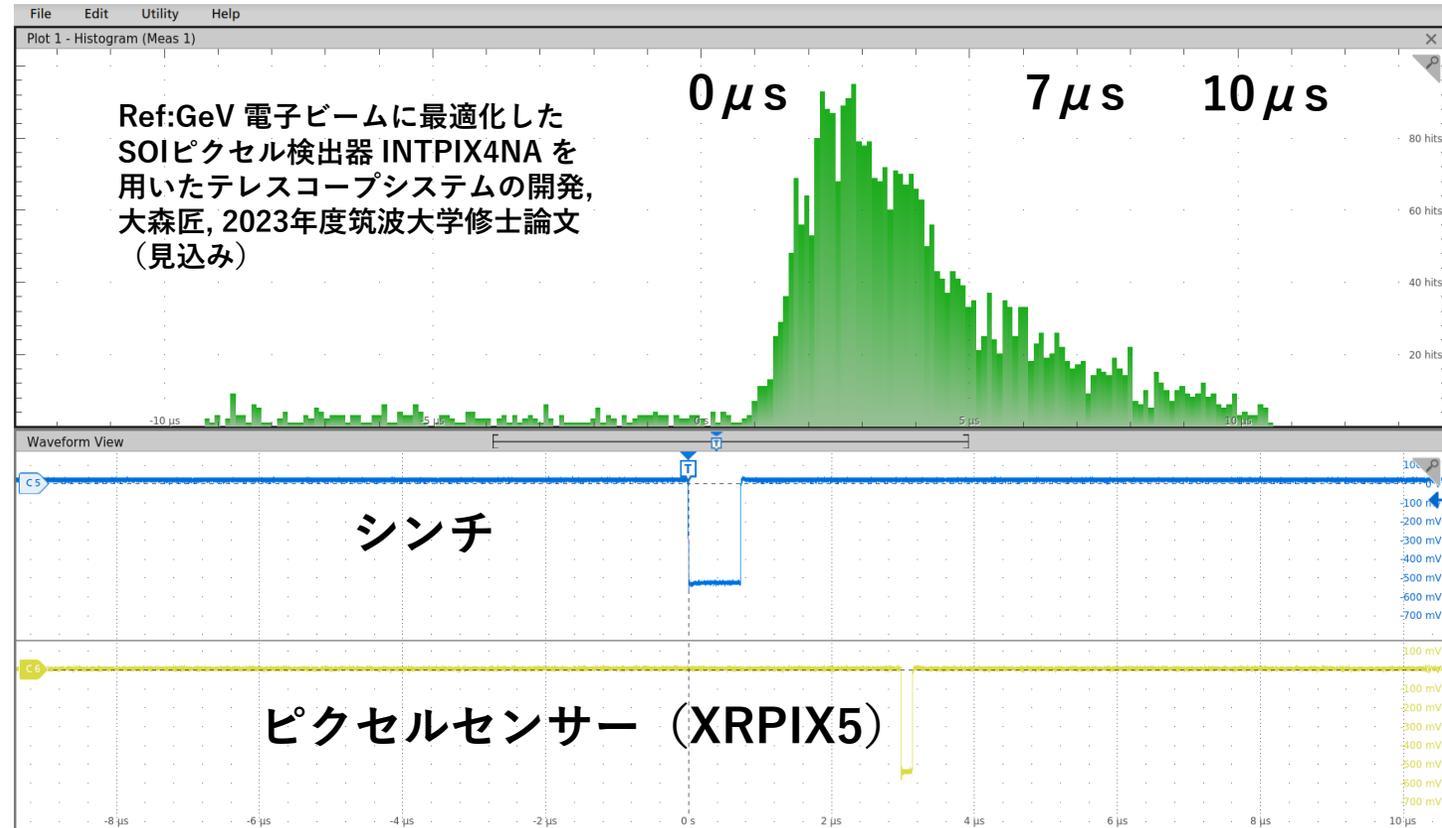
## Run毎の検出効率



- 条件毎の検出効率は誤差の範囲では一致している
- 動作条件2はそれ以外のパラメータと異なり、入力に関わる電圧を低い設定にしていた
- ピクセルの信号電荷収集効率、またはアナログ回路の動作特性が、アナログ部の電圧パラメータ設定に依存している可能性がある
- 検出効率が60%程度の要因の内、約10%はトリガーの遅延が影響していると考えている

# トリガーの遅延

- シンチの上にトリガー用ピクセルセンサー (XRPIX5) を置き、その上からSr<sup>90</sup>を置いた
  - 両者の時間差をオシロスコープで測定
  - 最大で10μsecの遅延があることがわかった
  - DuTiP1は7bit(127クロック目)でコインシデンスを取るため10%くらいは取り漏らしてしまっている
- ※INTPIX4NAは電荷を積分してデータを蓄積する時間を100μsecにしていたのでこの遅延による影響を受けない



# 目次

- **序論**
  - Belle II実験
- **プリシャワー検出器**
  - 構造
  - Geant4でのシミュレーションについて
- **DuTiP**
  - 構造
  - 検出効率について
- **まとめと今後**

# まとめ (1)

- Belle II実験の電磁カロリメーターの性能改良のアイデアとして  $\gamma$  線の到来方向に感度があるプリシャワー検出器を考えている
- プリシャワー検出器はアクティブ吸収層とトラッキング層を1層とした3層から成る構成
- シミュレーション結果からピクセル角 $50\mu\text{m}$ かつバイナリー読み出しで $1000\text{MeV}$ の  $\gamma$  線を入射する場合、約 $40\text{mrad}$ の角度分解能を持つ

# まとめ (2)

- Belle II実験崩壊点検出器のアップグレード向けに開発中のDuTiPセンサーの性能評価を行った
- DuTiPは7bitタイマーを2つ持ち、片方が動作中でももう一方を動作させることが可能であるため高レートにも耐えられる
- 4GeVの電子ビームを入射させるビームテストを行った
- 結果からDuTiPでGeV程度の高エネルギー荷電粒子が検出可能であることがわかった
- 検出効率は先行研究で最適化されたパラメーターで概ね約60%であった
  - トリガー用ピクセルセンサーの遅延の影響が約10%ある
- 検出できていない残りの約30%の原因究明には、アナログ部の電圧設定やピクセル中の電荷収集効率が最適か、さらに調査が必要であると考えている

# 今後

- シミュレーションでは、プリシャワー検出器そのものの性能評価を行ったため、実際にBelle II測定器にインストールしたときの利点や他の検出器への影響を見積る必要がある
- 入射条件（角度・位置）を大きくずらしたときに位置・角度分解能が変わるかどうかにも調べないといけない
- DuTiP1はビームテストの結果から位置分解能を算出する
- アナログ回路のパラメータ設定値、ピクセルの構造に依存する信号電荷収集効率について、さらに詳しく検討する必要があることが示唆された

# Back Up

---