

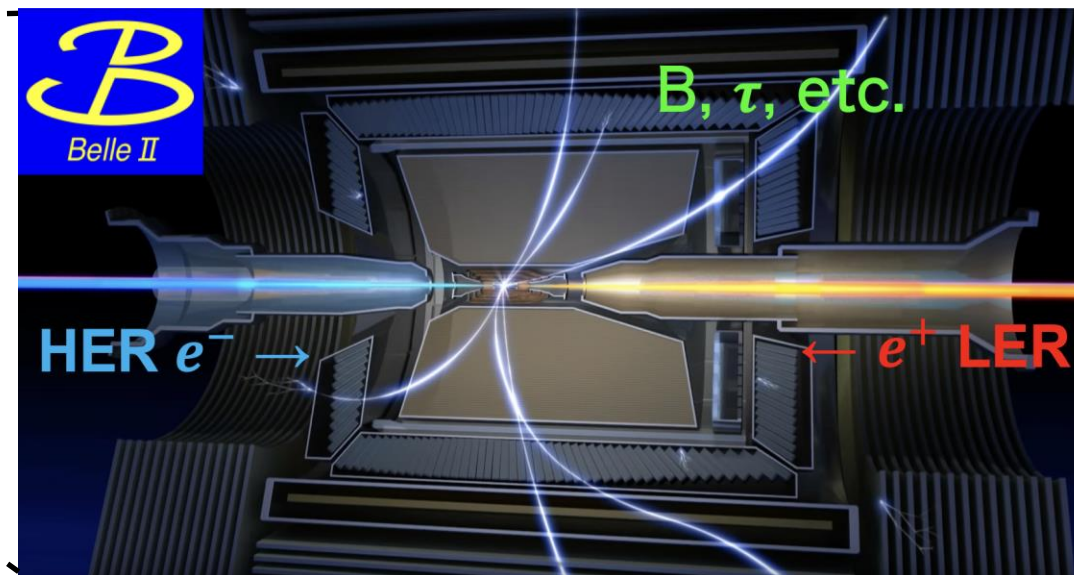
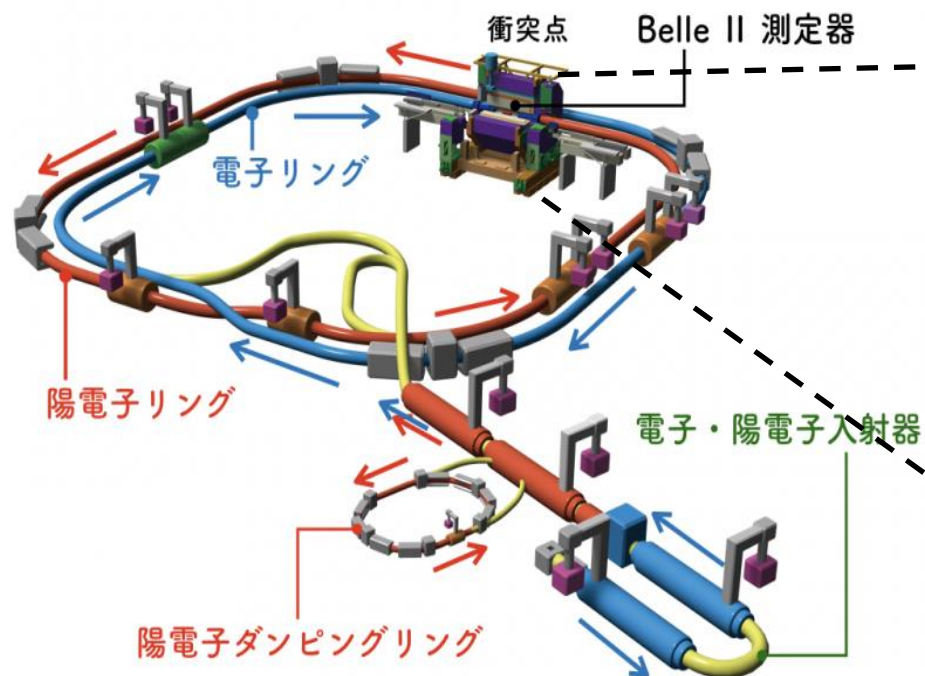
Belle II 実験アップグレード用 SOIピクセルセンサーDuTiPの性能評価

奈良女子大学大学院
人間文化総合科学研究科数物科学専攻
高エネルギー物理学研究室
修士2年 尾崎恵美

2026/2/18
修士論文審査会

Belle II 実験

茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構で行われている電子・陽電子衝突実験



- SuperKEKB 加速器とBelle II 測定器で構成
- 衝突によって生成する B 中間子やタウレプトンの崩壊を Belle II 測定器で測定することで粒子・反粒子の対称性の破れや新しい物理法則を探索

Belle II 測定器

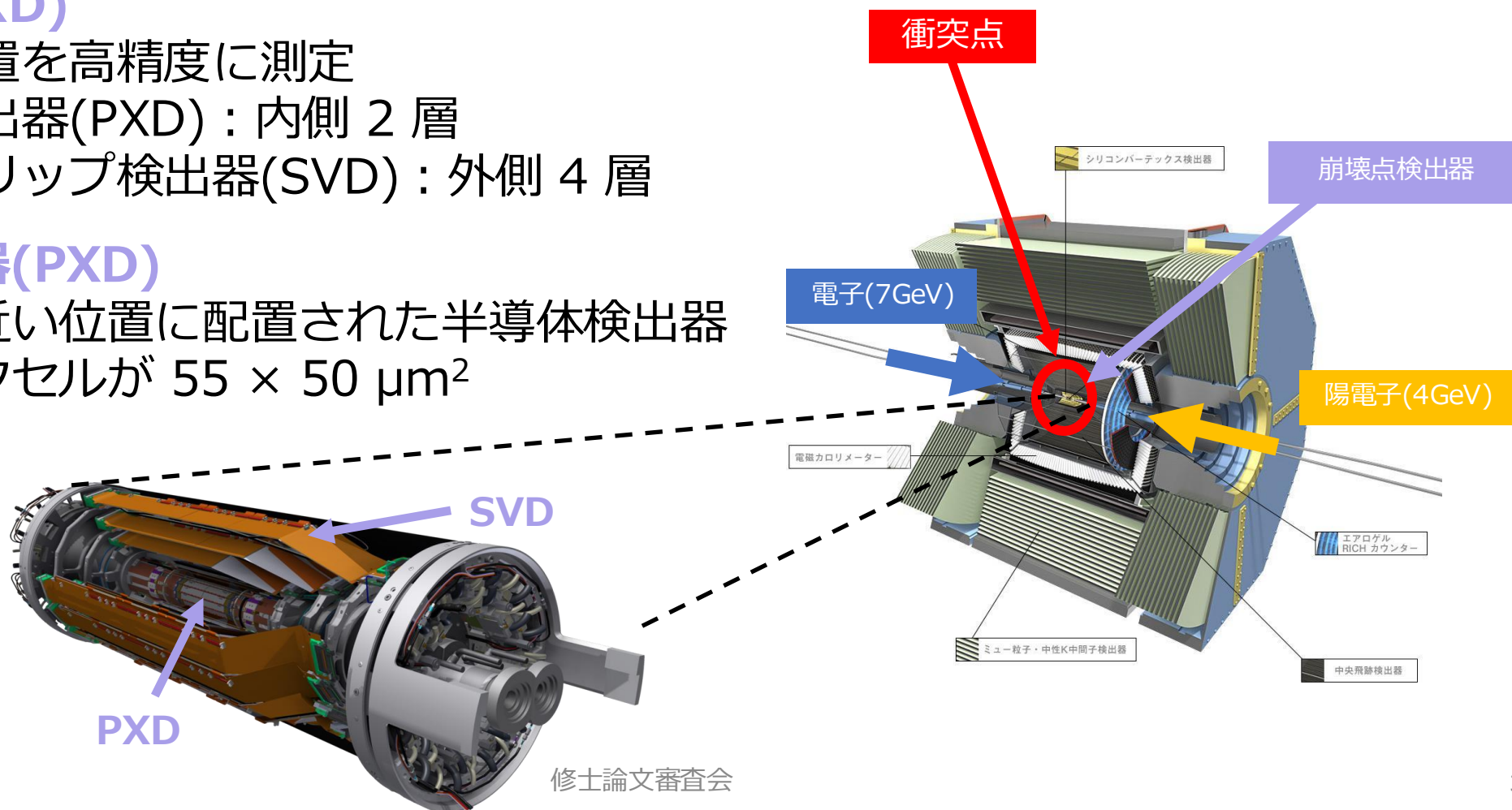
- 衝突点を覆うように役割の異なる複数の検出器で構成

崩壊点検出器(VXD)

- 粒子の崩壊位置を高精度に測定
- ピクセル型検出器(PXD)：内側 2 層
- シリコンストリップ検出器(SVD)：外側 4 層

ピクセル型検出器(PXD)

- 崩壊点に最も近い位置に配置された半導体検出器
- 最も小さいピクセルが $55 \times 50 \mu\text{m}^2$



SuperKEKB アップグレードと PXD

SuperKEKBアップグレード

- 高統計データ取得にはルミノシティ向上が必須
- 目標瞬間ルミノシティ : $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

→物理事象の増加に伴い、ビームバックグラウンドも増大

PXD(ピクセル型検出器)

- 衝突点から1.4 cm の位置に設置されており、バックグラウンドによる大量のヒットを検出

→最大予想ヒットレート120 MHz/cm²

PXDアップグレードの要求性能

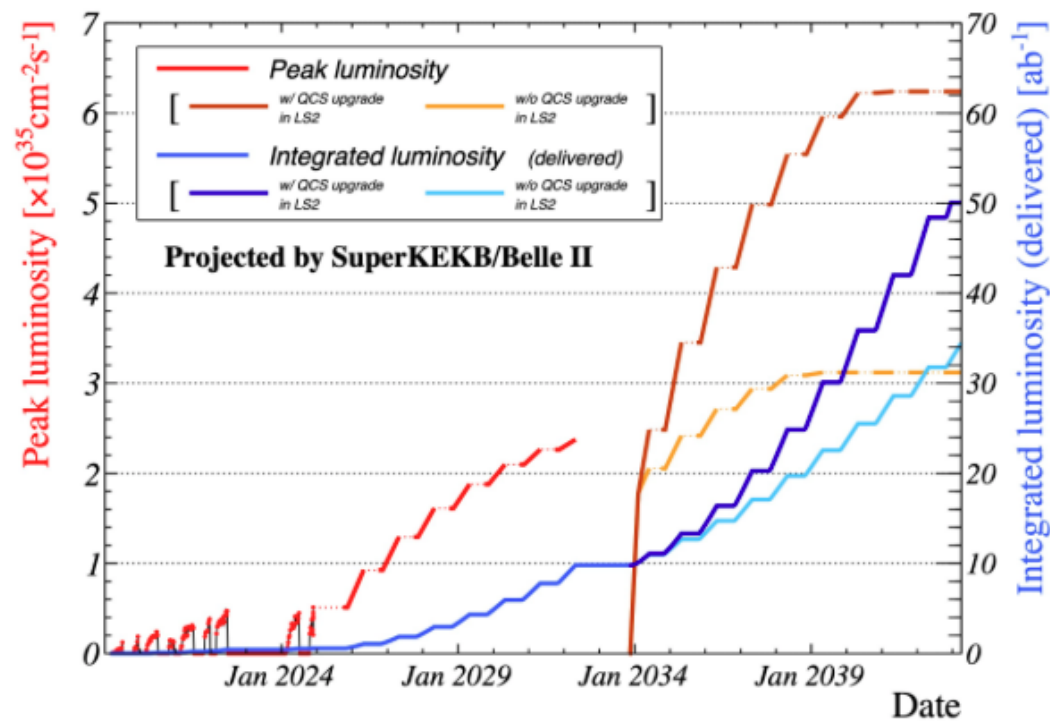
- 位置分解能 < 15 μm
- 物質厚:0.1% X_0/layer ($\sim$ Si 50 μm 厚)
- 時間分解能 < 100 ns
- トリガーレイテンシ 5-10 μs 中のヒット保持
- トリガーレート : 50 kHz

物理事象数

$$N = \sigma \int L dt$$

生成断面積

ルミノシティ



LS2 : 2032~2033

Dual Timer Pixel (DuTiP)

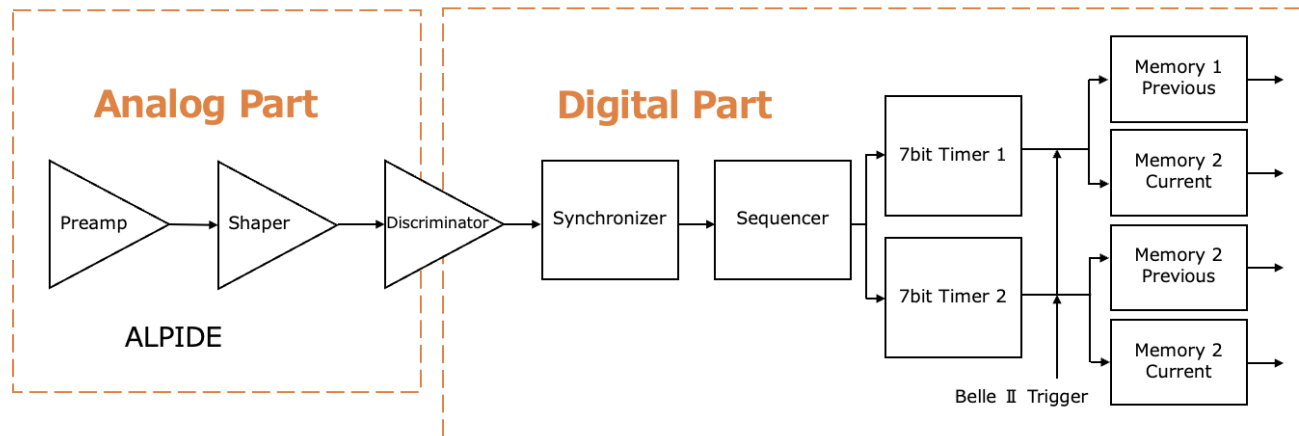
崩壊点検出器向けに開発中の SOI ピクセル検出器

- SOI：センサ層と回路層を単一シリコン基板上に形成するモノリシック技術

DuTiP の主な特徴

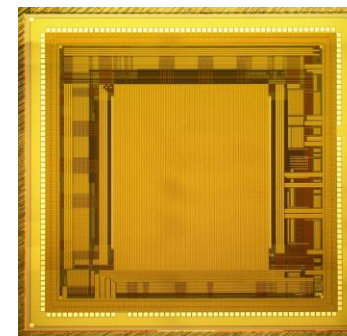
- 2系統の独立したタイマーを各ピクセルに搭載
 - 時間的に近接した2つのヒットを分離して検出可能
- タイマー仕様
 - カウンタ：7bit幅（127カウント目で外部トリガーとコインシデンスを取る）
 - 分解能：16MHzで動作（=62.5 ns の時間分解能）

ピクセル回路



修士論文審査会

試作チップのDuTiP1で要素技術の検証を進めている



チップサイズ	6.0mm × 6.0mm
有感領域	2.7mm × 2.7mm
ピクセルサイズ	45μm × 45μm
ピクセル数	64×64
厚み	310μm
読み出し方法	バイナリー

DuTiP1 仕様

研究目的

DuTiP1 の荷電粒子通過に対する性能を評価する

本研究における性能評価の流れ

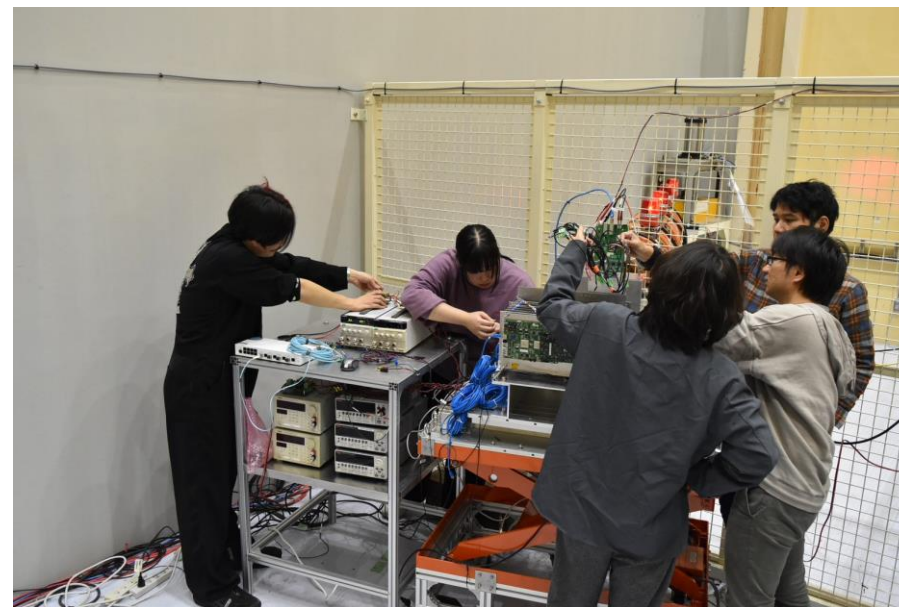
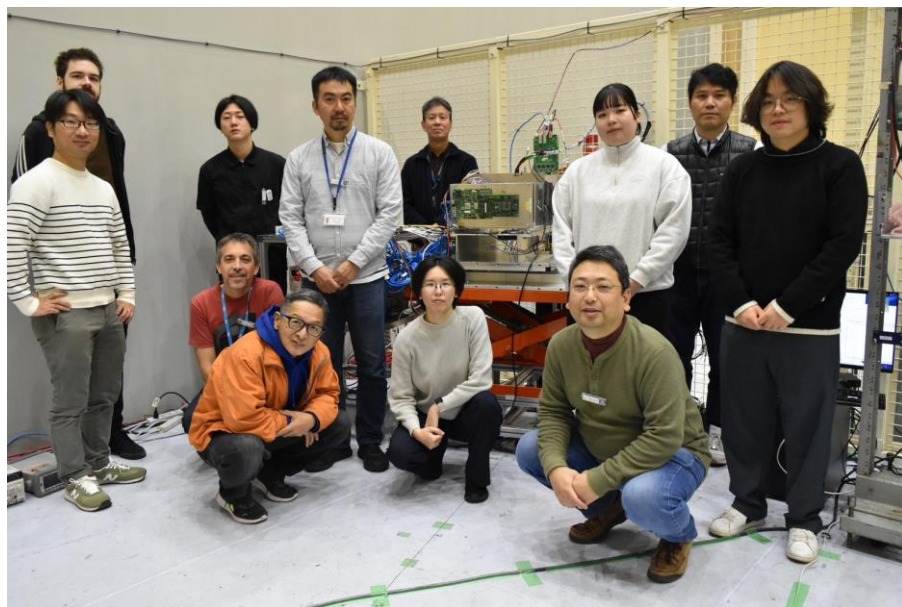
1. テストビーム実験による性能評価

- 位置分解能
- 検出効率
- テストビーム実験で観測されたNoisy / Silent ピクセルの検証

2. 赤外線レーザーによる性能評価

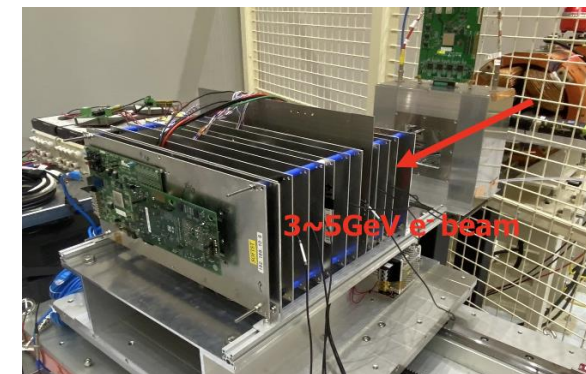
- 検出効率のピクセル内位置依存性の評価

テストビーム実験



テストビーム実験セットアップ

5 GeV 電子ビーム試験 @ KEK PF-AR テストビームライン

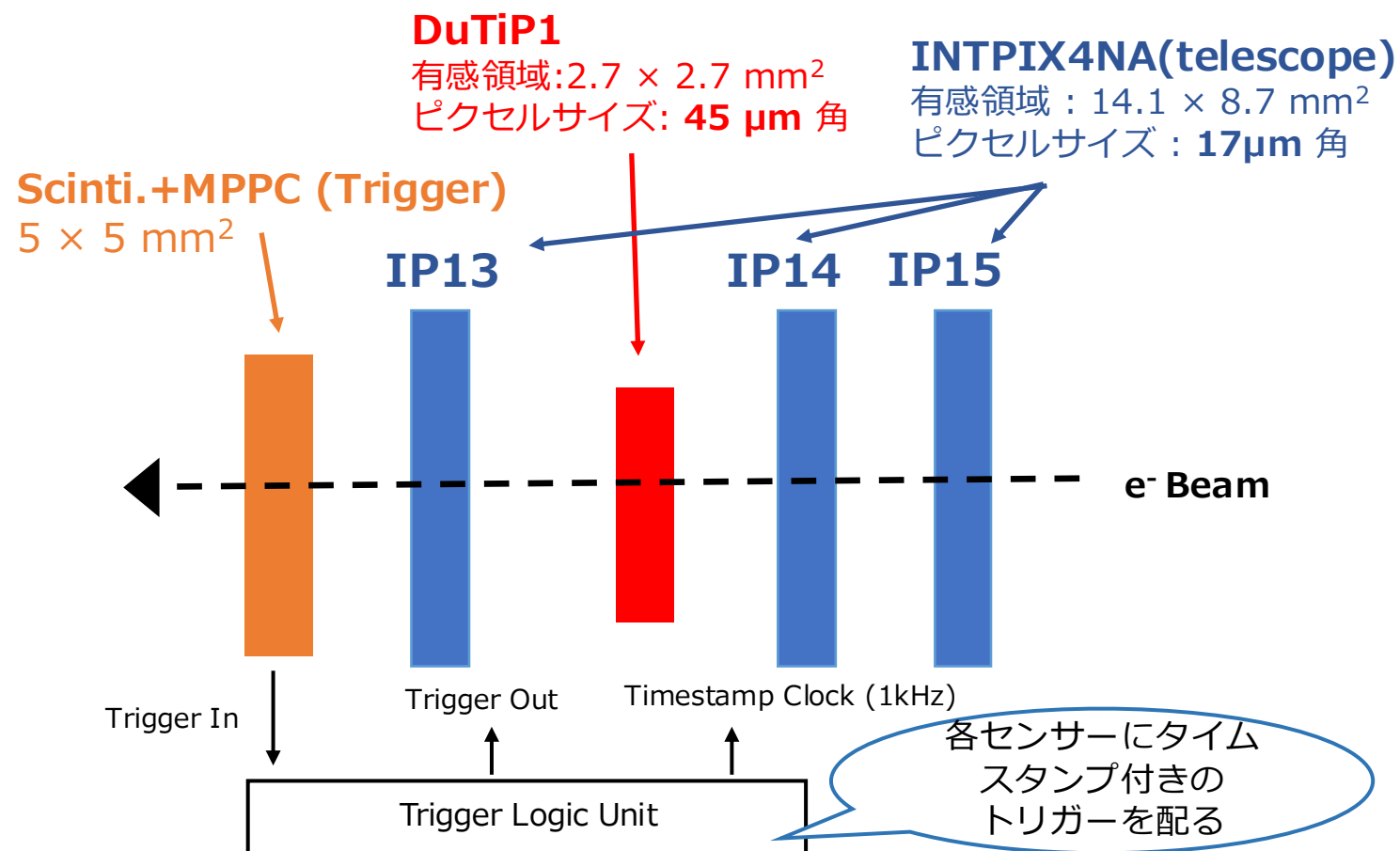


テレスコープ構成

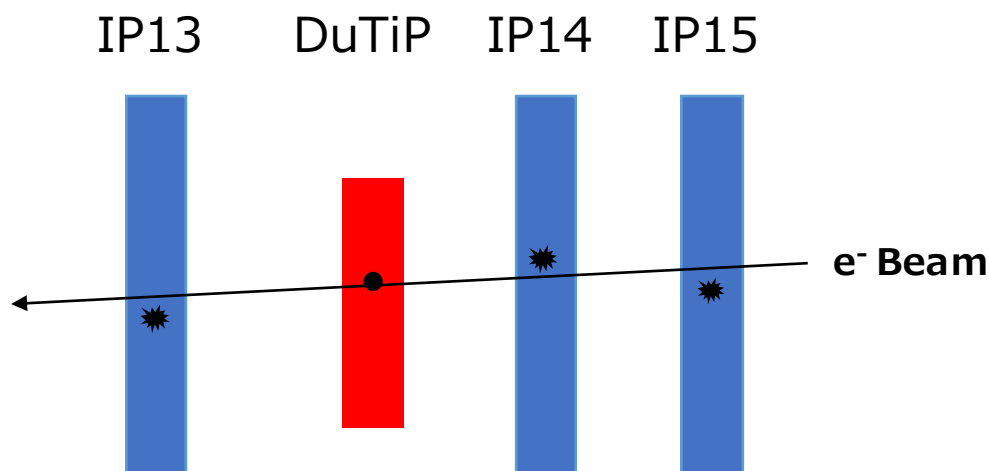
- テレスコープ：複数の検出器により評価対象 (DuTiP1) への粒子入射位置を高精度に測定
- INTPIX センサーで構成したテレスコープを用いて飛跡を再構成
- ビーム最下流のシンチレーターでトリガー生成

データ同期

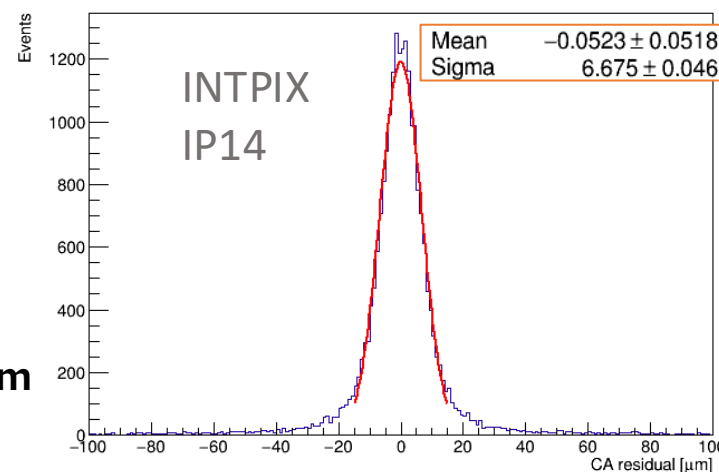
- TLU を介した全検出器のイベント同期 (共通トリガー・タイムスタンプ 配布)



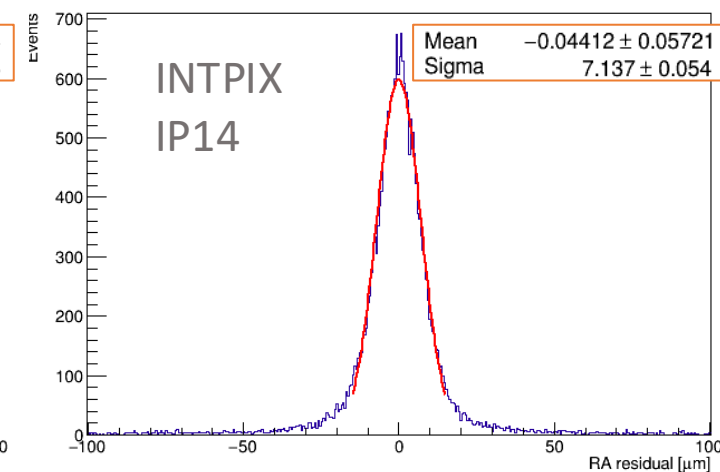
飛跡再構成方法



垂直方向 Residual 分布



水平方向 Residual 分布

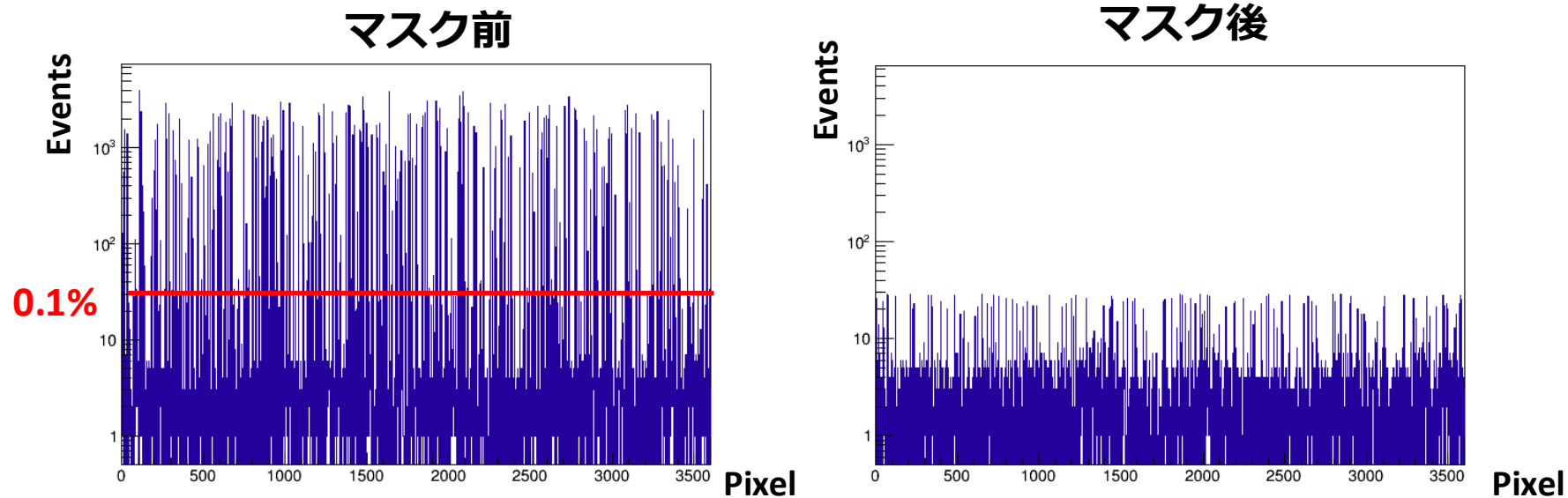


Residual = ヒット位置 - 再構成トラック位置

- DuTiP の上流 2 枚および下流 1 枚に配置した INTPIX のヒット位置を一次関数でフィットし、飛跡を再構成
- 再構成したトラックを DuTiP 位置に内挿
- INTPIX間残差 ($\sigma \doteq 7 \mu\text{m}$) をトラックの位置分解能と仮定
- このトラックを基準として、DuTiP の位置分解能および検出効率を評価

DuTiP1で観測されたノイジーピクセル

テストビーム実験において、期待されるレートを大きく超えてヒットするピクセルが存在
→ ノイジーピクセルを特定して除外したい

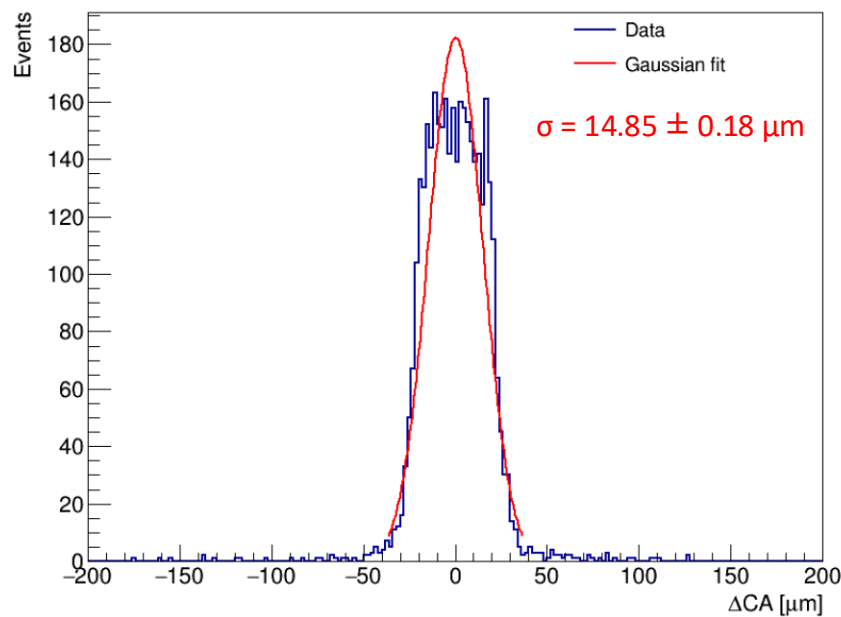


- 電子が最大4ピクセルでヒットすると仮定すると、1イベントあたりの占有率の上限は
$$\frac{4}{60 \times 60 \text{ pixel}} \doteq 0.1 \%$$
- 各 Run で、占有率 0.1% を超えるピクセルをノイジーピクセルとしてマスク
- これらピクセルは DuTiP ヒットリストから除外し、内挿したトラック位置が該当ピクセル上にあるイベントも解析から除外

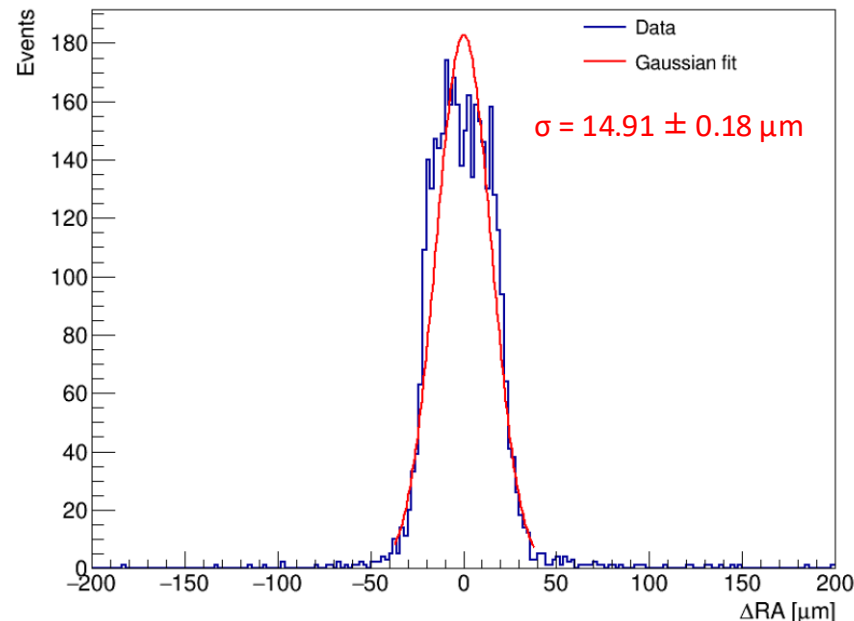
結果 – 位置分解能

再構成したトラックをDuTiP1位置に内挿し、実際のヒット位置との差を評価した

垂直方向 Residual 分布



水平方向 Residual 分布



- $\sigma_{res} = \sqrt{\sigma_{dut}^2 + \sigma_{trk}^2}$
- $\sigma_{trk} \sim 7 \mu m$ 、 $\sigma_{res} \sim 15 \mu m$ より位置分解能 $\sigma_{dut} \sim \sqrt{15^2 - 7^2} \sim 13.2 \pm 0.2 \mu m$
Belle II PXD アップグレードで要求される位置分解能（15 μm 以下）を達成

検出効率の算出方法

$$\text{検出効率} = \frac{\text{DuTiP上でヒットが検出されたイベント数}}{\text{トラックがDuTiPの有感領域内に存在したイベント数}}$$

分母の条件

- トラック位置がDuTiPの有感領域の端から200 μm 内側にあること
- ノイジーピクセル位置に対応するトラックを除外

分子の条件

- 分母条件を満たすイベントのうち、トラック位置から3 σ_{res} 以内にヒットが存在すること

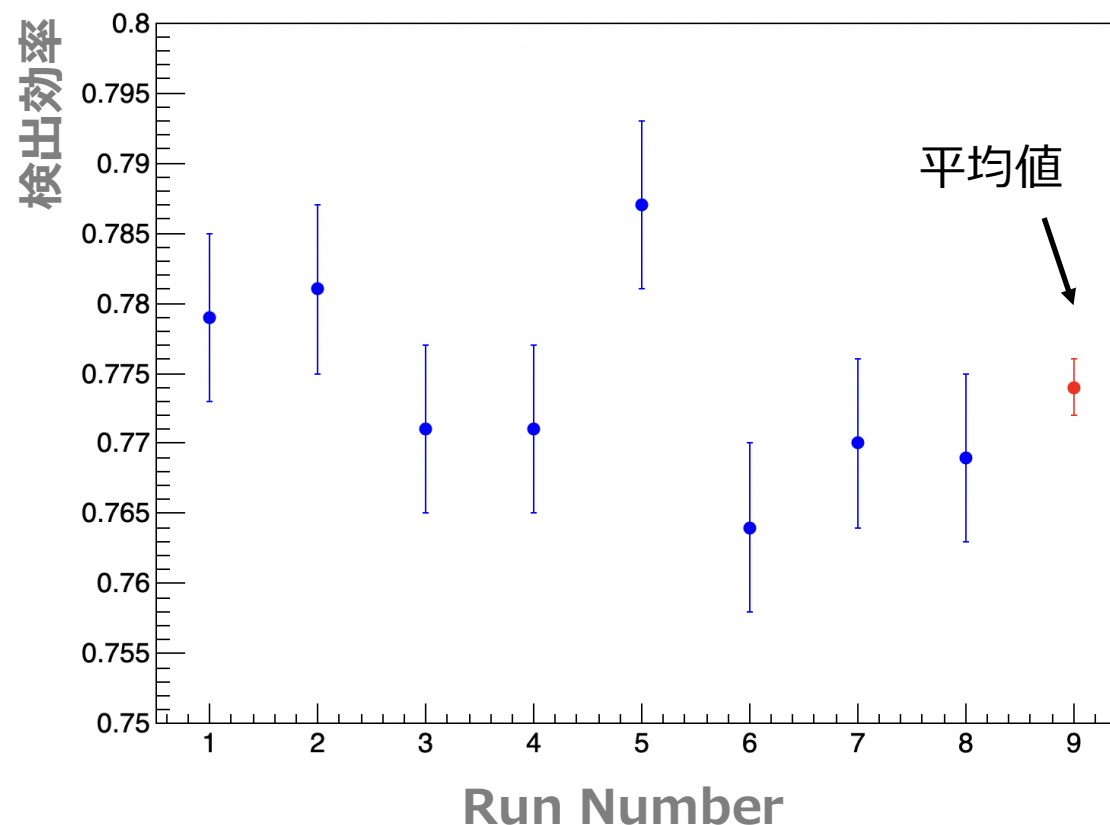
イベント選択の流れ(代表的な Run の例)

条件	イベント数
1. 取得トリガー数	30000
2. 全センサーでタイムスタンプ一致	25000
3. トラック再構成成功イベント数	25000
4. 分母の条件を満たすイベント数	4556
5. 分子の条件を満たすイベント数	3548
検出効率 = 5/4	0.778 $\pm$ 0.006

結果 – 検出効率

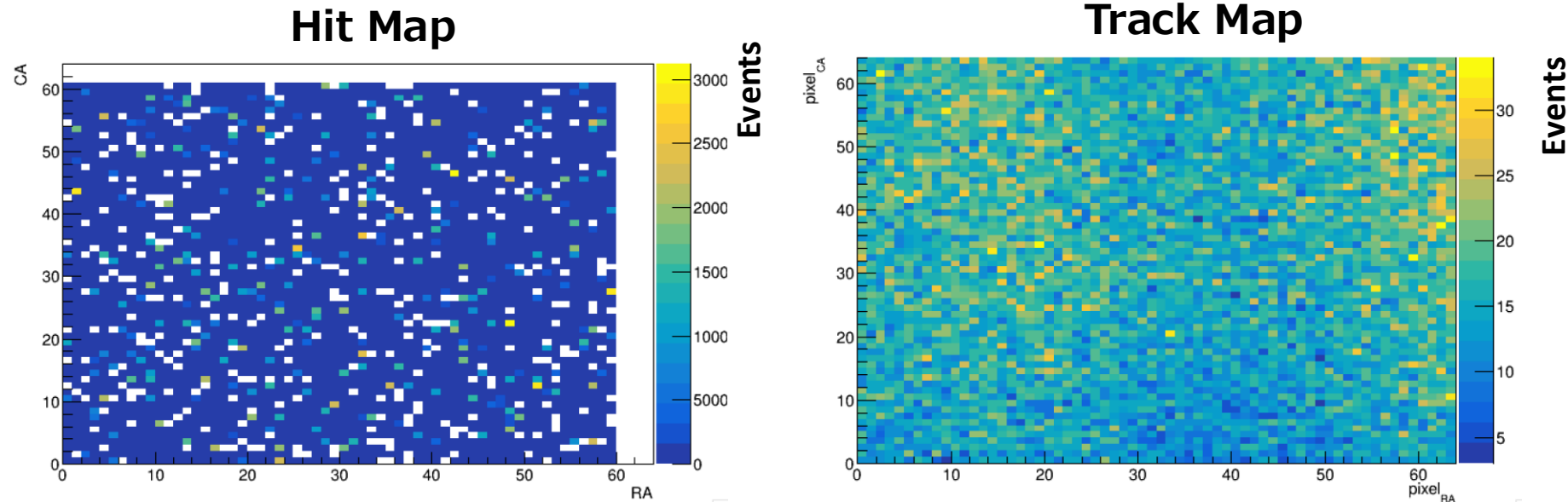
解析に用いたデータの条件

- ビームエネルギー：5GeV 電子
 - トリガー：シンチレータ
 - HV： -150 V (空乏化条件)
 - 1 Run あたり 30000イベント
- 先行研究において比較的良好な検出効率を示したアンプの供給電圧パラメータで取得した合計 8 Run を解析した
 - 検出効率は平均で $77.4 \pm 0.6\%$ であった
- ⇒ ヒット検出を 2 割損失させた要因は？



考察 – Hit Map と Track Map の比較

- 8 Run 合計 24 万トリガー分の Hit Map と Track Map を比較
- Hit map でエントリー 0 のピクセル (= silent pixel) が約 1 割存在



- シンチレータとの面積比より、約 8 万個の電子が DuTiP を通過したと推定
- 一様に入射すると仮定すると、あるピクセルにヒットが 1 度も記録されない確率は

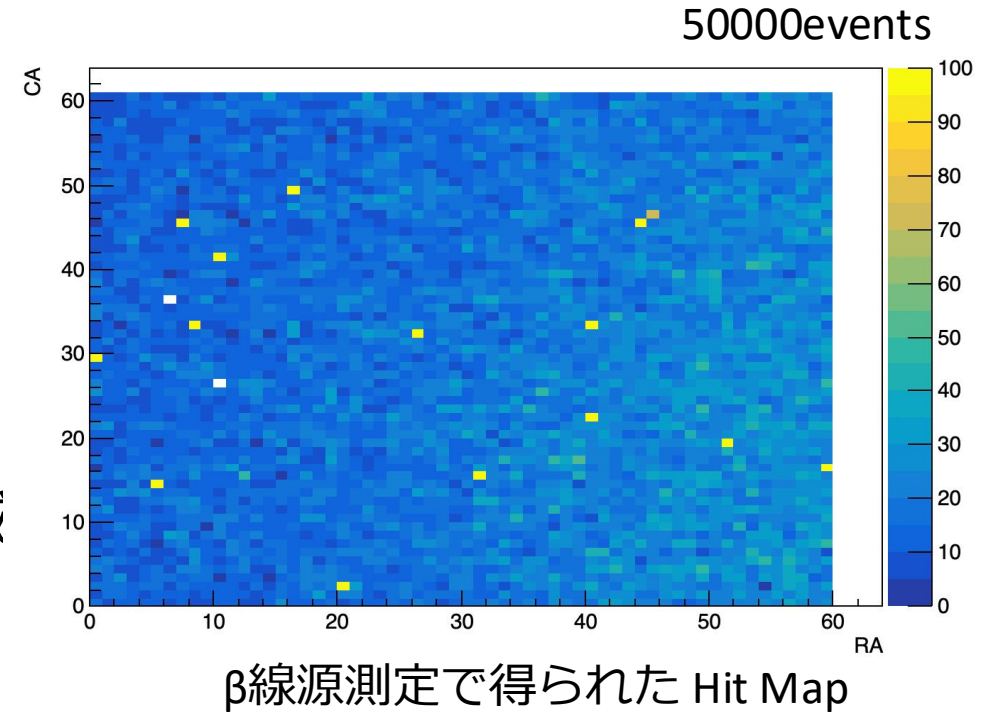
$$\left(1 - \frac{1}{3600}\right)^{80000} = 2.2 \times 10^{-8} \approx 0 \%$$

→正常に応答していないピクセルが約1割存在した可能性が示唆される

テストビーム実験およびその後の検証

実験から明らかになった点

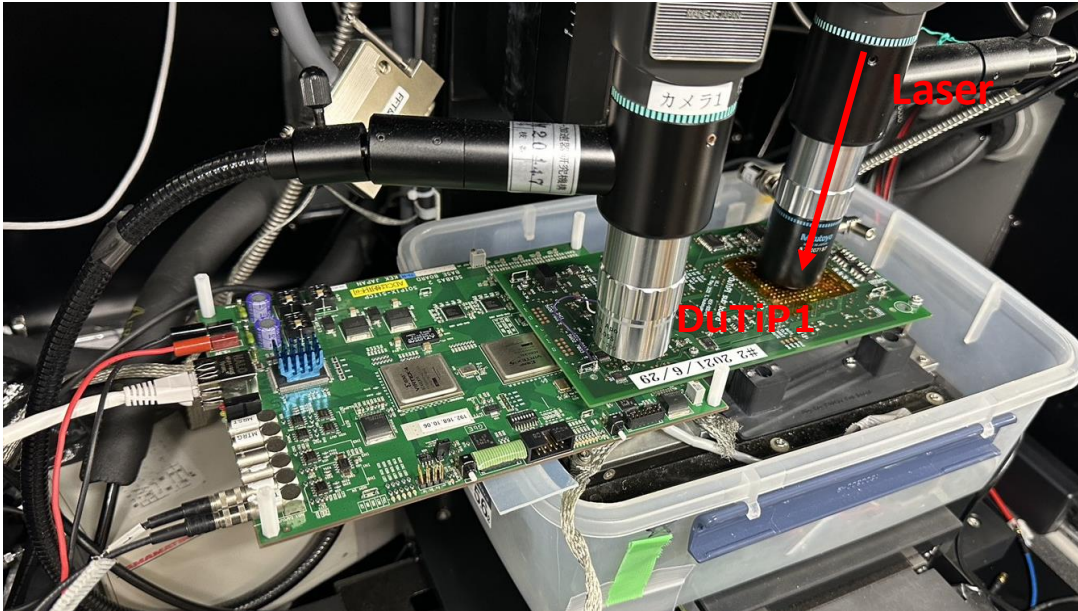
- 検出効率は $77.4 \pm 0.6\%$ であった
- チップ全体の約 12% に Noisy pixel が存在し、Silent pixel が約 10% 存在した
- テストビーム実験後に、 β 線源を用いて DuTiP1の応答を確認した結果、これらNoisy / Silent pixel は再現されず、妥当なレートでヒットが検出された
- 再現性のない Noisy / Silent pixel を除いた有感領域 (約 80 %) に対して検出効率を算出した結果、
約 84 %となった
- 残る16%の効率低下の要因を明らかにするため、赤外線レーザーによる検出効率の位置依存性評価を行った



赤外線レーザーによる検出効率の評価

赤外線レーザーを用いた検出効率評価

- スポットサイズ $2\mu\text{m}$ 角の赤外線レーザーを用いて、ピクセル内、境界をスキャン
- 照射位置は約 $0.1\mu\text{m}$ の精度で制御可能であり、テストビームにおけるトラックの位置分解能($\sigma_{trk} \sim 7\mu\text{m}$)では観測できない位置依存性の評価が可能



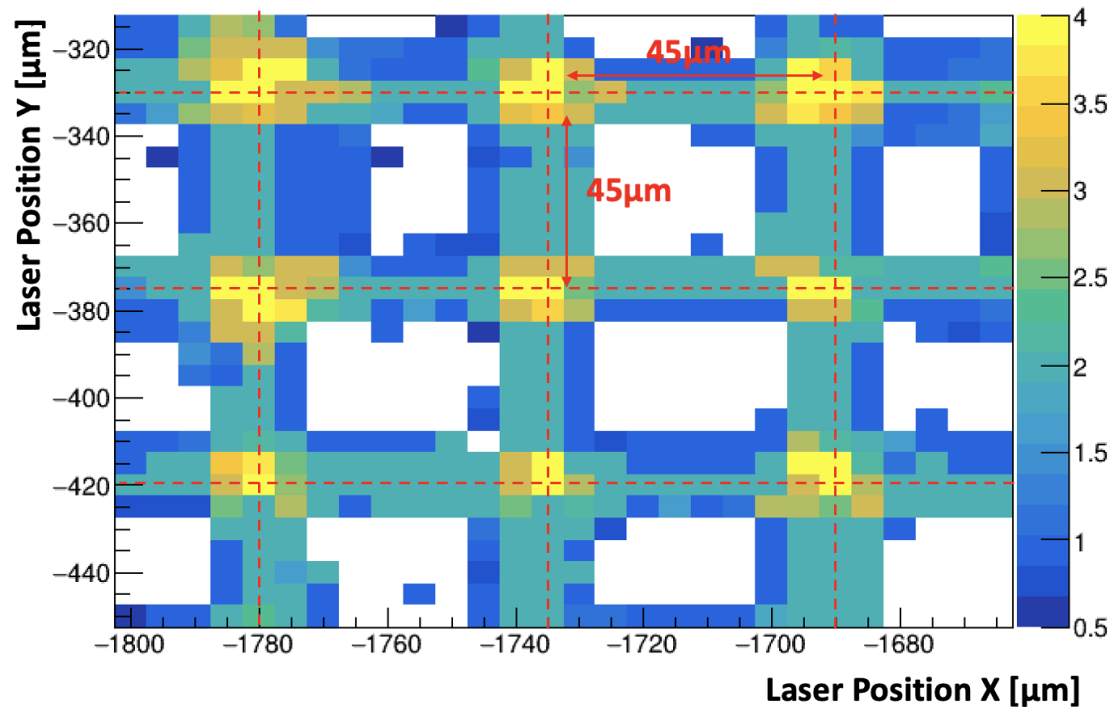
- 1064nm 赤外線レーザー
- レーザーの光量はINTPIXを用いて生成電荷量を評価し、荷電粒子通過時のエネルギー損失と等価となるよう調整した。
- HV : -150 V

- 1 照射位置につき200回レーザーを照射
- 検出効率の算出方法

$$\text{検出効率} = \frac{\text{ヒット数}}{\text{入力したレーザーの数}}$$

赤外線レーザーを用いた検出効率評価

- 照射位置を $5\text{ }\mu\text{m}$ ずつ移動したときの検出効率を平均クラスタサイズで評価
 - クラスタ：隣り合うピクセルで検出されたヒットをまとめたもの



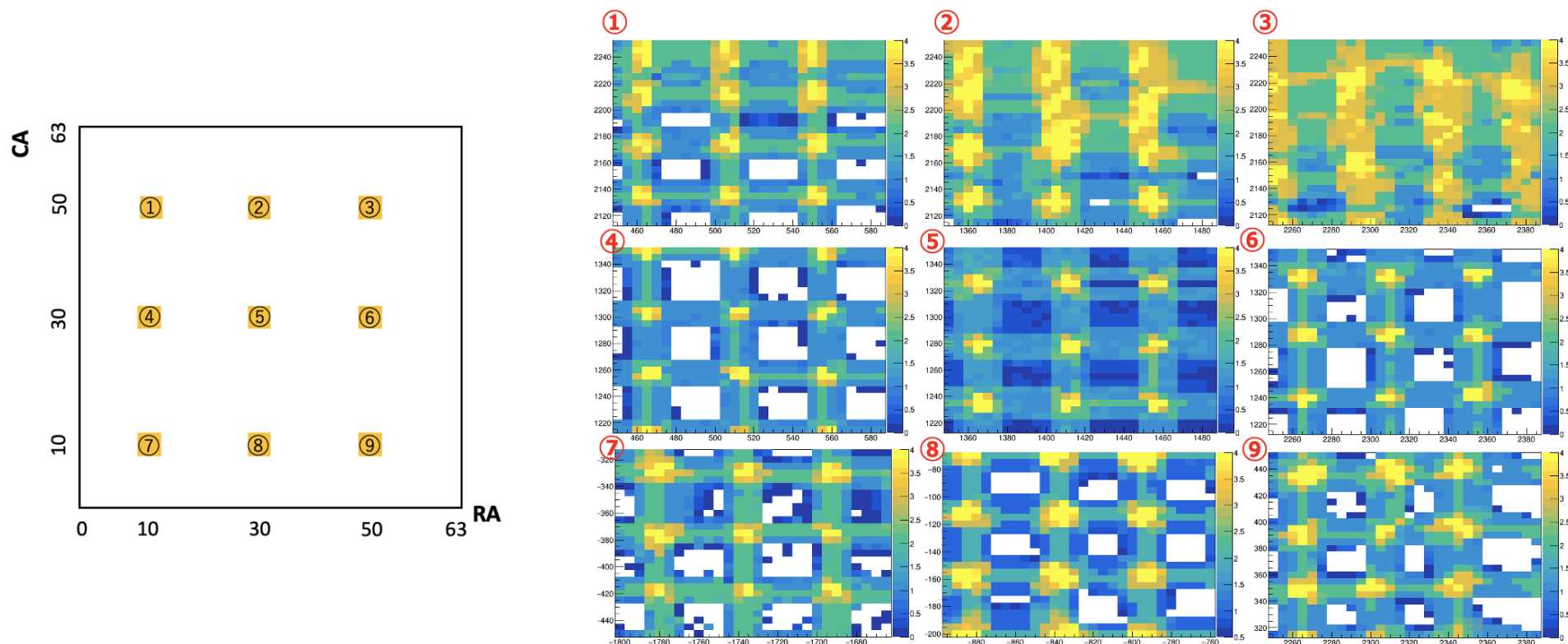
クラスタサイズの平均が

- 1 のとき：1 ピクセルで検出効率 100%
- 2 のとき：隣り合う 2 ピクセルで検出効率 100%
- 1.5 のとき：隣り合う 2 ピクセルでヒットを検出しているが、片方が 50%
- 1未満: 1ピクセルでの検出効率が100%未満
- 0のとき：200 回照射で 1 度もヒットなし
境界に入射した際に複数のピクセルでヒット検出している

- ピクセル内の感度不均一性の可視化に成功
- ピクセル中央部に検出効率が著しく低下する領域が存在する

ピクセル内不感領域の評価

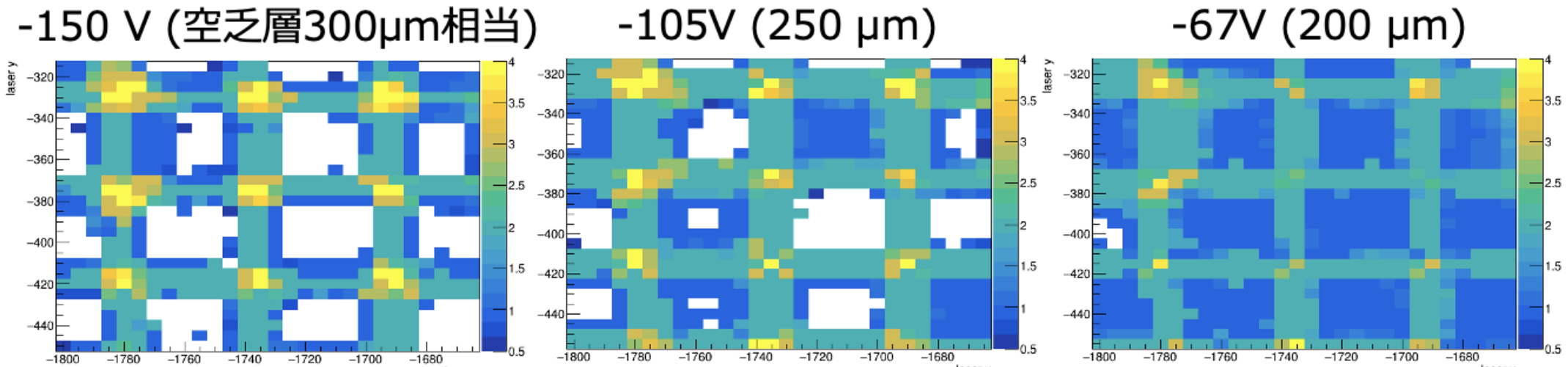
チップ内の9箇所において3×3ピクセルのサンプリング測定を行った



- 有感領域内において平均クラスタサイズが 0 となる不感領域の割合は**13.8%**であった
- ビームテストで観測された効率損失は約16% であり、効率低下の主要因がピクセル内不感領域であることを示唆する

バイアス電圧依存性

生成電荷量がピクセル応答に与える影響を調べるため、同一照射領域で、バイアス電圧を -150 V から 段階的に変化させて測定した



- バイアス電圧を下げて空乏層を狭くするにつれて、ピクセル中心付近の不感領域が縮小し、検出効率が回復した
- DuTiP1 は 300 μm 厚で製作
- ALPIDE アンプは最終目標の 50 μm 厚を想定した設計
→ 過剰な量の信号電荷によりアンプが正常に動作してないことが考えられる

まとめと展望

Belle II 崩壊点検出器向けに開発された DuTiP の性能評価を行った

5GeVの電子ビームを入射させるテストの結果

- 位置分解能は $13.2 \pm 0.2 \mu\text{m}$ であり、要求性能 (15 μm 以下) を達成
- 有効領域における検出効率は約 84%
- 残る 16% のヒット損失の原因解明のため、赤外線レーザーによる位置依存性評価を行った

赤外線レーザーを用いた検出効率の評価

- ピクセル内不感領域は 13.8 %
- この値はビームテストにおけるヒット欠損 (16%) と近く、ピクセル中央部の不感領域が検出効率低下の主要因であることを特定した

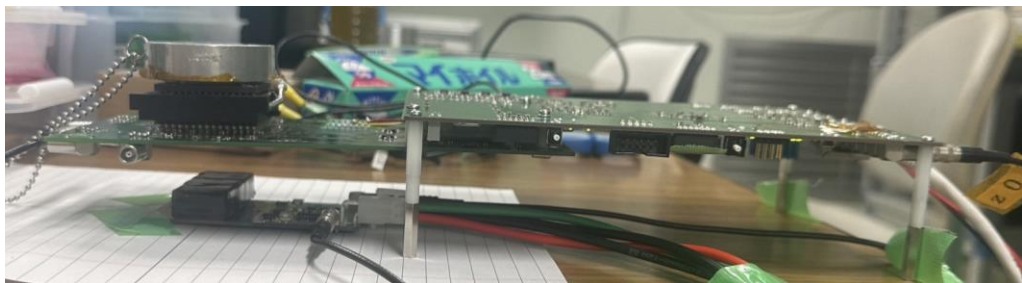
今後

- 薄化したセンサーでの試験
- ALPIDEアンプに供給する電圧セットの最適化

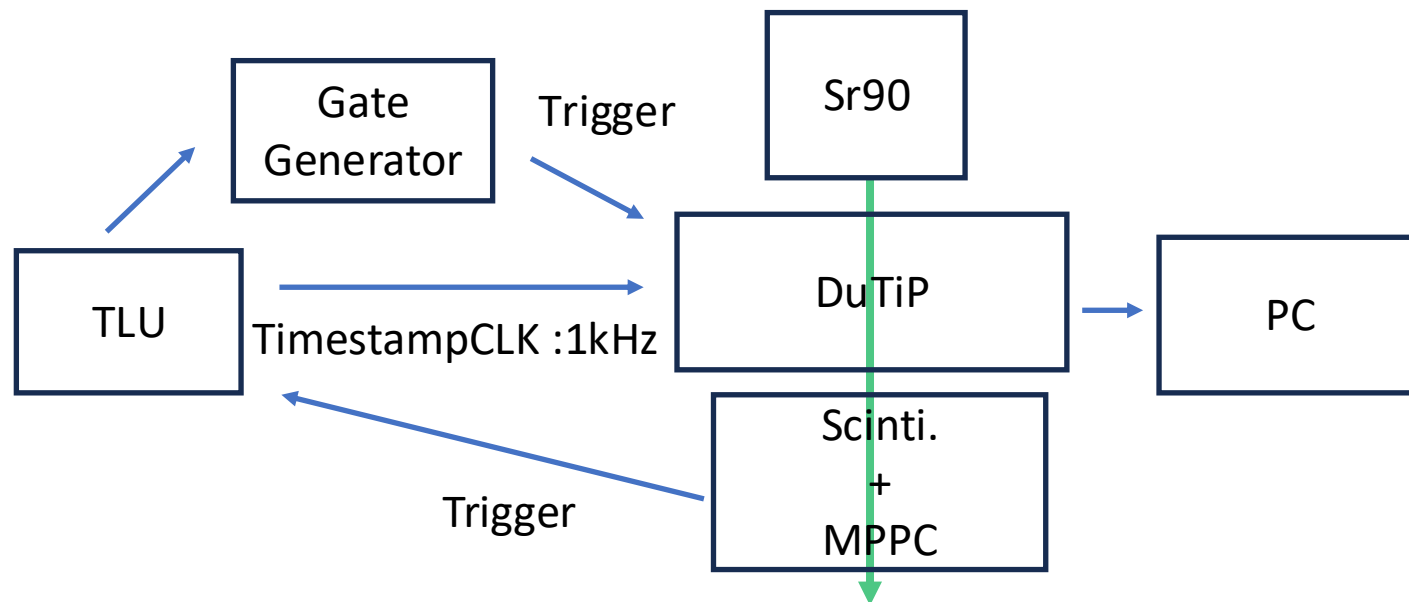
BACK UP

β線テスト

ビームテスト後に、
β線源を用いた評価試験を行った

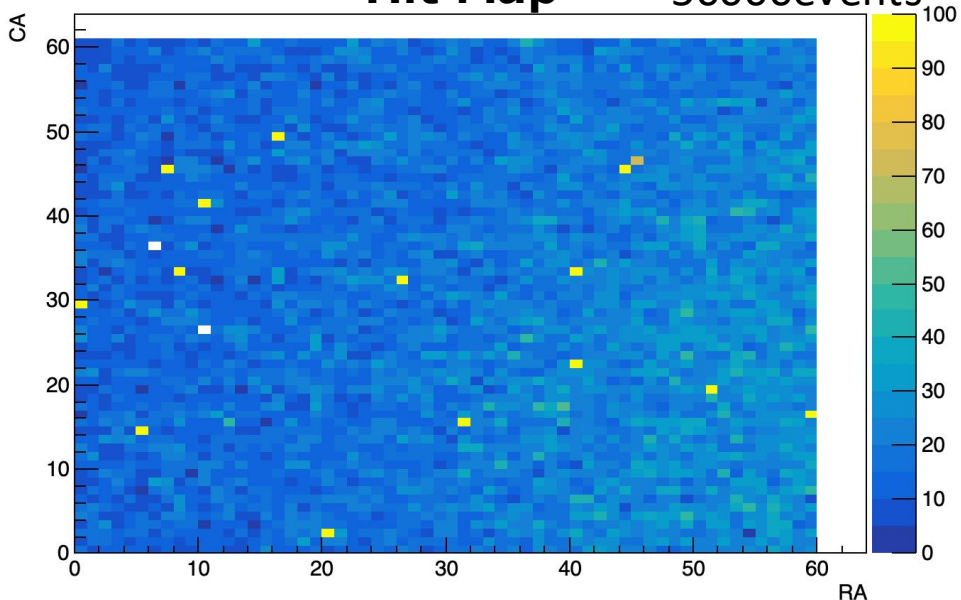


セットアップ



Hit Map

50000events

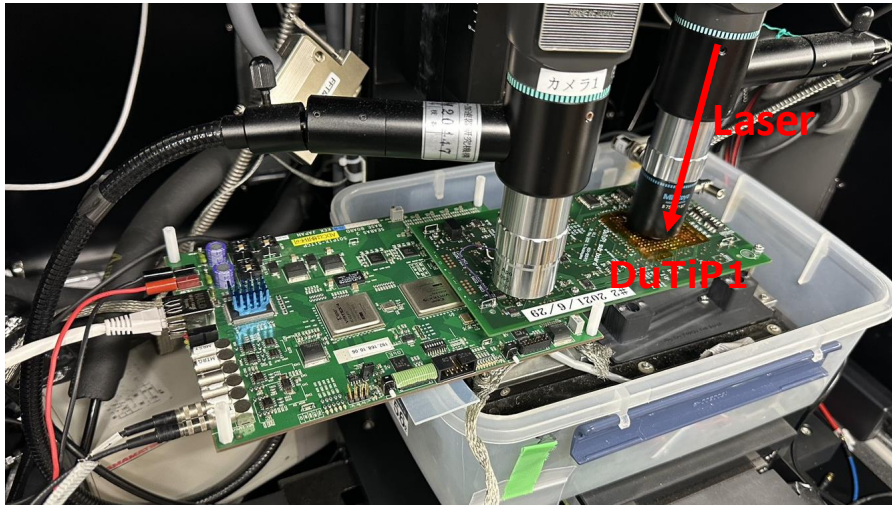


- 2ピクセルを除き、全ピクセルでヒットを検出した
- ノイジーピクセル数もビームテスト時と比較して大幅に少なかった(ビームテスト時は約1割のピクセルをマスク)
- ビームテスト時に見られたの異常は再現されなかった
- したがって、ビームテスト時の低効率の一因は、センサー固有の故障ではなく、ビーム環境または読み出し条件に起因する可能性が高い

赤外線レーザーを用いた検出効率評価

- スポットサイズ $2\mu\text{m}$ 角の赤外線レーザーを照射し、照射位置に対する検出効率の変化を測定した。
- 照射位置は約 $0.1\ \mu\text{m}$ の精度で制御可能であり、テストビームにおけるトラック分解能($\sigma_{trk} \sim 7\mu\text{m}$)では観測できない位置依存性の評価が可能である。

照射位置を $5\ \mu\text{m}$ ずつ移動したときの検出効率

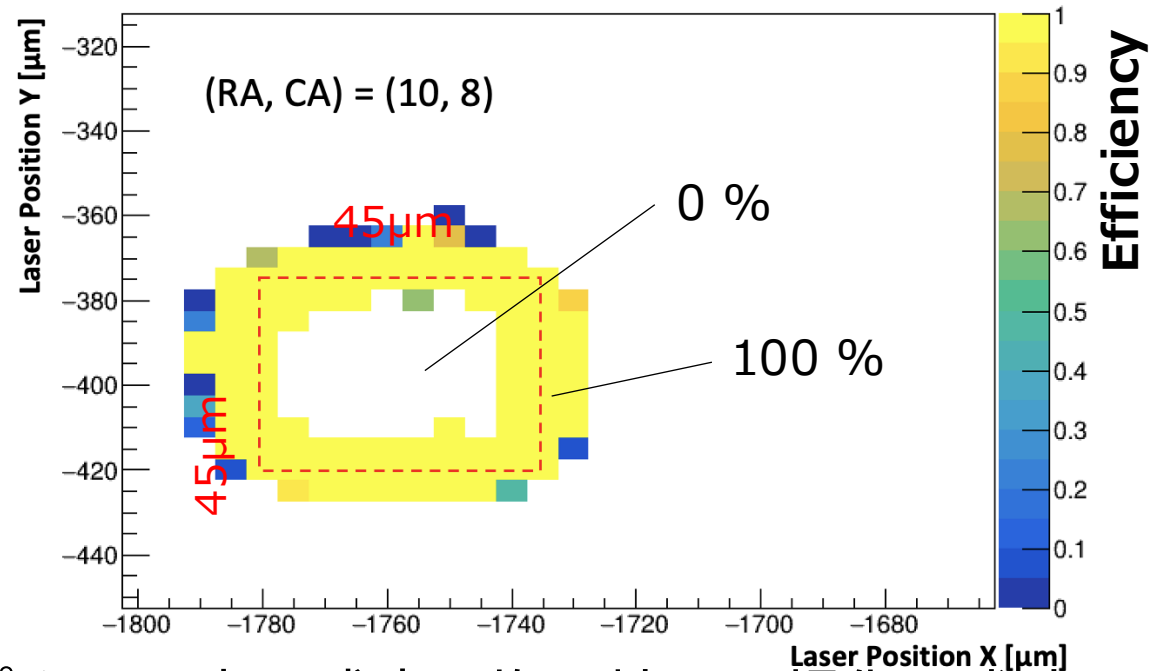


1064nm赤外線レーザー

Laser spot : $2\mu\text{m}$ 角

レーザーの光量はINTPIXを用いて生成電荷量を評価し、荷電粒子通過時のエネルギー損失と等価となるよう調整した。

HV : -150V

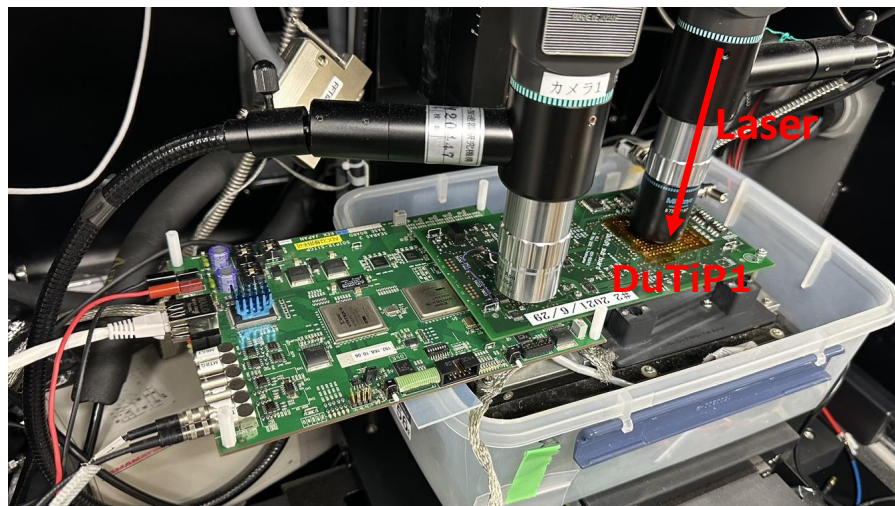


- ピクセル内の感度不均一性の可視化に成功
- ピクセル中央部に検出効率が著しく低下する領域が存在する

赤外線レーザーを用いた検出効率評価

- スポットサイズ $2\mu\text{m}$ 角の赤外線レーザーを照射し、照射位置に対する検出効率の変化を測定した。
- 照射位置は約 $0.1\ \mu\text{m}$ の精度で制御可能であり、テストビームにおけるトラック分解能($\sigma_{trk} \sim 7\mu\text{m}$)では観測できない位置依存性の評価が可能である。

照射位置を $5\ \mu\text{m}$ ずつ移動したときの検出効率 (3×3 ピクセル)

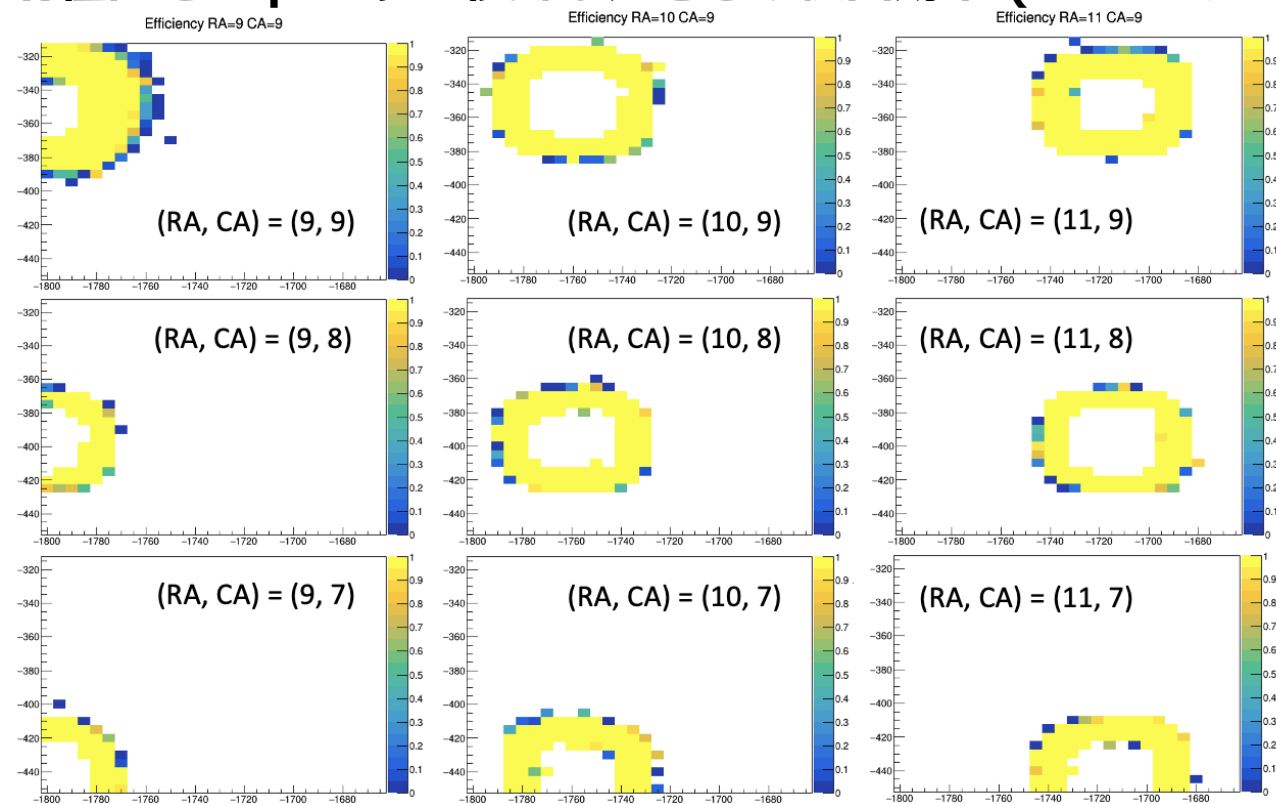


1064nm赤外線レーザー

Laser spot : $2\mu\text{m}$ 角

レーザーの光量はINTPIXを用いて生成電荷量を評価し、荷電粒子通過時のエネルギー損失と等価となるよう調整した。

HV : -150V

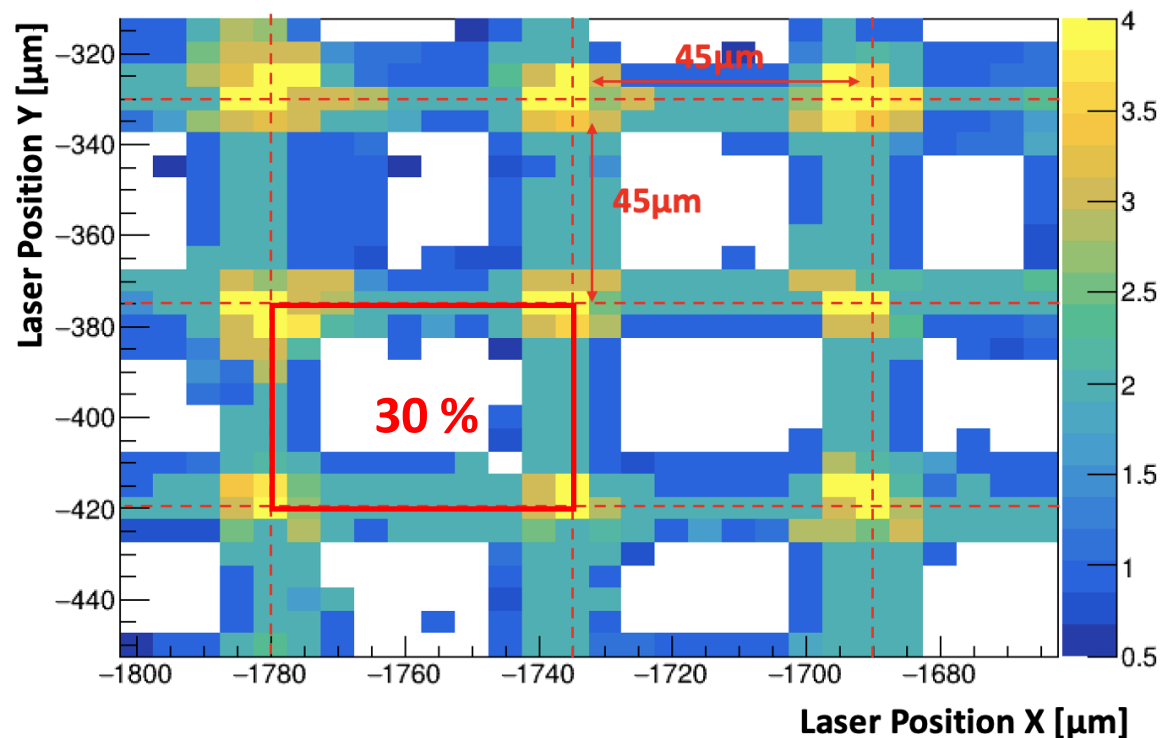


同様の検出効率分布は複数のピクセルにおいても確認された。

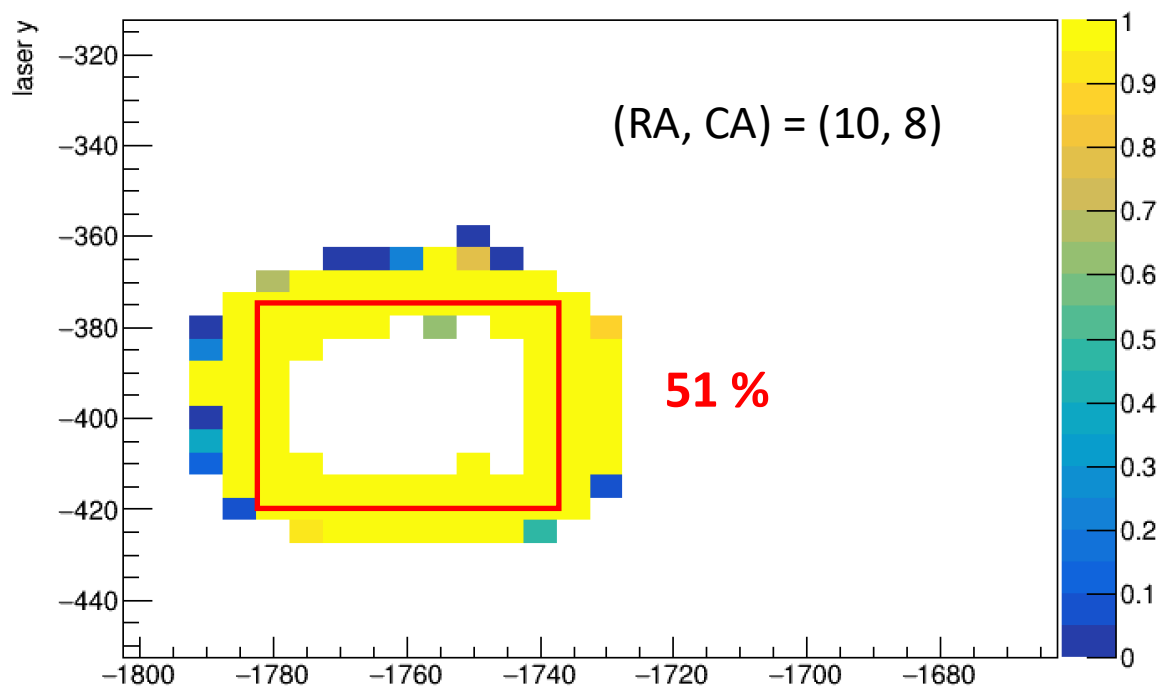
修士論文審査会

平均クラスタサイズ

-150v



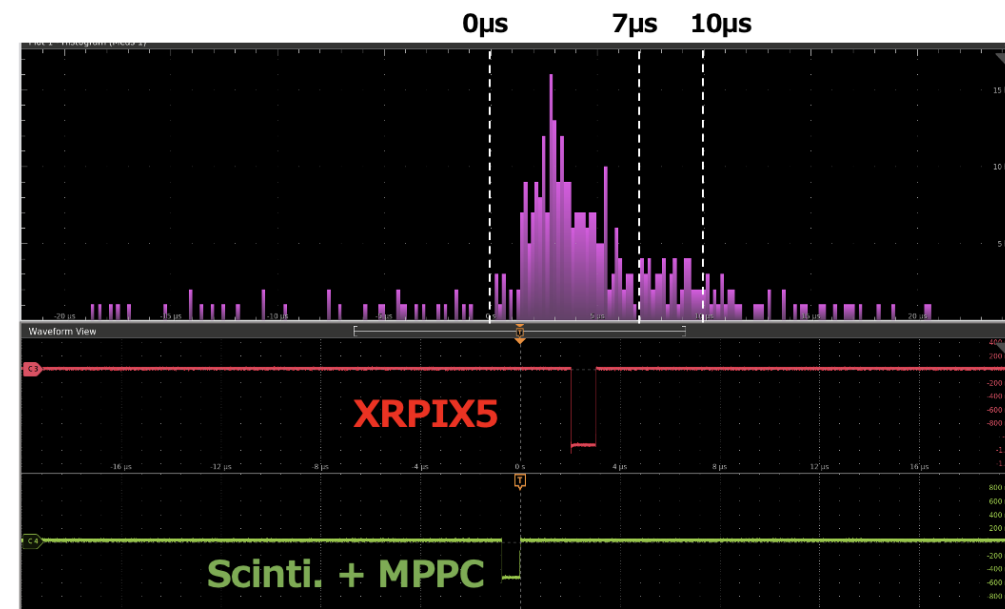
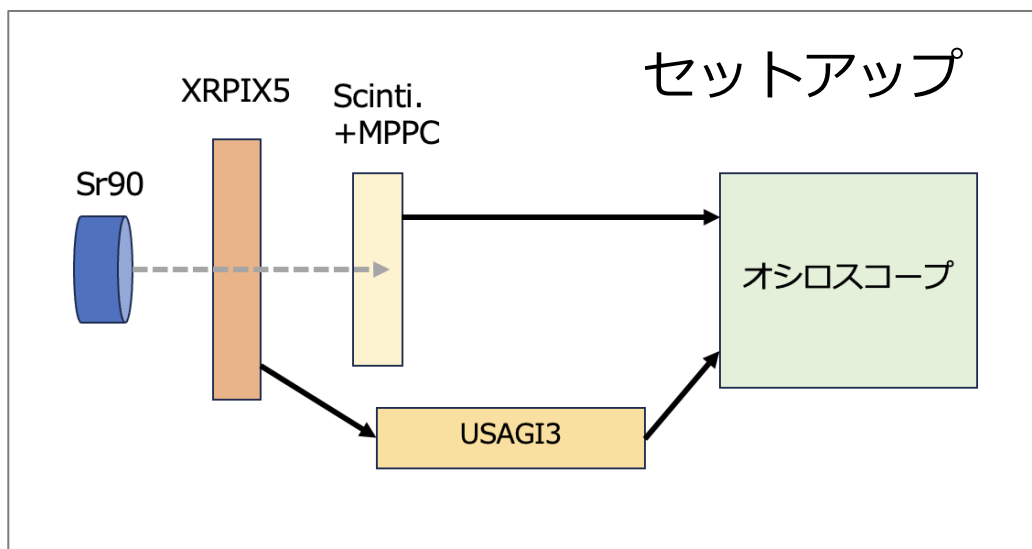
Efficiency RA=10 CA=8



- 平均クラスタサイズ分布と1pixelでの検出効率分布を比較すると、真ん中の白抜け面積がClusterSize分布の方が小さい
→隣のpixelで検出されているから
- Residualの幅が改善するか可能性がある(ビームテスト時：14.9μm)

検出効率が低く見えた要因

テレスコープトリガー(XRPIX5)の遅延



β線源で測定したトリガー遅延分布

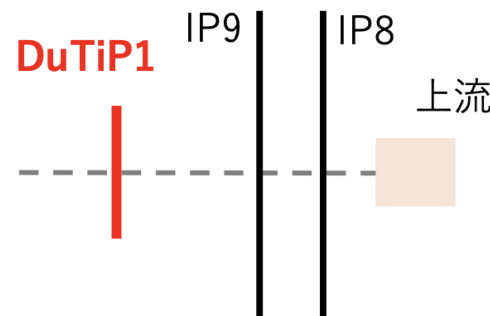
- 最大で10μsecの遅延
- DuTiPは7bitタイマーの127クロック目(6.7μsec)でコインシデンスをとるため10%ほど取り漏らしてしまっている
- →今回のテストビーム実験ではトリガーをシンチレーターに変えて検出効率の評価を行った

先行研究

田頭陽菜 修士論文, 奈良女子大学(2024年)

DuTiP1の検出効率評価(4GeV/c電子)

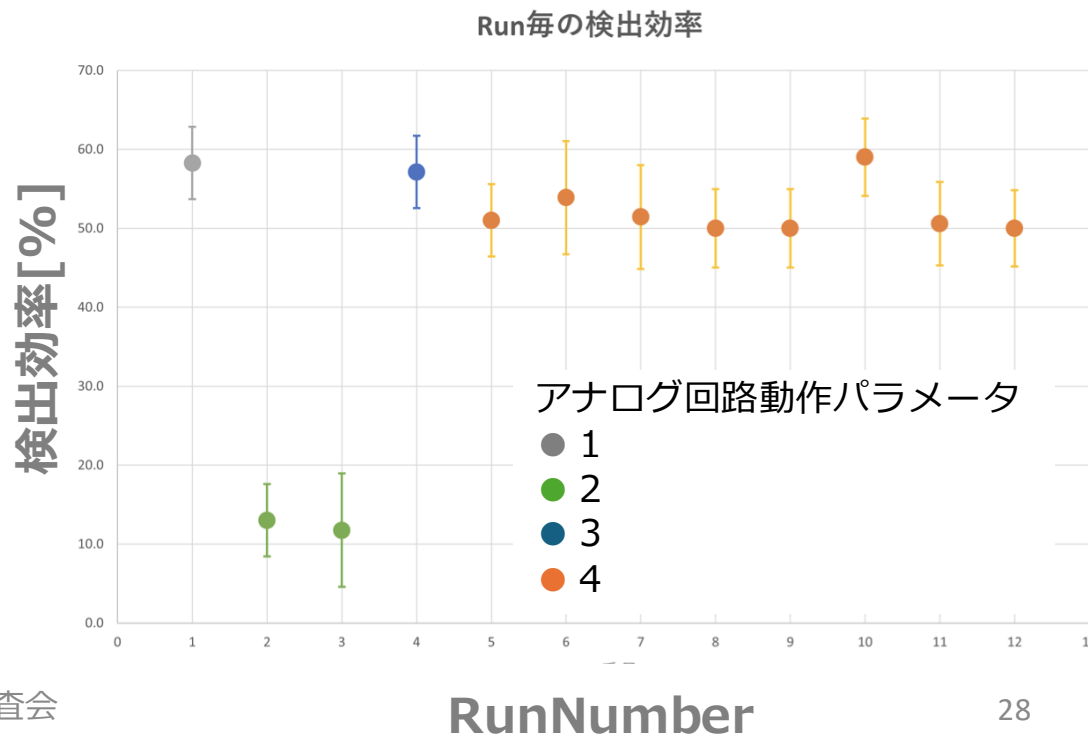
2023年にARTBLで初のビームによるDuTiP1の検出効率評価



- 上流の2枚のセンサーのヒット情報からDuTiPのヒット位置を外挿
→この時に実際にDuTiP上でヒットがある割合=検出効率

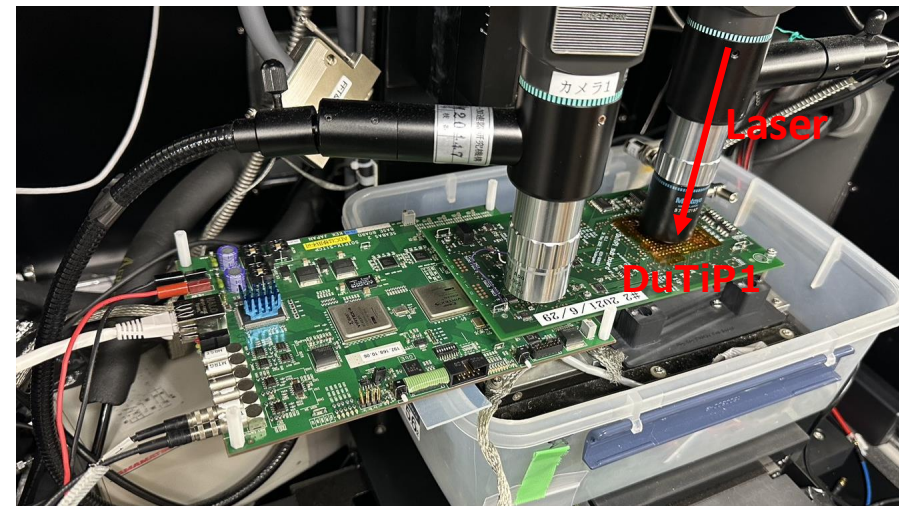
- パラメータ2では10~20%
→パラメータ次第で大幅に低下し得る
- この時の測定で得られた検出効率は
50~60%

⇒検出効率が低く見えた要因は??

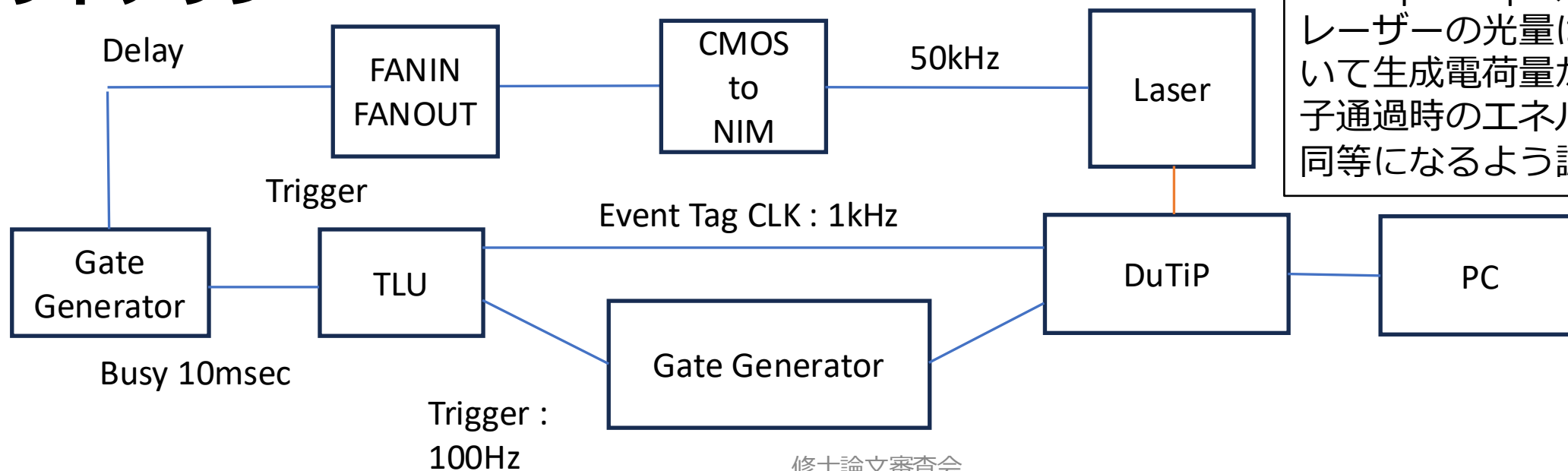


赤外線レーザー試験

- スポットサイズ $2\mu\text{m}$ 角の赤外線レーザーを照射し、照射位置による検出効率の変化を調べる
- レーザーは照射位置を $1\mu\text{m}$ 程度の精度で制御できるため、ビームテストでは見えない位置依存性を評価可能



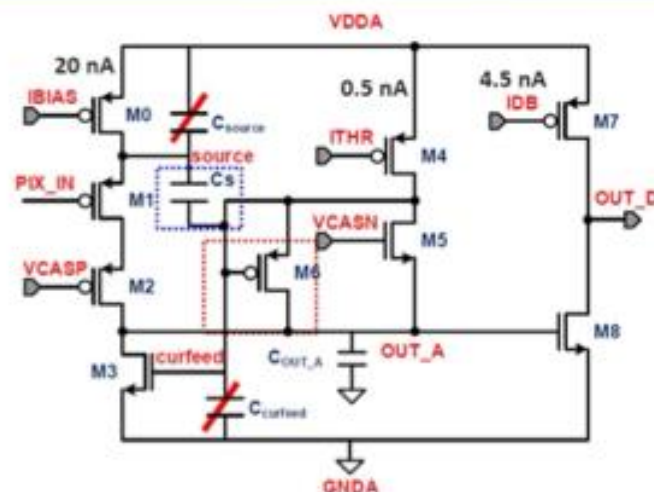
セットアップ



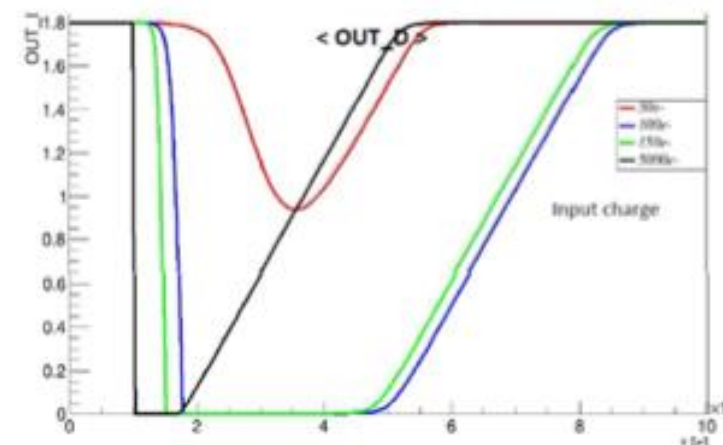
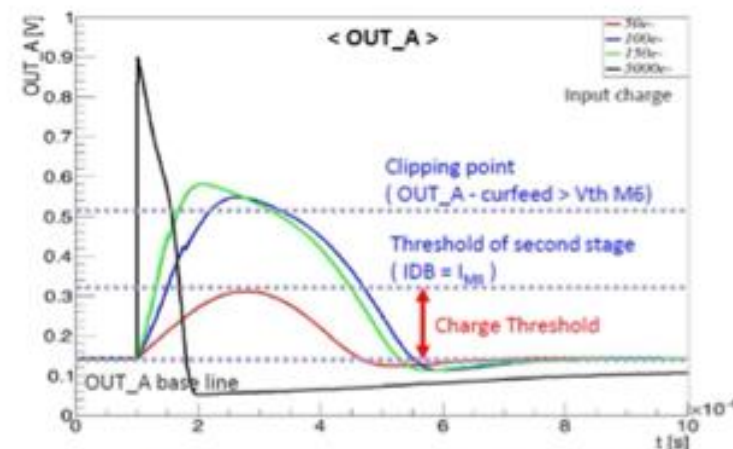
1064nm赤外線レーザー
Laser spot : $2\mu\text{m}$ 角
レーザーの光量はINTPIXを用いて生成電荷量から、荷電粒子通過時のエネルギー損失と同等になるよう調節した

Appendix. ALPIDE資料(1)

ALPIDE: Pixel Front-end Circuit (3)

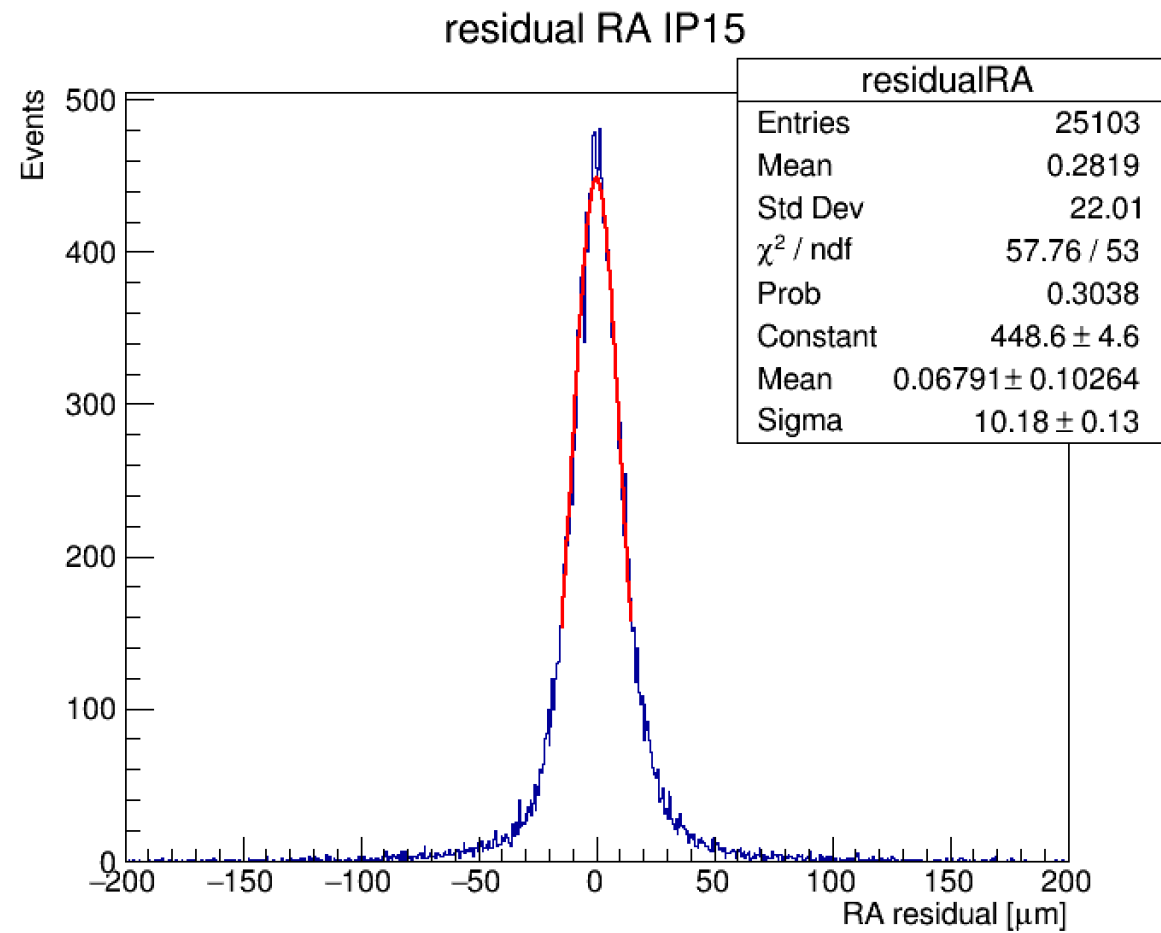
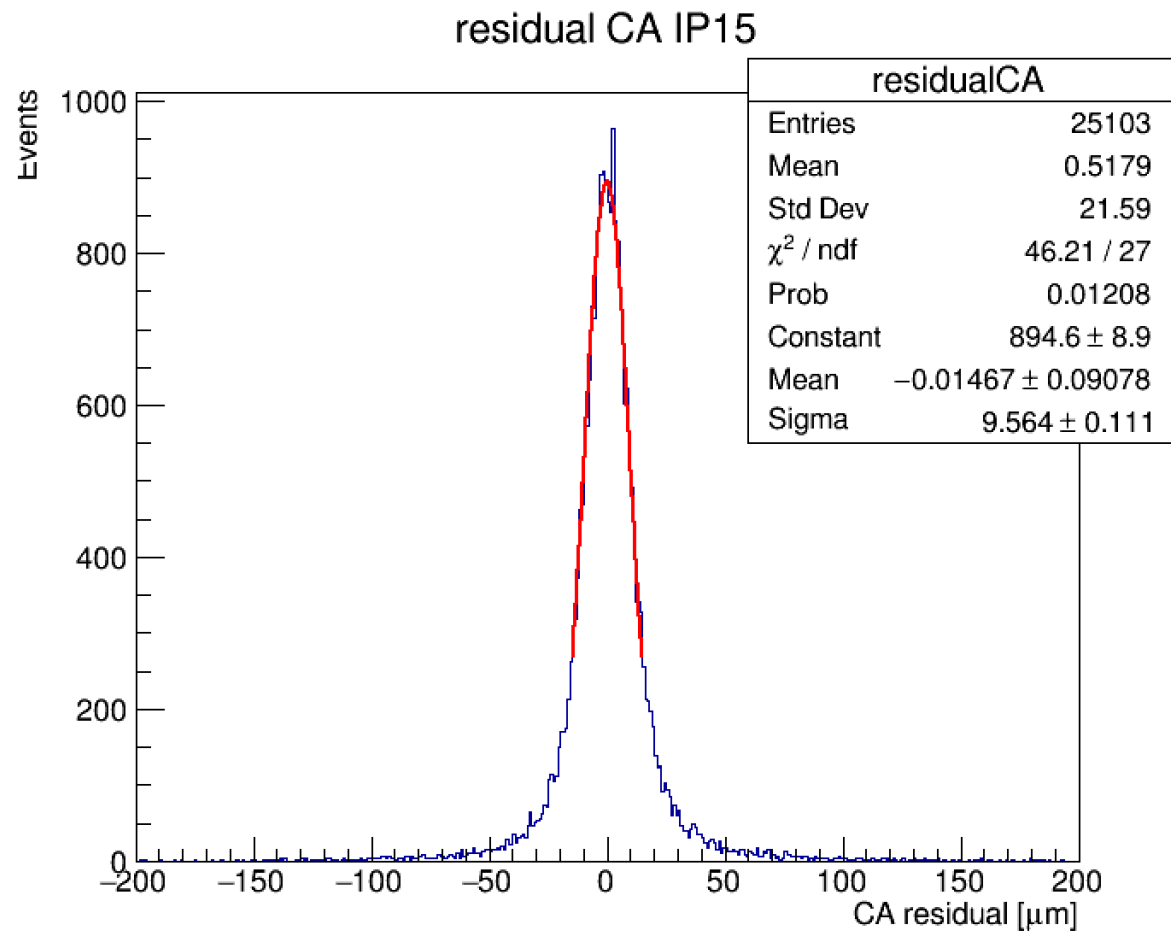


- Combined capa. to reduce layout area
 C_{source} and $C_{curfeed} \rightarrow C_s$
- Charge threshold parameters
 OUT_A baseline value : $ITHR, VCASN$
 Threshold of second stage : IDB
- M6 is used to clip large signals and force OUT_A to quickly return to its DC value
- Keeping $C_{OUT_A} \ll C_{source}$



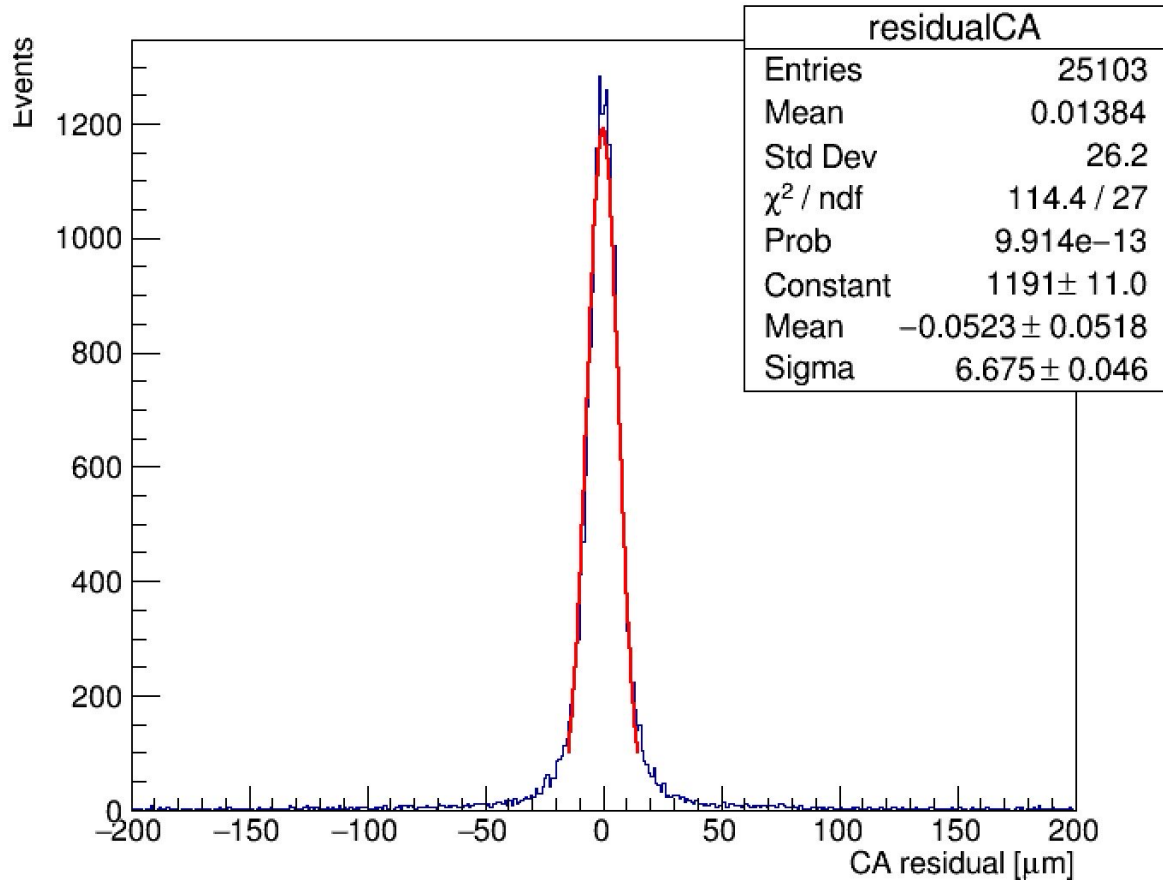
Ref. D. Kim, 2016 JINST 11 C02042

Resolution IP15

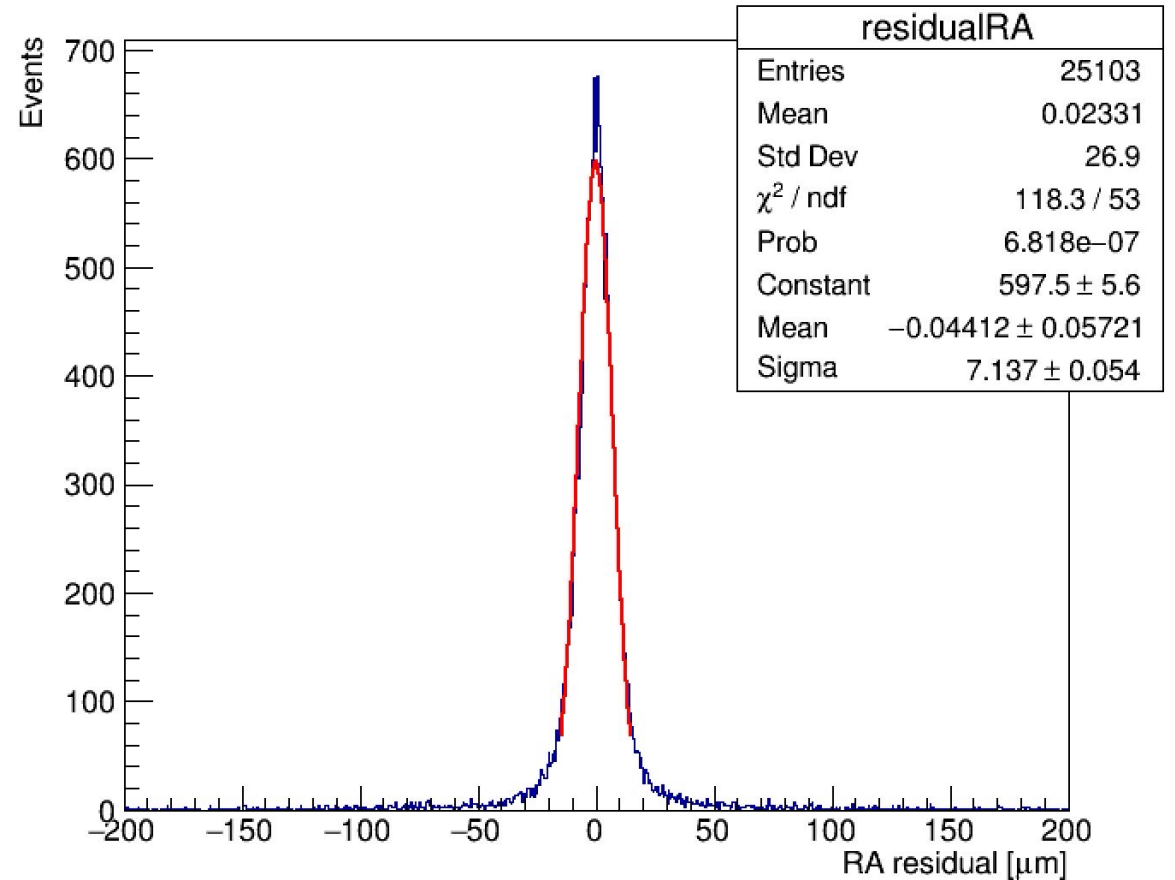


Resolution IP14

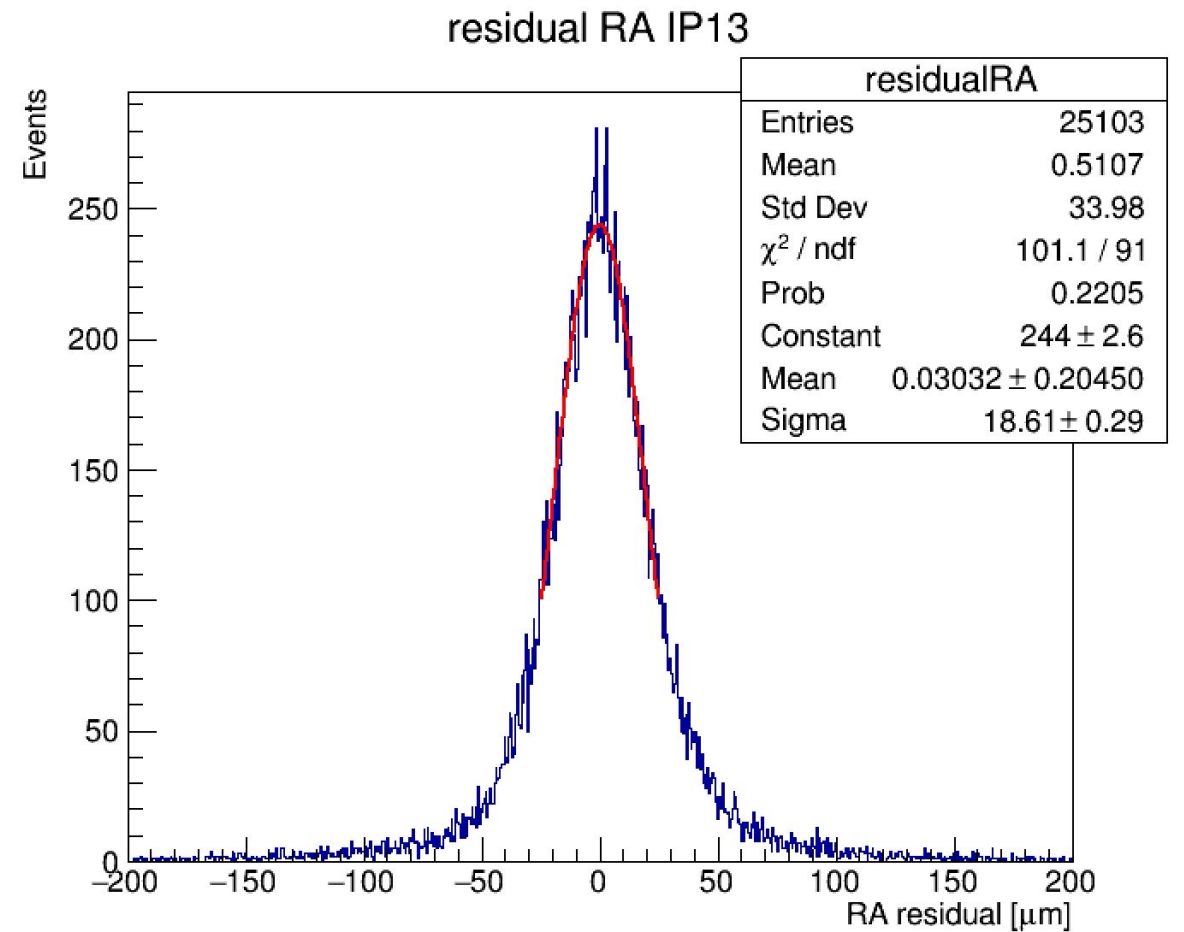
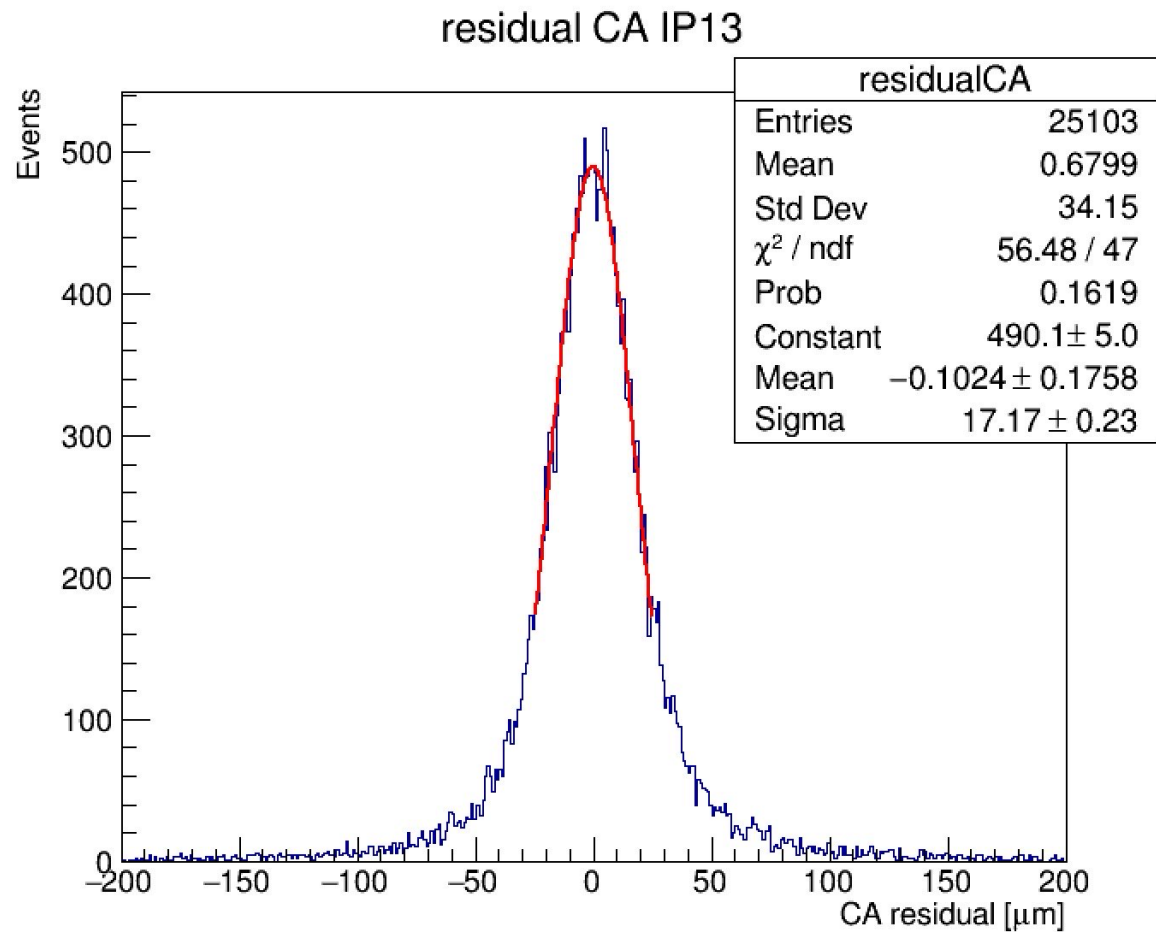
residual CA IP14



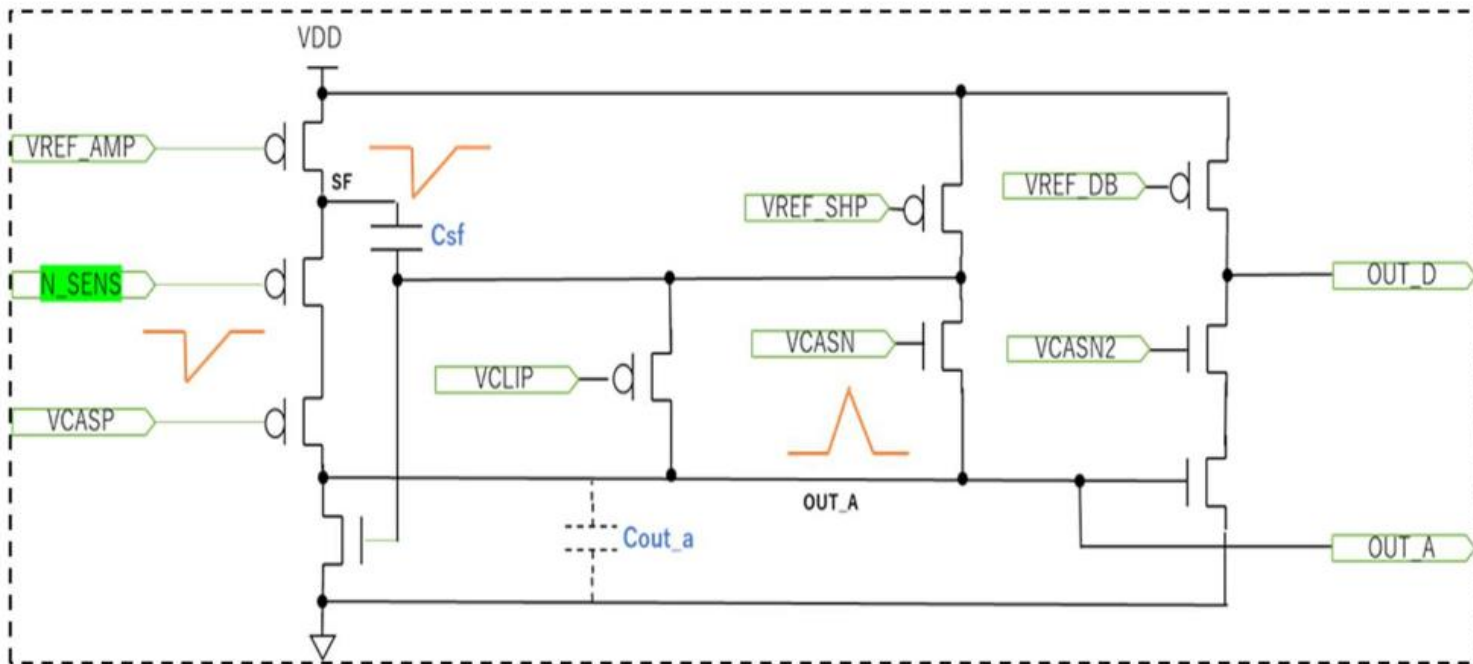
residual RA IP14



Resolution IP13



ALPIDE

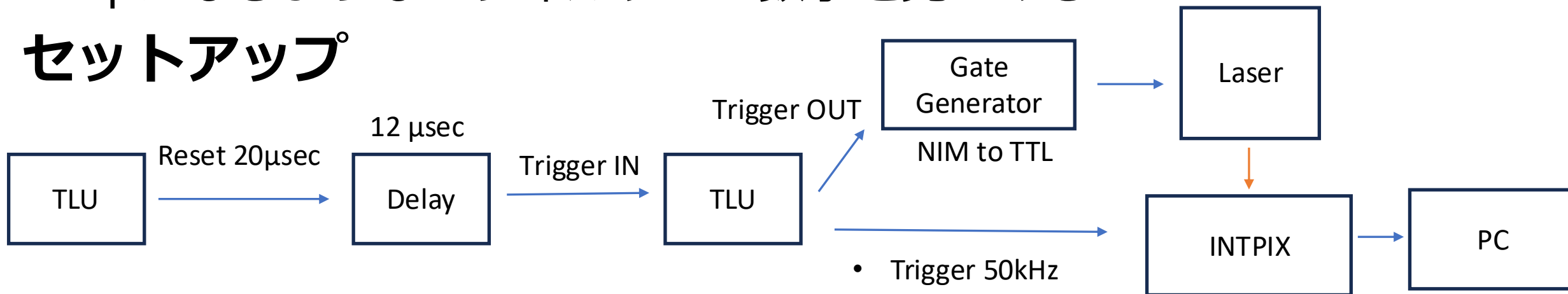


端子名	機能
VDIODE	入力リセット電圧
VREF_RESET	入力リセット電流
VREF_AMP	初段電流
N_SENS	入力
VCASP	P オン電流
VCLIP	クリッピング電圧
VREF_SHP	フィードバック電流
VCASN	OUTA baseline
VREF_DB	スレッシュホールド電流
VCASN2	N オン電圧
OUT_B	デジタル出力
OUT_A	アナログ出力

INTPIXで1mipのキャリブレーション

1mipになるようなIRフィルターの数字を見つける

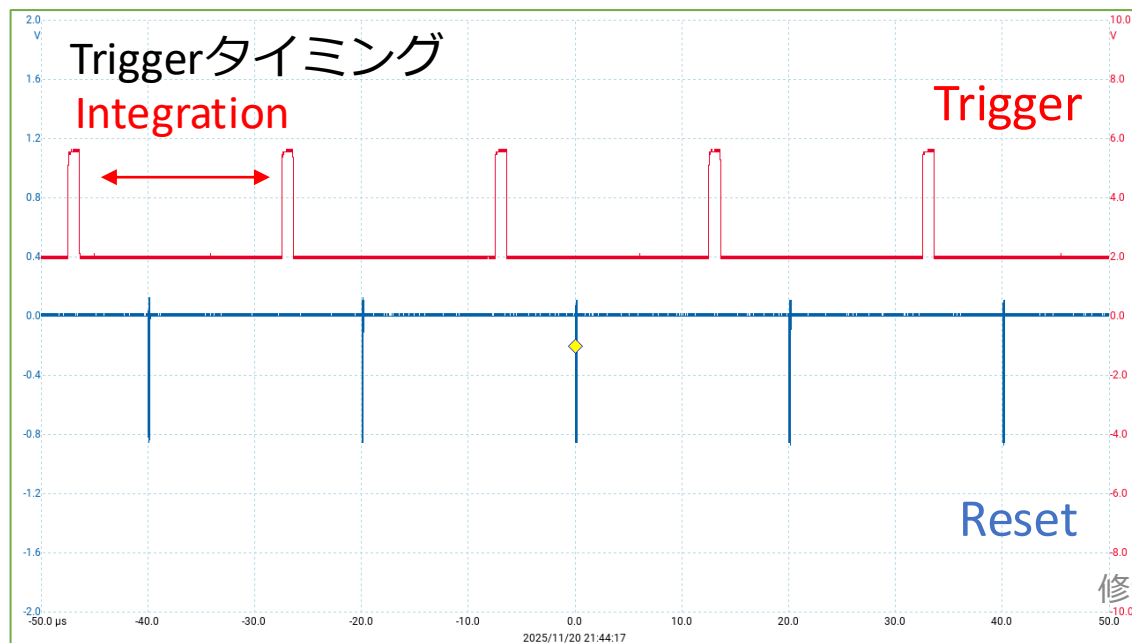
セットアップ



- Trigger 50kHz
- EventTagCLK 1kHz
- Reset 20μsec
- Busy

- INTPIX IP15
- 裏面アルミあり
- ROI

• INTPIXの表面にはL字の窓が開いている



INTPIXで1mipのキャリブレーション

- ビームテストでのClusterChargeは、-30V(完全空乏化)で350~375[ADC]
(大森さん修論p44)
- レーザが1mip相当になるIRfilterの目盛りは6.2
- LGAD堀越さんの測定では<5.14で1mipとなっている
- INTPIXの窓がLaserのスポットサイズとギリギリなので、位置が少しでもズレるとえられる波高分布の形とmeanの値が大きく変わってしまう

