

高い位置・時間分解能を持つ半導体飛跡検出器AC-LGADの 多チャンネル読み出しに向けた低消費電力かつ高速応答ASICの開発と性能評価

素粒子実験研究室 M2 堀越一生

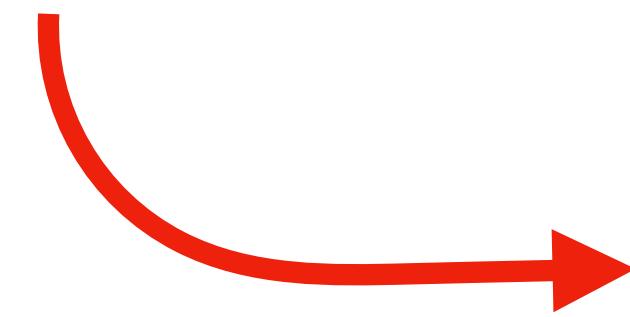
2025年12月16日 宇宙史研究センター構成員会議

モチベーション

ILC：国際リニアコライダー

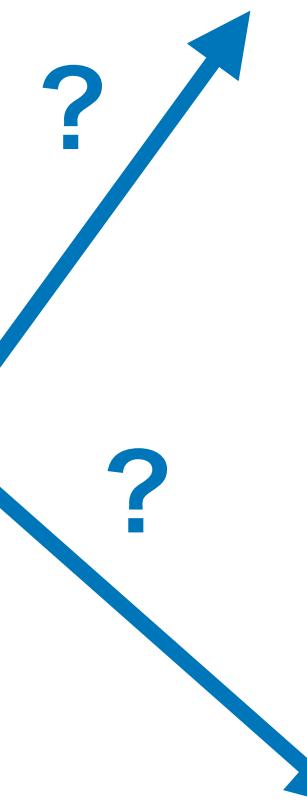
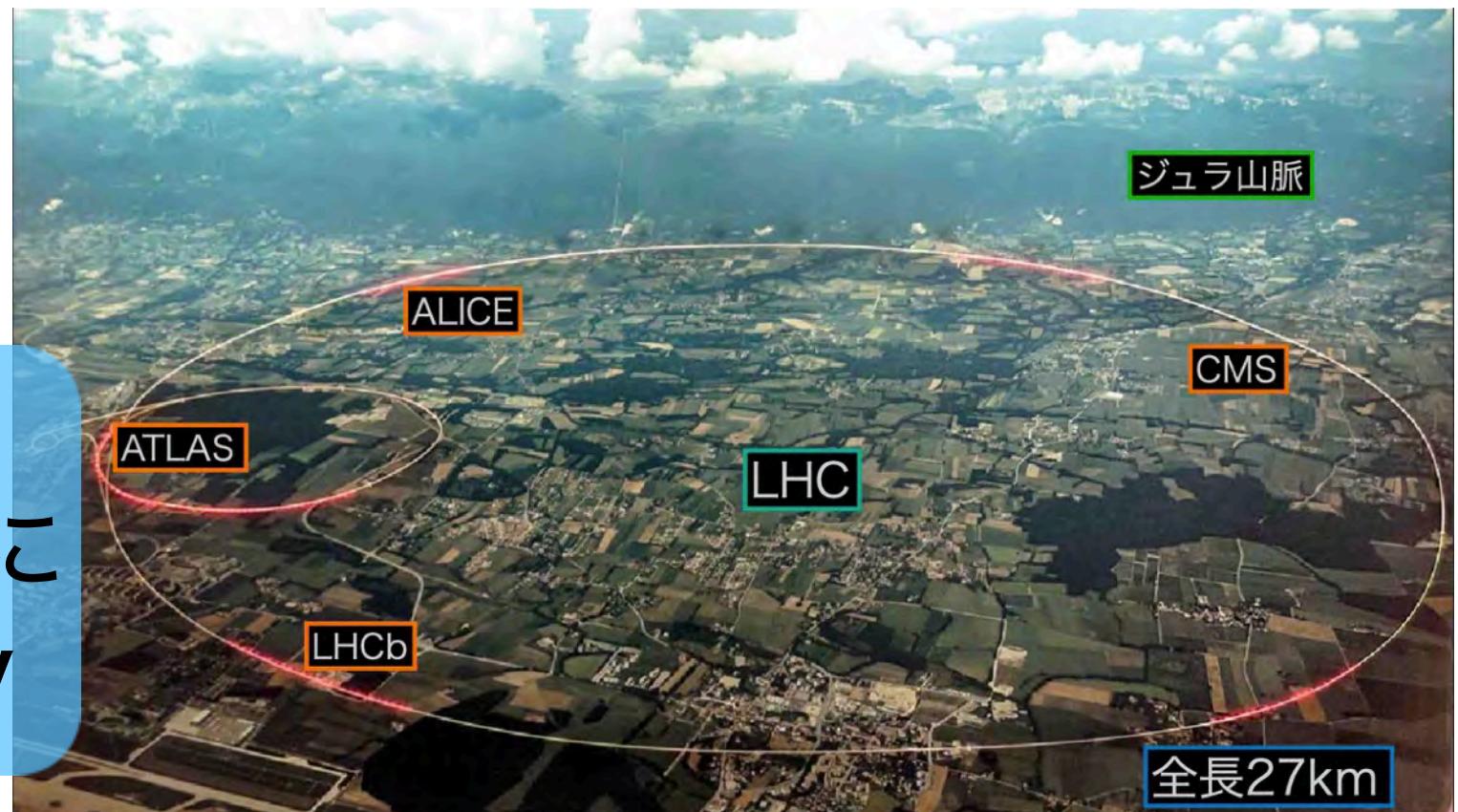
将来の加速器実験

2011～2026年：LHC

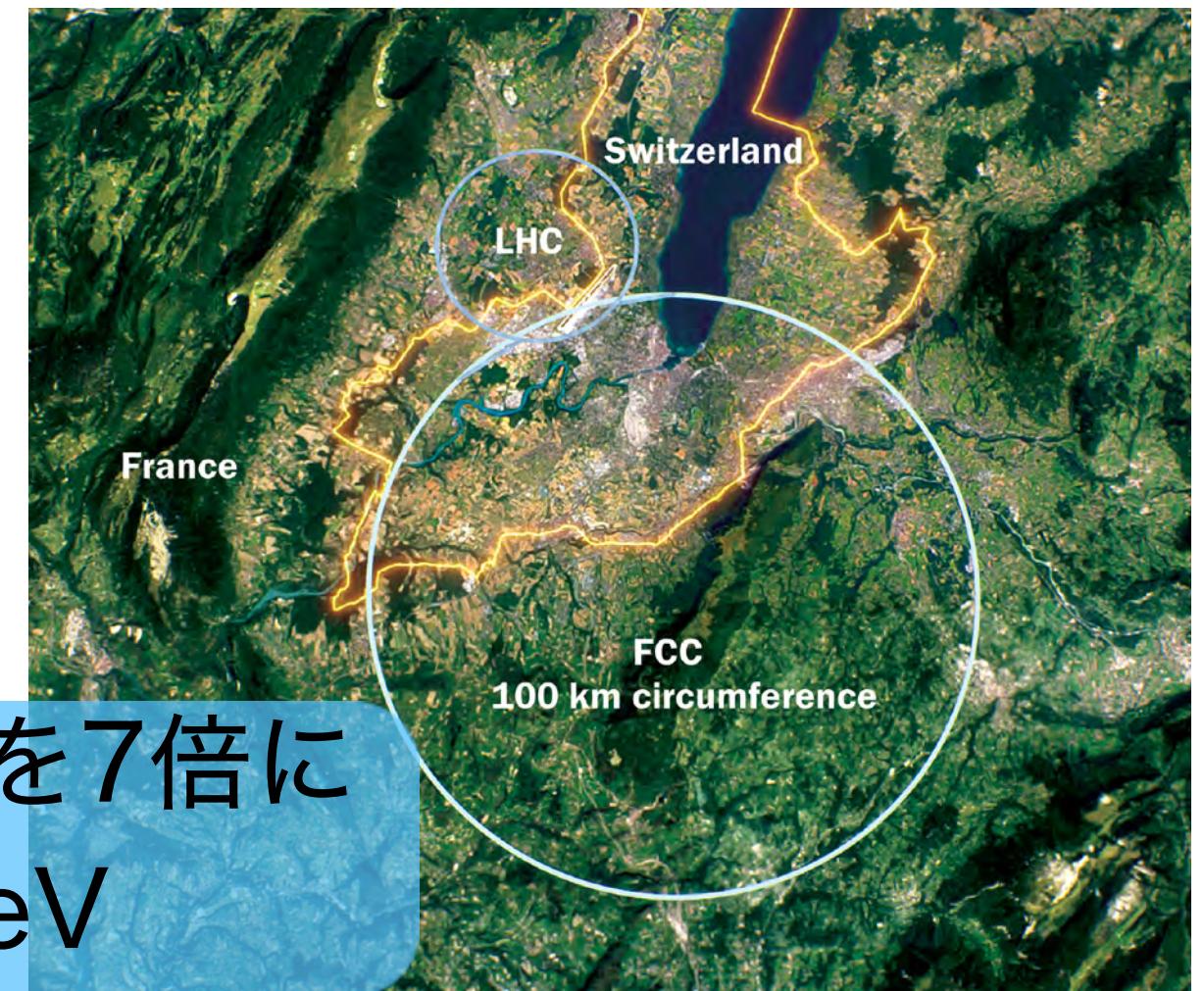


LHCをアップグレードして、合計データ量を10倍に
エネルギーは最大14TeV

2030～2041年：高輝度LHC



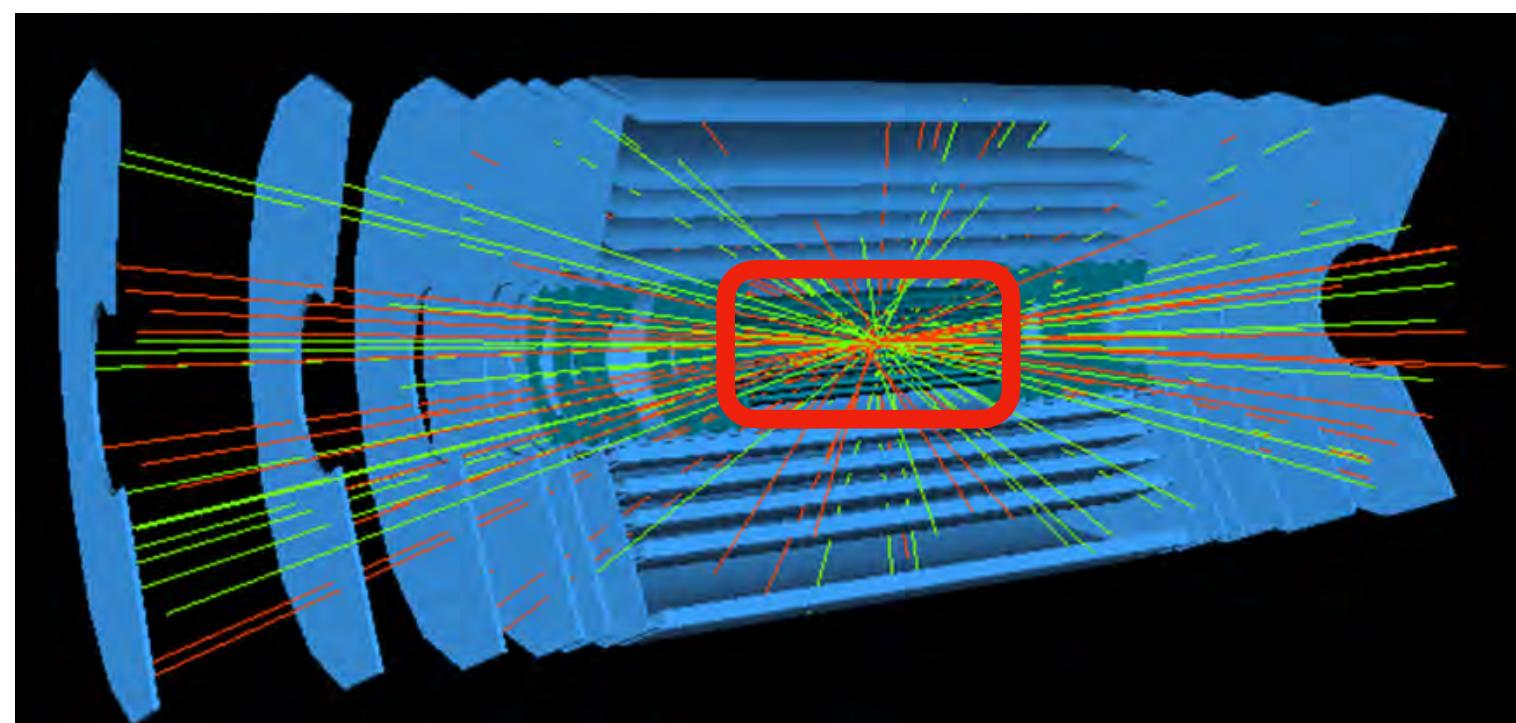
FCC：Future Circular Collider



エネルギーを7倍に
100TeV

予想される困難

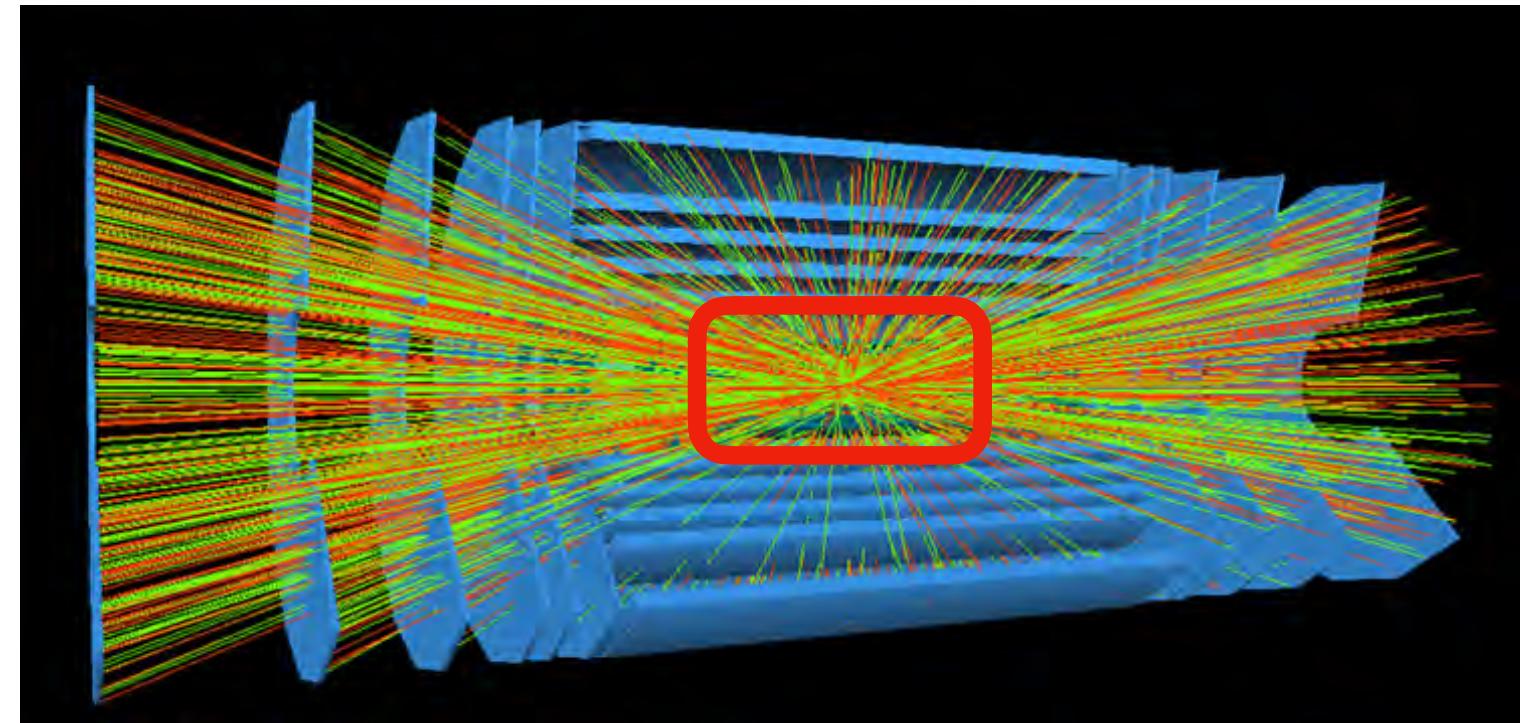
2011～2026年：LHC



陽子の衝突数が3~4倍
に増加
→背景事象が増加



2030～2041年：高輝度LHC

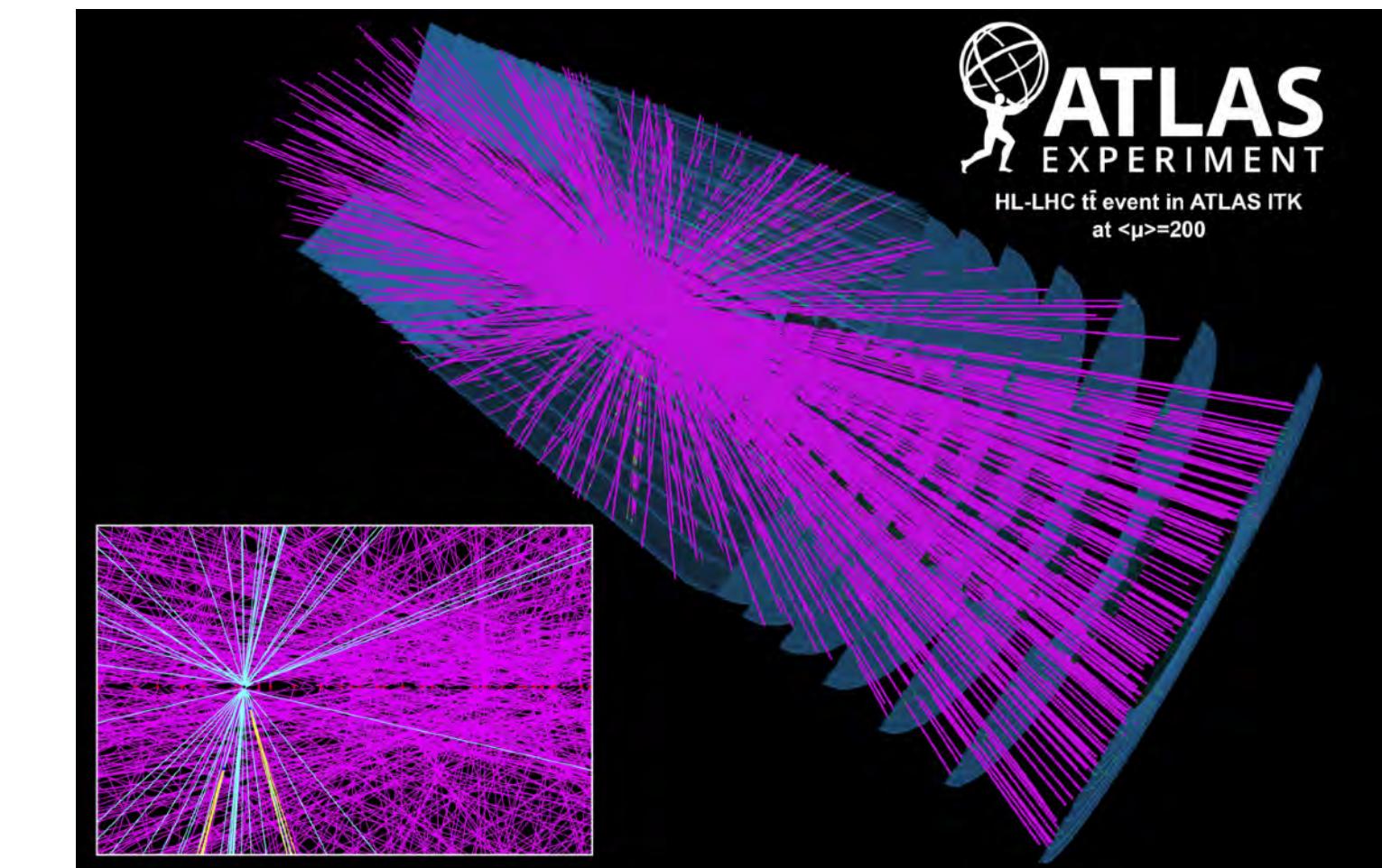


？
FCCではさら
に増加の
予定？

モチベーション

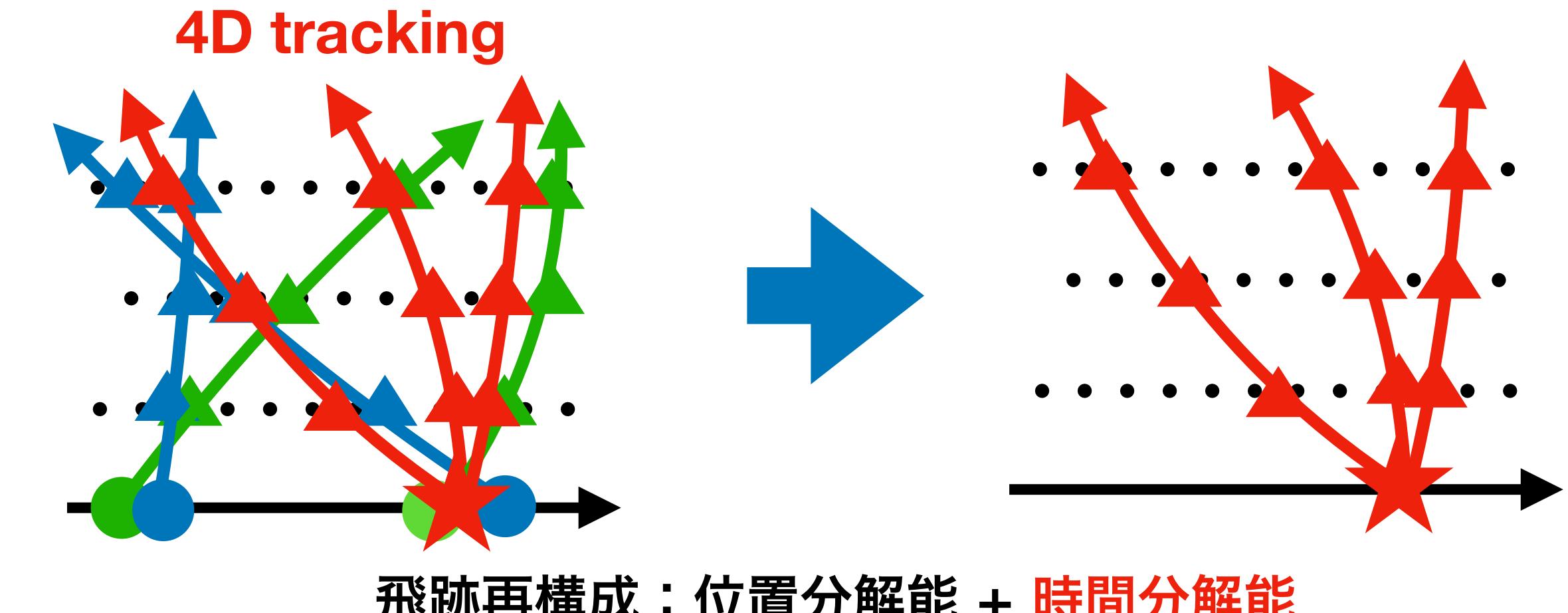
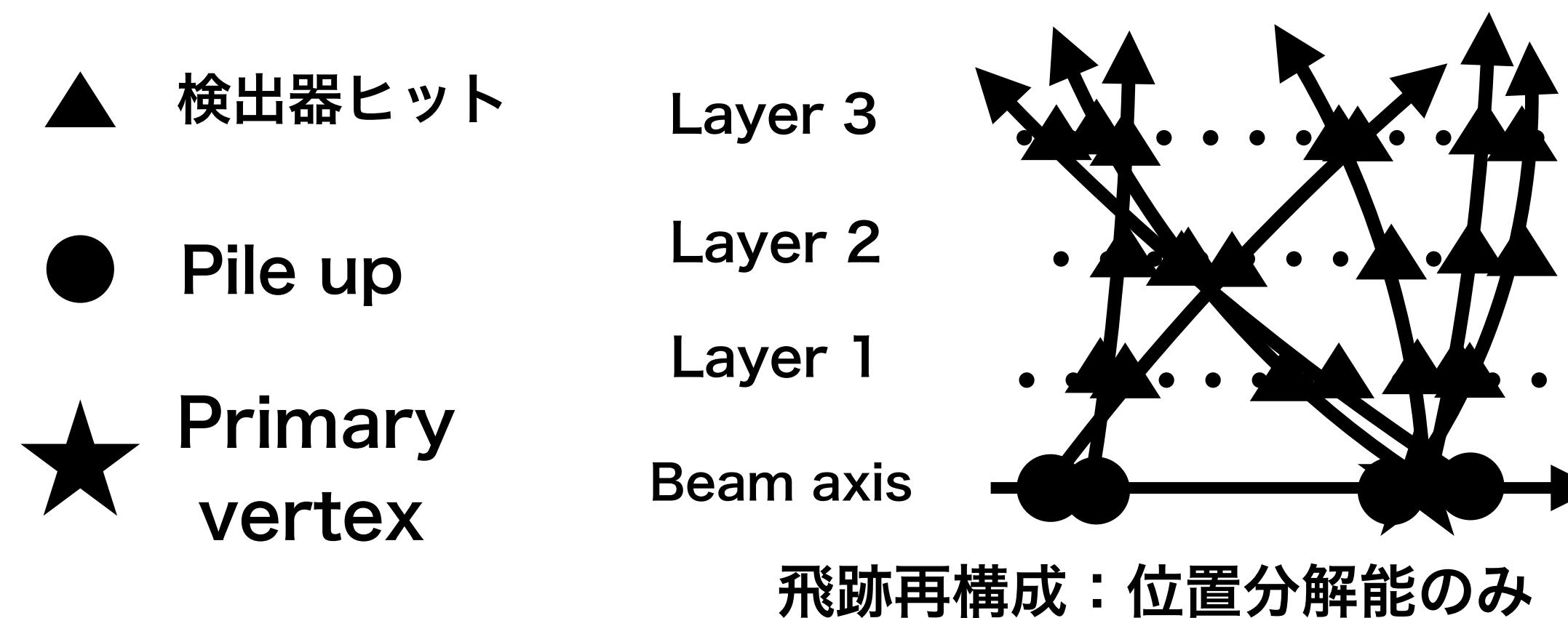
これからの内部飛跡検出器の課題と解決策

- 将来の高エネルギー衝突型加速器実験：
 - 高輝度化による瞬間ルミノシティの増加
 - 多数の衝突点、検出器ヒットでも高い飛跡再構成の精度が必要
- 位置分解能と時間分解能による**4次元的な飛跡再構成**が有効



高輝度LHCにおける要求値

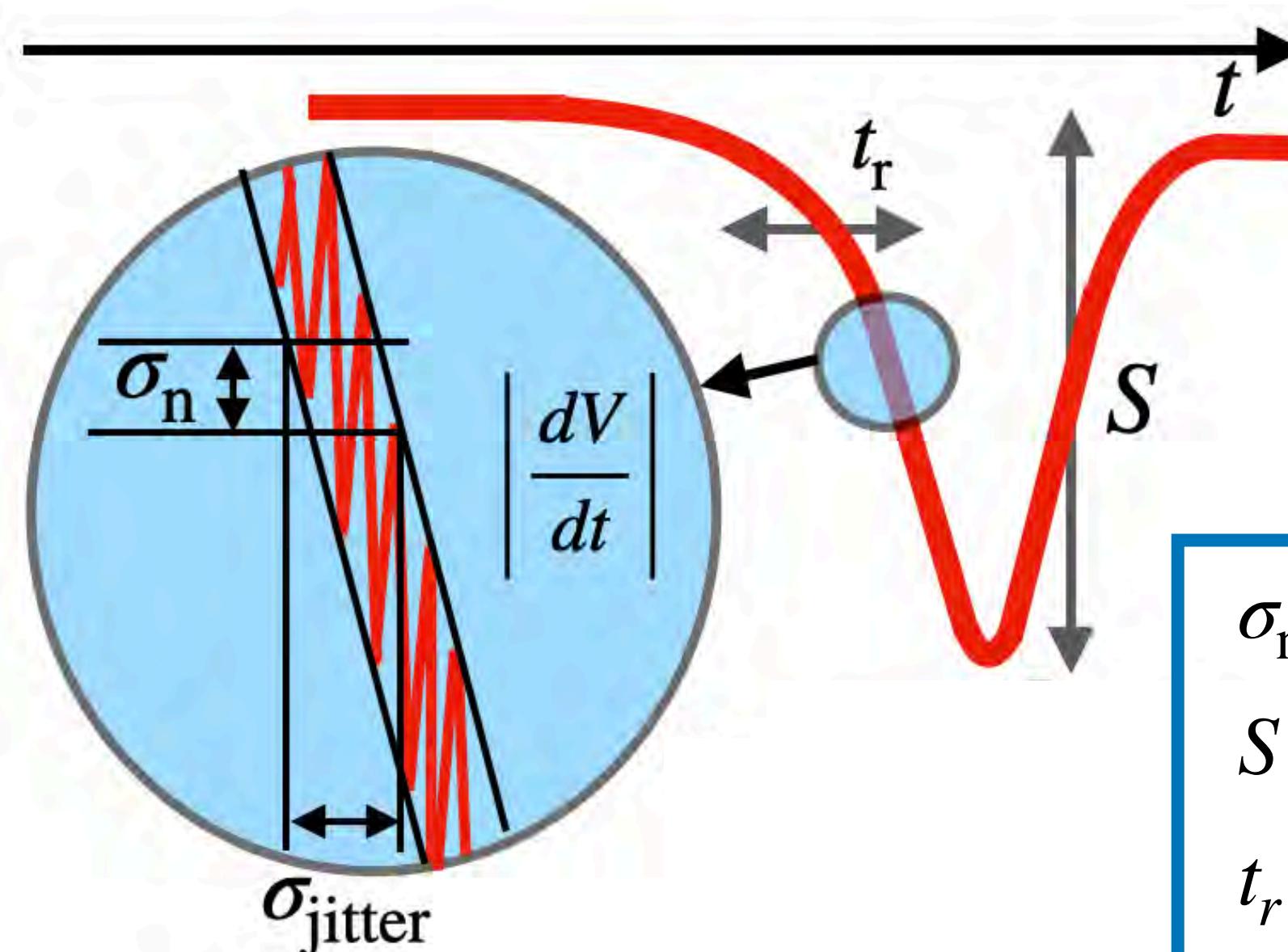
- **~30 ps** の時間分解能 + **O(10 μm)** の位置分解能
 - 高輝度LHC途中の内部飛跡検出器の入れ替えで、AC-LGADのインストールを目指す



Low-Gain Avalanche Diode (LGAD)

時間分解能

- ジッター σ_{jitter} : 読み出し回路由来のノイズによる時間方向の揺らぎ
- ジッターは式で表現可能
→信号サイズ大, ノイズ小, 立ち上がりが速い信号であることが重要

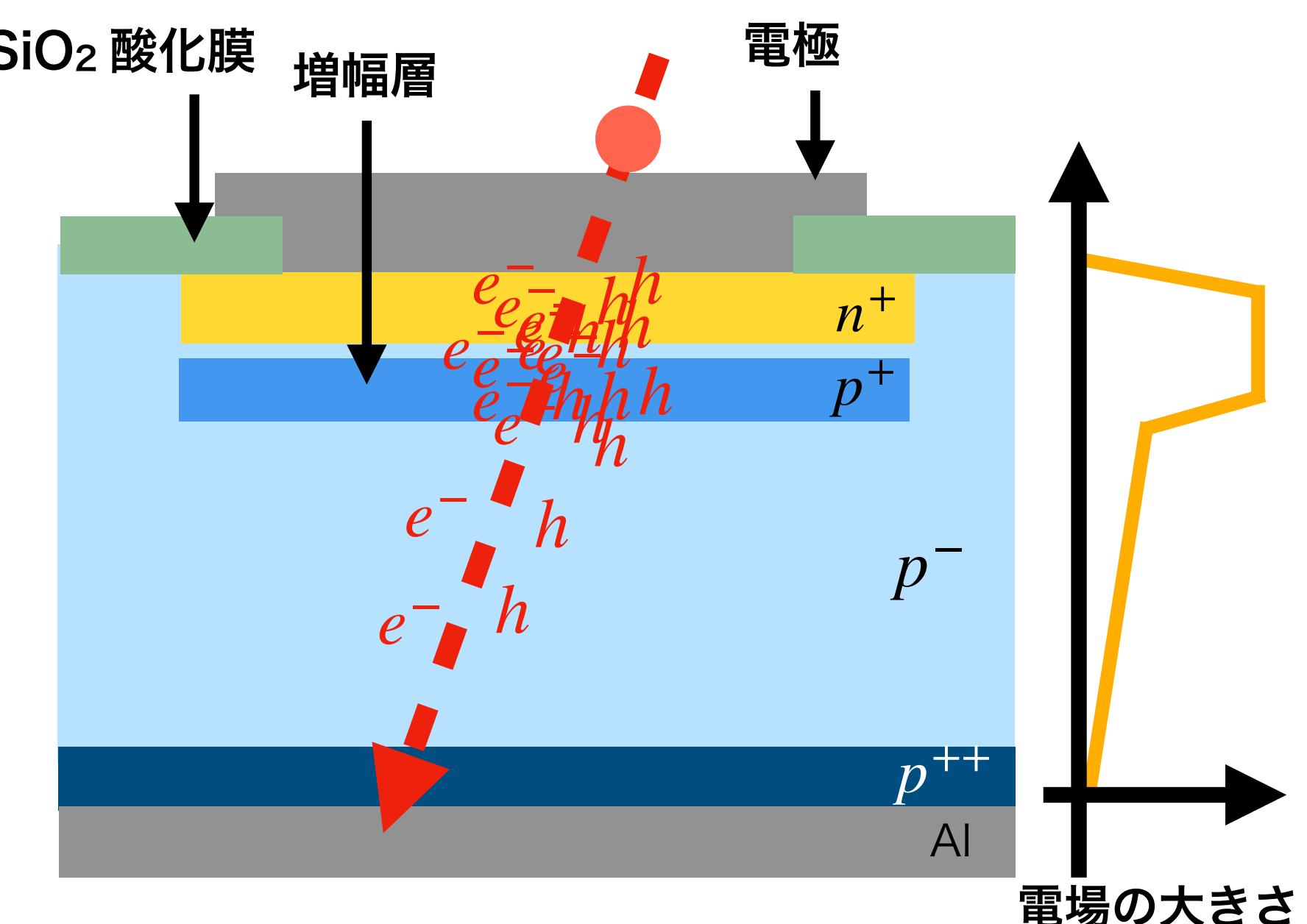


$$\sigma_{\text{jitter}} = \frac{\sigma_{\text{noise}}}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} = \frac{\sigma_{\text{noise}}}{\left| \frac{S}{t_r} \right|}$$

σ_{noise} : 読み出し回路由来のノイズ
 S : 信号の大きさ
 t_r : 信号の立ち上がり時間

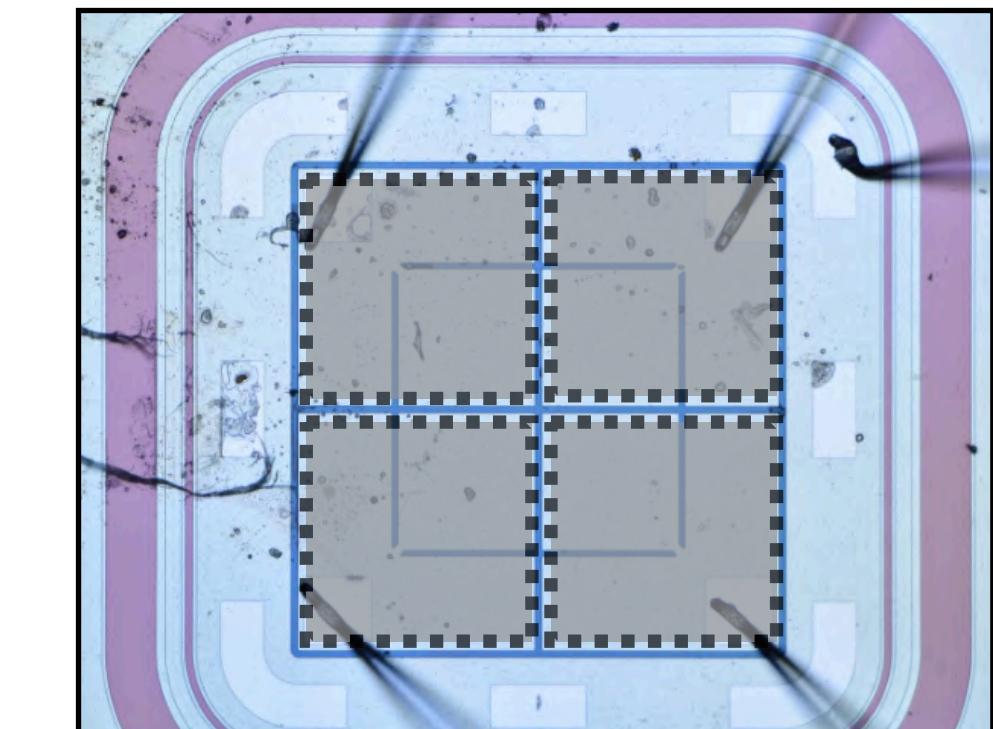
LGADの利点

- アクセプター濃度の高い増幅層 (p^+ 層) により局所的な高電場を生み出す
→雪崩増幅によって信号サイズ S が大きい
→高電場による電子正孔対の加速により立ち上がり時間 t_r が速い



AC-LGAD

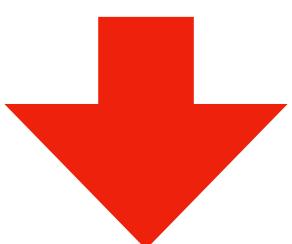
- **AC-LGAD** : 静電容量型増幅機能付き半導体検出器
→ 一様に増幅層を設置することにより、不感領域をなくすことができる



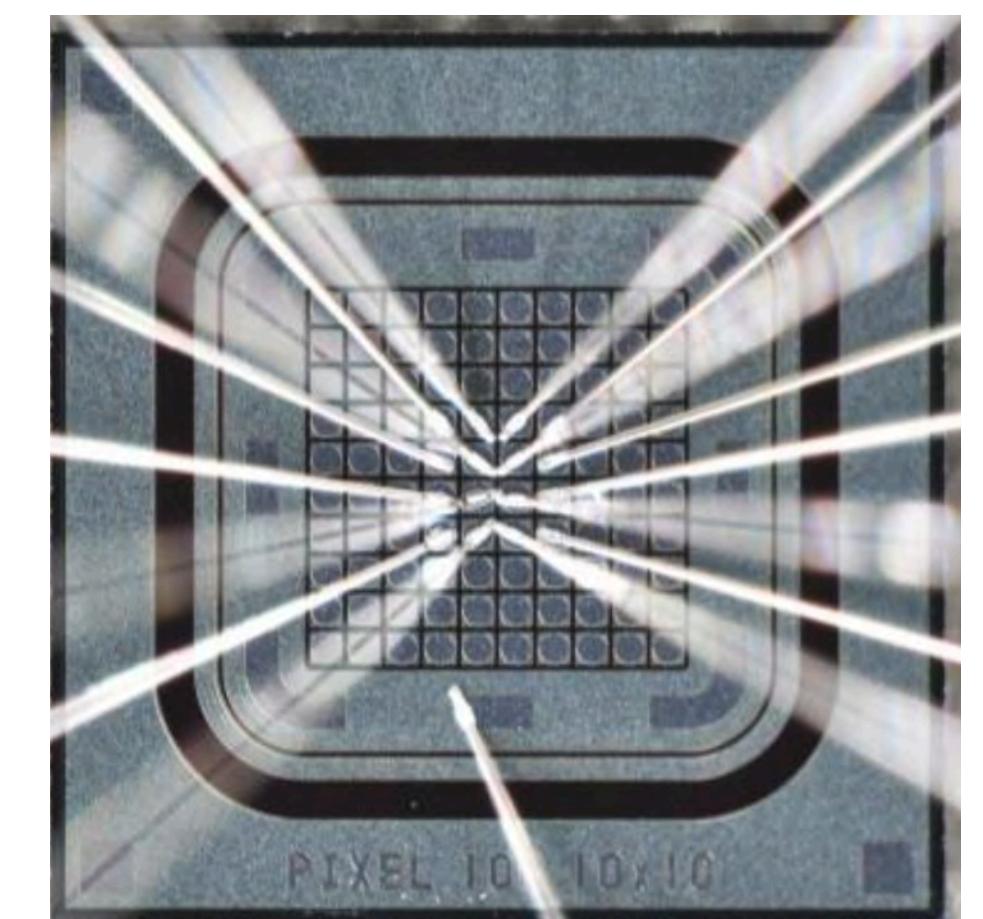
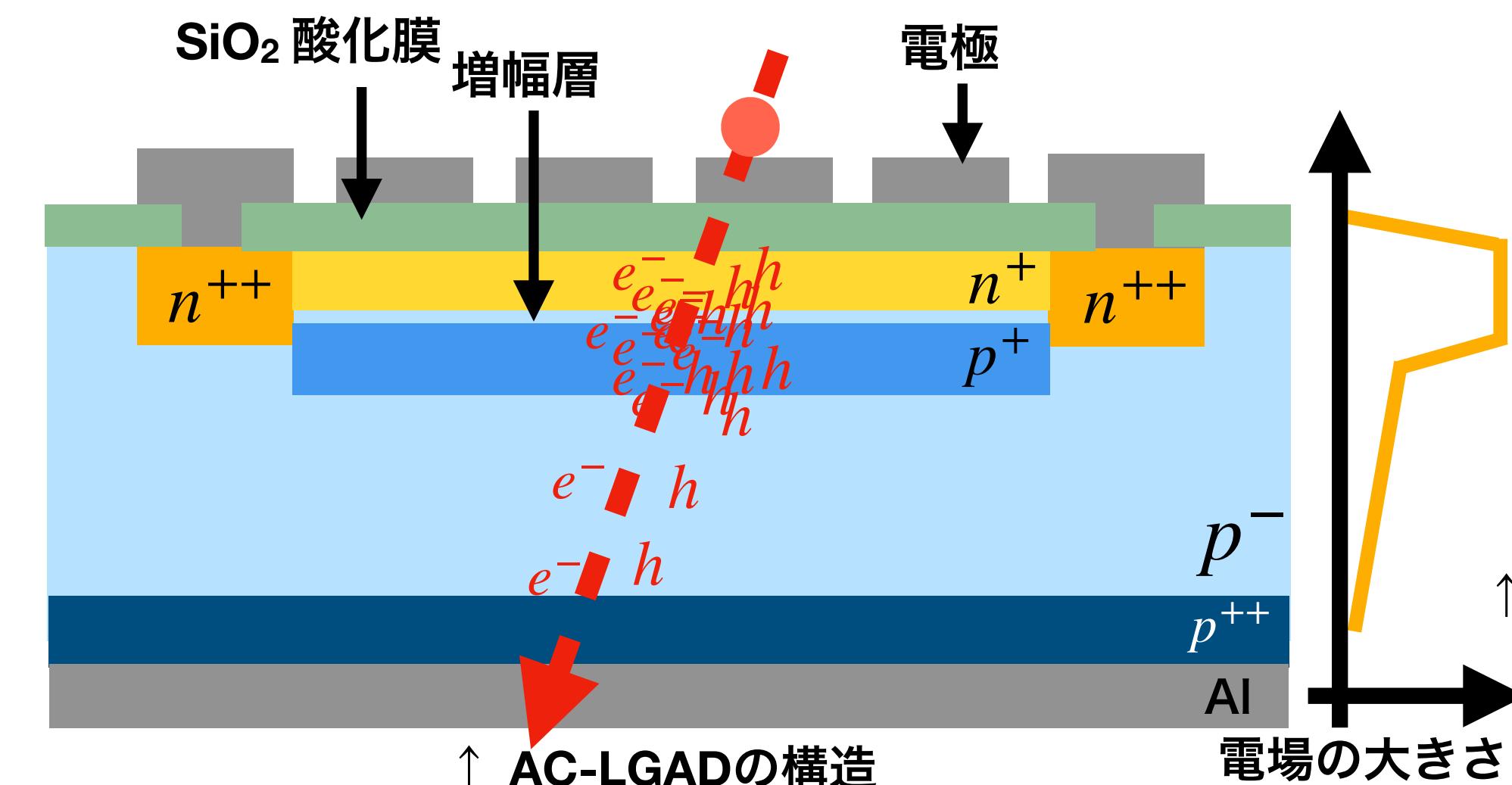
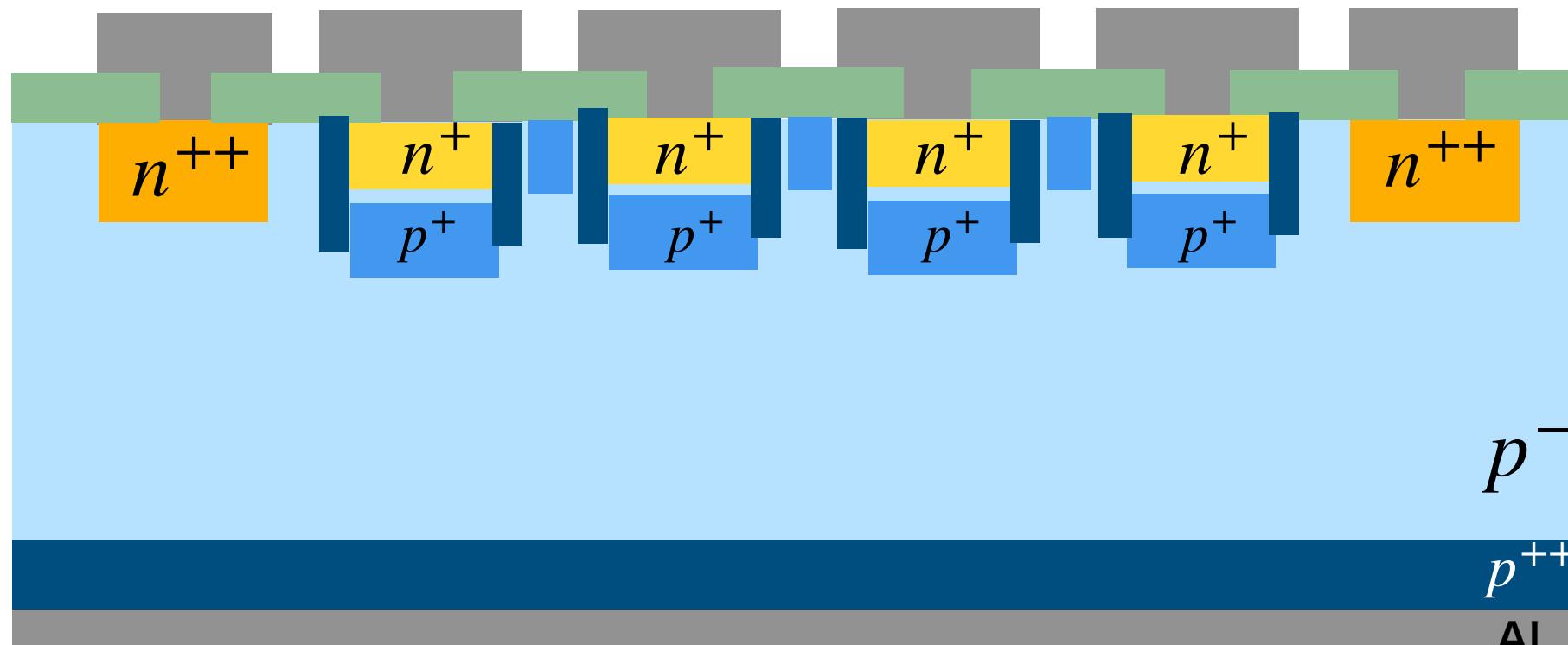
↑ AC-LGAD : 電極 500μm ピッチ

AC-LGAD Pixel Sensor

- **AC-LGADpix** : 電極サイズを $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ まで細密化したAC-LGAD
- 電極を細密化しても、100%の有感領域と全ての領域で高い時間分解能を実現



高い位置分解能と時間分解能の両方を兼ね備えた検出器



↑ AC-LGADpix : 電極 100 μm ピッチ

読み出しASICの開発

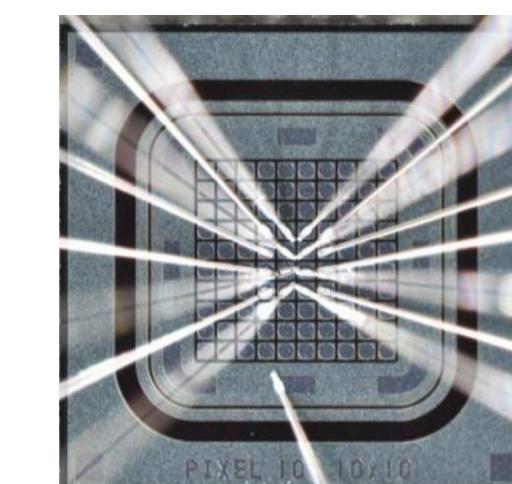
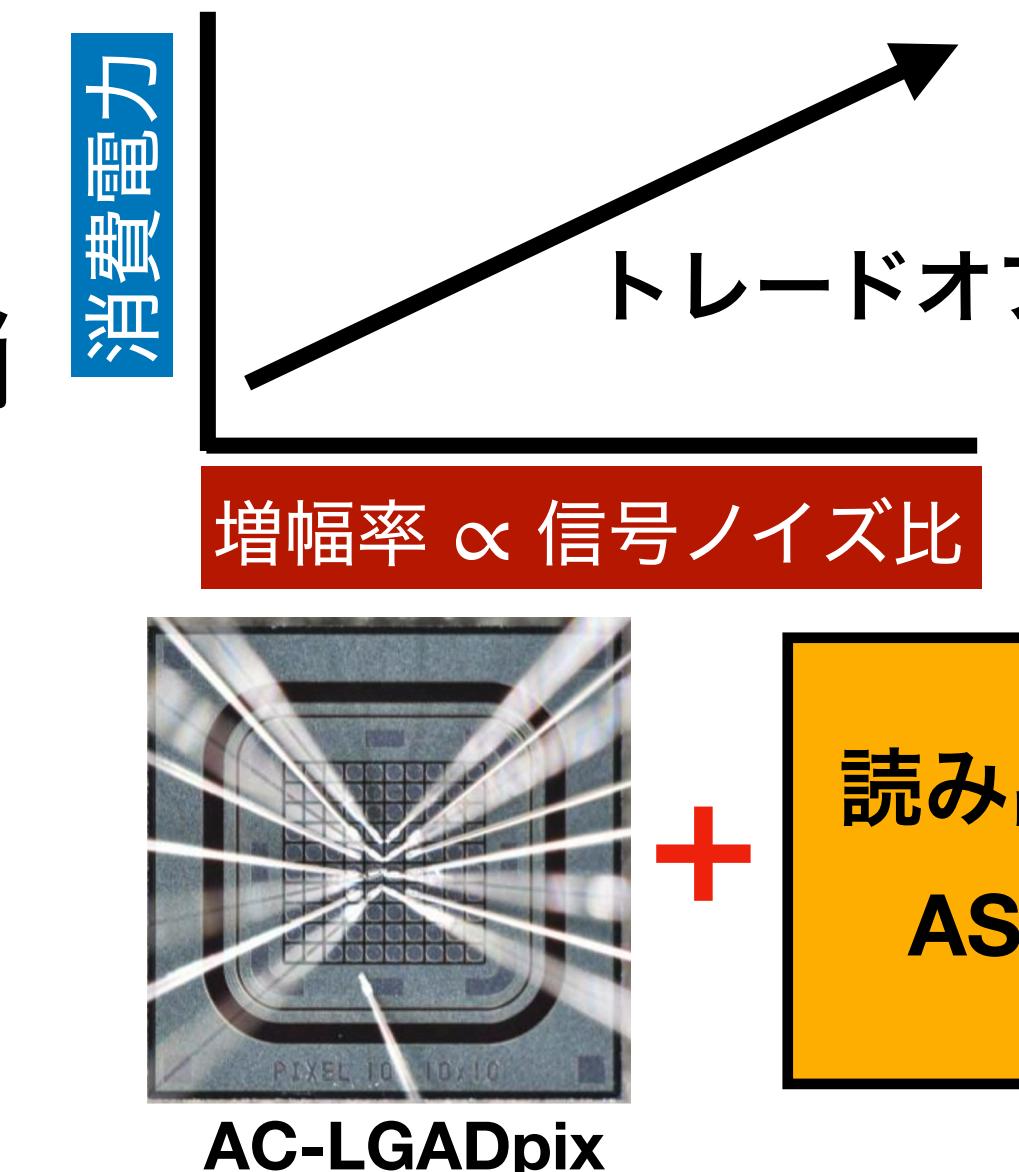


AC-LGADの読み出しASICへの要求

- **低ジッター**=高い信号ノイズ比：高い時間分解能を得るために
- **低消費電力**：冷却機構の要求上限を超えないために
- 消費電力と**アンプの增幅率**を考慮して回路構造を開発する必要がある

本研究の目的

- AC-LGADの信号を30 psの時間分解能かつ低消費電力で読みだすことができるASICの開発
- Si-Ge BJT ASICとCMOS ASICの性能評価を通して、最適なプロセスを決定する



AC-LGADpix



読み出し ASIC



フリップチップ接続



AC-LGAD Module

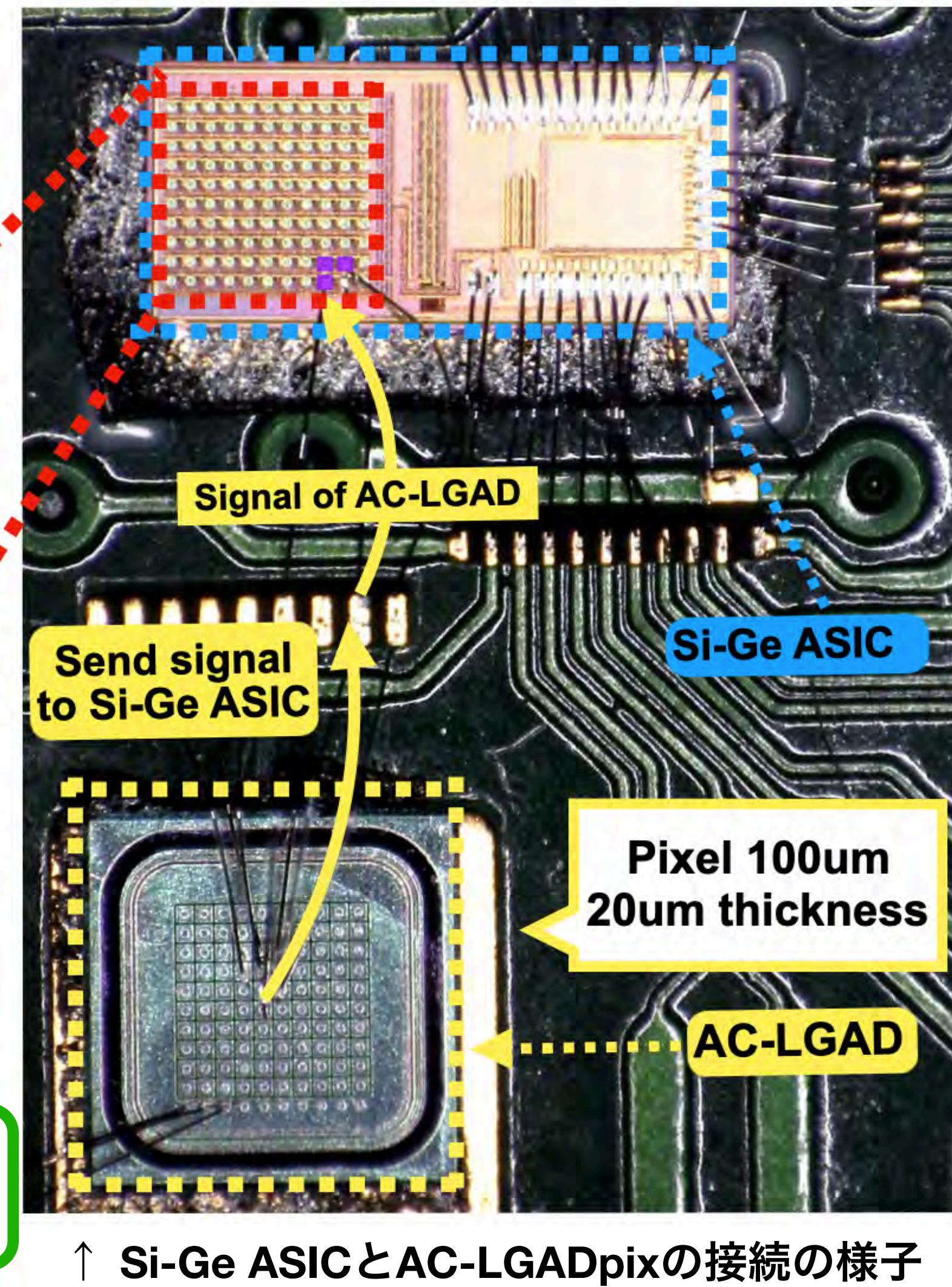
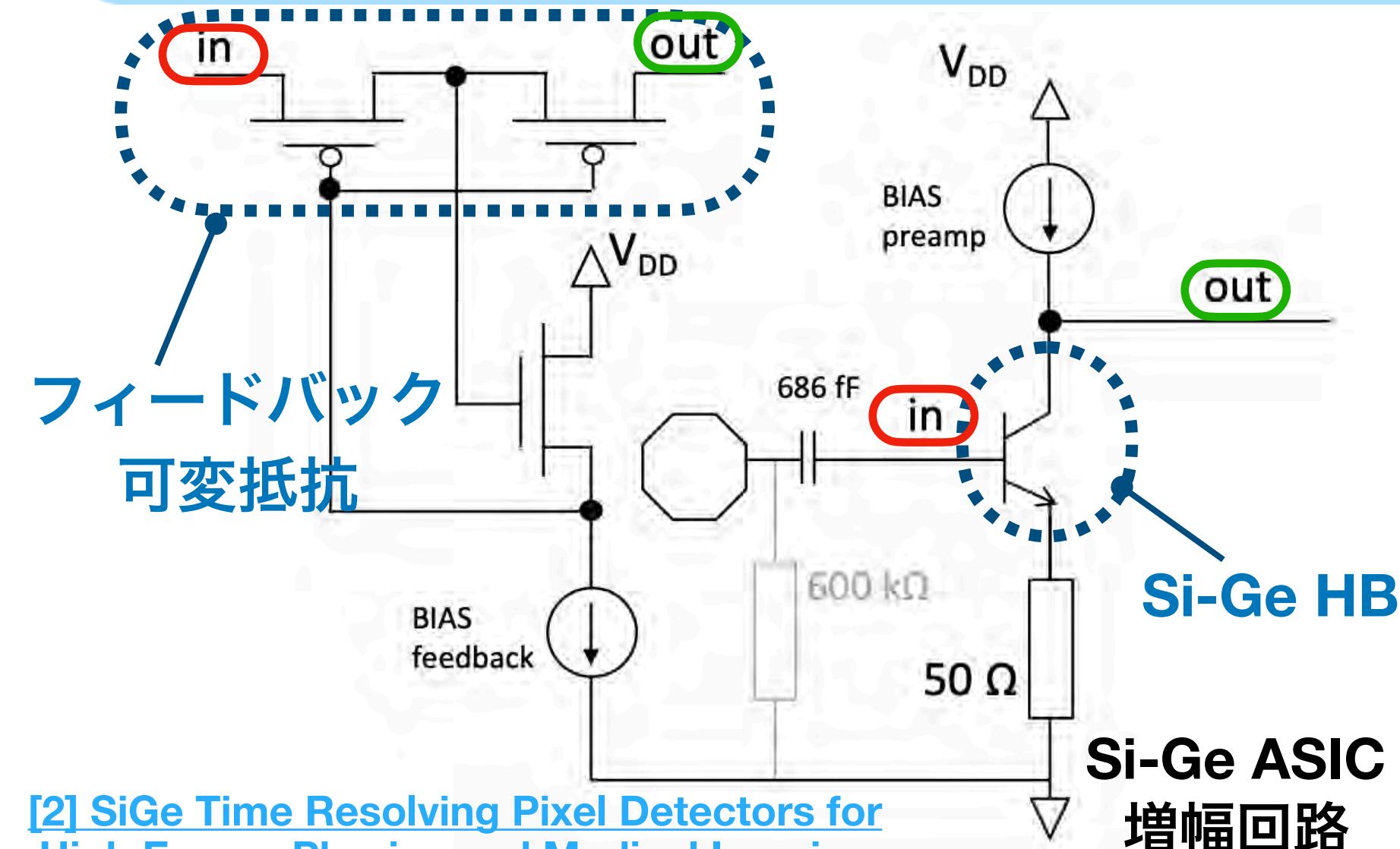
ASICへの要求

- ▶ 入力電荷 2-50 fC
- ▶ 検出器容量 6-10 fF
- ▶ 消費電力 <100 μ W/ch
 - ・ Preamp < 10 μ W/ch
- ▶ ジッター < 10 ps
- ▶ TDC << 30 ps
- ▶ Time walk 補正

Si-Ge ASIC

Si-Ge ASIC の特徴

- Si-Ge (シリコン-ゲルマニウム) を用いた読み出しASIC
→ 入力電荷をフィードバック抵抗で電圧の変換する増幅回路
- Si-GeのHBT : **高い増幅率と速い読み出しが特徴**
- ASICの入力電極は $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ の電極が 10×10 の100 個存在
- Si-Ge ASICの性能評価では、アナログ回路の信号を出力できる3ch 分の信号を用いて行う。

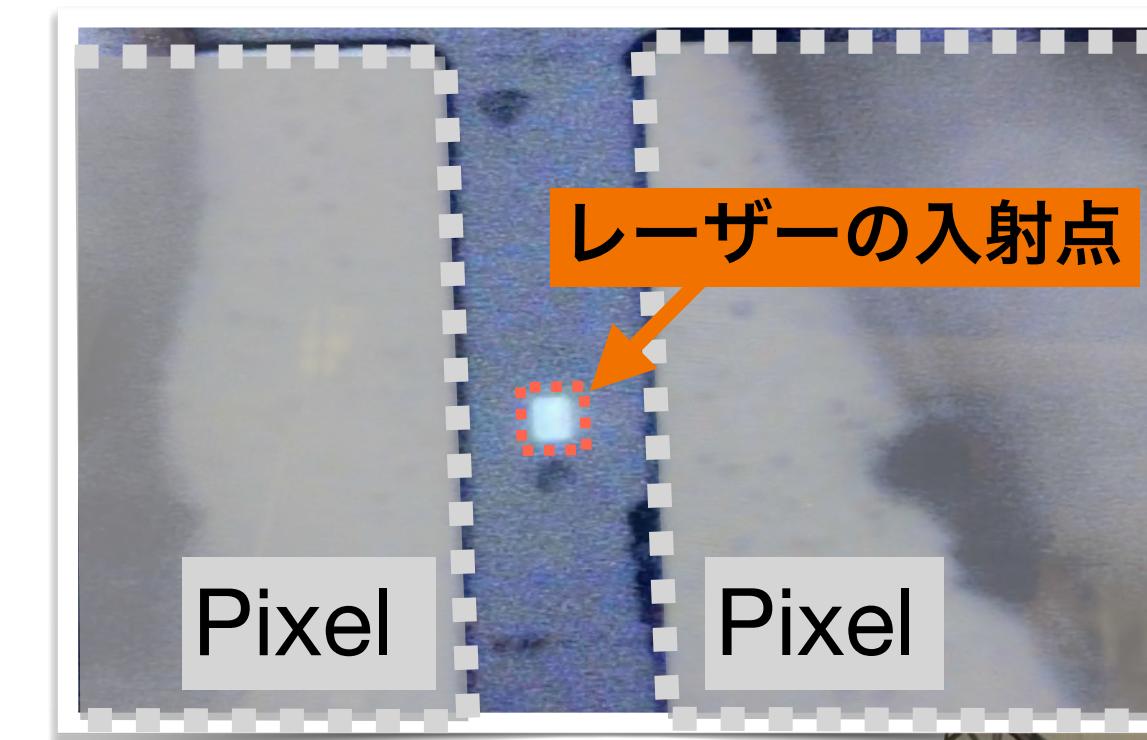


[2] SiGe Time Resolving Pixel Detectors for High Energy Physics and Medical Imaging

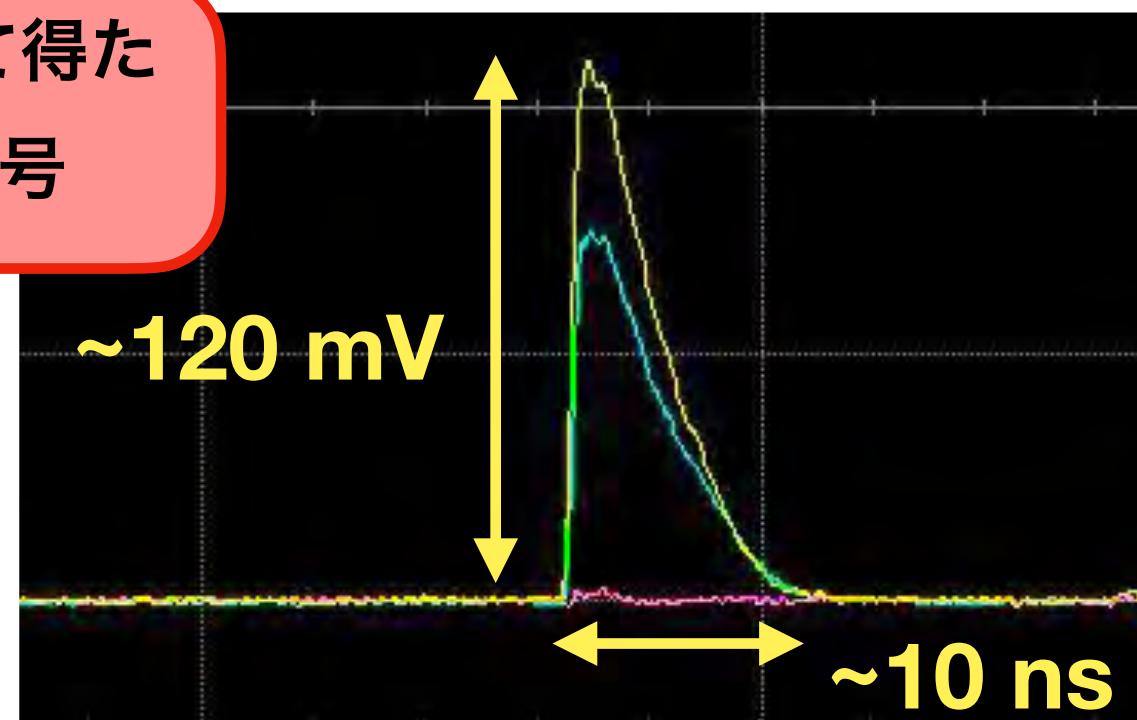
測定セットアップと解析方法

レーザーのセットアップ

- 赤外線パルスレーザー：波長 1064 nm
- レーザーの焦点を **2 μm** まで絞ることが可能
→Pixel電極の間にレーザーを入射できる

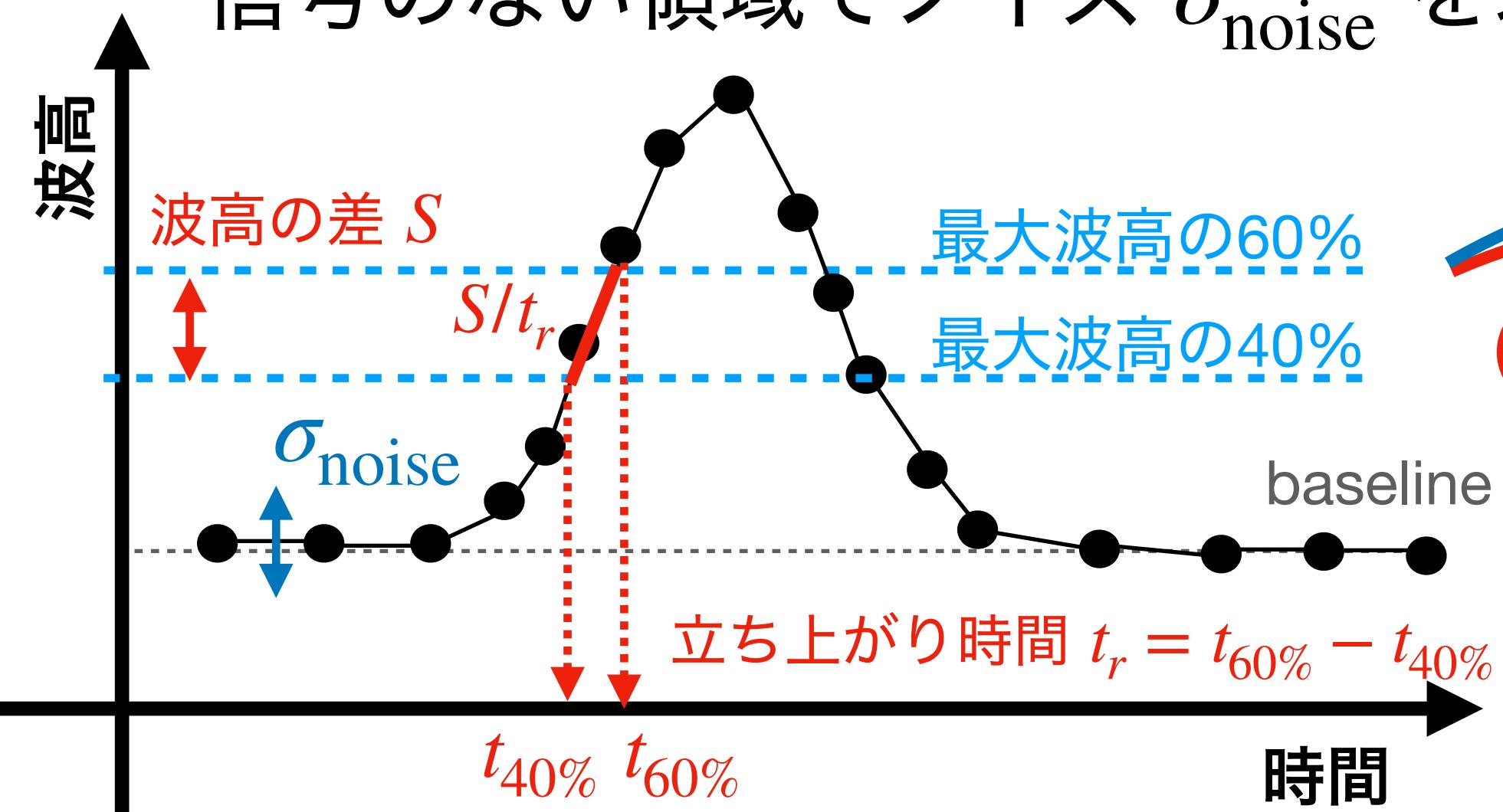


IRレーザーを使って得た
Si-Ge ASICの信号

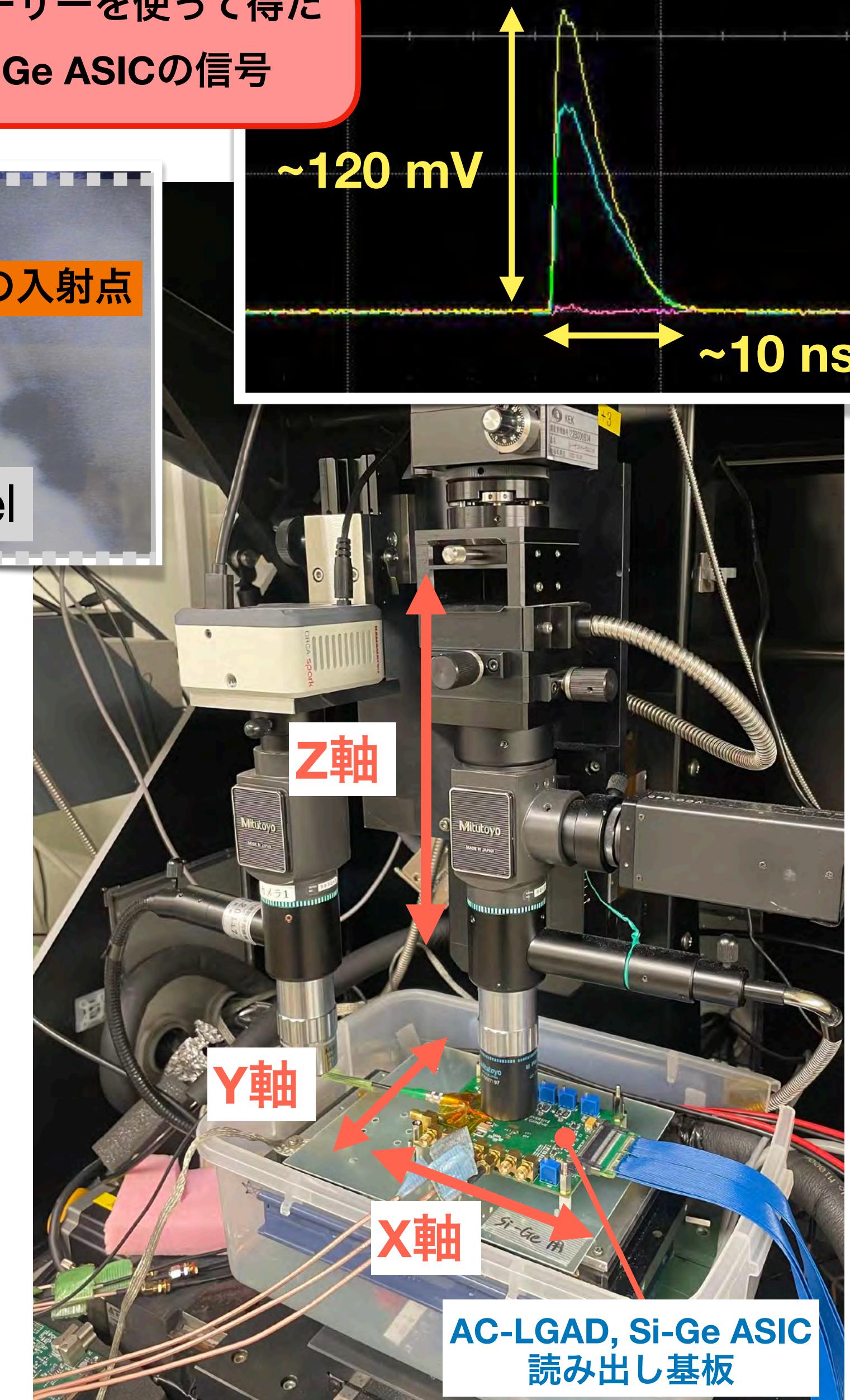


ジッターの解析方法

- 信号波形から、波高の40%から60%の時の信号の傾き S/t_r と、
信号のない領域でノイズ σ_{noise} を求めてジッターを計算する



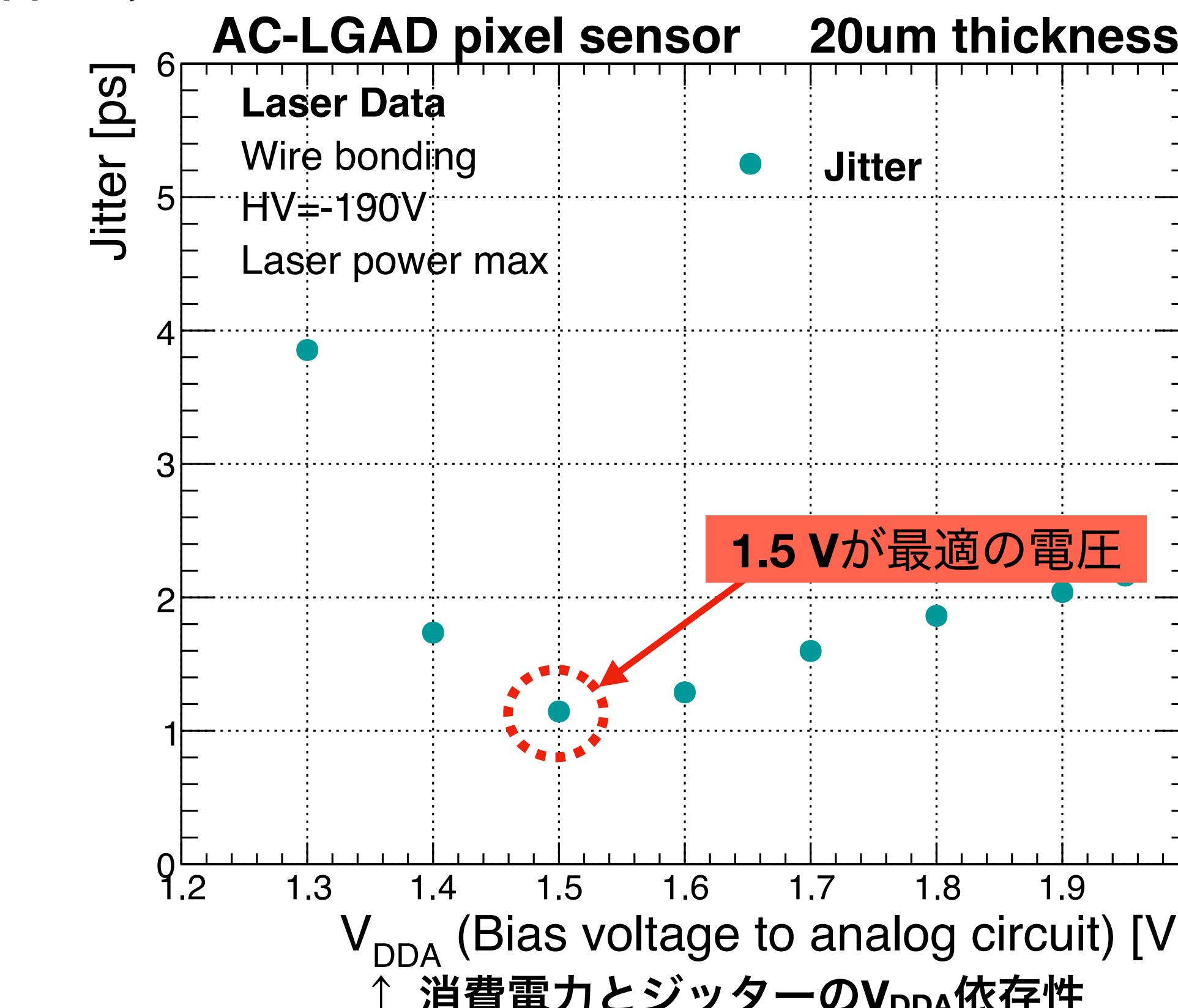
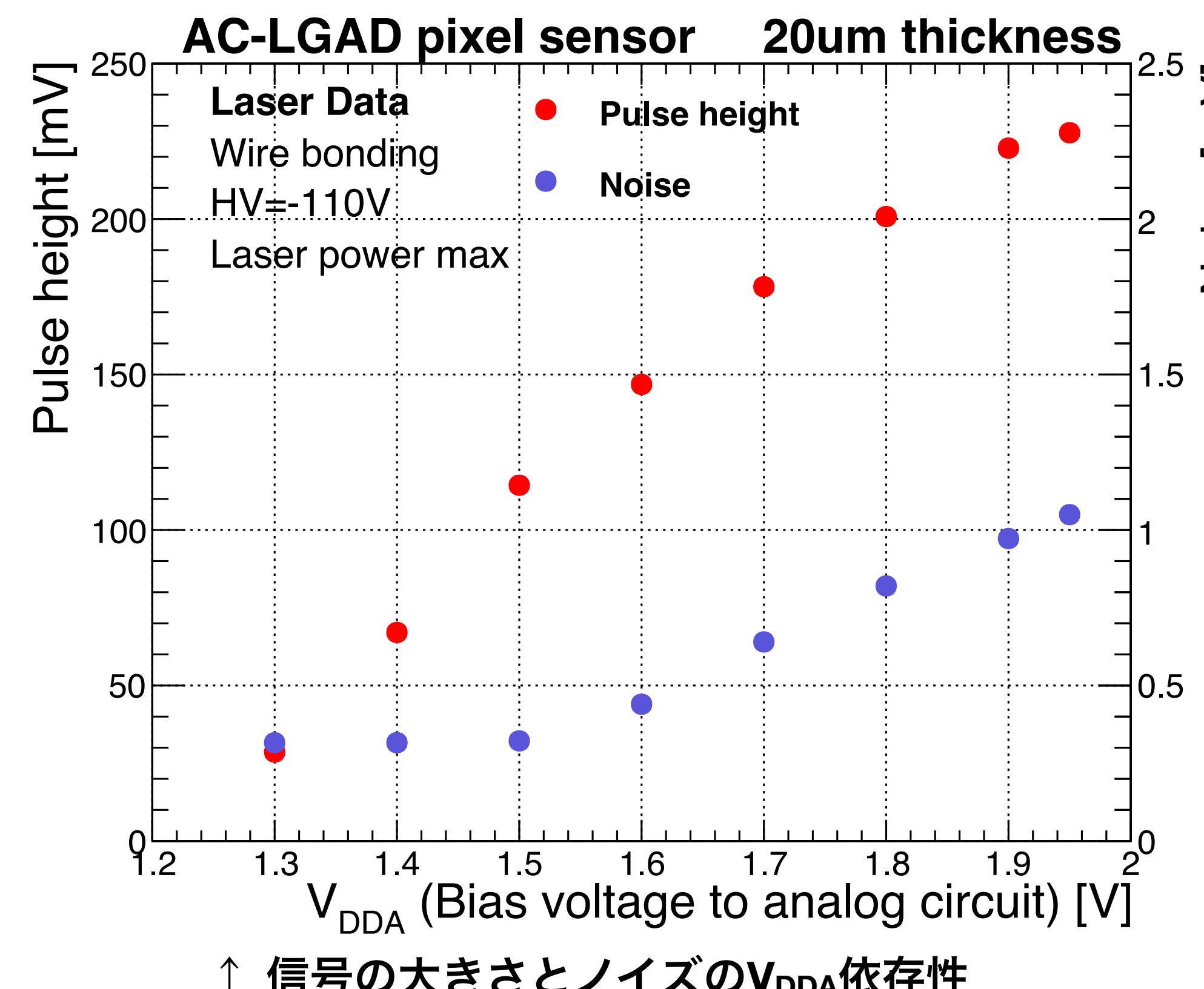
$$\sigma_{jitter} = \frac{\sigma_{noise}}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} = \sigma_{noise} \cdot \left| \frac{S}{t_r} \right|$$



レーザー測定の結果

最適な V_{DDA} の測定

- レーザー強度を最大にして測定
- V_{DDA} が上昇するに伴って波高とノイズも増加→最小のノイズは **~ 0.3 mV**
- ジッターが最も小さい時の電圧を最適な V_{DDA} とすると **1.5 V**



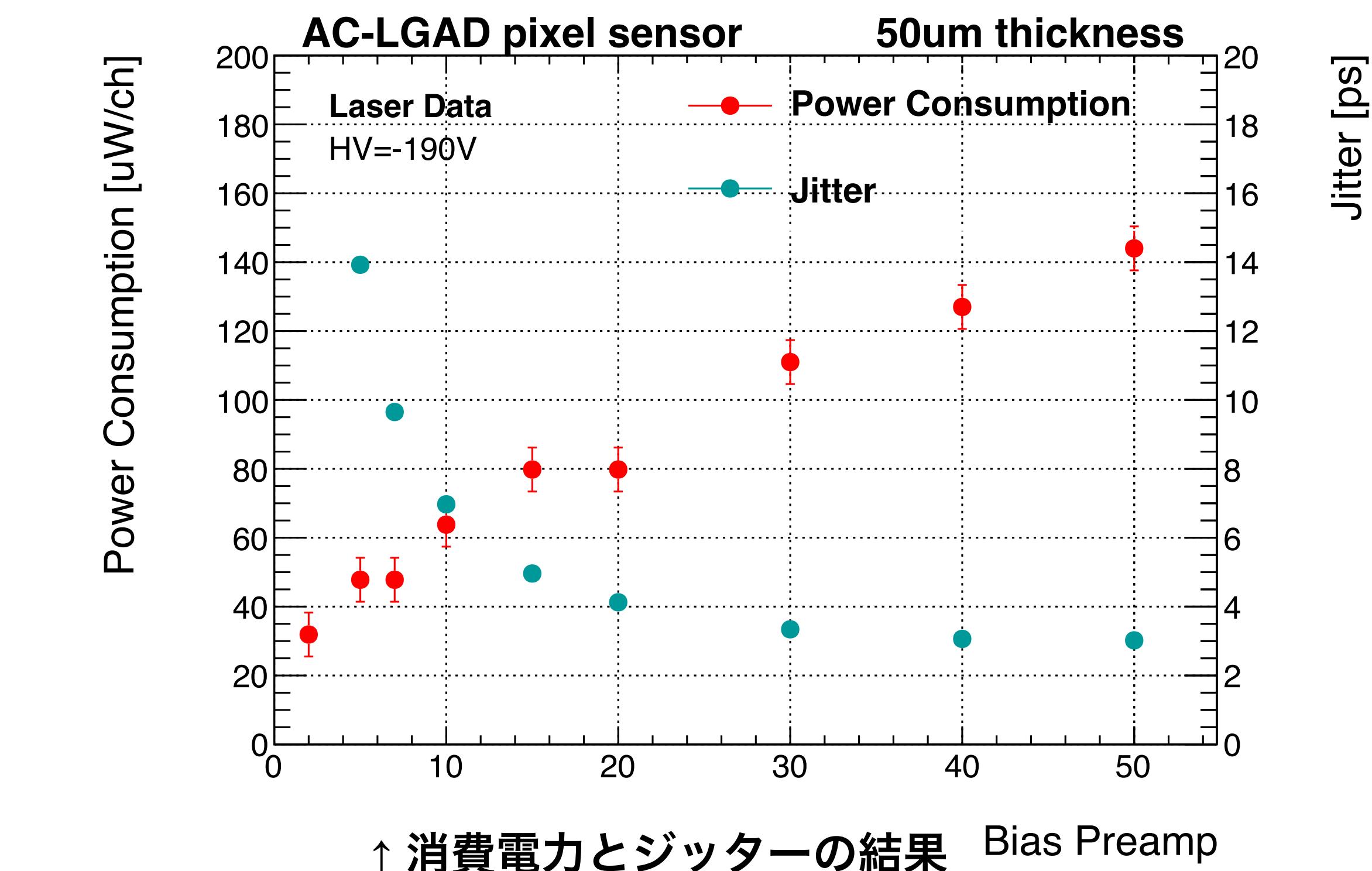
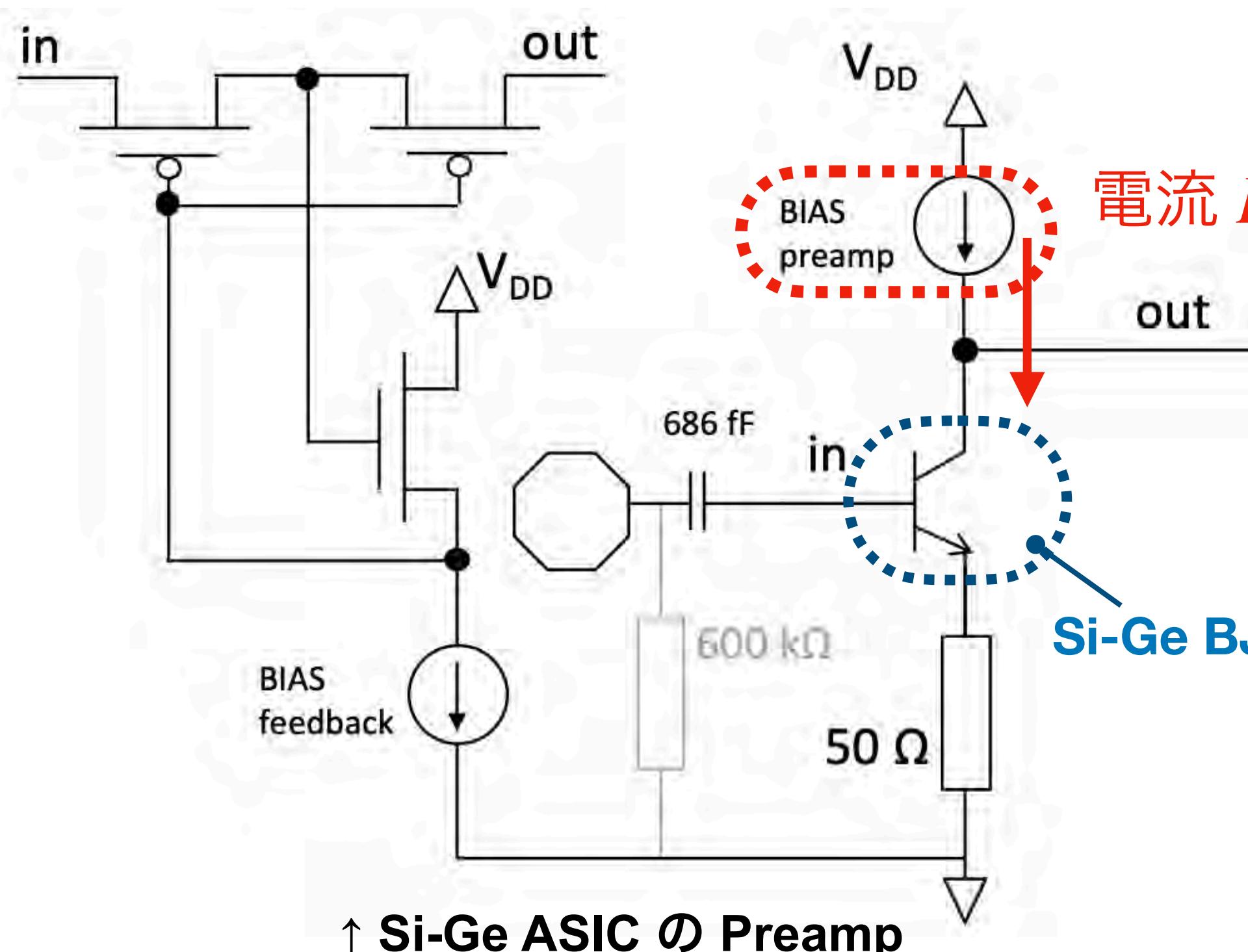
1MIP相当のレーザー測定

消費電力vsジッター

- MIP相当のレーザー強度でジッターの消費電力依存性を測定
- Si-Ge BJTへ流す電流を変えることで、消費電力を調節することができる。
- Si-Ge ASICの最高性能：ジッター 3.02 ps, 消費電力 $144 \pm 6 \mu\text{W}/\text{ch}$
消費電力を抑えた時の性能：ジッター 9.65 ps, 消費電力 $47.8 \pm 6 \mu\text{W}/\text{ch}$

ASICへの要求

- ▶ 消費電力 $< 100 \mu\text{W}/\text{ch}$
 - ・ Preamp $< 10 \mu\text{W}/\text{ch}$
- ▶ ジッター $< 10 \text{ ps}$



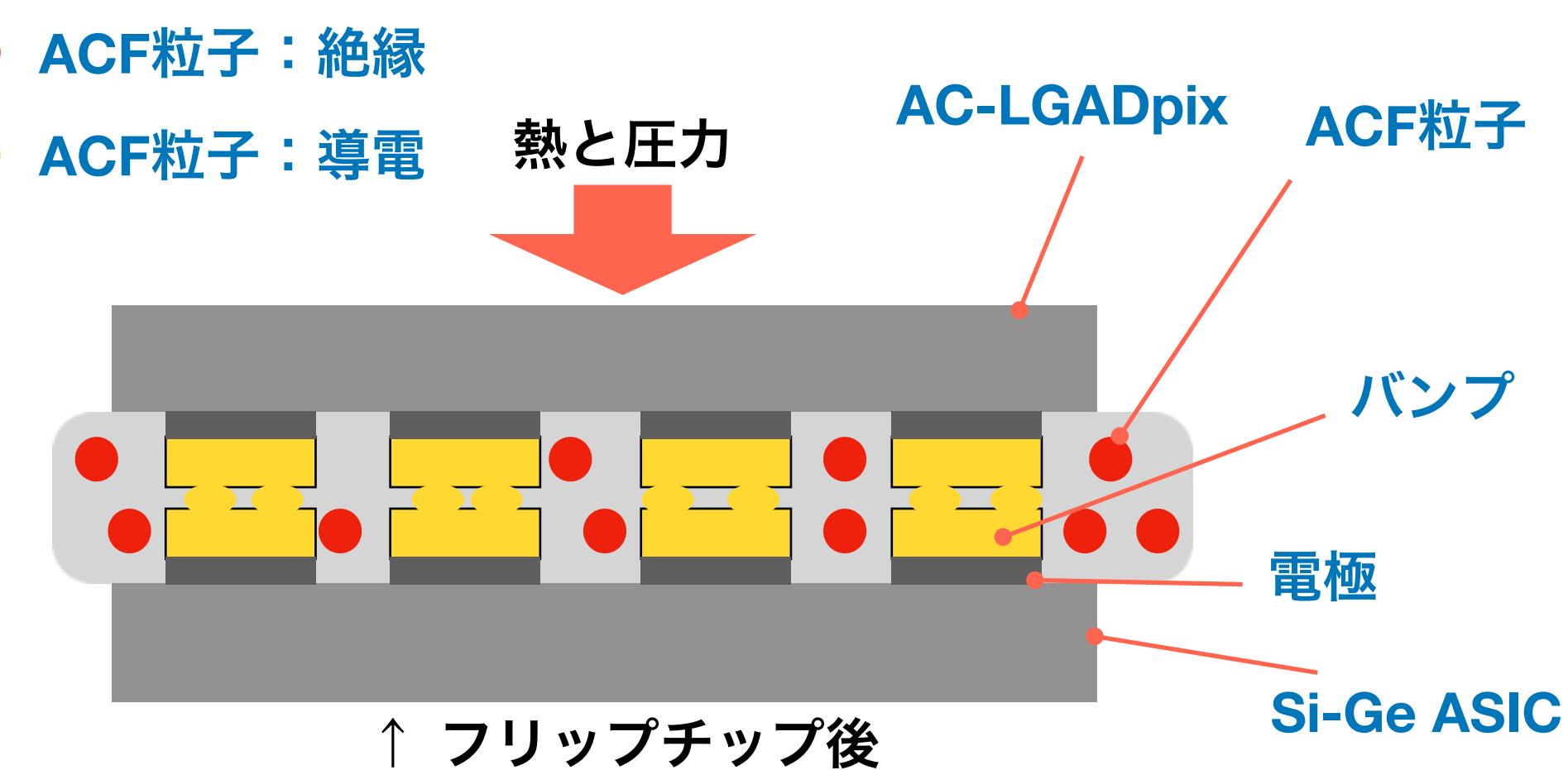
フリップチップ接続

ACFを用いたフリップチップ

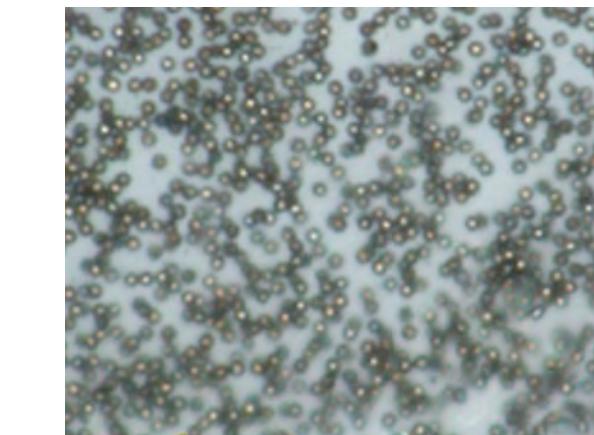
- ACF (異方導電性フィルム) を用いて、AC-LGADとSi-Ge ASICをフリップチップ
- ACFに含まれる粒子はポリマーを導電層と絶縁層でコーティングした構造
- 電極上にACF粒子を潰すためのバンプを形成
- バンプでACF粒子を潰すことで潰された領域のみ接続



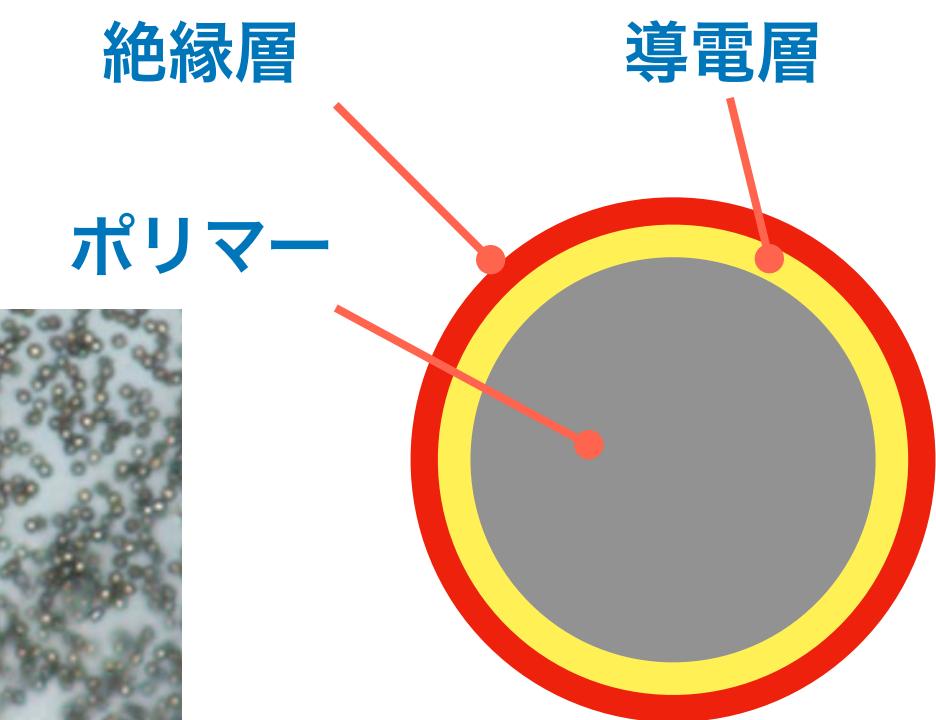
↑ フリップチップボンダー
(ACCμRA 100)



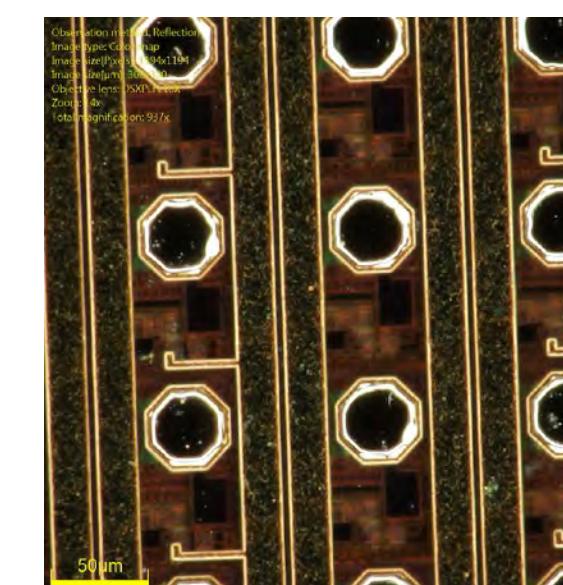
↑ ACF



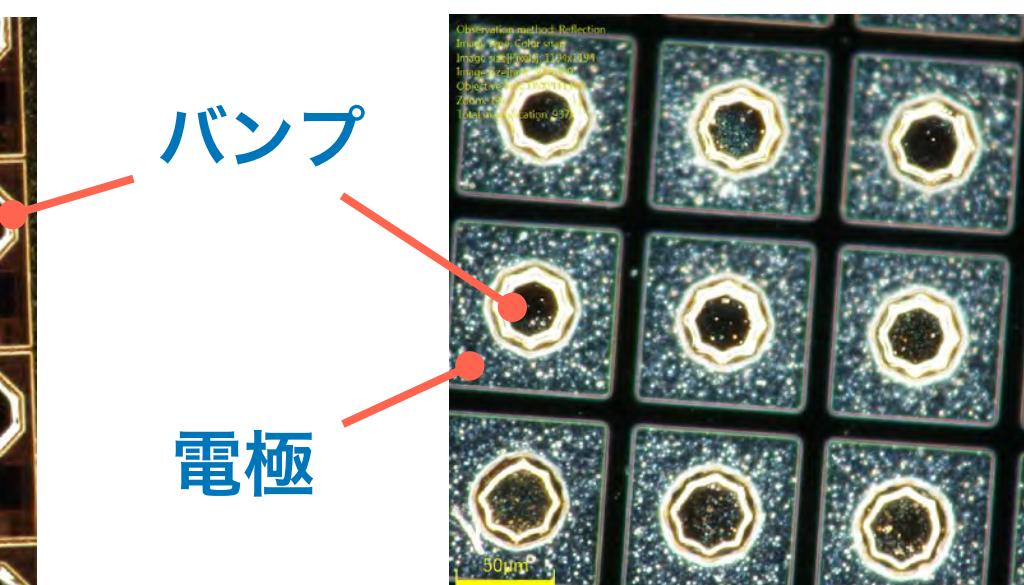
↑ ACFの拡大図



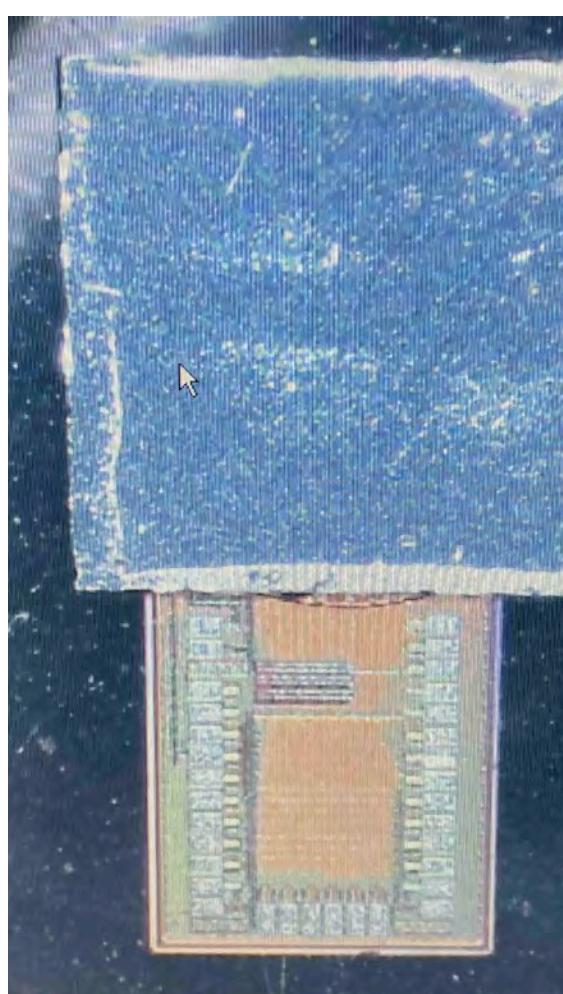
↑ ACF粒子の断面図



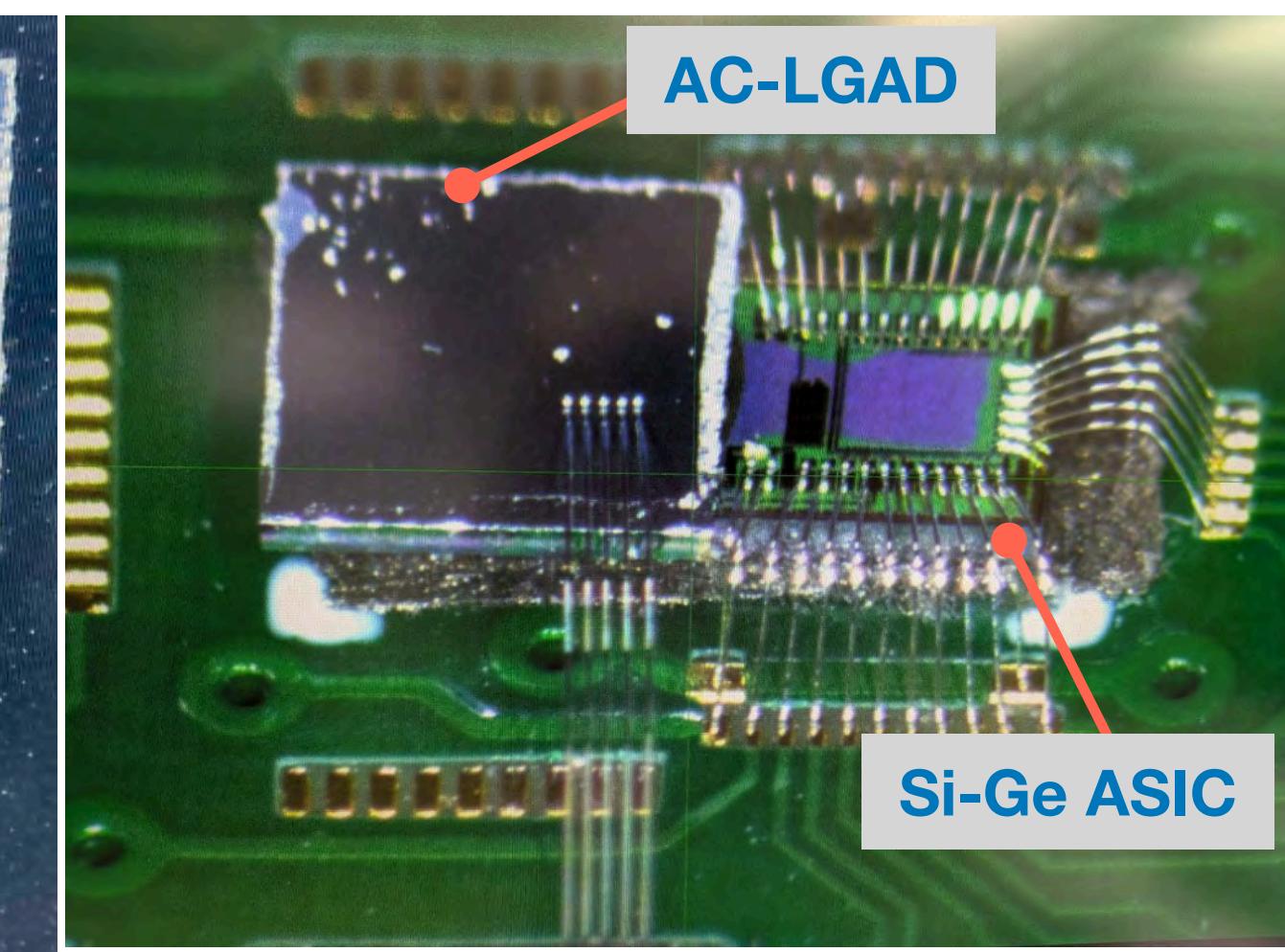
↑ Si-Ge ASIC と AC-LGAD の電極上のバンプ



バンプ
電極



↑ フリップチップ後



ベータ線測定のセットアップと解析方法

測定セットアップ

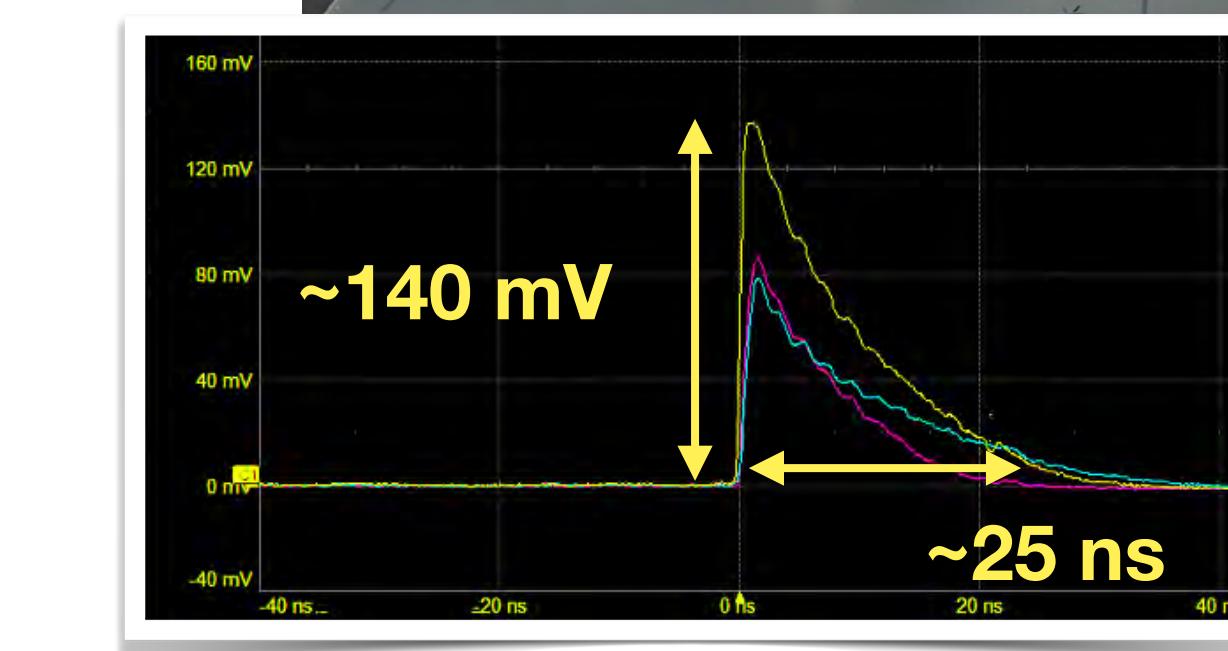
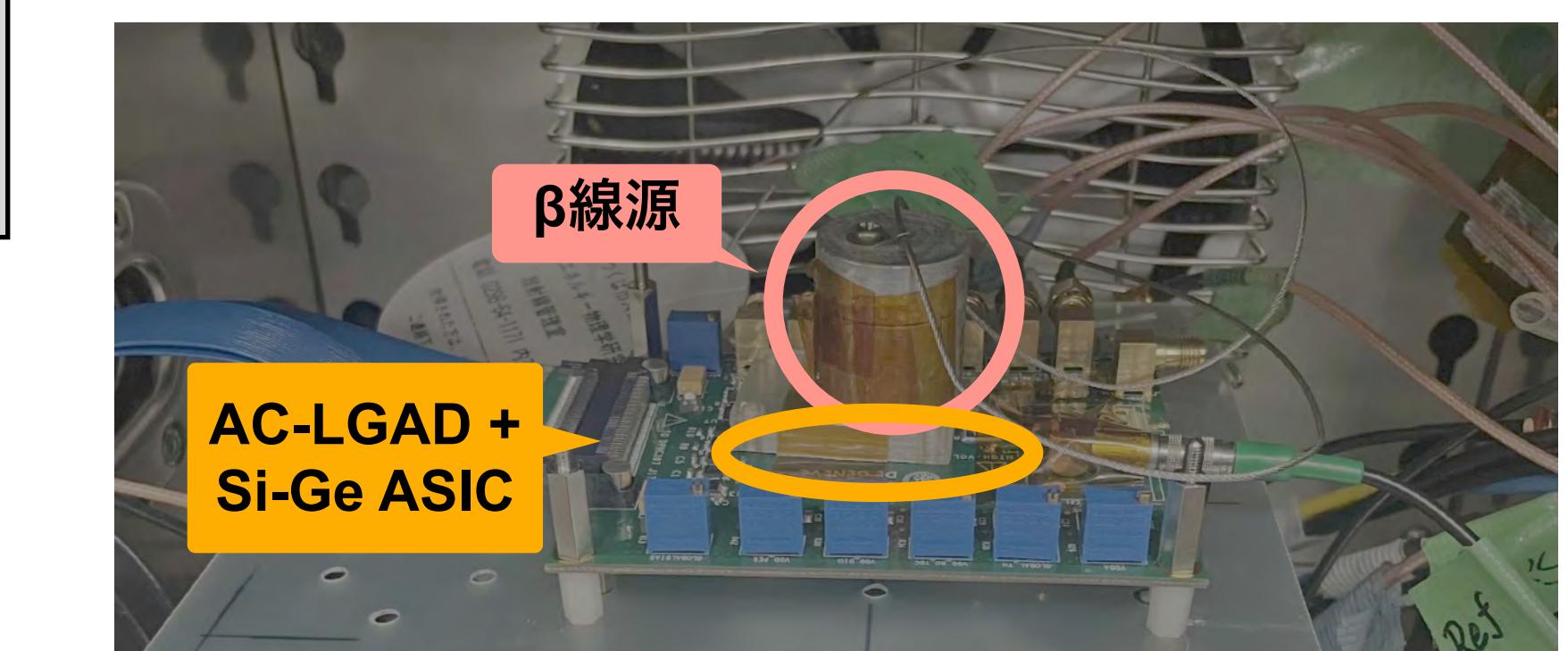
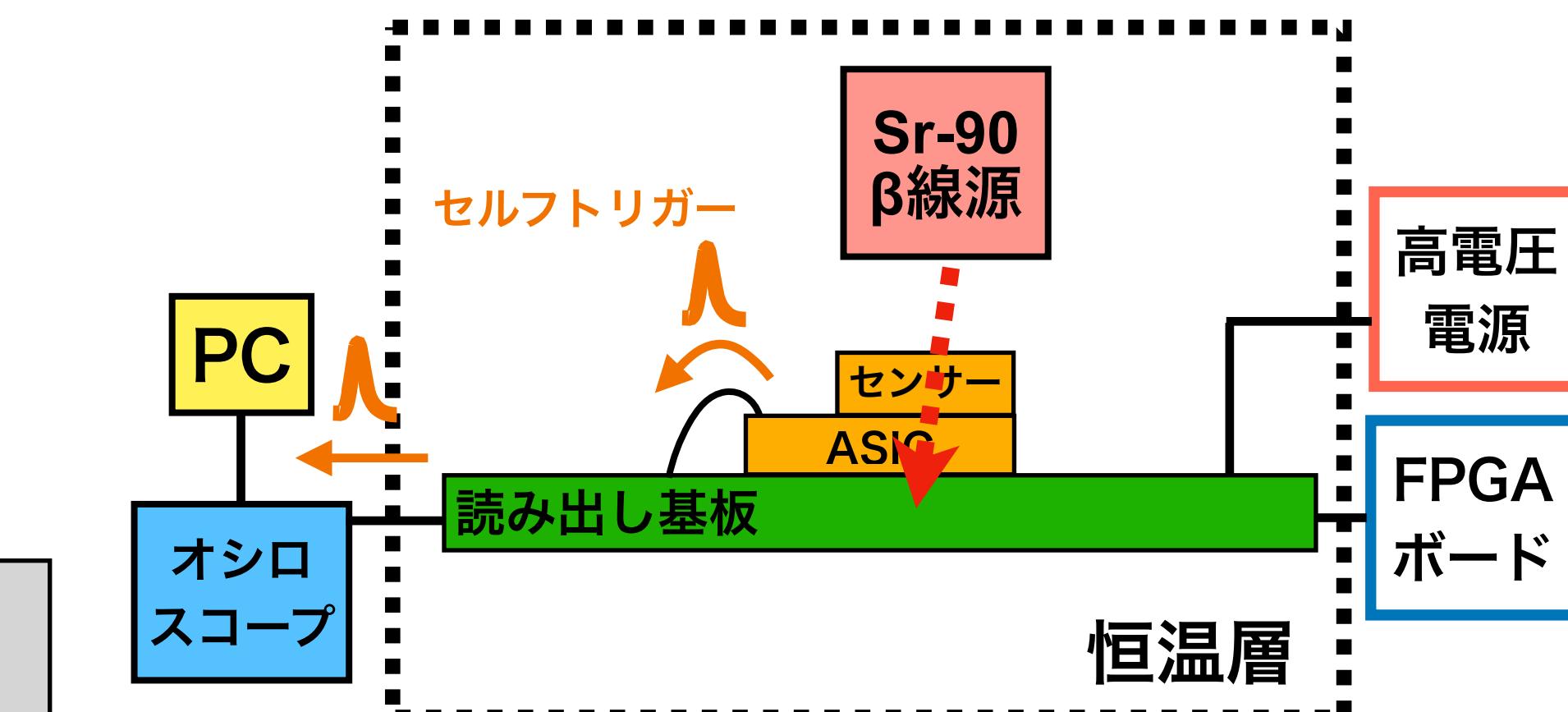
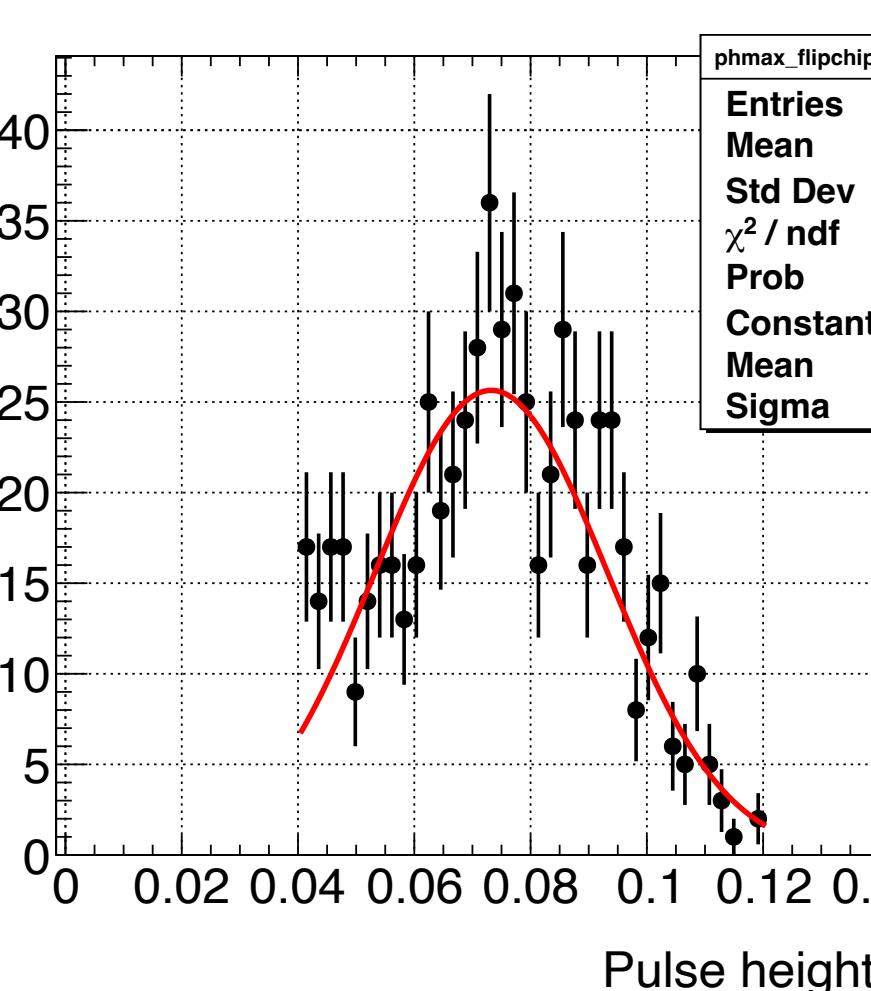
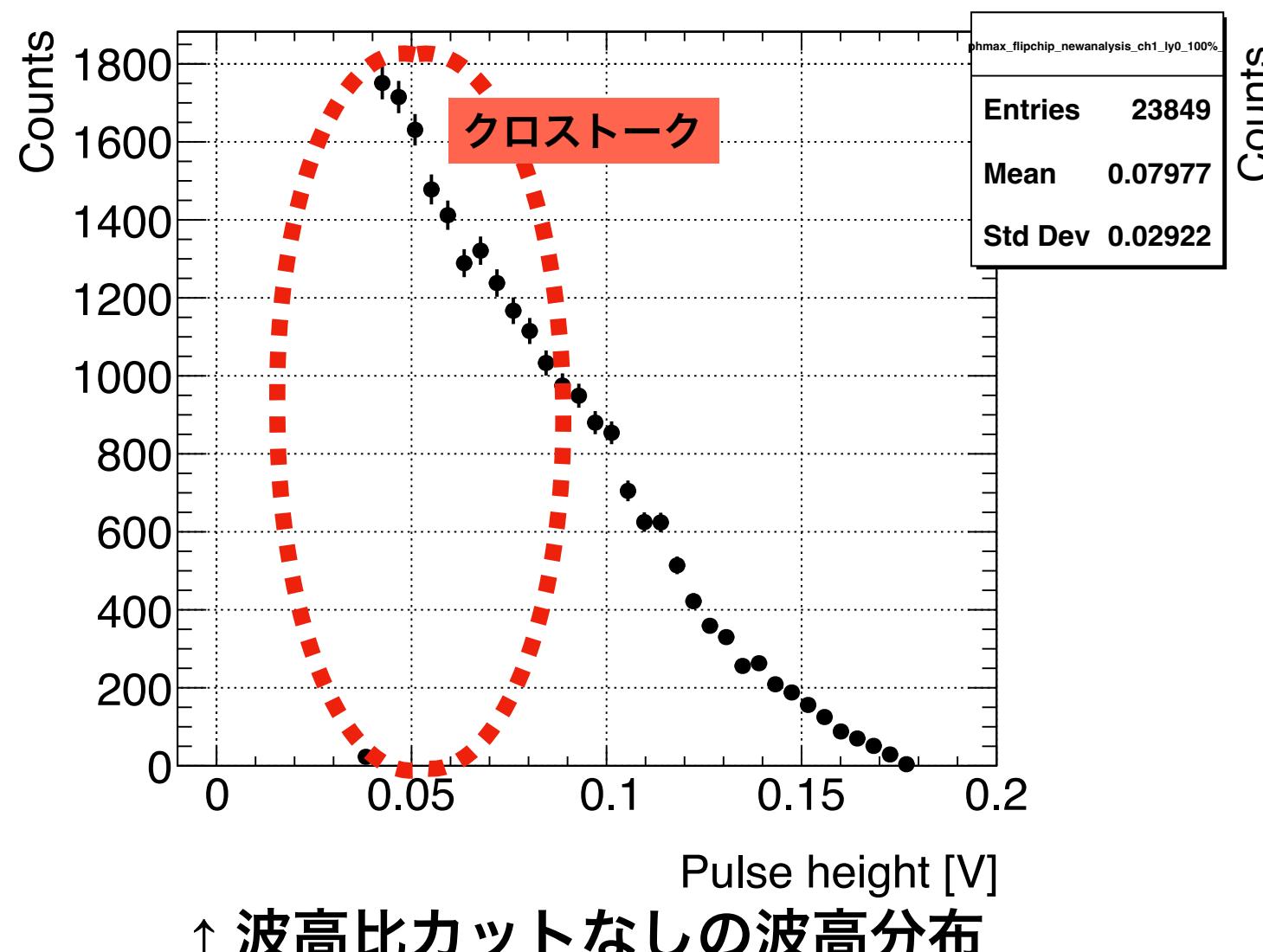
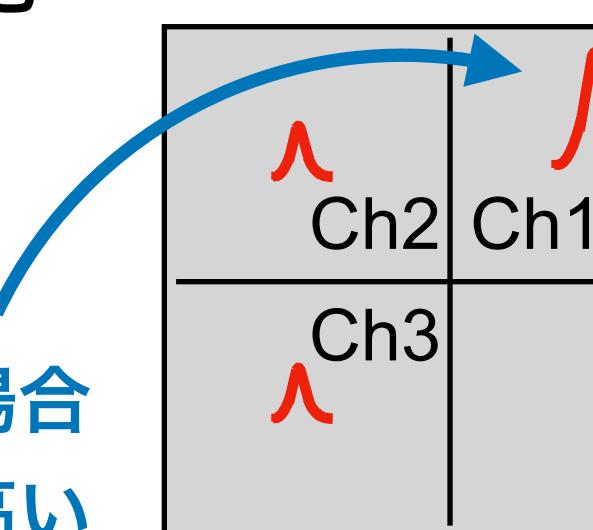
- ベータ線：ストロンチウム90, セルフトリガーで測定

解析方法

- 波高を求めるために隣のチャンネルとの波高比でクロストークを除去

$$\frac{Ph_{ch2}}{Ph_{ch1}} < 50\%, \frac{Ph_{ch3}}{Ph_{ch1}} < 50\%$$

ch1にヒットした場合
ch1が最も波高が高い

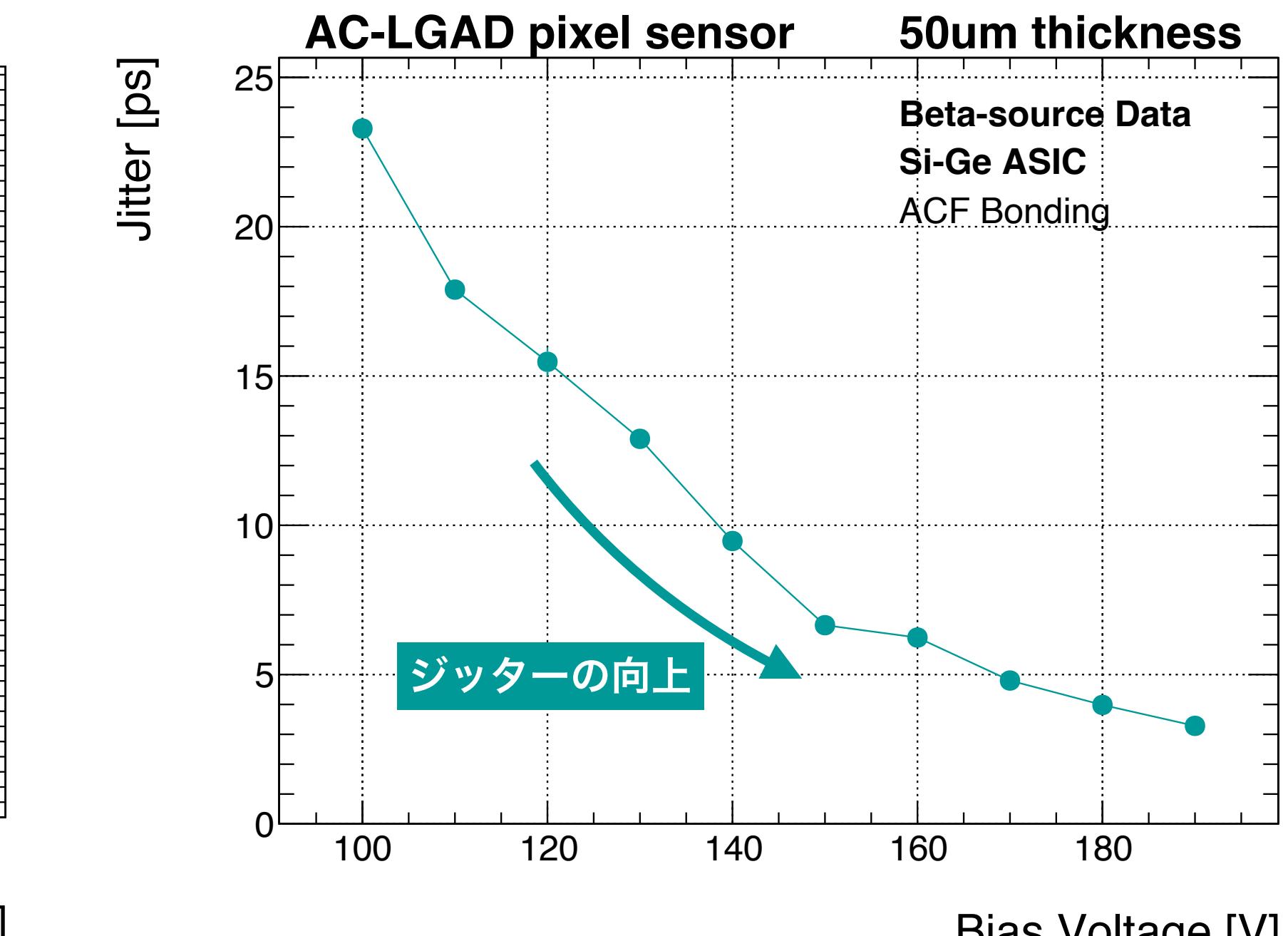
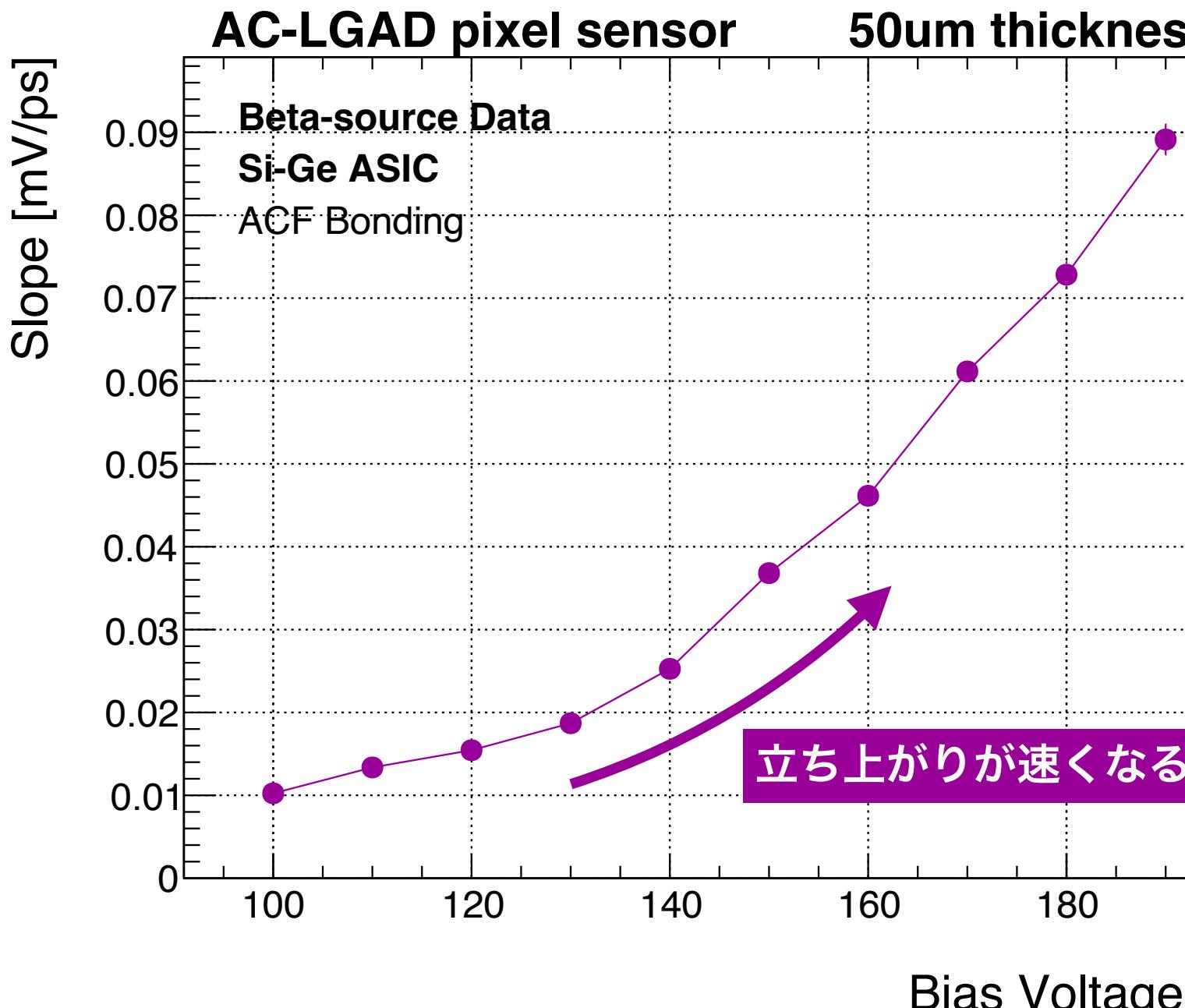
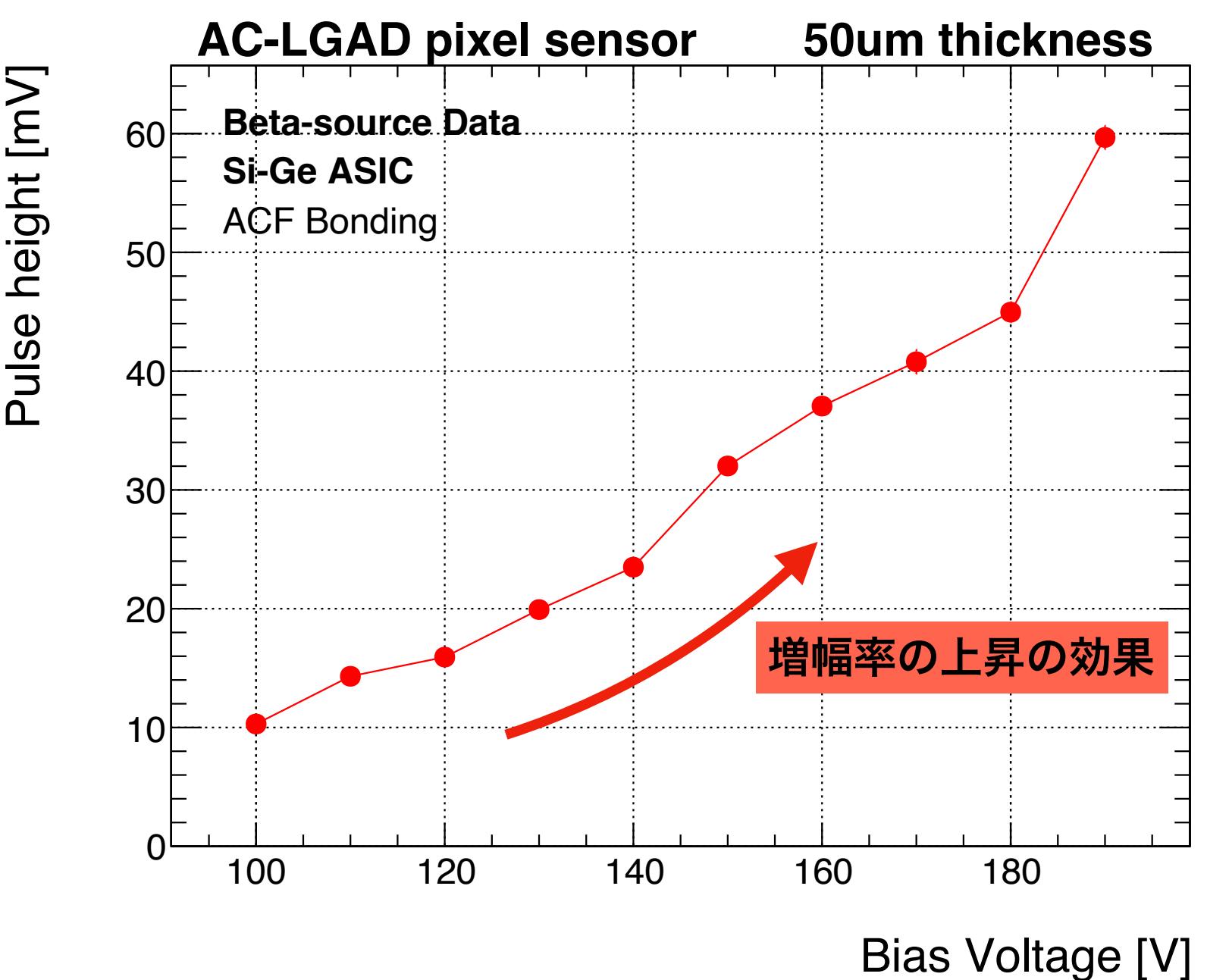
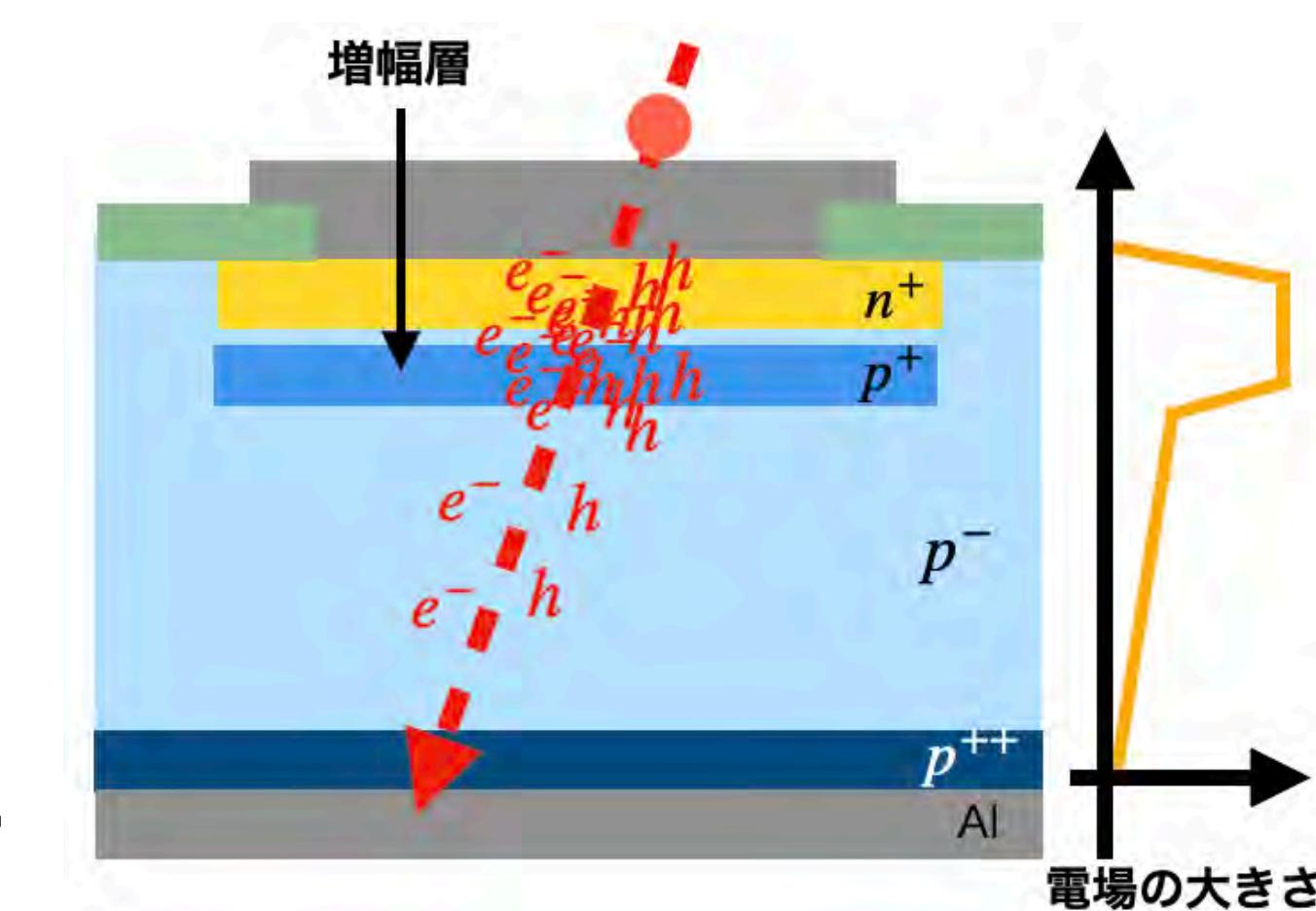


↑ ベータ線セットアップ

ベータ線の結果

信号の大きさとジッターのHVカーブ

- 印加電圧を増やすとLGADの增幅率が上昇
→信号が大きく、立ち上がりが速くなるためジッターが向上
- 運転電圧190V印加時：信号の大きさ60 mV, ジッター4.0 ps

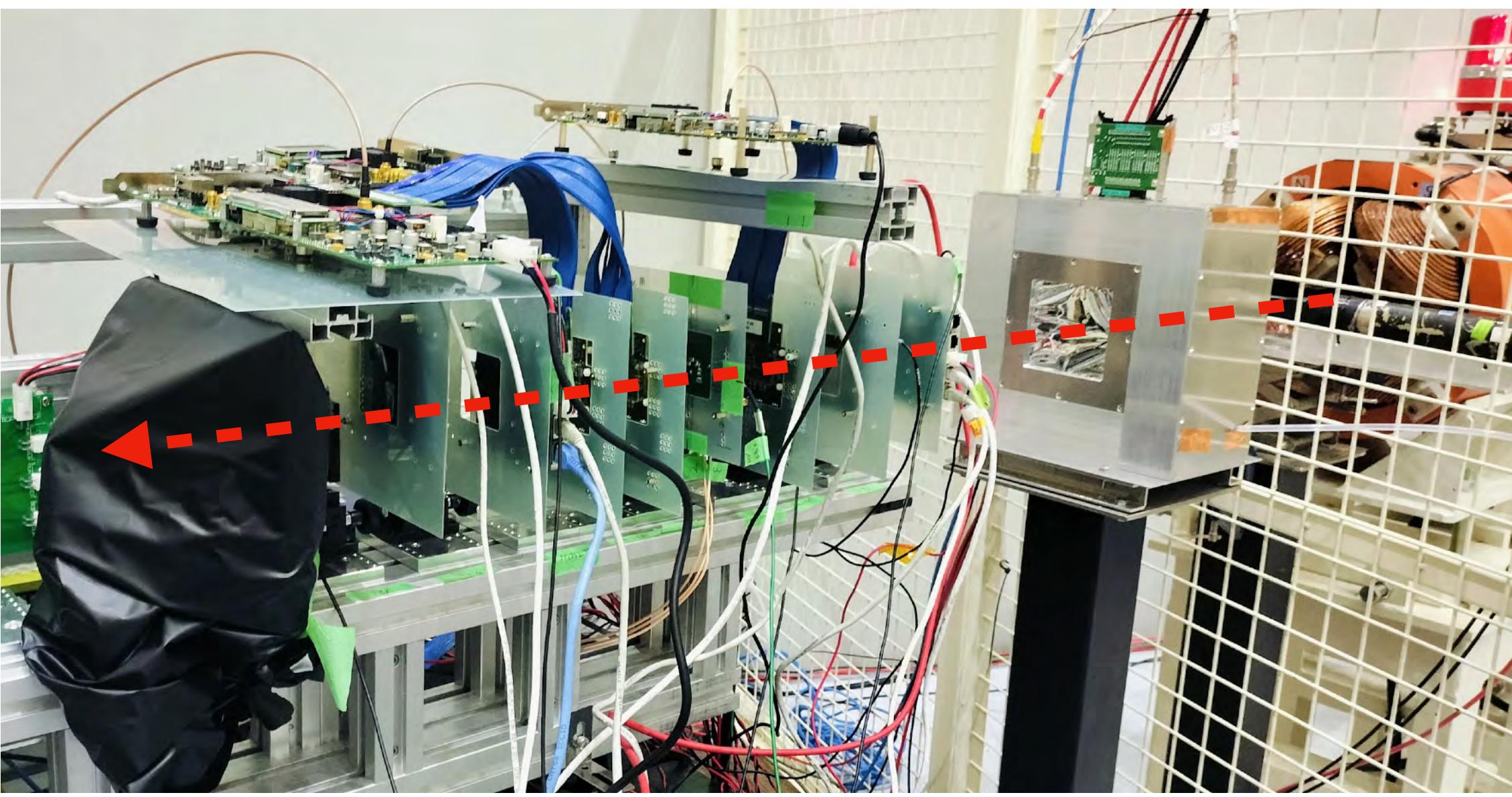


テストビーム at KEK AR-TBL

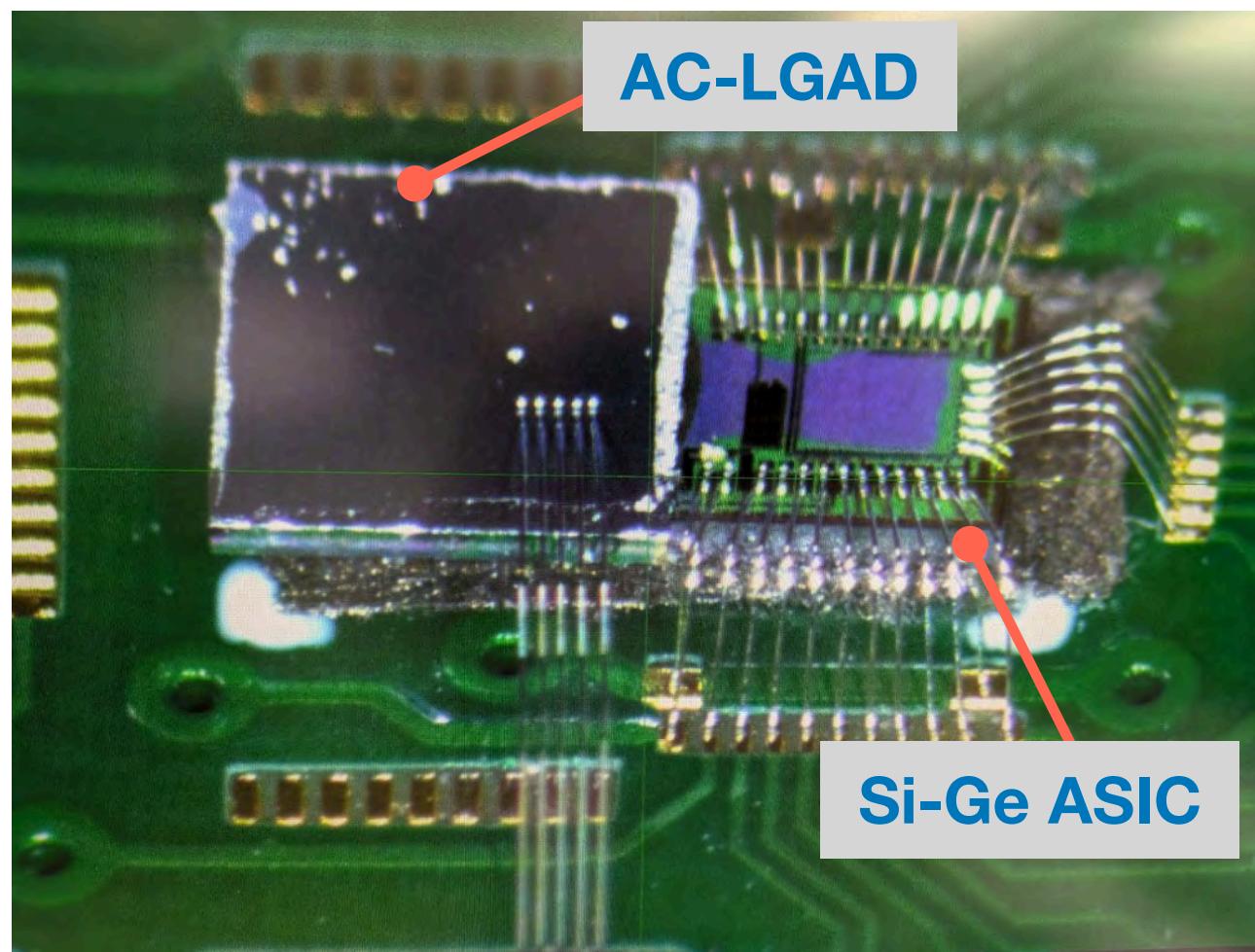
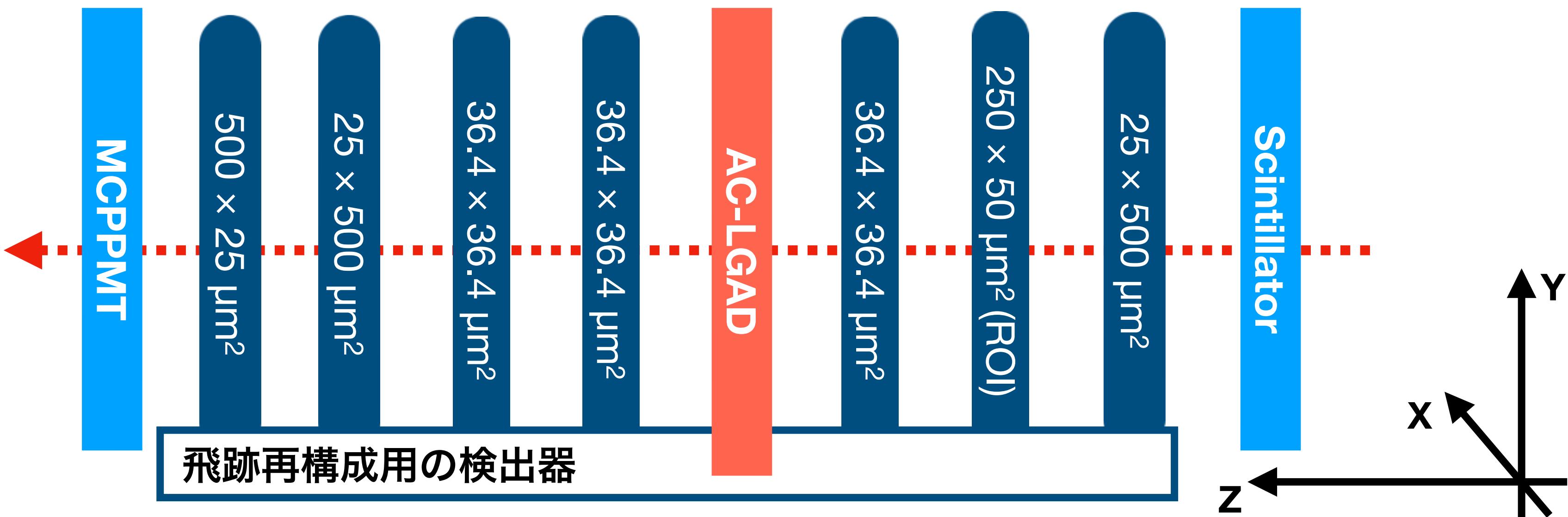
- 目的 : AC-LGADとSi-Ge ASICのモジュールの位置
分解能, 検出効率, 時間分解能の評価

セットアップ

- KEK AR-TBL : 3 GeV電子ビーム
- 7枚の検出器を飛跡再構成に使用
- 測定対象 : ACF接続のAC-LGADpixとSi-Ge ASIC

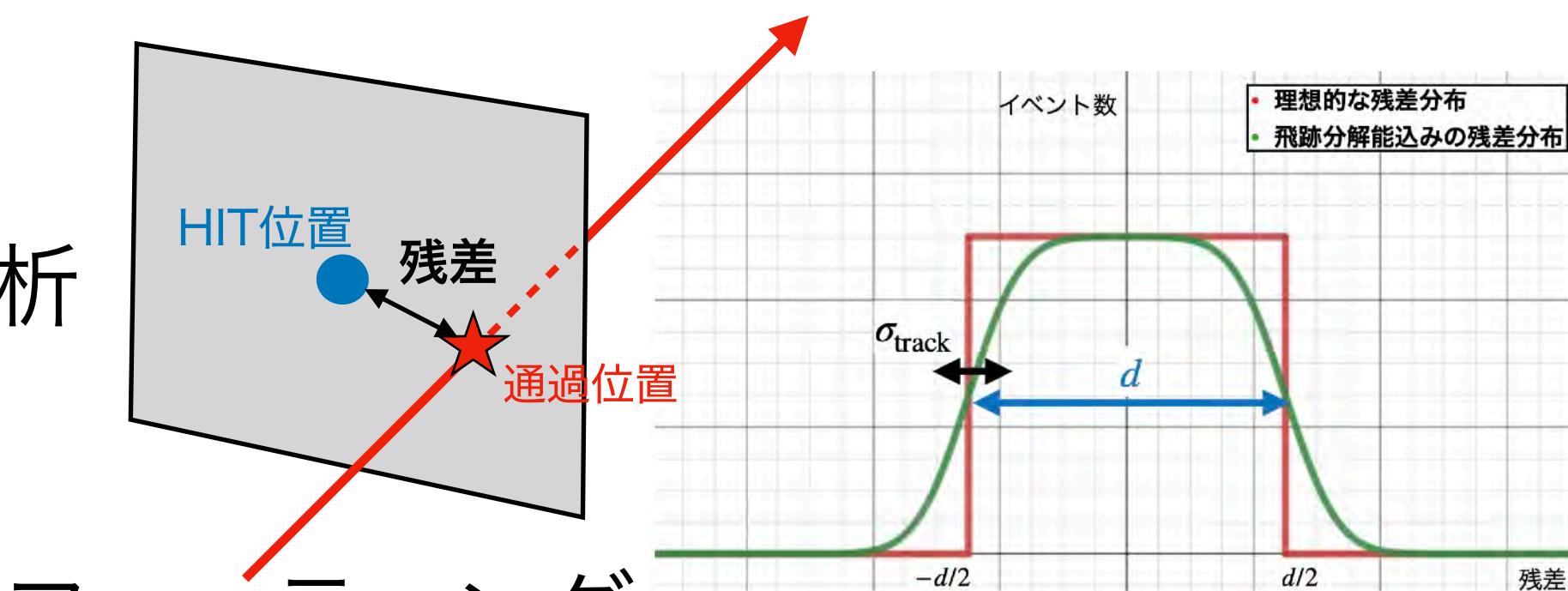


↑ テストビームのセットアップ



Track分解能, 位置分解能

- ト ラッ クの通 過位 置と 検出 器の ヒット 位 置から 位 置分 解能を 解 析
 - ・ 検出 器の ヒット 位 置は 最 大波 高チ ャンネル の電 極中 心
- エ ラー 関 数の 電 極幅に 対応する 变 数(p_1-p_2)は 100 μm に 固定 し て フィッ ティング



σ_{track}^2 : 飛跡の位置分解能

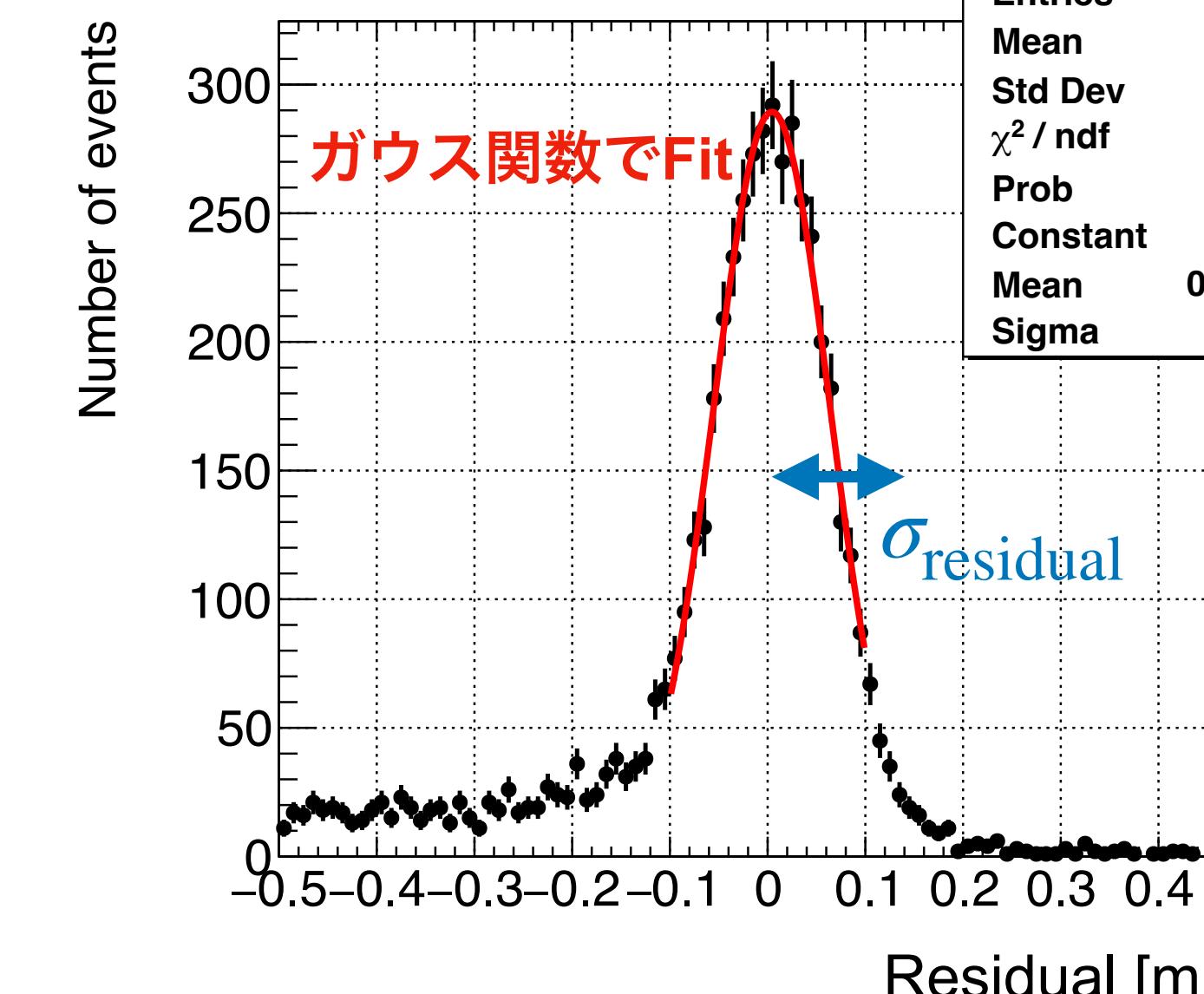
- ・ 飛跡再構成の 不定性
- ・ エラー関数で評価

$\sigma_{\text{detector}}^2$: 検出器の位置分解能

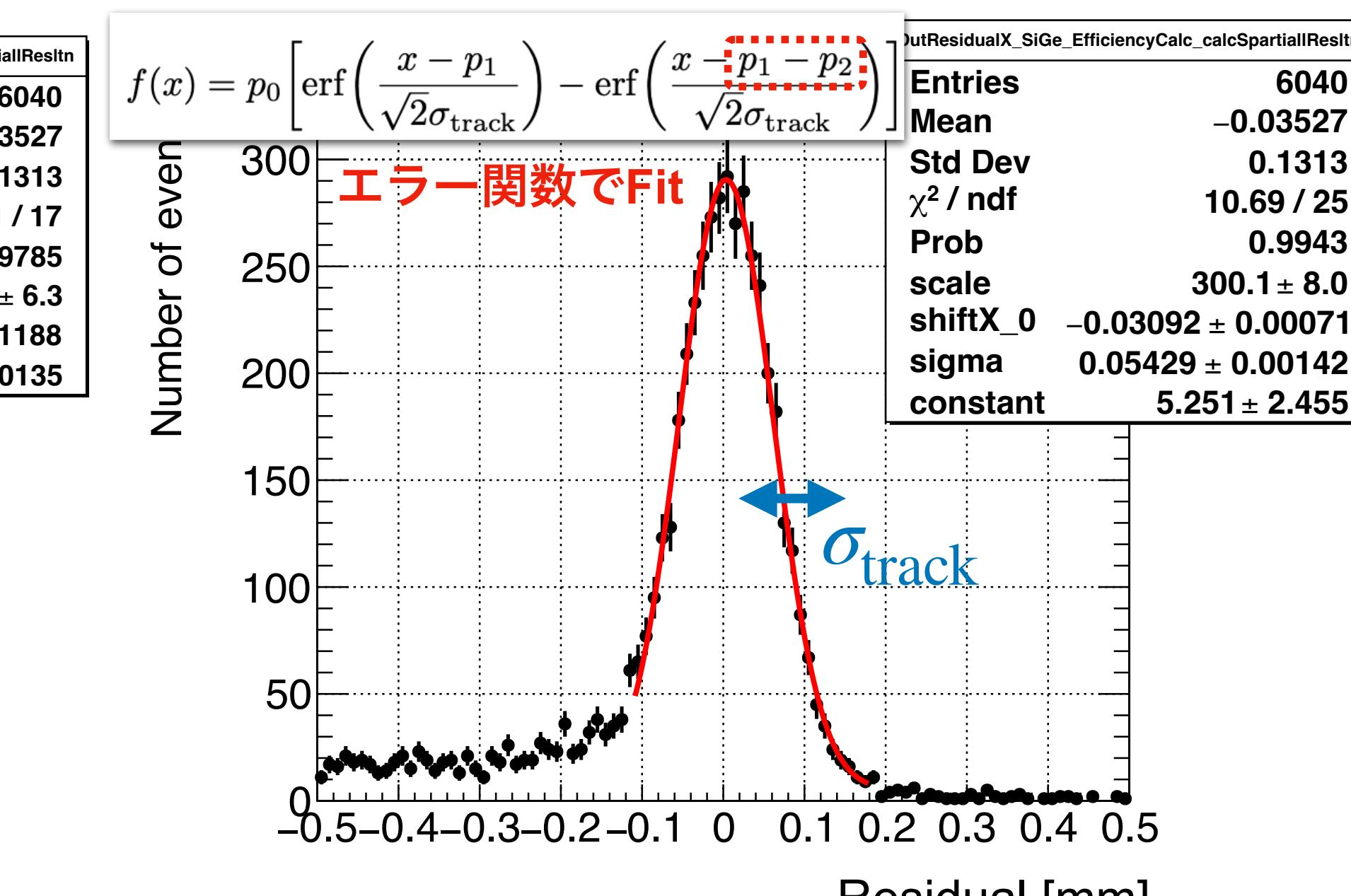
- ・ 検出器による 位置の 不定性
- ・ 下式から 評価

↓
残差分布の標準偏差

$$\sigma_{\text{residual}}^2 = \sigma_{\text{track}}^2 + \sigma_{\text{detector}}^2$$



↑X方向の残差分布・ガウス関数fit



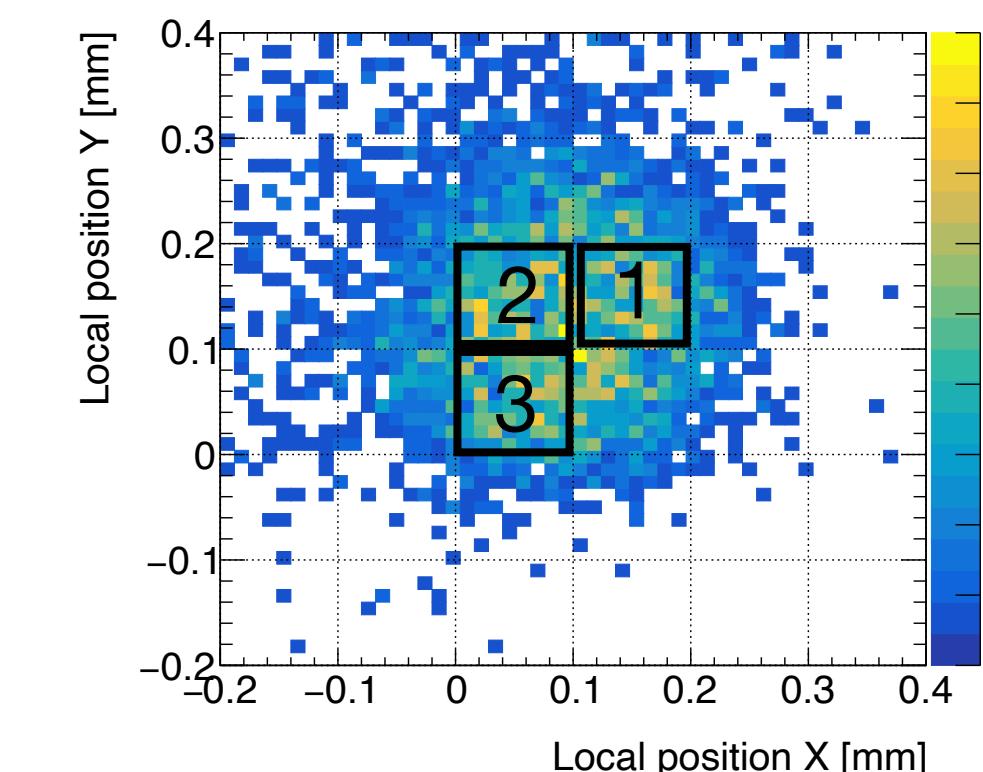
↑X方向の残差分布・エラー関数fit

	σ_{residual}	σ_{track}	σ_{detector}
X	$59.3 \pm 1.4 \mu\text{m}$	$54.3 \pm 1.4 \mu\text{m}$	$23.8 \pm 6.8 \mu\text{m}$
Y	$58.2 \pm 1.3 \mu\text{m}$	$52.6 \pm 1.2 \mu\text{m}$	$24.9 \pm 5.6 \mu\text{m}$

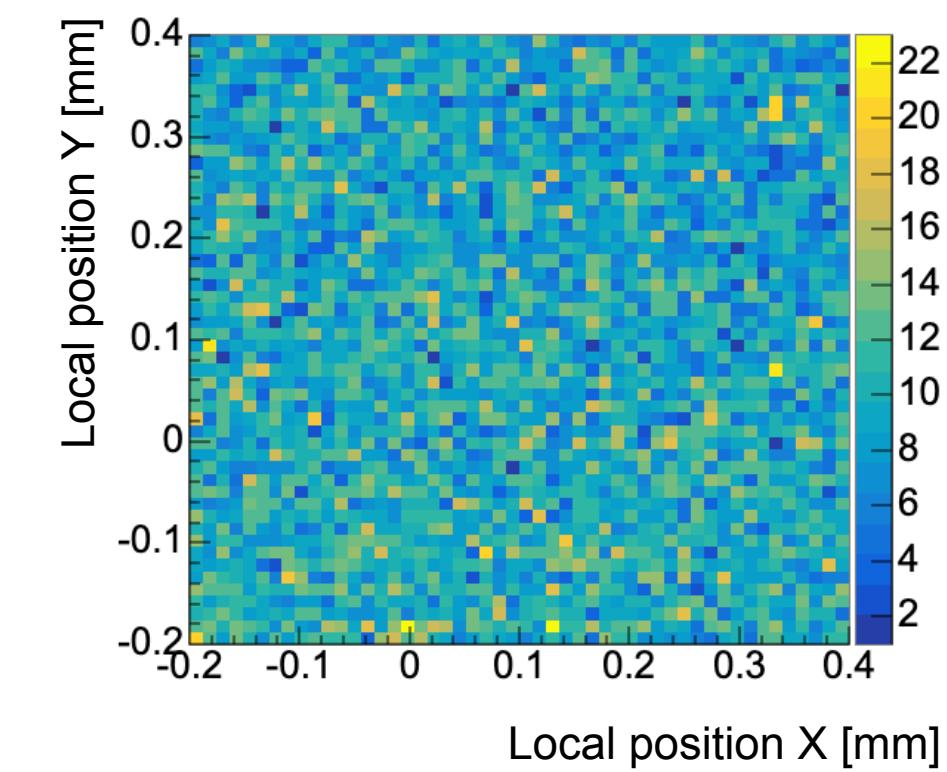
Efficiency : 検出効率

- 検出効率 = ヒットした数 / トランクが通過した数
- LGADのヒット判定とする残差の条件は $5\sigma_{\text{residual}}$ 以内

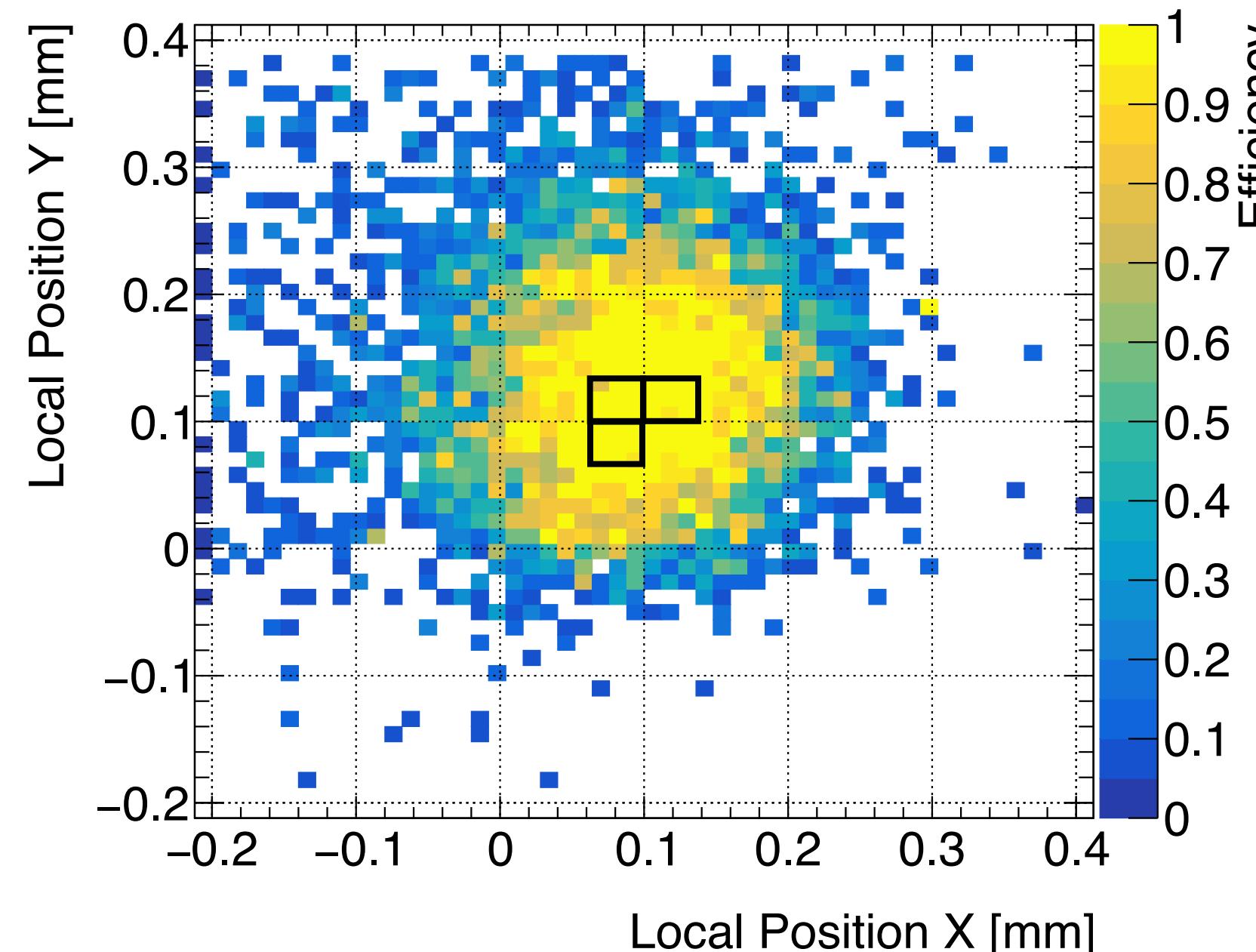
	X方向	Y方向	全体の領域
検出効率	$97.9 \pm 0.8 \%$	$98.1 \pm 0.7 \%$	$98.8 \pm 0.6 \%$



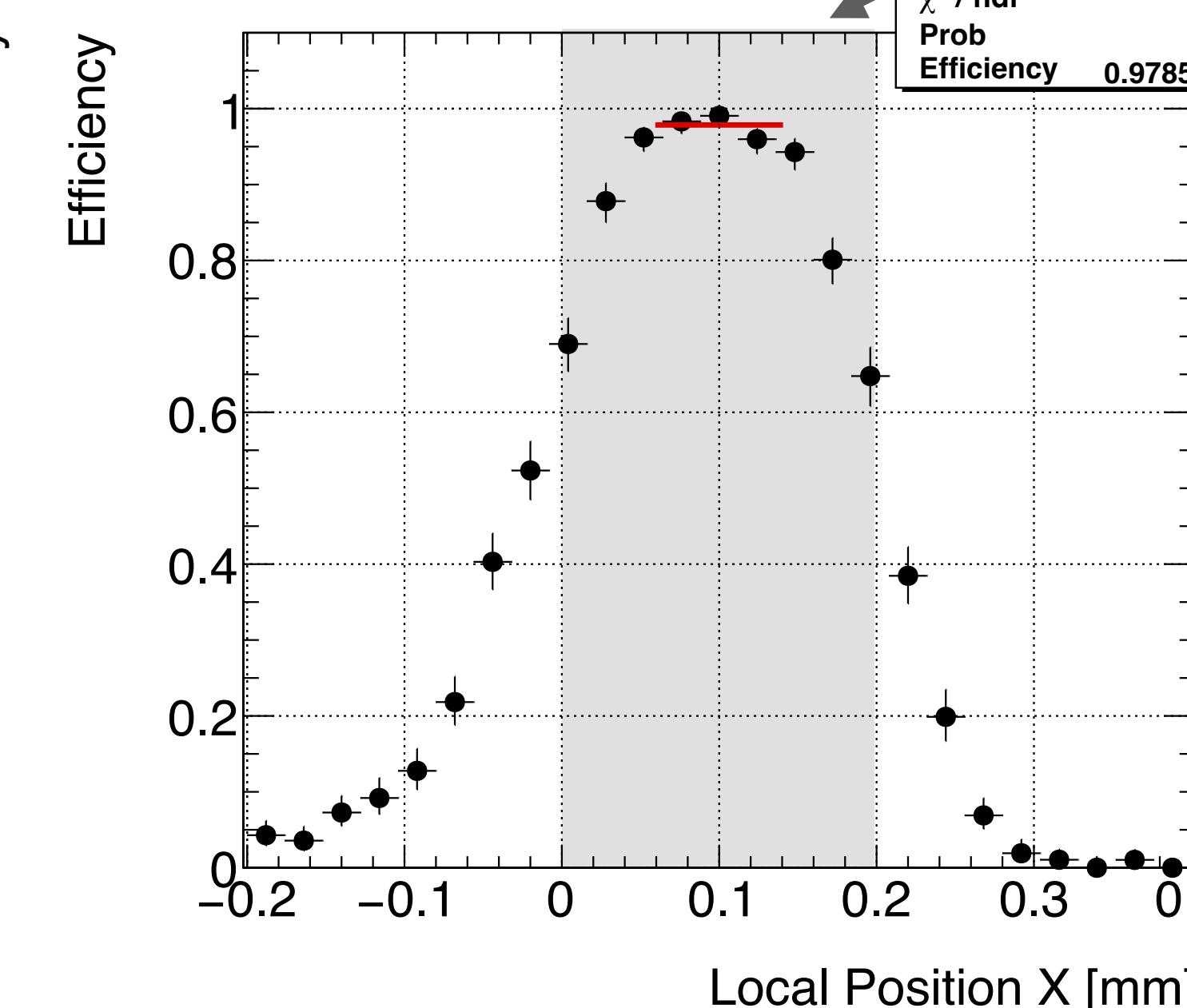
↑ 検出器のヒットマップ



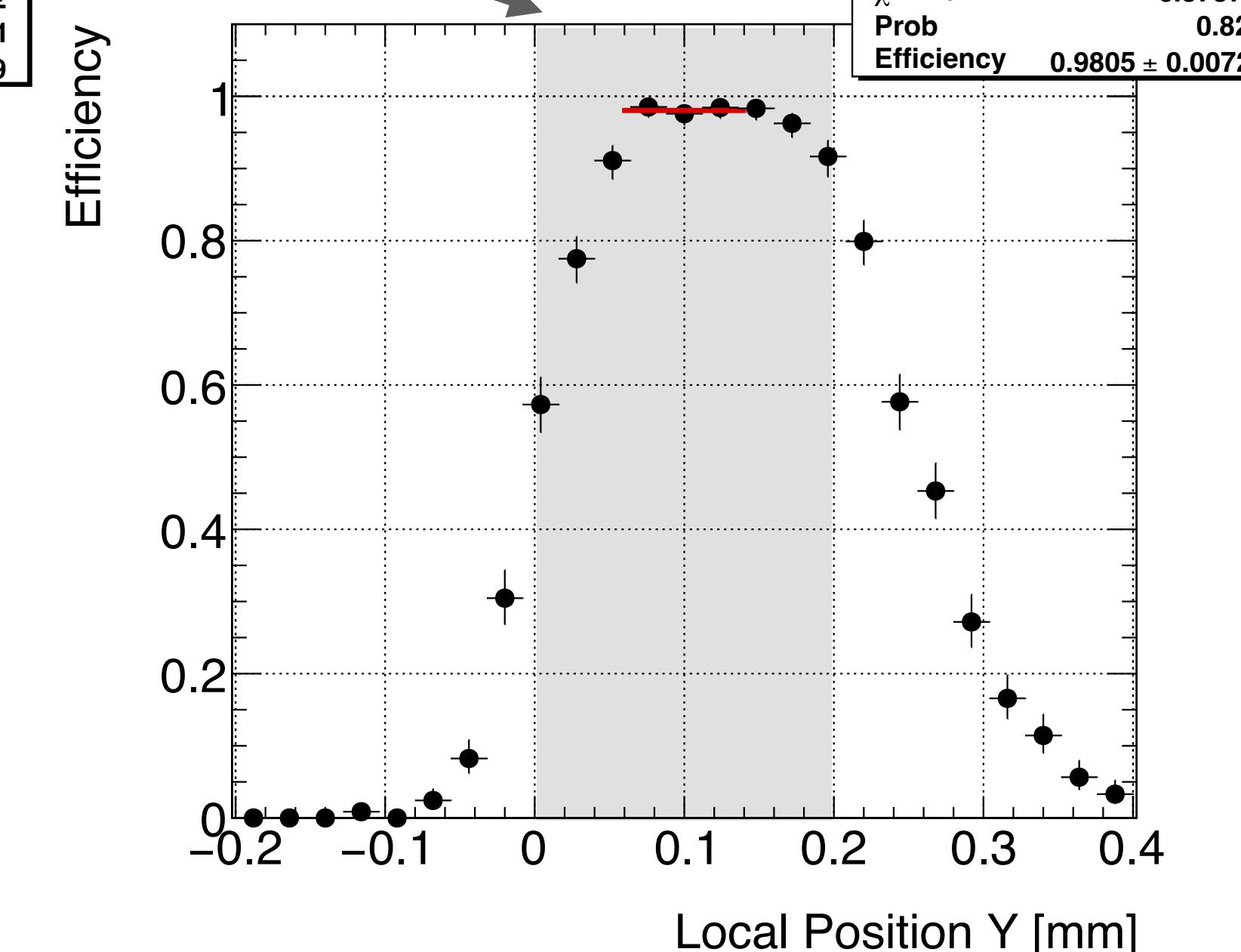
↑ 飛跡のマップ



↑ 検出効率の2次元分布



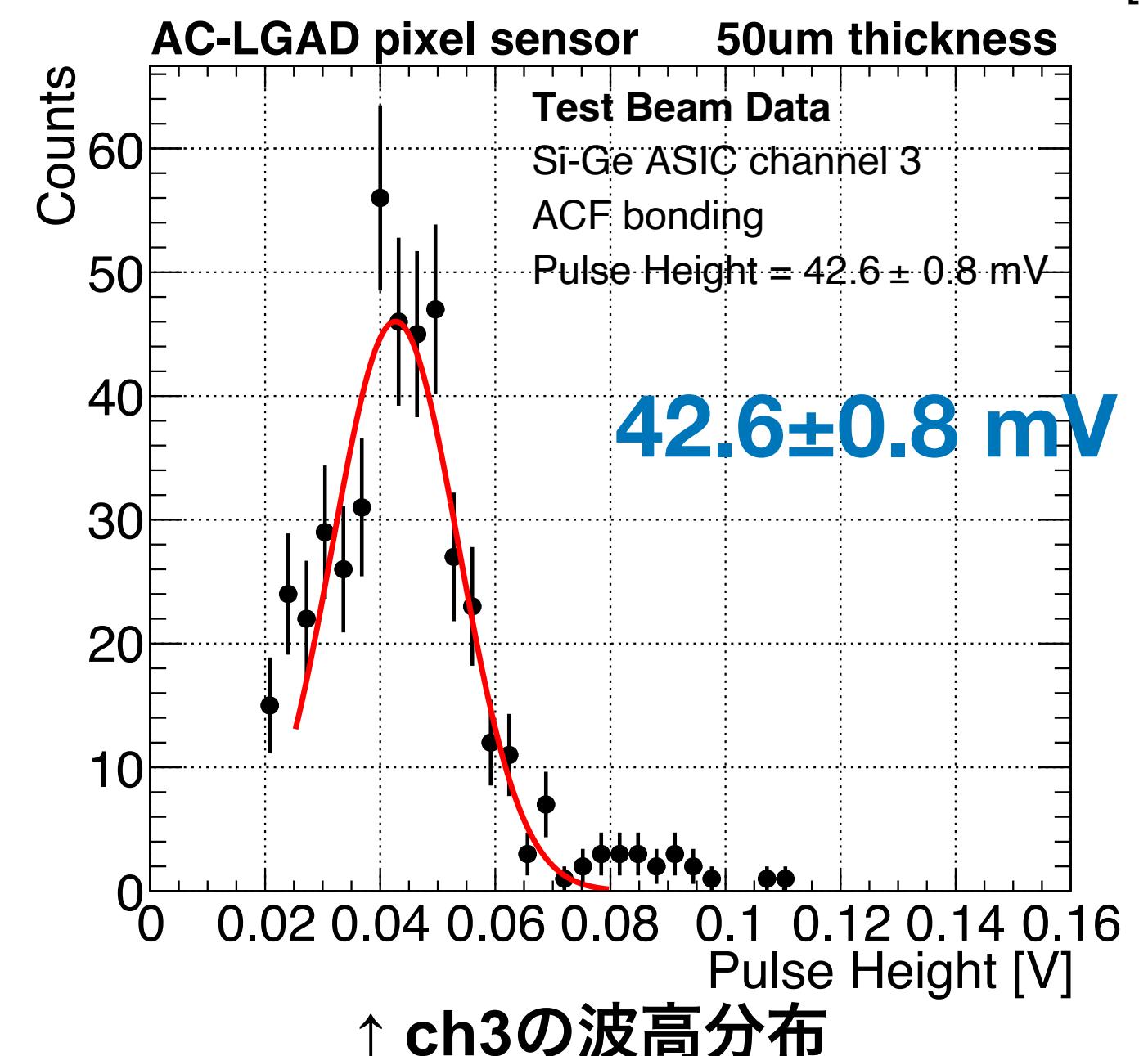
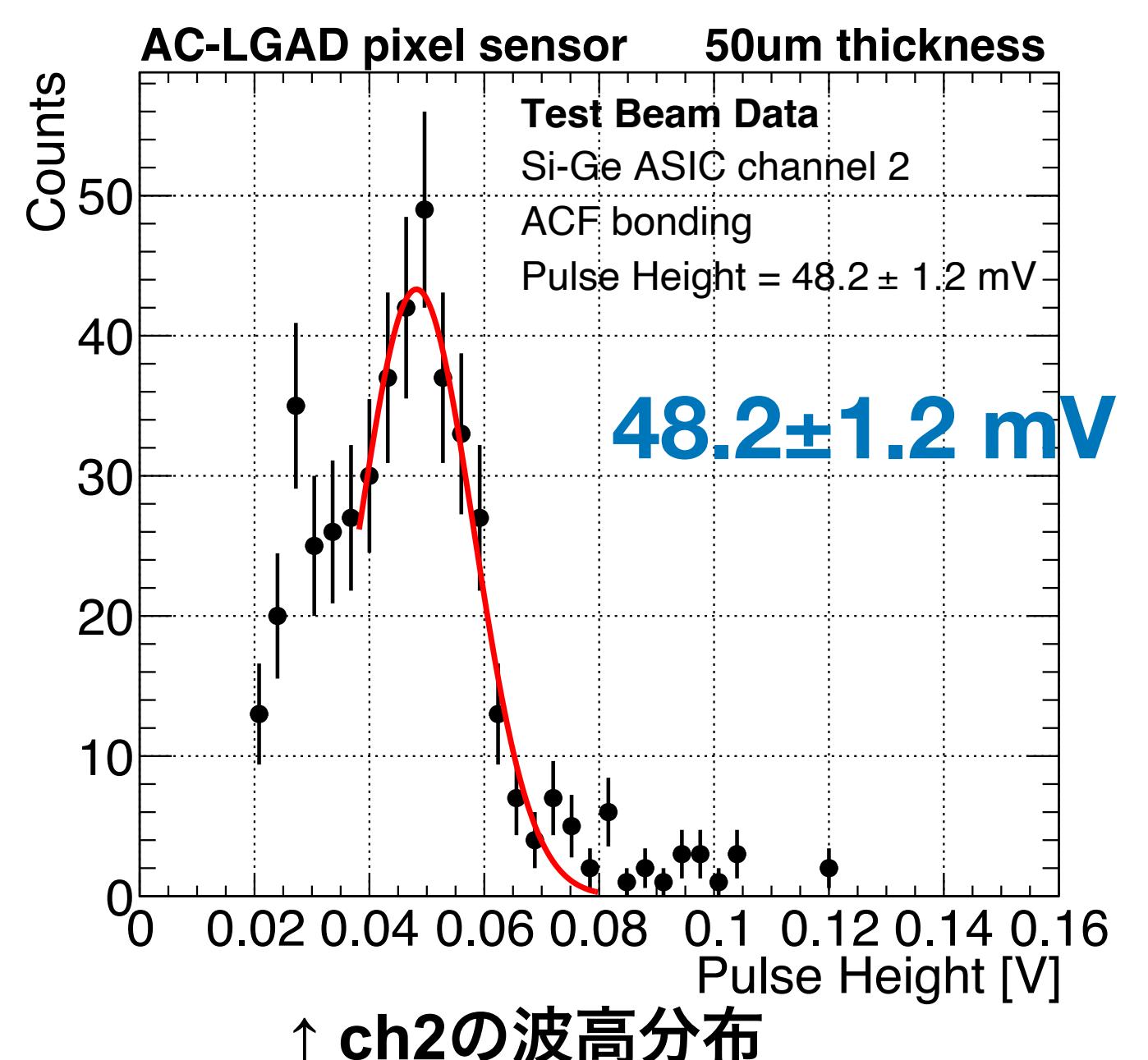
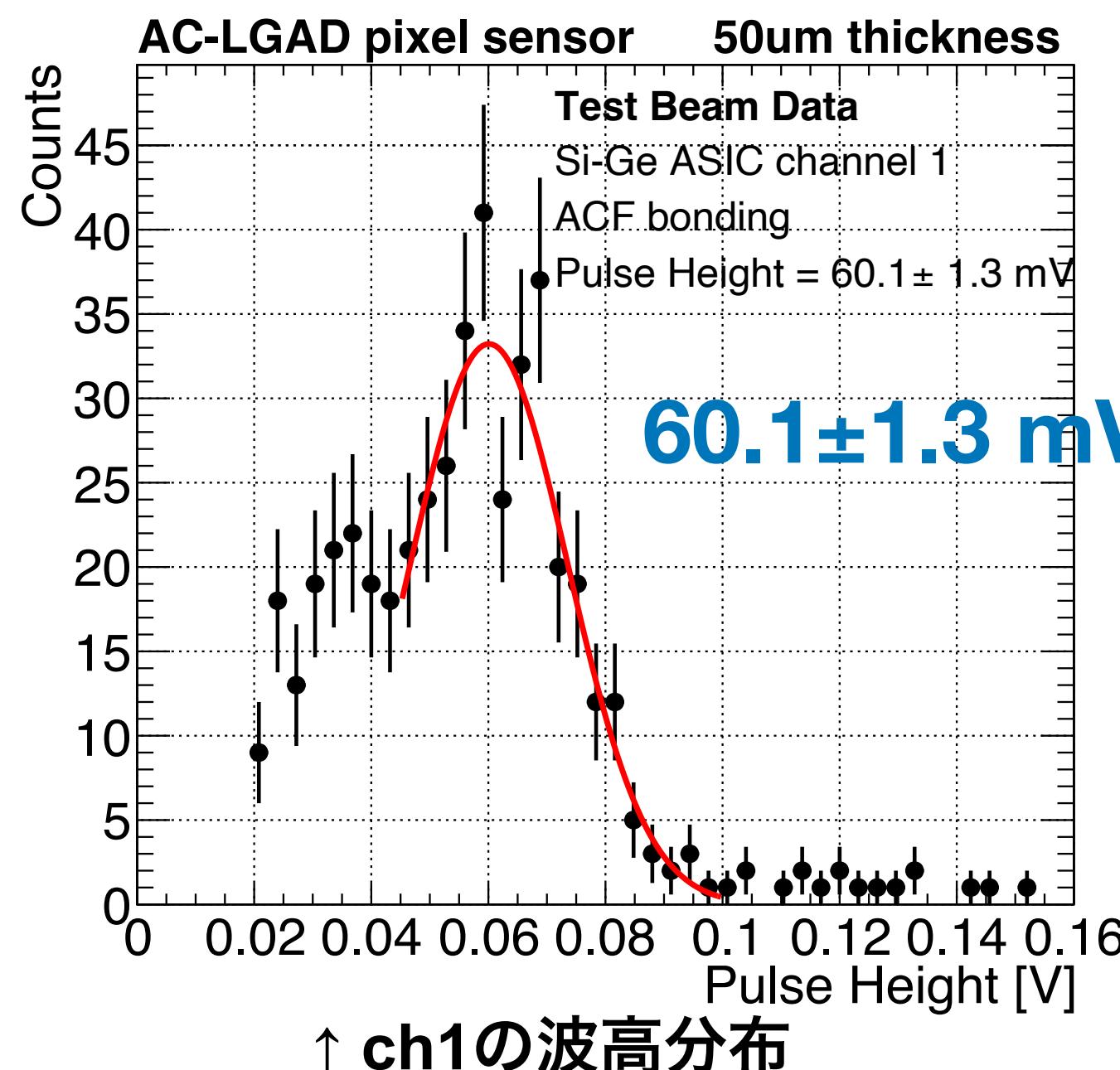
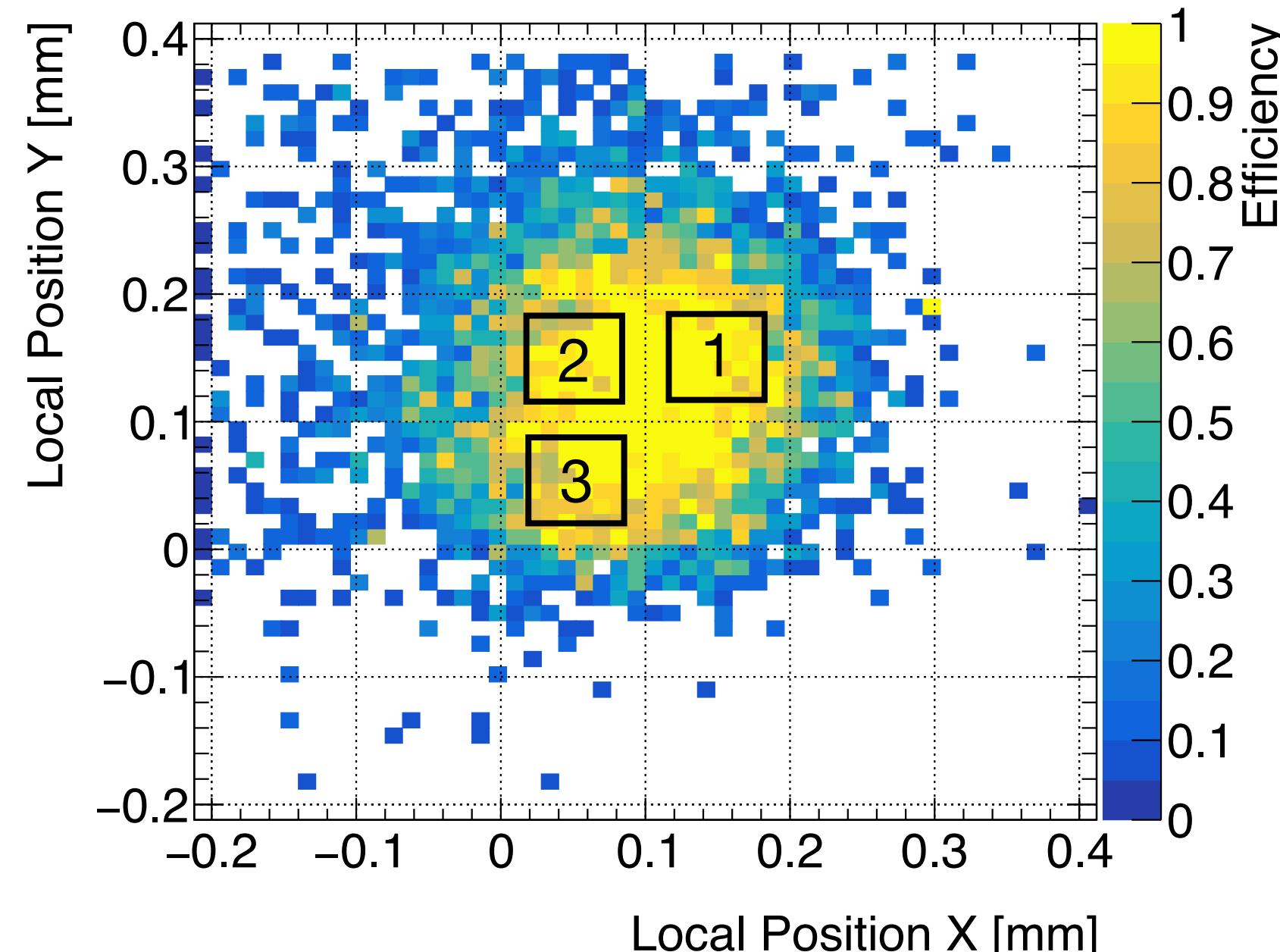
↑ 検出効率の1次元分布 (X方向に射影)



↑ 検出効率の1次元分布 (Y方向に射影)

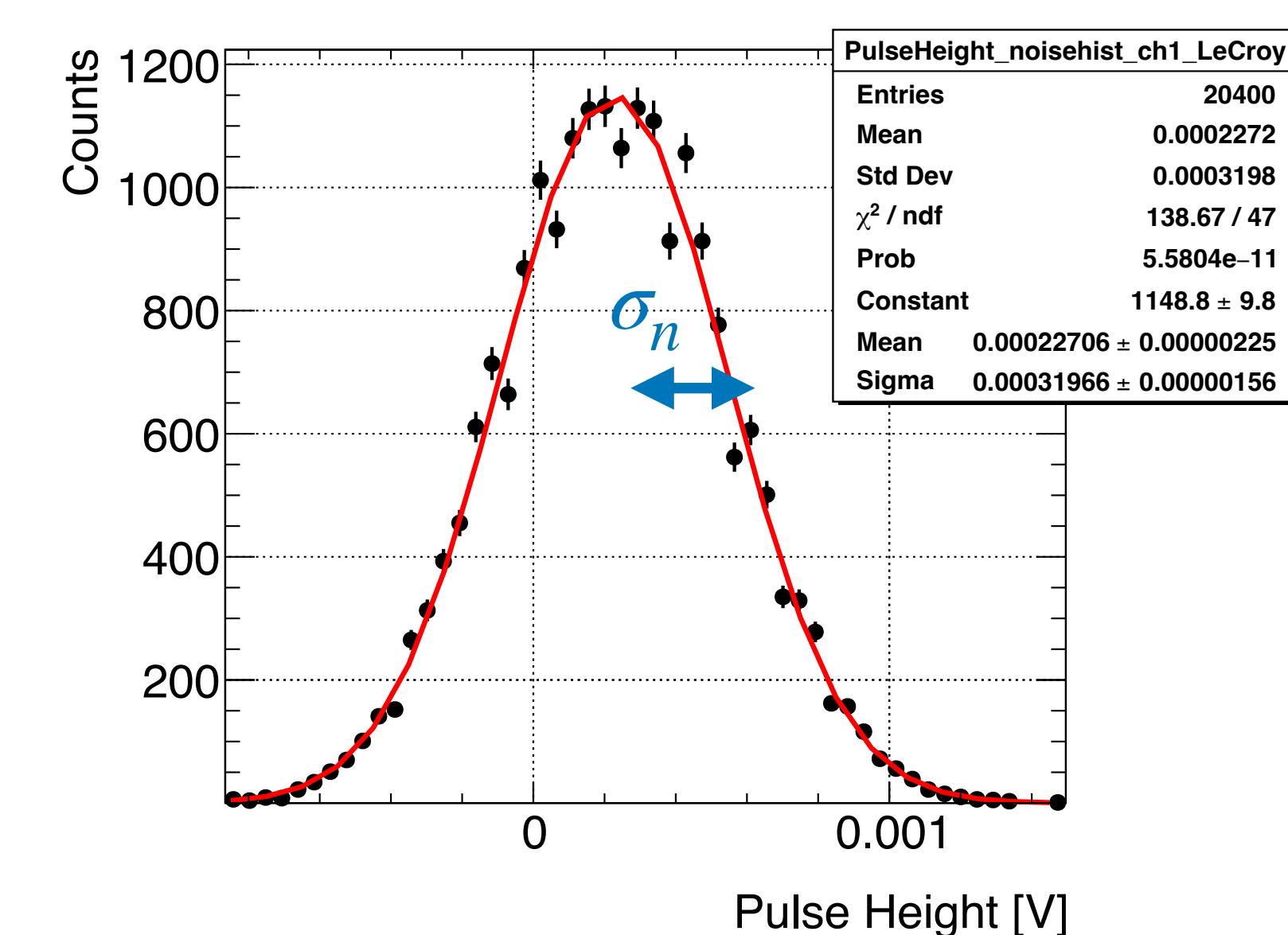
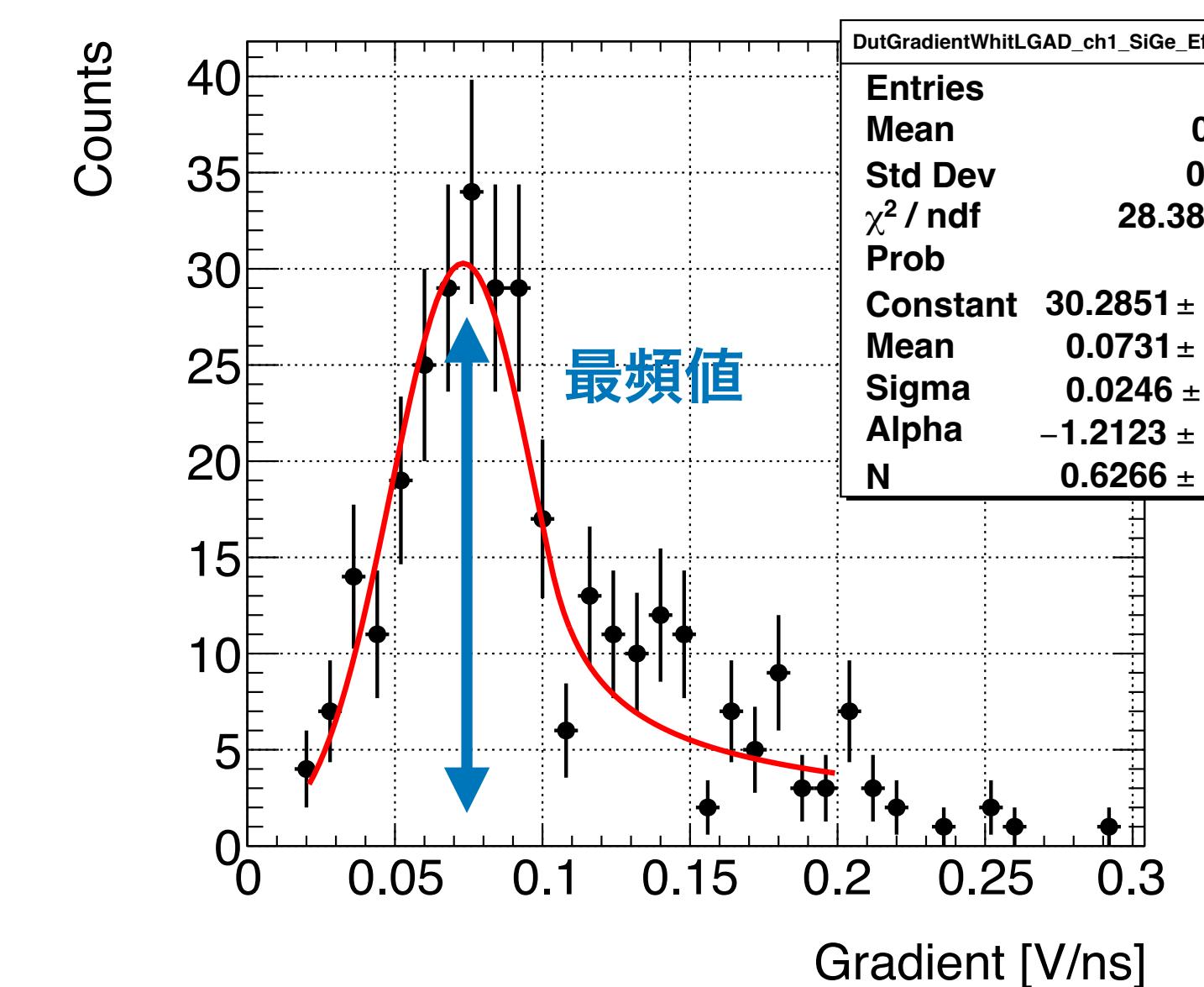
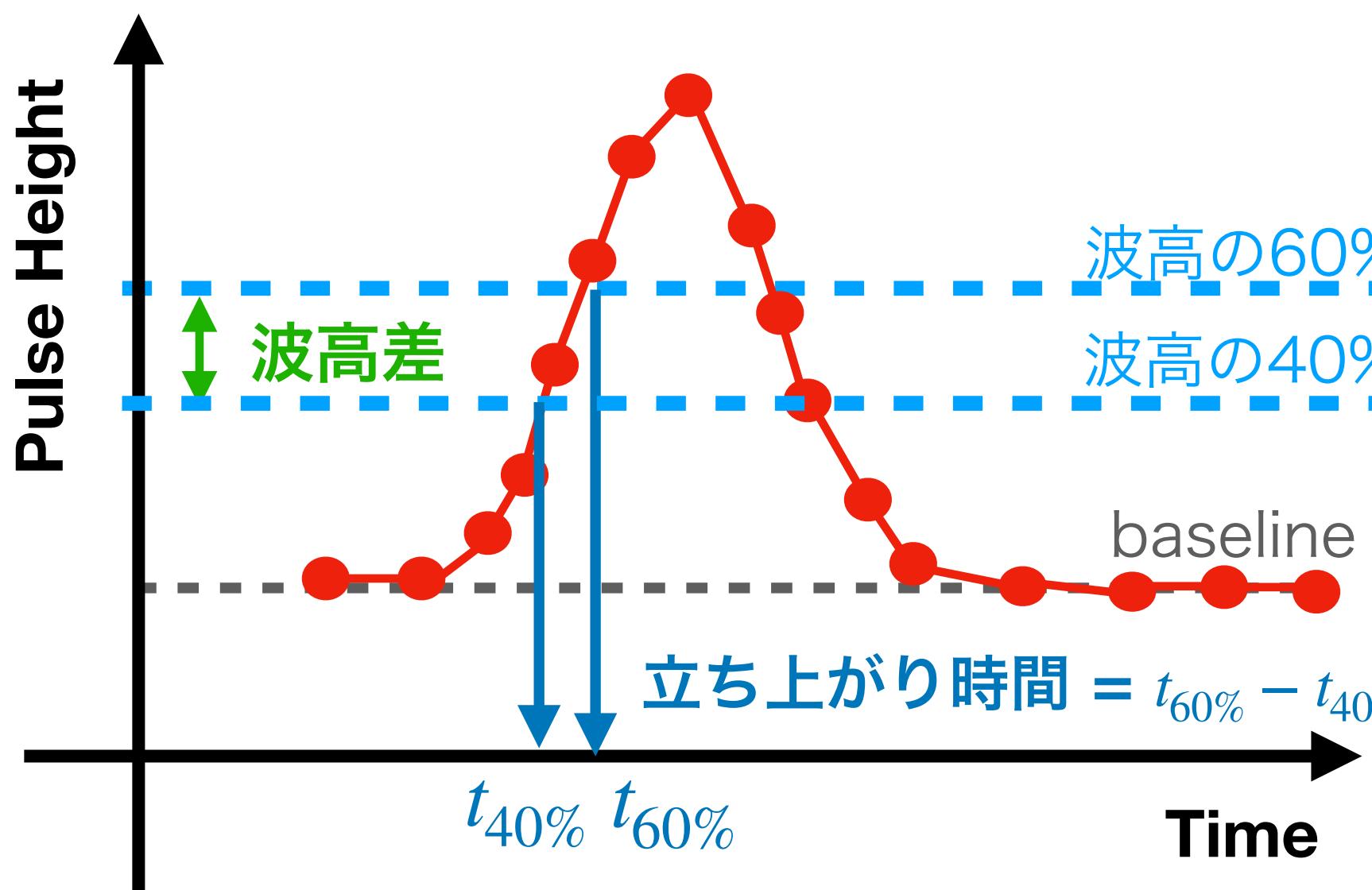
各チャンネルの波高分布

- クロストークを除去して波高分布を作成するために、 $100\text{ }\mu\text{m}$ の電極に対して、 $60\text{ }\mu\text{m} \times 60\text{ }\mu\text{m}$ の領域に入ったイベントのみを使用
- AC-LGADとSi-Ge ASICをACF接続したサンプルの性能結果
→ch1, 2, 3の波高は **60, 48, 43 mV** であった
→荷電粒子で、フリップチップ後も十分な信号が得られた



ジッター

- 波高が40-60%の間での傾きとノイズから各チャネルのジッターを求める
- 全てのチャネルについて、4~5 psのジッターであることがわかった。
 - ・Si-Ge ASICはジッターの影響がほとんどない状態の時間分解能が得られる

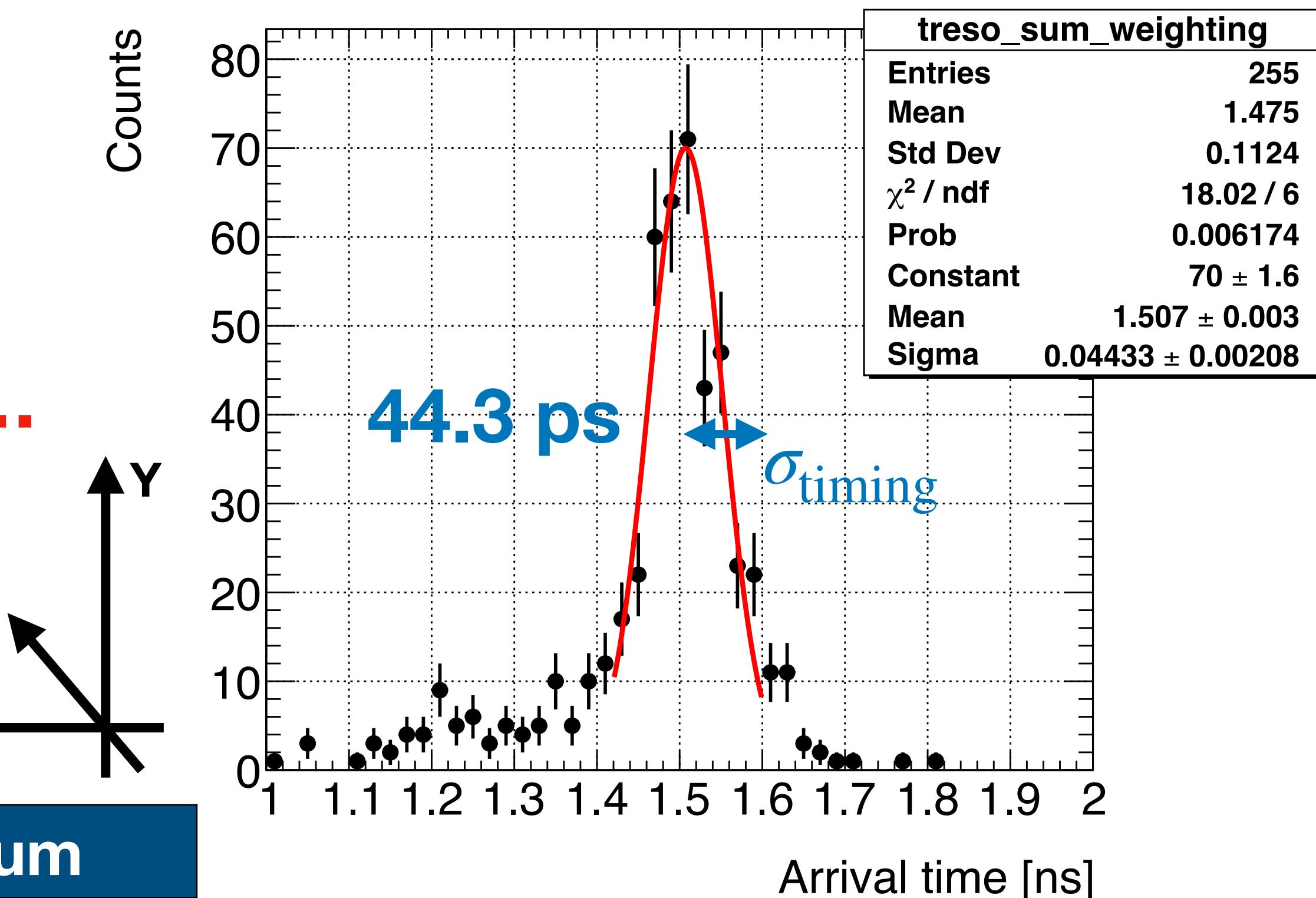
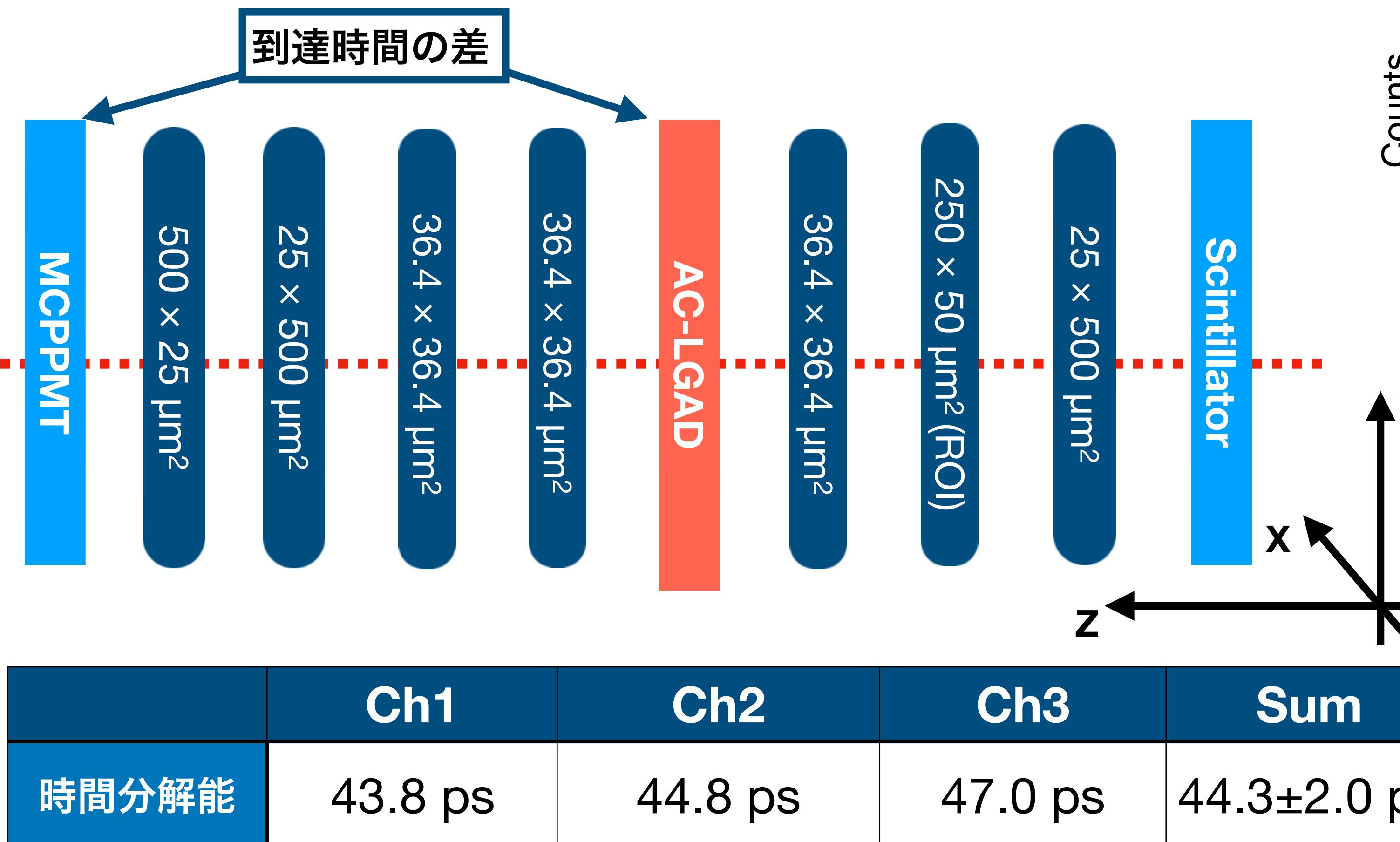


$$\sigma_{\text{jitter}} = \frac{\sigma_{\text{noise}}}{\left| \frac{dV}{dt} \right|} = \frac{\sigma_{\text{noise}}}{\left| \frac{S}{t_r} \right|}$$

	Ch1	Ch2	Ch3
ジッター	$4.4 \pm 0.1 \text{ ps}$	$5.4 \pm 0.1 \text{ ps}$	$5.5 \pm 0.2 \text{ ps}$

時間分解能

- 時間分解能 10 ps 以下のMCP-PMTとの時間差をとることでAC-LGADの時間分解能を求める
- 統計を増やすために全チャンネルをピーク値が一致するように足し合わせて解析
 - ・ 時間分解能 : 44.3 ± 2.0 ps

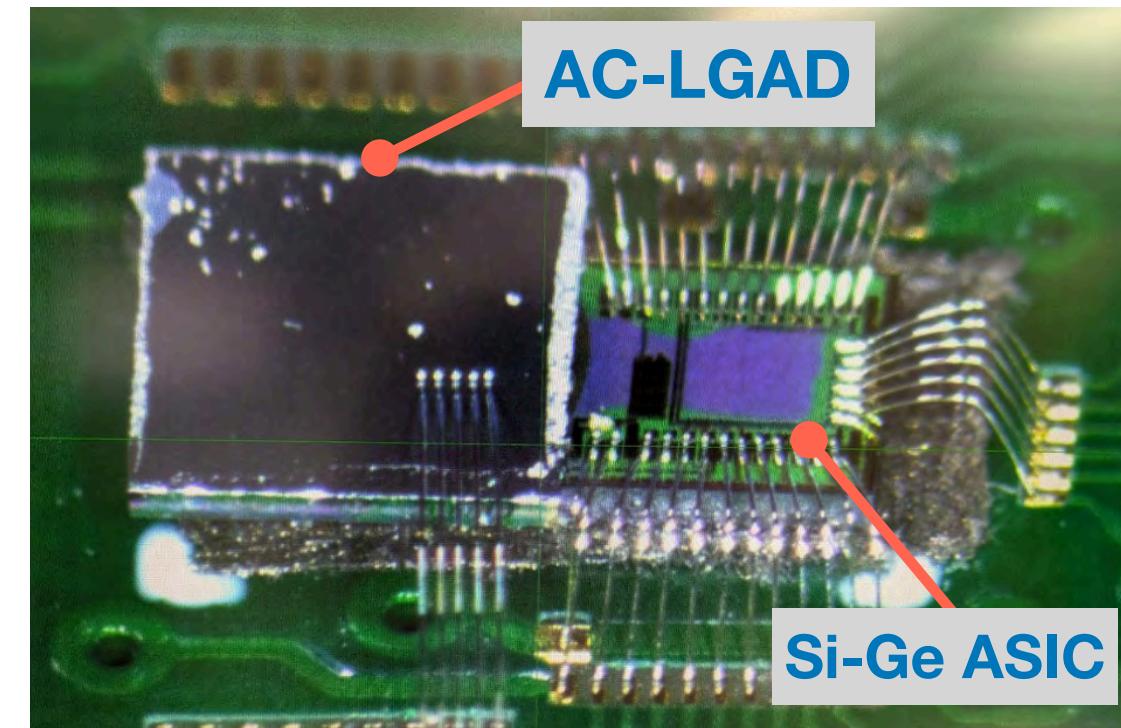


↑ 全チャンネルの到達時間差分布

まとめ

AC-LGADpixの読み出しASICの開発

- AC-LGADは一様な増幅層によって、不感領域がなく高い時間分解能を実現
- AC-LGADの読み出しASICは**低ノイズかつ低消費電力**でないといけない



Si-Ge ASIC

- シリコンゲルマニウムを用いたHBTで構成 → $V_{DDA} = 1.5V$ が最適の運転電圧
 - 赤外線レーザー測定：
 - ・ Si-Ge ASICの最高性能：ジッター 3.02 ps, 消費電力 $144 \pm 6 \mu\text{W}/\text{ch}$
 - ・ 消費電力を抑えた時の性能：ジッター 9.65 ps, 消費電力 $47.8 \pm 6 \mu\text{W}/\text{ch}$
 - ベータ線測定：
 - ・ 信号の大きさ 60 mV, ジッター 4.0 ps
 - テストビーム測定：
 - ・ 位置分解能 : $23.8 \pm 4.7 \mu\text{m}$, 時間分解能 : $44.3 \pm 2.0 \text{ ps}$, 検出効率 : $98.8 \pm 0.6 \%$
- 今後について：Si-Geの最適化, CMOSを用いた回路での可能性を検討, CFDの開発へ

ASICへの要求

- ▶ 入力電荷 2-50 fC
- ▶ 検出器容量 0.1-2 pF
- ▶ 消費電力 <100 $\mu\text{W}/\text{ch}$
- ▶ ジッター << 30 ps
- ▶ TDC << 30 ps
- ▶ Time walk 補正

Backup