

# AC-LGAD R&D progress @ Hiroshima University

Kanato Matsutani

Hiroshima University, Japan

# Progress after JPS



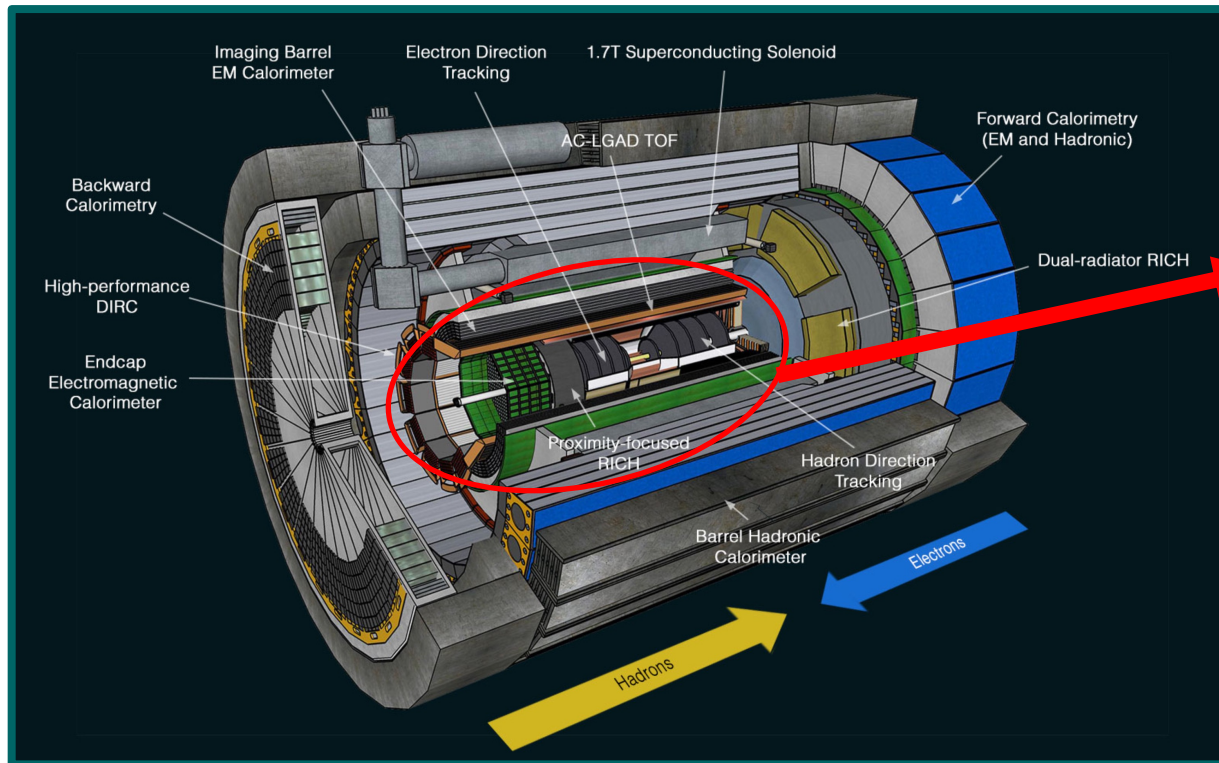
- Modified the analysis code and changed the definition of arrival time (time to reach 50% of the maximum value).
  - Analysis results are not yet available. (Data processing is not going well.)
- Changed AC-LGAD channel to acquire data.
  - Continuous. Equally spaced. Data acquisition in progress.
- Attended ASIC training course
  - Create ASIC schematic and simulate Gain, output voltage, etc.

# electron-Proton/Ion Collider (ePIC) Collaboration

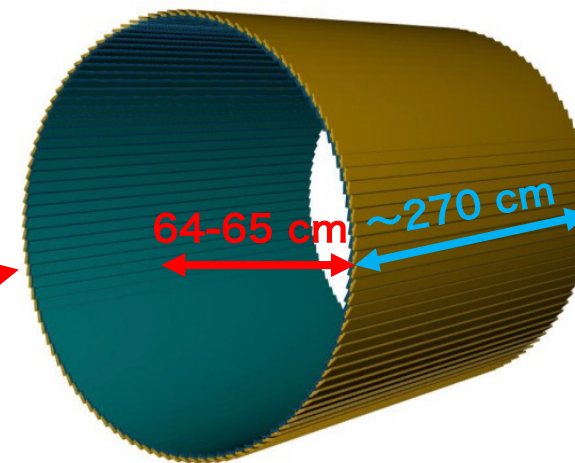
## EICの物理を理解するための検出器を開発する国際コラボレーション

- さまざまな高精度の検出器を組み合わせ、衝突後の生成粒子情報を得る
- 広島大学は粒子識別検出器 Barrel Time of Flight (BTOF)の開発をリード

### ePIC Detector

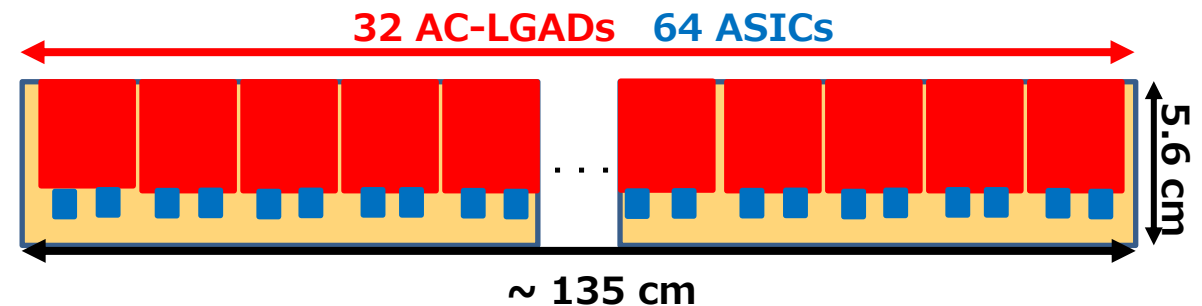


### BTOF Detector



- BTOF 要求性能**
- ◆ 時間分解能 : ~35 ps
  - ◆ 位置分解能 : ~30  $\mu\text{m}$
  - ◆ センサー数 : 9216
  - ◆ 有効面積 : ~12  $\text{m}^2$

### BTOF module 案 (144個でBTOFを構成)



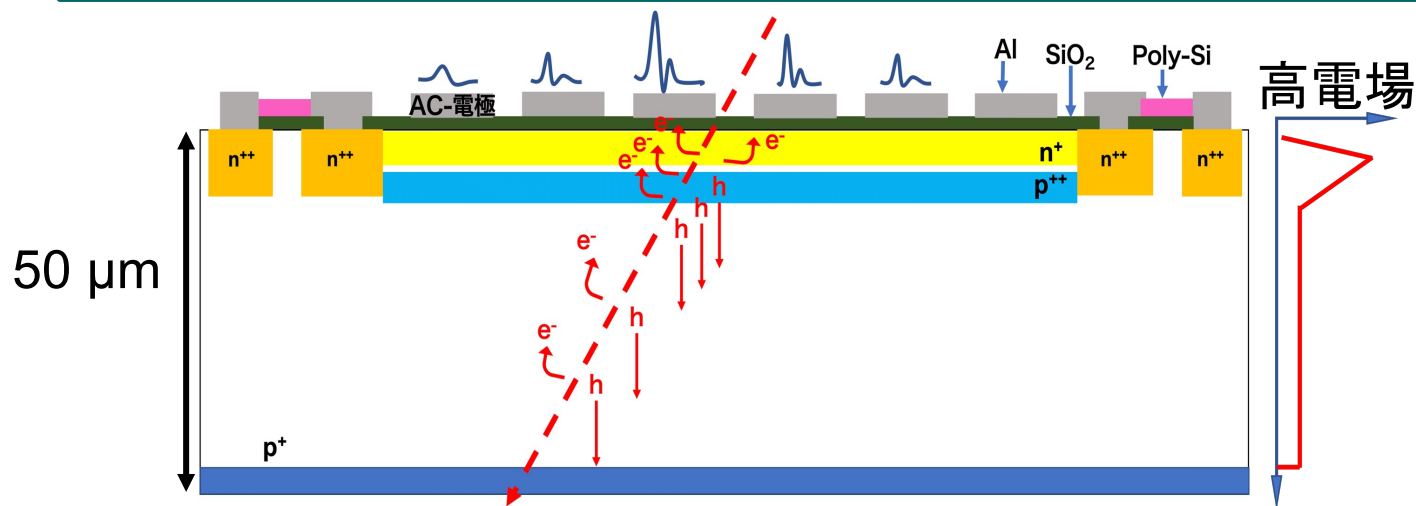
# AC-coupled Low Gain Avalanche Detector (AC-LGAD)検出器

TOFの要求性能を達成することのできるシリコン型半導体検出器 [1]

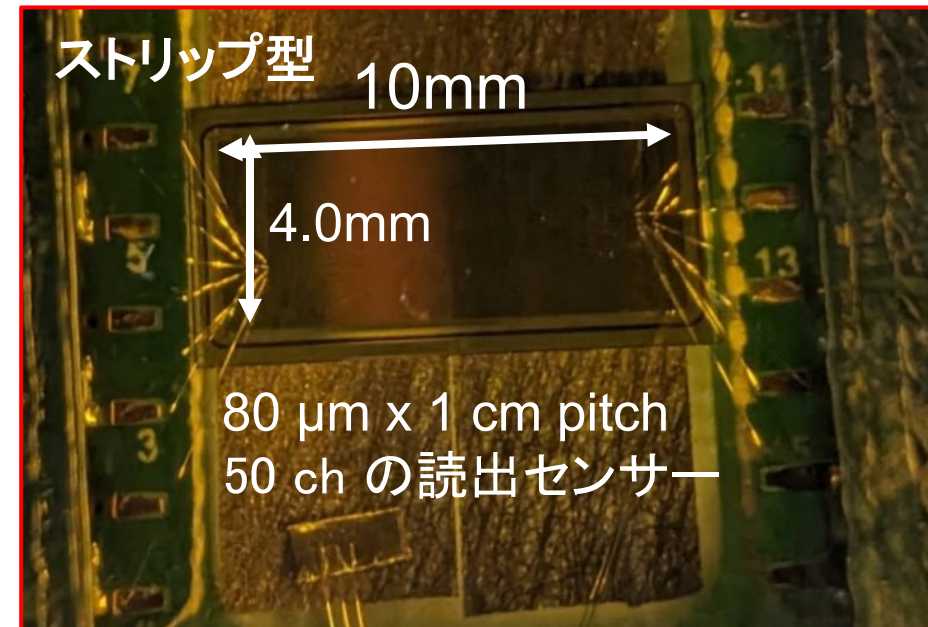
- 表面にある薄い増幅層で電子雪崩増幅 → 30 ps の時間分解能
- 不感領域のない全ての電極に一様な増幅層による電荷共有アプローチ  
→ 30 μm の位置分解能

## Barrel TOFに使用するAC-LGAD

- ストリップ型
- 0.05 x 1 cm<sup>2</sup> pitch, 64 x 4 ch の読出センサー
- 3.2 x 4.0 cm<sup>2</sup>



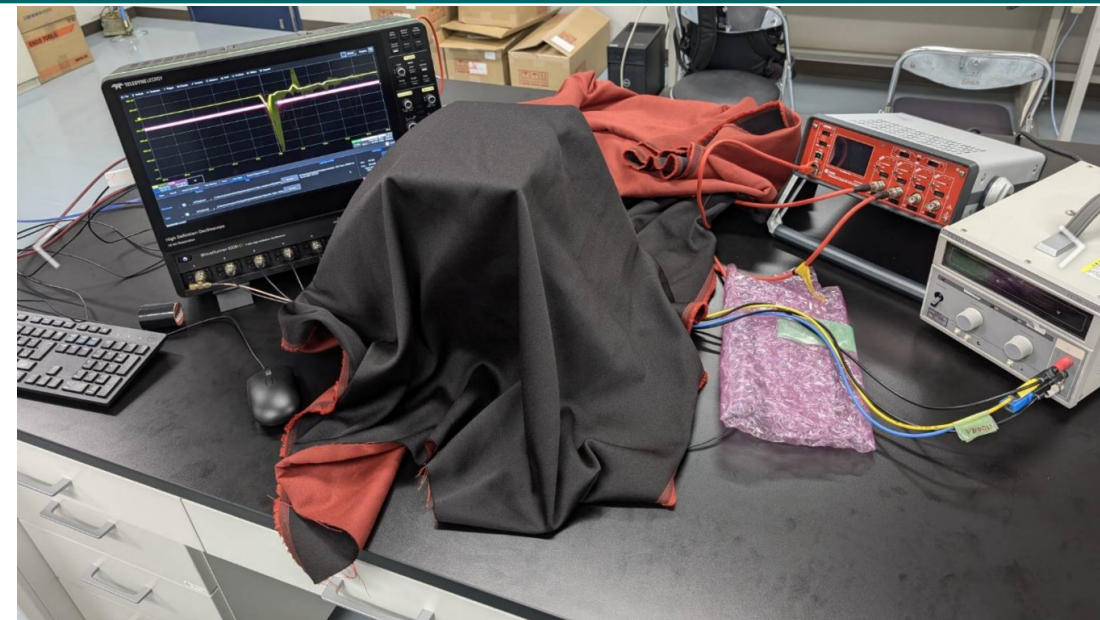
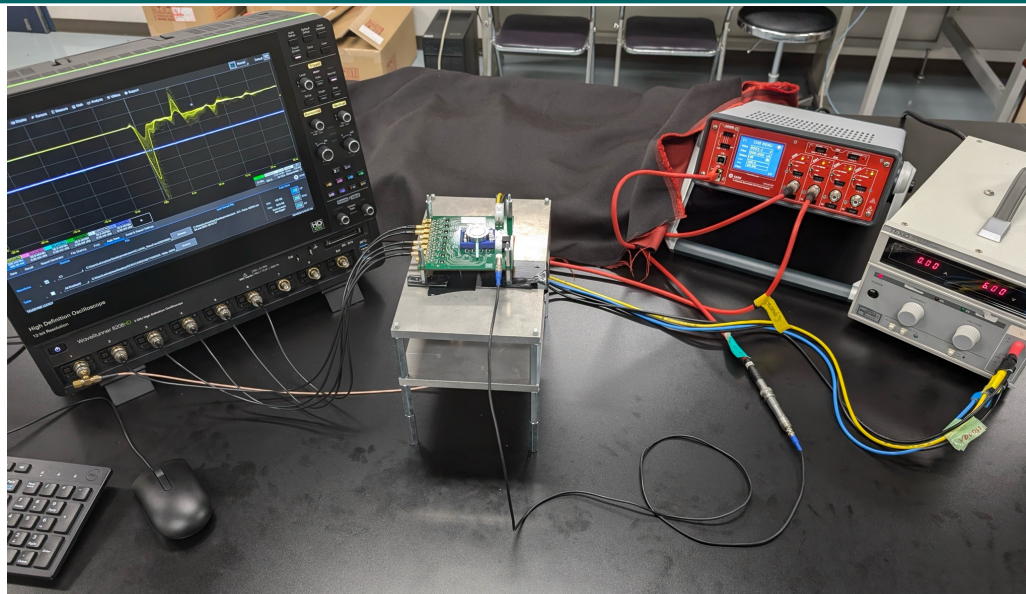
## 本実験で使用する試験版AC-LGAD



[1] <https://arxiv.org/pdf/2201.07772>



# 実験室風景 @広島大学

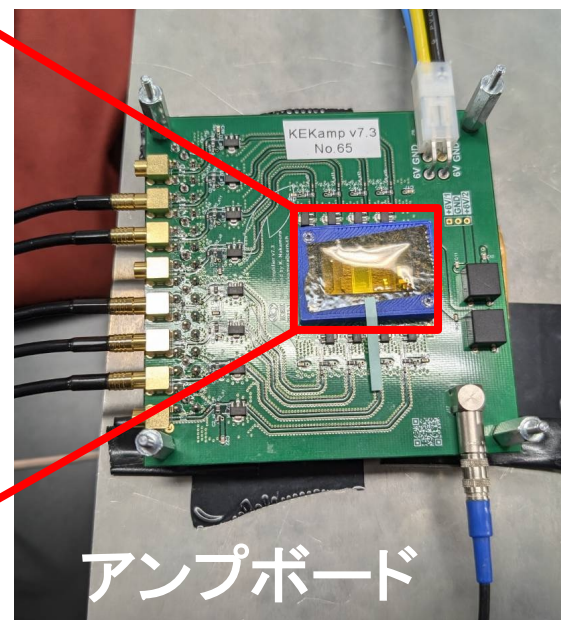


## 現在の完了事項

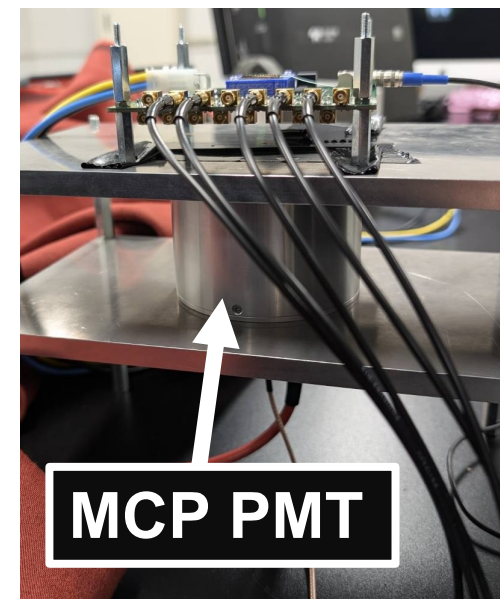
- ✓ テストベンチ作成
- ✓ データ転送システム
- ✓ HV電源リモート制御
- ✓ 波形解析
- ✓ 時間分解能測定



ストリップ型AC-LGAD  
(浜松ホトニクス製)



アンプボード



MCP PMT

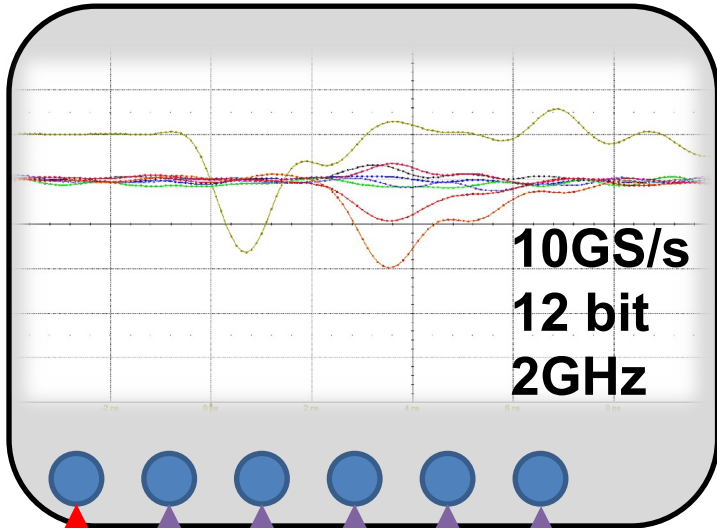
広島大学でのAC-LGAD性能評価環境の構築が完了



# 実験環境

室温: 21°C(恒温槽を手配中), 遮光

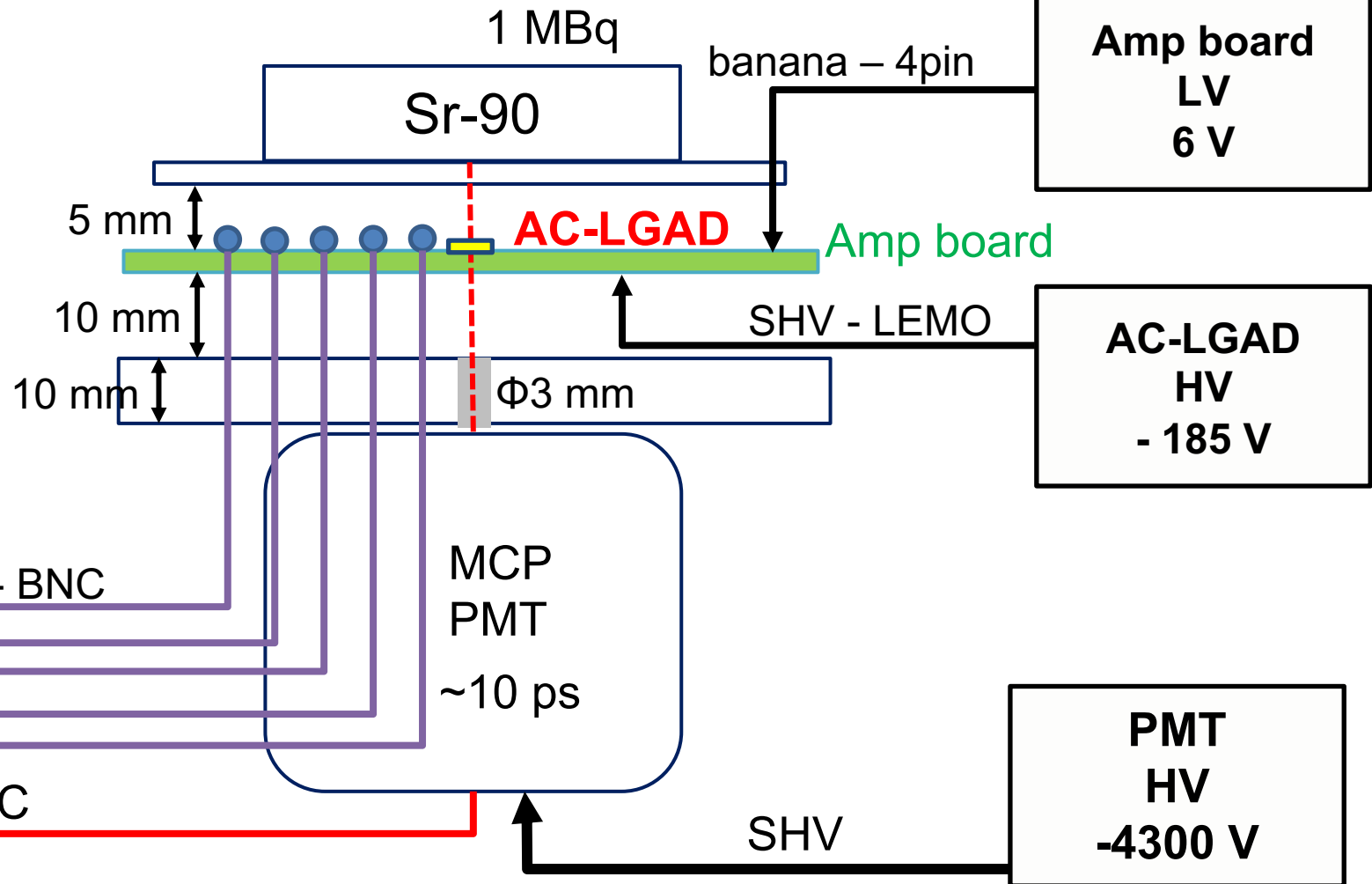
LECROY  
oscilloscope



MCX - BNC

SMA - BNC

50Ω





## ■ Time resolution

- ✓ The measurement environment is complete

## ■ Temperature dependence

- ✓ bought a constant-temperature chamber (Nov. – Dec.)

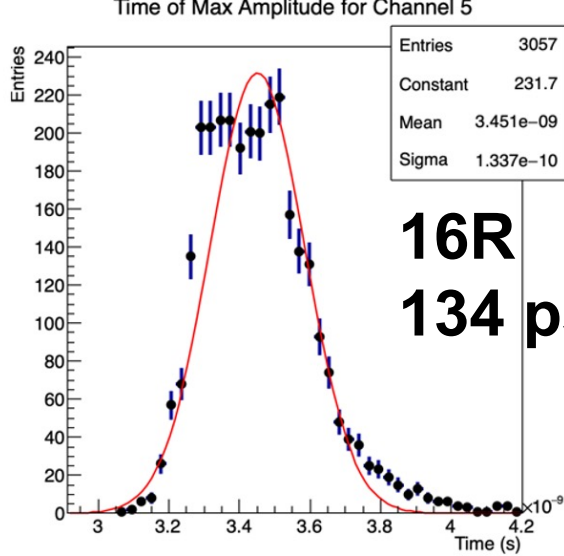
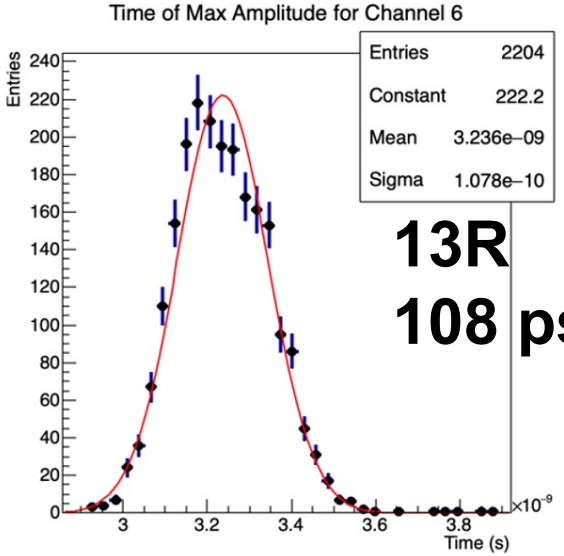
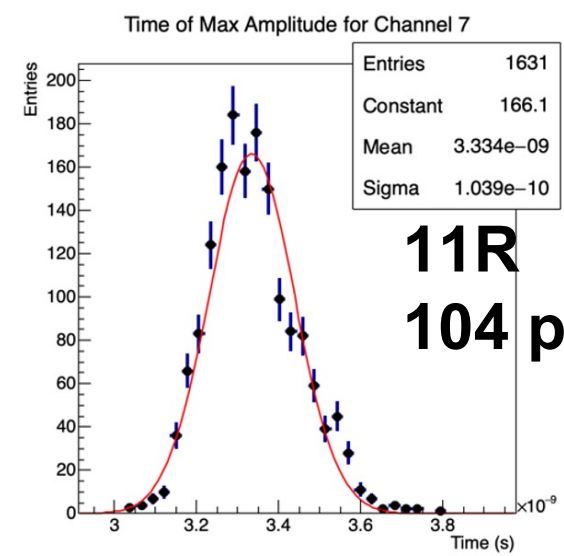
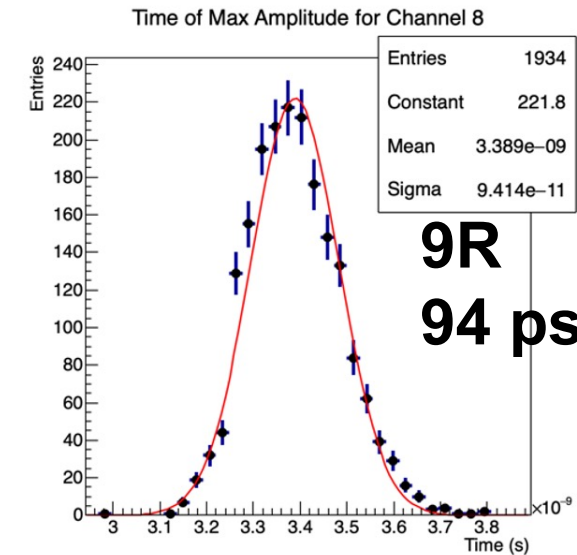
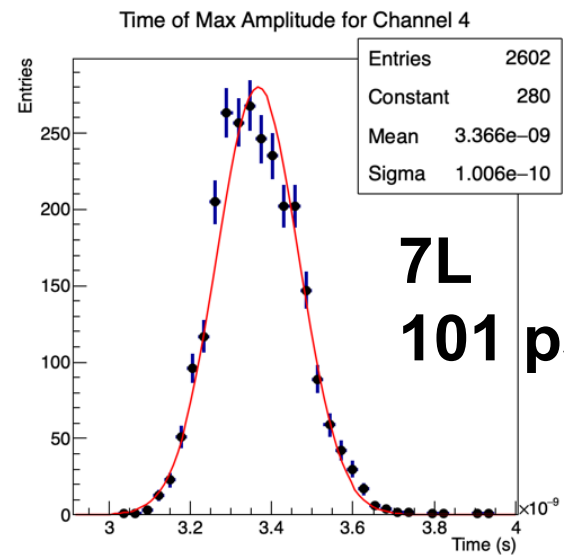
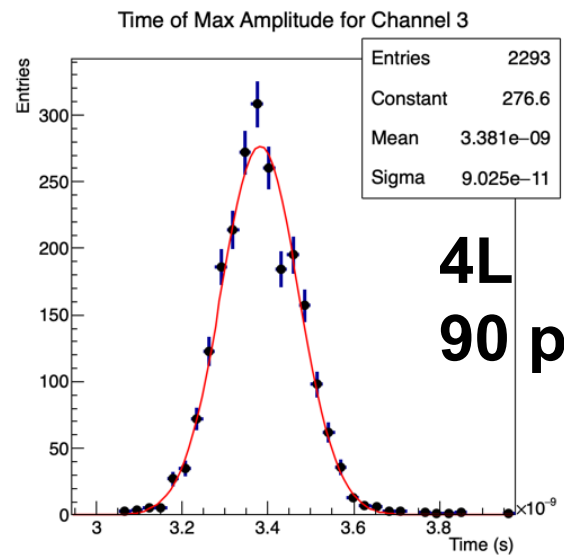
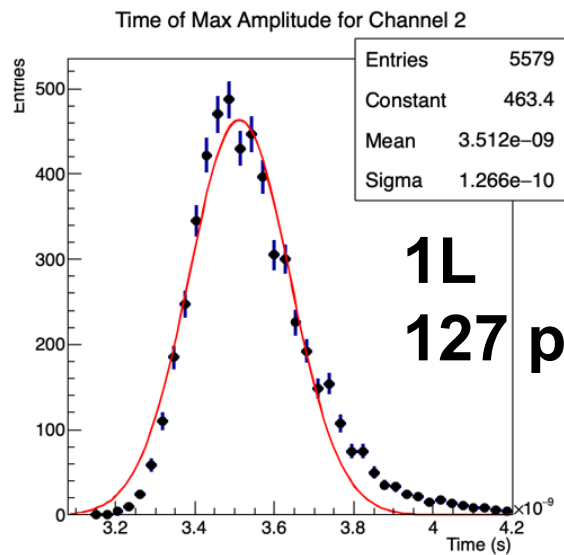
## ■ Gain uniformity

- Need to irradiate accurately (collimator)

## ■ Spatial resolution

- Need to irradiate accurately
- Need a laser or beam test

# AC-LGAD: Timing resolution



**統計情報**

- 100000 events
- 各イベントのうち最大振幅のみ抽出
- Threshold < -10 mV

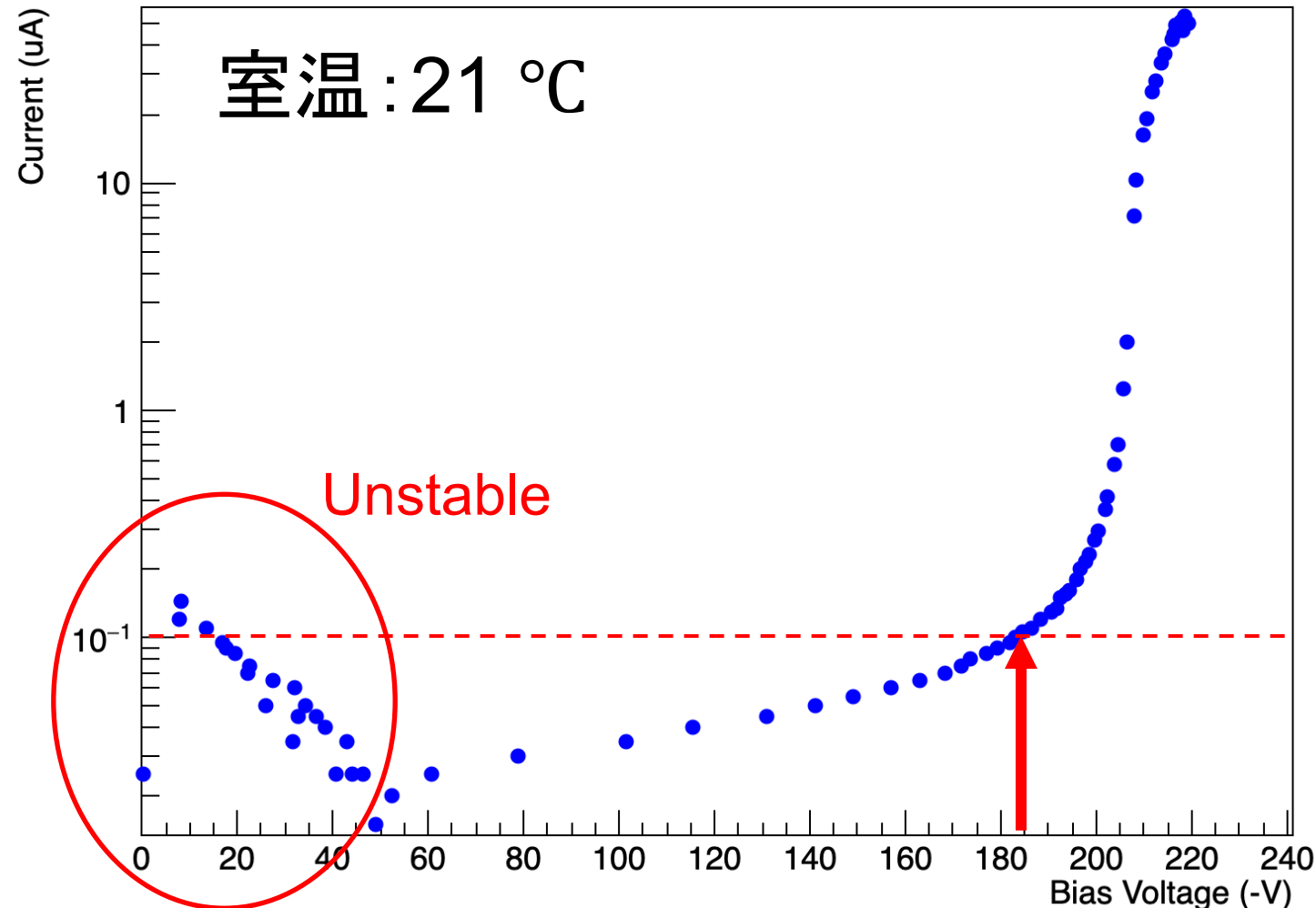
**$\sigma = 90 - 108 \text{ ps}$**





# AC-LGAD: Temperature dependence

VMon vs IMonH



## 目的

- AC-LGADにかかる電流, 電圧大 → 負荷, ノイズ大
- 負荷がかからず信号が大きくなる最適値を探す
- AC-LGADにかけるバイアス電圧は温度に依存<sup>[1]</sup>

## 結果

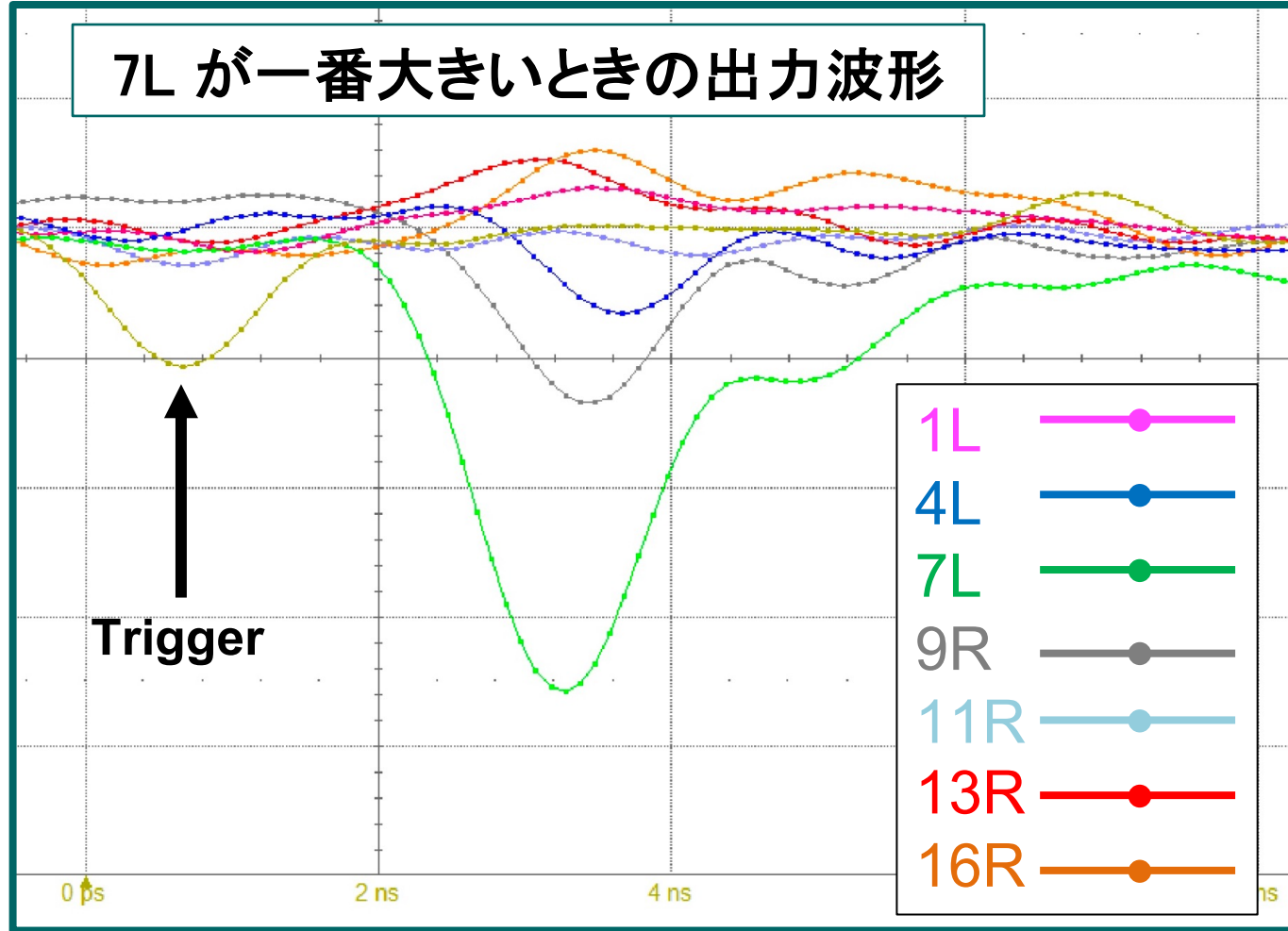
- 190 V 付近から電流値が急上昇
- 信号大&電流小 → -185 Vに決定
- 低電圧域に不安定な振る舞い → 半導体特有の空乏層が形成される途中

[1] S. Kita et al, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1048 (2023) 168009



# AC-LGAD : Charge sharing

AC-LGADは電極間の電荷共有によって、電極の間隔以上の精度でヒット位置を決定できる → 位置分解能の向上

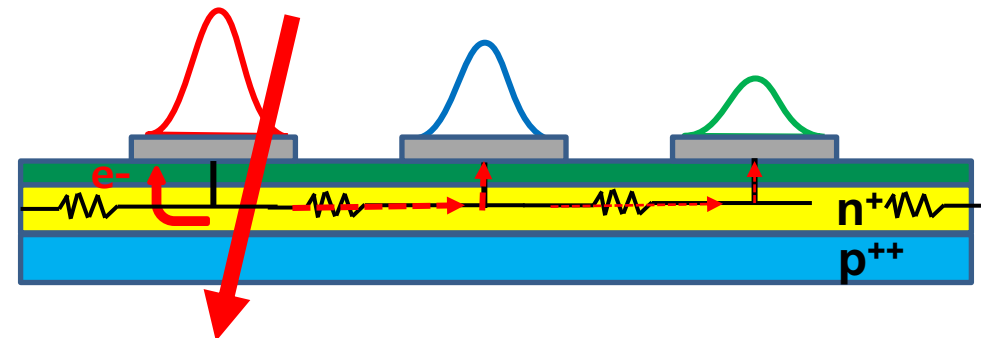


## 目的

- 線源からPMTまでの飛跡の再構成
- より正確な時間分解能の決定につながる

## 結果

- ヒット位置によって振幅に差があることを確認
- ヒット位置から遠ざかるほど弱い



# Next plan



- ❑ Analysis code
  - Change the definition of arrival time
  
- ❑ Doing AC-LGAD+ASIC research at BNL for 3 months
  - HGCROC? EICROC? others?
  - With Alessandro and Prithwish
  
- ❑ Build a setup with additional thermostatic chambers
  - Temperature dependence
  - Adjustment of irradiation position by collimator



# Backup



## HGCROC3 overview



### Overall chip divided in two symmetrical parts

- 1 half is made of:
  - 39 channels: 18 ch, CM0, Calib, CM1, 18 ch (78 channels in total)
  - Bandgap, voltage reference close to the edge
  - Bias, ADC reference, Master TDC in the middle
  - Main digital block and 3 differential outputs (2x Trigger, 1x Data)

### Measurements

- Charge
  - ADC (AGH): peak measurement, 10 bits @ 40 MHz, dynamic range defined by preamplifier gain
  - TDC (IRFU): TOT (Time over Threshold), 12 bits (LSB = 50ps)
  - ADC: 0.2 fC resolution. TOT: 2.5 fC resolution
- Time
  - TDC (IRFU): TOA (Time of Arrival), 10 bits (LSB = 25ps)

### Two data flows

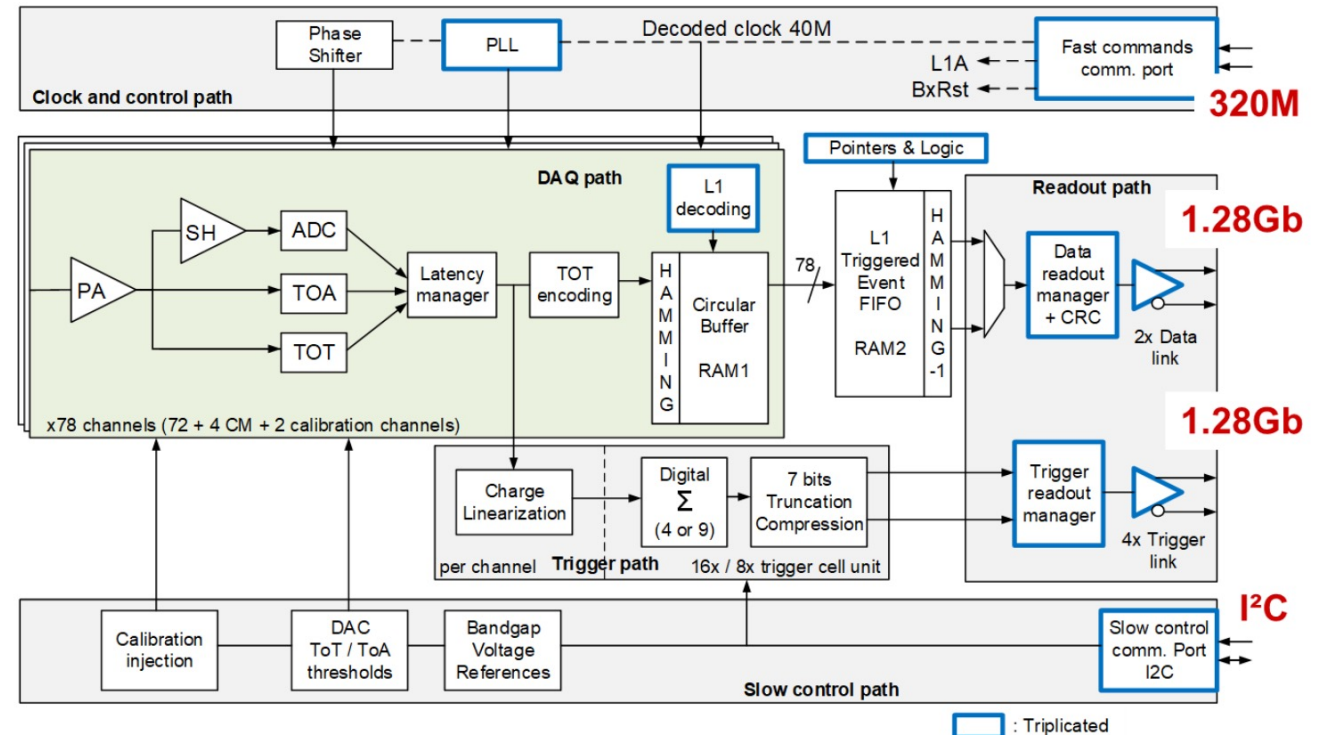
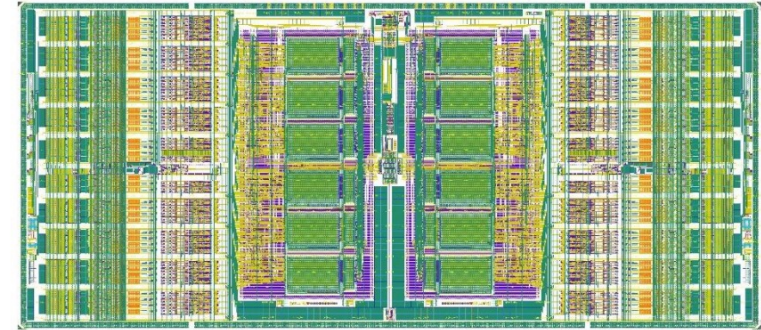
- DAQ path
  - 512 depth DRAM (CERN), circular buffer
  - Store the ADC, TOT and TOA data
  - 2 DAQ 1.28 Gbps links
- Trigger path
  - Sum of 4 (9) channels, linearization, compression over 7 bits
  - 4 Trigger 1.28 Gbps links

### Control

- Fast commands
  - 320 MHz clock and 320 MHz commands
  - A 40 MHz extracted, 5 implemented fast commands
- I2C protocol for slow control

### Ancillary blocks

- Bandgap (CERN)
- 10-bits DAC for reference setting
- 11-bits Calibration DAC for characterization and calibration
- PLL (IRFU)
- Adjustable phase for mixed domain





- High speed TZ PA and discriminator (from ALTIROC)
- I<sup>2</sup>C slow control (from CMS HGCROC)
- 8 bits 40 MHz ADC (adapted from HGCROC 10 bits ADC, M. Idzik *et al.*, AGH Krakow)
- Digital readout FIFO (depth 8, 200 ns)
- 10 bits **TDC** (TOA) designed by **CEA Irfu/DEDIP**:

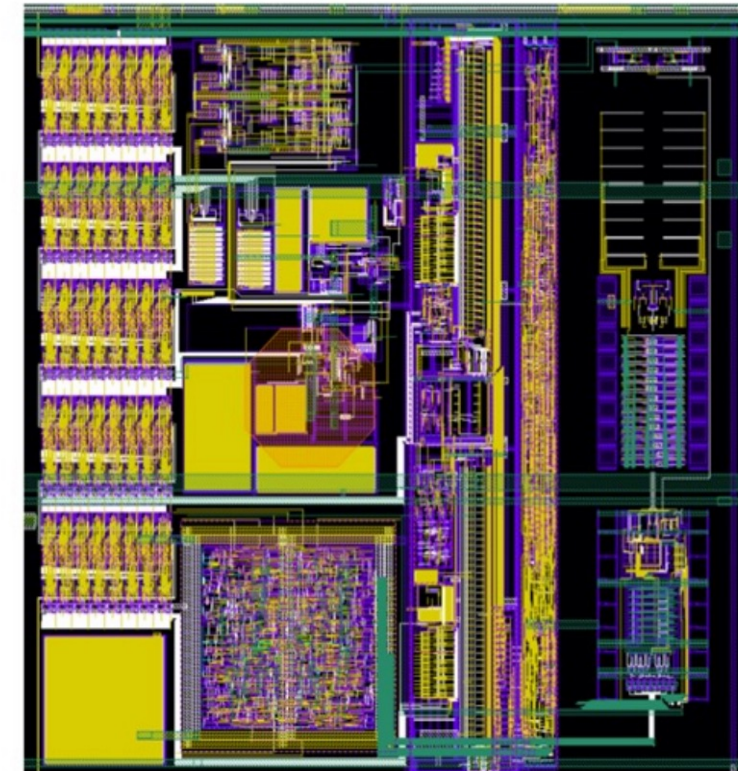
HGCROC TDC (1 mm x 120 μm):

- spatially adapted to fit in a pixel of 0.5 x 0.5 mm<sup>2</sup>
- optimization in terms of dynamic range and resolution (10 ps rms) as well as power consumption
- common block for calibration of all TDC channels

★ 5 slow control bytes/pixel:

- 6 bits local threshold
- 6 bits ADC pedestal
- 16 TDC calibration bits
- Various on/off and probes

EICROC0 layout (1 pad = 1 channel)



Slow control

PA +discr

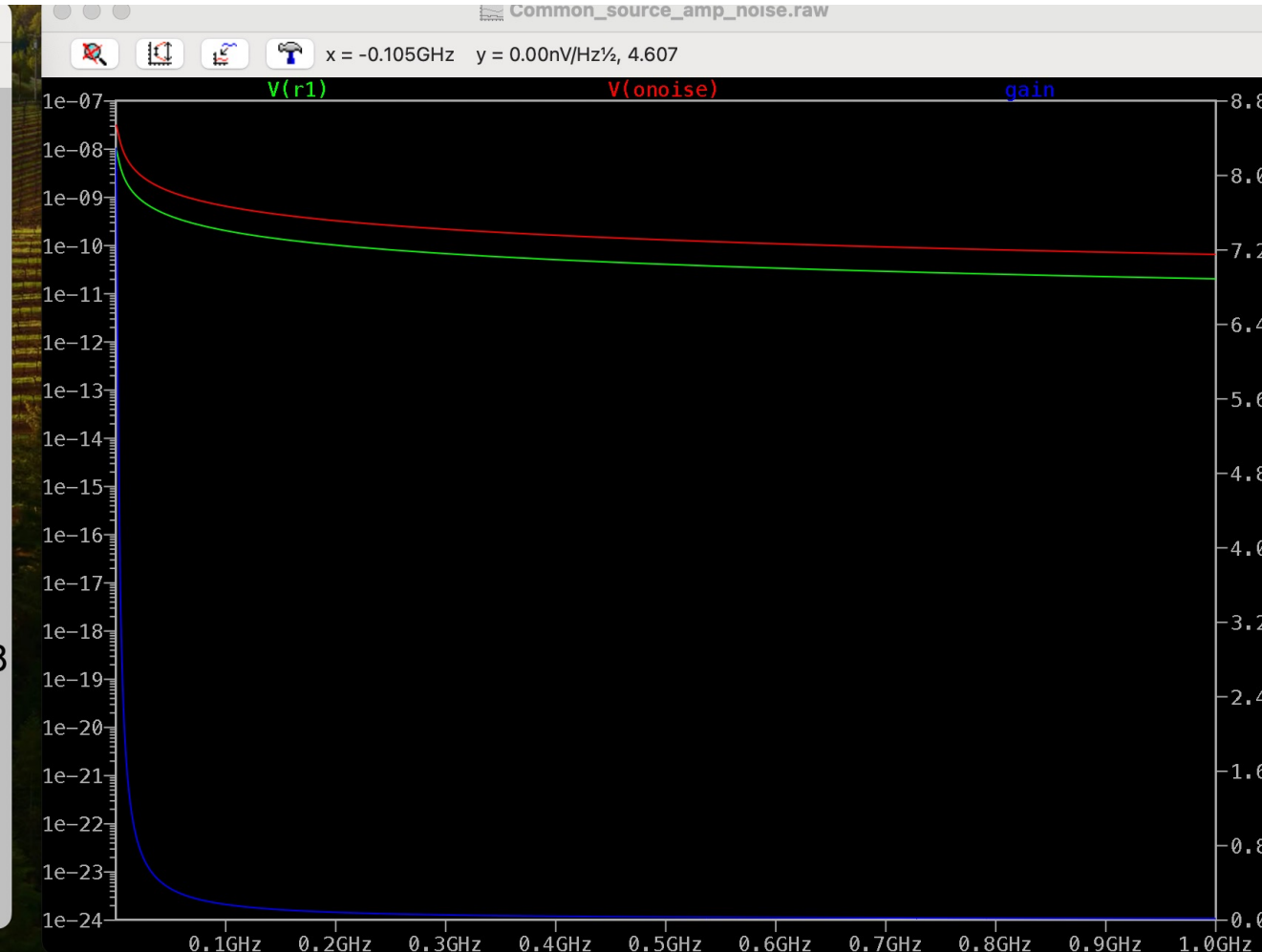
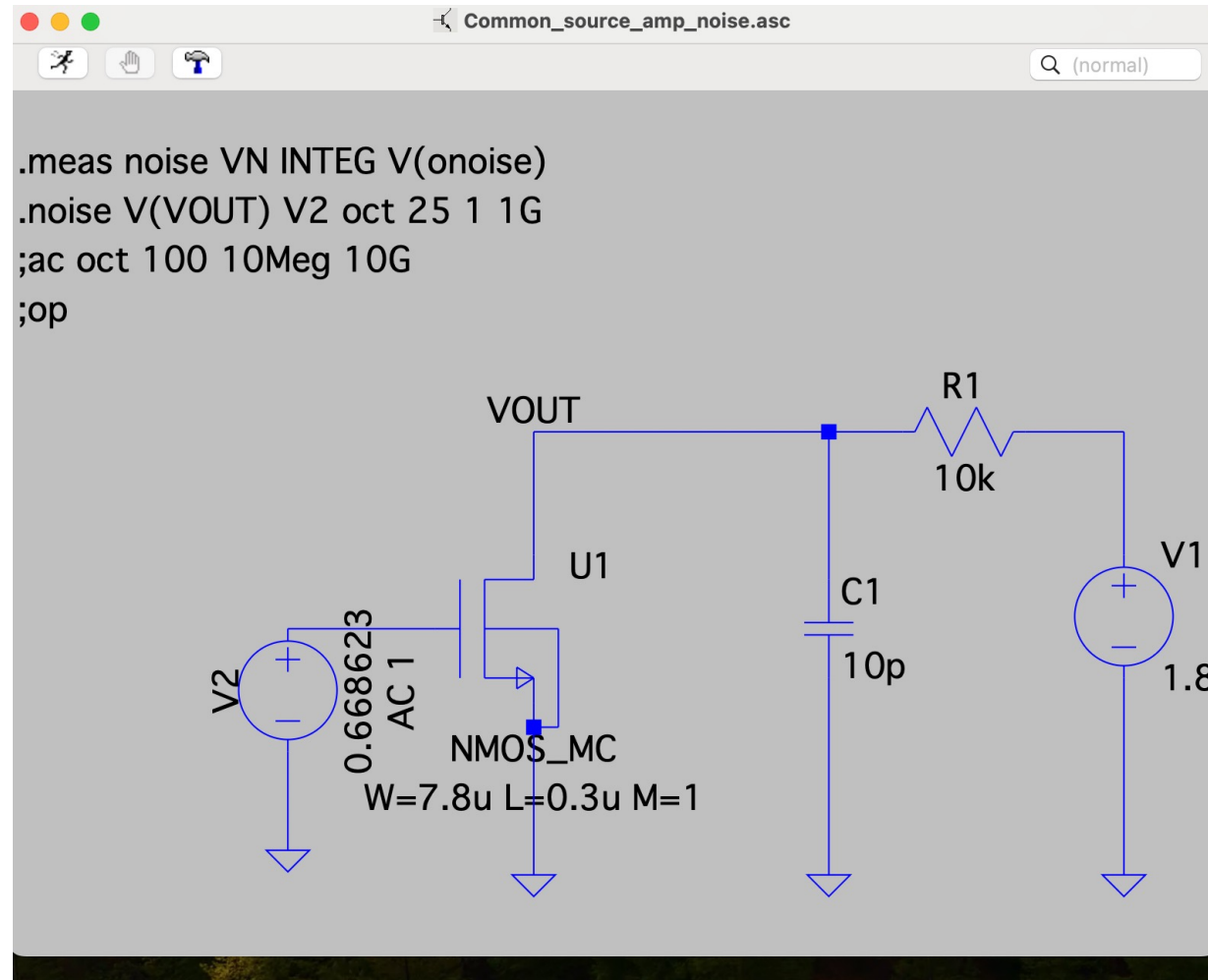
TOA TDC

8b 40M ADC



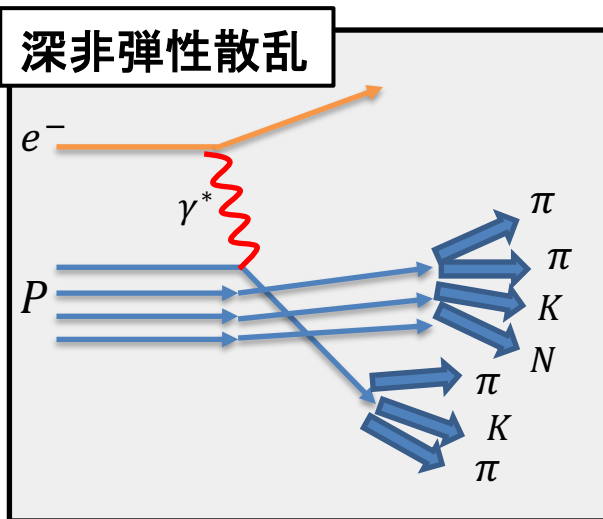
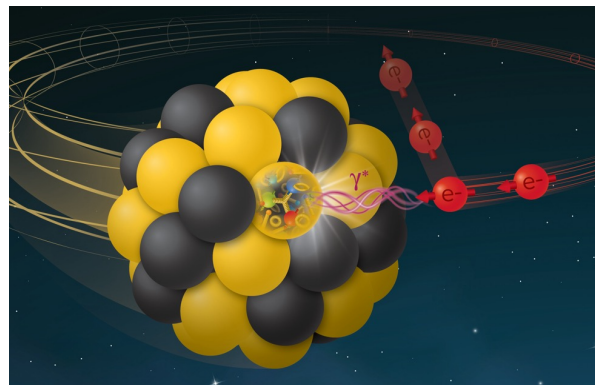
# ASIC simulation

## LTspice



# Electron Ion Collider (EIC) 加速器

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) に建設予定 → 2032年頃稼働開始  
 世界初 偏極電子+偏極陽子及び原子核衝突型加速器



- ◆ 輝度:  $L = 10^{33} - 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 
  - 過去のe-p実験(HERA)の1000倍
- ◆ 高偏極ビーム: 70%
  - 偏極電子, 偏極陽子・重陽子・ $^3\text{He}$
- ◆ 衝突エネルギー: 20-140 GeV
  - 陽子質量  $\sim 1 \text{ GeV}$
- ◆ 衝突イオン範囲: 陽子～ウラン
  - 主な原子核(O, Cu, Au)

- 深非弾性散乱では, 光速付近の原子核を仮想光子で叩く
- ハドロンが多次元構造の理解から, 質量, スピンの理解へつなげる

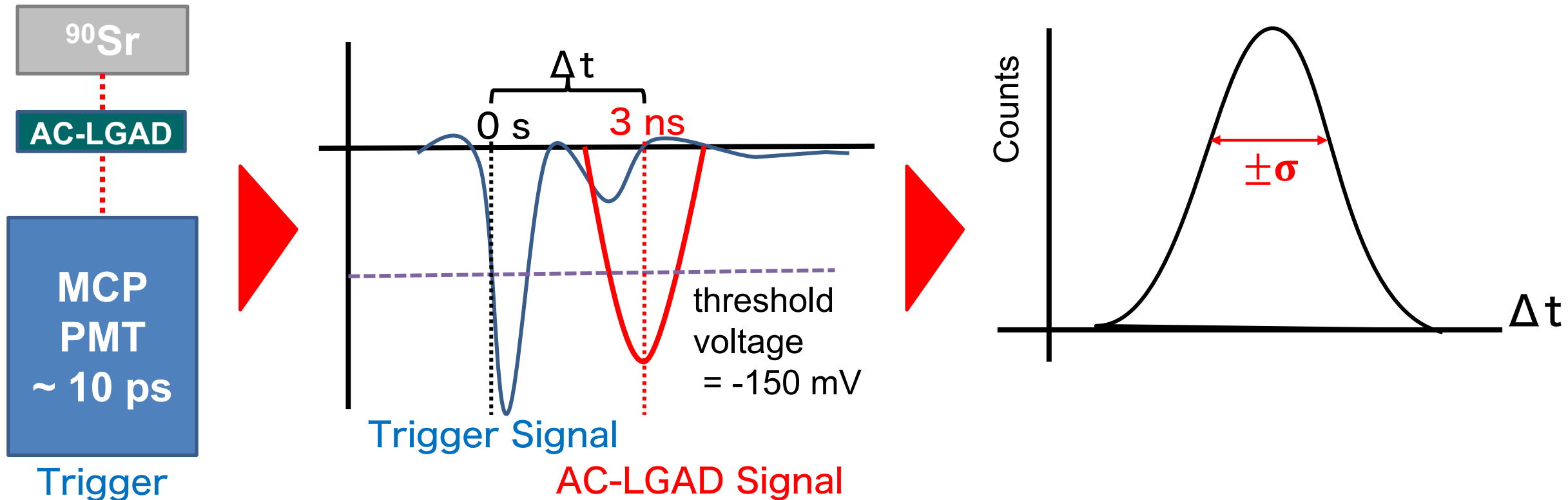




# 実験方法

# AC-LGAD 時間分解能評価方法

1. 放射線源 $^{90}\text{Sr}$ からの $\beta$ 線をAC-LGADとトリガー(MCP PMT:  $\sim 10$  ps)に照射
2. トリガー信号とAC-LGAD信号の到達時間差  $\Delta t$ を測定
3.  $\Delta t$ の時間分布をガウシアンでフィットし, 時間分解能  $\sigma$ を計算

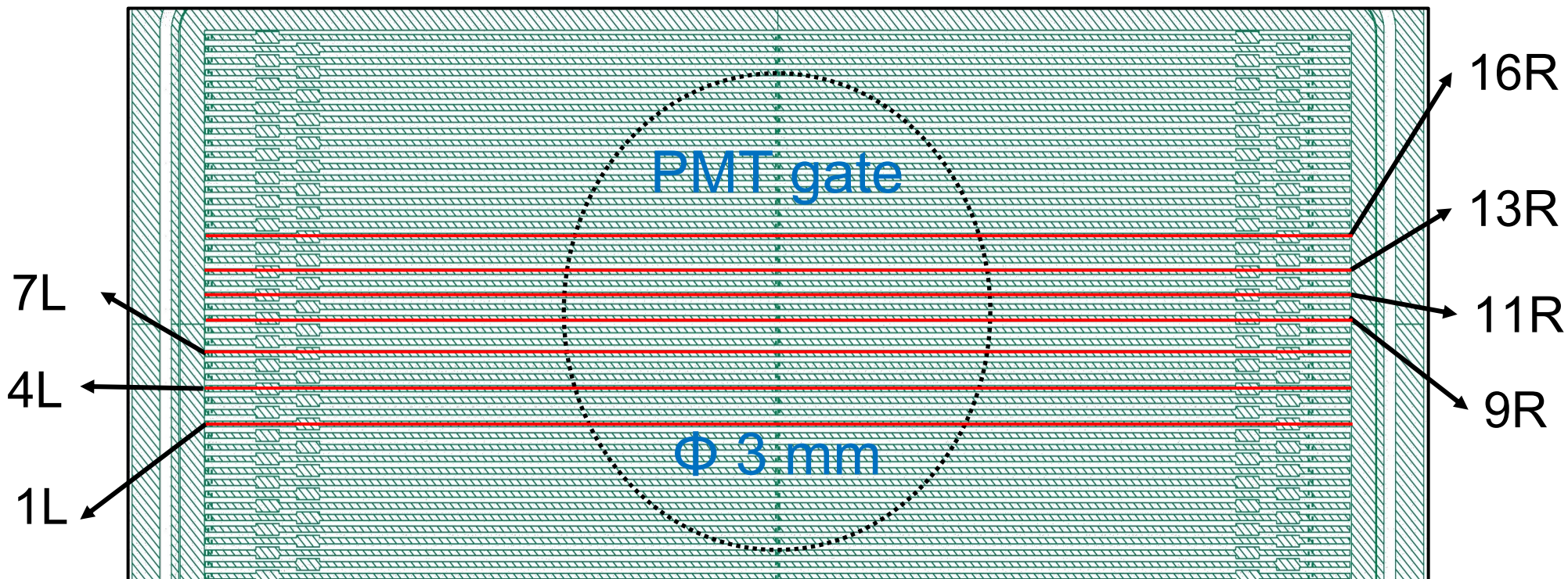




# AC-LGAD の測定チャンネル選択

- 50 ch のストリップのうち16 ch がワイヤーボンド
- オシロスコープの読出チャンネルの関係で, 7 ch の信号を選択
- トリガーとして20 mm 先にある時間分解能  $\sim 10$  ps のPMTを使用

## C1: PMT Signal (Trigger; -150mV)



### AC-LGAD Status

- ストリップ型
- $0.08 \times 10$  mm<sup>2</sup> pitch
- 50 x 1 ch の読出センサー
- $4.0 \times 10$  mm<sup>2</sup>



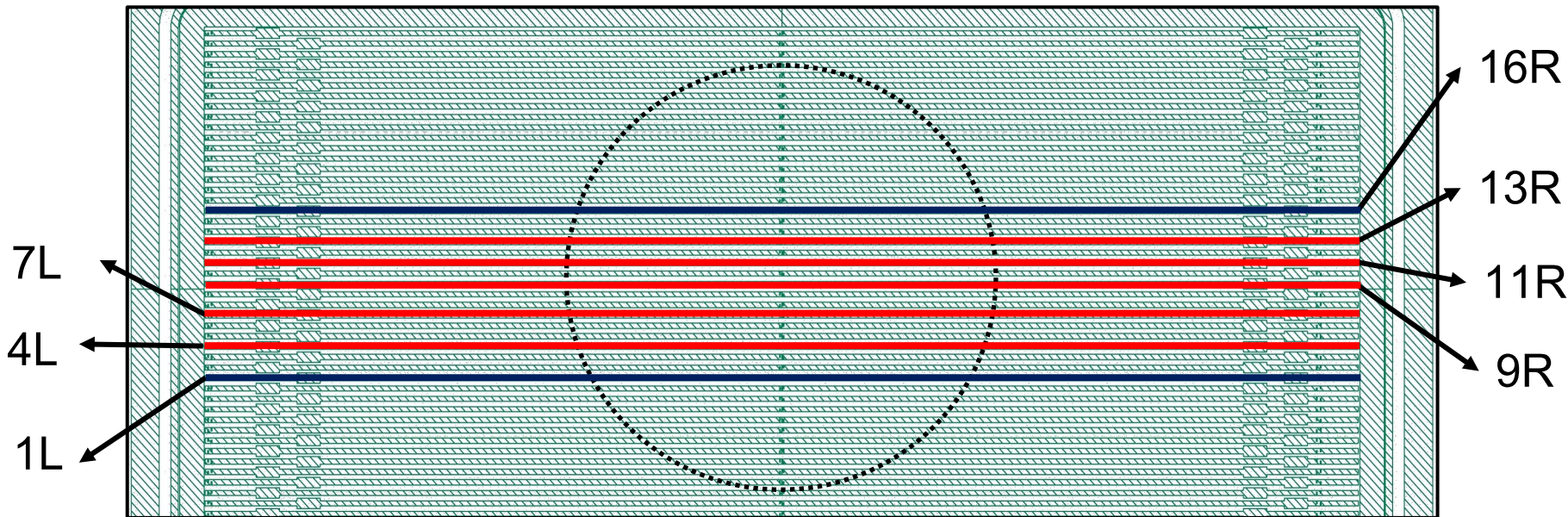
# 時間分解能の精度について

## ◆ ~100 ps の時間分解能の得た

- 今回は環境構築後の1st trial. 解析を簡単にするため波形のピークで測った
- thresholdを低く設定し、波形をフィット後信号の20%に到達する時間で再計算すれば向上する見込み

## ◆ 1L,16Rについて

- 到達時間が遅い方向に尾を引いている
- 1Lと16Rは端のチャンネルのため、それより外側から電荷共有されてきた信号も最大値となる
- 端二つ(1L,16R)は波高比較の参考データとして利用する



Channel	時間分解能
1L	126.6 ps
4L	90.3 ps
7L	100.6 ps
9R	94.1 ps
11R	103.9 ps
13R	107.6 ps
16R	133.7 ps

# Summary

- EIC 加速器は世界初の偏極電子+偏極陽子及び原子核衝突型加速器
- ePIC 検出器のなかで粒子識別検出器 **Barrel Time of Flight (BTOF)** は広島大学がリード
- **AC-LGAD** は BTOF の要求性能を満たす半導体検出器
  - 30 ps の時間分解能と 30  $\mu\text{m}$  の位置分解能を満たすことが可能
- 広島大学で **AC-LGAD の実験環境の構築を完了**
  - AC-LGAD の信号を取得し時間分解能の評価が可能 → 100 ps の時間分解能
  - 実験環境と解析手法はこれからどんどん良くなっていく予定
  - EIC-ePIC 検出器への実装に向けて AC-LGAD の開発および改良をおこなう