



EIC ePIC 実験飛跡検出器における 高時空間分解能測定に向けた AC-LGAD 検出器性能評価

松谷奏^{AB}, 志垣賢太^{AB}, 八野哲^A

広島大学先進理^A,
International Institute for Sustainability with Knotted Chiral Meta Matter
(WPI-SKCM²)^B

1. 概要

- 物理動機
- Electron-Ion-Collider 加速器
- ePIC 検出器
- AC-LGAD

2. 実験方法

- 時間分解能評価
- 実験環境, セットアップ
- 測定チャンネル選択

3. 結果

- バイアス電圧の決定
- 時間分解能
- 電荷共有

4. 考察

- 時間分解能の精度

5. まとめ



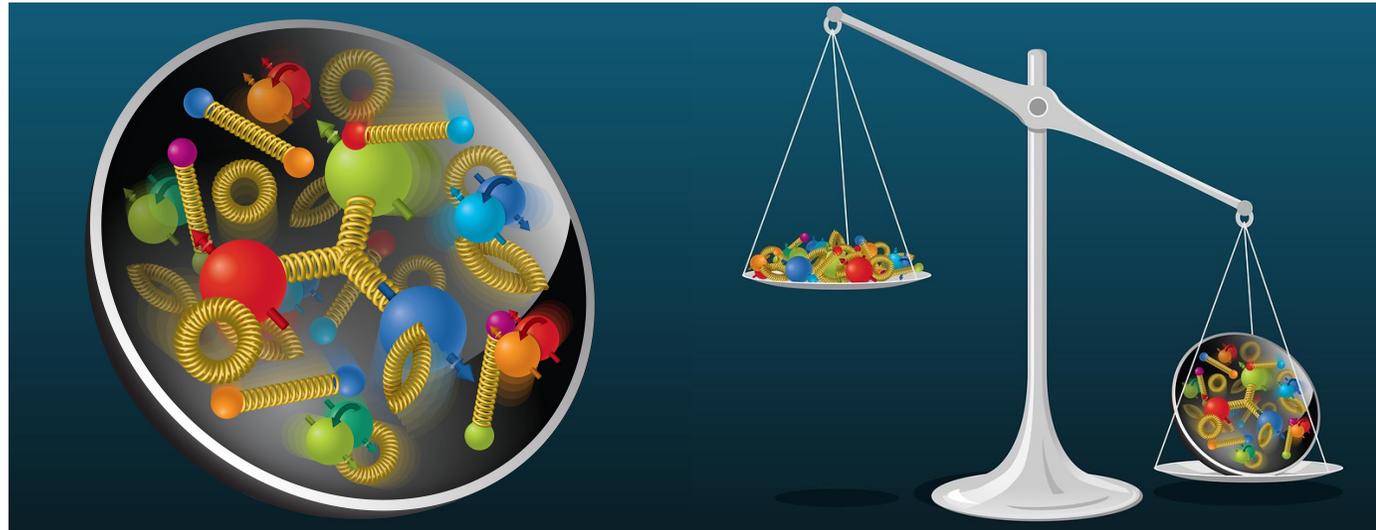
概要

Physics Motivation

陽子の質量起源の解明

- 陽子の構成要素 (u,u,d)
- $m_p = 938 \text{ MeV}$
- $m_u = 3 \text{ MeV}, m_d = 5 \text{ MeV}, m_g = 0$

残りの質量はどこから？



陽子質量分解

$$M = M_q^{kin} + M_g^{kin} + M_q + M_a$$

Quark Energy
Quark Mass
Gluon Energy
Trace Anomaly
 Ji (1995)

Trace Anomaly

$$T_\mu^\mu = \frac{\beta(g)}{2g} F^2 + m(1 + \gamma_m(g)) \bar{q}q$$

$$\langle P | T_\mu^\mu | P \rangle = 2M^2$$

$$\langle P | F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} | P \rangle$$

グルーオン凝縮

QCD のラグランジアンはクォーク質量を除いて、古典的にはスケール不変

スケール不変性は量子レベルでアノマリーによって破れる → ハドロンの質量

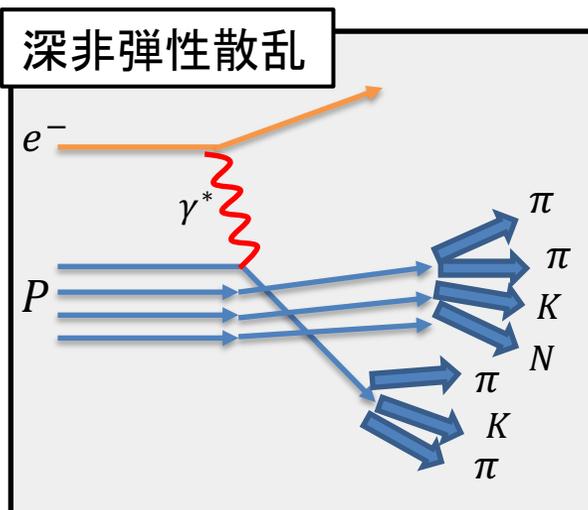
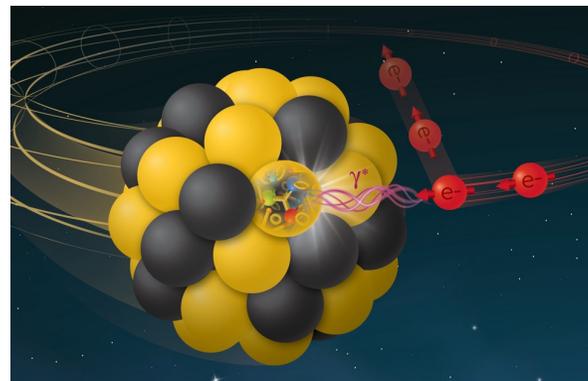
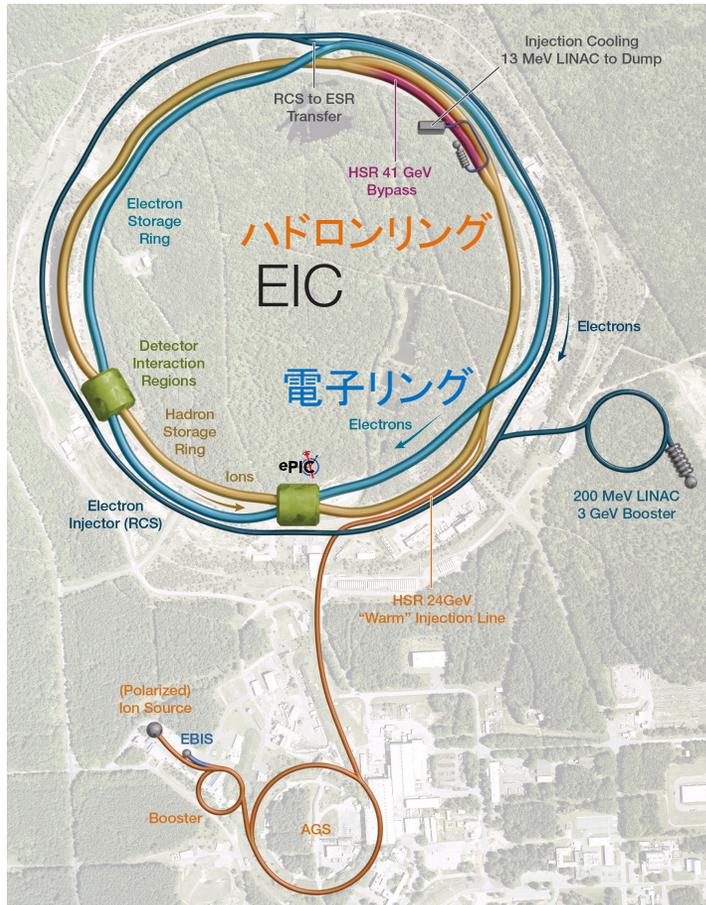
グルーオン凝縮の値を実験で測定
→ 陽子の質量の謎に迫る



Electron Ion Collider での実験
で見ることが出来る可能性

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・ ^3He
- ◆ 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(p, Cu, Au)

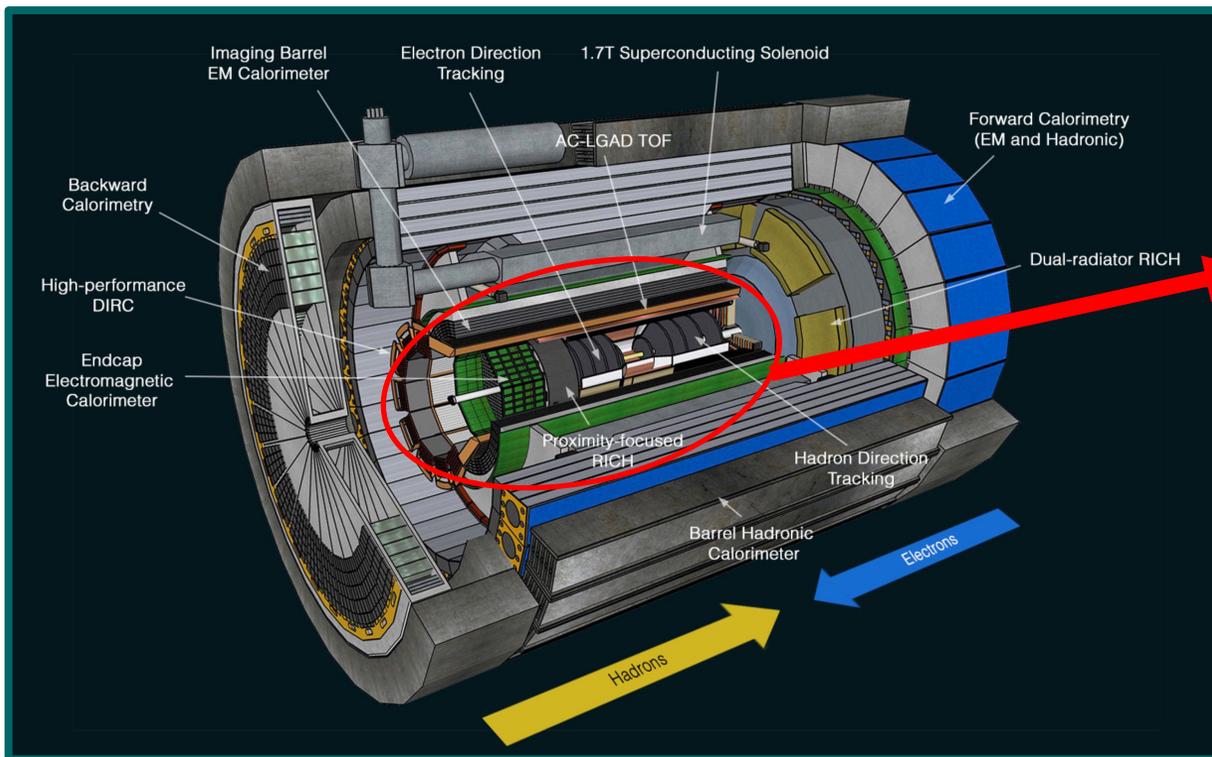
- 深非弾性散乱では, 光速付近の原子核を仮想光子で叩く
- ハドロンが多次元構造の理解から, 質量, スピンの理解へつなげる

electron-Proton/Ion Collider (ePIC) Collaboration

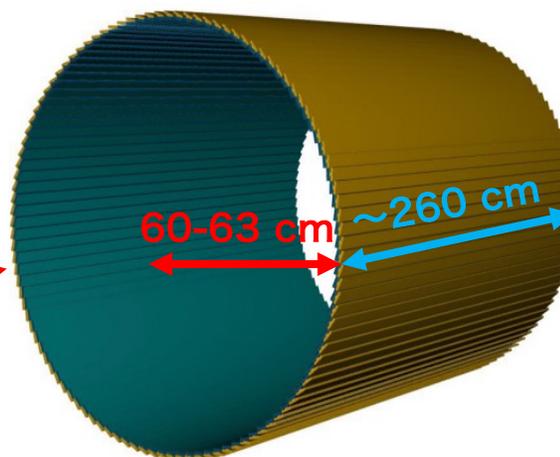
EICの物理を理解するための検出器を開発する国際コラボレーション

- 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Barrel Time of Flight (飛跡検出器)の開発をリード

ePIC Detector

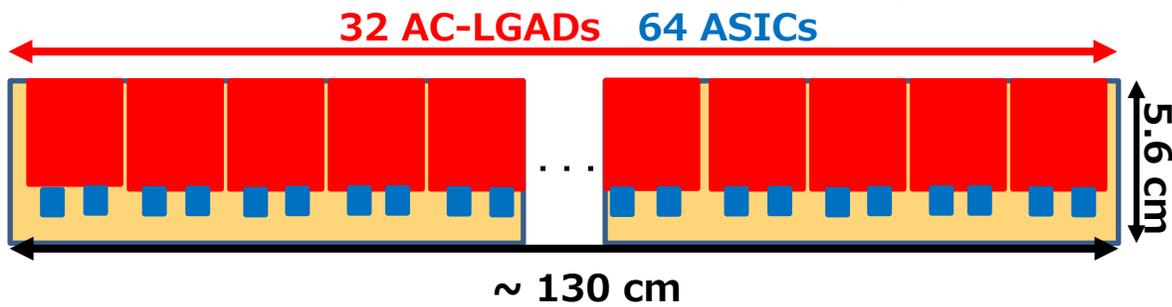


TOF Detector



TOF 要求性能	
◆	時間分解能 : ~30 ps
◆	位置分解能 : ~30 μm
◆	センサー数 : 9216
◆	有効面積 : ~12 m ²

TOF module 案 (144個でTOFを構成)



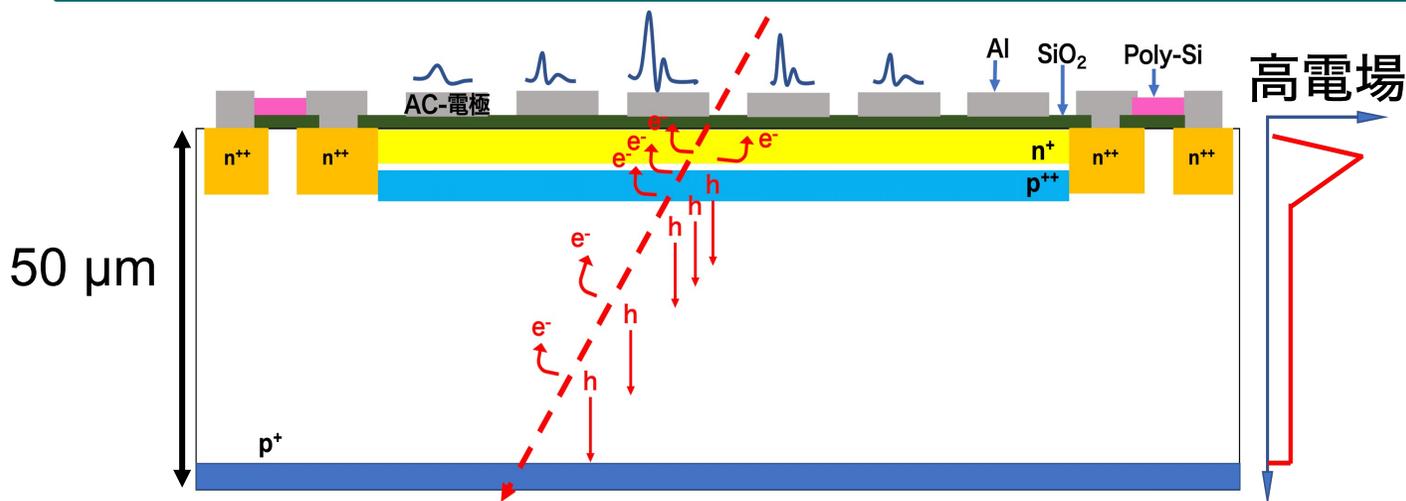
AC-coupled Low Gain Avalanche Detector (AC-LGAD) 検出器

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

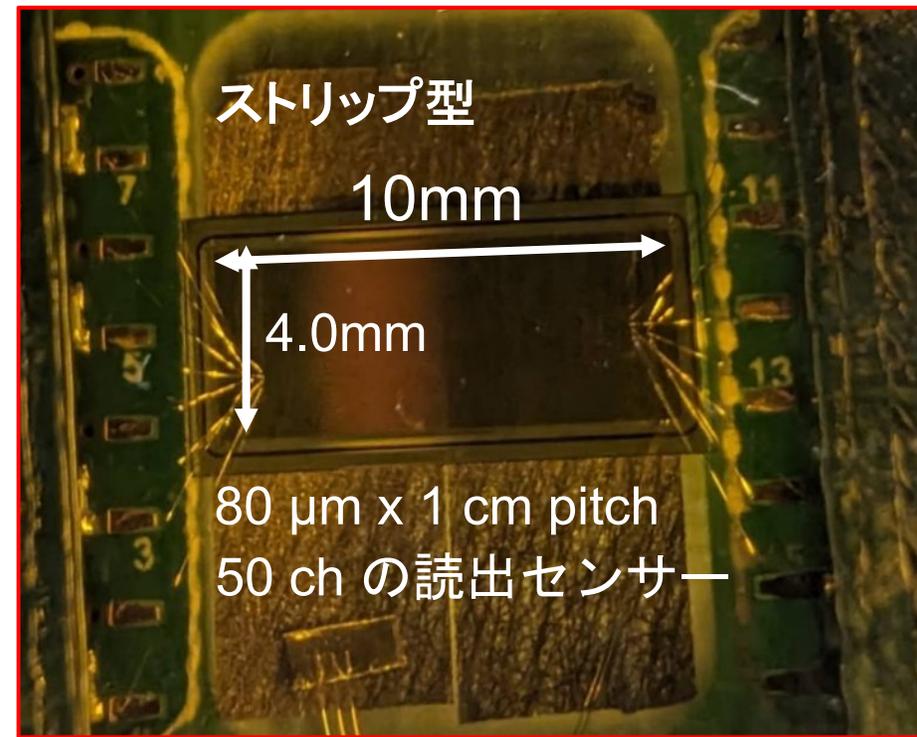
- 表面にある薄い増幅層で電子雪崩増幅 → 30 ps の時間分解能
- 不感領域のない全ての電極に一様な増幅層による電荷共有アプローチ → 30 μm の位置分解能

Barrel TOFに使用するAC-LGAD

- ストリップ型
- 0.05 x 1 cm² pitch, 64 x 4 ch の読出センサー
- 3.2 x 4.0 cm²



本実験で使用する試用版AC-LGAD

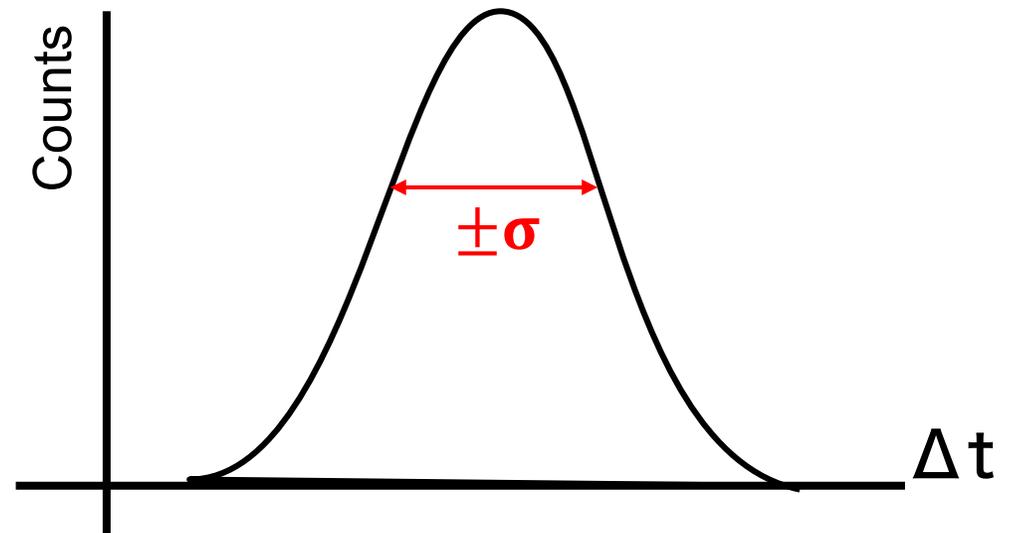
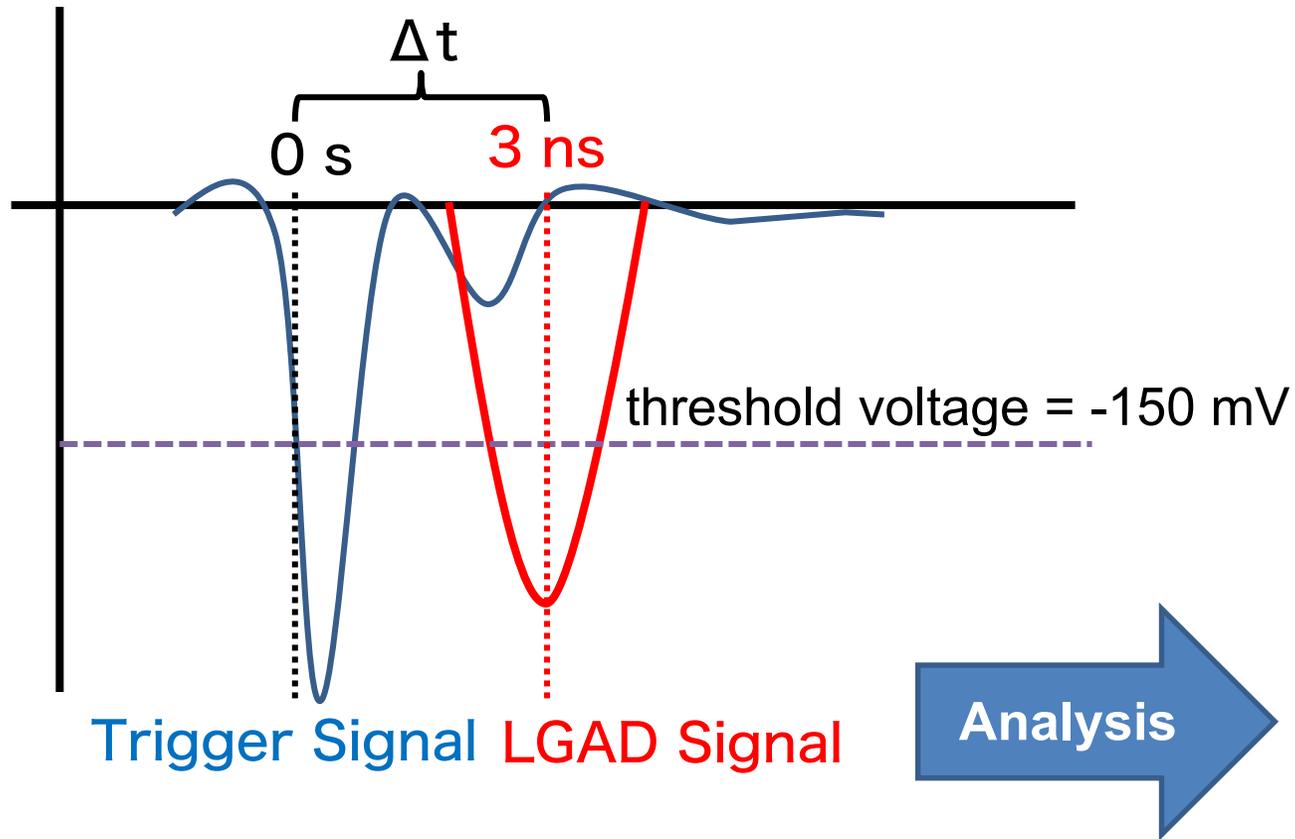




実験方法

AC-LGAD 時間分解能評価方法

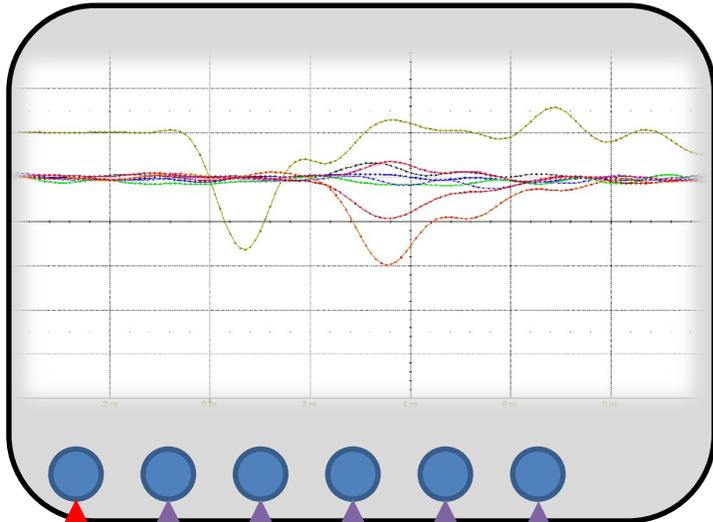
1. 放射線源 ^{90}Sr からの β 線をAC-LGADとトリガー(MCP PMT: ~ 10 ps)に照射
2. トリガー信号とAC-LGAD信号の到達時間差 Δt を測定
3. Δt の時間分布をガウシアンでフィットし, 時間分解能 σ を計算



実験環境

室温: 21°C
遮光

LECROY
oscilloscope



MCX - BNC

50Ω

SMA - BNC

1 MBq

Sr-90

banana - 4pin

Amp board
LV
6 V

5 mm

AC-LGAD

Amp board

10 mm

SHV - LEMO

AC-LGAD
HV
- 185 V

10 mm

Φ3 mm

MCP
PMT
~10 ps

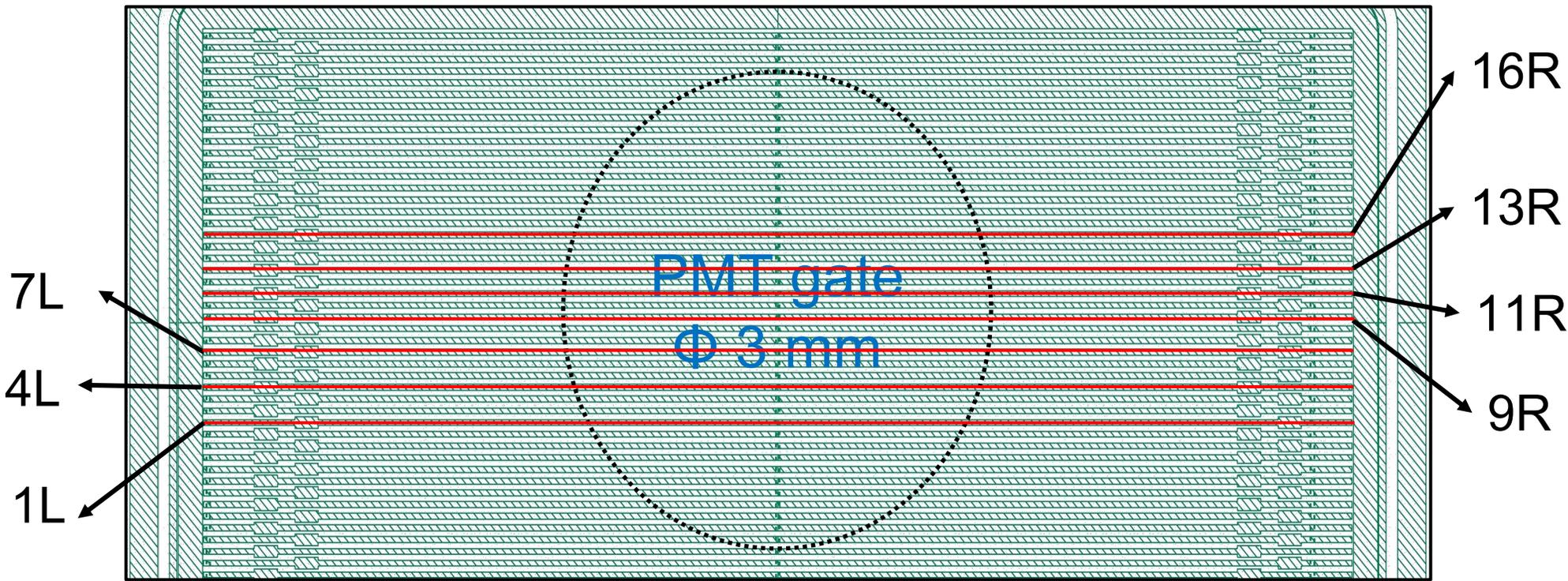
PMT
HV
-4300 V

SHV

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 ~10 ps のPMTを使用

C1: PMT Signal (Trigger; -150mV)



AC-LGAD Status

- ストリップ型
- 0.08 x 10 mm² pitch
- 50 x 1 ch の読出センサー
- 4.0 x 10 mm²

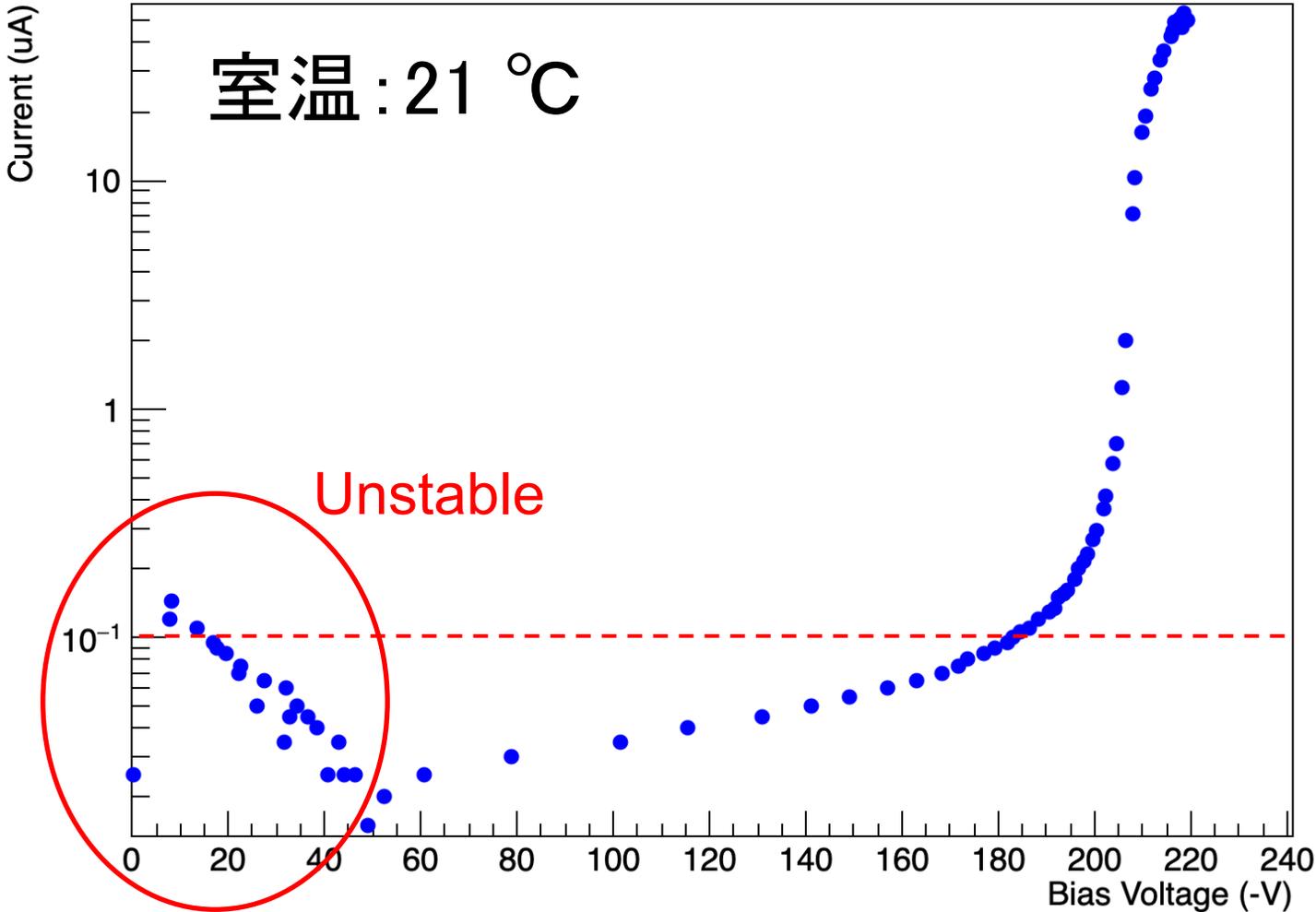


実験結果



結果① AC-LGAD バイアス電圧の決定

VMon vs IMonH



目的

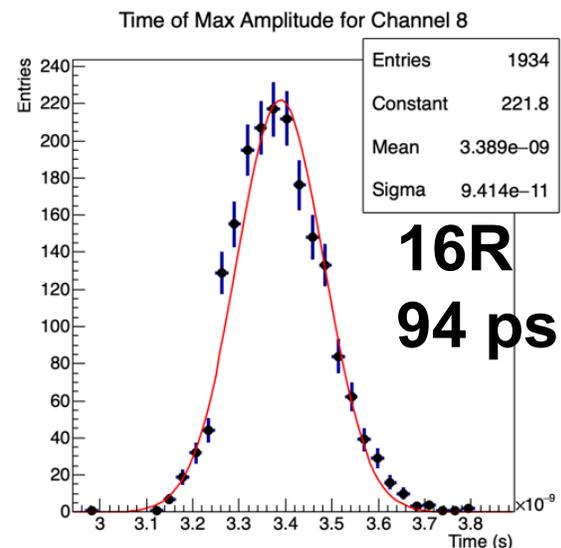
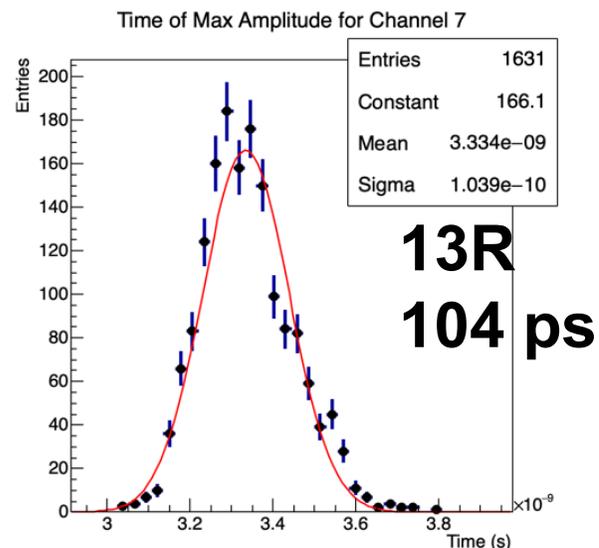
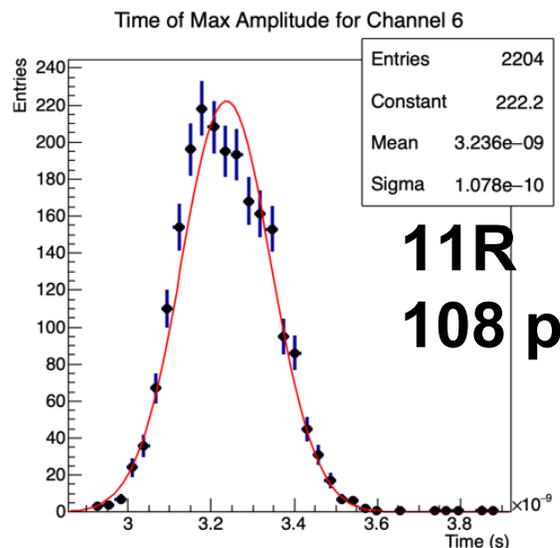
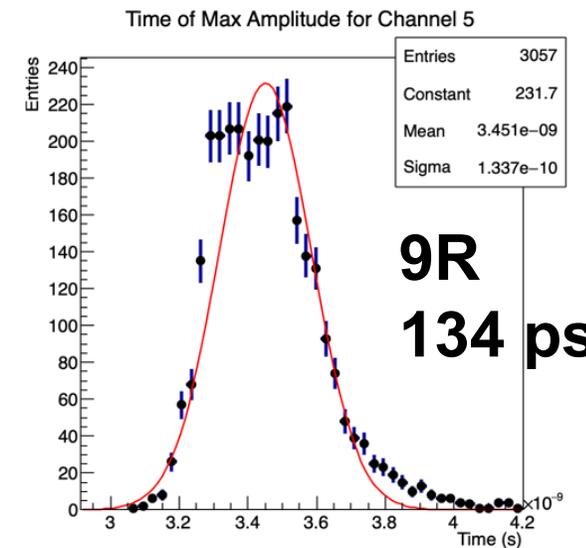
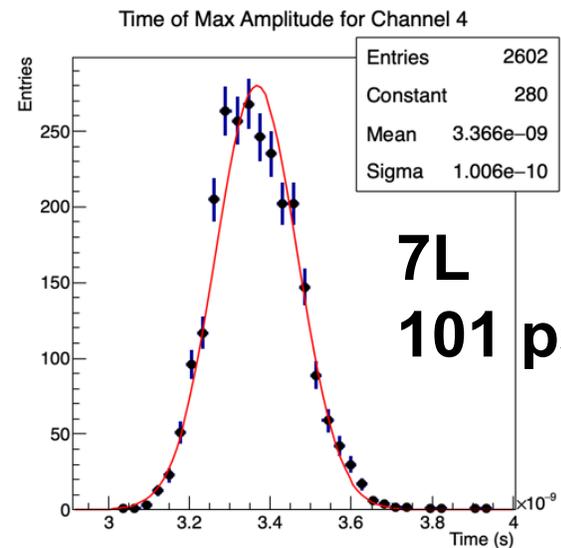
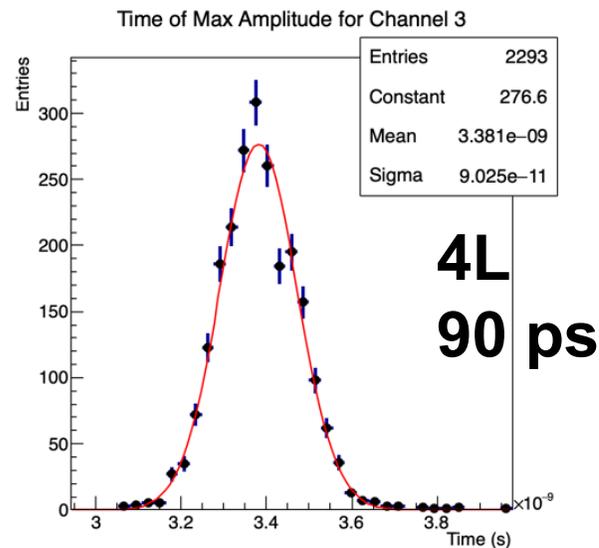
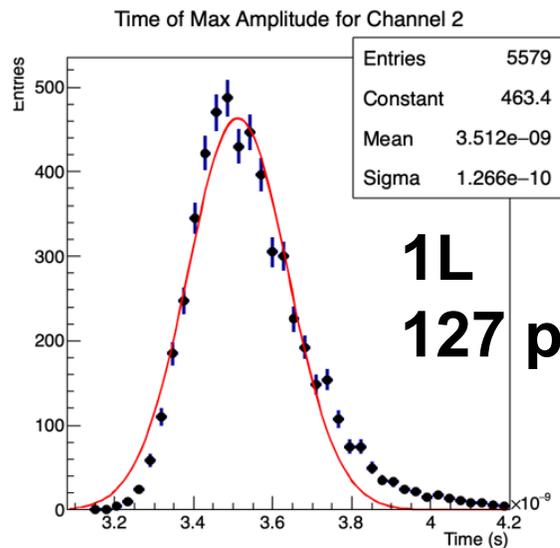
- AC-LGADにかかる電流大
→ 負荷大
- 負荷のかからない最適値を探す
- AC-LGADにかけるバイアス電圧は温度に依存^[1]

結果

- 180 -190 V 付近で電流値が急上昇
- 本実験ではバイアス電圧を **-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

結果② AC-LGAD 時間分解能



統計情報

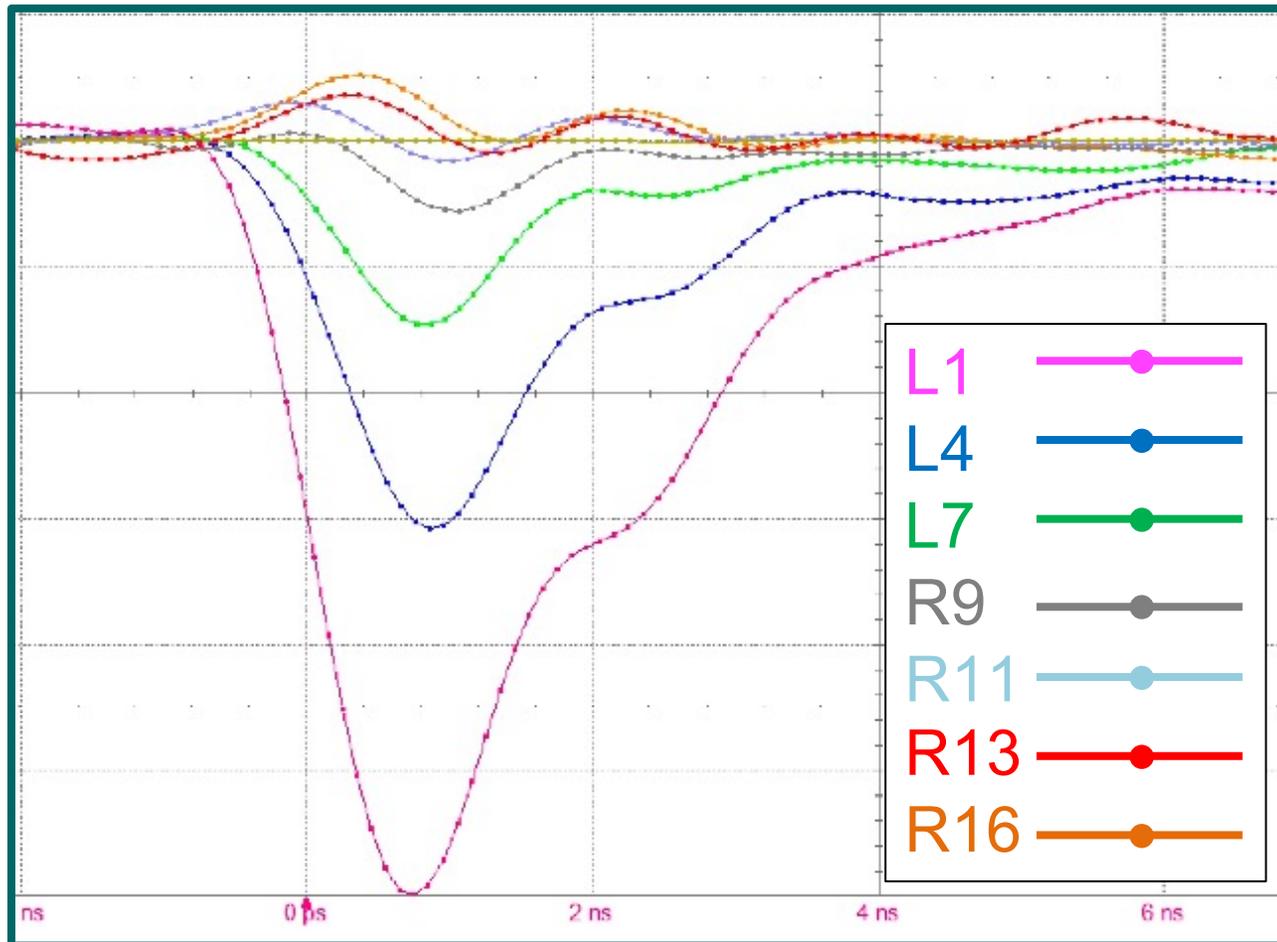
- 100000 events
- 各イベントのうち最大振幅のみ抽出
- Threshold < -10 mV

$\sigma = 90 - 130 \text{ ps}$



結果③ AC-LGADの特徴：電荷共有

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

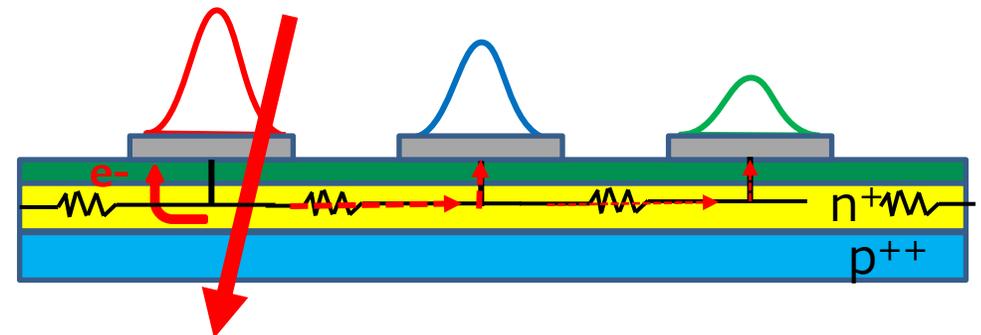


目的

- 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
- AC-LGAD上では



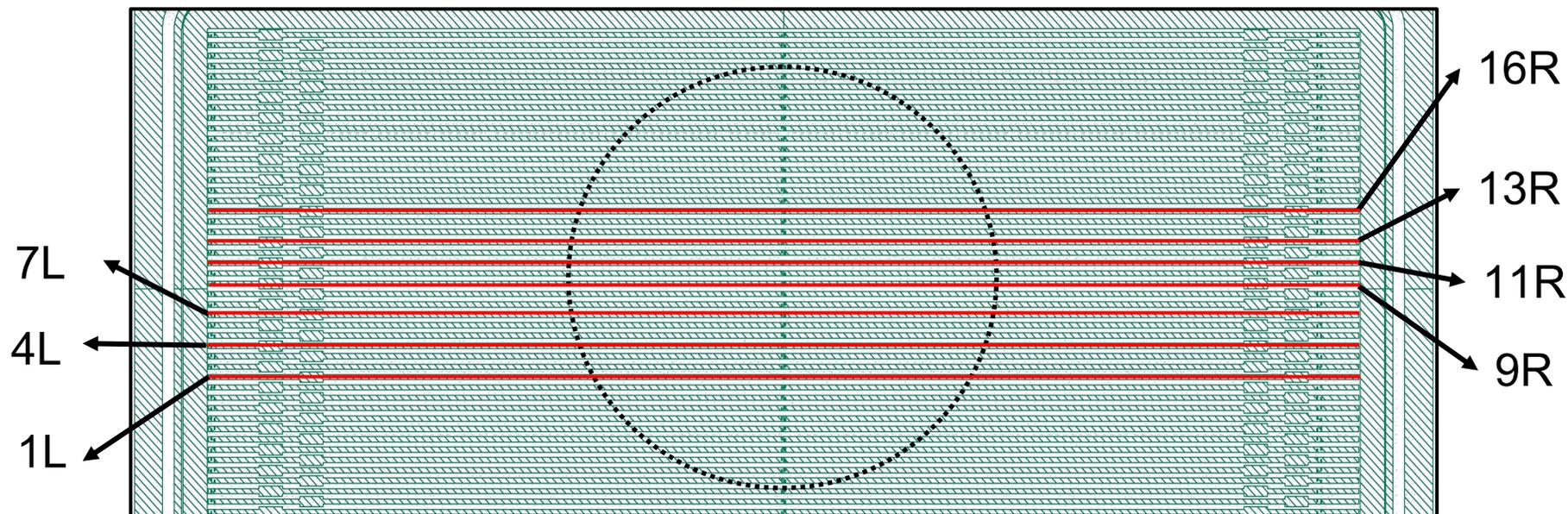


考察・まとめ



考察 時間分解能の精度について

- ◆ ~30 ps の時間分解能が出てない
 - O(10) ps はとてもシビアなため、データの取捨選択が重要
 - threshold, Trigger, イベント毎の最大値選択は精査する必要あり
- ◆ 1L,9Rについて、他のチャンネルより悪い結果
 - 1Lは端のため、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って精度が悪くなる
→16Rも同じはずだが違う振る舞いをするのはなぜか
 - 一方9Rは最内部だが、悪い結果。
 - チャンネルとワイヤーボンド箇所認識の間違い？
 - AC-LGADの構造上の問題？



Channel	時間分解能
1L	126.6 ps
4L	90.3 ps
7L	100.6 ps
9R	133.7 ps
11R	107.6 ps
13R	103.9 ps
16R	94.1 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**
 - ハドロンの多次的構造の理解で物理の未解明問題を解き明かす
- **ePIC 検出器のなかで粒子同定を担うBarrel Time of Flightは広島大学がリードする**
 - 30 psの時間分解能と 30 μm の位置分解能が要求されている
- **AC-LGADはTOFの要求性能を満たす半導体検出器**
 - 電子雪崩による信号増幅とその増幅層の薄さにより 30 ps を達成
 - 不感領域のない増幅層での電荷共有により 30 μm を達成
- **広島大学ではAC-LGADの時間分解能を測定開始**
 - 100 ps 程度の時間分解能を記録→温度依存性, 電荷共有パターン, 飛跡距離の規格化などを考慮し, AC-LGADを性能評価
 - 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

Reference

- <https://www.bnl.gov/eic/>
- Sayuka Kita, Koji Nakamura et al, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1048 (2023) 168009
- [レプトン - 核子深非弾性散乱実験の発展, KEK](#)
- Eur. Phys. J. A (2016) 52: 268
- EIC Yellow Report, Nuclear Physics A 1026 (2022) 122447
- 研究会「EICで展開する新たな原子核・素粒子物理」講義資料

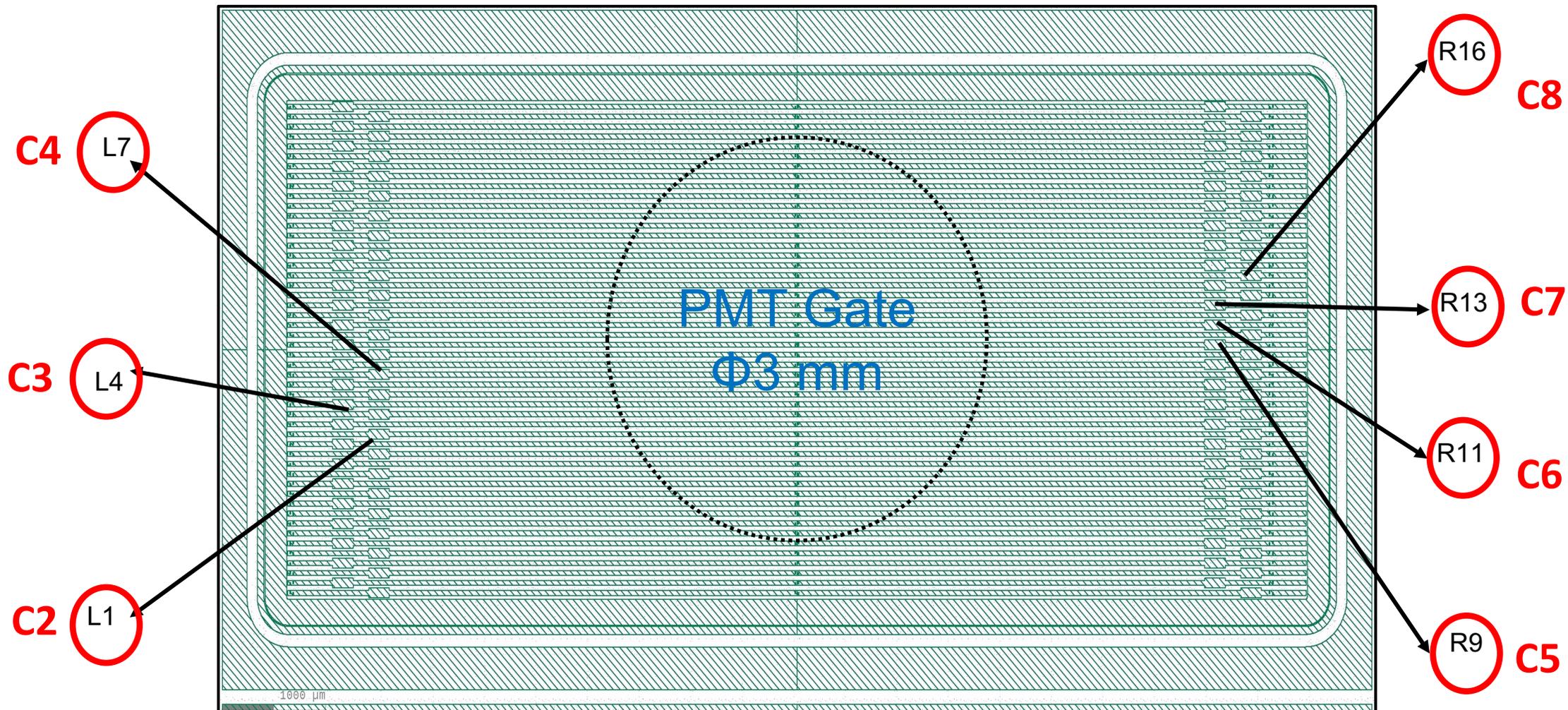
A decorative teal knot logo in the top left corner.

Thank you for listening!

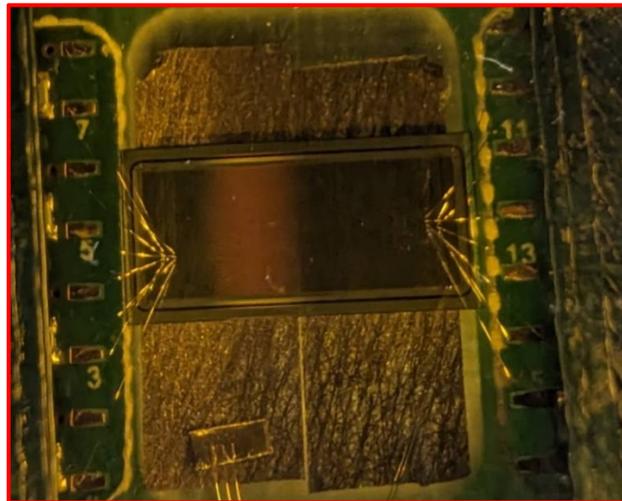
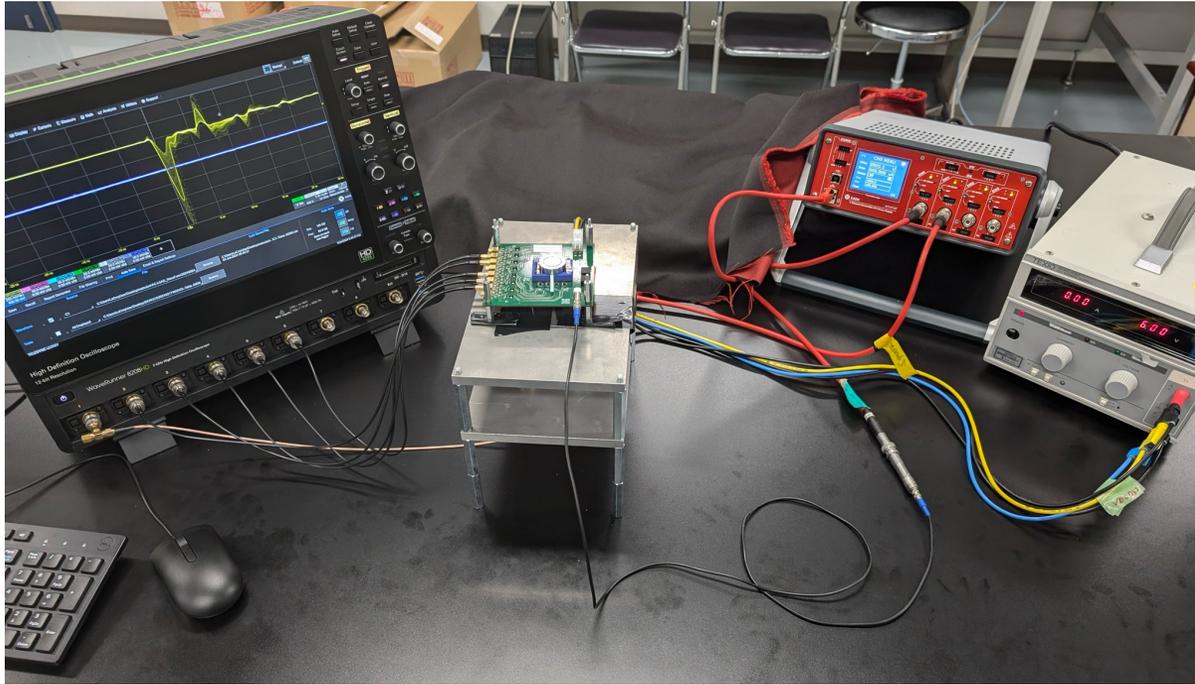


Strip type AC-LGAD レイアウト

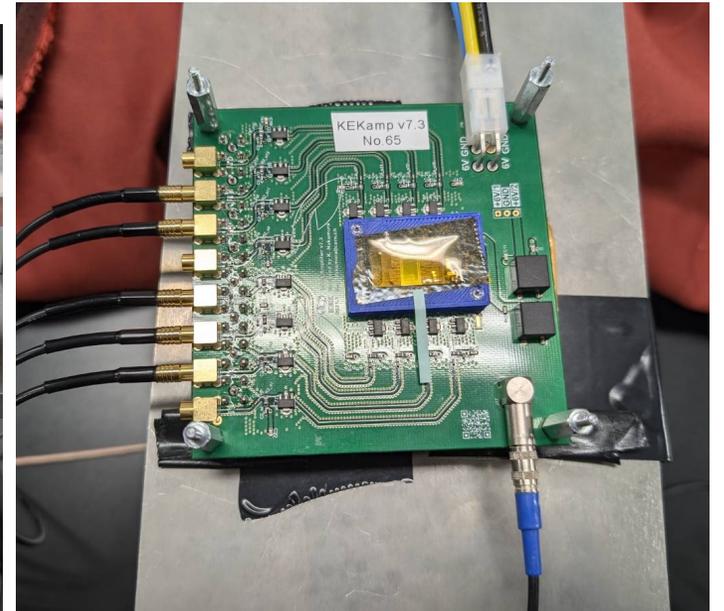
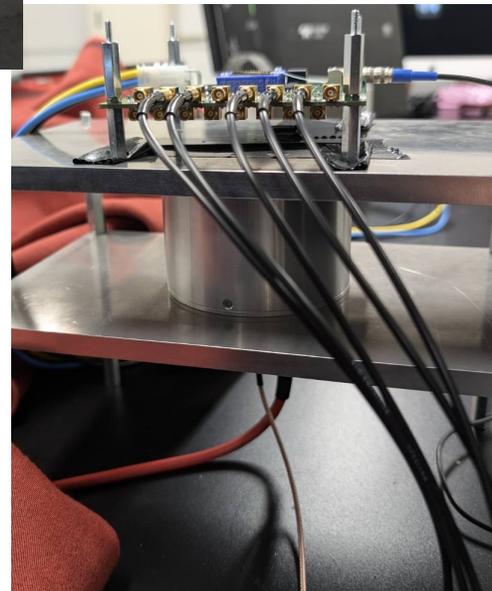
C1: PMT Signal (Trigger; -150mV)



実験室の風景



Stripe-type AC-LGAD from KEK(HPK) →





時間分解能

$$\sigma_t^2 = \sigma_{tw}^2 + \sigma_j^2 + \sigma_L^2$$

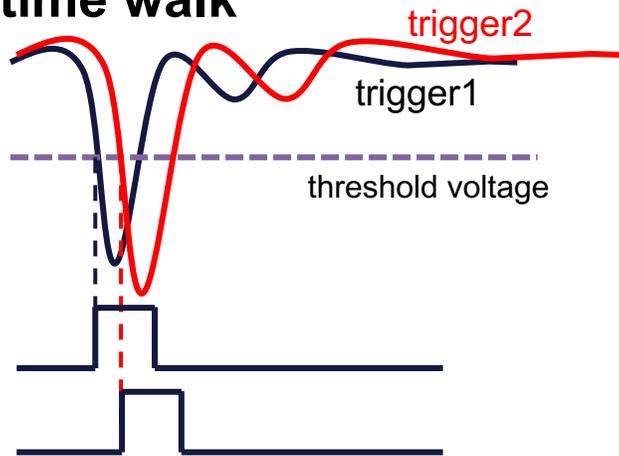
σ_t : time resolution

σ_{tw} : time walk

σ_j : time jitter

σ_L : Landau noise

time walk

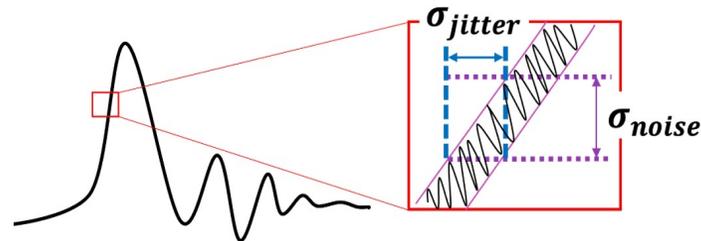


Signalの50%をtriggerとすることでほぼ0にすることができる

time jitter

$$\sigma_j = \frac{\sigma_{noise}}{\left| \frac{signal}{t_{rise}} \right|}$$

σ_{noise} : noise width
 t_{rise} : rise time
 signal: pulse height



Landau noise

荷電粒子が物質を通る際のエネルギー損失分布に関するノイズ

線源を使用する際にはこのノイズが含まれる

Backup に追加予定のもの

- EICの物理(DIS, 陽子質量起源, PDF・GPD・TMD)
- 波形のプロット
- 実験室の実際の写真
- 時間分解能について(詳細)