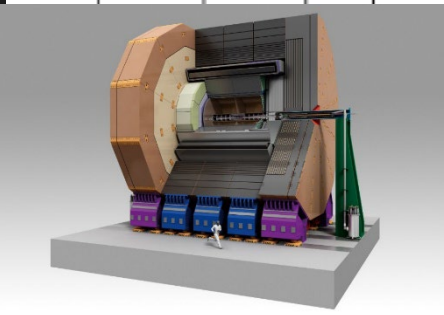
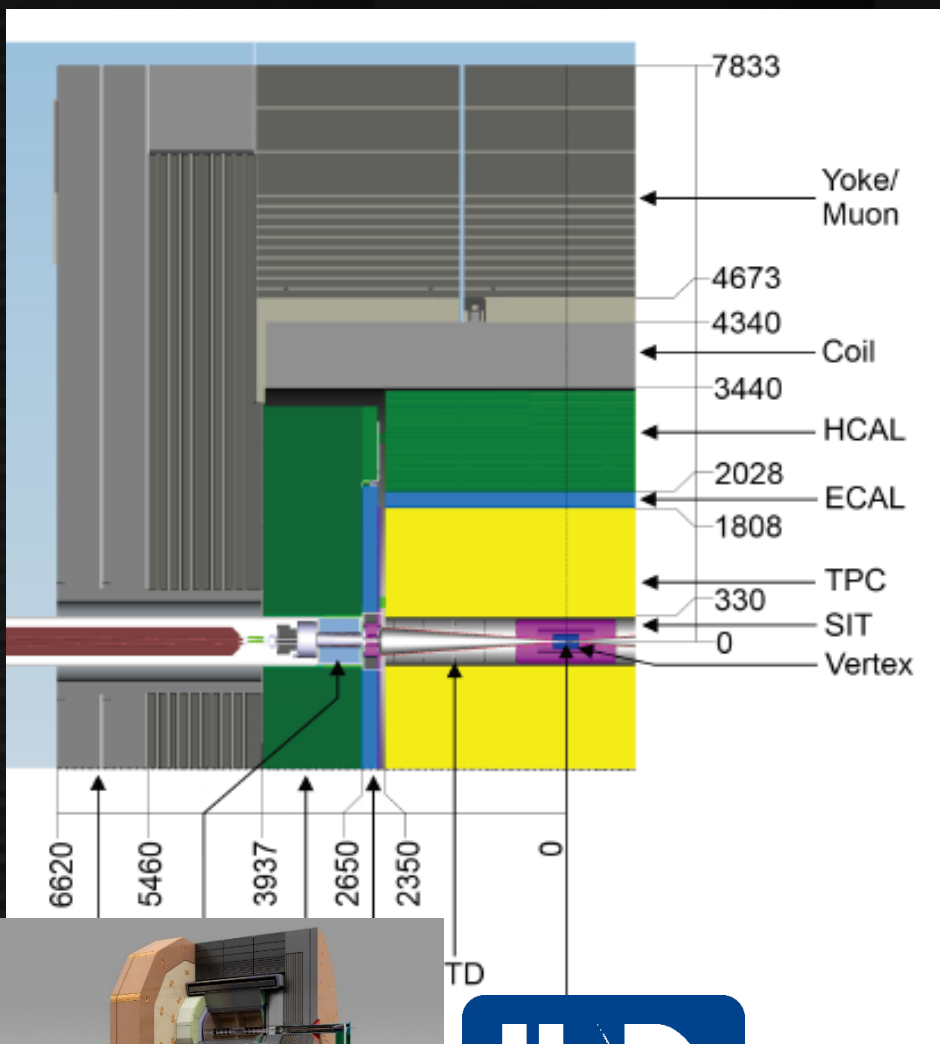


# シリコンカロリメータに関わる 開発課題

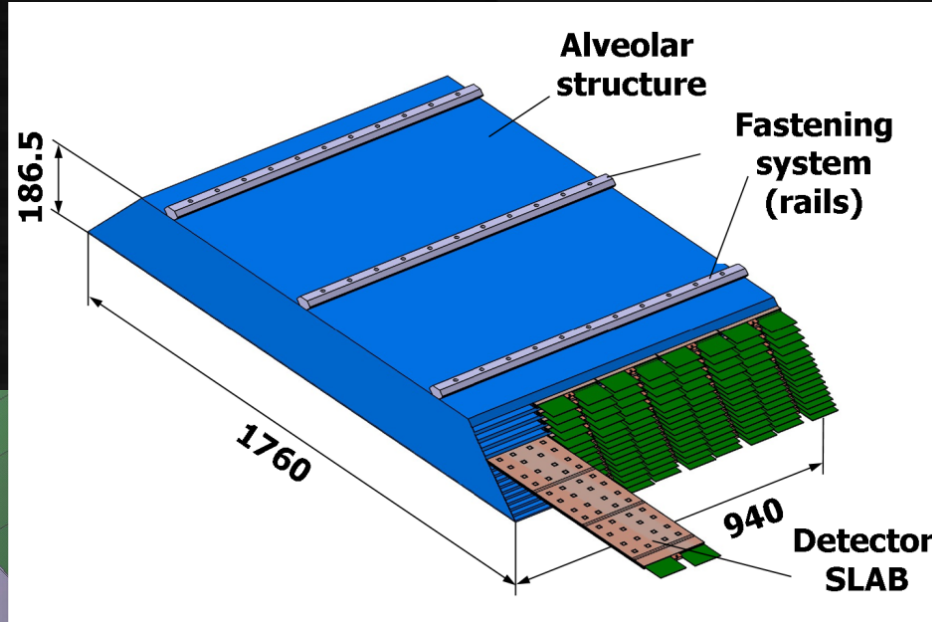
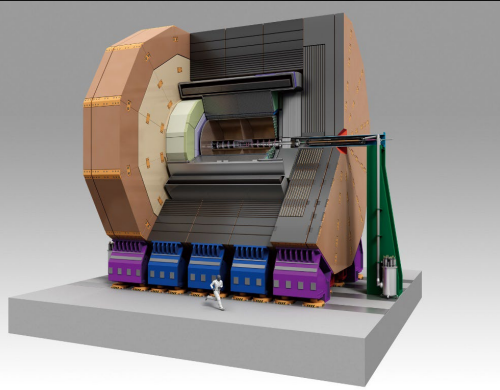
Taikan Suehara (Kyushu)

# ILD測定器

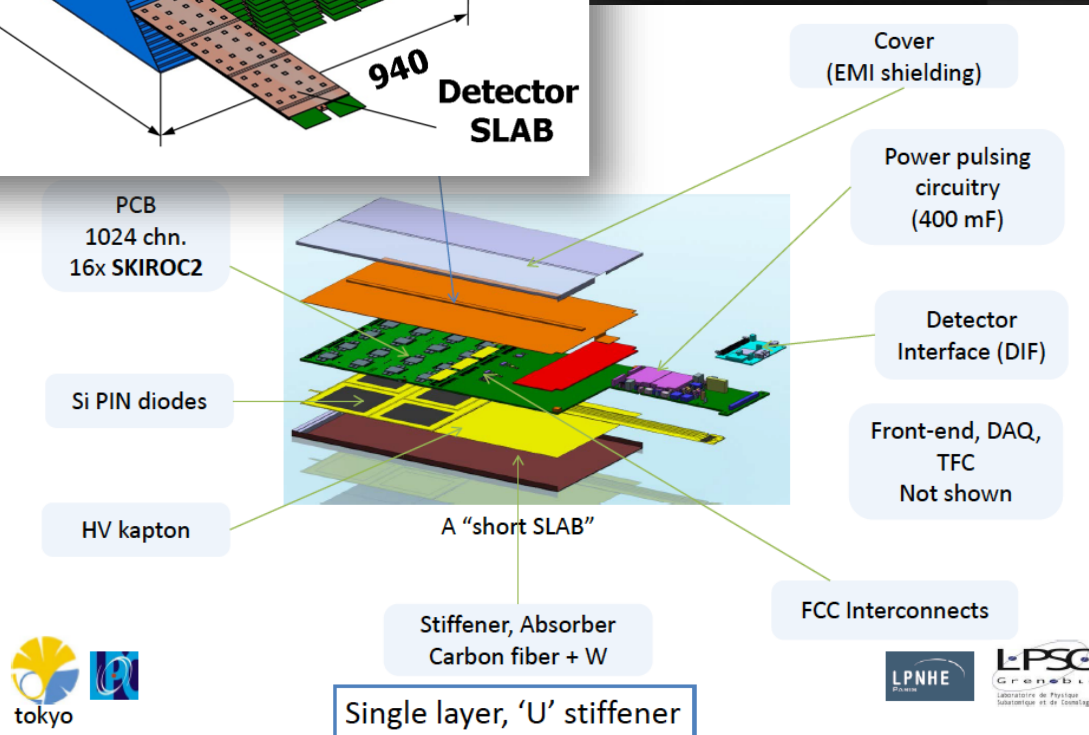
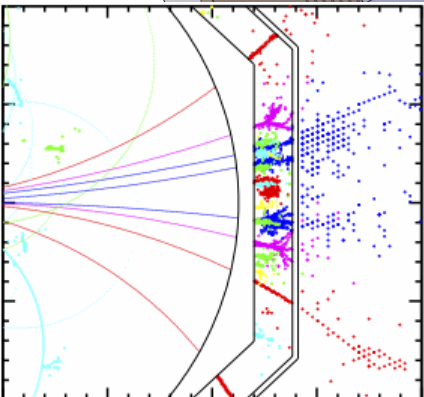
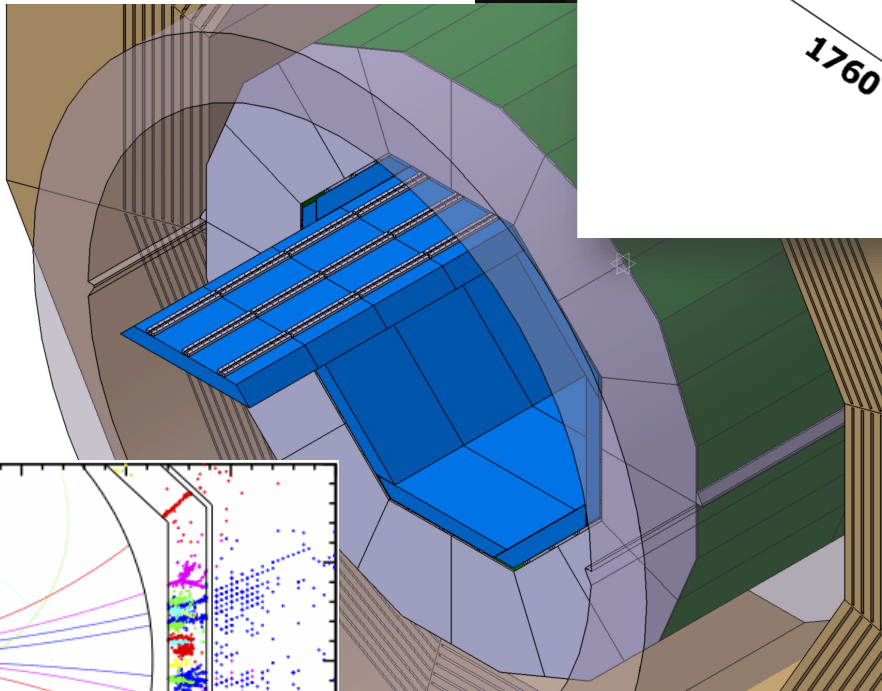


- Vertex (6層,  $r = 15-60$  mm)
  - モノリシックシリコン
  - Pixel size 5-25  $\mu\text{m}$
  - 0.1%  $X_0/\text{layer}$
- Silicon tracker (SIT/SET/ETD)
  - SIT(内層): Pixel?
  - SET(外層): strip (LGAD?)
  - ETD(endcap)
- 中央飛跡検出器 (TPC)
  - 端部読み出し: pad / Si pixel
- 電磁カロリメータ (ECAL)
  - W / sensor 20-30層
  - シリコンパッド/シンチレータ
- ハドロンカロリメータ (HCAL)
- Coil (3.5T) / Yoke / Muon

# シリコンタンゲステン電磁カロリメータ



層状構造(30層)  
シリコンセンサーと読み出し回路  
がタンゲステン吸収体に挿入  
される構造。



レイヤー構造  
(プロトタイプ)  
高電圧供給  
フレキ基板、  
センサー、  
読み出し回路  
(フロントエンド)  
冷却層、シールド  
等からなる。

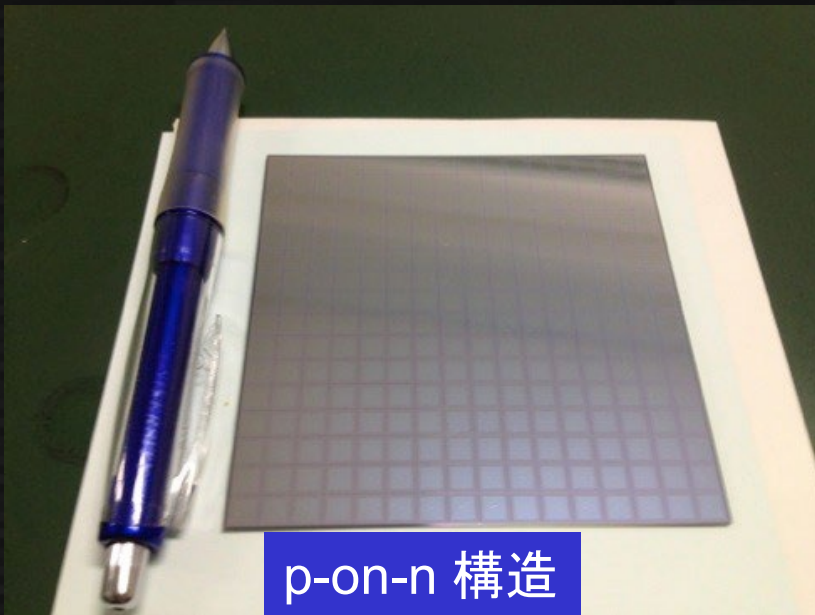


Single layer, 'U' stiffener

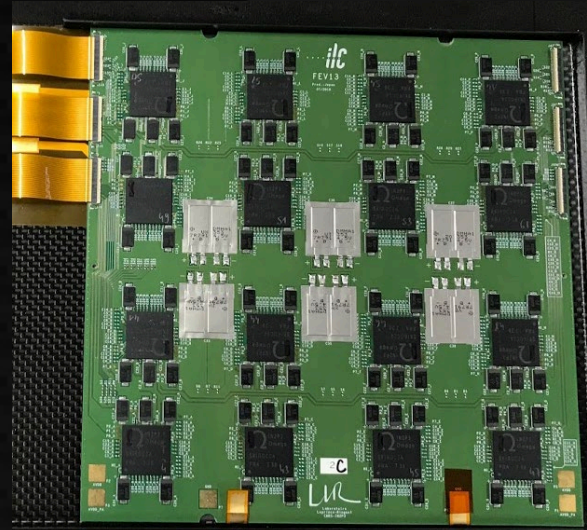


# センサーとPCBの接続

浜松ホトニクス製  
シリコンセンサー  
(9cm角、256セル)

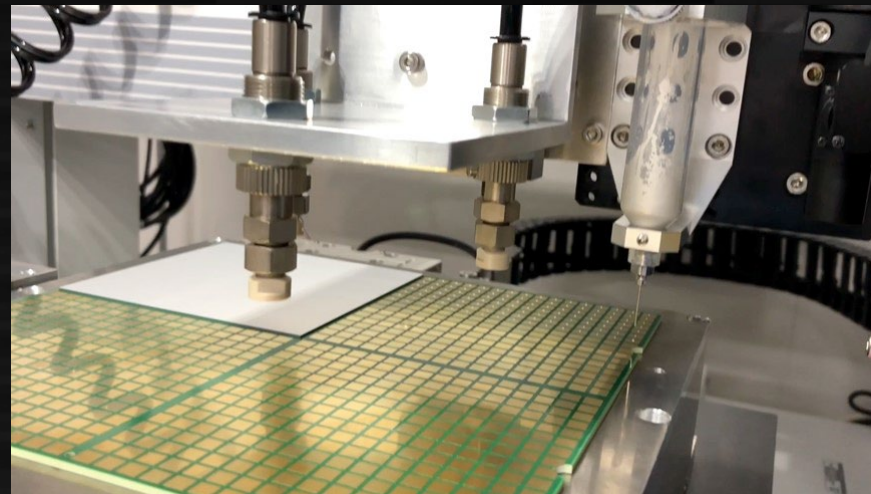


センサー40万枚を用いる  
大規模な測定器システム  
信頼性の高い接続方法が必須



フロントエンド基板 (180 mm角)  
64チャンネル読み出し可能なASIC  
(フランスで開発)を16個搭載  
裏面は電極になっており、  
センサーと導電性接着剤で接続

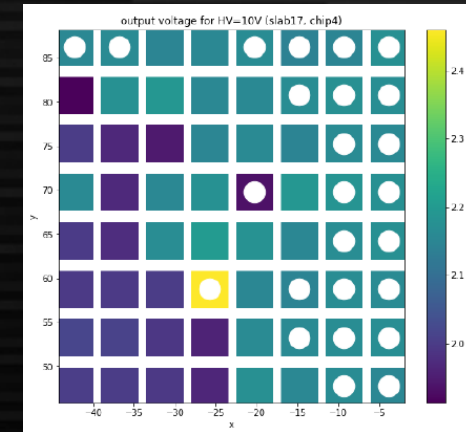
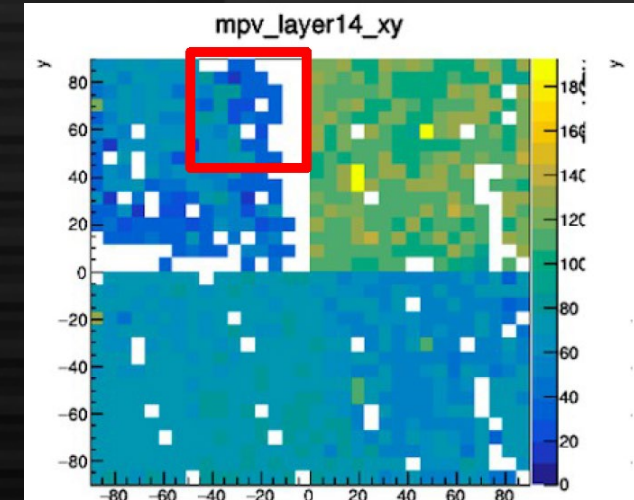
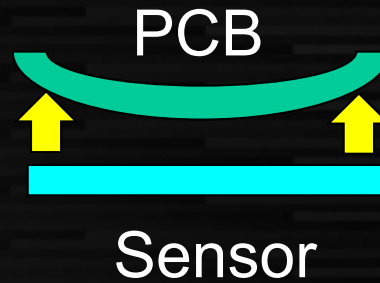
ディスペンサー、ロボットによる接着剤滴下



2液混合室温硬化  
導電性接着剤  
(EPO-TEK E4110-LV)

# 1. 接続に関する課題

- 接続が経年劣化?(数年)によりはがれてしまう問題が発生
  - センサーが物理的に剥がれてしまう場合と
  - 一部読めなくなる場合がある
- 考えられる原因
  - センサーとPCB間の応力
    - 温度、湿度による影響
    - 接着時の応力 (真空吸着、加圧)  
接着を確実にするために上から押さえている
  - 接着剤の劣化・滴下時の気泡など
    - 粘度が低いので気泡は入りそうもないが...



# 1. 接続に関する課題 (続き)

- 原因をどう究明するか?

- 応力を測定

- センサーとPCBの間にピエゾゲージを入れてみる (しかし接着剤にかかる力そのものではない)
    - その他の方法は?

- X線による内部観察 (glue dotの劣化)

- 接着力の測定 (再現性が取れるか?)

- 考えられる対応

- 応力をかけずに接着する (接着時の問題なら)

- PCB/シリコンの表面状態をコントロール(洗浄など)

- 接着剤の選択最適化

- 非導電接着剤で隙間を埋める

- 別の方法(右記) – ただし大きな設計変更になる

## 別の方法

- フレキ基板に接着 (ASIC接続の問題あり)
- 接続点を小面積に集約 (たわみの影響小)
  - 導電性接着剤 (現在と同様)
  - 異方性導電シート(ACF)
  - Bump-bonding
  - 他

フランスでやっている

フランスでやろうとしている

### Metrology and PCB Deformation

- Setup of a device to measure the flatness of the PCB at different stages
- PCBs will be out into cabling machine and dimensions will be monitored before and afterwards

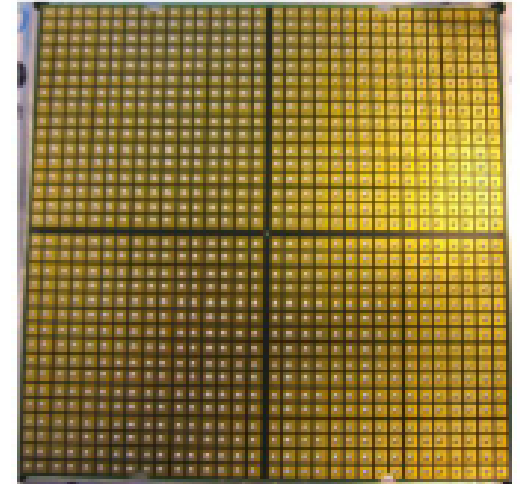
### Glue – Alternative agents and procedures

- After discussion with Astronomy Institute of Paris and Epotek
- Test glue of type H20E as alternative to Epotek J2189
  - Should have higher mechanical stability
- Use EPOTEK 301-2 as underfill for mechanical stabilisation (proposal of Epotek)
  - This underfill has low viscosity that ensures mechanical stability by capillary effect
  - First tests promising – underfill flows across the PCB, need to control polymerisation
- Alternative proposal EPOTEK 353ND-T
  - Epoxy for gluing electrical component, could be used to stabilise glued sensor at sensor boundaries
- Alternative with double sided scotch about to be studied
- 25 sheets arrived last week, 10 on their way to IFIC
- Further contact with Technacol, a lab specialised on polymers for technology transfer to industry

### Pull tests

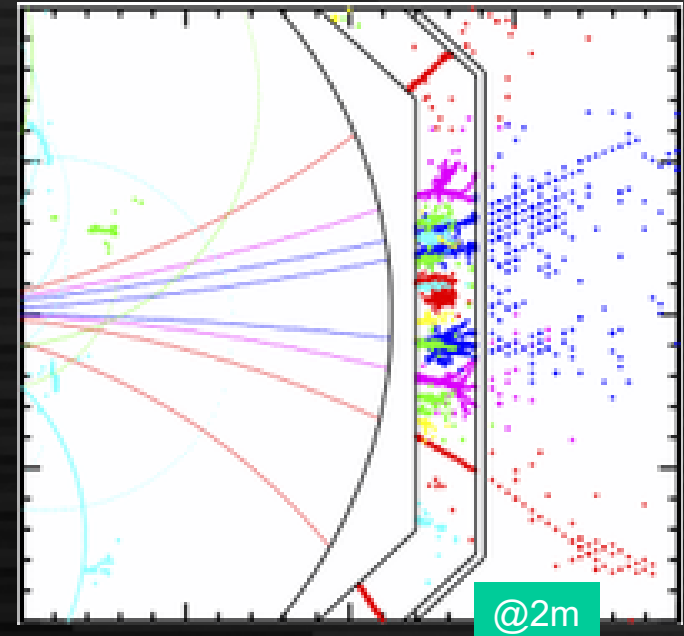
- IJCLab prepares pull tests in order to get a quantitative picture of the mechanical stability of the glue

DESY, CNRS-IJCLab, CNRS-LLR, FZU, JGU



## 2. <10ピコ秒タイミング測定

- 粒子の飛来時間を10ピコ秒で捉える
  - 粒子の速度と運動量から質量を決定
    - 光速に極めて近い( $\beta > 0.99$ )ため高精度測定が必要
  - 粒子のクラスタ分離に活用
- 実現には様々な要素技術が必要
  - 10~30ピコ秒の分解能を持つ高速センサー
    - アバランシェ増幅機構つきシリコンセンサーなど
  - 高密度、高分解能、低消費電力の読み出しASIC
    - 高密度実装(例: 10cm角, 0.6 cm厚で1024セル)のため発熱低減・放熱が課題
  - 高精度クロック同期
  - 多数の測定点を平均して精度向上を図る
    - シャワー発展の時間構造を再現する深層学習等のintelligentなソフトウェア



Energy	$\beta$ ( $\pi$ )	$\beta$ (K)	$\beta$ (p)	$\Delta t$ ( $\pi/K$ )	$\Delta t$ (K/p)
5 GeV	0.9996	0.9951	0.9822	30 ps	88 ps
10 GeV	0.9999	0.9988	0.9956	7 ps	21 ps

粒子のエネルギーと  
同定に必要な時間  
分解能



## 2. <10ピコ秒タイミング測定 (続き)

主な時間分解能決定要因:  $\sigma_t^2 = \sigma_s^2 + \sigma_n^2$

- $\sigma_s^2$ : センサーの時間分解能

- 電荷収集時間のばらつき: シリコンの場合はセンサー内での電荷のドリフト時間に起因し、電荷発生領域を薄くする(ただし信号強度は下がる)ことで低減できる。この場合アバランシェ増幅機構が必要。光検出の場合、発光時間や発光体の形状によるセンサーへの光の到達時間のばらつきが問題となる。

- $\sigma_n^2$ : 電気回路に起因する時間分解能

- ランダムノイズ: 立ち上がり時間とS/N比による。立ち上がり時間はセンサーの容量と電子回路で決まる。シリコンでは典型的な元電荷は800 e-/μm程度で $\sigma_s$ を抑えるため厚みは数十μm以下、ゲインは通常100~1000程度。容量は例えば数10pF/cm<sup>2</sup>程度で容量を抑えるにはセンサーを細かく分割する必要がある。

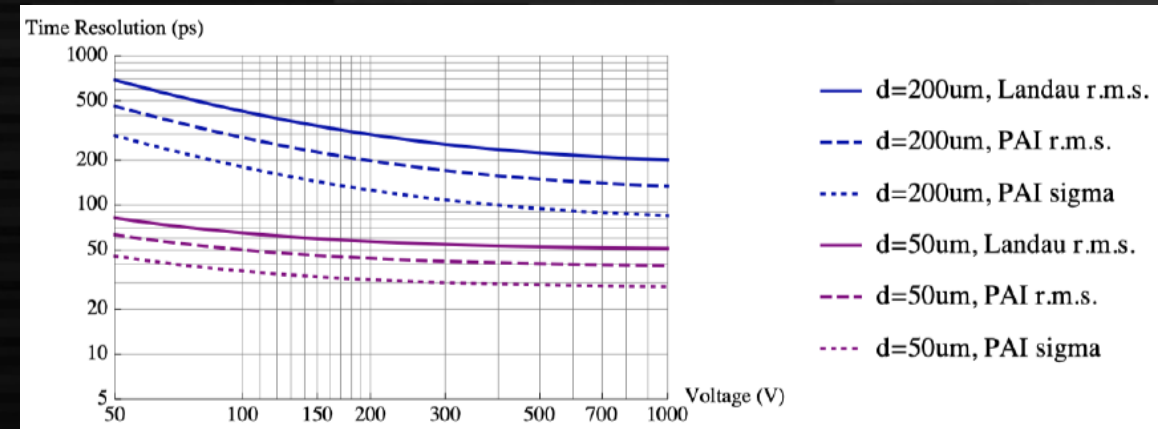
- 立ち上がり時間が早く(例えば100-200ps)、高集積、低消費電力の回路は実現可能か? (時間分解能は電力の2乗に比例?)

# センサー技術、エレクトロニクス技術

- ゲインが高く、感度層が薄いセンサー

- 信号量として $10fC$ くらいはほしい。

- 感度厚 $10\ \mu m$ で達成するには  
Gain  $\sim 100$ が必要
- 薄いとhigh gainが困難?



- もしくはガイガーモードのセンサー

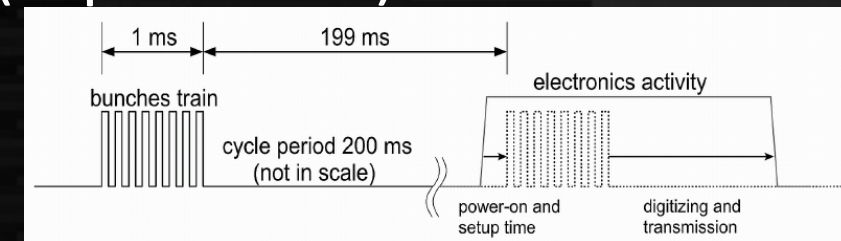
- SPAD-like, でもpixel sizeが細かい必要がある。(capacitance)

- 読み出し、monolithic or hybrid

- 高速応答、低消費電力は可能か

- Pulsed power? 時間分解能が必要な時間レンジは短い

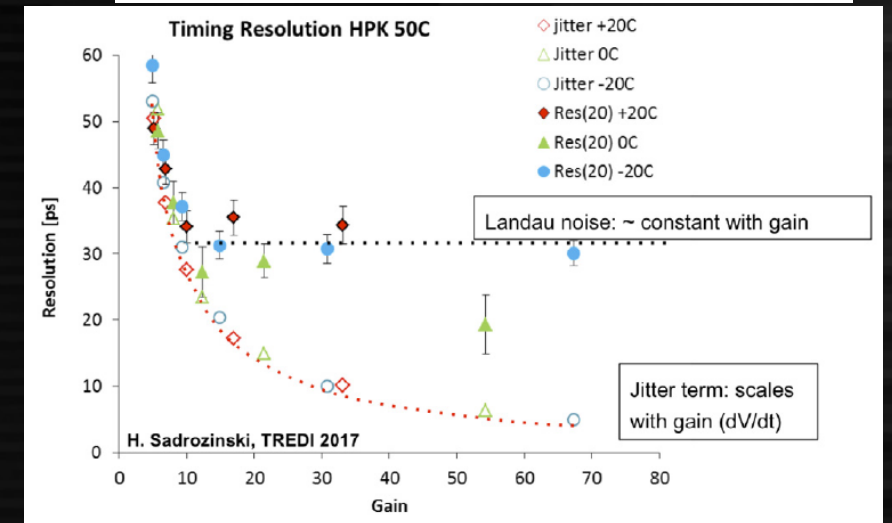
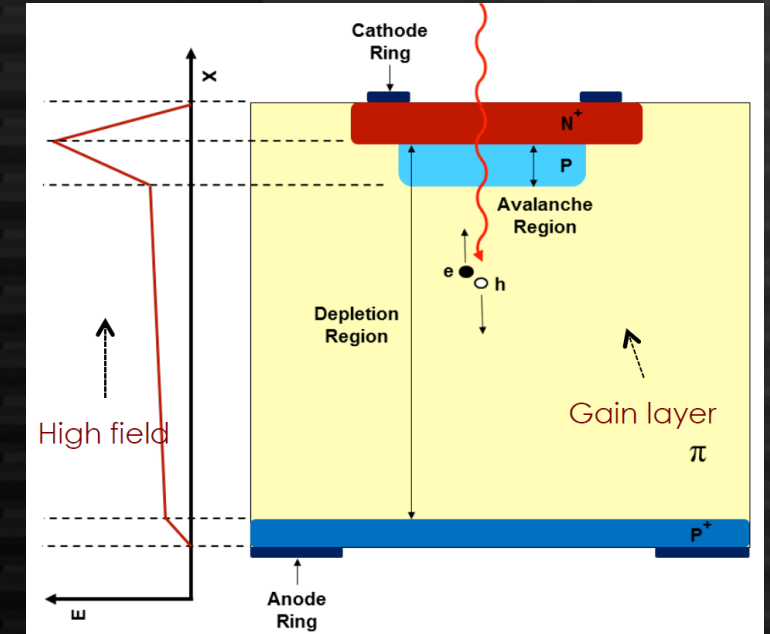
- 加速器のパルスに同期、 $300\ nsec$ ごとにa few ns程度のレンジ



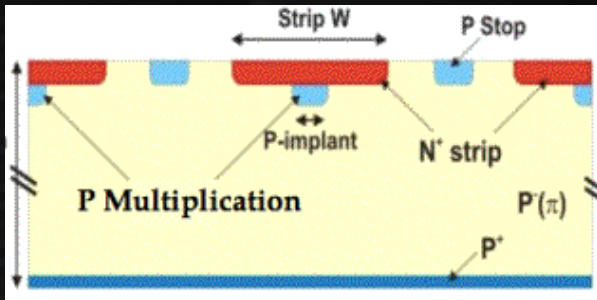
# Backup

# Avalanche Detectors (LGAD / SPAD)

- Difficult to get high S/N with thin sensors  
→ Avalanche gain
  - Already widely used in optical detectors (APD/SiPM)
  - Linear region: Low Gain Avalanche Detector (LGAD)
    - Developed for HL-LHC pileup separation (ATLAS HGTD / CMS MTD)
    - $G = 10-100$ , radiation tolerance OK (with increasing HV)
    - Finally dominated by Landau fluctuation (~30 psec with current structure)
  - Geiger region: SPAD-like structure
    - Thinner active layer: lower Landau fluctuation
    - Higher gain: easier electronics for high S/N
    - Dark count: not suitable for calorimetry?

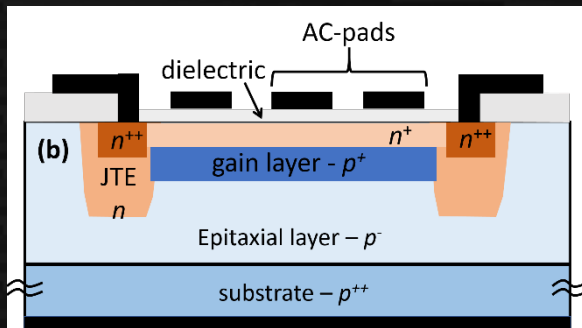


# Various structures of LGADs

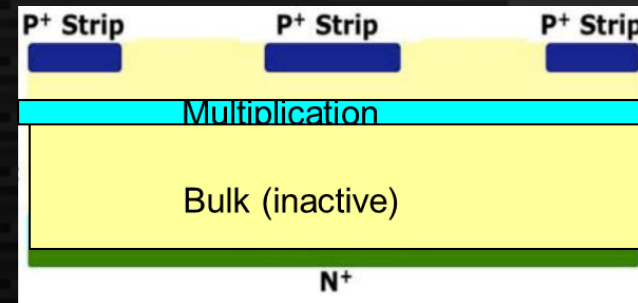


## Reach-through LGAD

- Standard structure well investigated
- Resolution limited to 30 psec
- Issue: inactive region between channels → AC-LGAD / inverse

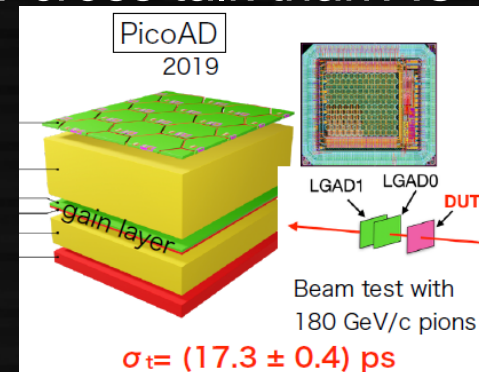


AC LGAD: AC-coupled electrodes with planar gain layer: good for strips  
Rather big crosstalk to neighbor channels



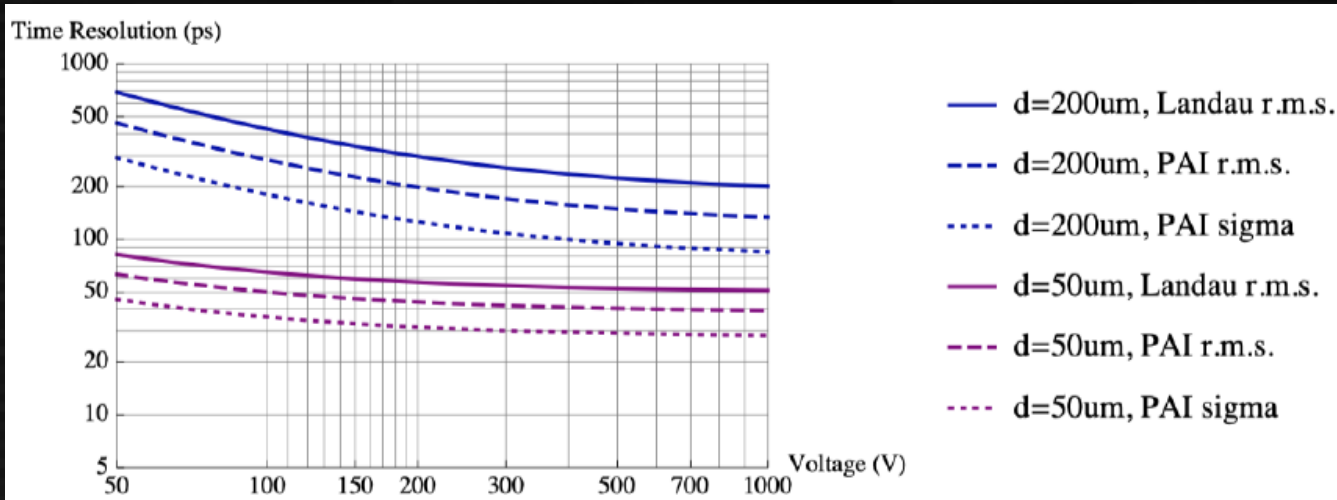
## Inverse LGAD (single sided)

- The same structure as reverse APD
- Current structure has 5-10  $\mu\text{m}$  active thickness (confirmed with ion injection) → too thin (limited by the production process)
- Intrinsically low Landau Fluctuation
- Relatively flat multiplication expected (tbc)
- Lower cross talk than AC-LGAD expected (tbc)



Monolithic LGAD with SiGe process

# Timing resolution with LGAD



- MIP timing resolution of 10 psec  
→ ~10  $\mu\text{m}$  thickness needed  
→ higher gain (>100) necessary

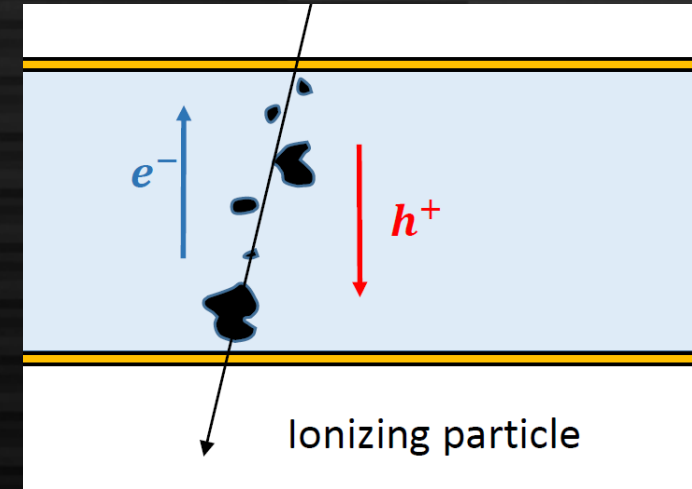
LGAD Landau fluctuation: worse than standard Si  
(because only electrons contribute the timing resolution)

Issues in the readout:

- Capacitance needs to be small → smaller pixels, more channels  
→ many technological issues (connection, amplifier, readout, software...)
- High density readout (with ASICs) → power consumption ( $P \sim 1/\sqrt{\sigma_t}$  ?)
- Monolithic LGAD?

# Waveform analysis

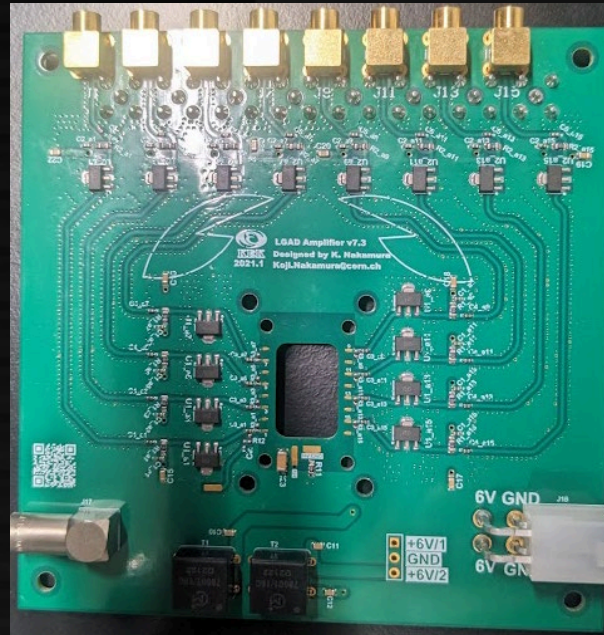
- Separate Landau fluctuation from noise contribution
- Compare reach-through and inverse types
  - RS: S3884 (1.5 mm  $\phi$ , 10 pF) @ 183V
  - Inverse: S8664-20K (2 mm  $\phi$ , 11 pF) @ 420V
- Readout
  - 3 GHz discrete amp (mini-circuit GALI-S66+)
  - R&S RTO64 Oscilloscope
    - 2GHz analog bandwidth, 10 GSPS
- Source
  - $^{90}\text{Sr}$   $\beta$  source, self triggering



2 GHz oscilloscope

# Electronics & sensors

3 GHz amplifier board  
(designed by K. Nakamura (KEK))



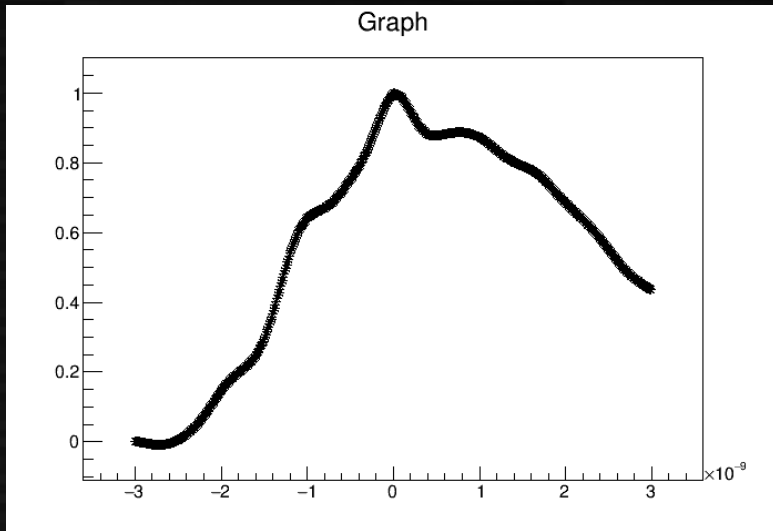
Mini-Circuits GALI-S66+  
<https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=GALI-S66%2B>

APDs	Type	Size [mm]	Capacitance [pF]
S8664-20K	Inverse	2φ	11
S3884	Reach-through	1.5φ	10
S8664-30K	Inverse	3φ	22
S2385	Reach-through	3φ	95
S8664-55	Inverse	5 x 5	80

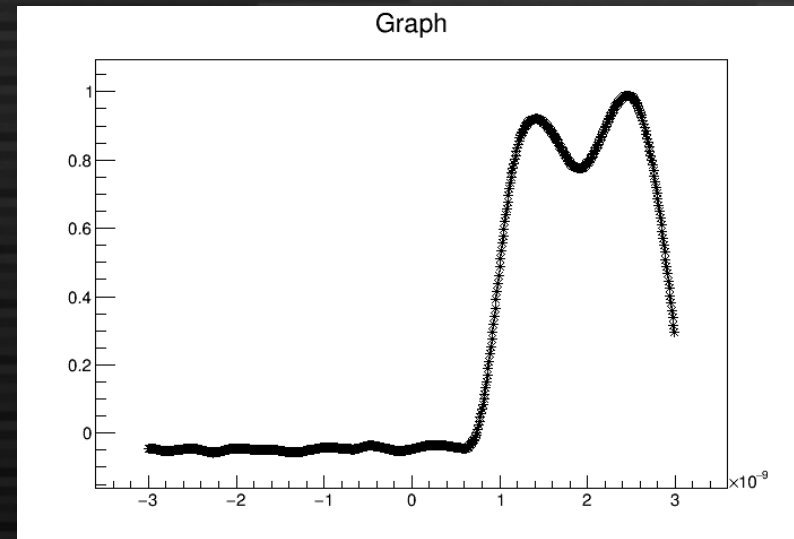


# Waveforms

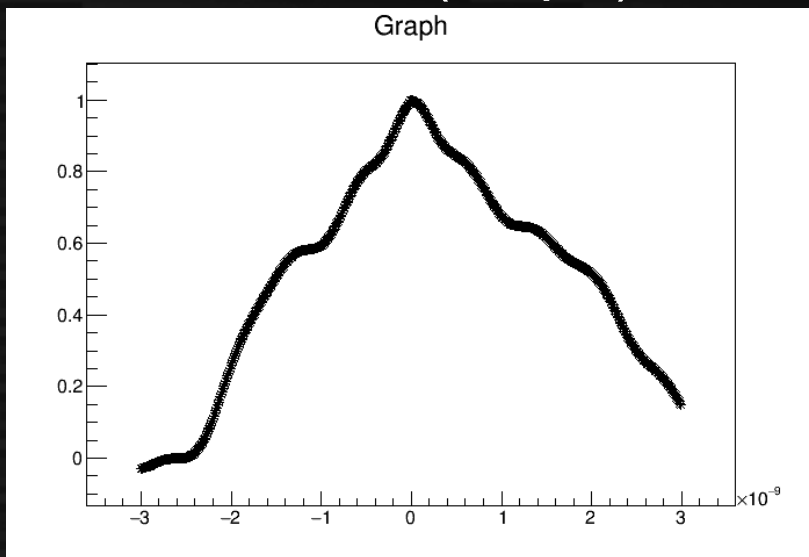
Average of ~30 waveforms  
Smaller capacitance  
→ faster rise time  
Subtle differences by  
RS and inverse APDs



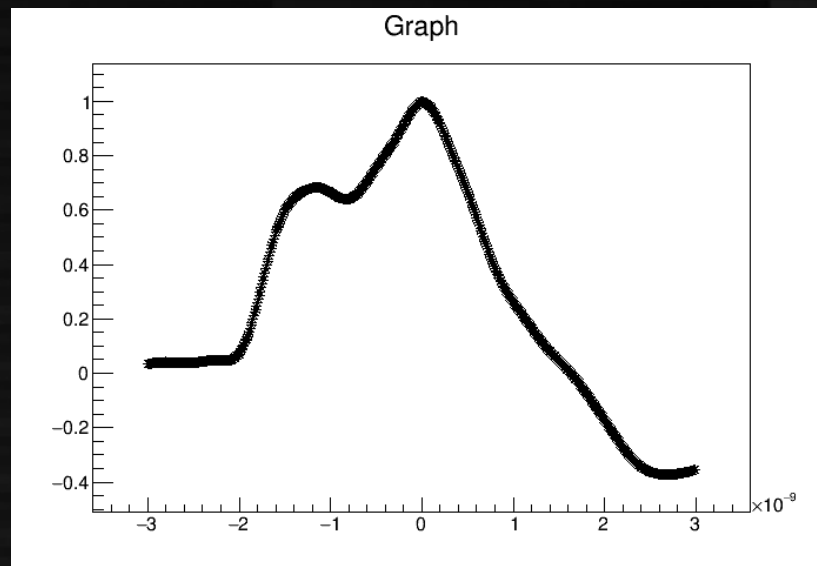
S2385 (95 pF)



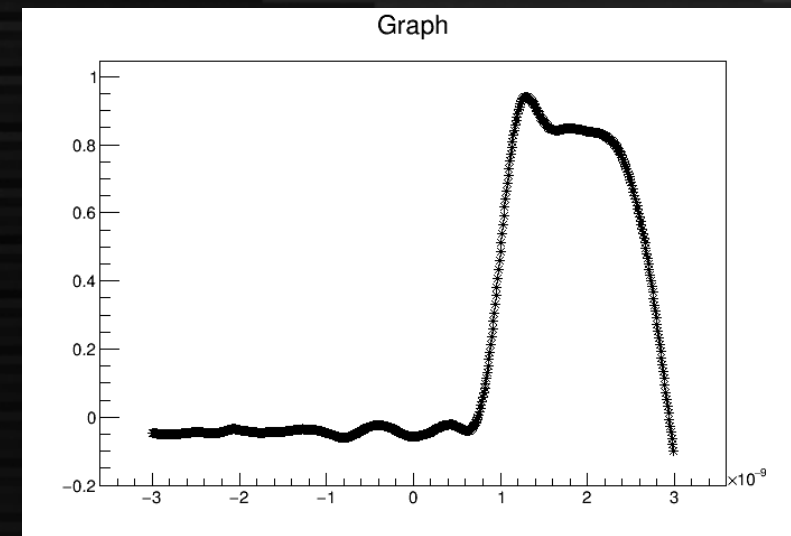
S3884 (10 pF)



S8664-55 (80 pF)



S8664-30K (22 pF)



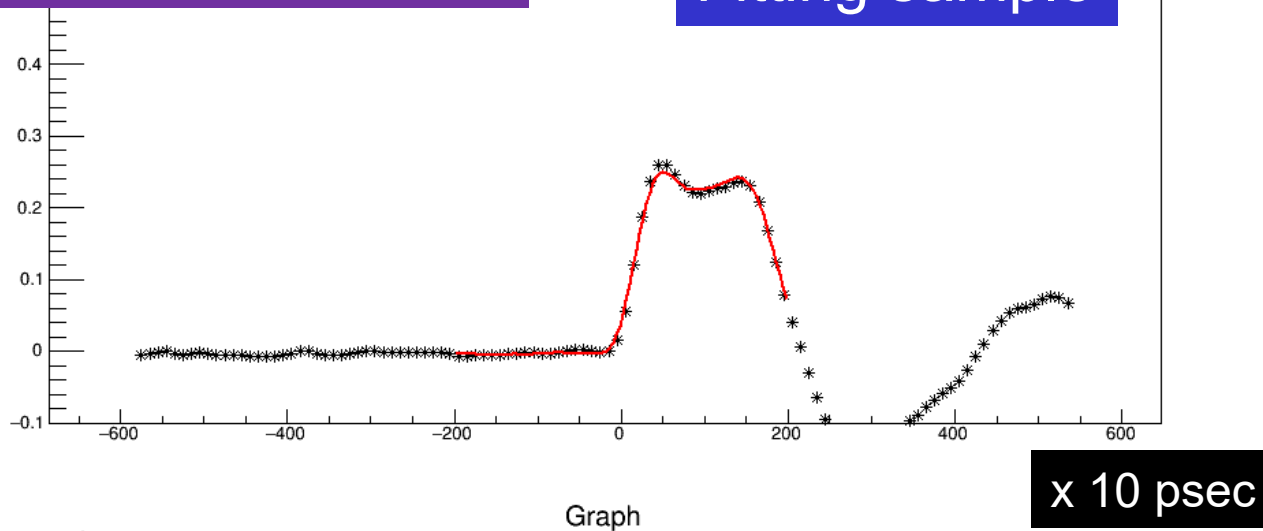
S8664-20K (11 pF)

# Fitting of waveforms

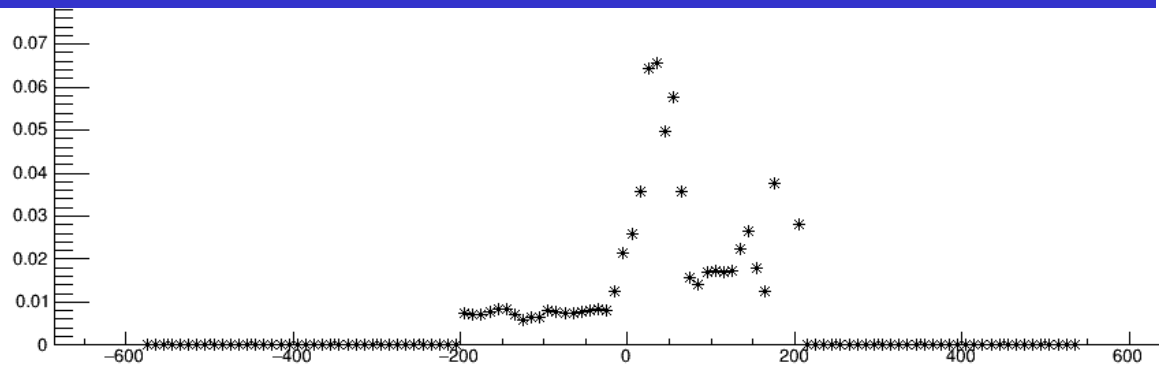
S8664-20K (inverse)

Graph

Fitting sample



Deviation from fitted waveforms (average)

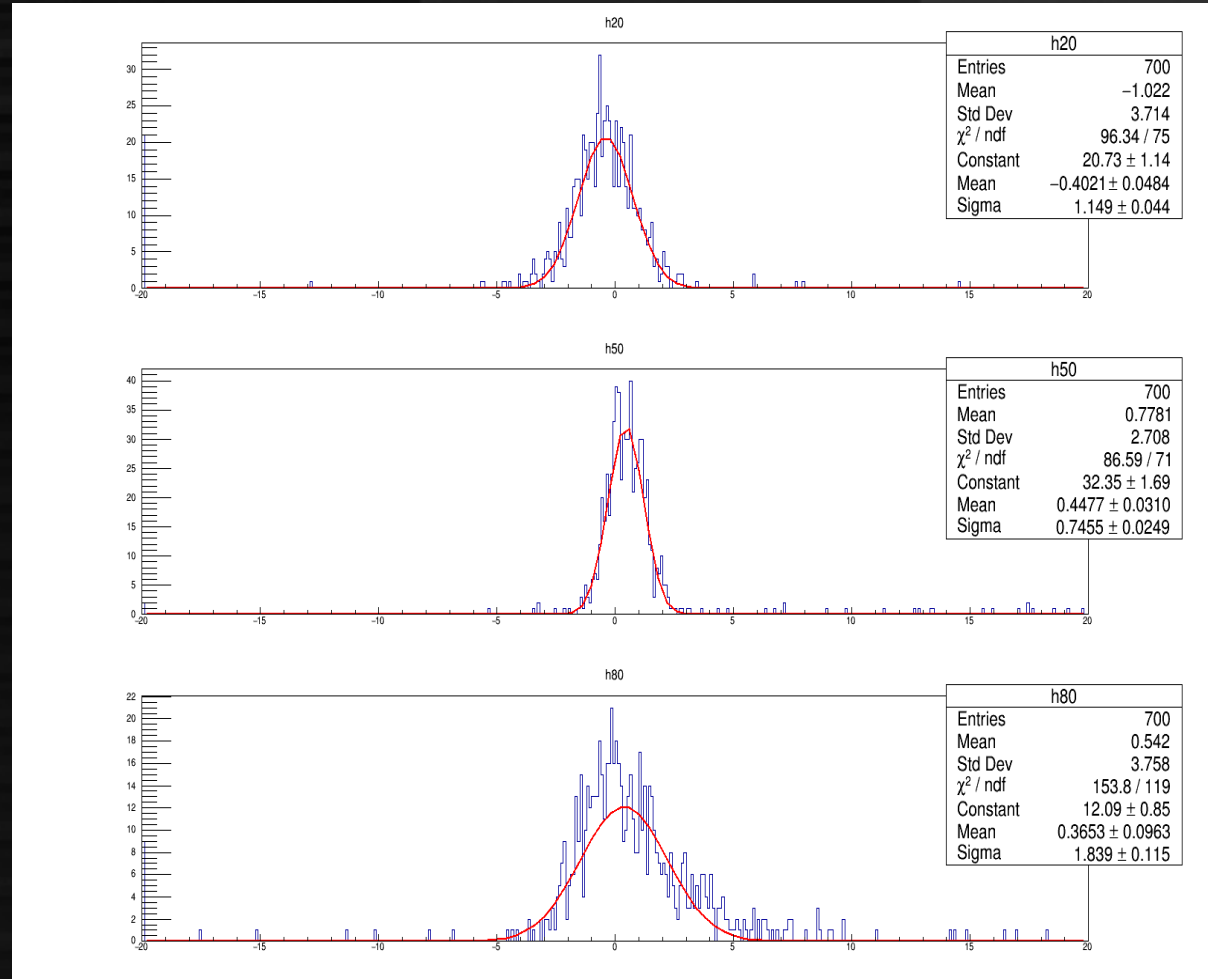
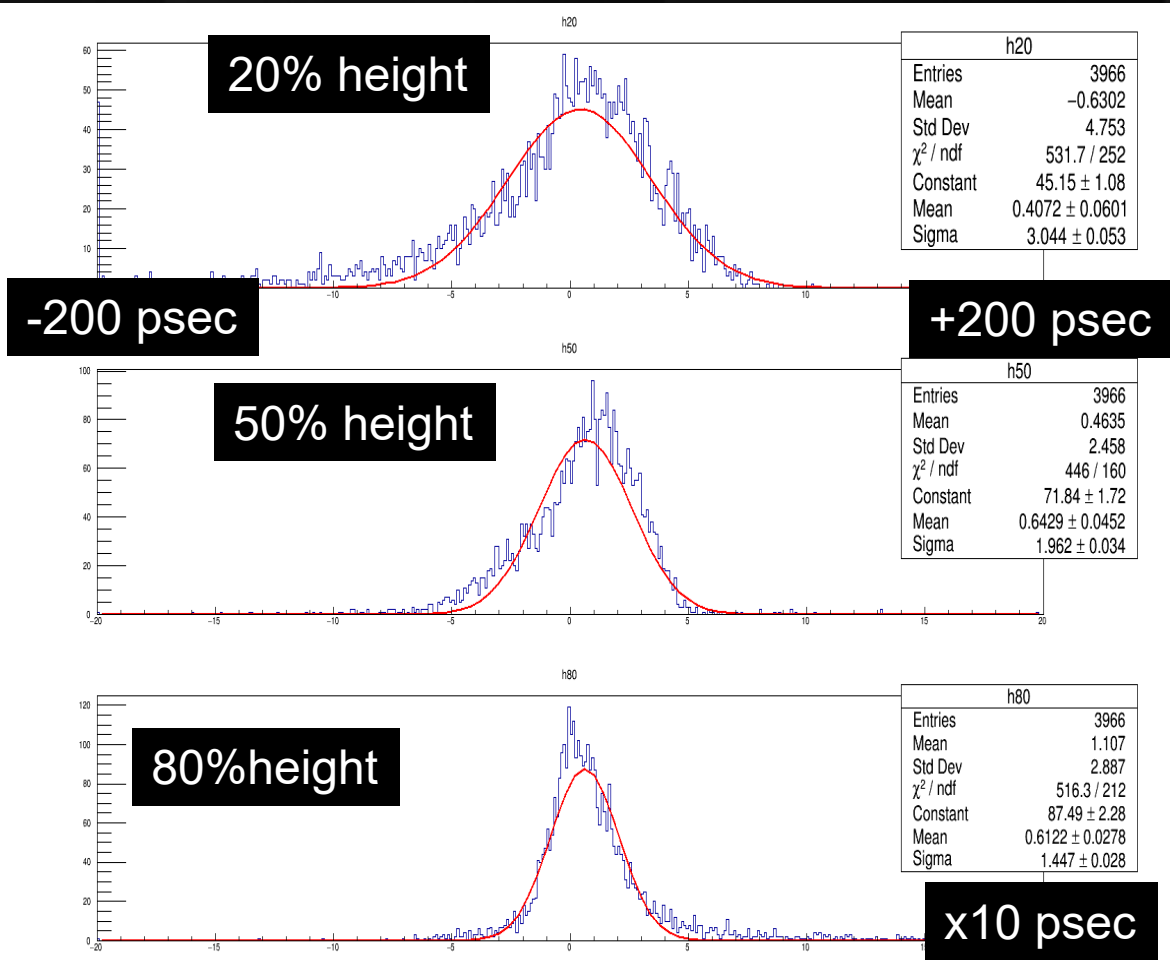


1. Average waveform obtained with a few 100 waveforms (Synchronizing timing of 50% height of signal)
2. Fitting individual waveforms for amplitudes and timing by the average waveform
3. Evaluating deviation of timing between fitted spectra and waveforms
  - 20% height
  - 50% height
  - 80% height

# Fitted waveforms

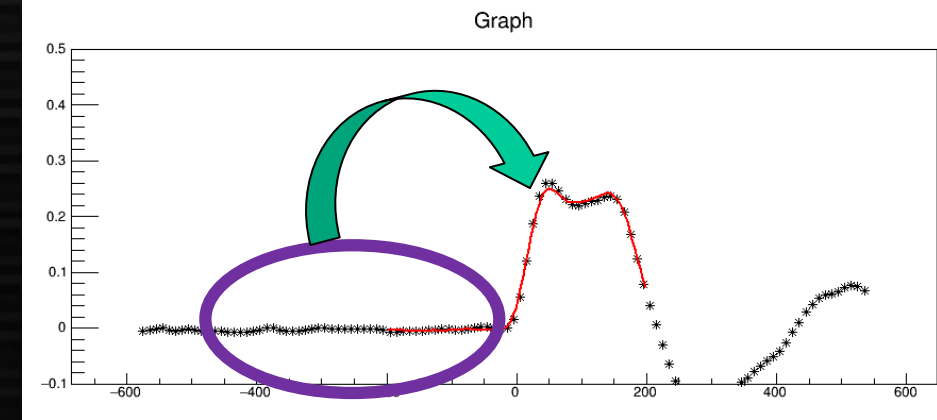
S3884 (RS)

S8664-20K (inverse)



# Pedestal contribution

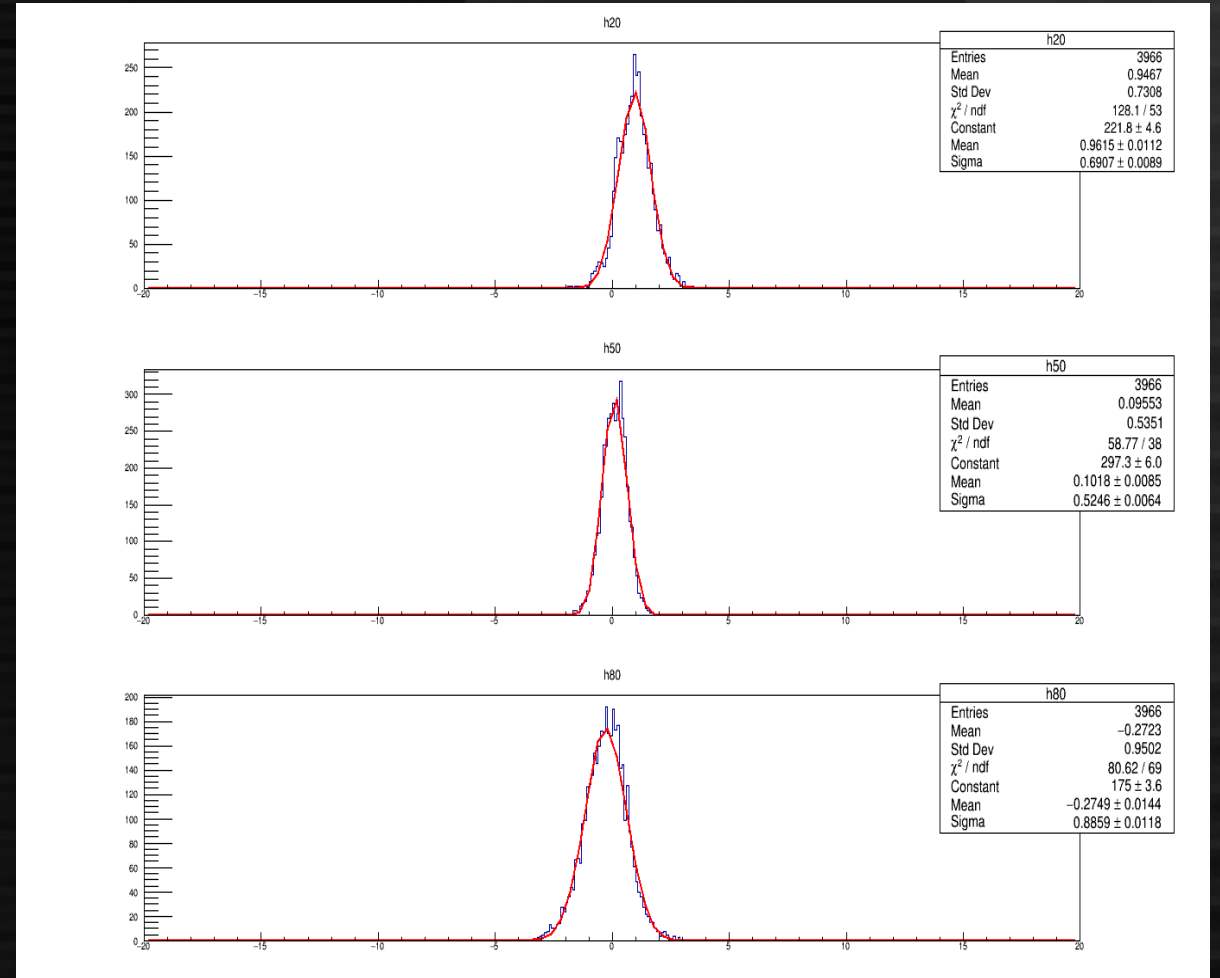
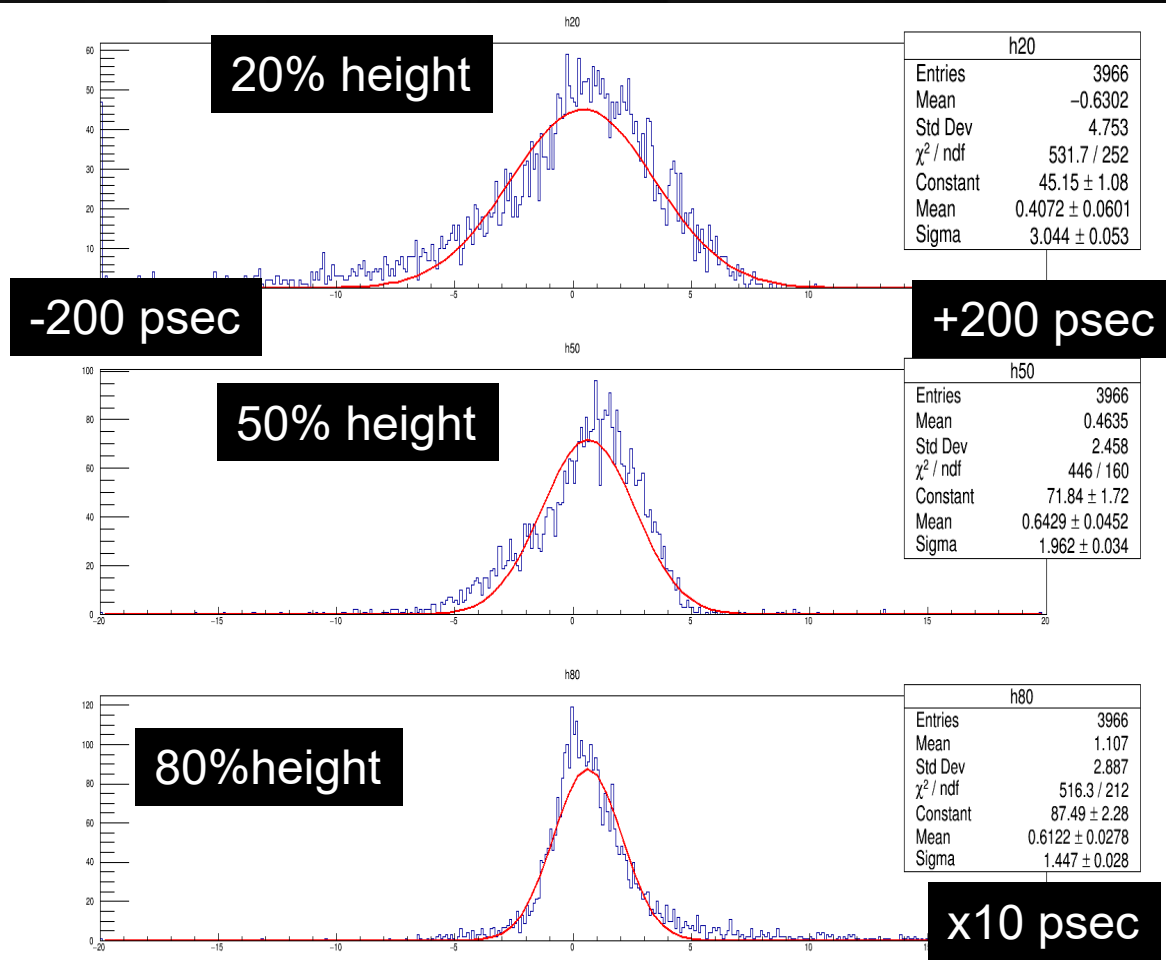
- Difficulties
  - Limited bandwidth (2 GHz, 10 GSPS & 3GHz amplifier)
    - Individual points (10 GHz) have correlation to neighbor points
- Pedestal contribution
  - Using “pre-time” waveforms
    - Adding to “average” spectrum at rising edge
  - Do the same analysis



# Comparison: signal vs pedestal

S3884 (RS)

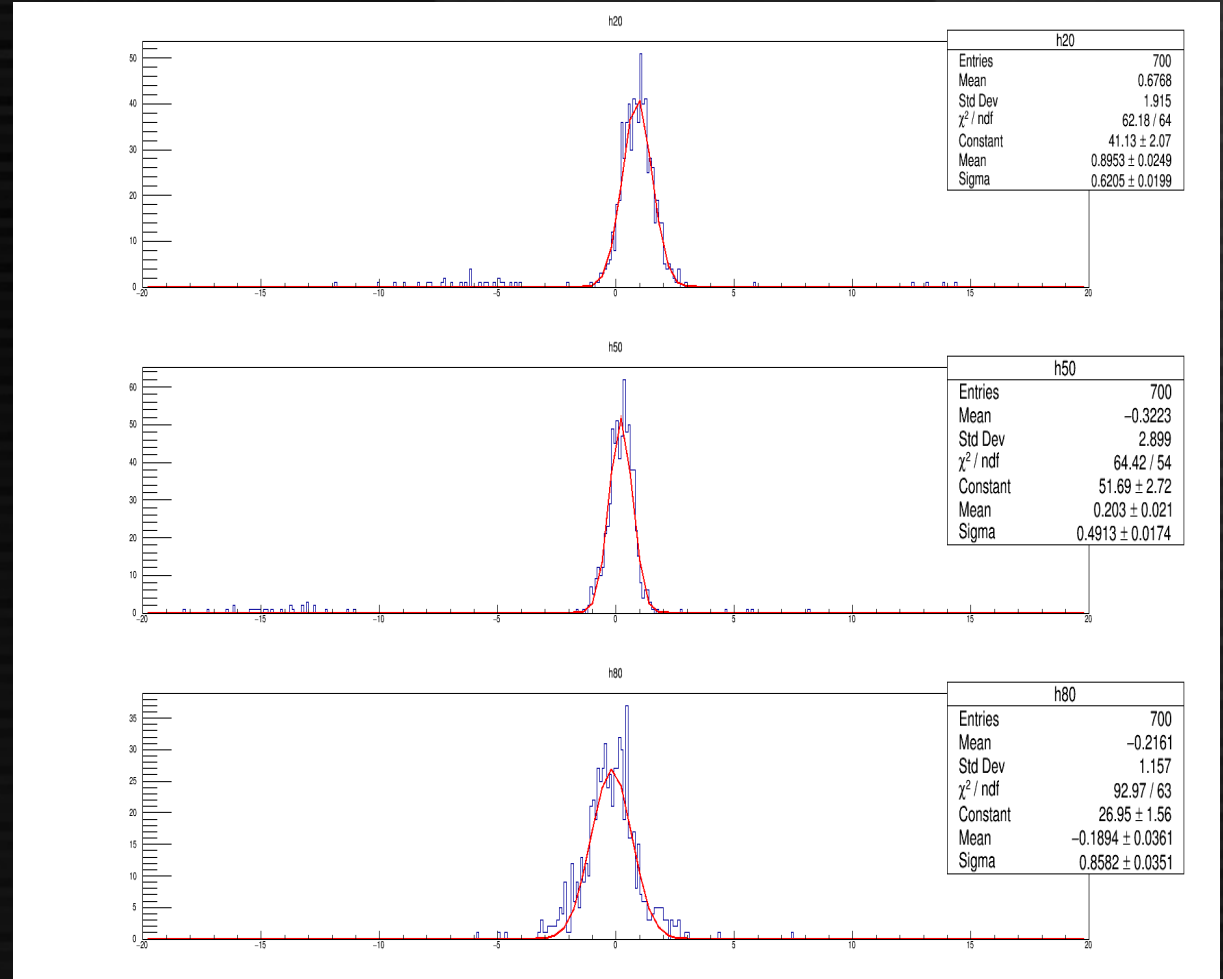
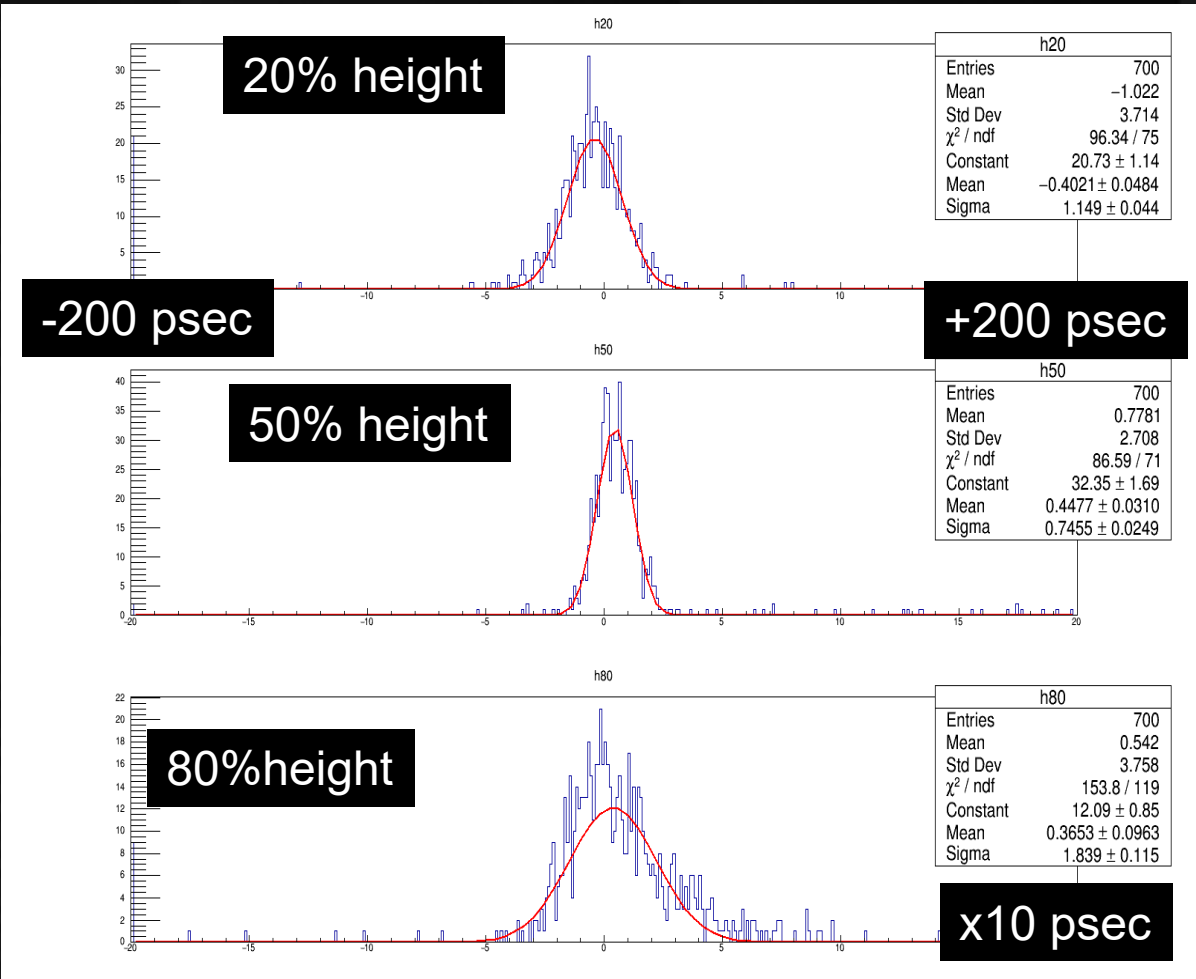
pedestal



# Comparison: signal vs pedestal

S8664-20K (inverse)

pedestal



# Results

	Signal reso [psec]	Pedestal reso [psec]	Quad difference [psec]
S3884 (RS)			
20% height	30.4	6.9	29.6
50% height	19.6	5.2	18.9
80% height	14.5	8.9	11.4
S8664-20K (inverse)			
20% height	11.5	6.2	9.7
50% height	7.5	4.9	5.7
80% height	18.4	8.6	16.3

Inverse type indicates smaller Landau fluctuation

Note: this does not directly reflect the timing resolution (due to correlation of points)

Test beam needed to identify “overall” timing resolution

- Too much material on APD packaging for RI test with “double-tag” ...