



九州大学  
KYUSHU UNIVERSITY

# 国際リニアコライダーにおける 粒子識別精度向上のための 高時間分解能シリコンセンサー開発に向けた研究

粒子物理分野 素粒子実験研究室

出口 遊斗

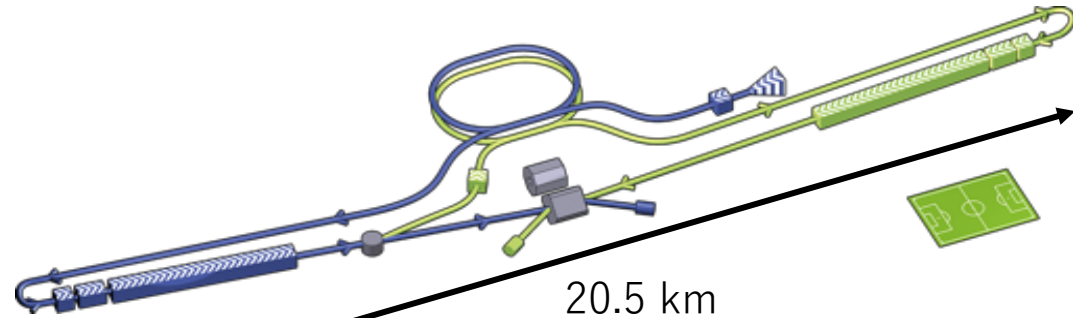
指導教員: 川越 清以, 末原 大幹



# 国際リニアコライダー計画 (ILC)

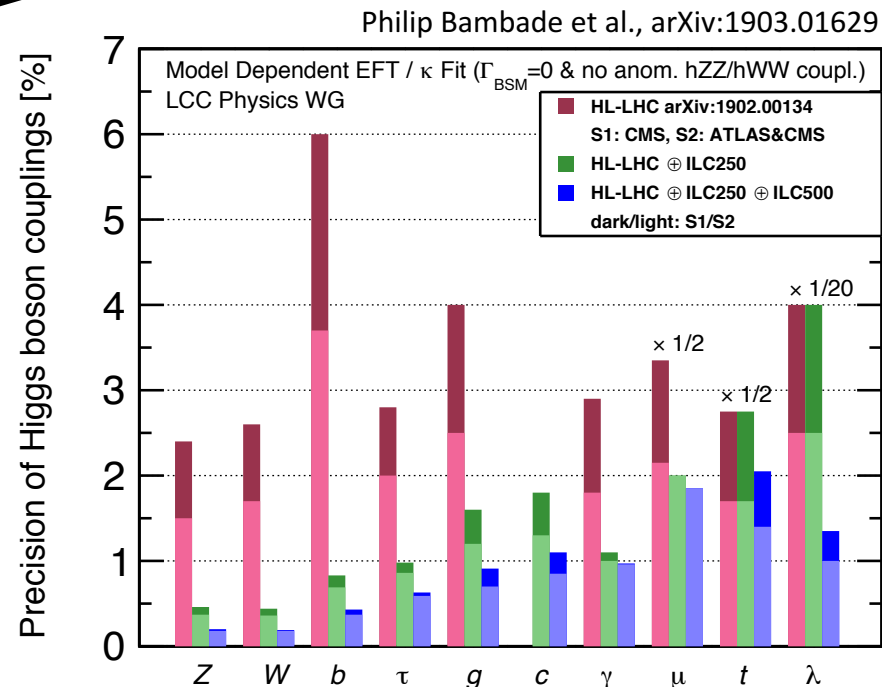
## ➤ ILCとは？

- 電子陽電子衝突型加速器
- 重心エネルギー：250 GeV  
→ 将来的には1 TeVまで予定
- 全長：約20 km  
→ 将来的には50 kmまで延伸可能
- ヒッグス粒子やその他粒子の精密測定から新物理の発見を目指す



## 今後期待される動き (2020年以降)

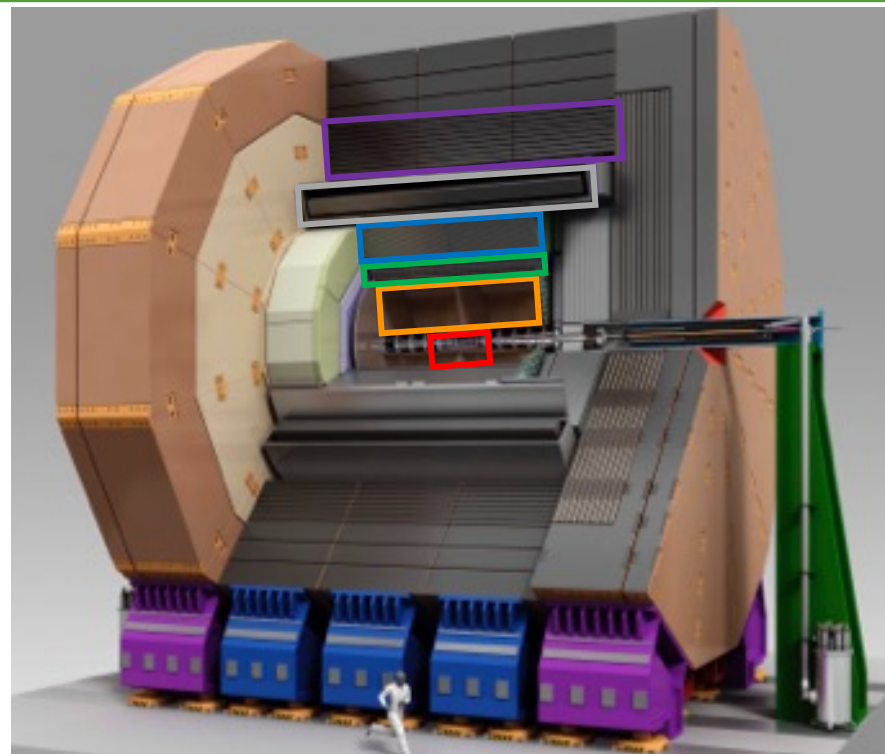
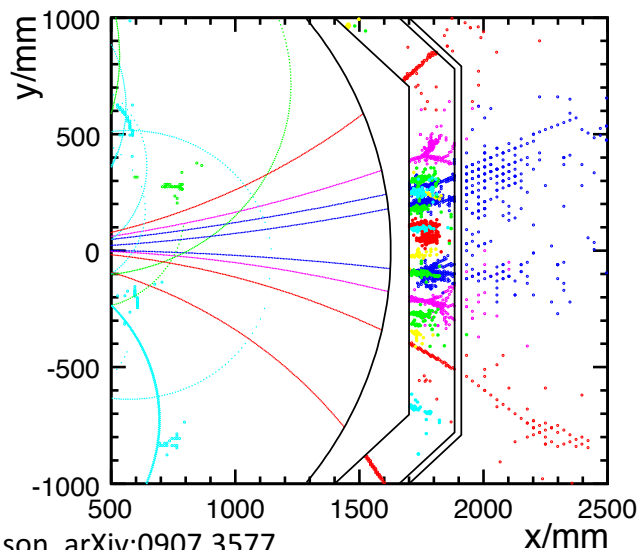
- ✓ 各国との国際交渉を開始
- ✓ 国際的なILC準備研究所の設立



# International Large Detector (ILD)

## ➤ ILDの構成

- **崩壊点検出器**
- **飛跡検出器(TPC / シリコン)**
- **電磁カロリメータ(ECAL)**
- **ハドロンカロリメータ(HCAL)**
- **超電導ソレノイド**
- **ミューオン検出器**



International Large Detector (ILD)

飛跡検出器 → 荷電粒子の検出  
カロリメータ → 中性粒子の検出

粒子の性質に最適な検出器で重複なく測定を行う

# ILCの物理

## ➤ ヒッグス粒子の精密測定

重心エネルギー：250 GeV

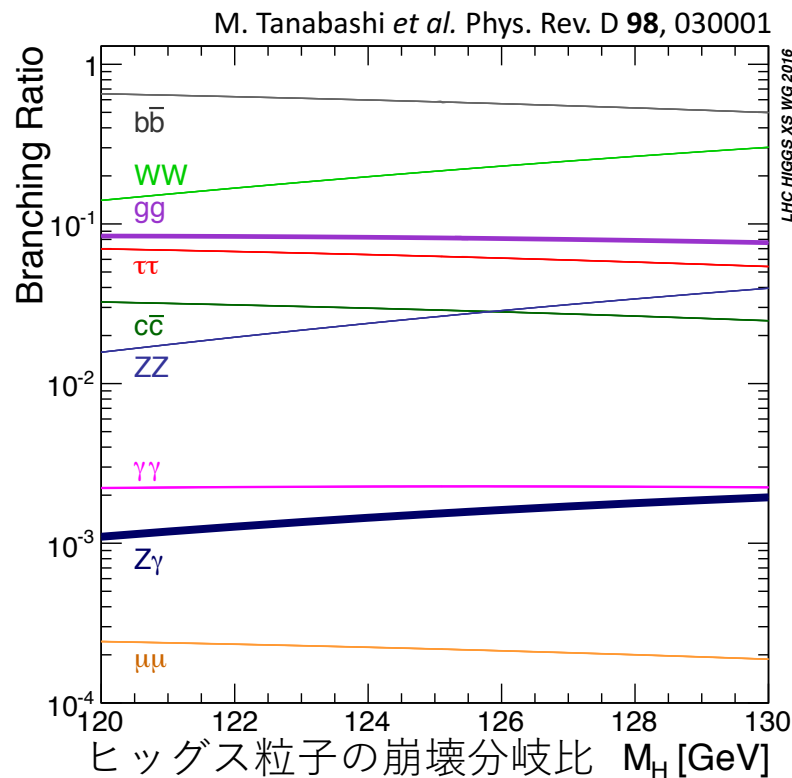
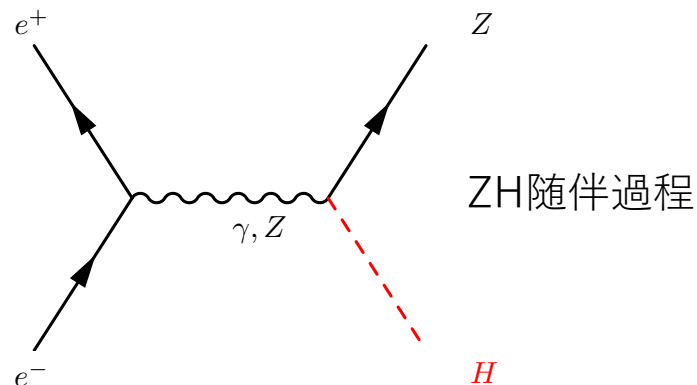
→ ZH随伴過程によるヒッグス粒子の生成

$m_H = 125 \text{ GeV}$

崩壊粒子	分岐比
$b\bar{b}$	65.7 %
WW	15.0 %
gg	8.0 %
$\tau\tau$	5.5 %
$c\bar{c}$	3.6 %

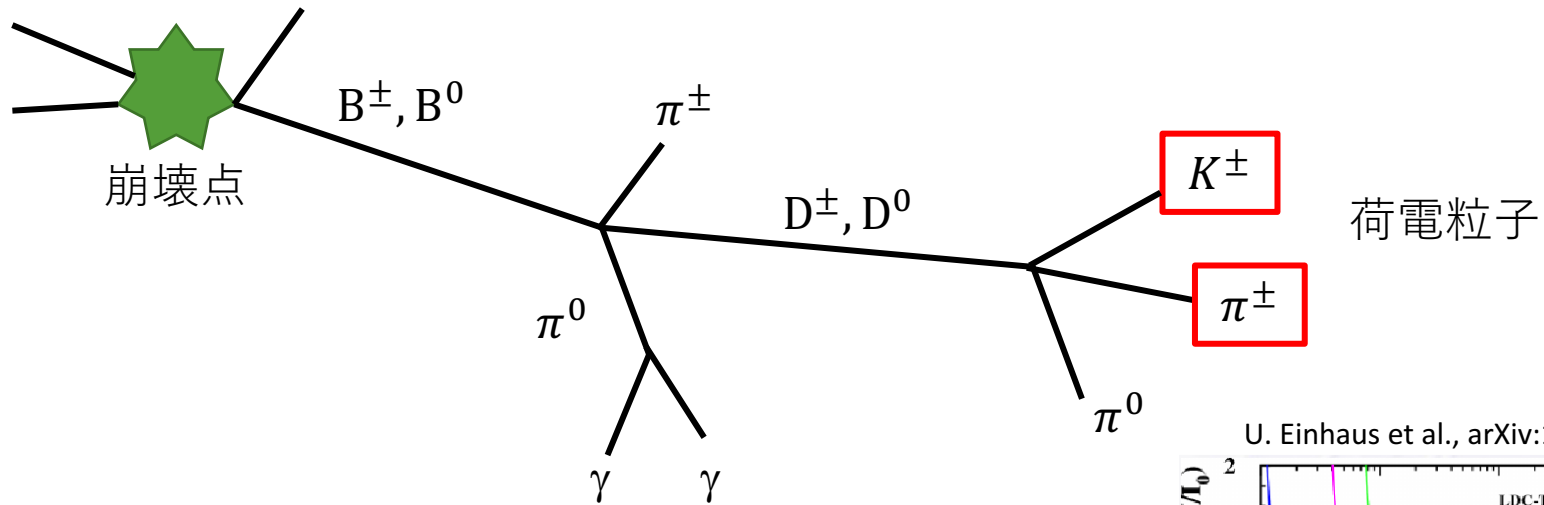
$H \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, gg$  崩壊反応

→ 反応の分離にクォークのフレーバ識別



# ILCの物理

## ➤ bクォークの再構成過程



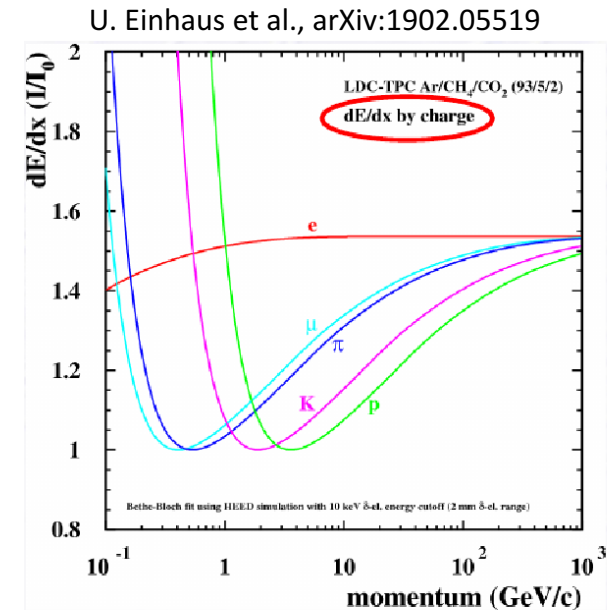
- $K^\pm$  ... bクォーク  $\rightarrow$  cクォーク の連鎖崩壊での生成を示唆



$K^\pm$ を同定することでb/cクォークのタグに役立つ

$K^\pm$ や $\pi^\pm$ のような荷電粒子

$\rightarrow$  ガス飛跡検出器でのトラッキング & 粒子識別



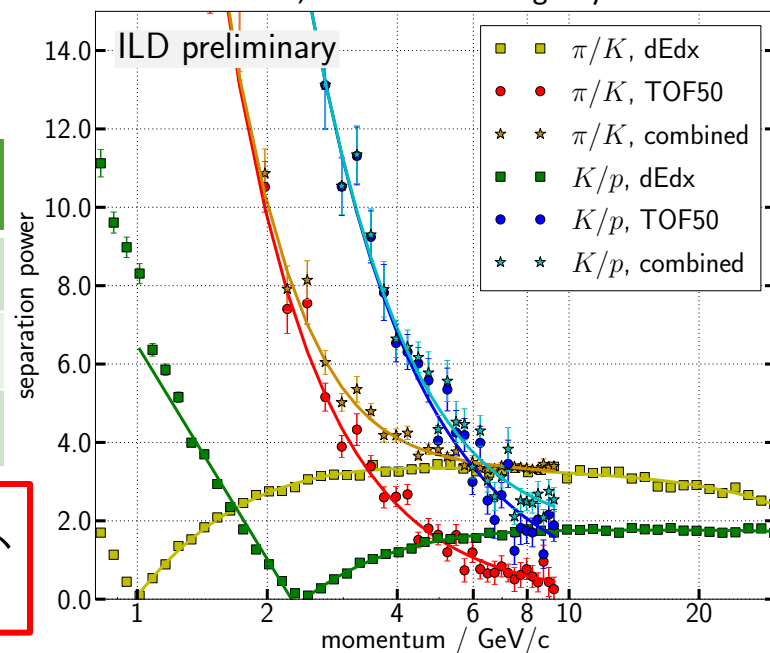
# 測定精度と粒子識別

## ➤ Time of Flight (ToF)

粒子の質量により、飛行時間に差ができることを利用して粒子を識別

粒子	質量	$\beta = \frac{v}{c}$ (5 GeV)
$\pi$	139 MeV/c <sup>2</sup>	0.9996
K	494 MeV/c <sup>2</sup>	0.9951
p	938 MeV/c <sup>2</sup>	0.9829

“Particle ID Performance with dE/dx and TOF”  
Uli Einhaus, ILD Benchmarking Days 2018



5 GeVのK粒子と $\pi$ 粒子の識別を行うためには、50 psec以下の高い時間分解能が必要

- 時間分解能と識別能力

識別粒子	時間分解能	$3\sigma$ で識別できる運動量
K / $\pi$	100 ps	1.94 GeV/c
	50 ps	2.74 GeV/c
K / p	100 ps	3.26 GeV/c
	50 ps	4.60 GeV/c

# Low Gain Avalanche Diode

## ➤ LGAD (Low Gain Avalanche Diode)

高時間分解能センサー → ATLASでの研究で~30 psecを達成

✓ リーチスルー

✓ インバース

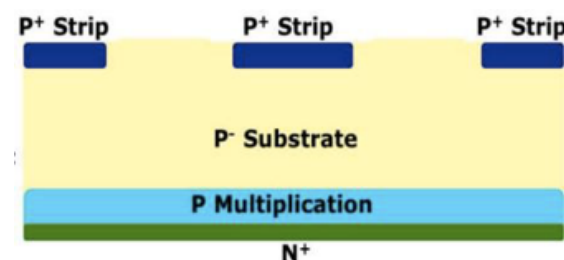
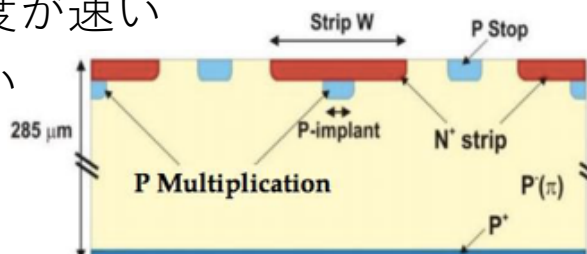
電極の直下に増幅機構

検出器の最下層に増幅機構

• 電荷収集速度が速い

• 信号のばらつきが少ない

• 増幅されない粒子がある



## ➤ APD (Avalanche Photo Diode)

APDはLGADと同じ内部構造を持つ ➡ LGADの開発に向けてAPDの性能を評価

九州大学で所持しているAPD

APD No.	タイプ	降伏電圧	受光面積	APD No.	タイプ	降伏電圧	受光面積
S12023-10A	リーチスルー	139 V	φ 1 mm	S2384	リーチスルー	159 V	φ 3 mm
S8664-10K	インバース	417 V	φ 1 mm	S3884	リーチスルー	189 V	φ 1.5 mm
pkg-10	リーチスルー	約 250 V	φ 1 mm	S8664-20K	インバース	425 V	φ 2 mm
pkg-20	リーチスルー	約 120 V	φ 1 mm	S8664-55	インバース	433 V	5 × 5 mm <sup>2</sup>

# LGAD研究の報告内容

## ➤ 放射線源を用いた測定

- 各APDの放射線源でのADC分布
- APDのGain測定
- APDの有感領域測定

## ➤ 陽電子ビーム照射実験

- 各APDの陽電子ビームでのADC分布
- 各APDの検出効率
- 時間分解能測定

## ➤ 測定機器の性能に関わる測定

- TOA較正
- Timewalk測定
- Jitter測定



# LGAD研究の報告内容

## ➤ 放射線源を用いた測定

- 各APDの放射線源でのADC分布
- APDのGain測定
- APDの有感領域測定

## ➤ 陽電子ビーム照射実験

- 各APDの陽電子ビームでのADC分布
- 各APDの検出効率
- ✓ 時間分解能測定

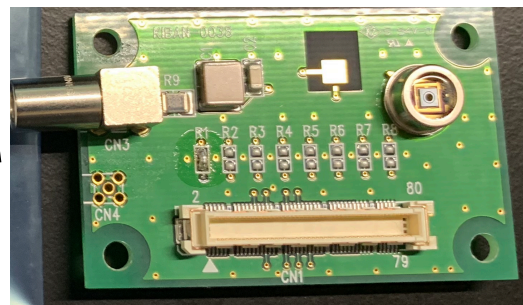
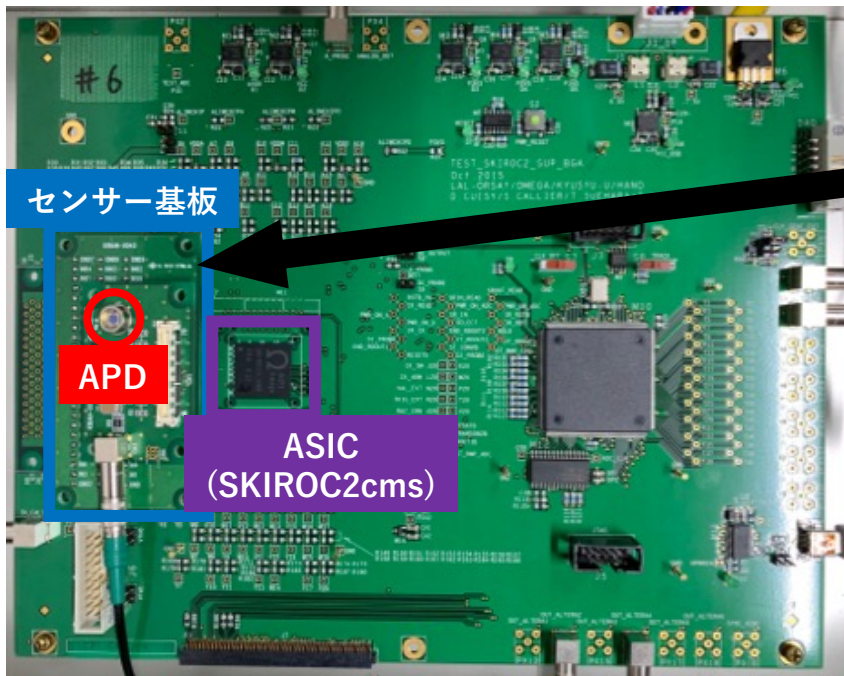
## ➤ 測定機器の性能に関する測定

- ✓ TOA較正
- ✓ Timewalk測定
- ✓ Jitter測定

# 評価基板とSKIROC2cms

## ➤ 評価基板

… ASICの性能評価を行うことを目的として製作された評価基板



センサー基板 (S8664-10K 半田付け)

APDを取り付けたセンサー基板  
を評価基板に接続

➡ APDの信号を評価基板で読み出し

評価基板#6 (SKIROC2cms 半田付け)

## ➤ SKIROC2cms

… センサーからの信号処理を行うASIC

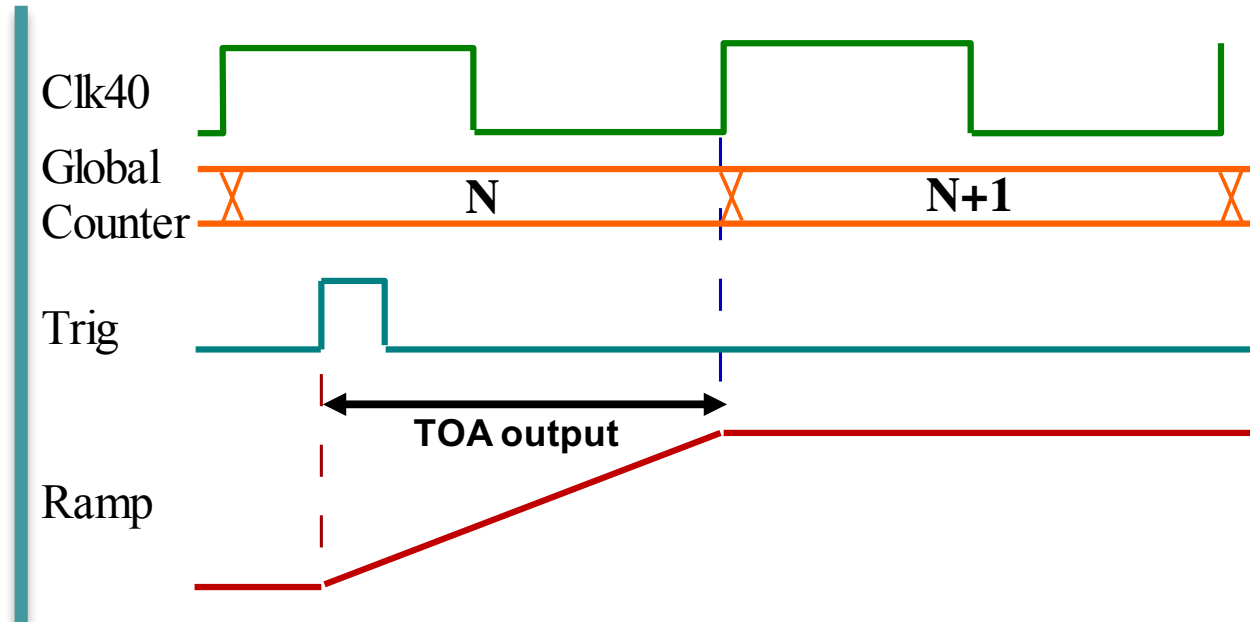
- 時間情報が取得可能
- 前段増幅器での極性の変更が可能



# TOA measurement

## ➤ TOAの測定原理

クロック信号  
(40 MHz)



内部クロック (緑) の立ち上がりを基準にトリガーがかかって次の立ち上がりまで電荷がチャージされる

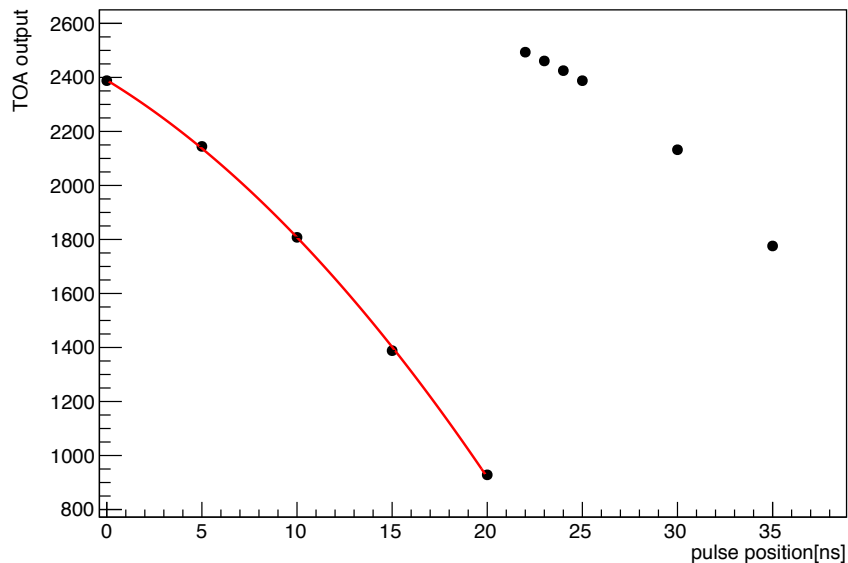


電荷量からトリガーがかかった時間がわかる

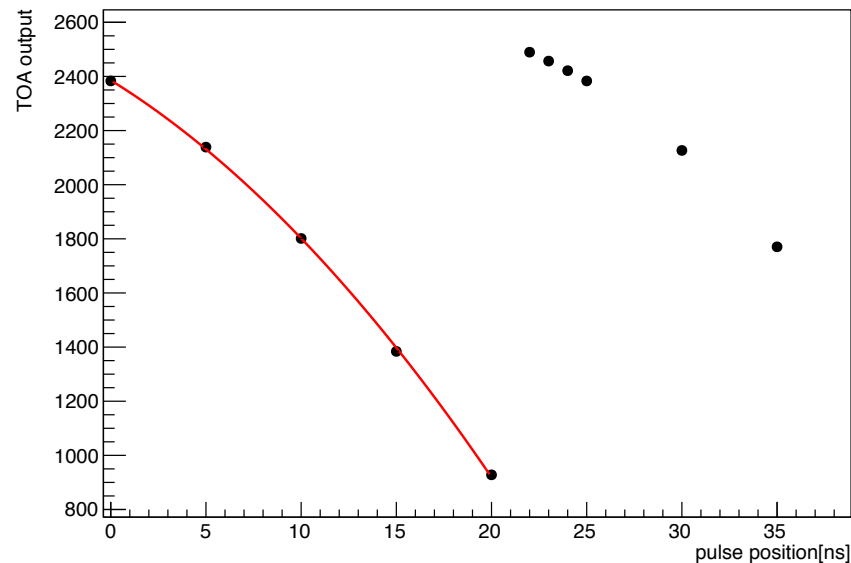
# 測定機器に関する測定

## ➤ TOA較正

pulse position vs TOA output (ch 30)



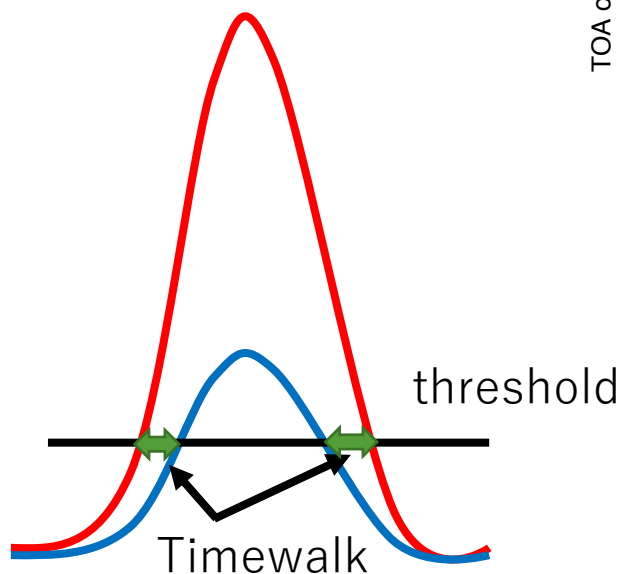
pulse position vs TOA output (ch 33)



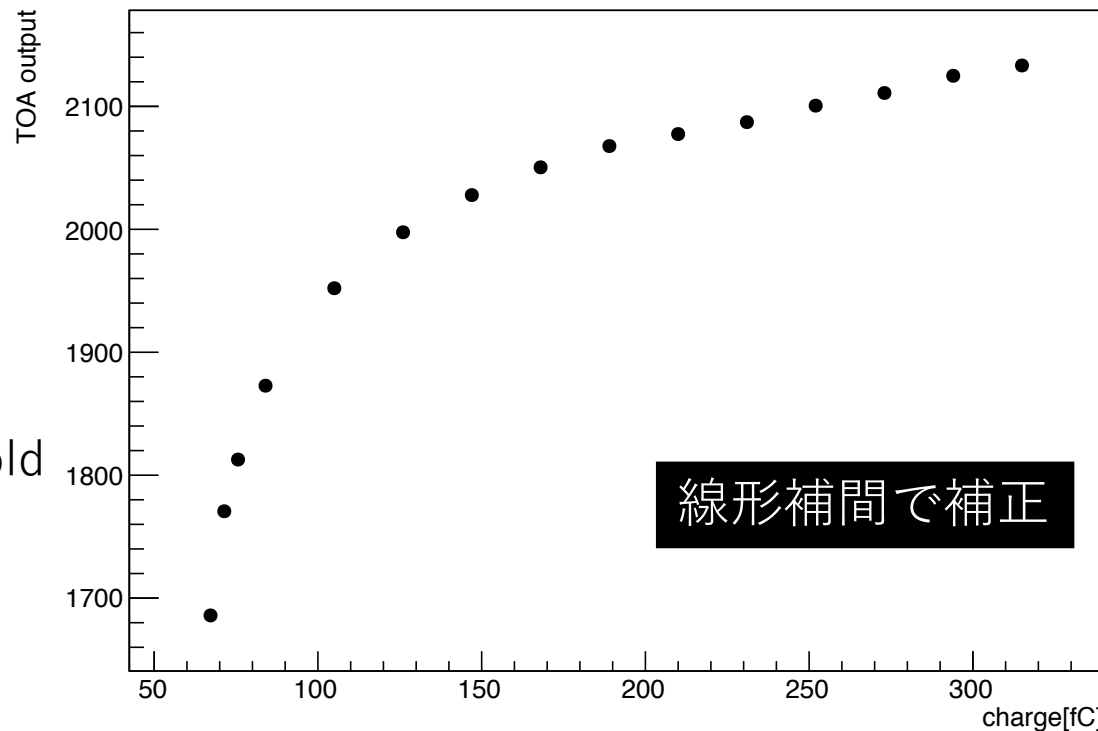
- クロック信号と任意の時間遅延させた擬似信号を評価基板に入力
- 25 nsごとにTOAの値がループする ← クロック信号が40 MHz
- 二次関数的な相関関係 → TOA  $\leftrightarrow$  Time [ns]の変換をする際に使用

# 測定機器に関する測定

## ➤ Timewalk測定



Timewalk



## Timewalk

信号の大きさ(波高の高さ)による立ち上がり時間の違いから生じる時間情報の誤差

- 擬似信号のChargeを変えつつTOAを取得
- 100 fC以下で特にTimewalkの効果が大きい
- TOAの解析時にこの測定結果から得られたTimewalkの効果を補正

# 測定機器に関する測定

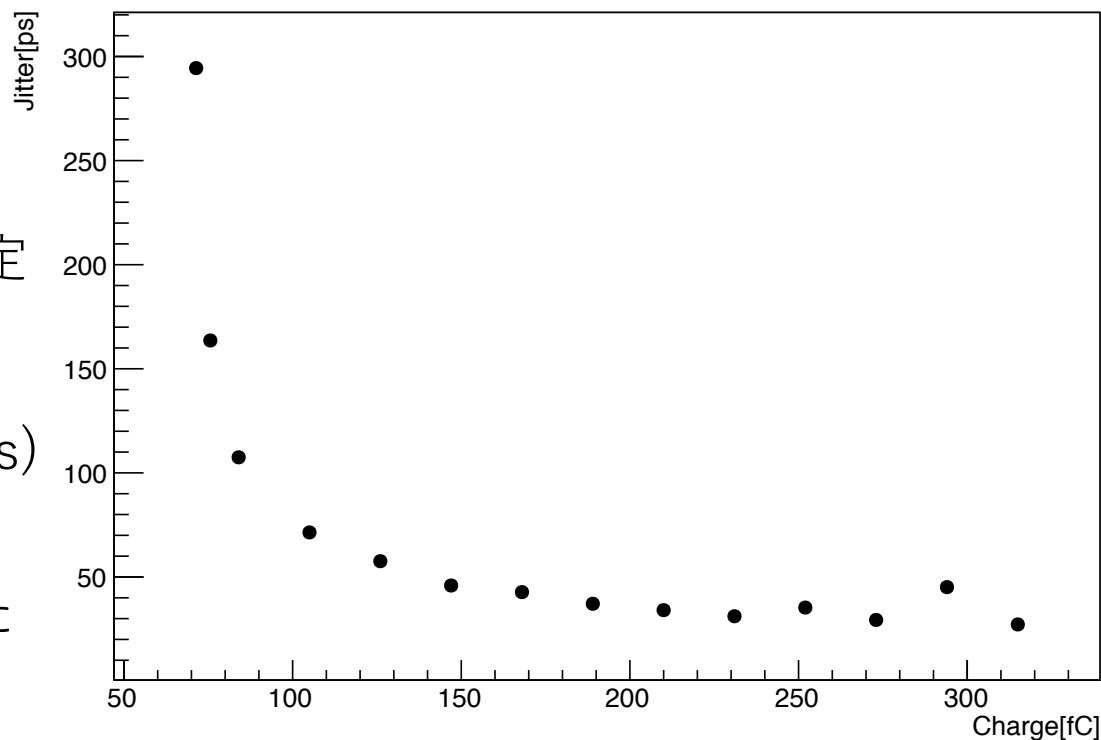
## ➤ Jitter測定

### Jitter

ASICや基板などの測定機器によって生じるランダムな誤差による値のばらつき

Charge vs Jitter (RSM 5 channels)

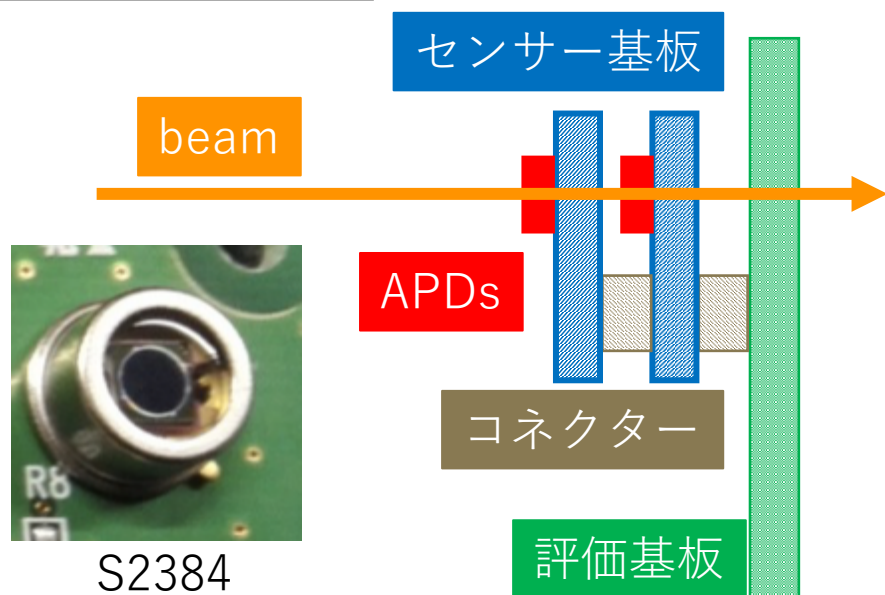
- 擬似信号のChargeを変えつつTOAを取得
- TOAの値のばらつきを測定
- < 150 fCで約50 ps以下  
(最小値 約30 ps)
- 時間分解能導出の際に  
この測定結果から得られた  
Jitterの効果を考慮



# 陽電子ビーム照射実験 (11/18~22)

- Test Beam @ELPH(東北大学)  
陽電子ビーム, 500 MeV

時間分解能測定



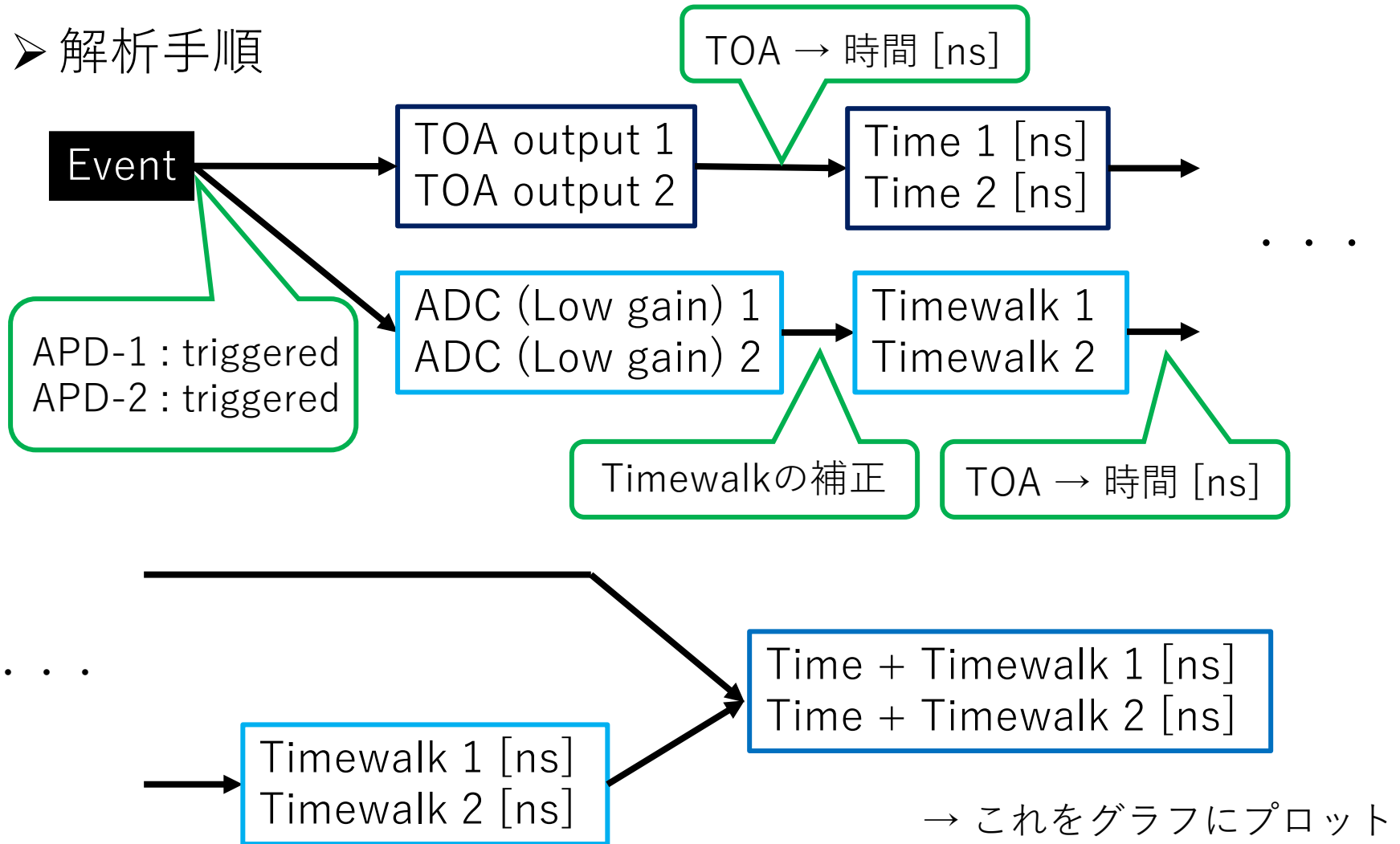
同種のAPDをビームが貫いたイベント

2つのAPDの時間差から時間分解能を導出



# TOA measurement

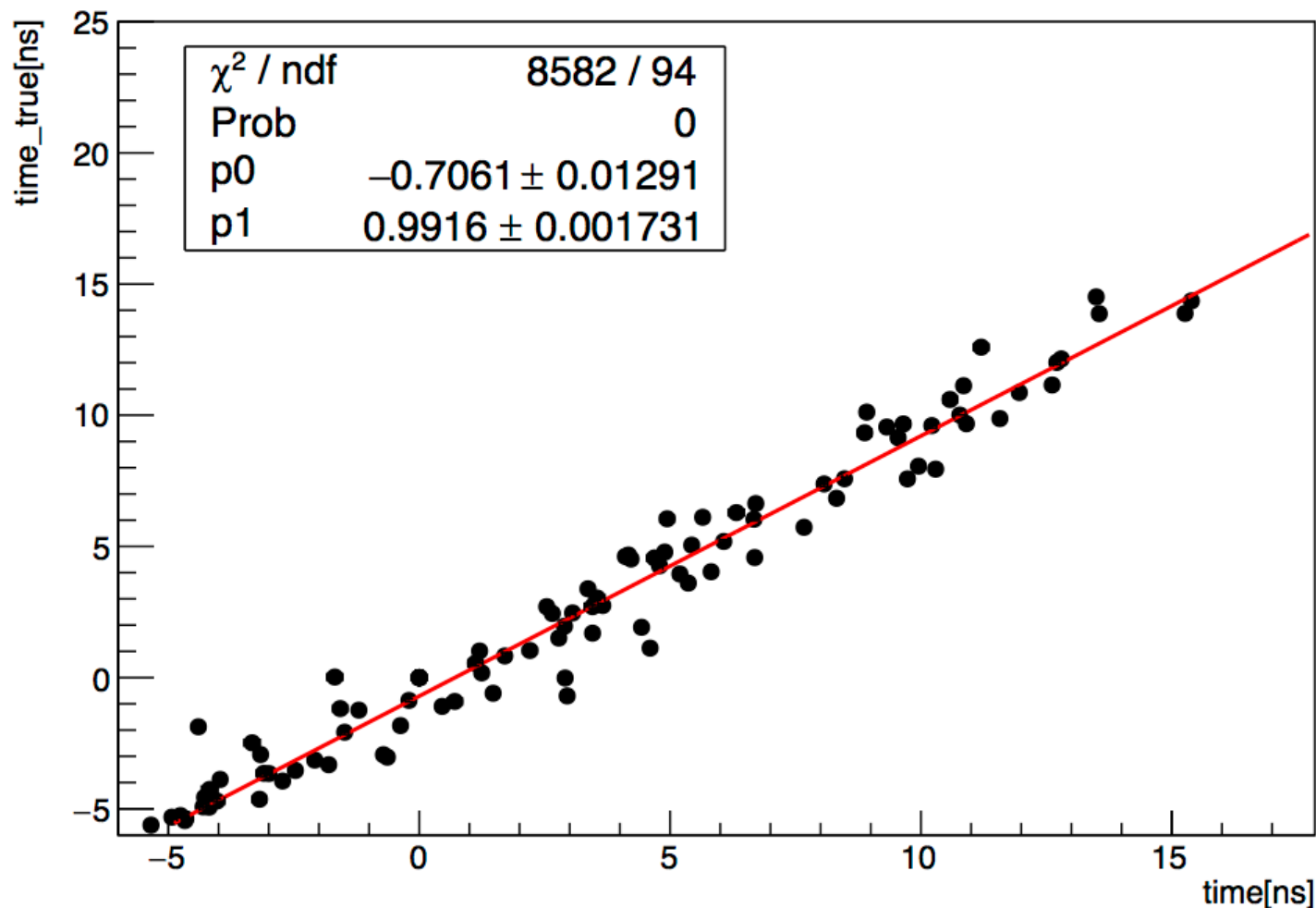
## ➤ 解析手順





# 陽電子ビームを用いた測定

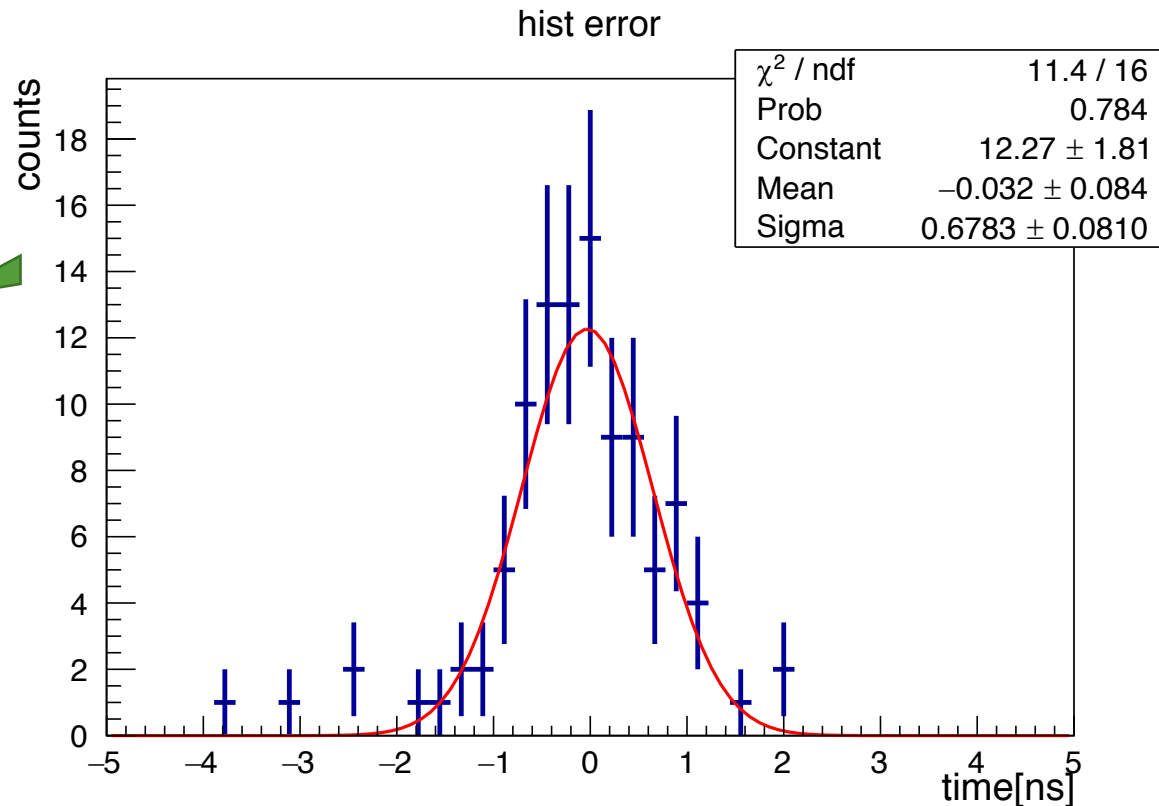
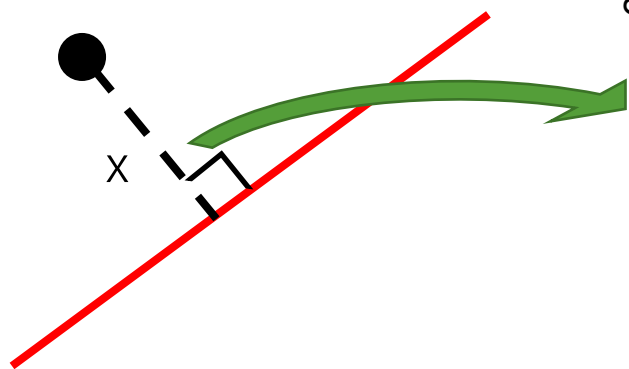
TOA measurement



※Timewalkによる効果は補正済み

# 陽電子ビームを用いた測定

➤ 近似直線からの距離



ヒストグラムの近似直線からの距離は2つのAPDによるもの

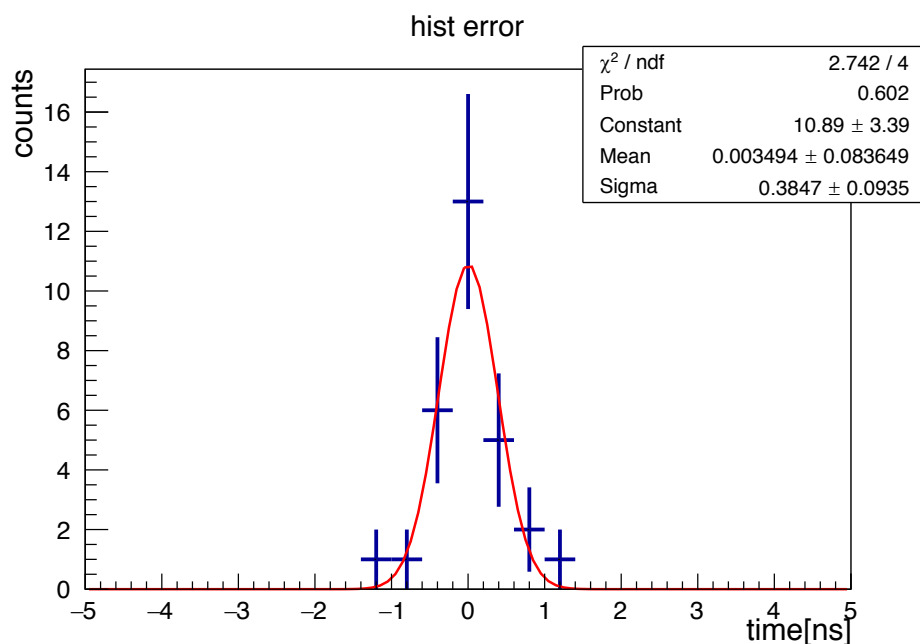
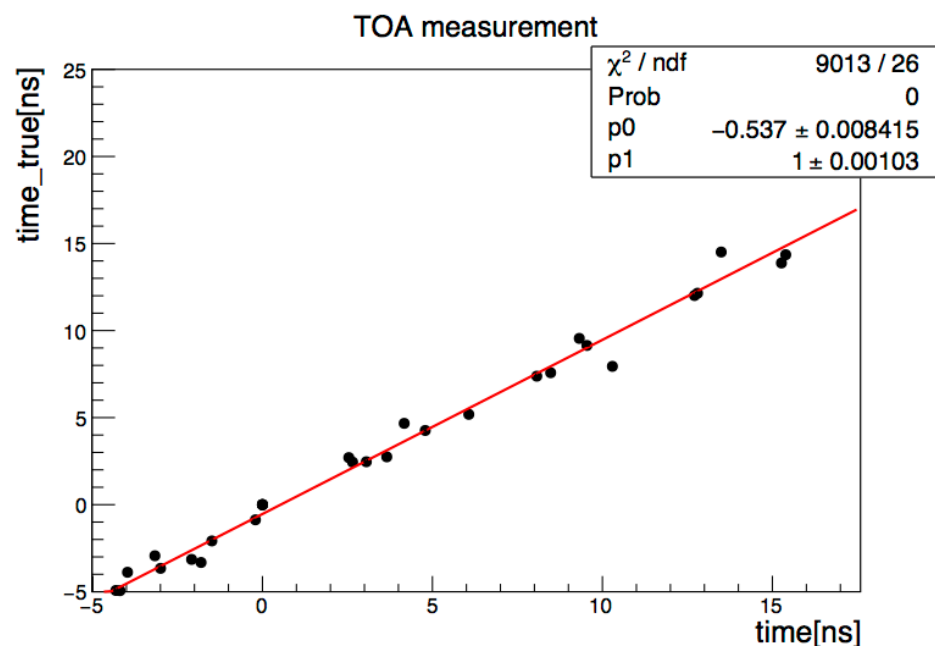
→ ヒストグラムの $\sigma$ を $1/\sqrt{2}$ 倍した値が時間分解能

時間分解能 :  $440 \pm 57$  ps

# 陽電子ビームを用いた測定

## ➤ 100 fC以上の信号のみでの解析

- Timewalkの効果が比較的少ない
- Jitterが小さい
- 信号の立ち上がりが早く、時間分解能が良くなるはず



時間分解能 (> 100 fC) :  $272 \pm 66$  ps

Jitterを100 fC以上で50 psだとすると...  $\sqrt{272^2 - 50^2} \cong 267$  ps

# 時間分解能についての考察

## ➤ 時間分解能の結果

LGAD研究における初めて時間分解能の測定 :  $272 \pm 66$  ps

- Timewalkの不定性

Timewalkの効果はSKIROC2cmsの64チャンネルのうち特定の1チャンネルのもの

➡ 今回時間分解能を測定したチャンネルとTimewalk効果が異なる可能性

- 測定環境の違い

時間分解能測定に使用したデータ : ELPHのガンマ線照射室(東北大学)  
測定機器に関する測定 : 九州大学の実験室

➡ TOAの較正やTimewalkの補正が測定環境の違いによって系統誤差を含んでいる  
(ELPHでの測定時と九州大学の実験室での測定時で取得したTOAの値の範囲が若干異なった)

- 統計量の不足

両方のAPDでトリガーがかかったイベントが少ない

➡ 検出効率が低い

# まとめと今後の展望

## ➤ まとめ

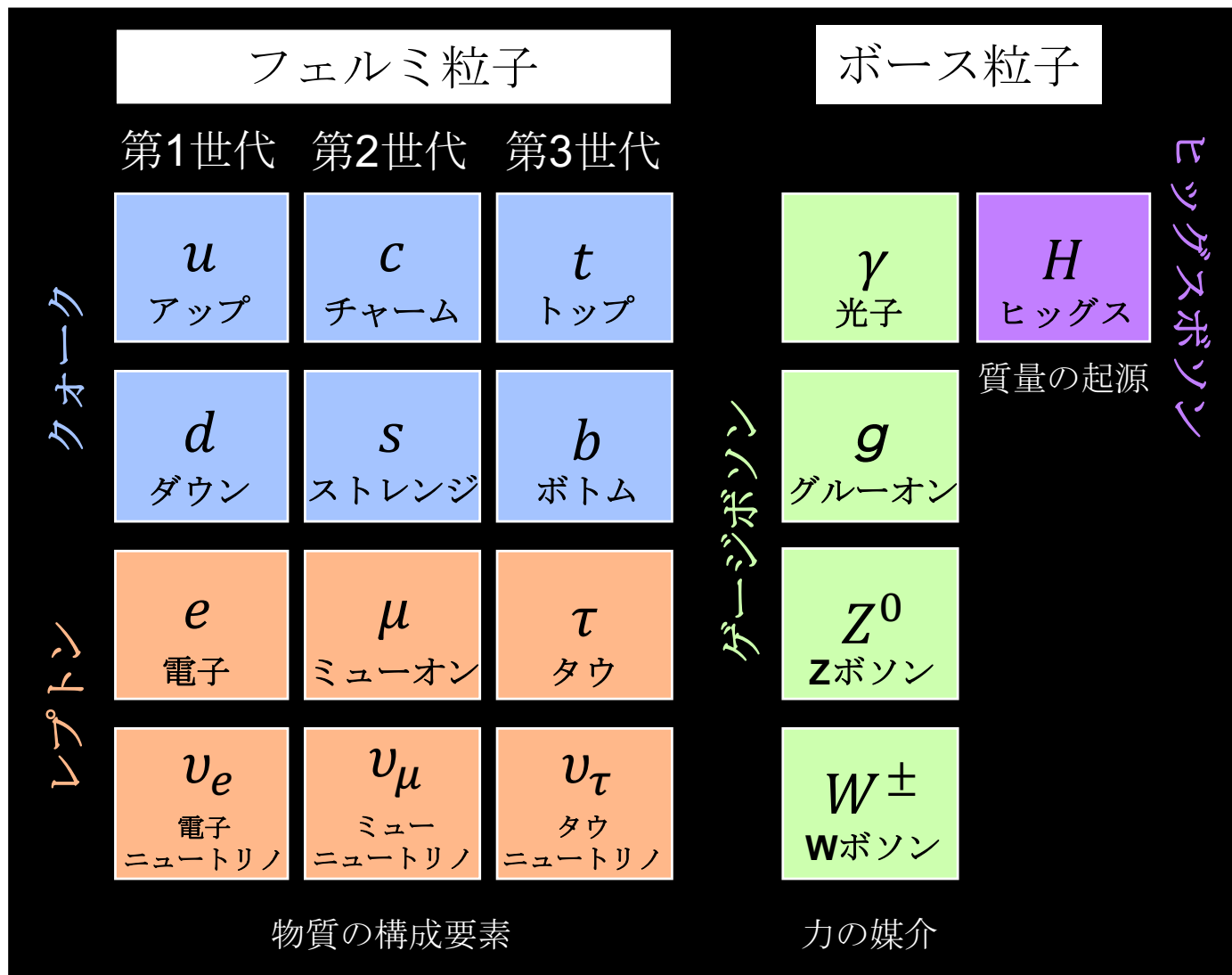
- ILDでの粒子識別能力向上のために高時間分解能センサーの開発を行なっている
- ILC用のLGADプロトタイプ作成のためAPDの性能評価を行なった
- 時間分解能導出のため評価基板・SKIROC2cmsについての測定を行なった
- APDの性能評価のため陽電子ビーム照射実験を東北大学ELPHで行なった
- 照射実験の結果として時間分解能： $440 \pm 57$  psという結果を得た

## ➤ 今後の展望

- 本研究の考察を踏まえた上での時間分解能の再測定
- センサー内部での増幅率のばらつき・位置依存性の調査
- インバース型での時間分解能測定
- 時間測定の精度がより高いALTIROC (ASIC)の導入
- ILC用のLGADプロトタイプの作成

Back up

# 標準理論



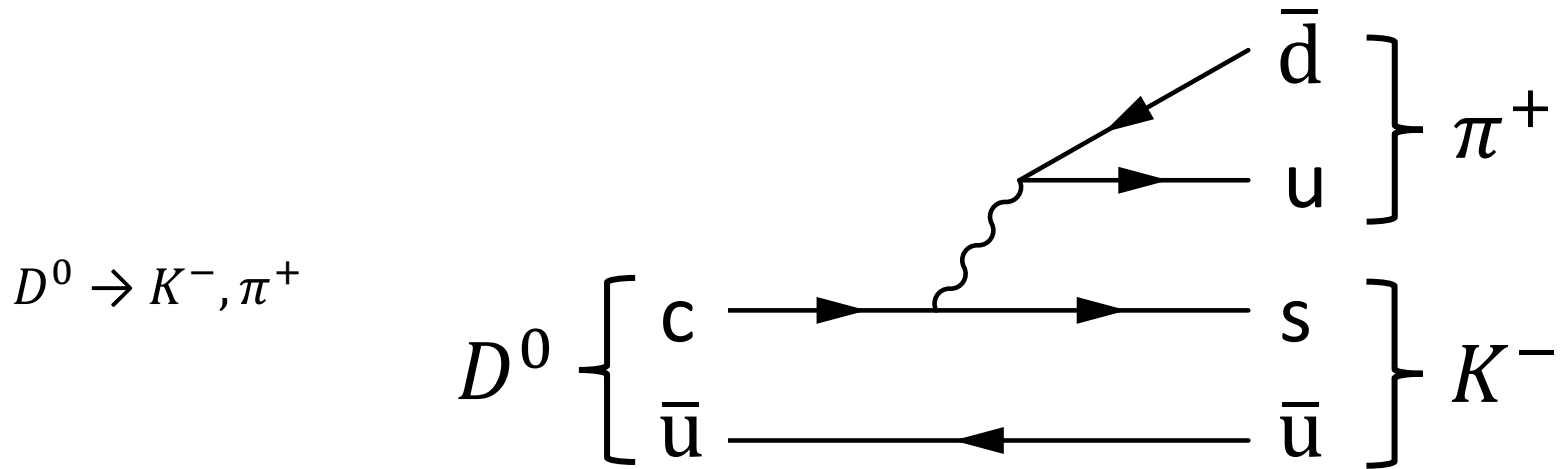
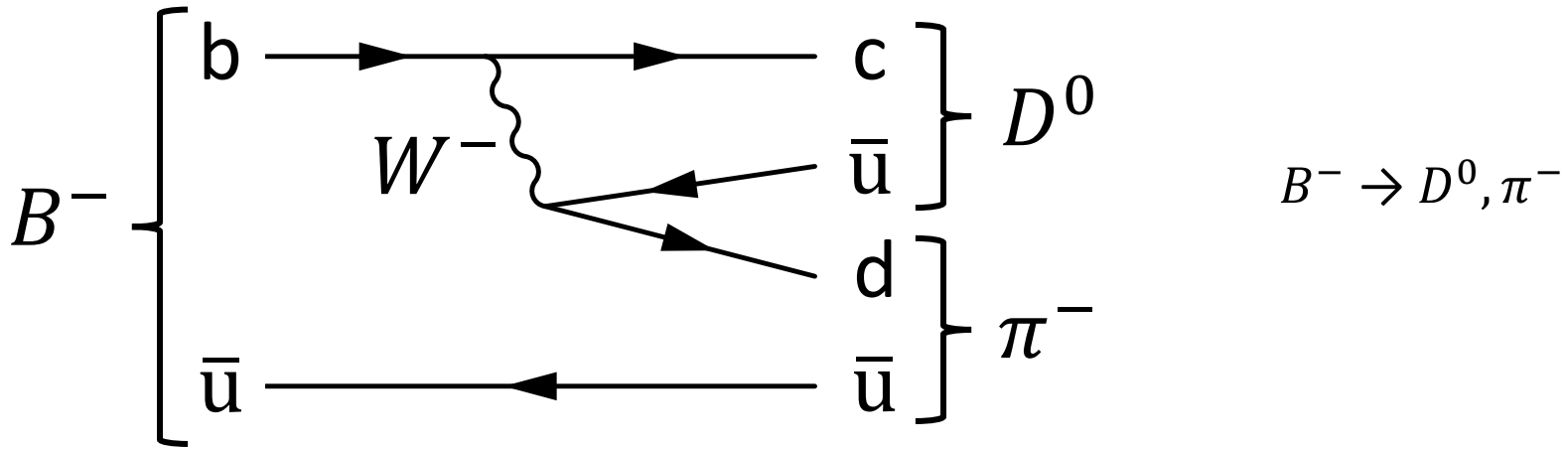
# ILC運転計画

重心系エネルギー	反応過程	測定内容
91 GeV	$e^+e^- \rightarrow Z$	電弱相互作用の超精密測定
160 GeV	$e^+e^- \rightarrow WW$	$W$ ボソンの質量の超精密測定
250 GeV	$e^+e^- \rightarrow ZH$	ヒッグス粒子の結合定数の精密測定
350-400 GeV	$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$	トップクォークの質量と結合定数の測定
> 350 GeV	$e^+e^- \rightarrow WW$ $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H$	$W$ の結合定数の精密測定 ヒッグス粒子の結合定数の精密測定
500 GeV	$e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$ $e^+e^- \rightarrow ZHH$	$Z'$ などの新粒子の間接的探索 トップクォークとヒッグス粒子の結合定数測定 ヒッグス粒子の自己結合
> 500 GeV	$e^+e^- \rightarrow \tilde{\chi}\tilde{\chi}$ $e^+e^- \rightarrow AH, H^+H^-$	超対称性粒子の探索 標準理論を超えるヒッグス粒子の探索
700-1000 GeV	$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}HH$ $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}VV$ $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}t\bar{t}$ $e^+e^- \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^*$	ヒッグス粒子の自己結合 ベクトル粒子に崩壊する複合ヒッグス粒子の探索 トップクォークに崩壊する複合ヒッグス粒子の探索 超対称性粒子の探索



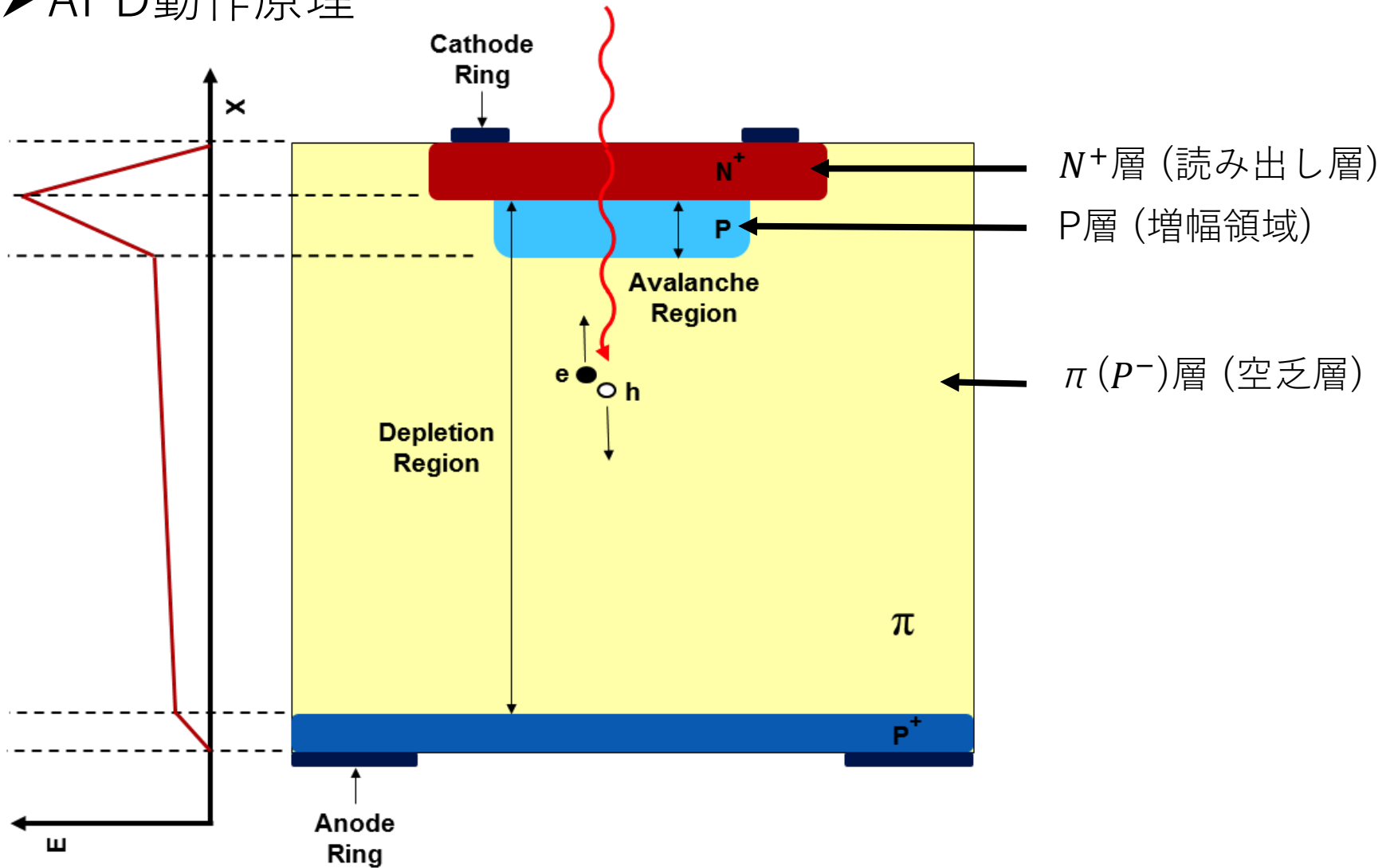
# クォークの連鎖崩壊

➤ bクォーク・cクォークの連鎖崩壊の例

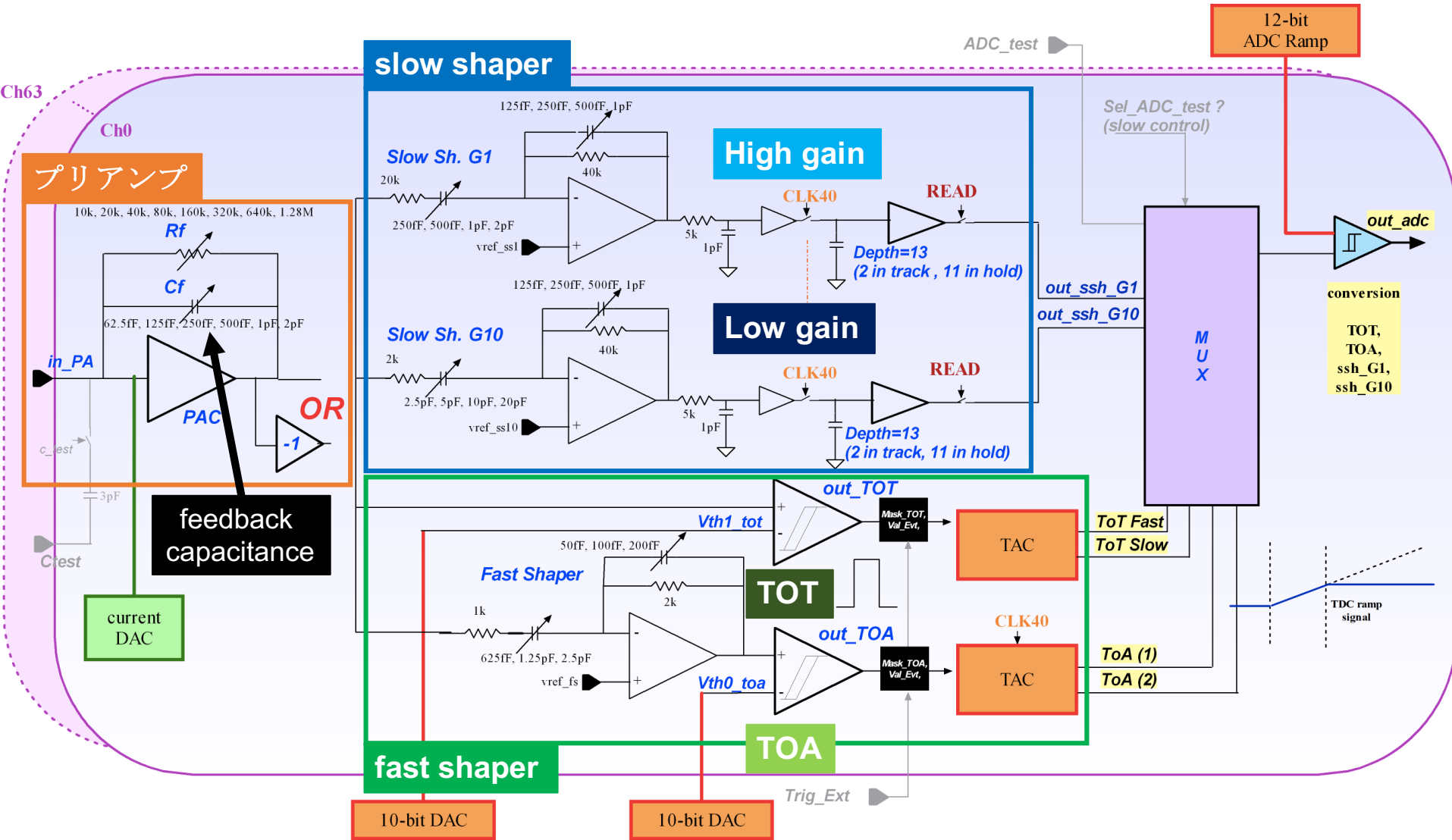


# Avalanche Photo Diode

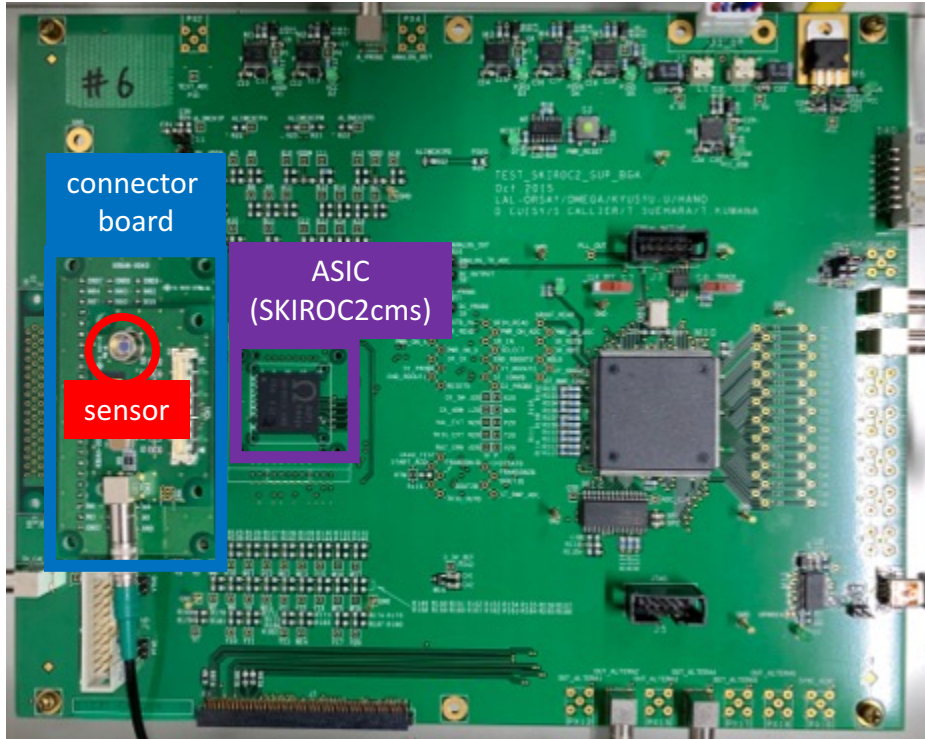
## ➤ APD動作原理



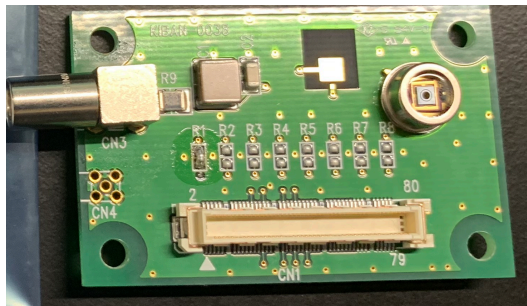
# SKIROC2cms



# 放射線源を用いた測定



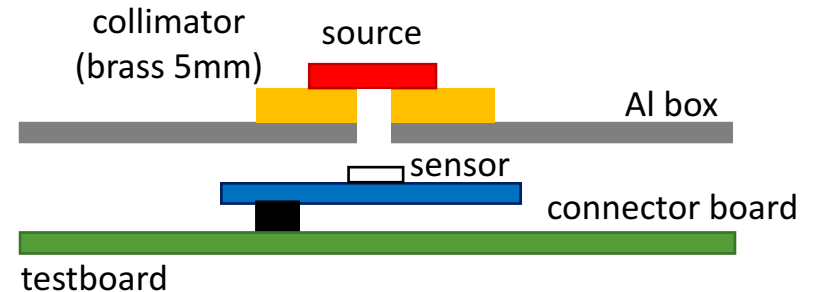
Testboard#6 (SKIROC2cms 半田付け)



connector board (with S8664-10K)



アルミボックスで覆う



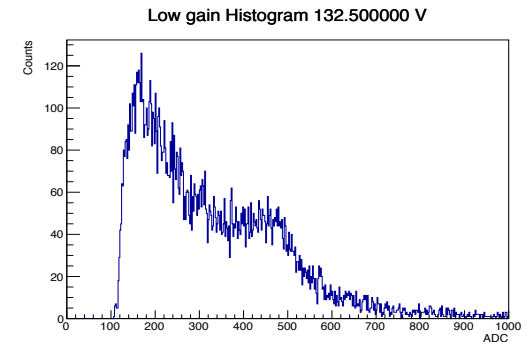
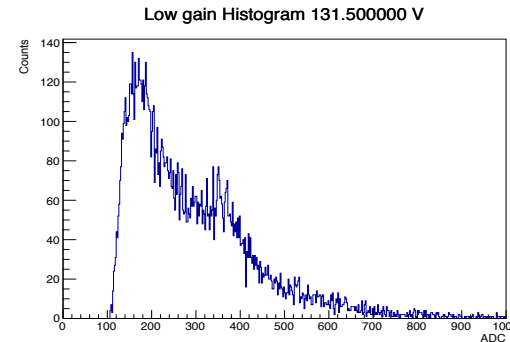
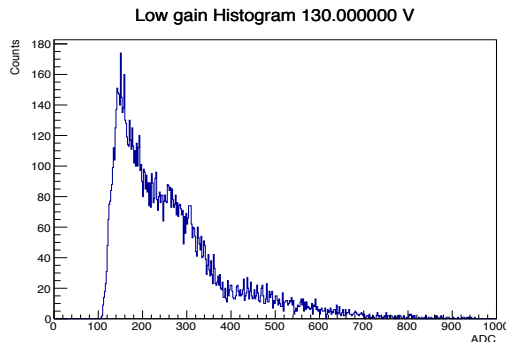
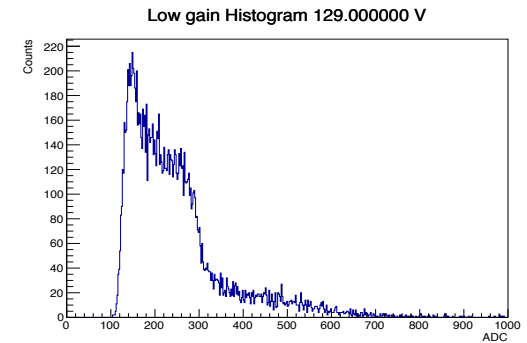
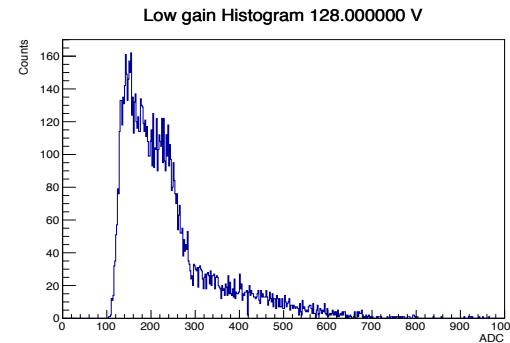
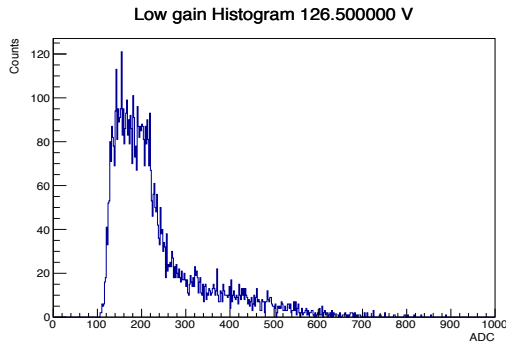
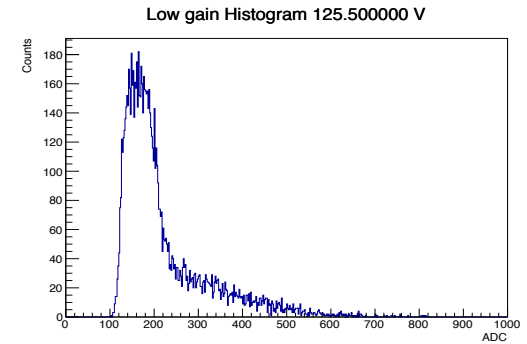
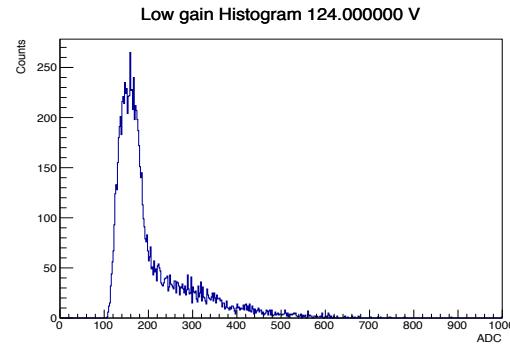
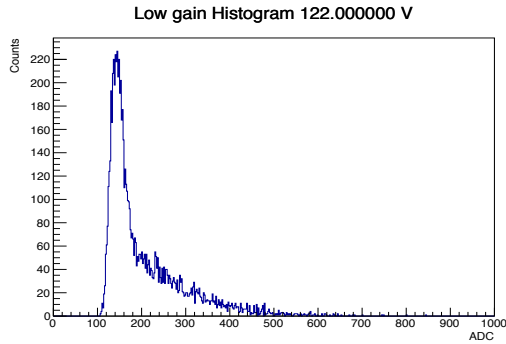
線源

ガンマ線源 :  $^{133}\text{Ba}$ , 81 keV + 356 keV  
(compton edge : 207 keV)

ベータ線源 :  $^{90}\text{Sr}$ , 546 keV (max)

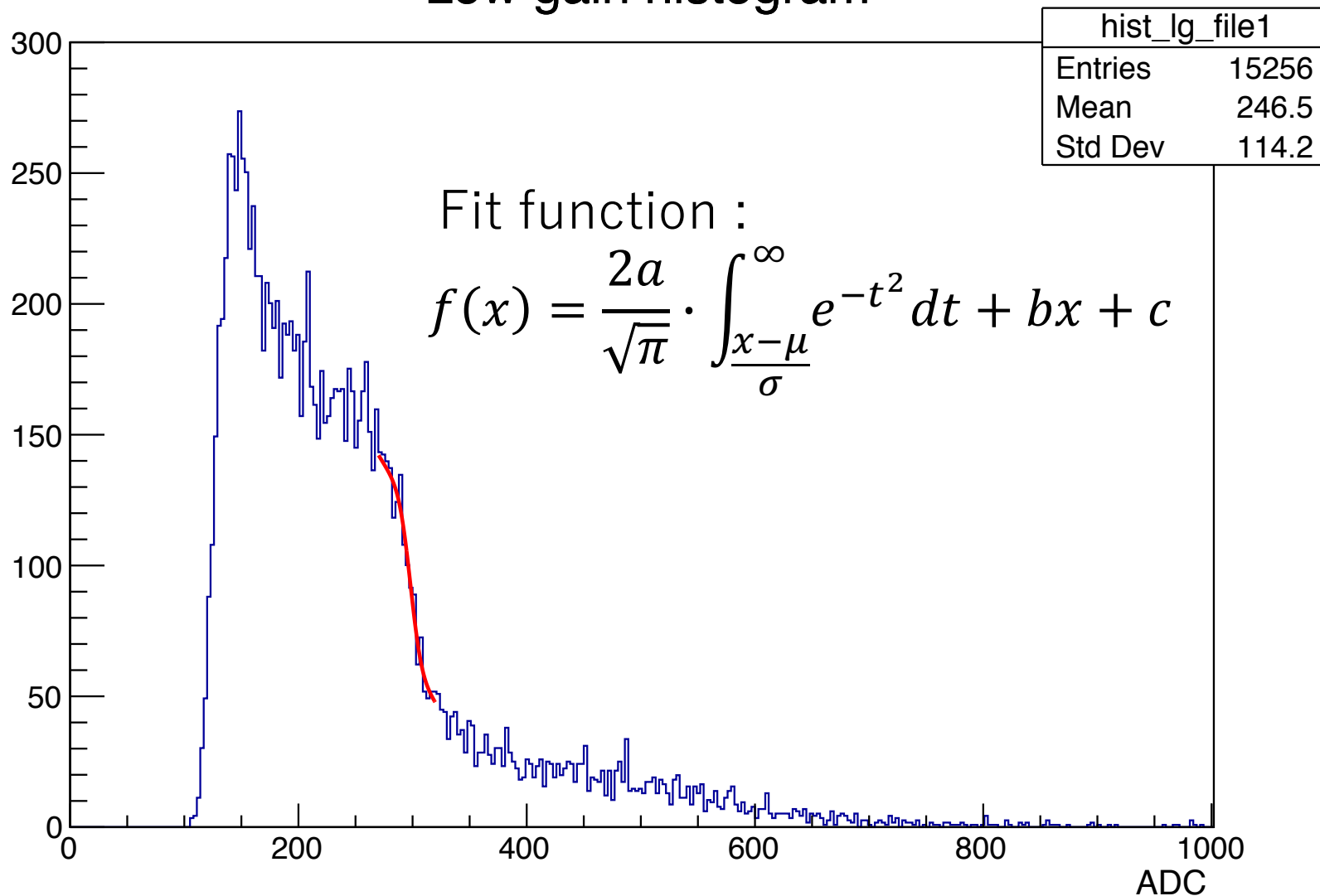
# 放射線源を用いた測定

## ➤ ガンマ線でのGain測定



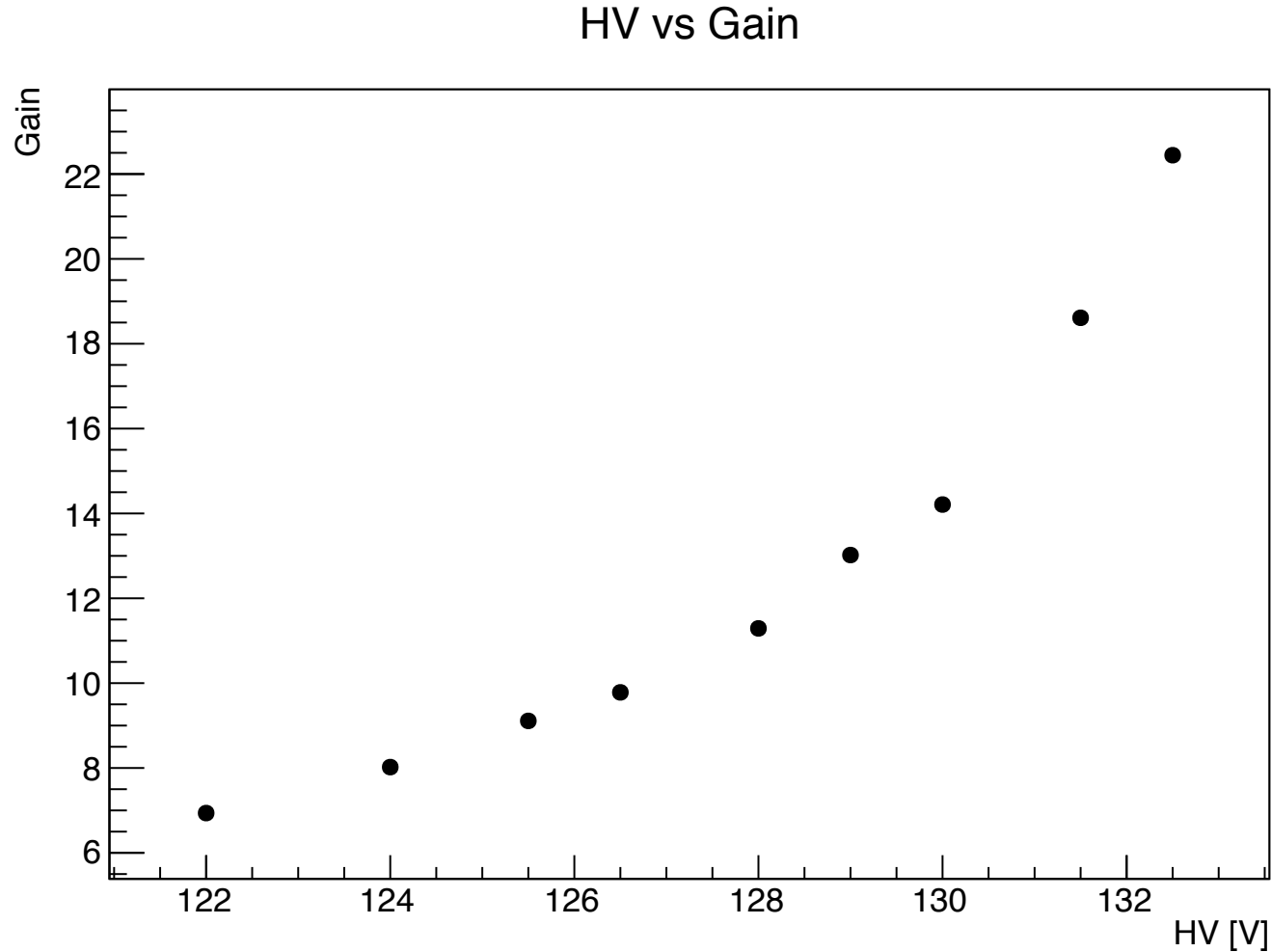
# 放射線源を用いた測定

## Low gain histogram



# 放射線源を用いた測定

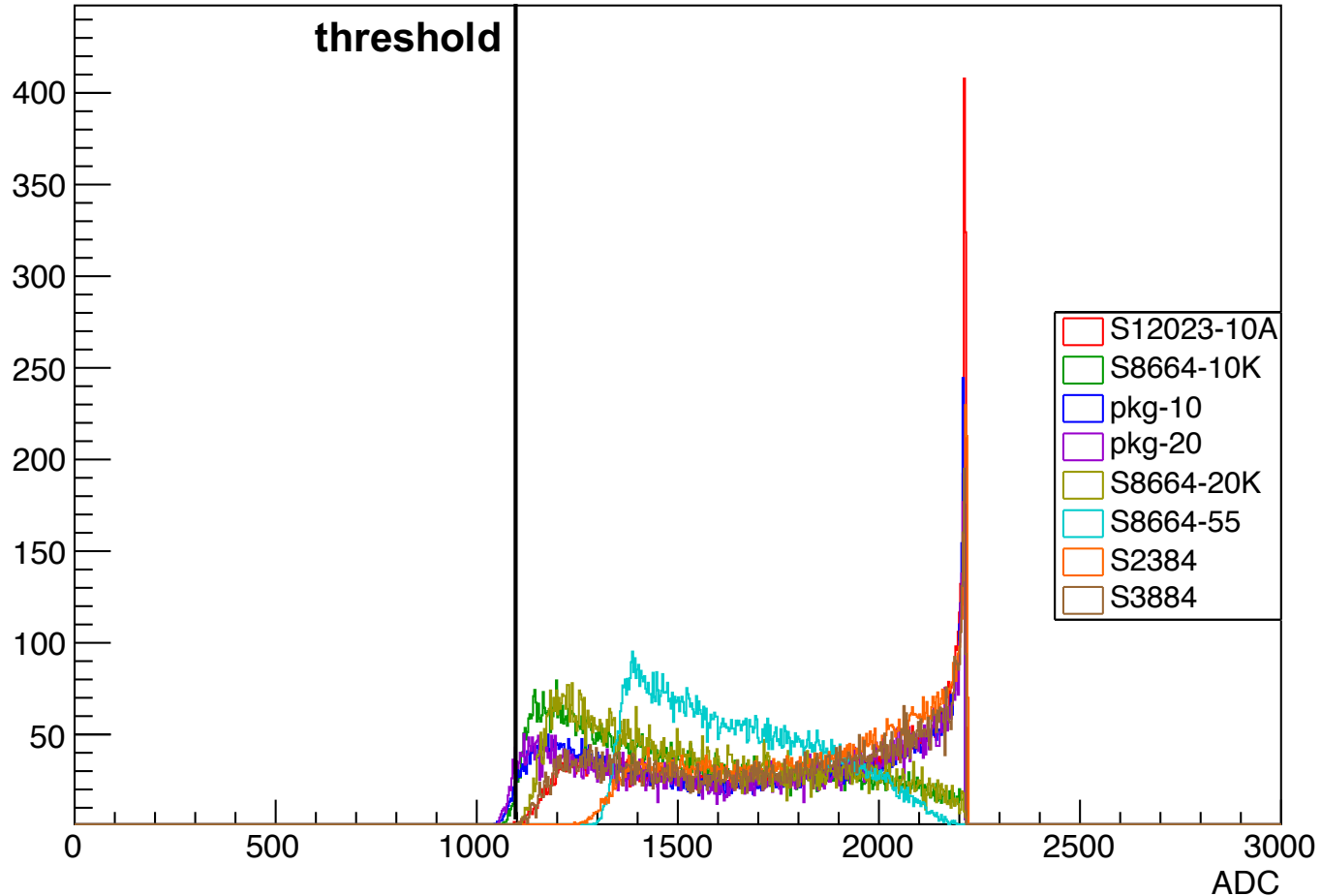
## ▶ ガンマ線でのGain測定



# 放射線源を用いた測定

➤ 各APDのADC分布 (High gain)

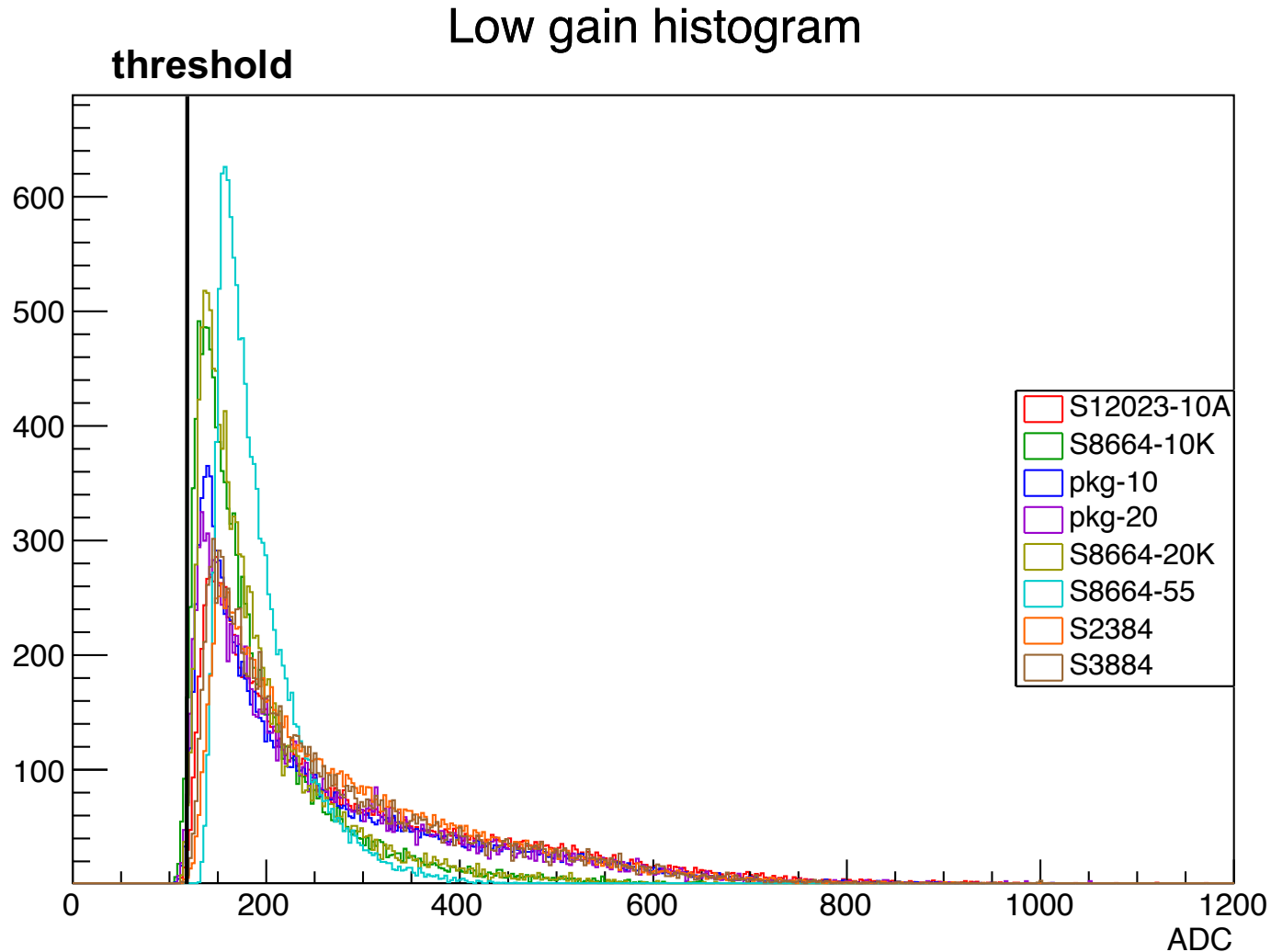
High gain histogram





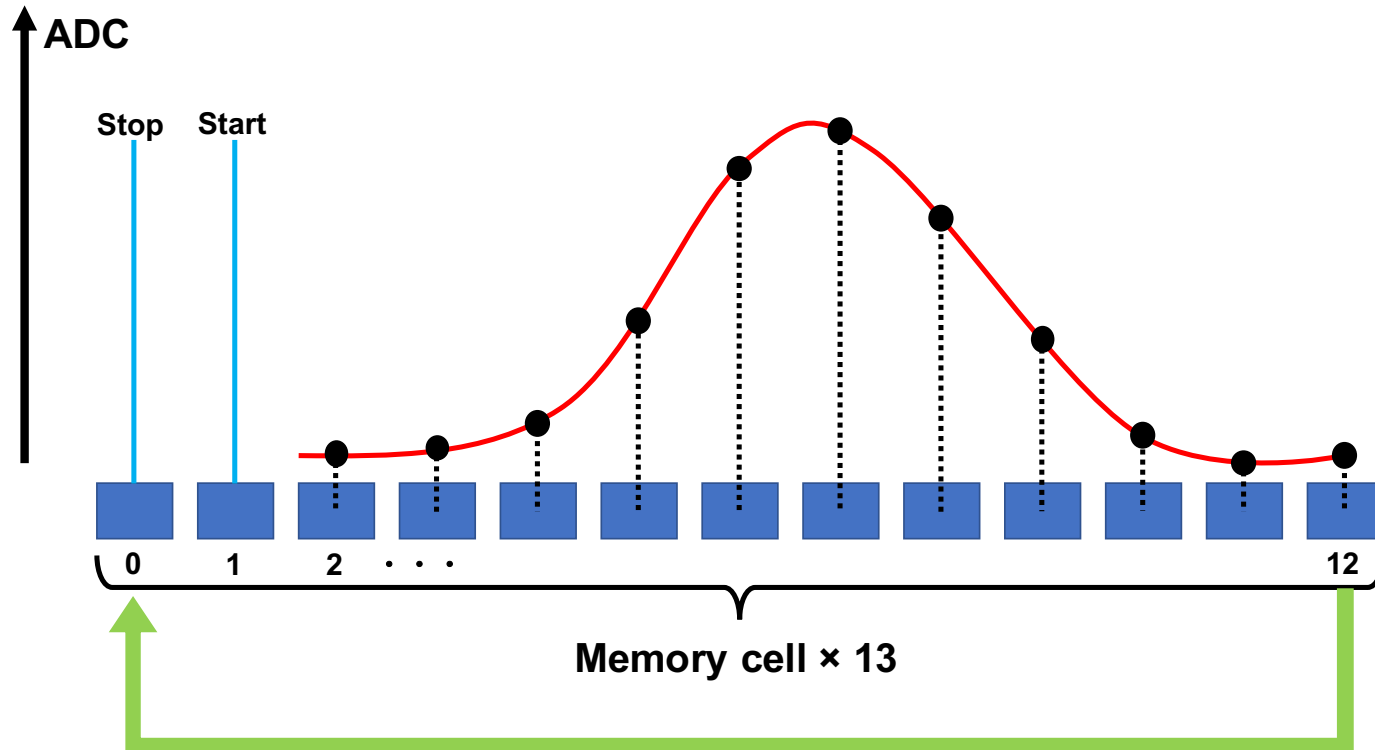
# 放射線源を用いた測定

➤ 各APDのADC分布 (Low gain)



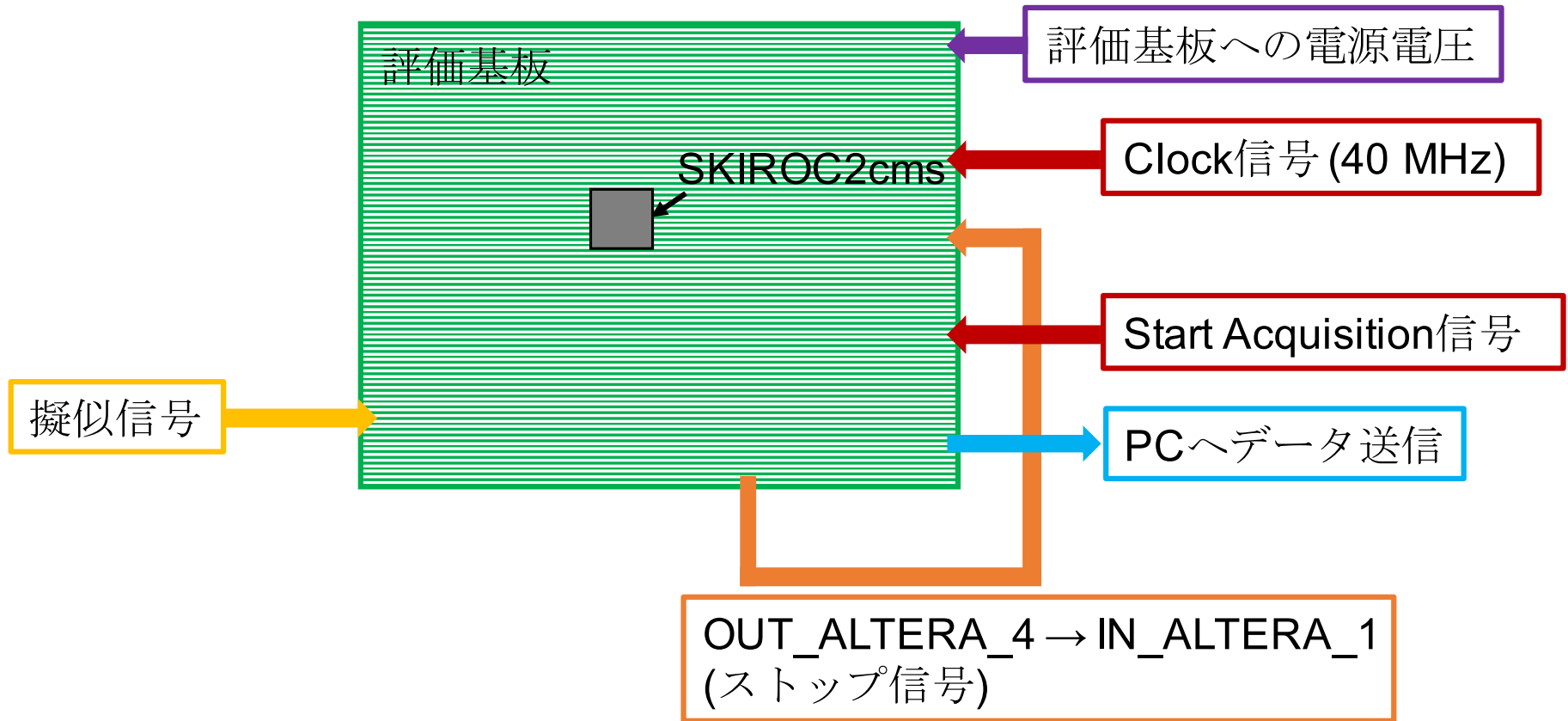
# ADC measurement

## ➤ ADCの測定原理



Start 信号によって ADC 情報の取得が開始され、内部 クロック (40 MHz) に合わせて ADC 情報を 13 個の Memory cell に記録し続ける

# 測定機器に関する測定のセットアップ



# 検出効率

## ➤ 各APDの検出効率

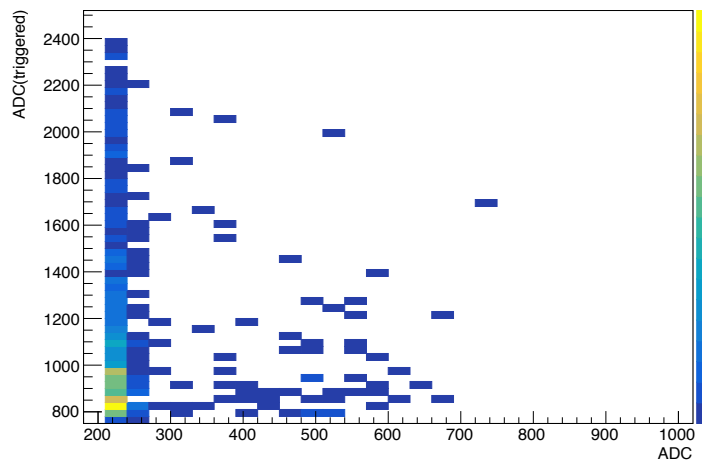
表 6.3 各 APD の検出効率

APD serial No.	APD-1 イベント数	APD-2 イベント数	同期イベント数	検出効率
S12023-10A	1002	965	147	14.9 %
S8664-10K	613	298	4	0.9 %
S2384	4355	5796	1136	22.4 %
S8664-20K	368	185	2	0.7 %
S8664-55	3060	2327	96	3.6 %
pkg-10	1687	1584	15	0.9 %
pkg-20	1956	3010	219	8.8 %

- 同時に測定を行なったAPDの影響
- 閾値が高すぎる
- センサー内部での増幅率のばらつき
- 物理的に片方のAPDにしか入射していない

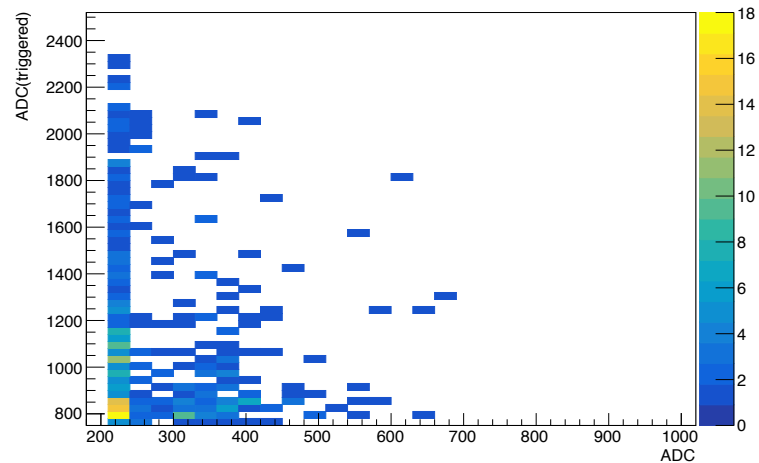
# 検出効率

S8664-10K ADC correlation (ch 33 & ch 42)

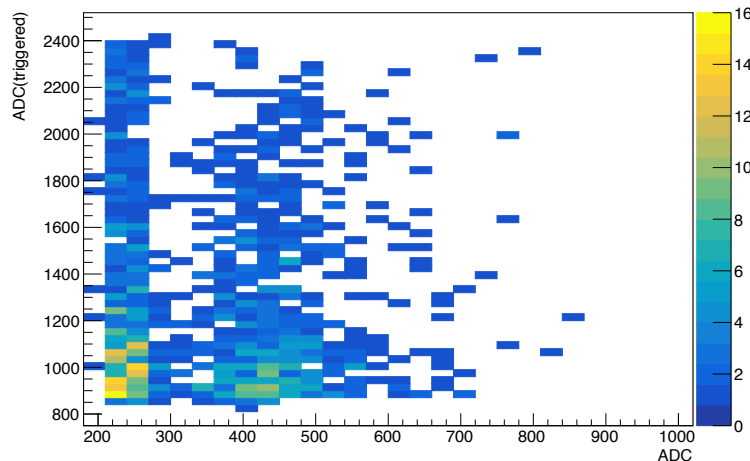


S8664-20K

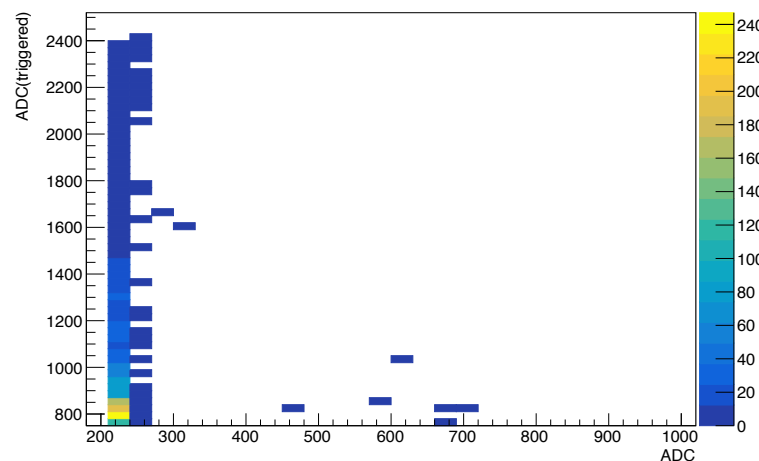
ADC correlation (ch 39 & ch 42)



ADC correlation (ch 39 & ch 42)



ADC correlation (ch 36 & ch 39)



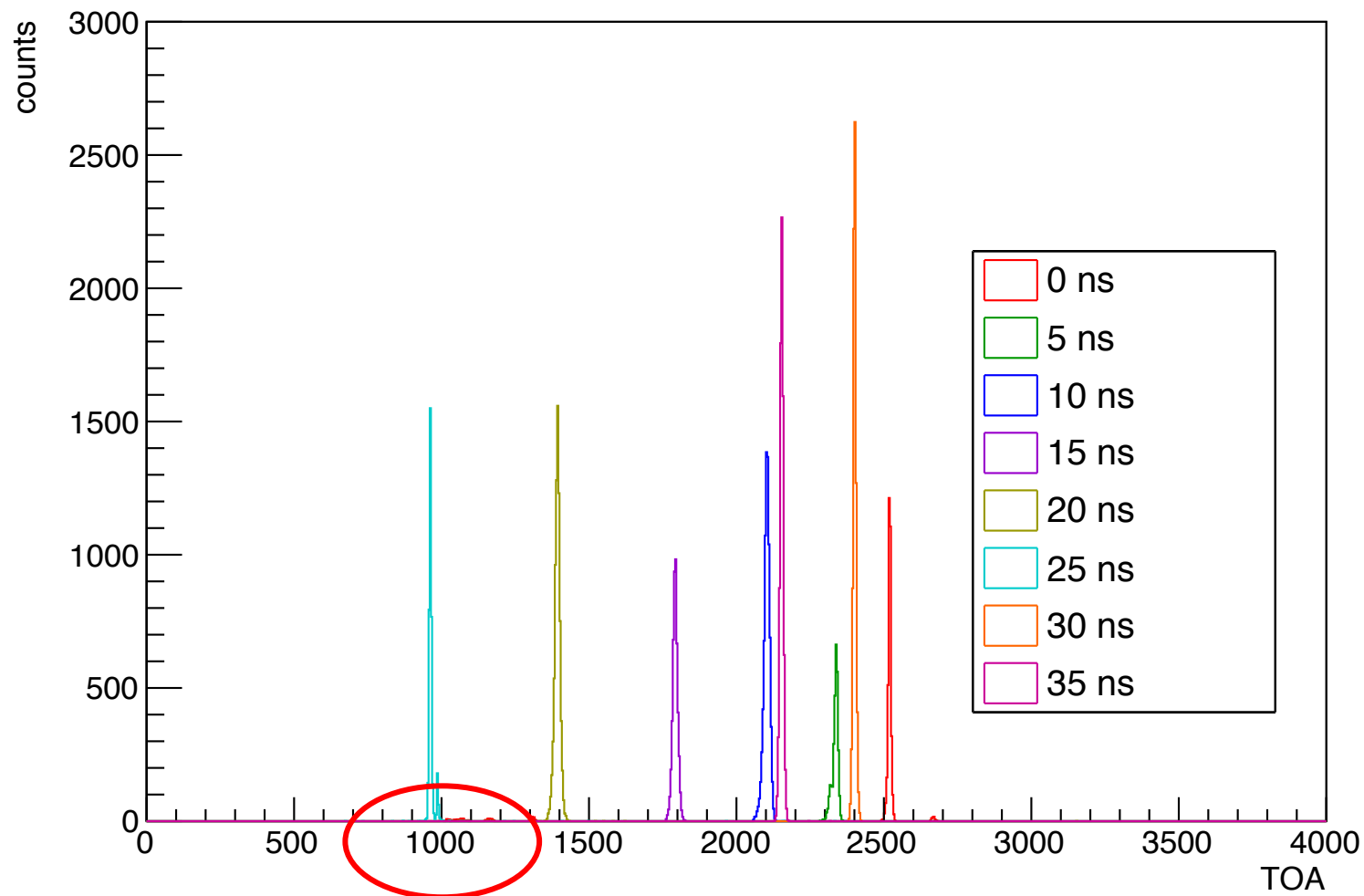
S8664-55

pkg-10

# TOA measurement

## 九州大学でのTOA測定

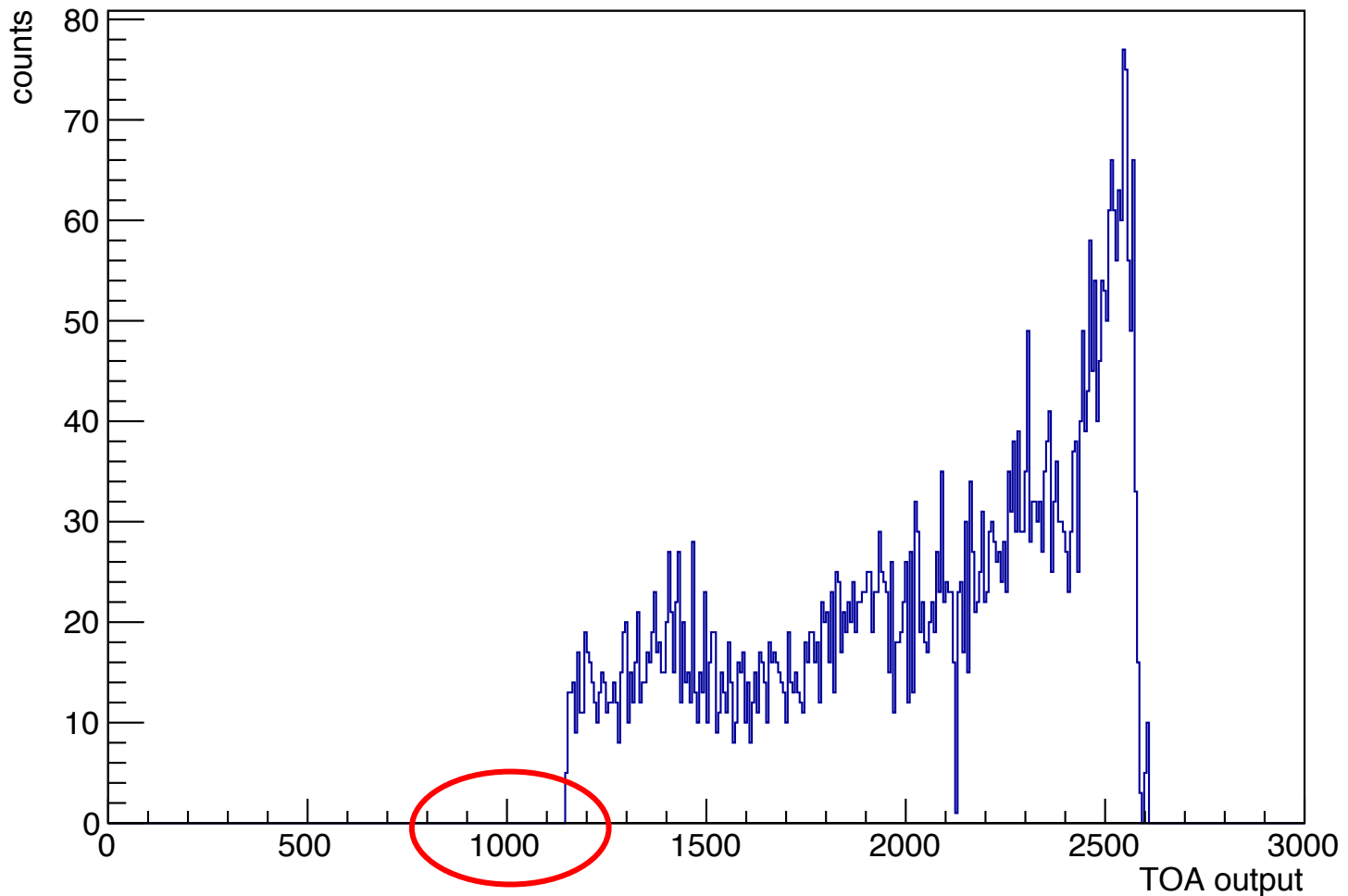
TOA positions



# TOA measurement

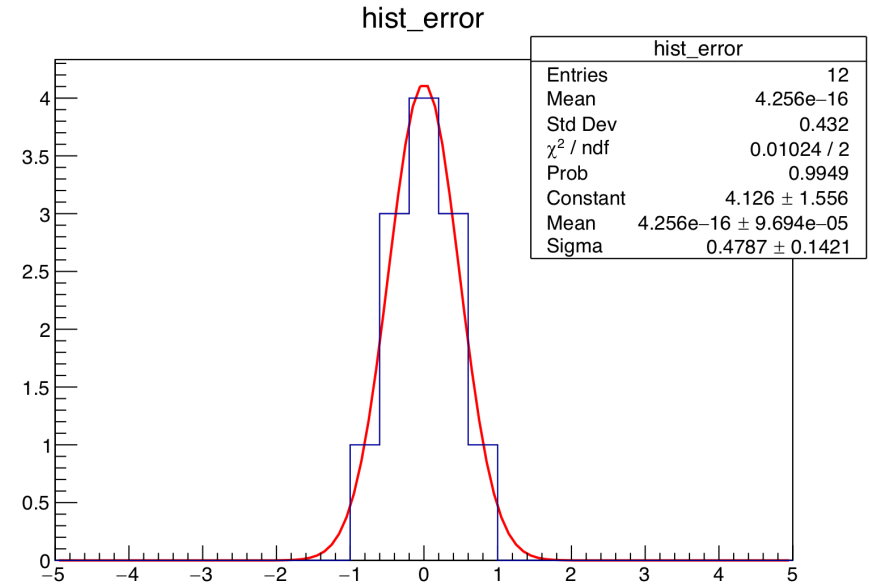
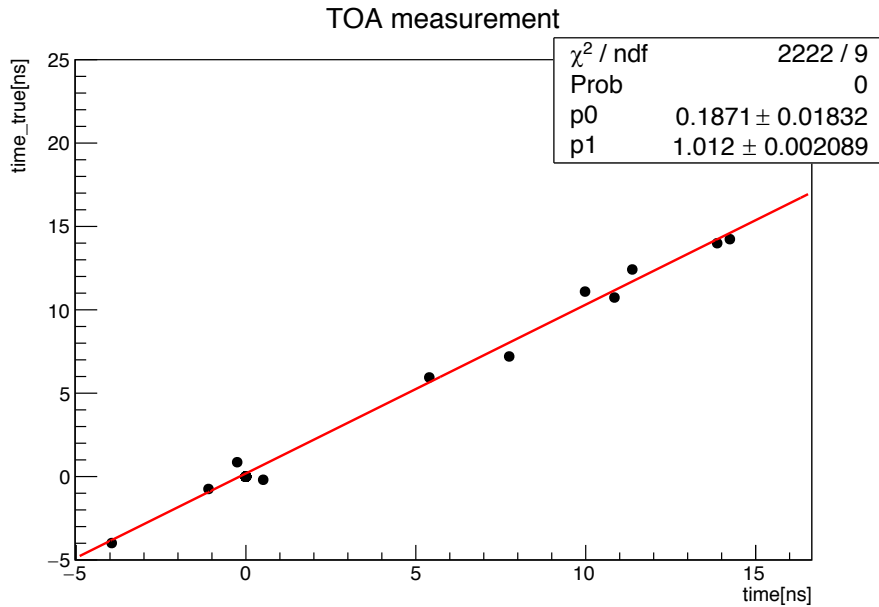
## ➤ ELPHでのTOA測定

### TOA output histogram channel33



# 陽電子ビームを用いた測定

## ➤ 時間分解能(S8664-55)



時間分解能 :  $338.5 \pm 100.5$  ps