

# Belle II 実験のための Aerogel-RICH 読み出し用ASICの開発

首都大学東京  
高垣英幸

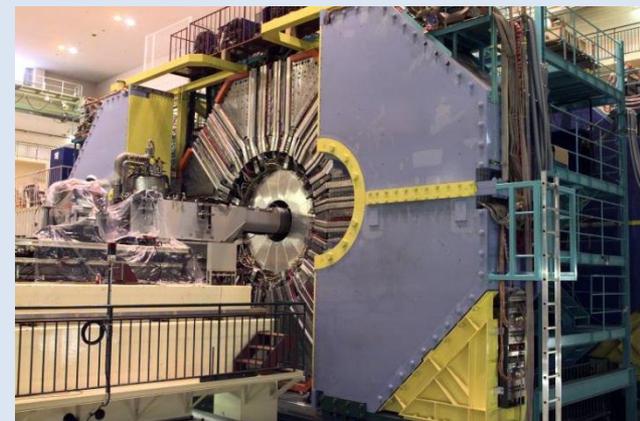
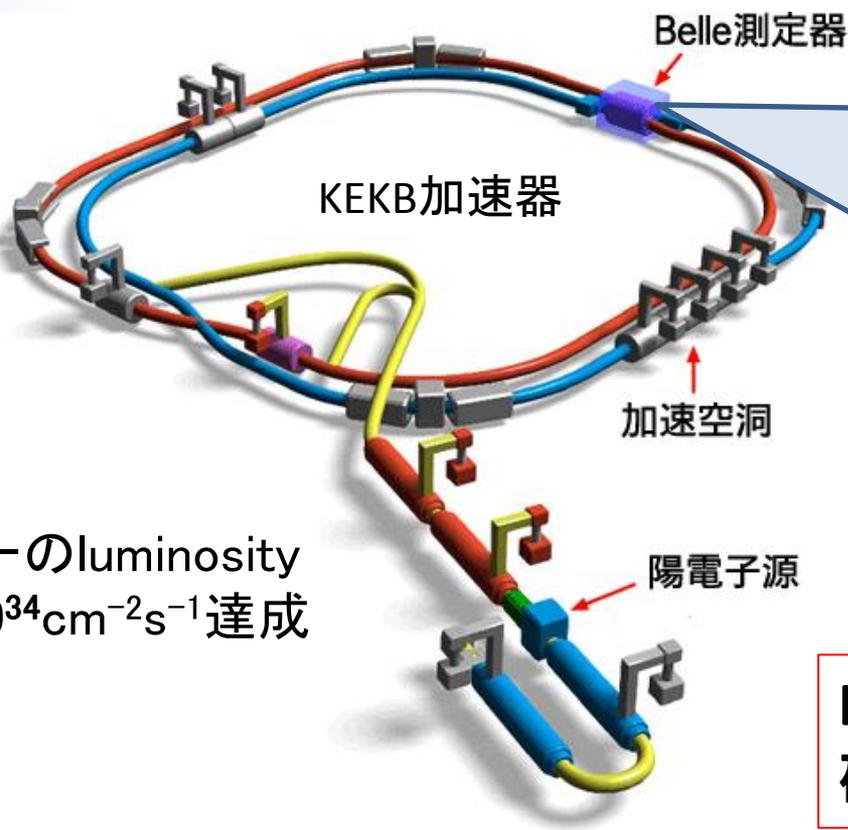
# 目次

- 研究背景
- Belle II実験におけるAerogel-RICH
- 読み出し用回路の開発状況
- Aerogel-RICHプロトタイプ試験
- まとめ

# 研究背景

# Belle実験

電子・陽電子非対称エネルギー衝突型加速器を使用したB中間子系での素粒子実験



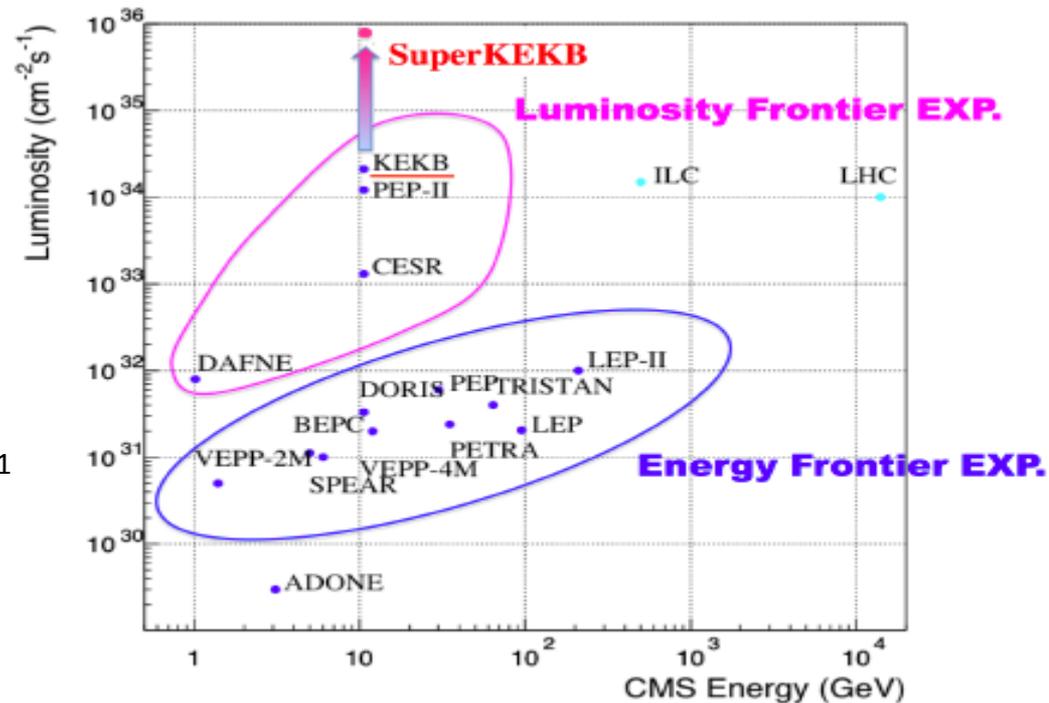
Belle検出器

世界一のluminosity  
 $2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 達成

B中間子系でのCP対称性の  
破れの観測に成功

# Belle II実験

標準模型を超えた新しい物理を発見するために  
B中間子系の稀な崩壊過程を観測する  
⇒ KEKB加速器、Belle検出器をアップグレード



luminosity :  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



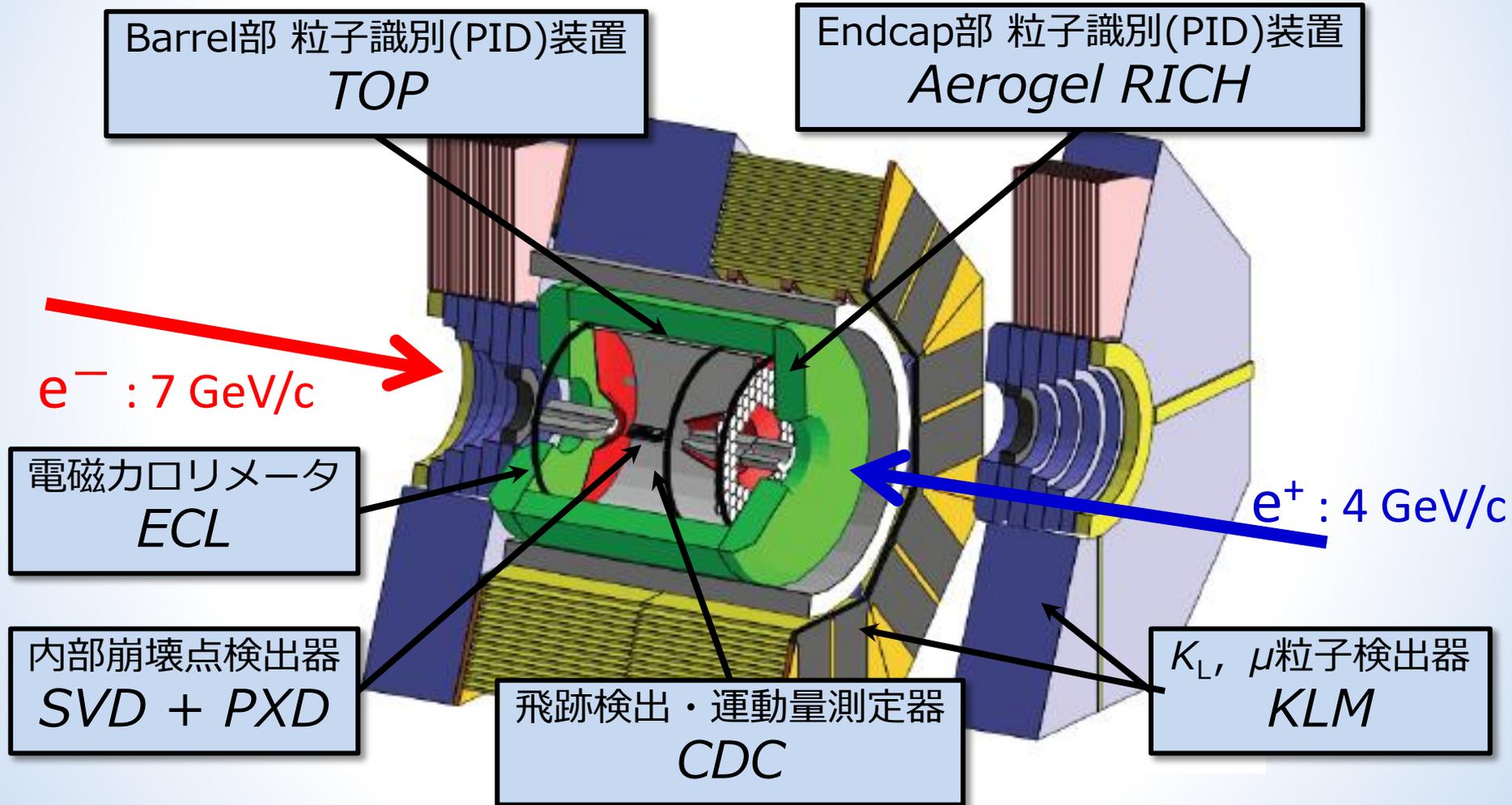
40倍

$8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

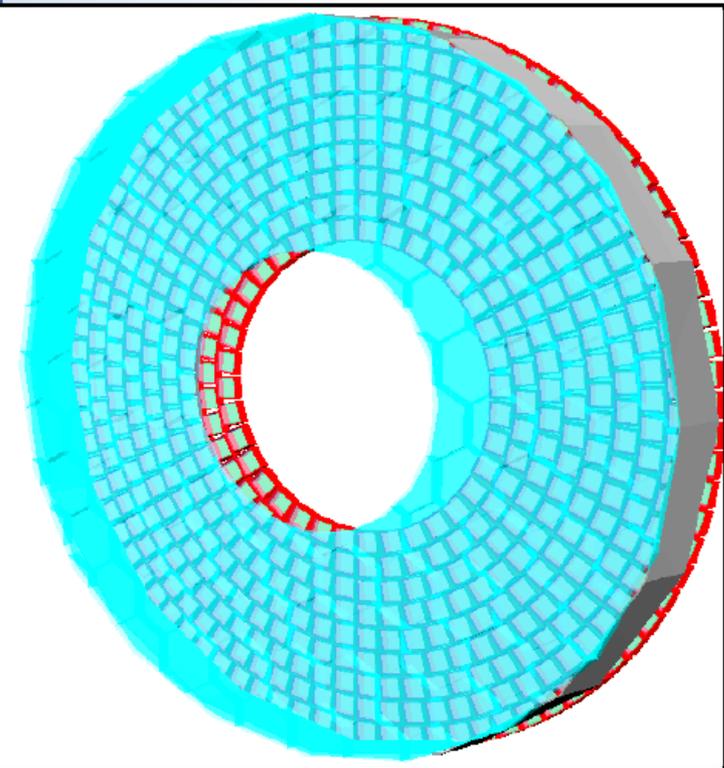
2014年実験開始予定

# Belle II実験におけるAerogel-RICH

# Belle II検出器



# K/ $\pi$ 識別装置 Aerogel RICH



Endcap部 粒子識別(PID)装置  
*Aerogel RICH*

識別対象粒子:  $K^\pm, \pi^\pm$   
運動量:  $0.5 < p < 4$  (GeV/c)  
4 $\sigma$  の精度で識別

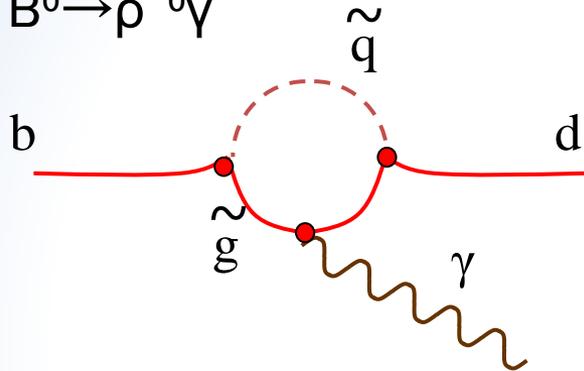
Aerogel-RICH完成イメージ  
SVD + PXD

飛跡検出・運動量測定器  
CDC

$K_L, \mu$ 粒子検出器  
KLM

# アップグレードの効果

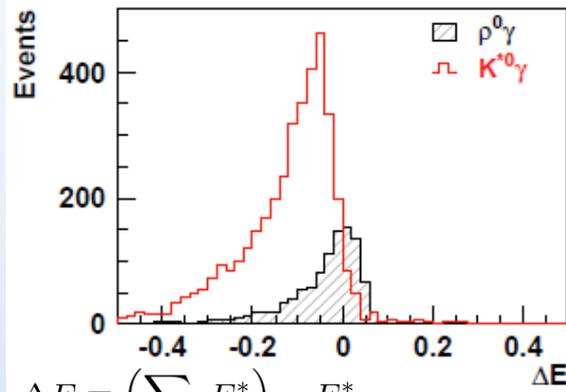
例)  $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$



[Y. Ushiroda et al. PRL 100, 021602 (2008)]

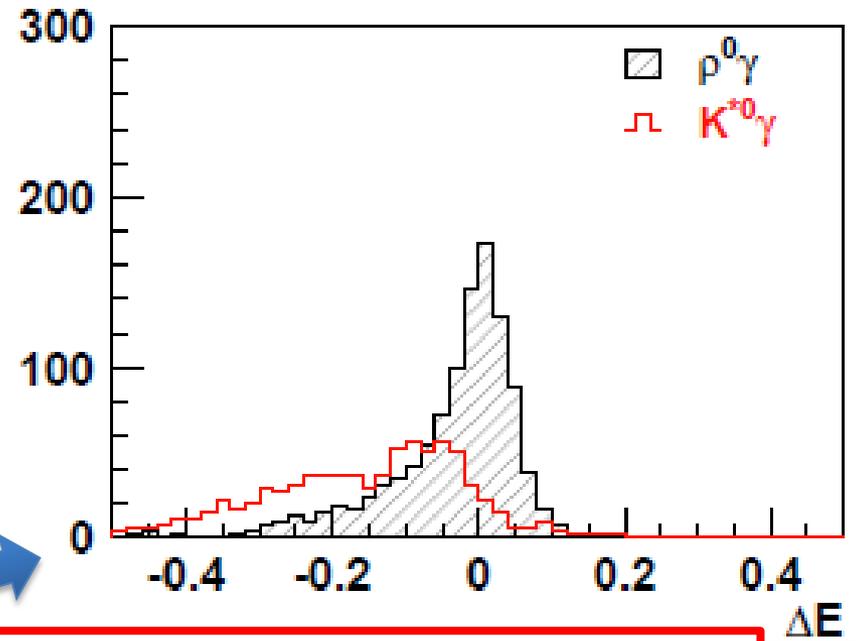
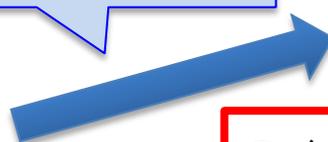
Signal mode:  $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$   
 Background mode:  $K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$

$B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$  シミュレーション (7.5  $ab^{-1}$ 相当)



$$\Delta E \equiv \left( \sum_i E_i^* \right) - E_{\text{beam}}^*$$

Aerogel RICH  
+  
TOP

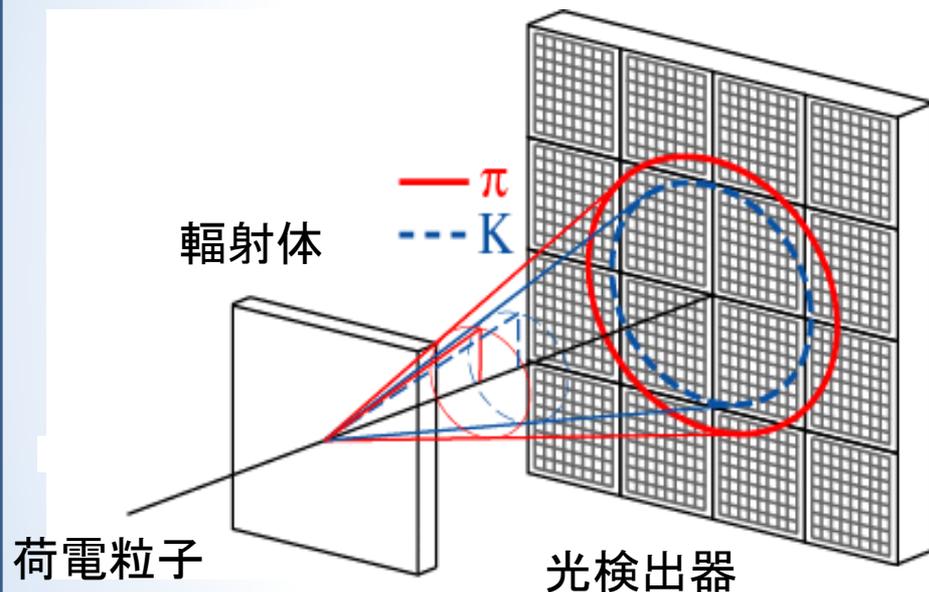


S/N比を飛躍的に向上できる

# Aerogel RICH

# Aerogel-RICHの原理

Aerogel Ring Image Cherenkov counter



Cherenkov 放射角と粒子質量の関係

$$m = p \sqrt{n^2 \cos^2 \theta_c - 1}$$

$m$ : 通過粒子の質量、 $p$ : 運動量  
 $n$ : 輻射体の屈折率  $\theta_c$ : 放射角

$p$  → CDCで測定

$n$  → Aerogelの屈折率(既知)

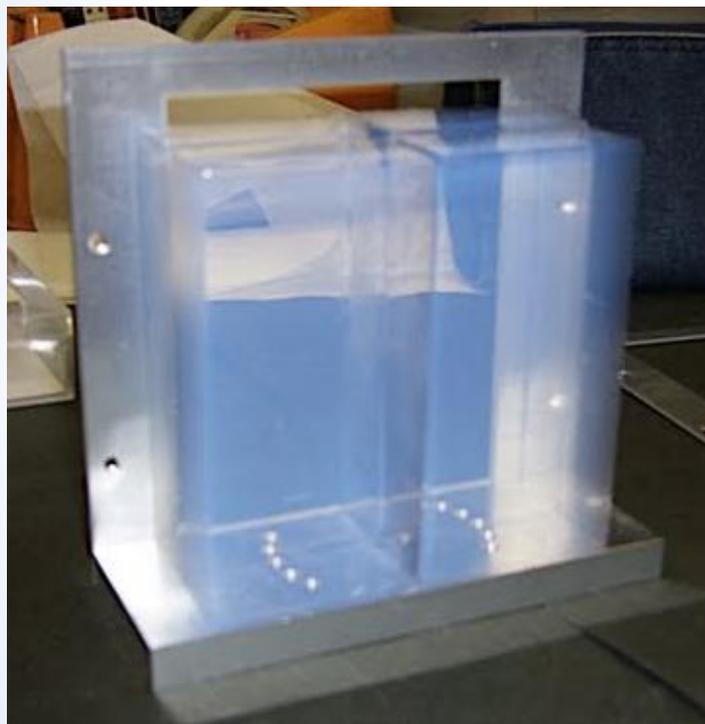
$\theta_c$  → リングイメージにより  
Aerogel-RICHで測定

Aerogel-RICH概念図

放射角 $\theta_c$ を測定し、K/ $\pi$  識別を行う

# 輻射体 シリカエアロゲル

Aerogel-RICHには1.05付近の屈折率が適切



シリカエアロゲル

	物質	屈折率
固体	ガラス	1.47
	シリカエアロゲル	1.006~ 1.07
液体	水	1.33
気体	空気	1.0003

屈折率1.05のとき (@ $p=4$  GeV/c)

$\pi^\pm$  : 140 MeV/c<sup>2</sup>  $\theta_c$  : 308 mrad

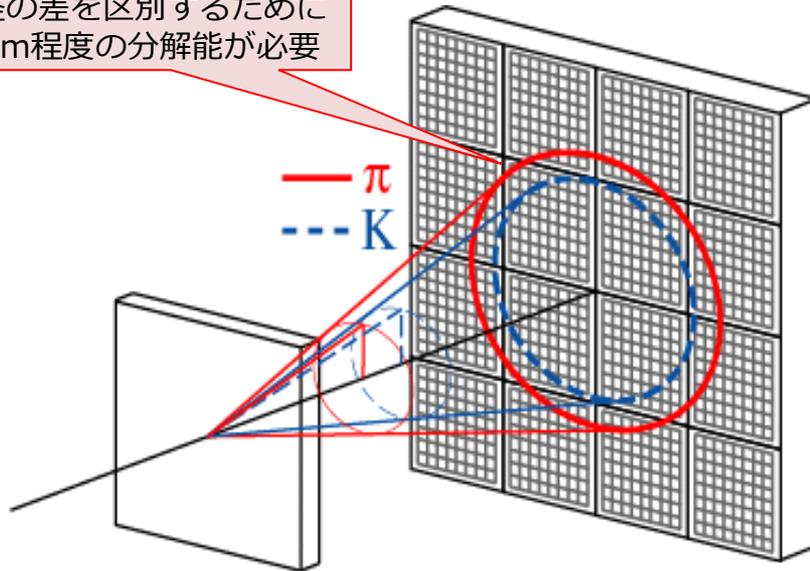
$K^\pm$  : 494 MeV/c<sup>2</sup>  $\theta_c$  : 285 mrad

Kと $\pi$ の放射角の差 : 23mrad

# 光検出器 HAPD

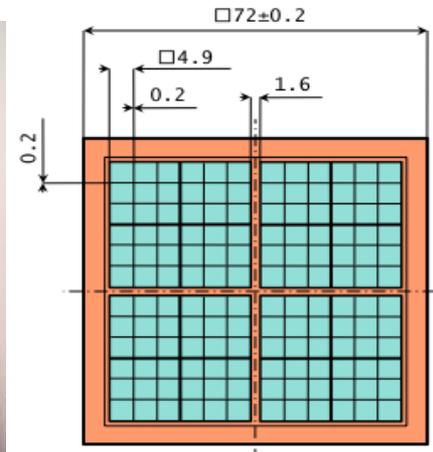
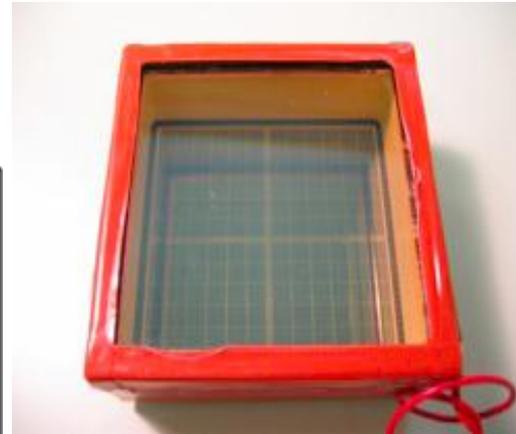
## Hybrid Avalanche Photo Detector

半径の差を区別するために  
5mm程度の分解能が必要



### 要求性能

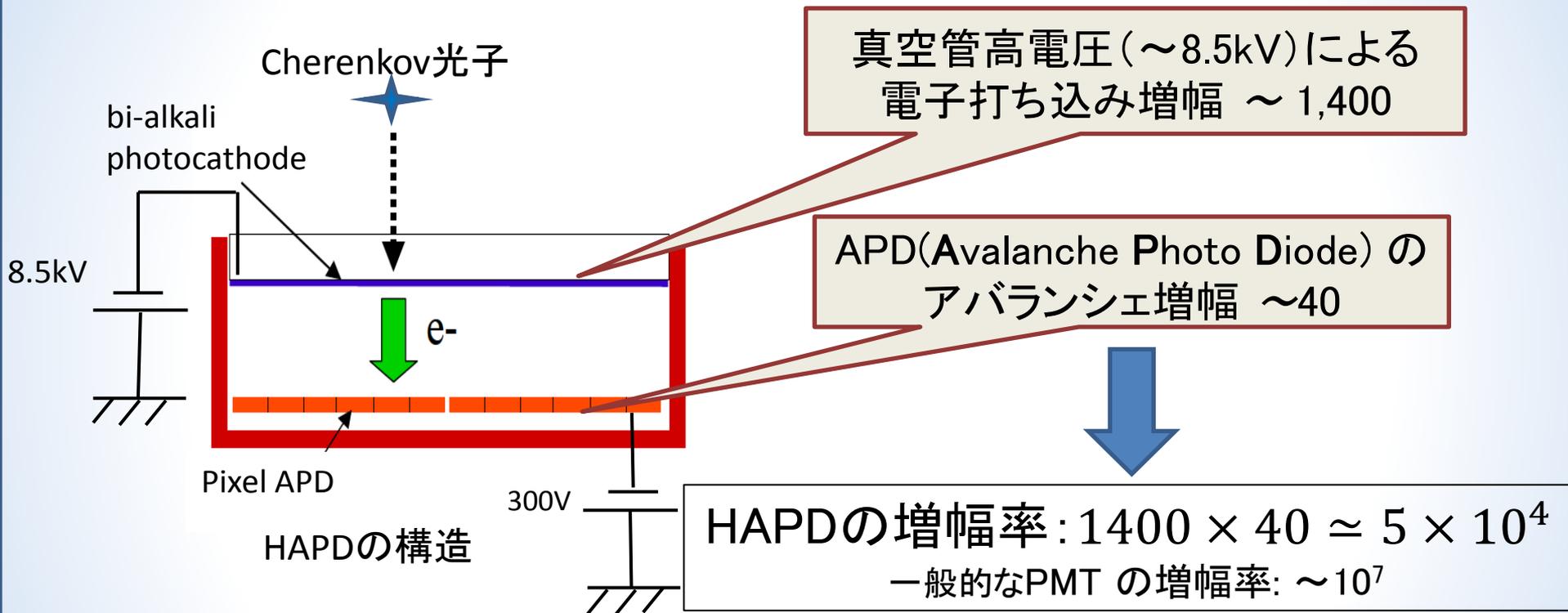
1. 1光子検出可能
2. 位置分解能(5mm程度)
3. 1.5 Tの磁場中で動作可能



HAPDの断面図

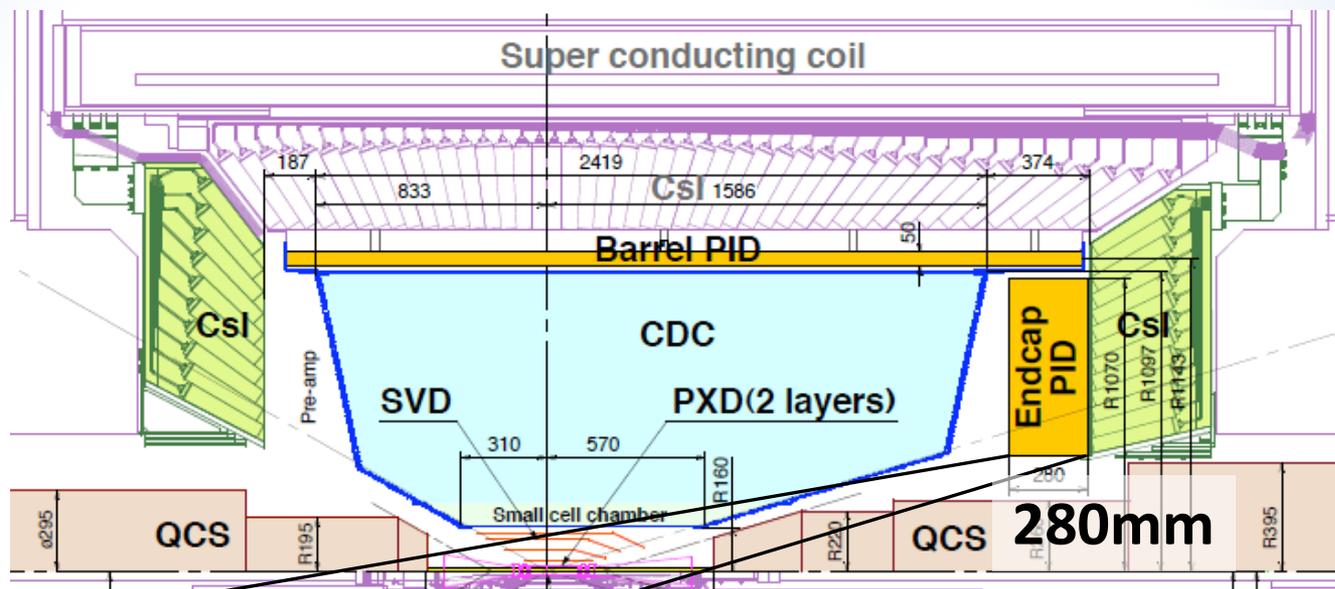
チャンネル数	12 × 12 = 144ch
真空管サイズ	73 × 73 mm <sup>2</sup>
有効面積	~65%
APDピクセルサイズ	4.9 × 4.9 mm <sup>2</sup>
APD 静電容量	80 pF
ピークQE	30%
S/N	~ 15

# HAPDの動作原理

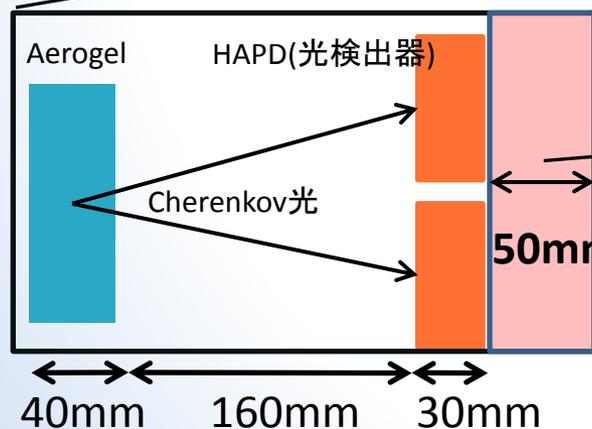


⇒ 高ゲイン、低ノイズの信号読み出し回路が必要

# Aerogel-RICHの空間的制約



Belle II検出器の断面図



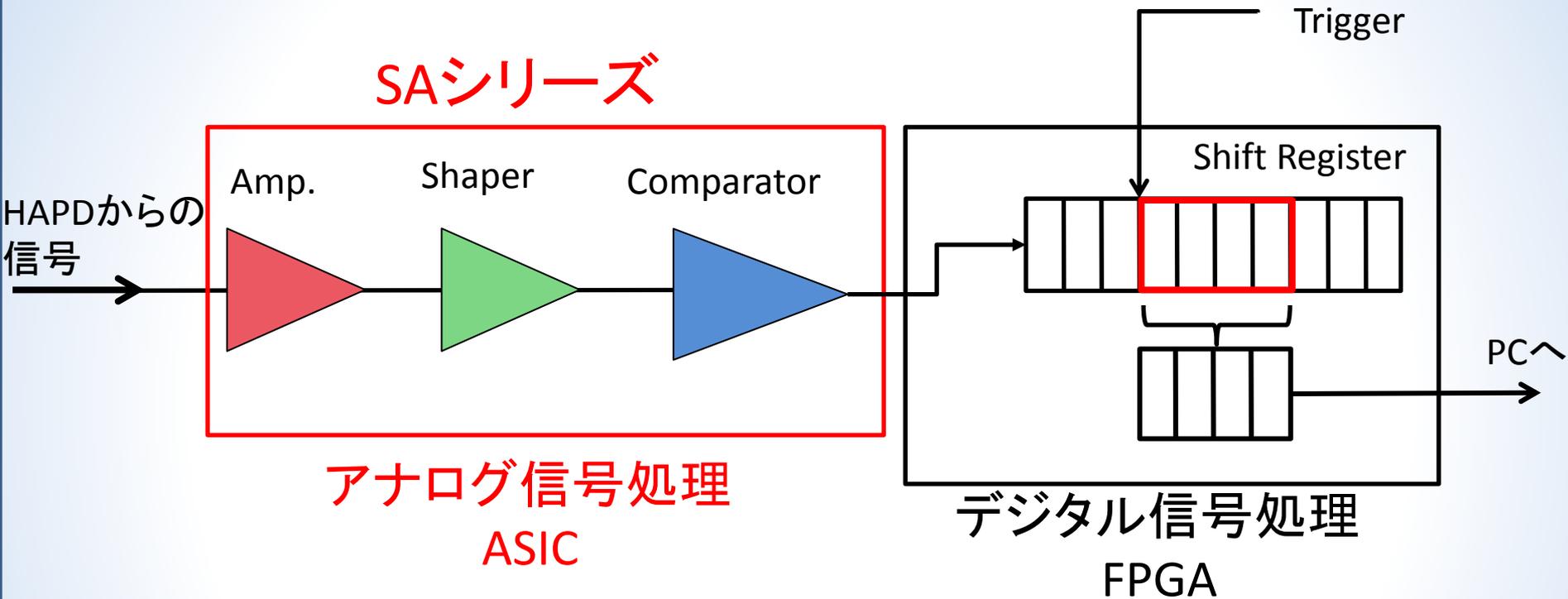
読み出し回路領域

50mm以下

コンパクトな信号読み出し回路を開発

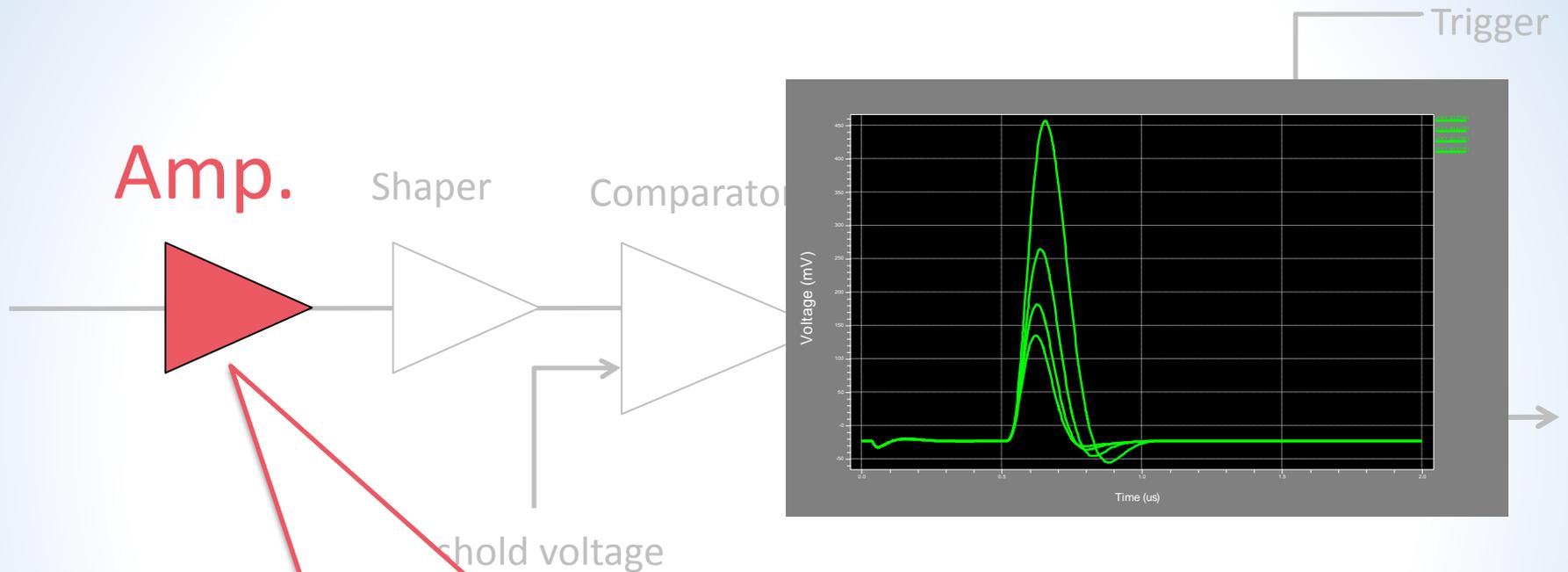
# 読み出し用回路の開発状況

# 読み出し回路の構成



現在開発中のSAシリーズをアナログ回路シミュレータ T-Spice  
を用いて動作検証を行なった

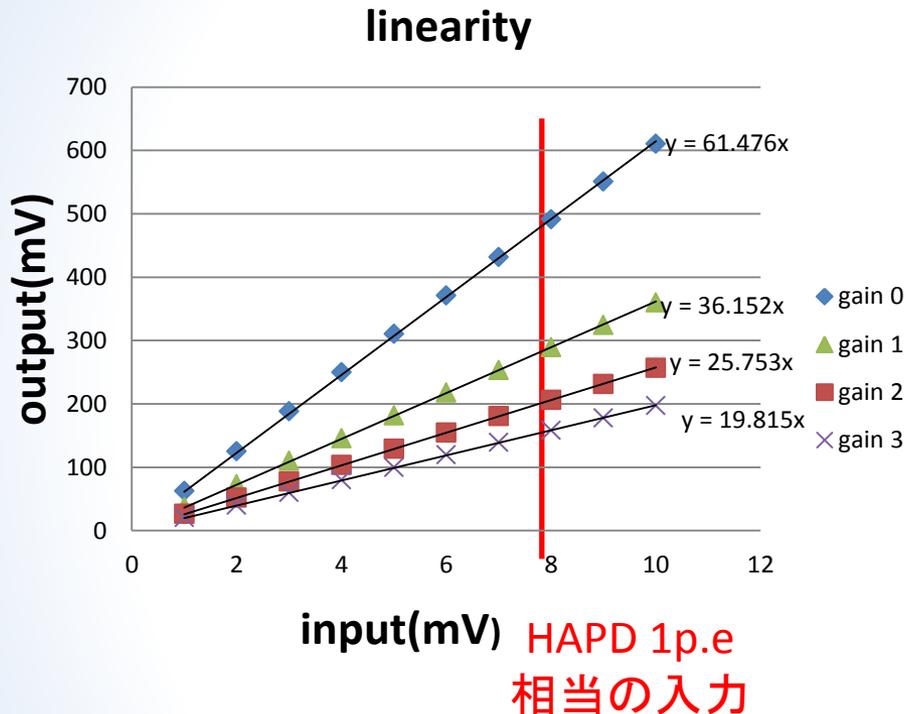
# 信号増幅器



信号増幅器 (charge sensitive amplifier)  
ゲインは4段階に調節可能

# 増幅性能

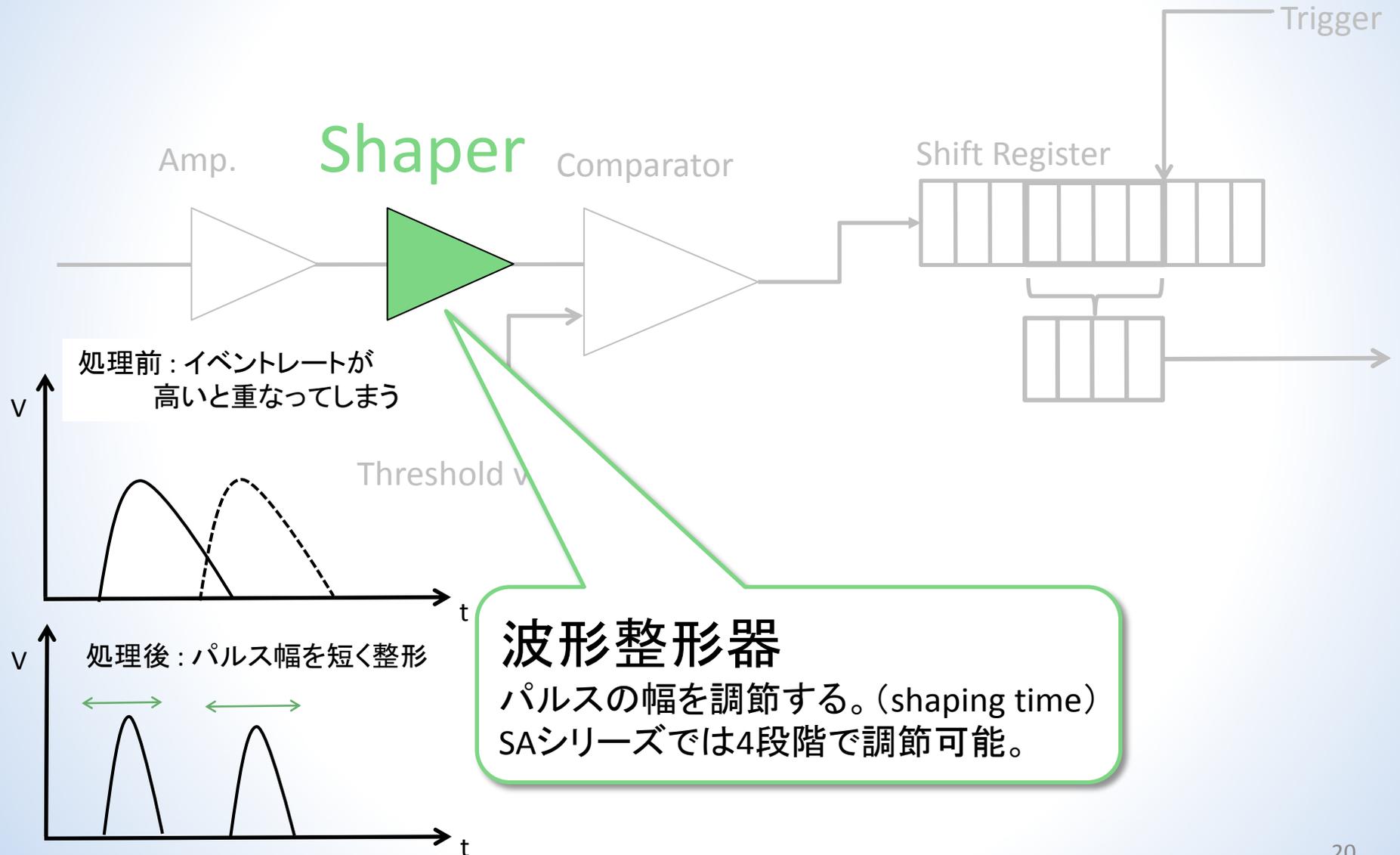
HAPD 1 p.e相当入力時の出力信号



gain 0	462 mV
gain 1	260mV
gain 2	177mV
gain 3	129mV

1p.e相当信号で線形性が保たれていることを確認できた

# 波形整形器



## 波形整形器

パルスの幅を調節する。(shaping time)  
SAシリーズでは4段階で調節可能。

# リーク電流とノイズの関係

HAPDの中性子損傷によりリーク電流が増加し、ショットノイズが増加

$$(\sigma_{\text{noise}})^2 = \frac{(AC_{\text{det}})^2}{\tau} + \left( \sqrt{\frac{1}{e} I_{\text{leak}} F G \tau} \right)^2$$

増幅器からのノイズ

ショットノイズ

$A$  : 増幅器定数

$C_{\text{det}}$  : 検出器容量

$\tau$  : **Shaping time**

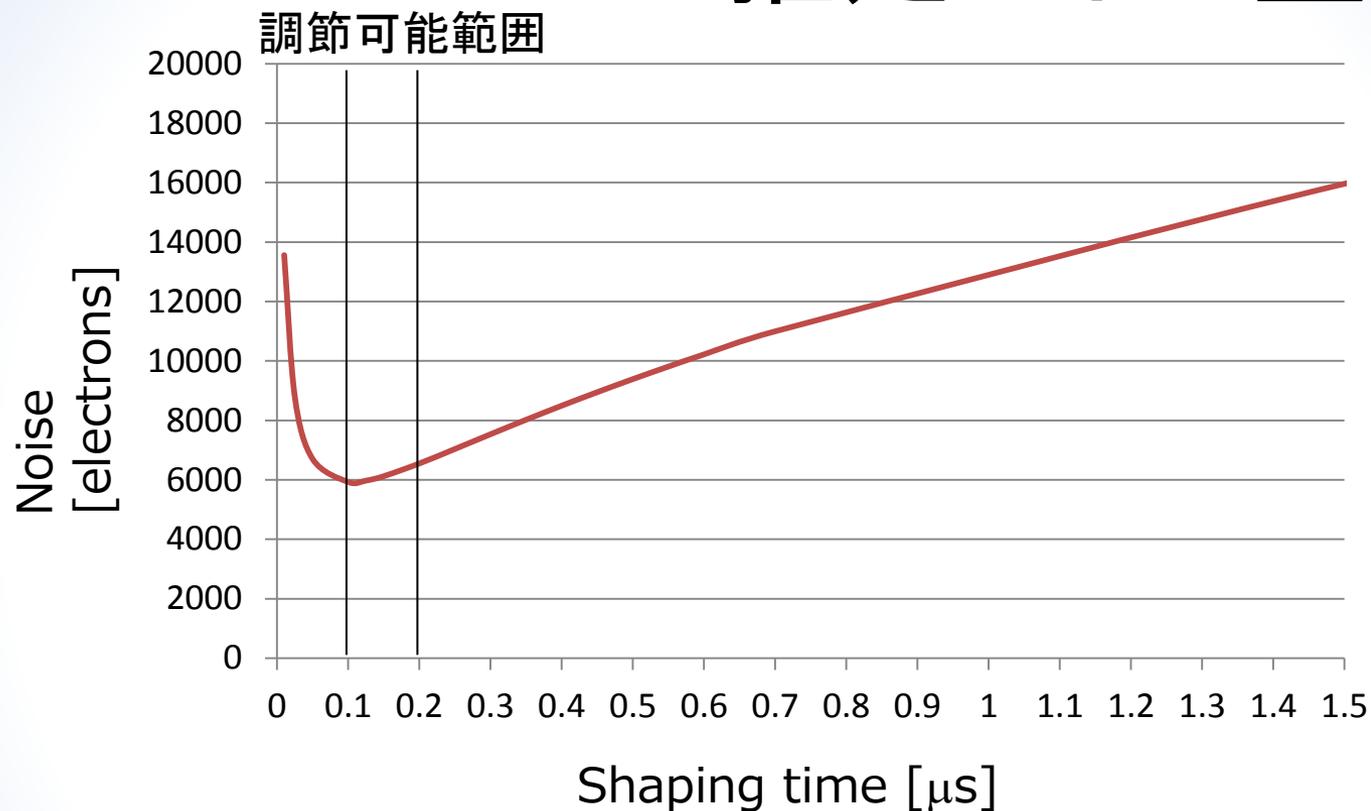
$e$  : 素電荷

$I_{\text{leak}}$  : リーク電流

$F$  : ノイズ因子( $\sim 2$ )

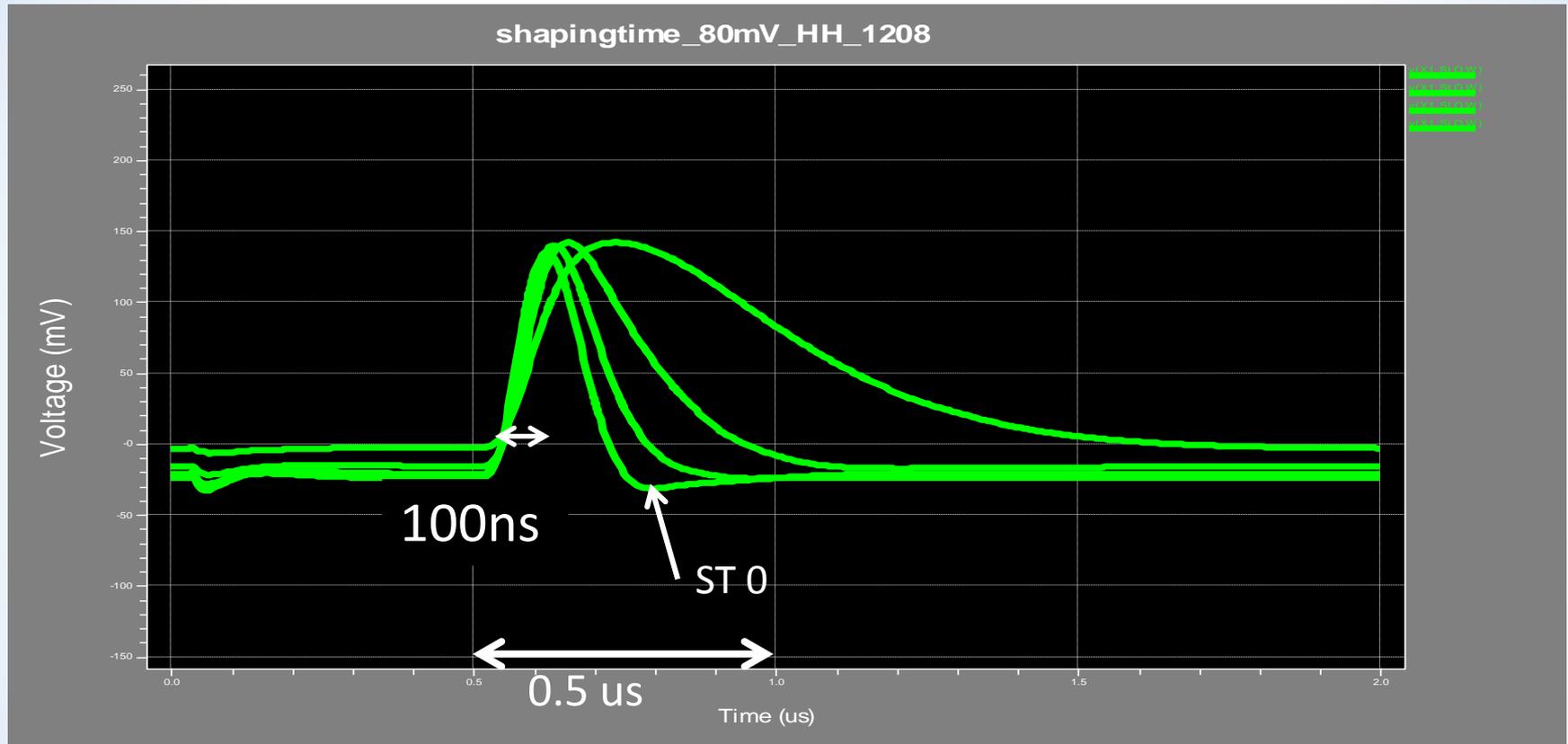
$G$  : Avalanche増幅率

# HAPDからの推定ノイズ量



中性子損傷によりHAPDのリーク電流が増えた時、読み出し用ASICのShaping timeの最適値は**100 ns**付近

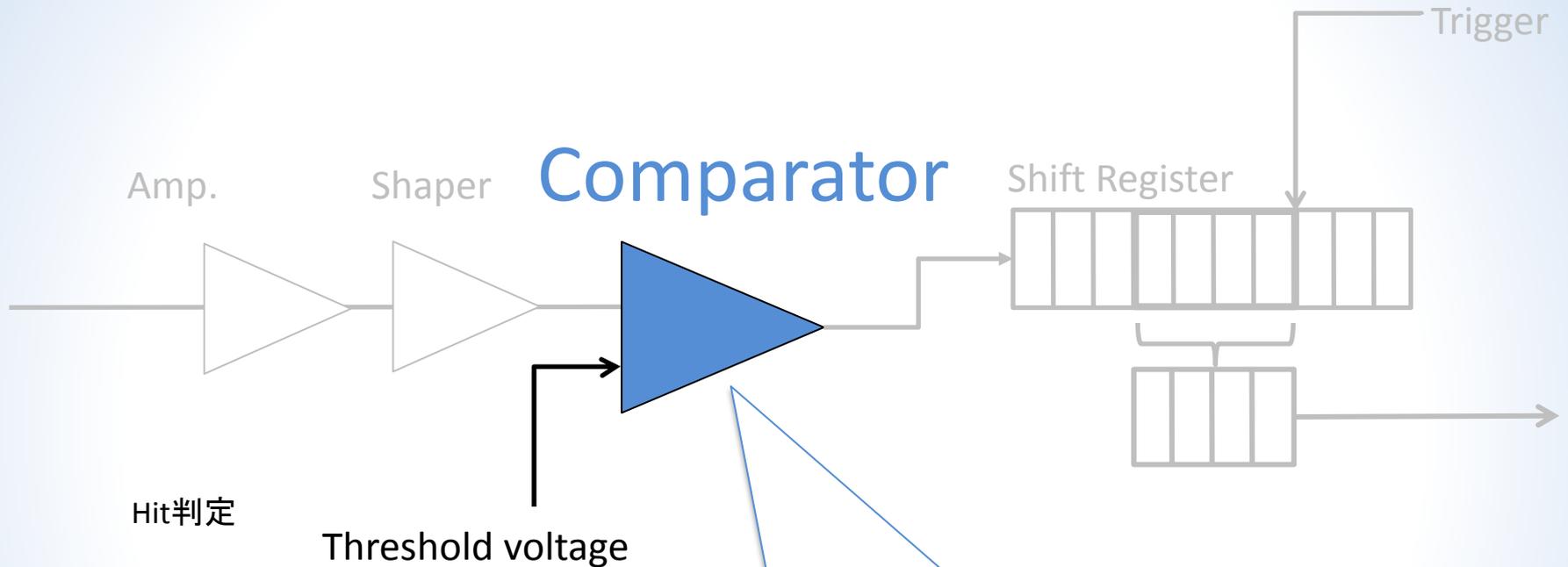
# shaping time調節機能



ST 0 : 100nsec ST 1: 110nsec ST 2: 130nsec ST 3: 200nsec

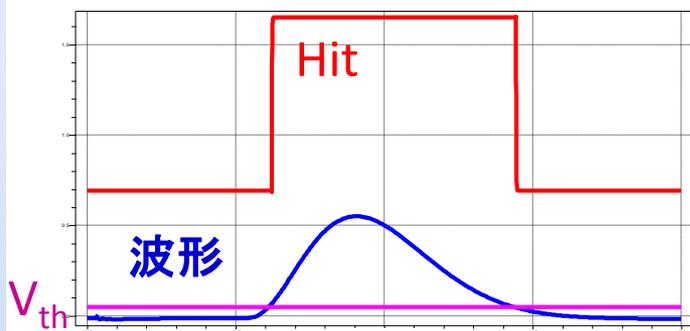
shaping timeを100ns付近に調節可能であることを確認

# 比較器



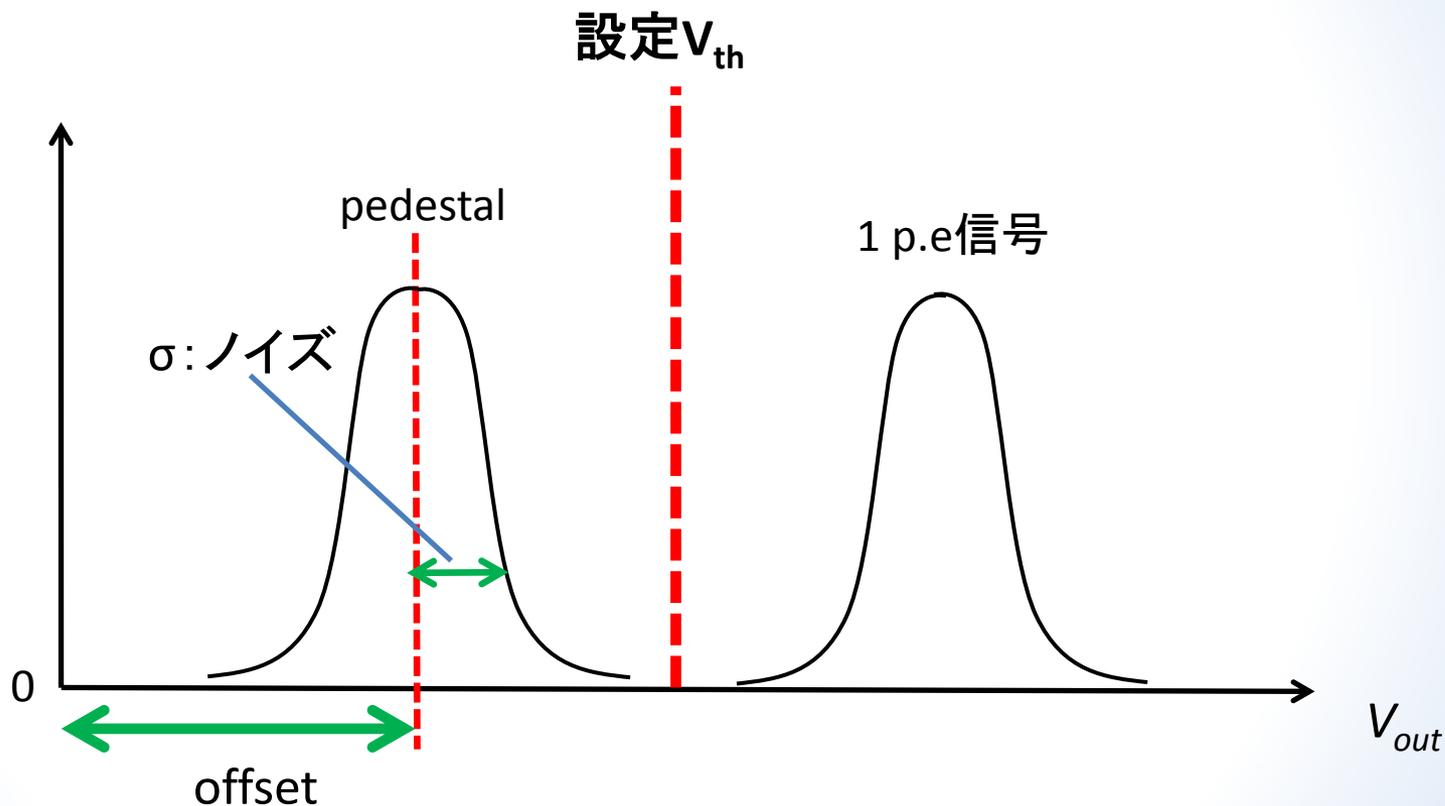
## 比較器 (comparator)

閾値電圧(Threshold Voltage:  $V_{th}$ )と入力信号を比較して  $V_{th}$  以上ならデジタルパルスを出力をする。SAシリーズでは  $V_{th}$  を全チャンネルで共通にする。



# offset調節方法

Shaperを通した波形の波高分布

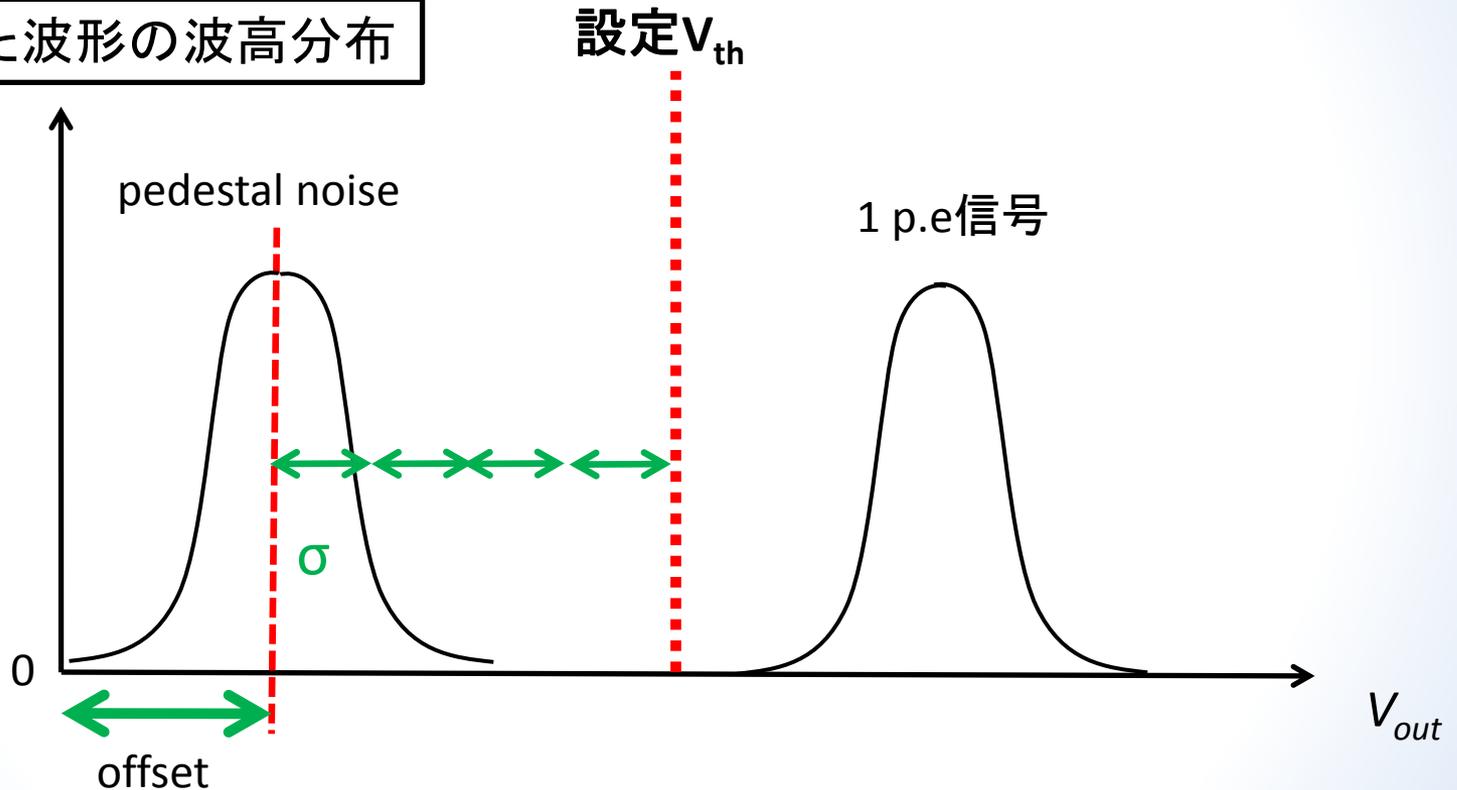


$V_{th}$ は全チャンネルで共通

# offset調節

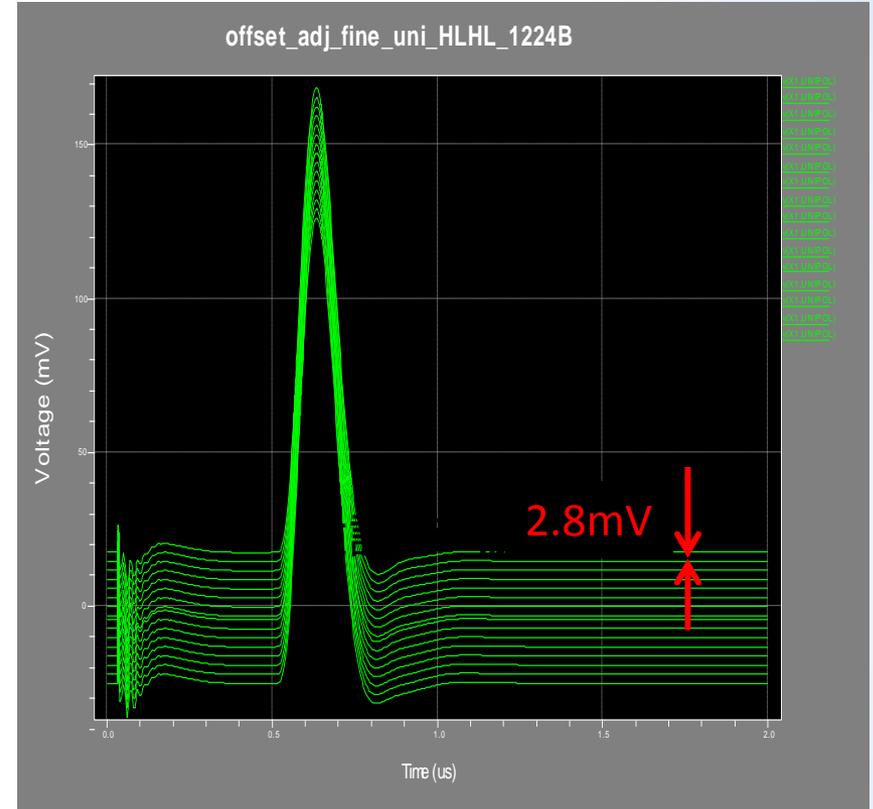
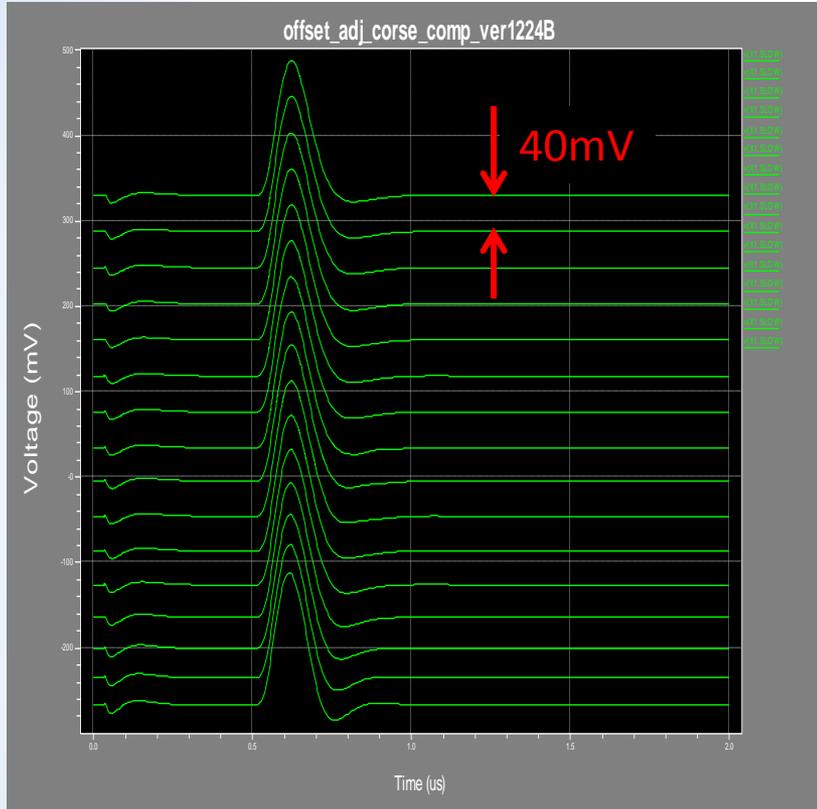
ノイズの $4\sigma$ が $V_{th}$ になるように各チャンネルのoffsetを調節する

Shaperを通した波形の波高分布



⇒細かく広いレンジでoffset調節ができる機能が要求される

# offset調節機能

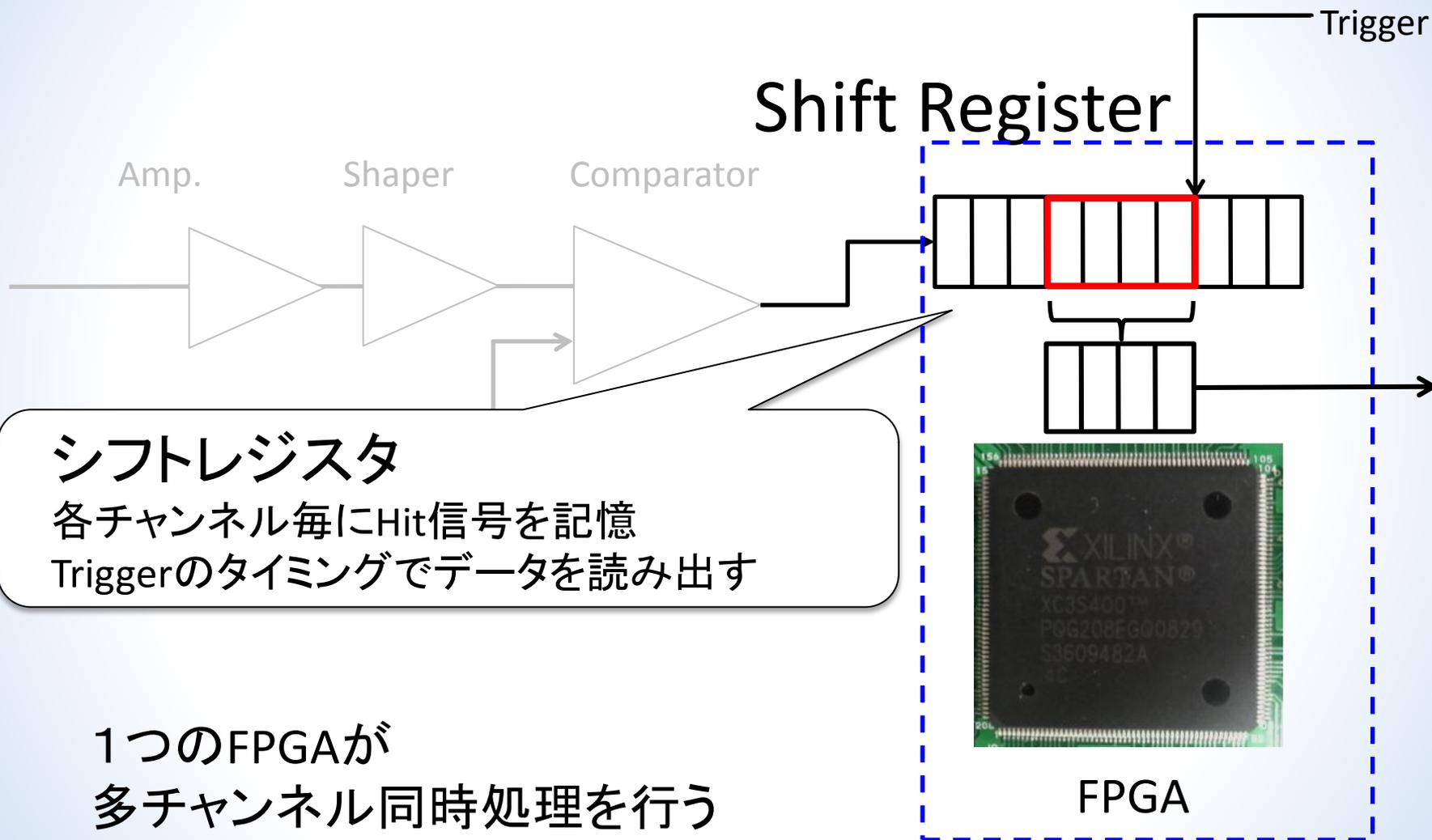


offset粗調節 波形

offset微調節 波形

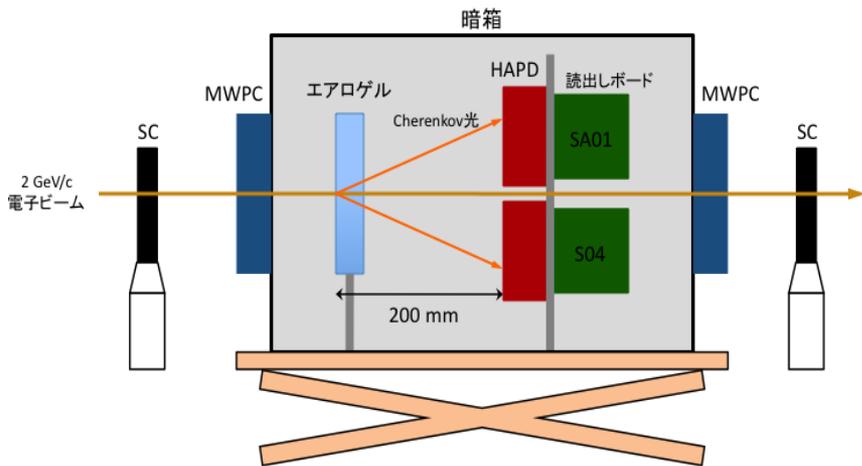
粗調節 : 40mV、微調節 : 2.8mV  
調節可能範囲 : 600mV

# ヒット信号処理



# プロトタイプ Aerogel-RICHの ビームテスト

# プロトタイプ Aerogel-RICH



セットアップ

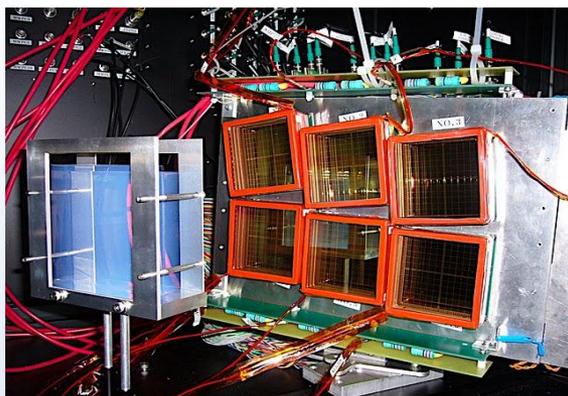
2009.11 KEKB 富士テストビームライン

で実施

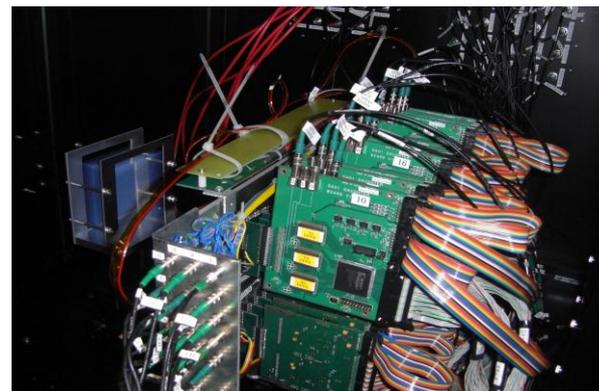
2.0 GeV/cの電子ビーム

HAPD 6台を使用

☆信号読み出しに旧版ASICを使用



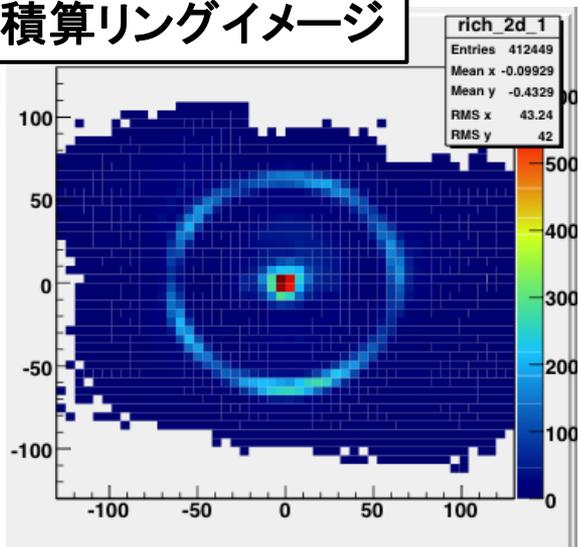
エアロゲルとHAPDの配置



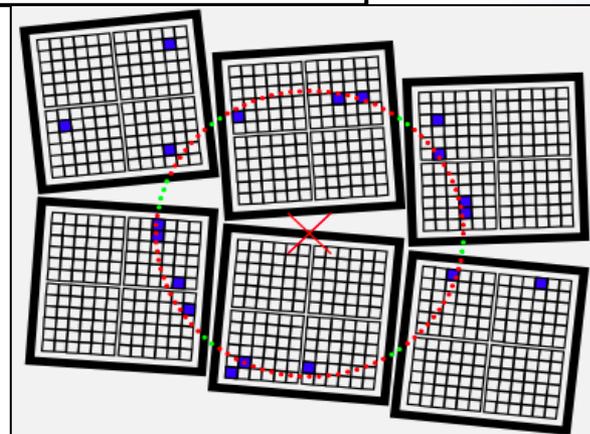
読み出しシステム

# プロトタイプ ビームテスト

全イベント積算リングイメージ

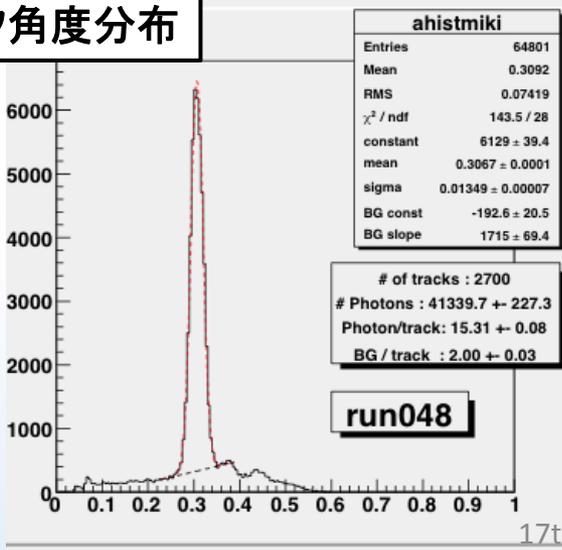


イベントディスプレイ例



※赤線はビームトラックから算出したリング生成予想図

チェレンコフ角度分布



解析結果

検出光子数 : 15.3/track  
 角度分解能 : 3.4. mrad/track  
 $K/\pi$ 放射角度差 : 23 mrad (4GeV/c)  
 $\Rightarrow K/\pi$ 識別能力 : **6.7 $\sigma$**

**目標性能4 $\sigma$  以上の  
 $K/\pi$ 識別を達成**

# まとめ

- HAPDからの信号読み出し用ASICを開発している  
⇒ Belle IIでの使用を想定した設計、開発は順調
- プロトタイプ Aerogel RICHを用いたビームテストで  
リングを観測することに成功  
⇒  $6.7\sigma$  K/ $\pi$ 識別相当

# 今後

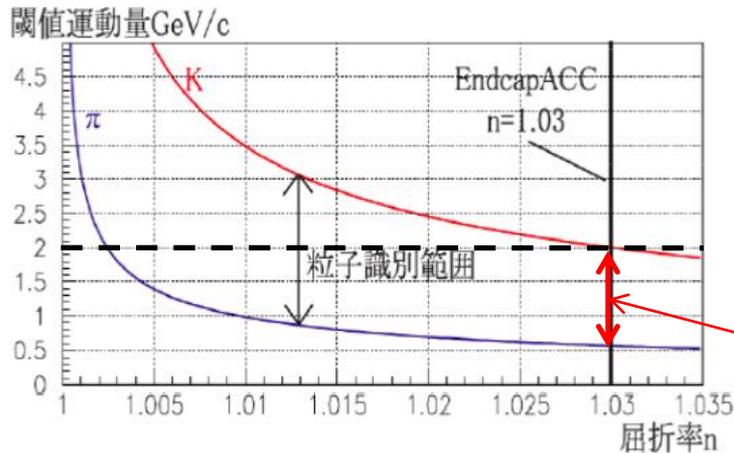
- ~今夏: 開発中のASIC試作、動作検証  
⇒ 量産開始

**END**

# Back Up

# Belleでの粒子識別

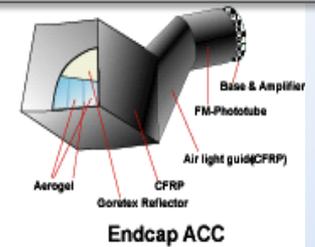
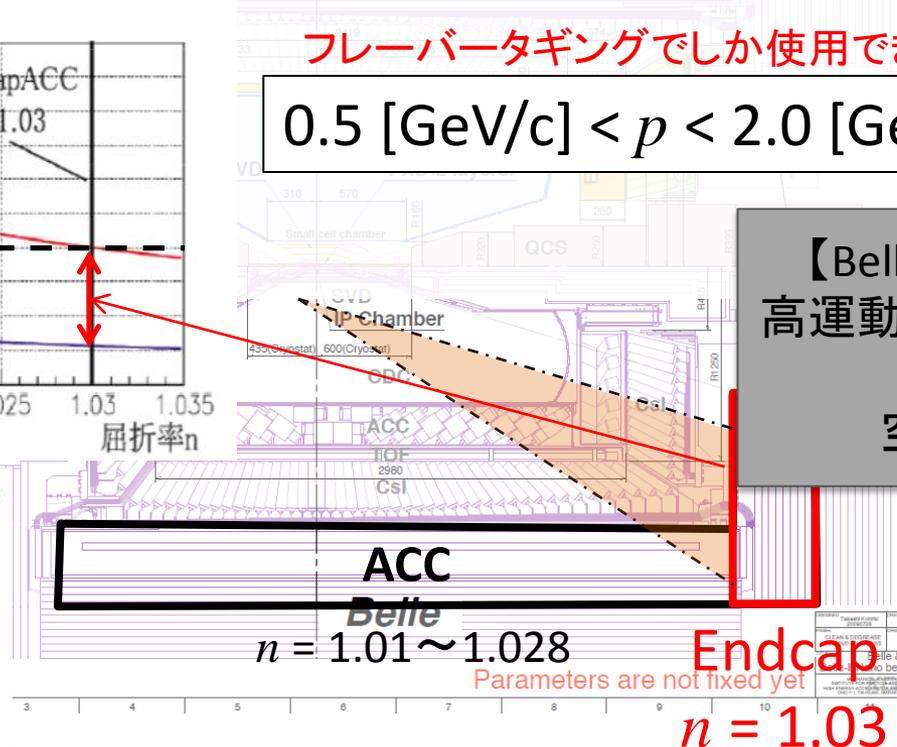
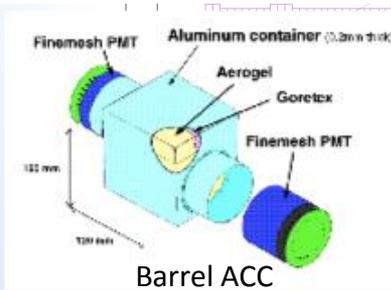
ACC : (Threshold-type) Aerogel Cherenkov Counter  
 チェレンコフ光の有無で荷電K/ $\pi$ 中間子を識別



フレーバータギングでしか使用できない

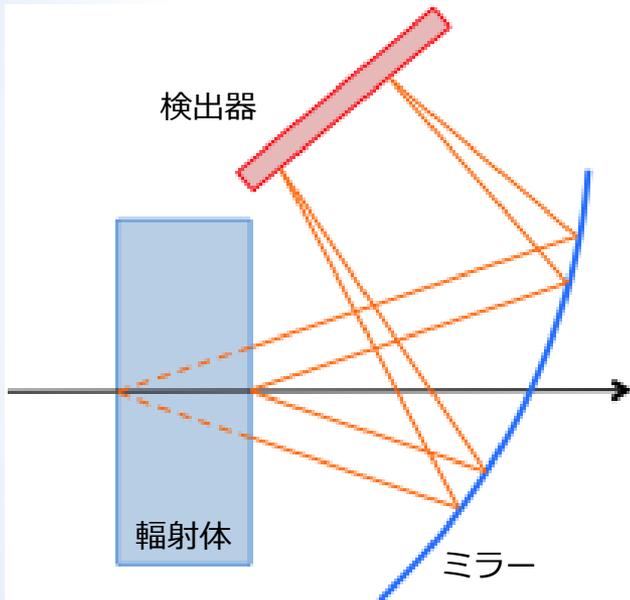
$$0.5 \text{ [GeV/c]} < p < 2.0 \text{ [GeV/c]}$$

【Belle-II への課題】  
 高運動量領域への拡張  
 $\updownarrow$   
 空間的制限



# RICHの種類

## ミラー焦点型RICH

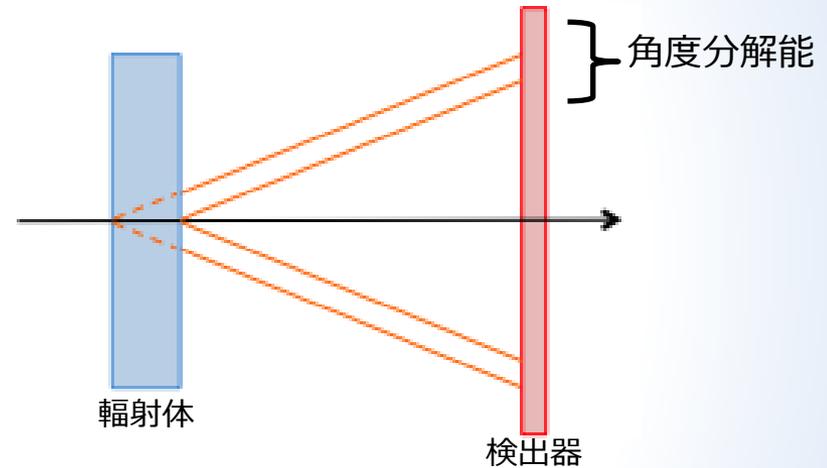


角度分解能の悪化を防ぎつつ輻射体を厚くできるため、多くの光量が得られる

構造が大きくなってしまふ

## Aerogel RICH

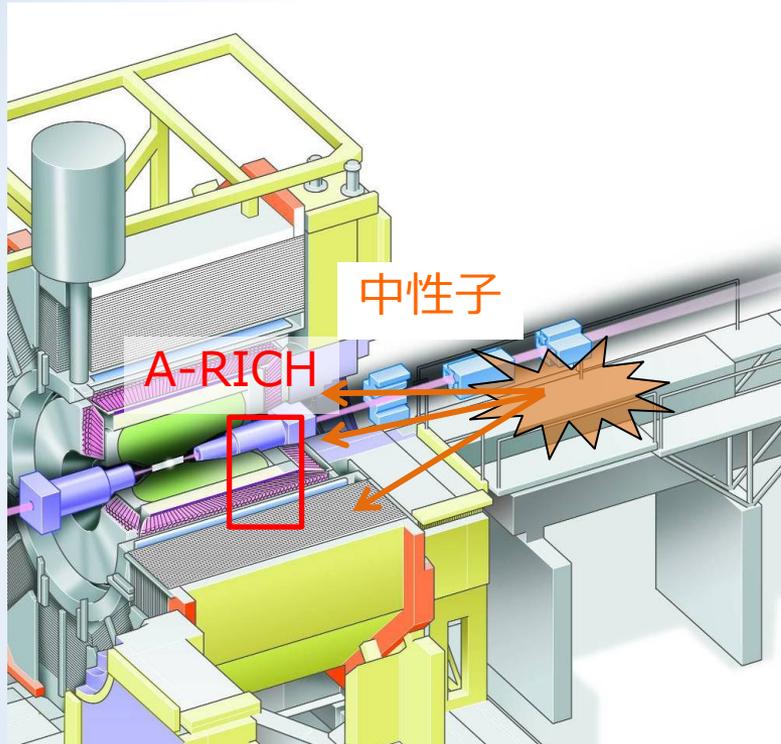
## 近接焦点型RICH



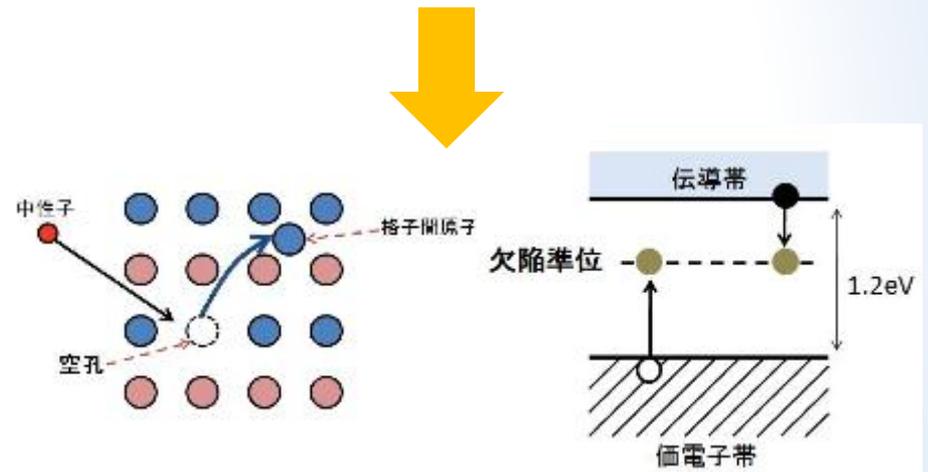
コンパクトな設計が可能  
角度分解能は落ちる

必要な角度分解能と光量によって  
輻射体の厚さを決める

# HAPDの中性子耐性



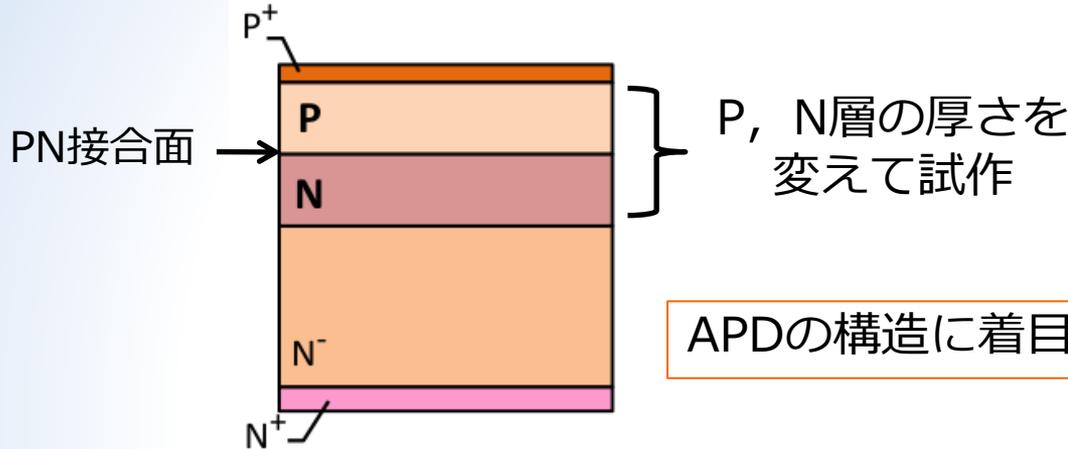
Bhabha散乱によって $\gamma$ 線が生じ、  
それらが検出器外の構造体に当たり、  
中性子などがバックグラウンド放射線となる



Belle IIで予想される年間中性子量  
 $1 \times 10^{11}$  neutrons/cm<sup>2</sup>

中性子損傷によってHAPDに流れる  
リーク電流が増加する  
⇒ S/N比 低下を招く

# HAPD 中性子照射結果



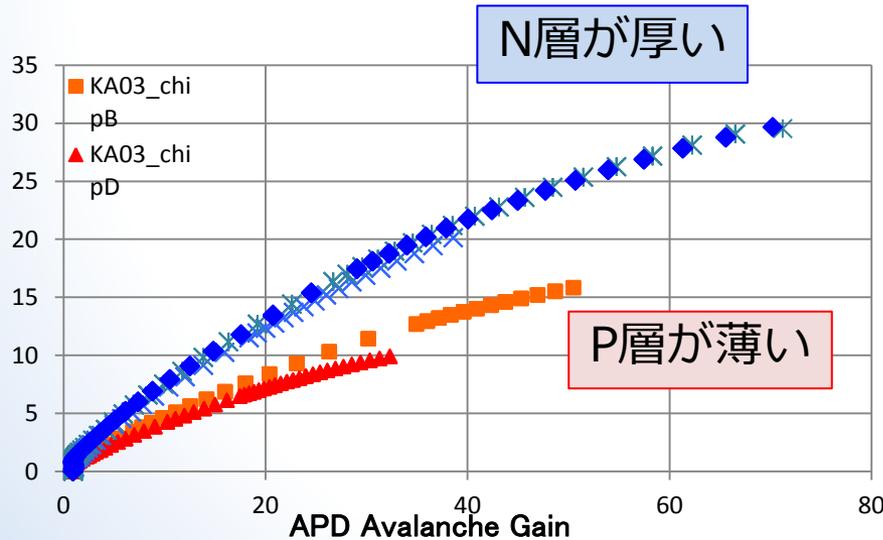
(Belle II実験 10年分に相当)

照射量 :  $10 \times 10^{11}$  n/cm<sup>2</sup>

※N厚は従来品と同程度と仮定

照射前後のリーク電流の変化

リーク電流 増加量 [uA/chip]



HAPDのリーク電流増加は P層薄が最も低くなった



HAPDの最終仕様を P薄APDとする！

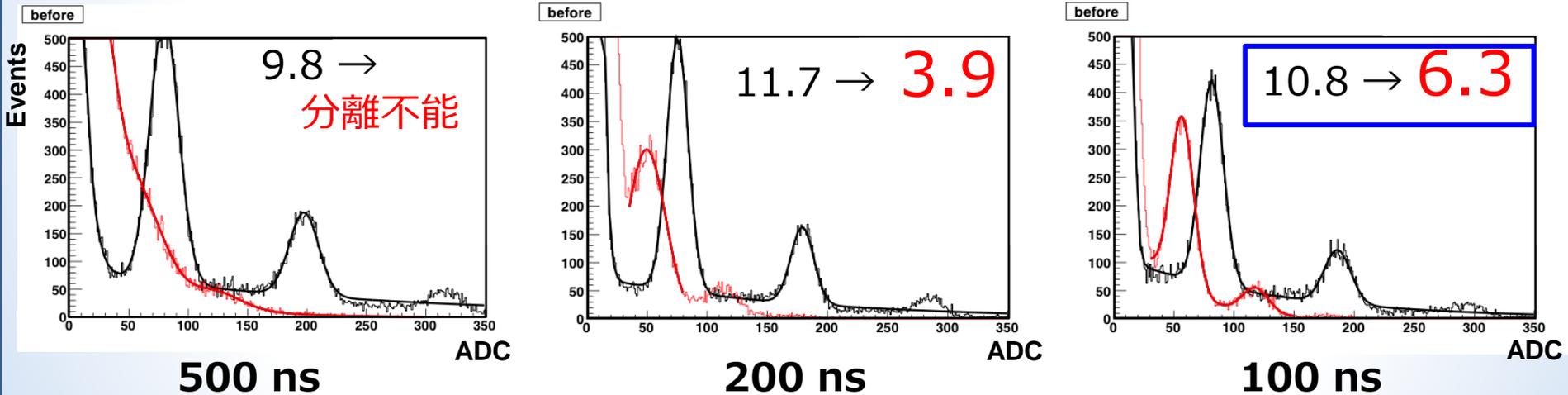
# 読み出し回路による中性子対策

中性子損傷によるS/N比低下を  
**Shaping time調整**によって補償する効果を確認した

中性子照射前後のHAPDにLEDで光を入射させ  
波高分布(ADC)より S/N比 を見積もる

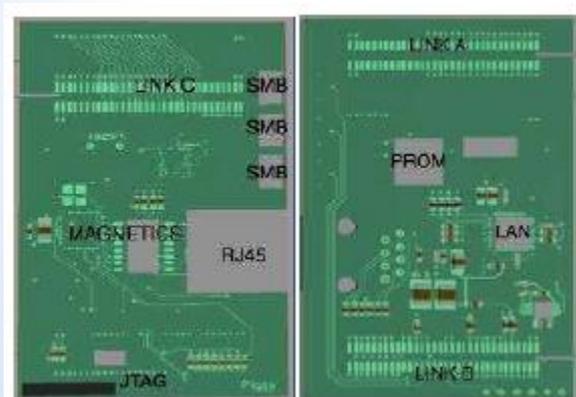
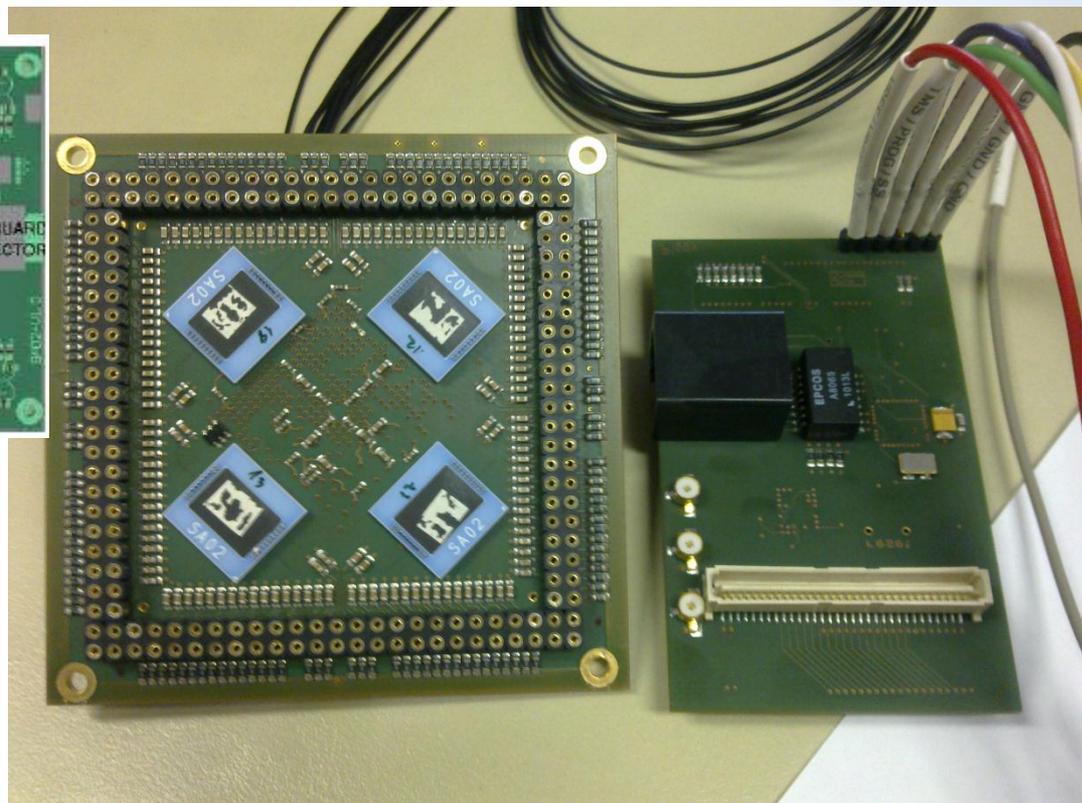
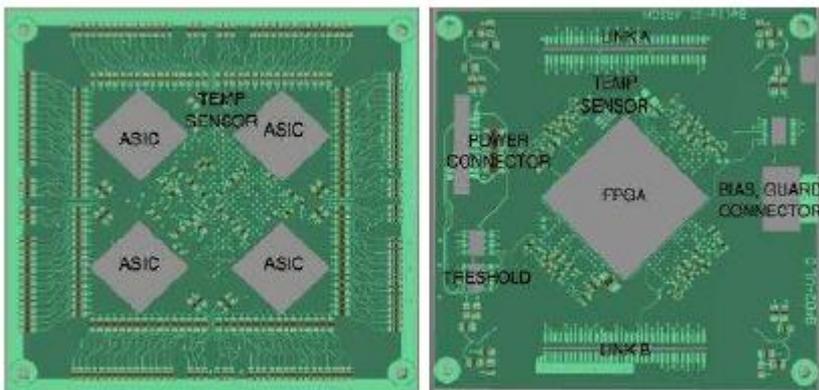
— 照射前  
— 照射後

$$S/N = (1 \text{ 光電子波高}) / (\text{ペDESTALノイズ} \sigma)$$



読み出しシステムのShaping timeを短縮することで  
S/N比の補償が可能！

# 読み出し用ボード



# リーク電流とノイズの関係

$$(\sigma_{\text{noise}})^2 = \frac{(AC_{\text{det}})^2}{\tau} + \left( \sqrt{\frac{1}{e} I_{\text{leak}} F G \tau} \right)^2$$

増幅器からのノイズ

ショットノイズ

$A$  : 増幅器定数

$C_{\text{det}}$  : 検出器容量

$\tau$  : Shaping time

$e$  : 素電荷

$I_{\text{leak}}$  : リーク電流

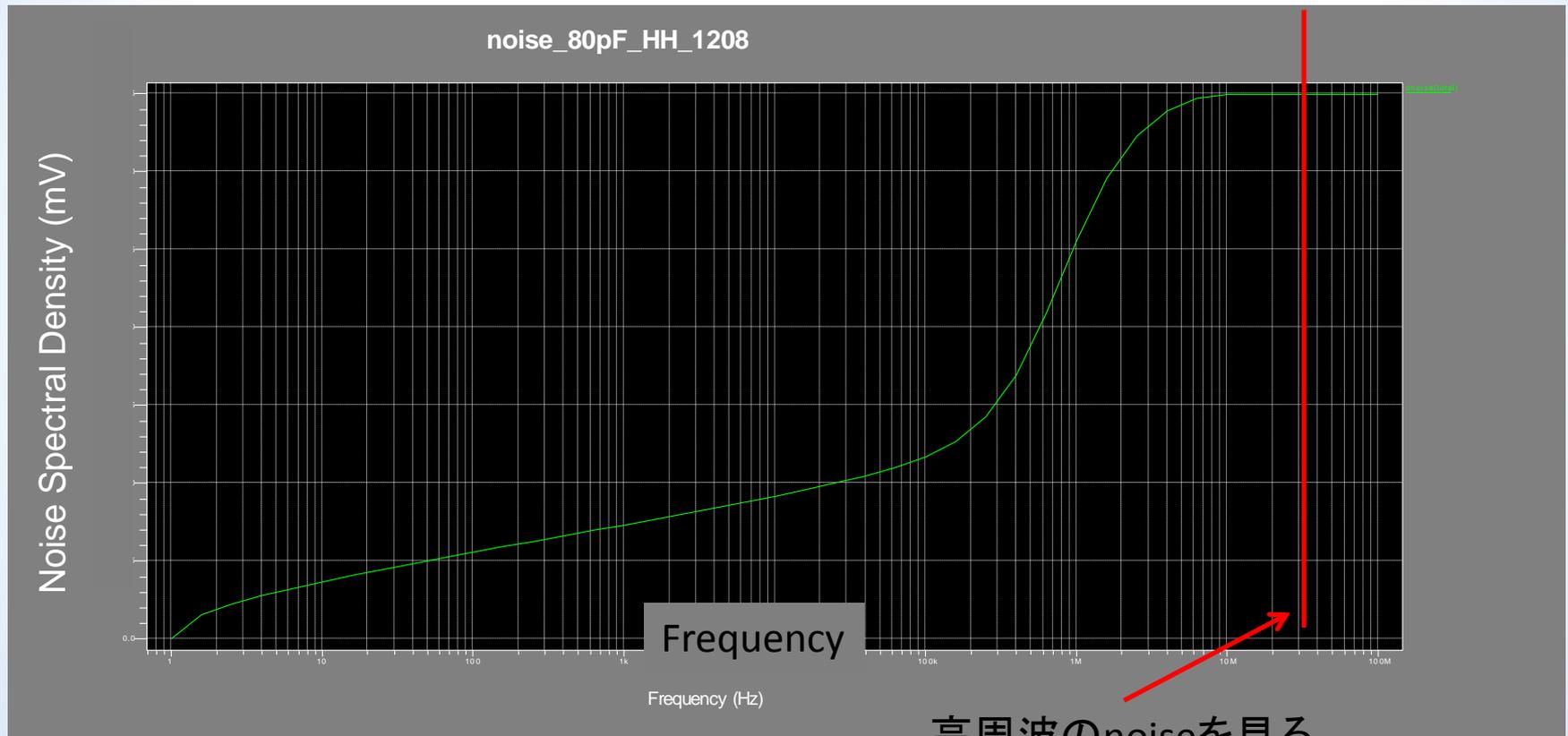
$F$  : ノイズ因子( $\sim 2$ )

$G$  : Avalanche増幅率

Shaping time

# noise level

周波数解析によりノイズを求めた



高周波のnoiseを見る

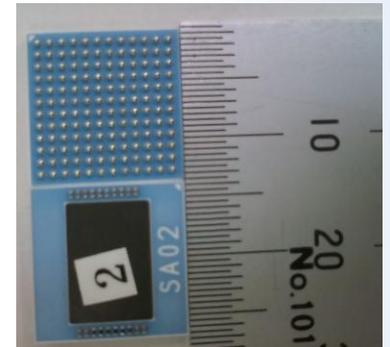
noise level : 約1400[e-] ...HAPD信号50000[e-]に対し十分なS/N

# ASIC FPGA とは

- **ASIC** : Application Specific Integrated Circuit

→ 特定用途向け集積回路

- ◆ 一度回路を設計、製作したら変更不可
- ◆ 動作速度、集積度などがよい



- **FPGA** : Field Programmable Gate Array

→ 再書き換え可能プログラマブル論理回路

- ◆ 必要に応じて回路構成を  
プログラムによって変更可能

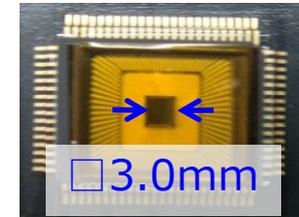


# SAシリーズ

Belle IIでの使用に向けた最終シリーズとなるASIC

## SA01

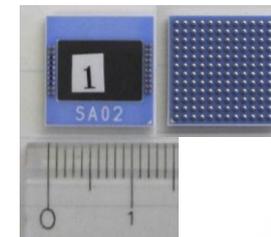
- チャンネル数 : 12 (HAPD: 144ch)
- gain(測定値) : 約71, 89, 122, 291 [mV/fC]
- shaping time : 250, 500, 750, 1000 [ns]
- offsetをそれぞれ16段階に粗調節、微調節可能



SA01

## SA02

- チャンネル数 : 36
- gain(測定値) : 約19, 25, 35, 72 [mV/fC]
- shaping time : 250, 500, 750, 1000 [ns]
- offsetをそれぞれ16段階に粗調節、微調節可能



SA02

# SA03の開発

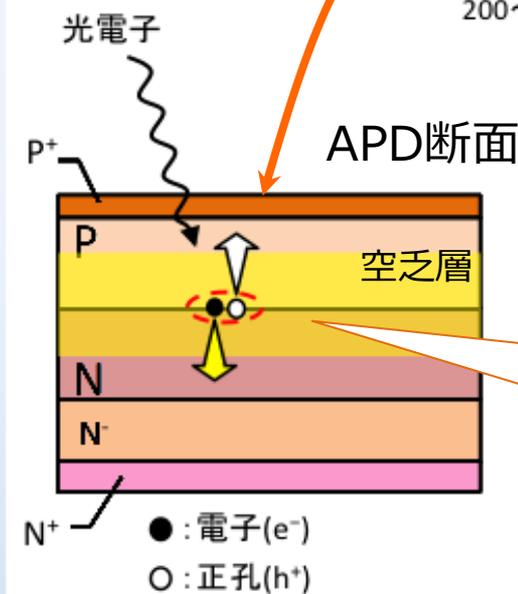
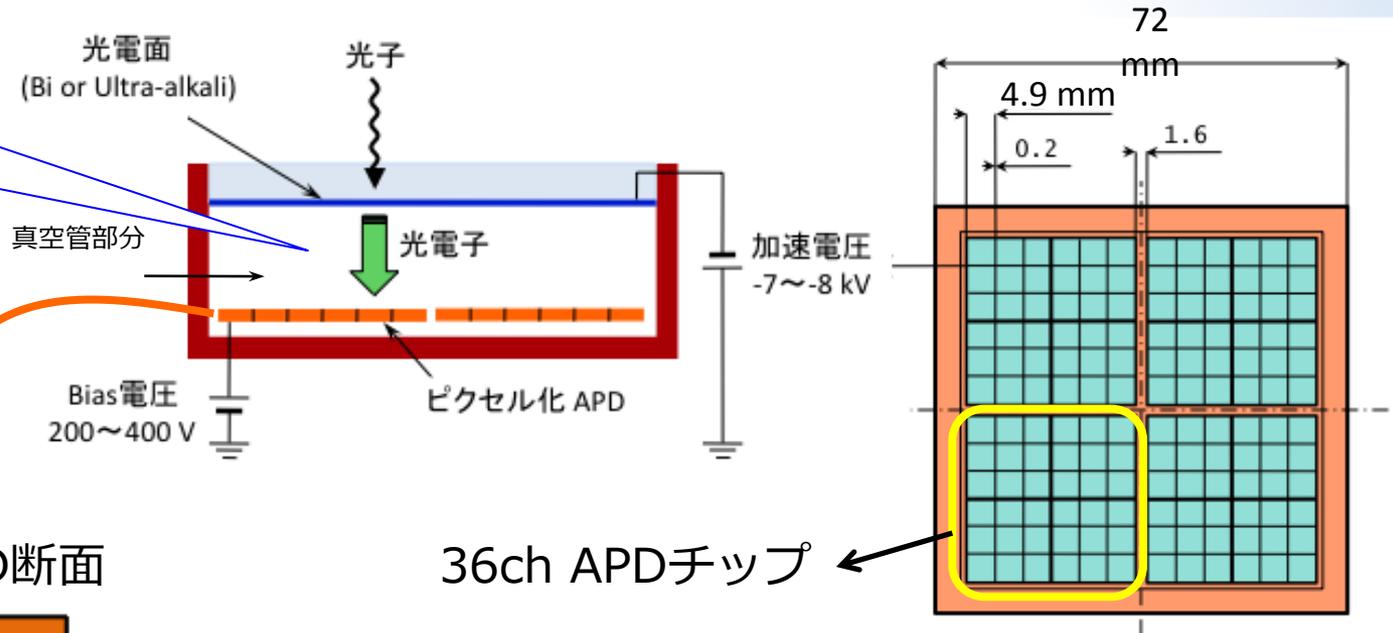
- チャンネル数 : 36(HAPD :144ch)
- shaping timeを100ns付近に調節できるように設計
- offsetをそれぞれ16段階に  
粗調節、微調節できるように設計

これらの機能を確認するために動作シミュレーションを行った

# HAPD の動作原理

電子打ち込み増幅

$$G_{\text{Bom}} = 1,400$$



Avalanche増幅

$$G_{\text{Ava}} = 40$$

$$G_{\text{Tot}} = G_{\text{Bom}} \times G_{\text{Ava}} \rightarrow 56,000$$

光電子増倍管( $G \sim 10^7$ )に比べ低い

⇒ 高利得・低雑音の増幅器をもった読み出しシステムが必要!

# SA02とSA03のlinearity

設計値

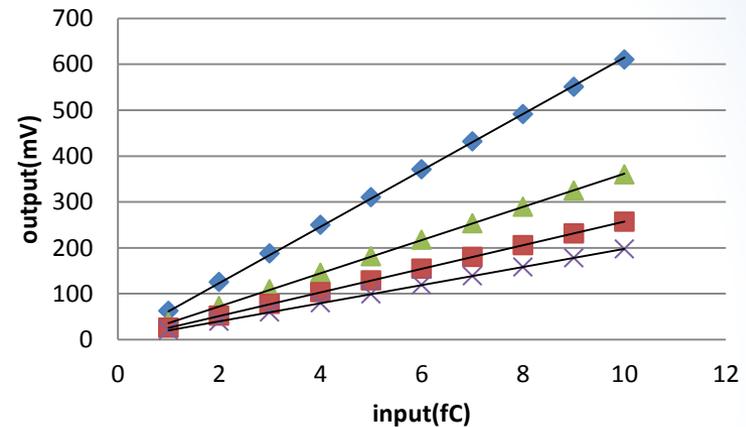
gain3に対して

gain3 : gain2 : gain1 : gain0

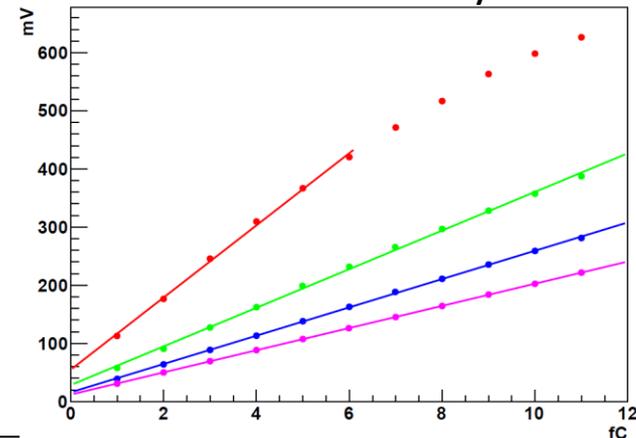
1    4/3    2    4

	SA02	SA03
gain 0	60(mV/fC)	61(mV/fC)
gain 1	38	36
gain 2	26	26
gain 3	20	20

SA03 linearity



SA02 linearity

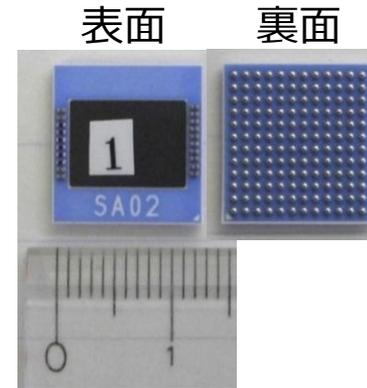


SA02のgainと同程度のゲインを持つ

# アナログ処理ASIC SA02

## SAシリーズの第2バージョン

- チャンネル数 : 36
- Gain(測定値) : 約16, 20, 26, 55 [mV/fC]

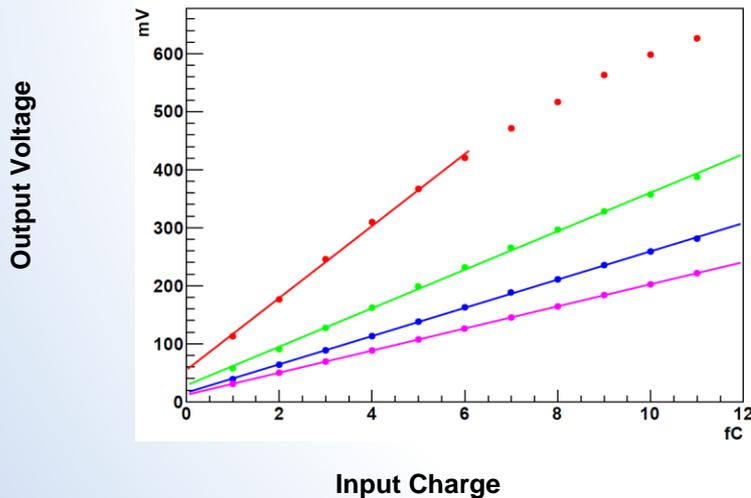


gain3に対して

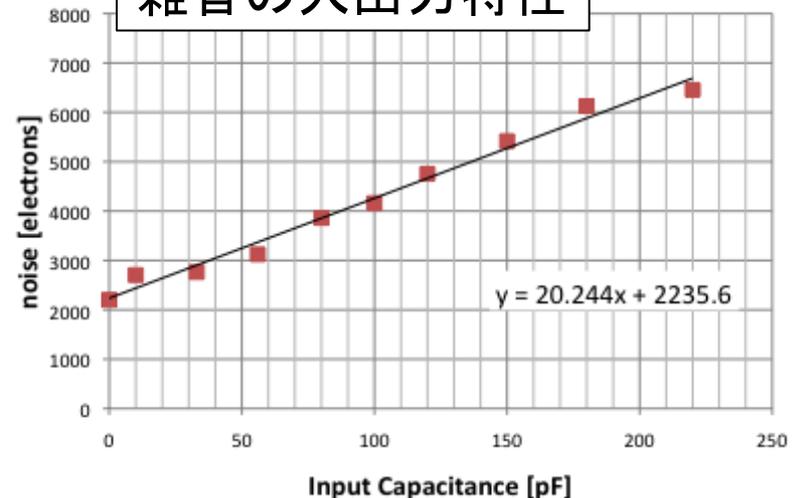
gain3 : gain2 : gain1 : gain0

1    4/3    2    4

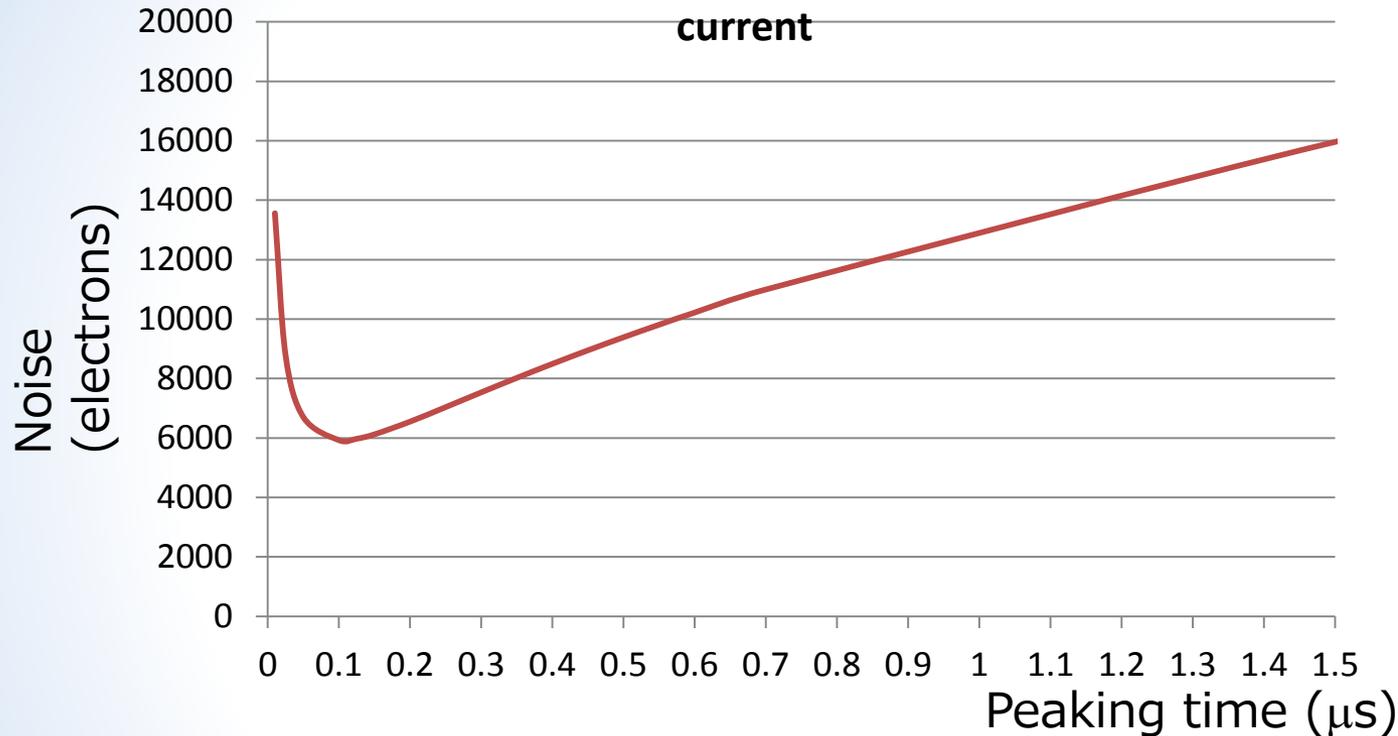
### Amp.の線形性



### 雑音の入出力特性



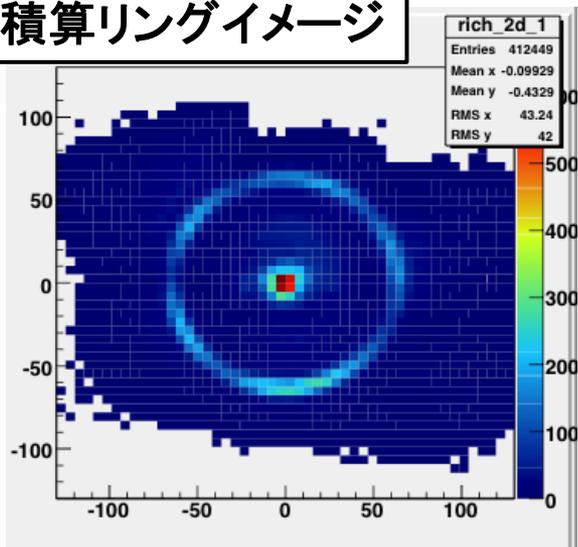
# Expected noise for HAPD at $10^{12}$ n/cm<sup>2</sup>



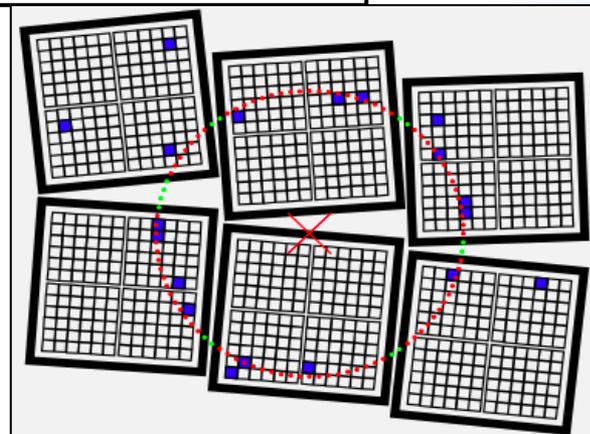
“Current” is  
calculated by  
$$n^2 = \frac{1350^2}{\tau} + (13000)^2$$

# プロトタイプ ビームテスト

全イベント積算リングイメージ

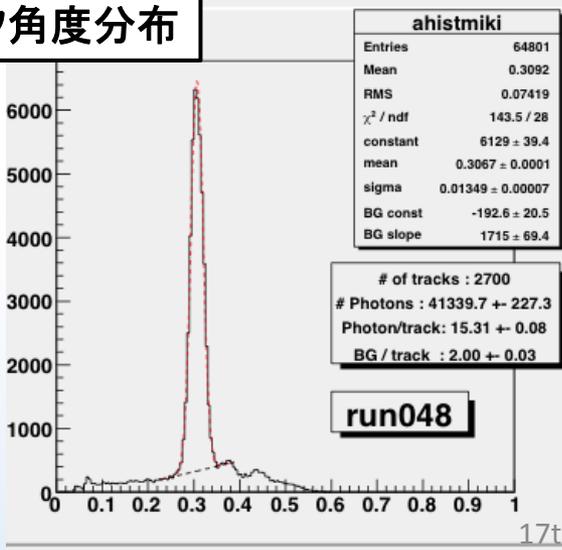


イベントディスプレイ例



※赤線はビームトラックから算出したリング生成予想図

チェレンコフ角度分布



解析結果

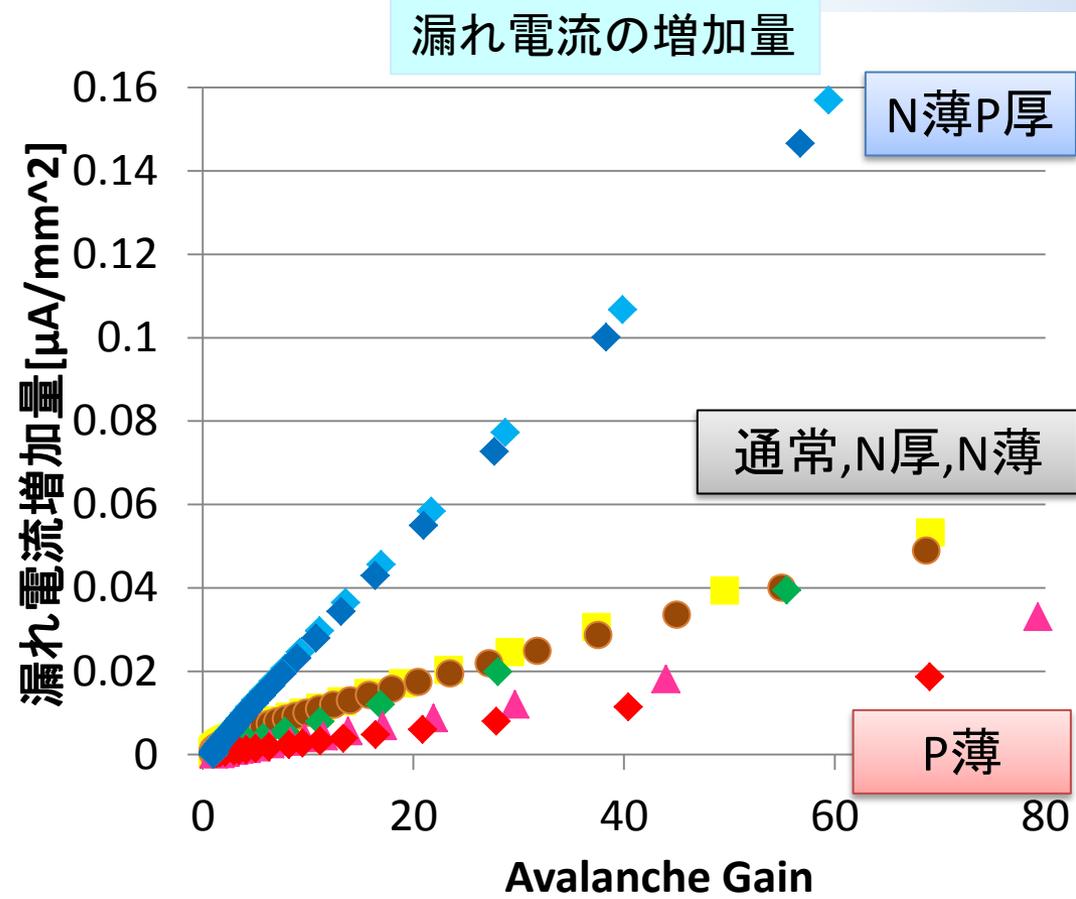
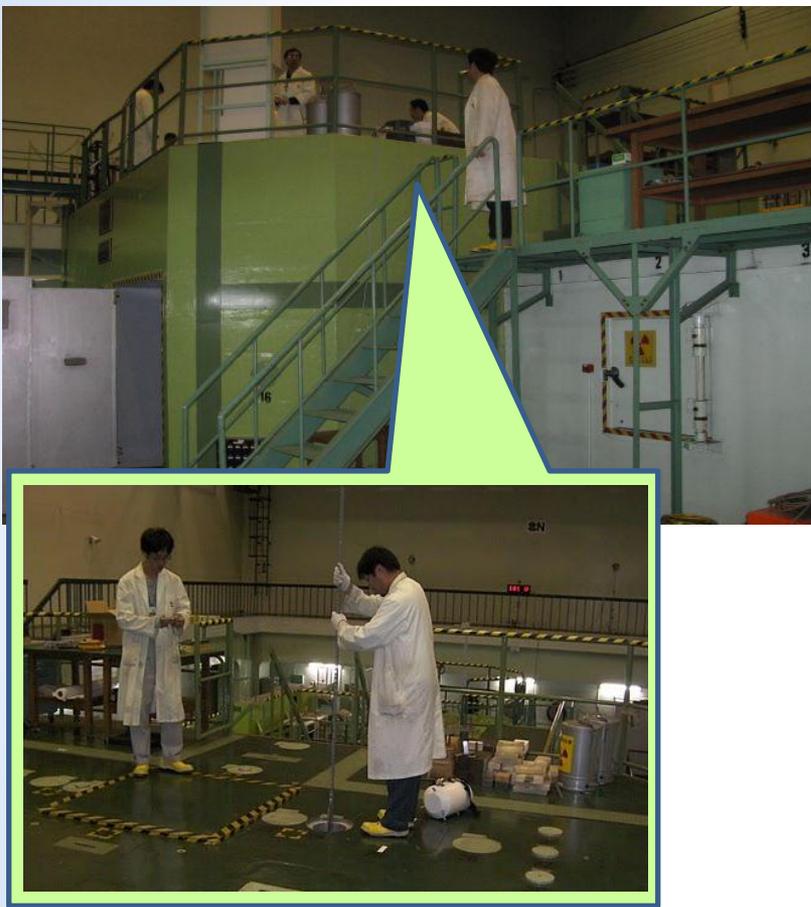
検出光子数 : 15.3/track  
角度分解能 : 13.5 mrad/photon  
: 3.4. mrad/track

$K/\pi$ 識別能力 :  $6.7\sigma$  (@4 GeV/c)

目標性能 $4\sigma$  以上の  
 $K/\pi$ 識別を達成

# APDの中性子照射試験

- 東京大学原子炉『弥生』 照射量: $10^{12}$ (neutron/cm<sup>2</sup>)



•漏れ電流の増加量は、P層の厚さにのみ依存していることを確認。  
(Gain:40)通常⇒P薄 漏れ電流の増加を半分程度に抑えられる。

# APD部分の改良

**問題** 漏れ電流の増加に伴うノイズの増大⇒光子検出能力の低下

**原因** 格子欠陥の形成

**解決策**

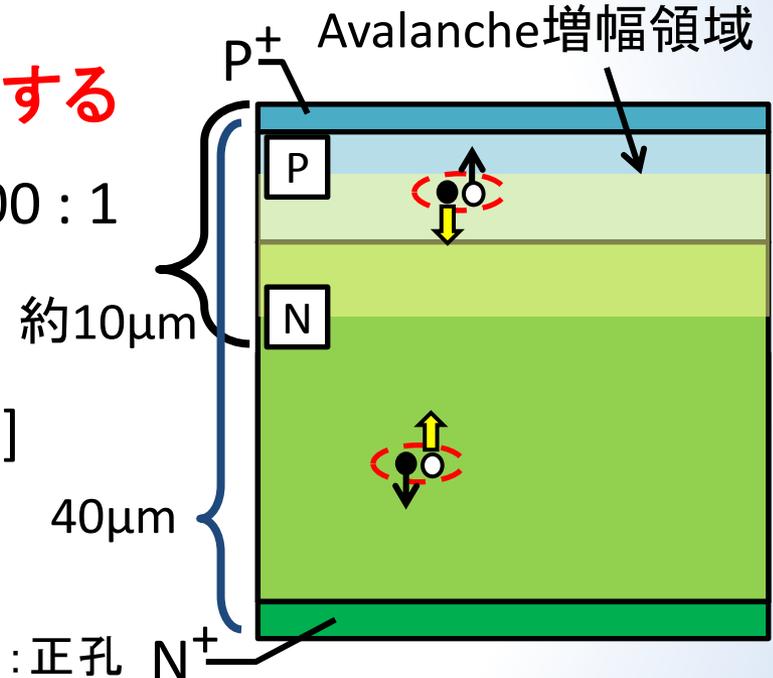
格子欠陥の総数を減らす⇔ APDを薄くする

□ 増幅領域での増幅率 電子:正孔 = 100 : 1  
⇒ P層を薄くすることが重要

□ 電子(7kV)がSiに入射する距離:2[ $\mu\text{m}$ ]  
⇒ 増幅領域の厚さ:~10[ $\mu\text{m}$ ] **➡** 5[ $\mu\text{m}$ ]

● : 電子 ○ : 正孔  $N^+$

HAPDで用いる  
APD部分の構造



P層とN層の厚さ変えて中性子照射試験を実施