

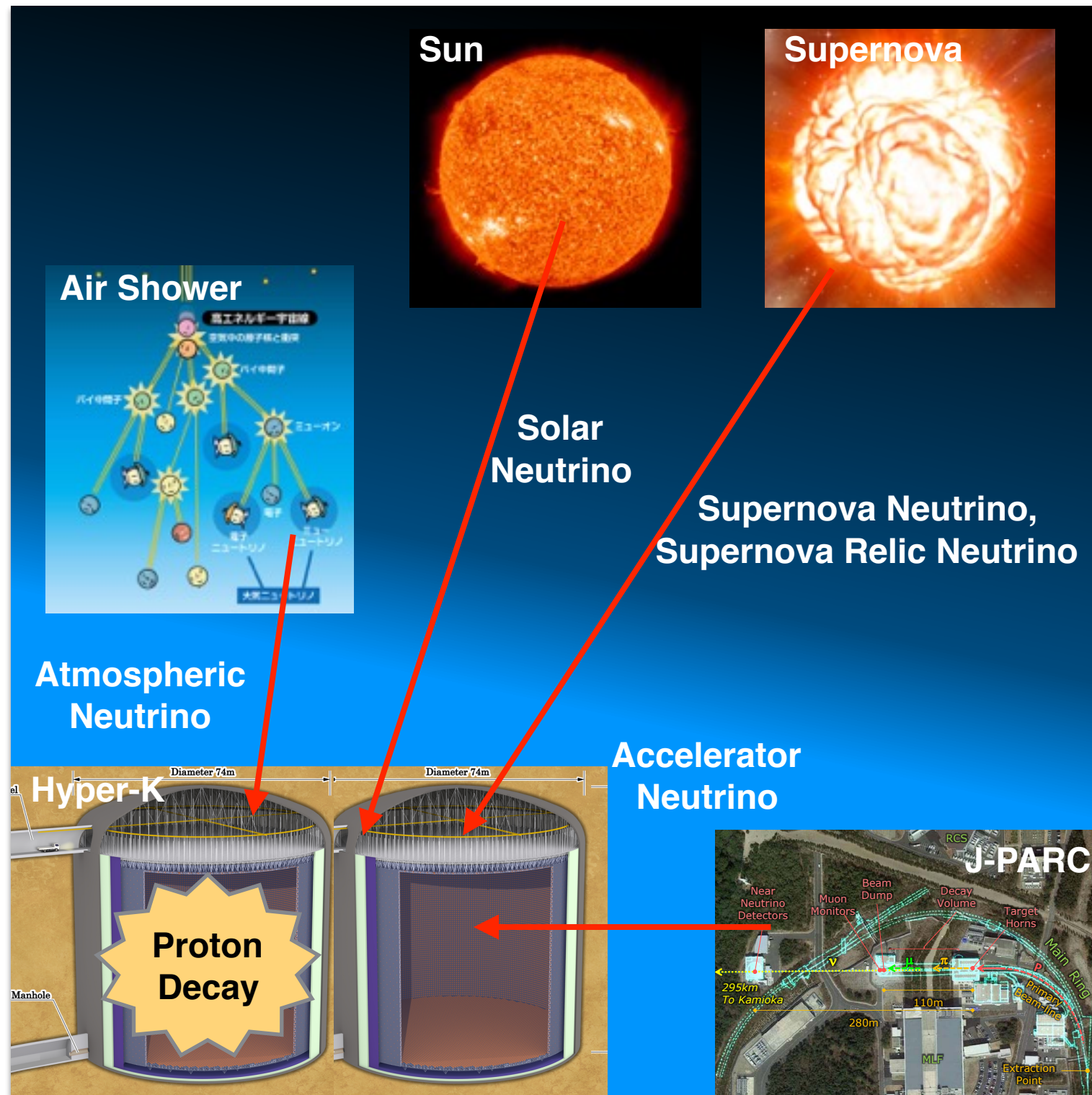
ハイパーカミオカンデに向けた 大口径ハイブリッド型光検出器の 低ノイズ読み出し開発と性能評価

婁 天濛 (東京大学)

22nd ICEPP Symposium

2016/3/2

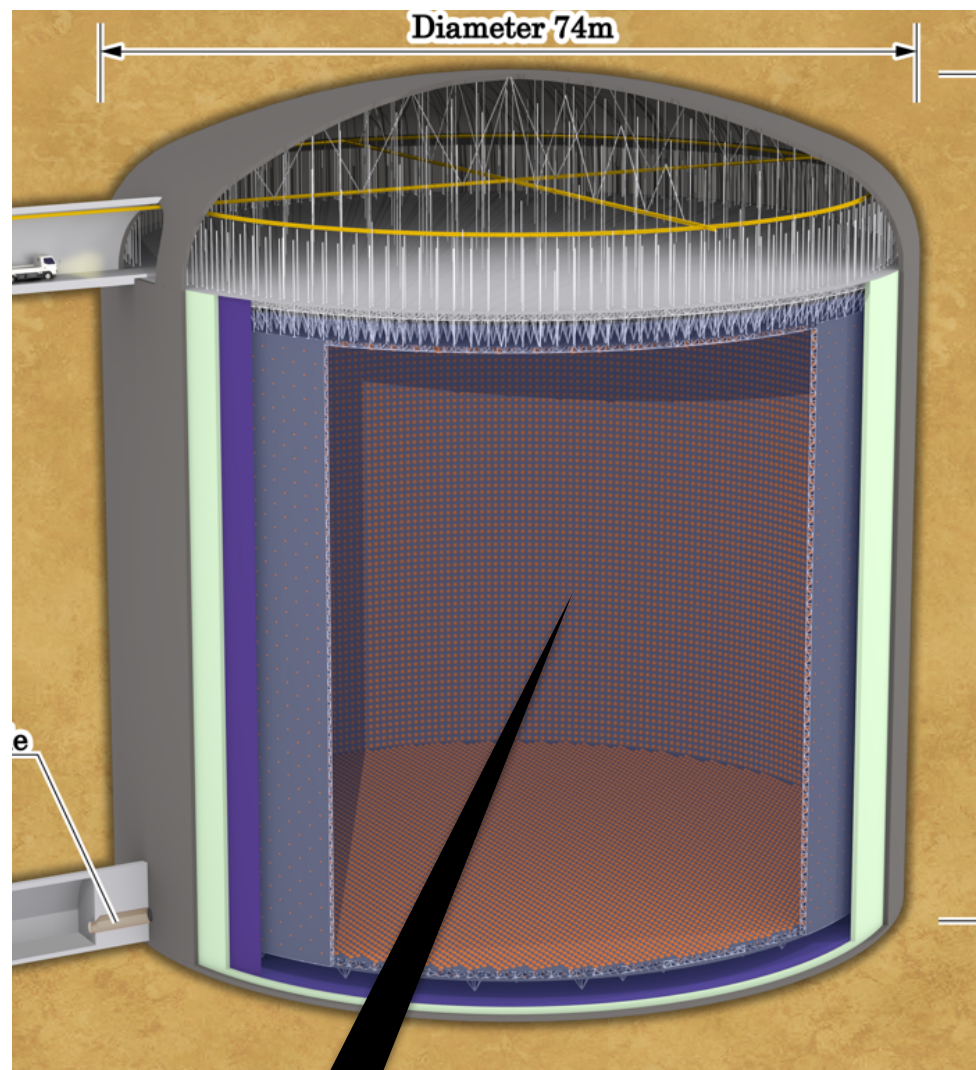
ハイパーカミオカンデの物理



- ・ ニュートリノ振動の全容解明, CP対称性の破れ
 - ・ 長基線加速器ニュートリノ
 - ・ 大気ニュートリノ
- ・ 大統一理論の検証
 - ・ 陽子崩壊
- ・ ニュートリノ天文学
 - ・ 超新星ニュートリノ
 - ・ 超新星背景ニュートリノ
 - ・ 太陽ニュートリノ
- ・ 暗黒物質探索
- ・ ジオフィジックス

Super-Kamiokande の17倍
の体積を用いた大統計測定

Hyper-K(HK)に向けた光検出器の要求



Photosensors

- ・ 内部検出用に8万本(2tank分)の光センサーが必要
→ 量産化が容易、安価
- ・ Large Photo Coverage
→ 大口径
- ・ 高精度なvertex再構成
→ 良い時間分解能
- ・ 高いエネルギー分解能、低エネルギーへの感度
→ 優れた光電子(photo electron, p.e.)検出能力
- ・ 幅広い物理ターゲット、エネルギーレンジ
(1p.e. ~ 1000p.e.)
→ 広いダイナミックレンジ

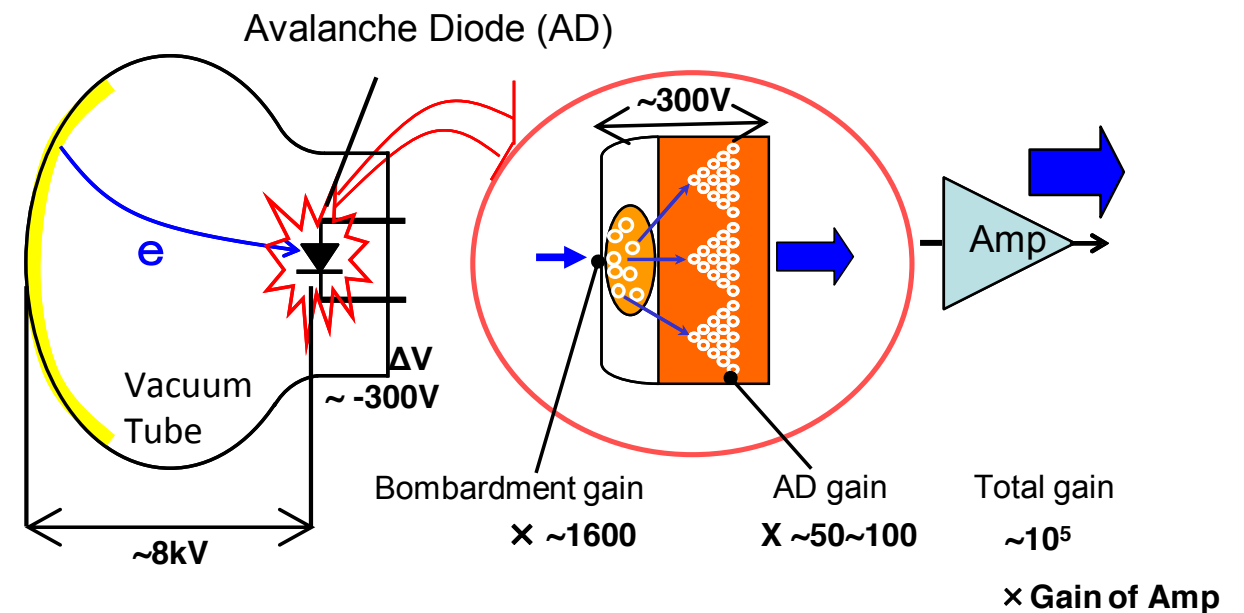
HK用の光検出器の候補：Box&Line PMT or HPD

Hybrid Photo Detector (HPD) の原理・利点

原理

- ・ 増幅部に多段ダイノードではなく Avalanche Diode (AD) を使用
- ・ 光子を光電面で光電子に変換
→ 高電圧で加速、ADに入射
→ AD内でアバランシェ増倍
- ・ 高電位による加速 + 半導体素子
= 「ハイブリッド」

Typical values in an HPD prototype



利点

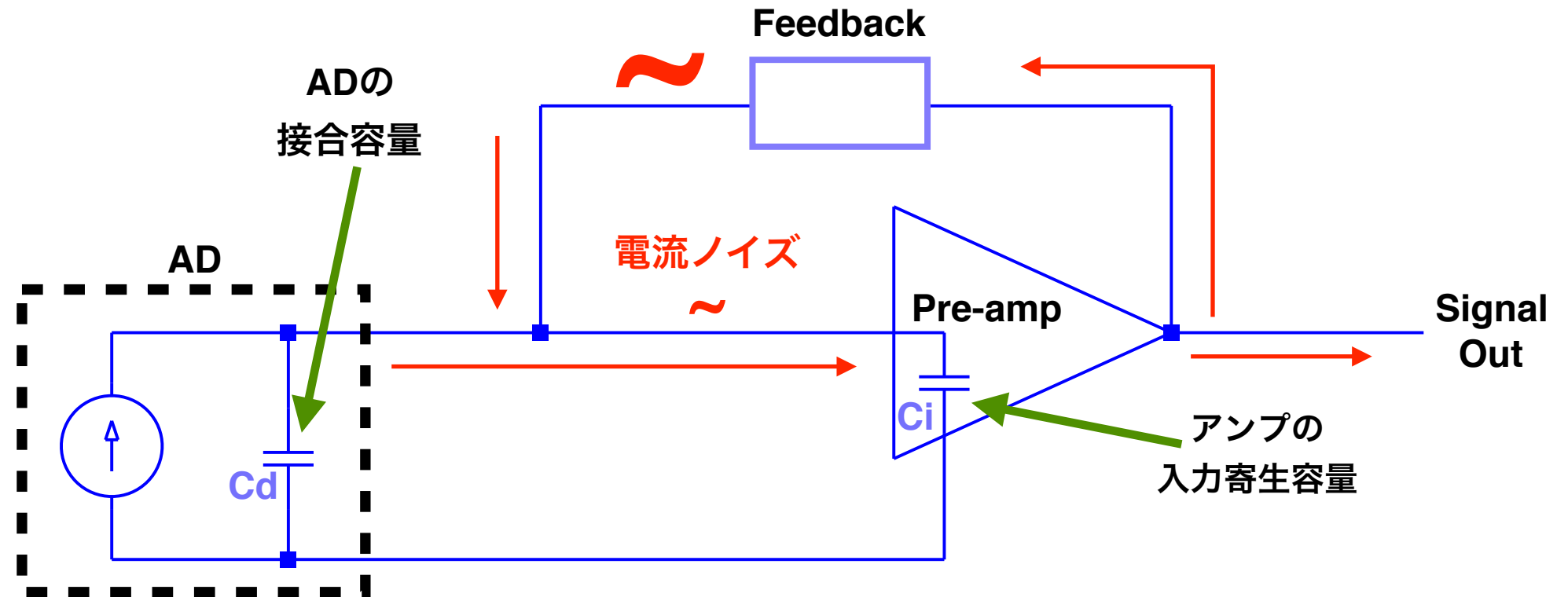
- ・ PMTより単純な構造 → 低コスト
- ・ 高い初段の増幅率 → 優れた1 p.e. 分解能
- ・ 電子収束と増倍が速く、揺らぎが少ない → 良い時間分解能
- ・ 全体のゲインは低いため、プリアンプを用いる必要がある

HPDの開発状況



- ・ 8inch HPDは開発が完了し、水中で実証試験中
- ・ 20inch HPD w/ 5mmΦ AD は 8inch HPDと同じ回路構成で開発済。
- ・ 大口径でも十分な収集効率を得るため、ADを大面積化(5mmΦ→20mmΦ)
- ・ **課題**： 接合容量の増加(60pF → 800pF) → アンプノイズの増加 → S/Nの悪化

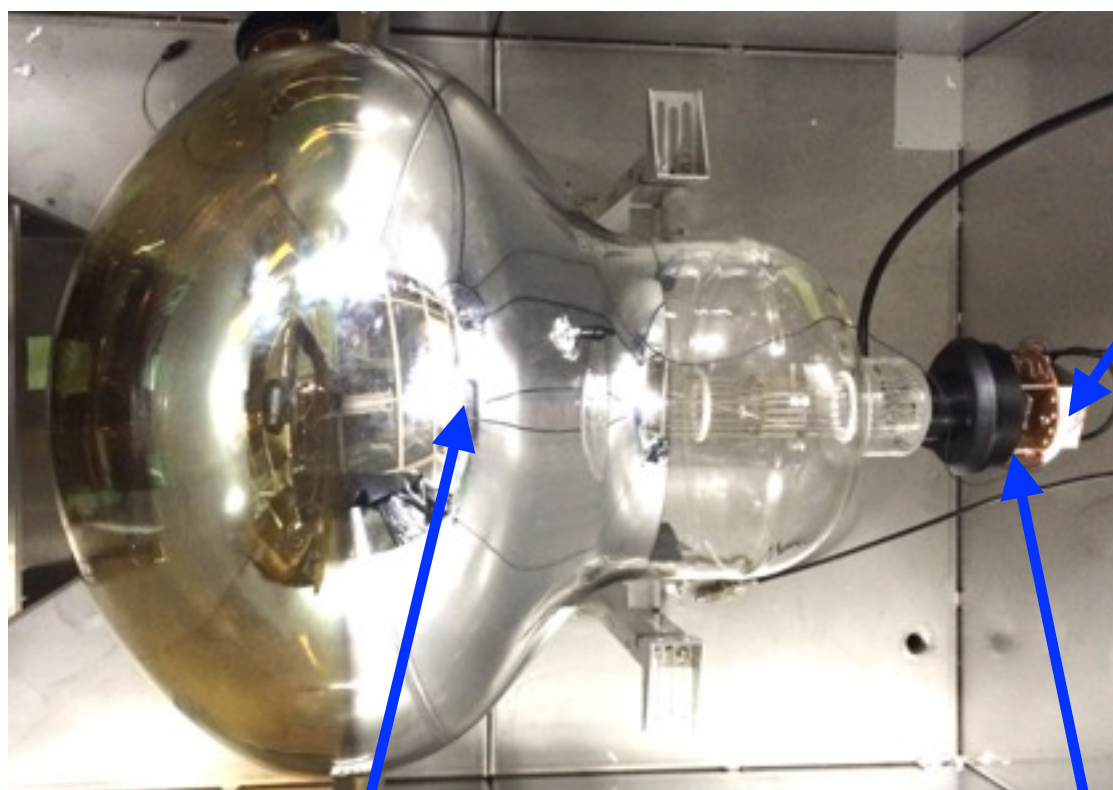
接合容量によるノイズ増加の原理



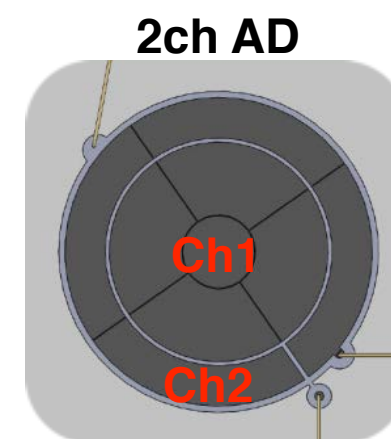
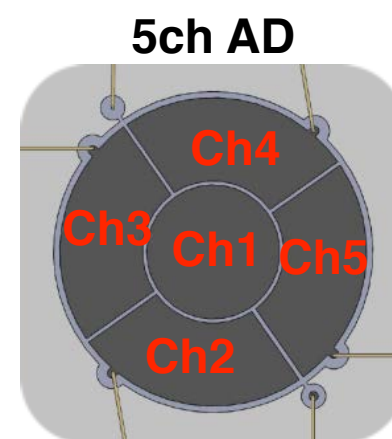
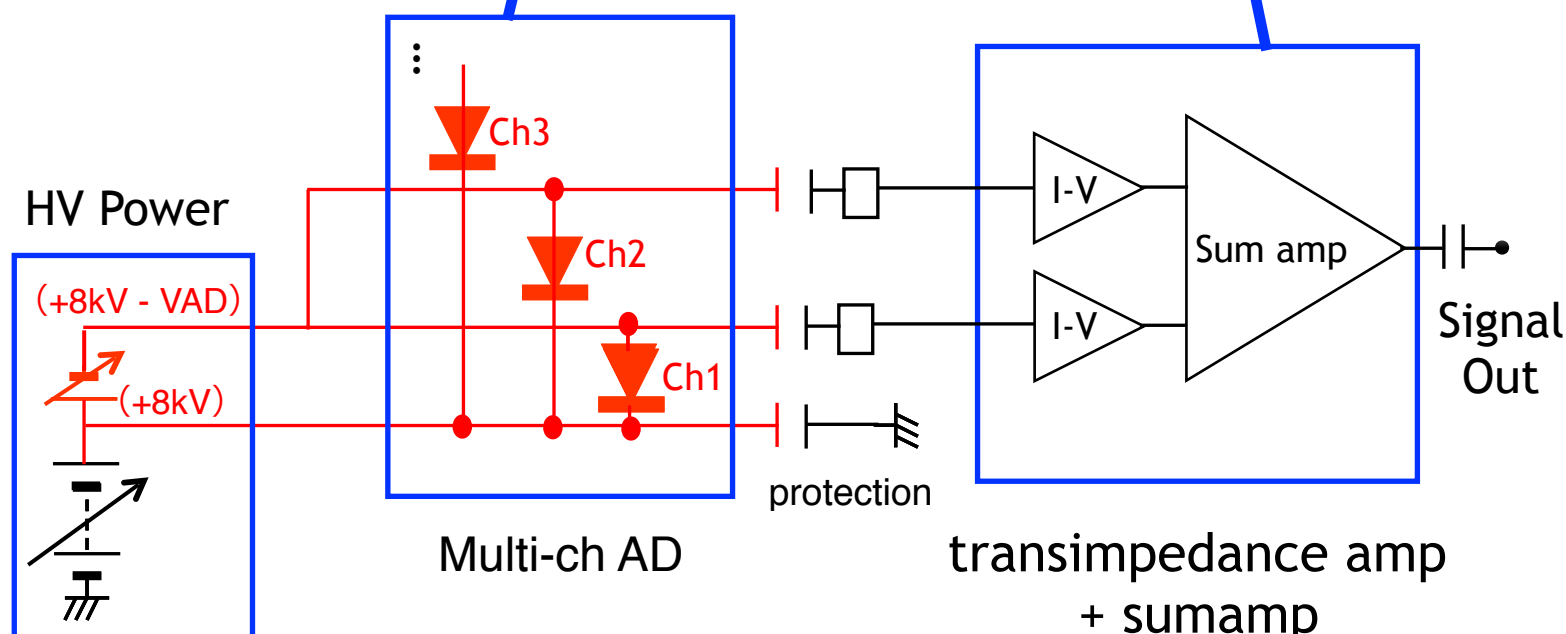
- ・ プリアンプにトランスインピーダンスアンプ(電流電圧変換アンプ)を使用
- ・ 電流ノイズがフィードバックを介して増幅
- ・ アンプから見える容量 ($C = C_d // C_i$) が増加すると、インピーダンスが小さくなる($1/\omega C$)
- ・ 流れる電流の量が増加し、ノイズ量も増加する
- ・ $C_d \gg C_i$ なので、 C_d がノイズに大きく寄与

ADの大面積化によるノイズ増加への対策

50cm HPD w/ 20mm Φ AD



- ・ プリアンプの改良
- ・ ADの分割：5ch or 2ch
 - ・ 各chをプリアンプで増倍
 - ・ 各chを個別読み出し or サムアンプで1ch読み出し
- ・ ADの増厚化による容量減少
- ・ Decoupling transformerの使用



プリアンプの改良

プリアンプ

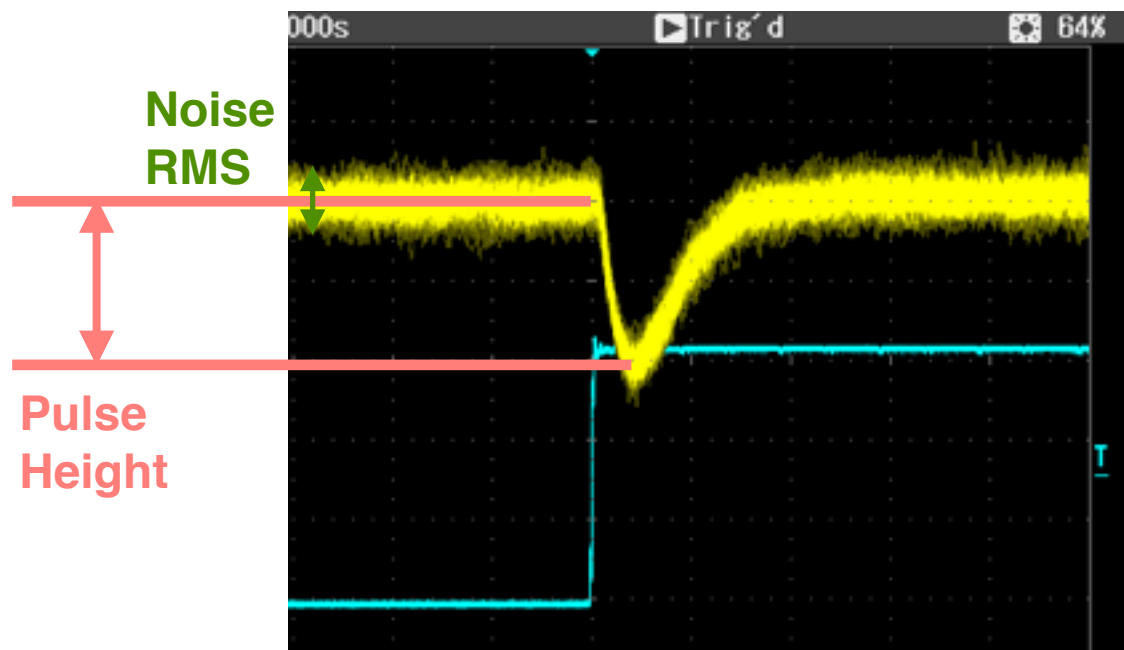


- ・ 以前(~2015)のプリアンプの問題点
 - ・ 電荷分布での1p.e.分解能が悪い
 - ・ プリアンプごとのノイズの個体差
 - ・ 実証試験用には+5単電源が望ましい



- ・ 本郷でのプリアンプの開発
 - ・ Feedback増 → Gain増
 - ・ GND強化 → ノイズ耐性増
 - ・ パラメータチューニング
 - ・ 評価基準
 - ・ $S/N (= \text{Pulse height} / \text{Noise Root Mean Square(RMS)}) > 10\sigma$

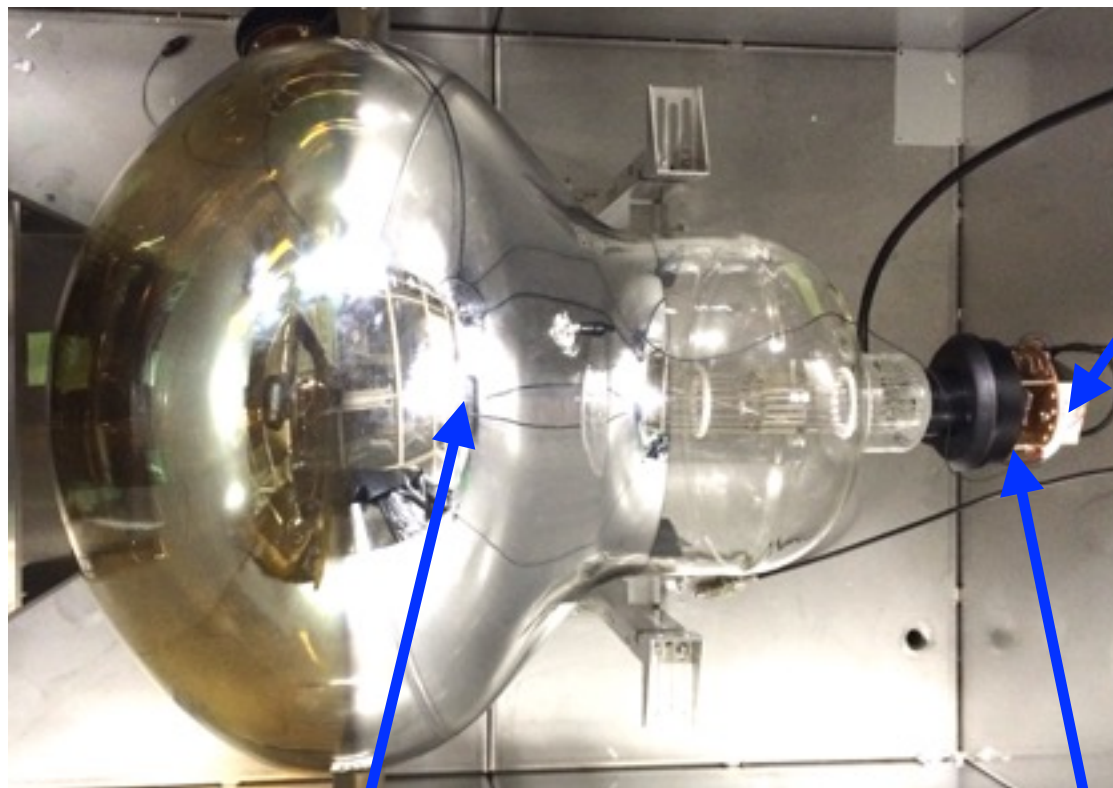
事前試験でのプリアンプの波形



⇒ 神岡でHPDに実装して試験

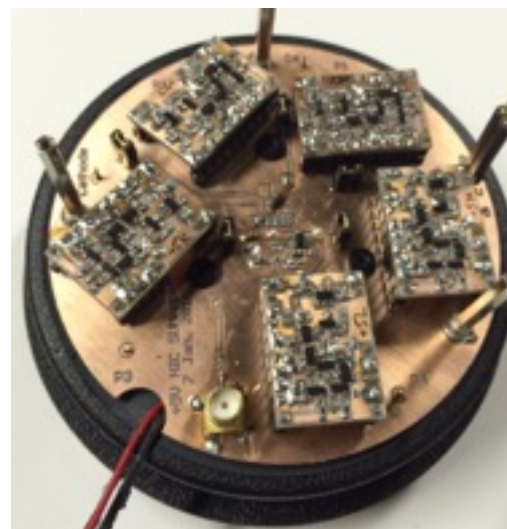
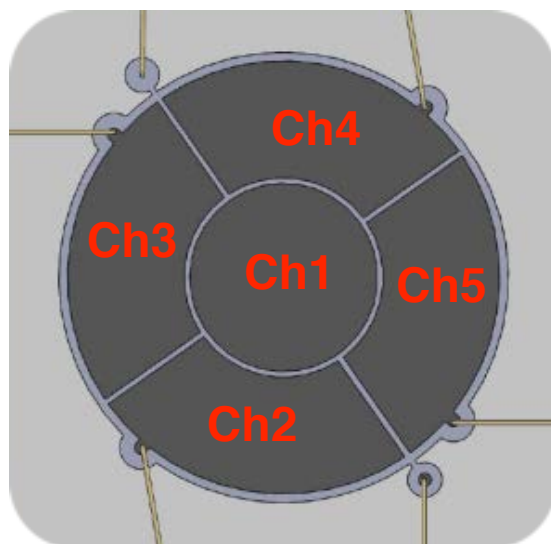
5ch HPD

50cm HPD w/ 20mm Φ AD



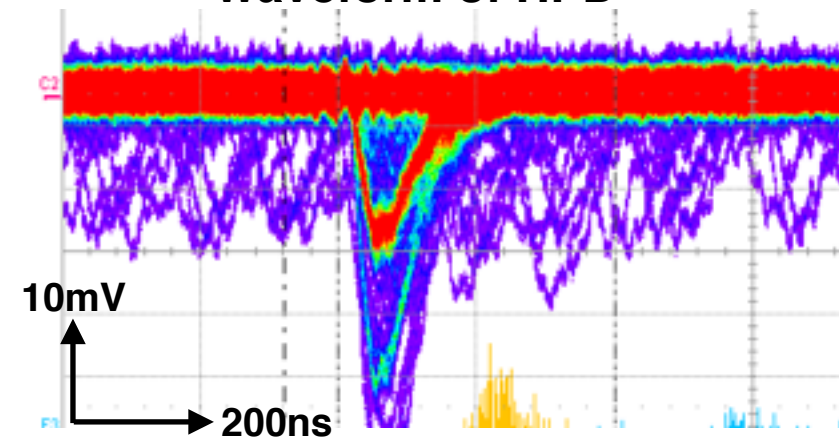
5ch AD

Preamplifiers

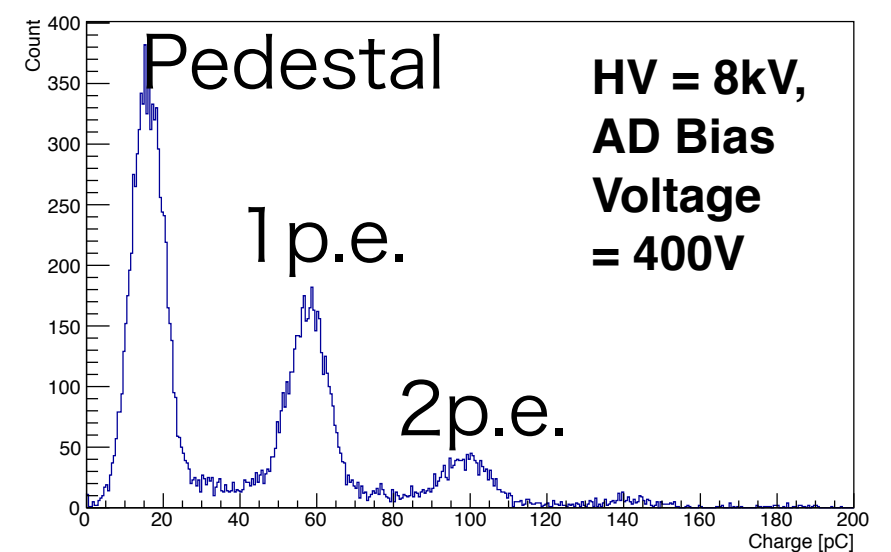


- ・ 昨年~1月初旬まで開発・試験
- ・ ADを5分割
 - ・ 160pF/1ch (800pF/5ch)
 - ・ プリアンプ×5で読み出し

Waveform of HPD

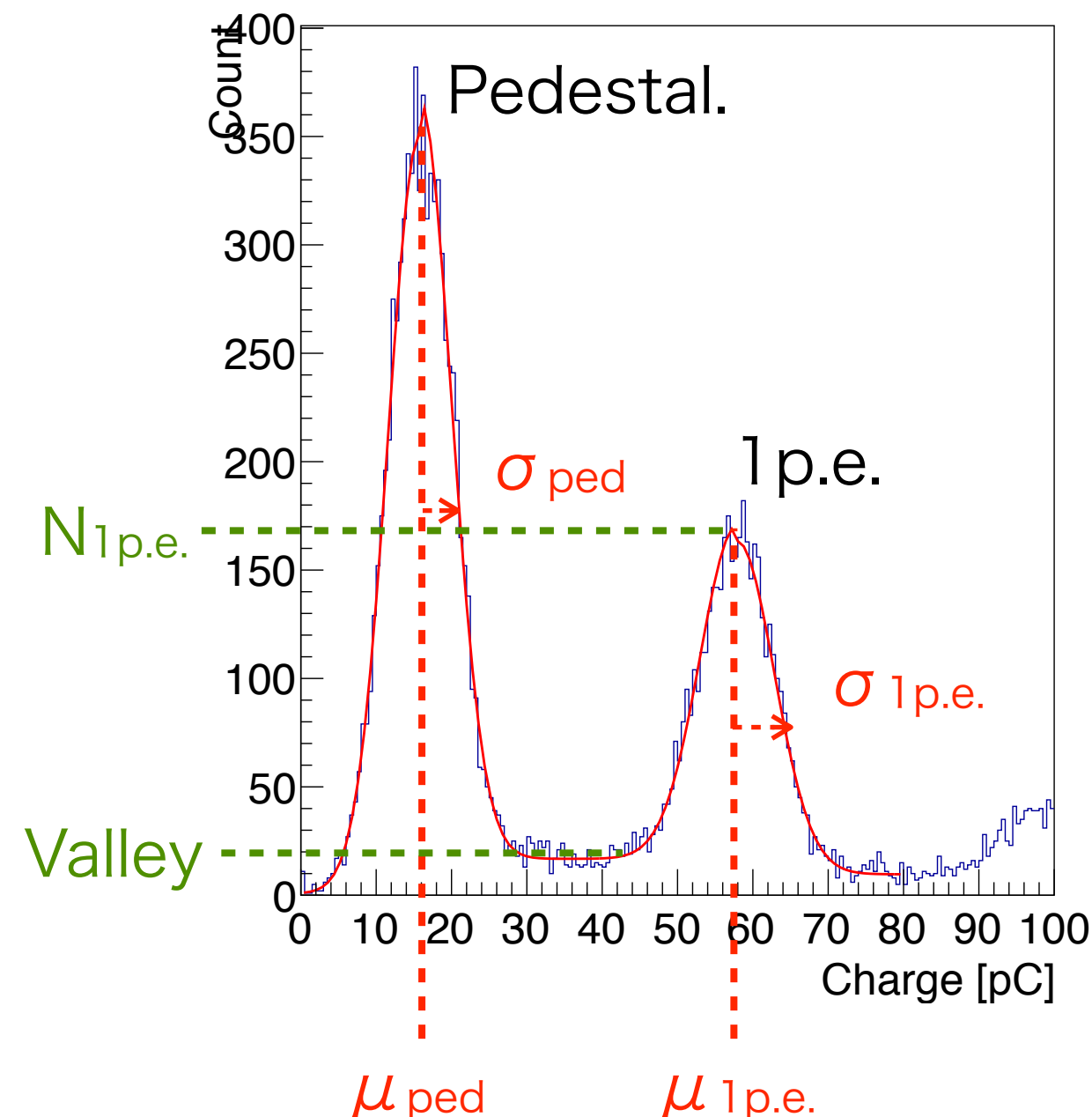


Charge distribution (Gate = 400ns, 1ch)



5ch HPD w/ 800pF AD (個別読み出し)の 1 p.e.分解能・P/V比

Charge distribution (Gate = 400ns, 1ch)

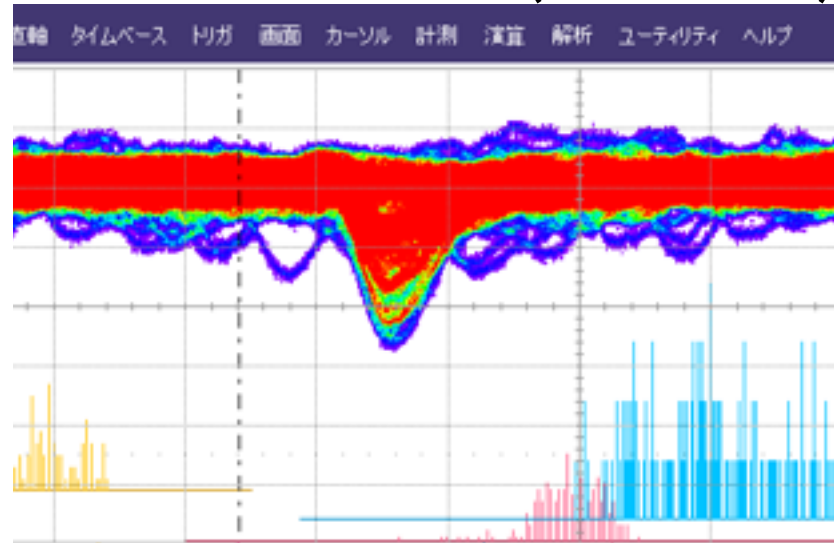


- **1 p.e. resolution** = $\sigma_{1p.e.} / (\mu_{1p.e.} - \mu_{ped})$
: エネルギー分解能の指標
- **Noise level** = $\sigma_{ped} / (\mu_{1p.e.} - \mu_{ped})$
: ノイズレベルの指標
- **Peak to Valley ratio (P/V)** = $N_{1p.e.} / \text{Valley}$
: トリガーthresholdの指標

	5ch HPD w/ 20mm AD (Current, 1ch)	5ch HPD w/ 20mm AD (Previous, 1ch)	HPD w/ 5mmAD	SKPMT
1 p.e. resolution	12%	28%	16%	53%
P/V	9.0	3.1	4.0	2.2

5ch HPD w/ 800pF AD (サムアップ)の 波形・電荷分布

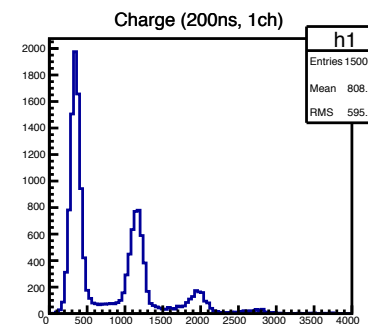
サムアップの波形(5ch sum)



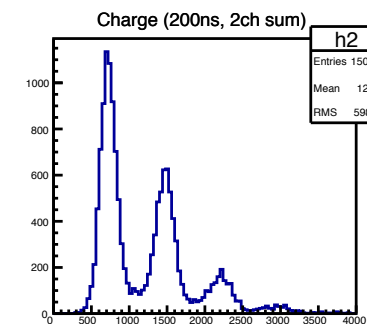
Gate=
200ns

Gate=
400ns

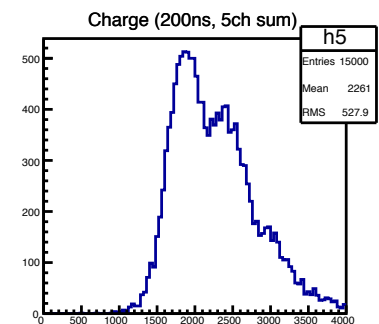
1ch



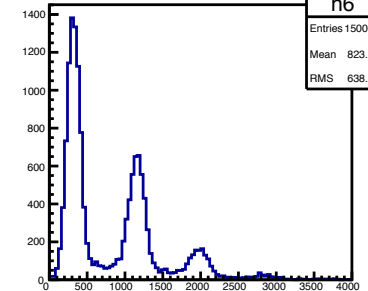
2ch sum



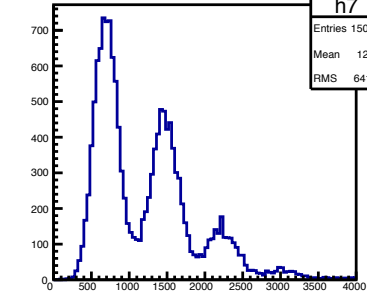
5ch sum



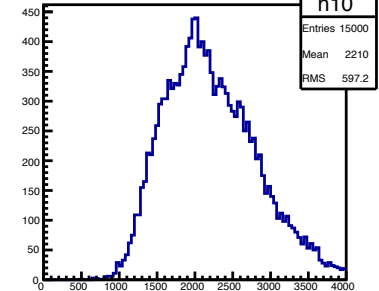
Charge (400ns, 1ch)



Charge (400ns, 2ch sum)



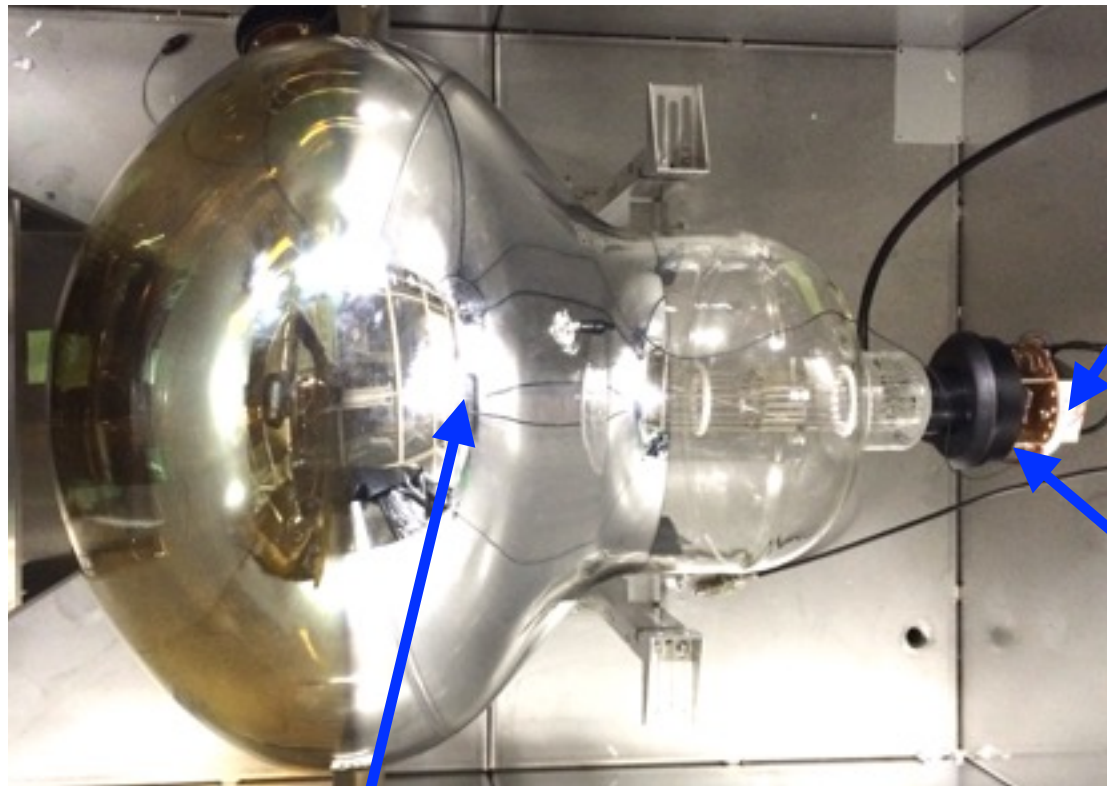
Charge (400ns, 5ch sum)



- ・ 5chサムするとノイズがリニアに増加し、1p.e.が見えなくなる
 - ・ クロストーク、コモンモードノイズの影響(調査・対策中)
- ・ 個別読み出しでは現在のHPDオプションの中で最も性能が良い
 - ・ デジタル出力(個別の電荷・時間読み出し)がHPD本来の性能を引き出せる
 - ・ まずはPMTと同じ1信号出力(サム)で評価

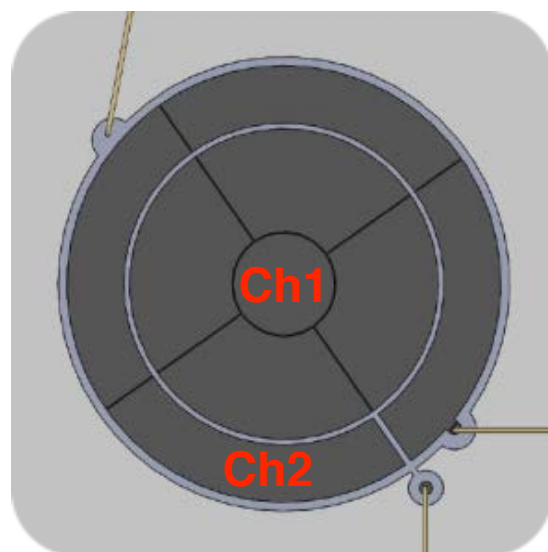
2ch HPD

50cm HPD w/ 20mm Φ AD

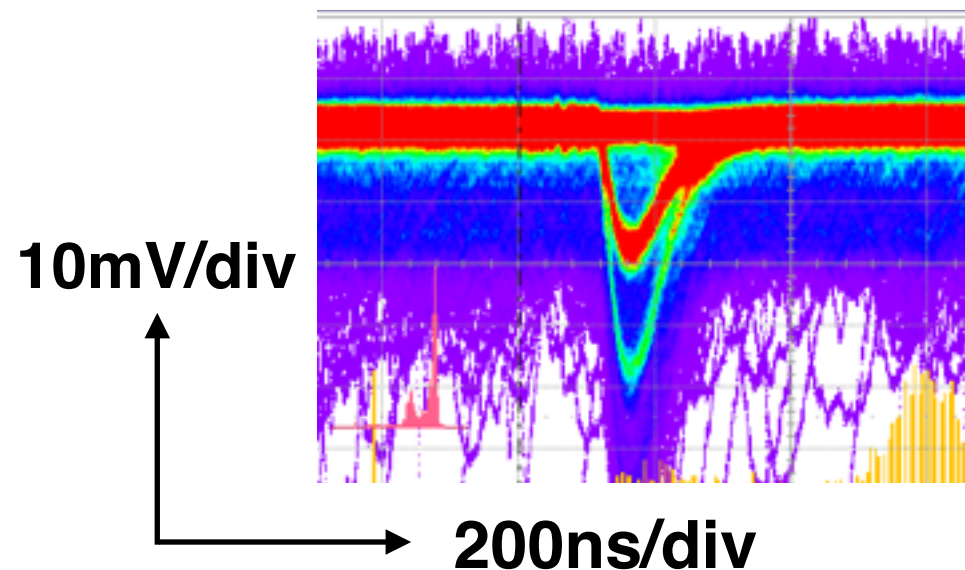


- ・ 昨年12月に容量半減AD(800pF → 400pF)の開発に成功
- ・ HPD w/ 2分割ADを製作
 - ・ 200pF/1ch (400pF/2ch)
 - ・ プリアンプ×2で読み出し

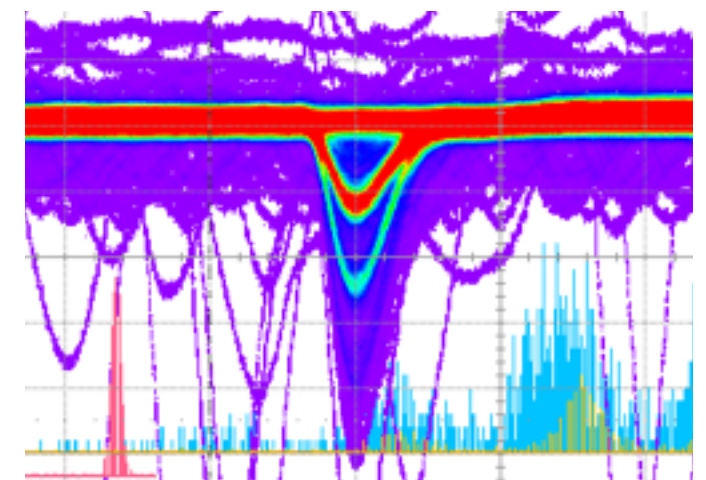
2ch AD



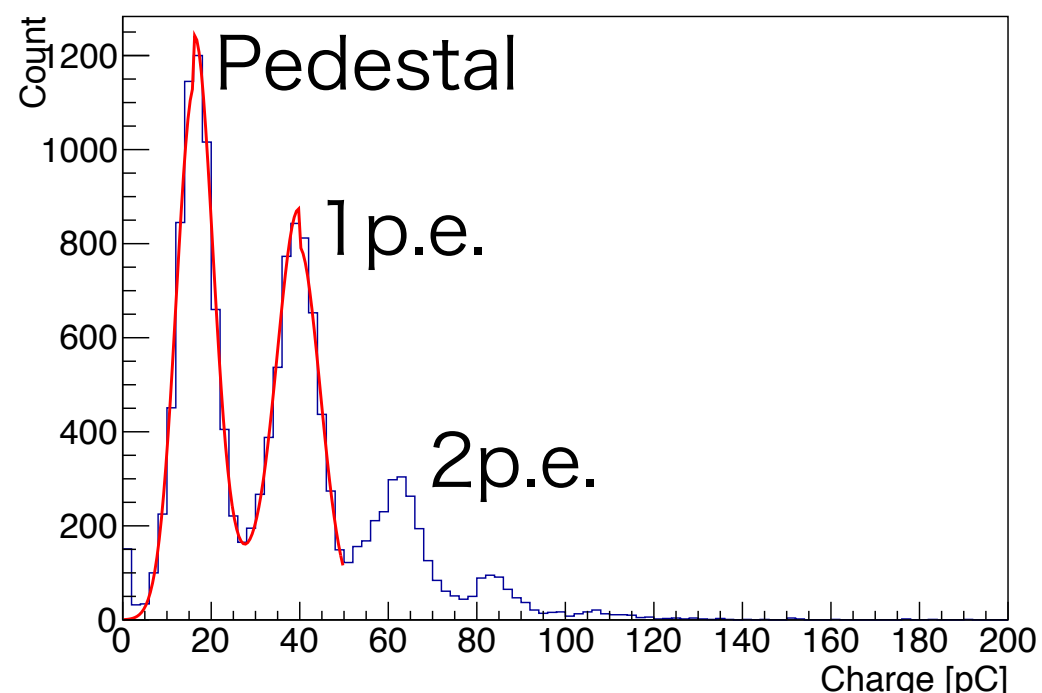
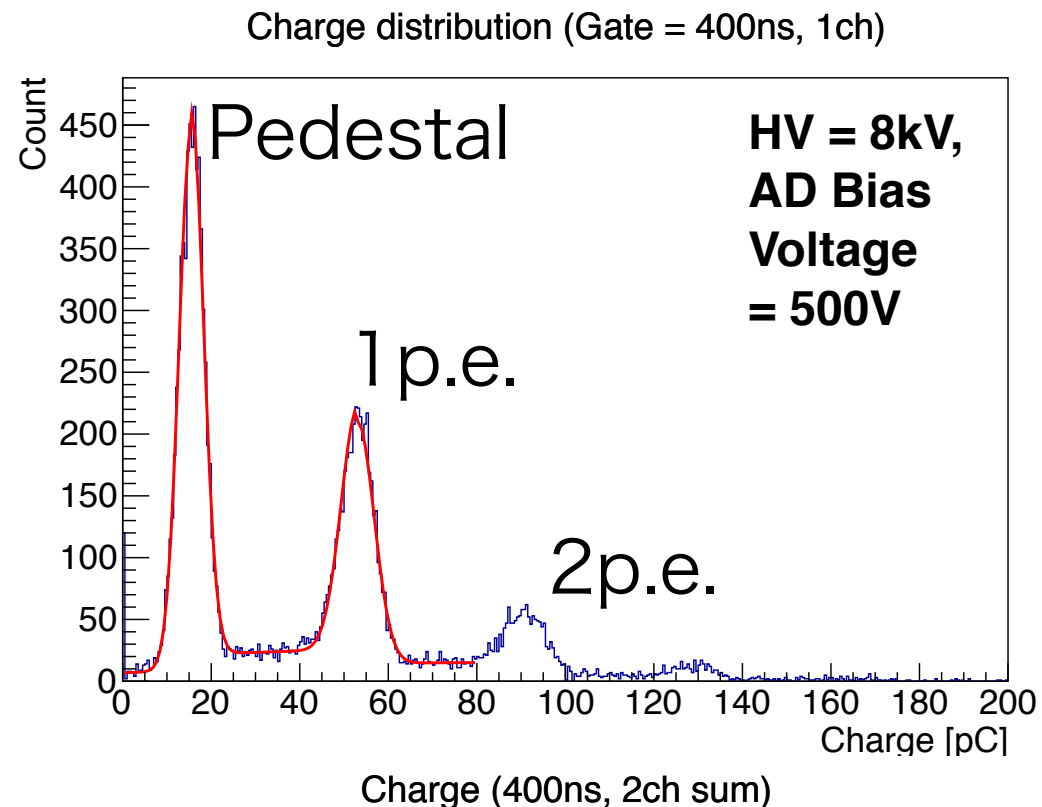
個別読み出しの出力波形



サムアップの出力波形



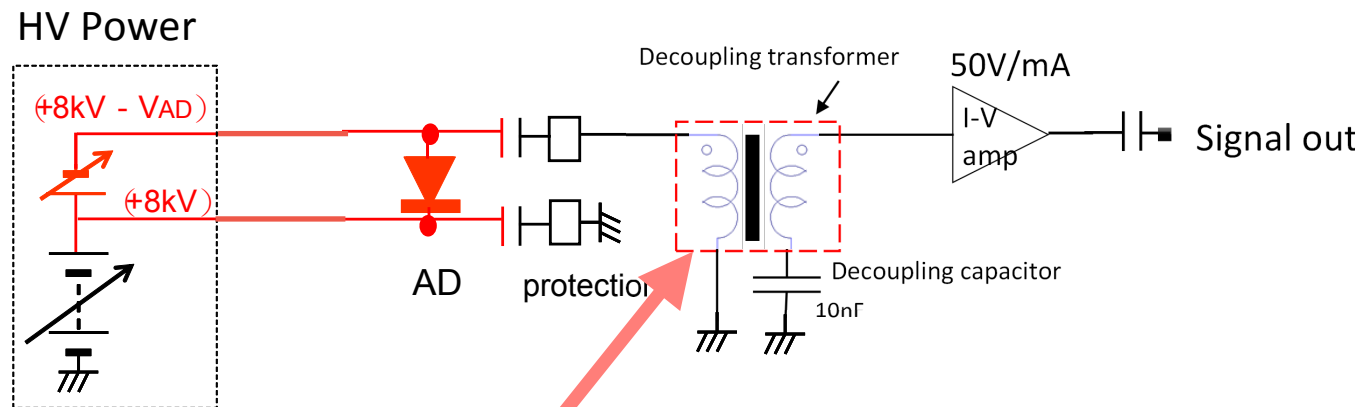
2ch HPD w/ 400pF ADの1 p.e.分解能・P/V比



	1 p.e. resolution	Noise Level	P/V
2ch HPD w/ 20mm AD (1ch)	10%	7.4%	9.2
2ch HPD w/ 20mm AD (2ch Sum)	20%	17%	5.0

- ・ 160pF → 200pFによるノイズの急激な増加は見られない
- ・ 2ch sumしても1 p.e.が分離
- ・ クロストークによりゲインが減少
→ ADの改良中
- ・ Sum-ampの改良によって1 p.e.
resolution, P/Vを改善予定

1ch HPD w/ 400pF AD, トランスを用いた試験



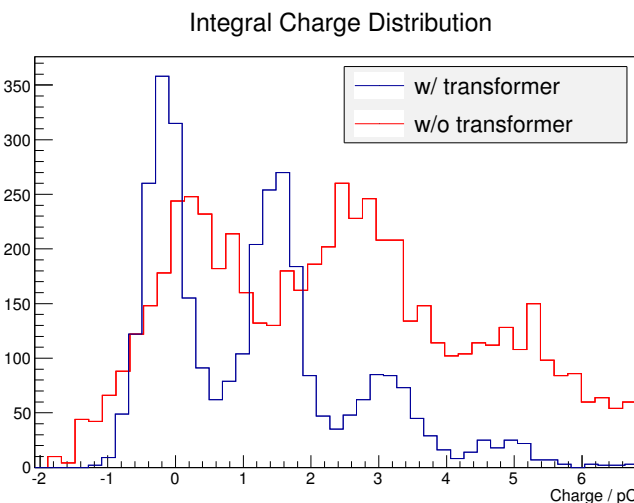
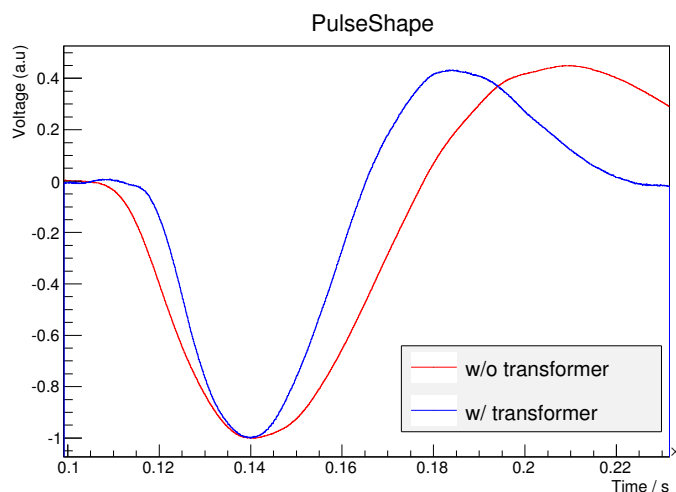
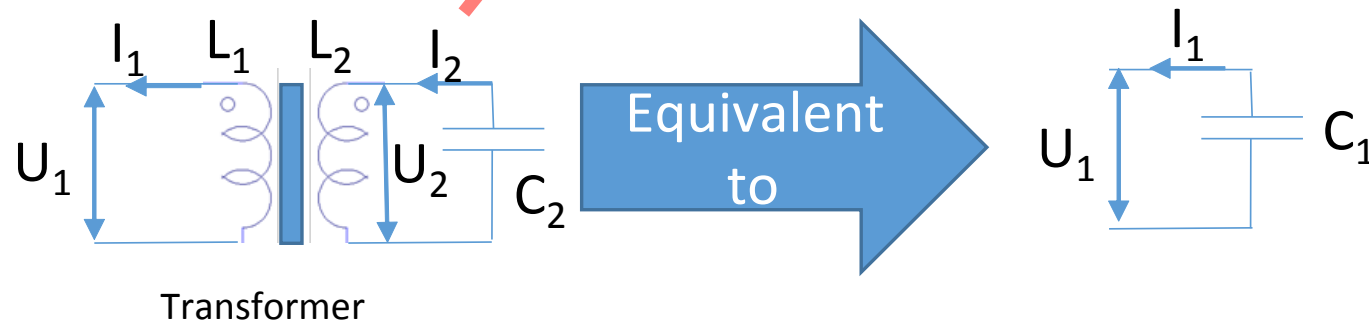
$$I_1 = C_1 \times \frac{\Delta U_1}{\Delta t}$$

$$I_2 = C_2 \times \frac{\Delta U_2}{\Delta t}$$

$$I_1 = n \times I_2$$

$$\Delta U_2 = n \times \Delta U_1$$

$$C_1 = n^2 \times C_2$$



20inch HPD w/ 14.7mmΦ AD での先行研究の結果。

トランスの効果が見られている。

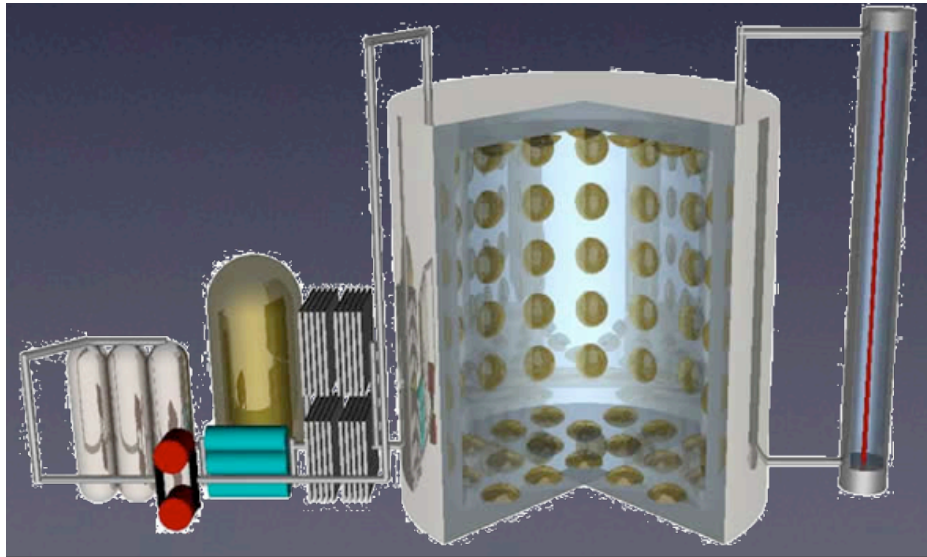
- ・ トランス：コイルを二つ並べた素子
- ・ 各電流値、電圧値は上式に従うため、アンプから見える入力キャパシタンスは元のキャパシタンスの n^2 倍
- ・ 巻き数比 $n < 1$ とすることで入力容量を減らせる
- ・ 現在、トランスを含めたプリアンプを試作中。三月にHPDに実装して試験予定

まとめ

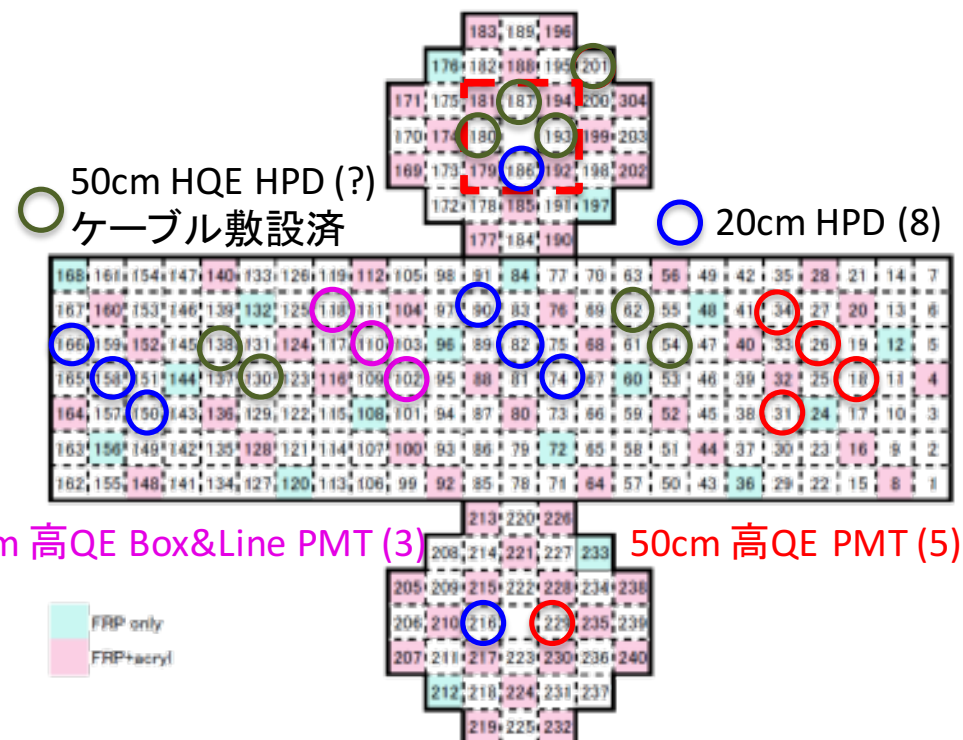
- ・ 開発状況
 - ・ 8inch HPD, 20inch HPD w/ 5mm Φ ADは開発を経て現在、20inch HPD w/ 20mm Φ ADの開発が進んでいる
 - ・ ADの大面積化に伴うノイズの増加を抑えるため、新しいプリアンプを開発し、5ch HPD と 2ch HPDの試験を行った
 - ・ 5ch HPDは個別のchは良い性能
 - ・ 2ch HPDは個別・サムアンプ読み出しともに良い性能
- ・ 今後の予定
 - ・ 1ch HPD + トランスのオプションを試験・性能評価
 - ・ プリアンプの時間分解能の向上
 - ・ 十分な性能が得られ次第、20inch HPDの水中試験を行う

Backup

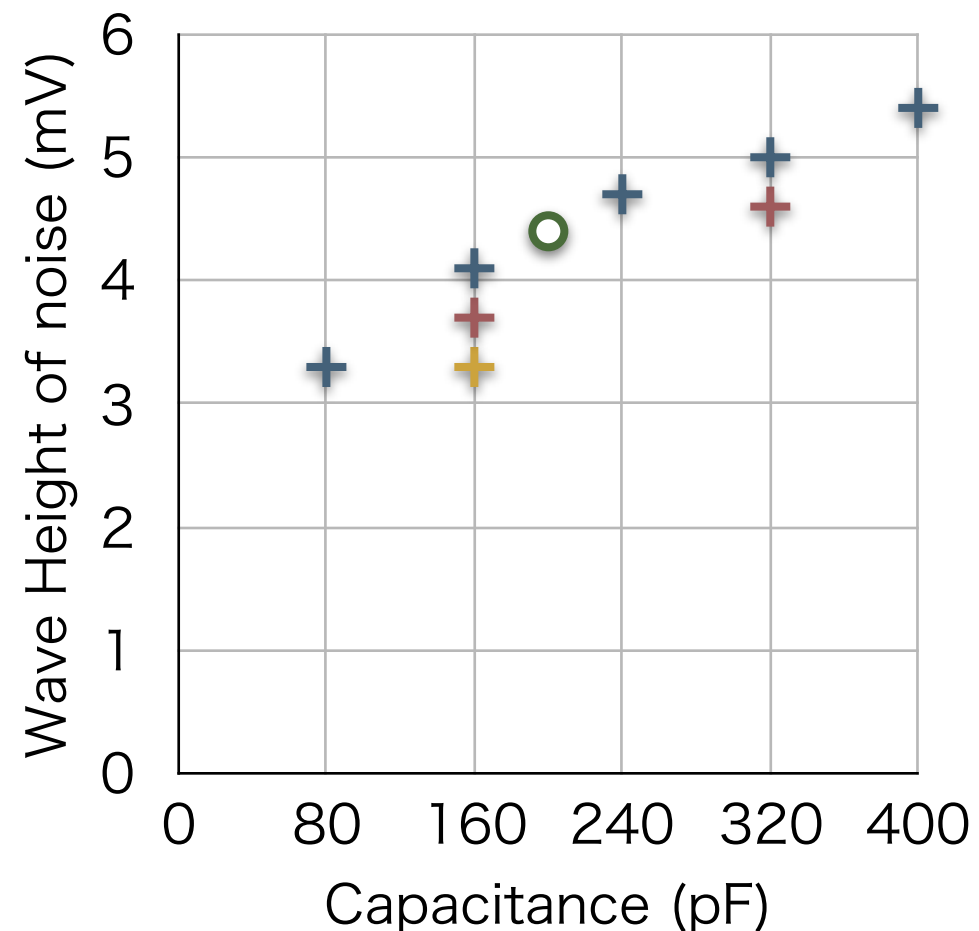
水中での実証試験用HPDに対する条件



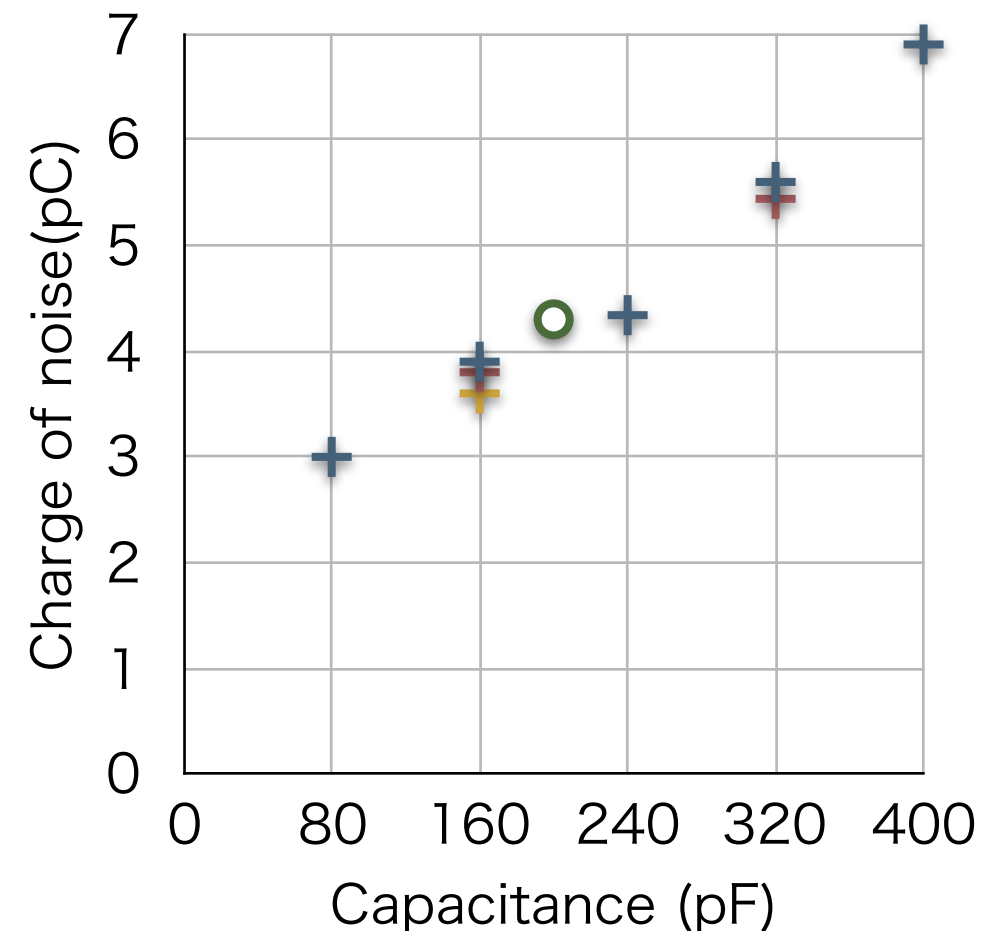
- ・ 200水タンクEGADSにインストールし、水中で実証試験を行う
- ・ 取り付け条件
 - ・ ダークレート 35 kHz以下
 - ・ 暗中放置一時間で 20kHz
 - ・ 安定後、10kHz(常温)を第一目標、最終的に3kHz(年内・15°C)を目標
- ・ P/V比 1.3以上
- ・ 耐久性試験
 - ・ 3日間連続印加
 - ・ 100回以上 HV on/off
- ・ 正極(逆)大パルス 1 Hz以下
- ・ 水中で 動作確認 (放電・発光なしを保証)



ノイズレベルと接合容量の関係

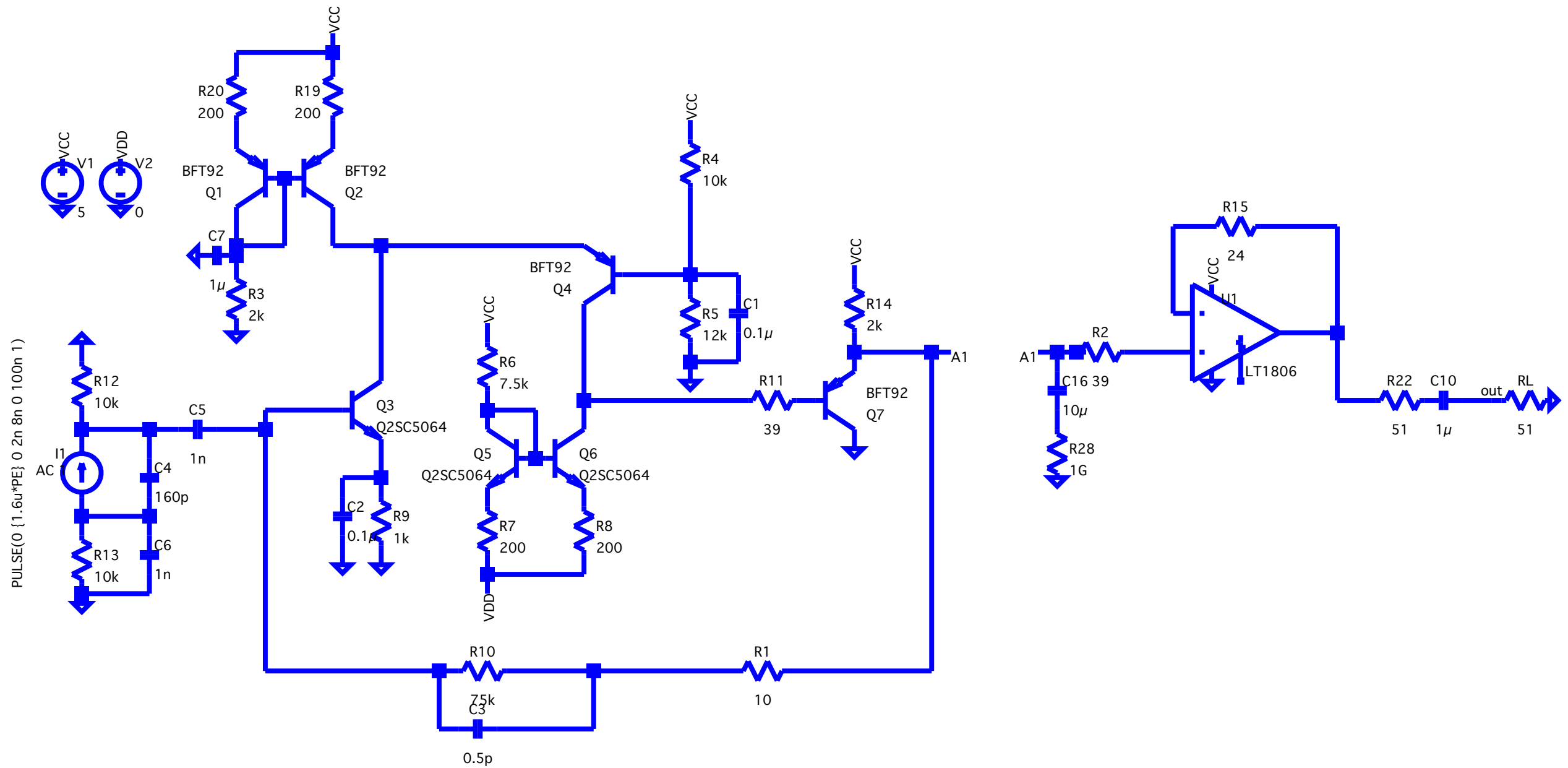


- + 5ch new AD
- + 5ch Old AD
- + HPD w/ 5ch old AD
- HPD w/ 2ch new AD



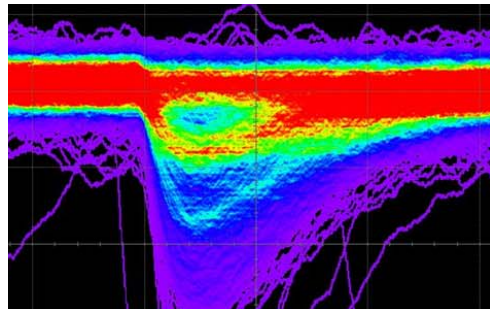
- ・ gate=400nsでノイズの波高と積分値を測定
- ・ ノイズレベルは接合容量に主に依存している

プリアンプ回路図

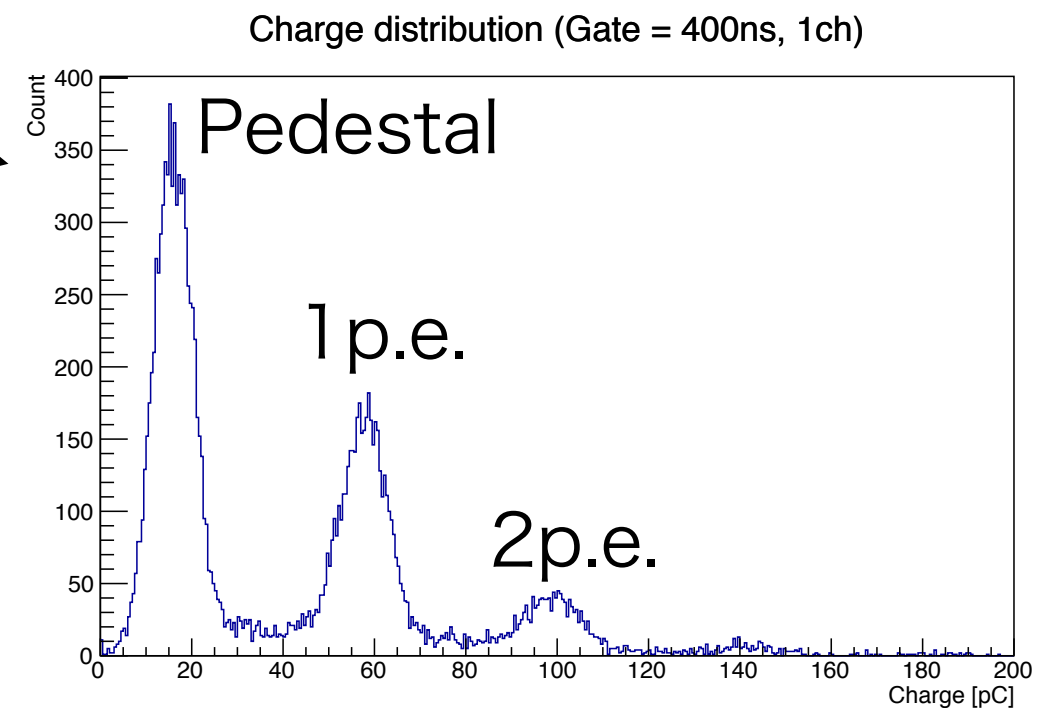
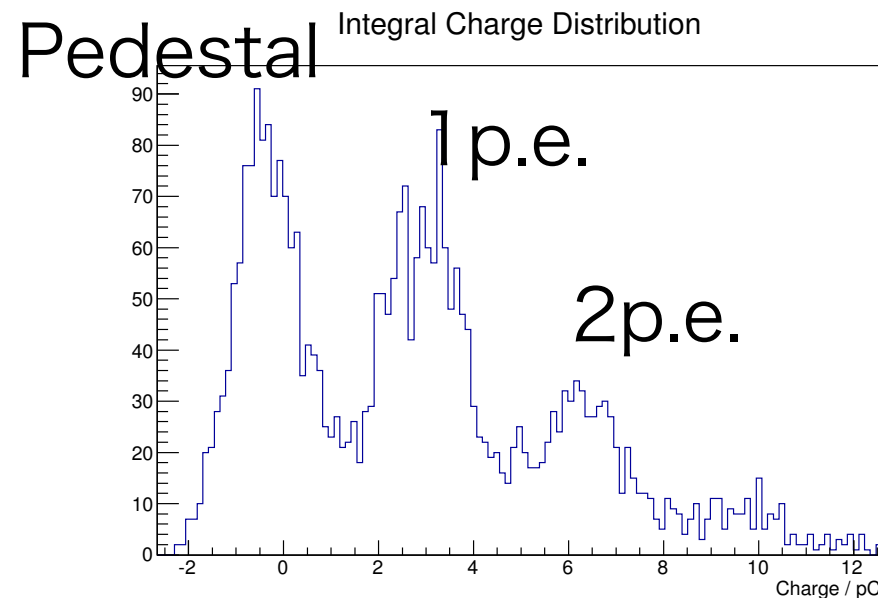
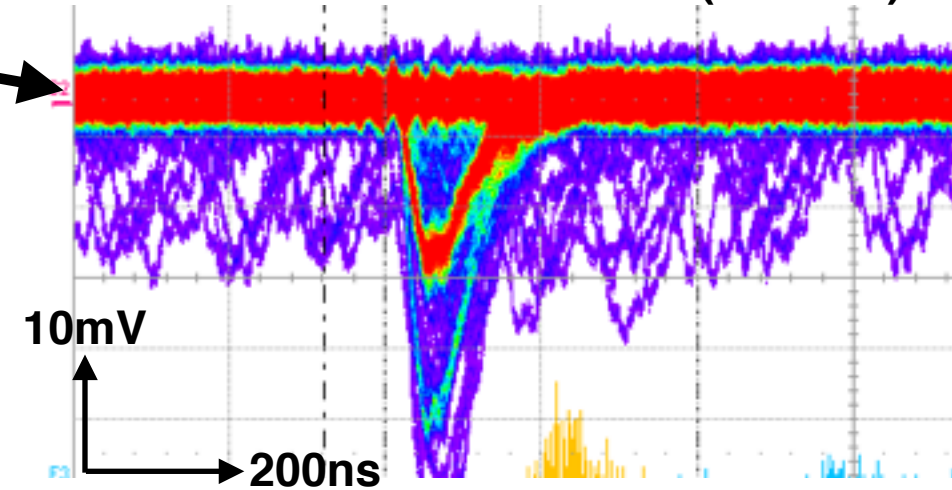


5ch HPD w/ 800pF AD (個別読み出し)の 波形・電荷分布

Waveform of HPD
(Summer, 2015)



Waveform of HPD (Current)

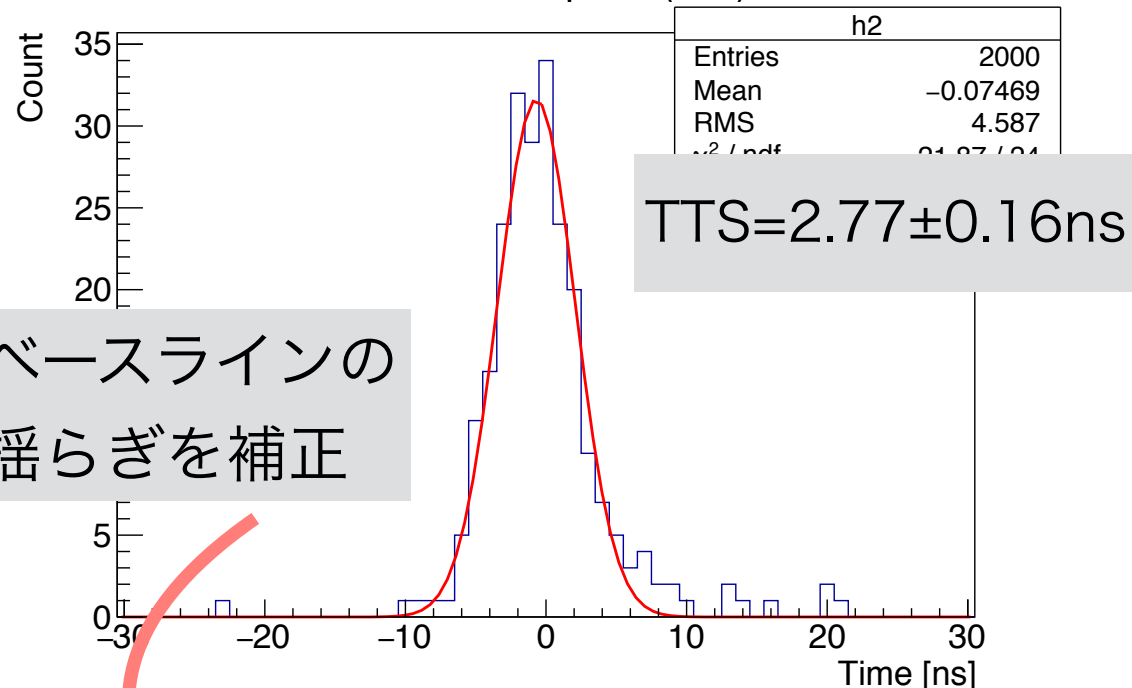


- ・ プリアンプの改良により、以前よりも1p.e.が綺麗に見えるようになった

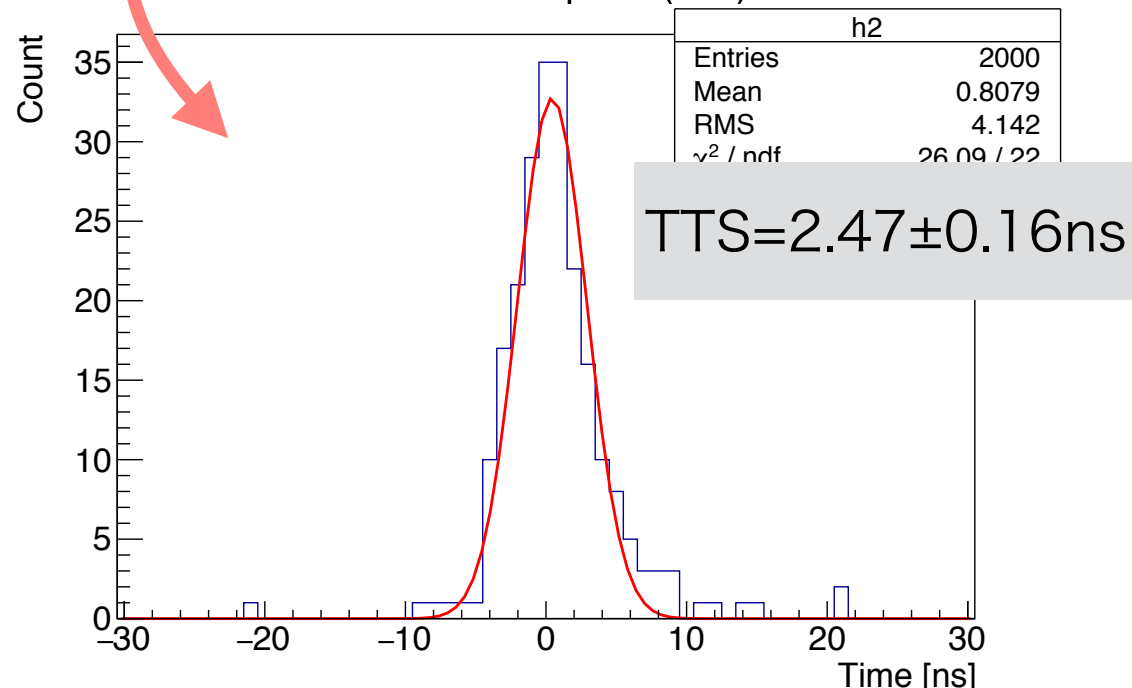
HV=8kV, AD Bias Voltage = 400V

2ch HPD w/ 400pF AD (個別読み出し)の 1 p.e. Transit Time Spread (TTS)

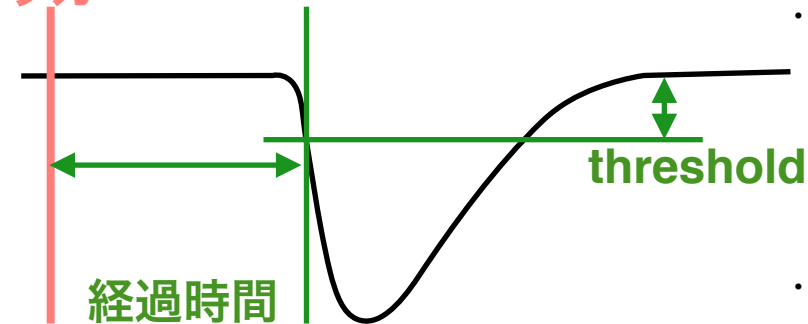
Transit Time Spread (TTS)



Transit Time Spread (TTS)



トリガー



- threshold=-5mV (0.25p.e.に相当)とした時の通過時間を測定
- 経過時間のゆらぎから時間分解能を測定

	20inchHPD w/ 5mmΦ AD	SK PMT	HK requirement
TTS [ns]	1.15	2.2	1

- GaussianのフィットによるsigmaでTTSを評価
- HPD単体のTTSは1ns以下
- Pre-ampによって悪化している
 - Pre-ampの改良によって改善可能
- 波形フィッティング・Time Walk補正など、読み出し法を工夫することでも改善が見込まれる