

# K<sup>0</sup>T0実験における 荷電粒子Veto検出器の開発

京都大学理学研究科

物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室

内藤大地、前田陽祐、河崎直樹、増田孝彦、

臼杵亨、塩見公志、森井秀樹、南條創、野村正、

笹尾登

# Contents

- $K^0$ TO実験

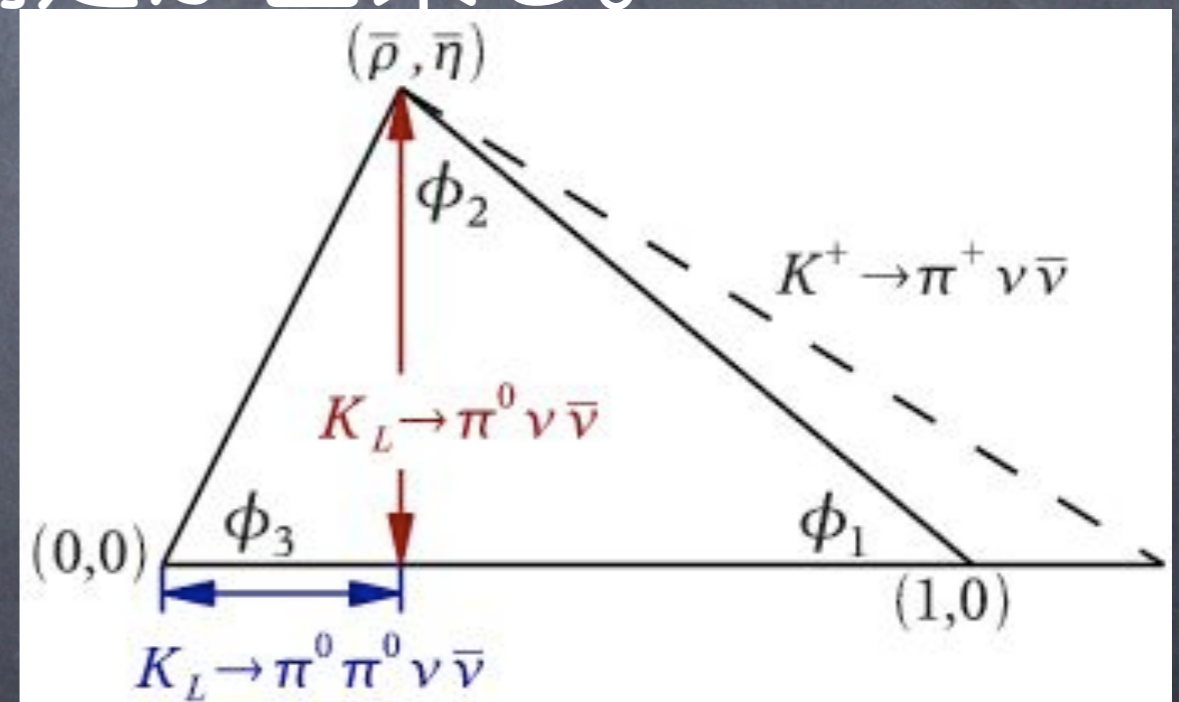
- 荷電粒子Veto検出器(CV)

- MPPCについて

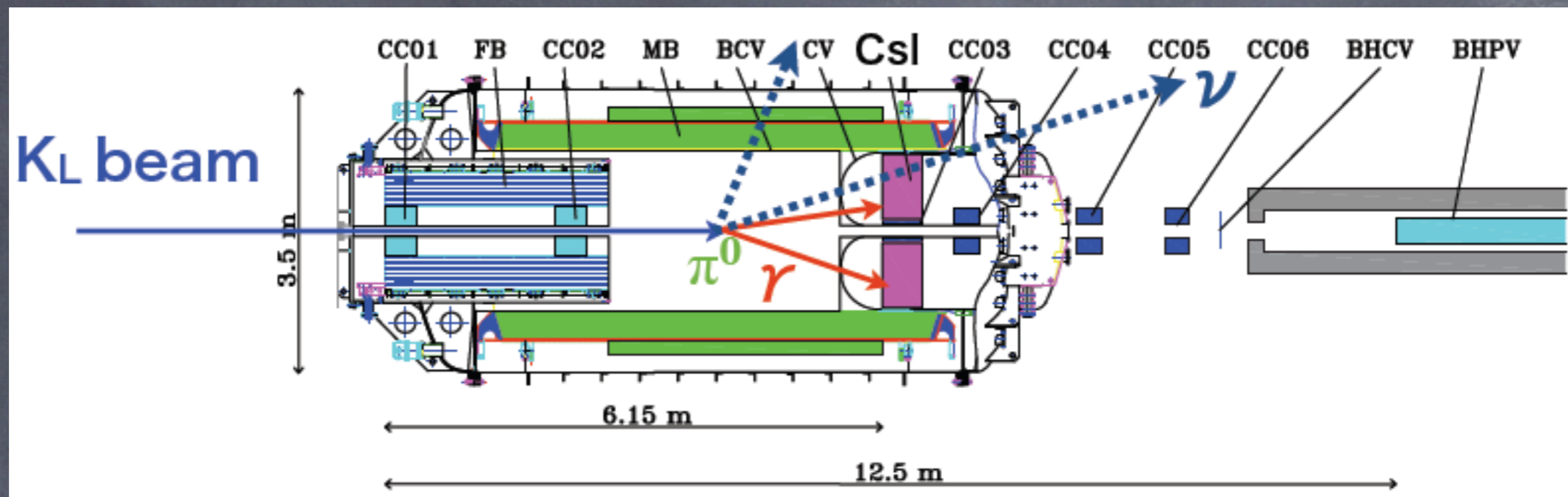
# KOTO実験( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験)

- KEKで行われたE391aのアップグレード実験
- $2.8 \times 10^{-11}$ という非常に小さい分岐比
- $\text{Br}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto \eta^2$
- $\eta$ 以外のパラメータの持つ不定性が1~2%と非常に小さく、 $\eta$ の精密測定が出来る。

- 標準模型の精密な検証
- 新しい物理への可能性
- 反応に関わる粒子が全て中性なので測定が困難

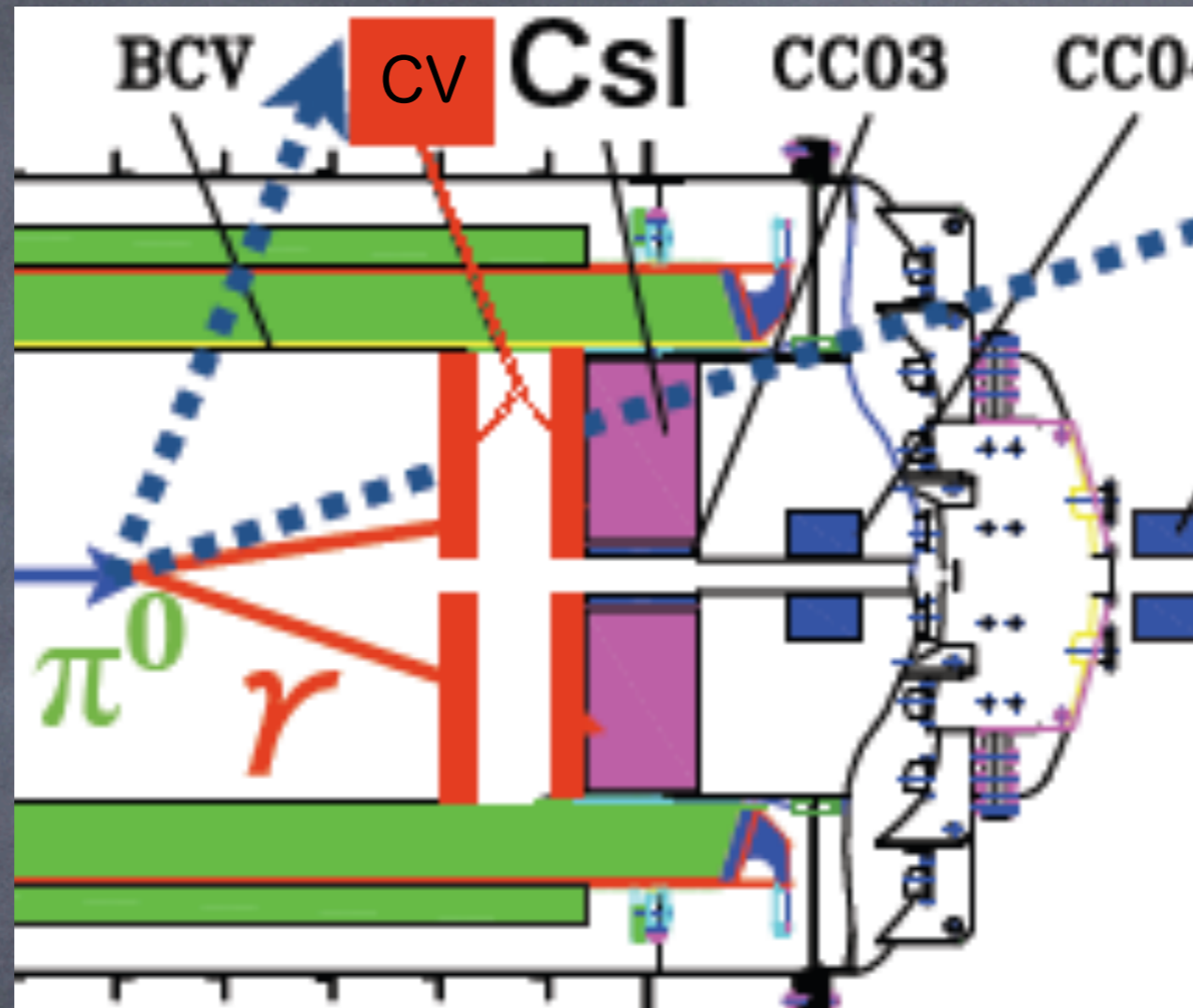


# 実験原理



- KL崩壊による $\pi^0$ から崩壊した $2\gamma$  (分岐比99%)をCsIカロリメータで位置とエネルギーを測定し、 $\pi^0$ を再構成する
- 崩壊領域を全立体角Veto検出器で覆い、 $2\gamma$ 以外何も検出しないものをsignalとする。

# 荷電粒子Veto検出(CV)の役割



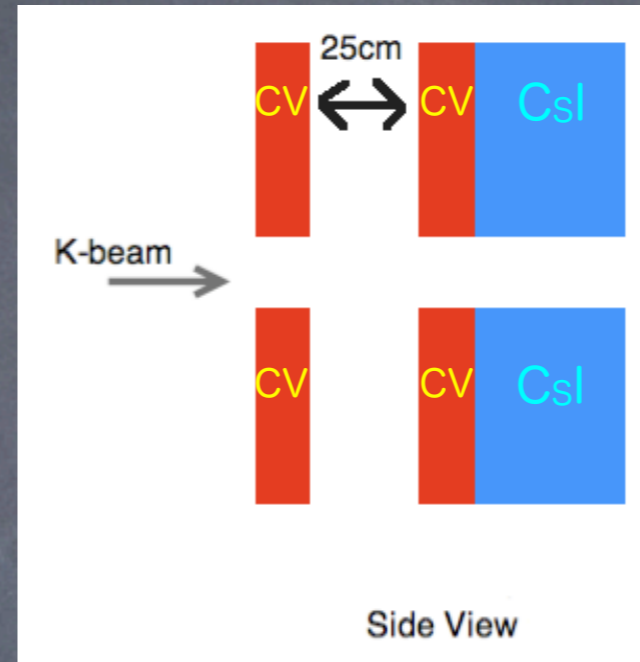
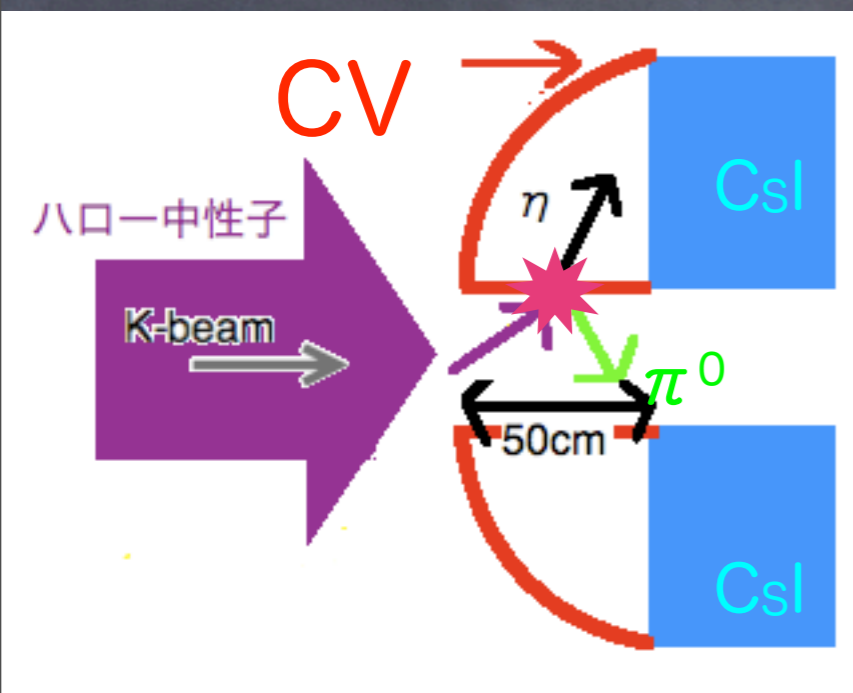
●  $K_L$ 崩壊によって生じた荷電粒子をVetoする

•  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$

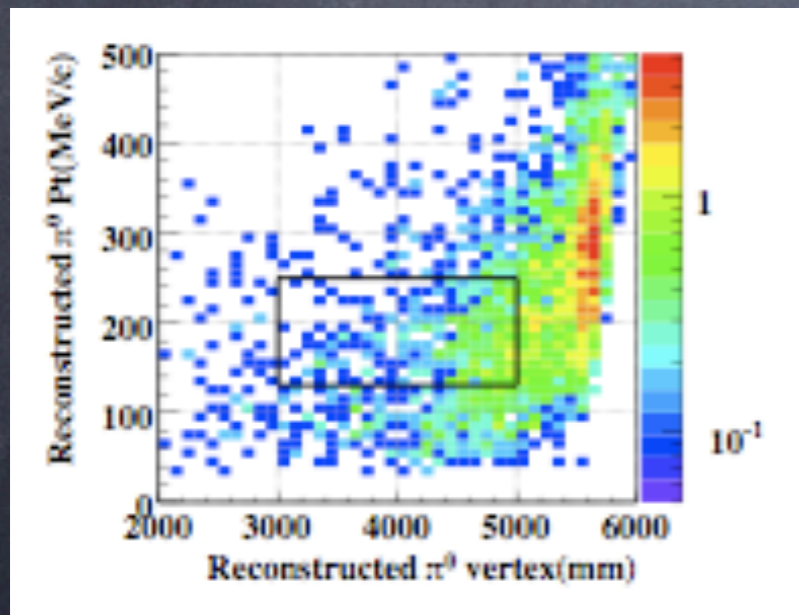
•  $K_L \rightarrow e^+ \pi^- \nu$

● 荷電粒子に対して $10^{-4}$ 以下のinefficiencyを要求

# CVデザインの改良



E391aのCVデザイン

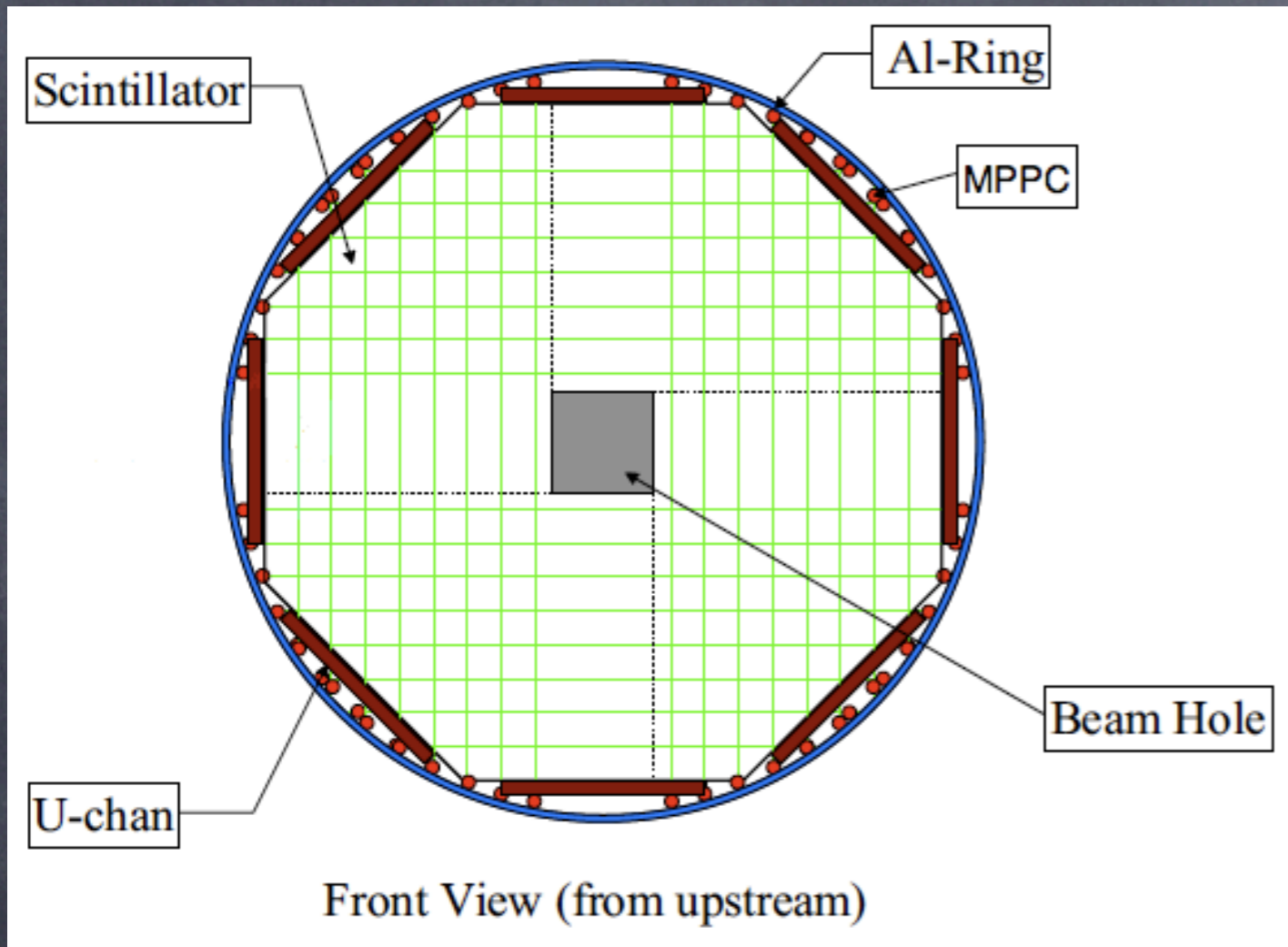


CV- $\pi^0$   
Background

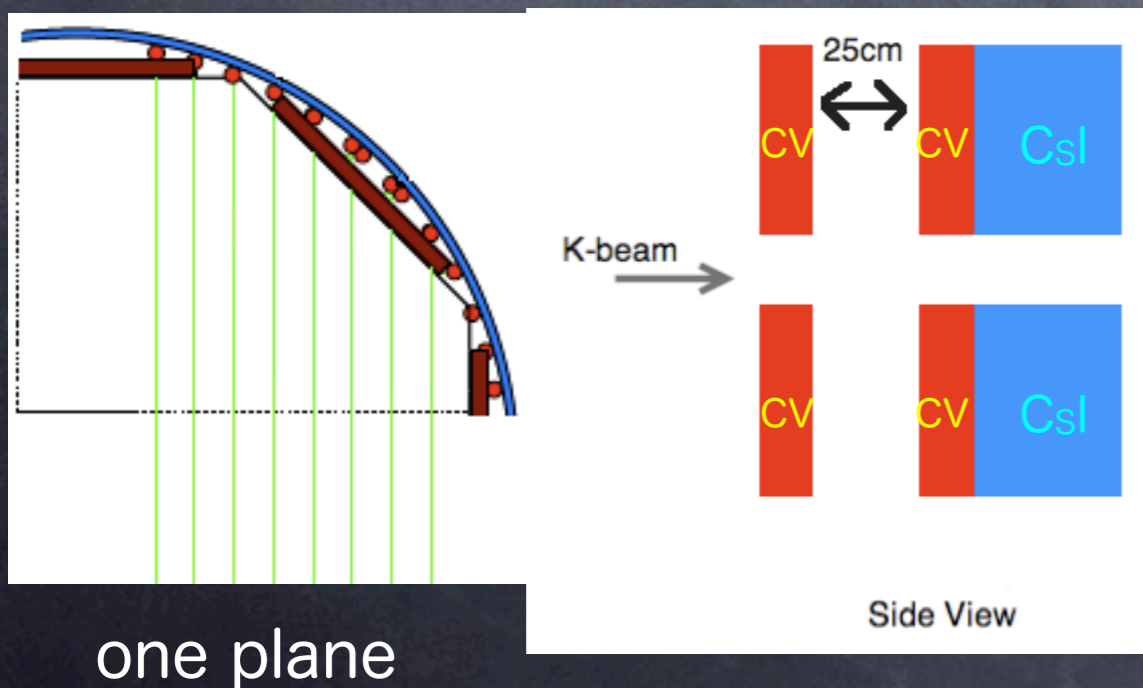
KOTO実験のデザイン

- ・二層構造でinnerをなくす  
(beam軸と平行な部分)
- ・signal regionから離す
- ・シンチレータを薄くする  
(10mm→5mm)

# 具体的なCVデザイン



- ・正八角形
- ・シンチレーターの面積 =  $1.5\text{m}^2$
- ・シンチレーターの厚さ =  $5\text{ mm}$
- ・2プレーン
- ・一つはCslの直前
- ・一つはCslから25cm
- ・ビーム上流
- ・一つのプレーンは4つのモジュールからなる



one plane

# Read Out Design

- WLS fiber(クラレY11)を使う
    - (1 module 64本、合計512本)
  - DetectorとしてMPPCを用いる ←ファイバーは両読み出し
    - (1 module 128本、合計1024本)
  - MPPCは8本ギャングして使う
    - (1 module 16 ch、合計128 ch)
- Cf:ギャングとはMPPC8個を並列につないで回路上で一つの信号に合成して1つの信号として読み出す
- 読み出しにはFlash ADCを用いる



# MPPPCを使うメリットとデメリット

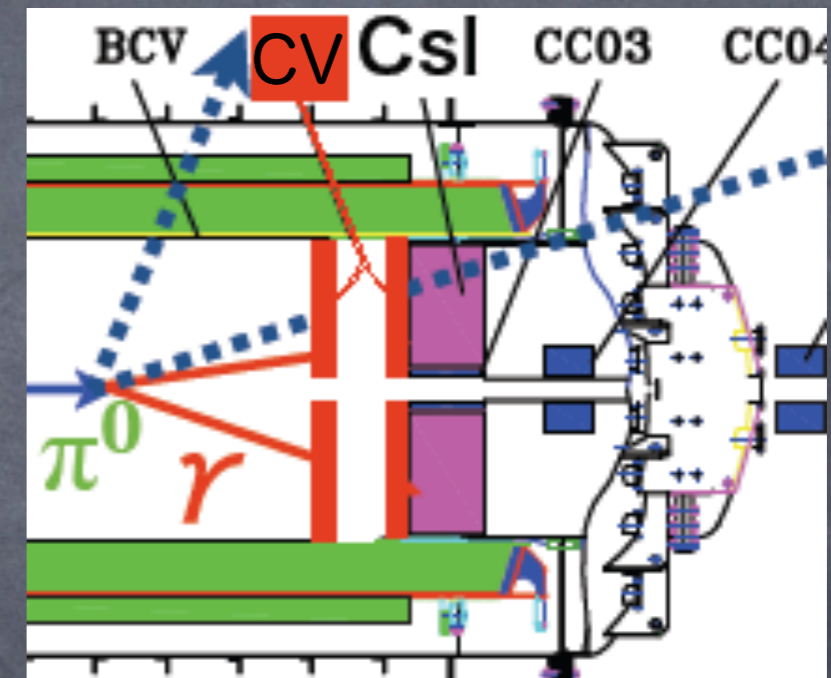
- スペース的要請

- inefficiencyの問題から光量が重要

緑の波長域に対して量子効率が30%

Cf:普通のPMTは15%

- コストが安い



- MPPPCを使うデメリット

- ・ダークカレントノイズによるaccidentalなAcceptance lossが大きい恐れがある(Vetoカウンターなので)

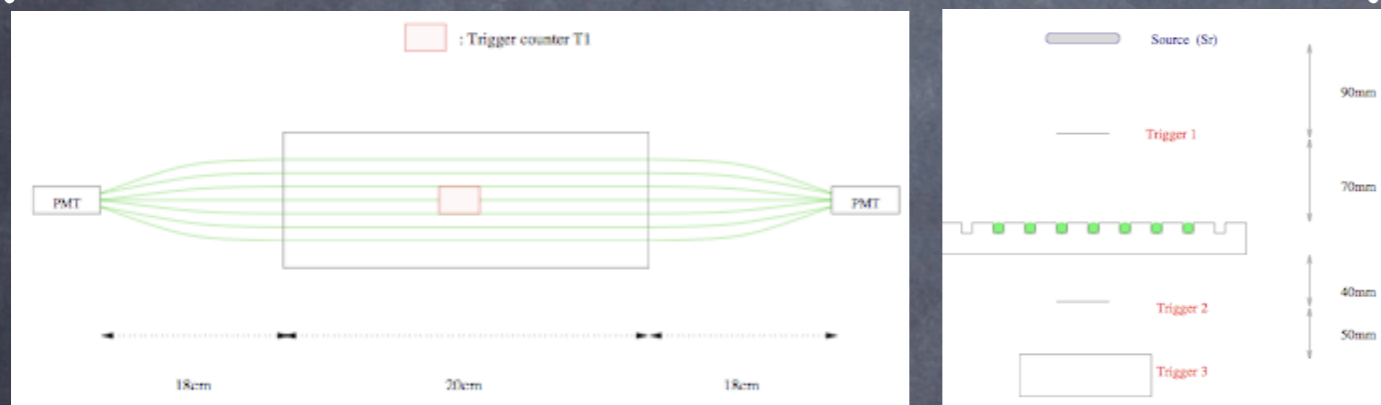
# MPPPCに対する要求

CVはenergy depositで100keVのthrが要求されている。

→100keV thrは6.5p.e.thr

に相当

(テスト実験により実証済み)

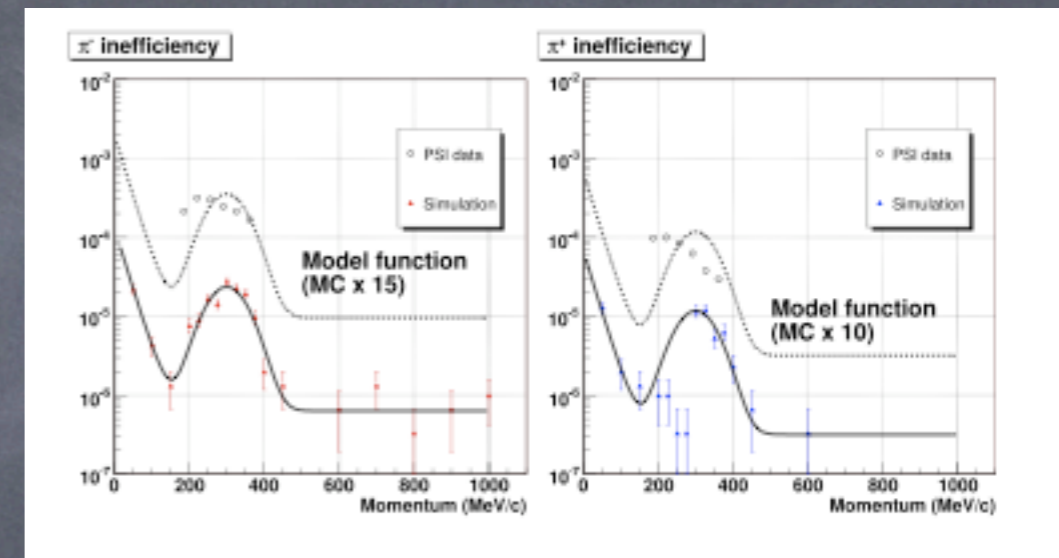


## ● 2個ギャングの特性

- ・単体時との比較

## ● 8個ギャングの特性

- ・6.5p.e.thr時のノイズレートとAcceptance loss



KOTO実験におけるVetoカウンター  
全体の荷電粒子に対するinefficiency  
function

## ・MPPC単体の基礎特性

- ゲインと電圧の線形性

- BreakDown Voltage(ゲインが0になる電圧)

- ダークカレントノイズレート

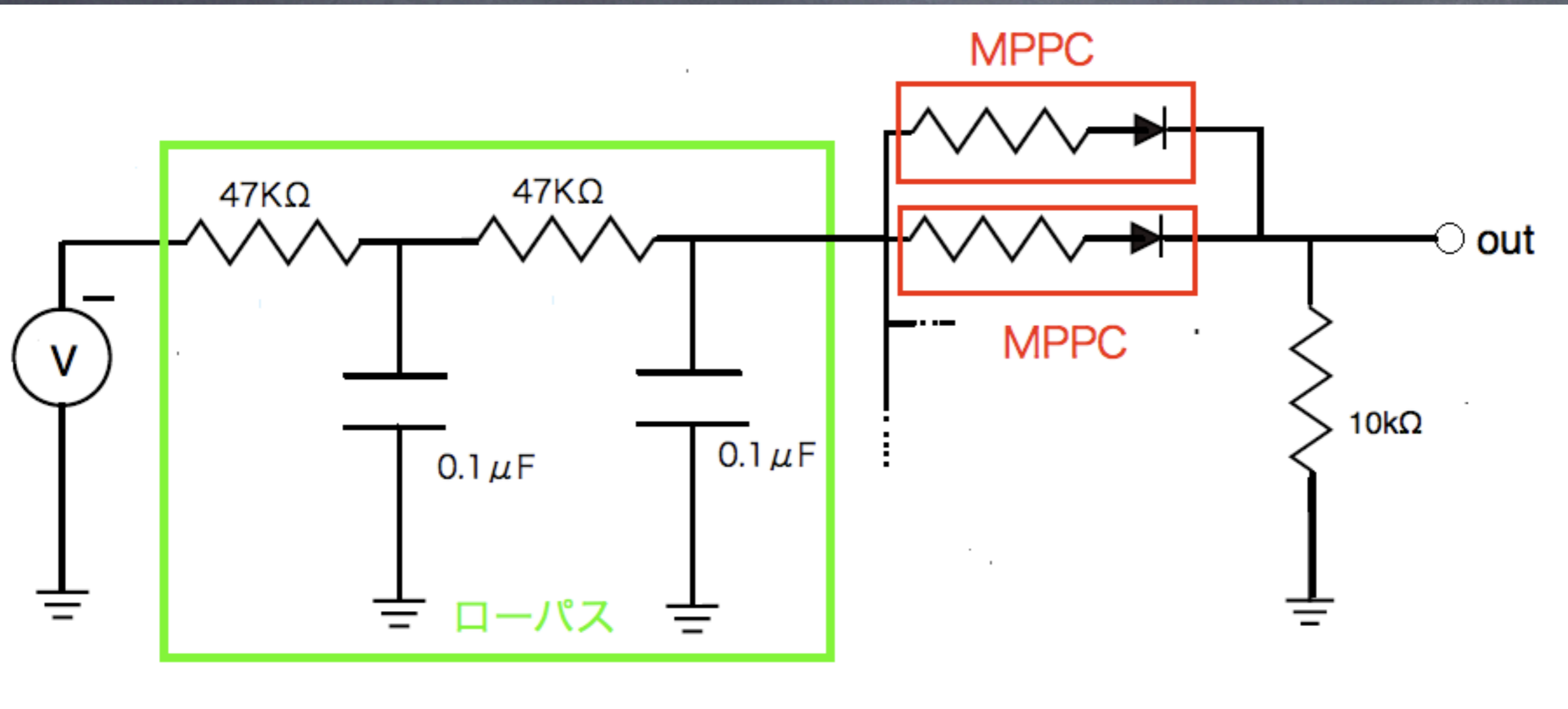
## ・ギャング(2個)したときの基礎特性

- 単体の時と同じ

## ・ギャング(8個)した時のダークカレントノイズレート

→測定はそれぞれ25°C、0°C、-20°Cの温度三点に対して行った。またギャングにはゲインが±3%以内のものを用いた。

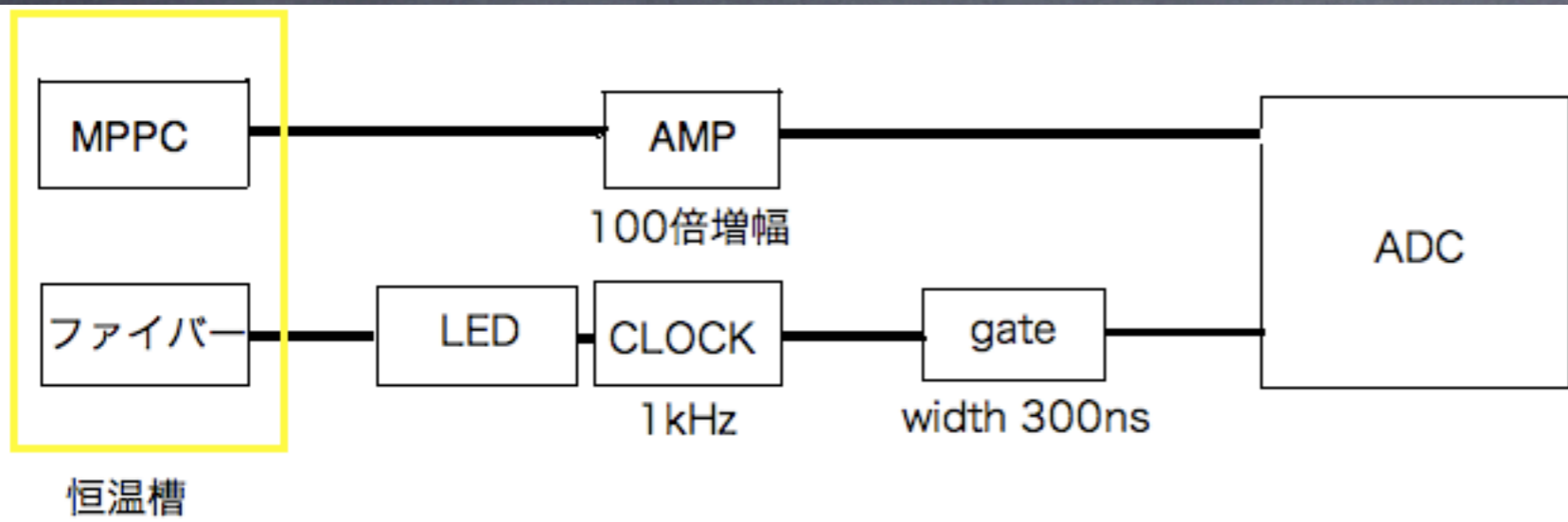
# 実験のセットアップ～その一～



ガンギング回路

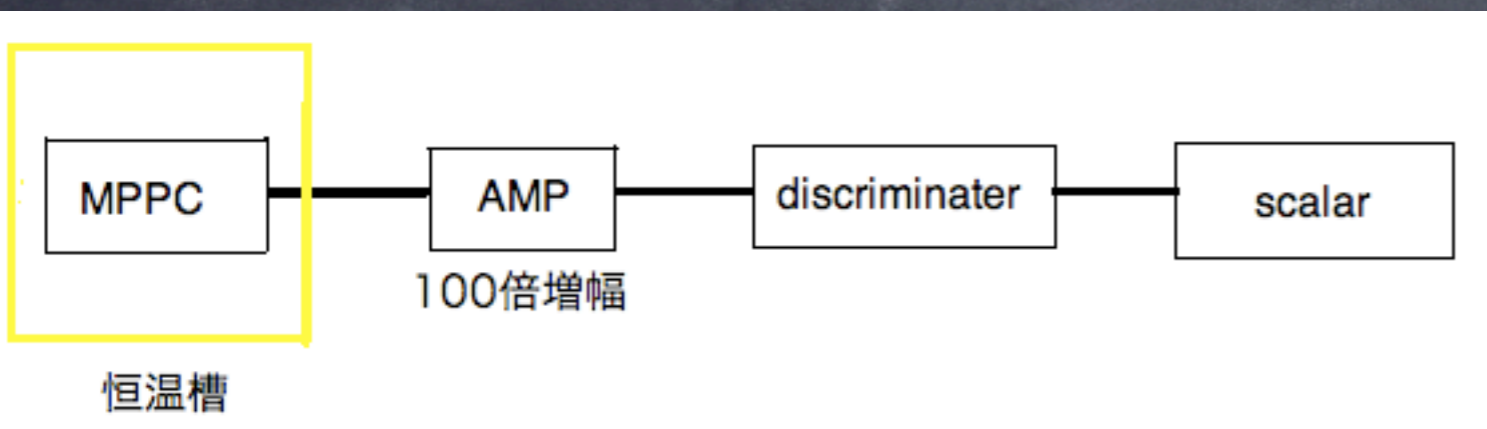
# 実験のセットアップ～その2～

## ・ゲイン測定



$$\text{gain} = (\text{ch}_1 \text{ p.e.} - \text{ch\_ped}) \times 0.25 \text{ pc} \div \text{素電荷} \div \text{増幅率}$$

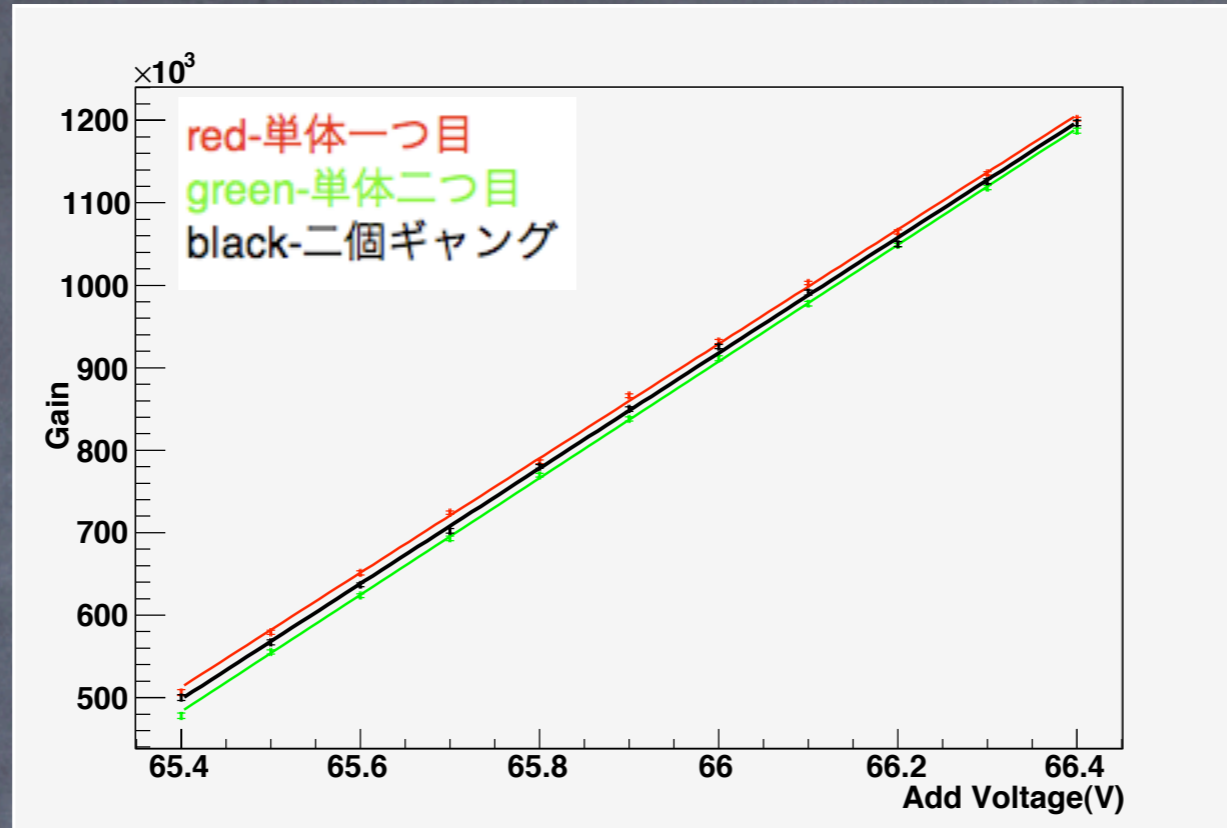
## ・ノイズ測定



# 2個ギヤングと単体の比較

- ・ゲインとリニアリティ
- ・ノイズレート

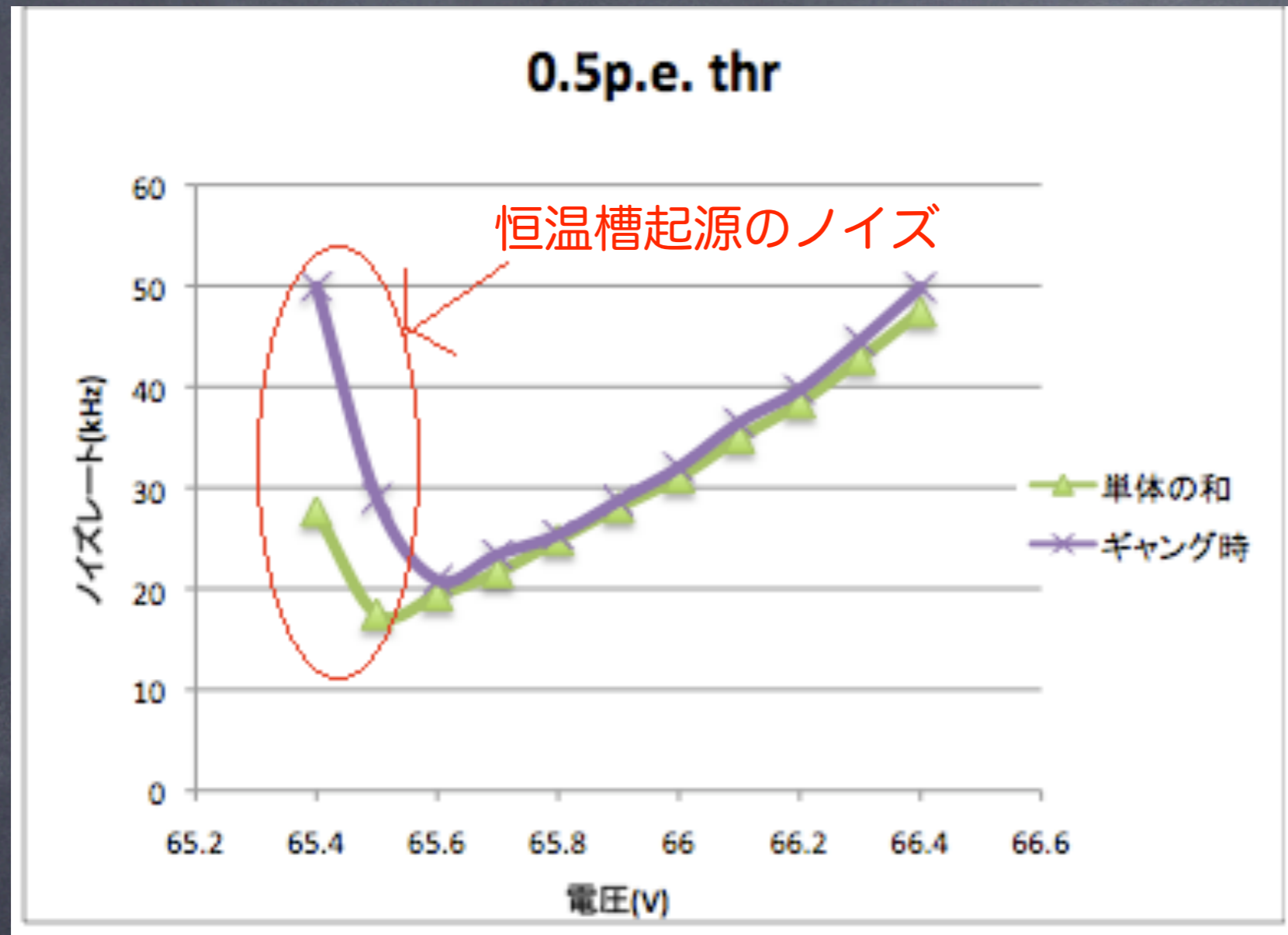
# ゲインとリニアリティ(-20°C)



	傾き	BreakDown Voltage
単体 1	$7.072 \times 10^5$	64.66
単体 2	$6.937 \times 10^5$	64.72
ギャング	$6.995 \times 10^5$	64.68

2個ギャングした時のゲイン, BreakDown Voltage はエラーの範囲内で単体同士のゲインの平均と一致した。

# ノイズレート(-20°C)



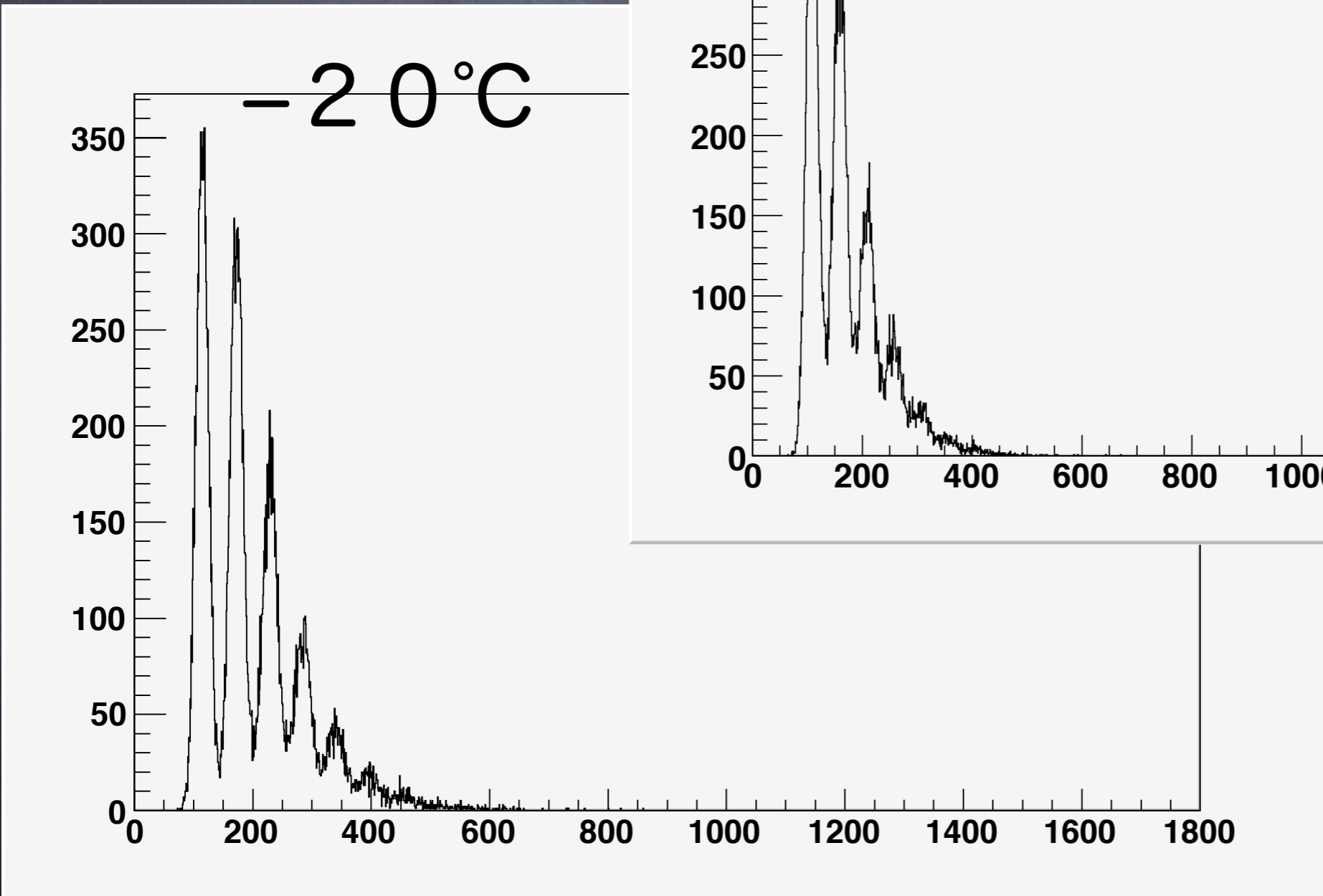
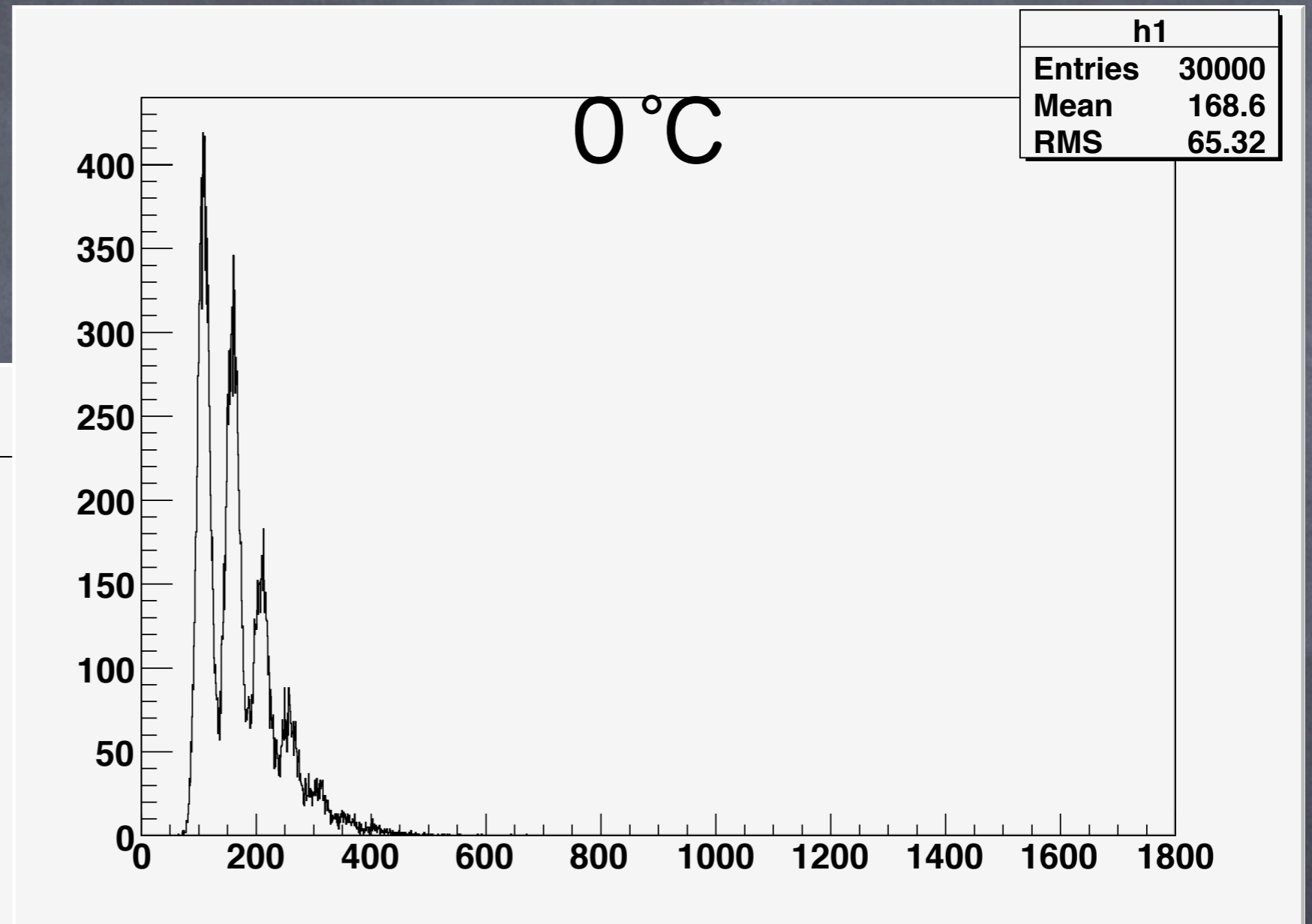
ノイズレートは単体時の和になった



# 8個ギヤング

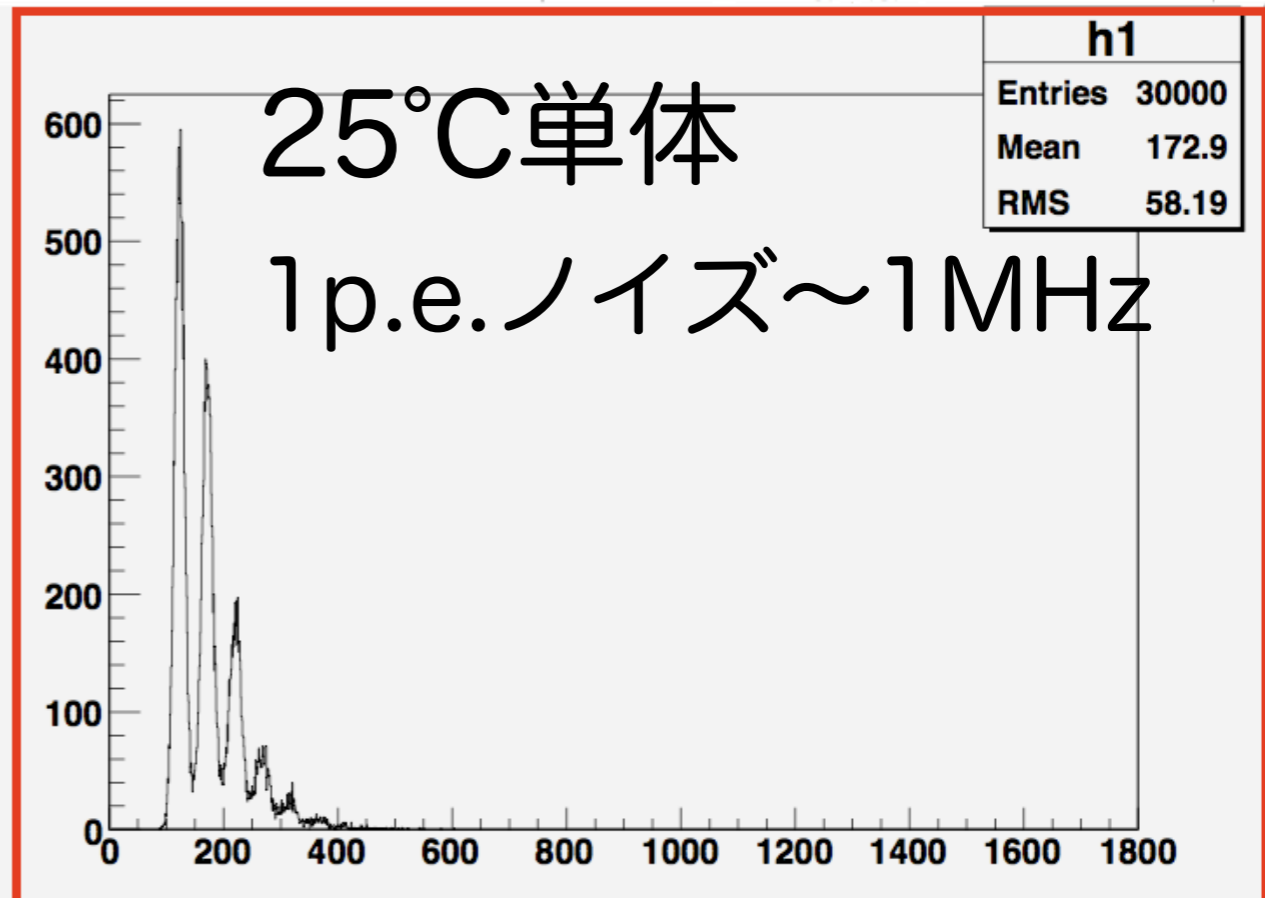
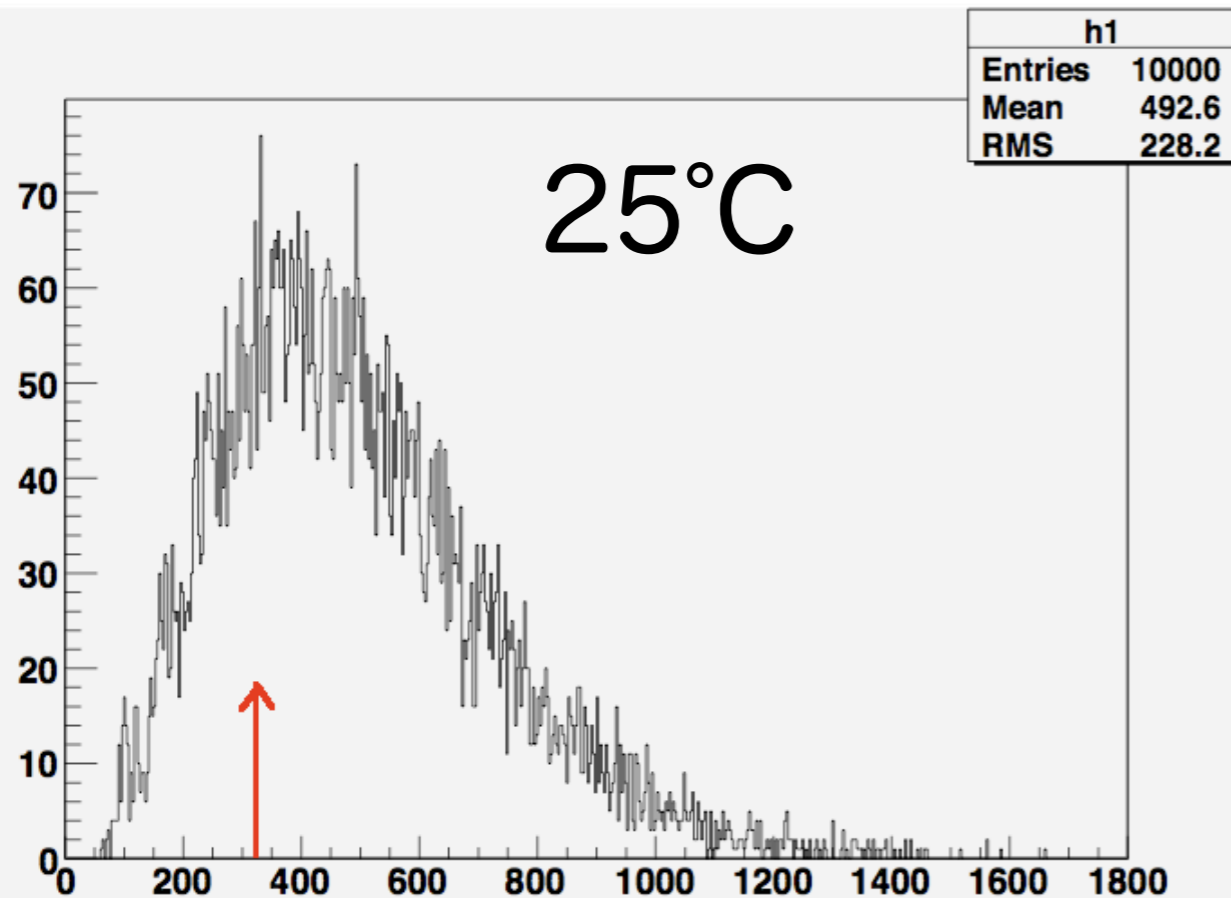
- ・ADCスペクトラム
- ・6.5p.e.thr時のノイズレート
- ・Acceptance lossの見積もり

# ギャングした時のスペクトラム



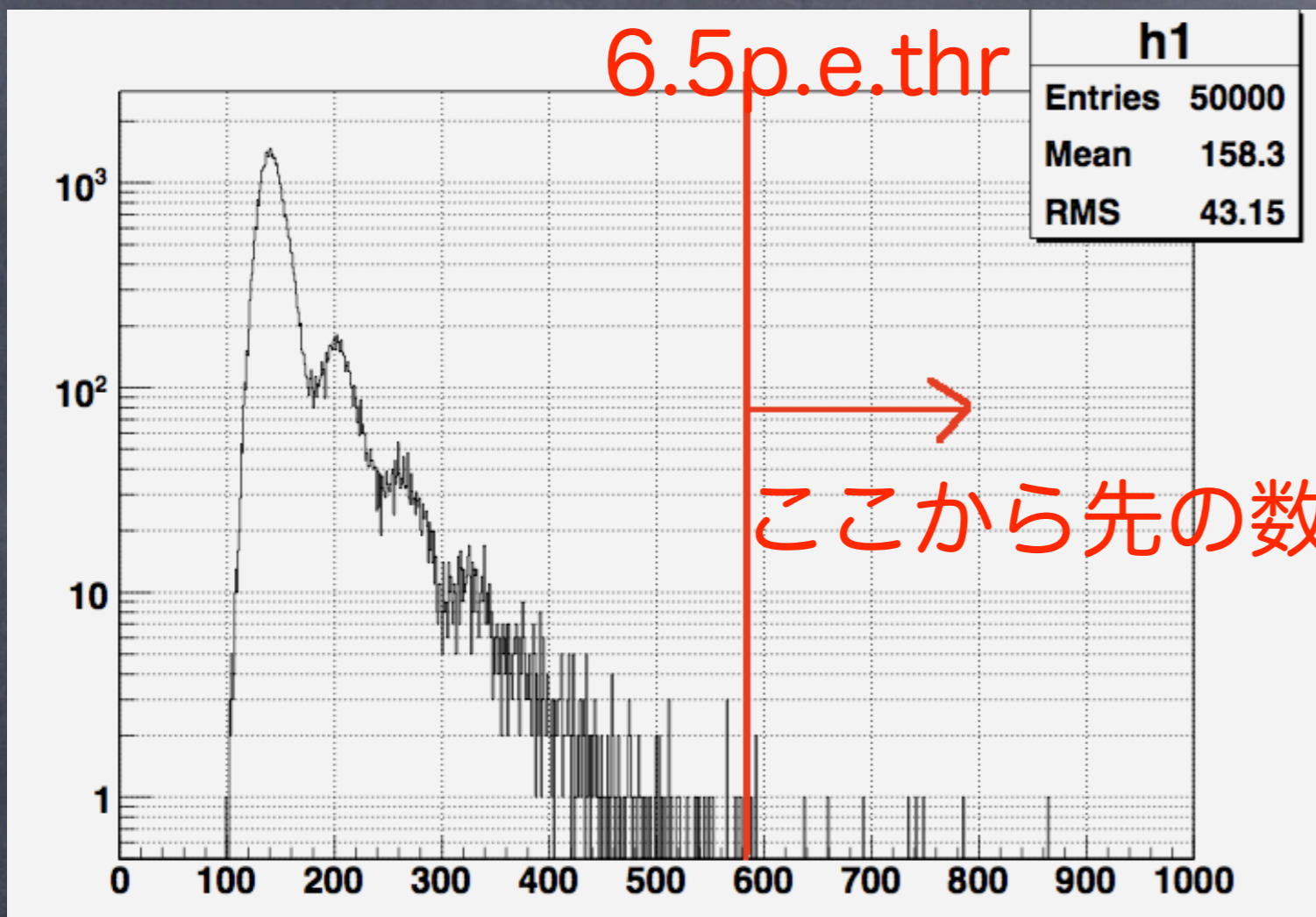
電圧を調整してゲインを揃えてある

# 25°Cのスペクトラム



- ・ゲートが300ns
  - ・LEDの平均光量が1p.e.
- ゲートに入る平均光量は  
 $8\text{MHz} \times 300\text{ns} + 1 = 3.4$

# ノイズレート測定



←0°C、8個ギャング

ここから先の数をカウント

## ノイズレート

=ADC Count/測定時間(ゲートwidth300ns×Event)

6.5p.e.thr	0°C	-20°C
ノイズレート(kHz)	4.4	0

# Acceptance lossの見積もり

- ・全ch数は128,ファイバーは両側読み出し
- ・両端でCoincidenceを取る
- ・MPPCからの信号の幅は40ns

## Acceptance loss

$$=(\text{noiserate} \times \text{信号幅})^2 \leftarrow \text{coincidenceのなる割合}$$
  
×ch数

- ・0°C, 6.5p.e.thrでモジュール全体のノイズは560KHz

Acceptance lossは $2 \times 10^{-4}\%$

Acceptance lossが1%以上になるthr

0°C	-20°C
1.5p.e	0.5p.e.

# まとめと今後の方針

## ●CVデザイン

- ・2plane構造

- E391a実験で問題になったバックグラウンドを抑える

## ●Read out design

- ・WLSF+MPPC

- スペース問題の解決

- 光量問題の解決→inefficiencyの保証

- ・ギャングすることでch数を減らす

## ●ギャング時の特性(2個)

- ・ゲインはギャングしたMPPCの平均になる

- ・ノイズレートはギャングしたものの和になる

## ●8個ギャングの運用可能性

→6.5thrの時ノイズレートは0°Cで4.4kHz,-20°Cで0kHz

→6.5thrの時Acceptance lossは0°C,-20°Cではほぼ0

→Acceptance loss 1%以下ならば0°Cで1.5p.e.,-20°Cで0.5p.e.までthrを下げられる

## ●今後の方針

- ・25°Cでの運用可能性

  - ノイズレート測定

  - ギャングする数の最適化

- ・プロトタイプを作成

- ・冷却システムの開発

BackUp



# MPPPCとは？

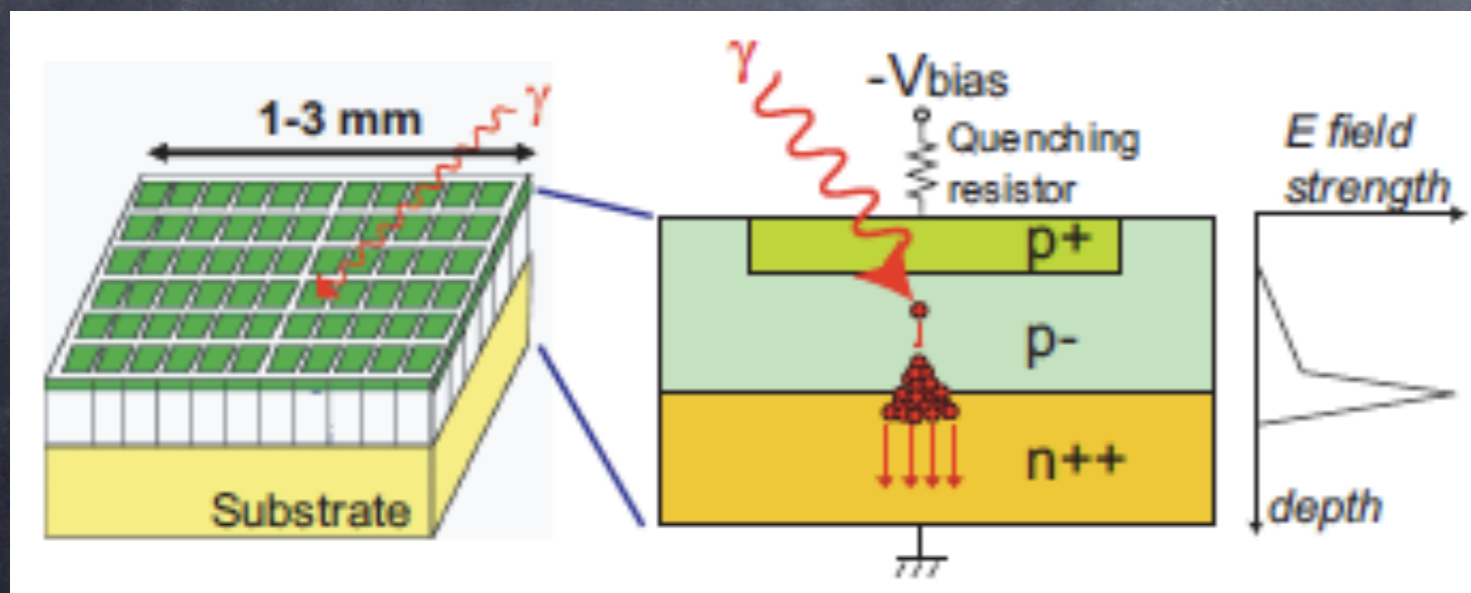
- ・Multi Pixel Photon Counter(MPPPC)とは優れた photon counting能力を持つ半導体光検出器
- ・受光面内に多数のAPD(Avalanche Photo Diode)ピクセルが並んだ構造をしている
- ・一つのピクセルの大きさは $50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$
- ・受光面の大きさは $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ (全ピクセル数は400)



←浜松製MPPPC

## ・MPPPCの光検出原理

APDピクセル内のp-n接合面にBreakDown Voltage (APDがガイガーモード(後述)に移行する最小値)以上の逆電圧がかかると入射光子によってできたキャリアがアバランシェ増幅を起こし、 $10^5$ 倍程度に増幅されたpulseを検出することができる。



←MPPPCの模式図

# APDピクセルの動作モード

## 1. ノーマルモード

- ブレイクダウン電圧 ( $V_{bd}$ ) 以下の電圧で動作
- ゲイン  $\leq 100$
- APD へ入射した光子数に比例した電荷量の出力

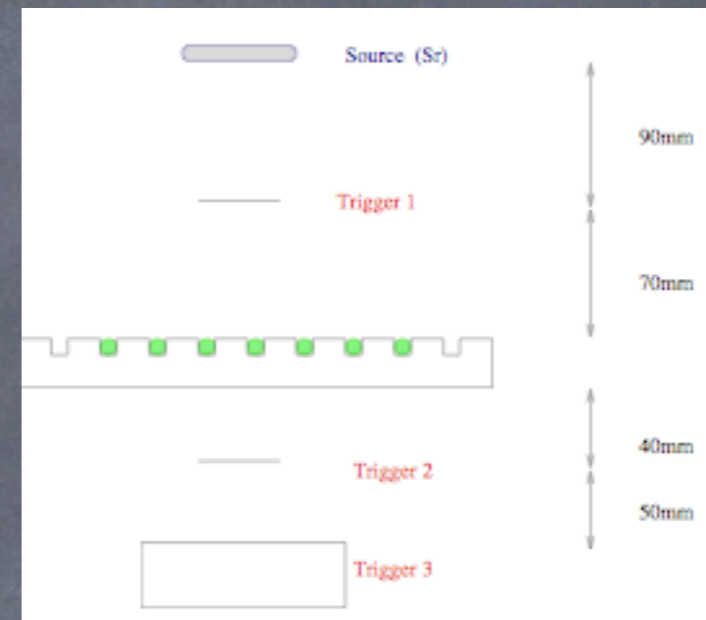
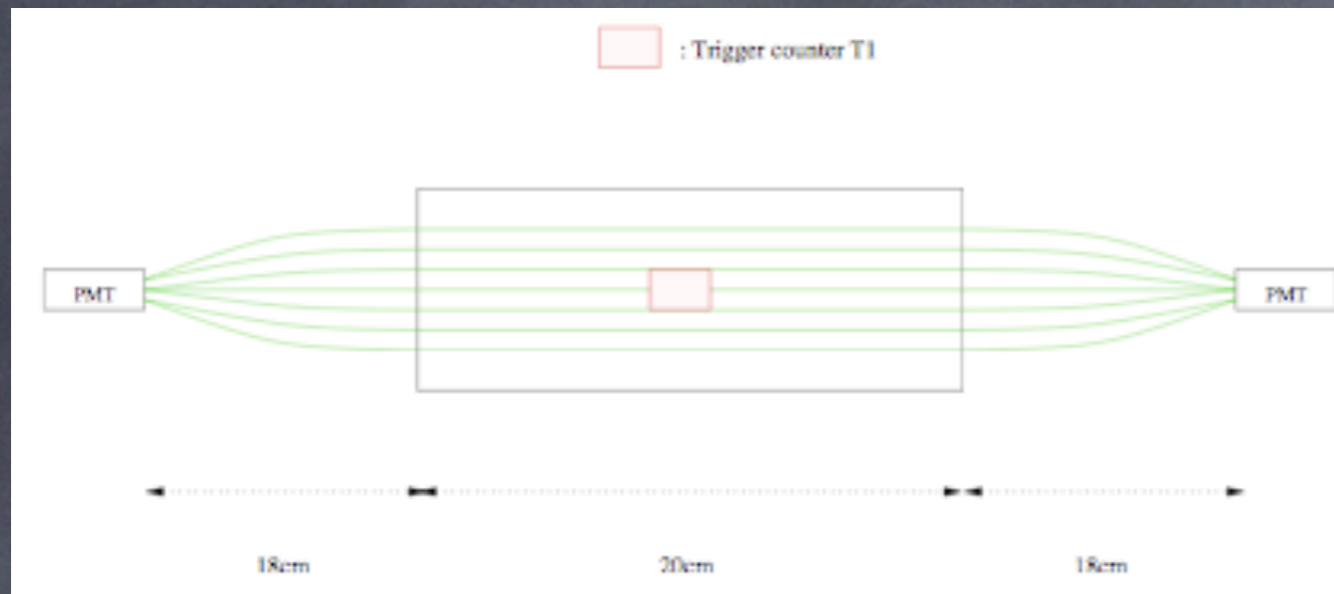
## 2. ガイガーモード

- ブレイクダウン電圧 ( $V_{bd}$ ) 以上の電圧で動作
- ゲイン  $\sim 10^6$
- APD へ入射した光子数に無関係の、電圧値に依存した決まった電荷量の出力

Index	MPPC	PMT
ゲイン	$10^5 \sim 10^6$	$10^6 \sim 10^7$
バイアス電圧	60 ~ 70V	1000 ~ 2000V
有感領域	$(1 \sim 1.3\text{mm})^2$	$\sim 10\text{cm}^2$
磁場への耐性	在り	無し
光子検出効率	30 ~ 45%	$\sim 15\%$

←MPPCと通常の  
PMTとの性能比較

# 過去の光量測定



ファイバー15本5mmピッチ,シンチレーター5mm,

HGE PMTで15p.e./mmの光量が得られた

- ・現在8本10~8mmピッチで使用する予定
- ・MPPCは緑の波長域でHQE PMTとほぼ同じ量子効率
- ・ファイバーの減衰長考慮

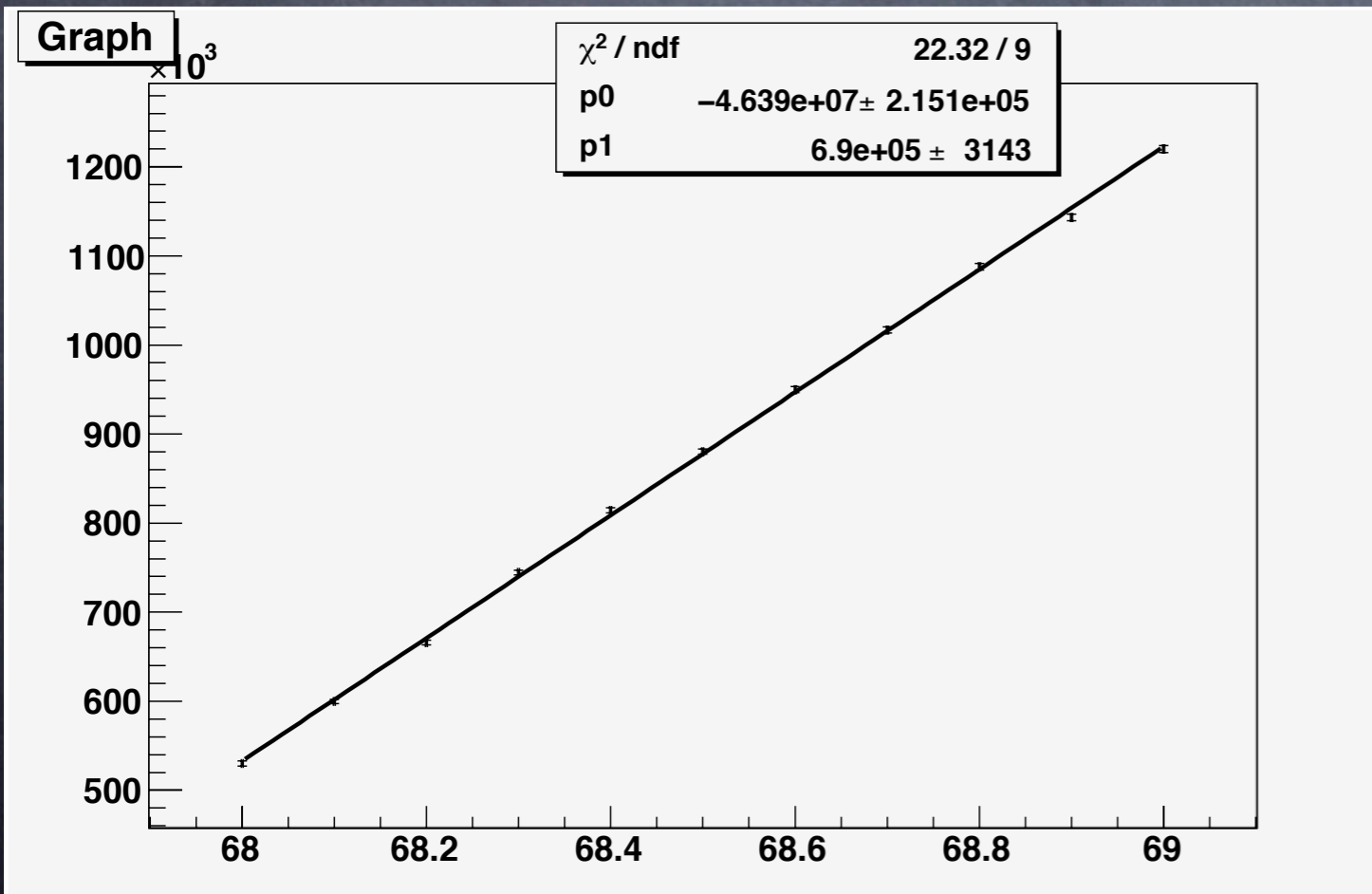
→13.5p.e./mm程度得られるはず

100keVthr

→ $(13.5\text{p.e./mm}) / (200\text{keV/mm}) \times 100\text{keV} = 6.75\text{p.e.}$

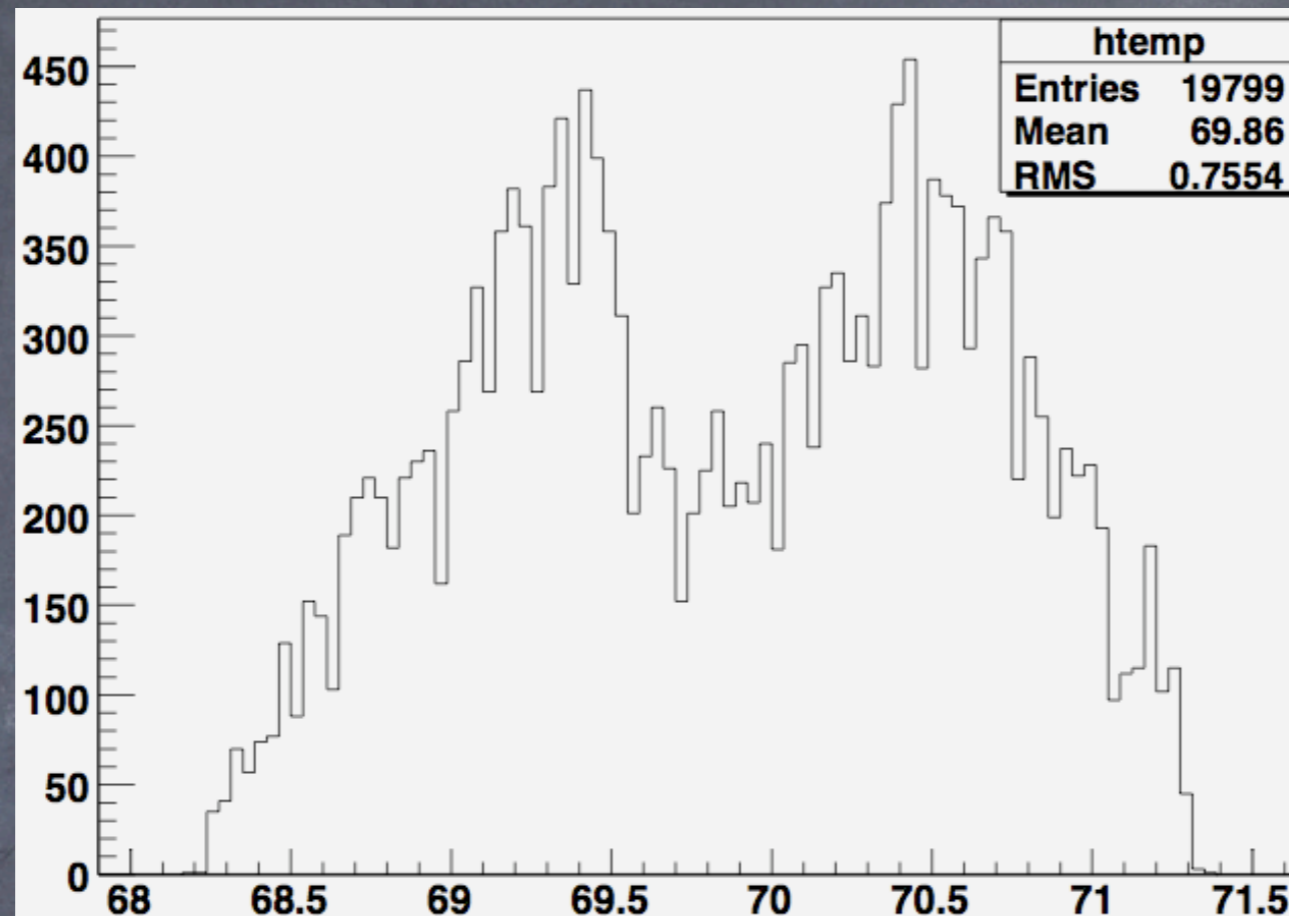
# 測定系について

今回実験したところゲインの大きさが文献値(浜松フotonニクスのデータシート)と20%程度ずれていた。しかし、ゲインの線形性が保たれており、AMPの増幅率もMPPCの信号のもつ周波数成分に対して安定に100倍増幅を実現している。また実験の再現性も問題ない。よってこの測定系での結果は信頼できると思われる。



←横軸電圧(V)と縦軸ゲインの関係

# MPPCギャング8個をを用意するには

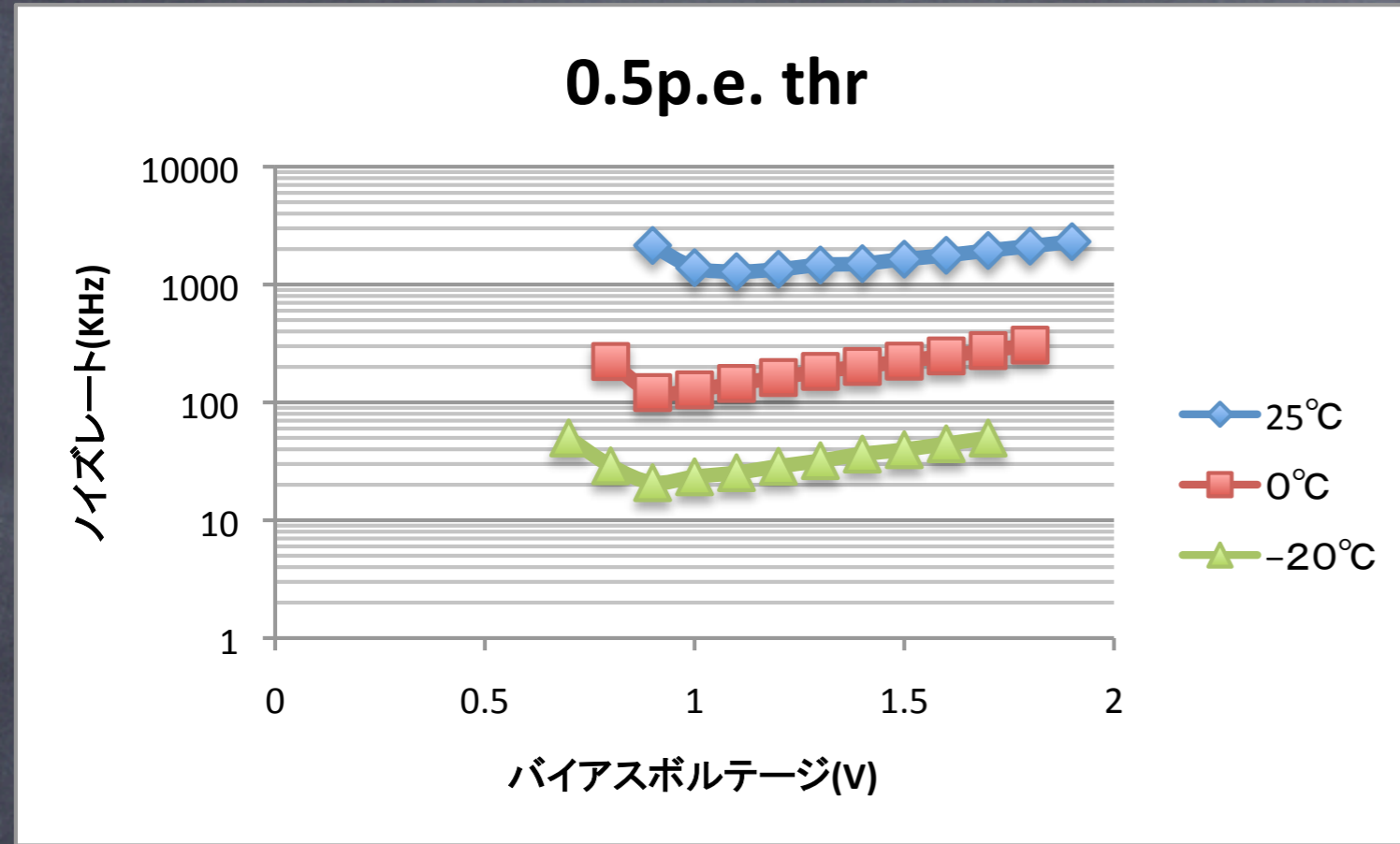


19800個のMPPCを横軸にオペレーションボルテージ  
(ゲインが $7.5 \times 10^5$ )になる電圧を取ってヒストグラムにした図

電圧のバラツキが $\pm 20\text{mV}$ 以内のものを8個ギャングしよう  
と思うと(約200binを5binずつまとめる)最大で300個程度  
損をすることになる。

→ 8個ギャング124組作るには必要な数の1.2倍で十分。

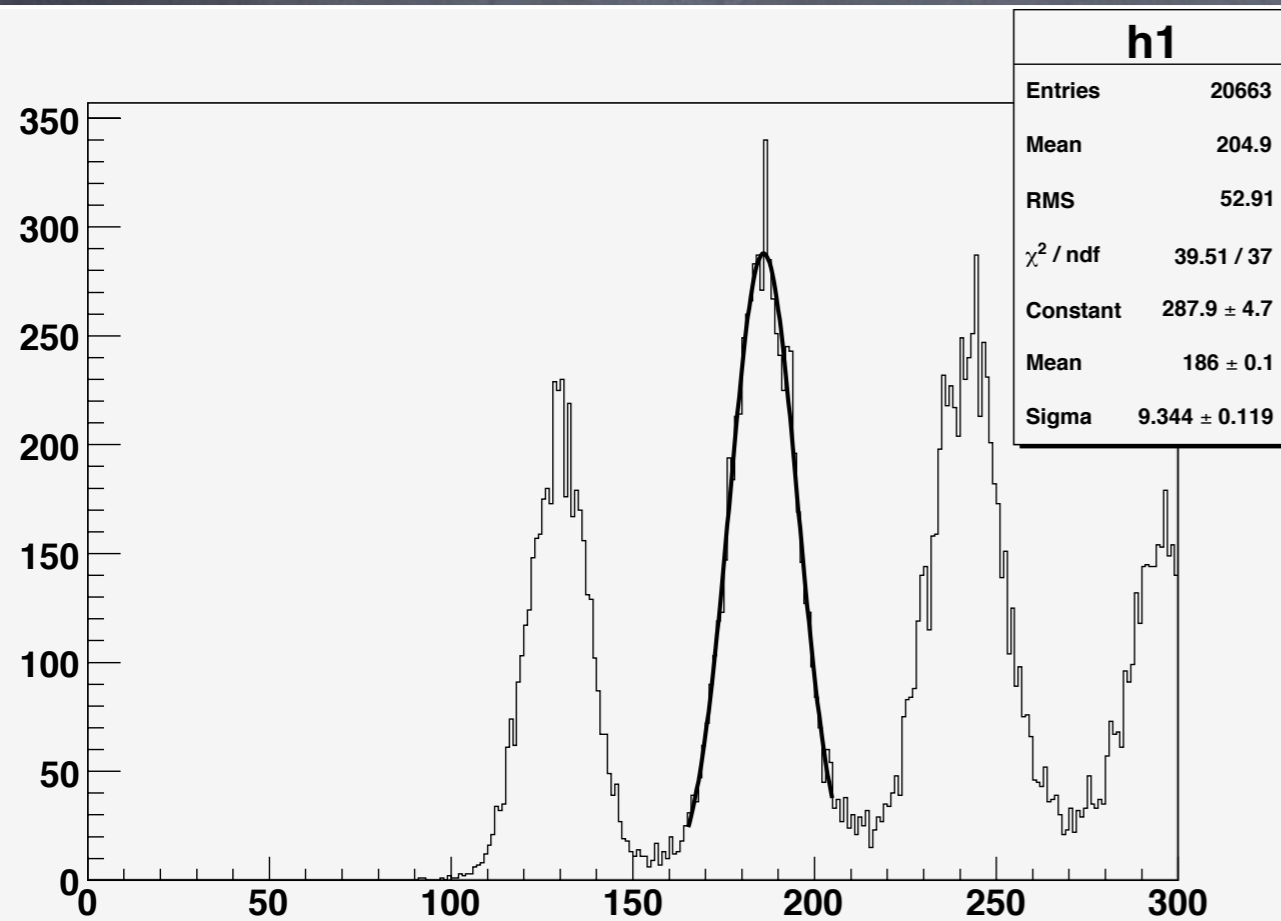
# ノイズレートの温度依存性(2個ギャング)



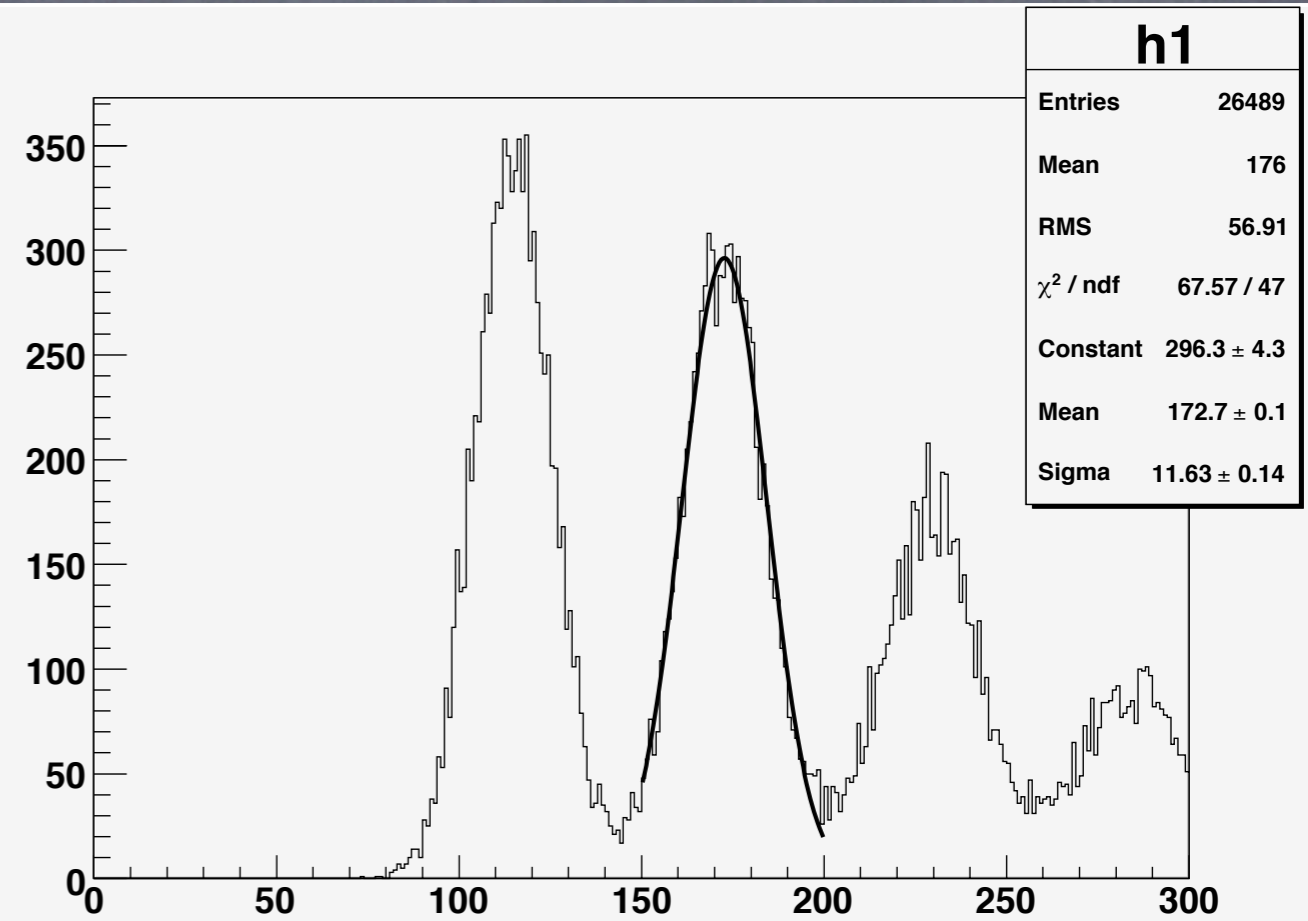
↑バイアスボルテージ(BreakDown Voltageと実際にかけている電圧の差)とノイズレートの関係

- ・ノイズレートは20°C下がるごとに1/6になる

# ADCスペクトラム

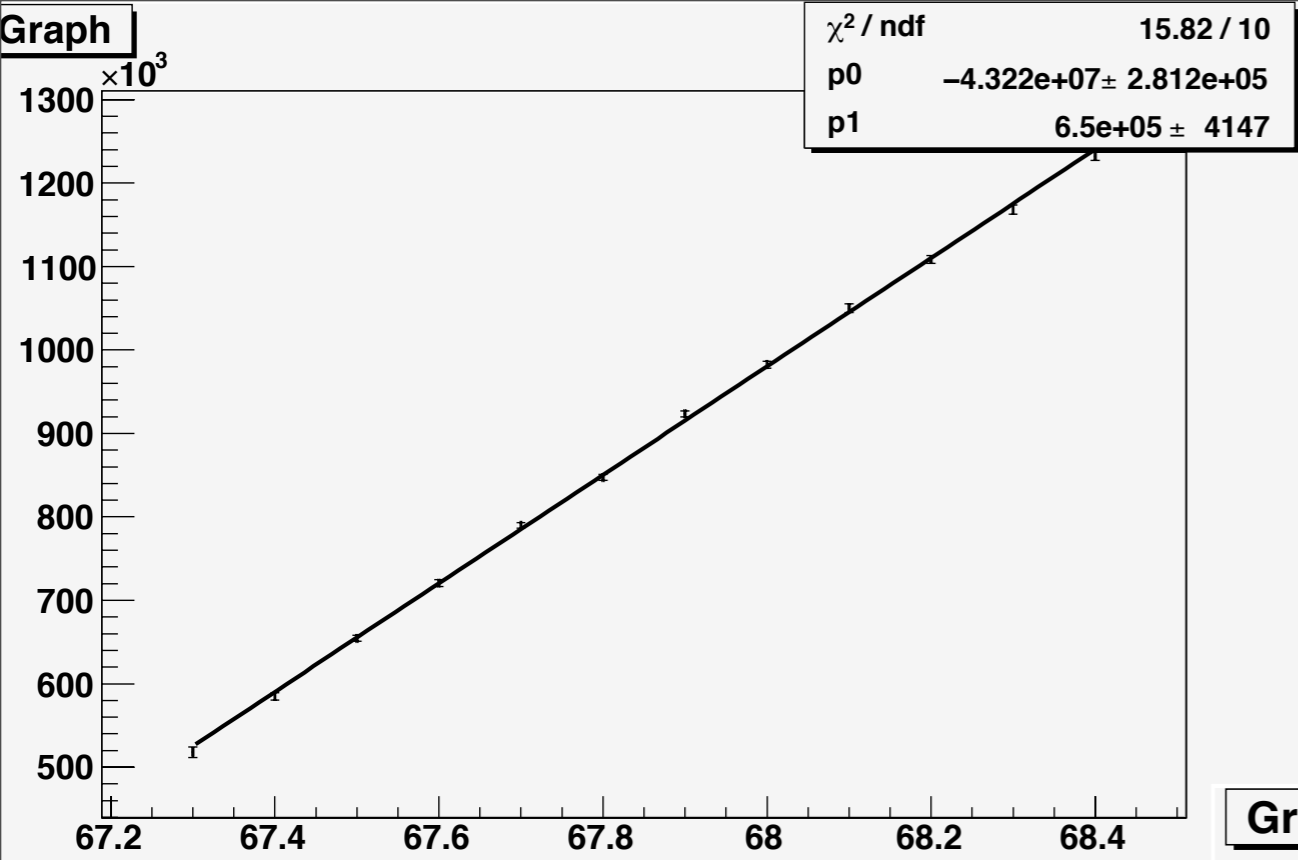


-20°C 一個



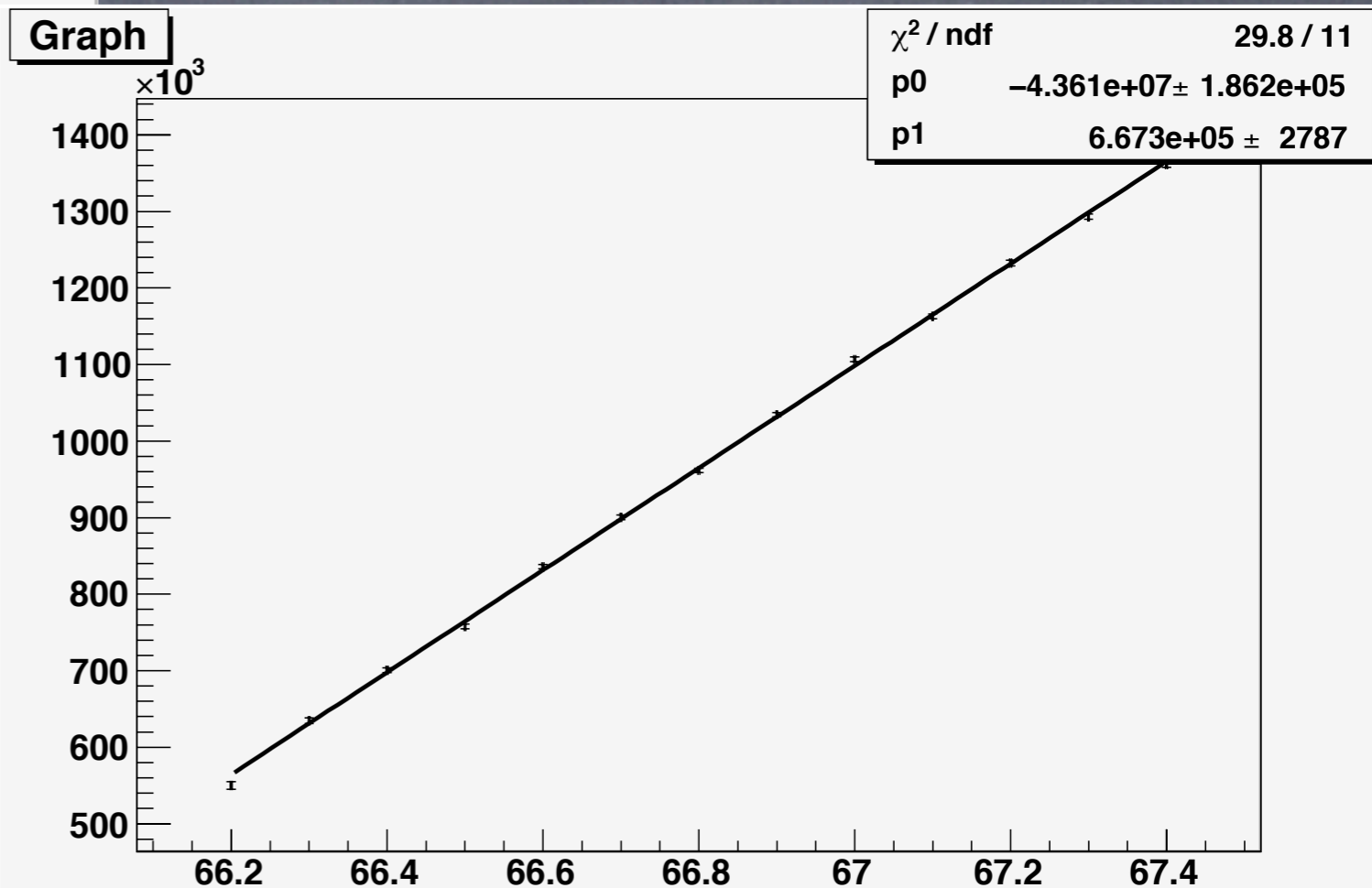
-20°C 8個ギャング



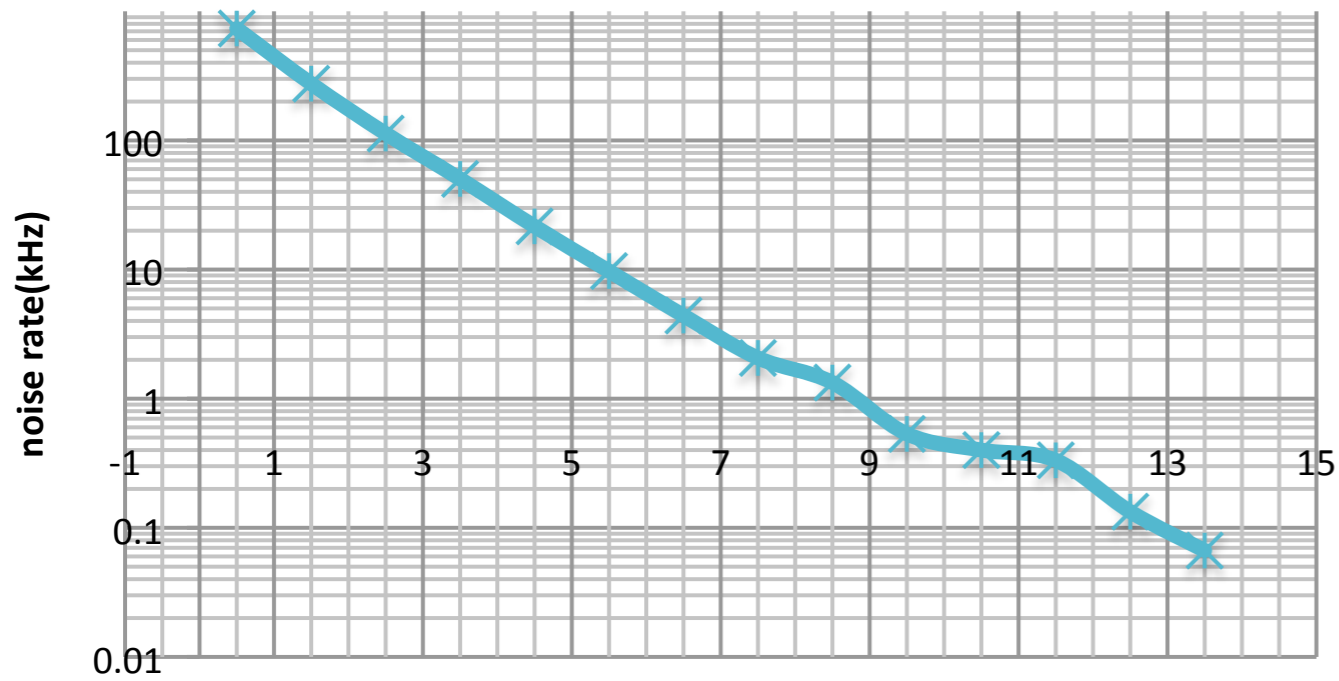


← 0°C 8個ギヤング

-20°C 8個ギヤング →

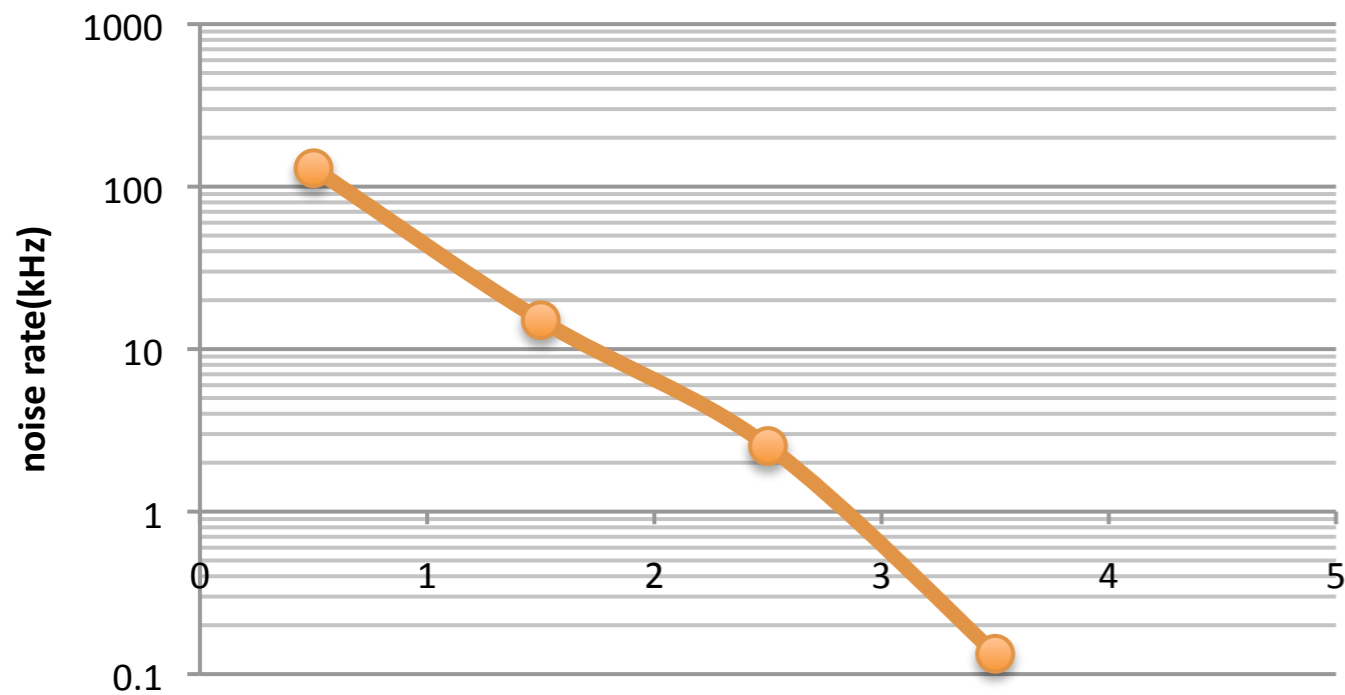


0,oct

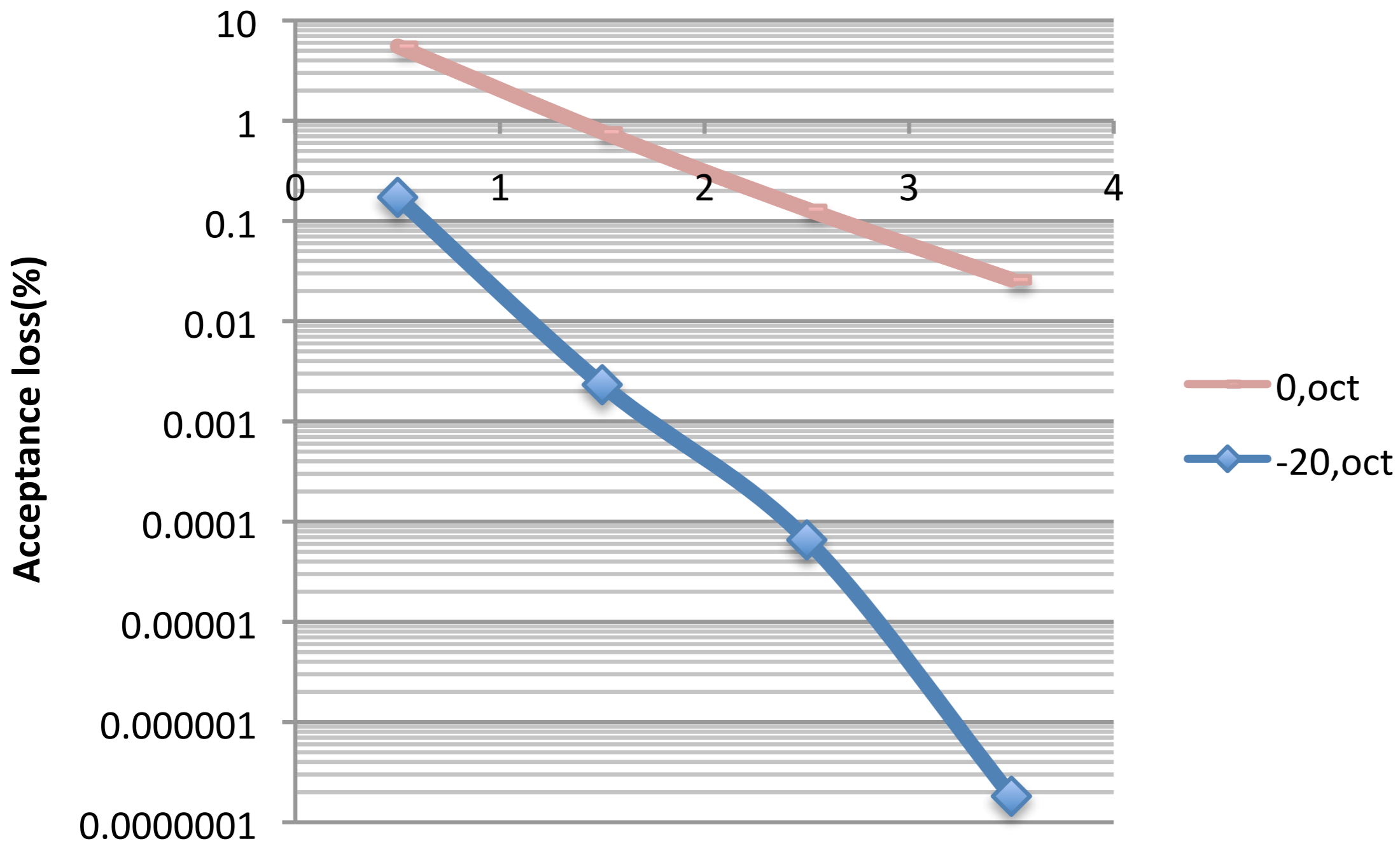


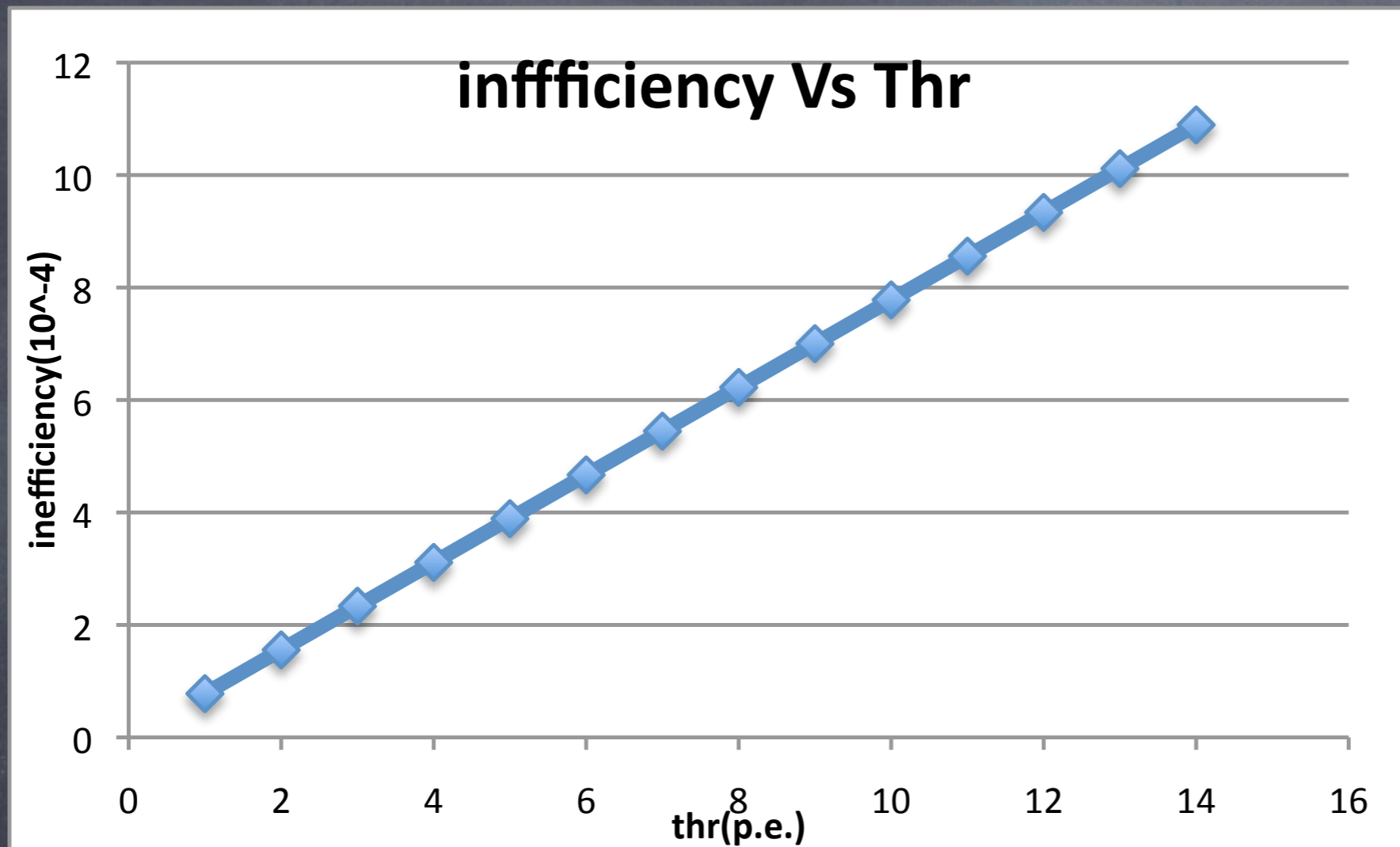
0°C、8個ノイズレート

20,oct



-20°C、8個ノイズレート





(荷電交換反応  $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$  の反応断面積が最大になる kinetic energy 約 200 MeV の  $\pi^-$  に対する inefficiency。対応する p.e. 相当の距離を粒子がシンチレータ中を進むまでに反応する確率を inefficiency とした。)