

# Belle II実験 ARICH検出器 アップグレードに向けた 光検出器MPPCの放射線耐性の評価

東京都立大学 高エネルギー物理実験研究室

修士2年 本橋完太

# 目次

## イントロダクション

- ・ ARICH検出器について
- ・ 光検出器について

## 研究内容

- ・ 中性子照射試験について
- ・ 測定の概要
- ・ 結果と比較

## まとめ

# 目次

## イントロダクション

- ・ ARICH検出器について
- ・ 光検出器について

## 研究内容

- ・ 中性子照射試験について
- ・ 測定の概要
- ・ 結果と比較

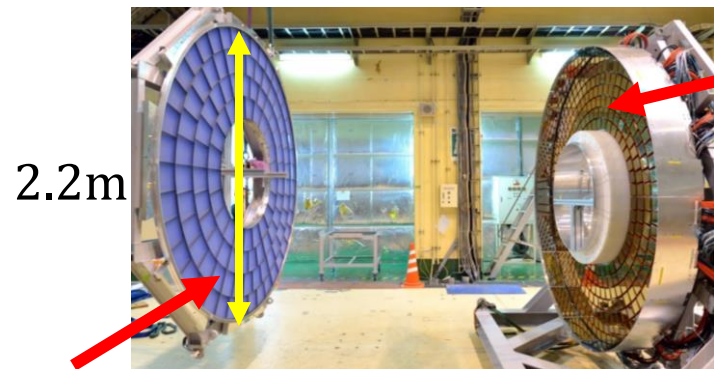
## まとめ

# ARICH検出器について

ARICH検出器 {
 

- ・エアロゲル輻射体
- ・光検出器HAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector)

 の二層構造

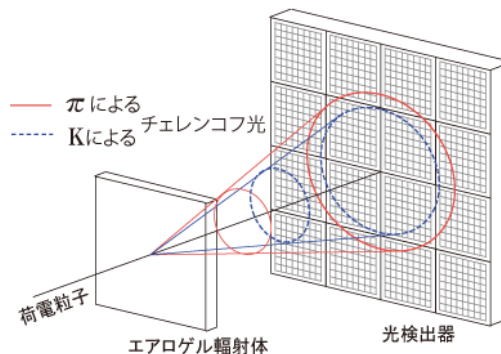


2.2m

エアロゲル  
輻射体

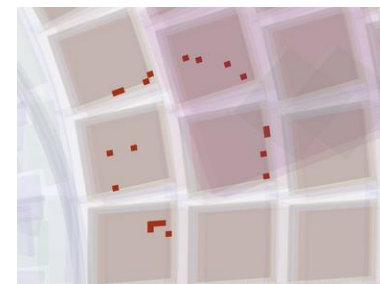
ARICHの写真(組立時)

光検出器



粒子識別原理のイメージ図

20光電子ほど



チェレンコフリングの観測例

$$\cos\theta_c = \frac{\sqrt{m^2 + p^2}}{np} \quad (\theta_c: \text{放射角} \quad m: \text{粒子の質量} \quad p: \text{運動量} \quad n: \text{屈折率})$$

(測定値) (既値)

荷電粒子がエアロゲル輻射体を通過時に発するチェレンコフ光の放射角の違いから荷電K中間子と荷電 $\pi$ 中間子を識別

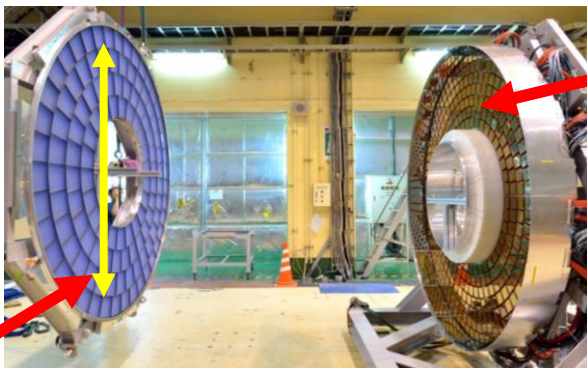
## 1光子検出が重要

# ARICH検出器について

ARICH検出器 {
 

- ・エアロゲル輻射体
- ・光検出器Hybrid Avalanche Photo Detector(HAPD) の二層構造

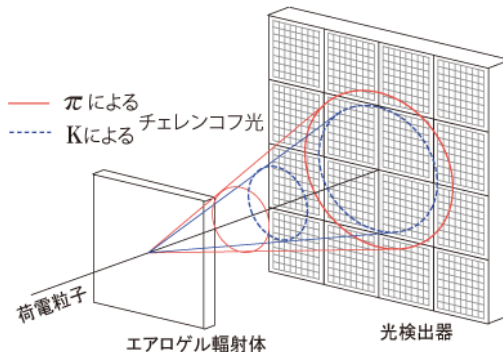
2.2m



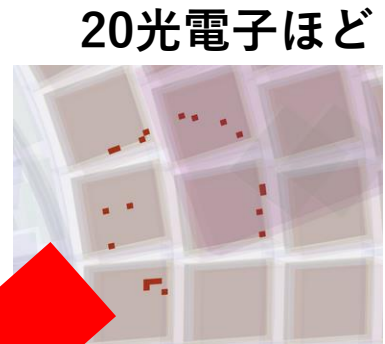
エアロゲル  
輻射体

ARICHの写真(組立時)

光検出器



粒子識別原理のイメージ図  
チェレンコフリングの観測例



20光電子ほど

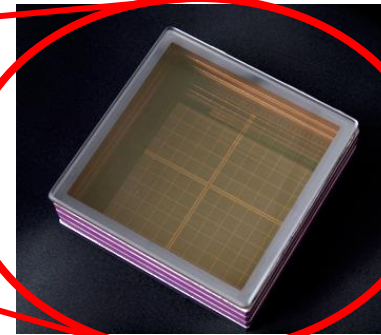
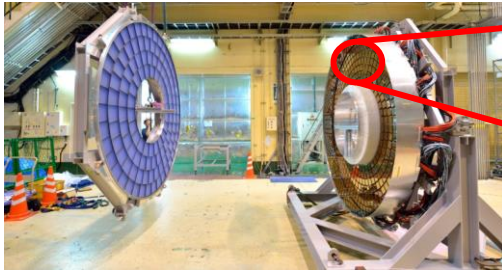
$$\cos\theta_c = \frac{\sqrt{m^2 + p^2}}{np} \quad (\theta_c: \text{放射角} \quad m: \text{粒子の質量} \quad p: \text{粒子の運動量} \quad n: \text{屈折率})$$

(定値) (既値)

荷電粒子がエアロゲル輻射体を通過時に発するチェレンコフ光の放射角の違いから荷電K中間子と荷電π中間子を識別

**1光子検出が重要**

# 光検出器について



光検出器  
HAPDの写真

## 光検出器の現状

- ・ HAPDは、**10年程度の運用を想定**し、現在運用中(2018年~)
- ・ 現状、総チャンネルの5.4%が使用不可(うち2.3%がHAPD)
- ・ **生産終了**のため、予備を超えた故障には対応できない



- ・ 運用中のHAPDの想定外の故障や、**10年を超える運用に備える必要性**
- ・ 新たな光検出器への置き換えの際の**性能向上**

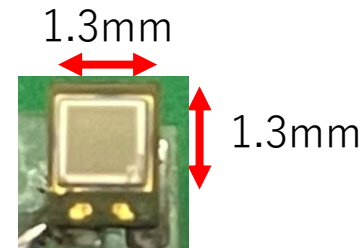


**光検出器のアップグレードが計画(2030年頃)**

# 光検出器について

## ARICHにおける 光検出器への要求

- ・ リングの半径差を判別可能な位置分解能(5mm程度)
- ・ 1光子の検出
- ・ 高磁場中(1.5T)での動作
- ・ 10年間の運用における放射線(中性子)耐性  
1MeV換算で  $10^{12} \text{neutrons/cm}^2$



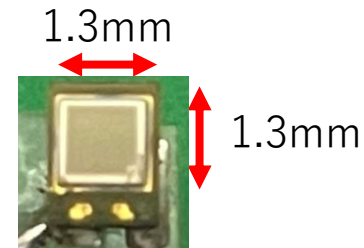
新たな光検出器の候補として**Multi Pixel Photon Counter(MPPC)**を検討中

**特徴：**ガイガーモード(ブレークダウン電圧より高い電圧)での動作  
による高い増倍率

# 光検出器について

## ARICHにおける 光検出器への要求

- ・ リングの半径差を判別可能な位置分解能(5mm程度) ○
- ・ 1光子の検出 ○
- ・ 高磁場中(1.5T)での動作 ○
- ・ 10年間の運用における放射線(中性子)耐性  
1MeV換算で  $10^{12} \text{neutrons/cm}^2$  ×

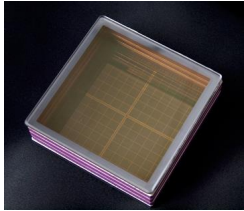


新たな光検出器の候補として**Multi Pixel Photon Counter(MPPC)**を検討中

**特徴：**ガイガーモード(ブレークダウン電圧より高い電圧)での動作  
による高い増倍率



# 光検出器について



## HAPD



: メリット



: デメリット

## MPPC

(S14160-1315PS)



$4.9 \times 4.9 \text{mm}^2$	チャンネルサイズ 位置精度の向上	$1.3 \times 1.3 \text{mm}^2$
200~600nm	有効波長範囲	290~900nm
$5.6 \times 10^4$	増倍率 向上	$3.6 \times 10^5$
~19%	PDE(光子検出効率) 向上	~32%
200~400Vと -7~8kV	動作電圧 運用の容易化	41V
△	放射線耐性 悪化	×
~0cps	ダークカウントレート 悪化	~0.12Mcps

# 目次

## イントロダクション

- ・ Belle II実験とARICH検出器について
- ・ 光検出器について

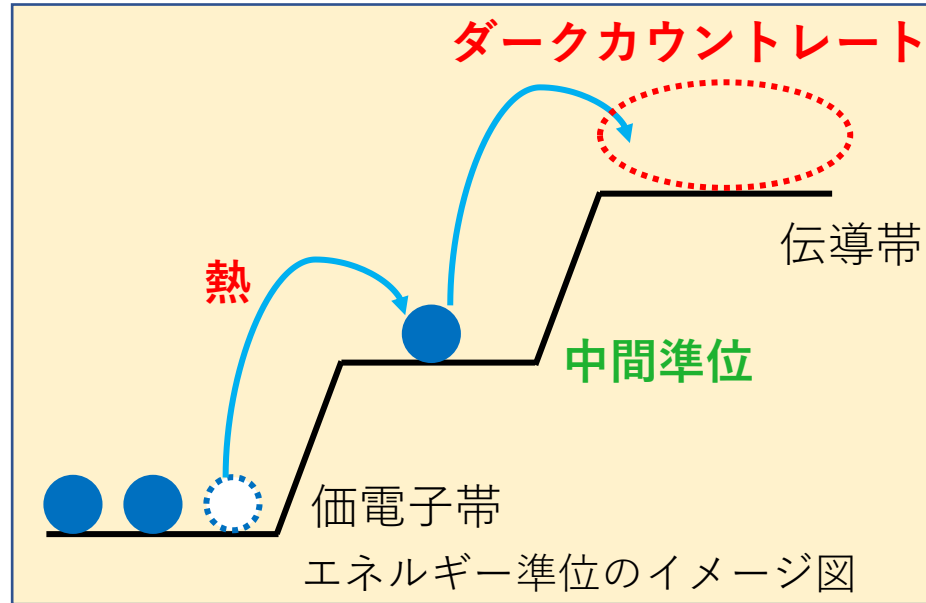
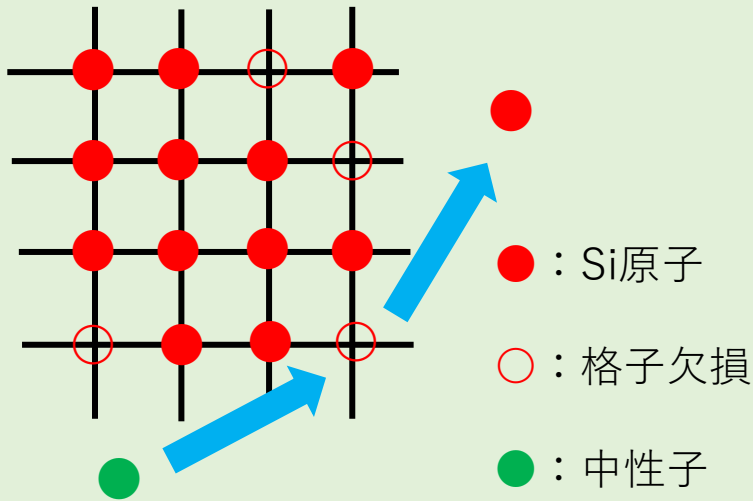
## 研究内容

- ・ 中性子照射試験について
- ・ 測定の概要
- ・ 結果と比較

## まとめ

# 中性子被曝によるMPPCへの影響(低放射線耐性)

MPPC内のSi格子のイメージ図



MPPCはシリコンデバイスであり、中性子がMPPCに当たることにより格子欠損が増え、**中間準位が生成**

熱励起キャリアが増加し、**ダークカウントレートが増加**

⇒ **冷却によるダークカウントレート抑制の可能性**

# 中性子照射試験

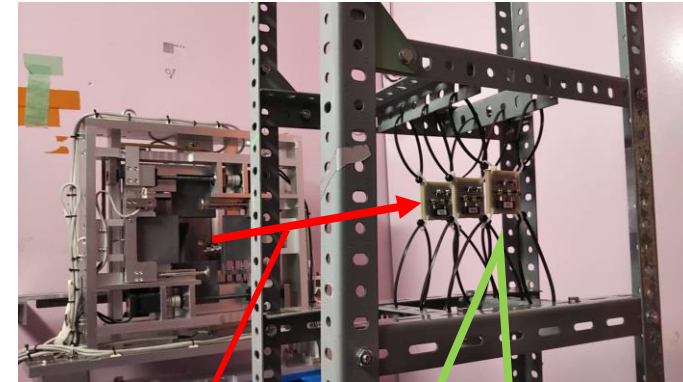
2020年2月14~17日にJ-PARC MLFでMPPCの中性子照射試験を実施

照射前後でMPPCの特性がどのように変化するかを評価

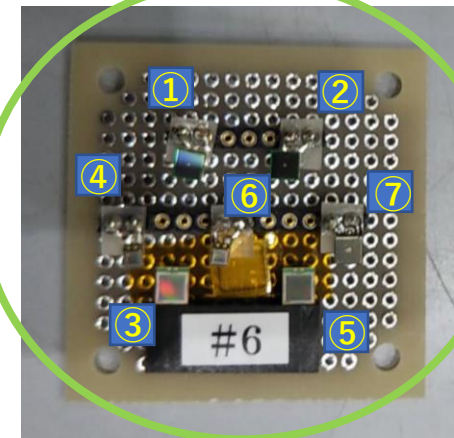
中性子を $10^8 \sim 10^{11} \text{ neutrons/cm}^2$ の照射量  
(エネルギー 1 MeV換算)で試験を実施

参考) Belle II 運転時の10年間中性子被曝量(見積)  
 $10^{12} \text{ neutrons/cm}^2$

中性子照射試験の様子



中性子beam



照射サンプルの写真

	Mppc サンプル名	ピクセルピッチ(um)	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ (mm <sup>2</sup> )	ダークカウント レート(kcps)	終端容量 (pF)
①	3050VE	50	17	40	3×3	500	320
②	3075VE	75	40	40	3×3	500	320
③	3010PS	10	1.8	18	3×3	700	530
④	1310PS	10	1.8	18	1.3×1.3	120	100
⑤	3015PS	15	3.6	32	3×3	700	530
⑥	1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100
⑦	3050HS	50	25	50	3×3	500	500

7種類のMPPCをテスト

# 中性子照射試験

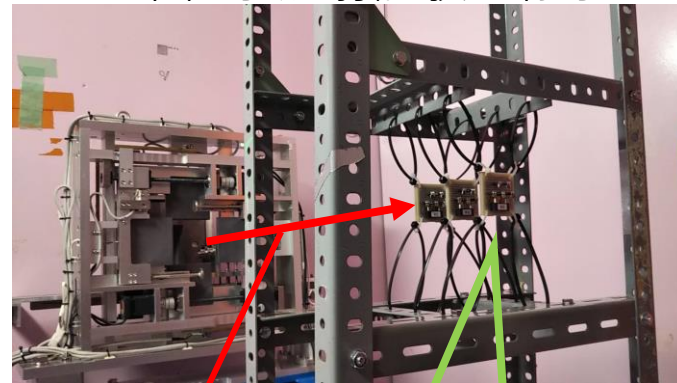
2020年2月14~17日にJ-PARC MLFでMPPCの中性子照射試験を実施

照射前後でMPPCの特性がどのように変化するかを評価

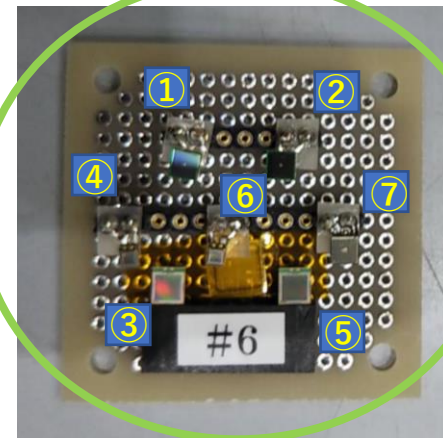
中性子を $10^8 \sim 10^{11} \text{ neutrons/cm}^2$ の照射量(エネルギー 1 MeV換算)で試験を実施

参考) Belle II 運転時の10年間中性子被曝量(見積)  
 $10^{12} \text{ neutrons/cm}^2$

中性子照射試験の様子



中性子beam



照射サンプルの写真

	Mppc サンプル名	ピクセルピッチ(um)	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ (mm <sup>2</sup> )	ダークカウント レート(kcps)	終端容量 (pF)
①	3050VE	50	17	40	3×3	500	320
②	3075VE	75	40	40	3×3	500	320
③	3010PS	10	1.8	18	3×3	700	530
④	1310PS	10	1.8	18	1.3×1.3	120	100
⑤	3015PS	15	3.6	32	3×3	700	530
⑥	1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100
⑦	3050HS	50	25	50	3×3	500	500

7種類のMPPCをテスト

# 測定の概要(サンプル)

## 報告するサンプルのリスト

	MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
②	3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
⑥	1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
⑦	3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

### <特徴>



②3075VE・・・現行で一般的に用いられている



⑥1315PS・・・小面積、少ダークカウントレート



⑦3050HS・・・高い光子検出効率(PDE)

# 測定の概要(サンプル)

## 報告するサンプルのリスト

	MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
②	3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
⑥	1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
⑦	3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

### 照射前後における測定項目

- ・ダークカウントレート
- ・I-V曲線(リーク電流vs印加電圧)
- ・波高分布(増倍率)

### 依存性の測定項目

- ・中性子照射量依存性  
照射量 $10^8 \sim 10^{11}$
- ・温度依存性  $25^\circ\text{C} \sim -15^\circ\text{C}$

# 測定の概要(サンプル)

## 報告するサンプルのリスト

	MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
②	3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
⑥	1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
⑦	3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

### 照射前後における測定項目

- ・ **ダークカウントレート**
  - ・ **I-V曲線(リーク電流vs印加電圧)**
  - ・ **波高分布(増倍率)**
- 昨年の発表  
本発表

### 依存性の測定項目

- ・ 中性子照射量依存性  
照射量 $10^8 \sim 10^{11}$
- ・ 温度依存性  $25^\circ\text{C} \sim -15^\circ\text{C}$

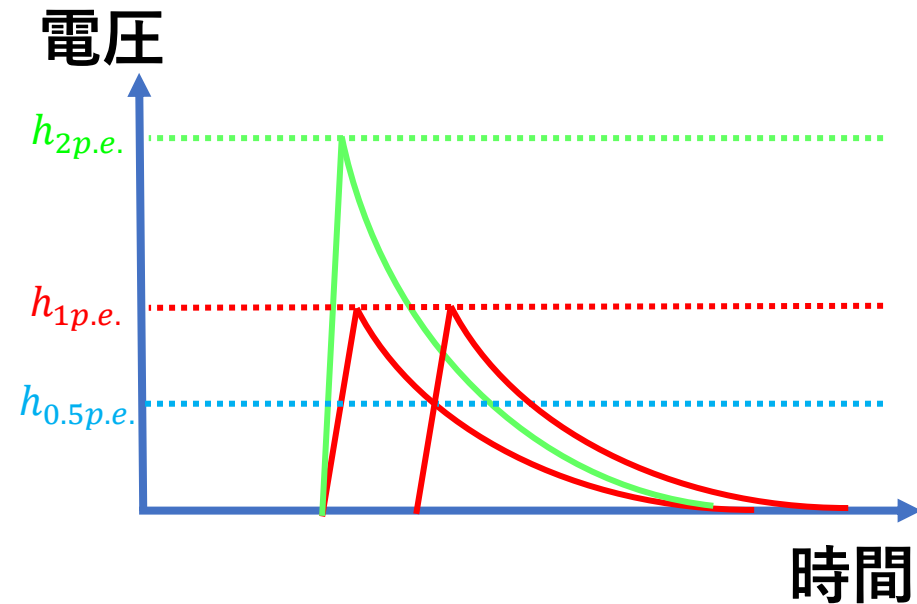
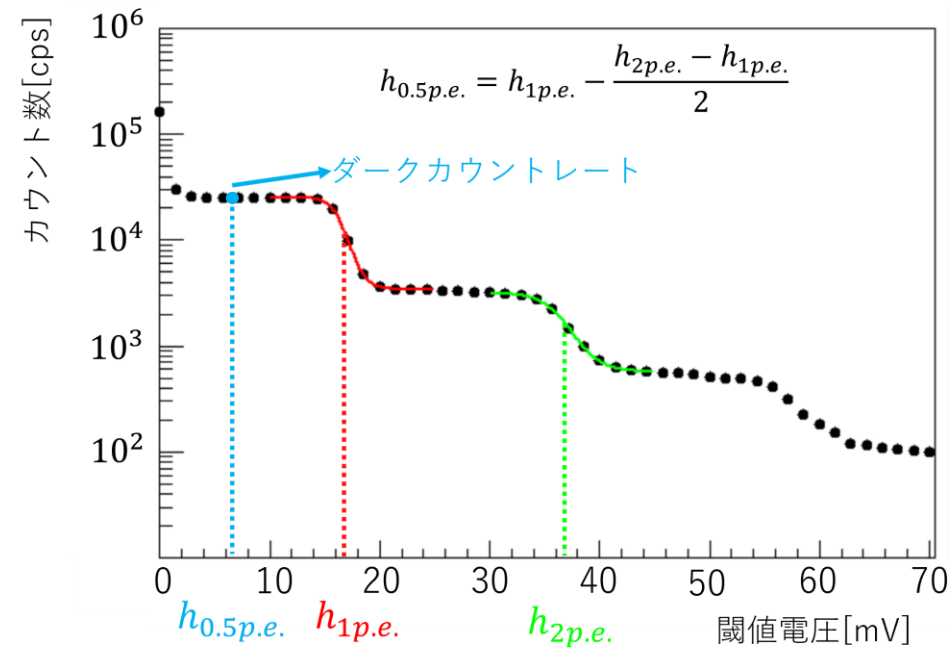


# 測定の概要(ダークカウントレート)

<ダークカウントレートとは>

0.5p.e.の波高値を閾値とした時の単位時間当たりのカウント数

動作電圧( $V_{op} = V_{bd} + 3[V]$ )におけるスレッシュホールドスキャン

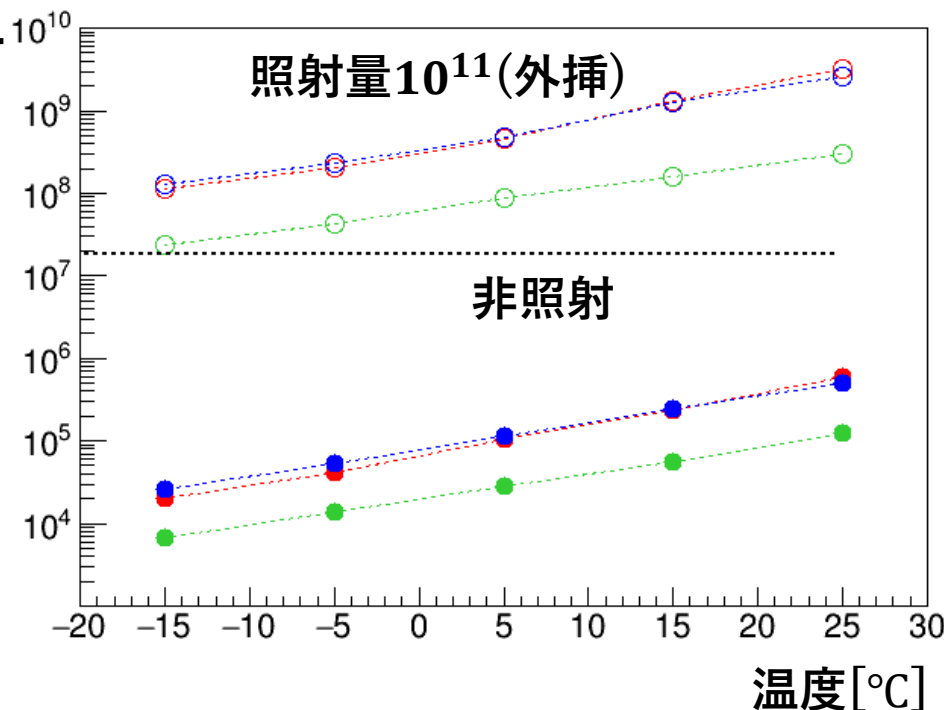


⇒ 温度を変えながらダークカウントレートを測定  
(暗状態で)

# 昨年の発表(ダークカウントレート)

	MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
②	3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
⑥	1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
⑦	3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

ダークカウントレート [cps]



● : ②3075VE

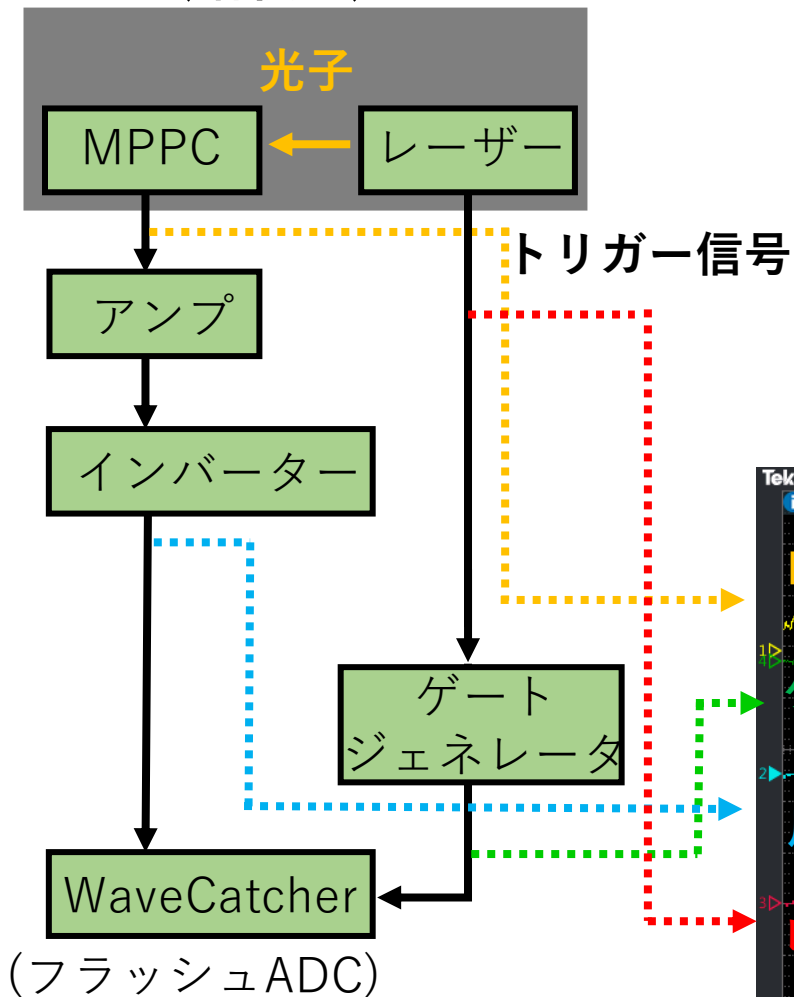
● : ⑦3050HS

● : ⑥1315PS

- ・冷却によりダークカウントレートは減少
- ・中性子被曝によりダークカウントレートは増加
- ・3サンプルの中で  
⑥1315PSのダークカウントレートは抑制的

# 波高分布測定の概要(セットアップ)

恒温槽(暗状態)



MPPCへの印加電圧：降伏電圧+3[V]

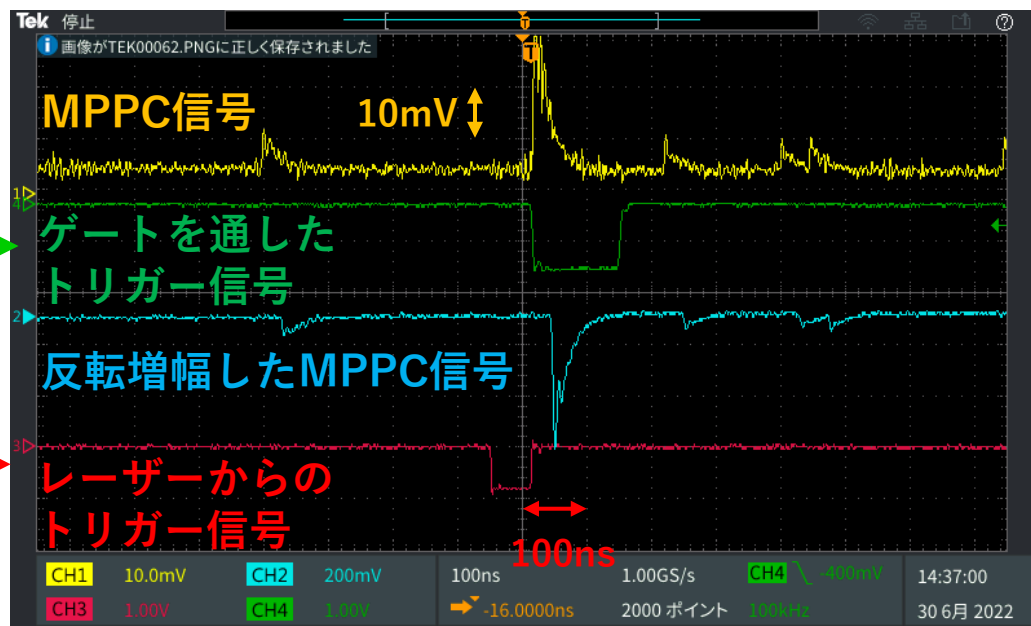
増倍率が一定になるように印加

1光子信号の波高値の7割を閾値

AND

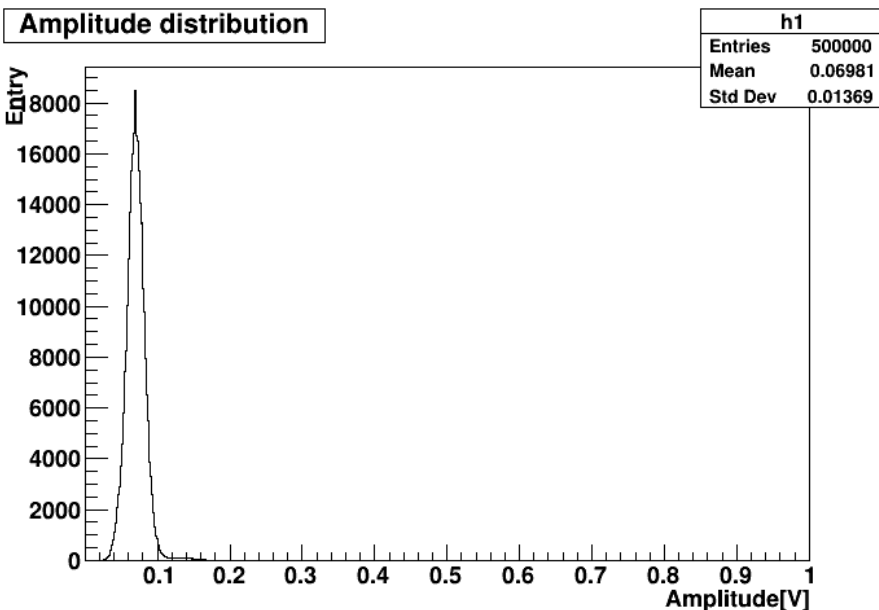
レーザーからの信号

設定したゲート内の最大の波高値を取得

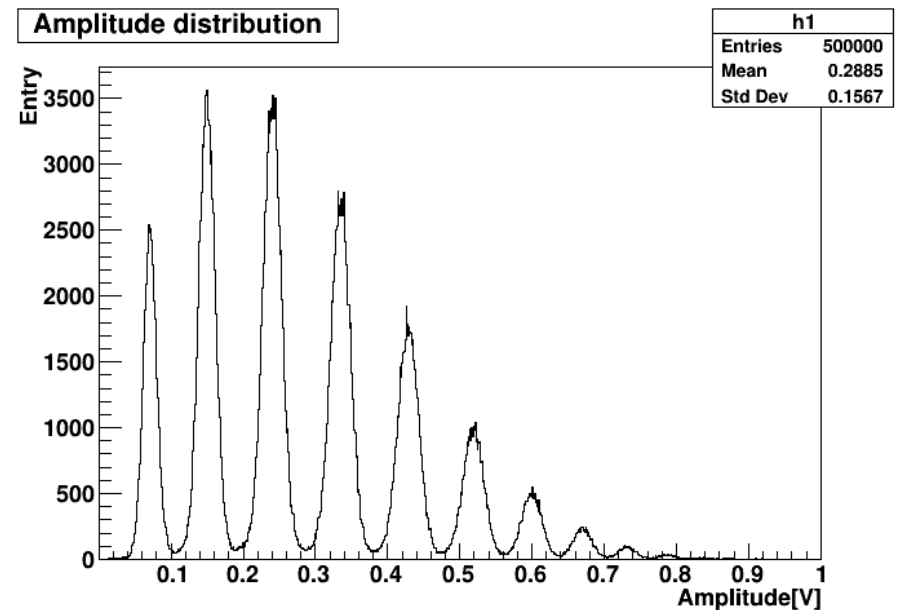


# 測定の概要(波高分布)

- ・ 光子信号の波高を測定
- ・ フィンガープロットから増倍率を導出し、比較



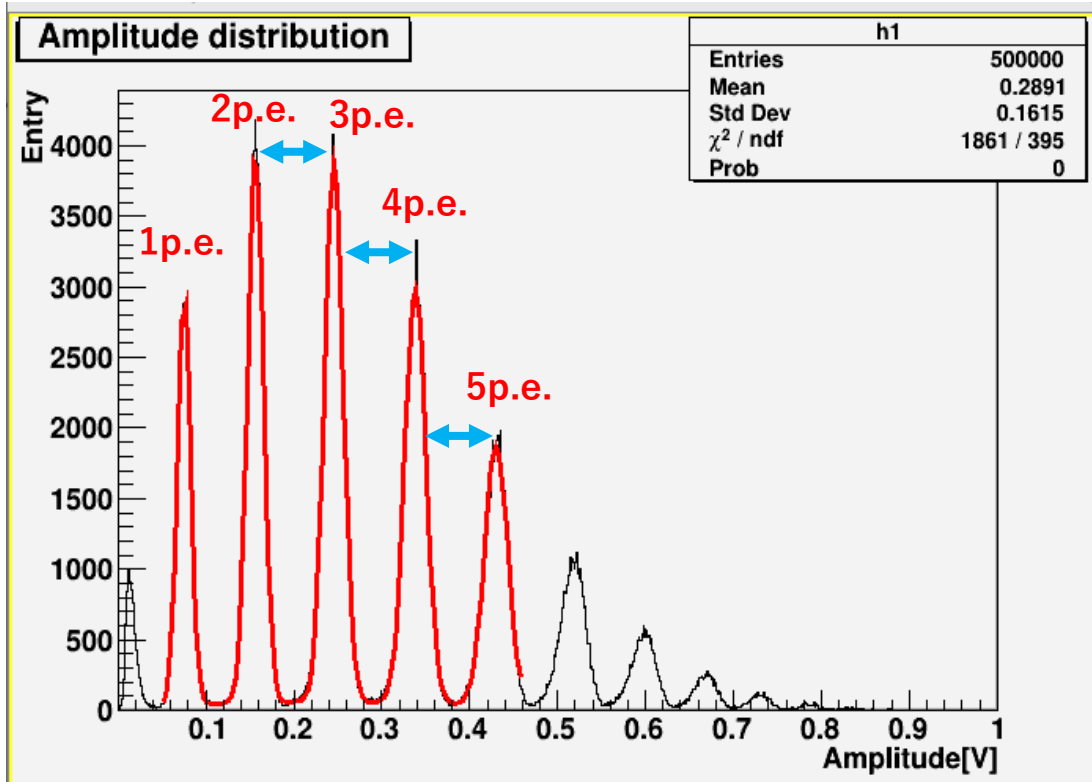
暗状態での波高分布



光子を入射した際の波高分布

平均検出光子数がおおよそ3~4になるよう光量を調整

# 測定の概要(波高分布)



2~5光子のピーク間の差をフィット



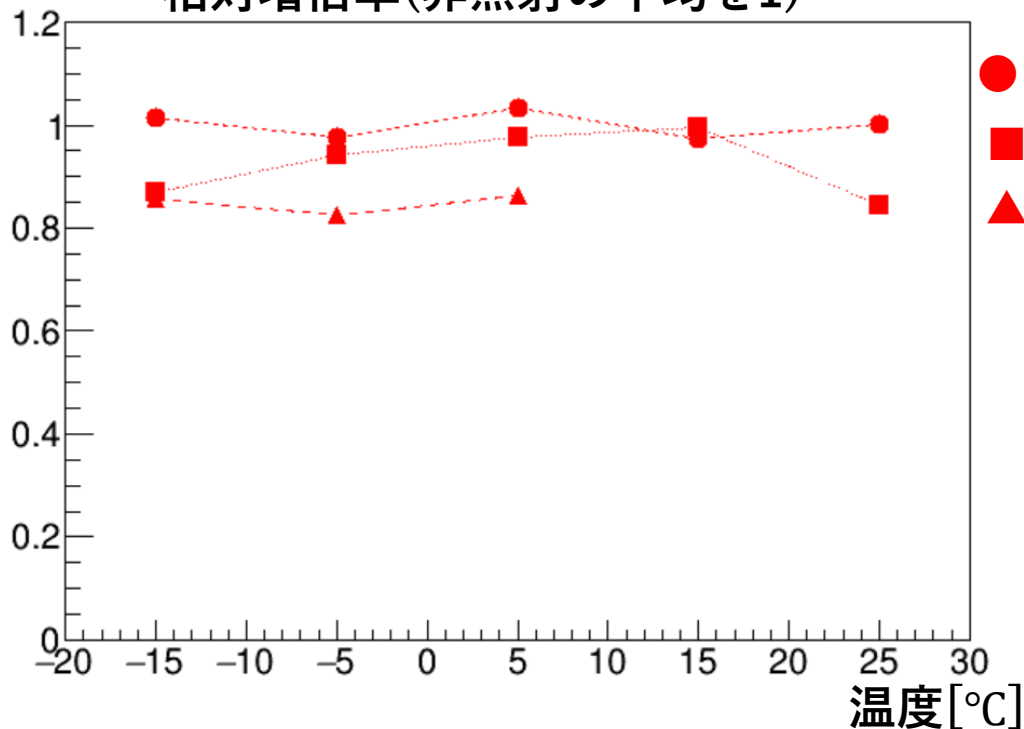
非照射を1とした際の相対的な増倍率を導出

⇒増倍率の中性子照射量依存性を検証

# 結果(増倍率@②3075VE)

	MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
②	3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
⑥	1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
⑦	3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

相対増倍率(非照射の平均を1)

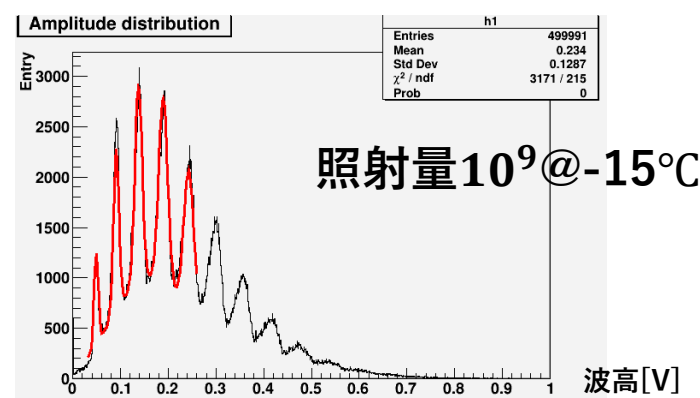
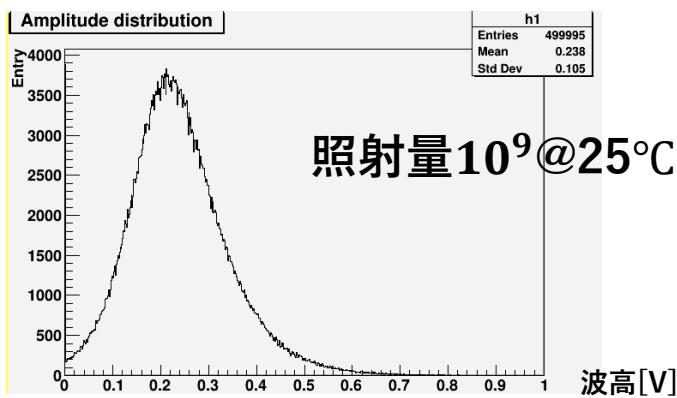
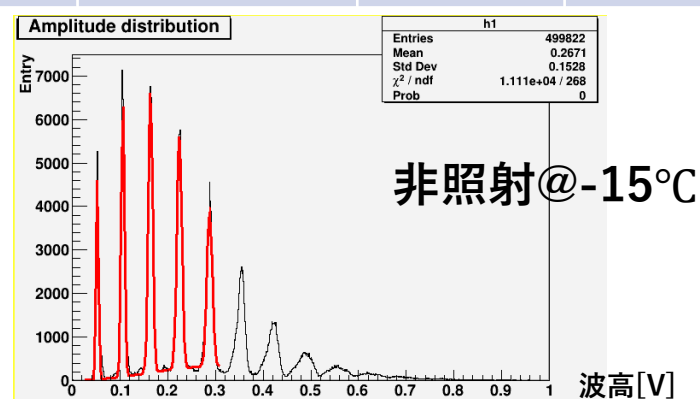
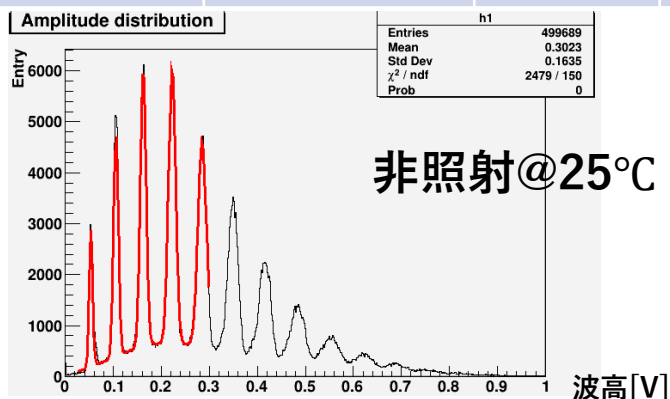


- : 非照射
- : 照射量 $10^8$
- ▲ : 照射量 $10^9$

- ・ 照射量が増えるにつれて増倍率が低下
- ・ 照射量の高いサンプルは増倍率の導出が不可( $10^{10}$ ,  $10^{11}$ )

# 結果(冷却による波高分布@②3075VE)

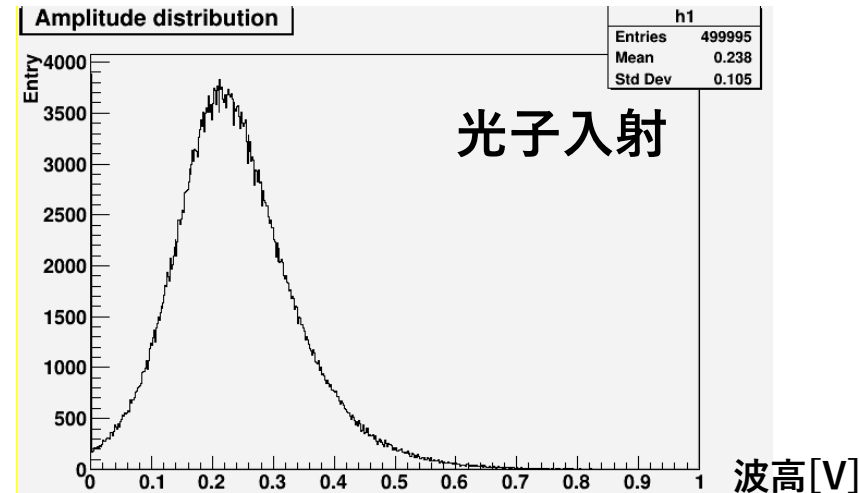
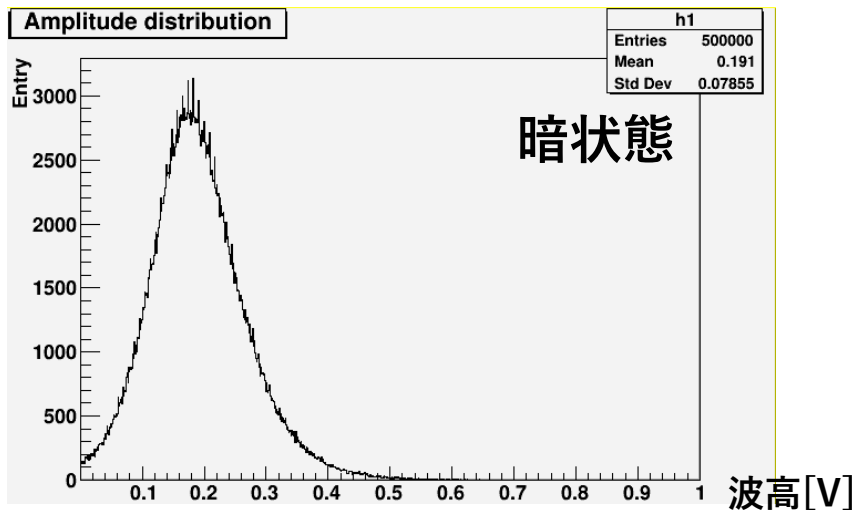
MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
② 3075VE	75	40	40	$3 \times 3$	500	320	82
⑥ 1315PS	15	3.6	32	$1.3 \times 1.3$	120	100	49
⑦ 3050HS	50	25	50	$3 \times 3$	500	500	74



# 結果(光子入射前後の波高分布@②3075VE)

	MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
②	3075VE	75	40	40	$3 \times 3$	500	320	82
⑥	1315PS	15	3.6	32	$1.3 \times 1.3$	120	100	49
⑦	3050HS	50	25	50	$3 \times 3$	500	500	74

照射量 $10^9$ @ $25^\circ\text{C}$



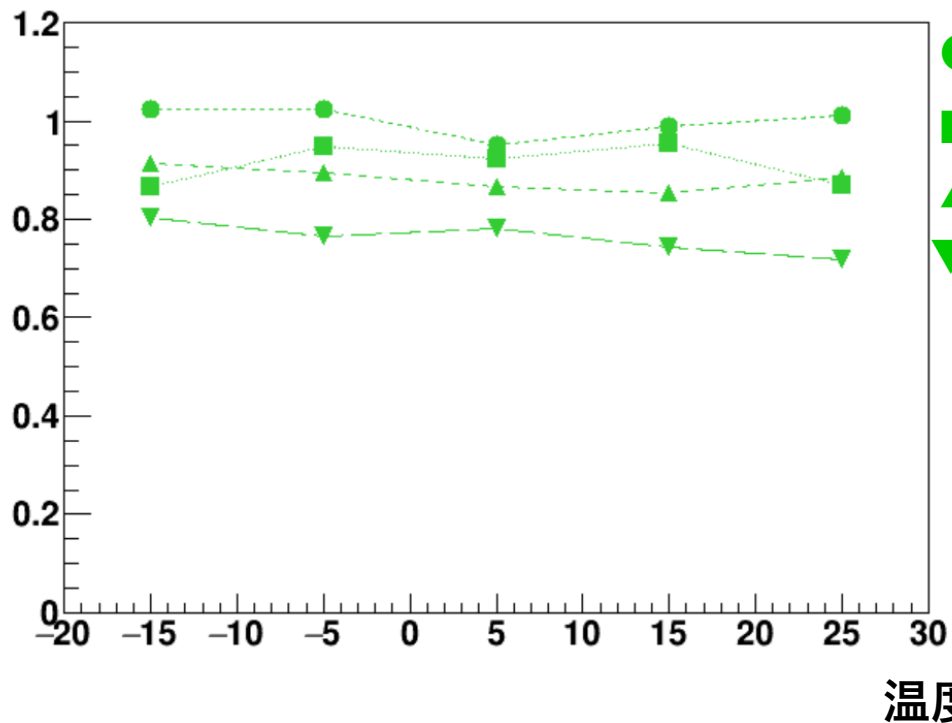
光子入射前と入射後で幅が広がる等の違いはあるが光子信号は識別不可



# 結果(増倍率@⑥1315PS)

MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
② 3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
⑥ 1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
⑦ 3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

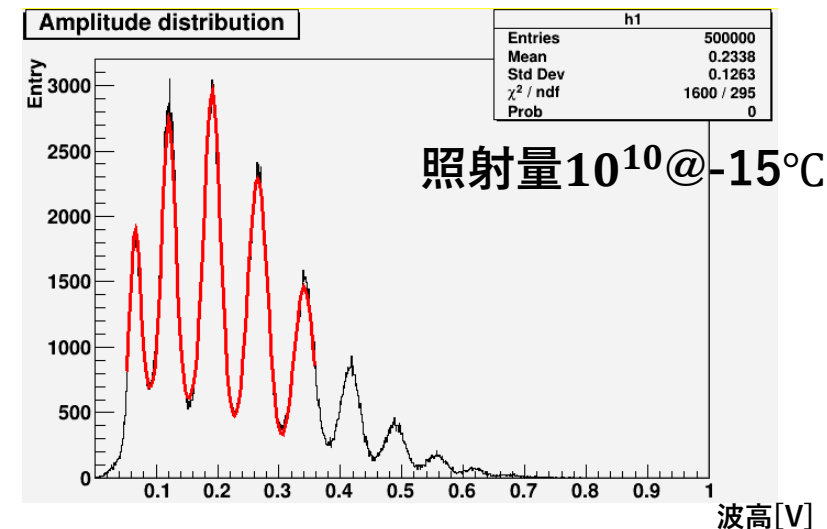
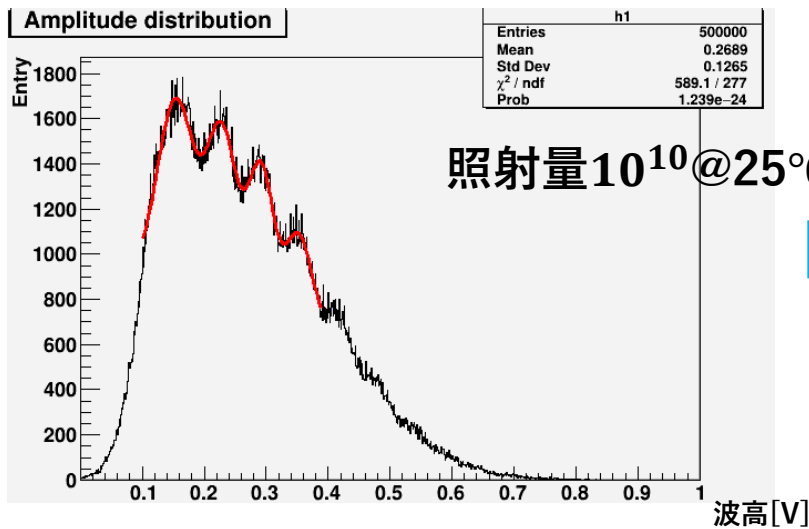
相対増倍率(非照射の平均を1)



・ 照射量が増えるにつれて増倍率が低下  
 ・ 照射量の高いサンプルは増倍率の導出が不可( $10^{11}$ )

# 結果(冷却による波高分布@⑥1315PS)

MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
② 3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
⑥ 1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
⑦ 3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

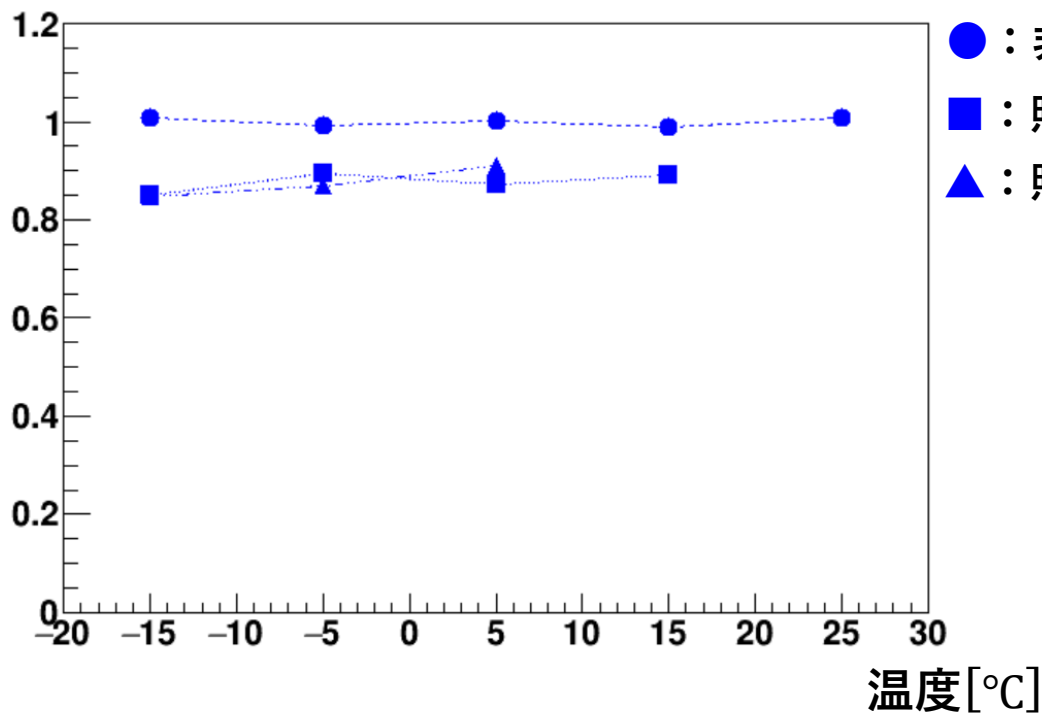


⑥1315PSのみ照射量  $10^{10}$ , 25°Cにおける測定が可能

# 結果(増倍率@7)3050HS)

	MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
②	3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
⑥	1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
⑦	3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

相対増倍率(非照射の平均を1)



- : 非照射
- : 照射量 $10^8$
- ▲ : 照射量 $10^9$

- ・ 照射量が増えるにつれて増倍率が低下
- ・ 照射量の高いサンプルは増倍率の導出が不可( $10^{10}, 10^{11}$ )

# 結果(相対増倍率の低下)

中性子照射による相対増倍率の低下(非照射の増倍率を1)

MPPCサンプル名	照射量 $10^8$	照射量 $10^9$	照射量 $10^{10}$
②3075VE	0.93	0.85	×
⑥1315PS	0.93	0.90	0.78
⑦3050HS	0.88	0.88	×

増倍率の低下の割合などから3サンプルの中では  
⑥1315PSには強い放射線耐性

しかし10年間の運用に耐えられる放射線耐性は無く、  
冷却が必須という現状

# 考察

	MPPC サンプル名	大きさ (mm <sup>2</sup> )	開口率(%)	検出可能面積(mm <sup>2</sup> )
②	3075VE	3×3	82	7.38
⑥	1315PS	1.3×1.3	49	0.828
⑦	3050HS	3×3	74	6.66

Belle II実験の年間中性子被曝量： $10^{11} \text{neutrons/cm}^2$



各サンプルに予想される  
年間中性子照射量

②3075VE： $7.38 \times 10^9 \text{neutrons}$

⑥1315PS： $8.28 \times 10^8 \text{neutrons}$

⑦3050HS： $6.66 \times 10^9 \text{neutrons}$

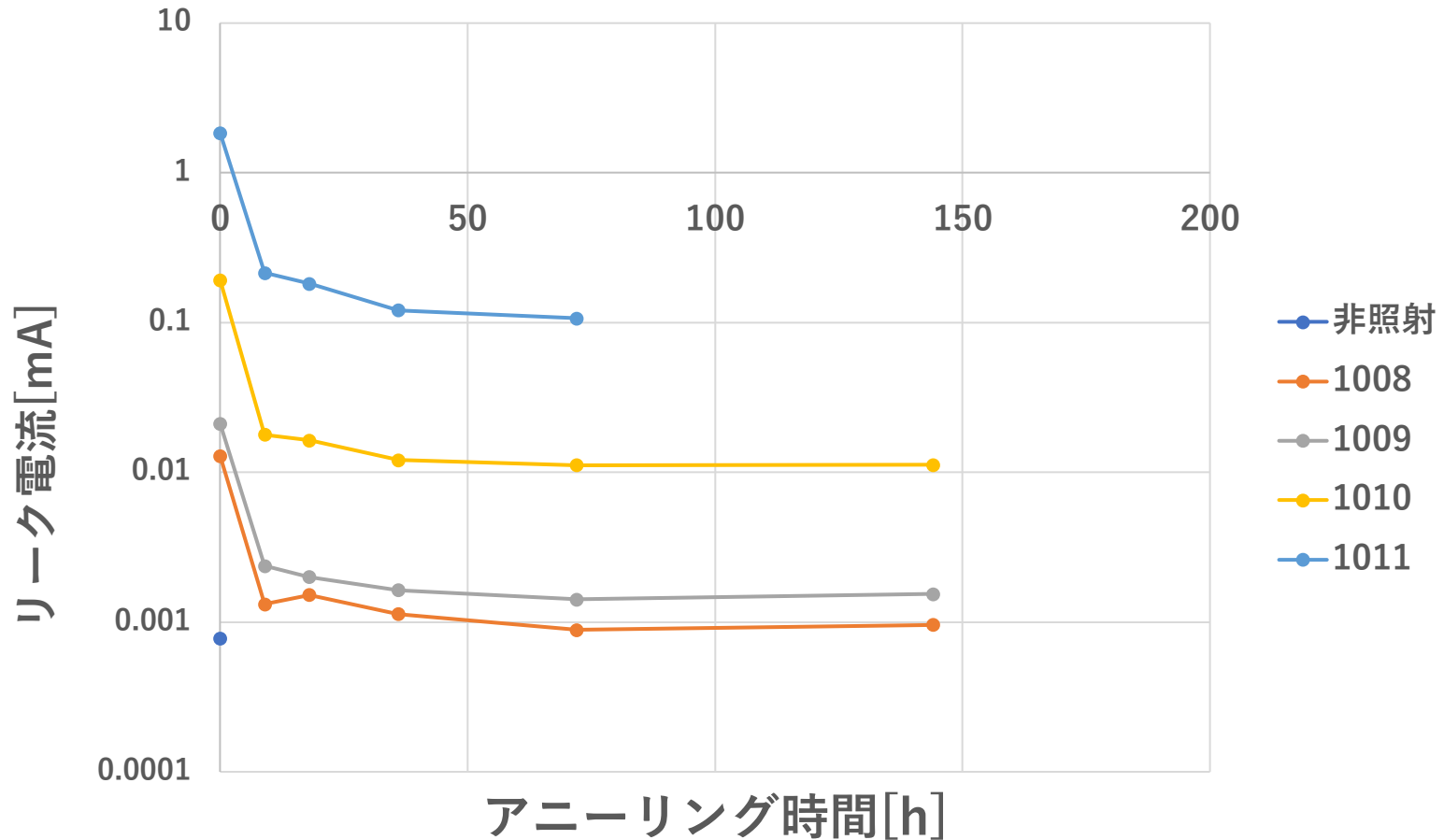
開口率(ピクセル領域における有感領域の割合)の低さが  
放射線耐性に寄与すると考えられる

# まとめ

- ARICHの新たな光検出器の候補として、MPPCを検討中
- 増倍率は中性子照射量が増えるにつれ減少
- 1315PSは3075VE,3050HSと比較して
  - ダークカウントレートが抑制的
  - 増倍率の減少率が少
  - 強い放射線耐性
- しかし、現状1年間の運用への耐性は無く、冷却が必須
- 現在、アニーリングの効果についての研究を進めている

# アニーリングの進捗(②3075VE)

動作電圧( $V_{bd} + 3[V]$ )におけるリーク電流@25C

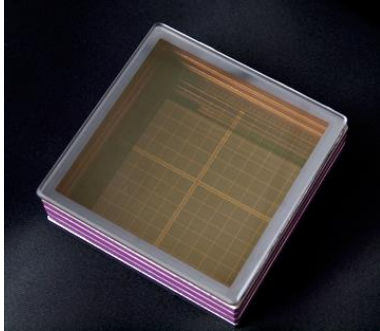


**~ Back up ~**



# MPPCを取り扱う上での懸念

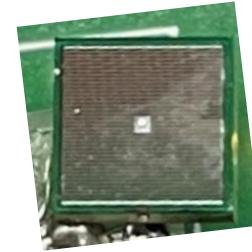
HAPD



1CHあたり  $4.9 \times 4.9 [mm^2]$

識別性能が向上すると予想

②3075VE



⑦3050HS



1CHあたり  $3.0 \times 3.0 [mm^2]$

⑥1315PS



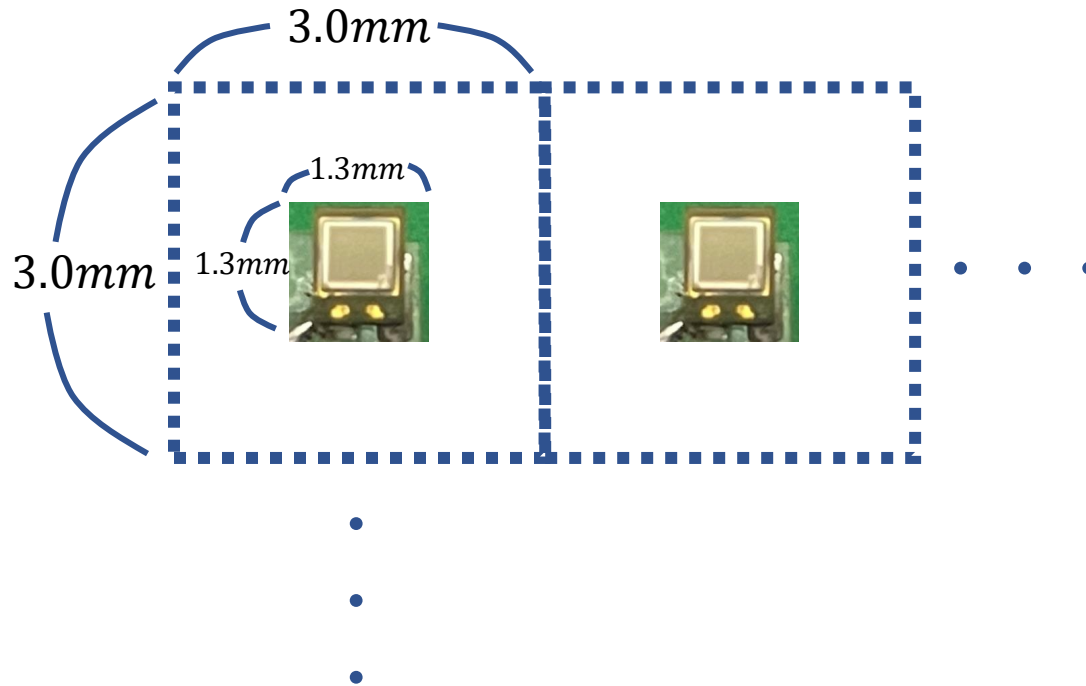
1CHあたり  $1.3 \times 1.3 [mm^2]$

あまり性能は向上しないと考えられている

ARICHに敷き詰めた場合、チャンネル数が多くなり、扱い難

# MPPCをARICHに組み込んだ際の配置方法

<⑥1315PSを実際に運用する際>



$3.0 \times 3.0[\text{mm}^2]$ の領域に入射した光子をウィンストンコーンを用い集光

# 冷却による効果(光子入射、波形)

## ②3075VE

照射量 $10^9$

25C



-15C

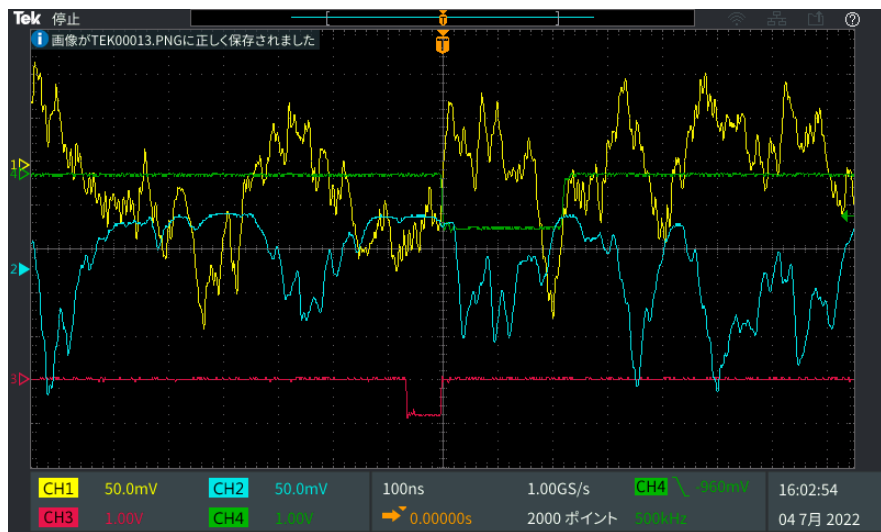


# 冷却による効果(光子入射、波形)

## ②3075VE

照射量 $10^{11}$ (年間に予想される照射量)

25C



-15C

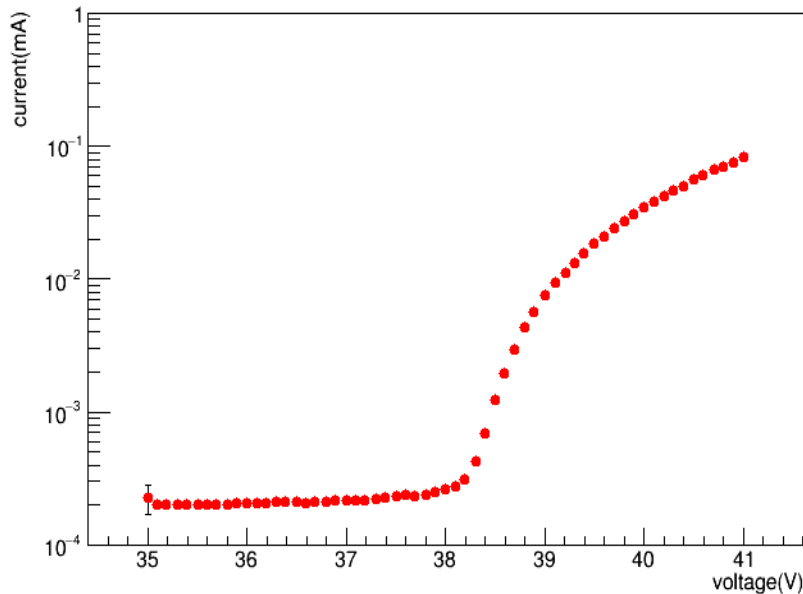


# 測定の概要

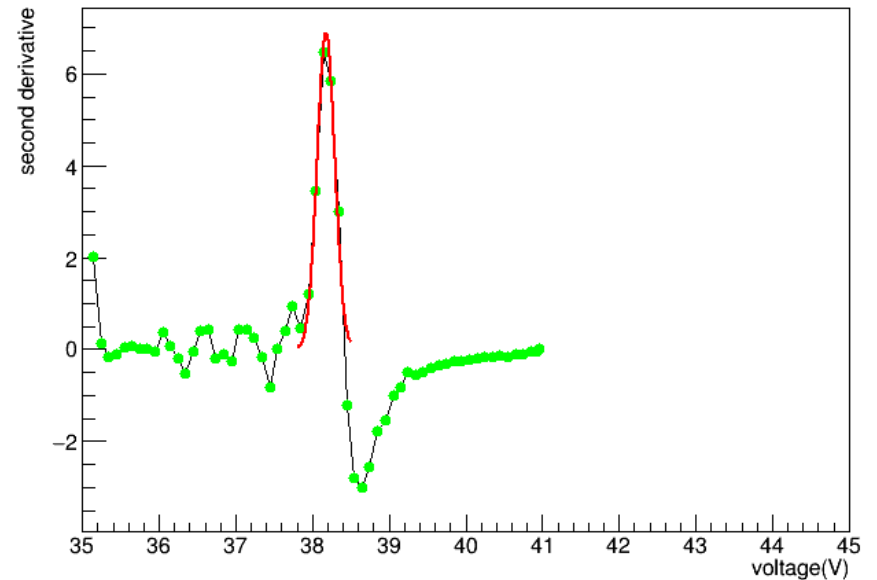
## ブレークダウン電圧の導出方法

⇒ I-V曲線において曲率(二回微分)の最大値をとる電圧をブレークダウン電圧と解釈

I-V曲線



2回微分

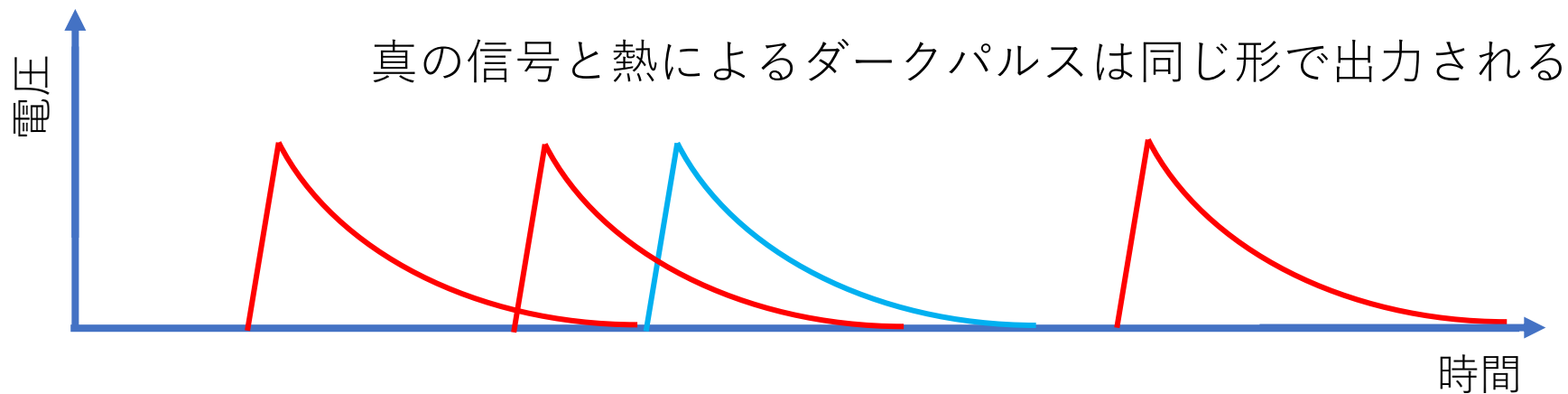


Mean値をブレークダウン電圧とした

# MPPCの使用におけるデメリット

- ・ 高ダークカウントレート

→ キャリアが熱的に励起することにより出てしまうシグナル



青：真の信号

赤：ダークパルス

⇒ 2つの信号を見分けるのは困難

# MPPC(Multi Pixel Photon Counter)

$$Q = C(V - V_{bd}) \quad (V > V_{bd} \text{のとき})$$

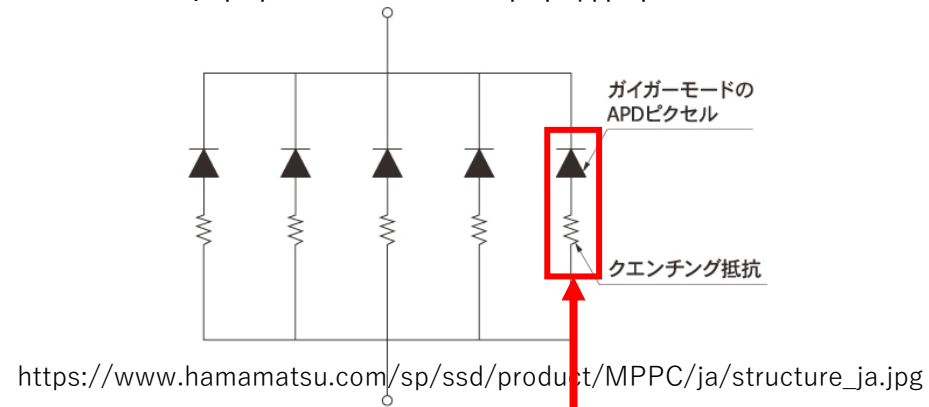
$Q$  : APDからの出力電荷

$C$  : 静電容量

$V$  : 印加電圧

$V_{bd}$  : ブレークダウン電圧

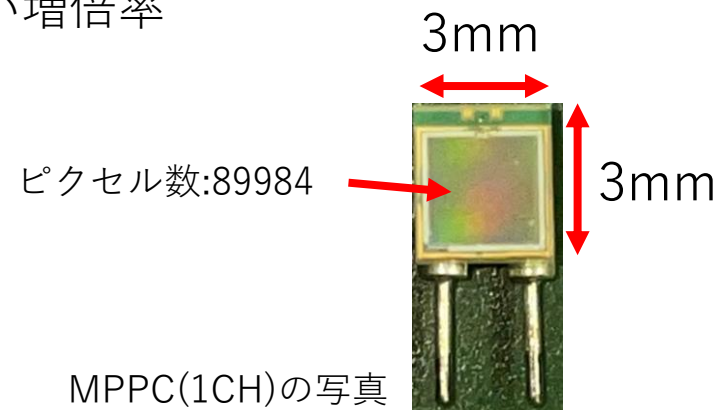
下図：MPPCの回路図



1 Pixel

<特徴>

- ・ ガイガーモード( $V > V_{bd}$ )での動作による高い増倍率
- ・ 1ピクセルに同時に光子が複数入射しても1光子に相当するシグナルを出力

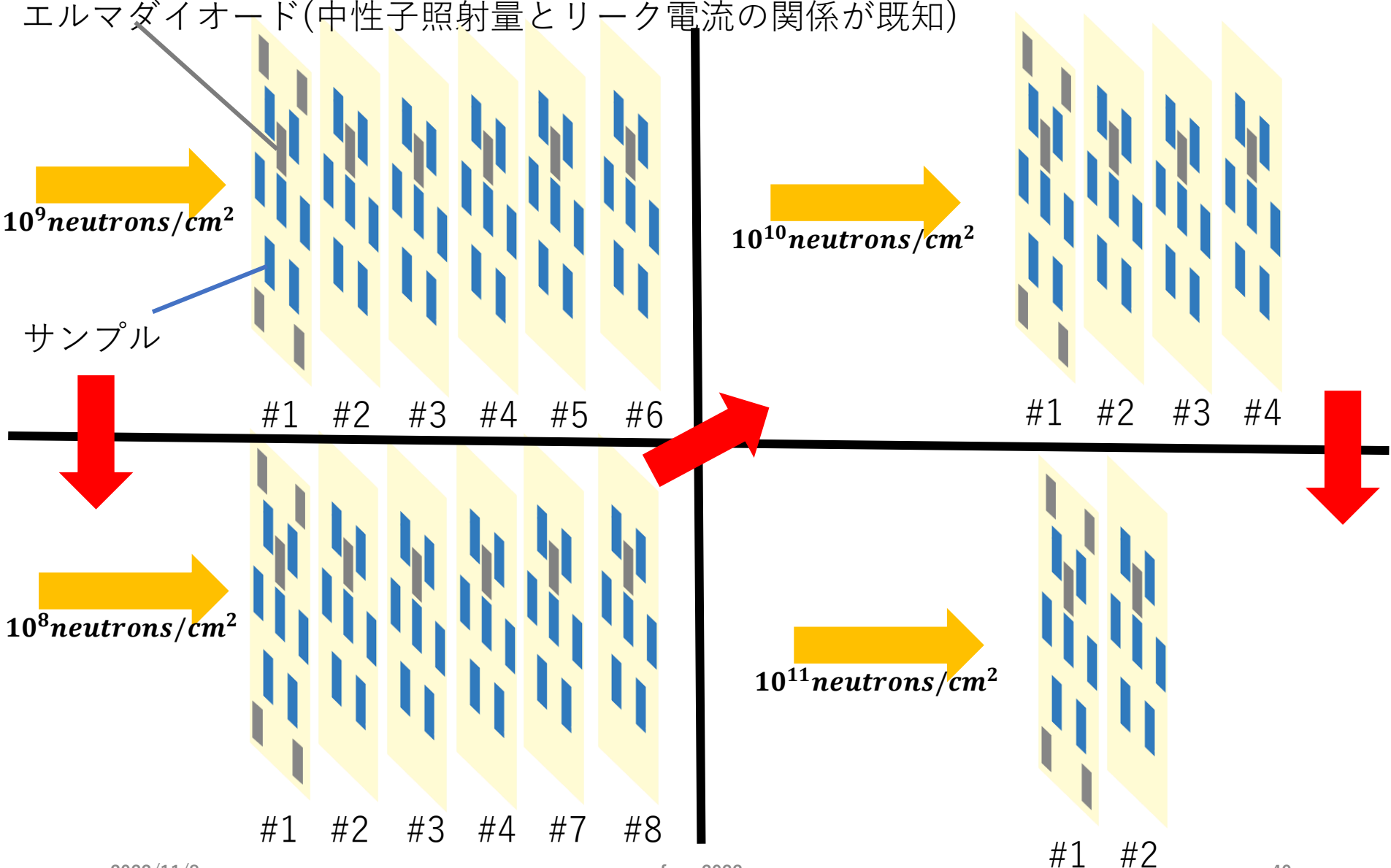


MPPC(1CH)の写真

S14160-3010PS

# 中性子照射試験

エルマダイオード(中性子照射量とリーク電流の関係が既知)





# 中性子照射試験における中性子ビームのflux

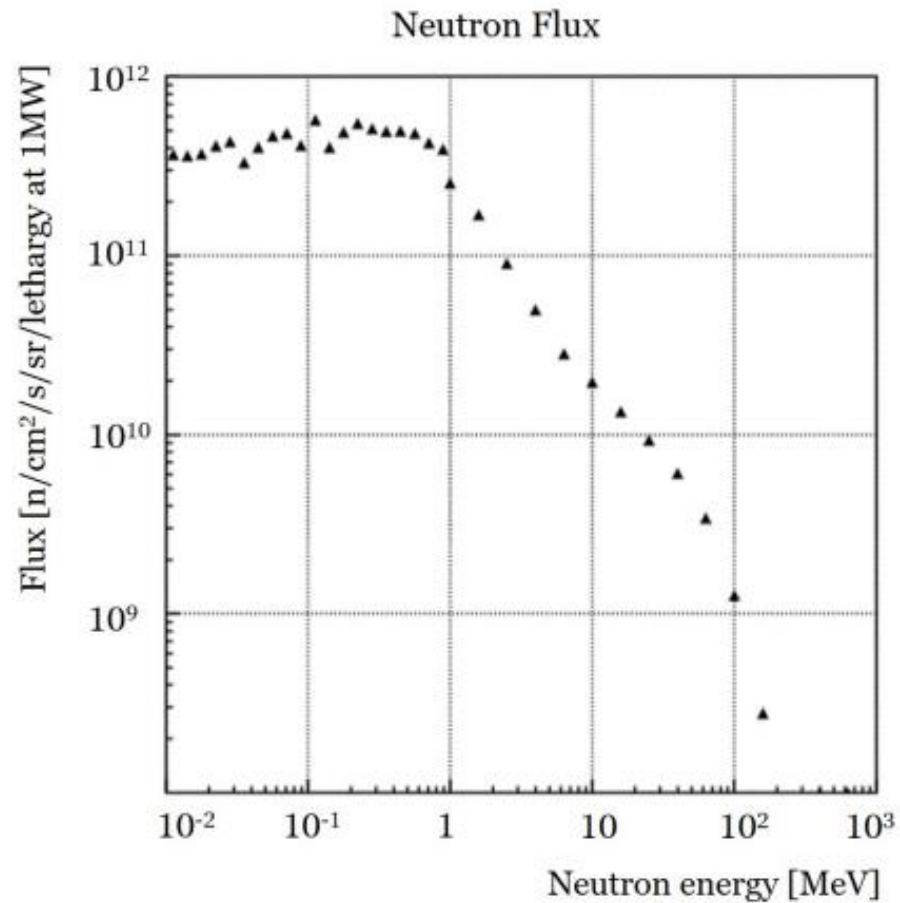


図 6.5 中性子ビーム内における中性子の持つエネルギーとその Flux

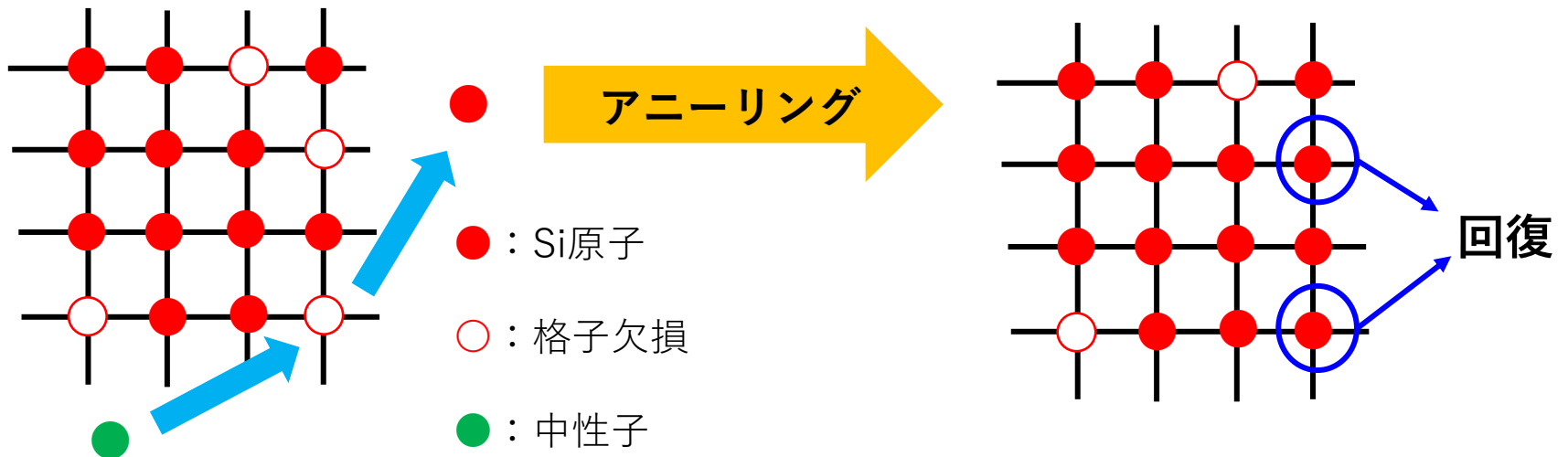
# アニーリングの研究について

MPPCサンプルを一定時間、高温で熱することを想定

高温で熱することによりSi原子が熱運動

⇒中性子により弾き飛ばされたSi原子が格子欠損へ

## 中性子損傷が回復



# MPPC以外の光検出器候補

## LAPPD(Large Area Picosecond PhotoDetectors) が候補

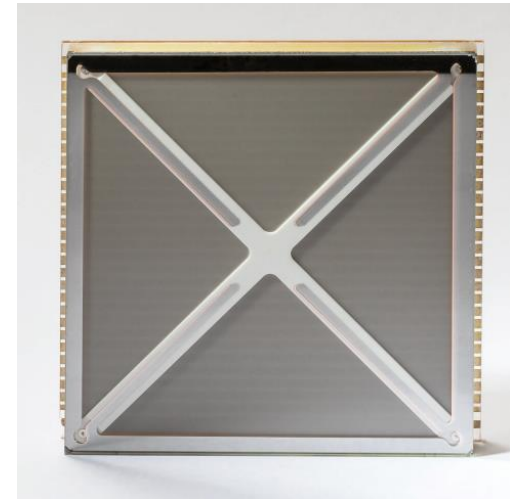
MCP-PMTの一種

### メリット

- ・従来のMCPより安価
- ・高い時間分解能

### デメリット

- ・磁場による影響大
- ・MPPCよりPDE低
- ・charge collectionによる損傷大



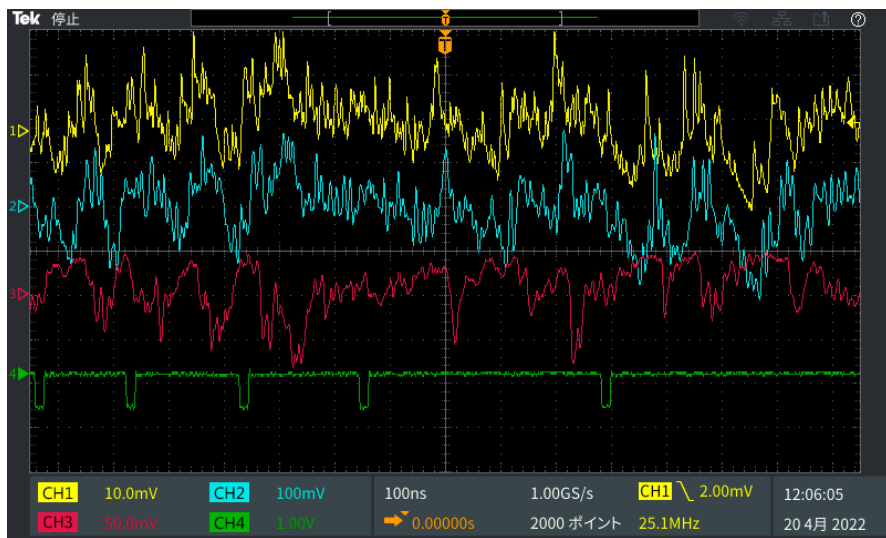
[LAPPD-Data-Sheet-05-19.pdf \(incomusa.com\)](#)

# 冷却による効果(ダークカウントレート、波形)

## ⑥ 1315PS

照射量 $10^{11}$ (年間に予想される照射量)

25C



-60C



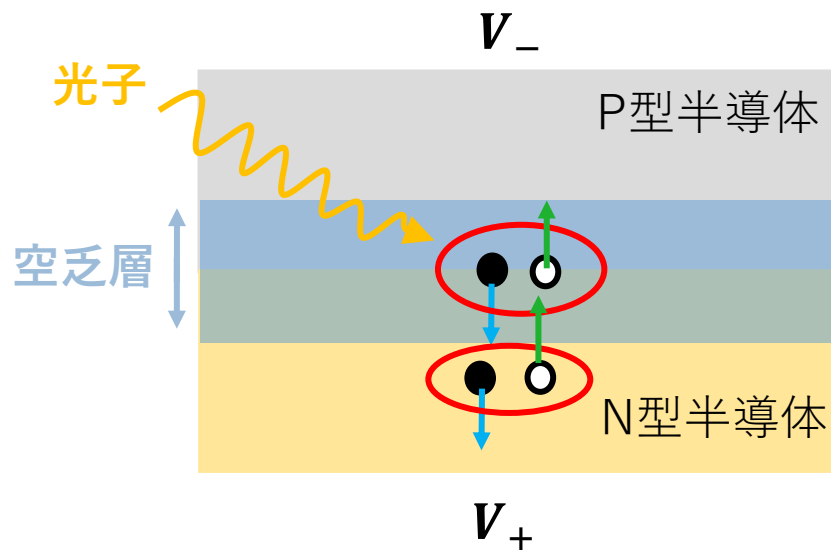
# APD

APD: Avalanche Photo Diodeの略の半導体光検出器

●:電子

○:電子、正孔対が生成

○:正孔(ホール)



1.光子が空乏層に入射すると  
電子と正孔が生成

2.電場により電子と正孔がそれぞれ  
加速

3.ある一定以上のエネルギー $E$ (温度依  
存性あり)で結晶格子に衝突

4.再び新たな電子、正孔対が生成

繰り返すことにより信号を増幅

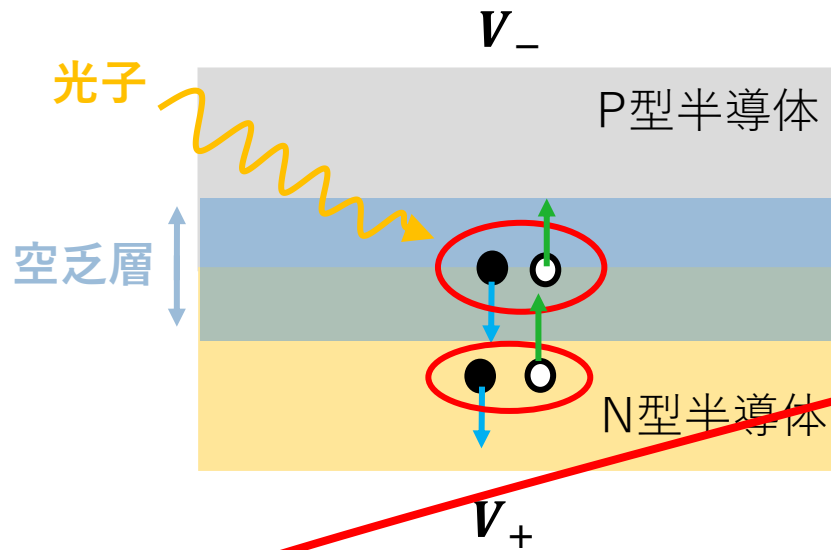
# APD

APD: Avalanche Photo Diodeの略の半導体光検出器

●:電子

○:電子、正孔対が生成

○:正孔(ホール)



1.光子が空乏層に入射すると  
電子と正孔が生成

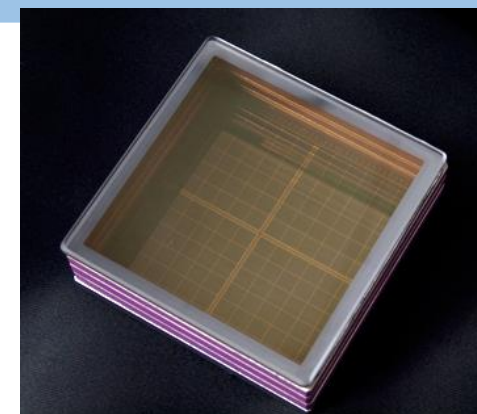
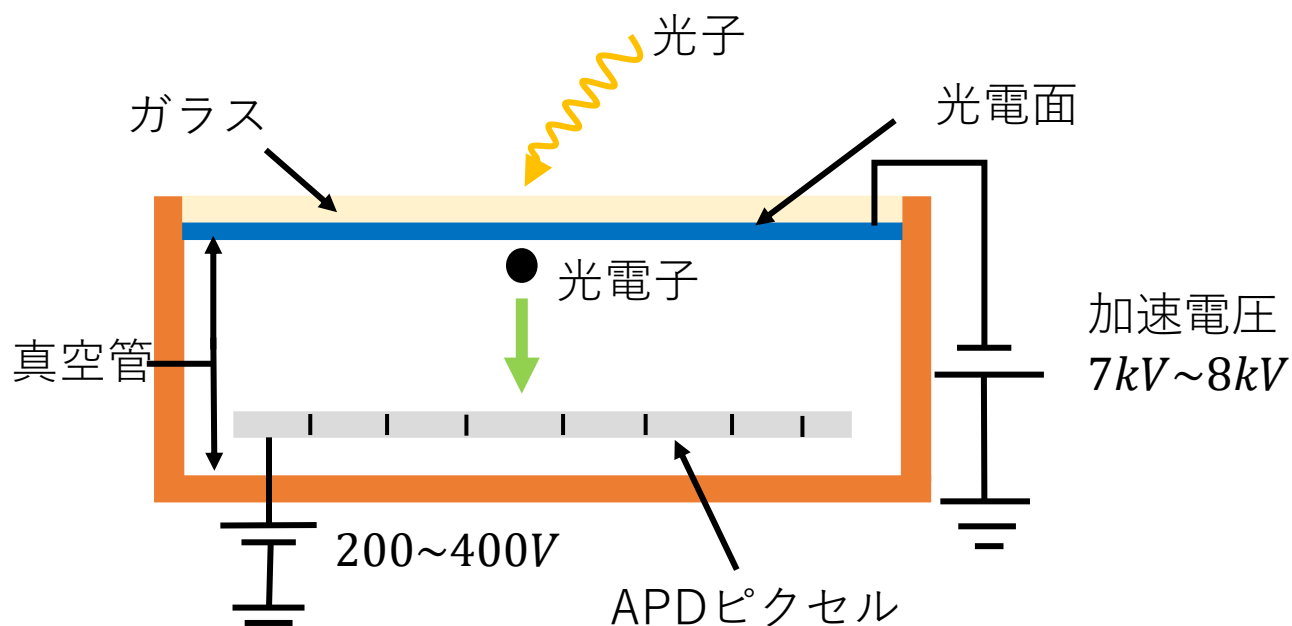
2.電場により電子と正孔がそれぞれ  
加速

3.ある一定以上のエネルギー $E$ で  
結晶格子に衝突

4.再び新たな電子、正孔対が生成

結晶に衝突して減速する前に $E$ に達せられる電圧  
⇒ブレークダウン電圧

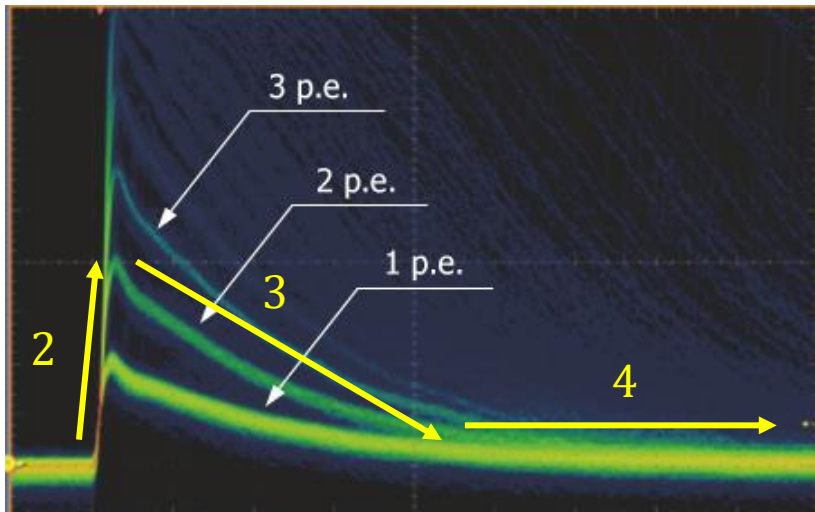
# HAPDの動作原理



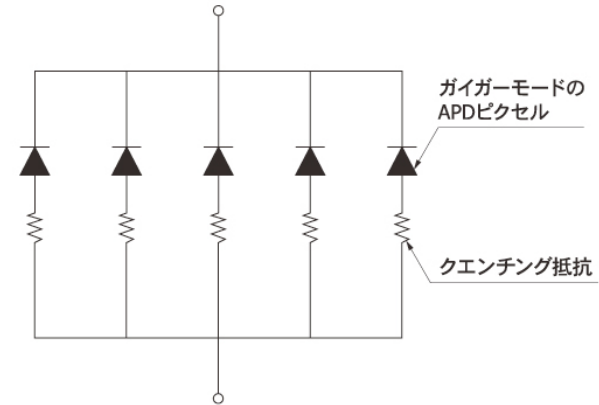
加速による増幅(約1700倍)とアバランシェ増幅(約40倍)により合計で $10^4 \sim 10^5$ 倍に増幅される

# MPPCの動作原理

## ガイガーモード ( $V > V_{bd}$ ) のとき動作



[https://www.hamamatsu.com/sp/ssd/product/MPPC/ja/pulse\\_ware\\_forms.jpg](https://www.hamamatsu.com/sp/ssd/product/MPPC/ja/pulse_ware_forms.jpg)



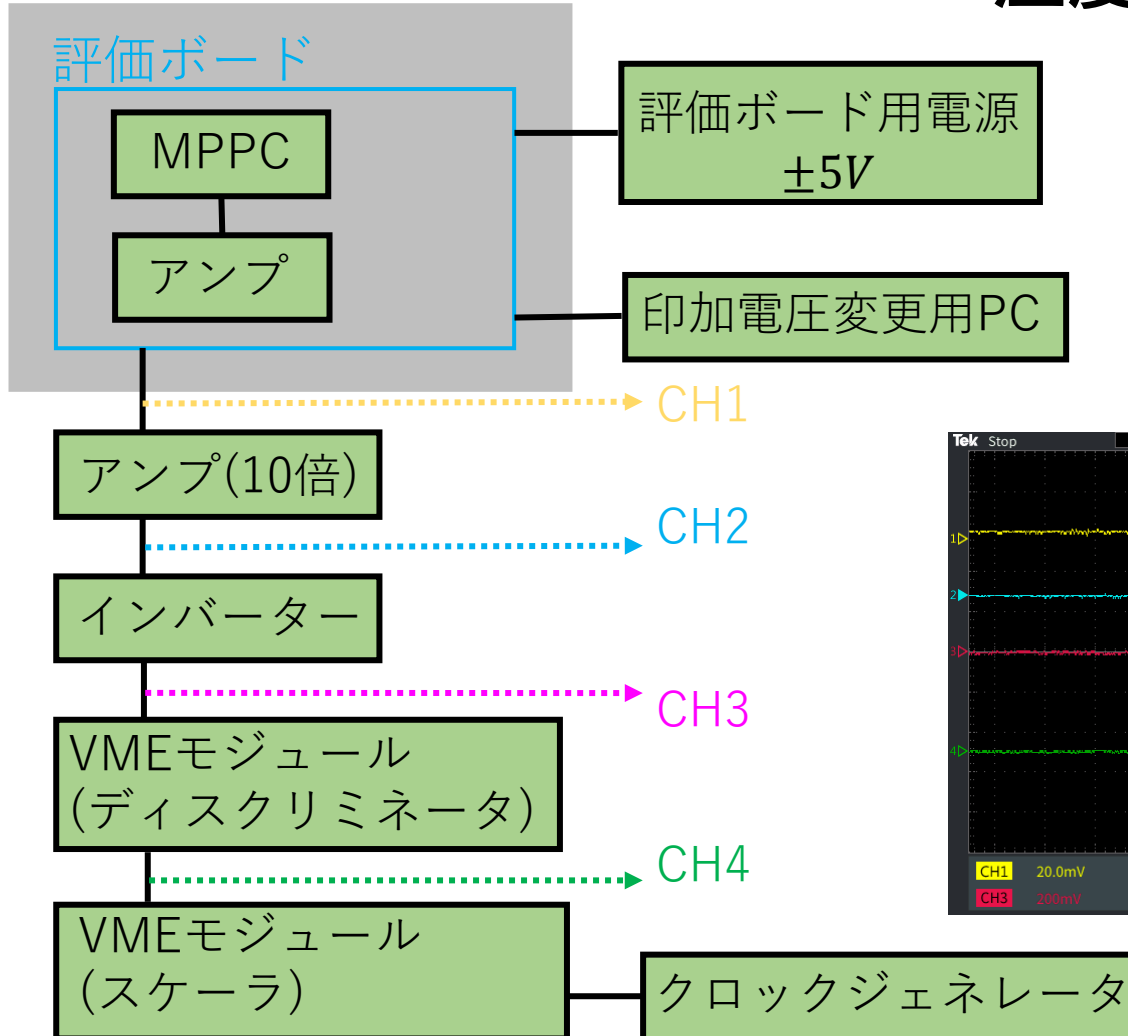
1. 光子が空乏層に入射
2. ガイガー放電(増幅率が $\infty$ となる)を起こし電荷放出
3. クエンチング抵抗により電圧降下
4. 放電が止まり再充電される $\rightarrow$ 1へ



# セットアップ(ダークカウントレート)

恒温槽(暗状態)

温度を変えながら測定



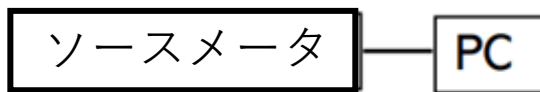
3050HS(⑦)



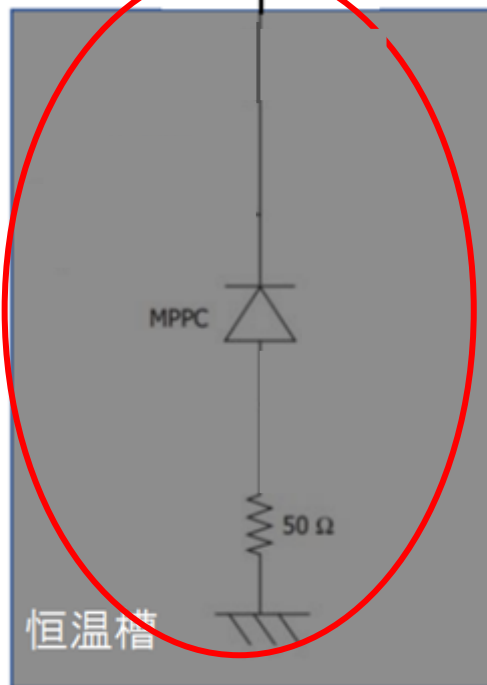
# セットアップ(I-V曲線)

ソースメータ (電圧の印加、電流の測定)

温度を変えながら測定



MPPC接続部



恒温槽(温度の設定)



ブレークダウン電圧近傍で電圧を0.1Vずつ上げながら  
各電圧で30回測定し平均値を測定値とした

# 測定に使用したモジュール(I-V曲線)

- ・ ソースメータKEITHLEY2410(電圧の印加、電流の測定)



- ・ クールインキュベーターKMH-050(温度の設定)

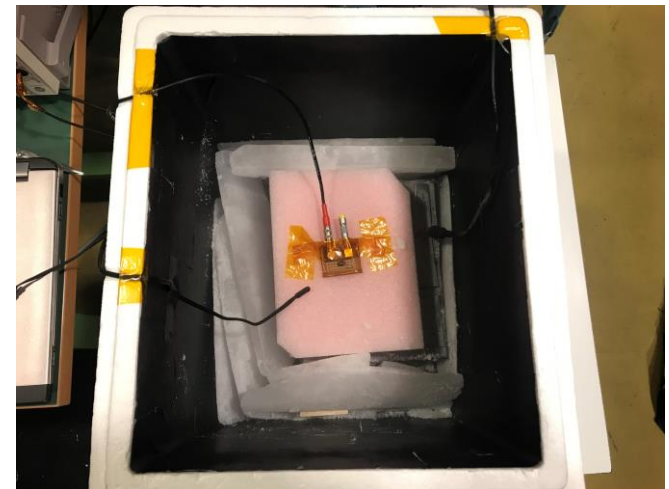


- ・ 自動計測ソフト(ソースメータのデータをexcelに出力)



# -15°C以下における測定

- 発泡スチロールの箱の裏側に黒いゴムテープを張り遮光
- セットアップは今まで使用していたものを再使用
- 箱内の回路については、台の上に乗せて温度が下がりすぎないように調整  
(高さを調節して温度を調整)
- 箱を暗幕で覆って更に遮光



# 参考：ARICHにおけるダークカウントレートの許容量

引用：古井孝侑 東京大学 修士論文

Belle II ARICH検出器のアップグレードに向けた光検出器MPPCの研究

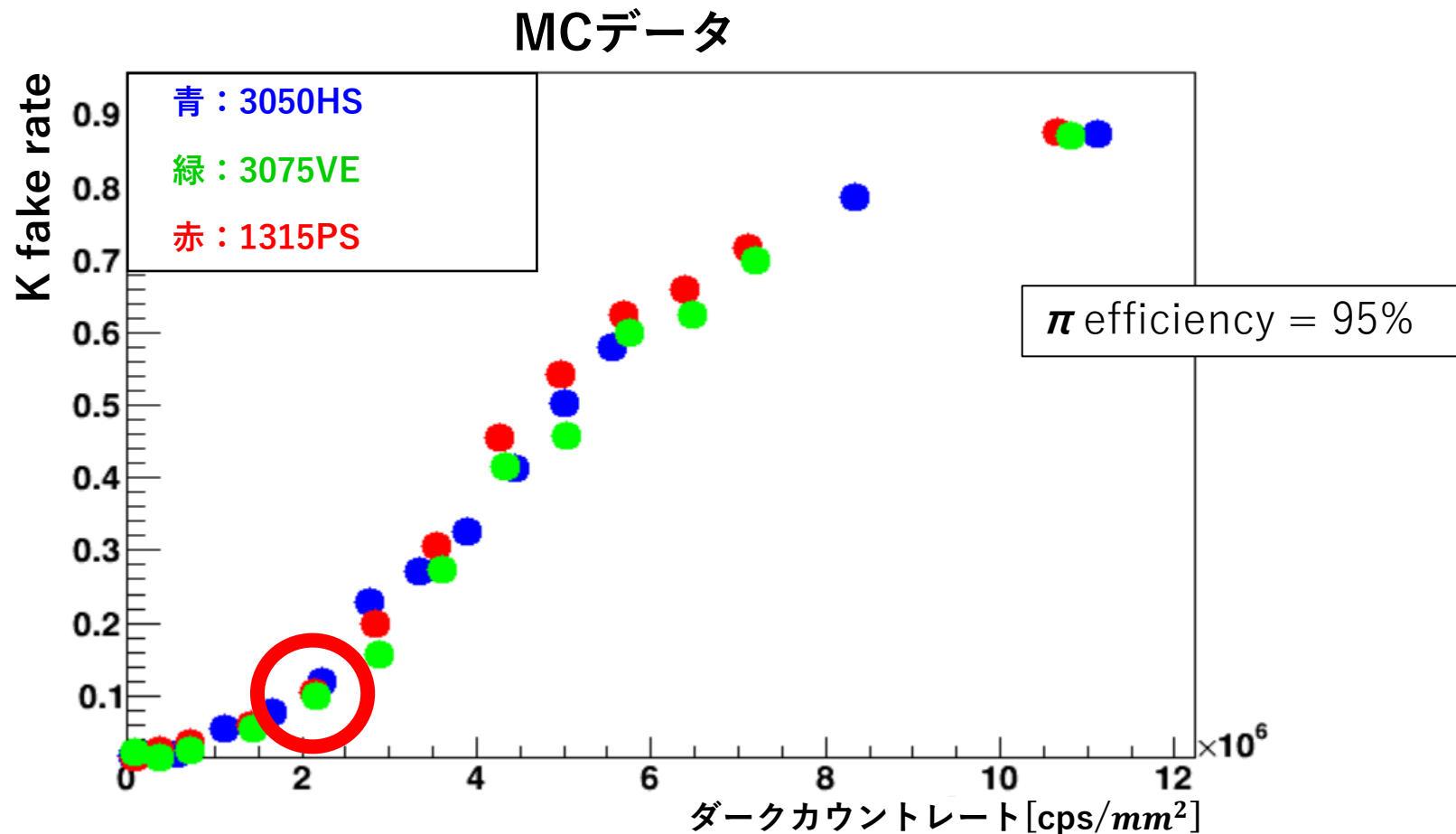
Belle IIの  
MCシミュレーション

- ・ MPPCのPDEを適用(大きさは不適用)
- ・ Time Window(取得データの時間幅)を1nsと仮定  
(実際は250ns)

$$K \text{ fake rate} = \frac{\text{誤識別されてしまった}K\text{中間子}}{K\text{中間子の総数}}$$

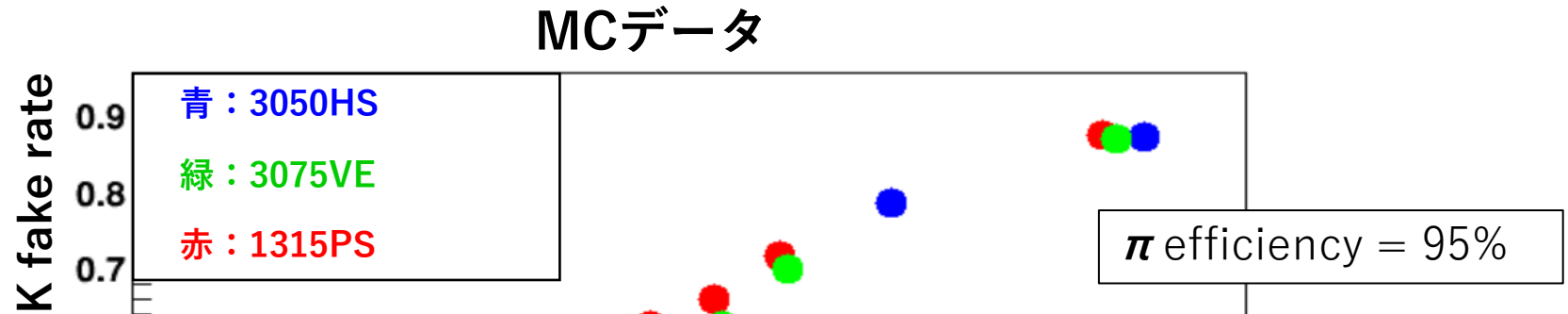
K fake rateと呼ばれる、ARICHに入射したK中間子に対する、 $\pi$  中間子と誤識別されてしまったK中間子の割合を評価

# 参考：ARICHにおけるダークカウントレートの許容量



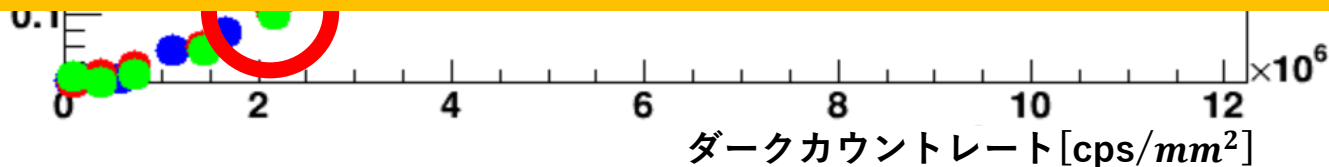
ダークカウントレートが $\sim 2$  [ $\text{Mcps}/\text{mm}^2$ ]程度ならK fake rateが10%程度  
(Belle実験時の粒子識別性能と同程度, Belle IIでの目標は2%)

# 参考：ARICHにおけるダークカウントレートの許容量



本研究では、MPPCを面積 $3.0 \times 3.0 [mm^2]$ あたり1つ配置すると仮定し、ダークカウントレートの許容量を  
 $2 [Mcps/mm^2] \times (3.0 \times 3.0) [mm^2] = 18 [Mcps]$ とする

(ダークカウントレート $18 [Mcps]$ はK fake rate = 10%に相当)



ダークカウントレートが $\sim 2 [Mcps/mm^2]$ 程度ならK fake rateが10%程度  
(Belle実験時の粒子識別性能と同程度, Belle IIでの目標は2%)

# 測定の概要(ダークカウントレート)

- 1.VMEモジュールを用いてスレッシュホールドスキャンを測定
- 2.スレッシュホールドスキャンから $h_{0.5p.e.}$ を導出
- 3.VMEモジュールの仕様によりシグナルのとりこぼしがあるため閾値電圧を $h_{0.5p.e.}$ に設定しディスクリミネータでカウントを測定



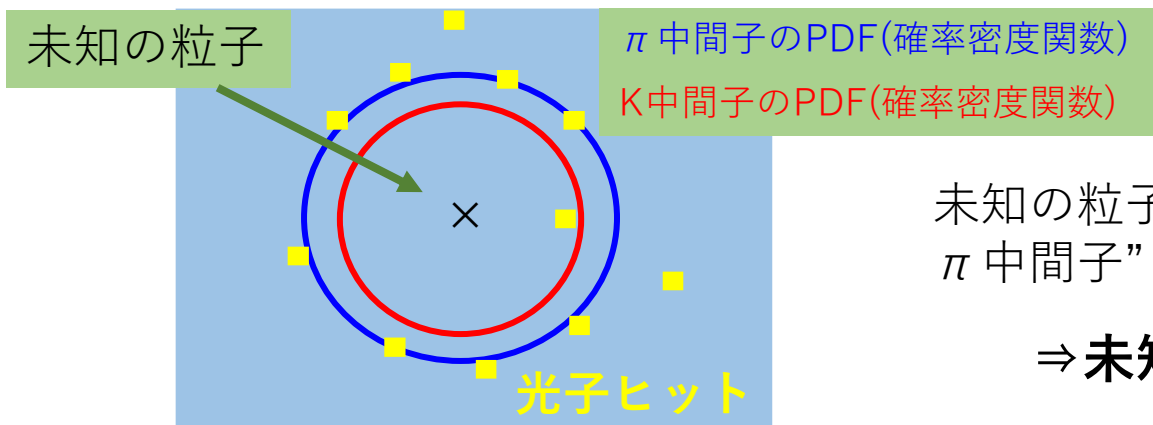
# ARICHにおける粒子識別方法

$$\cos\theta_c = \frac{\sqrt{(mc)^2 + p^2}}{np} \quad (\theta_c: \text{放射角} \quad m: \text{粒子の質量} \quad p: \text{運動量 (測定値)} \quad n: \text{屈折率 (既値)})$$

⇒ 実際にはLog(Likelihood)を計算

$$\ln L^h = -N^h + \sum_{\text{hit } i} [n_i^h + \ln(1 - e^{-n_i^h})]$$

( $h$ : 候補粒子,  $N^h$ : 候補粒子から期待される検出光子数  $i$ : チャンネル番号,  $n_i^h$ : 候補粒子から期待される、チャンネル  $i$  に予想される検出光子数)



未知の粒子から発せられた光子の  $\pi$  中間子”らしさ”が高い

⇒ 未知の粒子は  $\pi$  中間子

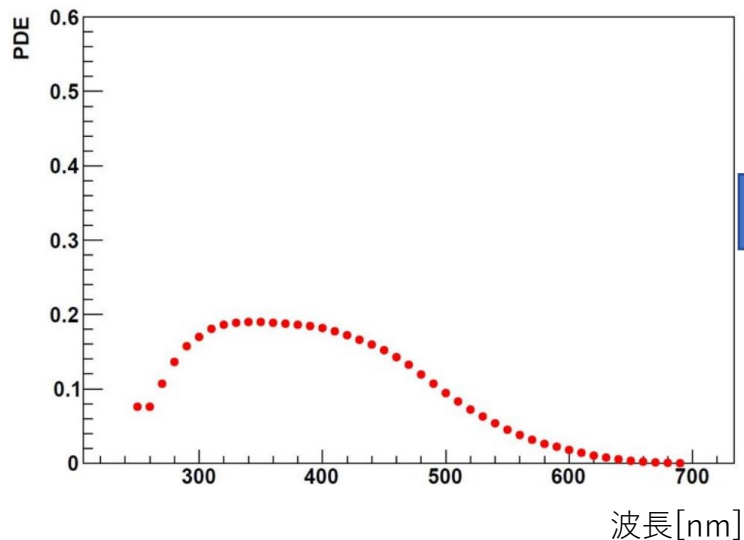
# 参考：ARICHにおけるダークカウントレートの許容量

昨年度、東京大学を卒業された古井さんの修士論文から引用  
(Belle II ARICH検出器のアップグレードに向けた光検出器MPPCの研究)

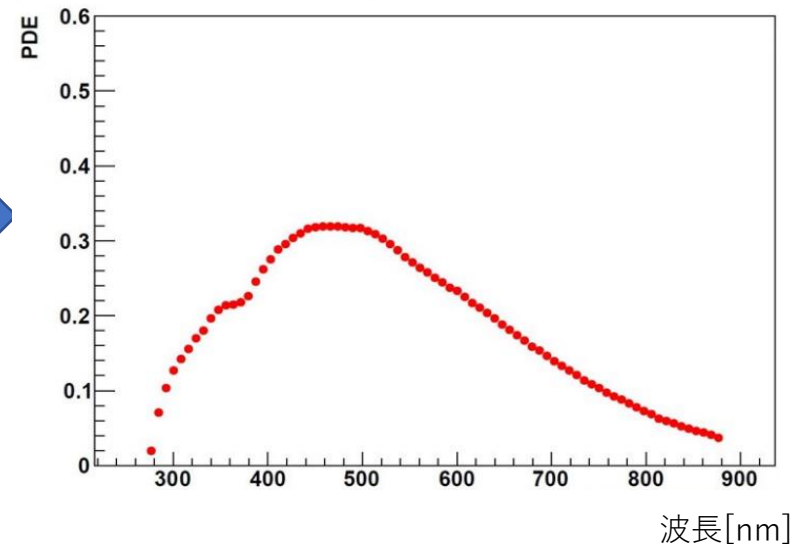
<MCシミュレーションのセットアップ>

- ・ PDE(光子検出効率)を変更
- ・ time windowを1nsと仮定

**HAPD**



**1315PS**



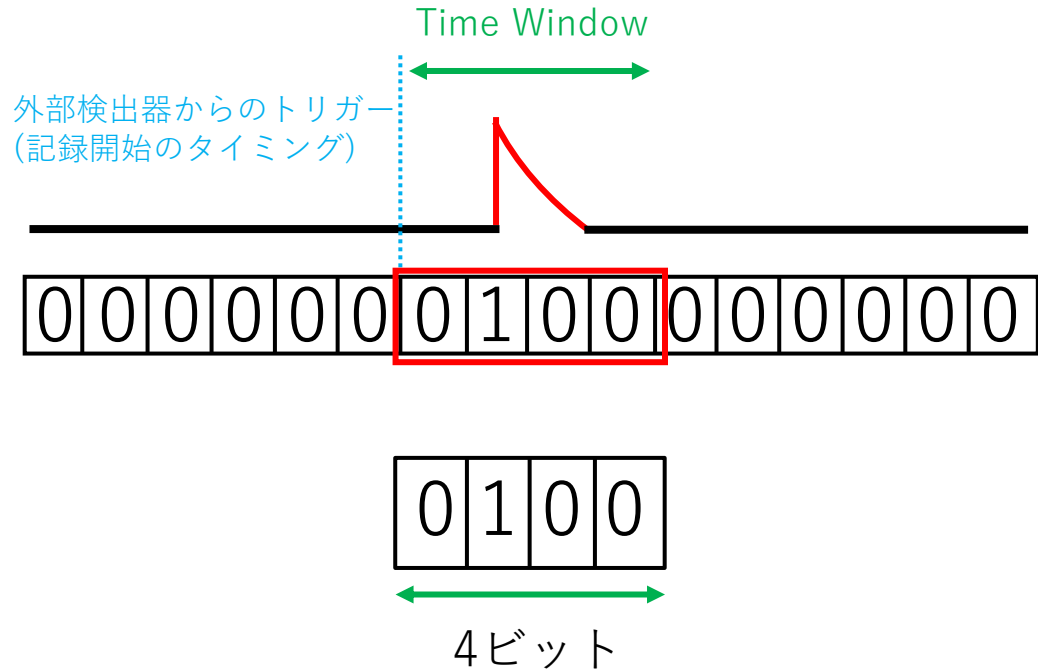
# 参考：ARICHにおけるダークカウントレートの許容量

## <Time Window>

光検出器(1CH)からの  
シグナル

デジタル変換された  
シグナル

記録されるデータ



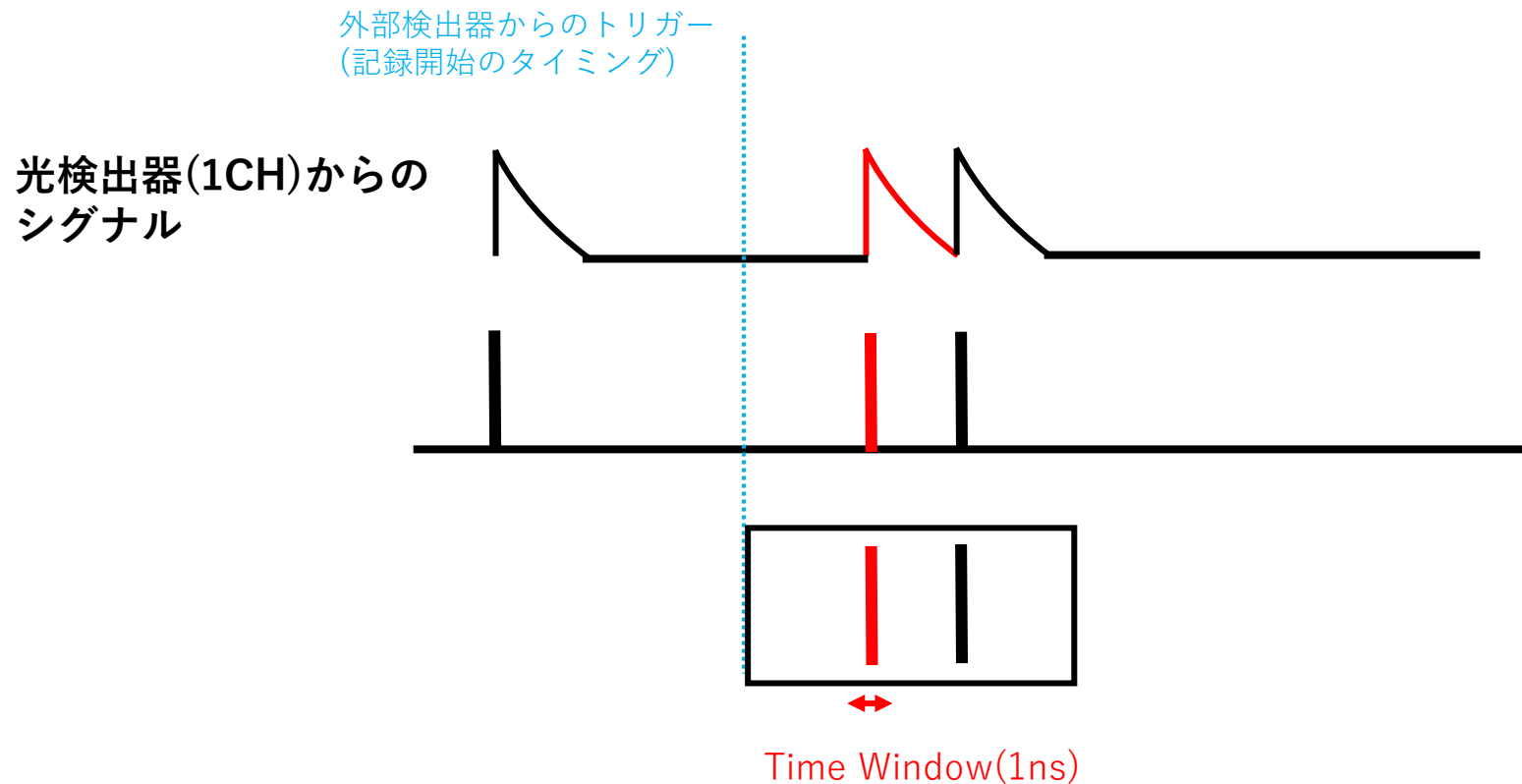
Time Windowを250ns→1nsとする

**エレキの時間分解能を向上させ、  
ダークカウントと真のシグナルを正確に区別**

# 参考：ARICHにおけるダークカウントレートの許容量

現行の手法でTime Windowを1nsにするのは不可能

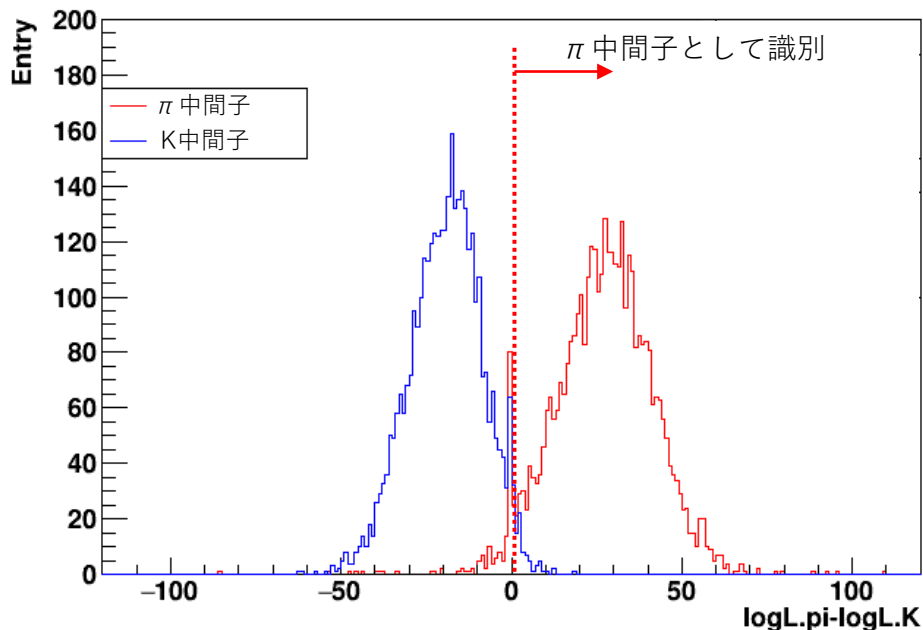
⇒信号の立ち上がりを記録し、オフラインでTime Windowにカットをかける



# 参考：ARICHにおけるダークカウントレートの許容量

ARICHの識別性能の指標としてLog(likelihood)を解析

logL.pi – logL.K(MC)



$\pi$  中間子のエントリーに95%のカットをかけ、その領域を  $\pi$  中間子として識別された粒子とする

その領域内に含まれる、 $\pi$  中間子として識別されてしまったK中間子をfake Kと呼ぶ

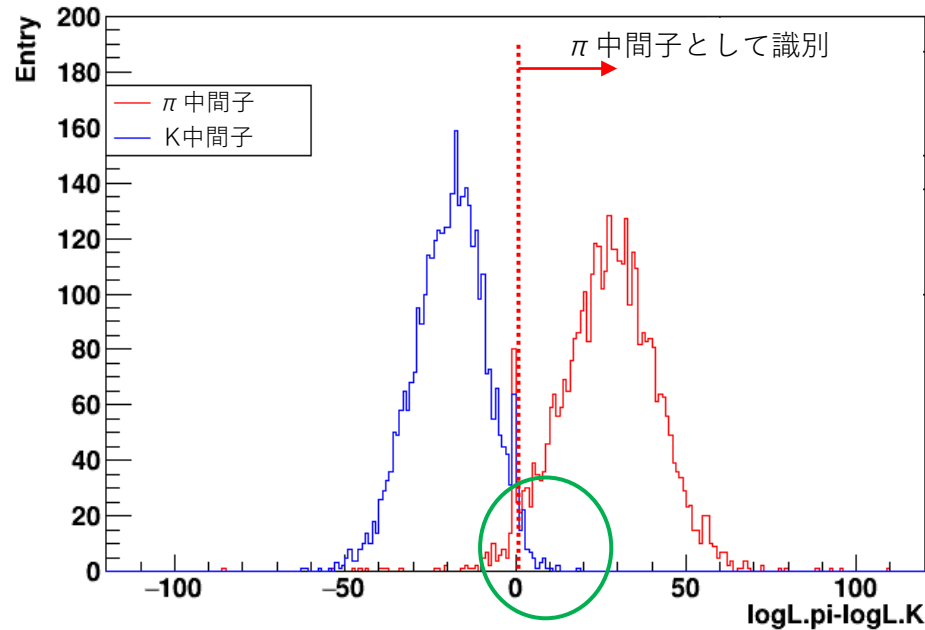
fake Kの全体のK中間子のエントリーに対する割合をK fake rateと呼ぶ

$$K \text{ fake rate} = \frac{\text{fake K}}{K \text{ 中間子のエントリー}}$$

# 参考：ARICHにおけるダークカウントレートの許容量

ARICHの識別性能の指標としてLog(likelihood)を解析

logL.pi – logL.K(MC)



$\pi$  中間子のエントリーに95%のカットをかけ、その領域を  $\pi$  中間子として識別された粒子とする

その領域内に含まれる、 $\pi$  中間子として識別されてしまった  $K$  中間子を fake K と呼ぶ

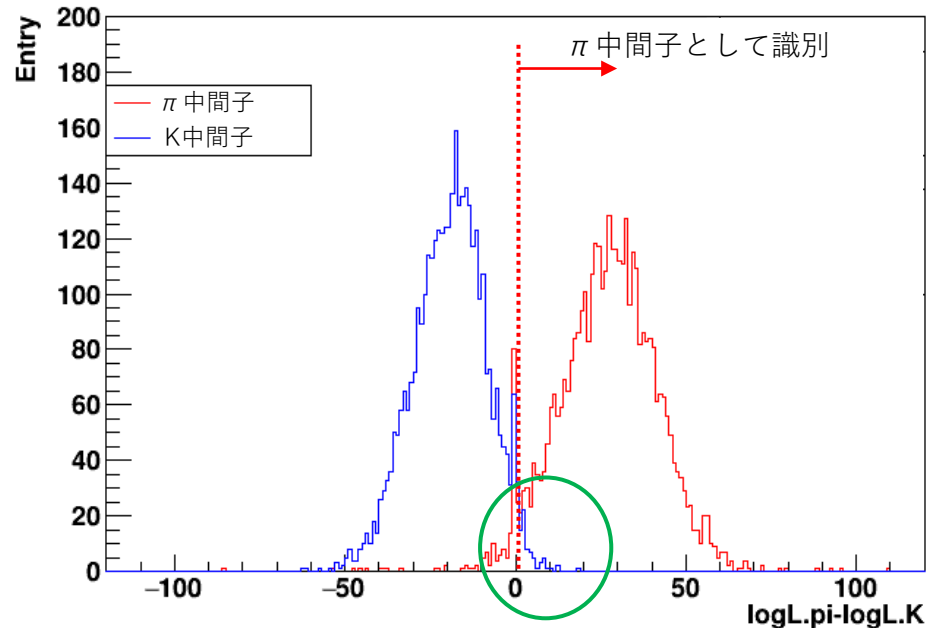
fake Kの全体の  $K$  中間子のエントリーに対する割合を  $K$  fake rate と呼ぶ

$$K \text{ fake rate} = \frac{\text{fake } K}{K \text{ 中間子のエントリー}}$$

# 参考：ARICHにおけるダークカウントレートの許容量

ARICHの識別性能の指標としてLog(likelihood)を解析

logL.pi – logL.K(MC)



$\pi$  中間子のエントリーに95%のカットをかけ、その領域を  $\pi$  中間子として識別された粒子とする

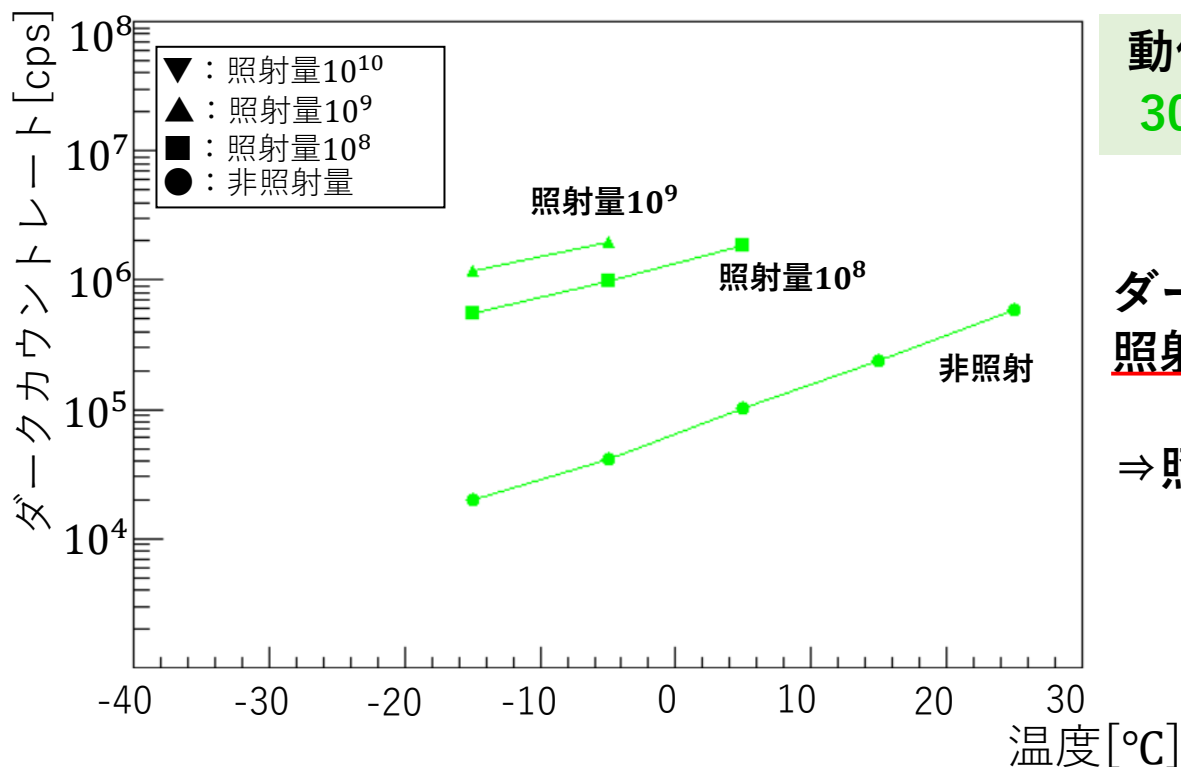
その領域内に含まれる、 $\pi$  中間子として識別されてしまった  $K$  中間子を fake  $K$  と呼ぶ

fake  $K$  の全体の  $K$  中間子のエントリーに対する割合を  $K$  fake rate と呼ぶ

$$K \text{ fake rate} = \frac{\text{fake } K}{K \text{ 中間子のエントリー}}$$

# 結果

MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	$3 \times 3$	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	$1.3 \times 1.3$	120	100	49
3050HS	50	25	50	$3 \times 3$	500	500	74



動作電圧  $V_{op}(V_{bd} + 3[V])$  における  
3075VEのダークカウントレート

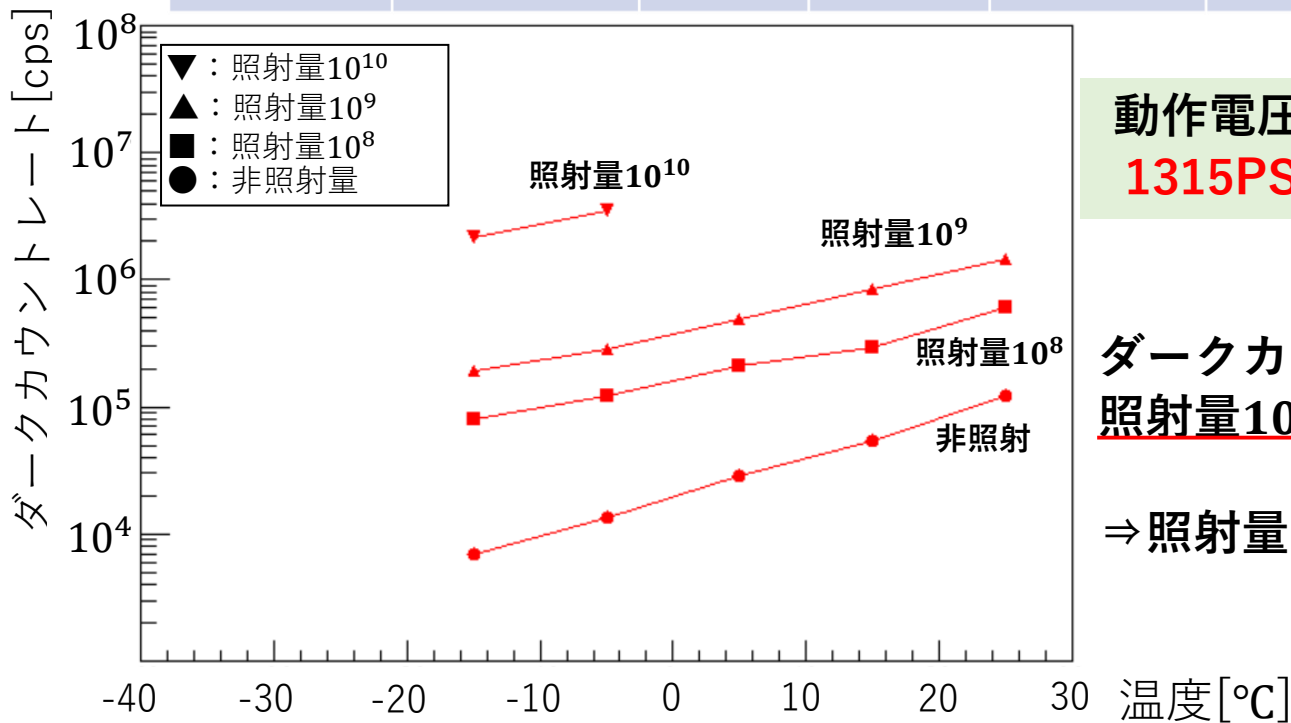
ダークカウントレートが多量のため  
照射量  $10^{10}$ ,  $10^{11}$  は1光子検出が不可

⇒ 照射量  $10^{10}$ ,  $10^{11}$  は測定不可



# 結果

MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	$3 \times 3$	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	$1.3 \times 1.3$	120	100	49
3050HS	50	25	50	$3 \times 3$	500	500	74



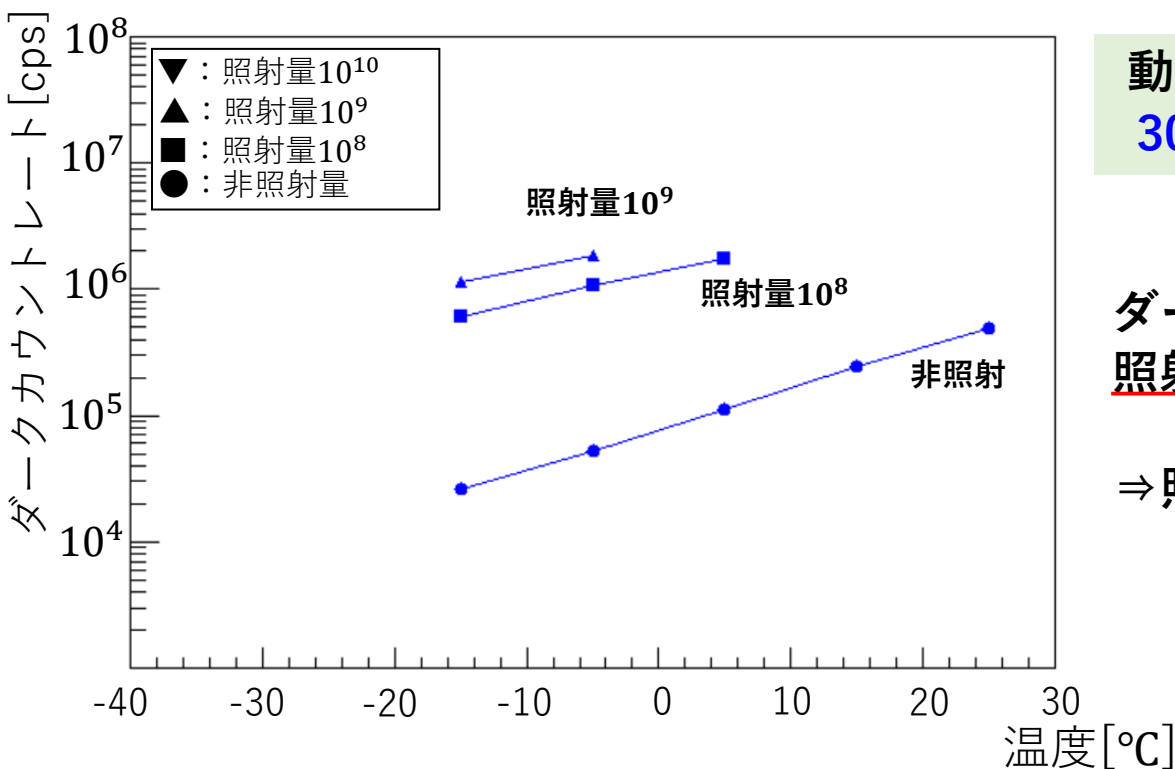
動作電圧  $V_{op}(V_{bd} + 3[V])$  における  
**1315PS** のダークカウントレート

ダークカウントレートが多量のため  
照射量  $10^{11}$  は1光子検出が不可

⇒ 照射量  $10^{11}$  は測定不可

# 結果

MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート (kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	$3 \times 3$	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	$1.3 \times 1.3$	120	100	49
3050HS	50	25	50	$3 \times 3$	500	500	74



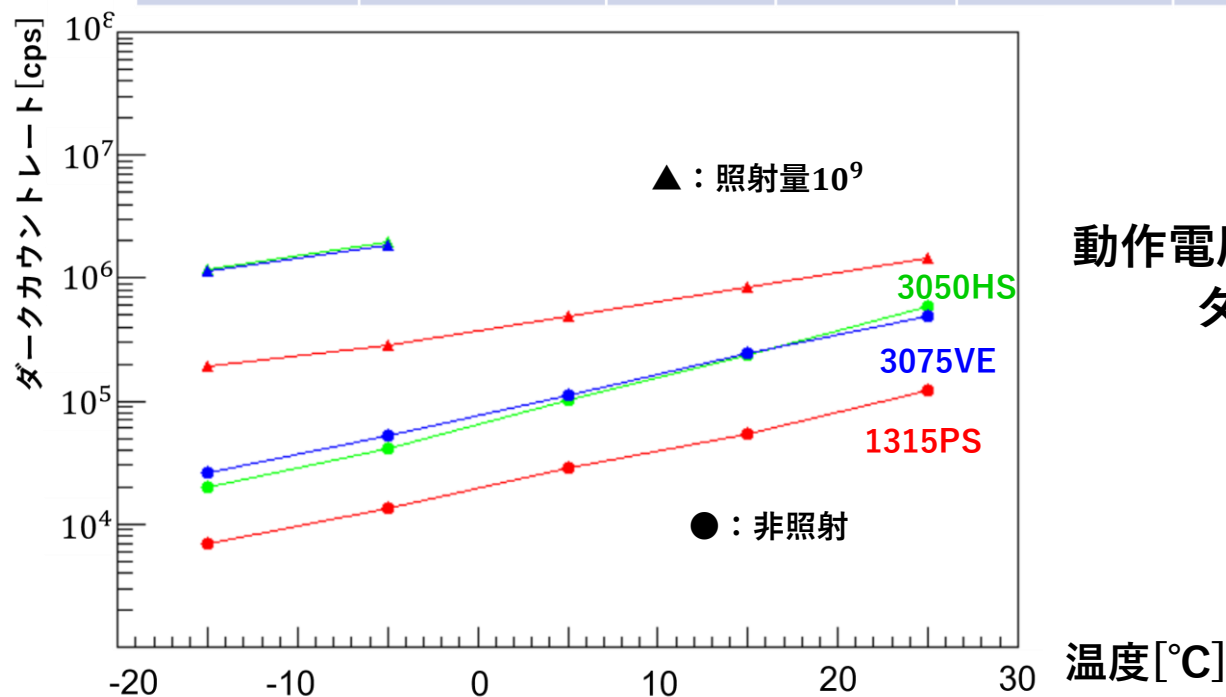
動作電圧  $V_{op}(V_{bd} + 3[V])$  における  
3050HSのダークカウントレート

ダークカウントレートが多量のため  
照射量  $10^{10}$ ,  $10^{11}$  は1光子検出が不可

⇒ 照射量  $10^{10}$ ,  $10^{11}$  は測定不可

# 比較

MPPC サンプル名	ピクセル ピッチ ( $\mu\text{m}$ )	増倍率 ( $\times 10^5$ )	PDE(%)	大きさ ( $\text{mm}^2$ )	ダークカウント レート (kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	$3 \times 3$	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	$1.3 \times 1.3$	120	100	49
3050HS	50	25	50	$3 \times 3$	500	500	74



動作電圧  $V_{op}$  ( $V_{bd} + 3[V]$ ) における  
ダークカウントレート

3サンプルの中で**1315PS**のダークカウントレート量は抑制的

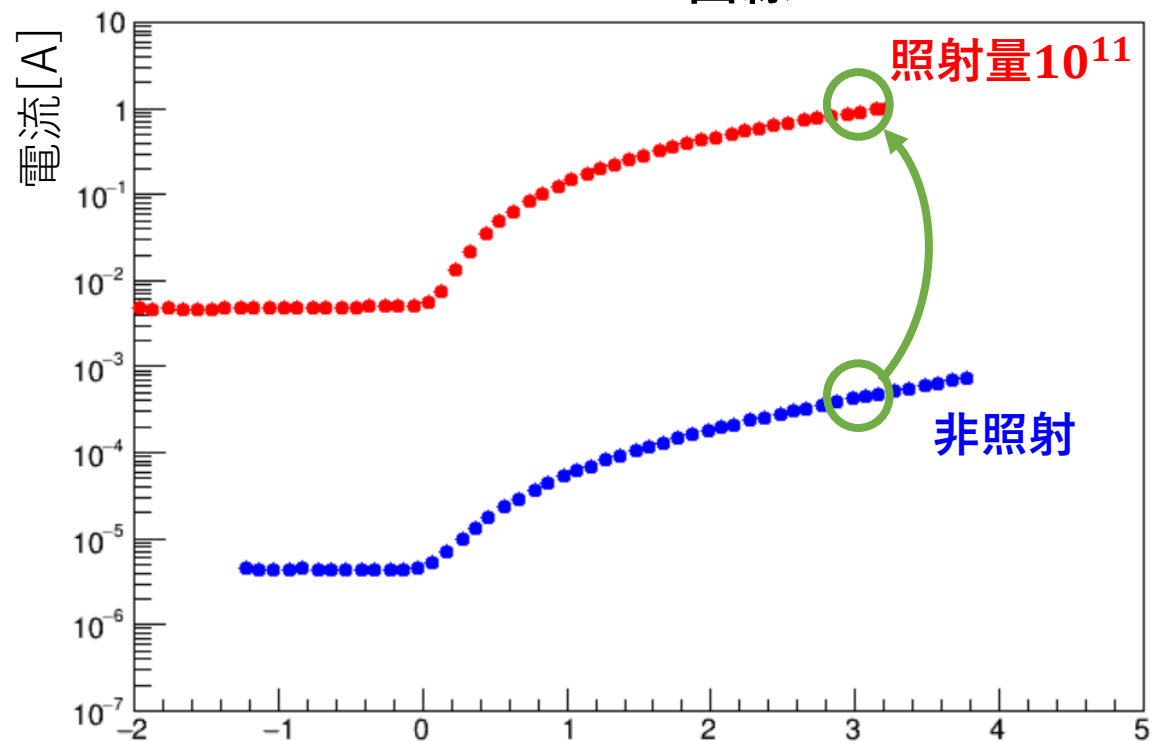
# 測定の概要(I-V曲線)

リーク電流はダークカウントレートに比例



測定できなかった照射量 $10^{11}$ のダークカウントレートの見積もりを行った

I-V曲線



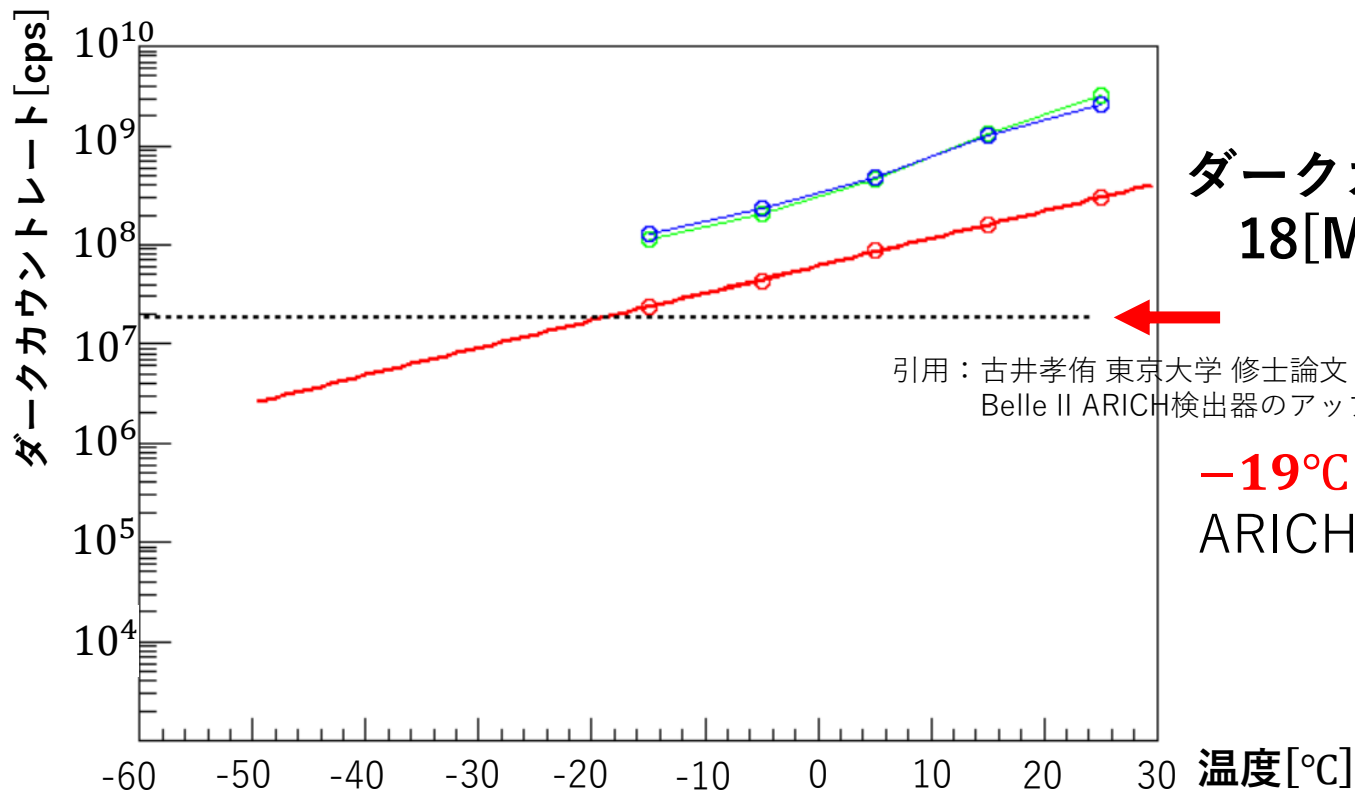
倍率をダークカウントレートに適用することで照射量 $10^{11}$ のダークカウントレートを外挿

ブレークダウン電圧からの差[V]

# 結果(外挿)

動作電圧 $V_{op}(V_{bd} + 3[V])$ における  
照射量 $10^{11}$ のダークカウントレート(推定)

推定値である照射量 $10^{11}$   
をフィット(**1315PS**)



ダークカウントレート許容量  
18[Mcps](先行研究から)

引用：古井孝侑 東京大学 修士論文  
Belle II ARICH検出器のアップグレードに向けた光検出器MPPCの研究

**-19°C**まで冷却することで  
ARICHは正常に動作

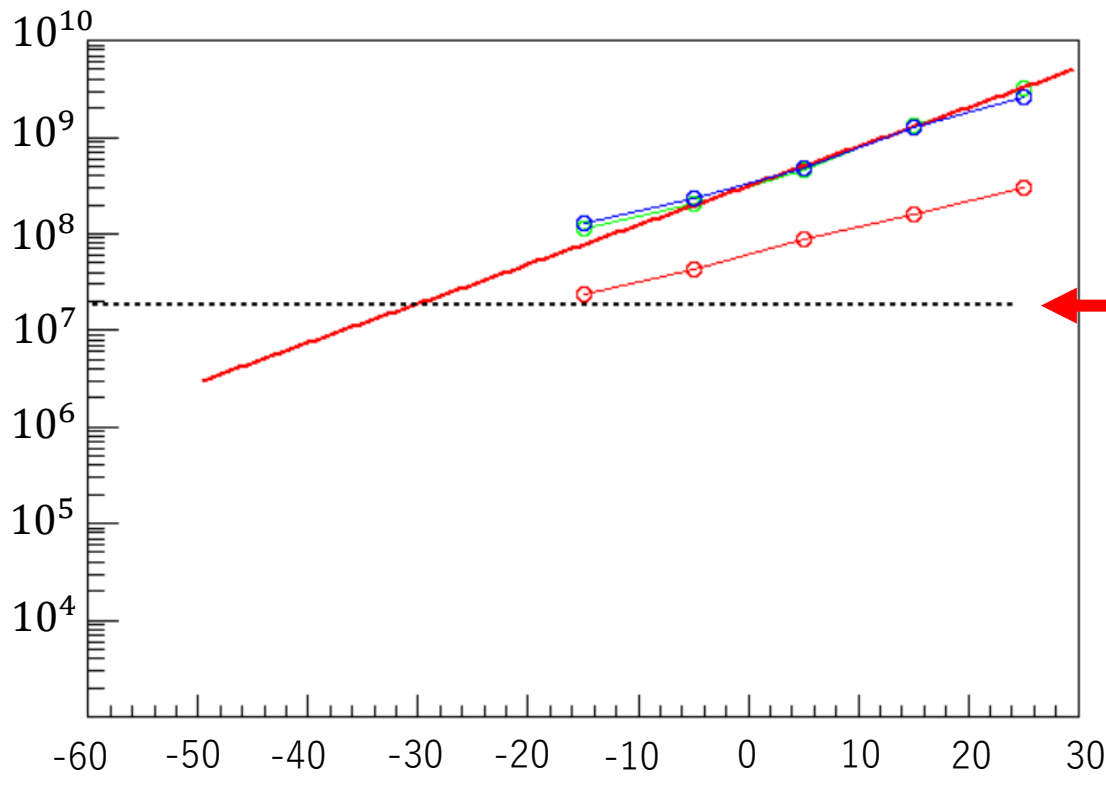
**1315PSは3サンプルの中で1番冷却が不要**

# 結果(外挿)

動作電圧 $V_{op}(V_{bd} + 3[V])$ における  
照射量 $10^{11}$ のダークカウントレート(推定)

推定値である照射量 $10^{11}$   
をフィット(**3075VE**)

ダークカウントレート[cps]



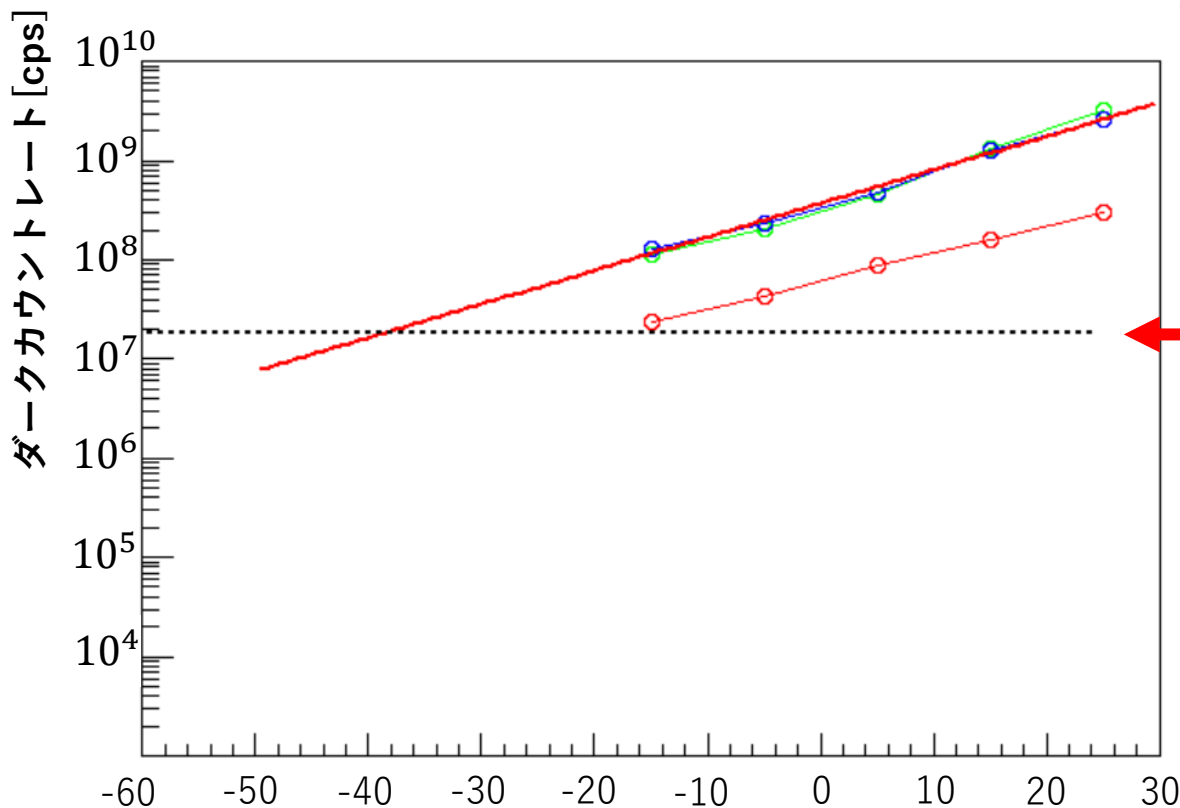
ダークカウントレート許容量  
18[Mcps]

**-31°C**まで冷却することで  
ARICHは正常に動作

**1315PSは3サンプルの中で1番冷却が不要**

# 結果(外挿)

動作電圧 $V_{op}(V_{bd} + 3[V])$ における  
照射量 $10^{11}$ のダークカウントレート(推定)



推定値である照射量 $10^{11}$   
をフィット(**3050HS**)

ダークカウントレート許容量  
18[Mcps]

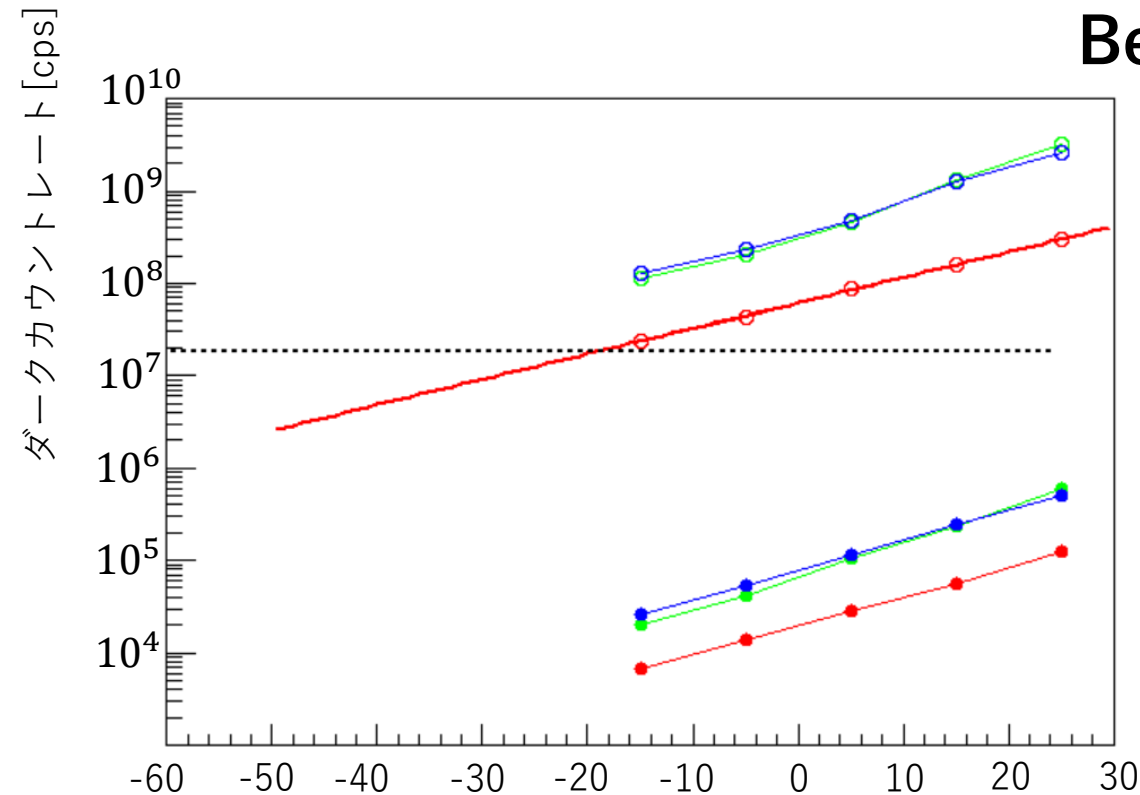
**-39°C**まで冷却することで  
ARICHは正常に動作

**1315PSは3サンプルの中で1番冷却が不要**

# 結果(外挿)

動作電圧 $V_{op}(V_{bd} + 3[V])$ における  
照射量 $10^{11}$ のダークカウントレート(推定)

Belle II実験 1年間の運転で



**1315PS**:  $-19^{\circ}\text{C}$ の冷却が必要

**3075VE**:  $-31^{\circ}\text{C}$ の冷却が必要

**3050HS**:  $-39^{\circ}\text{C}$ の冷却が必要

**1315PSは3サンプルの中で1番冷却が不要**

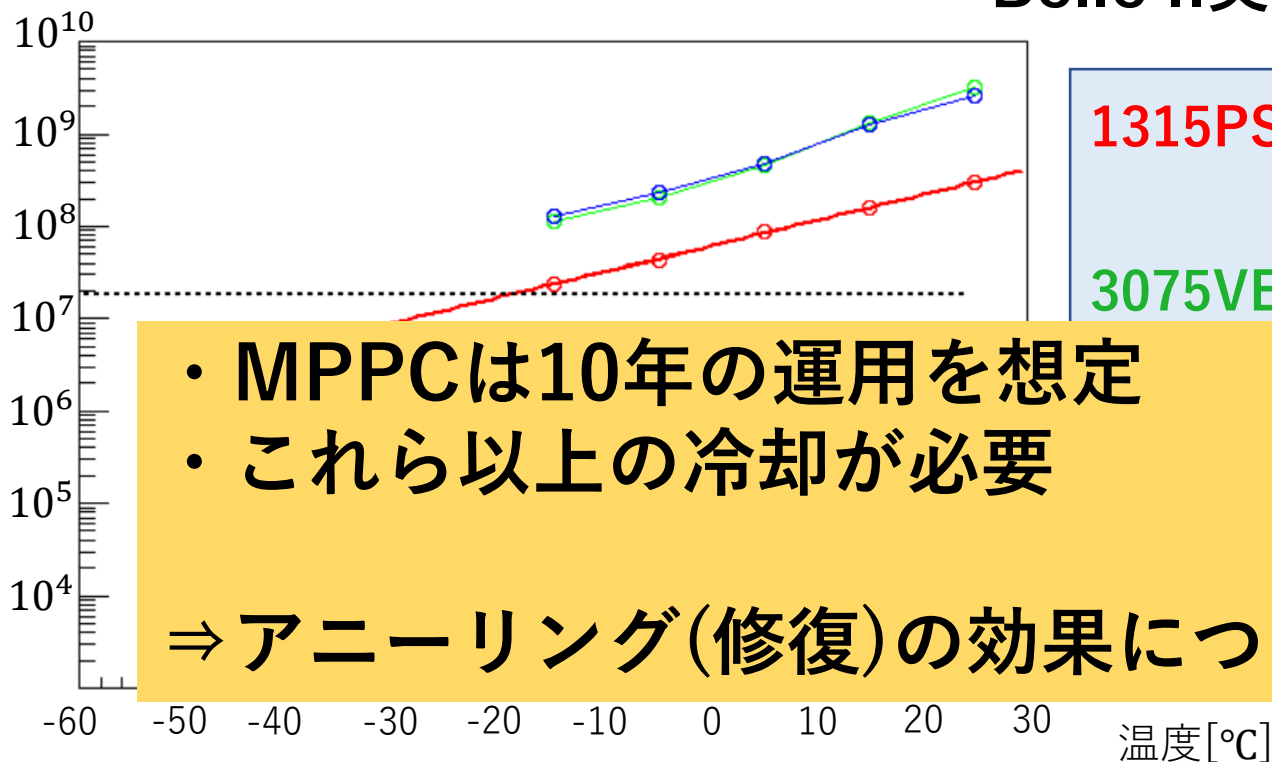


# 結果(外挿)

動作電圧 $V_{op}(V_{bd} + 3[V])$ における  
照射量 $10^{11}$ のダークカウントレート(推定)

Belle II実験 1年間の運転で

ダークカウントレート[cps]



1315PS:  $-19^{\circ}\text{C}$ の冷却が必要

3075VE:  $-31^{\circ}\text{C}$ の冷却が必要

- MPPCは10年の運用を想定
- これら以上の冷却が必要

⇒ アニールリング(修復)の効果についての研究

必要

1315PSは3サンプルの中で1番冷却が不要

# リーク電流からダークカウントレートを見積もることができる理由

リーク電流  $I_D = I_s + I_j + I_b$  と表せる

( $I_s$ :表面リーク電流、 $I_j$ :再結合電流、 $I_b$ :バルク電流)

$$I_b = qMN_{fired}$$

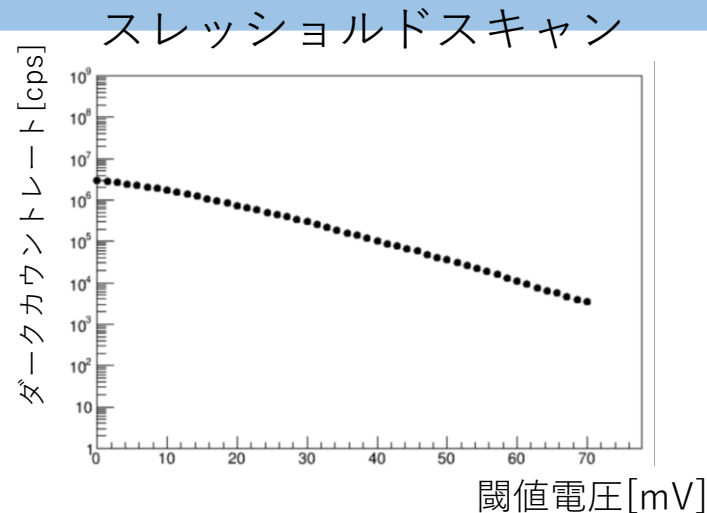
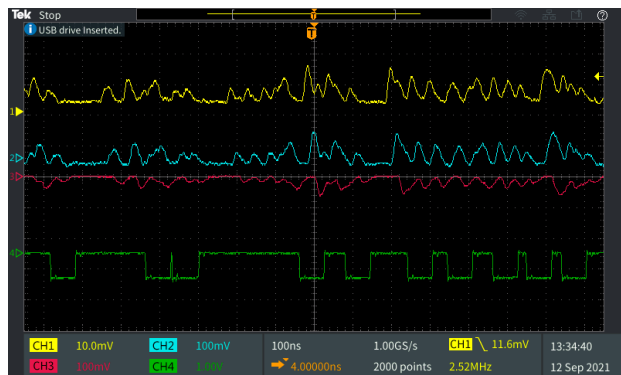
( $q$ :1素子当たりの電荷量、 $M$ :増倍率、 $N_{fired}$ :単位時間当たりにアバランシェ増倍が発生したピクセル数)

$$I_D \sim I_b = qMN_{fired}, N_{fired} = N_{0.5p.e.} \text{ (ダークカウントレート [cps])}$$

クロストークが低いとき、 $I_D \sim qMN_{0.5p.e.}$

# ダークカウントレート1光子検出不可について

<1315PS 照射量 $10^{10}$  25°C>



<1315PS 照射量 $10^{10}$  -5°C>

