Belle II実験 ARICH検出器 アップグレードのための 光検出器MPPCの中性子による影響の評価

東京都立大学 理学研究科 物理学専攻

高エネルギー物理実験研究室

M2 村澤亮太

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

光検出器MPPCの中性子による影響の評価

・ブレークダウン電圧V_{bd}の評価

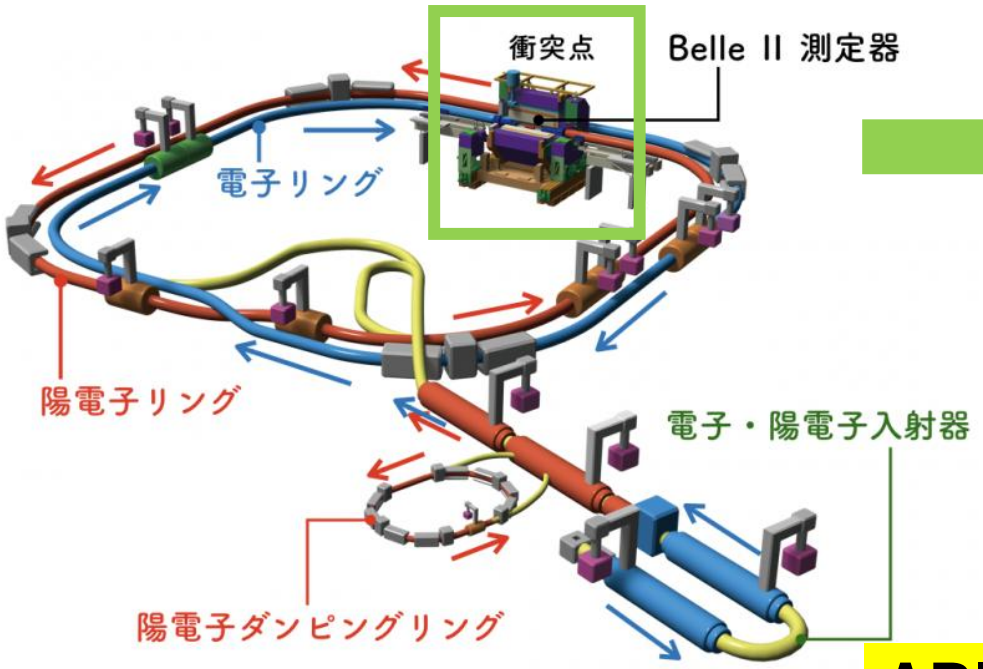
・暗電流の評価

・ダークカウントレートの評価

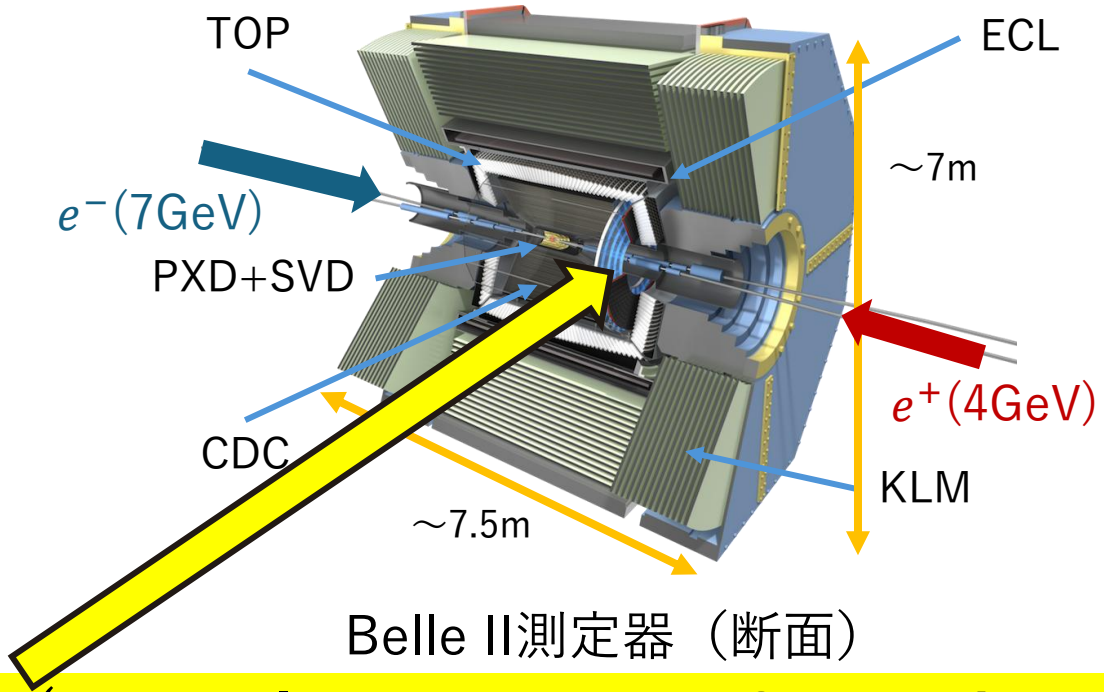
まとめ

Belle II 実験

- 標準模型の枠を超える新物理探索を目的としたBファクトリー実験（茨城県つくば市、KEK）
- 世界最高ルミノシティ $5.3\times10^{34}\ \mathrm{cm^{-2}s^{-1}}$
- 積分ルミノシティ $50\ \mathrm{ab^{-1}}$ を目指し、2040年代まで運転見込み



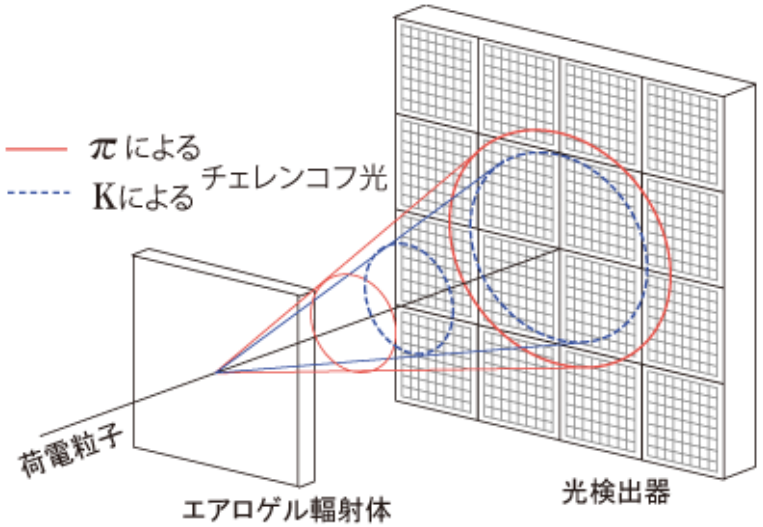
SuperKEKB加速器



Belle II測定器（断面）

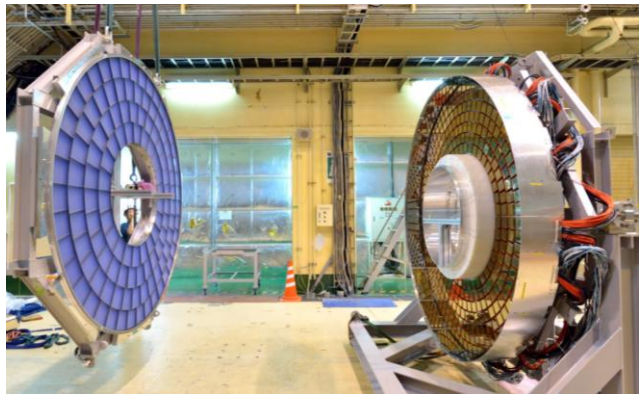
ARICH (Aerogel Ring Imaging CHerenkov counter)
⇒荷電K/π中間子を識別

ARICH検出器

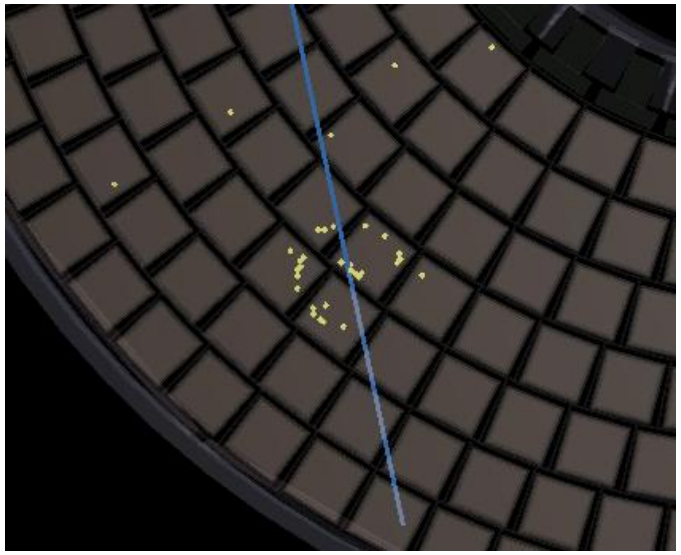


粒子識別のイメージ図

エアロゲル輻射体　　光検出器HAPD



ARICH検出器の写真(組立時)



宇宙線によるチェレンコフリングの様子

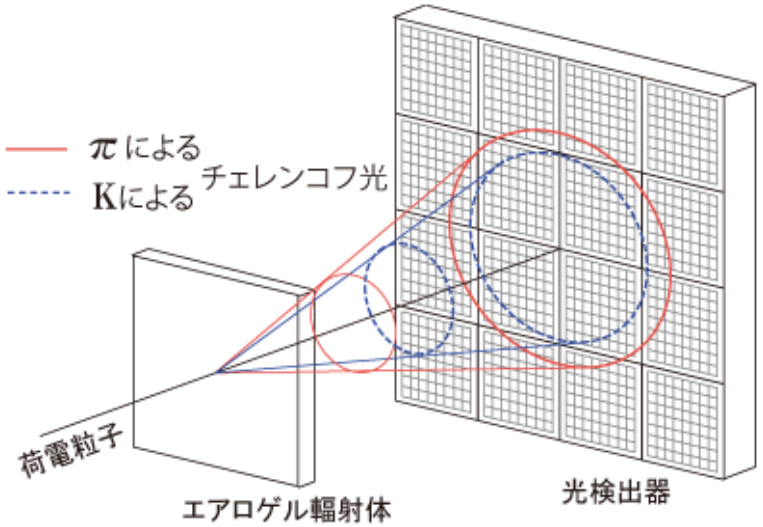
・エアロゲル輻射体と光検出器HAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector)の二層構造

・チェレンコフ光による放射角の違いから、荷電K/π中間子を識別

$$\cos\theta = \frac{\sqrt{m^2+p^2}}{np}$$ （θ：放射角　m：粒子の質量　p：運動量（測定値）　n：屈折率（既知））

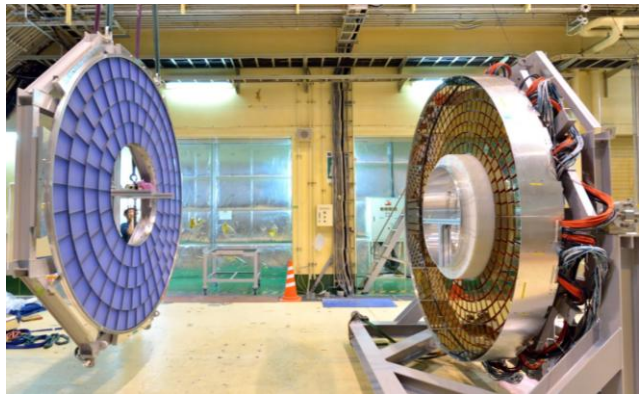
１光子検出が重要

ARICH検出器

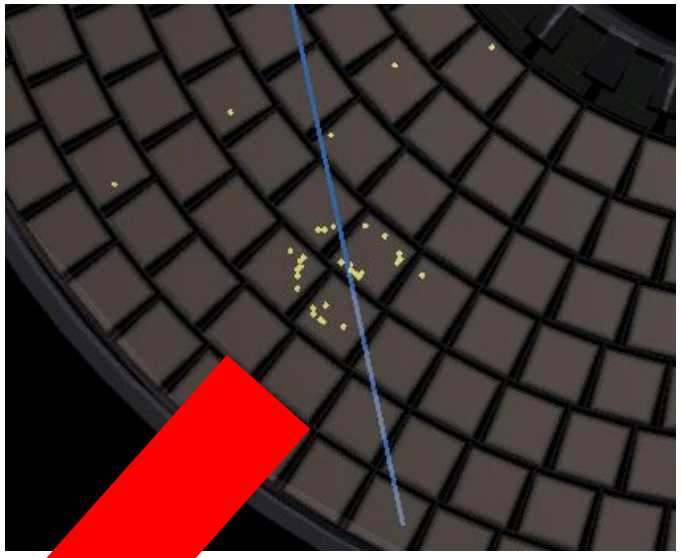


粒子識別のイメージ図

エアロゲル輻射体　　光検出器HAPD



ARICH検出器の写真(組立時)



宇[illegible]よるチェレンコフリングの様子

・エアロゲル輻射体と光検出器HAPD(Hybrid Avalanche [illegible] Detector)の二層構造

・チェレンコフ光による放射角の違いから、荷電K/π中[illegible]を識別

$$\cos\theta = \frac{\sqrt{m^2+p^2}}{np}$$ （θ：放射角　m：粒子の質量　p：運動量[illegible]定値）　n：屈折率（既知））

１光子検出が重要

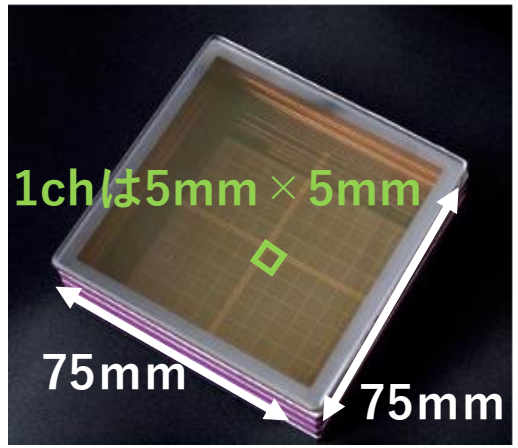
光検出器のアップグレード

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~)

・生産終了により、予備を超えた故障には対応できない

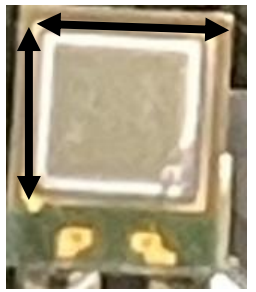
・Belle II実験の延長を見据えた性能向上を目指したい



HAPD(12×12ch)

光検出器のアップグレードが計画

⇒新たな光検出器の候補の一つとして
MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)を検討中

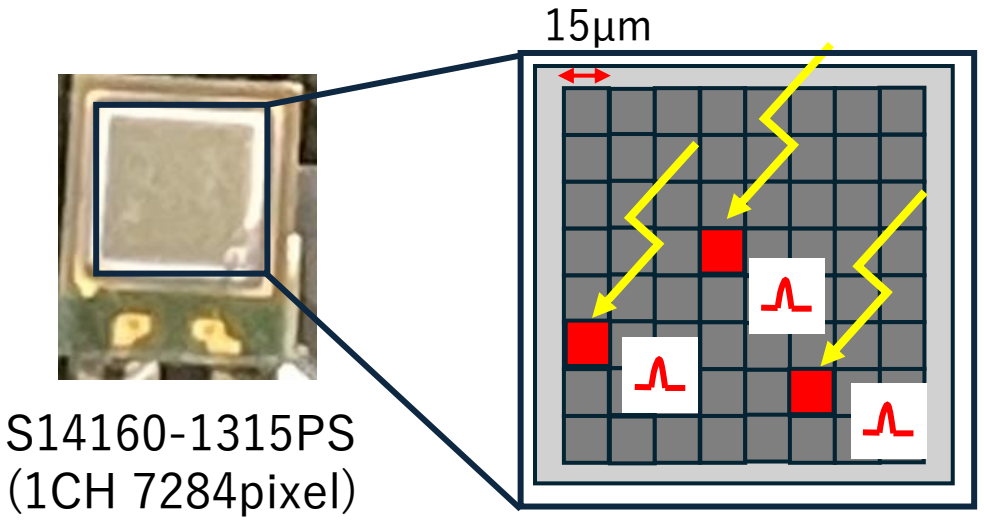


MPPC (1ch)

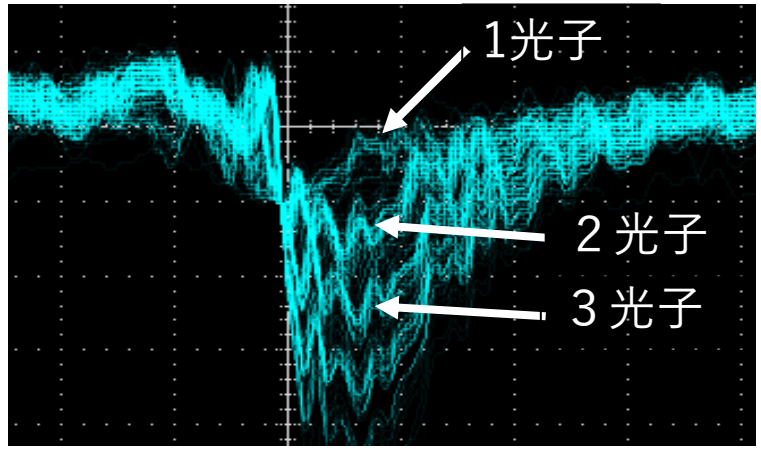
MPPCについて

- 多数のAPDピクセルで構成された半導体型光検出器(SiPM)
- 各ピクセルをブレークダウン電圧以上で動作（ガイガーモード）
- 光子が入射すると電子雪崩が発生し大きな信号へ増幅
- 微弱な光を検出可能
- 各ピクセルは一定の波高パルスを出力

光子入射時の様子



S14160-1315PS
(1CH 7284pixel)

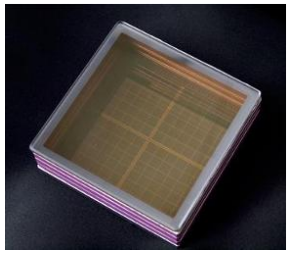


実際のMPPCからの信号

HAPDとMPPCの比較

改善 ↑　悪化 ↓

HAPD			MPPC
$4.9\times4.9\ \mathrm{mm^2}$	チャンネルサイズ	$1.3\times1.3 \sim 3.0\times3.0\ \mathrm{mm^2}$	
5.6×10^4	増倍率	$3.6\times10^5 \sim 4.0\times10^6$	↑
$\sim19\ \%$	PDE(光子検出効率)	$32 \sim 50\ \%$	↑
$200\sim400\ \mathrm{V}$ $-7\sim-8\ \mathrm{kV}$	動作電圧	$\sim41\ \mathrm{V}$	↑
△	放射線(中性子)耐性	×	↓
$\sim0\ \mathrm{cps}$	ダークカウントレート	$120 \sim 700\ \mathrm{kcps}$	↓



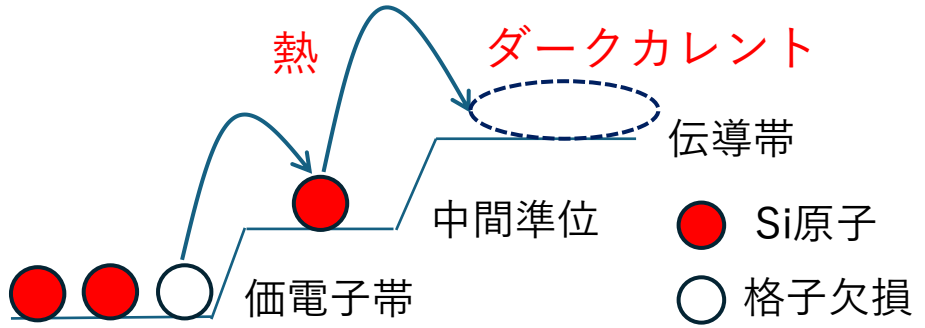


MPPCの特徴：

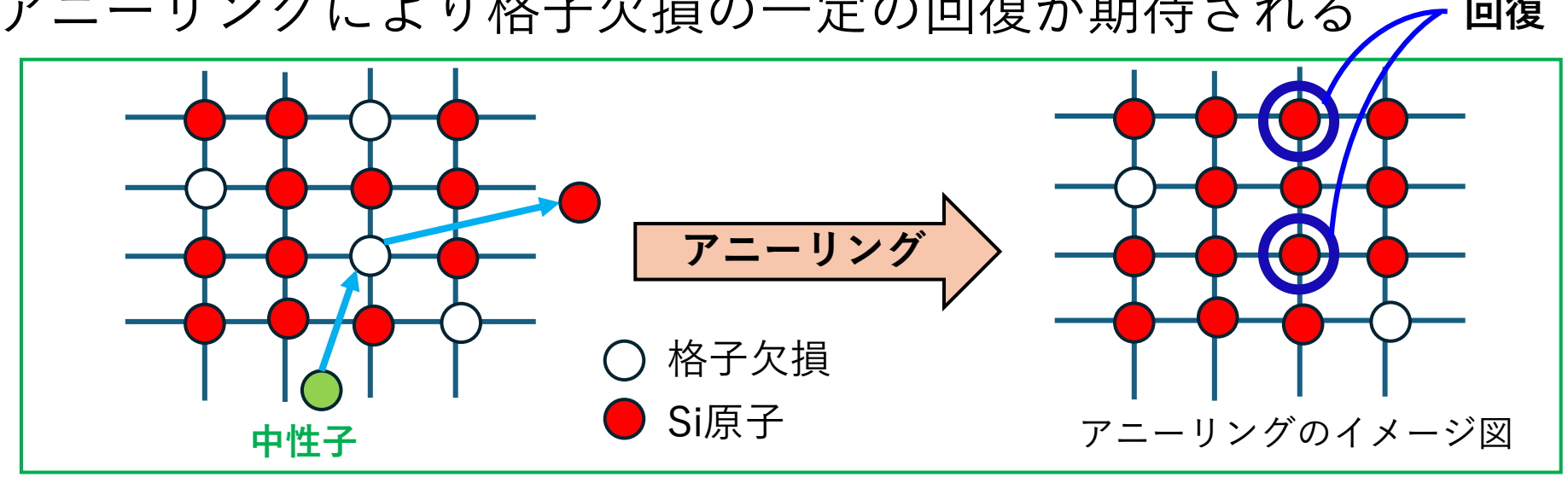
- 高い増倍率およびPDEを有する
- 低電圧で動作可能
- **放射線(中性子)耐性に課題がある**

本研究ではMPPCの中性子による影響を評価

中性子損傷と冷却・アニーリング



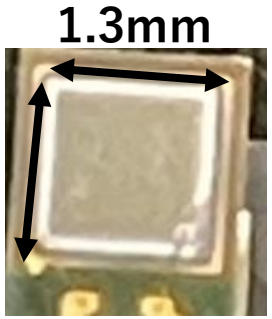
- **Belle II ARICHで見込まれる中性子量**
  - ・10年間で1MeV換算$10^{12}\mathrm{n/cm^2}$
- **中性子被爆の影響**
  - ・中性子により格子欠損が生成 ⇒ 暗電流およびダークカウントレートが増加
- **中性子損傷への対策**
  - ・冷却により熱励起を抑制し、ダークカウントレートの低減が期待される
  - ・アニーリングにより格子欠損の一定の回復が期待される



実験概要

サンプルについて

MPPC(S14160-1315PS)を使用



ピクセルピッチ(μm)	増倍率($\times 10^5$)	PDE(%)	大きさ(mm^2)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量(pF)	開口率(%)	動作電圧(V)
15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49	V_{bd}+3

- 中性子照射量（非照射、10^8、10^9、10^{10}、10^{11} n/cm^2）
  - ・2020年にJ-PARC MLFでMPPCの中性子照射試験を実施
- アニーリング（あり、なし）
  - ・ 電気炉でアニーリングを実施（170°C・144時間）
- 設定温度（25°C、5°C、-10°C、-40°C、-80°C）

測定項目

・ブレークダウン電圧(V_{bd})

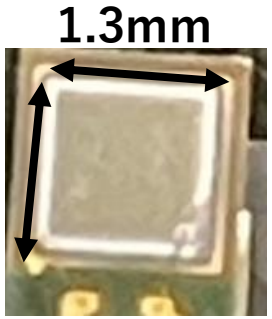
・暗電流

・ダークカウントレート

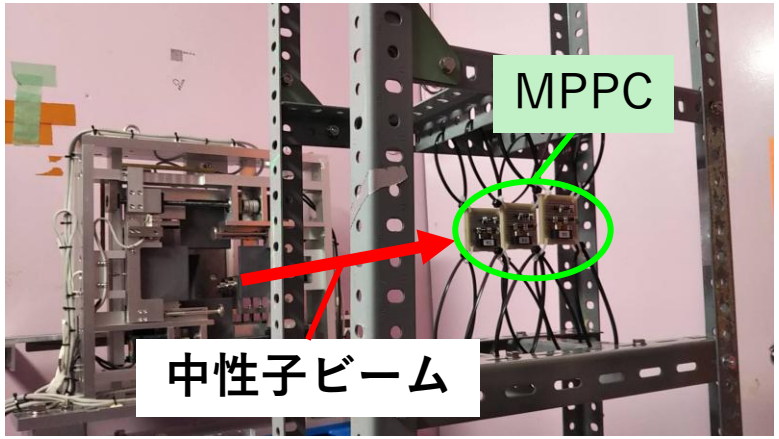
実験概要

サンプルについて

MPPC(S14160-1315PS)を使用



ピクセルピッチ(μm)	増倍率($\times 10^5$)	PDE(%)	大きさ(mm^2)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量(pF)	開口率(%)	動作電圧(V)
15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49	V_{bd}+3



MLF(BL)での中性子照射試験の様子

- **中性子照射量（非照射、10^8、10^9、10^{10}、10^{11} n/cm^2）**
  - **・2020年にJ-PARC MLFでMPPCの中性子照射試験を実施**
- アニーリング（あり、なし）
  - ・ 電気炉でアニーリングを実施（170°C・144時間）
- 設定温度（25°C、5°C、-10°C、-40°C、-80°C）

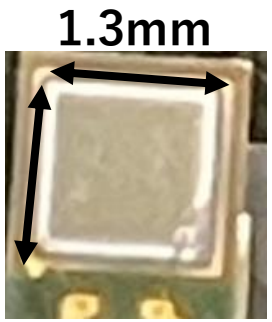
測定項目

・ブレークダウン電圧(V_{bd})
・暗電流
・ダークカウントレート

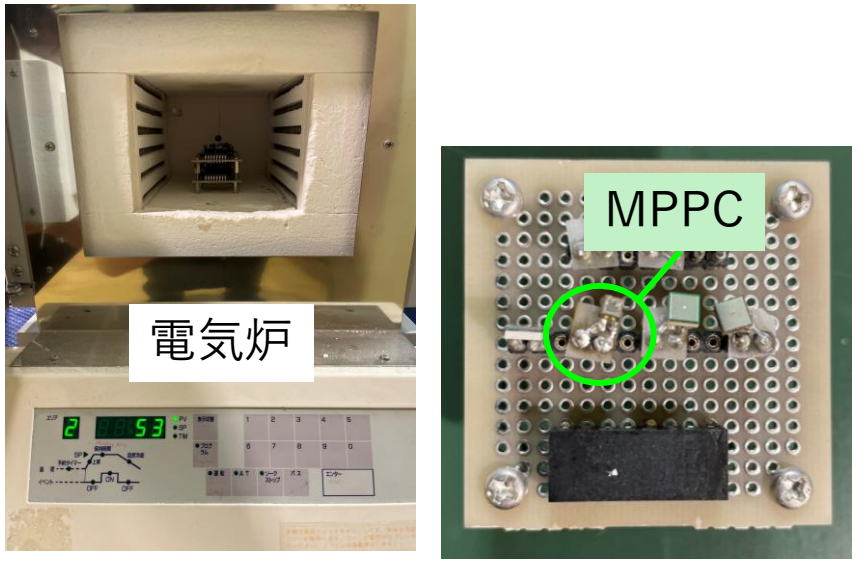
実験概要

サンプルについて

MPPC(S14160-1315PS)を使用



ピクセルピッチ(μm)	増倍率($\times 10^5$)	PDE(%)	大きさ(mm^2)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量(pF)	開口率(%)	動作電圧(V)
15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49	V_{bd}+3



アニーリングのセットアップ

- 中性子照射量（非照射、10^8、10^9、10^{10}、10^{11} n/cm^2）
  - ・2020年にJ-PARC MLFでMPPCの中性子照射試験を実施
- **アニーリング（あり、なし）**
  - **・ 電気炉でアニーリングを実施（170℃・144時間）**
- 設定温度（25℃、5℃、-10℃、-40℃、-80℃）

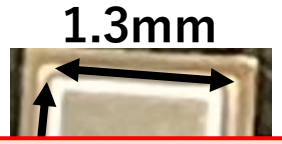
測定項目

・ブレークダウン電圧(V_{bd})

・暗電流

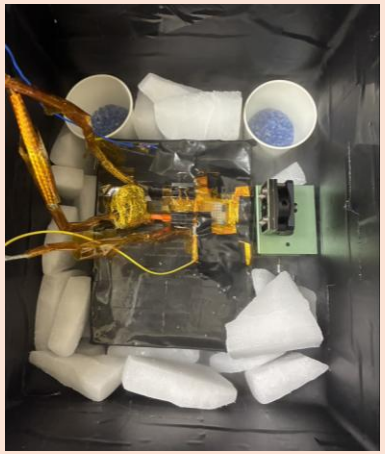
・ダークカウントレート

実験概要





恒温槽での測定
(25℃、5℃、-10℃)



ドライアイスを用いた測定
(-40℃)



フリーザーでの測定
(-80℃)

- アニーリング（あり、なし）
  - 電気炉でアニーリングを実施（170℃・144時間）
- **設定温度（25℃、5℃、-10℃、-40℃、-80℃）**

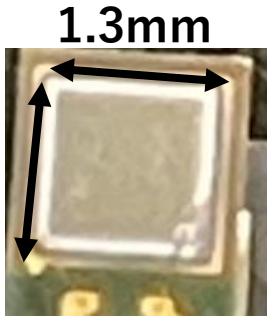
測定項目

- ブレークダウン電圧(V_{bd})
- 暗電流
- ダークカウントレート

実験概要

サンプルについて

MPPC(S14160-1315PS)を使用



ピクセルピッチ(μm)	増倍率($\times 10^5$)	PDE(%)	大きさ(mm^2)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量(pF)	開口率(%)	動作電圧(V)
15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49	V_{bd}+3

- 中性子照射量（非照射、10^8、10^9、10^{10}、10^{11} n/cm^2）
  - ・2020年にJ-PARC MLFでMPPCの中性子照射試験を実施
- アニーリング（あり、なし）
  - ・ 電気炉でアニーリングを実施（170°C・144時間）
- 設定温度（25°C、5°C、-10°C、-40°C、-80°C）

測定項目

・ブレークダウン電圧(V_{bd})

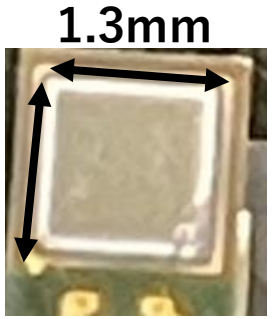
・暗電流

・ダークカウントレート

実験概要

サンプルについて

MPPC(S14160-1315PS)を使用



ピクセルピッチ(μm)	増倍率($\times 10^5$)	PDE(%)	大きさ(mm^2)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量(pF)	開口率(%)	動作電圧(V)
15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49	V_{bd}+3

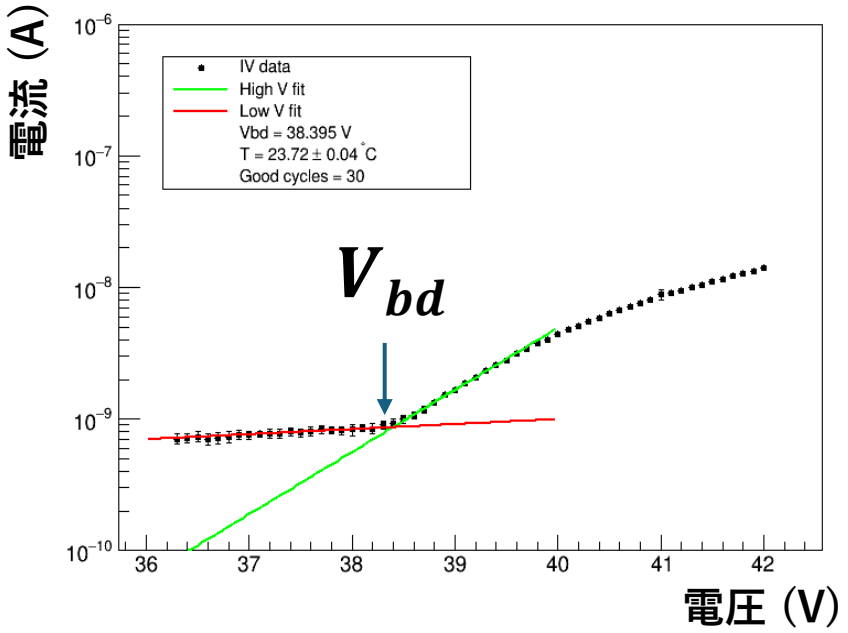
- 中性子照射量（非照射、10^8、10^9、10^{10}、10^{11} n/cm^2）
  - ・2020年にJ-PARC MLFでMPPCの中性子照射試験を実施
- アニーリング（あり、なし）
  - ・ 電気炉でアニーリングを実施（170°C・144時間）
- 設定温度（25°C、5°C、-10°C、-40°C、-80°C）

測定項目 **本発表**

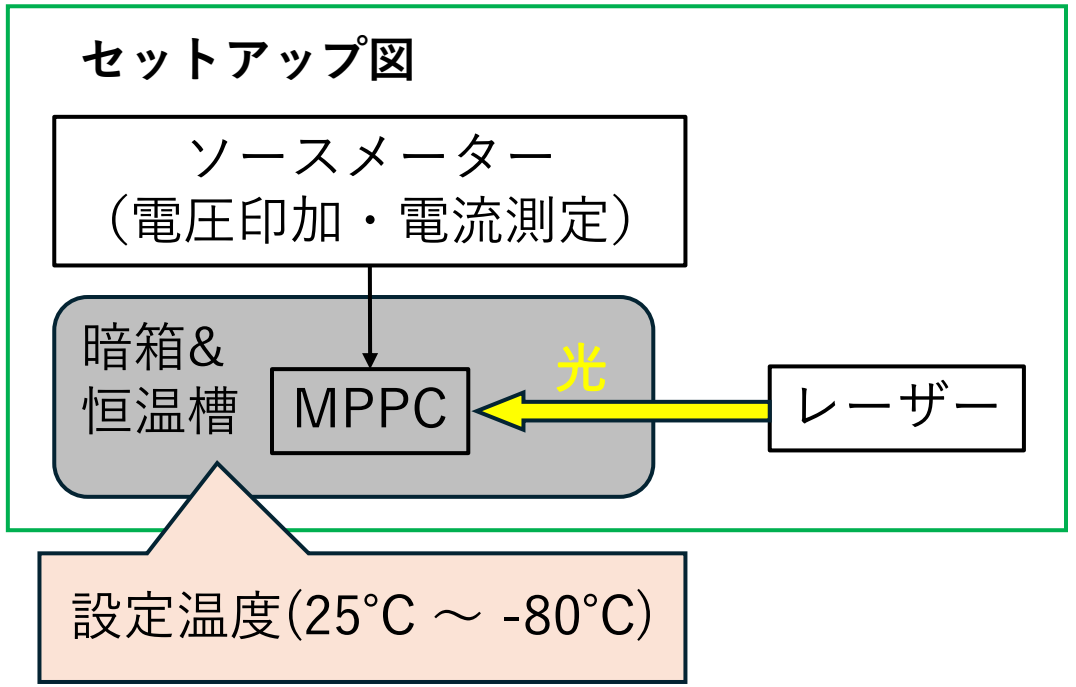
- **ブレークダウン電圧(V_{bd})**
- **暗電流**
- **ダークカウントレート**

ブレークダウン電圧評価（測定概要）

- IV曲線から電流が急激に増加する領域を見つける
- 低電流領域と高電流領域に対してフィッティングし、外挿
- ２直線の交点をブレークダウン電圧V_{bd}と定義
- 光子を入射（電流増加の立ち上がりを見やすくするため）

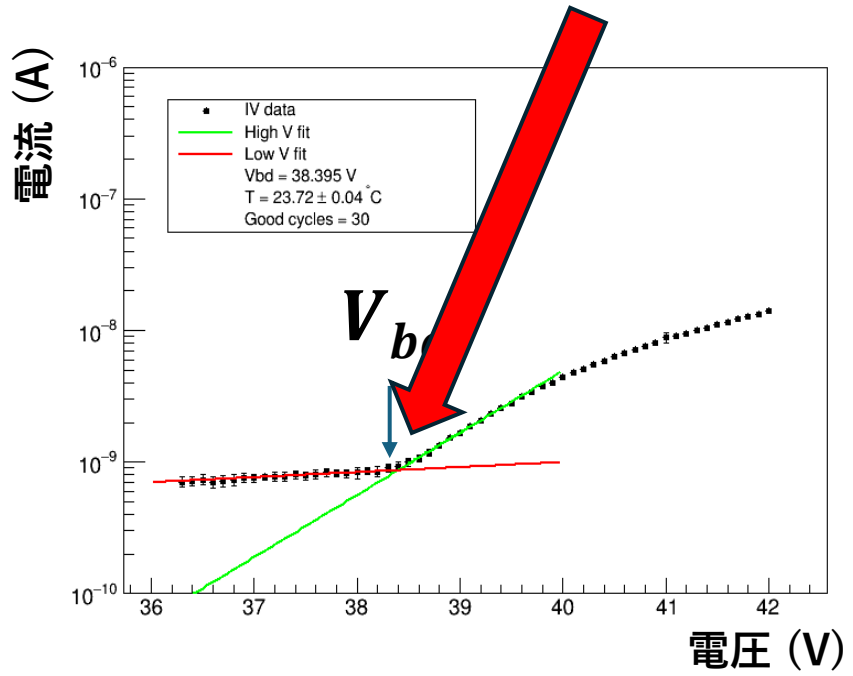


図：光子入射時のIV曲線

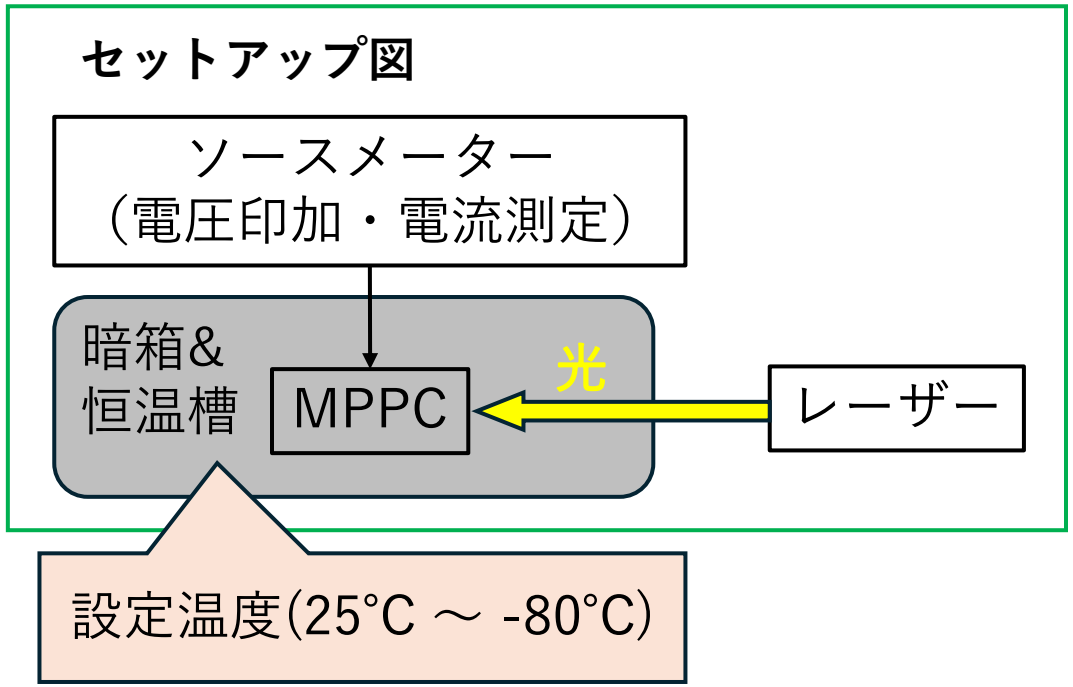


ブレークダウン電圧評価（測定概要）

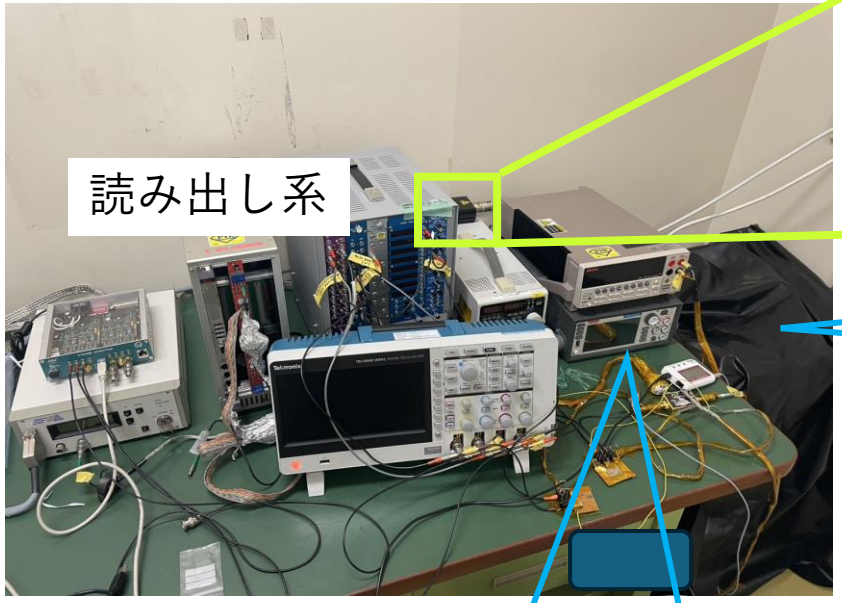
- IV曲線から電流が急激に増加する領域を見つける
- 低電流領域と高電流領域に対してフィッティングし、外挿
- ２直線の交点をブレークダウン電圧V_{bd}と定義
- 光子を入射（電流増加の立ち上がりを見やすくするため）

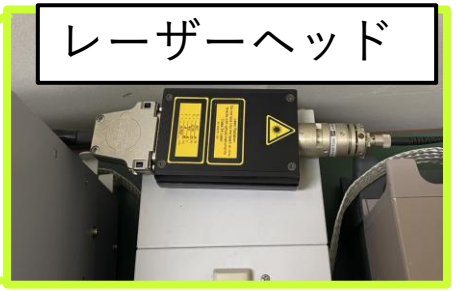


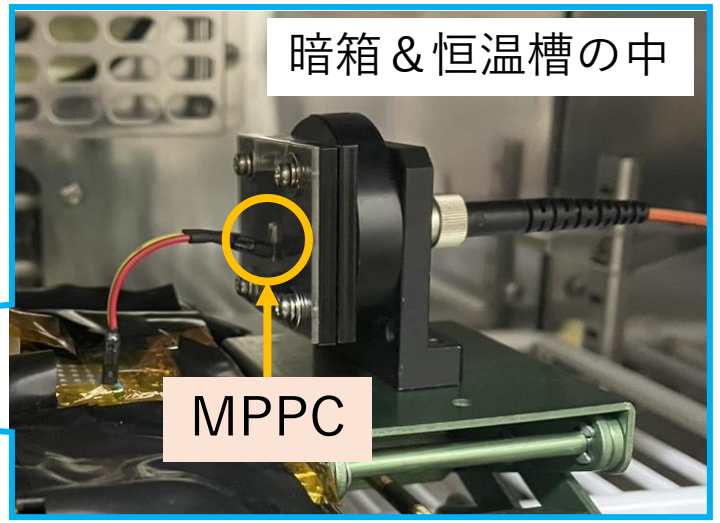
図：光子入射時のIV曲線

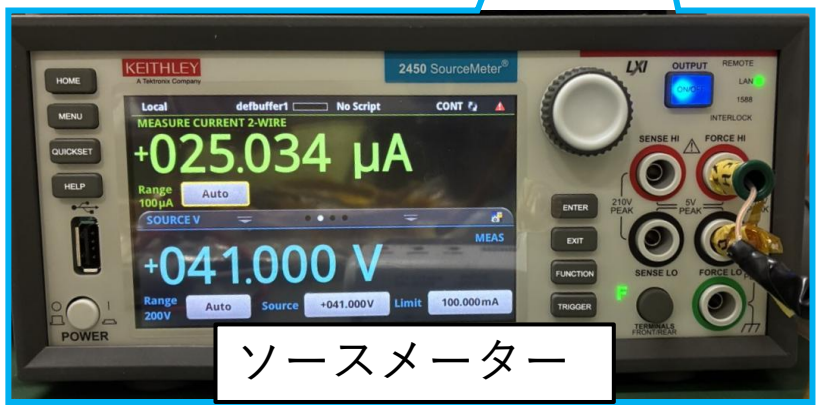


ブレークダウン電圧測定のセットアップ





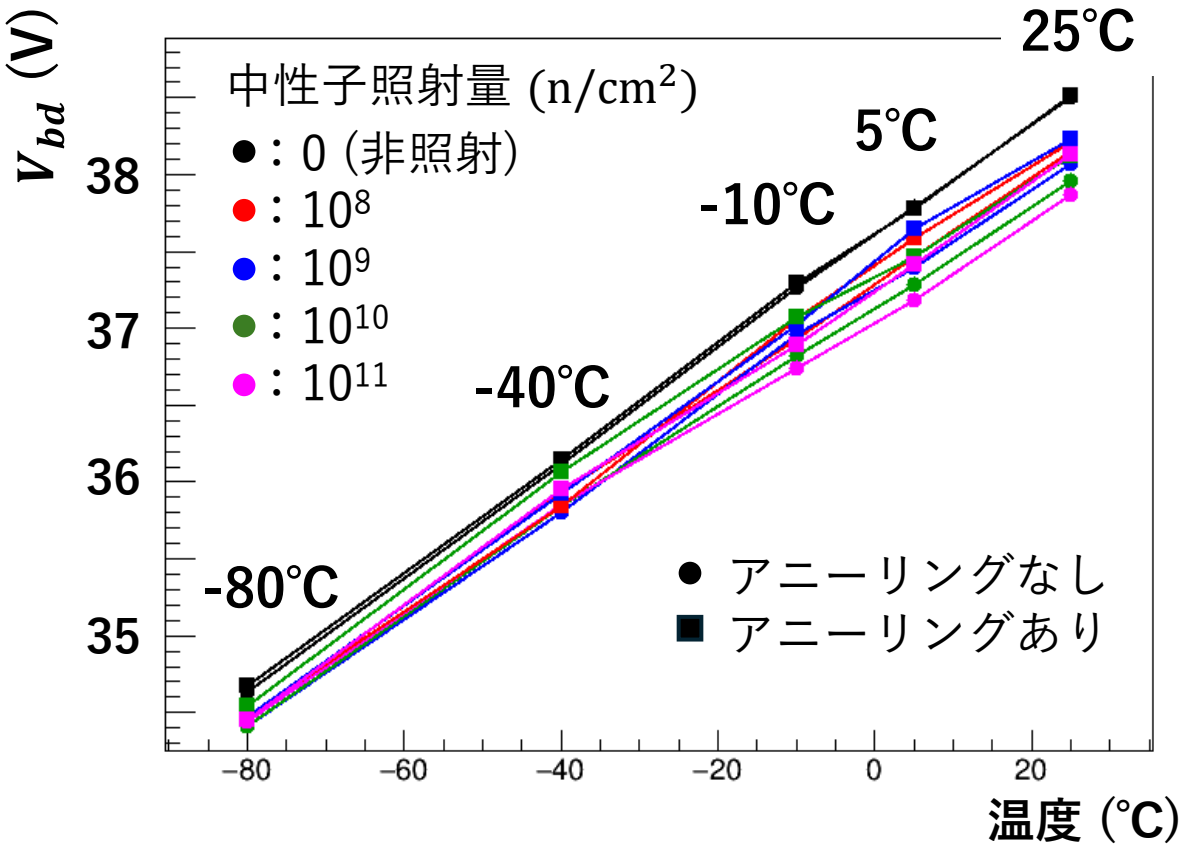




- 暗箱&恒温槽内にMPPCを設置
- 光ファイバーを用いてレーザー光を暗箱内へ導入
- ソースメーターでMPPCに電圧印加・電流測定

ブレークダウン電圧の評価（結果）

・温度依存性（25℃ ~ -80℃）



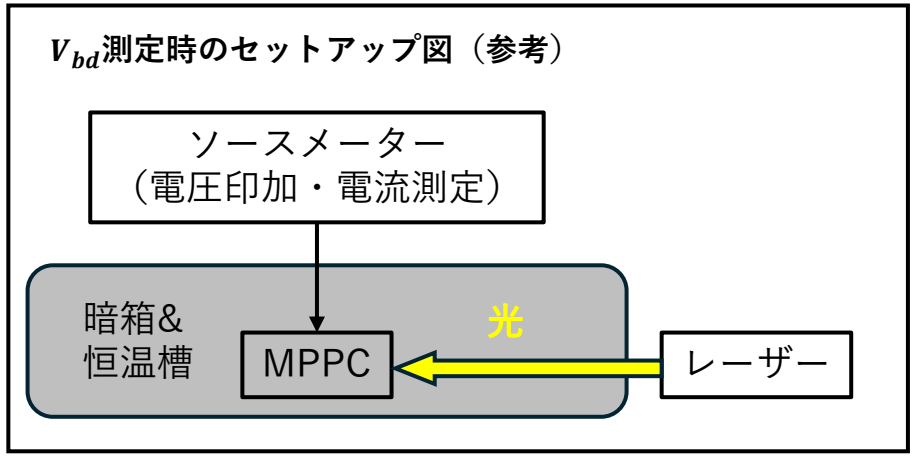
・V_{bd}は温度低下に伴い減少した

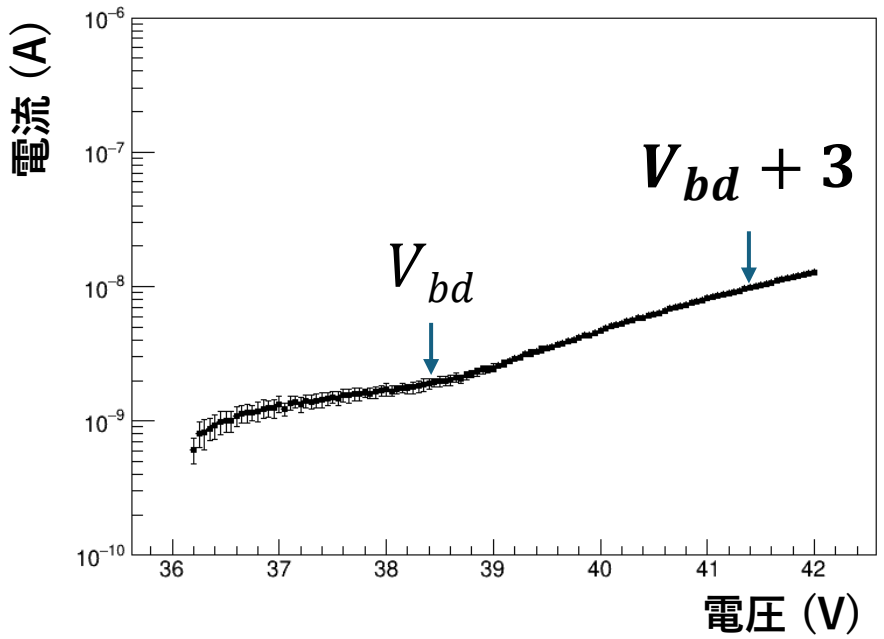
・照射量およびアニーリングによるV_{bd}の変化は小さく、温度依存性が支配的であった

・以降の暗電流やダークカウントレート評価では、得られたV_{bd} + 3 Vを印加電圧として使用

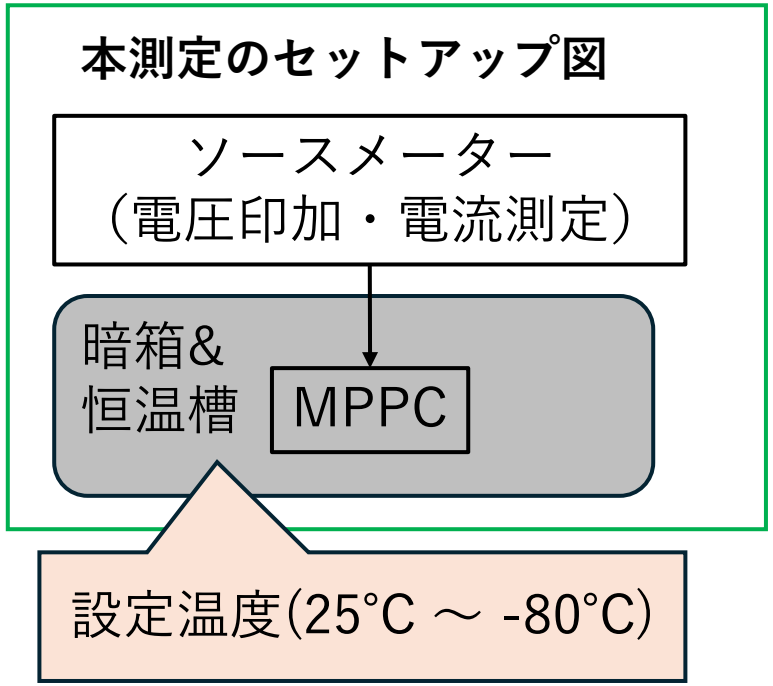
暗電流の評価（測定概要）

- 光を入れず暗状態で測定
- 得られたブレークダウン電圧V_{bd}を用いて
  V_{bd} + 3 Vにおける電流値を暗電流として評価



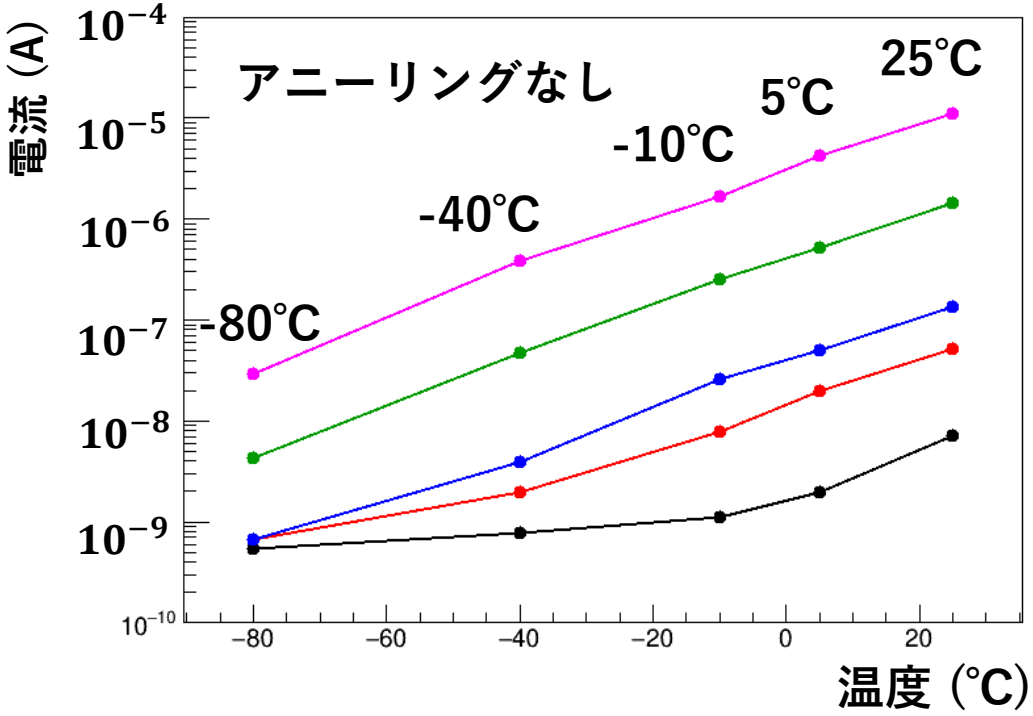


図：暗状態におけるIV曲線



暗電流の評価（結果）

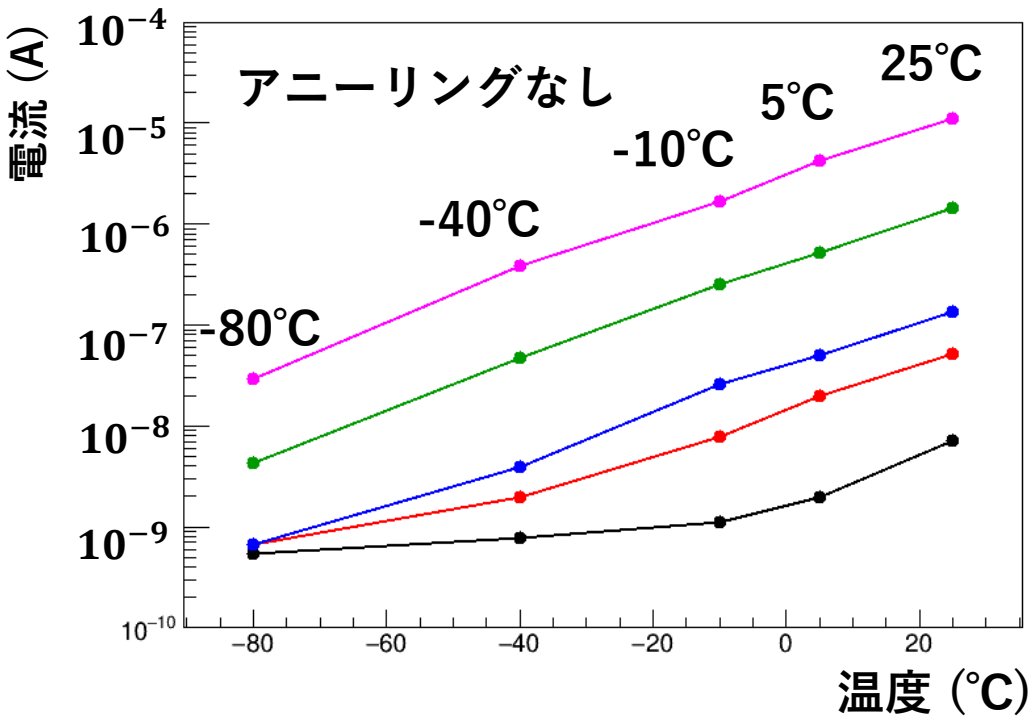
中性子照射量 (n/cm^2)　●：0（非照射）●：10^8　●：10^9　●：10^{10}　●：10^{11}

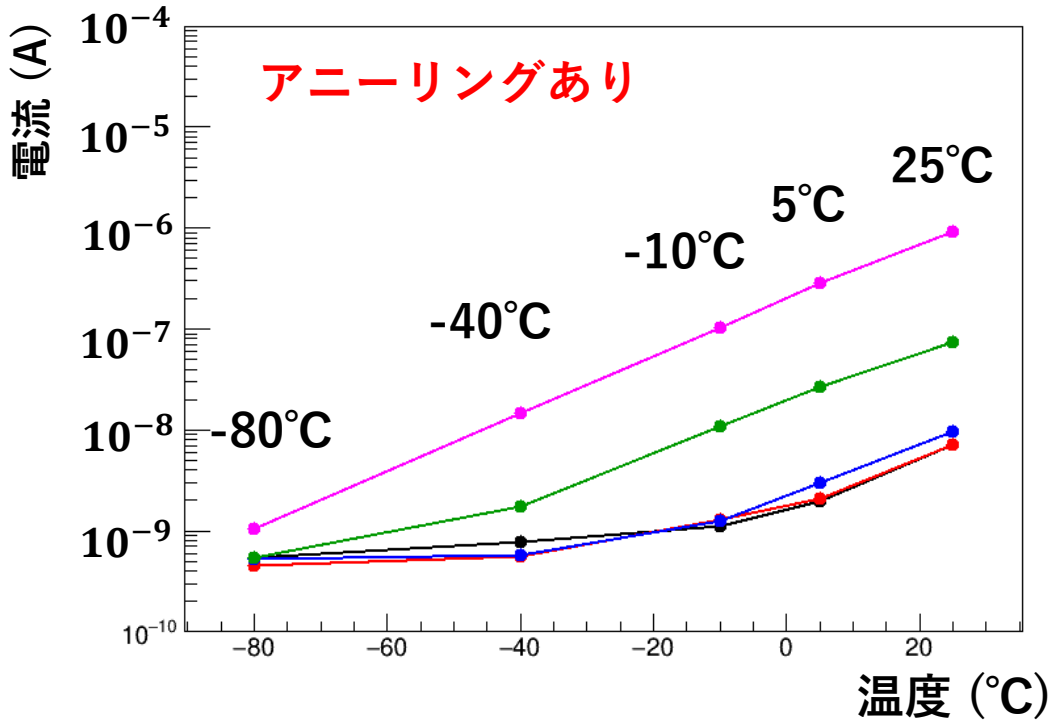


- 中性子照射量の増加に伴い、暗電流は増加
- 温度の低下に伴い、暗電流は減少

暗電流の評価（アニーリング効果）

中性子照射量 (n/cm^2)　●：0（非照射）●：10^8　●：10^9　●：10^{10}　●：10^{11}

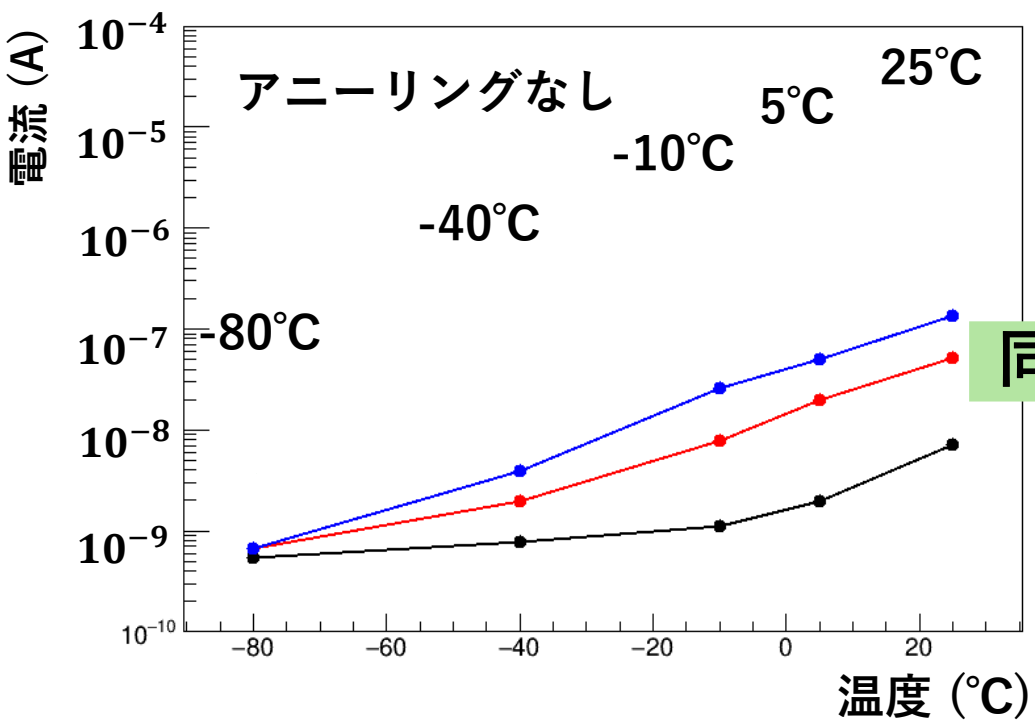




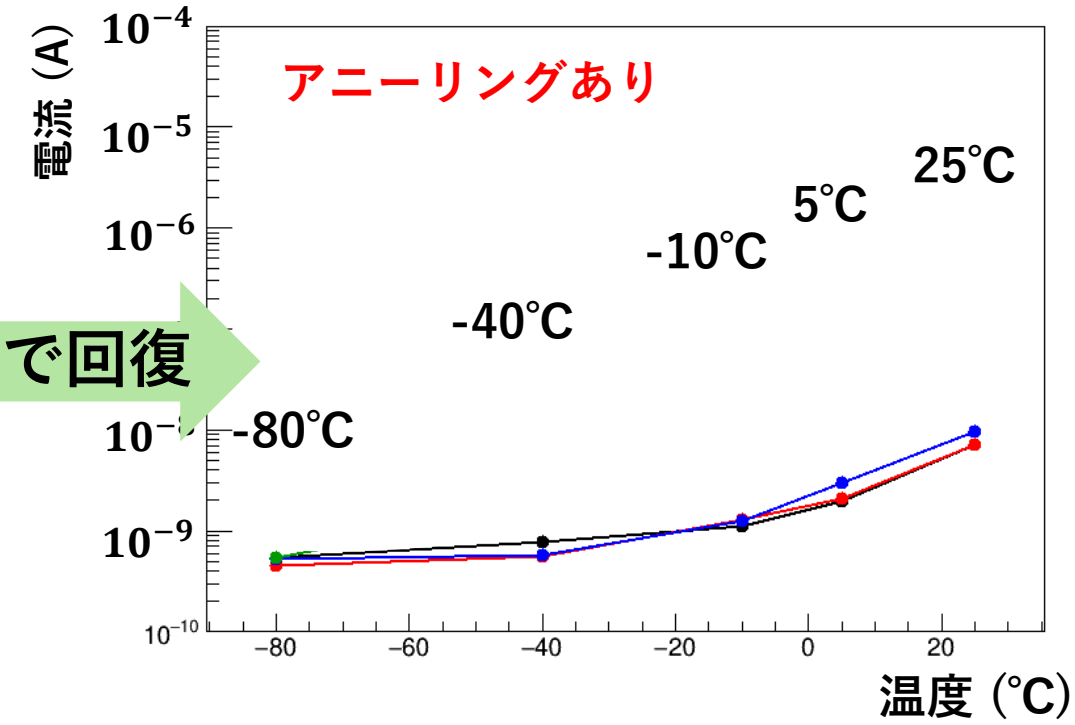
- アニーリング後の$10^8, 10^9$ n/cm^2は非照射とほぼ同等まで回復
- 中性子照射量$10^{11}n/cm^2$において、アニーリングにより暗電流が約1桁減少

暗電流の評価（アニーリング効果）

中性子照射量 (n/cm^2)　●：0 (非照射)　●：10^8　●：10^9　●：10^{10}　●：10^{11}



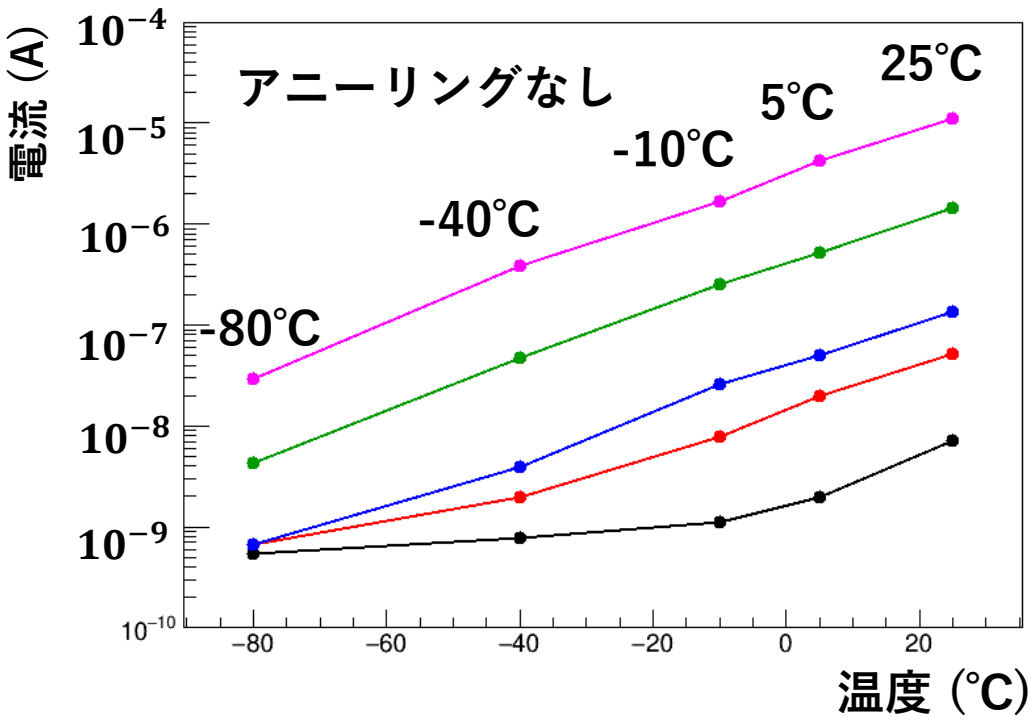
同等まで回復

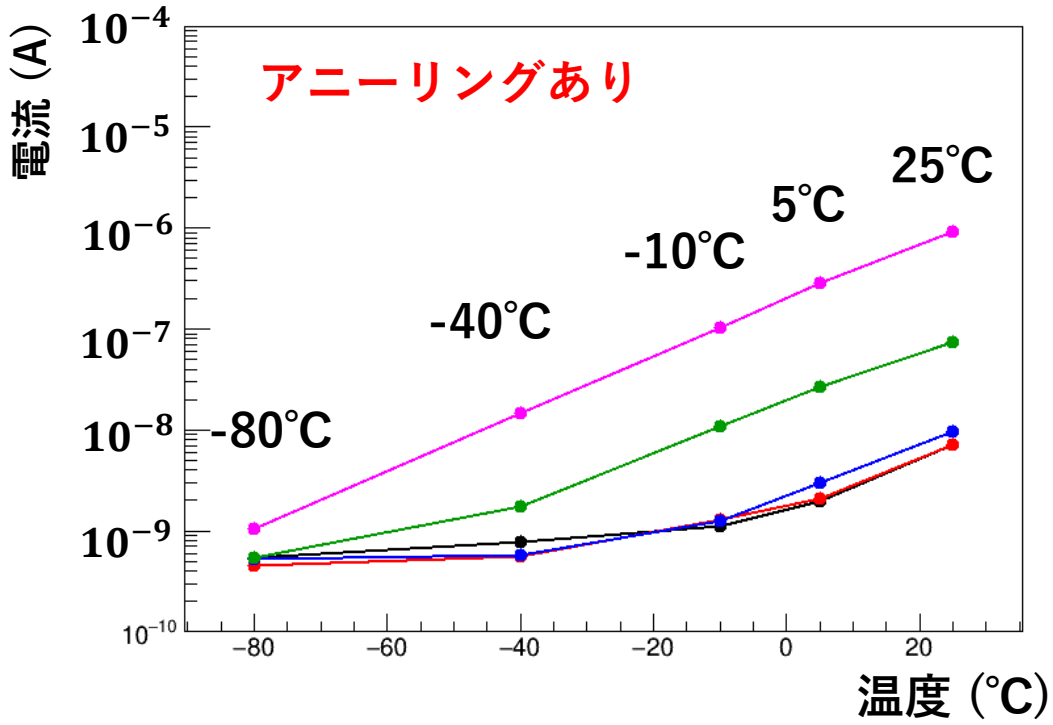


- アニーリング後の$10^8, 10^9$ n/cm^2は非照射とほぼ同等まで回復
- 中性子照射量$10^{11}n/cm^2$において、アニーリングにより暗電流が約1桁減少

暗電流の評価（アニーリング効果）

中性子照射量 (n/cm^2)　●：0（非照射）●：10^8　●：10^9　●：10^{10}　●：10^{11}

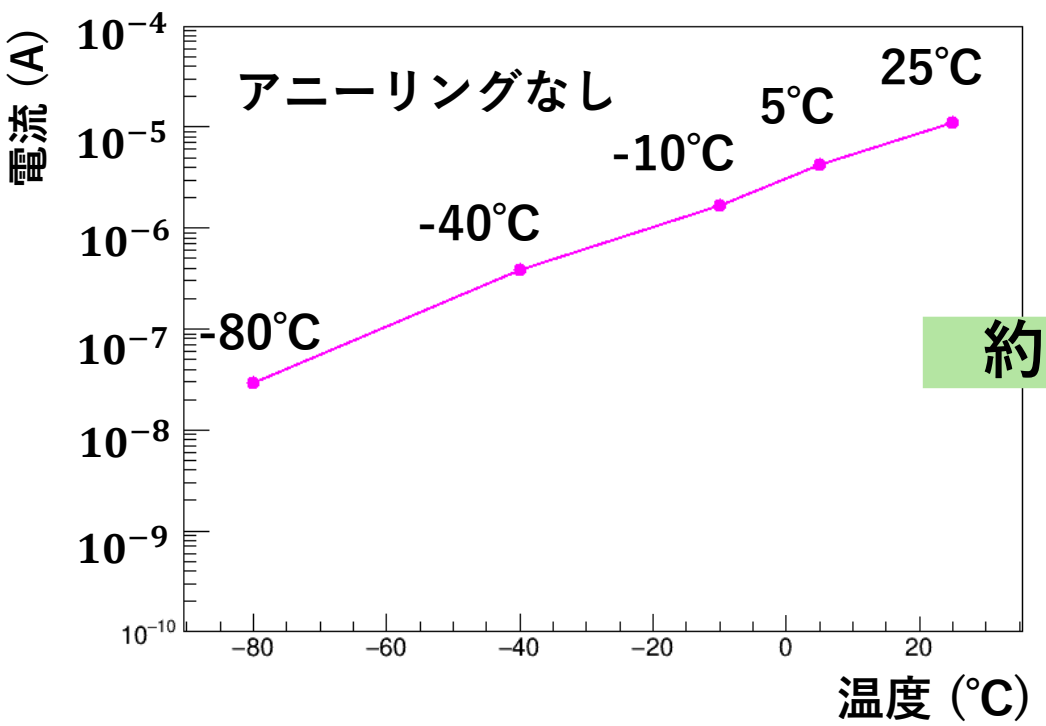




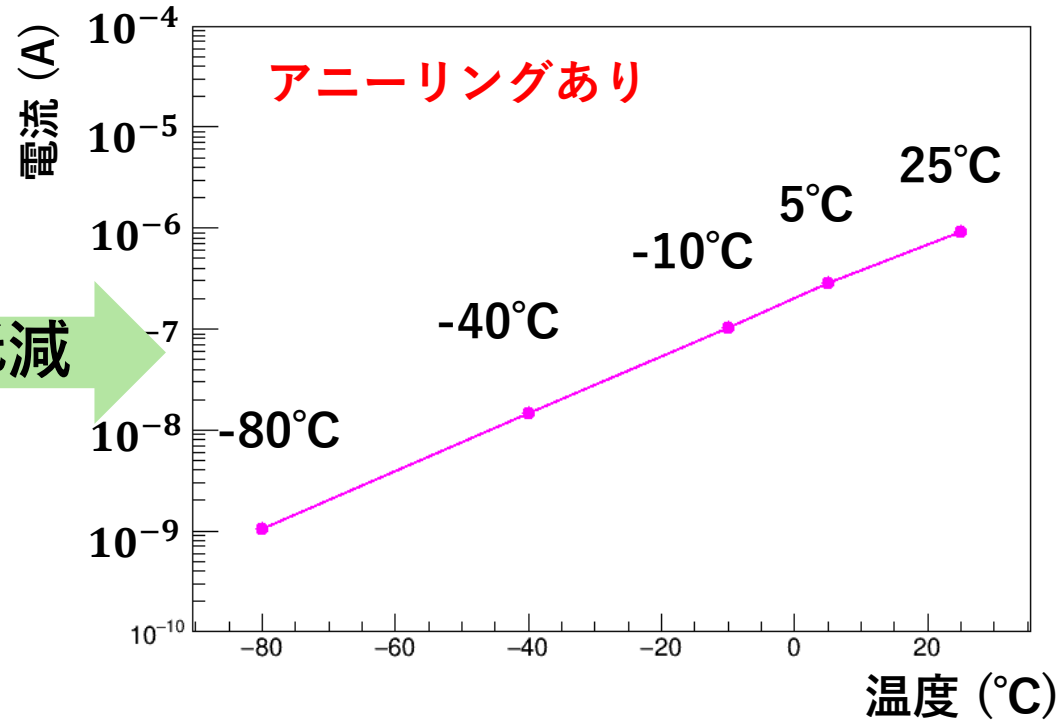
- アニーリング後の$10^8, 10^9$ n/cm^2は非照射とほぼ同等まで回復
- 中性子照射量$10^{11}n/cm^2$において、アニーリングにより暗電流が約1桁減少

暗電流の評価（アニーリング効果）

中性子照射量 (n/cm^2)　●：0（非照射）●：10^8　●：10^9　●：10^{10}　●：10^{11}



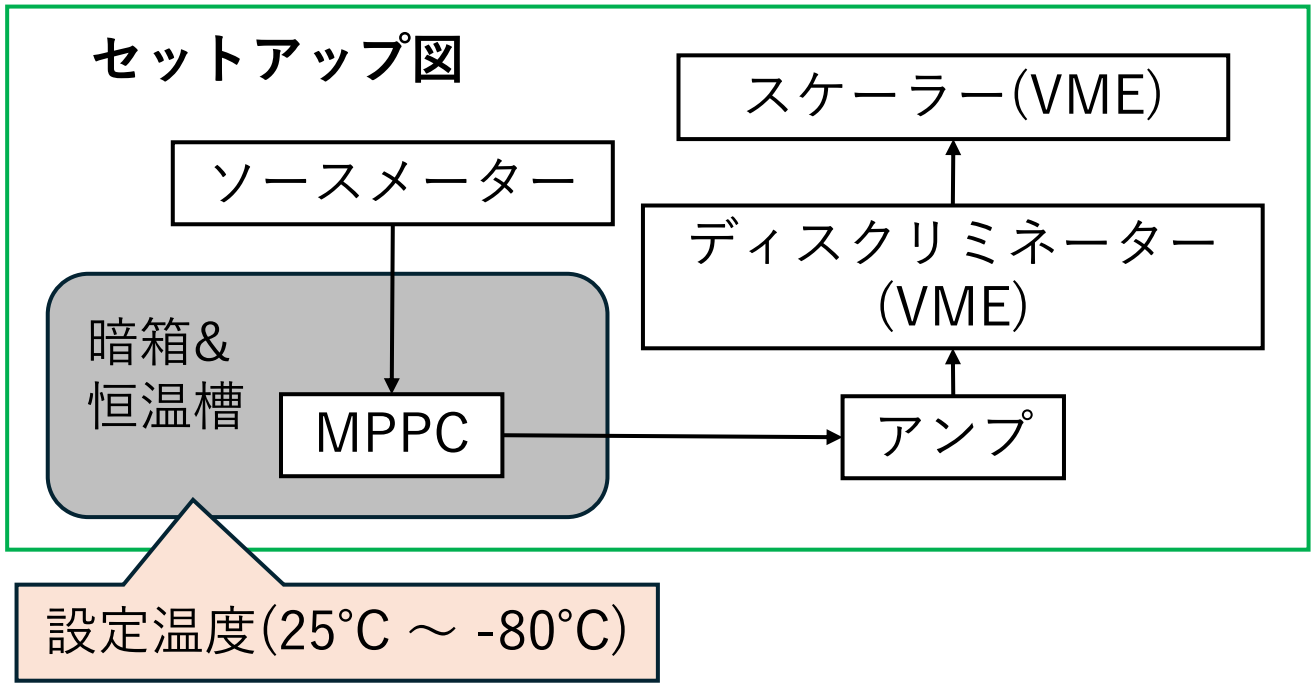
約1桁低減

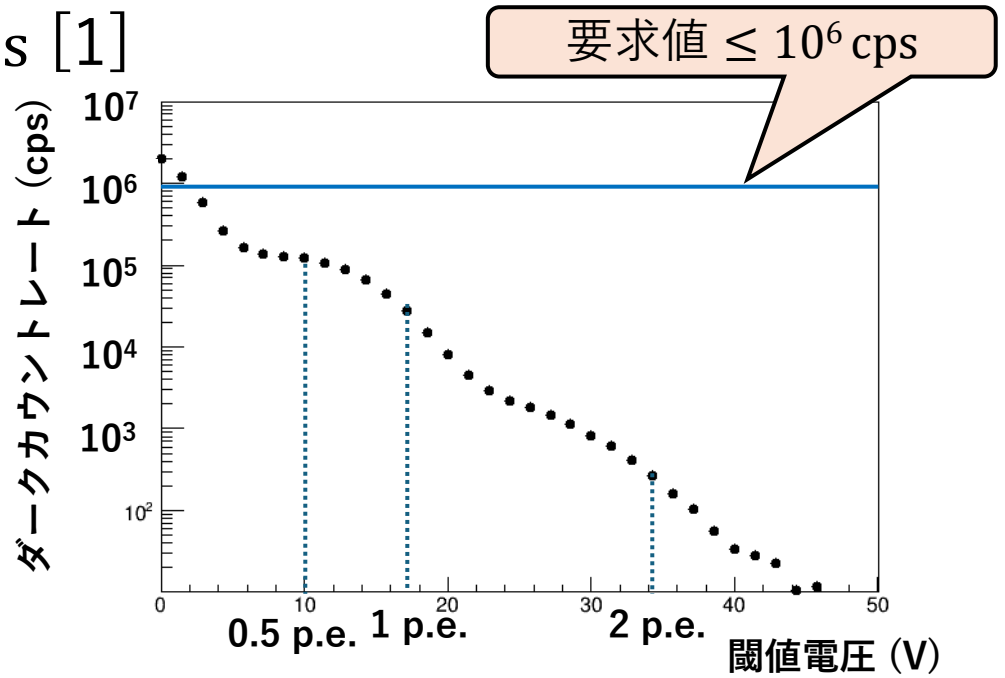


- アニーリング後の$10^8, 10^9$ n/cm^2は非照射とほぼ同等まで回復
- 中性子照射量$10^{11}n/cm^2$において、アニーリングにより暗電流が約1桁減少

ダークカウントレート（測定概要）

・印加電圧：V_{bd} + 3 V
・ディスクリミネーターの閾値を変化
・各閾値におけるダークカウントレートを測定
・1光子検出のための閾値設定0.5 p.e.
・粒子識別性能を維持するための要求値 ≤ 10^6 cps [1]



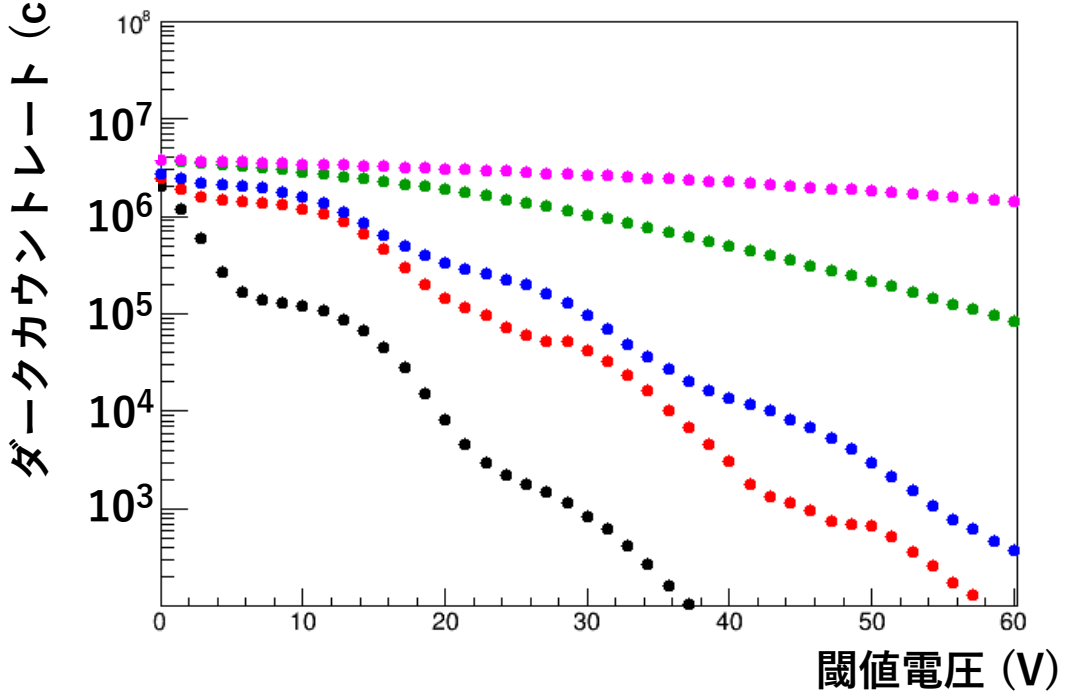


ダークカウントレート測定の例

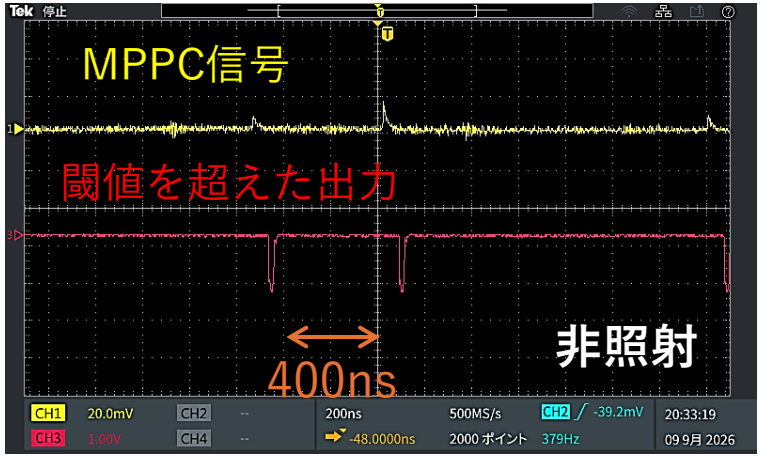
[1]古井孝侑 修士論文,東京大学大学院理学研究科, 2021年

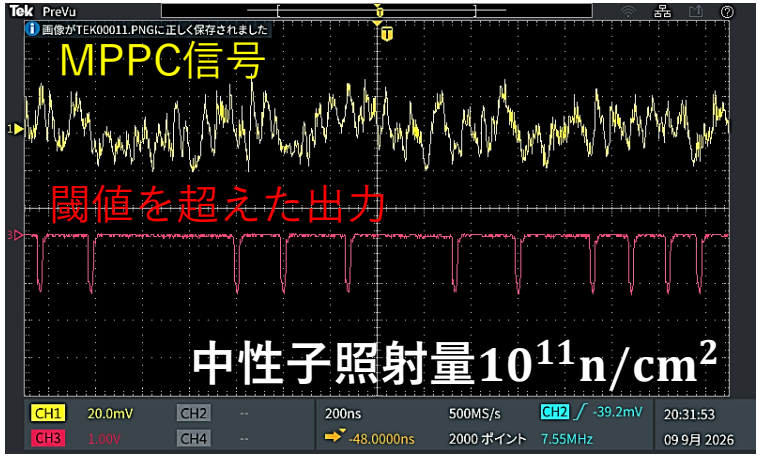
ダークカウントレートの測定結果①
中性子照射量依存性

サンプル：25℃・アニーリングなし



中性子照射量 (n/cm^2)
- ●：0（非照射）
- ●：10^8
- ●：10^9
- ●：10^{10}
- ●：10^{11}

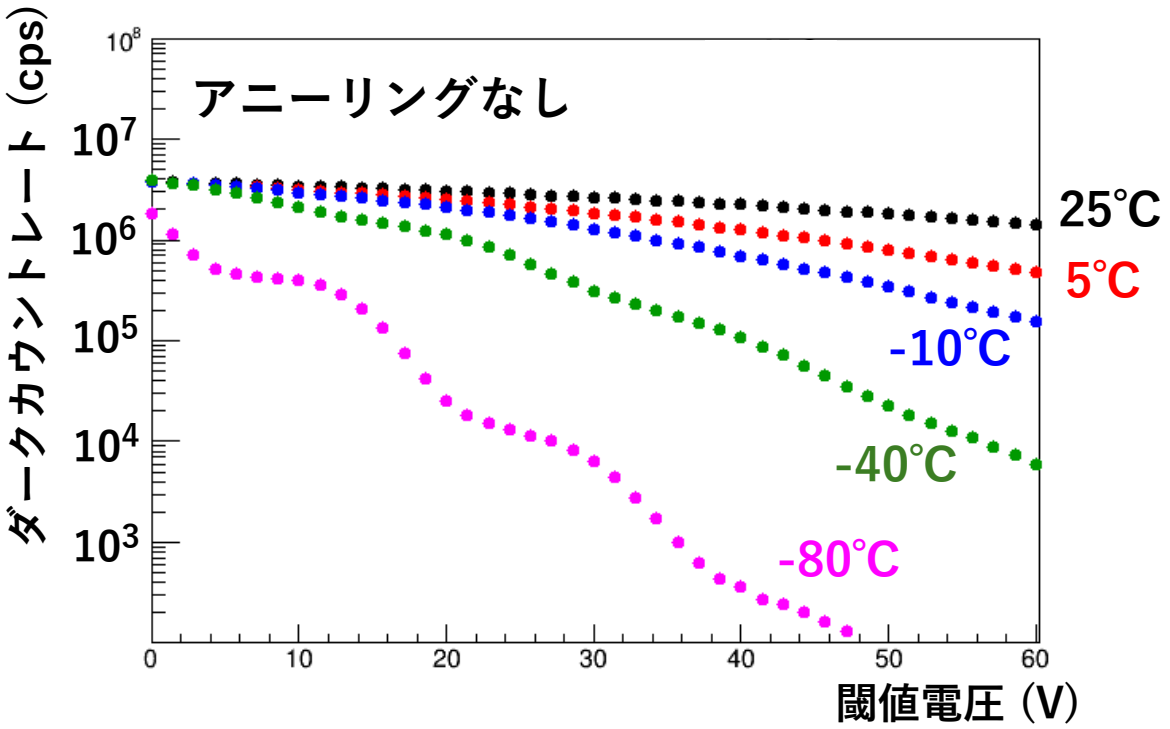


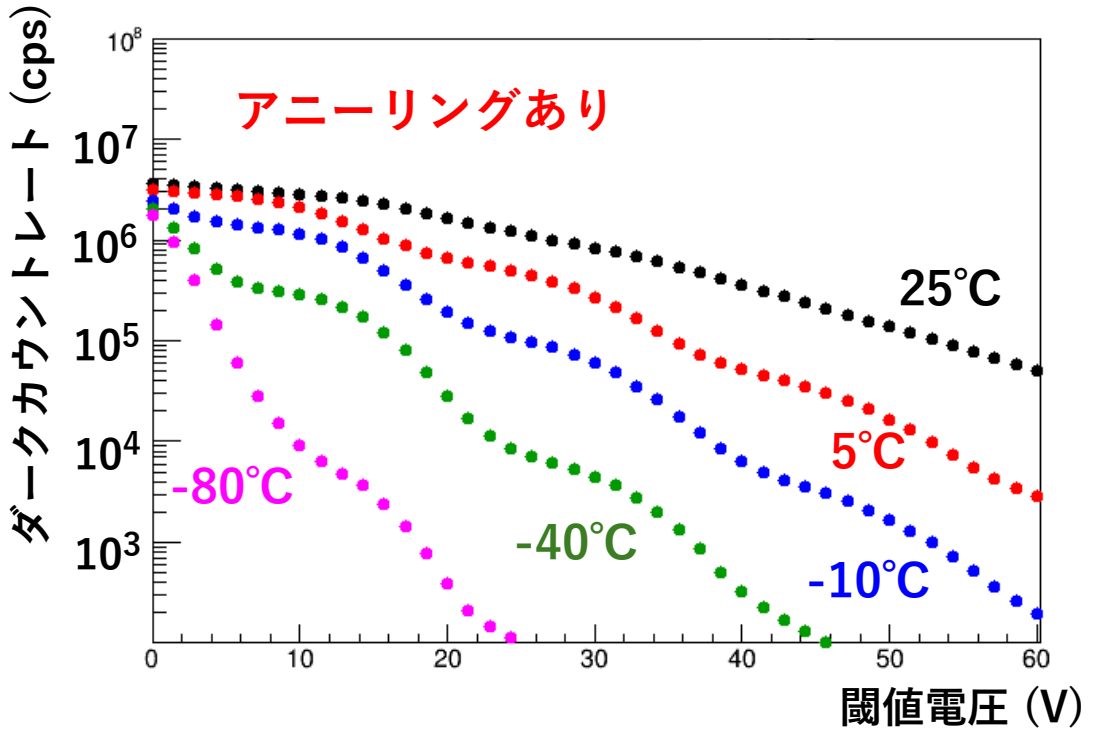


- 中性子照射量の増加に伴い、ダークカウントレートが増加
- 中性子照射量10^{10}と10^{11}で光子のピークが見えない

ダークカウントレートの測定結果②
温度依存性とアニーリングによる効果

サンプル：中性子照射量10^{11} n/cm^2



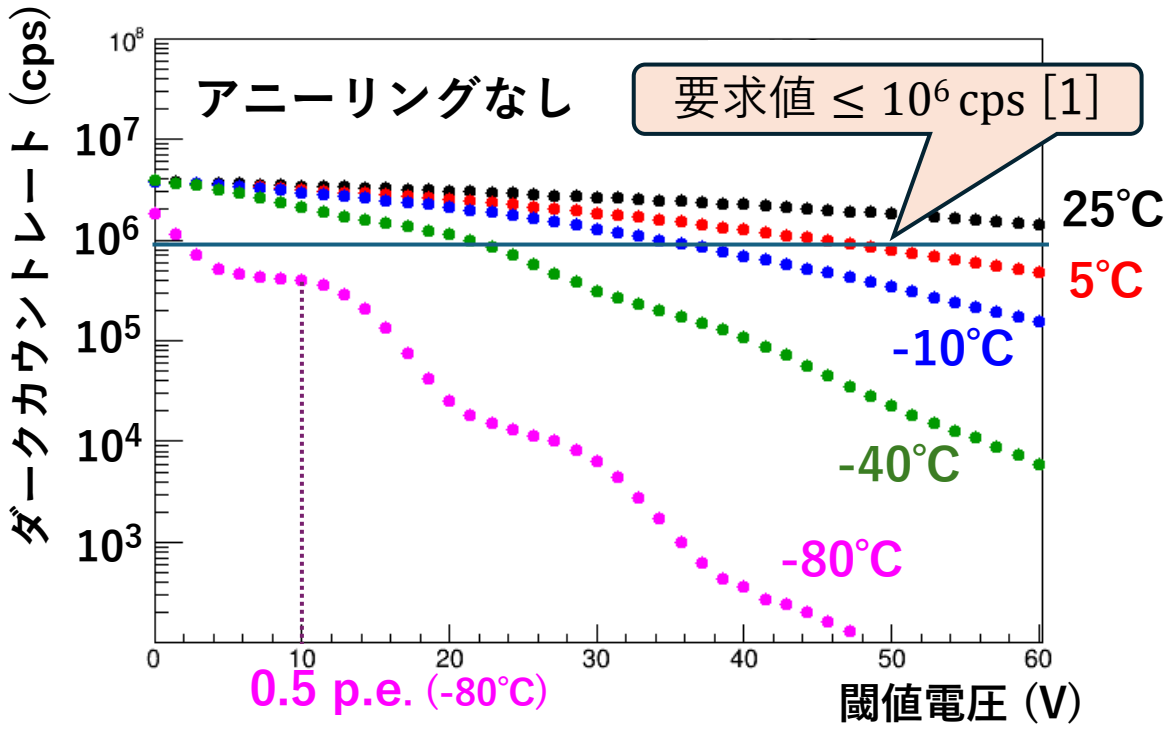


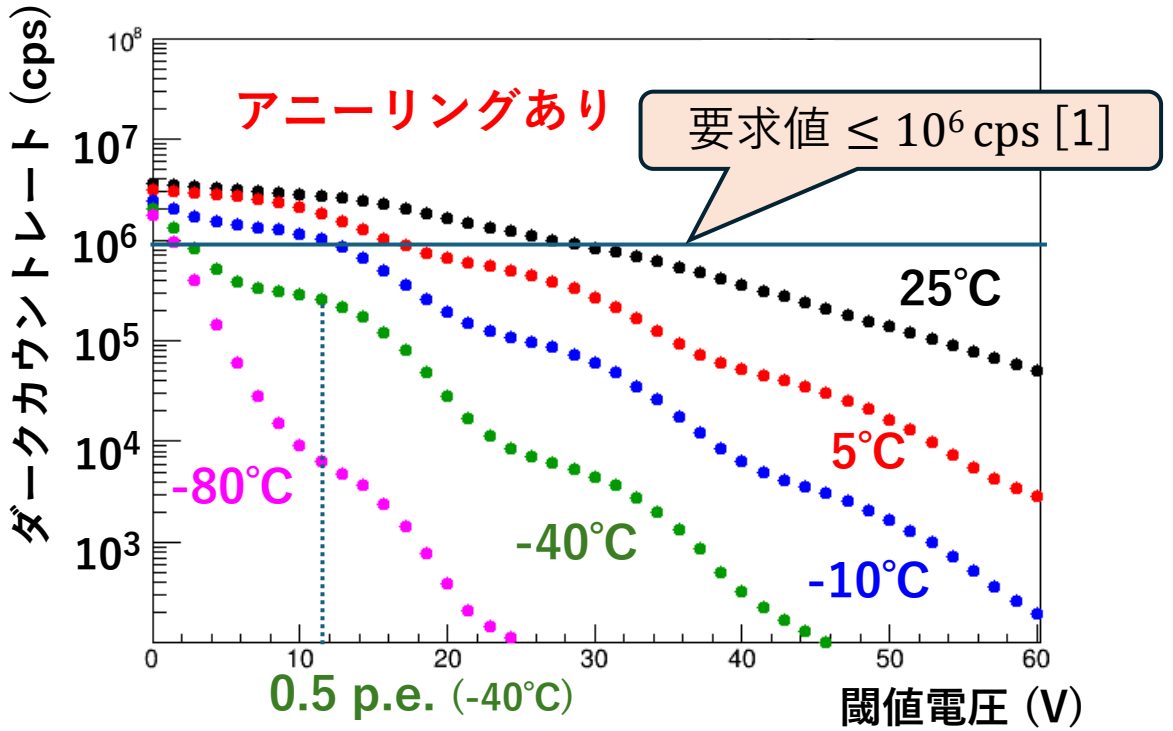
・アニーリングなしでは、要求値を満たすのは-80℃のみ
・アニーリングにより、-40℃でも要求値を満たす

[1]古井孝侑 修士論文,東京大学大学院理学研究科, 2021年

ダークカウントレートの測定結果②
温度依存性とアニーリングによる効果

サンプル：中性子照射量10^{11} n/cm^2





・アニーリングなしでは、要求値を満たすのは-80℃のみ
・アニーリングにより、-40℃でも要求値を満たす

[1]古井孝侑 修士論文,東京大学大学院理学研究科, 2021年

まとめ

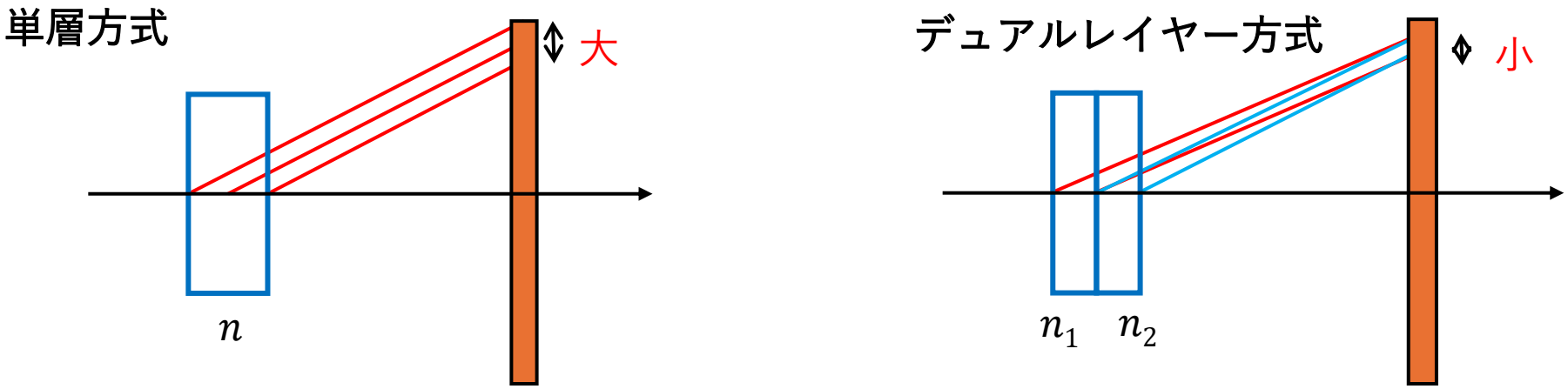
- ARICH検出器では新たな光検出器の候補として、MPPCを検討中

  ←Belle II実験環境下ではMPPCの中性子による影響が懸念
- 本研究では、 MPPCの中性子による影響を評価
- 中性子照射量およびアニーリングによるV_{bd}の変化は小さく、温度依存性が支配的であった
- 暗電流は中性子照射量の増加に伴い増加し、温度低下およびアニーリングにより低減することを確認
- 特に中性子照射量10^{11} $\mathrm{n/cm^2}$ではアニーリングにより暗電流は1桁程度低減
- ダークカウントレート測定では中性子照射量10^{11} $\mathrm{n/cm^2}$ において、
  冷却およびアニーリングにより、-40°C以下で要求値 $\leq 10^6$ cpsを満たすことを確認

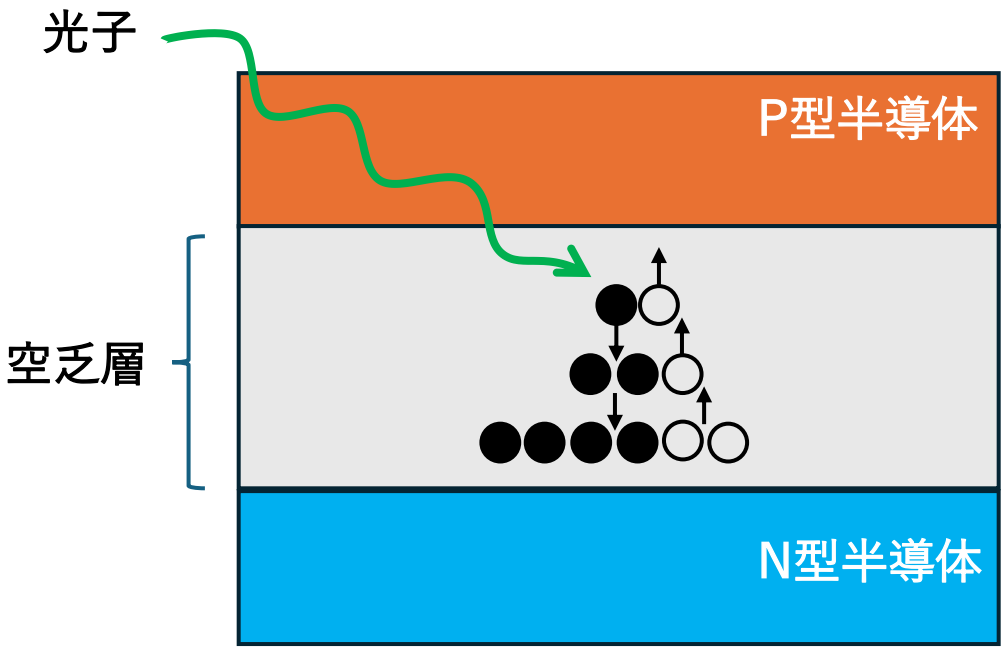
Back up

デュアルレイヤー方式

屈折率が$n_1 = 1.045$と$n_2 = 1.055$の２枚を使用することで検出光子数を減らさず、
角度分解能を向上させている



APD(Avalanche Photo Diode)



①空乏層に光子が入射すると、
　電子・正孔対が生成

②強い電場により、電子と正孔がそれぞれ加速

③加速された電子が結晶格子に衝突

④再び新たな電子・正孔対が生成

⑤この過程が連鎖的に繰り返され、
　キャリアが増倍する

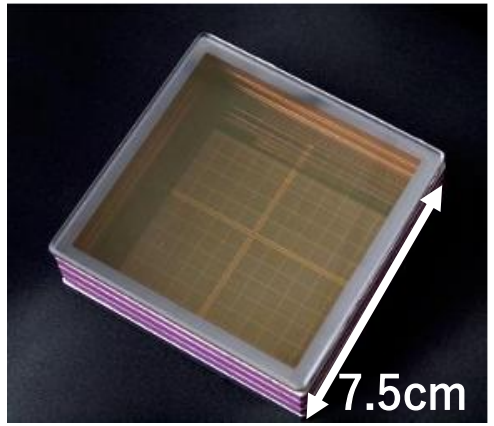
光検出器HAPD

特徴

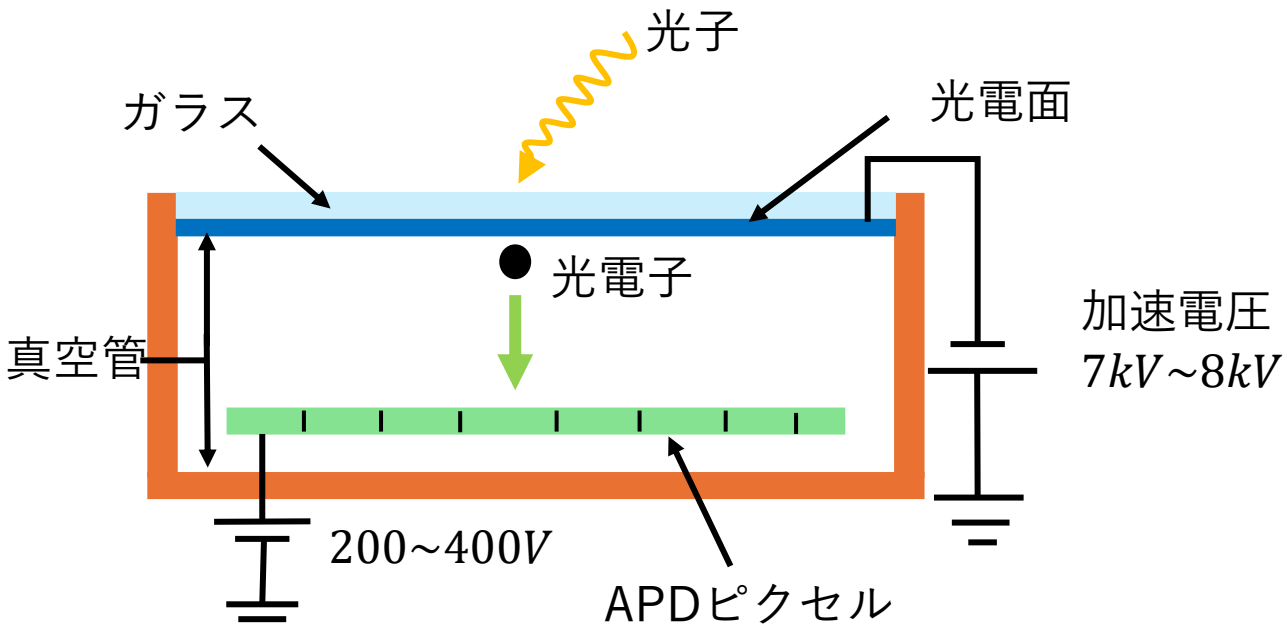
・光子を光電子に変換

・光電子を真空中で加速してAPDで増幅

チャンネルサイズ	$4.9\times4.9[\mathrm{mm}^2]$
増倍率	5.6×10^4
PDE(光子検出効率)	$\sim19\%$
動作電圧	$200\sim400[\mathrm{V}]$ $-7\sim-8[\mathrm{kV}]$
放射線(中性子)耐性	△
ダークカウントレート	$\sim0[\mathrm{cps}]$



HAPD
(144ch)



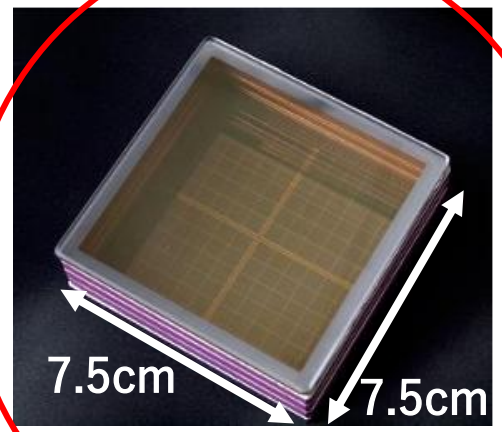
光検出器のアップグレード

光検出器の現状

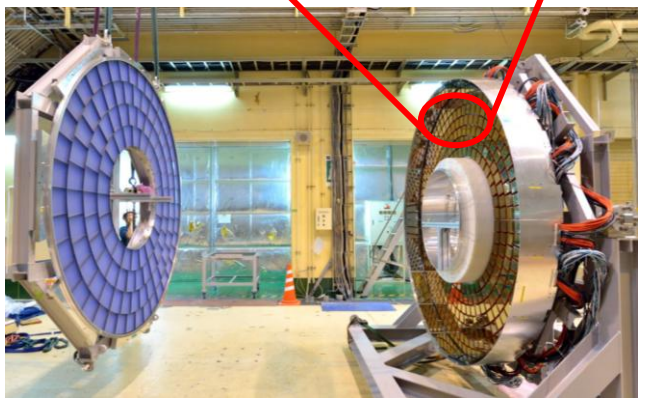
・HAPDは、10年程度の運用を想定し、現在運用中(2018年~)

・生産終了により、予備を超えた故障には対応できない

光検出器のアップグレードが計画



HAPD(144ch)



ARICH検出器の写真(組立時)

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

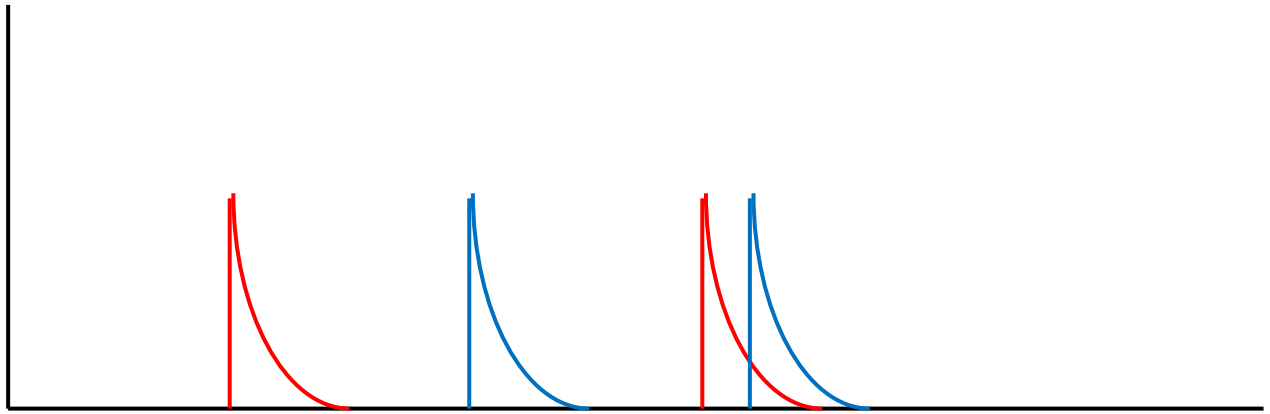
・高磁場中(1.5T)での動作

・10年間の運用における放射線(中性子)耐性

1MeV換算で$10^{12} neutrons/\mathrm{cm}^2$

ダークカウントレートについて

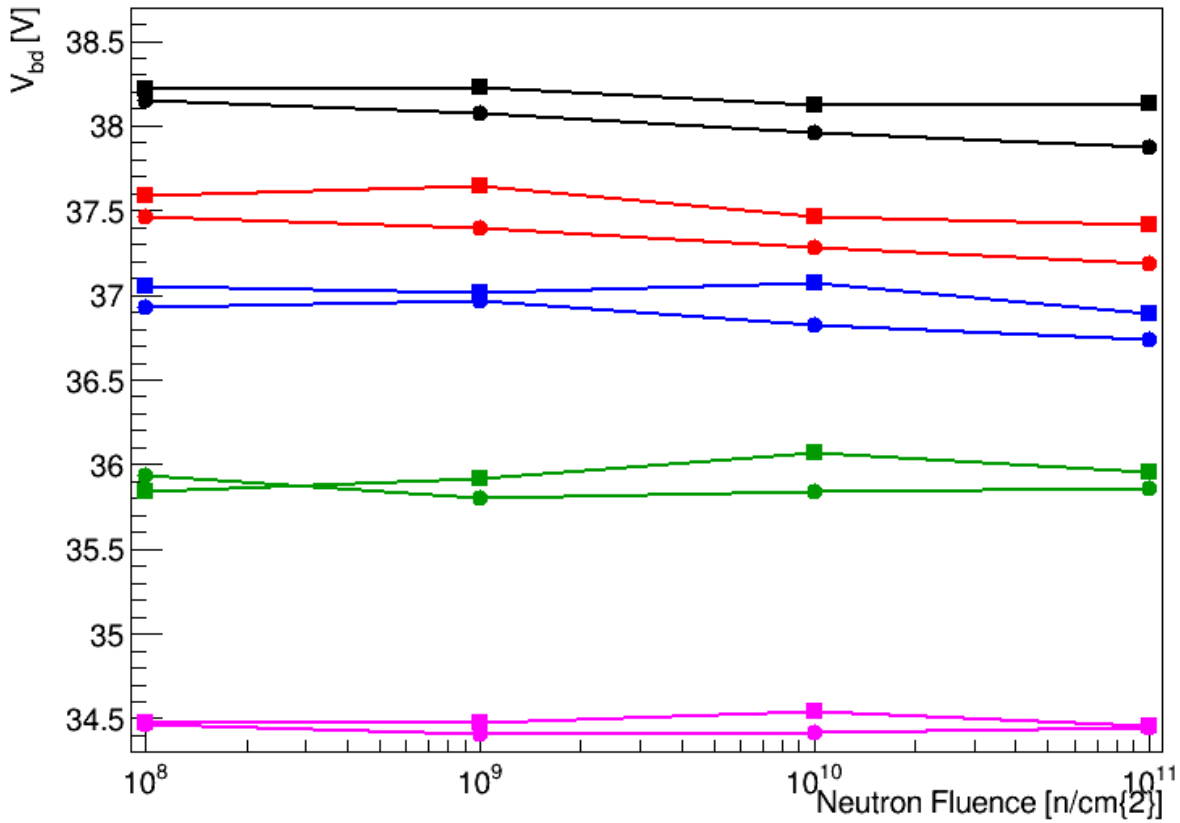
・キャリアが熱的に励起することにより出てくる偽の信号



赤：真の信号
青：ダークパルス

２つの信号を区別するのは難しい

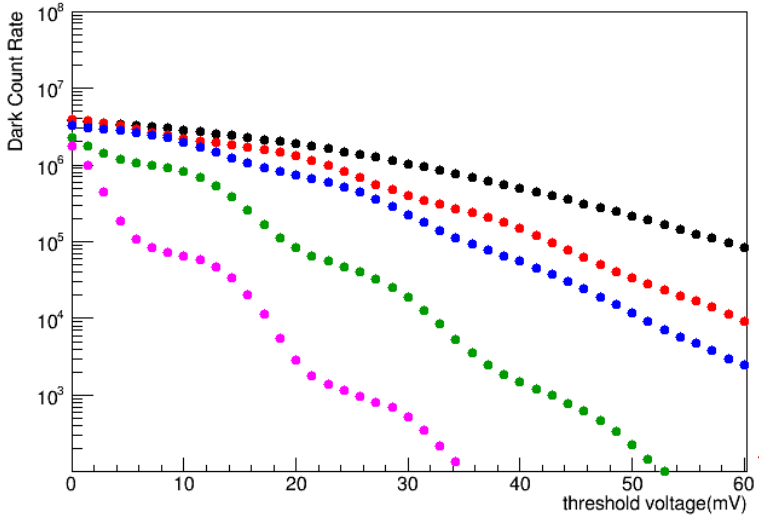
ブレークダウン電圧の照射量依存性



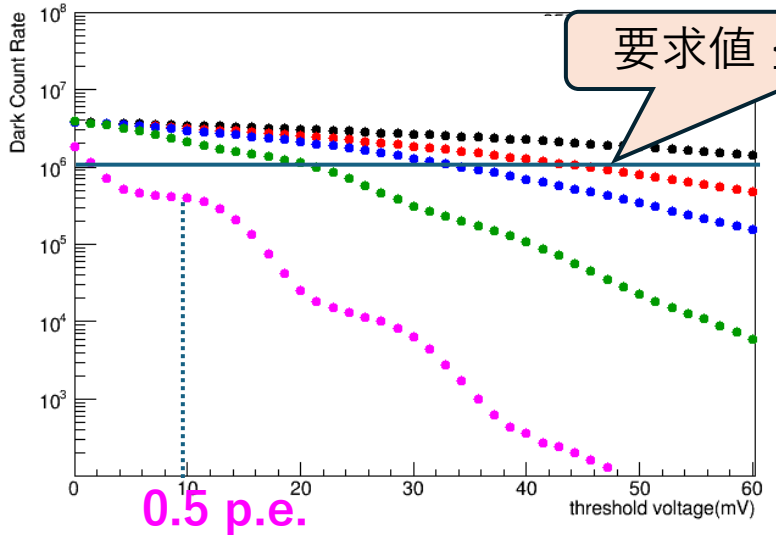
中性子照射量10^{12} n/cm^{2}のダークカウントレートの予測

- 25℃
- 5℃
- -10℃
- -40℃
- -80℃

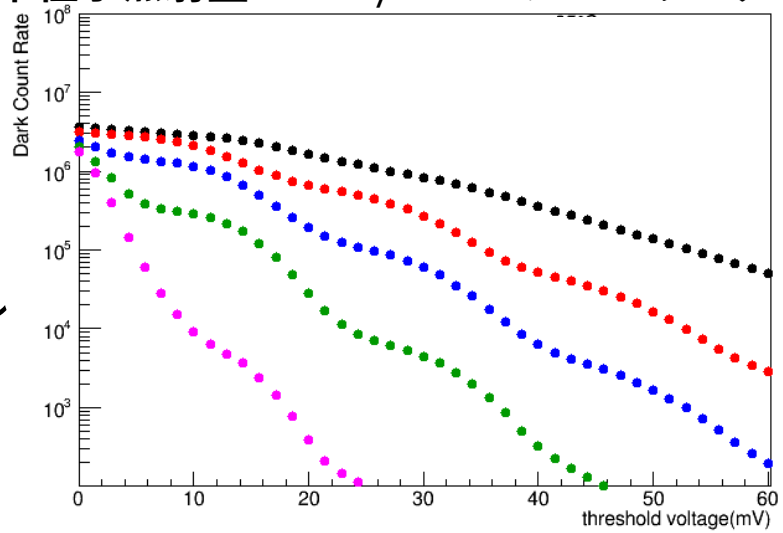
中性子照射量10^{10} n/cm^2・アニーリングなし



中性子照射量10^{11} n/cm^2・アニーリングなし



中性子照射量10^{11} n/cm^2・アニーリングあり

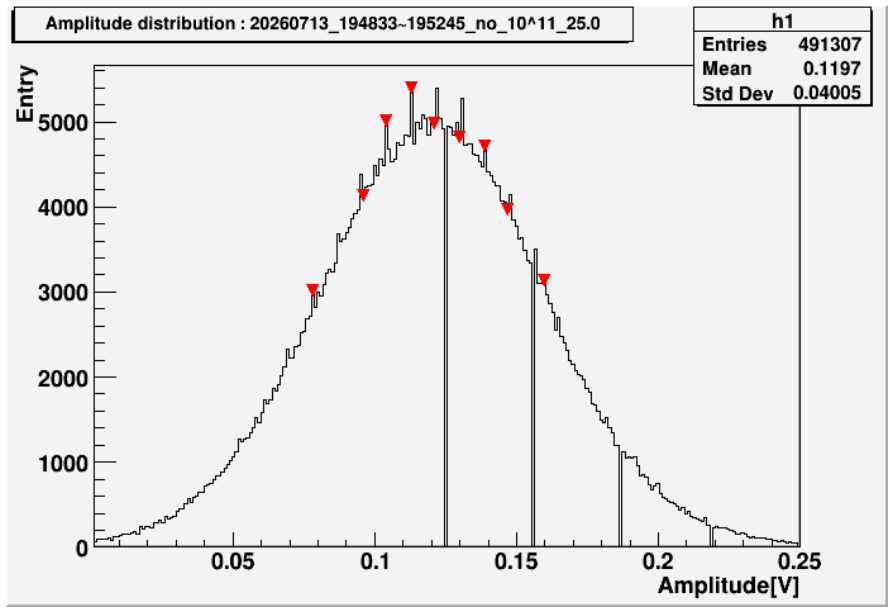


・アニーリングにより、ダークカウントレートは照射量１桁増加前と同程度まで低減

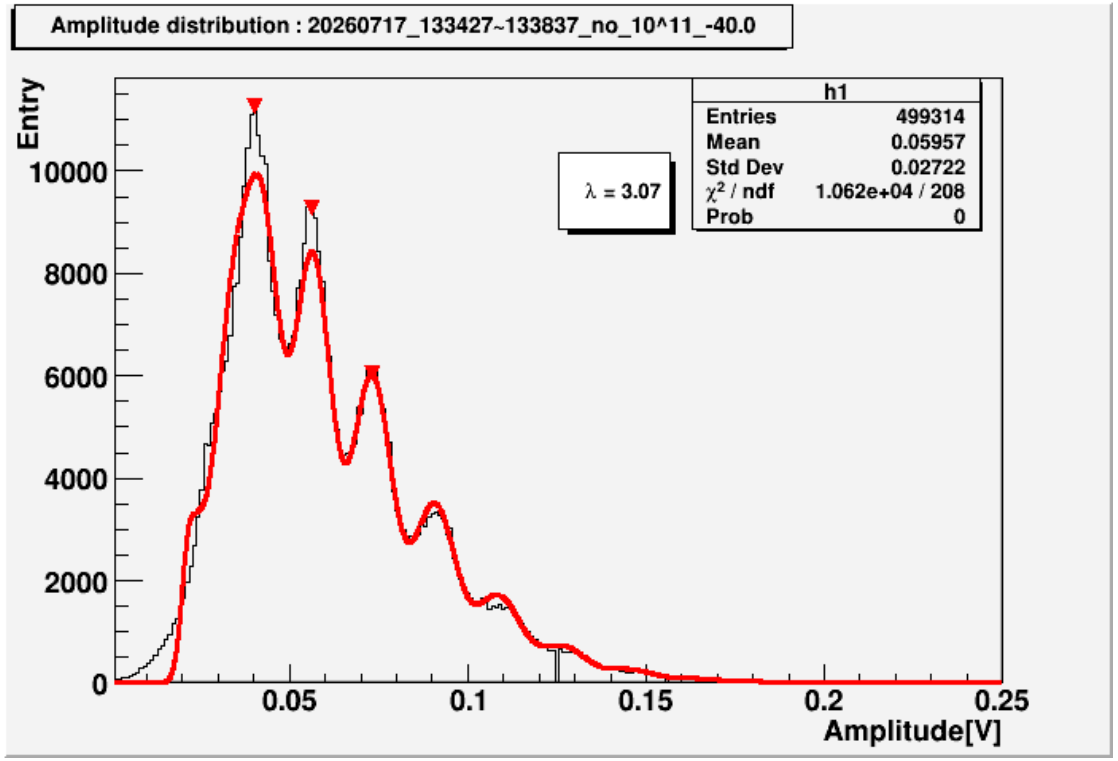
⇒中性子照射量10^{12} n/cm^2・アニーリングあり
≈ 中性子照射量10^{11} n/cm^2・アニーリングなし
と予想

波高分布（冷却効果）

10^{11} アニーリングなし 25℃

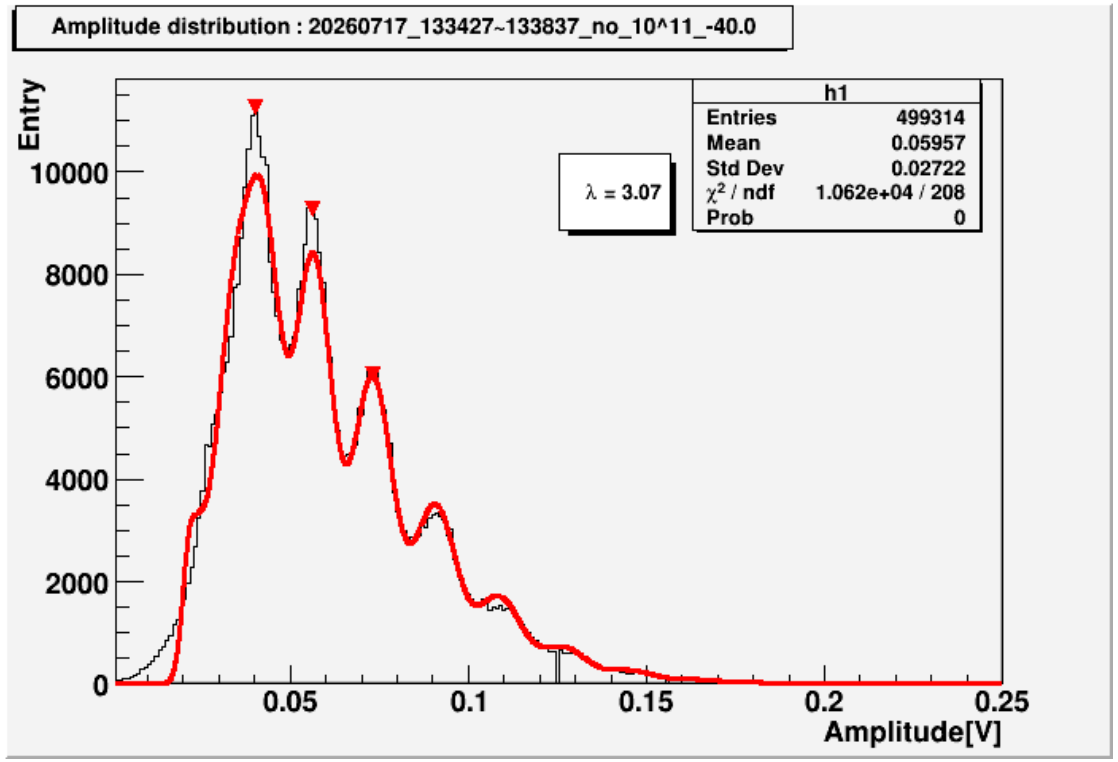


10^{11} アニーリングなし -40℃

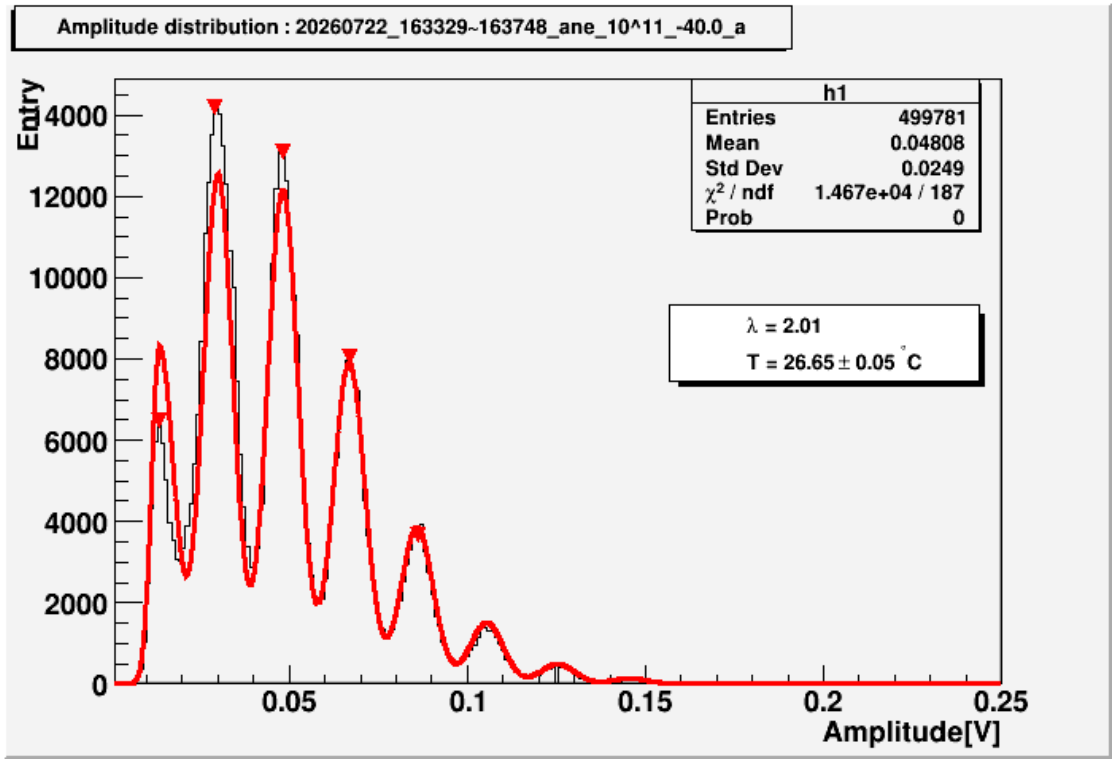


波高分布（アニーリング効果）

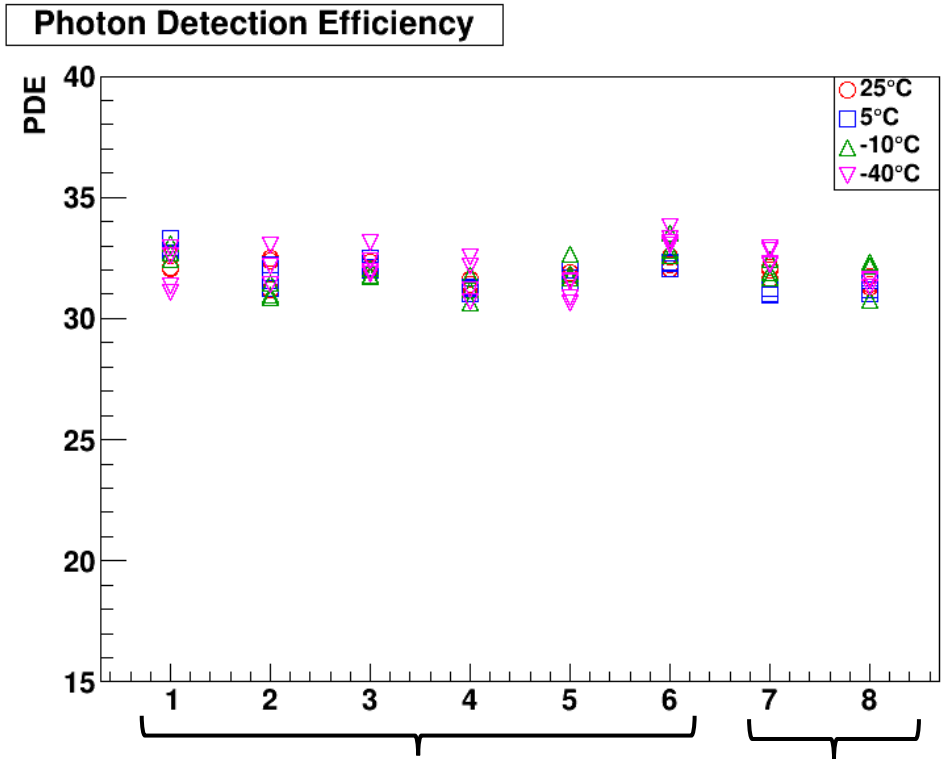
10^{11} アニーリングなし -40℃

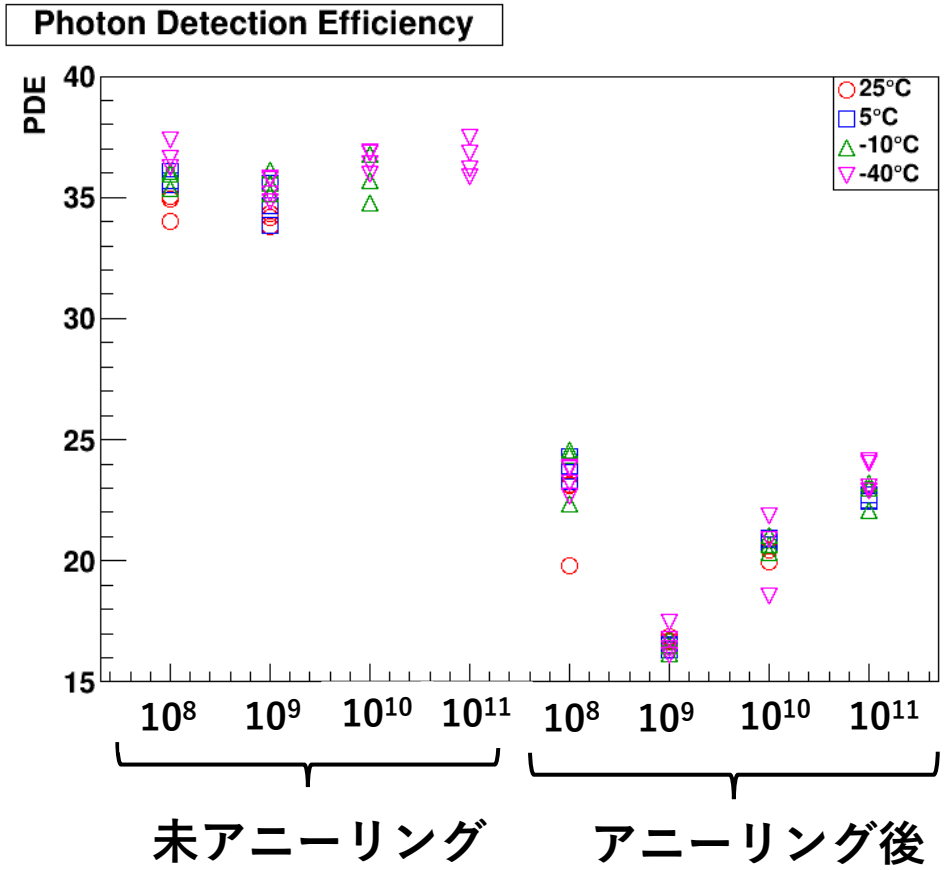


10^{11} アニーリングあり -40℃



波高分布（PDE評価）





- PDEの温度依存性は小さい
- 照射サンプルのアニーリング後にPDE低下傾向が見られた

波高分布（PDE評価）

アニーリング前後で比較すると・・・
- 中性子非照射サンプル⇒変化なし
- 中性子照射サンプル⇒有意なPDEの低下

	アニーリング前	アニーリング後
非照射	32.1±0.7	32.0±0.5
10^8	36.7±0.4	23.4±0.5
10^9	35.4±0.4	16.7±0.5
10^{10}	36.5±0.4	20.5±1.2
10^{11}	36.6±0.6	23.5±0.6

