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

修士1年　本橋完太[A]

角野秀一[A],汲田哲郎[A],住吉孝行[A],米永匡伸[A],鶴藤昌人[A],渡辺啓太[A]古井孝侑[I],
足立一郎[C,D],飯嶋徹[G],岩田修一[J],河合秀幸[E],川崎健夫[B],金道玄樹[D],高力孝[C],今野智之[B],松岡広大[C],西田昌平[C],西村美紀[C],小川和也[H],小川了[F],
庄司正剛[C],田端誠[E],宇野健太[H],遊佐洋右[H]

東京都立大[A],北里大[B],KEK[C],総研大[D],千葉大[E],東邦大[F],名古屋大[G],新潟大[H],
東京大[I],東京都立産業技術高専[J]

目次

イントロダクション

- Belle II実験とARICH検出器について
- MPPC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

・Belle II実験とARICH検出器について

・MPPCについて

研究内容

・中性子照射試験について

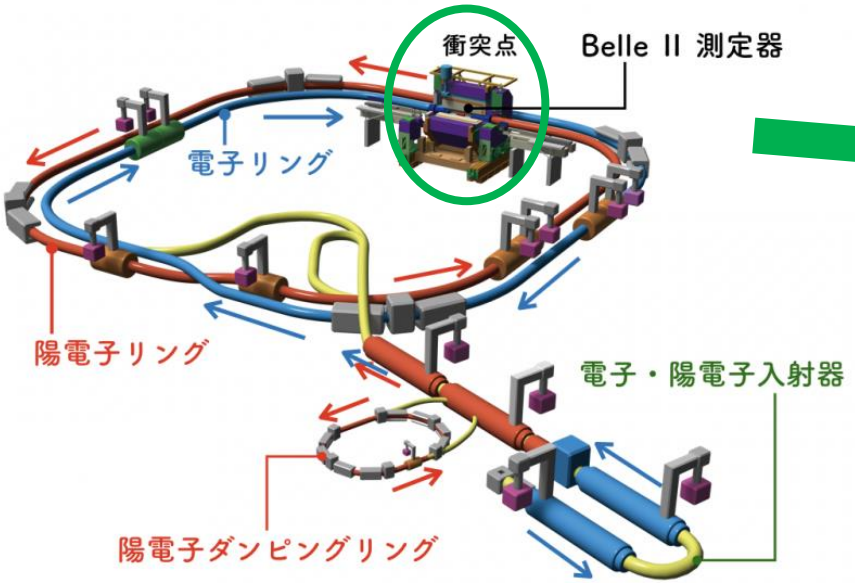
・測定の概要

・結果と比較

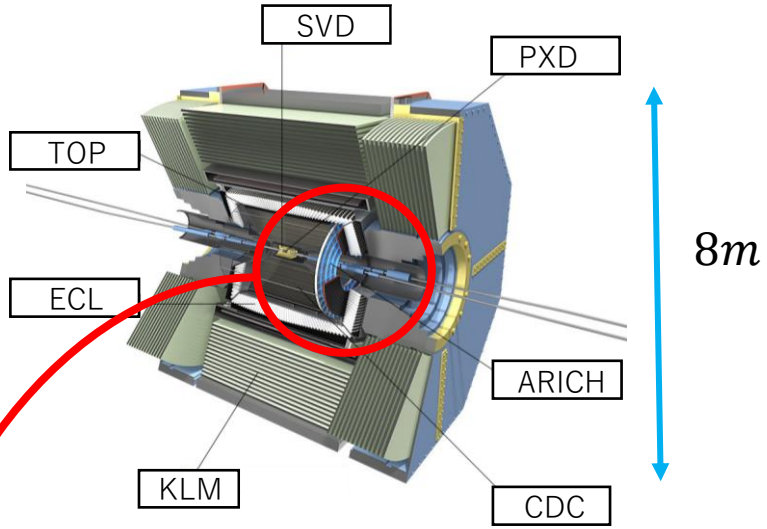
まとめ

Belle II実験について

茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構(KEK)にて進行中の
新物理探索を目的とした新しいB-factory実験



SuperKEKB加速器のイメージ図



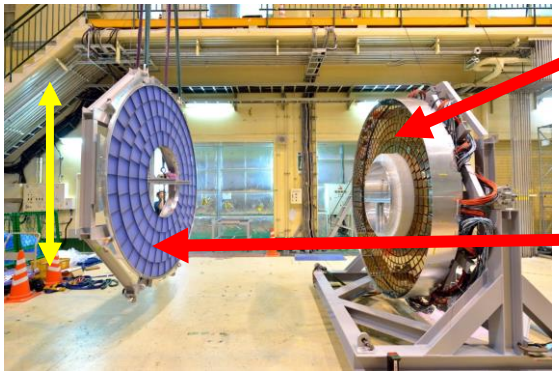
Belle II測定器のイメージ図

Aerogel Ring Imaging CHerenkov Counter

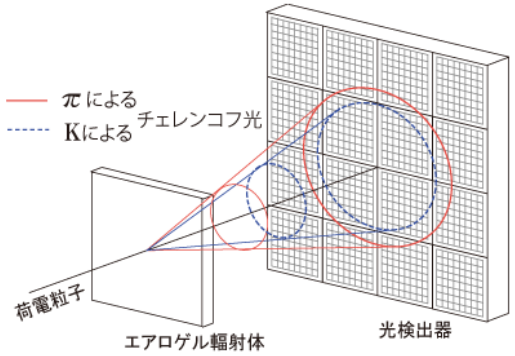
⇒通称ARICH(荷電K/π 中間子を識別)

ARICH検出器について

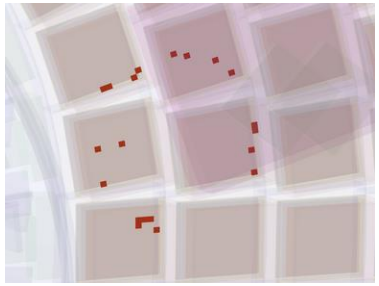
ARICH検出器 ・エアロゲル輻射体
・光検出器Hybrid Avalanche Photo Detector(HAPD)
の二層構造



ARICHの写真(設置前)



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

荷電粒子がエアロゲル幅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

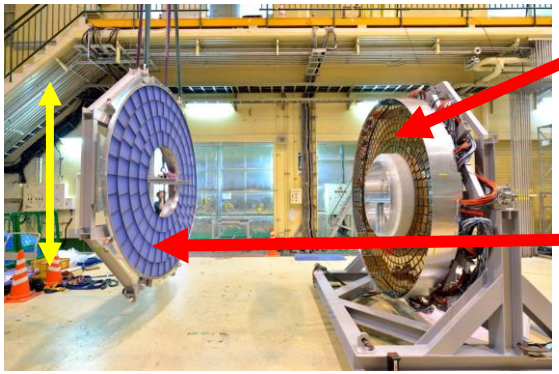
$$cos\theta_c = \frac{\sqrt{(mc)^2+p^2}}{np}$$

(θ_c: 放射角　m:粒子の質量　p:運動量(測定値)　n:屈折率(既値))

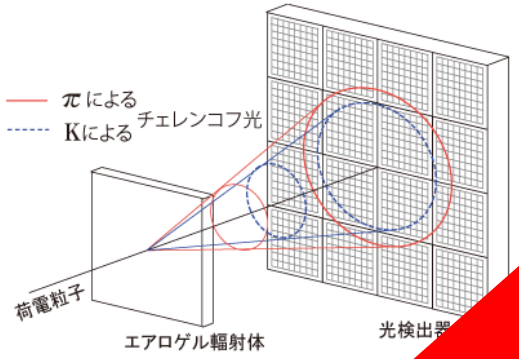
1光子検出が重要

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



ARICHの写真(設置前)



粒子識別原理のイメー

チェレンコフリングの観測例

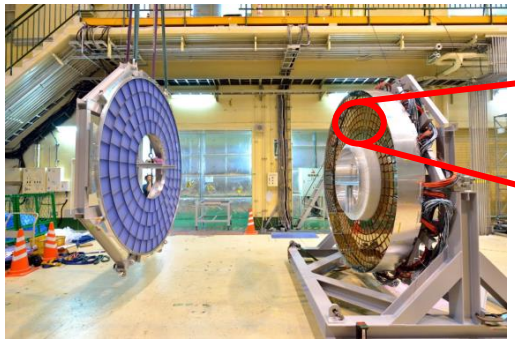
荷電粒子がエアロゲル幅射体を通過時に発するチェレ 光の放射角の違いから
荷電K中間子と**荷電π中間子**を識別

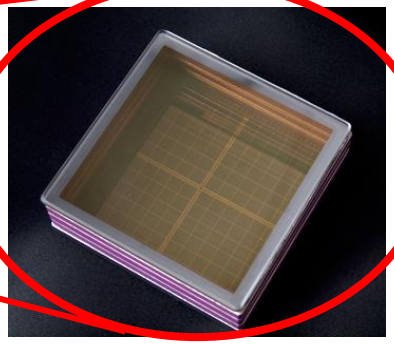
$$cos\theta_c = \frac{\sqrt{(mc)^2+p^2}}{np}$$ （θ_c: 放射角　m:粒子 　p:運動量（測定値）　n:屈折率（既値））

1光子検出が重要

光検出器について

光検出器HAPDの写真





・HAPDは、10年の運用を想定

・上記の期間で想定される数を除き生産終了

・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

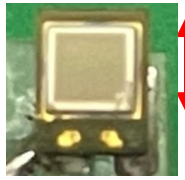
新たな光検出器の候補として**Multi Pixel Photon Counter(MPPC)**を検討中

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

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

ガイガーモード$(V > V_{bd})$で動作

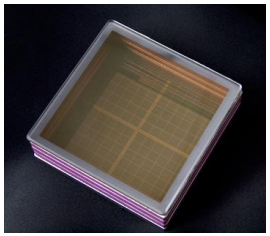
1.3mm



1.3mm

MPPC(1CH)の写真

HAPD



：メリット

：デメリット

MPPC

(S14160-1315PS)

$4.9 \times 4.9mm^2$	チャンネルサイズ 位置精度の向上	$1.3 \times 1.3mm^2$
$200\sim600nm$	有効波長範囲	$290\sim900nm$
5.6×10^4	増倍率 向上	3.6×10^5
$\sim19\%$	PDE(光子検出効率) 向上	$\sim32\%$
$200\sim400V$と $7\sim8kV$	動作電圧 運用の容易化	$41V$
△	放射線耐性 悪化	×
$\sim0cps$	ダークカウントレート 悪化	$\sim0.12Mcps$

目次

イントロダクション

・Belle II実験とARICH検出器について

・MPPCについて

研究内容

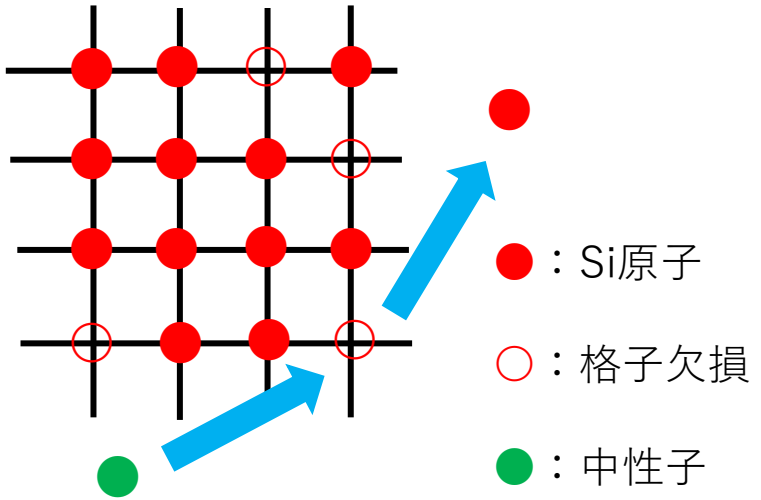
・中性子照射試験について

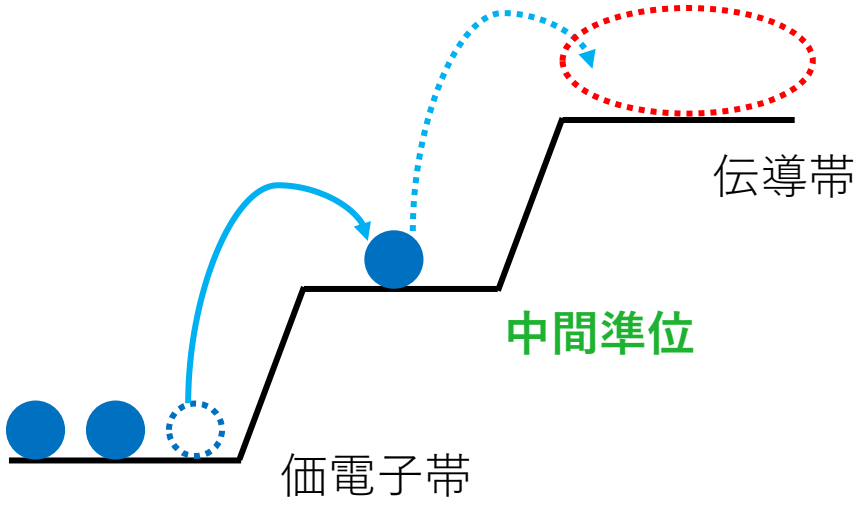
・測定の概要

・結果と比較

まとめ

中性子照射によるMPPCへの影響(低放射線耐性)





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、新たな準位が生成

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

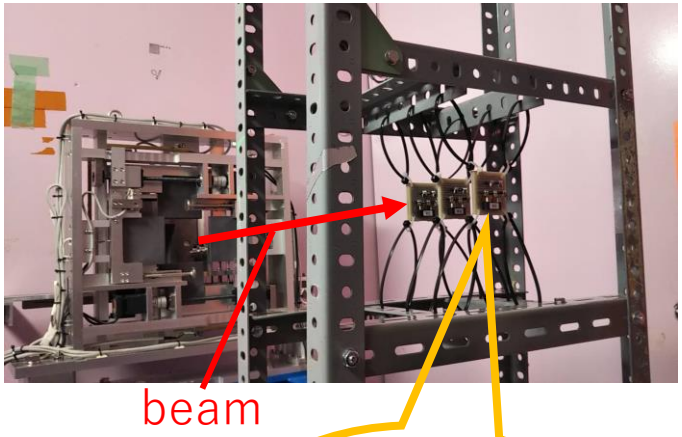
中性子を10^8~$10^{11} neutrons/cm^2$の照射量(エネルギー１MeV換算)で試験を実施

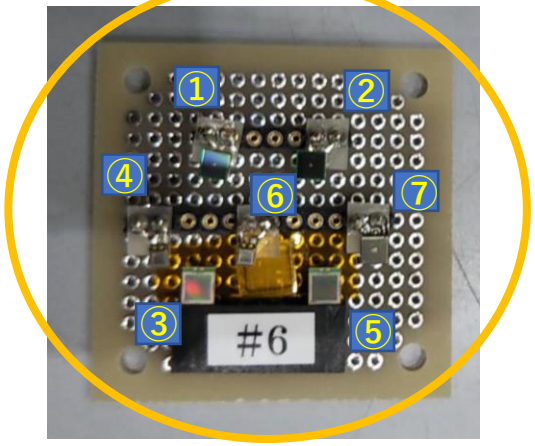
参考)Belle II運転時の年間中性子被曝量(見積)
$10^{11} neutrons/cm^2$

	Mppc サンプル名	ピクセルピッチ(um)	増倍率 (×10^5)	PDE(%)	大きさ (mm^2)	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

表は中性子照射試験で照射したサンプルのリスト

中性子照射試験の様子



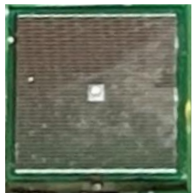


照射サンプルの写真

測定について

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(um)	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 (%)
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**



3075VEの写真

照射前後における測定項目

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

- 現行で広く用いられているサンプル
- 高い増倍率

測定について

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(um)	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 (%)
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

1315PSの写真

照射前後における測定項目

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

- ②より新しい世代のサンプル
- 小ピクセルピッチ、小面積、低い開口率

測定について

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(um)	増倍率 (×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 (%)
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**

3050HSの写真

照射前後における測定項目

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

- ②より新しい世代のサンプル
- 高い増倍率、高い光子検出効率(PDE)

測定について

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(um)	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 (%)
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

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

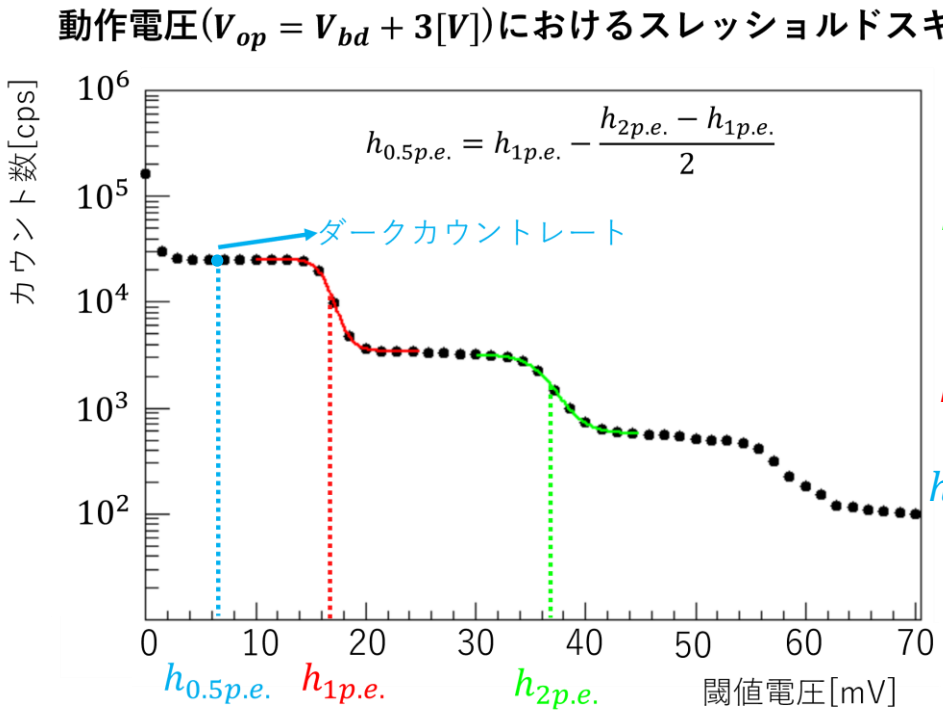
依存性の測定項目

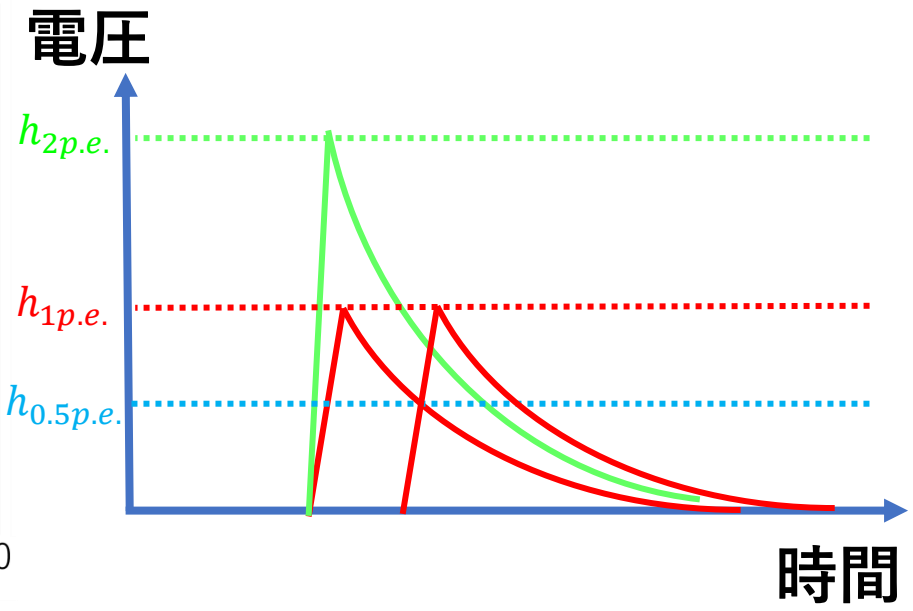
- **中性子照射量依存性**
  照射量10^8~10^{11}
- **温度依存性 25℃~ − 60℃**

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





⇒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)

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

MCシミュレーション

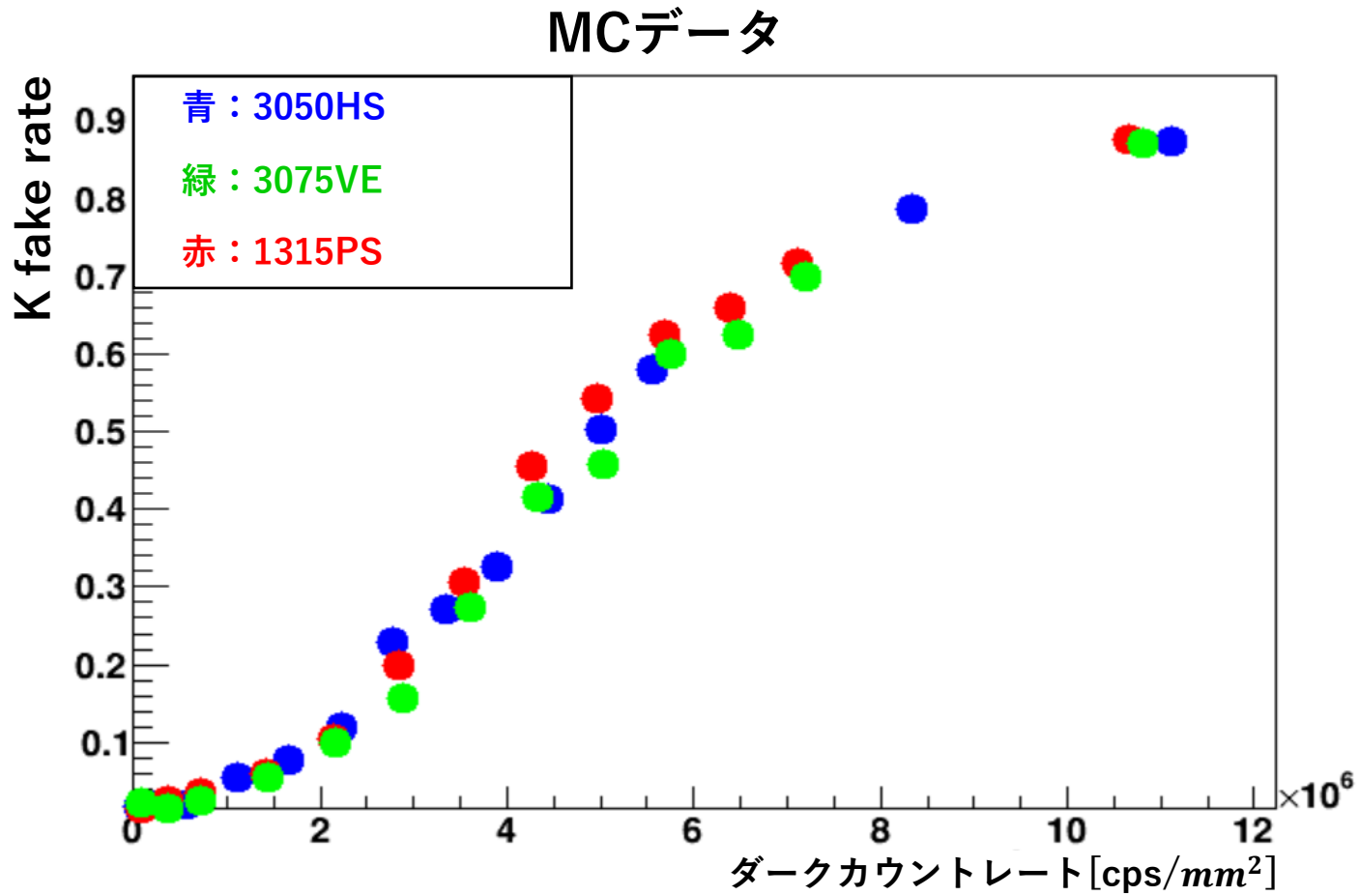
(ARICHにおける粒子識別のシミュレーション)

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

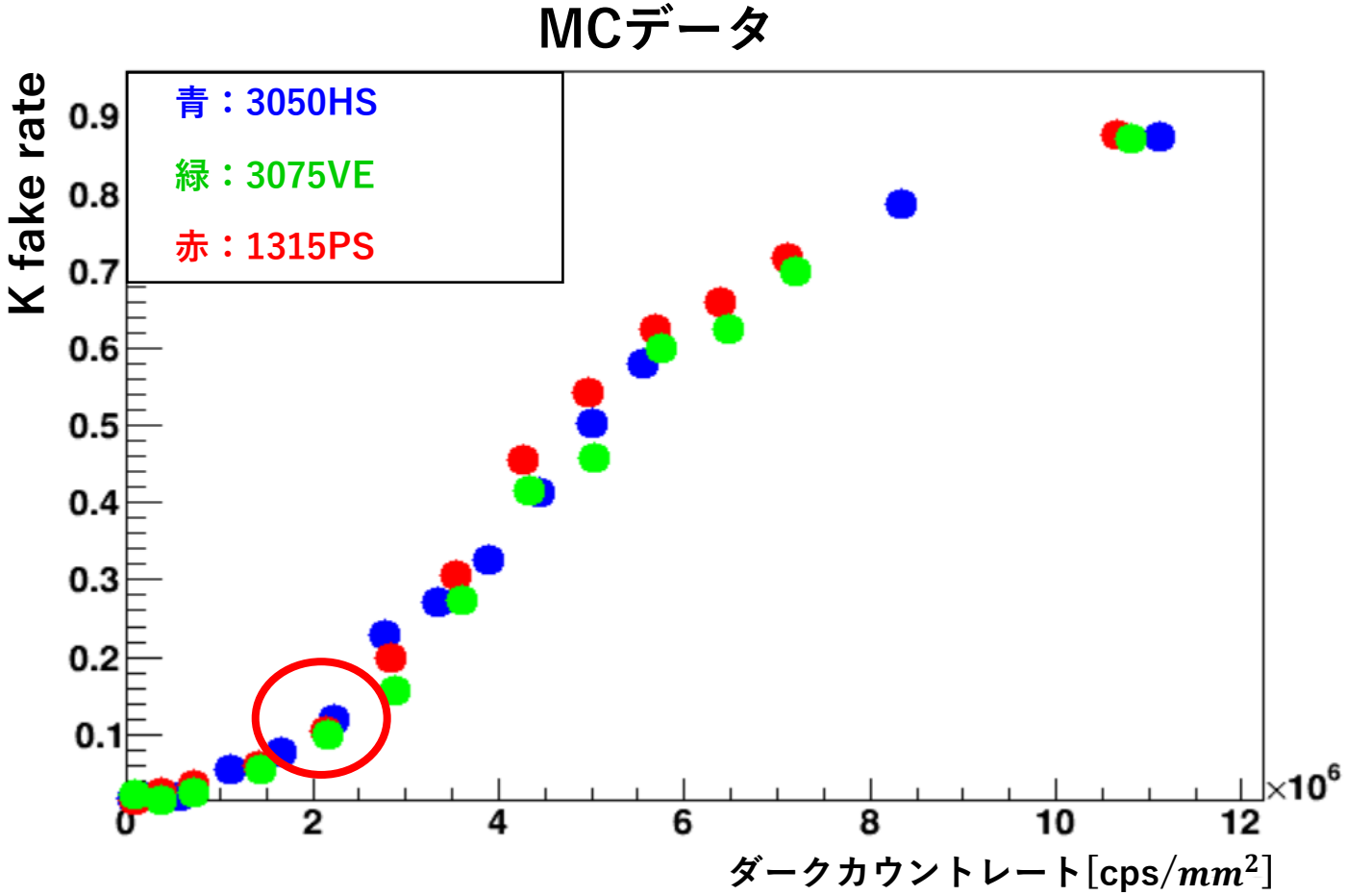
$$K\ fake\ rate\ = \frac{\text{誤識別されてしまった}K\text{中間子}}{K\text{中間子の総数}}$$

参考：ARICHにおけるダークカウントレートの許容量



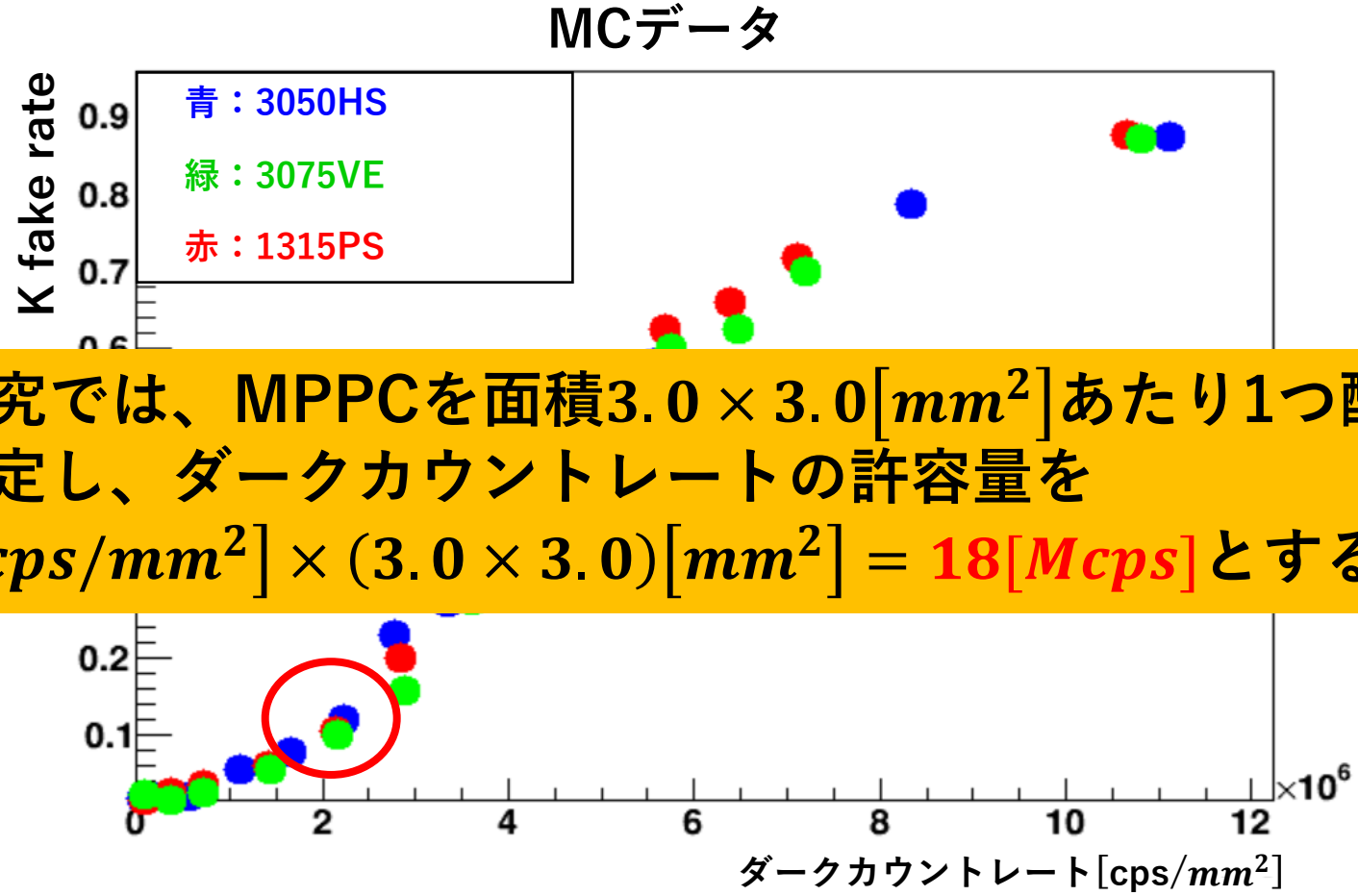
ダークカウントレートが~2$[Mcps/mm^2]$程度ならK fake rateが10%程度
(Belle実験時の粒子識別性能と同程度)

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~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)

参考：ARICHにおけるダークカウントレートの許容量

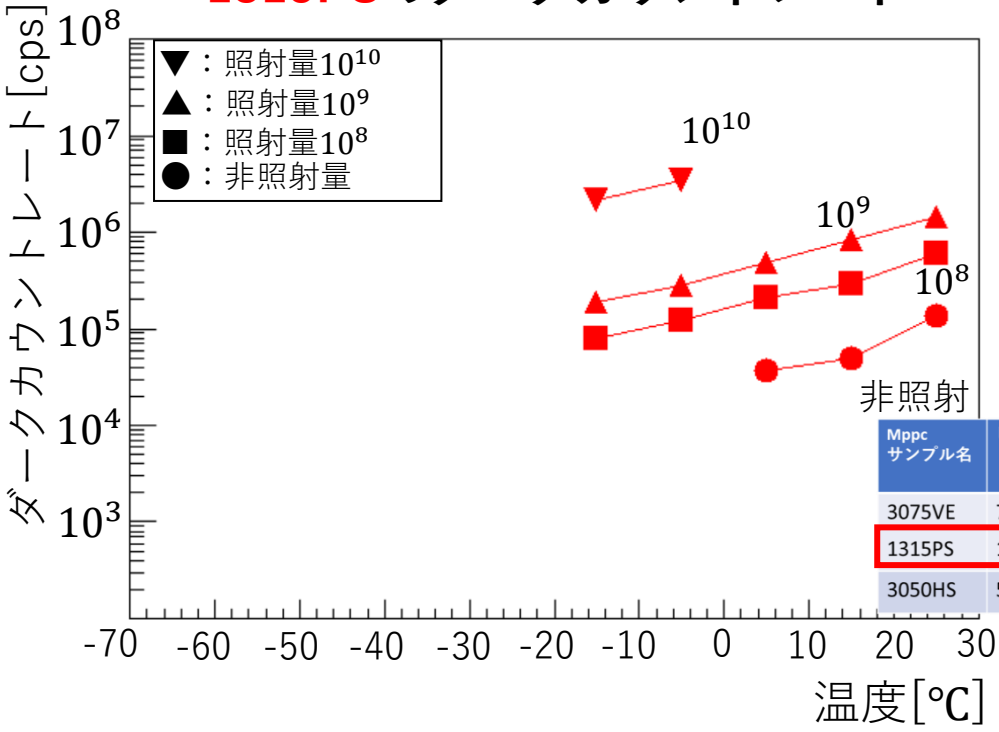


本研究では、MPPCを面積$3.0 \times 3.0 [mm^2]$あたり1つ配置すると仮定し、ダークカウントレートの許容量を
$2 [Mcps/mm^2] \times (3.0 \times 3.0) [mm^2] = 18 [Mcps]$とする

ダークカウントレートが~$2 [Mcps/mm^2]$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)

結果(ダークカウントレート)　＜照射量、温度比較＞

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

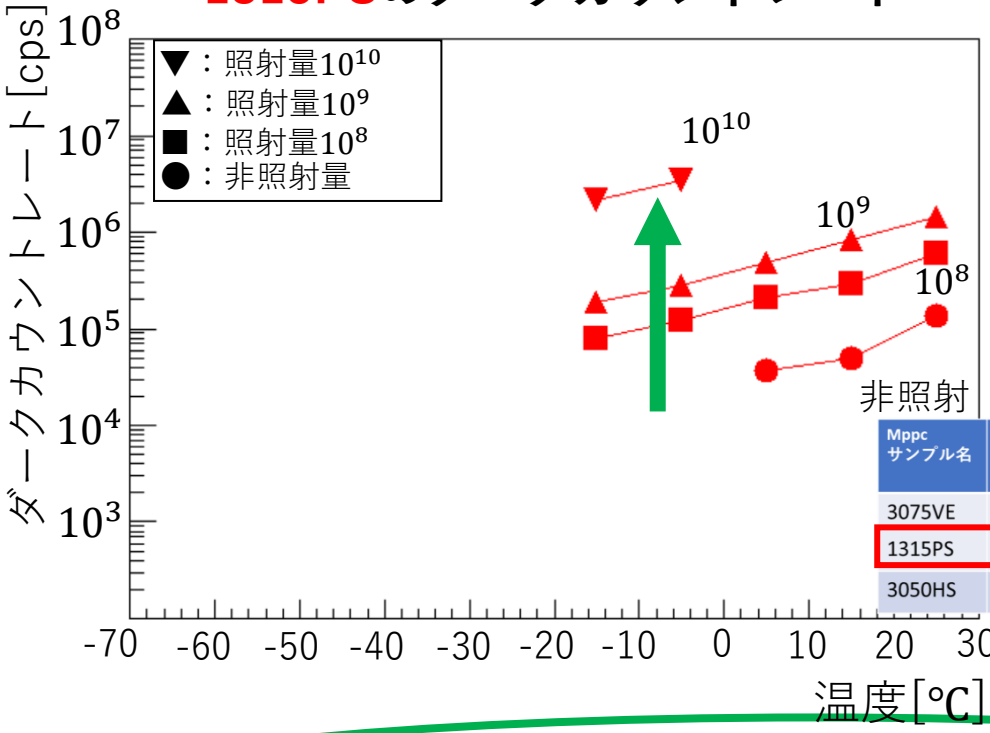
Mppc サンプル名	ピクセルピッチ(um)	増倍率 (×10^5)	PDE(%)	大きさ (mm^2)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

中性子照射によりダークカウントレートが増加

温度低下に対して指数関数的にダークカウントレートが抑制

結果(ダークカウントレート)　＜照射量、温度比較＞

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

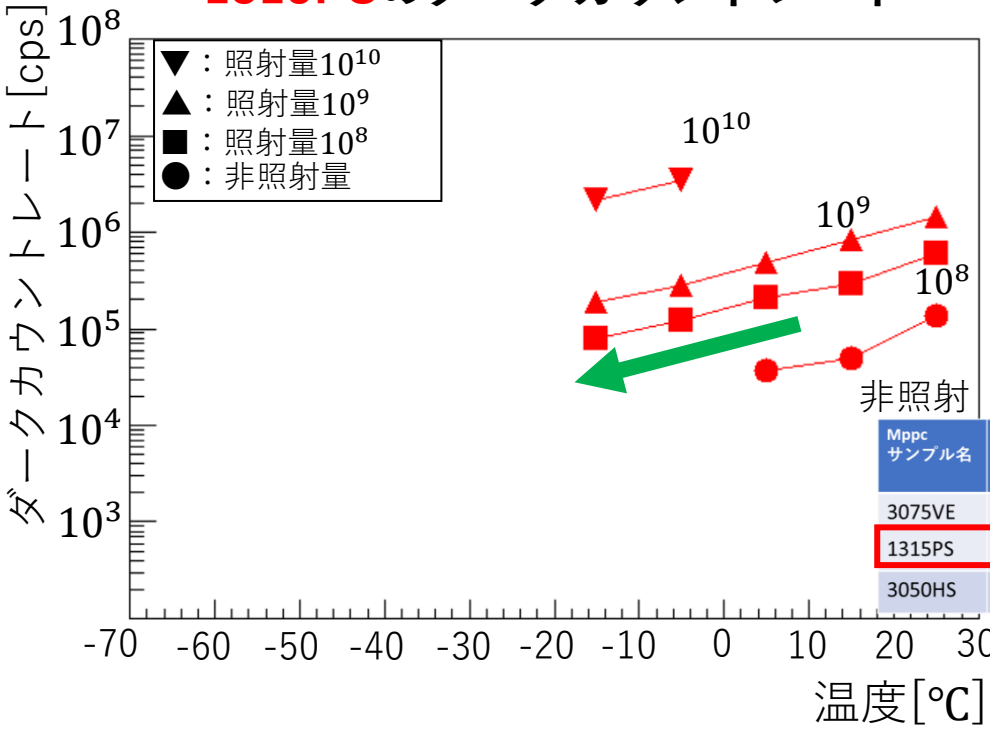
Mppc サンプル名	ピクセルピッチ(um)	増倍率 (×10^5)	PDE(%)	大きさ (mm^2)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

中性子照射によりダークカウントレートが増加

温度低下に対して指数関数的にダークカウントレートが抑制

結果(ダークカウントレート)　＜照射量、温度比較＞

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

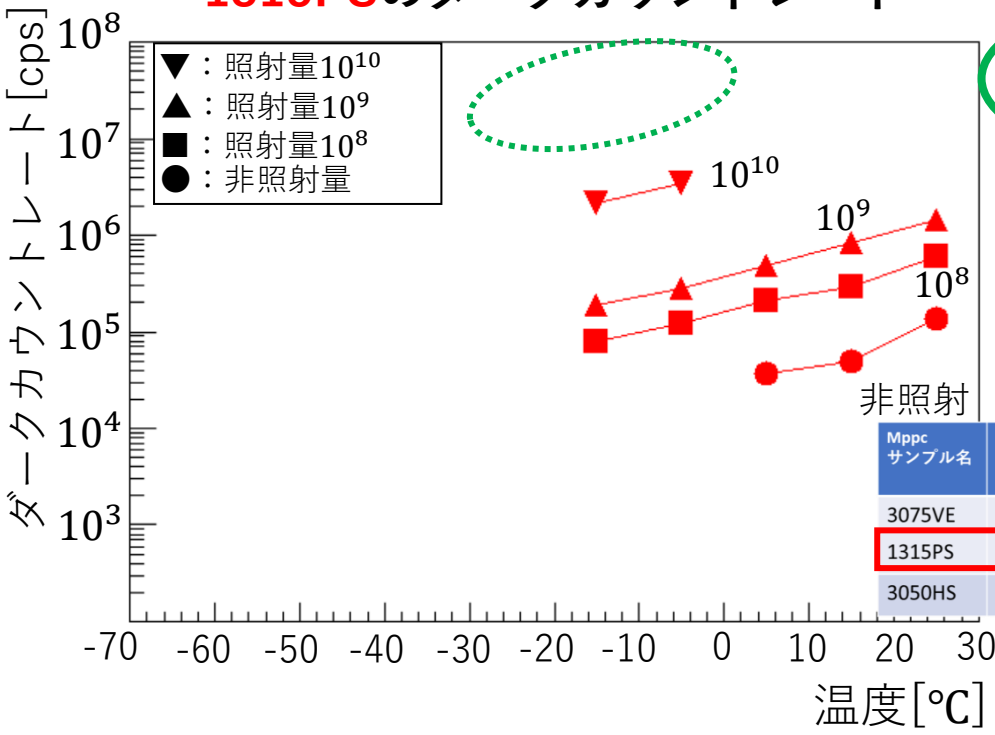
Mppc サンプル名	ピクセルピッチ(um)	増倍率 (×10^5)	PDE(%)	大きさ (mm^2)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

中性子照射によりダークカウントレートが増加

温度低下に対して指数関数的にダークカウントレートが抑制

結果(ダークカウントレート)　＜照射量、温度比較＞

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

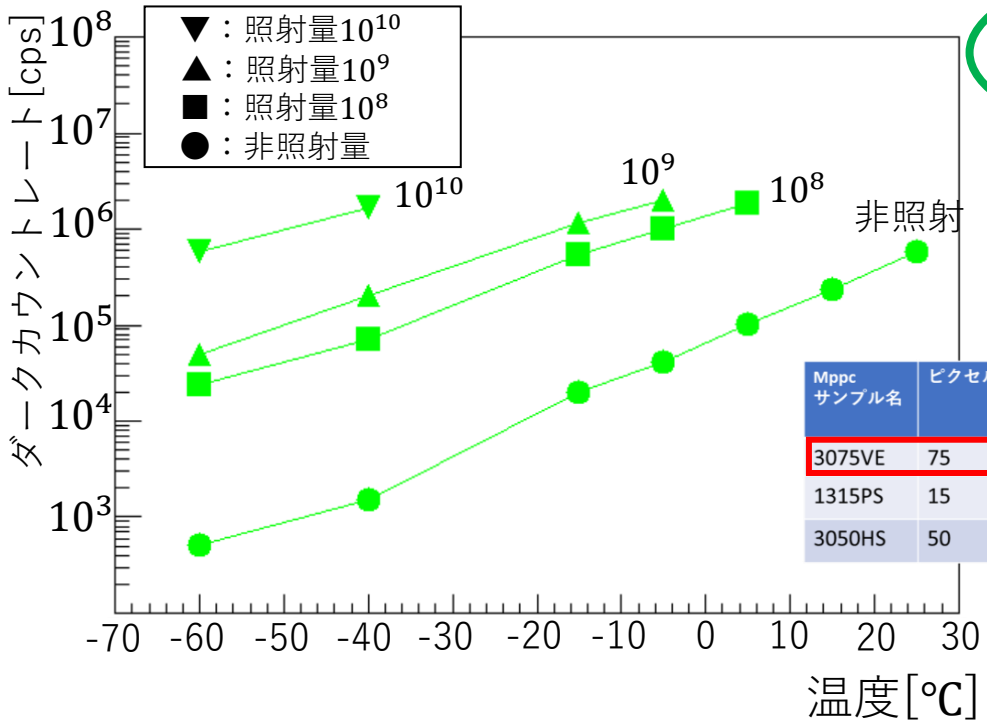
Mppc サンプル名	ピクセルピッチ(um)	増倍率 (×10^5)	PDE(%)	大きさ (mm^2)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

中性子照射によりダークカウントレートが増加

温度低下に対して指数関数的にダークカウントレートが抑制

結果(ダークカウントレート)　＜照射量、温度比較＞

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^{11}は1光子検出が不可

⇒照射量10^{11}は測定不可

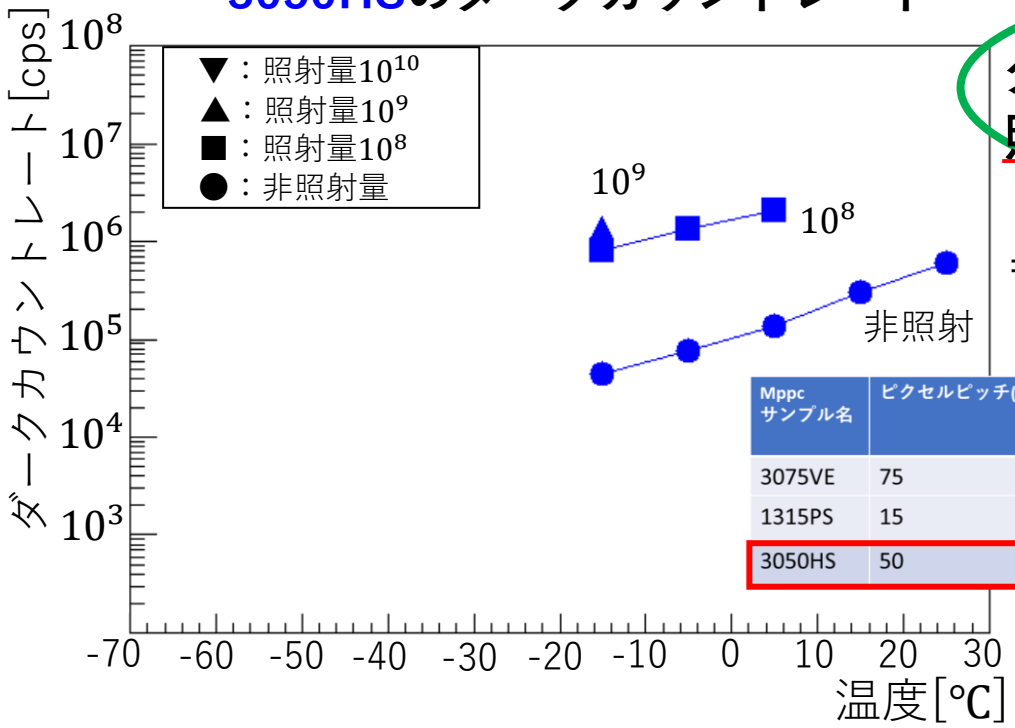
Mppc サンプル名	ピクセルピッチ(um)	増倍率 (×10^5)	PDE(%)	大きさ (mm^2)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

中性子照射によりダークカウントレートが増加

温度低下に対して指数関数的にダークカウントレートが抑制

結果(ダークカウントレート)　＜照射量、温度比較＞

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^{11}は1光子検出が不可

⇒照射量10^{11}は測定不可

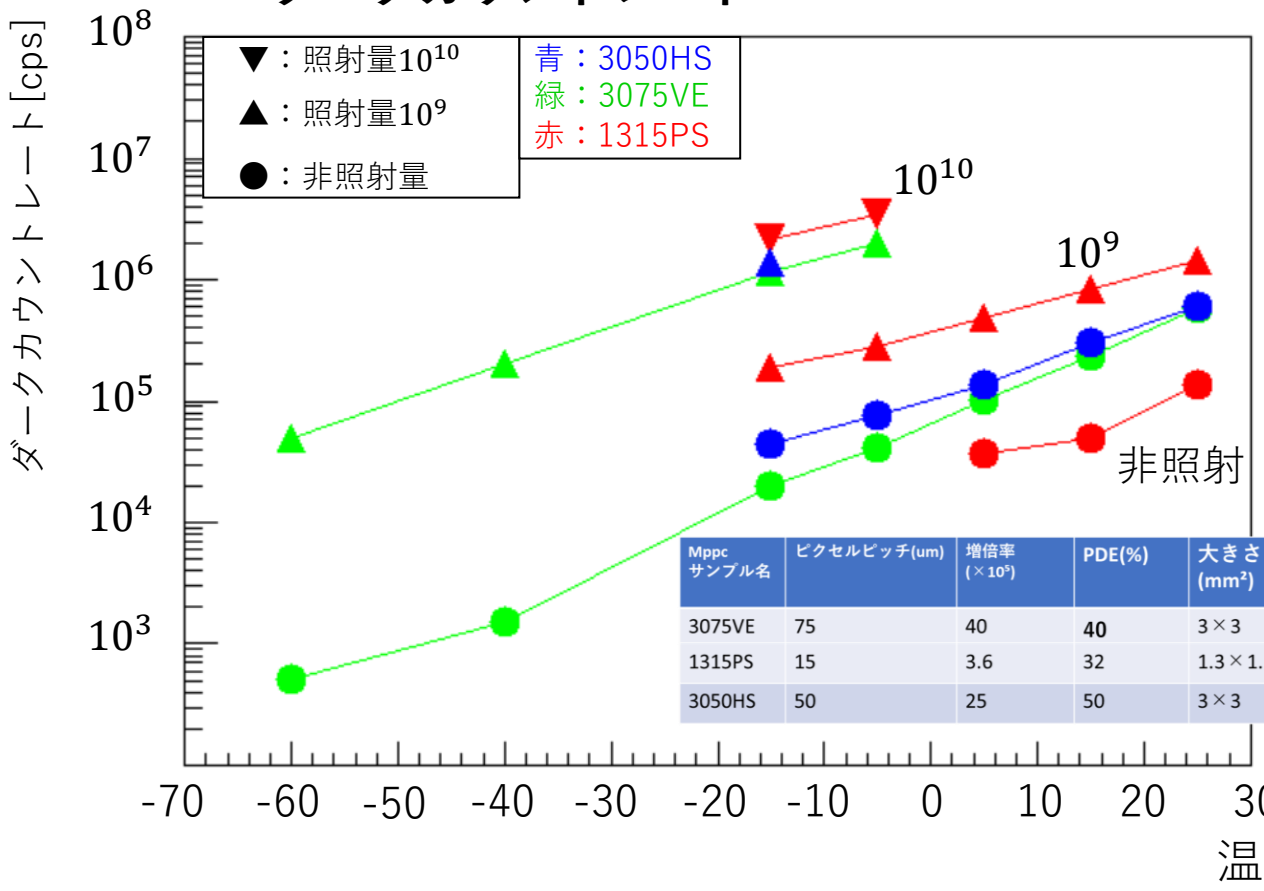
Mppc サンプル名	ピクセルピッチ(um)	増倍率 (×10^5)	PDE(%)	大きさ (mm^2)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

中性子照射によりダークカウントレートが増加

温度低下に対して指数関数的にダークカウントレートが抑制

結果(ダークカウントレート) ＜サンプル間比較＞

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

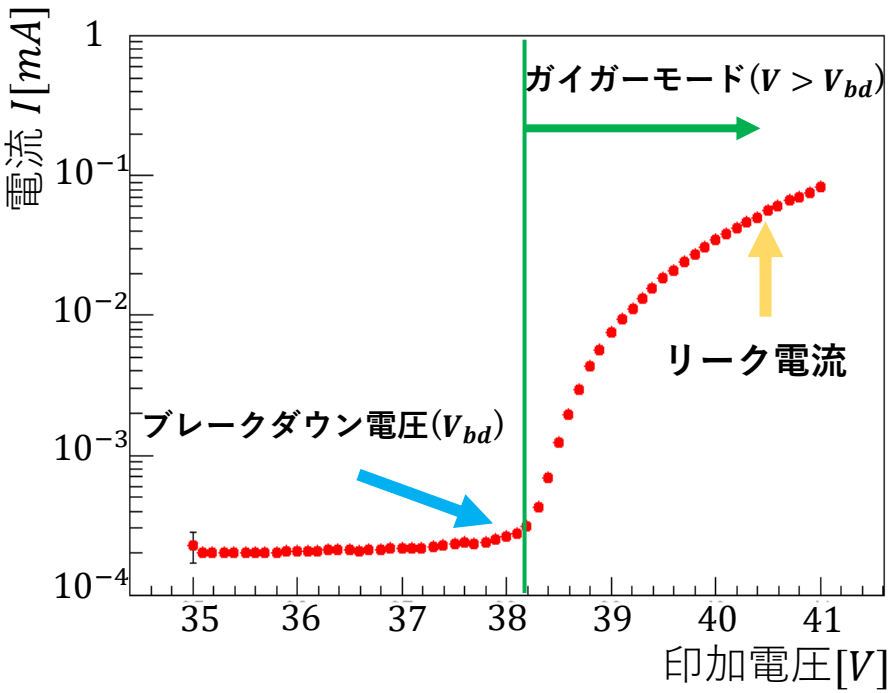


Mppc サンプル名	ピクセルピッチ(um)	増倍率 ($\times 10^5$)	PDE(%)	大きさ (mm^2)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

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)

温度を変えながら暗状態でI-V曲線を測定



〈I-V曲線の解析において〉

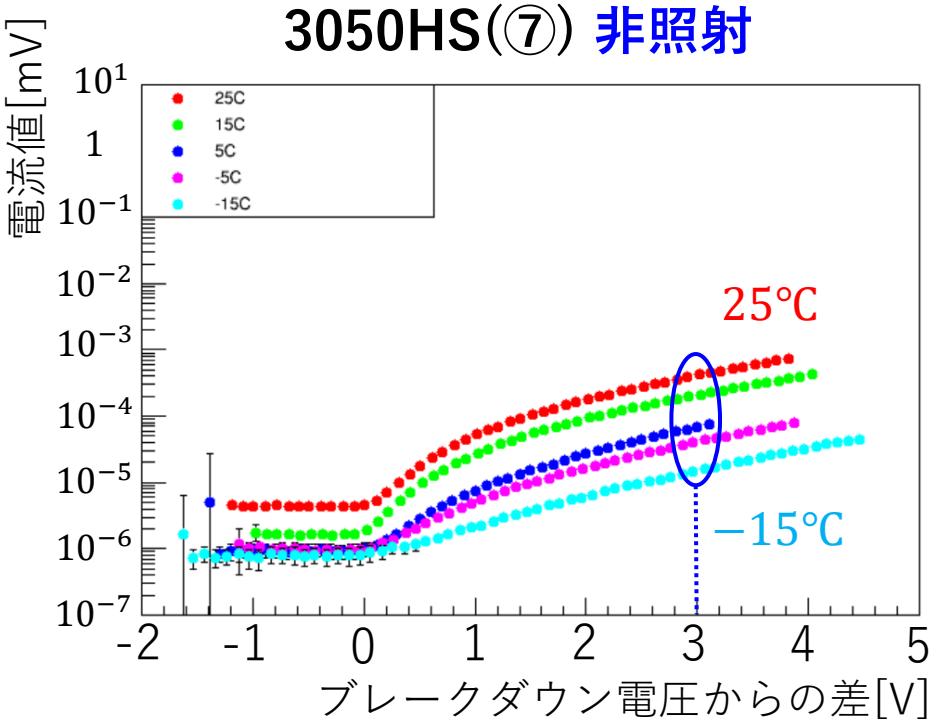
・ブレークダウン電圧から、おおよその動作電圧の見積もりが可能
(動作電圧$V_{op} = V_{bd} + 3[V]$)

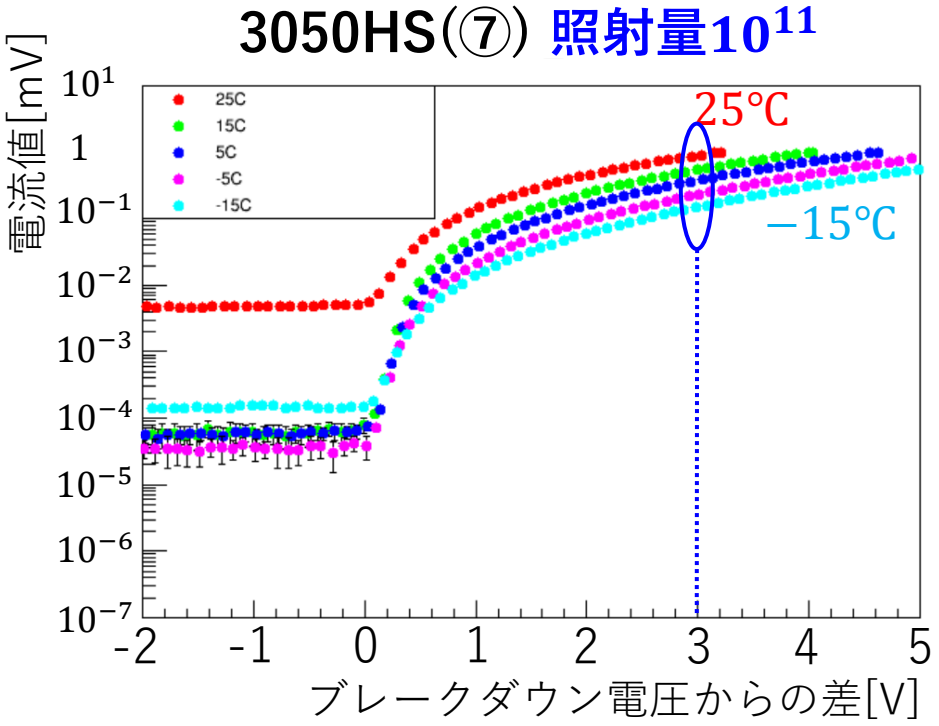
◎リーク電流から、おおよそのダークカウントレートの見積もりが可能

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う

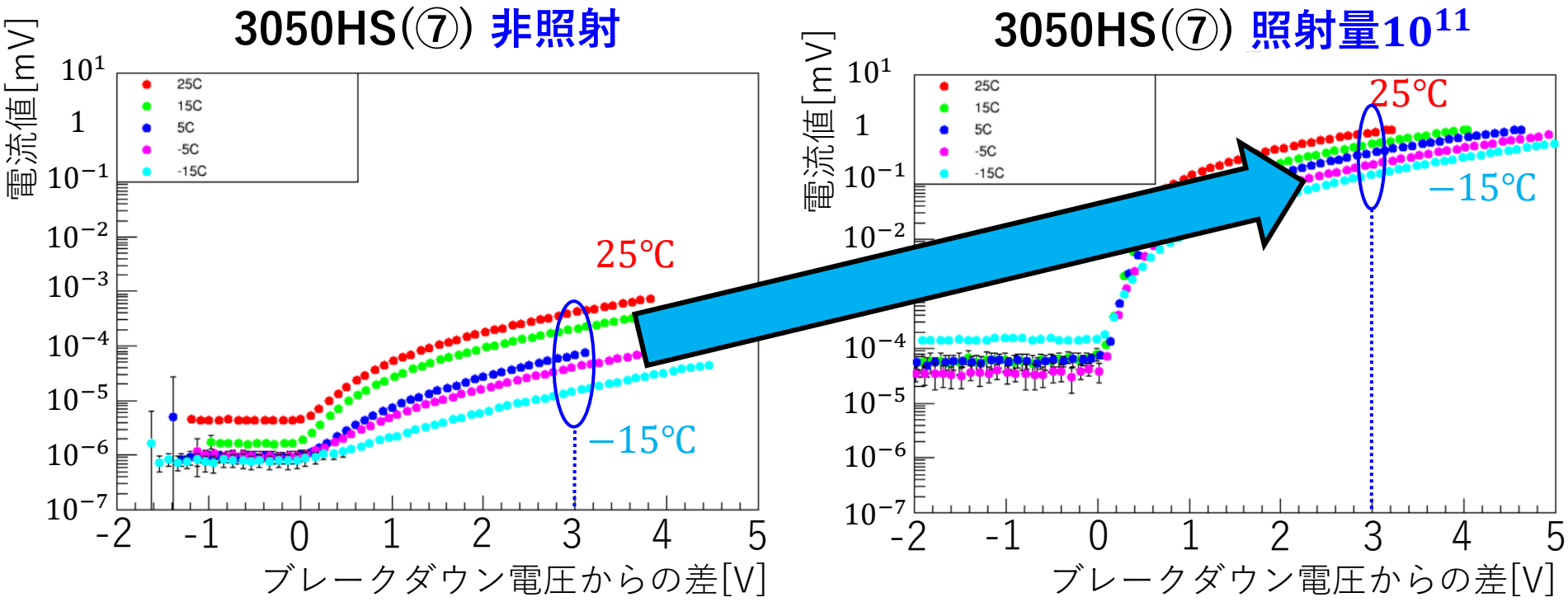
結果(I-V曲線)

動作電圧$V_{op}(V_{bd}+3[V])$におけるリーク電流を非照射と照射量10^{11}で比較





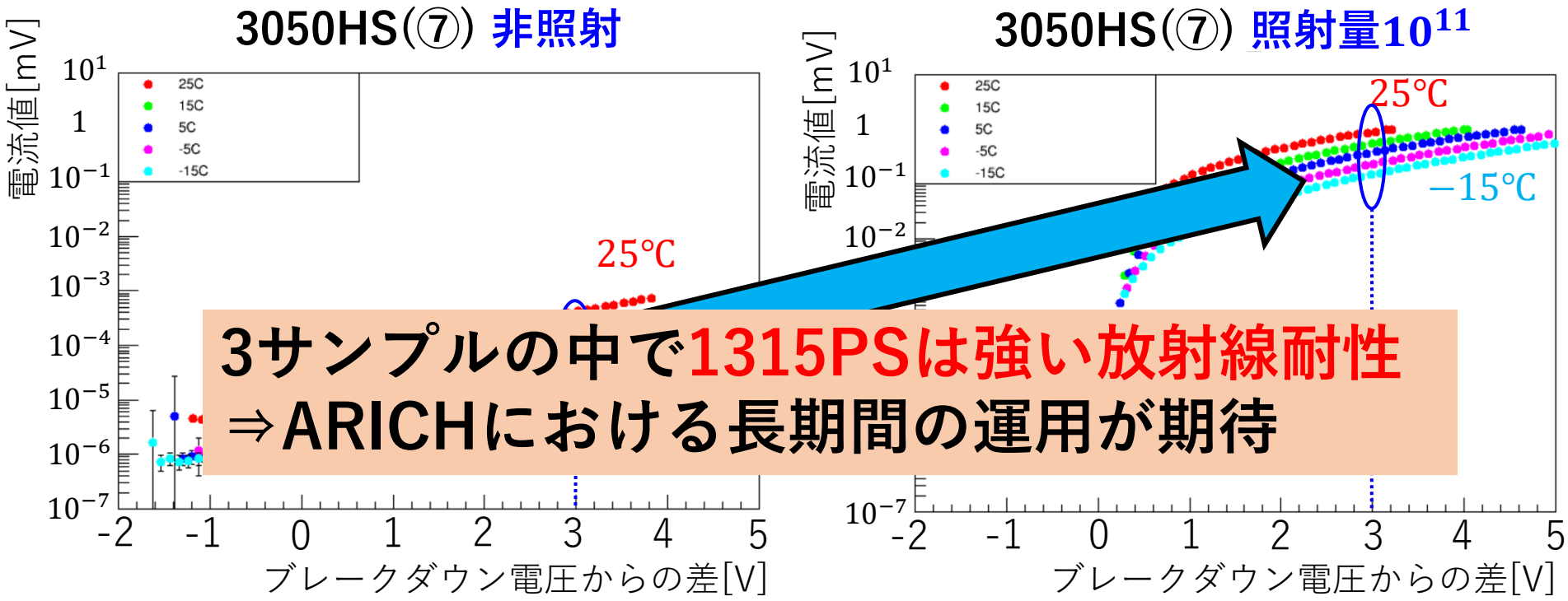
結果(I-V曲線)



3050HSの照射量10^{11}のリーク電流は非照射と比較しておよそ6600倍

同様に1315PSはおよそ2800倍、3075VEはおよそ5500倍に増大

結果(I-V曲線)



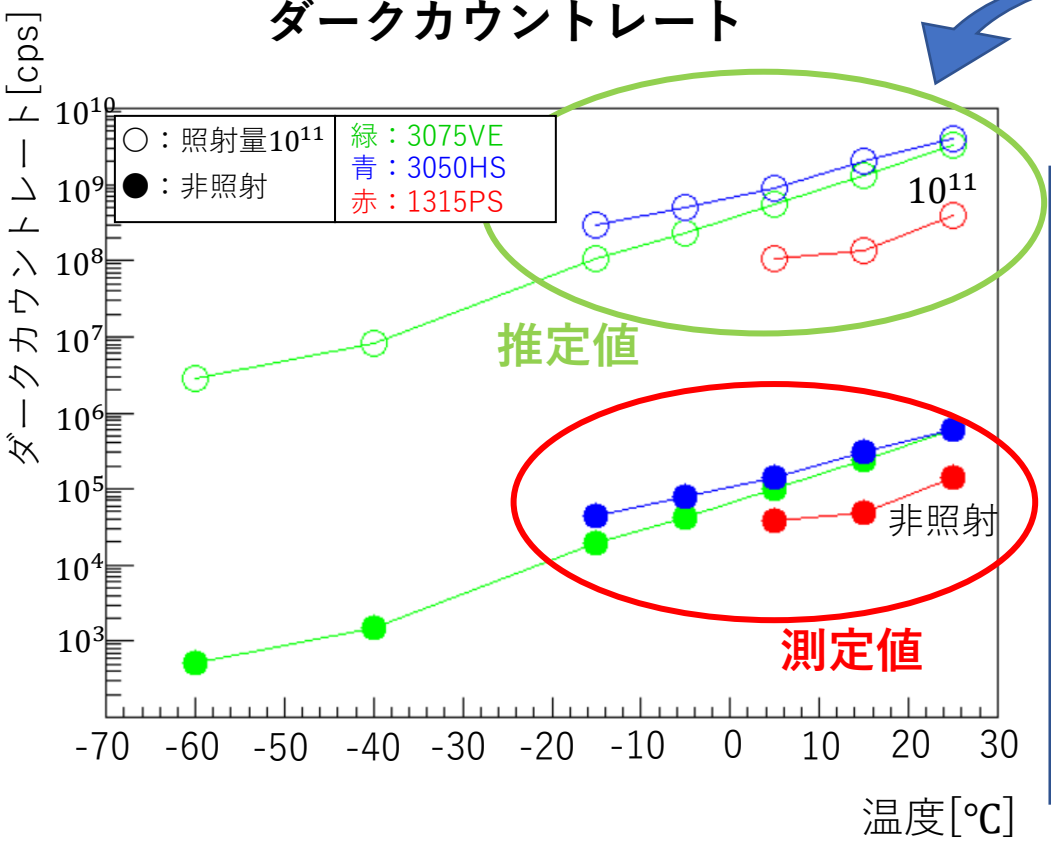
3サンプルの中で1315PSは強い放射線耐性
⇒ARICHにおける長期間の運用が期待

3050HSの照射量10^{11}のリーク電流は非照射と比較しておよそ6600倍

同様に1315PSはおよそ2800倍、3075VEはおよそ5500倍に増大

結果(I-V曲線,ダークカウントレート)

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

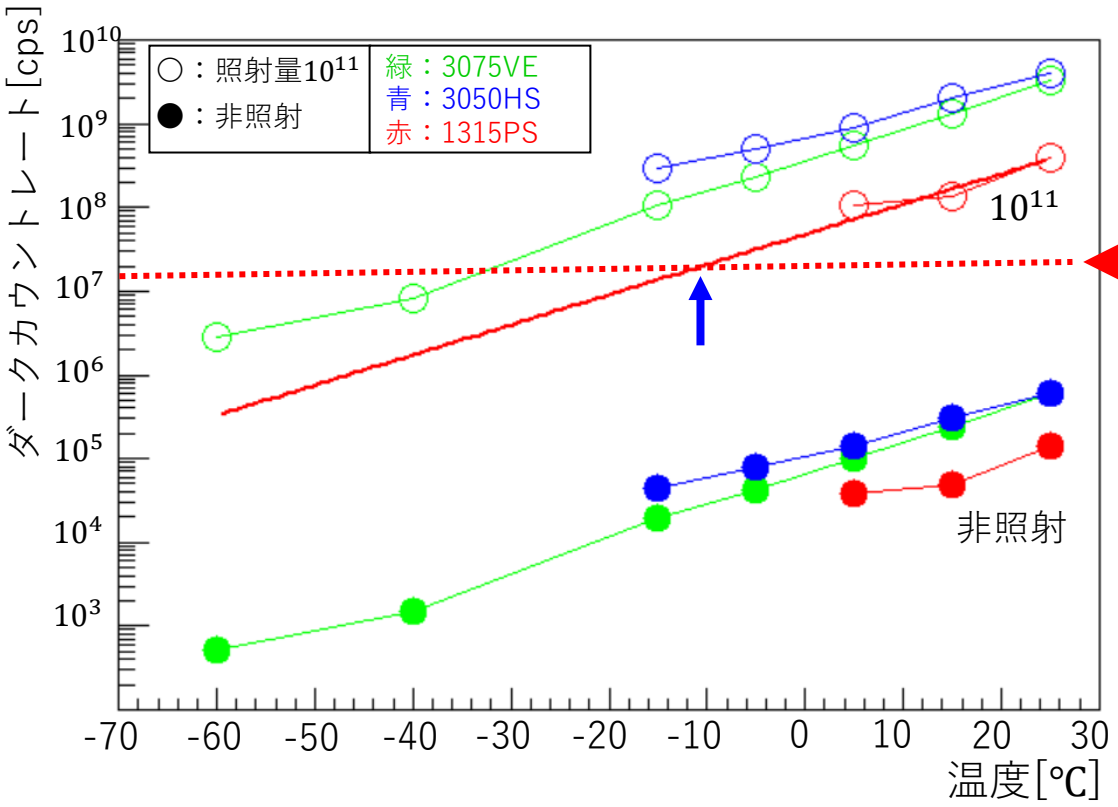


ダークカウントレートに適用

- 3075VE(②)において照射量10^{11}は非照射のリーク電流と比べ約5500倍
- 3050HS(⑦)において照射量10^{11}は非照射のリーク電流と比べ約6600倍
- 1315PS(⑥)において照射量10^{11}は非照射のリーク電流と比べ約2800倍

結果(I-V曲線,ダークカウントレート)

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)

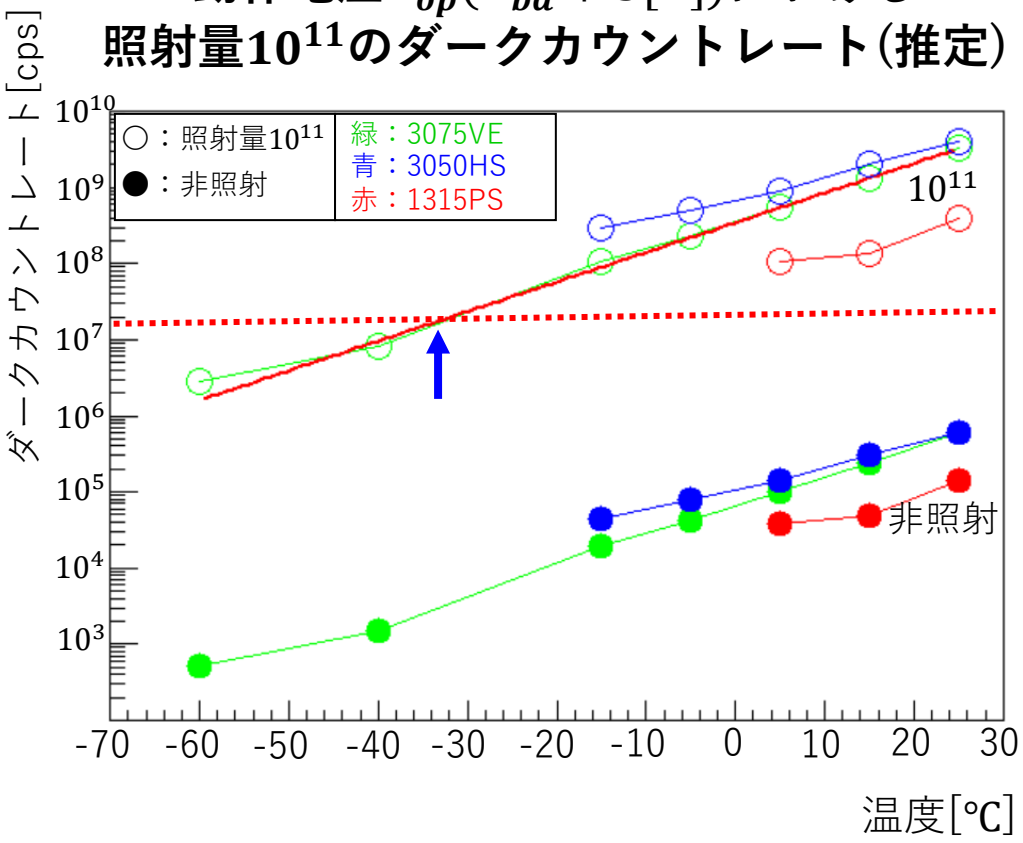
ダークカウントレート許容量
18[Mcps]

−12℃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(I-V曲線,ダークカウントレート)

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)

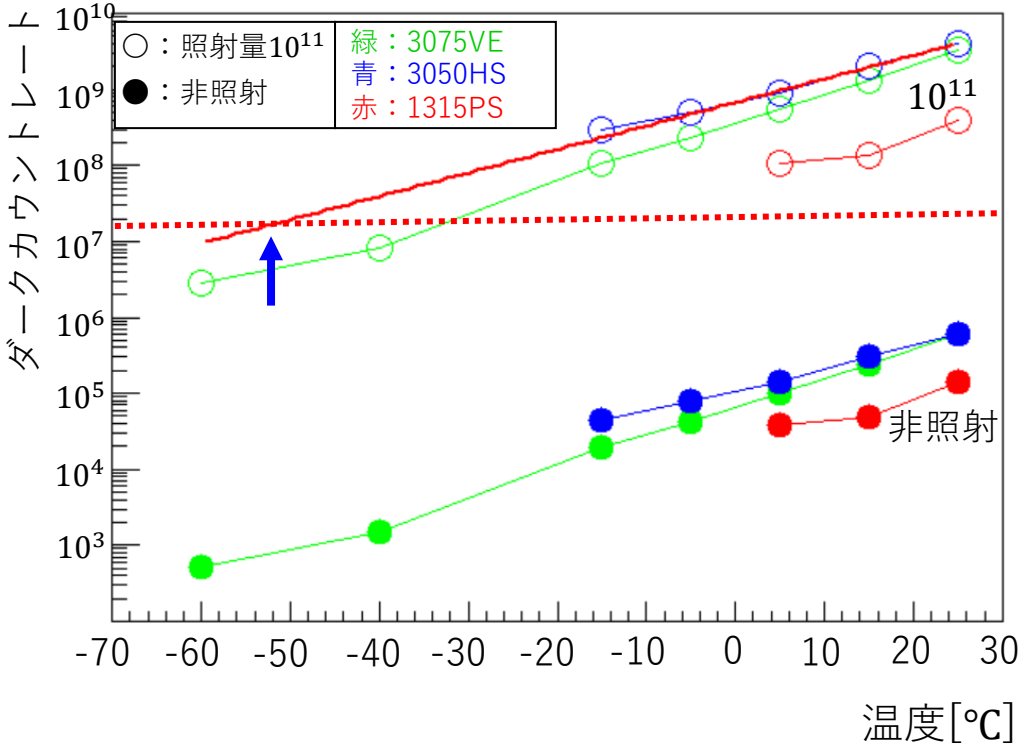
ダークカウントレート許容量
18[Mcps]

−33℃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(I-V曲線,ダークカウントレート)

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)

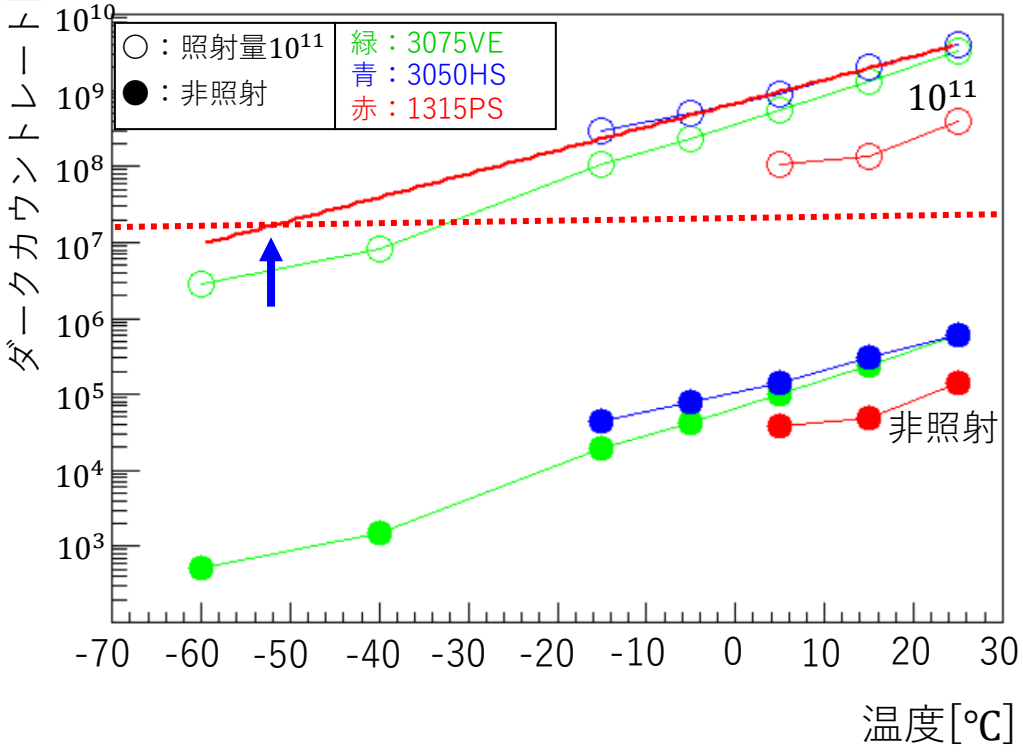
ダークカウントレート許容量
18[Mcps]

−51℃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(I-V曲線,ダークカウントレート)

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:−12℃の冷却が必要

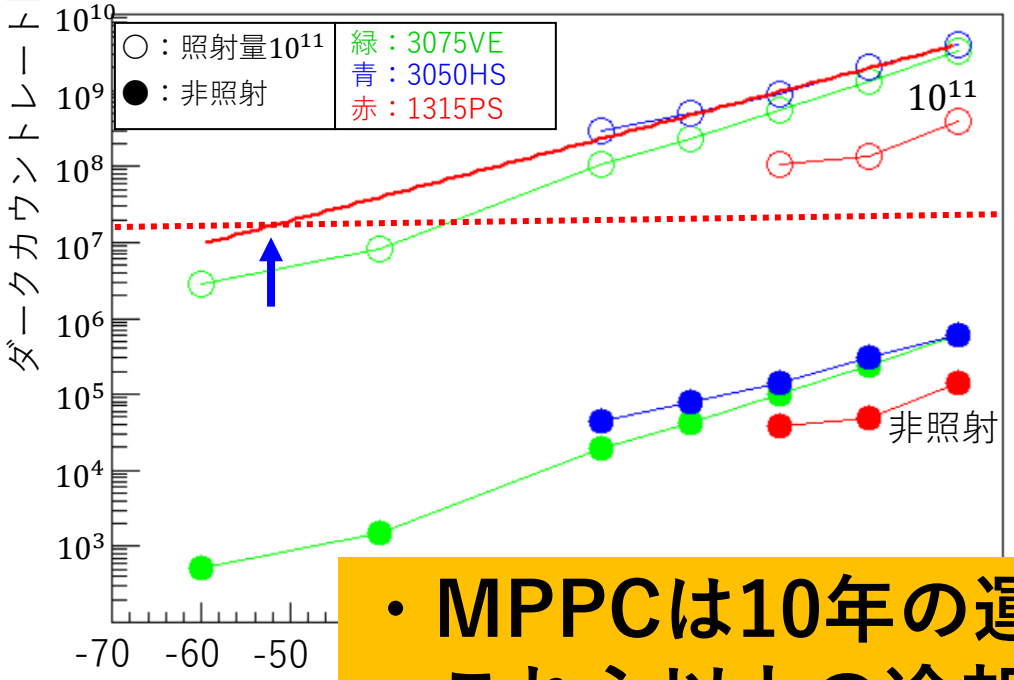
3075VE:−33℃の冷却が必要

3050HS:−51℃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(I-V曲線,ダークカウントレート)

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:-12℃の冷却が必要

3075VE:-33℃の冷却が必要

3050HS:-51℃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

⇒アニーリングの効果についての研究

まとめ

・ARICHの新たな光検出器の候補として、MPPCを検討中

・ダークカウントレートは中性子照射に対し増大
温度低下に対し指数関数的に減少

・1315PSは3075VE,3050HSと比較して
- ダークカウントレートが抑制的
- 強い放射線耐性

1年間の運用において−12℃でARICHが正常に動作

・10年間の運用においてはかなりの冷却が必要

⇒今後、アニーリングの効果についての研究

~Back up~

Belle II実験について

7GeVの電子と4GeVの陽電子を衝突させ、B中間子を生成し
その崩壊過程を観測することにより新しい物理を発見することを目標

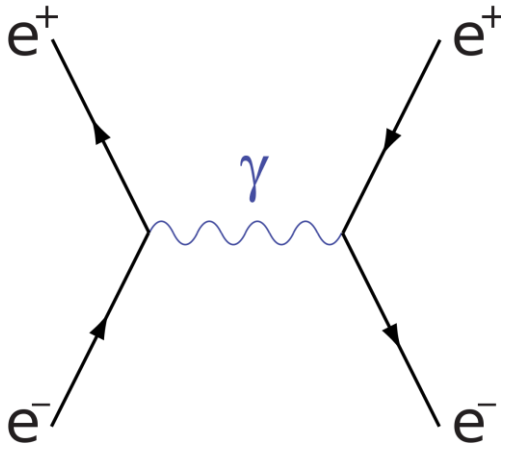
特殊相対論より、重心系エネルギーは$\sqrt{4E_1E_2}$となるので
電子と陽電子のエネルギーをそれぞれE_1, E_2とすると$10.58GeV$
$(E_1 = 7[GeV], E_2 = 4[GeV])$

LHCのエネルギーはおよそ$10TeV$(陽子)
Belle IIのエネルギーは$10.58GeV$(電子、陽電子)

LHCのルミノシティはおよそ$2 \times 10^{34} cm^{-2} s^{-1}$
Belle IIのルミノシティはおよそ$2.4 \times 10^{34} cm^{-2} s^{-1}$(2020年6月)

中性子耐性

Bhabha散乱により生じたγ線が検出外器の構造体に当たり、中性子がはね返ってくるので光検出器には中性子耐性が必要



左図：Bhabha散乱のファインマンダイアグラム

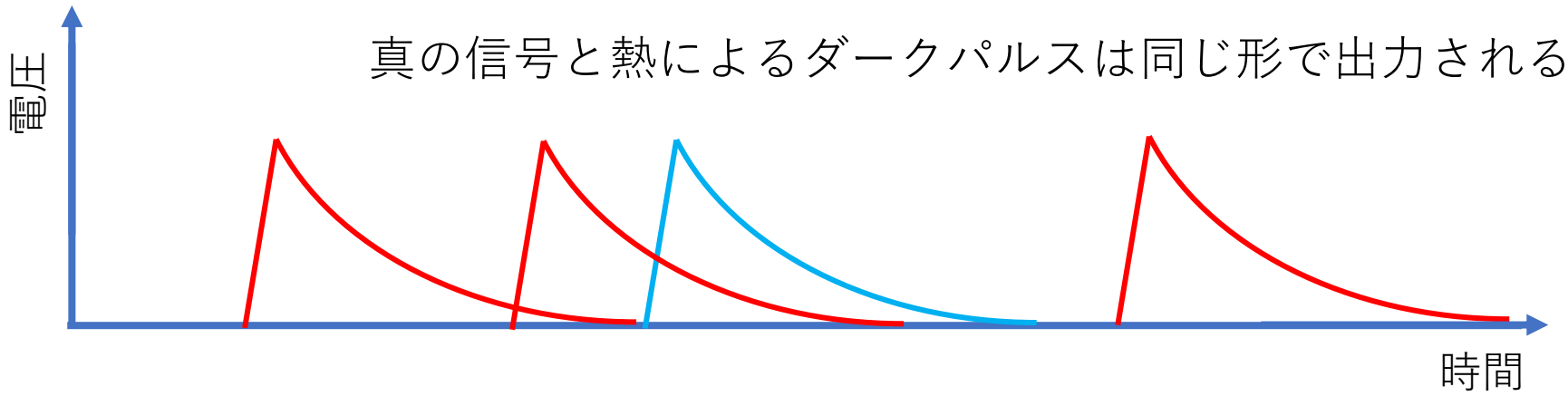
Belle II実験では、年間およそ$10^{11}/cm^2$の中性子が照射すると推定

１０年間の運用においては10^{12}個$/cm^2$の耐性が必要

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

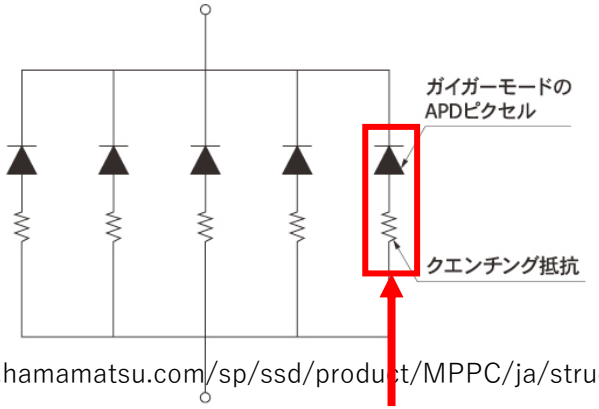
⇒２つの信号を見分けるのは困難

MPPC(Multi Pixel Photon Counter)

$Q = C(V - V_{bd})$ （$V > V_{bd}$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

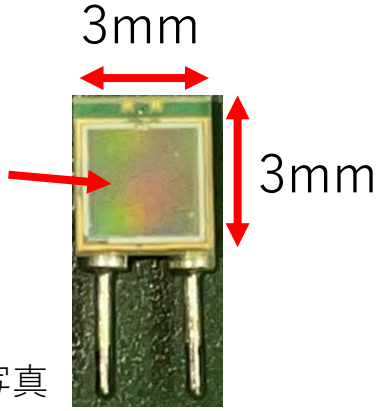


https://www.hamamatsu.com/sp/ssd/product/MPPC/ja/structure_ja.jpg

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

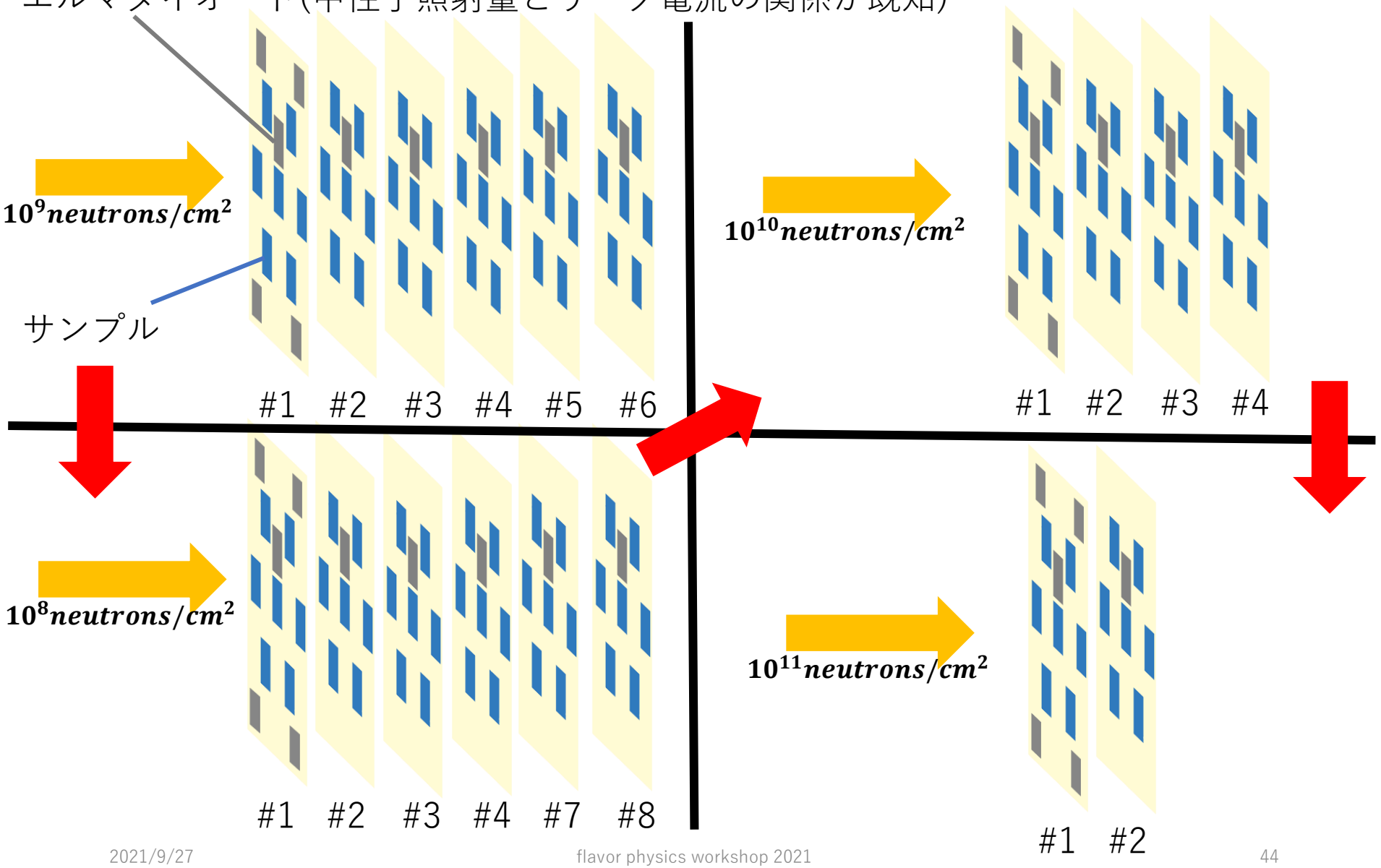


MPPC(1CH)の写真

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)

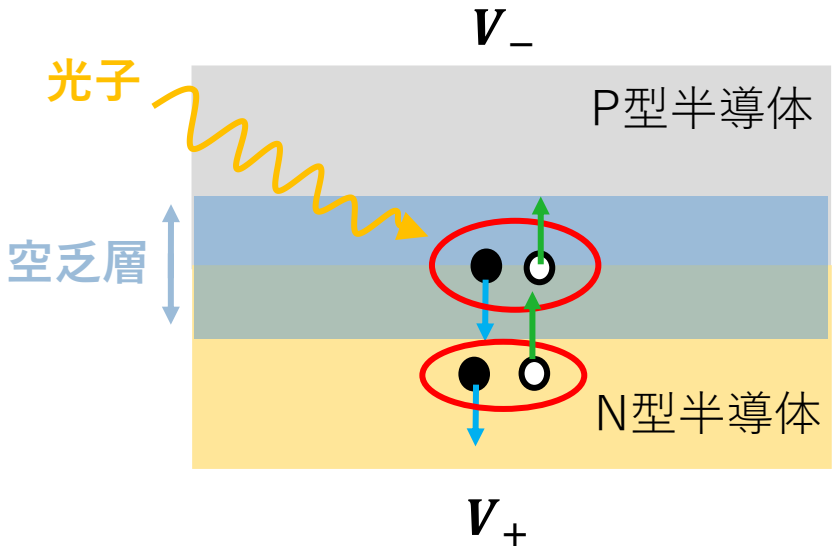


APD

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

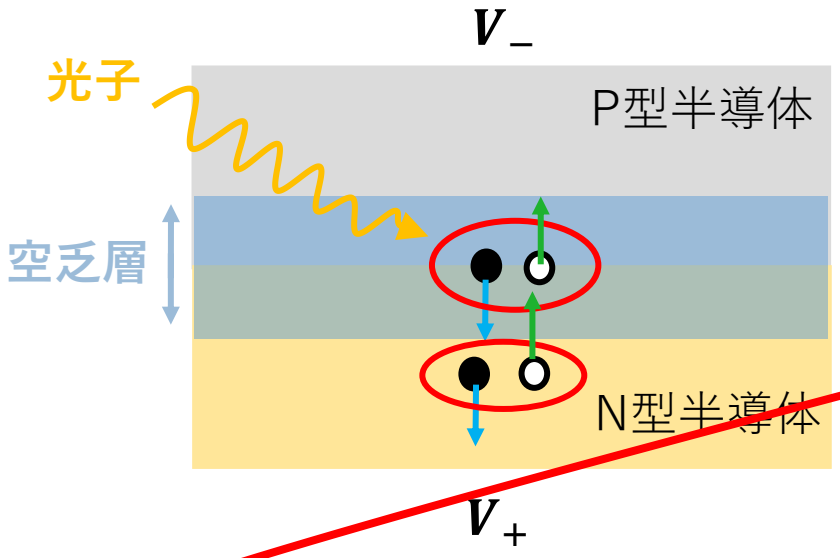
繰り返すことにより信号を増幅

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

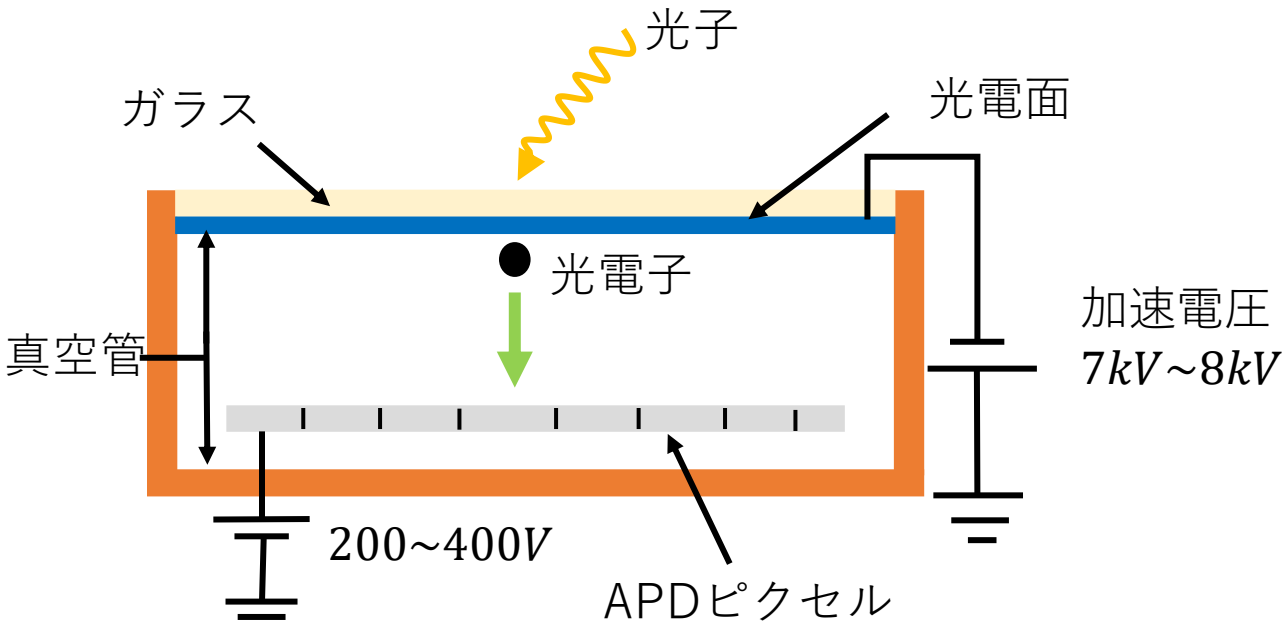
2.電場により電子と正孔がそれぞれ
加速

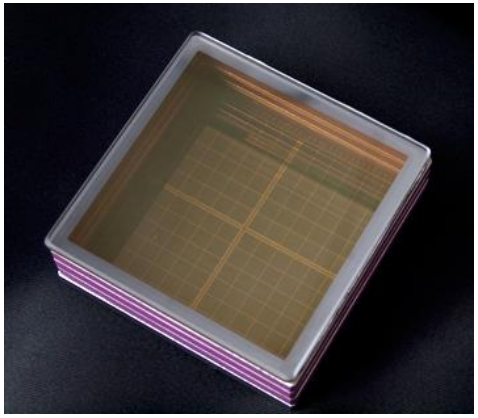
3.ある一定以上のエネルギーEで
結晶格子に衝突

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

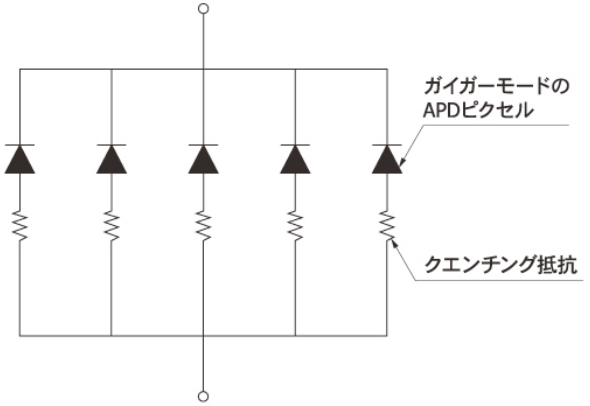


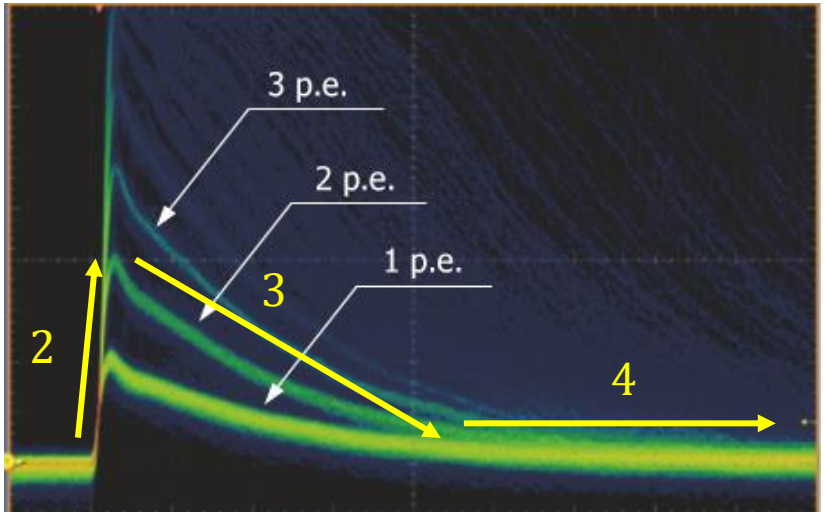


加速による増幅(約1700倍)とアバランシェ増幅(約40倍)により合計で10^4~10^5倍に増幅される

MPPCの動作原理

ガイガーモード(V>Vbd)のとき動作





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∞となる)を起こし電荷放出

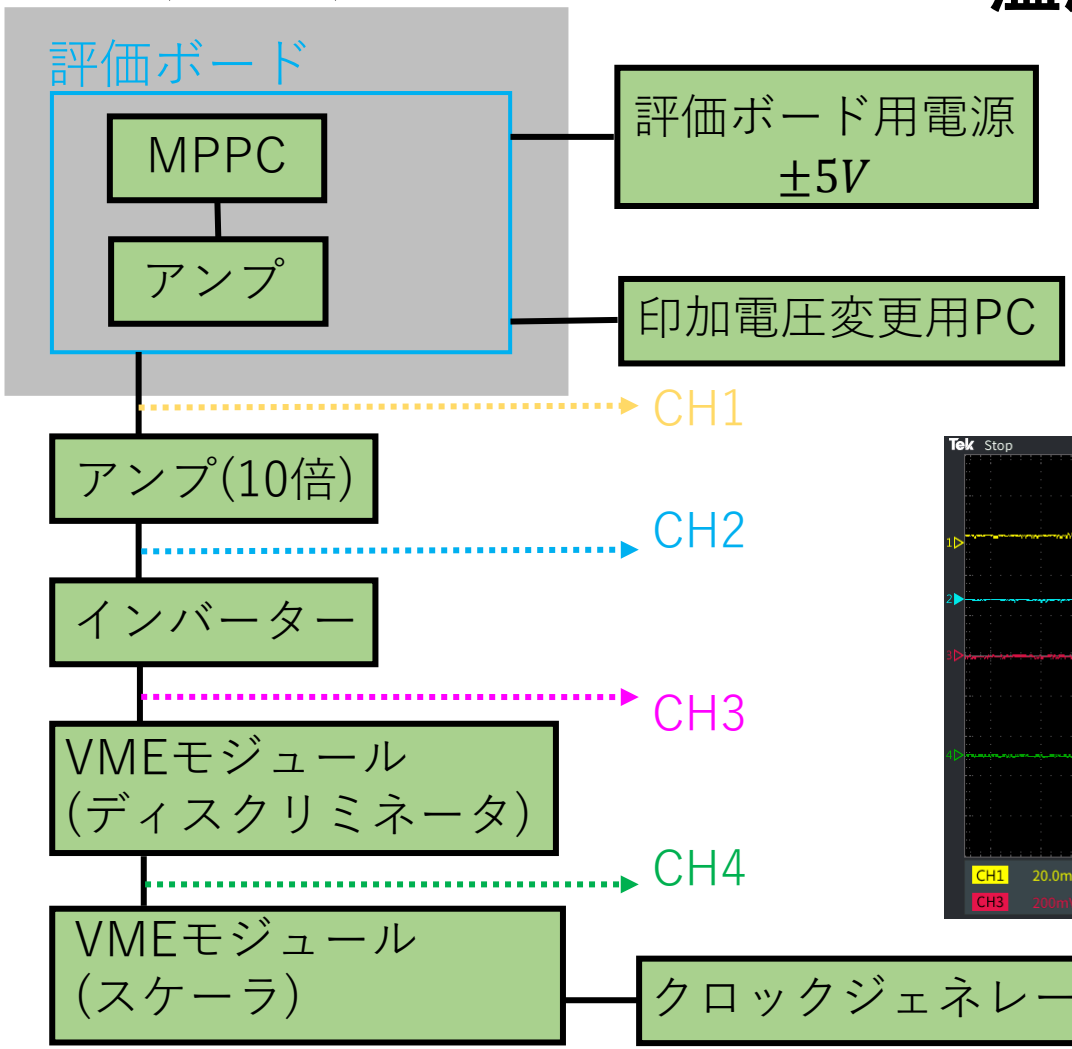
3.クエンチング抵抗により電圧降下

4.放電が止まり再充電される→1へ

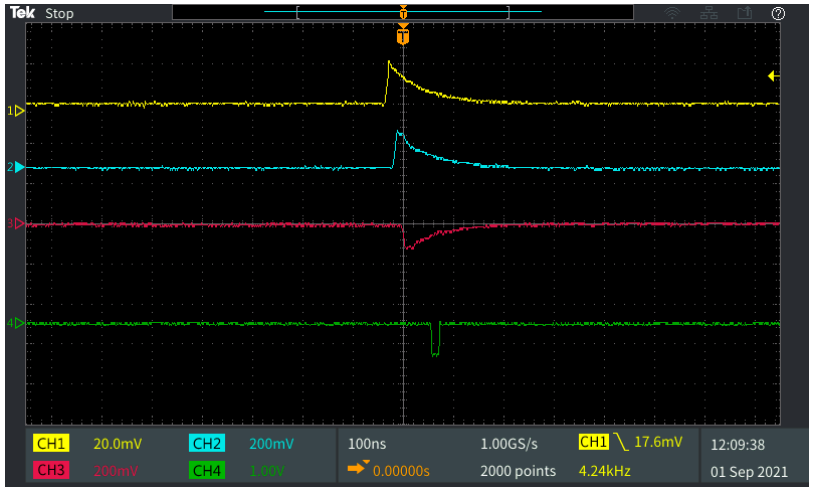
セットアップ(ダークカウントレート)

恒温槽(**暗状態**)

温度を変えながら測定



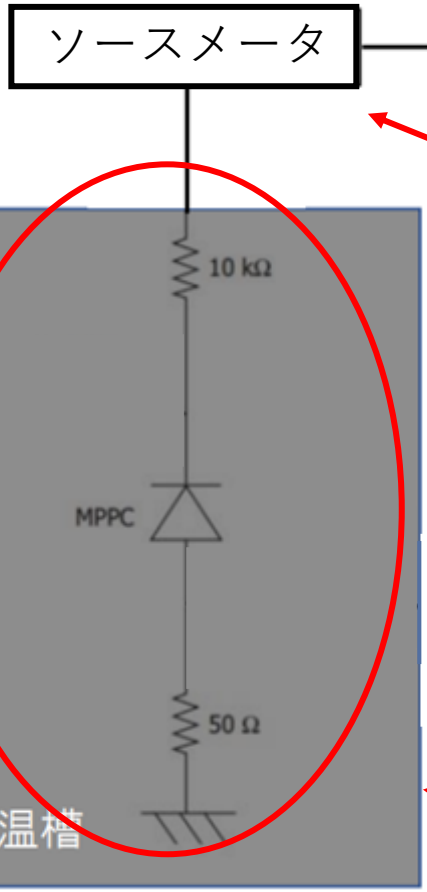
3050HS(⑦)



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)

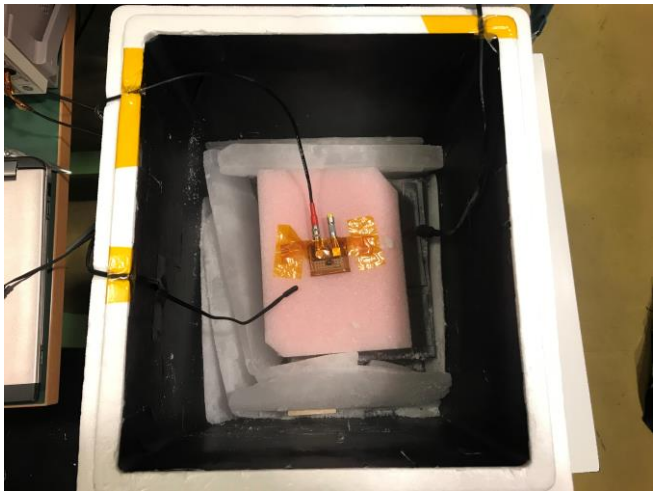
−15℃以下における測定

・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、台の上にの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

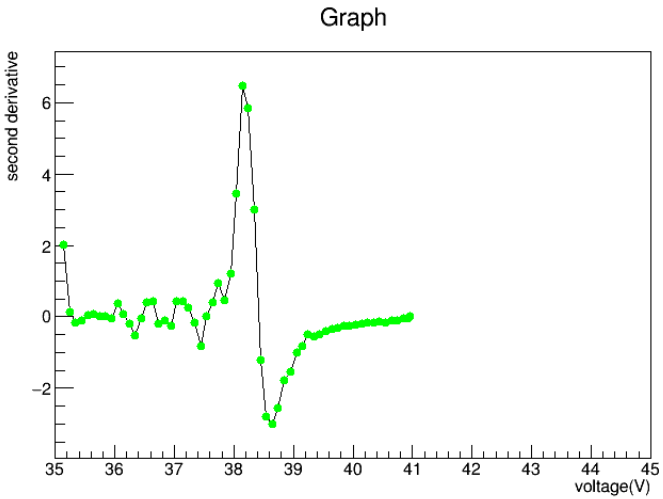


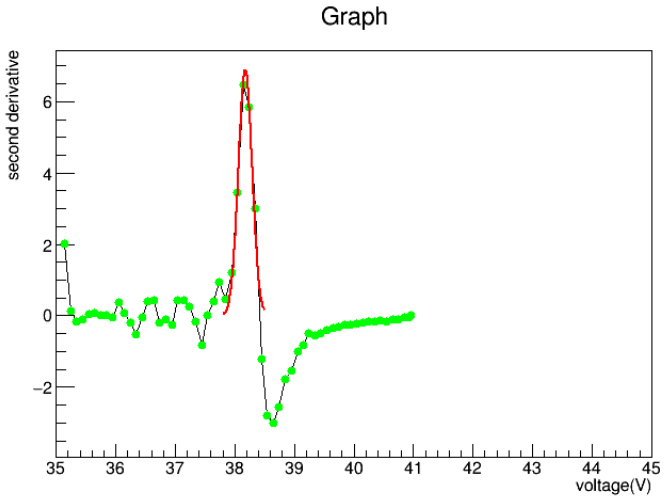
測定の概要

ブレークダウン電圧をどのように導出するか？

⇒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

ガウス関数でFit





Mean値をブレークダウン電圧とした

測定の概要(ダークカウントレート)

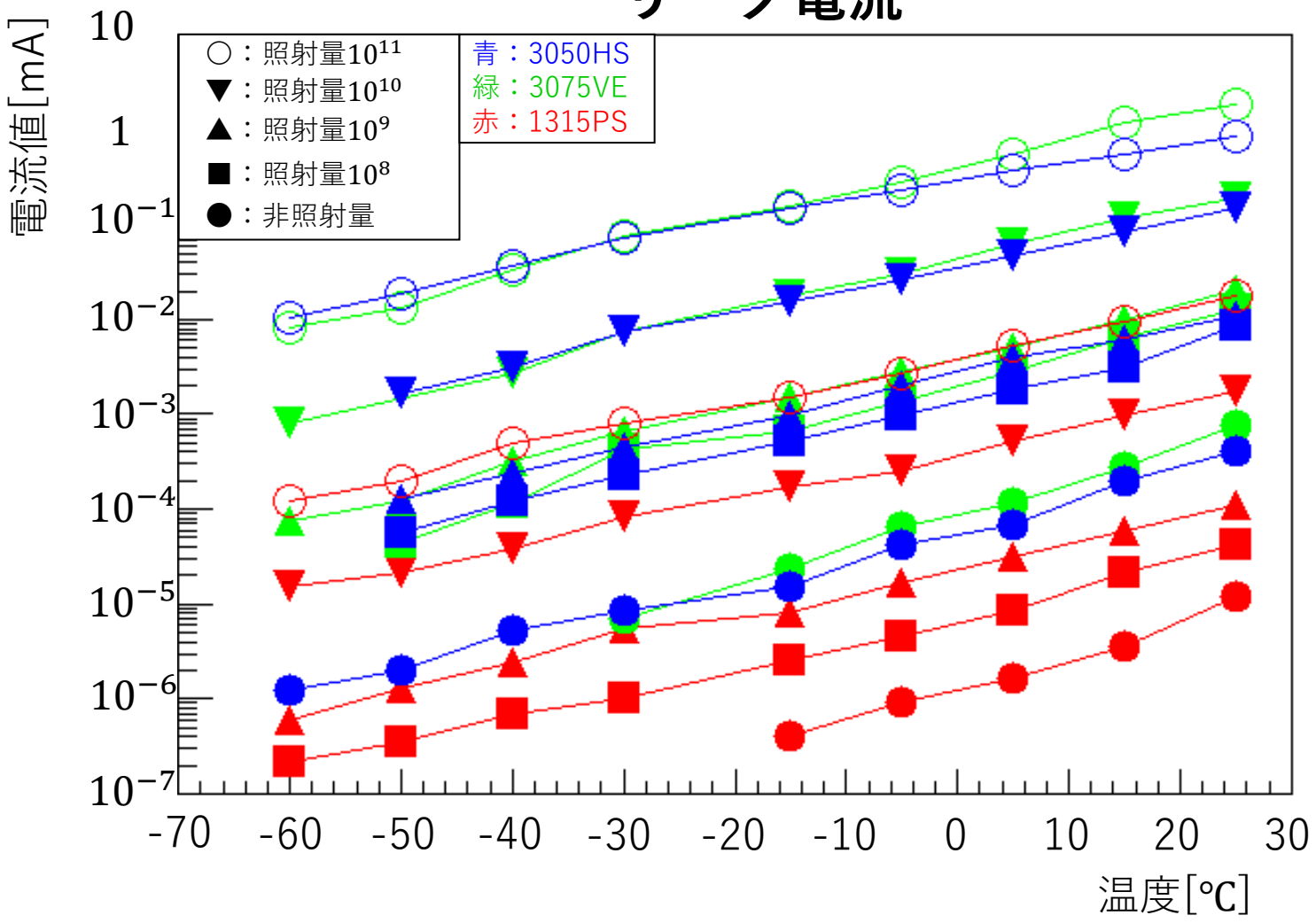
1.VMEモジュールを用いてスレッショルドスキャンを測定

2.スレッショルドスキャンから$h_{0.5p.e.}$を導出

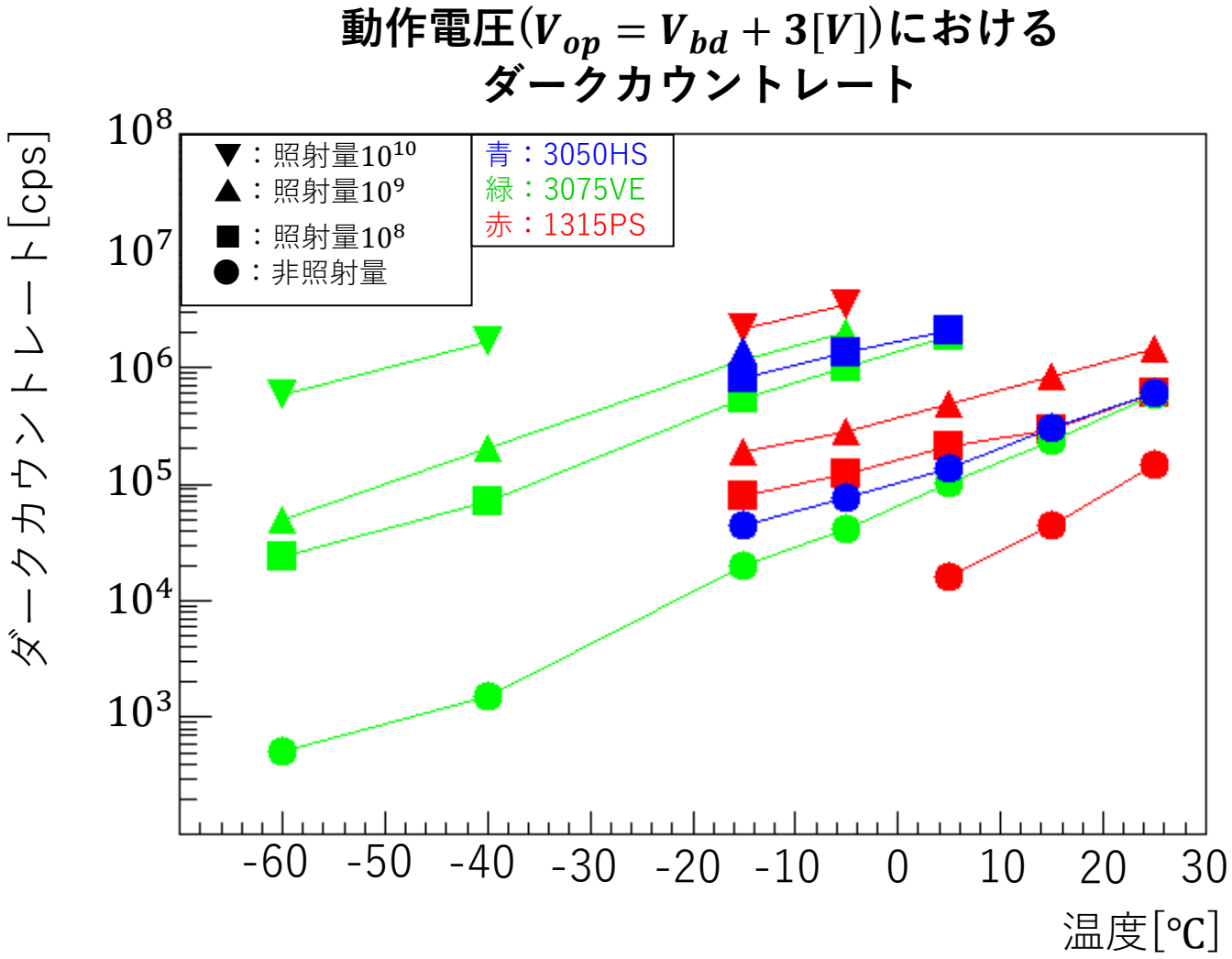
3.VMEモジュールの仕様によりシグナルのとりこぼしがあるため閾値電圧を$h_{0.5p.e.}$に設定しディスクリミネータでカウントを測定

結果(I-V曲線)

動作電圧$V_{op}(=V_{bd}+3[V])$における リーク電流



結果(ダークカウントレート)



開口率を加味した中性子被曝量の比較

開口率(ピクセル領域における有感領域の割合)の低さや薄さから放射線耐性が高いと予想

	開口率(%)	面積(mm^2)	検出可能面積(mm^2)
3075VE	82	3.0×3.0	7.38
1315PS	49	1.3×1.3	0.821
3050HS	74	3.0×3.0	6.66

(検出可能面積=開口率×面積)で概算

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

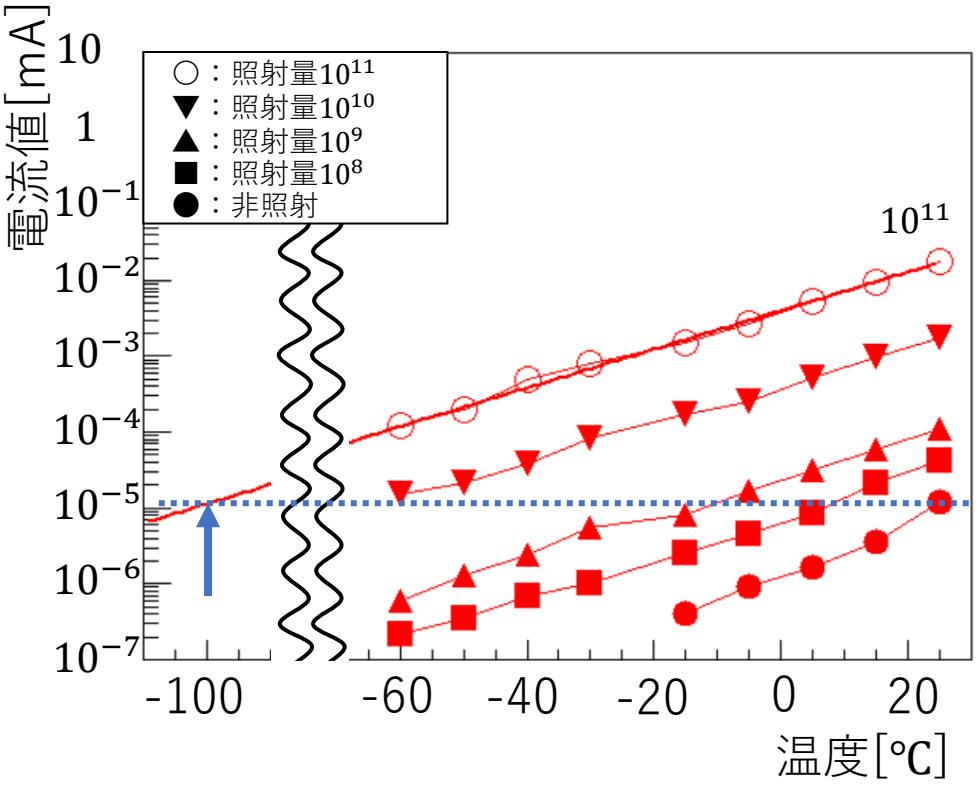
各サンプルに予想される年間中性子照射量

- 3075VE：$7.38 \times 10^9 neutrons$
- 1315PS：$8.21 \times 10^8 neutrons$
- 3050HS：$6.66 \times 10^9 neutrons$

1CHの被曝量は1315PSが1桁近く少ない

結果(I-V曲線) <照射量、温度比較>

動作電圧における1315PS(⑥)のリーク電流



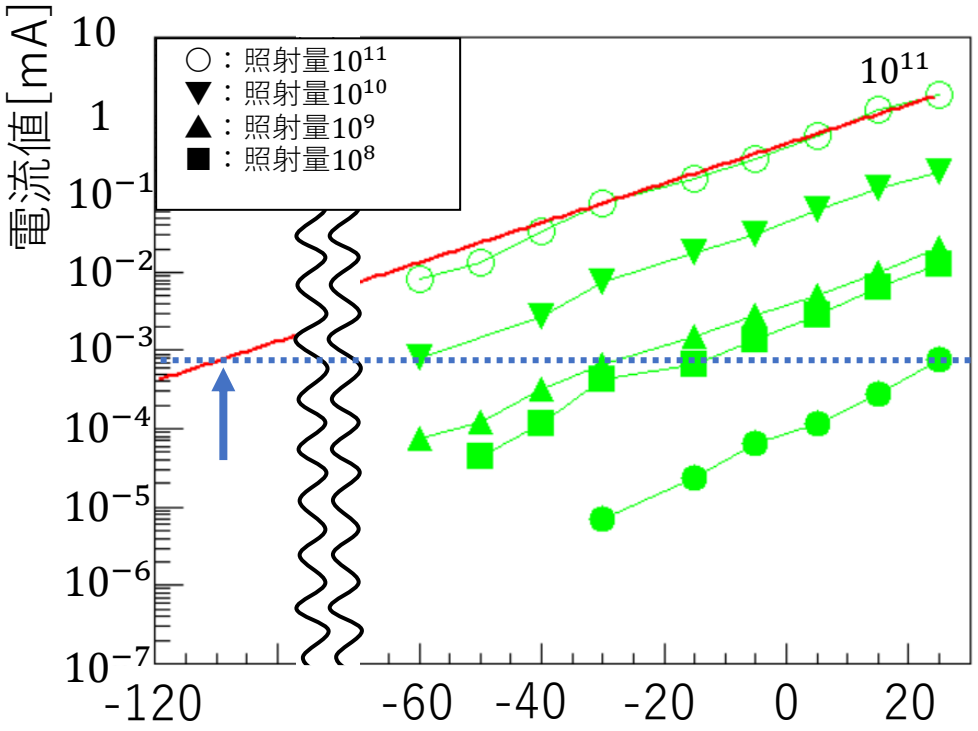
照射量10^{11}をフィット

フィット結果の外挿から
照射量10^{11}を非照射、25℃における
リーク電流まで抑制するためには
– 95℃まで冷却が必要

同様に、3075VE(②)においては–109℃
3050HS(⑦)においては–148℃まで冷却
が必要

結果(I-V曲線) <照射量、温度比較>

動作電圧における3075VE(②)のリーク電流



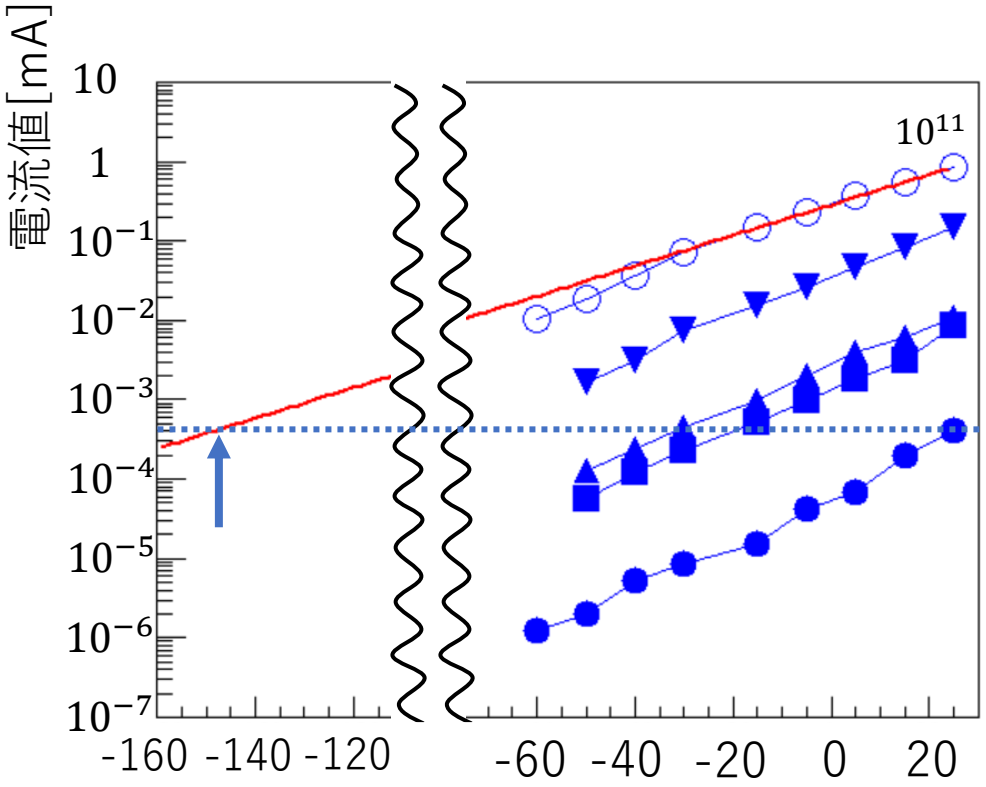
照射量10^{11}をフィット

フィット結果の外挿から
照射量10^{11}を非照射、25℃における
リーク電流まで抑制するためには
−95℃まで冷却が必要

同様に、3075VE(②)においては−109℃
3050HS(⑦)においては−148℃まで冷却
が必要

結果(I-V曲線) <照射量、温度比較>

動作電圧における3050HS(⑦)のリーク電流



照射量10^{11}をフィット

フィット結果の外挿から
照射量10^{11}を非照射、25℃における
リーク電流まで抑制するためには
−95℃まで冷却が必要

同様に、3075VE(②)においては−109℃
3050HS(⑦)においては−148℃まで冷却
が必要

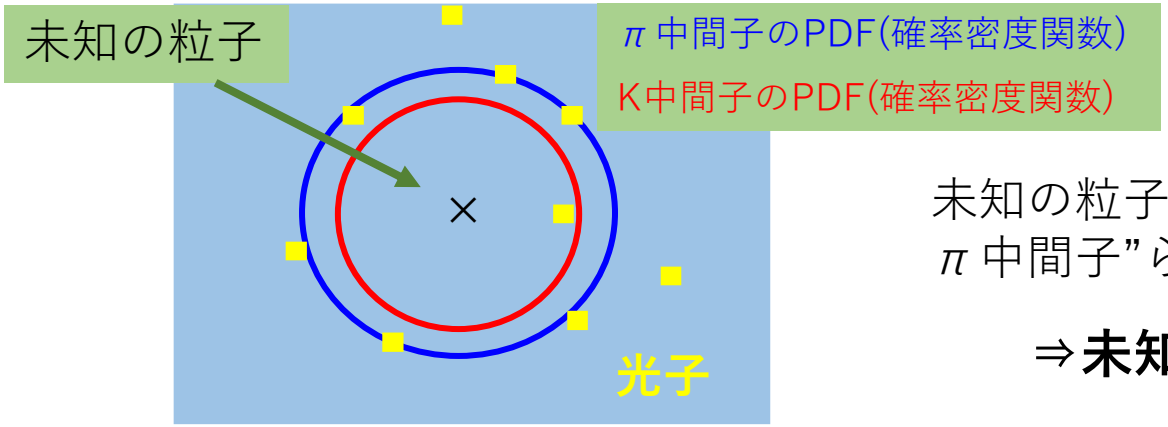
ARICHにおける粒子識別方法

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

⇒実際にはLog(Likelihood)を計算

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

(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
π 中間子”らしさ”が高い

⇒未知の粒子はπ中間子

参考：ARICHにおけるダークカウントレートの許容量

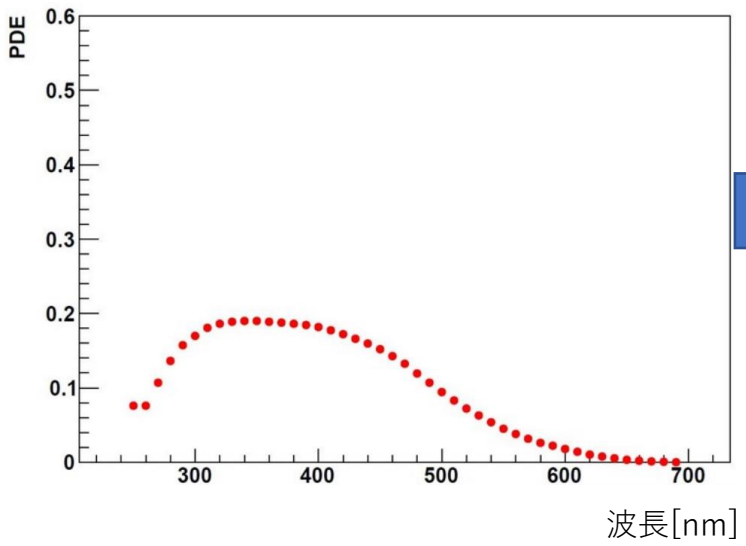
昨年度、東京大学を卒業された古井さんの修士論文から引用
(Belle II ARICH検出器のアップグレードに向けた光検出器MPPCの研究)

＜MCシミュレーションのセットアップ＞

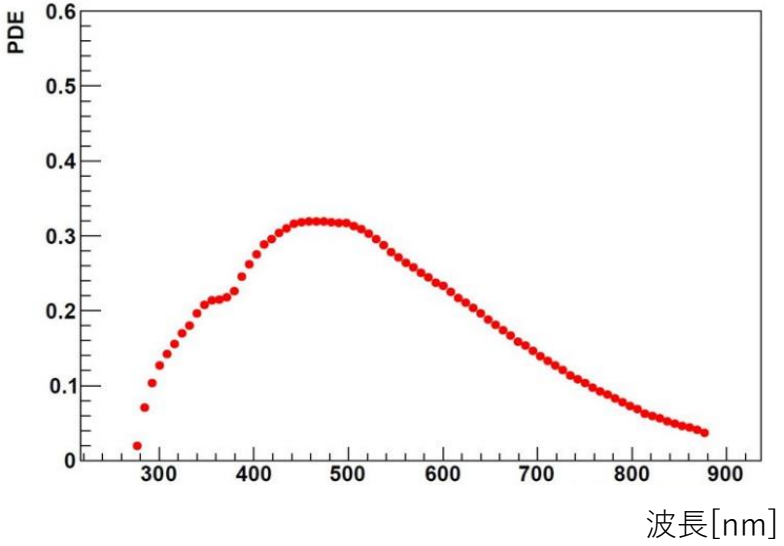
・PDE(光子検出効率)を変更

・time windowを1nsと仮定

HAPD

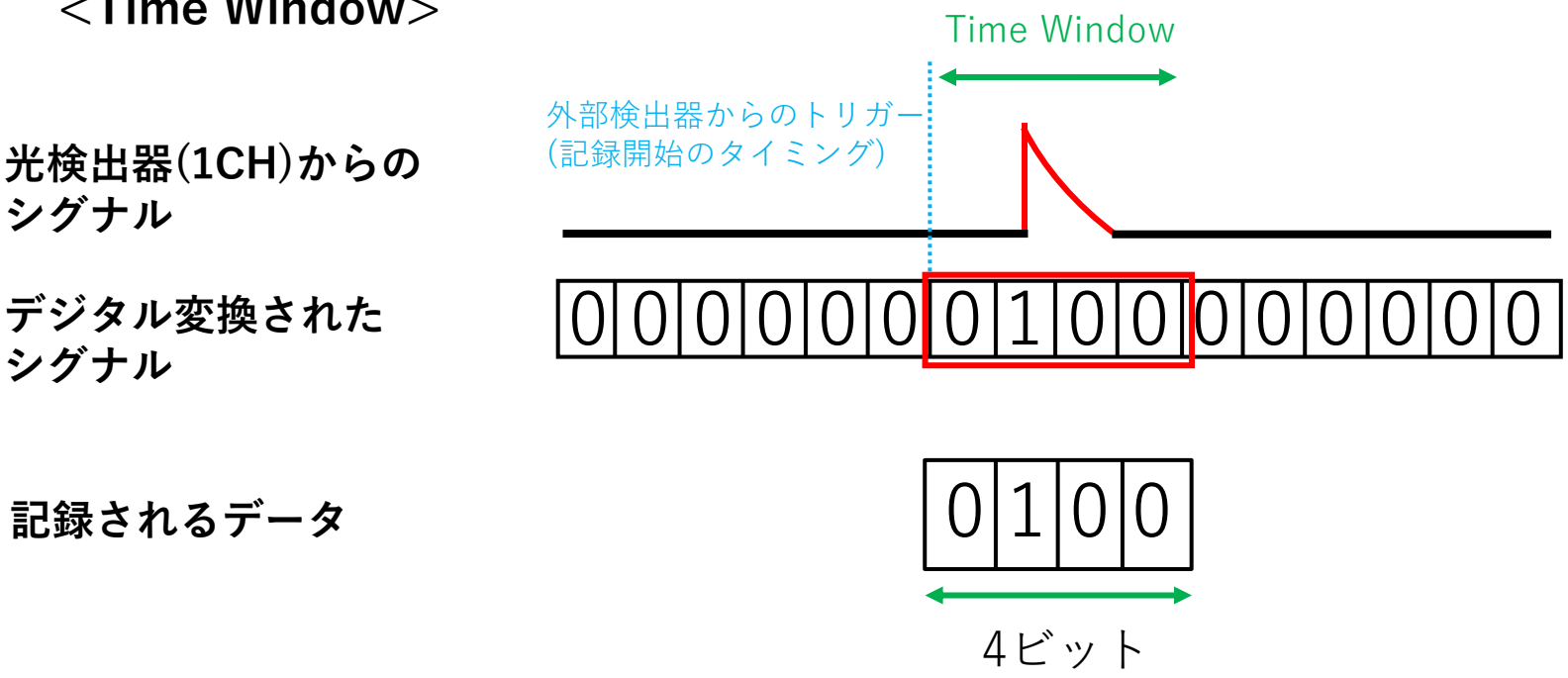


1315PS



参考：ARICHにおけるダークカウントレートの許容量

<Time Window>



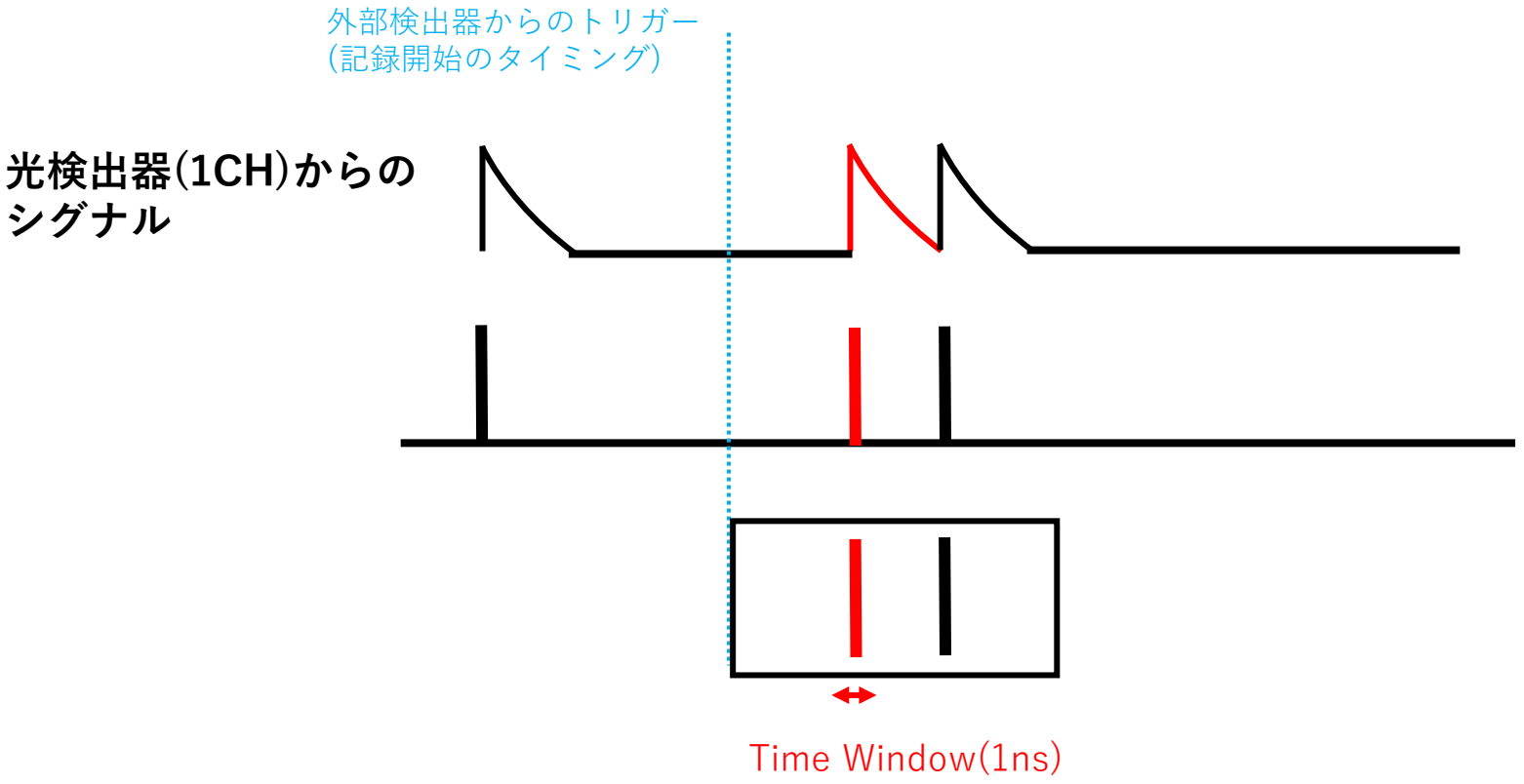
Time Windowを250ns→1nsとする

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

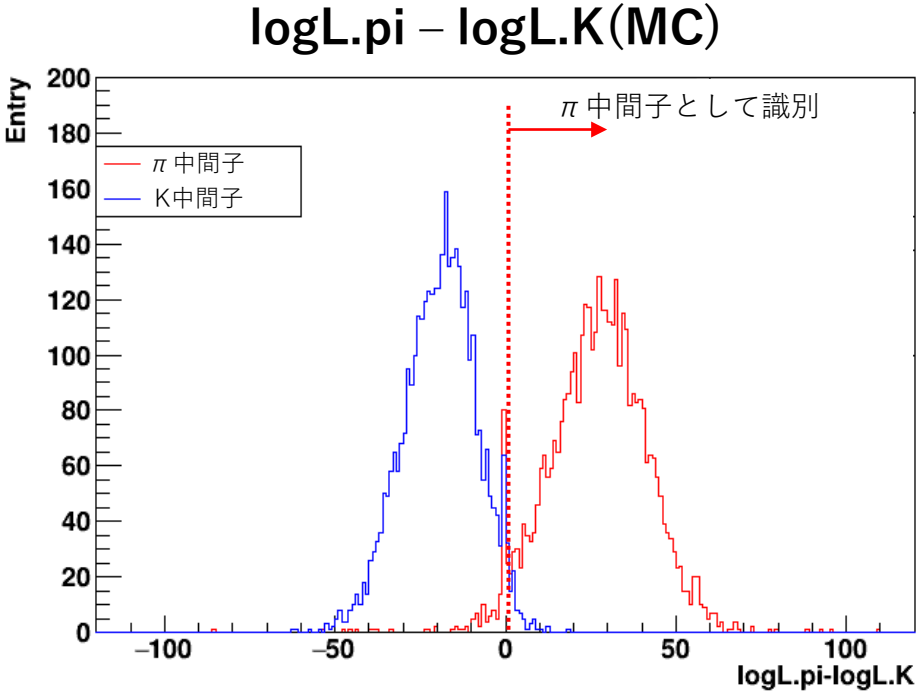
現行の手法でTime Windowを1nsにするのは不可能

⇒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



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

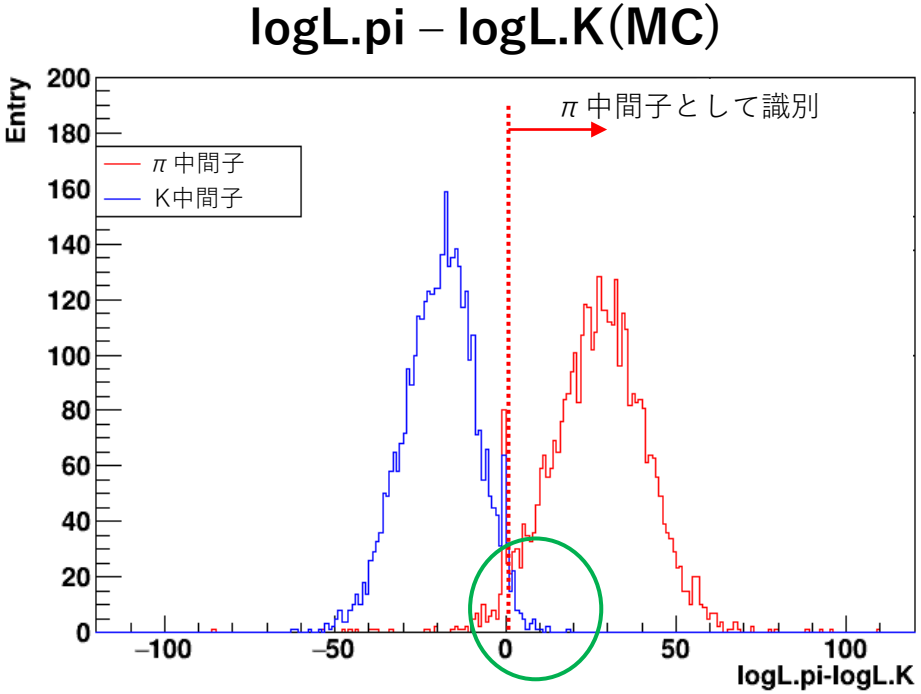
その領域内に含まれる、π中間子として識別されてしまったK中間子をfake Kと呼ぶ

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

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

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



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

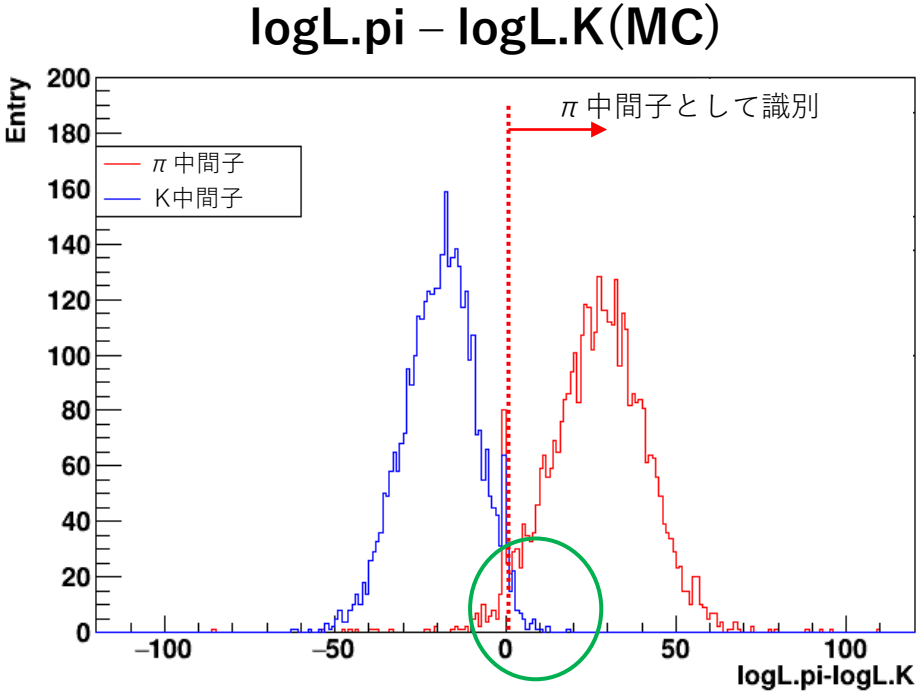
その領域内に含まれる、π中間子として識別されてしまったK中間子をfake Kと呼ぶ

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

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

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



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

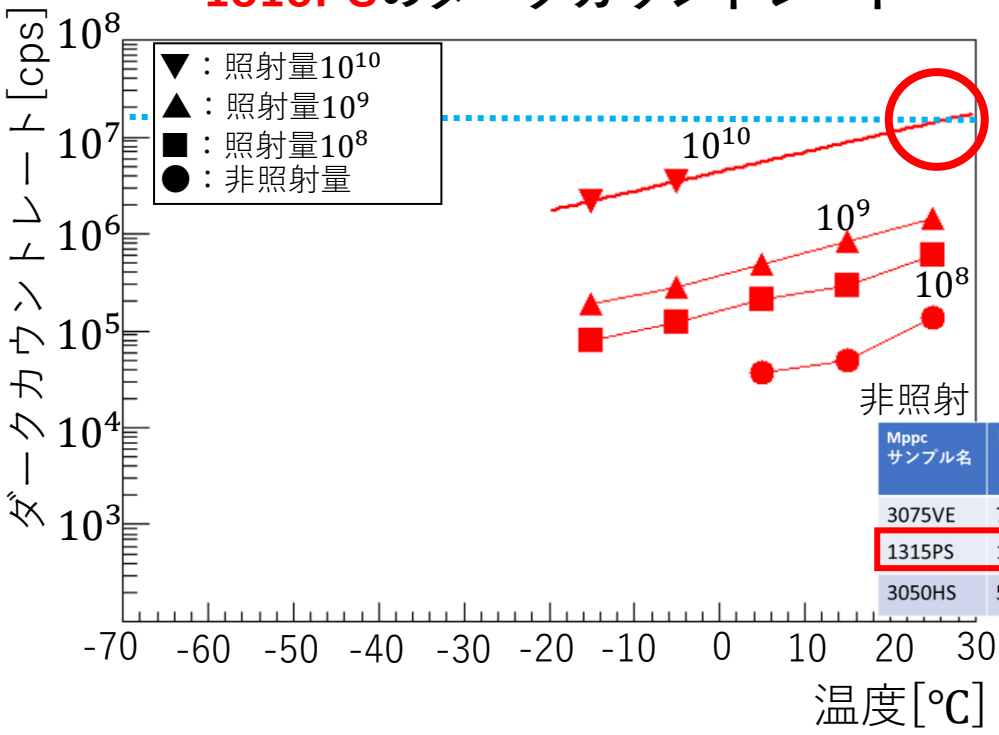
その領域内に含まれる、 π 中間子として識別されてしまったK中間子をfake Kと呼ぶ

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

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

結果(ダークカウントレート)　＜照射量、温度比較＞

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の許容量
18[Mcps]

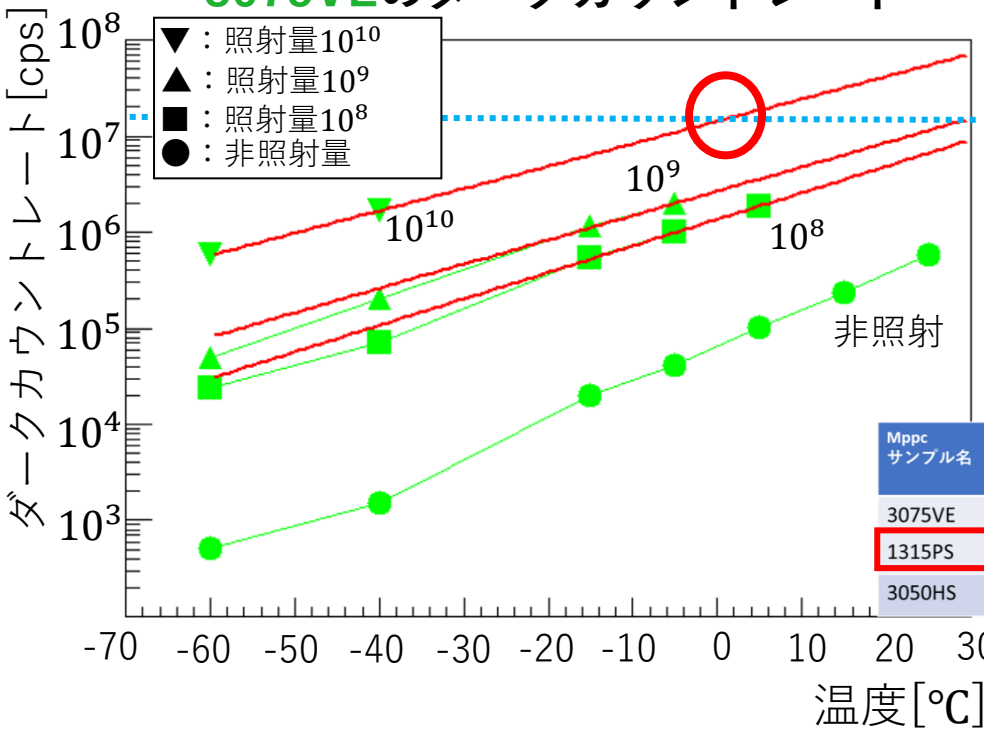
Mppc サンプル名	ピクセルピッチ(um)	増倍率 (×10⁵)	PDE(%)	大きさ (mm²)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

フィットから推定

照射量10^{10}まで、ARICHは正常に動作(常温)

結果(ダークカウントレート)　＜照射量、温度比較＞

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の許容量
18[Mcps]

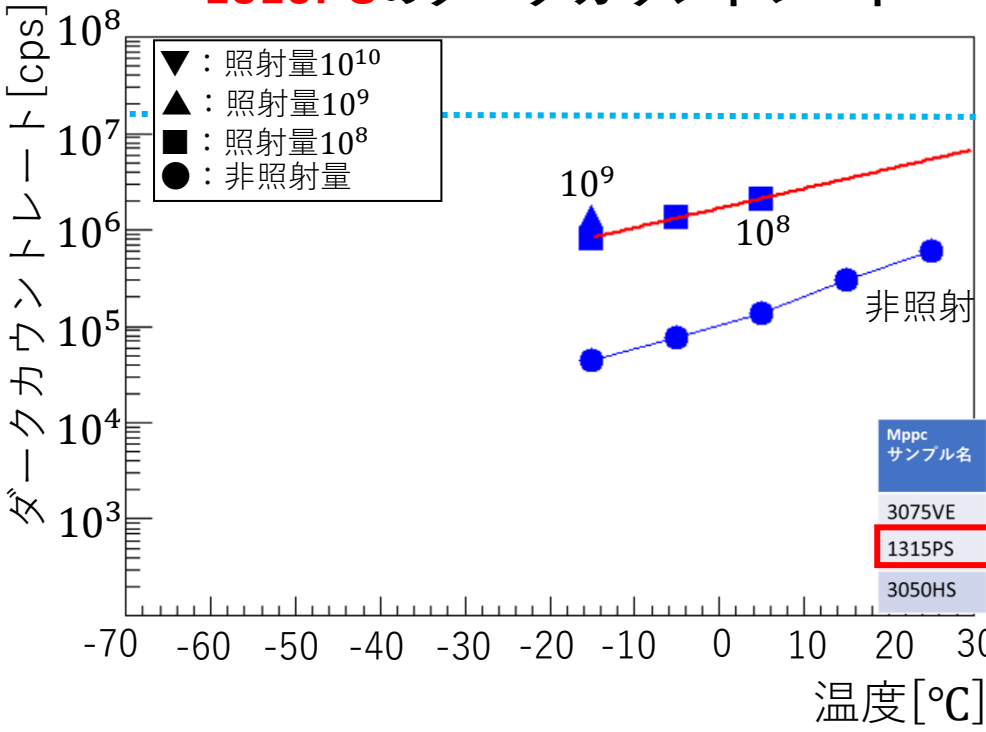
Mppc サンプル名	ピクセルピッチ(um)	増倍率 ($\times 10^5$)	PDE(%)	大きさ (mm^2)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

フィットから推定

0℃までの冷却により照射量10^{10}まで
ARICHは正常に動作

結果(ダークカウントレート)　＜照射量、温度比較＞

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の許容量
18[Mcps]

Mppc サンプル名	ピクセルピッチ(um)	増倍率 (×10⁵)	PDE(%)	大きさ (mm²)	ダークカウントレート(kcps)	静電容量 (pF)	開口率 (%)
3075VE	75	40	40	3×3	500	320	82
1315PS	15	3.6	32	1.3×1.3	120	100	49
3050HS	50	25	50	3×3	500	500	74

フィットから推定

照射量10^9まで、ARICHは正常に動作(常温)

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$\boldsymbol{I_D = I_s + I_j + I_b}$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)

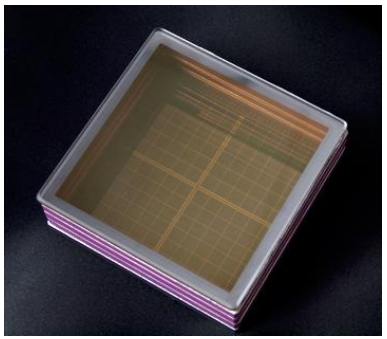
$\boldsymbol{I_b = qMN_{fired}}$
(q:1素子当たりの電荷量、M:増倍率、 N_{fired}:単位時間当たりにアバランシェ増倍が発生したピクセル数)

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

クロストークが低いとき、 $\boldsymbol{I_D \sim qMN_{0.5p.e.}}$

MPPCを$3.0 \times 3.0[mm^2]$おきに配置すること

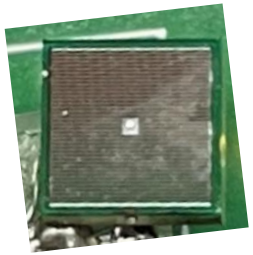
HAPD



$1CH$あたり$4.9 \times 4.9[mm^2]$

識別性能が向上すると予想

3075VE



3050HS

$1CH$あたり$3.0 \times 3.0[mm^2]$

1315PS

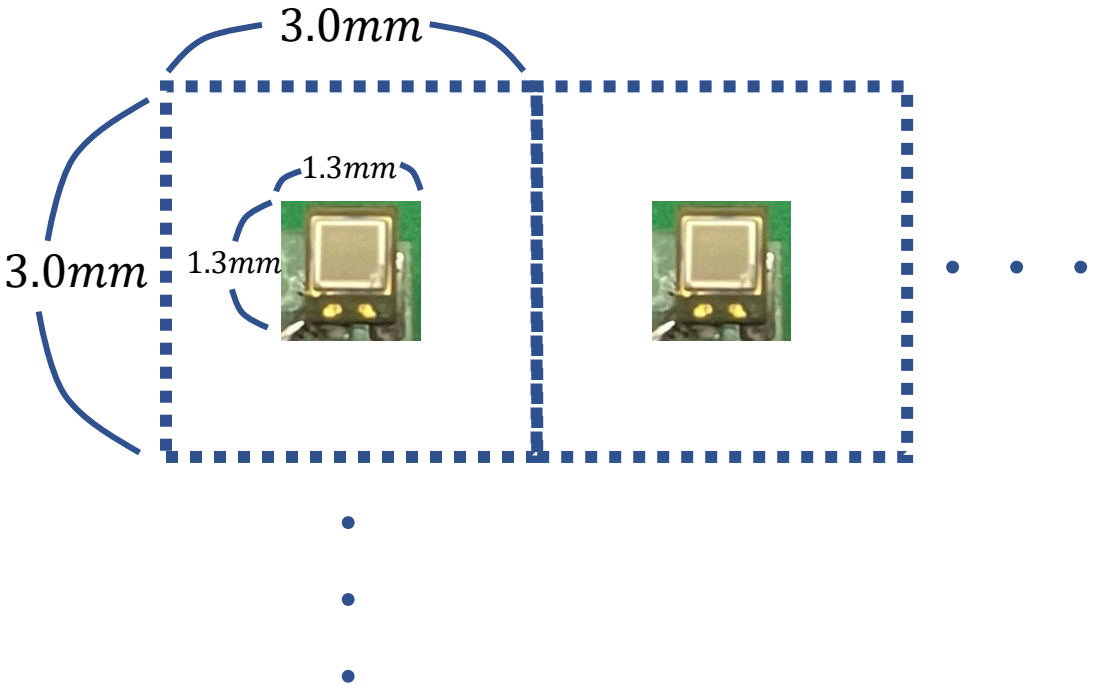
$1CH$あたり$1.3 \times 1.3[mm^2]$

あまり性能は向上しないと予想

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$3.0 \times 3.0[mm^2]$おきに配置すること

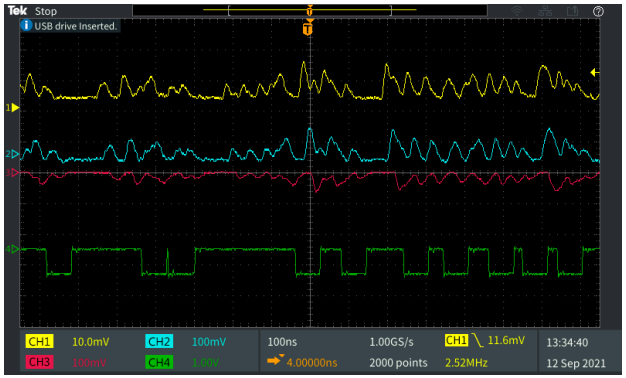
<1315PSを実際に運用する際>



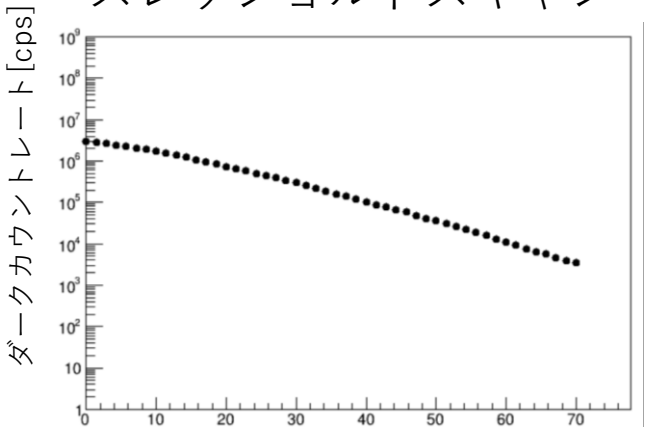
$3.0 \times 3.0[mm^2]$の領域に入射した光子をミラー等を用い集光

ダークカウントレート1光子検出不可について

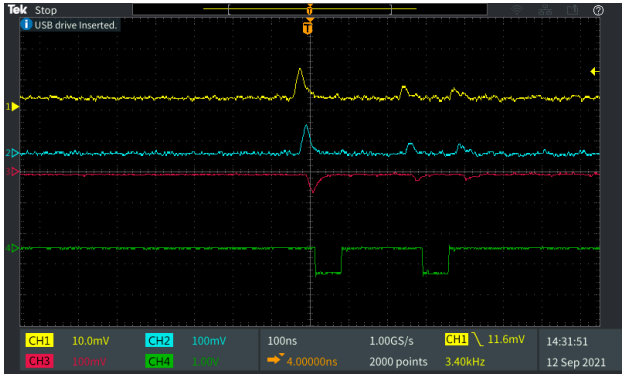
<1315PS　照射量10^{10}　25℃>



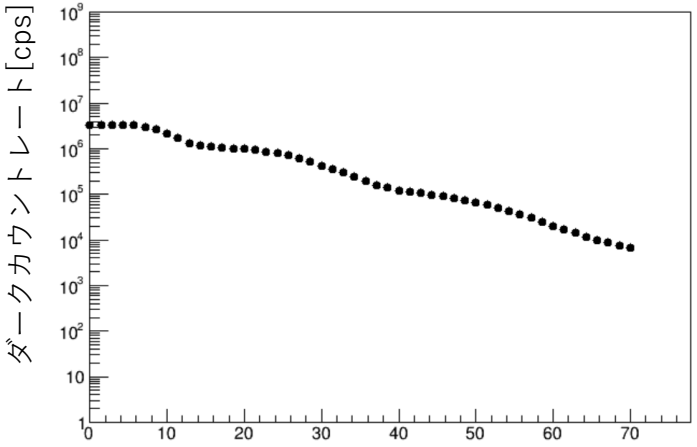
スレッショルドスキャン



<1315PS　照射量10^{10}　−5℃>



スレッショルドスキャン



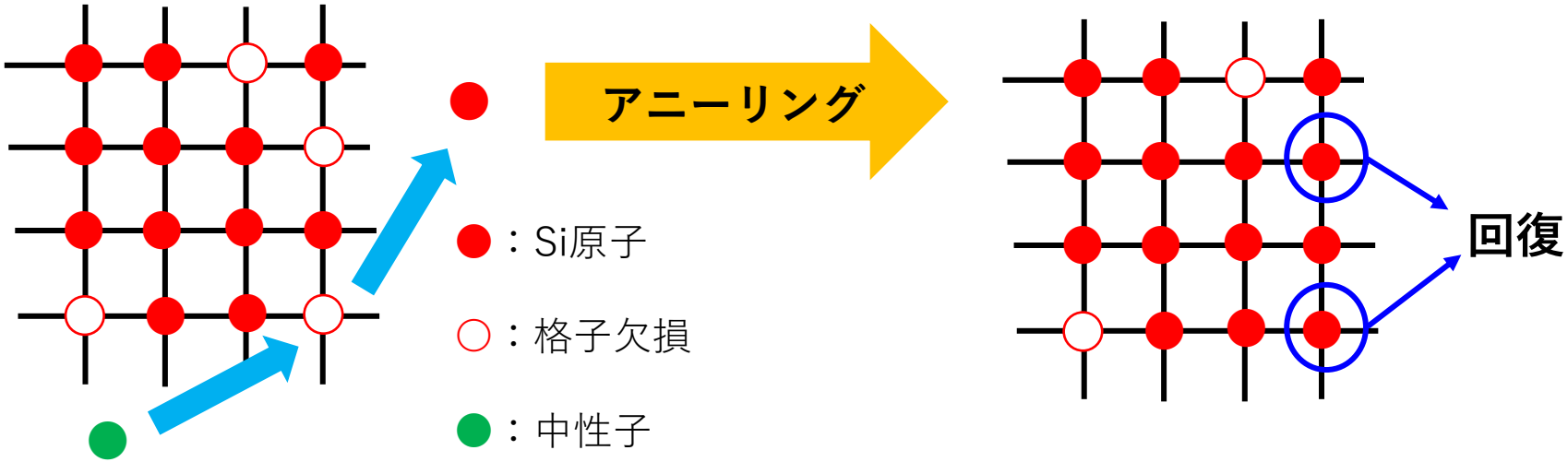
アニーリングの研究について

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

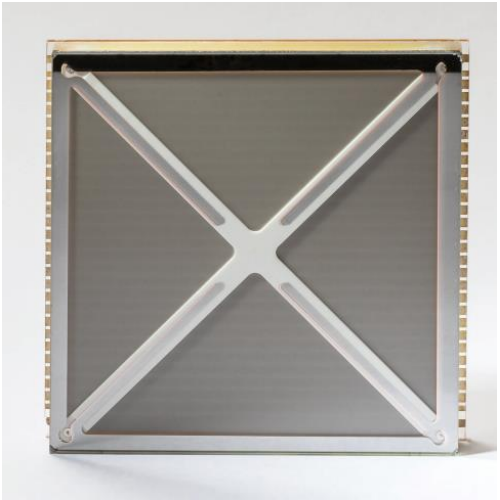
中性子損傷が回復



MPPC以外の光検出器候補

(Large Area Picosecond PhotoDetectors)LAPPDが候補

MCP-PMTの一種



LAPPD-Data-Sheet-05-19.pdf (incomusa.com)

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