

次世代ガンマ線望遠鏡CTAのための SiPMの開発とその性能評価

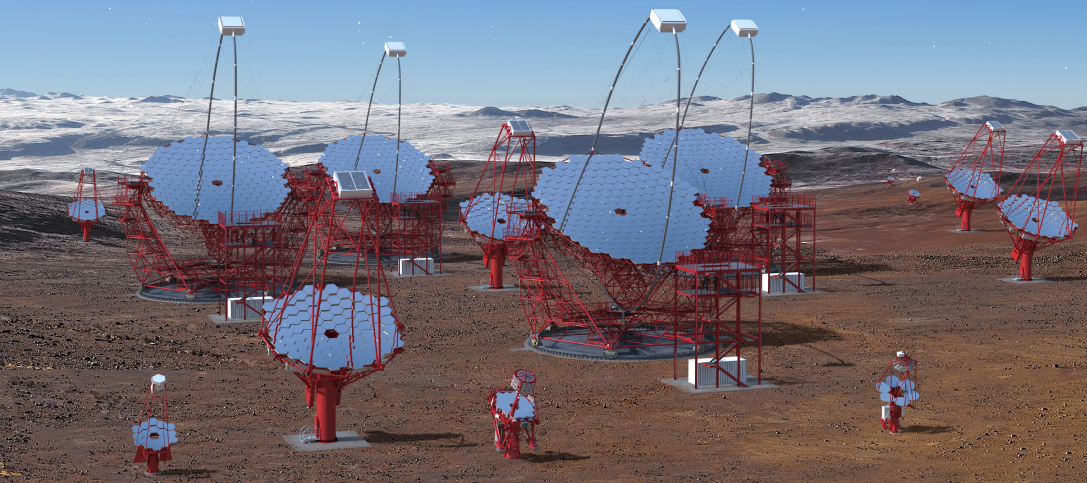
山根暢仁, 田島宏康, 奥村暁, 朝野彰,
中村裕樹, 日高直哉, 他 CTA-Japan consortium
名大ISEE



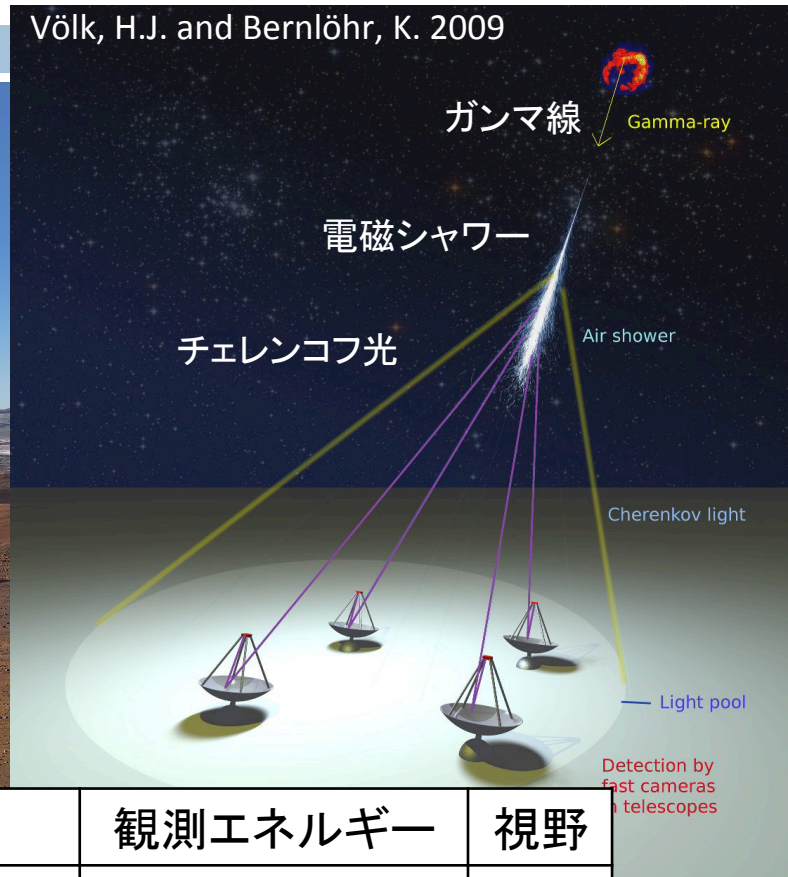
2017年春季物理学会3月20日大阪大学(豊中キャンパス)

Cherenkov Telescope Array (CTA)

- 次世代の地上ガンマ線望遠鏡。
- 暗黒物質探査、宇宙線の起源と加速機構の解明などが期待される。



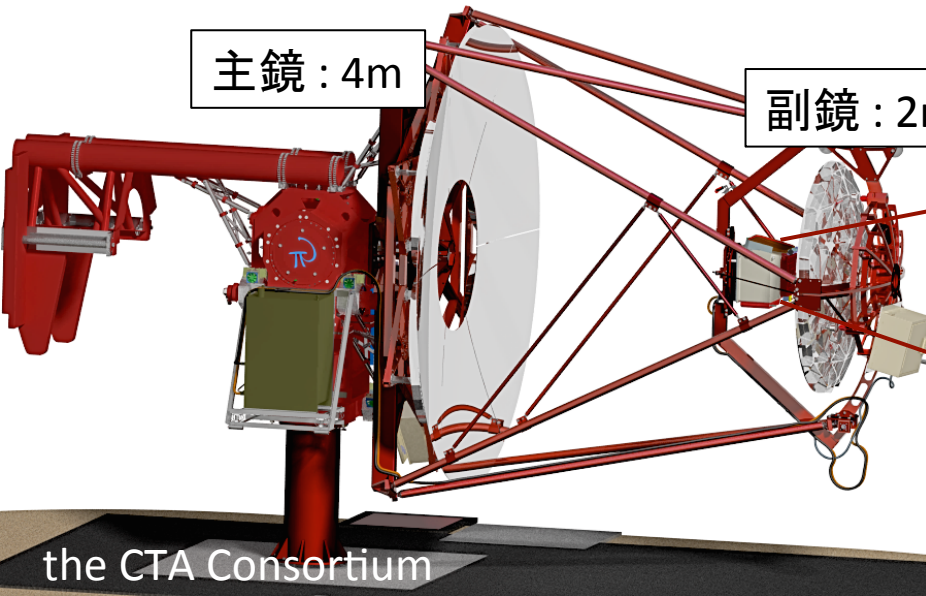
Völk, H.J. and Bernlöhr, K. 2009



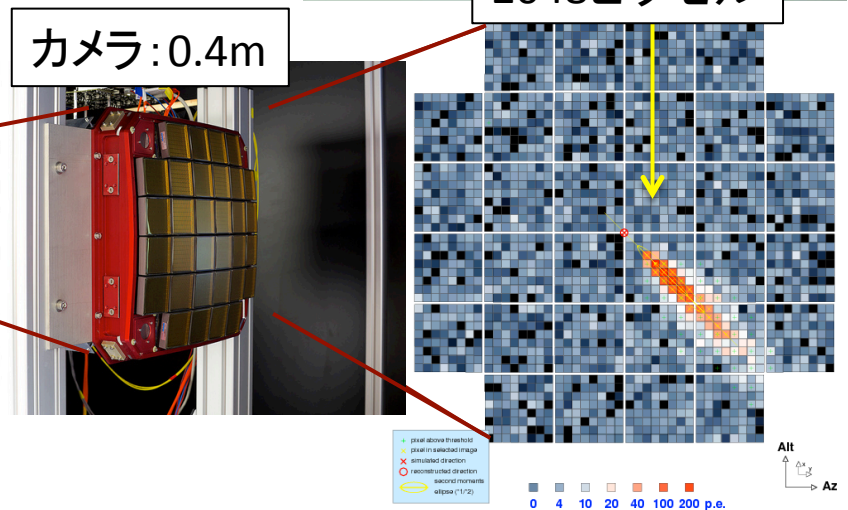
種類	口径	台数	観測エネルギー	視野
大口径望遠鏡	23 m	4台(北・南半球)	20—200 GeV	4.5°
中口径望遠鏡	12 m	15台(北半球) 24台(南半球)	0.1—10 TeV	7.7°
小口径望遠鏡	4 m	70台(南半球)	5—300 TeV	9.6°

小口径望遠鏡

- カメラに搭載する光検出器は**半導体光電子増倍素子**を予定。
 - 高い光検出効率、高い耐久性、低い印加電圧、費用の低減
- チェレンコフ光以外に**夜光(大気光や星光)**がバックグラウンドとしてカメラに入射する。



the CTA Consortium
cherenkov telescope array



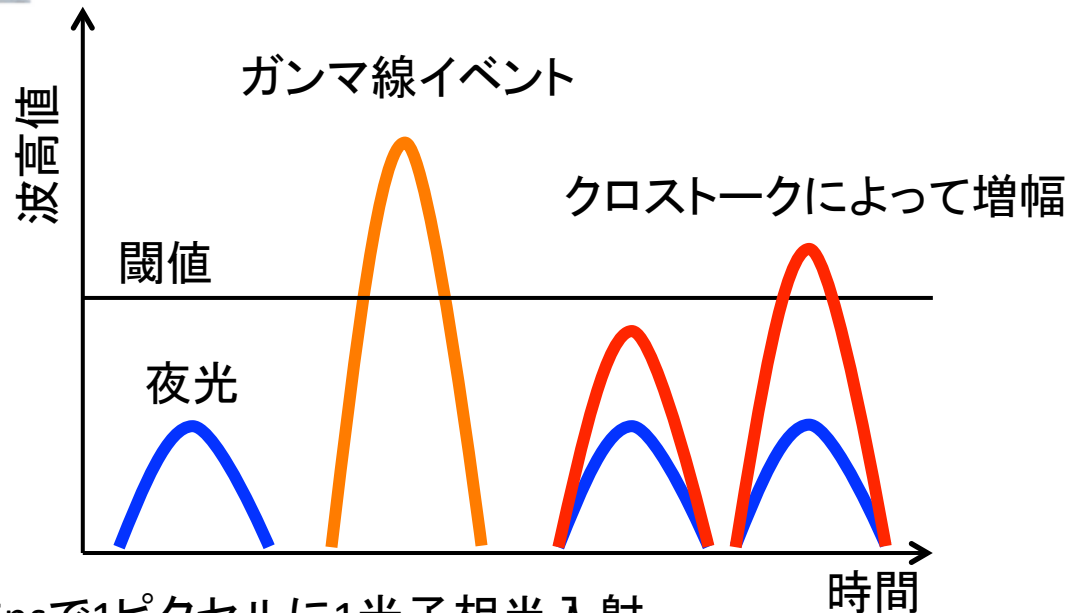
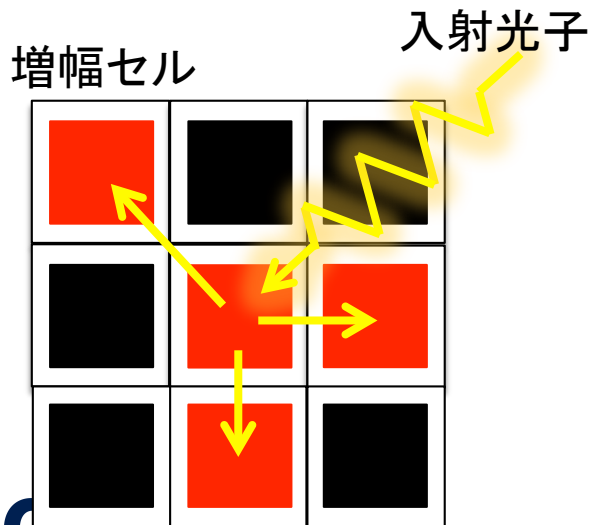
半導体光電子増倍素子 (SiPM)

1ピクセル
($\sim 6 \text{ mm}$)

1増幅セル
($\sim 75 \mu\text{m}$)

ノイズ特性

- オプティカルクロストーク (以後、クロストークと呼ぶ)
 - 検出光電子数を誤計数してしまう
- ダークカウント
- アフターパルス

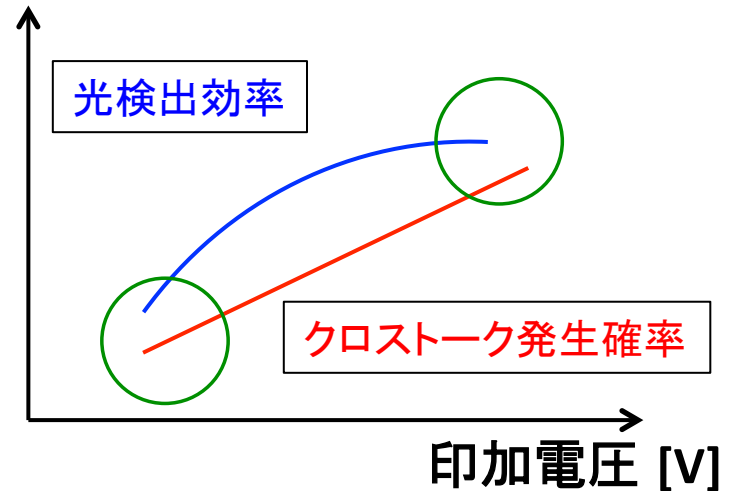


夜光は数nsで1ピクセルに1光子相当入射

17/03/13

本研究の目的

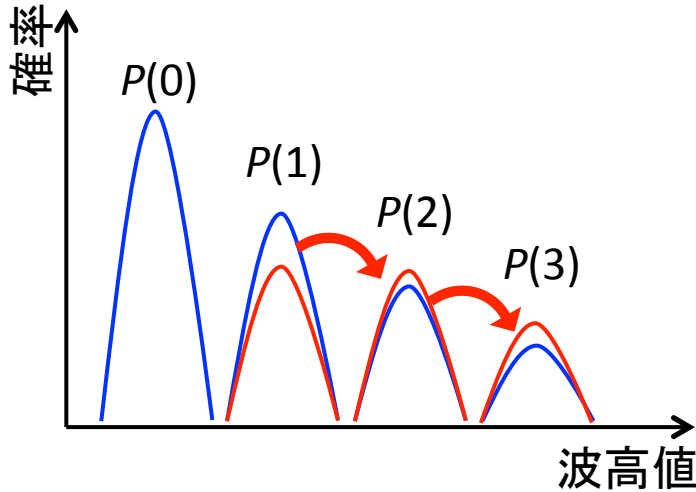
- 低エネルギーのガンマ線を検出するためには、高い光検出効率と低いクロストーク発生確率が必要。
- この二つは相関関係をもち、光検出効率を高くすると、クロストーク発生確率も高くなる。
- これらの電圧依存性はSiPMによって違うため、複数のSiPMを比較して最適な動作点を決定する必要がある。



CTAのカメラにSiPMを採用する際に重要な、光検出効率とクロストーク発生確率に関するデータを揃える。

本研究のデータを使い、シミュレーションや実地試験によってSiPMの選定と動作電圧を決定する。

光検出効率の評価と測定系

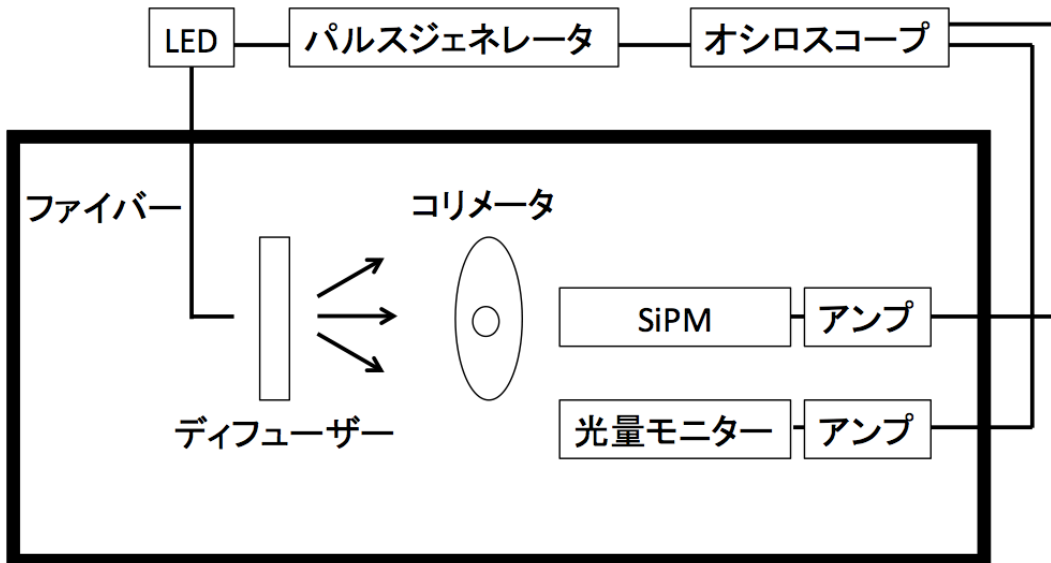


SiPMに一定の光を照射した時の平均検出光電子数を比較することで光検出効率を相対的に評価する。

$$P(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$$

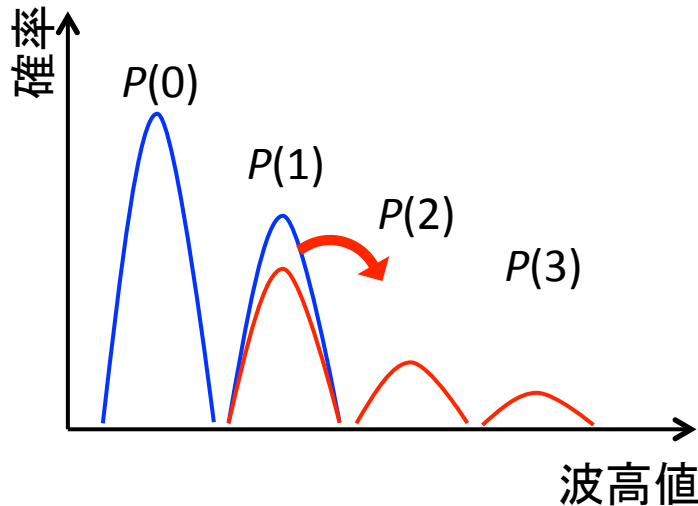
$P(k)$: k 個の光電子を検出する確率
 λ : 平均検出光電子数

$$P(0) = e^{-\lambda} \quad \therefore \lambda = -\log P(0)$$



- LEDにパルス信号を入力し、一定の微弱光を照射する。
- SiPMの出力波形をオシロスコープで記録し、波高分布を作る。

クロストークの評価



- SiPMに光を照射しない時、1光電子以上の波形は全てダークカウント。
- ダークカウントとは熱励起によってランダムに出力する波形。
- 2光電子以上検出する確率で近似式を立て、クロストーク発生確率を算出する。

$$R_{\text{crosstalk}} = \frac{N(\geq 1.5 \text{ p.e.})}{N(\geq 0.5 \text{ p.e.})}$$

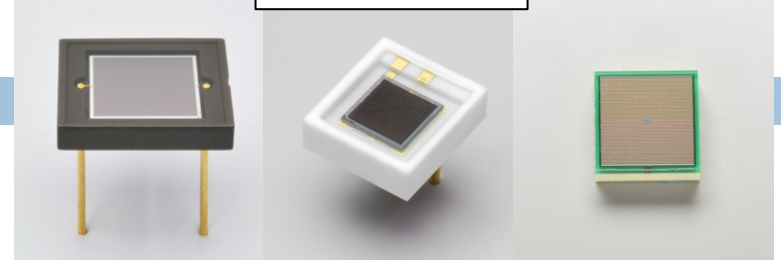
$R_{\text{crosstalk}}$: クロストーク発生確率

$N(\geq 0.5 \text{ p.e.})$: 波高分布で0.5光電子相当の波高値以上の波高値を持つ確率

$N(\geq 1.5 \text{ p.e.})$: 波高分布で1.5光電子相当の波高値以上の波高値を持つ確率

測定したSiPM

浜松ホトニクス



□ 浜松ホトニクス社

□ S12572-050C (参照用)

光量モニターに使用。光検出効率を絶対値に変換する際に使用。

□ S13360-**-CS (低クロストーク版(シリコン))

参照用SiPMの改良版。増幅セル間に溝を作り、クロストークを低減。フィルファクターを改善。

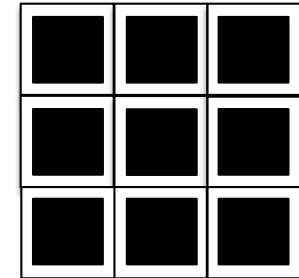
□ S13360-3050-VE (低クロストーク版(エポキシ))

入射窓がエポキシの低クロストーク版SiPM。
これ以外の浜松ホトニクス社のSiPMはシリコンが入射窓。

□ S14161-**-CS (低電圧版)

低クロストーク版SiPMの改良版。増幅セルの厚さを薄くして電場勾配を大きくし、低い印加電圧で高い光検出効率を獲得。

増幅セル



フィルファクター = $\frac{\blacksquare}{\blacksquare}$
光検出効率に影響

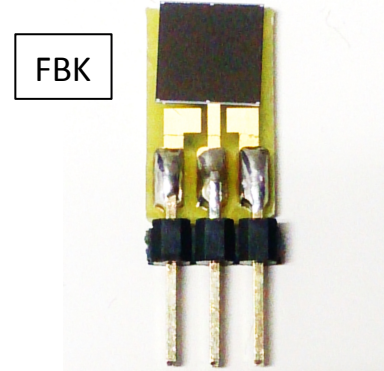
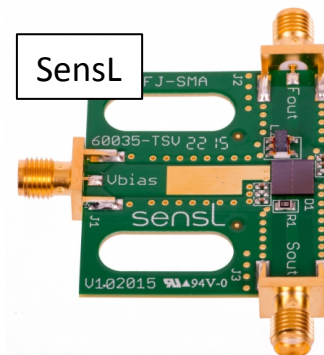
□ SensL社、FBK社

□ MicroFJ-SMA-60035 (SensL)

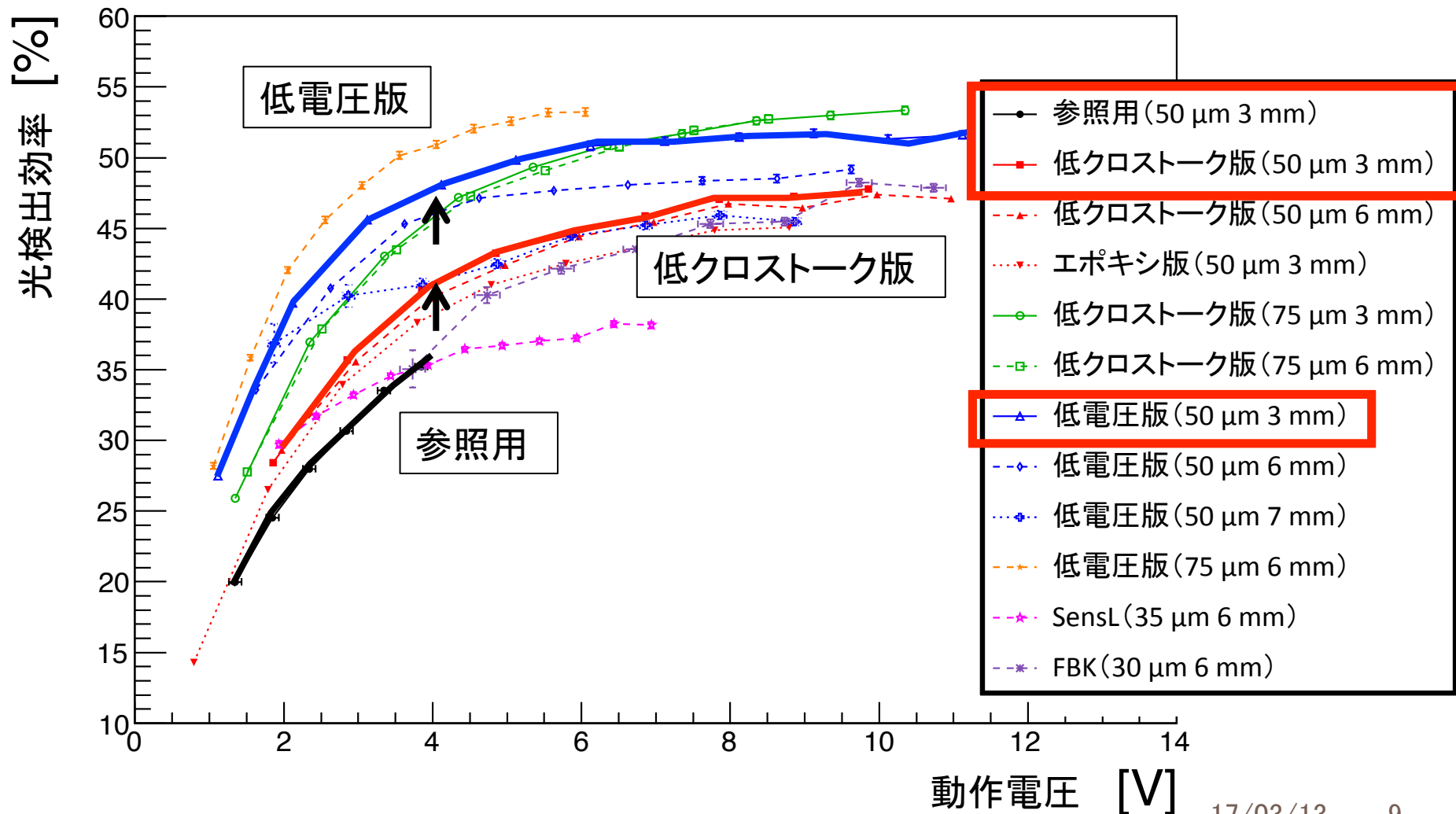
SensL社のSiPM。入射窓はガラス。

□ NUV-HD (FBK)

FBK社のSiPM。入射窓なし。

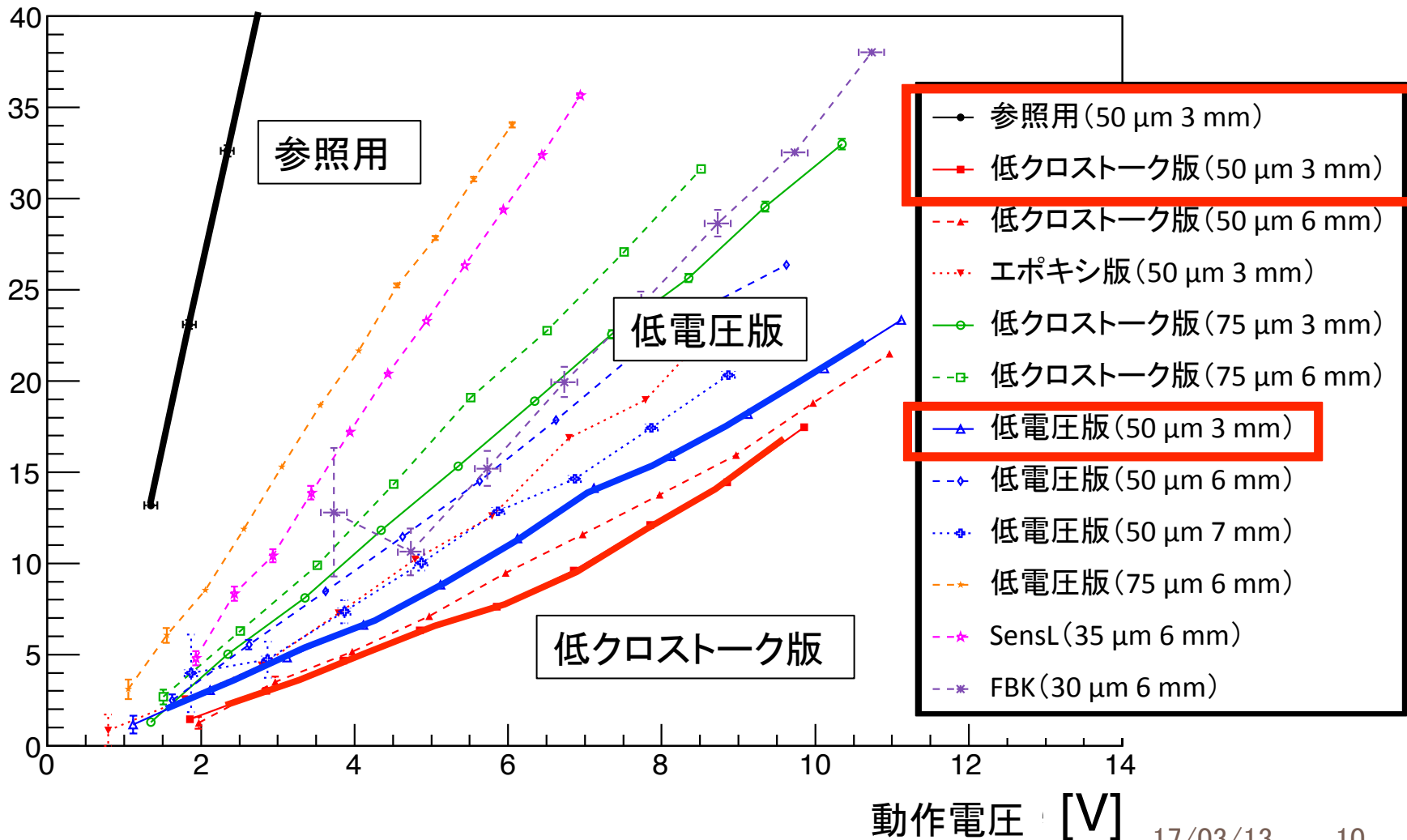


光検出効率の電圧依存性@ 400 nm



クロストーク発生確率の電圧依存性@400 nm

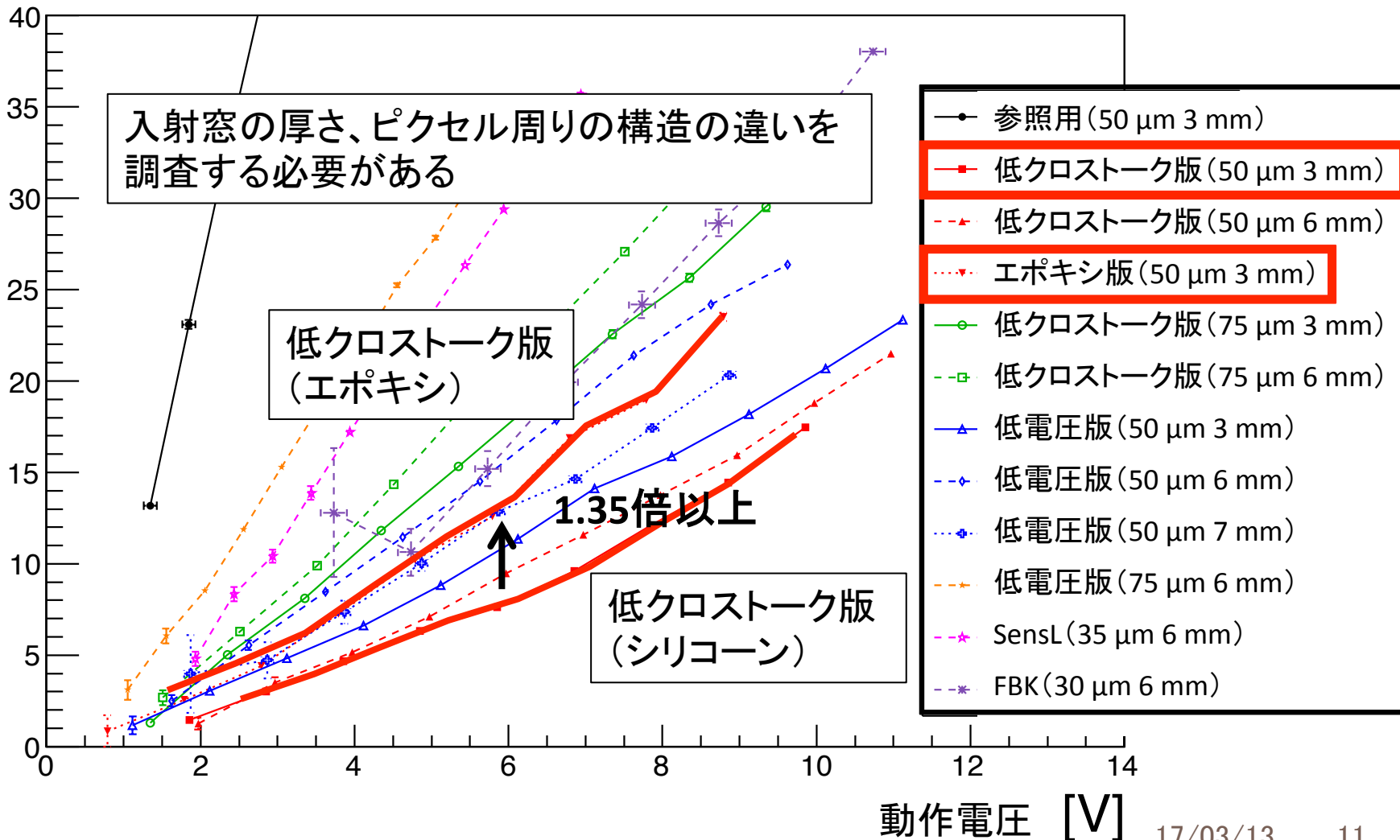
クロストーク発生確率 [%]



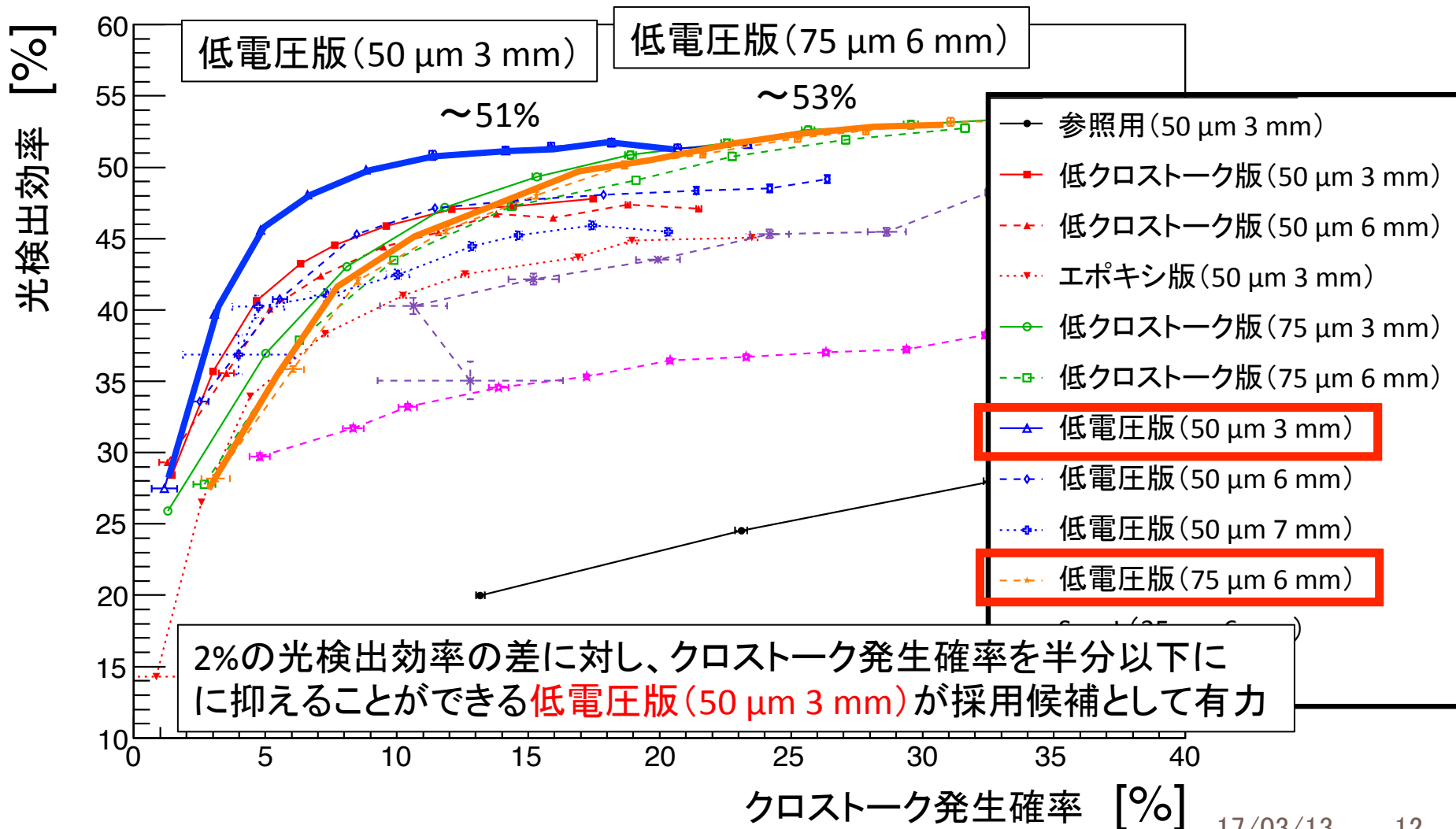
動作電圧 [V]

クロストーク発生確率の電圧依存性@400 nm

クロストーク発生確率 [%]



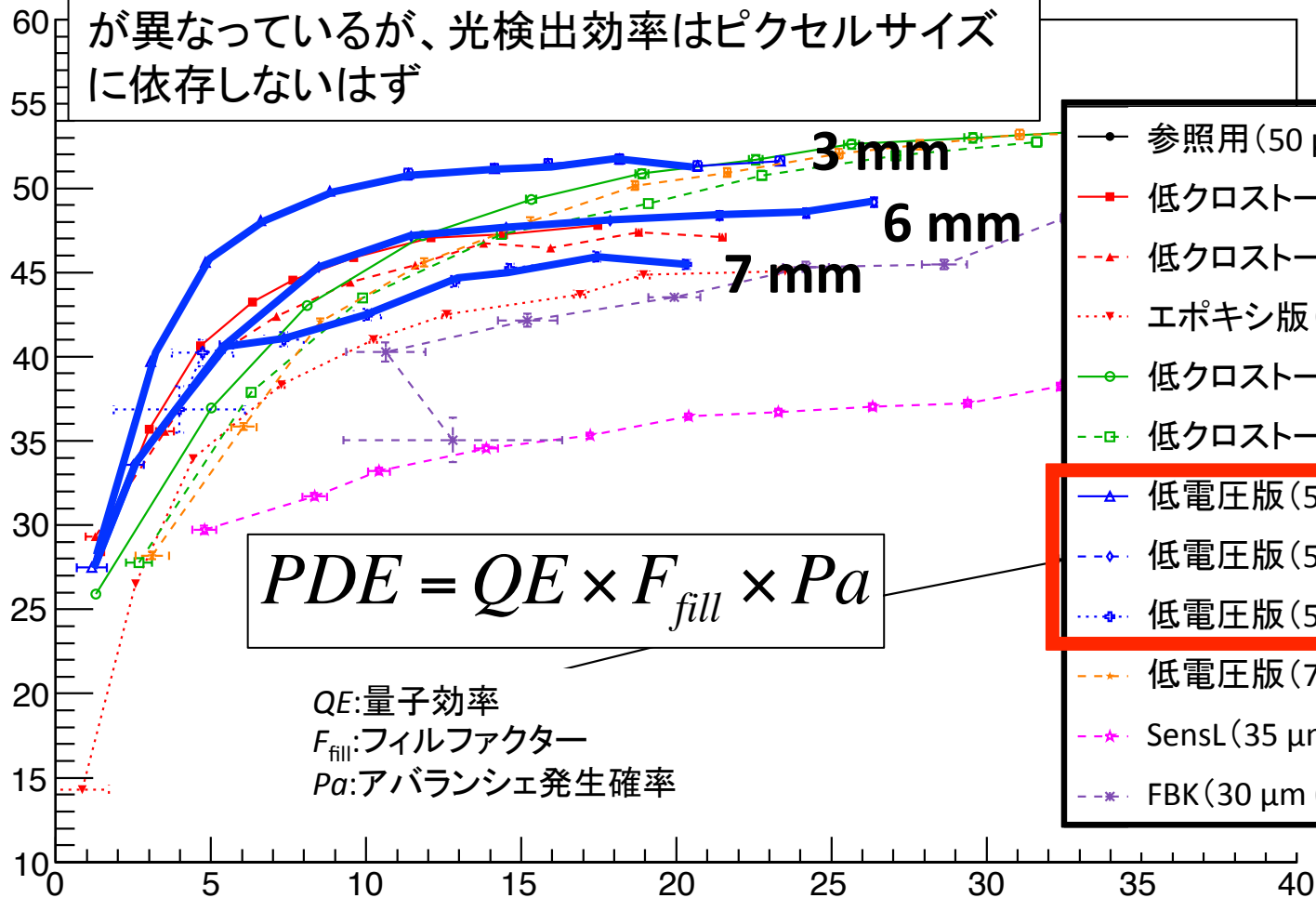
光検出効率とクロストーク発生確率の関係@400 nm



光検出効率とクロストーク発生確率の関係@400 nm

低電圧版ではピクセルサイズによって光検出効率が異なっているが、光検出効率はピクセルサイズに依存しないはず

光検出効率 [%]



- 参照用 (50 μm 3 mm)
- 低クロストーク版 (50 μm 3 mm)
- ▲ 低クロストーク版 (50 μm 6 mm)
- ▼ エポキシ版 (50 μm 3 mm)
- 低クロストーク版 (75 μm 3 mm)
- 低クロストーク版 (75 μm 6 mm)
- ▲ 低電圧版 (50 μm 3 mm)
- ◇ 低電圧版 (50 μm 6 mm)
- ◆ 低電圧版 (50 μm 7 mm)
- 低電圧版 (75 μm 6 mm)
- ★ SensL (35 μm 6 mm)
- ✱ FBK (30 μm 6 mm)

クロストーク発生確率 [%]

低電圧版SiPMの光検出効率の検証

- ピクセルサイズ3 mm, 6 mm, 7 mmの低電圧版SiPMに連続光を当てて電流値を測定。
- クロストーク、ダークカウント、アフターパルスの影響を補正。

$$I = \frac{(I_{ON} - I_{OFF})}{\left(\frac{1}{1 - R_C}\right)(1 + R_A)}$$

I_{ON} : LEDを照射した時の電流値
 I_{OFF} : LEDを照射していない時の電流値
 R_C : クロストーク発生確率
 R_A : アフターパルス発生確率

	クロストーク	アフターパルス	電流値
3 mm	15%	5.1%	31.1 ± 0.1 μA
6 mm	22%	7.2%	34.4 ± 0.2 μA
7 mm	18%	6.0%	29.4 ± 0.1 μA

解析結果と異なる

まとめと今後の展望

- 次世代地上ガンマ線望遠鏡として、CTA計画を進める中、我々は**小口径望遠鏡**の開発を行っている。
- 小口径望遠鏡のカメラに搭載する光検出器には**SiPM**を予定しており、低エネルギーガンマ線の検出感度と検出効率の向上に向けて、SiPMの**光検出効率とクロストーク発生確率**を評価した。
- 波長400 nmの測定結果によると、クロストーク発生確率が20%以下と20%以上で光検出効率が最大となるSiPMが二つ存在したが、本研究では浜松ホトニクス社の**低電圧版SiPM**を採用候補として結論づけた。
- 低電圧版SiPMでは、ピクセルサイズによって光検出効率が異なっており、今後原因を詳しく調査する必要がある。
- 本研究のデータを使い、シミュレーションや実地試験によるSiPMの選定と動作電圧決定が期待される。