

SiPM の隣接画素オプティカルクロストークと その保護層厚依存性

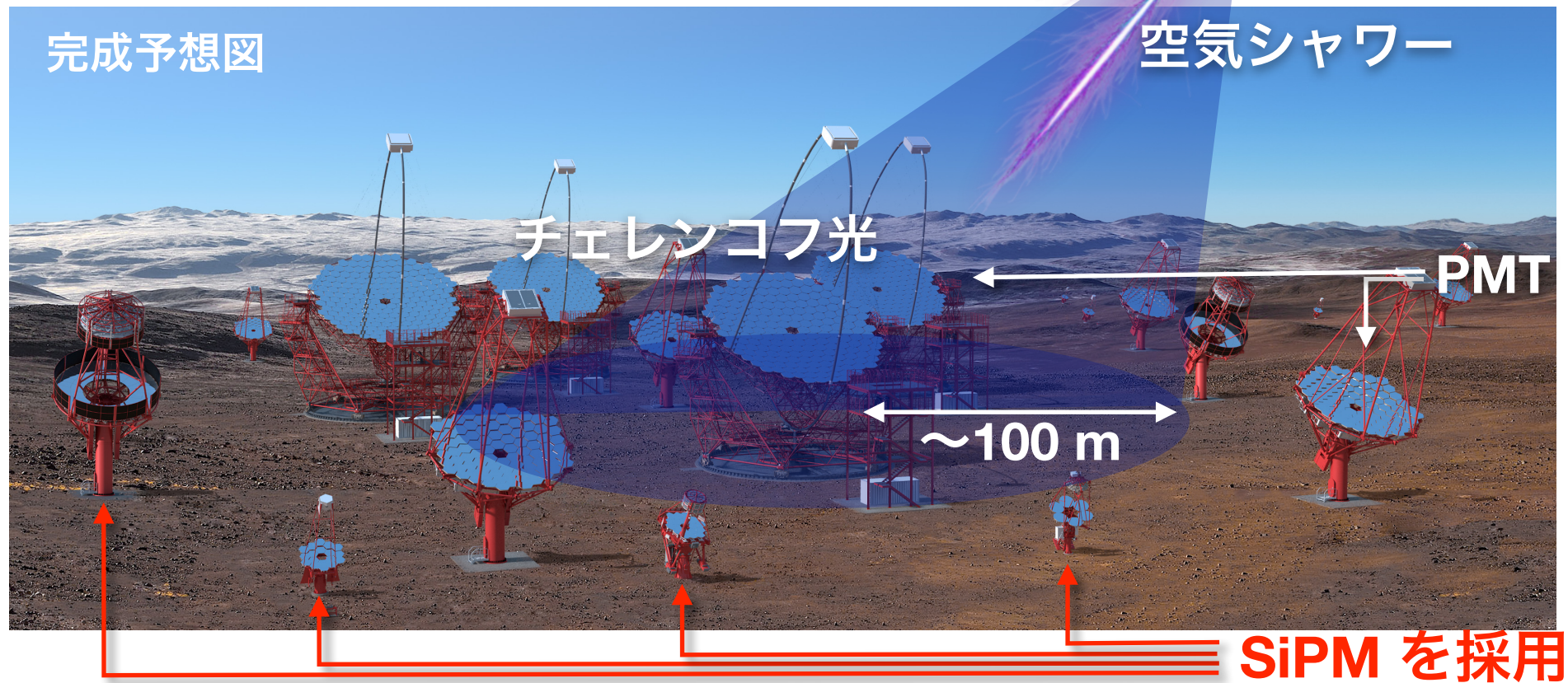
中村 裕樹, 奥村 暁, 田島 宏康, Anatolii Zenin

名大ISEE

日本物理学会 : 九州大学 伊都キャンパス

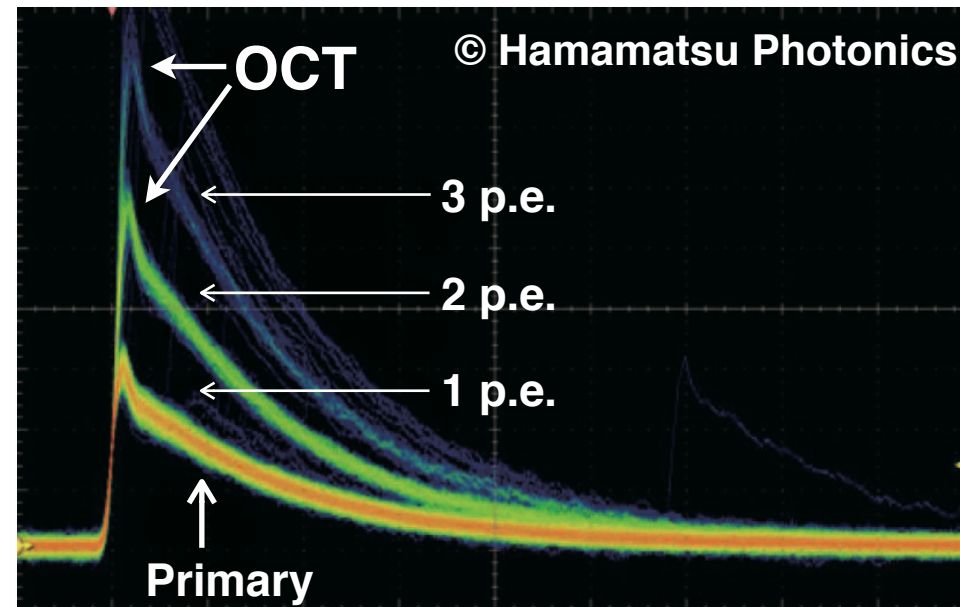
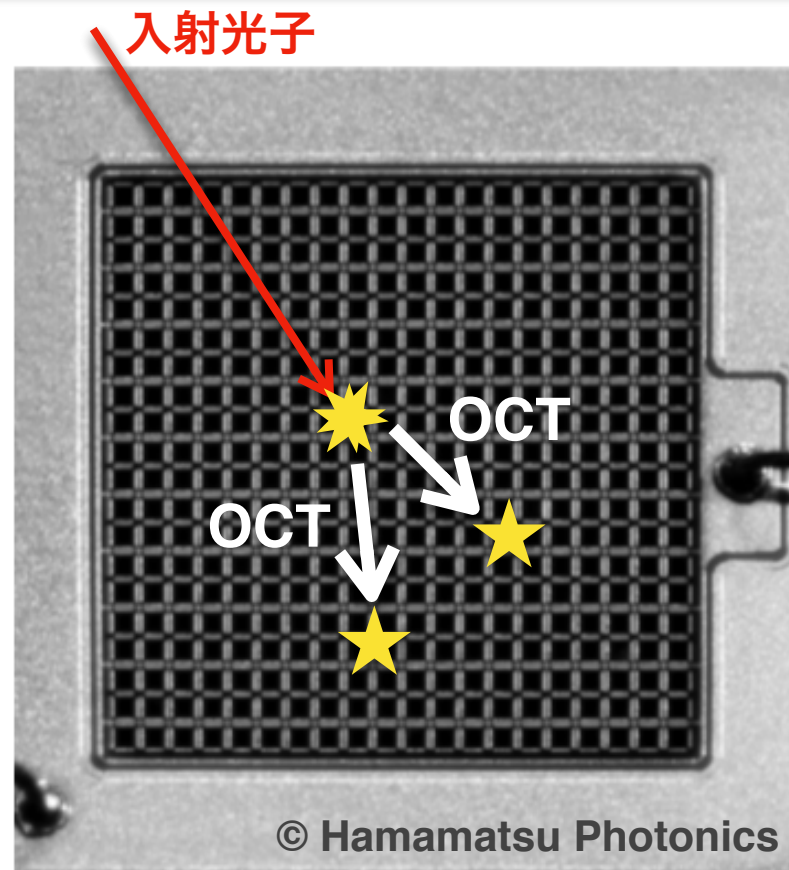


Cherenkov Telescope Array (CTA)



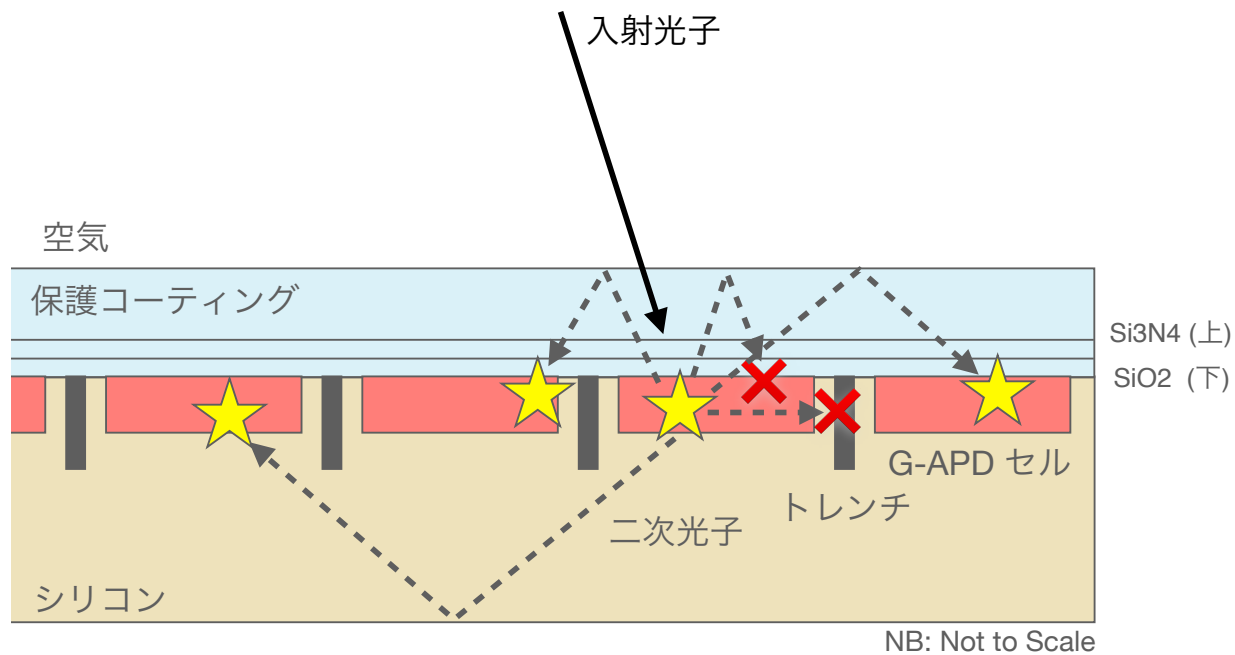
- ≫ 大中小の異なる口径の望遠鏡を広範囲に設置することで 20 GeV – 300 TeV のガンマ線を観測する
地上ガンマ線望遠鏡計画
- ≫ 一部の望遠鏡のカメラには光検出器に半導体光電子増倍素子 (**SiPM**) を採用する
 - ≫ 画素あたりの費用
 - ≫ 夜光の多い状況下でも使用可能 (月夜に観測できる)
 - ≫ オプティカルクロストーク
 - ≫ ゲインの温度依存性

オプティカルクロストーク (OCT)



- » SiPM の特徴のひとつとしてオプティカルクロストークが発生する
 - » アバランシェ増幅中に二次光子が放出される
 - » 他の増幅セルで二次光子が検出され、数 p.e. 相当の信号が出力される
- » 出力波形から入射光子とオプティカルクロストークは**区別できない**
 - » 入射光子数を多く見積もってしまう
 - » 電荷分解能の悪化、偶発トリガーの原因となる
- » この影響を抑えるため、オプティカルクロストークレートの低いSiPM の使用が重要となる

オプティカルクロストークレートの保護層厚依存性（単一画素 SiPM）



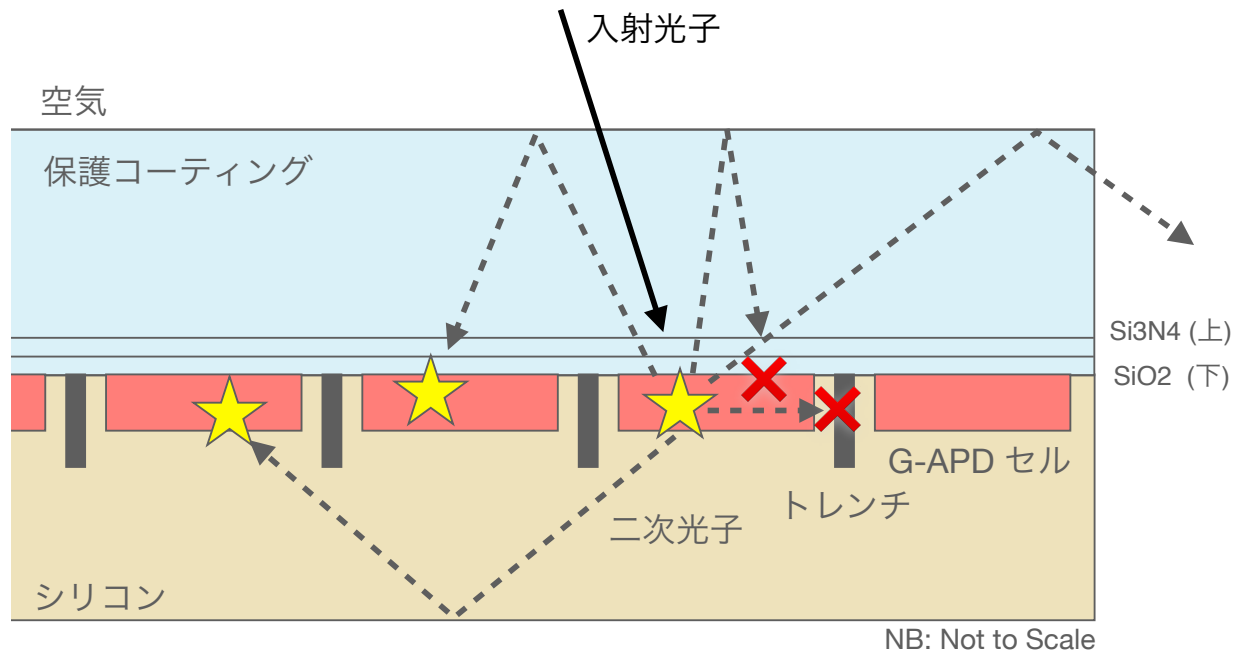
≫ 二次光子の伝播経路は保護コーティングの厚さによって変化する

- 厚くする → 画素の外へと伝播する光子が増える
- 薄くする → 同一増幅セルへと戻る光子が増える

≫ 単一画素SiPM のオプティカルクロストークレートは期待される保護層依存性が得られた

≫ コーティングがある方が取り扱いが容易である → コーティングを厚くする

オプティカルクロストークレートの保護層厚依存性（単一画素 SiPM）



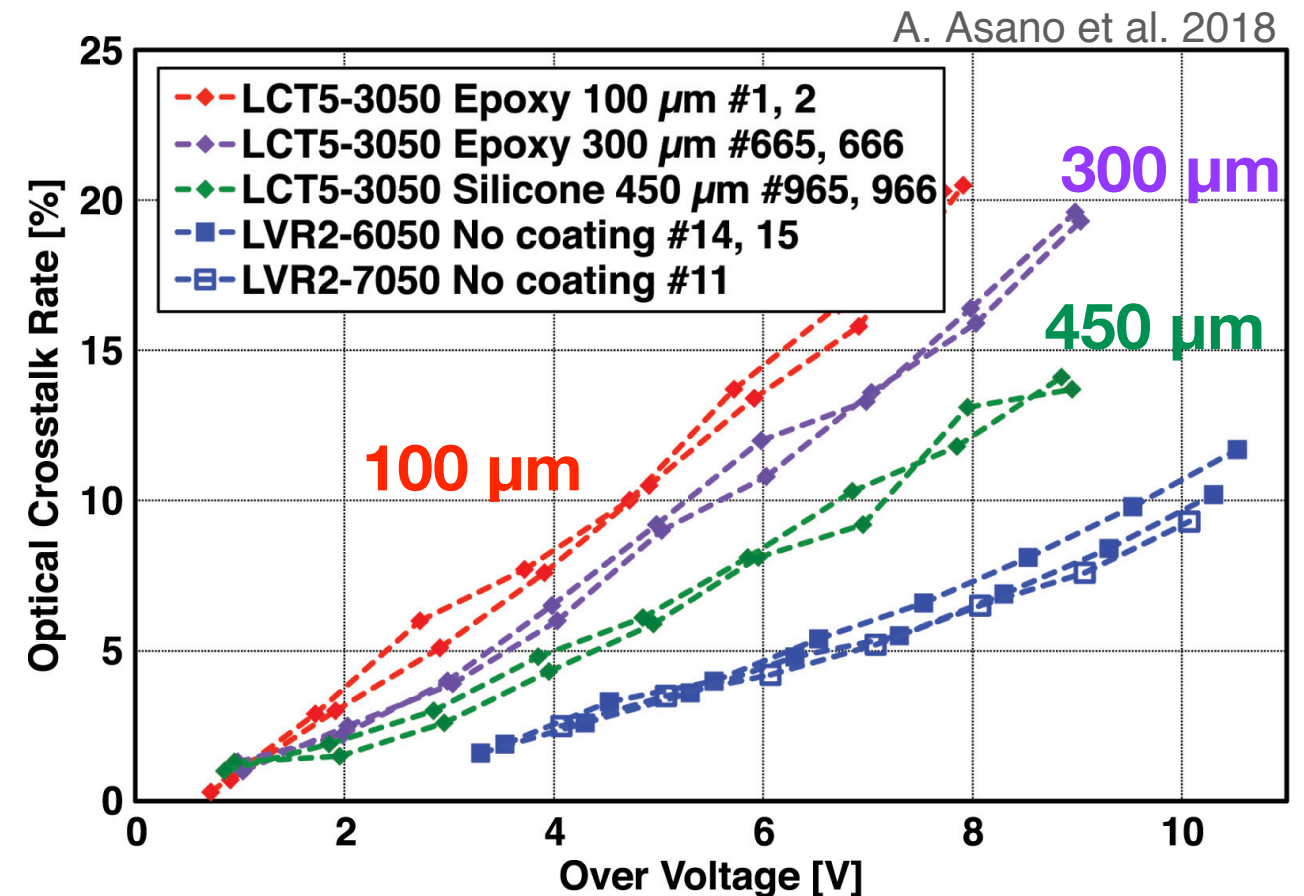
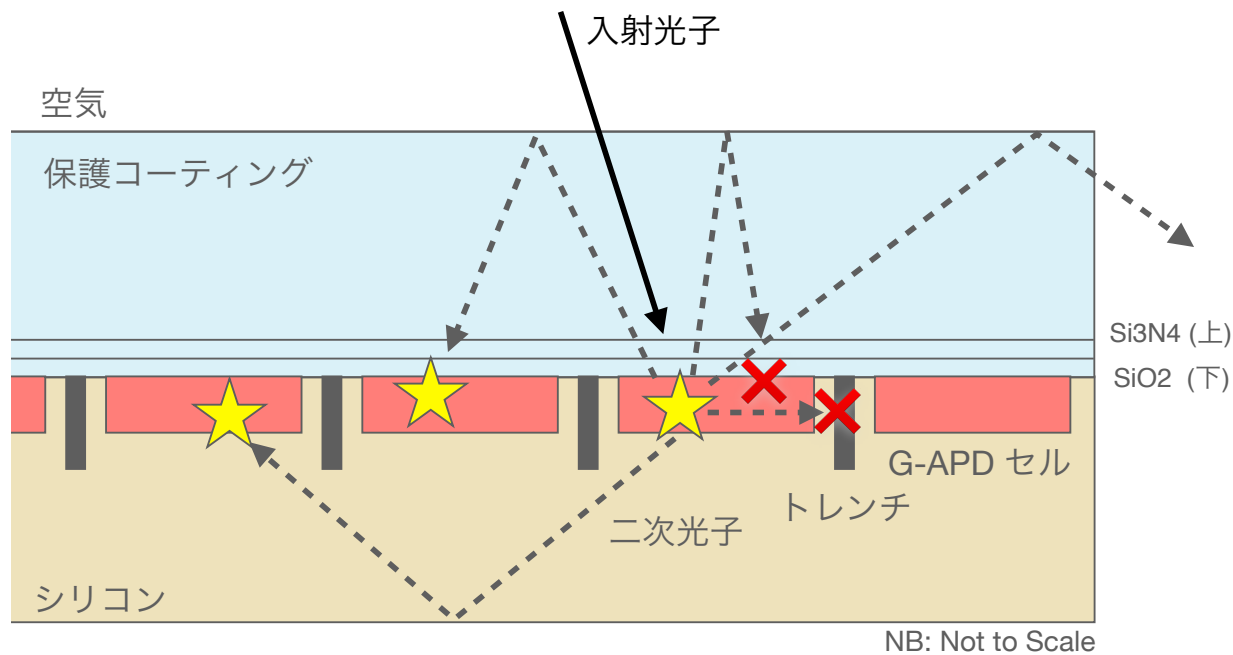
≫ 二次光子の伝播経路は保護コーティングの厚さによって変化する

- 厚くする → 画素の外へと伝播する光子が増える
- 薄くする → 同一増幅セルへと戻る光子が増える

≫ 単一画素SiPM のオプティカルクロストークレートは期待される保護層依存性が得られた

≫ コーティングがある方が取り扱いが容易である → コーティングを厚くする

オプティカルクロストークレートの保護層厚依存性（単一画素 SiPM）



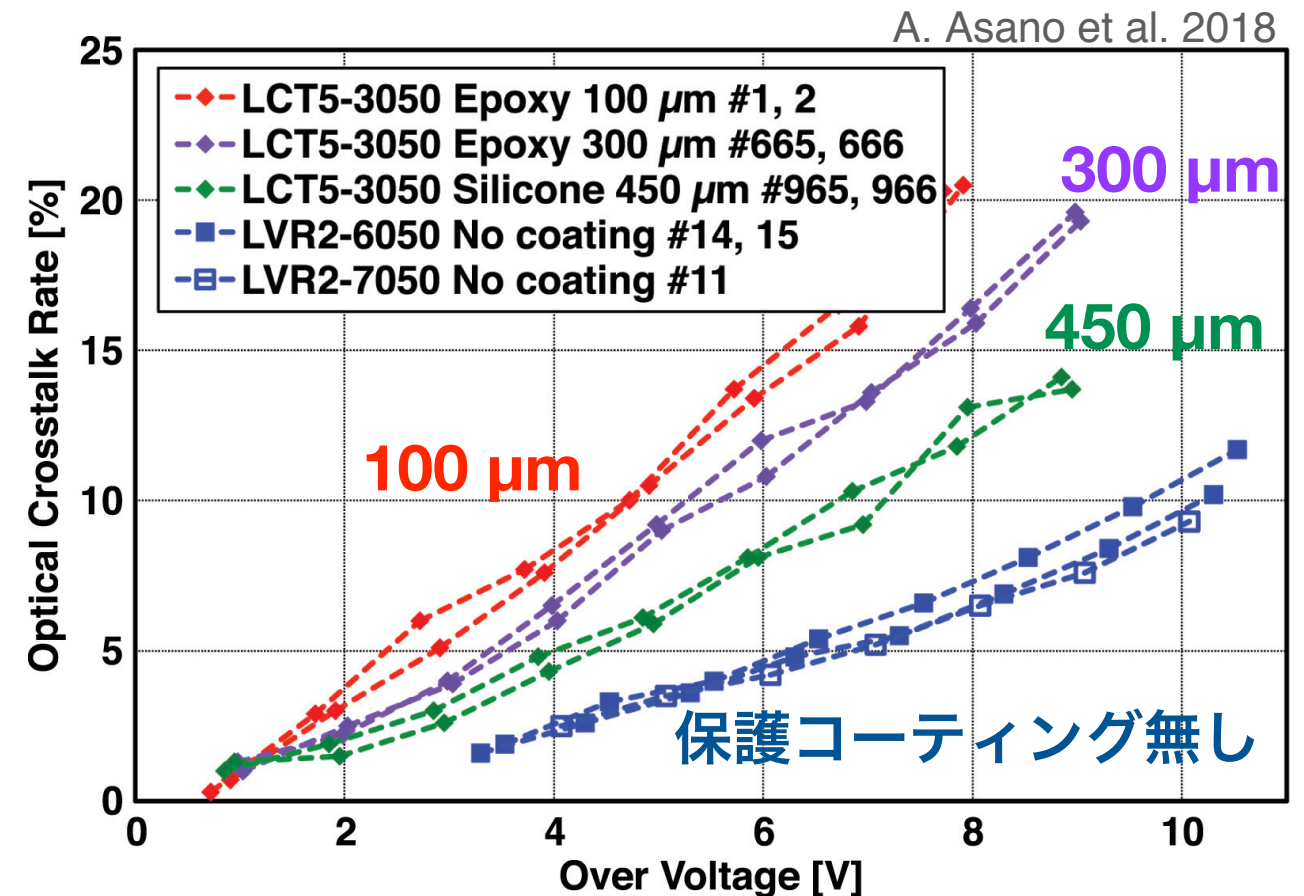
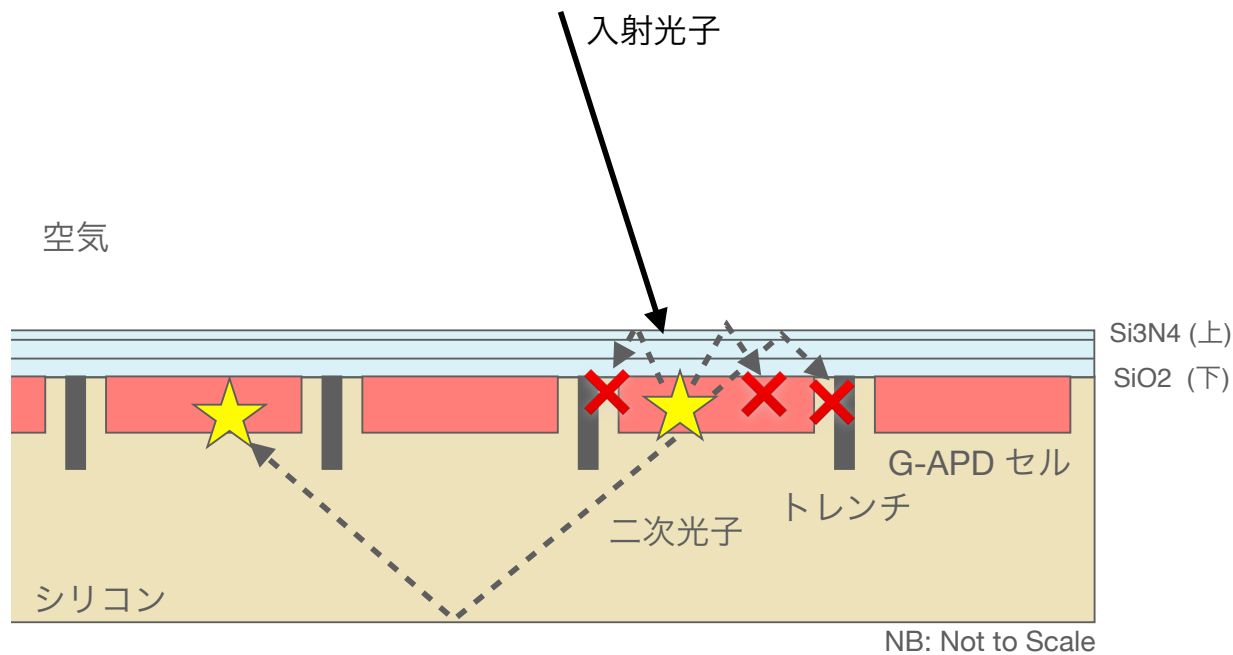
» 二次光子の伝播経路は保護コーティングの厚さによって変化する

- 厚くする → 画素の外へと伝播する光子が増える
- 薄くする → 同一増幅セルへと戻る光子が増える

» 単一画素SiPM のオプティカルクロストークレートは期待される保護層依存性が得られた

» コーティングがある方が取り扱いが容易である → コーティングを厚くする

オプティカルクロストークレートの保護層厚依存性（単一画素 SiPM）



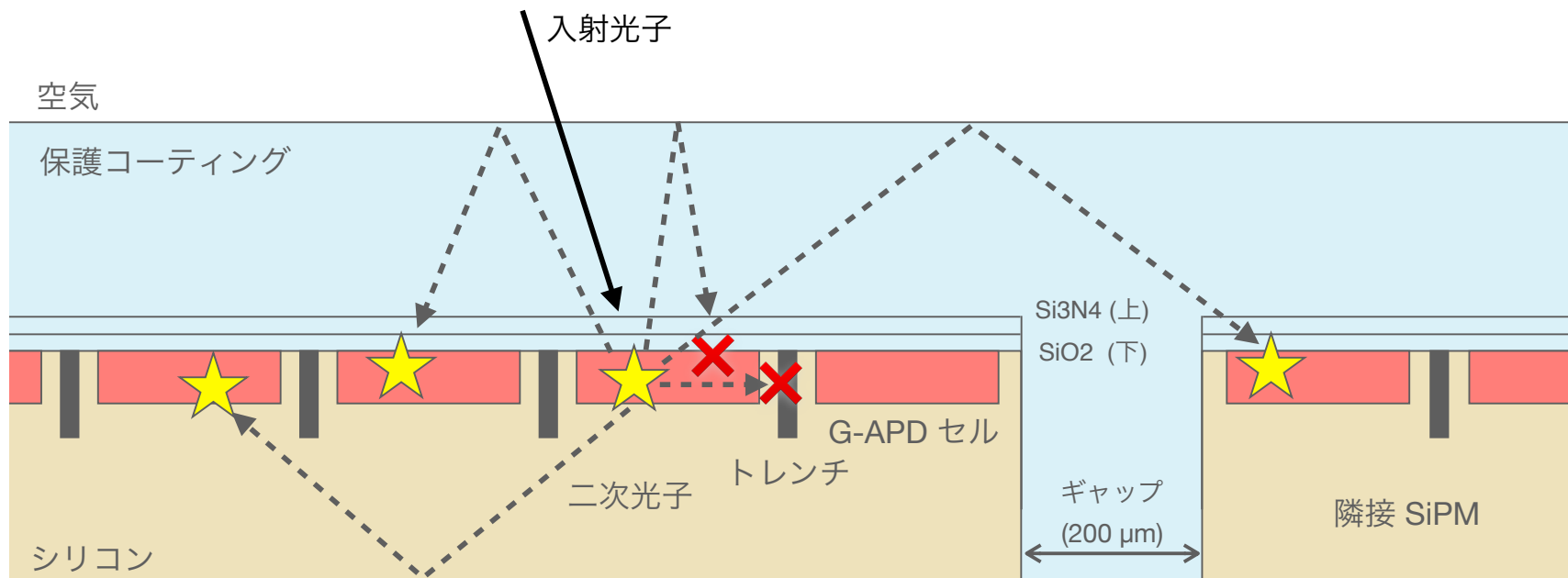
≫ 二次光子の伝播経路は保護コーティングの厚さによって変化する

- 厚くする → 画素の外へと伝播する光子が増える
- 薄くする → 同一増幅セルへと戻る光子が増える

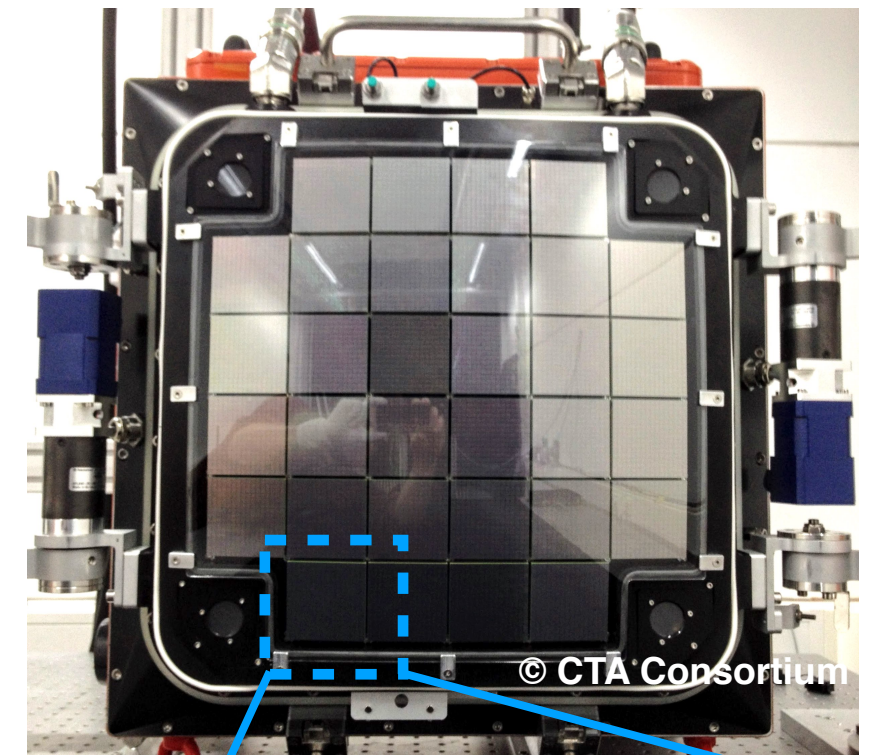
≫ 単一画素SiPM のオプティカルクロストークレートは期待される保護層依存性が得られた

≫ コーティングがある方が取り扱いが容易である → コーティングを厚くする

アレイ型 SiPM のオプティカルクロストーク

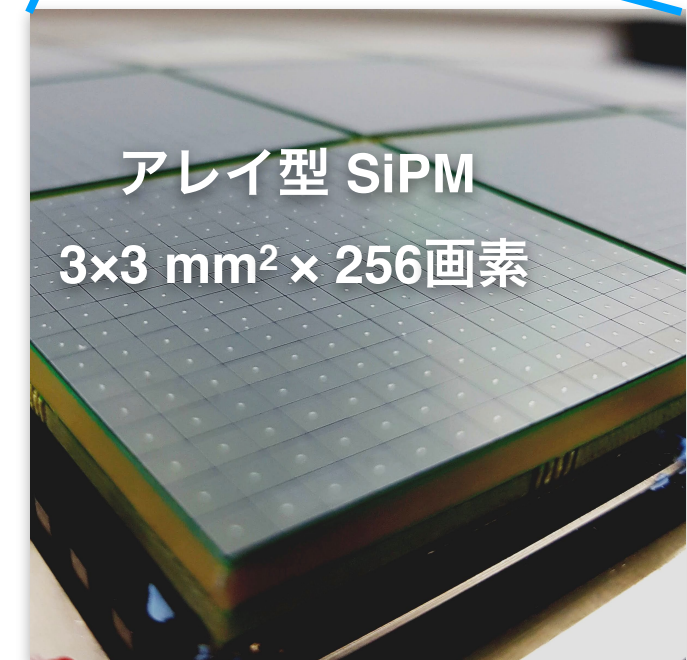


SiPM カメラ



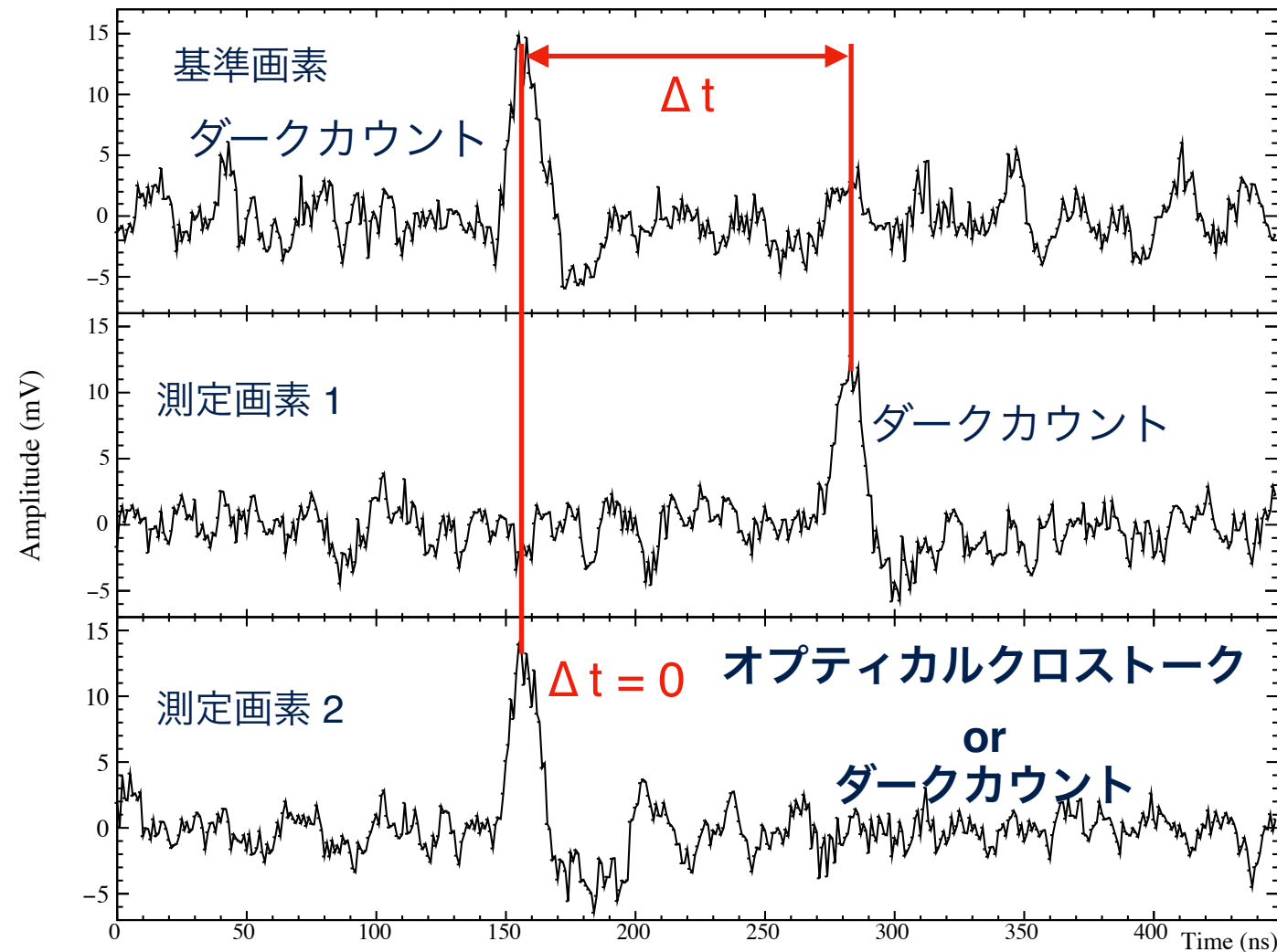
© CTA Consortium

- » カメラには**アレイ型 SiPM** を使用する
- » **隣接する画素へも二次光子は伝播する**
 - » このオプティカルクロストークレートはこれまで評価されていなかった
 - » オプティカルクロストークの観点から保護コーティングを厚くする選択を棄却できる可能性がある
- » 保護コーティングはガラス板を貼り付けることで代用した
 - » 同じSiPMで測定できる
 - » 厚さの調整が容易である

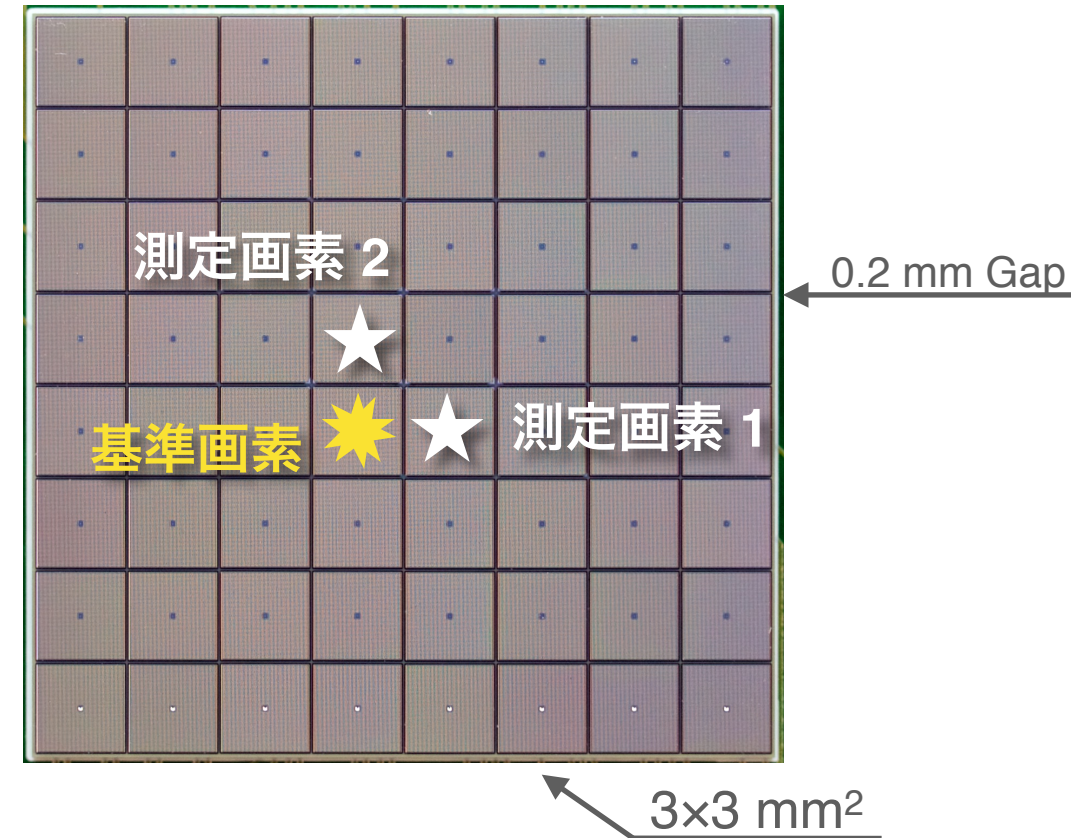


© CTA Consortium

隣接画素へのオプティカルクロストークの測定原理

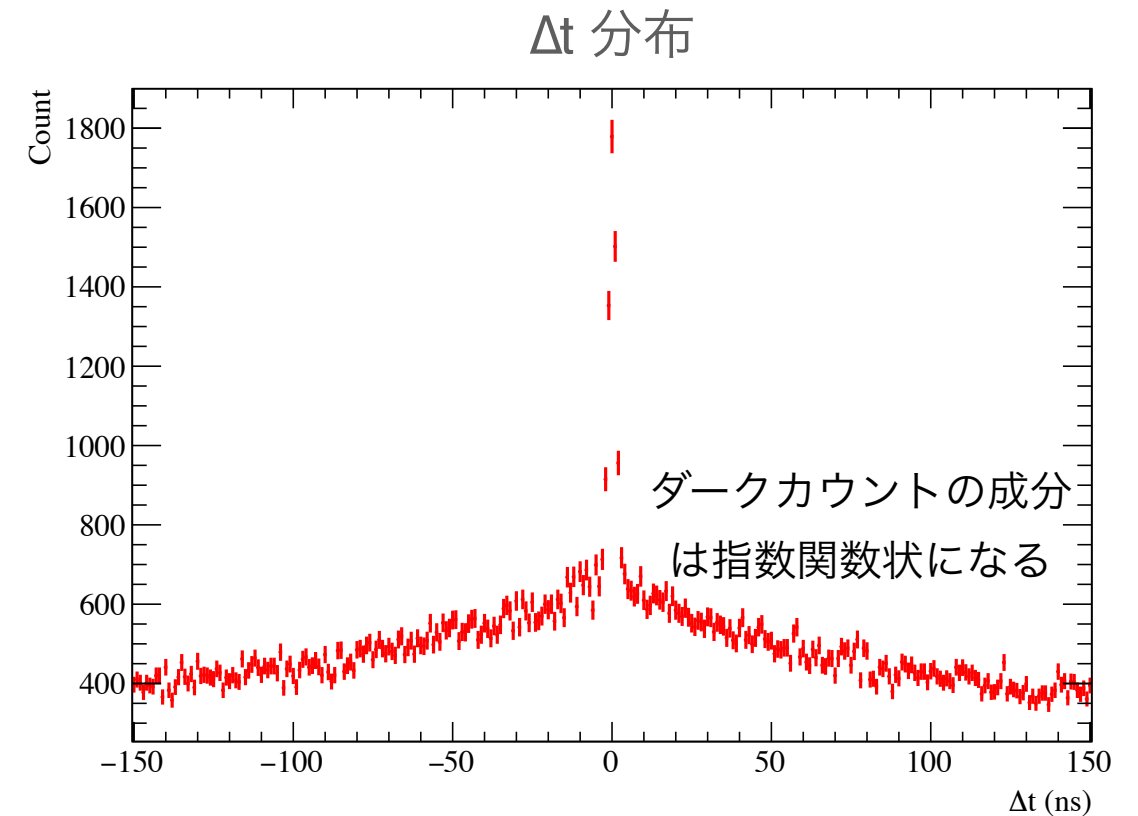
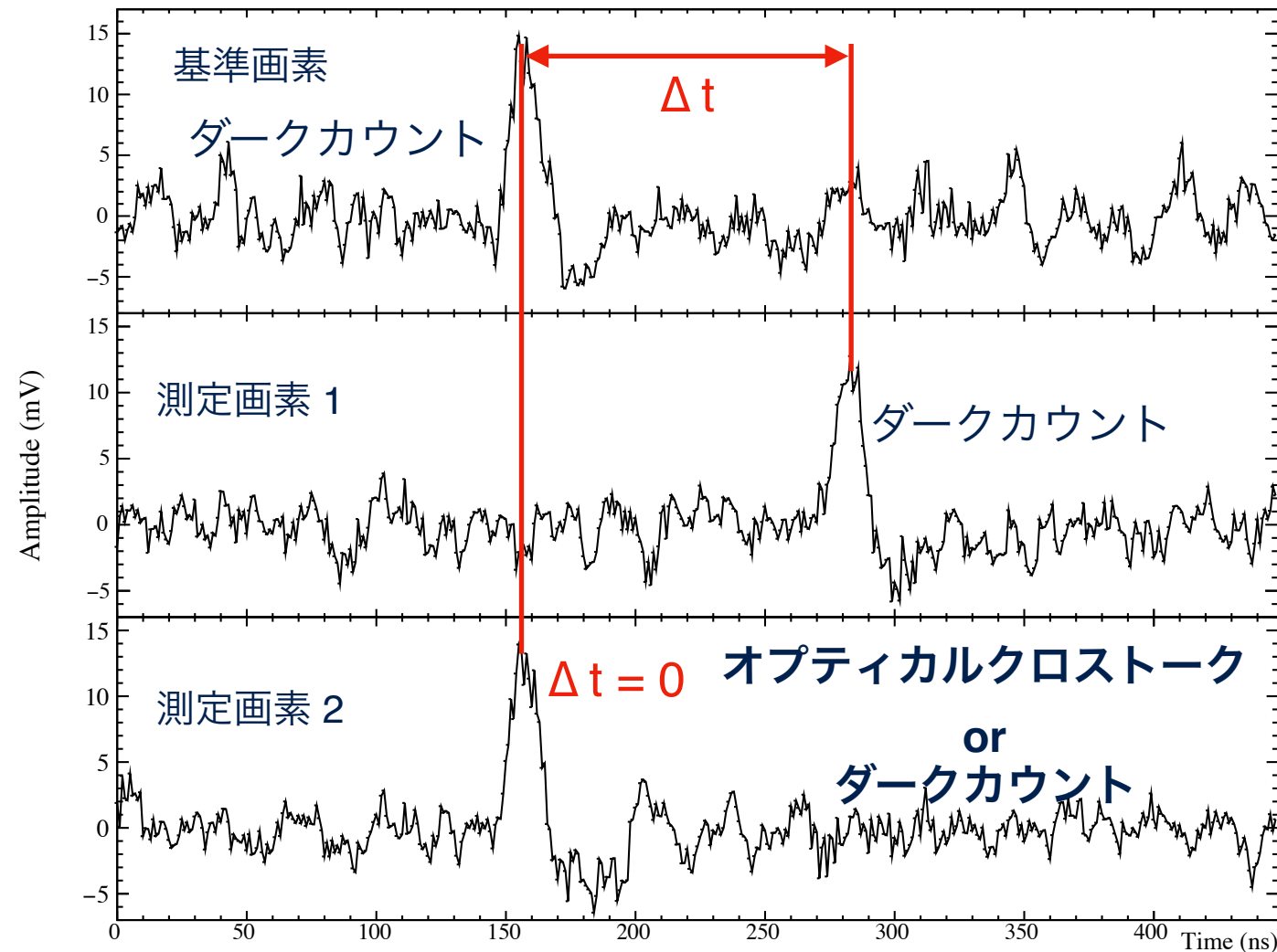


64画素 SiPM (S13361-6805)



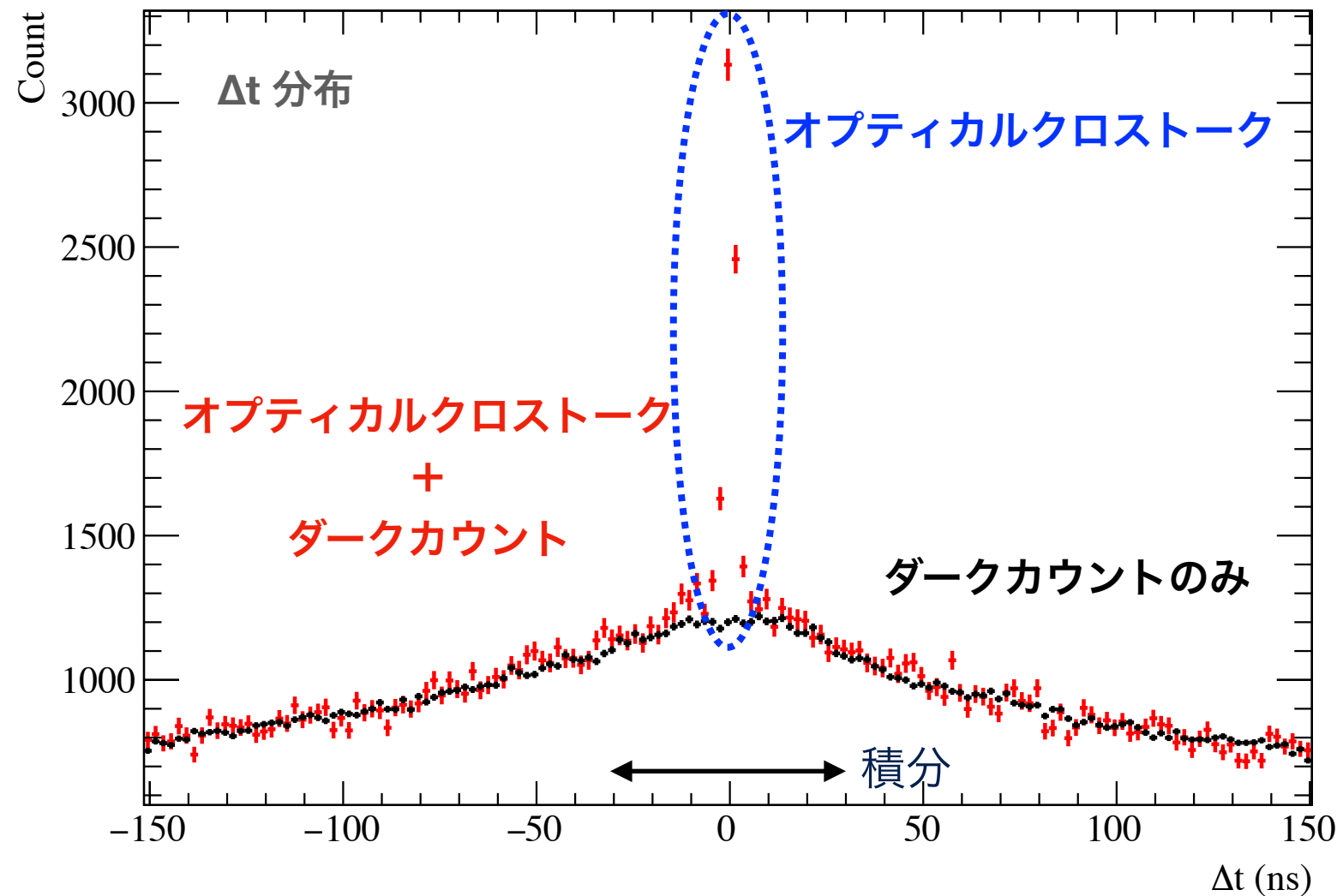
- ≫ 64画素SiPMの波形を同時に記録し、基準画素との光電子検出時刻の差を測定する
 - ≫ ダークカウントのみを使用した
 - ≫ 同時に光電子を検出したイベント数からオプティカルクロストークを算出する
 - ≫ オプティカルクロストーク
 - ≫ ダークカウントが偶然同時に検出される
- 波形から区別できない

隣接画素へのオプティカルクロストークの測定原理



- ≫ 64画素SiPMの波形を同時に記録し、基準画素との光電子検出時刻の差を測定する
 - ≫ ダークカウントのみを使用した
 - ≫ 同時に光電子を検出したイベント数からオプティカルクロストークを算出する
 - ≫ オプティカルクロストーク
 - ≫ ダークカウントが偶然同時に検出される
- 波形から区別できない

オプティカルクロストークの計算

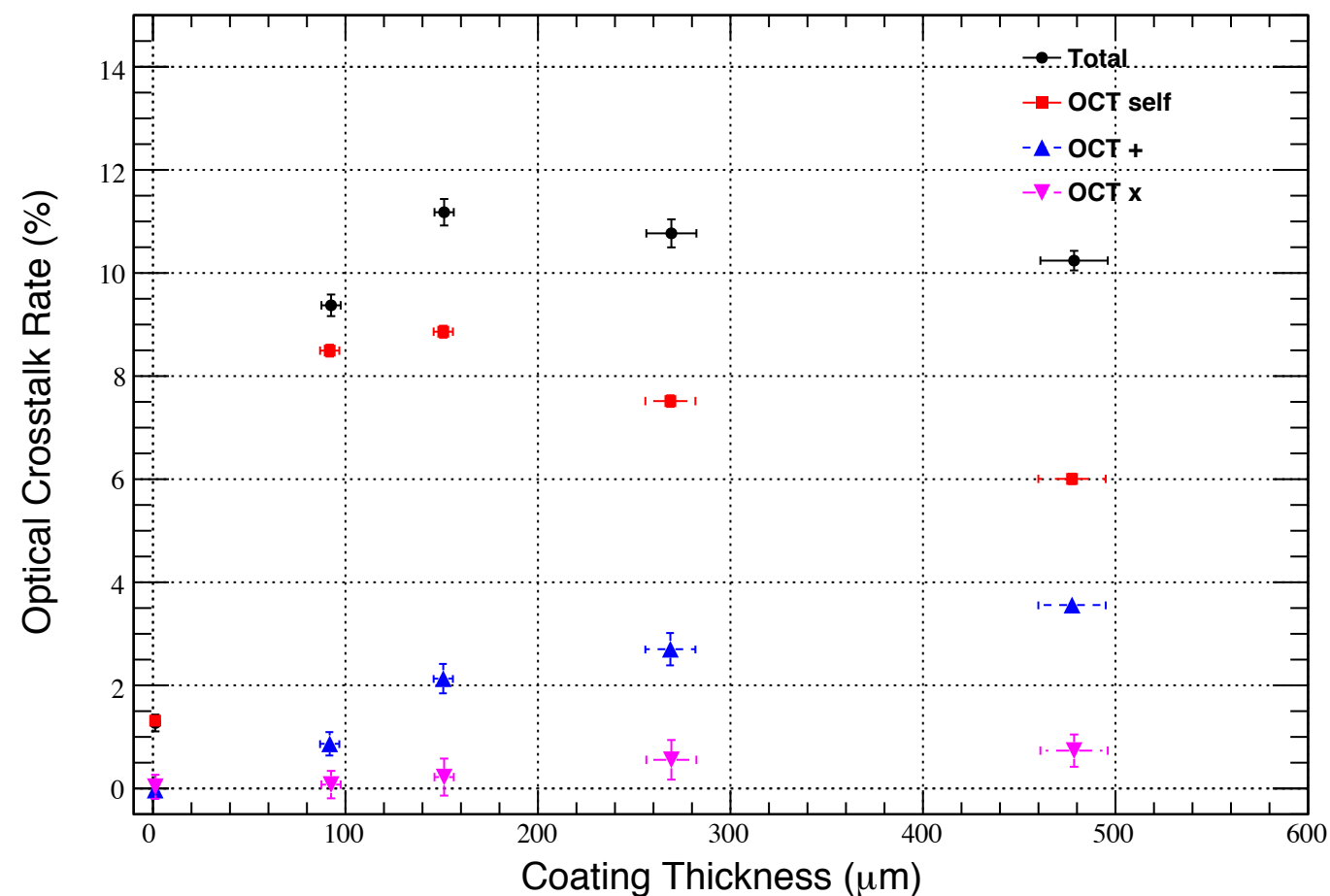


赤の分布：基準画素で光電子が検出されたイベントを使用した

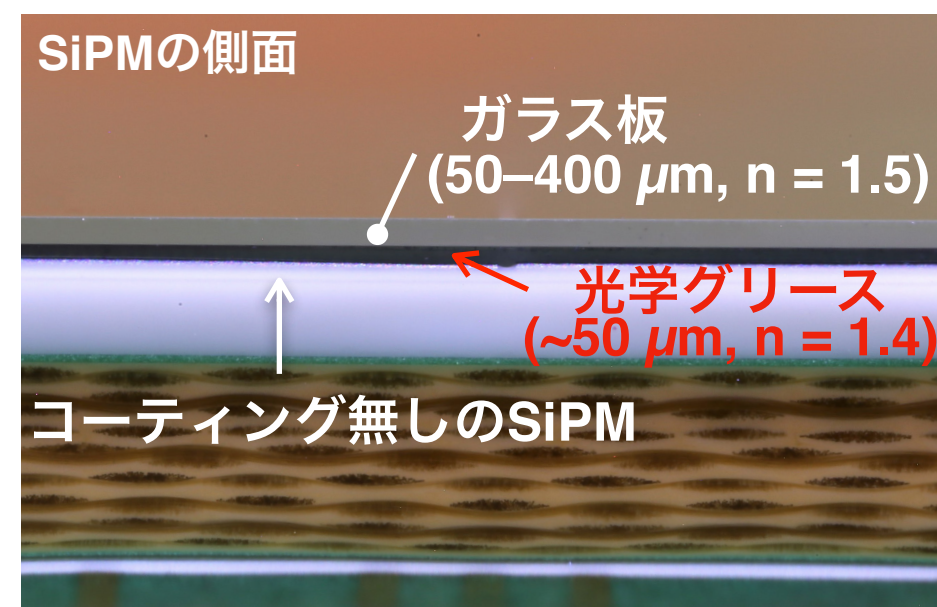
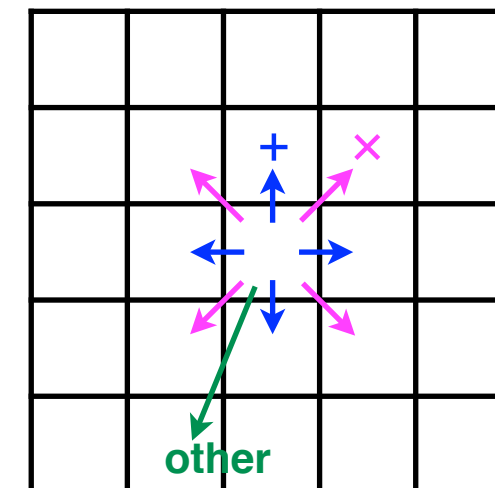
黒の分布：基準画素で光電子が検出されなかったイベントのみを使用した（オプティカルクロストークは含まれない）

ダークカウントの寄与を取り除き、オプティカルクロストークレートを算出した

SiPMアレイのオプティカルクロストークレートの保護層厚依存性

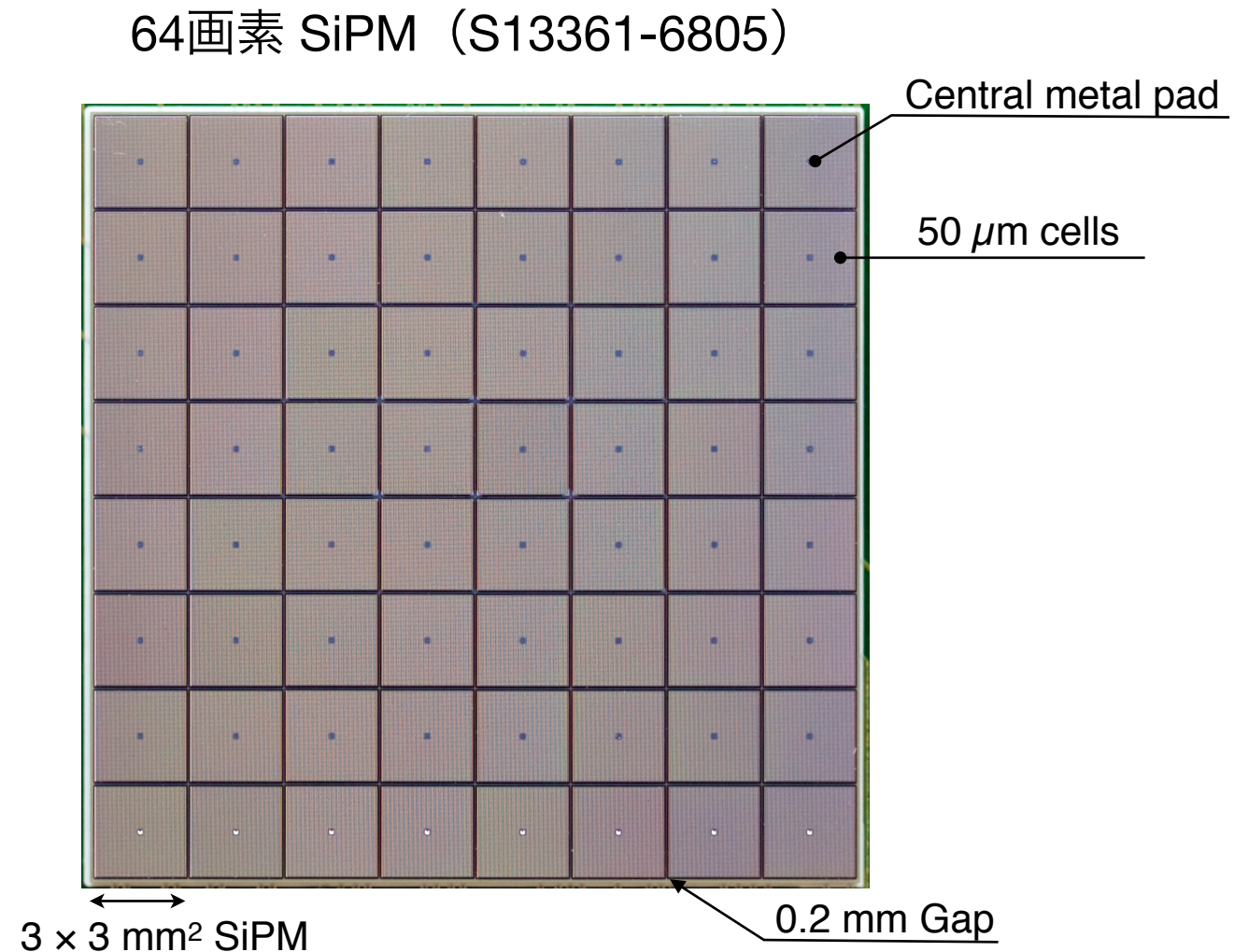
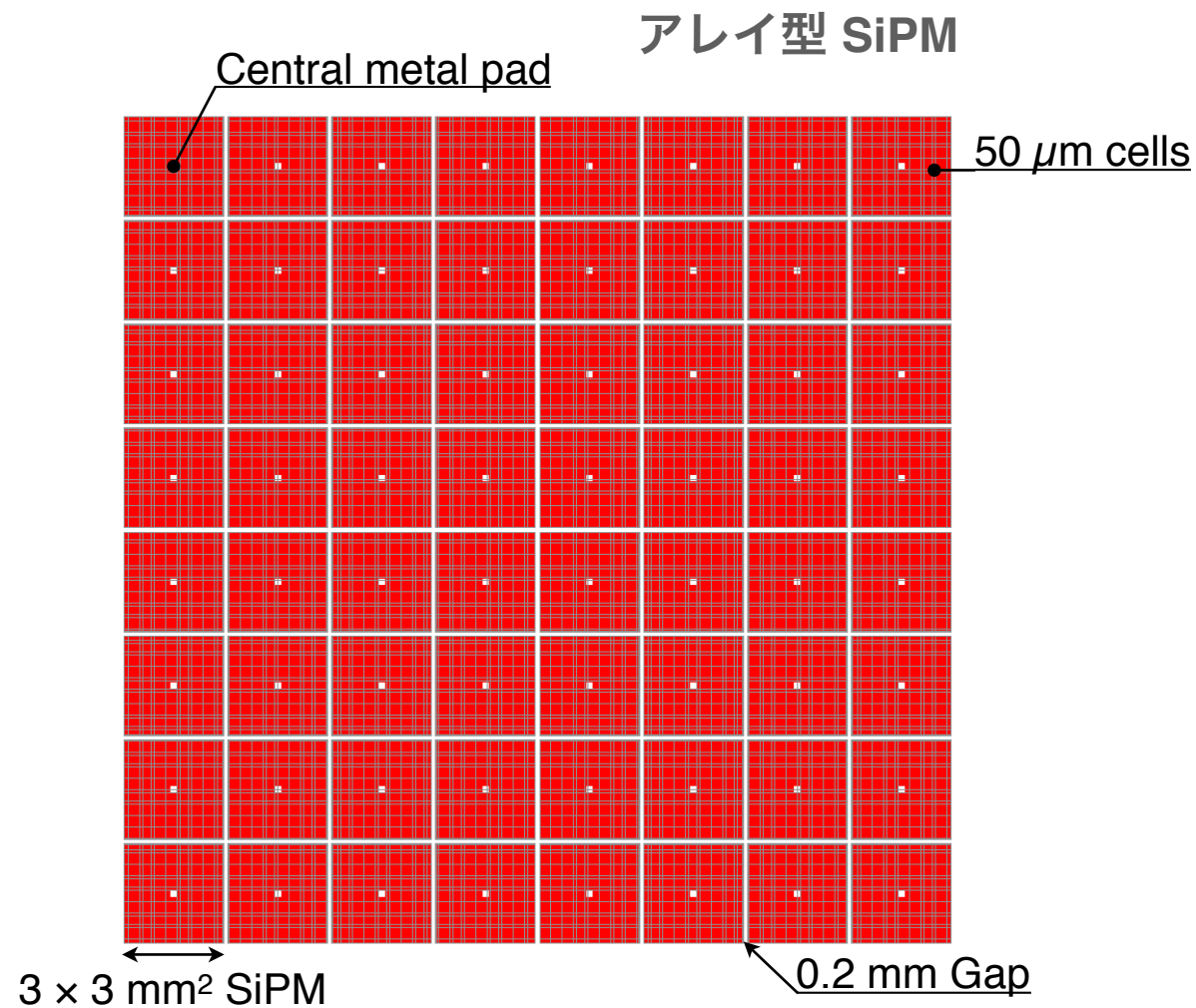


※ Self OCTは $N_{\geq 2}$ と $N_{\geq 1}$ の比から計算



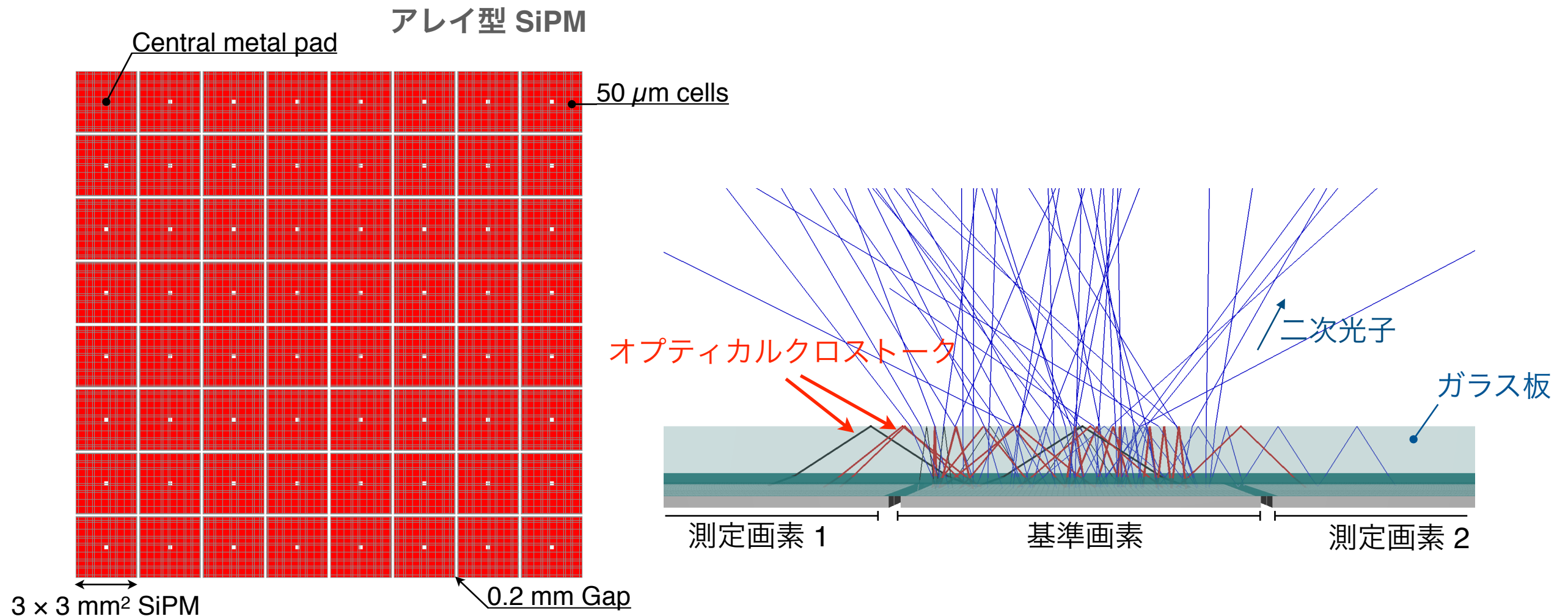
- ≫ 保護コーティングの厚さは厚さの異なるガラス板を用いて調整した
- ≫ 保護コーティングを厚くするとオプティカルクロストークは**同一画素で減少し、隣接画素へ増加する**
- ≫ 厚さが $\sim 100 \mu\text{m}$ 以上ではレートの総和は一定になる

光線追跡シミュレーション



- ❖ 二次光子の伝播によって保護層厚依存性が説明できるのか光線追跡シミュレーションを用いて検証した
 - ・ 光子を基準画素から等方的に放出、放出開始点は基準画素内で一様にした
 - ・ ガラス板の厚さを変えて厚さ依存性を検証した
 - ・ シリコン層内の伝播は考慮していない

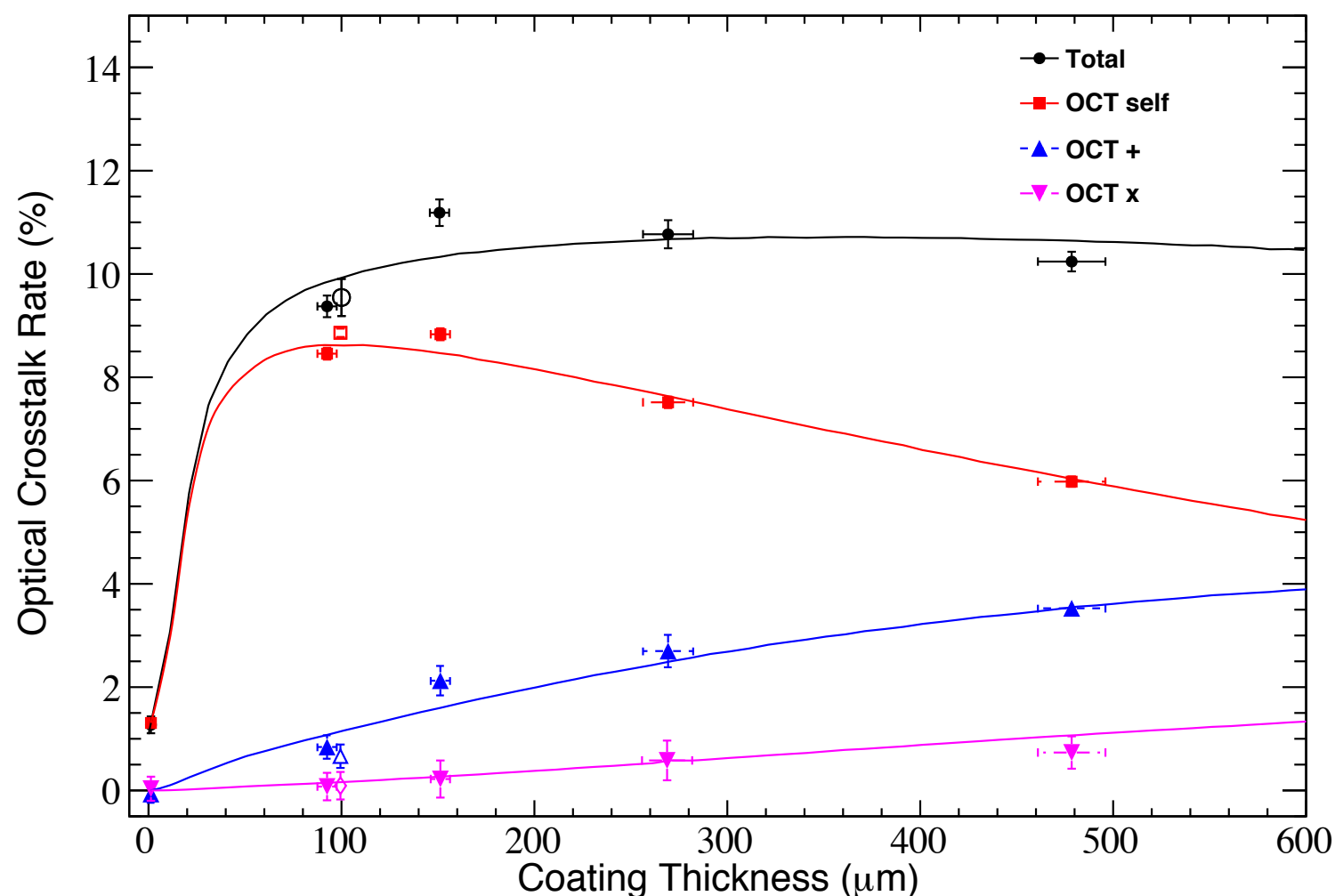
光線追跡シミュレーション



❖ 二次光子の伝播によって保護層厚依存性が説明できるのか光線追跡シミュレーションを用いて検証した

- ・ 光子を基準画素から等方的に放出、放出開始点は基準画素内で一様にした
- ・ ガラス板の厚さを変えて厚さ依存性を検証した
- ・ シリコン層内の伝播は考慮していない

実験とシミュレーションの比較



» 二次光子の伝播によって実験結果をよく説明できる

- » 放出される二次光子数は未知のため、実験結果に合うようにスケールしている
- » 保護コーティング無しの際に発生する同一画素でのオプティカルクロストークはシリコン内部を伝播したものと考え、オフセットとして同一画素のオプティカルクロストークレートに加えている

» オプティカルクロストークを抑制するためには保護コーティングを薄くする (<セルサイズ) のが最善である

まとめ

- » アレイ型 SiPM の隣接画素へのオプティカルクロストークを測定した
 - » 保護コーティングを厚くするほど増加する
 - » オプティカルクロストークの総和は厚さ約100 μm 以上では一定になる
 - » 保護コーティング無くすことで抑制できる
- » 光線追跡シミュレーションによって測定結果をよく説明できた
 - **保護コーティングの厚さ依存性は二次光子の伝播によって説明できる**
- » オプティカルクロストークの総和を抑制するためには保護コーティングは薄くすることが最善の方法である
 - * 組み立て時にはフィルムを取り付けて作業、取り付け後は直接触れないなどの注意は必要