

CTA 報告 180 :

小口径望遠鏡の保護ガラスによるSiPMオプティカルクロストークの実測とシミュレーションによる評価

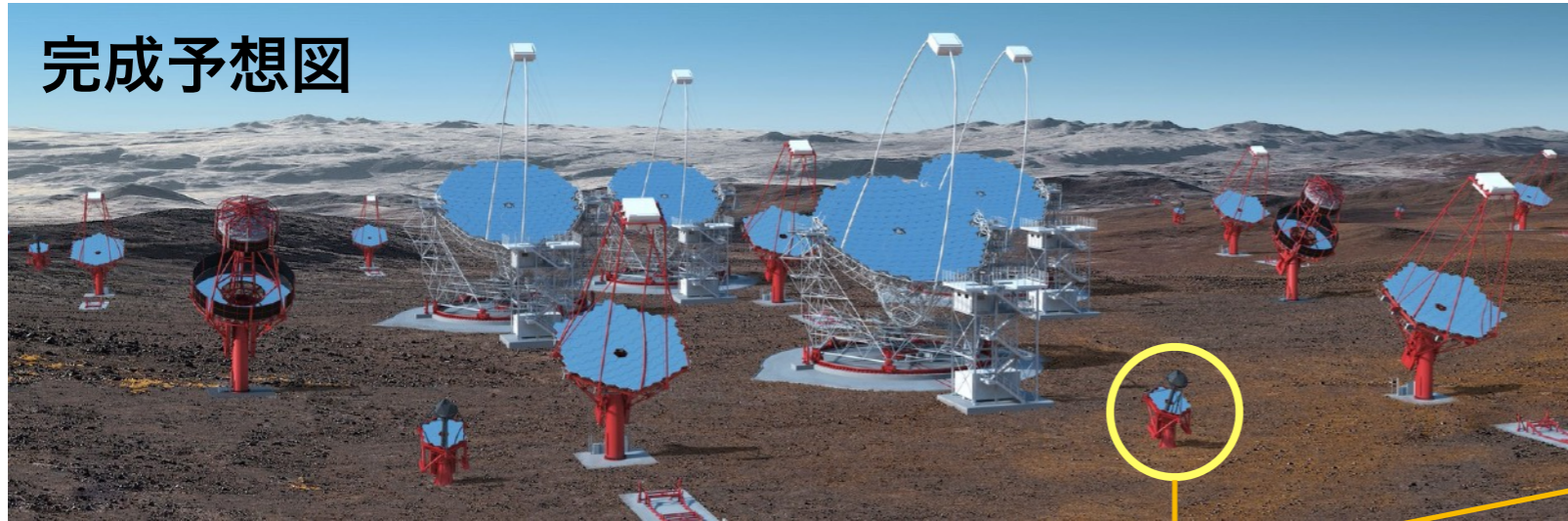
黒田裕介^A, 奥村暁^{A,B}, 古田和浩^A, 田島宏康^A

名大 ISEE^A, 名大 KMIB^B

日本物理学会 第76回年次大会 2021 / 3 / 14

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画

完成予想図



画像提供：Gabriel Pérez Diaz, IAC / Marc-André Besel, CTAO

小口径望遠鏡

南サイト
(チリ・パラナル)
に70台



主鏡 4.3 m

副鏡 1.8 m

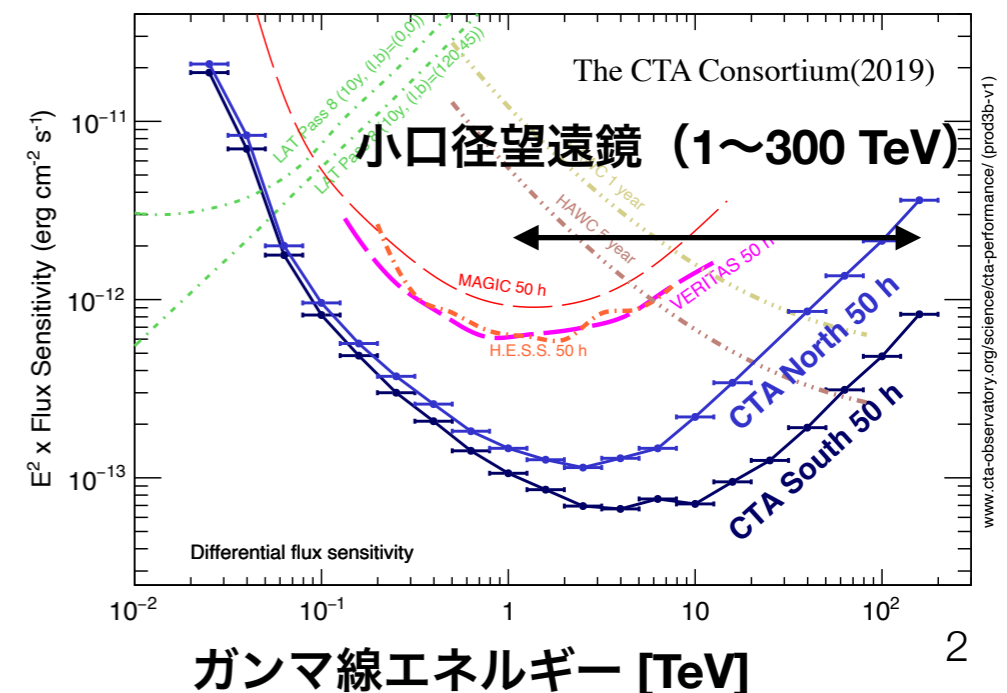
焦点面カメラ

画像提供：奥村暁

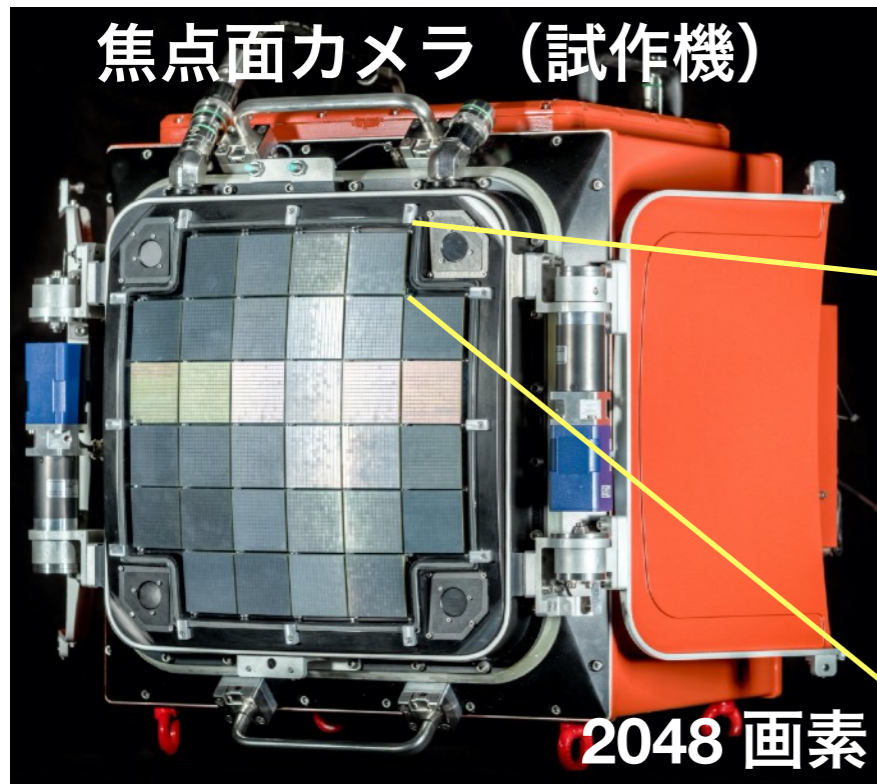
(試作機)

- 大気チェレンコフ光を利用して高エネルギーガンマ線を観測する望遠鏡計画 (CTA 報告172：全体報告 13pW2を参照)
- 大中小の口径の異なる3種類の望遠鏡を使用
- 1~300 TeV (3×10^{14} eV) のガンマ線を観測する小口径望遠鏡は70台設置
 - 2枚の鏡を用いる光学系を採用し、焦点面カメラを小型化
 - 光電子増倍管よりも小型な光検出器である半導体光電子増倍素子 (SiPM) を採用

ガンマ線源の検出感度曲線

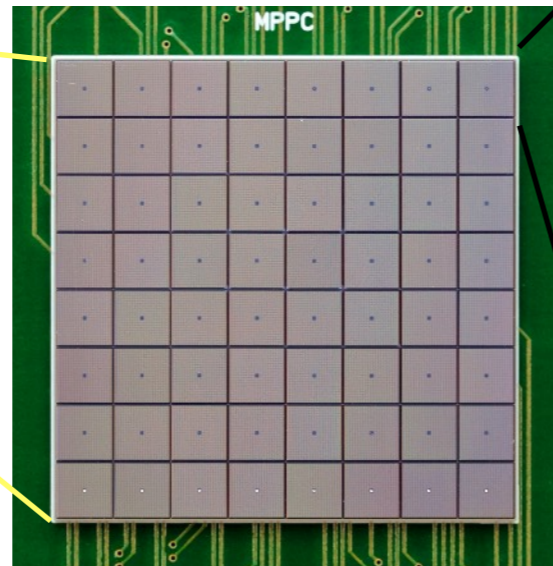


半導体光電子増倍素子 (SiPM)

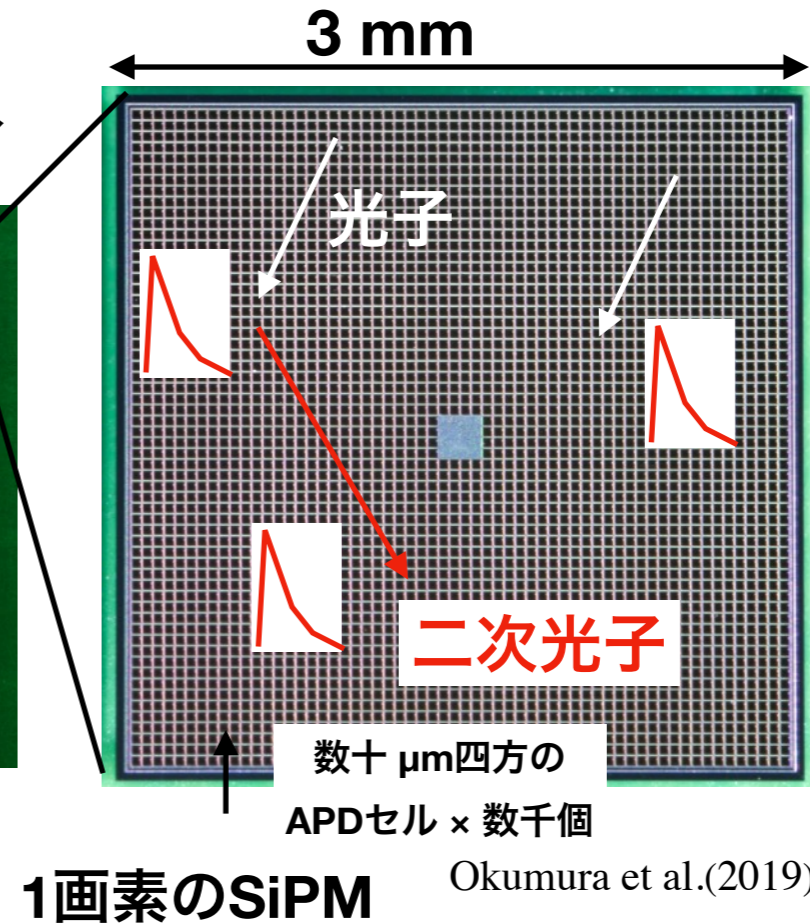


画像提供: Christian Föhr

64画素のSiPMアレイ



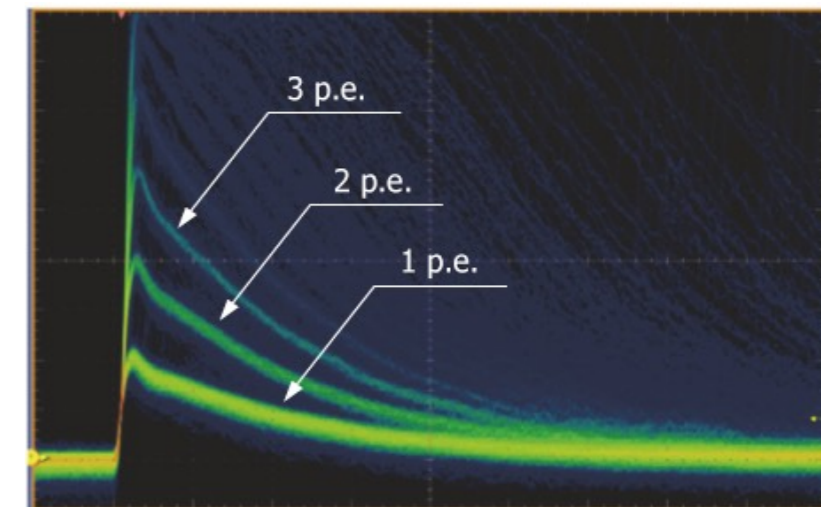
Nakamura et al.(2019)



Okumura et al.(2019)

- SiPMとは
 - アバランシェフォトダイオード (APD) セルが並列に接続された素子
 - 各APDセルの電荷 (0 or 1光電子相当) の和が画素の出力
 - 電子増幅過程で赤外線二次光子が生じる
- 二次光子が他のAPDセルで検出されると、1光電子を複数光電子と誤検出 (オプティカルクロストーク) →ガンマ線エネルギー決定の系統誤差要因
- オプティカルクロストーク発生確率の測定が必要

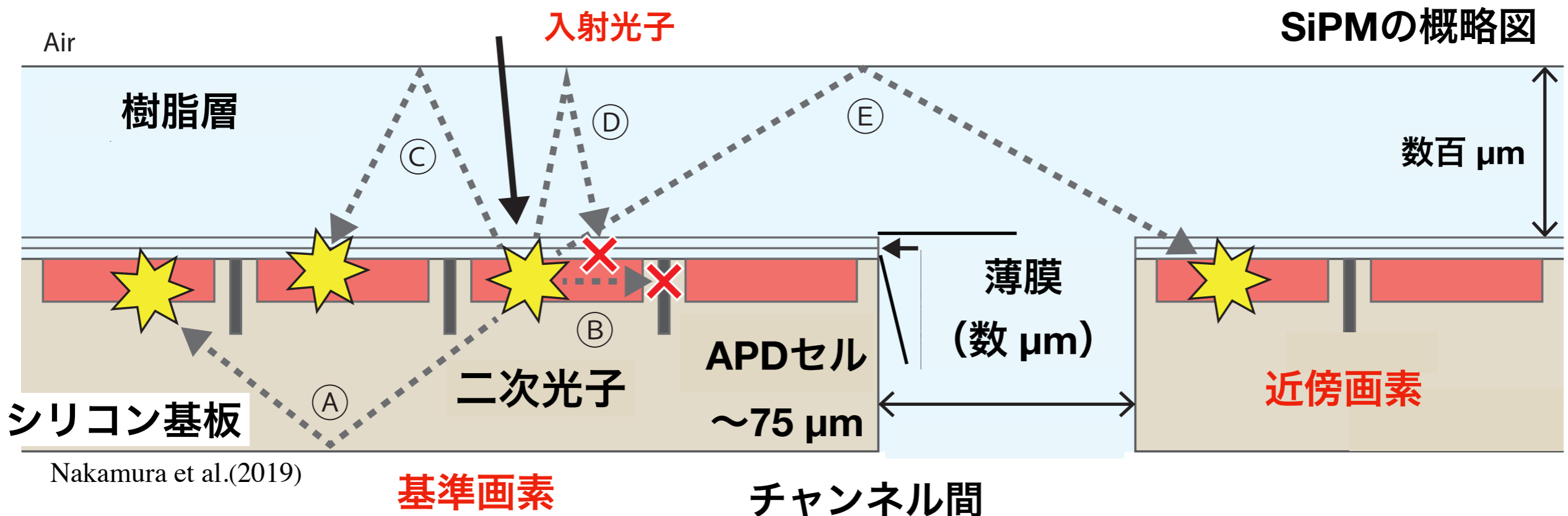
SiPMの信号



© 浜松ホトニクス

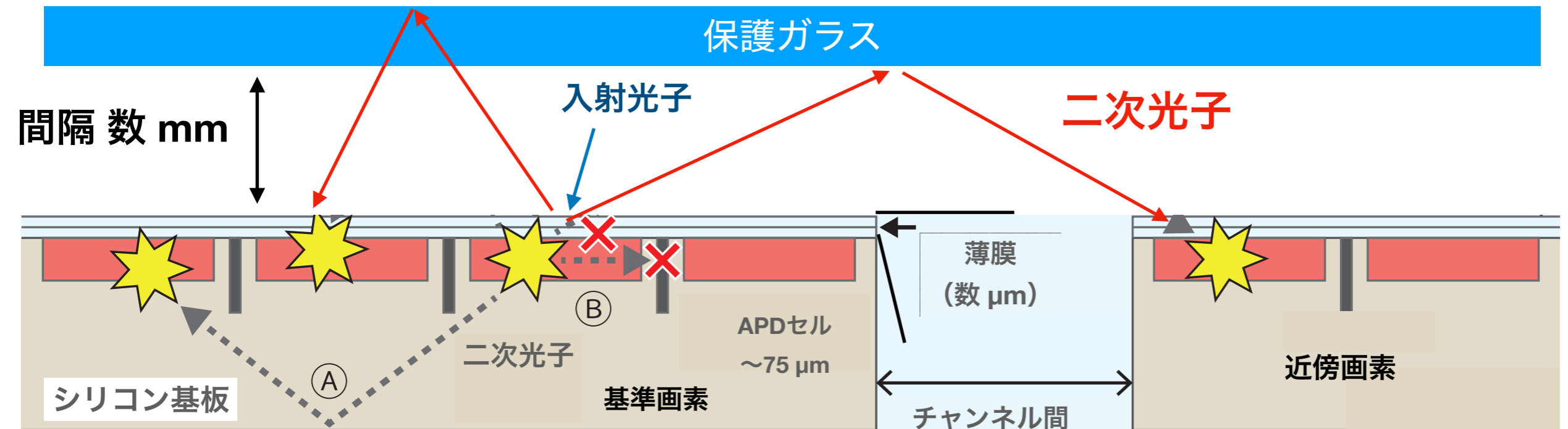
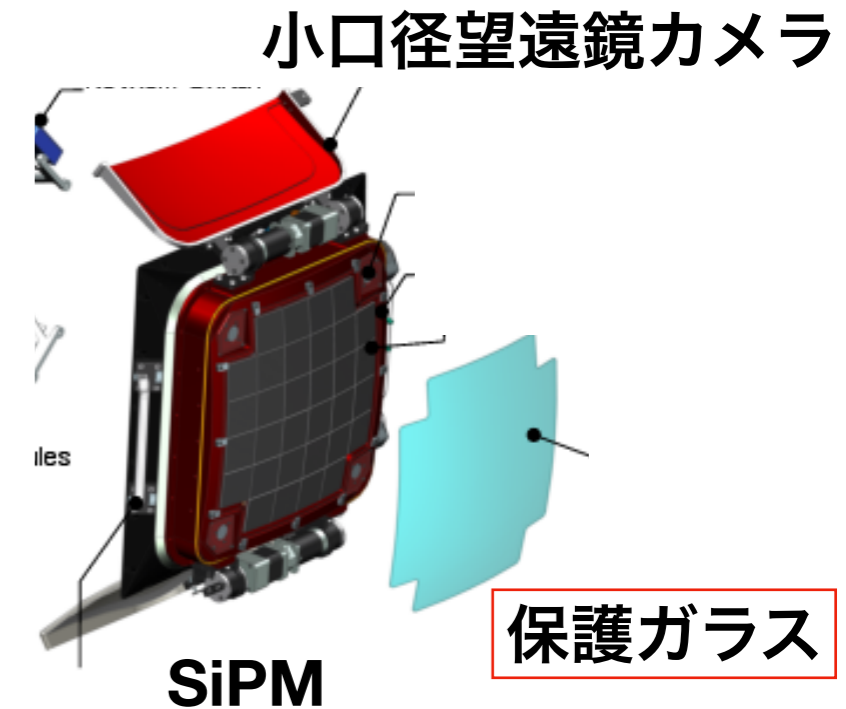
オプティカルクロストーク (OCT) の発生経路

- フレネル反射による赤外線二次光子の伝搬がOCTの発生要因
 - シリコン基板と空気層での反射 (A)
 - 表面樹脂層と空気層での反射 (C、E)
- 同一画素内だけでなく近傍画素へもOCTが発生する→チェレンコフ光像のイメージパラメーターへの影響
- CTAの先行研究では、SiPMアレイのOCTを測定し、樹脂層を取り除くとOCT発生確率を下げられる (~10%→<2%) ことがわかった。



保護ガラスによるオプティカルクロストーク (OCT)

- 小口径望遠鏡では、表面に保護ガラスを設置する → 反射光によってOCT発生確率が増加する可能性がある
→ **本研究で実測**
- 保護ガラスとSiPMの距離によっては、基準画素からより離れた画素に二次光子が入射する可能性がある
- 近傍画素のOCTはモンテカルロシミュレーションで考慮されていない
 - 保護ガラス設置時のOCTを測定とシミュレーションで評価する



Nakamura et al.(2019)

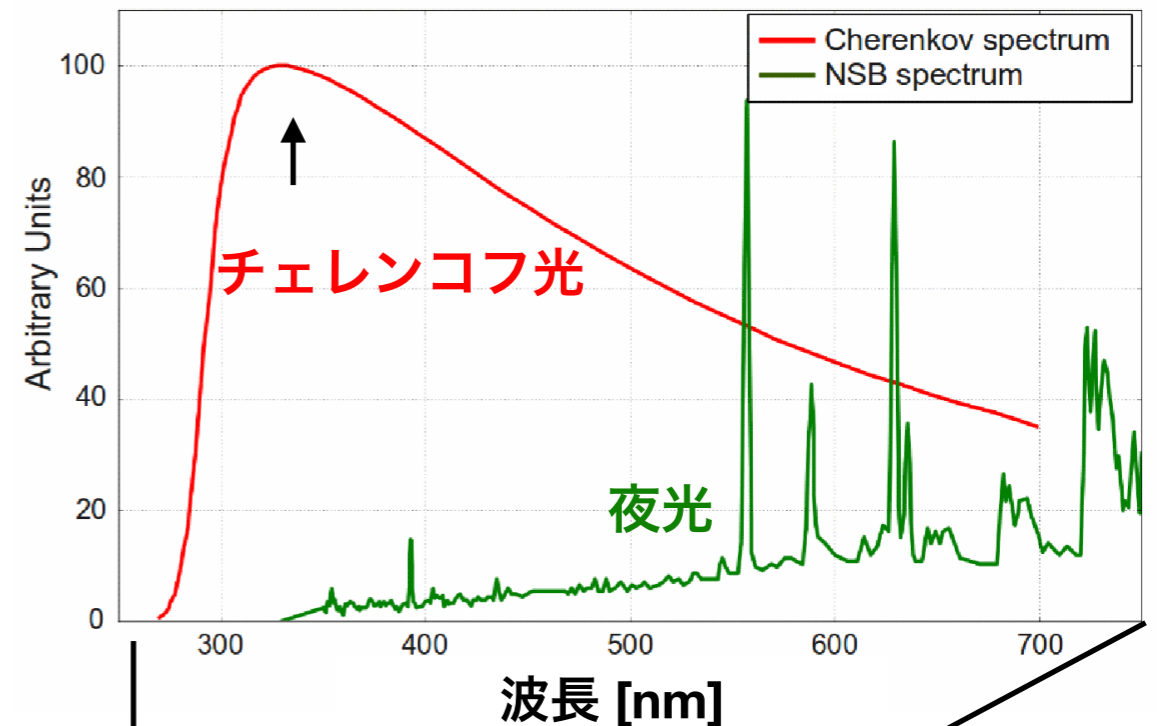
SiPMの概略図

コーティングガラスの反射率

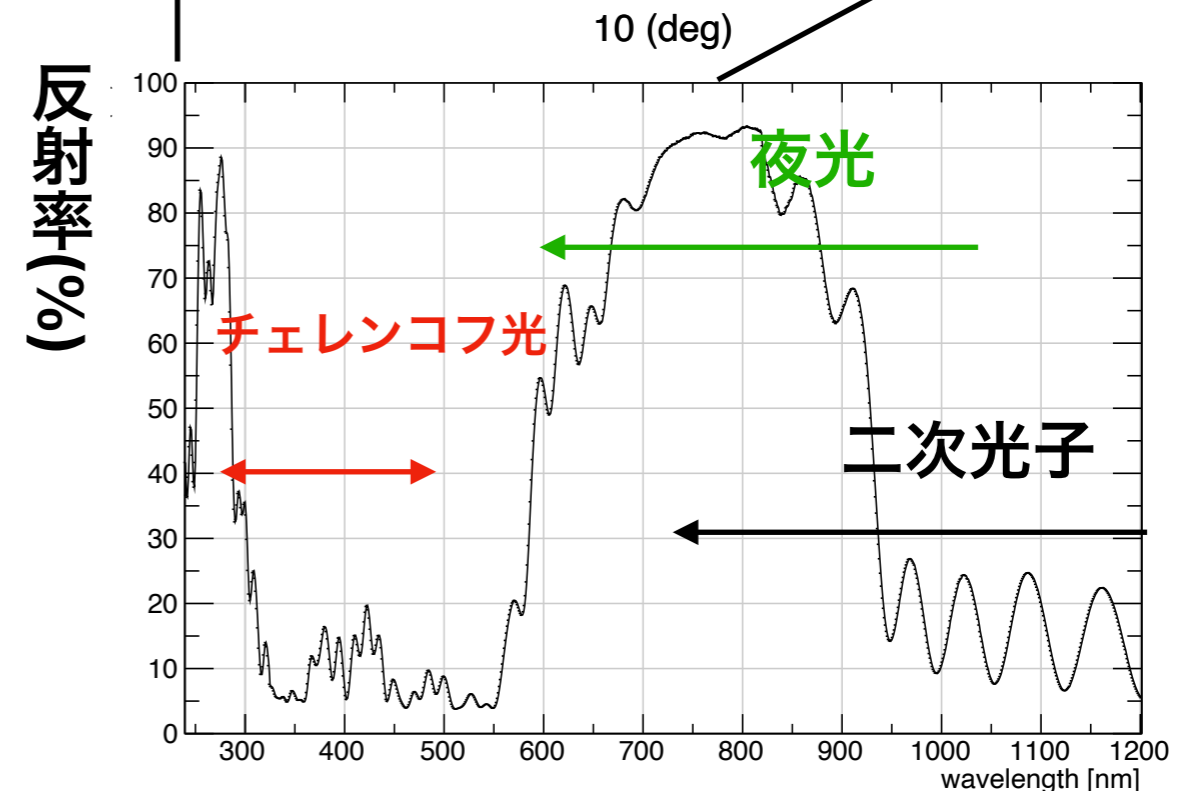
- **チェレンコフ光**を透過し、**夜光**を反射するコーティングを施したガラス
- 赤外線二次光子の反射率が上昇するため、OCT発生確率がさらに上昇する可能性がある
- コーティングガラスと単一ガラス（反射率約7%）を使用し、コーティングの有無によるOCT発生確率を調べた

単一ガラス：Borofloat

コーティングガラス：Borofloat + コーティング

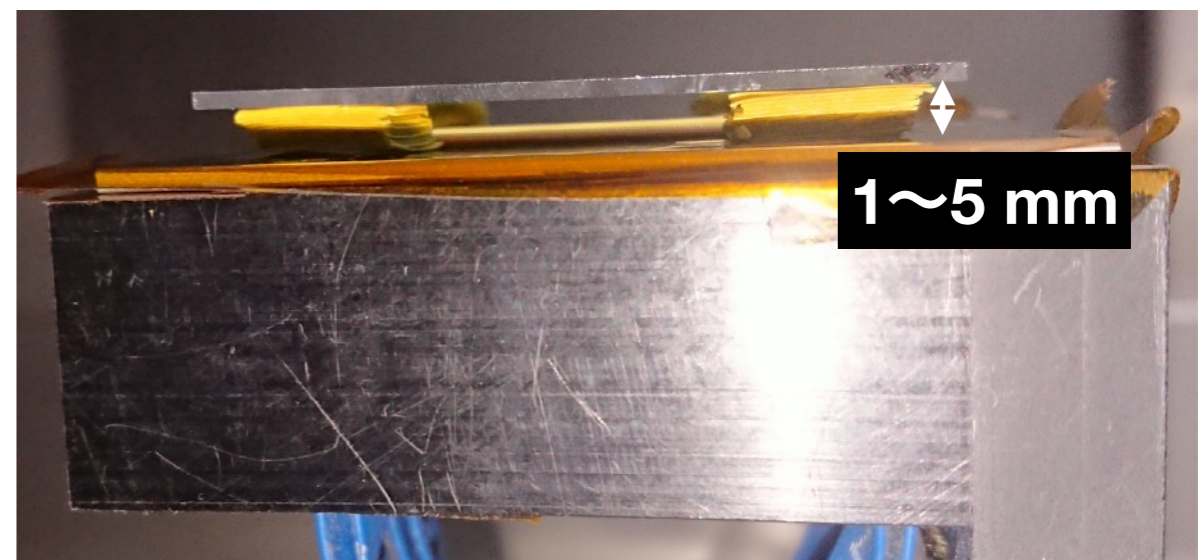
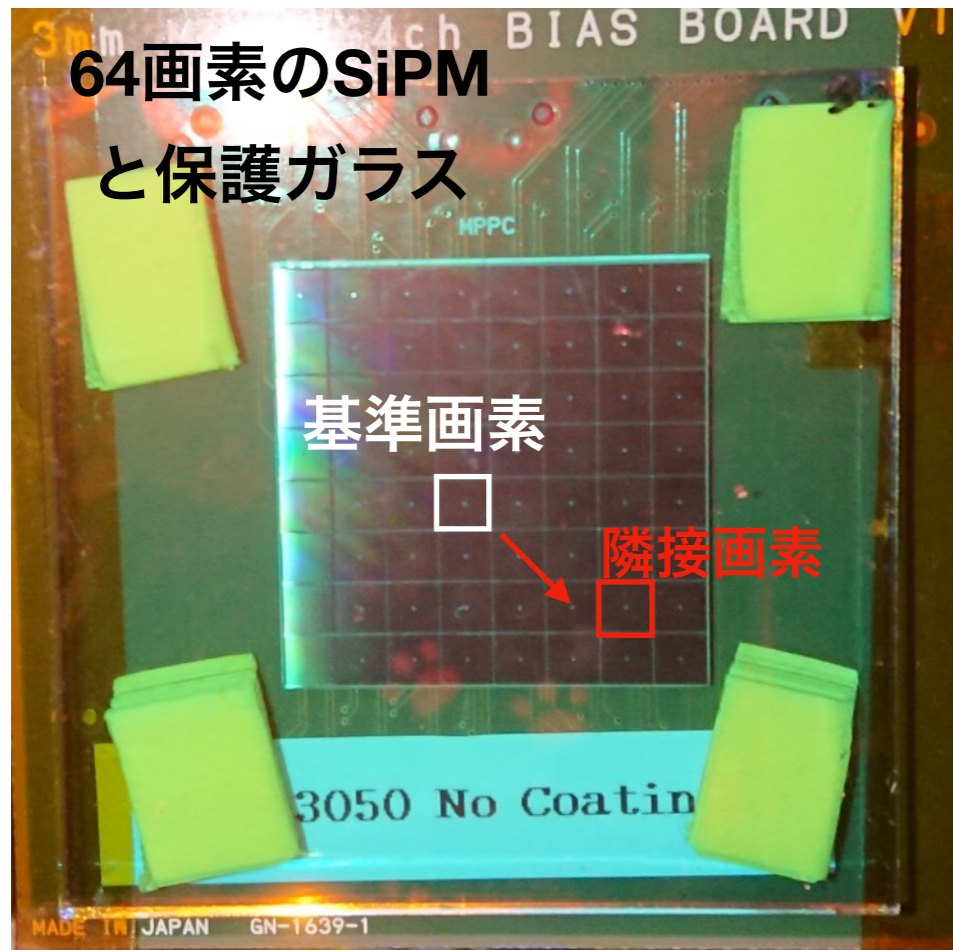


Bonardi et al.(2014)



コーティングガラスの反射率(入射角度10°)

保護ガラス設置時のOCT測定



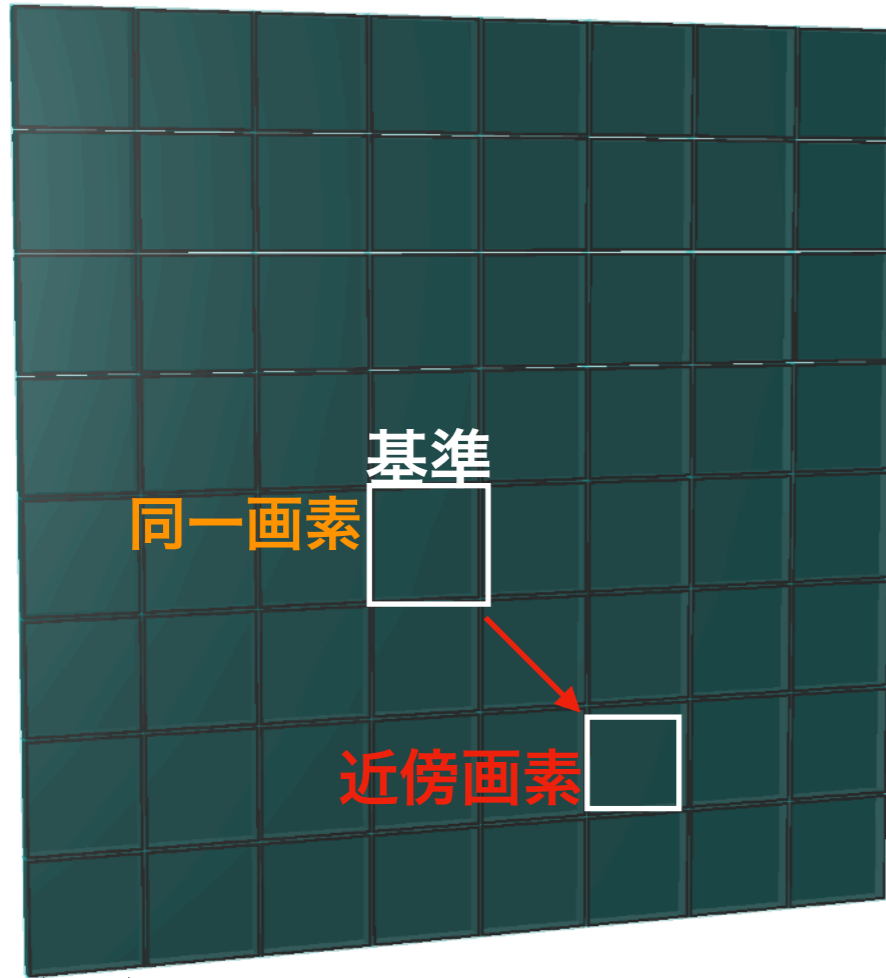
- 保護ガラス設置時の、基準画素から発生した同一画素及び近傍画素のOCT発生確率を測定
- SiPM表面と保護ガラスの間隔を変え、熱励起によって発生するランダムなダークパルスからOCT発生確率の空間分布を測定した

表面に樹脂層のないSiPM (S13361-6805 : 浜松ホトニクス製) を使用

SiPMのオーバー電圧 5V

光線追跡シミュレーション

64画素のSiPMアレイの三次元図

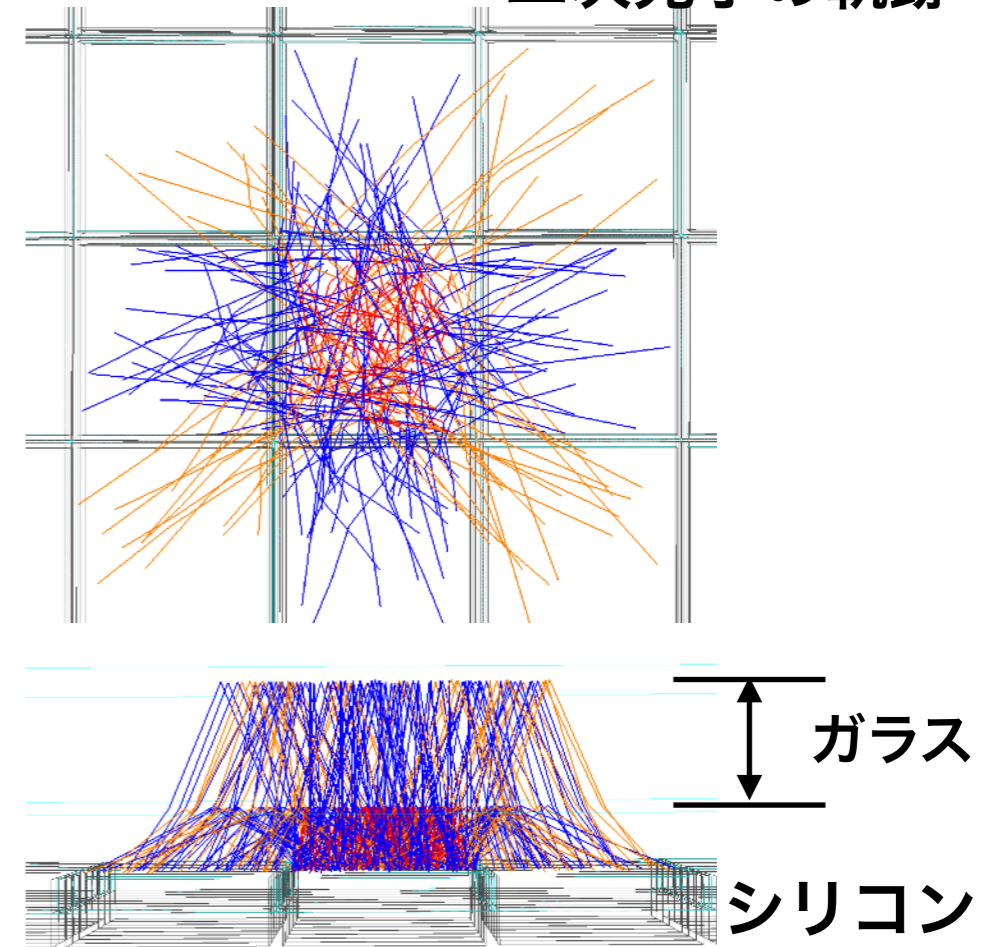


チャンネル間 0.2 mm

1 画素 3 mm × 3 mm

ROBAST(Okumura et al. 2016) を使用

二次光子の軌跡



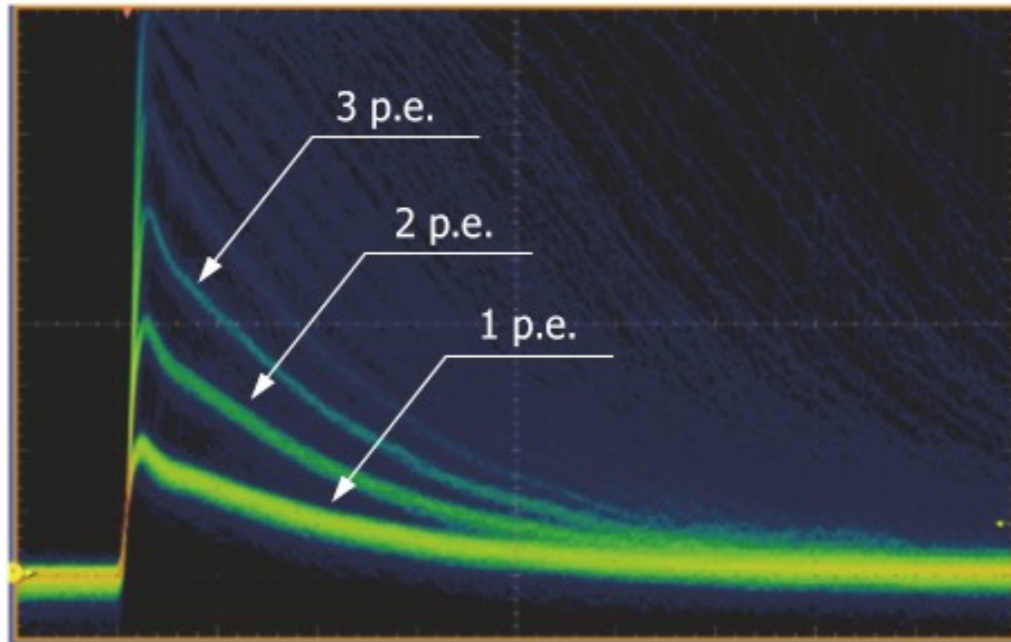
同一画素及び近傍画素に入射する二次光子

- 光線追跡シミュレーションで、基準画素保護ガラス面で反射して同一、近傍画素に入射する赤外線二次光子を計数
- 保護ガラスの距離を変化させ画素分布の距離依存性を評価
- 直接画素間に入射する、シリコン基板内及び薄膜で反射する二次光子は考慮していない

同一画素のOCT発生確率

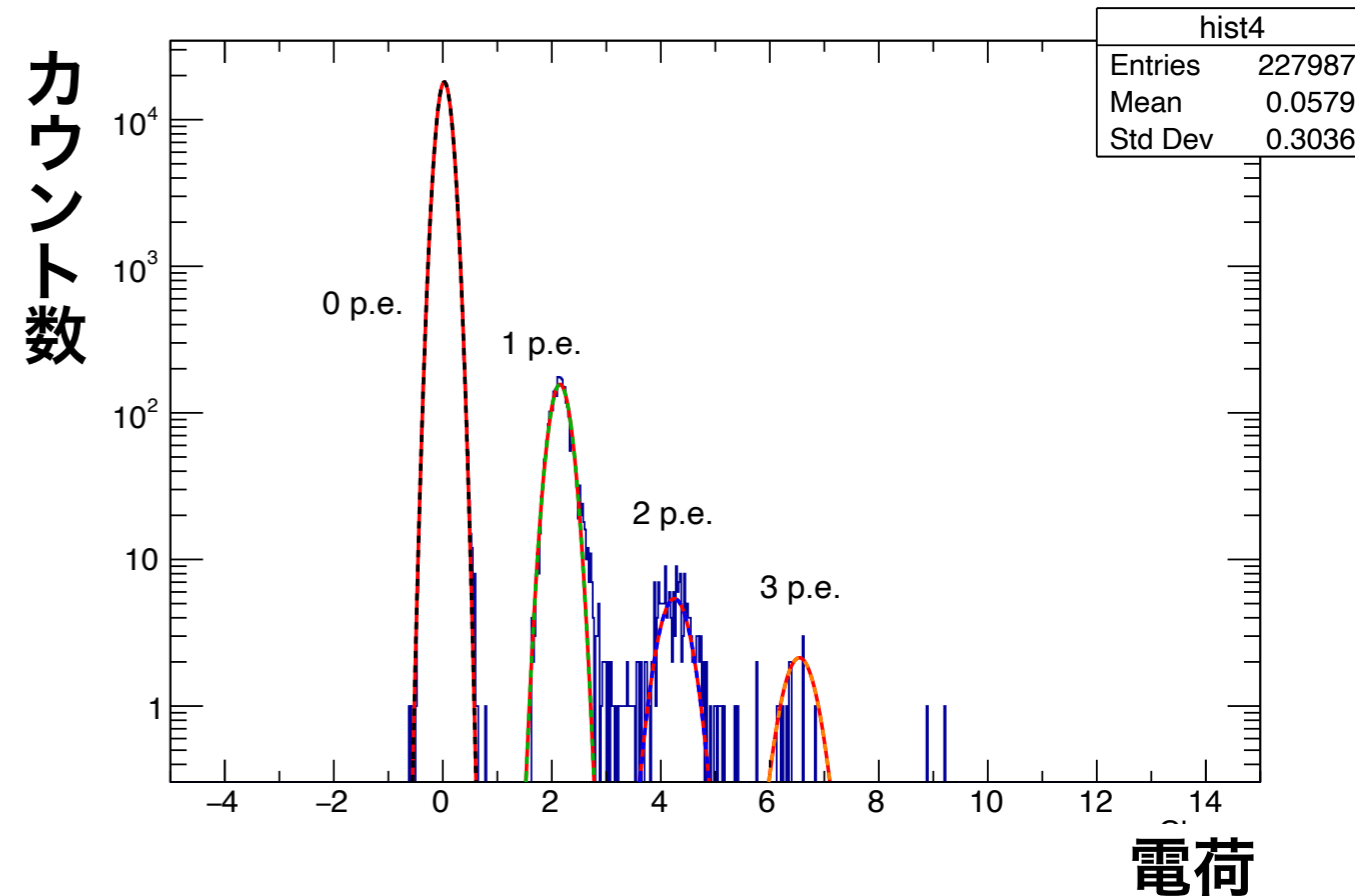
SiPMの信号

© 浜松ホトニクス



ダークパルスがOCTによって増幅されると
2 p.e.以上の出力が生じる

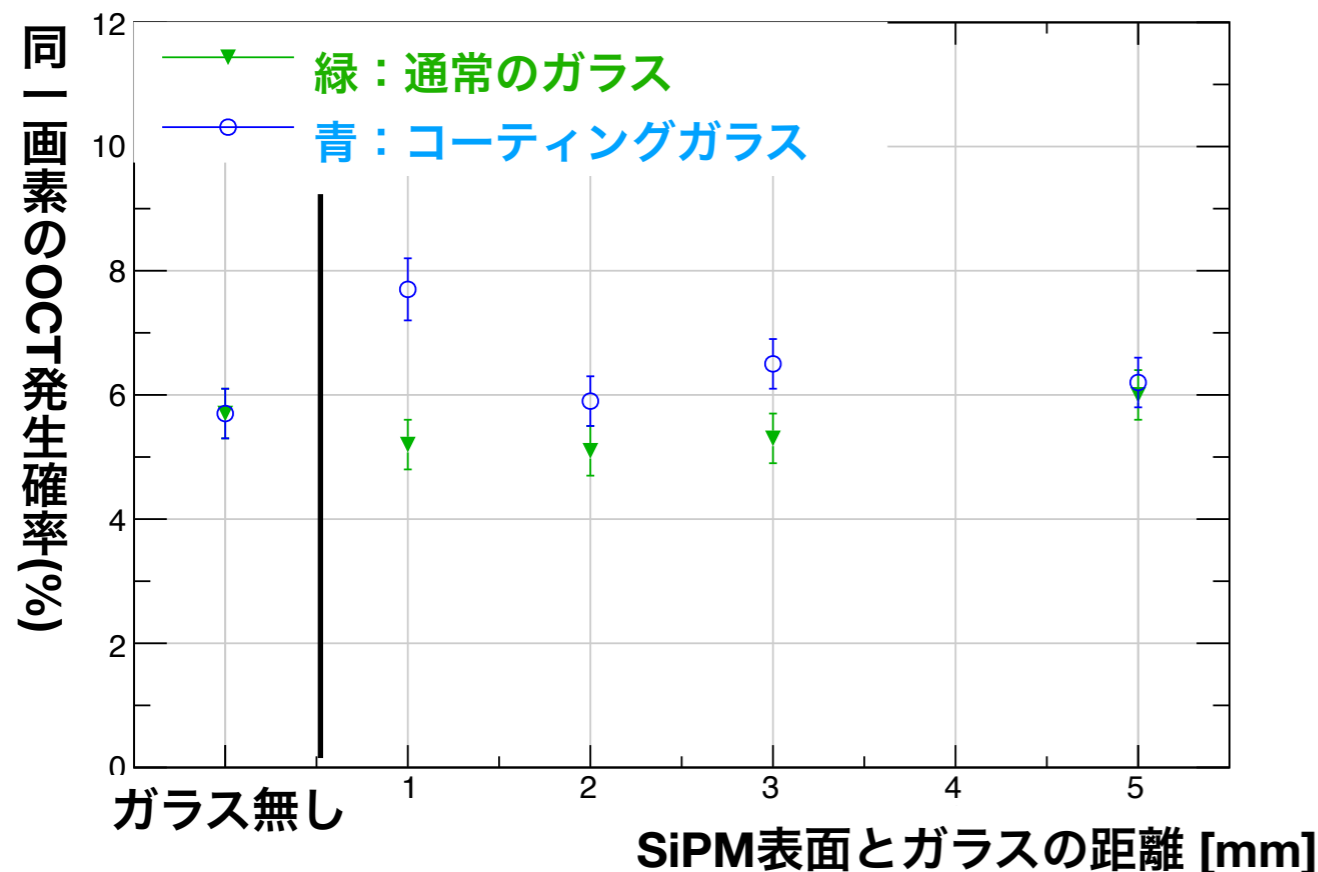
SiPM波形の出力電荷分布



- 同一画素でOCTが発生する場合、熱励起によって発生する信号であるダークパルスで複数光電子の出力が生じる
 - ダークパルスの出力電荷分布からOCT発生確率を測定することができる

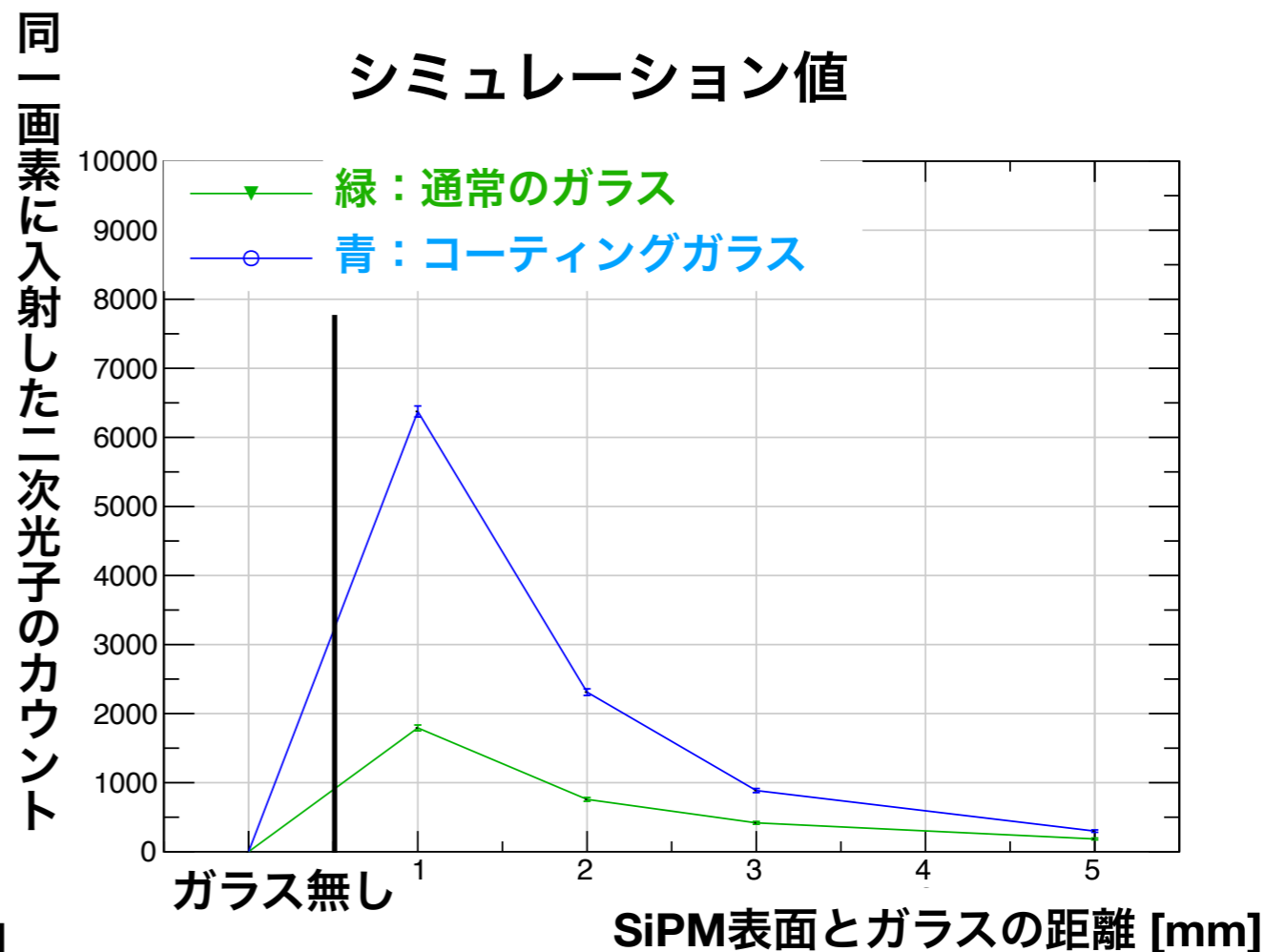
同一画素のOCT発生確率

同一画素のOCT発生確率測定値



0の時は保護ガラスがない場合を示す

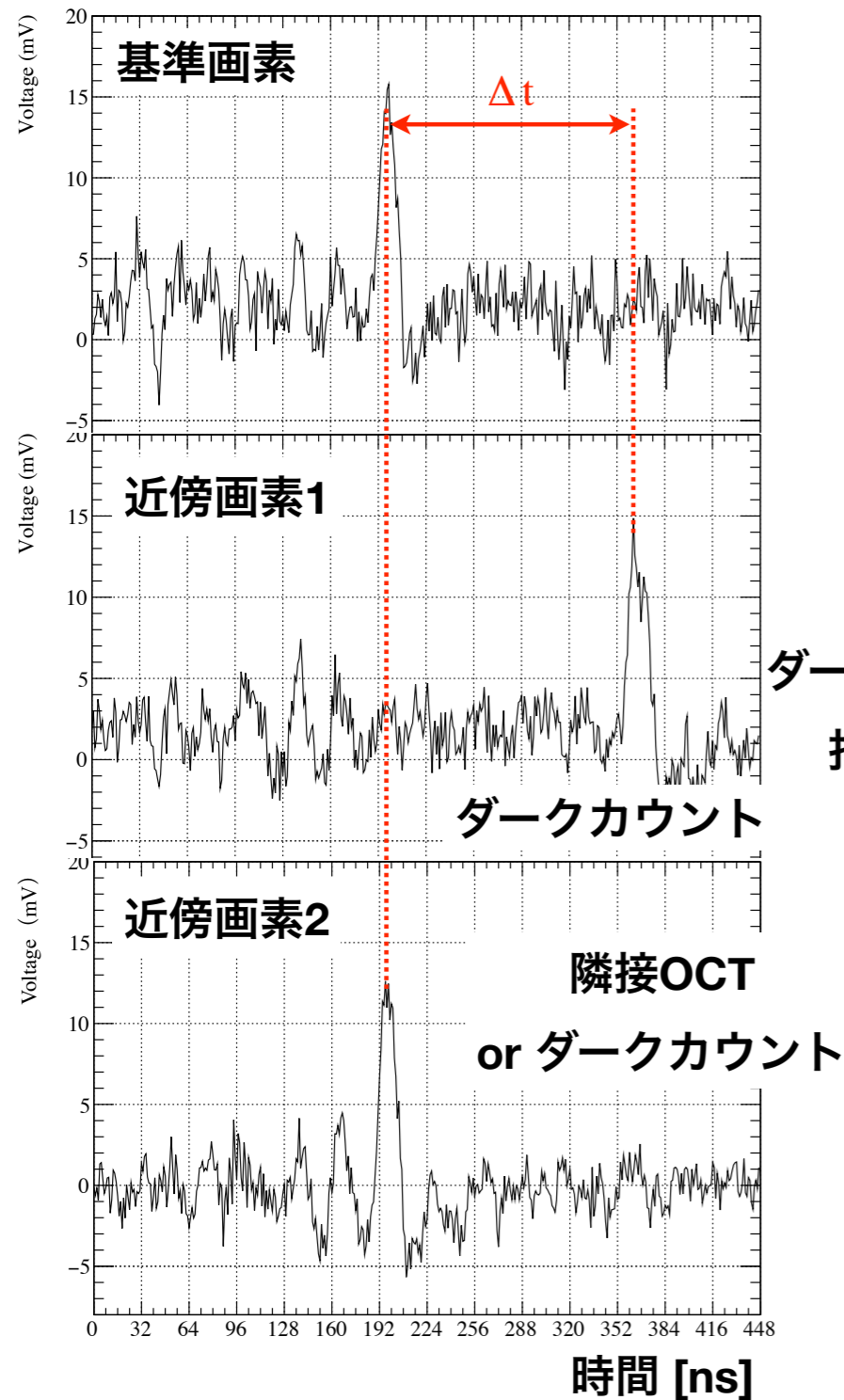
シミュレーション値



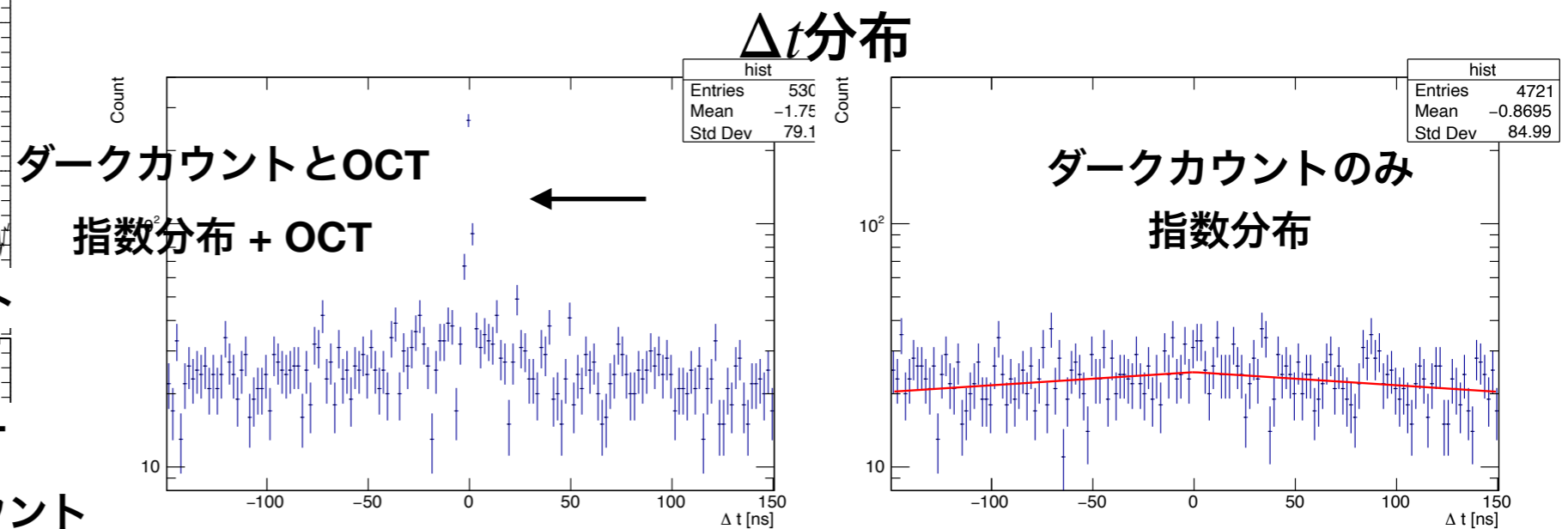
- コーティングガラスを距離1 mmに設置した時に、2%の増加が見られた
- シミュレーションでは、距離1 mmにある場合で値が大きくなり、離れると小さくなった
 - 二次光子の絶対量、及びシリコン基板内で反射する二次光子は考慮していない
- ガラスが遠ざかったことで、同一画素に戻ってくる二次光子が近傍画素に入射するようになったからだと思われる
- 先行研究 (Romeo et al. 2018、同一画素のみの測定) を再現

近傍画素のOCT発生確率

同時に観測された波形の例

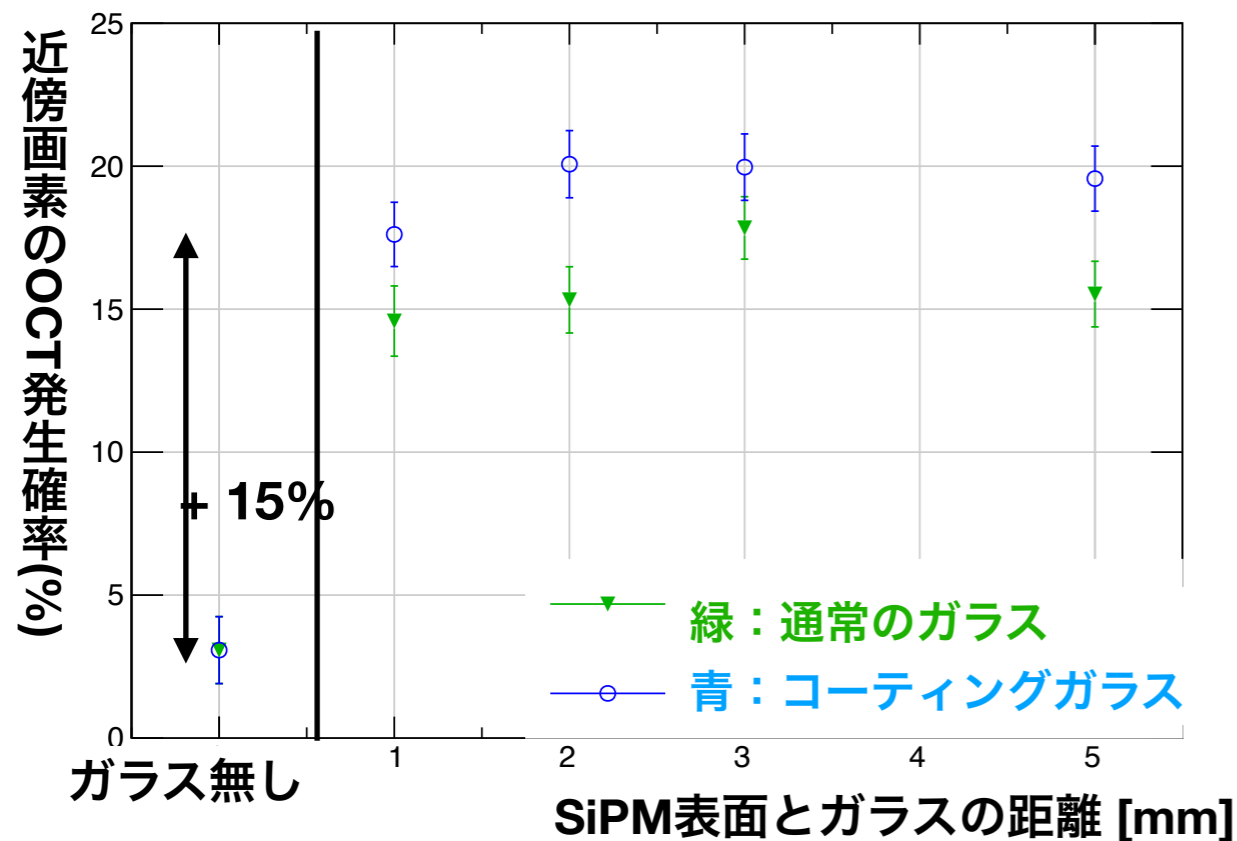


- 近傍画素へのOCTが発生すると、同タイミングでSiPMの信号が発生する
- 基準画素と近傍画素の信号の検出時刻の差 Δt の分布を求め、隣接画素のOCT発生確率を求めた

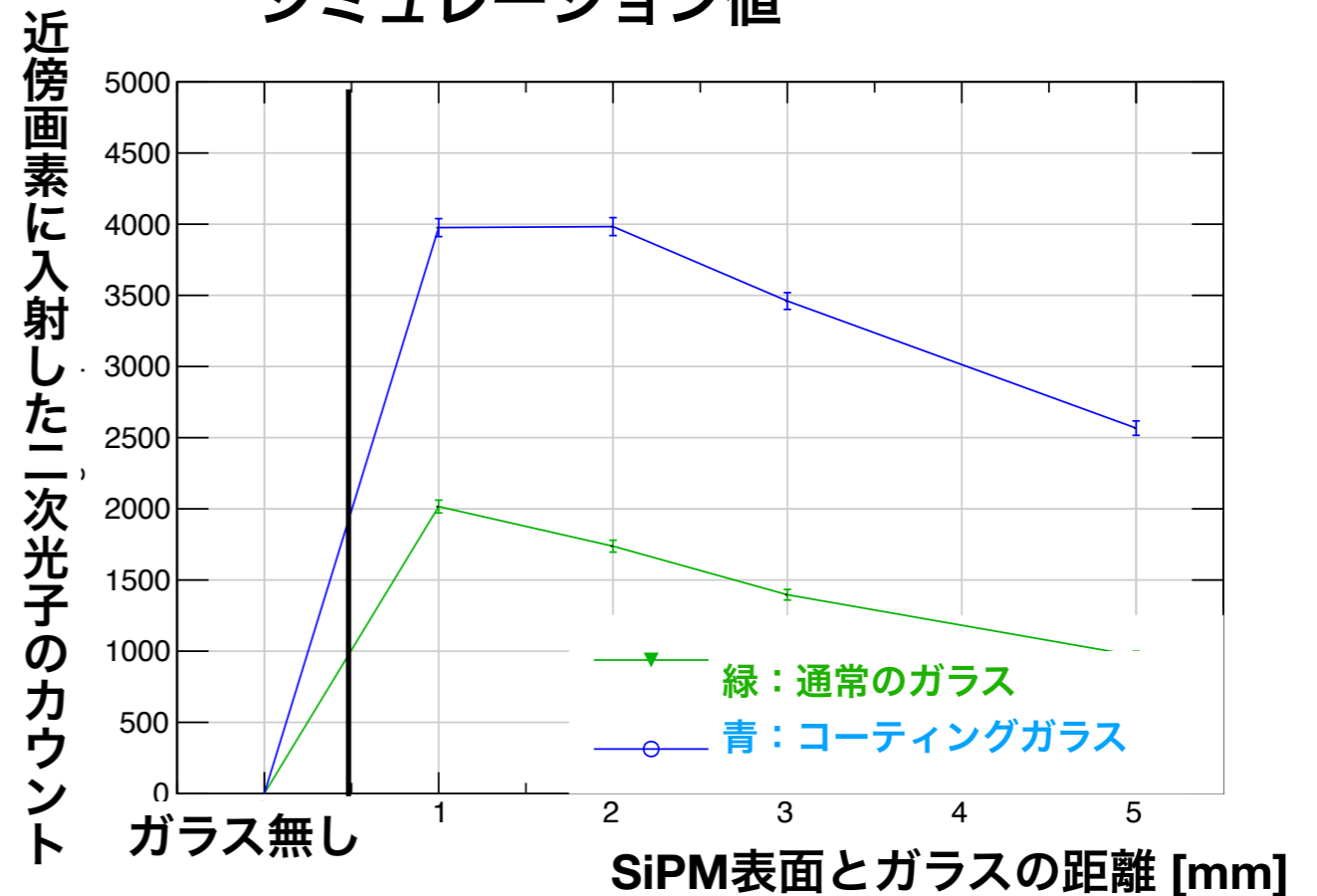


近傍画素のOCT発生確率

近傍画素のOCT発生確率測定値 (63画素合計)



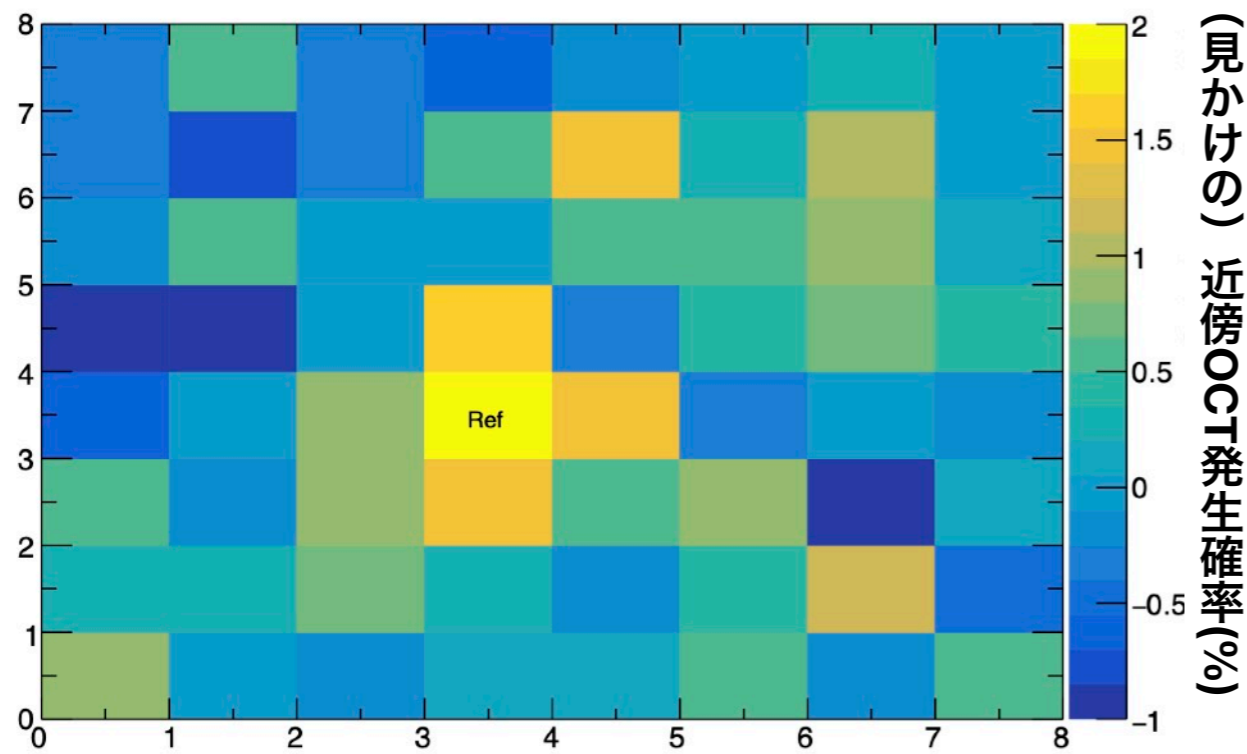
シミュレーション値



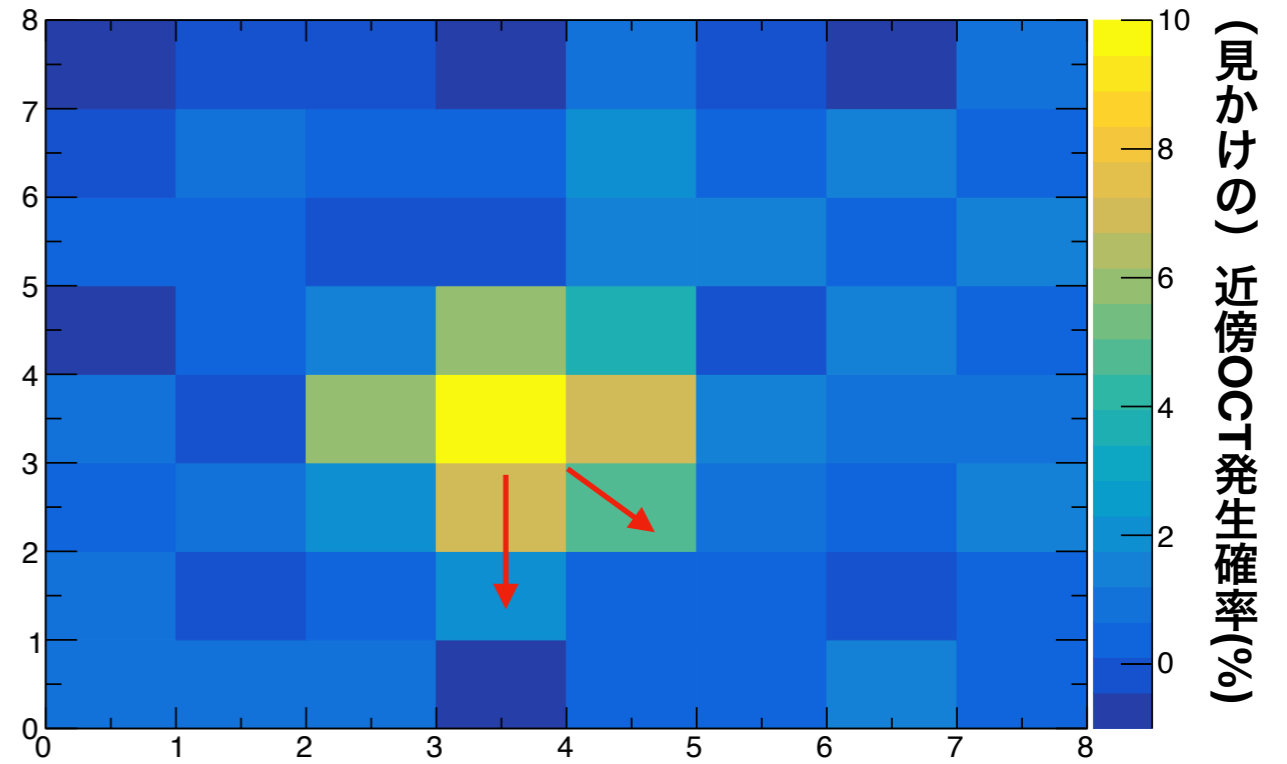
- 測定では保護ガラスが無い場合とある場合で近傍OCT発生確率が増加した (4%→15~20%)
 - コーティングガラスの使用時、数%増加している傾向が見られた
 - SiPM表面とガラスの距離によるOCT発生確率の変化はおよそ一定
- シミュレーション
 - コーティングガラスの場合では、単一ガラスと比較して近傍画素のOCTが2倍大きい
 - ガラスの距離が遠ざかるとOCT発生確率が減少する
 - 測定と一致していない→シミュレーションでは、SiPM表面の金属部分を考慮していないのが原因? 12

OCT分布

SiPMアレイの近傍画素OCT発生確率の分布



ガラス無しの場合



ガラス有りの場合

- OCT発生確率の画素分布
- ガラスを設置した場合に近傍OCTが増加
 - 特に、離れた画素で増加してしまう
- 本測定で、保護ガラス及びコーティングによるOCTの増加が見られたので、OCTの観点から適切なデザインが必要であることがわかった。

まとめ

- 保護ガラス設置時の同一画素及び近傍画素のオプティカルクロストーク（OCT）発生確率を測定した
 - 保護ガラスによって、SiPM単体でのOCTが増加してしまうことがわかった
 - 保護ガラス及びコーティングによるOCTの増加が見られたので、適切なデザインが必要であることがわかった
- 光線追跡シミュレーションではガラスの有無、SiPM表面とガラスの距離による近傍画素のOCT発生確率の変化を説明できていない
 - SiPM表面の形状等による改善が求められる
- 今後の課題
 - シミュレーションの改善
 - 2048画素の焦点面カメラでのOCTの測定、較正