

次世代電子・陽電子コライダー実験のためのPPDを用いた細分型電磁カロリメータの研究

Study of a segmented electromagnetic calorimeter using Pixelated Photon Detector for next-generation electron-positron collider experiments

2020/1/21 修士論文審査会

理学系研究科 物理学専攻
山下研究室 茂木駿紀

研究目的

研究内容：

ヒッグスファクトリー実験に向けたシンチレータ電磁カロリメータの開発

目的：

シンチレータストリップの改善

検出光子数の位置依存性の改善

MIPに対する十分な光量、全検出光量の向上

PPDの増倍率向上

ピクセルピッチを小型化、PPDのダイナミックレンジを拡大

アンプの低消費電力化

シンチレータストリップとPPDの改良による、ScECAL性能向上を目指す

Outline

研究概要

- 研究目的
- ヒッグスファクトリーについて
- ScECALについて

シンチレータの最適化

- 読み出し方法の比較と測定
- シミュレーションによる結果の検証
- エネルギー分解能改善を目指したシンチレータ形状開発

高増倍率PPDの開発

- TCADシミュレーションの概要
- PPDガイガー増幅の再現

今後の課題

ヒッグスファクトリー実験

ヒッグスファクトリー：ヒッグス粒子を大量生成して新物理を検証

International Linear Collider (ILC)

$$\sqrt{s} = 250 \text{ GeV} - 1 \text{ TeV}$$

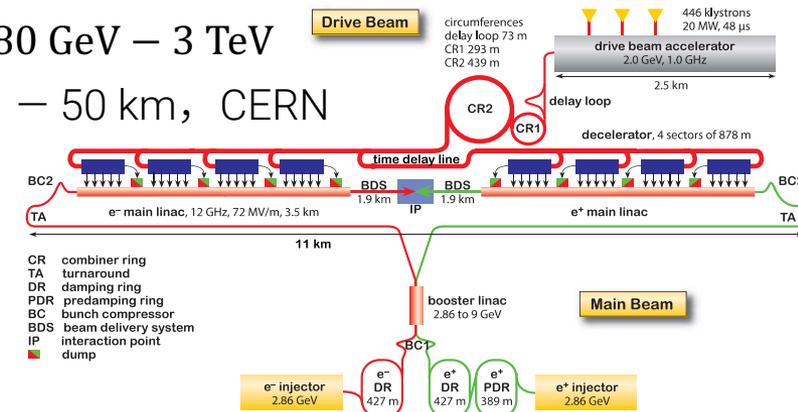
全長 20 - 50 km, 東北地方 北上山地



Compact Linear Collider (CLIC)

$$\sqrt{s} = 380 \text{ GeV} - 3 \text{ TeV}$$

全長 11 - 50 km, CERN

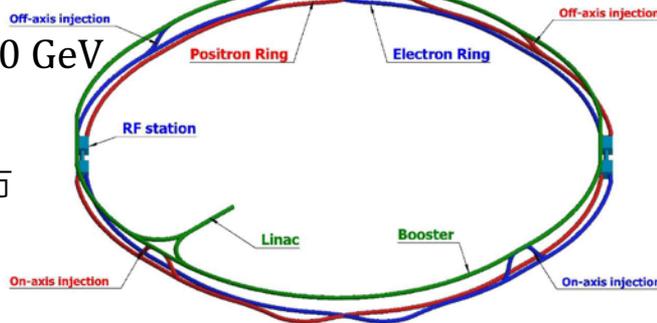


Circular Electron Positron Collider (CEPC)

$$\sqrt{s} = 91 - 240 \text{ GeV}$$

周長 100 km

中国 秦皇島市

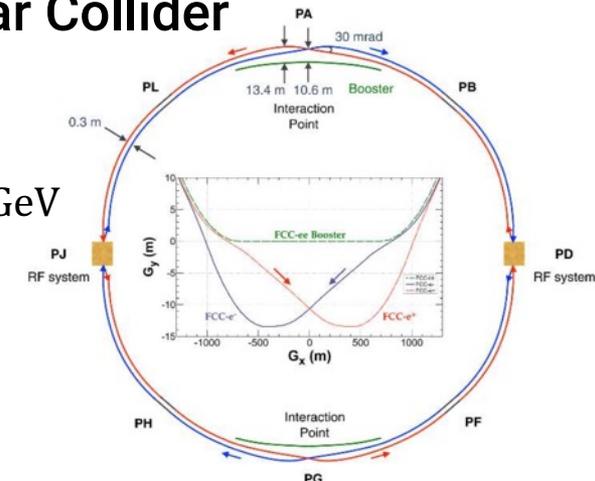


Future Circular Collider (FCC-ee)

$$\sqrt{s} = 91 - 365 \text{ GeV}$$

周長 100 km

CERN



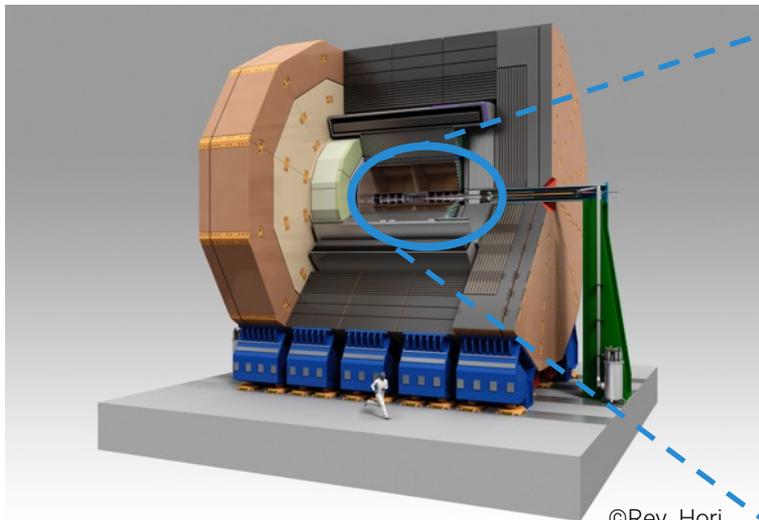
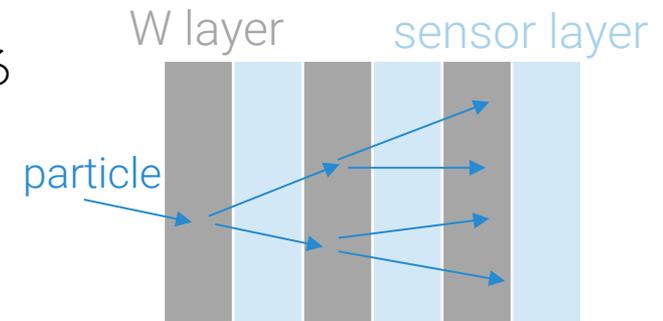
電磁カロリメータ

カロリメータ：物質量を大きくして中性粒子をとめる

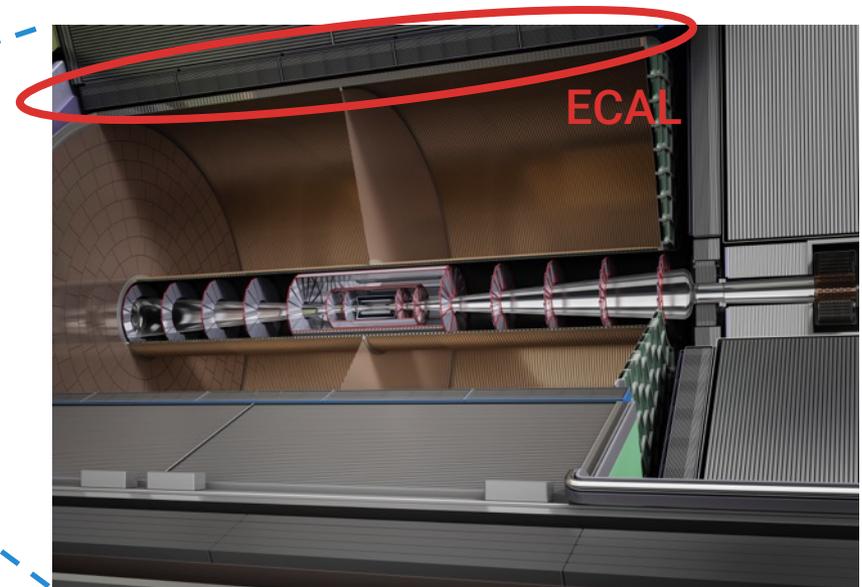
- 30層の検出層と吸収層からなるサンプリングカロリメータ
- 吸収体：W ($X_0=3.5 \text{ mm}$, $R_M=9.3 \text{ mm}$)

検出層のオプション

- SiWECAL (読み出し: silicon pad): **高精細**, 100,000,000チャンネル
- ScECAL (読み出し: scintillator + PPD): **低コスト**, 10,000,000チャンネル



ILC International Large Detector



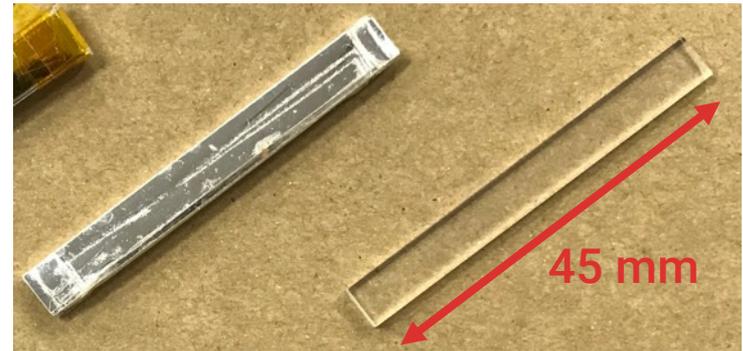
Scintillator ECAL (ScECAL)

ScECALの検出層：**シンチレータ+PPD**

シンチレータストリップ

プラスチックシンチレータ + 反射材

サイズ：5 mm x 45 mm x 2 mm



Pixelated Photon Detector (PPD)

有感領域：1 mm x 1 mm

増幅率： **10^5** (PMT： 10^6 – 10^7)

ピクセルピッチ：**10 μ m** or **15 μ m**

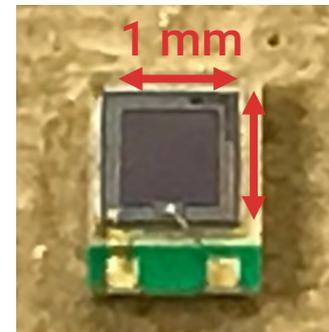
→ピクセルピッチが細かいほどダイナミック

レンジが広く、線型性が良い

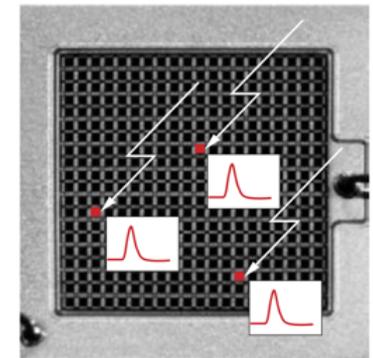
利点：低動作電圧(<100 V)、磁場耐性

欠点：ダークノイズ、

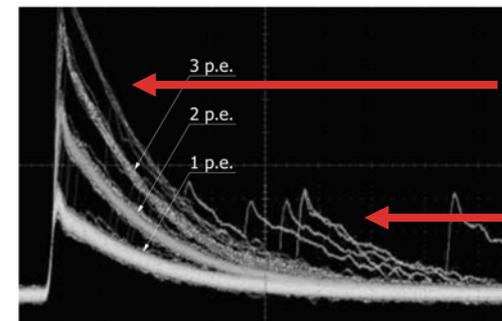
クロストーク、アフターパルス



PPD: S12571-015P
(HAMAMATSU)



HAMAMATSU, 光半導体素子ハンドブック



クロストーク

アフターパルス

HAMAMATSU,
光半導体素子ハンドブック

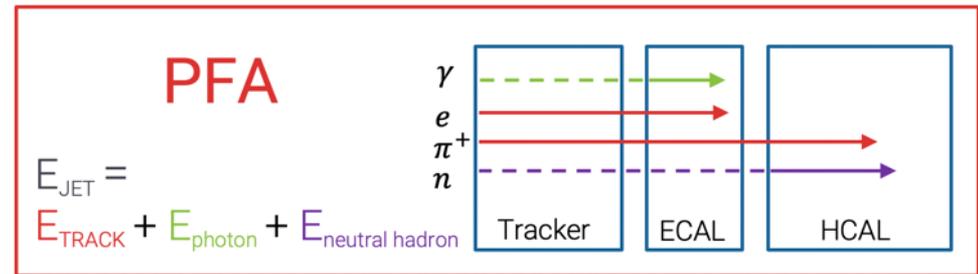
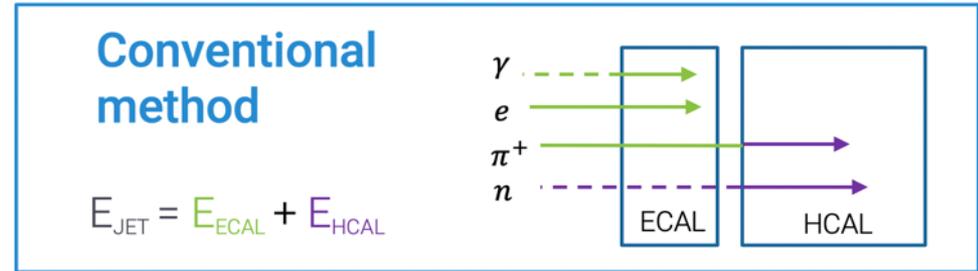
PFAとSSA

Particle Flow Algorithm (PFA)

ジェット中の粒子の種類に応じて最適な測定器で運動量・エネルギーを測定

- ▶ 荷電粒子→飛跡検出器
- ▶ 光子→ECAL
- ▶ 中性ハドロン→HCAL

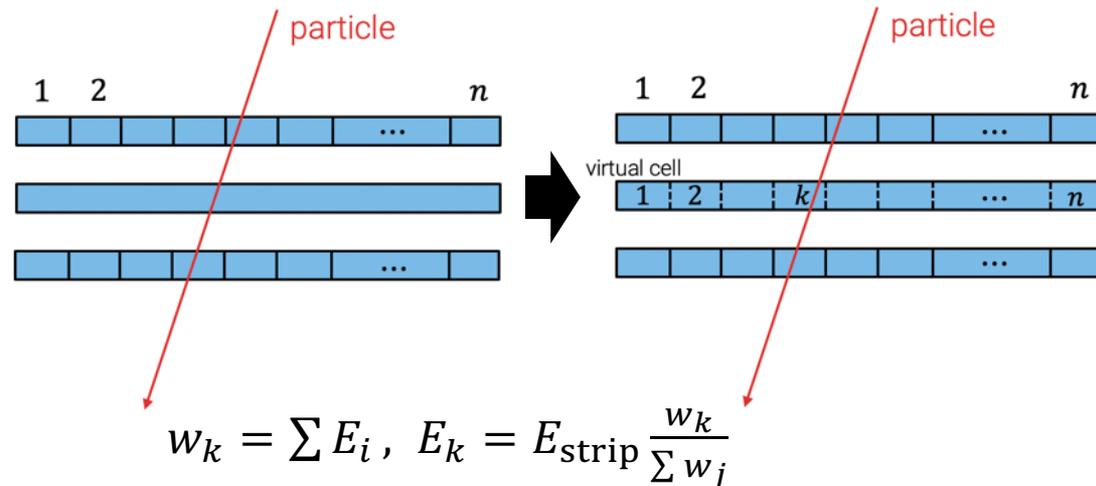
飛跡検出器とカロリメータのトラックを対応づけるために、**5 mm x 5 mm**の分解能がECALに求められる



Strip Splitting Algorithm (SSA)

45 mm x 5 mmのシンチレータストリップからなる層を直交させ、前後の層による重み付けで仮想的な5 mm x 5 mmのピクセルを構築

シリコンオプシオンなど5 mm角の読み出しに比べてチャンネル数がおおよそ1/10



Outline

研究概要

- 研究目的
- ヒッグスファクトリーについて
- ScECALについて

シンチレータの最適化

- 読み出し方法の比較と測定
- シミュレーションによる結果の検証
- エネルギー分解能改善を目指したシンチレータ形状開発

高増倍率PPDの開発

- TCADシミュレーションの概要
- PPDガイガー増幅の再現

今後の課題

光の読み出し方法

ScECAL: エネルギー損失 \propto 検出光子数

シンチレータ+PPDに要求される性能

MIPに対する十分な光量：S/Nに影響、 N_{total} 増で分解能向上

粒子の入射位置に対する光量の一様性：エネルギー分解能に影響

Side readout

○：十分な光量(~ 30 p.e.)

×：2%の不感領域，光量一様性悪い

scintillator

PPD

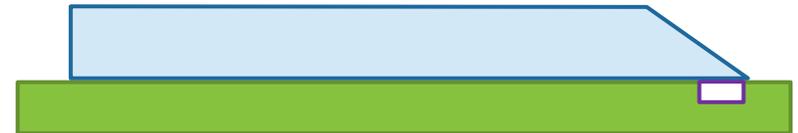
readout board



Bottom readout

○：不感領域無し，一様性良い

×：光量(~ 10 p.e.)



光の読み出し方法

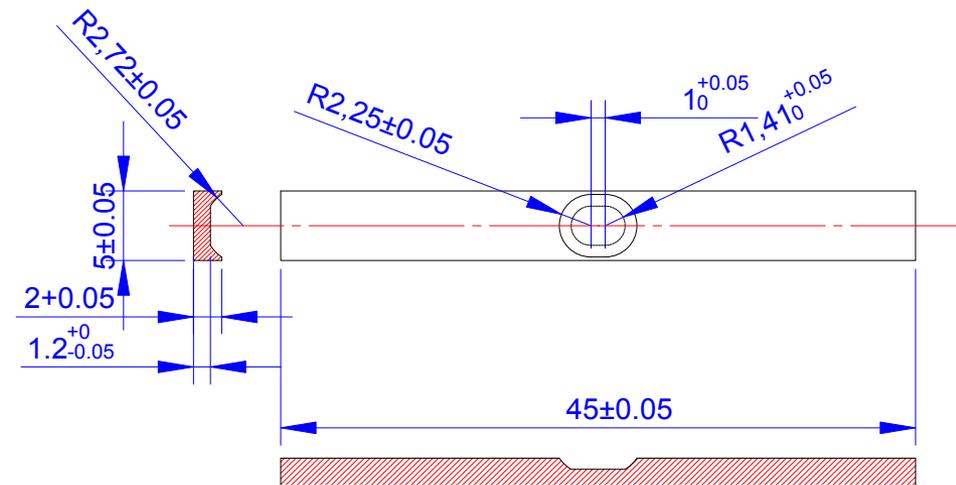
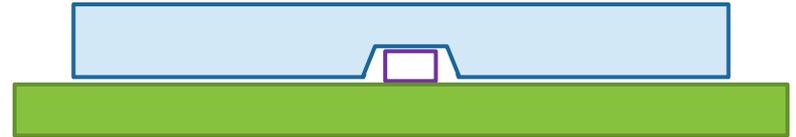
Dimple readout (New: proposed by USTC & IHEP)

シンチレータストリップにくぼみを開けて
PPDの上から被せる

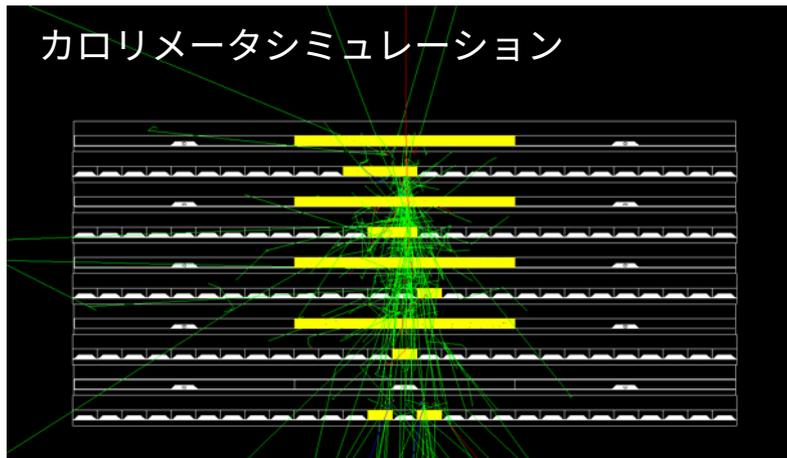
- ：不感領域無し，量産性高い
- ？：光量，一様性

方針：

1. Dimple readoutのMIPに対する光量・一様性を実測により検証
2. シミュレーションで結果を再現
3. シミュレーションにより新しいdimple形状を検討、カロリメータとしての性能評価

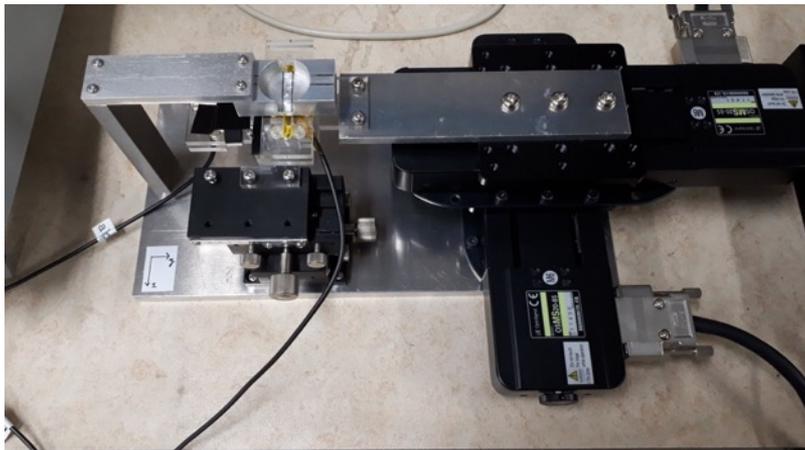
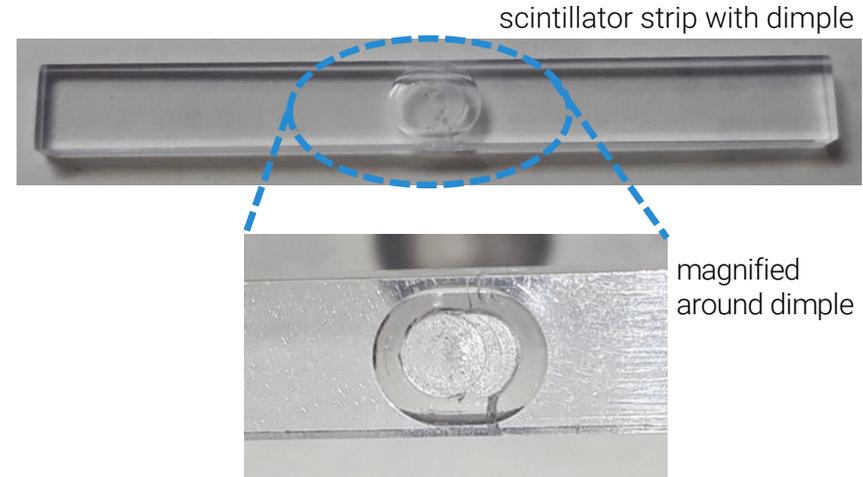


測定で使用するシンチレータ形状

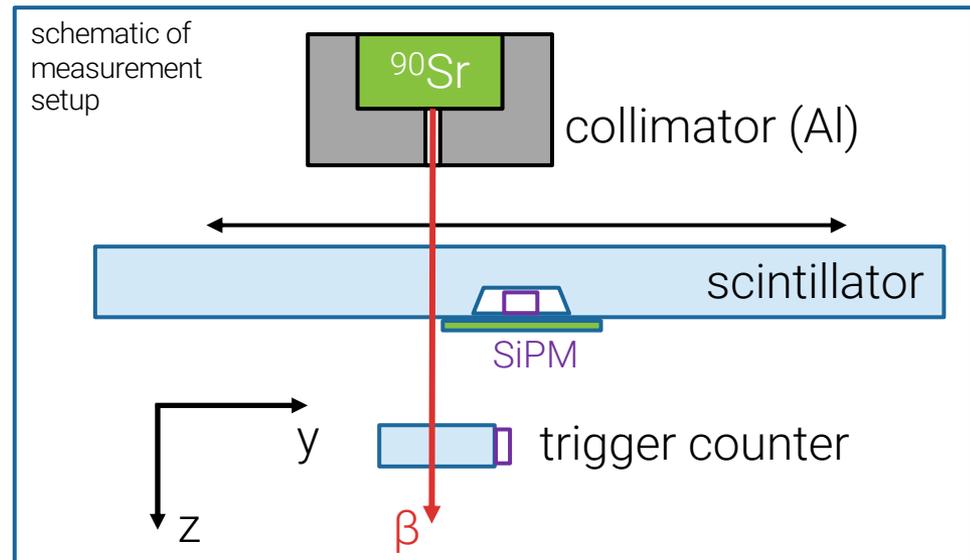


光量測定方法

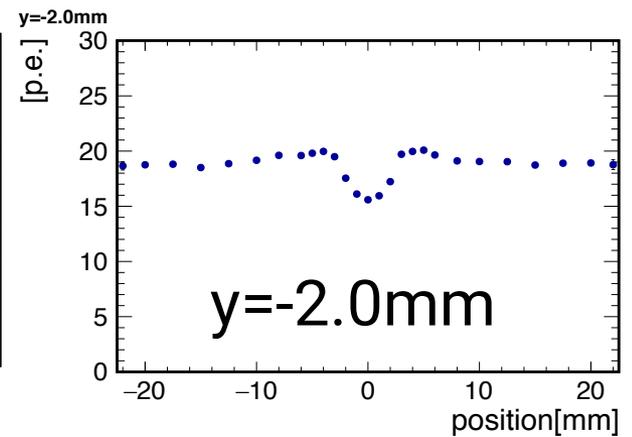
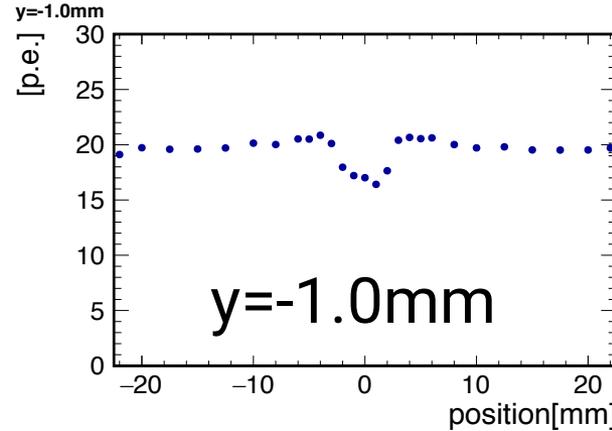
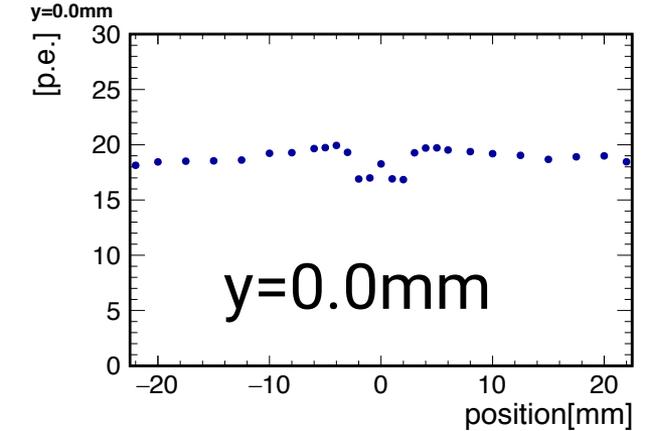
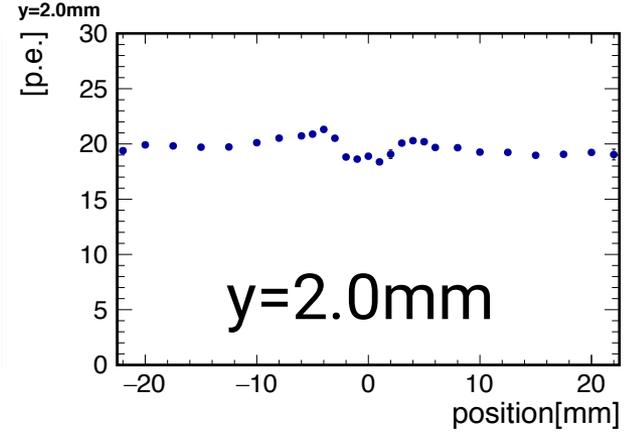
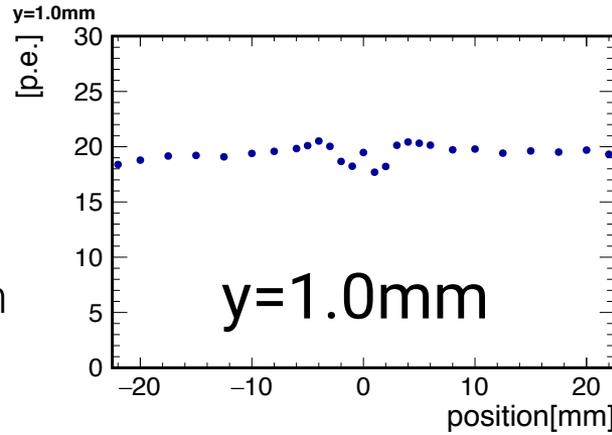
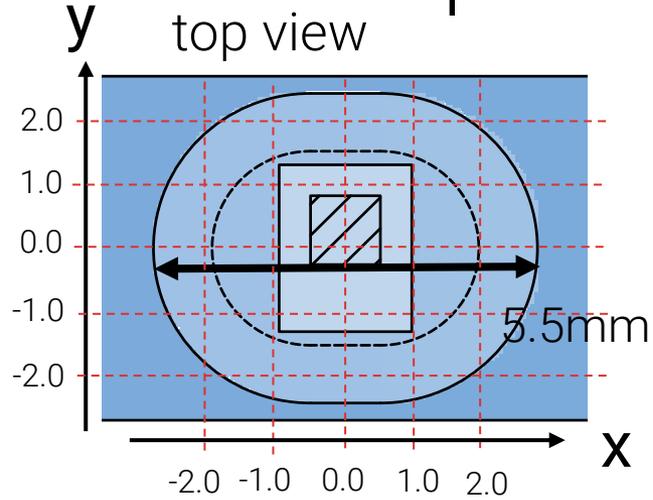
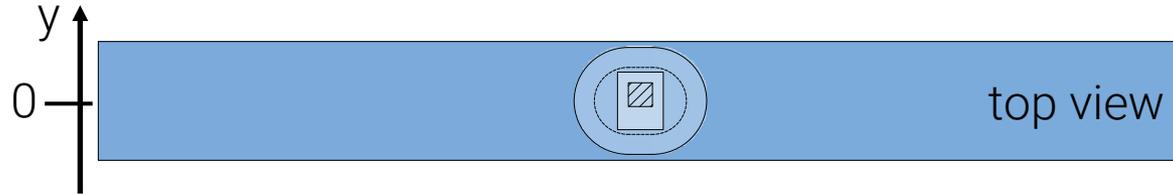
- Dimple readoutに関して、ベータ線の入射位置に対する光量を測定
 - Scintillator strip: BC-408
 - PPD: S12571-015P (浜松ホトニクス製MPPC)
ピクセルピッチ: **15 μm**
 - 読み出し: EASIROC module
 - 線源: ^{90}Sr
 - コリメータ: $\Phi 0.5 \text{ mm}$, 深さ3 mm
 - トリガーカウンターでトリガーをかける
 - 線源・トリガーは固定、シンチレータはステージにより $\pm 22 \text{ mm}$ の範囲で移動



PPDは信州大学高エネルギー物理学実験室 竹下徹様より、EASIROCモジュールは東京大学素粒子物理国際研究センター大谷研究室より、シンチレータは中国USTCよりご提供いただきました。ご協力いただきましたこと深く感謝申し上げます。

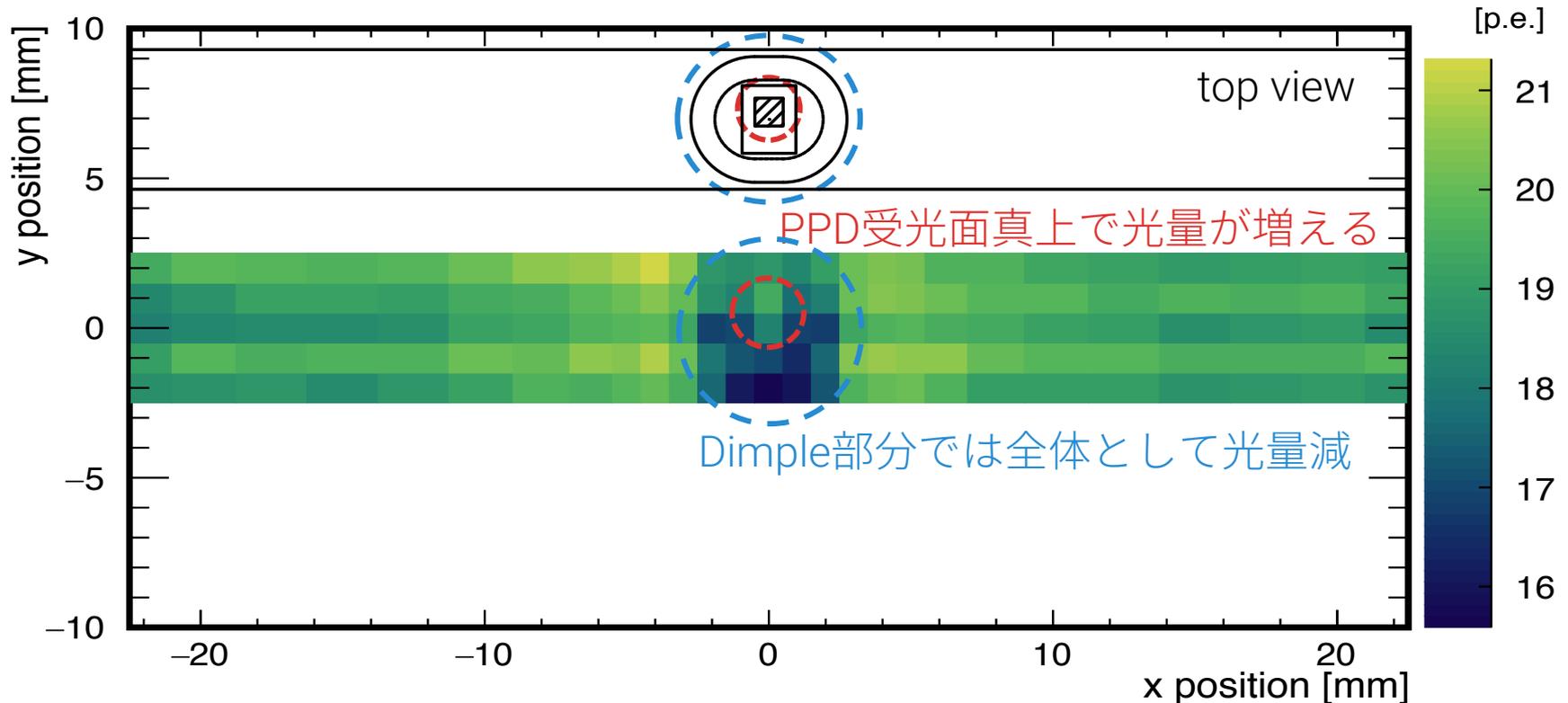


光量測定結果



光量測定結果

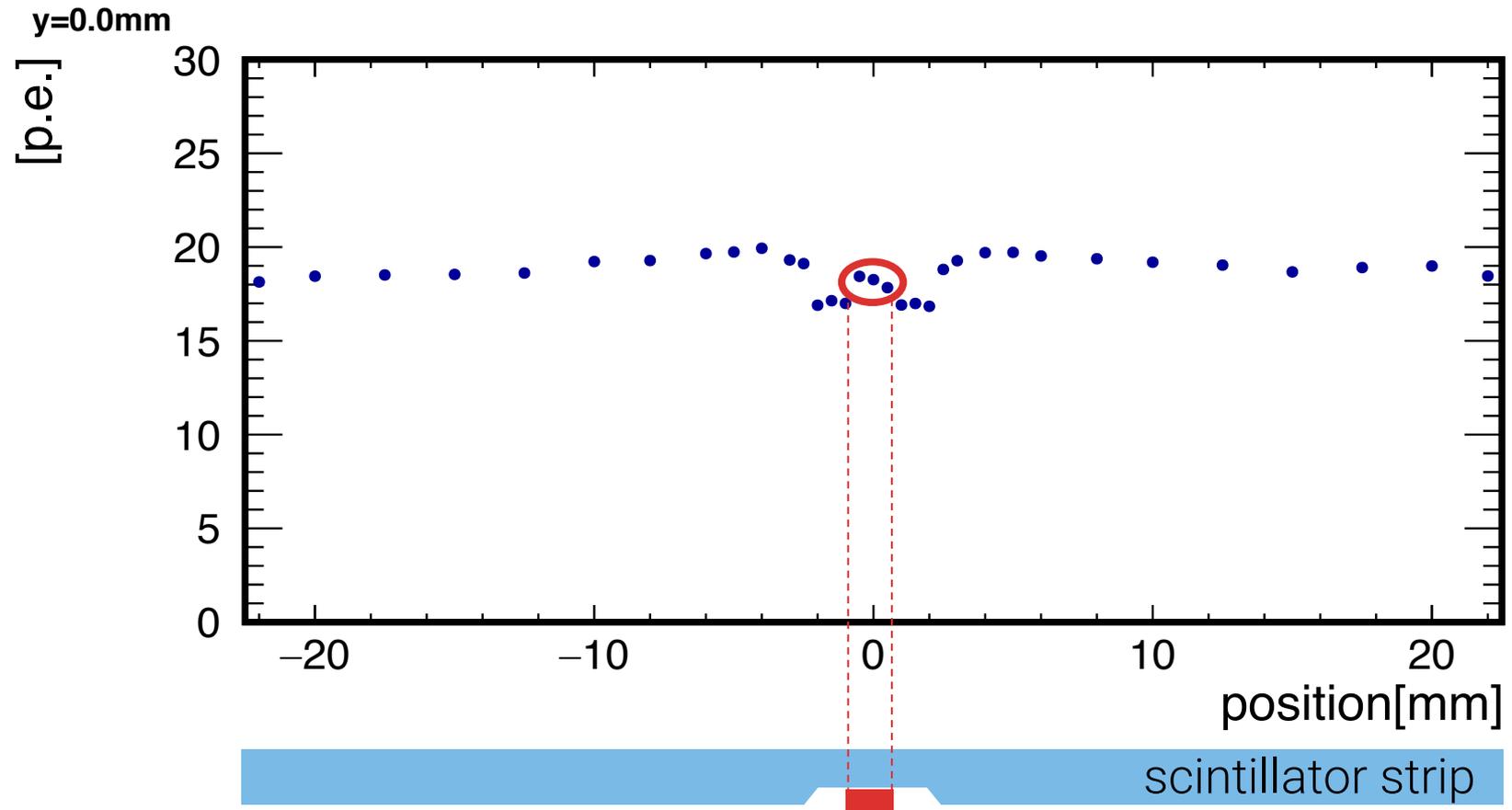
Measurement



maximum = 21.3 [p.e.], minimum = 15.6 [p.e.],
mean = 19.2 [p.e.], stdDev = 1.042

光量測定結果

Measurement



入射位置がPPDの受光面上空にあるとき光量が高い

→一度も反射されることなく直接受光面に到達するシンチレーション光の割合が多い
(シンチレーション光発生位置から見た立体角が中央で一番大きい)

Outline

研究概要

- 研究目的
- ヒッグスファクトリーについて
- ScECALについて

シンチレータの最適化

- 読み出し方法の比較と測定
- シミュレーションによる結果の検証
- エネルギー分解能改善を目指したシンチレータ形状開発

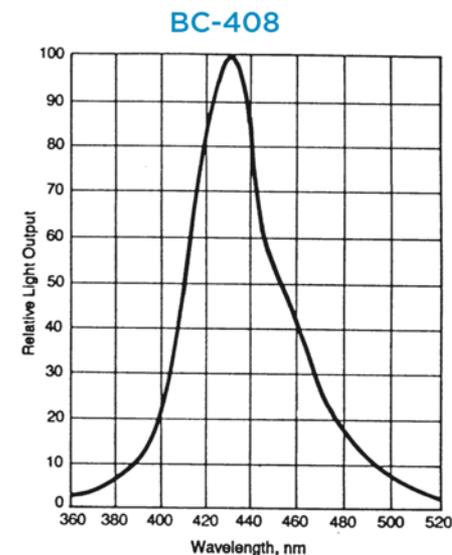
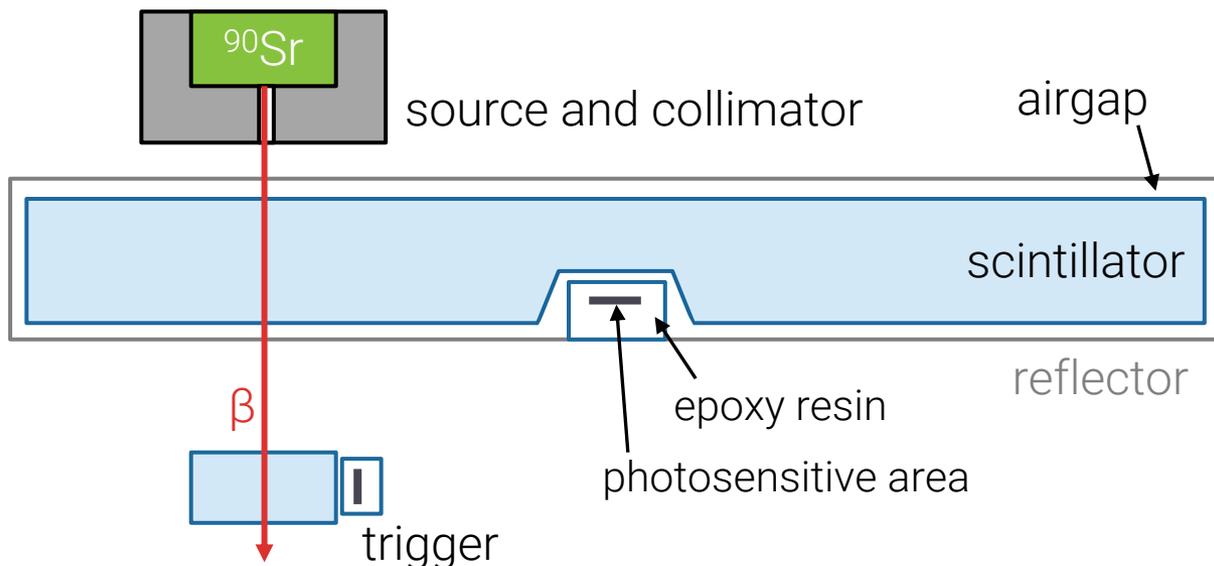
高増倍率PPDの開発

- TCADシミュレーションの概要
- PPDガイガー増幅の再現

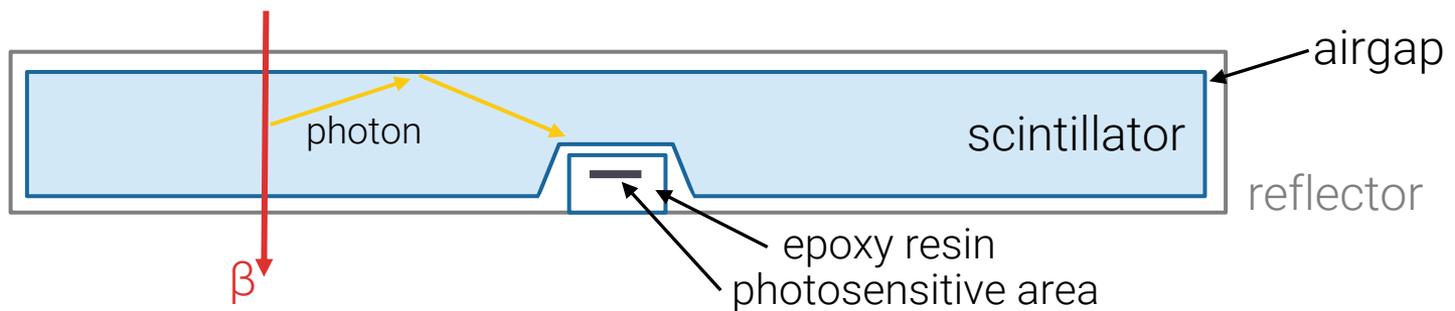
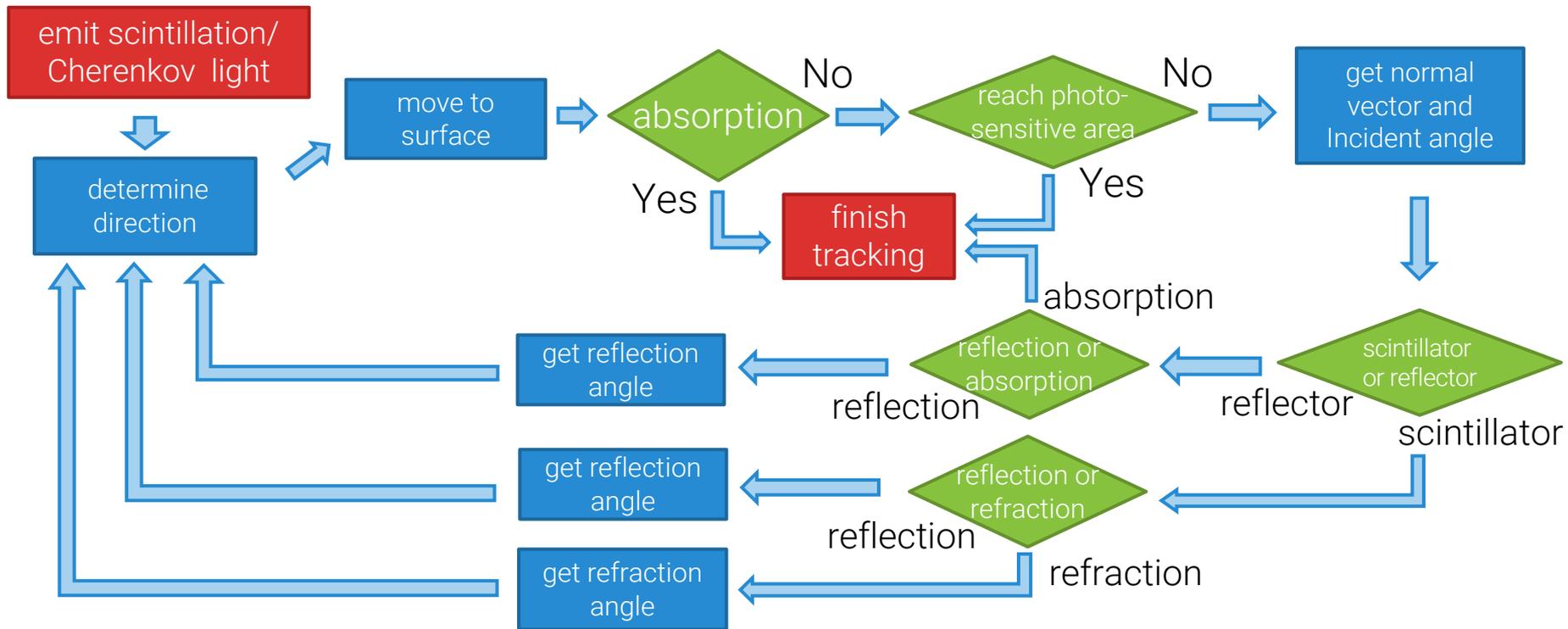
今後の課題

シミュレーションの概要

- ▶ 目的：シミュレーションで実測結果を再現、形状最適化・カロリメータシミュレーションに使用
- ▶ Geant4によるPPD光子計数のシミュレーションを作成(G4OpticalPhysicsクラス)
- ▶ 実測と同じ以下の環境を実装
 - $^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y} \rightarrow ^{90}\text{Z}$ によるベータ線をシンチレータに入射させ、発生したシンチレーション光の内のPPD受光面に到達した光子数 \times PDE(= p.e.)を計数
 - シンチレータと反射材、PPD上面の間には薄い空気層
 - シンチレータの発光スペクトルは右下の図に従うよう入力



シミュレーションの流れ



Parameters

Scintillator

- Dimpleの深さ: 0.80 mm
- 寸法: 45 mm x 5 mm x 2 mm
- 発光量: 2,000 photons/MeV
- **吸収長: 380 cm (BC-408 datasheet)**

Reflector

- **反射率: 98% (ESR film datasheet)**

PPD

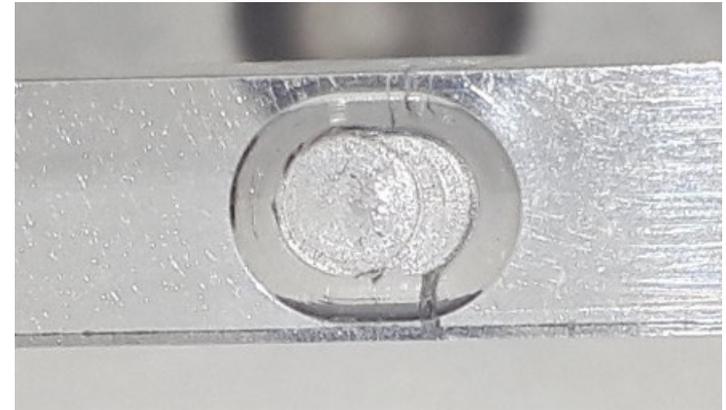
- 寸法: 2.425 mm x 1.9 mm x 0.85 mm
- 受光面の面積: 1 mm x 1 mm
- PDE: 100%

Collimator

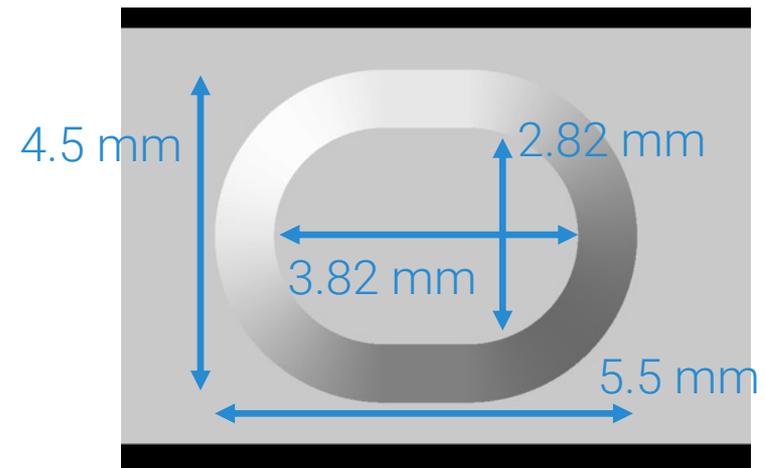
- **コリメータ径: 0.5 mm**
- **コリメータ深さ: 3 mm**

Trigger

- 寸法: 5 mm x 5 mm x 2 mm



dimple of scintillator

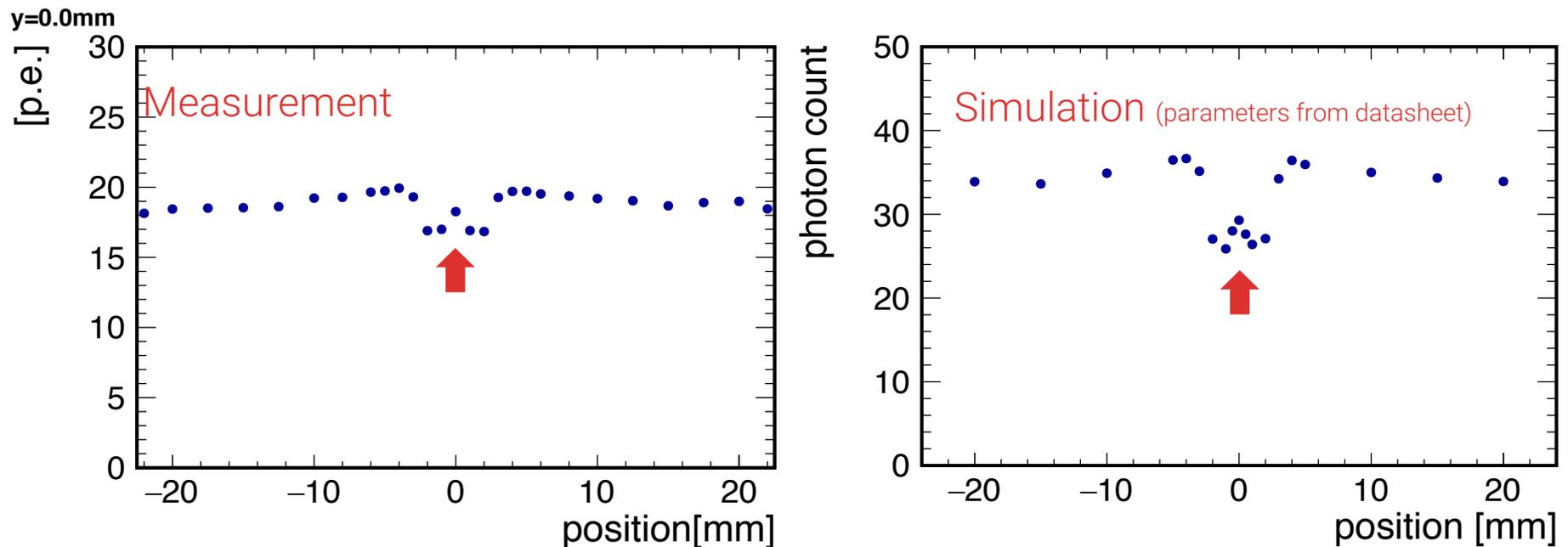


dimple implemented in Geant4

Parameters

実測の結果とシミュレーションの比較

- シミュレーションの平均光量は測定との1.5倍程度
- 全体の位置依存性の傾向は概ね再現可能
- 中央のピークはシミュレーション・実測共に見えている
- パラメータについては詳しく検討する必要がある



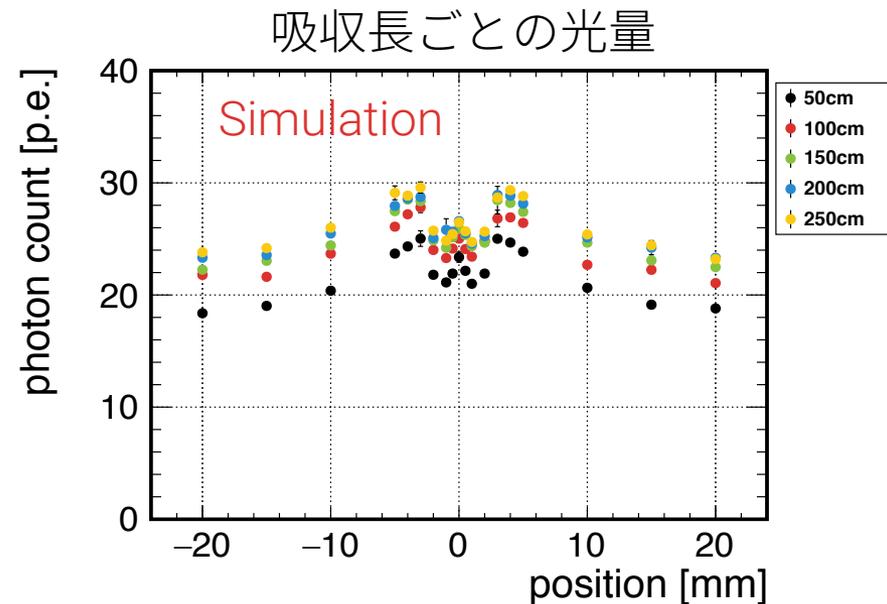
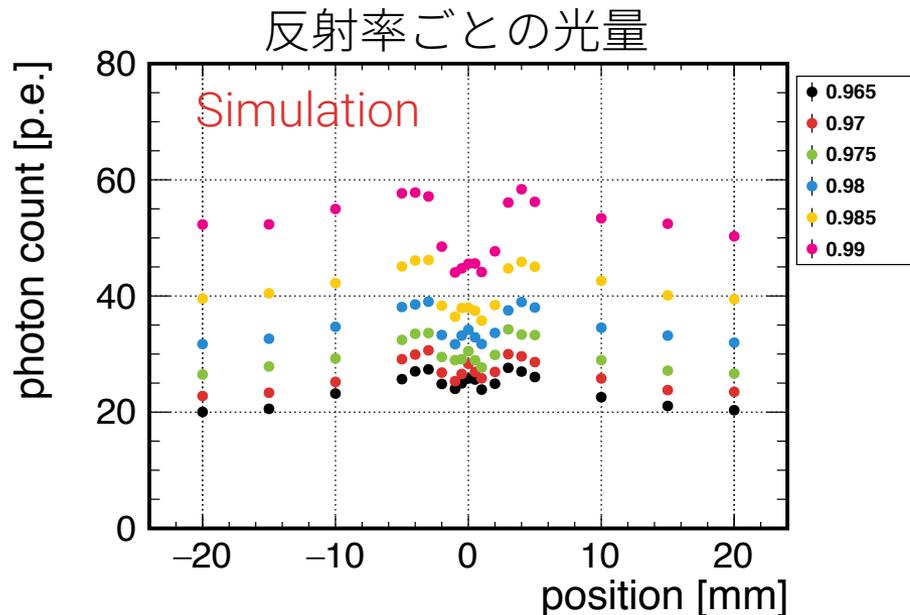
Parameters

先ほどのシミュレーションで使用したパラメータには波長依存性等が含まれていない

波長依存性のあるパラメータ：屈折率、反射材反射率、吸収長

平均光量の大きさは主に反射率と吸収長に強く依存する

反射率98%と吸収長380 cmは妥当であるか？



光学的特性の検討

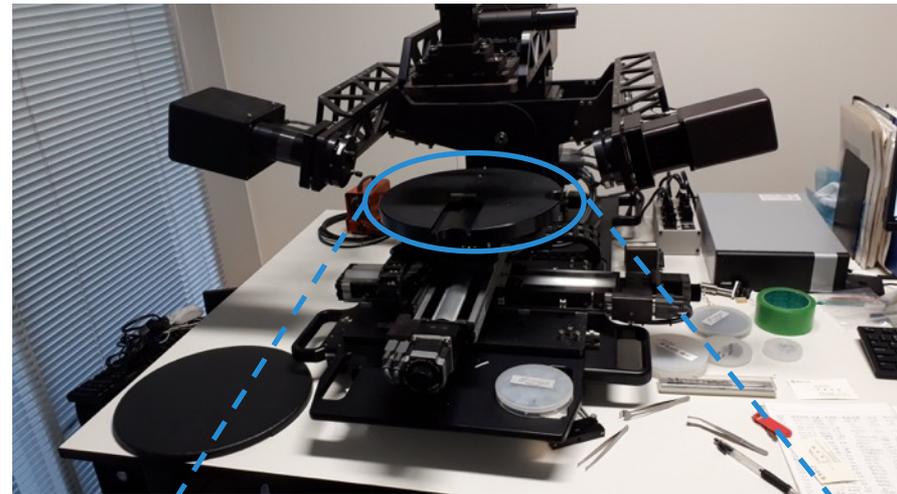
屈折率は分光エリプソメータによって測定

入射光と反射光の偏光状態の差を測定、測定結果を再現する屈折率と消失係数をフィッティングで求める

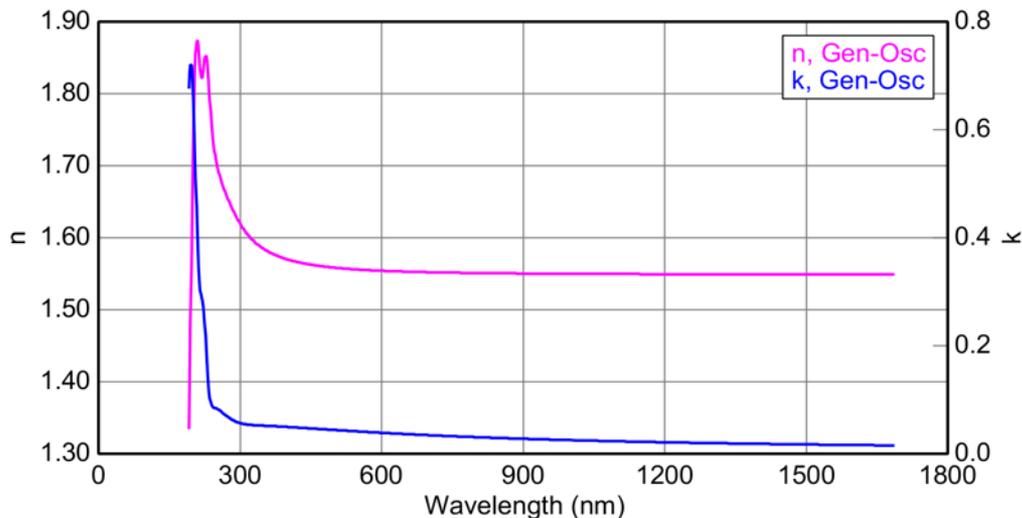
- シンチレータの発光波長範囲で屈折率は1.55-1.58

全反射の臨界角にして 39.2° - 40.2°

分光エリプソメータ M-2000DI-T(J.A.Woollam)



All Layer Optical Constants

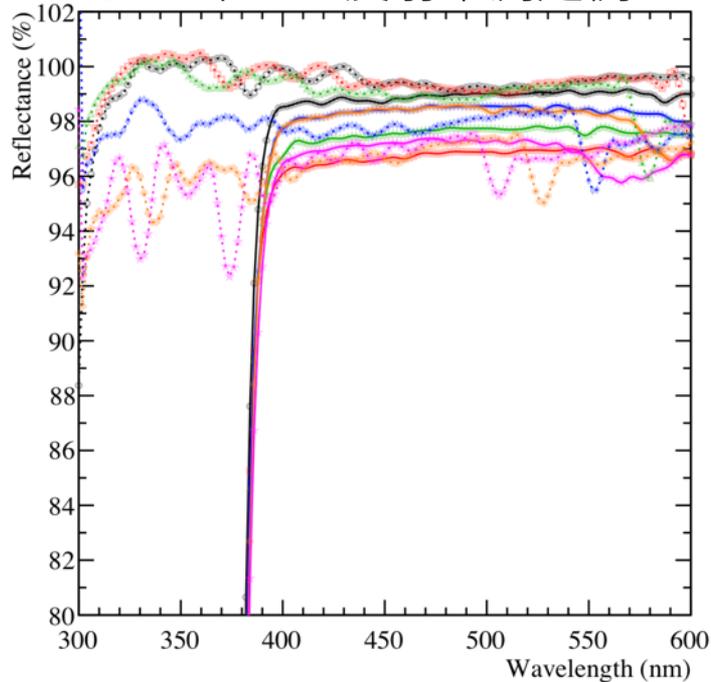


本測定は東京大学微細構造解析プラットフォームの支援を受けて実施されました。ご協力いただきました東京大学大学院理学系研究科附属 フォトンサイエンス研究機構の小西邦昭様に深く感謝申し上げます。

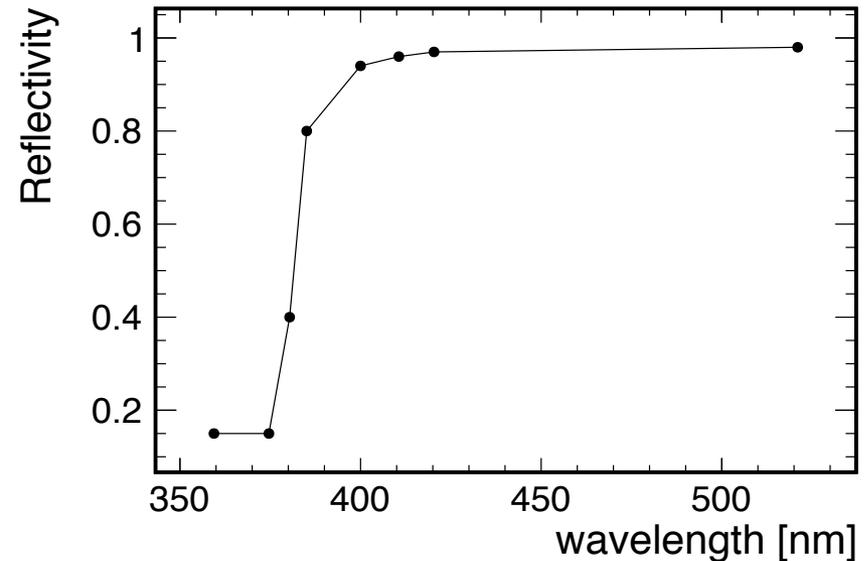
光学的特性の検討

- ESRフィルムの反射率はいくつか測定結果が報告されている
 - 可視光範囲(410 – 800 nm)で反射率98%、公称値と矛盾なし
 - 紫外領域に強い吸収を持ち、400 nm以下から反射率が急激に低下
- 吸収長は平均光量が実測に合う様に波長依存性無しの平均値を設定
 - 40 nmを使用

ESRフィルム反射率測定例



シミュレーションで入力する反射率



Akira Okumura et al, Prototyping Hexagonal Light Concentrators Using High Reflectance Specular Films for the Large-Sized Telescopes of the Cherenkov Telescope Array

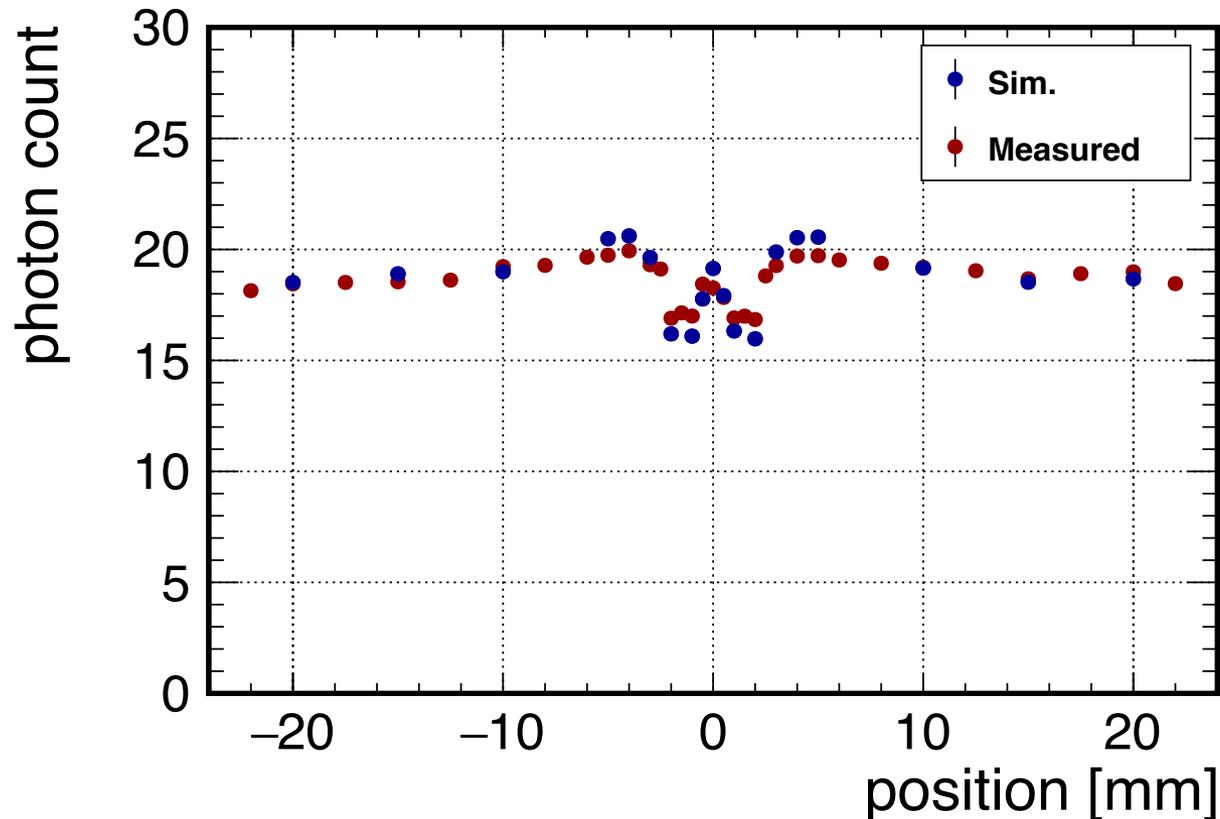
パラメータ調整後の結果

調整後のパラメータでの光量は下の図のようになる

シミュレーションで実測結果が再現可能

引き続きパラメータの測定が必要であるが、以降はこの値を使用

(他のシンチレータ形状でもシミュレーションと実測の光量が概ね一致)



Outline

研究概要

- 研究目的
- ヒッグスファクトリーについて
- ScECALについて

シンチレータの最適化

- 読み出し方法の比較と測定
- シミュレーションによる結果の検証
- エネルギー分解能改善を目指したシンチレータ形状開発

高増倍率PPDの開発

- TCADシミュレーションの概要
- PPDガイガー増幅の再現

今後の課題

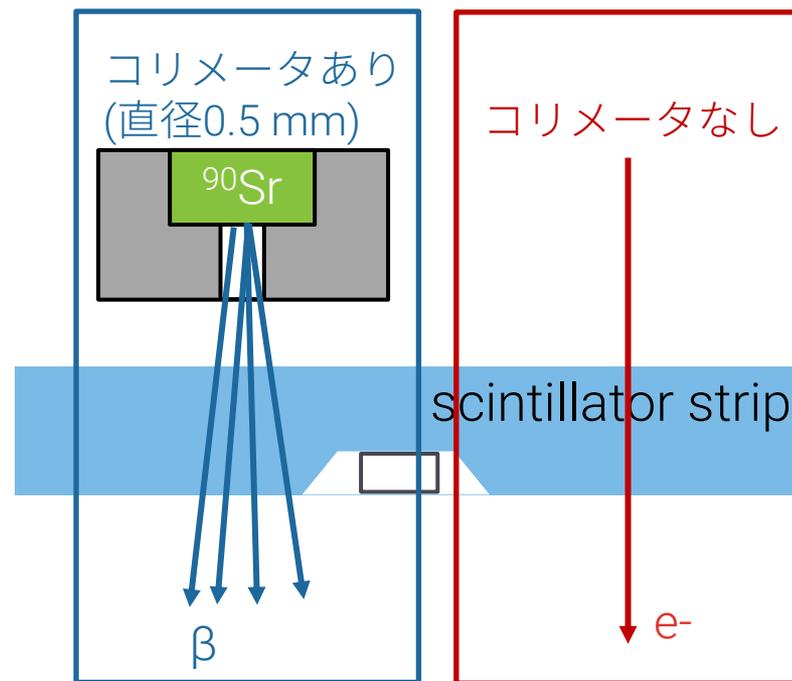
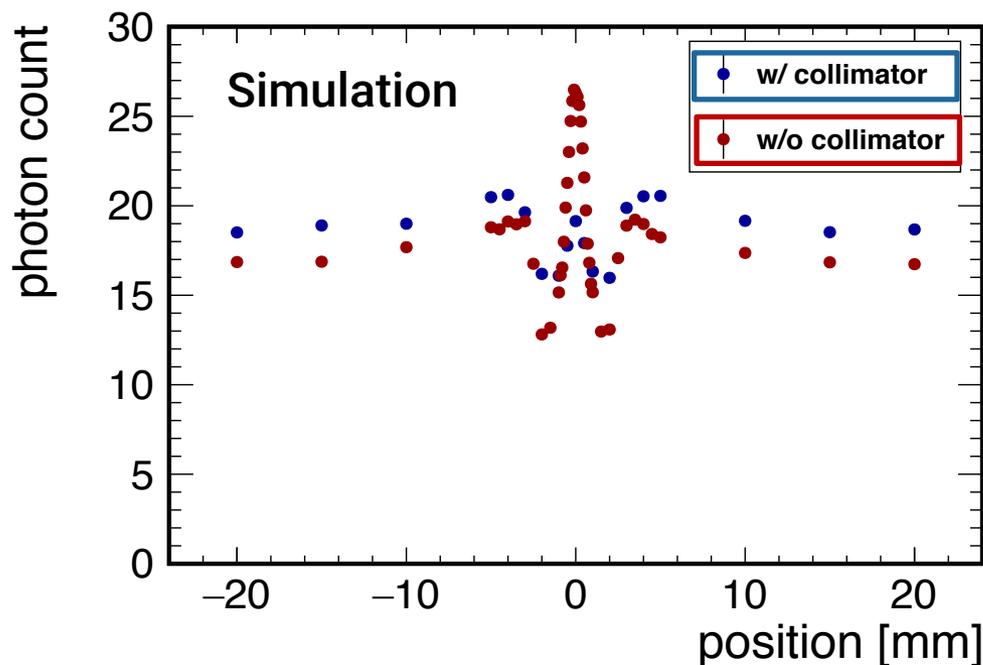
形状の改善

実測・シミュレーションでは直径0.5 mmのコリメータで広がったベータ線がシンチレータに入射している

電子の広がりをなくしたときの光量は**最大で27 p.e.、最小で13 p.e.**

実測では電子の入射位置の広がりや、斜め入射によって平均化されていたものを見ていたことになる

→MIPのような貫通性の高い粒子には現状のデザインは不適合



形状の改善

貫通性の高い粒子に対する光量の一様性を改善するために、dimpleの形状を変更する

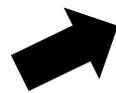
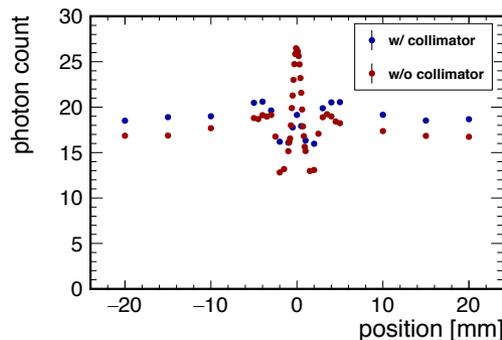
dimple内部での平均光量を増やすためにdimpleの深さを減らす

→シンチレータの厚さを1.3倍

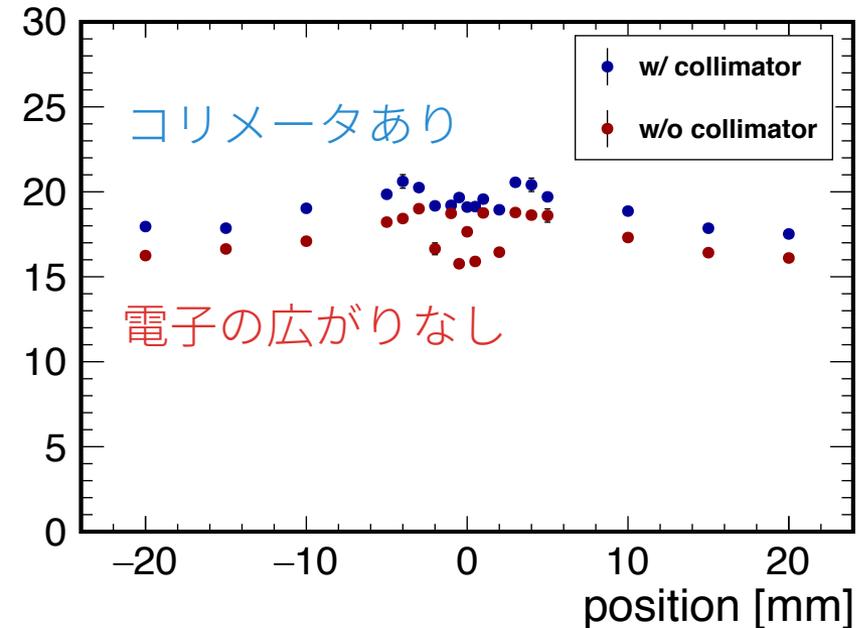
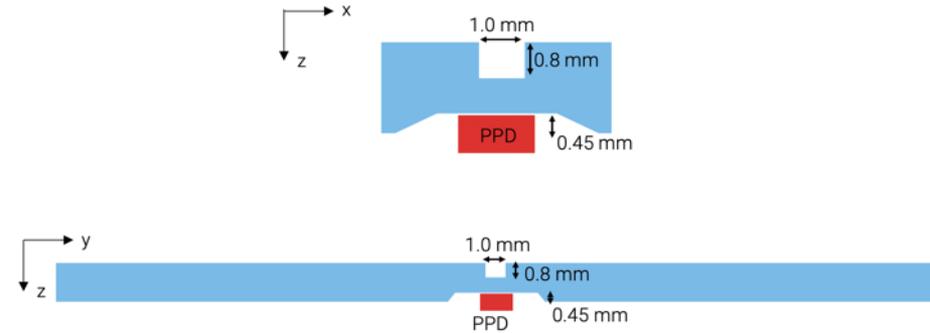
PPD受光面真上に粒子がきたときの光量を減らすためにdimpleの反対側に1mm角の直方体穴を開け、光量を減らす

→シンチレータの厚みを0.63倍

これにより、粒子が広がっていないときでも光量の局所的なピークが無くなる



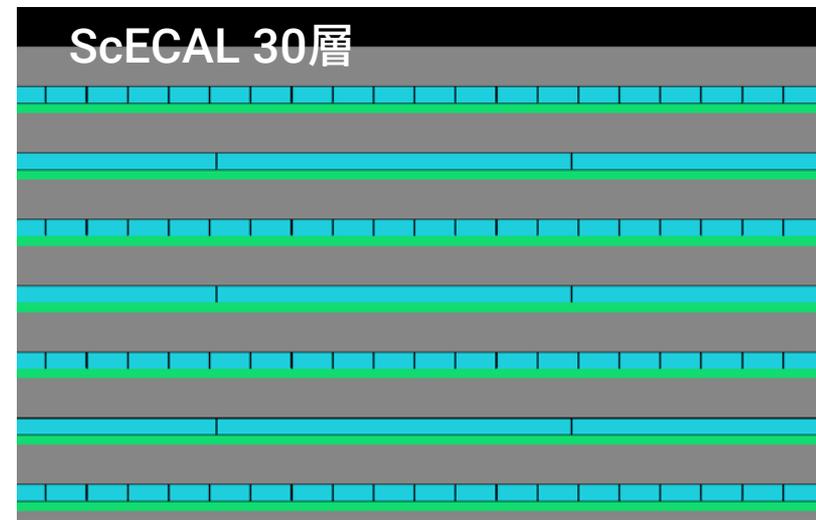
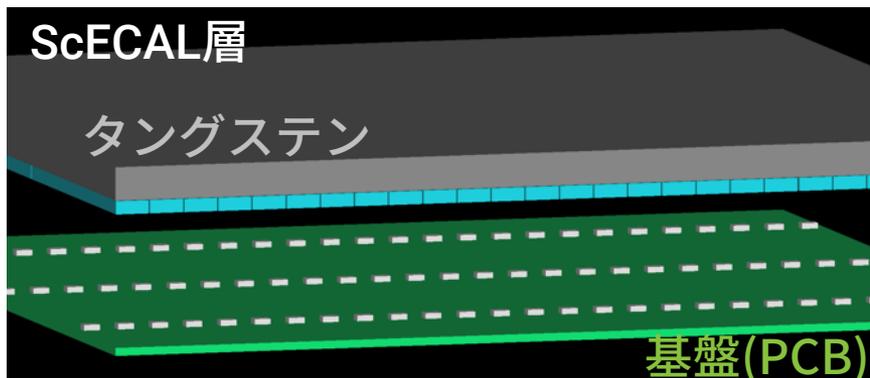
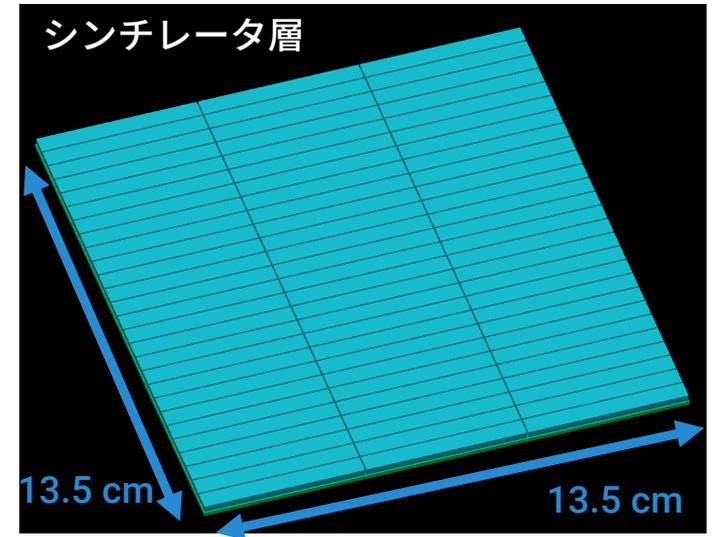
photon count



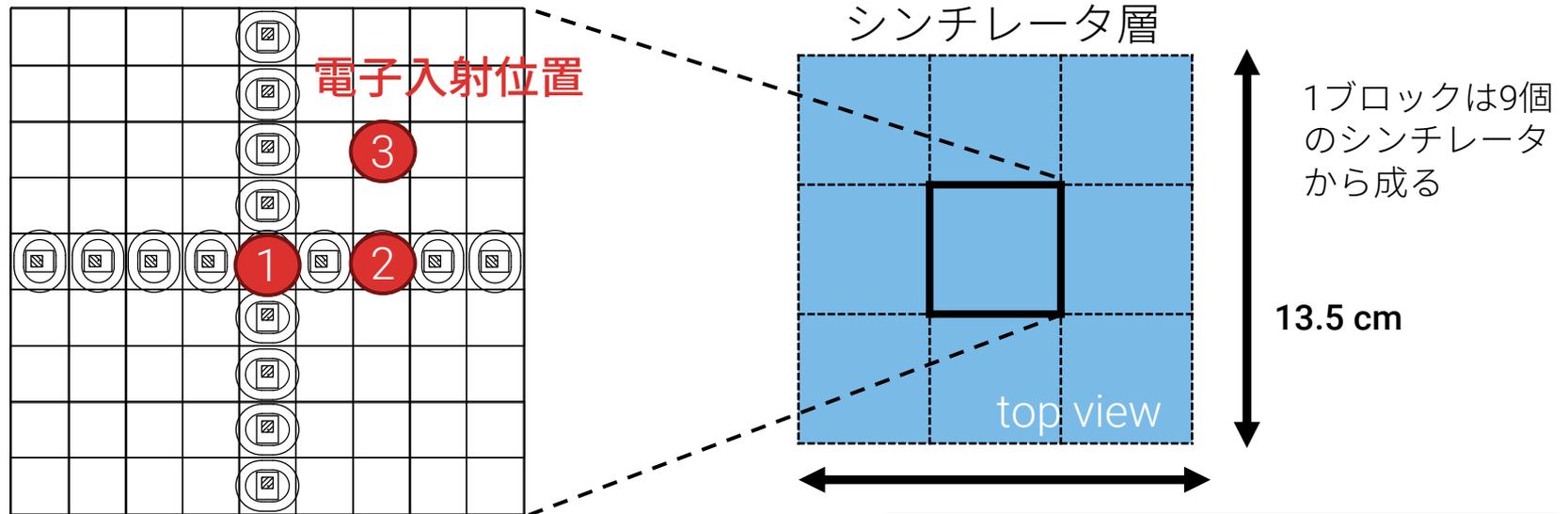
カロリメータシミュレーションの概要

一様性の違いが電磁シャワー与える影響を調べる

1. シンチレータを3 x 27個並べてシンチレータ層を形成
層の辺の長さは13.5 cm x 13.5 cm
2. タングステン吸収層と読み出し基盤層で挟んで ScECAL層を形成
タングステン層: 3 mm
シンチレータ層: 2 mm
基盤層: 1.2 mm
カロリメータ全体のMoliere半径 ~ 1 cm
3. ScECAL層を30層重ねてECALユニット形成

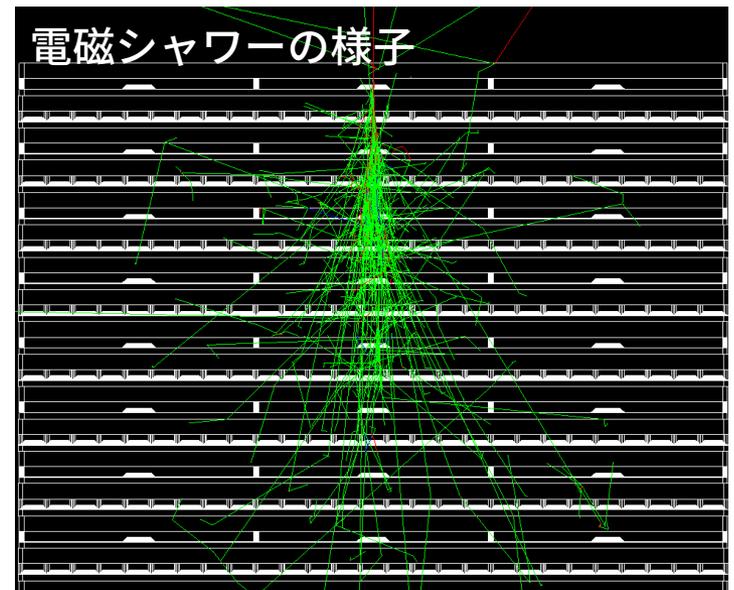


カロリメータシミュレーションの概要



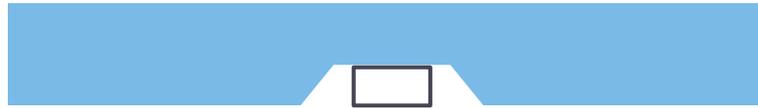
- 電子のエネルギーを1 GeV, 2 GeV, 3 GeVと変化させ、カロリメータで全て吸収させる
- 電子の入射位置ごとの全検出光量を計測 (PPDのサチュレーションの影響は含まない)

1. center: 全てのdimpleが重なる
2. side: 中央から1 mm, 0 mm、奇数番層でdimpleを通過
3. corner: 中央から1 mm, 1 mm、dimpleを通らない

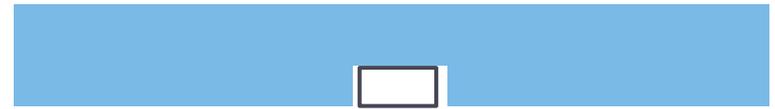


カロリメータシミュレーションの概要

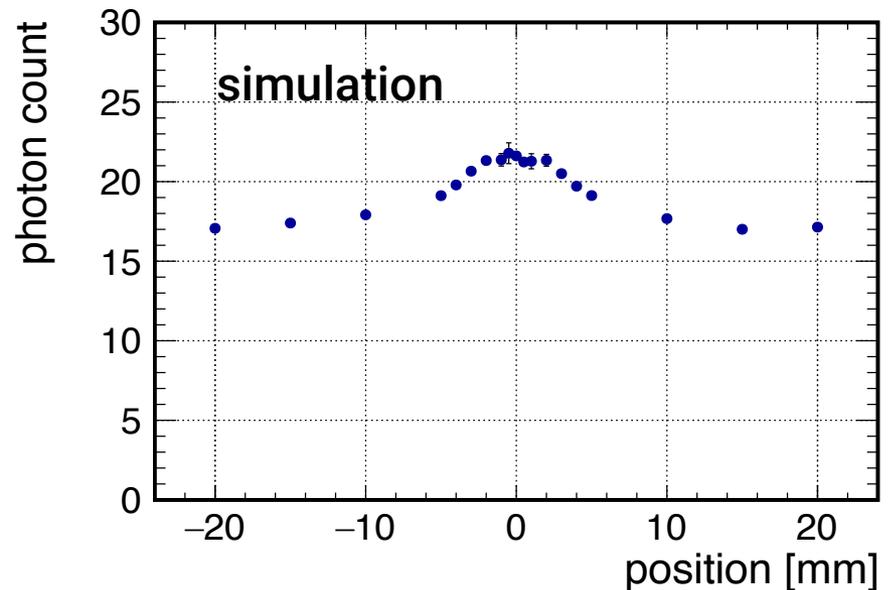
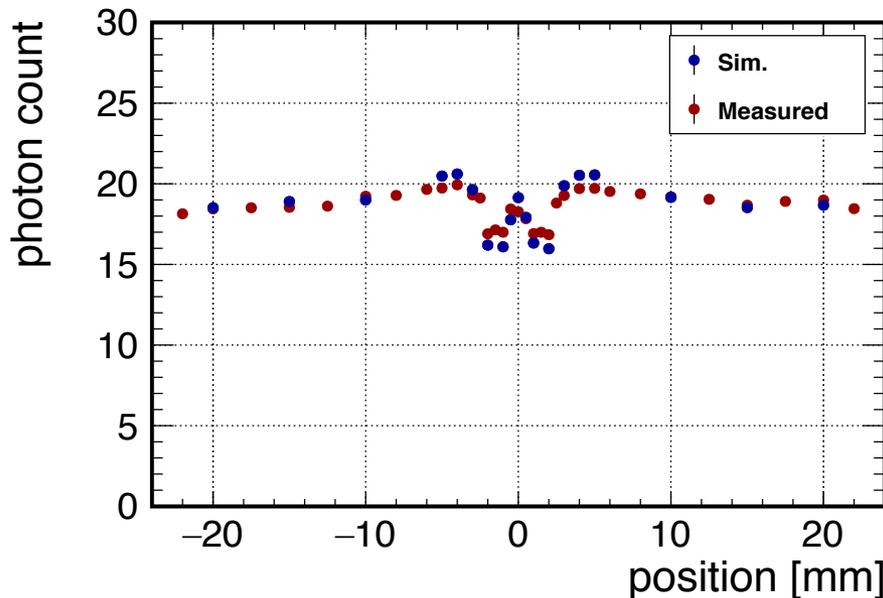
実測と同じ形



一様性の悪い形状



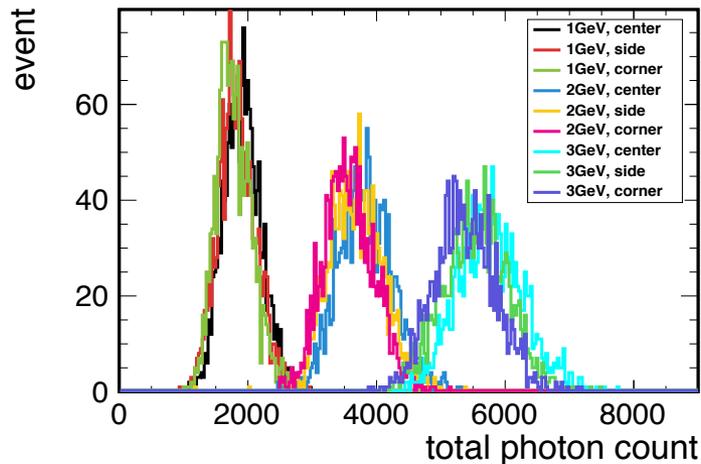
PPDと同じ大きさの長方形dimple



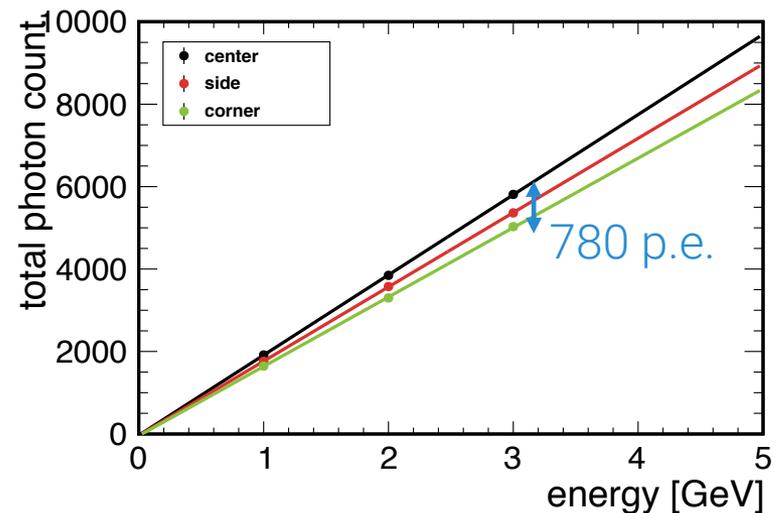
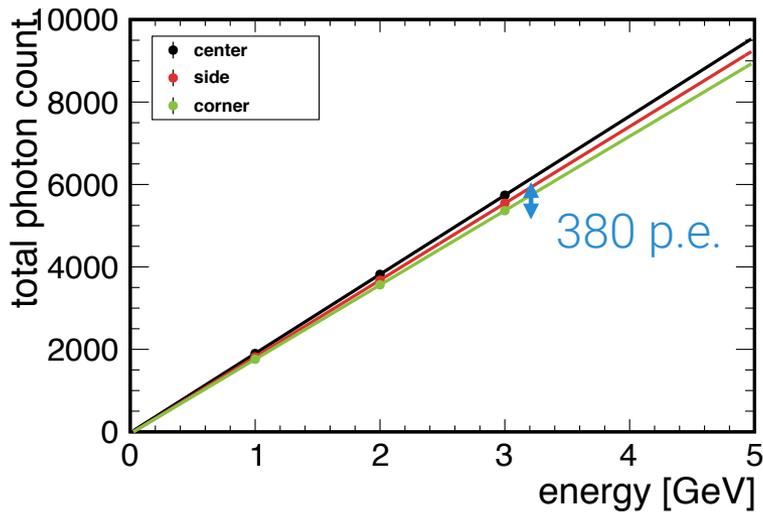
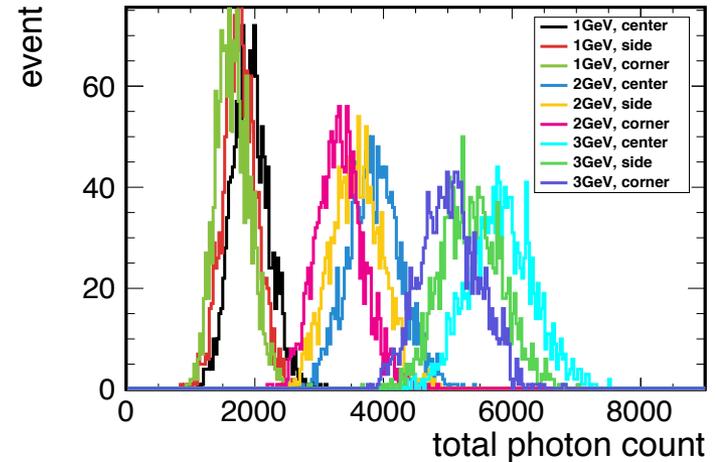
一様性の良い形状と悪い形状の2つでシャワーに対する全検出光量を比較

カロリメータシミュレーションの結果

実測の形状



一様性の悪い形状



光量の位置依存性がカロリメータとしての全検出光量の差として見えている

シンチレータ最適化のまとめ

- Dimple readoutの検出光量の一様性・光量の大きさが従来の読み出し方法より良いことを確認
形状を最適化することによってさらなる改善が見込める
- シミュレーションによる実測結果の再現、**光学的特性が検出光量に強く影響**
光量の大きさは反射材反射率・シンチレータ吸収長に強く依存
パラメータは引き続き検証する必要あり
- Dimple readoutではPPDの**受光面の位置によって光量が局所的に変化**
貫通性の高い粒子には現状の形状は不適合
- シミュレーションによる形状の設計とサンプリングカロリメータとして性能評価が行えるようになった
MIP粒子に対しても位置依存性の良い形状が設計できる
- シンチレータストリップ単体の光量位置依存性の違いはカロリメータ中の電磁シャワーの位置に対する全検出光量の差として見える
層の配置を前後でずらすとどうか(位置の再構成が難しくなる)

Outline

研究概要

- 研究目的
- ヒッグスファクトリーについて
- ScECALについて

シンチレータの最適化

- 読み出し方法の比較と測定
- シミュレーションによる結果の検証
- エネルギー分解能改善を目指したシンチレータ形状開発

高増倍率PPDの開発

- TCADシミュレーションの概要
- PPDガイガー増幅の再現

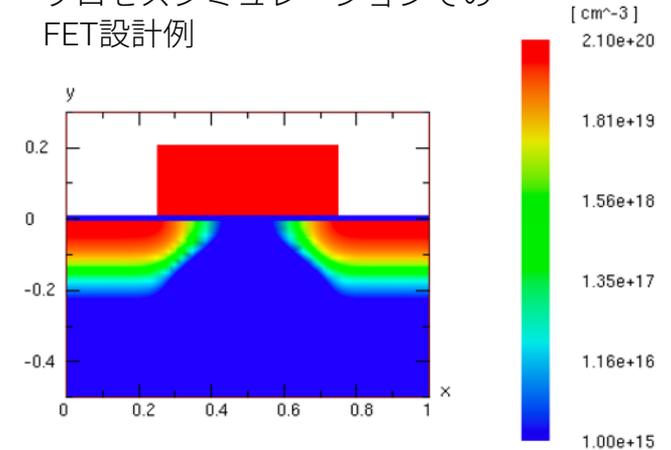
今後の課題

TCADによるPPD開発

TCADシミュレータ

- プロセスシミュレーション
 - ▶ 構造作成、イオン注入などのフロントエンドプロセスを行う
 - デバイスシミュレーション
 - ▶ 内部物理量の可視化、DC解析、過渡解析が可能
- 半導体物性に基づいた開発が可能

プロセスシミュレーションでの
FET設計例



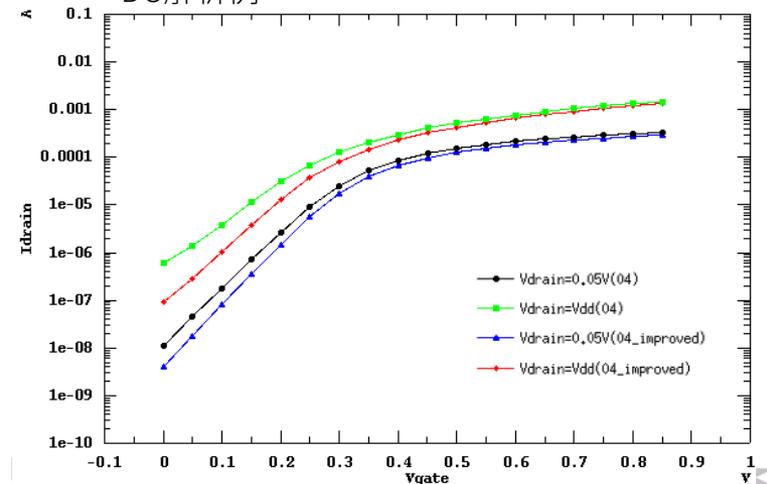
TCADによるPPD開発の目的と現状：

製造コスト・時間の大幅な短縮 高増倍率PPDの開発

現状TCADではPPDの動作が完全に再現できておらず、増倍率の評価が行えない

→PPD動作の完全再現を目指す

デバイスシミュレーションにおけるFETの
DC解析例



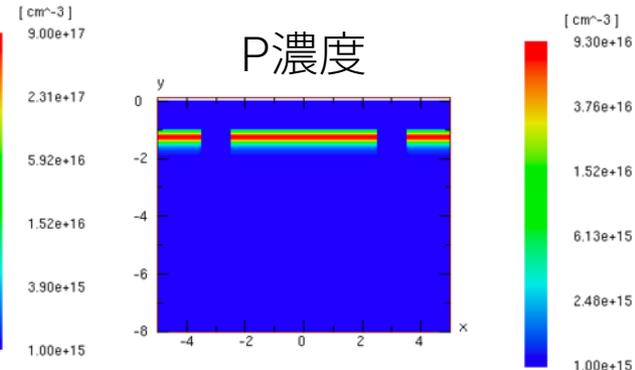
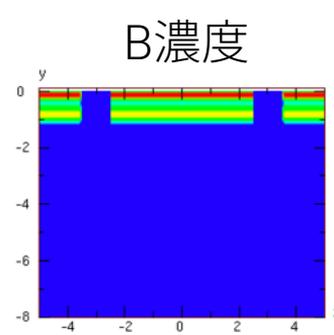
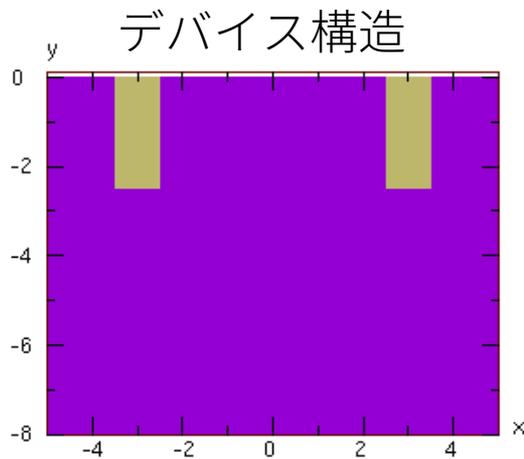
3次元TCADのHyENEXSSを使用

- KIOXIA株式会社(旧東芝メモリ株式会社)により開発中
- 慶応大TCADアカデミック委員会によりライセンス管理されたv8.5Kを学術用途で無償使用可能

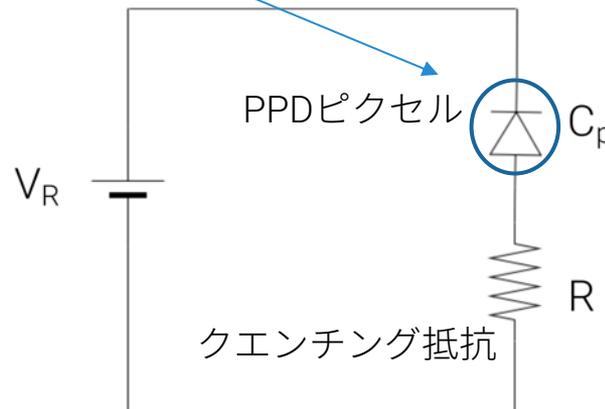
PPDプロセスシミュレーション

PPDの1ピクセル(~ 10 μm サイズ)を
プロセスシミュレーションで作成

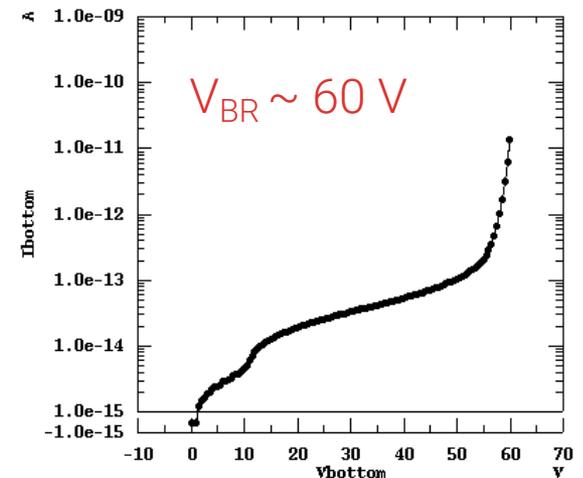
作成したピクセル内部の不純物濃度



外部回路にクエンチング抵抗 $R_q = 1 \text{ M}\Omega$ をつなぎ、直
流電圧を印加、デバイス内
部に電子・正孔対を発生さ
せて過渡解析を行う



I-V特性



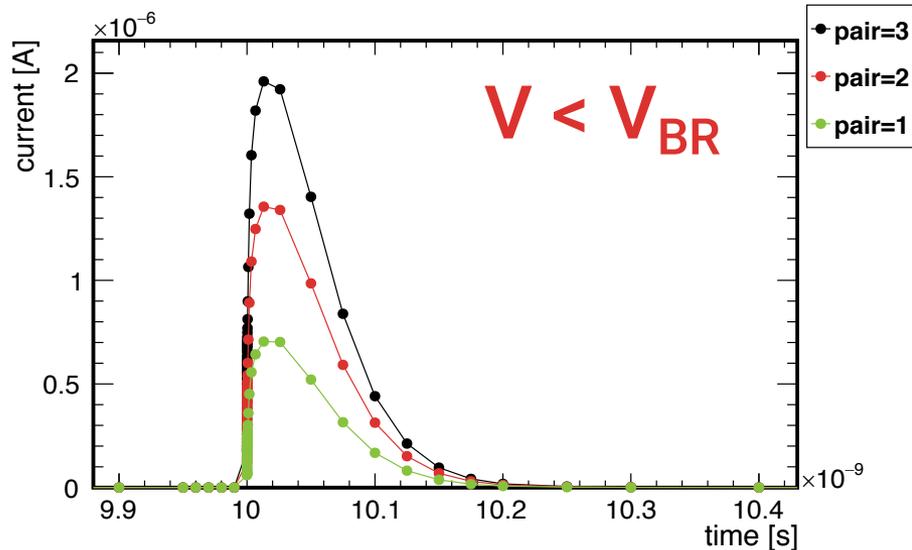
デバイスシミュレーションでの過渡解析

降伏電圧以下では、ペア数に比例した電荷が出力された

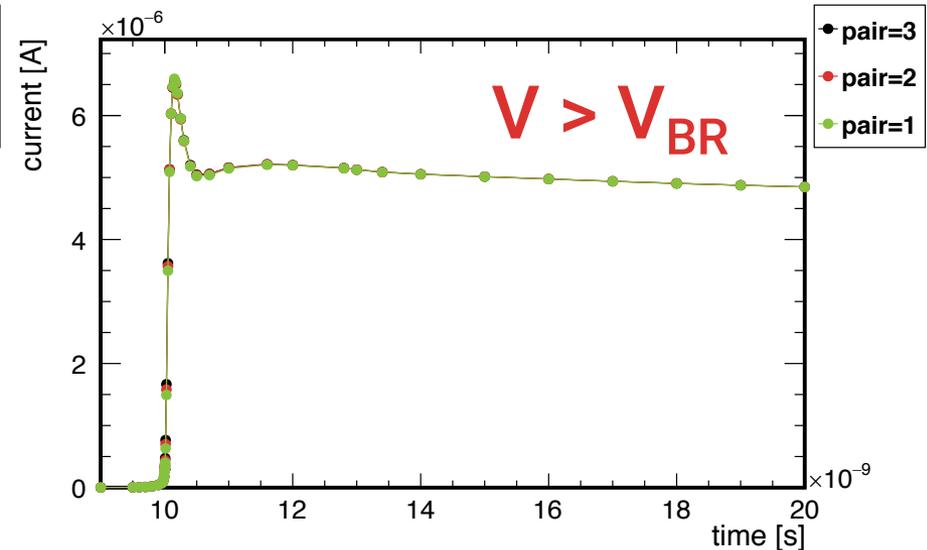
→APDピクセルとして動作している

降伏電圧以上では出力電荷は飽和、しかし電流が止まらない

$V_{op}=55V, R=1M$



$V_{op}=60V, R=1M$



$V > V_{BR}$ でペア数に依らない出力が得られた→**ガイガー増幅は再現できている**
 電流が落ち切らない→**クエンチ抵抗によるクエンチングが働いていない**
 クエンチングが働かない理由

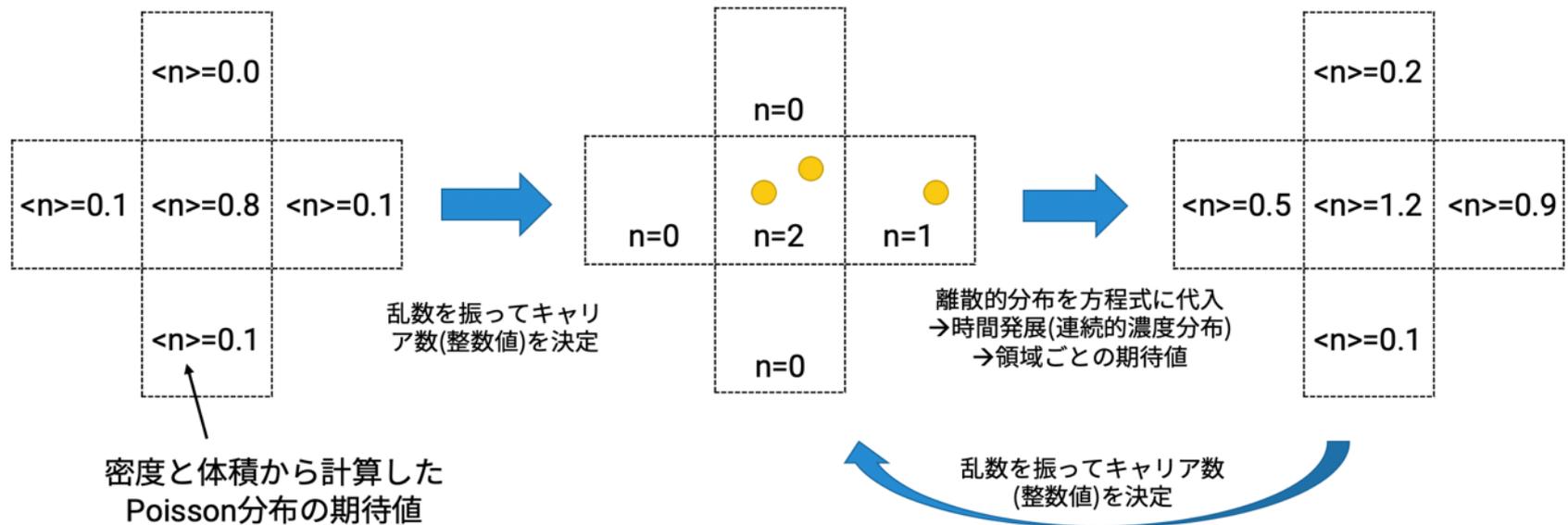
デバイスシミュレーションにおいて連続値の電子(正孔)濃度分布を使用しているために、1電子以下の状態になってもキャリアが消えず、延々と増幅過程を繰り返してしまうのではないか

クエンチング再現の方針

電子を離散化して扱うことで、クエンチング機構が再現できるはず

- **キャリア濃度をポアソン分布の期待値として電子・正孔を離散化**、方程式に代入する
- 期待値が小さくなれば自然にキャリア数が減っていき、最終的に0になる
- **PPDのノイズも期待値として入れて評価できるようになる**

→最新版のHyENEXSSで物理モデルをユーザーで追加できるようになった



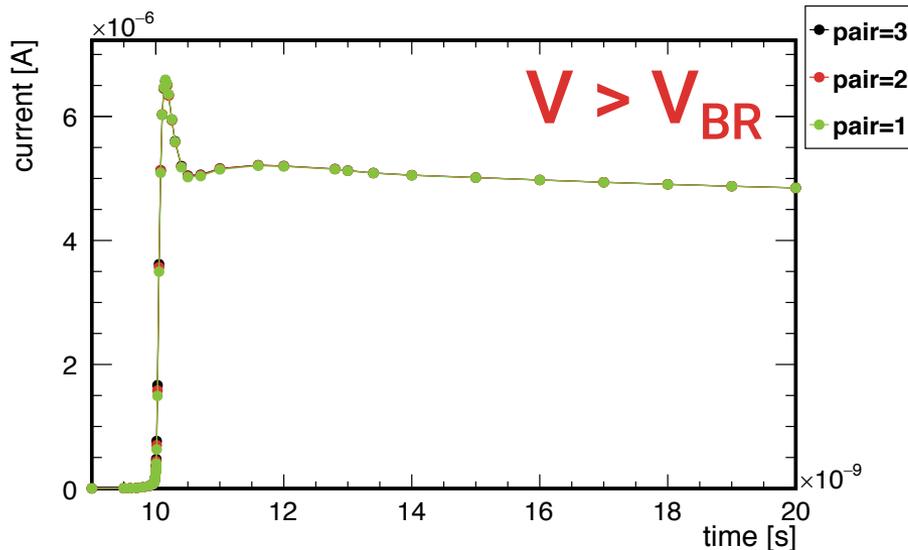
現在実装中、今後改良したTCADによって高増倍率PPDの設計開発を行う

PPD開発のまとめ

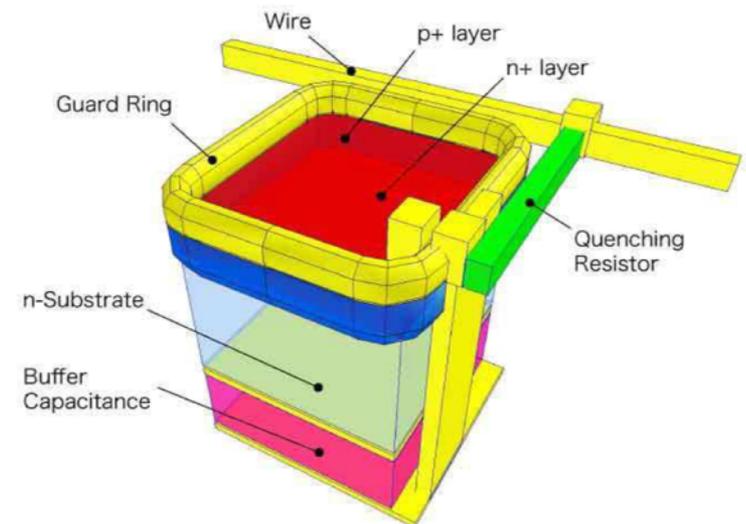
- 新型PPD開発に向けてTCADによるガイガーモードの動作再現を目指している
- ガイガー増幅状態は再現できたが、クエンチング機構による増幅の収束が確認できない
- キャリアの離散化を物理モデルに導入してクエンチング機構を実現させる

最終目標：PPDの動作をTCADで完全再現、高い増倍率を持った新型PPDを設計

$V_{op}=60V, R=1M$



提案されている新型PPD



H. Oide et al., Nucl. Instr. Meth. A 613, 2010, 23-38

結論と今後の課題

シンチレータ最適化

- Dimple readoutの検出光量の一様性が従来の読み出し方法より良いことを確認
- シミュレーションによる実測結果の再現、光学的特性が検出光量に強く影響
- Dimple readoutではPPDの受光面の位置によって光量が局所的に変化
- 形状の最適化とサンプリングカロリメータ性能評価シミュレーションが可能

PPD開発

- 新型PPD開発に向けてTCADによるガイガーモードの動作再現を目指している
- ガイガー増幅状態は再現できたが、クエンチング機構による増幅の収束が確認できない
- キャリアの離散化を物理モデルに導入してクエンチング機構を実現させる

今後の課題

- 使用するシンチレータ・反射率の材質検討
- 光学的特性の測定によるシミュレーションの精度改善
- 量産時の加工精度の違い、大量生産性を考慮した形状の設計
- 改良したTCADによる高増倍率PPDの設計