フレネルレンズを導入した新型粒子識別装置の開発

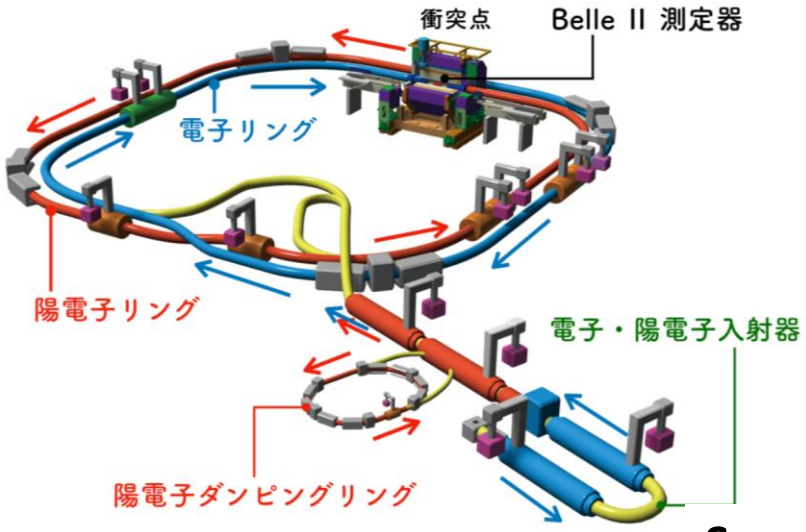
FPWS2026

新潟大学

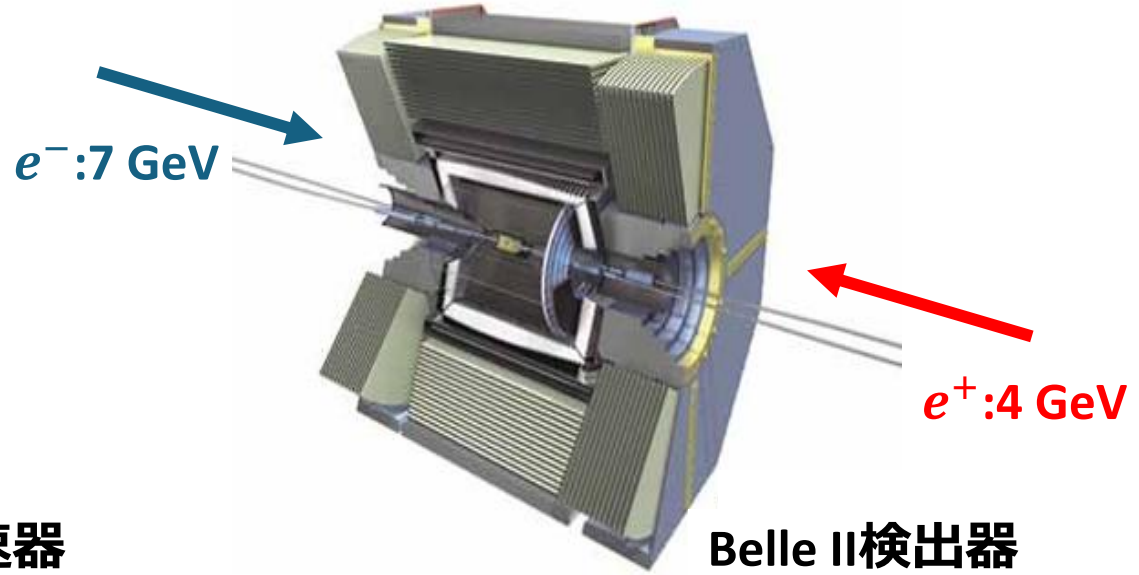
廣田宗久

Belle II実験

- 標準模型を超えた**新物理探索**を目的とした電子・陽電子衝突型加速器実験
- **SuperKEKB加速器**によって非対称エネルギーのe^-とe^+を衝突させることで、B中間子を生成
- **Belle II検出器**
  - B中間子崩壊から生じた粒子の飛跡・運動量・エネルギーなどの情報を測定
  - 崩壊点から出てきた粒子の種類を識別し、複数あるB中間子の崩壊モードを決定



SuperKEKB加速器



Belle II検出器

B中間子崩壊の精密測定には、高い粒子識別性能が必要

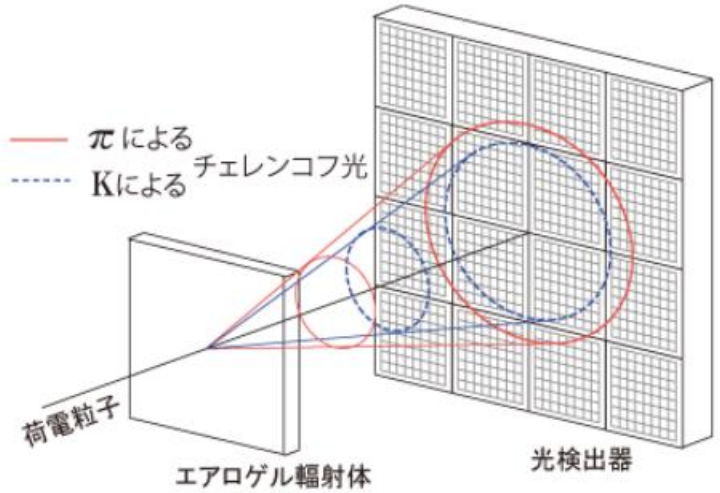
ARICH検出器

- B中間子の崩壊の終状態に多く含まれる**π/K中間子の識別**を行う
- 荷電粒子が媒質中の光速より速く進むとチェレンコフ光を粒子質量に応じた角度で放出

チェレンコフ光放射角

$$\cos\theta = \frac{\sqrt{1+(\frac{m}{p})^2}}{n}$$

θ: チェレンコフ角
m: 粒子の質量
p: 粒子の運動量
n: エアロゲルの屈折率



リングイメージの半径から放出角を測定し、粒子を識別

チェレンコフ角分解能

$$\sigma_{\mathrm{track}} = \frac{\sigma_{\theta,\mathrm{single}}}{\sqrt{N_\gamma}}$$

σ_{track}： 1トラックあたりの角度分解能
$\sigma_{\theta,\mathrm{single}}$：単一光子のチェレンコフ角分解能
N_γ： 検出光子数

ARICHの識別性能は、**検出光子数**と**リング幅**に依存する

ARICHは良好な識別性能を示しているが、加速器増強後の大統計データを生かした新物理探索に向け、さらなる性能向上が望まれる

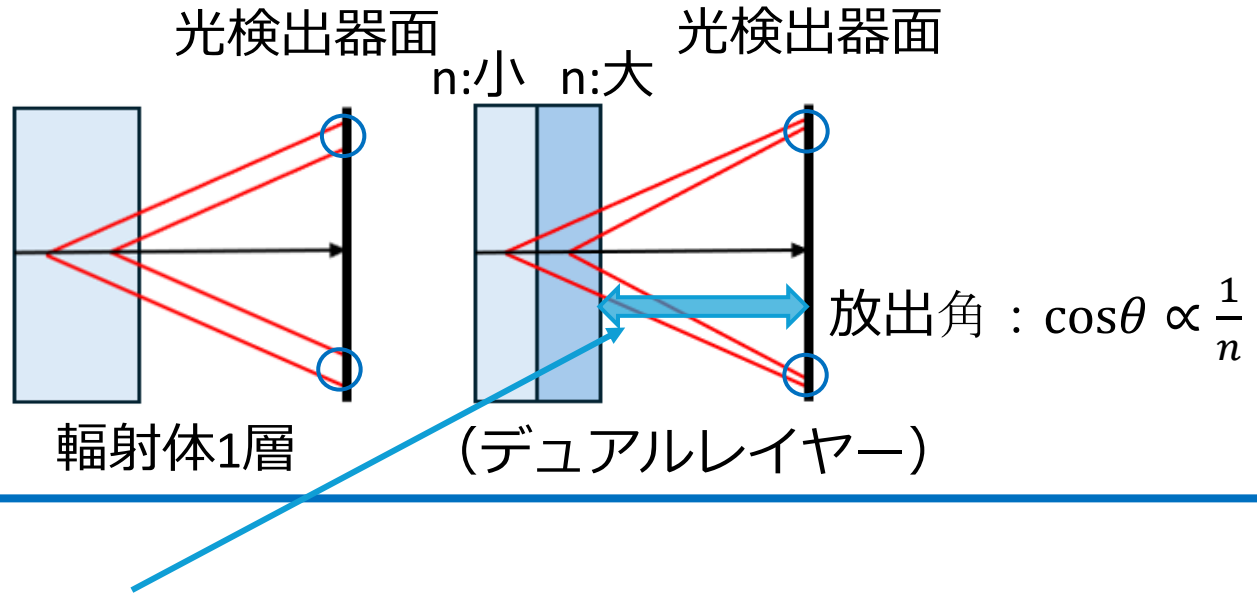
ARICHの識別性能向上における課題

■ 光子数とリング幅のトレードオフ

- 輻射体を厚くすると、光子数を増やせるが、リング分解能が悪化
- 現行ARICHではデュアルレイヤー方式を採用

■ ARICHにおけるデュアルレイヤー方式

- 屈折率の異なるエアロゲル輻射体を2層に重ねる
- 異なる層で出た光子が検出面で重なるように設計
- 同じ厚みでもリング幅を絞れる



輻射体と光検出器の間には一定の距離が必要

さらなる識別性能の向上に向け、検出器の小型化とリング幅抑制を両立する新たな手法を検討

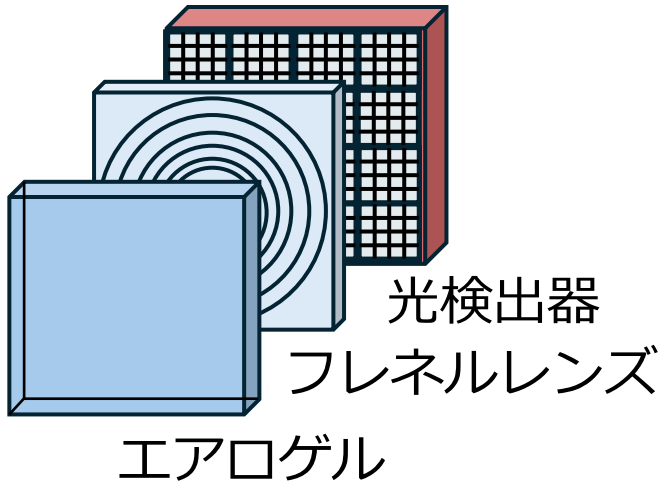
レンズ収束型RICH：LFC-RICH

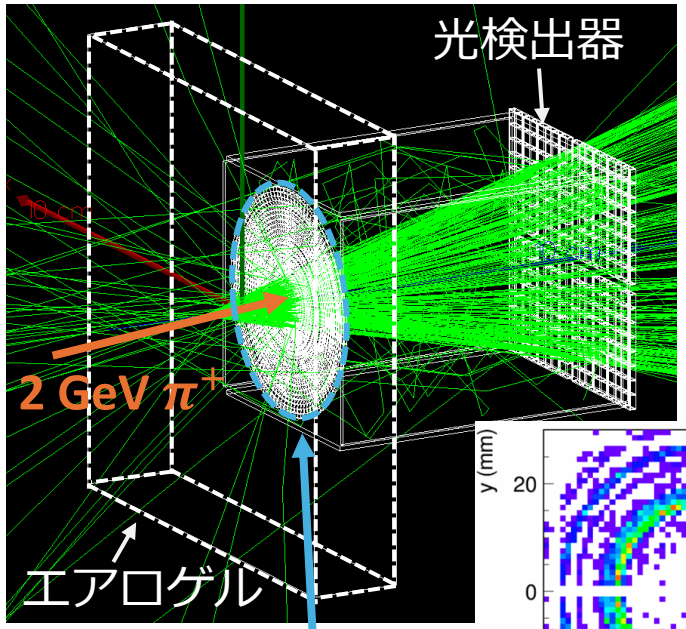
Lens Focusing Compact RICH

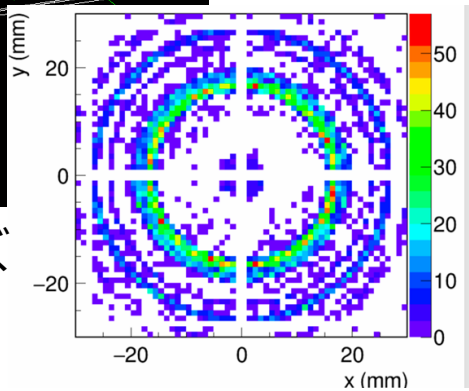
- **集光レンズ導入により、短い距離でもリング幅を抑制**

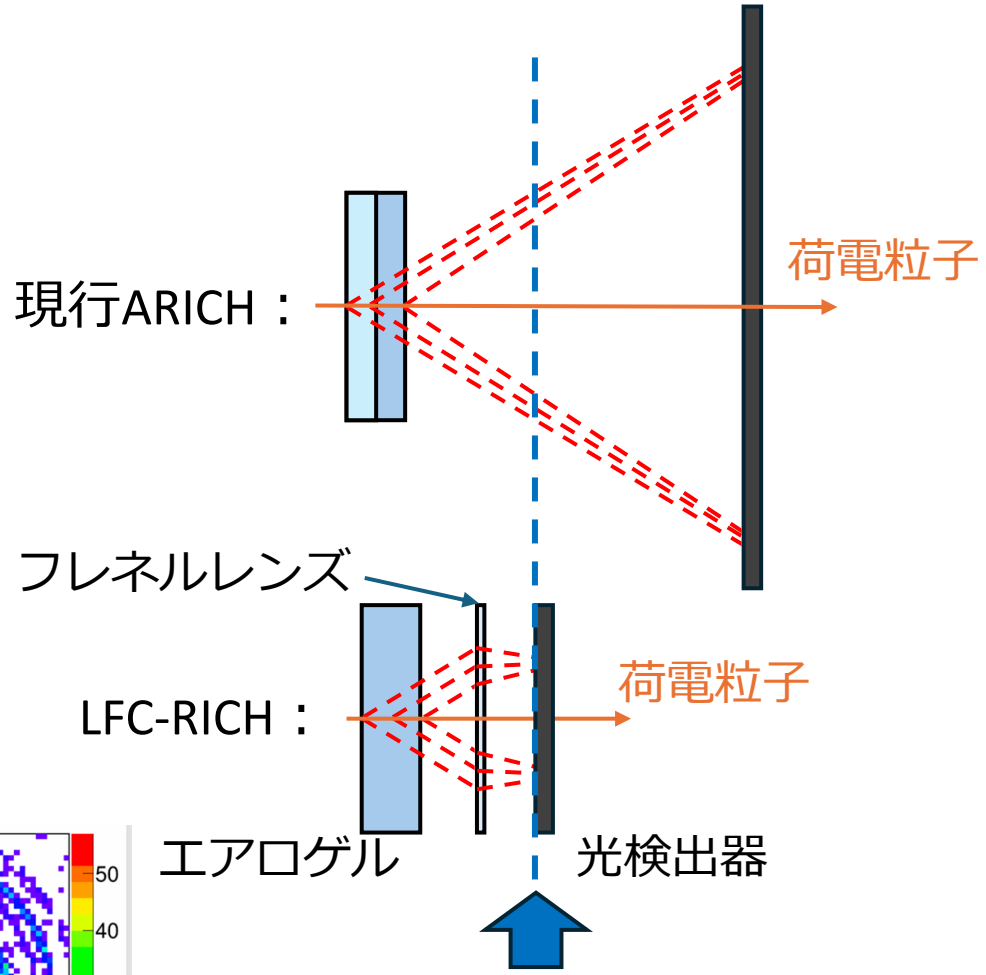
■ 構成

- 輻射体と光検出器の間にフレネルレンズを配置
  - ✓ 輻射体 ー 光検出器間の距離を短縮
  - ✓ チェレンコフ光を集光し、リング像の分解能を維持









距離短縮とリング幅抑制を両立

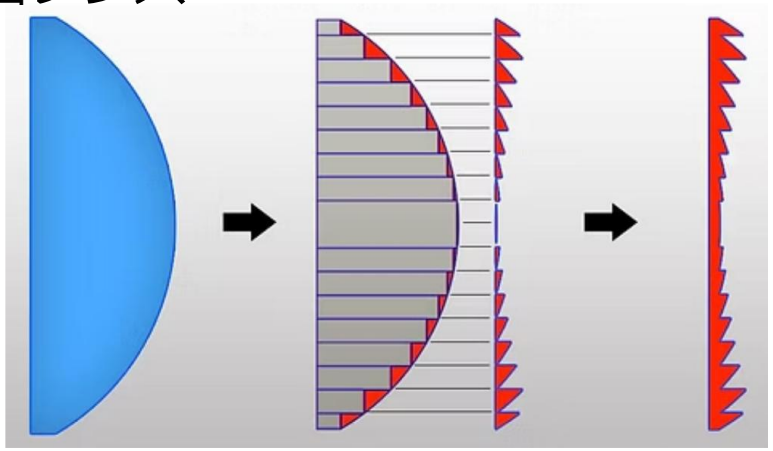
フレネルレンズ

- **フレネルレンズ**
  - 球面レンズを同心円状の溝構造で近似
  - 球面レンズと比較し、薄い構造を持つ

LFC-RICHにおける利点

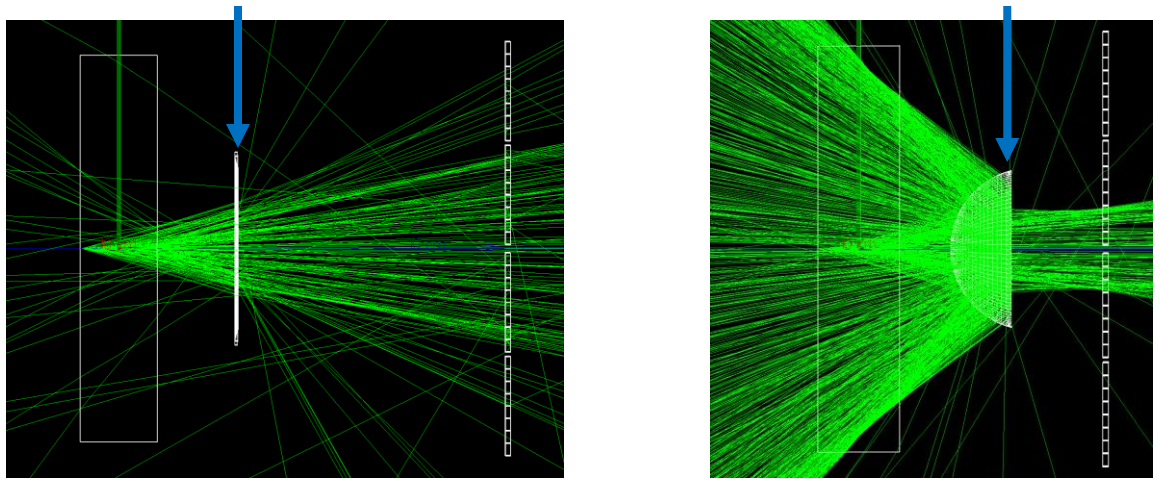
- 検出器全体の薄型化
- レンズ中で発生するチェレンコフ光が少ない

球面レンズ　　フレネルレンズ

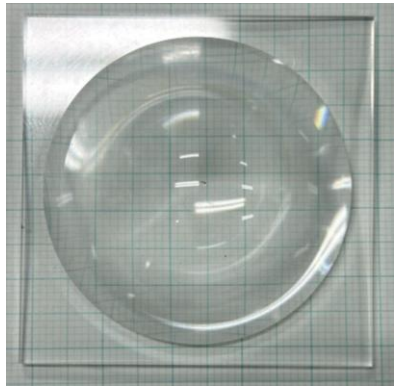


2 GeV π^+シミュレーション

フレネルレンズ　　球面レンズ



有機光学製フレネルレンズ

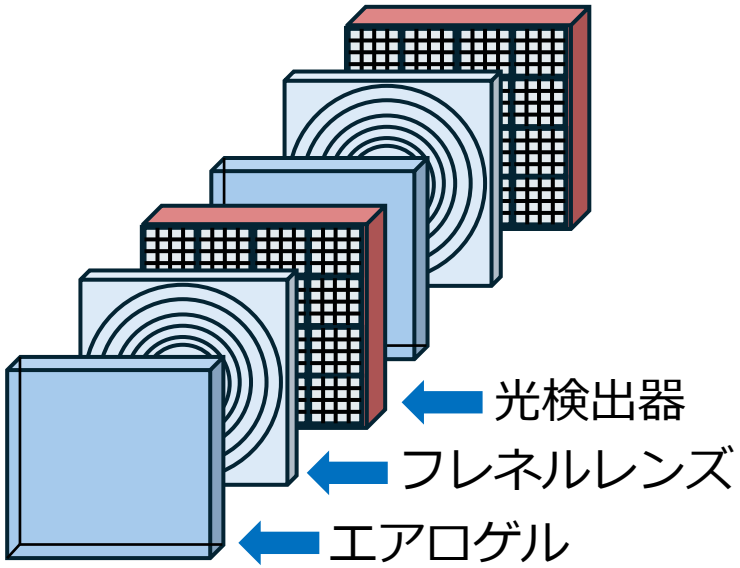


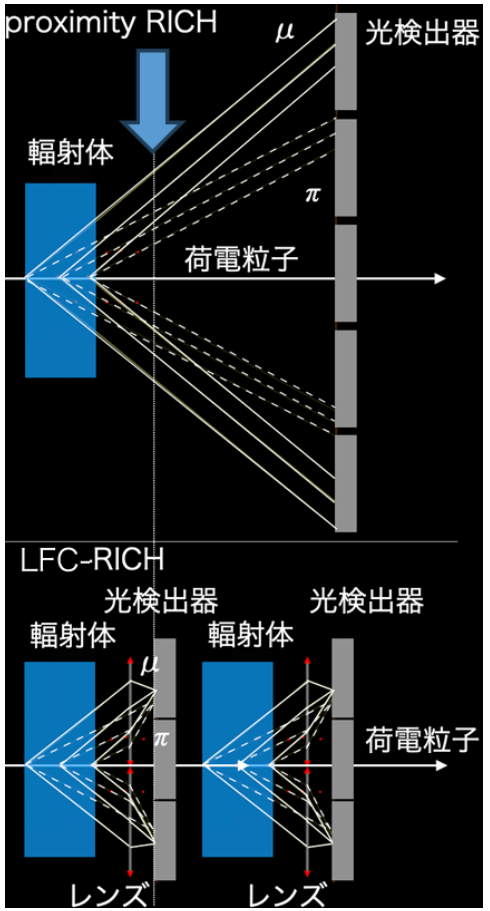
- 焦点距離50 mm
- レンズ半径50 mm
- 厚さ2 mm

小型化を活かしたアップグレード構想

- **レンズ収斂二層型RICH (Lens-Converging Double Layer RICH: LCDL-RICH)**
  - LFC-RICHを二層に配置
  - 2層化による検出光子数の増加

- **μ/π識別性能向上への貢献**
  - μ/πはπ/Kに比べて質量差が小さく、同じ運動量でのチェレンコフ角差も小さい
  - μ/π識別には、より高いチェレンコフ角分解能が求められる





➡**LCDL-RICHによってμ/π識別性能向上が期待**

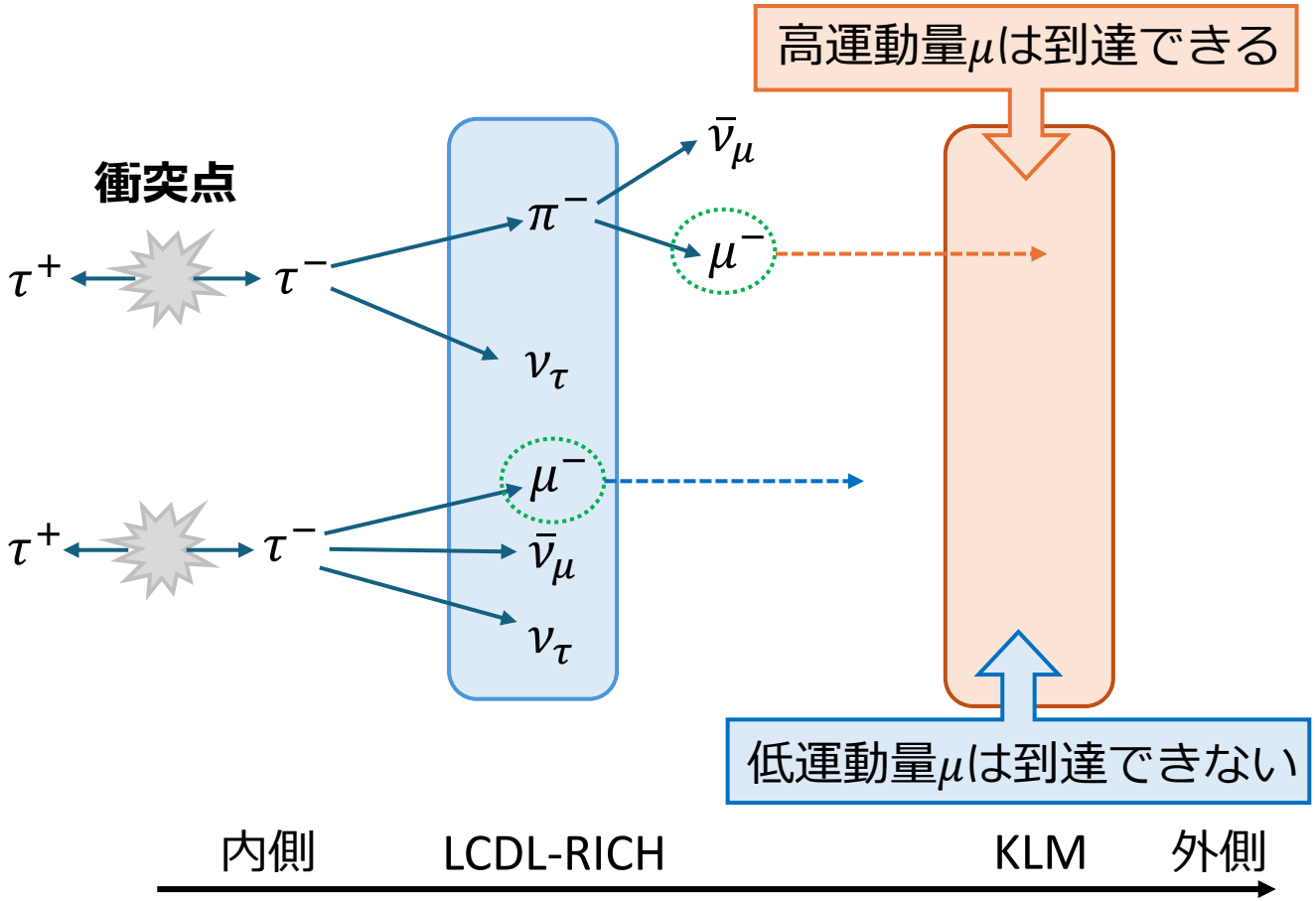
LCDL-RICHによる新物理探索への貢献

- **低運動量領域でのμ/π識別における課題**
  - Belle IIでのμ識別は主にKLM（μ検出器）を利用
  - 低運動量のμはKLMまで到達できず、識別性能が低下
  - μ/πは質量差が小さいため、現行ARICHでのμ/π識別性能は限定的

→ LCDL-RICHによる低運動量領域でのμ/π識別性能向上が期待

- **τ崩壊を用いた新物理探索**
  - $\boldsymbol{\tau \to \mu\nu\nu}$と$\tau \to e\nu\nu$の崩壊分岐比から、レプトンフレーバー普遍性を検証

低運動量μの識別における課題



低運動量μ識別性能の向上により、$\tau \to \mu\nu\nu$の信号事象選別効率の改善が期待できる

研究目的

■ **最終目的**

- **LFC-RICHの試作機を製作し、ビームテストにより性能を評価**

フレネルレンズの性能評価

- LFC-RICHではフレネルレンズの光学特性がリング幅や検出光子数に影響する
  ➡試作機設計に先立ち、レンズの特性を把握する必要がある

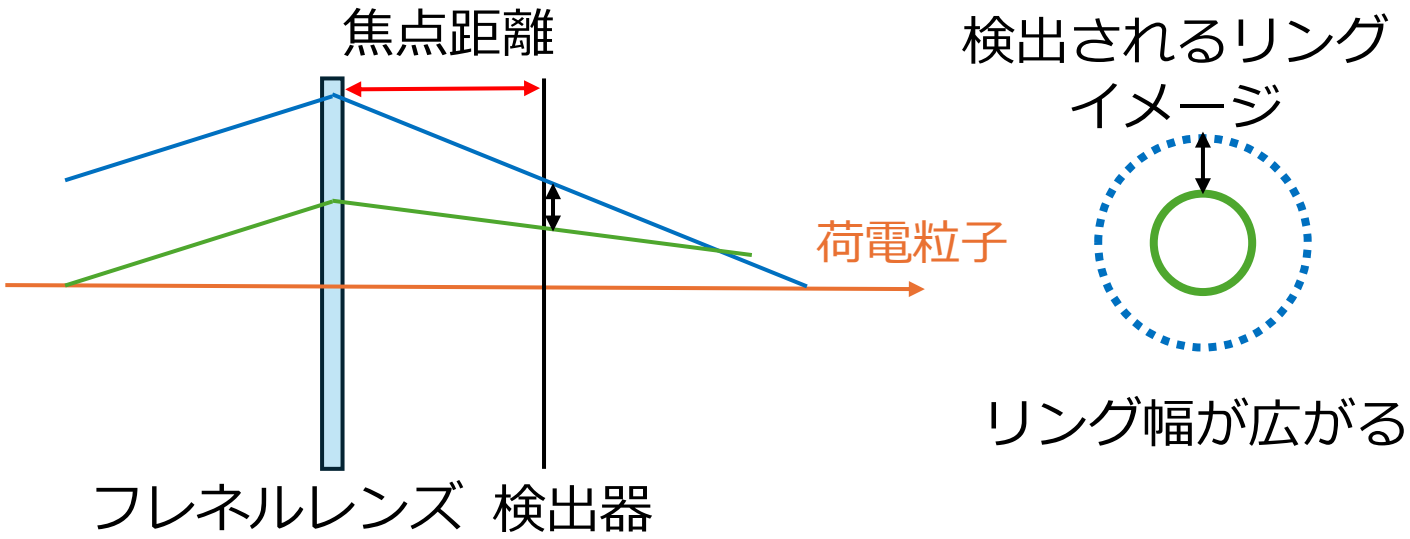
■ **評価したい項目**

✓ 入射位置に依存する集光特性（レンズ収差）

✓ 段差構造に由来する光子散乱

✓ 透過率➡検出光子数の減少

レンズ収差がリング幅に与える影響



理想的なレンズでは、同じ入射角の光は焦点面上の一点に集光する

研究目的

■ **最終目的**

- **LFC-RICHの試作機を製作し、ビームテストにより性能を評価**

フレネルレンズの性能評価

- LFC-RICHではフレネルレンズの光学特性がリング幅や検出光子数に影響する
  ➡試作機設計に先立ち、レンズの特性を把握する必要がある

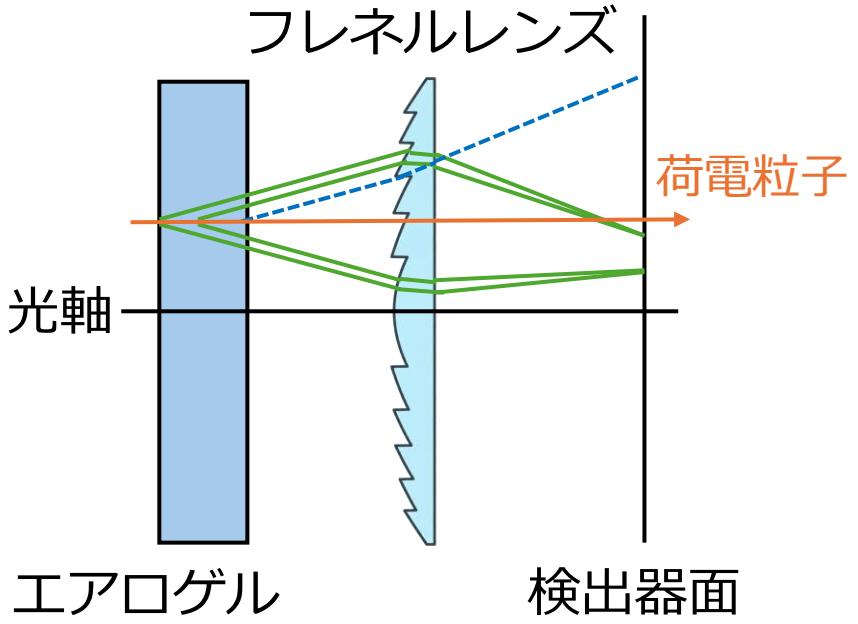
■ **評価したい項目**

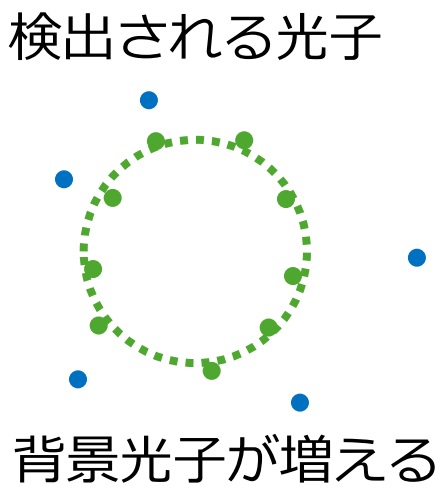
✓ 入射位置に依存する集光特性
（レンズ収差）

✓ 段差構造に由来する光子散乱

✓ 透過率➡検出光子数の減少

段差構造に由来する光子散乱





入射位置走査による集光特性評価

■ **測定方法**

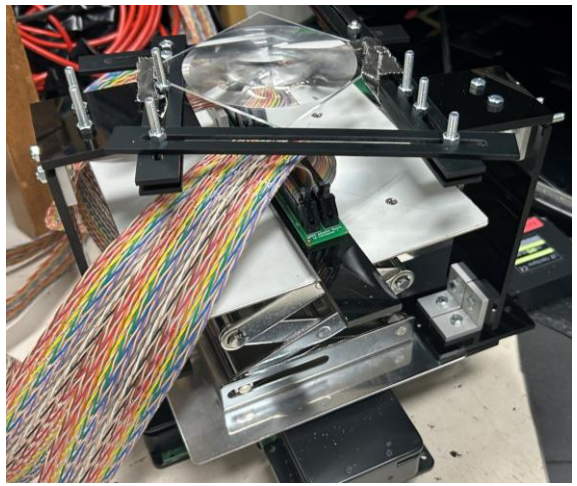
- レーザーの入射方向とレンズ - MPPC間距離を固定し、XYステージによってレンズ面上の入射位置を変化させた

■ **測定条件**

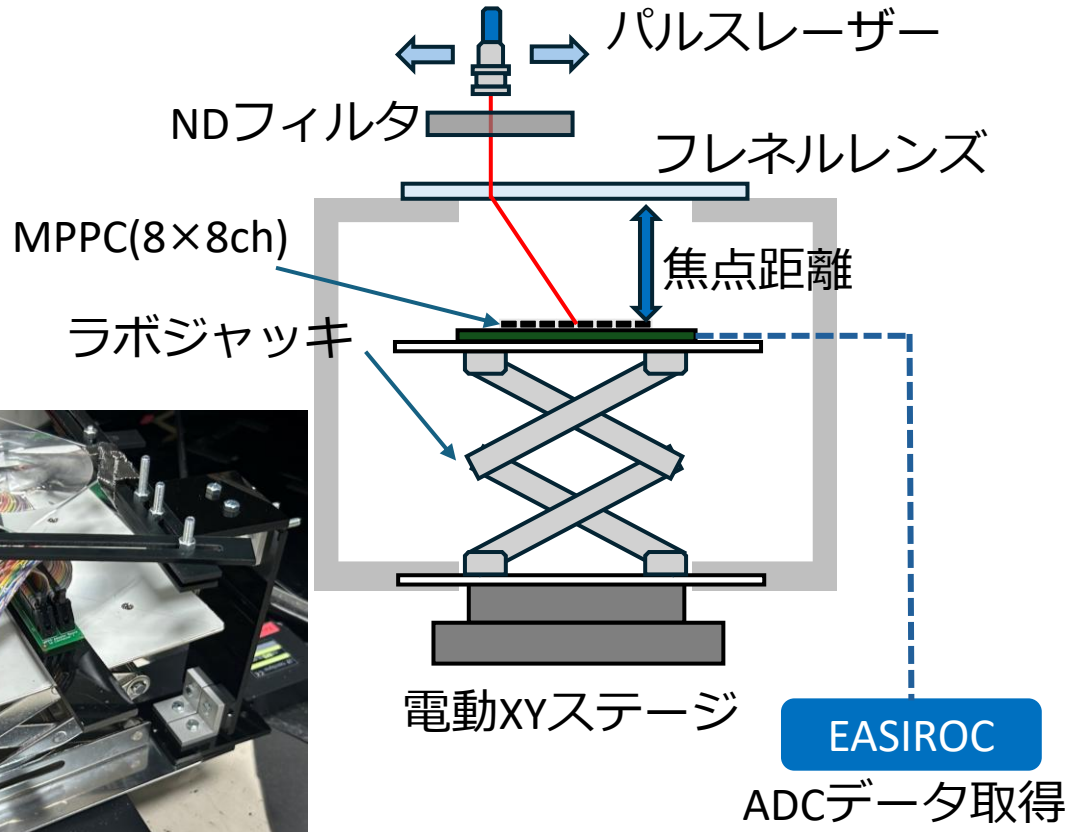
- レーザー波長：404 nm
- フレネルレンズ：焦点距離50 mm、レンズ半径50 mm (有機光学製市販レンズ)
- MPPC：8×8 ch、 1 ch 3×3 mm^2
- 取得イベント：各入射位置1万イベント

- レーザー発光に同期したタイミングで検出器からのパルス波高情報を取得

入射位置に応じたヒットchを比較した



セットアップ概念図

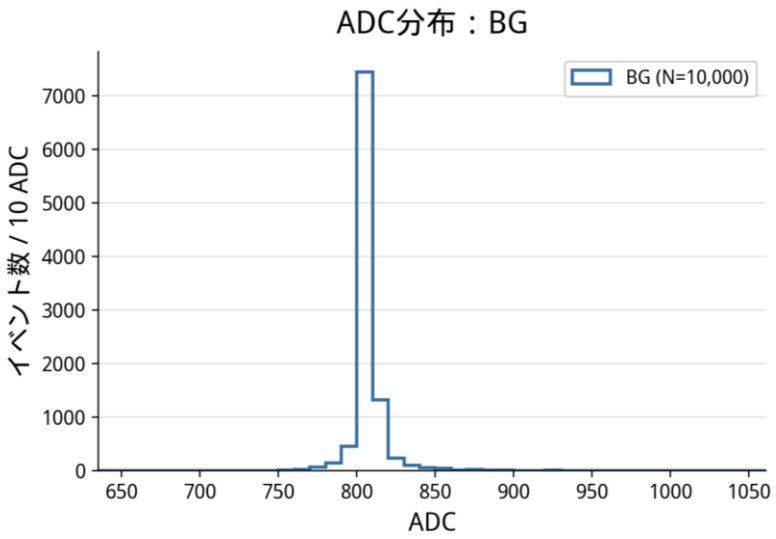


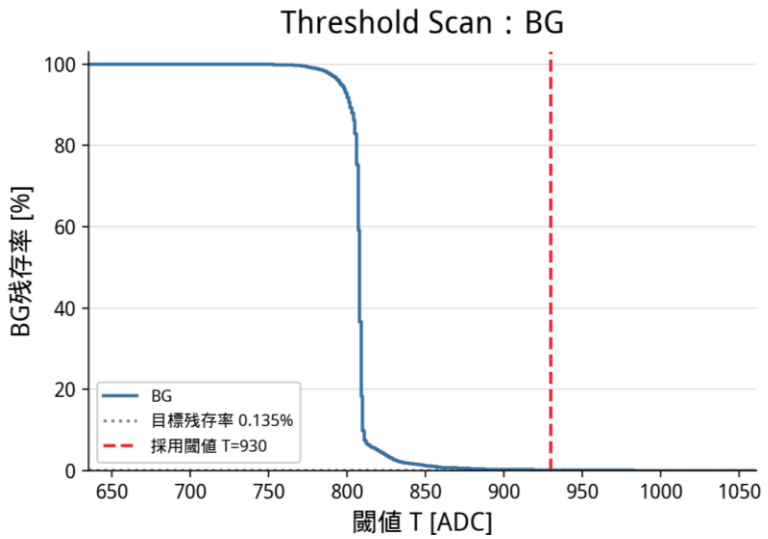
レーザー応答イベントの選別

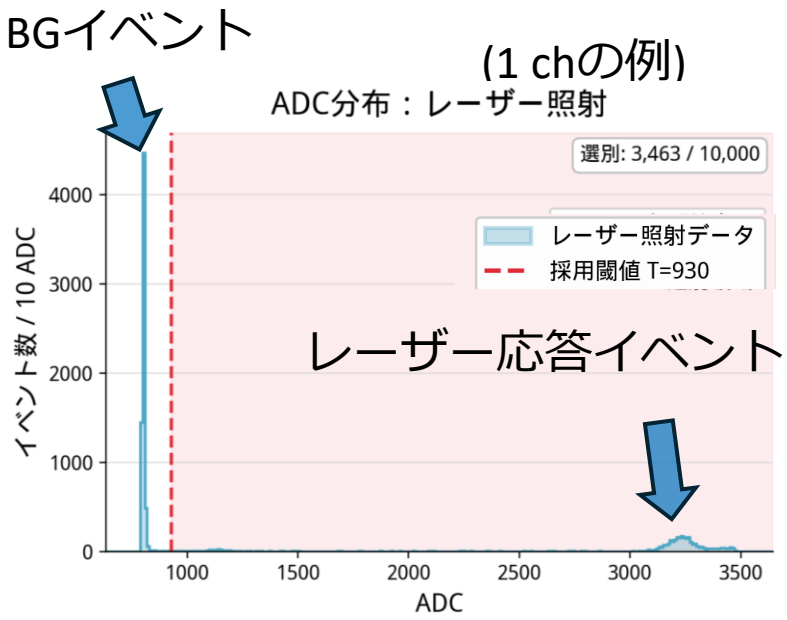
- ヒットマップを作成するために、ADC値を基にレーザーイベントの選別を行った

■ **バックグラウンド(BG)データ（レーザー光なし）を用いたレーザー応答イベントの選別**

- 各入射位置での測定前後にBGデータを取得
- BGのADC分布の選別条件（閾値）を大きくしていった際の残存率を測定（Threshold Scan）
- BGイベント残存率が0.135%以下となるような閾値を決定





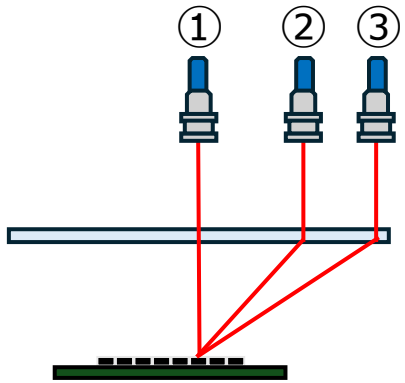


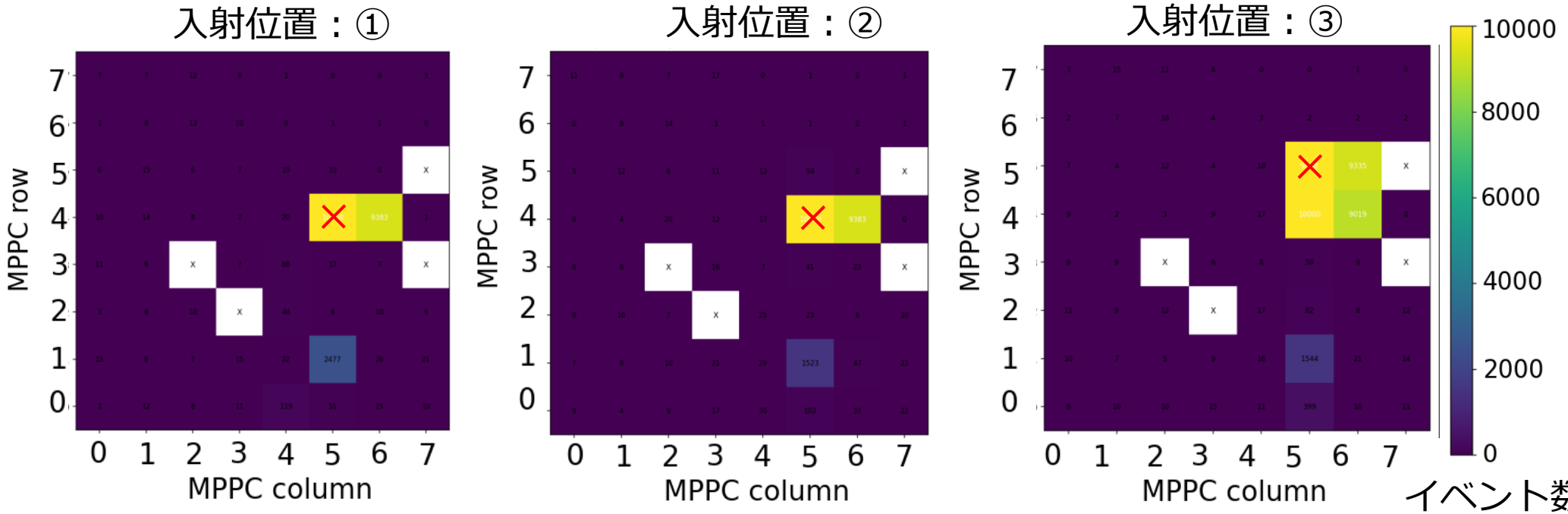
各chのBGペデスタル・ノイズ特性を考慮し、chごとに閾値を決定

ヒットマップによる集光位置の定義

- 屈折光観測によるヒットマップを作成
- 多数ヒットがあるchが複数見られたためヒット数の最も多いchをレーザー観測位置とした
- ヒットが同数の場合は、選別イベントのADC平均値が高いchを採用

選別イベントのヒットマップ例





X：デッドch　×：集光位置

最多ヒットchの入射位置依存性

- 入射位置をレンズ上5 mm間隔の格子点状に操作し、各入射位置における最多ヒットchの変化を比較した
  - マスの中心＝入射位置

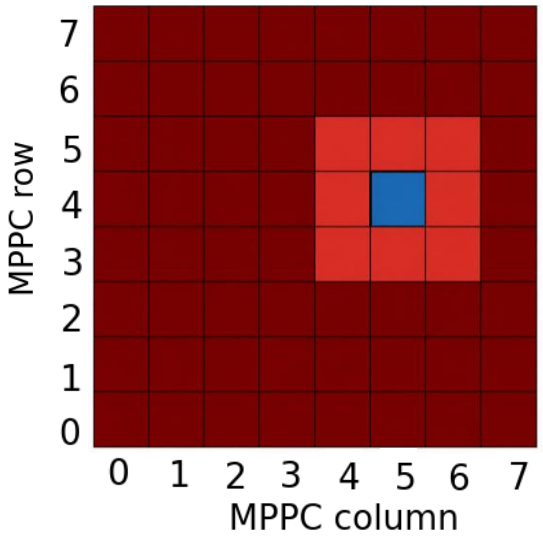
色分け

■：MPPC上で最多ヒットchが変動しなかった
■：MPPC上で最多ヒットchが隣接chに移動した
■：MPPC上で最多ヒットchが非隣接chに移動した
◌：レンズ領域

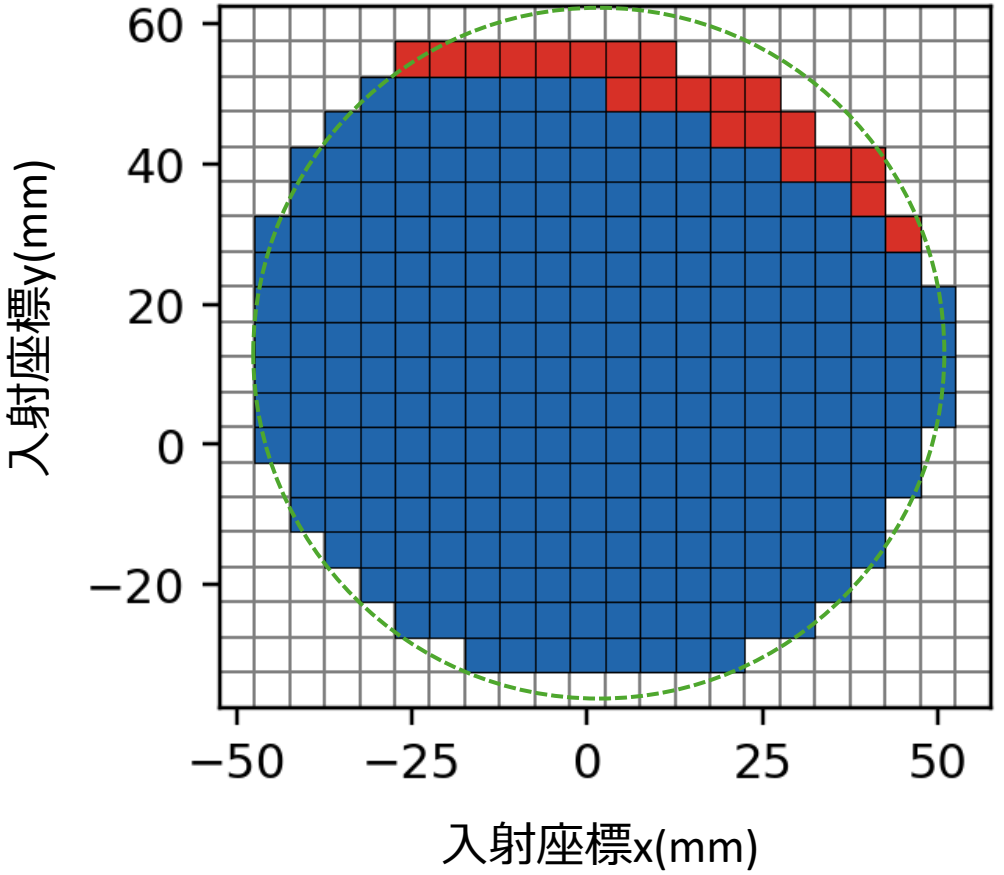
期待される結果

- 理想的なレンズではヒットchは変化しない

MPPC上での最多ヒットch



入射位置ごとの最多ヒットchの変化



最多ヒットchの入射位置依存性

- 入射位置をレンズ上5 mm間隔の格子点状に操作し、各入射位置における最多ヒットchの変化を比較した

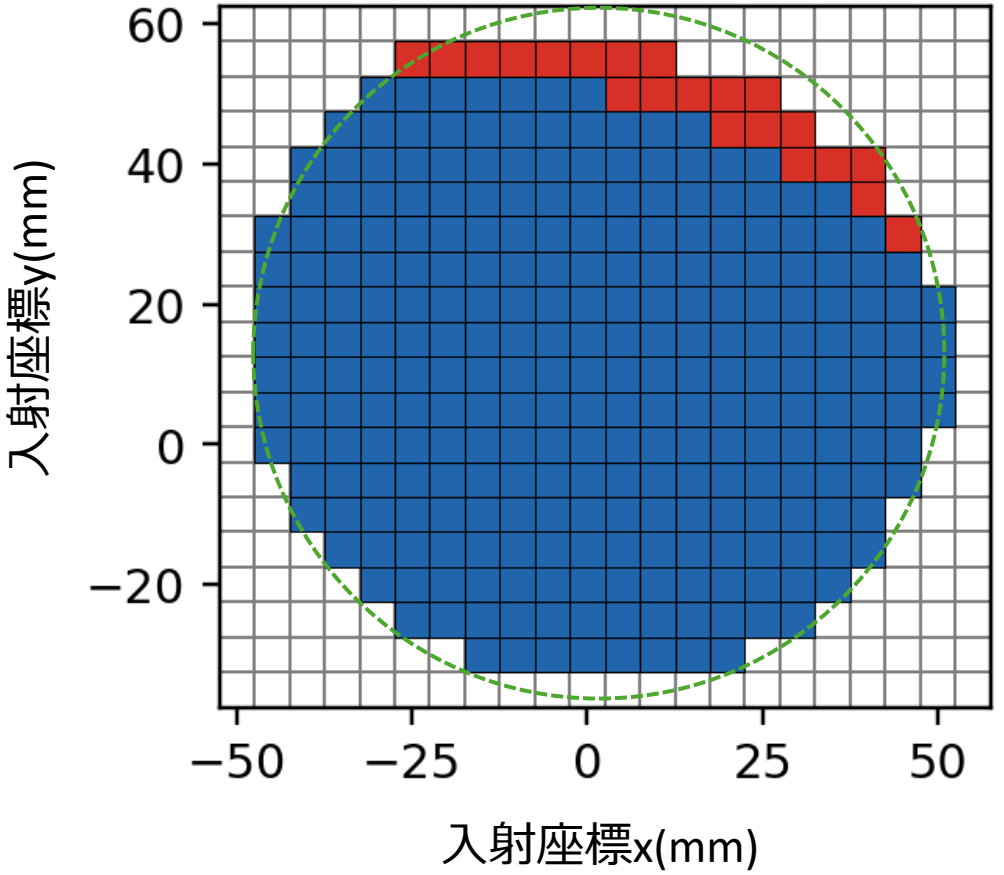
結果

- 大部分の入射位置で最多ヒットchは変化せず、集光位置は安定していた
- 一部のレンズ端部で最多ヒットchの移動が見られた

考察

- 集光性能の安定性の観点では、試作機で使用できる見通しが得られた
- 端部での集光位置変動については、追加測定による評価が必要

入射位置ごとの最多ヒットchの変化



透過率の推定

■ 測定方法

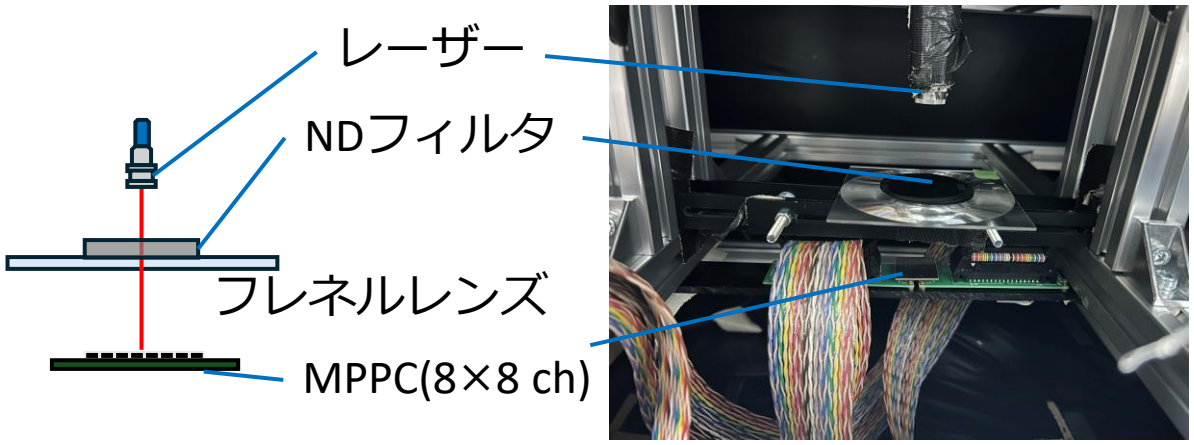
①測定条件の調整

- MPPCのchごとの応答特性の違いを避けるため、同一chで比較
- 数光子レベルのレーザーを用い、レンズあり/なしの両条件でch28にレーザー応答が観測されるようにMPPC位置を調整

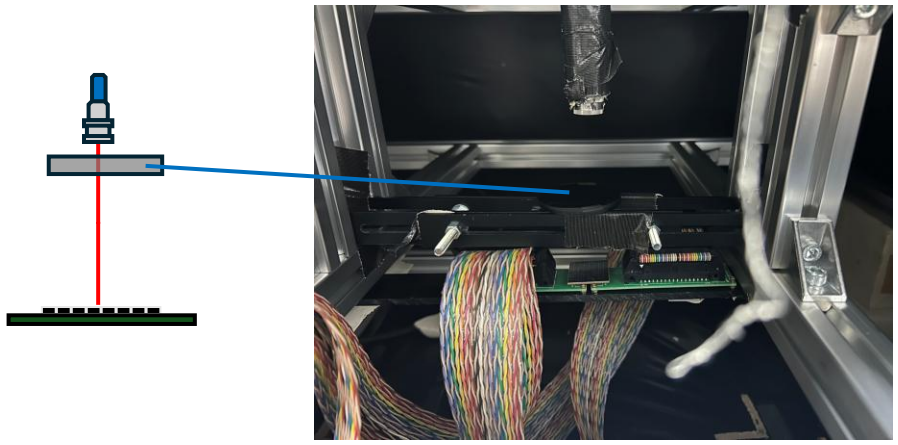
②透過率の測定

- レーザーを1光子レベルまで減光
- レンズあり/なしで各10万イベント取得し、ch28のヒット数を比較

<u>レンズあり</u>



<u>レンズなし</u>

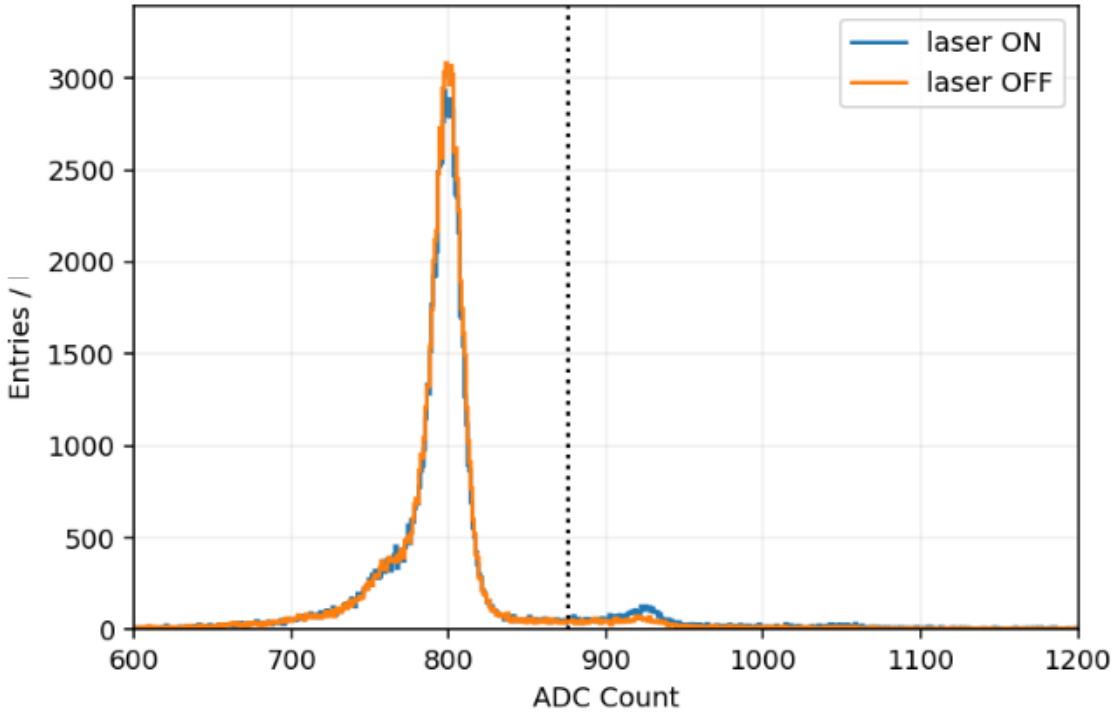


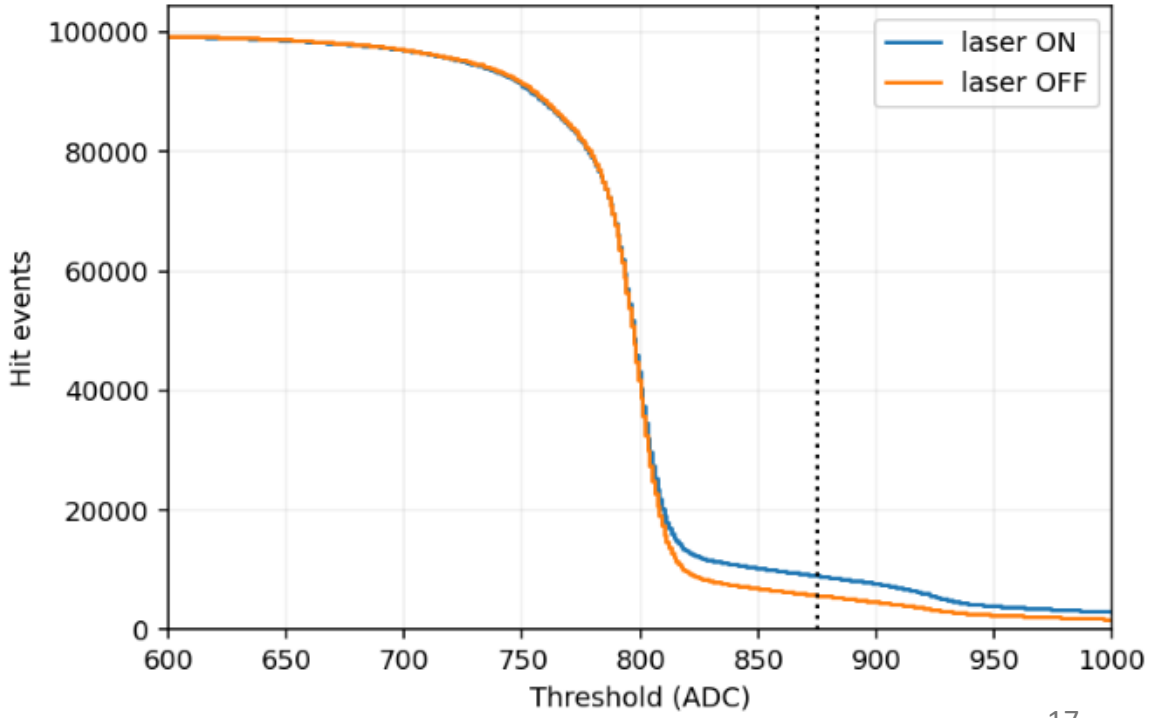
イベント選別

- レーザー照射によるヒットを評価するためにADC値を基にイベントを選別

- レーザーをoffにして10万イベント取得した時のBGデータに対して、threshold scanを行い、閾値を決定

- ペデスタルを除外する閾値としてADC値875を設定し、ヒット数を比較した





レンズの透過率推定

■ 透過率の算出

- レンズあり/なしのレーザー照射時のHit数とBGのHit数の差分を比較

レンズ有無によるHit数の違い（10万イベント取得）

	Hit数	BG差し引き後
レンズなし	9192±91	3335±118
レンズあり	8956±90	3099±117
BG	5857±74	-

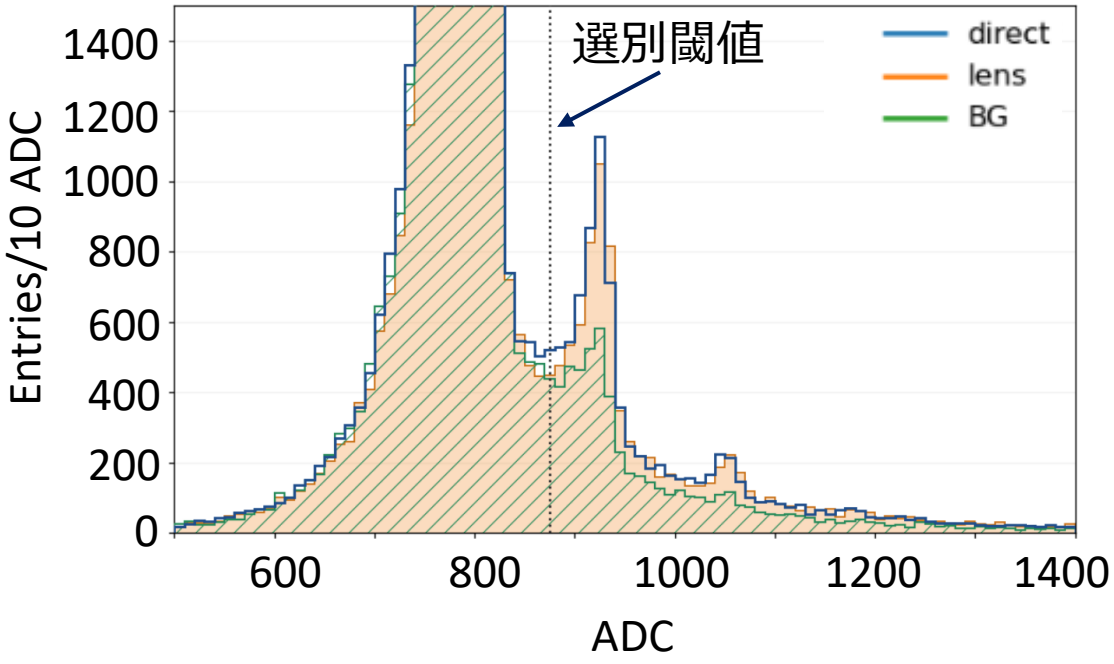
■ 誤差

- Hitの有無が二項分布に従うとして、統計誤差を算出
- BG差し引き後のHit数から、誤差伝播により透過率の統計誤差を算出

透過率推定

$$3099/3335 = 92.9 \pm 3.7\%$$

1光子レベルのレーザーを照射したときのADC分布



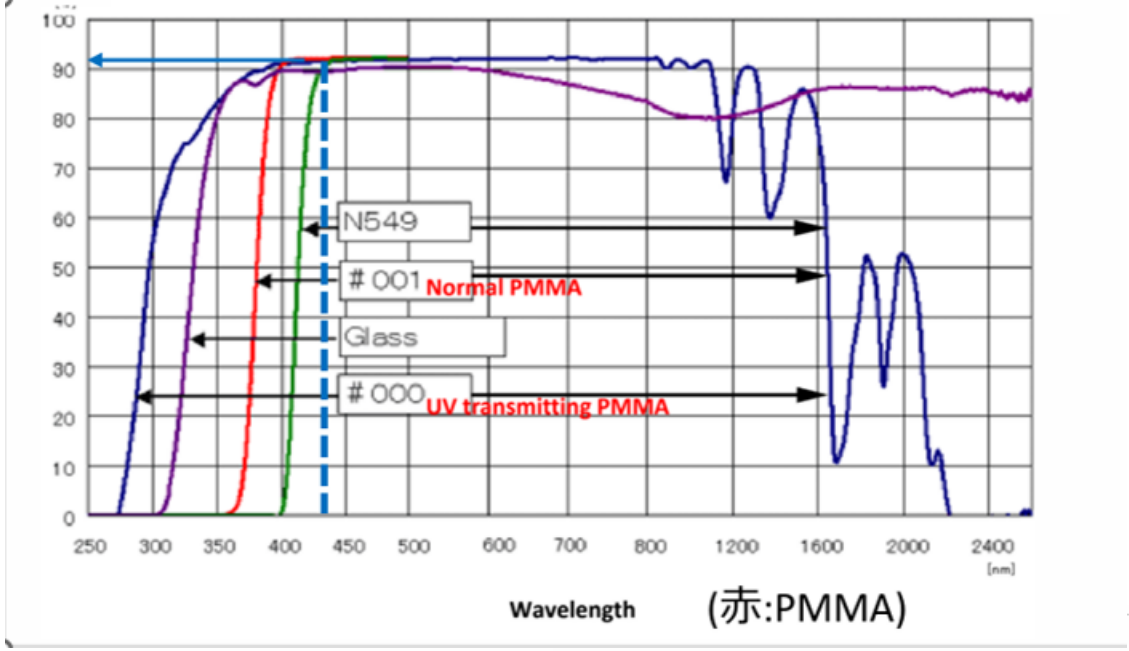
値比較（参考）

- 使用したPMMA製の2 mm厚レンズの透過率に関する他文献と比較

透過率推定
$3099/3335 = 92.9 \pm 3.7\%$

(レーザー波長：439 nm)

- 他社製のレンズと比較（日本特殊光学樹脂）
（測定レンズと同規格）



(赤:PMMA)

透過率推定の課題と今後

■ 課題

✓ **透過率の統計精度**

- BG差し引き後のヒット数が少なく、統計誤差が大きい

✓ **他chでのヒット**

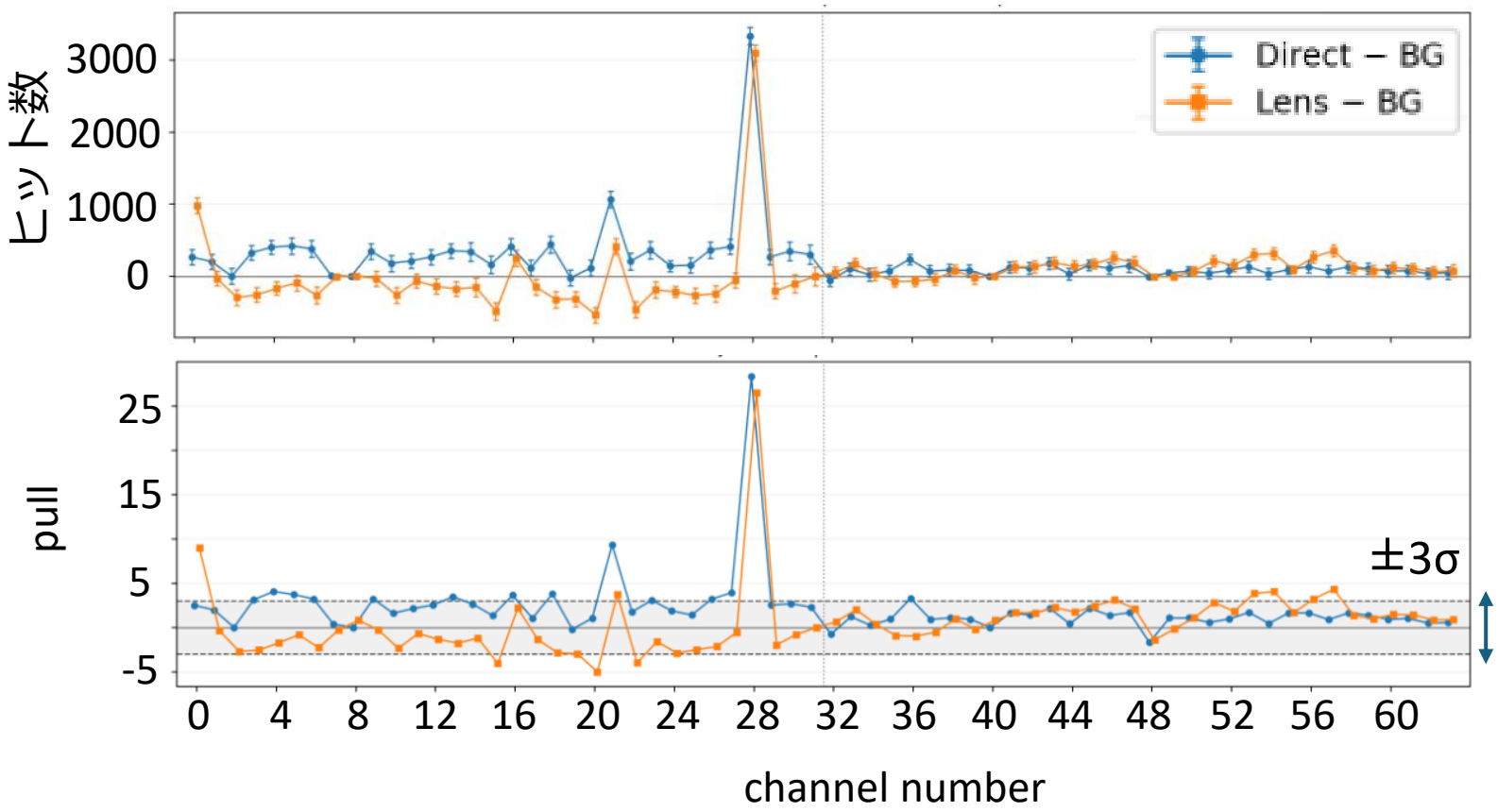
- ch28以外にもBGに対して、有意なヒット数増加がみられるchが存在

- レンズによる散乱か他要因かは未特定

■ 今後

- 取得イベントを増やして測定
- 他chのヒットを考慮した評価

chごとのBG差し引き後ヒット数



まとめと展望

■ まとめ

- ARICH検出器の小型化を目的としたLFC-RICHの開発を目指す
- LFC-RICH試作機の設計に向け、フレネルレンズの集光特性を評価した
- 大部分の入射位置で集光位置は安定しており、試作機で使用できる見通しが得られた
- レンズ有無でのBG差し引き後のヒット数比から透過率を評価し、 $92.9 \pm 3.7\%$と見積もった

■ 今後の展望

- レンズ端部での集光位置変動の原因特定のための追加測定
- 透過率測定における統計量の増加と他chのヒットを考慮した評価
- LFC-RICHの試作機設計とビームテストによる性能評価

Backup

値比較（参考）

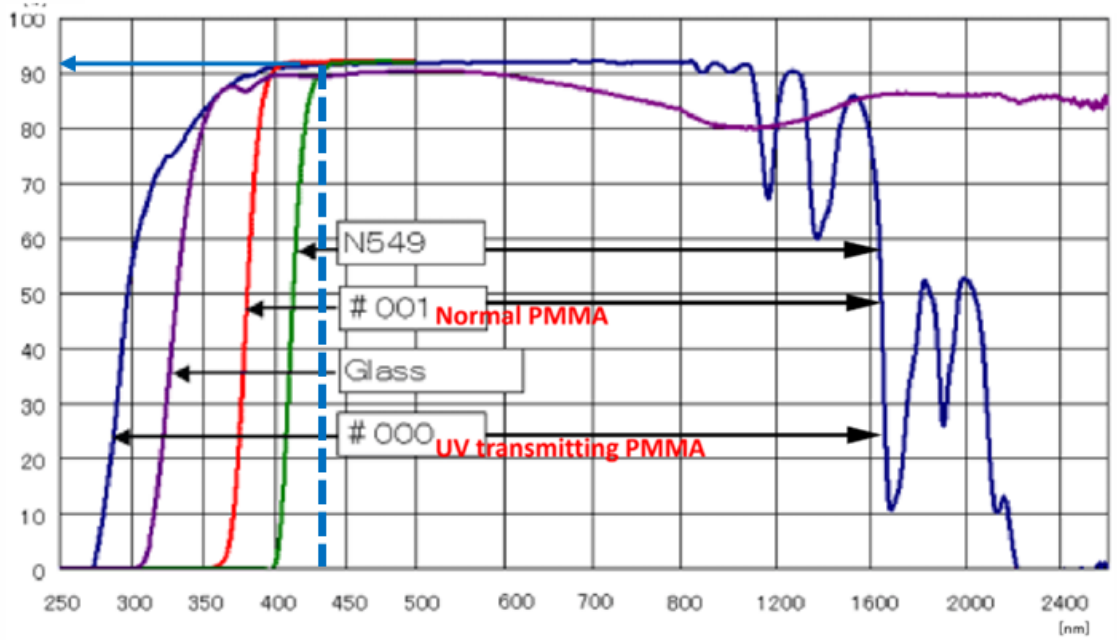
- 使用したPMMA製の2 mm厚レンズの透過率に関する他文献と比較

透過率推定
$3099/3335 = 92.9 \pm 3.7\%$

(レーザー波長：439 nm)

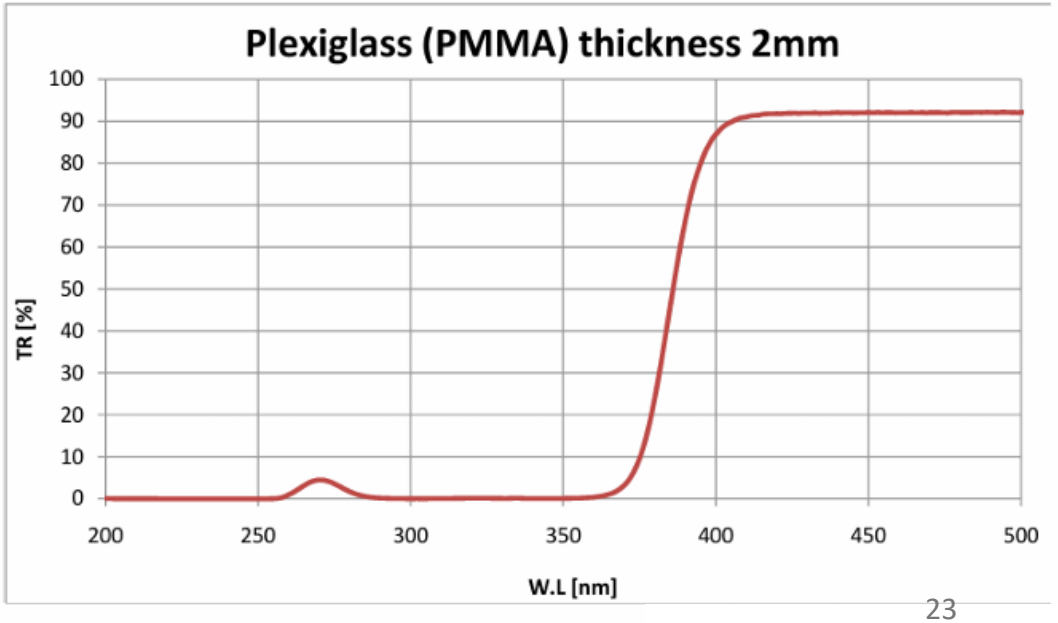
参考文献：PH-EP-Tech-Note-2009-003.pdf

- 他社製のレンズと比較（日本特殊光学樹脂）
（測定レンズと同規格）



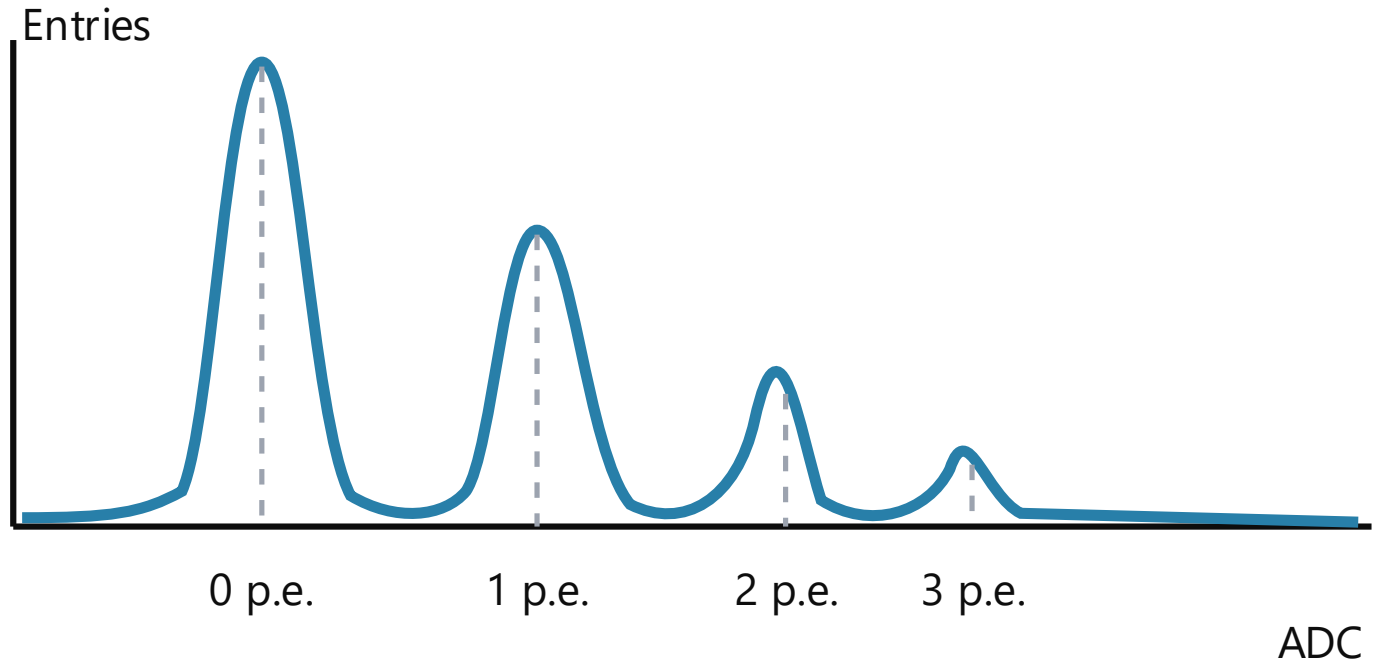
(赤:PMMA)

- CERNのPMMA透過率測定資料（2009）
(厚さ2 mmのPMMA板)：約92%



光量調整

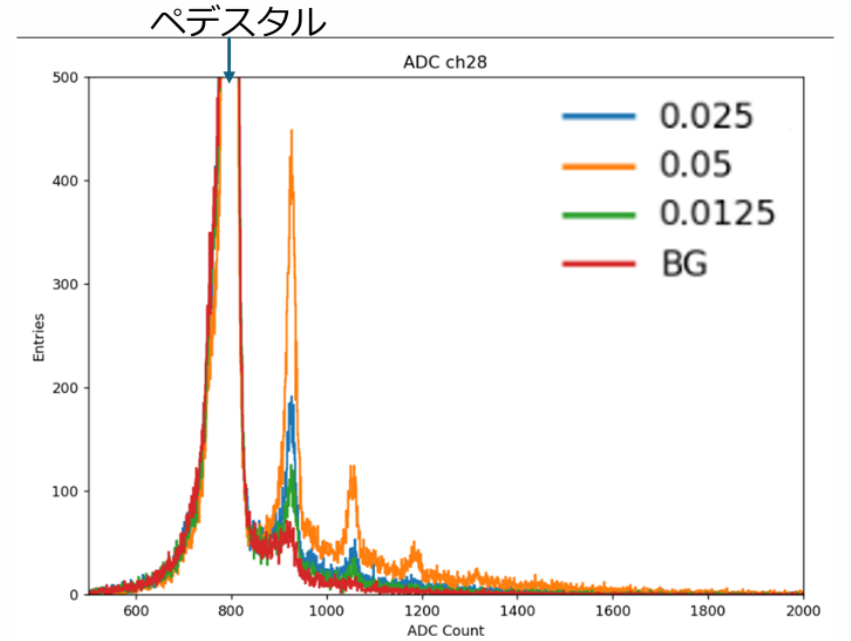
- MPPCでは、検出された光子数に応じた電荷信号が出力される
- EASIROCで信号を増幅・整形し、波高をADC値として記録する
- 1光子相当の信号がほぼ一定の電荷に対応するため、ADC分布には離散的なピークが現れる



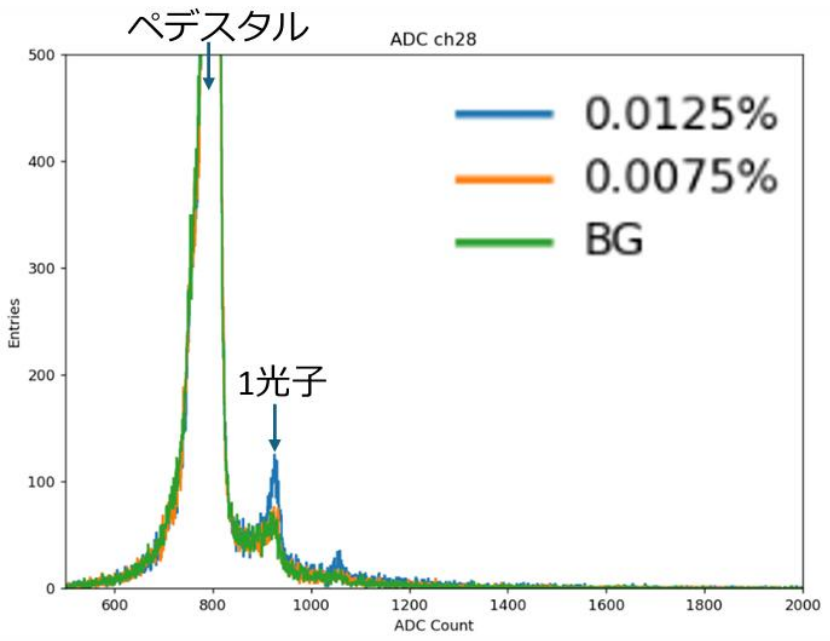
光量調整

- NDフィルタを用いて、レーザー光量をさらに減少
- 0.0075%に減光した場合は、ADC分布がほぼBGと重なり、レーザー応答の信号がほとんど観測されない
- 0.0125%では1光子相当のピークを確認できる

<u>レーザーを0.05%～0.0125%まで減光した時のADC分布</u>



<u>レーザーを0.0125%～0.0075%まで減光した時のADC分布</u>



EASIROC

Extended Analogue Silicon pm Integrated Read Out Chip

- MPPC読み出し用ASIC

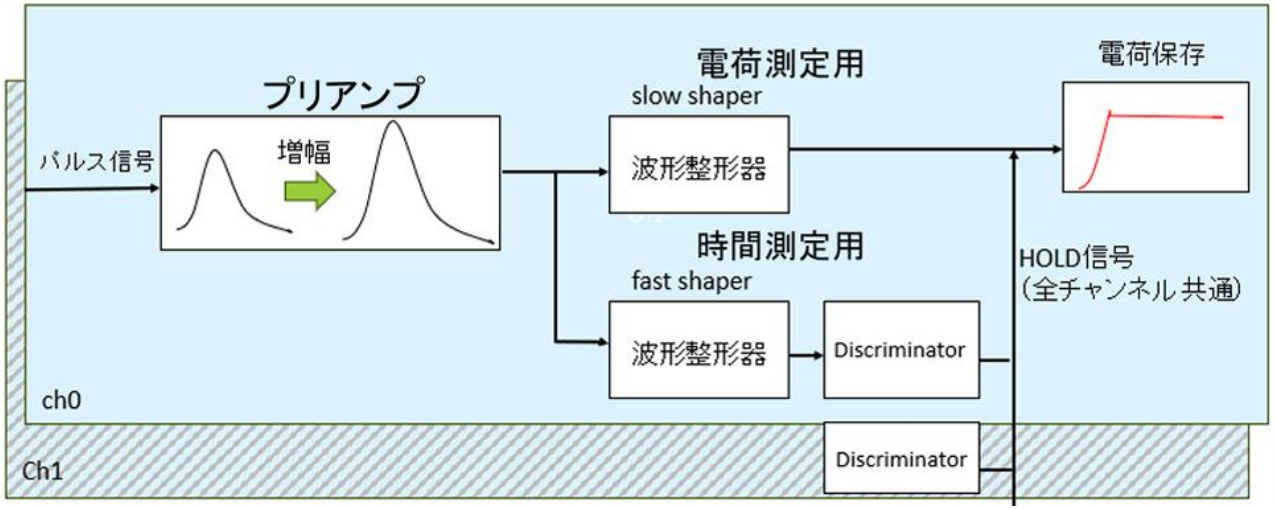
機能

- 32 chのMPPCを同時に読み出し可能
- MPPCへの印加電源内蔵
- 各chのMPPCへの印加電圧を0～4.5Vの間で調整可能
- 波形整形器の時定数を25 ns～175 nsの間で調整可能
- 温度・バイアス電圧・電流のモニタリング

モジュール内部



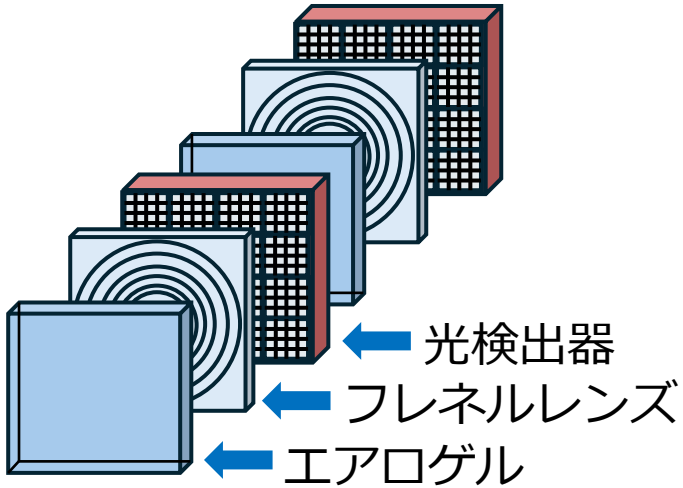
データ処理の流れ

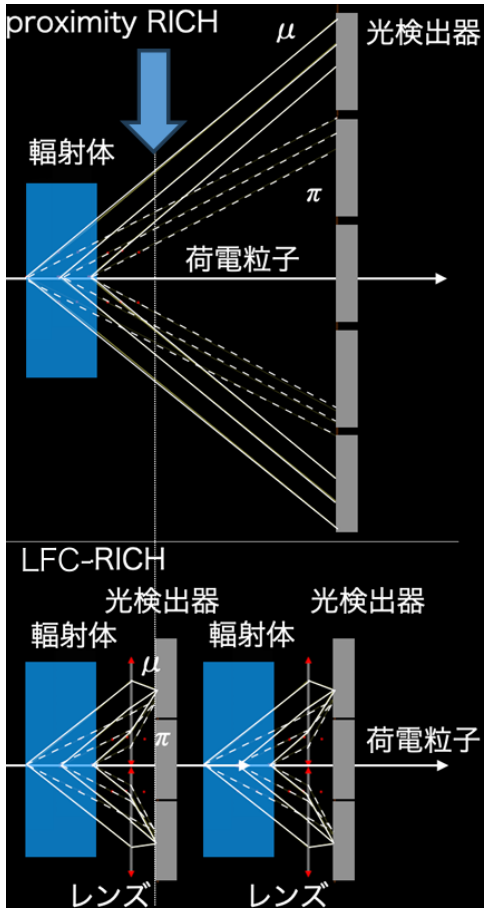


- MPPCの信号を増幅・整形
- HOLD信号が来た瞬間に信号を保持し、ADCでデジタル信号に変換

小型化を活かしたアップグレード構想

- **レンズ収斂二層型RICH (Lens-Converging Double Layer RICH: LCDL-RICH)**
  - LFC-RICHを二層に配置
  - 検出光子数の増加
  - μ/π識別性能の向上





- **期待されるμ/π識別性能**※

粒子運動量	現行ARICH	LCDL-RICH
2 GeV/c	2.6σ	5.7σ
3 GeV/c	1.2σ	2.5σ

➡**衝突点近傍での高精度なμ/π識別の実現が期待できる**

※検出光子数が2倍、レンズ収束によって$\sigma_{\theta,\mathrm{single}}$が4.6 mrad→3 mradに改善すると仮定

μ識別

- **KLMでのμ識別**

μの運動量	KLMでの識別
約0.6 GeV/c未満	KLMまで到達しにくい
約0.6～1 GeV/c	到達できても十分に貫通せず、識別が難しい場合がある
約1 GeV/c以上	識別性能が高い

- **ARICHでのμ/π識別性能**

粒子運動量	現行ARICH
2 GeV/c	2.6σ
3 GeV/c	1.2σ

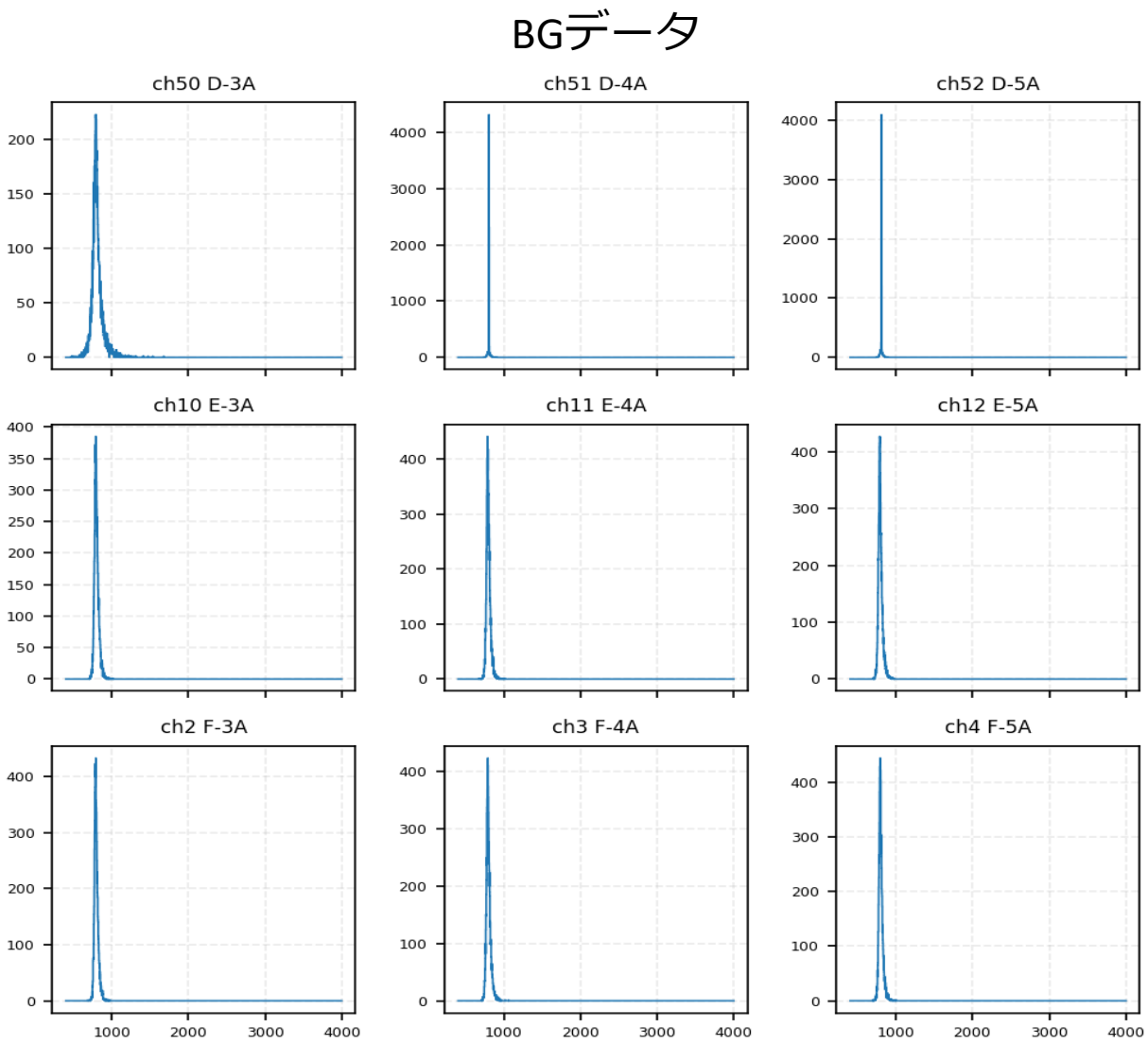
ビームテストの計画

ADC分布例

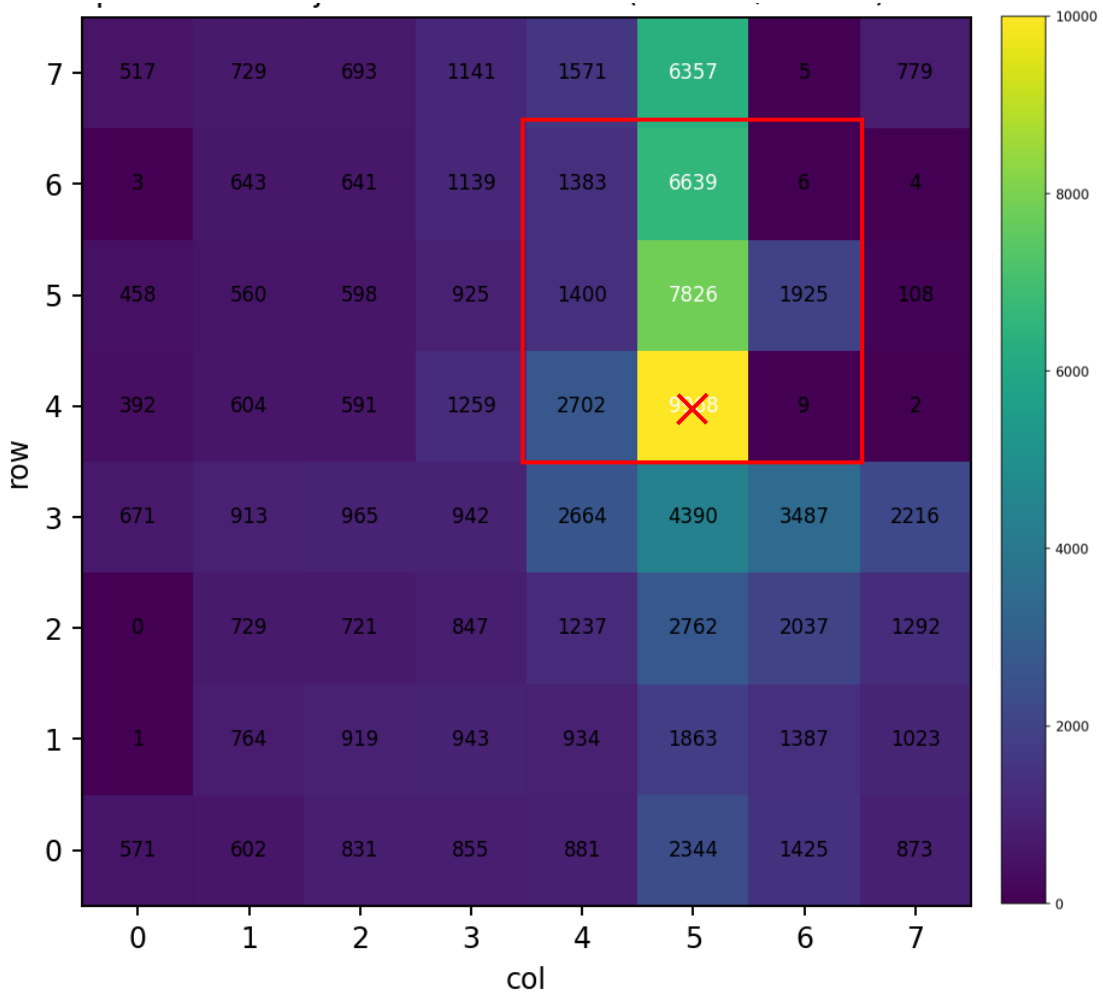
- chごとにペデスタル特性（幅・位置）が異なる

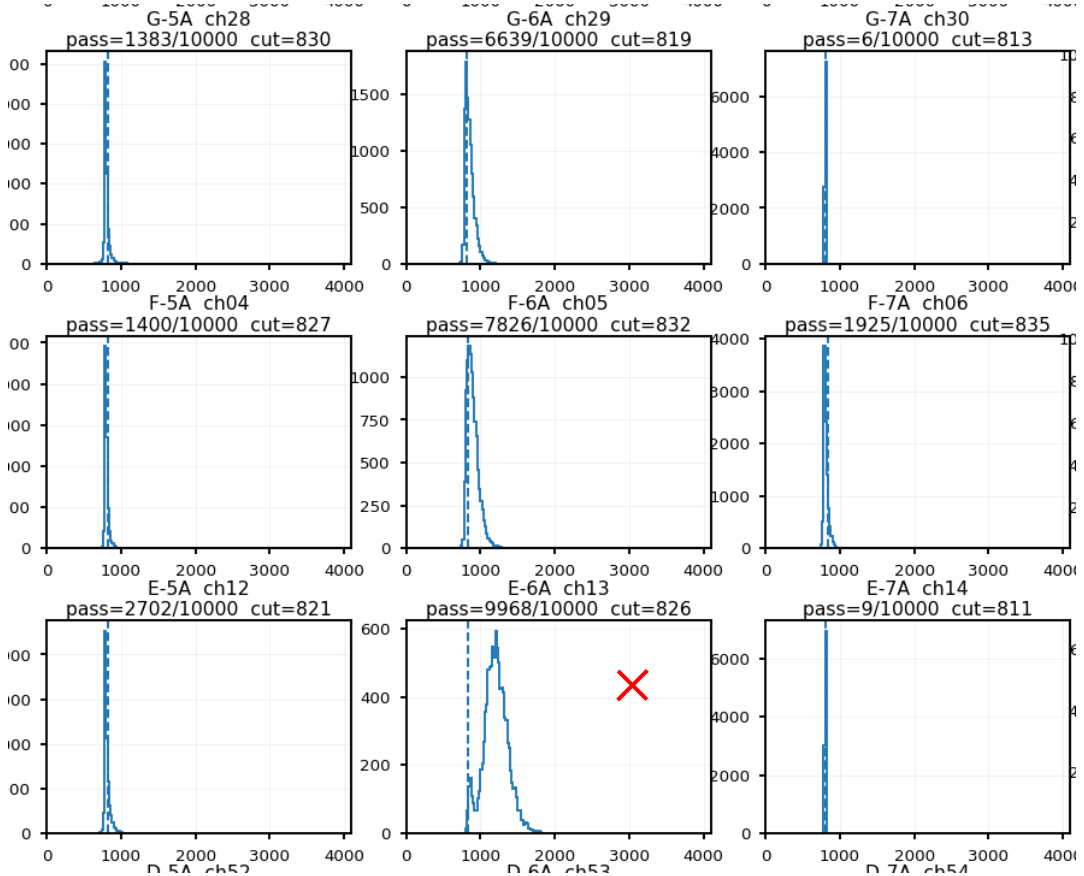
ガウシアンフィットの目的
- chごとのペデスタル特性を考慮する

- 光量によらないイベント選別を行う



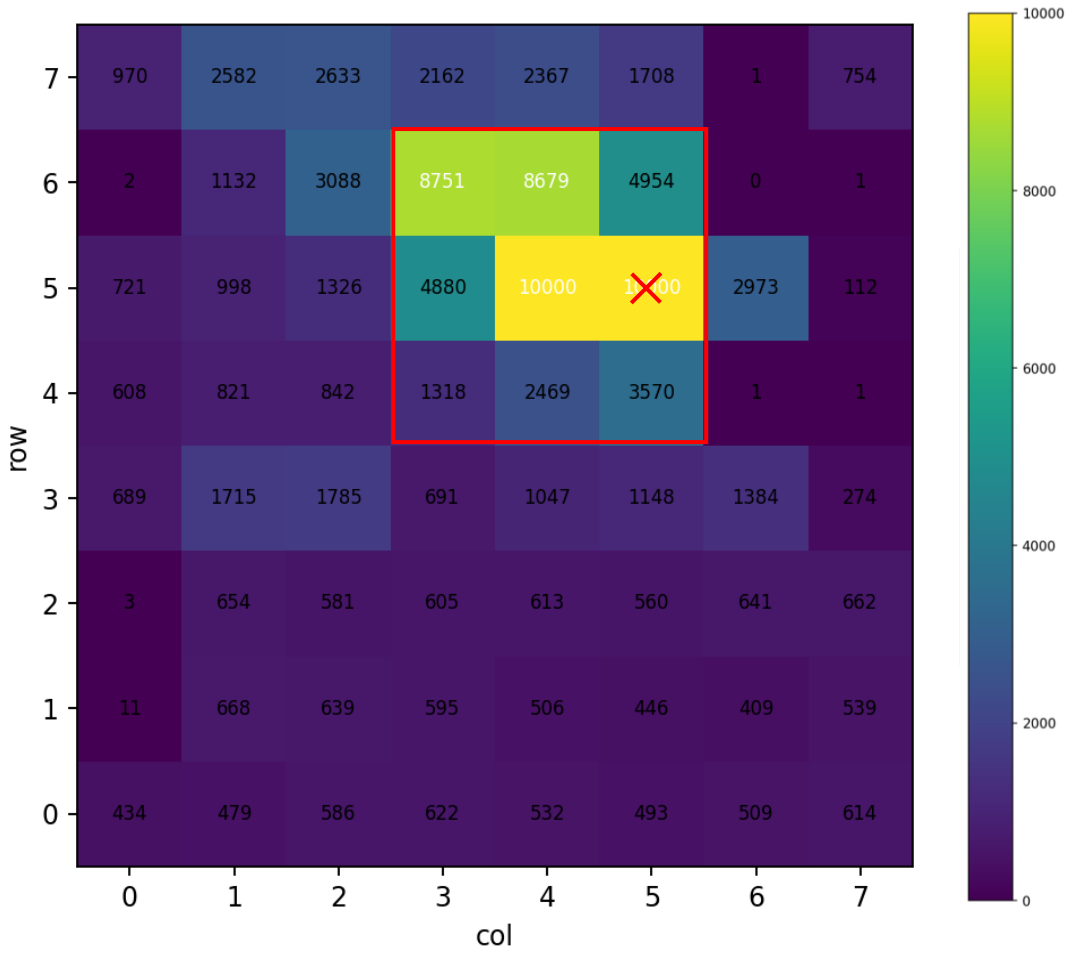
ヒットマップ例

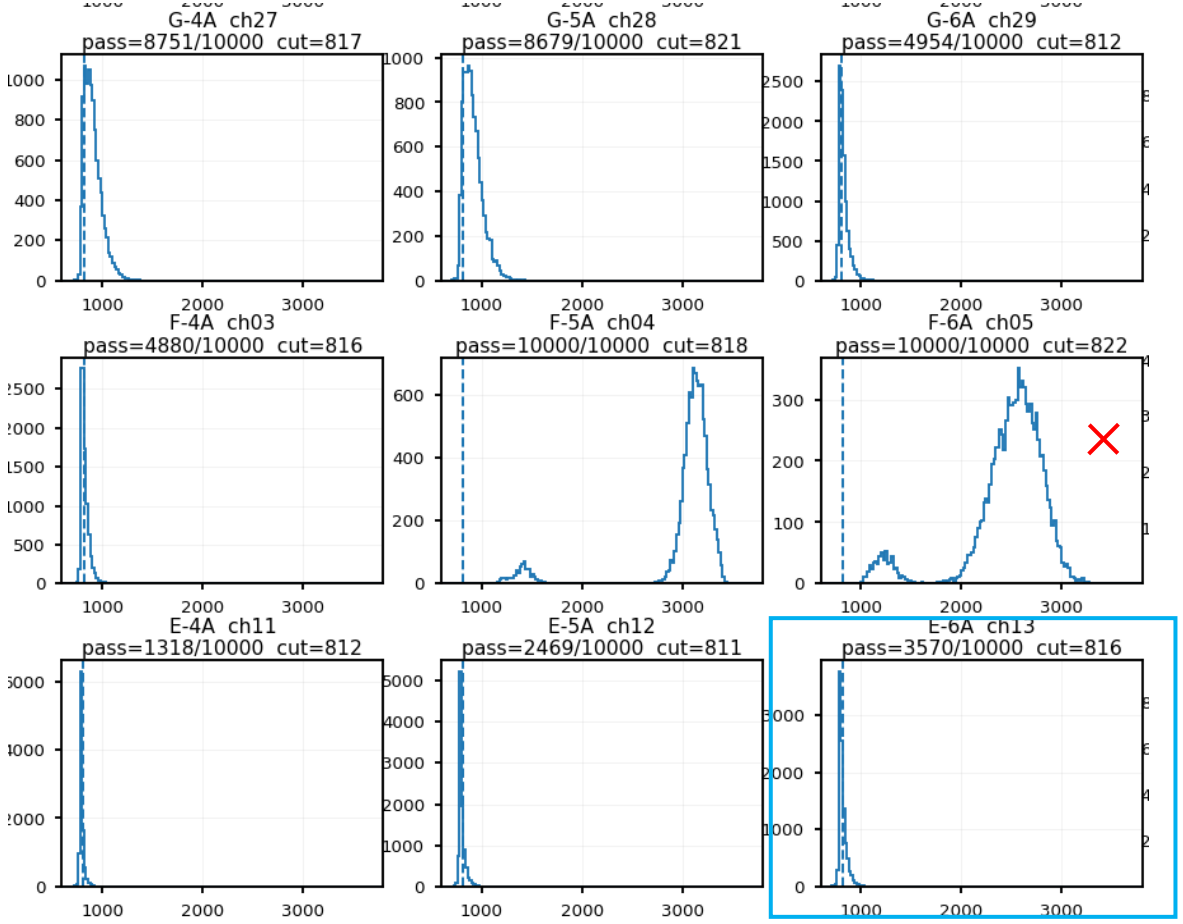




同一hit

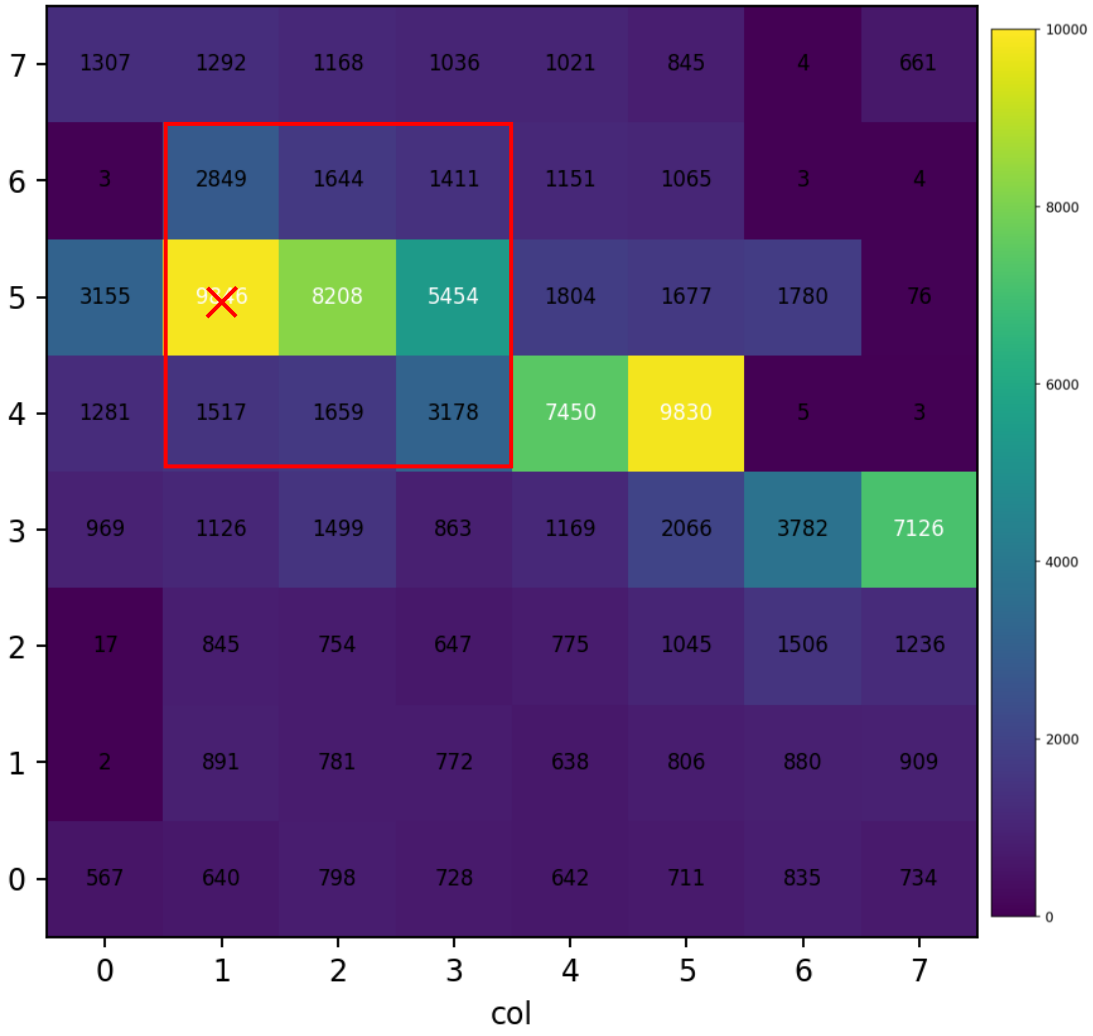
ヒットマップ例

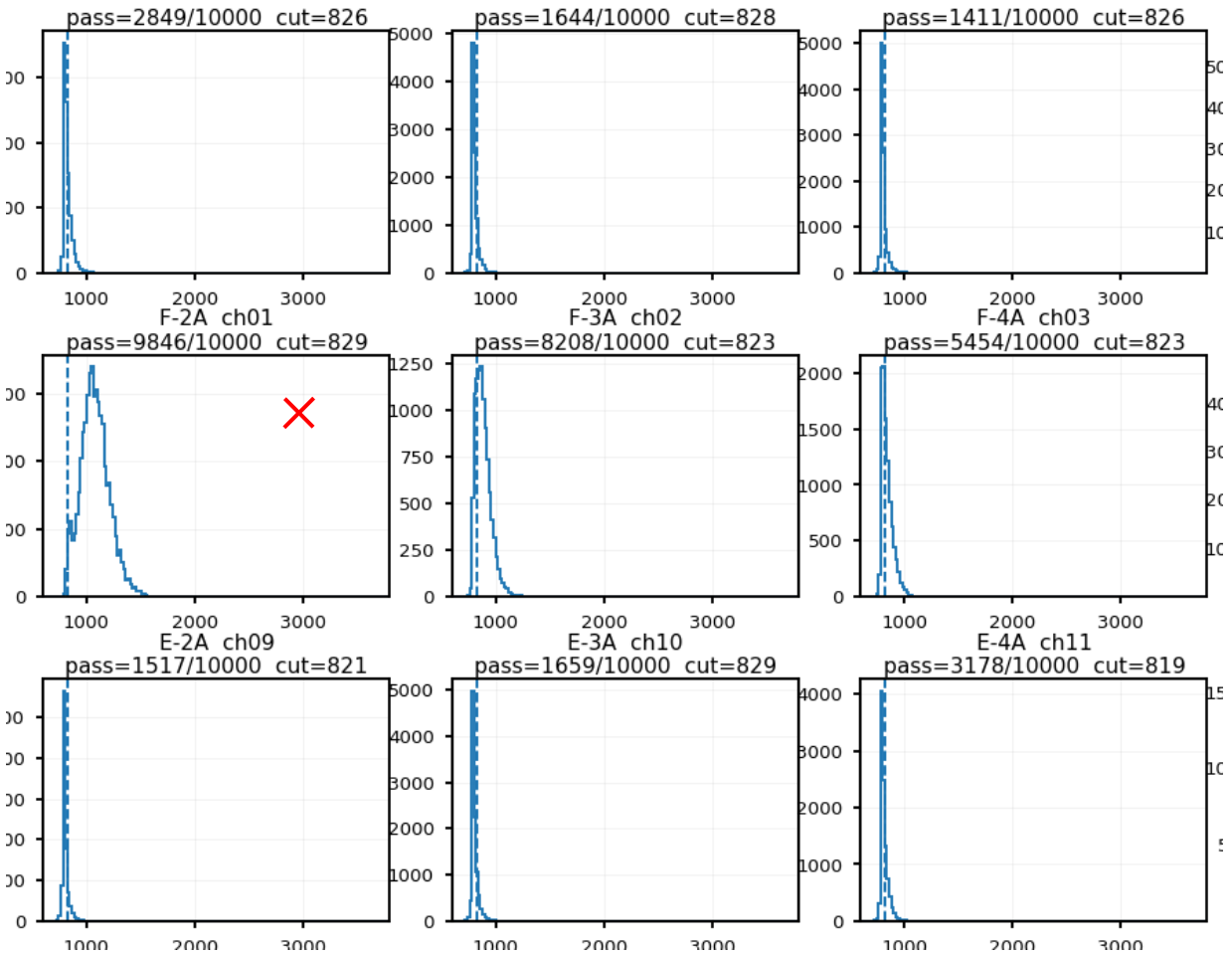




隣接移動

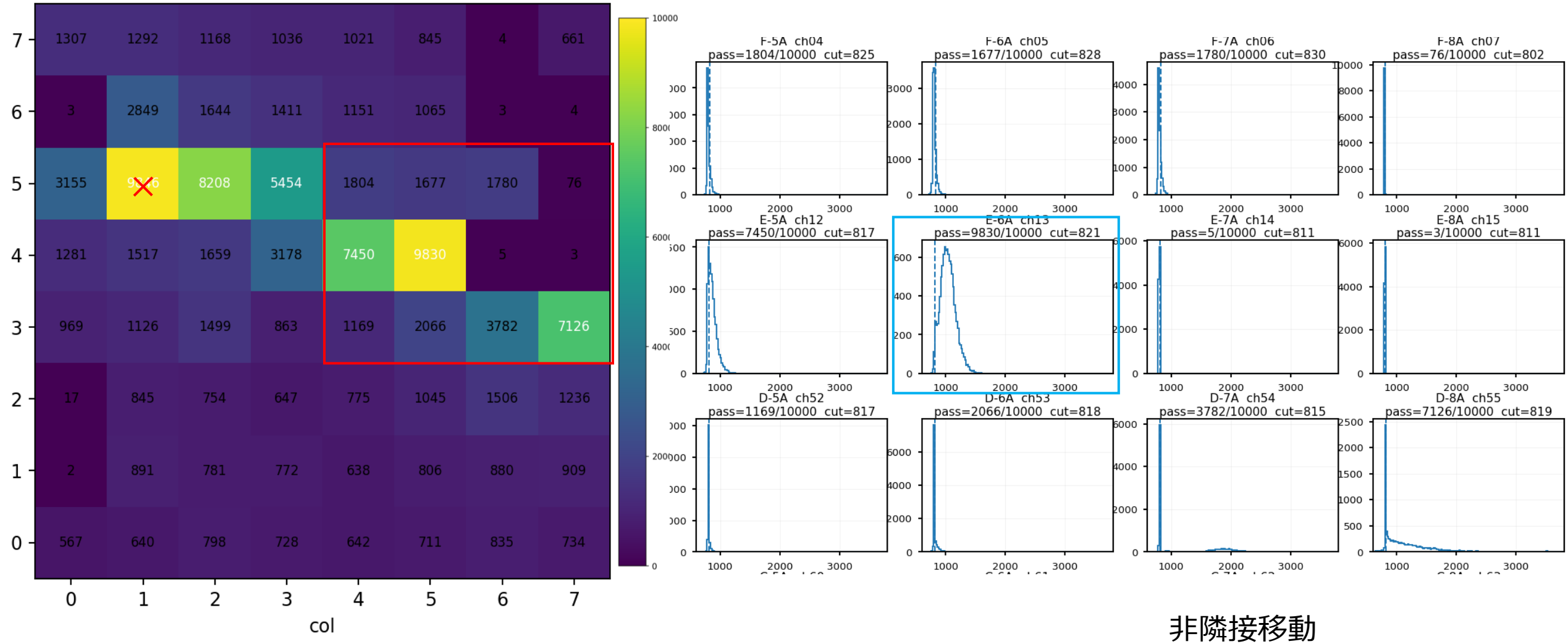
ヒットマップ例





非隣接移動

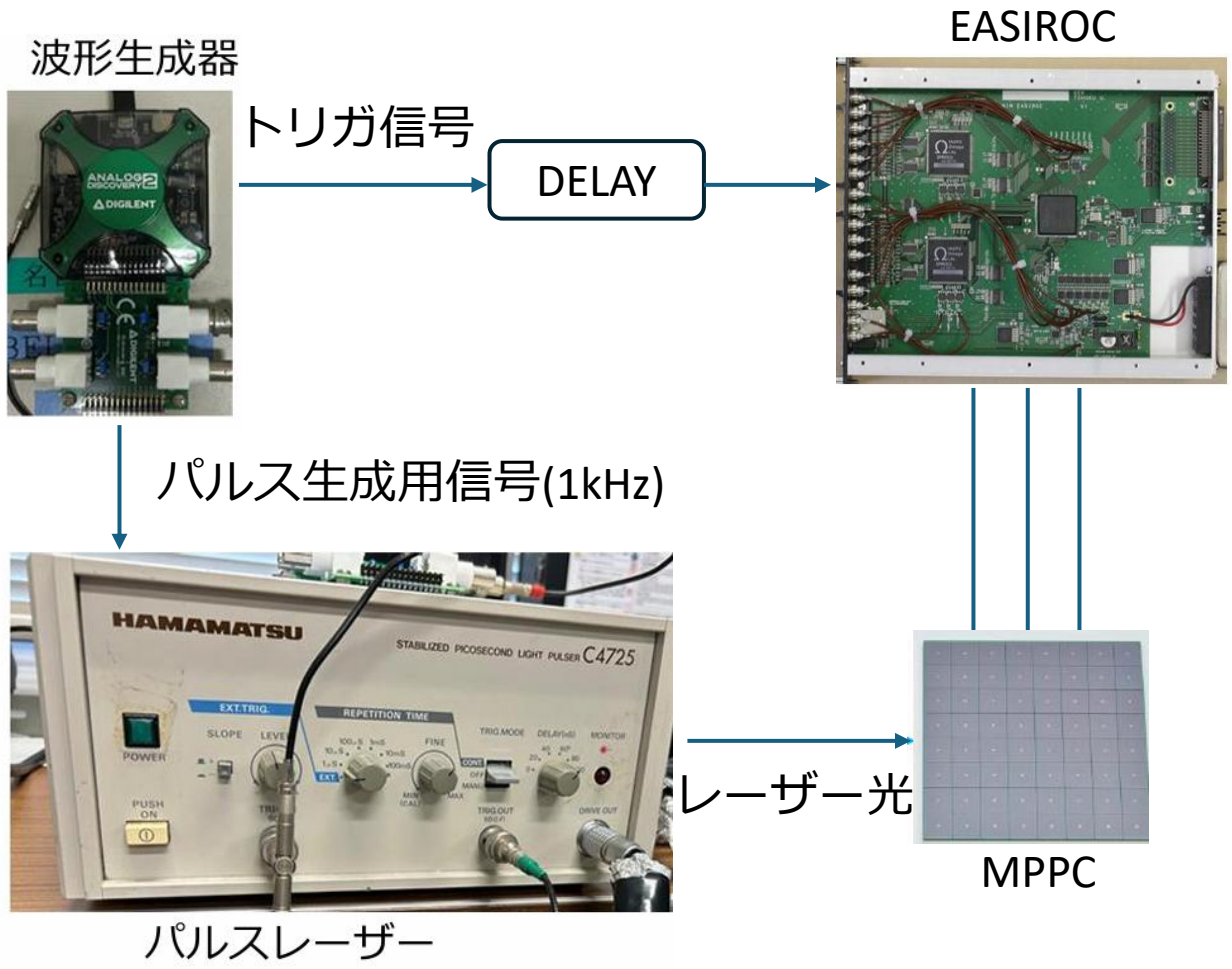
ヒットマップ例

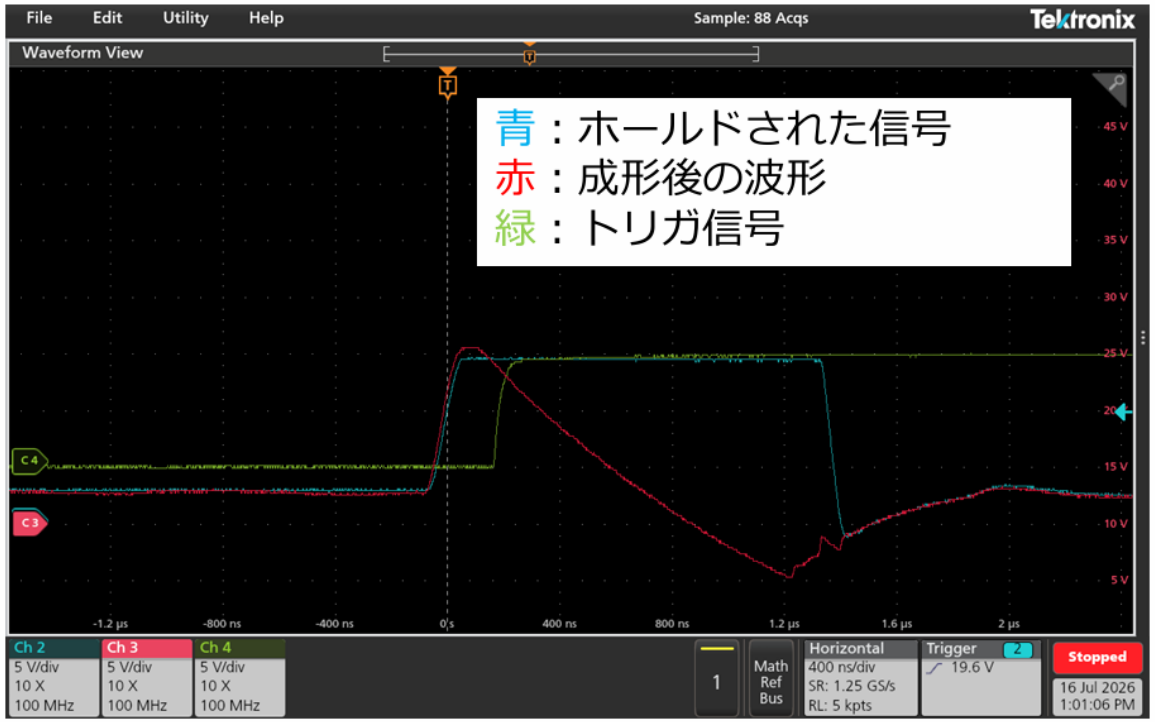


非隣接移動

ホールドタイミング調整

- トリガ信号：レーザーパルスと同期した1kHzの信号
- 生成波形の位相とDELAYによってタイミングを調整





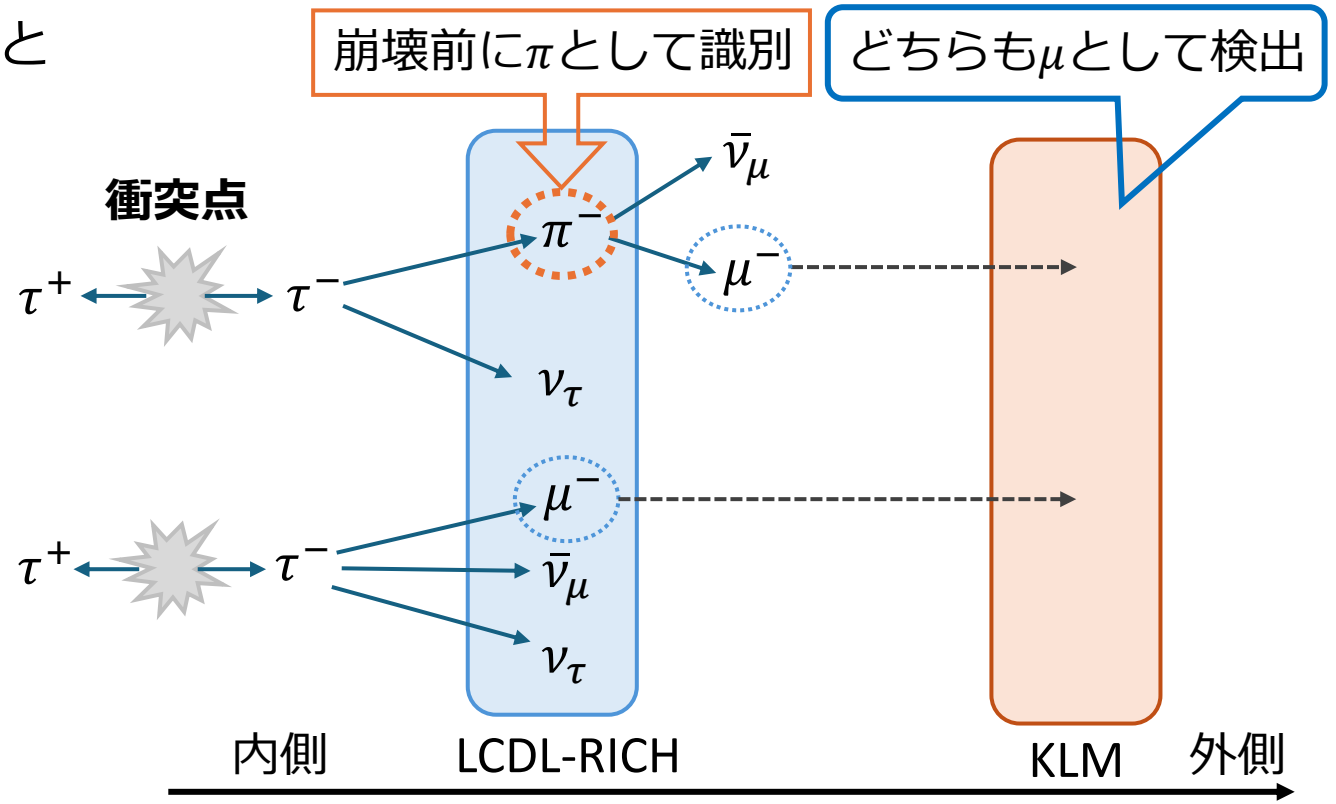
信号のピーク付近でホールドできている

LCDL-RICHによる新物理探索

- **衝突点近傍でのμ/π識別の意義**
  - 現行のμ識別は主にKLM（μ検出器）を利用
  - $\tau^- \to \pi^- \nu_\tau$で生成された$\pi^-$が$\mu^-$へ崩壊すると$\boldsymbol{\tau^- \to \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau}$の背景事象となる
  - 衝突点に近いARICH領域でのμ/π識別が、背景事象の混入を低減

- **τ崩壊を用いた新物理探索**
  - $\boldsymbol{\tau \to \mu\nu\nu}$と$\tau \to e\nu\nu$の崩壊分岐比から、レプトンフレーバー普遍性を検証

$\tau \to \mu\nu\nu$測定における背景事象の概念図

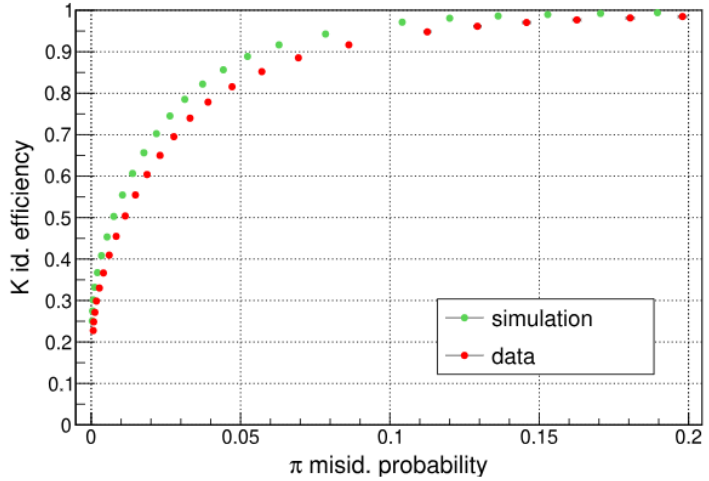


μ/π識別の改善による背景低減でτ崩壊測定の精度向上が期待される

ARICHの識別性能向上における課題

■ **識別効率と誤識別率のトレードオフ**

- 選別条件を緩めると識別効率は上がるが誤識別率も上昇する
  ➡さらなる識別性能の向上には、選別条件の調整だけでなく**検出器側の改善が必要**



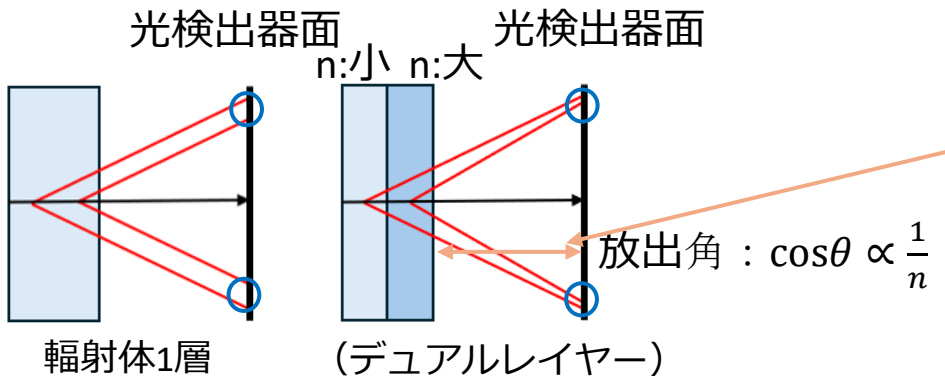
輻射体と光検出器の間には一定の距離が必要

■ **光子数とリング幅のトレードオフ**

- 輻射体を厚くすると、光子数を増やせるが、リング分解能が悪化
- 現行ARICHではデュアルレイヤー方式を採用

■ **ARICHにおけるデュアルレイヤー方式**

- 屈折率の異なるエアロゲル輻射体を2層に重ねる
- 異なる層で出た光子が検出面で重なるように設計
- 同じ厚みでもリング幅を絞れる



複数検出器が密集するBelle II検出器内部では空間的な制約があり、識別性能の改善に限界がある

ビームテストに向けた試作機設計

