
Belle II実験 ARICH粒子識別手法の開発

首都大学東京
修士1年 柿本詩織

目次

実験概要

- Belle II実験について
- ARICH検出器

ビームテストデータを用いた識別能力の見積もり

- ビームテストデータの情報
- 解析方法・結果

Belle II用MCシミュレーションを用いた識別手法の開発

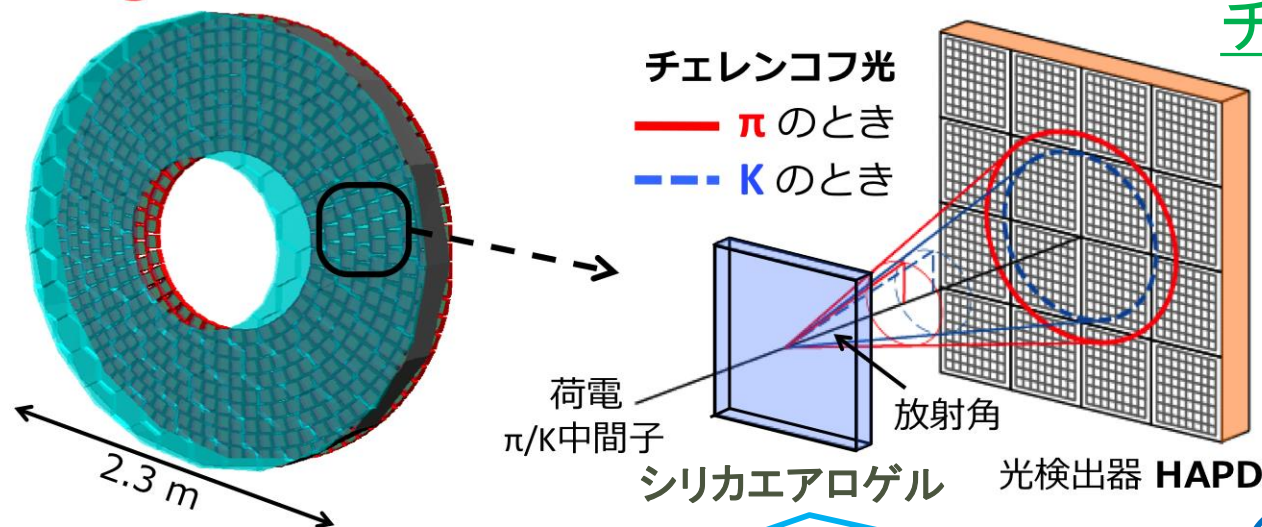
- 目的
- チェレンコフ角の分布

ARICH検出器

(Aerogel Ring Image Cherenkov counter)

Aerogel RICH検出器

識別原理 概念図



チェレンコフ光の放射角

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

荷電粒子がシリカエアロゲルを通過すると円錐状にチェレンコフ光が発生。放射角から π/K を識別する。

θ :チェレンコフ光の角度
 n :エアロゲルの屈折率
 p :粒子の運動量
 m : π/K 粒子の質量

性能目標: $P=4 \text{ GeV}/c$ の粒子に対して 4σ の分離

目次

実験概要

- ・ Belle II 実験について
- ・ ARICH 検出器

ビームテストデータを用いた識別能力の見積もり

- ・ ビームテストデータの情報
- ・ 解析方法・結果

Belle II 用 MC シミュレーションを用いた識別手法の開発

- ・ 目的
- ・ チェレンコフ角の分布

ARICHプロトタイプ^oのビームテスト

ARICH最終仕様^oの決定のためのビームテスト

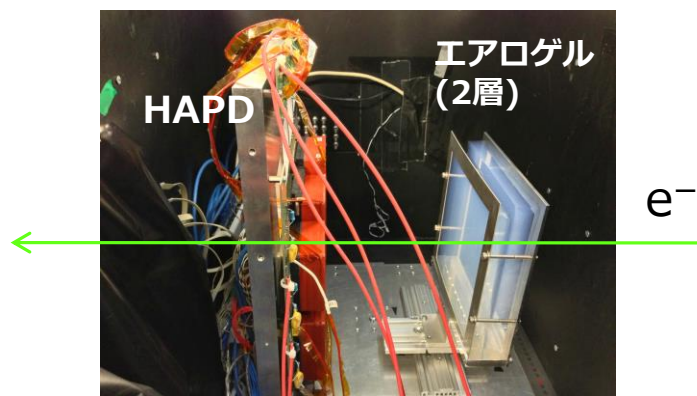
日時: 2013年5月20日~27日に実施

場所: ドイツ DESY

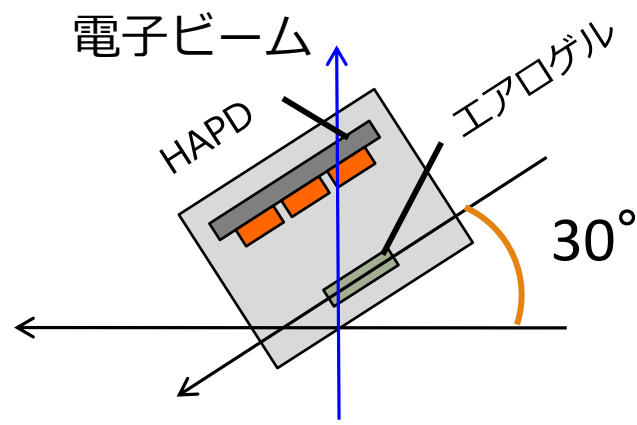
ビーム: 電子5 GeV $\beta = \frac{v}{c} = 0.999\cdots \simeq 1$

ビームテストのセットアップ

(垂直入射)



(角度付き入射)

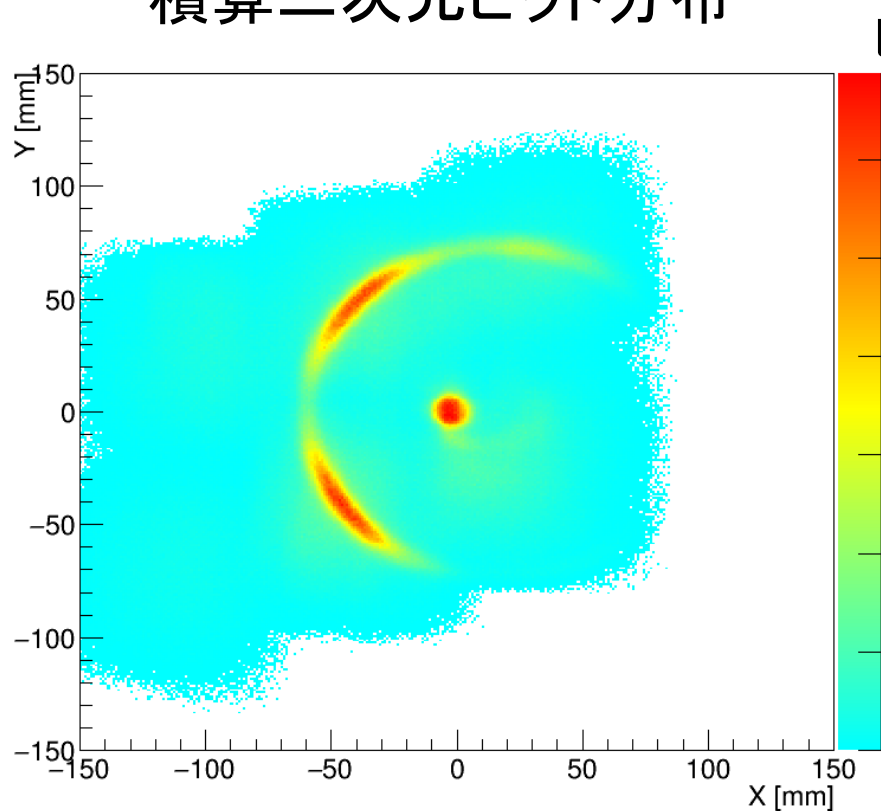


6台のHAPDと2層のエアロゲルを使用

ビームに対して暗箱を30度回転させる

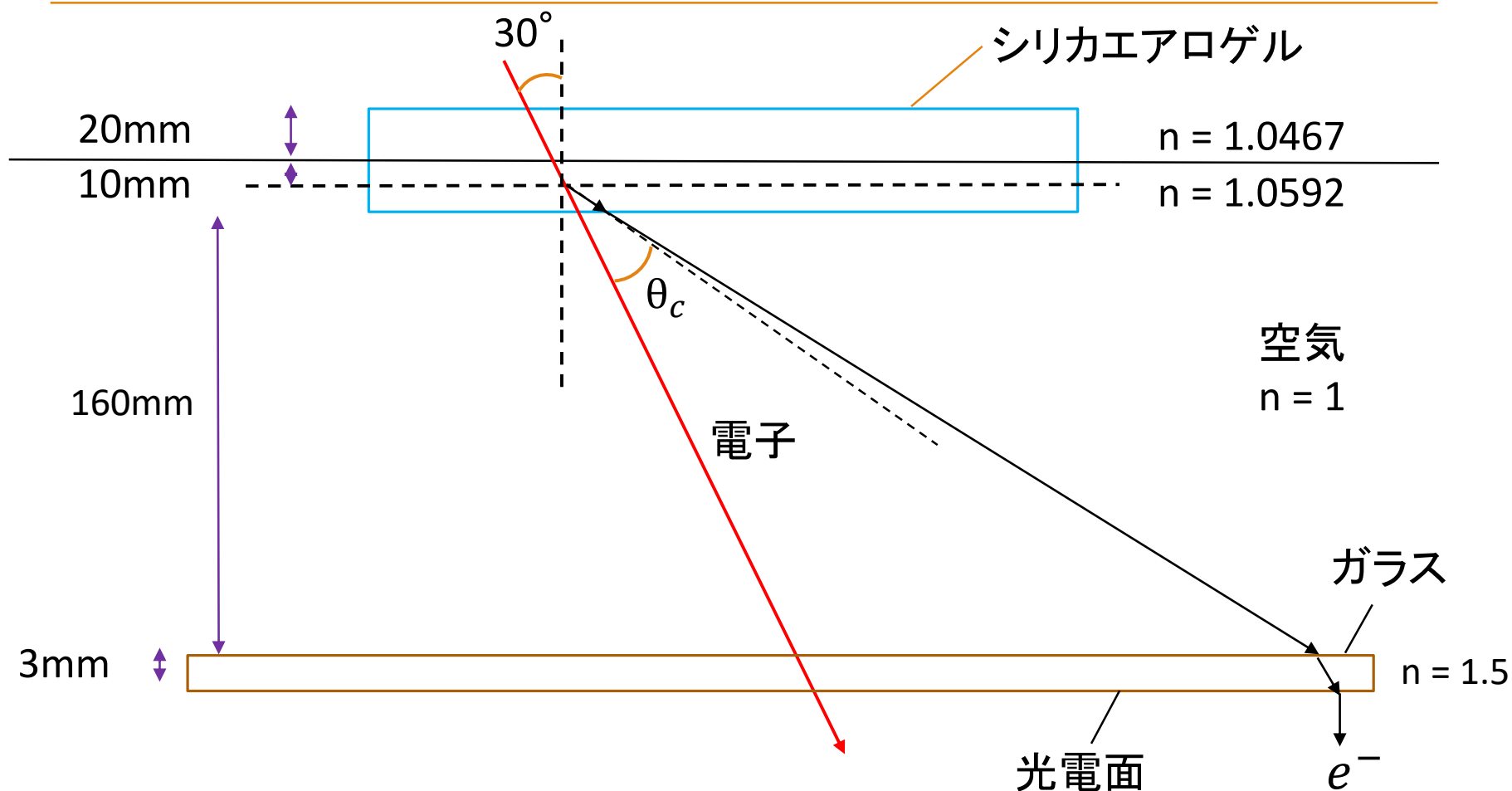
電子ビームの入射角 30° の積算リングイメージ

積算二次元ヒット分布



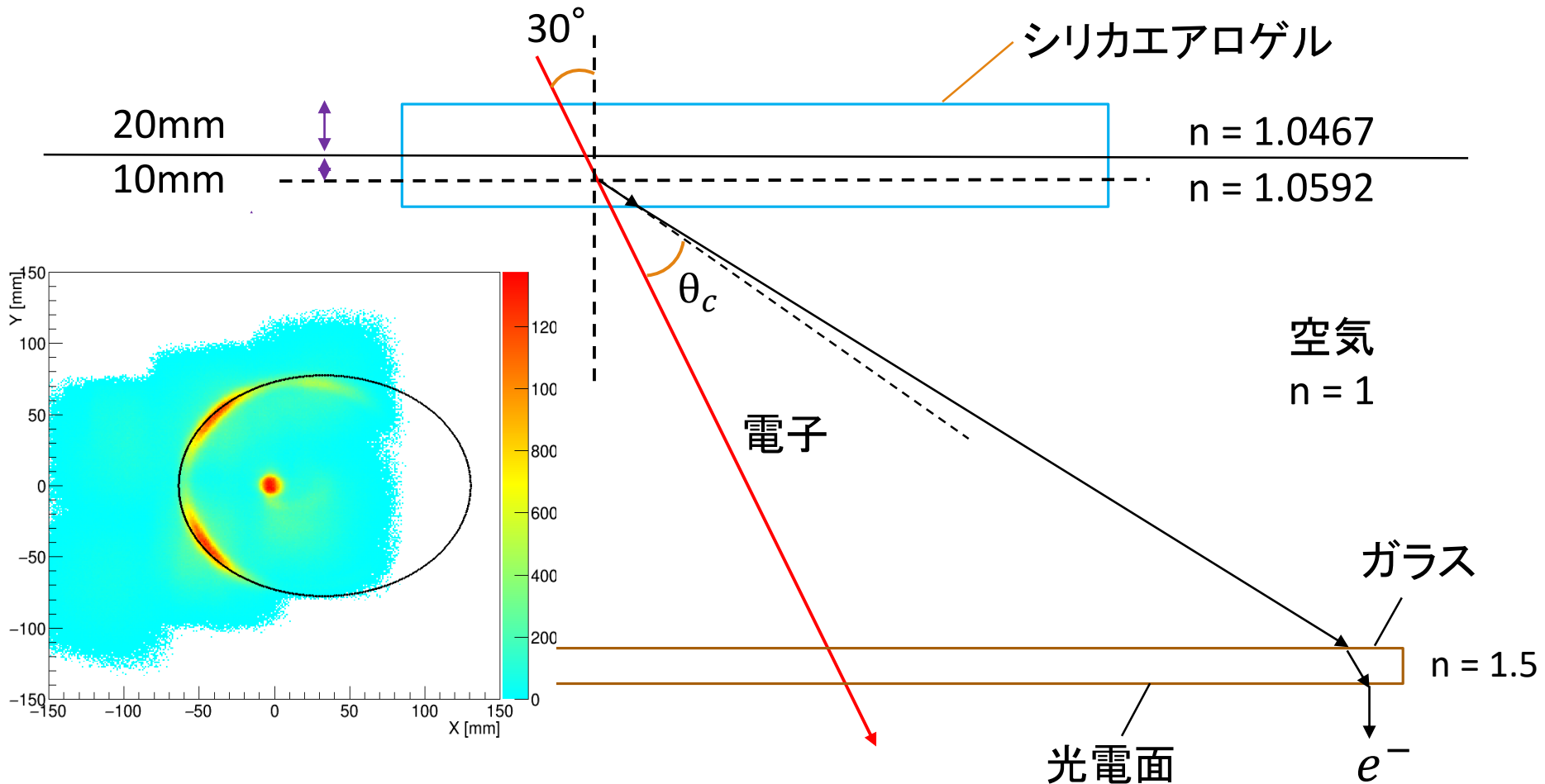
- ・事象数(入射電子数): 21万
- ・ヒット数(検出光子数): 388万
- ・電子ビームの通過位置を原点としてプロット
- ・円弧がチェレンコフリングに対応

予測されるリングの計算



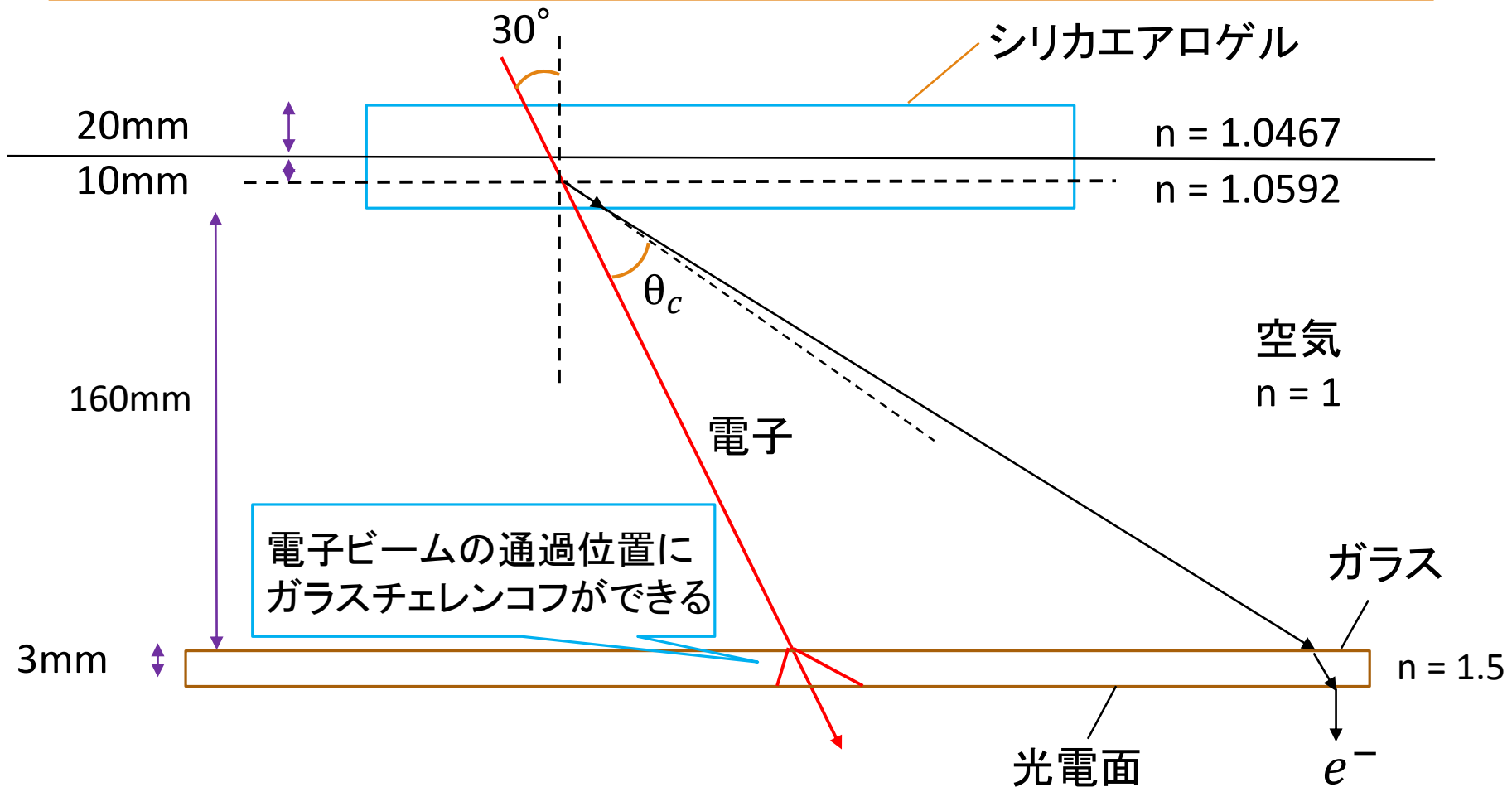
- ・電子の飛跡を中心軸として放射角 θ_c の光子の方向ベクトルを計算
- ・エアロゲル表面とHAPD表面(ガラス)での屈折を考慮してHAPD上での位置を計算

予測されるリングの計算



- ・電子の飛跡を中心軸として放射角 θ_c の光子の方向ベクトルを計算
- ・エアロゲル表面とHAPD表面(ガラス)での屈折を考慮してHAPD上での位置を計算

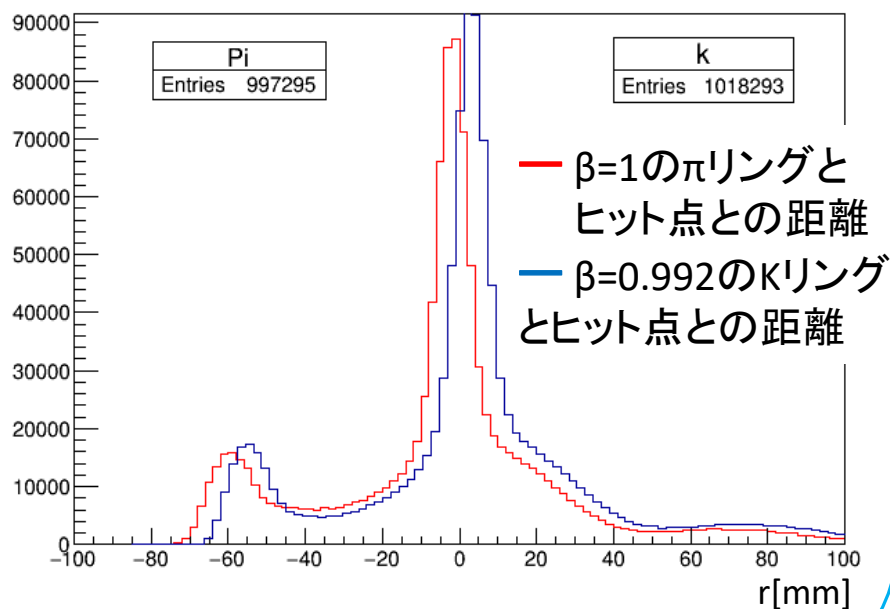
予測されるリングの計算



- ・電子の飛跡を中心軸として放射角 θ_c の光子の方向ベクトルを計算
- ・エアロゲル表面とHAPD表面(ガラス)での屈折を考慮してHAPD上での位置を計算

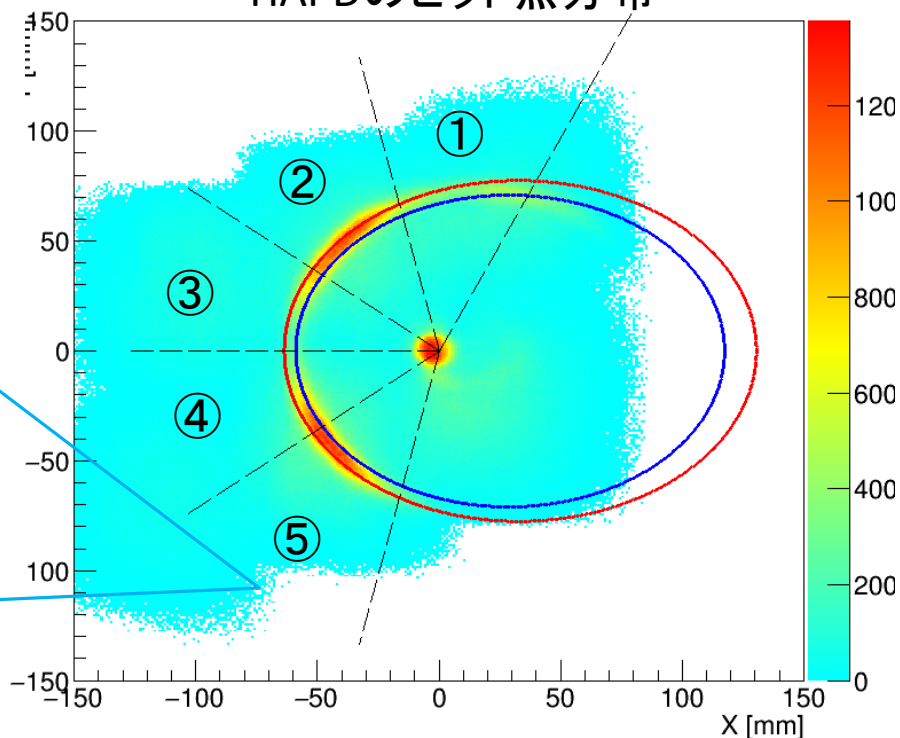
HAPDのヒット点と予測されるリングの距離

⑤の領域でヒット点とリングの距離
(符号付き:リングの内側は負の値、外側は正の値)



- $\beta=1$ の π 中間子を仮定したリング
- $\beta=0.992$ のK中間子を仮定したリング

HAPDのヒット点分布



リングを5つの領域にわけて解析

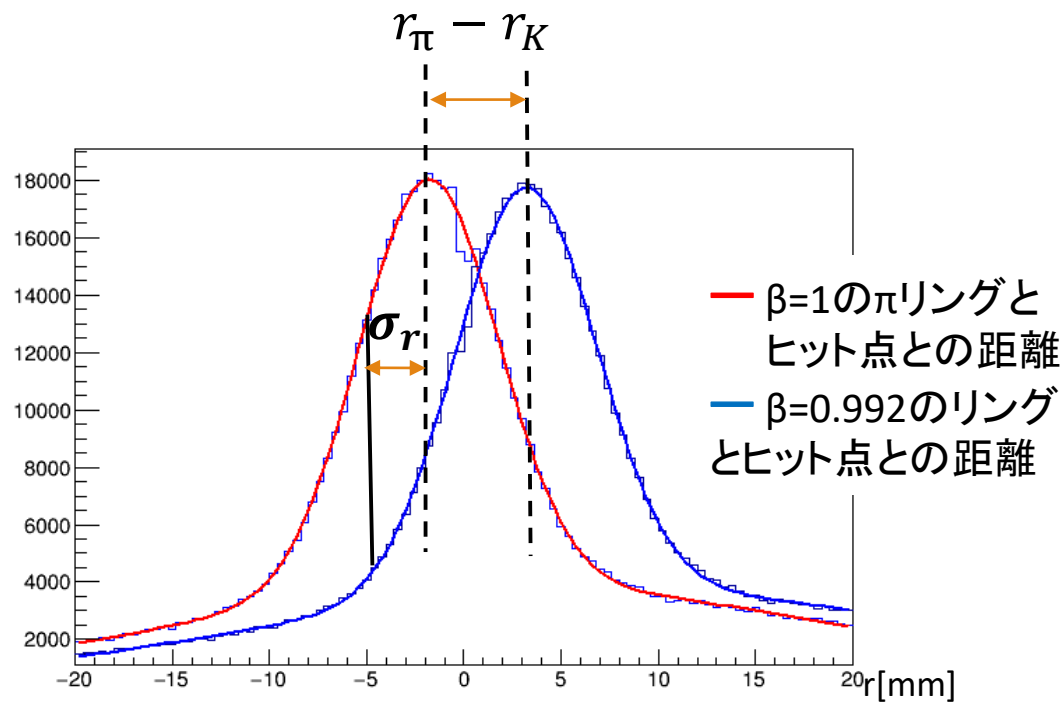
π/K の粒子識別能力

$$S = \frac{r_{\pi} - r_K}{\sigma_r} \sqrt{N_{pe}}$$

$r_{\pi} - r_K$ [mm]: π 中間子とK中間子のチェレンコフリング間の距離

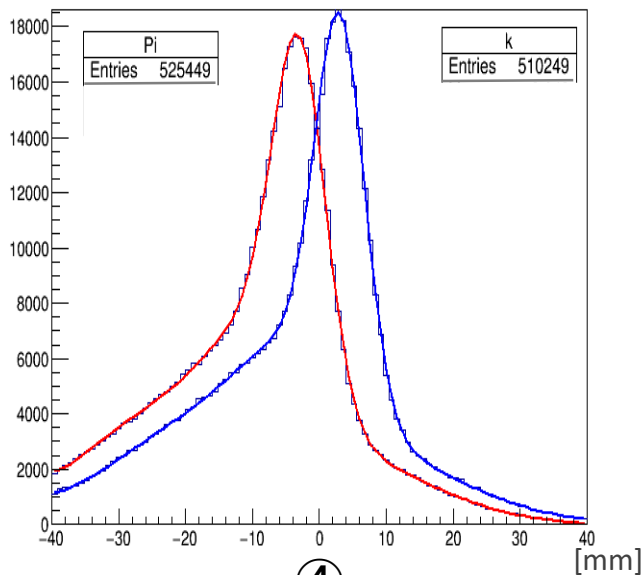
σ_r [mm]: 半径分解能

N_{pe} : 検出光子数

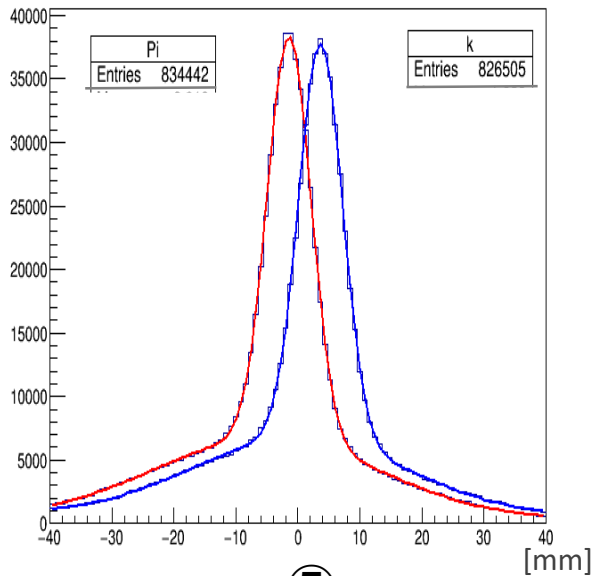


異なる β を仮定したリングとヒット点との距離

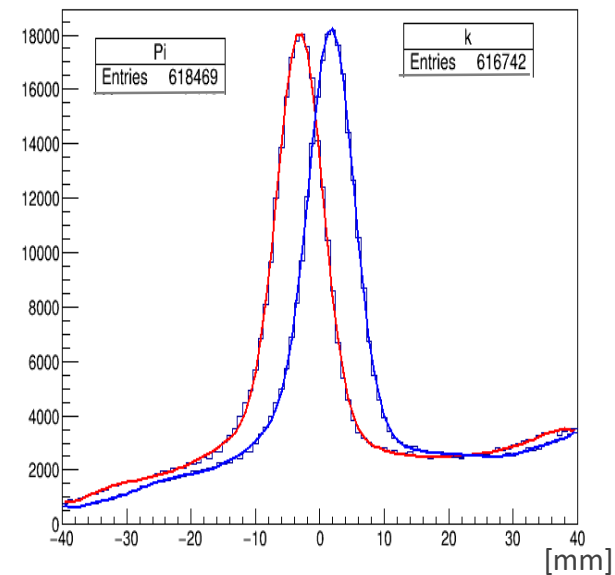
①



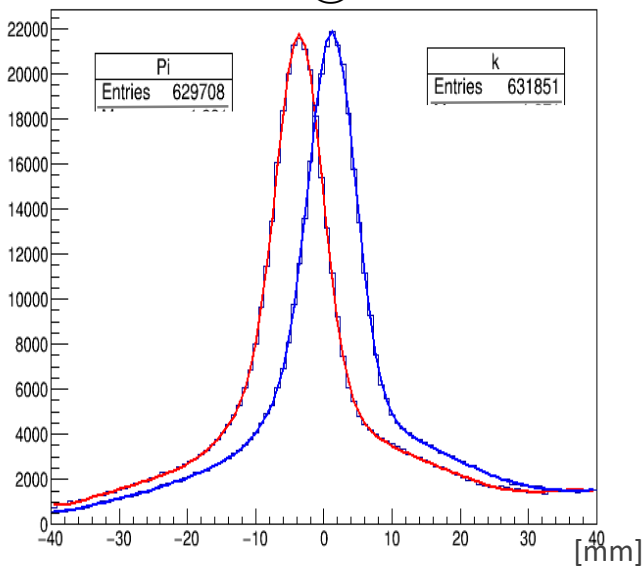
②



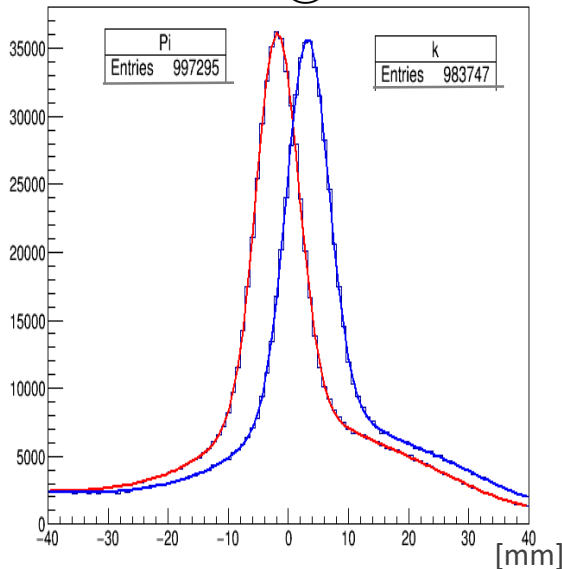
③



④



⑤



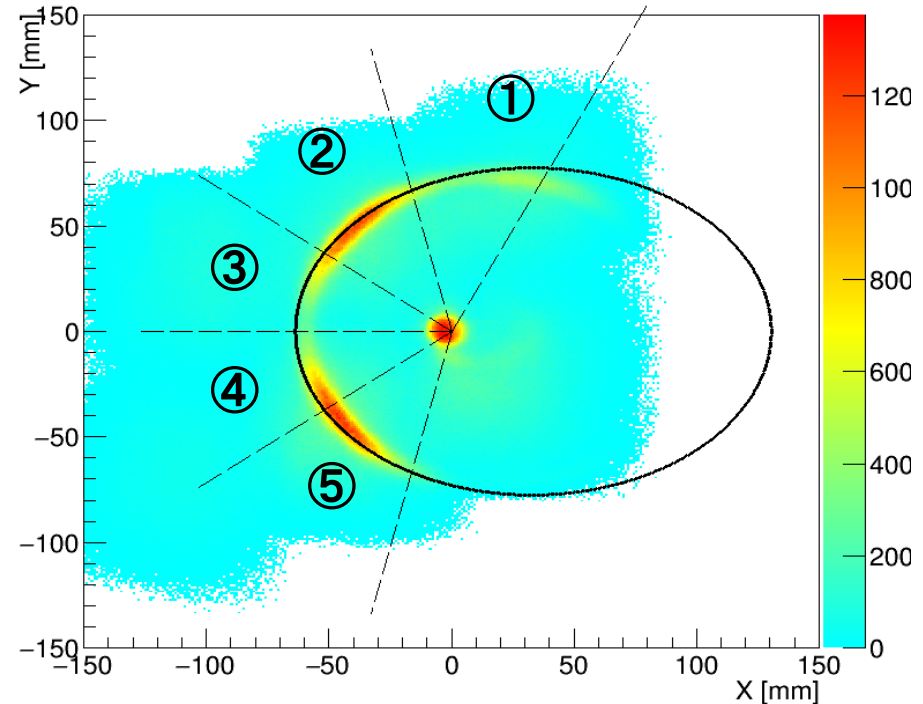
	リング間距離 $r_{\pi} - r_K$ [mm]	半径分解能 σ_r [mm]
①	5.967	3.864
②	5.041	3.441
③	4.904	3.518
④	4.913	3.292
⑤	6.136	3.917

各領域での検出光子数 N_{pe}

1トラック当たりの検出光子数 N_{pe}

領域	測定値	参考値
①	0.433	1.071 (垂直入射時の ビームテスト の測定値)
②	1.022	
③	0.487	
④	0.470	
⑤	1.077	

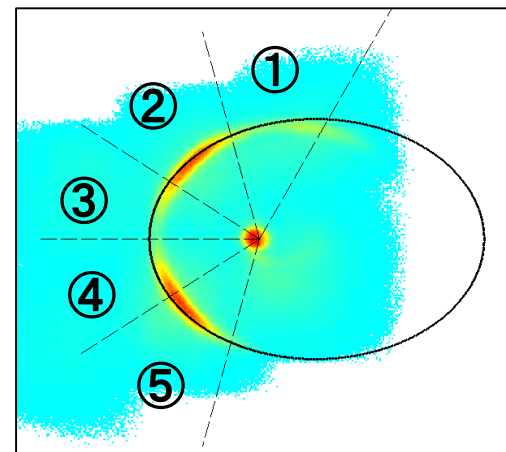
①～⑤の平均: 0.698



- ・測定値のばらつきはHAPDの配置に起因
- ・測定値は垂直入射時に比べ少ない
→原因については今後調査

識別能力の評価

領域	識別能力	備考
①	1.03σ	$S = \frac{r_{\pi} - r_k}{\sigma_r} \sqrt{N_{pe}}$ より計算
②	1.48σ	
③	0.97σ	
④	1.02σ	
⑤	1.63σ	
①～⑤	2.78σ	$\sqrt{①^2 + ②^2 + ③^2 + ④^2 + ⑤^2}$
全領域	3.97σ	上の $\sqrt{2}$ 倍



①～⑤は方位角180度分
→全体生成光子数は2倍

HAPDが全領域をカバーしていると仮定すると
識別能力は3.97σと見積もられた。

目次

実験概要

- ・ Belle II 実験について
- ・ ARICH 検出器

ビームテストデータを用いた識別能力の見積もり

- ・ ビームテストデータの情報
- ・ 解析方法・結果

Belle II 用 MC シミュレーションを用いた識別手法の開発

- ・ 目的
- ・ チェレンコフ角の分布

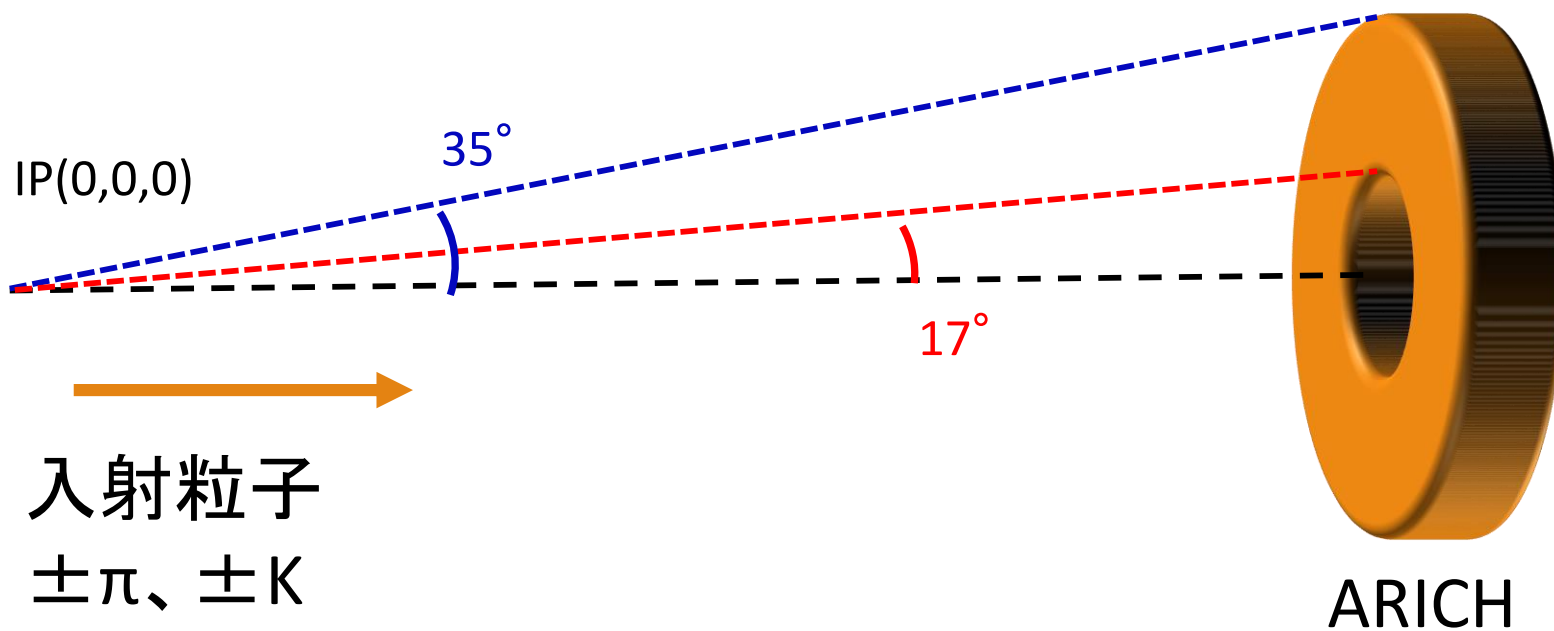
Belle II用MCシミュレーション

- ・目的

MC8にあるarichのreconstructionプログラムの改良を行う
→今回はチェレンコフ角の入射角依存性を見る。

セットアップ

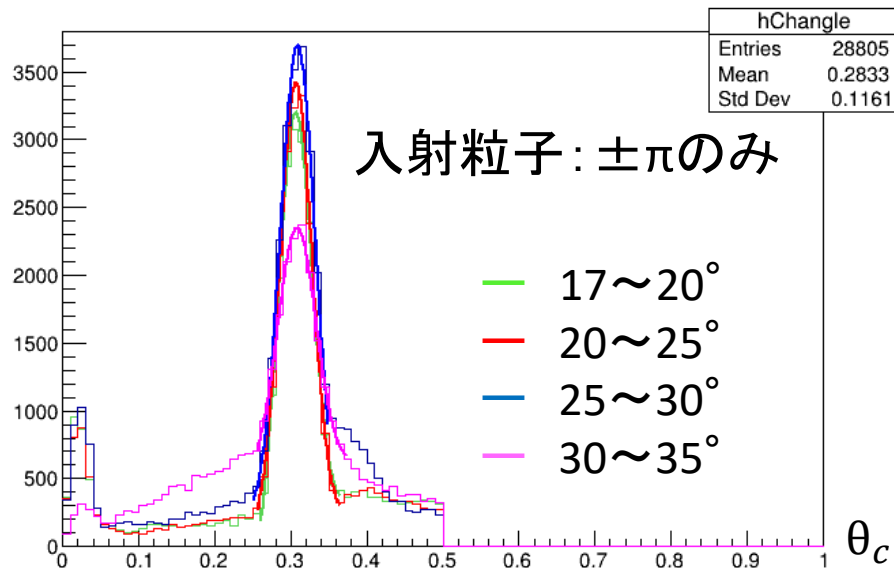
Belle II検出器中心から $\pm\pi$ 、 $\pm K$ をARICHに入射するシミュレーションを行う



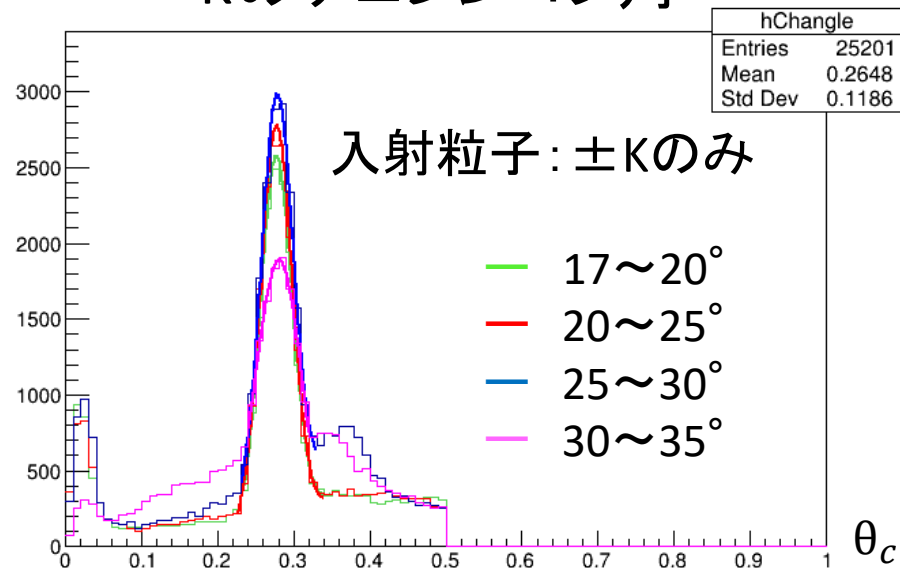
- ・入射角を変化させてシミュレーションを行う
- ・入射角の範囲は $17\sim 35^\circ$

入射角の依存性

π のチェレンコフ角



Kのチェレンコフ角



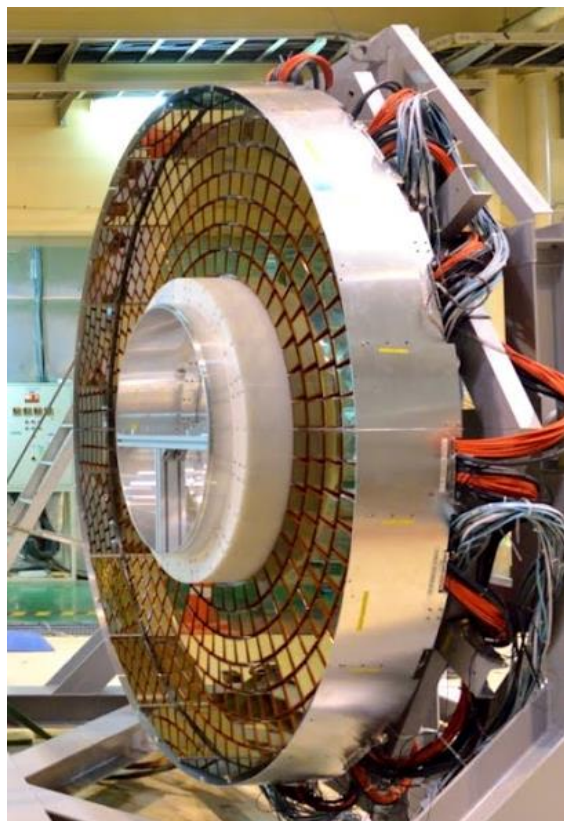
Incident angle	π (mean)	K (mean)	π (sigma)	K (sigma)
17~20°	0.306	0.276	0.022	0.021
20~25°	0.307	0.277	0.021	0.021
25~30°	0.309	0.278	0.024	0.023
30~35°	0.308	0.282	0.031	0.03

- ・運動量
3~4GeV
- ・1000 イベント

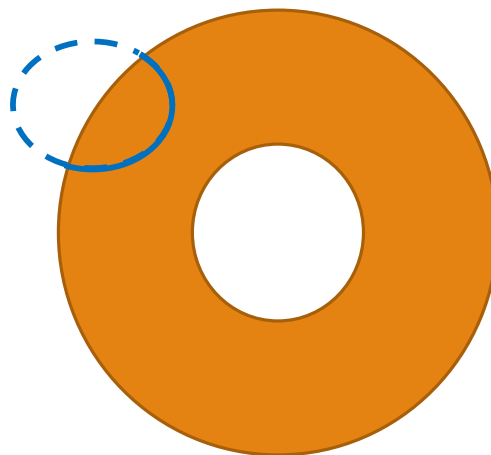
ほかの領域と比べて
 σ が大きい

ARICHのミラー

ARICH検出器の端を覆うようにミラーが付けられている。



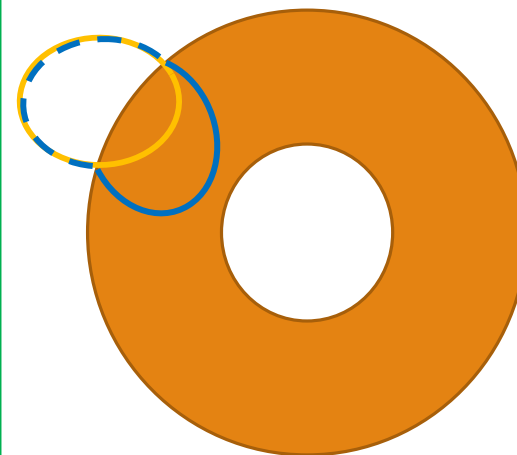
ミラーなし



ARICH

ARICHの端に来たリングが切れてしまう。

ミラーあり

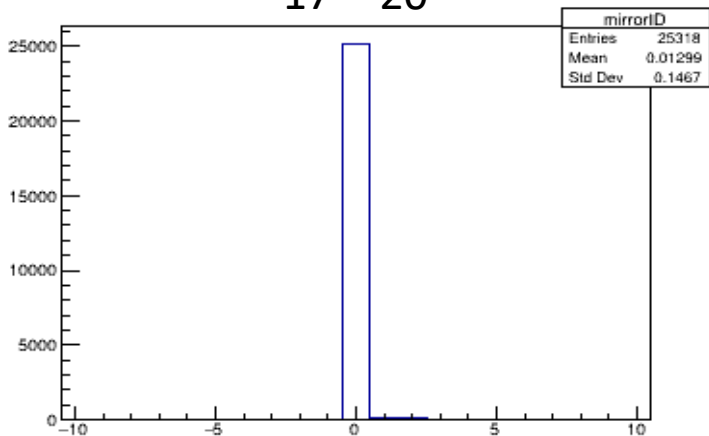


ARICH

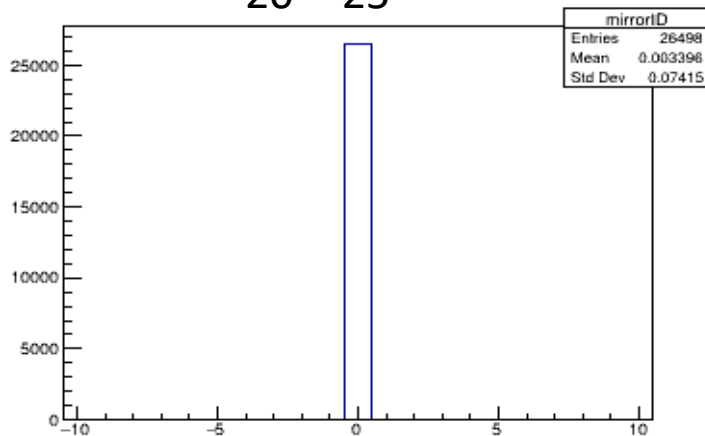
ARICHの端にリングが来ても反射して全体がわかる。

ミラーの反射(±K)

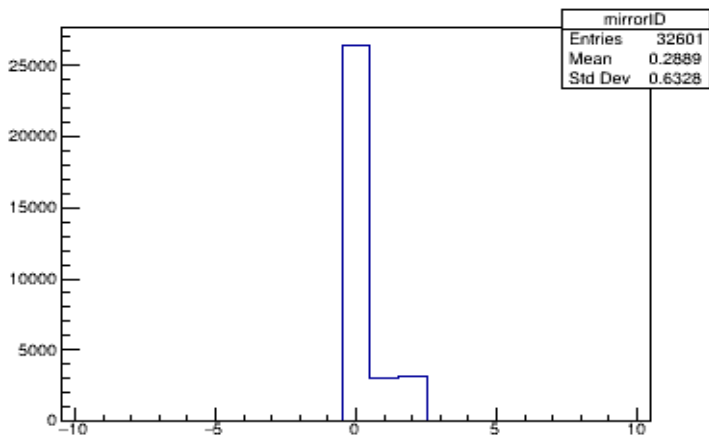
17~20°



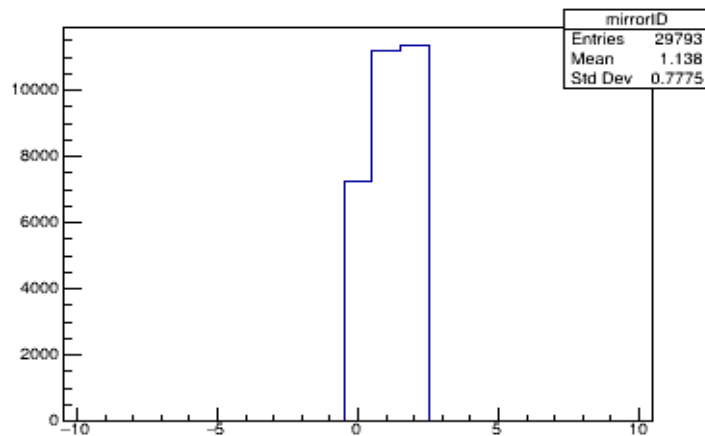
20~25°



25~30°



30~35°



- ・運動量
3~4GeV
- ・入射粒子
only ±K
- ・イベント数
1000

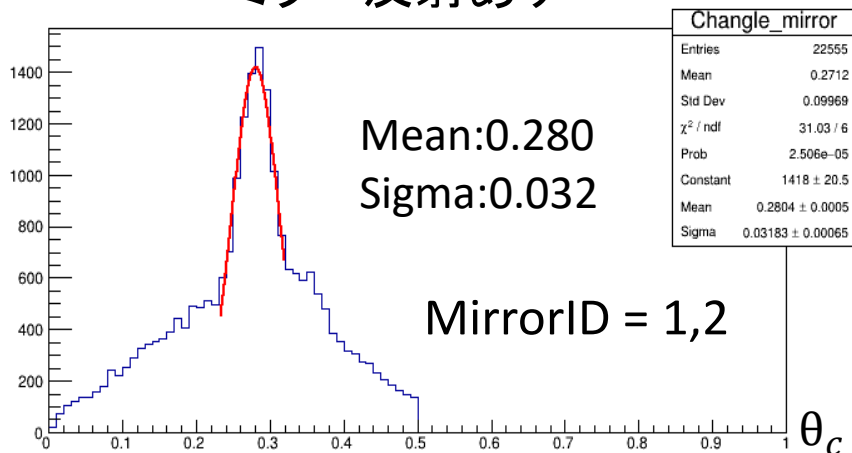
X軸: 0→ミラーの反射なし

1と2 → 反射したミラープレートの番号

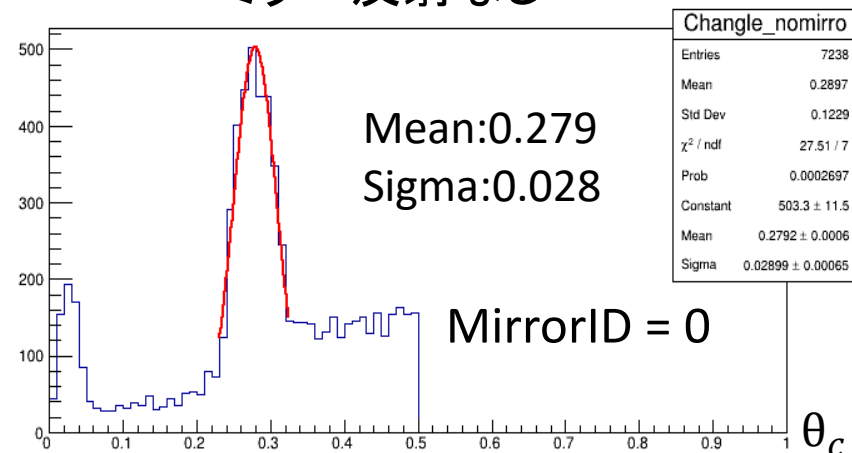
30~35° においてミラーの反射の影響が大きい。

ミラー反射の依存(± K)

ミラー反射あり



ミラー反射なし



ミラー反射ありとなしの比較

- ・Mean値はほとんど変わらない
- ・ミラー反射ありの σ はなしの σ より大きい。

- ・運動量
3~4GeV
- ・入射粒子
± Kのみ
- ・入射角
30~35°
- ・イベント数
1000

まとめと今後

ビームテスト

- ・プロトタイプARICH検出器において入射角 30° の粒子に対する識別能力の見積りを行った。



- ・4GeV/cの粒子に対して約 4σ の識別能力を持つことを確認した。



Belle II ARICH検出器の要求性能

Belle II 用MCシミュレーション

- ・運動量3~4GeVにおいて、チェレンコフ角の入射角依存性とミラーの反射の影響を確認した。
 - $30^\circ \sim 35^\circ$ の領域においてミラーの反射が大きな影響を持つことが定量的に分かった
- ・今後はミラーの反射についてより詳しく見ていく。

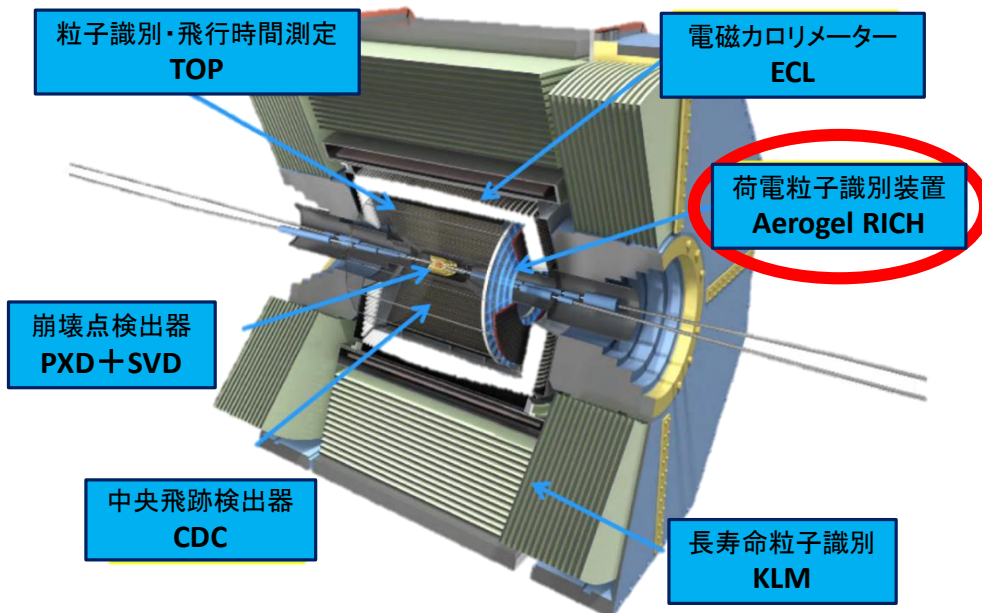
Back up (ビームテスト)

Belle II実験

7 GeVの電子ビームと4 GeVの陽電子ビームを用いた衝突型加速器実験。
大量のB中間子対を生成し、その崩壊過程を精密に調べることで標準模型を超える新物理を探索。



Belle II 検出器

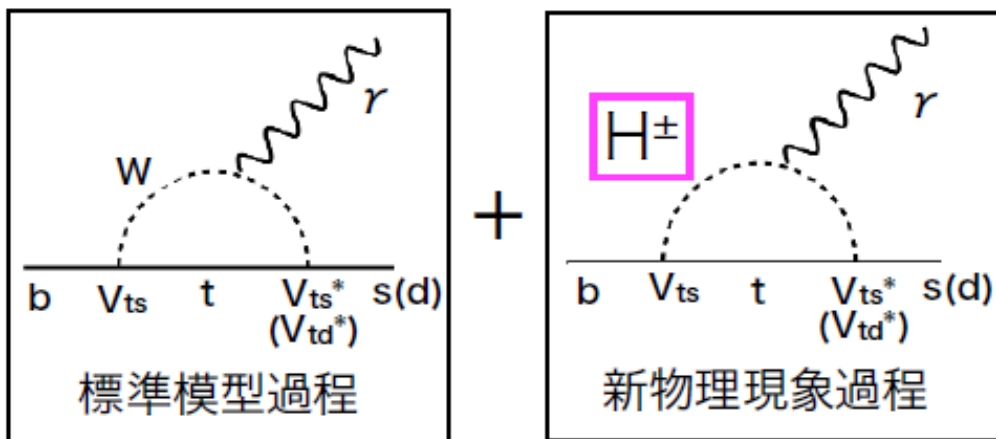


π 中間子とK中間子の識別を担う。

期待される新物理

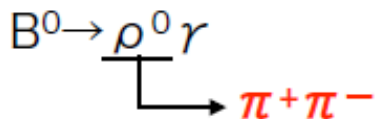
$b \rightarrow s \gamma$ 、 $b \rightarrow d \gamma$ 過程

Flavor Changing Neutral Current過程
 ⇒世代は変わるが電荷は変わらない過程
 標準模型ではループを介して発生

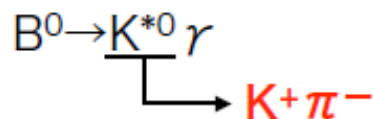


新物理現象があると観測結果に
 ⇒標準模型との"ズレ"が生じる
 (ズレ：崩壊分岐比やCP対称性など)

$b \rightarrow s \gamma$ 過程を含む崩壊例



$b \rightarrow d \gamma$ 過程を含む崩壊例



粒子識別能力の向上により、終状態に $K^\pm \cdot \pi^\pm$ を多く含む
 B^0 の崩壊過程を精密に測定することが可能となる

参考：米永匡伸修士論文(2016年度)

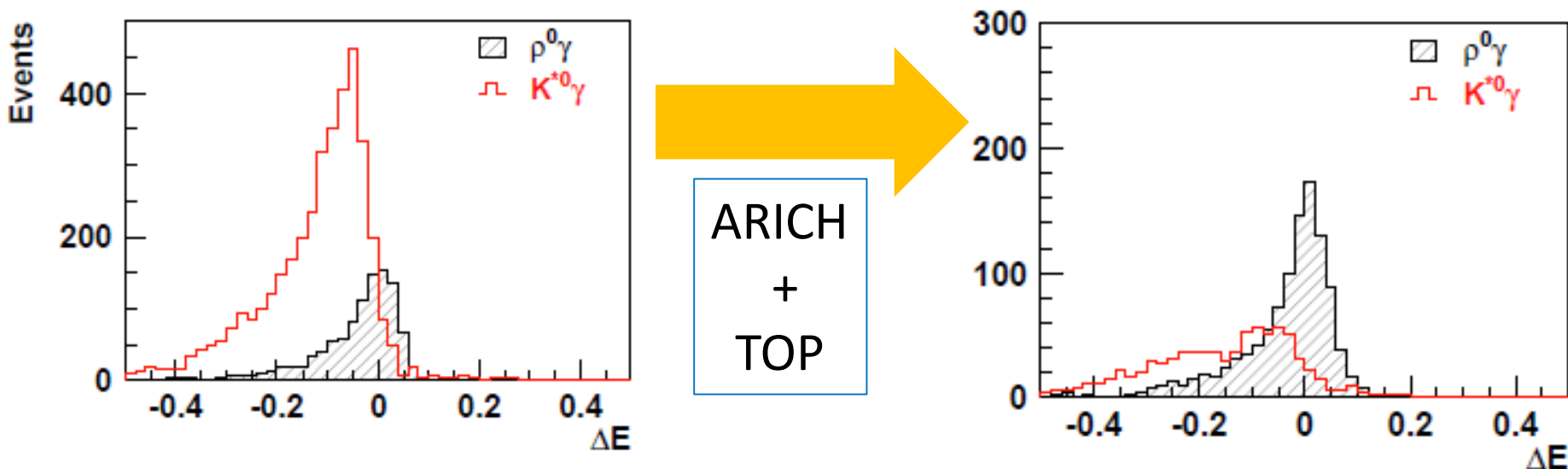
アップグレードの効果

例： $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$ (シミュレーション)

Signal mode: $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

Background mode: $K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$

荷電 K 、 π 粒子の識別が重要



S/N比を飛躍的に向上できる！！

シリカエアロゲル

シリカエアロゲルとは SiO₂ が三次元的に配列した多孔物質
体積の約 98% を空気が占める

- ・ 密度を自由に調整する事が可能
 - 任意の屈折率を選択できる
- ・ 粒子径が数10nm程度と可視光の波長に比べて小さい
 - 優れた光透過性
- ・ 構成する粒子が波長より小さい
 - 光学的特徴としてRayleigh散乱を起こす



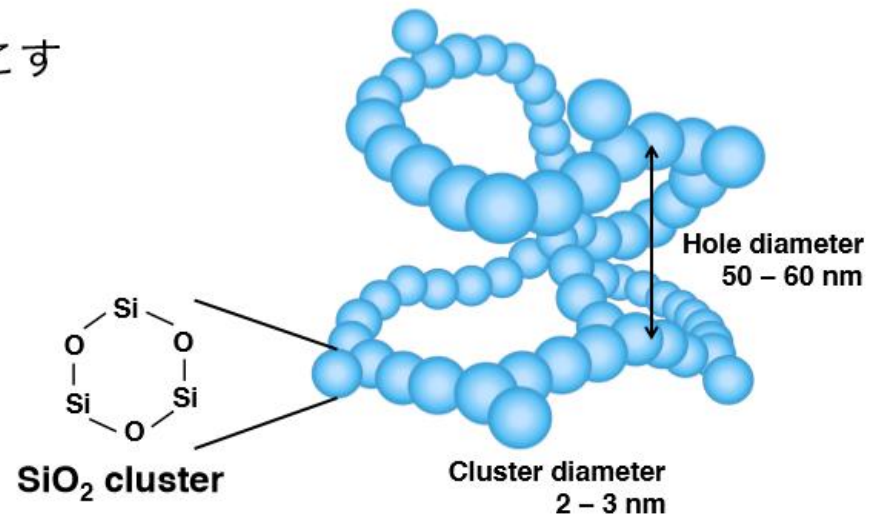
σ_s : 散乱断面積

$$\sigma_s = \frac{2\pi^5}{3} \frac{d^6}{\lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2$$

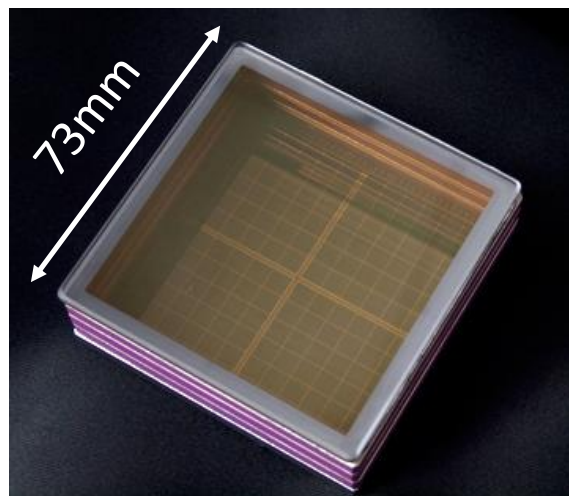
d: 粒子直径

λ : 散乱波の波長

n: 屈折率



HAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector)

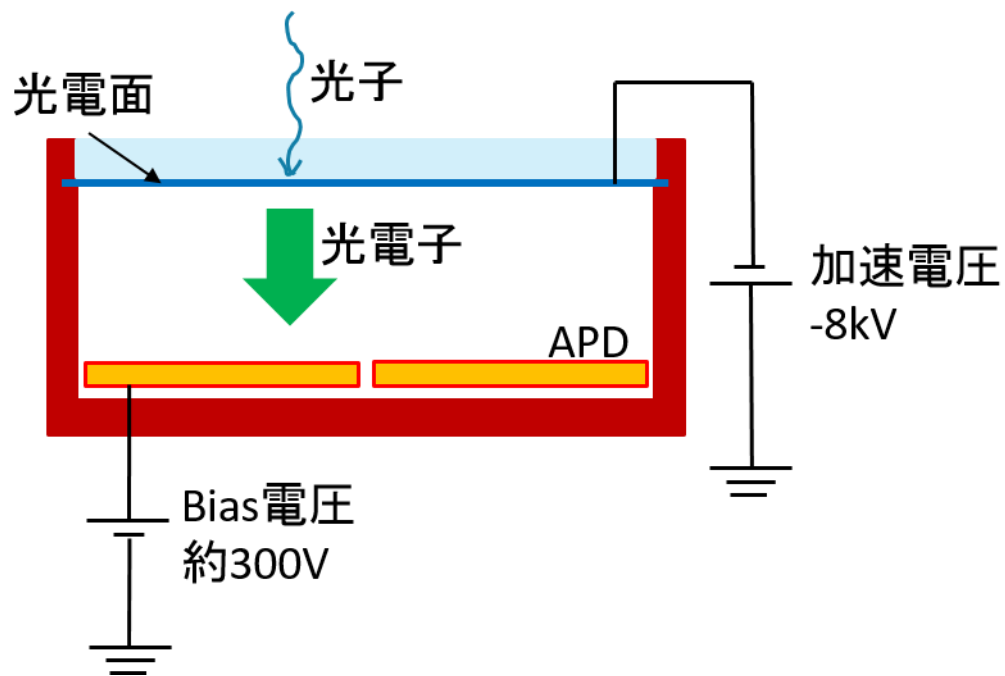


特徴

- ・1光子検出が可能
- ・1.5Tの高磁場中で動作可能
- ・144chのピクセル検出器
- ・ARICHでは420台使用

動作原理

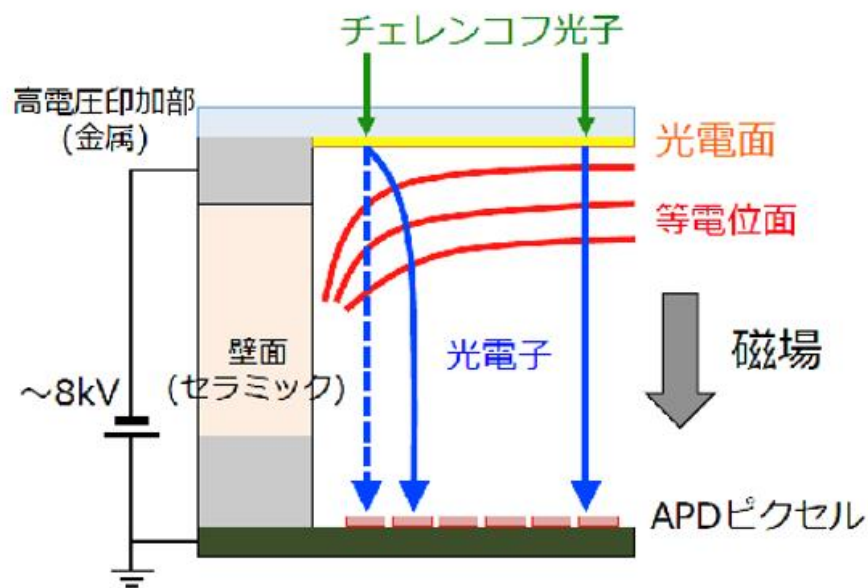
- ・光電面とAPD間の電場で加速され APDに入射
- ・光電子はエネルギーを落として停止し 1500~2000の電子-正孔対を生成
- ・APD内部のアバランシェ増幅により 40倍のゲインが得られ、最終的に数万の増幅度になる



HAPDの磁場特性

HAPDは**磁場と平行に設置**することで性能を向上させることができる

1. HAPD内部電場の影響の改善

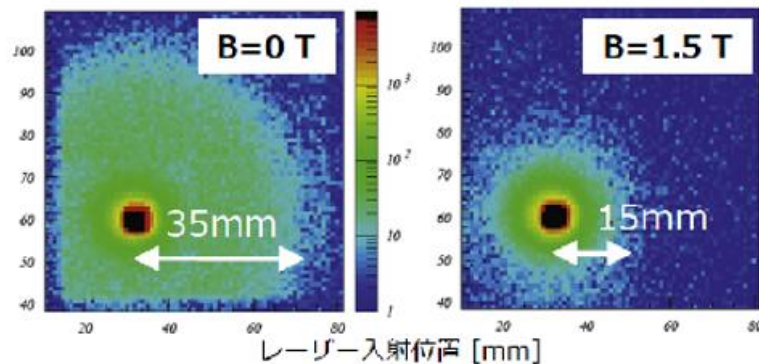


壁面付近は電場形状が歪んでいるので
光電子が曲げられ近隣ピクセルへ
入射してしまう
⇒ **磁場と内部電場を平行**にすることで
直進させることができる

2. APD表面反跳半径の減少

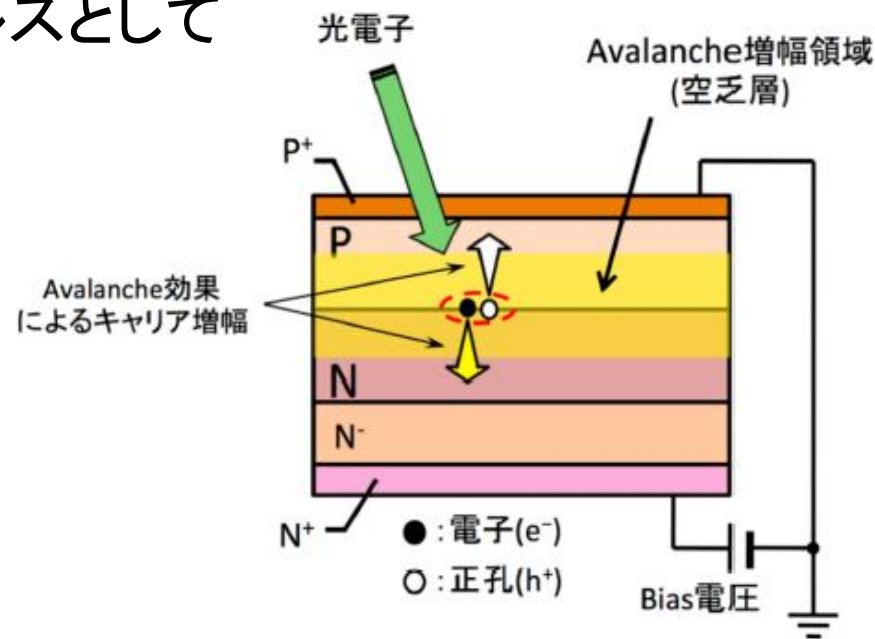


表面反跳半径を
小さくすることができる



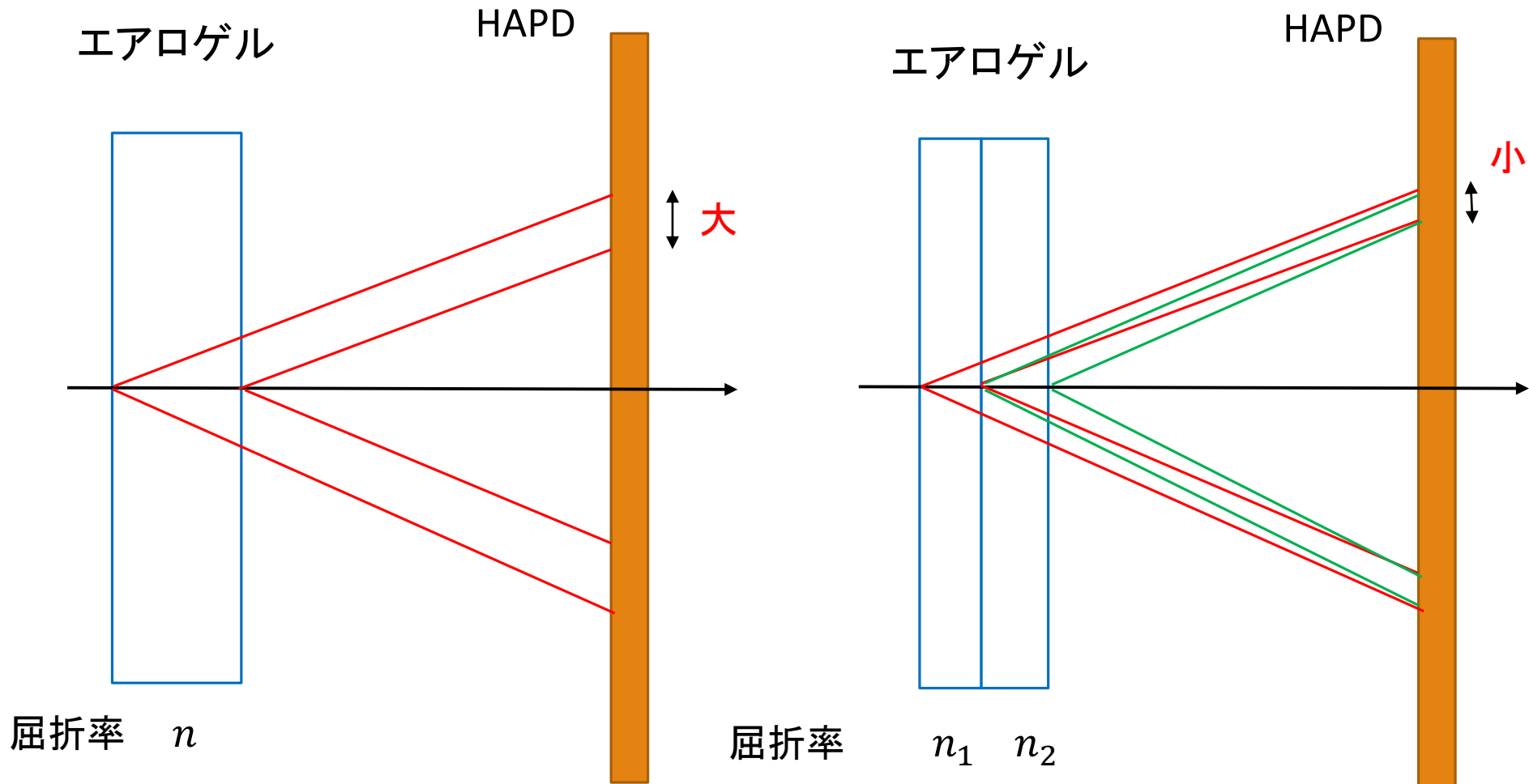
APD増幅原理

逆Bias電圧の印加によって空乏層が形成されたAPDに光が入射すると電子-正孔対が生成される。これらそれぞれが逆Bias電圧によって電極へとドリフトする。この時に空乏層内の格子原子や不純物と衝突することによって査収的には入射光電子数に比例した電圧パルスとして検出することができる。



デュアルレイヤー方式

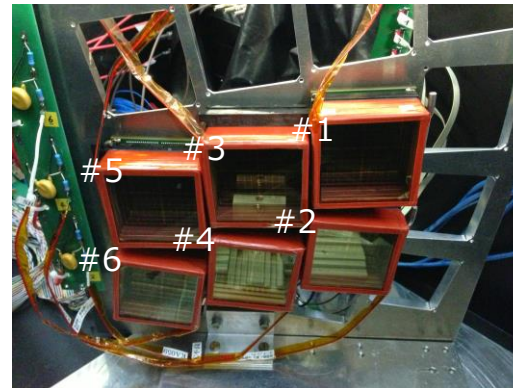
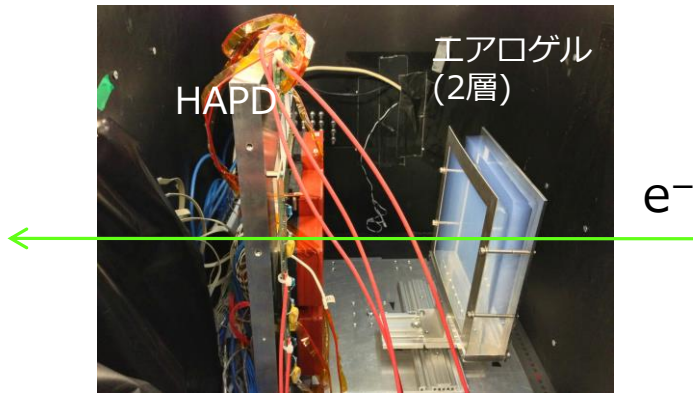
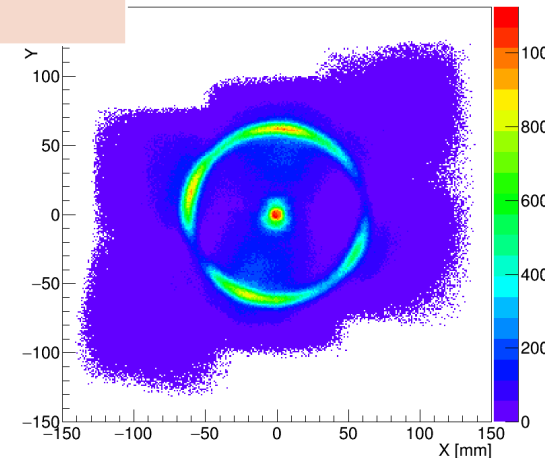
検出光子数を維持したまま角度分解能を向上できる。



ビームテストデータ(垂直入射)

Run#	125		143
ビーム	電子 5 GeV/c (磁場なし)		
ビーム入射角	0 deg		
エアロゲル	上流: 1.0467 (REM5-5) 下流: 1.0592 (BTR13-5)		無し
HAPD (ビーム上流から見た配置)	#5: SHP078 QE: 26.8% 2011以前の旧来品	#3: KA041 QE: 28.9% 2011白側管品 (旧来品と同等)	#1: SHP118 QE: 27.4% 2011以前の旧来品
	#6: KA025 QE: 22.3% 2011以前の旧来品	#4: KA058 QE: 31.1% 第1次放射線テスト品 ($9 \times 10^{11}n$, 1000Gy)	#2: SHP077 QE: 25.2% 2011以前の旧来品

リングイメージ
All



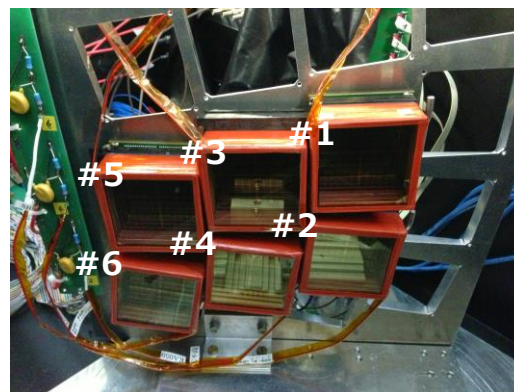
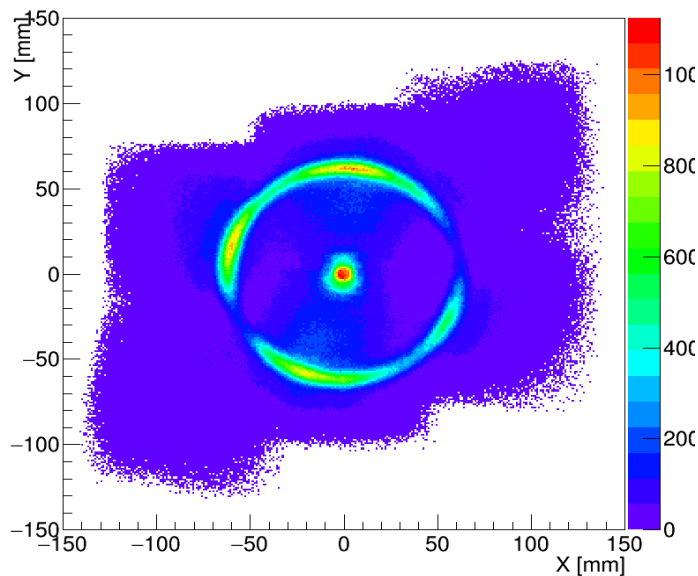
ビームテストデータ(垂直入射)

ARICHに垂直に入射する粒子に対する性能



運動量3.5 GeVの π 粒子に対して
 π 粒子の識別効率: 97%
 π 粒子をK粒子と誤識別する確率: 4.9%

約21万イベントの累積リングイメージ



岩田修一博士論文(首都大2015年度)
に詳細がまとめられている。

π/K 識別能力の見積もり方法

運動量4GeV/cの粒子を仮定した場合

$n = 1.0592$:エアロゲル輻射体の屈折率

・ π 中間子 質量: $0.14 \text{ GeV}/c^2$

$$\beta_{\pi} = 0.999 \simeq 1$$

$$\cos\theta_{\pi} = 0.944$$

・K中間子 質量: $0.5 \text{ GeV}/c^2$

$$\beta_K = 0.992$$

$$\cos\theta_K = 0.952$$

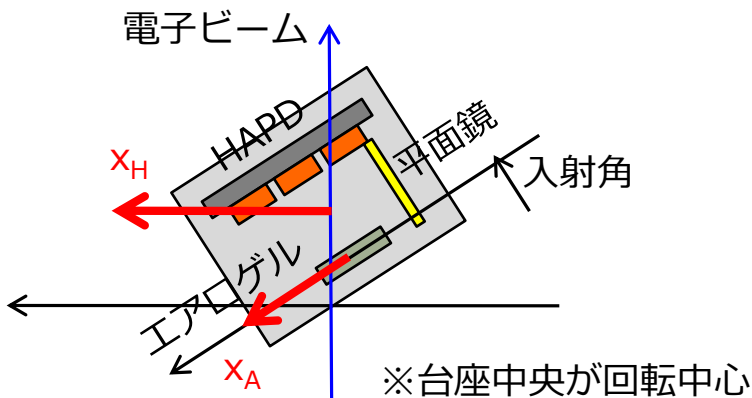
今回ビームテストで用いた5GeVの電子は $\beta_e \simeq 1 \simeq \beta_{\pi}$
→電子を π 中間子として模擬。

K中間子で予測されるリング ($\beta=0.992$)
 π 中間子で予測されるリング ($\beta=1$)

⇔ ヒット位置
比較

ビームテストデータ(角度付き)

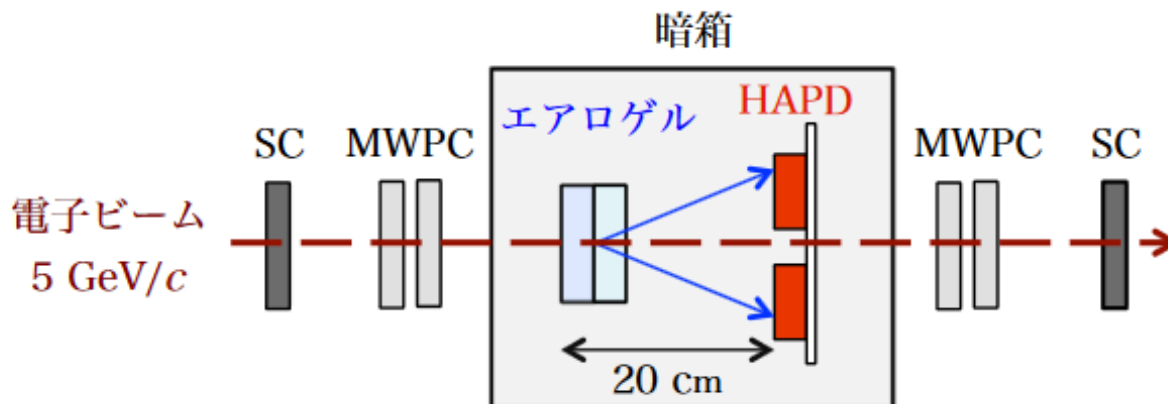
Run#	145	146	147	148	149	150	151
ビーム	電子 5 GeV/c (磁場なし)						
ビーム入射角	30 deg						
エアロゲル	Run125と同じ						
HAPD	Run125と同じ						
位置	初期位置 $x_H=0$ $x_A=0$	$x_H=+2c$ m $x_A=-2cm$	$x_H=+6c$ m $x_A=-6cm$	$x_H=+8c$ m $x_A=-8cm$	$x_H=+9.8cm$ $x_A=-9.8cm$	$x_H=+12c$ m $x_A=-12cm$	$x_H=+14c$ m $x_A=-14cm$



角度付き+鏡リング反射像の検出のための
実験ラン反射像がうまく見えるようにHAPDと
エアロゲルの位置を変えていた

HAPD, エアロゲル, 鏡が乗った台ごと
ビームに垂直方向に移動: x_H
台の上でさらにエアロゲルだけが
入射角方向に移動: x_A

ビームテストのセットアップ



SC: トリガーシンチレーションカウンター

→シンチレーションカウンターを通過した電子ビームトラックのみがトリガーを発行しイベントとして記録される

MWPC: Multi Wire Propotional Chamber

→ガス検出器の一種で、電子ビームトラックの入射位置を検出する

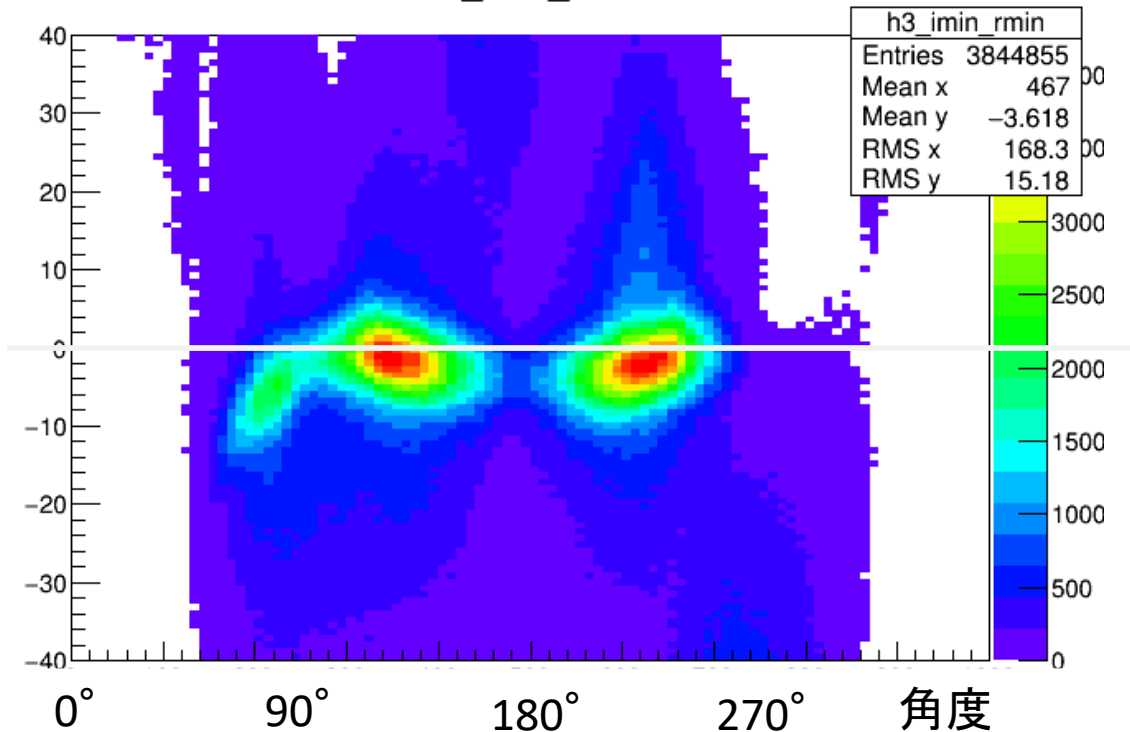
各検出器の検出位置から飛跡を再構成している。

参考文献: 片浦隆介さん修士論文(2016年)

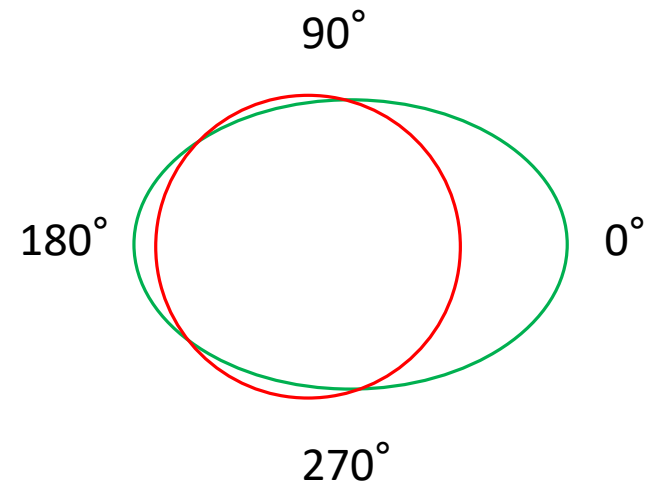
π の予測リングとヒット点との距離

π リングとHAPDとの差[mm]

h3_imin_rmin



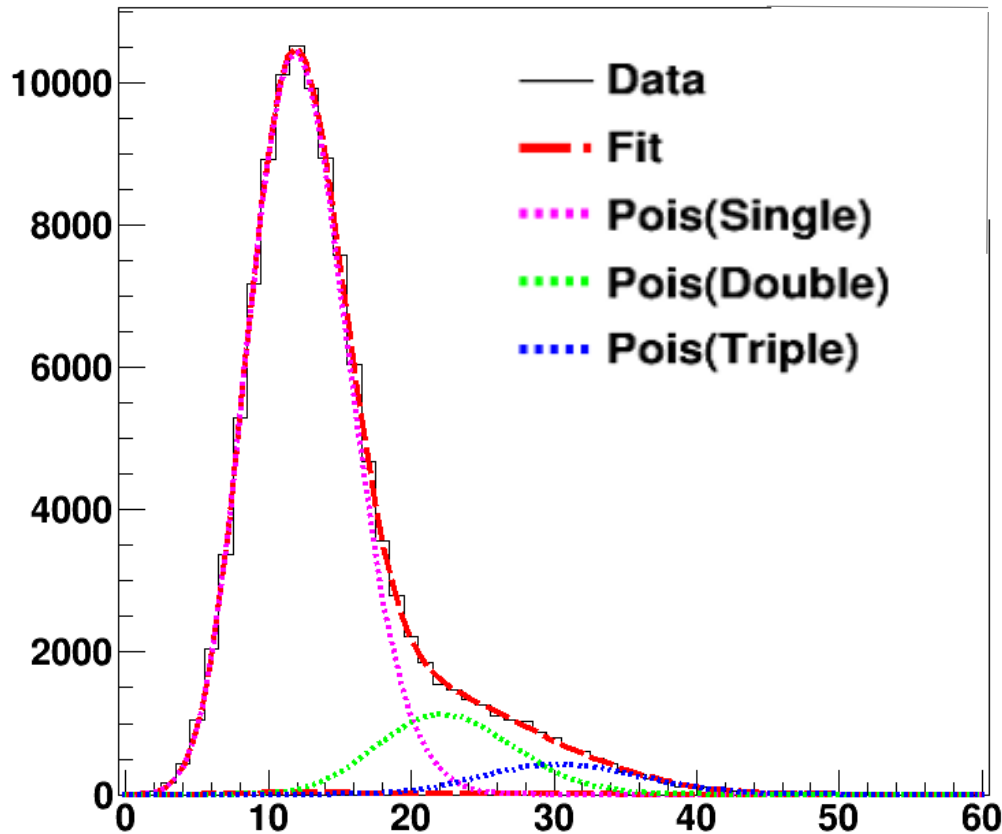
— ヒット点
— 期待されるリング



実際のビームの入射角が
30度より小さく見える

検出光子数の見積もり

1イベントあたりのヒット数分布



- ・垂直入射時の1イベントあたりの光子数をポアソン分布でフィットしたもの
- ・1トリガーに対して電子が複数観測されていることがわかる。
- ・このポアソンフィットの面積からそれぞれ1トラック、2トラック、3トラックイベントの割合を求める。

(2015年度、岩田修一博士論文より)

検出光子数の見積もり

先ほどのポアソン分布より求めた1～3トラックイベントの割合は以下のようにになっている。

1トラックイベント	82.52%
2トラックイベント	12.12%
3トラックイベント	5.36%

データのevent数は213407本。これより全トラック数は

$$(0.8252 + 0.1212 \times 2 + 0.0536 \times 3) \times 213407 = 261421 \text{本}$$

Gaussのメインピークの面積をAとすると(1トラック当たりの)検出光子数は

$$n_{pe} = \frac{A}{261421} \quad \text{と見積もられる。}$$

検出光子数の計算値

垂直入射時の1トラック当たりの検出光子数は10.71
(2015年岩田修一博士論文より)

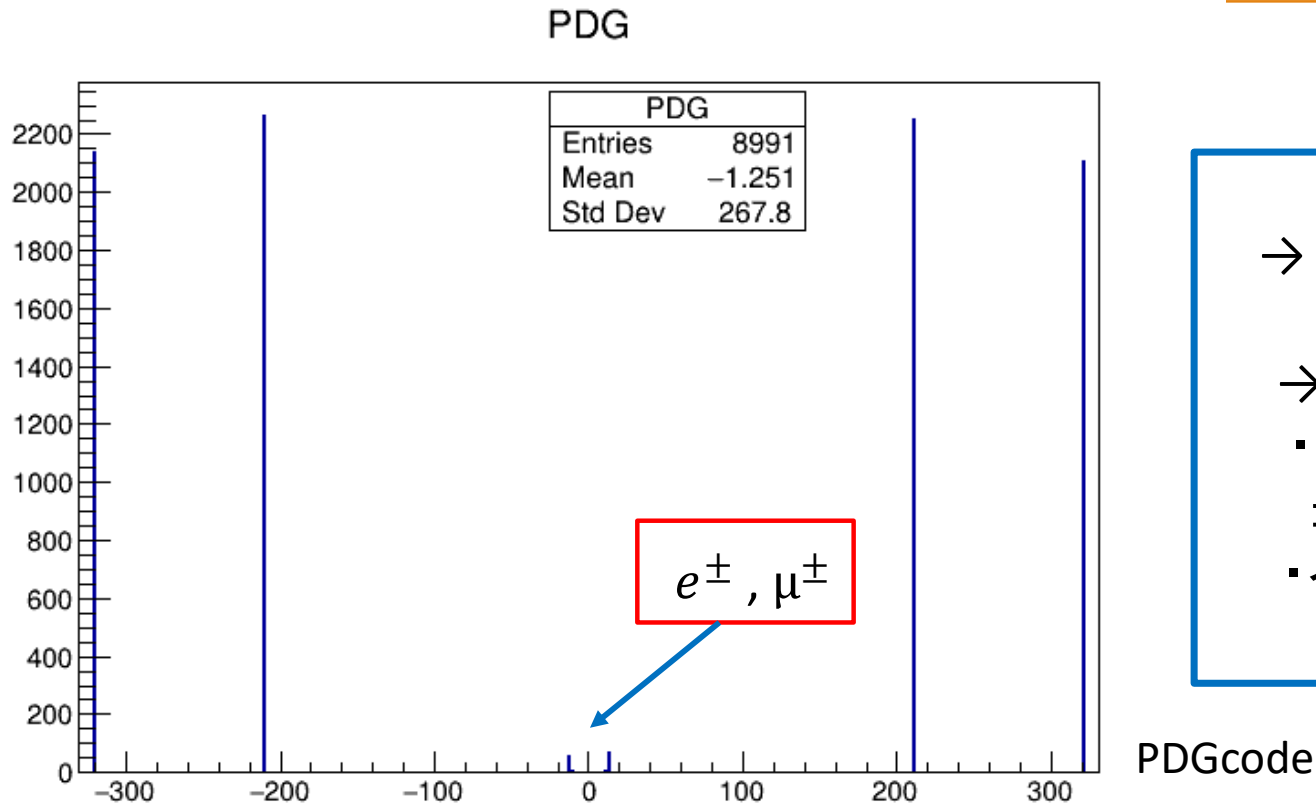
角度付き入射の場合、トラックがシリカエアロゲルを通過する距離が延びることより

$$10.71 \times \frac{1}{\cos 30^\circ} = 1.324 \quad \text{と見積もった。}$$

※実際は散乱の増加や吸収も増えるため正確な値ではない。
(Cf:減衰長40mm程度)

Back up_(reconstruction)

入射粒子の割合



- ・運動量
→ 0.5~4GeV
- ・入射角
→ 17~35°
- ・入射粒子
±π, ±K
- ・イベント数
10000

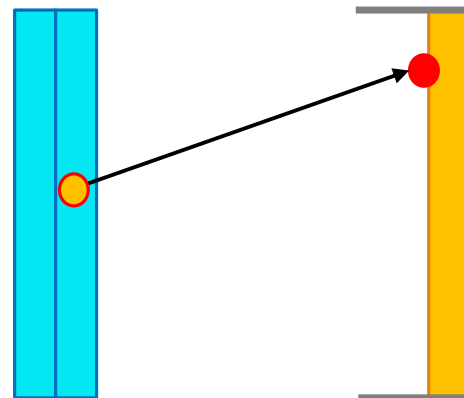
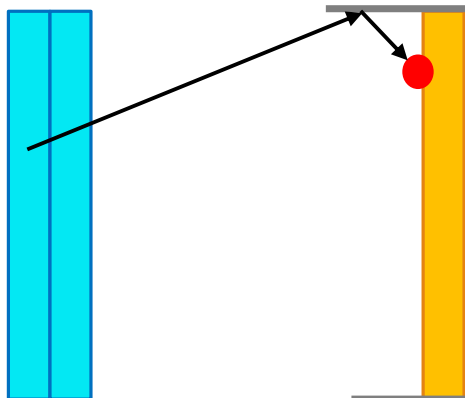
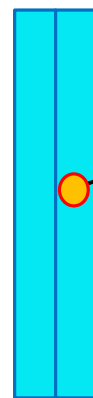
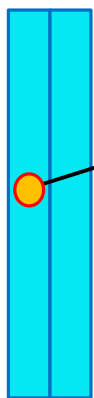
±K, ±πを入射させた際のARICHへ入射してきた粒子
0付近にはπ、Kが崩壊したμと電子のpeakがある。
それぞれの粒子はARICHへ同じ割合で入射している。

再構成候補

チェレンコフ角は1光子に対して以下の場合で再構成されている

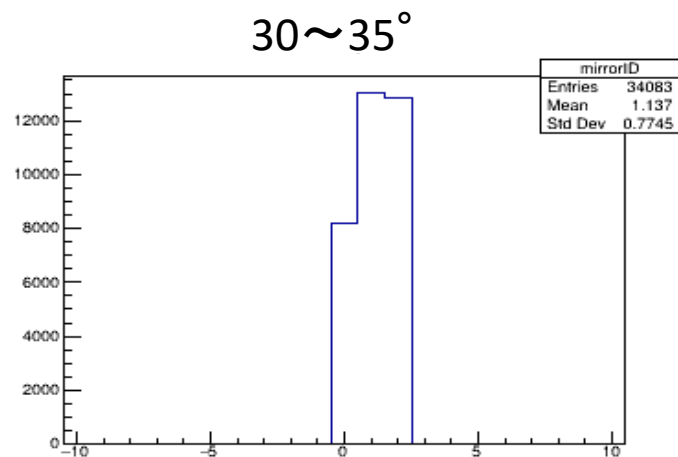
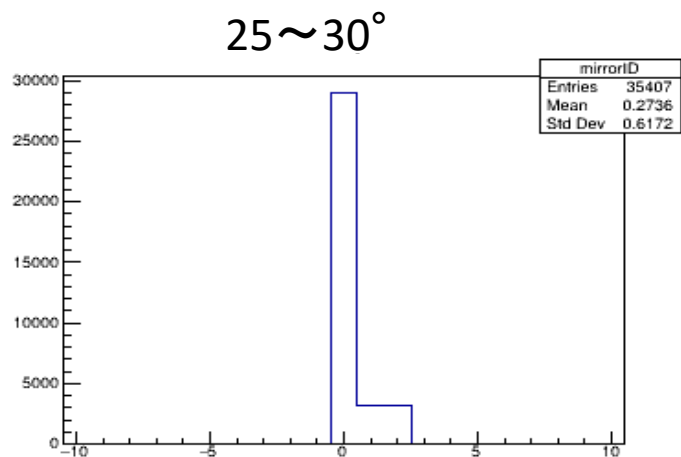
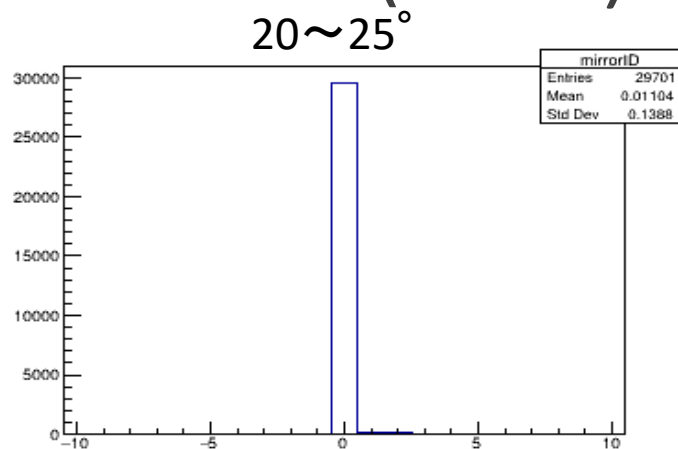
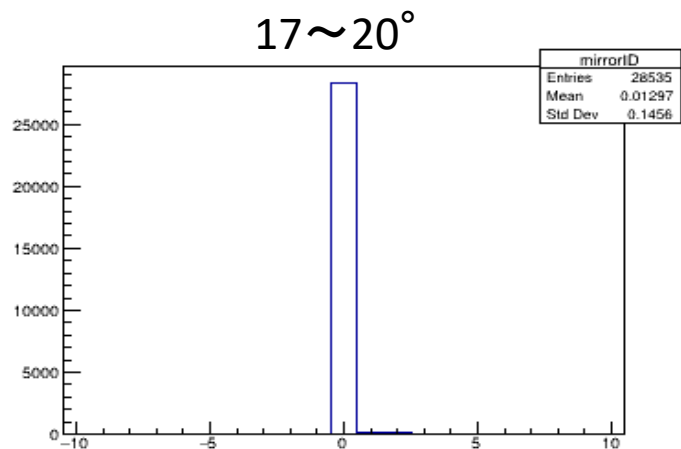
Aerogel

HAPD



これらの場合で、チェレンコフ角が 0.5rad 未満になるものを選別している

ミラーの反射 ($\pm\pi$)



- ・運動量
3~4GeV
- ・入射粒子
only $\pm\pi$
- ・イベント数
1000

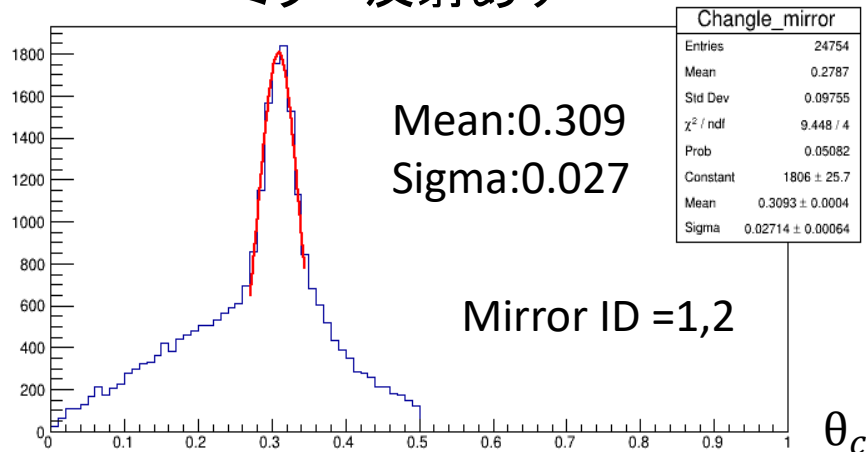
X軸: 0 → ミラーの反射なし

1と2 → 反射したミラープレートの番号

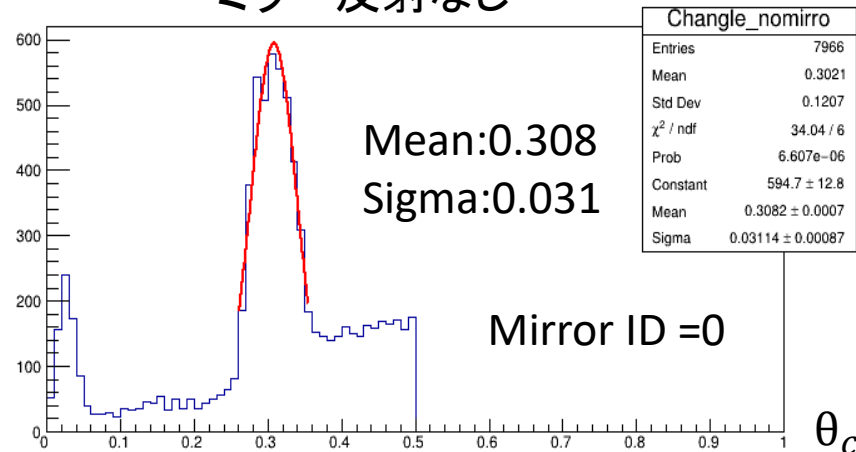
30~35° においてミラーの反射の影響が大きい。

ミラー反射の依存(± π)

ミラー反射あり



ミラー反射なし



ミラー反射ありとなしの比較

- Means値はほとんど変わらない
- ミラー反射なしの σ はありの σ より大きい。

- 運動量
3~4GeV
- 入射粒子
± πのみ
- 入射角
30~35°
- イベント数
1000