

BelleII実験用TOPカウンターの性能評価

2012.7.7(土)

名古屋大学

高エネルギー物理学研究室 (N研究室)

有田義宣



BelleII実験

□ Belle II 実験はBelle実験をさらに高輝度化(40倍)し、大量のB中間子からの稀崩壊現象を探る電子陽電子コライダー

⇒高精度な粒子識別が必要

(例) $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$ の稀崩壊現象

信号 : $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$

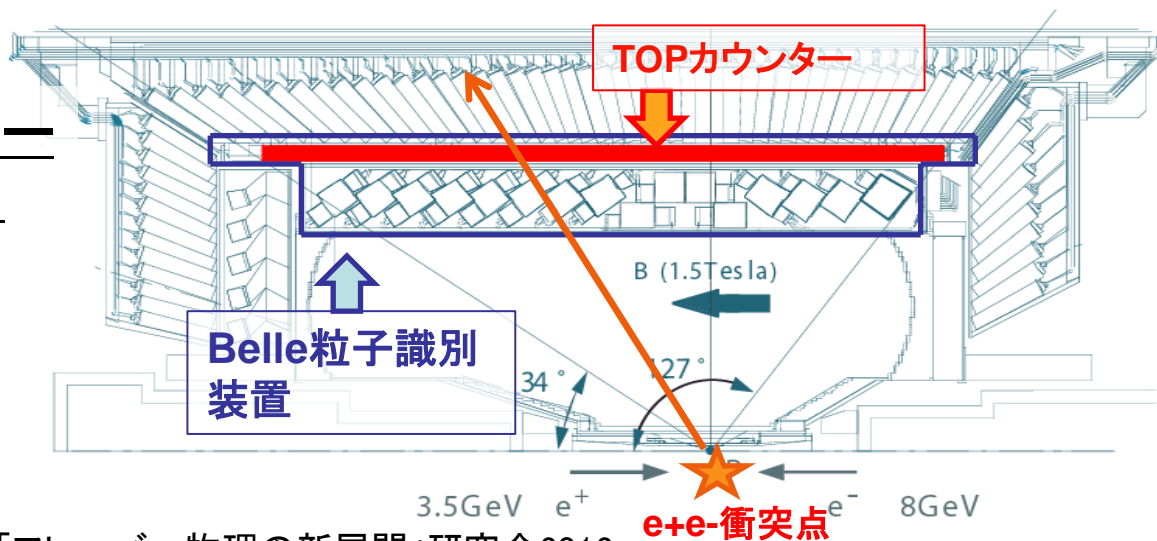
背景事象: $B^0 \rightarrow K^* \gamma \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$

もっとも識別の難しい π/K 識別

	Belle (ACC+TOF)	TOP カウンター
識別効率	90% ($\leq 3\text{GeV}/c$)	97% ($\leq 3\text{GeV}/c$)
誤識別率 (π をKと間違える確率)	11% ($\leq 3\text{GeV}/c$)	2% ($3\text{GeV}/c$)

新型粒子識別装置TOPカウンター (Time Of Propagation counter)

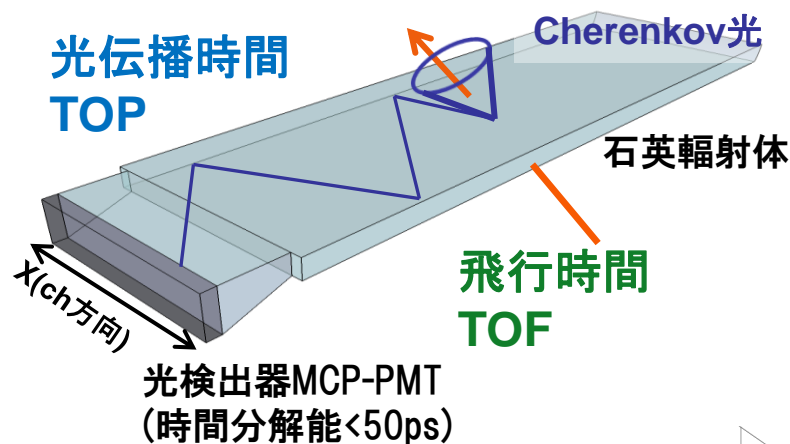
- 識別能力の向上
- 運動量領域の拡大
- 装置のコンパクト化



TOPカウンターの粒子識別の原理

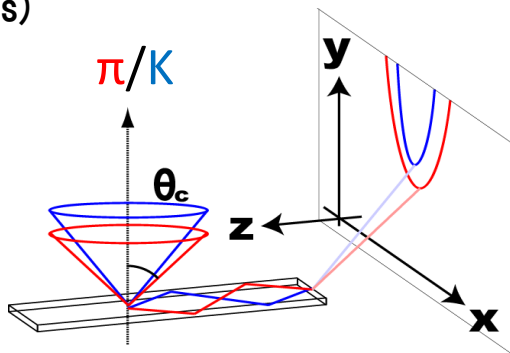
TOPカウンター = 「TOF検出器の性能を兼ね備えたRICH検出器」

□ 荷電粒子の速度 β を測定する

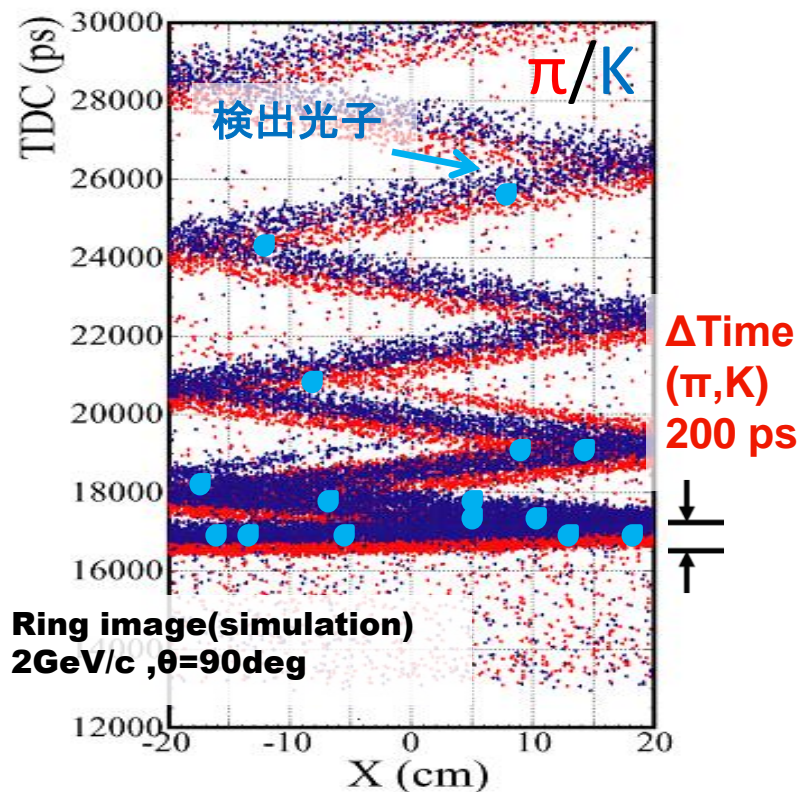


$$\cos\theta_c = \frac{1}{n\beta}$$

(θ_c :チェレンコフ角)



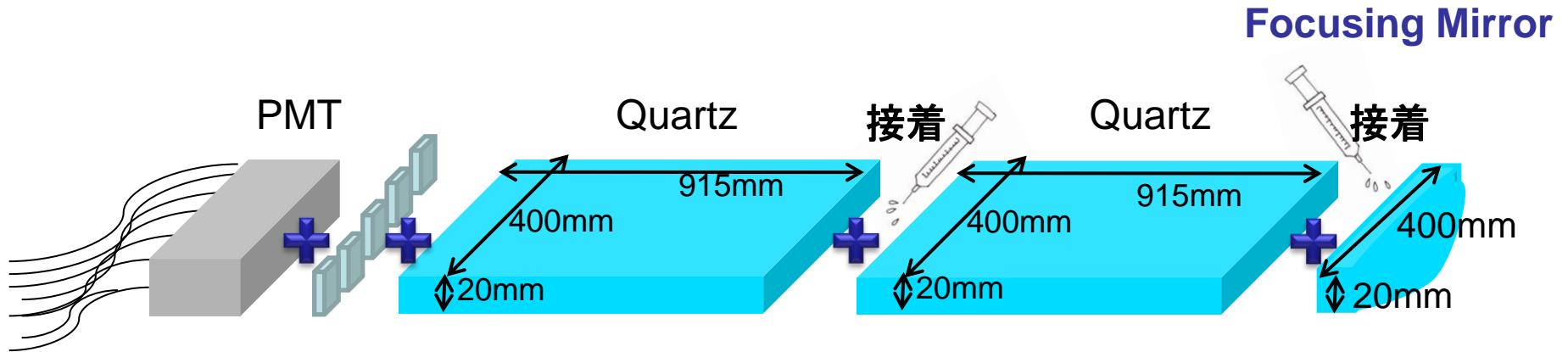
TOPカウンターのリングイメージ



TOPカウンターのプロトタイプを用いて性能評価を行なう

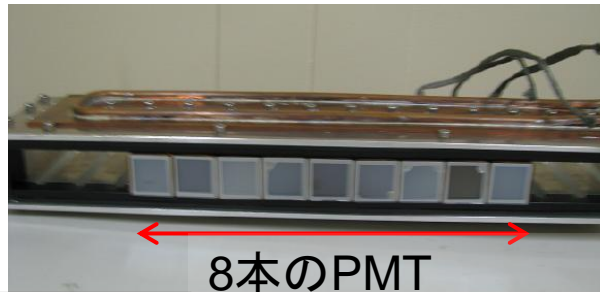
リングイメージを光子の
検出時間(t)と検出位置(x)によって再構成

TOPカウンターのプロトタイプ

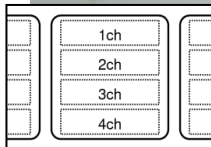


光検出器MCP-PMT

- ・4チャンネル
- ・QE~20.5% @400nm
- ・波長カット<350nm

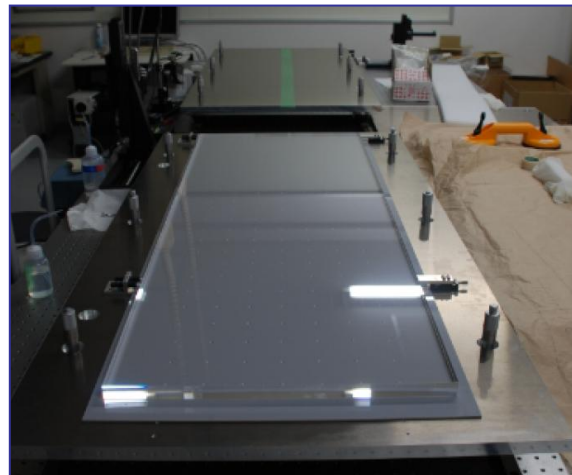


32チャンネル用いる
(全体のおよそ半分)
➤ 検出光子数も半分



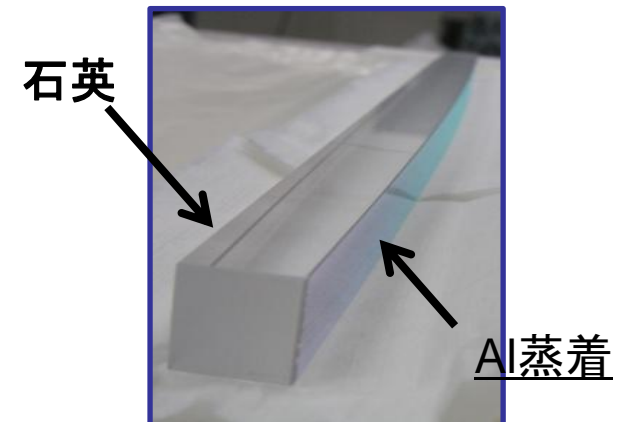
石英(クォーツバー)

- ・石英同士の接着精度0.2mrad
- ・表面粗さ5 Å
- ・屈折率 $n = 1.47 @ 400\text{nm}$



フォーカシングミラー

- ・Al蒸着
- ・球面状
(曲率半径5m)



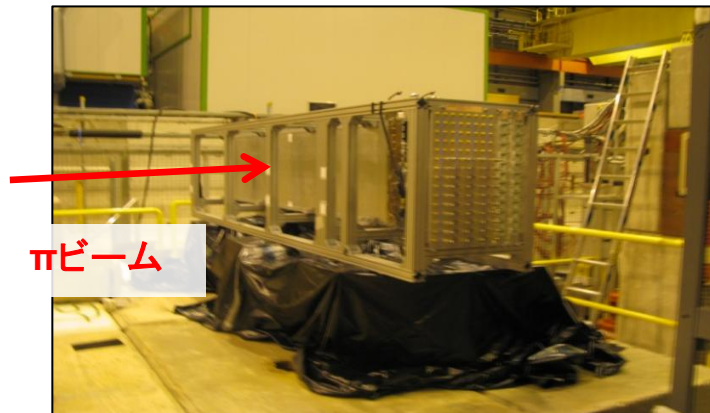
プロトタイプの実験検証のためのビームテスト 5

T4-H6-Bビームライン

(CERN, SPS)

-single π^+

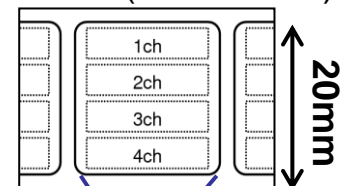
-120GeV/c ($\beta \doteq 1$)



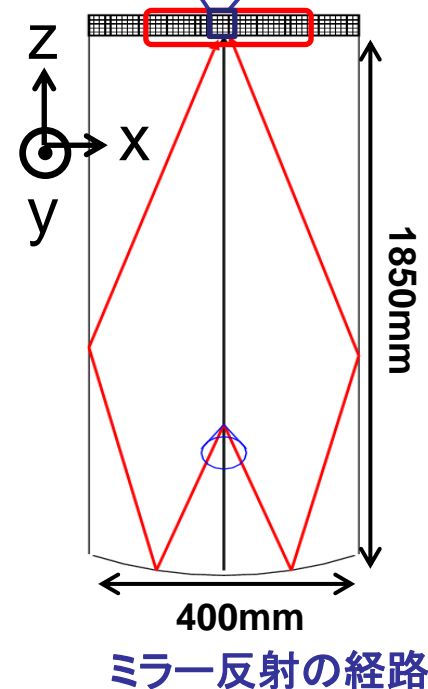
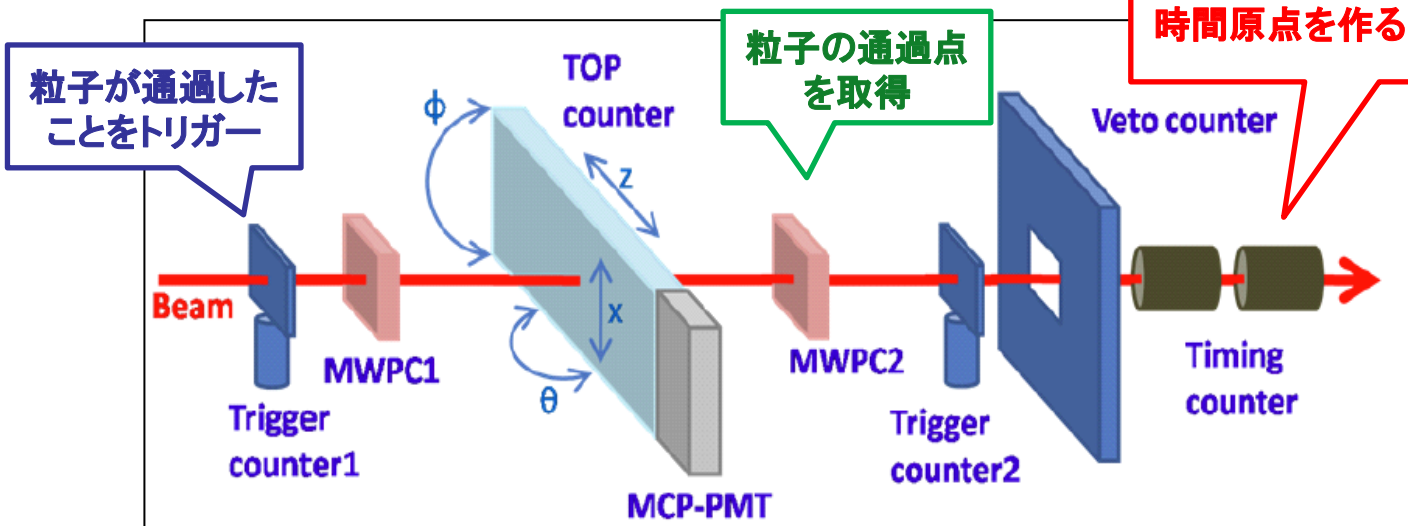
4ch MCP-PMT

8本のPMTを使用

⇒32ch(半分の領域)

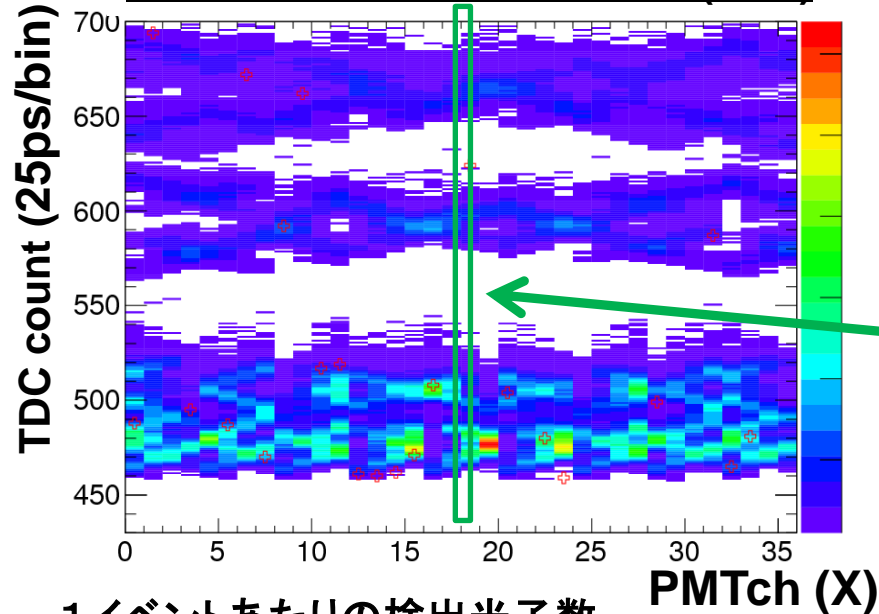


Beam test セットアップ

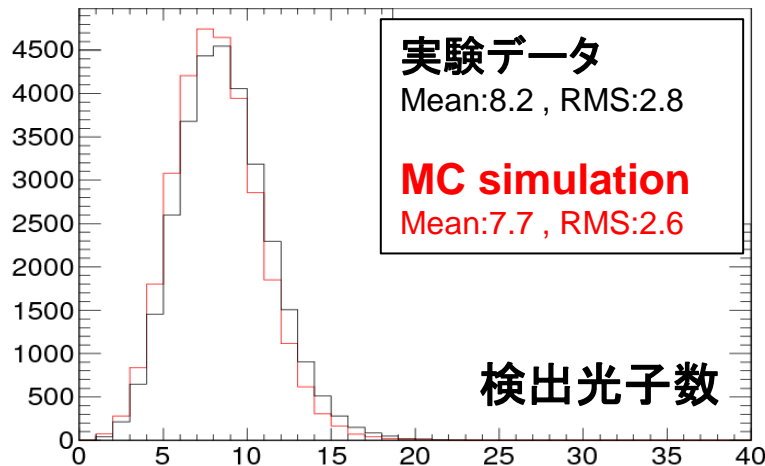


これまでの研究：検出光子数と時間分解能

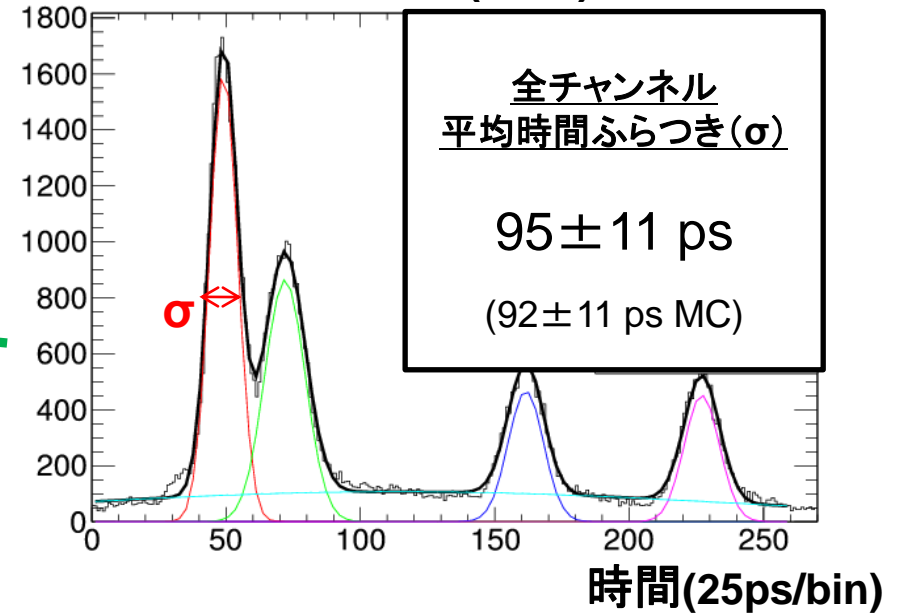
TOPカウンターのリングイメージ(蓄積)



1イベントあたりの検出光子数



CH18の時間分布(蓄積)



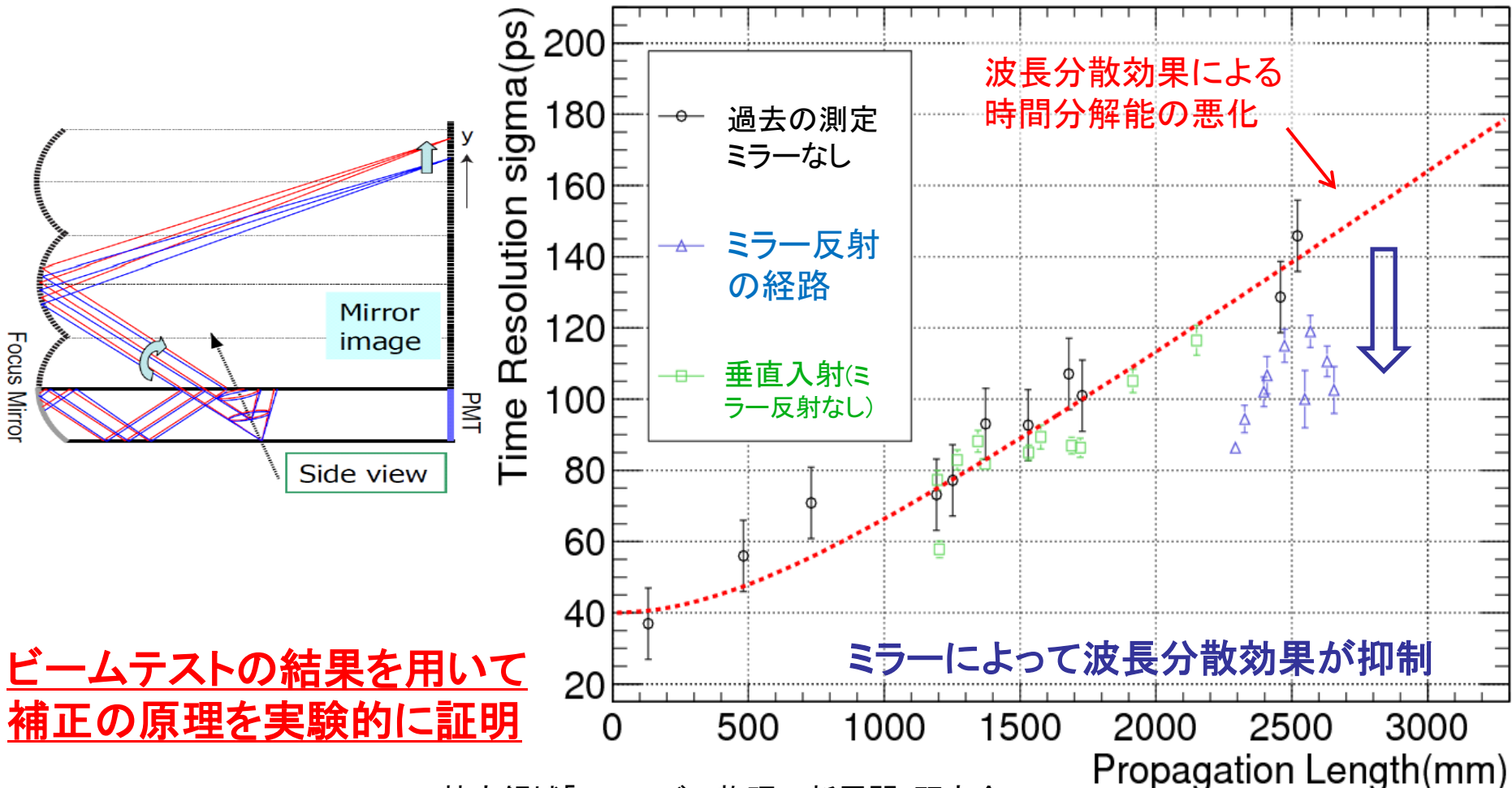
- 検出光子数は平均8.2
 - MC simulationはデータの形をよく再現
 - 平均値の5%のずれ⇒クロストーク

- 時間ふらつきは95ps ± 11ps
 - 各チャンネル毎の時間ふらつきはよく理解できている

これまでの研究:フォーカシングミラーによる時間分解能の改善⁷

伝播するチェレンコフ光は波長ごとの群速度が異なる(波長分散効果)ため、時間分解能が悪化する

⇒ミラーを用いる事で色収差を抑制し、時間分解能を改善



ビームテストの結果を用いて補正の原理を実験的に証明

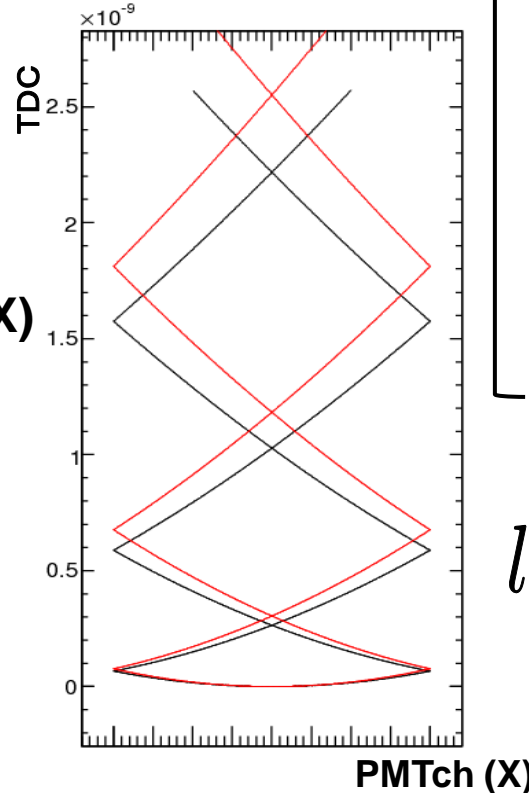
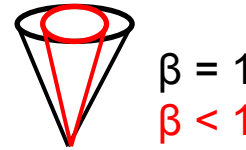
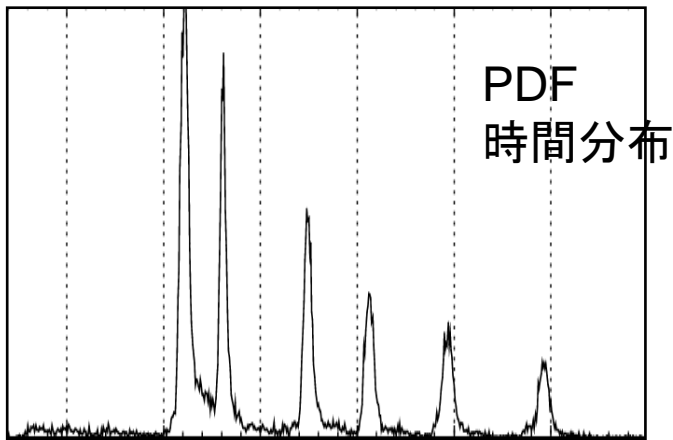
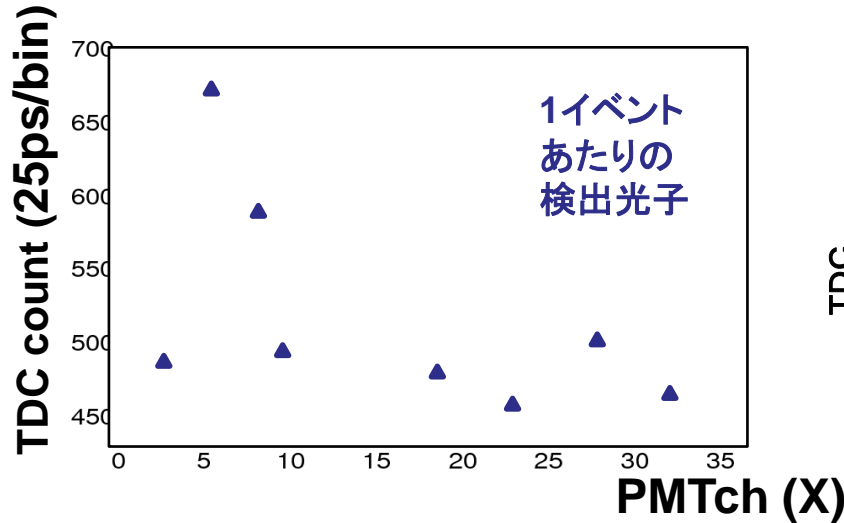
ミラーによって波長分散効果が抑制

今回の研究: 速度 β 分解能の評価

□ Cherenkovリングをフィットし、速度 β を評価する

⇒ 数個の光子の情報からリングイメージを再構成できるのか？

Likelihood法による、
リングイメージフィッティング



1. MCsimulationから検出時間の確率密度関数(PDF)を作成
2. β を変化させたPDFを作り,各イベントについて $\ln L$ を計算する
3. $\ln L$ が最大になるような β を採用する

$$\ln \mathcal{L} = \sum_i^N \ln P_i$$

N: 検出光子数

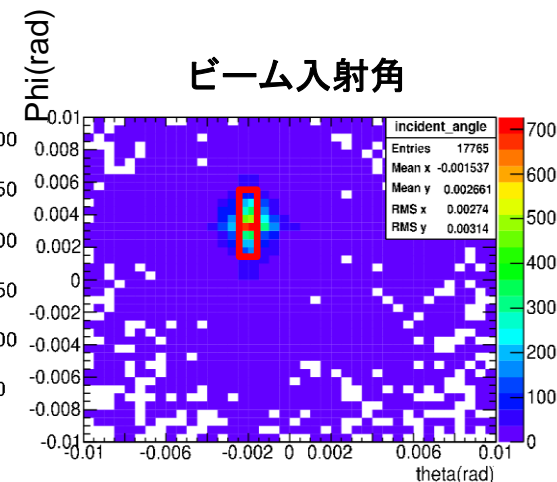
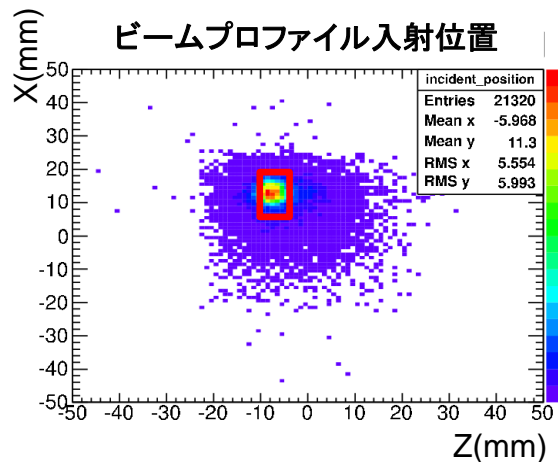
P_i : 1光子あたりの検出確率 (PDFからの値)

TDC count (25ps/bin)

粒子の入射情報(MWPC)で入射粒子を絞る

入射位置・角度のふらつきに
対する影響を抑えるために
カットする

入射位置 $< \pm 2\text{mm}$
入射角度 $\theta < \pm 0.5\text{mrad}$

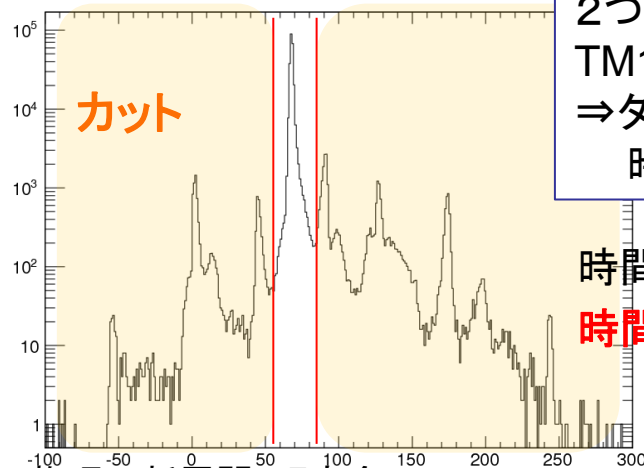


良い精度の時間原点を作る

タイミングカウンタ(チェレンコフカウンタ)

石英
 $\Phi 10\text{mm}$

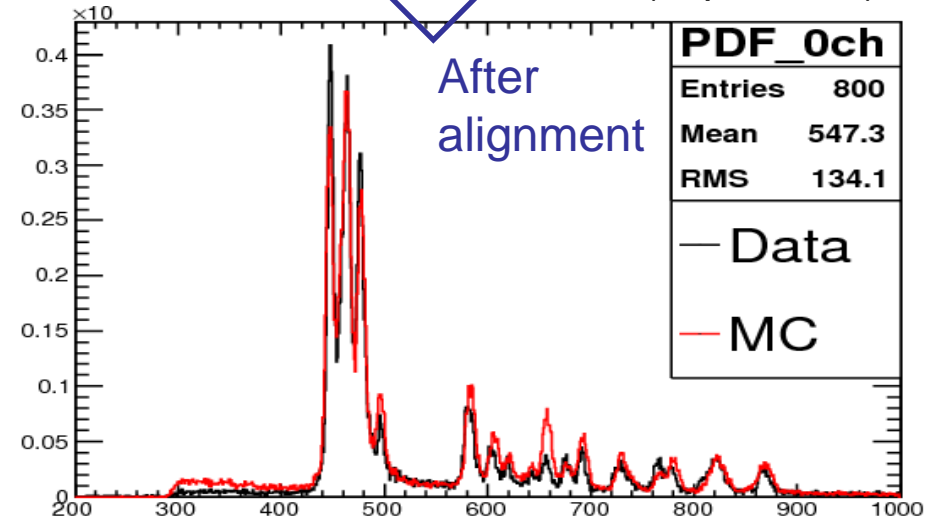
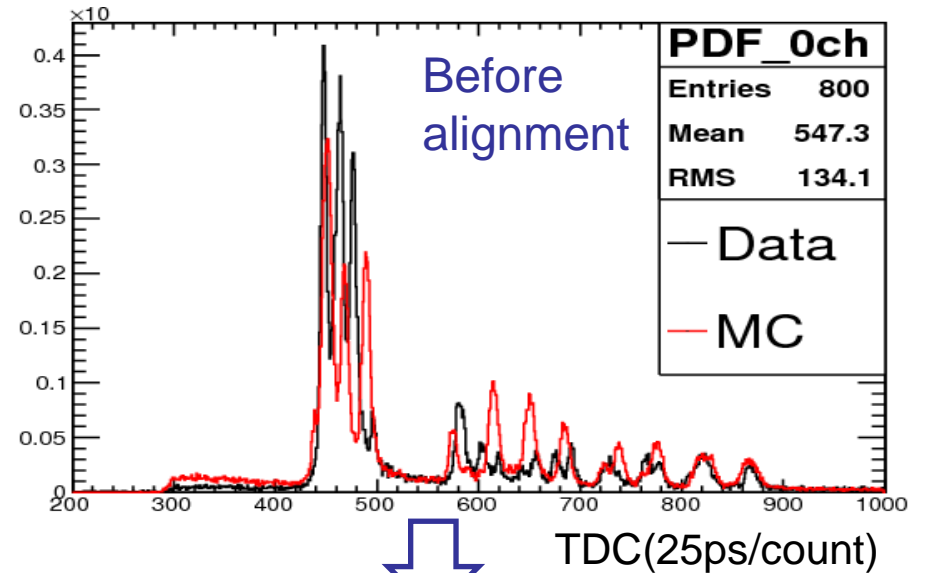
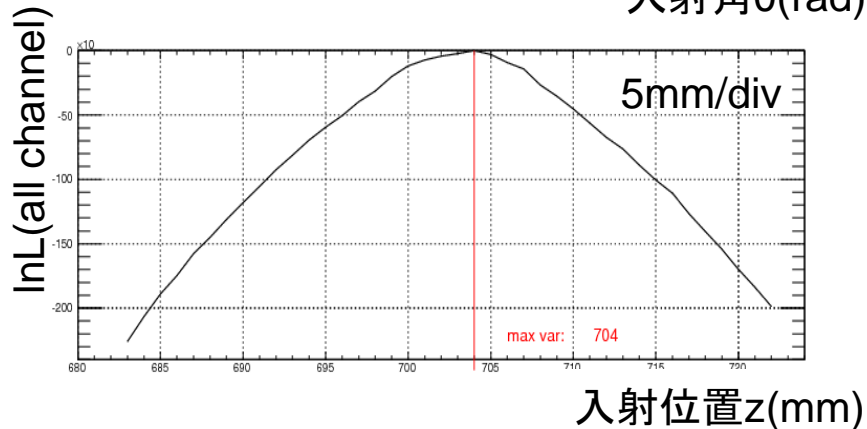
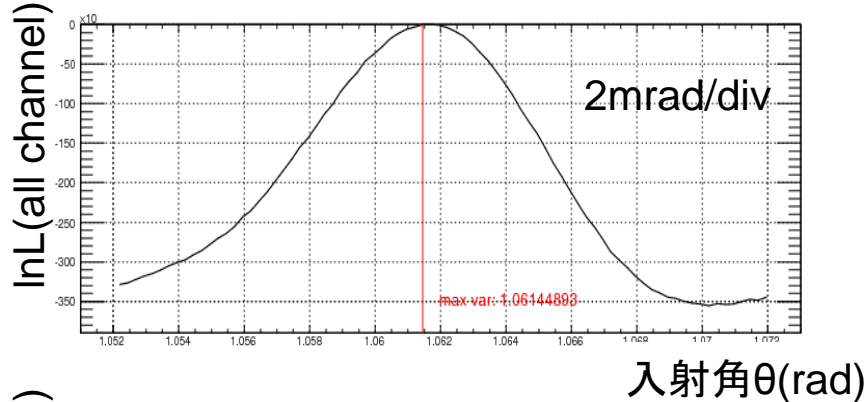
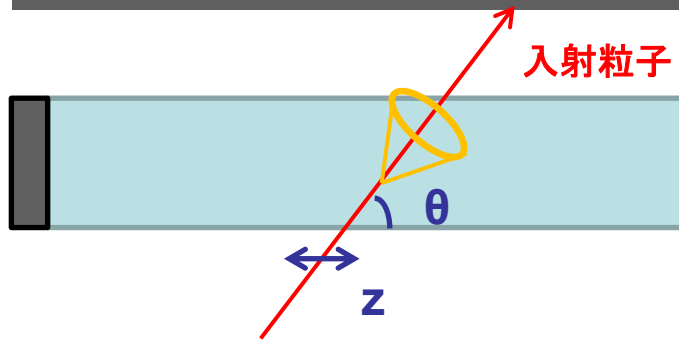
MCP-
PMT



2つのカウンタの時間差
TM1 - TM2
⇒タイミングカウンタの
時間分解能を評価

時間差のRMS: 42.48ps
時間精度 $\sigma_{\text{time}} = 30\text{ps}$

Likelihoodフィットによる入射位置のアライメント ¹⁰

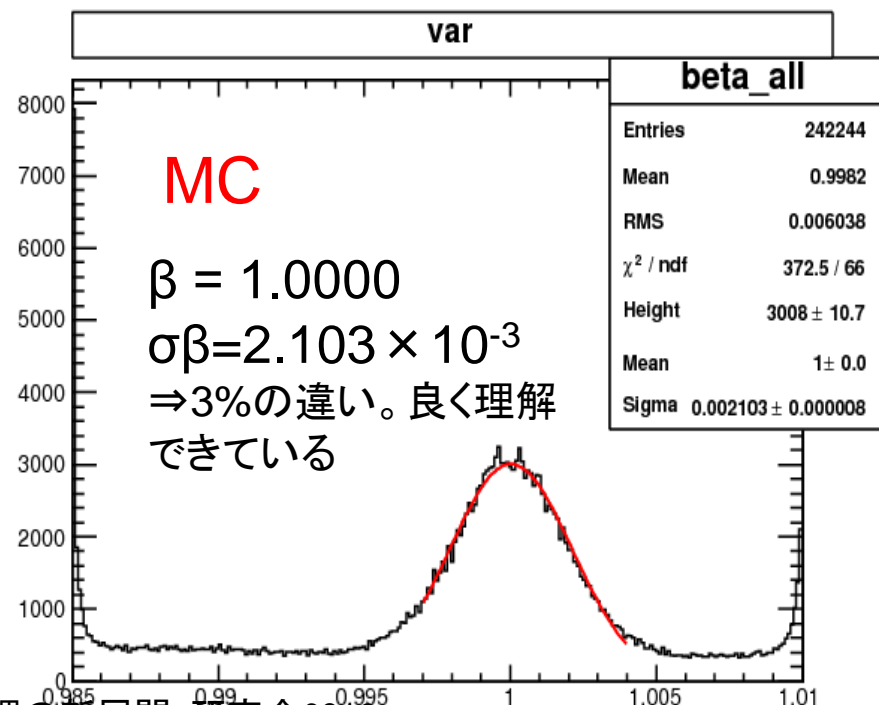
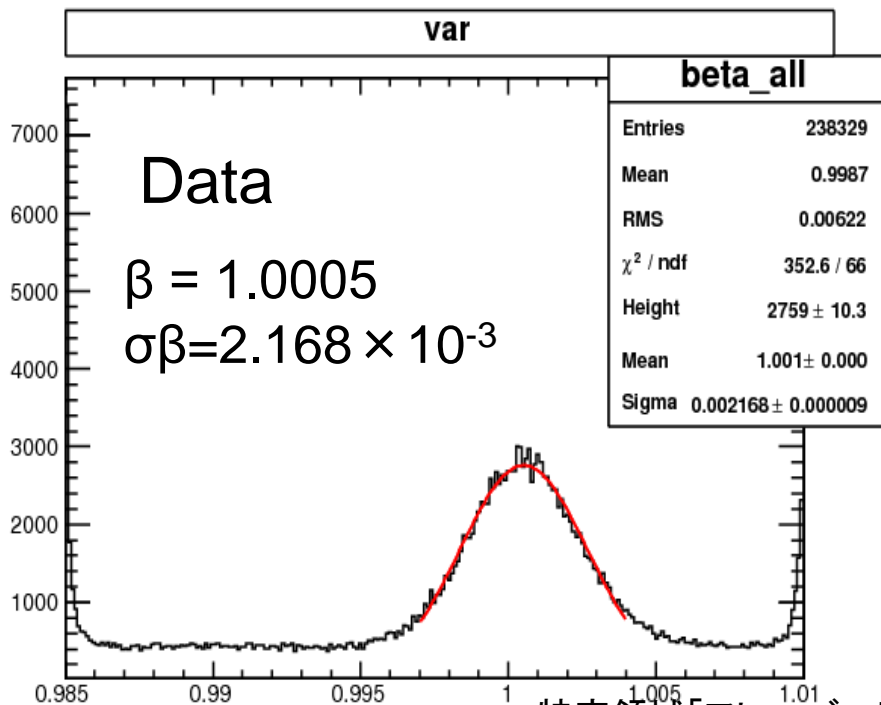
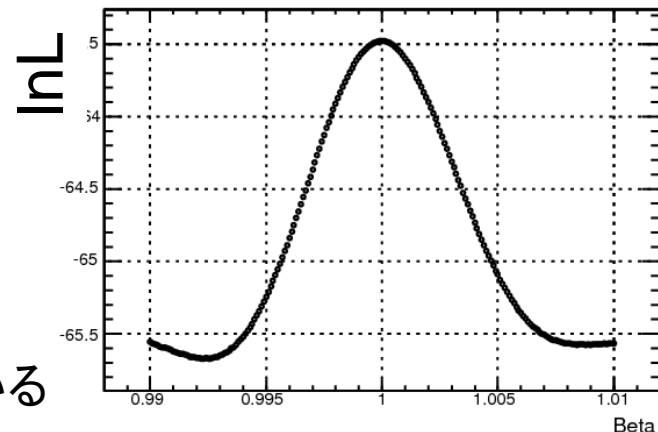


速度 β の評価(1入射粒子あたり)

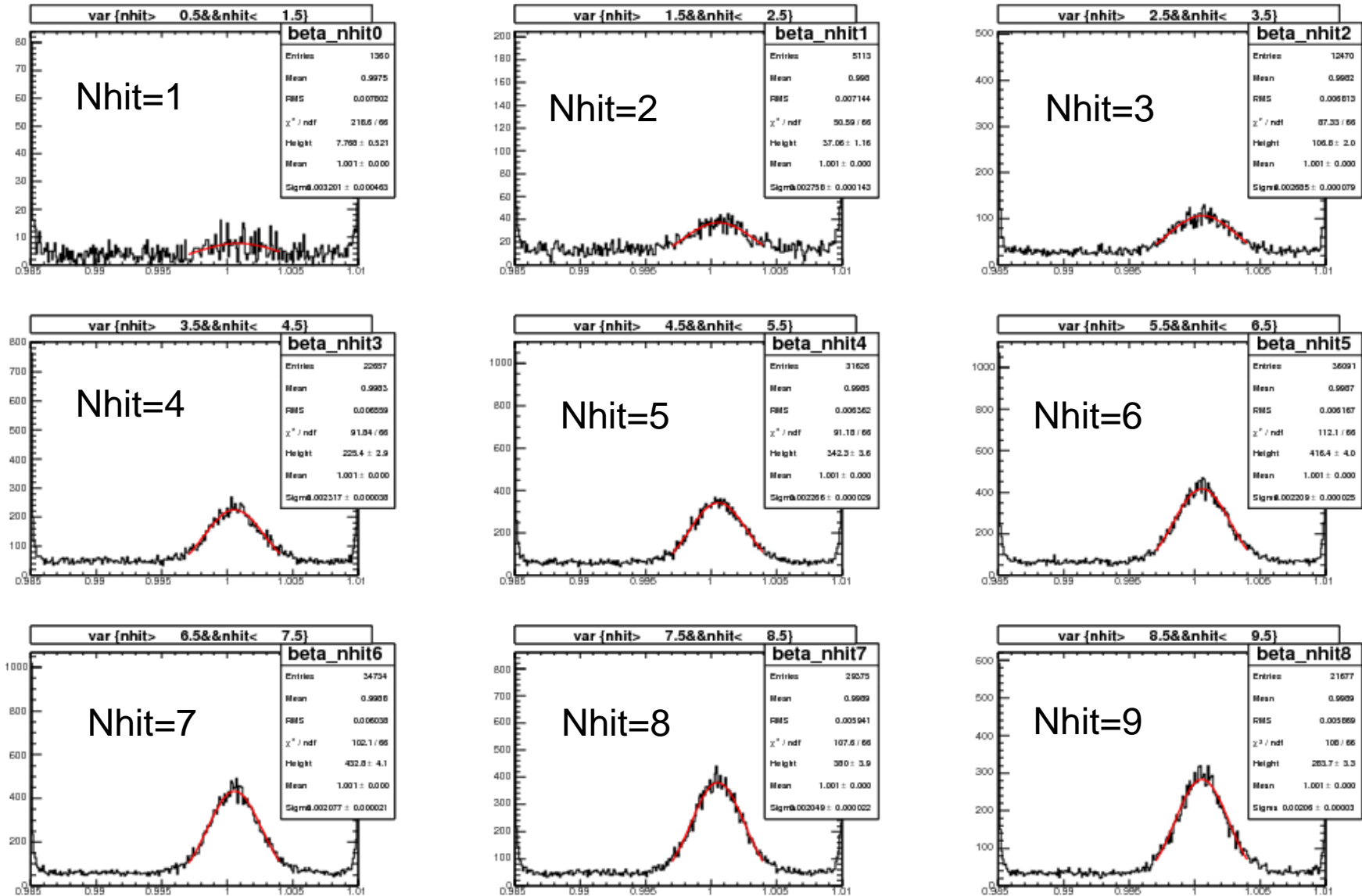
- 速度 β について評価(約24万イベント)
- 1イベント毎にLikelihoodを最大とする β を採用

同じPDFで実データとMC simulationについて評価

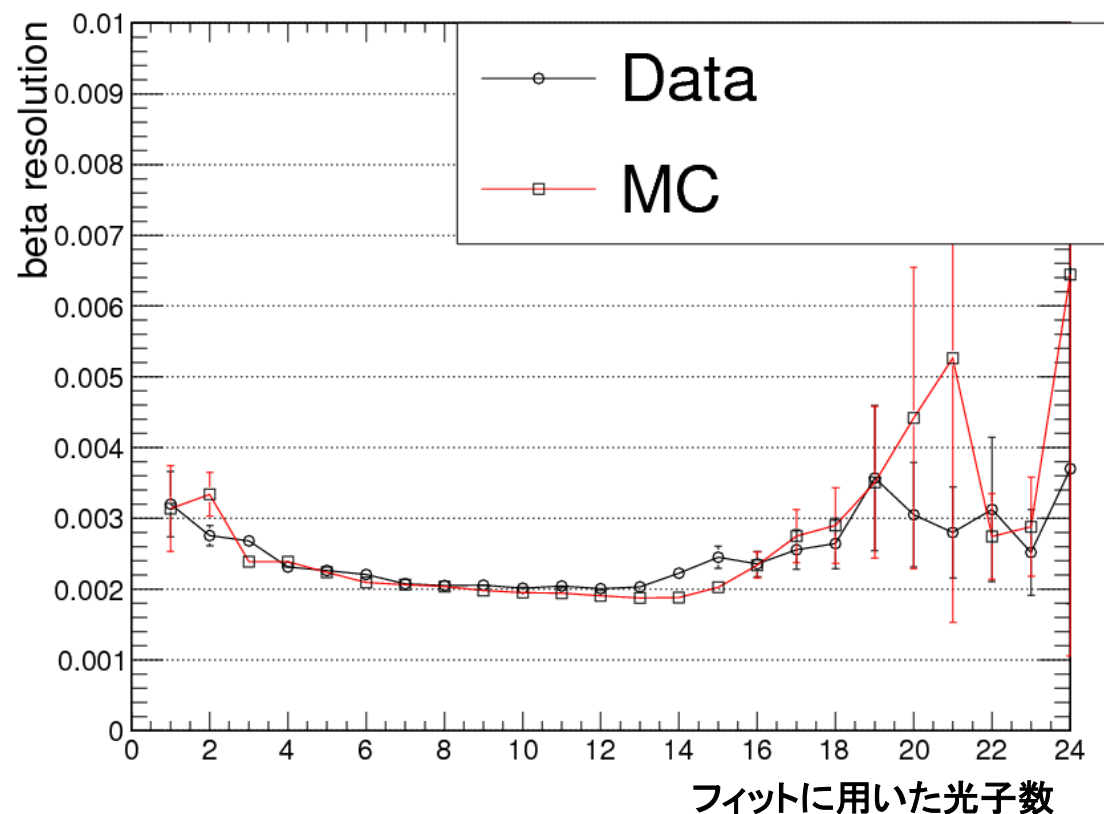
- リングイメージの再構成ができ、MCでよく再現できている
- データが少し1より大きい。 $\sigma\beta$ もMCより3%程度大きい



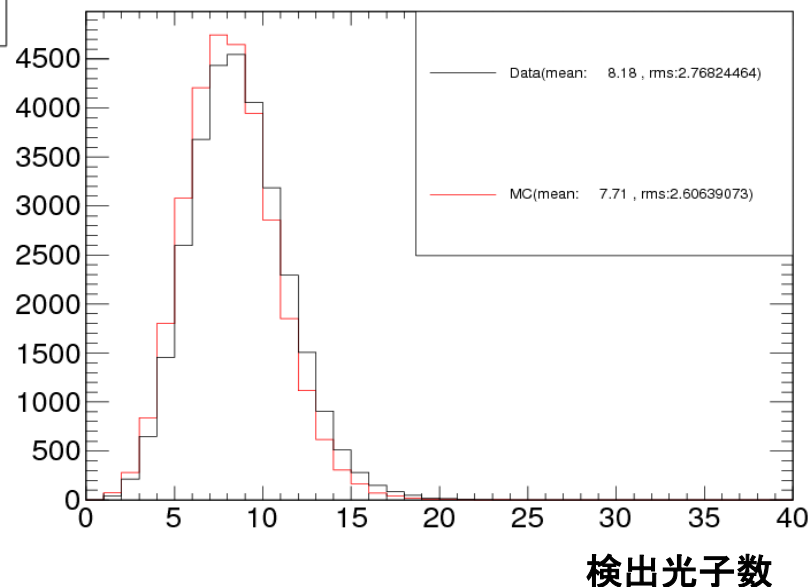
β 分解能の検出光子数依存性



Beta resolution:cos_theta = 0.5



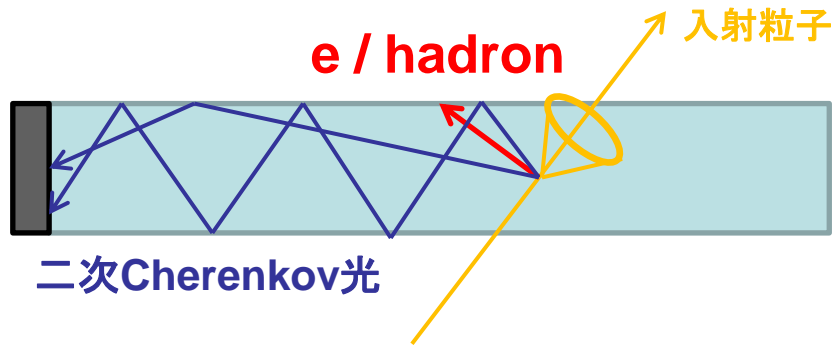
検出光子数分布



□光子数が増加するほどβ分解能はよくなる

□高い光子数のときには悪化していく⇒二次粒子起源のチェレンコフ光

特に頻度の高い4-12検出光子のあたりでβ分解能は良く理解できている



□ δ-ray(電子)やハドロン反応による二次的なCherenkov光

➢ δ-ray&ハドロン反応 によって、検出光子数の高い部分でのβ分解能の悪化

βの中心値/σについての微妙な違い

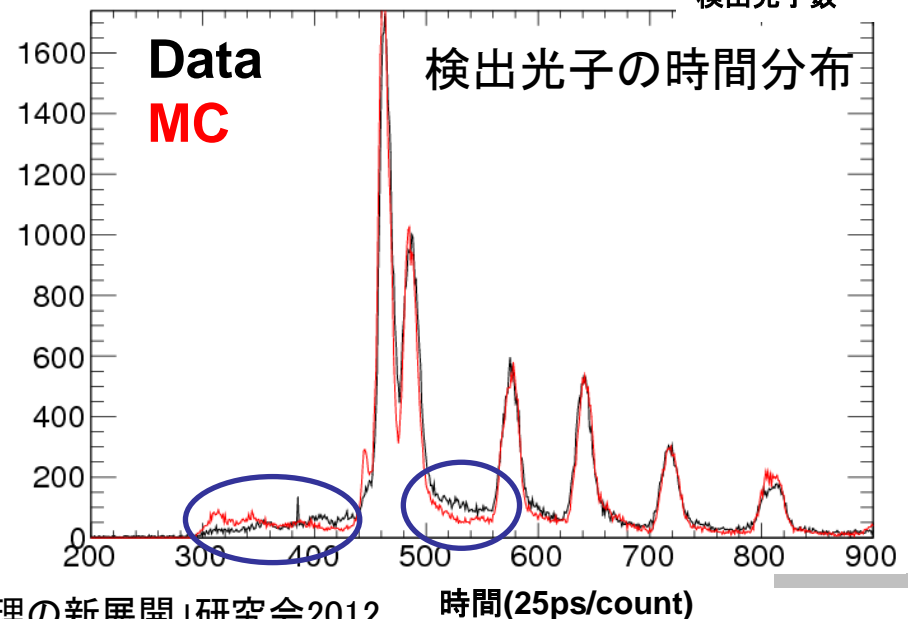
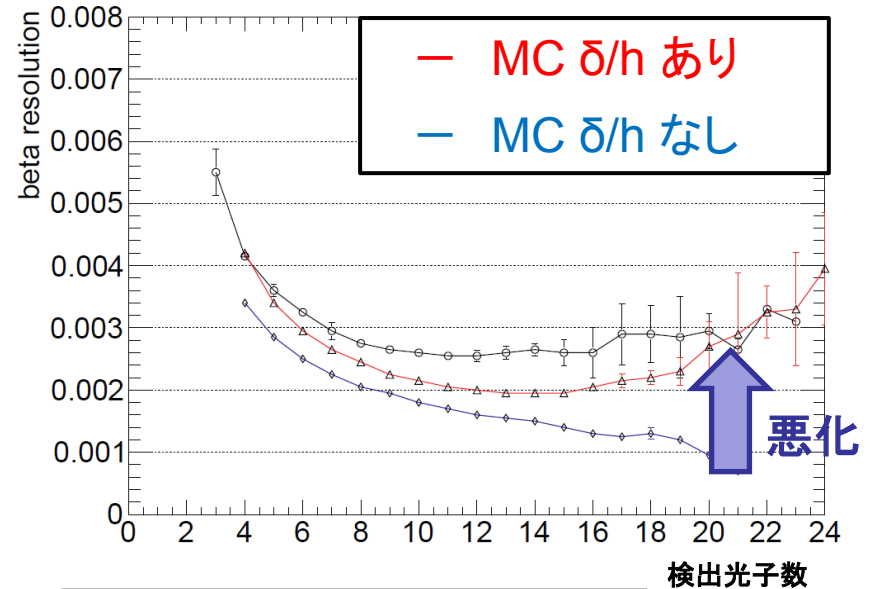
□ 時間分布の不一致

➢ 時間のテール分布

□ その他の要因

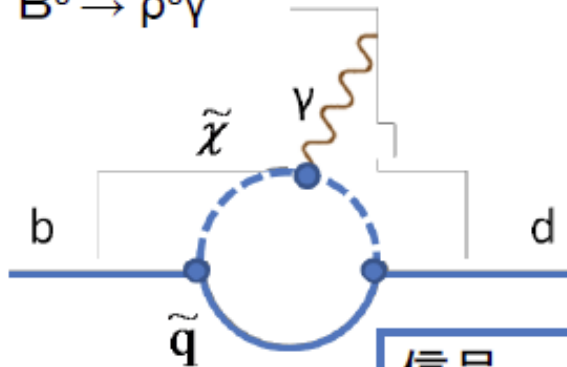
➢ アラインメント?

➢ 屈折率の波長依存性?



- Belle II に搭載する新型粒子識別装置TOPカウンターの開発を行なっている
 - CERNの π ビームを用いて原理検証を行なった。特に今回は、チェレンコフ光子の情報から**イベント毎にリングイメージフィッティング**を行ない、**速度 β 分解能の評価**を行なった
 - β 分解能の評価を行なうためにイベントの選別をし時間原点の精度を評価
 - 粒子の入射位置 $\pm 2\text{mm}$ 、入射角度 $\pm 0.5\text{mrad}$
 - 時間原点を与えるタイミングカウンタの分布から同期したタイミングのものを選別
 - タイミングカウンタの時間分解能 $=30\text{ps}$ と評価
 - 粒子の入射位置・角度についてデータに対してフィッティングしてアラインメントした
 - β 分解能について評価した
 - データの $\sigma_{\beta}=2.168 \times 10^{-3}$ で、MCとは**3%程度の範囲で一致**
- TOPカウンターについて光子情報からリングイメージを再構成し、 β を求める事ができるという事を実証した



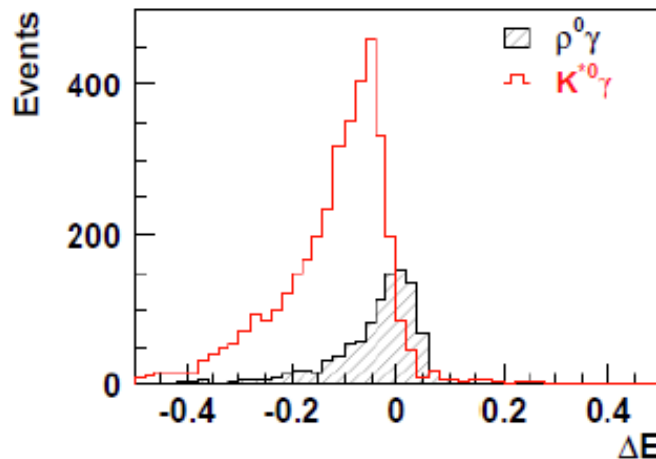
$B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$ 

信号 : $B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$
 背景事象: $B^0 \rightarrow K^* \gamma \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$

K/ π 識別性能 ($B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma$)

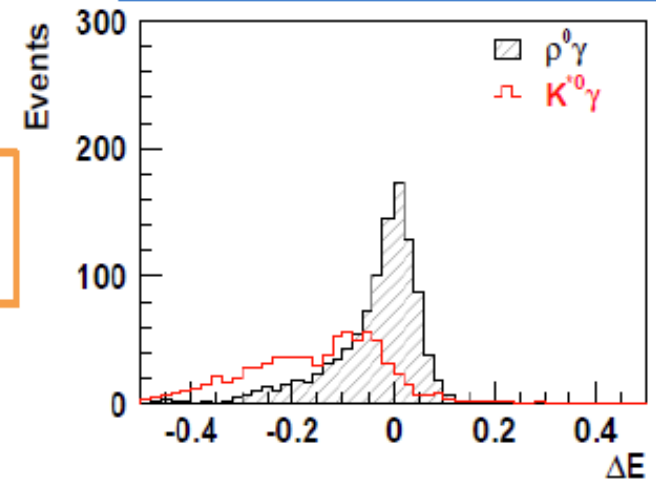
	Belle (ACC+TOF)	TOP カウンター
識別効率	87.5%	98.7%
誤識別率 (Kを π と間違える確率)	10.0%	2.4%

Belle (ACC + TOF)



・S/Nの大幅な向上
 ・ルミノシティ1.8倍相当

Belle II (TOP + RICH)



波長分散効果による時間分解能の悪化

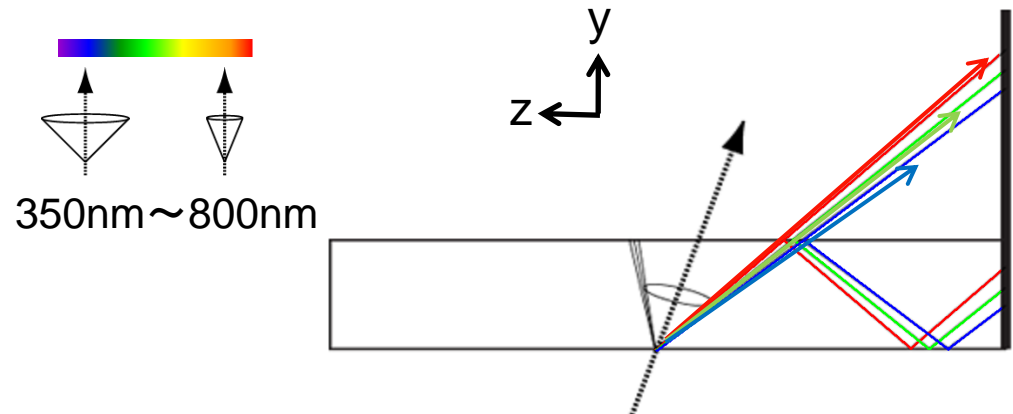
TOPカウンターの時間分解能を制限する要素

波長分散効果：屈折率の波長依存性による効果

□チェレンコフ角の違い

$$\theta_c(\lambda) = \cos^{-1} \left(\frac{1}{n(\lambda)\beta} \right)$$

$$\Delta\theta \sim 10\text{mrad}$$



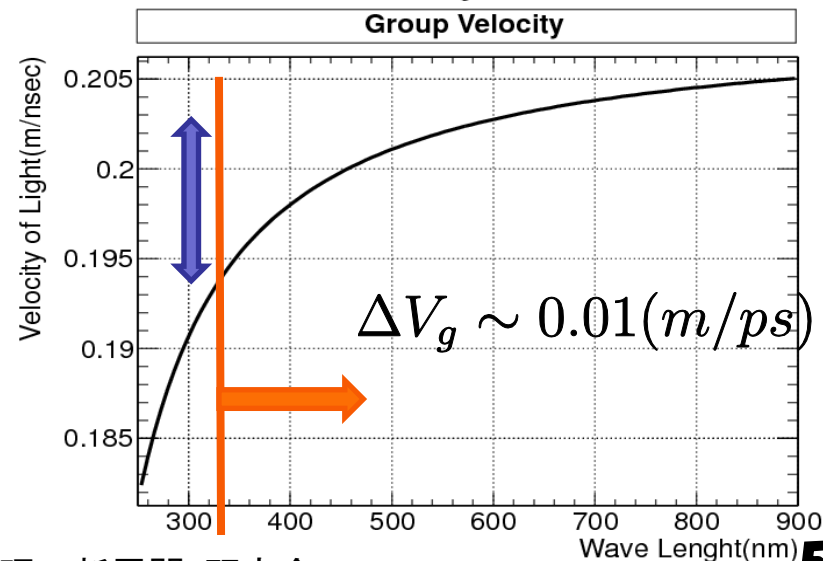
□光伝播時の群速度の違い

$$V_g(\lambda) = \frac{c}{n_g(\lambda)}$$

色(波長)が混ざると

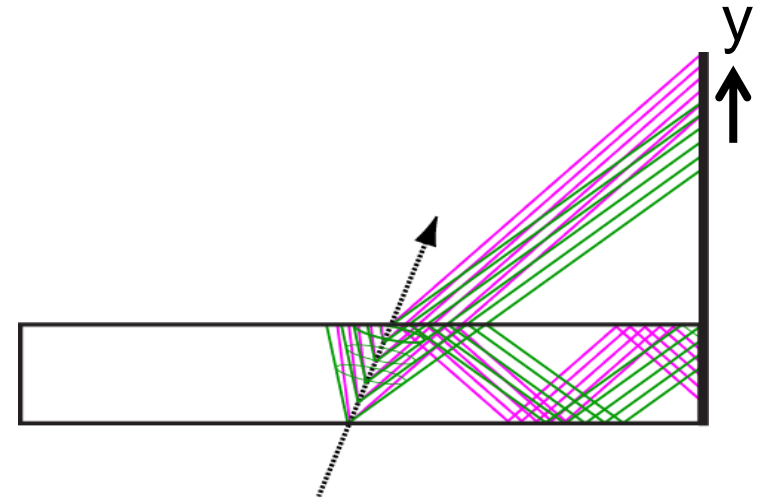
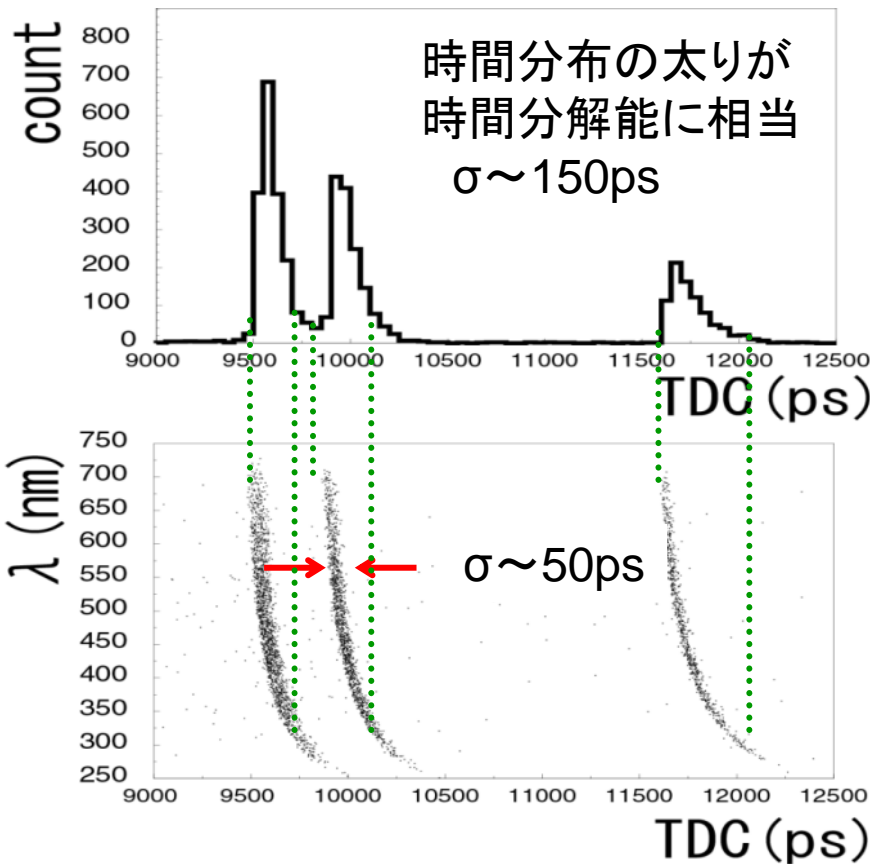
$\Delta t = 53\text{ps/m}$ の時間ふらつき

⇒時間分解能の大きな悪化を招く



波長分散効果を抑えるアイデア:フォーカシング¹⁹

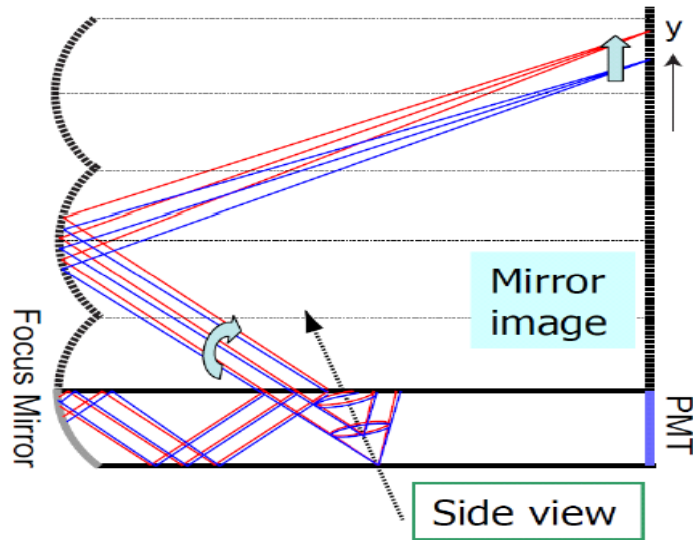
あるPMTでのTOPカウンターで
検出される光子の時間分布



y方向のPMTチャンネルで、
波長を分解すれば時間差は
小さくなる

チェレンコフ光の波長依存性

波長分散効果を抑えるアイデア:フォーカシング²⁰



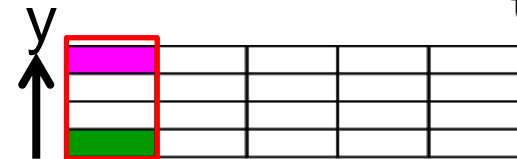
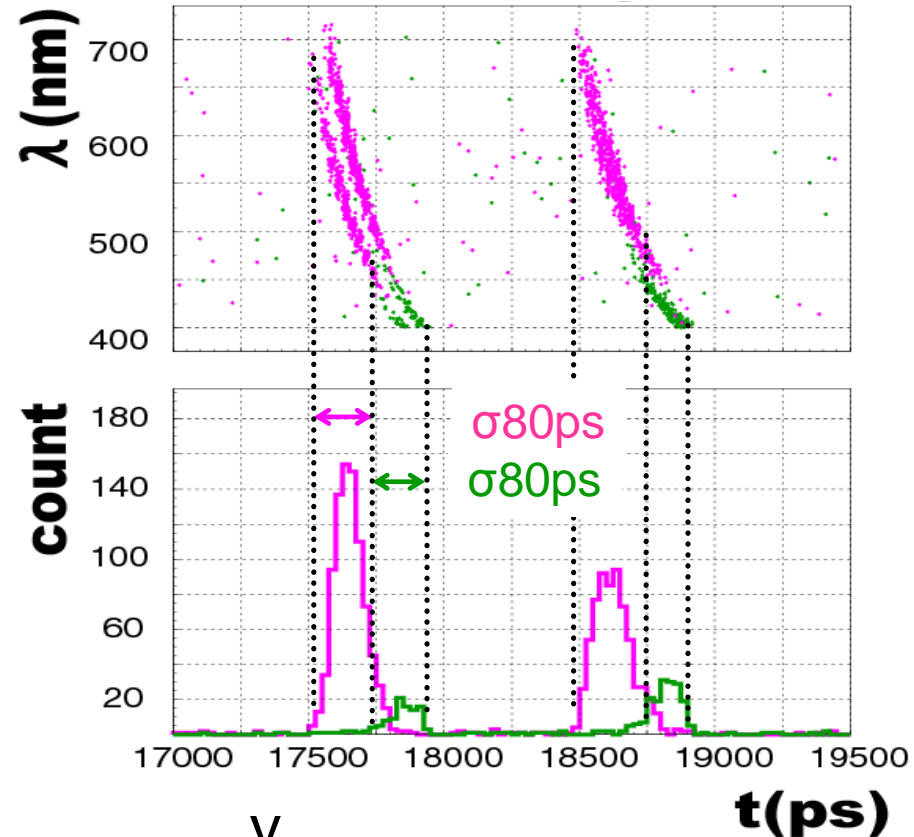
フォーカシングミラー

で波長によるチェレンコフ角の
違いを利用し、y方向に強く
波長分解させる

シミュレーションでは
時間分解能が改善すると予想

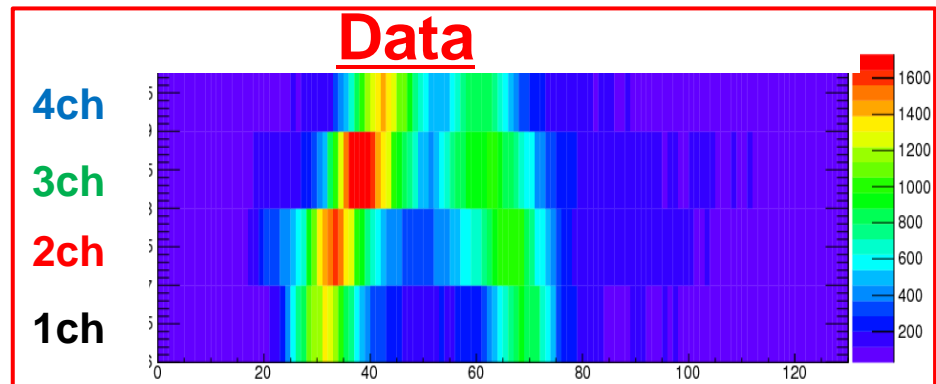
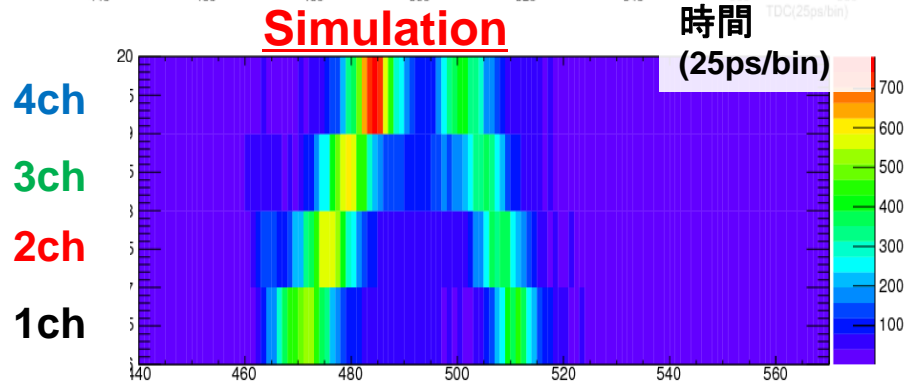
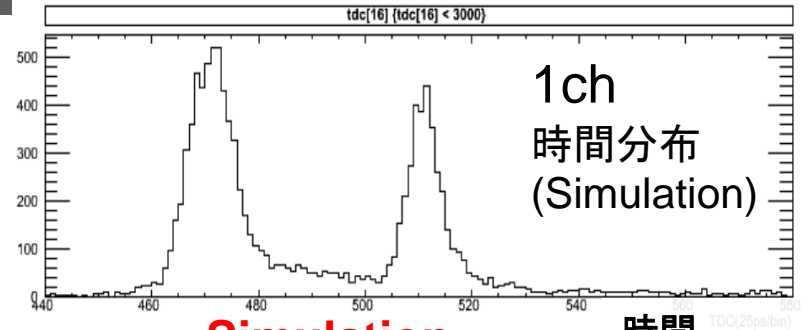
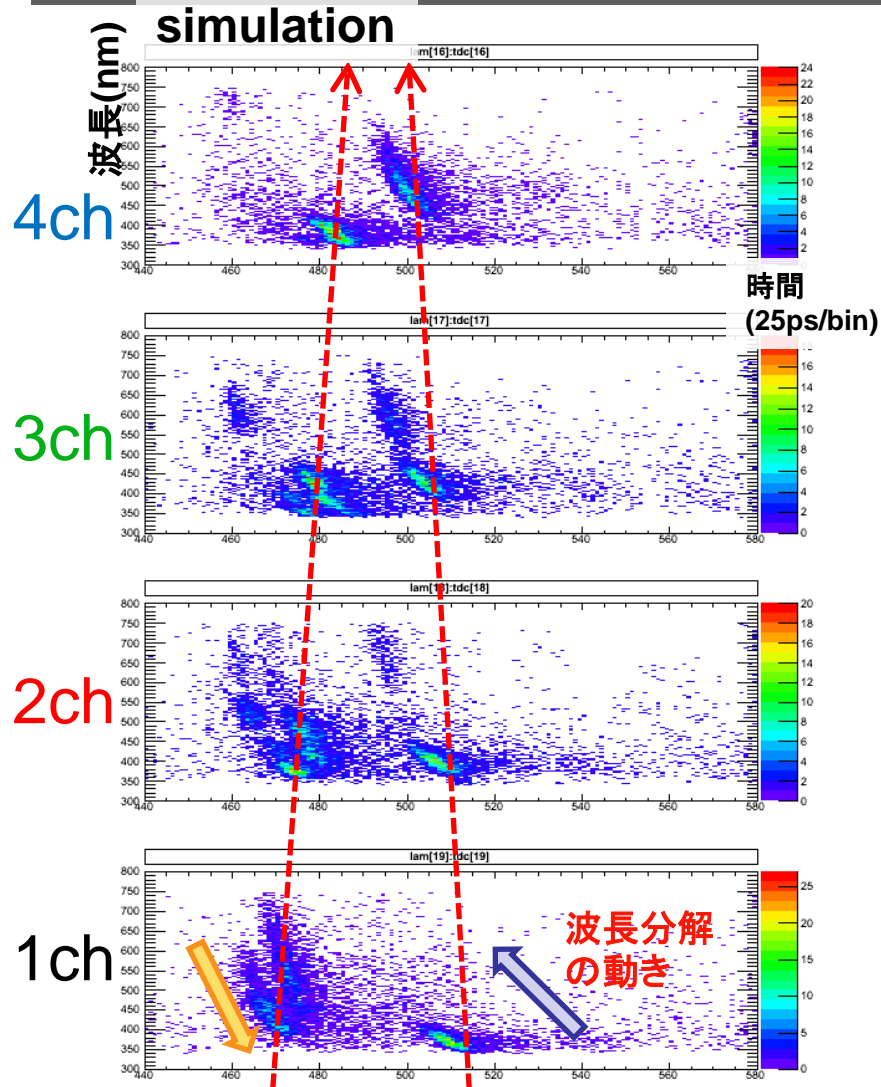
⇒荷電ビームを用いて原理の検証を行なう

PMTのチャンネルでy方向を検出



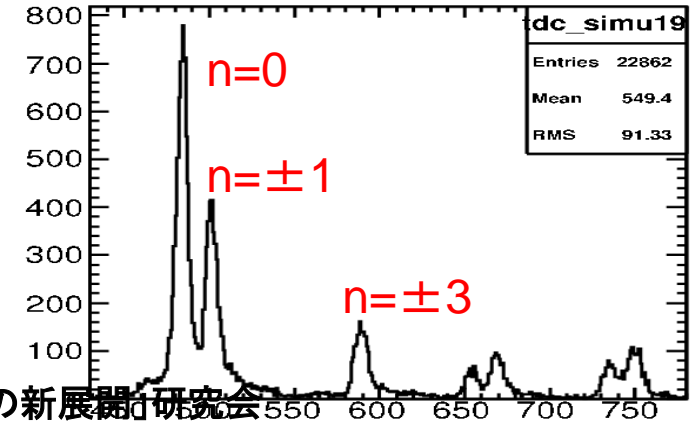
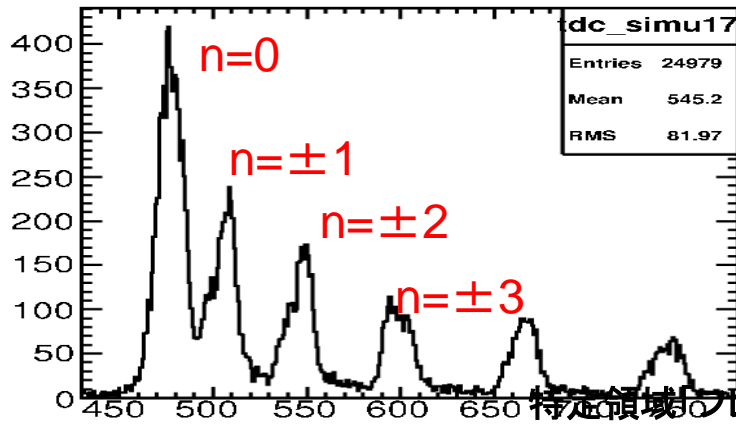
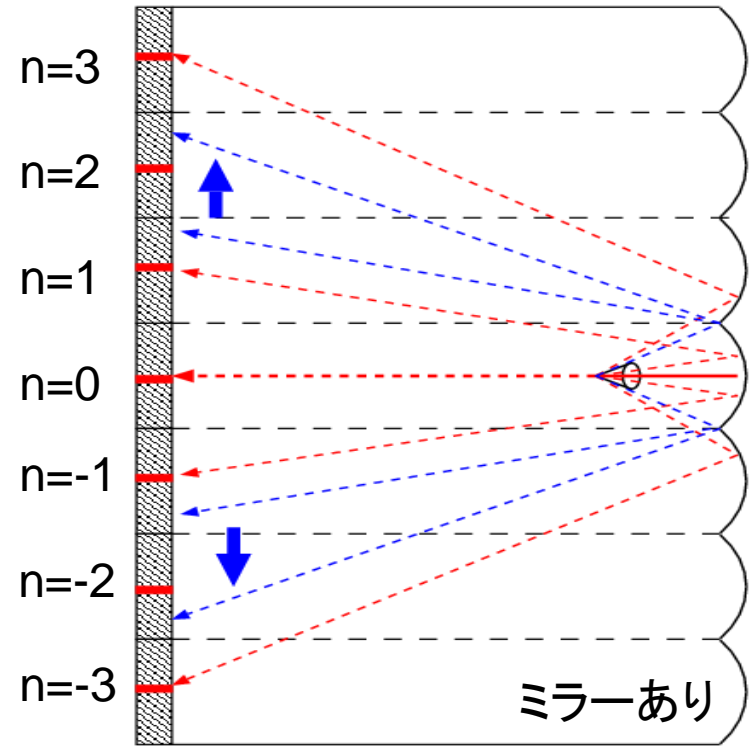
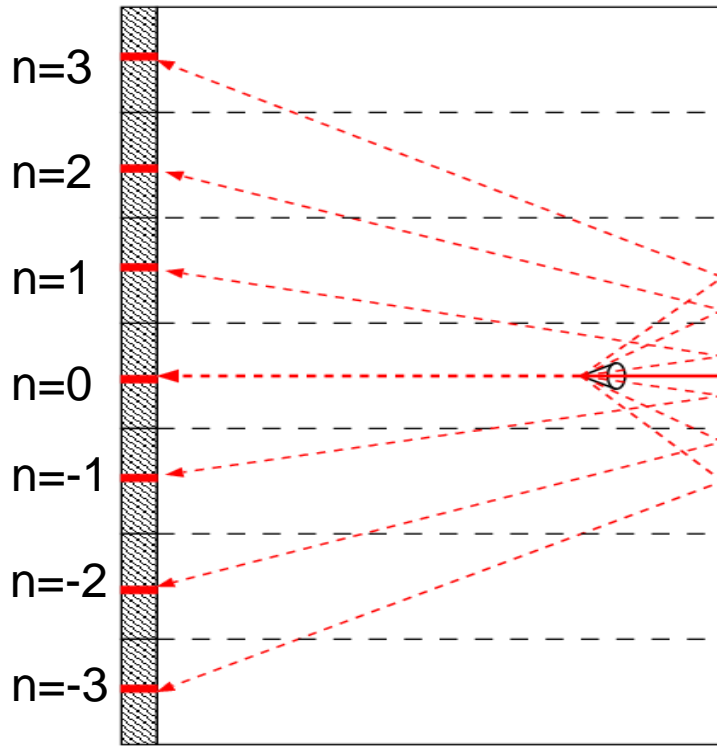
MCP-PMT

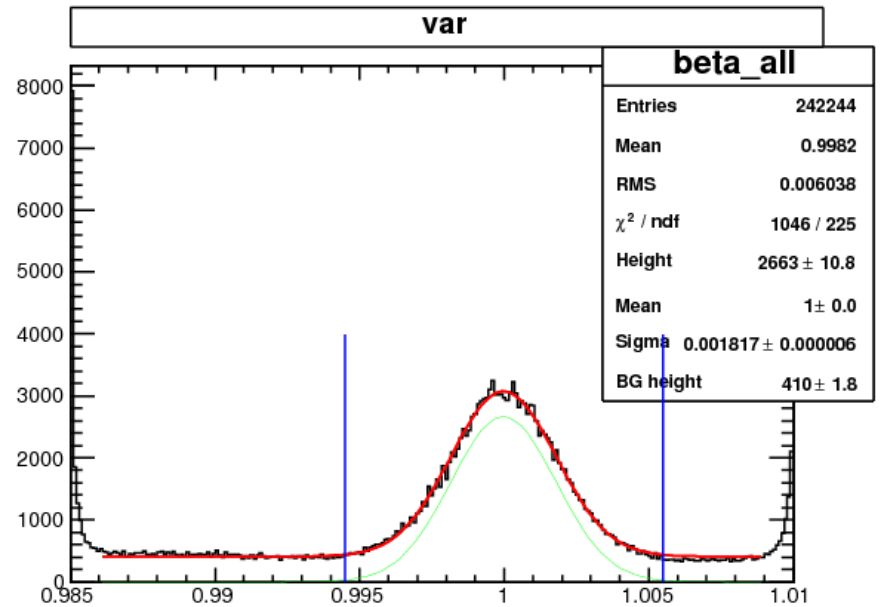
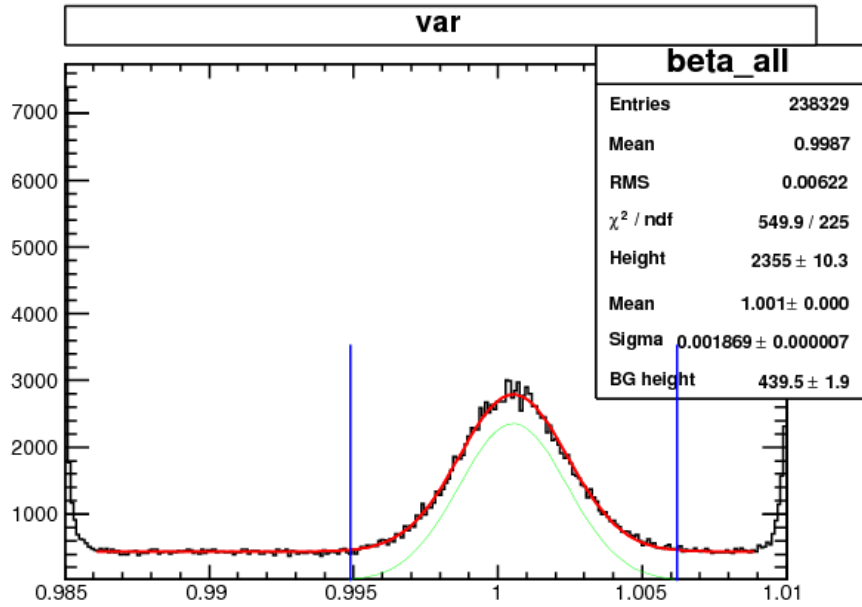
結果：フォーカシングによる色分解

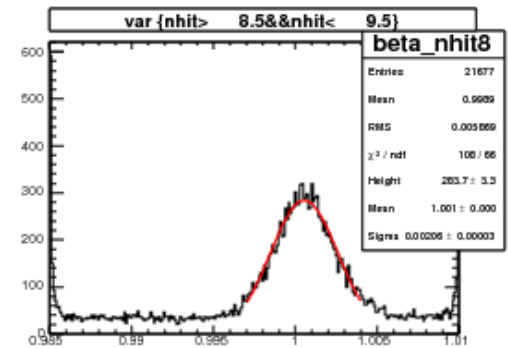
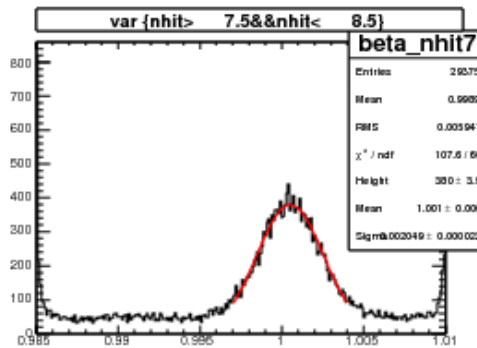
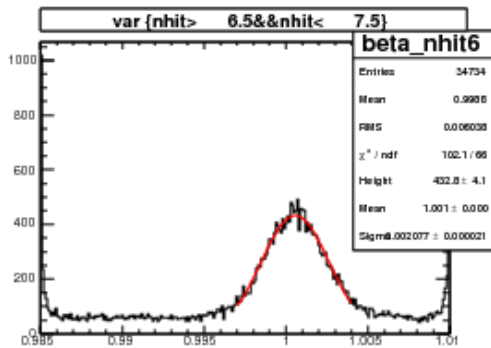
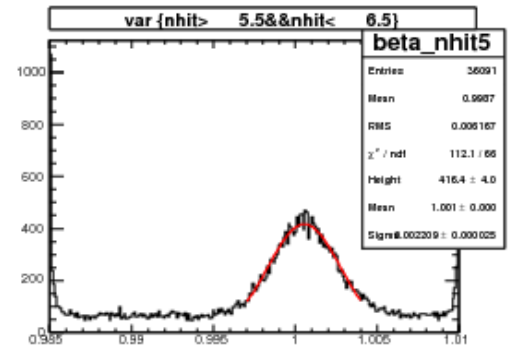
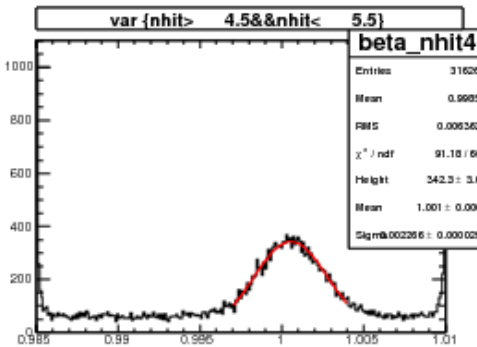
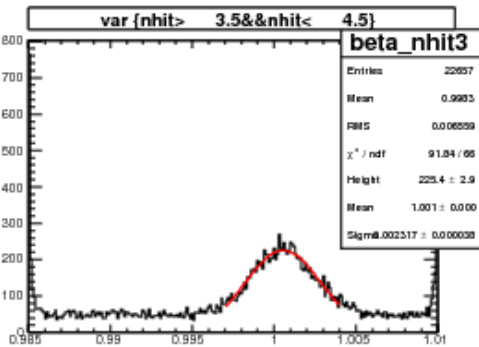
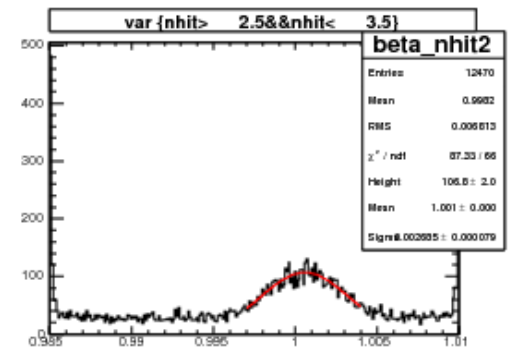
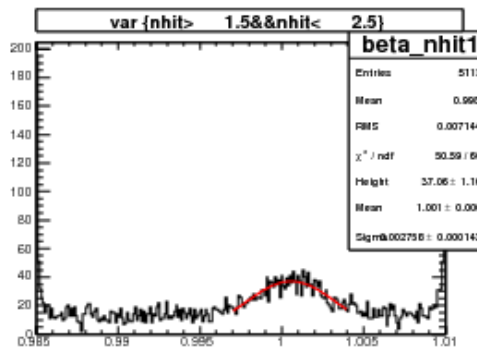
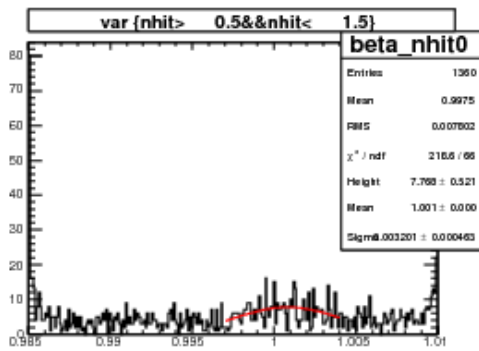


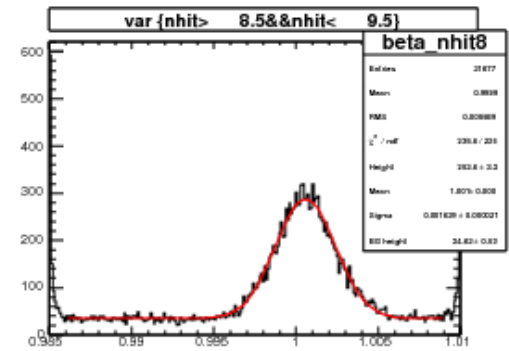
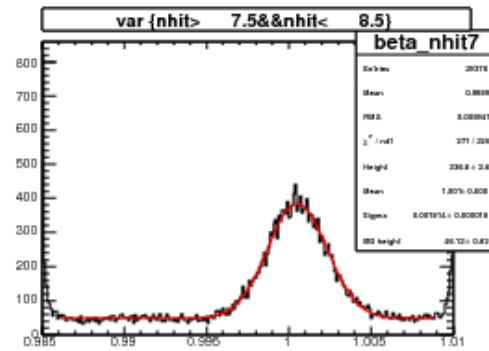
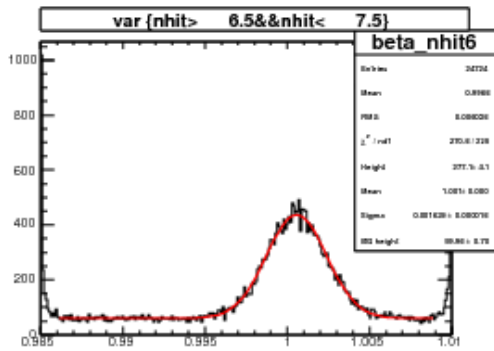
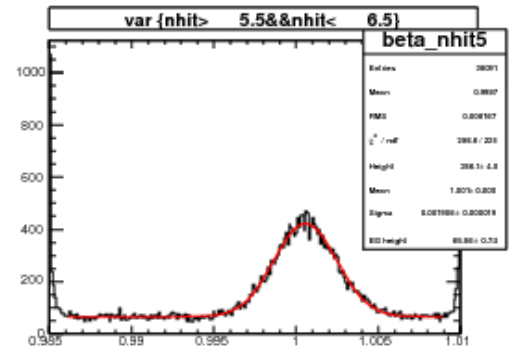
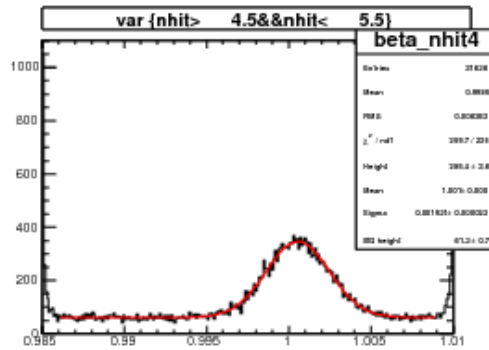
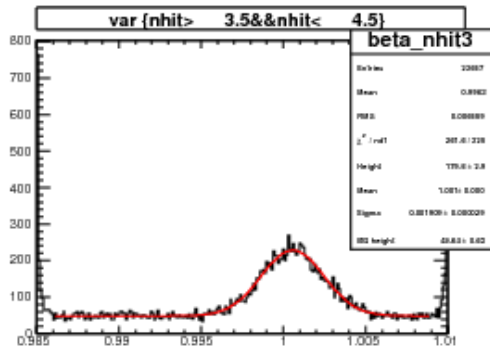
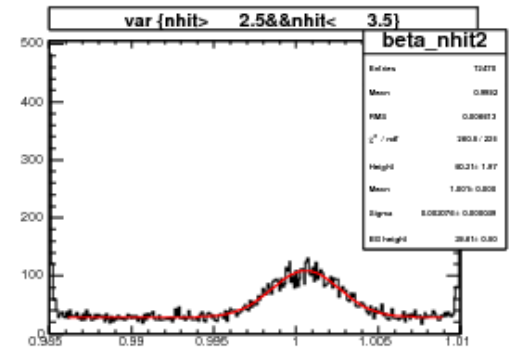
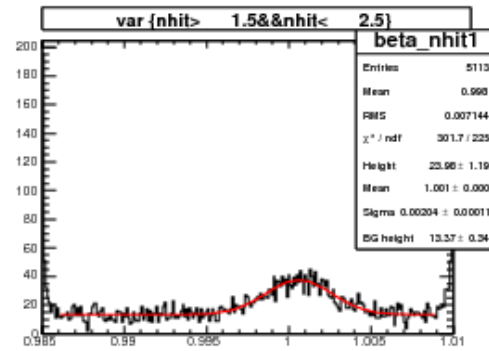
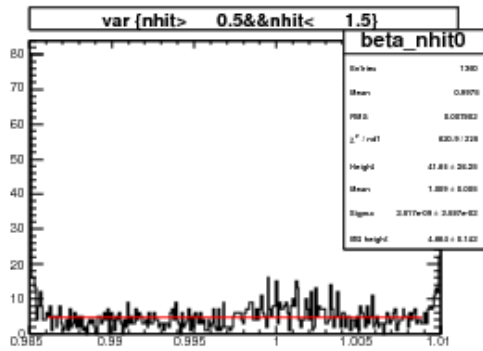
ピークの時間移動を確認 ⇒ フォーカシングによる色分解を確認

反射経路









BG height/gauss height

