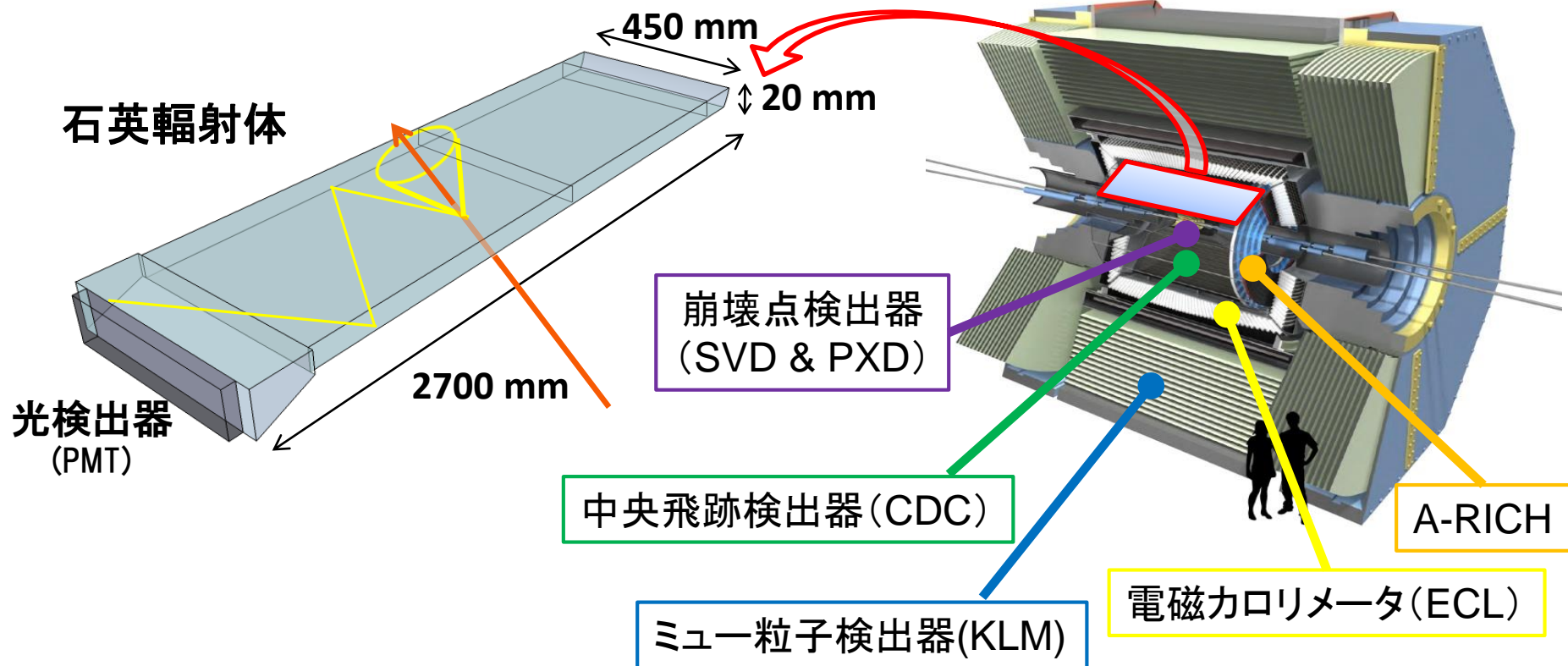


Belle II実験TOPカウンター 宇宙線データを用いた光子伝搬の 検証手法

名古屋大学 N研
都築 識次

TOPカウンター

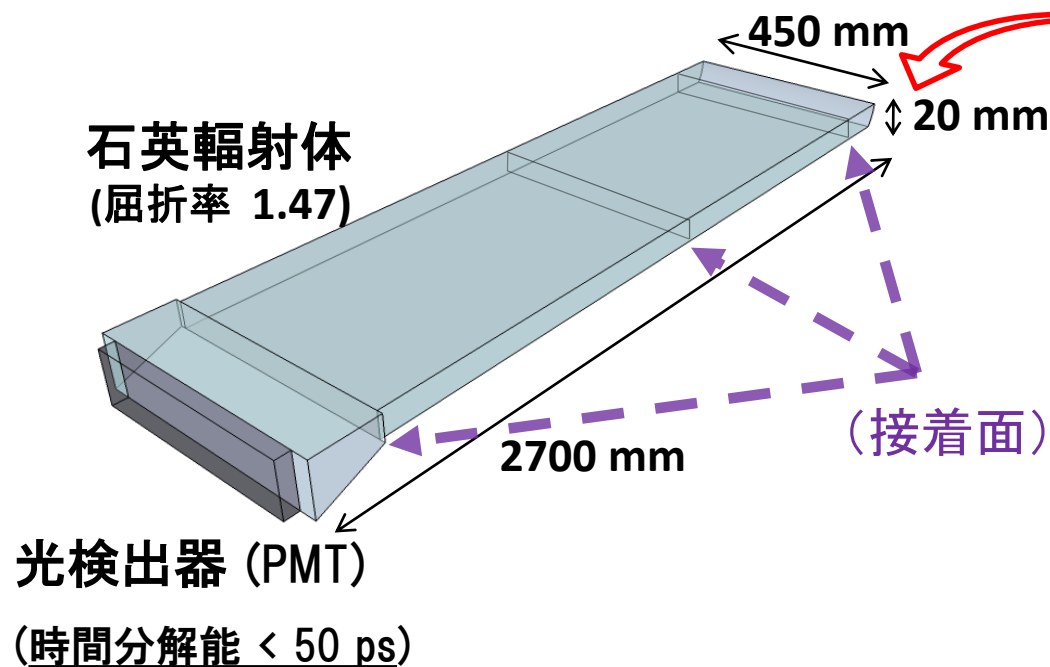


TOPカウンター

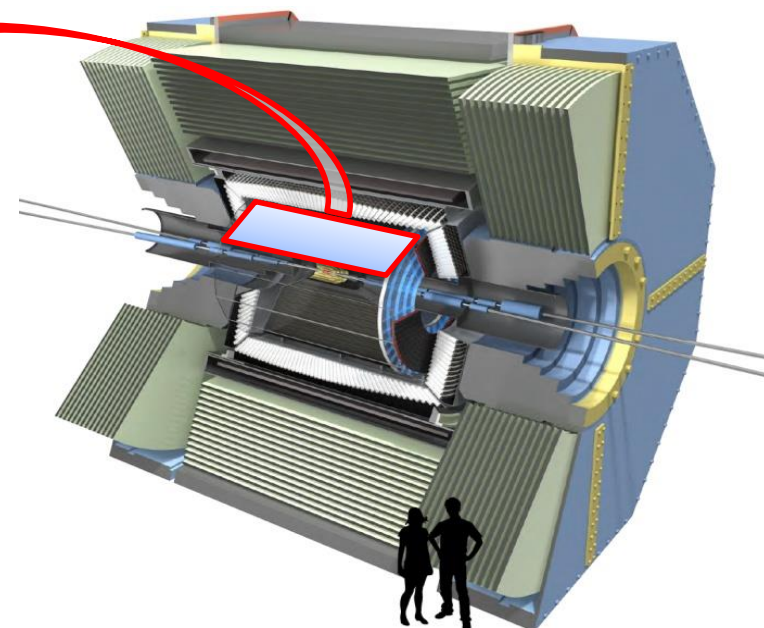
チェレンコフ角度に感度を持つ、粒子識別装置

(B中間子の稀崩壊など、荷電K、 π 中間子を見分けたい時に活躍)

TOPカウンター



Belle II 検出器



石英の製作精度

表面粗さ	~5 Å
面平行度	< 4 秒角
内部透過率	> 99.2 %/m
内部表面反射率	> 99.90 %

- Belle II 検出器インストール後、解析プログラムの準備と動作テストが進行中

本研究：石英輻射体の状態検証

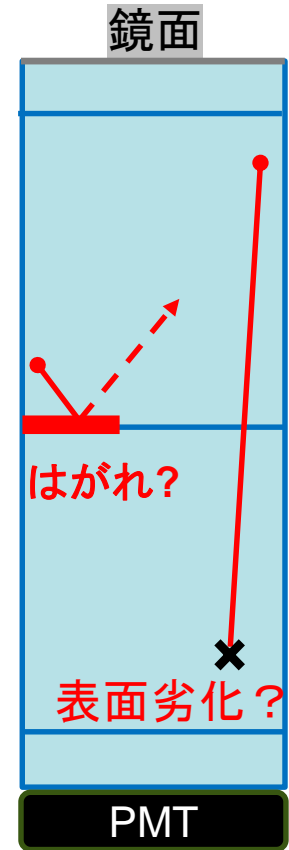
インストールが完了したTOPカウンター(16台)に問題がないことを確かめる

• 石英伝搬中の光子損失

- ✓ 接着面の剥がれ
→ 光子の伝搬を阻害
- ✓ 石英表面が劣化
→ 伝搬角度を保存せず、散乱

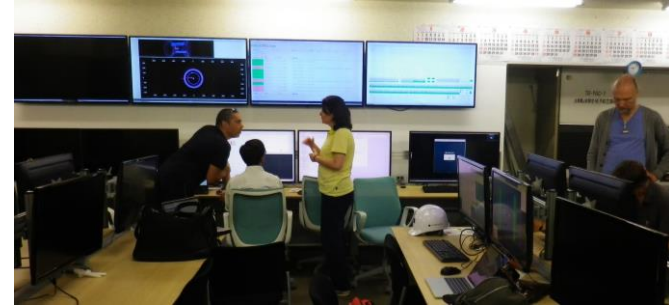
以下が本当でないか、データで確認する

- インストール作業中のダメージ
- 不純物(水蒸気など)による劣化

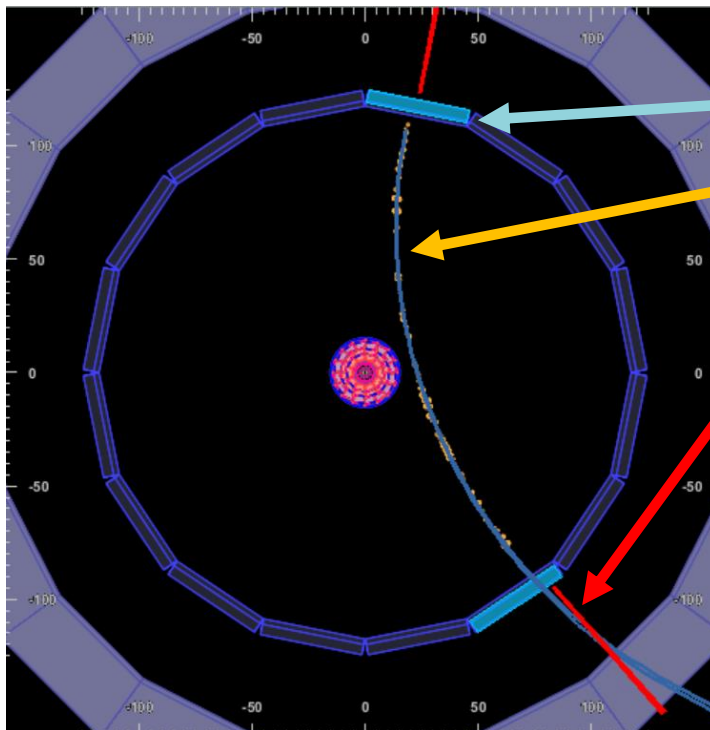


インストールが完了後、一年以上経過した現在の状態を調べる

統合宇宙線テスト



Belle II 検出器にインストール済みの装置を すべて 使って
宇宙線ミュオンのデータを取得し、装置の較正を行う

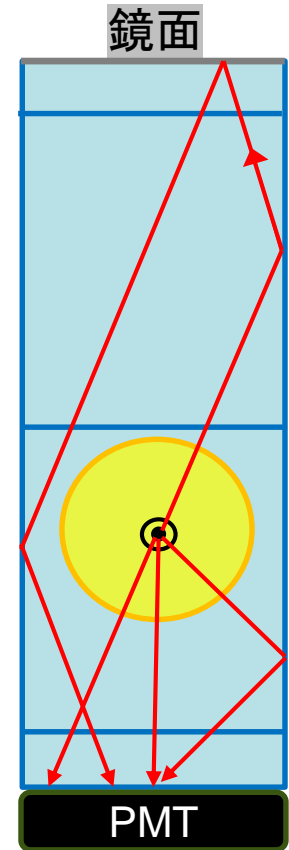


- TOPカウンター
- CDC (中央飛跡検出器)
- ECL (電磁カロリメータ)
- ソレノイド磁石 (1.5 T)
- KLM (μ 識別)

石英輻射体でのチェレンコフ光の
発生を計算できる

宇宙線ミューオンの信号

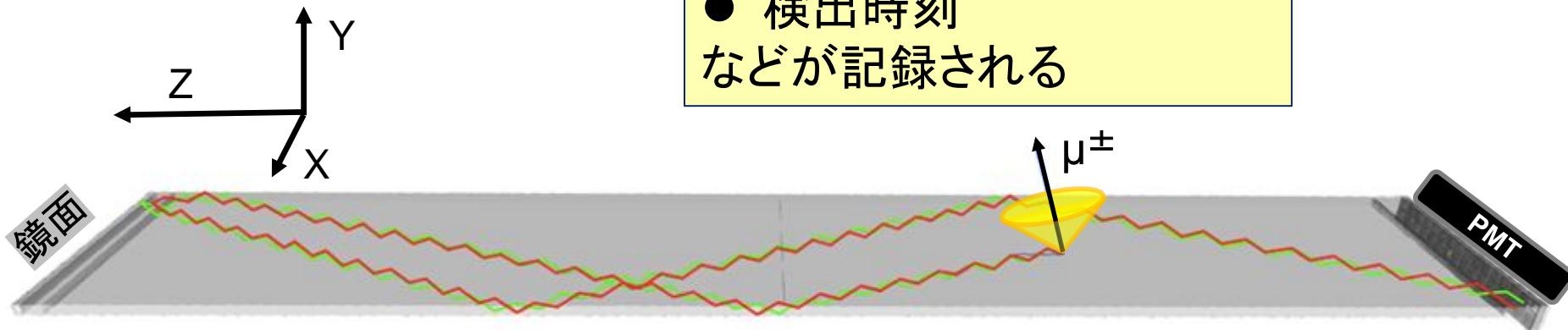
1. 宇宙線(荷電粒子)が石英に入射
2. チェレンコフ角度に光子を放射
(~200 光子) 主に全反射角以上の光子が伝搬
3. 光子は角度を保ったまま反射を繰り返し、石英内部を伝搬
4. 片端にあるPMTで検出 (検出効率~30%)
(~20 光子)



PMTの読み出し回路では、

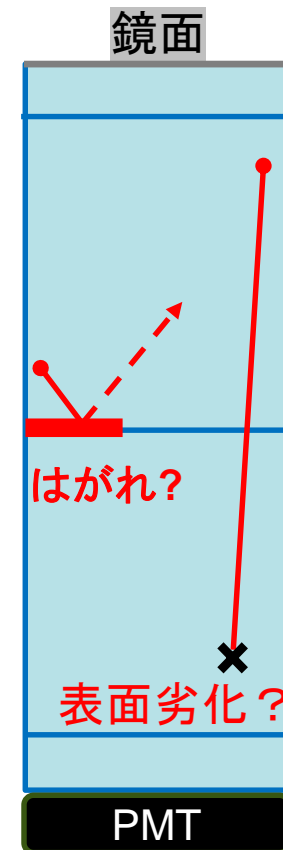
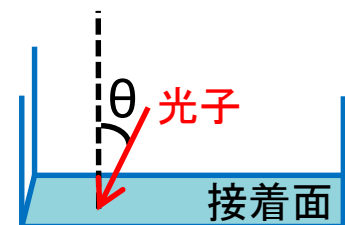
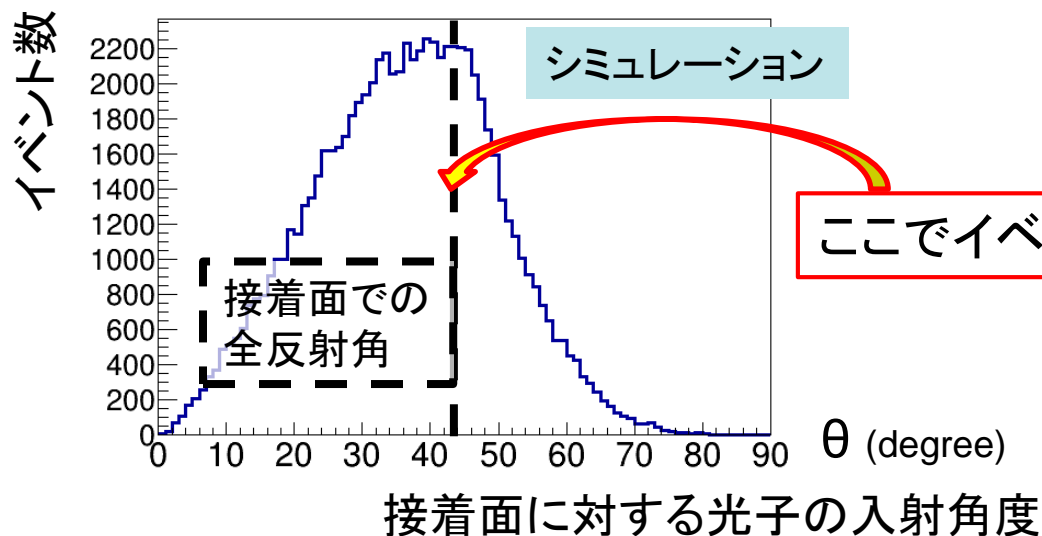
- 光子が検出された位置
- 検出時刻

などが記録される



動作検証の戦略

- ✓ 接着面のはがれ があると、光子がそこで反射
特に、面に対してある角度で **全反射**



- ✓ 石英表面の劣化 があると、反射回数が多い光子ほどロスする

チェレンコフ光が円錐上のどの方向に放出されたか推定する

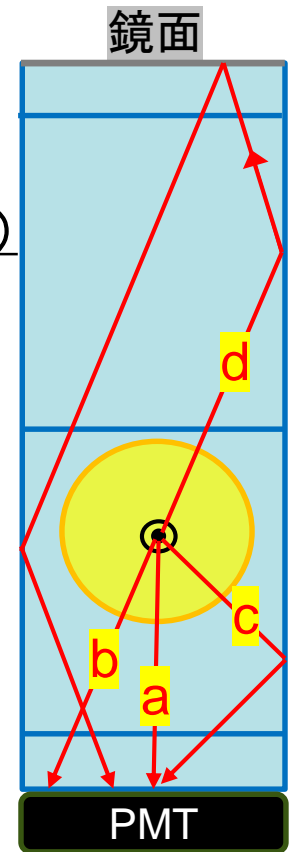
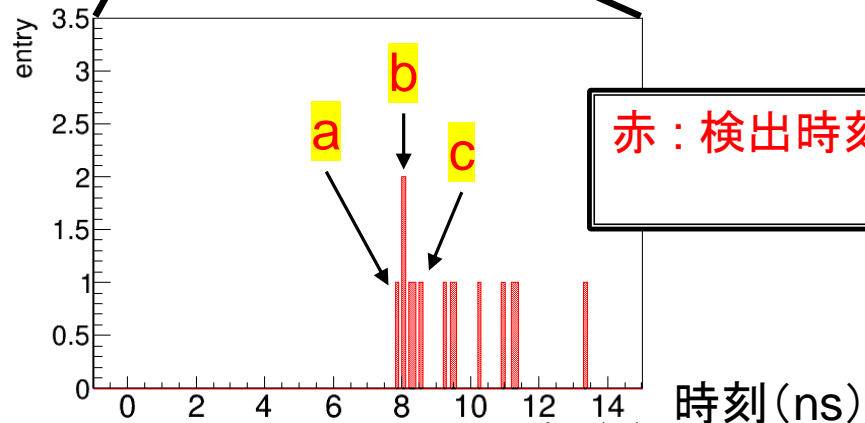
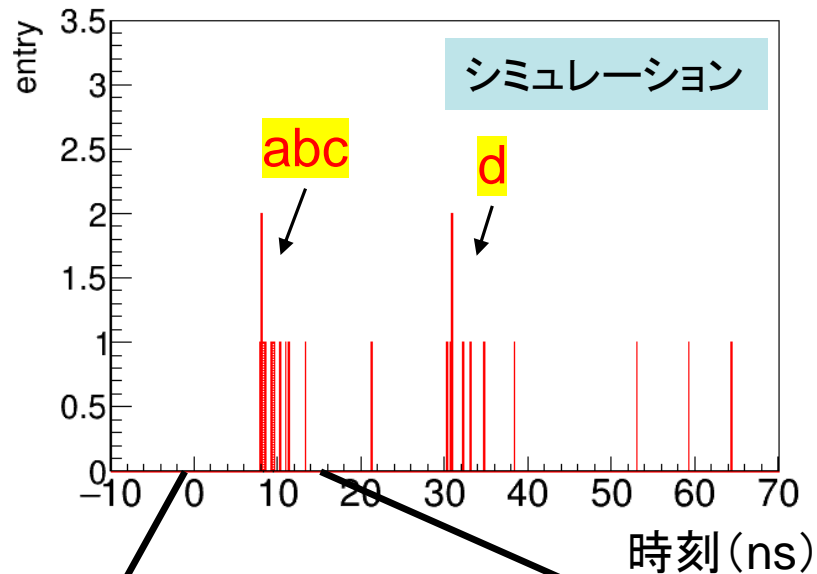
伝搬経路の推定

宇宙線の入射位置と
PMTでの検出位置から
候補は絞られる

さらに、
PMTでの検出時刻を
使ってもっともらしい
経路と角度を推定する

鏡面で反射した光子は
検出時間のばらつきが
大きいので無視

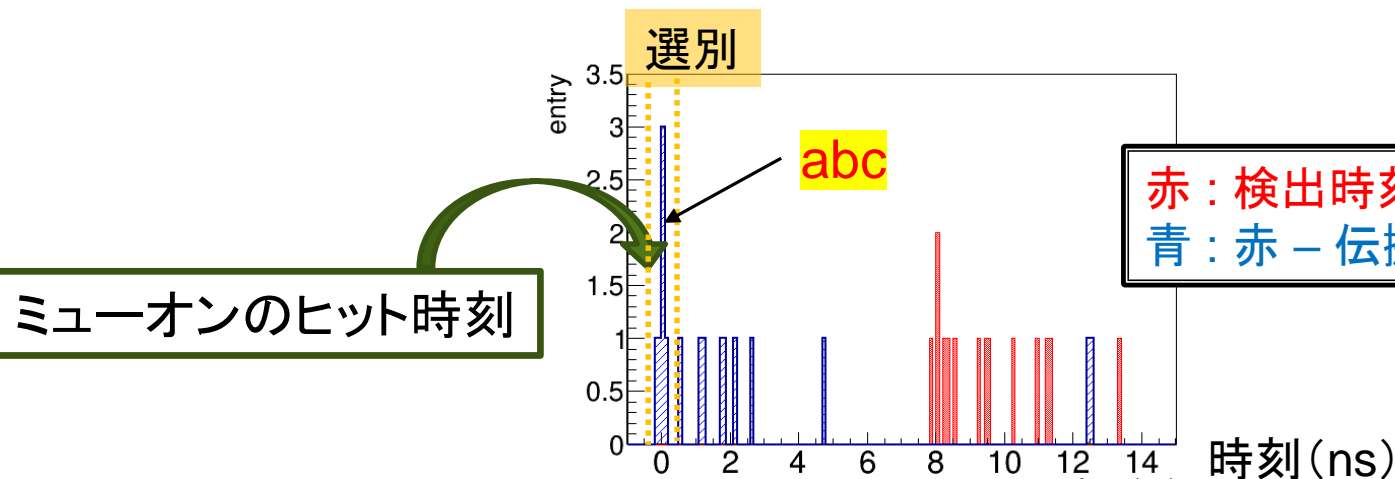
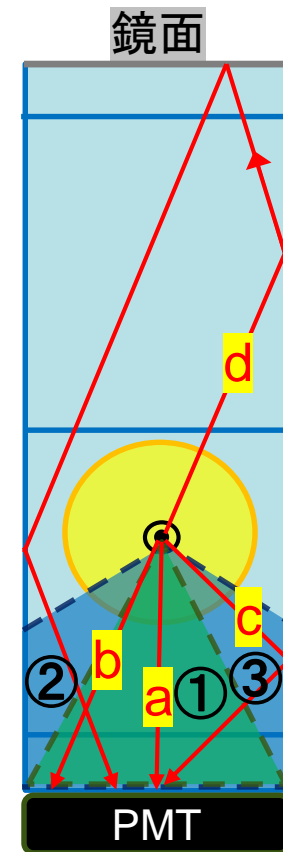
宇宙線1イベントでの検出時刻分布(一例)



伝搬経路の推定

- 光子が右図①~③の方向に放出されたと仮定して、光子の検出位置までの伝搬時間を計算
- (検出時刻 - 伝搬時間) = ミューオンのヒット時刻
となるものを正しい経路に選ぶ

次に、選別した光子の経路と角度の情報を用いて、石英輻射体の状態を検証する

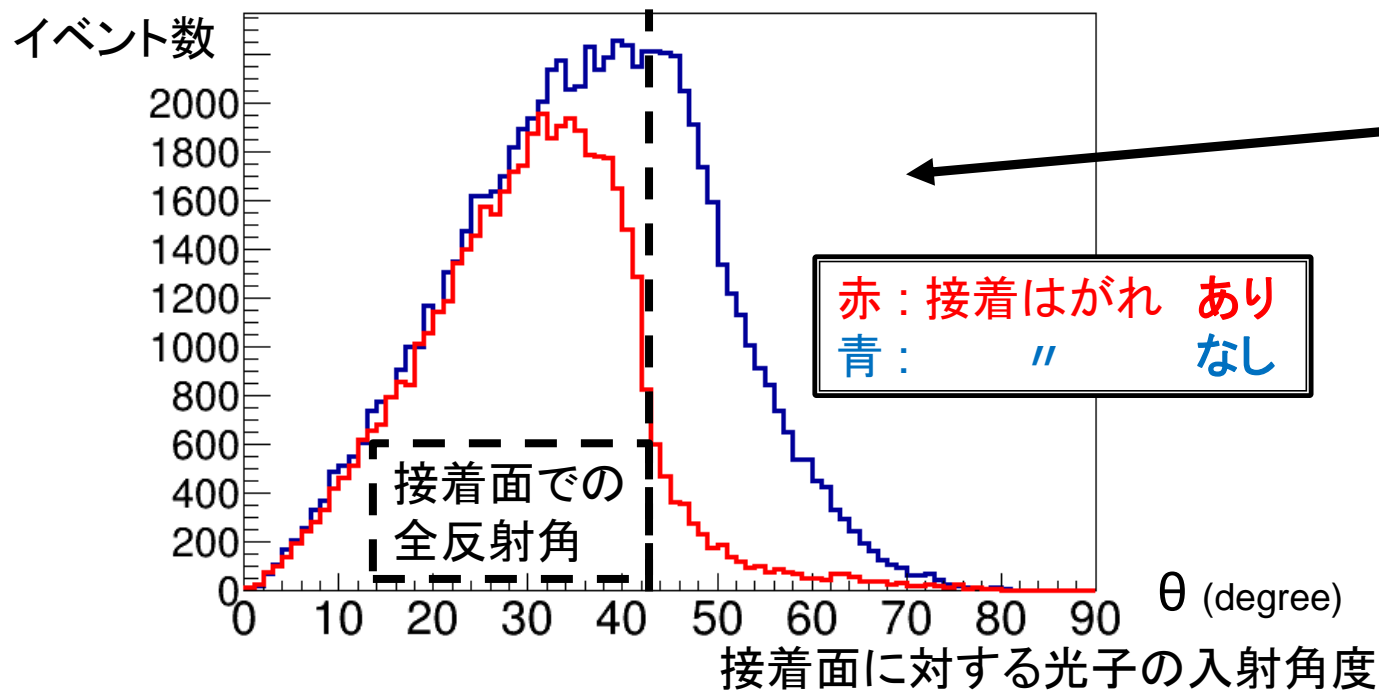


石英接着面の検証

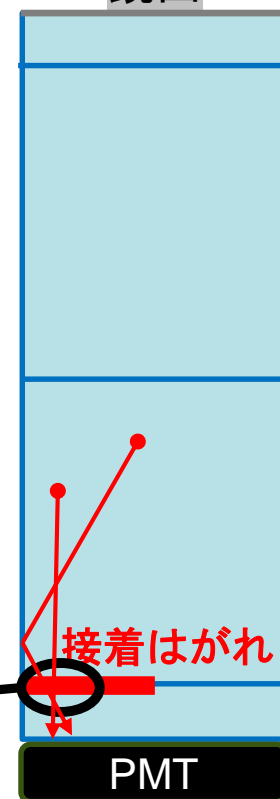
シミュレーション
(~100万 宇宙線イベント)

伝搬経路から接着面のうち、ある場所を通過する光子を選び出し、その角度分布から境界で全反射しているかを判定する

全反射角で明確な変化



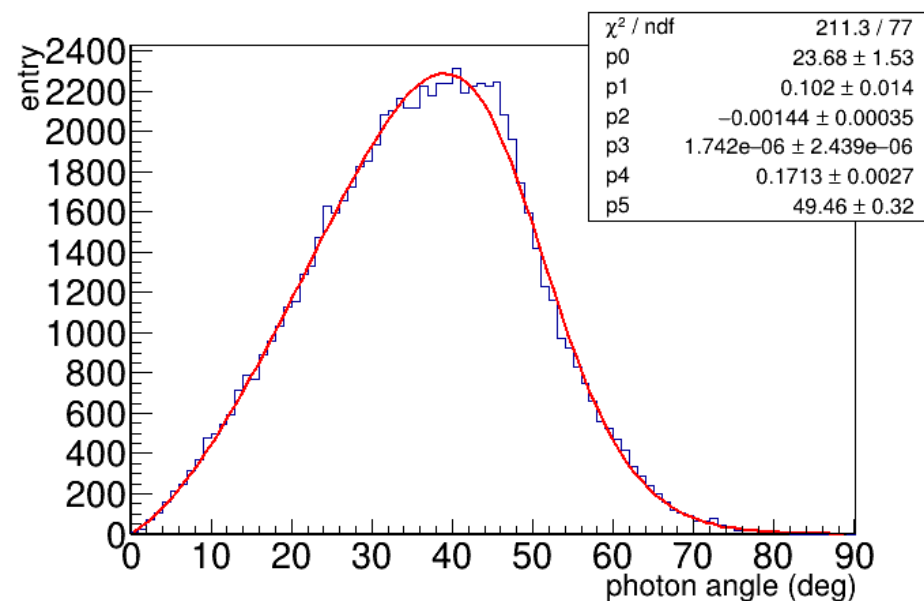
鏡面



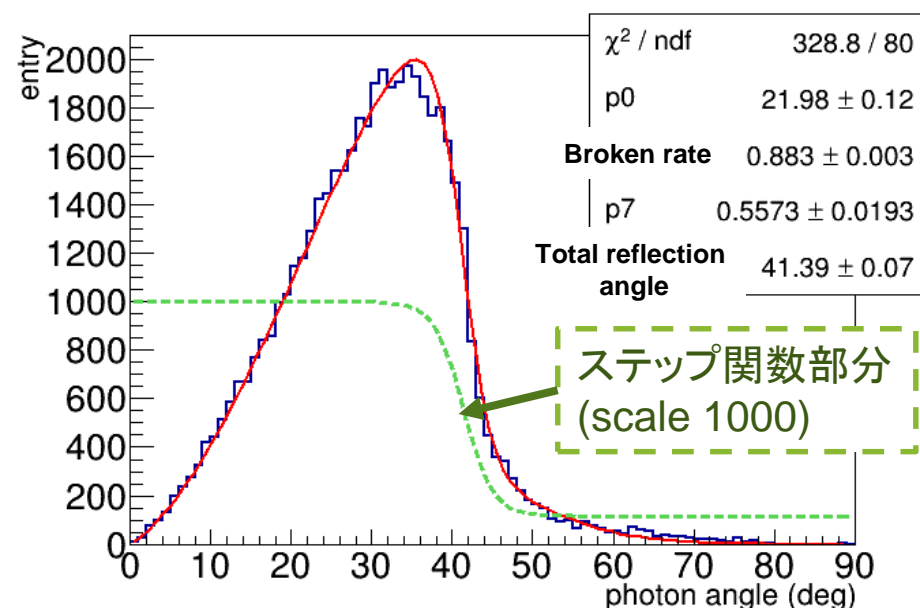
関数フィットによる評価

1. 適当な関数(f1)で「健全な」データの分布をフィットする
2. [(高さのみスケールしたf1) × (ステップ関数)]の関数で調べたい分布をフィットする。
3. フィット結果で剥がれの割合をみる

剥がれ なし (健全なデータ)



剥がれ あり (調べるデータ)



関数フィットによる評価

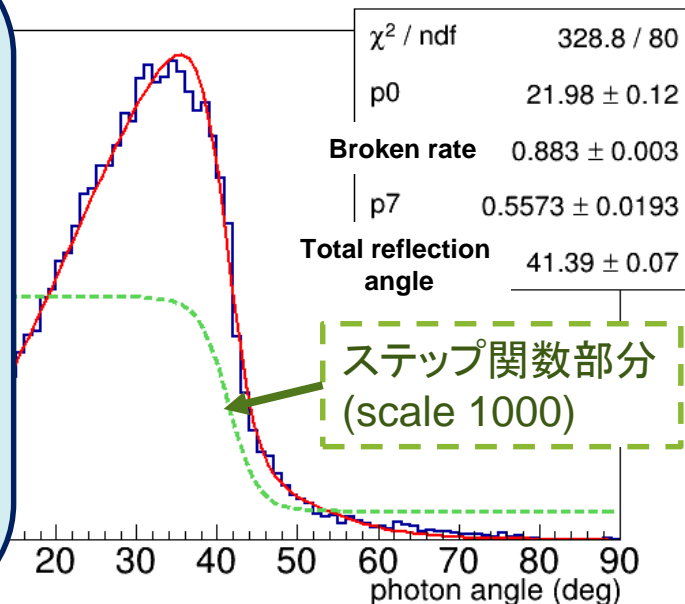
1. 適当な関数(f1)で「健全な」データの分布をフィットする
2. [(高さのみスケールしたf1) × (ステップ関数)]の関数で調べたい分布をフィットする。
3. フィット結果で剥がれの割合をみる

	MC	フィット結果
剥がれ率	1	0.88
全反射角(°)	~43	41.4

10%程度のずれだが、剥がれは発見可能
(誤って選別された光子が影響か)

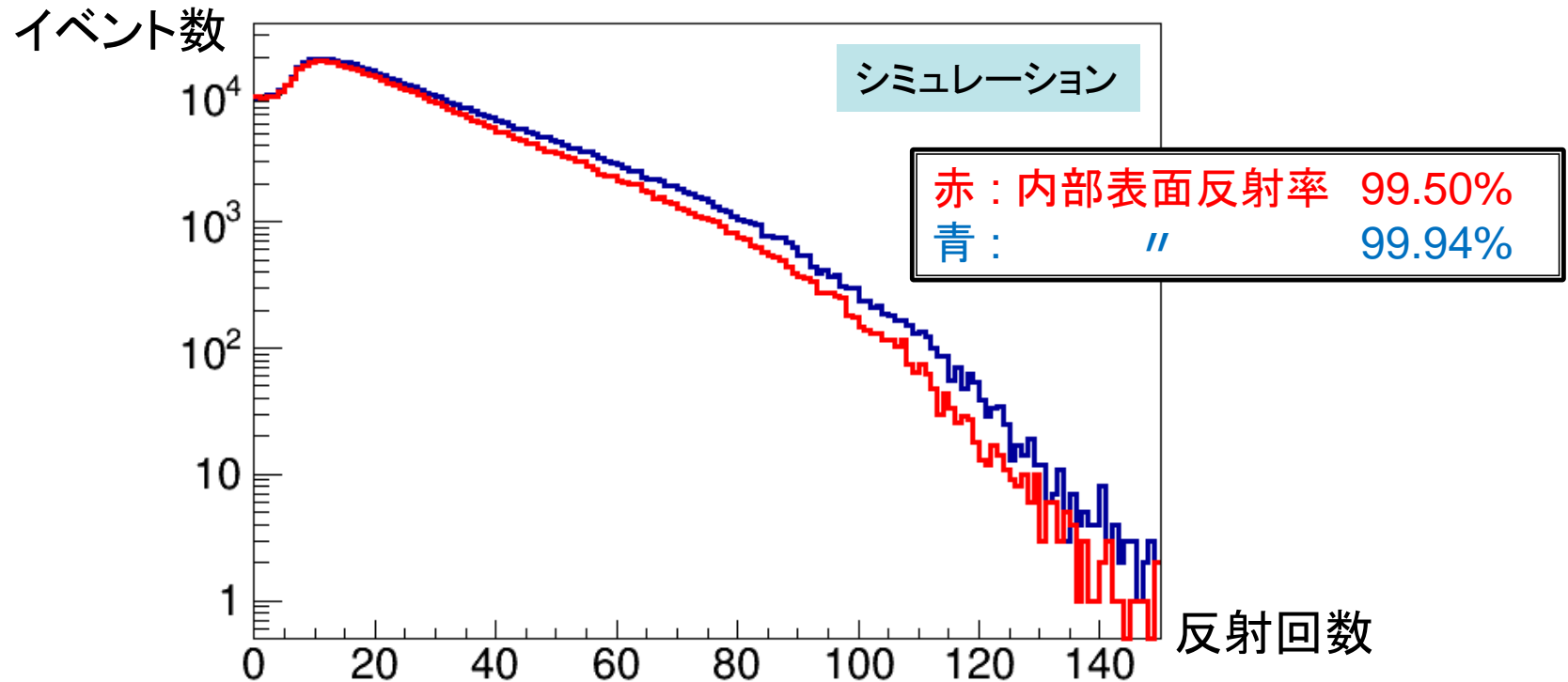
実データでは、他のTOPカウンターと比較する

剥がれ あり (調べるデータ)



石英表面の反射の検証

石英表面での反射回数と光子の損失割合の関連を調べる
→ 反射回数が多いほど、光子の損失割合が大きくなる



今後、関数フィットで定量的な評価を試みる

まとめと今後

- TOPカウンターは現在、宇宙線・レーザーデータの解析と、ファームウェア・ソフトウェアのテスト&デバッグが進行中
- 統合宇宙線テストの結果を解析することで、石英の状態チェックが可能（シミュレーション上で見通しがついた）
 - 誤差~10%程度で剥がれの割合を検証できる
(e^+e^- 衝突データでも同様にチェックできる)
- 実データをみるには、読み出しチャンネルごとの時間較正が必要
→ 次の課題

バックアップ

TOPカウンター：較正の流れ

時間較正

- 信号読み出し回路のサンプリング間隔
- 読み出しチャンネルごとの時間原点

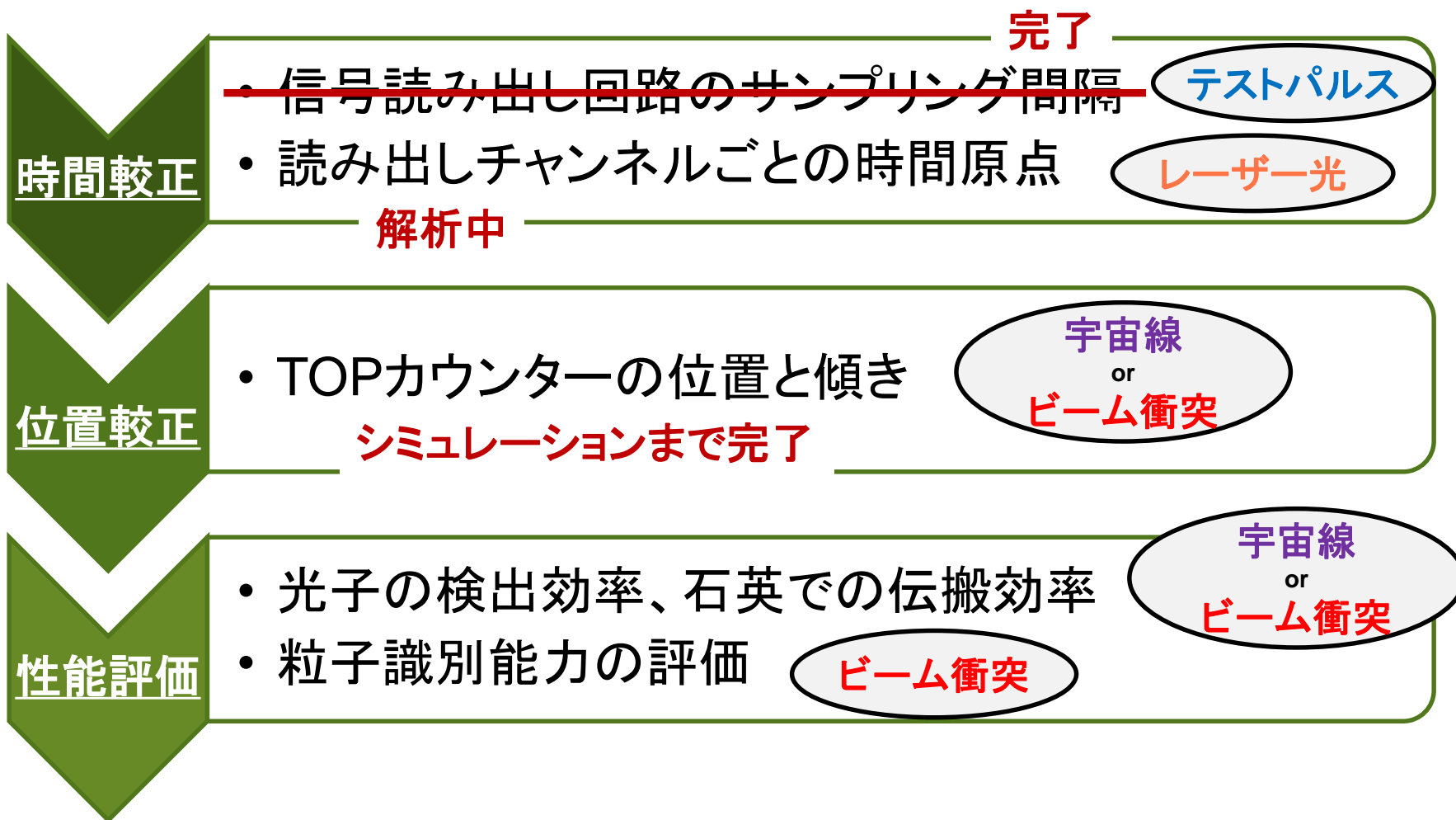
位置較正

- TOPカウンターの位置と傾き

性能評価

- 光子の検出効率、石英での伝搬効率
- 粒子識別能力の評価

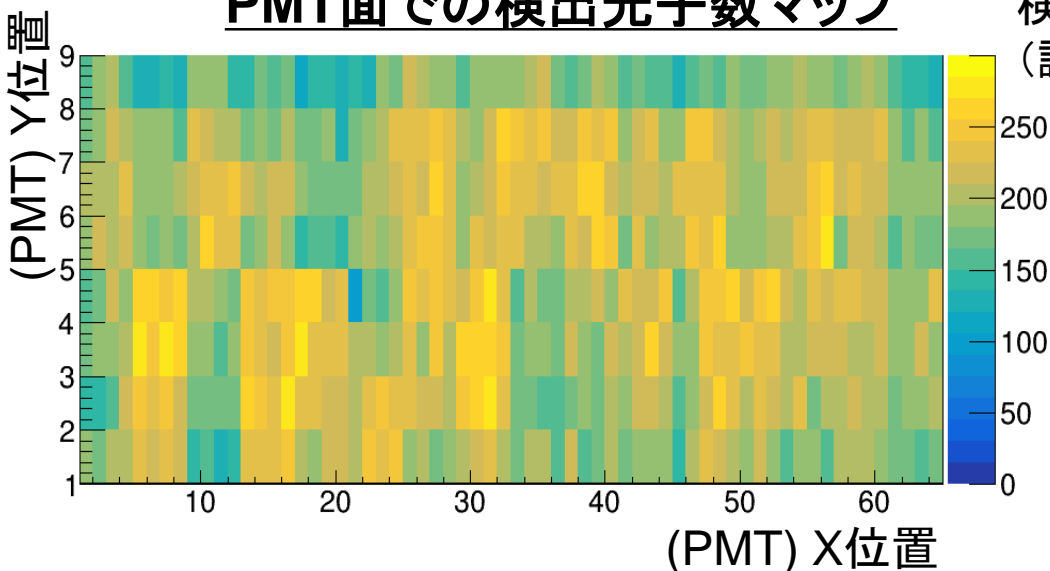
TOPカウンター：較正の流れ



統合宇宙線テスト TOPのデータ

実データ

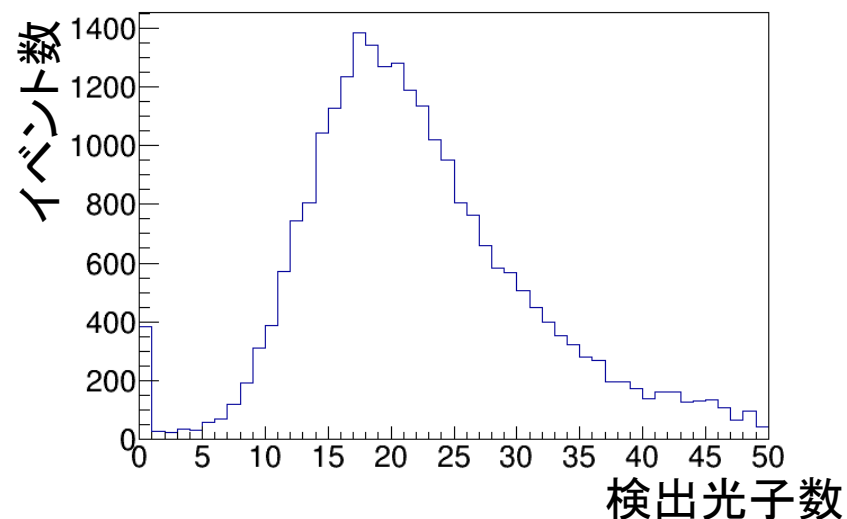
PMT面での検出光子数マップ



TOP1台につき、PMTが32個、
1個のPMTにつき、
読み出しチャンネルが16個
→ 512 チャンネル

1回の宇宙線ヒットあたりの検出
光子数は想定通り (~20個)
(右図)

1宇宙線イベントあたりの検出光子数



Fit function

- f1 (something function which suits fine data)

$$[0]*(x+[1]*x^2+[2]*x^3+[3]*x^4) / (1+\exp([4]*x-[5]))$$

- step function

$$1 - [6]/(1+\exp(-[7]*(x-[8])))$$

Broken rate



Total reflection angle

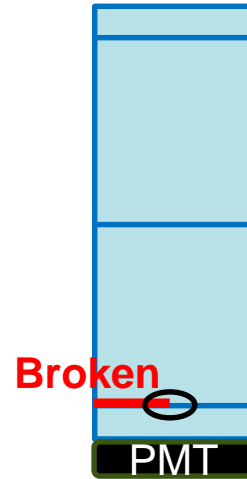


Glue status check 2

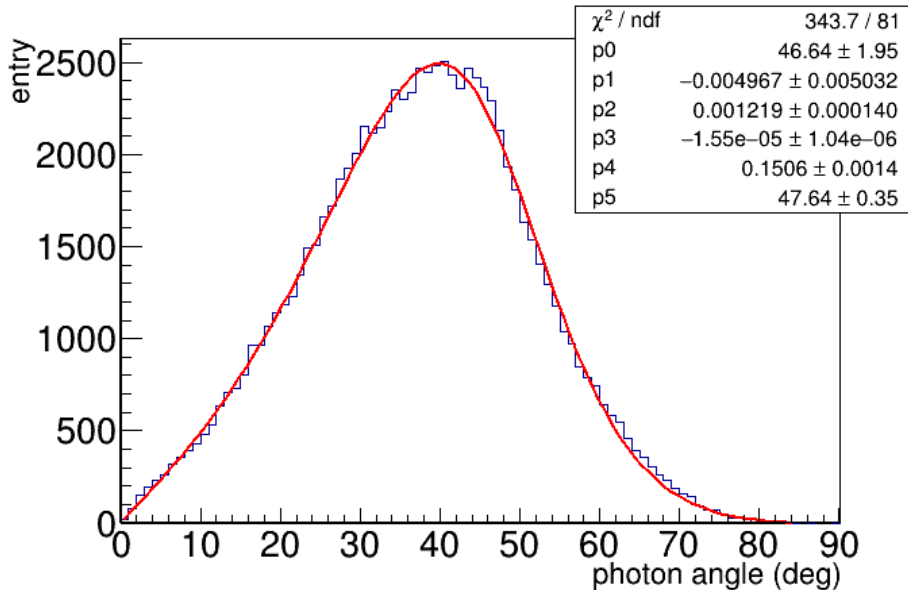
50 % glue broken data

The Broken rate is better than 100% broken.

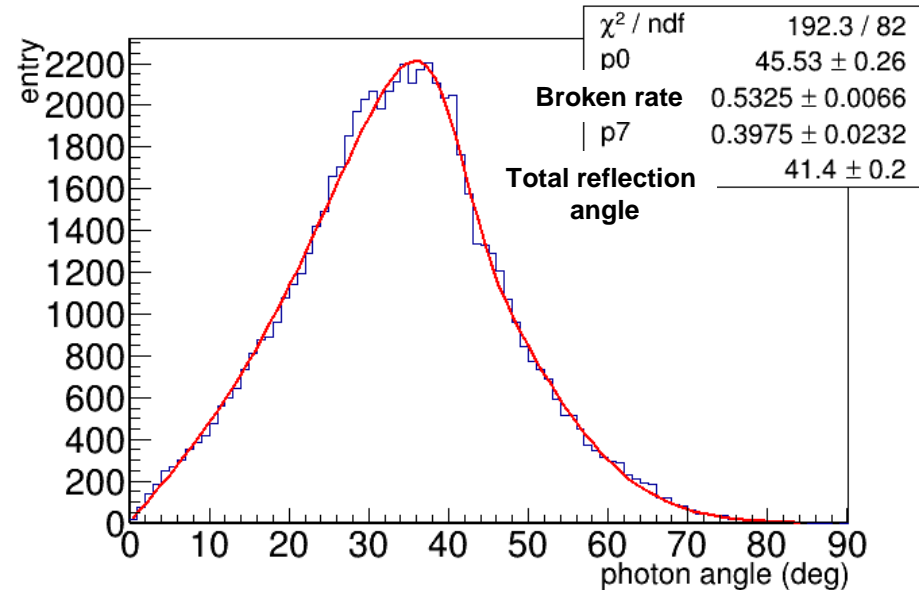
(the effect of miss selection photons becomes small.)



Fine data (f1)



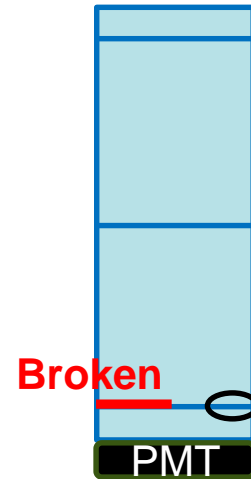
Broken data



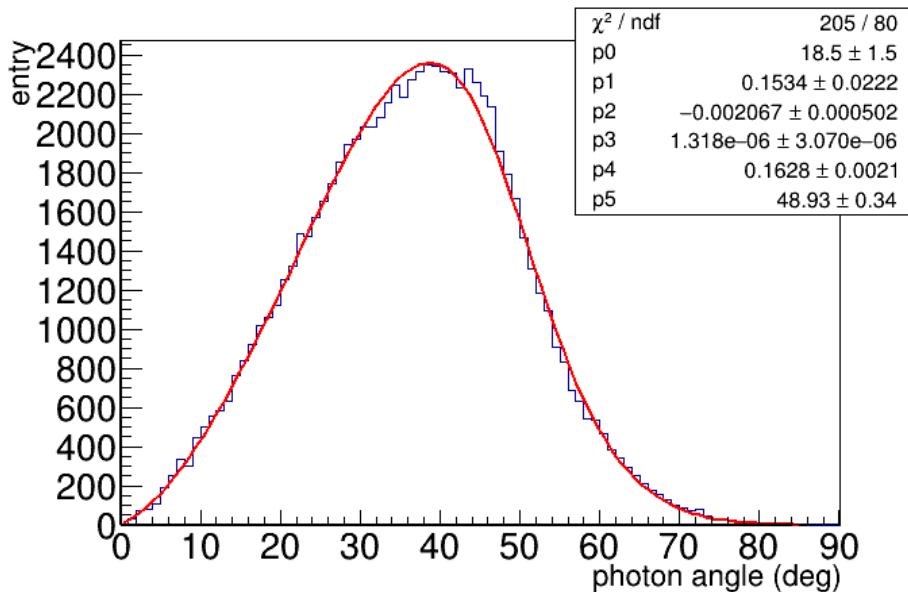
Glue status check 2

0 % glue broken data

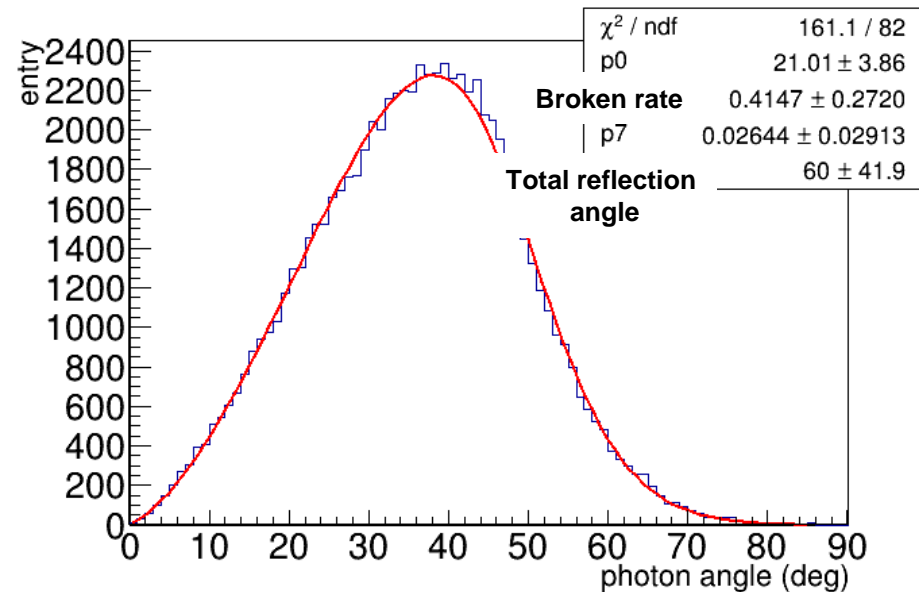
Step function didn't work as total reflection function.
(That's OK.)



Fine data (f1)



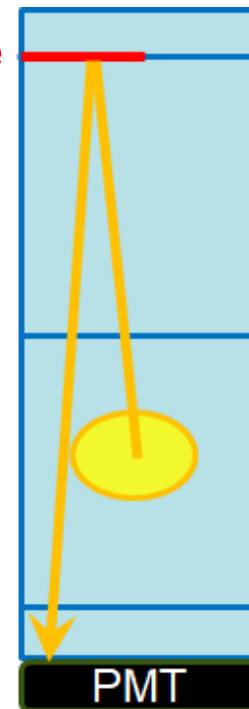
Broken data



Reflected photon path

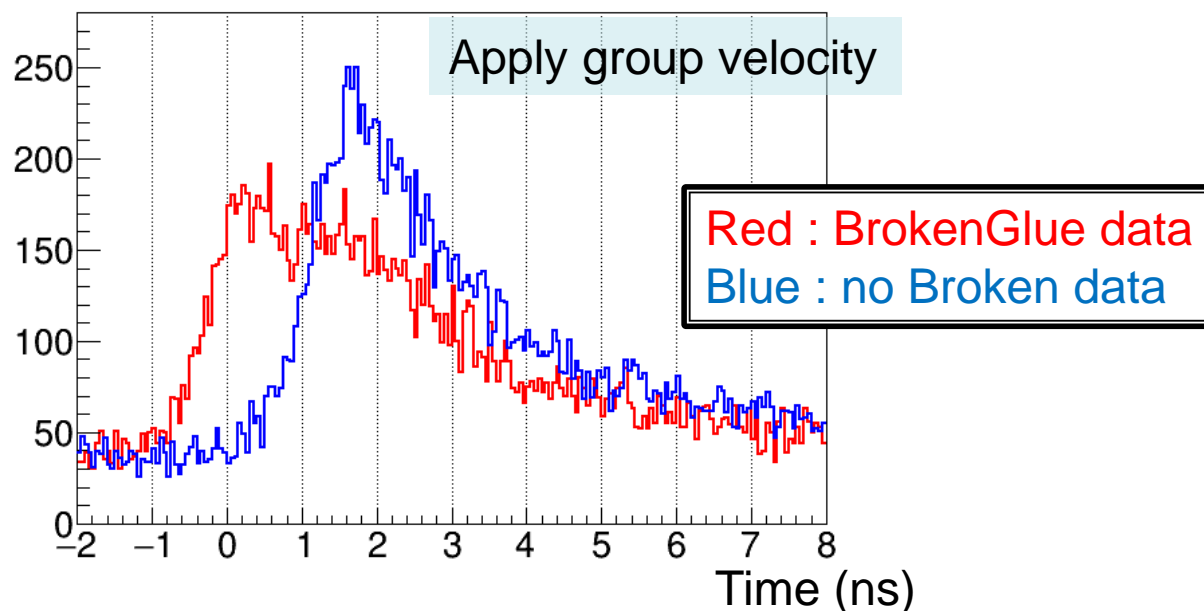
The entries around 0 should go through the path on the right figure.

Broken Glue



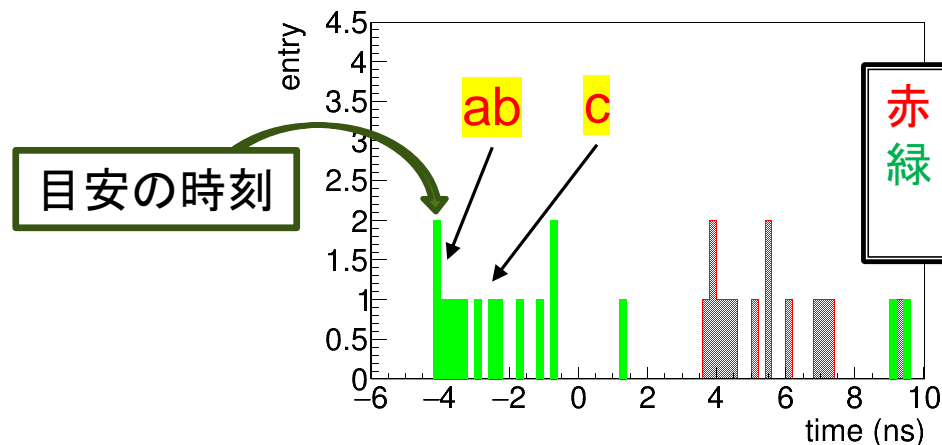
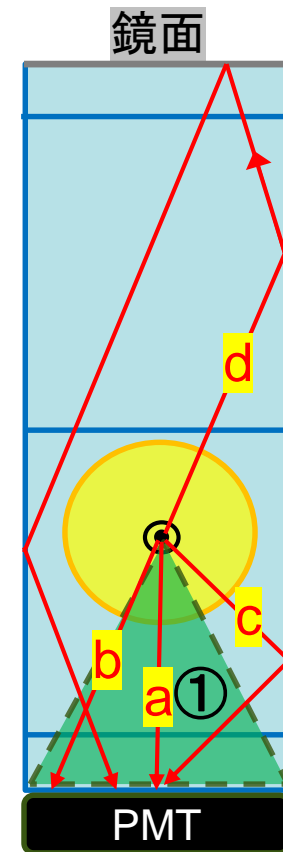
MC

Signal time – propagation time – muon hit time



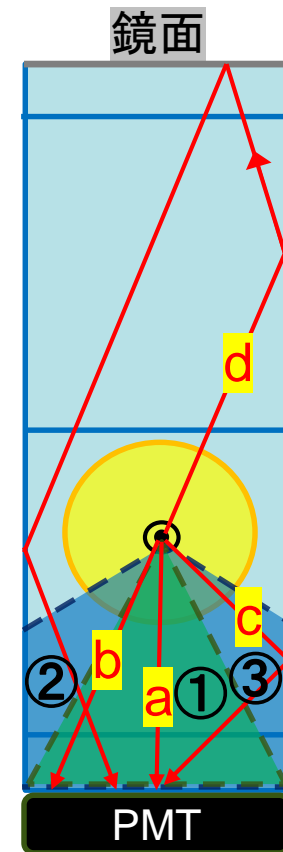
伝搬経路の推定

1. **最短距離**で伝搬した時の伝搬時間を計算
 → (検出時刻 - 伝搬時間①) が最小のデータが、
伝搬経路&角度を正しく得ている確率が高い。
 (実際はノイズがあり得るのでデータの集まっている所から選ぶ)
2. この時刻を目安として、他の経路を再計算する。

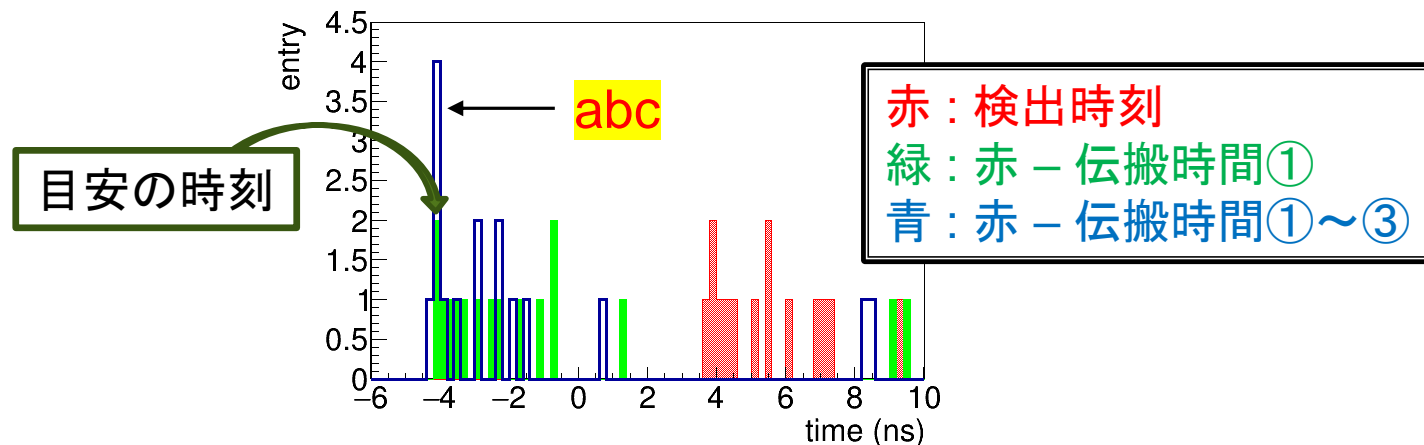


伝搬経路の推定

3. 石英側面で**1回反射**した場合の伝搬を計算
4. 伝搬時間①~③の中で最も目安の時刻に近づくものを正しい経路に選ぶ
5. この結果、目安の時刻付近にあるデータが伝搬経路の推定に成功した光子となる

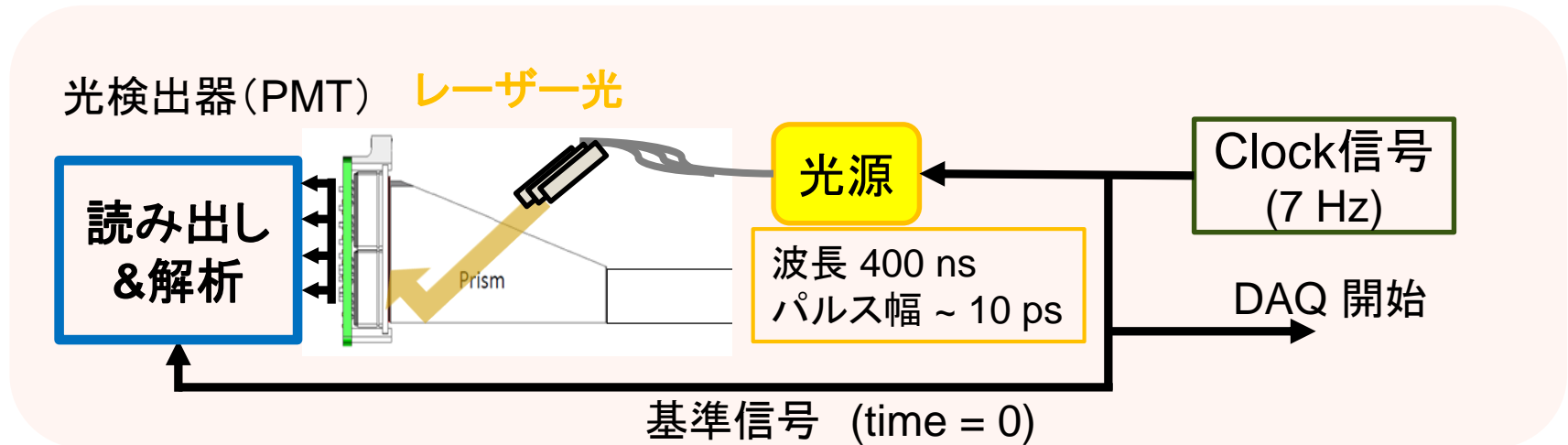


次に、光子の経路と角度を用いて
石英の状態を検証する



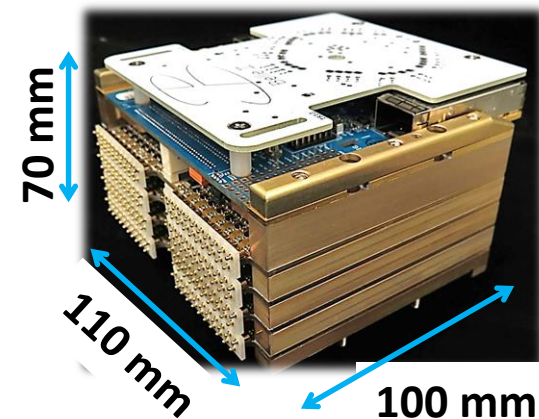
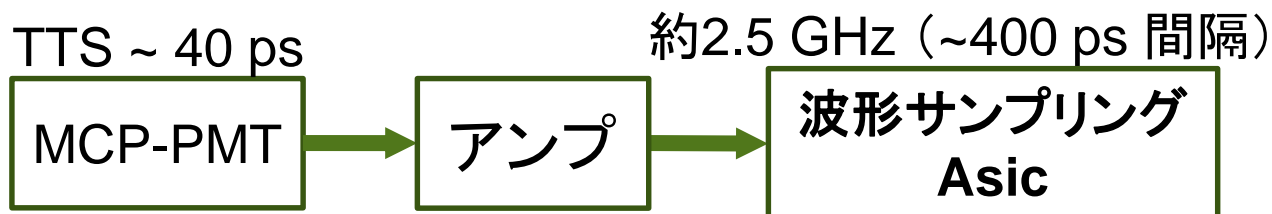
レーザーテスト

TOPの支持体に取り付けてある光ファイバーを使い、
PMT+解析の**時間分解能**を評価する



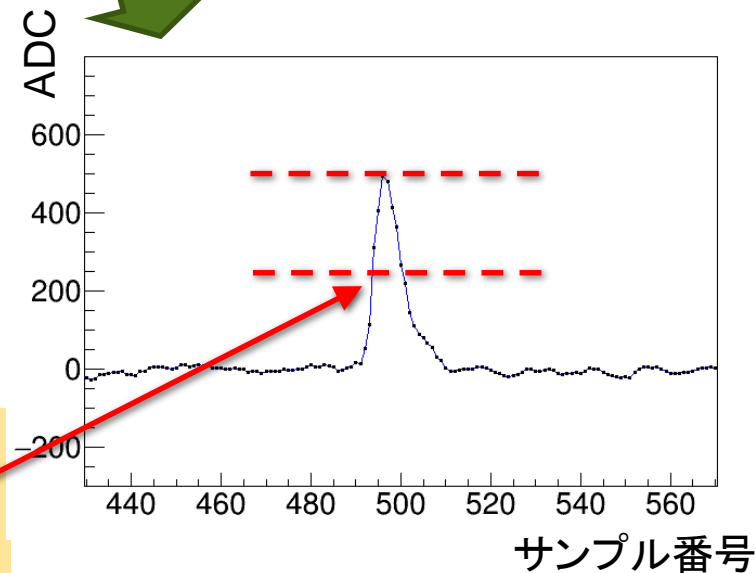
- 各PMTチャンネルに1光子レベルでヒット
- 読み出し&解析のファームウェアが予想通り働くかもこのテストデータで検証可能

信号解析システム



右の波形データをファームウェア上で関数フィットし、信号の情報をPCに送る
(現在、ファームウェアは開発段階)

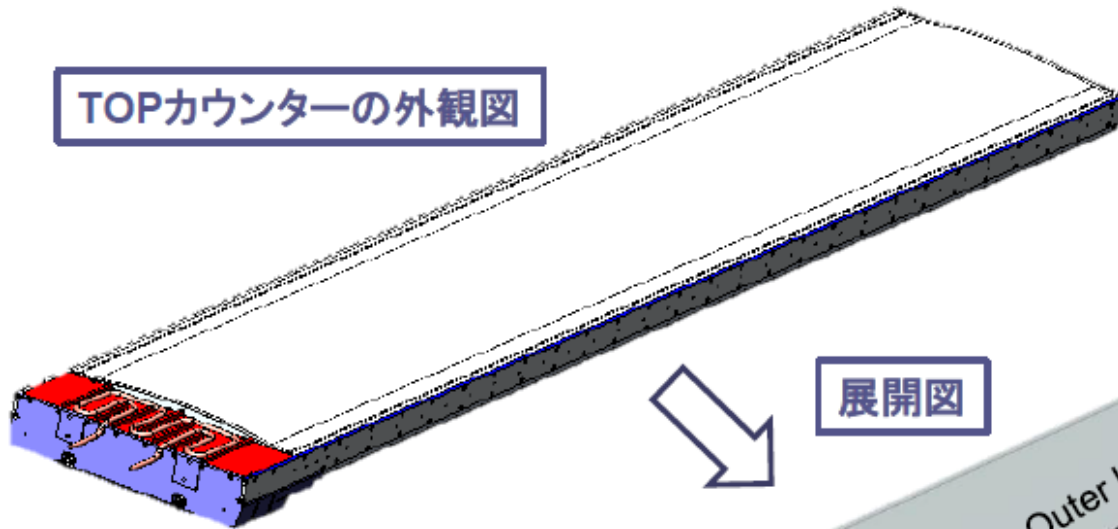
- 信号の時間
= ピークADC値の半分にあたる時間



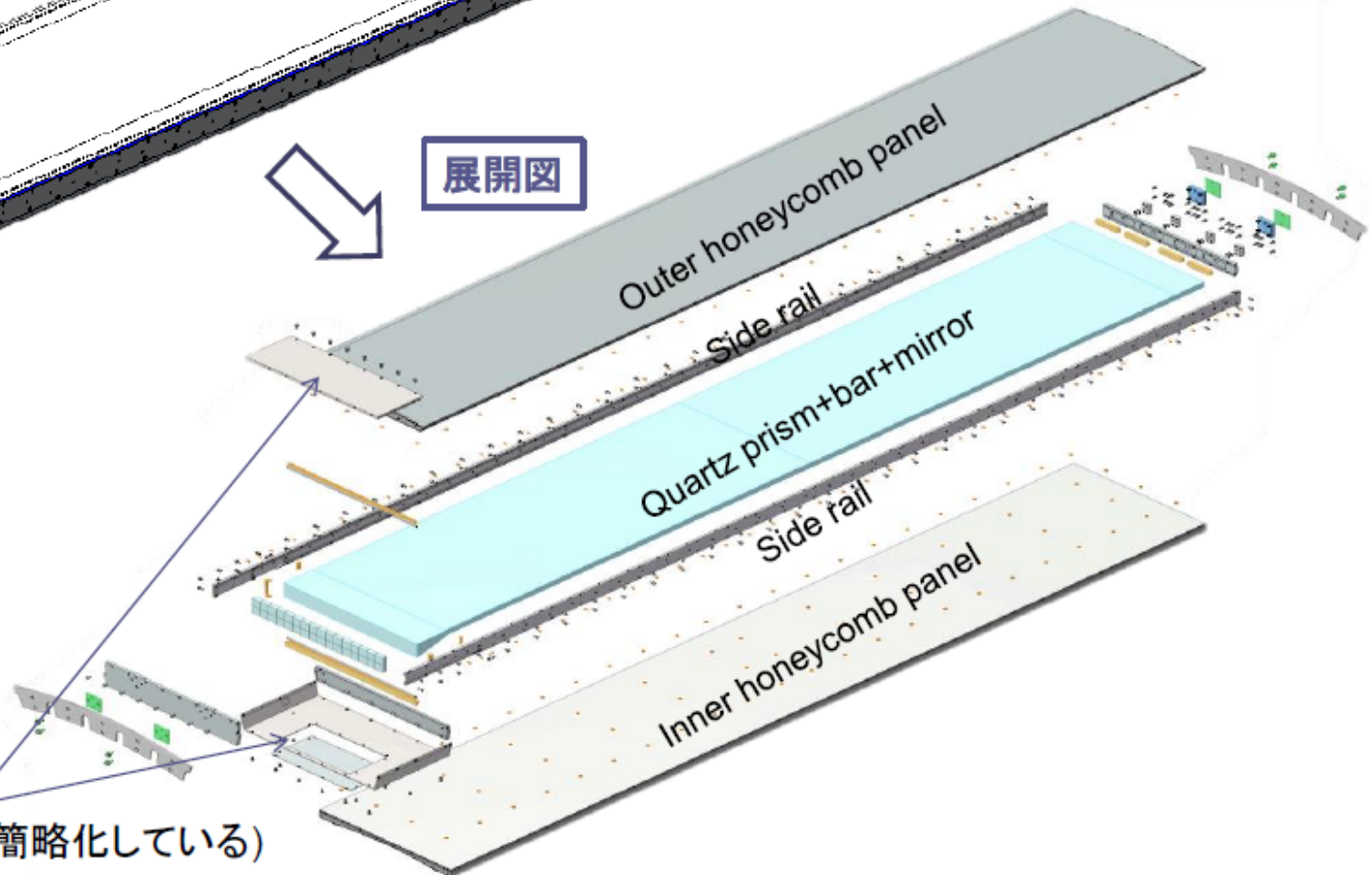
ベースラインにふらつきがあるため、時間の解析結果がぶれる
実地でのふらつきの影響を確認しておく必要がある。

TOPカウンター構造

TOPカウンターの外観図

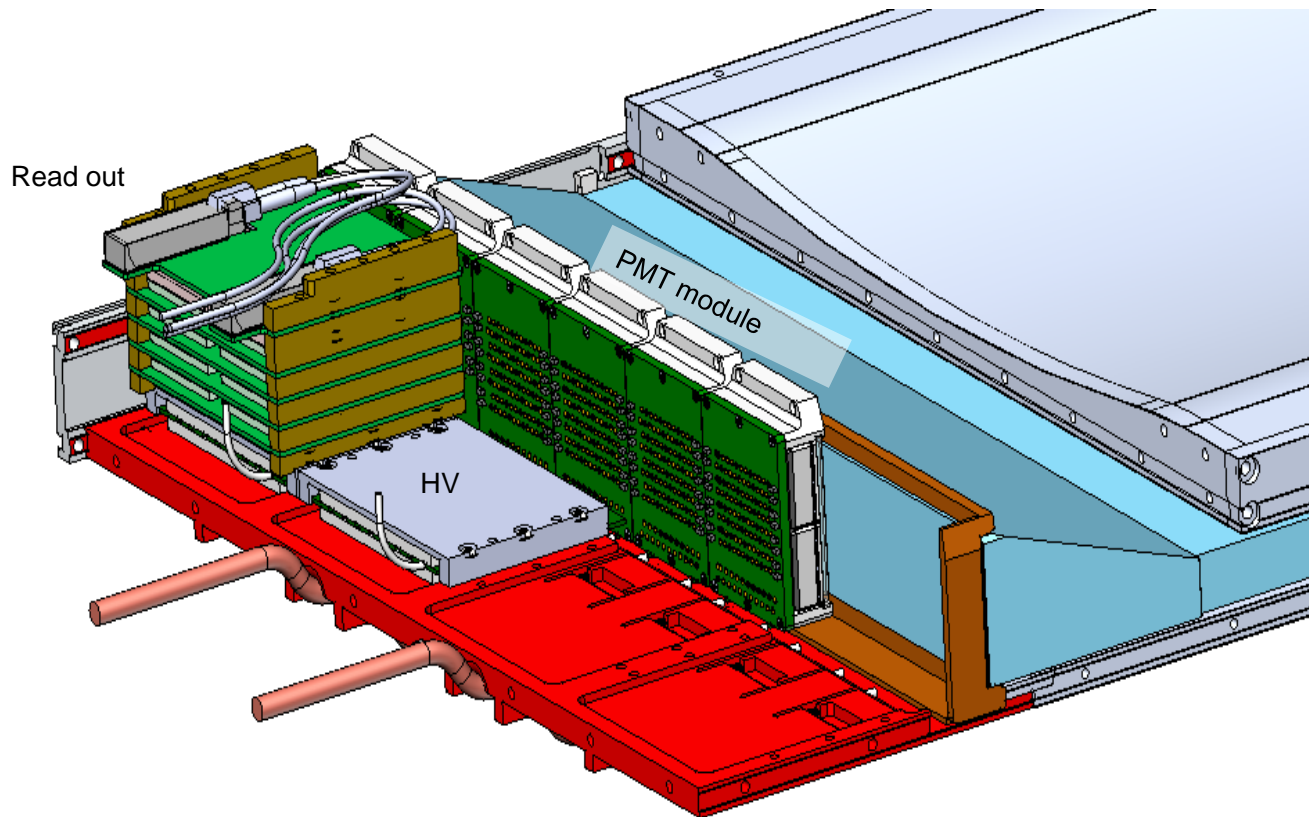


展開図

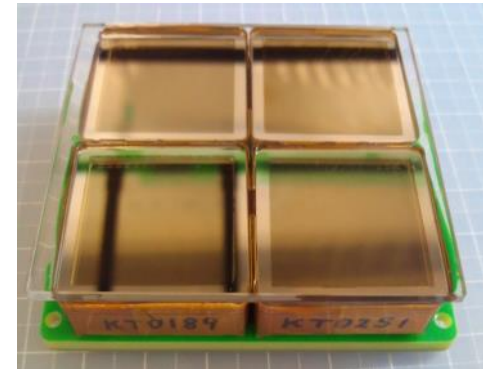


リードアウトカバー(簡略化している)

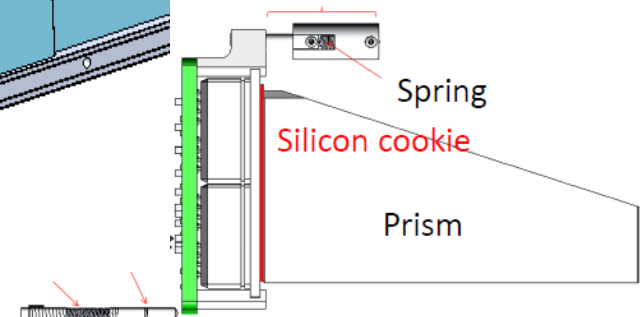
TOPカウンター



PMT module (4 PMTs)



Screw hole plunger






Cherenkov angle of K / π at TOP counter

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta} = \frac{1}{n \cdot \frac{p}{\sqrt{m^2 + p^2}}} = \frac{\sqrt{m^2 + p^2}}{np} \quad (\text{natural unit})$$

$$K^\pm : 494 \text{ MeV}/c^2$$

$$\pi^\pm : 140 \text{ MeV}/c^2$$

$$n : 1.47$$

4GeV	$K^\pm \Rightarrow 46.73$ degrees $\pi^\pm \Rightarrow 47.10$ degrees		Angular difference : 6.46mrad
3GeV	$K^\pm \Rightarrow 46.41$ degrees $\pi^\pm \Rightarrow 47.08$ degrees		Angular difference : 11.56mrad
2GeV	$K^\pm \Rightarrow 45.52$ degrees $\pi^\pm \Rightarrow 47.00$ degrees		Angular difference : 25.83mrad

TOPカウンターの原理と識別能力

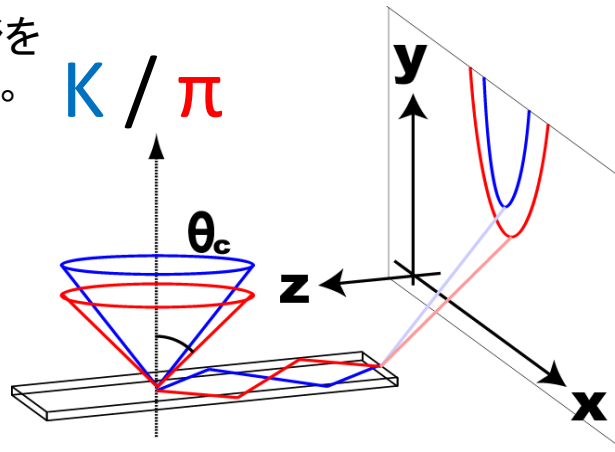
・粒子識別の原理

チェレンコフ光が、リングイメージを保存しつつ光検出器に到達する。

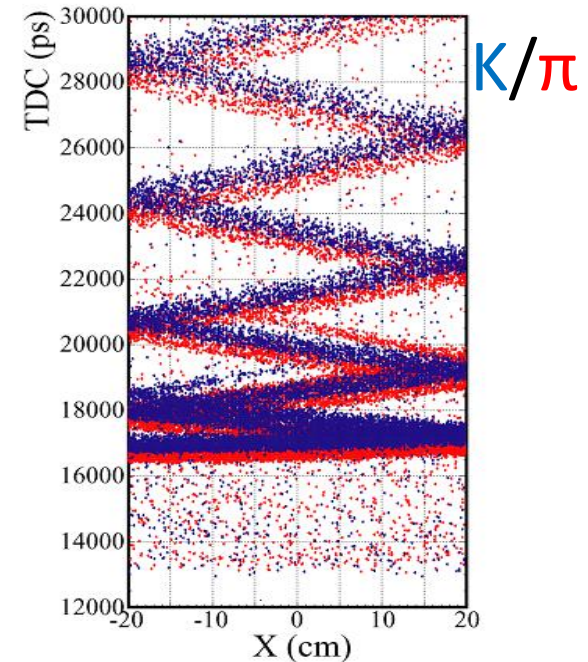
$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}$$

(θ_c : チェレンコフ角)

$$m = \frac{p\sqrt{1-\beta^2}}{\beta}$$



TOPカウンターのリングイメージ



シミュレーション
2GeV/c, $\theta = 90^\circ$

xと時間tの情報でリングイメージを再構成
(Likelihood scanで最小値探索) \Rightarrow 粒子識別

$$TOP \text{ 識別能力} = \frac{\Delta Time(\pi, K)}{\text{時間分解能}} \times \sqrt{\text{検出光子数}}$$

と近似できる。

物理解析での PID

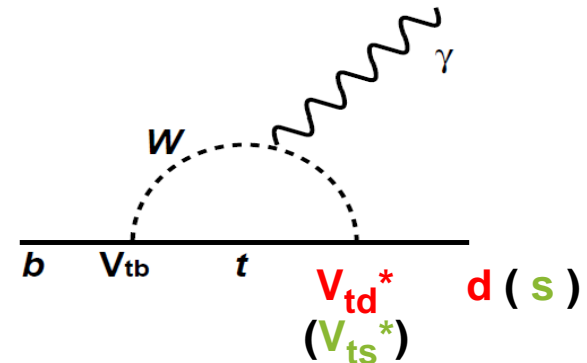
- $K^+(us)$ と $\pi^+(ud)$ の識別

⇒ sクォークに崩壊したのか、dクォークに崩壊したのかを識別

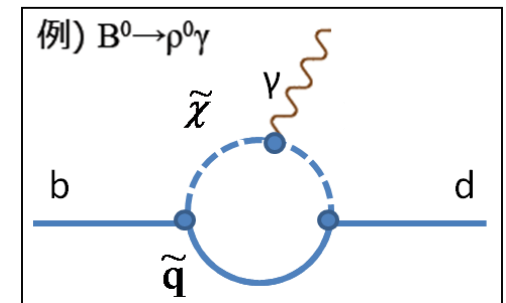
- 解析の例 $|V_{td}/V_{ts}|$

事象	崩壊分岐比
$B^0 \rightarrow \rho^0 \gamma \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$	8.6×10^{-7}
$B^0 \rightarrow K^* \gamma \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$	4.3×10^{-5}

~50倍

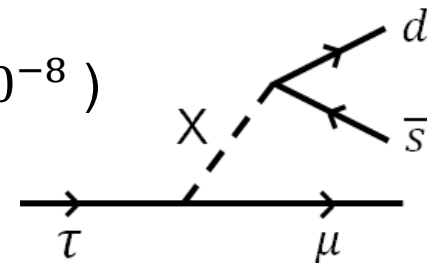


高い精度で測定することで
標準模型からのズレ(=新物理の寄与)を発見する。



$\tau \rightarrow \mu K^* (\rightarrow \mu K \pi)$ LFV探索への影響

$$(BR < 7.2 \times 10^{-8})$$



主な背景事象

$$\tau \rightarrow \pi \pi \pi \nu_\tau \quad (BR \sim 9.3\%)$$

μ とミス
(~数%)

Kとミス

K/ π 識別

PIDをミスした分の質量とニュートリノの持ち去ったエネルギーが一致したら背景事象になる

Belle I のK/ π 識別性能のままだと

Belle II の統計量では10~20個存在する

TOPの識別性能であれば、バレル部での背景事象を半減できる

TOPDigits.time – muon impact time
– (direct route) propagation time

