

Belle II実験 TOPカウンターの 宇宙線データを用いた 時間原点較正

名古屋大学 高エネルギー素粒子物理学研究室
修士1年 千賀智史

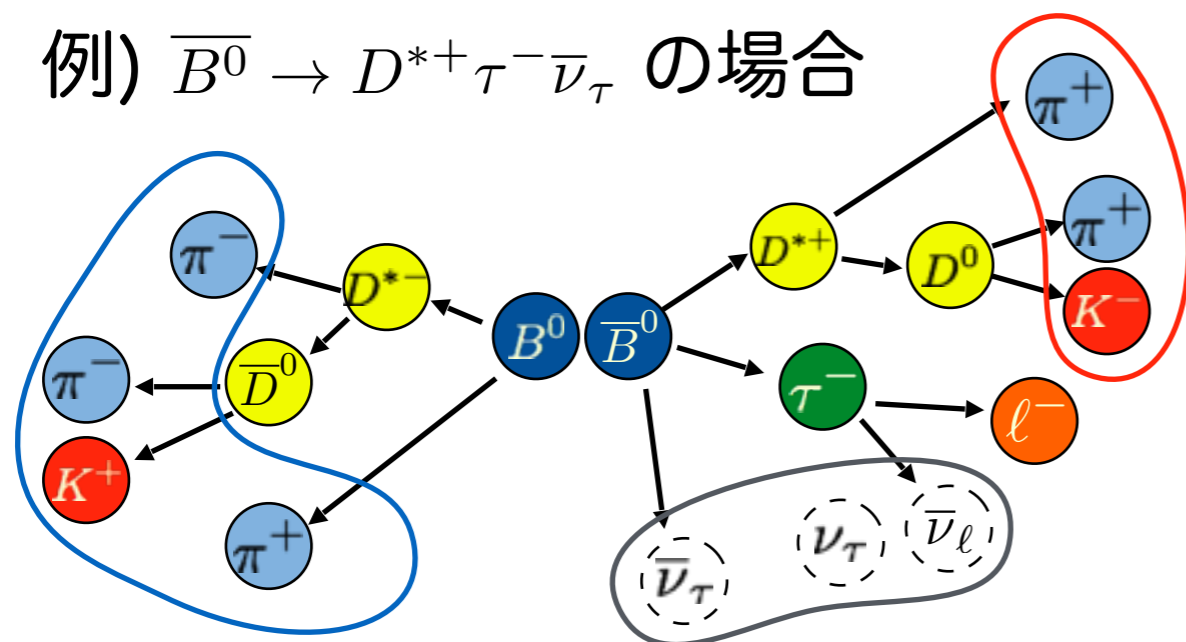


Belle II実験

Belle II実験 … 電子・陽電子の衝突実験

B中間子の稀崩壊などに潜む新物理を探索

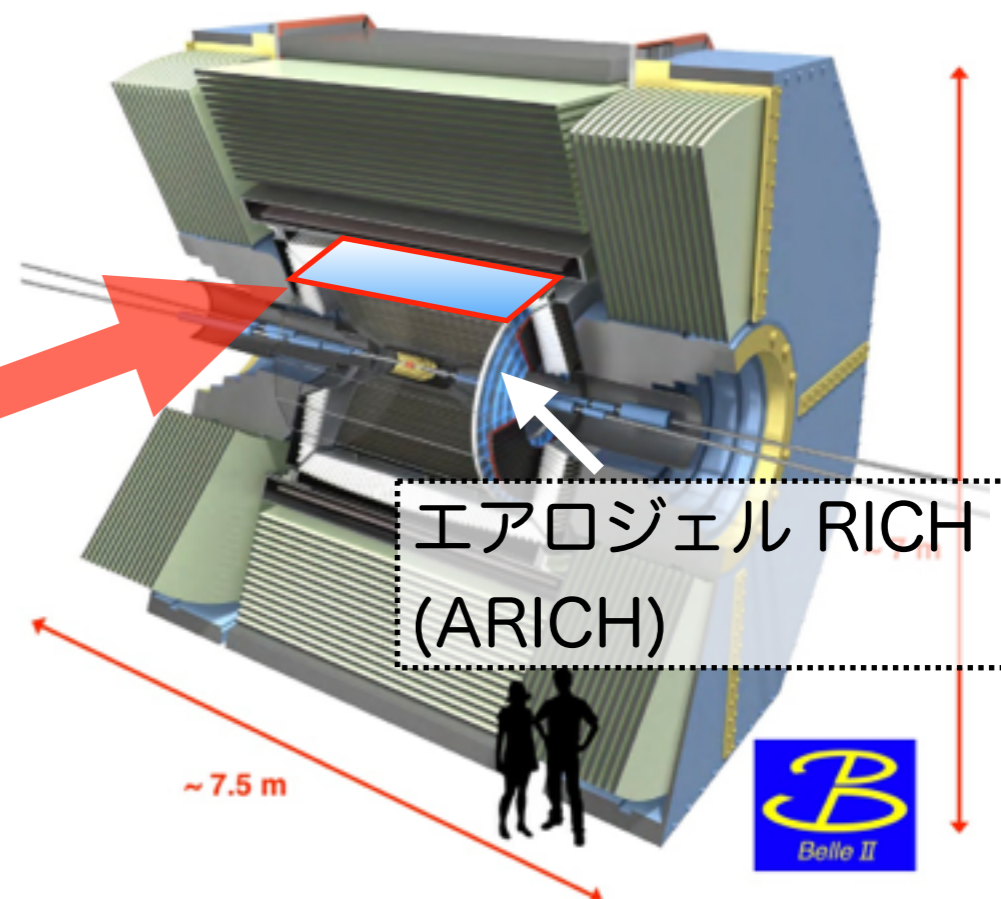
例) $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$ の場合



崩壊モードを再構成するために、 K^\pm 中間子、 π^\pm 中間子を正しく識別する必要がある

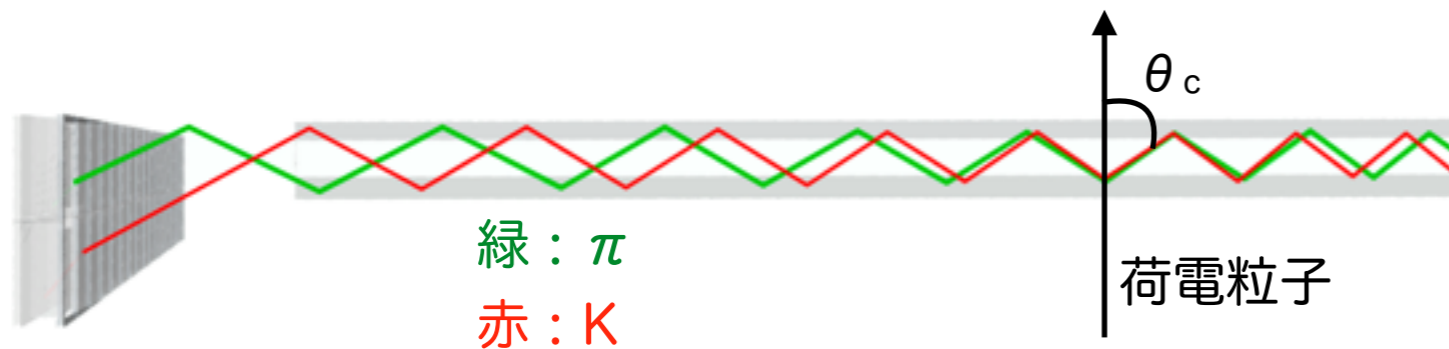
TOPカウンター

Belle II検出器：
2つの粒子識別装置



TOPカウンター

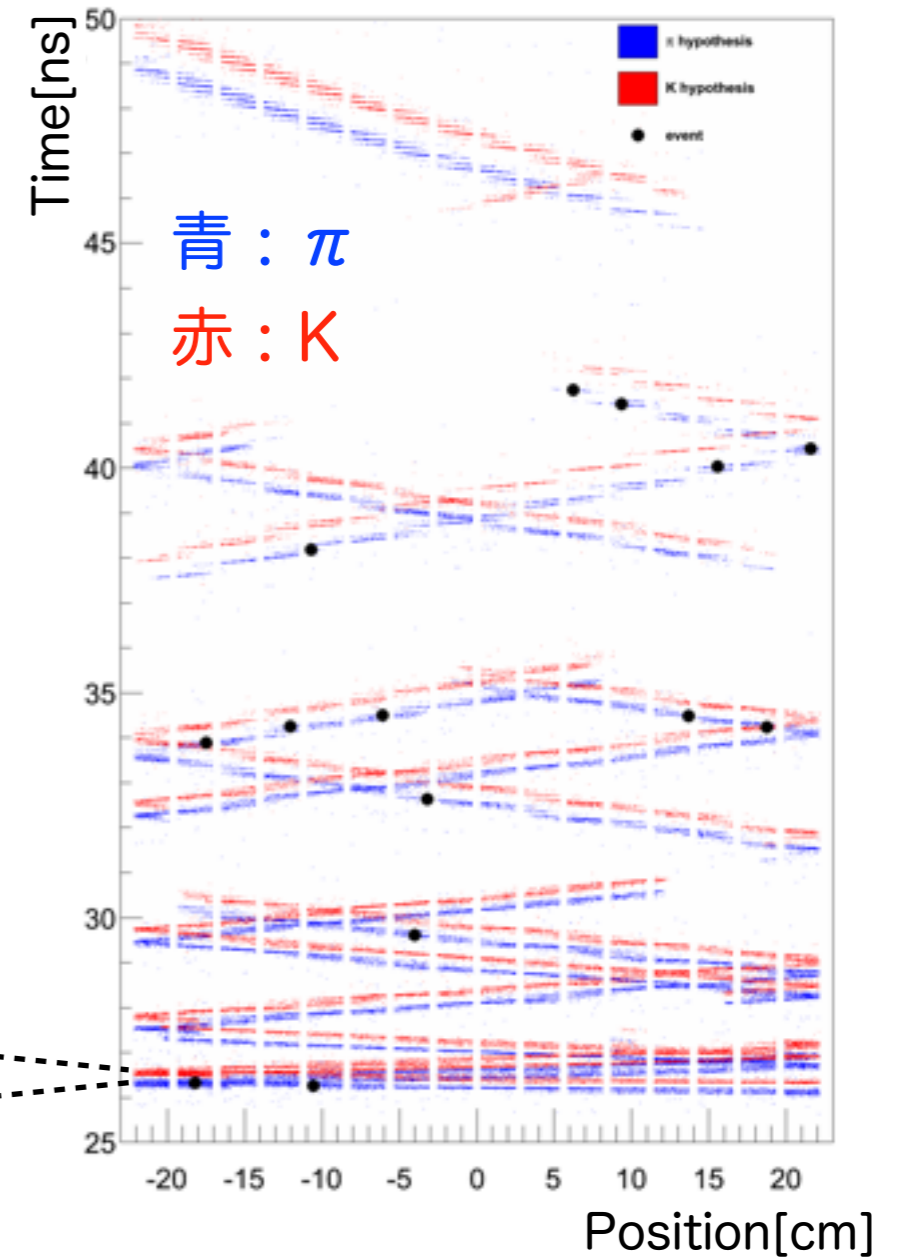
TOP(Time Of Propagation) カウンター：粒子識別装置



チェレンコフ角 θ_c $\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}$

→チェレンコフ角の違いが、
光子の経路の違いを生む。

→同じ条件(運動量、入射位置)でも、粒子の種類
によって光子検出時間が異なる(O(100 ps))。

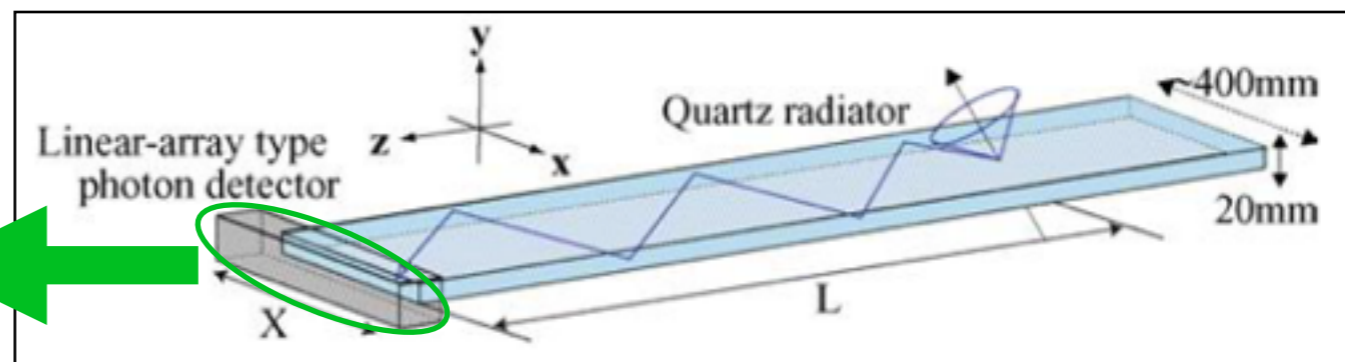
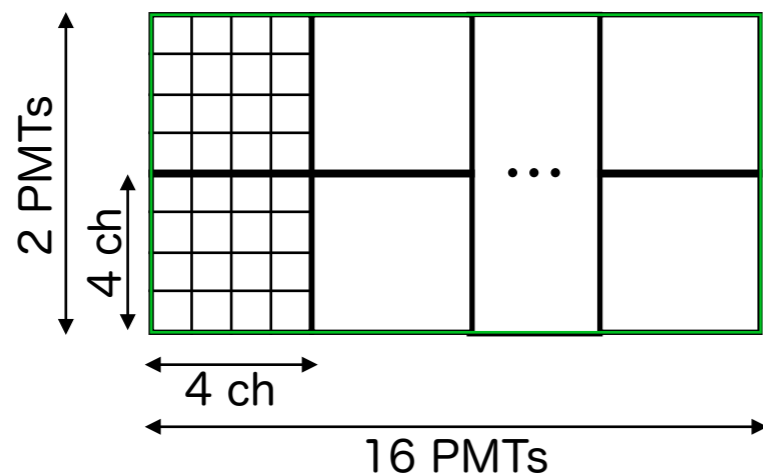


時間情報で粒子識別するため、正しい時間情報がほしい

→時間原点(T0)をそろえる必要あり！

時間原点較正

1. PMTのChannelごとのT0 (イタリアのグループ)

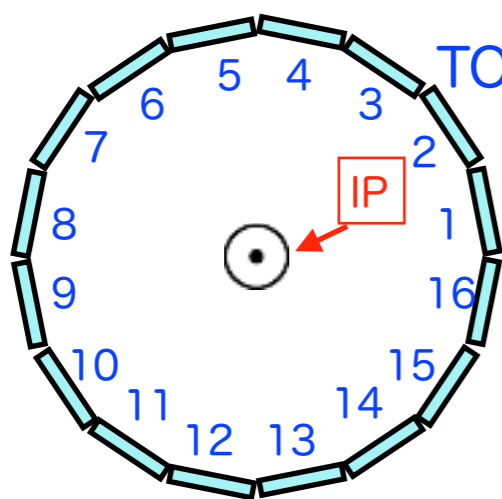


居波さん(名古屋大)のスライドから

1つのTOPに512 channel : レーザーでT0合わせ

2. TOPモジュールごとのT0

これが自分の研究です



TOPは全部で16台

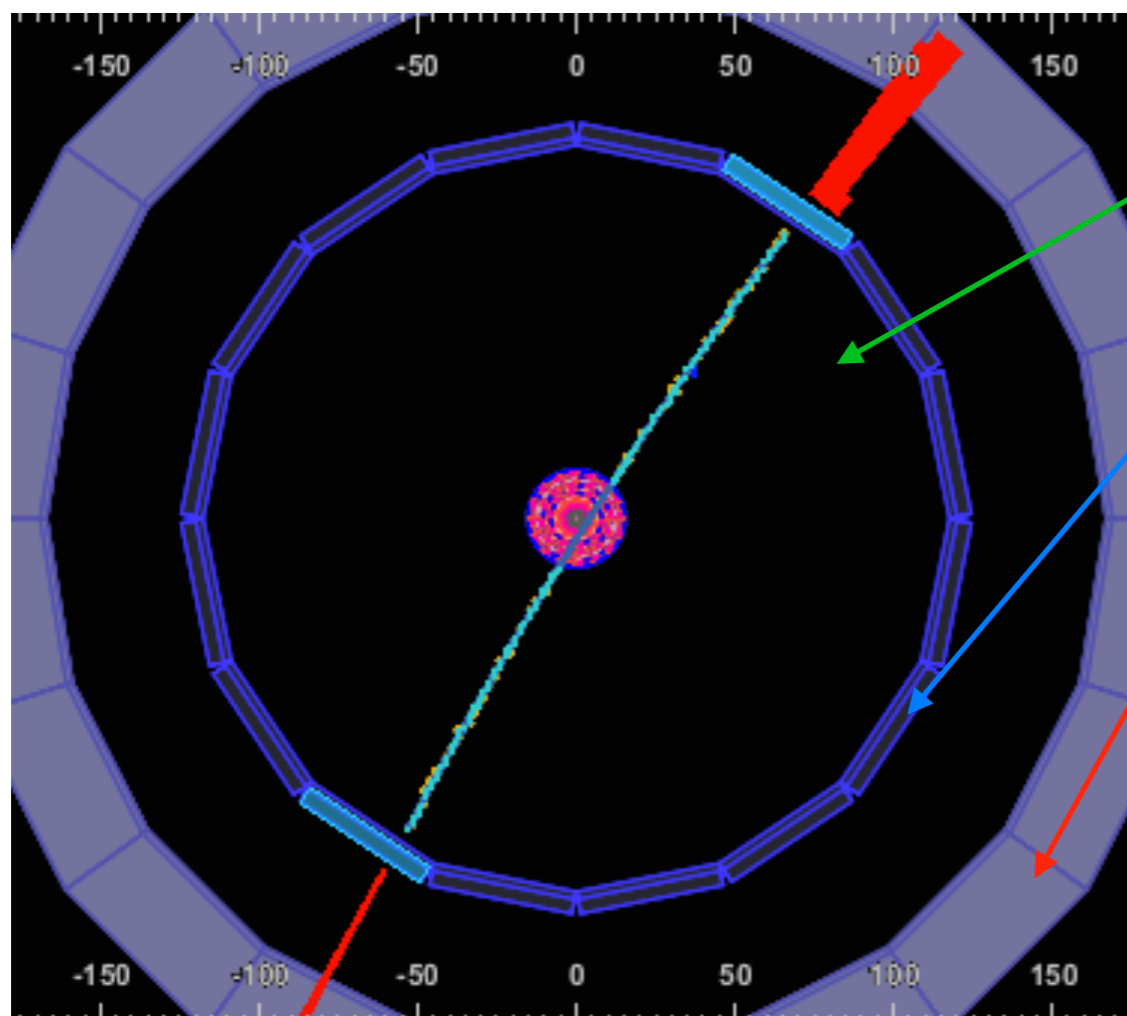
時間情報を較正するために

- ・ 宇宙線テスト
今年夏に実施された統合テスト
- ・ 衝突データ
今年度末開始予定

が利用できる

統合宇宙線テスト

2017年 7~8月、Belle II検出器にインストールされていた装置をすべて動かして、宇宙線ミュオンのデータを取得



CDC(中央飛跡検出器)

TOPカウンター

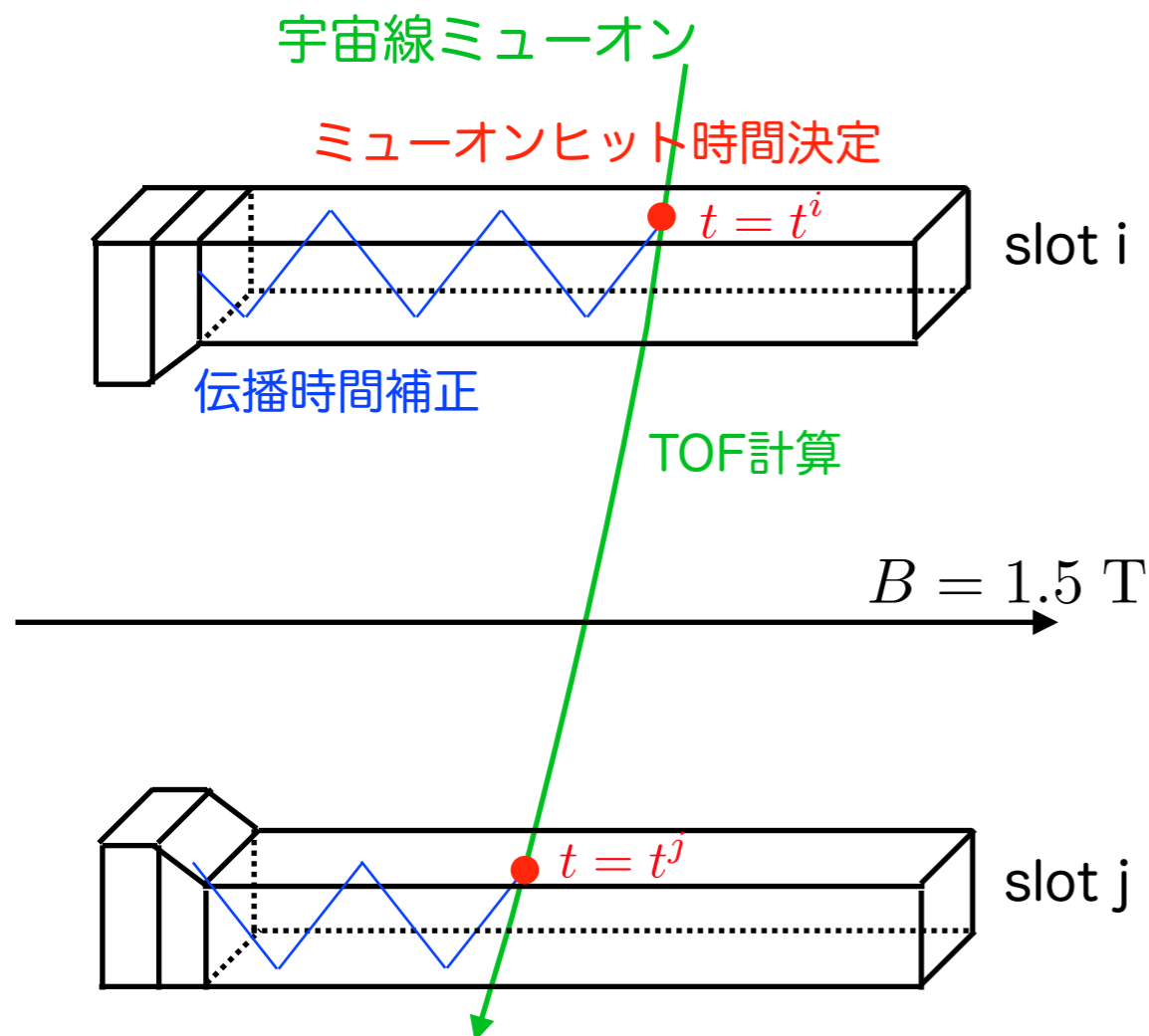
ECL(電磁カロリメータ)

ソレノイド磁石(1.5 T)
KLM(K_L中間子、 μ 粒子検出器)

宇宙線テストで期待されるイベント
(図はシミュレーション)

T0校正の手法

2つの方法で計算した
Time Of Flightを比較。



1. CDCから再構成された入射位置、入射角度、運動量(速度)と、チェレンコフ光がヒットしたPMTのpixelから、伝播時間を計算。
2. チェレンコフ光のヒット時間から伝播時間を引き、TOPにミュオンが当たった時間($t=t^{(i)}$)を決定。
3. 2つのTOPモジュールのミュオンヒット時間の差をとる。 $TOF_{TOP}^{ij}=t_j-t_i$ とする。

CDCの飛跡情報や運動量のみからもTime Of Flightの期待値(= $TOF_{expected}^{ij}$)は計算できる。

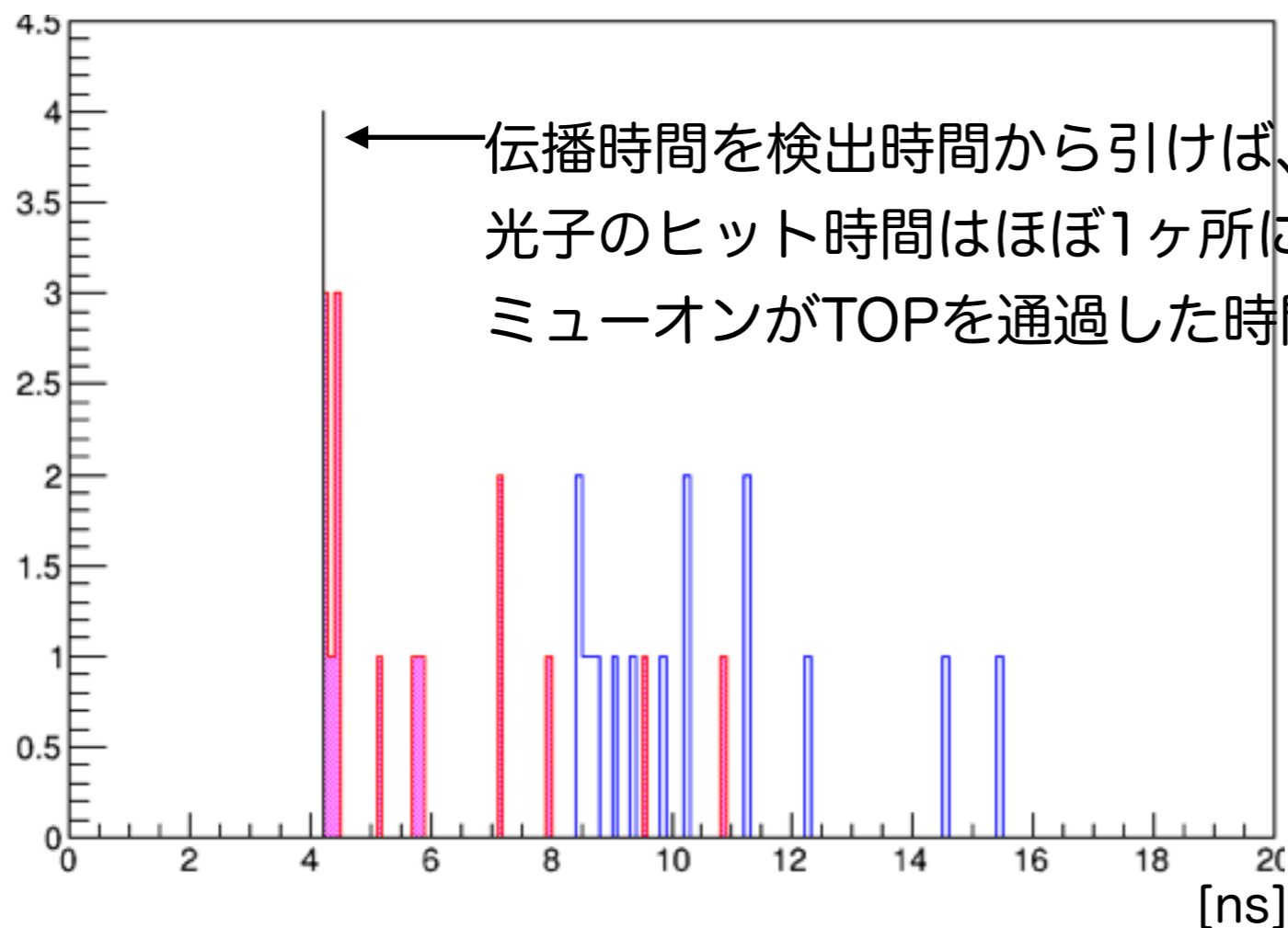
$\Delta t^{ij}=TOF_{TOP}^{ij}-TOF_{expected}^{ij}$ が、
モジュール間のT0の差を意味する。

(シミュレーションでは0) ← Δt をプロットして確認

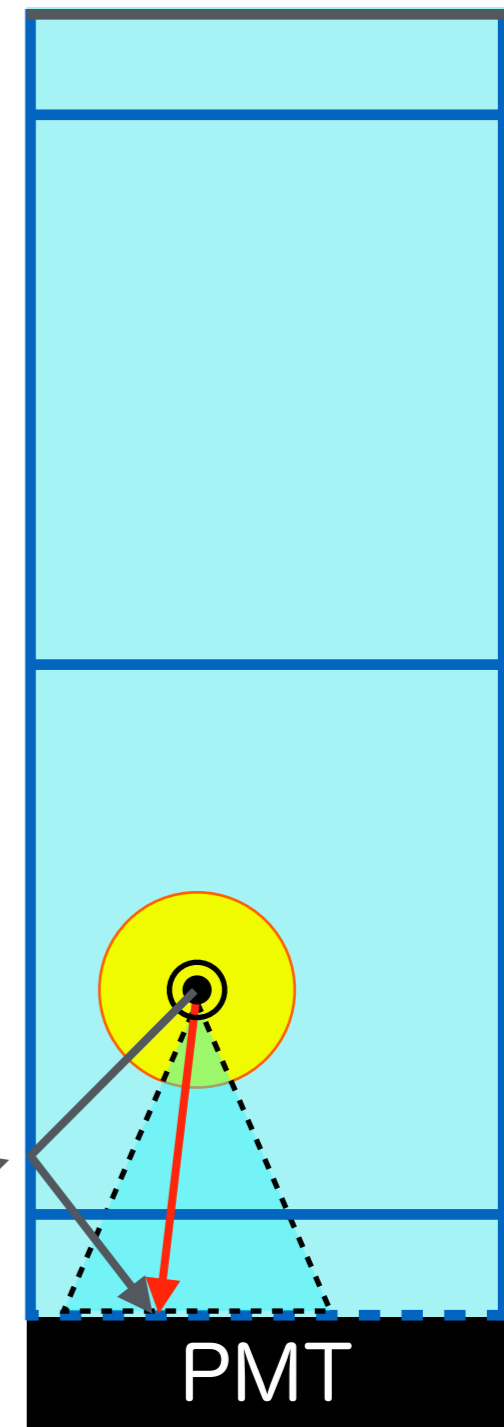
ミュオンヒット時間

Blue : チェレンコフ光子がPMTにヒットした時間

Red : Blueから、CDCで再構成された入射位置、入射角度、運動量(速度)と、PMTのpixel位置を用いて計算された伝播時間を引いた結果(光子はPMTに最短経路で向かうと仮定)



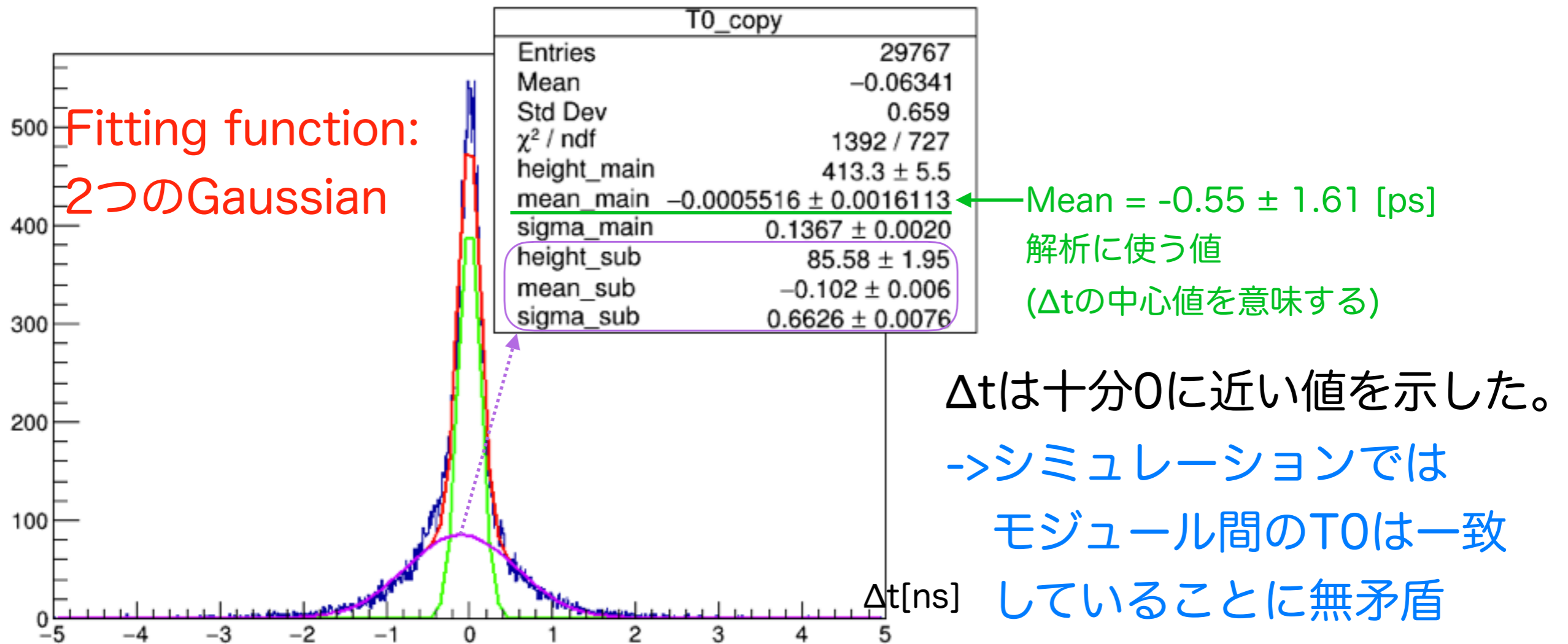
こういう経路は考えない



いろいろなpixelにヒット

Δt 分布

$$\Delta t = \text{TOF}_{\text{TOP}} - \text{TOF}_{\text{expected}}$$



今後の予定

- モジュールの各組合せで Δt_{ij} の分布を見て、それぞれの時間原点を決定する方法を考え、検証する
- 実際のデータを解析！

T0決定方法(ongoing)

$$\chi^2 = \sum_{i,j} \frac{[\Delta t^{ij} - (t_0^j - t_0^i)]^2}{(\sigma^{ij})^2}$$

Δt^{ij} : Mean($\text{TOF}_{\text{TOP}} - \text{TOF}_{\text{expected}}$)

t_0^i : slot i の時間原点

σ^{ij} : フィッティング誤差

(+Systematic Error?)

χ^2 が最小になるように t_0 を決定(基準はslot4)

t_0^4 は0に固定する

```
FCN=18.243 FROM MIGRAD      STATUS=CONVERGED      609 CALLS      610 TOTAL
EDM=2.00381e-07      STRATEGY= 1      ERROR MATRIX ACCURATE
EXT PARAMETER          STEP          FIRST
NO.   NAME            VALUE          ERROR          SIZE          DERIVATIVE
 1  t0_slot01      1.95795e-03    2.15595e-02    3.55390e-06    2.38450e-02
 2  t0_slot02      1.72228e-02    1.13570e-02    1.66644e-06   -6.73783e-02
 3  t0_slot03      5.69186e-03    8.86951e-03    1.29700e-06   -7.09089e-02
 4  t0_slot04      0.00000e+00    fixed
 5  t0_slot05     -6.66675e-03    8.67829e-03    1.24453e-06   -4.12449e-02
 6  t0_slot06      2.36534e-03    9.95732e-03    1.27731e-06    2.61762e-01
 7  t0_slot07      1.12139e-02    1.27027e-02    1.62154e-06   -1.83073e-01
 8  t0_slot08      1.58002e-03    2.16765e-02    3.47575e-06    3.32575e-02
 9  t0_slot09      1.43593e-02    1.37665e-02    1.90856e-06   -7.56412e-02
10  t0_slot10      7.28741e-03    1.00174e-02    1.61836e-06   -9.42308e-02
11  t0_slot11      4.37581e-04    8.35655e-03    1.38440e-06    4.00932e-01
12  t0_slot12     -2.68551e-03    7.94726e-03    1.40413e-06    5.36038e-01
13  t0_slot13     -6.94041e-04    8.43614e-03    1.36777e-06   -6.27863e-01
14  t0_slot14     -7.63359e-03    9.72456e-03    1.40649e-06   -6.24278e-03
15  t0_slot15      7.72138e-03    1.19182e-02    1.62714e-06    5.87218e-02
16  t0_slot16      1.36556e-02    1.43719e-02    1.80844e-06   -5.65519e-02
```

“Systematic Error”
など、細かいことは
現在検証中。

Minuitコードを使用

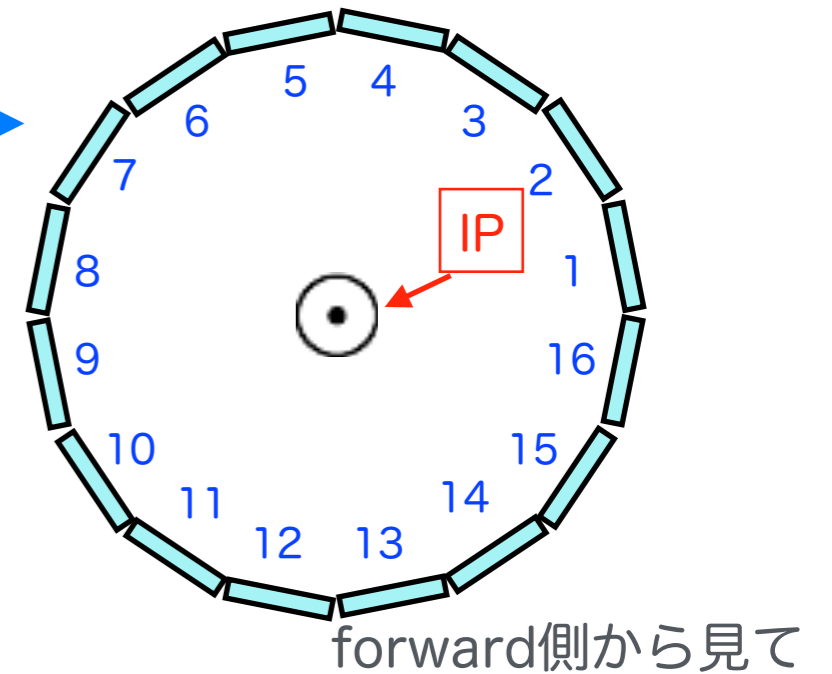
前田さん(名古屋大)のご協力により

まとめ

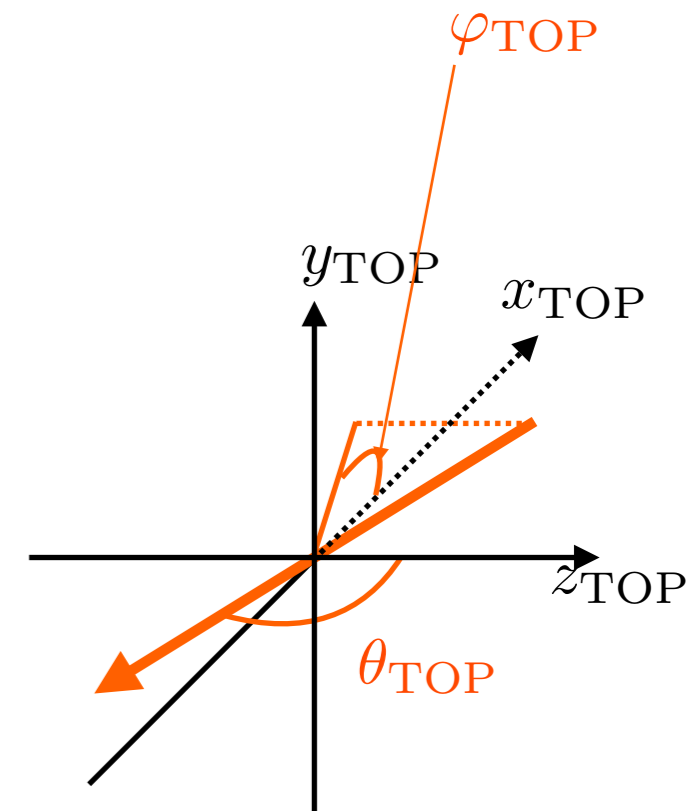
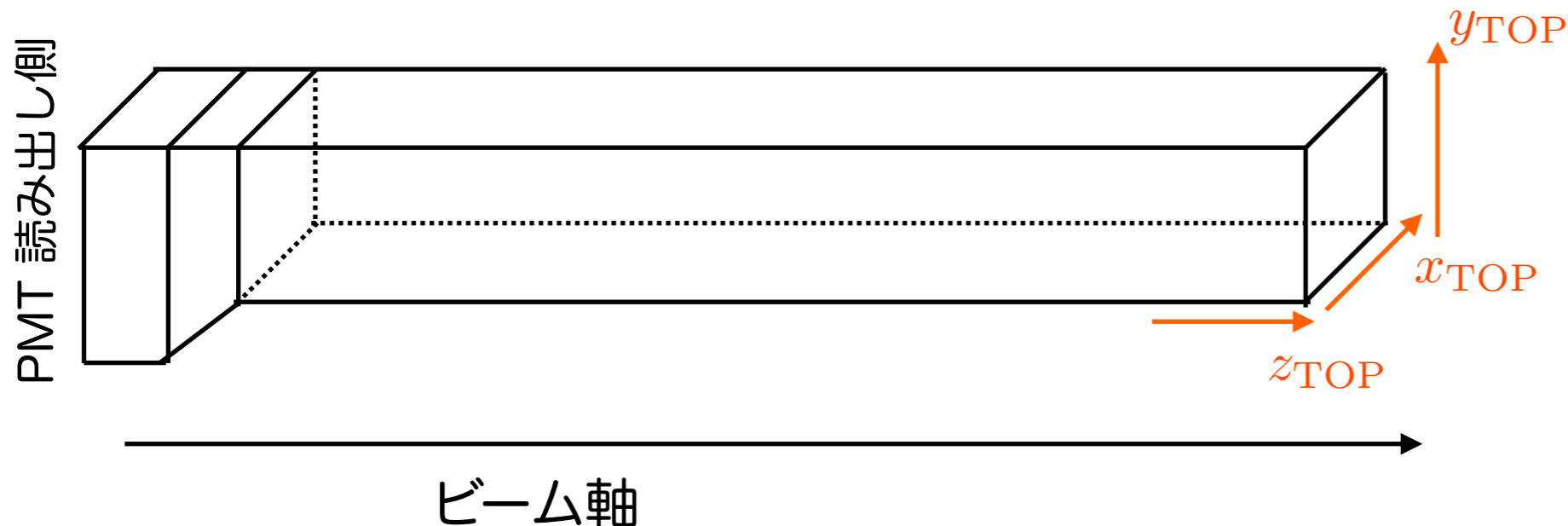
- ・ 2モジュール間での宇宙線ミュオンのヒット時間を決定して、ヒット時間の差 TOF_{TOP} を計算し、それと期待値 $TOF_{expected}$ を比較することで、モジュールごとのTOの差を測る。
- ・ シミュレーション上で Δt 分布をチェックすることで、TOPモジュールごとの時間原点の較正方法を確立した。
- ・ 今後、時間原点を決定する手法を考えて、正しく動作するか検証する必要がある。また、実際の宇宙線データの解析も開始する予定である。

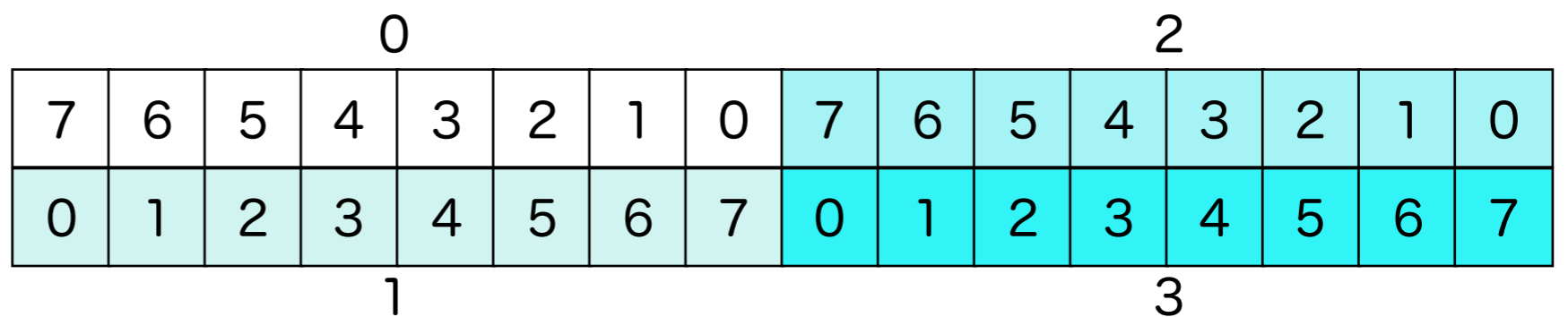
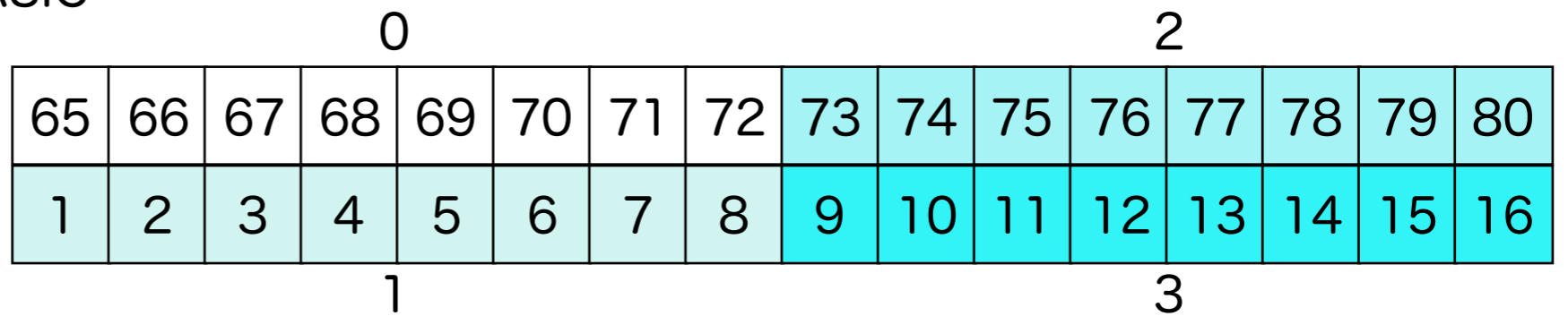
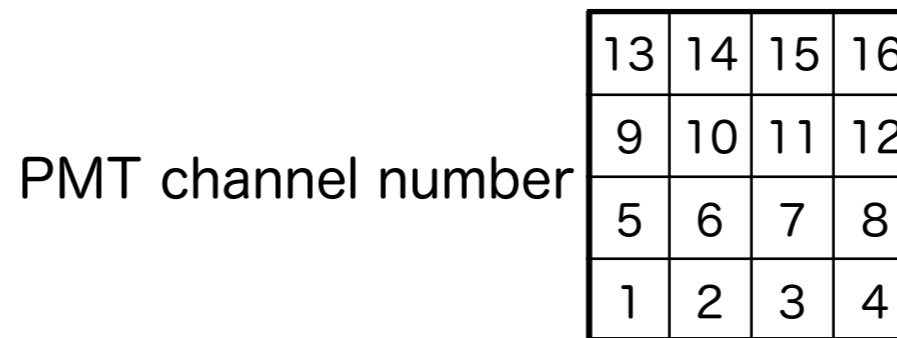
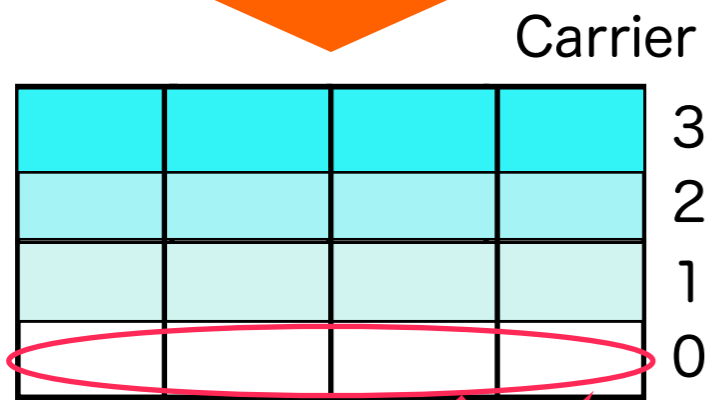
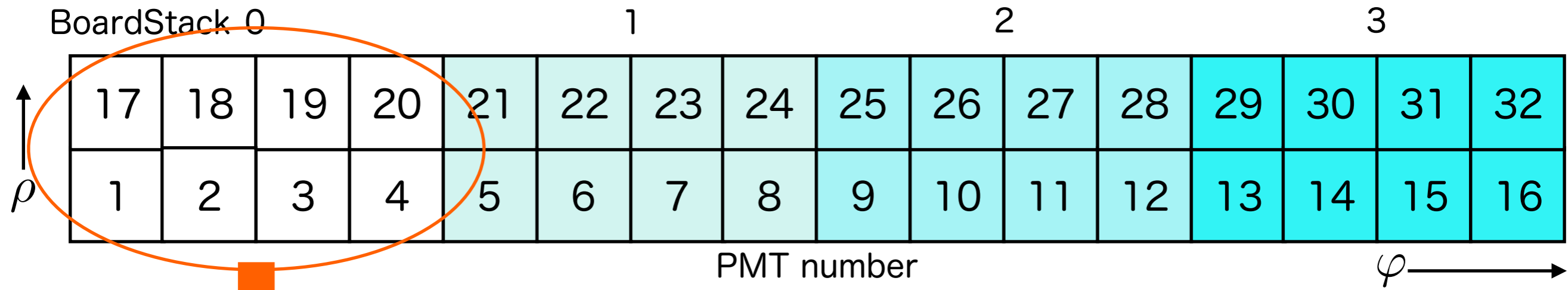
使用可能な量や数字

- TOPのslot番号
- PMTのpixel番号
(どのpixelに光子が当たったか)
- 運動量 p
- 入射角 (θ , ϕ), 入射位置 (x , z)
[ただし、これはTOP上の座標(下の図)]
- 光子の検出時間



****CDCの時間情報は、現在較正中なので使えません****



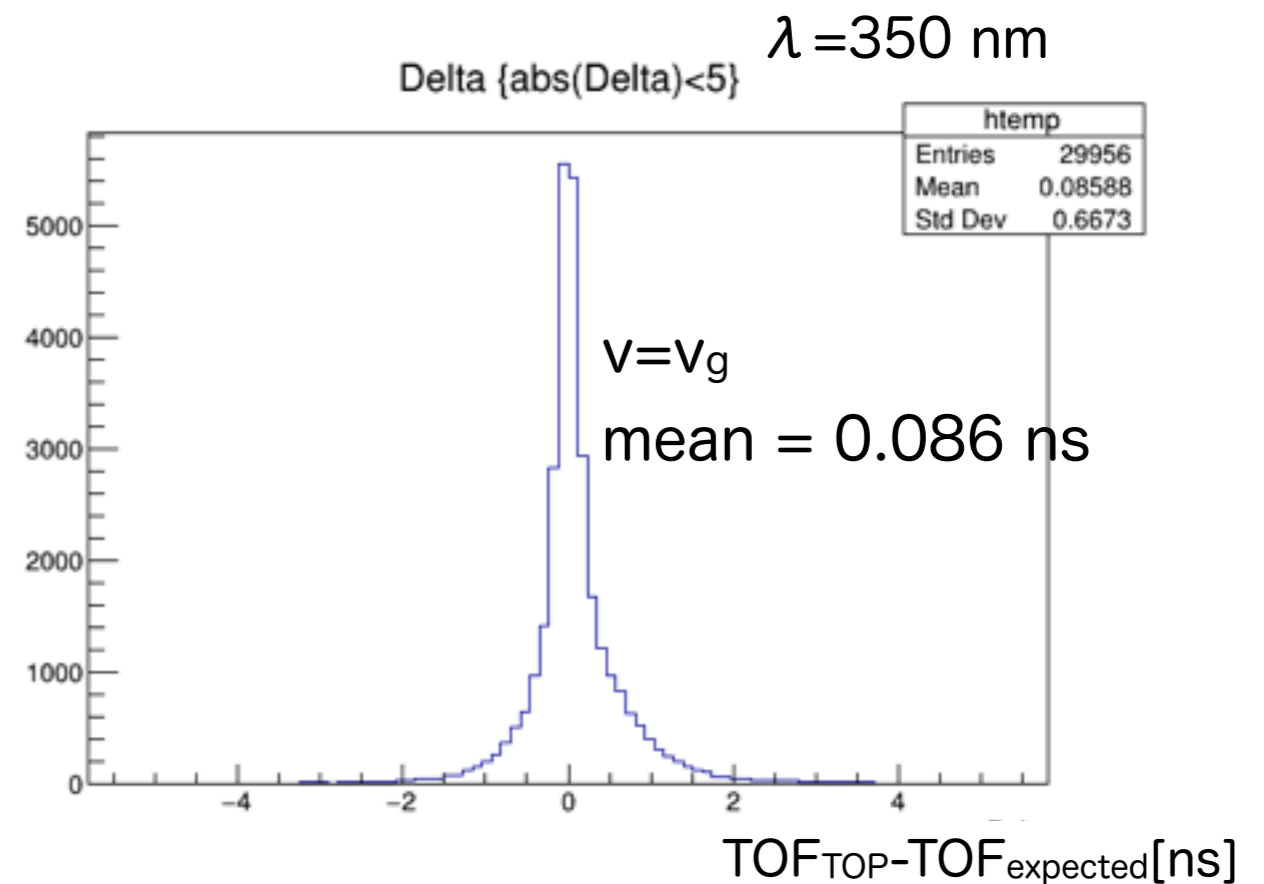
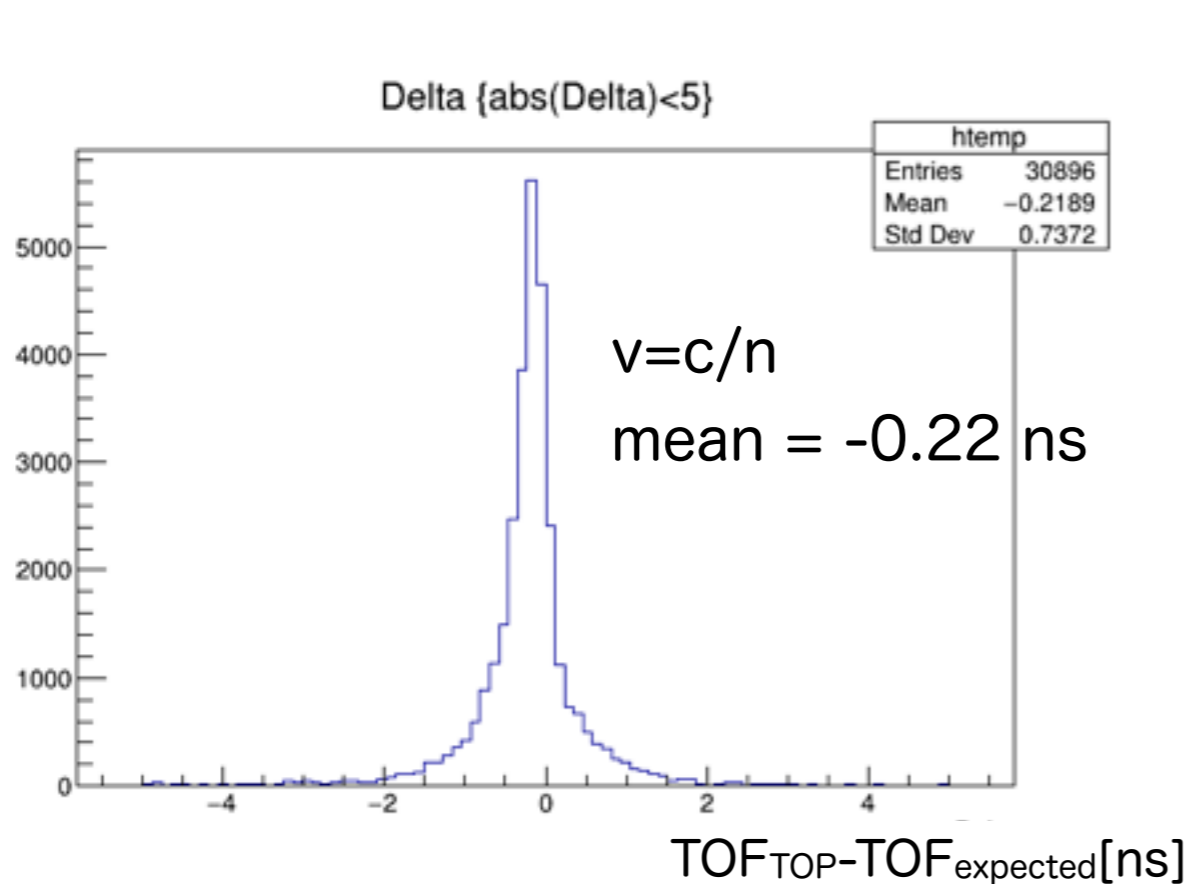


伝播速度

チェレンコフ光は、「群速度」に従って飛行する

$$v_g = \frac{c}{n} \left(1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right), \quad n = 1.44 + \frac{8.2}{\lambda(\text{nm}) - 126} \quad (\text{in the quartz})$$

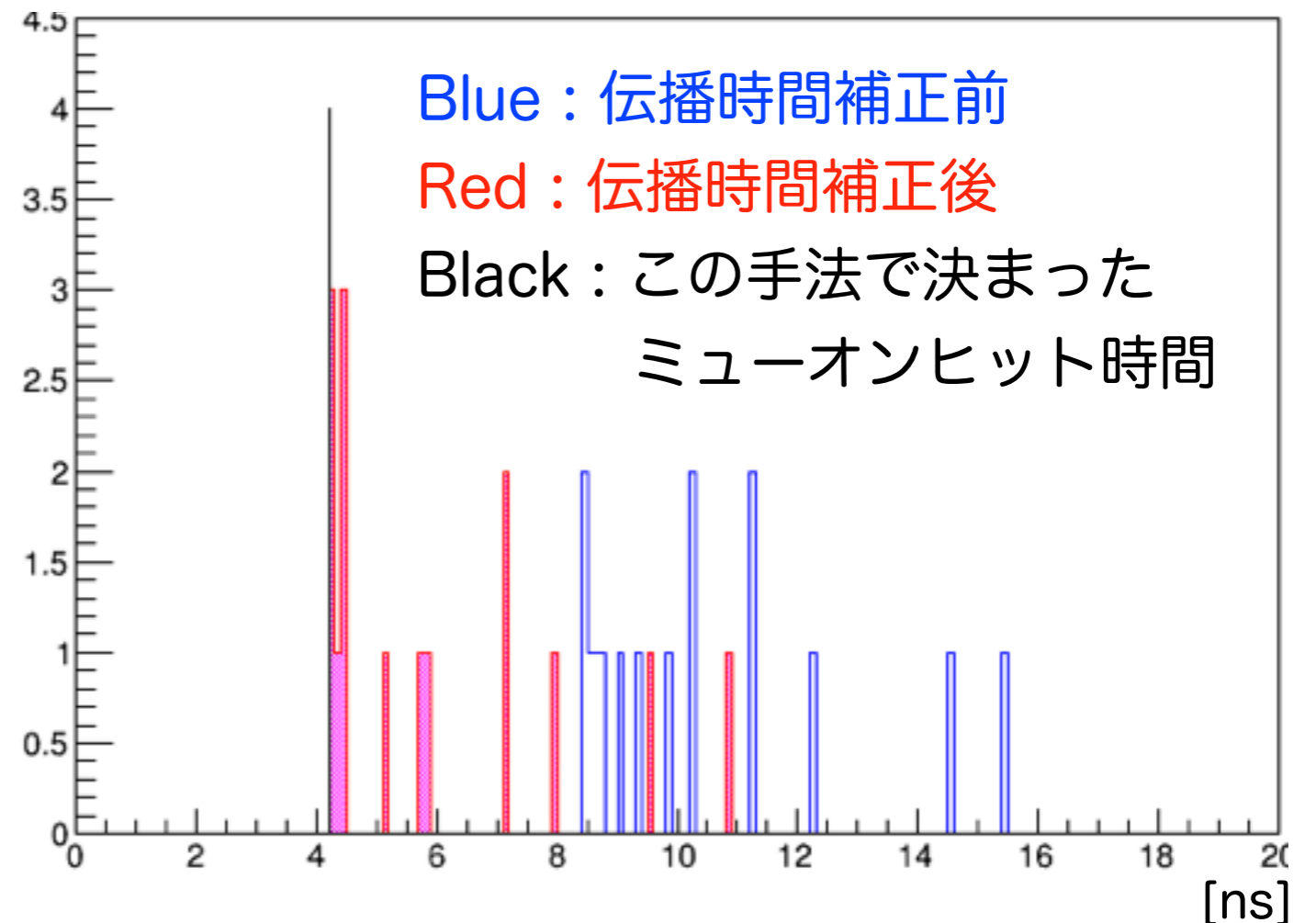
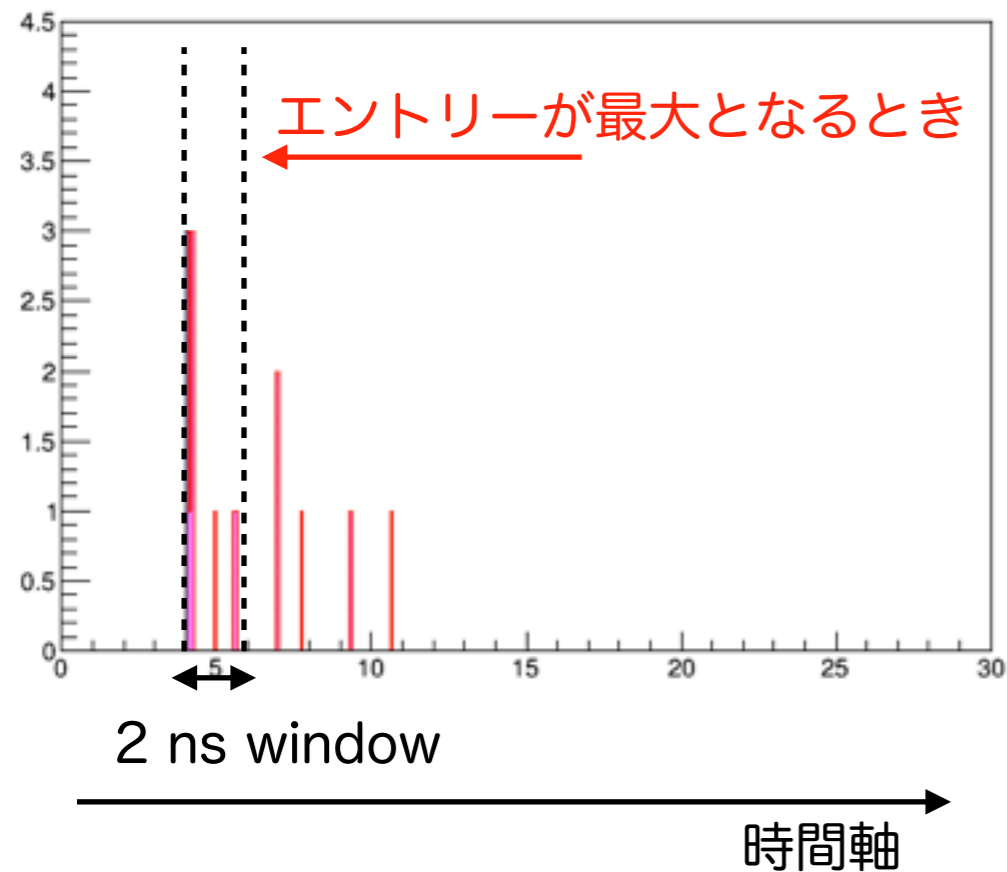
屈折率 n は波長 λ に依存



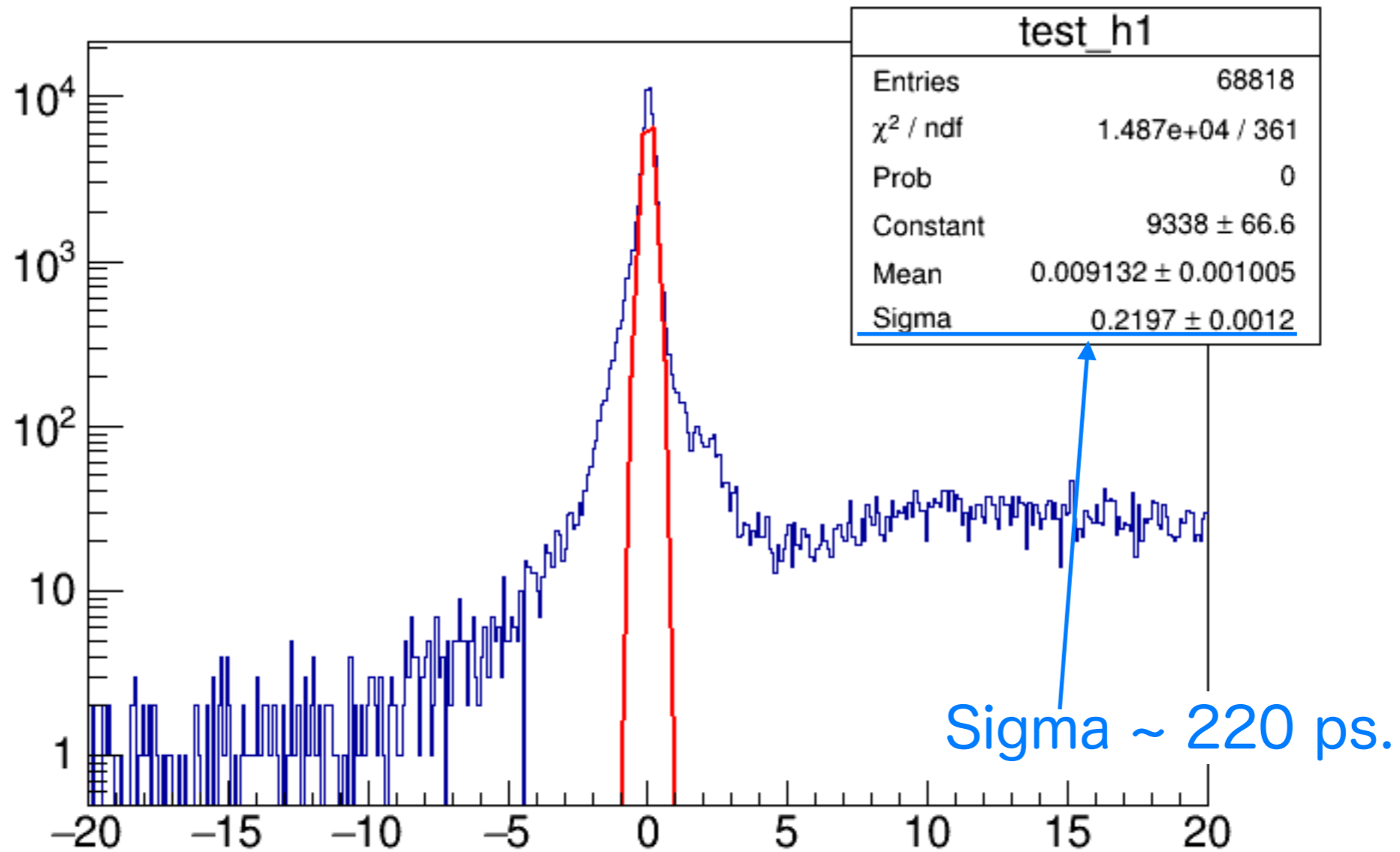
ミューオンヒット時間

- ・ 幅2 nsのウィンドウを仮定し、時間方向にシフト
- ・ ウィンドウ内のエントリー(伝播時間補正後)を数える
- ・ エントリーが最大になるとき、ウィンドウの「左端」をミューオンヒット時間とする

This code was written by Tsuzuki-san.



ミューオンヒット時間の精度

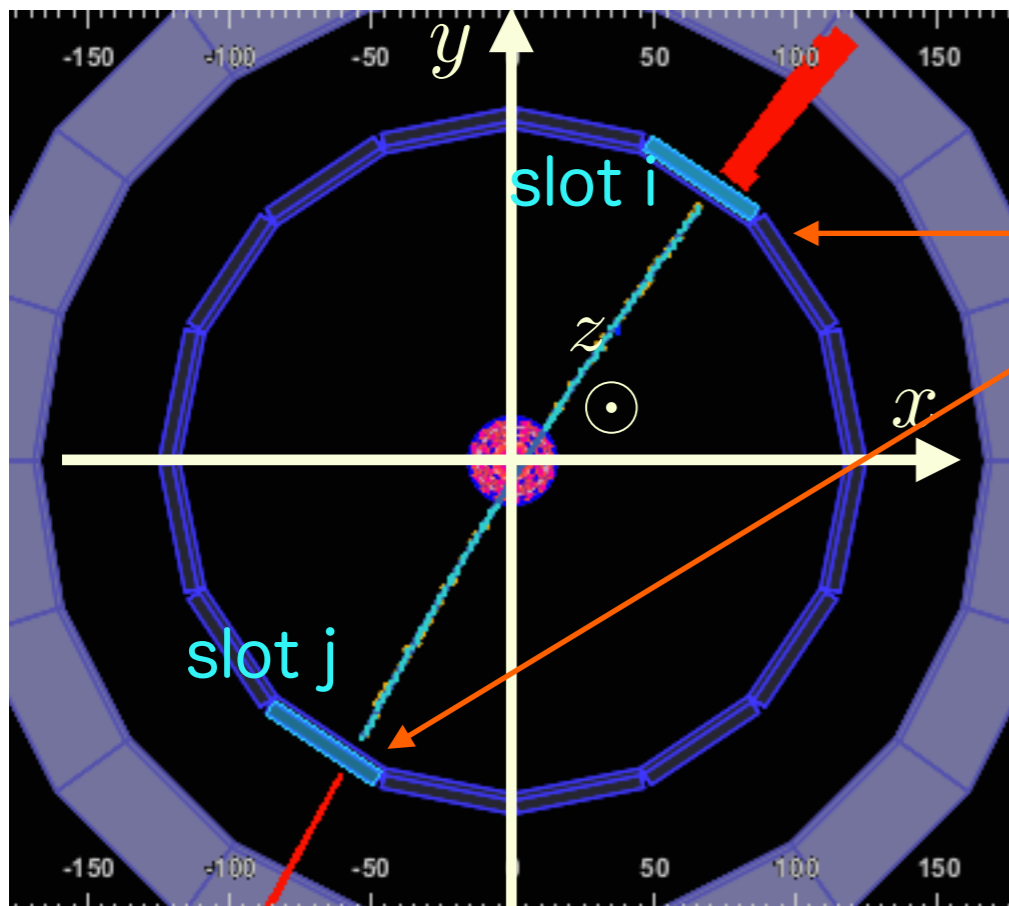


都築さんのスライドから

TOF_{trk} を計算

- ・ ミューオンヒット時間決定までを、2つのTOPモジュールで行う。
- ・ 2モジュールのヒット時間の差 = Time Of Flight (飛行時間)
この値をTOF_{TOP}とする。

一方で



入射位置は、CDCから再構成される。

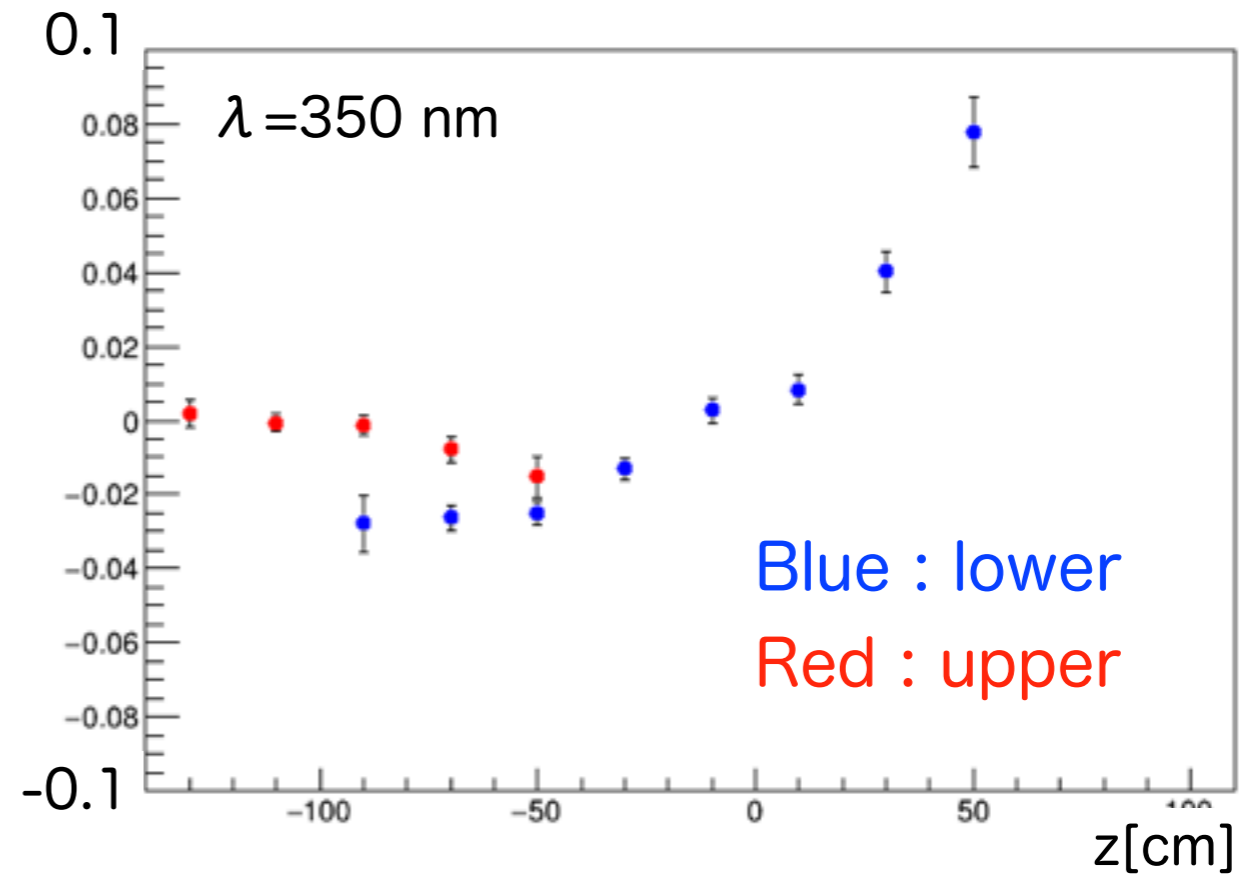
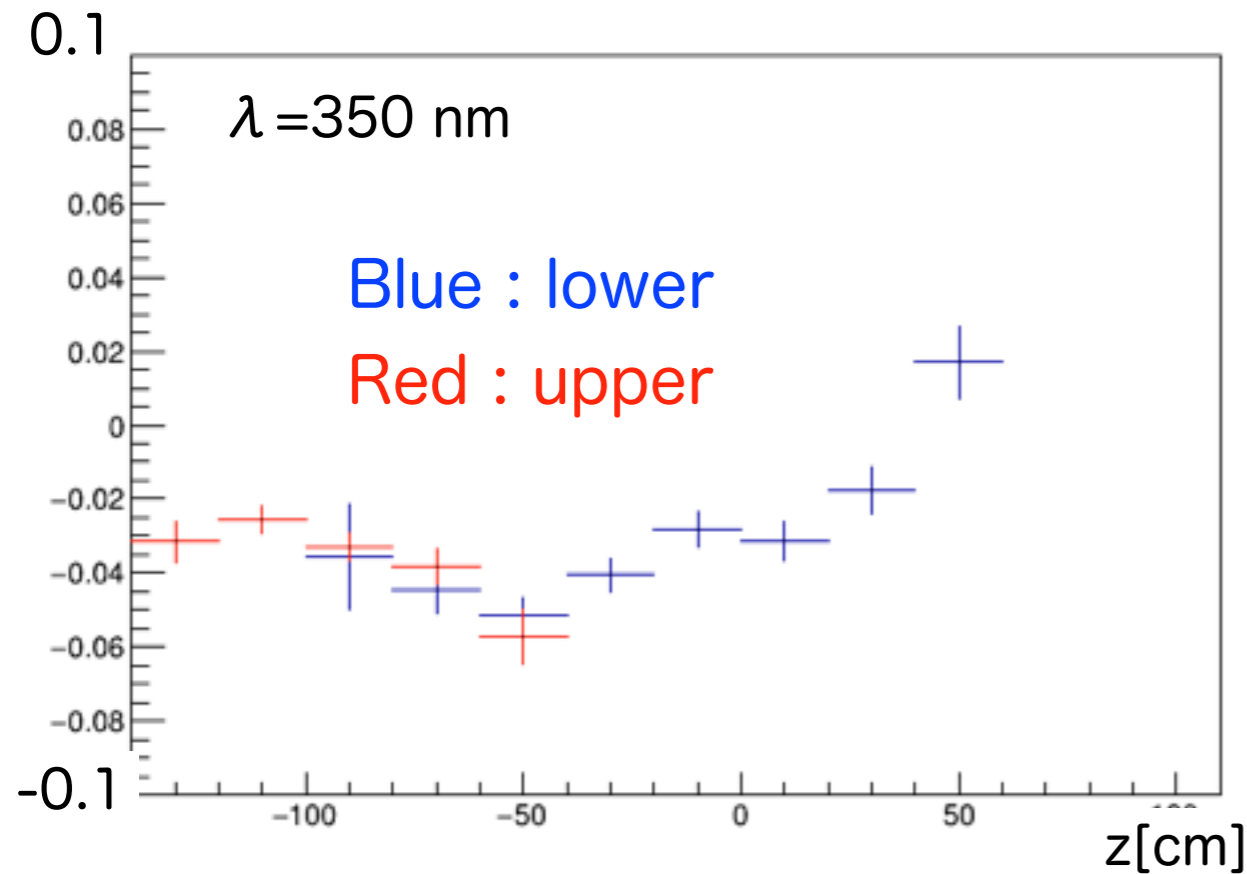
$$(x_i^{\text{global}}, y_i^{\text{global}}), (x_j^{\text{global}}, y_j^{\text{global}})$$

同じくCDCから再構成される運動量や入射角から、TOFの理論値(TOF_{trk})を計算

$$\Delta t = \text{TOF}_{\text{TOP}} - \text{TOF}_{\text{trk}} \text{ をプロット。}$$

Δt のzスキャン

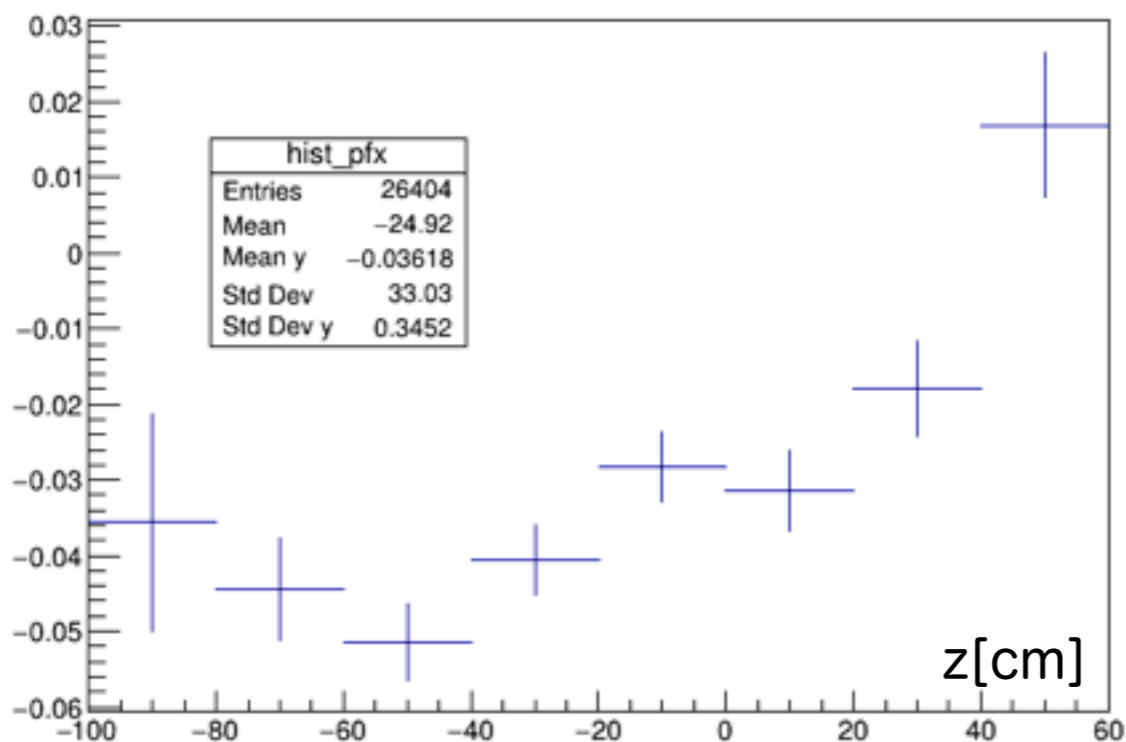
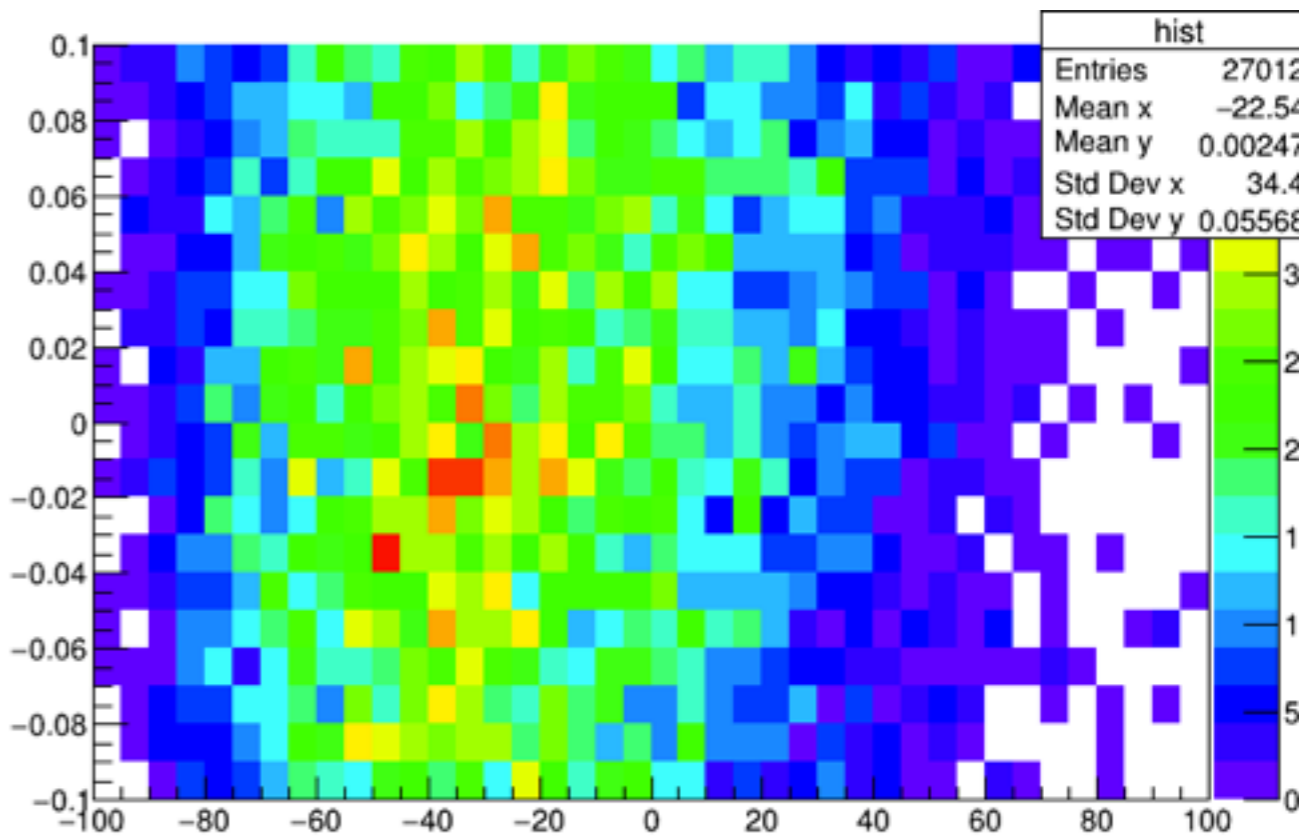
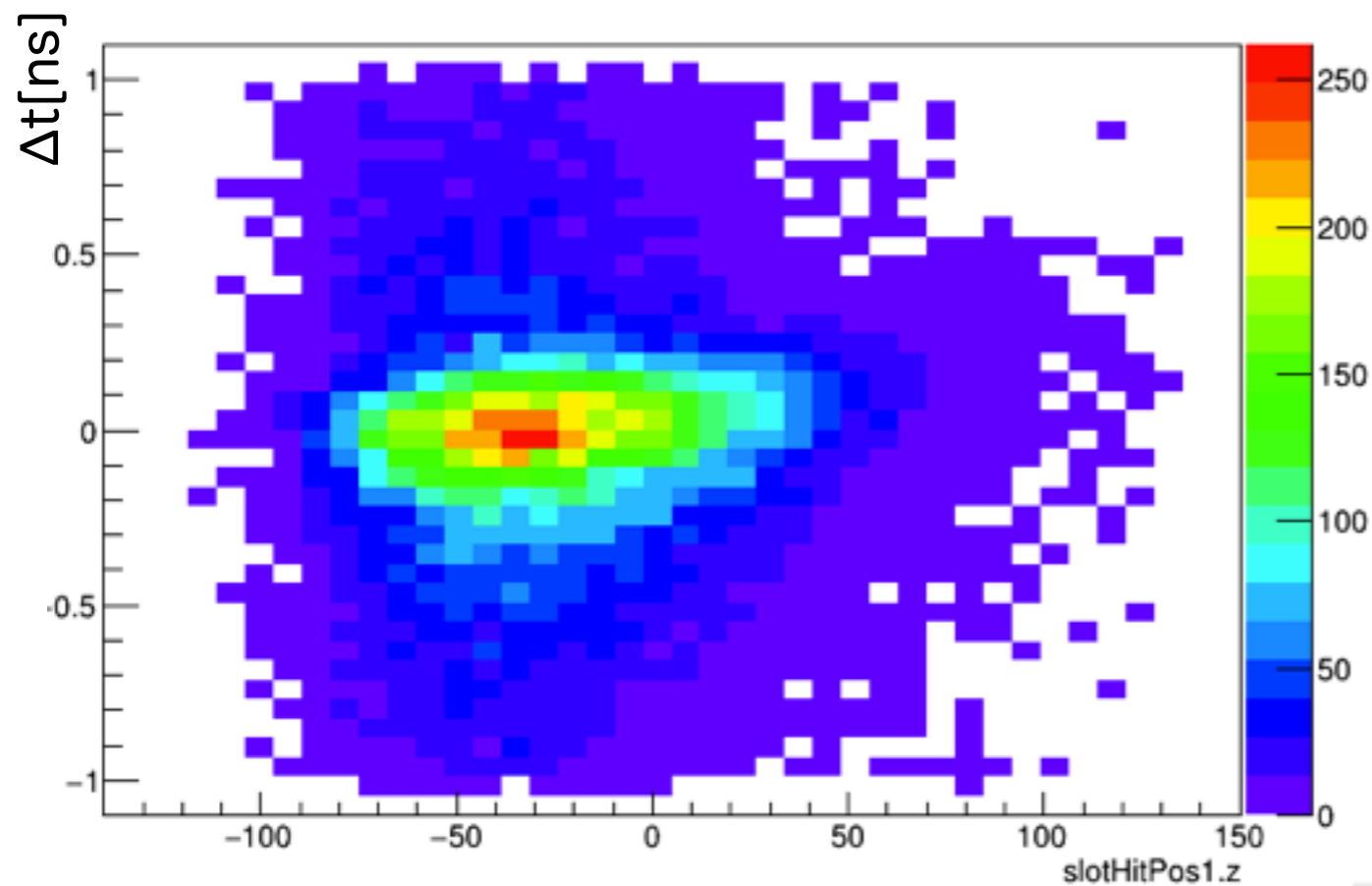
$$\Delta t = \text{TOF}_{\text{TOP}} - \text{TOF}_{\text{expected}}$$



各 z でスライスして、
それぞれの Δt の1D分布の
中心値をプロット。
-0.1付近にピークがあったのは
そこにテールがあるから？

2つのガウシアンで
フィッティングした
結果のmean値をプロット。

zのテール



…テールの寄与はよくわからない。
(100 ps以下の世界なので、
実はこの議論は詳細すぎ?)

事象選別

- ・ 200000イベントを収集
- ・ p (ミューオンの運動量) $\geq 1 \text{ GeV}/c$
- ・ $\theta \geq 90^\circ$ (チェレンコフ光が直接PMTに向かうように)
- ・ ミューオンは必ず
「片方は上半分(slot1-8)、もう片方は下半分(slot9-16)」
にヒットすることを要求

Z vs θ 相関

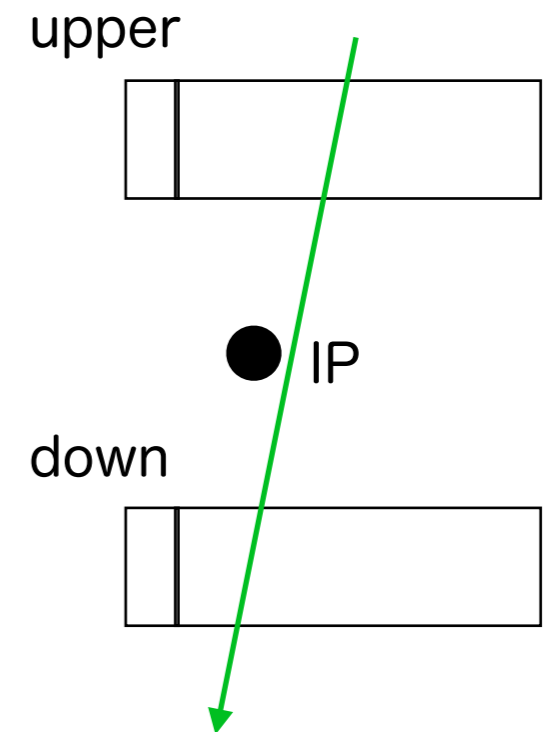
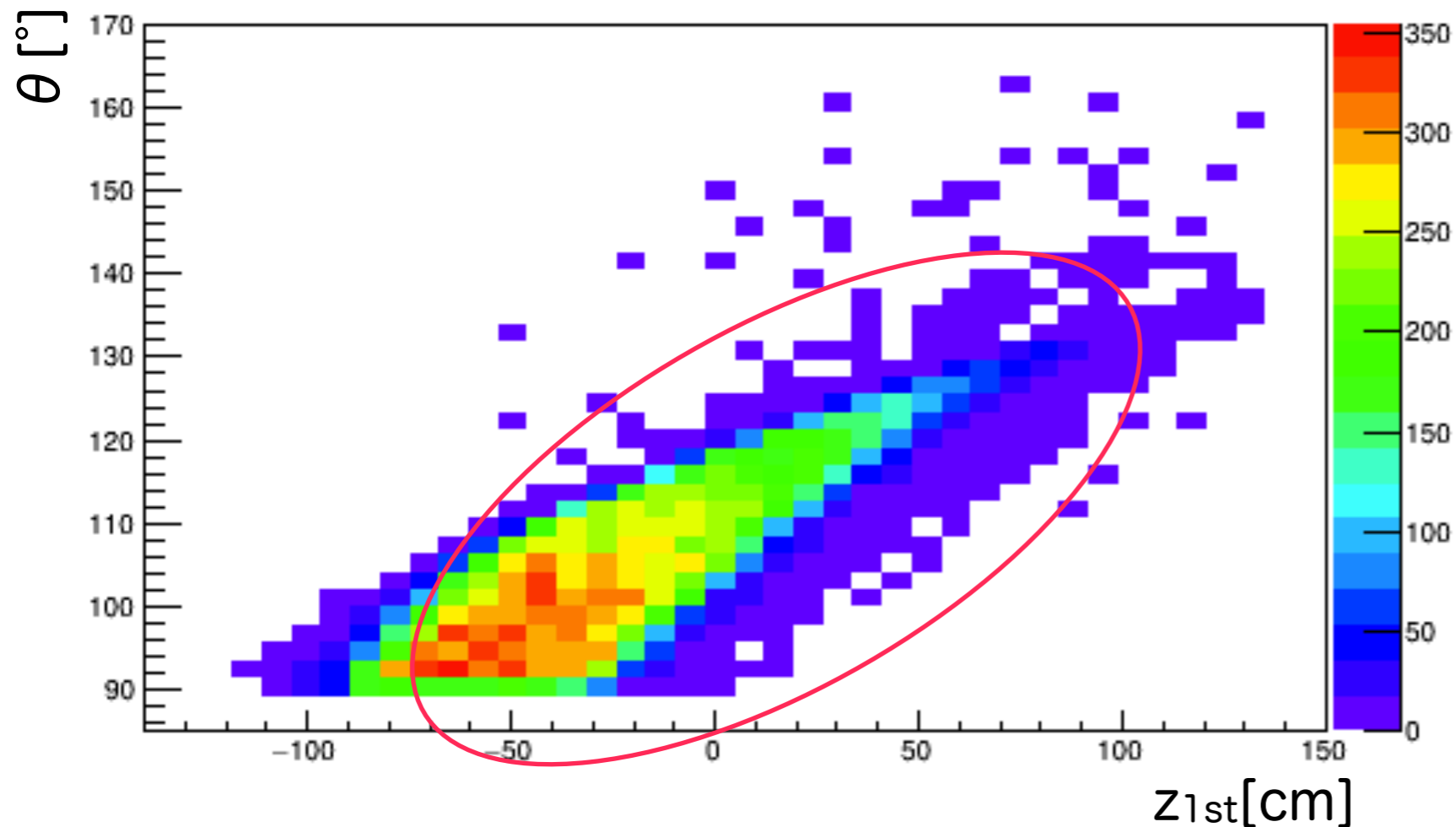
$$TOF_{TOP} = t_{2nd} - t_{1st}$$

片方は上側、片方は下側

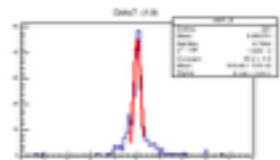
上側を1st、下側を2ndと固定

ミュオンはIPのある程度近くを通る

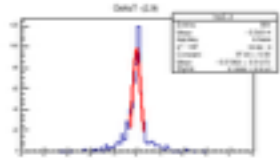
z vs θ correlation



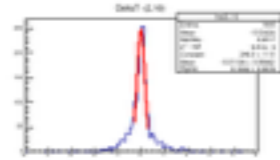
z依存性は θ 依存性由来？



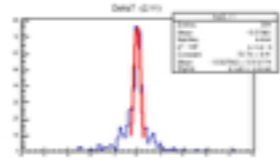
1-9



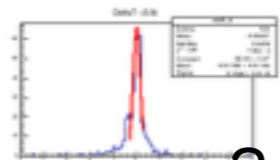
2-9



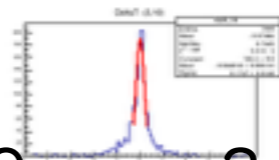
2-10



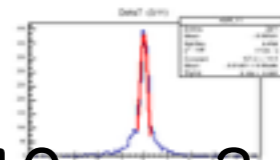
2-11



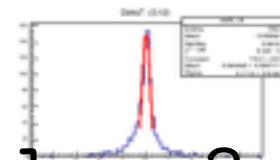
3-9



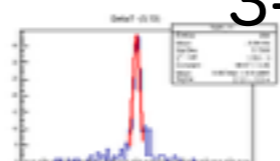
3-10



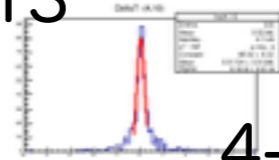
3-11



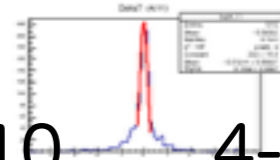
3-12



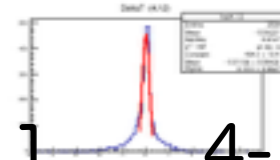
3-13



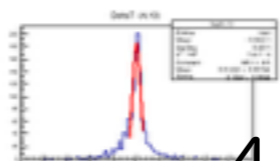
4-10



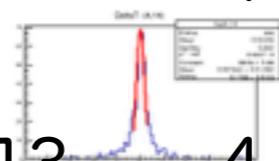
4-11



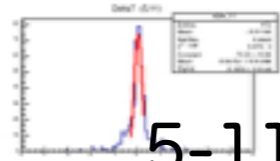
4-12



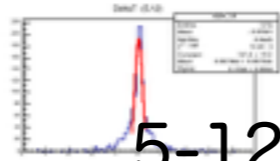
4-13



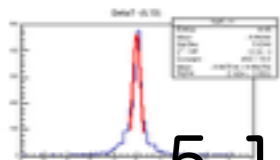
4-14



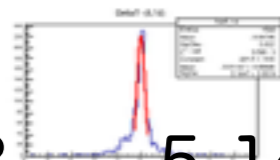
5-11



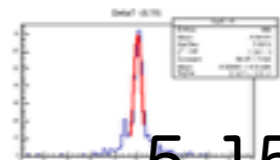
5-12



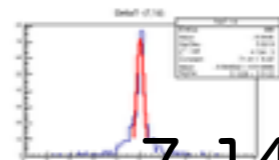
5-13



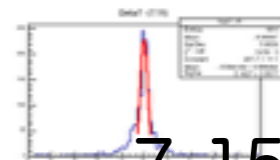
5-14



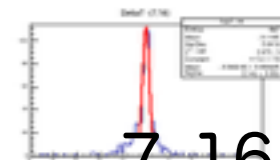
5-15



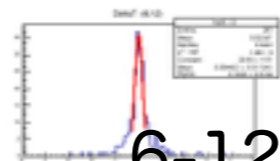
7-14



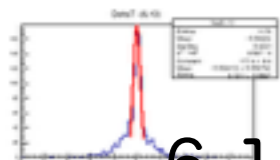
7-15



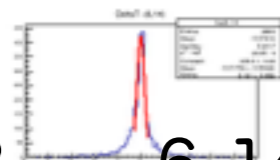
7-16



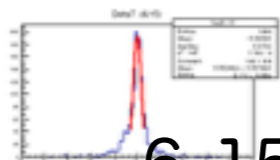
6-12



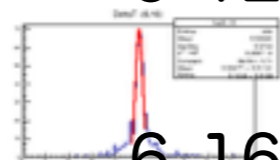
6-13



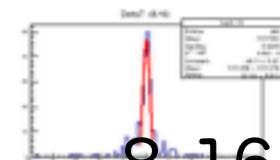
6-14



6-15



6-16



8-16

Delta {abs(Delta)<5}

