

MEG-II実験のためのSiPMを用いた 陽電子タイミングカウンターの開発 —プロトタイプによる性能試験—

吉田昂平(東大)

内山雄祐(素セ)、大谷航(素セ)、柴田直哉(東大)、西村美紀(東大)

他 MEGコラボレーション

日本物理学会 2014年秋季大会@佐賀大学

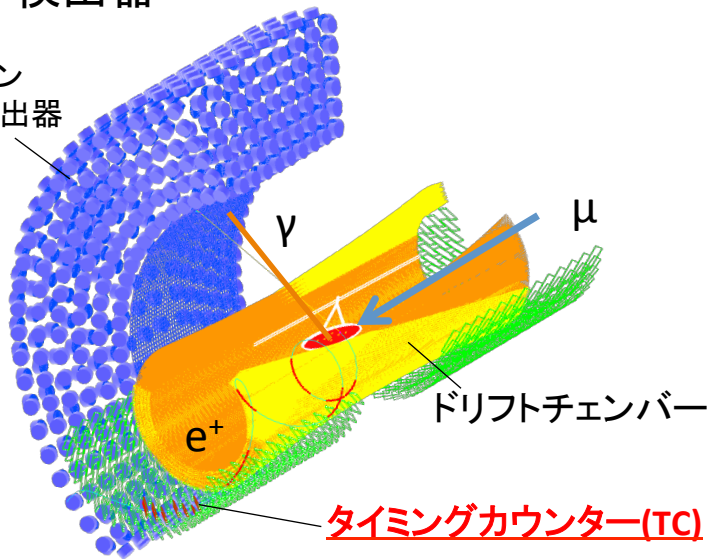
目次

- タイミングカウンターのアップグレード
- プロトタイプによるビームテスト
 - セットアップ
 - 解析方法
 - キャリブレーション
 - 結果
- まとめと今後

タイミングカウンターアップグレード

MEG-II 検出器

液体キセノン
ガンマ線検出器



MEG-Iでのタイミングカウンター



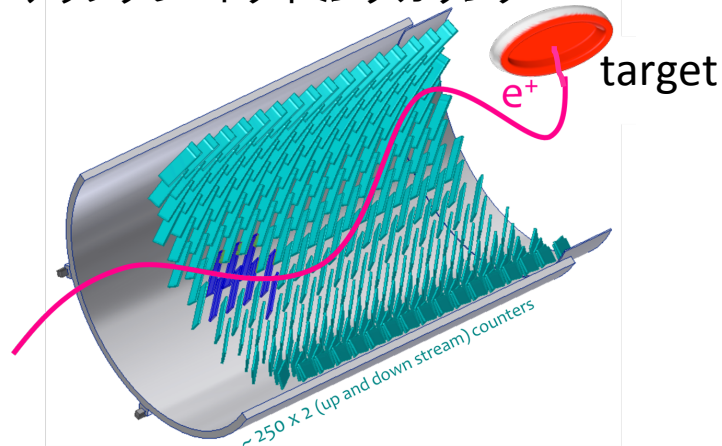
プラスチックシンチレータバー + PMT

• 細分化型タイミングカウンター

- $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ の陽電子の精密な時間測定
- 小型高速プラスチックシンチレータ+SiPM 読み出し
- 上流、下流に~250個ずつ
- 複数ヒットにより優れた時間分解能
- ハイレートな μ ビームでも低パイルアップ

$$\sigma_{\text{overall}}^2 = \frac{\sigma_{\text{single}}^2}{N_{\text{hit}}} + \frac{\sigma_{\text{inter-pixel}}^2}{N_{\text{hit}}} + \sigma_{\text{MS}}^2(N_{\text{hit}}).$$

アップグレードタイミングカウンター



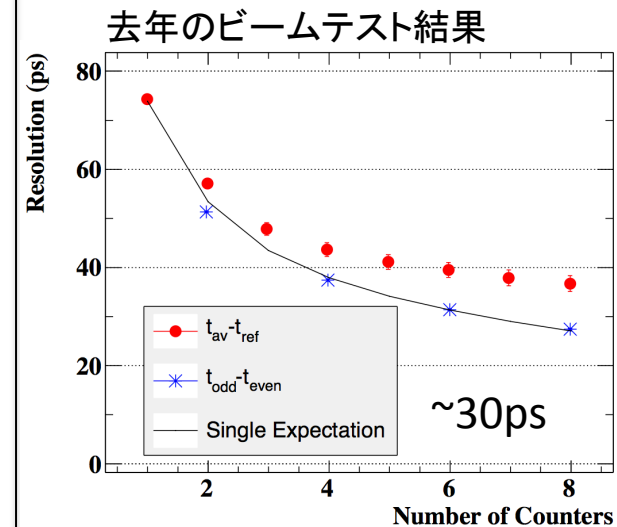
小型高速プラスチックシンチレータ+ SiPM

TCプロトタイプの実験結果

- 去年の実験結果において複数ヒットによる良い時間分解能($\sim 30\text{ps}$)が得られた
- 今回は実際のMEG-II実験に近いセットアップで陽電子ビームを用いて性能試験

前回からの変更点

- カウンターサイズ を実際のものに
 - $90 \times 40 \times 5\text{mm}^3 \rightarrow 120 \times 40 \times 5\text{mm}^3, 120 \times 50 \times 5\text{mm}^3$
- 読み出しも実際のものに
 - シンチ + SiPM3個直列 \rightarrow シンチ + SiPM6個直列
- エレクトロニクスも実際のものと近く
 - PCB, バックプレーン, 非磁性のケーブル(RG178, 7.8m)
- 解析方法の改善
 - 再構成したトラックからずれているヒットを除く
 - 2つのレファレンスカウンターを使う
- 時間分解能のヒットポジション依存性のテスト

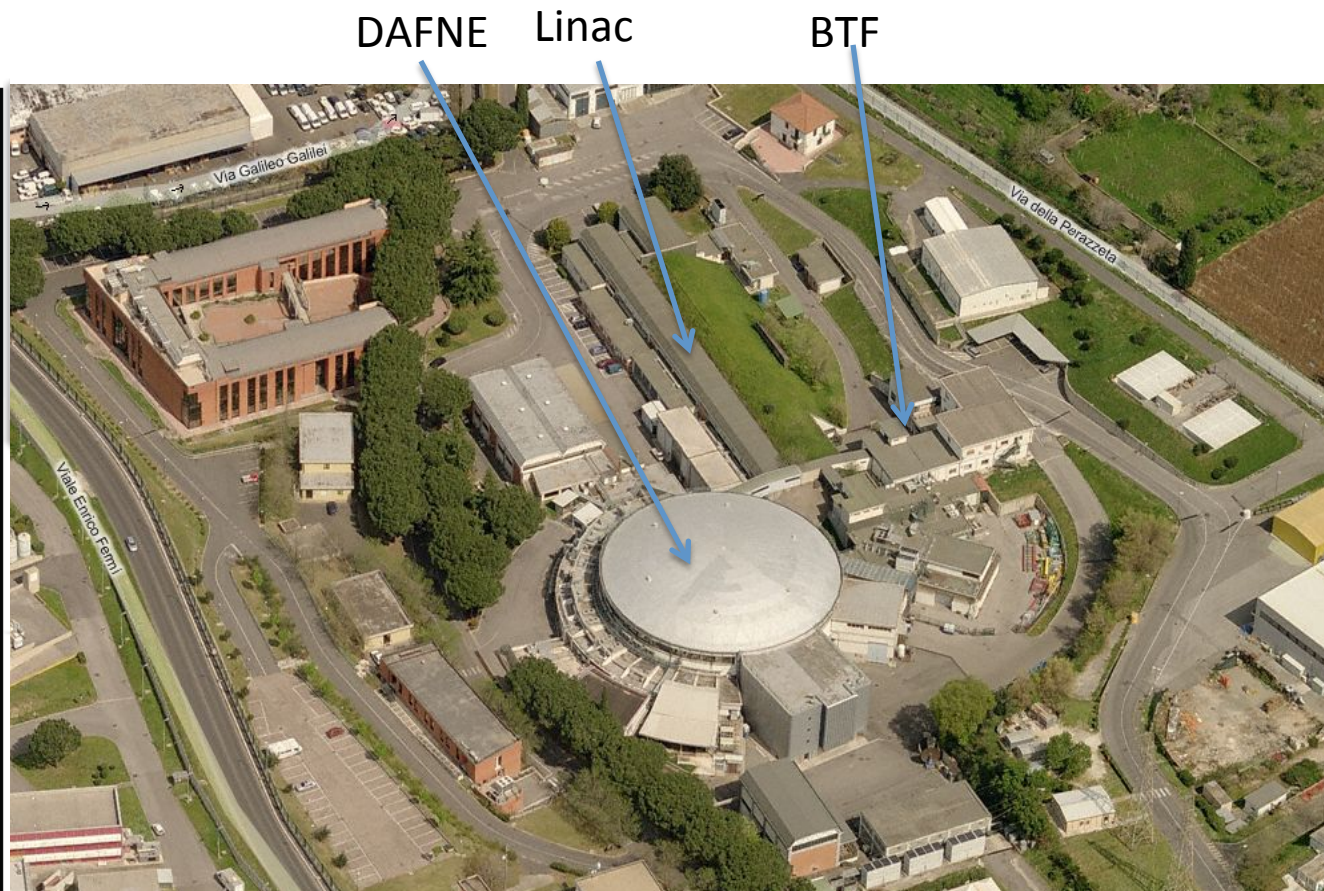


ビームパラメータ@フラスカティ研究所

- イタリアのフラスカティ研究所において陽電子ビームで性能試験
- ビームはシグナル e^+ (52.8MeV)に近い48MeVを用いた
- ビームレート: 25Hz バンチ幅: 10ns

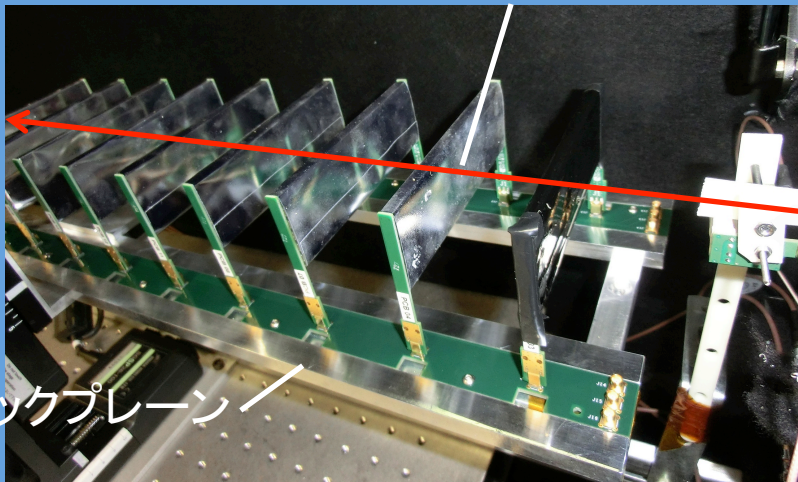
BTF main e- beam parameters

Parameter	Value
Energy Range	25-750 MeV (e-) 25-510 MeV (e+)
Transverse emittance @ 510MeV (both planes)	1mm mrad (e-) 10 mm mrad (e+)
Energy Spread @ 510 MeV	1% (e-) 2 % (e+)
Repetition Rate	1-50 Hz
Number of particles per pulse	1-10 ¹⁰
Macro Bunch duration	1 or 10 ns
Spot size (mm)	2mm (single particle) 2 cm (high multiplicity)

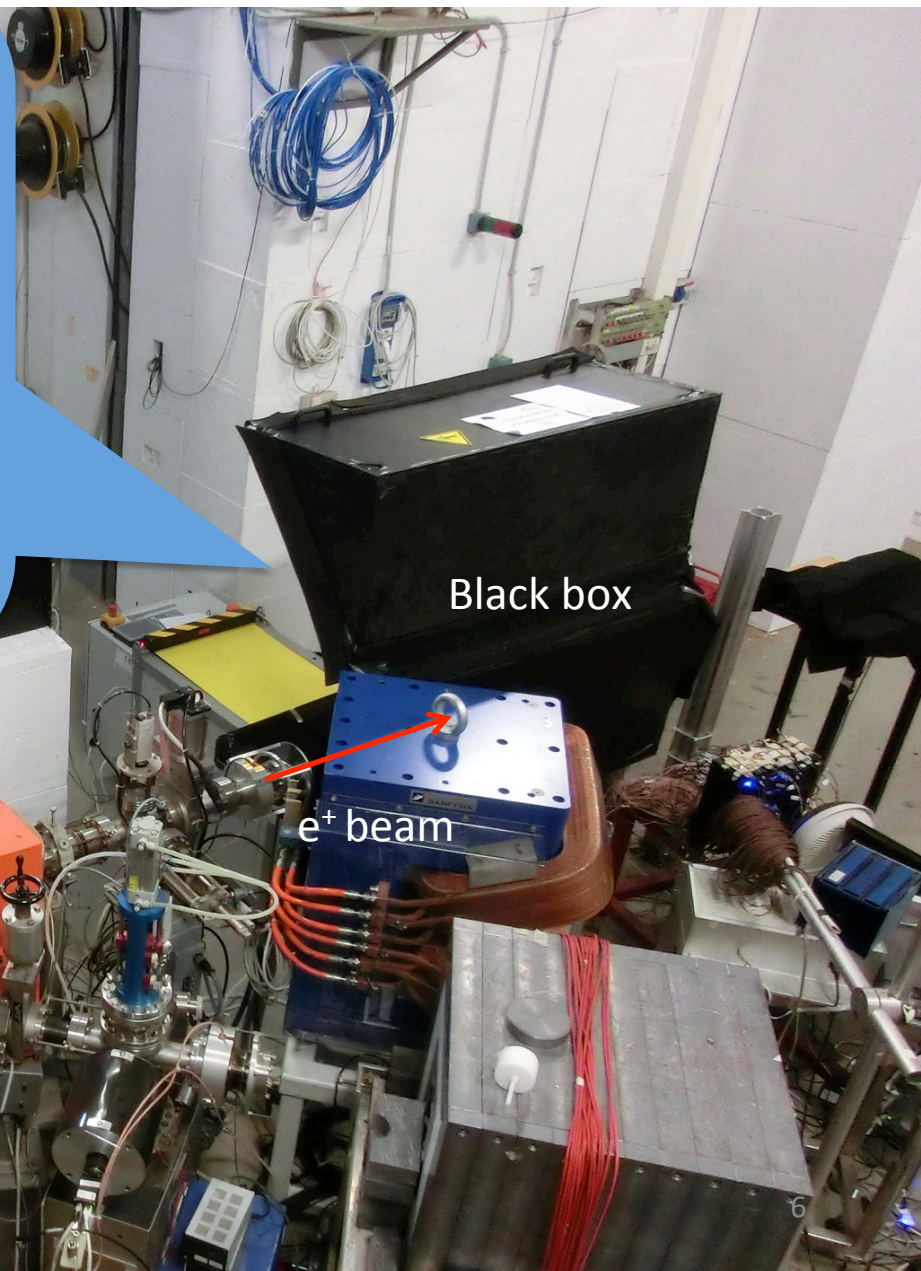


ビームテストのセットアップ

タイミングカウンタープロトタイプ
カウンター



バックプレーン

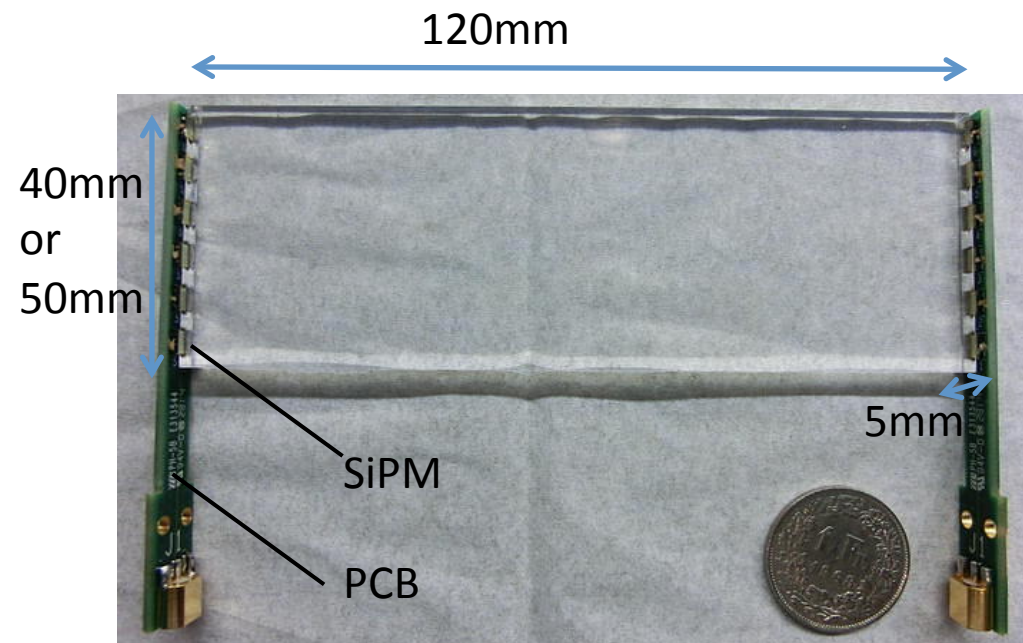


Black box

e⁺ beam

magnet

シングルカウンター



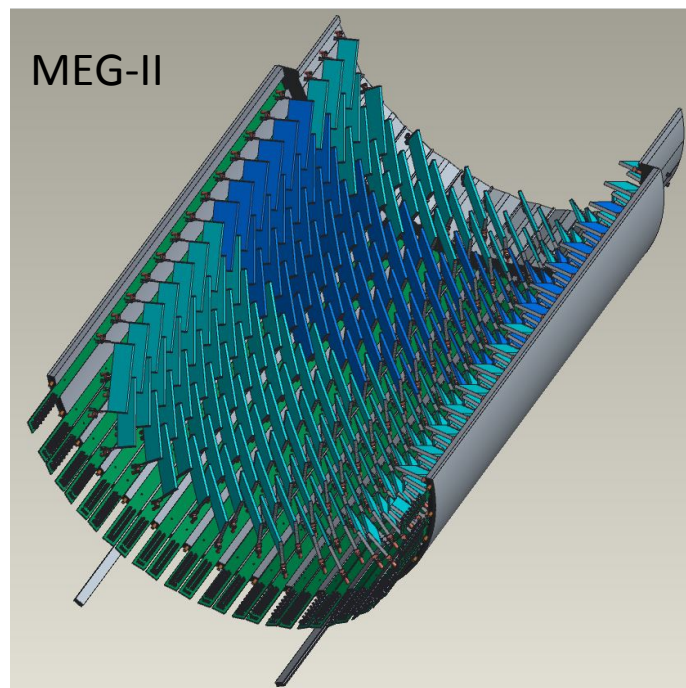
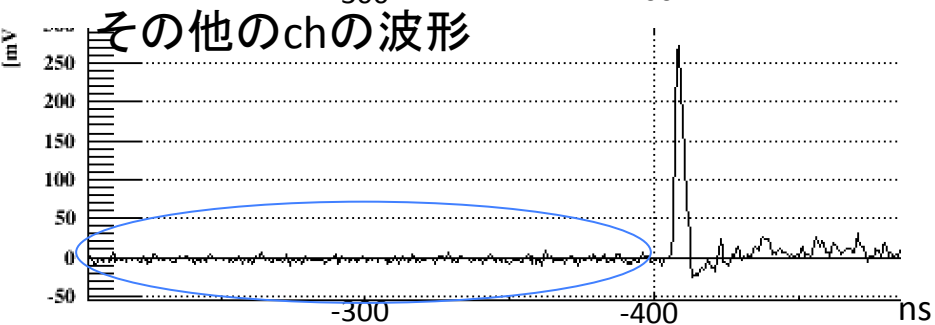
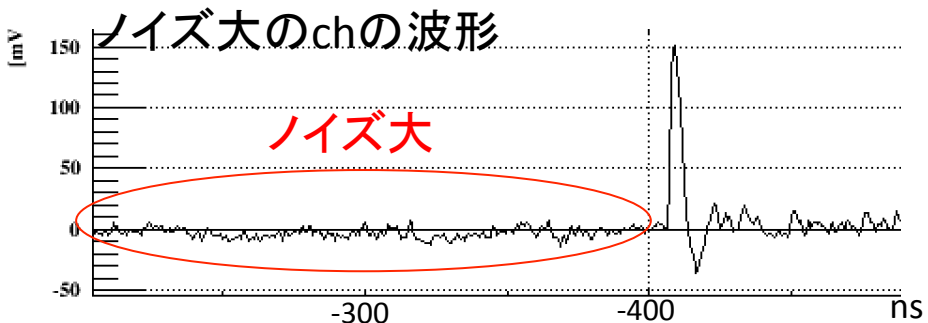
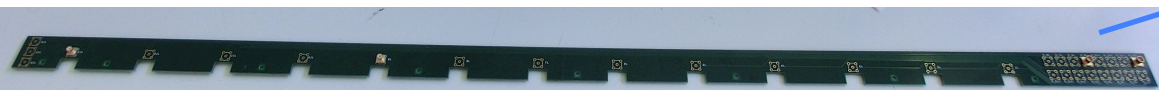
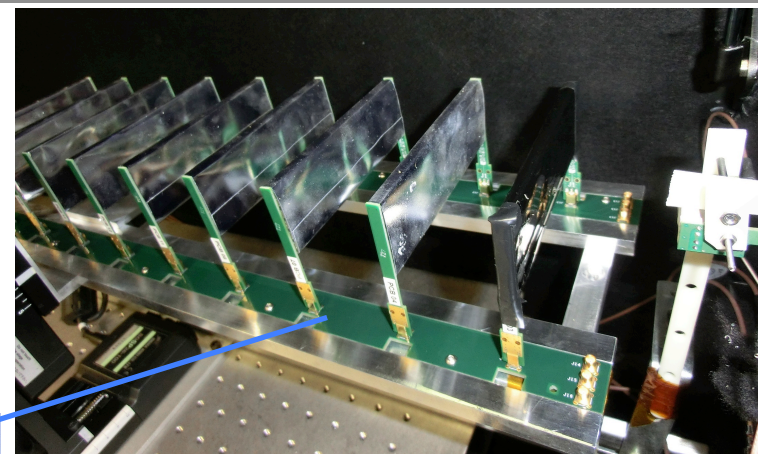
- 高速プラスチックシンチレータEJ232
 - Rise time 0.35ns
 - $120 \times 40 \times 5 \text{mm}^3$, $120 \times 50 \times 5 \text{mm}^3$
 - 鏡面反射型リフレクター(3M-film)、遮光シート(テドラー)で被う
- SiPM
 - AdvanSid製の $3 \times 3 \text{mm}^2$, 3600pix
 - PCB上に6個が直列接続
 - 2chの両端読み出し
- オプティカルセメントでSiPMとシンチレータを接合

SiPMのトラブル

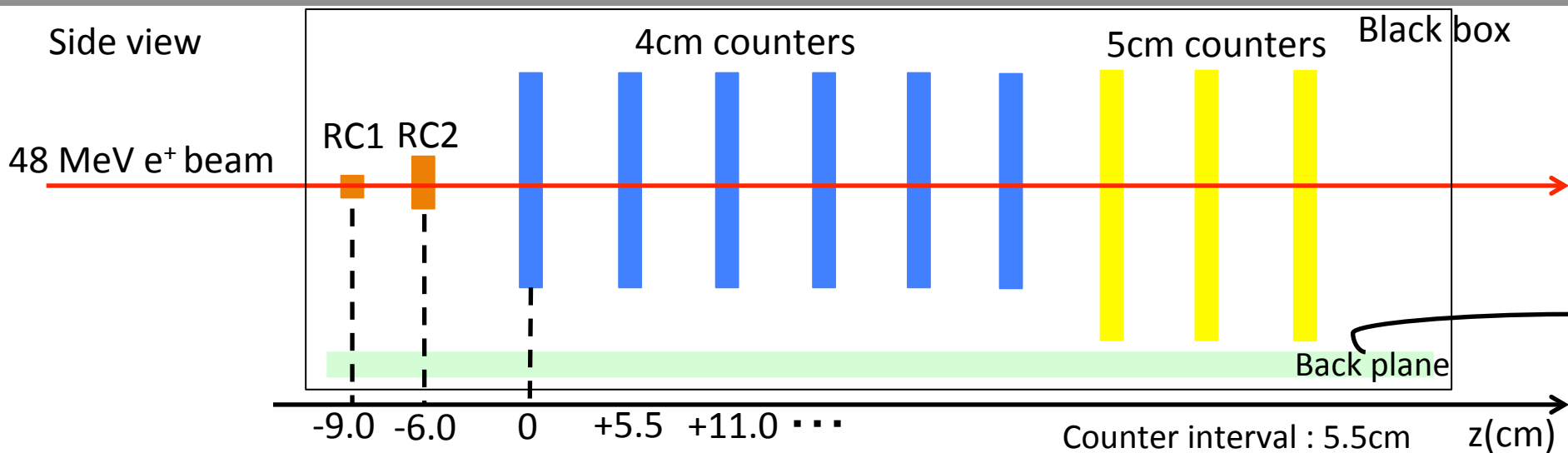
事前の試験では60psの時間分解能を確認していたが、ビームテスト用に発注したSiPMが本来のものと違い、80-90psの悪い時間分解能となってしまった(^{90}Sr に対して)

バックプレーン

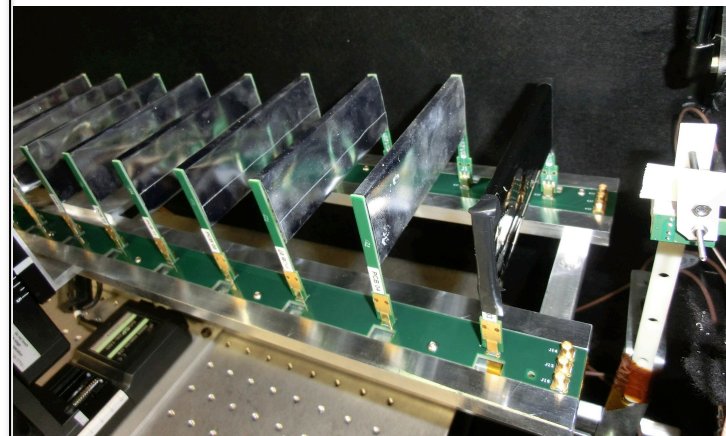
- 同軸の構造を持つ長いPCB
- 複数のカウンターをまとめて読み出すことができる
- MEG-IIで使用
- バックプレーン由来のノイズが見つかった



セットアップ

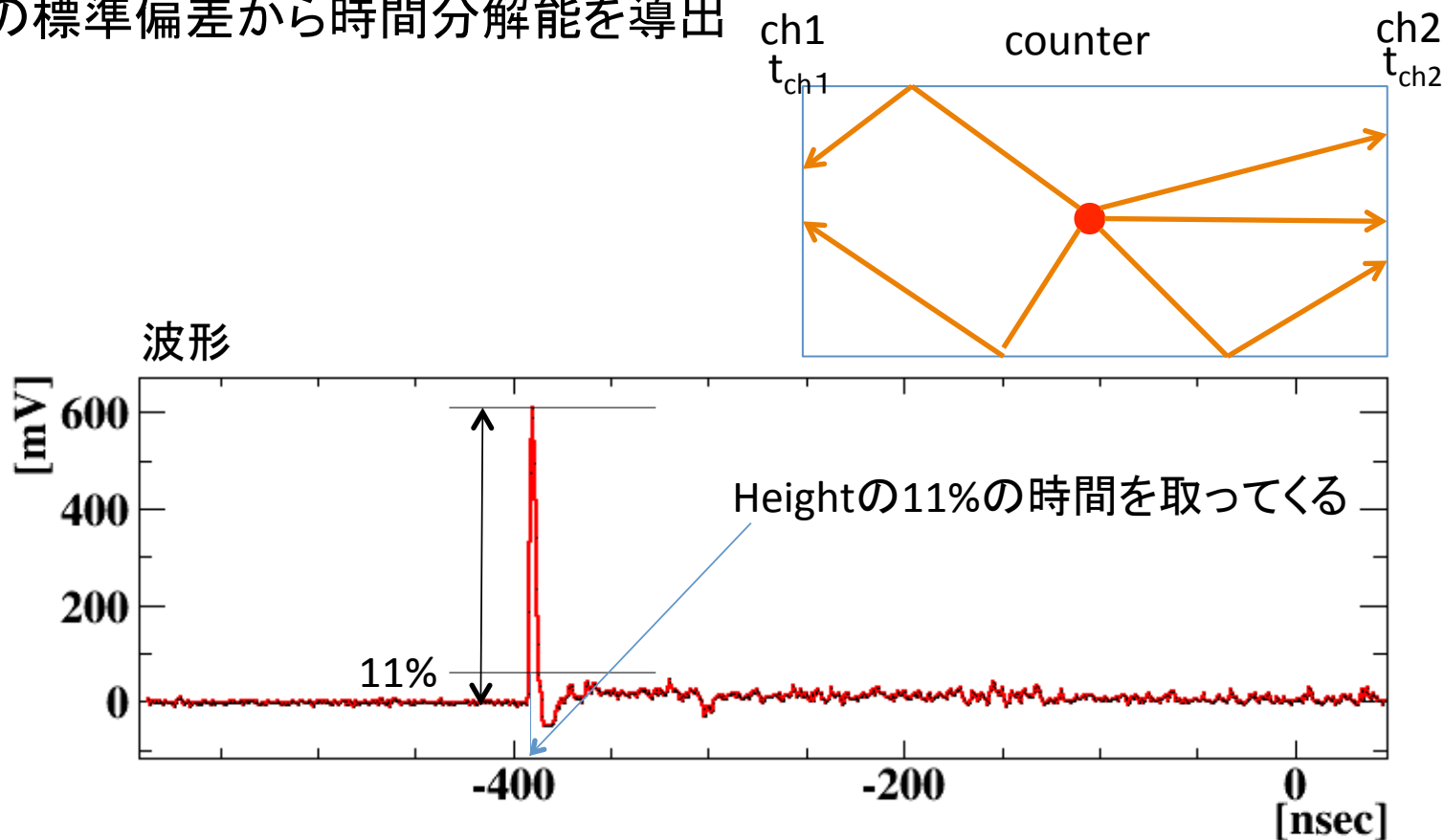


- e⁺ビーム
 - 48MeV でレートは25Hz
 - 一つのバンチには0-3個のe⁺が含まれる
- 2つのレファレンスカウンター(RC1,RC2)
 - RC1: シンチ(5×5×5mm³)+SiPM1個の1ch読み出し
トリガーとして使用
 - RC2: シンチ(25×12×5mm³)の両端にそれぞれ直列2個のSiPM
2ch読み出し
- エレクトロニクス
 - カウンターの両側のPCBをBack Planeにマウント
 - 非磁性ケーブル (RG178,7.8m)の後AMPへ(PSI製)
 - 各4chのwaveform digitizer 7個

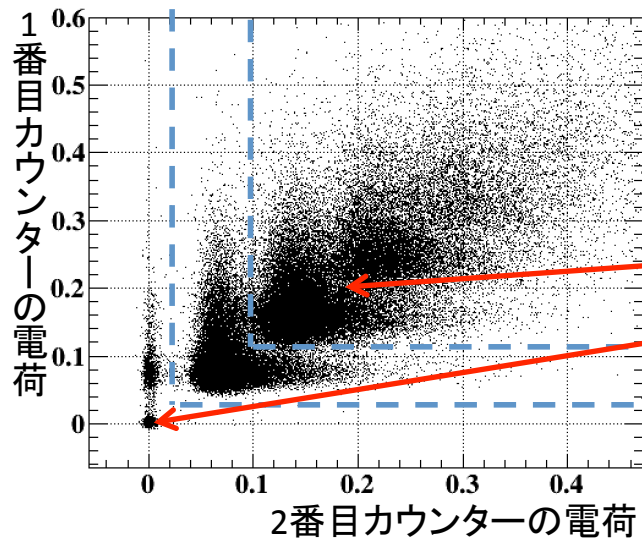


解析方法

1. ch毎のconstant fraction time(11%)をシグナルの時間とする
2. 2chのシグナル時間の平均 $(t_{ch1} + t_{ch2})/2$ を各カウンターのヒット時間とする
3. カウンターのヒット時間とレファレンス時間(RC1,RC2のヒット時間の平均)の差の標準偏差から時間分解能を導出

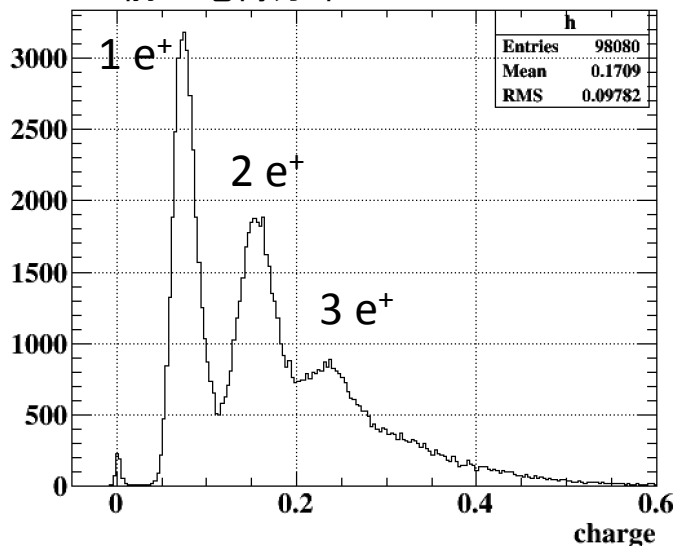


イベントセレクション



- 陽電子1つに対するの応答を見たいが、バンチには0-3個の e^+ が含まれている
- 1番目と2番目のカウンターの電荷の相関から e^+ が1個のイベントのみを選択
 - 複数 e^+ のイベント
 - e^+ なしのイベント

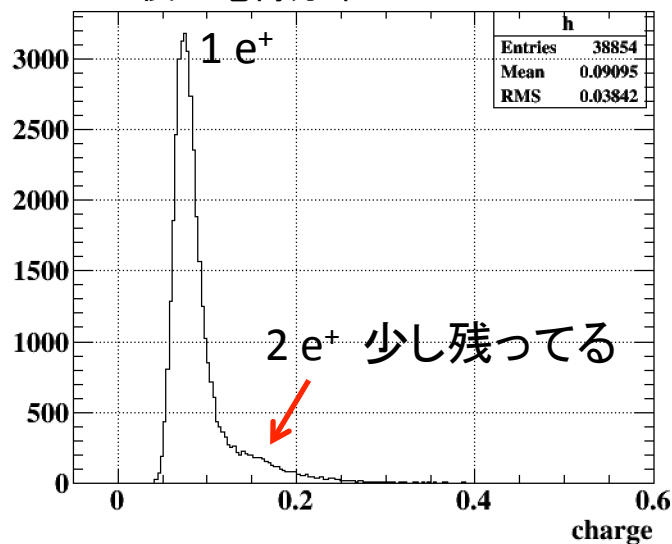
Cut前の電荷分布



Cut



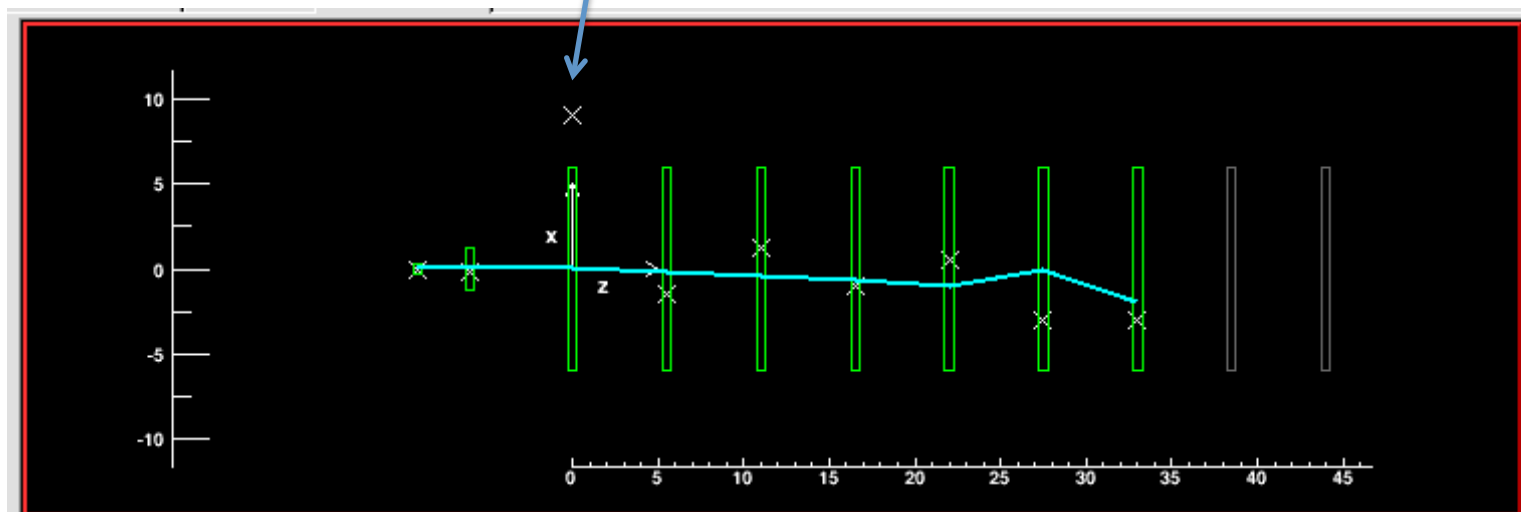
Cut後の電荷分布



トラッキングによるヒットセレクション

- カルマンフィルターにより、推定されたトラックとヒットポジションの測定値が大きくずれているカウンターを除去
 - 除ききれっていない複数 e^+ イベント
 - ビーム起源のガンマ線

トラックと大きくずれているため
このカウンターは解析で使わない

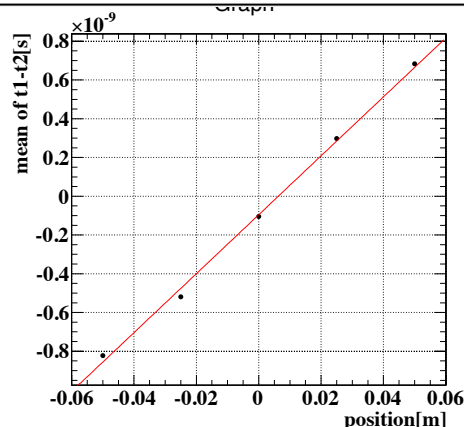


キャリブレーション

ヒットポジション

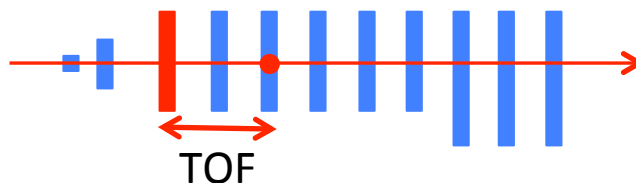
- 2chのシグナルの時間差から位置を再構成してヒットポジションの較正
- 位置分解能: ~1.2cm

$$t_{ch1} - t_{ch2} = \frac{2x}{v_{eff}}$$



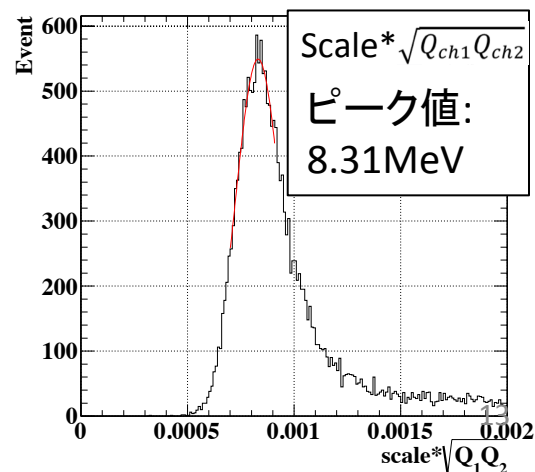
ヒット時間

- 相対的なヒット時間オフセットをTOFにより補正

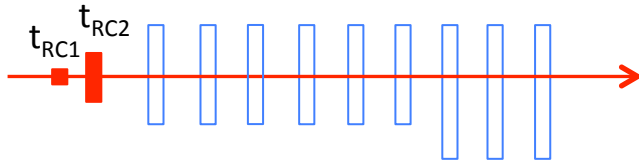


エネルギー

- エネルギーデポジットに比例する2chの電荷の相乗平均が $\sqrt{Q_{ch1}Q_{ch2}} = 0.83\text{MeV}$ (MCシミュレーションより) となるよう較正
- ヒットポジションの影響を受けない
- イベントセレクションを同じ値で行える

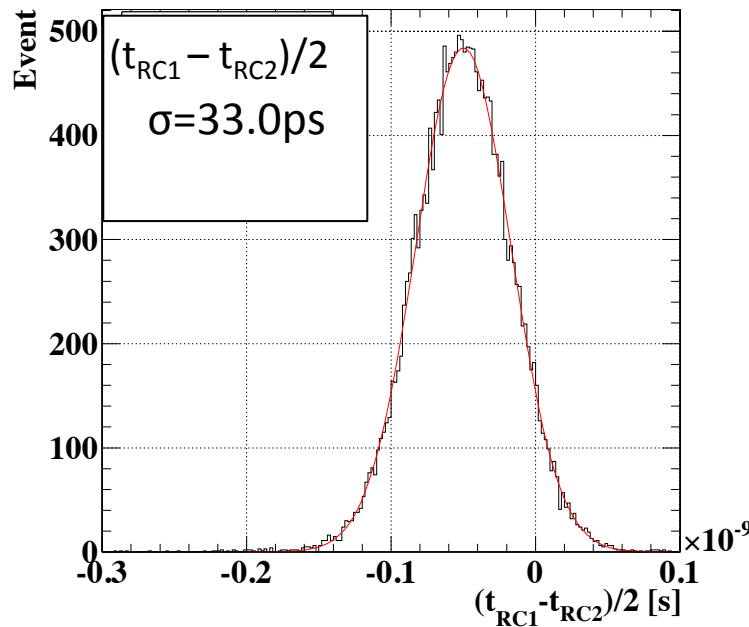


レファレンス時間



- 2つのレファレンスカウンターの平均時間をレファレンス時間とする $t_{\text{ref}} = (t_{\text{RC1}} + t_{\text{RC2}})/2$

リファレンス時間の分解能の見積もり

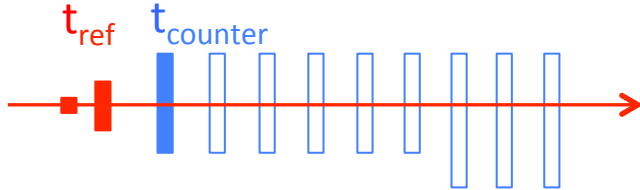


- $(t_{\text{RC1}} + t_{\text{RC2}})/2$ と $(t_{\text{RC1}} - t_{\text{RC2}})/2$ の標準偏差に相関がないと仮定すればそれらは等しい
→ $(t_{\text{RC1}} - t_{\text{RC2}})/2$ をガウシアンフィット



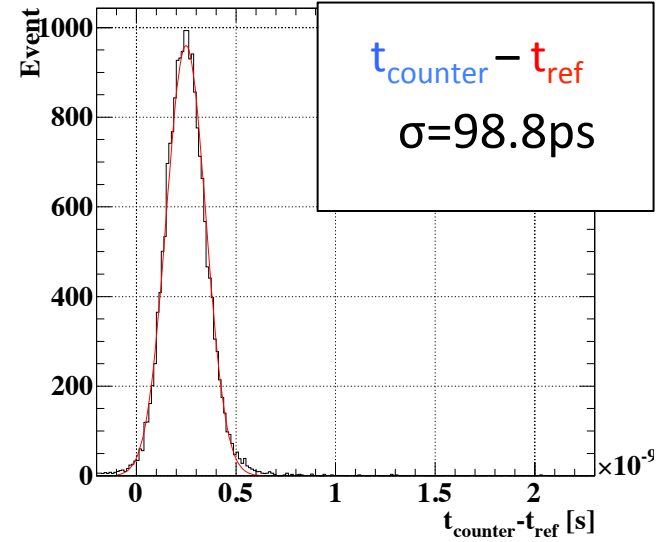
t_{ref} の時間分解能: 33.0ps

各カウンターの時間分解能



- 各カウンターのヒット時間とレファレンス時間の差の標準偏差から、レファレンス時間の分解能を除いて導出

各カウンターの時間分解能: 90-100ps

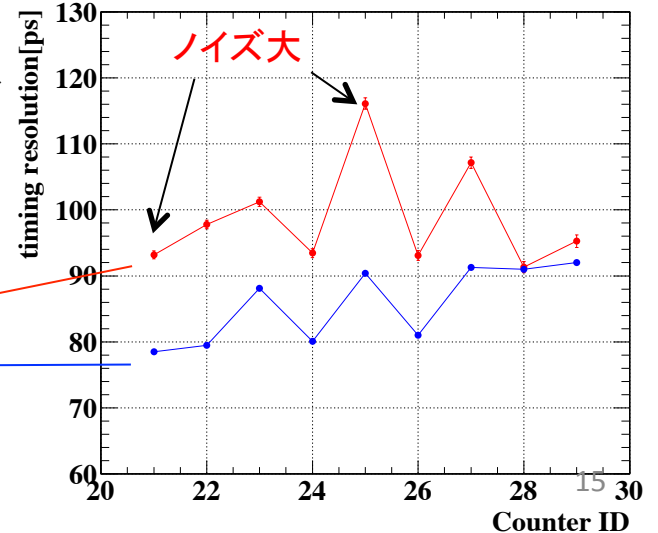


- エネルギーデポジットの違いを考慮すると⁹⁰Srを用いたラボテストの結果とコンシステント
- ノイズが大きいchがあり悪く見積もられているカウンターもある

ビームテスト(48MeV e⁺)

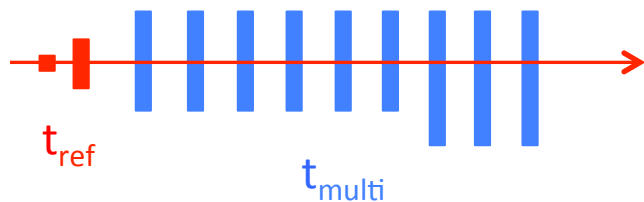
ラボテスト(⁹⁰Sr 2.2MeV e⁻)

各カウンターの時間分解能



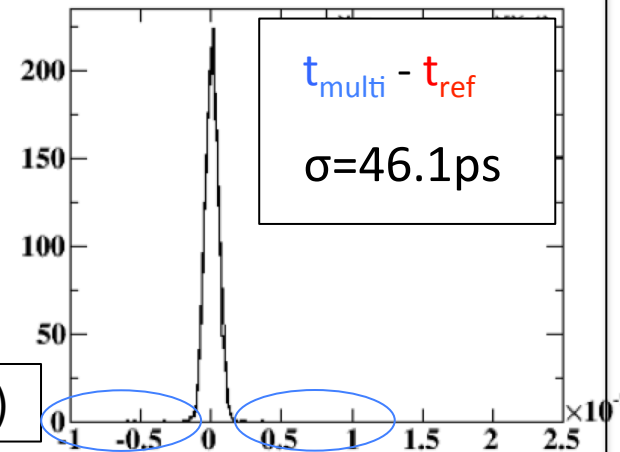
複数ヒットでの時間分解能

RC 解析

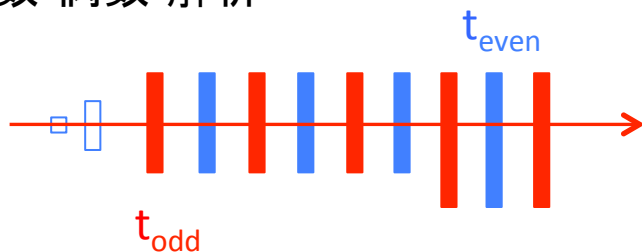


- ・複数カウンターの平均ヒット時間とレファレンス時間の差から複数ヒットでの分解能を導出

8ヒットでの分解能: **32.5ps** (ヒットセレクションなしでは37.9ps)

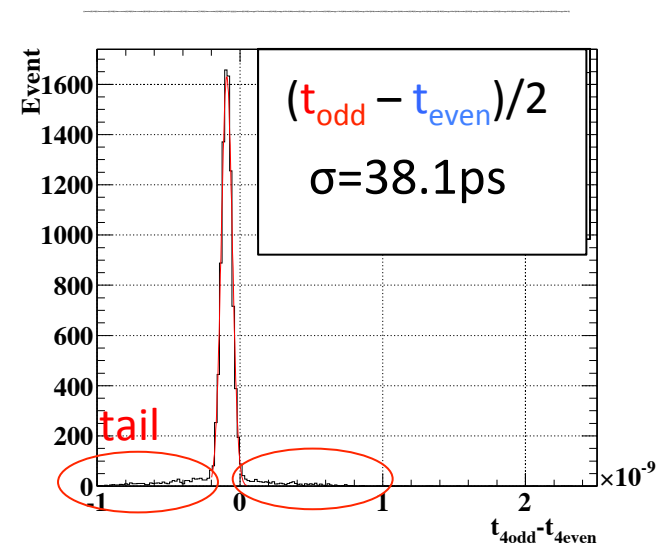


奇数-偶数 解析



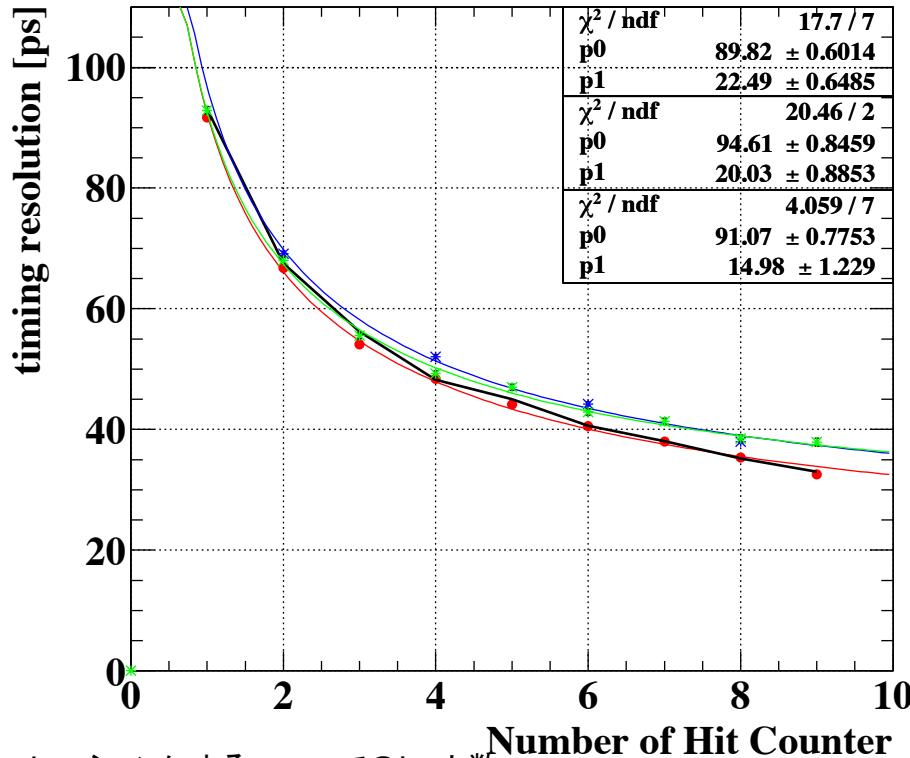
- ・奇数番目と偶数番目のカウンターの平均ヒット時間の差から導出
- ・レファレンスの影響を受けない

8ヒットでの分解能: **38.1ps** (ヒットセレクションなし)



➡ ヒット数毎に分解能の見積もり

時間分解能のヒット数依存性



- 各カウンターの分解能から導出した
予期される分解能
- RC解析(ヒットセレクションなし)
- 奇数-偶数解析(ヒットセレクションなし)
- RC解析(ヒットセレクションあり)

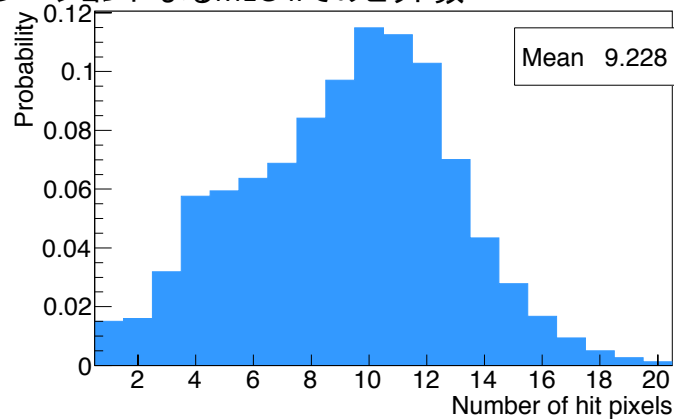
フィッティング関数

$$y = \sqrt{\frac{p0^2}{x} + p1^2}$$

- 第一項: 複数ヒットでのカウンターの分解能
- 第二項: エレキなどによる分解能のオフセット

- ・トラックからずれたヒットを除くことにより
精度のよい分解能の見積もり
- ・各カウンターの分解能からの
予想値と良い一致

シミュレーションによるMEG-IIでのヒット数



平均ヒット数9での分解能: 32.5ps

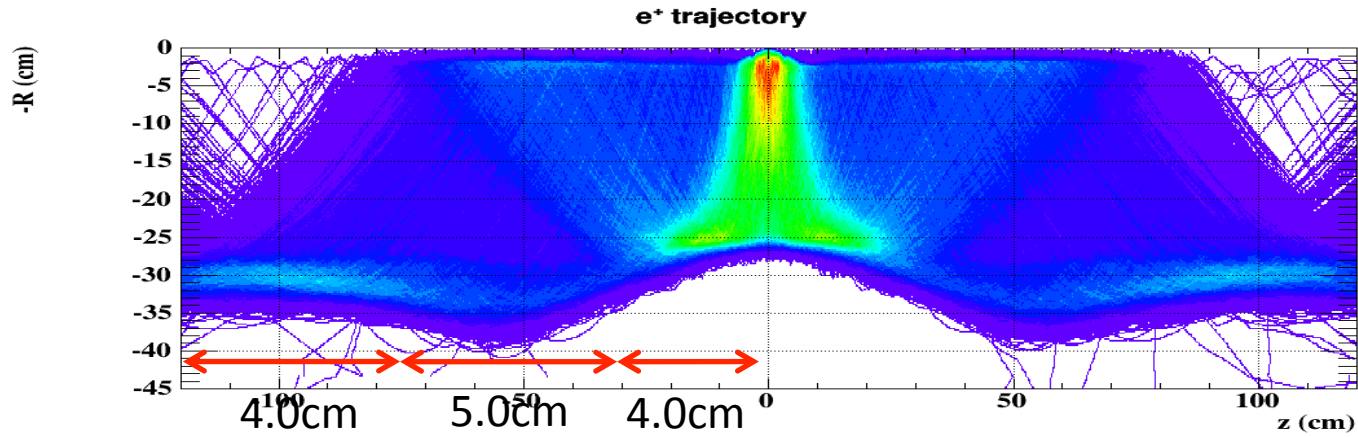
まとめと今後

- タイミングカウンターのアップグレードのため、プロトタイプを製作し実際のMEG-IIと近いセットアップでビームテストを行った
- 去年と同様に複数ヒットで時間分解能がよくなり、9ヒット(MEG-IIでの平均ヒット数)で32.5psの良い分解能を得た
- トラッキング情報を用いたヒットセレクションにより、精度よい分解能の見積もりができた
- SiPMの問題のためカウンター単体の分解能は悪いにも関わらず~30psを達成
- 複数カウンターでの分解能の振る舞いが予想値と一致しているため性質を理解できている

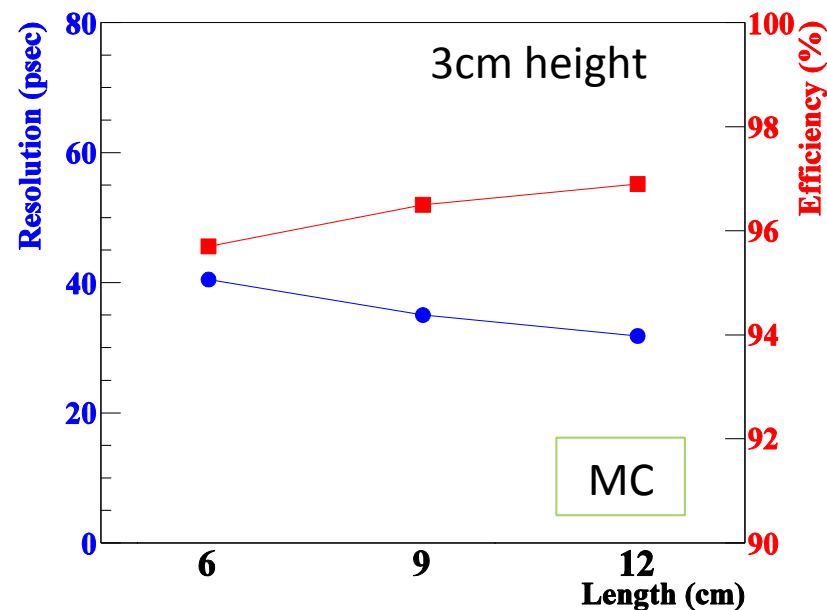
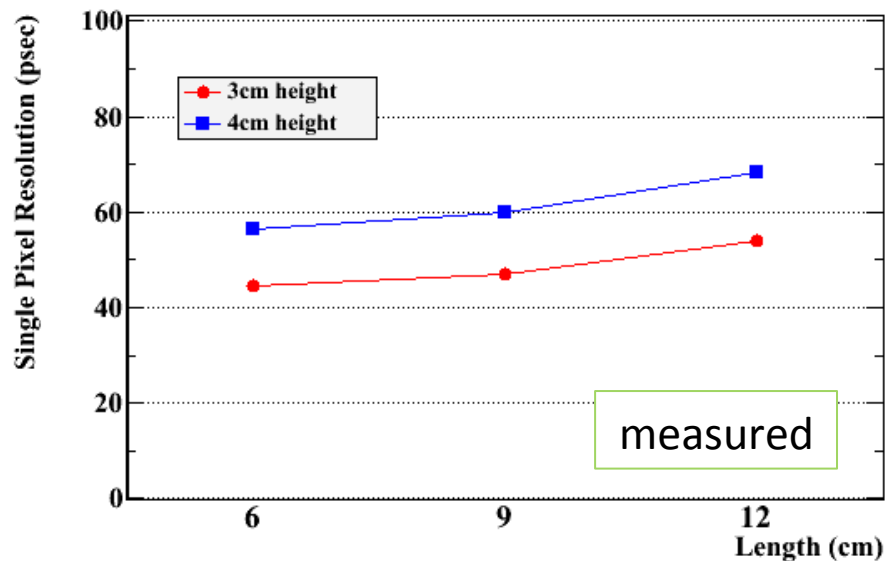
- 今後
 - ビームテストの解析
 - Digitizerのキャリブレーションの改善
 - エレキのジッターの見積もり
 - 分解能の位置依存性
 - 次回ビームテスト(今年10月@PSI)
 - 最終版エレクトロニクスの試験
 - 実際のBG同様高いビームレート50-100kHzでパイルアップの影響の試験

Back up

e^+ の軌跡



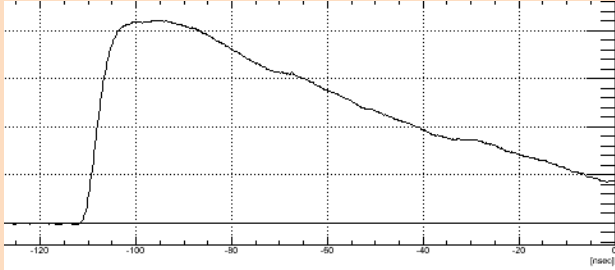
分解能のシンチの長さ依存性



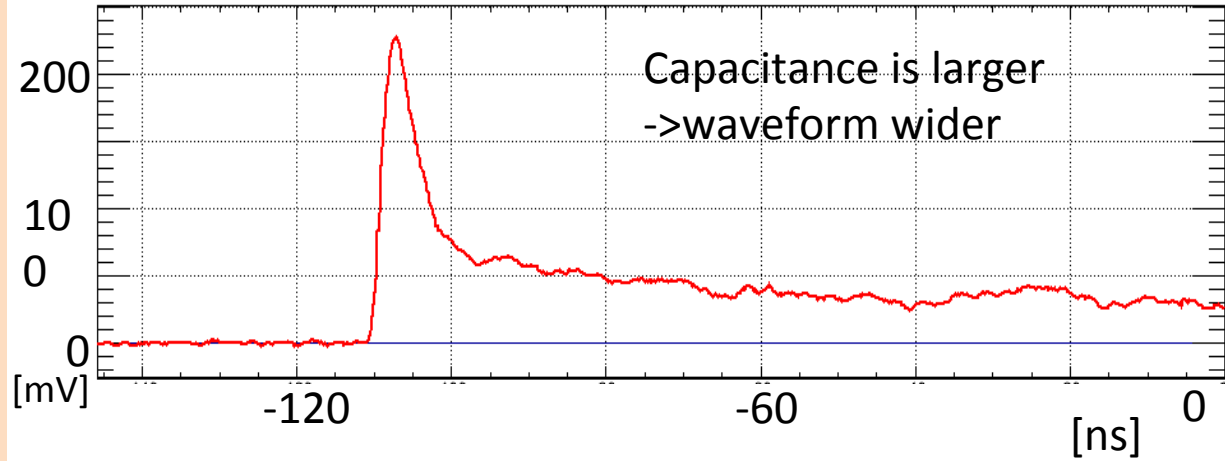
大きくすると単体では悪くなるが、Hit 数増えるため全体としてはよくなる

waveform

Parallel connection

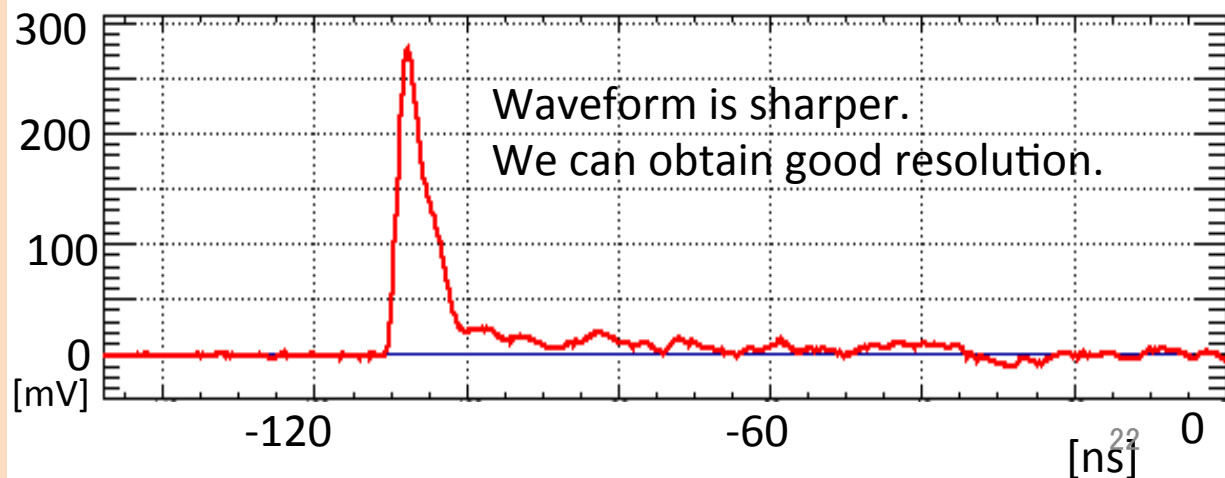
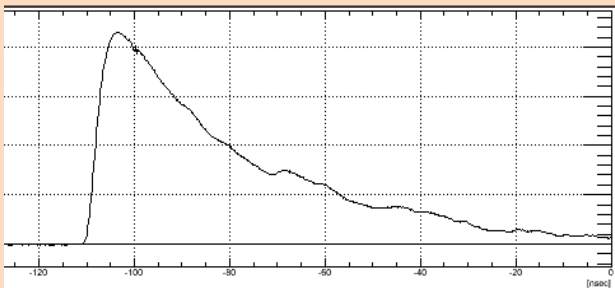


Before shaping



After shaping

Series connection



Deference of Scintillator types

scintillator の違いによるtime resolution を測定 (plate size:30×90×5mm³, no reflector)

- BC422

attenuation length 短いがrise time早い

$$\sigma=47.0\text{ps}$$

-  BC418

光量大しく、attenuation length 長いがrise time 遅い

$$\sigma=55.9\text{ps}$$

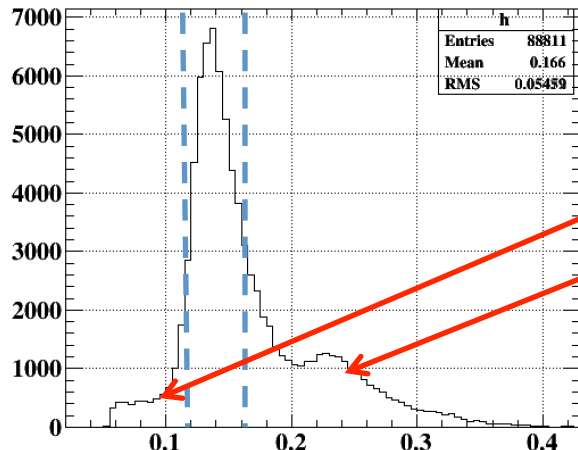
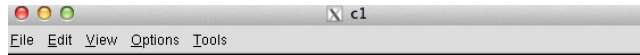


まだ準備段階だがMEG-Iのlong scintillator bar より良いtime resolutionが得られている

Properties	BC-418	BC-420	BC-422	BC-404
Light Output [% Anthracene]	67	64	55	68
Rise Time [ns]	0.5	0.5	0.35	0.7
Decay Time [ns]	1.4	1.5	1.6	1.8
Wavelength of Max. Emission [nm]	391	391	370	408
Bulk Light Attenuation Length [cm]	100	110	8	140

Cutting to analyze

Charge distribution for RC



I used the event of this area to analyze one positron event

For RC: grazing events

high multiplicity events

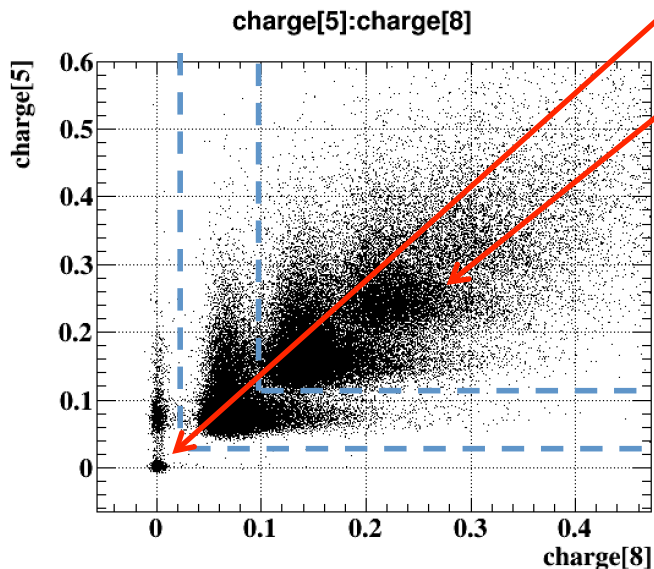
For BTC21(first) and BTC22(second):

no positron events at BTC

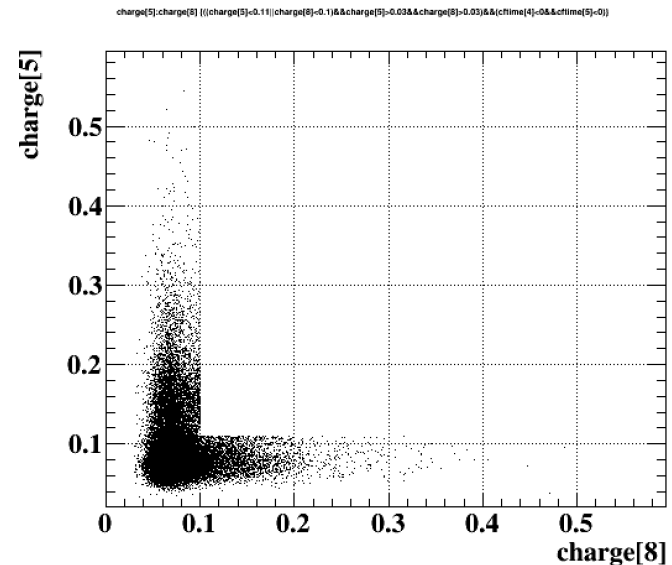
high multiplicity events

And I used event of ctime<0

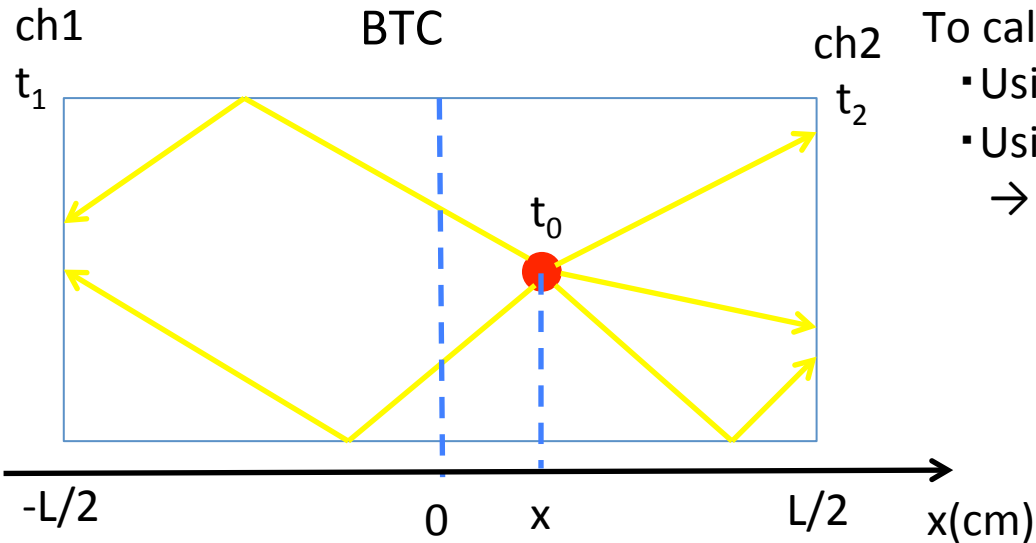
Correlation of charge at BTC21 and BTC22



Cut



x-position calibration



x : hit position
 t_0 : actual hit time
 t_1 : cftime of ch1
 t_2 : cftime of ch2
 L : counter length
 v_{eff} : effective velocity of scintillation light

This become smaller than actual velocity
because scintillation light is not enter directly to SiPM

To calibrate hit position

- Using position scan data (#run:3574-3609)
- Using the formula of $t_1 - t_2$ dependence on x
 \rightarrow I can estimate effective velocity and position offset

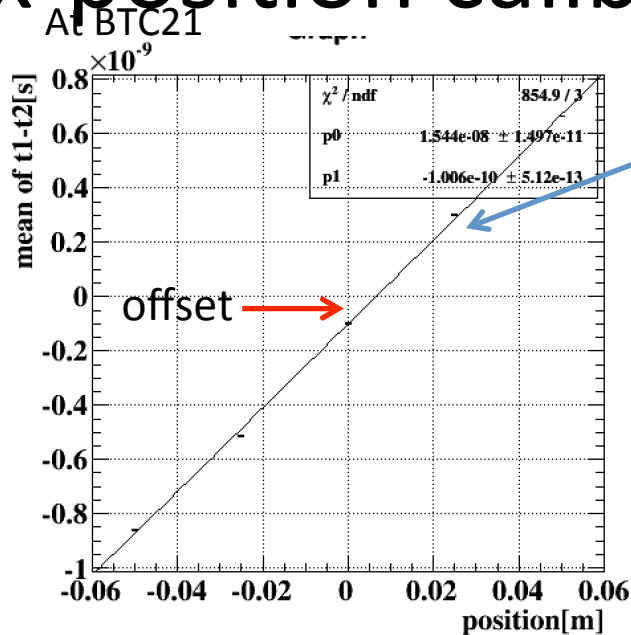
$$t_1 = t_0 + \frac{\frac{L}{2} + x}{v_{eff}}$$

$$t_2 = t_0 + \frac{\frac{L}{2} - x}{v_{eff}}$$



$$t_1 - t_2 = \frac{2}{v_{eff}} x$$

x-position calibration



$$t_1 - t_2 = \frac{2}{v_{\text{eff}}} x$$

x-axis: beam position
Y-axis: mean of $t_1 - t_2$ histogram
by gaussian fitting

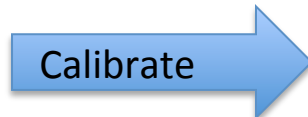
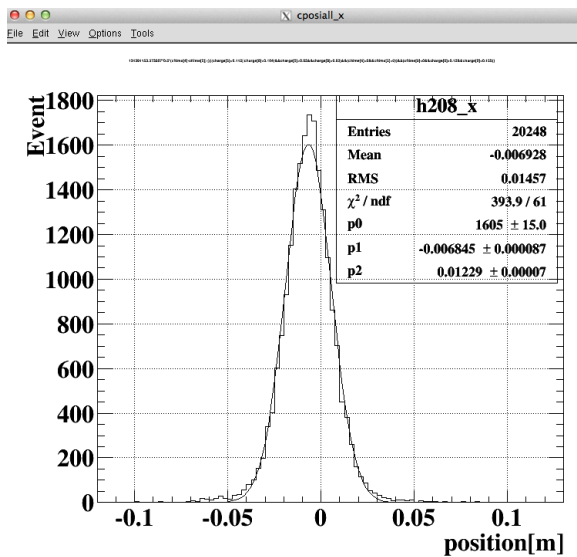
- I estimated v_{eff} and position offset by linear fitting for BTC21-29



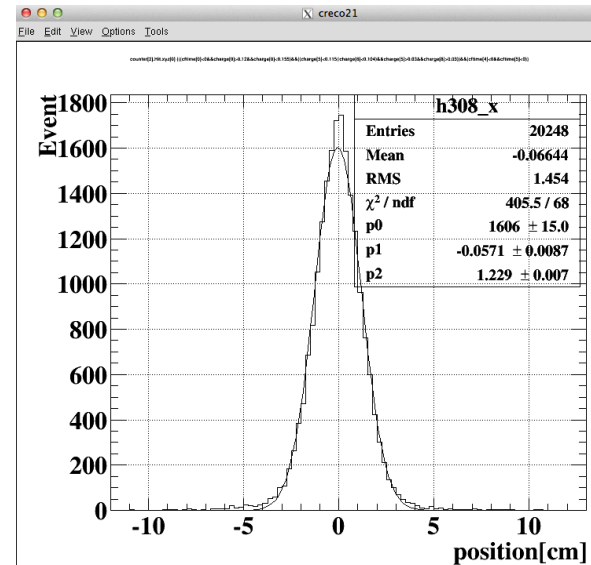
▪ At BTC21
Position Offset : -0.95449×10^{-10} (s)
 v_{eff} : 13.1391 (cm/ns)

- I inputted v_{eff} and position offset in database for BTC21-29 and calibrated hit position by spxanalyzer reading database

- position reconstruction for BTC21 at $x=0$



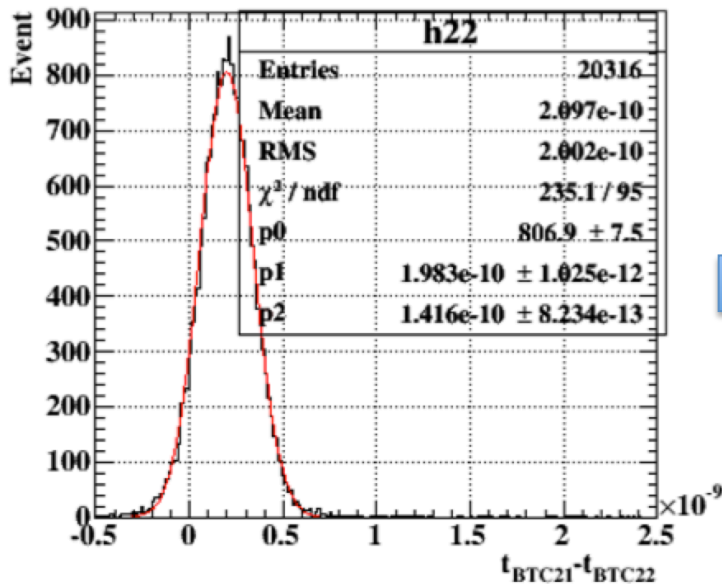
- Mean: $-0.68\text{cm} \rightarrow -0.06\text{cm}$
- Position resolution : 1.2cm



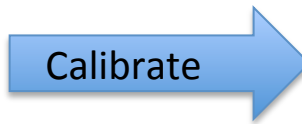
Hit time calibration

- I estimated mean of $t_{\text{BTC21}} - t_{\text{counter}}$ by gaussian fitting and hit time offset for each counter
- I inputted the time offset in database and analyzed using spxanalyzer

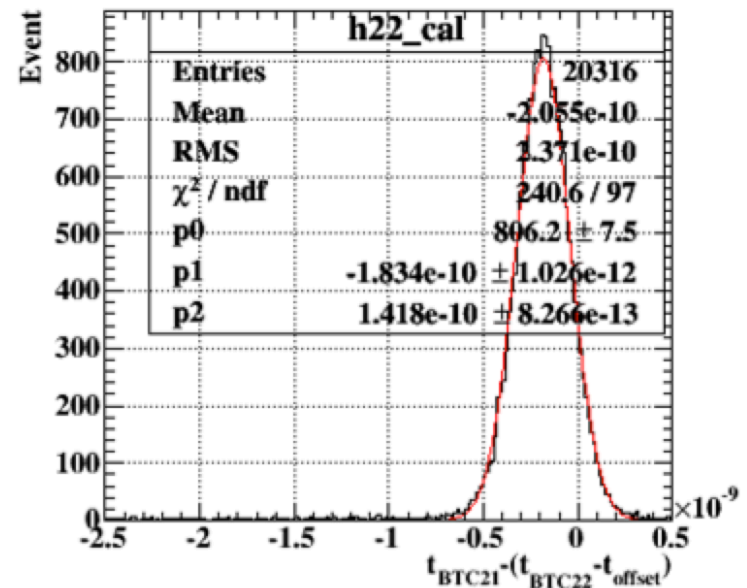
At BTC22



Mean : 198.3 ps

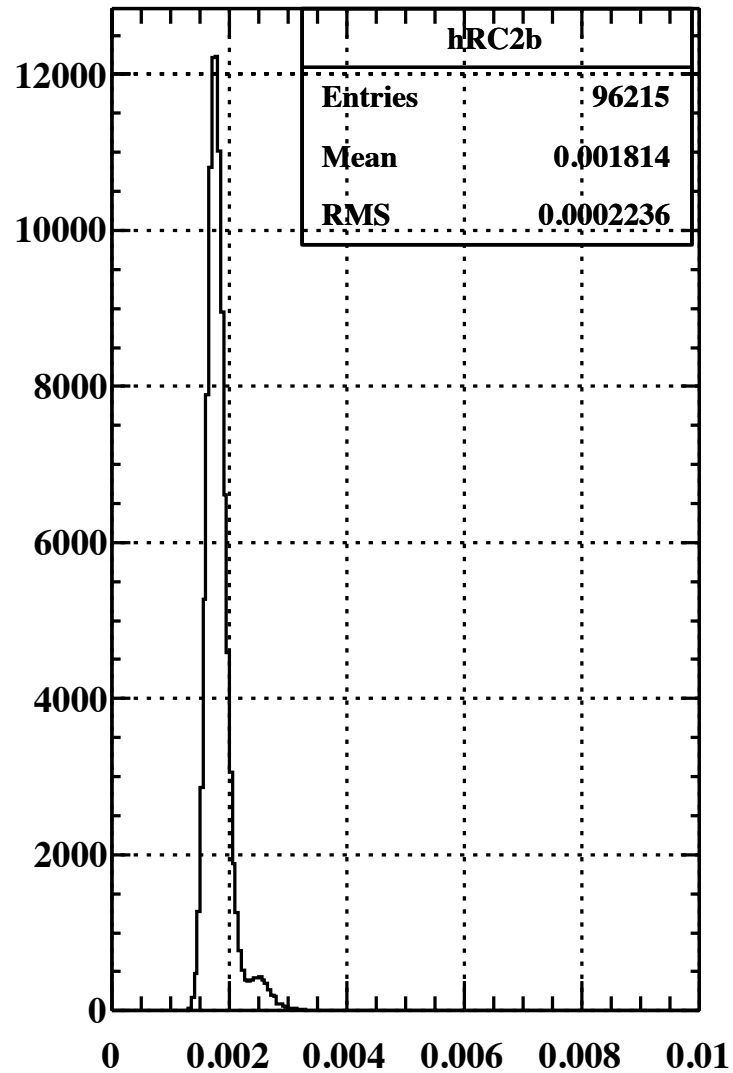
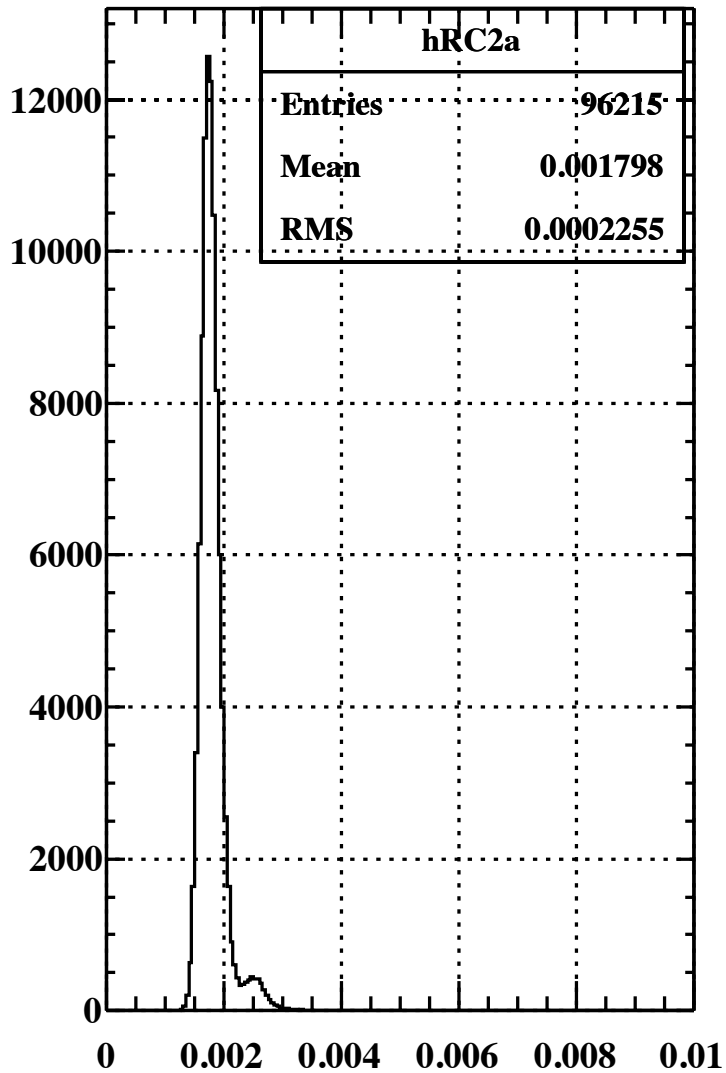
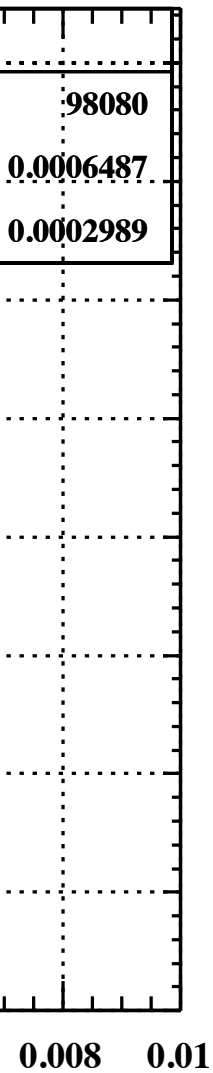


Hit time offset :
-3.81744e-10 s

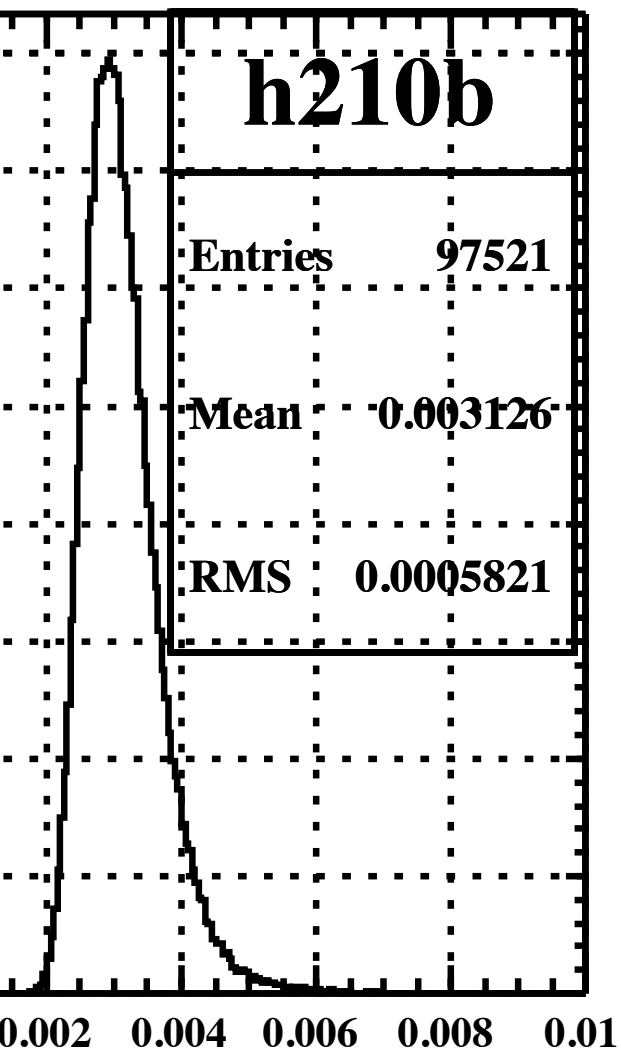


Mean : -183.4 ps

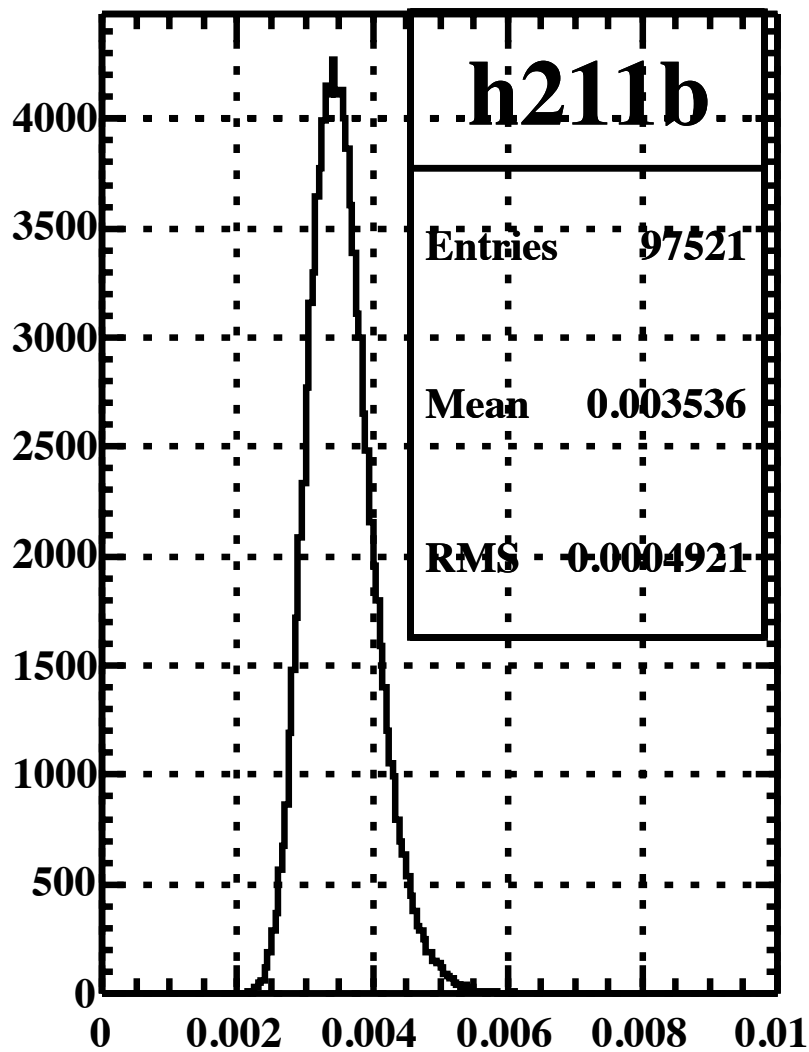
Exepected value : -5.5cm/c = -183.365 ps



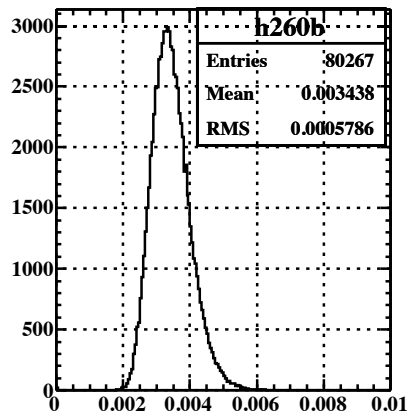
terms[4] {cftime[4]<0&& cftime[5]<0}



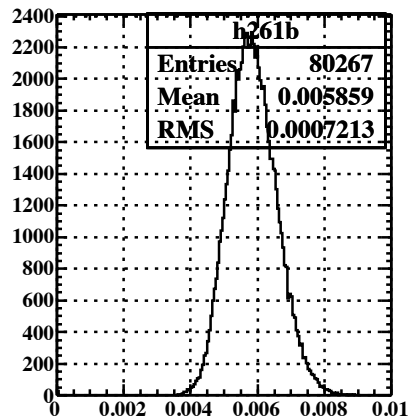
noiserms[5] {cftime[4]<0&& cftime[5]<0}



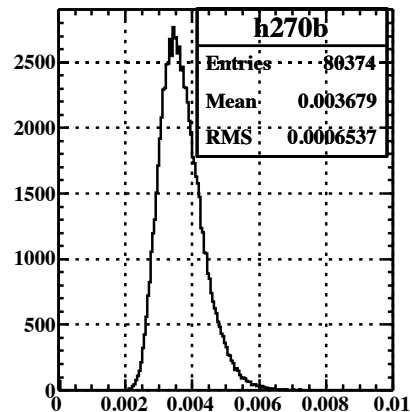
noiserms[17] {cftime[17]<0&&cftime[18]<0}



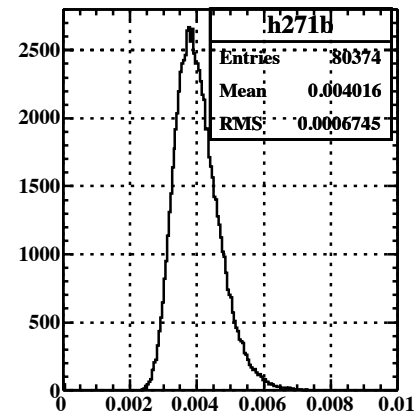
noiserms[18] {cftime[17]<0&&cftime[18]<0}



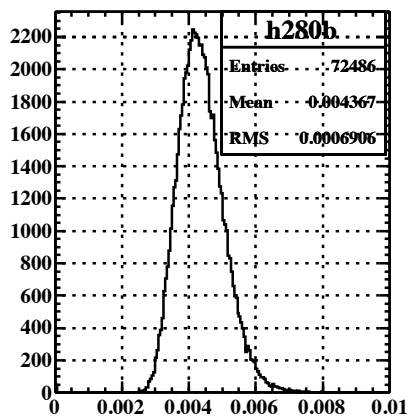
noiserms[20] {cftime[20]<0&&cftime[21]<0}



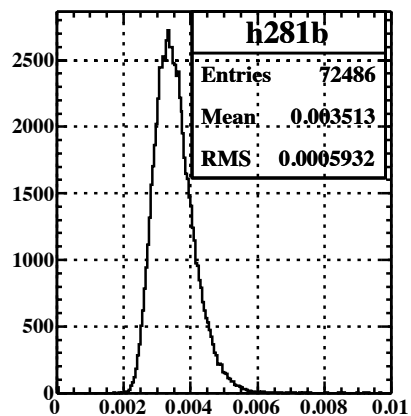
noiserms[21] {cftime[20]<0&&cftime[21]<0}



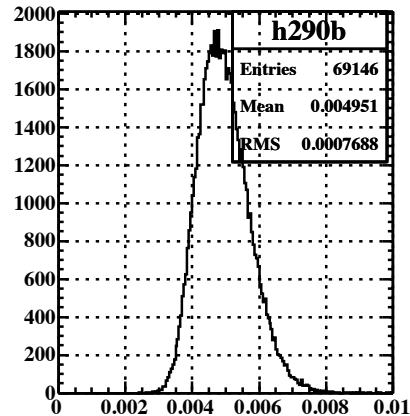
noiserms[22] {cftime[22]<0&&cftime[24]<0}



noiserms[24] {cftime[22]<0&&cftime[24]<0}



noiserms[1] {cftime[1]<0&&cftime[2]<0}



noiserms[2] {cftime[1]<0&&cftime[2]<0}

