

# MEGII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 —現状の報告と較正手法の開発—

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 本庄キャンパス

# 目次

- MEG
- MEGII
- 陽電子タイミングカウンター
- スケジュールと現状
  
- カウンター間の時間較正手法
  - MC
  - ビームテストデータ

# MEG実験

18pSJ4 金子

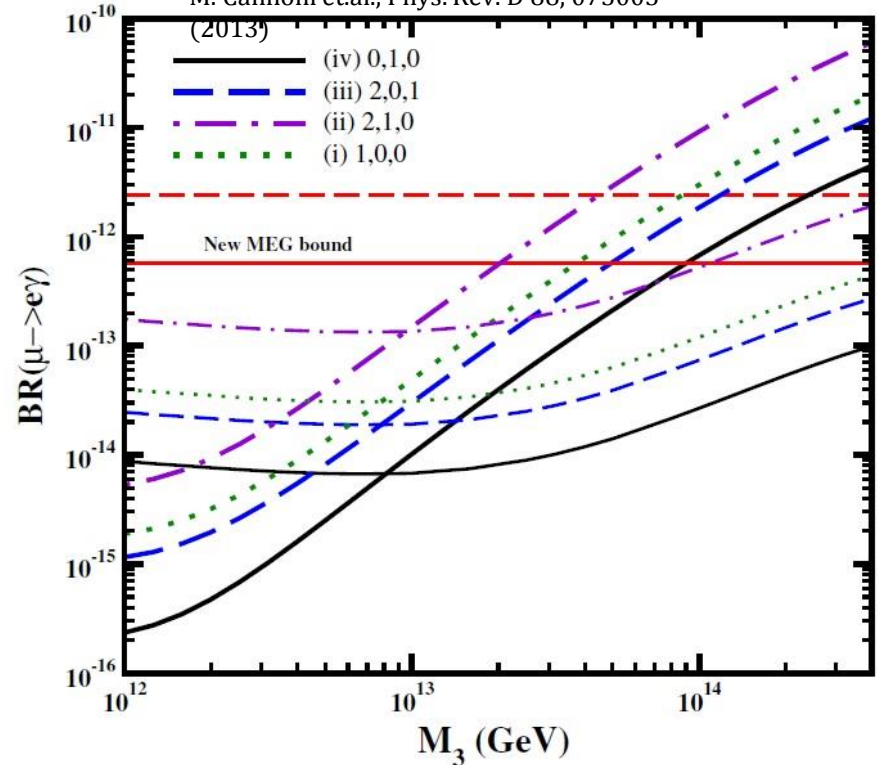
- 荷電レプトンフレーバー非保存現象、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の探索
  - 標準模型では、ほぼ起きない。
  - たくさんの有力な新理論 (SUSYとか) から大きい崩壊分岐比が期待
- 現在の崩壊分岐比への上限值は、MEG-I実験から、

**$5.7 \times 10^{-13}$  90% C.L.**

(Phys. Rev. Lett. 110(2013) 201801)

新物理が見えてくる領域

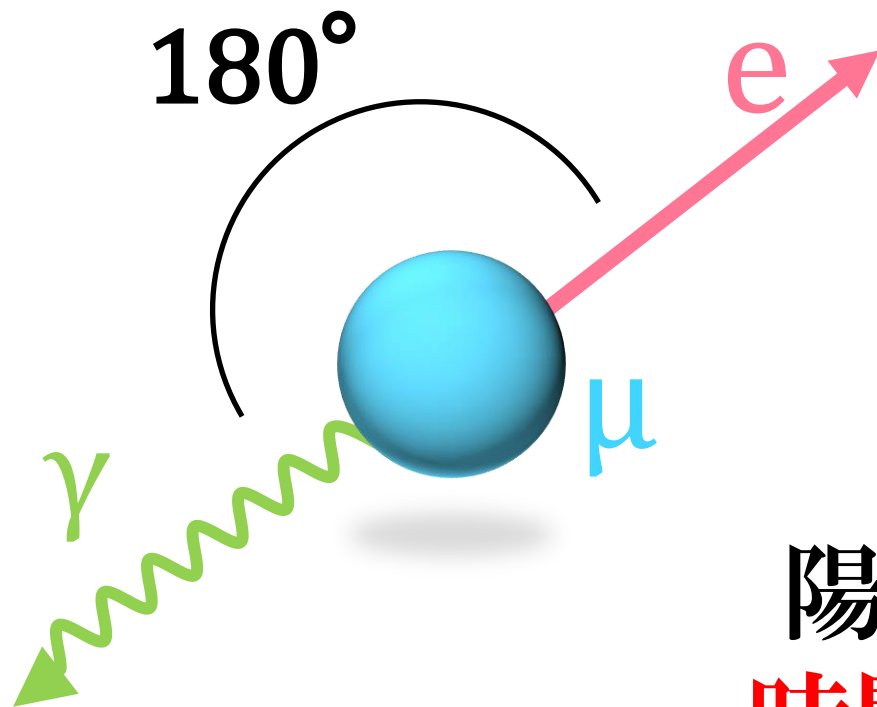
例、SU(5)の超対称性大統一理論からの予想崩壊分岐比  
M. Cannoni et.al., Phys. Rev. D 88, 075005 (2013)



右巻きニュートリノの質量

⇒ アップグレードをして、より高い感度での探索

# シグナルは静止 $\mu$ からの2体崩壊



陽電子とガンマの  
**時間・位置・運動量**  
をより高い精度で測る。

# MEG II

SiPM読み出し  
液体キセノン  
ガンマ線検出器

前の講演 家城・小川  
(19pSG2・19pSG3)

立体交差ワイヤードリフトチェンバー  
タイミングカウンターの直前までトラッキング

2倍のビーム強度  
(停止 $\mu \sim 7 \times 10^7$ )

19aSG1 中浦

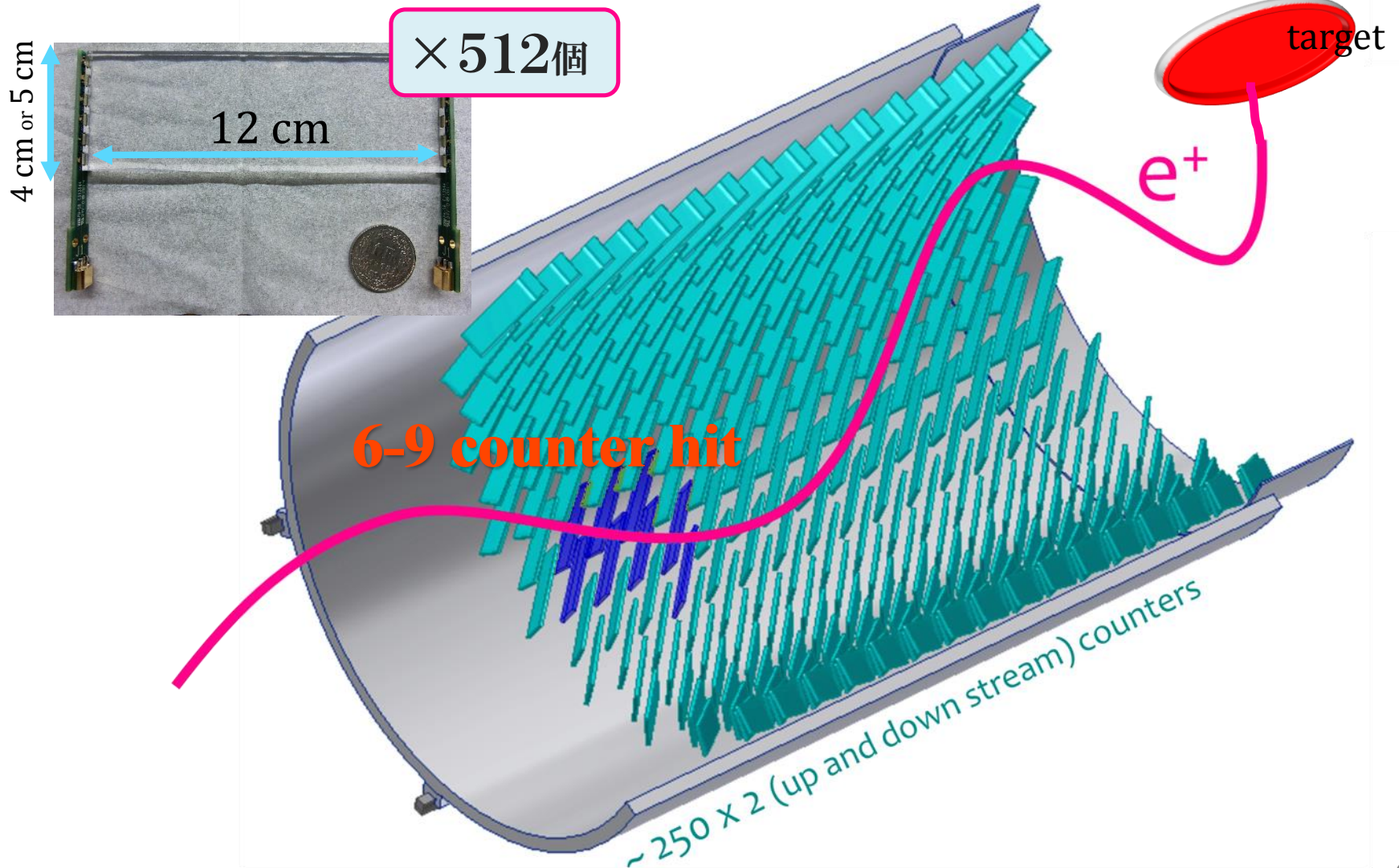
Radiative Decay Counter  
BG同定検出器

本講演、次の講演 吉田  
(19pSG5)

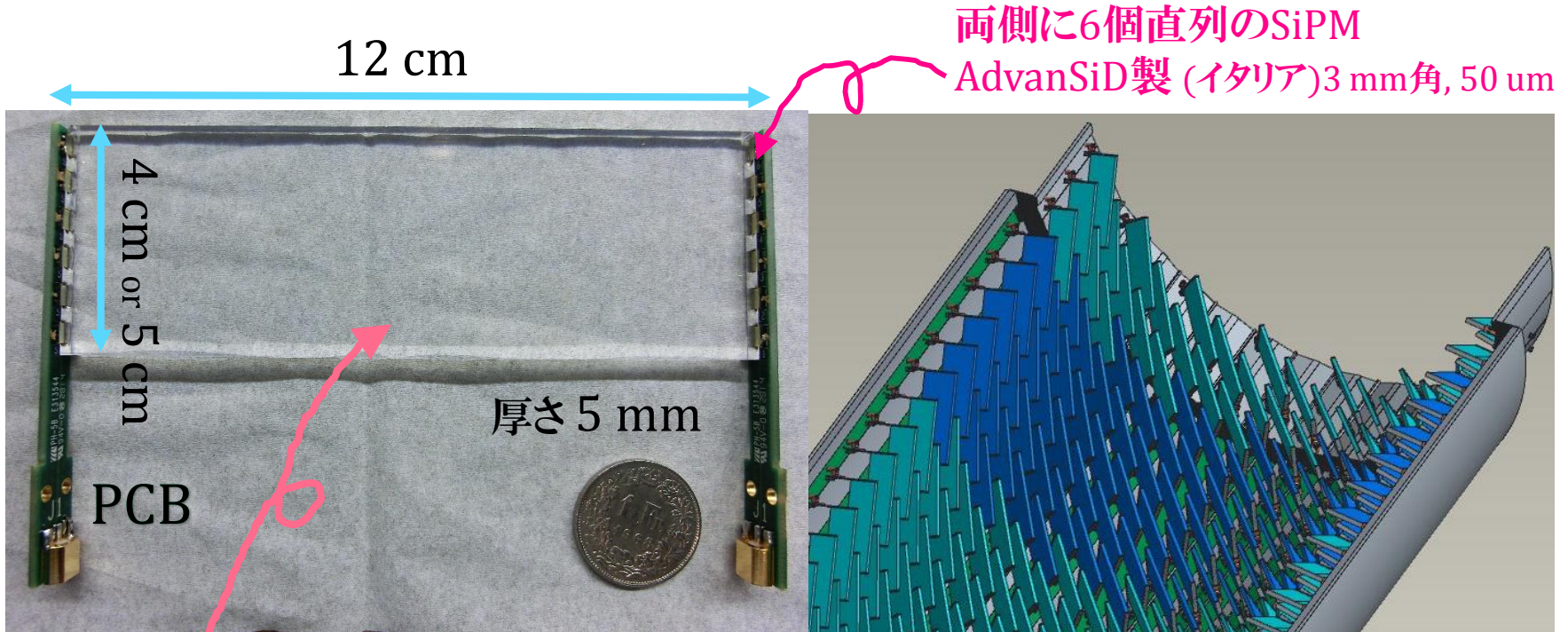
細分型陽電子タイミングカウンター

sensitivity  $5 \times 10^{-14}$

# 細分型陽電子タイミングカウンター

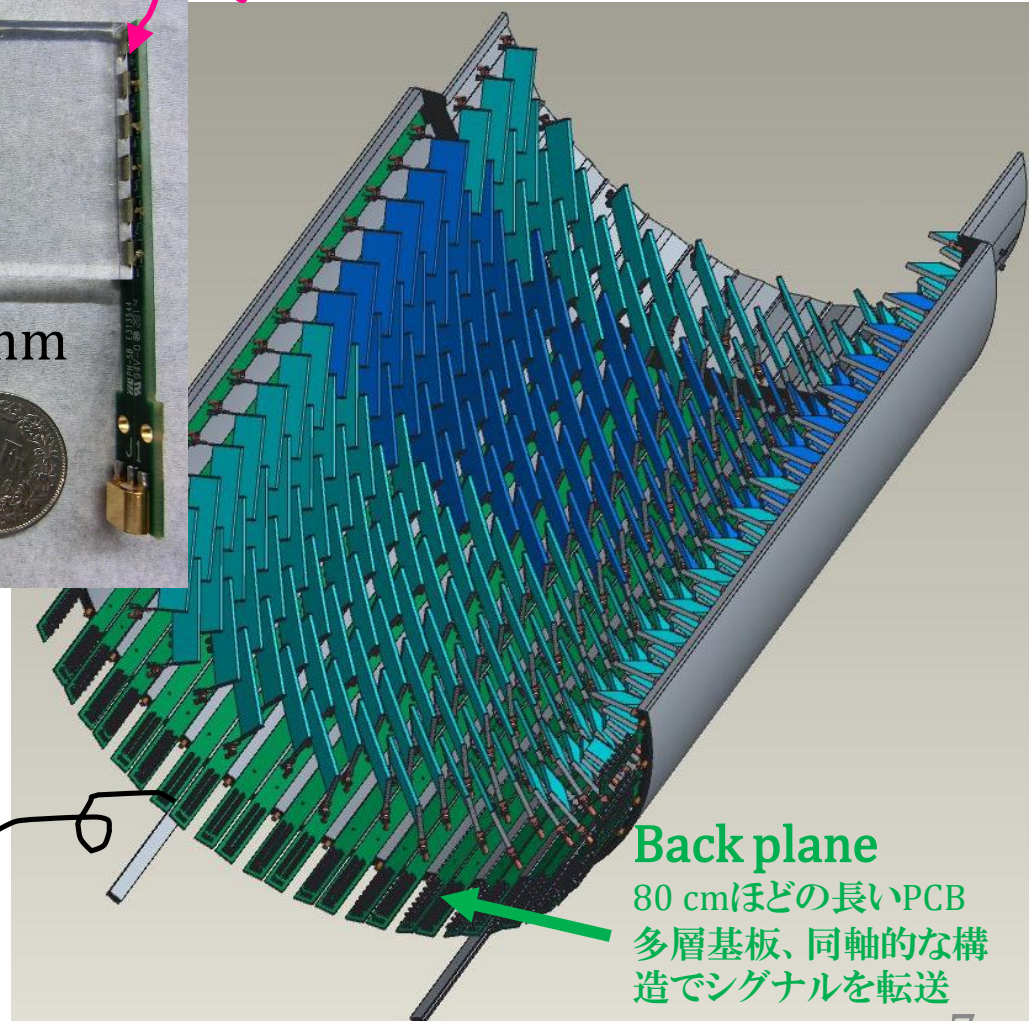


# 細分型陽電子タイミングカウンター



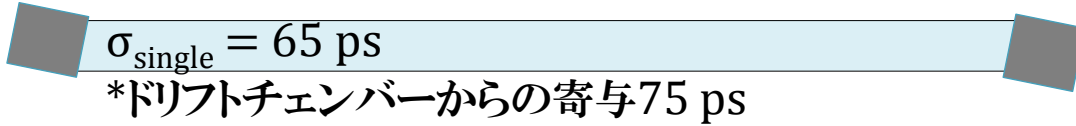
高速プラスチックシンチレーター  
EJ232, rise time 0.35 ns, 減衰長 8 cm

検出器の外側から  
ケーブル (RG178)  
非磁性

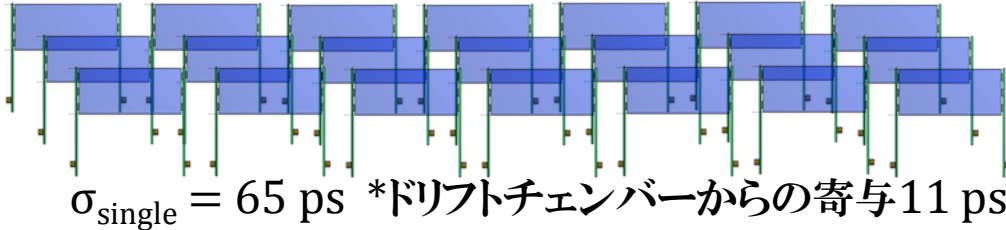


# 測定原理

MEG I: 80 cmのシンチレータバー (PMT2つ) × 15本



MEG II: 12 cmのシンチレータカウンター × 250個

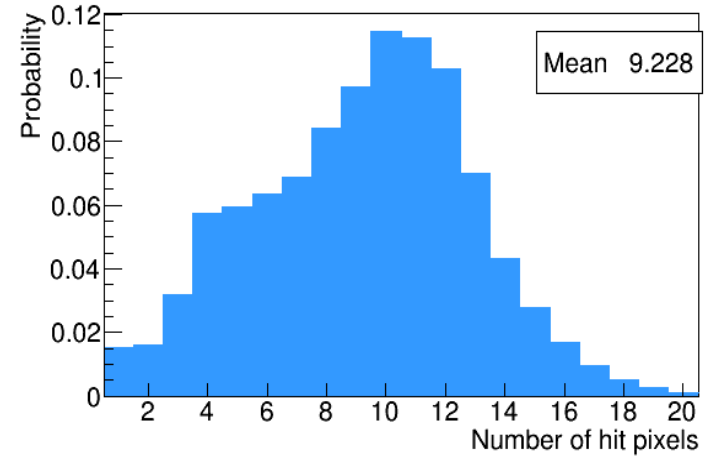


- たくさんのカウンターにあたる。
  - カウンターの時間情報を平均すれば、時間分解能が向上する。(原理はビームテストによって証明済み)

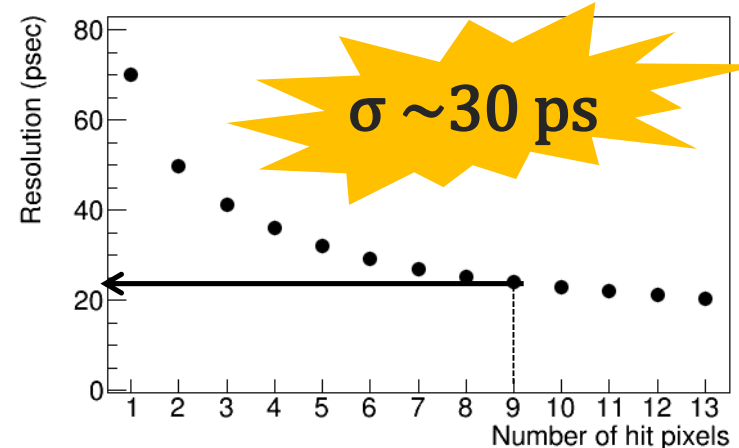
$$\sigma_{\text{total}}^2(N_{\text{hit}}) = \frac{\sigma_{\text{single}}^2}{N_{\text{hit}}} + \frac{\sim 30 \text{ ps}}{N_{\text{hit}}} + \sigma_{\text{MS}}^2(N_{\text{hit}}) \sim 5 \text{ ps}$$

- パイルアップを減らせる。
  - アップグレードでビーム強度アップ
- 陽電子がどこを通ったか細かくわかる。

Number of hit counters (MC)

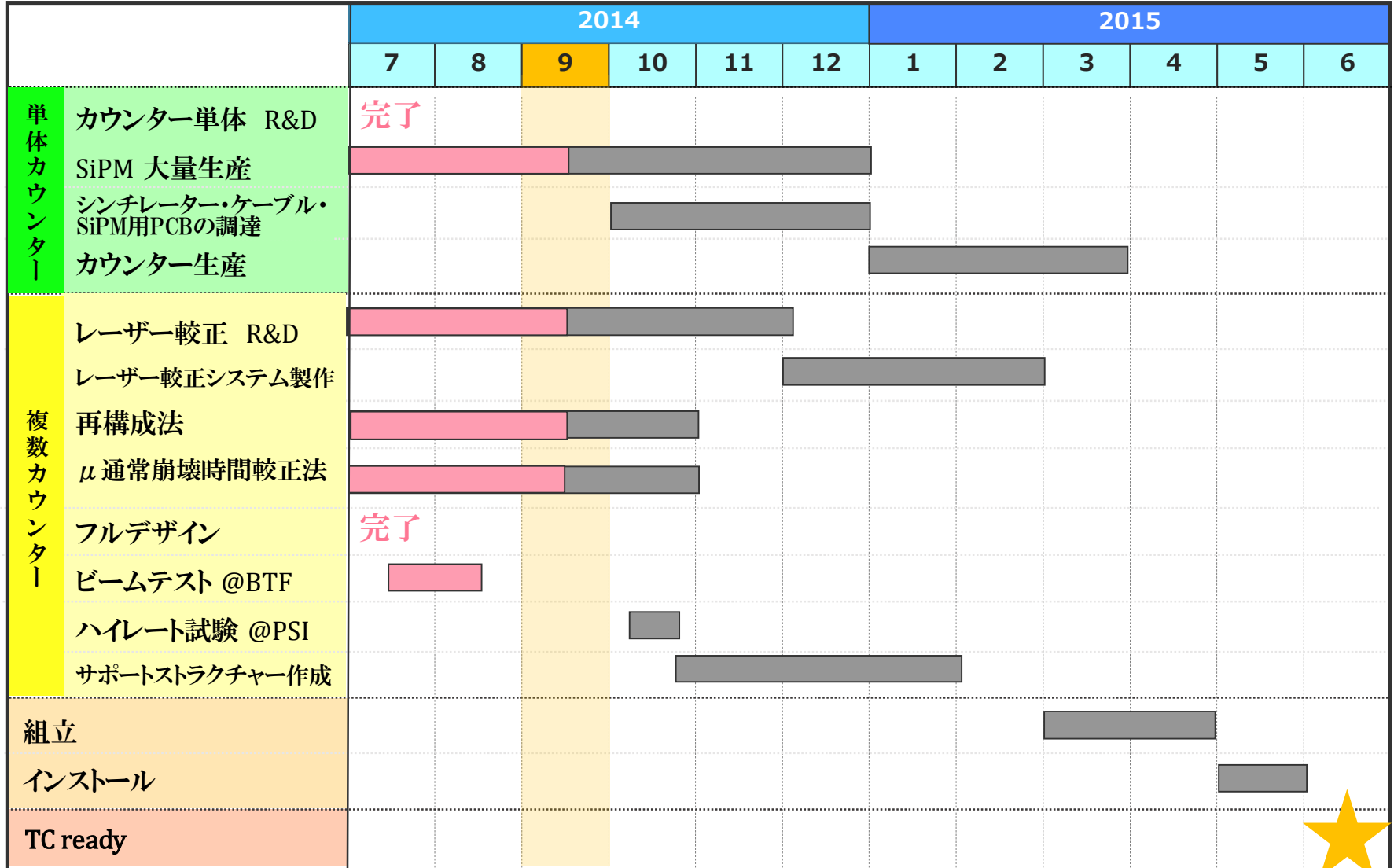



Resolution vs. # of hit counters





# スケジュールと現状




 =予定



# スケジュールと現状



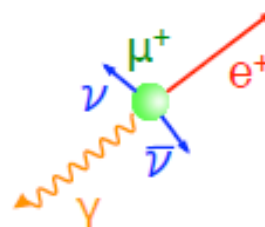
 = 予定



# カウンター間の時間較正

# カウンター間の時間較正

- 512個のカウンター
  - それぞれ時間オフセットを持っている。
  - 時間合わせが必要 (< 30 ps)



Radiative muon decay


 $\mu$ 通常崩壊

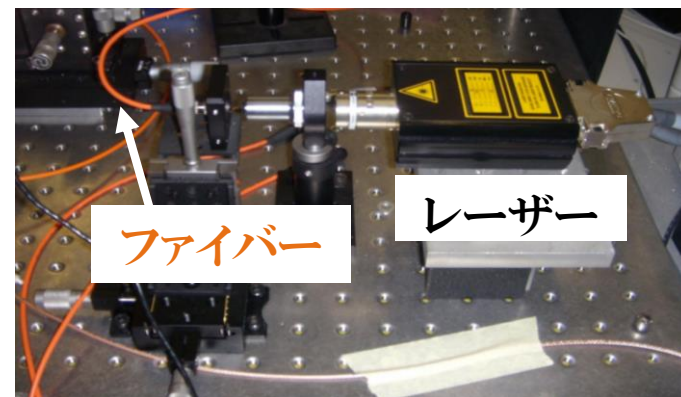
- 絶対的な時間合わせにはRadiative muon decayを用いる。
  - タイミングカウンターの中で相対的な時間合わせをすればよい。

## 相対的な時間合わせ

2つの独立な方法

### レーザー

- 同じ光源からスプリッターを用いて、すべてのカウンターに同時に照射する。
- ファイバー自体のテストは完了。光の分散、温度依存、ファイバーの選定など。
- 今後は、実際にカウンターに照射するテストを行う。

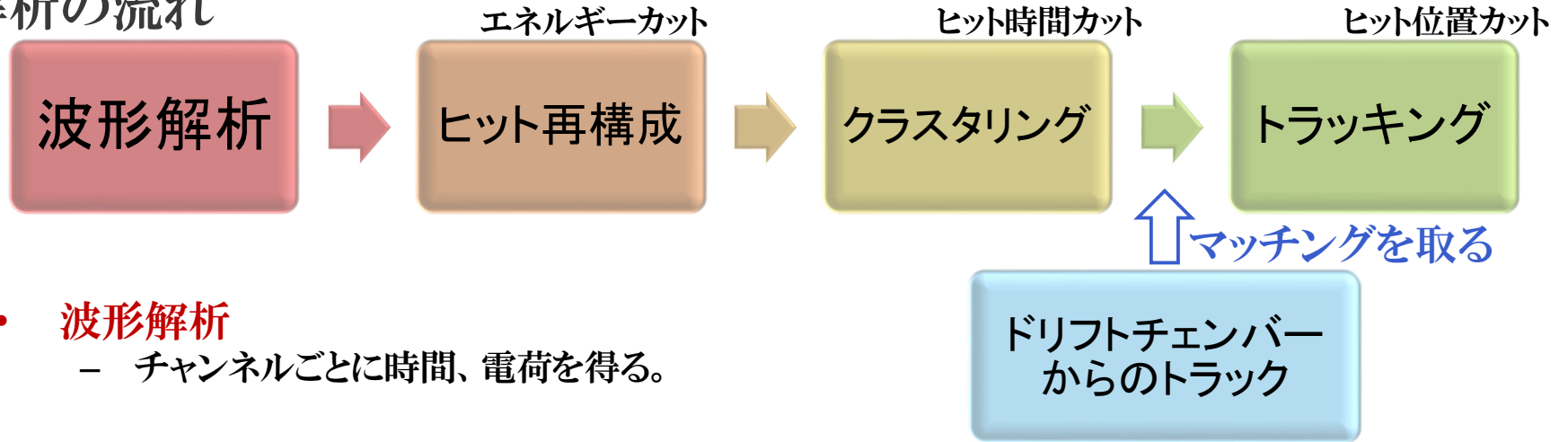


### MEGII実験で得られる大量の $\mu$ 通常崩壊 ( $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_\mu \nu_e$ )

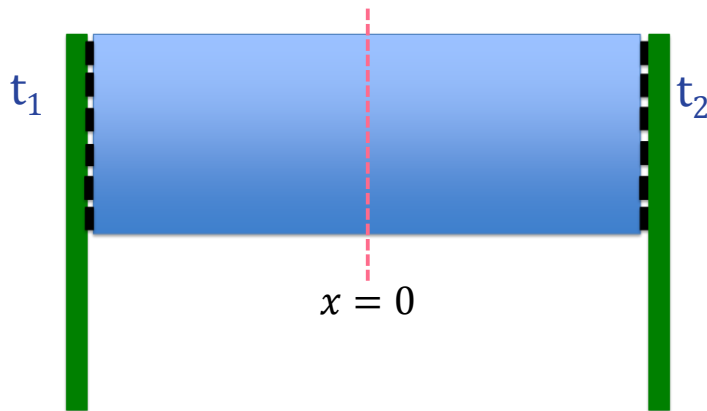
- MEGII実験での最終的なコンフィギュレーション・解析で測定。

# μ通常崩壊を用いた時間較正|解析

## 解析の流れ



- **波形解析**
  - チャンネルごとに時間、電荷を得る。
- **ヒット再構成**
  - カウンターごとにヒット時間・位置、エネルギーを得る。
  - エネルギーデポジットが小さいヒットはカットする。(< 0.7 MeV)

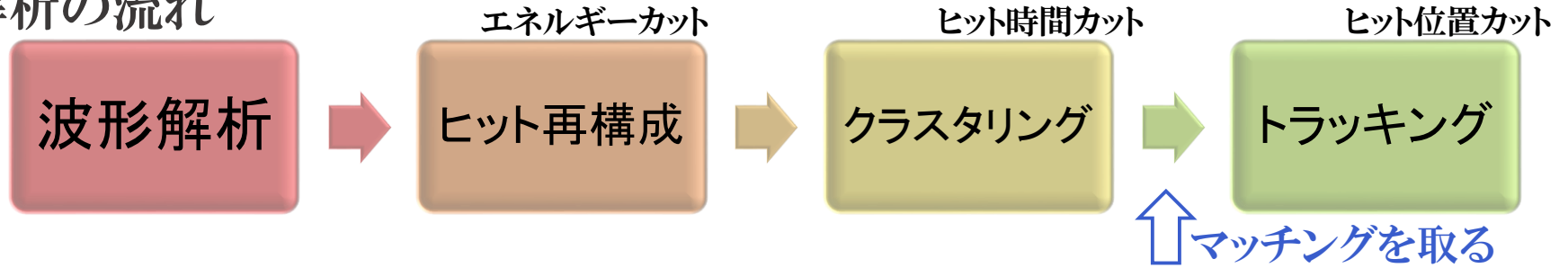


$$T_{counter} = (t_1 + t_2)/2$$

$$x = v_{eff}(t_1 - t_2)/2$$

# μ通常崩壊を用いた時間較正解析

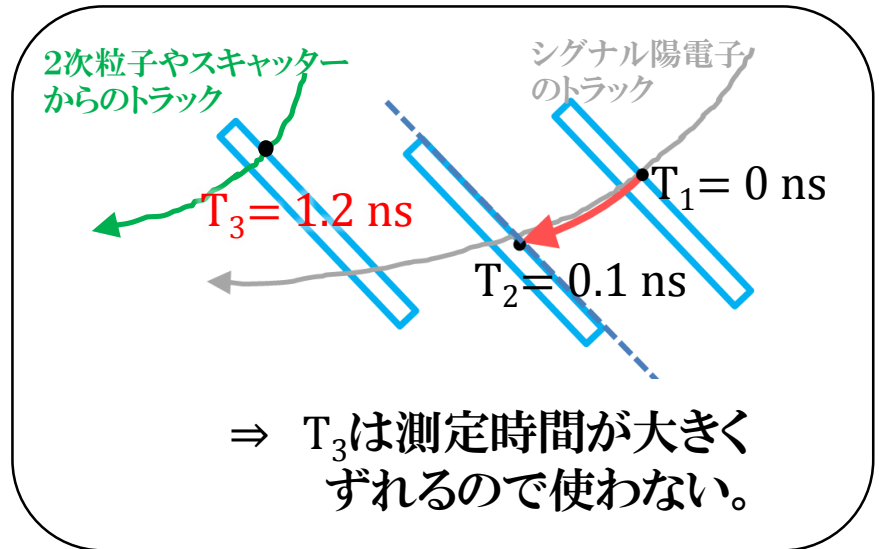
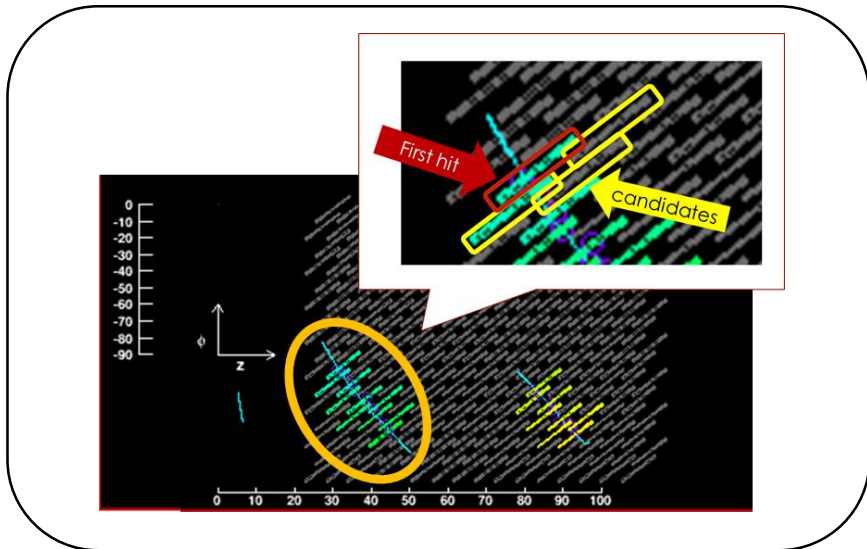
解析の流れ



## クラスタリング

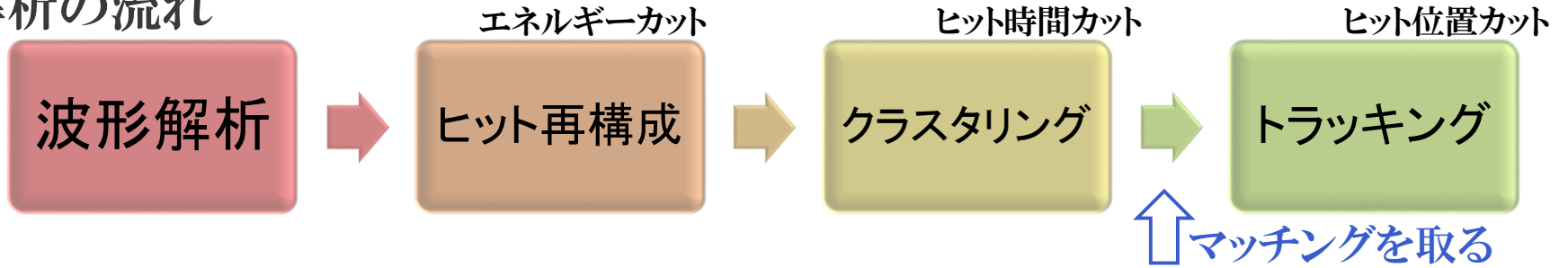
- ヒットカウンターの場所を参考にクラスターを作る。
- はじめのヒット時間と比べて、測定時間がずれるヒットは使わない。( < 1 ns)

ドリフトチェンバーからのトラック



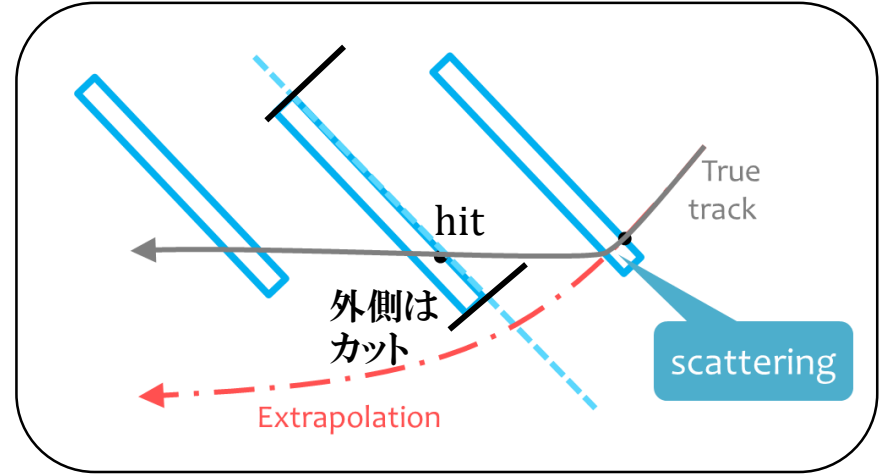
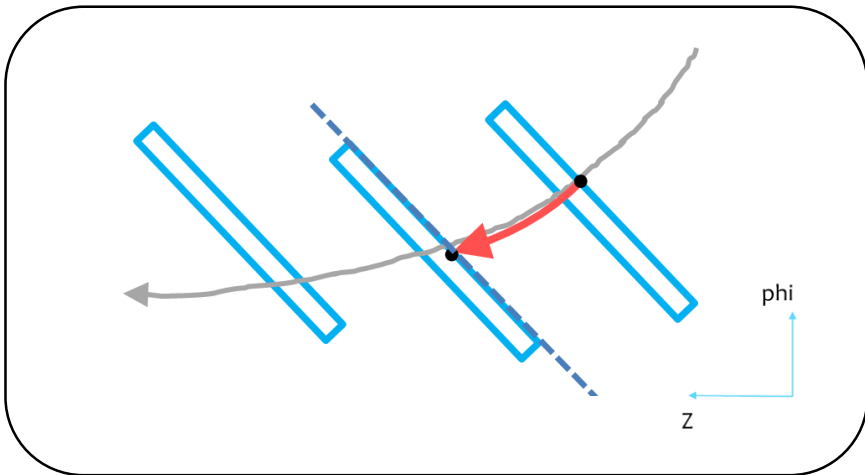
# $\mu$ 通常崩壊を用いた時間較正解析

解析の流れ



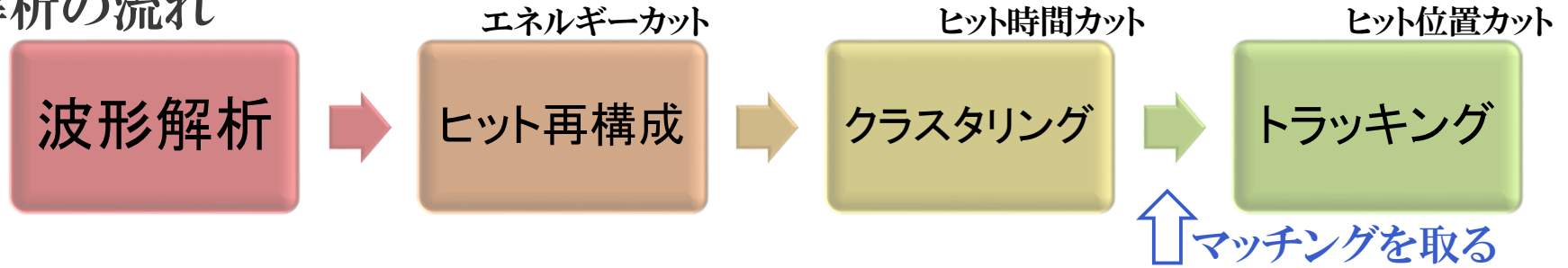
• **トラッキング**

- はじめのヒットの位置・運動量情報(ドリフトチェンバー)から、磁場の計算を行い、クラスタリングされたカウンターのトラックを再構成する。
- 再構成されたトラックからはずれるヒットは使わない。



# μ通常崩壊を用いた時間較正|解析

解析の流れ



- 得られたトラックごとにそれぞれのヒットカウンターのTOFを計算

$$\chi^2 = \sum_i^{nevent} \sum_j^{nhit} \underbrace{\left( t_{ij,measure} - (t_0 + TOF_{ij} + \Delta t_j) \right)}_{\text{残差}} / \sigma \Big)^2 \text{ 知りたいもの!}$$

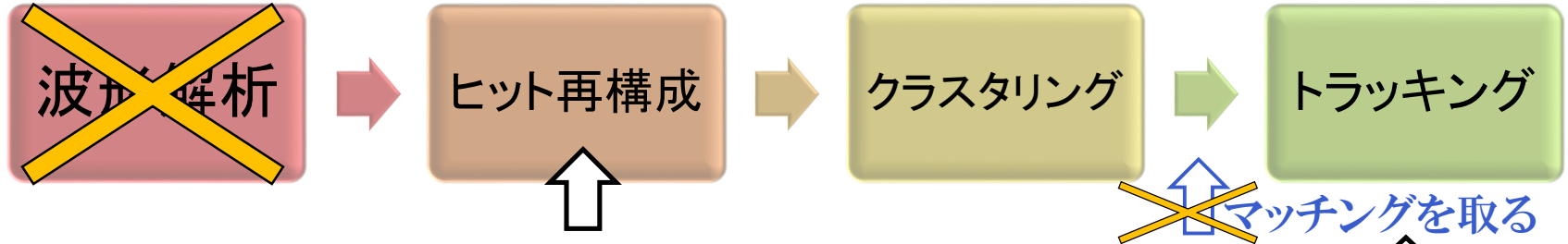
最初のヒット時間  
トラックごとの変数
時間オフセット  
カウンター固有の定数

- $\chi^2$ を最小にするように行列計算をして時間オフセットを得る。
  - 行列計算には“Millepede”を用いる。CMSやMEGIのドリフトチェンバーのアライメントにも用いられている。



# 今回のMCセットアップ

## 解析の流れ



- MC truthのヒットタイムに時間分解能分の広がりを入れる。
- 時間オフセットも加える。

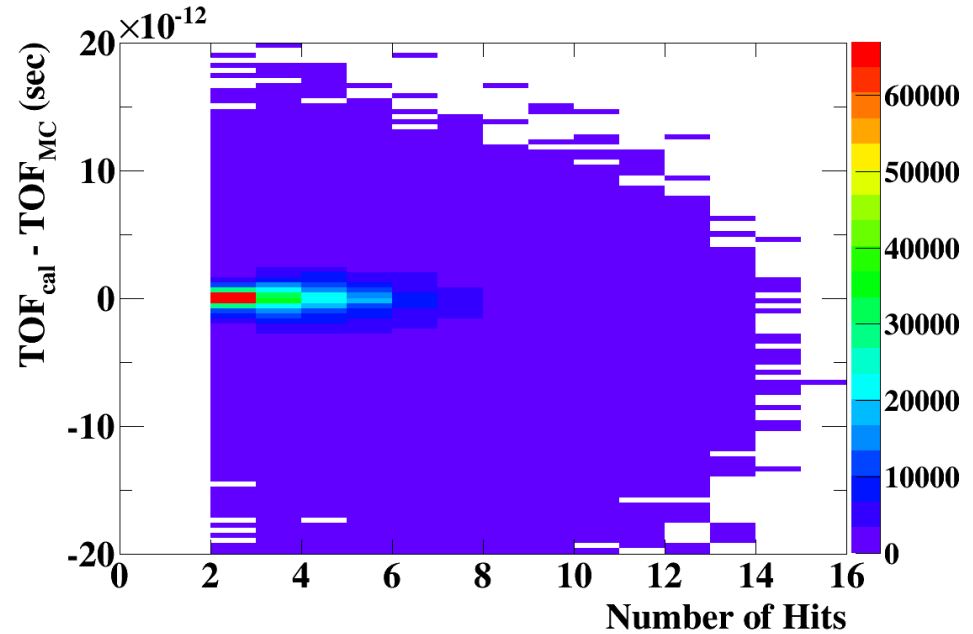
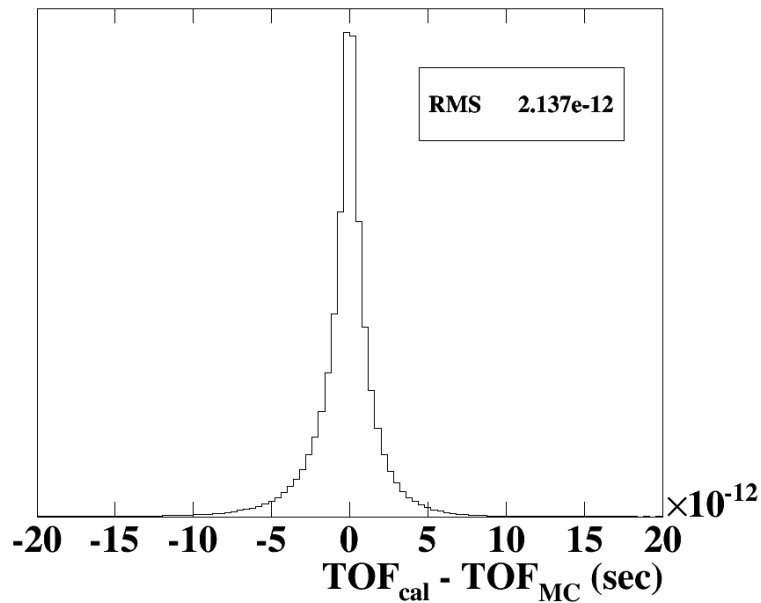
↑  
始めのヒットの運動量と位置はMC truthを用いる。

- $\mu$ 通常崩壊の陽電子
- タイミングカウンター、512個のカウンター
- MC truthのヒットタイムに時間分解能分( $\sigma = 60$  ps)の広がりを入れる。
- トラッカーとのマッチングやPile upは考慮していない。
- ダブルヒットカウンターは除外。
- 始めのヒットの運動量と位置はMC truthを用いる。
- ランダムな時間オフセット( $\sigma = 5$  ns)をそれぞれのMCヒット時間に加える。  
→ 残ったオフセットを評価する。

目標

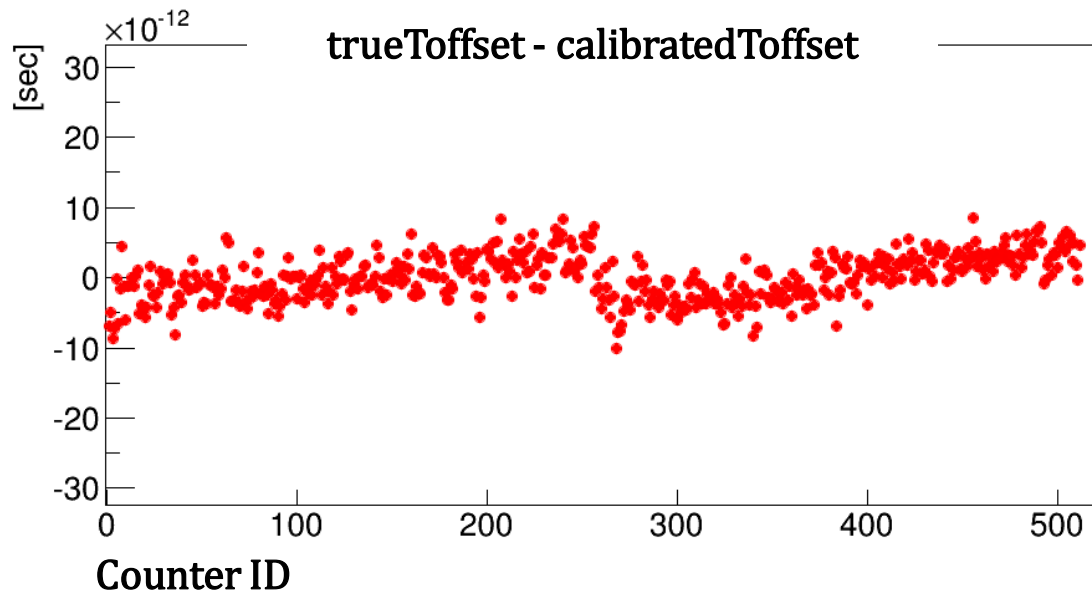
- 30 ps以下の精度
- バイアスがない

# TOFの見積もり精度

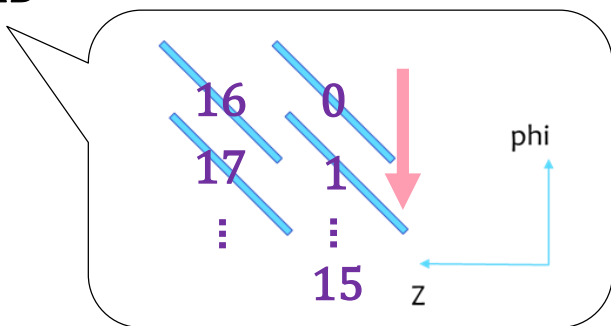


MCの値との差に大きなバイアスは見えない。  
TOFをうまく見積もれている。

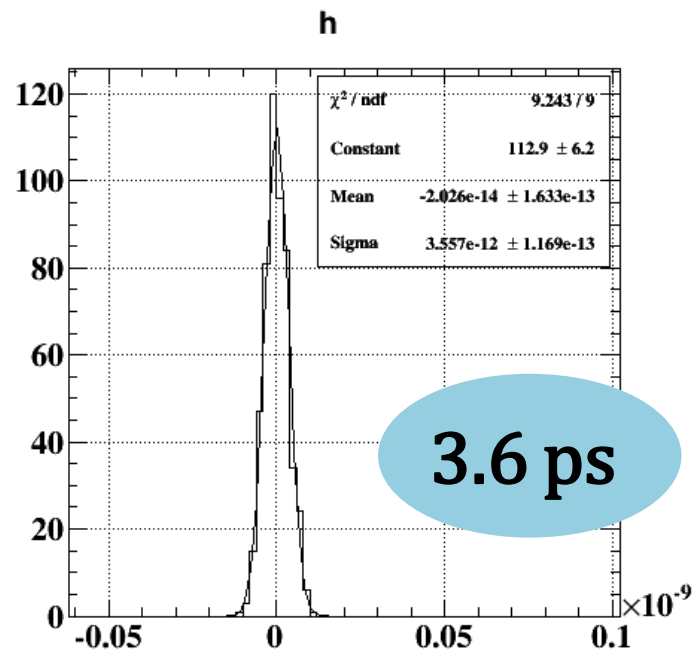
# 結果



±5 ps  
無視できる大きさ

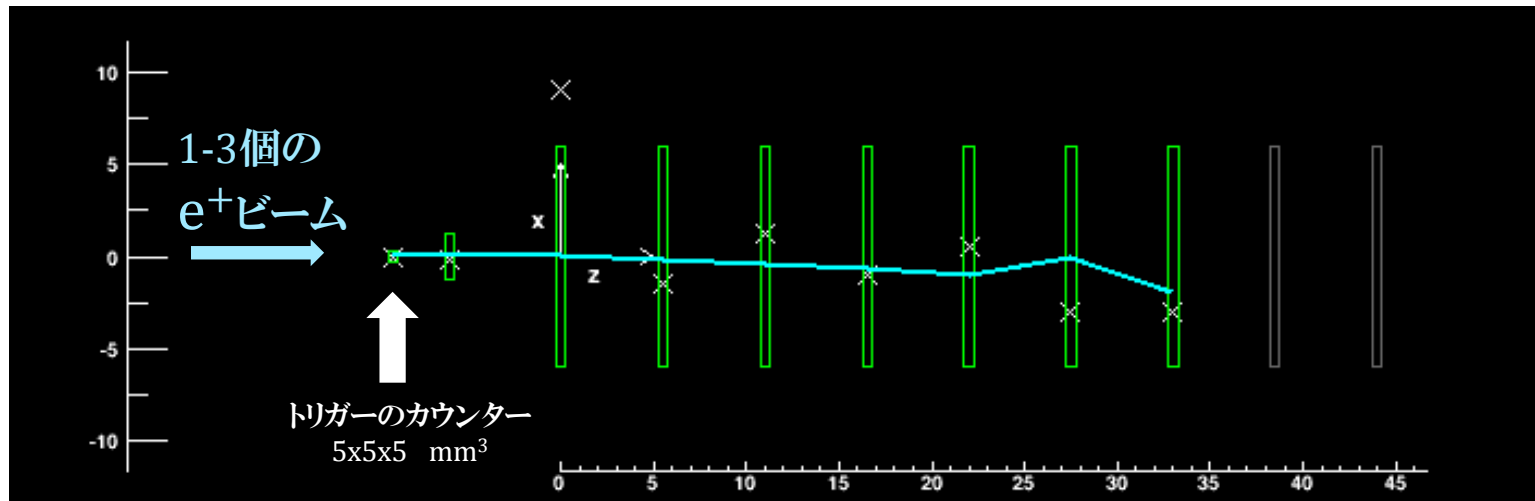


良い精度 (3.6 ps) で時間較正することができた。



# ビームテストデータでの時間較正

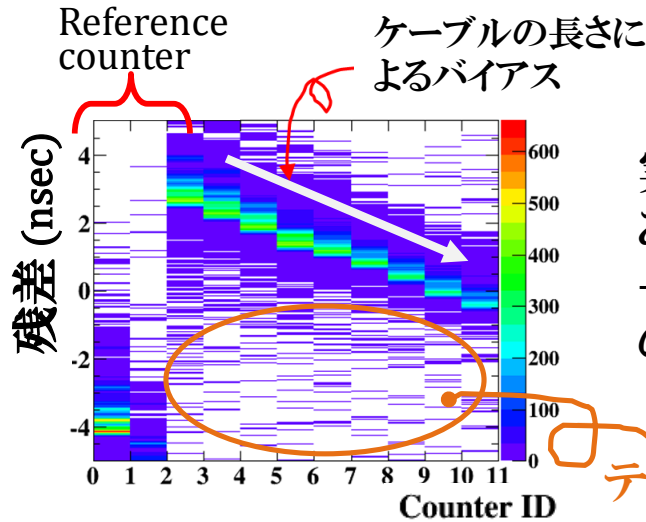
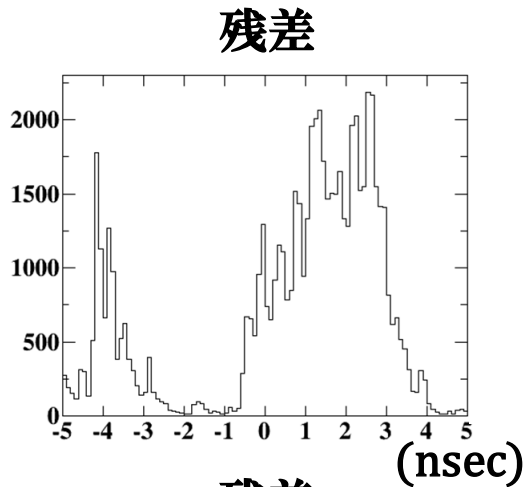
- ビームテストのデータで実際に較正法が働くか見た。
- レファレンスカウンター2個とプロタイプカウンター9個を直線状に設置。(詳しくは次のトーク)
- ビームはカウンターの中心にあたっている。
- トラッキングはKalman filterを使って行う。
  - 再構成した位置の情報も使っている。
- 時間カットは一つ前のカウンターからの時間差で決める。



トラッキングした後の実際のデータ

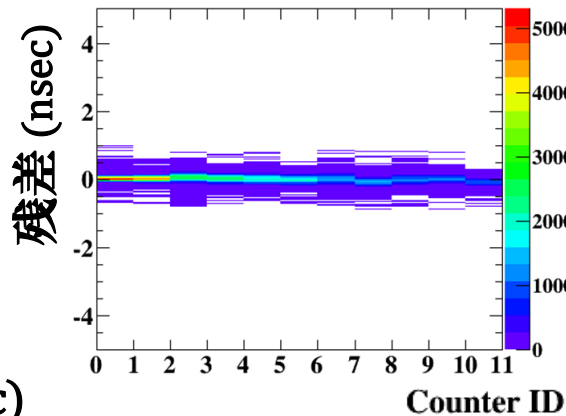
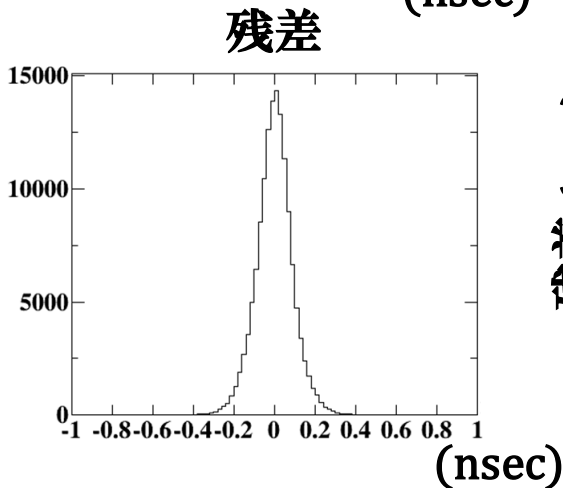
# ビームテストデータでの時間較正

- 実データでは、バイアスがある。→イタレーションが必要。



実データには、バイアスがある。  
→ 一回目は測定時間でのカットを行わない。

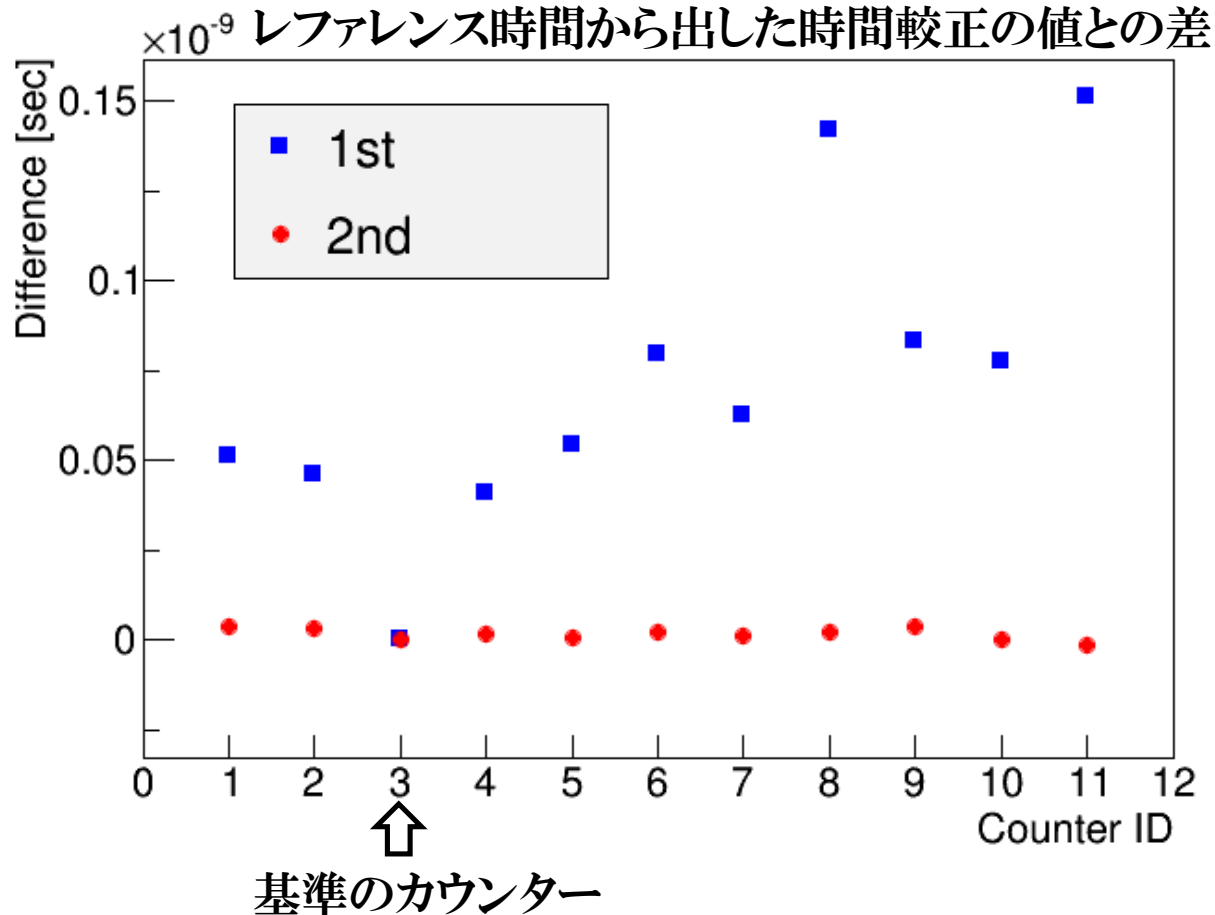
テールがある。



一回目でラフに較正した時間データを用いる  
→ 中心がそろうので測定時間でのカットを行える。

# ビームテストデータでの時間較正

- イタレーションをしない1回目では、大きいバイアスがあり、50-150 psの差が出てしまう。
- 2回目では < 4psの 良い精度。 → 実データでも時間較正ができた。

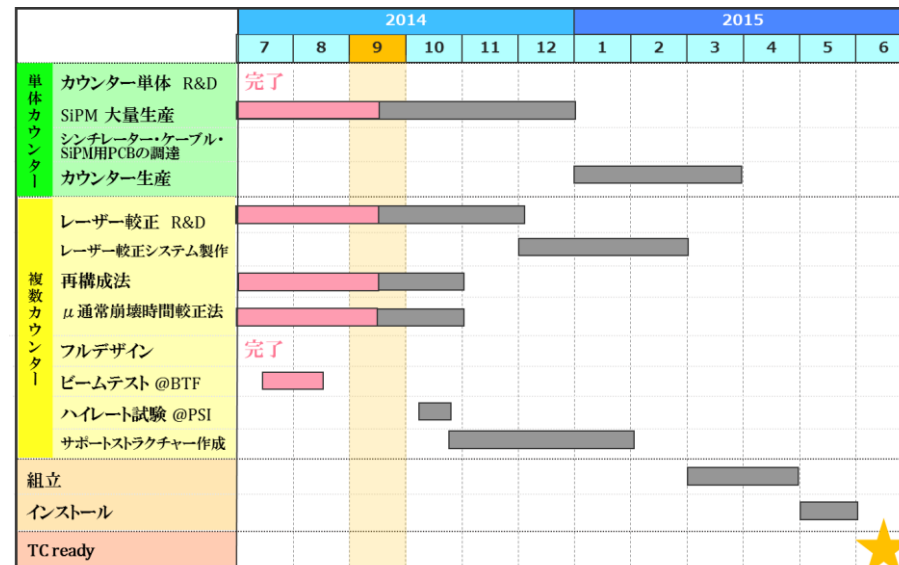


# まとめ

- MEG実験では、アップグレードが進行中。
- 陽電子タイミングカウンターでは、高速シンチレーターとSiPMを用いた小型カウンターで細分化することによって、 $\sim 30$  psの時間分解能で陽電子の時間を正確に測る。
  - 現在、SiPMのマスプロダクションが進行中。
- $\mu$ 通常崩壊を用いた時間較正を行った。
  - トラックとのマッチングやパイルアップなどのない理想的な状態ではあるが、 $\mu$ 通常崩壊の陽電子を用いて時間較正を行った場合、3.6 psの良い精度で時間較正できた。
  - イタレーション後、ビームテストデータでは、 $< 4$  psの精度で時間較正することができた。

# 今後

- 10月にビームテスト @PSI
  - ノイズチェックやハイレートでの測定
- サポートストラクチャーやバックプレーンなどの作成
- カウンター大量生産
- レーザー時間校正のR&D
- 解析手法の向上
  - クラスタリングやトラッキング
- より現実的な $\mu$ 通常崩壊を用いた時間校正精度の見積もり。
  - パイルアップによる効果を確認する。
  - ヒット位置による測定時間のずれを考慮する。
  - 様々なバイアス下(磁場やトラッキングなど)での時間校正精度の見積もり。





**BACK UP**

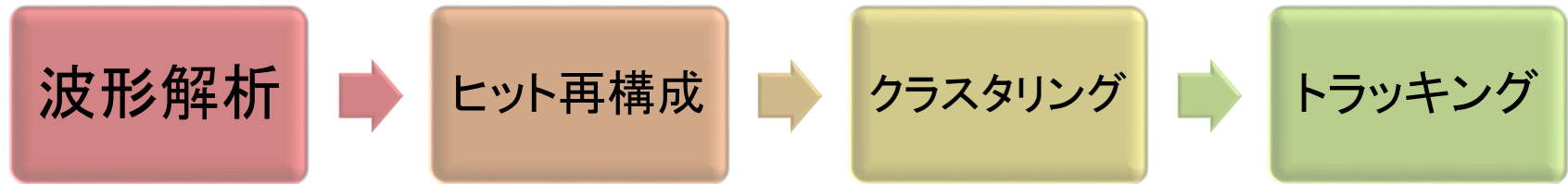
<b>Properties</b>	<b>BC-418</b>	<b>BC-420</b>	<b>BC-422</b>
Light Output [% Anthracene]	67	64	55
Rise Time [ns]	0.5	0.5	0.35
Decay Time [ns]	1.4	1.5	1.6
Wavelength of Max. Emission [nm]	391	391	370
Bulk Light Attenuation Length [cm]	100	110	8

Properties of ultra-fast plastic scintillators from Saint-Gobain

# イベント数

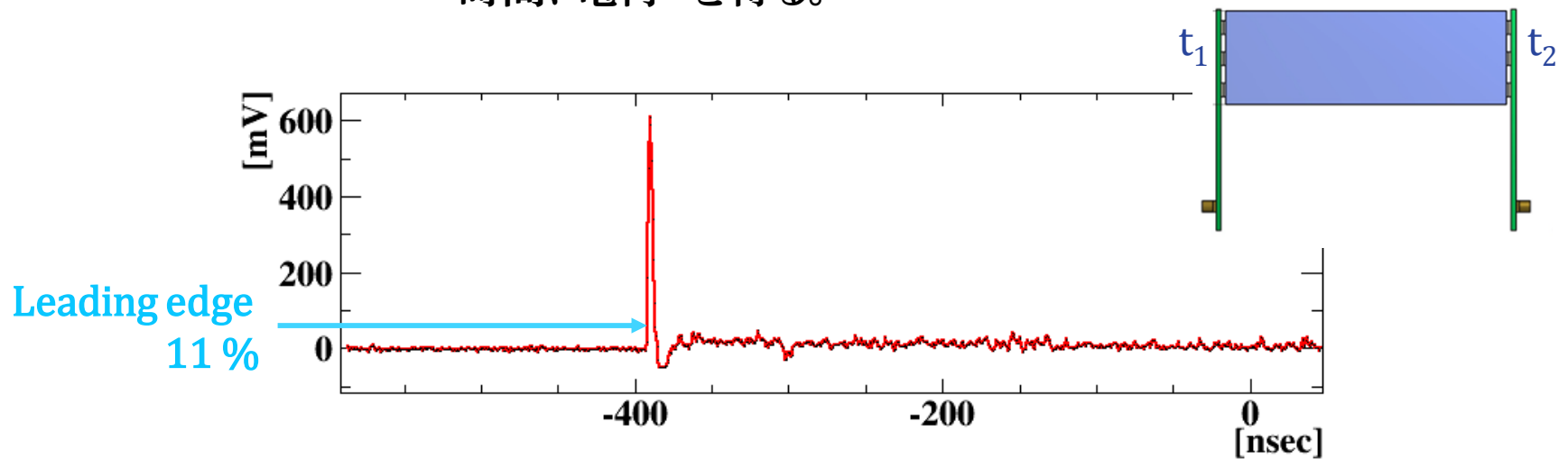
- Number of Triggered Event for Calibration is 365148
- Number of Used Event for Calibration is 248699

# 解析

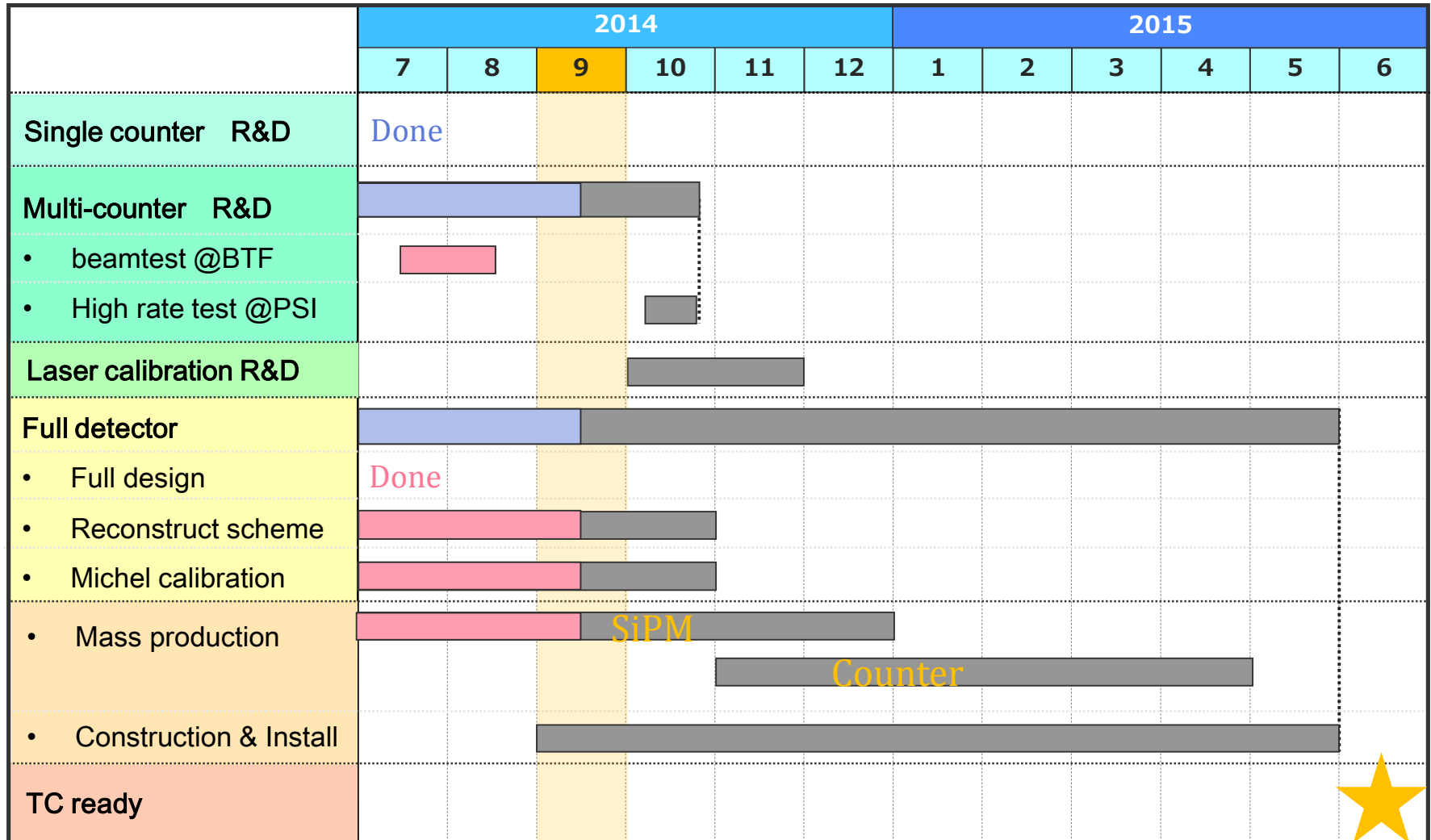


## 波形解析

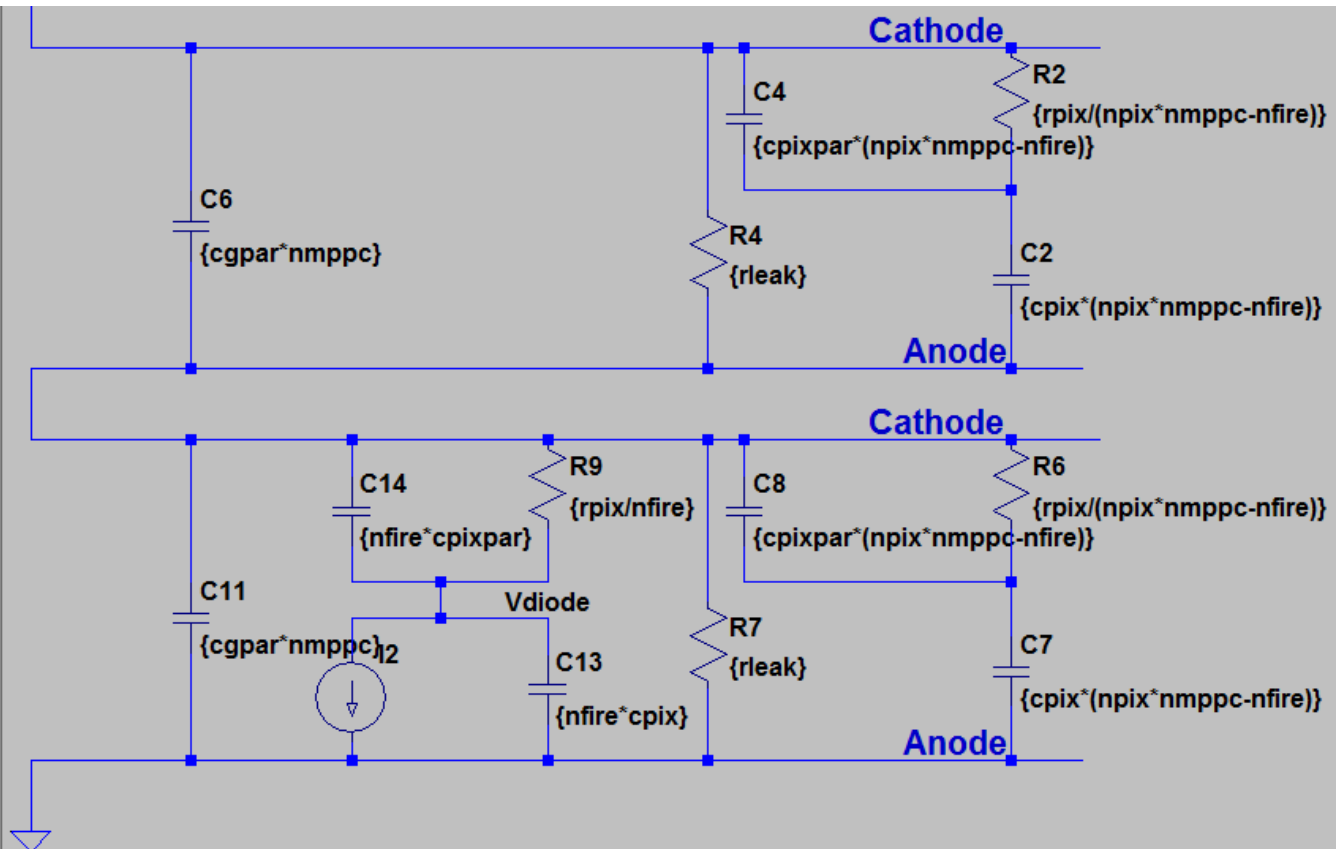
- チャンネル(カウンター数 $\times$ 2)ごとに時間、電荷を得る。



# TC Schedule



# SiPM Model



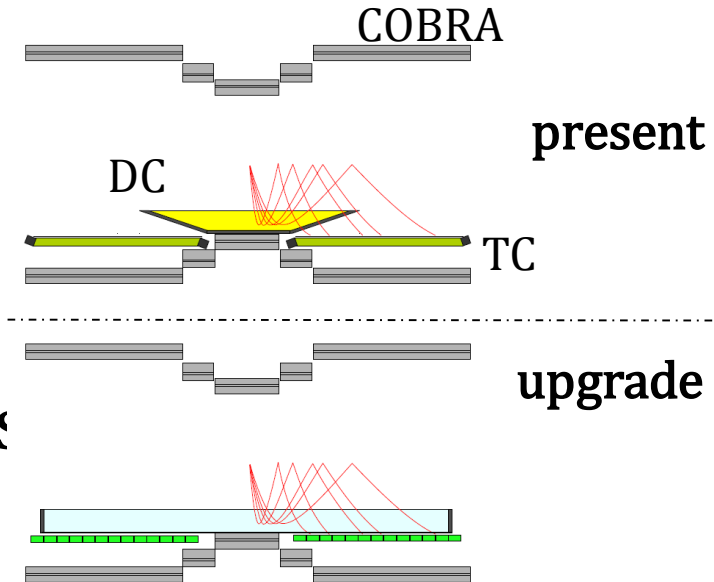
```
.tran 0 500e-9 0e-9 1e-9

.param nmppc 1
.param igen 540u
.param npix 3600
.param cpix 100f
.param rpix 150k
.param cpixpar 2f
.param cgpar 300p
.param trise 0.5n
.param nfire 1
.param rleak 10000k

.param RH 10k
.param CH 10n
```

# $t_{e\gamma}$ resolution

track length: 75 ps  $\rightarrow$  11 ps  
 gamma side: 67 ps  $\rightarrow$  76 ps  
 Timing counter: 76ps  $\rightarrow$  30-35ps



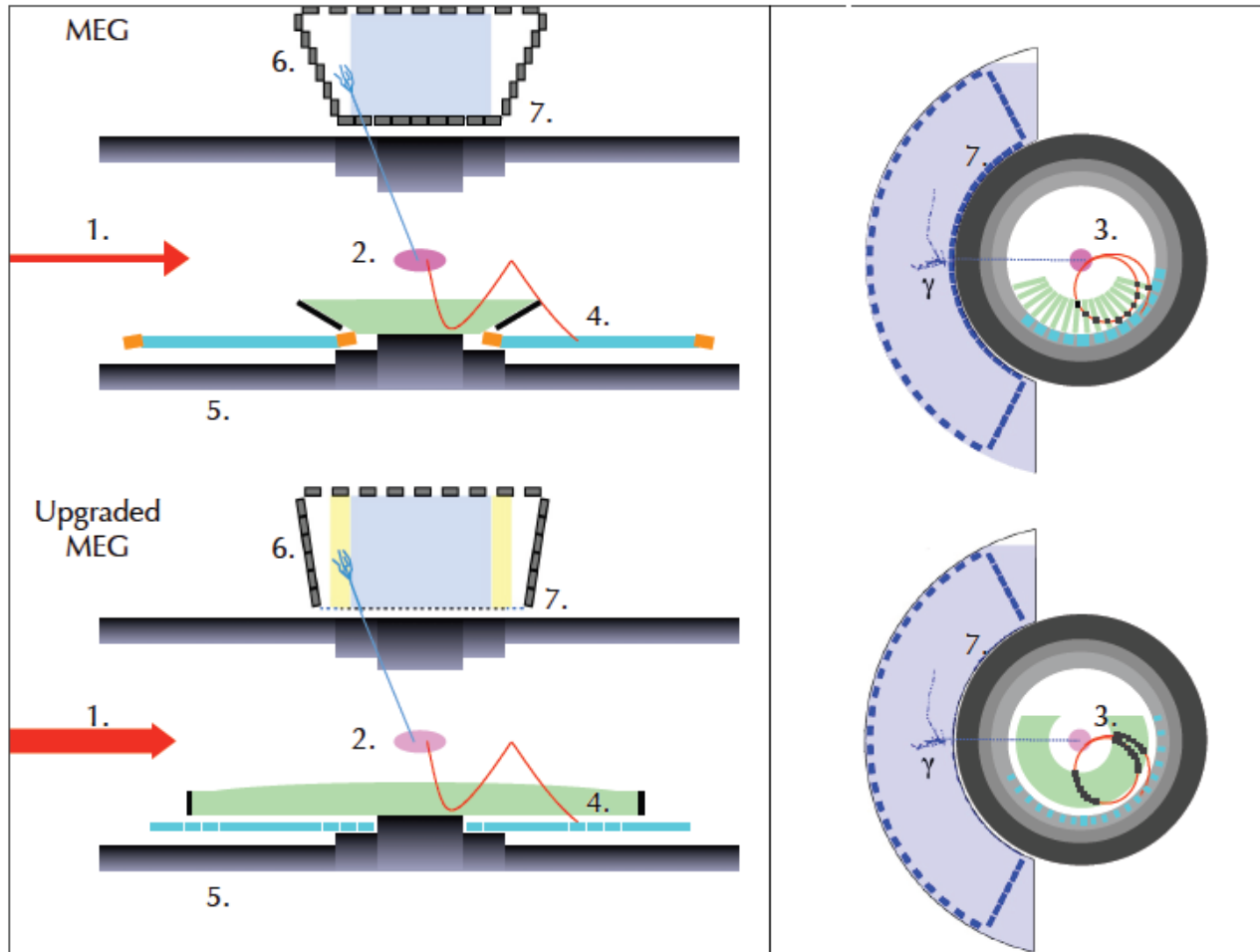
$$\sigma_{e\gamma} = 130 \text{ ps} \rightarrow \mathbf{84 \text{ ps}} \text{ (35\% } \downarrow \text{)}$$

## for MEG upgrade

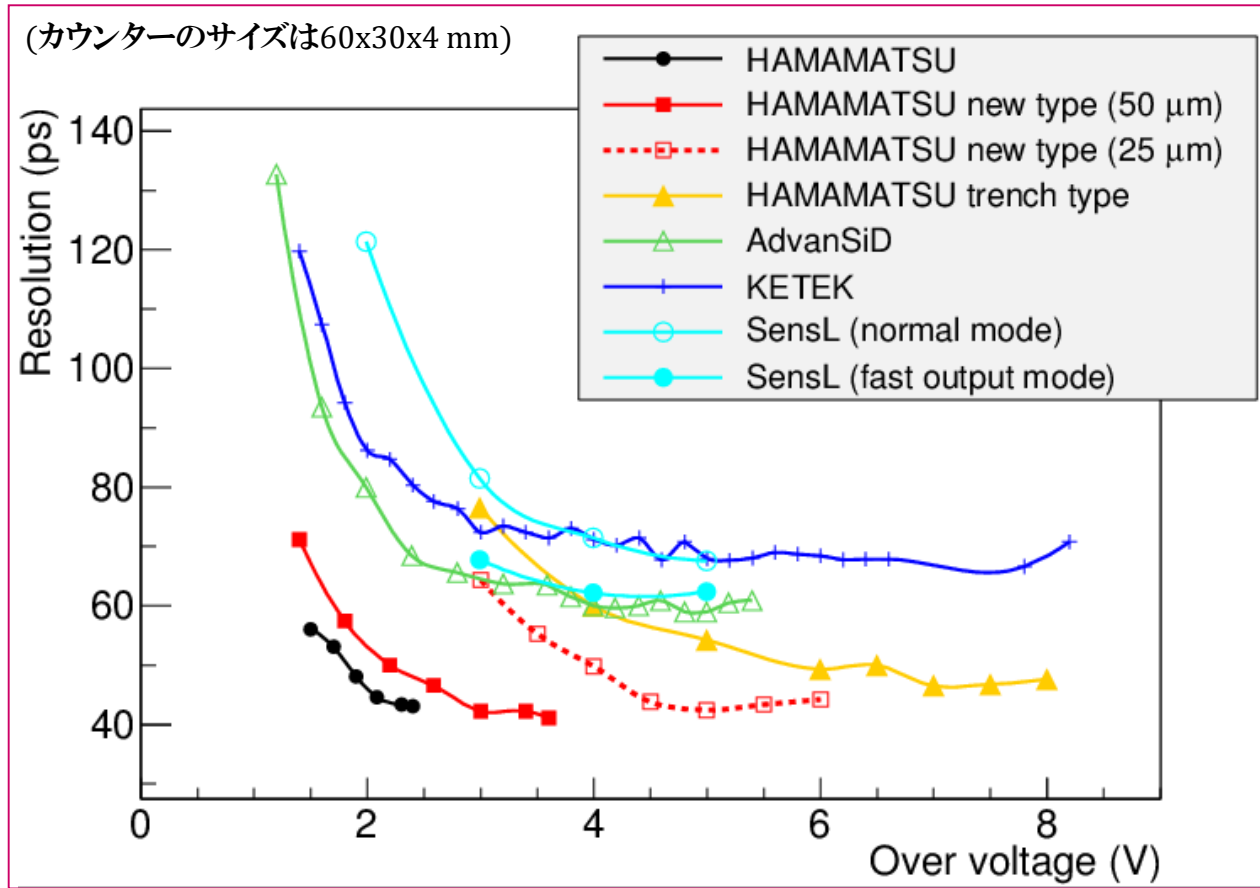
PDF parameters	Present MEG	Upgrade scenario
$e^+$ energy (keV)	320	110-140
$e^+$ $\theta$ (mrad)	11	5-7
$e^+$ $\phi$ (mrad)	7.2	5-7
$e^+$ vertex Z/Y(core) (mm)	2.0/1.1	1.5/1.0
$\gamma$ energy (%) ( $w > 2$ cm)	1.9	1.0
$\gamma$ position ( $u, v, w$ ) (mm)	5( $u, v$ ), 6( $w$ )	2
$\gamma$ - $e^+$ timing (ps)	122	75-90
<b>Efficiency (%)</b>		
trigger	$\approx 99$	$\approx 99$
$\gamma$ reconstruction	59	59
$e^+$ reconstruction	40	85-90
event selection	80	85



# Upgrade summary



# SiPMのメーカーによる時間分解能の違い



# モチベーション

- 512個のカウンター
  - それぞれ時間オフセットを持っている。
  - 時間合わせが必要 (< 30 ps)

