

MEG II実験陽電子タイミングカウンターの
製作および較正と
大強度ミュー粒子ビームを用いた性能評価

**MEG II positron timing counter
- construction, calibration, and performance evaluation by
using high intensity muon beam**

東京大学

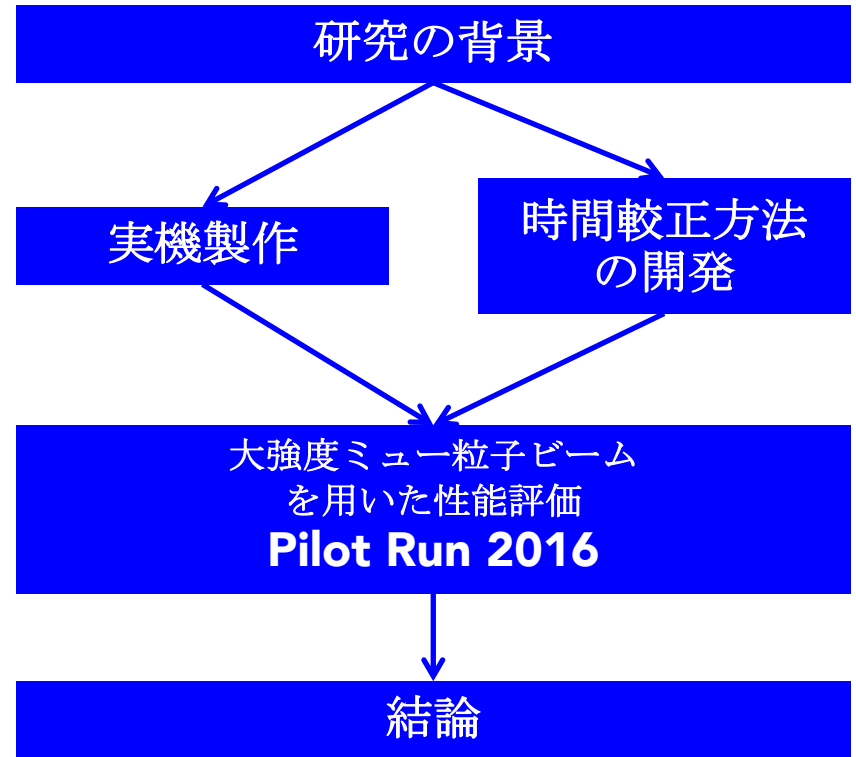
理学系研究科 物理学専攻

素粒子物理国際研究センター 森研究室

中尾 光孝

発表の内容

- 研究の背景
 - 荷電レプトンフレーバーの破れ
 - MEG II実験
- 実機製作
 - 陽電子タイミングカウンター
 - 実機製作
- 時間較正方法の開発
 - レーザー較正法
 - ミシェル較正法
- 大強度ミュオン粒子ビームを用いた性能評価: Pilot Run 2016
 - セットアップ
 - 時間較正の適用
 - 時間分解能の評価
- 結論
 - 今後の課題と展望
 - まとめ

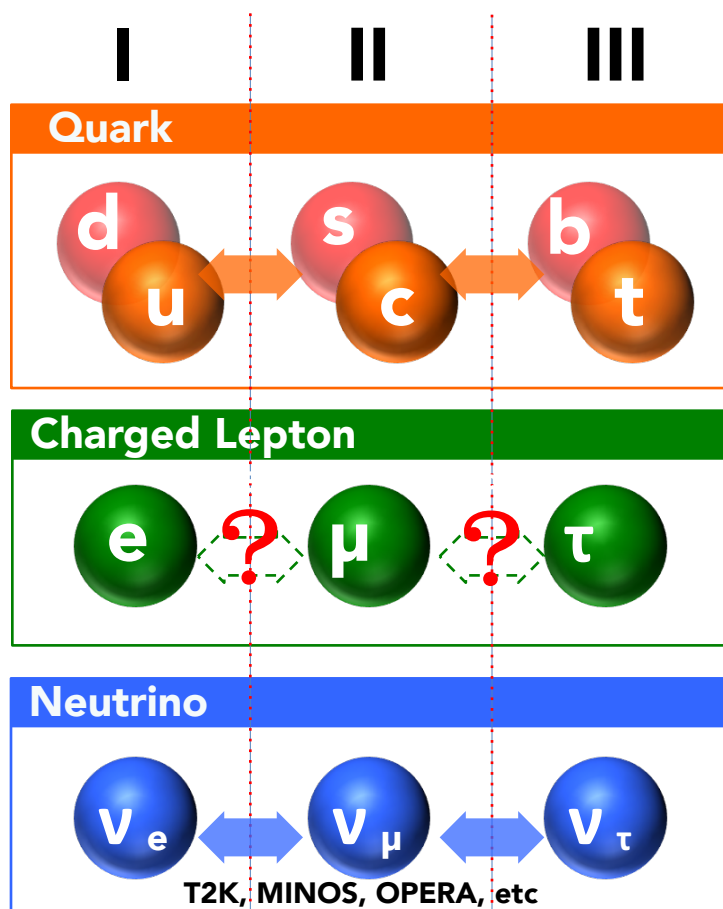


研究の背景

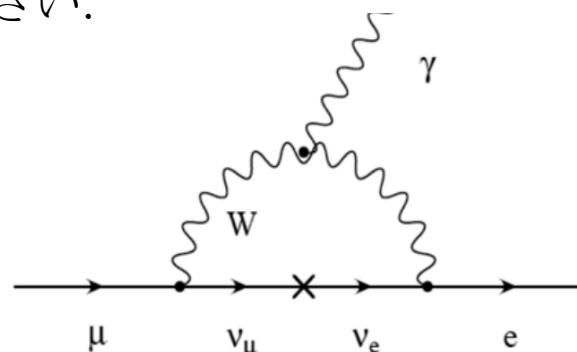


荷電レプトンフレーバーの破れ

Charged Lepton Flavour Violation, CLFV



- 世代間混合は, 荷電レプトンセクターにおいてのみ未発見.
- ニュートリノ振動を含めても分岐比は非常に小さい.



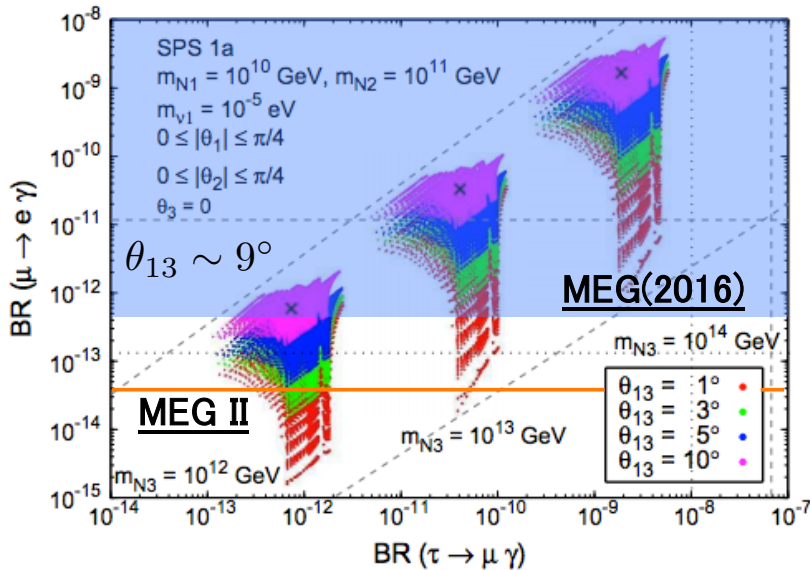
$$\mathcal{B}(\mu \rightarrow e \gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{e i} \frac{\Delta m_{i1}^2}{M_W^2} \right|^2 \simeq 10^{-54}$$

- 標準理論を超える多くの理論では, 観測可能な分岐比が预言されている: $O(10^{-12}) \sim O(10^{-14})$

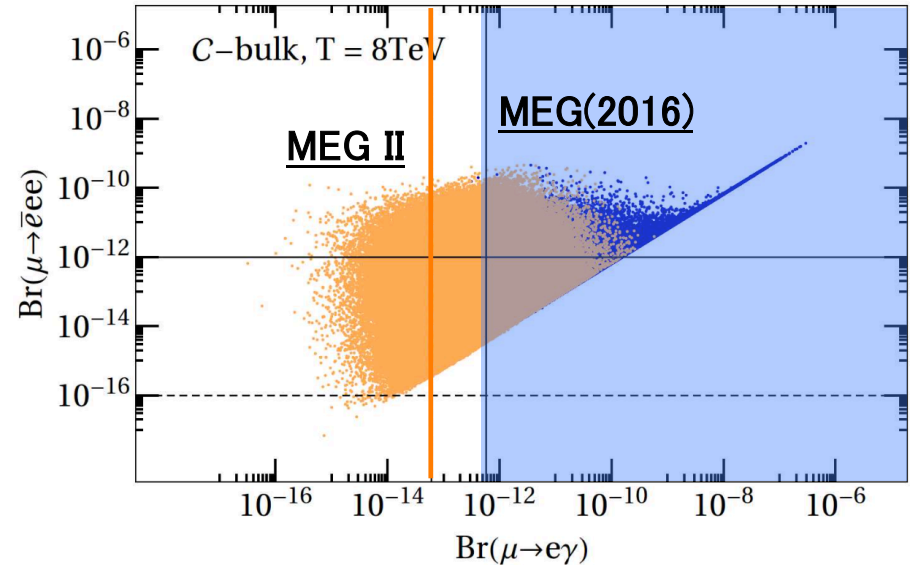
荷電レプトンフレーバーの破れの発見 = 新物理の証拠!!

$\mu \rightarrow e\gamma$ と物理モデルの例

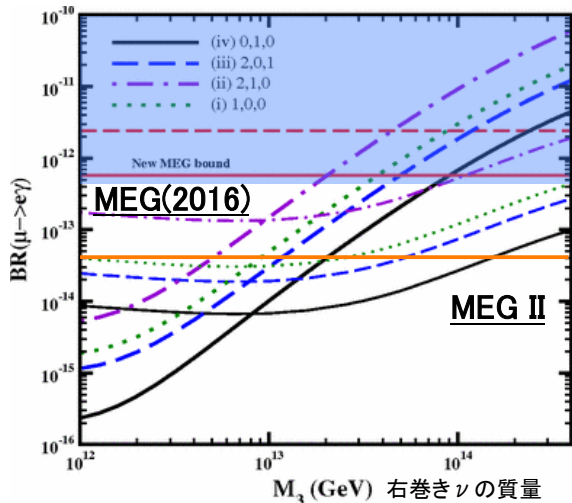
SUSY-Seesaw JHEP11(2006)090



余剰次元 Nucl. Phys. B 906 (2016) 561



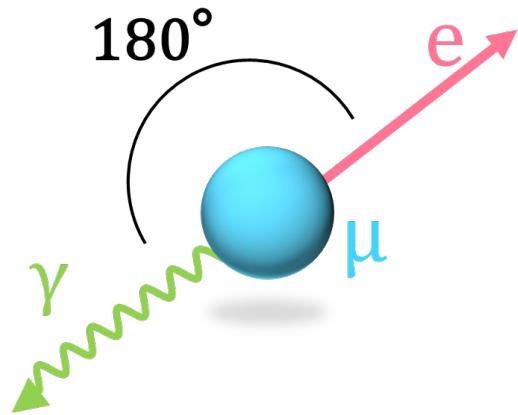
SUSY-GUT Phys. Rev. D 88, 075005(2013)



- 多くの新物理モデルが観測できるレベルの分岐比を予想。
- 2016年, MEG実験は最終結果を発表:
 4.2×10^{-13} (90% C.L.)
- MEG II実験は 4×10^{-14} を目指して準備中。

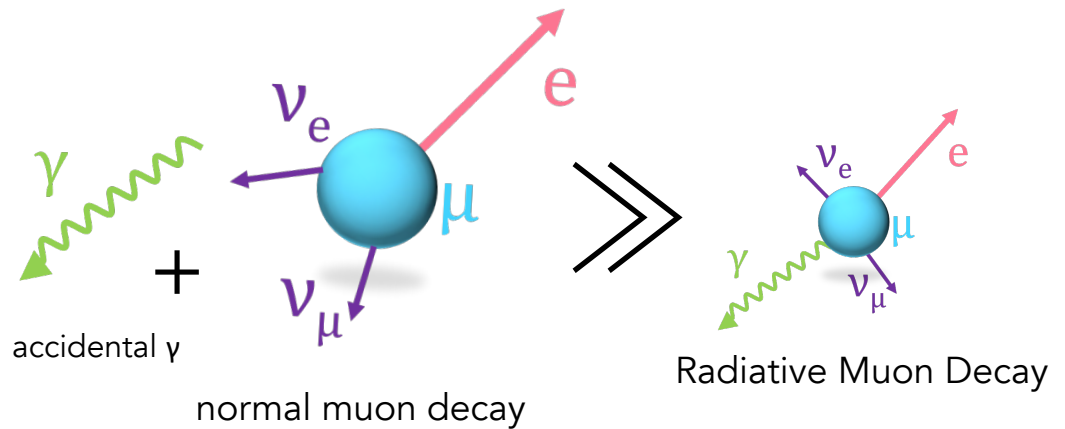
MEG II 実験: 原理

SIGNAL



- 同時に反対方向 ($\theta_{e\gamma}=180^\circ, T_\gamma=T_e$)
- エネルギーは半分ずつ ($E_\gamma, E_e=52.8\text{MeV}$)

BACKGROUND



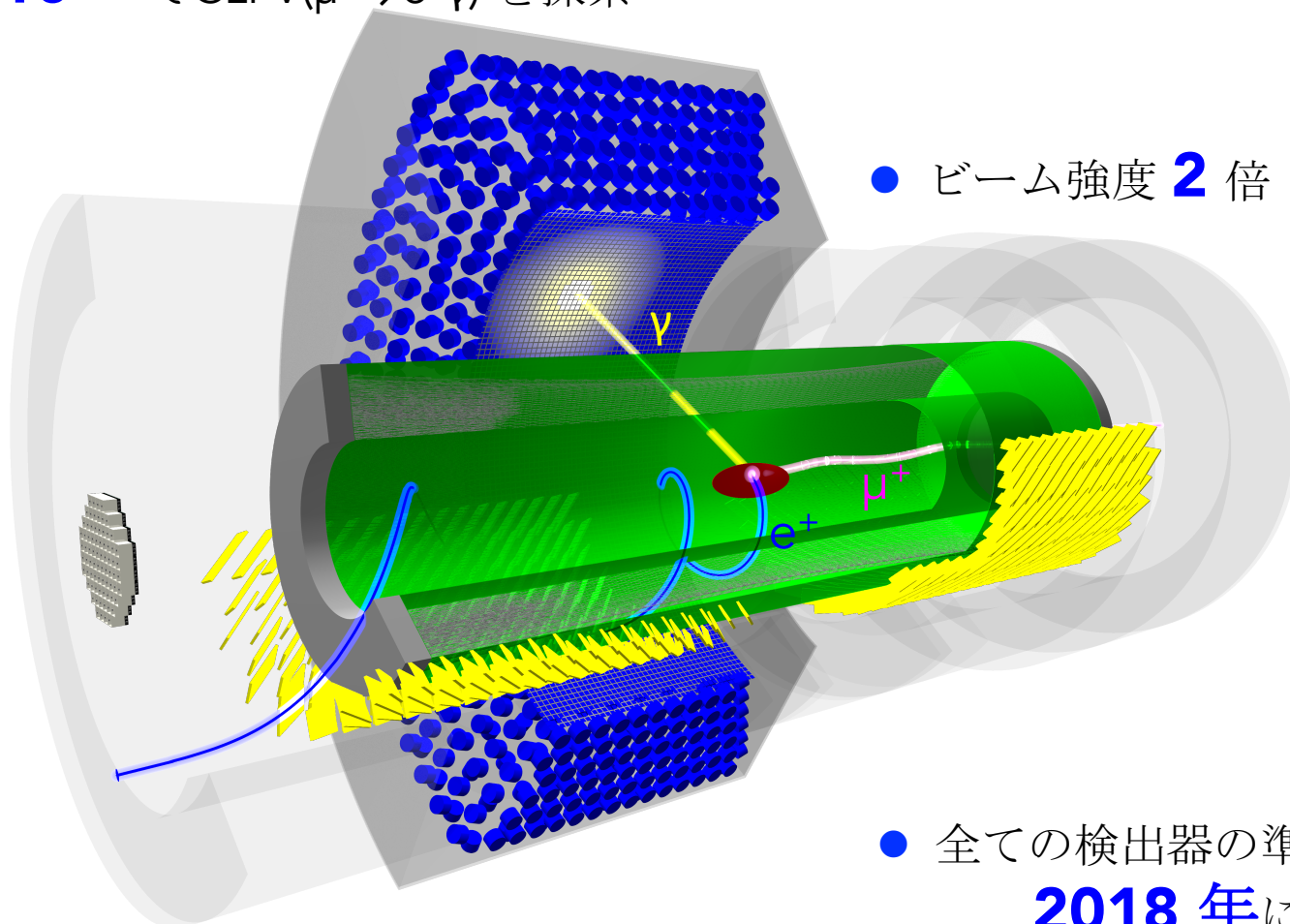
- 左が支配的
- accidental γ の原因は,
1. Annihilation in Flight or 2. RMD

要請

- 連続的・大強度ミュオンビーム
- 高いエネルギー・位置・時間分解能をもつ検出器
- 高いレート環境で運用できる検出器

→ MEG/MEG II実験 @ ポール・シェラー研究所(スイス)

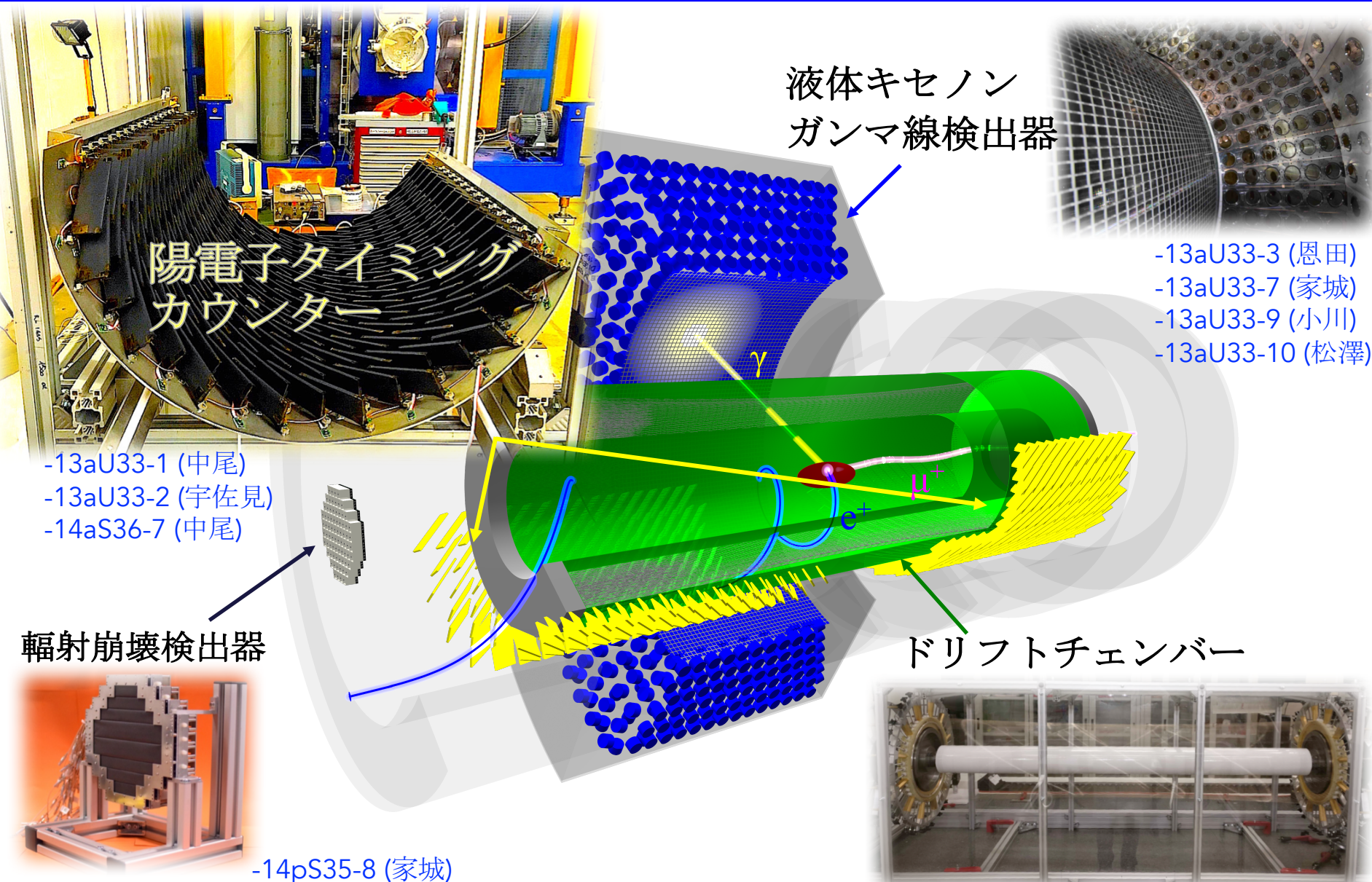
- MEG実験による制限を **10** 倍改善する,
感度 **4×10^{-14}** でCLFV($\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$) を探索



- 全ての分解能を **2** 倍改善

MEG II 検出器

At Paul Scherrer Institut
in Switzerland



本研究のゴール

本研究の対象

- 陽電子タイミングカウンター
 - ▶ 陽電子の時間を高精度に測定する。
→主要なバックグラウンドである偶発事象を減らすために重要.

本研究のゴール

- MEG IのTCを2倍改善する時間分解能: 35 psを達成すること.

そのために

- 実機を製作し,
- 時間較正方法を開発し,
- MEG II実験と同じ環境で大強度ミュオン粒子ビームを用いて性能評価した.

修士論文

本論文のタイトル:

MEG II 実験陽電子タイミングカウンターの
製作および較正と
大強度ミュオン粒子ビームによる性能評価

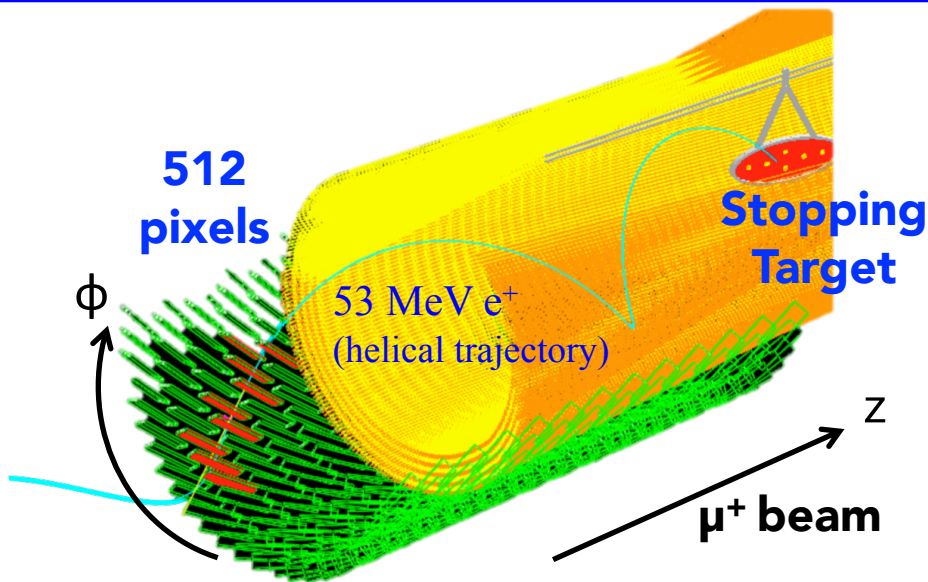
実機製作



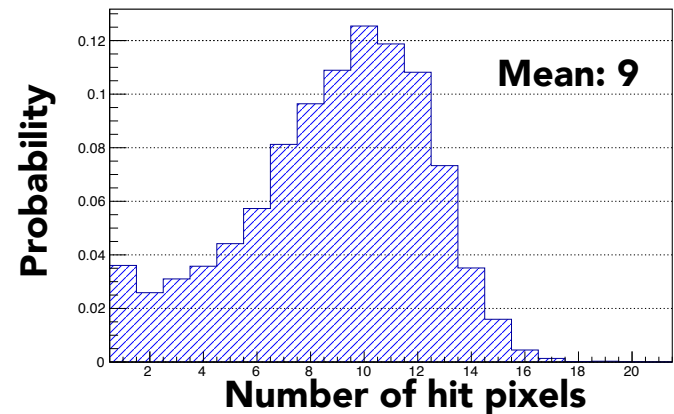
原理: 複数ヒット

Key Concept

- 1つの陽電子を多重測定することで時間分解能を向上させる。



- シグナル陽電子は平均して9個の「ピクセル」にヒットする (MC).



- ヒット数Nでの時間分解能は $\frac{1}{\sqrt{N_{\text{hit}}}}$ で改善し, 9ヒットに対して時間分解能 ~ 35 psを達成する。

Stochastic term

Constant term

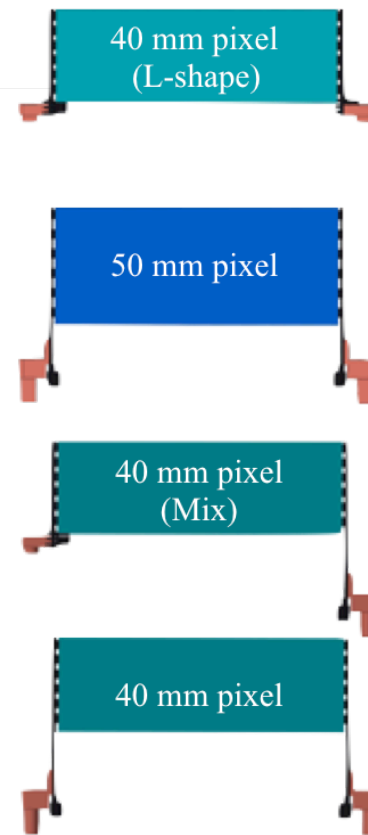
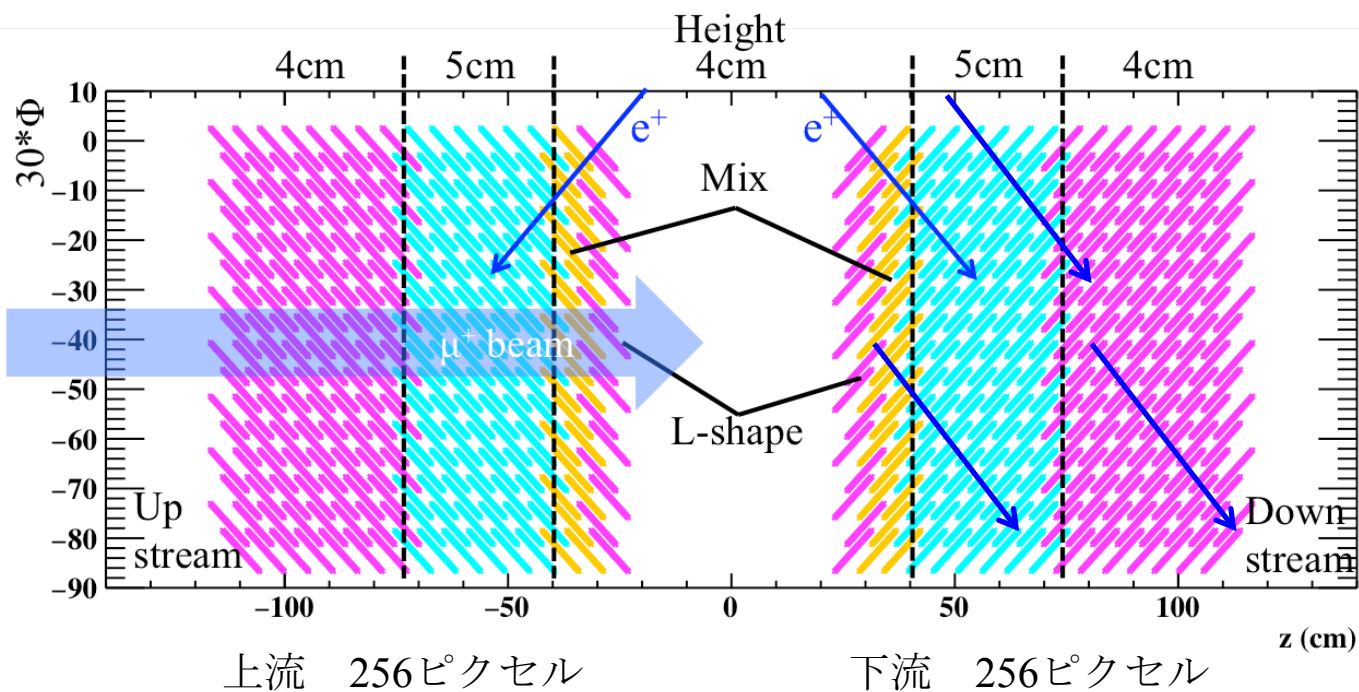
$$\sigma_{\text{all}}(N_{\text{hit}}) = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{intrinsic}}^2}{N_{\text{hit}}} + \frac{\sigma_{\text{inter-pixel}}^2}{N_{\text{hit}}} + \sigma_{\text{MS}}^2(N_{\text{hit}}) + \sigma_{\text{const}}^2}$$

Intrinsic resolution:
70~80 ps

Multiple scattering:
~4 ps at 9 hits

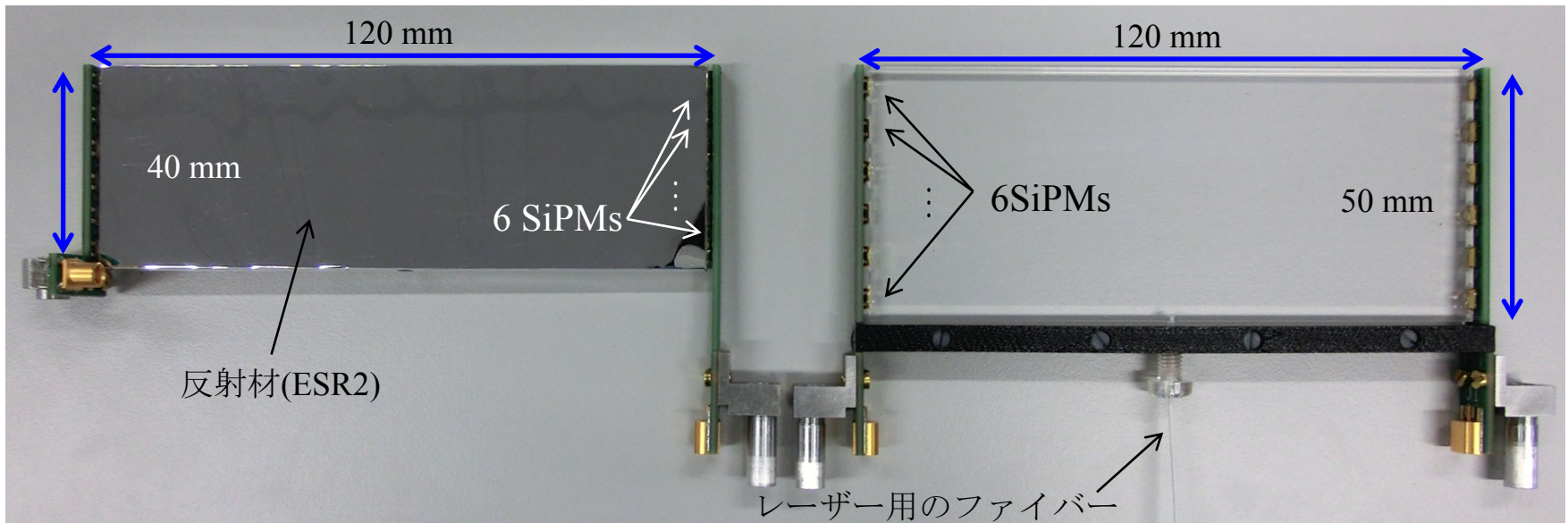
ピクセル(1)

- 上流側(256個)+下流側(256個)=512個の「ピクセル」で構成される。
- 高速プラスチックシンチレータ(BC422, 40(50)x12x5 mm³)
- 両端にSiPMs(AdvanSiD, ASD-NUV3S-P High-Gain)を6つずつ接着し, 直列接続で読み出す(合計6144個).
- ピクセル間の時間較正精度: 30 ps

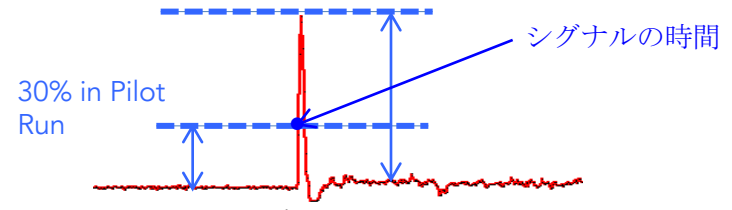
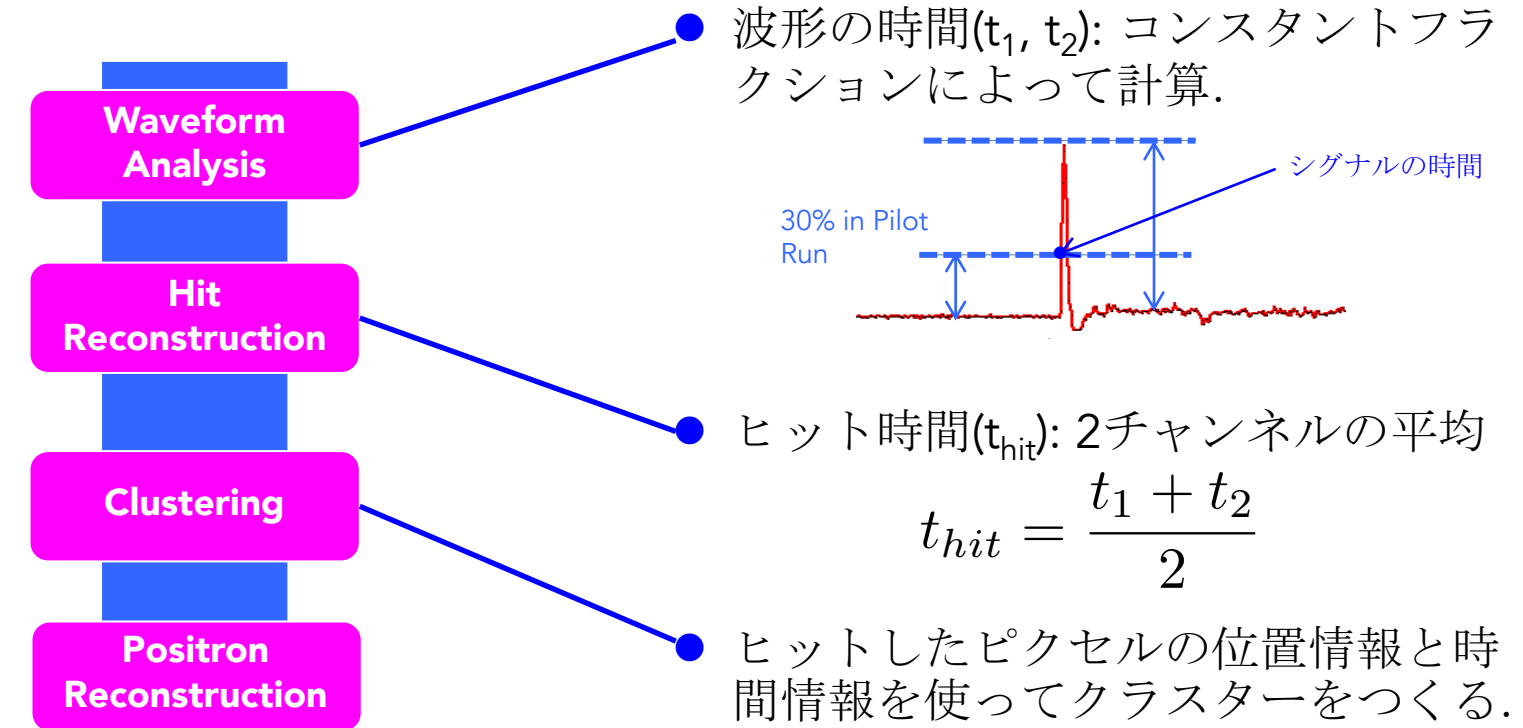


ピクセル(2)

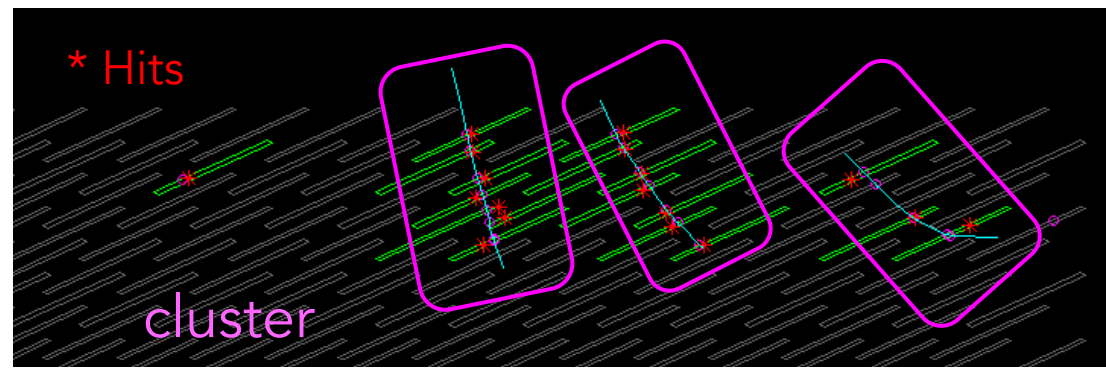
- 上流側(256個)+下流側(256個)=512個の「ピクセル」で構成される.
- 高速プラスチックシンチレータ(BC422, 40(50)x12x5 mm³)
- 両端にSiPMs(AdvanSiD, ASD-NUV3S-P High-Gain)を6つずつ接着し, 直列接続で読み出す(合計6144個).
- ピクセル間の時間較正精度: 30 ps



解析方法

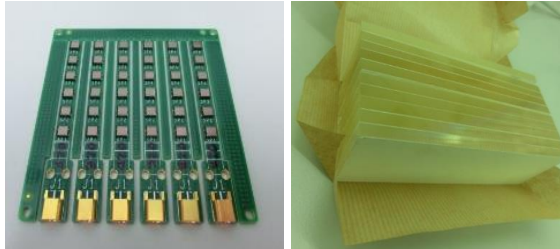


Positron Timing
by Timing Counter

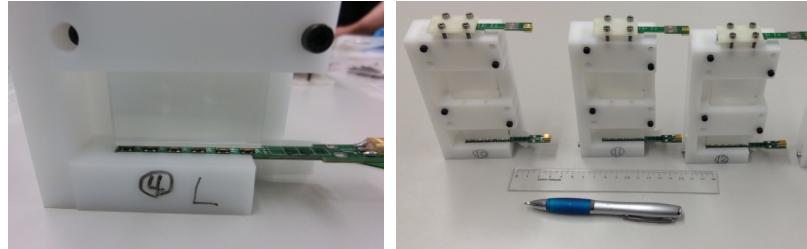


実機製作 ①

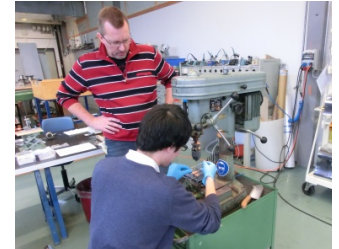
SiPMs on PCB
& Scintillators



Couple scintillators and arrays w/
optical cement



Hole
making



- 各段階で、SiPM, SiPM Array, シンチレータの個別試験を行った。

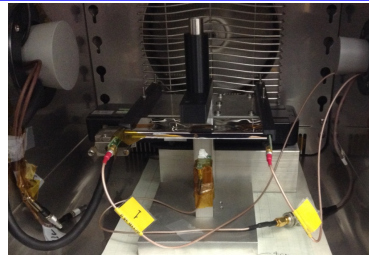
BC600

Wrap pixel with
reflector



ESR2

Pixel
Test



Shielding



Tedlar®

Finish!!

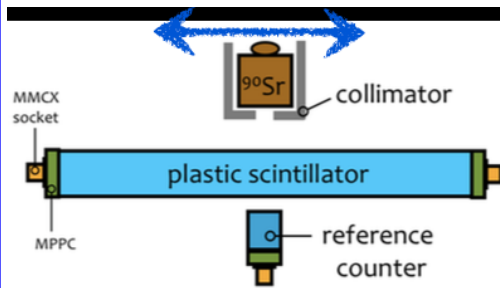


- 500 ピクセル以上を製作&試験完了。

実機製作 ②

各ピクセルの性能評価

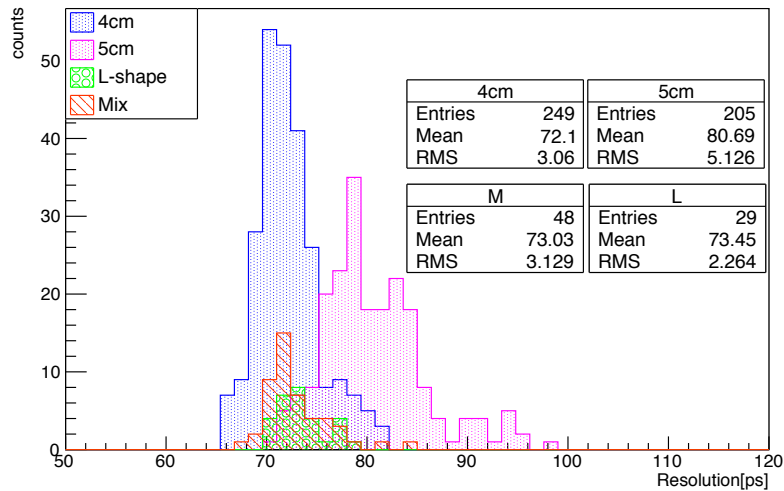
- ^{90}Sr 線源を用いて全てのピクセルの時間分解能を測定した。



$$\frac{t_1 + t_2}{2} - t_{RC}$$

で時間を計算し, RCの時間分解能を差し引いてピクセルの時間分解能を算出。

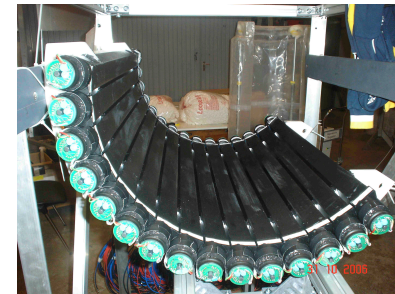
Mass Test



- ピクセルの時間分解能:70 psから80 ps

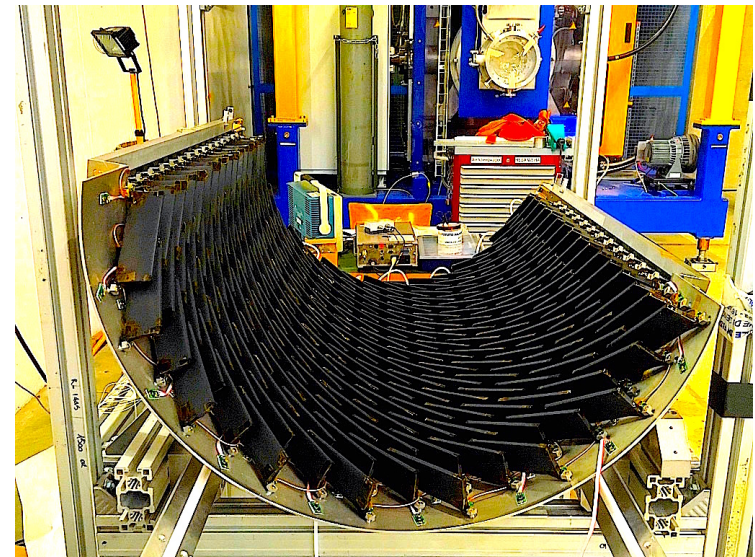
インストール

MEG I TC(31Oct., 2006)

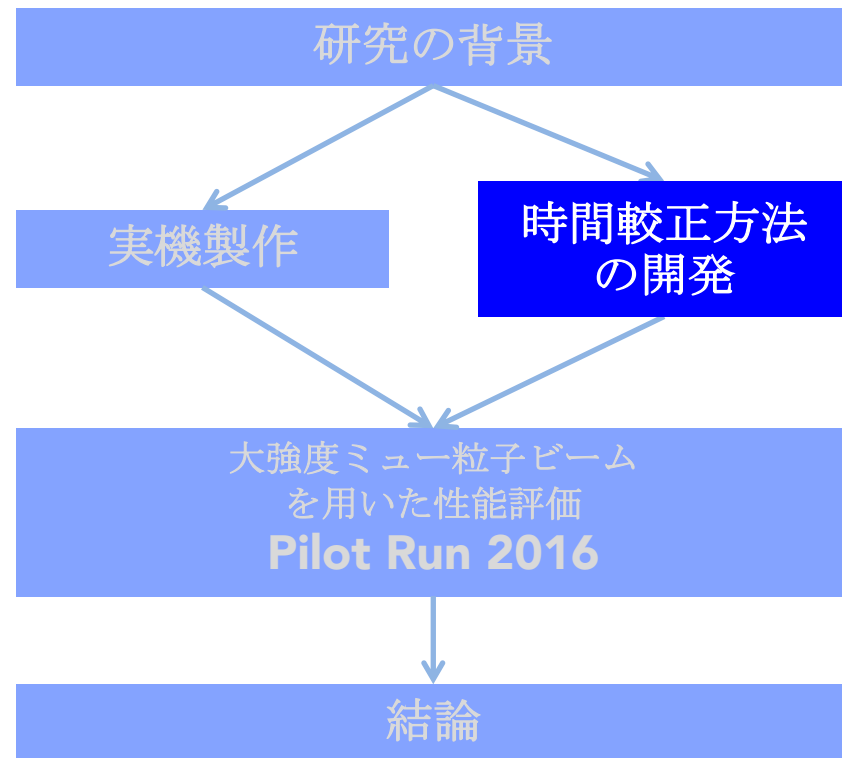


10 years!

MEG II TC(21Nov., 2016)



時間較正方法の開発



時間較正の概要

- 512個のピクセルは時間のオフセットをもっており, 30 psの精度で時間を合わせる必要がある.
- ピクセル間の時間較正のために, ミシエル較正法とレーザー較正法という2つの相補的な方法を開発した.
- ガンマ線検出器との時間合わせはミューオン輻射崩壊($\mu \rightarrow e\nu\nu$)を用いて行う.

ミシエル較正法

メインのBGである, ミシエル崩壊($\mu \rightarrow e\nu\nu$)の陽電子を用いる.

レーザー較正法

同じ光源からピクセルにレーザーを照射する.

あり

場所依存

なし

Good!

長い

必要な時間

短い

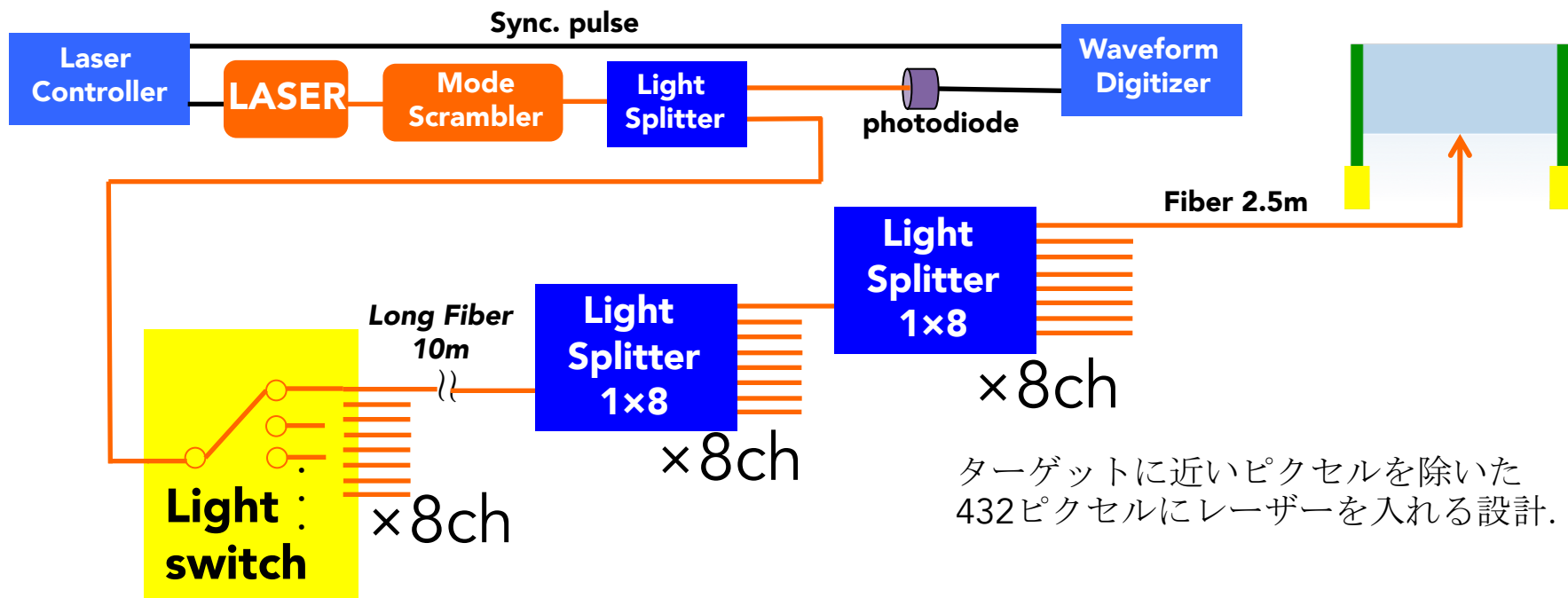
Good!

Good! 11 ps

精度

24 ps

レーザー較正法 ①: 概要



ターゲットに近いピクセルを除いた
432ピクセルにレーザーを入れる設計.

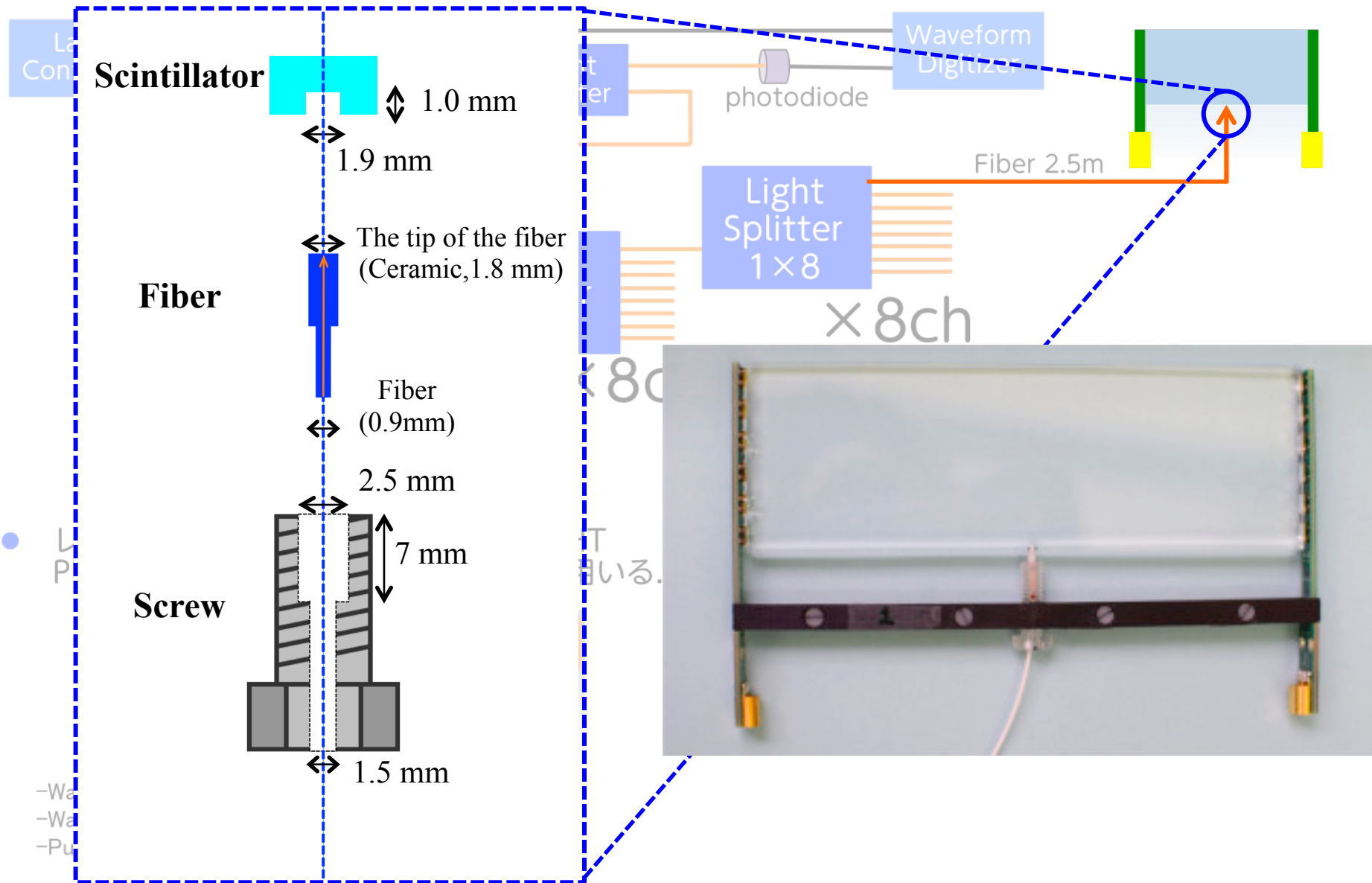
- レーザー源としてPICOSECOND LIGHT PULSER PLP-10(浜松ホトニクス社)を用いる.



- Wavelength 405 nm
- Wavelength FWHM < 10 nm
- Pulse duration typ. (max) 60 (100) ps

- 十分な光量を確保するため、Light Switchによって切り替え、1回に64ピクセルずつ較正を行う。
- レーザー同期パルスの時間を基準にして各ピクセルの時間オフセットを求める。

レーザー校正法 ②: ファイバーの固定



$$\chi^2 = \sum_i^{N_{event}} \sum_j^{N_{hit}} \left(\frac{\overbrace{T_{ij}}^{\text{測定時間}} - \underbrace{(T_{0i} + TOF_{ij} + \Delta T_j)}_{\text{計算した時間}}}{\sigma} \right)^2$$

→ ピクセルに固有の時間オフセット
:これが知りたい

- (CDCHを用いて)再構成した飛跡からTOFを計算.
- モンテカルロからTOFの値を計算する.
- 飛跡によって, 各ピクセルが3種類のTOFの値を持つと仮定.
 → pattern A, B and C (3patternx128pixels=384種類のTOF)
- χ^2 を全ヒット, 全イベントに対する測定時間と計算した時間の差として定義する(上式).
- χ^2 を最小化するようなピクセルに固有の時間オフセット: ΔT_j を求める.
 (Millepede IIを用いた)

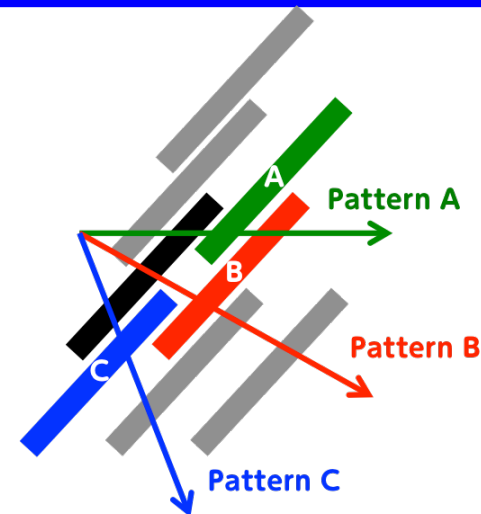
Millepede II www.desy.de/~kleinwrt/MP2

A software provided by DESY to solve the linear squares problems, such as detector alignment and calibration based on track fits.

$$\chi^2 = \sum_i^{N_{event}} \sum_j^{N_{hit}} \left(\frac{T_{ij} - (T_{0i} + TOF_{ij} + \Delta T_j)}{\sigma} \right)^2$$

測定時間 計算した時間

ピクセルに固有の時間オフセット
:これが知りたい



● (CDCHを用いて)再構成した飛跡からTOFを計算。

● モンテカルロからTOFの値を計算する。

● 飛跡によって、各ピクセルが3種類のTOFの値を持つと仮定。

→ pattern A, B and C (3patternx128pixels=384種類のTOF)

あとは同じ

● χ^2 を全ヒット、全イベントに対する測定時間と計算した時間の差として定義する(上式)。

● χ^2 を最小化するようなピクセルに固有の時間オフセット: ΔT_j を求める。

(Millepede IIを用いた)

Millepede II www.desy.de/~kleinwrt/MP2
A software provided by DESY to solve the linear squares problems, such as detector alignment and calibration based on track fits.

ミシエル較正法 ①: モンテカルロ

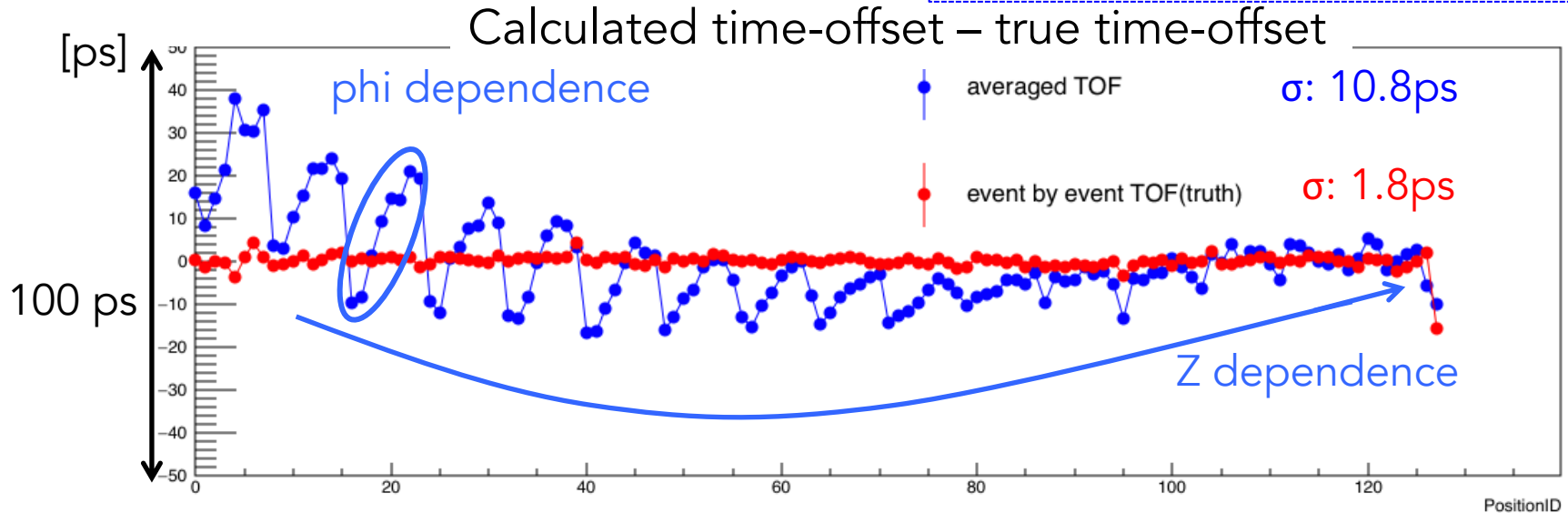
セットアップ

- 時間オフセットを $N(0 \text{ ns}, (5 \text{ ns})^2)$ で生成(正解).
- ミシエル較正法を用いて時間オフセットを計算.
- 計算結果の正解からのずれをプロット.
- TOFの値として2パターン考えた.

青: 384種類, 赤: イベント毎にMonte Carlo truth
(理想的な場合)

Monte Carlo

- Based on Geant4.
- Generate μ^+ beams, which stop at target.
- e^+ from normal muon decay hits the TC.
- Detector: 1/4TC and No CDCH.
→ the same as Pilot Run 2016

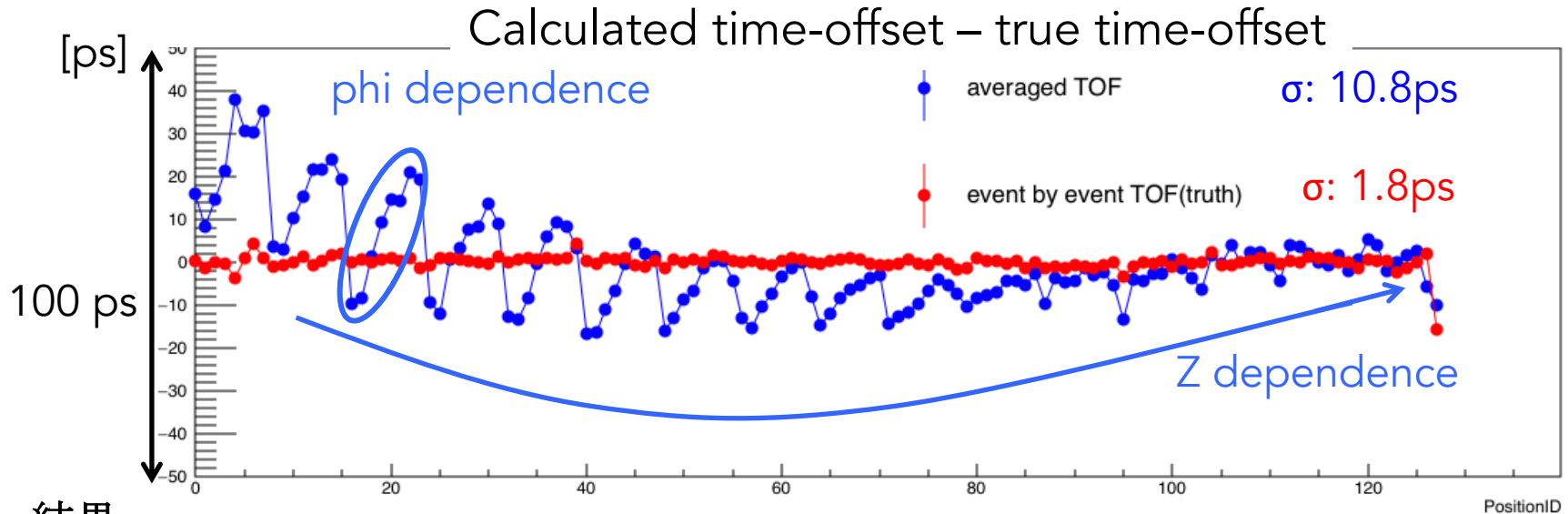
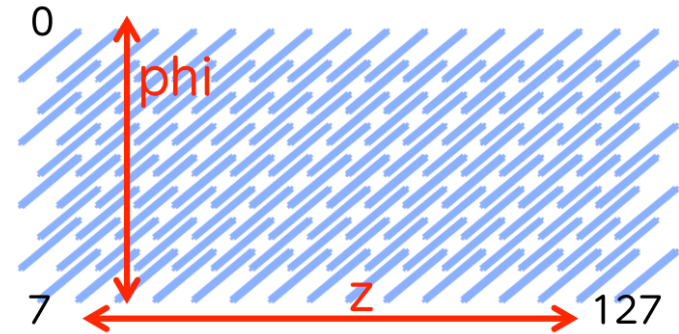


ミシエル較正法 ②: モンテカルロ

セットアップ

- 時間オフセットを $N(0 \text{ ns}, (5 \text{ ns})^2)$ で生成(正解).
- ミシエル較正法を用いて時間オフセットを計算.
- 計算結果の正解からのずれをプロット.
- TOFの値として2パターン考えた.

青: 384種類, 赤: イベント毎にMonte Carlo truth
(理想的な場合)

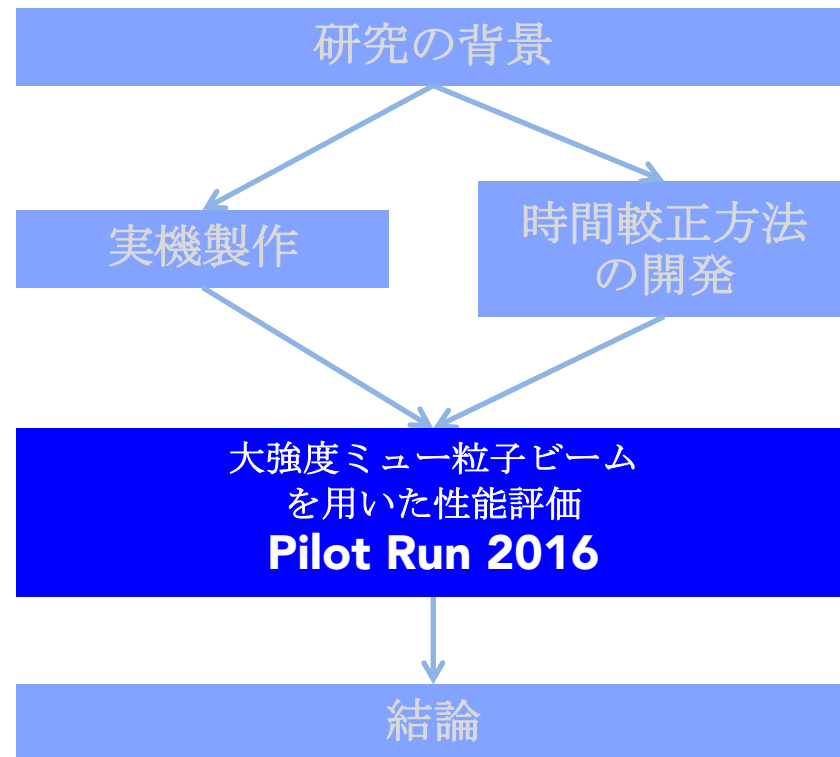


結果

- 全体のばらつき(標準偏差)は, 10.8 ps
- z/ ϕ バイアスが見られた. \rightarrow TOFの見積もりに依存(赤では消えた).
 \rightarrow CDCHのトラッキングを用いる最終的なミシエル較正法ではバイアスは小さくなると思われる(Physics Runへ向けての課題).

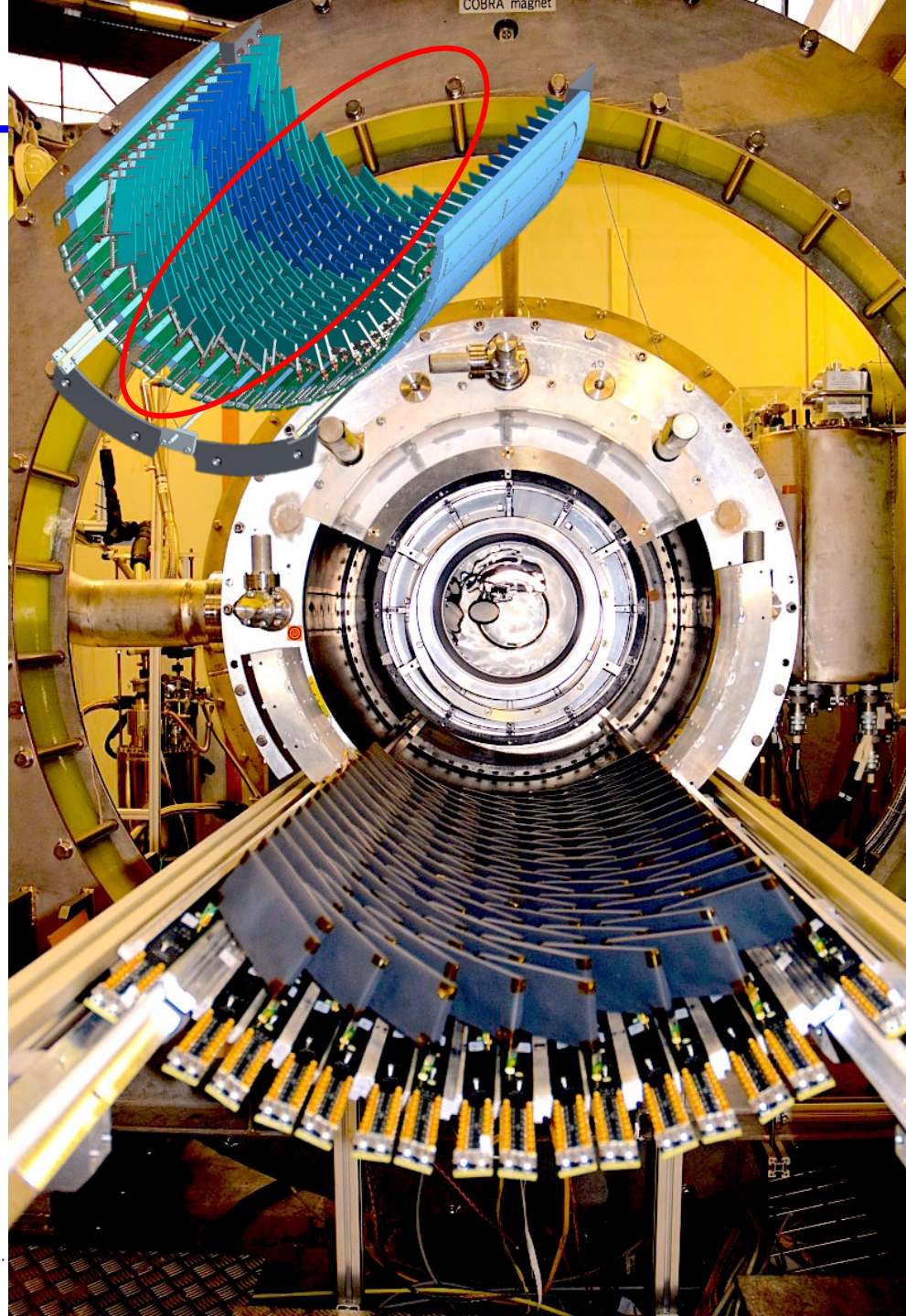
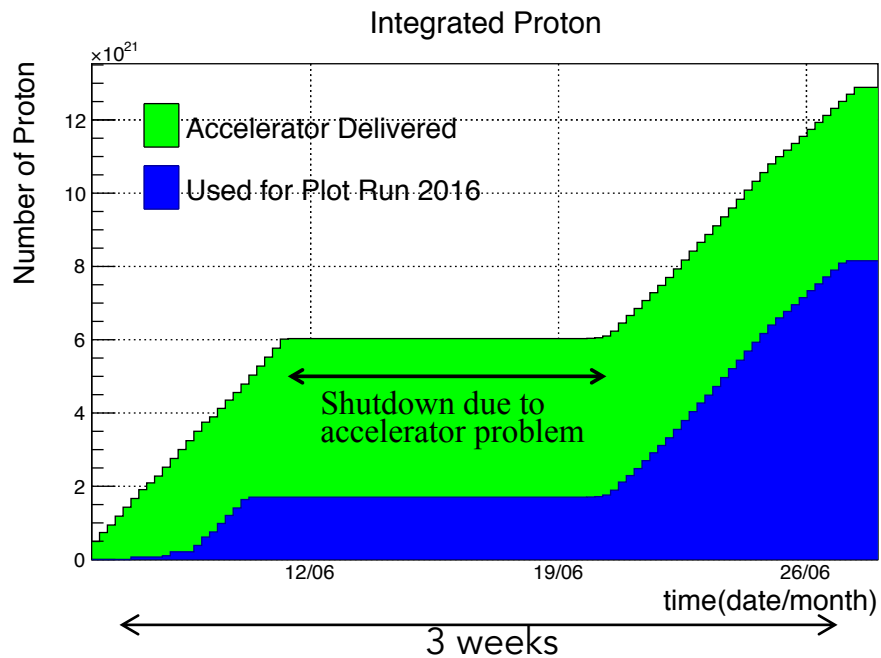
大強度ミュー粒子ビーム
を用いた性能評価

Pilot Run 2016



Pilot Run 2016

- ¼ TC にあたる128 ピクセルをインストールした.
- ビームタイム: 3週間
- MEG II 同強度の μ^+ ビーム (Stopping Rate: $7.0 \times 10^7 \text{ Hz}$).



DAQ & Trigger

MEG II実験用にトリガー & DAQの統合システムを開発中.

トリガー

- Pilot Run 2016ではいくつかのトリガーを試した.
 - Track-like
 - Multiplicity
 - OR
 - Laser
 - Pedestal

DAQ: WaveDREAM2

- PSIで開発された多機能のDAQボード. 以下の機能を併せ持つ.
 - SiPM biasing (~ 240 V)
 - Amplifier (no pre amplifier)
 - Pole-zero cancellation
 - Waveform digitization at giga-sampling (DRS*4 chip)
 - First level trigger

*DRS = Domino Ring Sampler

WaveDAQ crate (= 16 WaveDREAM2 boards = 256 channels)

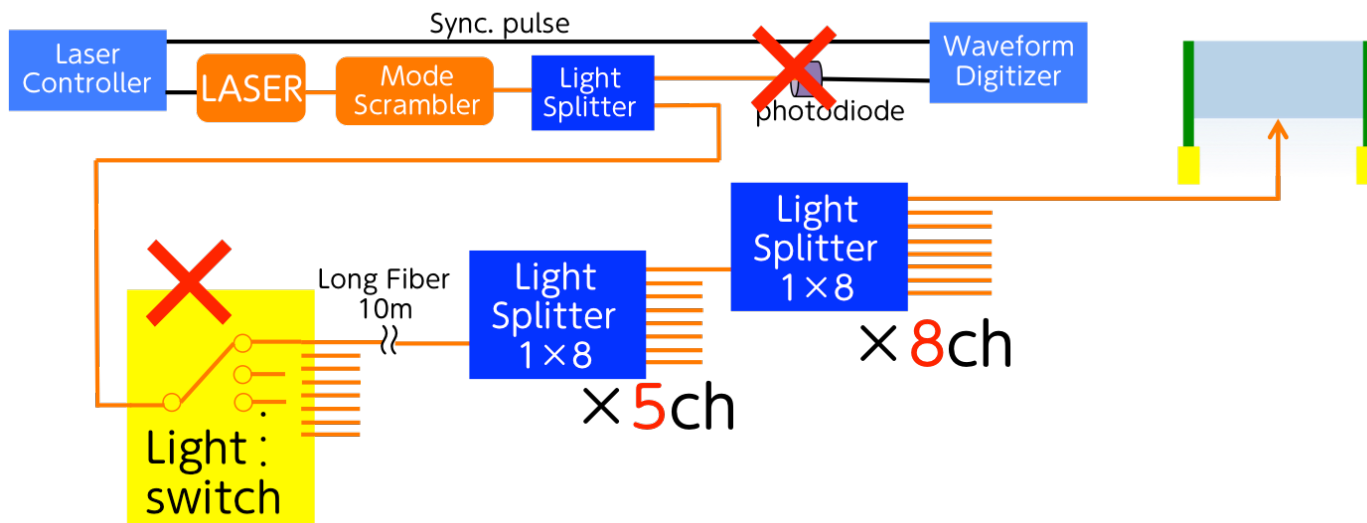
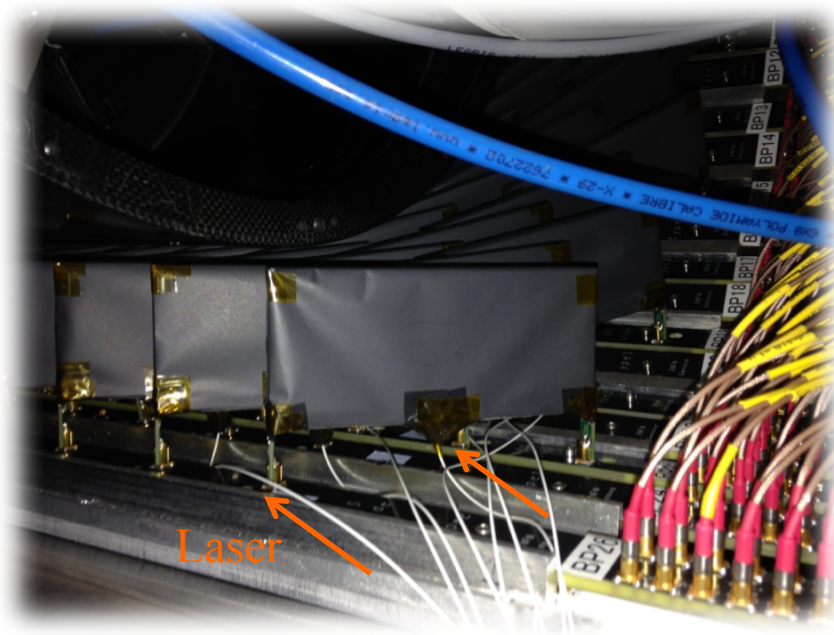
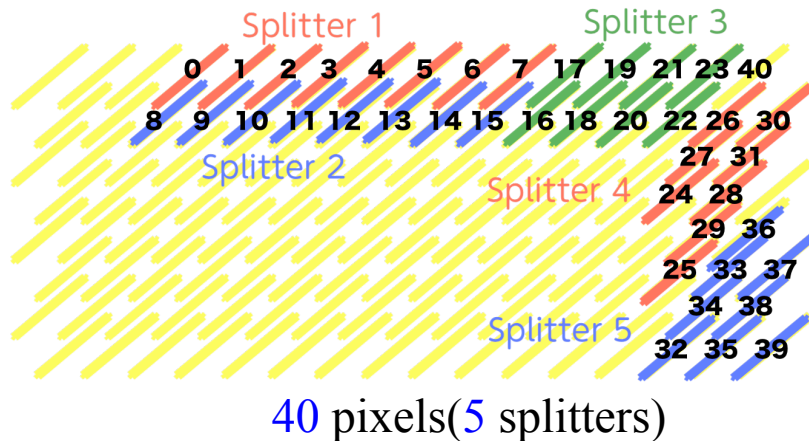


Trigger Concentrator Board

WaveDREAM2 board = 16 channels

レーザー較正システムのセットアップ

- レーザー較正システムを128ピクセル中、40ピクセルにインストールした。(実際にレーザーデータを取得したのは37ピクセル)



2つの時間較正方法を適用①

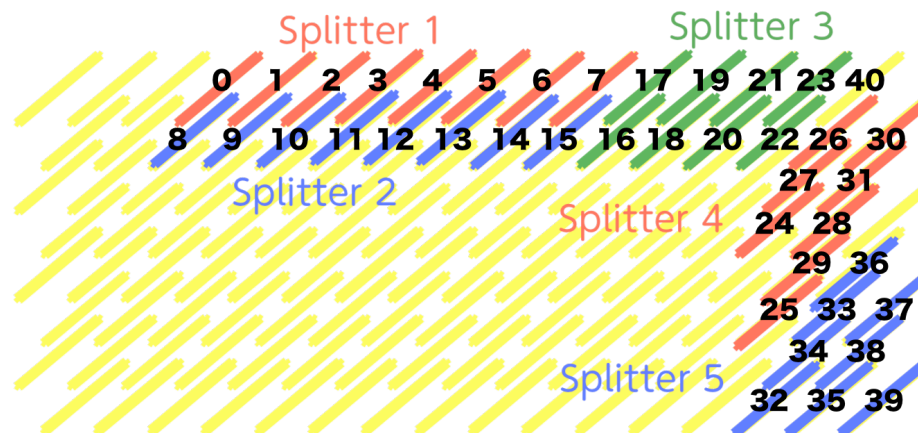
確認したいこと

(相対的な)時間オフセットの

- ① Pilot Run中における(時間的な)安定性. →較正方法そのものの安定性.
- ② 場所ごとのバラつき. →全体の時間分解能に影響する.

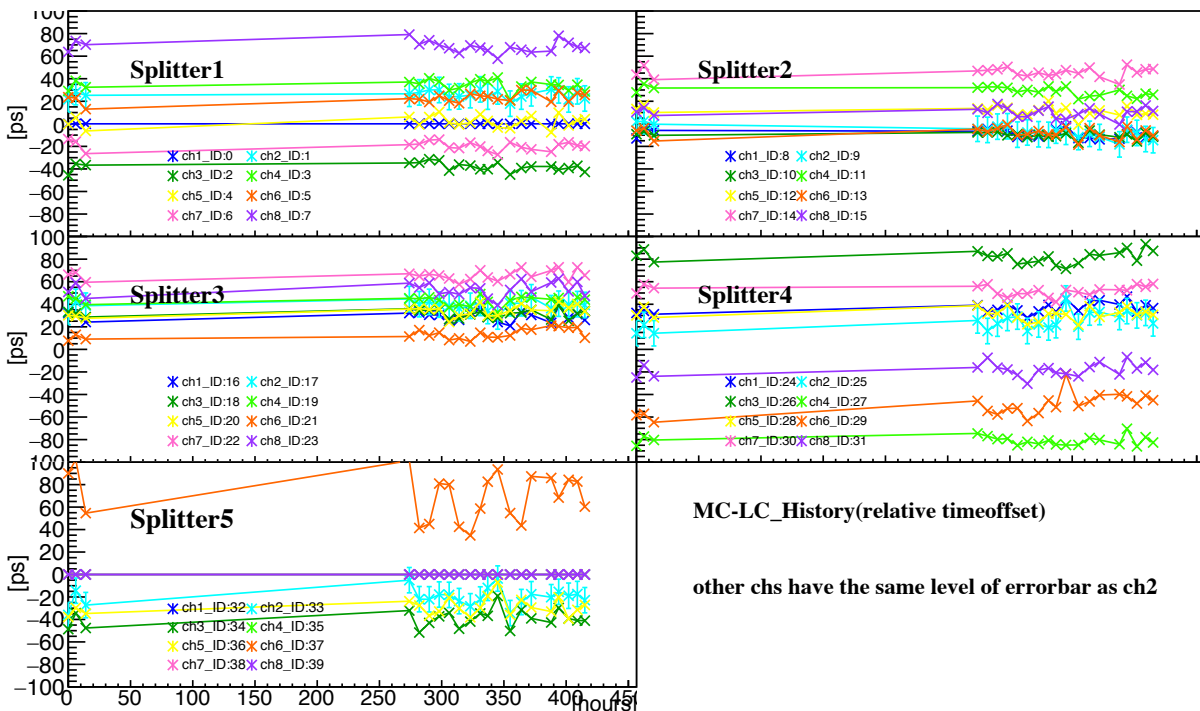


レーザー較正法とミシェル較正法の差を考える。
(時間の基準はID=0のピクセル)

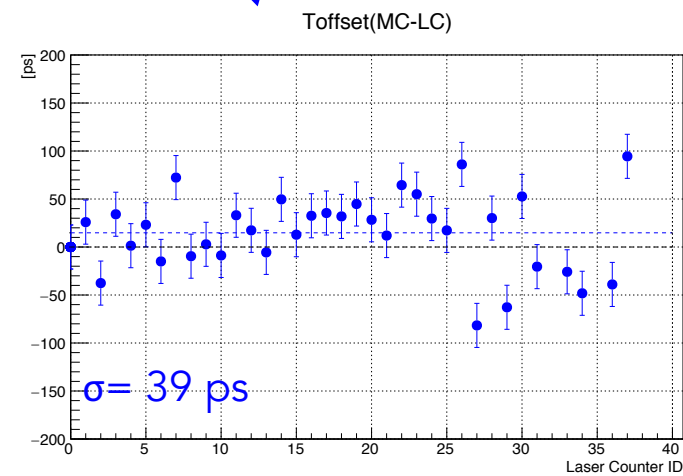


2つの時間較正方法を適用②

2つの較正方法による時間オフセットの差のヒストリー
(はじめのピクセルを基準にした相対値)



はじめの時間での値を
取り出した



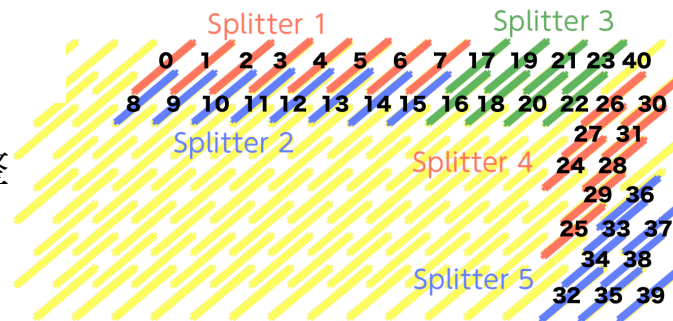
① 時間オフセットの相対値の時間変動は、6 psで安定して整合性が取れている。

② 2つの較正法の差のばらつきは、39 ps

→スプリッター4, 5が大きくばらついている。

- レーザー: 温度変化大?/スプリッター5のみファイバー固定が旧型.
→Physics Runへ向けて改善予定。

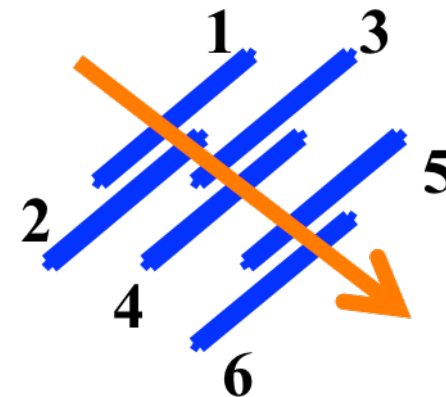
- 以降の解析では、ミシェル較正法の結果を39 psの精度だとして用いる。



時間分解能の評価 ①: Even-Odd 解析

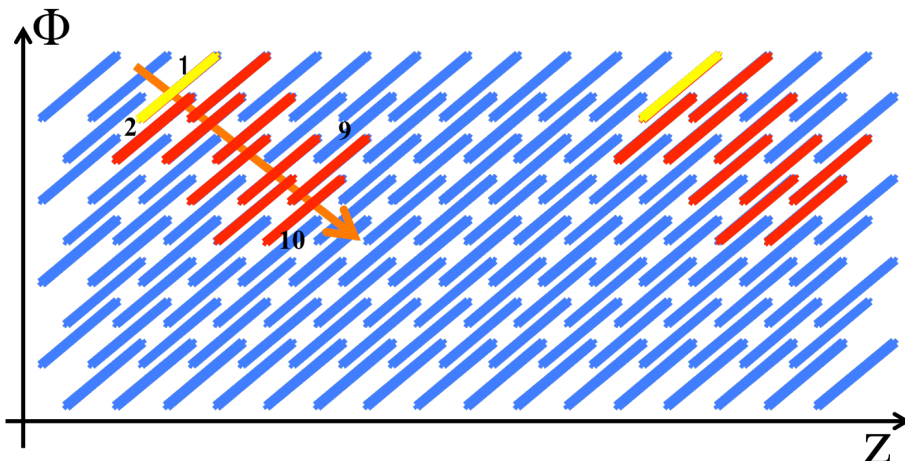
- 複数ピクセルでの時間分解能を, "Even-Odd" 解析で評価する.
- (奇数番目ピクセルの平均-偶数番目ピクセルの平均)/2を計算することで, 複数ヒットによる分解能を評価する.
- ヒット数=2, 4, 6, 8, 10について計算.

例: 6ヒット

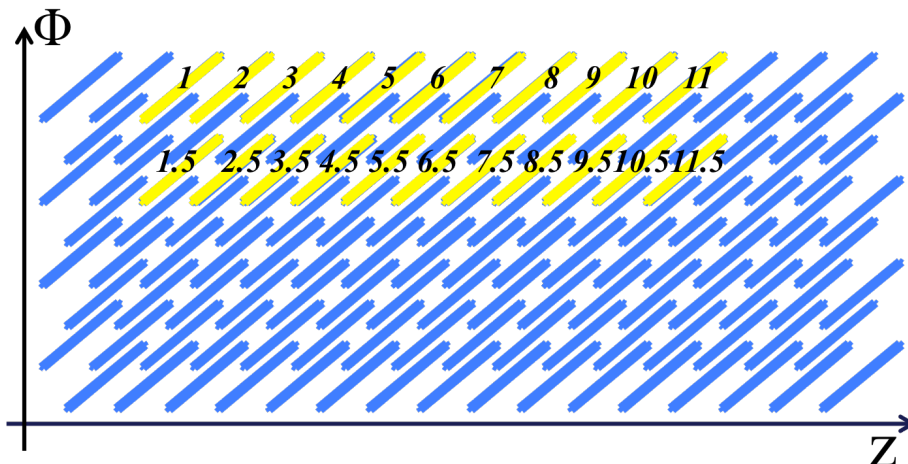


$$T_{6\text{hits}} = \left(\frac{T_1 + T_3 + T_5}{3} - \frac{T_2 + T_4 + T_6}{3} \right) / 2$$

10ピクセルの組をつくる

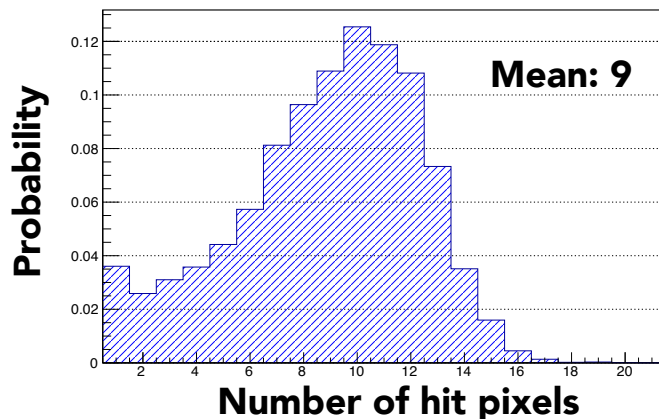
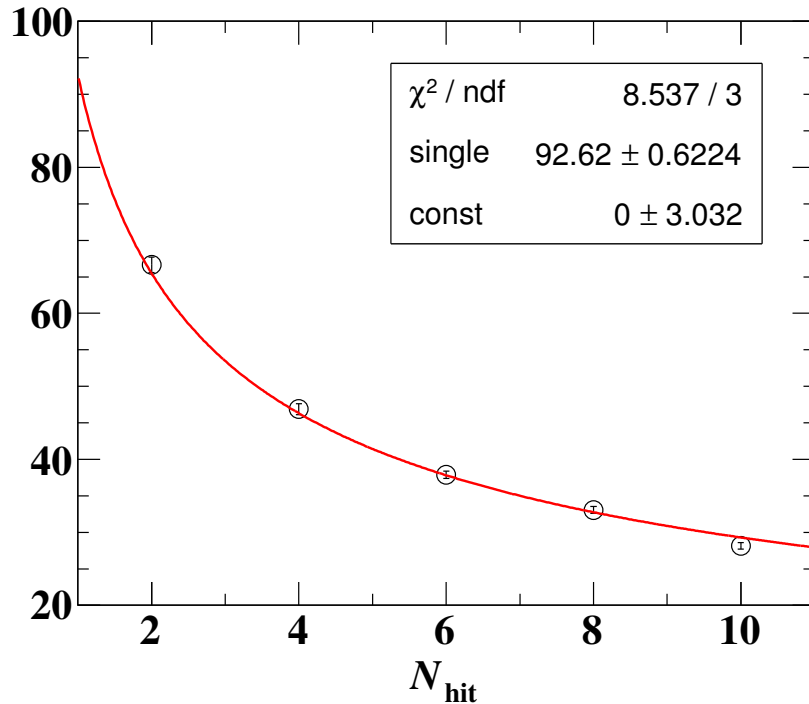


位置が異なる22組を選ぶ



時間分解能の評価 ②: 結果

Total time resolution vs. number of hits



- 各点は22組の組み合わせの重み付け平均を取った時間分解能.

- 赤線はベストフィットを表す:

$$\sigma_{\text{total}}(N_{\text{hit}}) = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{single}}^2}{N_{\text{hit}}} + \sigma_{\text{const}}^2}$$

- $\sigma_{\text{total}}(9) = 31 \text{ ps}$ を達成した.

- シグナルのヒット数で重み付けした時間分解能は, 38 psであった.

$$\sigma_{\text{all}} = \sqrt{\sum_{N_{\text{hit}}} p_{N_{\text{hit}}} \sigma_{\text{total}}^2(N_{\text{hit}})}$$

- これは**MEG I**の**TC**に比べて分解能を**2倍改善**したことに相当.

→ **MEG II TC**の建設に成功.

結論



- 今後の予定
 - ▶ 2017年春から秋にかけて全てのMEG II実験検出器をインストール.
 - ▶ Engineering Run → Physics Run開始.
- 陽電子タイミングカウンター
 - ▶ SiPMの放射線損傷
 - 照射試験で電流増加に対する時間分解能の影響を評価する予定.
 - ▶ SiPMのシンチレータからの剥離
 - メカニカルな補強, 光学セメントの追加等の対応策を検討中.
- 時間較正法
 - ▶ レーザー較正法: インストールの過程で時間オフセットをモニターする, ケーブルの一部を交換して温度依存性を減らす.
 - ▶ ミシェル較正法: CDCHの導入へ向けてアップデート.
- ソフトウェア
 - ▶ ドリフトチェンバーの解析と合わせることで, 陽電子スペクトロメータとしての陽電子再構成アルゴリズムを完成させる.

● 今後の予定

- ▶ 2017年春から秋にかけて全てのMEG II実験検出器をインストール.
- ▶ Engineering Run → Physics Run開始.

→あとで

● 陽電子タイミングカウンター

- ▶ SiPMの放射線損傷
→照射試験で電流増加に対する時間分解能の影響を評価する予定.
- ▶ SiPMのシンチレータからの剥離
→メカニカルな補強, 光学セメントの追加等の対応策を検討中.

→時間分解能の悪化は最大25%程度. 低温度でoperationすることで5%程度に抑えられる (宇佐見, 13aU33-2).

→2017年7月までに全ピクセルの補強を完了.

● 時間較正法

- ▶ レーザー較正法: インストールの過程で時間オフセットをモニターする, ケーブルの一部を交換して温度依存性を減らす.
- ▶ ミシェル較正法: CDCHの導入へ向けてアップデート.

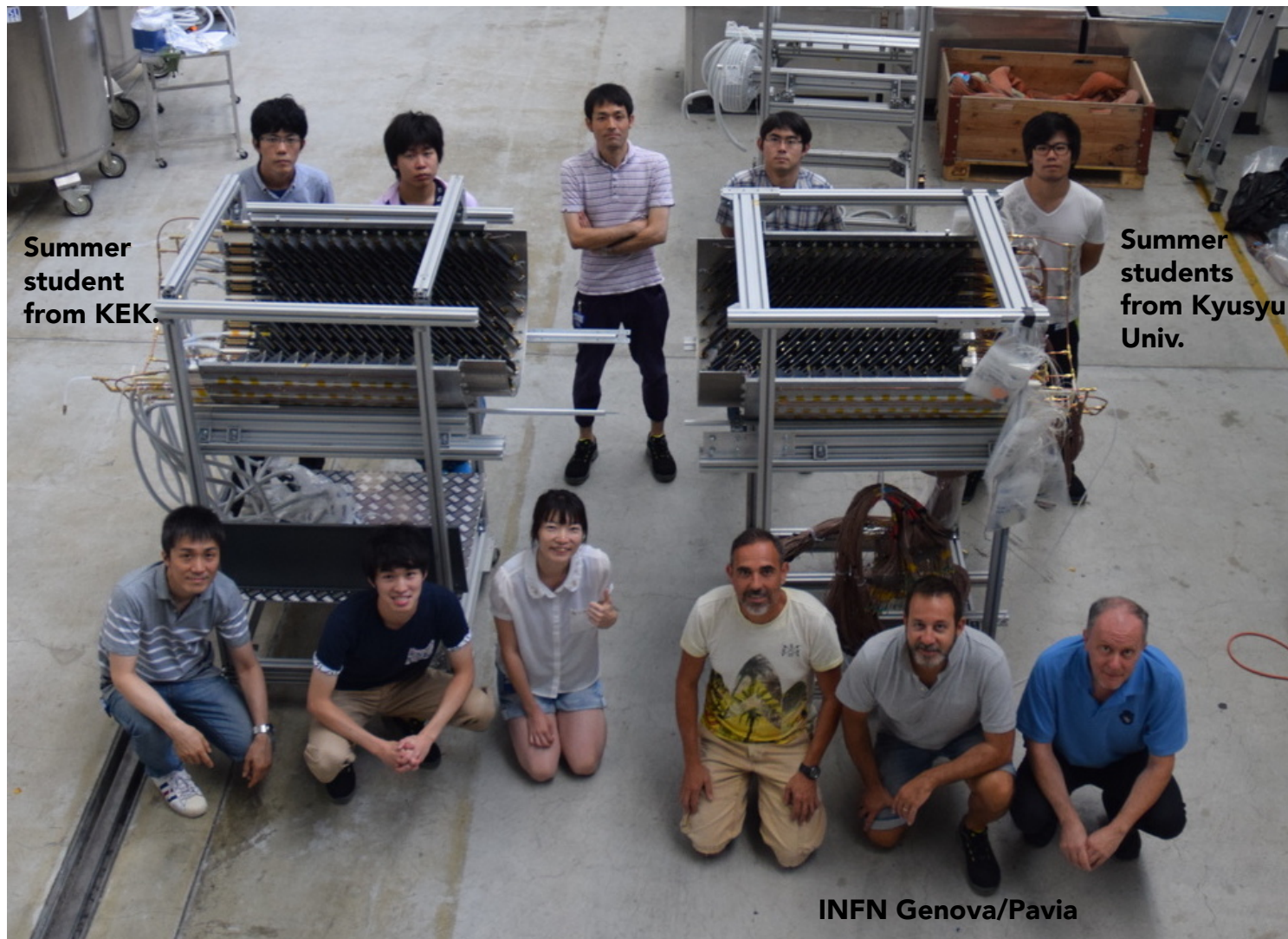
↓フルシステムの建設完了. 2017年10月より長期モニター開始予定. ケーブルはLemoからAndrew社のHeliax FSJ1に交換予定.

↑ドリフトチェンバー入りで最初の結果を出した. 2018年まで改善の余地あり (中尾, 13aU33-1).

● ソフトウェア

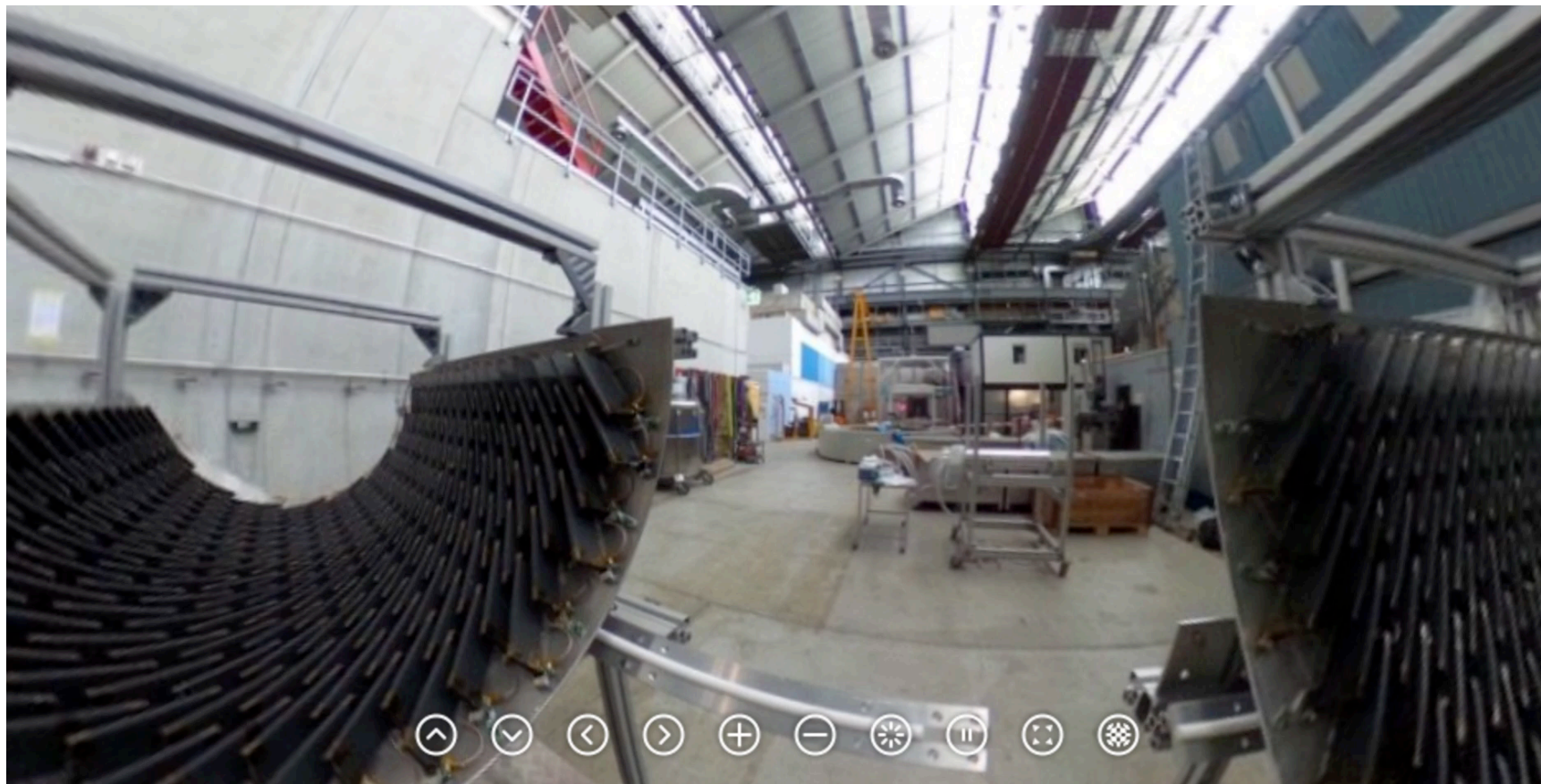
- ▶ ドリフトチェンバーの解析と合わせることで, 陽電子スペクトロメータとしての陽電子再構成アルゴリズムを完成させる.

陽電子タイミングカウンターの現在 (1)



上流側・下流側ともに完成し, インストール準備完了(2017年8月).

陽電子タイミングカウンターの現在 (2)



ターゲットの位置から見たMEG II TC (RICOH THETA Sで撮影).

Key months

Nov.

2017

● **Pilot Run 2017**

- 陽電子タイミングカウンター, 液体キセノンガンマ線検出器, 輻射崩壊検出器をインストールする.
- MEG II実験と同じ環境で, μ ビームを用いて7週間程度のDAQを行う.
- レーザー較正法とミシェル較正法をフルのTCに適用する.
- フルのTCでの性能評価も行う.

● **全ての検出器のインストール**

- Pilot Run 2017後の検出器のメンテナンスを行う.
- ドリフトチェンバーも含めてインストールする予定.

Jul.

2018

● **Engineering Run**

- 6ヶ月のデータ取得を行う.
- 検出器間の較正も行う.
- 問題がなければPhysics Runへ移行する.

● **Physics Run**

- 世界最高感度で $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ の探索を開始する.

まとめ

● 研究の背景

- CLFVは新物理の証拠, いつ発見されてもおかしくない.
- MEG II実験 (2018年～)によって発見を目指す.

● 実機製作

- 512個のピクセルの実機製作を完了.
- 時間分解能: 70-80 ps

● 時間較正方法の開発

- 2つの相補的な較正手法を開発した.

● 大強度ミュオン粒子ビームを用いた性能評価: Pilot Run 2016

- 2つの較正法の相補性を確認した.
- 相対的な時間オフセットの安定性を確認した.
- MEG I TCを2倍改善する時間分解能を達成した.

● 結論

- 陽電子タイミングカウンター実機で目標時間分解能を達成.
- いよいよ世界最高感度で $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊探索を開始する.

