

MEG II実験のための陽電子タイミング カウンターの研究開発

ICEPP 森研究室M1 吉田 昂平、MEG II コラボレーション

2015/02/08-11
21st ICEPP Symposium

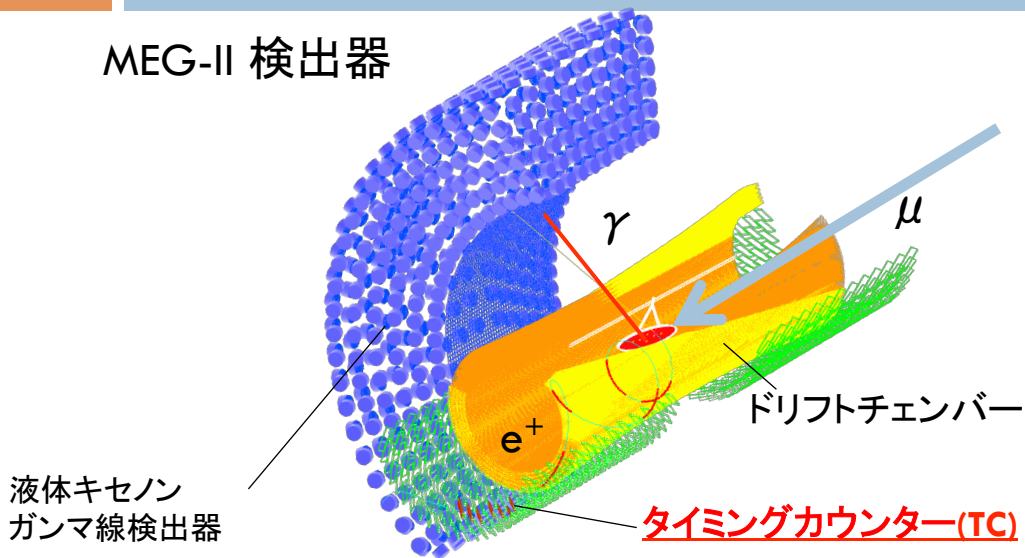
目次

- タイミングカウンターのイントロダクション
- レーザーによる時間較正法の開発
 - タイミングカウンターの時間較正
 - レーザーによる時間較正
 - セットアップ
 - 結果
- まとめと今後

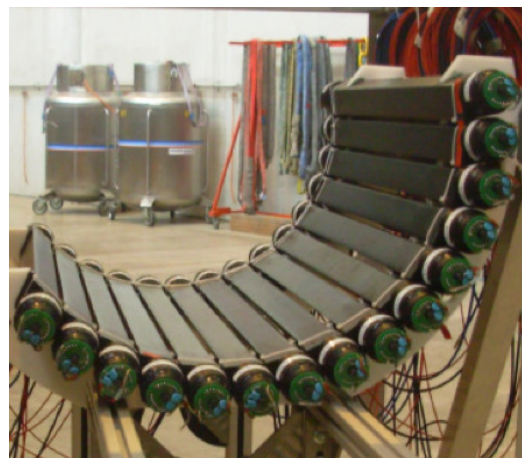
タイミングカウンターアップグレード

3

MEG-II 検出器



MEG-Iでのタイミングカウンター

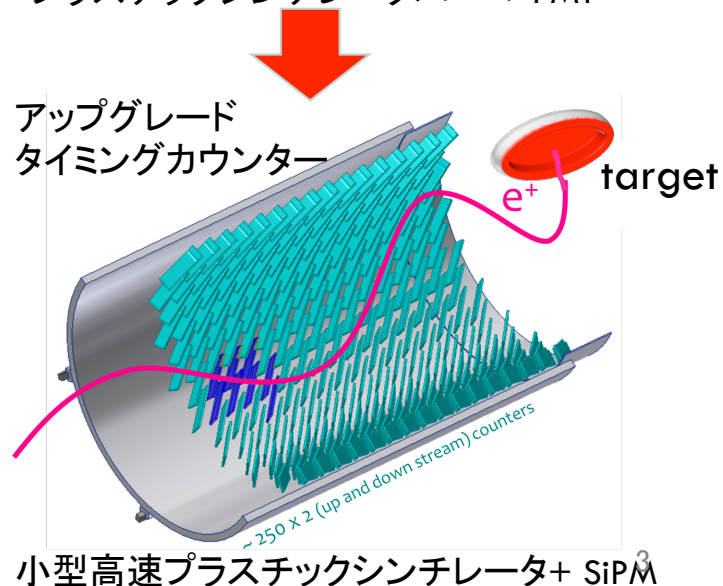


プラスチックシンチレータバー + PMT

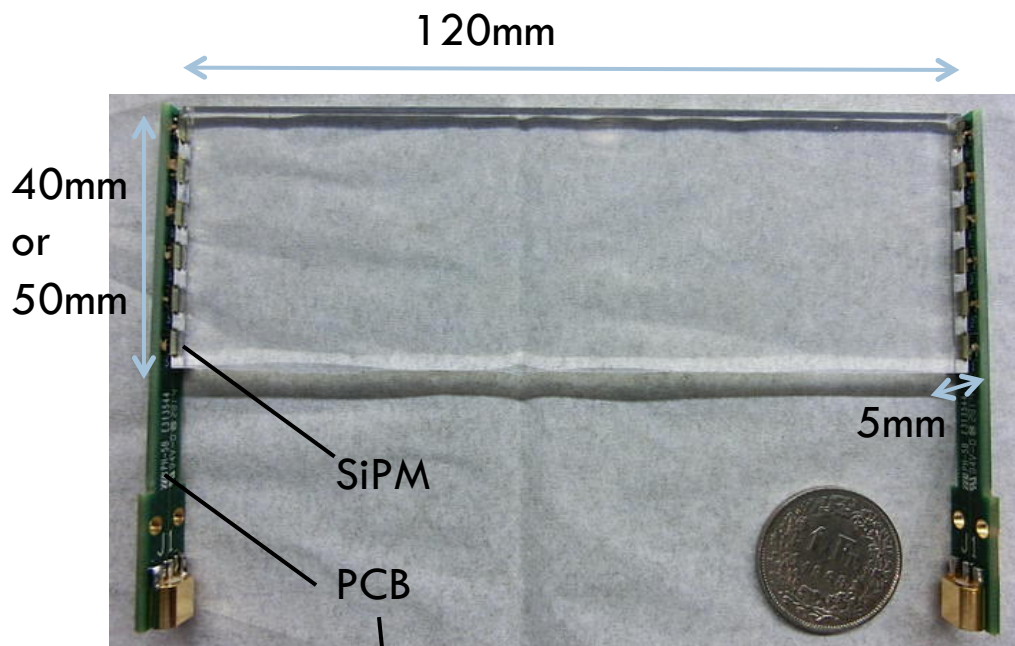
細分型タイミングカウンター

- $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 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256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

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



シングルカウンター



- 高速プラスチックシンチレータ BC422(orEJ232)
 - Rise time : 0.35ns
 - Light output : 55% of Anthracene
 - Peak wavelength : 370 nm
 - Light attenuation : 8cm
- $120 \times 40 \times 5 \text{mm}^3$, $120 \times 50 \times 5 \text{mm}^3$
- 鏡面反射型リフレクター(3M ESR 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

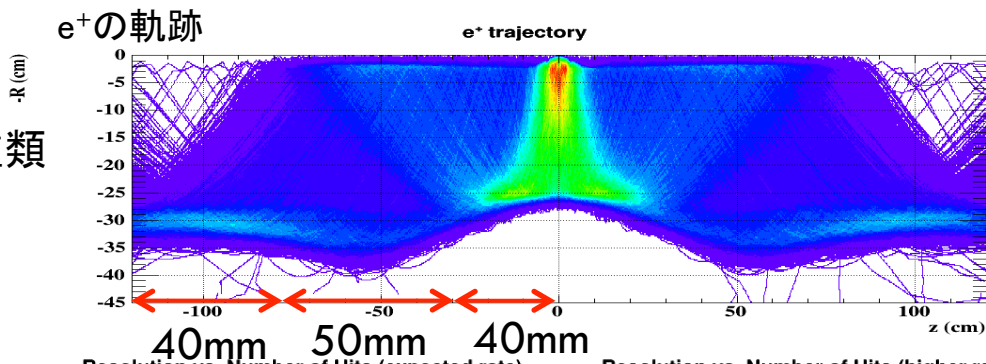
時間分解能 ~70ps

これまでのTC

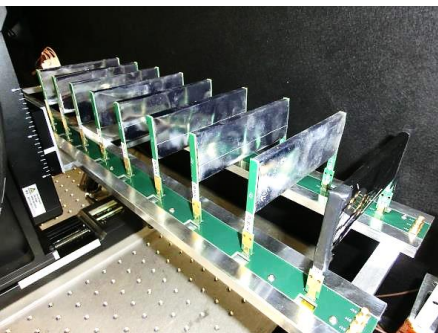
5

- シングルカウンターの最適化
 - プラスチックシンチレータの選定(BC422)
 - SiPMの選定(AdvanSiD)
 - 読み出しに6個直列のSiPM
- ジオメトリの決定
 - 512個のカウンター
 - 120×40×5mm、120×50×5mmの2種類

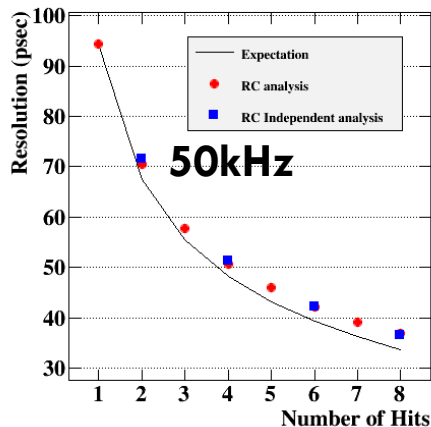
- 複数ヒットで良い時間分解能の実証
 - プロトタイプのビームテストでMEG-IIの平均ヒット数9において最高~30ps
 - MEG-IIで予期されるヒットレート下(50-150kHz)の試験でも良い分解能



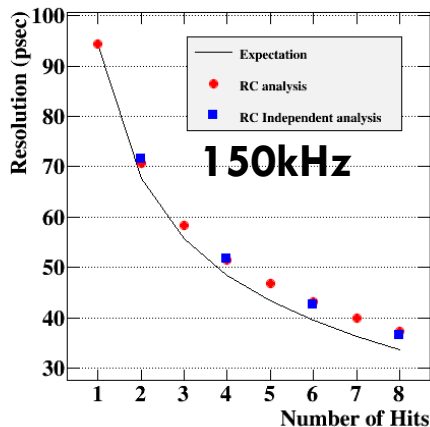
TCプロトタイプ



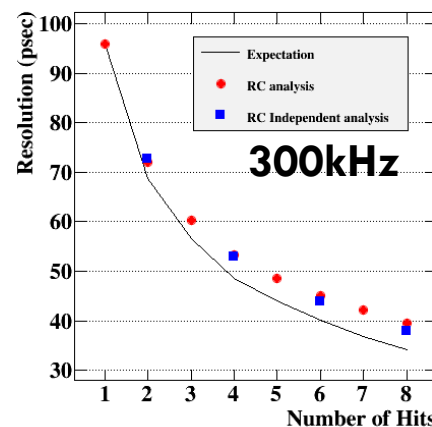
Resolution vs. Number of Hits (lower rate)



Resolution vs. Number of Hits (expected rate)



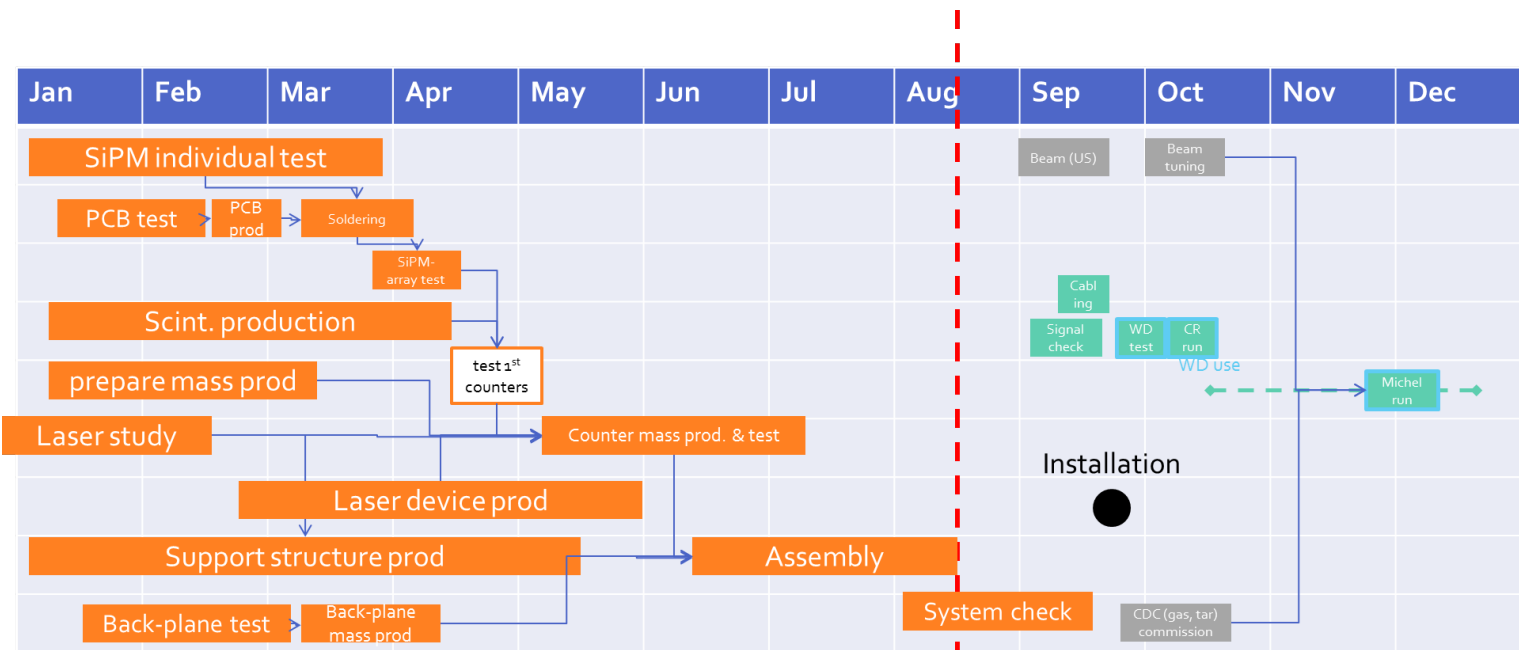
Resolution vs. Number of Hits (higher rate)



これからのTC

6

- 実機建設
 - 6144個のSiPMの大量試験
 - 512個のカウンターの製作、大量試験
- 時間較正方法の確立
 - レーザーによる時間較正法の開発



レーザーによる時間較正法の開発

- ・ タイミングカウンターの時間較正
- ・ レーザーによる時間較正法
- ・ セットアップ
- ・ 実験結果

タイミングカウンターの時間較正

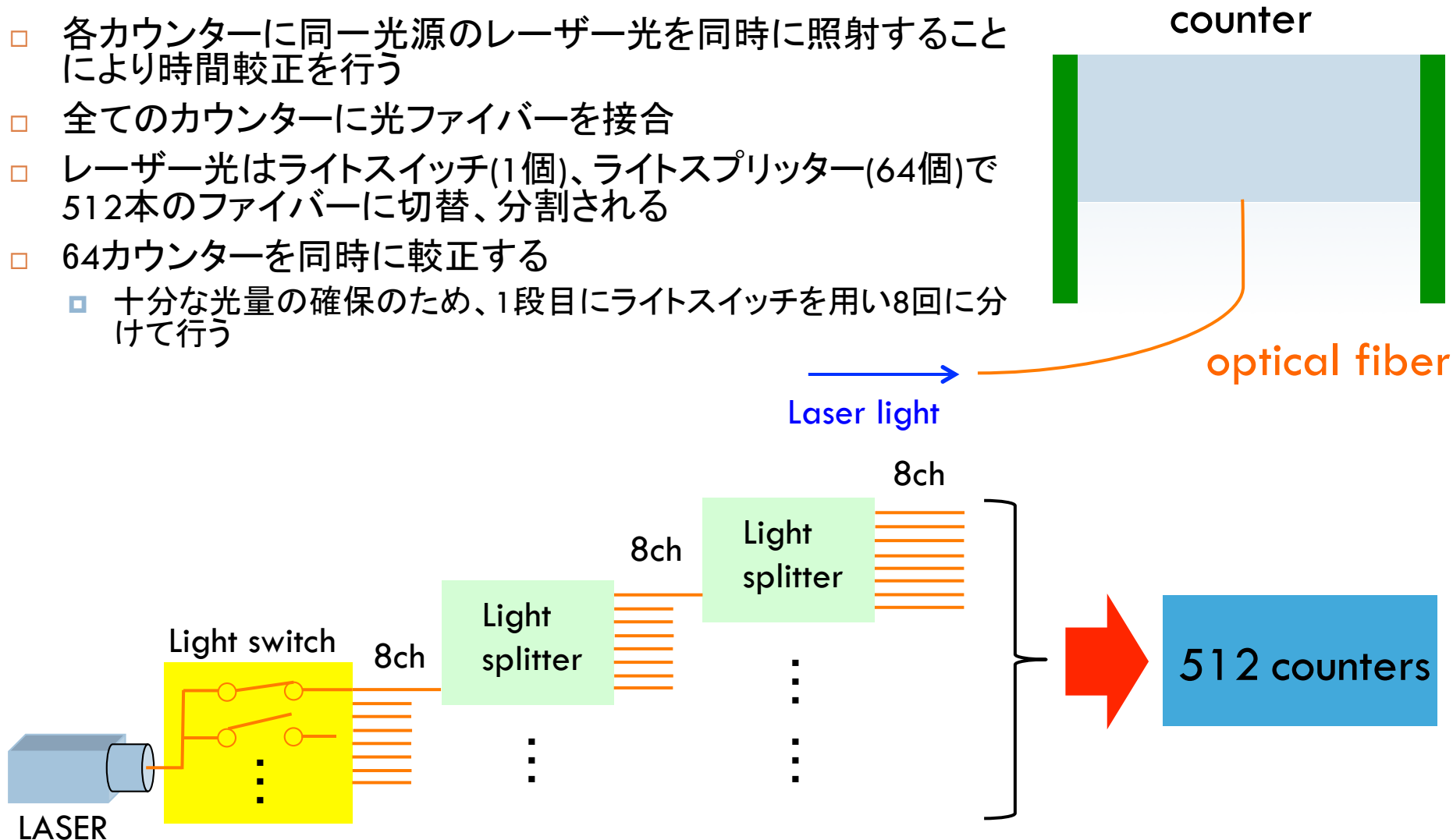
8

- 細分型タイミングカウンターの512個のカウンターはそれぞれ異なる時間オフセットを持つ
 - エレキの長さの違いなどから
- 陽電子の時間を正しく再構成するにはカウンター間の相対的オフセットの較正が必要
- 2つの独立な方法で較正
 - ミューオン通常崩壊 $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu \bar{\nu}$ からの e^+
 - 実際に磁場をかけたsignal-likeな e^+
 - 実験中に較正できる
 - ヒットレートの場所依存性がある
 - 上流、下流のカウンターを同時に較正できない
 - レーザー
 - 全カウンターを一様に較正できる
 - ビームが止まっている時に較正できる
 - ハードウェアの準備が必要

レーザーによる時間較正法

9

- 各カウンターに同一光源のレーザー光を同時に照射することにより時間較正を行う
- 全てのカウンターに光ファイバーを接合
- レーザー光はライトスイッチ(1個)、ライトスプリッター(64個)で512本のファイバーに切替、分割される
- 64カウンターを同時に較正する
 - ▣ 十分な光量の確保のため、1段目にライトスイッチを用い8回に分けて行う



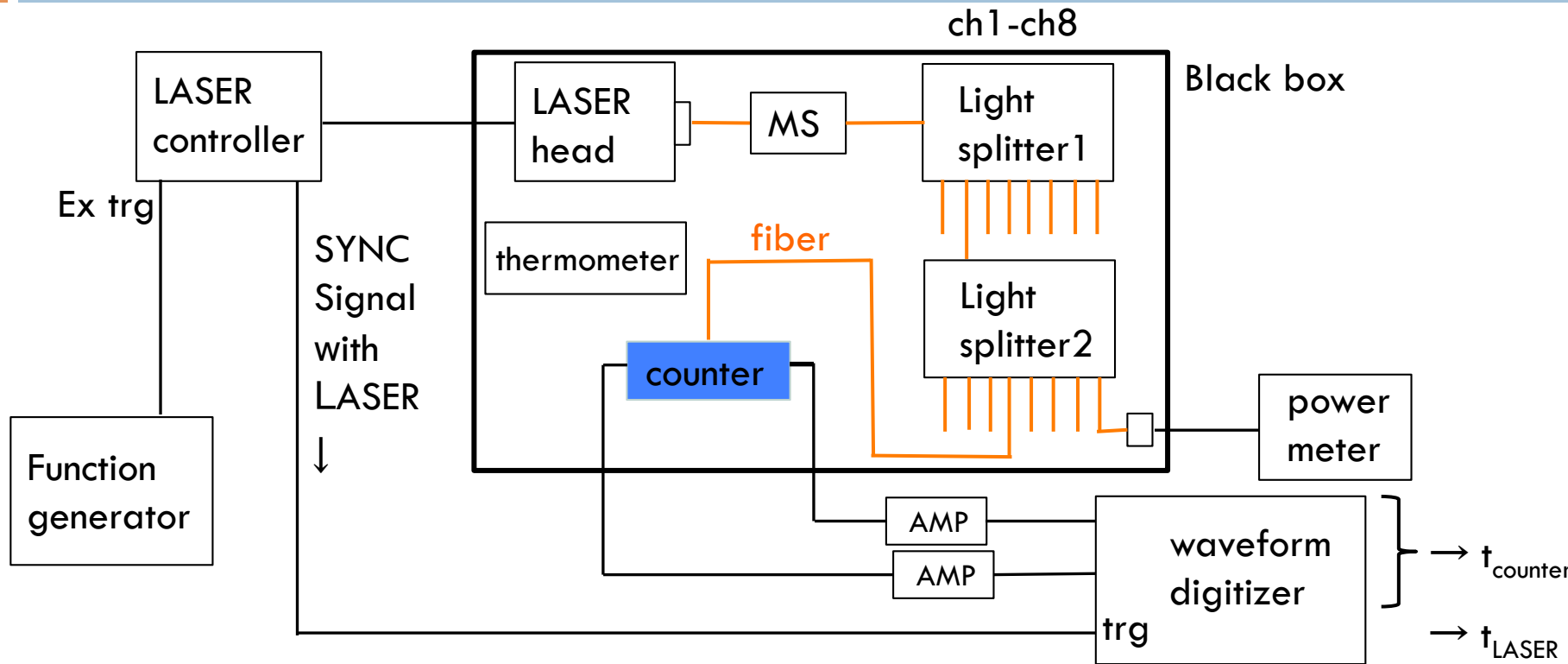
レーザーによる時間較正のテスト

10

- 最初のテストとして、1つのカウンターに対してレーザーを照射しその応答を測定した
- 測定項目
 - 十分な光量が得られるか
 - スプリッターの各出力チャンネルの一様性
 - レーザーの安定性
 - 各スプリッターチャンネルの時間較正の再現性
 - コンスタントなチャンネル間オフセットは補正可能

Setup

11



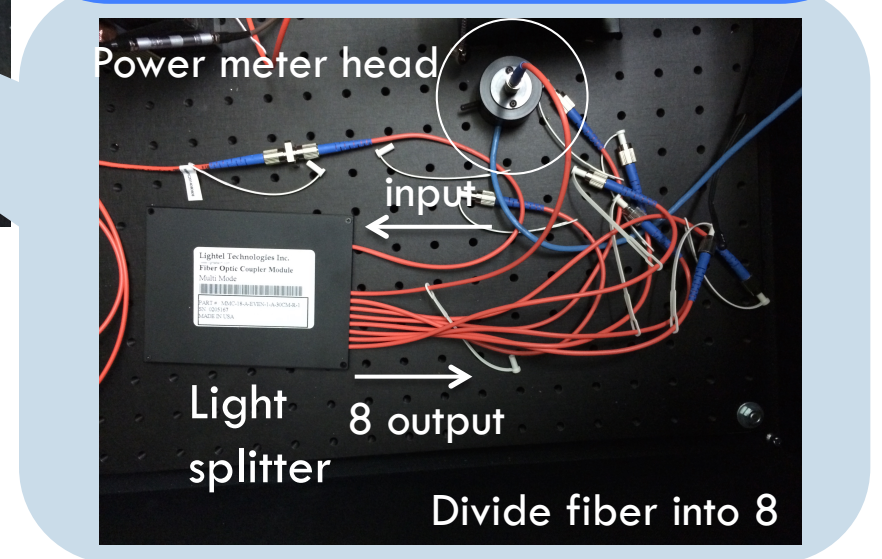
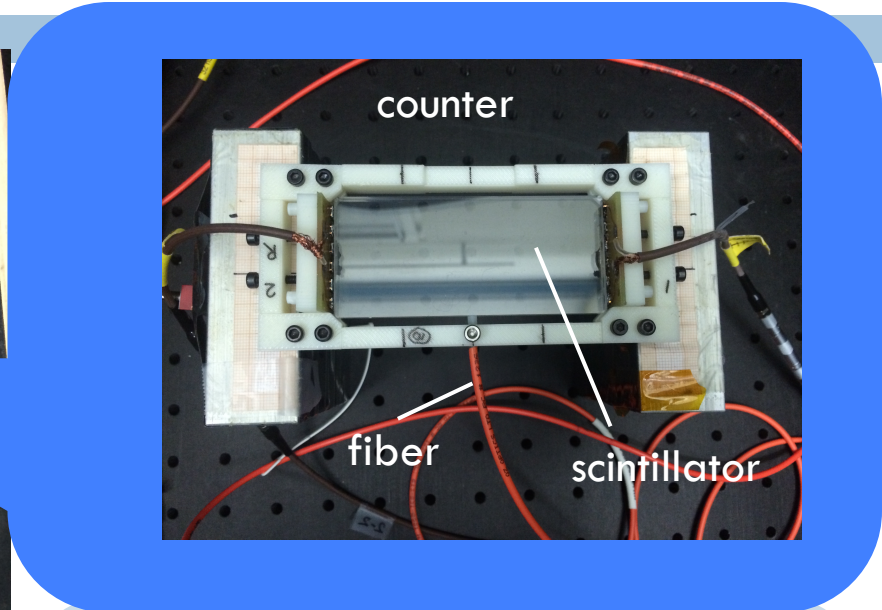
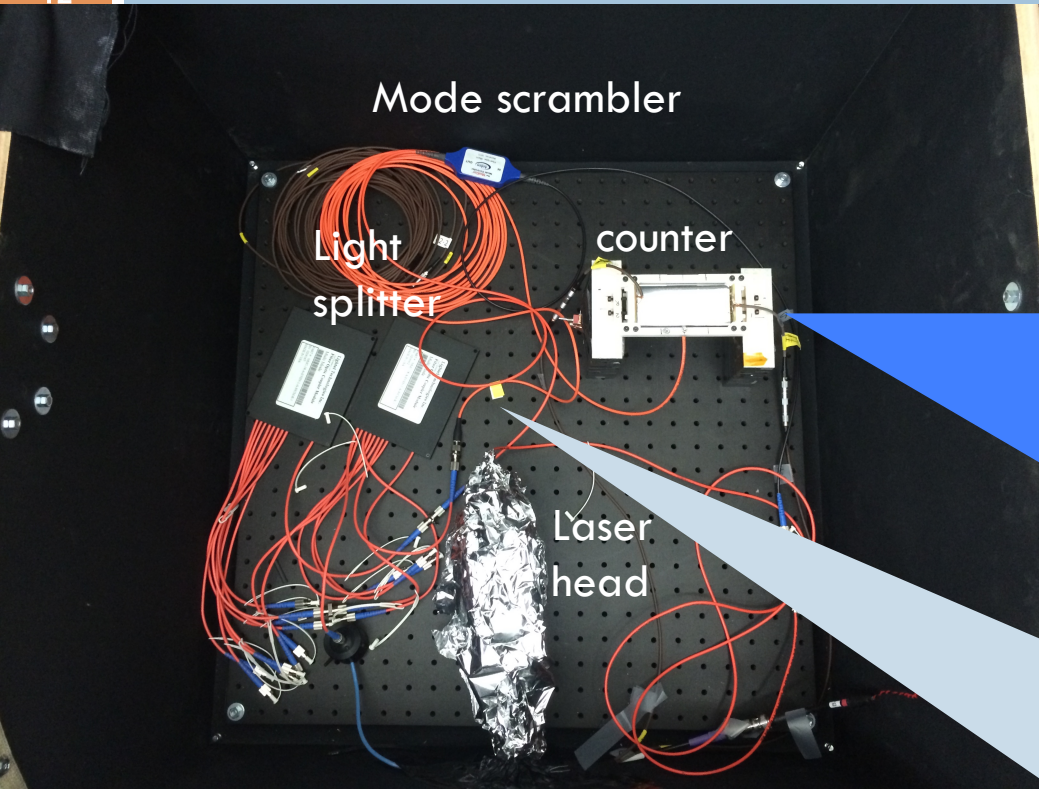
レーザー

- 浜松のピコ秒ライトパルサPLP-10
 - 波長 : 401nm (シンチ光は370nm)
 - 半値幅60psの超短パルス
 - レーザーパルスの周波数 : 10-100M Hz

- カウンター : プラシン(BC422,90×40×5mm)と2chの6個直列SiPM(Advansid)
- レーザーとの同期信号をトリガー
- Mode scrambler
 - ファイバー内の光の通り方のモードを統一させる

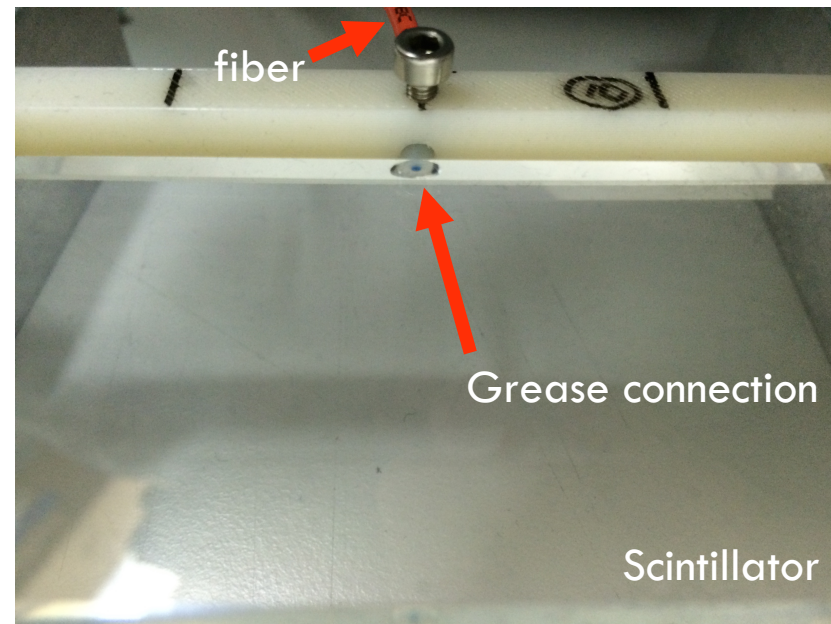
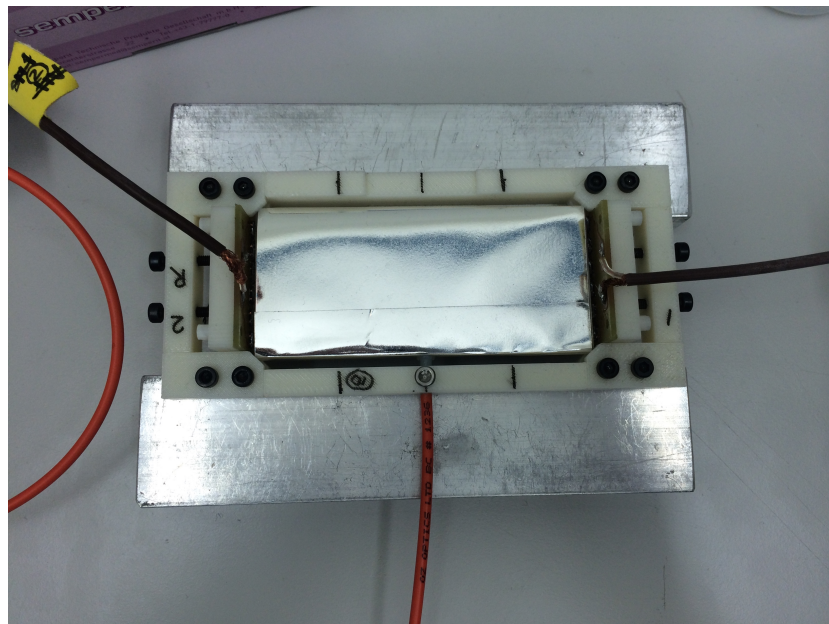
Setup

12



光ファイバーの接合

13



- リフレクターにファイバー用の穴を開け、ファイバーとプラスチックシンチレータをgreaseでoptical connect
- ファイバーはネジで固定
- 最終的な接合、固定法の候補
 - optical grease、optical cement
 - support structure
 - シンチに穴を開ける
 - プリズム

Support structure

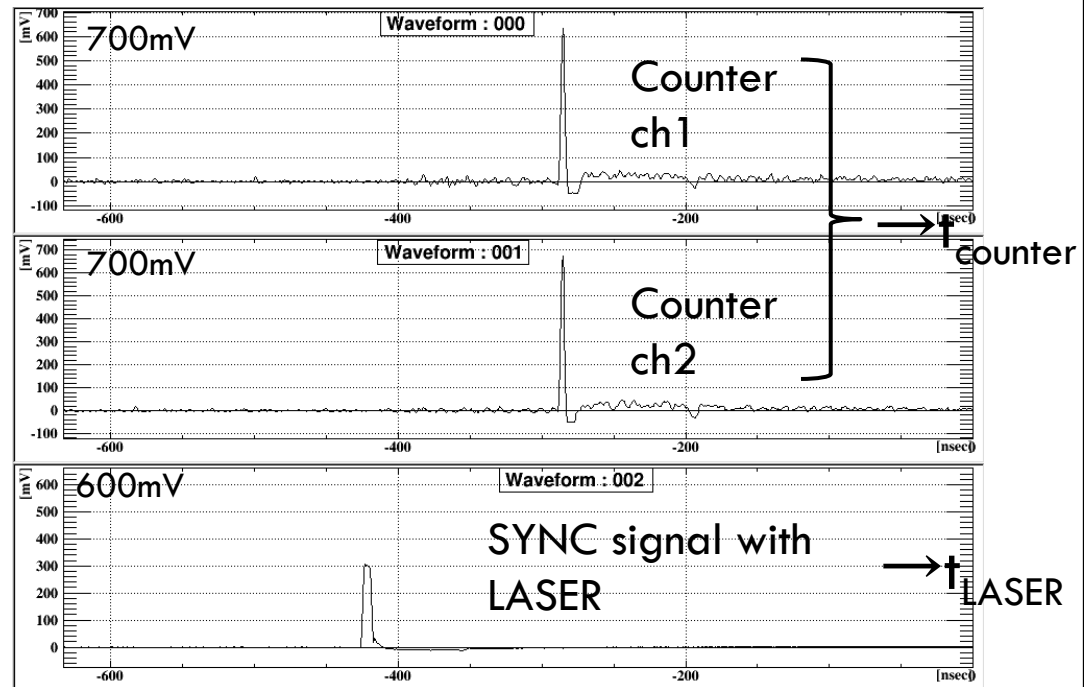


レーザーの出力

Splitter ch	Laser power(nW)
ch1	35.21
ch2	31.62
ch3	28.35
ch4	29.15
ch5	31.69
ch6	32.30
ch7	30.70
ch8	30.57

- スプリッターの各出力チャンネルの一様性が確かめられた

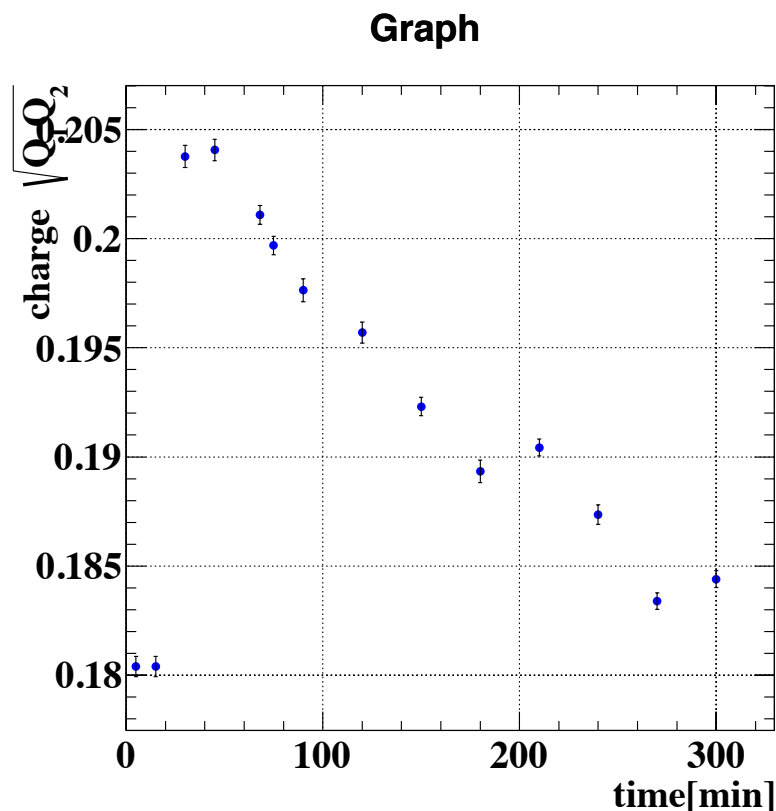
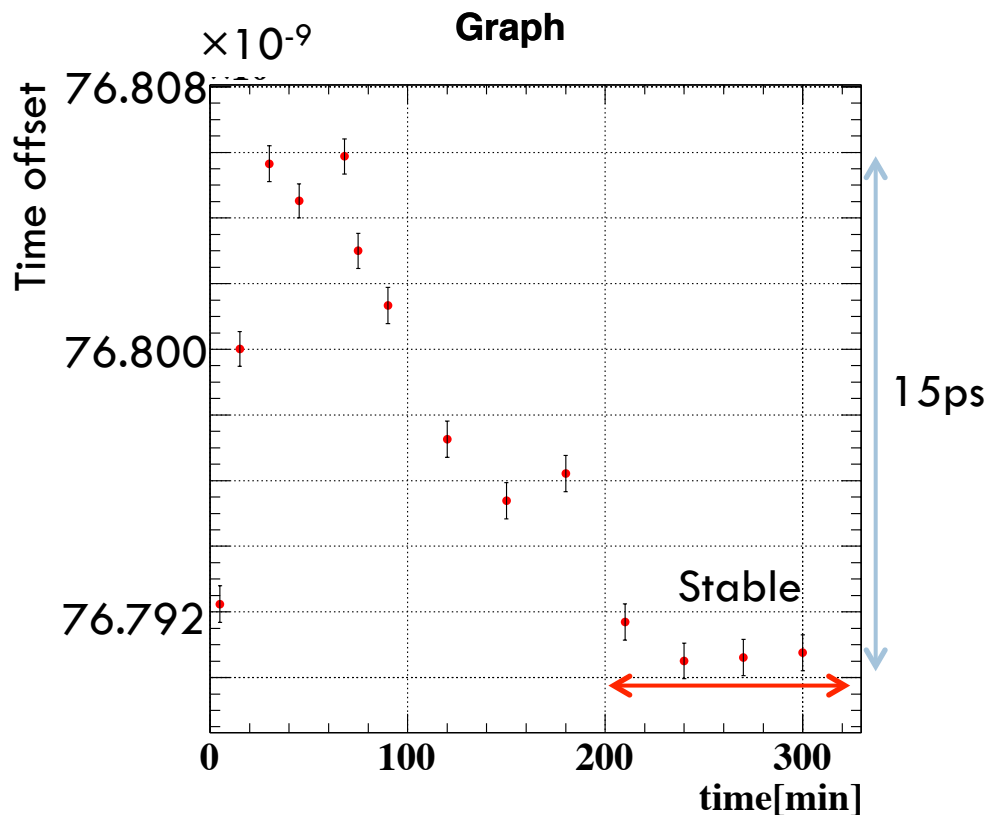
波形



- レーザーの最大出力の1/10で十分な光量が得られた
- Signal e^+ (52.8MeV)によるシンチレーション光の光子数 $\sim 10^5$ 個
レーザー光の光子数 10^4 - 10^5 個
- レーザーとのシンクロ信号の時間 t_{LASER} をレファレンス時間とし、カウンター時間 $t_{counter}$ との差をカウンターの時間オフセットとする

レーザーの安定性

15

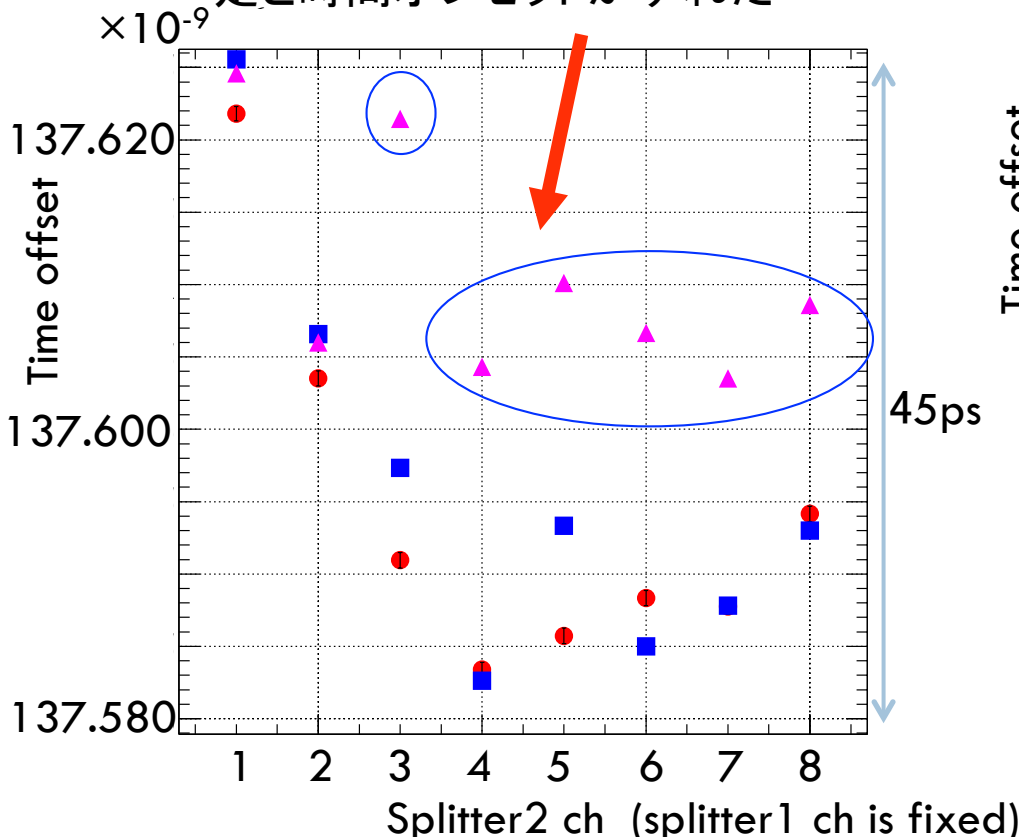


- レーザーの時間に対する安定性を測定
- レーザーのスイッチオン後、200minで安定するため、校正前に待つ必要がある

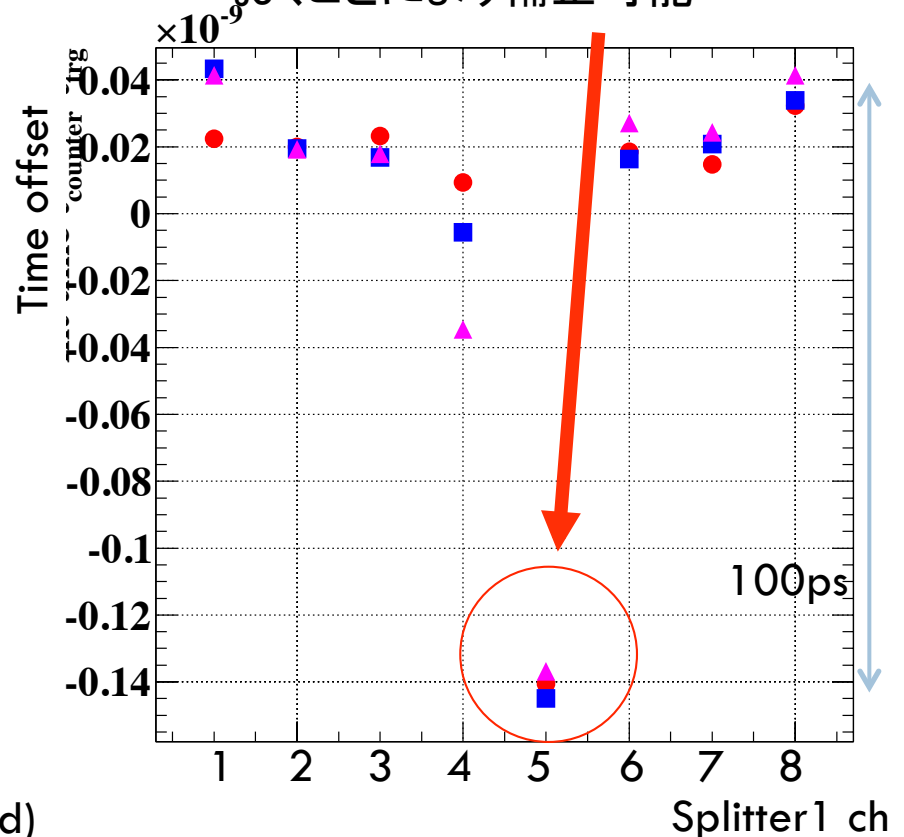
時間オフセットの再現性

- スプリッターの各出力チャンネルについて、それぞれの時間オフセットを3回測定

3回目の測定中、一時的にシグナルが小さくなった後、前2回の測定と時間オフセットがずれた



時間オフセットが大きく異なるチャンネルがあるが、事前に測定しておくことにより補正可能



まとめと今後

17

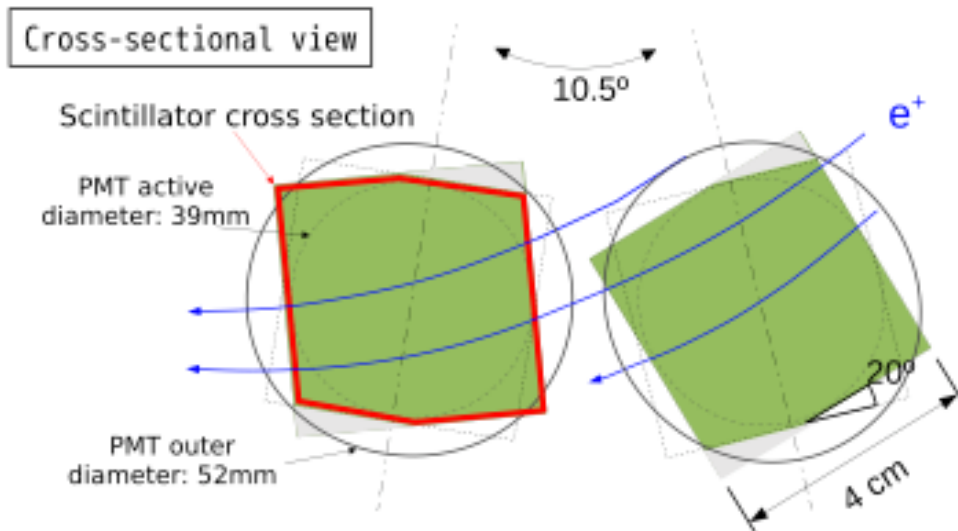
- MEG II タイミングカウンター
 - 512個のカウンターにより細分化された e^+ の時間測定用検出器
 - ビームテストにおいて複数ヒットにより $\sim 30\text{ps}$ の良い時間分解能が実証されている
- レーザーによる時間較正
 - タイミングカウンターの時間較正法の一つとしてレーザーによる較正法を研究中
 - 1つのカウンターを用いてテストした結果、時間オフセットの測定のために十分な光量が得られることが確認できた
 - 事前にスプリッターのチャンネル間オフセットを測定しておく必要がある
- 今後
 - 時間オフセットの再現性の確認
 - ライトスイッチのテスト
 - 光ファイバーとカウンターの接合方法の決定
 - ヒット時間の電荷依存性
 - 複数個のカウンターを用いた実機に近いセットアップでの試験

END

Back up

MEG-IのTC

- 六角形のscintillator bar + PMT
- e^+ の方向に合わせて角度をつけて設置することにより良い uniformity



MEG-IのTC

- beam test での time resolution : 40ps
- しかし実験段階ではtime resolution : 65ps

原因

- spectrometer内の磁場によるPMTへの影響 20ps
TTS(Transit Time Spread) 5% 上昇
gainの減少(30%)によりpulse height ↓ → time walkの影響 ↑
- Sc bar が厚いためz projectionが大きい time spread 20ps
- エレキのjitter 40ps

Scintillator

- light yield, rise time, decay time, emission spectrum を考慮して決定

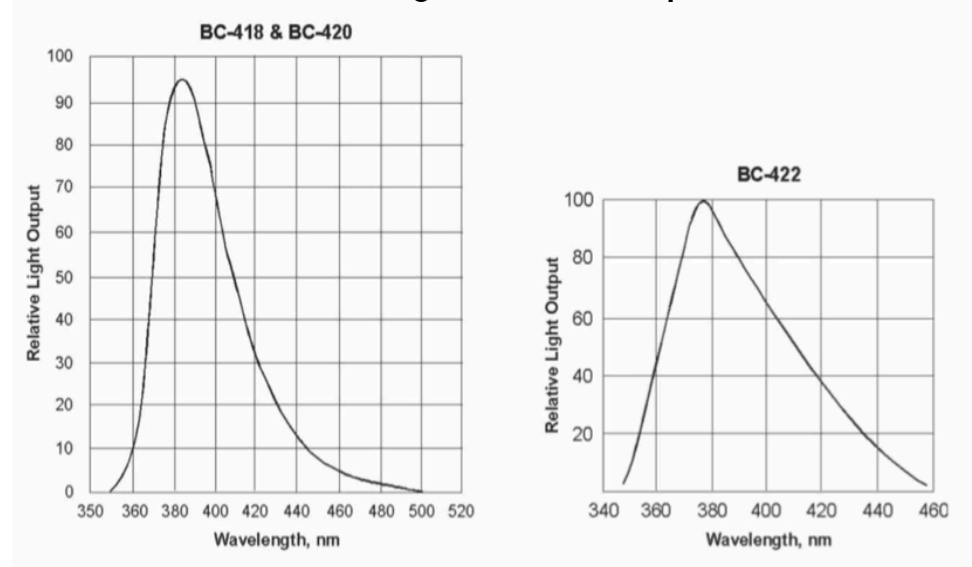
ultra-fast plastic scintillatorの候補 (Saint-Gobain社)

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

BC-422はrise time は小さいが attenuation length が短いため数cm以下の小さいplateで用いる

長いplateではBC-418,BC-420が attenuation length が長くlight yield も高いのでよい

Scintillation light emission spectra



他の候補としてp-Terphenylの単結晶

SiPM

- 半導体光検出器
- 優れた性能で従来のPMTの代わりとなる
 - サイズが小さい
 - single photon を見れる
 - 高いgain(10^5 - 10^6)
 - 高いPDE at $\lambda \sim 450\text{nm}$
 - 磁場耐性
 - 優れたtime resolution (<100ps for 1 p.e.)
 - 雪崩の変動がない(excess noise factor ~ 1 -1.5)
- pixel module の読み出しとして最適

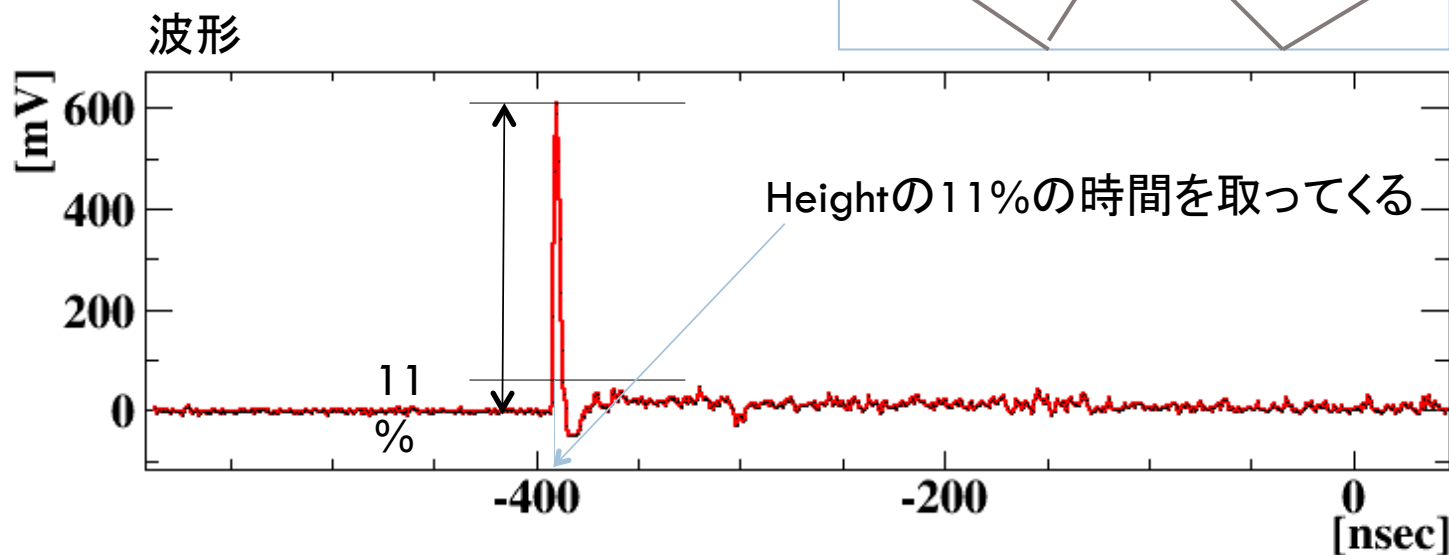
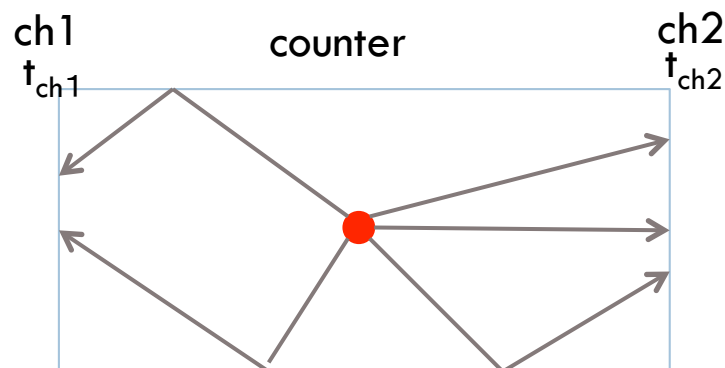
解析方法

24

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



SiPM

SiPMの候補

浜松のS10931-050P

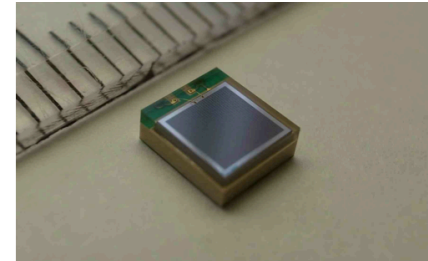
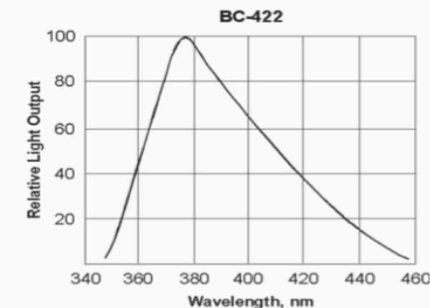
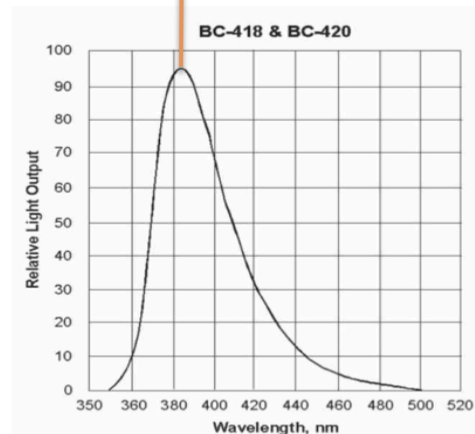
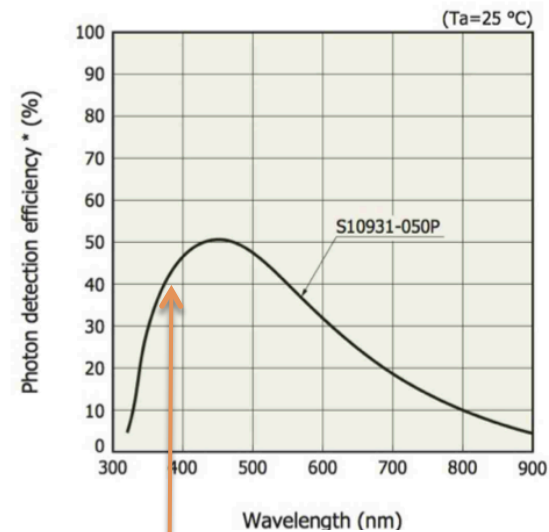


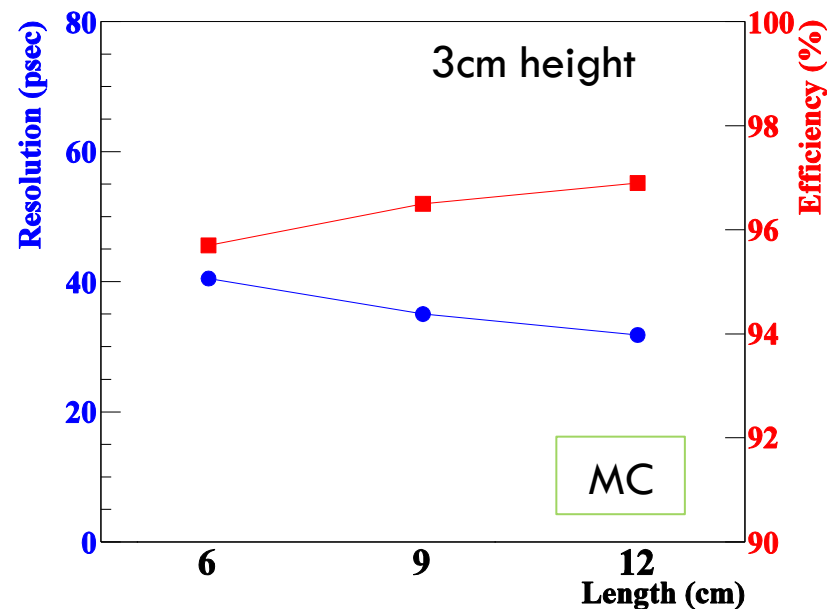
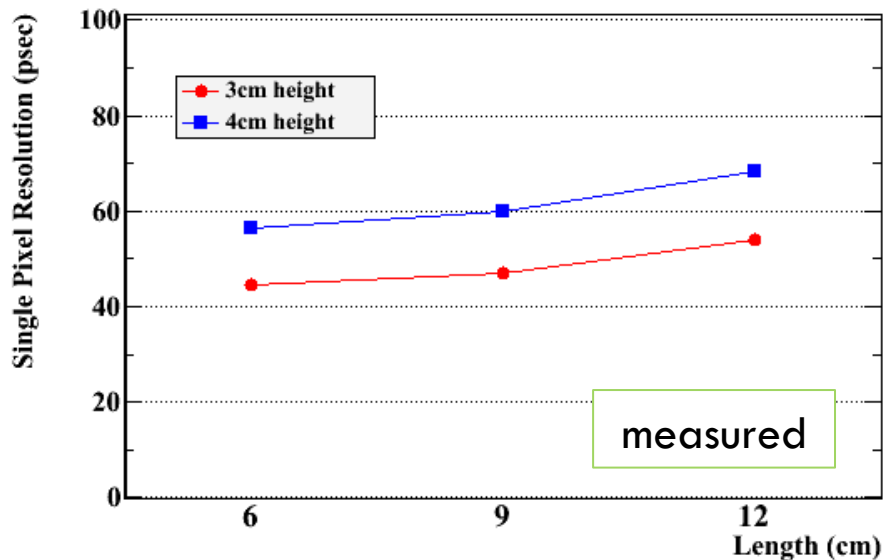
TABLE IX: Specifications of Hamamatsu MPPC S10931-50P [33].

Active area	$3 \times 3 \text{ mm}^2$
Pixel pitch	$50 \times 50 \mu\text{m}^2$
Number of pixels	3600
Geometrical fill factor	61.5%
Peak wavelength	440 nm
Operating voltage	$70 \pm 10 \text{ V}$
Temperature coefficient of breakdown voltage	$56 \text{ mV}/^\circ\text{C}$
Gain	7.5×10^5
Dark count rate	6 Mcps

このScintillatorの発光波長で十分なPDEが得られる

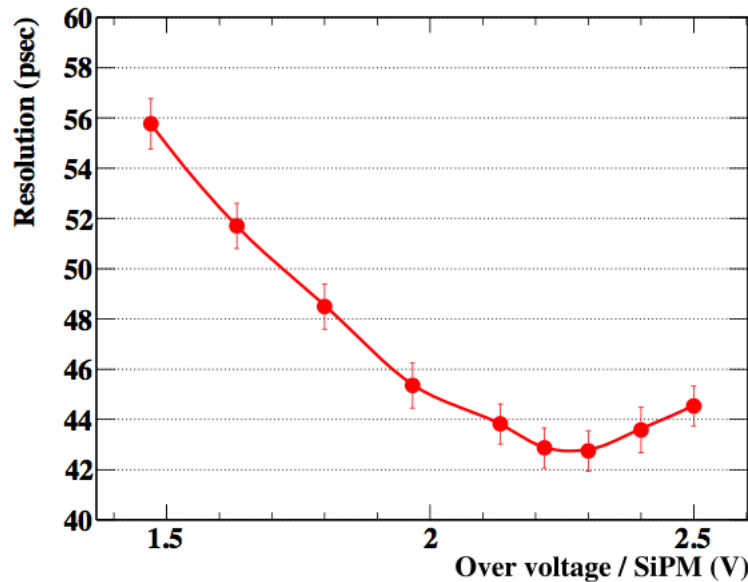


分解能のシンチの長さ依存性



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

time resolution の over voltage 依存性



Sc: BC422(30×90×5mm³), SiPM: 3 MPPCs each side ,
reflector: 3M radiant mirror film

2.3Vあたりまでは波高がたかくなることによりtime walk の影響が減少しtime resolutionは良くなるが、それ以降はdarkが増えることにより悪くなる。

→ Operation voltageの決定

Performance of new TC

- ピクセル間travel timeを考慮して複数のピクセルでのe⁺ のhit timeを平均しimpact timeが正確に測定できる
- hitピクセル間の距離L
 - ドリフトチェンバーにより再構成されたtrackから見積もられる
- TCに入射するまでのtrackに不定性があるのでTC細分化されるべき
- hit pixelでの多重散乱によりLの精度が悪くなり時間の広がりができる

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

N_{hit} 増加で小さくなる

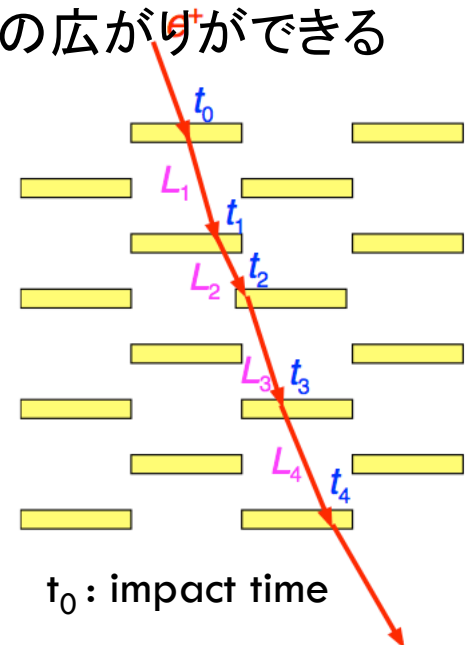
σ_{overall} : 全体のtime resolution

σ_{single} : single pixelのtime resolution

$\sigma_{\text{inter-pixel}}$: ミス配置やエレキのjitterによるpixel間の時間のふらつき 30-40ps

σ_{MS} : 多重散乱の影響 (N_{hit} 依存)

N_{hit} : hit pixel 数



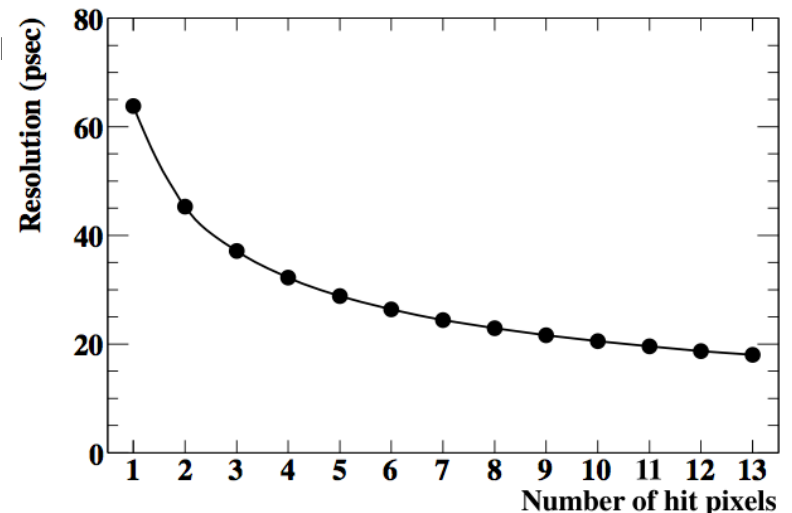
Performance of new TC

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

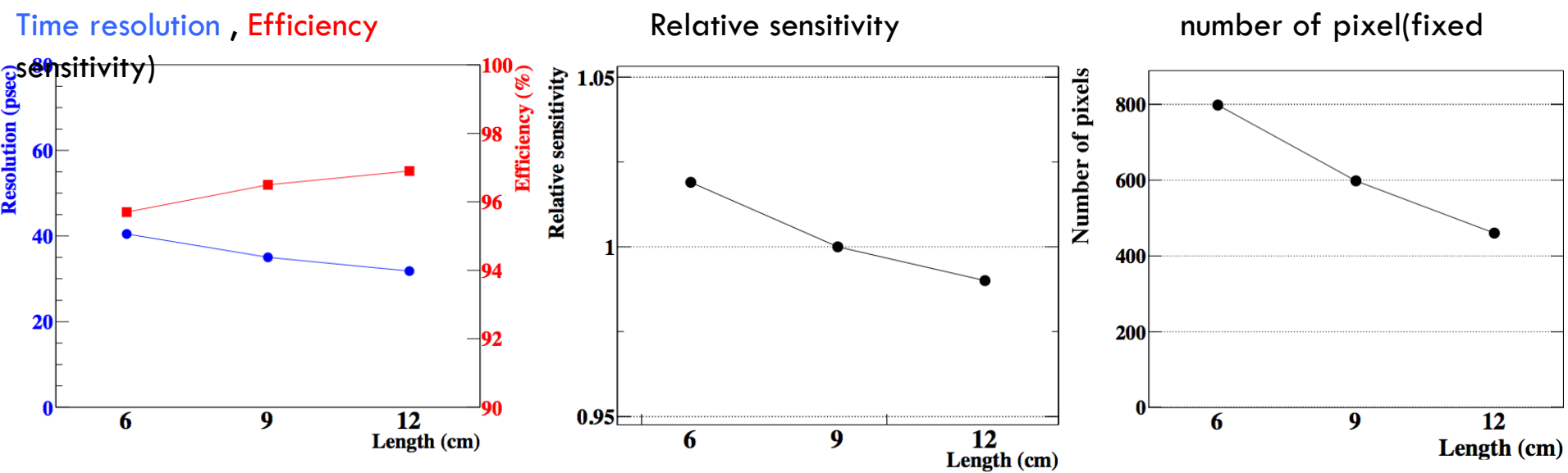
各hitピクセルでの多重散乱による角度の広がりとは約35mrad ~5psに相当

(for 5mm thick pixel)

N_{hit} 増で σ_{MS} が増えてしまうので σ_{overall}



Sc plate の長さに対する依存性



カウンターが長くなるとあたりやすくなり検出効率増える
hitするpixel数も増えるためtime resolutionも良くなる
その結果、長い方が感度よくなる (Punzi's method)
ピクセル数も少なくてすむのでコスト削減

しかし、長いとパイルアップやダブルヒットの効果が増えてしまう要study

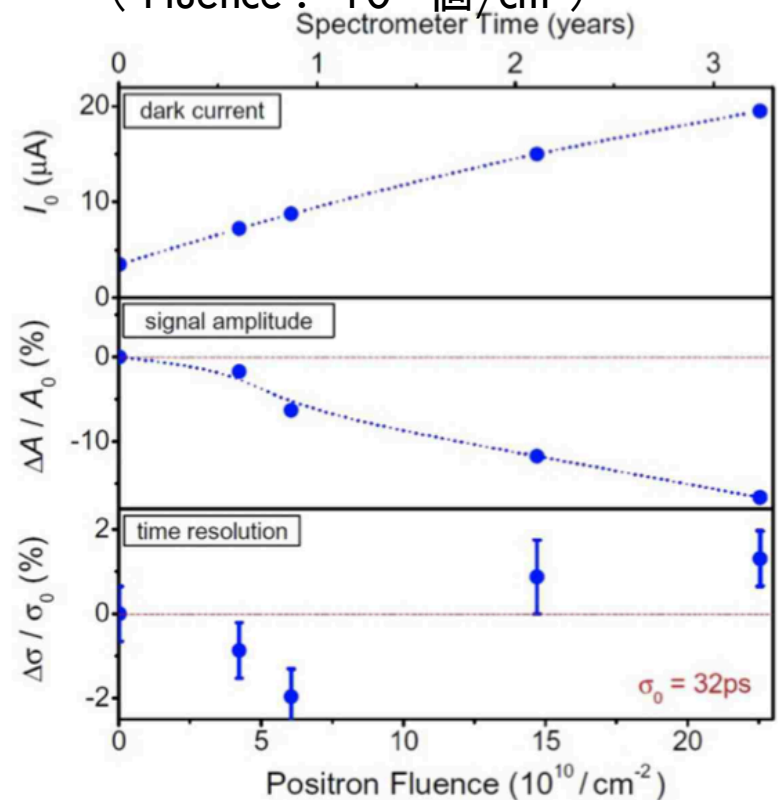
SiPMの放射線耐性

- SiPMの放射線耐性は高くない
 - dark current 増
 - gain 変わる
- 3年でMichel positrons 5×10^9 個/cm²
- 同じようなconfigurationでのテストの結果、
 - dark current 6倍、gain 15% 減少
 - time resolution 変化しない
- neutron, γ 線耐性も問題ない(Sec.7)

放射線耐性問題なし

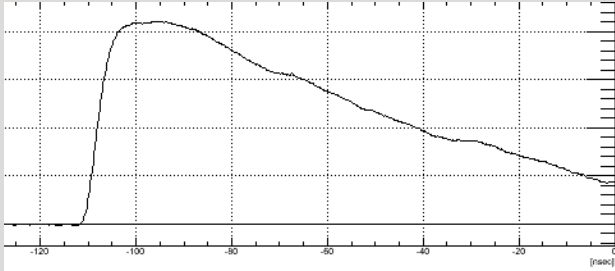


Michel positrons の照射テスト結果 (Fluence : $\sim 10^{11}$ 個/cm²)

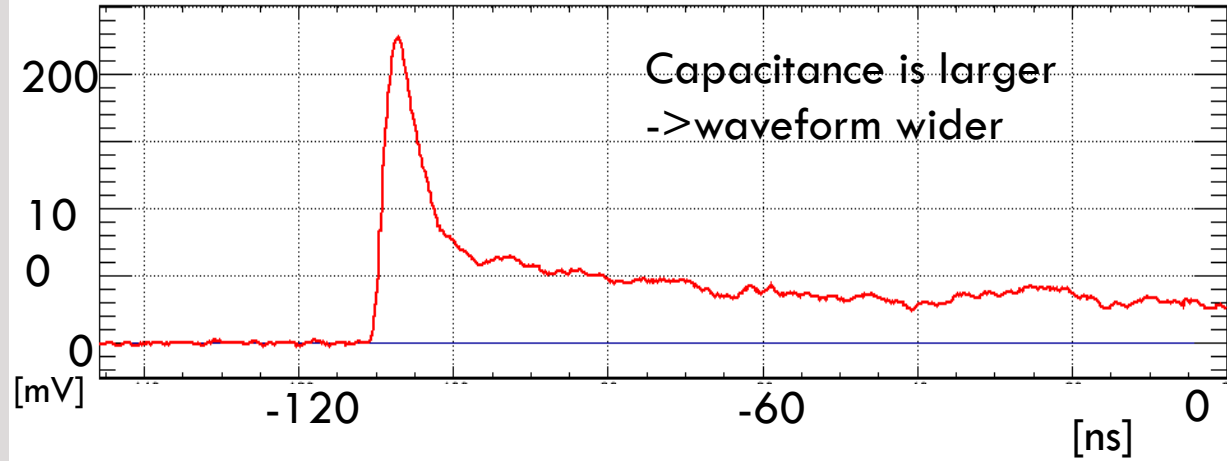


waveform

Parallel connection

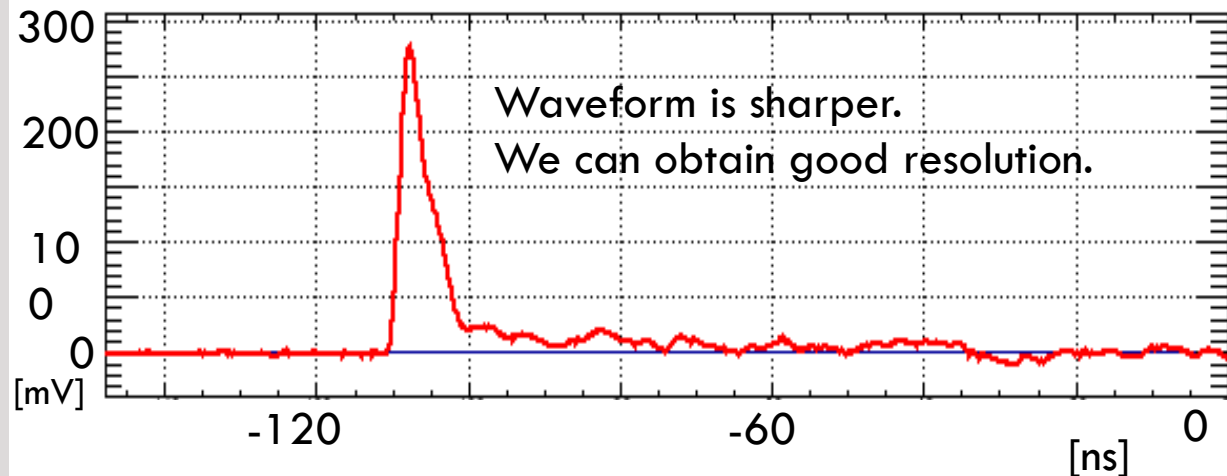
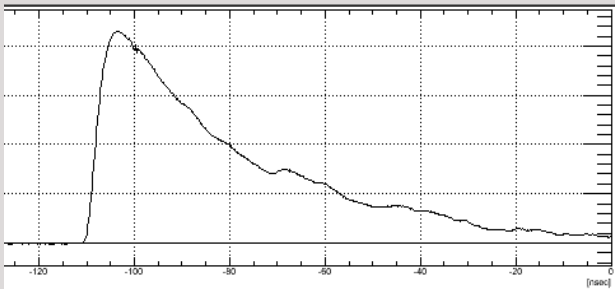


Before shaping



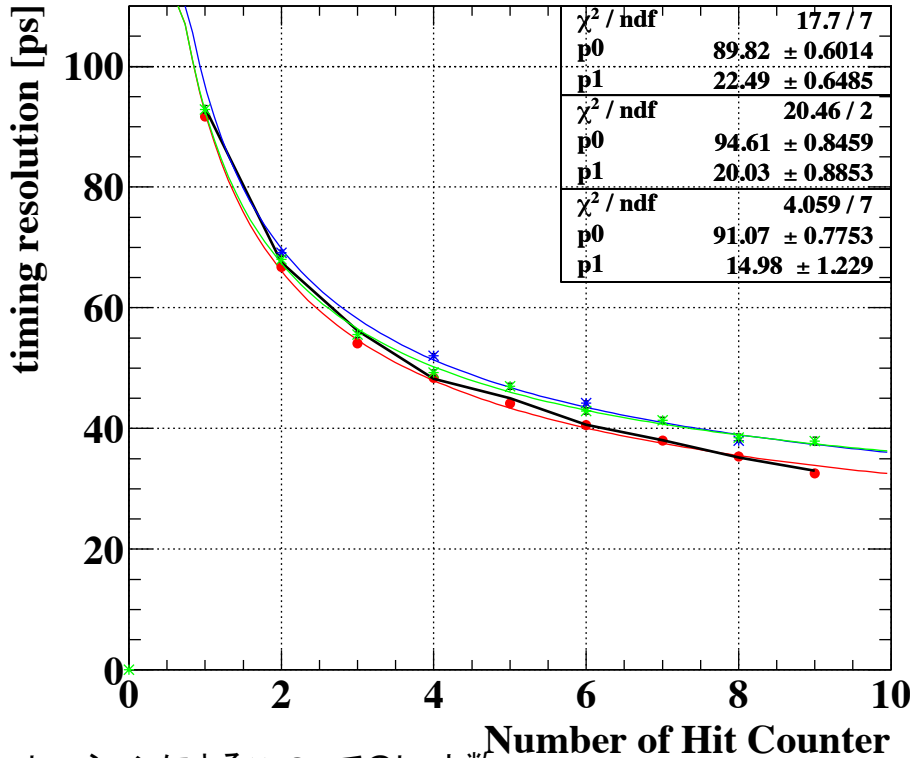
After shaping

Series connection



時間分解能のヒット数依存性

33



- 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)

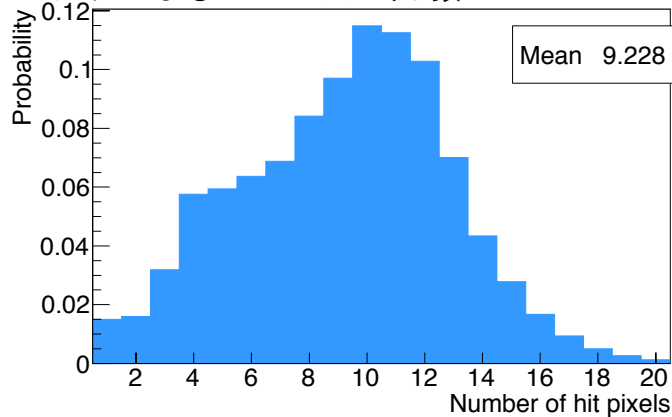
フィッティング関数

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

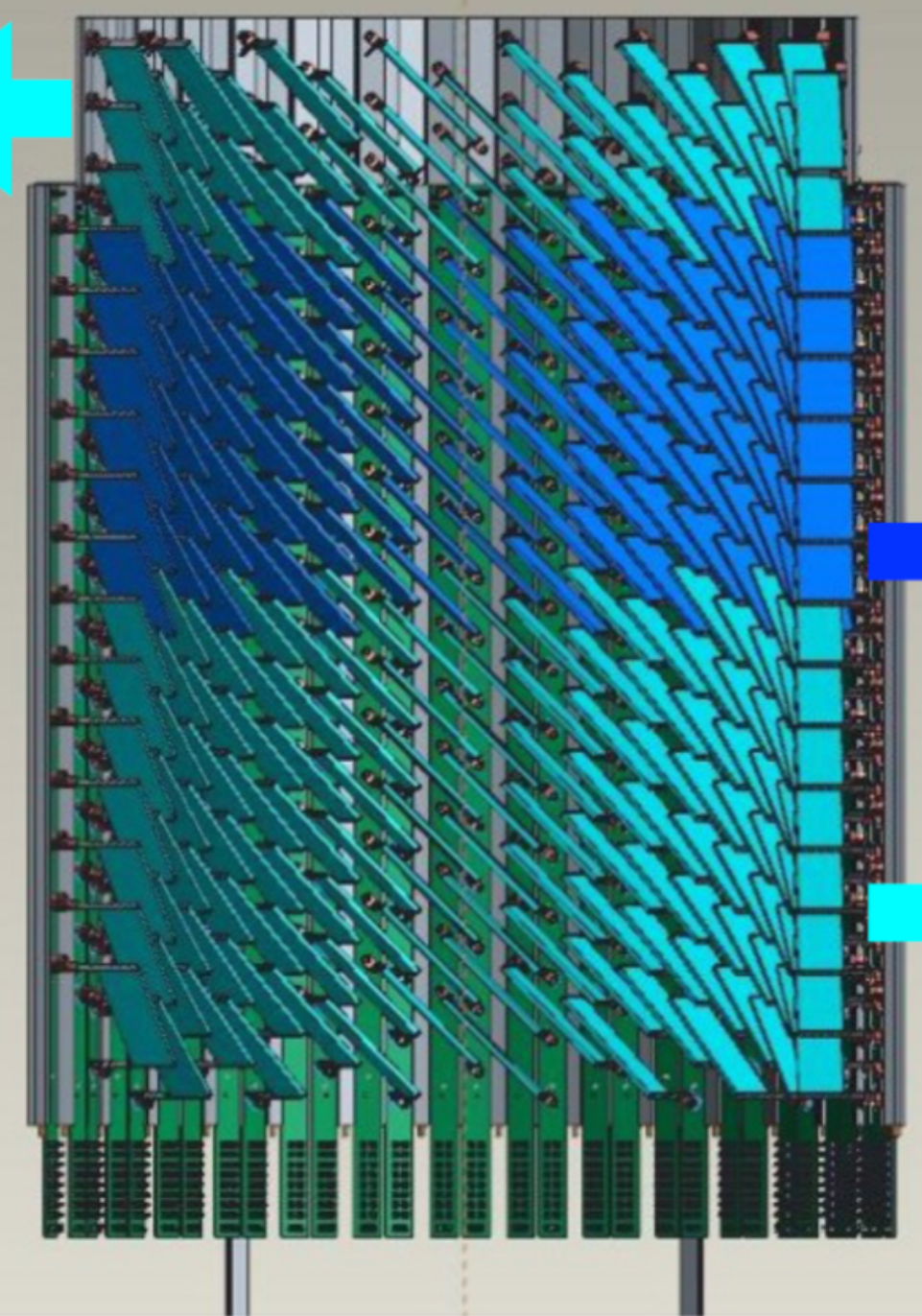
- 第一項: 複数ヒットでのカウンターの分解能
- 第二項: エレキなどによる分解能のオフセット

- ・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

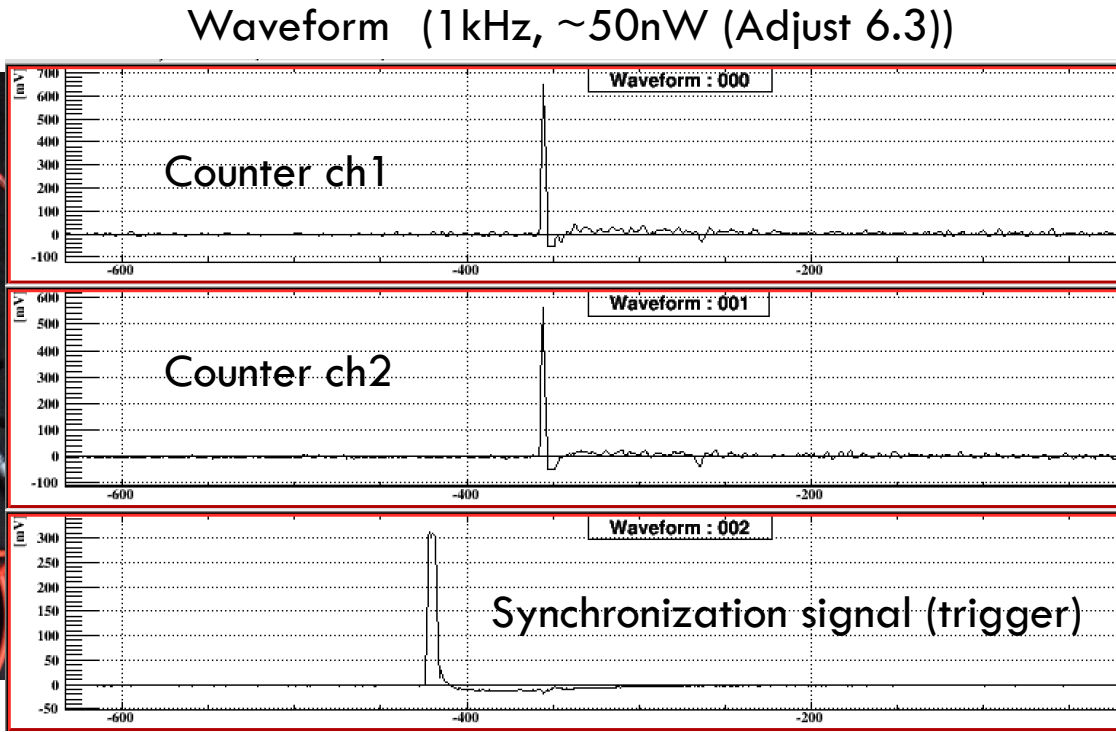
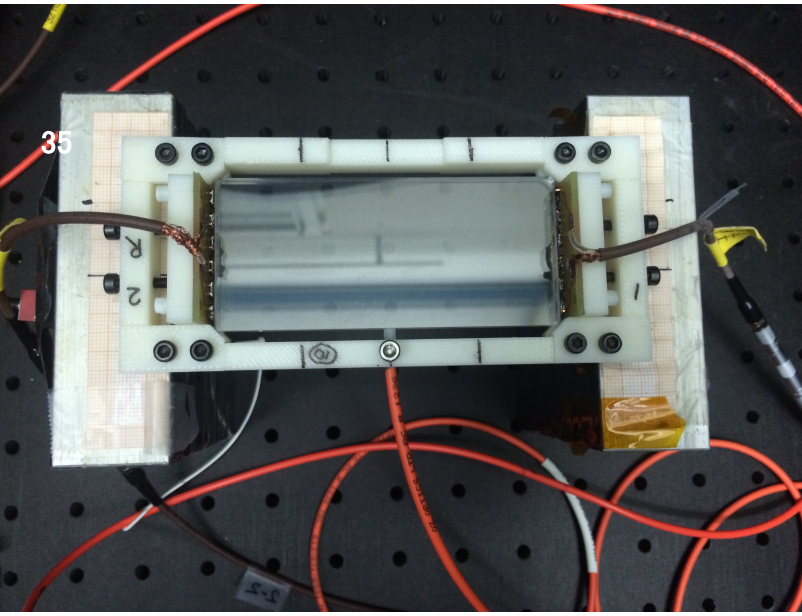


平均ヒット数9での分解能: 32.5ps



バックプレーン片側~100cm

counter



Connection is touch only

2 hole for fiber and screw in counter case to fix fiber by screw

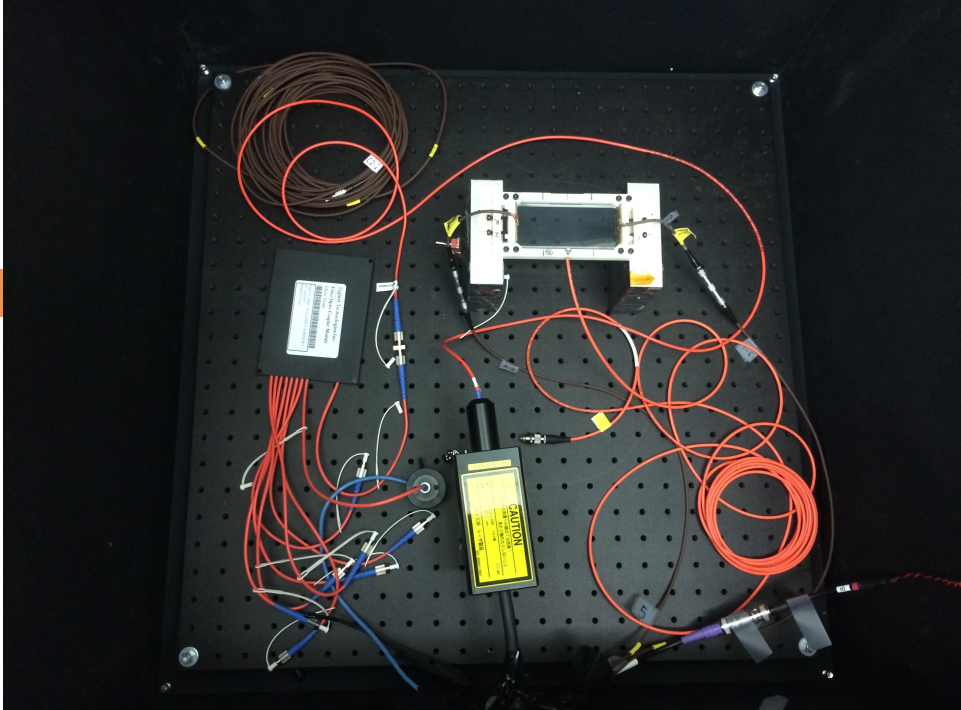
HV : ch1 171V , ch2 171V

LASER power check : 1MHz

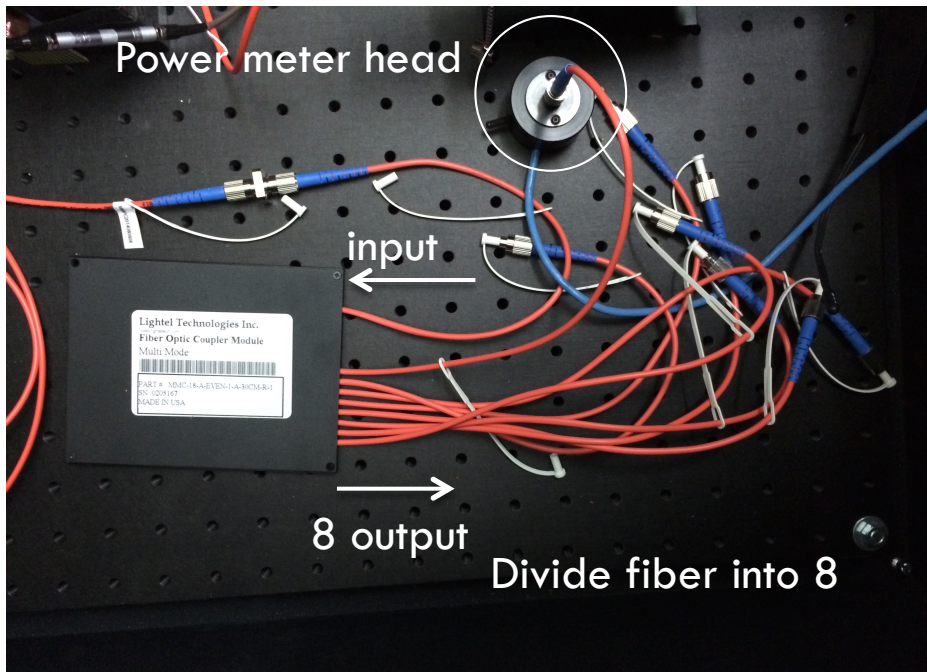
DAQ : 1kHz

Because current is too large in 1MHz and can not measure power by power meter in 1kHz

LASER power is $\sim 50\text{nW}$ $\rightarrow \sim 10^5$ photo/pulse
Power adjust : 6.3 (becoming 1/20 of standard power)
roughly power using 2 splitter
1/20 is decreasing value at one splitter



LASER divider



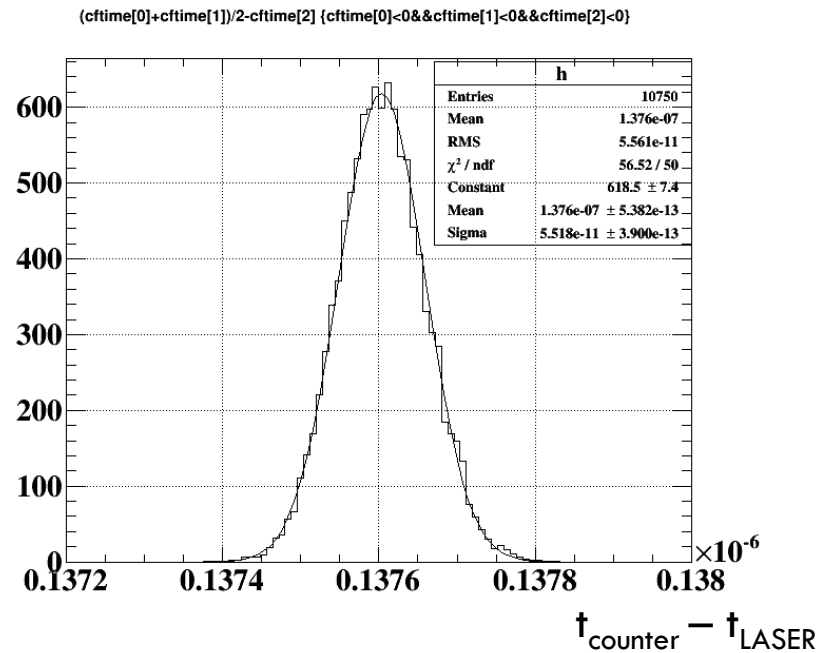
Optical power meter



Hit timing

37

- Counter time is average the constant fraction time of both ch : t_{counter}
- Time reference is timing of SYNC signal with Laser : t_{LASER}

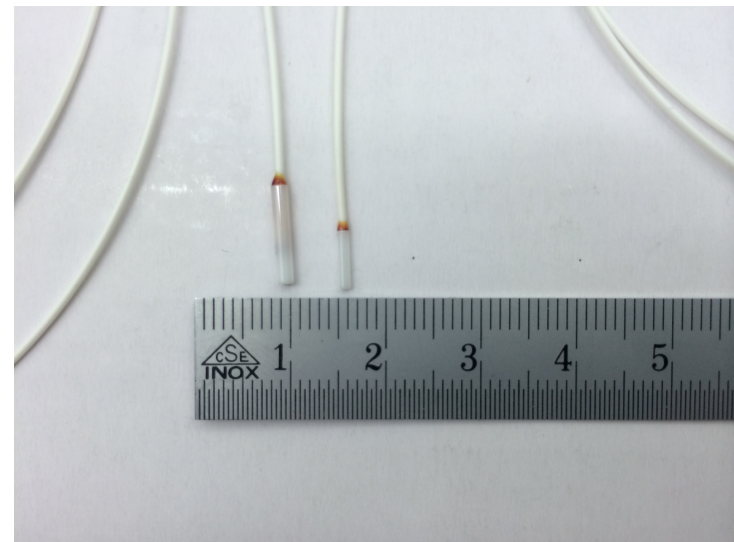
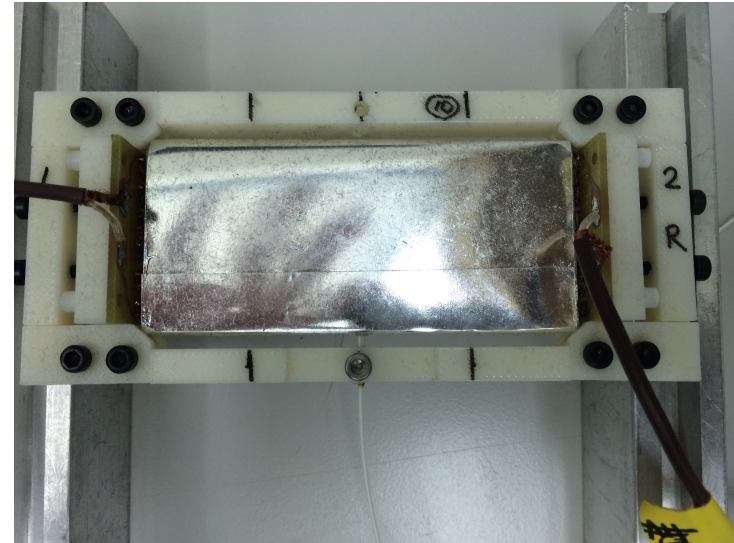


- Laser hit timing : mean of Counter time – LASER time
- Resolution : 55.2ps

Thiner fiber test

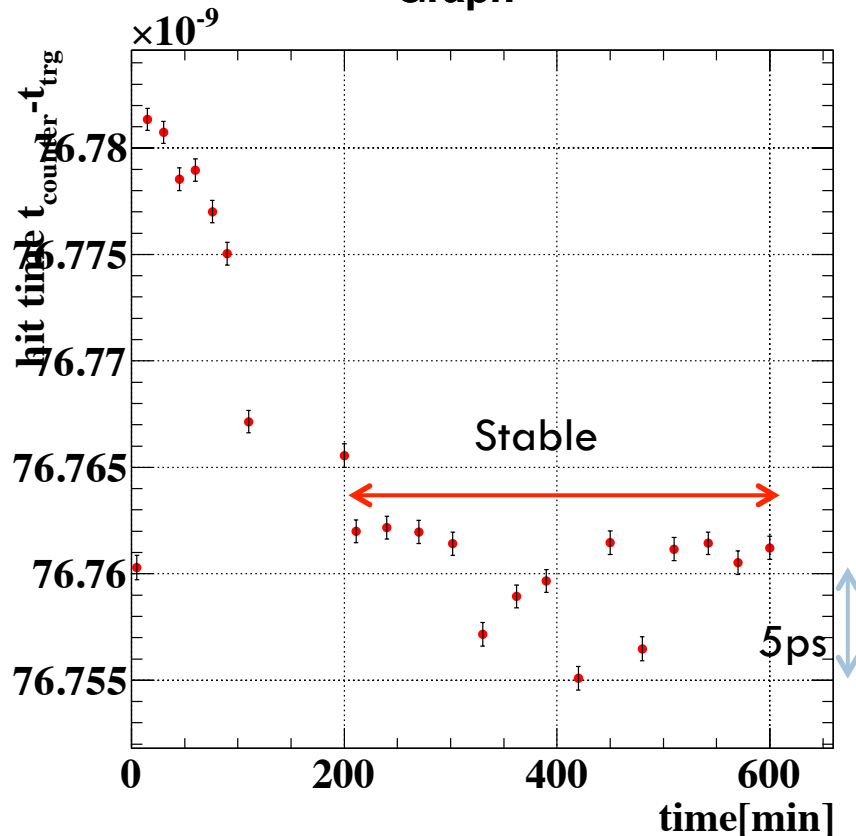
38

- This thin fiber will be used finally
- Power decrease to about 80% from previous fiber
- Enough Laser power can be gotten at this fiber , too

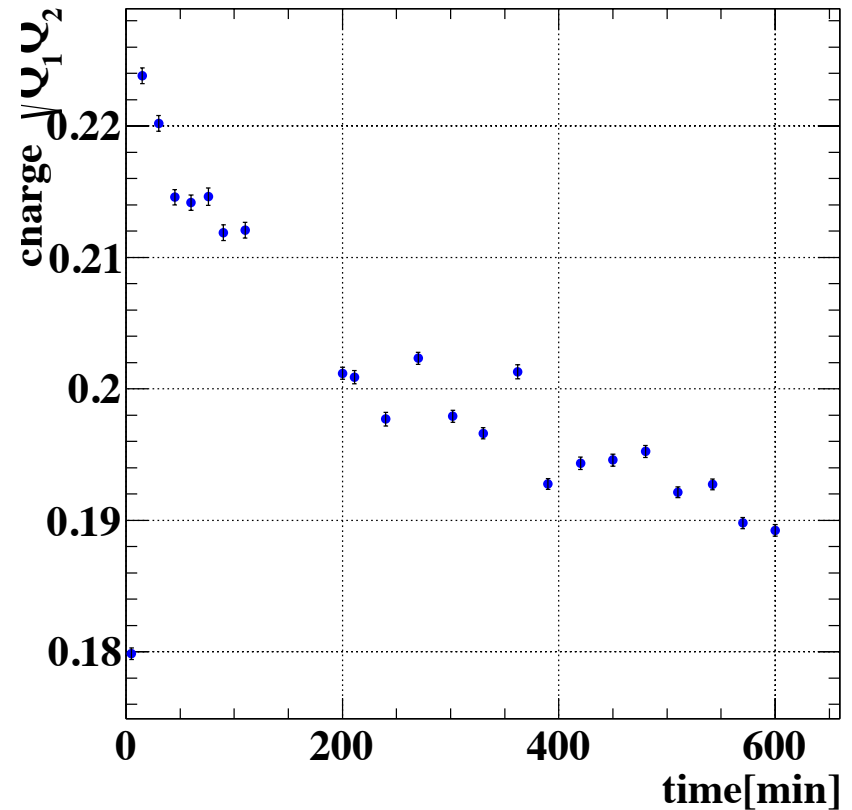


Laser stability for time

Graph

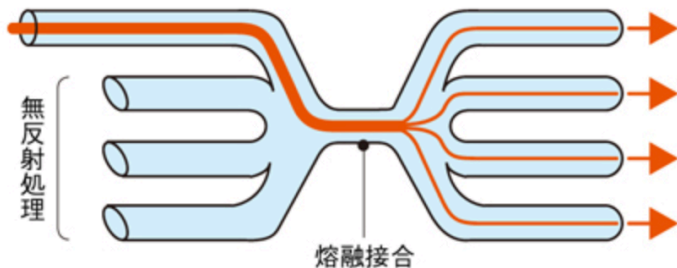


Graph



- Laser hit time decrease till 200 min
- Laser become stable after 200min from switch on
- Tendency is same with previous test

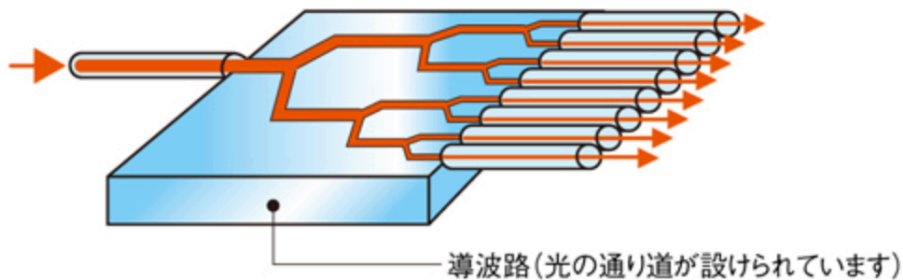
光ファイバカプラ(図は1×4分岐)



上図のように光ファイバの束を熔融接合したものです。

入力された光は接合部で2等分または4等分に分岐され、各ポートより出力されます。光ファイバカプラは、分岐数が少ない場合、製法が比較的単純であるため、2分岐または4分岐として最適です。

導波路型スプリッタ(図は1×8分岐)



上図のように導波路に光ファイバを接合したものです。

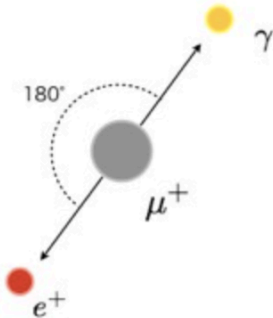
板状ガラスの導波路にはY字型に枝分かれしていく光回路(光の通り道)が設けられており、その部分を光が通過するごとに分岐され、各ポートより8~64等分されて出力されます。コンパクトなサイズで多くの光回路を構成できるため、分岐数の多い8分岐~64分岐として最適です。

中浦

- ・対象とする物理現象:cLFV $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$
 - ・標準理論+ニュートリノ振動での分岐比： $O(10^{-45})$ 以下
 - ・SUSY-GUTなどでの分岐比： $O(10^{-14}) \sim O(10^{-12})$
 - ・発見されれば新物理のまぎれもない証拠
 - ・現在の分岐比の上限： 5.7×10^{-13} (90% C.L.)

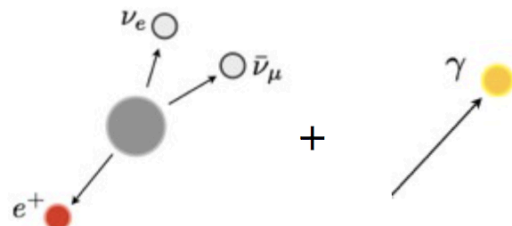
Phys. Rev. Lett. 110, 201801 – Published 13 May 2013

・ signal



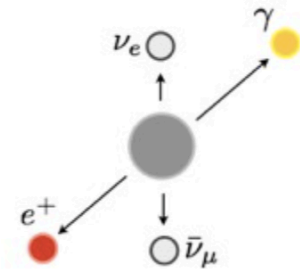
- ・ μ 粒子の静止系での崩壊
- ・ $E=52.8\text{MeV}$
- ・ back-to-back
- ・ 同時刻

・ accidental background



- ・ ミッセル崩壊による陽電子と γ 線の偶発的ヒット
- ・ ランダムな角度分布
- ・ ランダムなタイミング

・ radiative muon decay



- ・ $E < 52.8\text{MeV}$
- ・ not back-to-back
- ・ 同時刻