

COMET実験のためのMPPC読み出し カロリメータの開発

2010年2月17日

第16回 ICEPPシンポジウム

大阪大学久野研究室M2 立元琢土

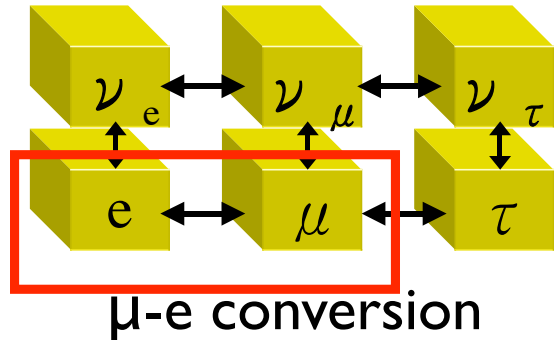
目次

- イントロダクション
 - COMET実験について
 - COMET実験に用いる電磁カロリメータについて
 - 光検出器MPPCについて
- カロリメータR&D
 - 研究概要
 - MPPCとLYSOを組み合わせたカロリメータ試作機による電子ビームテスト
 - ビームテストより得られた結果を用いての実機カロリメータの性能評価
- まとめ

イントロダクション

COMET実験

レプトン



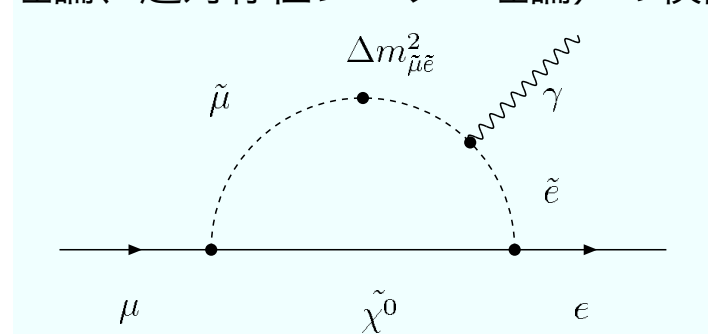
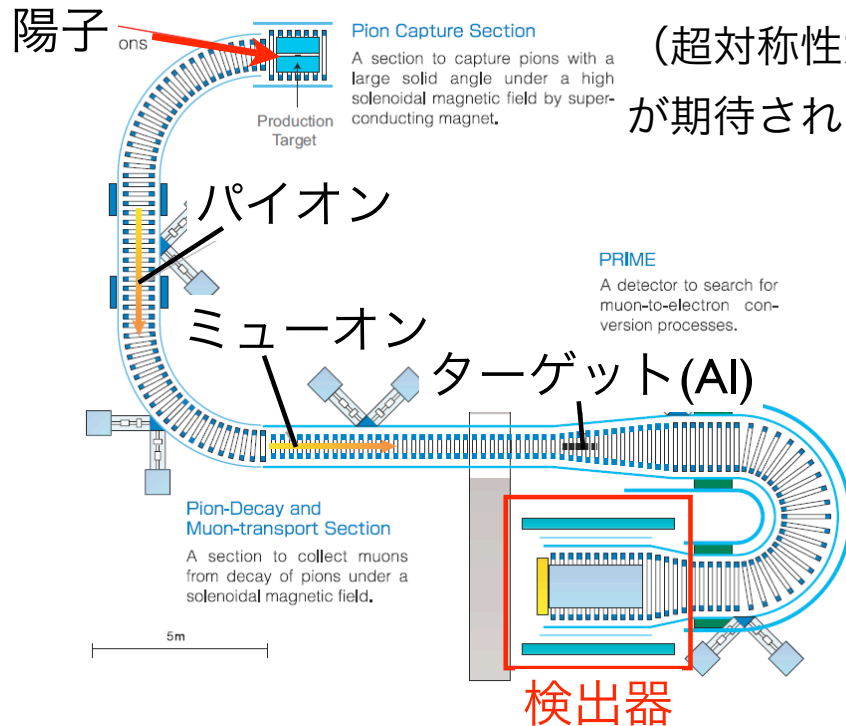
目的

ミューオン・電子転換過程

$\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$ の探索

標準理論モデルでは観測不可能。

→分岐比を精密に測定することで標準理論を超える理論
(超対称性大統一理論、超対称性シーソー理論)の検証
が期待される。



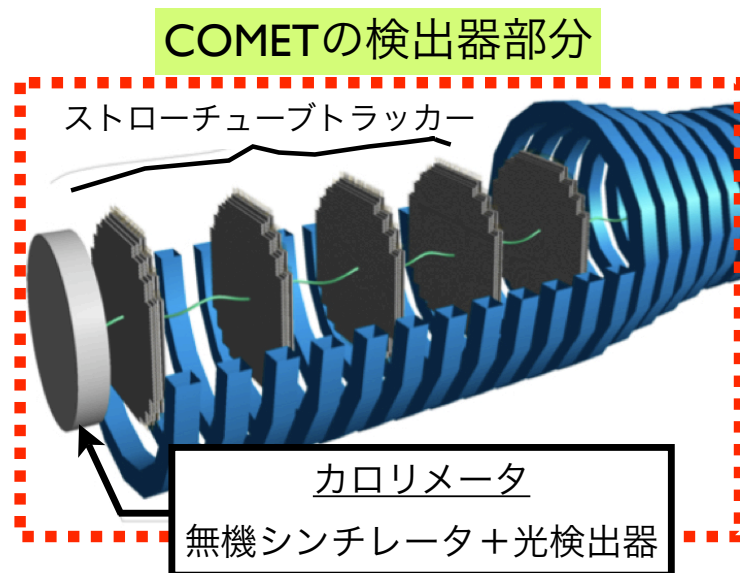
ミューオン・電子転換過程探索

現在の感度(SINDRUMII) $\rightarrow 7.0 \times 10^{-13}$

COMETの目標 $\rightarrow \sim 10^{-16}$

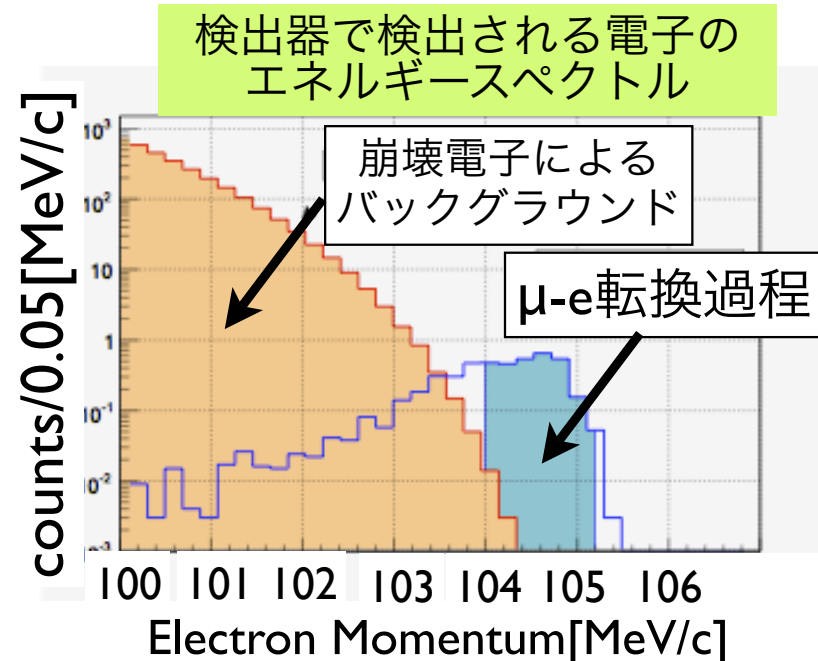
J-PARCに設置を計画中

COMET実験における電磁カロリメーターの開発



カロリメーターの役割

- ・トラッカーへのイベントトリガー
- ・エネルギー測定
- ・位置検出

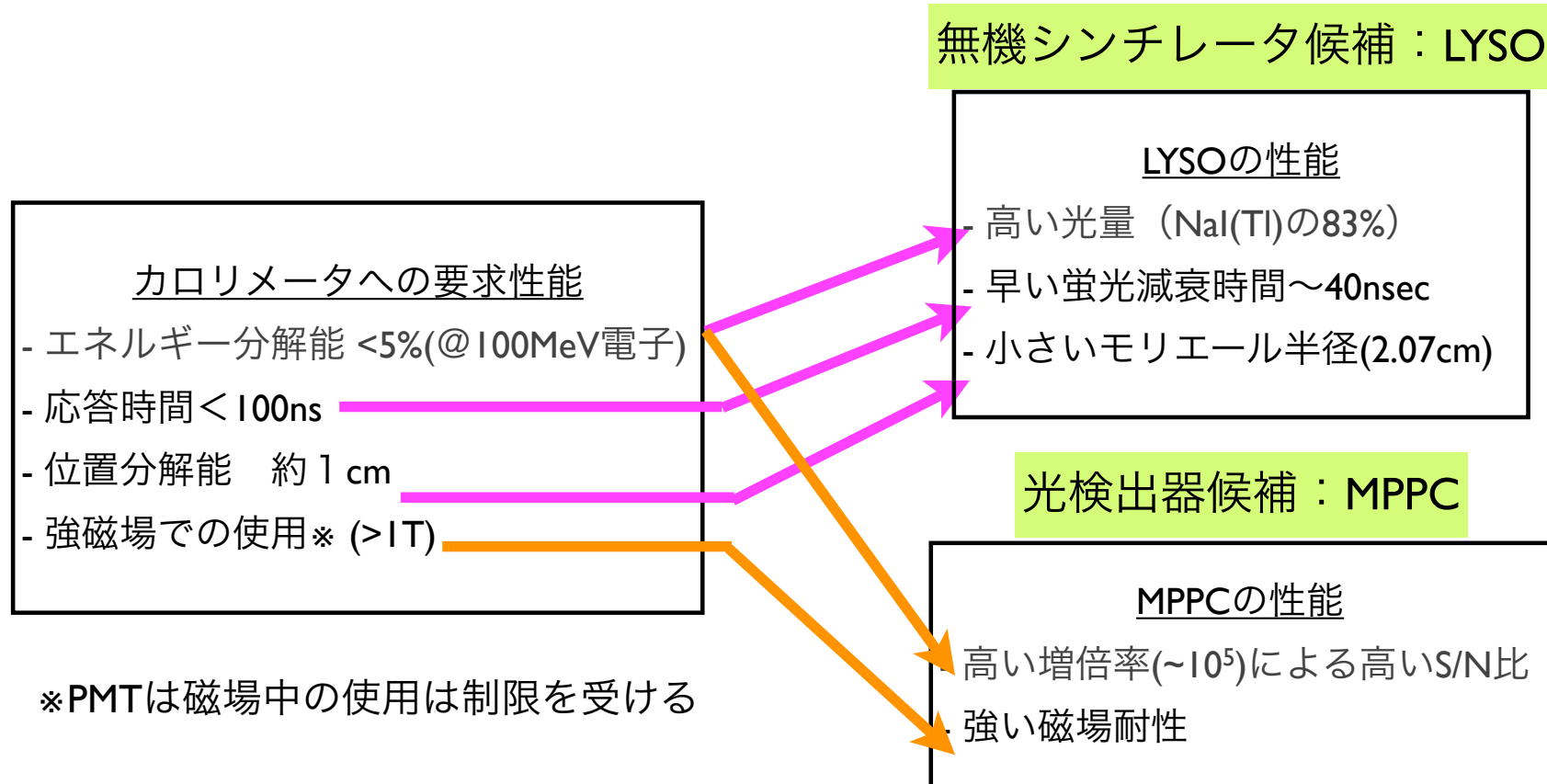


カロリメーターへの要求性能

- エネルギー分解能 < 5% (@ 100 MeV電子)
- 応答時間 < 100 nsec
- 位置分解能 約 1 cm
- 強磁場での使用 (> 1T)

カロリメータの構成

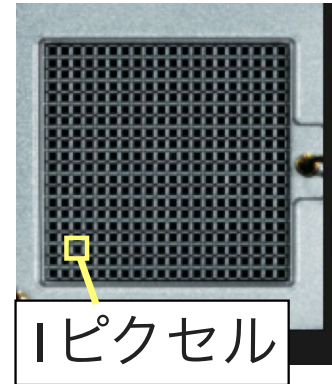
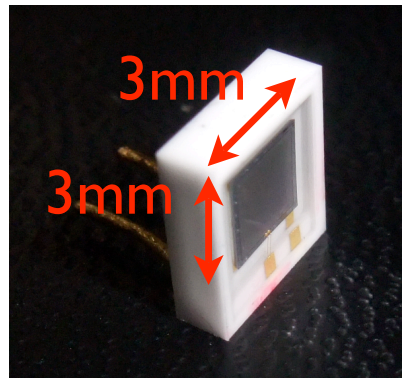
無機シンチレータLYSOと光検出器MPPCの使用を検討



光検出器MPPC(Multi Pixel Photon Counter)についての解説

磁場耐性のある光検出器：MPPCの使用を検討

MPPCとは



- 磁場耐性がある
- 高い増倍率 ($\sim 10^5$)
- 受光面は最大で3mm×3mm
- ガイガーモードAPD(アバランシェ・フォトダイオード)をピクセル構造にして並べている。
- 光子を検出したピクセル数に応じた信号を返す(photon equivalent[p.e]=PMTのphoto-electronに相当)
- 適正バイアス電圧 -70V程度
- 入射光子数が多くなるに従い、検出光子数のリニアリティが崩れる

近年開発された光検出器であるため研究が必要

カロリメータR&D

研究概要

光検出器MPPCを用いたカロリメータのエネルギー分解能を評価し、
COMET実験の要求を満たす実機カロリメータ案を提案

MPPCと無機シンチレータLYSOを組み合わせたカロリメータ試作機による
100MeV帯の電子ビームテストを行った。

ビームテスト実験の結果とシミュレーション結果とを比較することにより、
MPPCの検出光子数(photon-equivalent [p.e])を求めた。

得られたMPPCの検出光子数を元にCOMET実験に用いる実機カロリメータの
エネルギー分解能を見積もった。

研究のポイント

これまで前例のない、無機シンチレータ表面に直接MPPCを貼付け
した検出器による100MeV領域の電子ビームの測定を行った。

ビームテストの目的

カロリメータへの要求性能

- エネルギー分解能 <5%(@100MeV電子)

σ_{all} : 実機カロリメータのエネルギー分解能

$$\sigma_{all} = \sqrt{\sigma_{ed}^2 + \sigma_{p.e}^2 + \sigma_{noise}^2}$$

・ 結晶内でのエネルギー損失のばらつき

シミュレーションから見積もる

・ 光子統計によるばらつき
・ 電気ノイズによる信号のばらつき

実験値を用いる

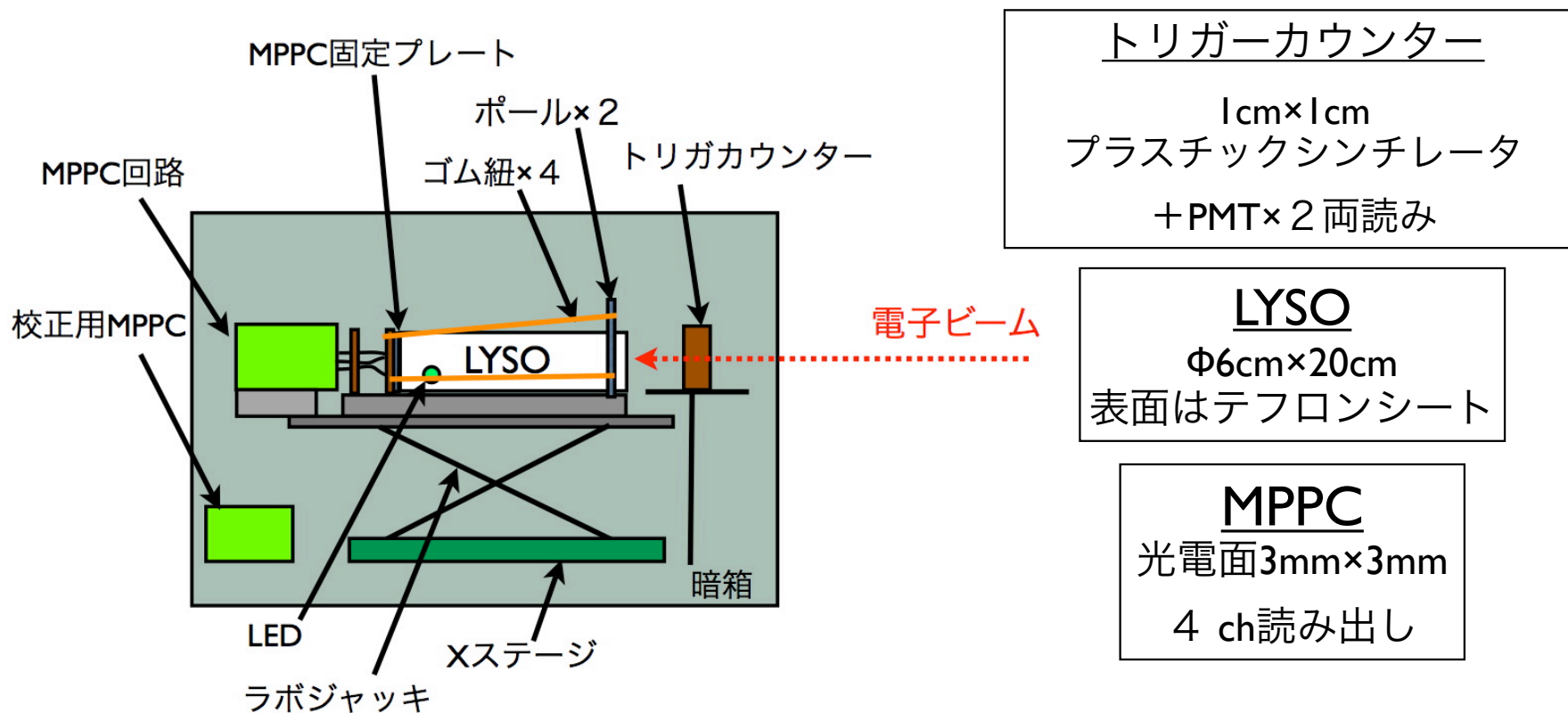
無機シンチレータ表面に直接MPPCを貼付けした検出器による
100MeV領域の電子ビームの測定は前例がない。

カロリメータ試作機を製作し、実際100MeV帯の電子ビーム
によるテストを行い、 $\sigma_{p.e}$ と σ_{noise} の値を得る必要がある。

MPPCの検出光子数 $N_{p.e}$ に依存

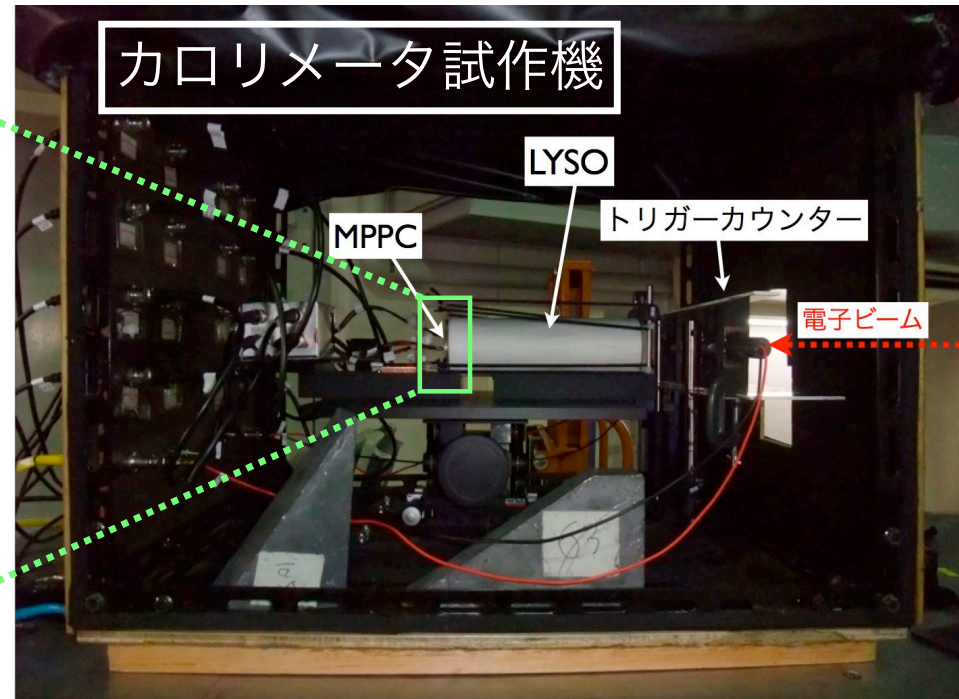
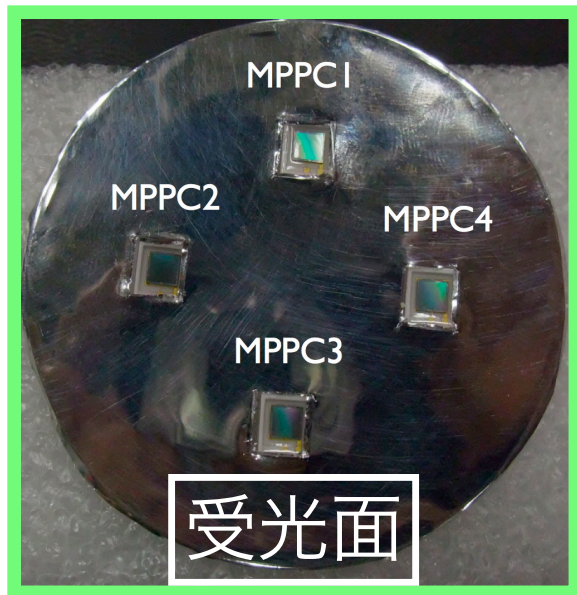
ビームテストセットアップ

場所：東北大学電子光物理学研究センター

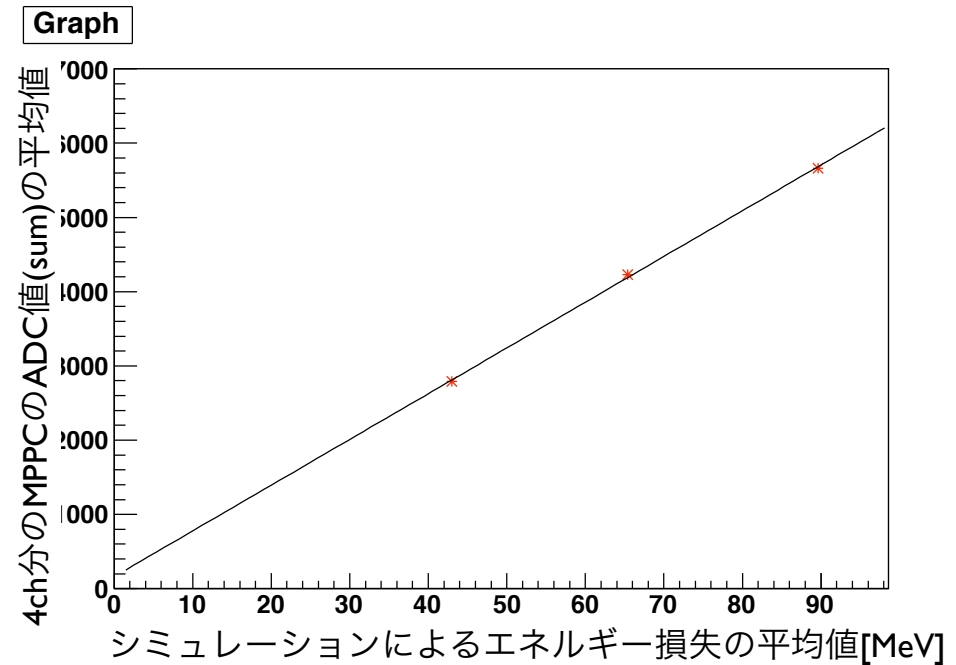
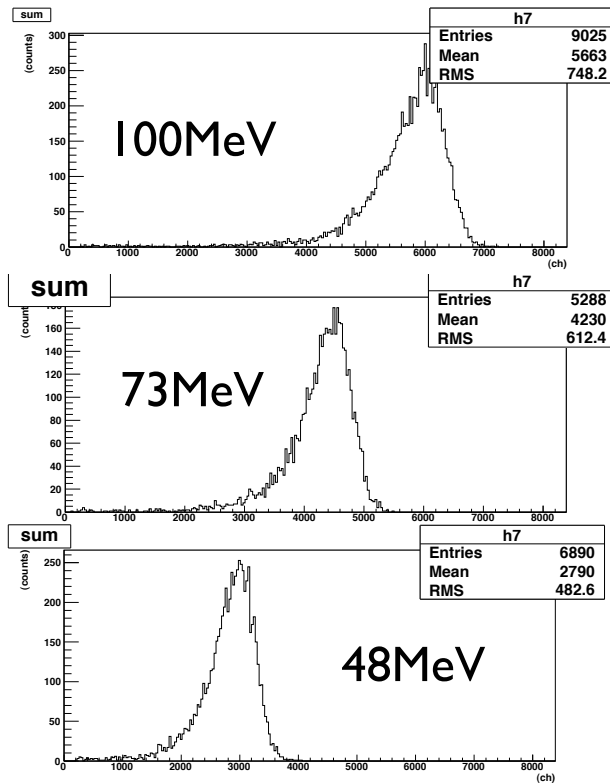


測定電子ビーム：100MeV、73MeV、48MeV

セットアップ写真



MPPCのリニアリティの確認



- シミュレーションから得られたエネルギー損失の平均値と、ビームテストで得られたADCchの平均値を比較すると線形がほとんど崩れていない。
→MPPCのリニアリティは保たれている。

ビームテストで得られたヒストグラムをシミュレーションとフィッティング

シミュレーションとの比較による光量算出

Geant4シミュレーションのエネルギー損失から見積もったADC値と
 ビームテストのADC値を比較し、MPPCの検出光子数を算出

$$ADC_{sim} = f(\overline{N}_{p.e}, \sqrt{\overline{N}_{p.e}}) \times G_{MPPC} \times e \times \underline{p_1} \times G_{ADC}$$

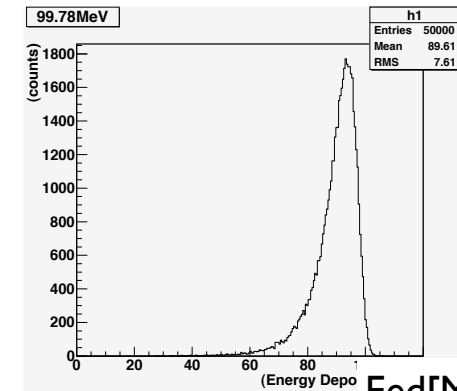
- ADCsim : Geant4のエネルギー損失から見積もったADC値
- $f(x, \sigma)$: 中心値 x 、標準偏差 σ の正規分布となる乱数の関数
- $\overline{N}_{p.e}$: MPPCの平均検出光子数[p.e]
- G_{MPPC} : MPPCの増倍率
- e : 素電荷[C]
- p_1 : 回路による信号の増倍率
- G_{ADC} : ADCのゲイン [pC/count]

$$\overline{N}_{p.e} = E_{ed} \times I \times \underline{p_0} \times e^{L/\lambda_l} \times \alpha_{PDE}$$

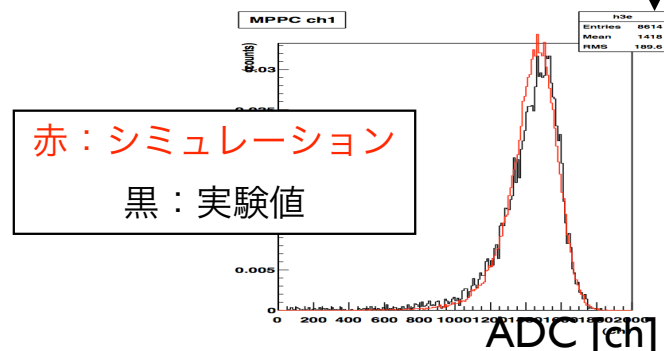
- E_{ed} : GEANT4より得られたエネルギー損失[MeV]
- I : LYSOの発光数[photon/MeV]
- p_0 : 発生した光子のMPPCへの到達確率
- L : 発生した光子のMPPCへの平均到達距離[cm]
- λ_l : LYSOの減衰距離[cm]
- α_{PDE} : MPPCの検出効率

シミュレーションより得られた

エネルギー損失

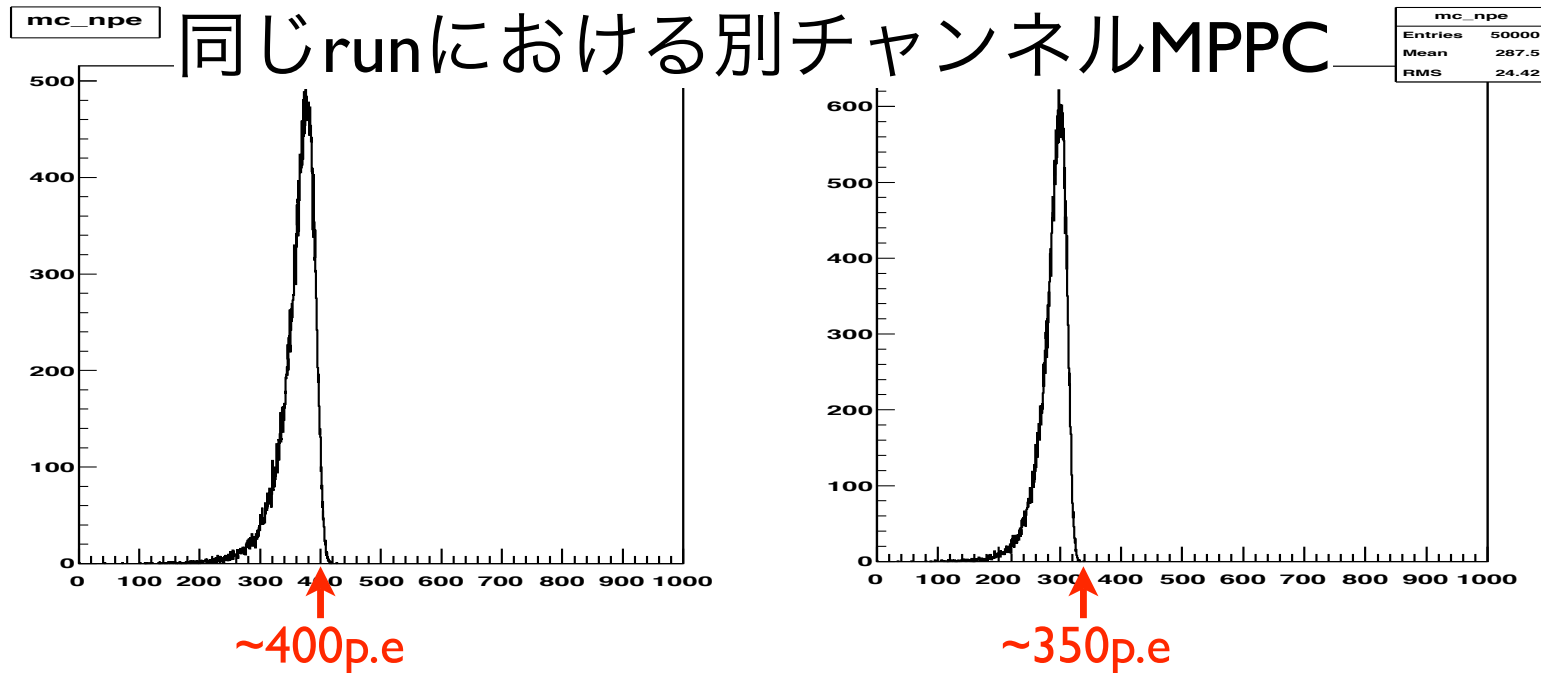


正規分布で太らせフィッティング ↓



ADCsimのヒストグラム (シミュレーション値) とビームテストのADC のヒストグラム (実験値) をフィッティングし p_0 、 p_1 を決め、 $\overline{N}_{p.e}$ を求めた。

シミュレーションとの比較による光量算出



MPPCの貼付け時のセットアップ状況によりそれぞれのchの検出光子数にばらつきが見られた。99.78MeVの電子ビーム測定、5回分のrunの統計をとり、1チャンネル辺りの平均値とRMSを求めた。

・ 99.78MeV電子ビームにおける平均検出光子数 $N_{p,e} = 311 \pm 72$ [p.e/MPPCch]

・ ペDESTラルの値より、 σ_{noise} を見積もる

$$\sigma_{noise} = 0.088 [\%] \text{ for } 100MeV$$

→実機分解能の評価に使用

→小さいため無視できる

ビームテストで得られた結果を用いての
実機カロリメータの分解能評価

エネルギー分解能の構成

カロリメータへの要求性能

- エネルギー分解能 <5%(@100MeV電子)

$$\sigma_{all} = \sqrt{\sigma_{ed}^2 + \sigma_{p.e}^2 + \sigma_{noise}^2}$$

σ_{all} : 実機カロリメータのエネルギー分解能

σ_{ed} : 結晶内でのエネルギー損失のばらつき

$\sigma_{p.e}$: 光子統計によるばらつき

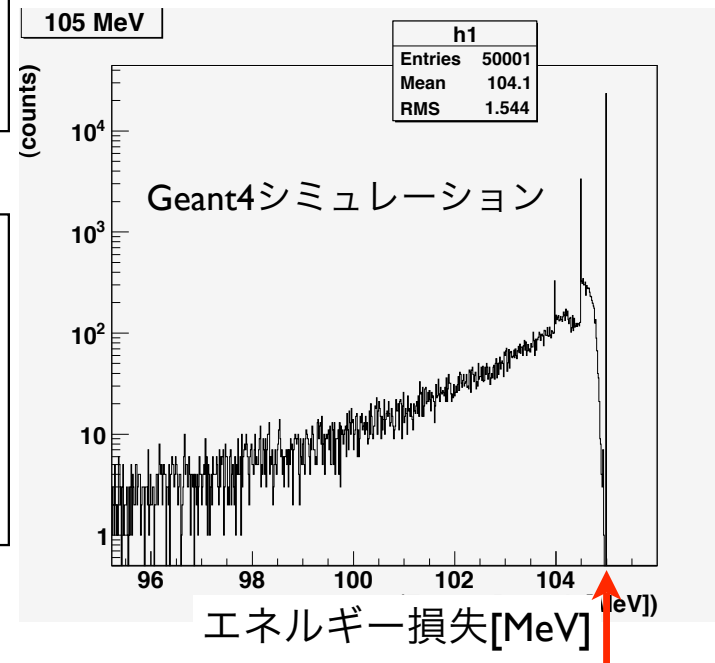
σ_{noise} : 電気ノイズによる信号のばらつき

σ_{noise} について

$\sigma_{noise} = 0.088$ [%] for 100MeV
要求性能5%に対し小さいため無視できる。

σ_{ed} について

実機カロリメータ (Φ 1 m \times 20cm) におけるエネルギー損失をシミュレーションすると、カロリメータの要求性能 (エネルギー分解能<5%) に対して、結晶内でのエネルギー損失のばらつきは無視できるとわかった。



105MeV

エネルギー分解能の構成

カロリメータへの要求性能

- エネルギー分解能 <5%(@100MeV電子)

$$\sigma_{all} = \sqrt{\cancel{\sigma_{ed}^2} + \sigma_{p.e}^2 + \cancel{\sigma_{noise}^2}}$$

σ_{all} : 実機カロリメータのエネルギー分解能

σ_{ed} : 結晶内でのエネルギー損失のばらつき

$\sigma_{p.e}$: 光子統計によるばらつき

σ_{noise} : 電気ノイズによる信号のばらつき

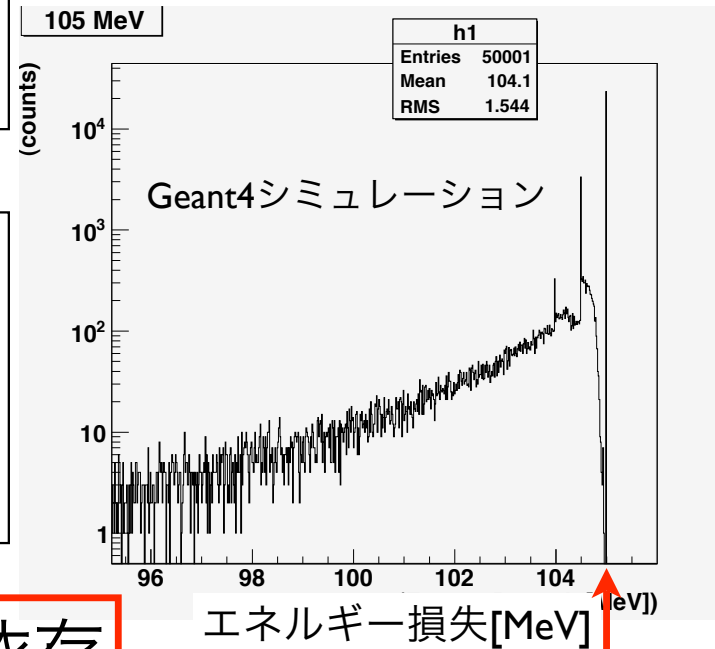
σ_{noise} について

$$\sigma_{noise} = 0.088 [\%] \text{ for } 100\text{MeV}$$

要求性能5%に対し小さいため無視できる。

σ_{ed} について

実機カロリメータ ($\Phi 1\text{m} \times 20\text{cm}$) におけるエネルギー損失をシミュレーションすると、カロリメータの要求性能 (エネルギー分解能<5%) に対して、結晶内でのエネルギー損失のばらつきは無視できるとわかった。



σ_{all} は $\sigma_{p.e}$ に依存

105MeV

ビームテストで得られた結果を用いての実機カロリメータの分解能評価

実機カロリメータの分解能 $\sigma_{all} \doteq$ 光子統計のばらつき $\sigma_{p.e}$

光子統計のみを考えて実機カロリメータの評価

1辺3cmの六角柱を並べたカロリメータデザインにした場合、ビームテスト時99.78[MeV]と同じ光量
が得られると仮定

$$\sigma_{p.e} = 1/\sqrt{m \times N_{p.e}}$$

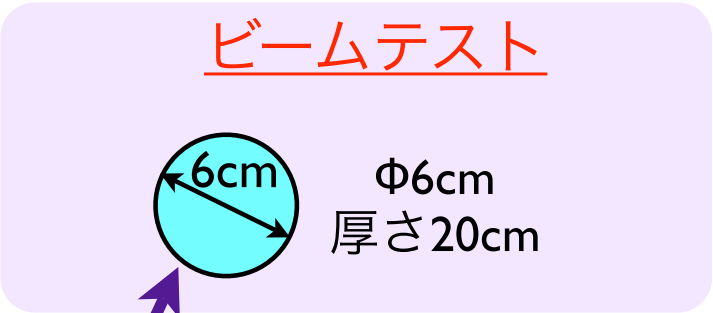
m : MPPCの個数

$N_{p.e} : 311 \pm 72$ [p.e]

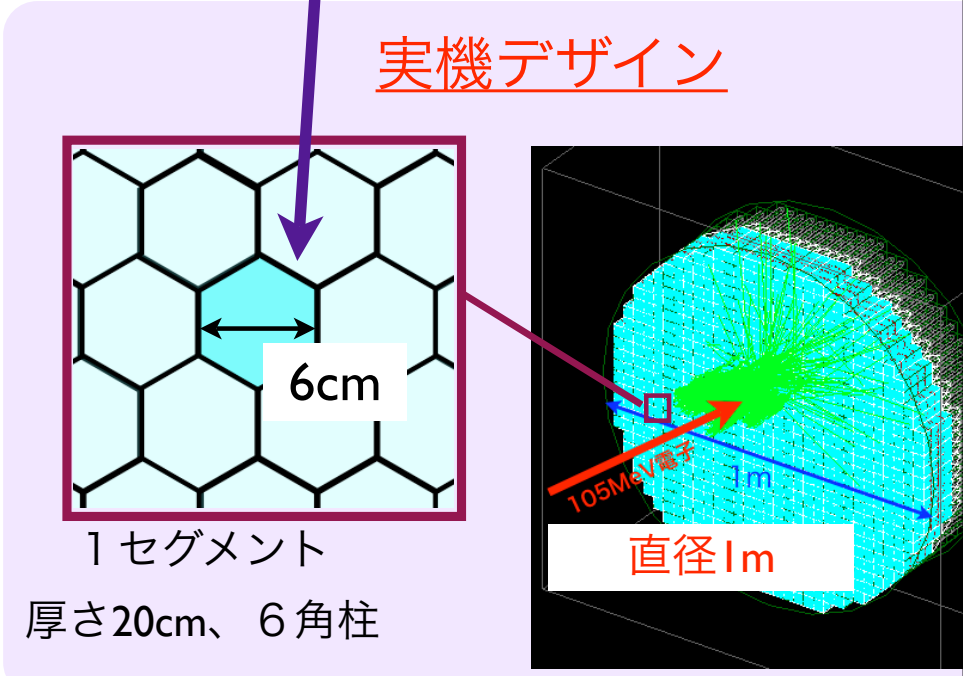
(ビームテスト時の検出光子数)

1 セグメント当たりの MPPC 個数	$\sigma_{p.e}$ (%)
1	5.7 ± 0.7
2	4.0 ± 0.5
3	3.3 ± 0.4

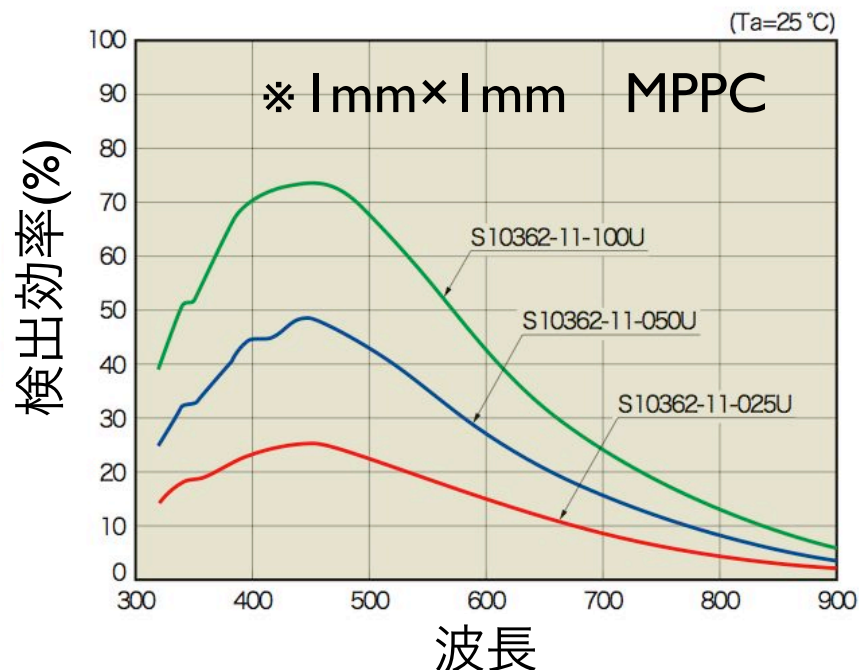
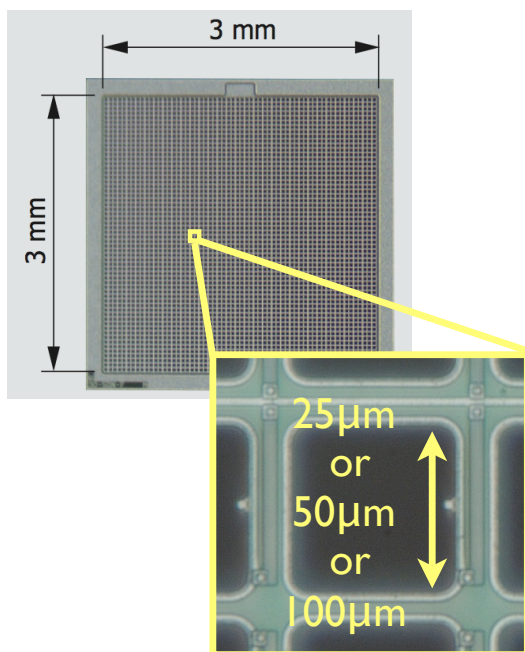
※ビームテストで用いた3mm×3mm、
ピクセルサイズ25μmのMPPCを仮定



同じ光量が得られると近似



ピクセルサイズの異なるMPPCでの見積もり



ピクセルサイズ：25µm(14400ピクセル)

MPPC 1つ当たりの検出光子数：311±71

1セグメント当たりのMPPC個数	$\sigma_{p.e}$ (%)
1	5.7±0.7
2	4.0±0.5
3	3.3±0.4

ピクセルサイズ：50µm(3600ピクセル)

MPPC 1つ当たりの検出光子数：621±142

1セグメント当たりのMPPC個数	$\sigma_{p.e}$ (%)
1	4.0±0.5
2	2.8±0.3
3	2.3±0.3

ピクセルサイズ：100µm(900ピクセル)

MPPC 1つ当たりの検出光子数：807±185

1セグメント当たりのMPPC個数	$\sigma_{p.e}$ (%)
1	3.5±0.4
2	2.5±0.3
3	2.0±0.2

まとめ

- μ -e転換探索実験COMETを計画
- COMETに用いるカロリメータとして光検出器MPPCと無機結晶LYSOの使用を検討している。
- これまで前例のない、MPPCを無機結晶へ直張りした検出器による100MeV帯の電子ビームテストを行い、シミュレーションと比較。検出光子数 311 ± 72 [p.e/ch]を得た。
- 得られた検出光子数を用いてCOMET用実機カロリメータの分解能を見積もり、実機カロリメータにおいて以下の分解能が得られることがわかった。

ピクセルサイズ：25 μ m(14400ピクセル)
MPPC 1つ当たりの検出光子数：311 \pm 71

1セグメント当たりのMPPC個数	$\sigma_{p.e}$ (%)
1	5.7 \pm 0.7
2	4.0 \pm 0.5
3	3.3 \pm 0.4

ピクセルサイズ：50 μ m(3600ピクセル)
MPPC 1つ当たりの検出光子数：621 \pm 142

1セグメント当たりのMPPC個数	$\sigma_{p.e}$ (%)
1	4.0 \pm 0.5
2	2.8 \pm 0.3
3	2.3 \pm 0.3

ピクセルサイズ：100 μ m(900ピクセル)
MPPC 1つ当たりの検出光子数：807 \pm 185

1セグメント当たりのMPPC個数	$\sigma_{p.e}$ (%)
1	3.5 \pm 0.4
2	2.5 \pm 0.3
3	2.0 \pm 0.2

- back up

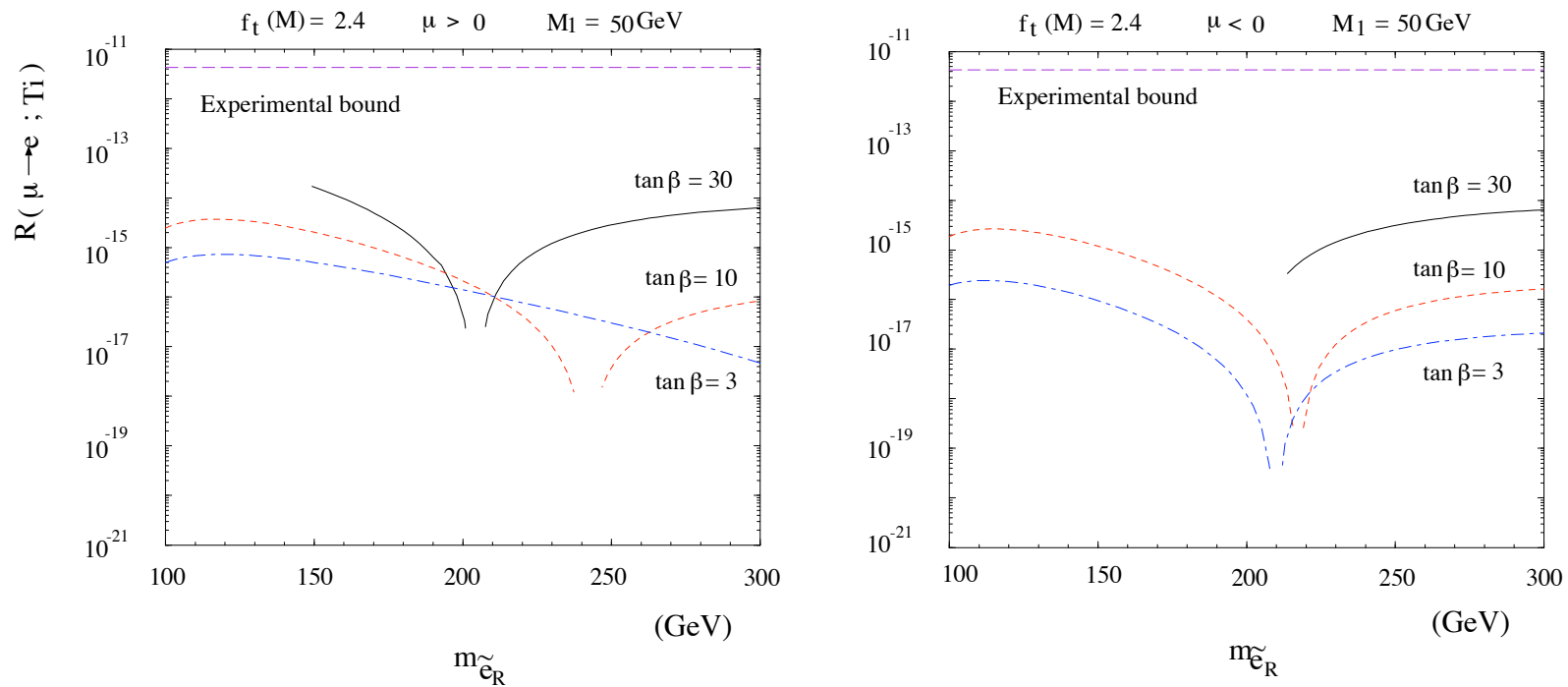
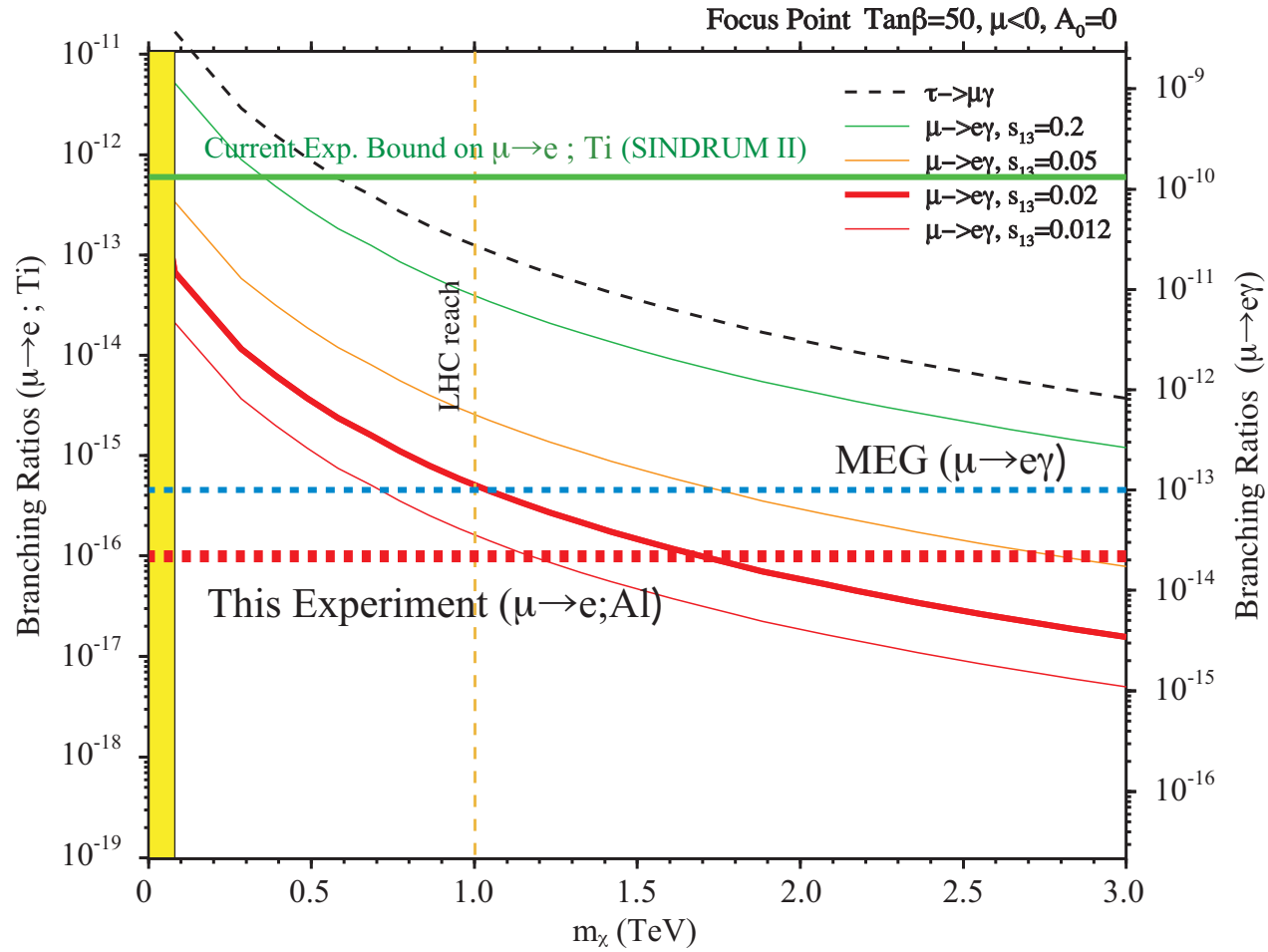


Figure 1.4: Predicted branching ratios for $\mu^- - e^-$ conversion in SUSY-GUT. μ is one of the SUSY parameters, and $\mu > 0$ (left) and $\mu < 0$ (right).

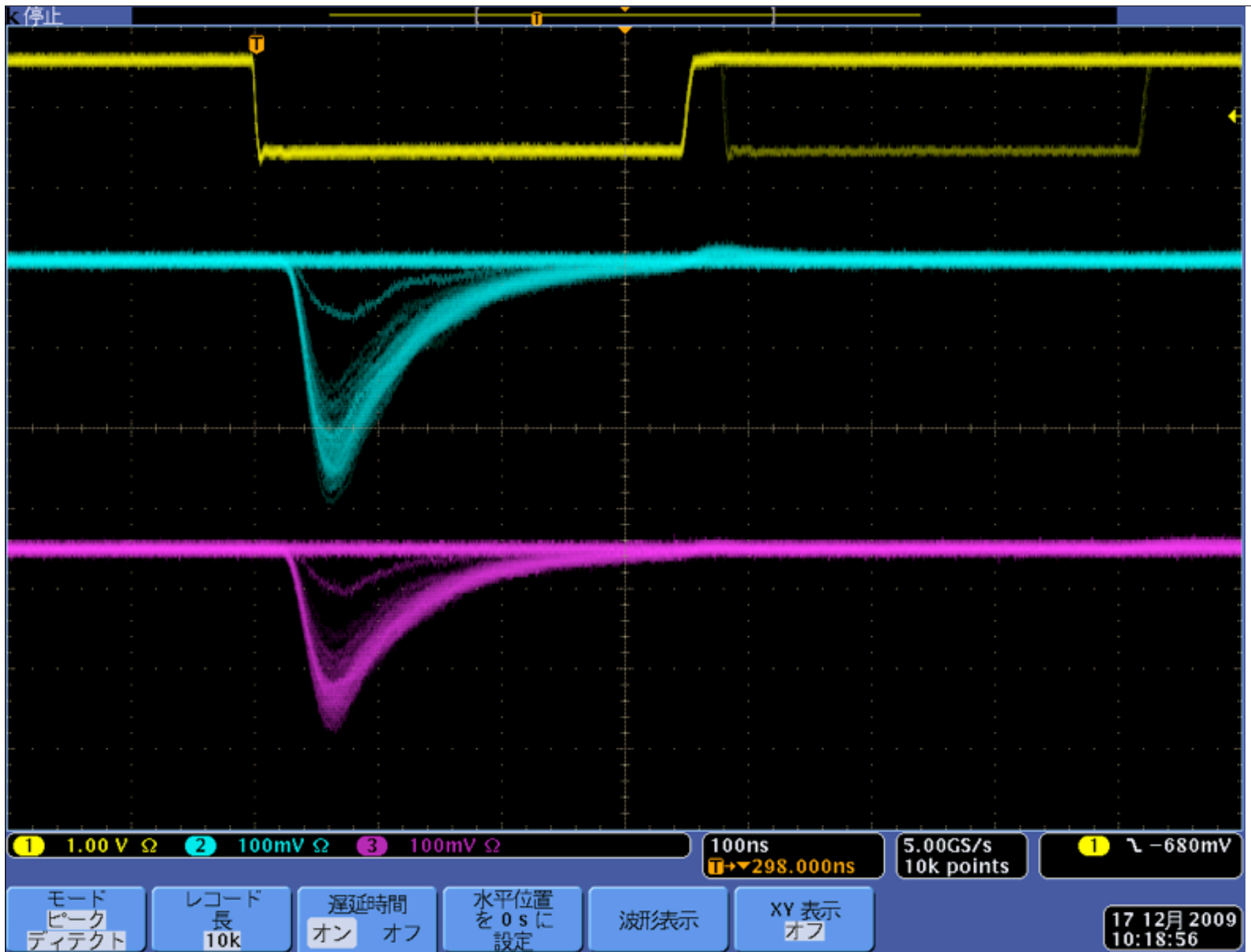
現在の μ -e転換過程の感度



χ^2

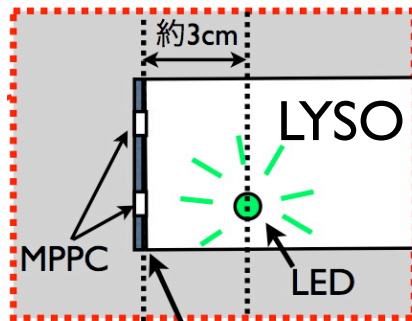
$$\chi^2 = \frac{\Sigma(ADC_{sim} - ADC_{exp})^2}{\delta_{sim}^2 + \delta_{exp}^2}$$

$$reduced\chi^2 = \chi^2 / 1998$$

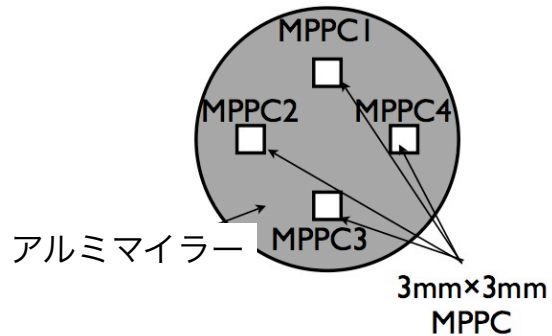


MPPCのバイアス電圧の調整

※ビームテストのデータを取得する前に、MPPCのバイアス電圧の調整をLEDを用いて行った。



受光面の断面



目的

MPPCの分解能が最も小さくなるようなバイアス電圧を求める。

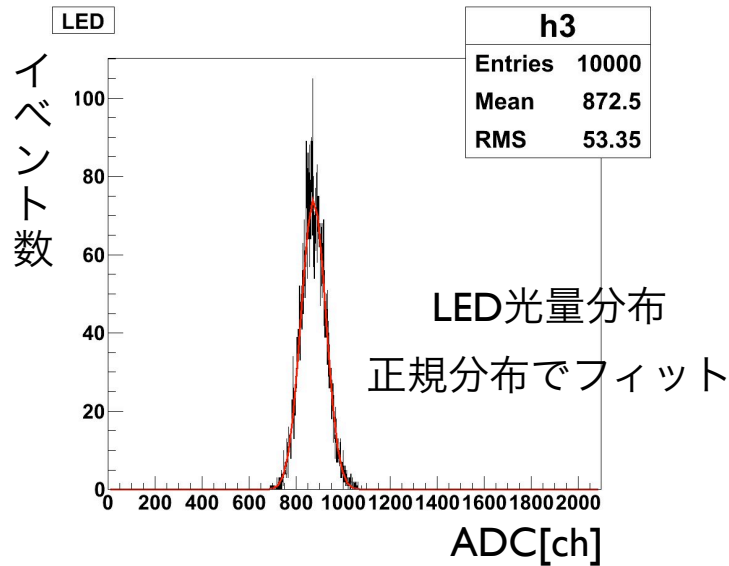
方法

MPPCのバイアス電圧を変化させながらLEDの光量分布を測定し、その分解能の変化を見る。

セットアップ

- ・ビームテスト時と同じセットアップ。
- ・4chのMPPC個々のバイアス電圧を調整。

MPPCバイアス電圧の決定



$$R_{LED} = \frac{\sqrt{\sigma_{LED}^2 - \sigma_{ped}^2}}{\mu_{LED} - \mu_{ped}}$$

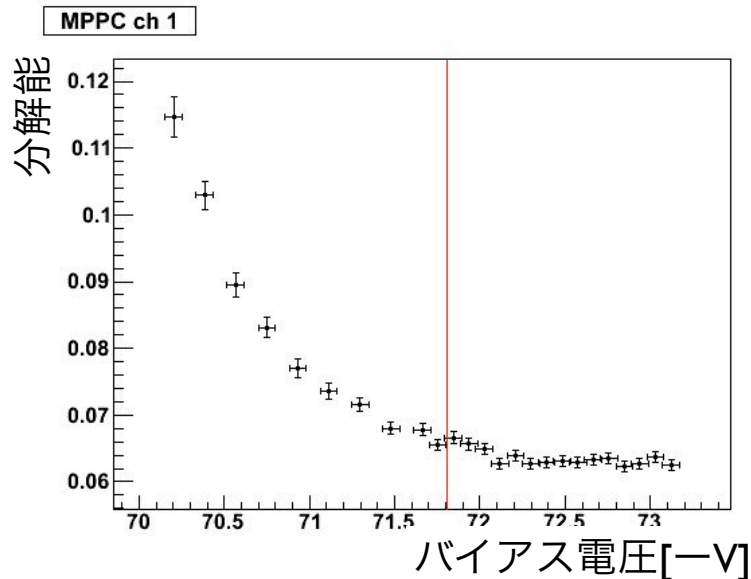
R_{LED} : 光子統計に依存する分解能[%]

σ_{LED} : LED光量分布の分解能[ch]

σ_{ped} : ペDESTALの分解能[ch]

μ_{LED} : LED光量分布のADC平均[ch]

μ_{ped} : ペDESTALのADC平均[ch]



結果

バイアス電圧は一定値を超えると分解能は安定するようになる。一般的にバイアス電圧が上昇するとクロストーク、アフターパルスといったノイズ成分が増加するので左図の赤線のラインをバイアス電圧として用いた。

光検出器MPPCと無機結晶LYSOを組み合わせたカロリメータの開発

→無機シンチレータとしてLYSOの使用を検討



	LYSO	PbWO ₄	NaI(Tl)
密度(g/cm ³)	7.40	8.3	3.67
相対光量	83	0.083	100
蛍光減衰時間(ns)	40	30	230
潮解性	無し	無し	有り

カロリメータへの要求性能

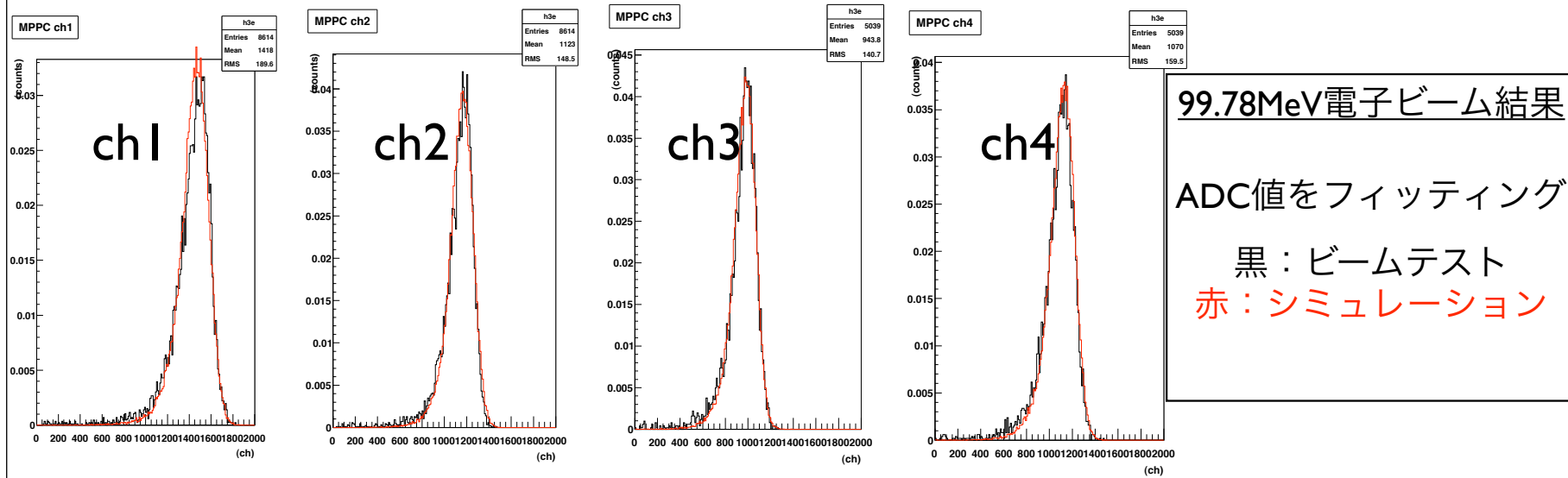
- エネルギー分解能 <5%(@100MeV電子)
- 応答時間<100nsec
- 位置分解能 約1cm

LYSOの性能

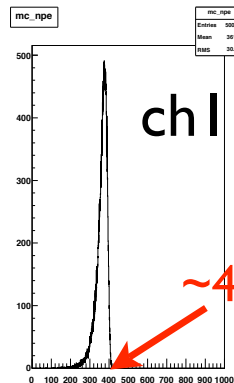
- 高い光量 (NaI(Tl)の83%)
- 早い応答時間~40nsec
- 高密度

ロシアの結晶開発グループよりΦ60mm×200mmの結晶の提供を受けた。

シミュレーションとの比較による光量算出



フィッティング結果より検出光子数を算出



MPPCの貼付け時のセットアップ状況により検出光子数にばらつきが見られた。

~400p.e 、 99.78MeVの電子ビームに測定、5回分のrunの平均値を得た。

99.78MeV電子ビームにおける平均検出光子数 $N_{p.e} = 311 \pm 72 [p.e./MPPCch]$

→シミュレーションに適用

実機における分解能の見積もり

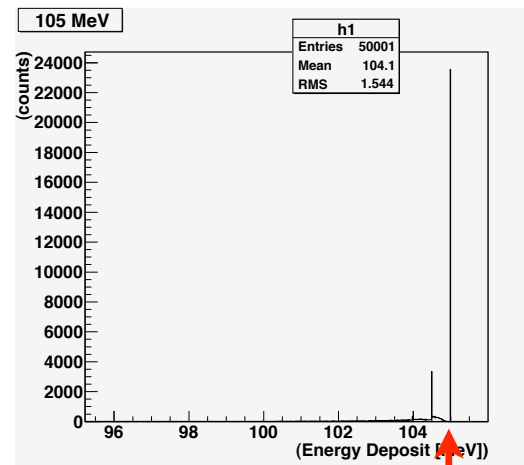
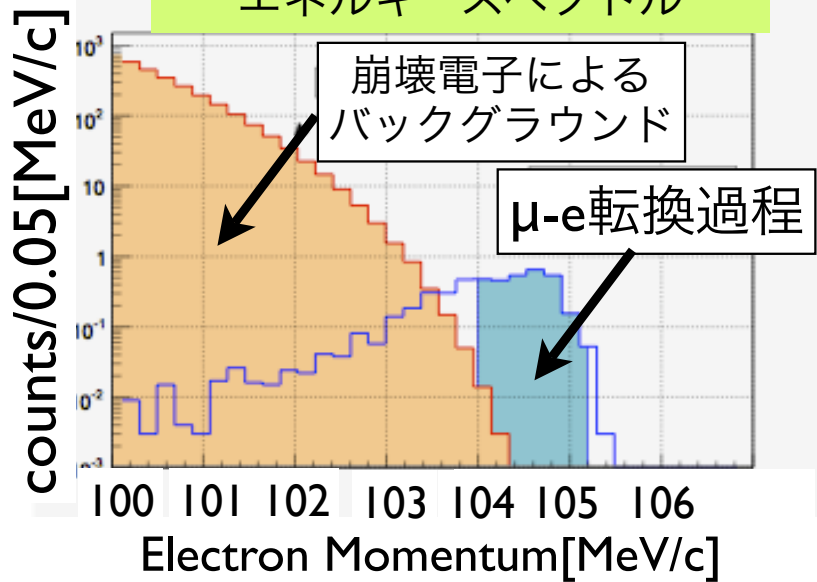
ピクセルサイズ (ピクセル数)	検出効率 (%)	MPPC1個あたり 検出光子数	1セグメント当たりの MPPC 個数	$\sigma_{p.e}$ (%)
25 μ m (14400)	25%	311 \pm 71	1	5.7 \pm 0.7
			2	4.0 \pm 0.5
			3	3.3 \pm 0.4
			4	2.8 \pm 0.3
			5	2.5 \pm 0.3
			6	2.3 \pm 0.3
50 μ m (3600)	50%	621 \pm 142	1	4.0 \pm 0.5
			2	2.8 \pm 0.3
			3	2.3 \pm 0.3
			4	2.0 \pm 0.2
			5	1.8 \pm 0.2
			6	1.6 \pm 0.2
100 μ m (900)	65%	807 \pm 185	1	3.5 \pm 0.4
			2	2.5 \pm 0.3
			3	2.0 \pm 0.2
			4	1.7 \pm 0.2
			5	1.6 \pm 0.2
			6	1.4 \pm 0.2

カロリメータへの要求性能
 - エネルギー分解能 <5%(@100MeV電子)

$$\sigma_{all} = \sqrt{\sigma_{ed}^2 + \sigma_{p.e}^2 + \sigma_{noise}^2}$$

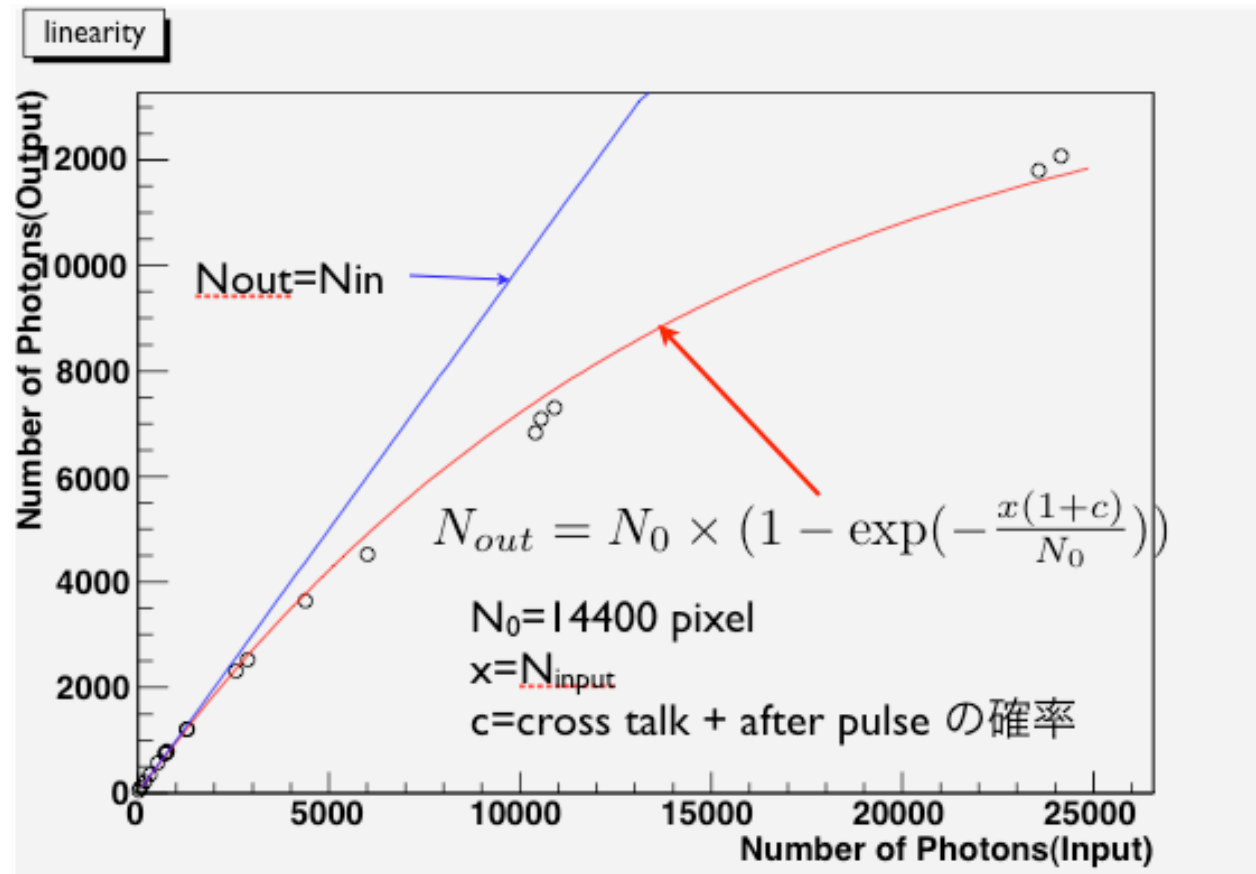
- σ_{all} : 実機カロリメータのエネルギー分解能
- σ_{ed} : 結晶内でのエネルギー損失のばらつき
- $\sigma_{p.e}$: 光子統計によるばらつき
- σ_{noise} : 電気ノイズによる信号のばらつき

検出器で検出される電子の
 エネルギースペクトル

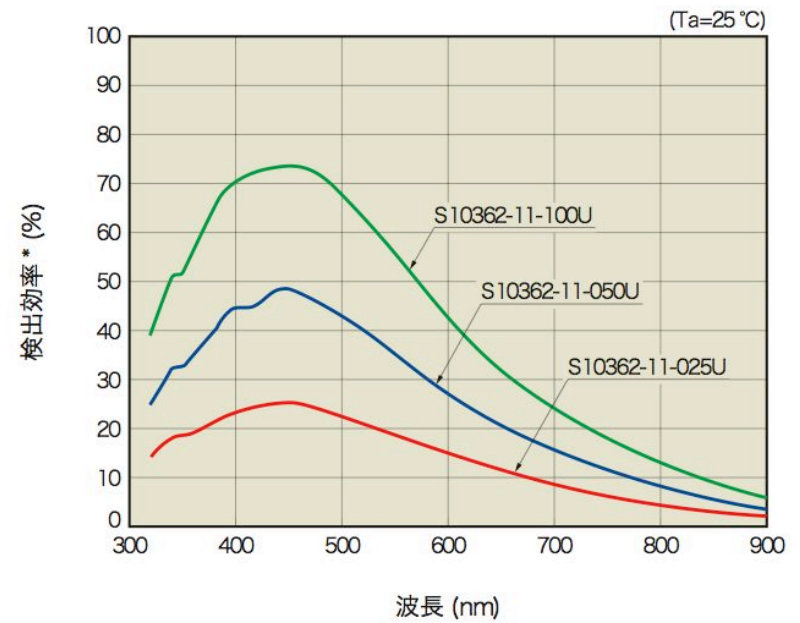
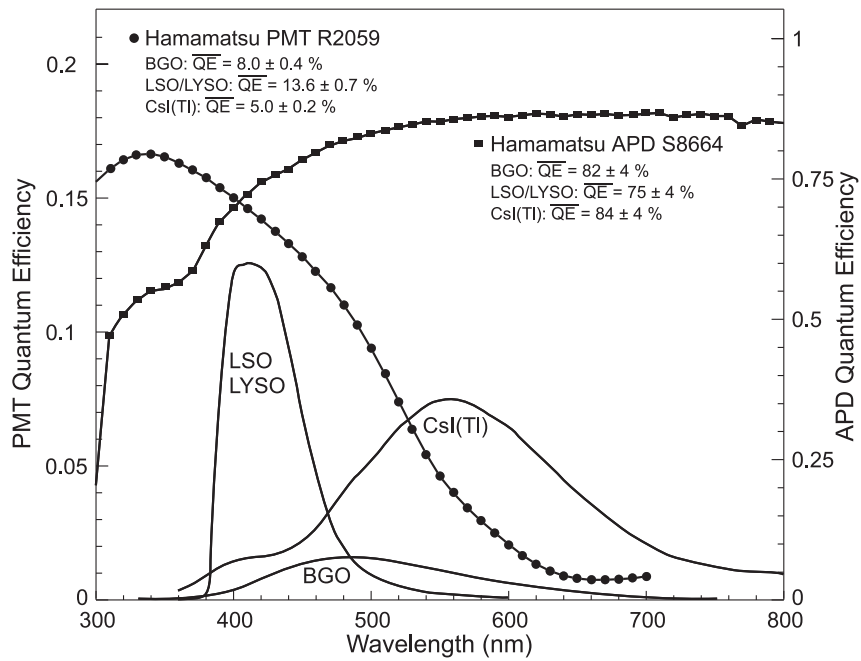


エネルギー損失[MeV]
 105MeV

MPPC リニアリティ



MPPCとLYSOの波長



LYSOとその他の無機結晶

物理量	密度	屈折率	融点	光量	最大 蛍光波長	蛍光減衰 時間	輻射長	モリエール 半径	dE /dx	d(LY) /dT	潮解 性	減衰 距離
単位	g/cm ³		°C	a.u.	nm	ns	cm	cm	MeV/cm	%/°C		cm
LYSO	7.40	1.82	2050	83	420	40	1.14	2.07	9.6	-0.2	無	20.9
NaI(Tl)	3.67	1.85	651	100	410	230	2.59	4.13	4.8	-0.2	有	42.9
BGO	7.13	2.15	1050	21	480	300	1.12	2.23	9.0	-0.9	無	22.8
BaF ₂	4.89	1.50	1280	36 3.4	300 220	630 0.9	2.03	3.1	6.6	-1.3 ~0	無	30.7
CsI(Tl)	4.51	1.79	621	165	560	1300	1.86	3.57	5.6	0.3	小	39.3
CsI(pure)	4.51	1.95	621	5.6 2.3	420 310	3.6 1.1	1.86	3.57	5.6	-1.3	小	39.3
PbWO ₄	8.3	2.20	1123	0.083 0.29	425 420	30 10	0.89	2.00	10.2	-2.7	無	20.7
GSO(Ce)	6.71	1.85	1950	3 30	430 430	600 56	1.38	2.23	8.9	-0.1	無	22.2

表 B.1: 一般的な無機結晶シンチレータの特性表。[27]