

MEG-II実験に向けた 背景事象ガンマ線同定用SiPM読み出し シンチレーション検出器の研究開発

東京大学 素粒子物理国際研究センター

藤井 祐樹, 他MEGコラボレーション

日本物理学会第69回年次大会

28th March 2014 @ 東海大学湘南キャンパス

1. RDCとは
2. ビーム試験結果
3. 実機作製に向けた研究
4. まとめ

MEG II Goal sensitivity $\sim 5 \times 10^{-14}$

金子 28aTH-7

LXe detector Upgrade
Inner face PMT $\rightarrow$ UV-sensitive SiPM
Better energy & position resolutions

$\sim 7 \times 10^7$ μ /s stopped on target
already available @ PSI

This talk

Radiative Decay Counter (RDC)
Tagging gamma BG from RMD
 $\rightarrow$ BG suppression

澤田 30pSD-2

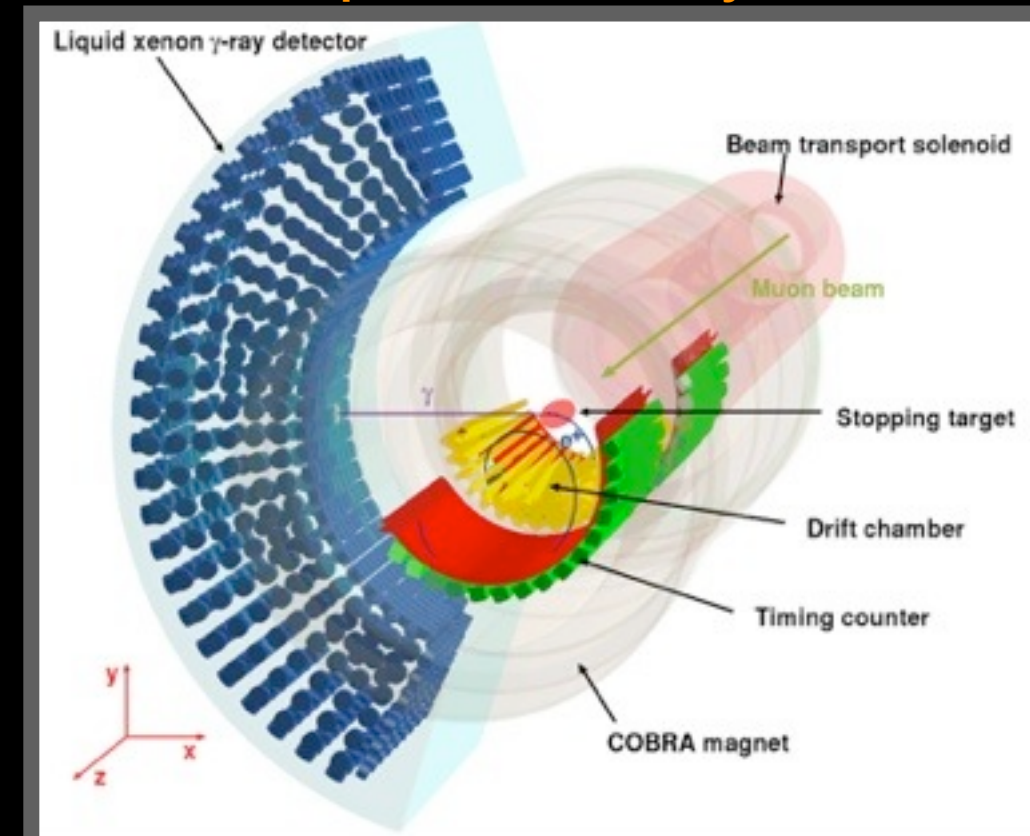
MEG

- Finished data taking in August 2013
- Final Expected Sensitivity $\sim 5 \times 10^{-13}$

Pixelated Timing Counter
Better Timing Resolution
Less pileup
Flexible design

西村 28aTH-5

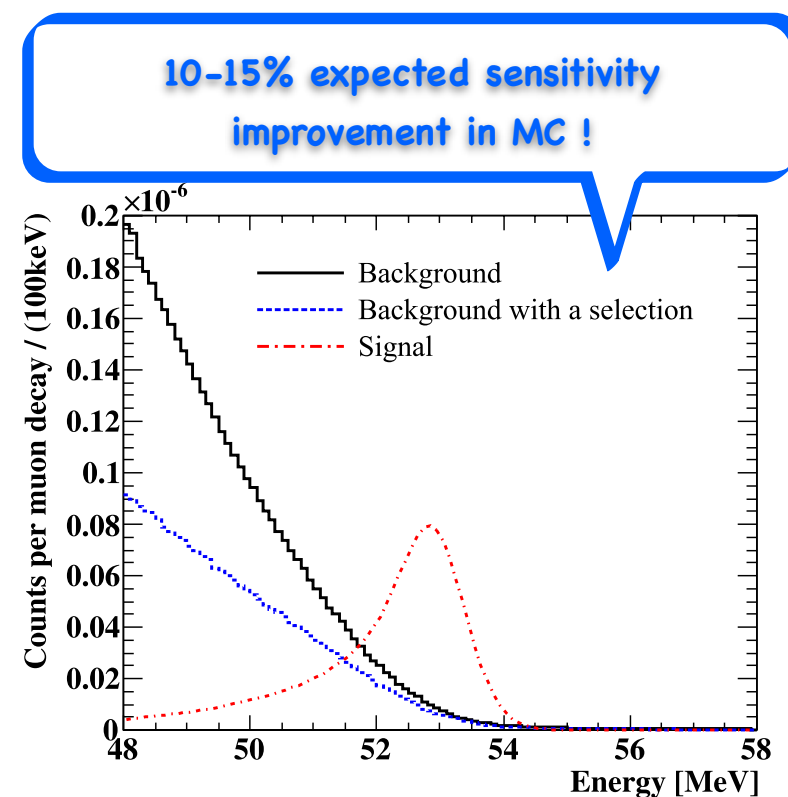
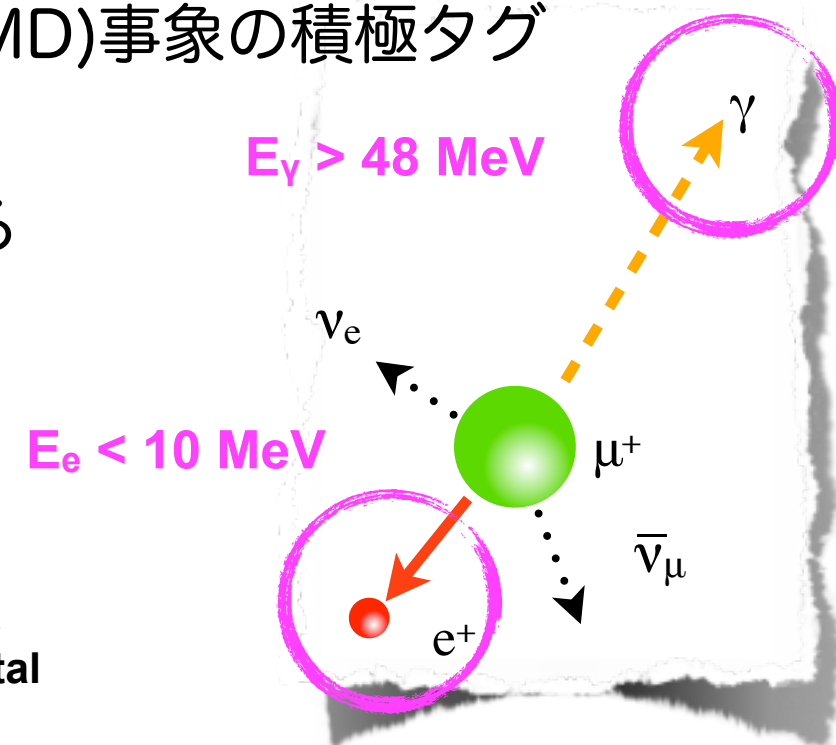
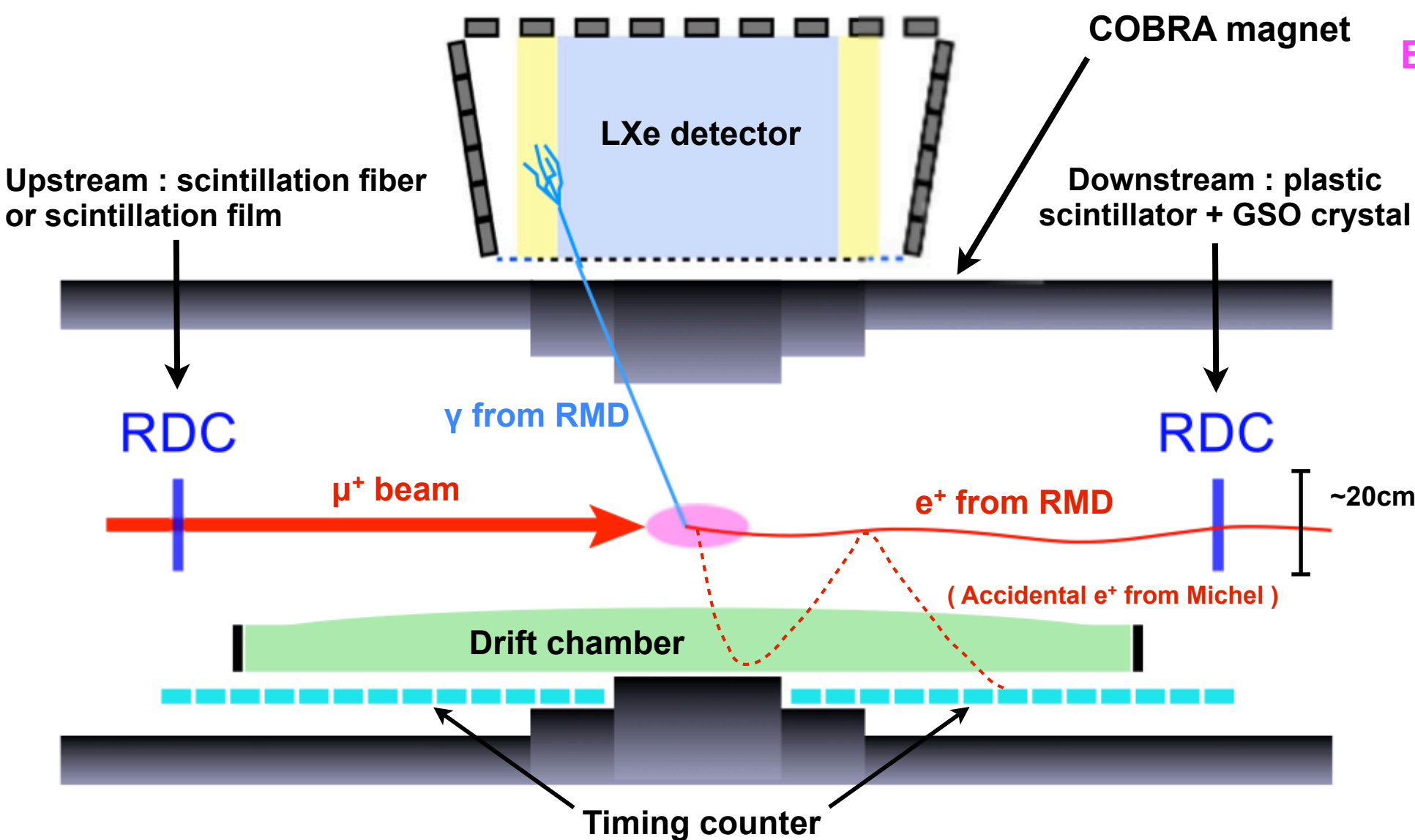
Stereo Wire Drift Chamber
Higher efficiency
Less MS, BG γ generation
High granularity

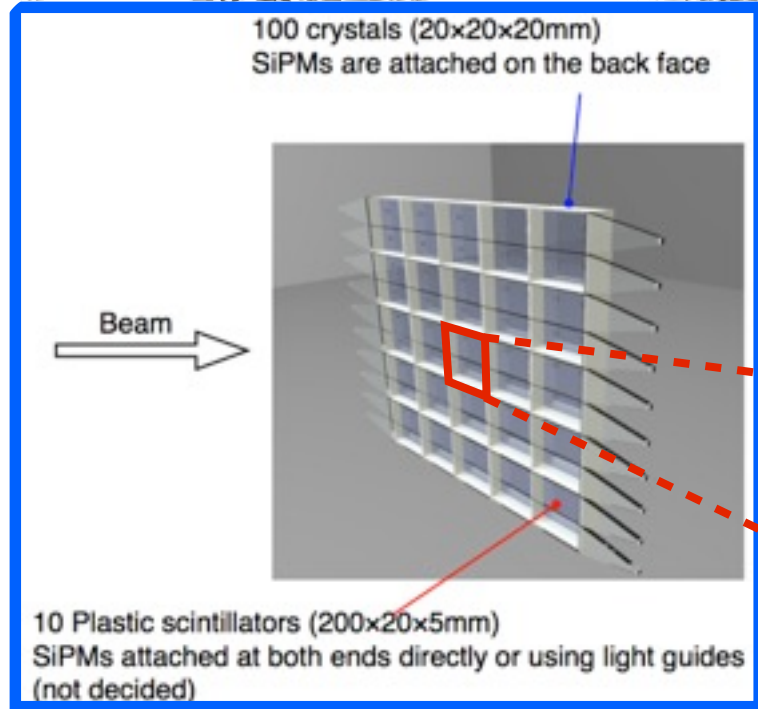


Upgrade proposal was already approved by
Paul Scherrer Institut (arXiv:1301.7225)

Radiative Decay Counter (RDC) の目的

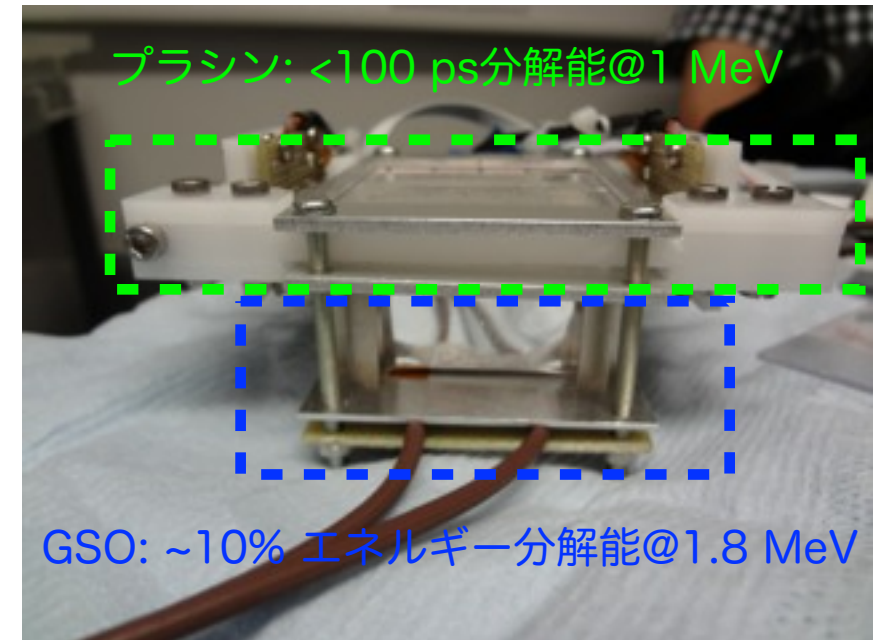
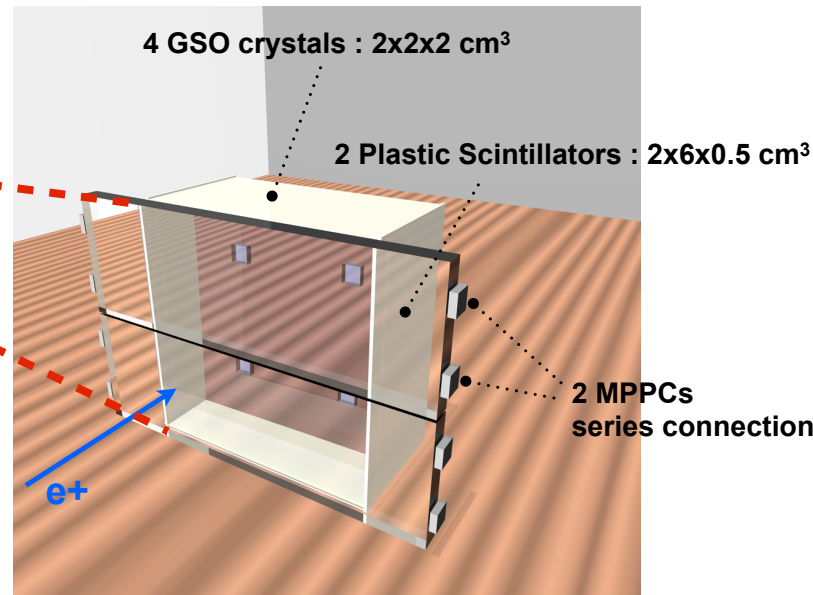
- ガンマ線の主な背景事象源であるRadiative Muon Decay (RMD)事象の積極タグ
- ビーム軸状に低運動量陽電子同定用の検出器を設置
- シミュレーションからは40%の合計背景事象低減が期待される





RDC DS full size (base design)

Prototype
size : 1/25
efficiency for RMD tagging : 2/3



- MEG検出器内部にプロトタイプを設置し、データ取得
- 低ビーム強度で場所のスキャン ($z = 60 \sim 142 \text{ cm}$, 1×10^7)
 - MEG同様のビーム強度 ($z = 142 \text{ cm}$, 3×10^7)
 - MEG IIで想定しているビーム強度 ($z = 142 \text{ cm}$, $\sim 8 \times 10^7$)

Insertion system

**LXe
detector**

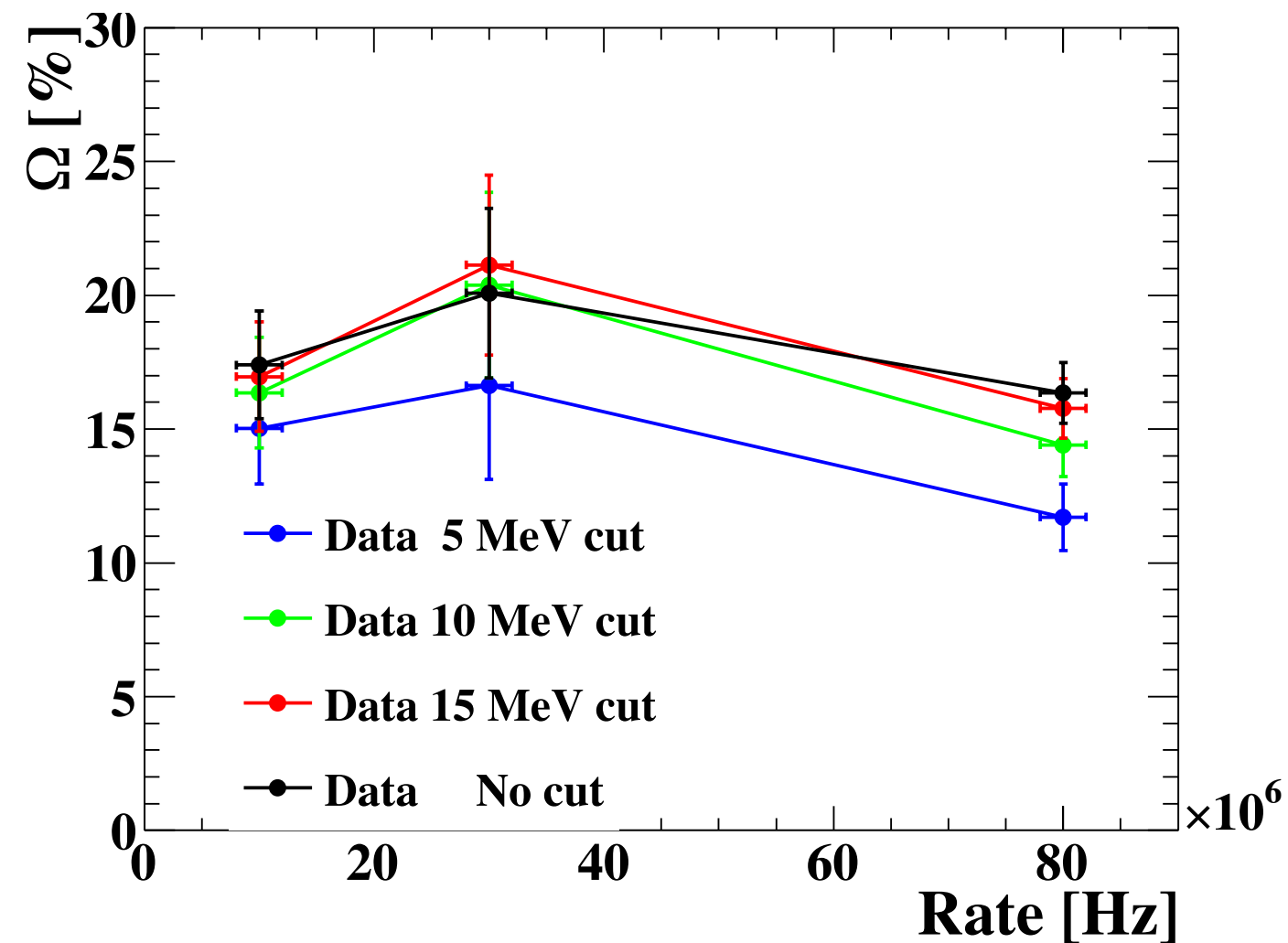
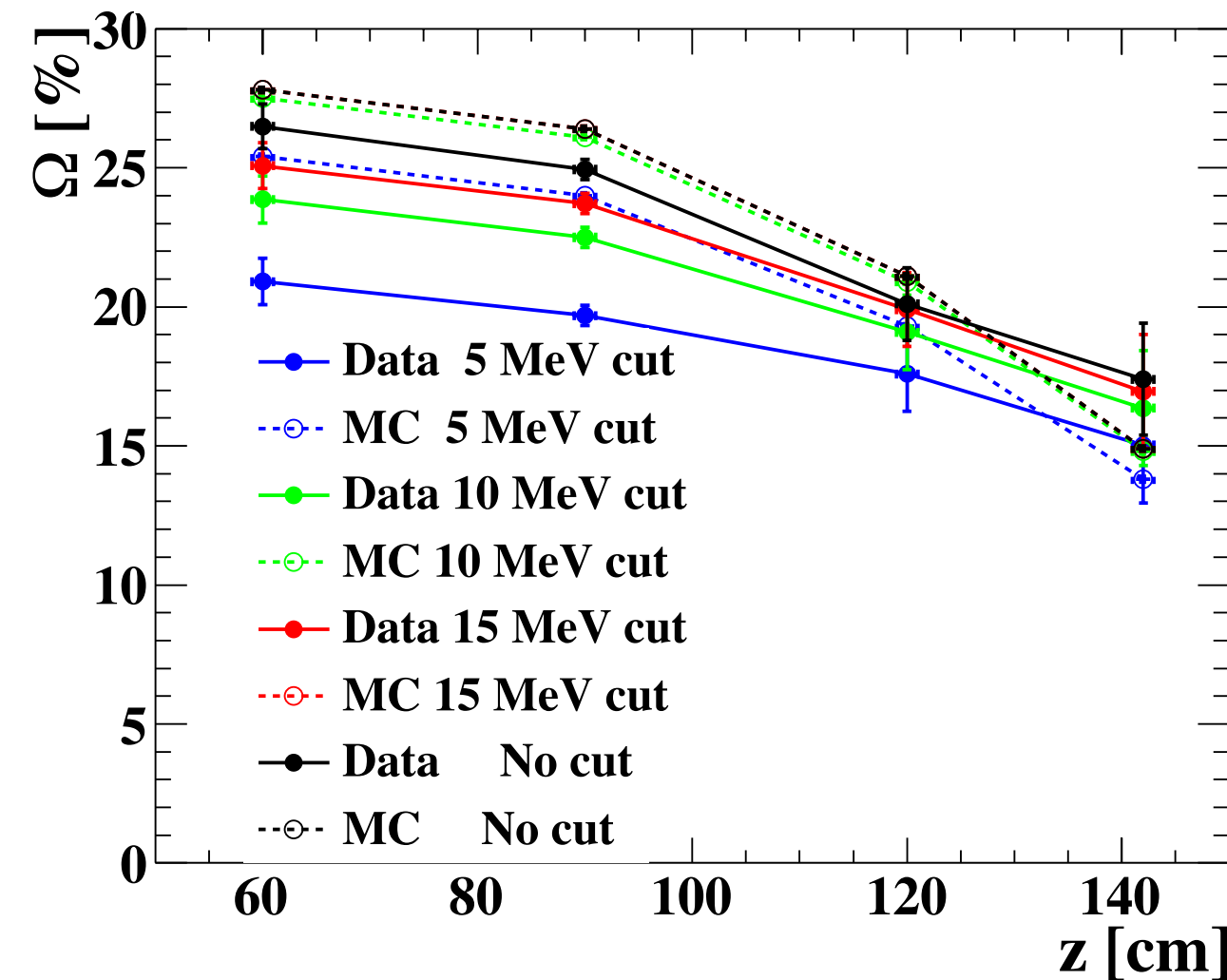
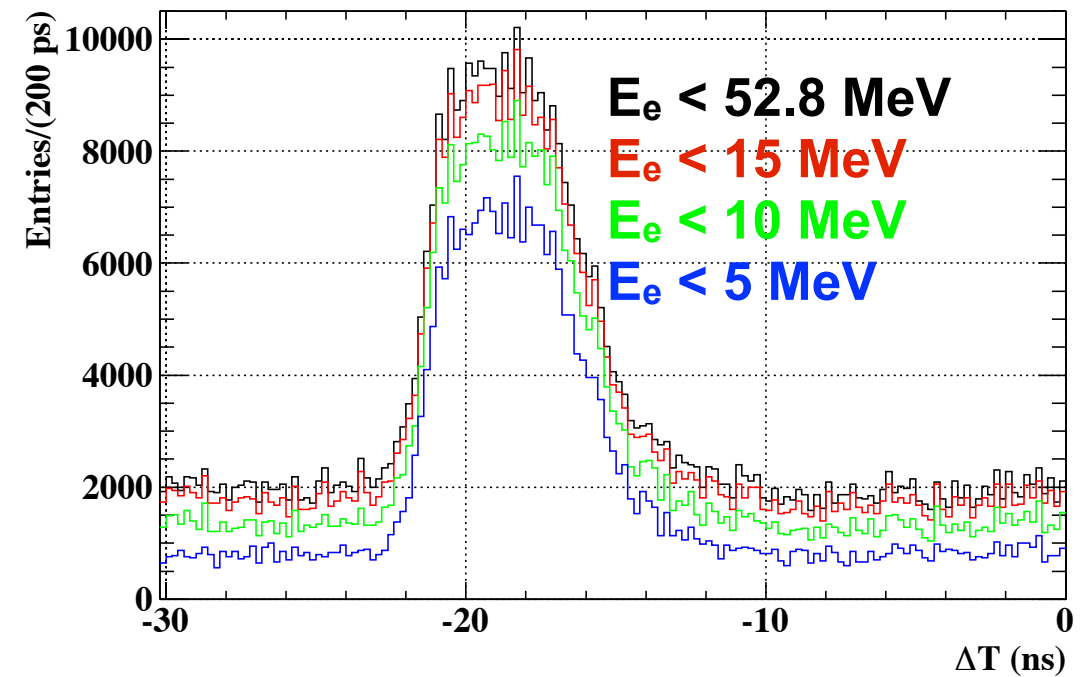
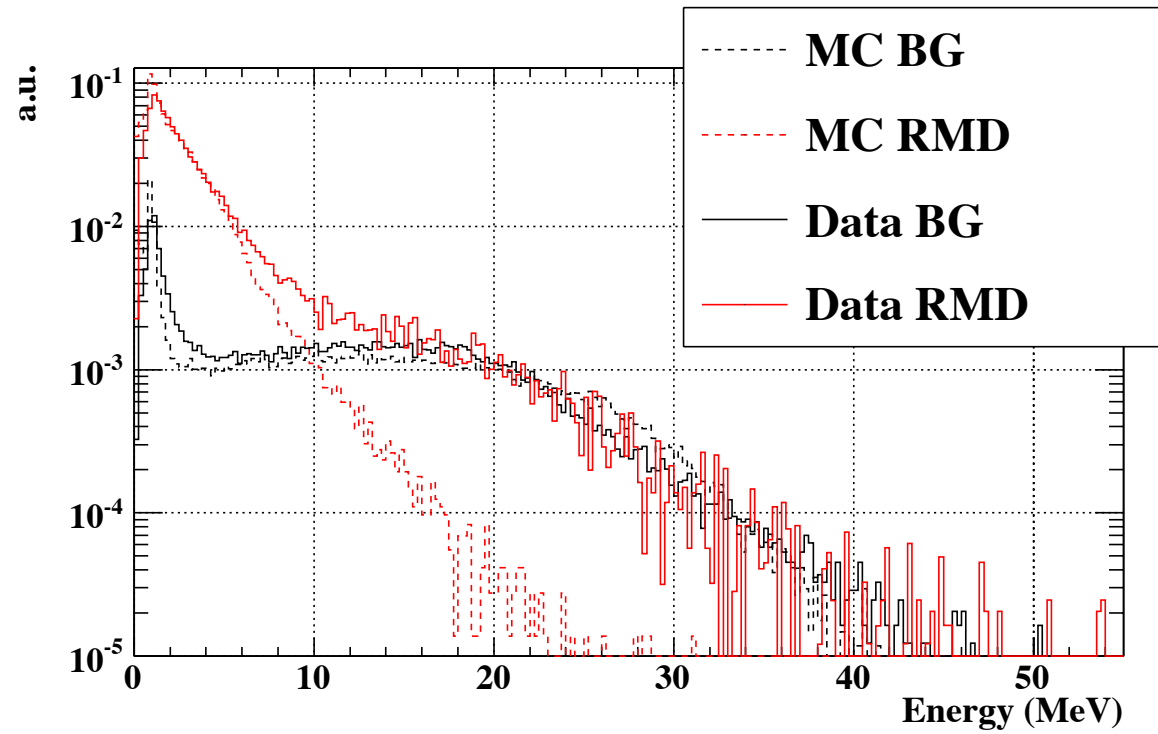
Muon target

z (target=0)

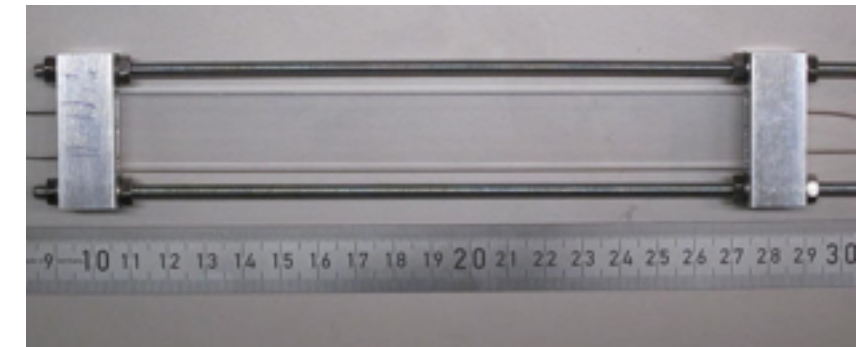
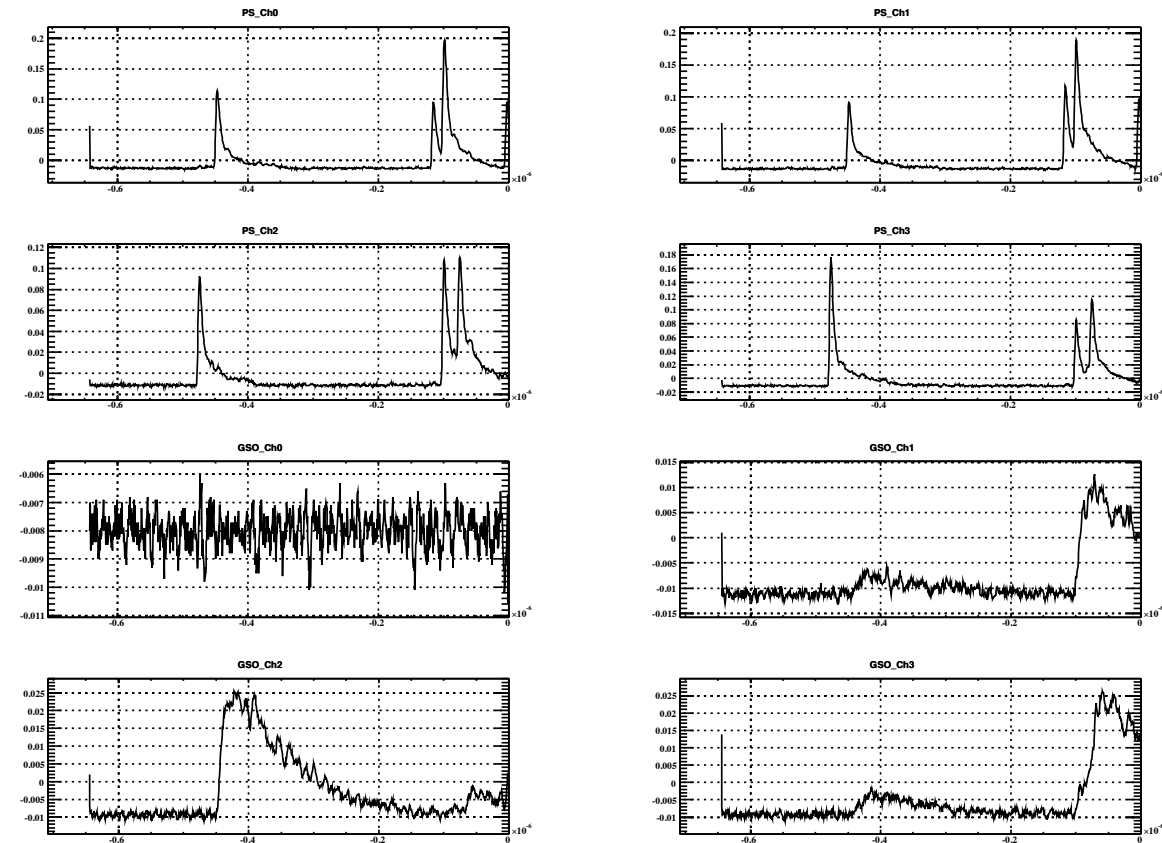
μ^+ beam

RDC

Readout & HV
× 8 channels



- 期待通りにRMD事象を検出する事ができた
- ただし, MEG II相当のビーム強度では半分近くの事象でパイルアップが見られた
 - 波形が重なると陽電子エネルギーが正しく再構成できなくなる
 - ⇒ 解析の工夫や検出器改善により出来るだけ減らす
- 実機作成に向けて
 - 実機サイズのプラシンを試験
 - 約3倍の長さで性能に問題無いか
 - GSO以外の結晶(LYSO)を試験
 - 上記パイルアップ対策に有効な可能性
 - 上流用のRDC試験
 - シンチレーションファイバ

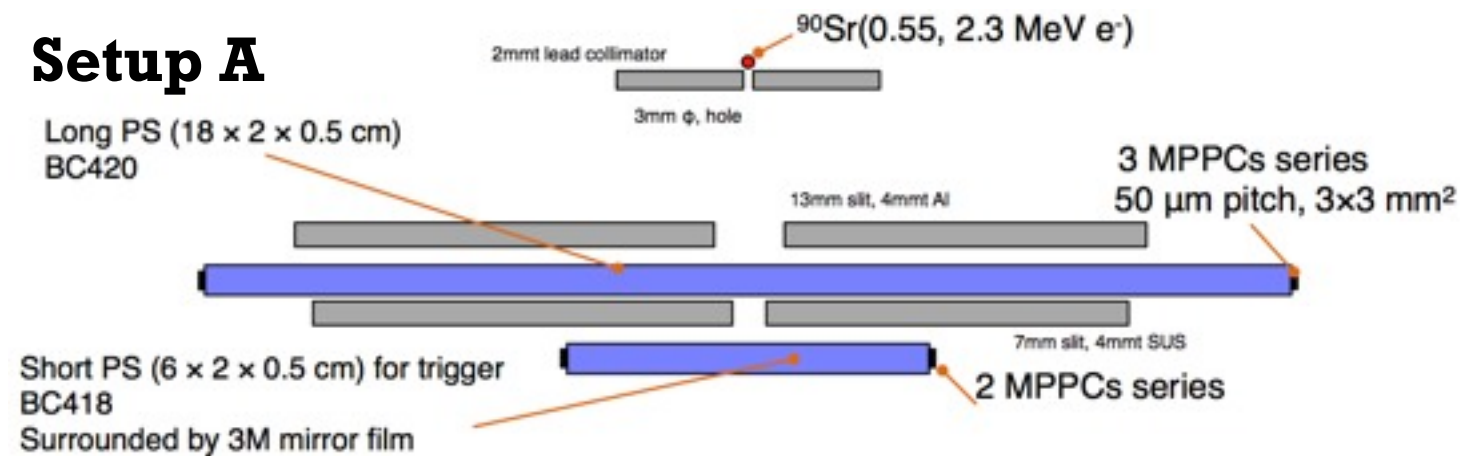


	NaI(Tl)	GSO	LYSO
Density, g/cm ³	3.67	6.71	71
Att. length, cm	2.6	1.38	1.12
Decay const., ns	230	30-60	41
Max emission, nm	415	430	420
Relative LY	100	20	70-80

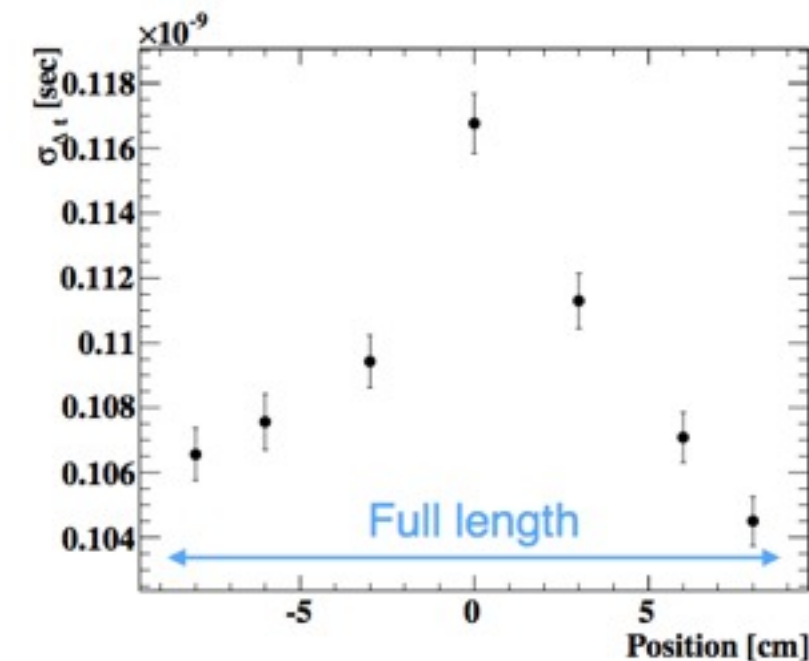
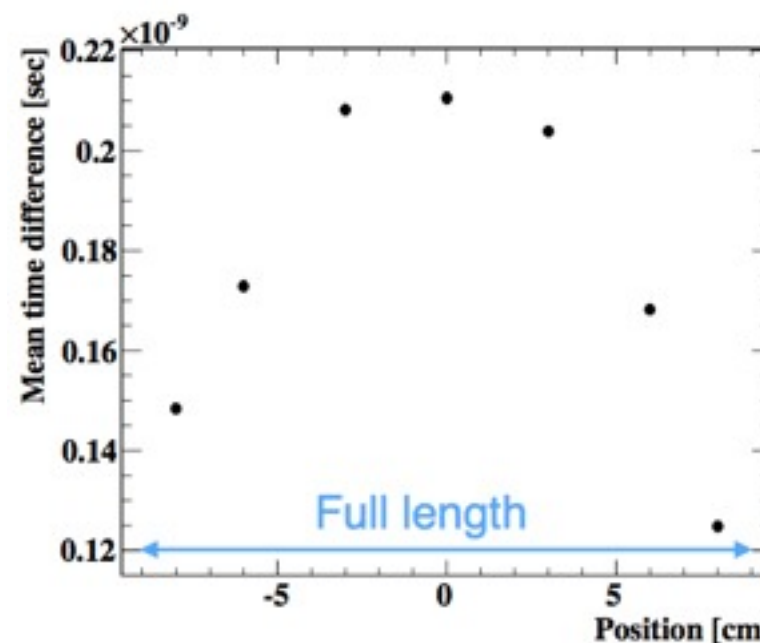
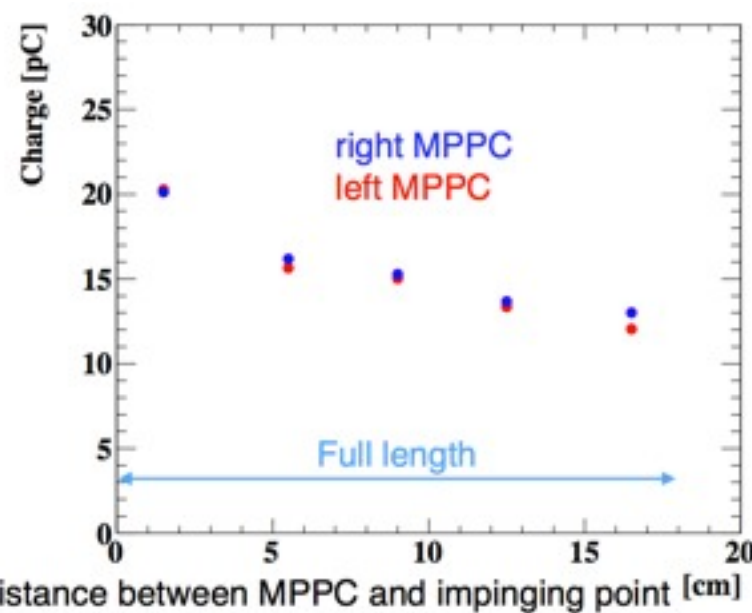
試験 1

- 場所依存性の評価
 - 光量の減衰はどれくらいか
 - 測定性能の場所依存性はどれくらいか

Setup A



場所依存性測定用セットアップ

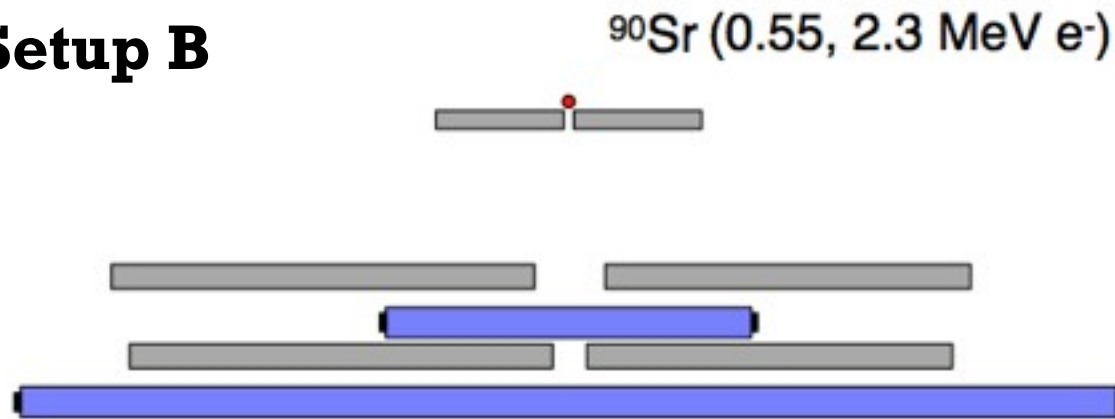


光量減衰量は許容範囲

端と中心で<100 ps時間中心のズレ

⇒ RDCの性能としては問題無し, 位置再構成をすれば補正可能

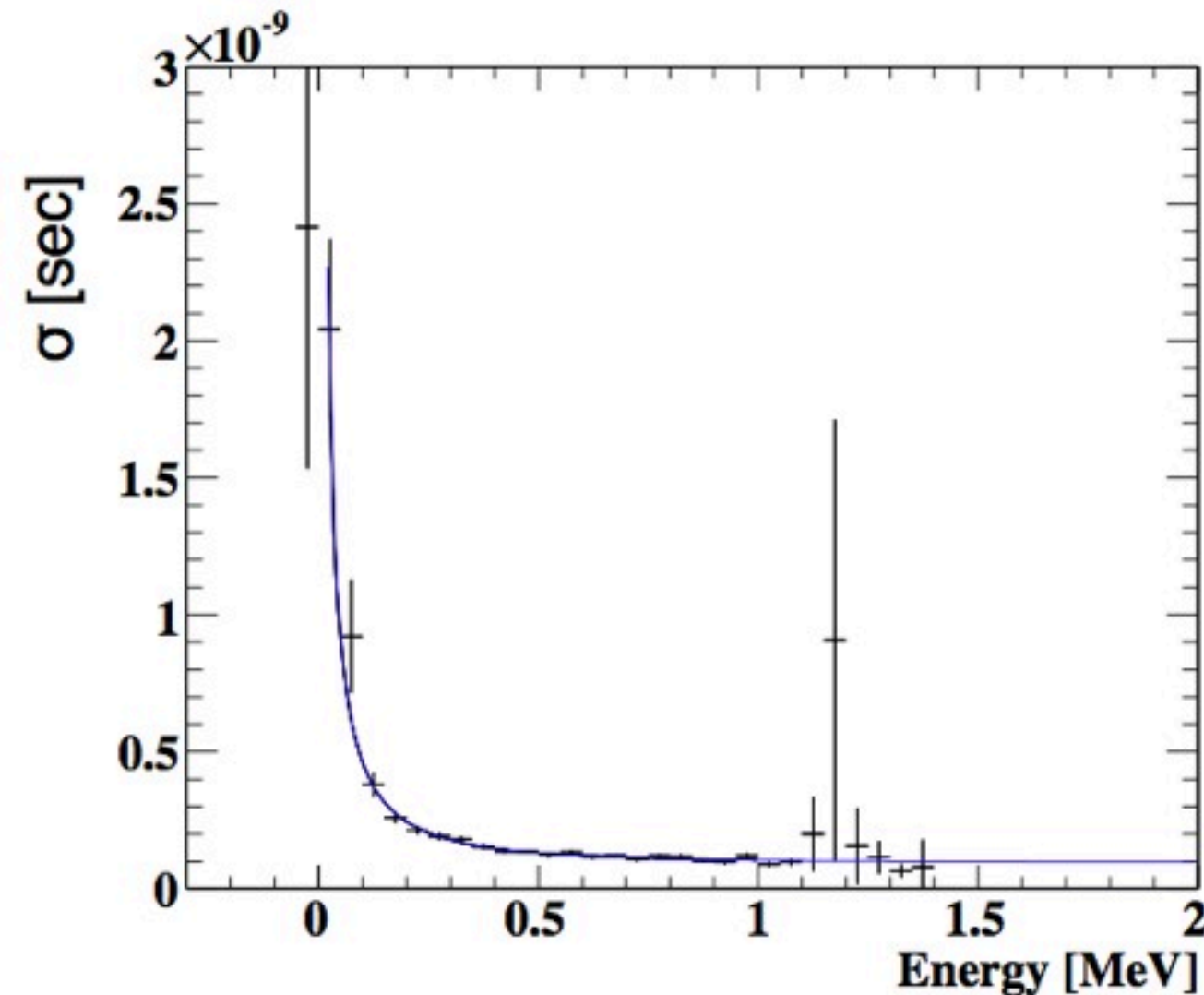
Setup B



低エネルギー測定用セットアップ

試験 2

- エネルギー依存性の評価
- 閾値をどこまで下げられるか
- どれだけの性能が出せるか

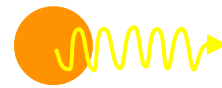


低エネルギー陽電子に対し, 十分な時間分解能が得られた

- 450 ps @ 100 keV, 230 ps @ 200 keV
- Reference counterの分解能約80 psを含む

- GSOより安価な場合も
- 光量がGSOより多く, 減衰時間も短い
- Lu自己崩壊のガンマ線は問題になるか
 - トリガーはプラシンでかけるので影響は小さい
- 光量のnon-uniformityが報告されている
 - 2cm³のサイズでは問題無い?

¹³⁷Cs/⁶⁰Co



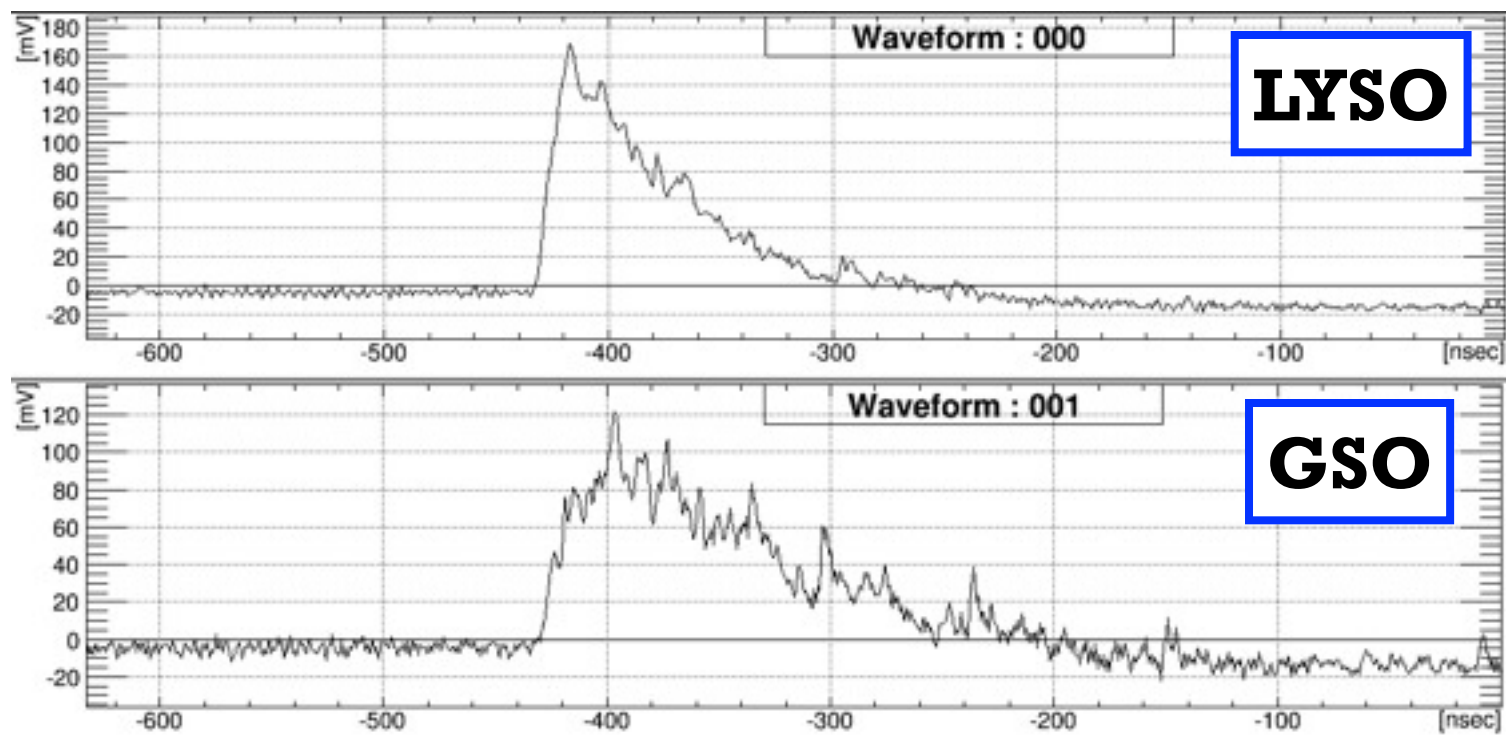
**LYSO/
GSO**

**HV/signal divider w/
or w/o preamp**

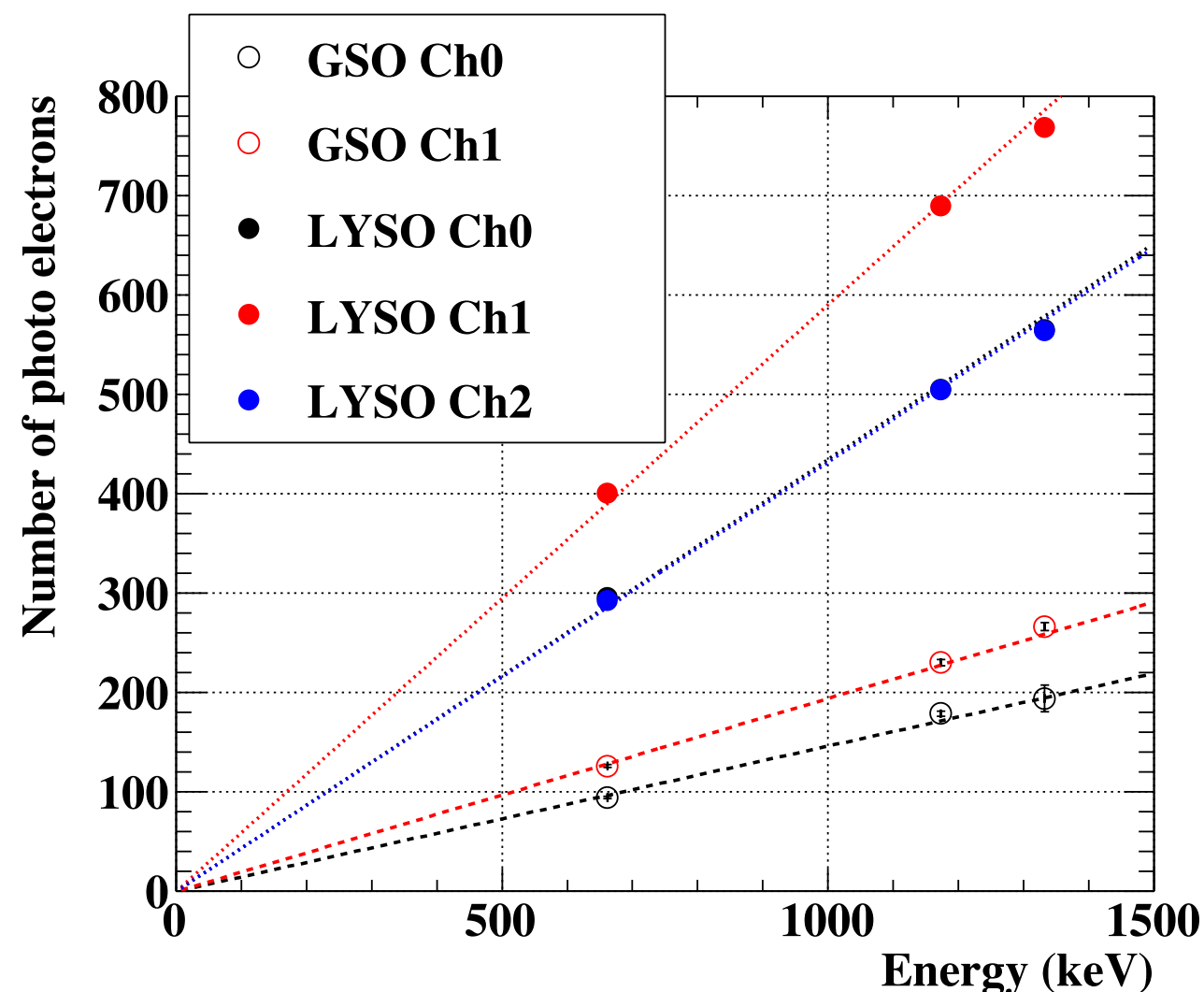
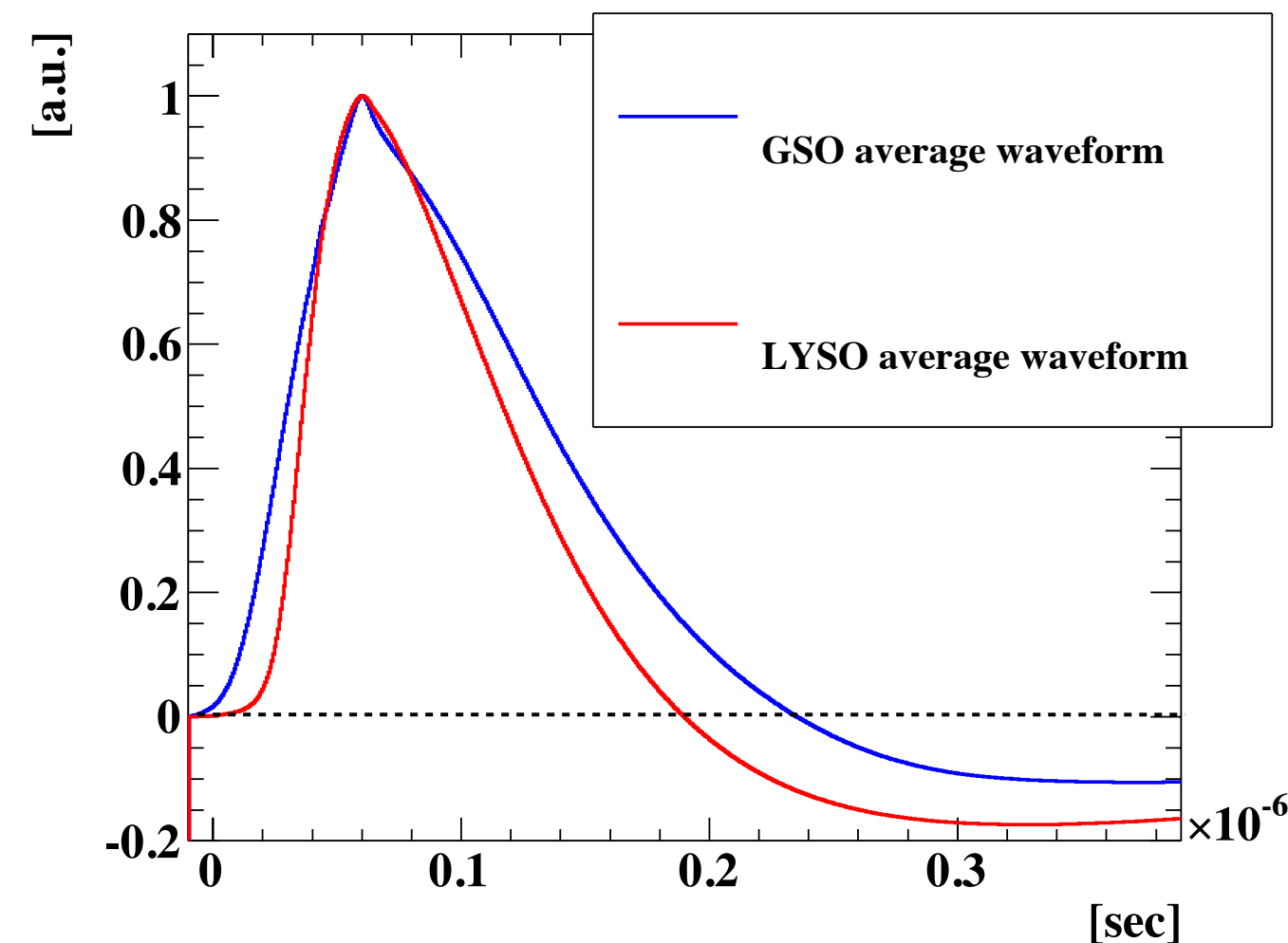
**Signal output to the
waveform digitizer
(DRS4)**

Setup for the crystal comparison

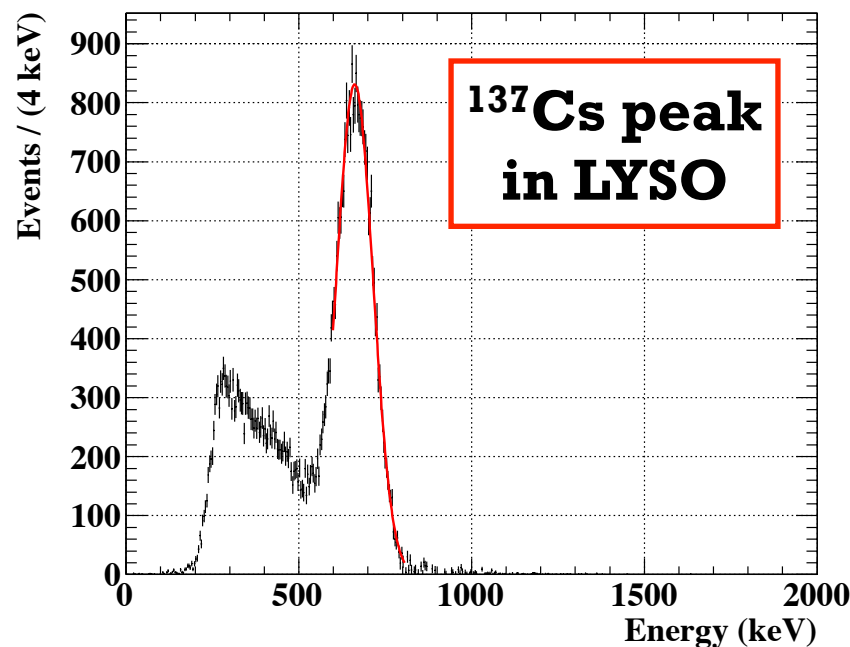
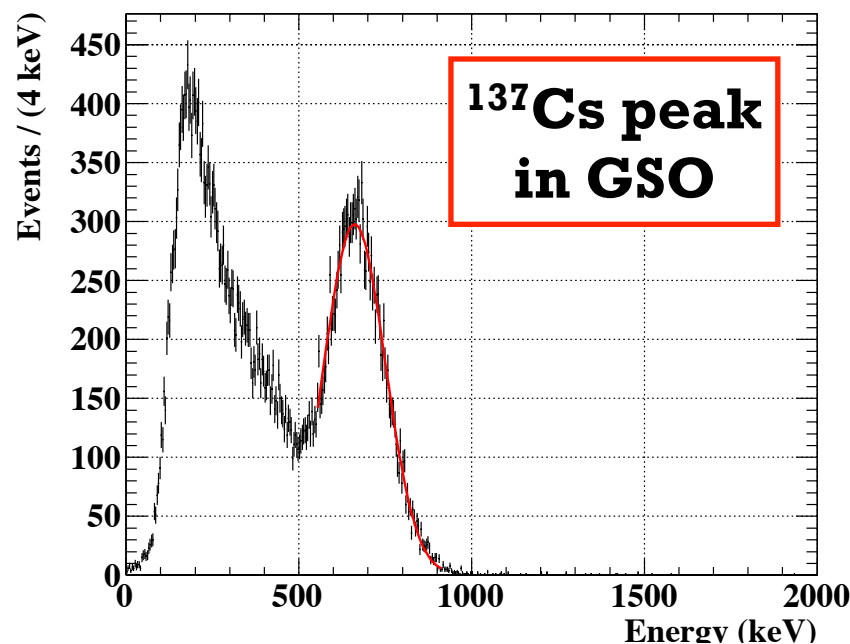
HV (66-67 V)



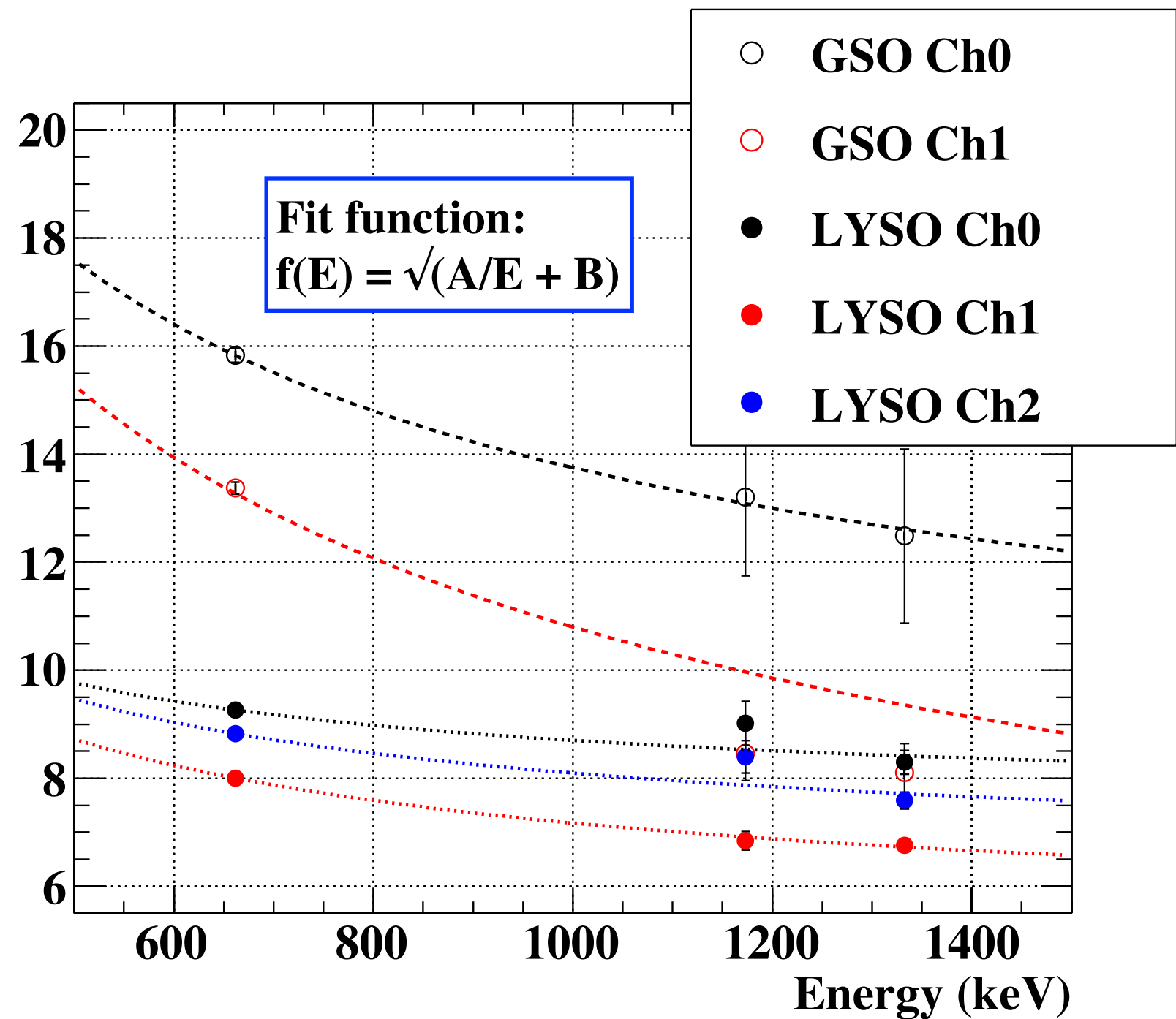
約1MeVの γ 線に対する波形例
LYSOの方が光量が多いために波形が滑らか
⇒波形フィットによるパイルアップ分離可能



- LYSOでは期待通り波形の立ち上がり, 立ち下がりが速い
 - パイルアップ分離に有利
- LYSOで観測された光電子数はGSOのおよそ3倍
(MPPCE印加電圧の違いによるPDEの違いを含む)
 - GSOよりも良い分解能が期待できる



Resolution in σ (%)



LYSOが約1.5倍ほど良い分解能を示す
相対的な光電子数の違いとは無矛盾
(絶対数では光電子数からの予想より悪い)

- MEG II実験の感度を最大化するため, RMD起源ガンマ線同定用検出器を開発している
 - 40%の背景事象低減 from simulation study
 - 小型プロトタイプを用いたビーム試験でもsimulationとconsistentな結果
- 実機作製に向けたさらなる研究を行っている
- ~20cmのプラスチックシンチレータでも十分な時間分解能が得られた (<100 ps @ 1 MeV)
- GSOに代わる結晶シンチとしてLYSOを用いる事を検討している
 - 2cm^3 の単体試験で十分な性能
 - 低コスト, 大きな問題は今の所ナシ
 - GSOに対して約1.5倍良い分解能が得られた
 - 光量はGSOの2-3倍程度+よりシャープな波形
 - 波形フィットによるパイルアップ分離が可能
- 今後の計画
 - より詳細な解析やsimulationによるパイルアップ分離を試験
 - 検出器校正手段の確立
 - 実機的设计及び作製

Backup

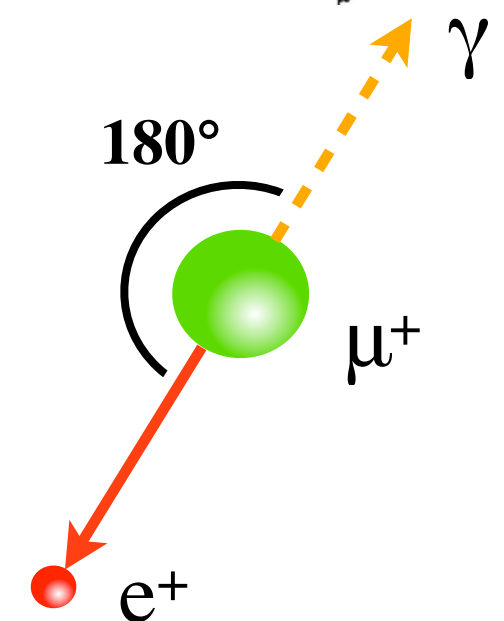
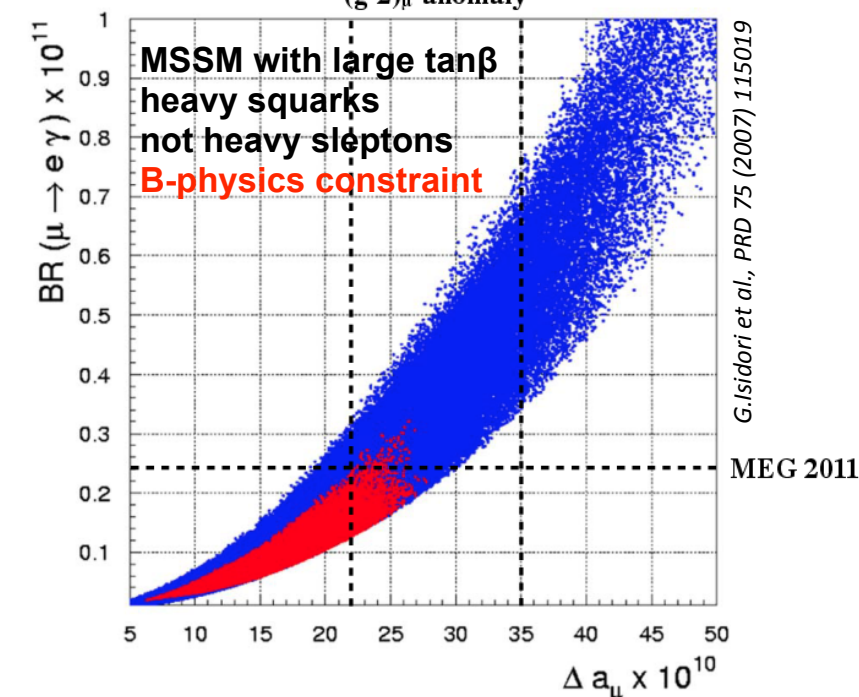
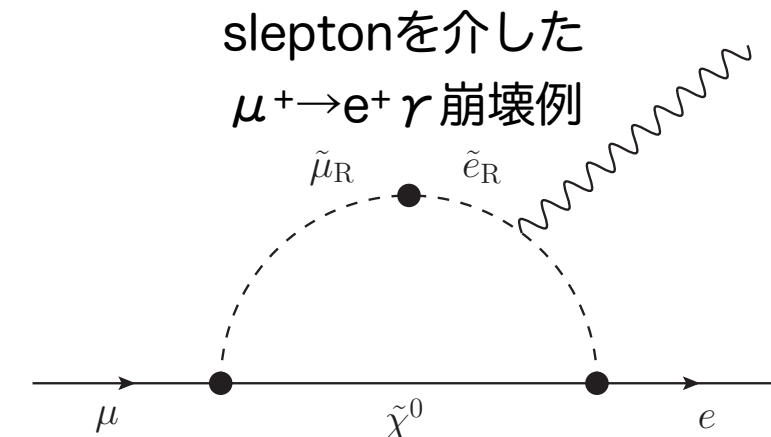
- ニュートリノセクターではレプトンの世代間の破れあり
- 荷電レプトンセクター？ (Charged Lepton Flavor Violation: CLFV)
 - 標準模型で禁止, ニュートリノ振動を入れても崩壊確率 $\sim O(10^{-50})$
 - CLFV過程は未発見, 実験からは上限値のみ与えられている

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ $< 2.4 \times 10^{-12}$ @ 90% C.L. published by MEG in 2011

$\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ $< 1.0 \times 10^{-12}$ @ 90% C.L. SINDRUM

$\mu^- N \rightarrow e^- N$ $< 7 \times 10^{-13}$ @ 90% C.L. SINDRUM II

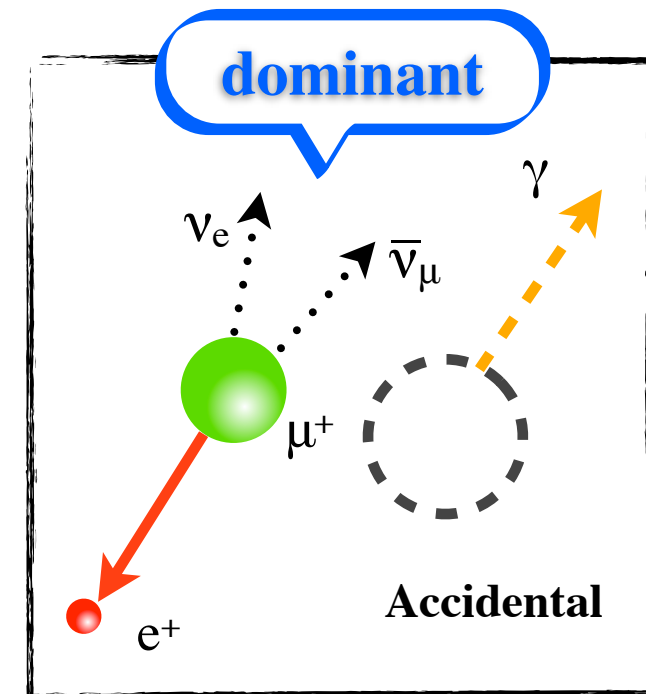
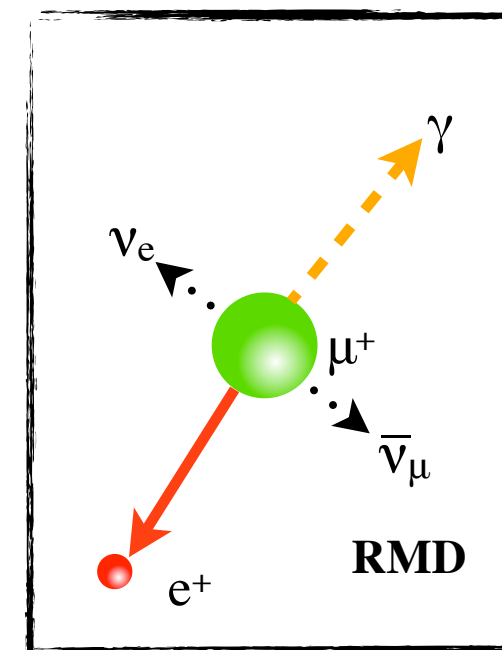
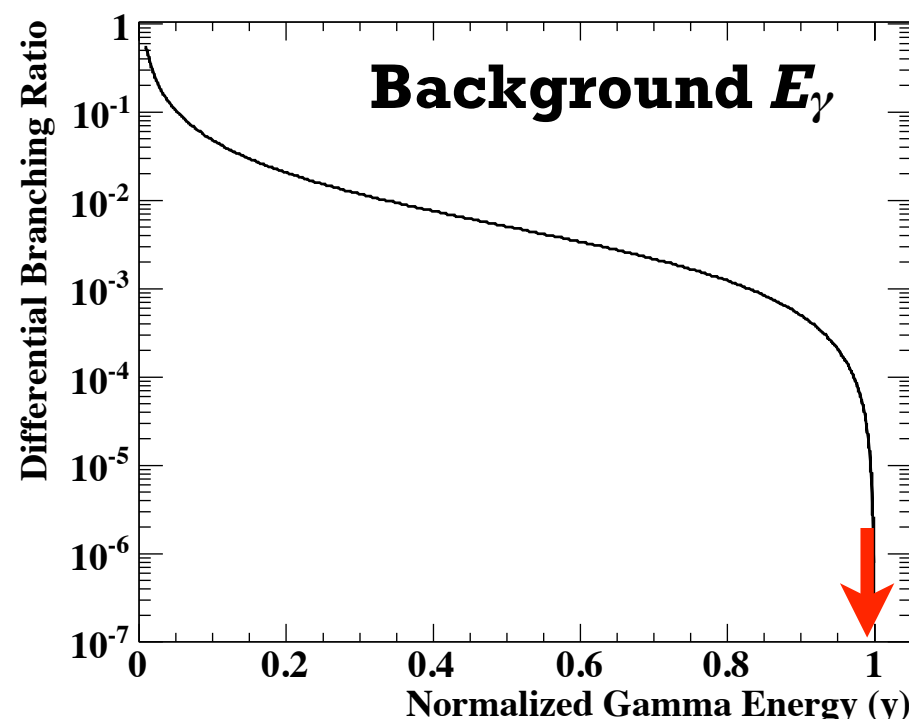
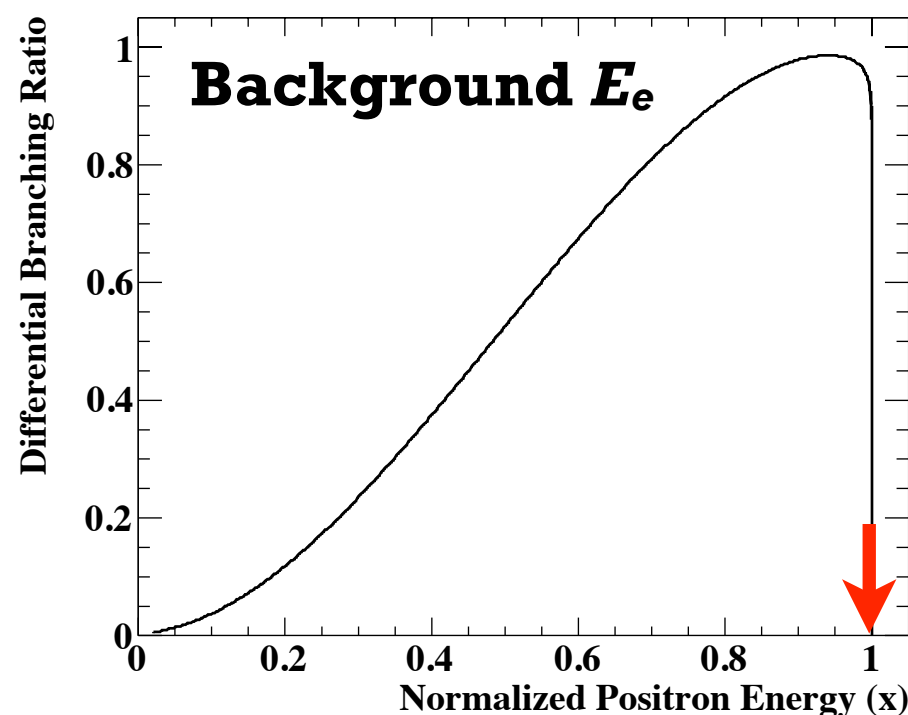
- 多くのBSMではCLFVの大きな崩壊分岐比が予言
 - SUSY-GUT, SUSY-Seesaw, Extra dimension, etc.
 - $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊は今の上限値に近い崩壊分岐比を持つ可能性
 - CLFV過程である $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊発見はBSMの確かな証拠となる
 - ミューオンg-2や複数CLFV探索により相補的なモデル検証が可能
- 2体崩壊によるシンプルなキネマティクス
 - $(E_e = E_\gamma = m_\mu/2 = 52.8 \text{ MeV})$ & $(T_e = T_\gamma)$ & $(\Theta_{e\gamma} = 180^\circ)$



• 考えられる背景事象は2種類

- ミューオン輻射崩壊 (Radiative Muon Decay: RMD) : $\mu \rightarrow e \nu \nu \gamma$
 - 2体崩壊で無いため, E_γ , E_e , $\Theta_{e\gamma}$ の精密測定によりオーダー 10^{-15} まで低減可能
- 偶発的背景事象 (Accidental): 近年の $\mu \rightarrow e \gamma$ 探索実験において支配的
 - Michel崩壊からの陽電子とRMD, AIF等による γ 線の偶発的重なり
 - 時間差, 角度差の精密測定, エネルギー高精度測定により低減
 - Accidentalの分岐比は瞬間ミューオンレート(R_μ)に比例
 - $\Rightarrow$ 直流 (DC) ミューオンが有効

$$B_{\text{acc}} = R_\mu \cdot f_e^0 \cdot f_\gamma^0 \cdot \left(\frac{d\omega_{e\gamma}}{4\pi} \right) \cdot (2\delta t_{e\gamma}), \quad (1.20)$$

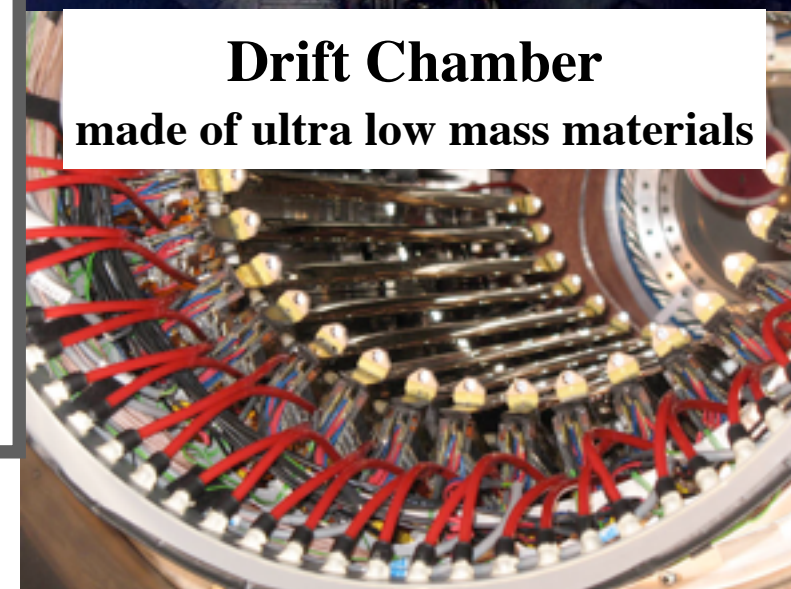
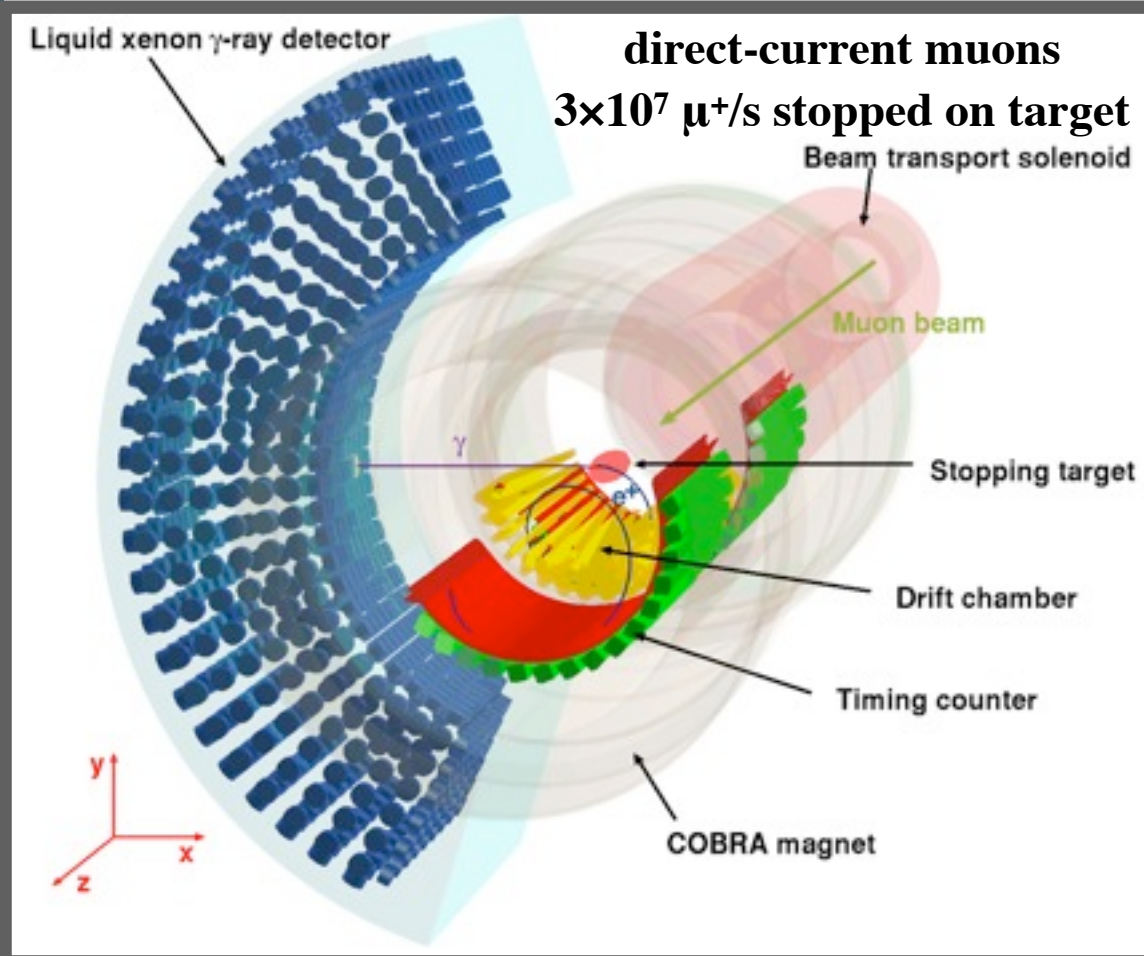


- スイス・ポールシェラー研究所(PSI)で2008年, 物理ラン開始
- 約60人の研究者による国際共同実験 (日・瑞西・伊・米・露)
- 偶発的背景事象を低減するための様々な工夫
 - 世界最大強度のDCミュオン源 @ PSI
 - 高分解能・高検出効率の液体キセノンを用いたガンマ線検出器を開発
 - 高レート下で高分解能の陽電子検出を実現するため,
 - 特殊な勾配磁場を超伝導磁石(COBRA磁石)で作る
 - 超低物質質量Tracker $\Rightarrow$ 陽電子多重散乱, ガンマ背景事象生成を抑制
 - 全データを波形で取得 $\Rightarrow$ 解析でパイルアップ分離可能
- 2011年には, 2009-2010取得データにより, これまでの上限値を5倍更新
 - 信号事象の超過無し, $B(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 2.4 \times 10^{-12}$ (90% C.L.)の上限値のみ与えた
 - 新物理で期待される領域に大きく踏み込んだ $\Rightarrow$ いつ信号が発見されてもおかしくない?

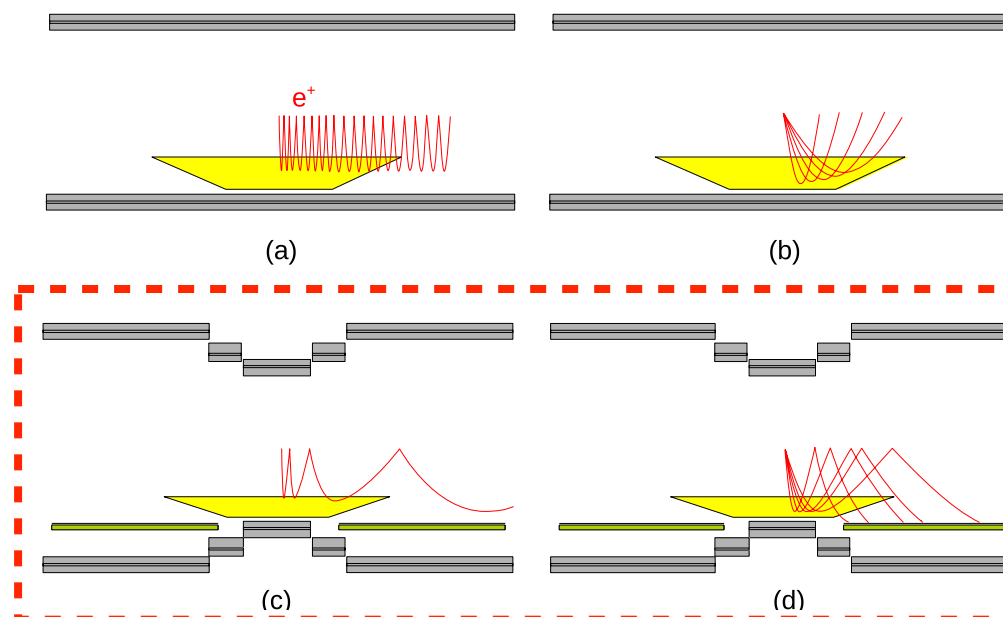




COBRA magnet
special graded field to detect signal e^+



COntant Bending RAdius



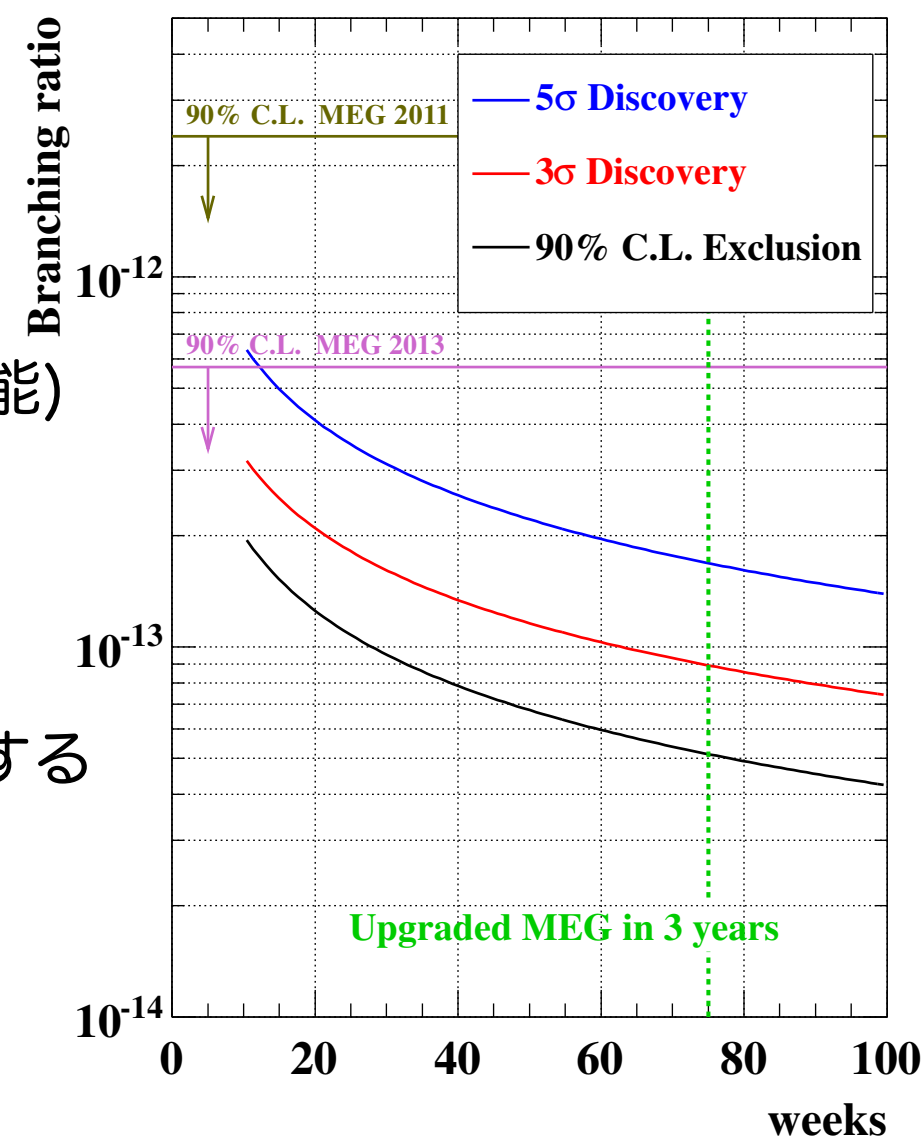
Observables in Physics Analysis

Table 5.7: Performance summary.

Variable	2009	2010	2011
Gamma Resolutions			
E_γ (%)	1.9 ($w > 2$ cm), 2.4 ($w < 2$ cm)	1.9 ($w > 2$ cm), 2.4 ($w < 2$ cm)	1.7 ($w > 2$ cm), 2.4 ($w < 2$ cm)
u_γ, v_γ (mm)	5	5	5
w_γ (mm)	6	6	6
t_γ (ps)	96	67	67
Positron Resolutions			
E_e (MeV)	0.31	0.32	0.31
ϕ_e (mrad)	6.6	7.2	7.5
θ_e (mrad)	9.4	11.0	10.6
y_e (mm)	1.1 (core)	1.1 (core)	1.2 (core)
z_e (mm)	1.1	1.7	1.9
t_e (ps)	107	107	107
Combined Resolutions			
$\phi_{e\gamma}$ (mrad) *パラメータ相関補正後	8.9	9.0	8.9
$\theta_{e\gamma}$ (mrad)	15.0	16.1	16.2
$t_{e\gamma}$ (ps)	156	123	127
Efficiency			
ϵ_γ (%)	63	63	63
ϵ_e (%)	28	35	31
ϵ_{trg} (%)	91	92	97

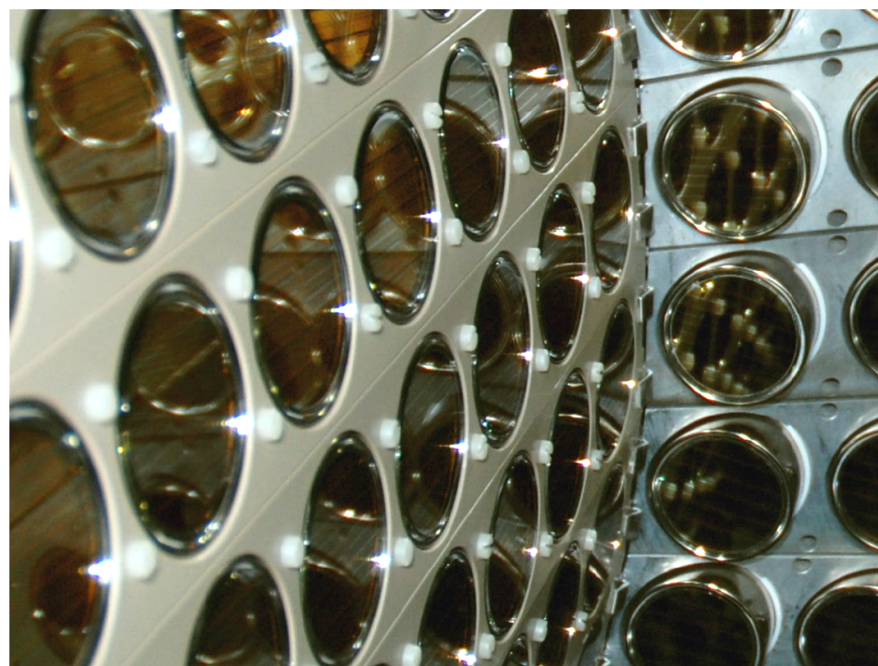
- MEG実験は新物理に感度のある重要な領域の探索を実現している
- 現MEGは背景事象による感度改善度合いの悪化が見え始めている
 - 統計を増やすだけではこれ以上の感度改善は難しい $\Rightarrow$ 高感度化には背景事象低減が必要不可欠
- 一方で新物理が存在すれば信号はいつ発見されてもおかしくない
- そこで, さらなる感度改善のため検出器大幅改良を行う
- 目標到達感度は現MEGと比して約10倍
- どのように達成するか?
 - PSIのミュオン強度を最大限活用 (10^8 Hzまで到達可能)
 - 検出器レート耐性を上げる
 - 背景事象低減のために全ての検出器性能を向上する
 - 各検出器改良で, $E_\gamma, E_e, t_{e\gamma}, \theta_{e\gamma}, \phi_{e\gamma}$ の分解能を倍改善する
 - さらなる背景事象低減
 - 背景事象源となる物質低減
 - 積極的な背景事象同定

MEG upgradeの目標感度
arXiv:1301.7225

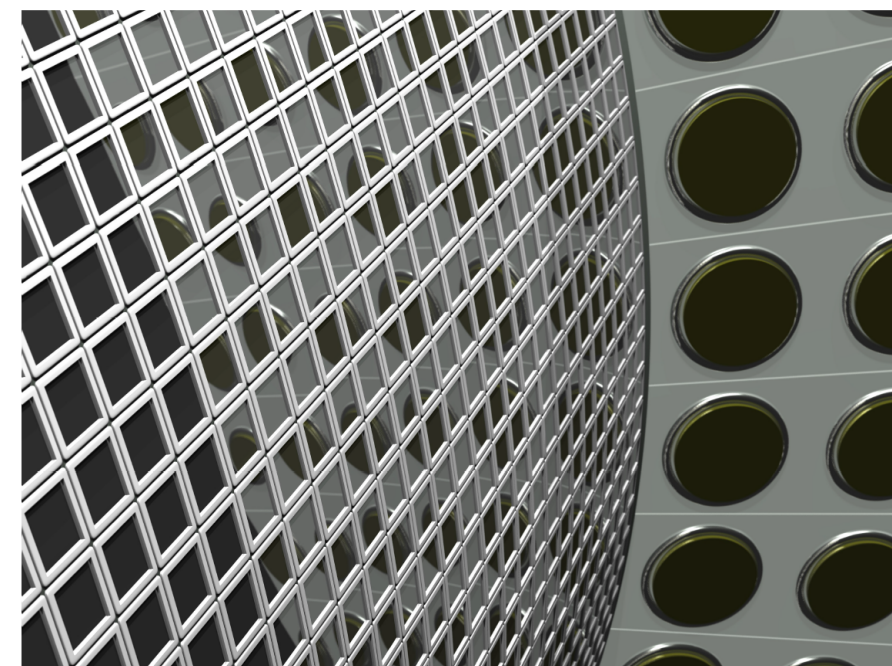
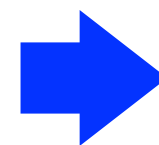


入射面のPMTをSiPMに変更
⇒ 浅い事象でのエネルギー
及び位置分解能大幅改善が期
待される
12×12mm²で約4000個の
SiPM

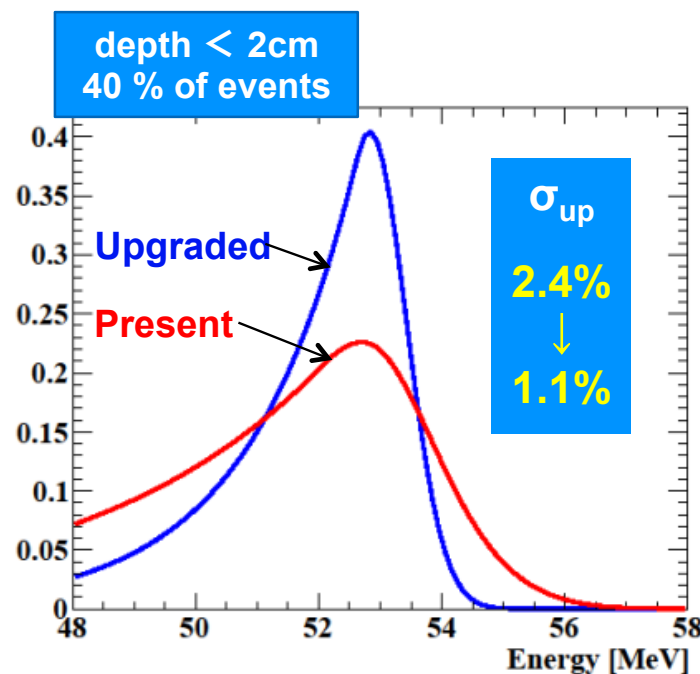
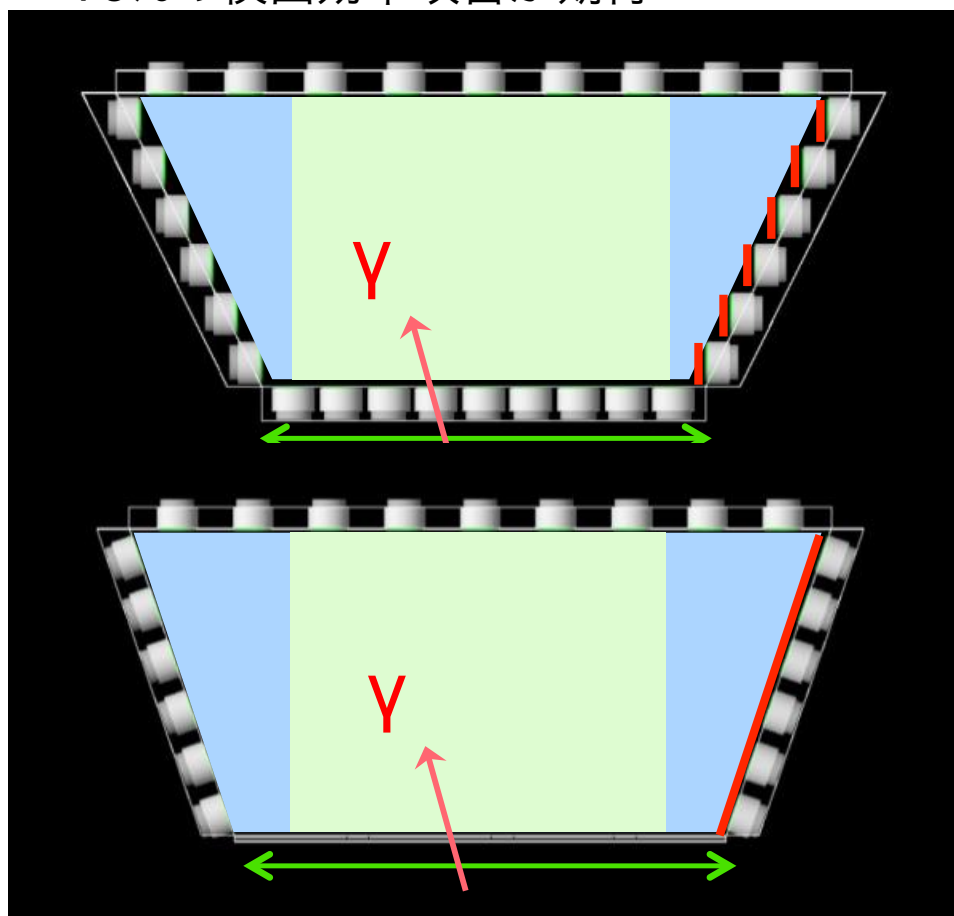
PMT配置を最適化し, ガンマ線の
エネルギーリークを抑える
⇒ 10%の検出効率改善が期待



検出器入射面の様子

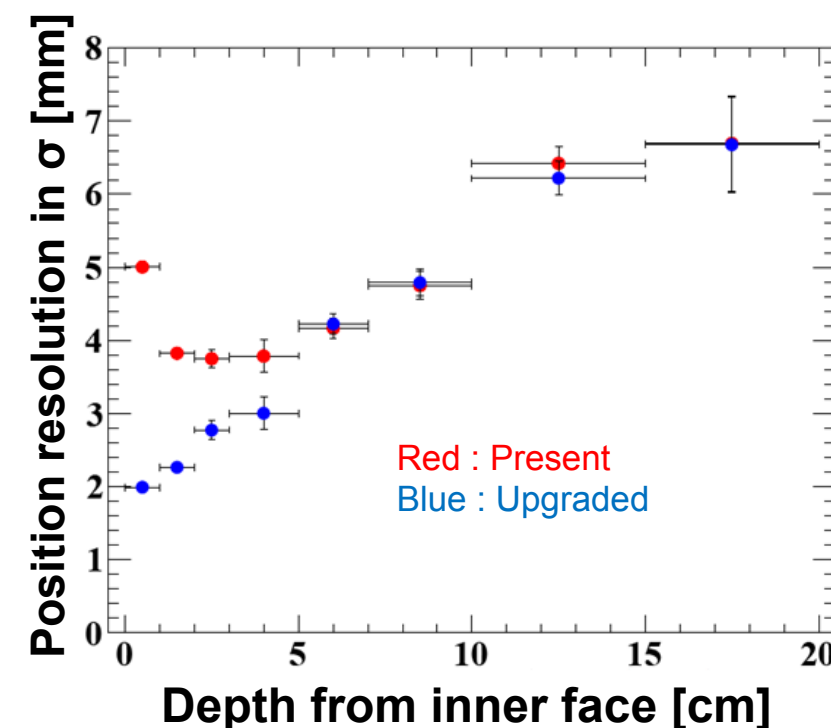


アップグレード後 (CG)

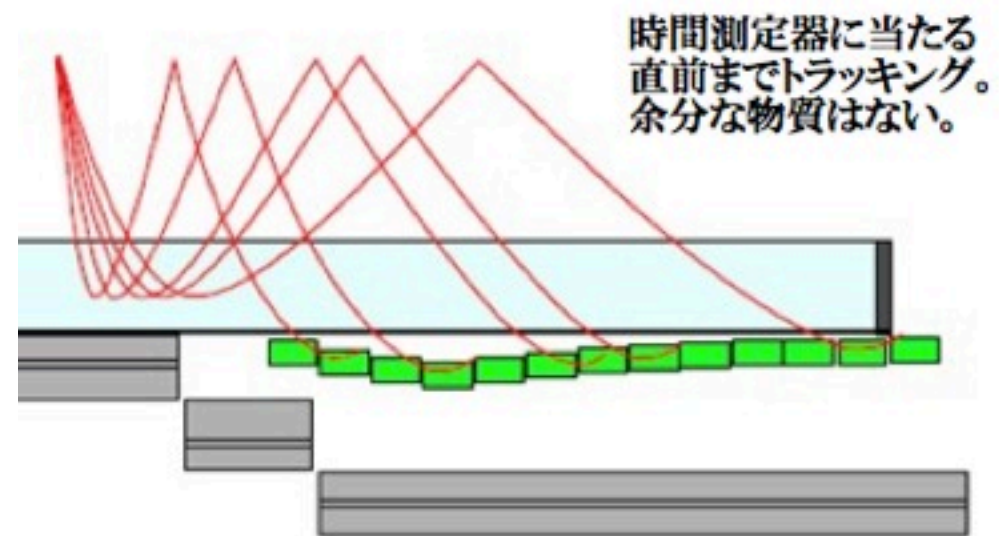
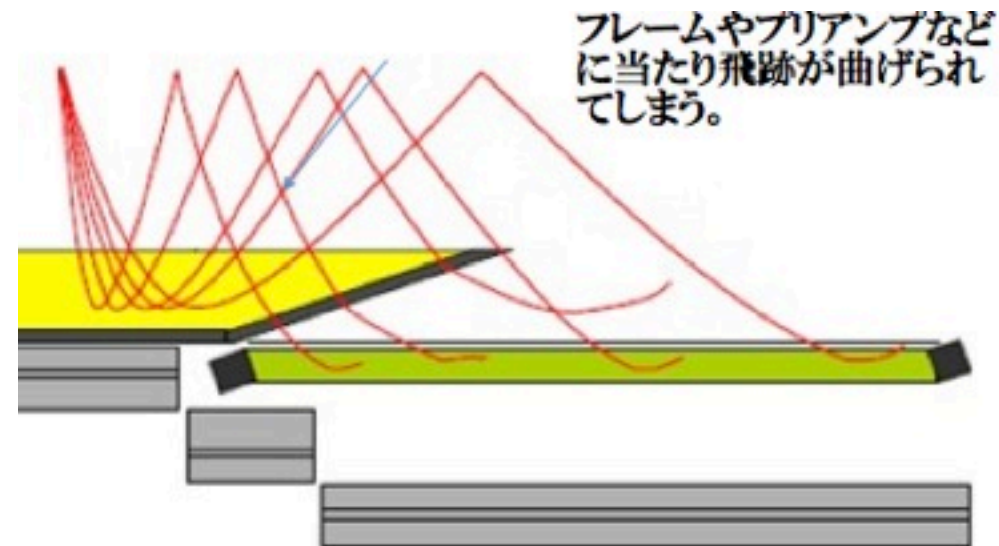


SiPMを用いた場合の浅い事象での
エネルギー分解能の改善具合(MC)

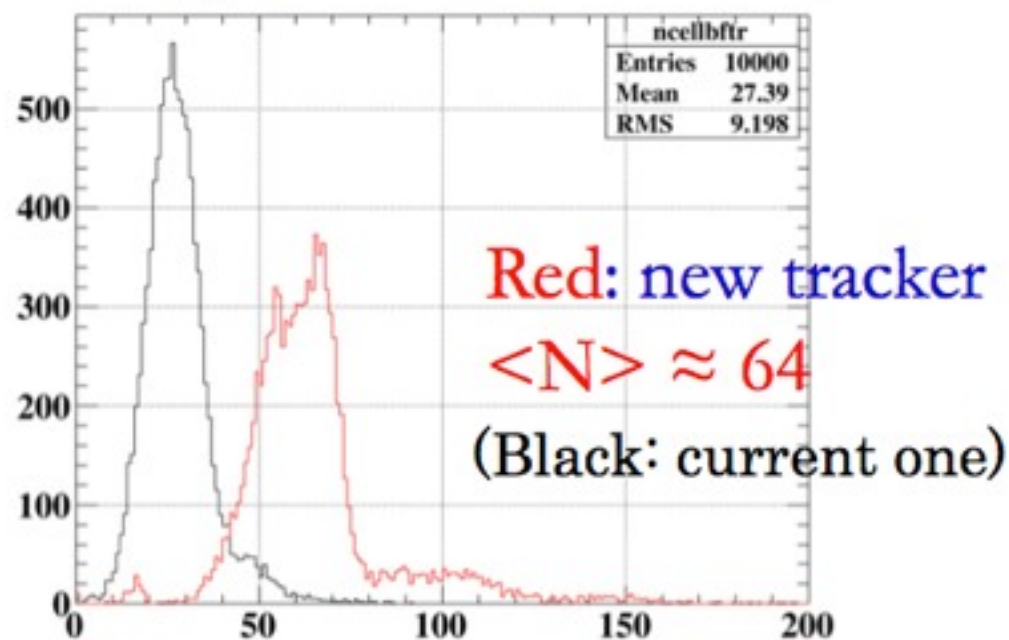
SiPMを用いた場合の浅い事象での
ガンマ線位置分解能の改善具合(MC)



- 一体型のガス検出器
 - モジュールの壁による物質量減
- ビーム軸方向に広い領域をカバー
 - TCまでの物質量減
 - TC直前までトラッキング
- ヒット数の大幅増 (平均25 $\Rightarrow$ $\sim$ 60)
 - ヒット数増による分解能改善
- ワイヤーを立体交差させる事でz方向の位置を再構成する

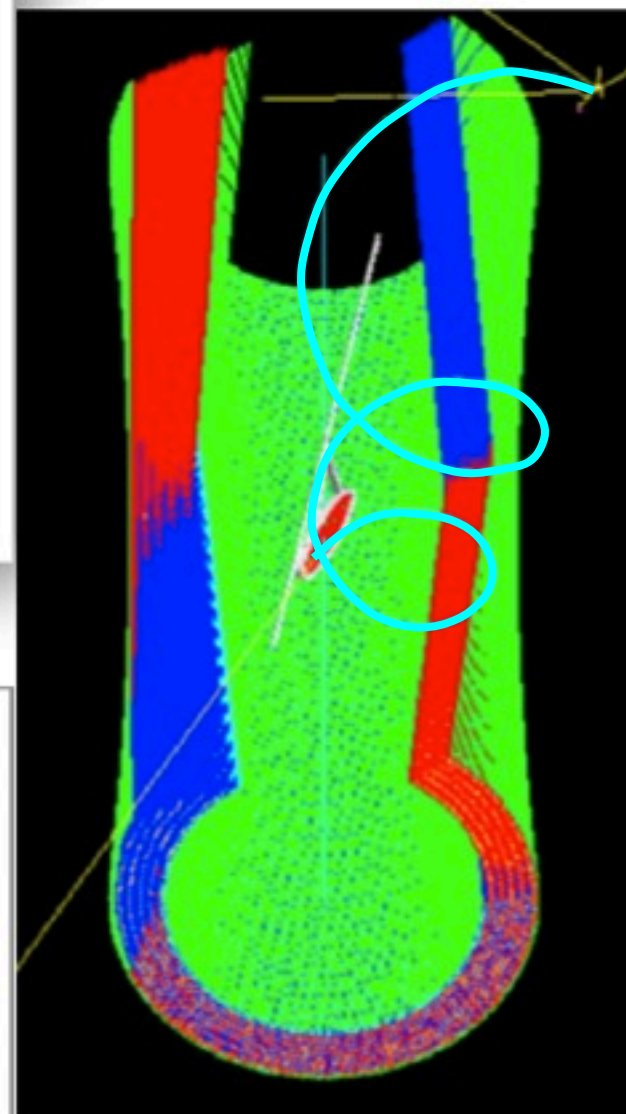
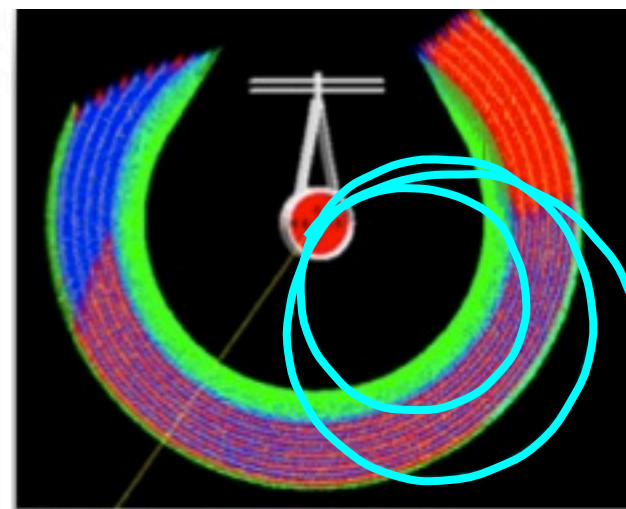


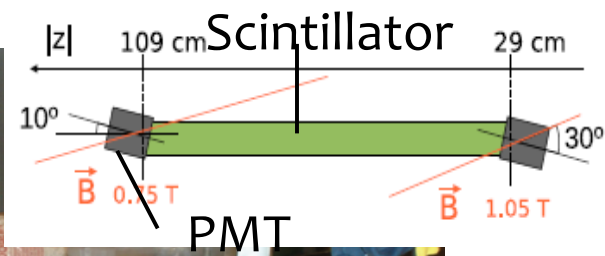
Large number of hits



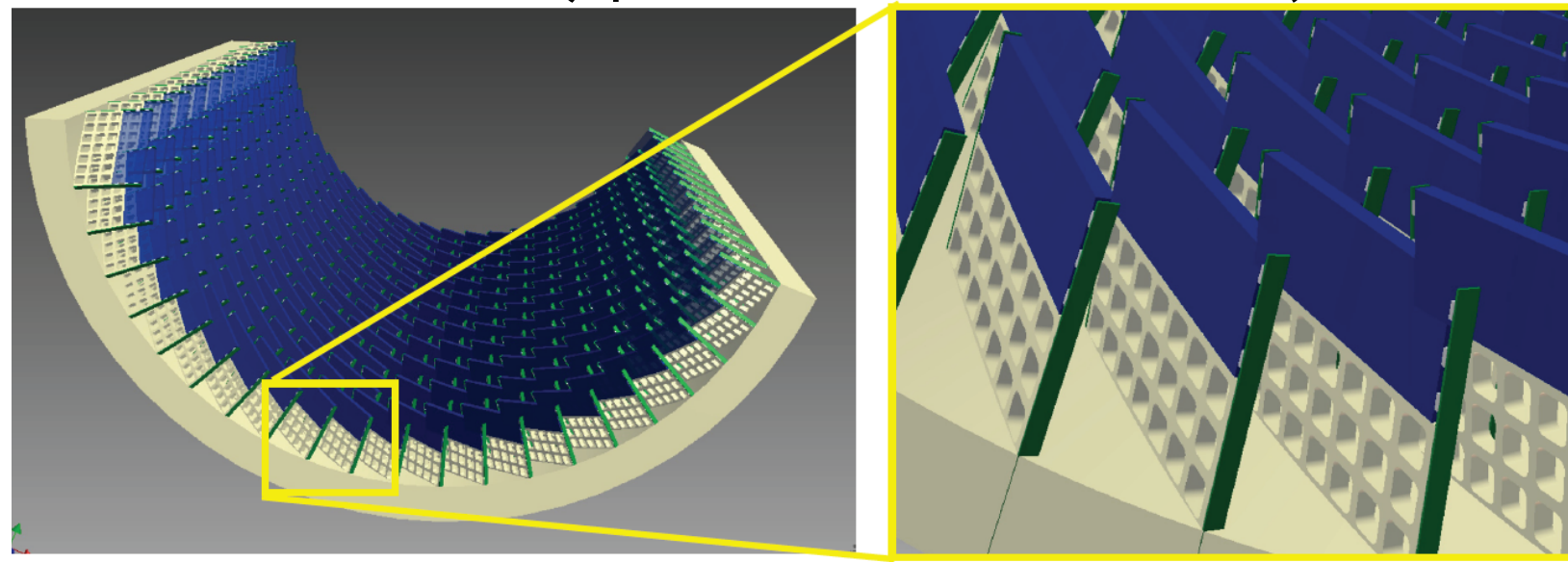
Expected Performance

Momentum ~ 130 keV (350 keV)
 Angular ~ 5 mrad ; ~ 5 mrad
 (9 mrad ; 11 mrad)
 Vertex ~ 1.2 mm ; ~ 0.7 mm
 (1.8 mm ; 1.1 mm)
 DC-TC matching eff. ~ 90 % (41%)





~250 counters × 2 (upstream, downstream side)

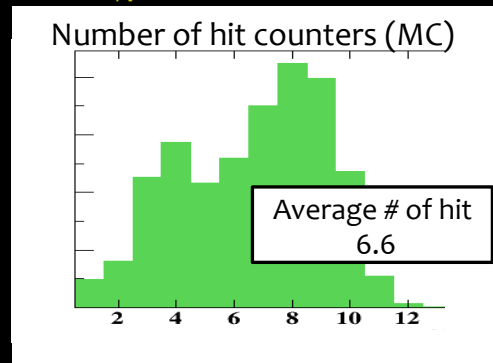


Present

Upgrade

MC simulation

5-8 counter hit



シンチレータをより細分化する

1. パイルアップ耐性強化
2. 複数カウンターを組み合わせ, 時間分解能改善
3. レイアウトの柔軟性

読み出しはPMTからSiPMに変更

SiPMを複数個接続する事でチャンネル数を抑えながら十分な時間分解能を達成可能

カウンターは約600個