

MEG実験における軽いスカラー粒子 を媒介とした2つのガンマ線を伴う 崩壊事象の探索

日本物理学会2011秋季大会@弘前大学

18 / Sep. /2011

名取寛顕 他MEGコラボレーション



Contents

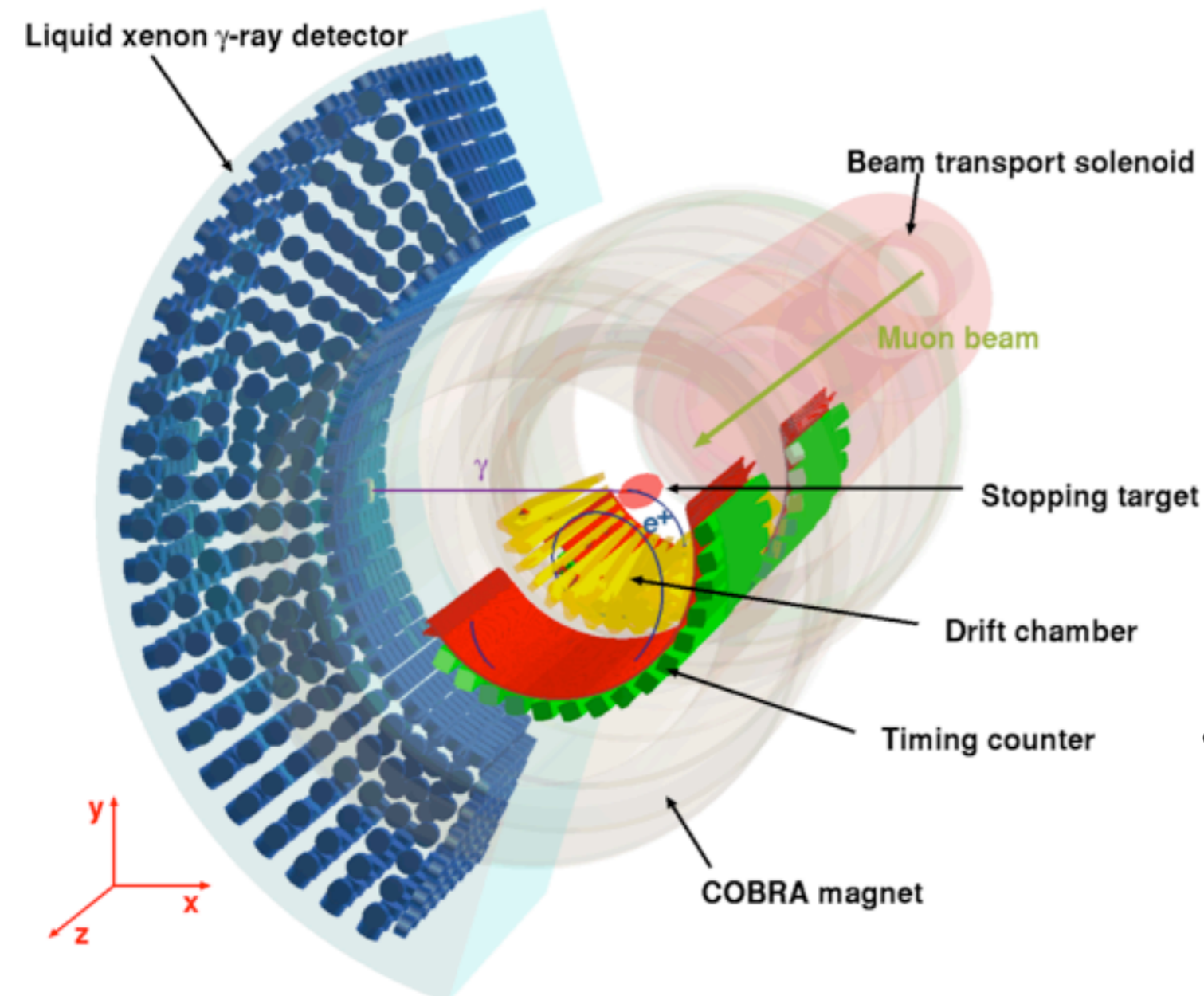
- Introduction
- MEG検出器
- 軽い粒子 ϕ を媒介とした $\mu \rightarrow e\phi$ 、 $\phi \rightarrow \gamma\gamma$ の解析
(Preliminary)
- まとめ

Introduction

- MEG実験では $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索の為に $\sim 3 \times 10^7/\text{s}$ の μ 粒子の崩壊を測定
- このデータを用い、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 以外の物理について調べたい

MEG 検出器

- 陽電子スペクトロメータ
 - 勾配磁場Solenoidal coil
+ Drift chamber
+ Timing counter
 - optimized for 52.8MeV e^+
 $\Omega/4\pi \sim 10\%$
 - Smaller acceptance for e^+ with
lower momentum
- γ 線検出器
 - 900l liquid Xe + 846PMTs
 - Not segmented
 - $\Omega/4\pi \sim 10\%$



$\mu \rightarrow e\gamma$ 探索のデータを使ったByproduct探索

$\mu \rightarrow e\phi$ 、 $\phi \rightarrow \gamma\gamma$

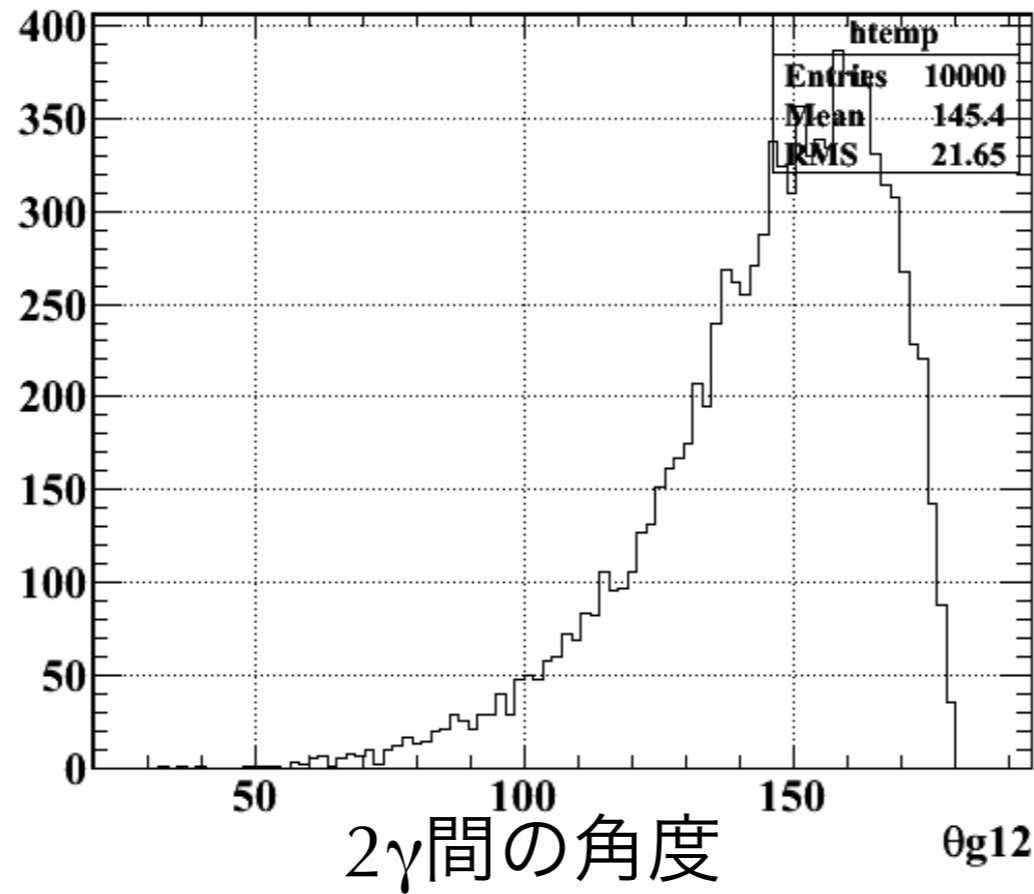
$\mu \rightarrow e \gamma \gamma$ について

- Current upper limit: 7.2×10^{-11} (Crystalbox)
- 重い粒子による General local interaction を仮定した MC をつくり、MEGでの Sensitivity を評価

$\mu \rightarrow e\gamma\gamma$ について

- Current upper limit: 7.2×10^{-11} (Crystalbox)

- 重い粒子によるバックグラウンドを減らすために、 θ_{g12} の分布を調べ、MCをつくり、MEGでのSensitivityを評価する。

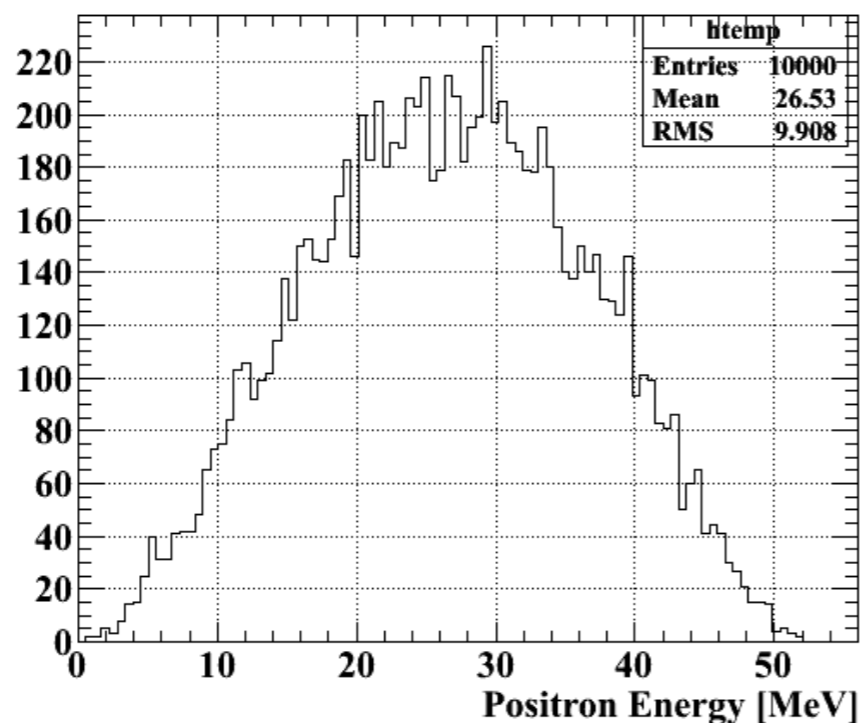


大きい角度にピーク

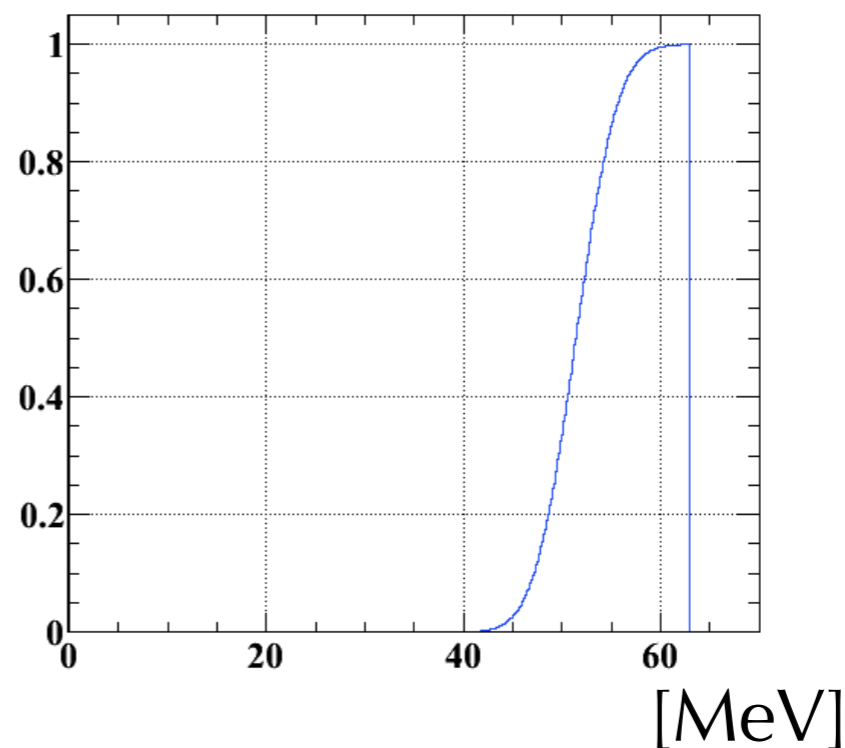
$\mu \rightarrow e\gamma\gamma$ について

- Current upper limit: 7.2×10^{-11} (Crystalbox)

- 重い
MEG



$\mu \rightarrow e\gamma\gamma$ の
 e^+ のエネルギースペクトル



MEG positron
Acceptance vs Energy

くり、

$\mu \rightarrow e\gamma\gamma$ について

- Current upper limit: 7.2×10^{-11} (Crystalbox)
- **重い粒子**による General local interaction を仮定した MC をつくり、MEGでの Sensitivity を評価
- MEG実験の2009年取得データ (6.5×10^{13} muon stop) を使ったときの Expected **S.E.S** $\sim 5 \times 10^{-9}$
 - 2γ 間の角度分布で角度の大きい所にピーク
 - e^+ のエネルギーのピーク (~ 28 MeV) は検出器のアクセプタンス外
- **軽い粒子**の媒介を仮定するモデルではアクセプタンスが大きい事象があるかもしれない

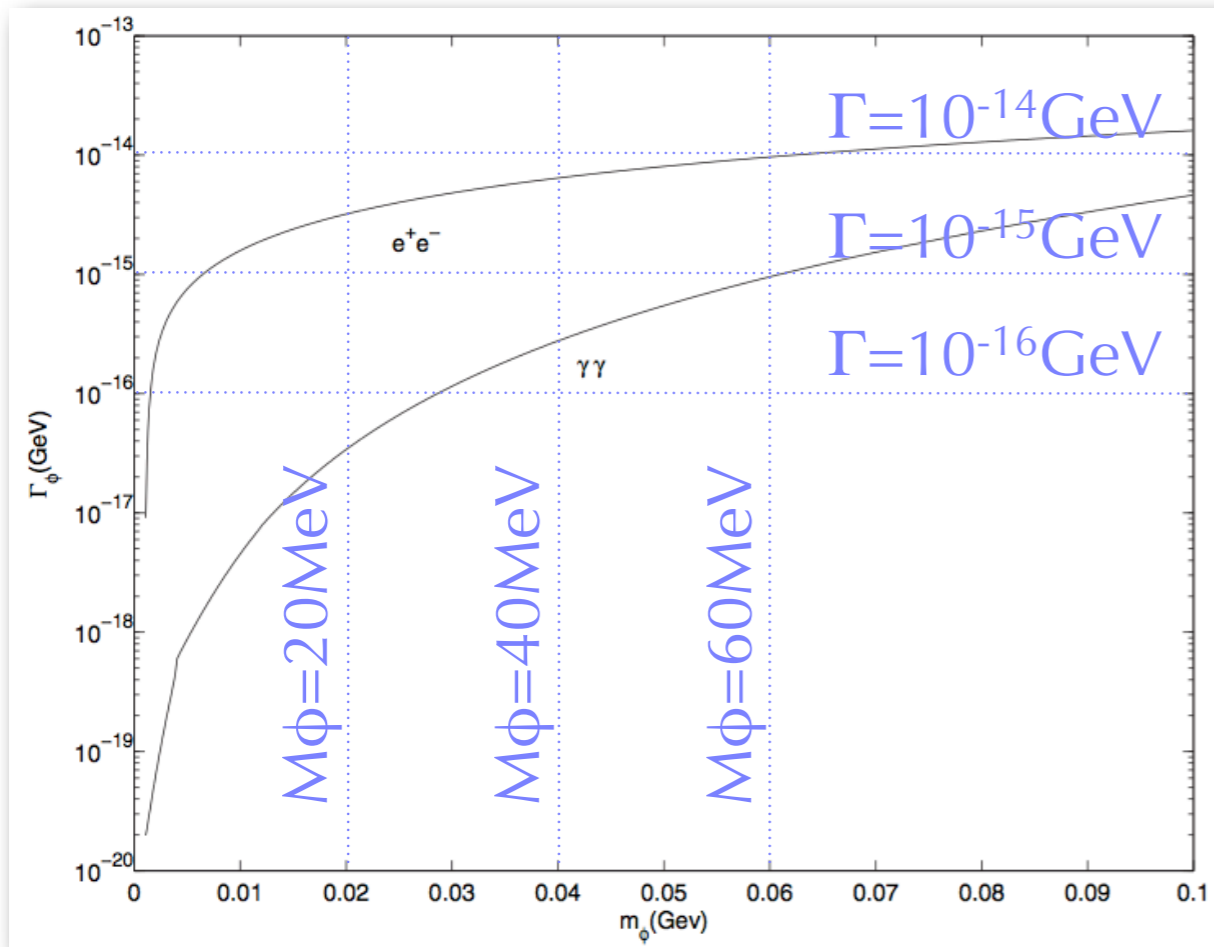
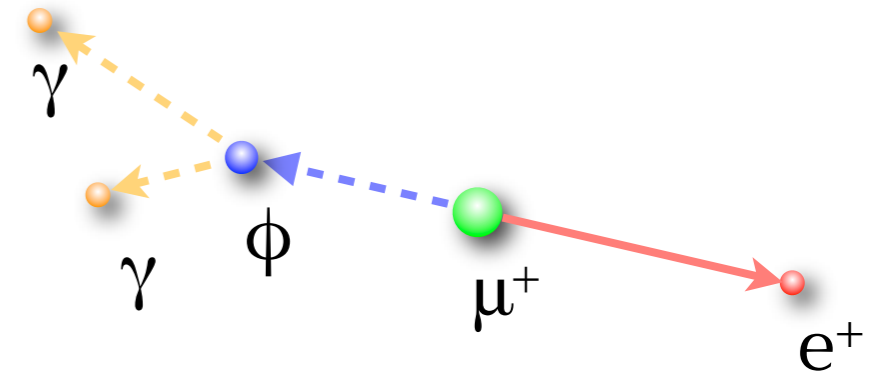
Implication of a very light pseudoscalar boson on lepton flavor violation

(Phys. Rev. D 72, 117701 (2005))

- **微小質量粒子**: **Global対称性**がexactでなく **Approximate**な場合、**自発的対称性の破れ**により生成するNambu Goldston bosonが masslessでなく微小質量を持つ
 - 例: two-Higgs doublet modelで $\lambda_5 \rightarrow 0$ の極限では exact global $U(1) \times U(1)$ symmetryを持つ $m_A = -\lambda_5 v^2$ の擬スカラー粒子A
 - 実例: π (Hadronとしては軽い。わずかに破れた $SU(2)_L \times SU(2)_R$ カイラル対称性の破れに伴う pseudo NG bosonと理解される)
- **新しいHiggs boson**による**cLFV**: 標準理論ではHiggs bosonのカップリングは決まっているが、新たなスカラー粒子の導入により Free parameterが増殖。tree levelでの**lepton flavor**を**保存しない** neutral currentが現れる

$M_\phi < M_\mu$ の擬スカラー粒子 ϕ の仲介する

$$\mu \rightarrow e\phi, \quad \phi \rightarrow \gamma\gamma$$



Decay width of $\phi \rightarrow ee$ and $\phi \rightarrow \gamma\gamma$ by
Phys. Rev. D 72, 117701 (2005)

$$\Gamma_{tot} = \frac{\hbar}{\tau}$$

$M_\phi \sim 30 \text{ MeV}$ の時 ($\Gamma \sim O(10^{-15})$)

ϕ の寿命 $\tau \sim O(100 \text{ psec})$ と、長寿命
→ 2つの2体崩壊と理解される

Γ が小: e^+ の運動量はモノクロ

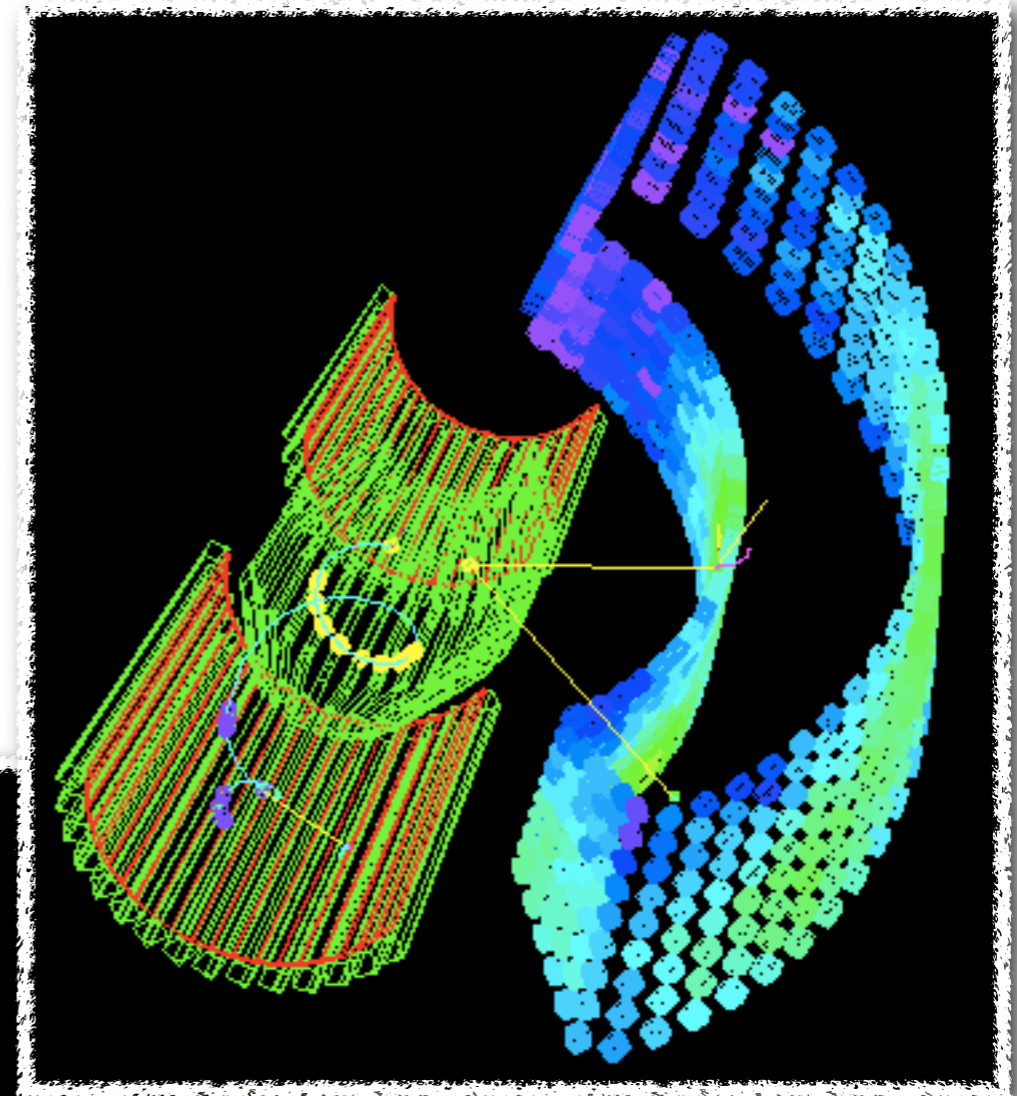
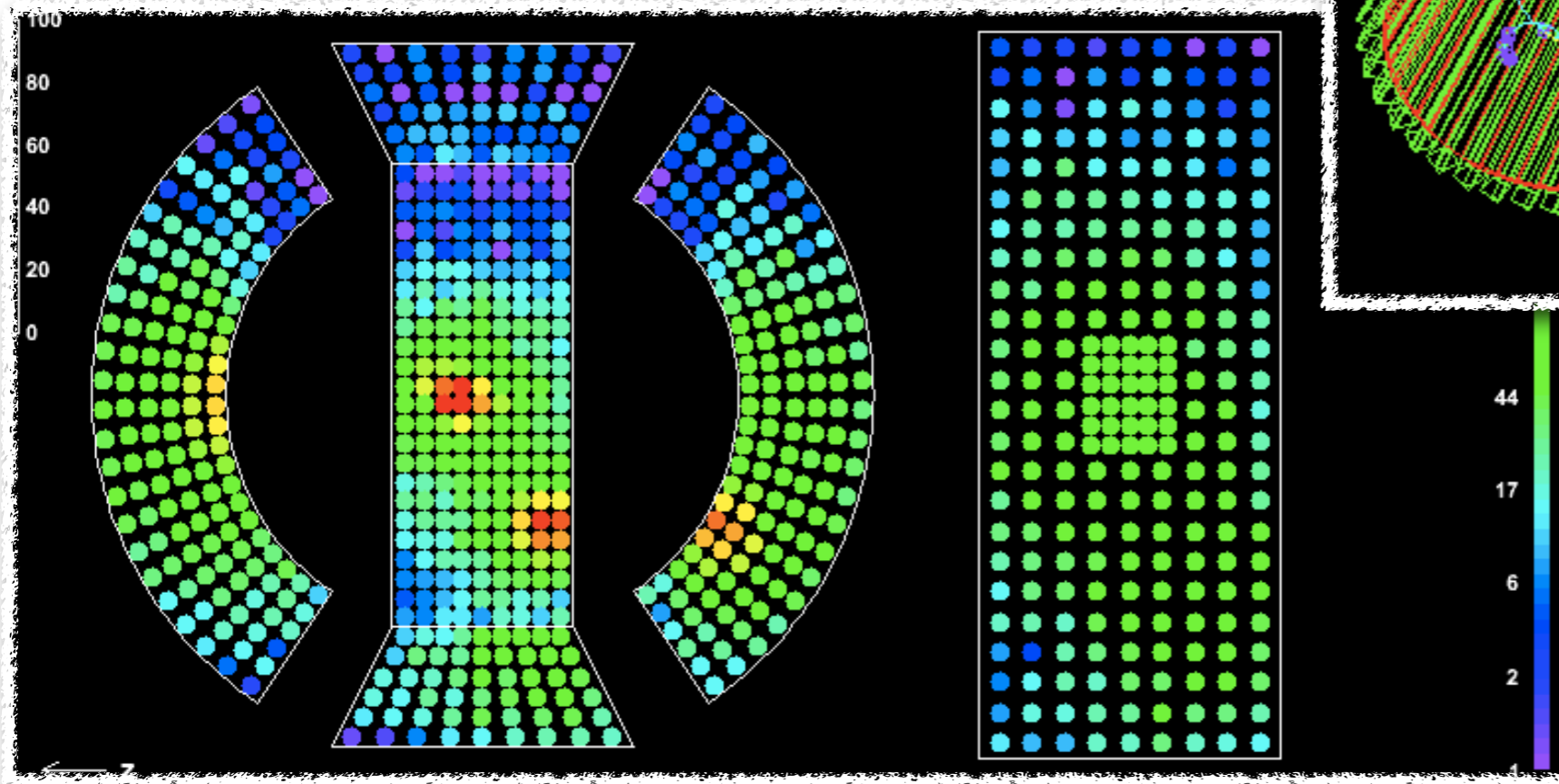
$M_\phi \rightarrow$ 小:

$$e^+ \rightarrow M_\mu/2 = 52.8 \text{ MeV}$$

2 γ 間の角度 → 小 by Lorentz boost

$\phi \rightarrow \gamma\gamma$ の初の探索

Event example(MC, $M\phi=20\text{MeV}$) and reconstruction



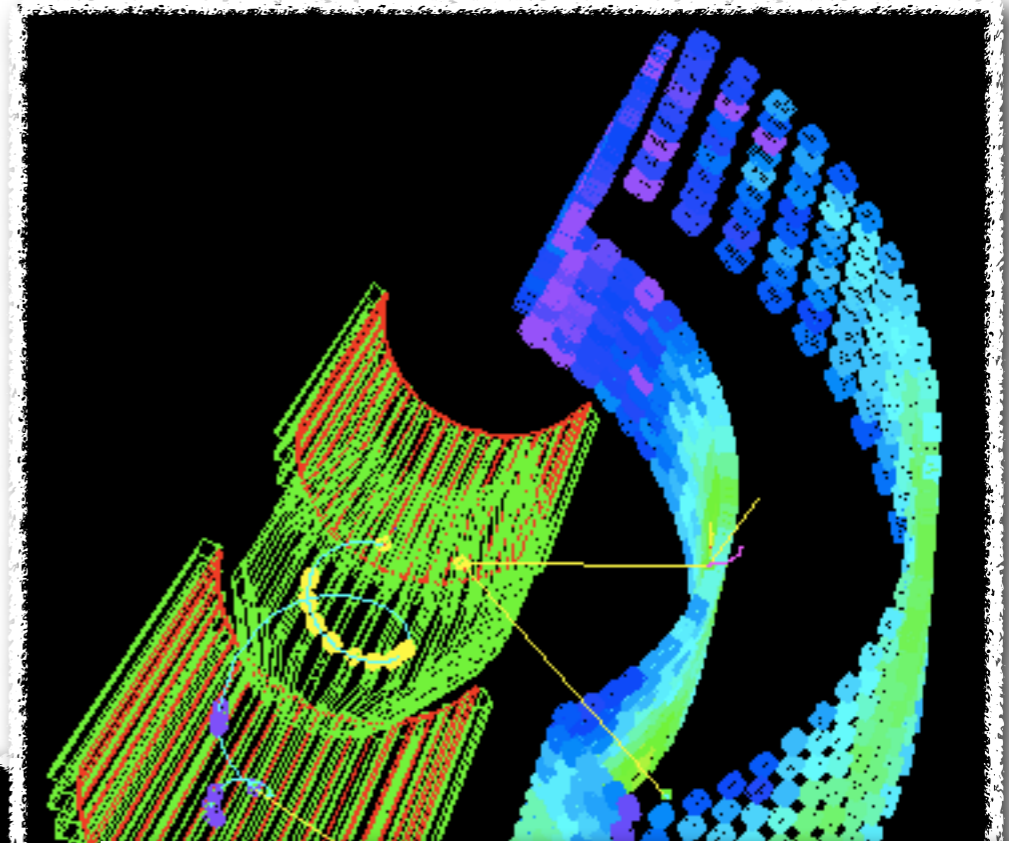
Event example(MC, $M\phi=20\text{MeV}$) and reconstruction

γ 線のエネルギーの和: 総光量から

2γ の位置、エネルギーの比: 光量分布からFit

時間: それぞれの γ 線に対しPMT selection、選
択したPMTでFit

ϕ の崩壊点と 2γ 放出角: e^+ の方向、 μ -vertexの
位置、 2γ の位置、エネルギーを使い、**時間情
報は使わず**にをFit (Time sidebandからBGの見
積もりを行う際**constraintが無いように**)



※Preliminary, MC
Resolution of γ :

$\sigma_{\text{position}} \sim 6\text{-}7\text{mm}$

$\sigma_{\text{depth}} \sim 1\text{cm}$

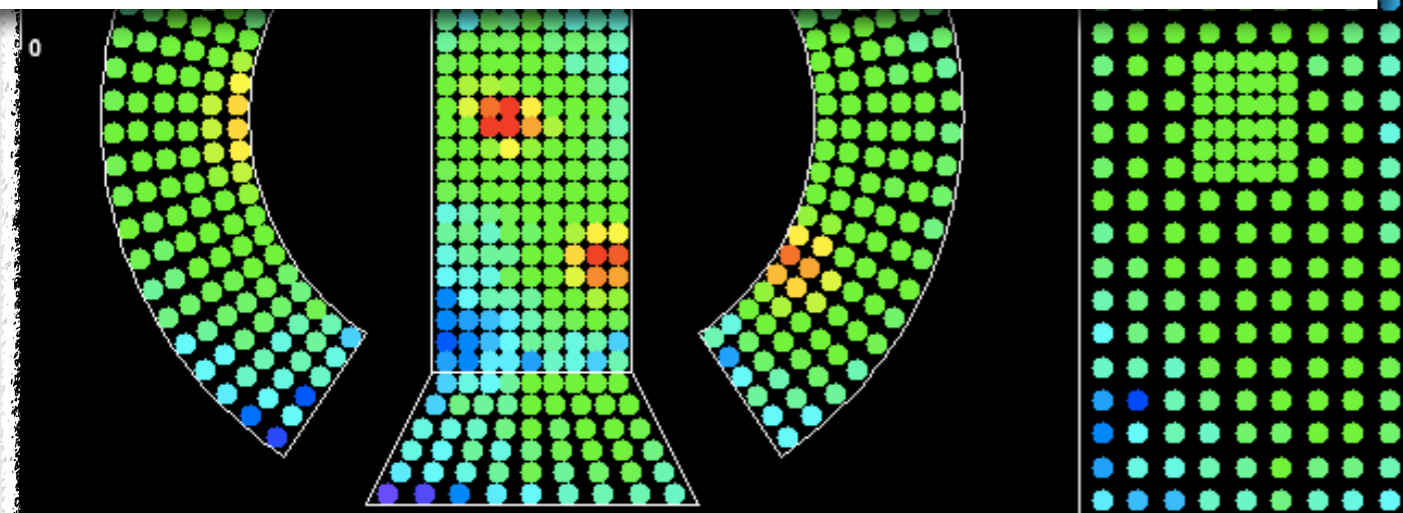
$\sigma_{\text{T}} \sim 200\text{psec}$

$\sigma_{E1,E2} \sim 10,15\%$

$\sigma_{E1+E2} \sim 3\%$

Resolution of ϕ conversion point:

$\sigma \sim 2\text{cm}$



$\mu \rightarrow e\phi$ 、 $\phi \rightarrow \gamma\gamma$ のMEGでの検出精度

Single event sensitivity の見積もり

$$S.E.S = 1 / (N_{MD} \times (e^+ \text{ energy selection の fraction}(ev\nu))$$

×(evν と $e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ の Trigger の比)

×(evν と $e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ の e^+ spectrometer の Acceptance, Efficiency の比)

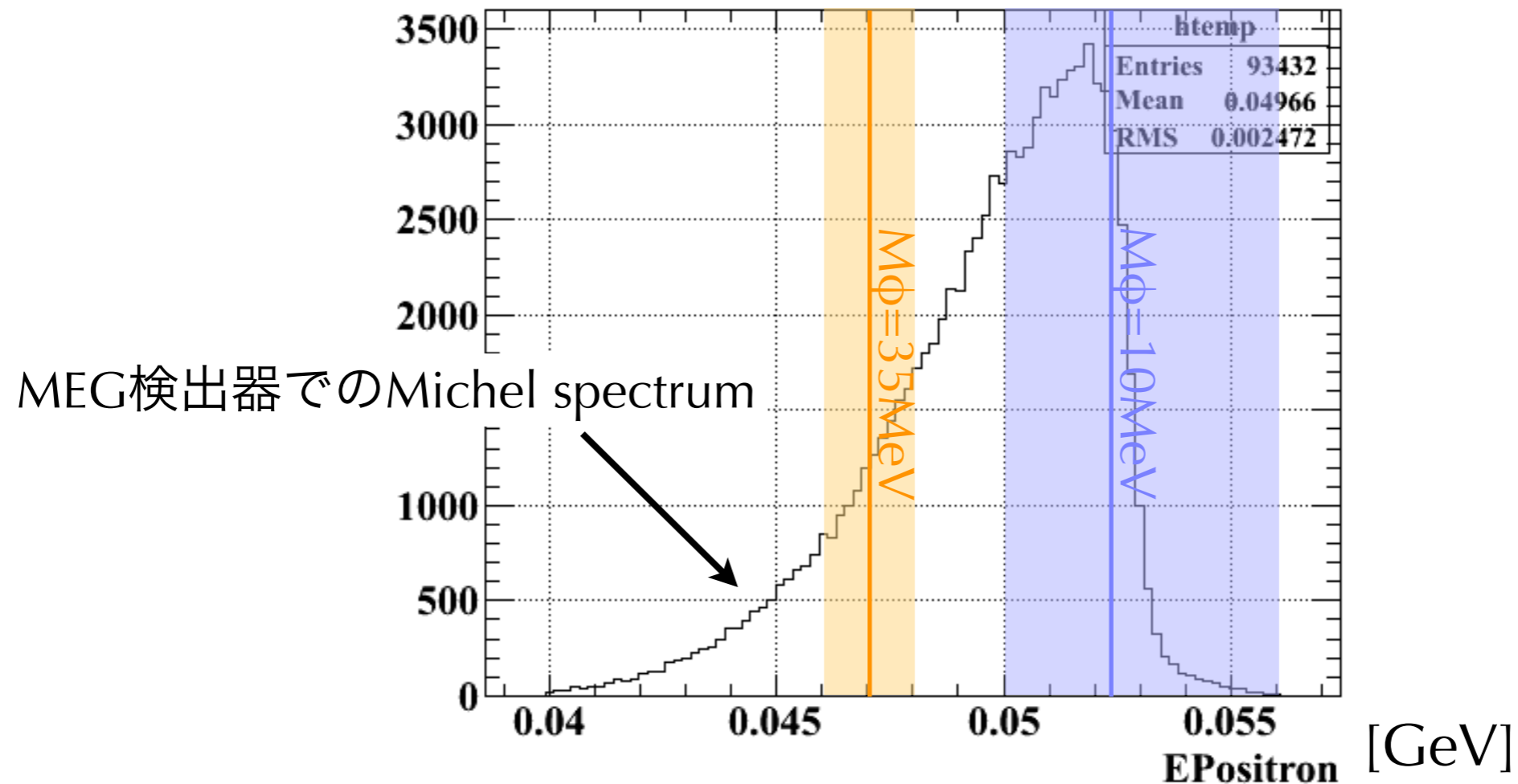
/ ($e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ の γ detector の Acceptance, Efficiency)

/ ϵ_{cut}

M_ϕ によって selection を変える

- MEG trigger と同時に取得している Michel positron を数え、 $\mu \rightarrow e\phi$ 、 $\phi \rightarrow \gamma\gamma$ との Acceptance、Efficiency の比から Normalization factor を計算
- Beam rate, positron detection efficiency の変化に依存しない
- $M_\phi = 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 \text{ MeV}/c^2$ のそれぞれについて Normalization を計算

Michel energy selection for different M_ϕ



M_ϕ が小さい時は $50 \text{ MeV} < E_{e^+} < 56 \text{ MeV}$

$M_\phi \geq 25 \text{ MeV}$ の時は ϕ の運動量 $\pm 1 \text{ MeV}$

観測する e^+ と同じエネルギーの Michel positron を選ぶことで e^+ spectrometer のエネルギーの違いによる応答の違いがあっても compensate できる

Single event sensitivity の見積もり

$$S.E.S = 1 / N_{MD} \times (e^+ \text{ energy selection の fraction}(ev\nu))$$

×(evν と $e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ の Trigger の 比)

×(evν と $e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ の e^+ spectrometer の Acceptance, Efficiency の 比)

/ ($e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ の γ detector の Acceptance, Efficiency)

/ ϵ_{cut}

$\mu \rightarrow e\gamma$ の Trigger で $\mu \rightarrow e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$

データが取得できているか

Estimate with MC

Trigger efficiency of $\mu \rightarrow e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ in $\mu \rightarrow e\gamma$ trigger

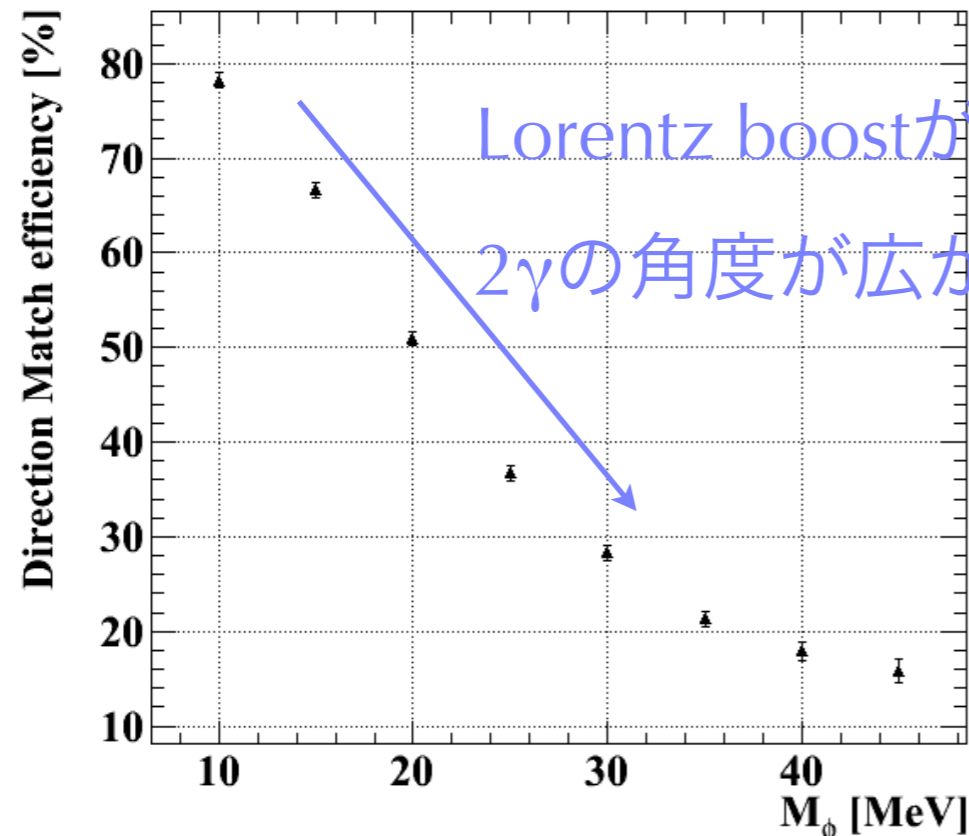
$\mu \rightarrow e\gamma$ trigger条件

γ charge sum $> \sim 42\text{MeV}$

γ charge sum $< \sim 62,65,77\text{MeV}$ (for 宇宙線veto)

TCとLXeのコインシデンス

TC hit位置とLXeの最も光量の大きいPMTの位置が
back to backとなる Direction match tableを満たす



Lorentz boostが小さく

2γ の角度が広がる

γ charge sum selection efficiency
75-85%(2009), 80%-96%(2010)

データ取得期間、 M_ϕ により異なる

Single event sensitivity の見積もり

S.E.S = $1 / N_{MD} \times (e^+ \text{ energy selection の fraction}(ev\nu))$

$\times (ev\nu \text{ と } e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma \text{ の Trigger の 比})$

$\times (ev\nu \text{ と } e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma \text{ の } e^+ \text{ spectrometer の Acceptance, Efficiency の 比})$

$/ ((e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma \text{ の } \gamma \text{ detector の Acceptance, Efficiency})$

$/ \epsilon_{cut}$



Estimate with MC

Xe detector efficiency

$E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2} > 46 \text{ MeV}$ (>Trigger cut)

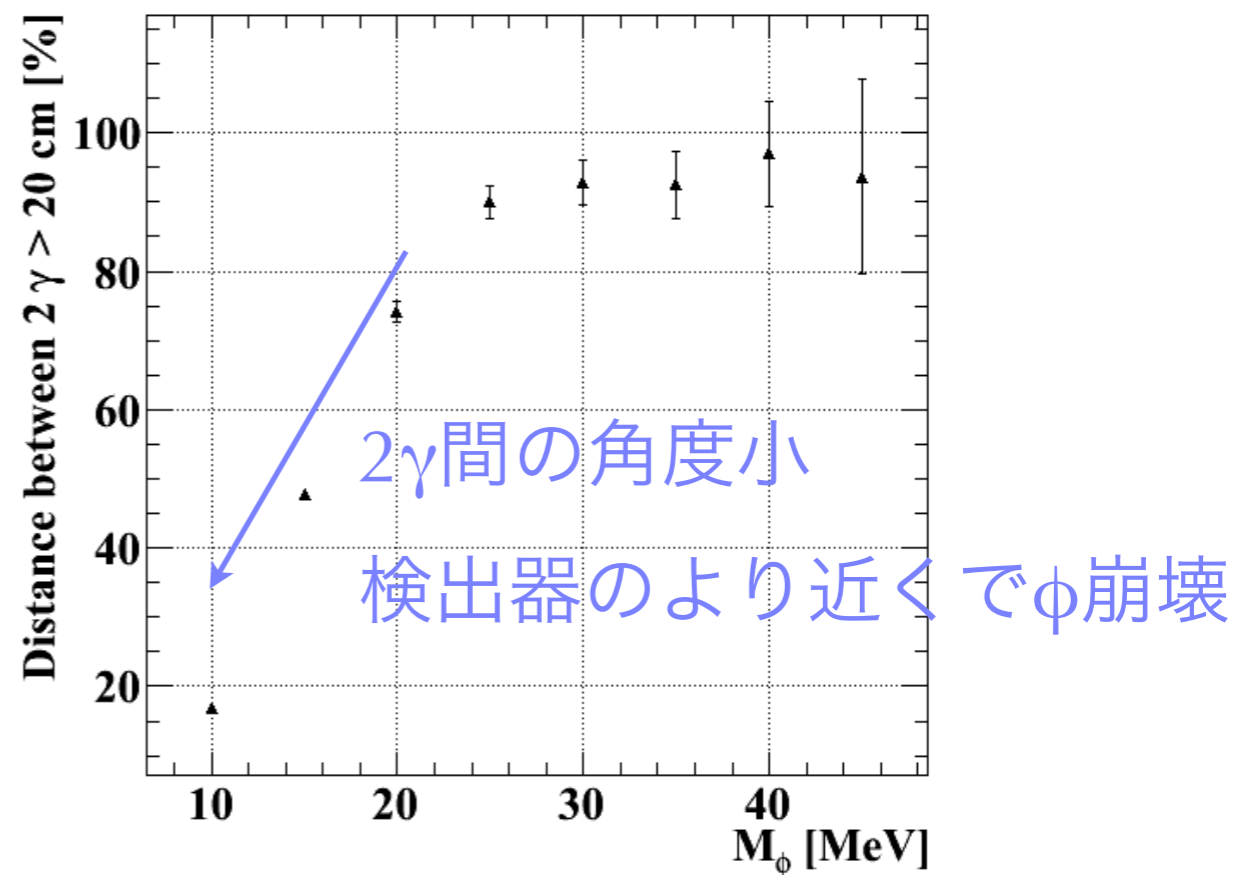
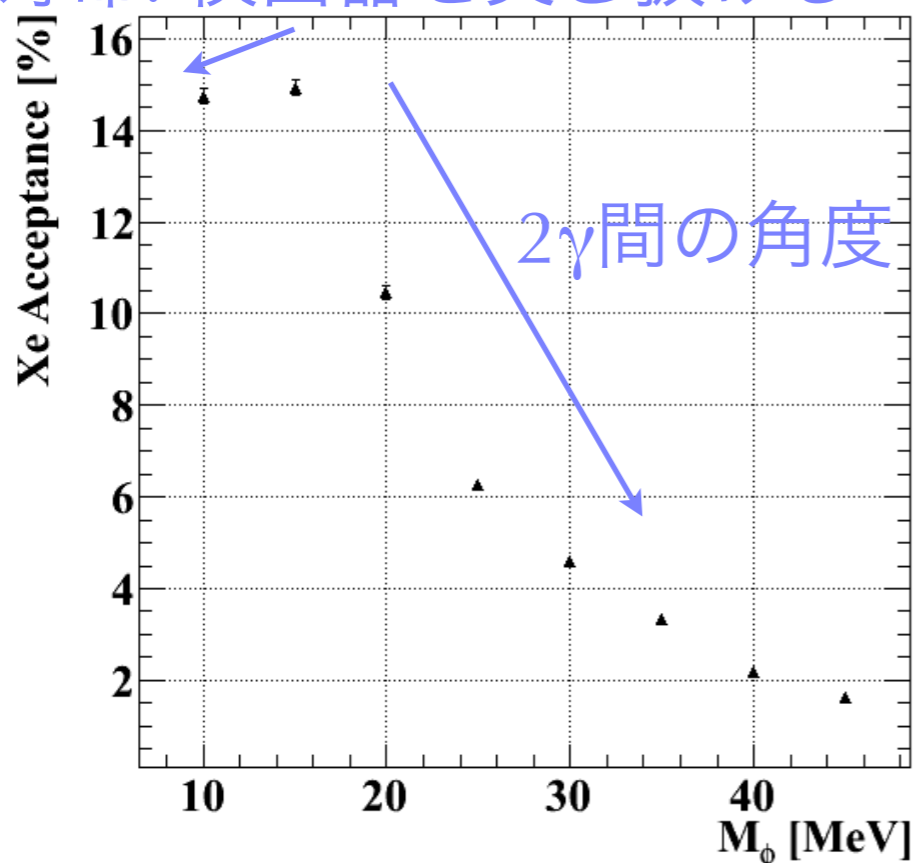
$E_{\gamma 2} > 10 \text{ MeV}$

γ 線が2つともAcceptance内

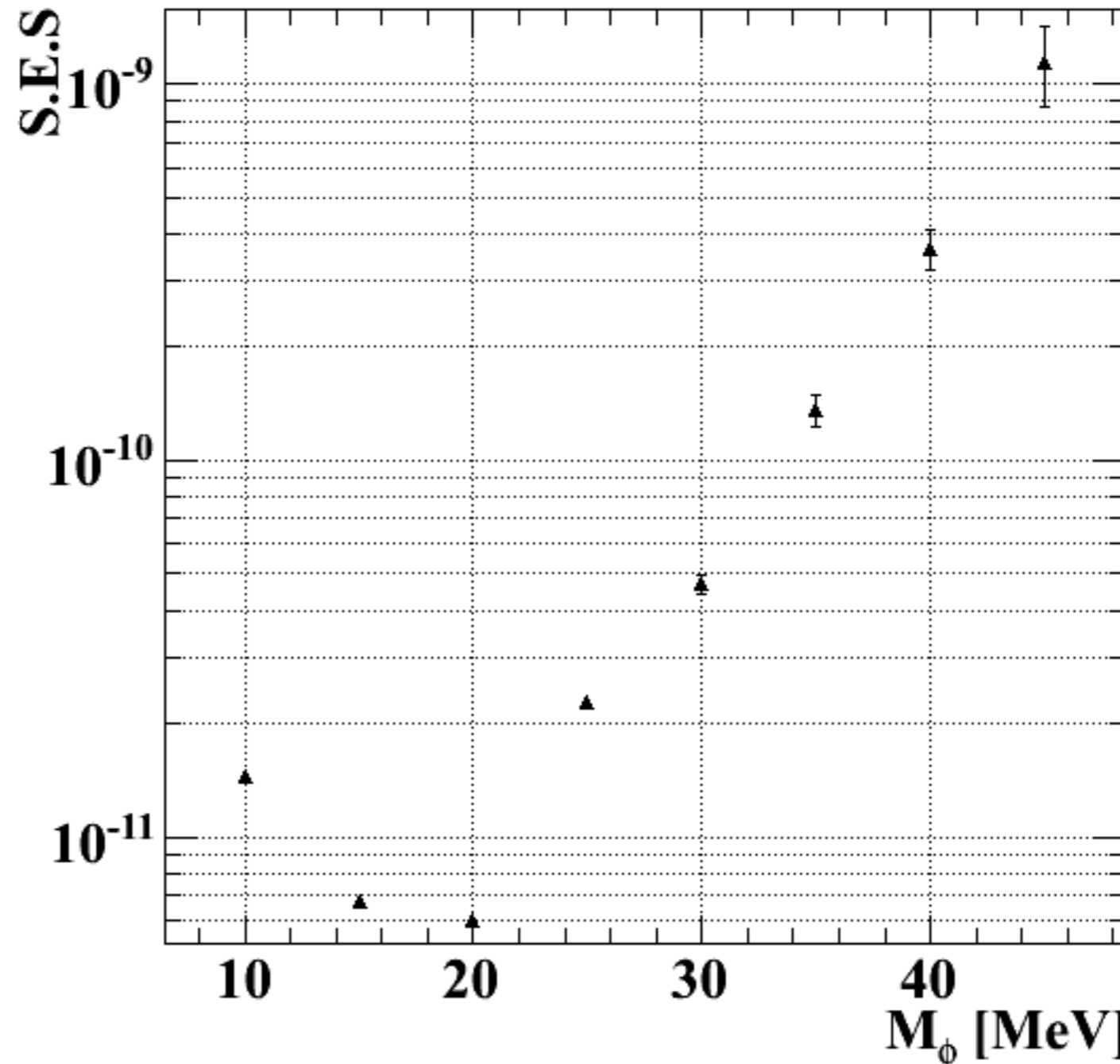
γ 線間の距離 > 20cm

(2γ の時間差を分離できないため)

長寿命: 検出器を突き抜ける



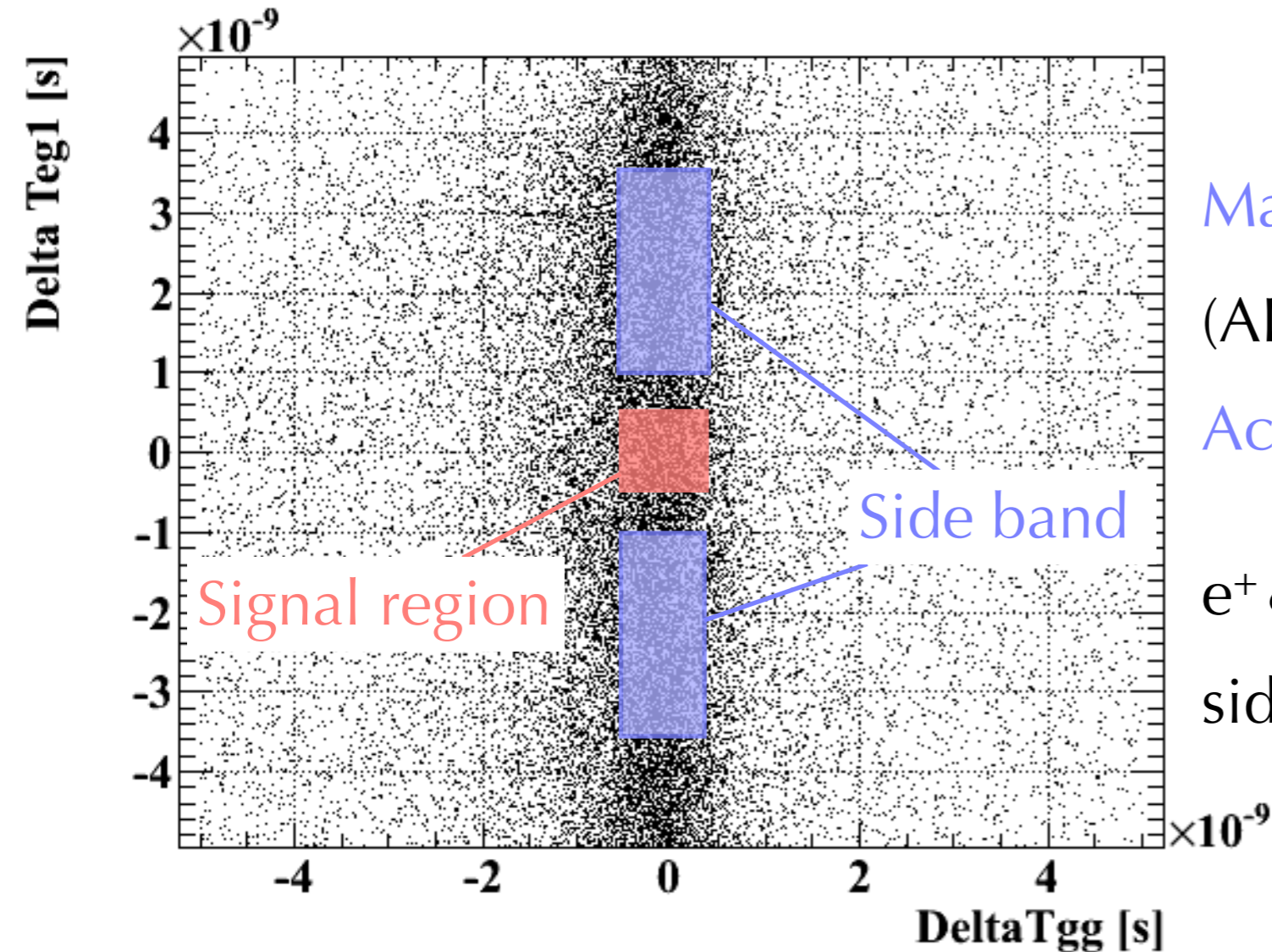
Single event sensitivity



エラーバーは統計エラー

2009, 2010年データの解析

2009, 2010 data analysis



Major B.G.: 2つの γ 線を伴う崩壊事象
(AIF 2γ 等)にMichel positronの
Accidental Coincidence

e^+ と γ の時間差が1~3.6nsecの
sideband で B.G.を見積もる

2009, 2010 data(w/o signal cut)

Result (Preliminary)

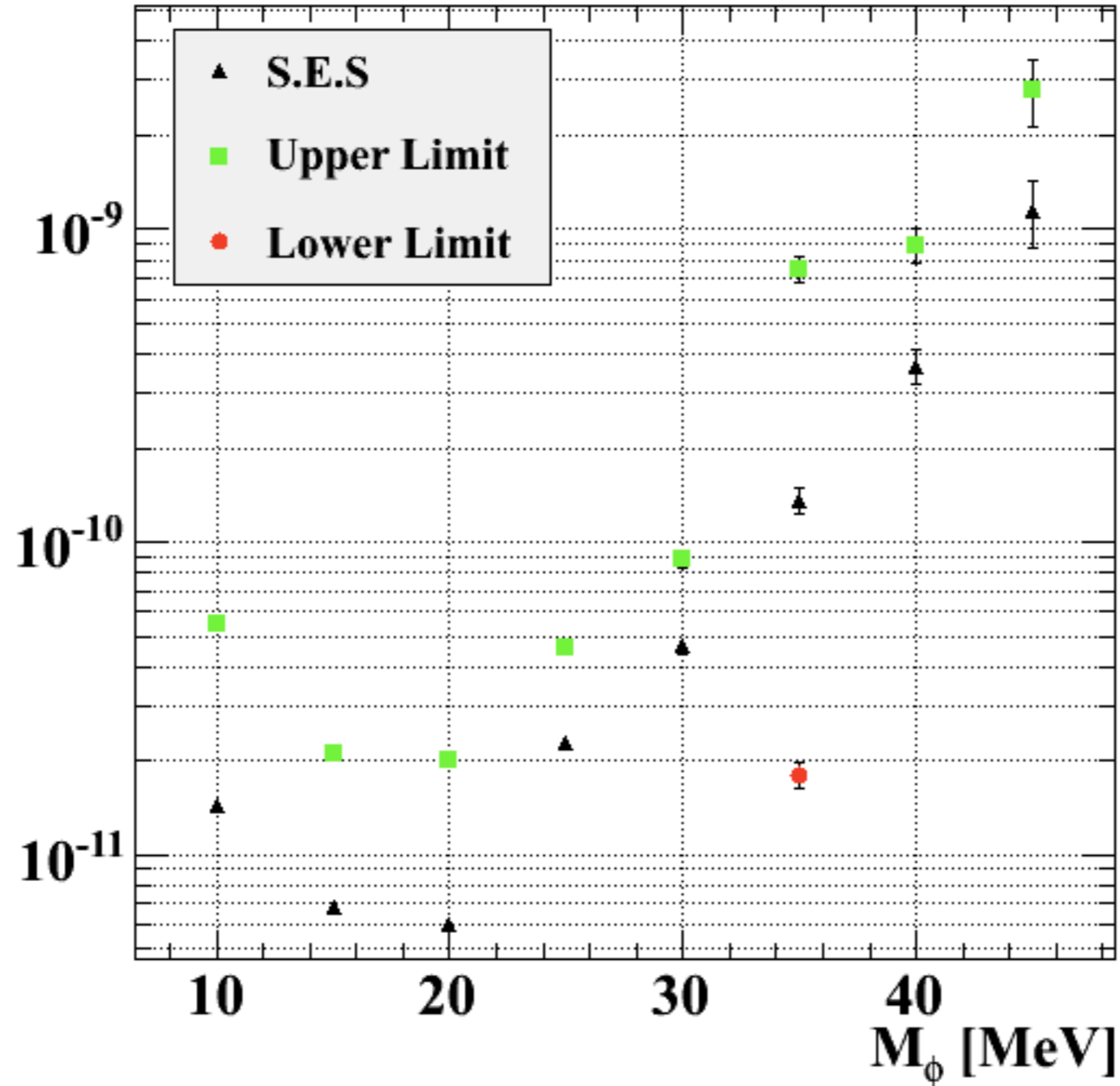
$M\phi$	10 MeV	15 MeV	20 MeV	25 MeV
S.E.S	1.4×10^{-11}	6.8×10^{-12}	6.0×10^{-12}	2.3×10^{-11}
N_{BG}	0.56	1.3	1.1	0.4
$N_{observed}$	1	1	1	0
BR(90%C.L.)	$< 5.5 \times 10^{-11}$	$< 2.1 \times 10^{-11}$	$< 2.0 \times 10^{-11}$	$< 4.6 \times 10^{-11}$
$M\phi$	30 MeV	35 MeV	40 MeV	45 MeV
S.E.S	4.7×10^{-11}	1.4×10^{-10}	3.7×10^{-10}	1.2×10^{-9}
N_{BG}	0.56	0.4	0	0
$N_{observed}$	0	2	0	0
BR(90%C.L.)	$< 8.8 \times 10^{-11}$	$> 1.8 \times 10^{-11}$ $< 7.5 \times 10^{-10}$	$< 8.9 \times 10^{-10}$	$< 2.8 \times 10^{-9}$

90%C.L. interval from the method of Feldman Cousins

(Phys. Rev. D 57, #7, p3873-3889)

JPS meeting 18/Sep./2011 @Hirosaki University

Result (Preliminary)



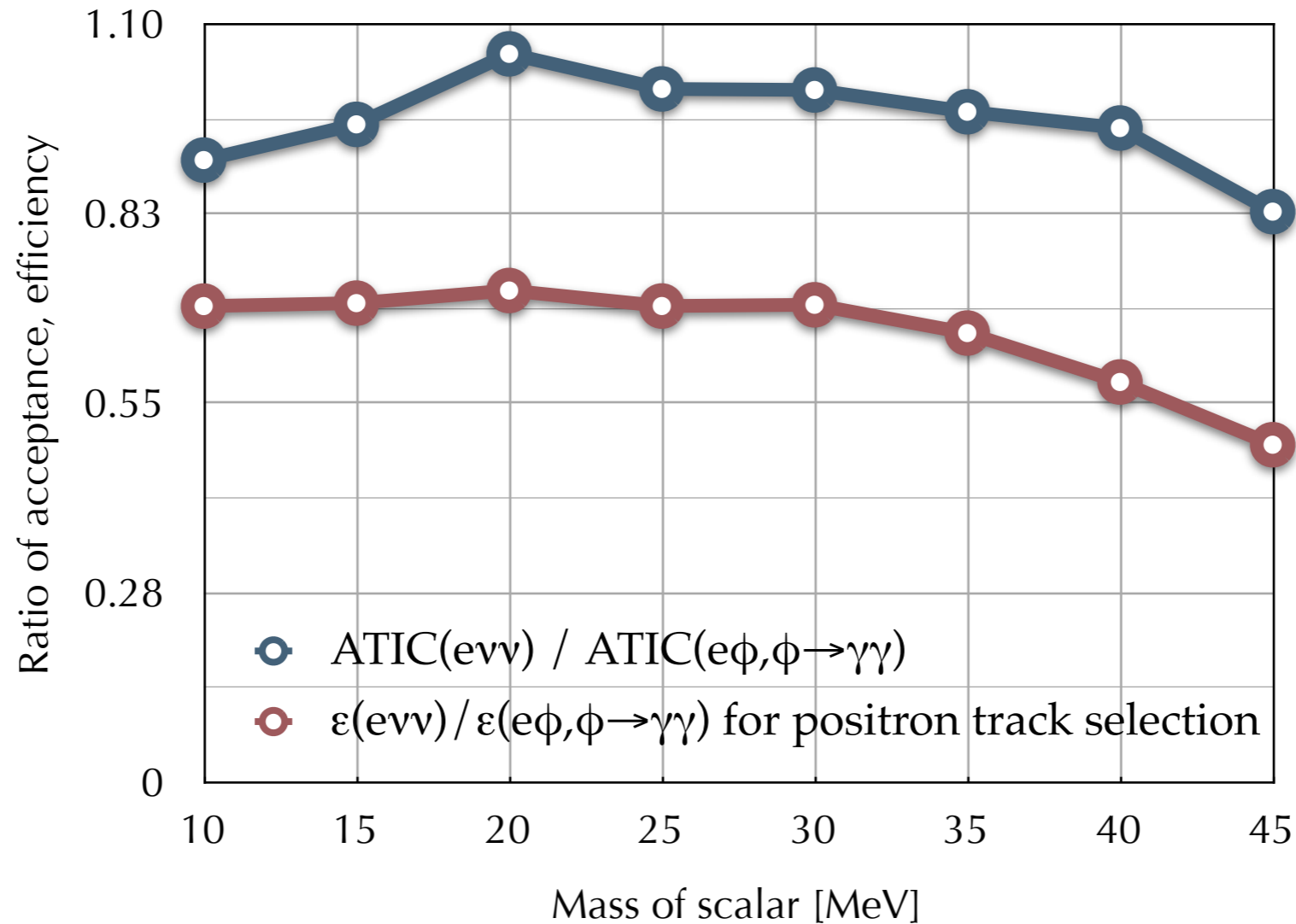
Summary and To do

- MEG実験の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索の2009,2010年のデータを用い、 $\mu \rightarrow e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ の初の探索を行った。
- $M\phi$ が10MeVから30MeVの範囲において $O(10^{-11})$ 、35-40 MeVの範囲において $O(10^{-10})$ 、45MeVにおいて $O(10^{-9})$ の分岐比上限を測定
- To do
 - MCとデータでのResolutionの違い、 γ 線検出器と e^+ spectrometerの相対位置の校正、ポジトロンの補正の考慮

End

Backup slides

Positron acceptance, selection efficiency



Timing counterのAcceptanceの比 ~ 1

2γ共にγ線検出器に入る時、ポジトロンはアクセプタンスの端のイベントは少なくなるのでトラックを引ける割合が増える

Analysis cut efficiency

ϕ の運動量と e^+ のenergy の差 $< 830\text{keV}$

ϕ の方向と e^+ の方向の差 $< 30\text{mrad}$ in θ and ϕ

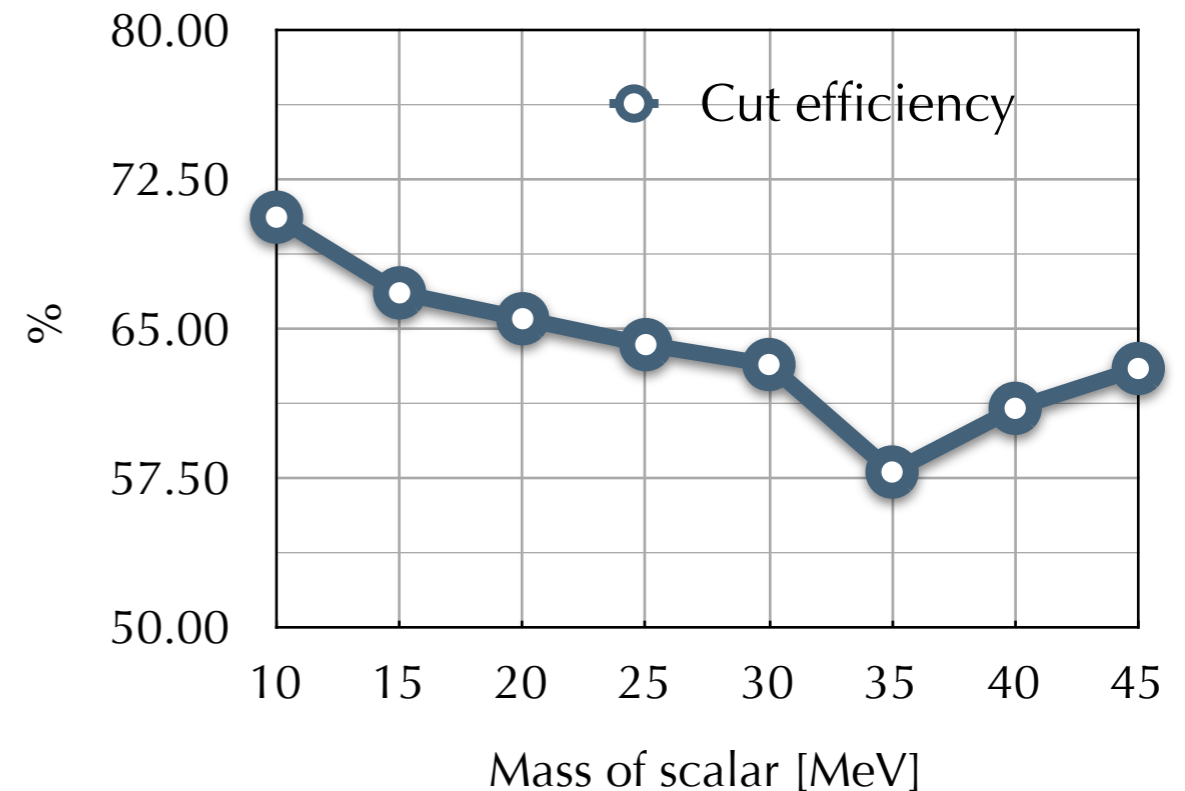
Fitした 2γ のvertex, 放出角から計算される

E_γ の差 $< 10\%$,

位置の差 $< 1\text{cm}$

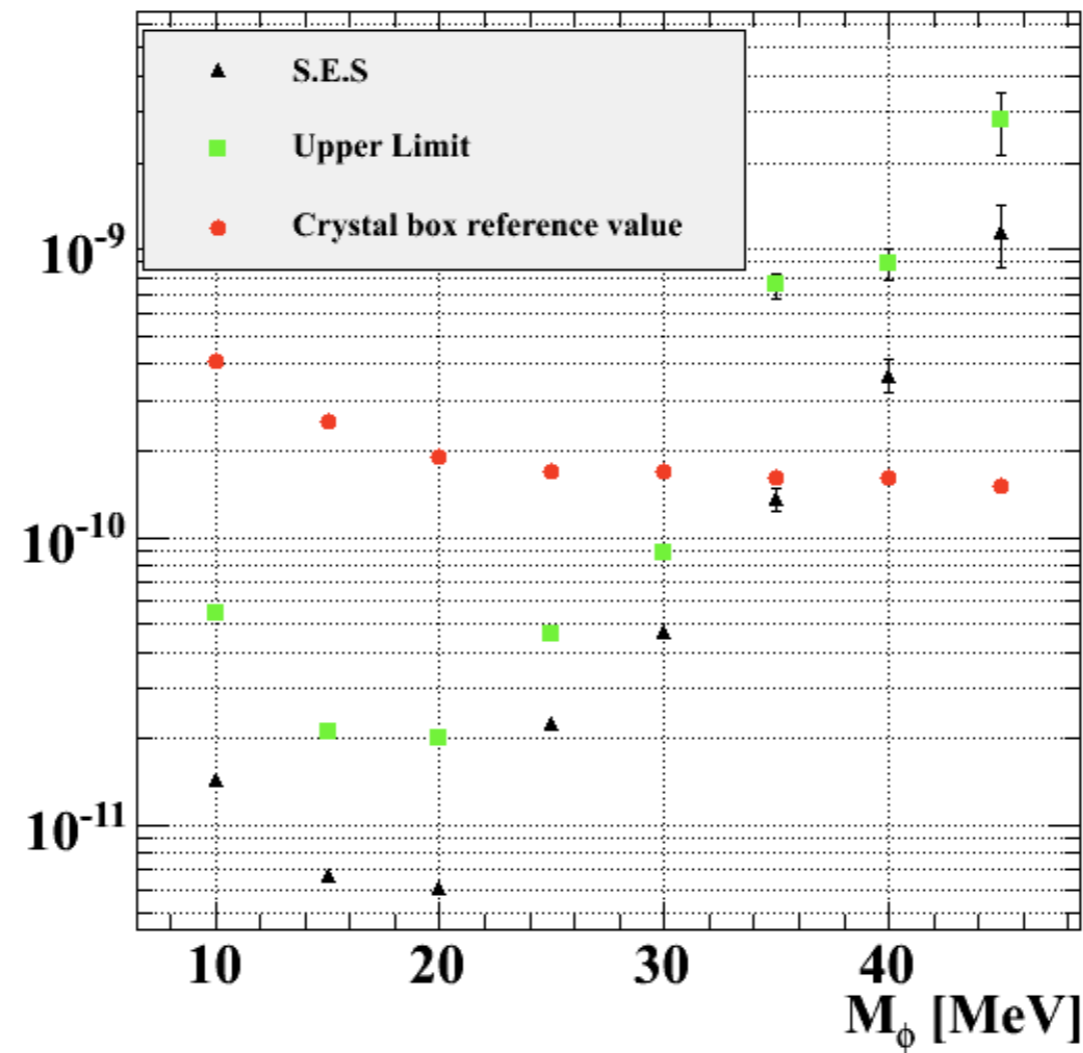
運動量の和 $< 10\text{ MeV}$

$\Delta T_{\gamma 1 e^+} < 500\text{psec}$, $\Delta T_{\gamma 1 \gamma 2} < 600\text{psec}$



Reference: scaled Crystalbox result

$$7.2 \times 10^{-11} \times N(e\gamma\gamma \text{ with some of the acc., mom cut}) \\ / N(e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma \text{ with some of the acc., mom. cut})$$

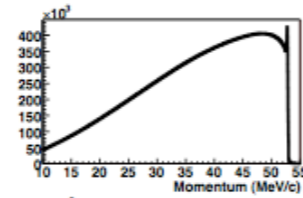


TWIST

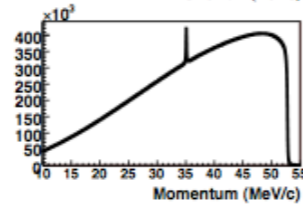
Kinematics of Two Body Decays

- ▶ Signal composed of decay positrons recoiling off X^0 at a single momentum

$m_X = 0$ global symmetry breaking



$m_X > 0$ local symmetry breaking



- ▶ Special case: In the presence of SUSY R-Parity breaking ¹

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial \cos \theta} \propto (1 + A \cos \theta) \text{ where } A = \pm \mathcal{P}_\mu$$

¹M. Hirsch and A. Vicente, PRD **79**,(2009) 055023

Results Summary

- ▶ Average \mathcal{B} compiled for $p \in [20 \text{ MeV}/c, 52 \text{ MeV}/c]$

Decay signal		90% Upper Limit
$A = 0$	Average	8.1×10^{-6}
	Endpoint	3.3×10^{-5}
$A = -1$	Average	8.4×10^{-6}
	Endpoint	6.7×10^{-5}
$A = +1$	Average	5.7×10^{-6}
	Endpoint	8.5×10^{-6}
Bryman, 1986 ²	Average	3×10^{-4}
Jodidio, 1986 ³	Endpoint	2.5×10^{-6}

Conclusions

- ▶ 5×10^8 muon decay events used to estimate $\mathcal{B} = \frac{\Gamma(\mu^+ \rightarrow e^+ X^0)}{\Gamma(\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu)}$
- ▶ Discriminate isotropic and anisotropic decay signals
 - ▶ First direct measurement
- ▶ Improved upper limit in massive X^0 case by a factor of 32
 - ▶ No evidence of signals when $A \geq 0$
 - ▶ Average of 90% upper limit between 5.7 and 8.4 ppm
- ▶ Limits set on massless X^0
 - ▶ 90% upper limit between 8.5 and 33 ppm