

MEG実験2009, 2010年取得データを用いた
 $\mu \rightarrow e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ 事象の探索

KEK 協力研究員 名取寛顕
他 MEGコラボレーション

本研究のテーマ

- MEG実験 2009年、2010年取得データを使い、未発見の軽い中性新粒子 (本論文では ϕ と呼称)を媒介とした $\mu \rightarrow e\phi$ 、 $\phi \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊事象を探索する
- 本研究では、 ϕ をミュー粒子より軽く、崩壊幅が非常に小さく寿命の長い (擬)スカラー粒子であり、等方的な分布であると仮定し、Cut 解析で解析を行った

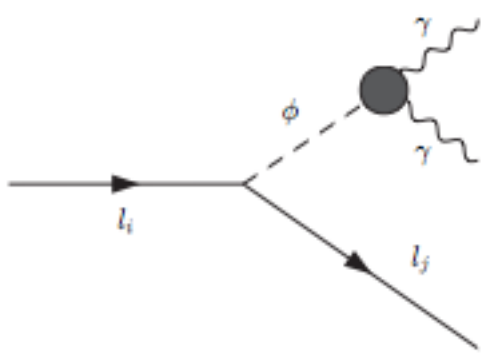
cLFVを媒介する軽い新粒子

- 新粒子の発見や標準理論で厳しく制限されている荷電粒子でのレプトンフレーバー非保存の反応 (cLFV) の観測が標準理論を超えた新たな物理探索へのヒントとなることが期待される
- 通常の粒子との相互作用が極めて小さい粒子の場合、過去の実験で未発見のまま残されている粒子が存在する可能性がある

新軽粒子の理論上の可能性

- “Approximate symmetry” の自発的な破れに伴う擬南部ゴールドストーンボソン
 - 不自然なFine tuningなどを伴わない
 - 軽い粒子を自然な形で導入可能
 - この考え方の実例： π 中間子 (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粒子として理解することが出来る)
- 本論文での探索粒子の候補: two-Higgs doublet model の粒子“A”, Axion, Majoron, FAMILON, etc.

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



ϕ の崩壊モード、崩壊幅、寿命、

Cheng-Sher ansatz,
Yukawa coupling

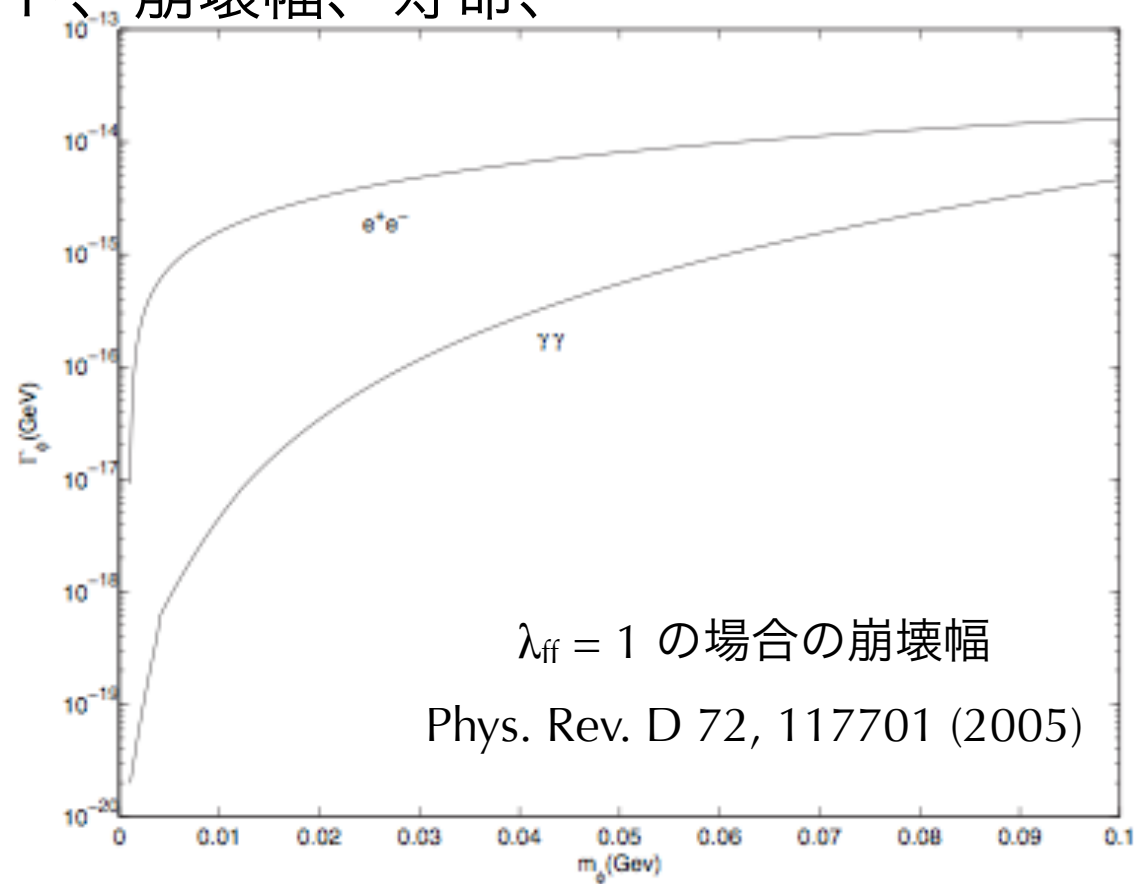
$$\lambda_{ij} \frac{\sqrt{M_i M_j}}{v} \gamma_5$$

$$\Gamma(\phi \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{\alpha^3 M_\phi}{16\pi^2 s_{2W}^2} \left(\frac{M_\phi}{M_Z}\right)^2 |F|^2,$$

$$F = \sum_{f=l,q} N_C^f Q_f^2 \lambda_{ff} x f(x),$$

$$f(x) = \begin{cases} \left(\arcsin \frac{1}{\sqrt{x}}\right)^2 & x \geq 1, \\ -\left(\operatorname{arccosh} \frac{1}{\sqrt{x}} - \frac{ix}{x}\right)^2 & x < 1, \end{cases}$$

$x = 4M_f^2/M_\phi^2$, N_C^f is the color index, and Q_f is the electric charge



$\lambda_{ff} = 1$ の場合の崩壊幅
Phys. Rev. D 72, 117701 (2005)

Tree levelで可能な崩壊は $e\bar{e}$ と $\gamma\gamma$ への崩壊のみ

崩壊幅の数値計算より、 $\Gamma_\phi \ll m_\phi$ で崩壊幅は非常に小さく、長寿命であると期待されるので

ϕ を媒介とする $\mu \rightarrow e\phi$, $\phi \rightarrow \gamma\gamma$ は2つの二体崩壊として取り扱える

($\Gamma_\phi = 10^{-15} \text{ GeV}$ の時 $\tau_\phi = 658 \text{ psec}$, $658 \text{ psec} \times c \sim 20 \text{ cm}$)

ミュー粒子崩壊の過去の実験例

Decay mode	Branching ratio
$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$	$\sim 100\%$
$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \gamma$	$(1.4 \pm 0.4) \times 10^{-2}$ [3]
$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$	$(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}$ [4]

Decay mode	Upper Limit (90% C.L.)
$\mu^- \rightarrow e^- \nu_e \bar{\nu}_\mu$	$< 1.2 \times 10^{-2}$ [5]
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$	$< 2.4 \times 10^{-12}$ [6]
$\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$	$< 1.0 \times 10^{-12}$ [7]
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma \gamma$	$< 7.2 \times 10^{-11}$ [8]
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma X^0$	$< 1.1 \times 10^{-9}$ [8] ¹
$\mu^+ \rightarrow e^+ X^0$	$< 3 \times 10^{-4}$ [9] ²
$\mu^+ \rightarrow e^+ X^0$	$< 2.6 \times 10^{-6}$ [10] ³
$\mu^+ \rightarrow e^+ X^0, X^0 \rightarrow e^+ e^-$	$< 1 \times 10^{-10}$ [11] ⁴

MEG

Crystalbox

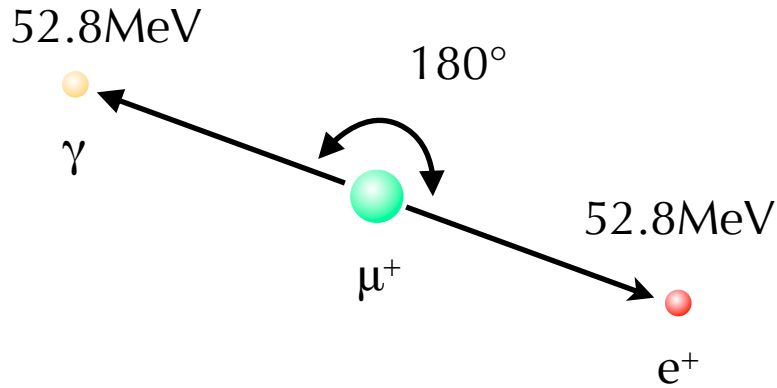
SINDRUM

cLFV
未発見

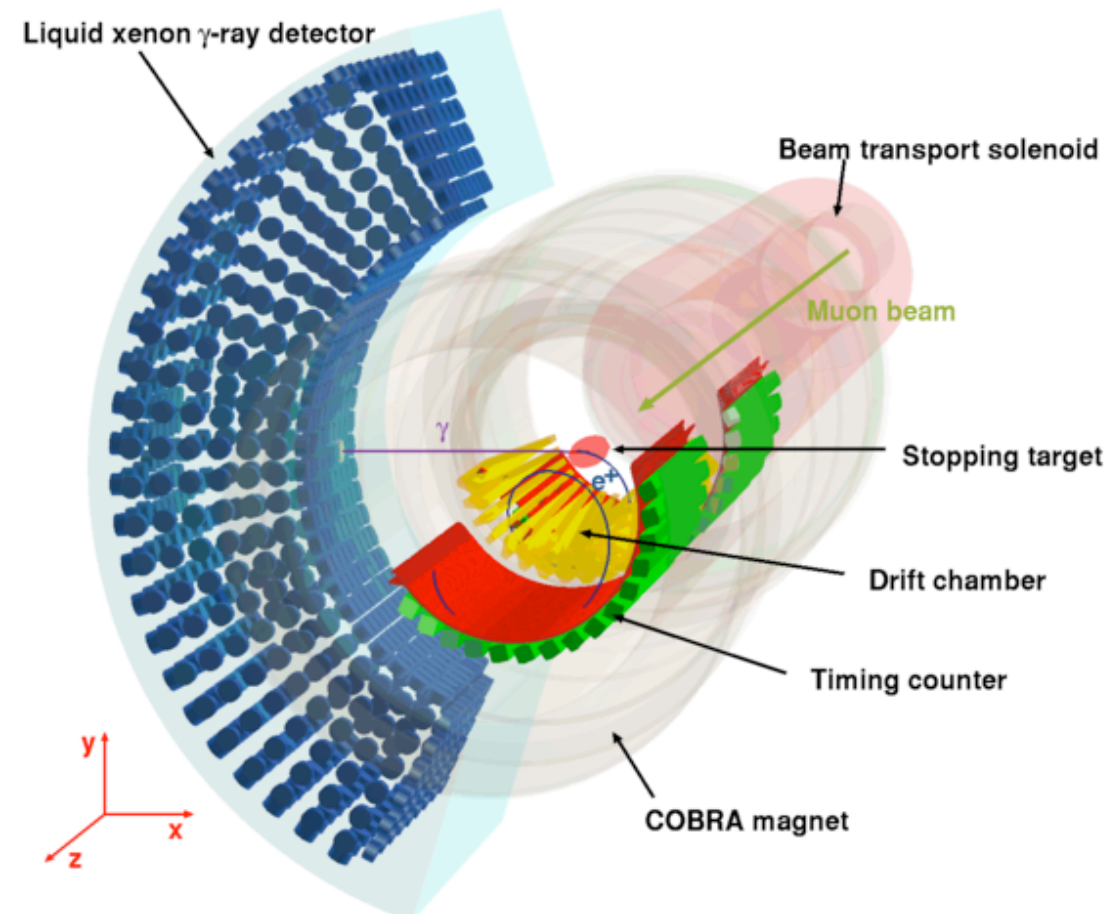
exoticな
粒子を伴う

- eeへの崩壊分岐比の上限値がγγへの崩壊の大きな制限となりうる ($\lambda_{ff}=1$ の数値計算結果からはおよそ2桁差があるので $O(10^{-12})$ 以下の制限となる)
- カップリングはモデル依存であり、 $Br(\phi \rightarrow \gamma\gamma) > Br(\phi \rightarrow ee)$ もありえ、γγへの崩壊事象の探索も意義がある
- $\mu \rightarrow e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ の崩壊モードは本研究が初の探索である

MEG実験



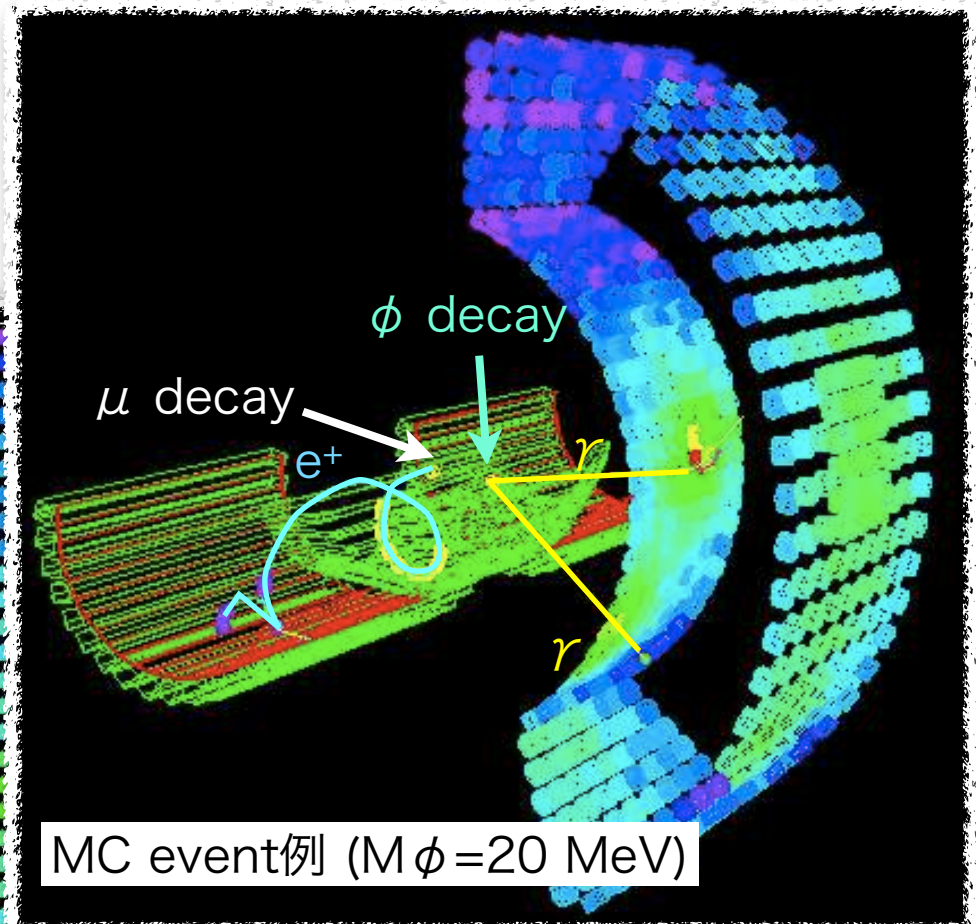
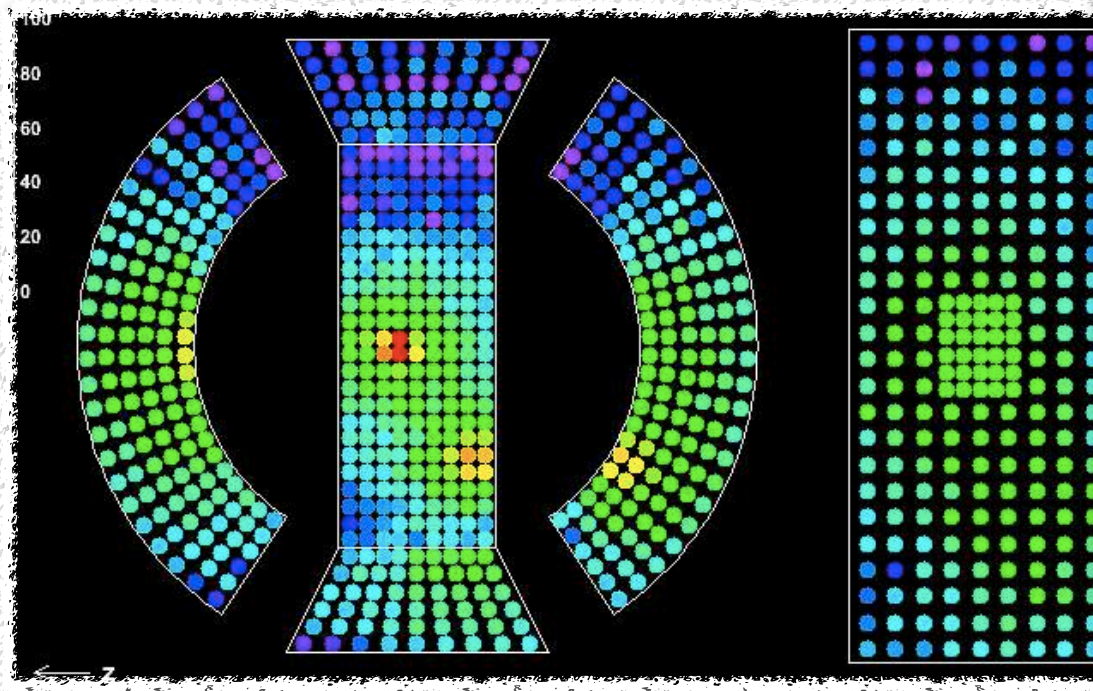
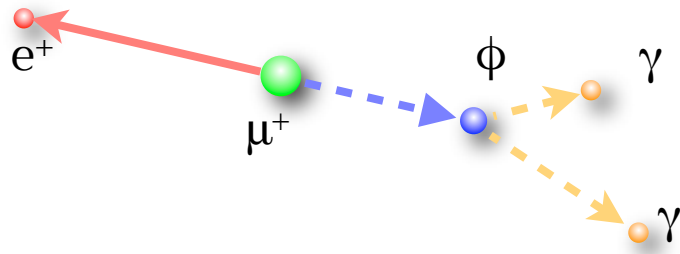
- $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索に特化したデザイン
静止 μ^+ の崩壊からの e^+ と γ のデータを取得
- $3 \times 10^7 \mu^+ / \text{sec}$ DC ミューオンビーム
- ガンマ線検出器
 - シンチレータ: 液体キセノン
846本の光電子増倍管
 - $\Omega/4\pi \sim 10\%$
- ポジトロンスペクトロメータ
 - 勾配磁場中の軌道を16枚のドリフトチェンバー、時間をタイミングカウンターで記録
 - 52.8MeV e^+ に対して $\Omega/4\pi \sim 10\%$
 - 40MeV以上の e^+ のデータを取得



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

崩壊幅が非常に小さく寿命が長いと期待されるので

2つの二体崩壊として取り扱う



$M\phi$ が軽ければ e^+ の運動量は $\mu \rightarrow e\gamma$ の場合と近く、またローレンツブーストによって γ 間の角度が小さくなるとガンマ線が両方共検出器に入り、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 取得トリガーを満たす場合が増える

$\mu \rightarrow e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊解析

Analysis

- Cut analysis
- Time sidebandを使ったAccidental background 数の見積り
- Normalization
 - MEG triggerと同時取得のMichelポジトロン数を使ってNormalize
- 90%C.L.での分岐比上限下限をRolkeの方法で算出
 - B.G.とsignal efficiencyの誤差を考慮。Combination of $\ln L+1/2$ and profile likelihood. Poisson分布のSignal, Poisson分布 or Gauss分布のB.G., Gauss分布 or Binomial分布のEfficiencyから上限値、下限値を計算する。(本論文ではGauss分布で扱っている。今回の結果ではPoisson分布で扱った場合と差がないことを確認している)

Cut

Signal MCとデータのバックグラウンドを比較して決定

Gamma-ray acceptance

- $|u_{rec,\gamma}| < 25\text{cm} \wedge |v_{rec,\gamma}| < 71\text{cm}$ for each gamma-rays

Cut for pileup identification

- $\sqrt{(u_{\gamma 1} - u_{\gamma 2})^2 + (v_{\gamma 1} - v_{\gamma 2})^2} > 20\text{cm}$

Energy selection

- $|E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2} + E_{e^+} - M_{\mu}| < M_{\mu} \times 10\%$
- $E_{\gamma 2} > 10\text{MeV}$
- $|P_{e^+} - P_{\phi}| < 1\text{MeV}$

Time selection

- $|t_{\gamma 1 e^+} - 0.1\text{ns}| < 0.5\text{ns}$
- $|t_{\gamma 1 \gamma 2}| < 0.5\text{ns}$

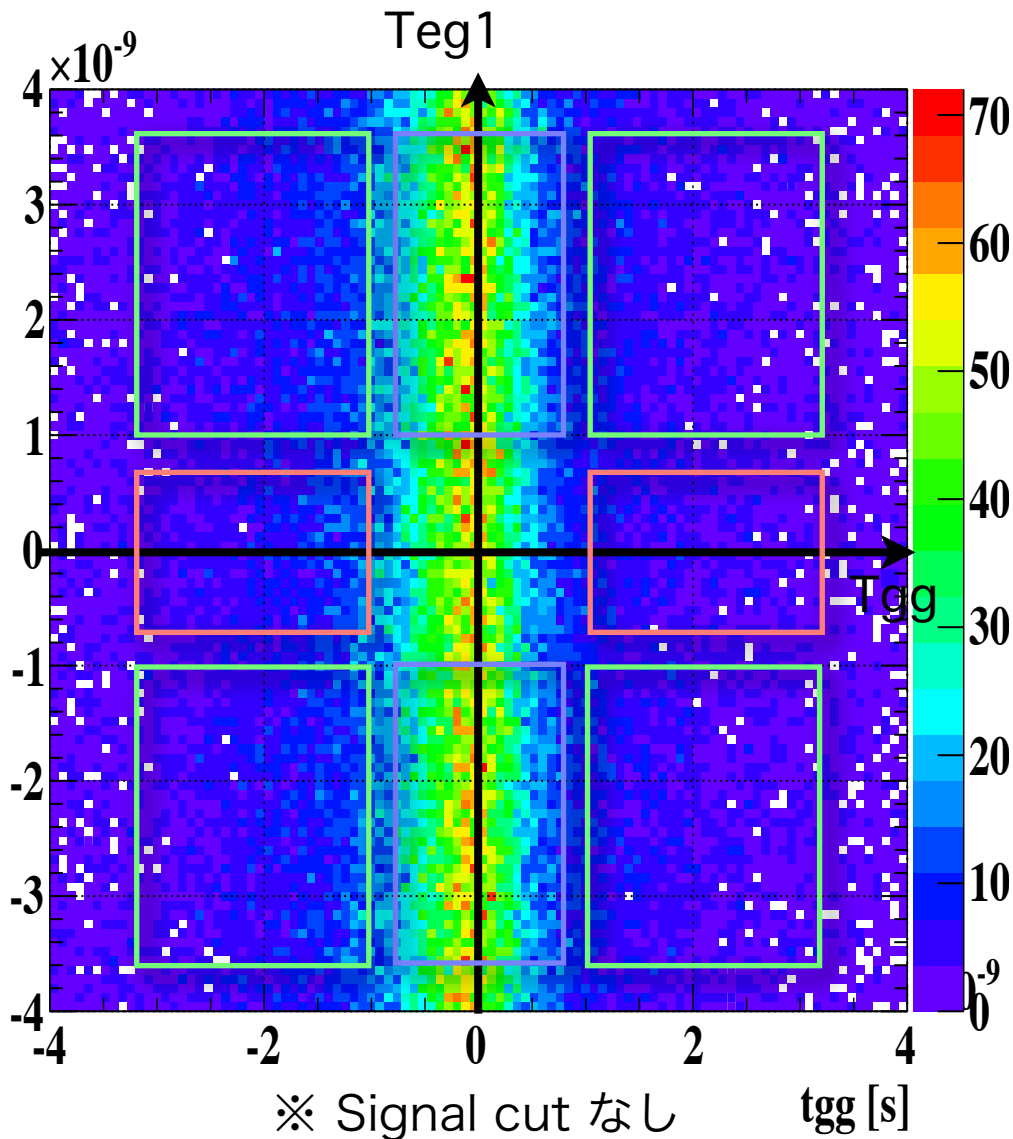
Certification for the quality of ϕ decay vertex fit

- $-4\text{MeV} < E_{rec,\gamma i} - E_{\gamma i}^{vtxfit}(M_{\phi}, \vartheta_{rest}) < 2\text{MeV}$ for $\gamma i = \gamma 1, \gamma 2$
- $|\theta_{rec, \vec{dir}_{e^+}} - \theta_{\vec{dir}_{\phi}}^{vtxfit}| < 30\text{mrad}$
- $|\varphi_{rec, -\vec{dir}_{e^+}} - \varphi_{\vec{dir}_{\phi}}^{vtxfit}| < 30\text{mrad}$
- $\sqrt{(u_{rec,\gamma i} - u_{\gamma i}^{vtxfit})^2 + (v_{rec,\gamma i} - v_{\gamma i}^{vtxfit})^2} < 2\text{ cm}$ for $\gamma i = \gamma 1, \gamma 2$
- $|w_{rec,\gamma i} - w_{\gamma i}^{vtxfit}| < 1\text{ cm}$ for $\gamma i = \gamma 1, \gamma 2$

Momentum conservation

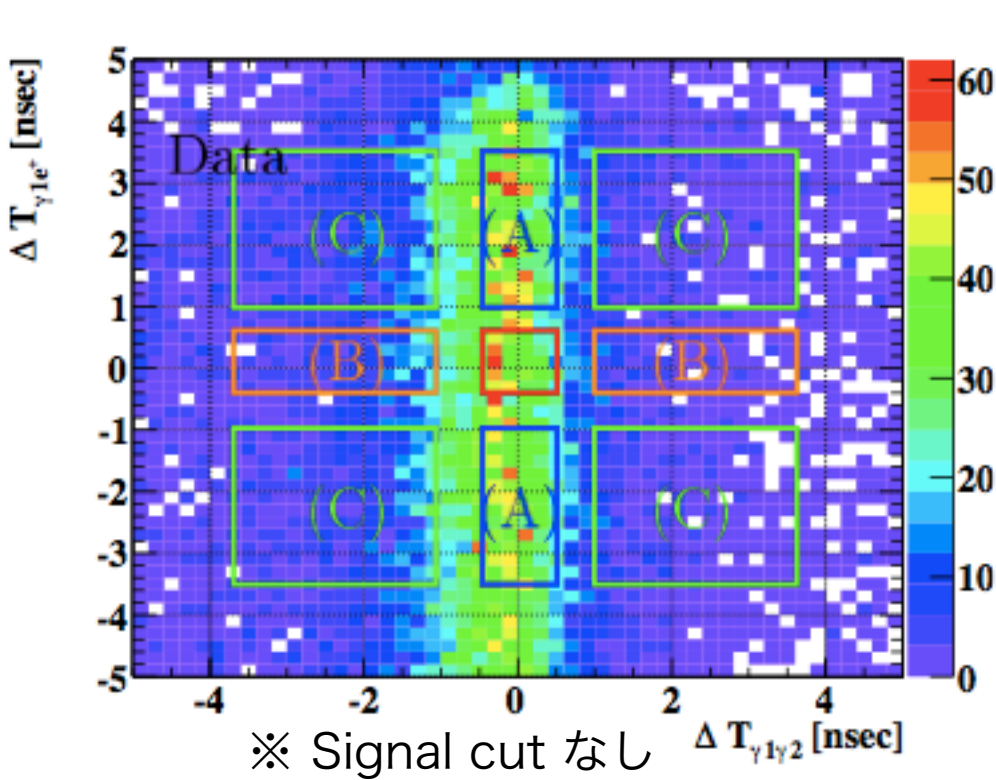
- $|P_{sum,perp}| < 1.5\text{MeV}$
- $-5\text{MeV} < P_{sum,para} < 2\text{MeV}$
- $|P_{sum,orth}| < 3\text{MeV}$

バックグラウンドと time sideband

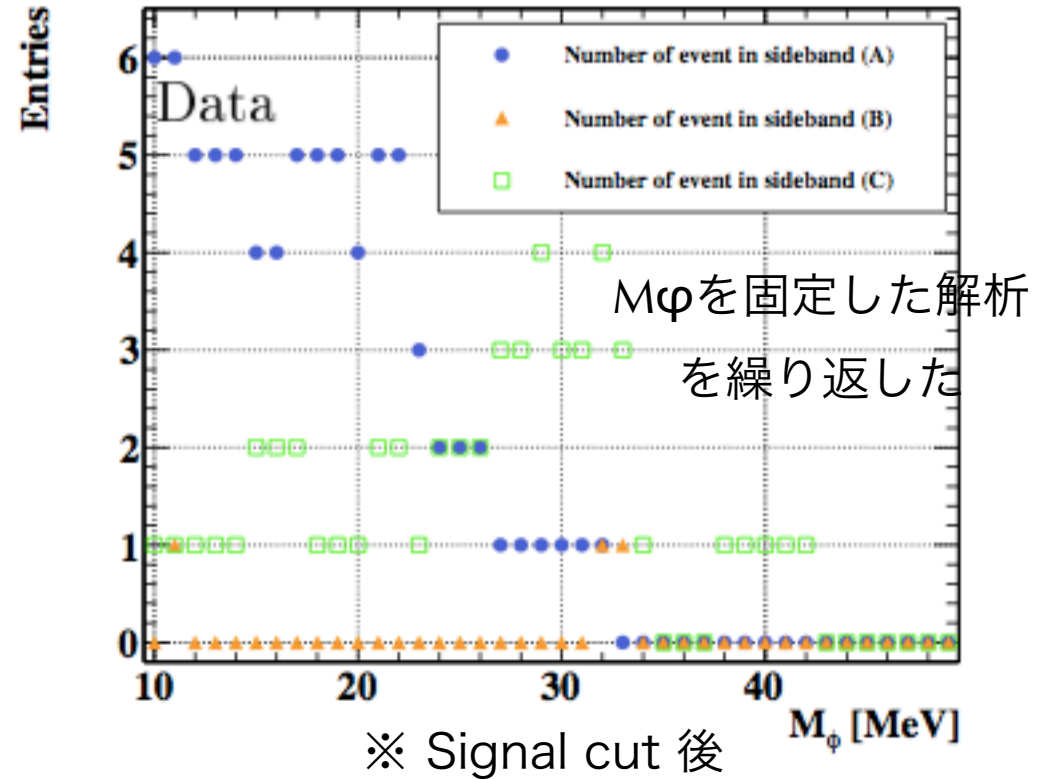


- B.G.1: 2γ が同時 (positron annihilation in flight (AIF) 2γ 等 + e^+)
 - $|tgg| < 500\text{psec}$
 - $t\text{eg}1: \pm 1\text{nsec} \sim \pm 3.6\text{nsec}$
- B.G.2: e^+ と一方の γ 線が同時 ($\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma + 1\gamma$ 等)
 - $tgg: \pm 1\text{nsec} \sim \pm 3.6\text{nsec}$
 - $|t\text{eg}1| < 500\text{psec}$
- B.G.3: 3粒子とも同時ではない
 - $tgg: \pm 1\text{nsec} \sim \pm 3.6\text{nsec}$
 - $t\text{eg}1: \pm 1\text{nsec} \sim \pm 3.6\text{nsec}$

Time sidebandでの観測数と バックグラウンド数

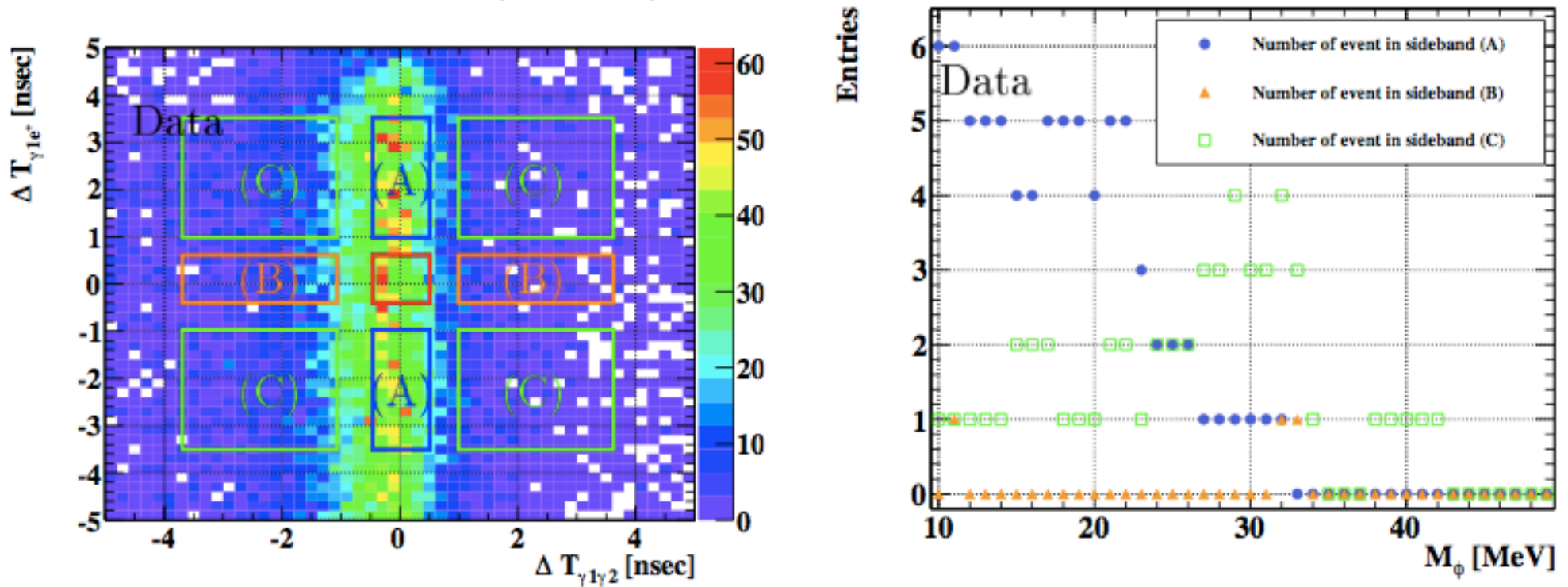


(a) Time structure of preselected events.



(b) Distribution of the number of observed events in each time sideband

Signal regionでのB.G.の期待値

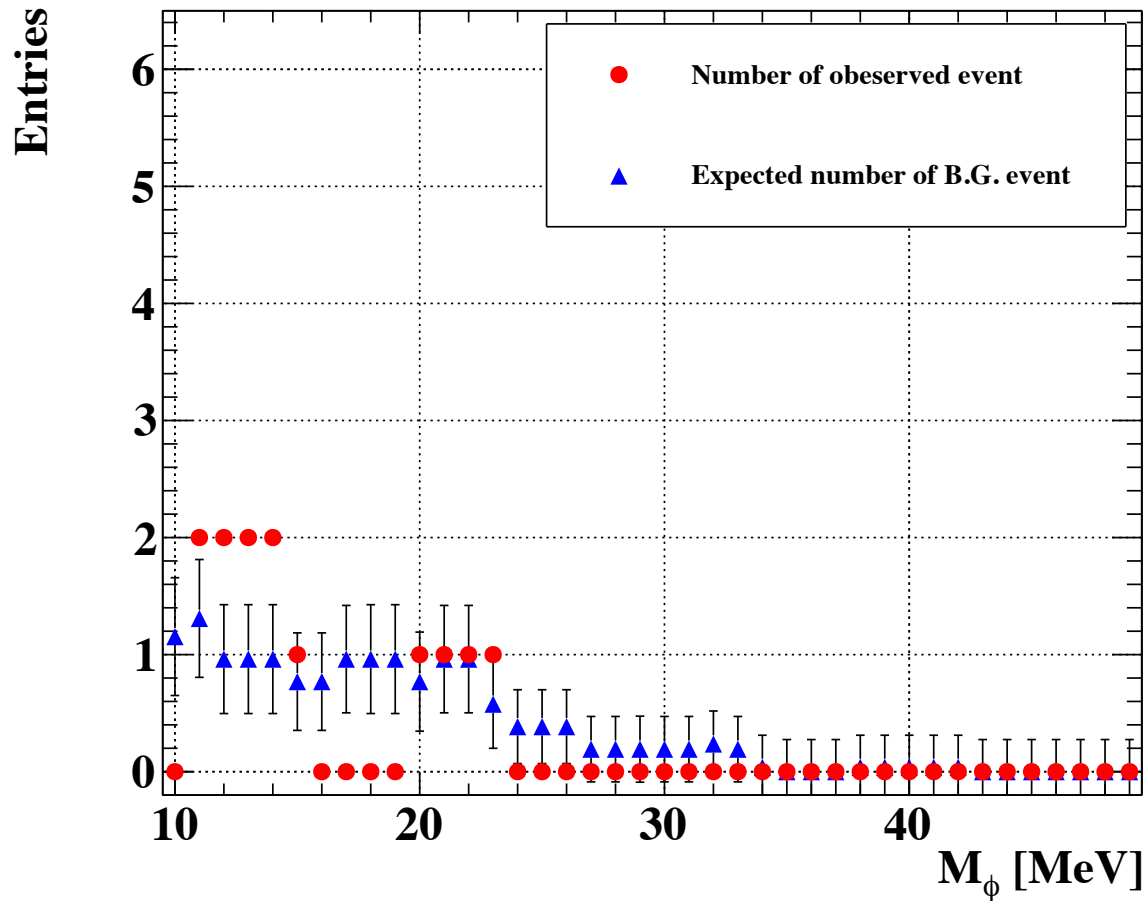


(a) Time structure of preselected events.

(b) Distribution of the number of observed events in each time sideband

- case I: obs. (A), (B), (C) > 0
 $N_{B.G.} = (N_{obs(A)} \text{ term}) + (N_{obs(B)} \text{ term}) - (N_{obs(C)} \text{ term})$
 (i)の(B)にしみだしたテールとB.G.iiiは(C)で差っ引く
- case II: obs. (B)=0
 $N_{B.G.} = (N_{obs(A)} \text{ term})$
- case III: obs. (A), (B) = 0, (C)>0
 $N_{B.G.} = (N_{obs(C)} \text{ term})$

シグナルボックスの観測数と バックグラウンド数の期待値



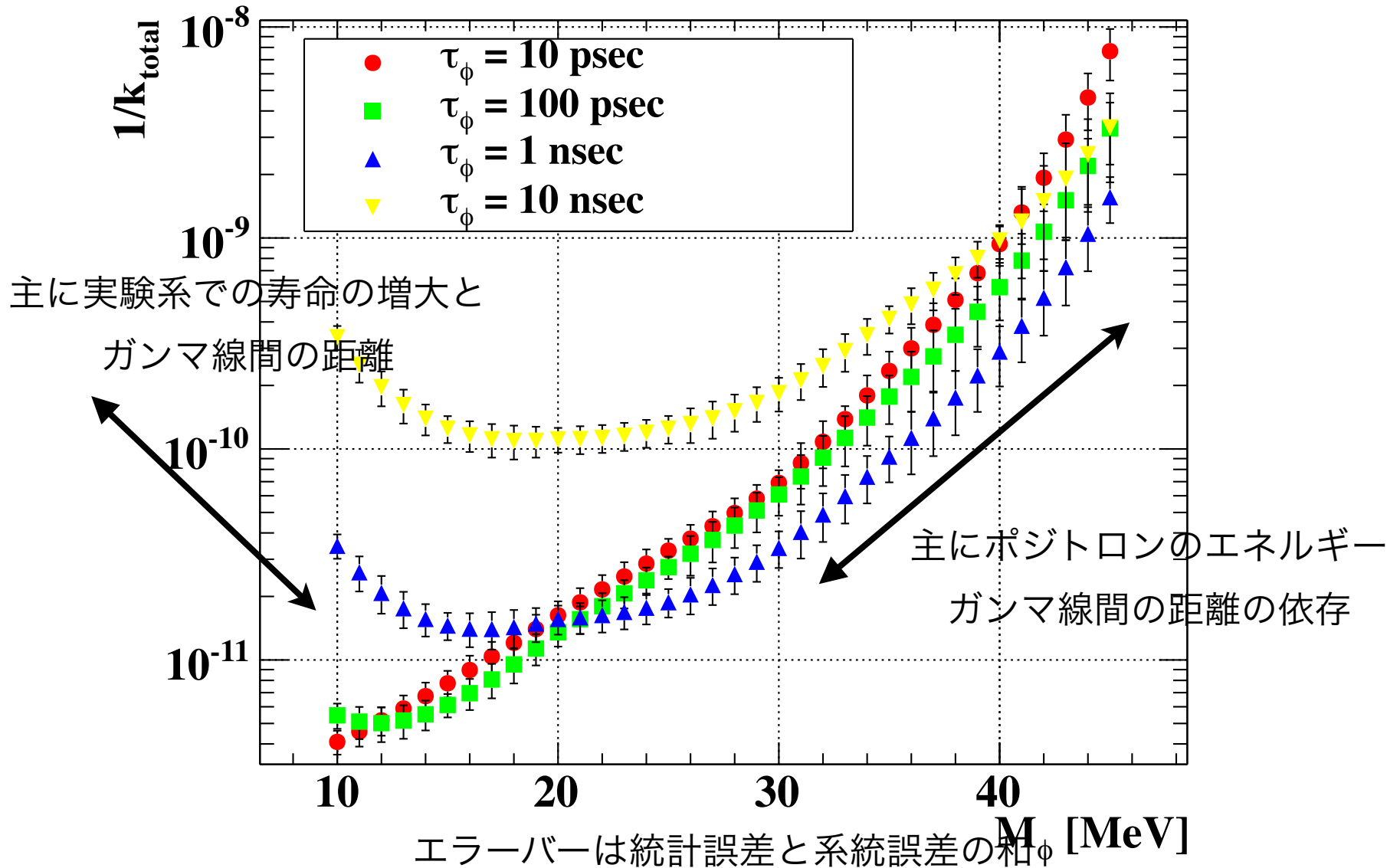
Totalで observed event数は4、

期待されるバックグラウンド数は2.7

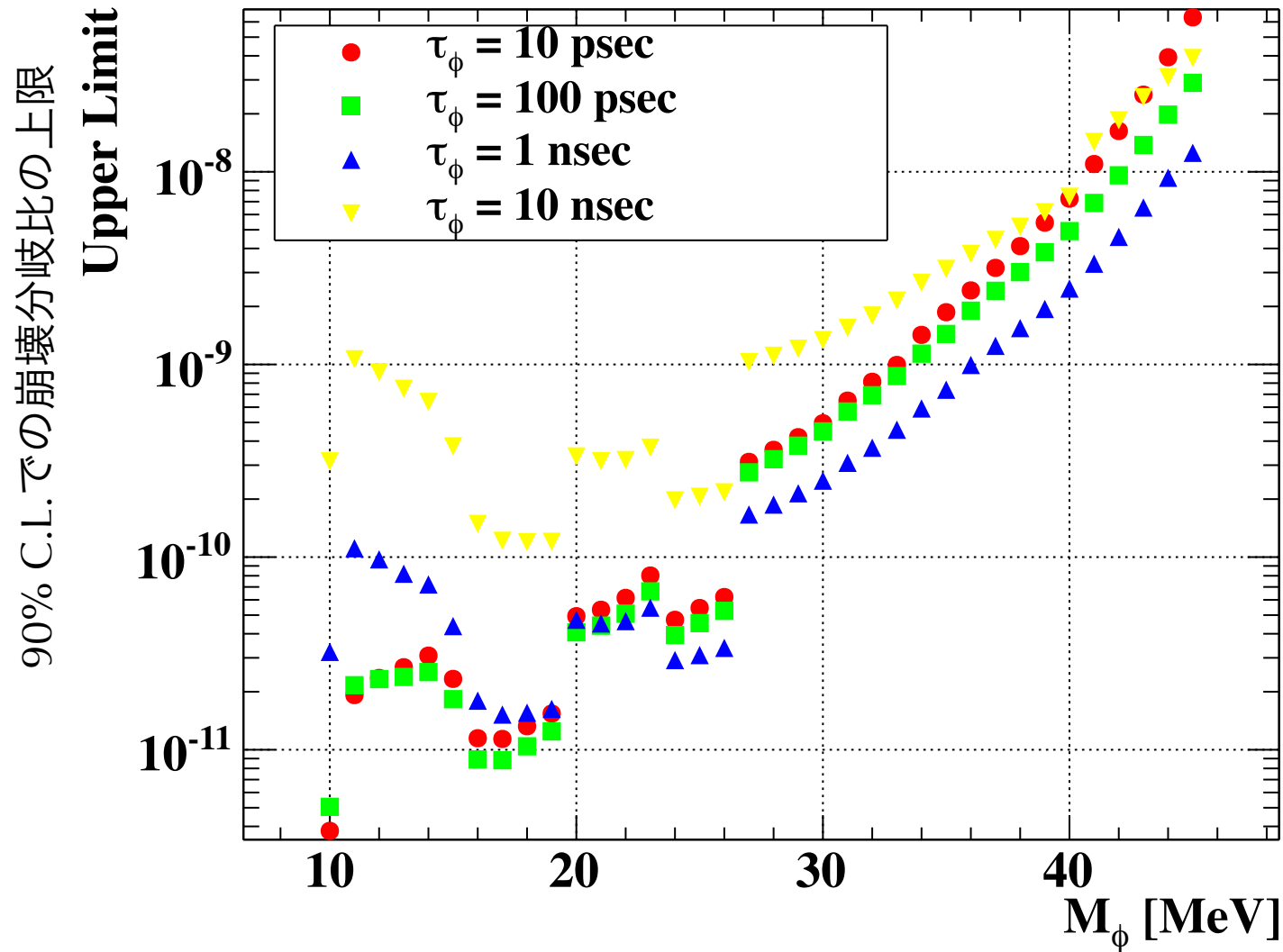
エラーバーはSidebandでの統計誤差からくる系統誤差

Single event sensitivity

- MEG triggerと平行取得のMichelポジトロン数、MC見積もった Efficiencyで算出



Branching ratioの測定結果 (系統誤差 込)



結論

- MEG実験 2009年、2010年取得データを使い、未発見の軽い中性新粒子 (本論文では ϕ と呼称)を媒介とした $\mu \rightarrow e\phi$ 、 $\phi \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊事象の世界初の探索を行った
- 残念ながら発見には至らなかったが、 $10 < M\phi < 45 \text{ MeV}$, $\tau\phi = 10\text{psec}$, 100psec , 1nsec , 10nsec の場合について崩壊分岐比の上限値を与え、測定精度の良い所では $O(10^{-11})$ の上限値を与えた

End

MCの調整

- Normalization の見積りがMCに依存しているため、MCをreconstructionの smearingで調節
- ポジトロンはドリフトチェンバーのヒット精度をデータと合うよう smear し、さらに軌道の再構成に残っている差異を smearして調整
- ガンマ線は1つのガンマ線入射の場合で精度が合うよう smearして調整し、2ガンマの場合と1ガンマの場合との位置、エネルギーの差を Systematic uncertaintyとした
- 2つのガンマ線の時間については適した実験データがないため conservative な値として smearした量の2倍の値(150psec)を Systematic uncertainty としている

ミュー粒子崩壊の過去の実験例

Decay mode	Branching ratio
$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$	$\sim 100\%$
$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \gamma$	$(1.4 \pm 0.4) \times 10^{-2}$ [3]
$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$	$(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}$ [4]

Decay mode	Upper Limit (90% C.L.)
$\mu^- \rightarrow e^- \nu_e \bar{\nu}_\mu$	$< 1.2 \times 10^{-2}$ [5]
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$	$< 2.4 \times 10^{-12}$ [6]
$\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$	$< 1.0 \times 10^{-12}$ [7]
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma \gamma$	$< 7.2 \times 10^{-11}$ [8]
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma X^0$	$< 1.1 \times 10^{-9}$ [8] ¹
$\mu^+ \rightarrow e^+ X^0$	$< 3 \times 10^{-4}$ [9] ²
$\mu^+ \rightarrow e^+ X^0$	$< 2.6 \times 10^{-6}$ [10] ³
$\mu^+ \rightarrow e^+ X^0, X^0 \rightarrow e^+ e^-$	$< 1 \times 10^{-10}$ [11] ⁴

MEG

Crystalbox

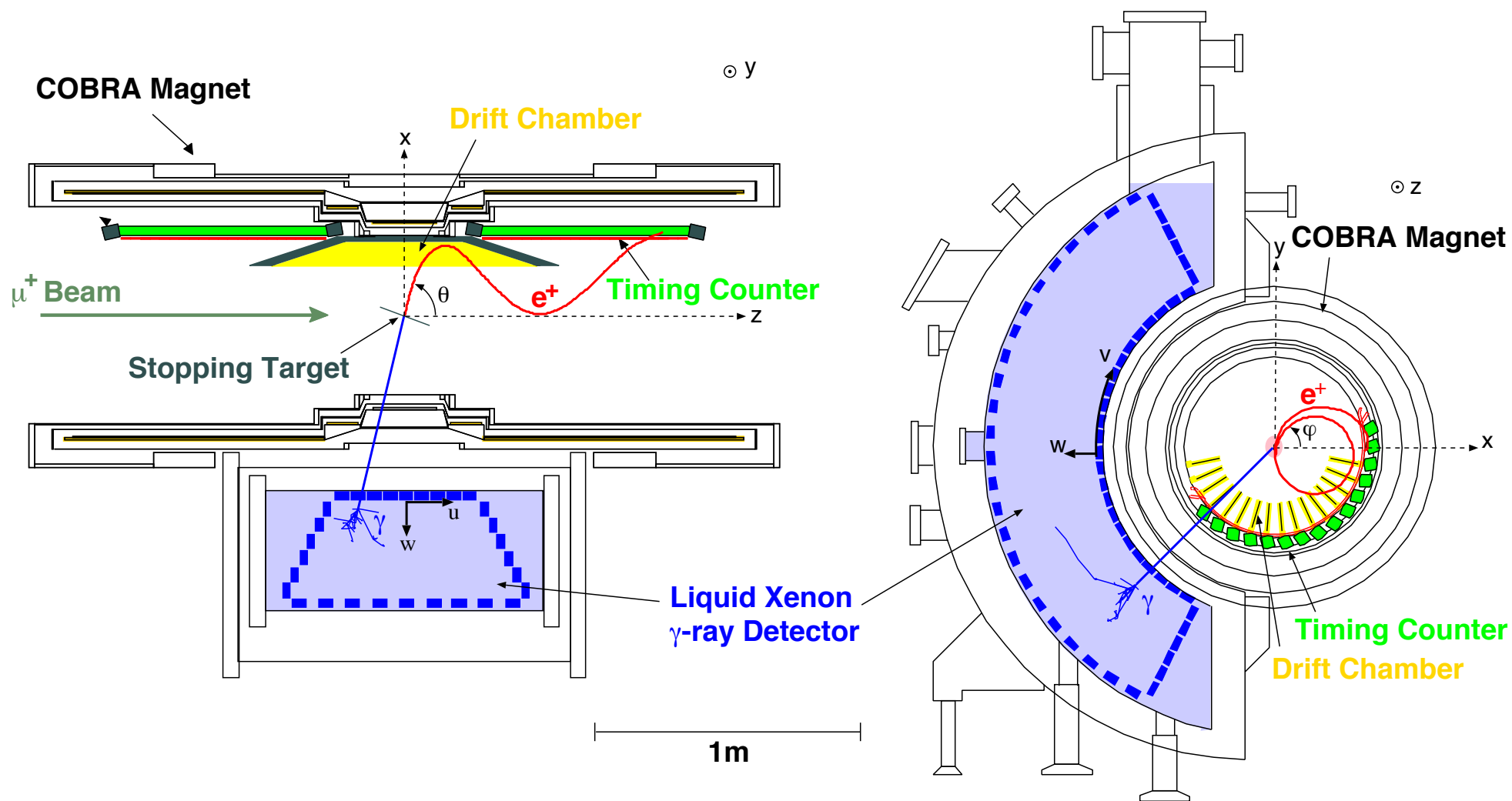
SINDRUM

cLFV
未発見

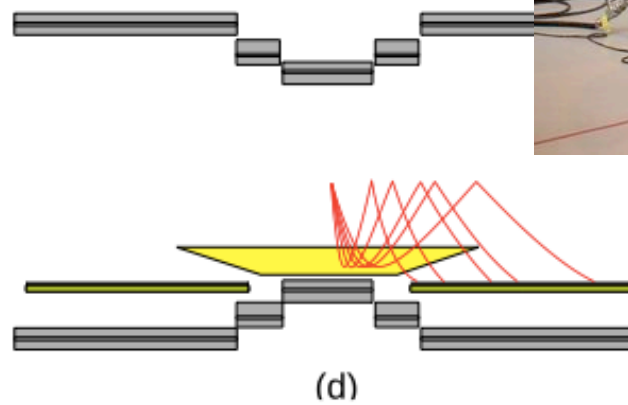
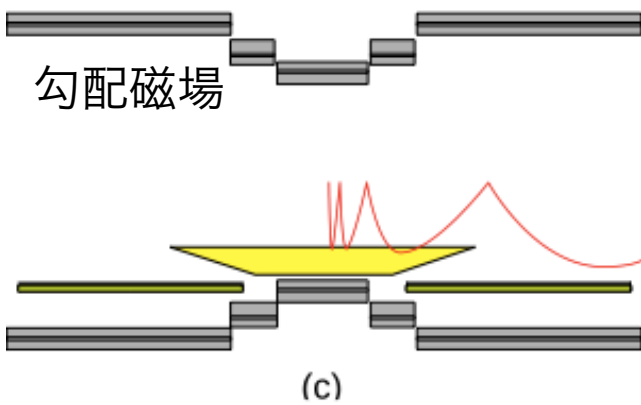
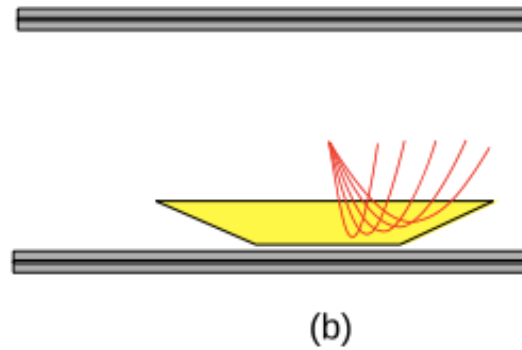
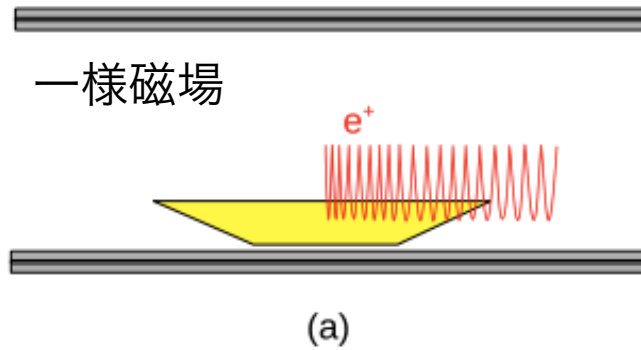
exoticな
粒子を伴う

- eeへの崩壊分岐比の上限値がγγへの崩壊の大きな制限となりうる ($\lambda_{ff}=1$ の数値計算結果からはおよそ2桁差があるので $O(10^{-12})$ 以下の制限となる)
- カップリングはモデル依存であり、 $\text{Br}(\phi \rightarrow \gamma\gamma) > \text{Br}(\phi \rightarrow ee)$ もありえ、γγへの崩壊事象の探索も意義がある
- $\mu \rightarrow e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ の崩壊モードは本研究が初の探索である

MEG検出器断面図

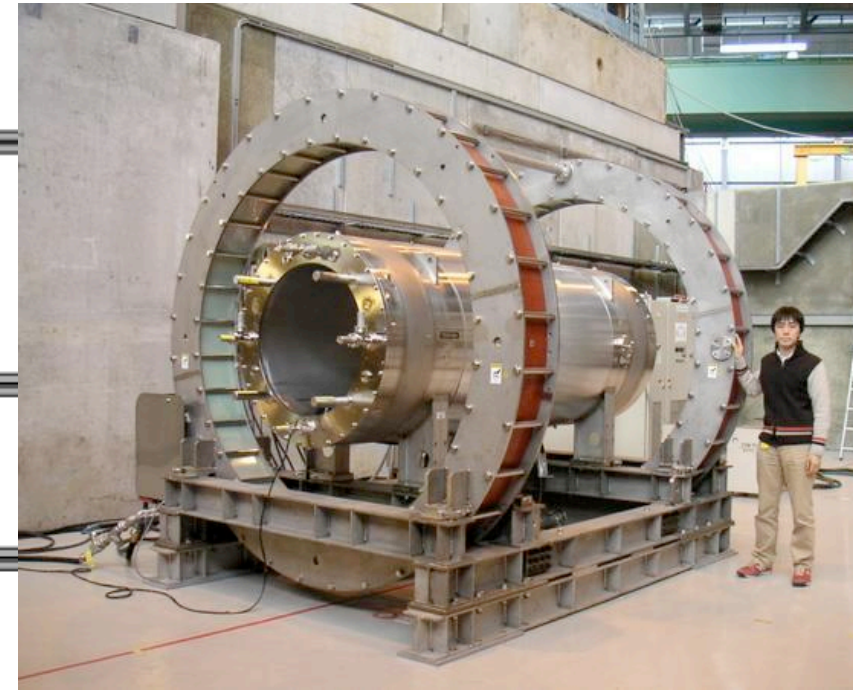


COBRA magnet

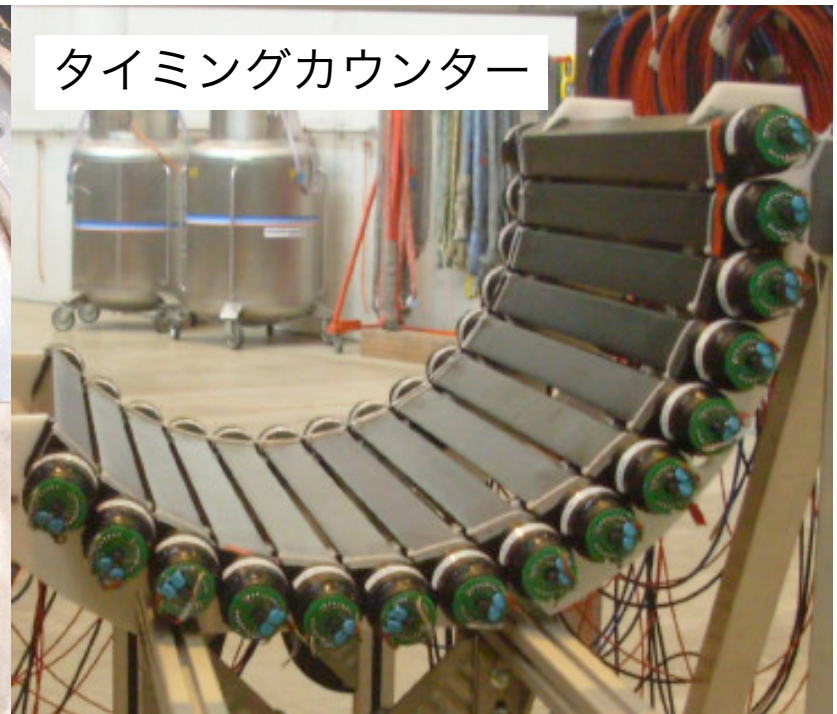
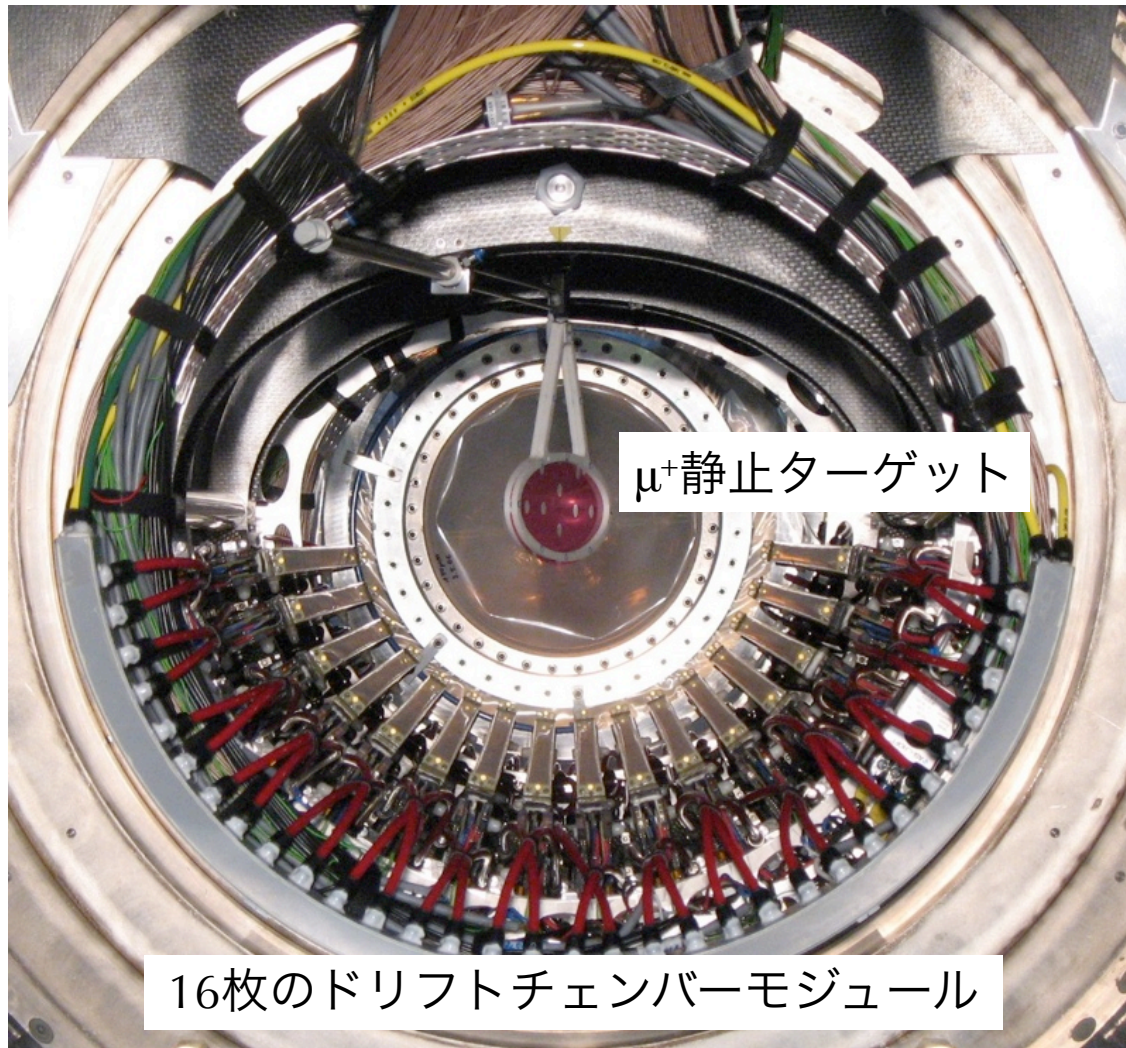


e^+ の素早い掃き出し

同一エネルギーでは回転半径は
放出角によらず、一定
回転半径によるエネルギー選別が可能



Drift Chamber, Timing counter

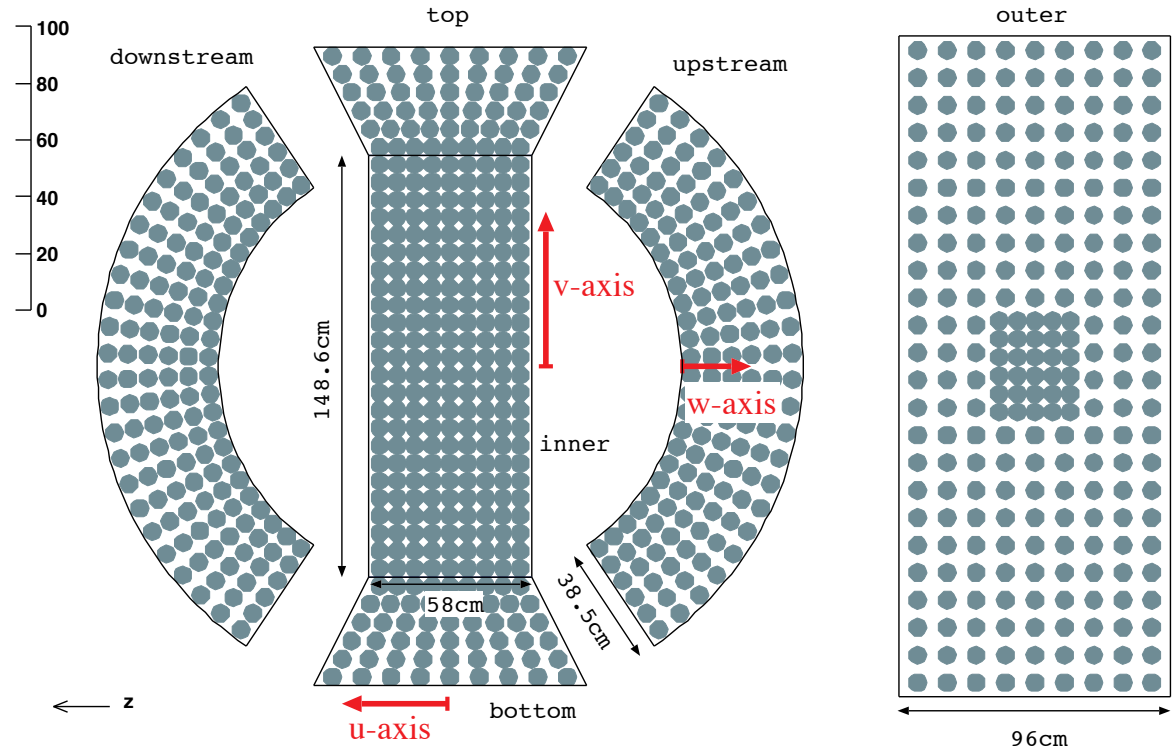
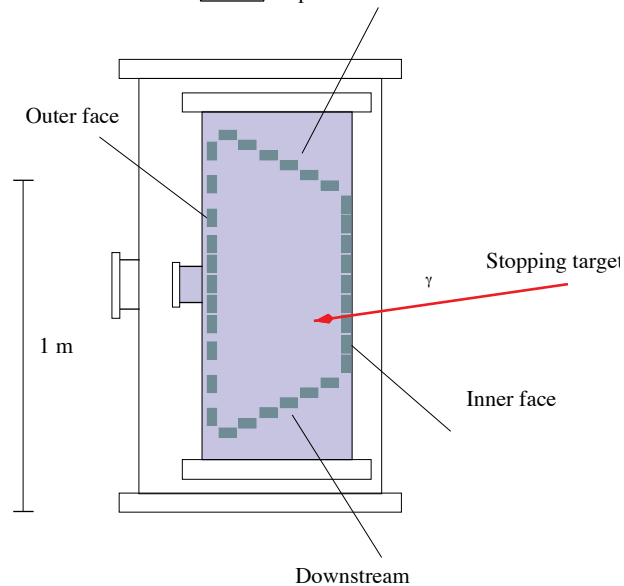
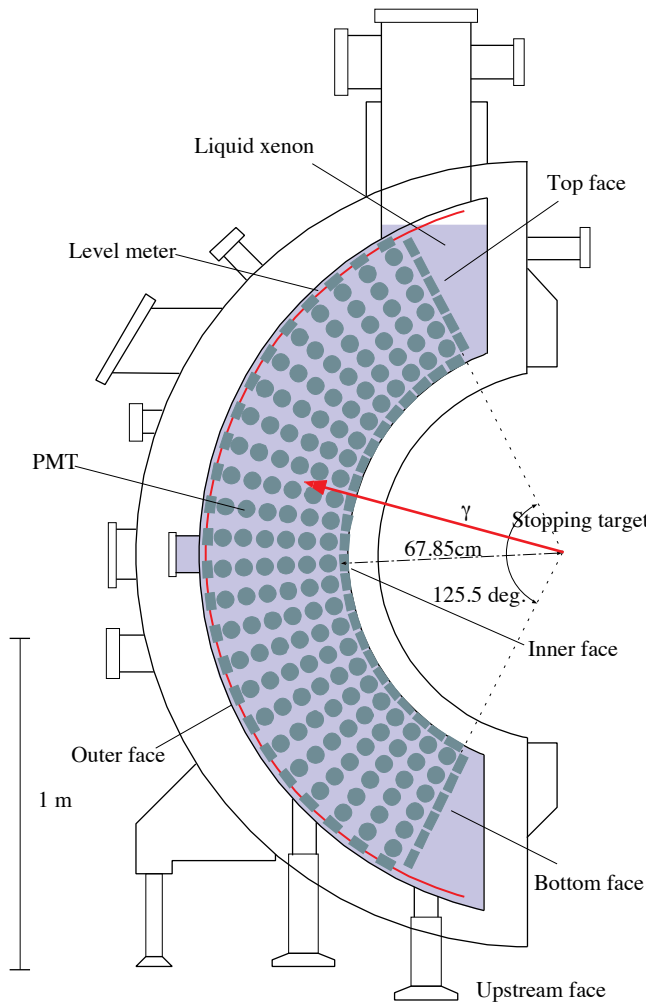


- 40MeV以上の e^+ のみ測定
- 低物質質量 $2 \times 10^{-3} X_0$
- 52.8MeVポジトロンに対して
 - $\sigma(Ee) = 320\text{keV}$
 - $\sigma(\theta) = 11, \sigma(\phi) = 7.2 \text{ mrad}$
 - $\sigma(\text{Te}\gamma) = 146(2009), 122(2010) \text{ psec}$

液体キセノン

- 利点
 - 高発光効率 (75% of NaI(Tl))
 - 早い時間応答 ($\tau_{\text{decay}} = 45\text{ns}$ for gamma-ray)
 - $X_0 = 2.8\text{cm}$
 - シンチレーション光の自己吸収なし
 - 均一で劣化しない
- 難点
 - 真空紫外光 (178nm)
 - 温度 (165K)
 - 水等、シンチレーション光の発光阻害や吸収をする物質の除去必要

ガンマ線検出器

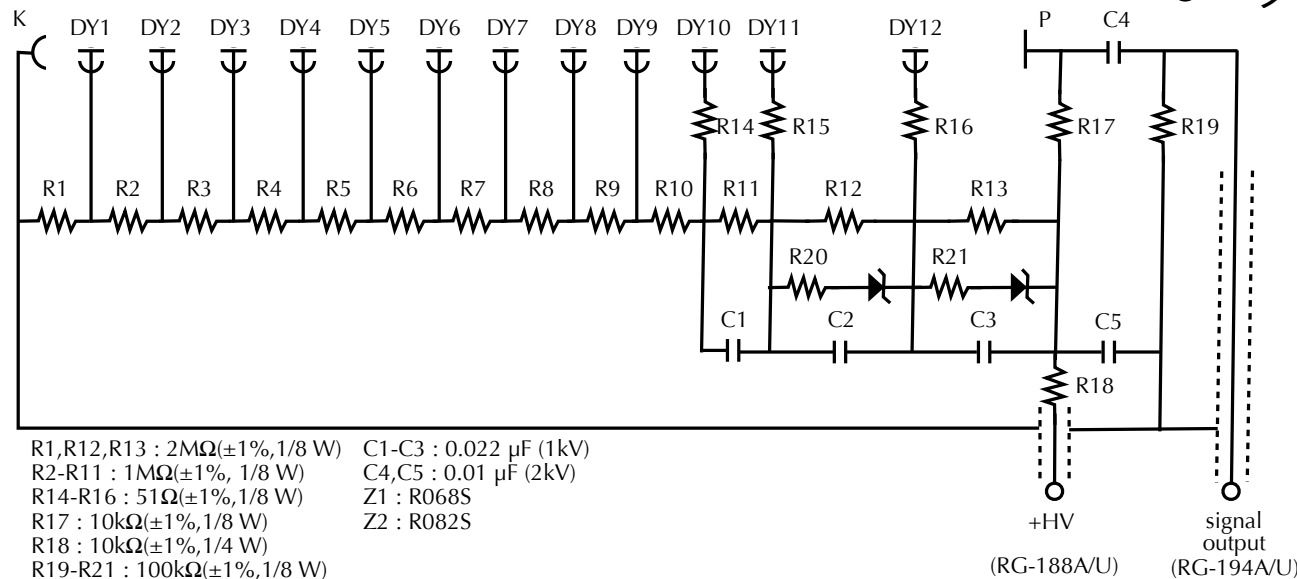


- ~ 800 ℓ 液体キセノン
- 846 PMT
- ターゲットからの γ に対して $14X_0$
- 52.8MeVガンマ線に対して
- $\sigma(E\gamma) \sim 2\%$, $\sigma(u) \sim \sigma(v) \sim 5\text{mm}$,
 $\sigma(w) \sim 6\text{mm}$, $\sigma(T\gamma) = 96(2009), 67(2010) \text{ psec}$

PMT



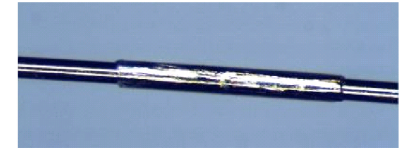
- 真空紫外光を透過するクォーツ窓
- バイアルカリフォトカソード (K-Cs-Sb)
- フォトカソードへのアルミストリップ
- メタルチャンネルダイノード
- ダイノード後段の zener diode



ガンマ線検出器 キャリブレーション

LED, alpha

^{241}Am α 線源

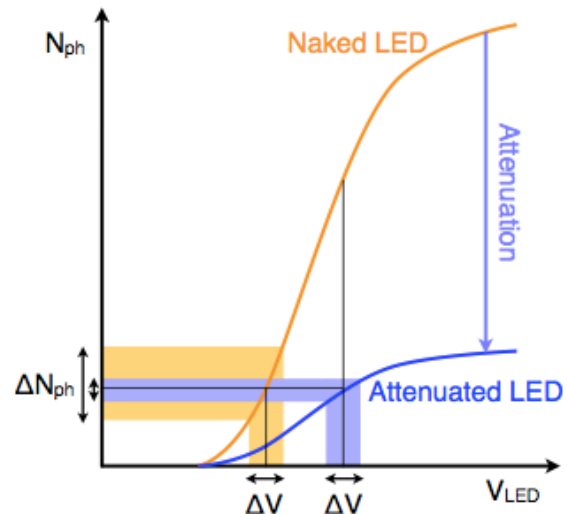


(a)



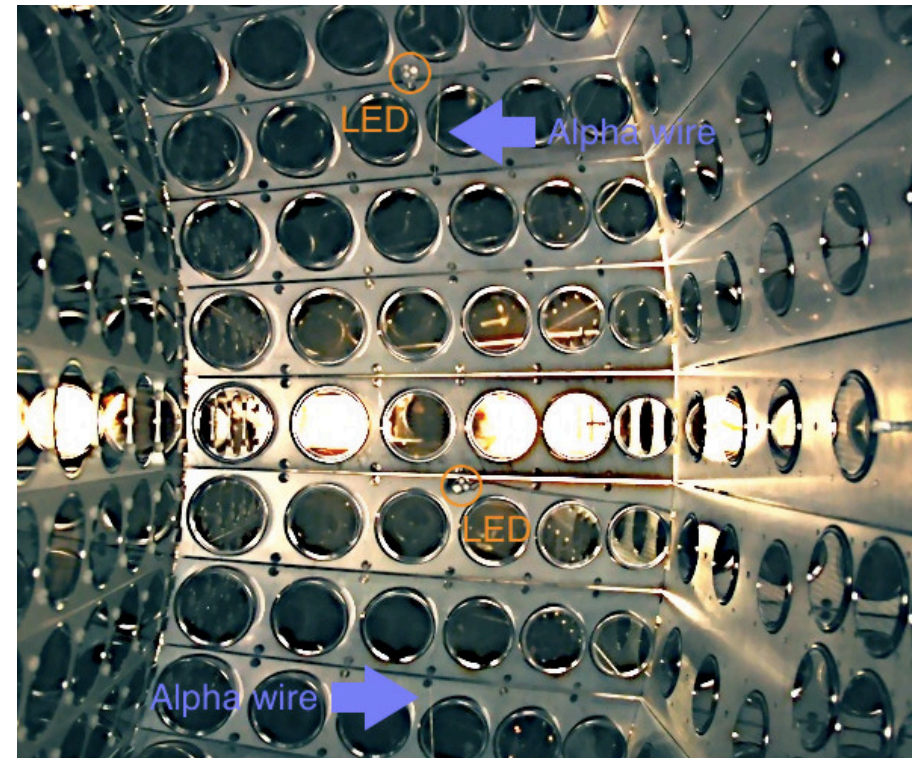
(b)

LED



LED発光量の電圧特性と
減光した場合の効果

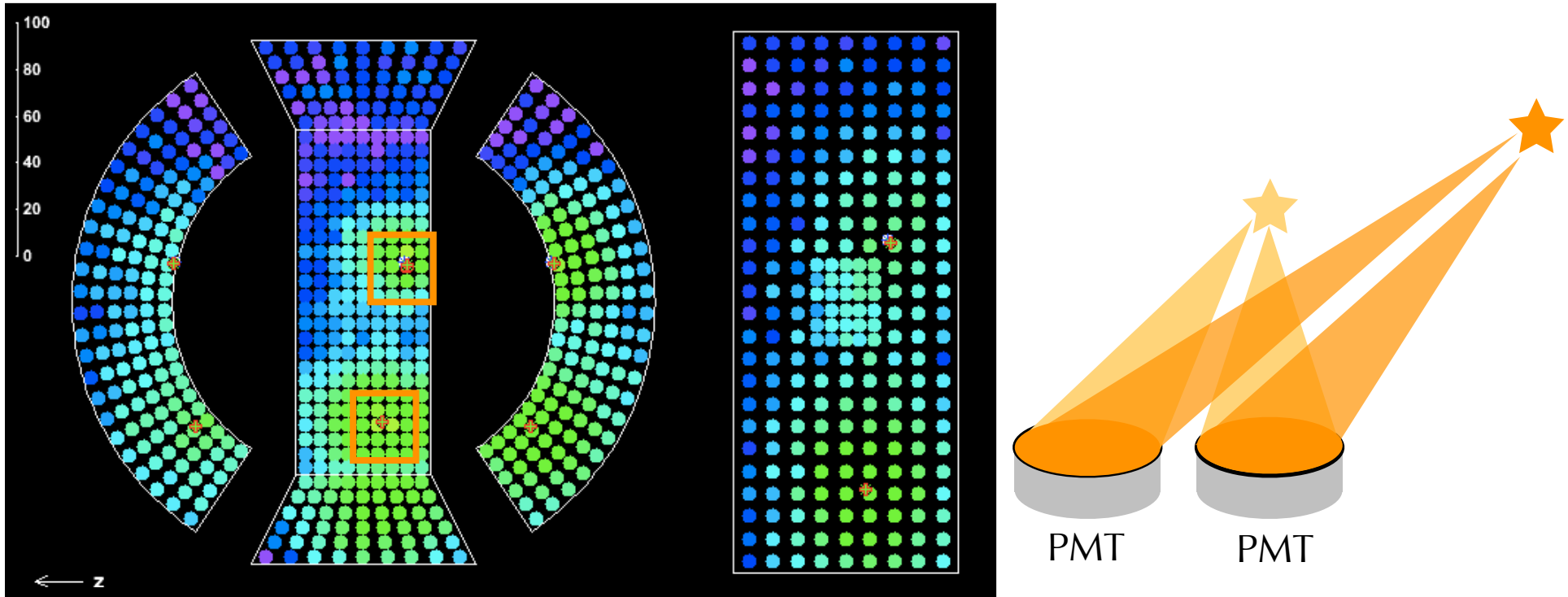
- LED
 - PMT Gainの測定、モニターに使用
 - 発光量の安定化のための減光とLEDの指向性を抑える為のテフロンのdiffuser
- alpha
 - PMT QE測定、モニター



Trigger

- 同時に複数のトリガーによるデータを取得
- Pre-scale による取得割合の調整 (pre-scale=100の場合はトリガーにかかった100event中1eventを記録)
- $\mu \rightarrow e\phi$, $\phi \rightarrow \gamma\gamma$ 用トリガーは用意されておらず、本論文では $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索用トリガーのデータを使用
- MEGトリガー
 - Pre-scale = 1
 - $E_{\gamma} > \text{lower threshold} \wedge E_{\gamma} < \text{Cosmic-ray veto threshold} \wedge \Delta T_{e\gamma} < 20\text{nsec} \wedge \text{Direction match}$
 - Direction match: Back to back event を取るための条件。 $\mu \rightarrow e\gamma$ MC を使って作られた “LXe検出器の最大光量の光電子増倍管” と “タイミングカウンターのヒット位置” の Look up table
- TIC alone trigger (Michel崩壊($\mu \rightarrow e\nu\nu$)データ取得用)
 - Pre-scale = 1×10^7
 - Timing counter hit

2つのガンマ線の位置、エネルギー再構成



位置再構成 □のように γ 線入射面で2つのピークの周りのPMTを選択
(それぞれの γ 線のシンチ光の総発光量) \times (γ 反応地点からの立体角)の和が
PMTの出力と合うよう発光量、反応地点のフィットを同時に行う

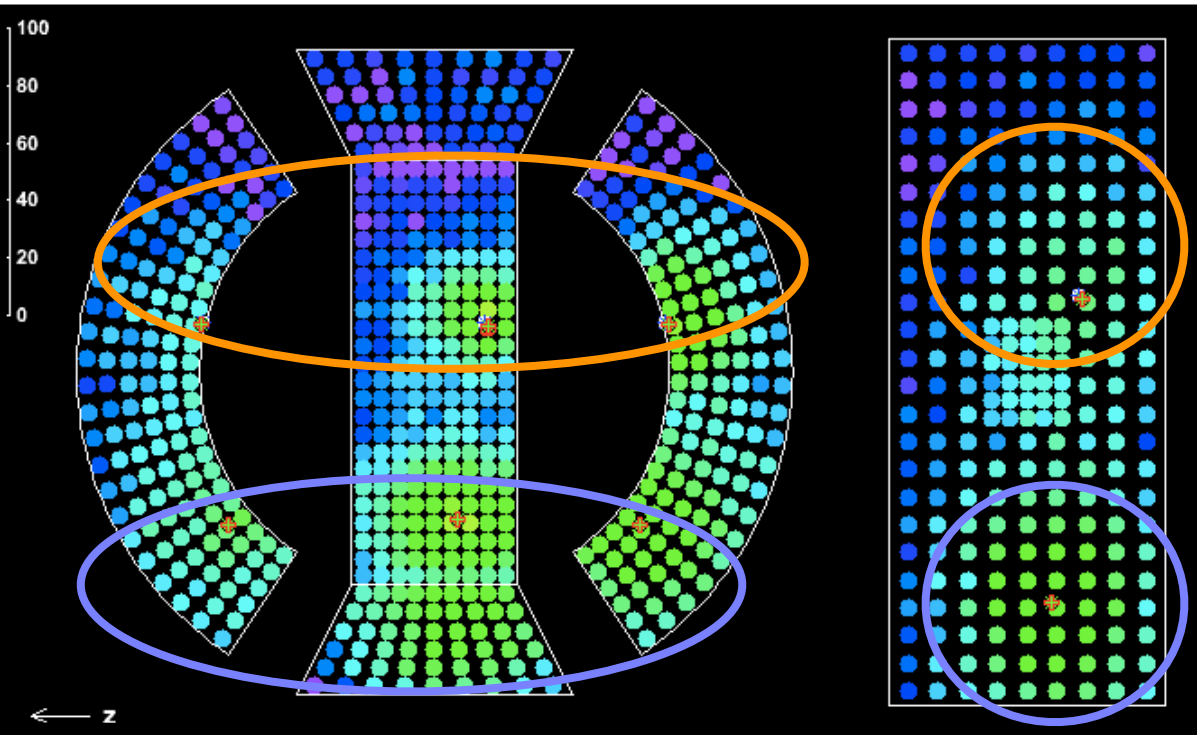
$$\sigma_u \sim \sigma_v \sim 6\text{mm}, \sigma_w \sim 7\text{mm}$$

エネルギー再構成

個々のPMTの受け取った光量をそれぞれの
ガンマ線からの寄与に分離し、総計を取る

$$\sigma E_\gamma \sim 1\text{MeV}$$

2つのガンマ線の時間再構成



PMT selection

一方のガンマ線からの入射光量が他方の5倍以上と期待されるPMTを選別

入射光量<100photon以下のものは除去
Fit時大きな χ^2 を与えるものも除去する

Fit

それぞれのガンマ線について選別したPMTの時間情報を用い
個々の γ 線について別々に下記 χ^2 が小さくなるよう時間フィットを行う

$$\chi_{time}^2 = \sum_{iPMT}^{nPMT} \frac{(t_{hit,iPMT,\gamma i} - t_{LXe,\gamma i})^2}{\sigma_{t,iPMT} (N_{pe,\gamma i})^2}$$

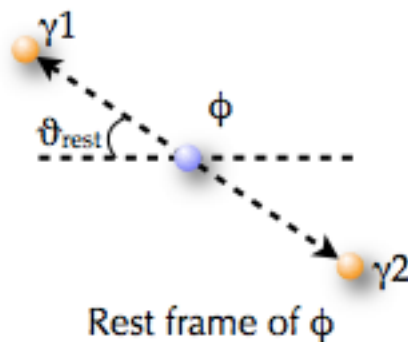
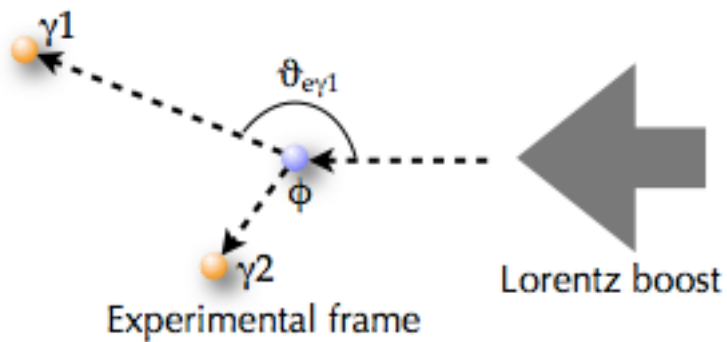
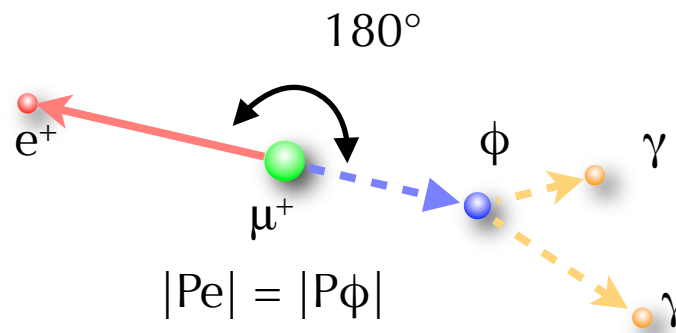
$\sigma_{t,iPMT} (N_{pe,\gamma i})^2$ is time resolution of each PMT

$$t_{hit,iPMT,\gamma i} = t_{PMT,iPMT} - t_{delay,iPMT,\gamma i} - t_{offset,iPMT}$$

$\sigma_{T\gamma} \sim 150\text{psec}$

ϕ decay vertex の再構成

- Fitは M_ϕ を固定して行う。二つのガンマ線、 e^+ のエネルギー、放出方向の相関によるKinematics を使った Fit



$$E_{\gamma_1} = \gamma_\phi M_\phi / 2 + \gamma_\phi \beta_\phi \cos \vartheta_{rest} M_\phi / 2$$

$$E_{\gamma_2} = \gamma_\phi M_\phi / 2 - \gamma_\phi \beta_\phi \cos \vartheta_{rest} M_\phi / 2$$

$$\cos \vartheta_{e\gamma_1} = (E_{\gamma_2}^2 - E_{\gamma_1}^2 - |P_{e^+}|^2) / 2E_{\gamma_1}|P_{e^+}|$$

$$\cos \vartheta_{e\gamma_2} = (E_{\gamma_1}^2 - E_{\gamma_2}^2 - |P_{e^+}|^2) / 2E_{\gamma_2}|P_{e^+}|$$

φ decay vertex の再構成

- Fitは M_ϕ を固定して行う。二つのガンマ線、 e^+ のエネルギー、放出方向の相関によるKinematics を使った Fit
- M_ϕ の値を変えてスキャンを行う
- Fitに時間情報を使うと、アクシデンタルバックグラウンドを $T_{\gamma\gamma}=0$ 、 $T_{\gamma e}=0$ へ引っ張ってしまい、時間構造にバイアスを作るおそれがあるため、行わない

再構成した φ decay vertexの位置を元に

ガンマ線、ポジトロンの運動量

ガンマ線間、ガンマ線ポジトロン間の相対時間

を再構成する

$$\begin{aligned}
 \chi_{\text{vtxfit}}^2 = & (|P_{\text{rec},e^+}| - |P_\phi^{\text{vtxfit}}(M_\phi)|)^2 / \sigma_{|P_{e^+}|}^2 \\
 & + \sum_{\gamma i=\gamma 1, \gamma 2} (E_{\text{rec},\gamma i} - E_{\gamma i}^{\text{vtxfit}}(M_\phi, \vartheta_{\text{rest}}))^2 / \sigma_{E_\gamma}^2 \\
 & + (\theta_{\text{rec},-\vec{dir}_{e^+}} - \theta_{\vec{dir}_\phi}^{\text{vtxfit}}(\vec{xyz}_{\text{vtxfit}} - \vec{xyz}_{\mu\text{decay}}))^2 / \sigma_\theta^2 \\
 & + (\varphi_{\text{rec},-\vec{dir}_{e^+}} - \varphi_{\vec{dir}_\phi}^{\text{vtxfit}}(\vec{xyz}_{\text{vtxfit}} - \vec{xyz}_{\mu\text{decay}}))^2 / \sigma_\varphi^2 \\
 & + \sum_{\gamma i=\gamma 1, \gamma 2} \sum_{X_j=u,v,w} (X_j^{\text{rec},\gamma i} - X_j^{\text{vtxfit}}(\vec{xyz}_{\text{vtxfit}}, \vartheta_{e\gamma i}(M_\phi, \vartheta_{\text{rest}}), \varphi_\gamma, r_{\gamma i}))^2 / \sigma_{X_j}^2
 \end{aligned}$$

CW 陽子加速器

CW 陽子加速器



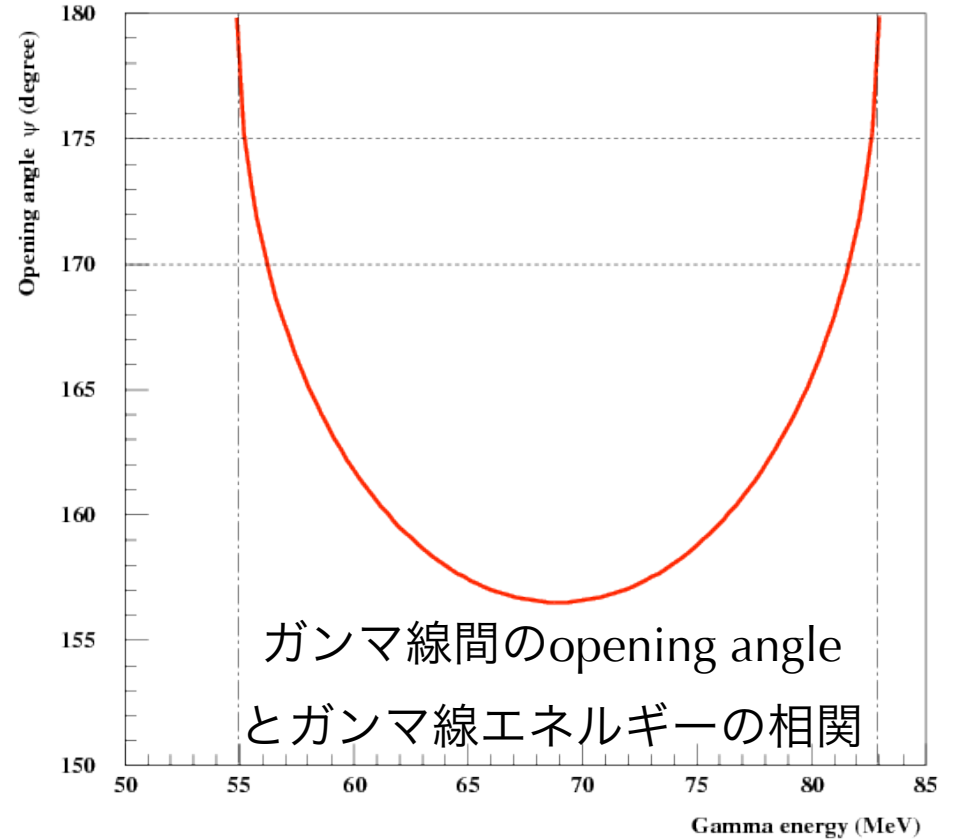
- $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ターゲット
- ${}^7_3\text{Li}(p, \gamma){}^8_4\text{Be}$ 反応の 17.6 MeV ガンマ線
- ${}^{11}_5\text{B}(p, \gamma){}^{12}_5\text{C}$ 反応の 11.7, 4.4 MeV ガンマ線
- Light yieldのモニター、



μ ビームラインと反対側に
設置されたCWビームライン

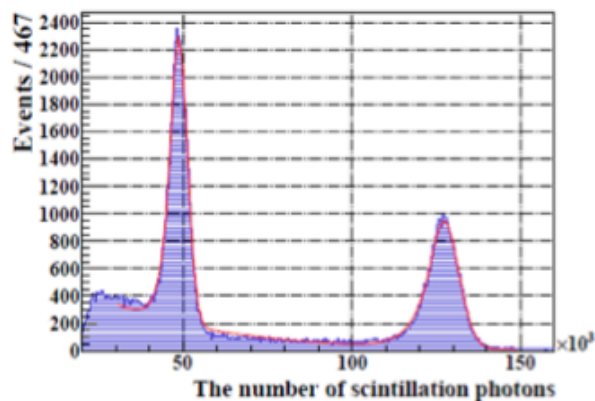


π^0 ラン NaI 検出器

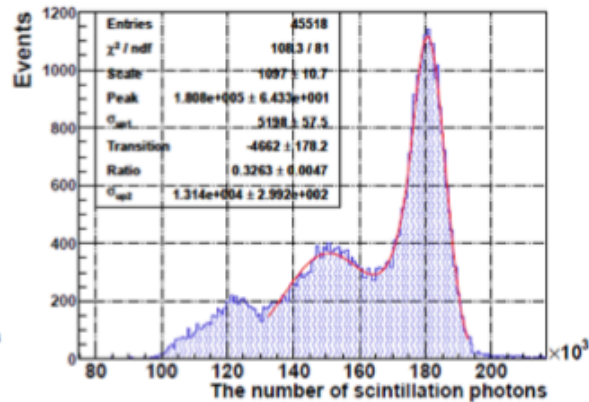


- π ビームと液体水素ターゲットを使用し、
 $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 反応を利用
- ガンマ線間のopening angleとLXe検出器の
反対方向のガンマ線エネルギーのタグのため
のNaI検出器
- スキャンのためのNaI mover

CW陽子加速器 4.4, 12, 18 MeV γ 線

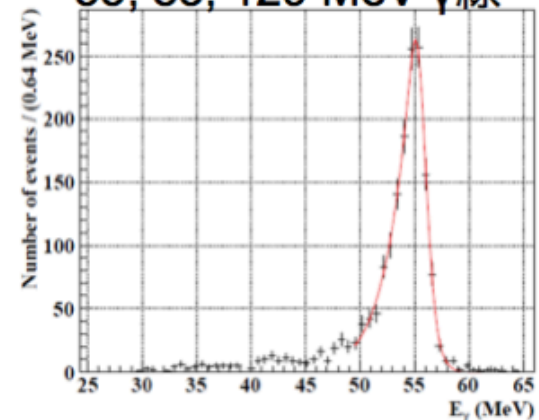


CW Bラン



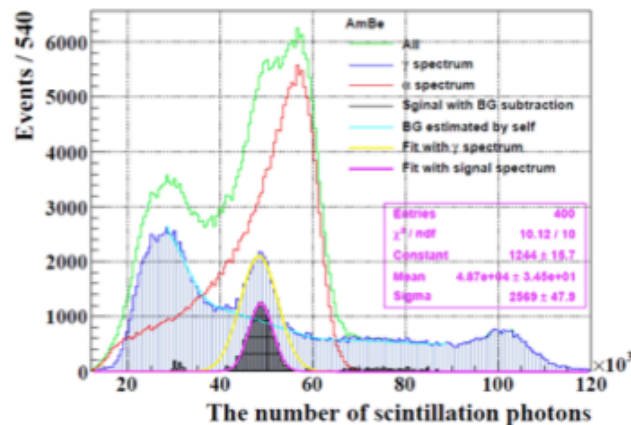
CW Liラン

55, 83, 129 MeV γ 線

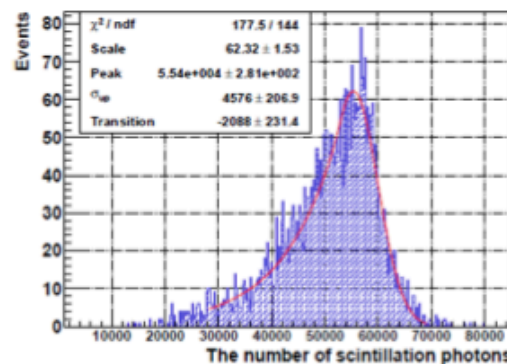


π^0 ラン

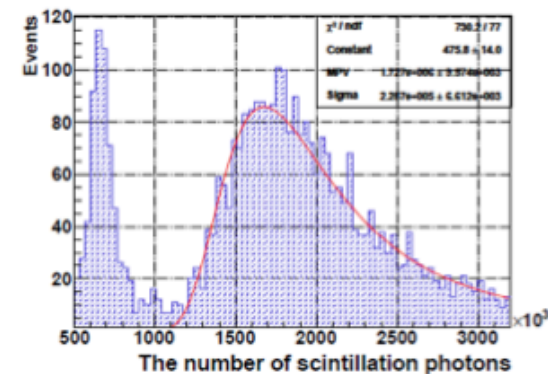
Am/Be線源 4.4 MeV γ 線



^{241}Am 線源 5.5 MeV α 線

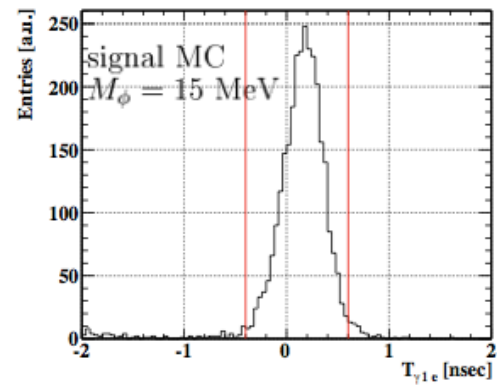


宇宙線

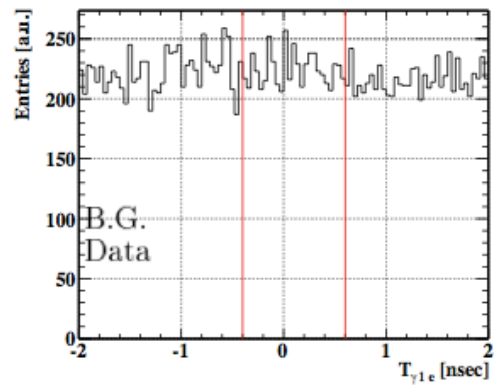


2008年時、Liピークと宇宙線データを解析し、run中の光量推移のモニターを行う

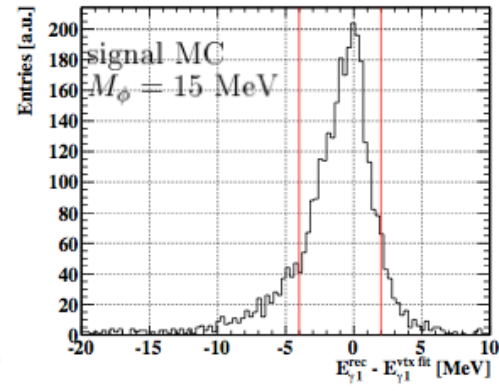
Cut (時間、ガンマ線エネルギー)



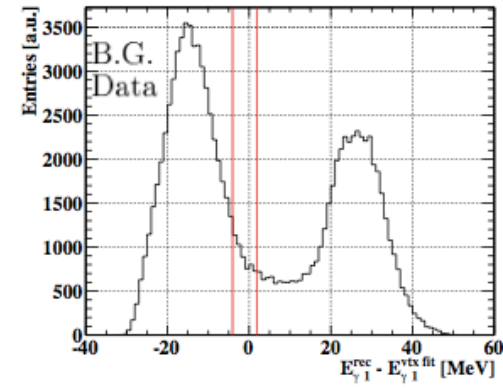
(a) Distribution for $t_{\gamma 1e}$ of signal by MC



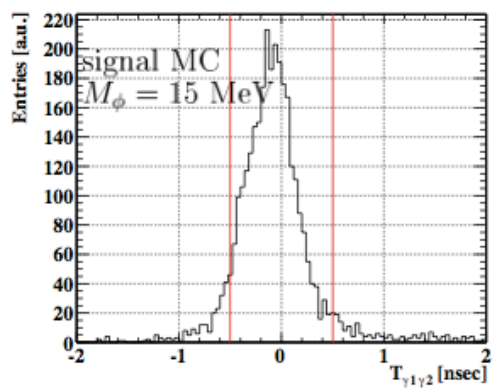
(b) Distribution for $t_{\gamma 1e}$ of B.G. by data



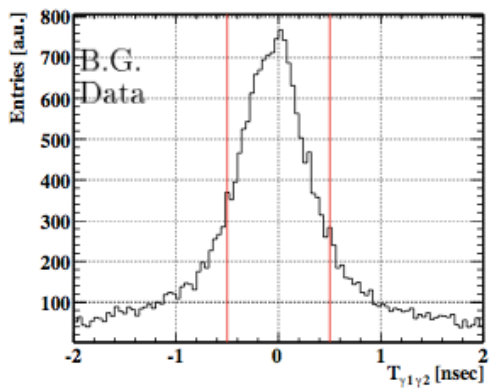
(a) Distribution for $E_{\gamma 1}$ of signal by MC



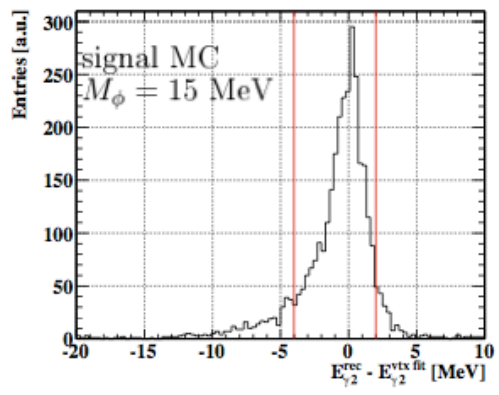
(b) Distribution for $E_{\gamma 1}$ of B.G. by data



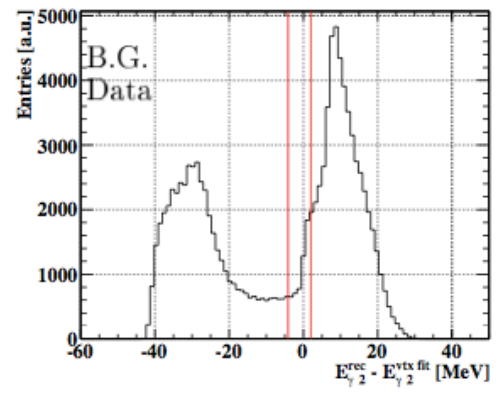
(c) Distribution for $t_{\gamma 1\gamma 2}$ of signal by MC



(d) Distribution for $t_{\gamma 1\gamma 2}$ of B.G. by data

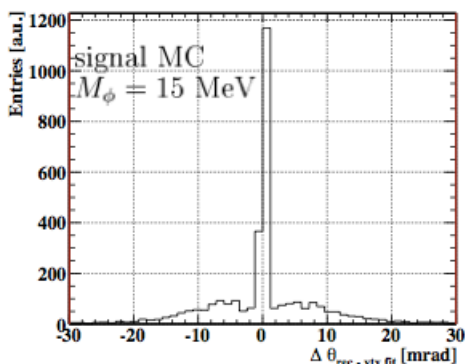


(c) Distribution for $E_{\gamma 2}$ of signal by MC

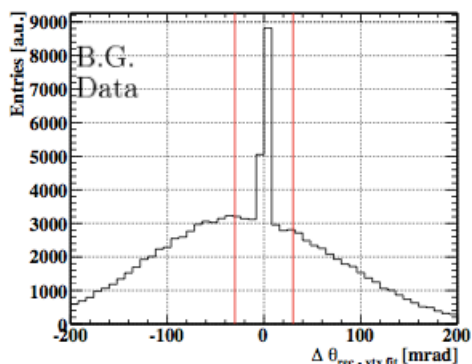


(d) Distribution for $E_{\gamma 2}$ of B.G. by data

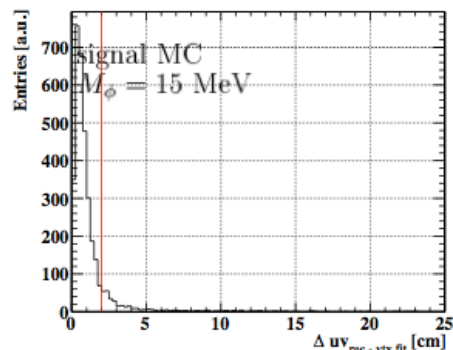
Cut (ポジトロン方向、ガンマ線反応位置)



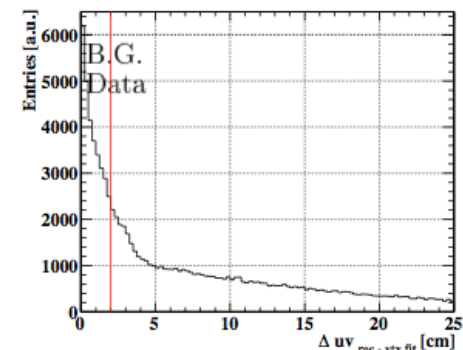
(a) Distribution for θ of signal by MC



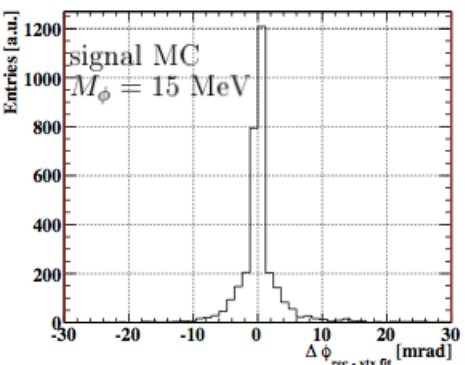
(b) Distribution for θ of B.G. by data



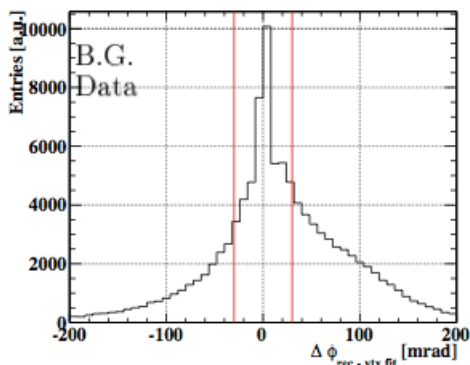
(a) Distribution for incident position in uv of signal by MC



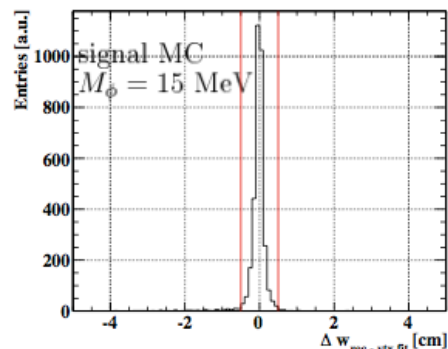
(b) Distribution for incident position in uv of B.G. by data



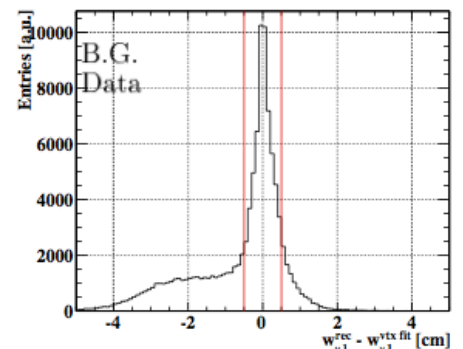
(c) Distribution for ϕ of signal by MC



(d) Distribution for ϕ of B.G. by data



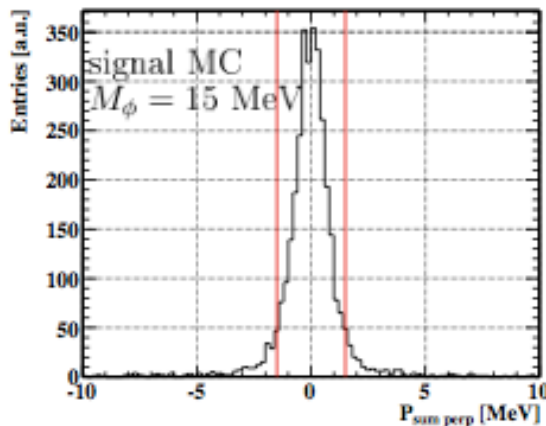
(c) Distribution for incident position in w of signal by MC



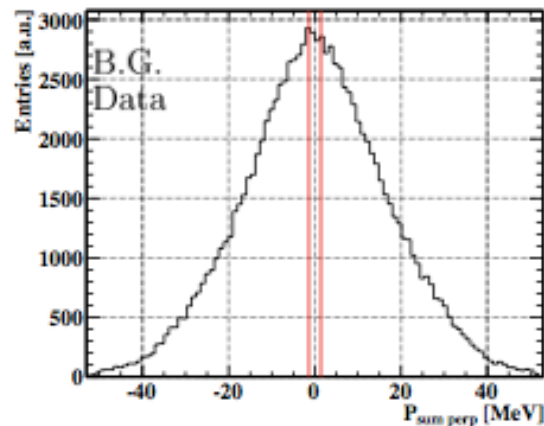
(d) Distribution for incident position in w by data

ϕ decay vertex Fit の位置の初期値は e^+ を
 反対方向に伸ばしたもののため、Fit初期
 値で角度差は0であり、初期値にLocal
 minimumがあれば0にピークが来る

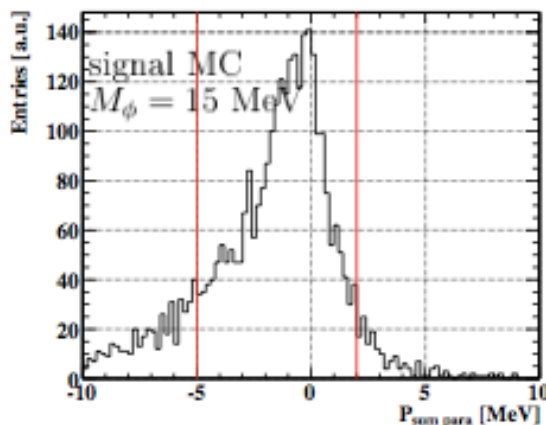
Cut (運動量の和)



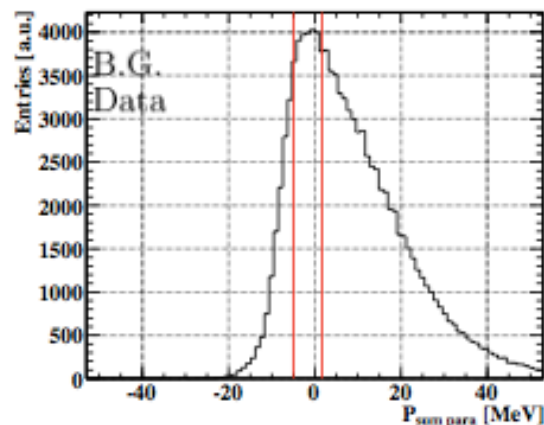
(a) Distribution for $P_{sum,perp}$ of signal by MC



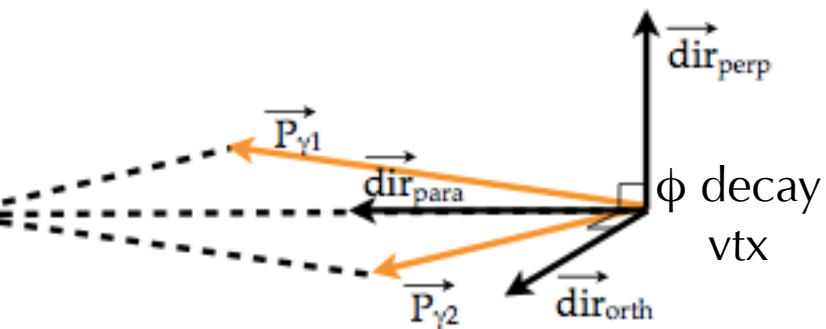
(b) Distribution for $P_{sum,perp}$ of B.G. by data



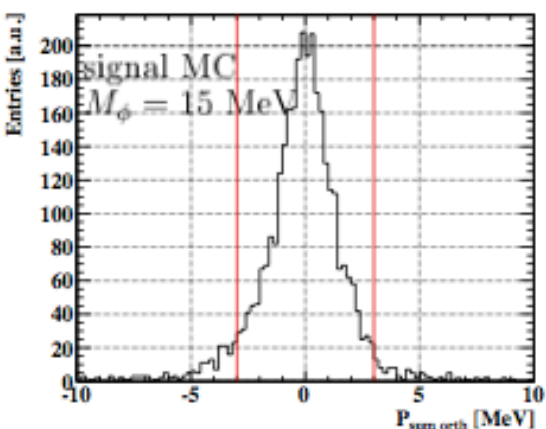
(c) Distribution for $P_{sum,para}$ of signal by MC



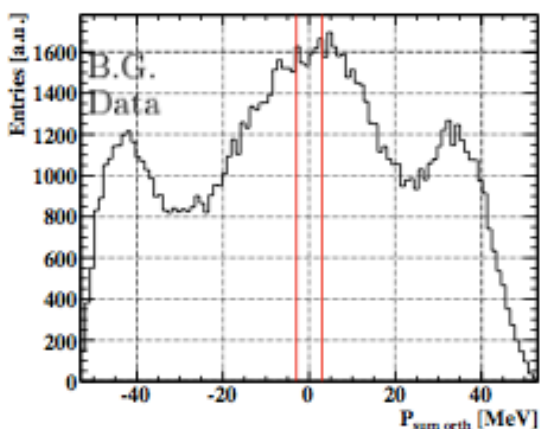
(d) Distribution for $P_{sum,para}$ of B.G. by data



運動量の和の軸の定義



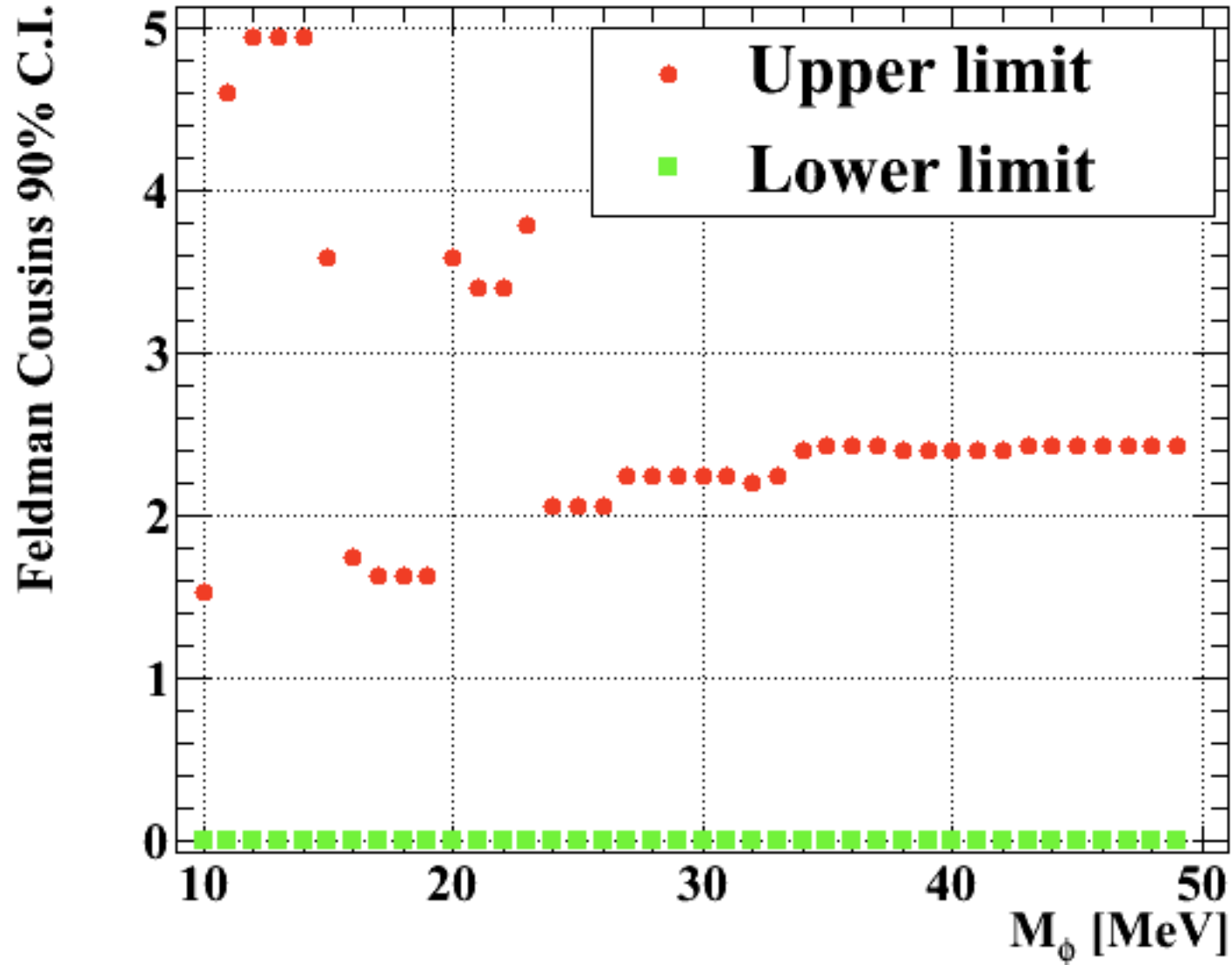
(e) Distribution for $P_{sum,orth}$ of signal by MC



(f) Distribution for $P_{sum,orth}$ of B.G. by data

Feldman Cousinsでの90% C.L. interval

(参考のため)



Normalization

$$\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+ \phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{N_{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma}}{k}$$

1/k (=Single event sensitivity)をMichelポジトロン事象数で出す

シグナル数、Michelポジトロン数は以下の式でかける

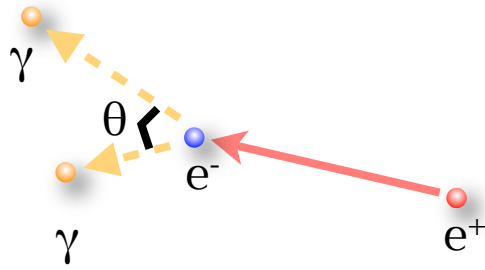
$$\begin{aligned} N_{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma} &= \mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+ \phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma) \times N_\mu \\ &\times A_{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma}^{e^+} \times A_{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma}^{\gamma\gamma} \\ &\times \epsilon_{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma}^{trg:0} \times \frac{1}{P_{trg:0}} \\ &\times \epsilon_{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma}^{e^+} \times \epsilon_{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma}^{\gamma\gamma} \\ &\times \epsilon_{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma}^{cut} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{e\nu\bar{\nu}} &= \mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu) \times N_\mu \\ &\times f_{e\nu\bar{\nu}}^{E_e \text{ selection}} \\ &\times A_{e\nu\bar{\nu}}^{e^+} \\ &\times \epsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{trg:22} \times \frac{1}{P_{trg:22}} \\ &\times \epsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{e^+} \end{aligned}$$

上の2式よりMichelポジトロン数とEfficiencyの比によって

$$1/k = \frac{1}{N_{e\nu\bar{\nu}}} \times \frac{f_{e\nu\bar{\nu}}^{E_e \text{ selection}}}{P_{trg:22}} \times \frac{A_{e\nu\bar{\nu}}^{e^+}}{A_{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma}^{e^+}} \times \frac{1}{A_{\gamma\gamma}^{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma}} \times \frac{\epsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{trg:22}}{\epsilon_{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma}^{trg:0}} \times \frac{\epsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{e^+}}{\epsilon_{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma}^{e^+}} \times \frac{1}{\epsilon_{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma}^{\gamma\gamma}} \times \frac{1}{\epsilon_{e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma}^{cut}}$$

AIF 2 γ



運動量保存

$$P_e^2 = E_{\gamma 1}^2 + E_{\gamma 2}^2 + 2E_{\gamma 1}E_{\gamma 2}\cos\theta$$

エネルギー保存

$$\sqrt{P_e^2 + m_e^2} + m_e = E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2}$$

2式より

$$\cos\theta = 1 - m_e(1/E_{\gamma 1} + 1/E_{\gamma 2})$$

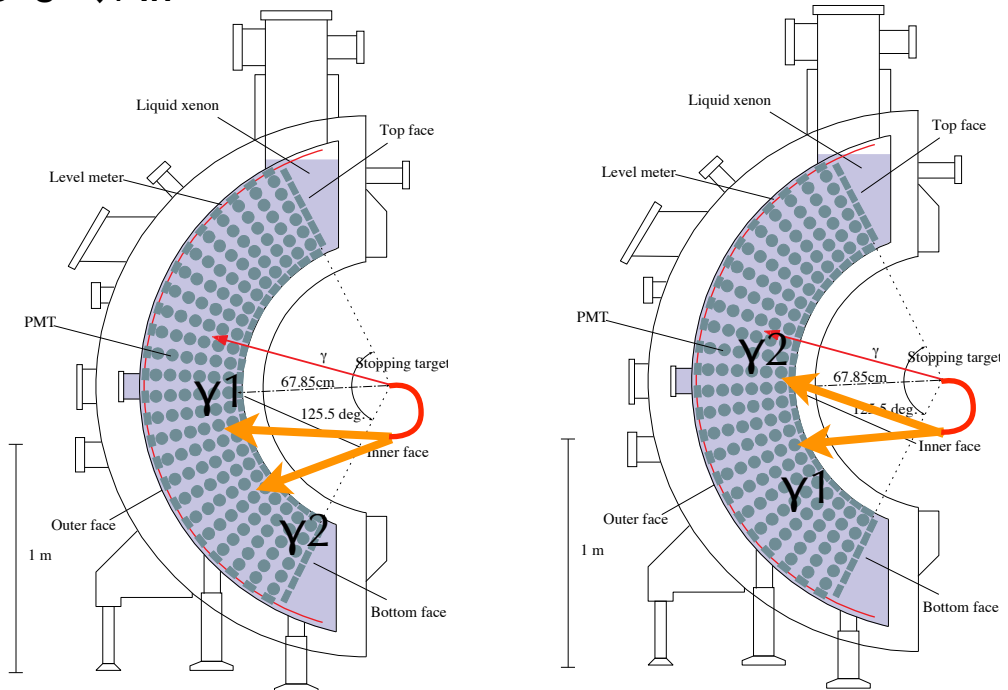
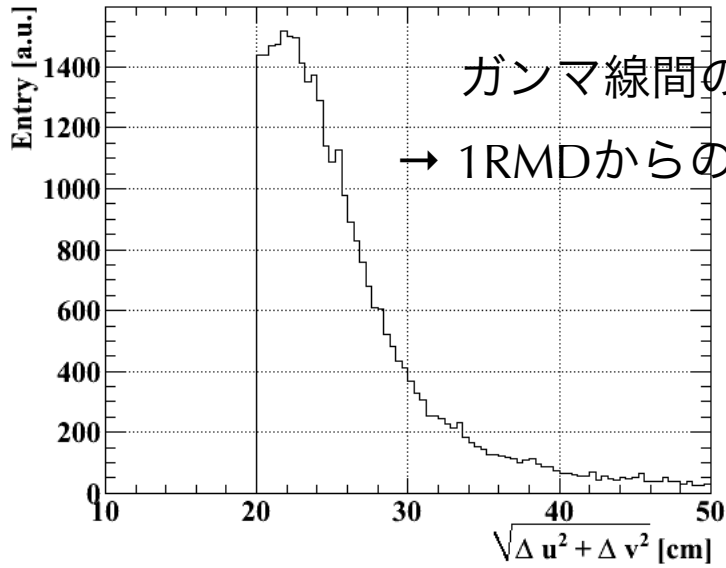
$E_{\gamma 1} = E_{\gamma 2} = 20\text{MeV}$ では $\theta = 0.32\text{rad} = 18.4^\circ$

$E_{\gamma 1} = 30\text{MeV}$, $E_{\gamma 2} = 10\text{MeV}$ では

$\theta = 0.37\text{rad} = 21.3^\circ$

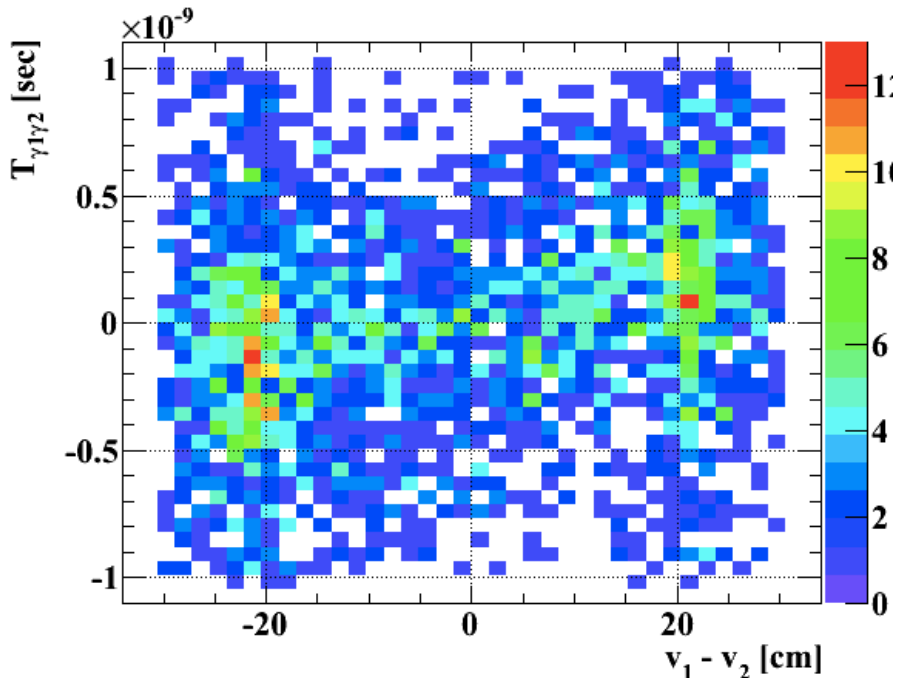
ターゲット中心からガンマ線検出器までの距離 = 67.85cmなので
ターゲットから来るAIF2 γ の間の距離は20cm-25cm

メインのガンマ線同時のB.G.



低いエネルギーの $\gamma 2$ の方が
 ポジトロン進行方向に対し
 大きな角度を持つ

ターゲット上のAIF +
 off centerからのAIFか?



$$B(\mu \rightarrow e\phi) \simeq \frac{\alpha |\lambda_{\mu e}|^2}{4s_{2W}^2} \left(\frac{m_e}{\Gamma_\mu} \right) \left(\frac{m_\mu}{m_Z} \right)^2 (1 - y_\mu^2)^2$$

$$B(\mu \rightarrow e\gamma\gamma) \simeq B(\mu \rightarrow e\phi)B(\phi \rightarrow \gamma\gamma)$$

$$y_\mu = m_\phi/m_\mu$$

$$s_{2W} = 2 \sin\theta_W \cos\theta_W, \text{ the weak angle being } \theta_W.$$

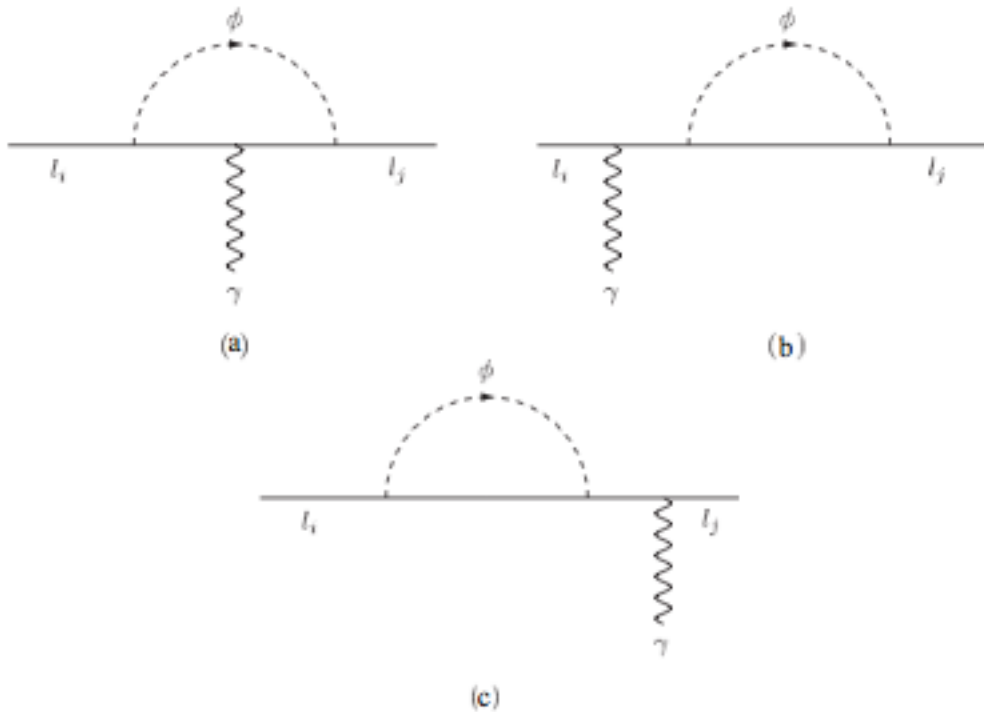
$l_i \rightarrow l_j \gamma$ decays

からの制限 (MEGA limit 1.2×10^{-11})

$$|\lambda_{\mu e}| |\lambda_{\mu\mu}| < 1.79 \times 10^{-3},$$

$$|\lambda_{\tau\mu}| |\lambda_{\tau\tau}| < 1.95 \times 10^{-1},$$

$$|\lambda_{\tau e}| |\lambda_{\tau\tau}| < 3.15.$$



Phys. Rev. D 72, 117701 (2005)

Cuts for acceptance calculation

2.5inchのcrystalをx,y方向は9本、z方向は10本

ϕ がCrystal手前でdecayすることを要求

- $|X_{\phi\text{decay}}| < 9 \times 2.5\text{inch} / 2$
- $|Y_{\phi\text{decay}}| < 9 \times 2.5\text{inch} / 2$

ガンマ線がアクセプタンス内

- ガンマ線を進行方向へ延長して $|X_{\gamma}| = 9 \times 2.5\text{inch} / 2$
または $|Y_{\gamma}| = 9 \times 2.5\text{inch}$ の時に
- $|Z_{\gamma}| < 10 \times 2.5\text{inch} / 2$

two of analysis cuts

- Both $E_{\gamma} > 20\text{MeV}$
- 四辺の内、同じ辺に来た 2γ イベントは除去

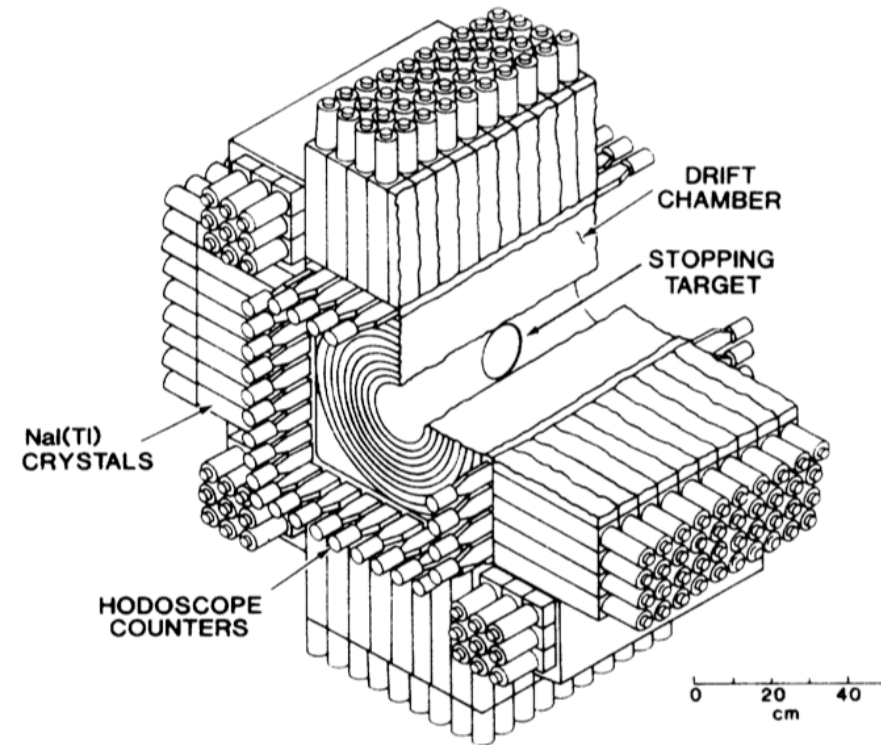
isotropic分布に対して元々のエネルギー、方向のtruthを使って、上記の条件の efficiency を $\mu \rightarrow e\gamma\gamma$ と $\mu \rightarrow e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ の双方について計算。

$$7.2 \times 10^{-11} \times (\varepsilon(\mu \rightarrow \gamma\gamma) / \varepsilon(\mu \rightarrow e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma))$$

と efficiency の比でスケールしてCrystalboxでの $\mu \rightarrow e\phi, \phi \rightarrow \gamma\gamma$ の分岐比を見積もる

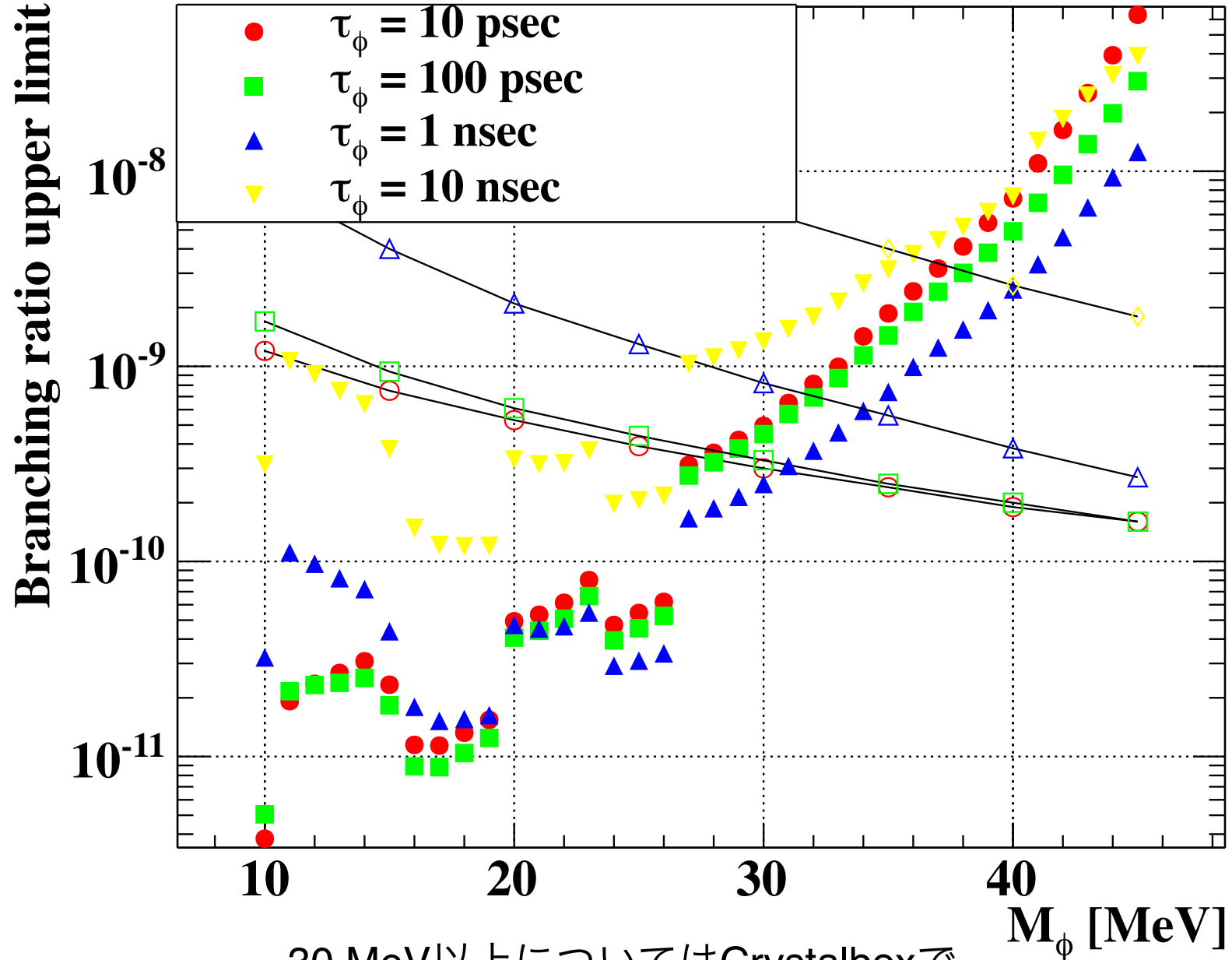
検出器の detection efficiency や resolution は考慮しない参考値となります

が、 γ 線に関しては相対値なので大きくずれることはないと考えられる



黒線がCrystalbox結果をスケールしたものの

マーカーの色は寿命に対応



~30 MeV以上についてはCrystalboxで
rejectされていそうです

本来は下記の運動量保存のカットがあり、 ϕ が移動がある程度の大きさであれば、運動量のestimatorが間違はずなのでさらに精度が悪いと予想される

- $P_{||} = |P_a + P_b + P_{ab} \times (P_c \times P_{ab})| < 14 \text{ MeV}$
(P_a, P_b : most nearly 90° , P_{ab} : unit vector)
- $|\cos\alpha| = P_c \cdot P_{ab} / |P_c| < 0.2$
(Momentum direction of γ s Crystalbox will see are different from true direction)

