

A Search for the Decay $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ Using a High-Resolution Liquid Xenon Gamma-Ray Detector

高分解能液体キセノンガンマ線測定器を用いた
 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊の探索

西村 康宏

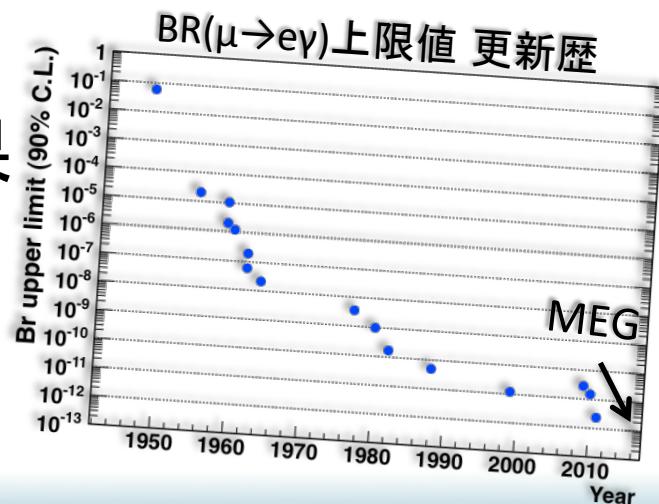


日本物理学会 第67回年次大会
若手奨励賞受賞記念講演

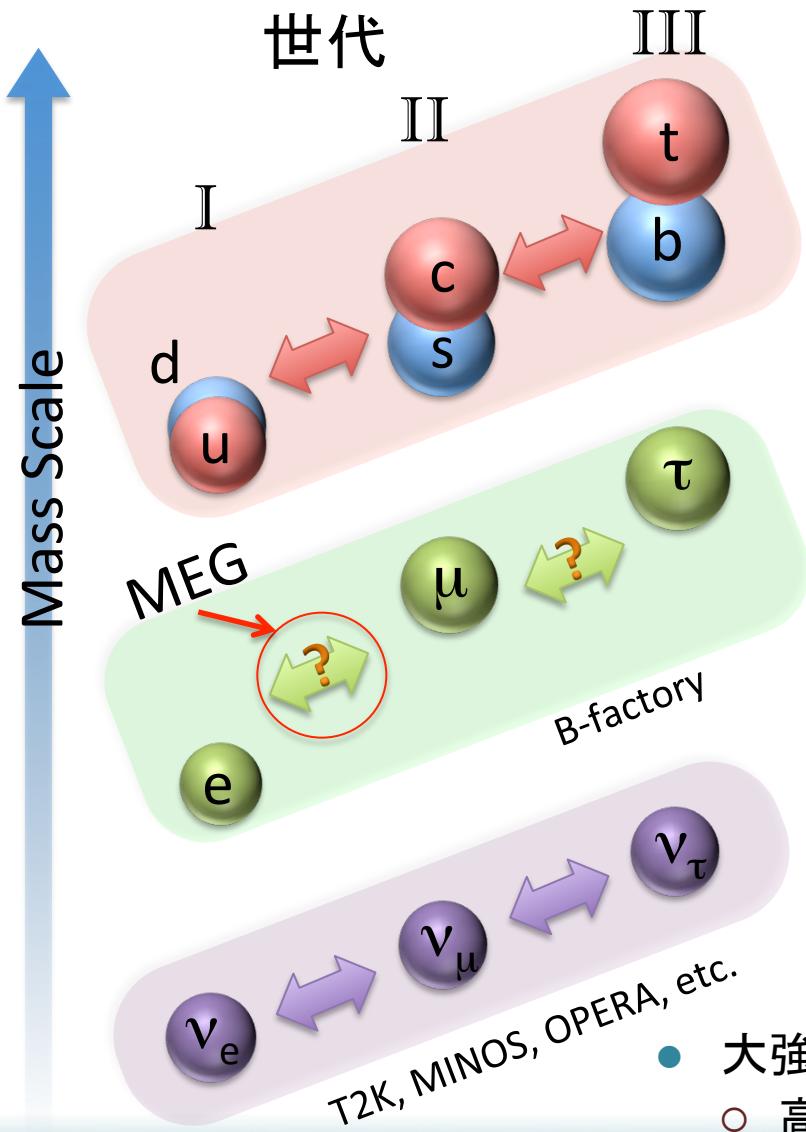
2012/3/24

内容

- MEG実験による $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索
 - 未発見の荷電レプトンフレーバー混合を調べる
 - γ 線を液体キセノン検出器にて検出
 - ▶ 開発・較正・性能測定・物理解析
- 2009年のデータを用いた解析
これまでの $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索結果 @ MEG
 - 2008年データによるMEG初の結果
 - 2009年データによる結果
 - 2009+2010年データによる結果



フレーバーの物理とMEG



クオーク

- ・良く知られたCKM行列による混合

荷電レプトン

- ・未発見の混合
- ・新物理に感度がある

ニュートリノ

- ・MNS行列による混合
- ・ニュートリノ振動により観測

- 大強度の物理 ← 稀な混合／相互作用
 - 高エネルギーによる探索(Higgs、超対称性粒子等)と相補的

$\mu \rightarrow e \gamma$

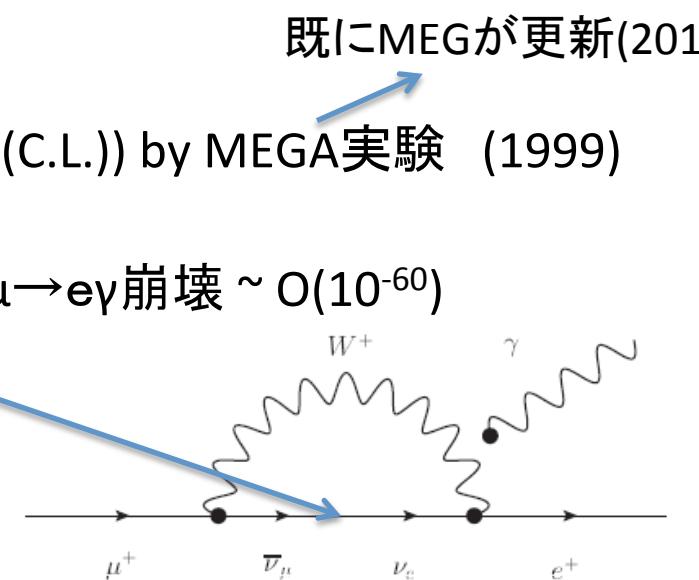
μ 粒子の通常崩壊

- $\text{Br}(\mu \rightarrow e \nu \bar{\nu}) \sim 100\%$
- $\text{Br}(\mu \rightarrow e \nu \bar{\nu} \gamma) = 1.4\% \quad (E_\gamma > 10 \text{ MeV})$

Lepton Flavor Violation (LFV)

- $\text{Br}(\mu \rightarrow e \gamma) < 1.2 \times 10^{-11}$ (90% Confidence Level (C.L.)) by MEGA実験 (1999)
- 標準理論 (SM) + ニュートリノ振動 で起こる $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊 $\sim O(10^{-60})$

$$\begin{aligned} B(\mu \rightarrow e \gamma) &= \frac{3\alpha}{32\pi} \sum_i \left| U_{\mu i}^* U_{e i} \frac{\Delta m_{21}^2}{M_W^2} \right|^2 \\ &\approx \frac{\alpha}{128\pi} \sin^2 2\theta_{12} \left(\frac{\Delta m_{21}^2}{M_W^2} \right)^2 < 10^{-54} \end{aligned}$$

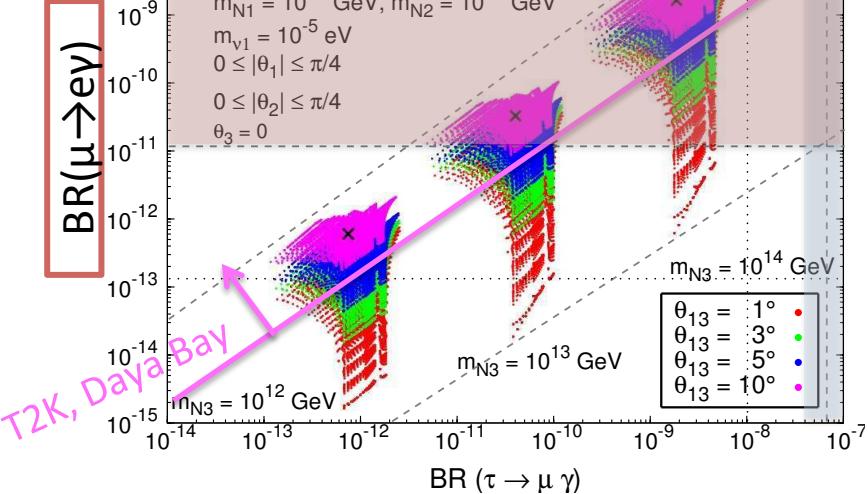


- 標準理論のみでは観測される粒に現れない (50桁ほどの差)
- 標準理論を拡張する理論の多くが LFV を MEG の到達範囲に予想
 - 超対称性理論, 余剰次元, ヒッグス多重項, ...
 - 既に観測されてもおかしくない領域

$\mu \rightarrow e \gamma$ と物理モデル

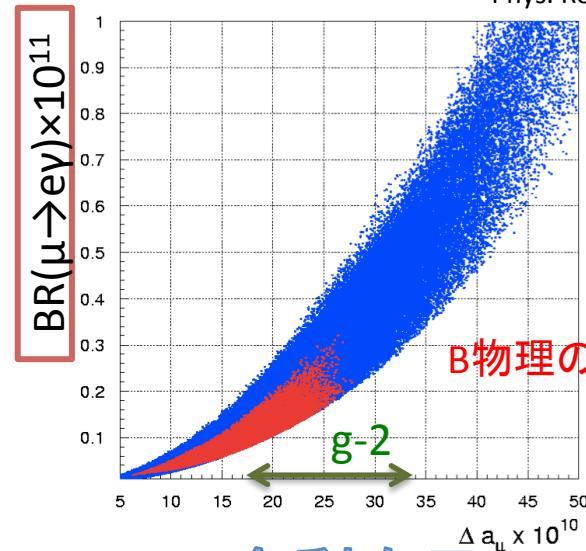
SUSY-Seesaw

JHEP11(2006)090



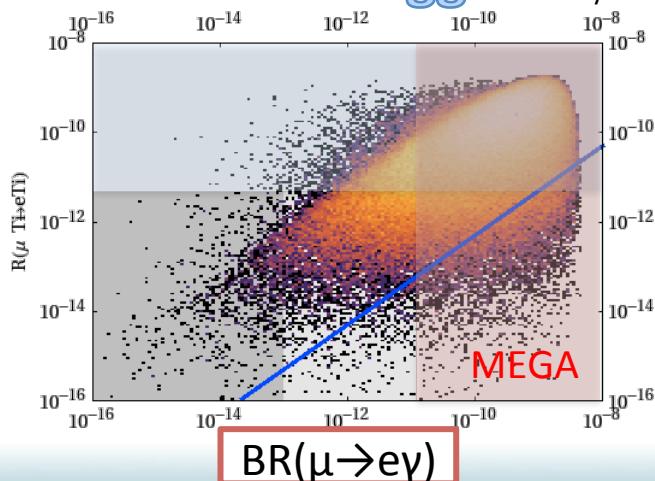
SUSY-GUT

Phys. Rev. D 75, 115019 (2007)



Little Higgs

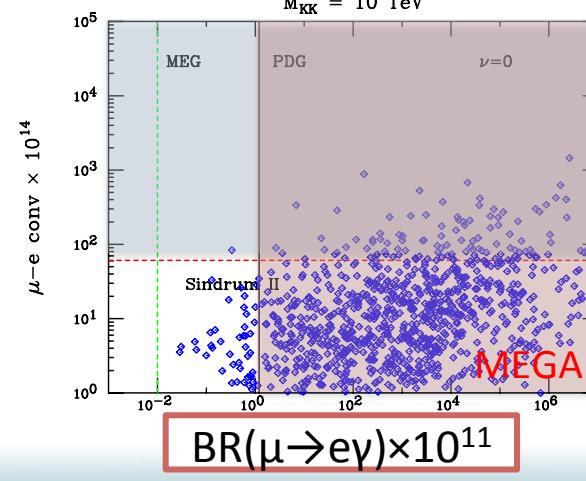
Acta Phys. Polon. B41:657, 2010



余剰次元

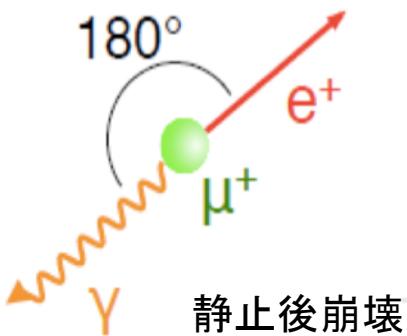
M_KK = 10 TeV

Phys. Rev. D 74, 053011 (2006)



$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ とバックグラウンド

Signal



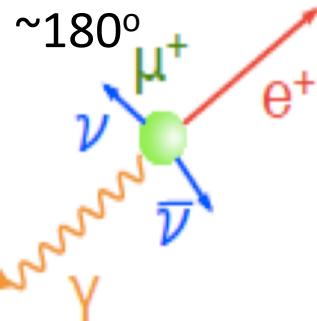
- $E_\gamma = E_e = 52.8\text{MeV}$,
 $t_{e\gamma} = 0$, $\Theta_{e\gamma} = 180^\circ$
- $\text{BR} < 1.2 \times 10^{-11}$
- MEG aims at $O(10^{-13})$

要件

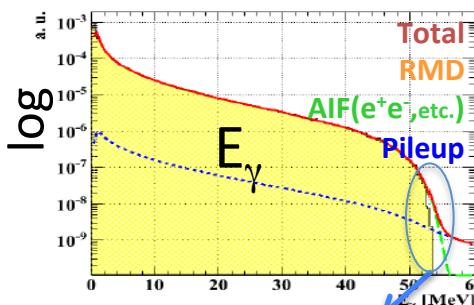
• 大強度 μ

• 探索感度は γ 線検出性能に大きく依存

Prompt Background



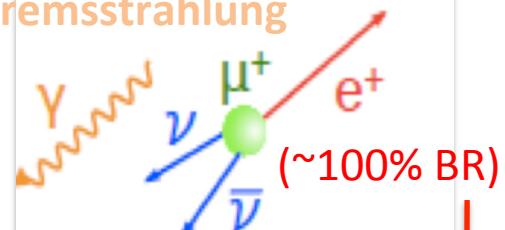
$$t_{e\gamma} = 0, \Theta_{e\gamma} > 180^\circ - \sigma, \\ E_{\gamma,e} \sim 52.8\text{MeV} \pm \sigma,$$



• 高分解能 γ 検出

Accidental Background

RD, AIF,
Bremsstrahlung



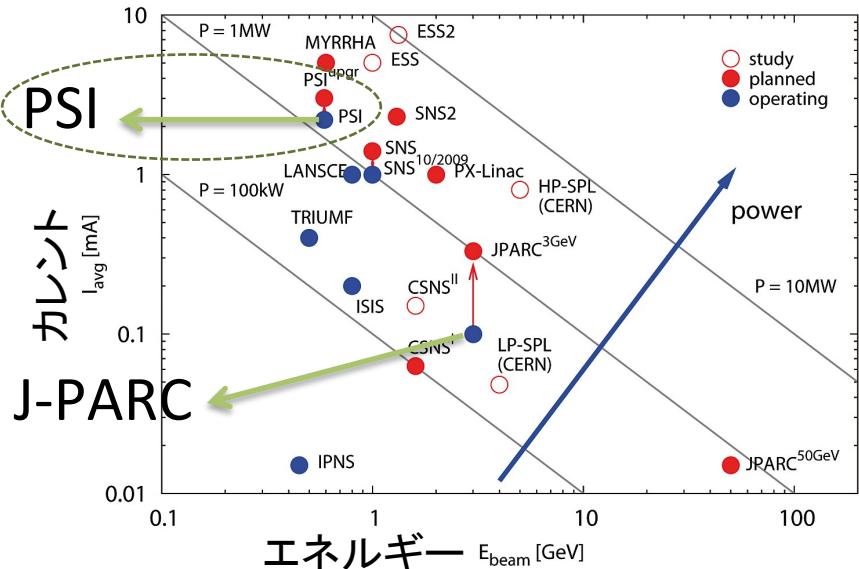
- Dominant BG
- ビームレートと分解能で制限

$$B_{BG} \propto R_\mu \\ \Delta t_{e\gamma}, \Delta E_\gamma^2, \Delta \theta_{e\gamma}^2, \Delta E_e$$

- 直流(DC) μ
• e^+ 高レート耐性

MEG実験の特徴

世界の加速器とビームカレント・エネルギー

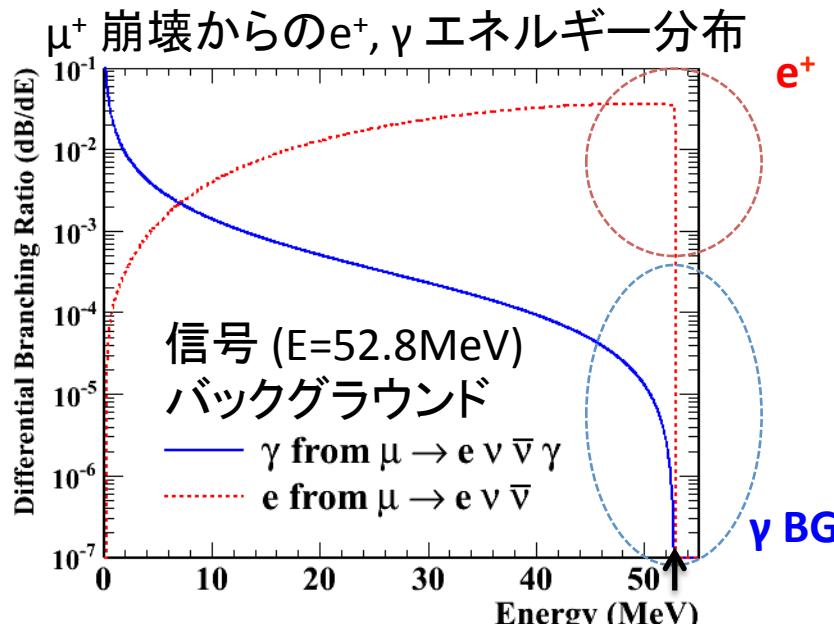


○ 十分な μ^+ 観測数

○ 高レート耐性を持つ陽電子測定

○ 高精度な γ 線のエネルギー決定

● 本講演は、液体キセノン検出器解析から2009年データ $\mu \rightarrow e\gamma$ 解析の話



世界最高強度・PSIのDCミューオン源

- ・ 陽子リングサイクロトロン (2.2mA) @ PSI
- ・ パイオンからの表面ミューオンDCビーム

e+検出器最適化・磁場勾配の陽電子スペクトロメータ

- ・ 特殊な勾配磁場 + ドリフトチェンバー

液体キセノン γ 線検出器

- ・ 優れた性能 (時間性能も)
- ・ 大規模、技術開発が必要

MEG実験



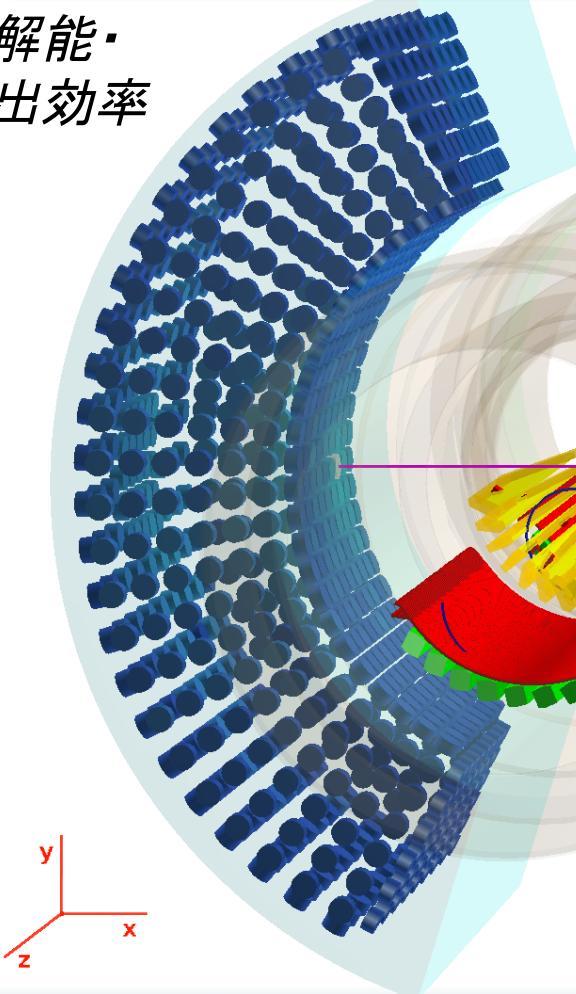
- 5カ国、60人程の共同研究
- スイス Paul Sherrer研究所(PSI)
- 1999年に実験提案、2008年に初の物理測定
- 2011年に分岐比上限を更新、測定は進行中

MEG検出器

γ : 900L 液体キセノン(LXe)検出器



高分解能・
高検出効率



Beam transport system

$\sim 3 \times 10^7 \mu^+ / sec$

Muon beam +

Stopping target

Drift chamber



Timing counter



e^+ 高レート測定

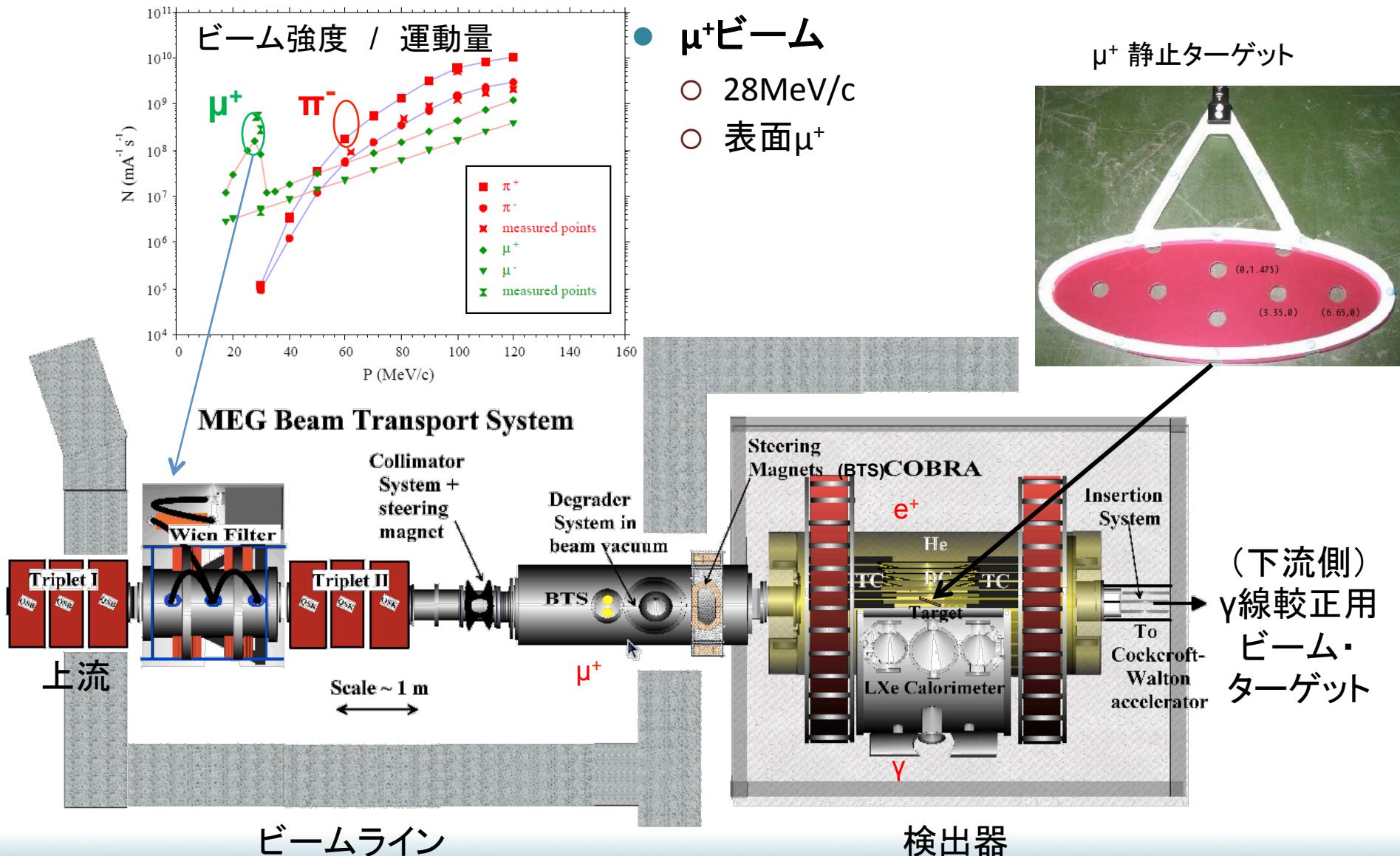
e^+ : 0.5 - 1.7 T 勾配磁場 +
Drift chamber + Timing counter

μ^+ : DC 表面 μ

590MeV Ring Cyclotron

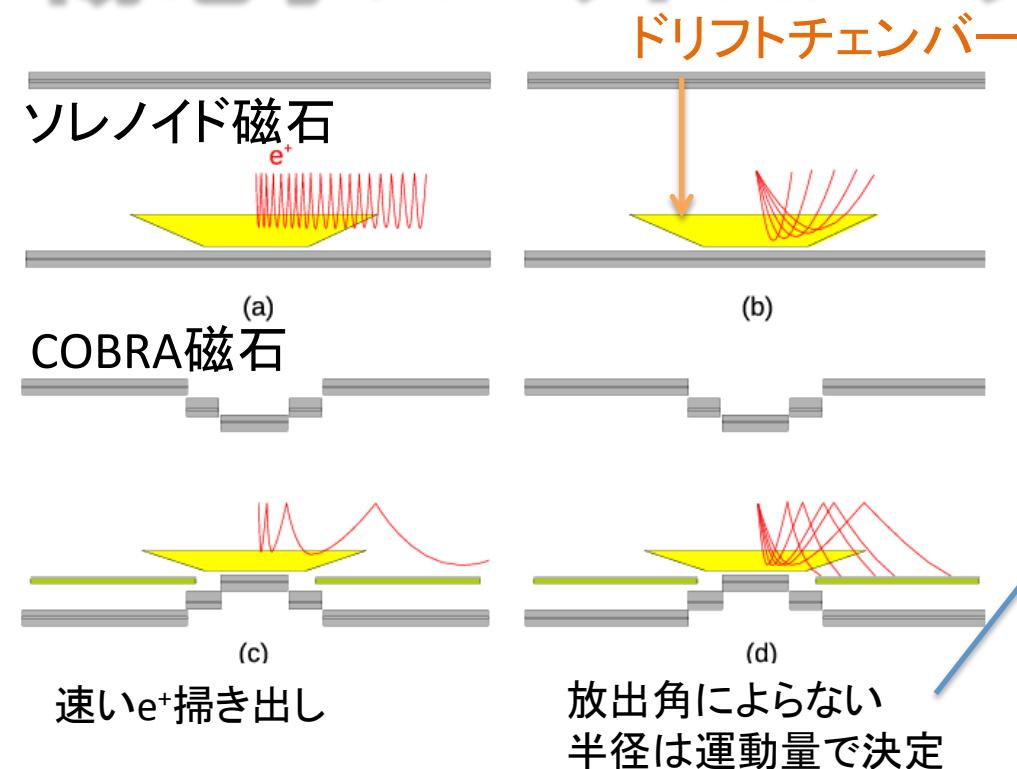
2.2mA proton

ビームライン・ターゲット

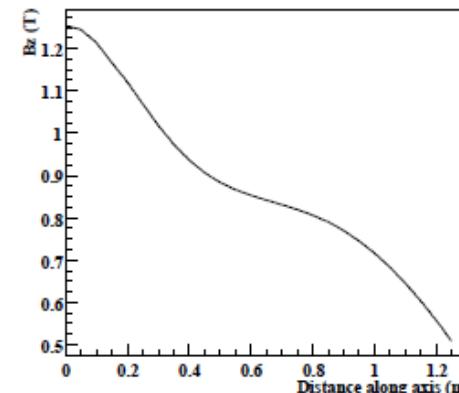


陽電子スペクトロメータ

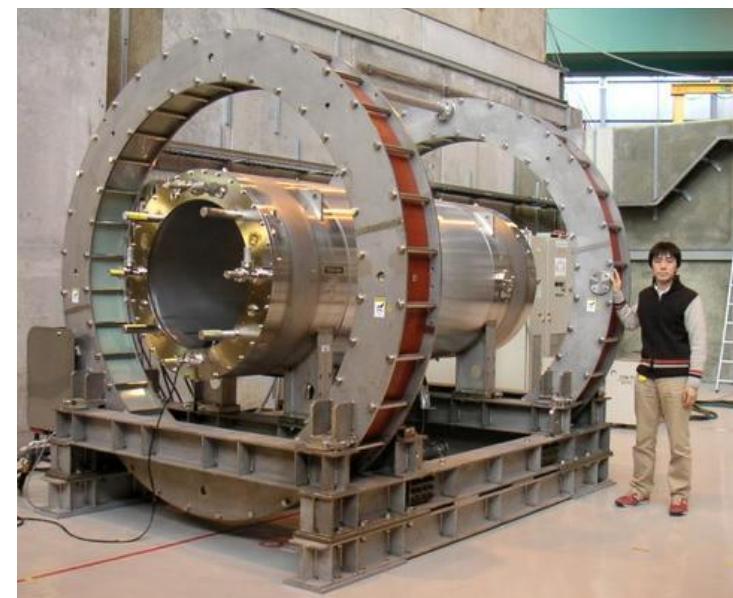
- COBRA磁石 -



COBRA磁石の勾配磁場



COBRA=Constant bending RAdius

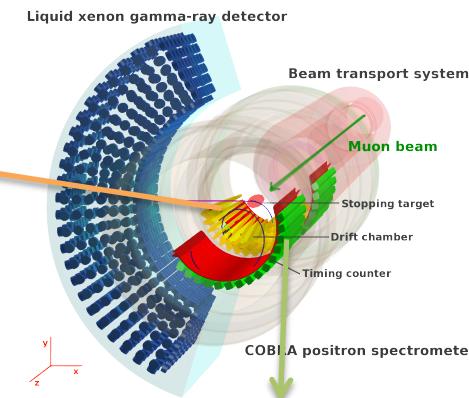
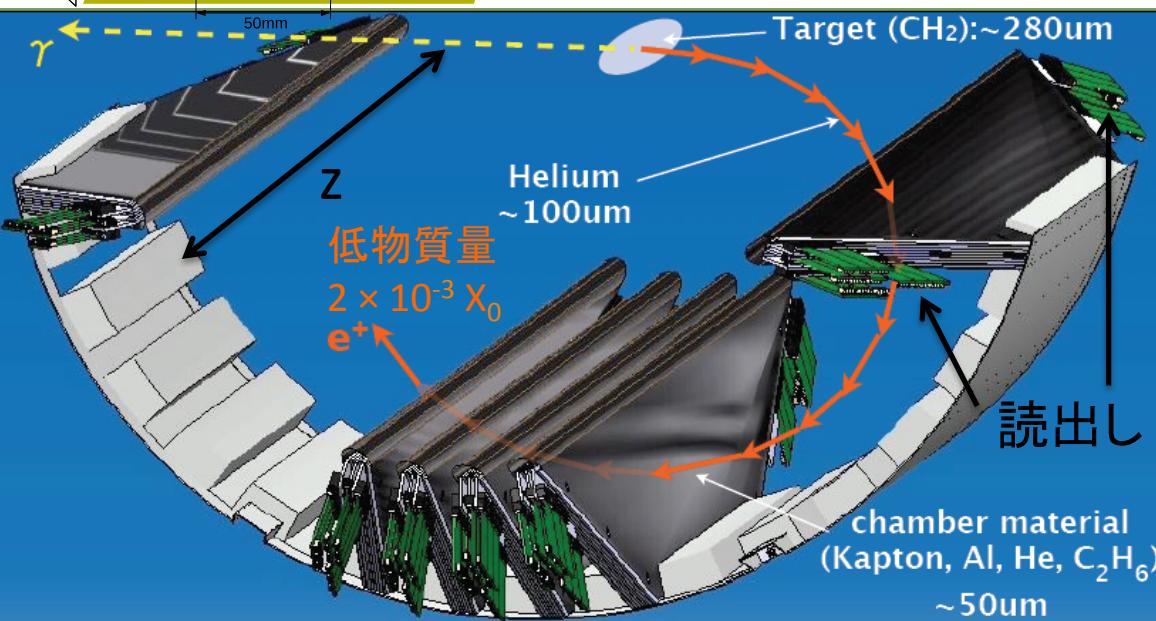
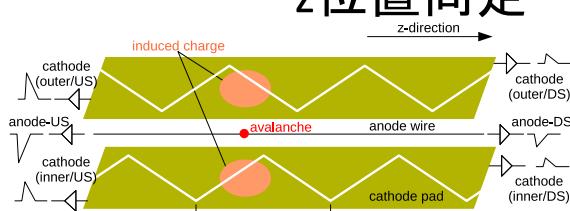


- 40MeV以上の陽電子のみを効率良く選出、レートを抑える
- 磁石内側で e^+ 検出、外側で γ 検出
 - 非常に薄い超電導磁石 $0.197X_0$ (85%)

陽電子スペクトロメータ - トラッキング -

ドリフトチェンバー (16枚)

- 40MeV以上のみ検出
- ワイヤー: z方向のみ
- カソード周期構造で
z位置同定



タイミングカウンタ (15×2本)

- プラスチックシンチレータ + PMT両端読出し
- 上下流に1セットずつ



液体キセノンシンチレータ

- 液体キセノンシンチレータの利点

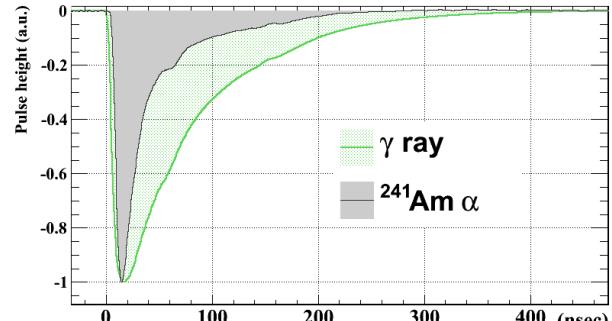
- 速い時間応答 ($\tau_{decay} = 45\text{ns}$)
- 高い制止力 ($X_0 = 2.8\text{cm}$)
- 高い光量 (NaI(Tl)の75%)
- 自己吸収が無い ($\text{Xe}_2^* \rightarrow 2\text{Xe} + h\nu$)
- 均一で劣化しない (液体)
- 粒子識別 (2つの発光過程)

- 難点と技術開発による解決

- 真空紫外光 ($\lambda=178\text{nm}$) → PMT
- 低温 ($T=165\text{K}$) → パルス管冷凍機
- 純度 → 液相/気相純化装置



シンチレーション光読み出し波形
MEGでは1.6GHzで全波形を取得



2インチ PMT

- メタルチャンネルダイノード
- クオーツ窓、バイアルカリ(K-Cs-Sb)
 - 真空紫外光有感
- 低物質量 ($\sim 0.14X_0$)
 - γ 線透過
- アルミ縞、ツェナーダイオード
 - 電圧降下防止

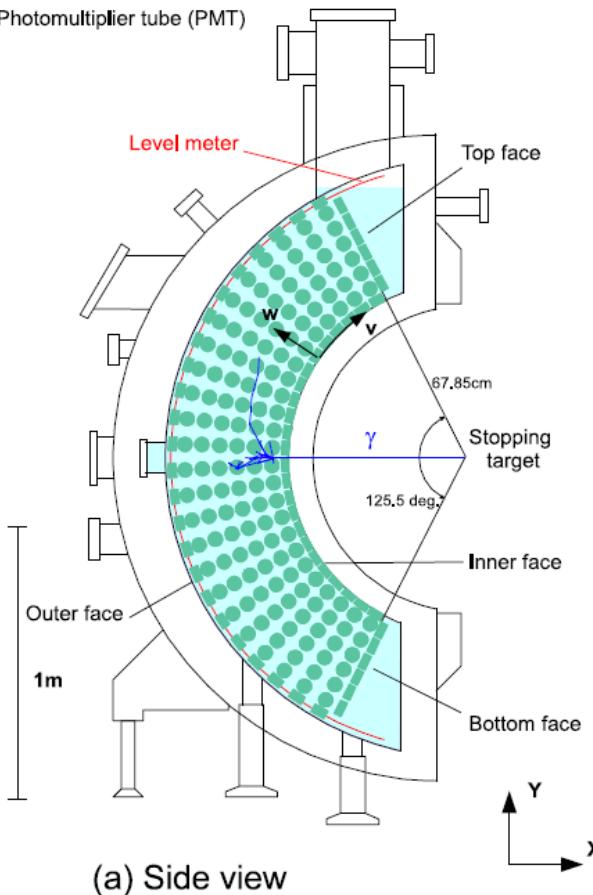
液体キセノン線検出器

● 900L 液体キセノン検出器 (2.7トン)

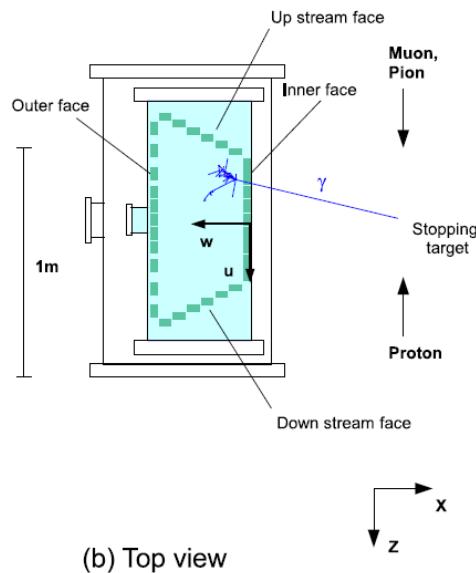
- 立体角11% ($\Delta\phi=120^\circ$, $\Delta\theta=30^\circ$), $14 X_0$
- 薄い γ 線入射窓 ($0.075X_0$)

846本のPMTで光量分布を読み出し

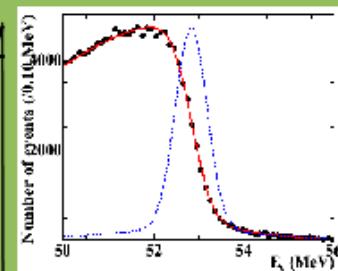
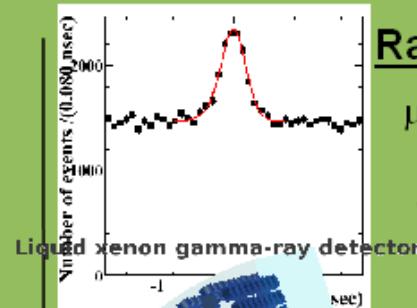
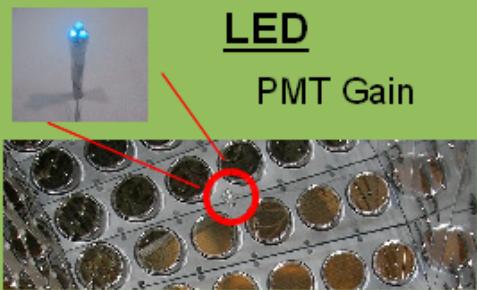
● Photomultiplier tube (PMT)



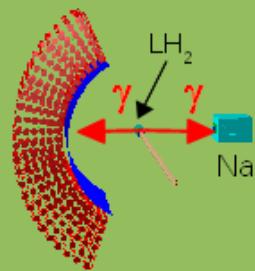
エネルギー・時間・位置を
測定可能



ガンマ線較正機構

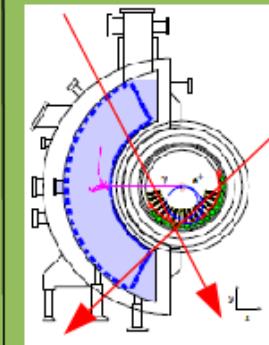
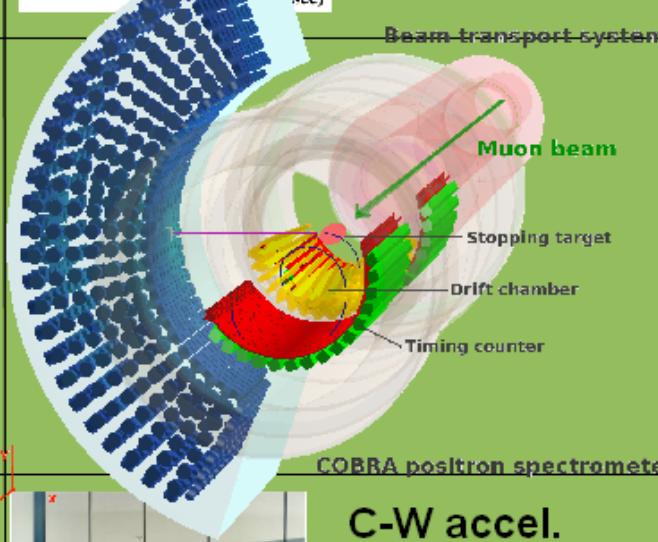


$\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$

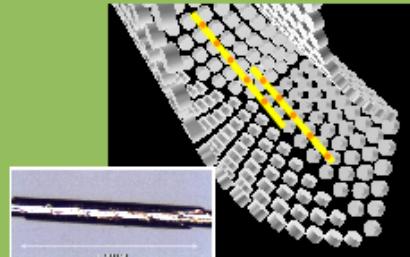


$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
55, 83, 129 MeV
monochro

$\pi^0 \rightarrow e^+e^-$
Relative timing
Similar topology



Alpha



C-W accel.

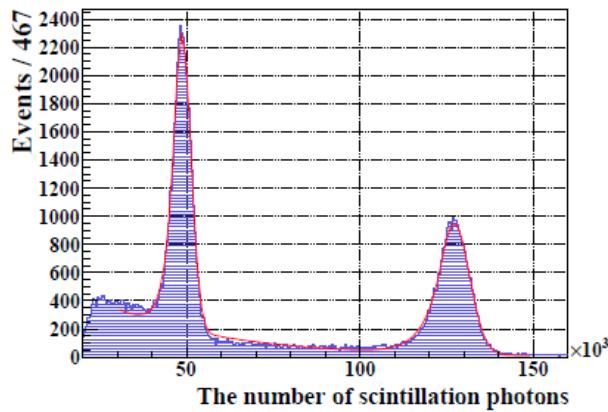
$Li(p,\gamma)Be$
- 18 MeV γ
 $B(p,\gamma)C$
- 4, 11 MeV 2γ

AmBe

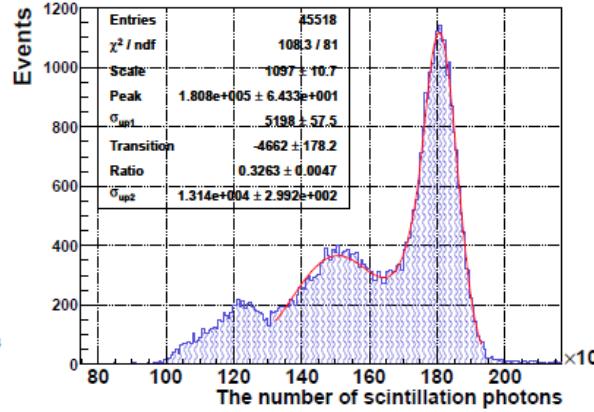
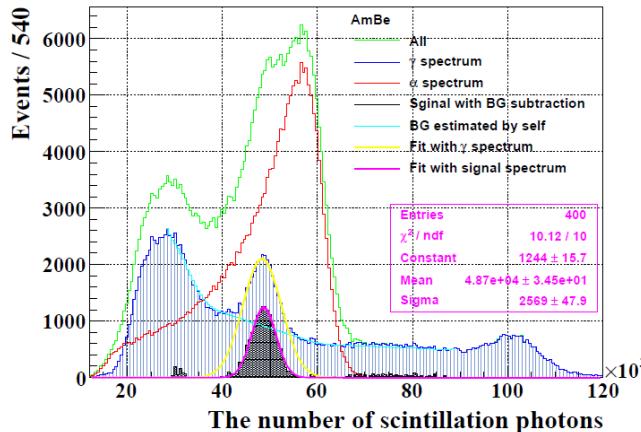


光量モニター源

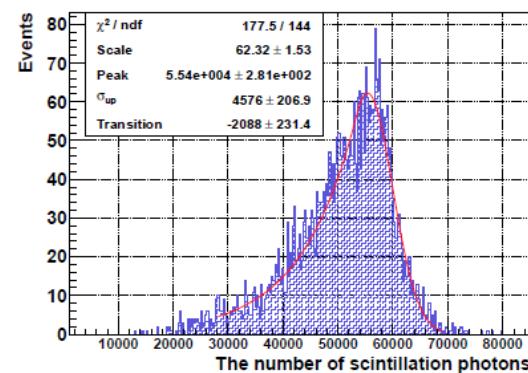
CW陽子加速器 4.4, 12, 18 MeV γ 線



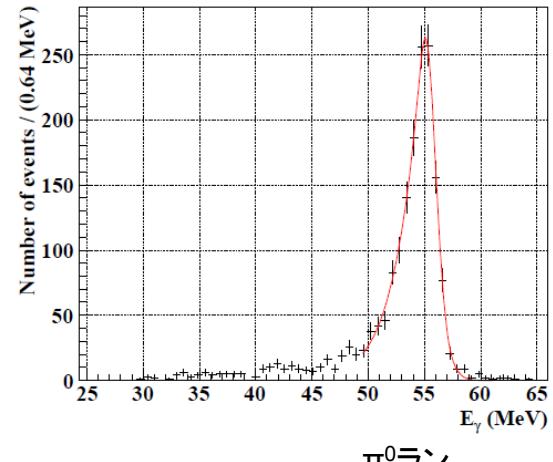
CW Bラン
Am/Be線源 4.4 MeV γ 線



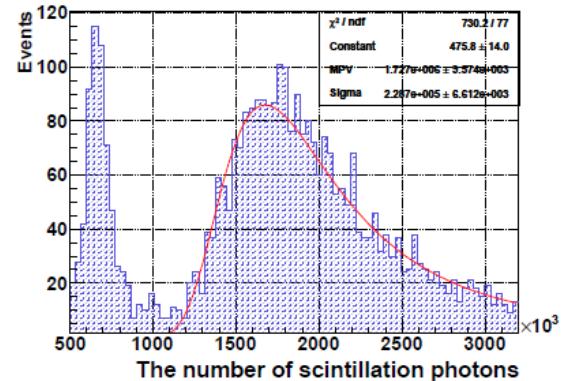
CW Liラン
241Am線源 5.5 MeV α 線



π^- ビーム
55, 83, 129 MeV γ 線



宇宙線



● 多種のモニタ・較正が可能

Cockcroft-Walton (CW) 陽子加速器

CW加速器 (< 1MeV)



励起原子核ガンマ線 ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)

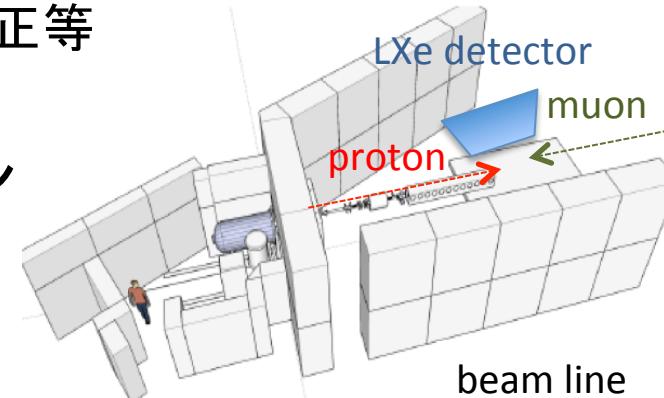
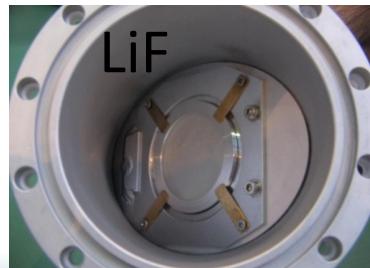
- ${}^5\text{B}(\text{p},\gamma){}^6\text{C} \rightarrow 4.4, 12 \text{ MeV } \gamma\text{線}$
 - 時間較正等

- ${}^3\text{Li}(\text{p},\gamma){}^4\text{Be} \rightarrow 18 \text{ MeV } \gamma\text{線}$
 - 光量モニタ、位置依存補正等

● 陽子ビームライン

- μ^+ の下流側

ターゲット

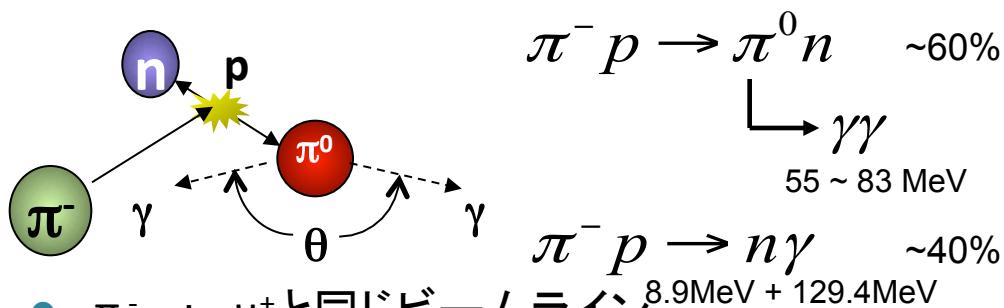


● $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 陽子ターゲット

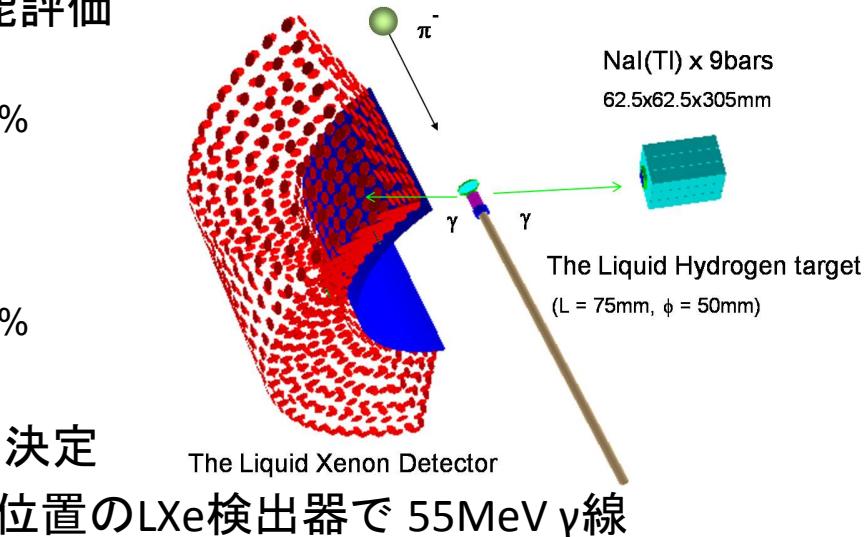
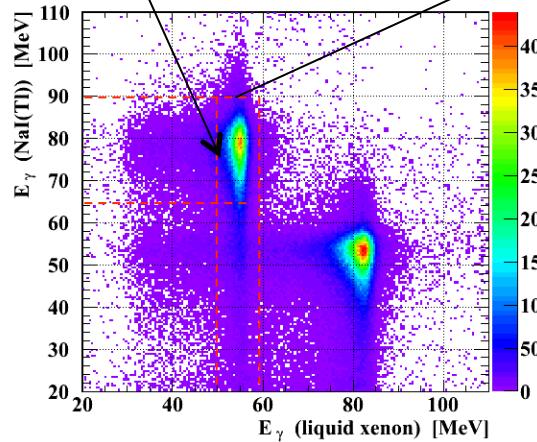
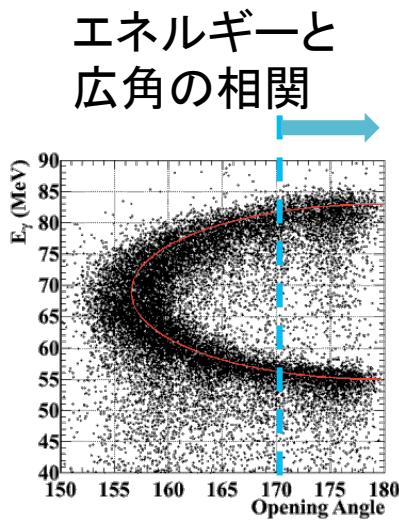
- μ^+ ターゲットと入れ替え(10分)
- 週に2, 3回 20分のCW ラン

パイオノン荷電交換反応

- 55 MeV γ で、信号(53 MeV)付近の較正・性能評価



- π^- : μ^+ と同じビームライン
- 2つの γ 線のエネルギーは π^0 崩壊の広角から決定
 - NaI検出器で83 MeV γ 線をタグ → 反対位置のLXe検出器で 55MeV γ 線

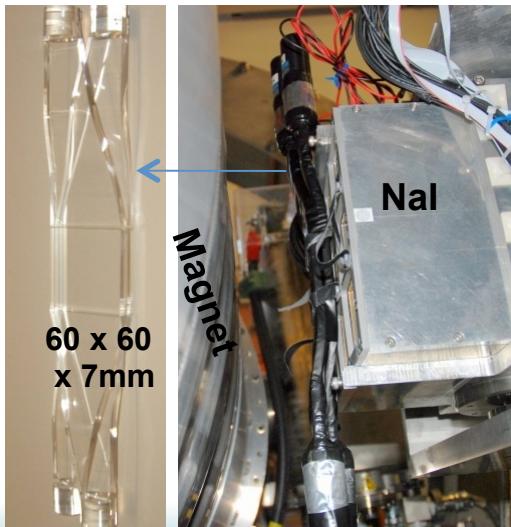
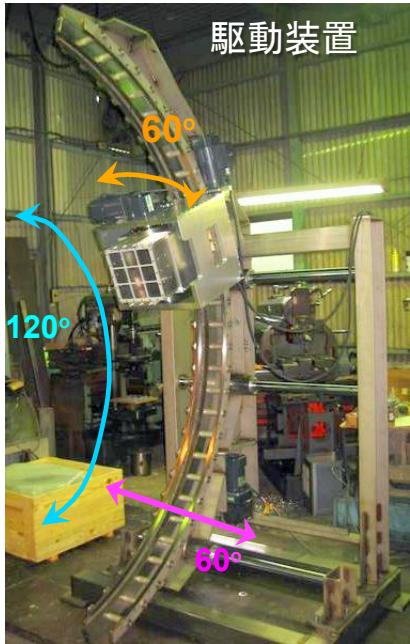


可能な性能評価 (年に1, 2回)

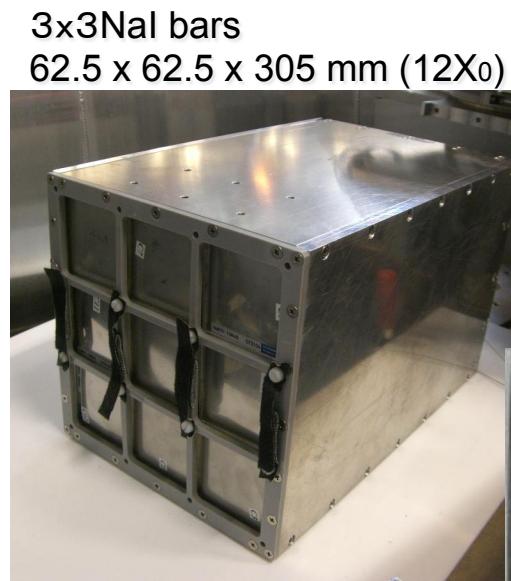
- エネルギースケール決定
- エネルギー分解能
- 時間分解能
- 位置分解能
- 検出効率

- 2 γ タグ用のNaI検出器を開発

Nal+APD検出器



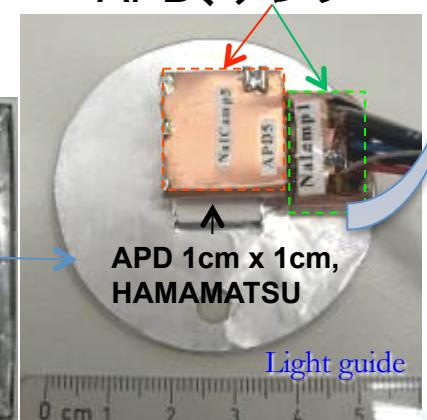
- 83MeV γ 線の位置・エネルギーをタグする
- 3 x 3 Nal(Tl) を駆動 → LXe検出器全面で測定可能
 - アバランシェ・フォトダイオード(APD)で光検出
 - APD + 温度制御で高磁場中の駆動でもゲイン一定
- 時間測定
 - 鉛コンバータ+プラスチックシンチレータ+PMT



3x3Nal bars
62.5 x 62.5 x 305 mm (12X₀)

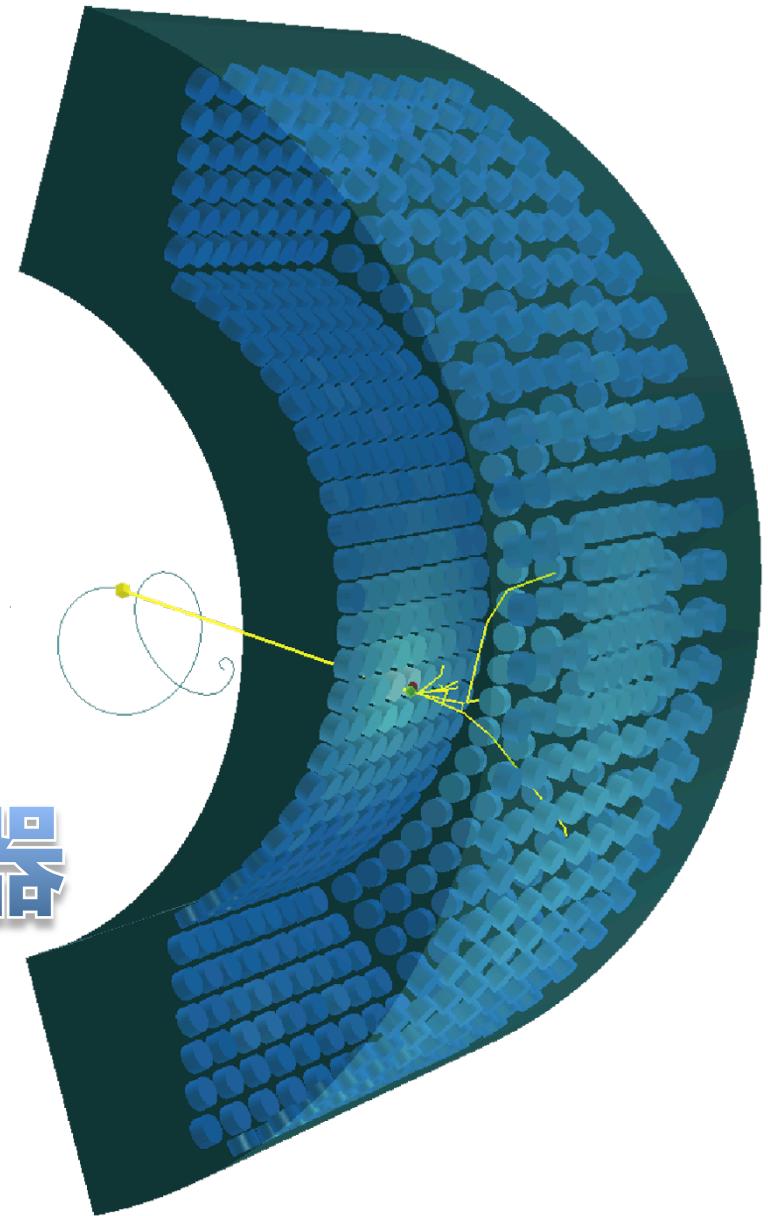


APDs

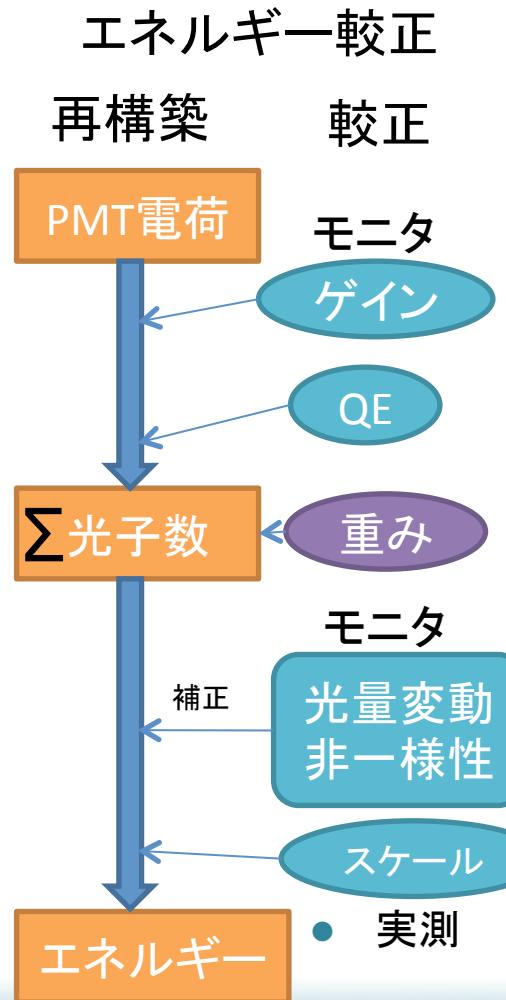


前面のプラスチックカウンタ

液体キセノン検出器 較正・性能評価



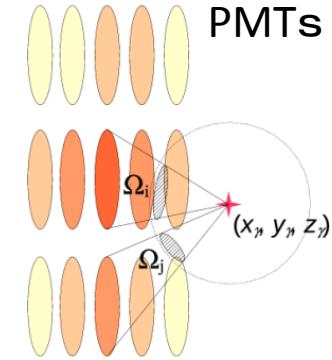
ガンマ線較正・再構築



- 時間、位置

- 入射位置付近のローカルなPMTでフィットして求める
- 位置

$$\chi^2_{position} = \sum_i^{PMT} \frac{N_{pho,i} - c \times \Omega_i(u, v, w)}{\sigma_{pho,i}(N_{pho,i})}$$



- 時間

$$\chi^2_{time} = \sum_i \frac{(t_{hit,i} - t_{LXe})^2}{(\sigma_{t,i}(N_{pe}))^2}$$

- エネルギー

- 全てのPMTの出力和

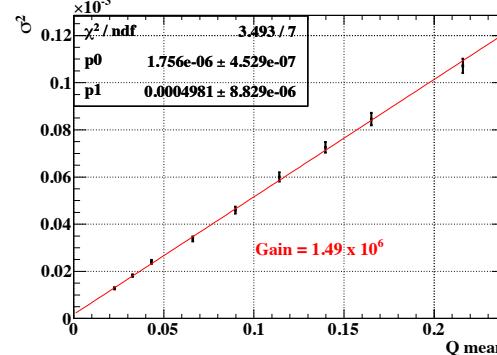
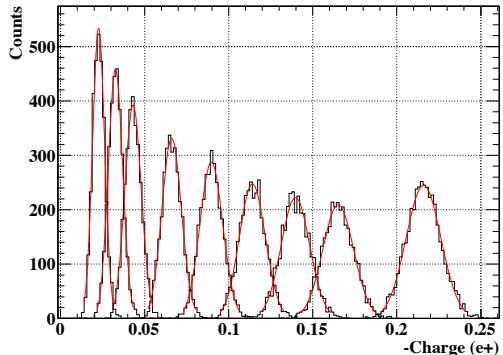
$$Energy = F(u, v, w) \times S(u, v, w) \times T(t) \times C \times \sum_i (N_{pho,i} \times W_i)$$

- N_{pho} : 光子数(PMT電荷, ゲイン, 量子効率から)
- W_i : 重み(定数)
- F : 場所依存の補正
- S : 浅い位置(3cm以下)の入射に対する、PMTの立体角補正
- T : 光量変動の補正
- C : エネルギースケール
- 2009年データでの見積もりが必要

PMTゲイン較正

ゲイン計算

- LEDピーク・分散でゲイン絶対値を求める
 - $\sigma^2 = \text{Gain} \times \text{Mean} \times e/C_{(\text{const.})} + \text{const.}$

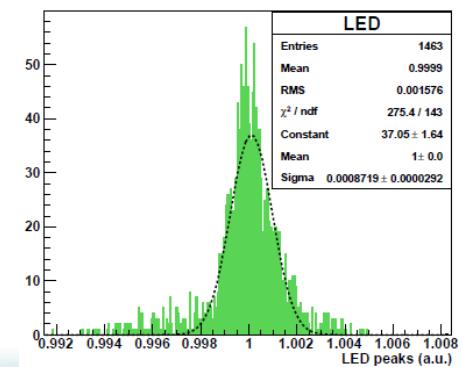
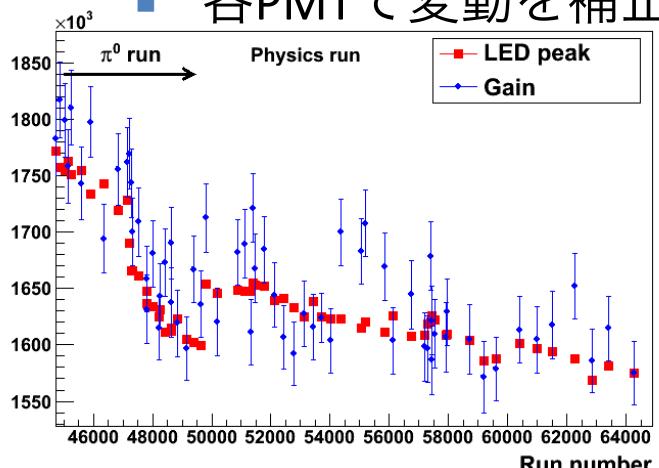


検出器内
青色LED 10個



ゲインモニタ

- LEDランのピークで各PMTのゲインをモニタ
- 各PMTで変動を補正
- 物理ラン中のLEDで補正後のピーク安定性を確認
- μ^+ ビーム中では0.1% σ で安定



PMT量子効率(QE)較正

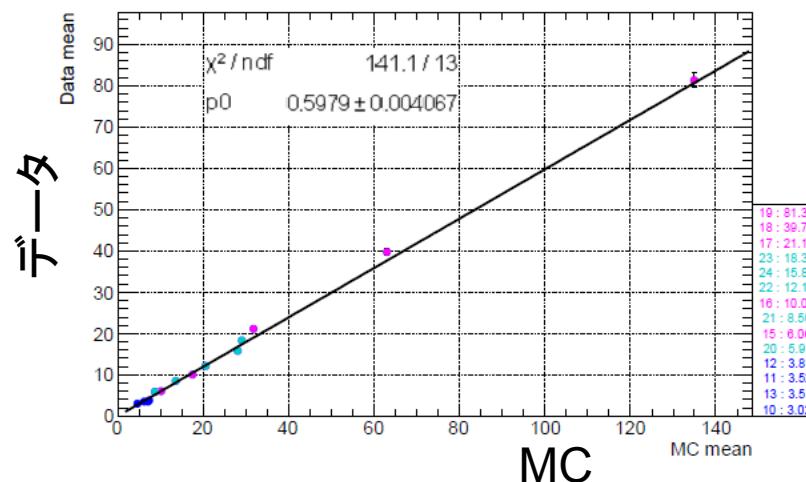
- 液体キセノン内、ワイヤ5本に各5つの α 線源(^{241}Am)
 - QE = α 線MCとデータでのPMT出力比／LEDから求めたゲイン

α 線源25個からの
検出器内事象位置分布

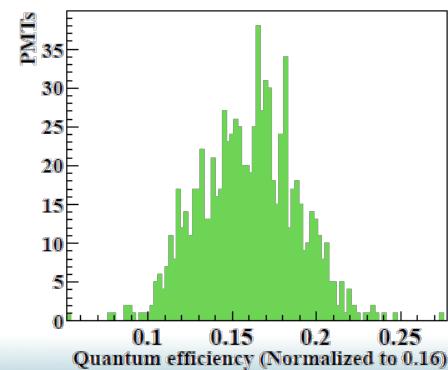


MC期待値とデータ
(1PMTから見た各 α 線源)

PMT 609. QE=9.56607 %, (Uncert. 2.27392 %)

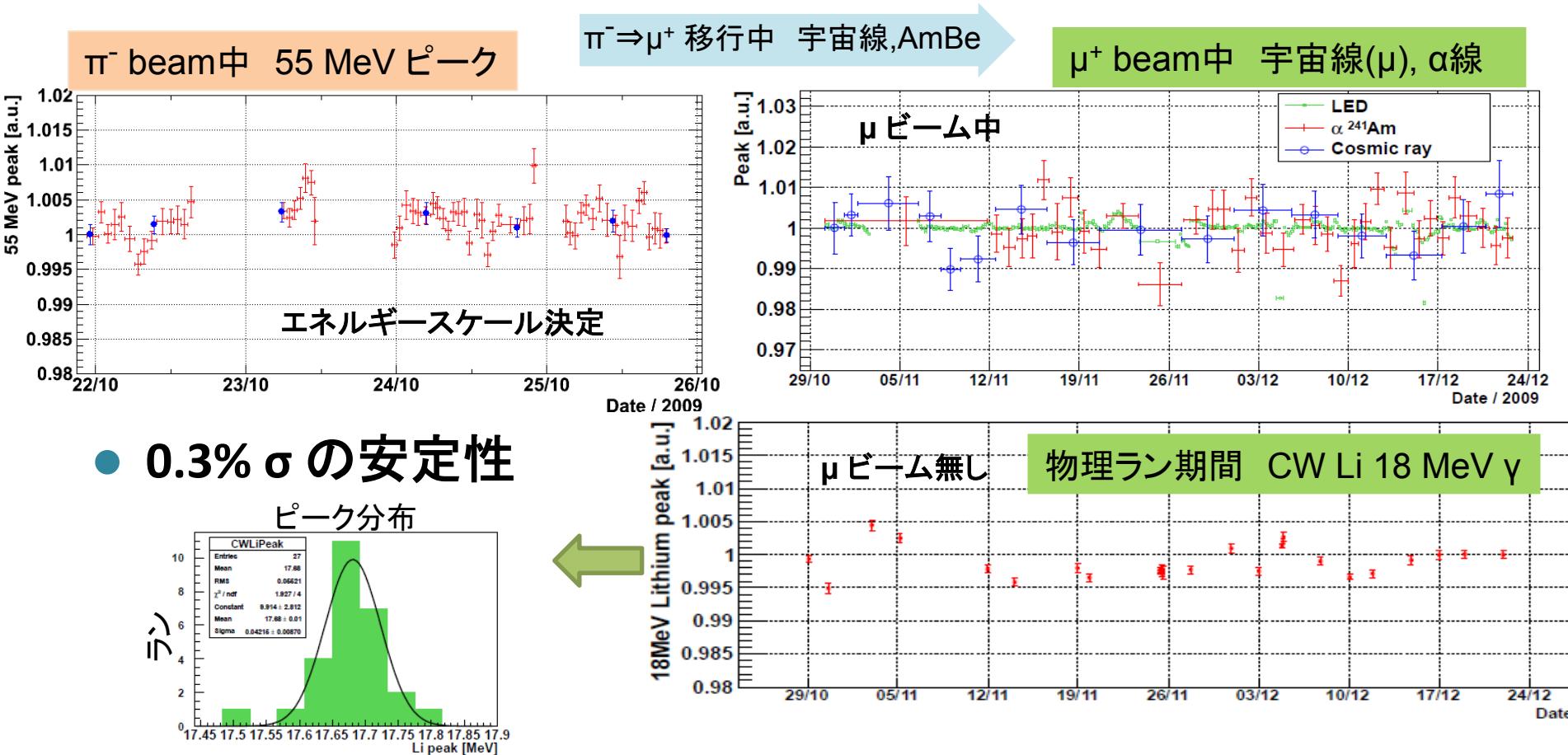


- QE = $N_{\text{pe}} / (N_{\text{pho}} \times \text{gain})$
 - gainはLEDで見積もる
 - ・ 全PMTのQE分布

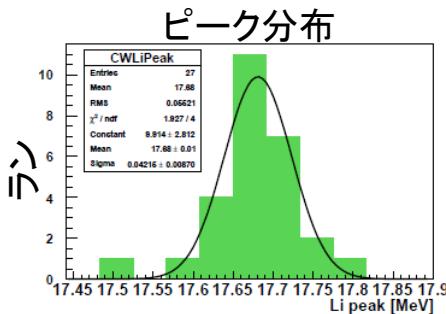


シンチレーション光量モニタ

- モニタ : π^0 ランの55 MeVで求めたエネルギー スケールを全期間で安定に用いる



- 0.3% σ の安定性

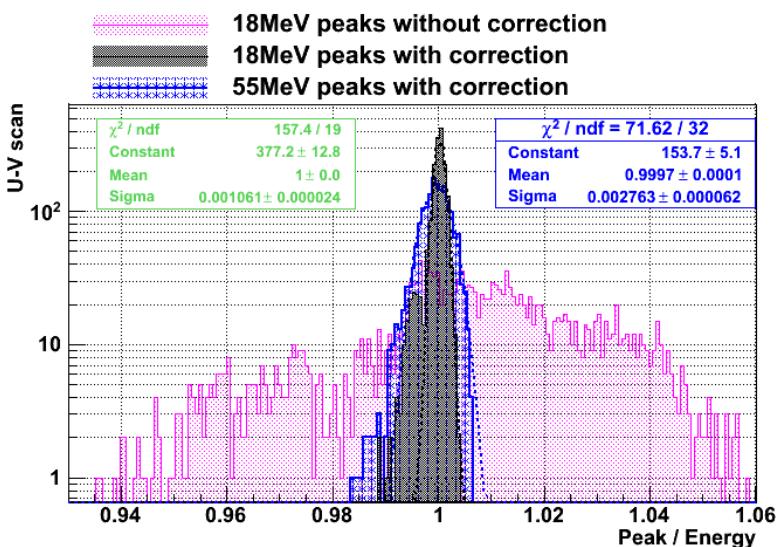
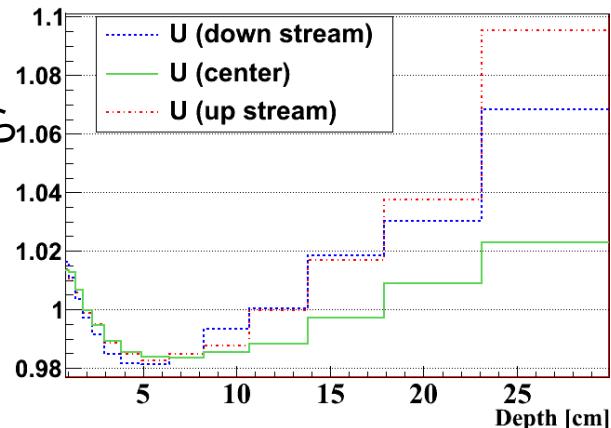


- 光量は2009年を通して非常に安定

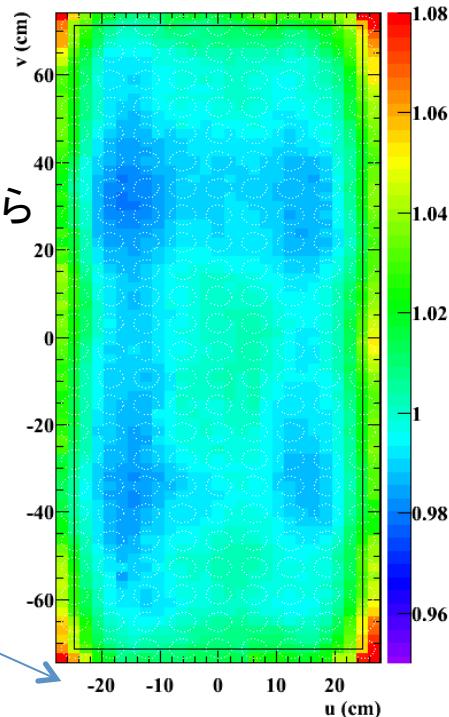
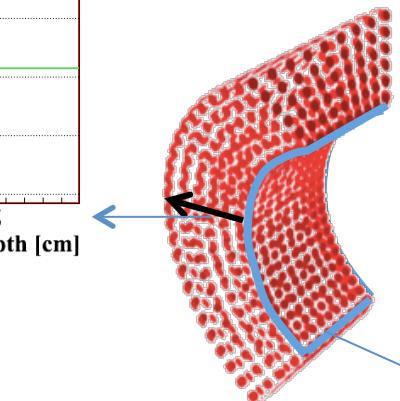
ガンマ線検出 エネルギースケール補正

- シンチレーション光検出数の位置依存を3次元で補正

補正係数(深さ方向)
 π^0 55 MeV ピークから



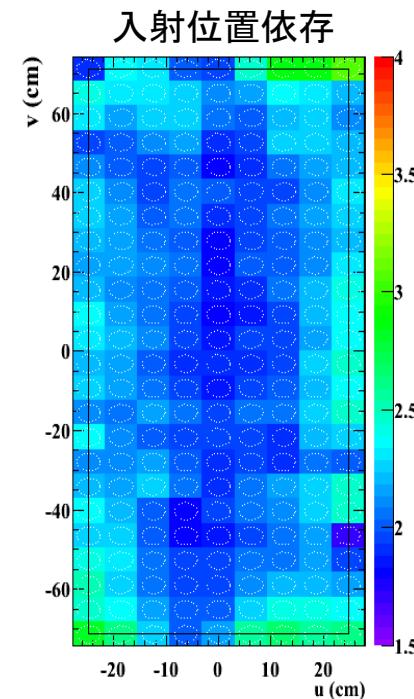
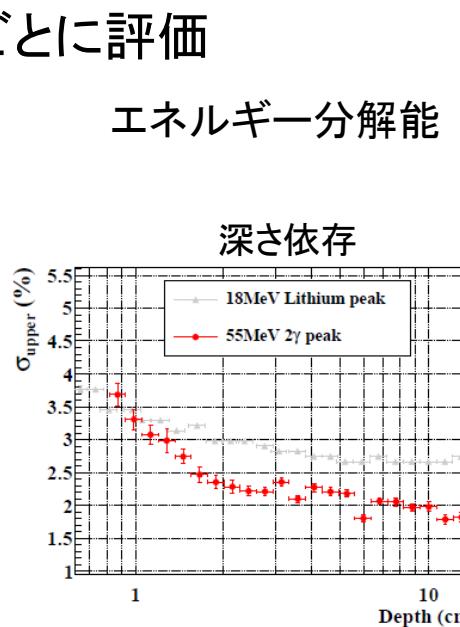
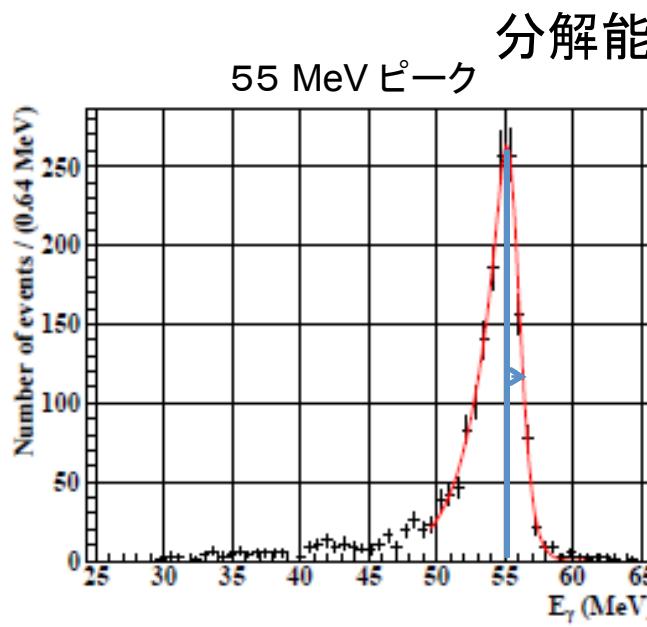
補正係数(検出面)
深さ補正後、
CW 18 MeV ピークから



- 検出面での補正前後ピーカ分布
 - 6.2cm x 6.2cm ごとにスキャン
- 補正後,
0.3% σ の一様性が得られた

ガンマ線検出 エネルギー性能評価

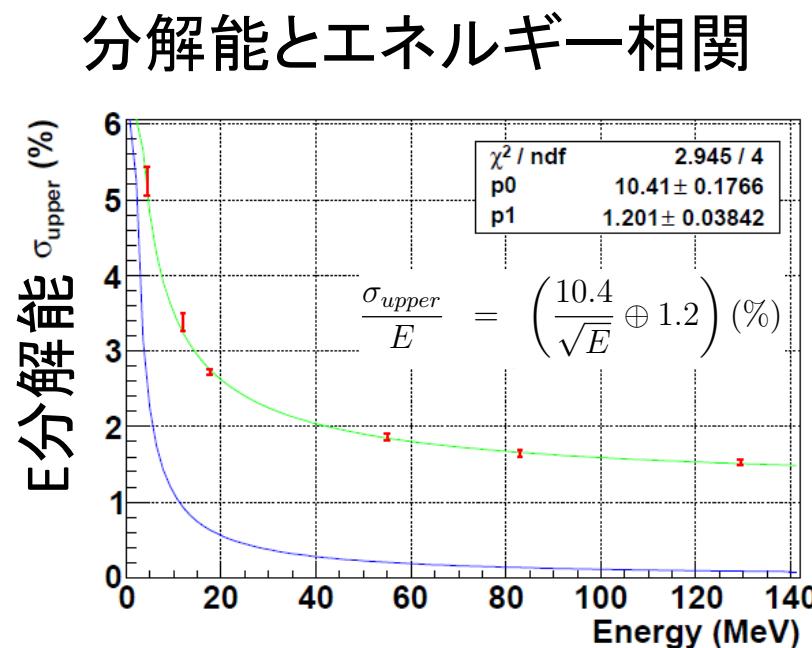
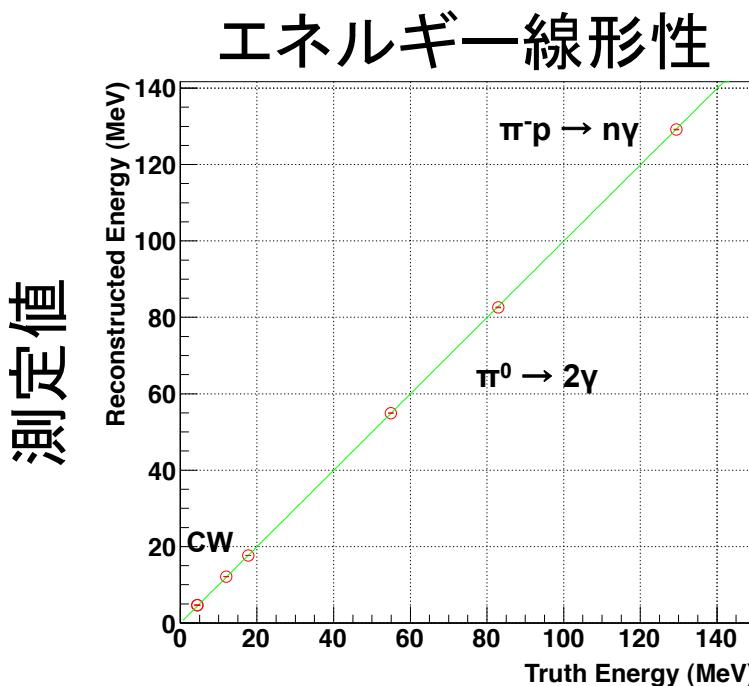
- π^0 からの 55 MeV ピークから見積もる
 - Exponential(テイル)+Gaussian関数で評価
 - π^- , μ^+ ビームのバックグラウンドの違いをペデスタルから取り入れる



- 53 MeVでの分解能平均 (σ_{upper})
 - ▶ 2.1% ($2 < w < 38$ cm), 2.8 % ($1 < w < 2$ cm), 3.3 % ($0 < w < 1$ cm)

ガンマ線検出 エネルギー性能評価

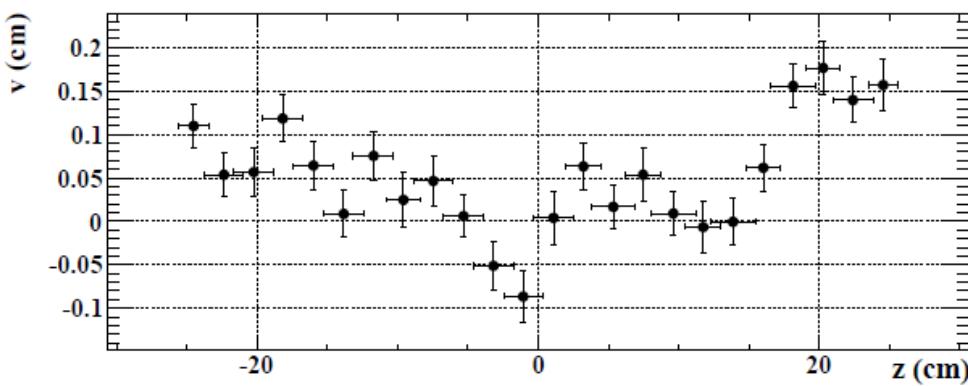
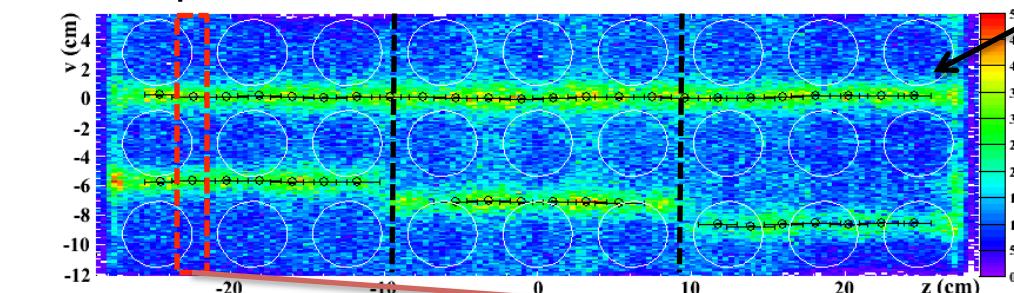
- エネルギー応答の線形性
→ π^0 runの3ピークで0.3%以内
- エネルギー分解能のエネルギー依存性
→ 信号エネルギーでの分解能へ換算



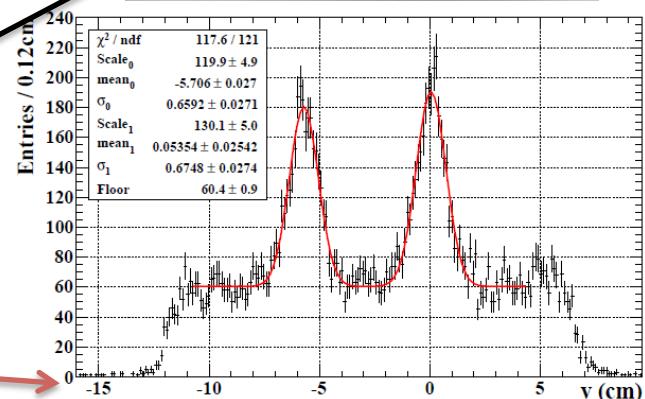
ガンマ線検出 位置性能評価

- ビーム軸方向全域の性能を見積もった。
 - 厚さ1.8cm, スリット幅 1 (or 0.5)cmを持つ鉛コリメータ
 - 40cm長と3x13cmの階段状のスリット

$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ の検出面イベント分布



鉛スリットコリメータ



スリットによる平均幅 σ

- 6.8mm (1cm スリット)
- 6.5mm (0.5cm スリット)

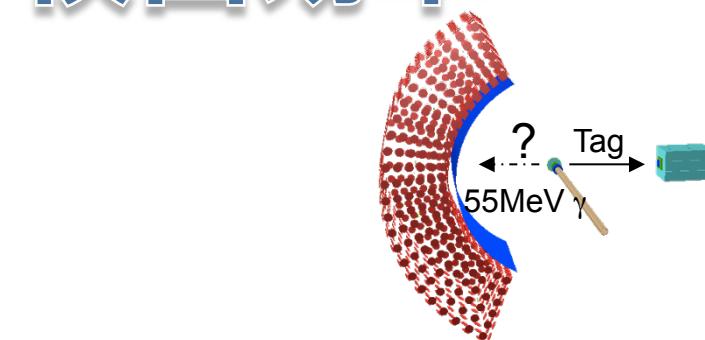
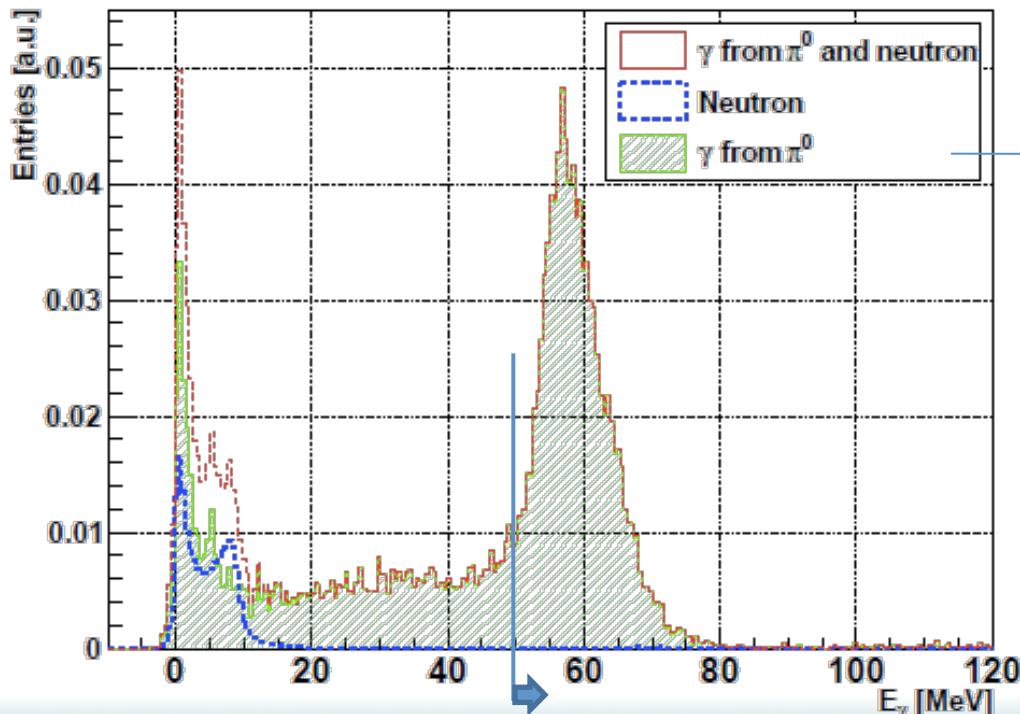
位置分解能

- ターゲットの広がり、スリットの幅を考慮
- 2008年 (5mm σ) とほぼ同じ性能

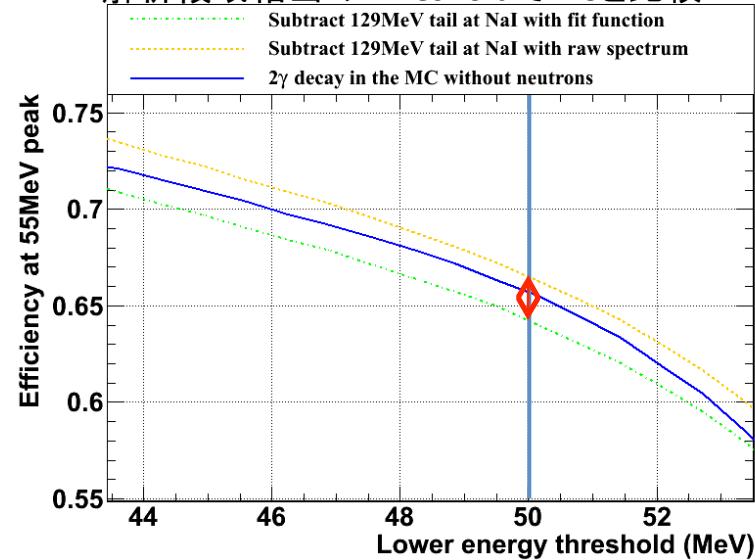
ガンマ線検出 検出効率

μ 崩壊数見積もりに必要

- MCシミュレーション (53 MeV 信号)
 - 入射位置ごとの検出効率
- $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 崩壊測定 (55 MeV 附近)
 - MCと測定の差から系統誤差見積もり
 - NaIのみで83MeVを要請した時のLXe側の55MeVピーク
 - 中性子バックグラウンド(9MeV)を除去



- 解析領域相当のThresholdでMCと比較

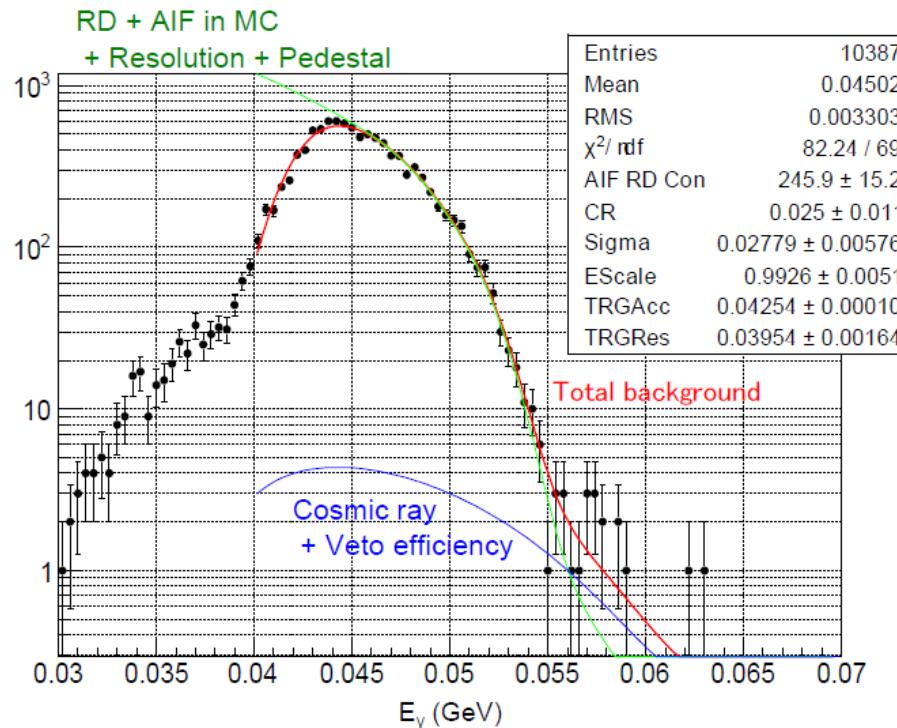


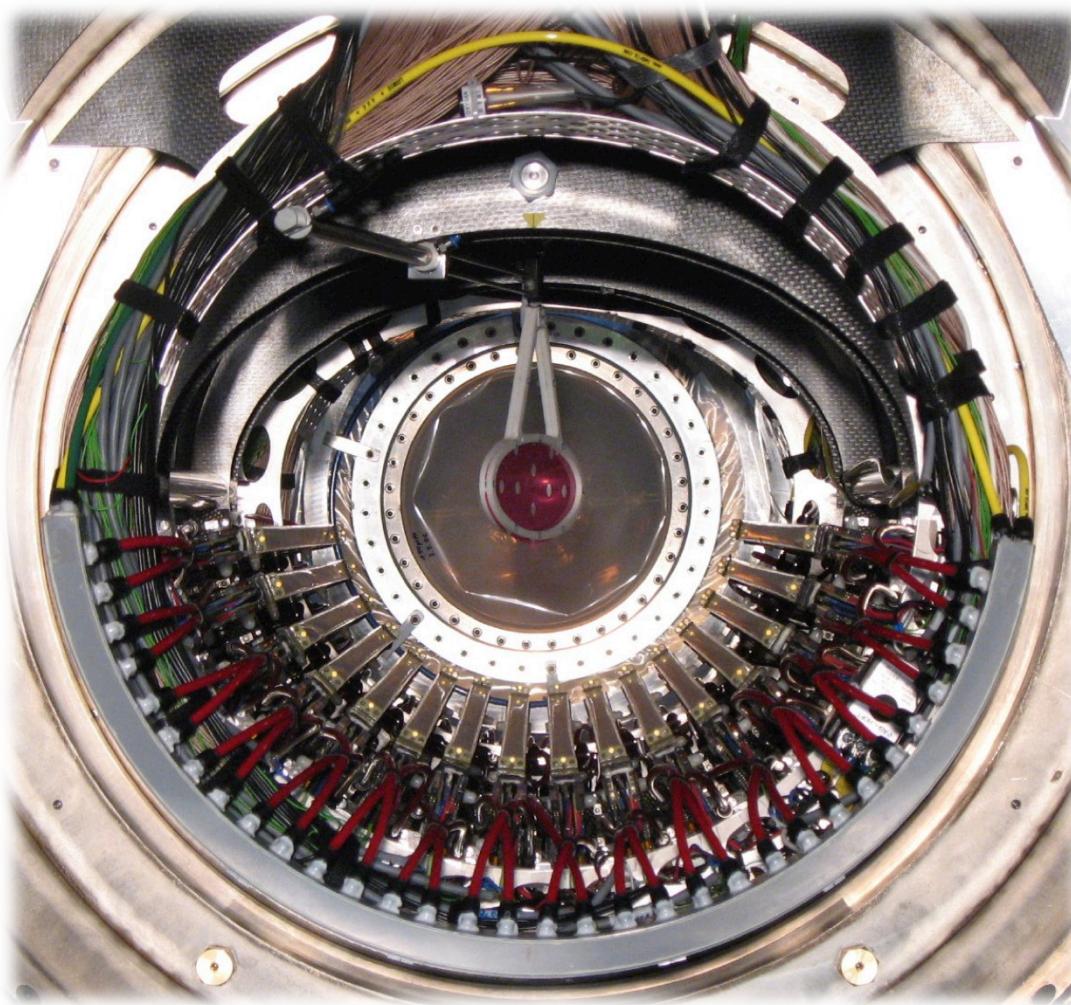
- 実効検出効率
= 検出効率 $\times \sum$ (解析効率 \times e⁺トリガ分布)

$$\epsilon_{ey}^{LXe} = 0.647 \times 0.893 = 0.578 \pm 0.02.$$

ガンマ線 バックグラウンド測定

- アクシデンタル γ 線バックグラウンドの見積もり
 - MCからRD + AIF × 分解能, ペデスタル
 - 宇宙線カット後に残る宇宙線バックグラウンドを三次関数で用意
 - トリガ効率曲線は誤差関数としてフィット
 - ▶ 解析領域の範囲外 (E_γ サイドバンドの解析で利用)

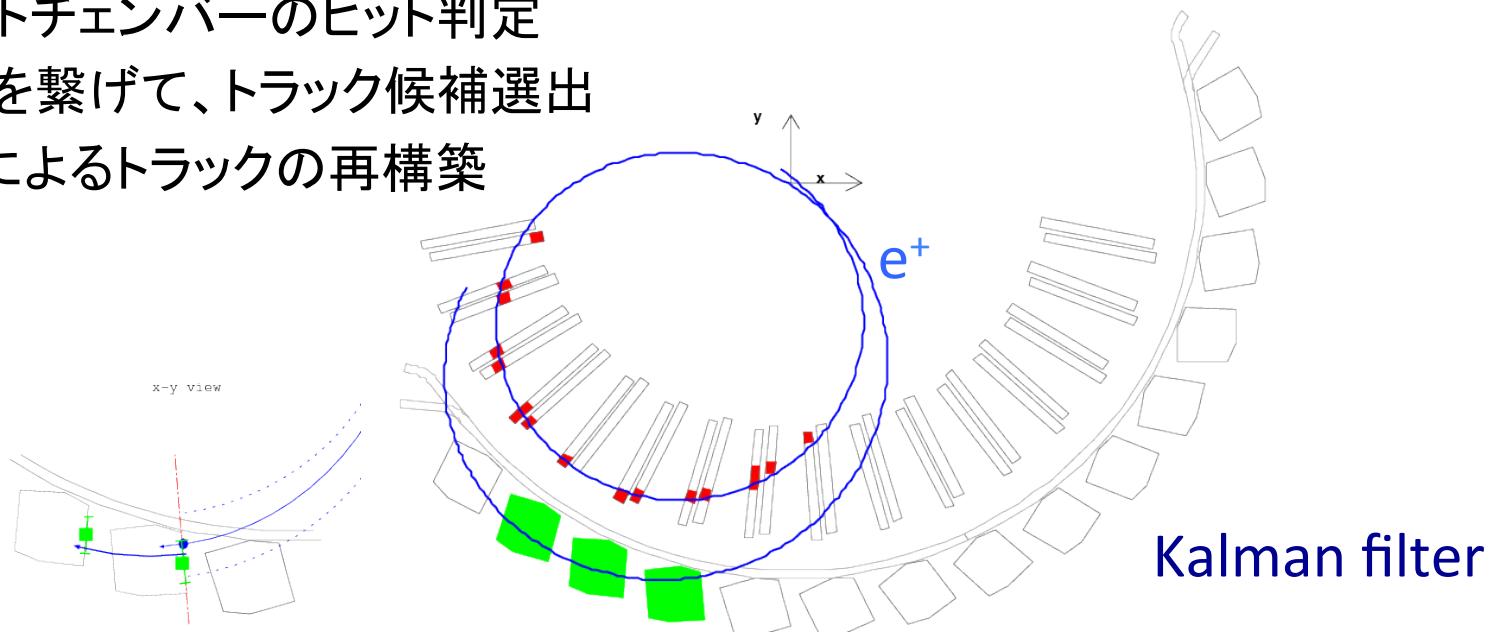
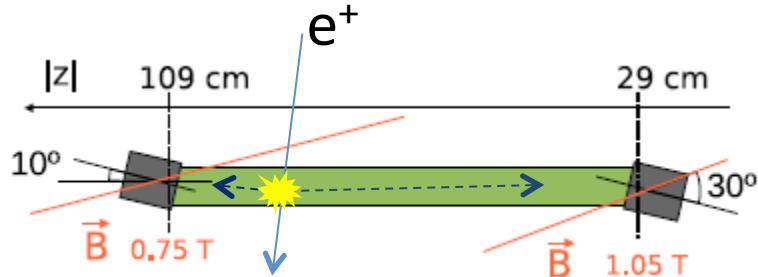




陽電子検出

陽電子トラッキング

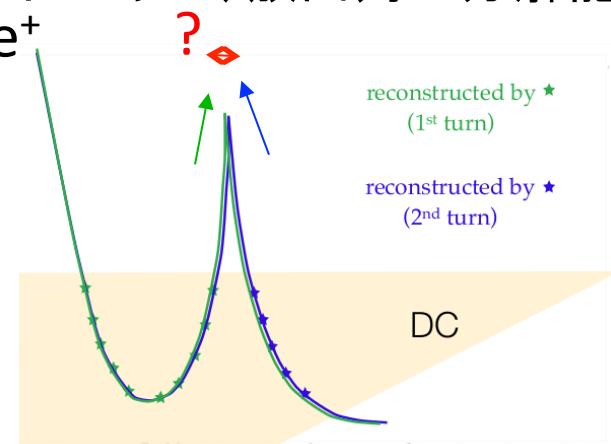
- 時間
 - カウンタ両端のPMT時間から
- トラッキング
 - 各ドリフトチェンバーのヒット判定
 - 各ヒットを繋げて、トラック候補選出
 - フィットによるトラックの再構築



陽電子検出性能・バックグラウンド

分解能の見積もり

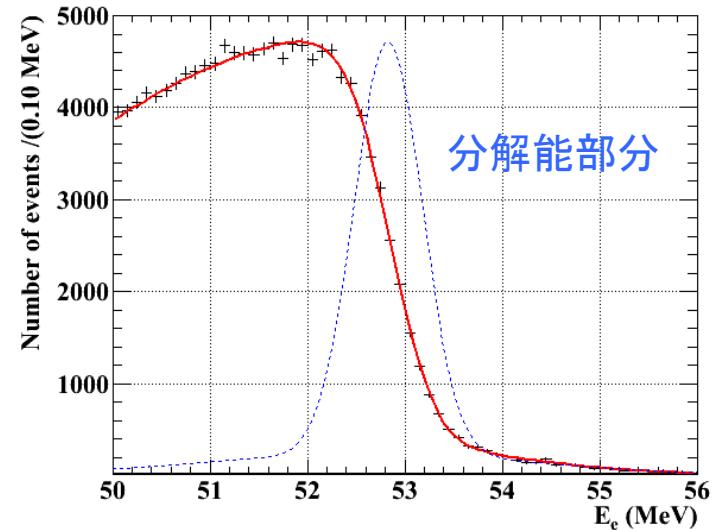
- 2つ以上ターンのあるトラックを1つずつに分けて再構築し、差を見積もる
 - エネルギー、放出角の分解能



- E_e : 0.74%
- ϕ_e : 7.1mrad
- θ_e : 11.2mrad

e⁺バックグラウンドの見積もり

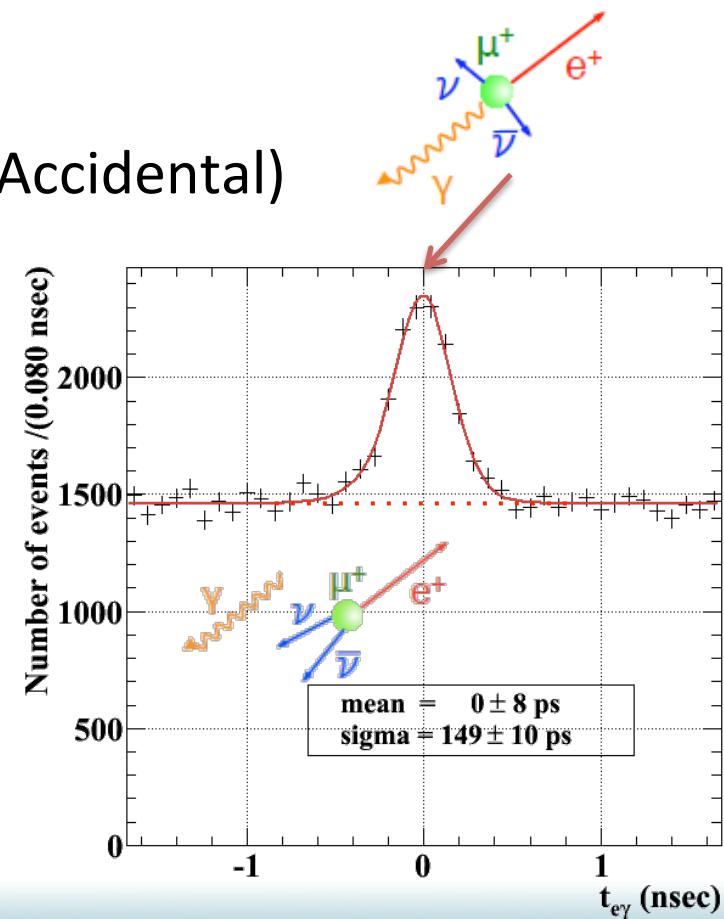
- $\mu \rightarrow e\nu\nu$ スペクトル
 - 理論式×分解能でフィット
 - バックグラウンド分布見積もり

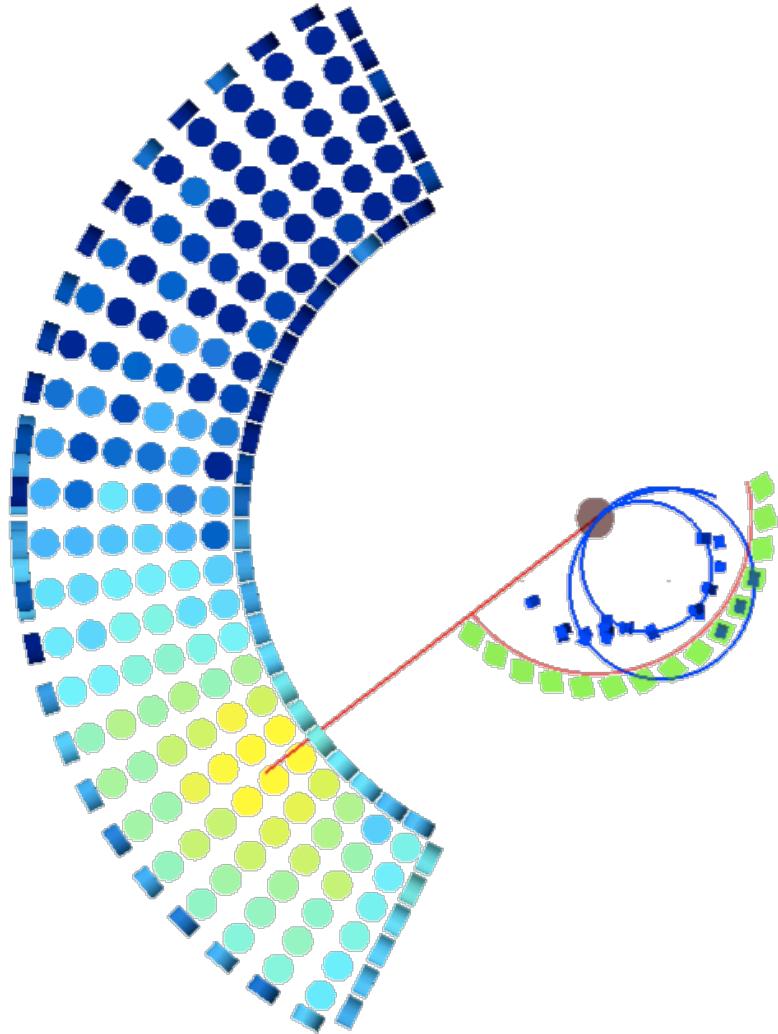


- ターゲット上の位置分解能
 - ターゲット上の穴をトラックの射影から見積もる
 - σ_R : 3.3mm, Z : 3.4mm

T_{eγ} 時間性能

- γ線・e⁺検出の時間性能は、RD peakから求める
- 低いγ線エネルギー領域のデータを用いる (ブラインド領域外)
 - E_γ : [40, 47] MeV,
 - E_e : [45, 55] MeV
 - Δangle < 300mrad
- Double Gaussian (RD peak) + Flat floor (Accidental)
- 分解能のγ線エネルギー依存を補正
- $\sigma(t_{e\gamma}) = \sigma(t_e - t_\gamma)$
 $= 149\text{ps} \rightarrow 142\text{ps at 52.8 MeV}$



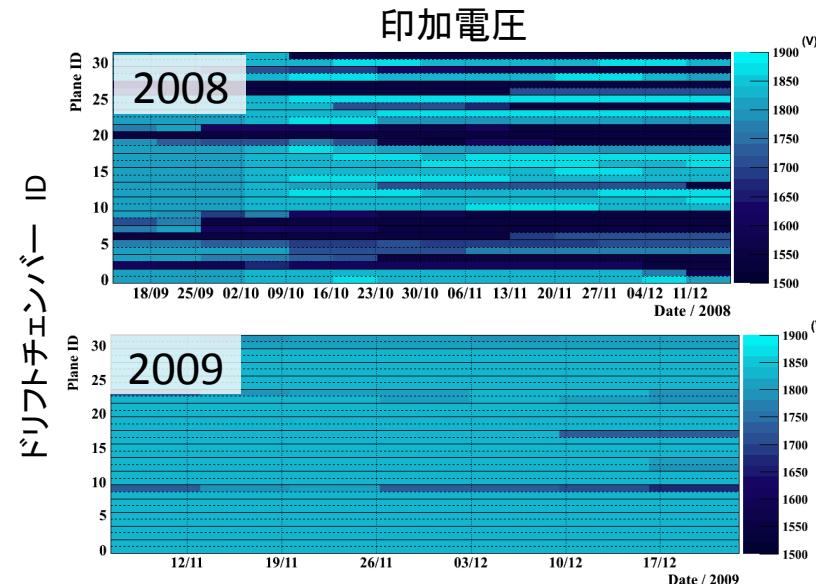
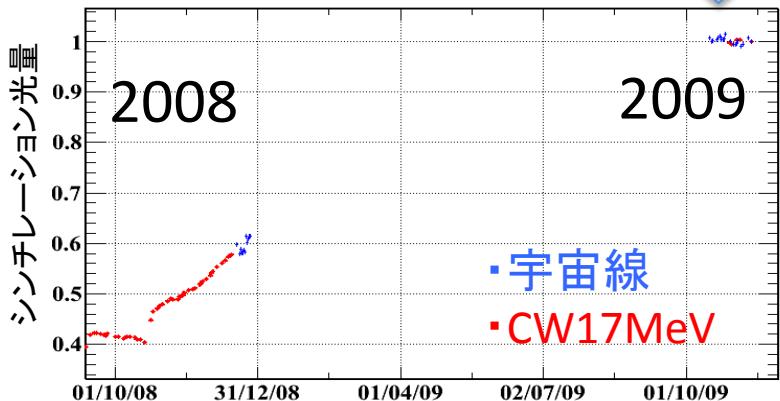


$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 解析

2009年測定

改善点

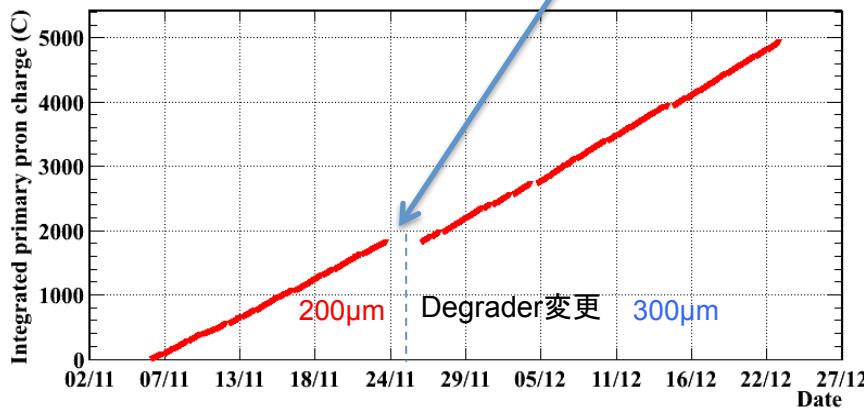
- ドリフトチェンバーのHV安定化、効率向上 →
- 液体キセノンの純化、光量増加・安定 ↘



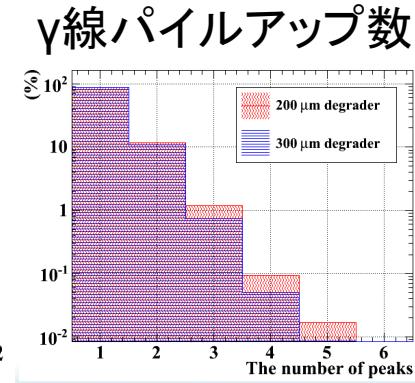
2009年測定

- π^0 較正ラン
 - 14日間 (12 ~ 24 /Oct.)
- MEG 物理ラン 2ヶ月
 - 実質DAQ 43日間
 - $2.9 \times 10^7 \mu^+ / s$
 - 84% $\mu \rightarrow e\gamma$ トリガ効率

ラン中積算ビームカレント



- μ^+ の Degrader厚さを変更
- BGの取り扱いを分ける



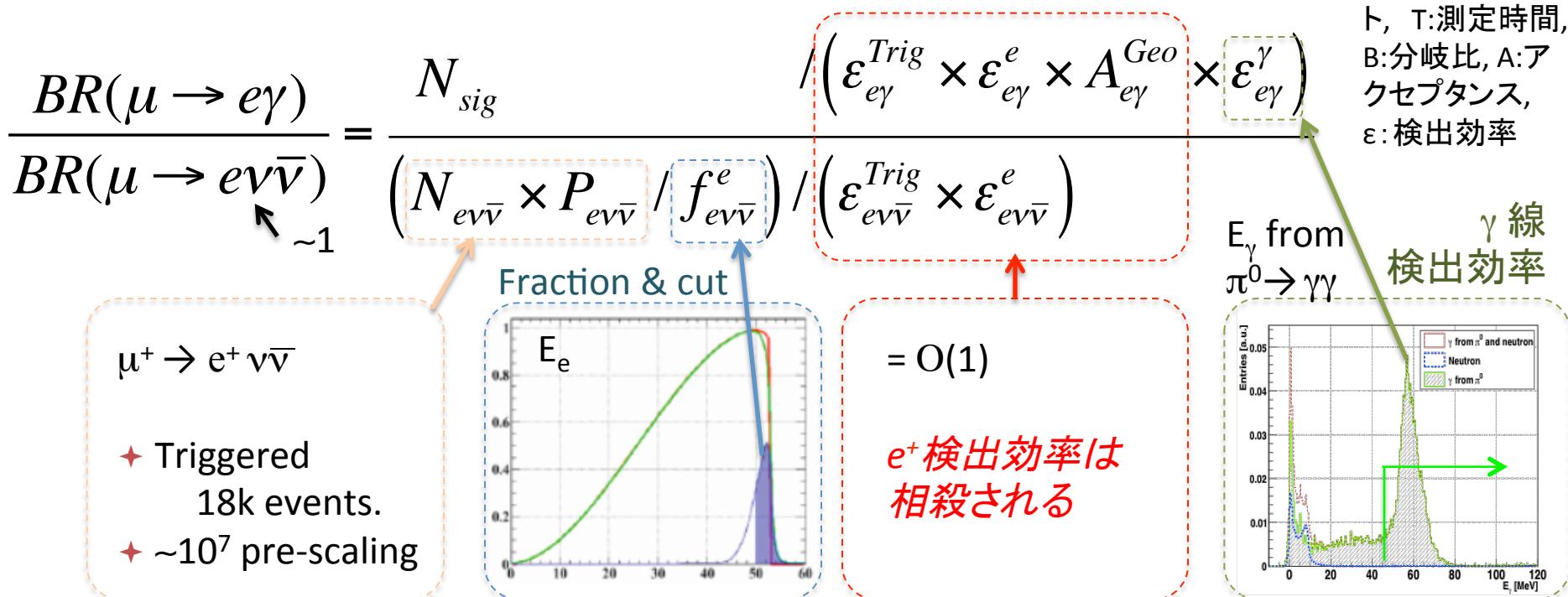
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 物理解析 (2009)

- 測定器の較正
 - エネルギー(E_γ, E_e), 場所($\theta_\gamma, \phi_\gamma, \theta_e, \phi_e$), 時間($T_{e\gamma}$)
- 最尤法に向けたProbability density function (PDF)の見積もり
 - 信号らしさ、バックグラウンドらしさを観測量から
 - 分解能の評価 → 信号のPDF
 - バックグラウンド評価 → バックグラウンドのPDF
- ミューオン崩壊数の見積もり
 - 検出効率、トリガ効率、等
- 物理解析の手順
 - ブラインド解析
 - ▶ ブラインド外でPDF, μ 数の評価
 - ▶ 実験感度見積もり
 - 最尤法によるイベント数導出
 - ▶ シグナル数の見積もり
 - 90%信頼度の分岐比上限導出

物理解析は、
見積もられた検出器性能と
測定されたバックグラウンド分布
をPDFとして行われる

μ崩壊数

- 統計数の多い $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu\bar{\nu}$ ($\sim 100\%$) で相対的に規格化
 - e^+ のみを $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ データ取得中に並行して取得



e^+ 検出効率・検出器のアクセプタンス・時間変動が相殺

- 規格化定数 $BR(\mu \rightarrow e\gamma)/N_{sig} = (1.01 \pm 0.08) \times 10^{-12}$

事象選出

- ブラインド解析

- 較正・性能評価は先に行う
- サイドバンドのデータで感度事前見積

データ選別の流れ

- 時間情報によるPre-selection

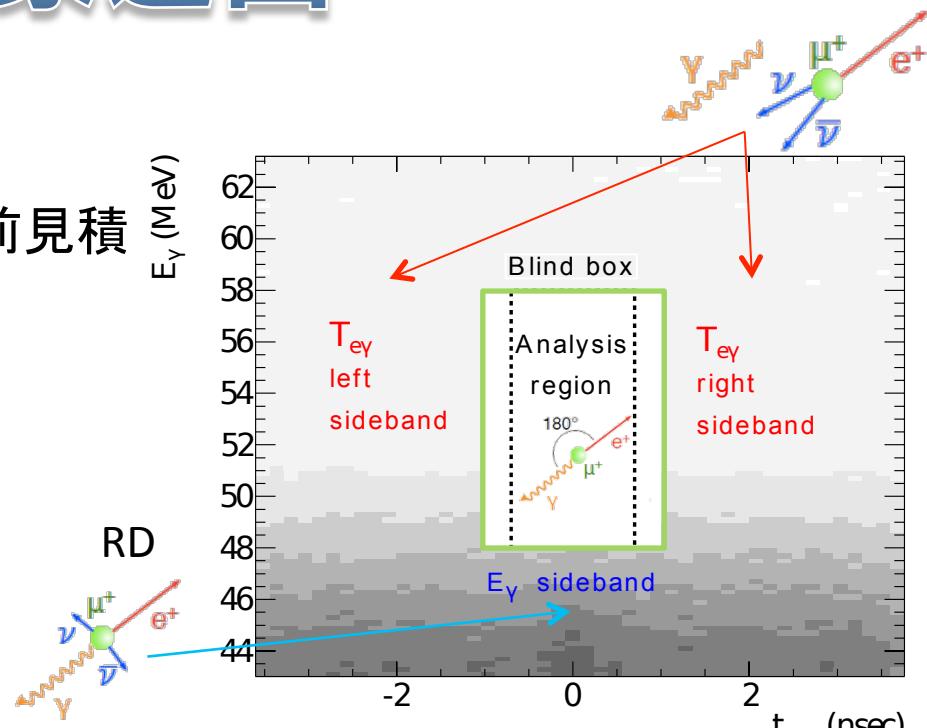
- $-6.875 \text{ ns} < t_\gamma - t_{TICHIT} < 4.375 \text{ ns}$,
- $|t_{track} - t_{TIC}| < 50 \text{ ns}$,

- ブラインド領域 ($E_\gamma, t_{e\gamma}$)

- $|E_\gamma - m_\mu/2| < 4.8 \text{ MeV}$,
- $|t_{e\gamma}| < 1 \text{ ns}$,

- 最尤法の解析領域

- $|t_{e\gamma}| < 0.7 \text{ ns}$,
- $50 \text{ MeV} < E_e < 56 \text{ MeV}$,
- $48 \text{ MeV} < E_\gamma < 58 \text{ MeV}$,
- $|\phi_{e\gamma}| < 50 \text{ mrad}$ and $|\theta_{e\gamma}| < 50 \text{ mrad}$



- $T_{e\gamma}$ サイドバンド

- 偶発BG, 事前の到達感度見積もり

- E_γ サイドバンド

- RD ピークによる時間較正、RD BG

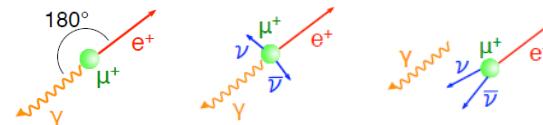
最尤法によるイベント数見積もり

- 信号数とBG数 (N_{sig} , N_{RD} , N_{BG})を見積もる

- $N = N_{sig} + N_{RD} + N_{BG}$

- N_{obs} : 解析領域内の事象数

$$L(N_{sig}, N_{RD}, N_{BG}) = \frac{N^{N_{obs}} \exp(-N)}{N_{obs}!} \prod_i^{N_{obs}} \left(\frac{N_{sig}}{N} S_i + \frac{N_{RD}}{N} R_i + \frac{N_{BG}}{N} B_i \right)$$

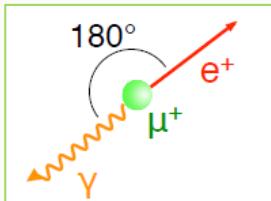
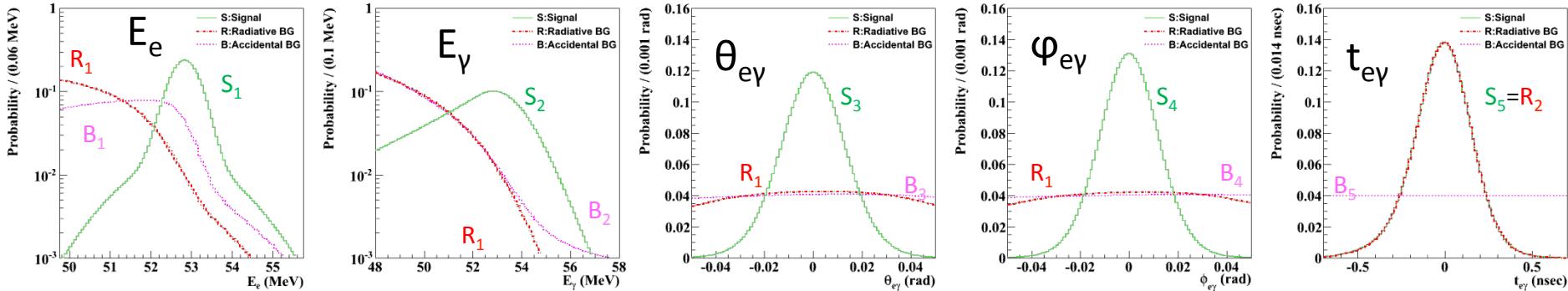


- S_i , R_i , B_i : i 番目事象の PDF
Signal ($\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$), RD ($\mu^+ \rightarrow e^+ \nu\nu \gamma$), Accidental Background
- PDFのObservables: (E_γ , E_e , $\theta_{e\gamma}$, $\phi_{e\gamma}$, $t_{e\gamma}$)
- e^+ 、 γ の位置などからObservablesを変数としたPDFを構築
- 実測分布(性能評価・バックグラウンド測定)を基にしたPDF
- 信号数 N_{sig} の90%信頼領域を、Feldman-Cousins法で導出
 - Toy MCにより、PDFを元にして事象を生成、Likelihood比で Toy 実験と比較
- 様々な解析手法で整合性を確認
 - Bayesian 手法, constant PDF, BG constraint.

確率密度関数 (PDF)

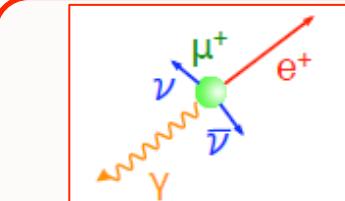
- PDFs

解析領域内の平均



- $E_e = E_\gamma = 53 \text{ MeV}$
- $\vartheta_{e\gamma} = \vartheta_\gamma - (\pi - \vartheta_e) = 0$
- $\phi_{e\gamma} = \phi_\gamma - (\pi - \phi_e) = 0$
- $t_{e\gamma} = 0$

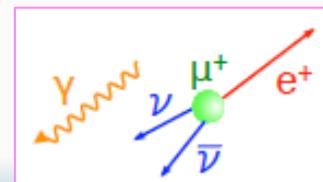
- $S_1(E_e)$: $\mu \rightarrow e\nu\nu$ 2回転 e^+ の各々の差から
- $S_2(E_\gamma)$: $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 55MeV γ のピーカから
- $S_3(\theta_{e\gamma})$, $S_4(\phi_{e\gamma})$
 - LXe中 γ 線 鉛のコリメータ射影から
 - e^+ tracking $\mu \rightarrow e\nu\nu$ (2回転 e^+ の差)
 - 崩壊点 ターゲット上の穴 + e^+ tracking
- $S_5(t_{e\gamma})$: $\mu \rightarrow e\nu\nu\gamma$ の e^+ - γ 時間差



- $t_{e\gamma} = 0$

- R_1 : 理論に基づく変数相関 $\times S_{1\sim 4}$
- $R_2(t_{e\gamma}) = S_5(t_{e\gamma})$

- $B_1(E_e)$: e^+ in $\mu \rightarrow e\nu\nu$
- B_2 : γ BG
- B_3, B_4 : $t_{e\gamma}$ sideband
- $B_5(t_{e\gamma})$: Flat



事前の感度見積もり

2009 PRERIMINARY

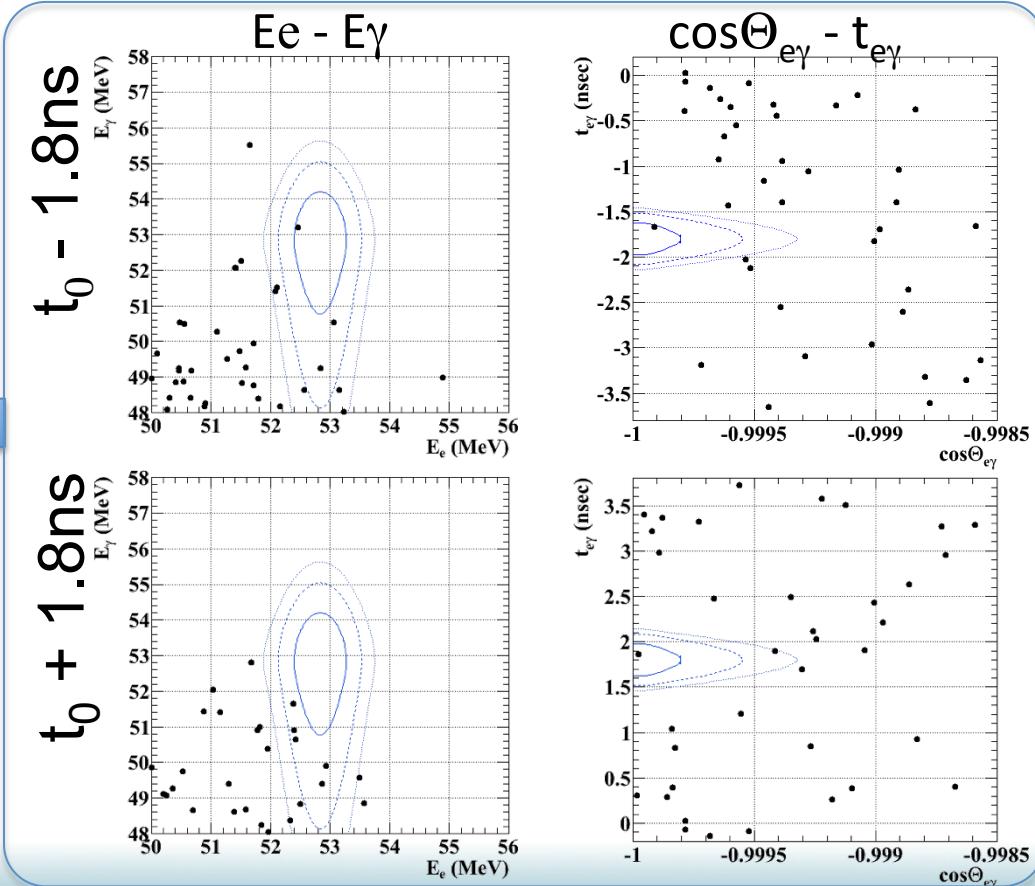
- Toy-MCによるPDFを元にした感度見積もり
 - PDFからの生成, 測定BG rate, 信号O, 2009年統計数
 - 2009年感度 $S_{2009} = 6.1 \times 10^{-12}$ in BR, (90%上限値)

PDF Base

- 2008年から感度向上 
 - $S_{2008} = 1.3 \times 10^{-11}$,
 - MEGA実験上限値, 1.2×10^{-11}

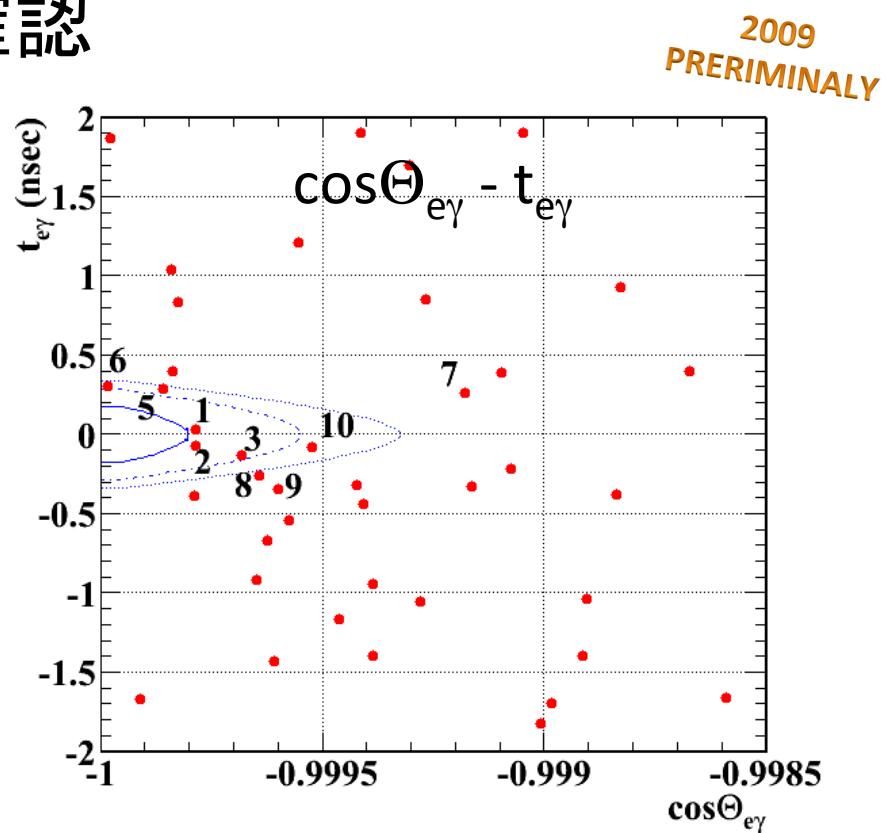
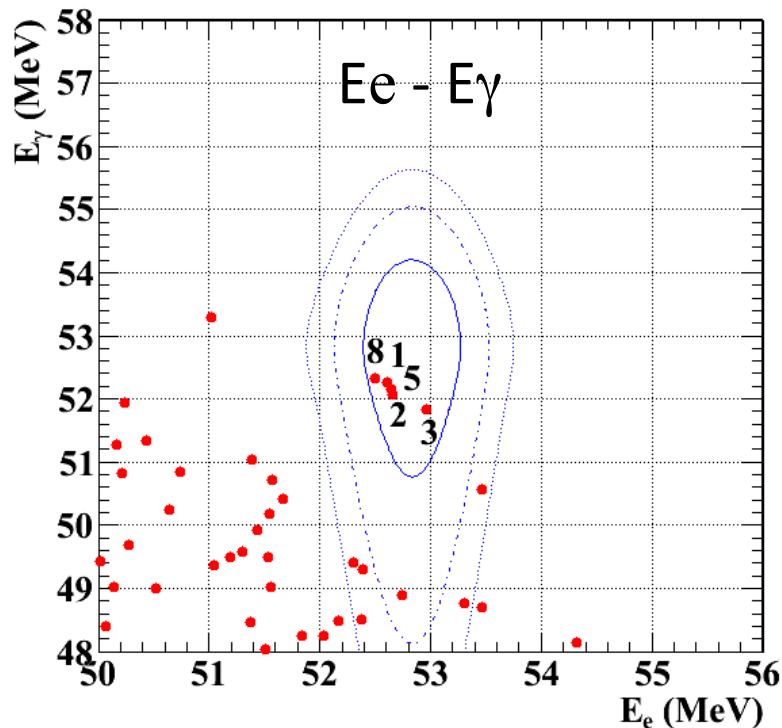
Sideband Base

- $t_{e\gamma}$ サイドバンドでの感度
 - $t_{e\gamma}$ サイドバンドをフィット
▶ 信号領域外、Accidental BGの寄与
 - サイドバンドでの感度 $(4 - 6) \times 10^{-12}$
 - PDFによる見積もりと良く整合



解析領域内の事象分布

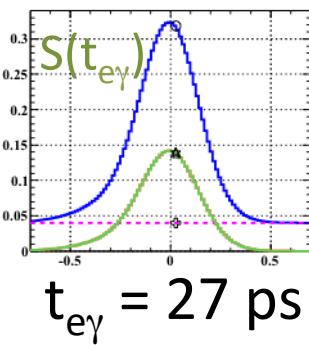
- ・ブラインド領域の事象を確認



- ・信号らしさのランク $\leftarrow S/(R'+B')$
- ・Contours by $1, 1.65, 2 \sigma$ in PDFs

信号付近のイベントディスプレイ

- 信号らしい事象を全てチェック → 不審点、再構成を誤ったような点は見られない
- 最も信号らしいイベントの例

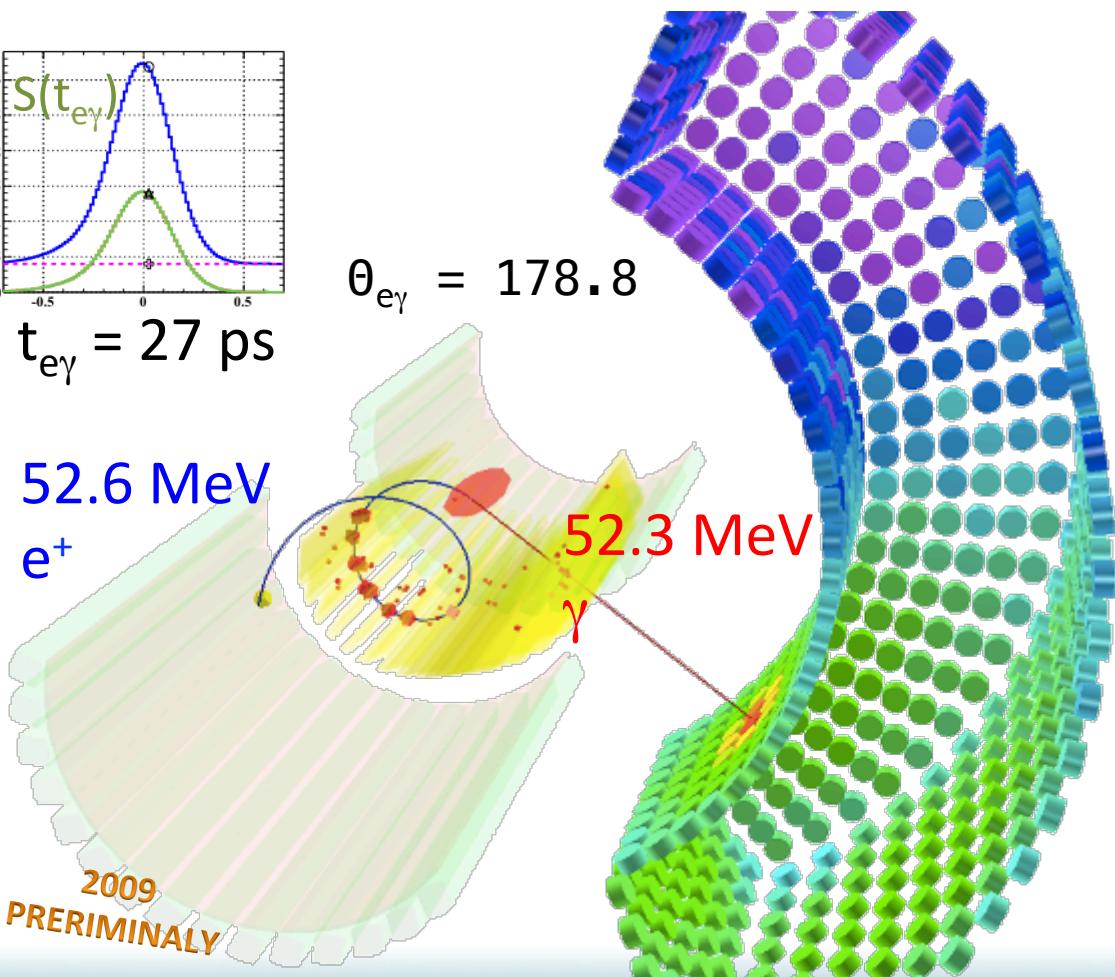


$t_{e\gamma} = 27 \text{ ps}$

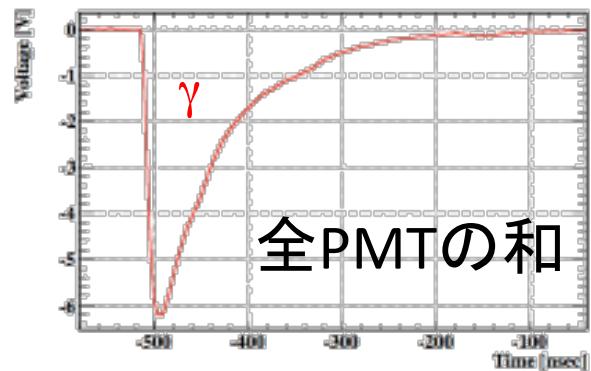
$\theta_{e\gamma} = 178.8$

52.6 MeV
 e^+

2009
PRERIMINALLY

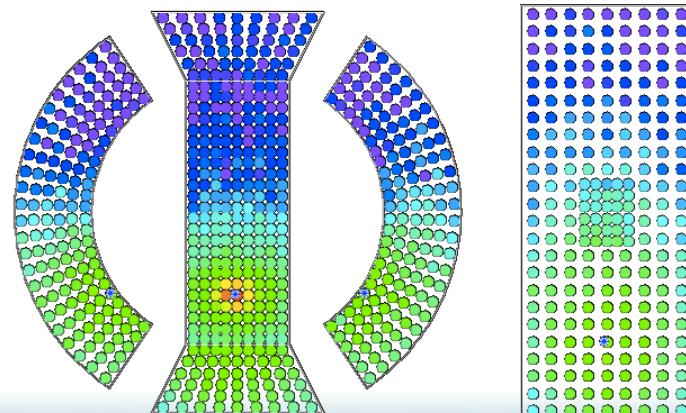


γ パイルアップは見られない
シンチレーション波形

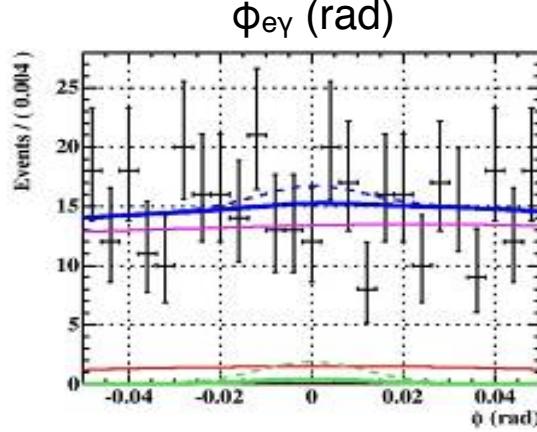
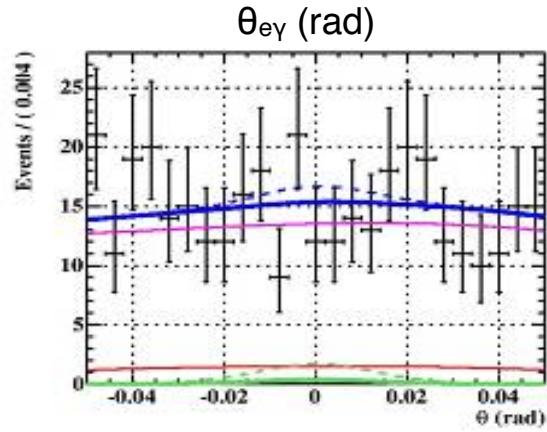
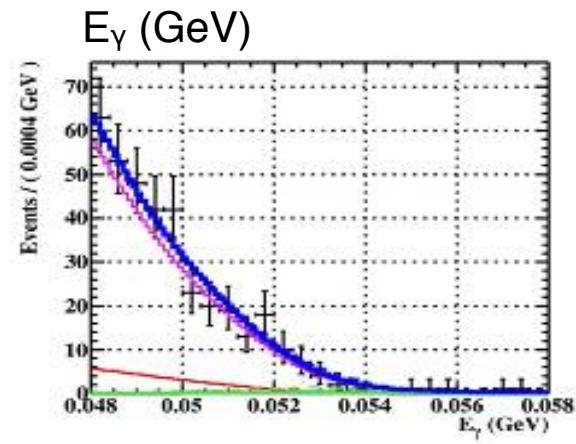
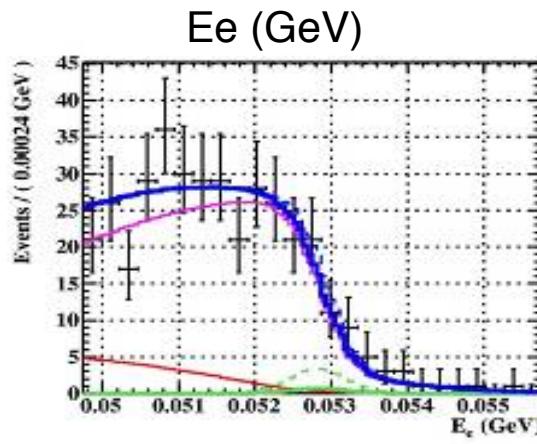
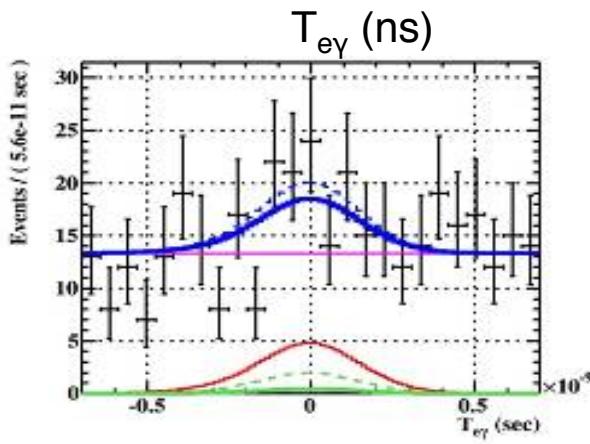


全PMTの和

光量の検出面上分布



Maximum Likelihood Fit (2009)



PDF平均
Accidental BG, RD, Signal, Total
点線：
90% C.L. N_{sig} 上限値

- Best fit $(\hat{N}_{sig}, \hat{N}_{RD}, \hat{N}_{BG}) = (3.0^{+6.9}, 35^{+24}_{-22}, 332^{+38}_{-36})$ 1.65σ エラー

- 信頼度見積もり

$BR_{2009} (\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 1.5 \times 10^{-11}$ at 90% C.L.

今回の結果

- 2009年MEG実験データを用いた $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索を行った
 - 検出器の較正・性能評価を行い, PDFを構築して解析
- 見積もった性能を元に、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 分岐比範囲を導出

	σ_{E_γ} (%)	$\sigma_{(u,v,w)}$ (mm)	ϵ_γ	σ_{E_e} (%)	σ_{ϕ_e} (mrad)	σ_{θ_e} (mrad)	Vertex $\sigma_{z,y}$ (mm)	ϵ_e	$\sigma_{t_{e\gamma}}$ (ps)	$\epsilon_{trigger}$
2009	2.1	5, 6	0.58	0.74	7.1	11.2	3.4, 3.3	0.4	142	0.84



- 2009年の実験感度は $S_{2009} = 6.1 \times 10^{-12}$ ($S_{2008} = 1.3 \times 10^{-11}$)
- 90%信頼度での分岐比上限を与えた $BR_{2009} (\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 1.5 \times 10^{-11}$ at 90% C.L.
- 本結果は2010年7月での段階 (Preliminary)

その後、2009 + 2010年データで解析 (2011年公表)

2011年結果までの進展

- 2010年データ取得(3ヶ月)
 - 2009年統計数の2倍
 - DAQ/トリガーの改善
 - ビーム輸送磁石の故障で中断

解析改善

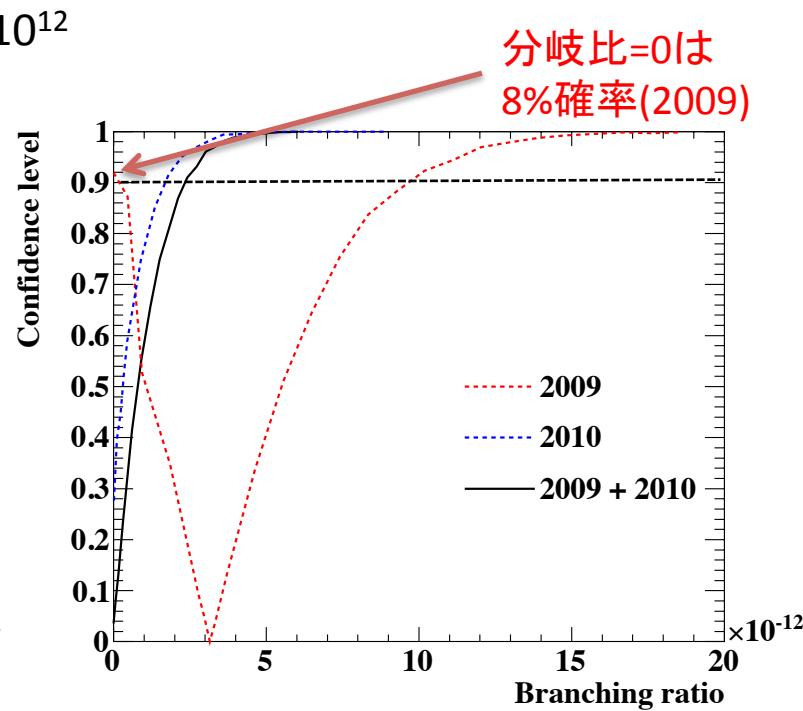
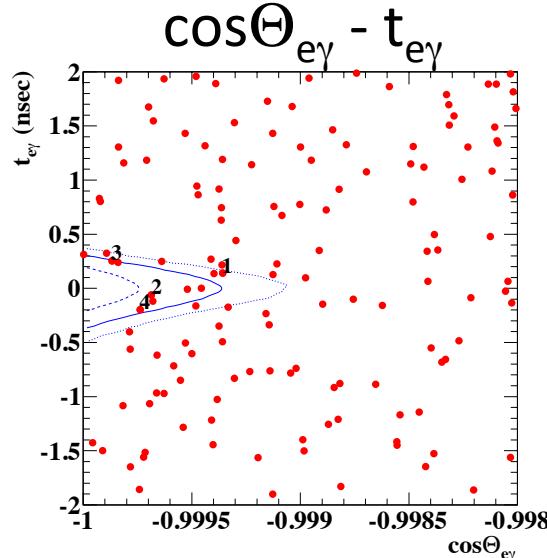
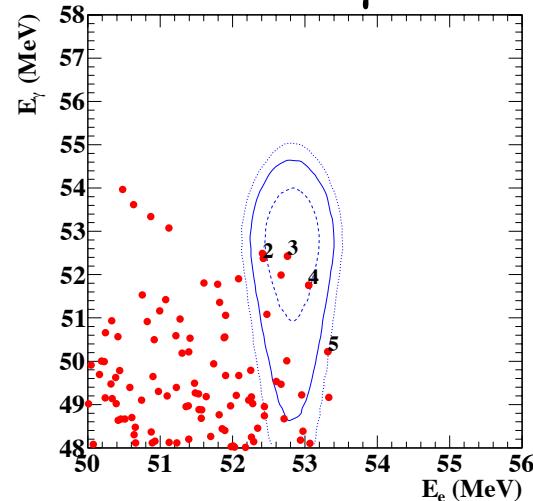
- 系統誤差を抑える
 - e^+ トラッキングに用いる磁場を再考
 - 検出器の位置再測定 (DC, LXe, DC – LXe)
- 解析手法の改良
 - ドリフトチェンバー解析改善 (ノイズ、変数相関等)
 - サイドバンドで見積もったバックグラウンド数を反映
 - 統計手法の見直し(プロファイル尤度)
- 2009年データのアップデート + 2010年データ → 2011/7 公表

MEG最新結果(2011年)

- 感度 $S_{2009+2010} = 1.6 \times 10^{-12}$
- $S_{2009} = 3.3 \times 10^{-12}, S_{2010} = 2.2 \times 10^{-12}$
- $1.8 \times 10^{14} \mu^+$ 崩壊, $N_{\text{sig}}/\text{Br} = (3.31 \pm 0.22) \times 10^{12}$

Phys. Rev. Lett. 107, 171801 (2011)

2009+2010
 $E_e - E_\gamma$

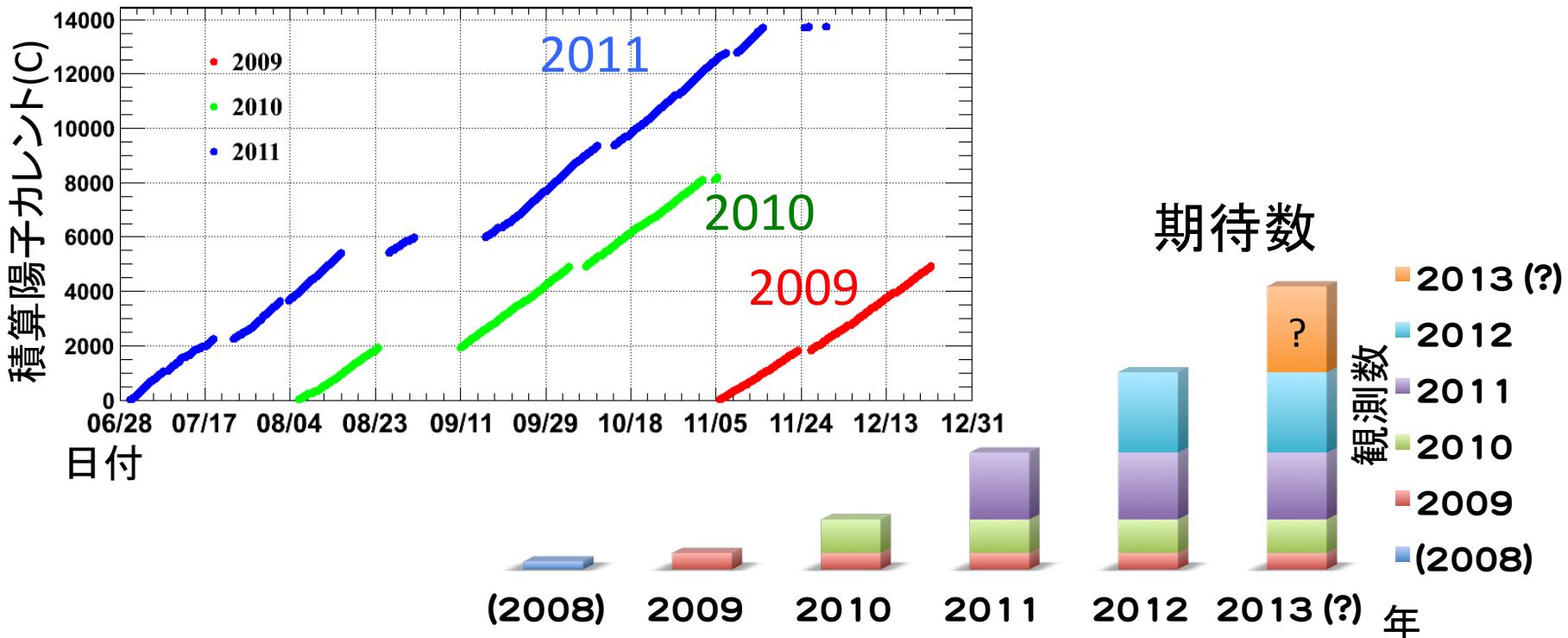


- $\text{Br} < 2.4 \times 10^{-12}$ (90% C.L.)
- これまでの分岐比上限より5倍強い制限

Data set	\mathcal{B}_{fit}	LL	UL
2009	3.2×10^{-12}	1.7×10^{-13}	9.6×10^{-12}
2010	-9.9×10^{-13}	—	1.7×10^{-12}
2009 + 2010	-1.5×10^{-13}	—	2.4×10^{-12}

今後の展望

- 2011年データは2009+2010データと同等量



- 2012～2013年辺りで一旦終了
 - 目標感度 $O(10^{-13})$
- 検出器のアップグレード計画を進行中

まとめ

- MEG実験では液体キセノン γ 線検出器を開発
- 2009年に安定して μ 崩壊データを取得し、解析
- PDFを元にLikelihood関数を構築し、 $\mu \rightarrow e\gamma$ を探索
- γ 線のエネルギー・位置・時間性能を掌握
 - 頻繁な較正とモニタにより、安定した γ 線検出が可能
 - π^0 崩壊測定等を元に見積もり、PDFへ
- 前年の感度を大きく向上し、分岐比上限を設定
- 2011年に $\mu \rightarrow e\gamma$ 分岐比上限値更新、今尚測定中
- 今後のアップグレード計画も進行中

$\mu \rightarrow e \gamma$ 以外の物理解析 (24日)

- 24pFA-12 内山雄祐 「MEG実験におけるミュー粒子放射崩壊の測定と利用」
- 24pFA-13 名取寛顕 「MEG実験2009、2010年データを用いた
軽いスカラーパーティクルを媒介とする $\mu \rightarrow e\phi$, $\phi \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊事象の探索」

MEGの検出器性能・将来計画 (25日)

- 25aFB-13 藤井祐樹 「MEG実験 陽電子スペクトロメータ性能改善のスタディ」
- 25pFA-9 金子大輔 「MEG実験 run2011 液体キセノン検出器の性能評価」
- 25pFA-10 澤田龍 「MEG実験LXeガンマ線検出器のアップグレードの為の研究」

Acknowledgment

PRL 107, 171801 (2011)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
21 OCTOBER 2011

New Limit on the Lepton-Flavor-Violating Decay $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$

J. Adam,^{1,2} X. Bai,³ A. M. Baldini,^{4a} E. Baracchini,⁵ C. Bemporad,^{4a,4b} G. Boca,^{6a,6b} P. W. Cattaneo,^{6a} G. Cavoto,⁷ F. Cei,^{4a,4b} C. Cerri,^{4a} A. de Bari,^{6a,6b} M. De Gerone,^{8a,8b} T. Doke,⁹ S. Dussoni,^{8a,8b} J. Egger,¹ K. Fratini,^{8a,8b} Y. Fujii,³ L. Galli,^{4a,4b} G. Gallucci,^{4a,4b} F. Gatti,^{8a,8b} B. Golden,⁵ M. Grassi,^{4a} D. N. Grigoriev,¹⁰ T. Haruyama,¹¹ M. Hildebrandt,¹ Y. Hisamatsu,³ F. Ignatov,¹⁰ T. Iwamoto,³ P.-R. Kettle,¹ B. I. Khazin,¹⁰ O. Kiselev,¹ A. Korenchenko,¹² N. Kravchuk,¹² A. Maki,¹¹ S. Mihara,¹¹ W. Molzon,⁵ T. Mori,³ D. Mzavia,^{12,*} H. Natori,^{3,1} D. Nicolò,^{4a,4b} H. Nishiguchi,¹¹ Y. Nishimura,^{3,†} W. Ootani,³ M. Panareo,^{13a,13b} A. Papa,¹ R. Pazzi,^{4a,4b,*} G. Piredda,⁷ A. Popov,¹⁰ F. Renga,^{7,1} S. Ritt,¹ M. Rossella,^{6a} R. Sawada,³ F. Sergiampietri,^{4a} G. Signorelli,^{4a} S. Suzuki,⁹ F. Tenchini,^{4a,4b} C. Topchyan,⁵ Y. Uchiyama,^{3,1} R. Valle,^{8a,8b,‡} C. Voena,⁷ F. Xiao,⁵ S. Yamada,¹¹ A. Yamamoto,¹¹ S. Yamashita,³ Yu. V. Yudin,¹⁰ and D. Zanello⁷

(MEG Collaboration)

ご清聴ありがとうございました