

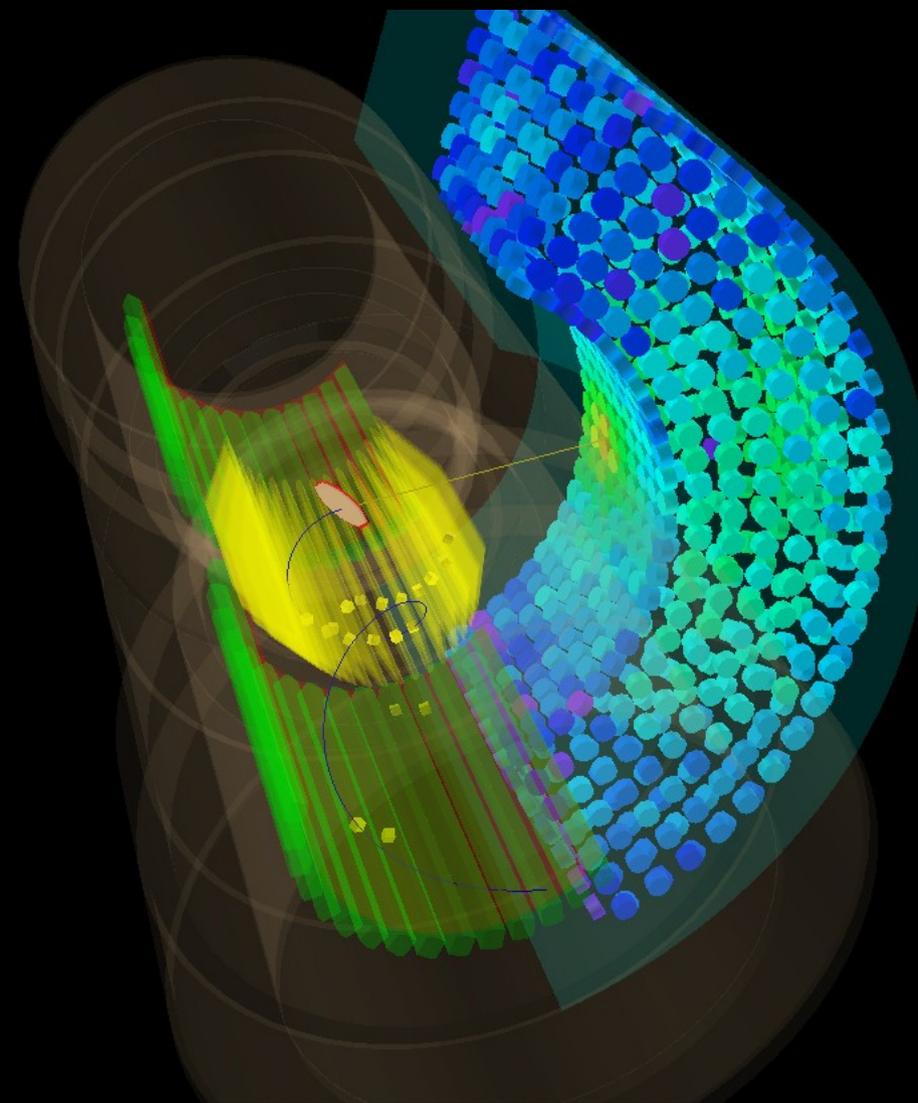
MEG 実験  
～最初のデータから～

ICRRセミナー  
23/October/2009



素粒子物理国際研究センター

内山 雄祐



- $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  探索実験MEGは2008年物理データテイキングを開始した。 MEGの最初の3ヶ月データを用いた $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊探索の解析と結果について報告する。

## Contents

- イントロ  
- 対象と目的
- 実験の概要
- 2008年ラン
- 物理解析  
- 検出器の性能  
- Likelihood解析
- 現状と今年の見通し
- 結論

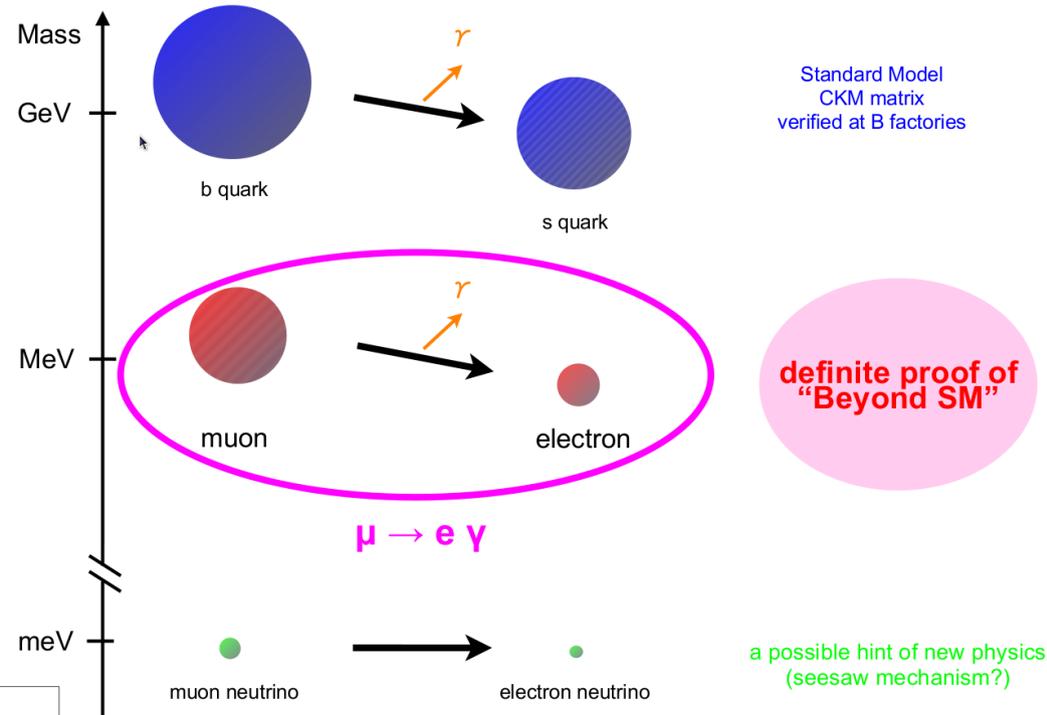
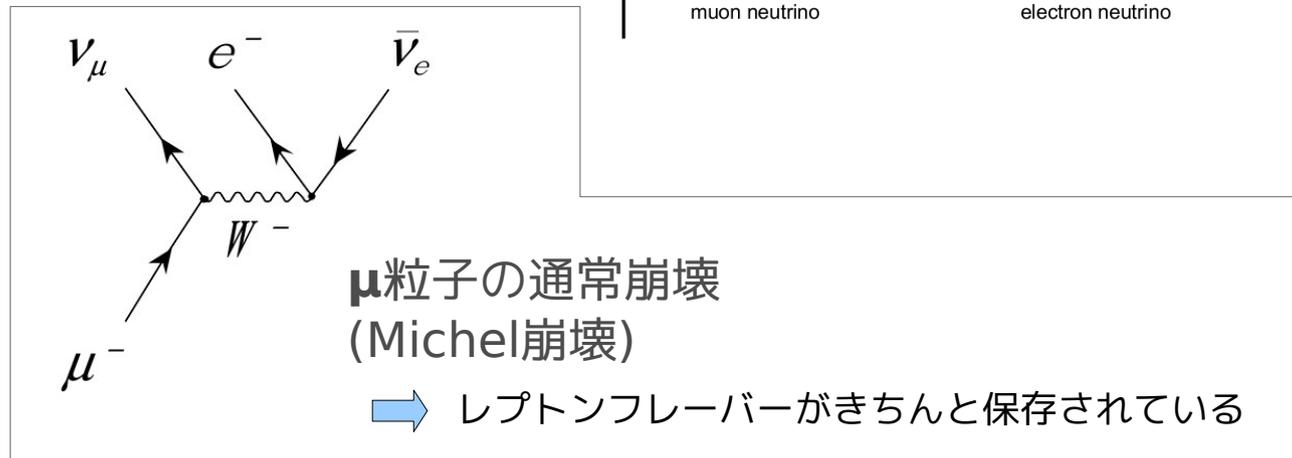
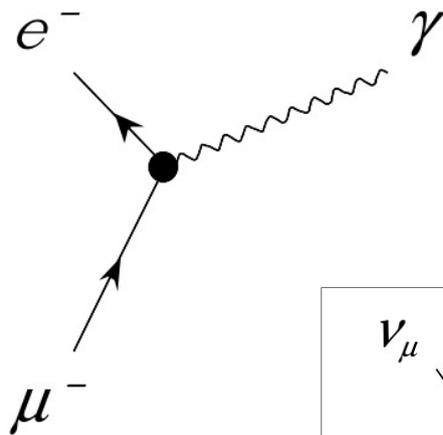
# Introduction

# 対象

- Lepton-flavorを破る  $\mu$ 粒子の崩壊 :  $\mu \rightarrow e \gamma$

- cLFV : SMで禁止
- $\nu$ の有限質量を導入しても観測不可
- SMを超えた新しい物理の突破口

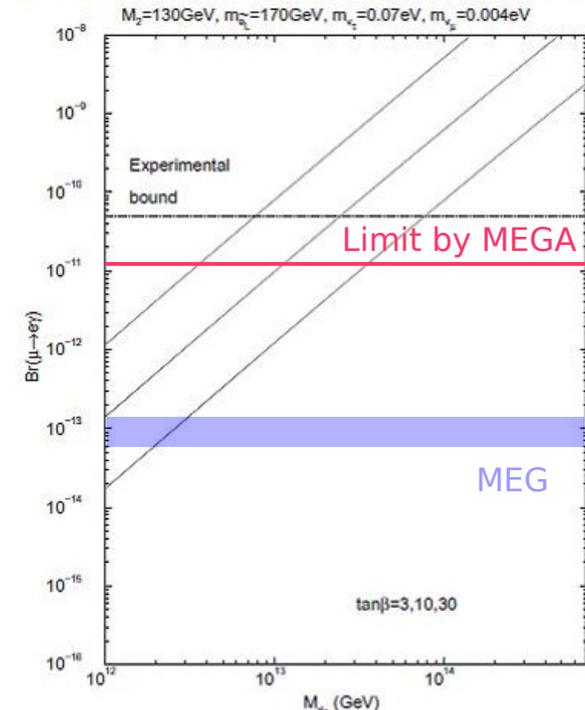
- $\mu \rightarrow e \gamma$  崩壊



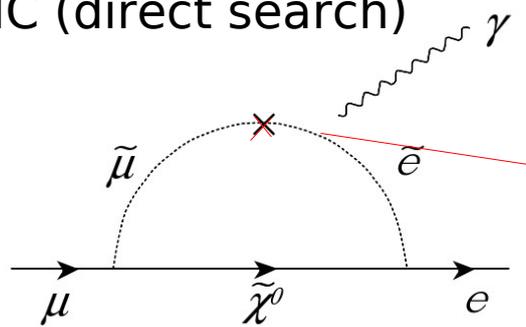
# Physics Motivation

- 多くのnew physics が大きな分岐比を予言
  - SUSY-GUT, SUSY-seesaw ...
  - 現在の実験上限値のすぐそばにある可能性
    - 現在の実験上限値は :  $10^{-11}$
    - ex)SU(5) SUSY-GUT:  $10^{-15} \sim 10^{-13}$ ,  
SO(10):  $10^{-13} \sim 10^{-11}$ ,  
SUSY-seesaw:  $>10^{-14}$
    - Large  $\tan\beta \rightarrow$  大きな分岐比
- 他の物理との関わり
  - cLFV :  $\mu$ -e Conversion,  $\tau$ -LFV ( $\tau \rightarrow l\gamma$ , etc) ..
  - g-2, EDM
  - LHC (direct search)

$\mu \rightarrow e\gamma$  in the MSSMRN with the MSW large angle solution



J. Hisano and D. Nomura, 1998



sleptonを通過しての混合

$$m_{\tilde{l}}^2 = \begin{pmatrix} m_{\tilde{e}\tilde{e}}^2 & m_{\tilde{e}\tilde{\mu}}^2 & m_{\tilde{e}\tilde{\tau}}^2 \\ m_{\tilde{\mu}\tilde{e}}^2 & m_{\tilde{\mu}\tilde{\mu}}^2 & m_{\tilde{\mu}\tilde{\tau}}^2 \\ m_{\tilde{\tau}\tilde{e}}^2 & m_{\tilde{\tau}\tilde{\mu}}^2 & m_{\tilde{\tau}\tilde{\tau}}^2 \end{pmatrix}$$

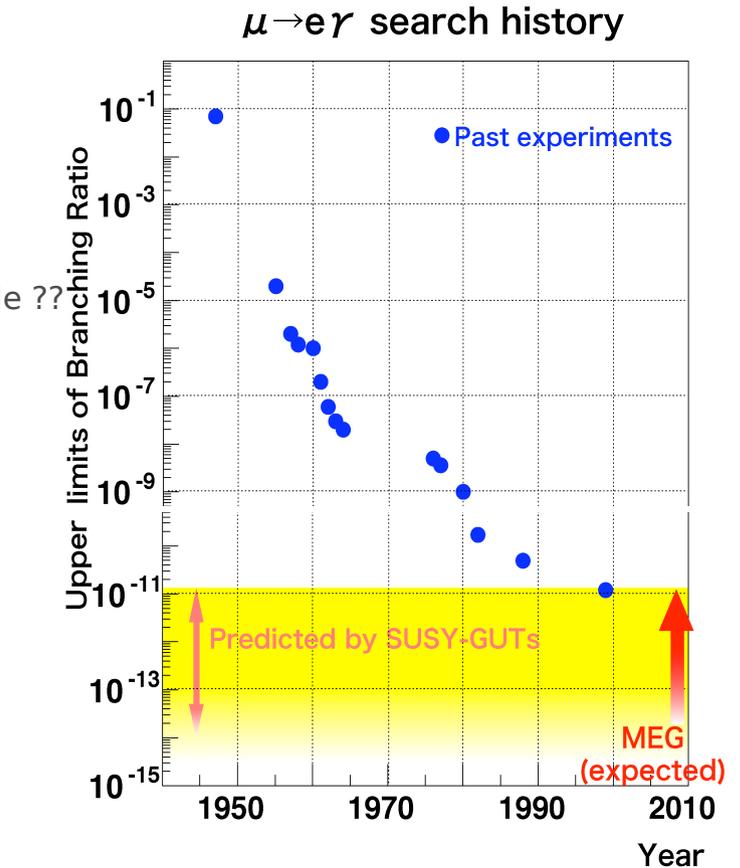
# MEG実験の位置付け

- 現在の実験上限値は :
  - $Br(\mu \rightarrow e\gamma) < 1.2 \times 10^{-11}$  (1999, MEGA実験@LAMPF)
- ターゲット :  $10^{-13}$ の感度まで探索
- 2008年物理データ取得開始 ~2011年? → MEG upgrade ??
- 現在のところ他の実験(将来計画)はない

## 他のcLFV探索

- $\mu$ -e conversion
  - 分岐比は~300 小さい
  - 現在の上限値~ $10^{-13}$ (@PSI)
  - 将来実験 ~ $10^{-16}$ 
    - COMET @J-Parc
    - mu2e @Fermilab
- $\tau$ -LFV
  - 多彩なモード
  - 分岐比は  $O(10^{3-5}) \times Br(\mu)$
  - 現在の上限値~ $10^{-7 \sim -8}$  (B-factory)
  - 将来計画 superB

5~10年先



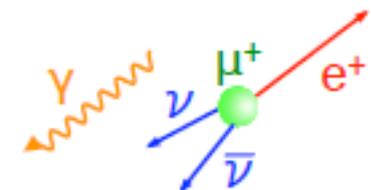
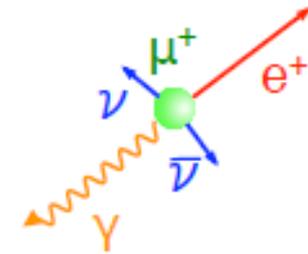
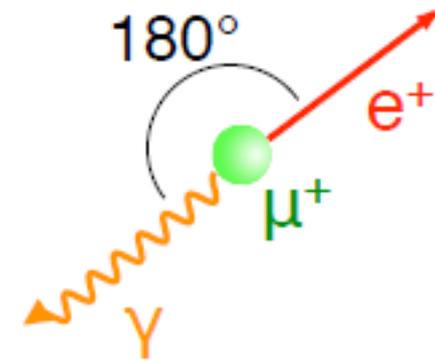
MEGの結果がどんなでも  
これらの実験を行うことは重要。

- LHCと相補的
  - LHC初期段階でSUSY粒子の発見の可能性

New physics 時代のさきがけに！

# $\mu \rightarrow e \gamma$ 探索

- とにかくたくさんさんのミュオンが必要
  - 正ミュオン( $\mu^+$ ) を使う
    - ミューオニック原子の形成を防ぐ
  - 高計数率実験
  
- $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  信号：陽電子とガンマ線 (2体崩壊)
  - 両方共52.8MeV(単色)、
  - Back-to-back、
  - time coincidence
  
- バックグラウンド
  - $\mu$ 粒子のradiative decay (prompt BG)
    - 信号領域で位相空間の急速な減少。
    - Reasonableな分解能を達成すれば問題ない。
  - 無関係な陽電子と $\gamma$ 線が偶発的に重なったaccidental BGが主
    - $\Gamma$ 線源: radiative decay,  $e^+$  AIF, 制動放射, CR

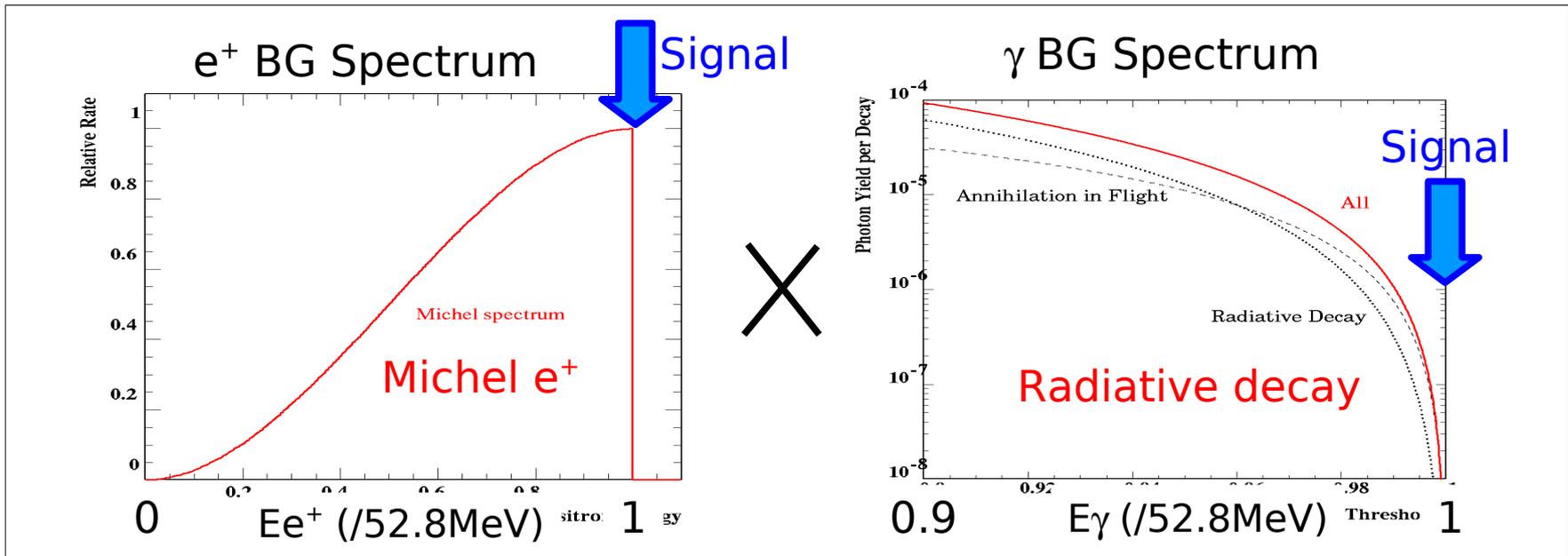


# Accidental Background

- アクシデンタルBGが実験を制限する。
  - BGレイトは瞬時的ビームレイトに比例する → 直流ビームが最適

$$B_{acc} = R_{\mu} \cdot f_e^0 \cdot f_{\gamma}^0 \cdot (\delta\omega/4\pi) \cdot (2\delta t)$$

$R_{\mu}$  =  $N_{\mu}$  (DC beam)     
  $(\delta\omega/4\pi)$  Back to back (角度分解能の2乗で効く)     
  $(2\delta t)$  Time overlap (時間分解能に1次)



**e<sup>+</sup> 高計数率**

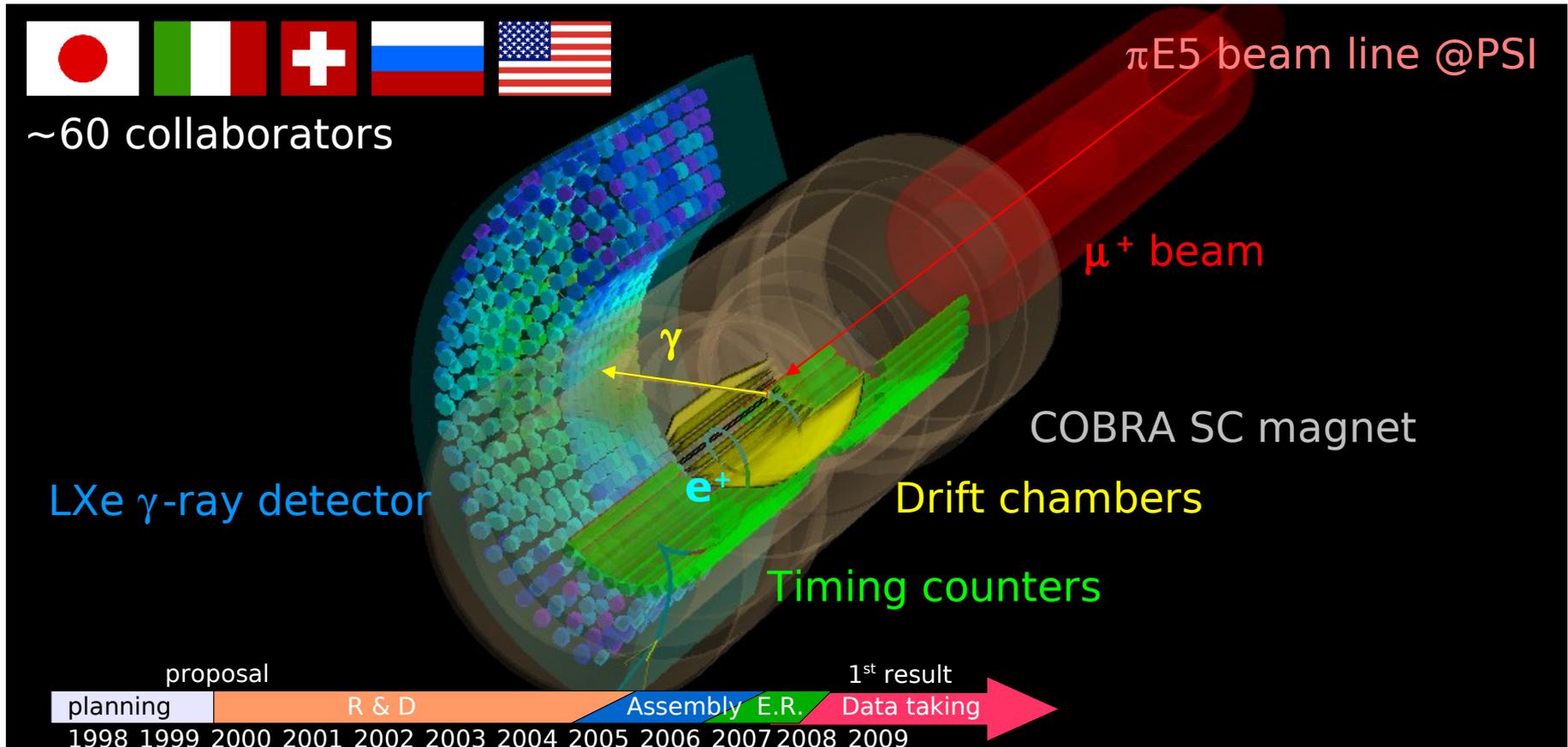
**γ線のエネルギー測定が最も重要**

- **高強度DC  $\mu^+$ ビーム**
  - $>10^7/\text{sec}$
- **High rateに耐えうる測定器**
  - $>10^7/\text{sec}$  で崩壊した $\mu^+$ はすべて $e^+$ を生み出す
  - $\Gamma$ 線のパイルアップが高エネルギーBG源になる
- **High resolutionの検出器**
  - $\Gamma$ 線のエネルギー測定が最も効果的
  - 角度・時間分解能もBG除去に効果的

# The MEG Experiment

# MEG実験

- 世界最大強度のDC $\mu^+$ ビーム @PSI (スイス)
- MEG検出器
  - 陽電子スペクトロメータ
  - 液体キセノン ガンマ線検出器
- 2008年秋、本格的な物理データ収集を開始.



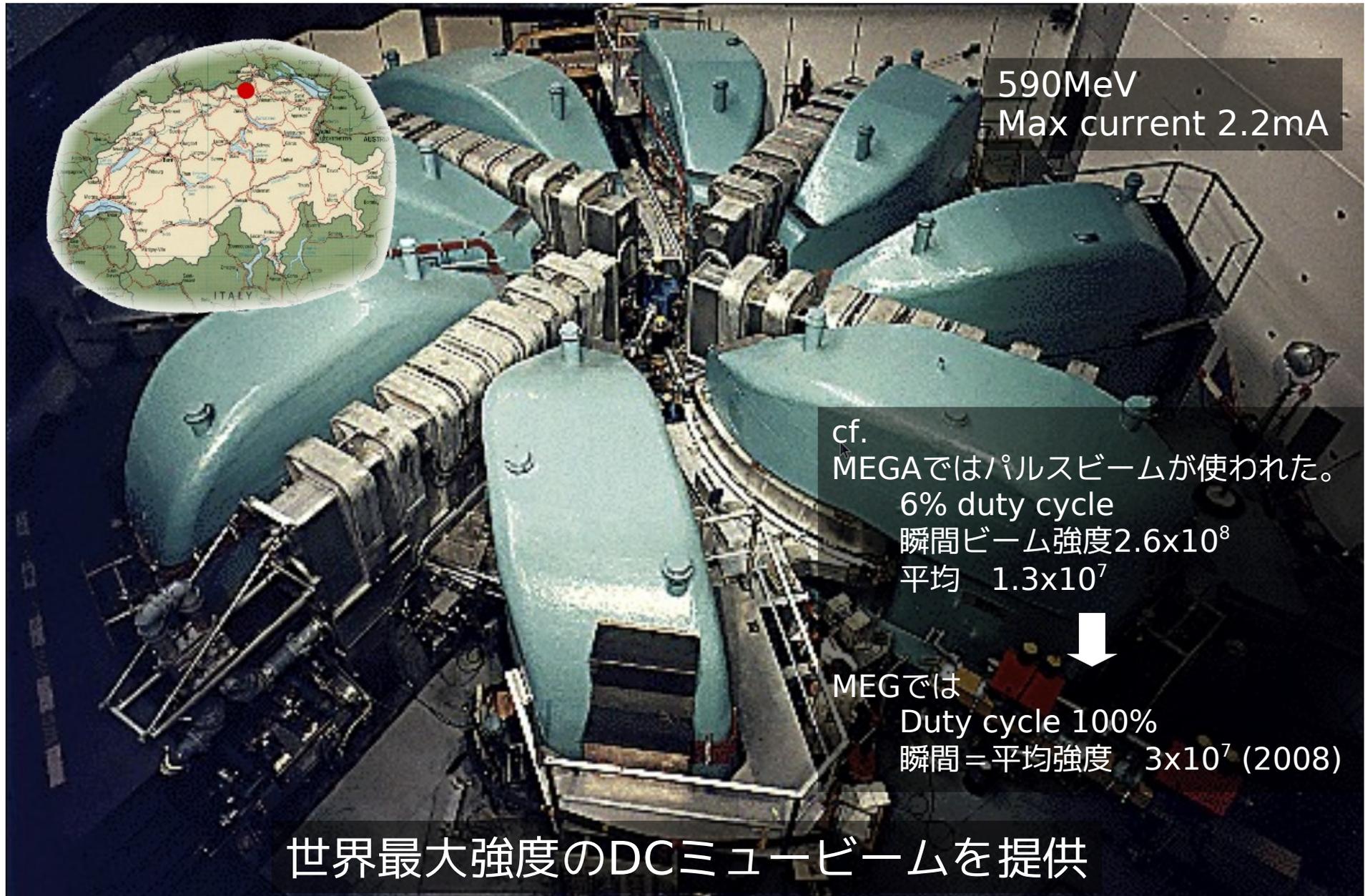
# MEG実験

- 世界最大強度のDC $\mu^+$ ビーム @PSI (スイス)
- MEG検出器
  - 陽電子スペクトロメータ
  - 液体キセノン ガンマ線検出器
- 2008年秋、本格的な物理データ収集を開始.



# 1.2MW proton Ring-Cyclotron at PSI MEG

Mu-E-Gamma Collaboration



590MeV  
Max current 2.2mA

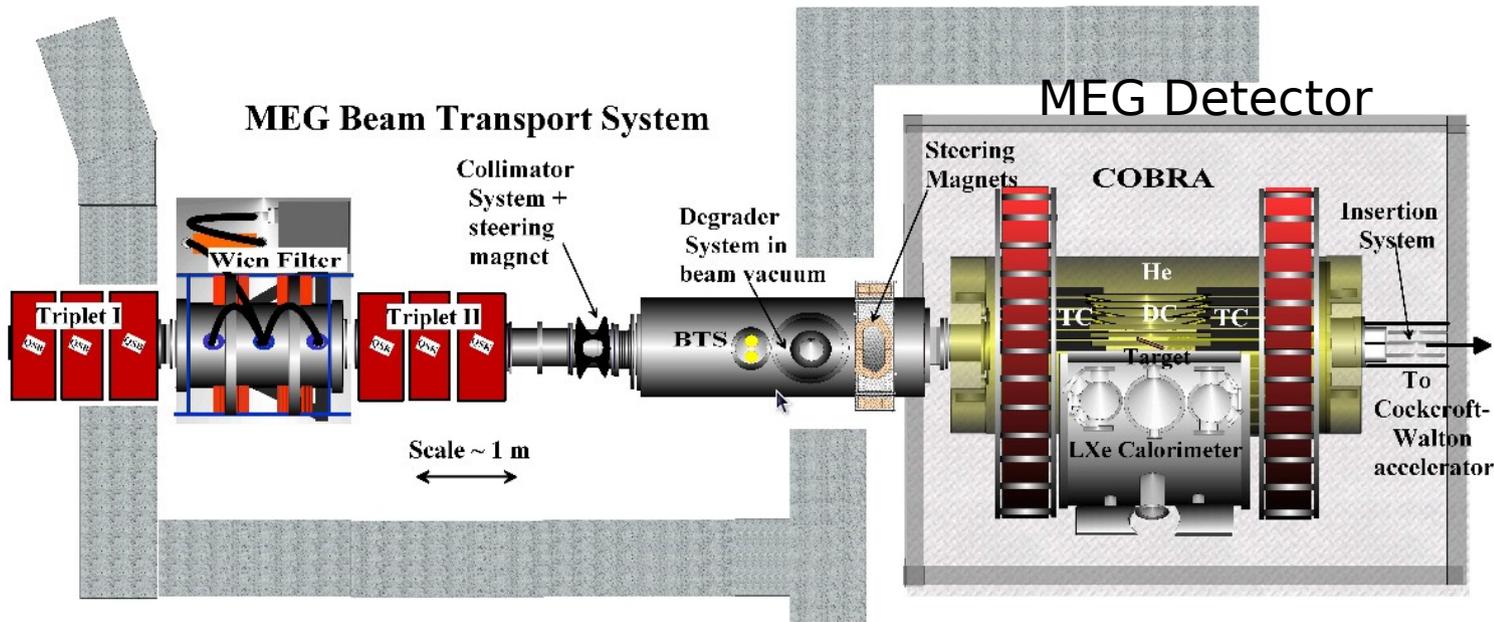
cf.  
MEGAではパルスビームが使われた。  
6% duty cycle  
瞬間ビーム強度  $2.6 \times 10^8$   
平均  $1.3 \times 10^7$



MEGでは  
Duty cycle 100%  
瞬間 = 平均強度  $3 \times 10^7$  (2008)

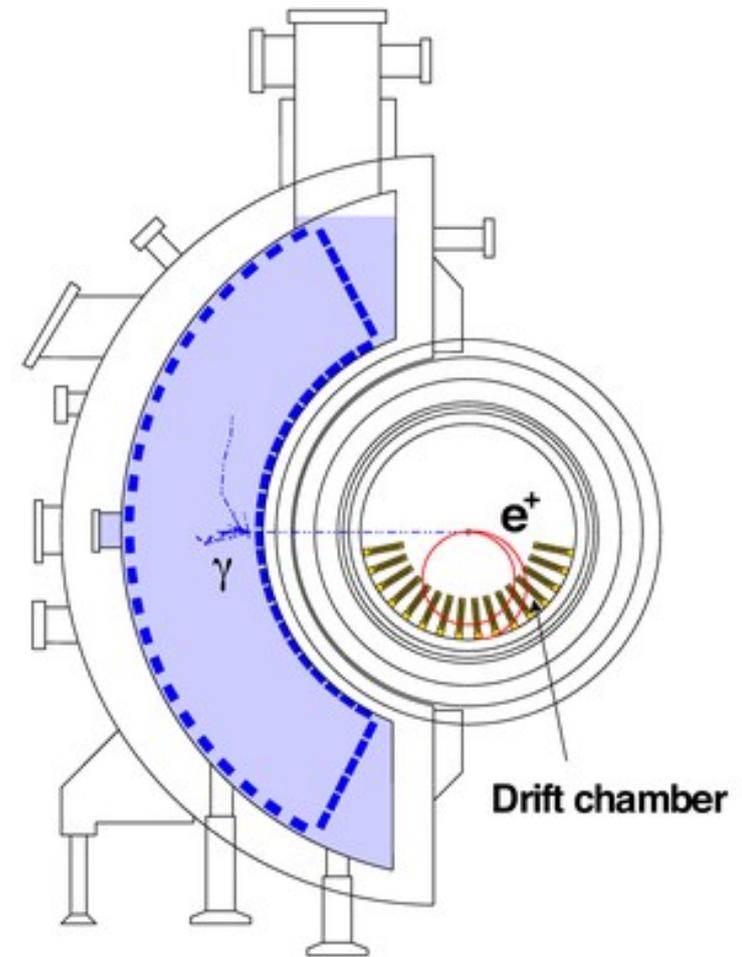
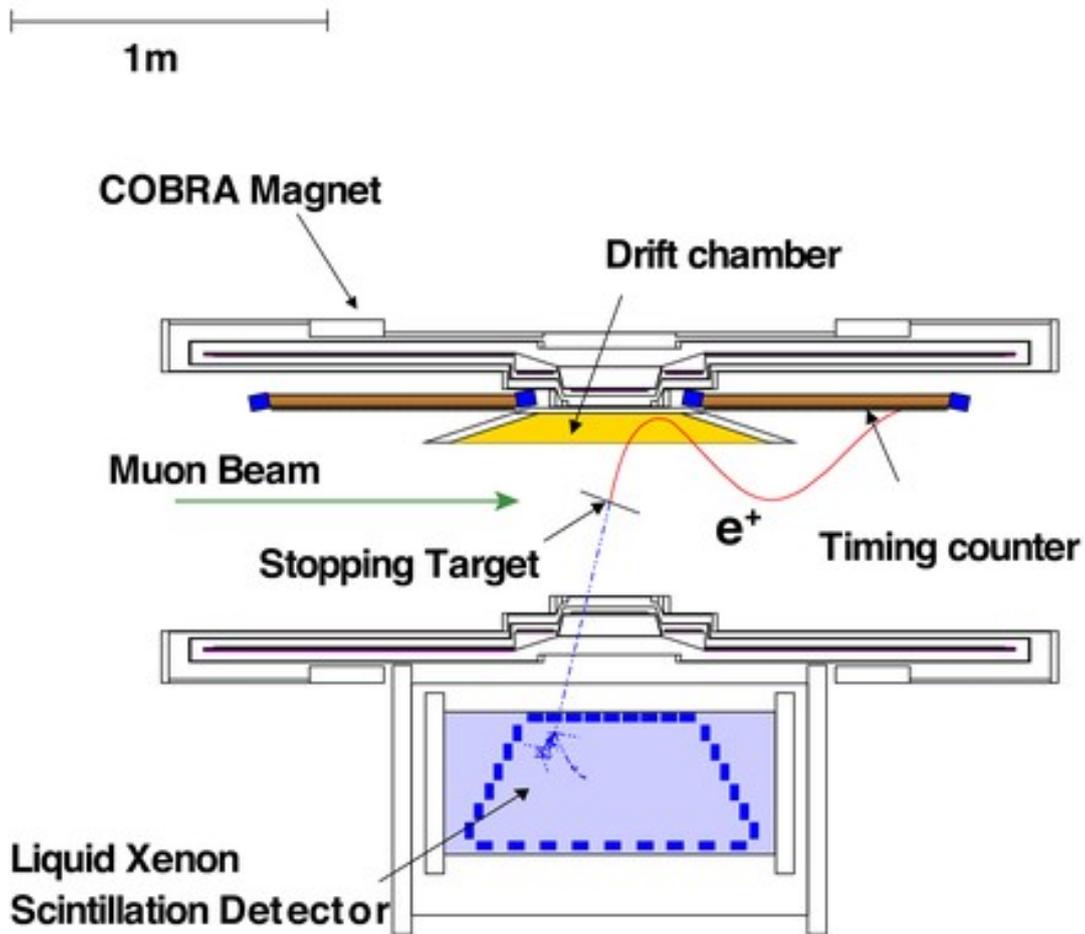
世界最大強度のDCミュービームを提供

# 'Surface muon' Beam Transport System



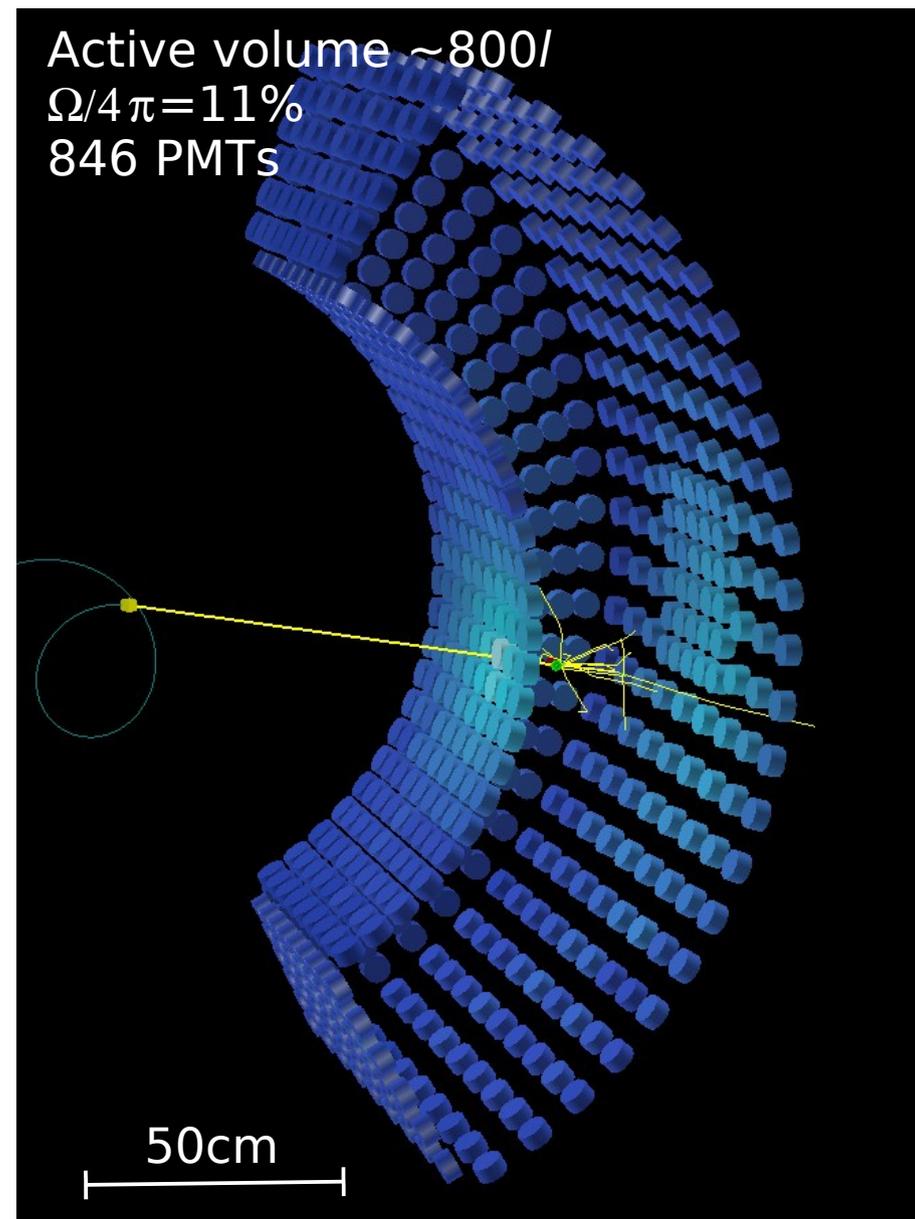
- Surface  $\mu$ : 生成ターゲット表面で生成したミュオン
  - pビームラインから175度の角度で取り出す
  - 低運動量(29MeV/c)で運動量の揃った $\mu^+$ ビームが得られる
- ビーム輸送システムを通して
  - $e^+$ をセパレート・減速・ビームプロファイルの調整
- $3 \times 10^7 \mu^+ / \text{sec}$  が静止ターゲット上で止まる
  - 10mmスポットサイズ
  - 200 $\mu\text{m}$ 厚ポリエチレン膜ターゲット、ビーム軸から20.5°傾けて設置
    - 散乱・BGの低減 vs ストップングパワー

# MEG 検出器



# 液体キセノン検出器

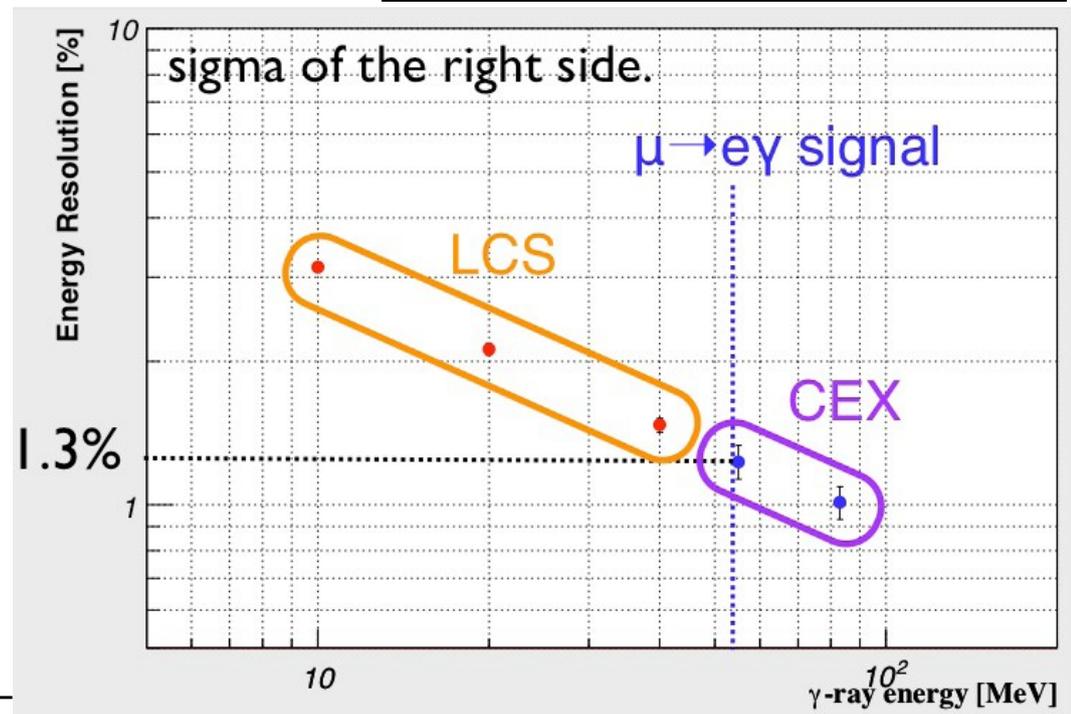
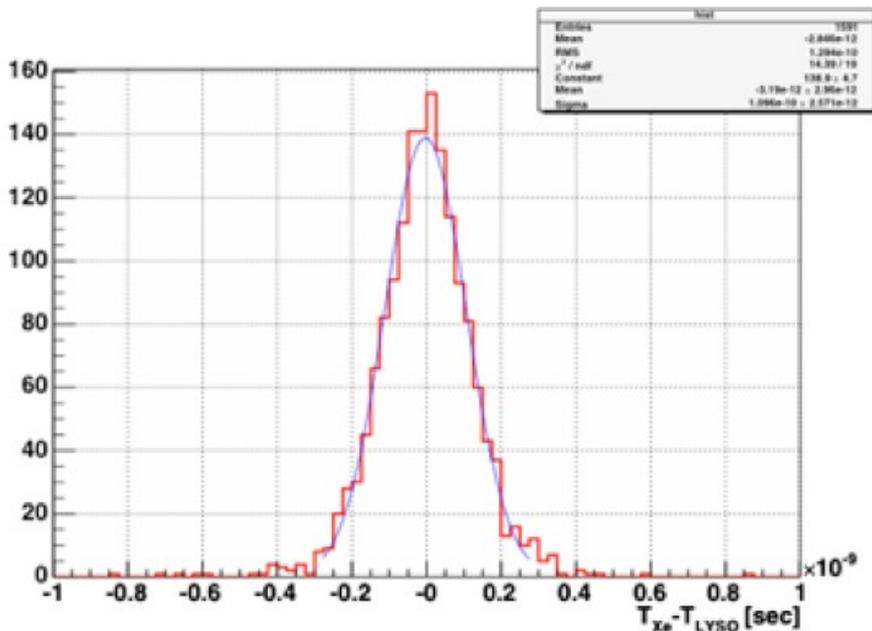
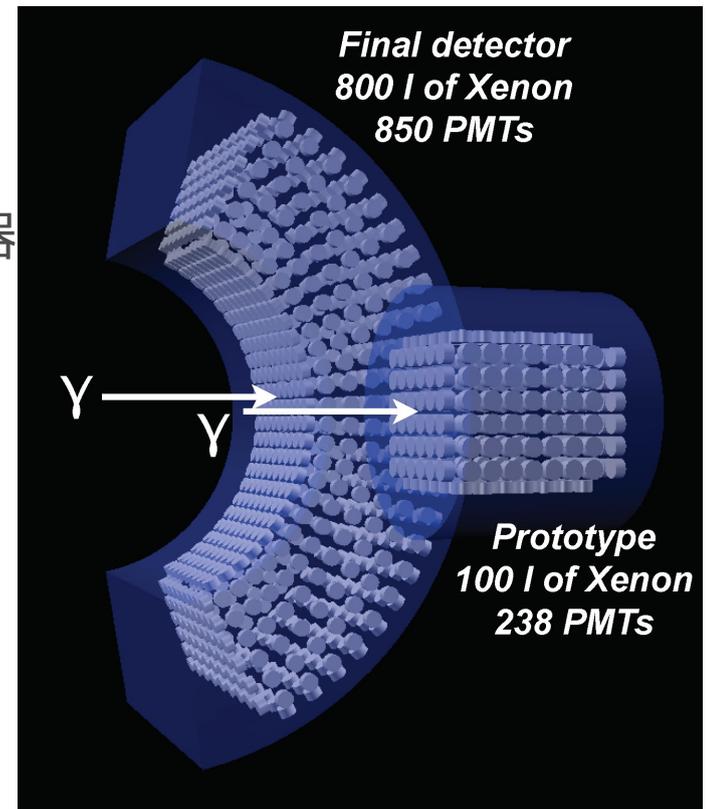
- 900リットル液体キセノン
  - シンチレーション媒体
    - 高い発光量 (NaI(Tl)の75%)
    - 早い応答 ( $\tau_{\text{decay}}=45\text{ns}$ )
    - ガンマ線阻止能力 ( $X_0=2.8\text{cm}$ )
    - 自己吸収無し
    - 一様、劣化なし
  - 挑戦
    - 真空紫外光 (178nm)
    - 低温 (165K)
    - 高純度
  - セグメント化なし
- エネルギー・位置・時間を同時に測定
- パイルアップ識別
  - 光量分布・時間分布・波形



# プロトタイプ検出器・R&D

- 液体キセノン検出器の性能をプロトタイプ検出器を用いて実証した。
  - エネルギー分解能 @55MeV
    - $\sigma_{up} = 1.23\%$ , FWHM = 4.8%
  - 時間分解能 @55MeV
    - $\sigma_t = 65$  ps

様々なR&D,本実験に必要なノウハウを得た。



# クライオスタット



Inner vessel



ハニカム構造の入射窓

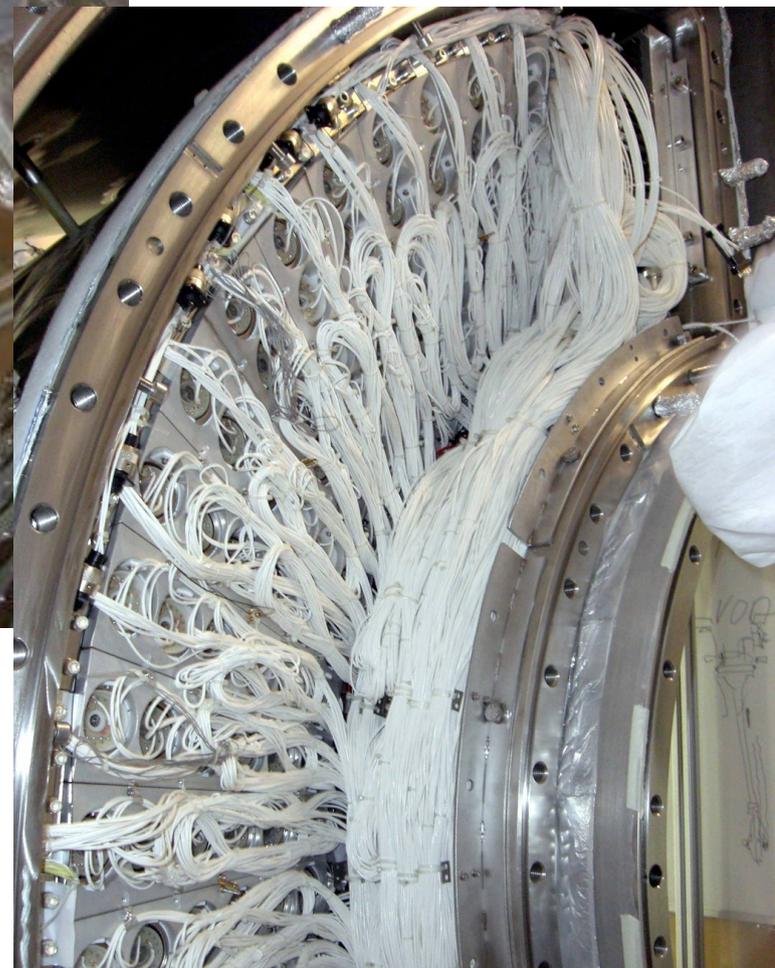
2層構造真空断熱容器  
 $\gamma$ 線入射面は薄窓

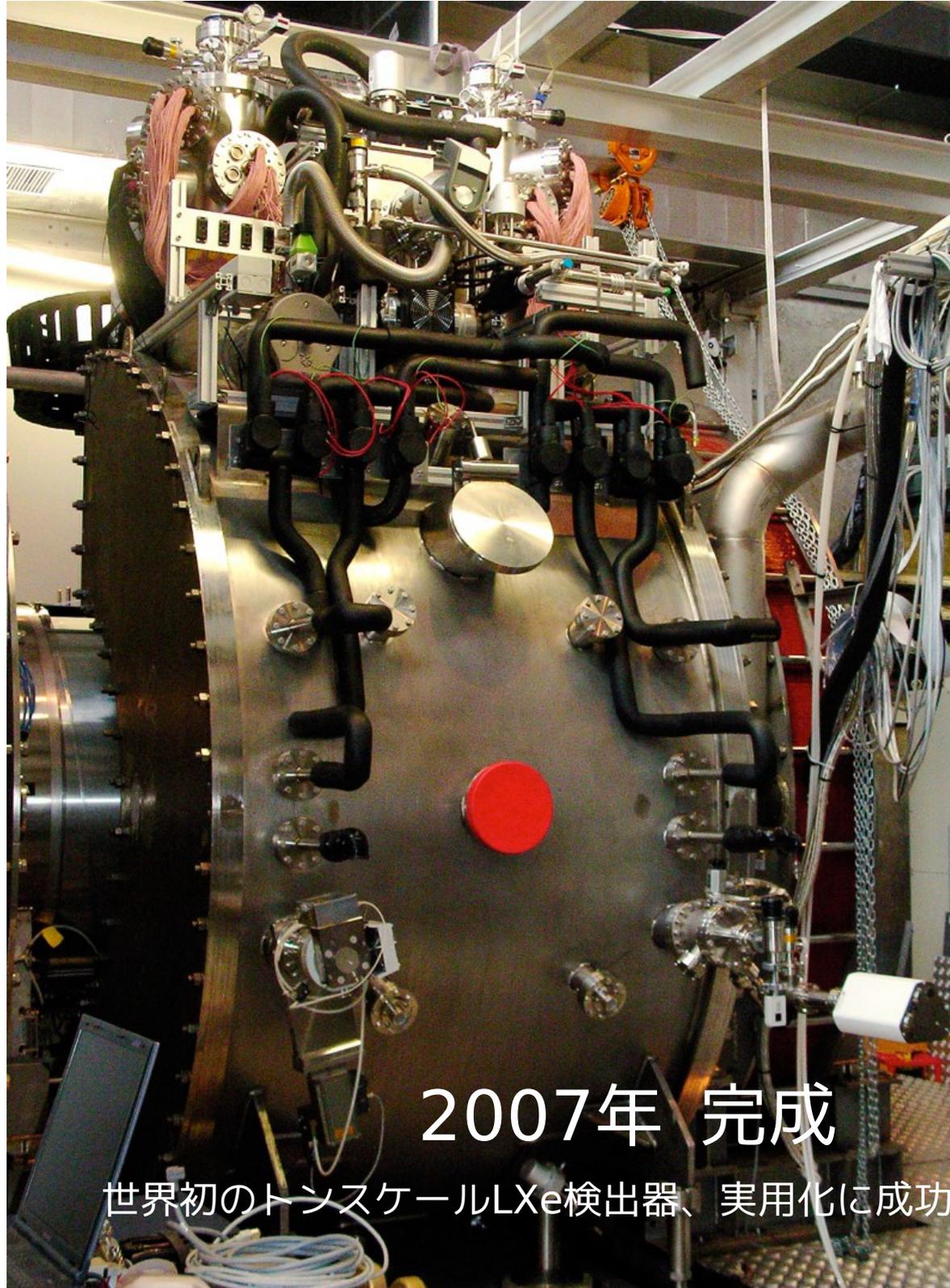


# PMT インストール

MEG用に開発された2" PMT

- 石英窓 for 真空紫外光
- K-ScSb 光電面
- Alストリップ on 光電面
- メタルチャンネルダイノード
- Bleeder回路後段にZener ダイオード

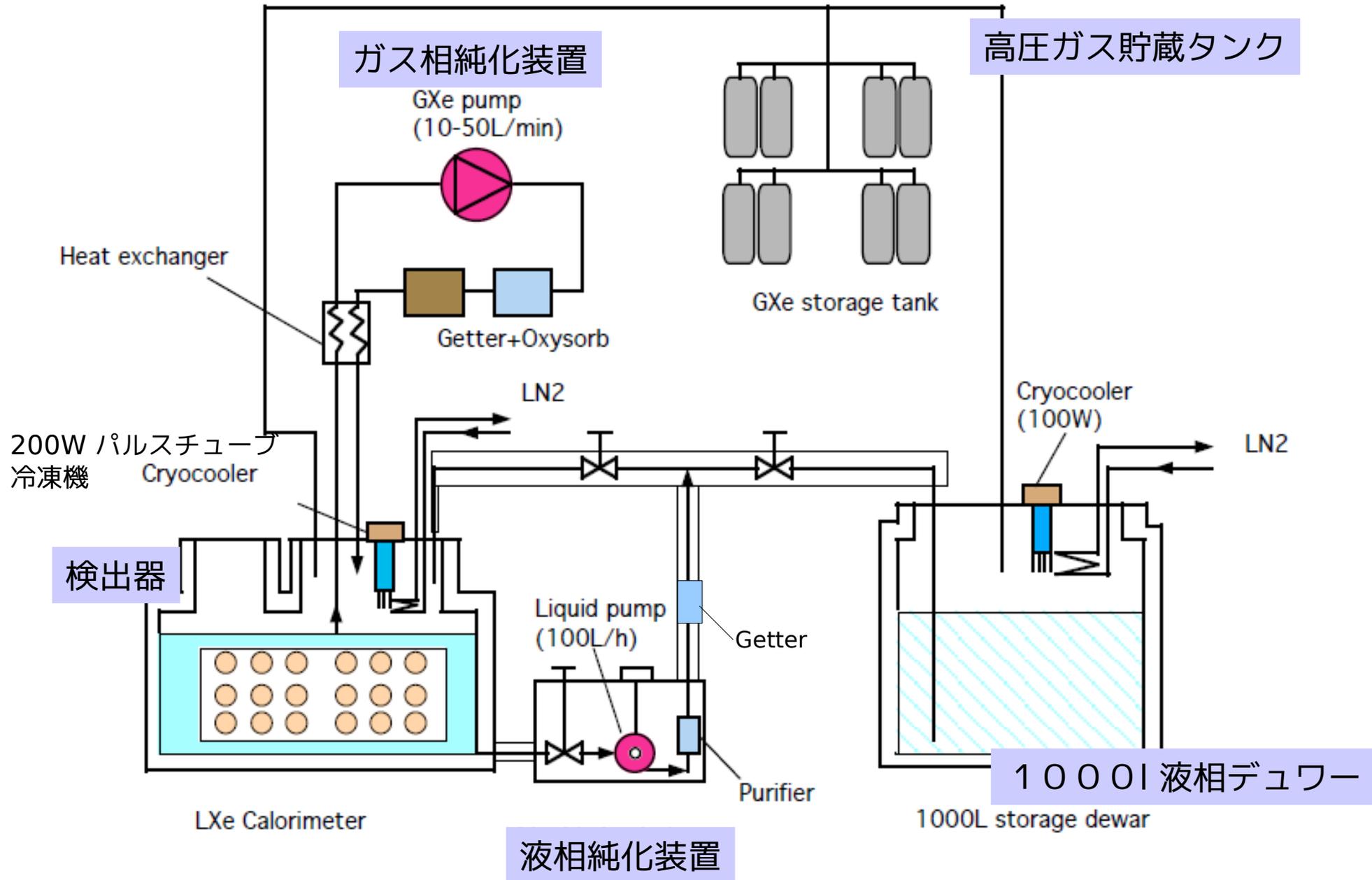




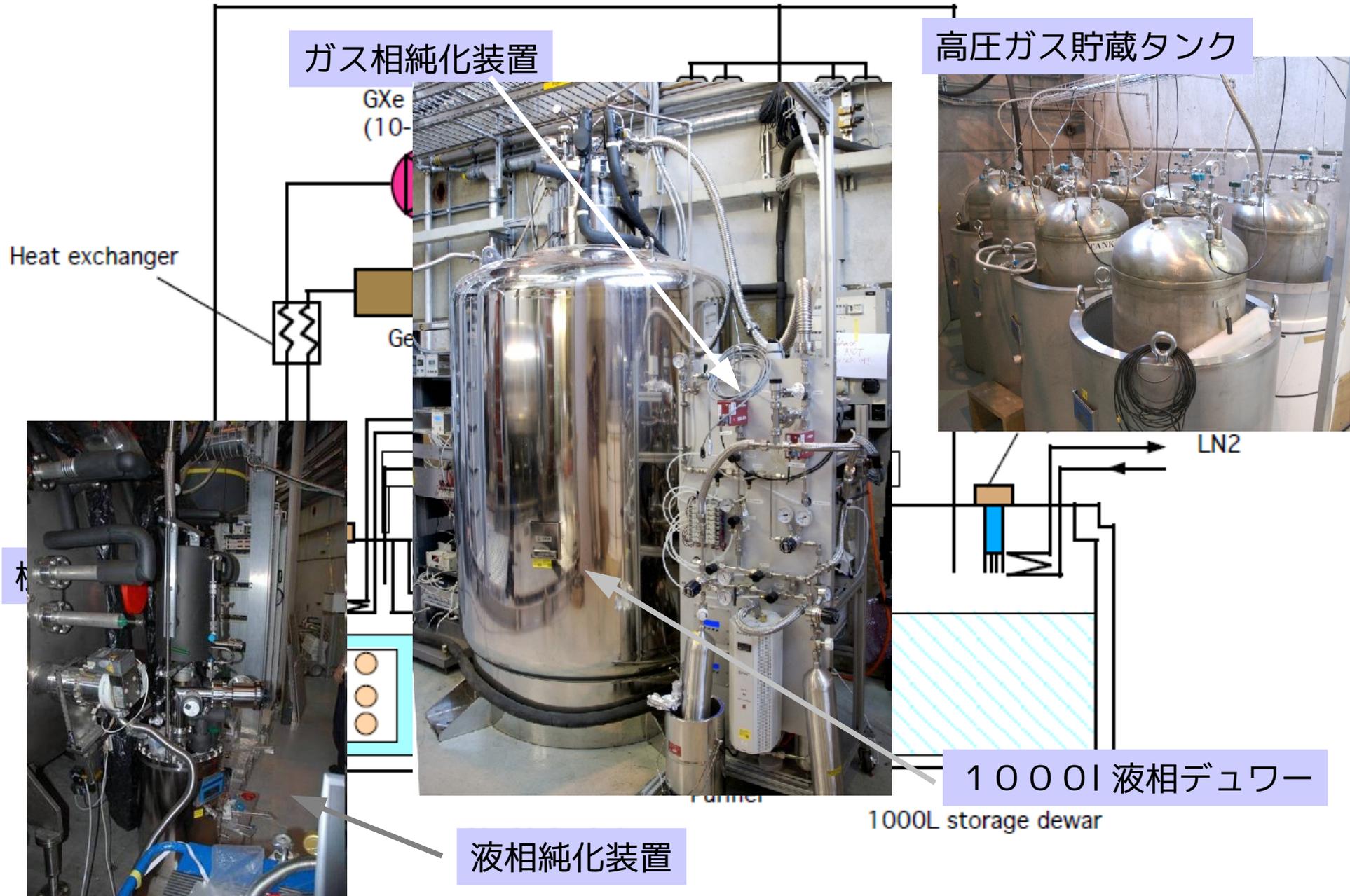
2007年 完成

世界初のトンスケールLXe検出器、実用化に成功

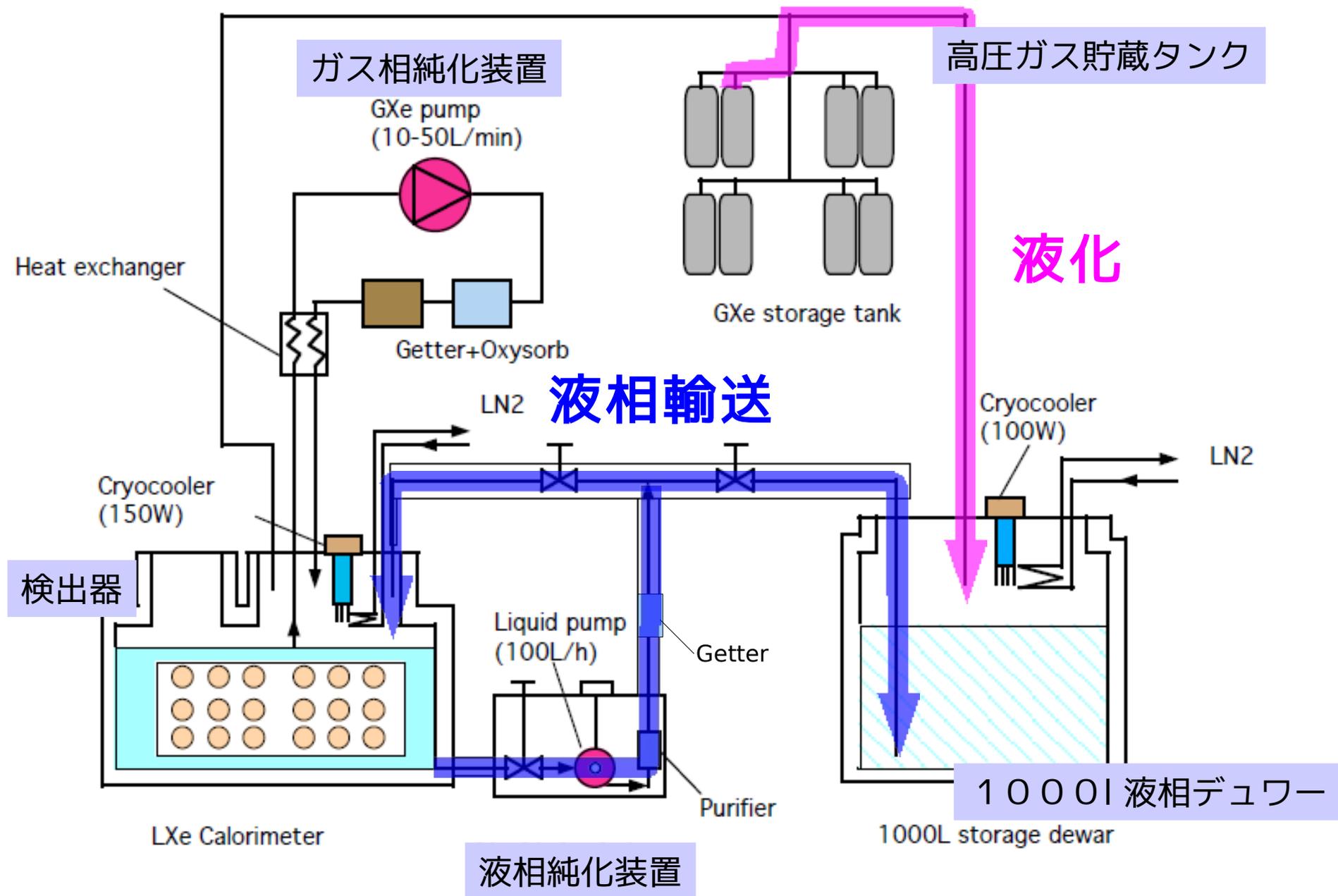
# キセノンシステム



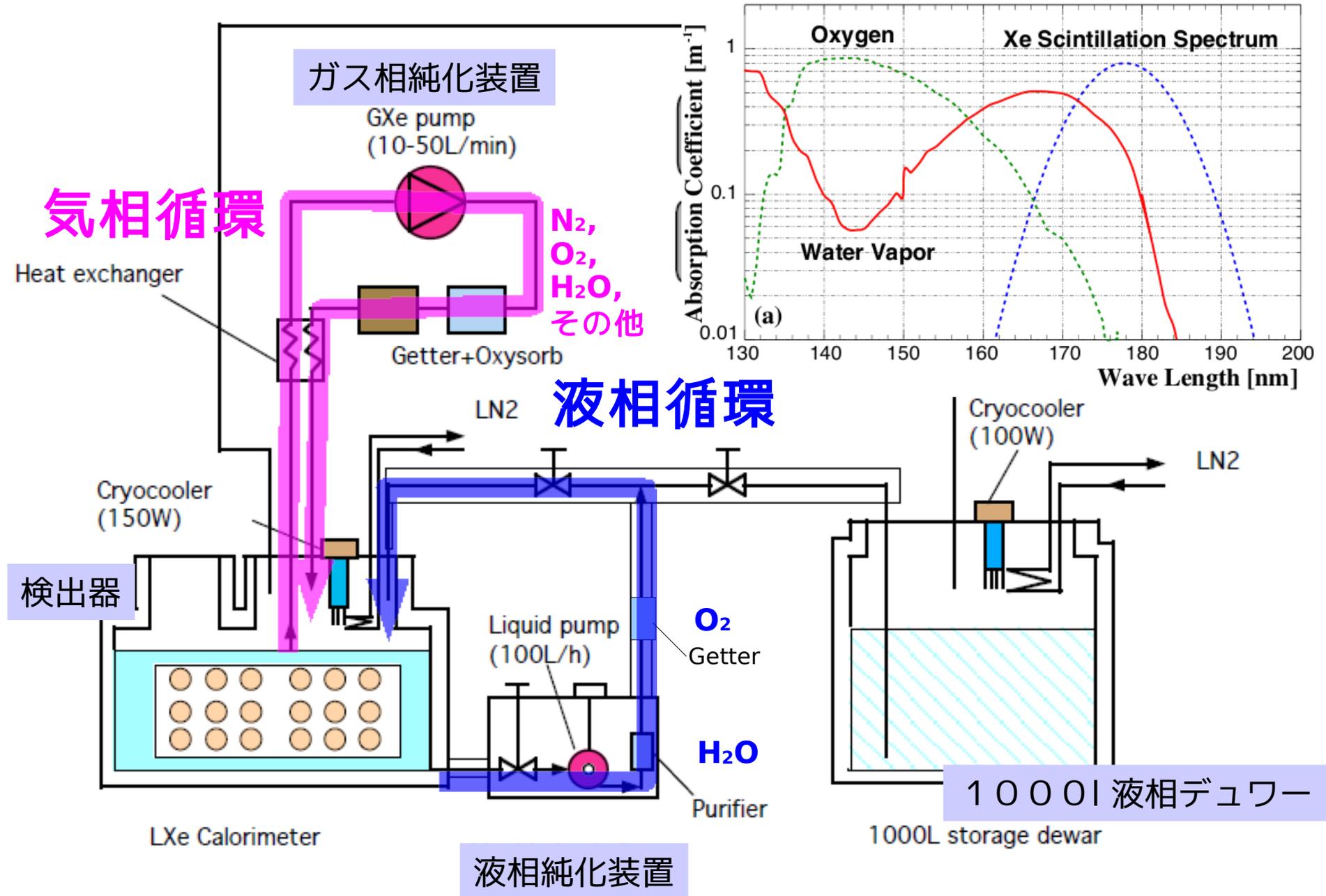
# キセノンシステム



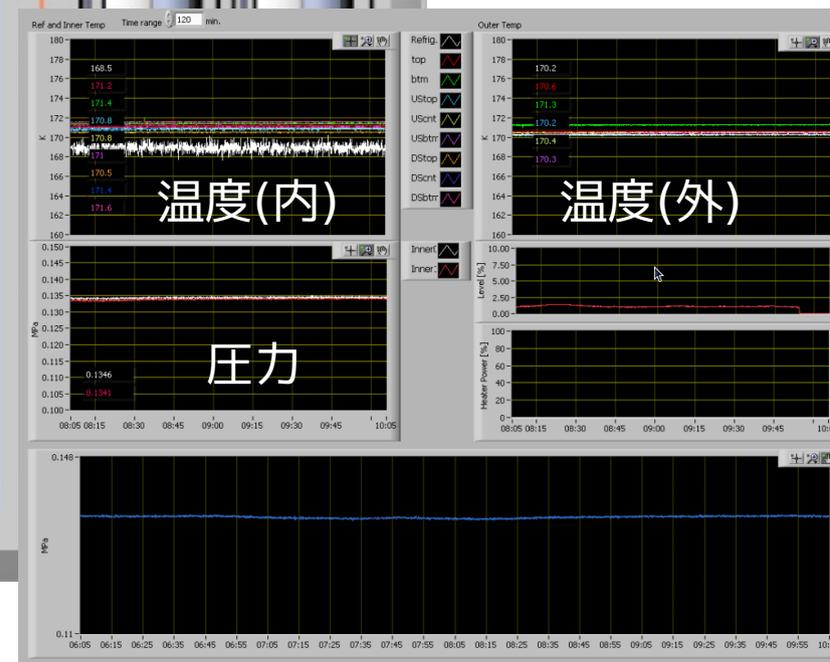
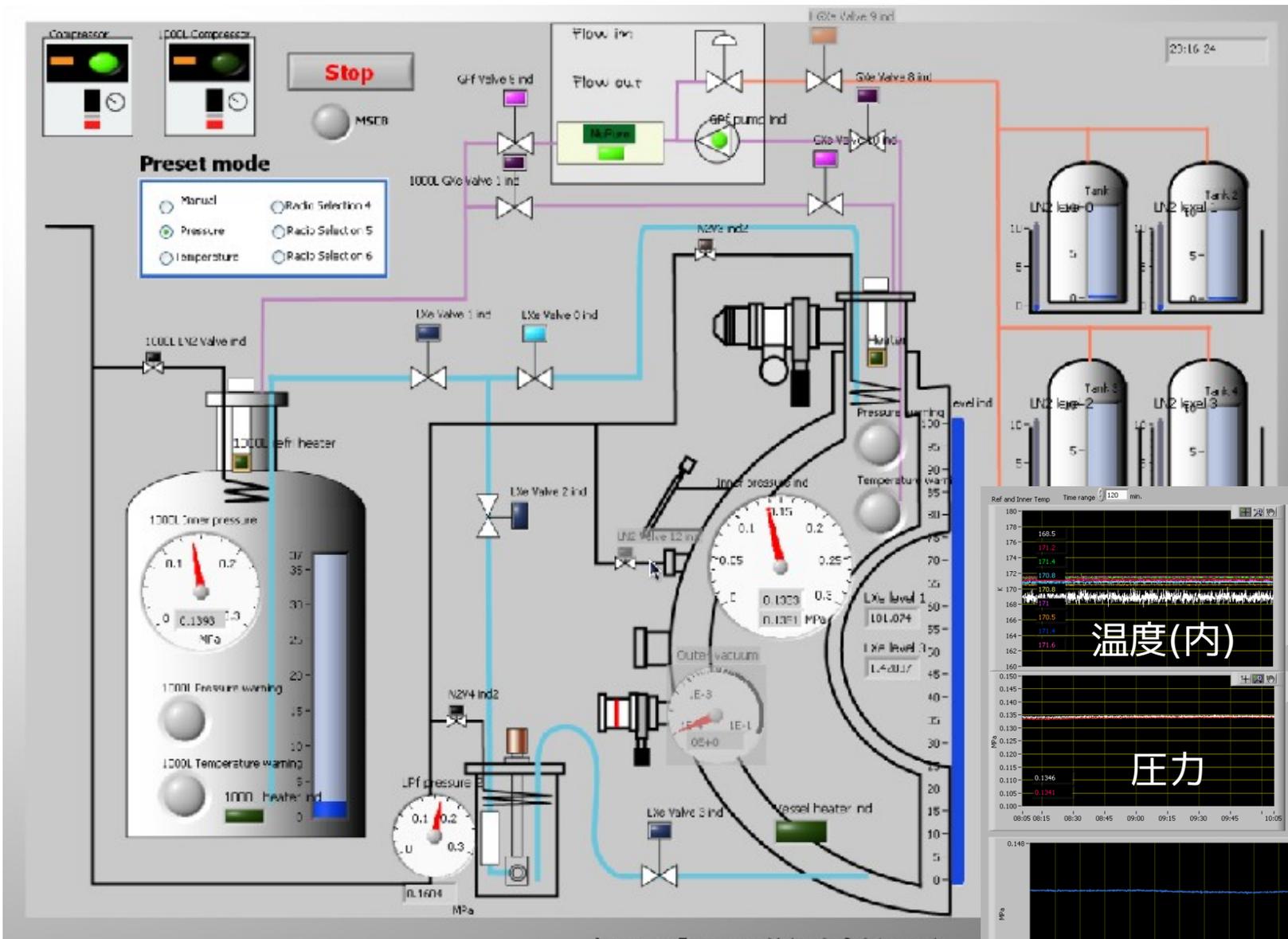
# キセノンシステム：液化・液相輸送



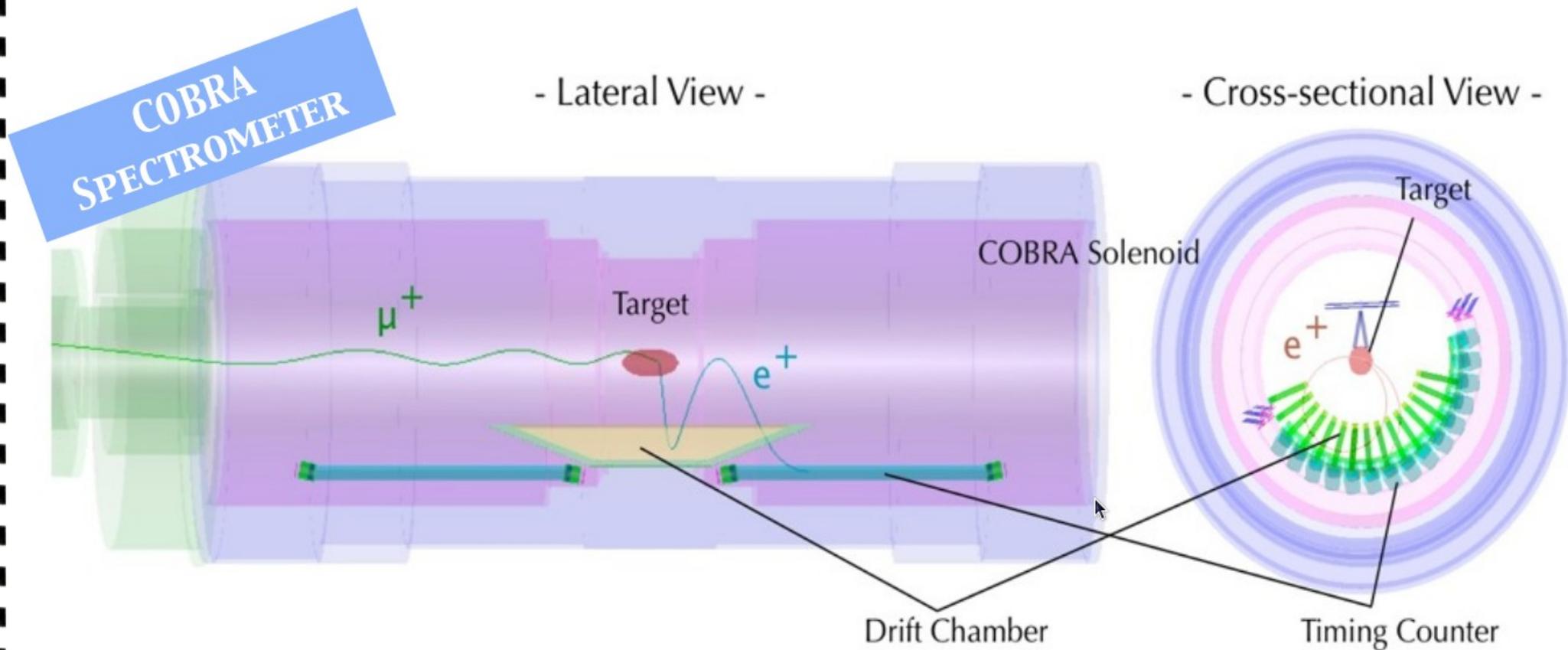
# キセノンシステム：循環純化系



# Slow control系のモニターと制御



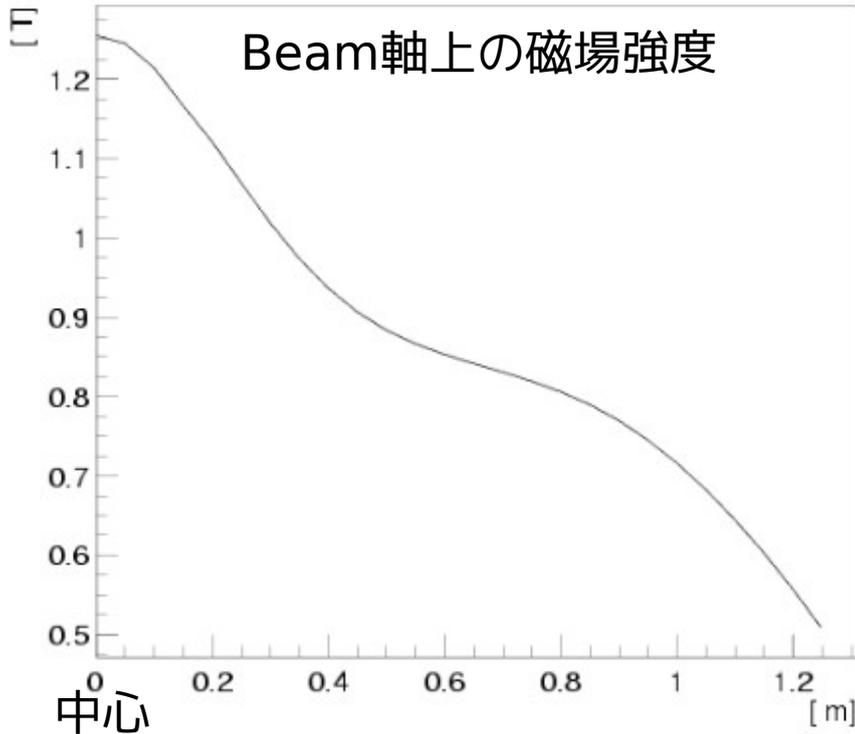
# 陽電子スペクトロメータ



- $3 \times 10^7$  というハイレイトな  $e^+$  をうまくさばくスペクトロメータ
- $e^+$  の運動量・放出角・時間を精度よく測定

# “COBRA” マグネット

- 特殊な勾配をもった磁場を形成する超電導ソレノイド
  - 中心 1.27 T → 端 0.49 T



## 他の特徴

薄いコイル

<0.2X<sub>0</sub>。Γ線を透過させるため(85%)

素早い起動・停止

~30分で安定 (GM冷凍機で冷却)

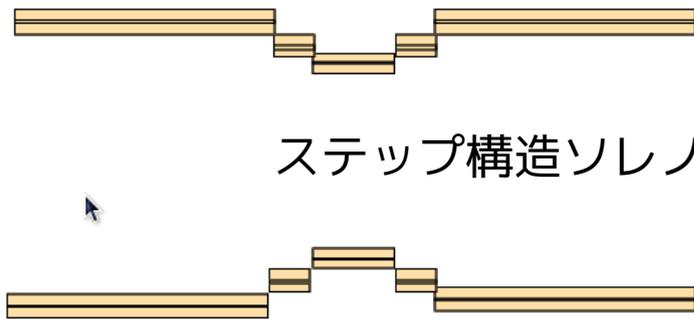
2つの常伝導補償コイルで漏れ磁場を抑制

(リターンヨークはない。)

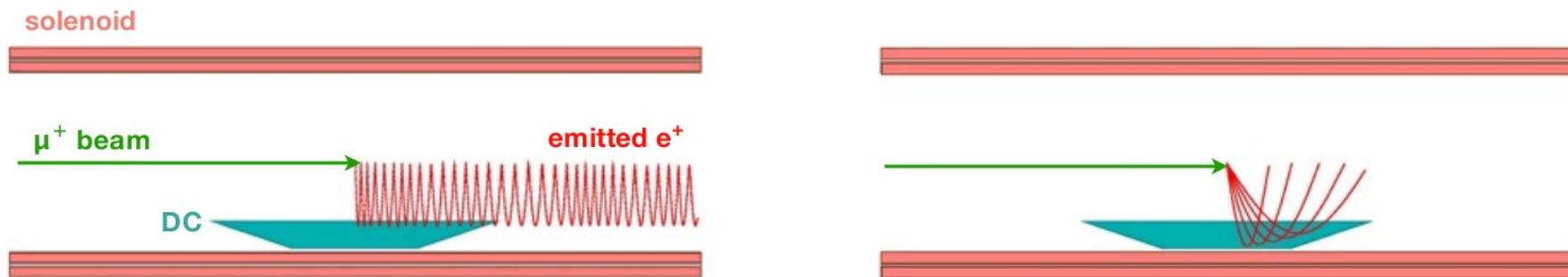
キセノン検出器付近で低磁場

PMT動作のため <50Gauss

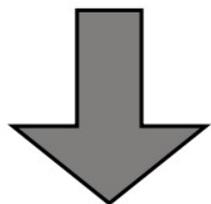
## ステップ構造ソレノイド



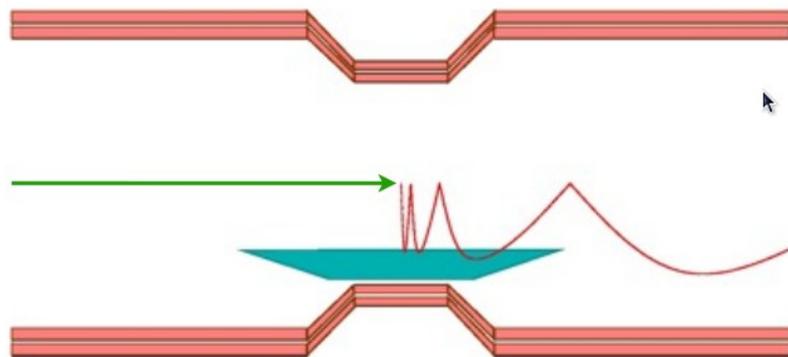
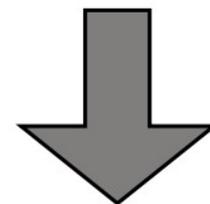
# 特殊勾配磁場



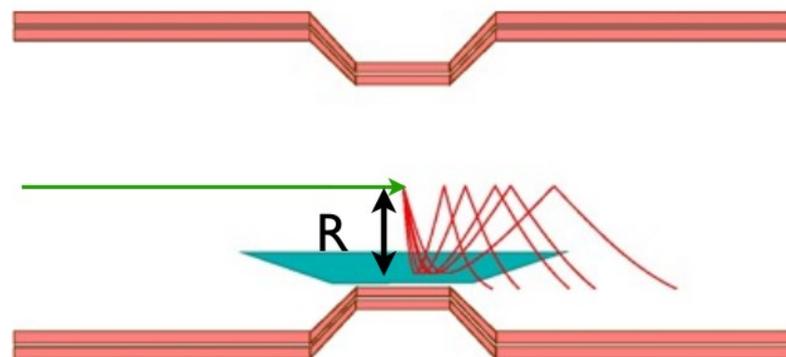
一様磁場



勾配磁場



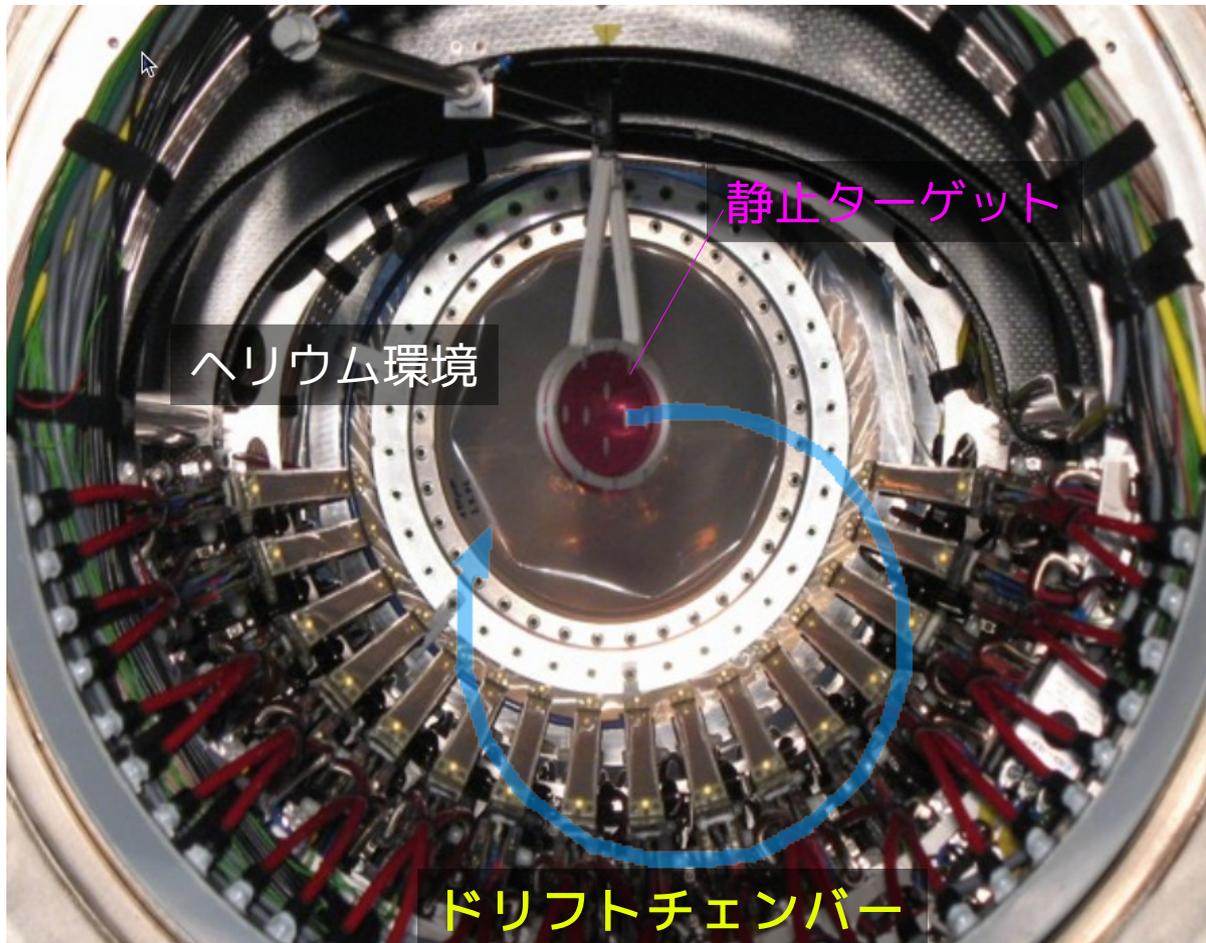
$e^+$ が素早く掃ける



同一運動量  $\Rightarrow$  同一半径  
(**C**onstant **B**ending **R**adius)

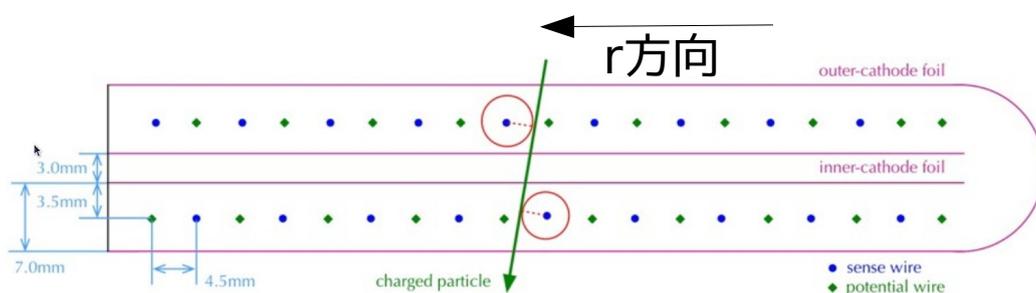
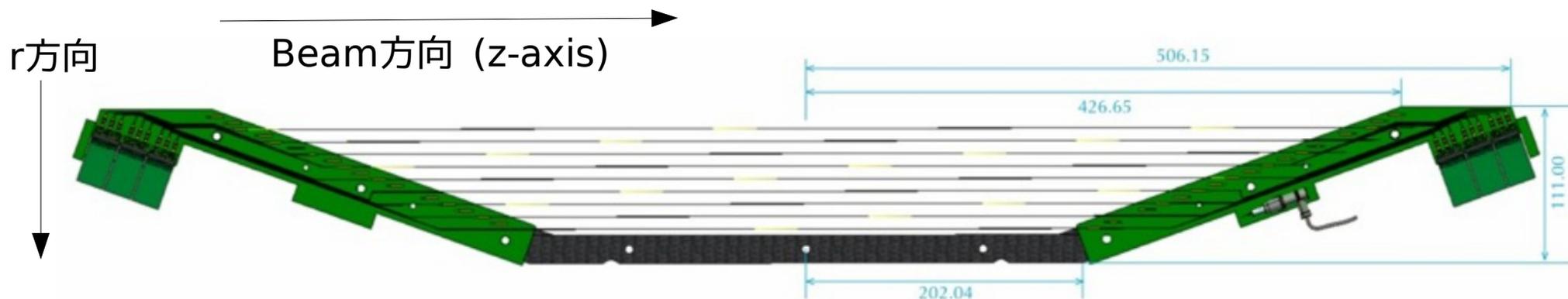
ハイレイト環境での測定を可能に

# ドリフトチェンバー(DCH)



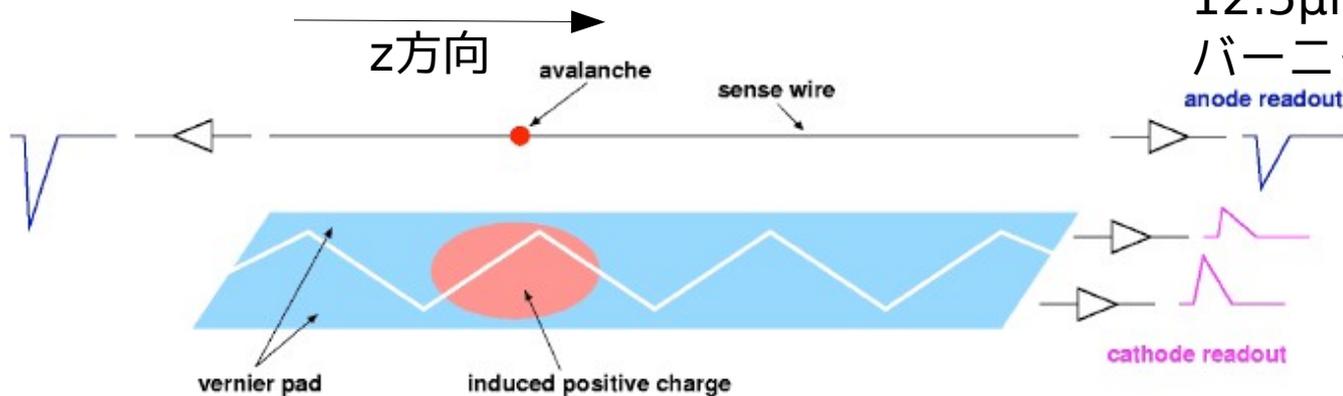
- 16個のモジュール
  - 同心円上の配置(10.5°)
  - 1モジュール2層
  -
- チェンバーガス
  - He:ethan(50:50)
  - 圧力コントロール
    - 周りHe大気
    -
- 超軽量ドリフトチェンバー
  - e<sup>+</sup>の飛跡にそってトータル  
~2.0 × 10<sup>-3</sup> X<sub>0</sub>
  - 性能は多重散乱で制限される
  - γのBG源を抑える

# DCH デザイン



半セルずつずれた2層構造  
1層9ドリフトセル

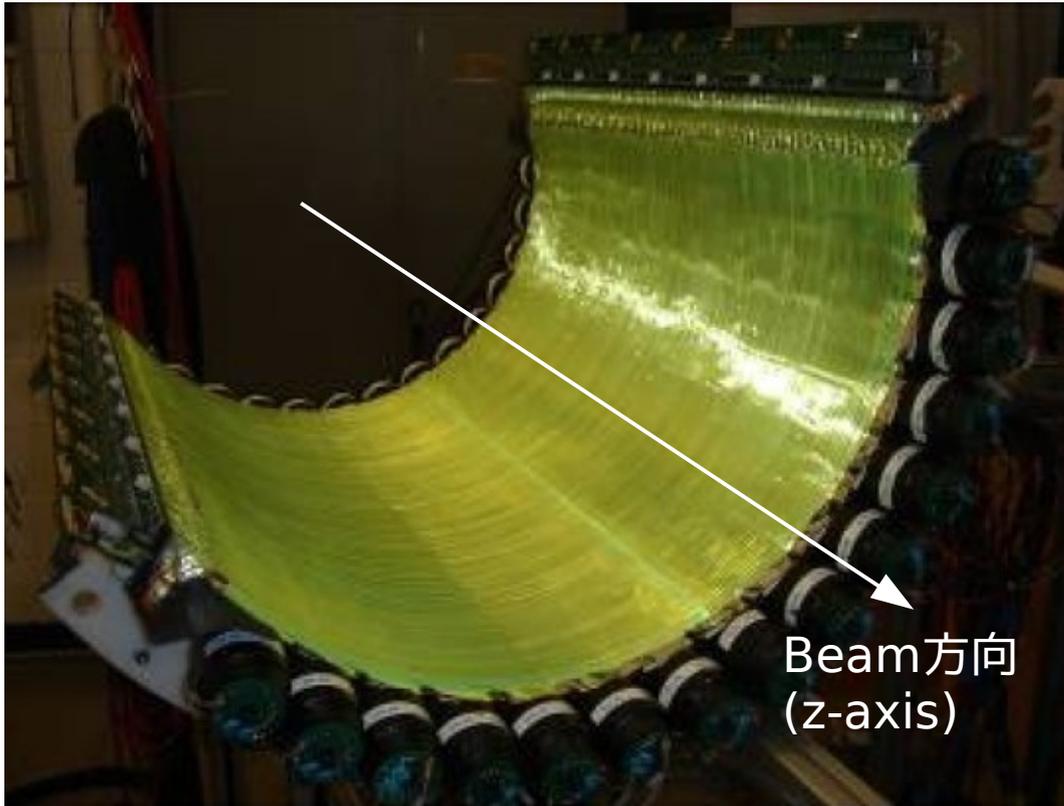
オープンフレーム構造  
カソードフォイルのみでセルを形成



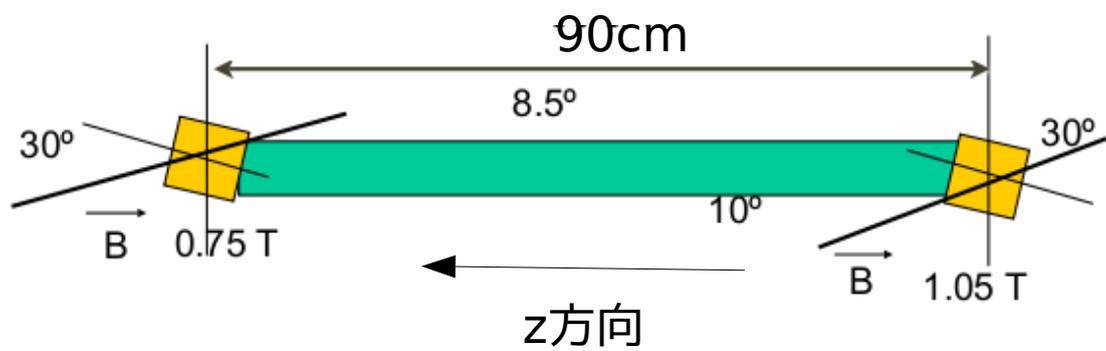
12.5 $\mu\text{m}$  カソードフォイル  
バーニャパターン  $\rightarrow$  z再構成



# タイミング カウンター

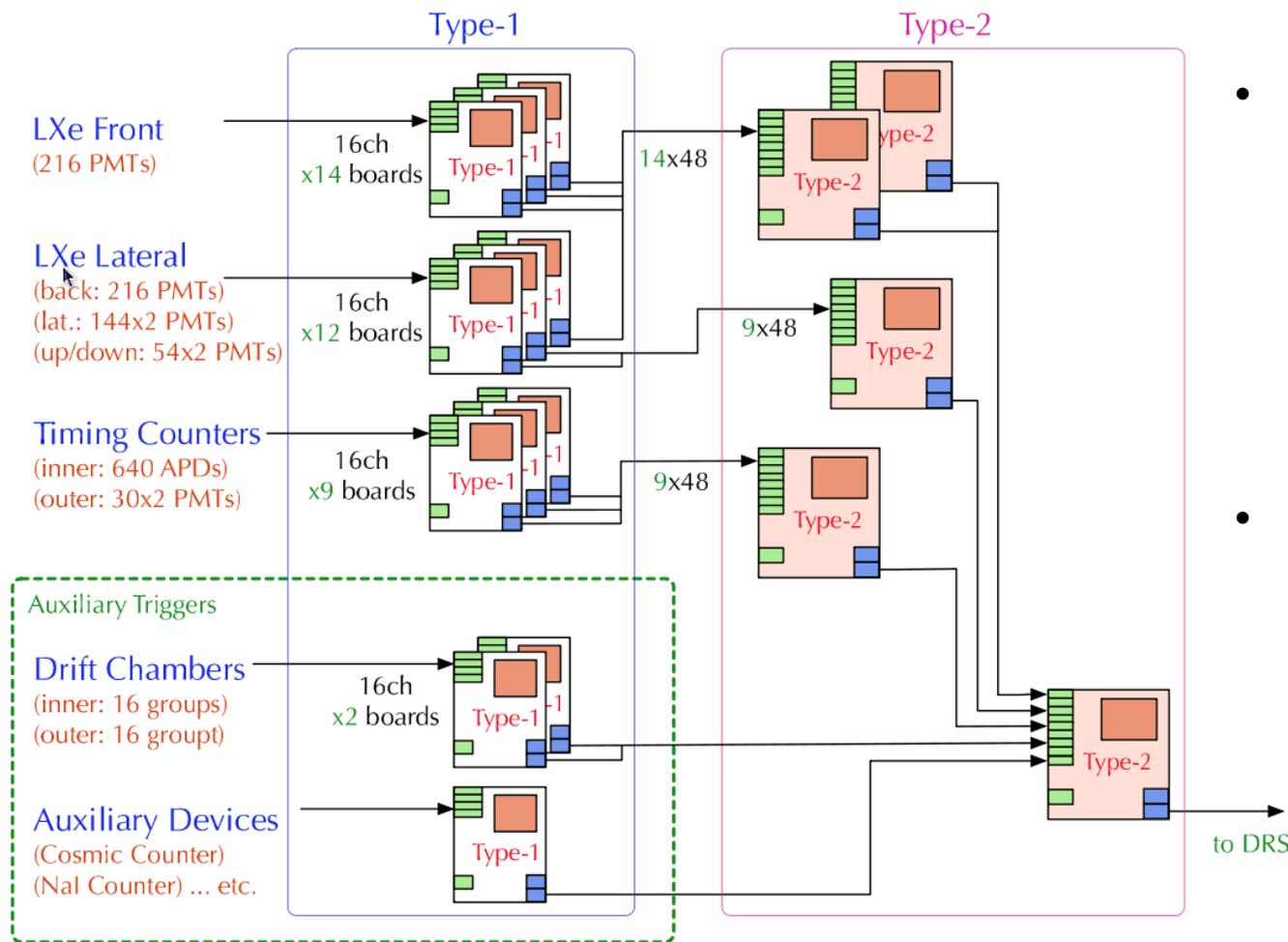


- DCHを出た後、さらに1周回転してタイミングカウンターにヒット、時間を測定
- 2層のプラスチックシンチレーションカウンターアレイ
  - 外側：シンチレーションバー
    - 4x4x80cm<sup>3</sup>, BC404
    - 同心円上に15本 (10.5°間隔)
    - Fine-mesh PMTで両読み
    - 時間の高精度測定
  - 内側：シンチレーティングファイバ
    - 5x5mm<sup>2</sup>
    - z方向に128本
    - APDで読み出し
    - ヒット情報 → trigger



2008年の解析では使っていない  
APDの読み出しに不具合

# Trigger

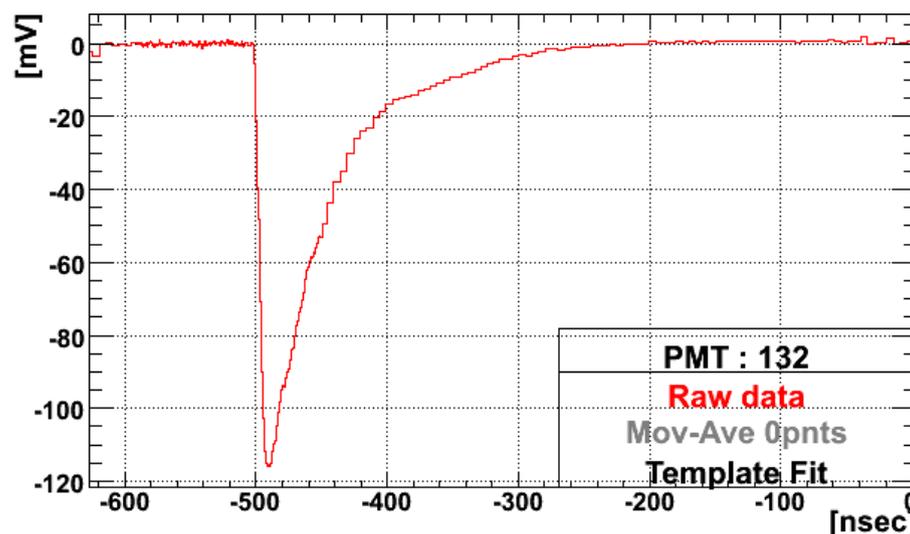
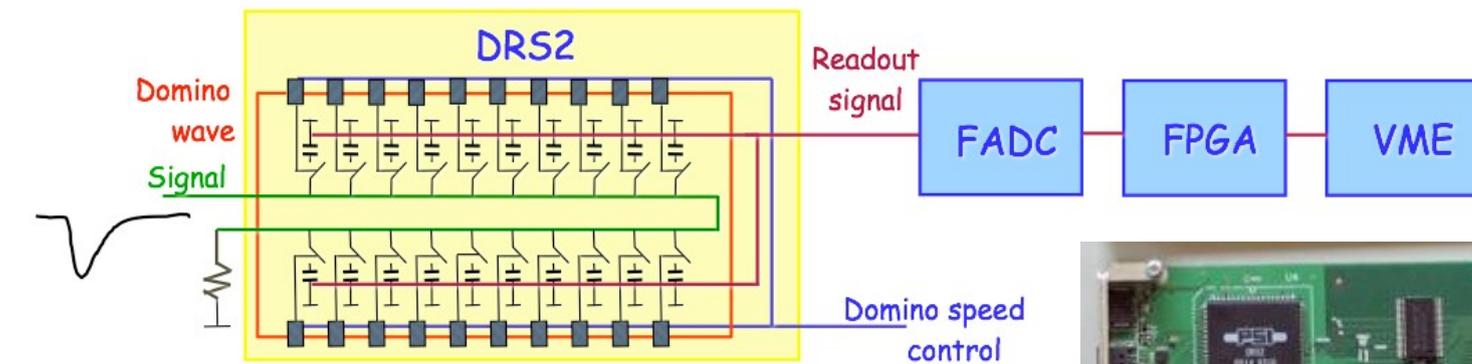


- FPGA-FADC architecture
  - 100MHz FADC on VME boards
- MEG trigger
  - 「線エネルギー
  - e<sup>+</sup>-γコインシデンス
  - e<sup>+</sup>-γ direction match (back-to-back)
    - LXe最大出力PMT
    - TCのヒットポジション
- さらに10種類のトリガーを混ぜてデータテイキング
  - Calibration, normalization

Beam rate	$3 \times 10^7 \text{s}^{-1}$
Fast LXe Q sum (>40MeV)	$2 \times 10^3 \text{s}^{-1}$
Time coincidence	$100 \text{s}^{-1}$
Direction match	$10 \text{s}^{-1}$

# 読み出し回路

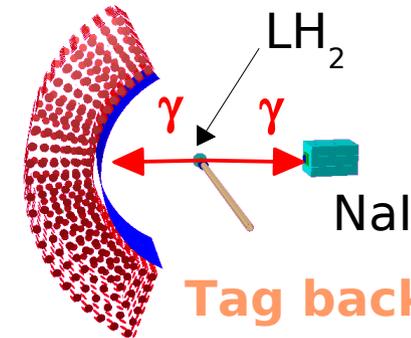
- すべての検出器の出力を波形情報で記録 (no ADC,TDC)
  - DRS chip (Domino Ring Sampler)
    - Up to 5GSPS, 1024cell, 8ch/chip
  - Sampling speed : 1.6GHz for LXe&TC, 500MHz for DCH
  -



# キャリブレーション

- $\pi^0$  崩壊からの55MeV 高エネルギーガンマ

- 位置、時間、エネルギー分解能の評価
- エネルギースケールの決定
- $\mu^+$ と同じビームライン
- セットアップに時間がかかる(~5日間)
  - 夏と冬、本実験の前後に行った.
- 本実験よりもBGが多い.



- Li(p, $\gamma$ )Be 反応からの17.6MeVガンマ

- 1/3のエネルギー
- 独自のpビームライン(反対側)
- 切り替えが簡単(~20分)
- 週3回の定期的なキャリブレーション

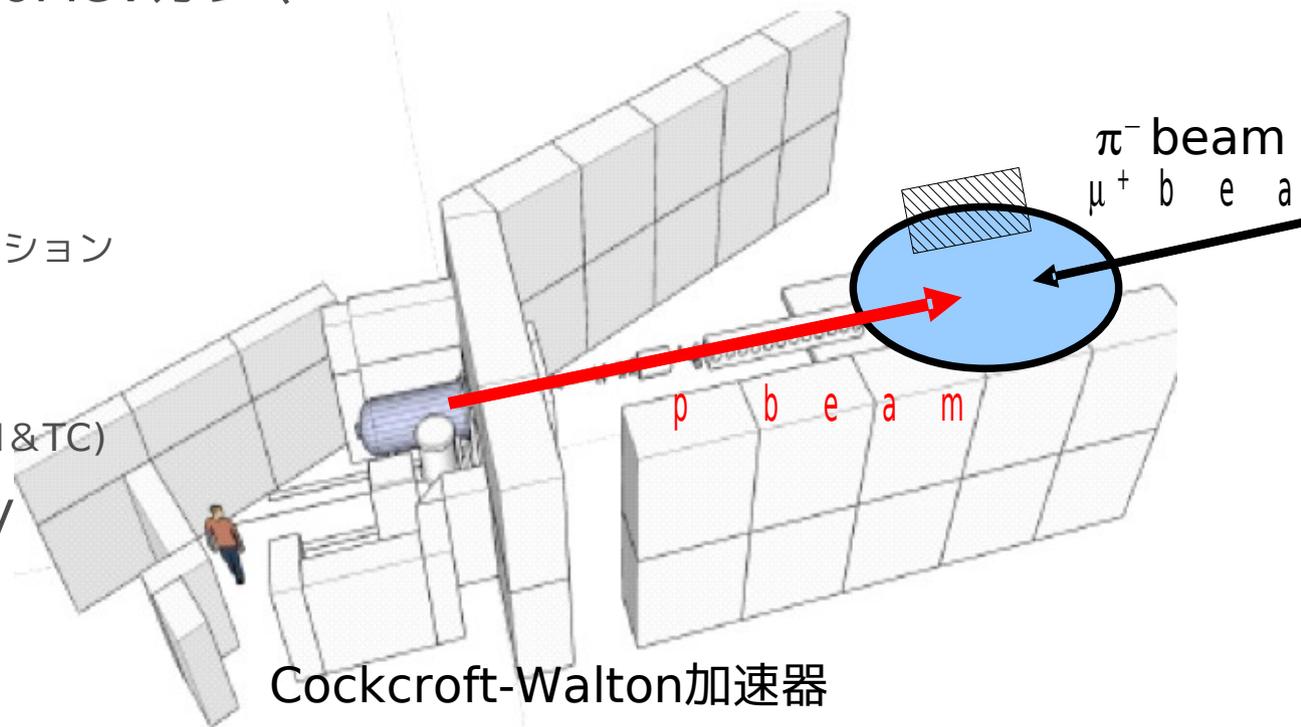
- $\mu$ 粒子のMichel decay

- $e^+$ のキャリブレーション(DCH&TC)

- $\mu$ 粒子のradiative decay

- 時間のキャリブレーション

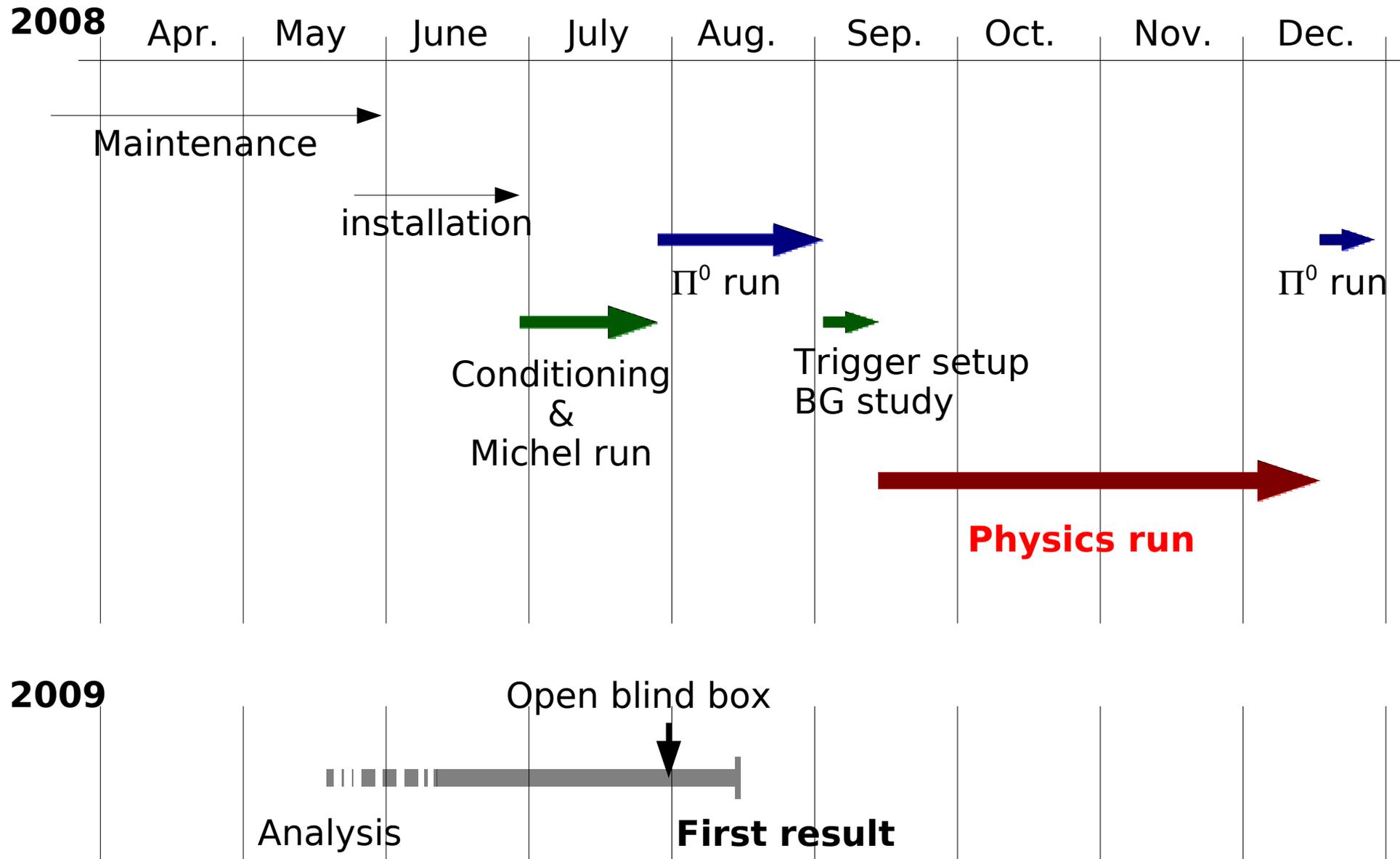
- LED, アルファ線源



Cockcroft-Walton加速器

# RUN 2008

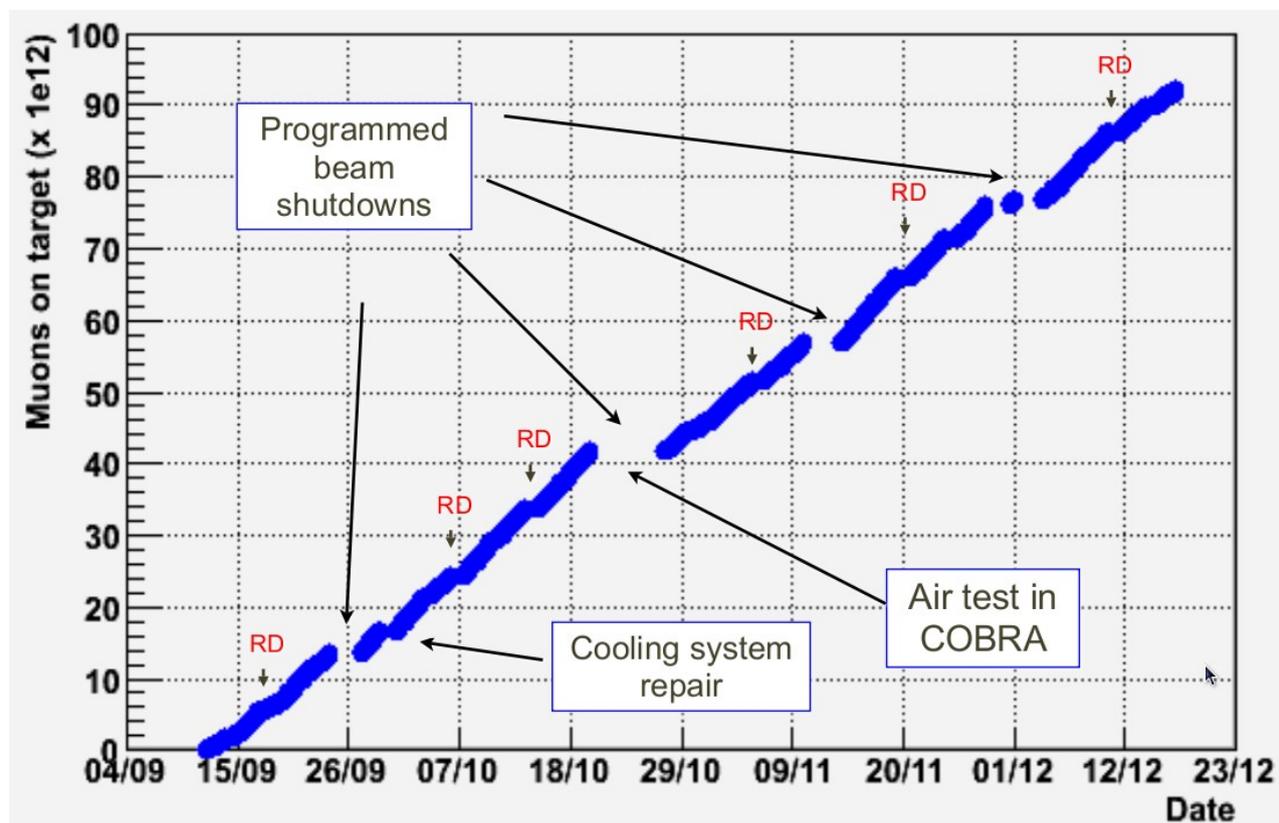
# Run 2008



# 2008 Data

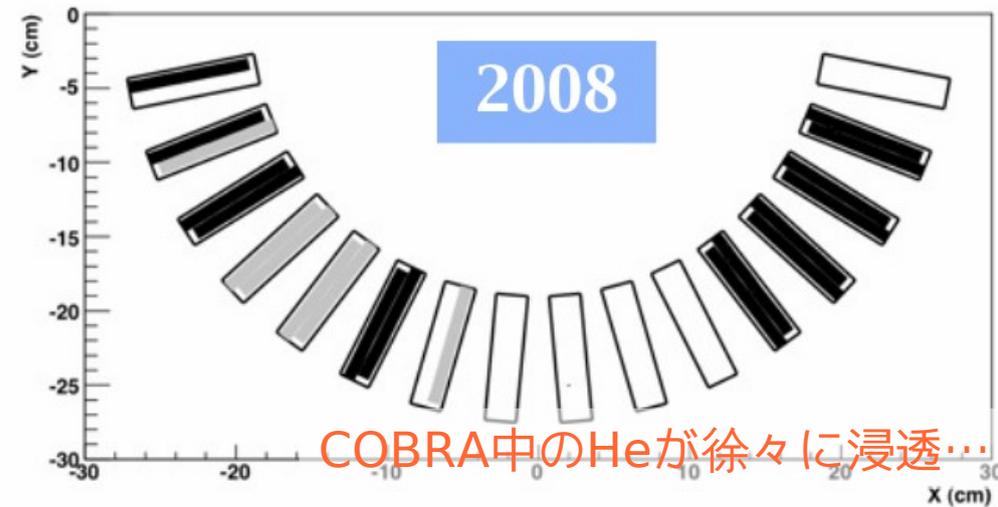
- MEG実験最初の3ヶ月データ  
Normal physics data taking :
  - **MEG run** w/ 11 mixed trigger
  - Daily **LED calibration** w/ beam ON
  - 3/week **Full calibration** sets
  - 1/week 24H **RD run**

Stopping Rate @2mA	$3.0 \times 10^7 \mu^+/\text{sec}$
Trigger rate	6.5 Hz, 9 MB/sec
Live time	$3.4 \times 10^6 \text{ sec}$ (87%)
Total number	$9.5 \times 10^{13}$

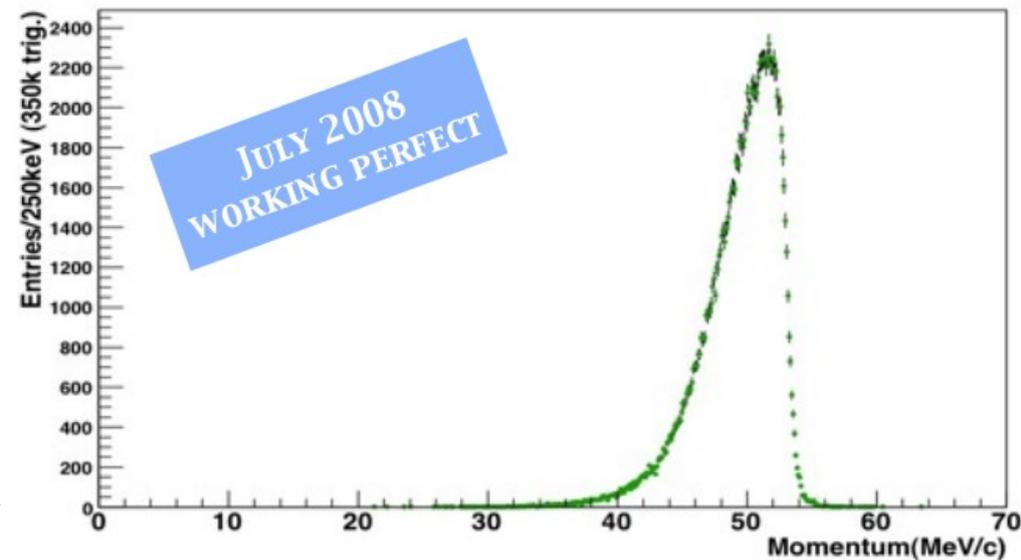


# DCH ディスチャージ問題

- DCHでディスチャージが頻繁に発生
- ディスチャージ問題は2007のエンジニアリングラン中にも発生
  - メンテナンス期間中に修復
  - 2008年初め、すべてのチェンバーが正常に運転された。
  - 問題を解決できたと思ったが...
- 2008年、数ヶ月の運転の後、
  - 徐々にディスチャージを起こすチェンバーが発生
- 最終的に、32プレーン中
  - 18プレーンのみ運転可
  - そのうち12プレーンのみ規格電圧で動作...



Reconstructed Spectrum (Michel + TC Trig.)



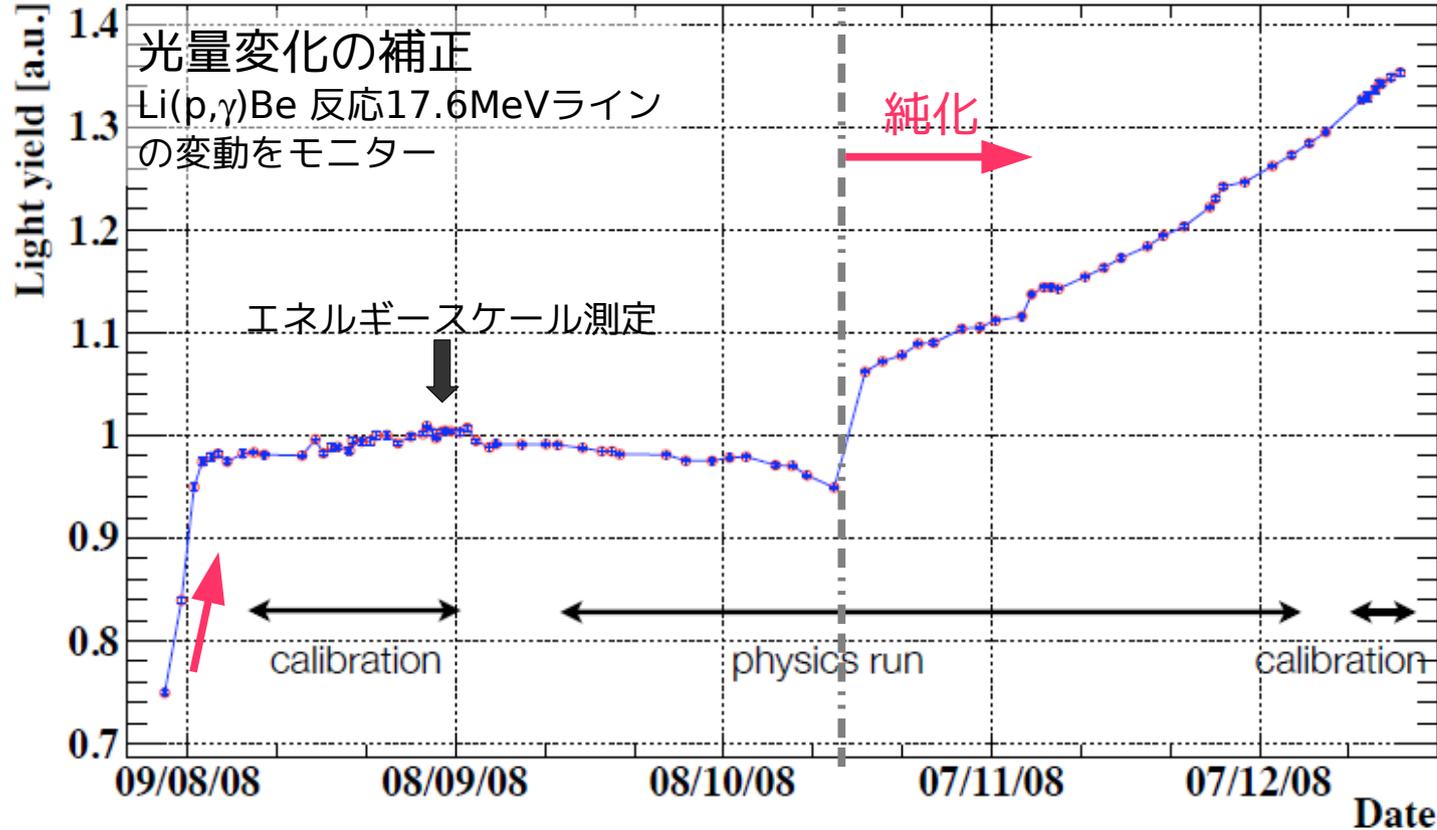
e<sup>+</sup>測定性能の低下 (測定効率・分解能)

# キセノン光量の変化

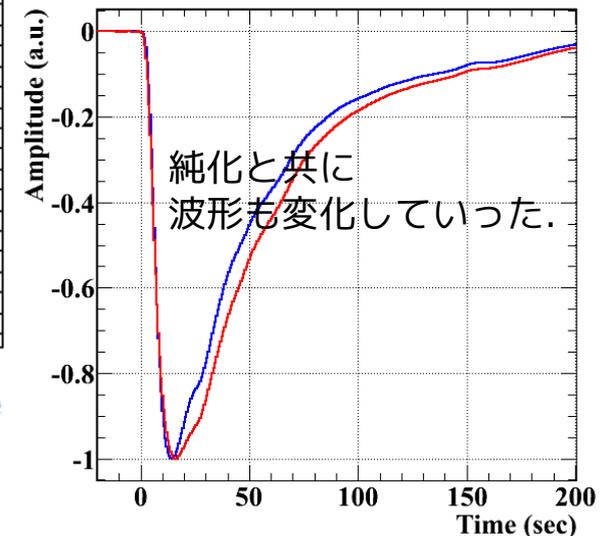
- 期待値より光量が少ない
- 純化による光量の回復
- リーク(可能性)による減少

日々の諸々のキャリブレーションデータを使って光量をモニターできることを確認

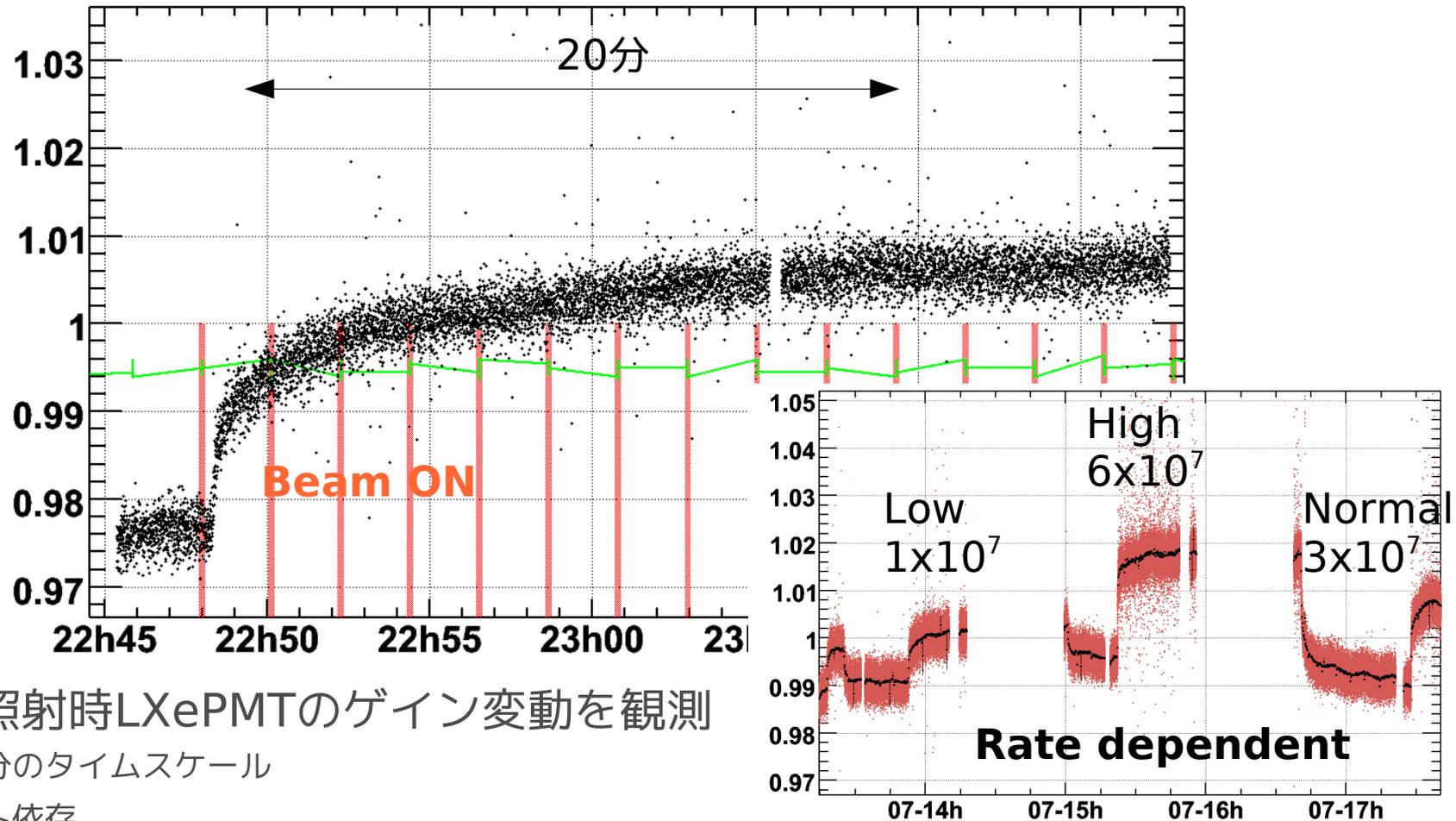
データテイキング中、純化を続けることを決断  
(気相循環: 継続的、液相循環: 断続的 (beam off時))



最終的にトータルなエネルギースケールの不定性を0.4%に抑えた。



# LXe PMT rate dependent gain shift



- ビーム照射時LXePMTのゲイン変動を観測
  - 数十分のタイムスケール
  - レイト依存
  - ただしシフト量は通常の $\mu$ ビーム中では長期に渡って安定
- LEDをビームON時に測定、ビーム情報と合わせて補正
  - 0.1%の精度で補正
  - ただし $\pi^0$ ラン中のシフト量が分からない
    - エネルギースケールの不定性

12月最後の $\pi^0$ ラン

最終的にトータルな  
エネルギースケールの  
不定性を0.4%に抑えた。

# Analysis

# Blind解析 & Likelihood解析

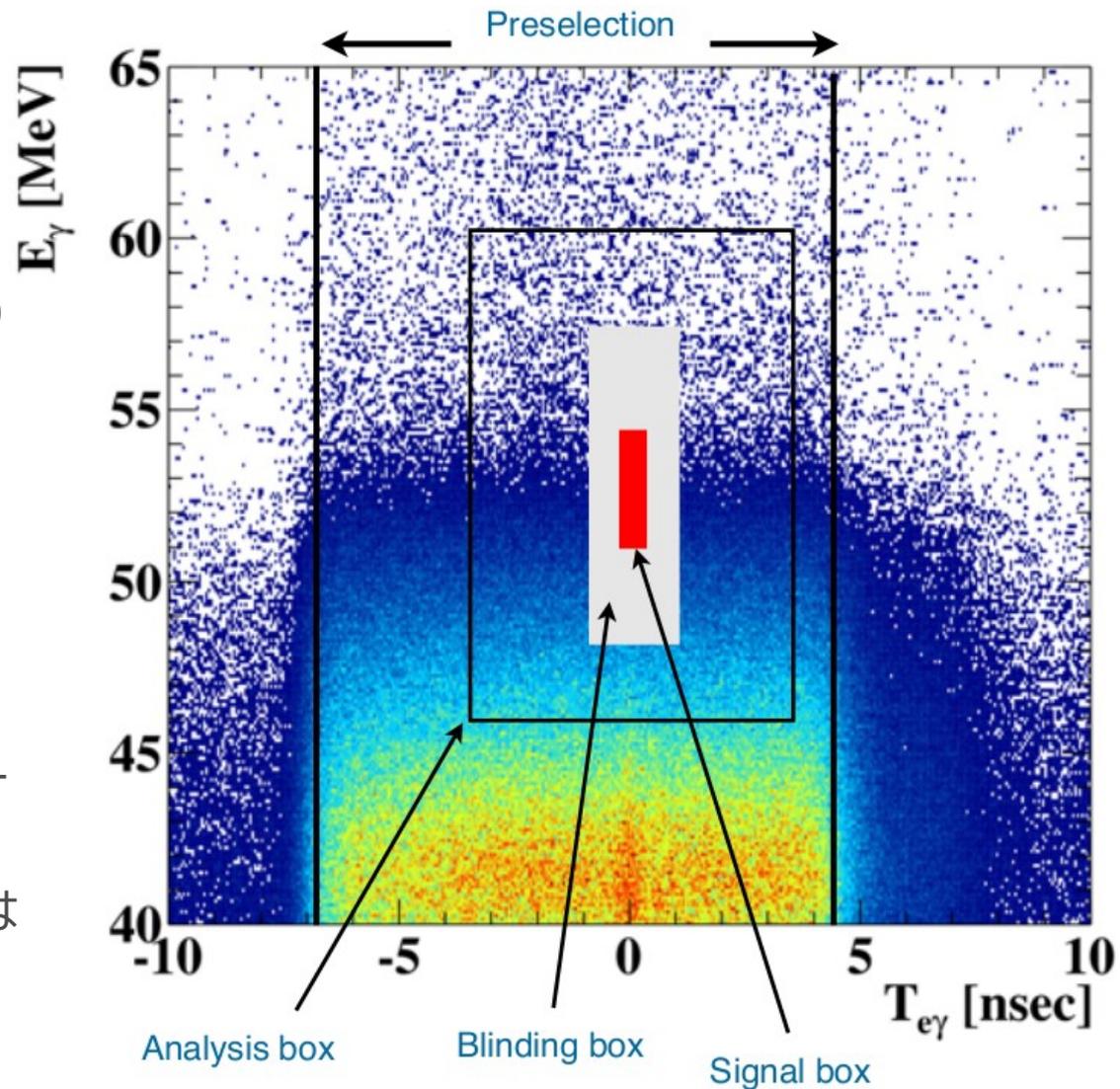
- 5つの観測変数

$$E_\gamma, E_e, t_{e\gamma}, \theta_{e\gamma}, \phi_{e\gamma}$$

検出器の応答が異なるため  
 $\theta, \phi$ を分けて扱う

- イベントタイプ(**Sig, RD, BG**)  
毎に上記5変数の**PDF**を求める
  - 情報を最大限に利用するため  
event-by-eventに求める
- ブラインド解析(Hidden Box)
  - 事前に定義されたblind box内にきたイベントは隠され、ユーザーはアクセスできない。
  - BG study, 解析の最適化などはすべてblind box外のイベントで行う。
  - Blinding parameters

- $(E_\gamma, t_{e\gamma})$



プリセレクション後のすべてのイベント

# Blind解析 & Likelihood解析

- 5つの観測変数

$$E_\gamma, E_e, t_{e\gamma}, \theta_{e\gamma}, \phi_{e\gamma}$$

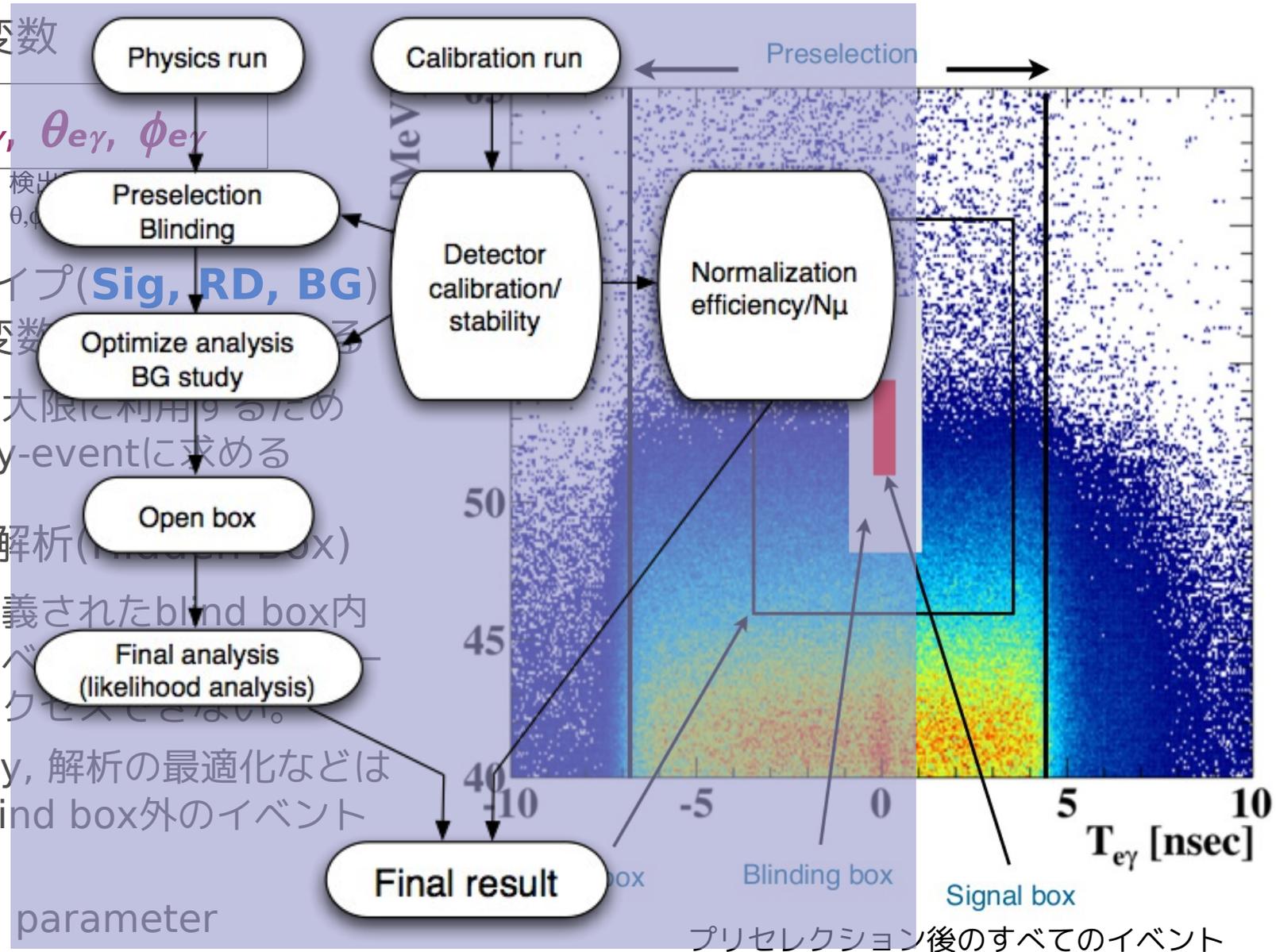
- イベントタイプ (Sig, RD, BG)  
毎に上記5変数

- 情報を最大限に利用するため event-by-eventに求める

- ブラインド解析 (Blind analysis)

- 事前に定義された blind box 内  
にきたイベントはアクセスできない。
- BG study, 解析の最適化などは  
すべて blind box 外のイベント  
で行う。
- Blinding parameter

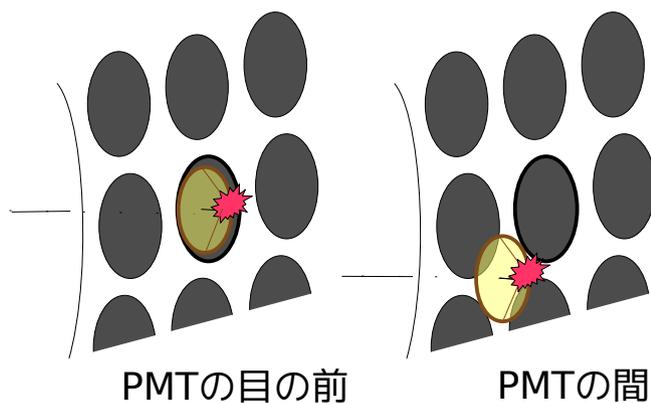
- $(E_\gamma, t_{e\gamma})$



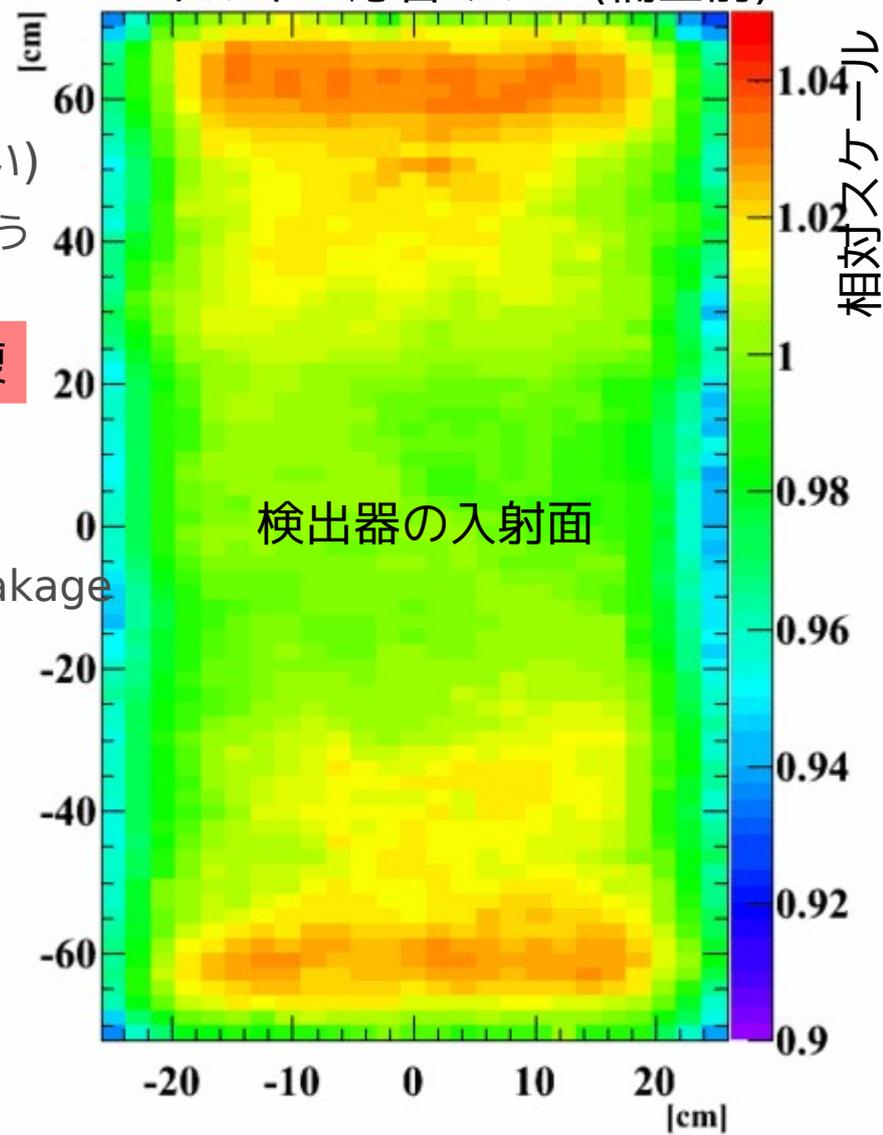
# γ線エネルギー測定 I

## 再構成方法

- PMT光量の和
- 非一様性の補正(場所による光量集率の違い)
  - Li(p,γ)Be 反応からの17.6MeVガンマを使う
    - 一様に検出器を照らす.
- 浅いイベントの回復 ε~30%回復
  - 浅いイベントは分解能が悪い
    - Shower escape
    - 光量集率の大きなバラツキPhoton leakage
    - 信号の飽和(エレキのdyn.range)
  - Efficiencyを稼ぐために使いたい.
  - 信号の飽和を波形を使って回復
  - 光量集率を立体角を計算して補正



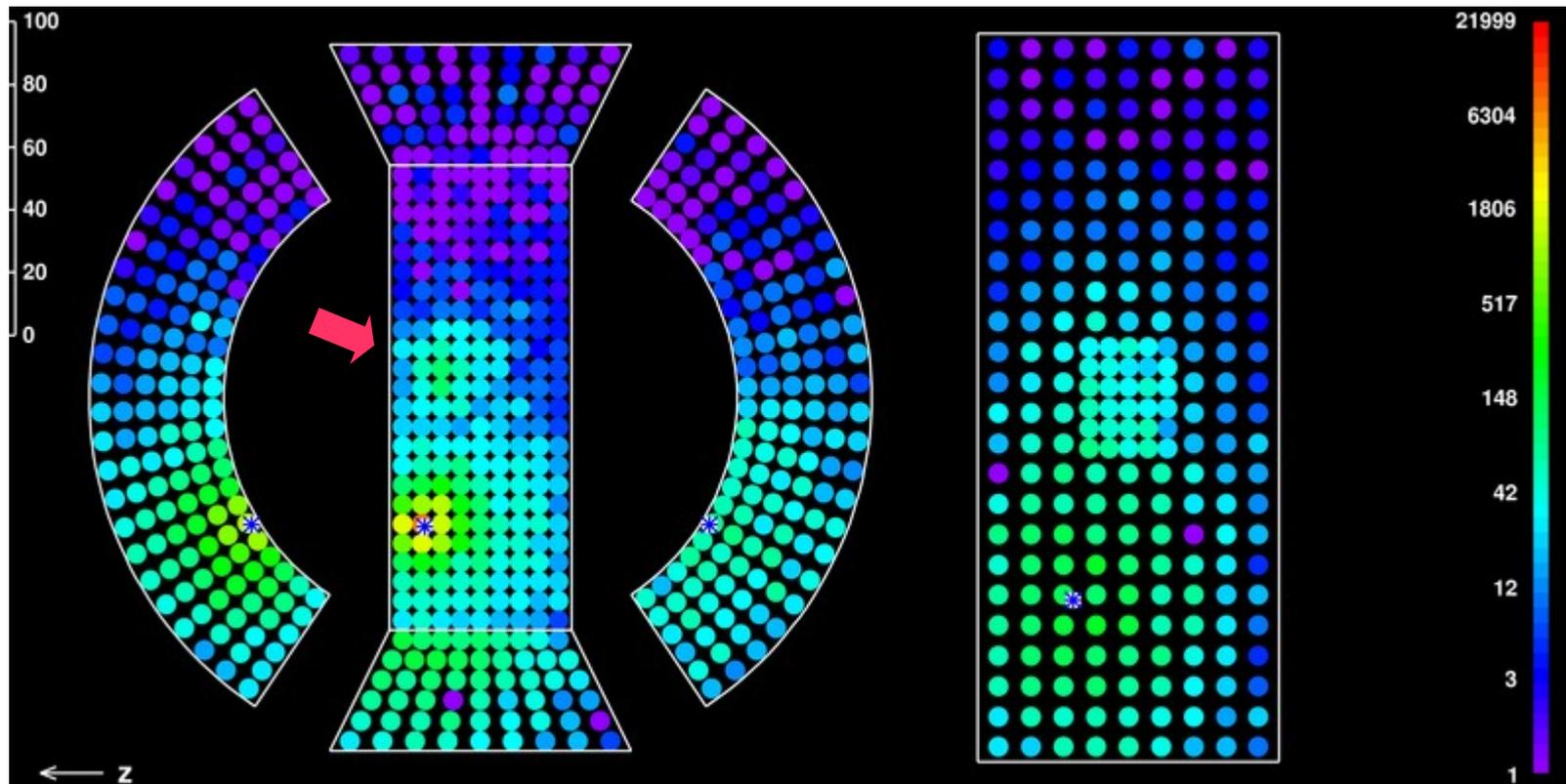
エネルギー応答マップ(補正前)



# $\gamma$ 線エネルギー測定 II

- パイルアップイベントの回復
  - パイルアップイベントを棄却せず、分離して使う.
  - efficiencyの向上

$\epsilon \sim 8\%$ 回復

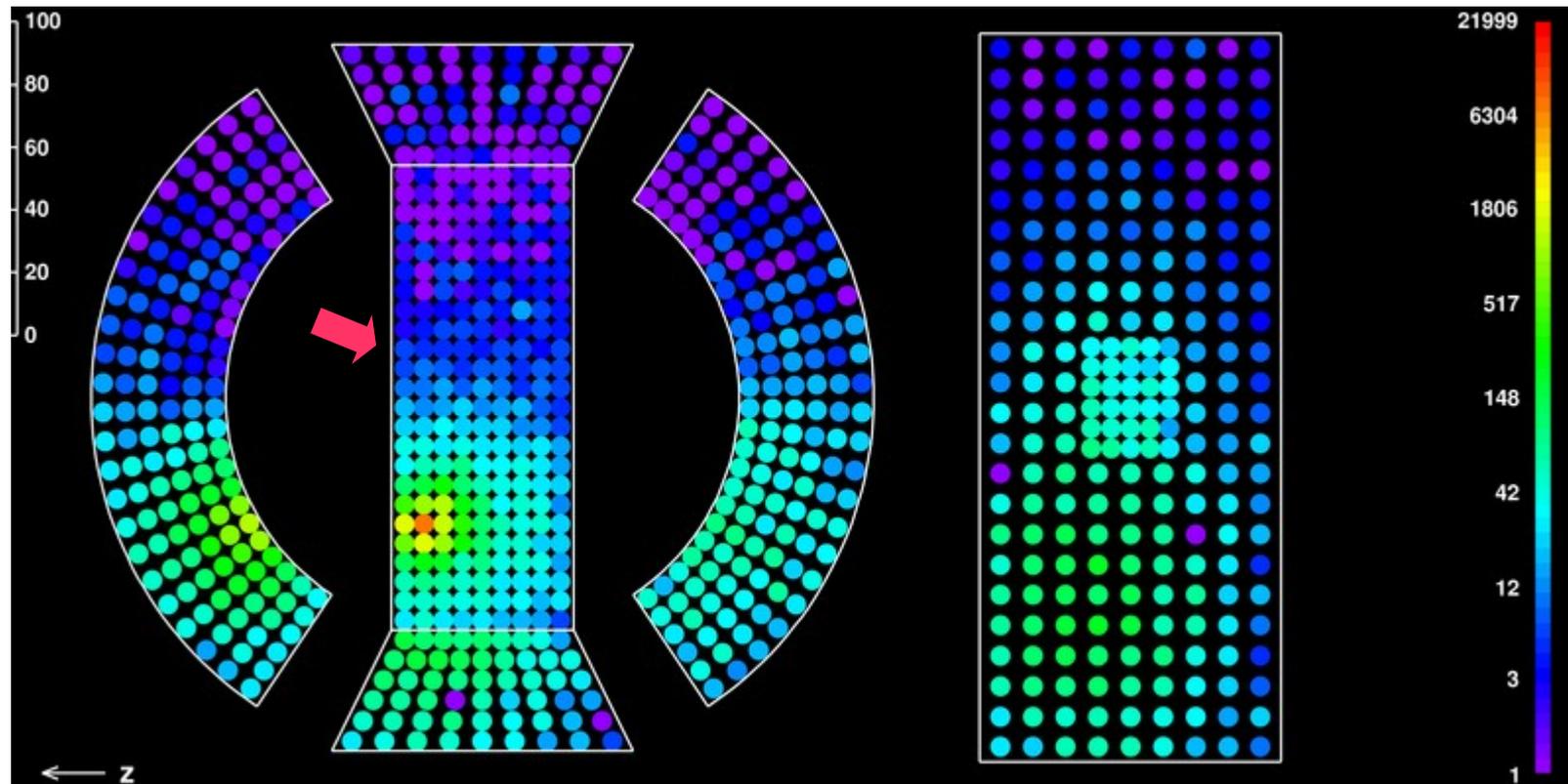


- パイルアップをID → パイルアップの影響しない領域でエネルギーを再構成 → パイルアップ領域の光量を見積もりで置き換える → 通常の再構成.

# $\gamma$ 線エネルギー測定 II

- パイルアップイベントの回復
  - パイルアップイベントを棄却せず、分離して使う.
  - efficiencyの向上

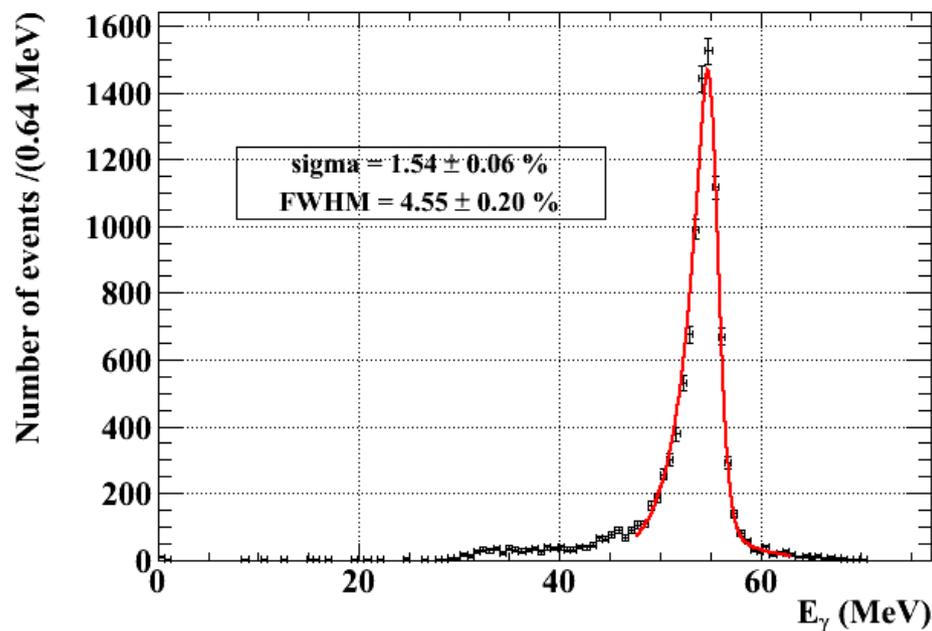
$\epsilon \sim 8\%$ 回復



- パイルアップをID → パイルアップの影響しない領域でエネルギーを再構成 → パイルアップ領域の光量を見積もりで置き換える → 通常の再構成.

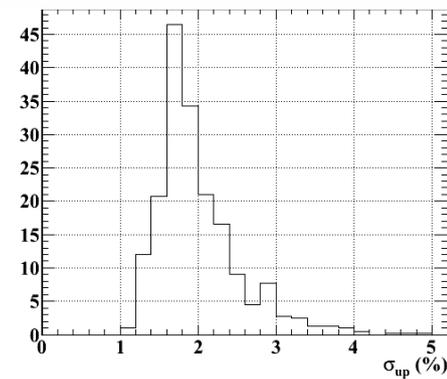
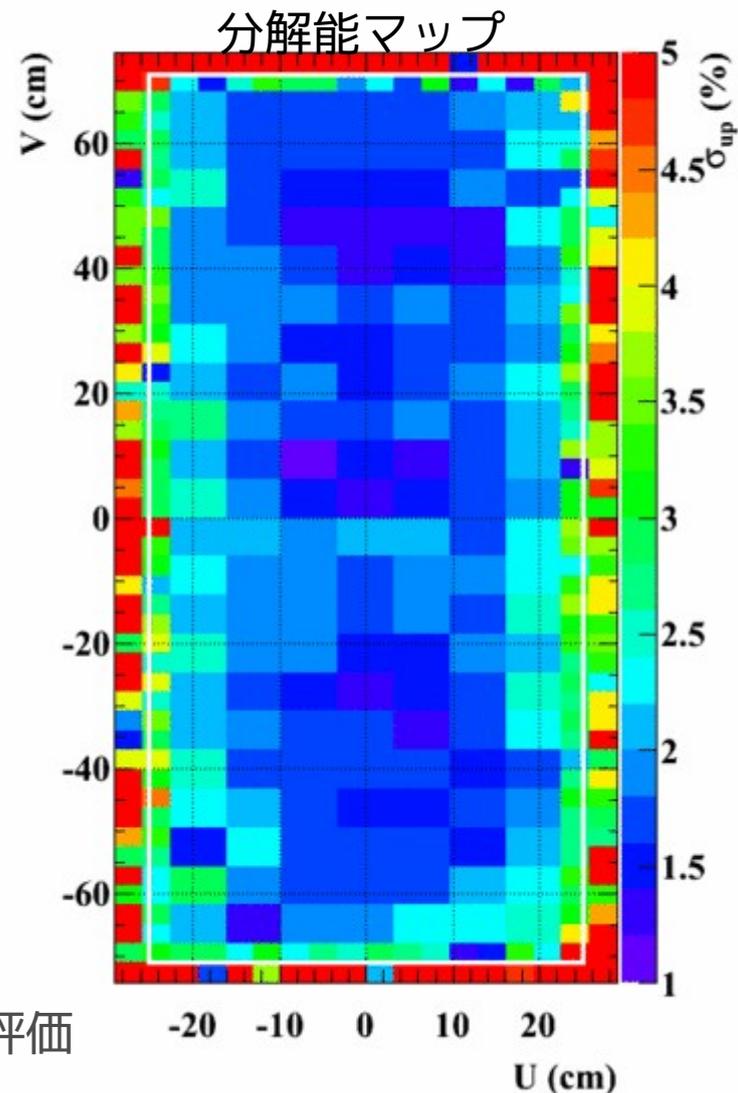
# $\gamma$ 線エネルギー測定 III

- $\pi^0$  55MeV



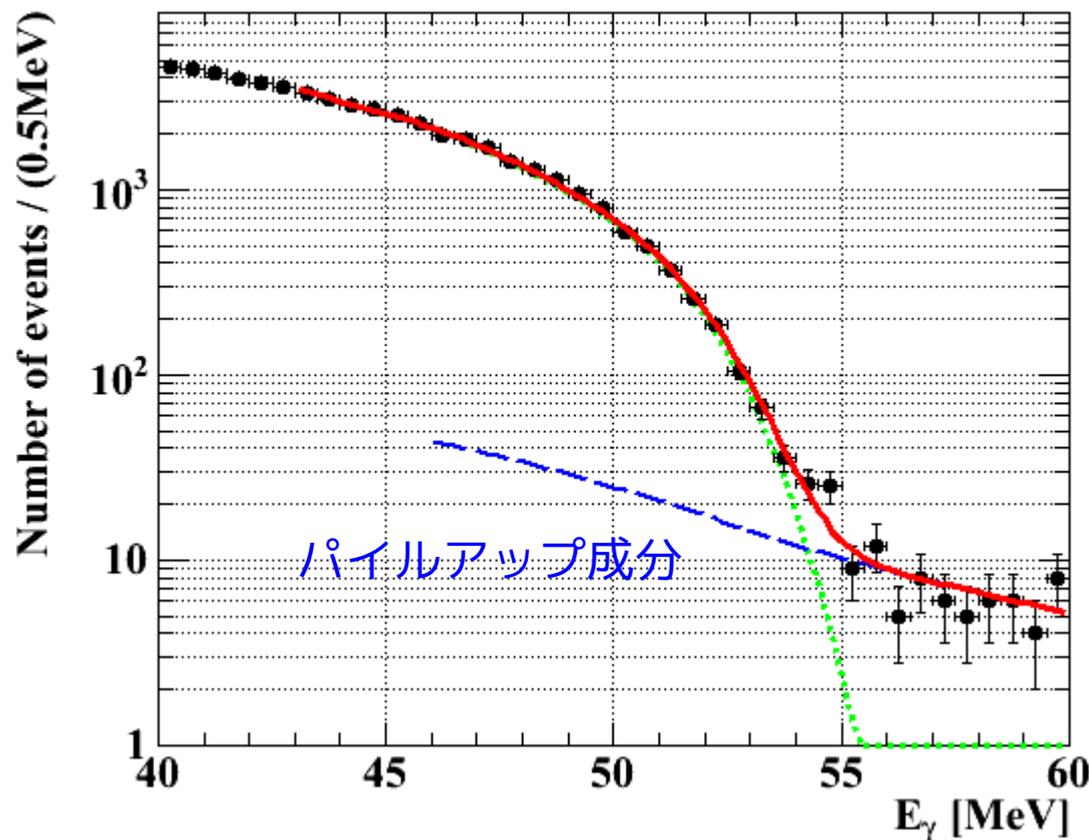
- ペDESTAL分布を分離することで分解能を正しく評価
- 入射面全体で分解能を評価しマップを作成.
- 平均分解能 (MEGラン中のイベント分布で平均)

$\sigma_{up} = 2.0\%$  for deep (>2cm),  $3.0\%$  (1~2cm),  $4.2\%$  (0~1cm)  
エネルギースケールの決定



# $\gamma$ 線エネルギー測定 IV

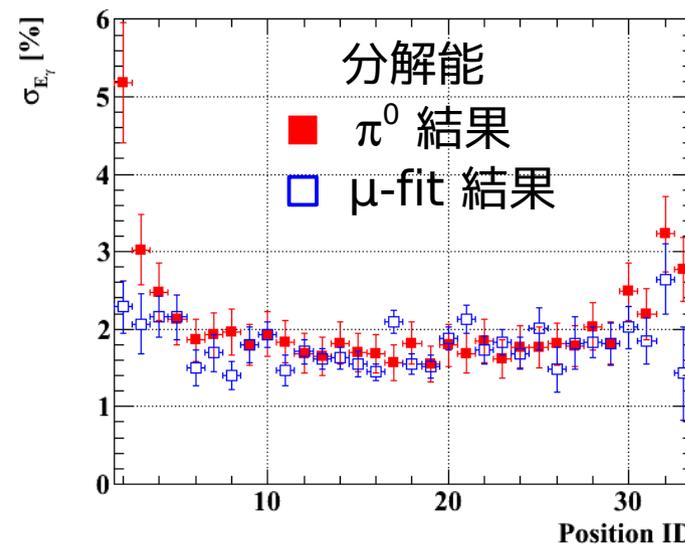
- $\mu$ 粒子崩壊からのガンマ線スペクトル自身を用いて (side-bandデータ)
  - 補正、分解能、エネルギースケールのチェック



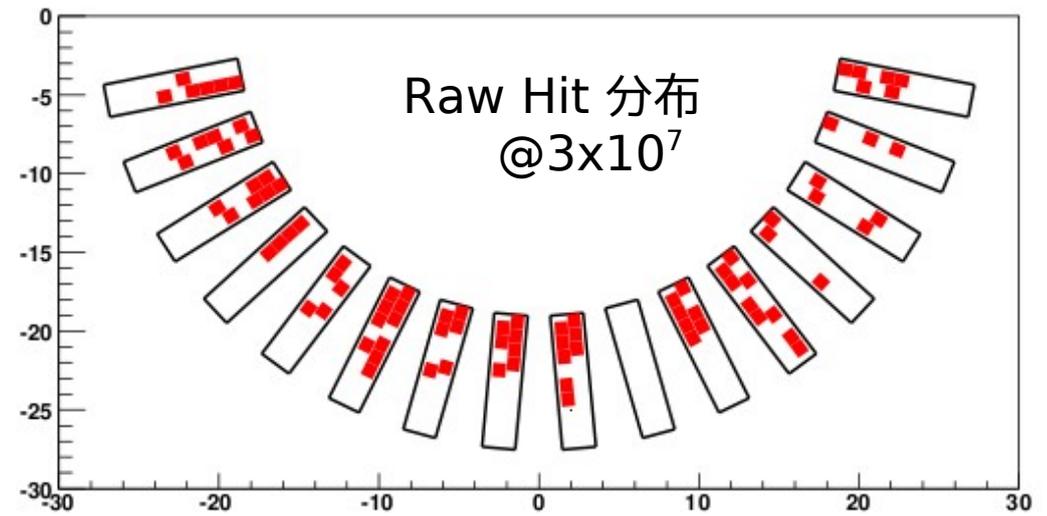
consistent

MCから予想されるスペクトルとデータをフィットする.

- パラメータ
  - エネルギースケール
  - 分解能
  - パイルアップの割合

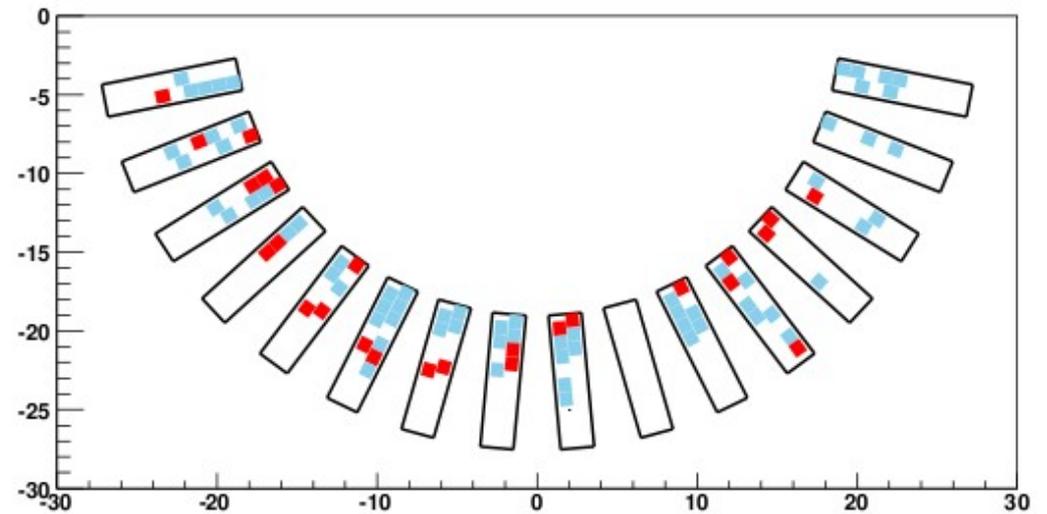


時間情報・z情報を用いて  
ヒットを選別



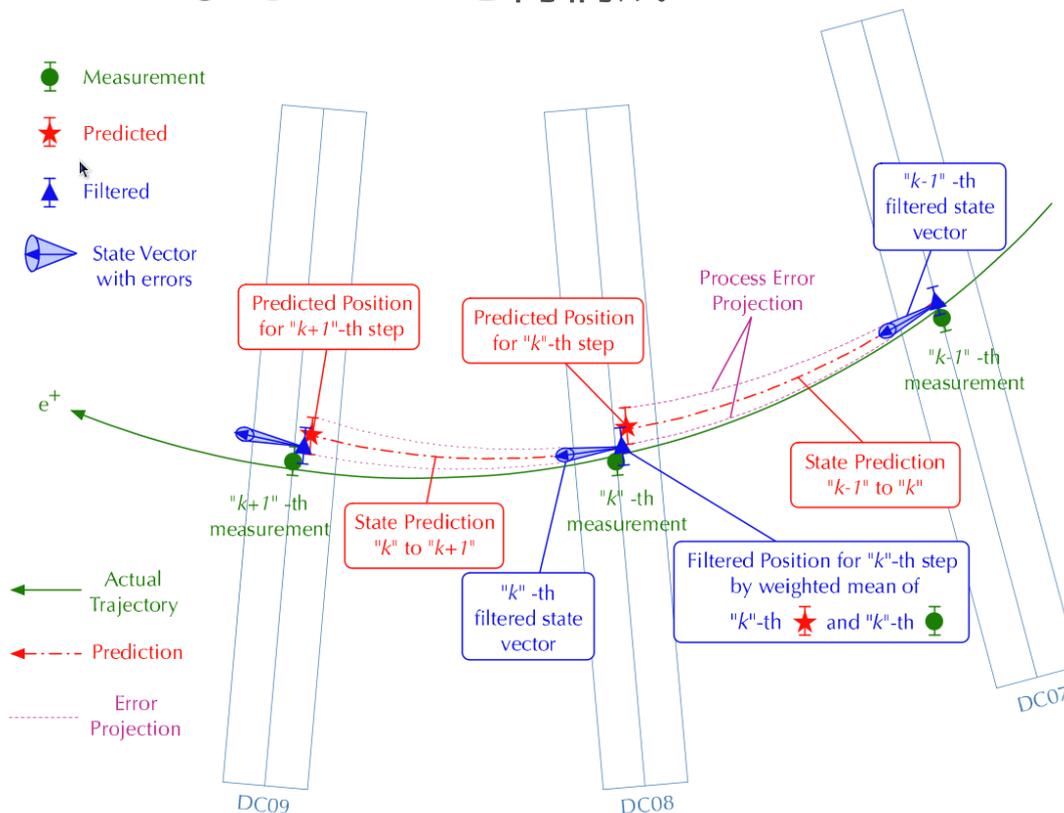
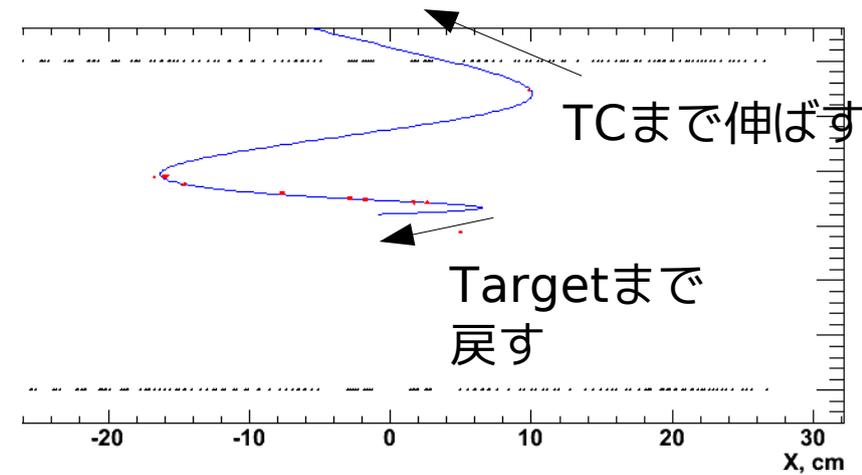
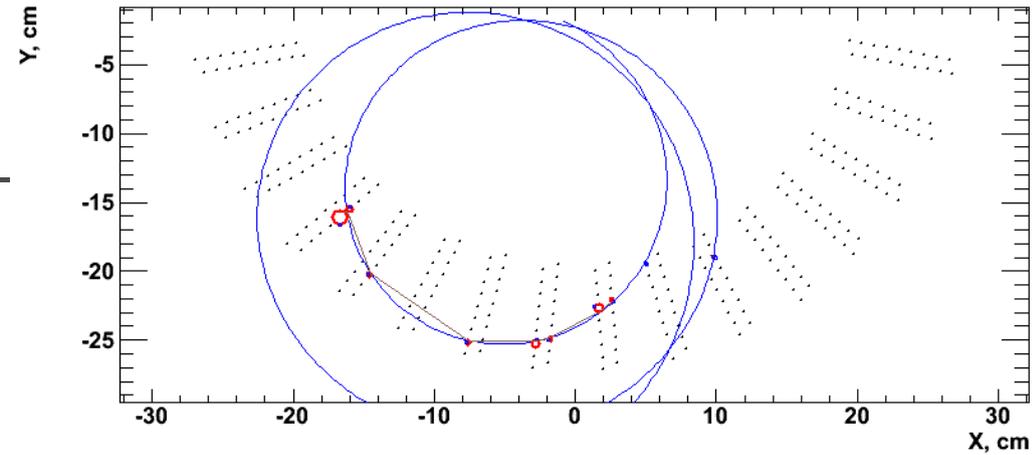
Clustering, connecting

Track候補を見つける

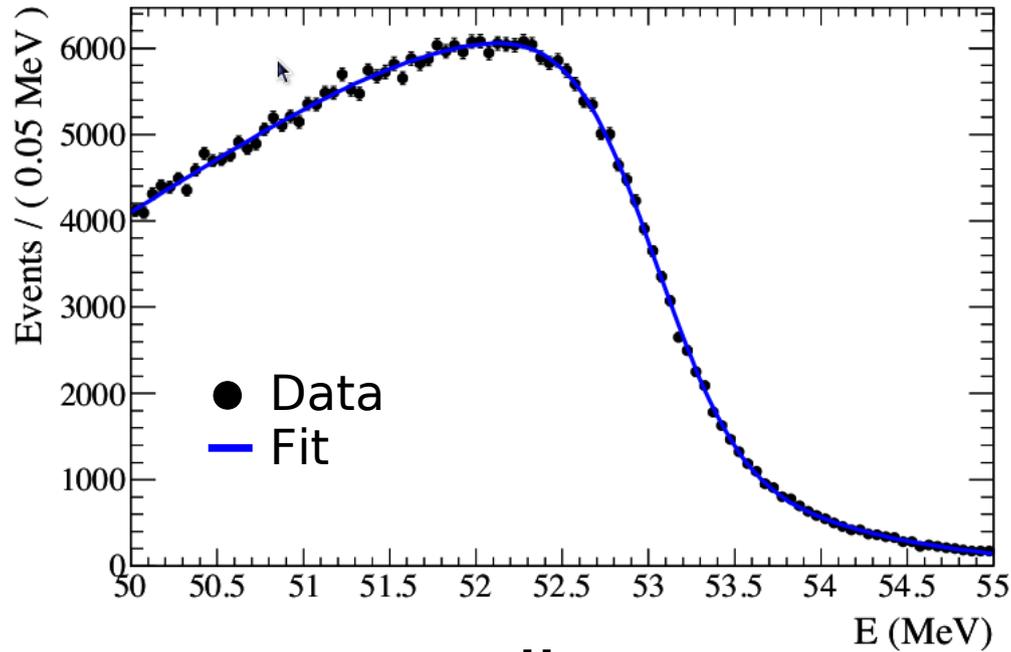


# Positron Tracking: Kalman Filter

- Kalman-filterテクニックを用いた track fitting で  $e^+$  の飛跡を決定
- ターゲット、タイミングカウンターまでトラックを外挿
- ターゲット上での **運動量・放出角・バーテックス** を再構成
- TCまでの **ToF** を再構成



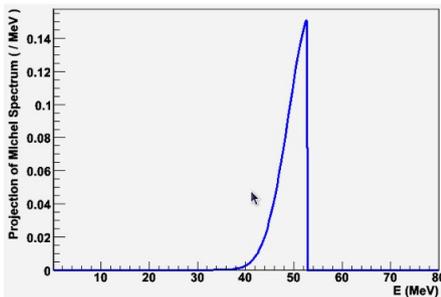
# Positron 運動量



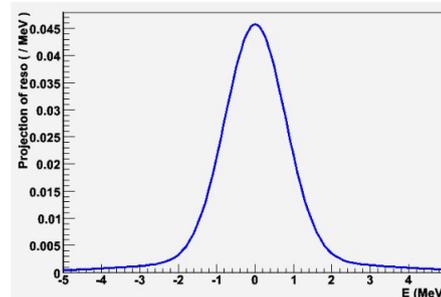
- Michelスペクトルの kinematical edge(52.8MeV) をフィットして、運動量応答(分解能)を評価する。
- 応答関数：3つのガウシアンを重ね合わせ
  - Core = 374keV (60%)
  - Tail = 1.06MeV (33%) , 2.00MeV (7%)

||

運動量応答関数

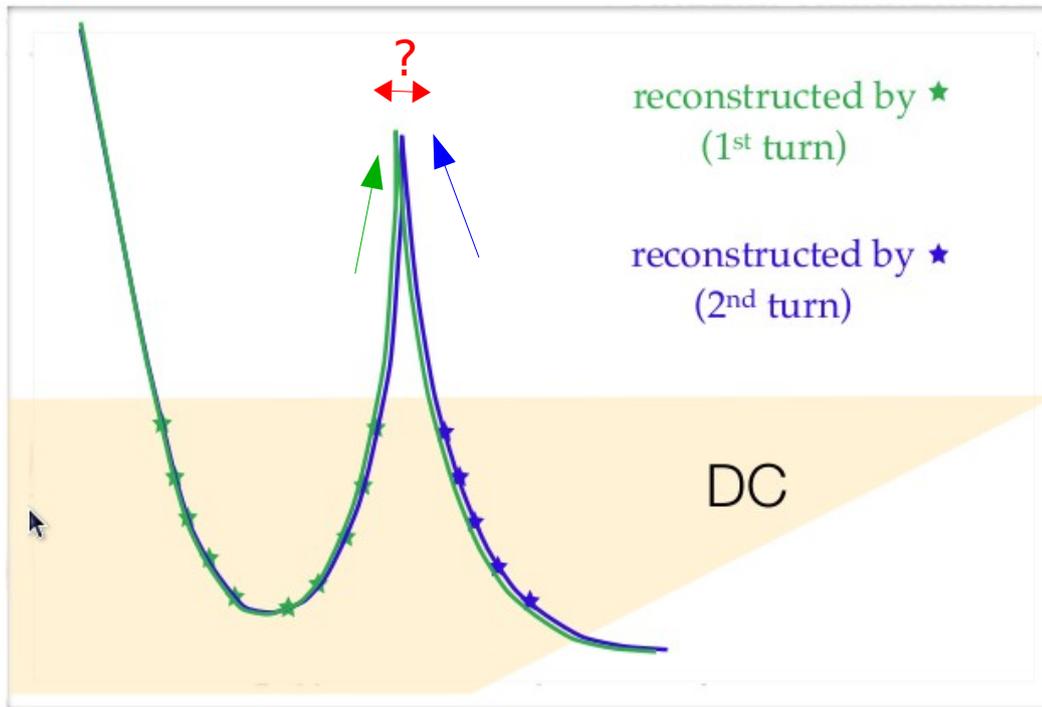


⊗



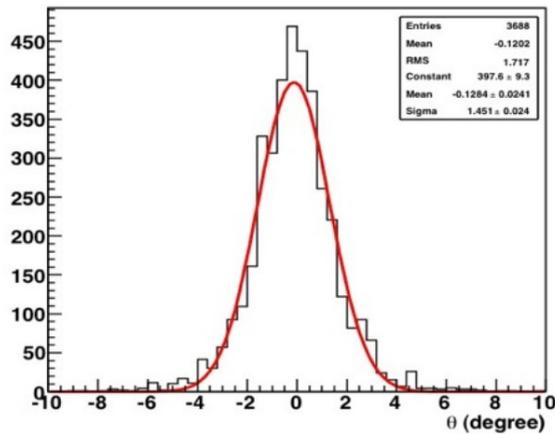
$$P(E) = (P_{\text{theo}}(E) \times P_{\text{acc}}(E)) \otimes P_{\text{res}}(E)$$

# Positron 放出角



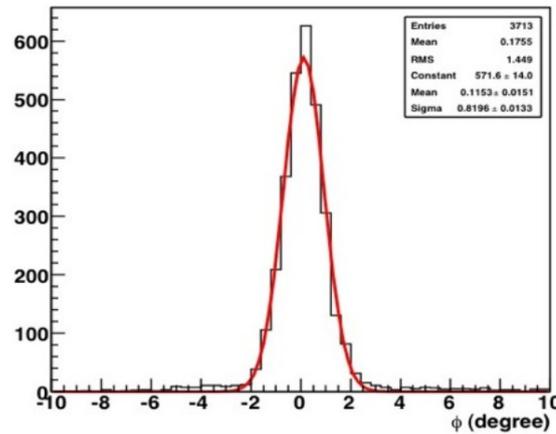
- 角度分解能は2ターンイベントを用いて評価
  - それぞれのターンのヒットのみで再構成したトラックの差を見る

Angular Resolution  $\theta$



\*  $\sigma_{\theta} = 1.45 \text{ deg.} / \sqrt{2}$   
 $\approx 18 \text{ mrad.}$

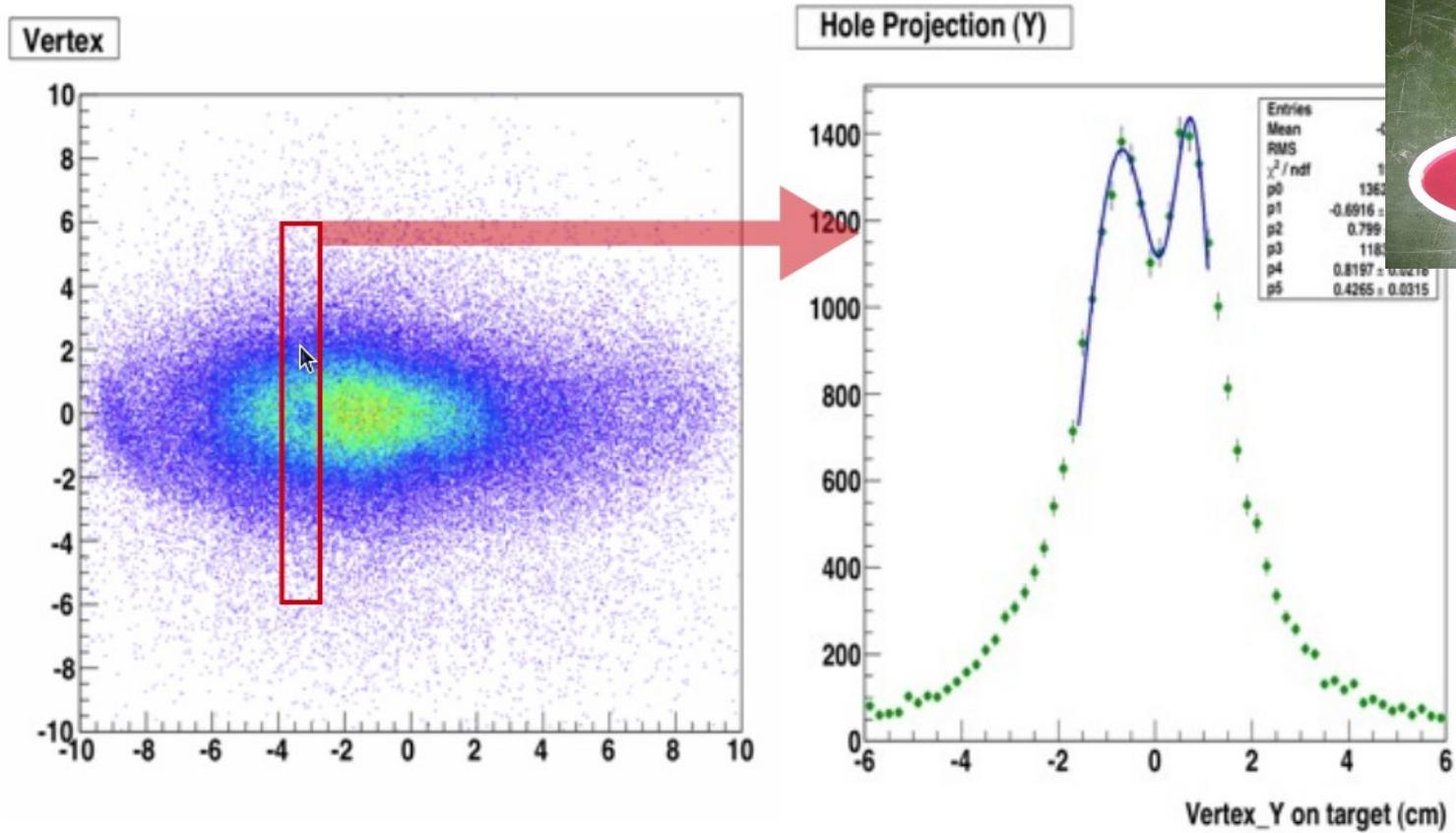
Angular Resolution  $\phi$



\*  $\sigma_{\phi} = 0.81 \text{ deg.} / \sqrt{2}$   
 $\approx 10 \text{ mrad.}$

$\sigma_{\theta} = 18 \text{ mrad}$   
 $\sigma_{\phi} = 10 \text{ mrad}$

# Muon 崩壊点



- $\mu$ 崩壊点は $e^+$ のトラックがターゲット平面と交わる点として求める
- 分解能の評価
  - ターゲット上に開けられた穴のイメージを使う
  - 2ターンイベントを使う

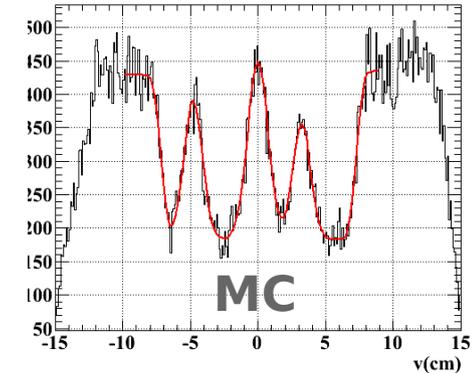
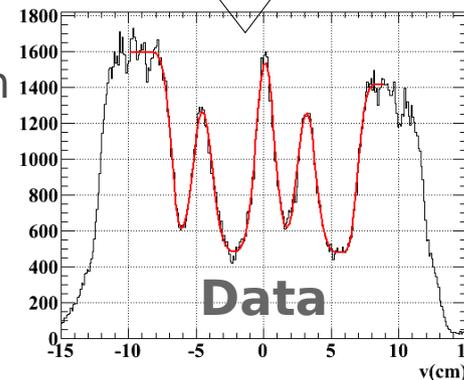
$$\sigma_x = 4.5 \text{ mm}$$
$$\sigma_y = 3.2 \text{ mm}$$

# 「線 位置測定

- 再構成方法：光量分布を立体角によりフィット.
- データを用いた分解能の評価

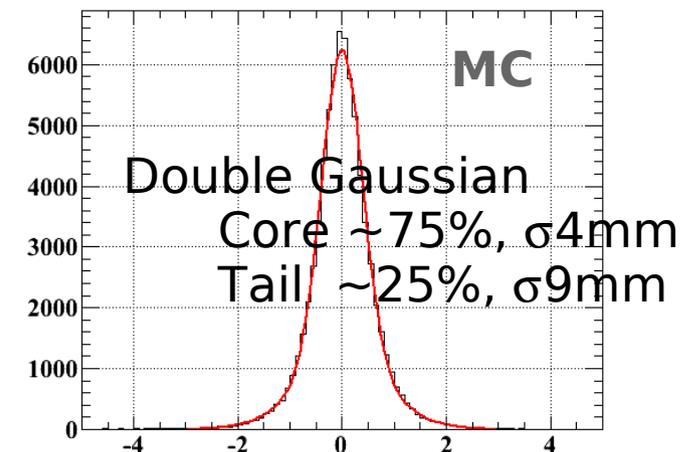
- 鉛ブロックを用いた $\pi^0$ ラン
- スリットの影から分解能、バイアスを測定
- 結果
  - $\sigma_{xy} = 4.5 \sim 5\text{mm}$ , bias(RMS) = 0.7mm
  - MCとの比較:
    - Systematicを減らす.
    - MCより1.8mm 悪い分解能
      - QE測定の誤差の影響

project

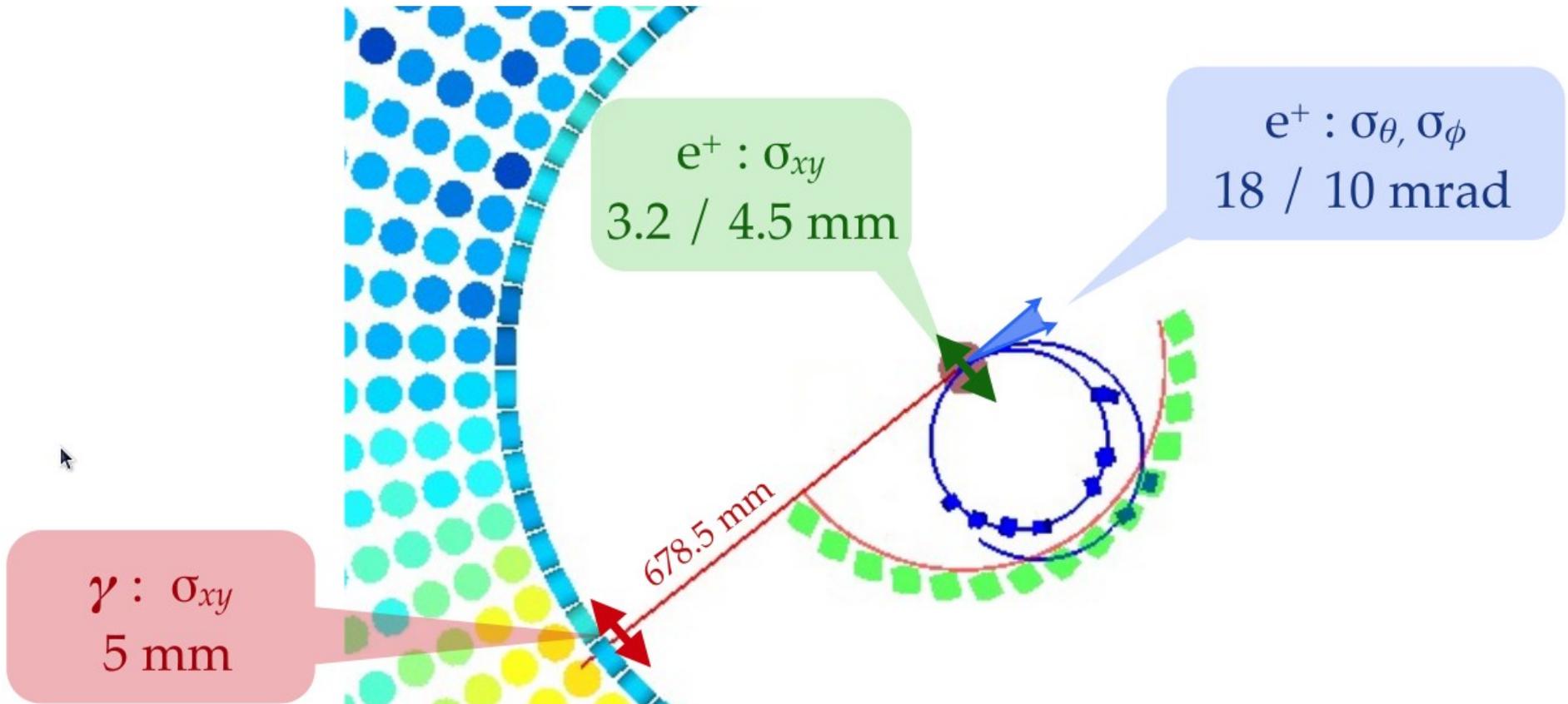


- MCを用いたレスポンスの詳細
  - dataとの違いを考慮.
  - PMTとの相対的な位置による分解能の変化
  - レスポンスの形

Double Gaussian  
 $\sigma_{xy} \sim 5\text{mm}$   
 (場所依存)



# Opening Angle



- 「線」に関しては放出角度の再構成はできない
  - $\mu$ 崩壊点と $\gamma$ 相互作用点を結んだ方向
- 統合した分解能 :  $\sigma_{\theta_{e\gamma}} = 20.6 \text{ mrad}$ ,  $\sigma_{\phi_{e\gamma}} = 13.9 \text{ mrad}$

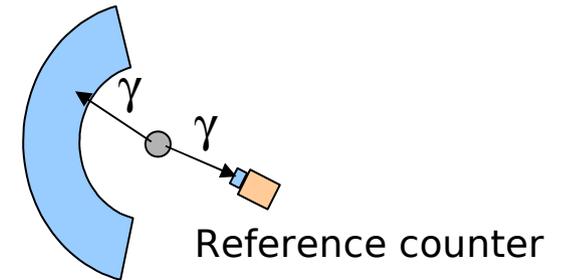
# 「線 時間測定 I」

- 再構成方法
  - PMT時間から再構成位置とPMT間の伝播時間を引いた時間.
  - たくさんのPMTの測定(~150本)を統合( $\chi^2$  fit).

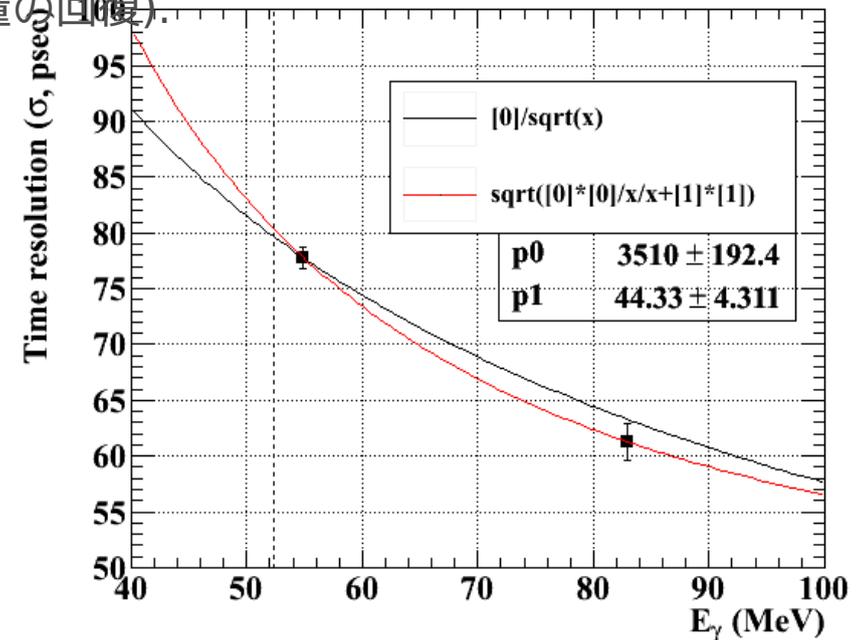
- $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$

- Refカウンターとの時間差
- 結果

- Gaussian
- $\sigma_t = 78\text{ps @}55\text{MeV}, 61\text{ps @}83\text{MeV}$
- 12月最後の測定ではより高い分解能(光量の回復).
  - $\sigma_t = 68\text{ps @}55\text{MeV}$

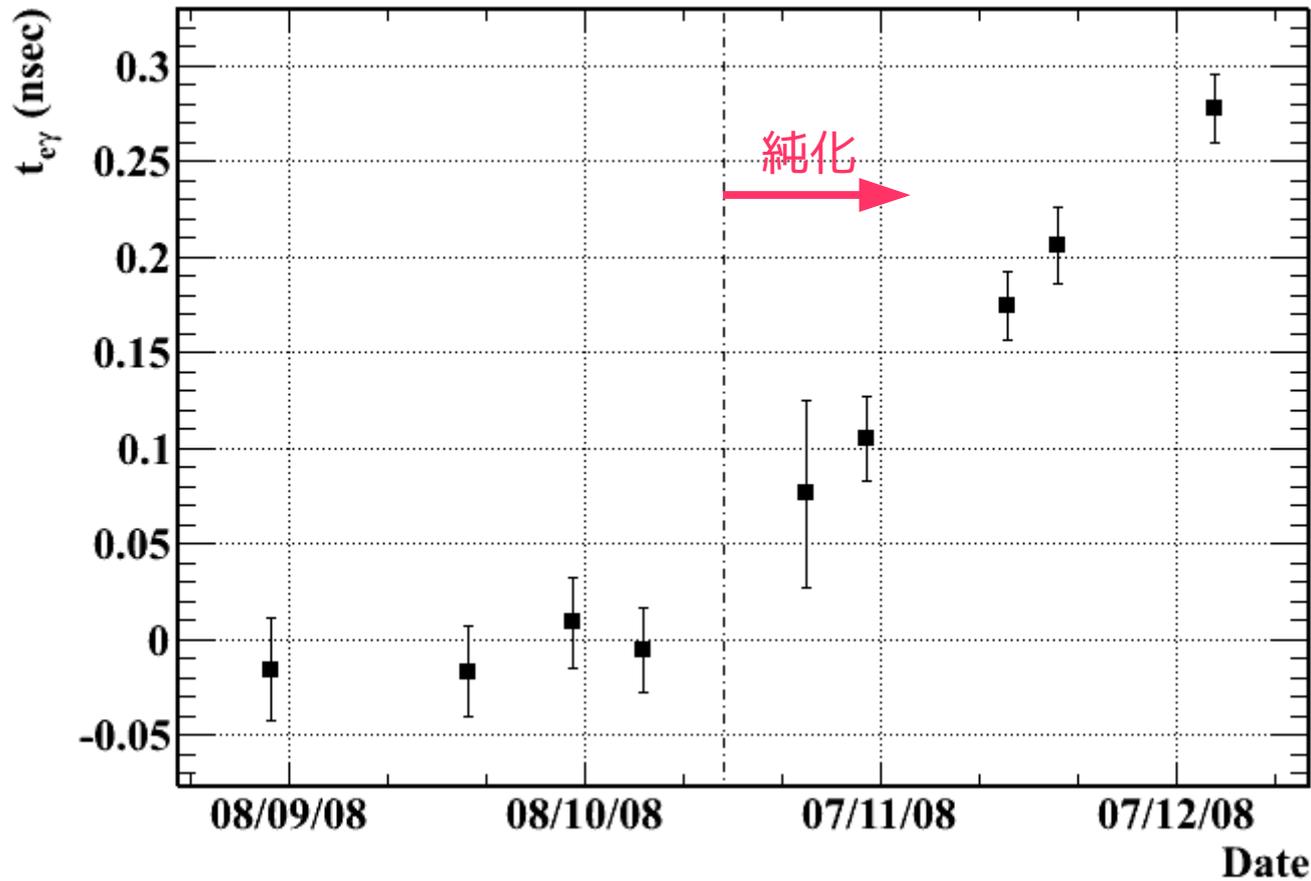


$\sigma_t = 80\text{ps @}52.8\text{MeV}$   
 (ただしこの値は直接は使われない.)  
 エネルギー依存性.

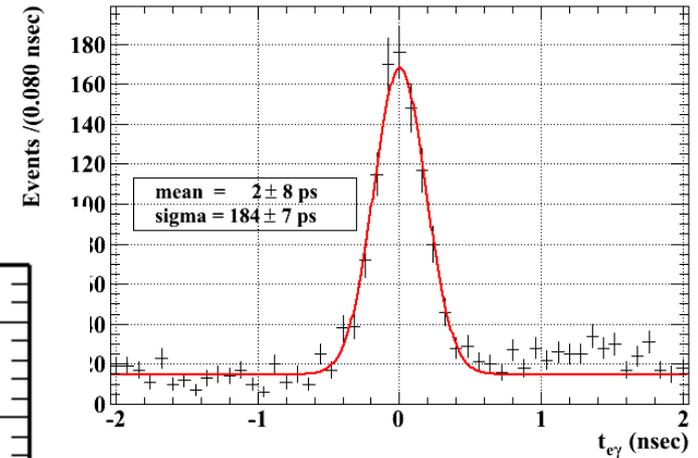


# Γ線 時間測定 II

- $\mu$  radiative decay測定での補正
  - 純度の回復に従い波形が変化
  - $t_0$ の変化を観測



- 補正後の安定性 < 20 ps



ビーム強度を落としたRDラン

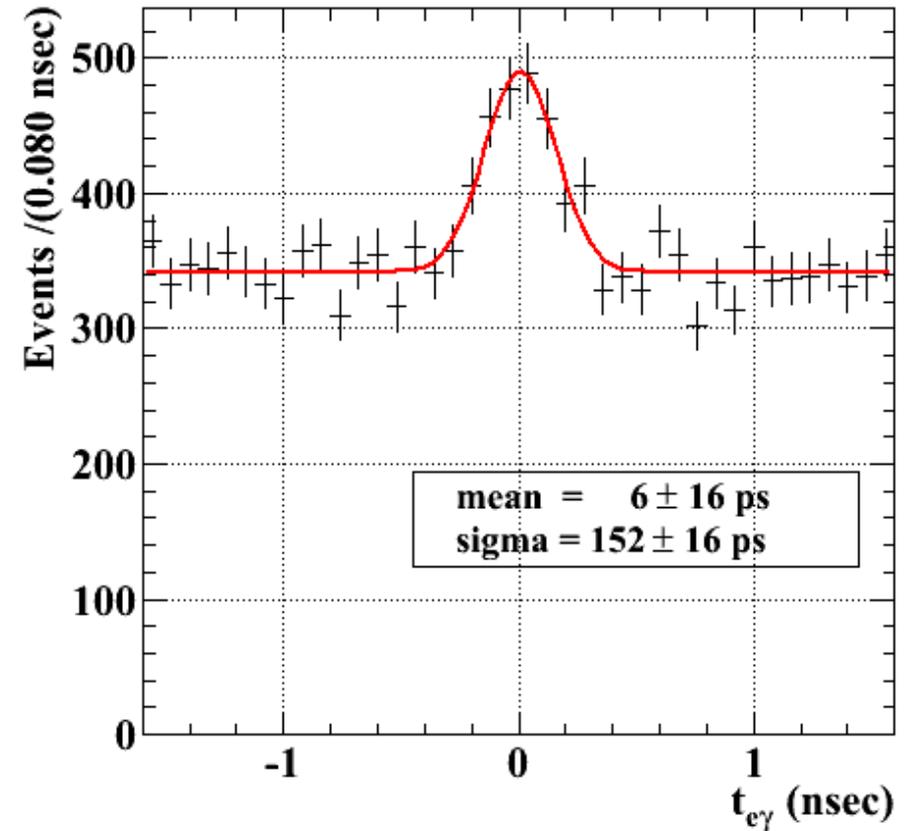
- 24時間 / 1week
- S/Nがよく精度よく  $t_0$ を求められる

純化開始後を  
1次関数で補正

# 時間分解能

- $t_{e\gamma}$  :  $\gamma$ と $e^+$ の放出時刻の時間差
  - $e^+$ 時間 : TCで測定、トラックの長さからToFを引く
  - $\gamma$ 時間 : LXe中での相互作用時刻からToFを引く
- Normal data taking中でRDのピークを観測
  - $\gamma$ 線のエネルギー依存性を補正

$$\sigma_{t_{e\gamma}} = 148 \pm 17 \text{ ps}$$

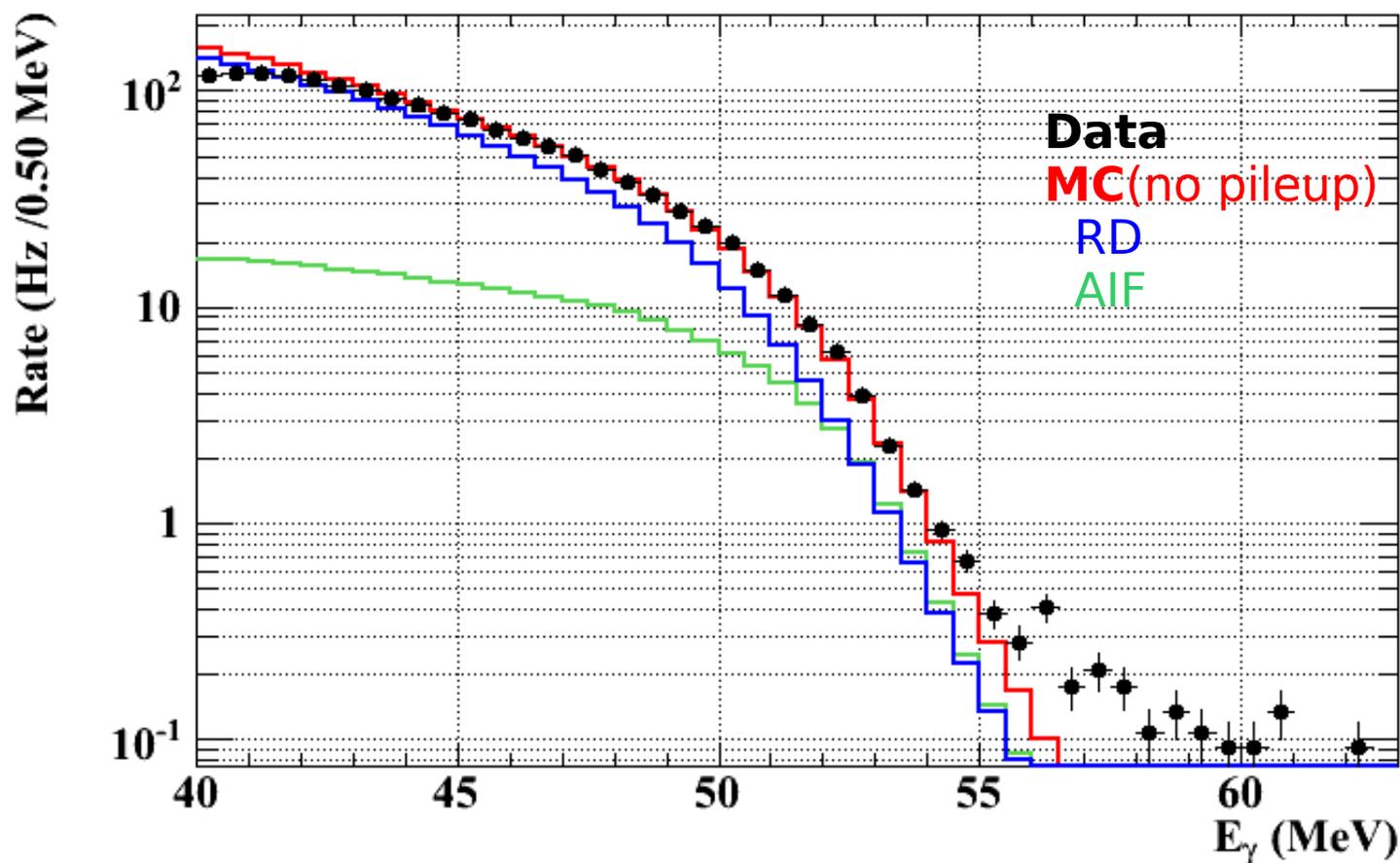


# バックグラウンド I

- バックグラウンドレイト
  - セルフトリガーデータで測定
  - MCと比較
    - レイトおよび形を再現

MC

3.7  $\mu^+$ decay/sec  
レスポンス考慮  
パイルアップ無し  
Uncert $\sim$ 7%

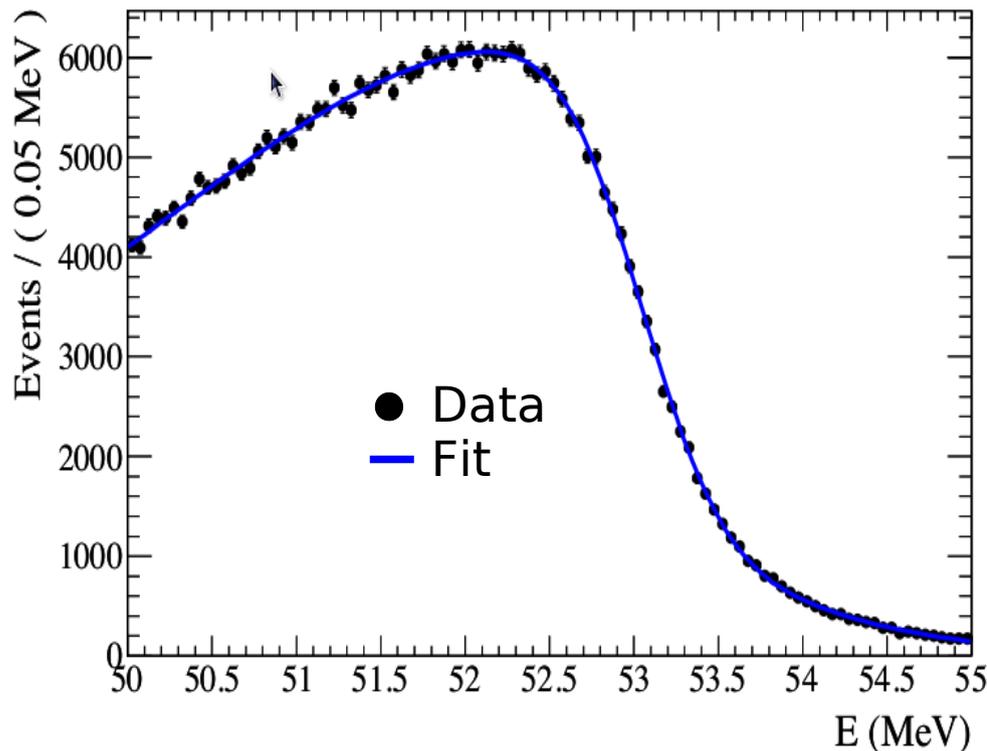


fitでは無い。

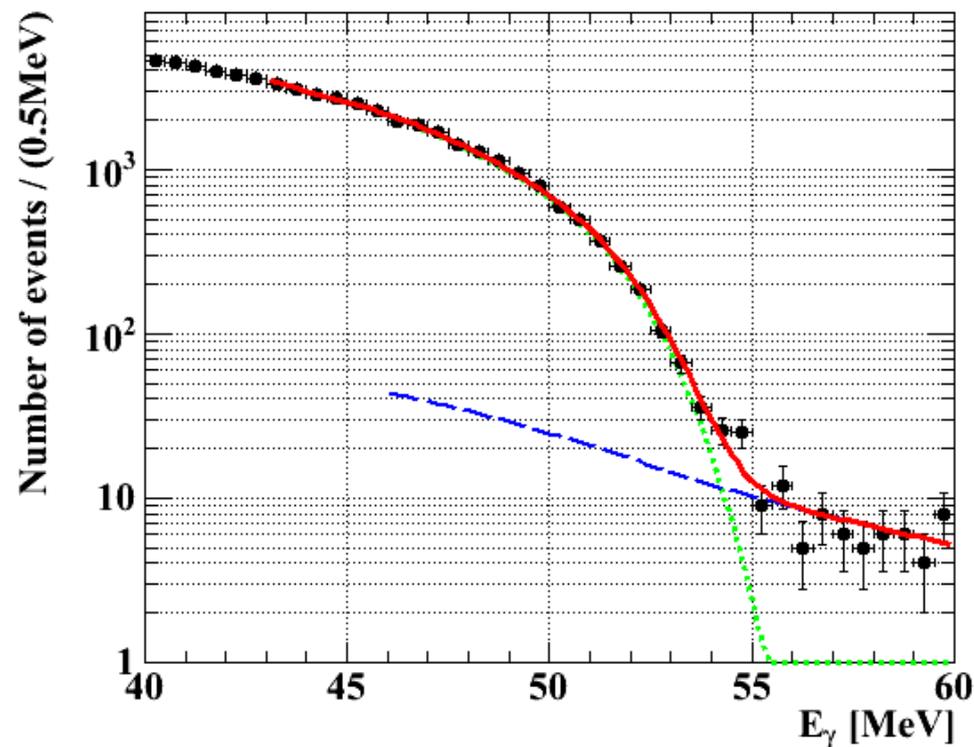
# バックグラウンド II

- バックグラウンド p.d.f. をside-bandデータを使って求める。

ポジトロン



ガンマ線

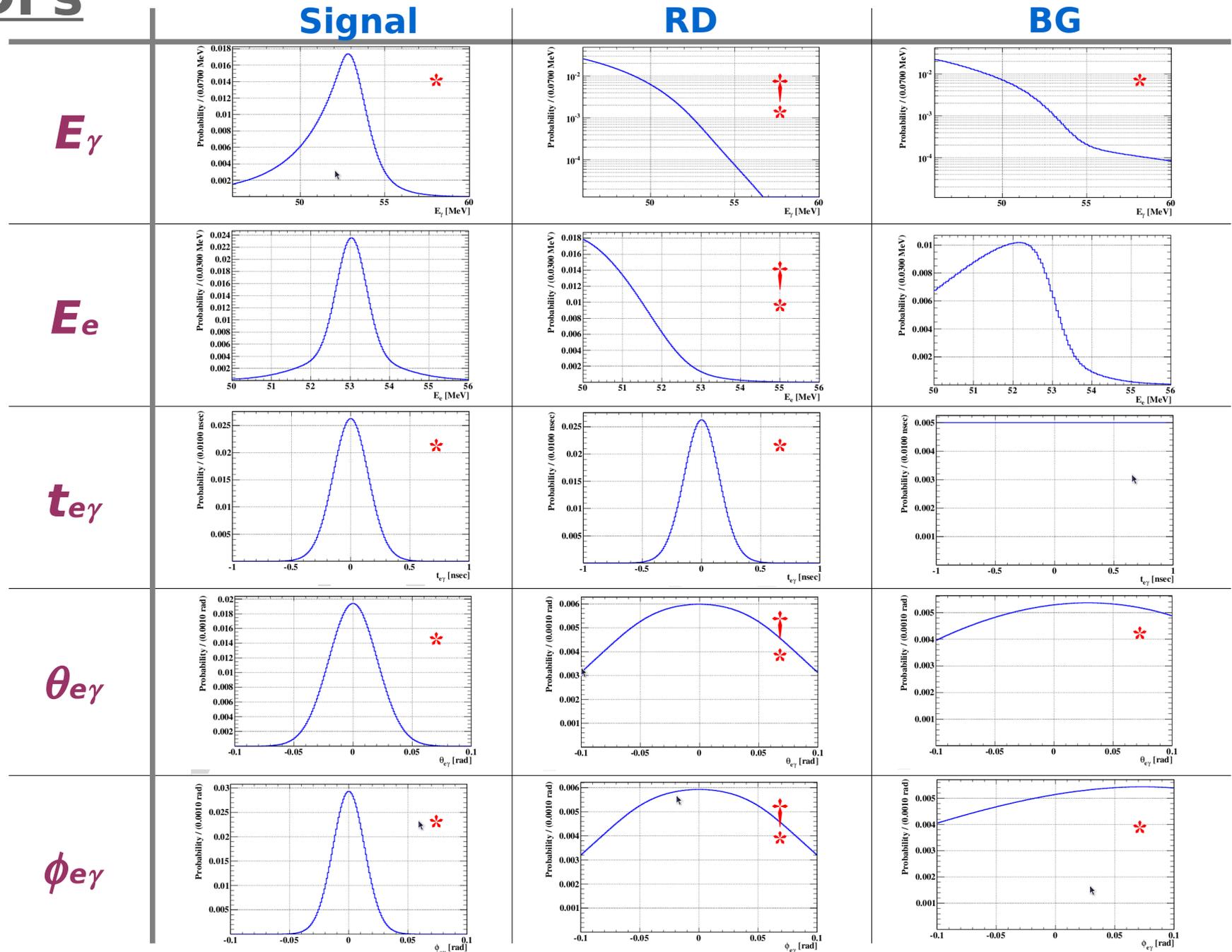


MCスペクトル $\otimes$ 応答関数でフィットした滑らかな関数をp.d.f.として使う

- 統計誤差を減らす.
- 場所毎に求める( $\gamma$ 線).

- Likelihood fitting に必要な情報がすべて揃った。

# PDFs



† correlated one another

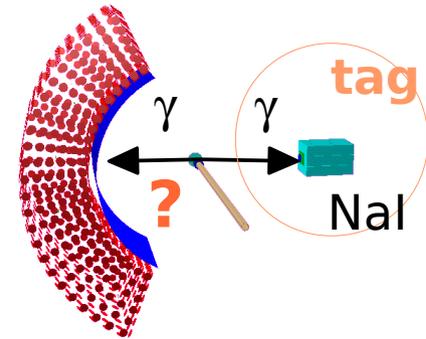
\* Event-by-event PDF (typical one is shown)

# Γ線 検出効率

## 検出効率

- $\pi^0$  2ガンマ : NaIシングルトリガー
- MC
- $\mu$ データシングルスペクトル
- 場所毎の検出効率をMCを元に求める
- $e^+$ のイベント分布と掛け合わせて
- 解析範囲  $46 < E_\gamma < 60\text{MeV}$

5%以内で一致

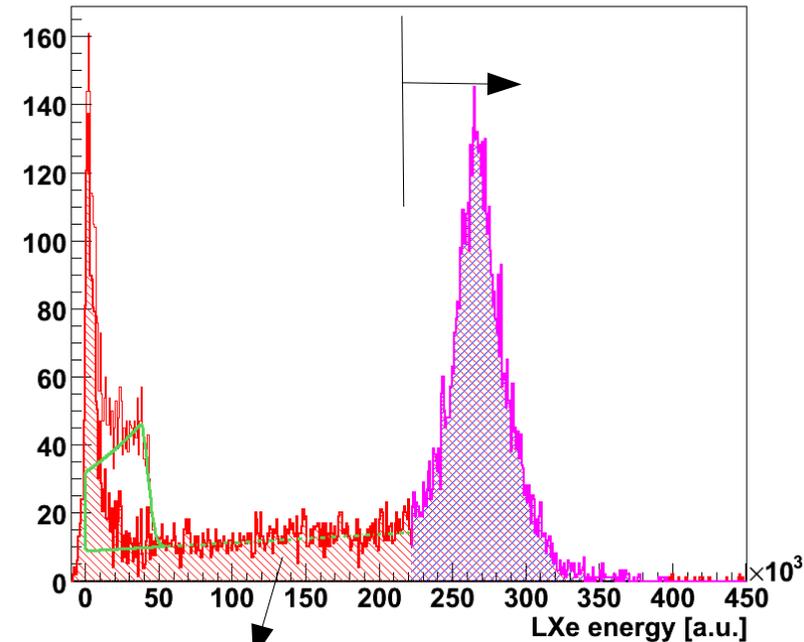


- $\epsilon_{\text{det}} = 66\%$

## 解析効率

- Inefficiency (パイルアップ、宇宙線カット)
- 9%

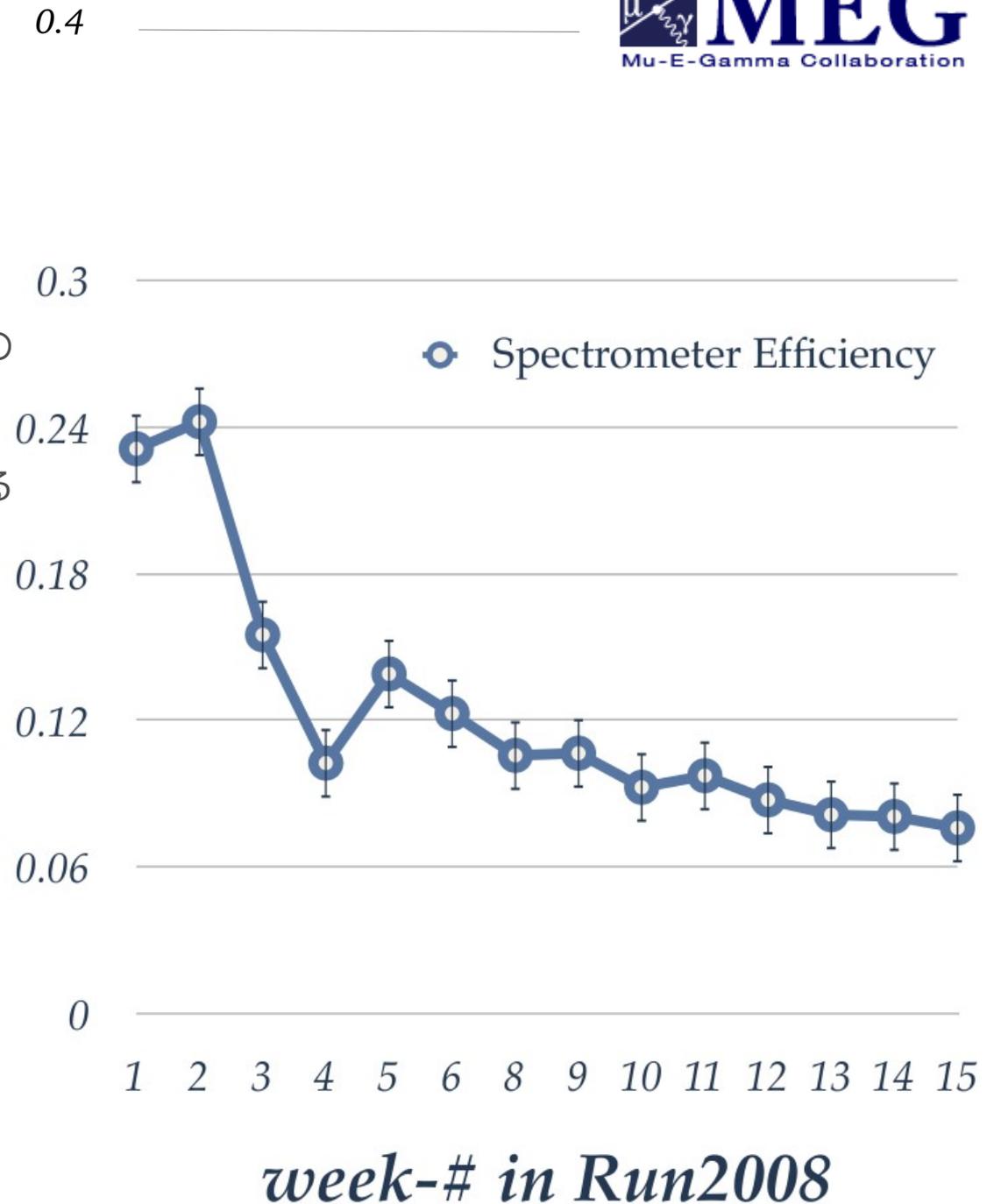
$$\epsilon_\gamma = (60 \pm 3)\%$$



有感領域前で物質と相互作用

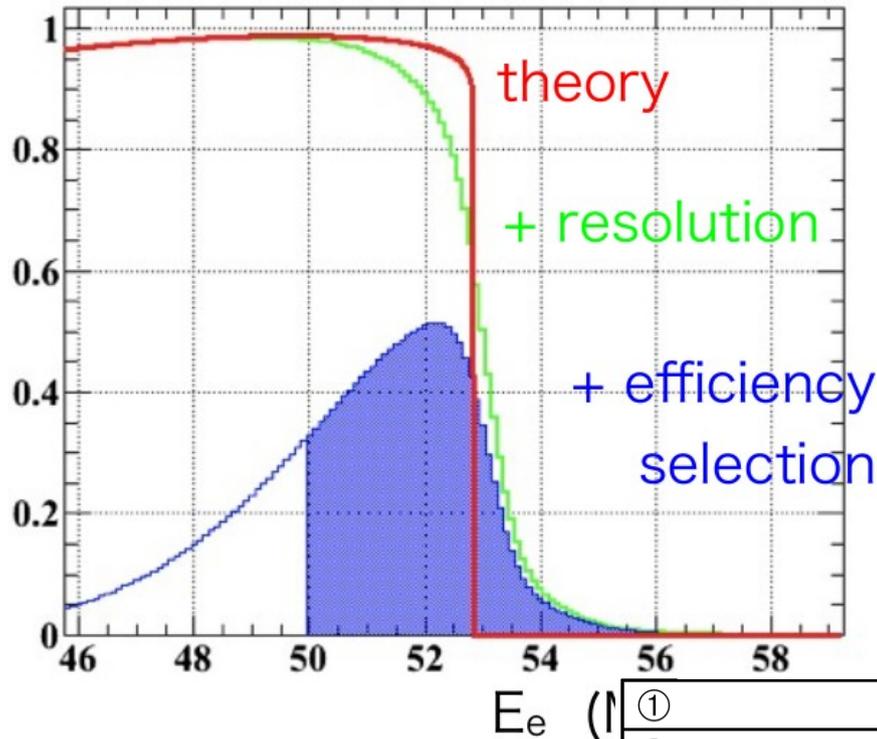
# Positron 検出効率

- $e^+$ 検出効率
  - $\epsilon_{e^+} = \epsilon_{DCH} \times A_{DCH-TC}$ 
    - $\epsilon_{DCH}$ : tracking efficiency
    - $A_{DCH-TC}$ : DCH-TC matching の確率。 $e^+$ が途中物質と相互作用して消滅または大きく方向をかえるとinefficiencyとなる
  
- $\epsilon_{e^+}$  は物理ラン中どんどん減少していった
  - DCHディスチャージ問題
  
- 期待値 (DCH full稼働時):  
 ~40% (= 80x50)



# Normalization : 観測したMichel崩壊の数

$$\text{BR}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) = \frac{N_{\text{sig}}}{N_{e\nu\bar{\nu}}} \times \frac{f_{e\nu\bar{\nu}}^E}{P} \times \frac{\epsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{trig}}}{\epsilon_{e\gamma}^{\text{trig}}} \times \frac{A_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{TC}}}{A_{e\gamma}^{\text{TC}}} \times \frac{\epsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{DC}}}{\epsilon_{e\gamma}^{\text{DC}}} \times \frac{1}{A_{e\gamma}^{\text{LXe}}} \times \frac{1}{\epsilon_{e\gamma}^{\text{LXe}}}$$



物理データと平行してとられたMichelデータ(mixed trigger)を用いて、データテイキング中に観測したMichel崩壊の数を数える。

ビームレイトと独立  
e<sup>+</sup>の検出効率の絶対値と独立  
DCHの状態の変化に影響されない

①	# of Michel trigger events	11414
②	Fraction of Michel > 50 MeV	0.101 ± 0.006
③	trigger efficiency ratio	0.66 ± 0.03
④	DC-TC matching efficiency ratio	1.11 ± 0.02
⑤	DCH reconstruction and acceptance ratio	1.02 ± 0.005
⑥	Geometrical acceptance of LXe	0.98 ± 0.005
⑦	LXe efficiency	0.61 ± 0.03
	Normalization factor	<b>2 ± 0.2 × 10<sup>-12</sup></b>

# 実験感度

- 必要な情報がそろったので実験感度を求めることができる。
- 実験感度：“この実験を何度も繰り返した時に得られる、upper limitの  
平均値 (null signalを仮定)” と定義
  - 得られたPDFを用いたtoyMC実験をたくさん行い、実際のデータに行うのとまったく同じ方法でlikelihood fitとconfidence regionの計算を行う。
  - 実際のイベントの統計的ふらつきに左右されない、実験の精度を評価する指標

MEG RUN2008 の実験感度： **$1.3 \times 10^{-11}$**

- Side-bandデータを用いた擬似解析
  - 正、負にずれた $t_{e\gamma}$ 領域(no signal)で解析を行いupper limitを算出
  - Upper limit： **$0.9 \times 10^{-11}, 2.1 \times 10^{-11}$**

cf. 現在の実験上限値はMEGAによる  $1.2 \times 10^{-11}$

# Maximum Likelihood Fit

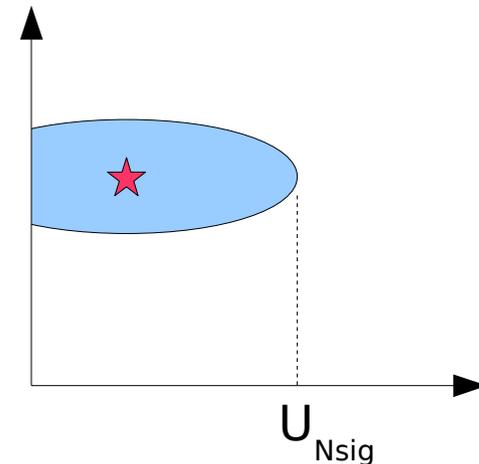
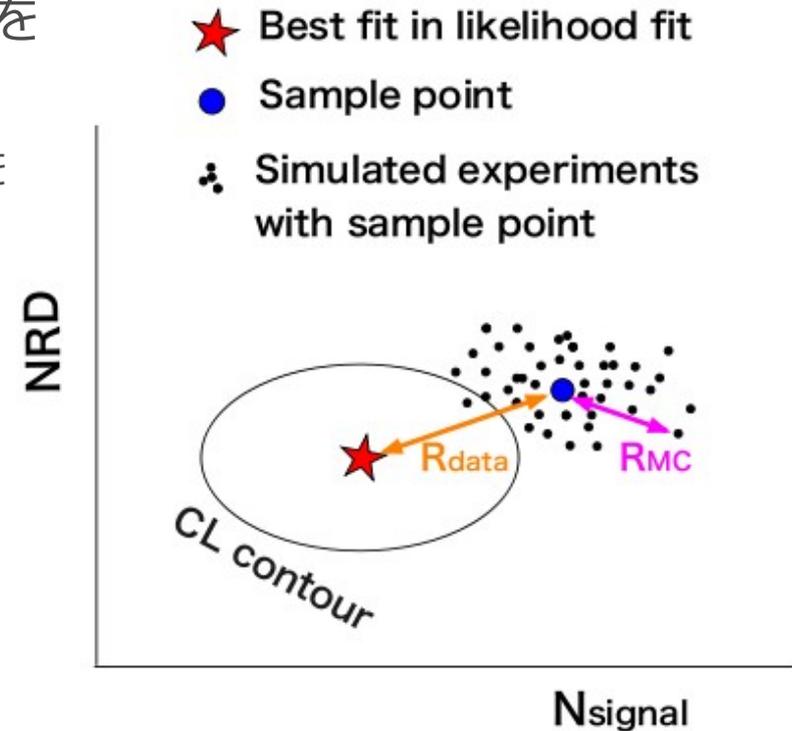
$$\mathcal{L}(N_{\text{sig}}, N_{\text{RMD}}, N_{\text{BG}})$$

$$= \frac{N^{N_{\text{obs}}} \exp^{-N}}{N_{\text{obs}}!} \prod_{i=1}^{N_{\text{obs}}} \left[ \frac{N_{\text{sig}}}{N} S + \frac{N_{\text{RMD}}}{N} R + \frac{N_{\text{BG}}}{N} B \right]$$

- Unbinned extended maximum likelihood fit
  - 5つの観測変数  $(\mathbf{E}_\gamma, \mathbf{E}_e, \mathbf{t}_{e\gamma}, \boldsymbol{\theta}_{e\gamma}, \boldsymbol{\phi}_{e\gamma}) = \mathbf{X}$
  - イベントタイプ(**Sig, RD, BG**)毎のPDF
    - $\mathbf{S} = \mathbf{P}(\mathbf{X}|\text{Sig}), \mathbf{R} = \mathbf{P}(\mathbf{X}|\text{RD}), \mathbf{B} = \mathbf{P}(\mathbf{X}|\text{BG})$
    - 情報を最大限に利用するため event-by-event PDF
  - フィットの変数はNsig, NRD, NBG

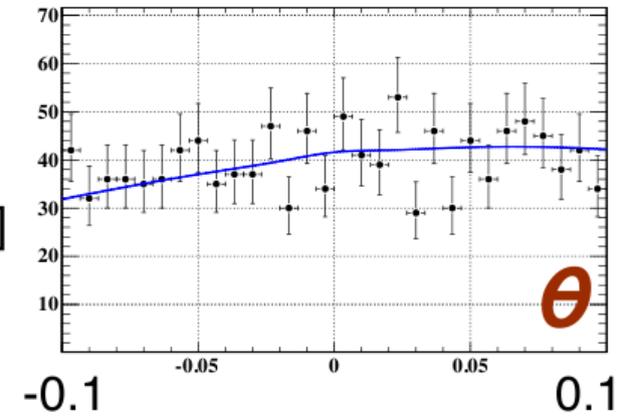
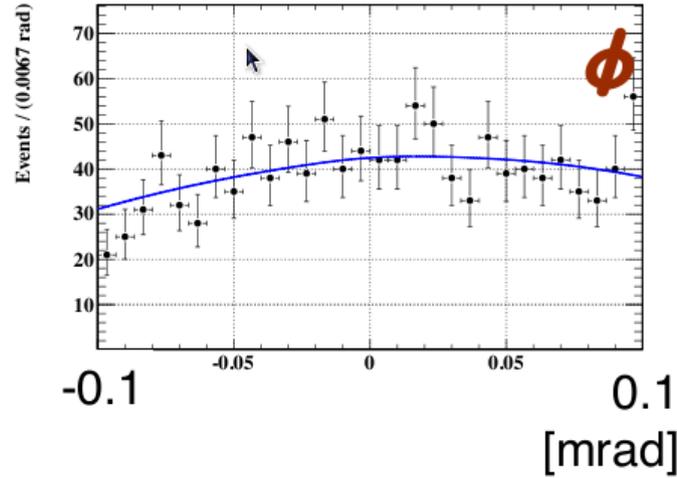
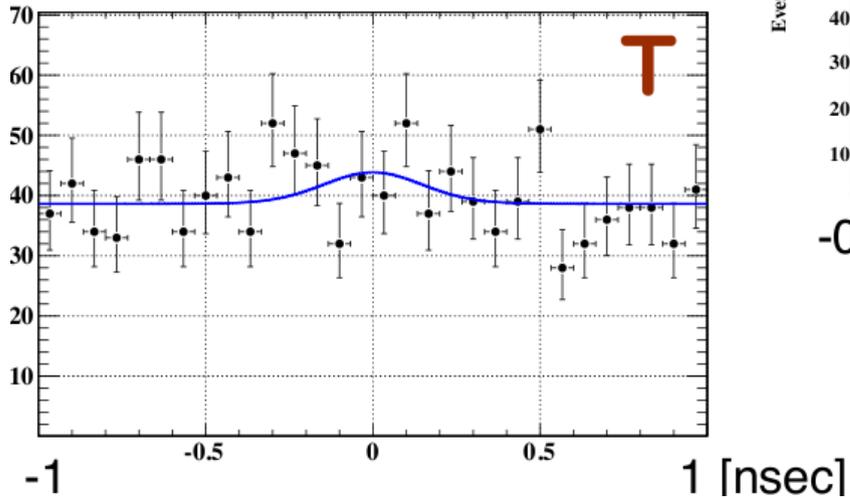
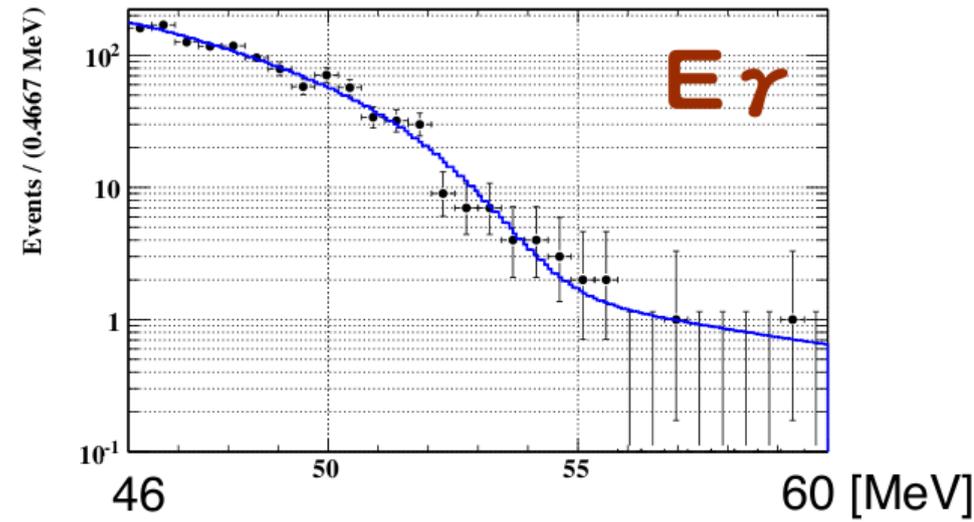
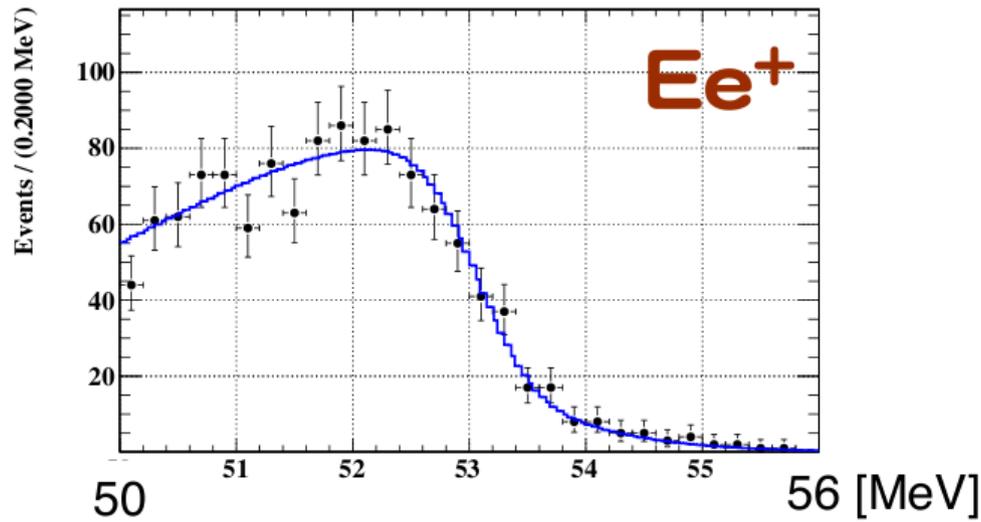
# Confidence Region

- (Nsig, NRD) 2次元のconfidence regionを **Feldman-Cousins**の方法で算出する。
  - それぞれの(Nsig, NRD)の点で、観測したPDFを元にしたtoyMC実験をたくさん行う。
  - それぞれのシミュレーション実験において likelihood ratio を計算
    - $R_{data} = L_{data,max} / L_{data}(N_{sig}, NRD)$
    - $R_{MC} = L_{MC,max} / L_{MC}(N_{sig}, NRD)$
  - もしシミュレートした実験のうち  $R_{data} < R_{MC}$  となる実験が90%に満たないとき、その点 (Nsig, NRD)は90% confidence region の外となる
- Likelihood関数の形から(Nsig, NRD)間に相関がないことが分かった。
- **Upper limit** (or confidence interval) on Nsig はNRDのベストフィット値上の値



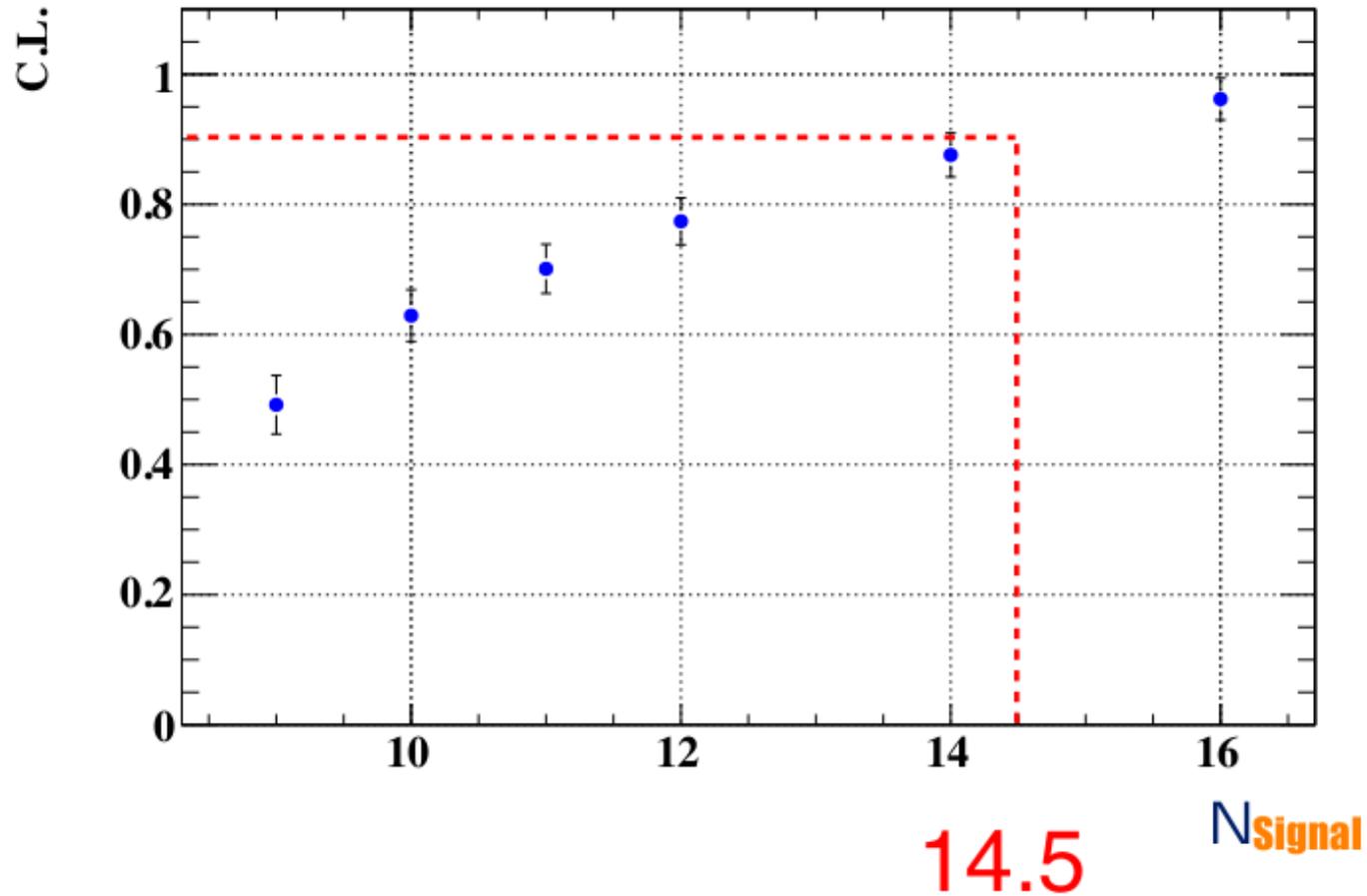
- Blind box の開封 (30/July)

# Fit 結果



# Upper limit on Nsig

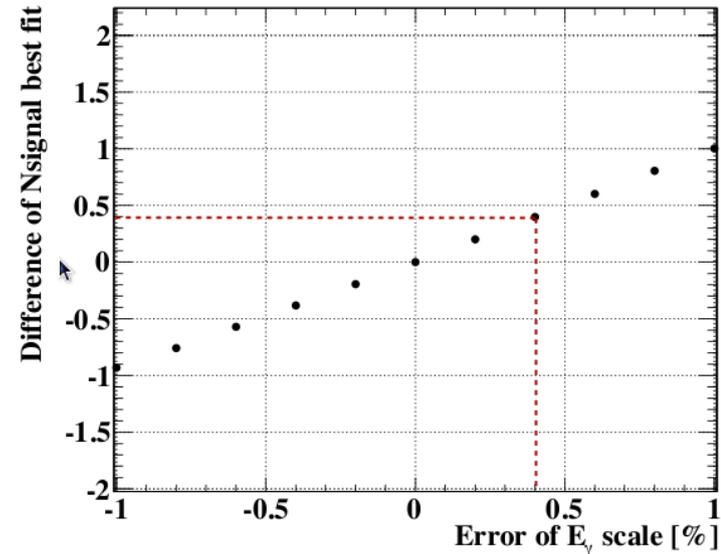
- NRDベストフィット値上のスキャン



# 系統誤差

For example, on  $E_\gamma$

- $\gamma$ 線エネルギースケール
  - 55MeVピークの精度 : 0.08 %
  - 光量変化の追跡 : 0.3 %
  - ゲイン変動の補正の誤差 : 0.2 %
  - 合計 : 0.4 %
- $e^+$  スペクトルパラメータ
- Normalization
  - 10%



$N_{sig}$ への影響はフィットを別のパラメータを使ってやり直すことで見積もる

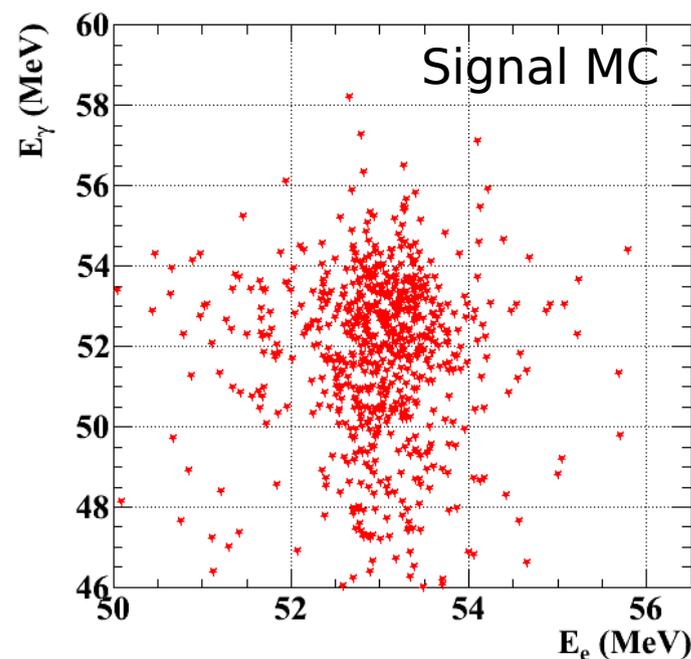
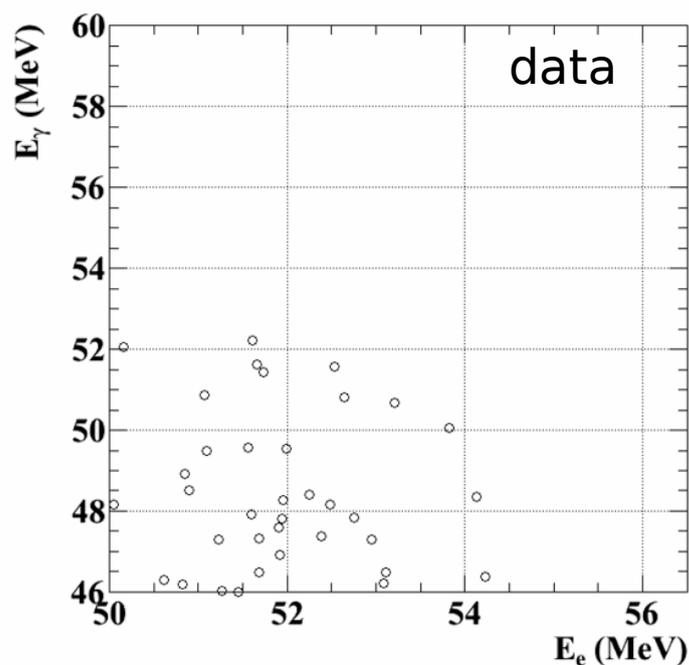
Scale : 0.4 events

Spectrum parameters : 1.1 events

Total 1.3 events

Upper limit inc. systematic error = **14.7**

$$\text{BR}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 3.0 \times 10^{-11}$$



他の変数に関してはsignalが90%残るようなカットをかけた際のプロット

# Prospects for 2009

- ~4倍の統計が期待される
  - DCHディスチャージ問題の解決
    - ~7ヶ月テストベンチで運転を確認
    - 現在のところ問題なく動いている
  - トリガーefficiencyの改善
    - $e^+ - \gamma$  direction match
  - DAQ livetimeの改善、calibrationに費やす時間の短縮
- 伴う性能の向上も見込める → 今年も統計で制限される
  - sensitivityも4倍よくなることが期待できる。

現在は

$\Pi^0$  runをおこなっている (~今週末)

来週からphysics runを開始

# 結論

- MEG実験は2008年秋、物理データ取得を開始。RUN2008ではMEG最初の3ヶ月分のデータをとった。
- RUN2008を一通り解析し結果を出した。
  - RUN2008のsensitivity :  $1.3 \times 10^{-11}$
  - 実際のデータからのupper limit :  $\text{Br}(\mu \rightarrow e\gamma) < 3.0 \times 10^{-11}$  @90% C.L.  
(preliminary)
- 今年はこの4倍の統計をためる。
  - これに応じてsensitivityの向上
  - sensitivityの詳細は今年の検出器の性能に依存する(現在、較正・性能評価中)性能の向上も見込めるのでsensitivityも4倍の向上が期待できる。
- $10^{-13}$ の目標感度に到達するには、さらに後2年のランが必要。

<http://arxiv.org/abs/0908.2594>.