

MEG実験

COBRA分光ロメータを用いた $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$ 稀崩壊探索の検証

東京大学 藤井 祐樹
他 MEGコラボレーター
日本物理学会第66回年次大会
新潟大学



Outline

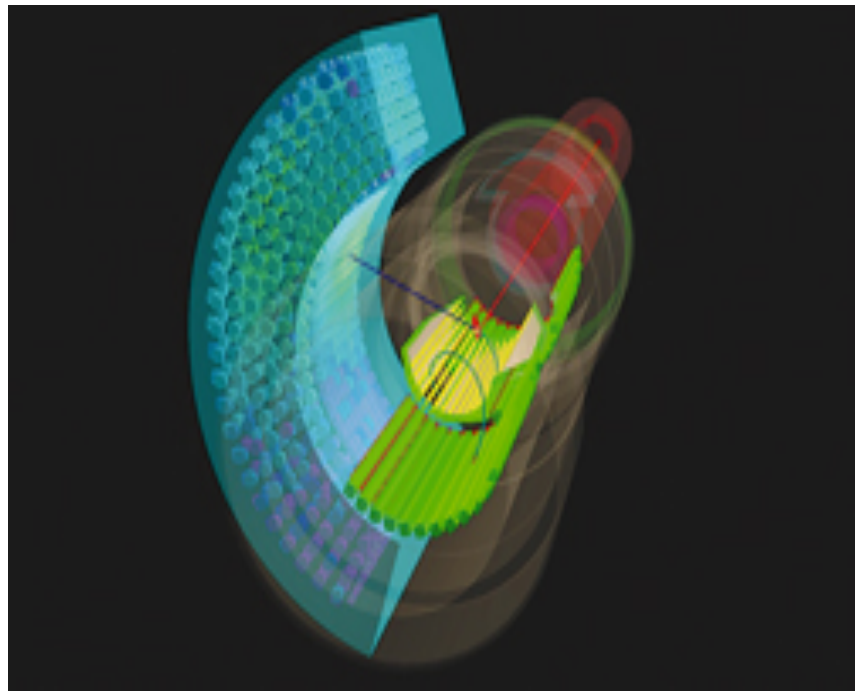
- ◆ Introduction
- ◆ Physics motivation
- ◆ Simulation & background
- ◆ Event reconstruction
- ◆ Performance
 - ◆ Resolution
 - ◆ Efficiency
- ◆ Analysis
- ◆ Summary

Introduction

- ◆ MEG実験はレプトンフレーバー非保存 (LFV) 過程である $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊を探索するため、2008年から本格的な物理データ取得を開始している
- ◆ 大量の正電荷直流ミュオンビームと、すでに準備された検出器を用いて、これまでに確立された解析手法をベースとして別の物理事象を見ることができないか？
 - ◆ 2γ 事象を用いた軽いスカラー粒子探索 → 28pGB-3 名取
- ◆ 本講演ではMEG実験のCOBRAスペクトロメータを用いてLFV過程であり、現在崩壊分岐比の上限値が 1×10^{-12} で与えられている $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ 崩壊を探索することの可能性について検証する

Introduction

- ◆ MEG実験で用いられているCOBRAスペクトロメータは $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索を目的としているため、 $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ 事象で生成する3つの荷電粒子すべてを検出するにはドリフトチェンバーの立体角が足りない
- ◆ 低い運動量領域には感度が無い
- ◆ 上記の理由により、COBRAスペクトロメータでの $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ 探索はchallengingであるが、大量のターゲット上静止ミューオン（毎秒 3×10^7 個）と高い分解能も期待される

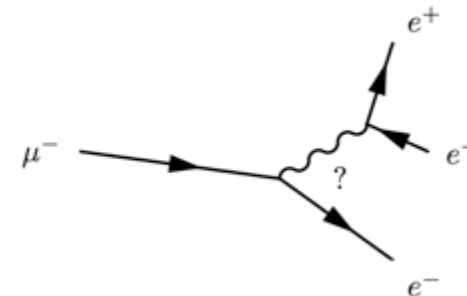


Physics motivation

- 見つかればもちろん新物理発見
- 上限値を更新することで、新物理のパラメータに制限を与える
- $\text{Br}(\mu \rightarrow eee)/\text{Br}(\mu \rightarrow e\gamma)$ の値を測定できれば新物理の同定にもつながる
- Treeレベルの崩壊モードがあれば分岐比が大きくなり、検出できる可能性あり

ratio	LHT	MSSM(dipole)	MSSM(Higgs)
$\frac{B(\mu \rightarrow eee)}{B(\mu \rightarrow e\gamma)}$	0.4 ... 2.5	$\sim 6 \times 10^{-3}$	$\sim 6 \times 10^{-3}$
$\frac{B(\tau \rightarrow eee)}{B(\tau \rightarrow e\gamma)}$	0.4 ... 2.3	$\sim 1 \times 10^{-2}$	$\sim 1 \times 10^{-1}$
$\frac{B(\tau \rightarrow \mu\mu\mu)}{B(\tau \rightarrow \mu\gamma)}$	0.4 ... 2.3	$\sim 2 \times 10^{-2}$	0.06 ... 0.1

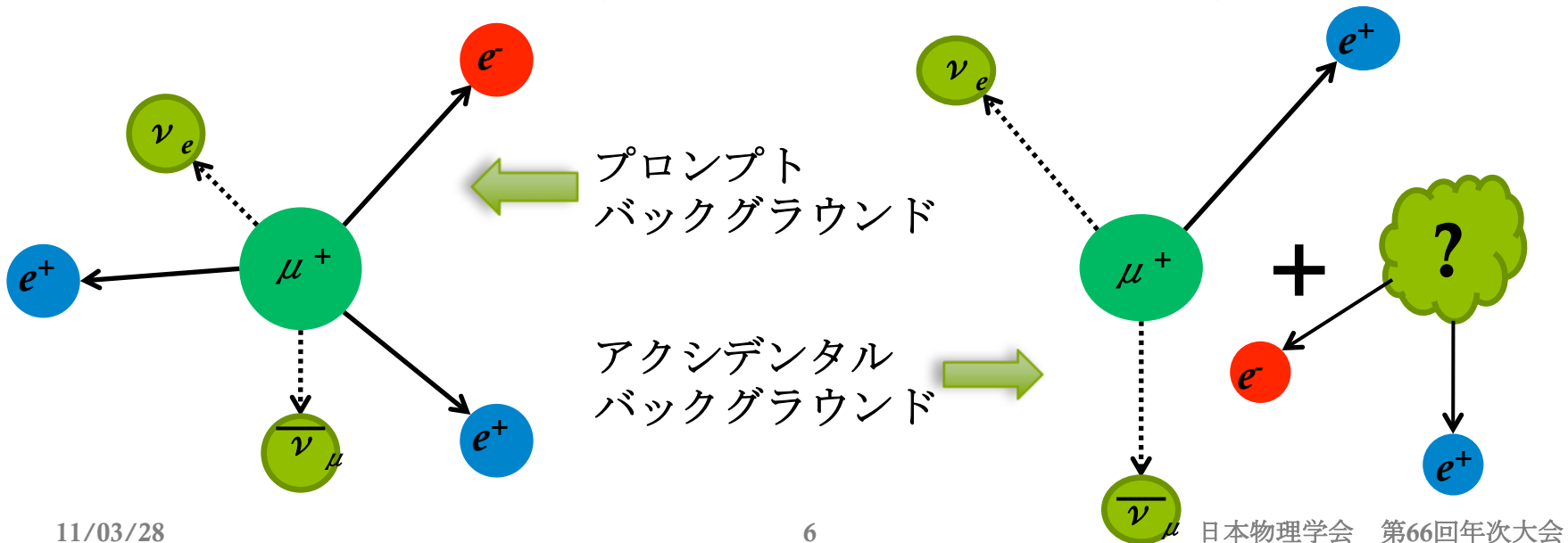
ミューオンが未知粒子を介してTree levelで崩壊した場合のファインマンダイアグラム



M. Blanke *et al*, JHEP 05 (2007) 013

Simulation & background

- ◆ 信号事象と背景事象のシミュレーションを行う
- ◆ 信号事象のキネマティクスは新物理の模型に依存する
- ◆ 背景事象となるのはレプトンフレーバーが保存される $\mu \rightarrow eee \nu \nu$ (プロンプトバックグラウンド) と通常のMichel崩壊と電子の生成事象が時間的に重なる事象 (アクシデンタルバックグラウンド)

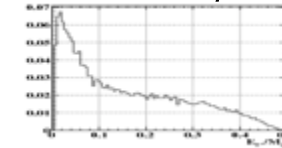


Simulation & background

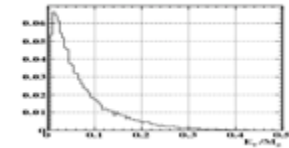
プロンプトバックグラウンドキネマティクス

- プロンプトバックグラウンドは崩壊分岐比が 3.4×10^{-5} であり、さらに荷電粒子の運動量が高い領域で4桁以上落とせる
- アクシデンタルバックグラウンドは直流のミュオンビームを用いることで低減され、さらに生成された電子が高い運動量を持つという条件を課すことで低減される
- 信号事象はミュオン偏極ゼロでTree levelのダイアグラムのみからの寄与を考えるとという簡略化したモデルで、スカラー・ベクター両方の中間子からの寄与がある場合と、ベクター中間子が支配的である場合の2通りを生成する
 - 前者を α_1 モデル、後者を α_2 モデルとする

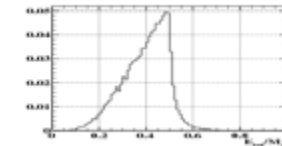
$$E_{e^+}/M_\mu$$



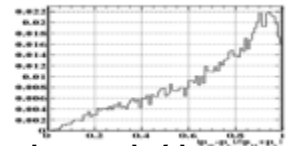
$$E_{e^-}/M_\mu$$



$$E_{\text{charged}}/M_\mu$$

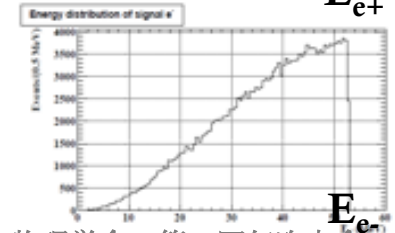
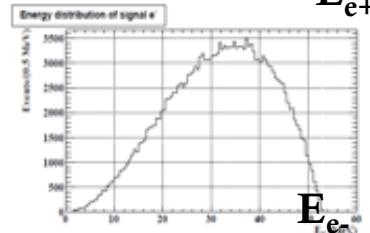
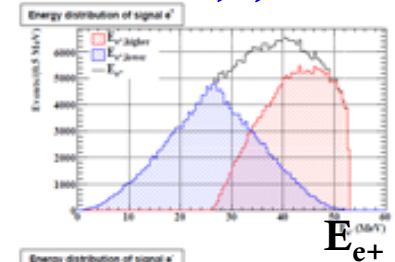
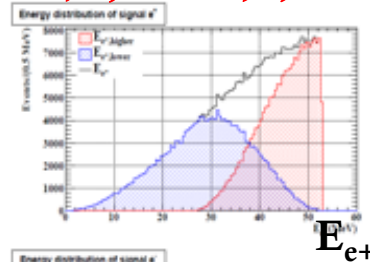


$$|\mathbf{p}-\mathbf{p}_1|/|\mathbf{p}+\mathbf{p}_1|$$



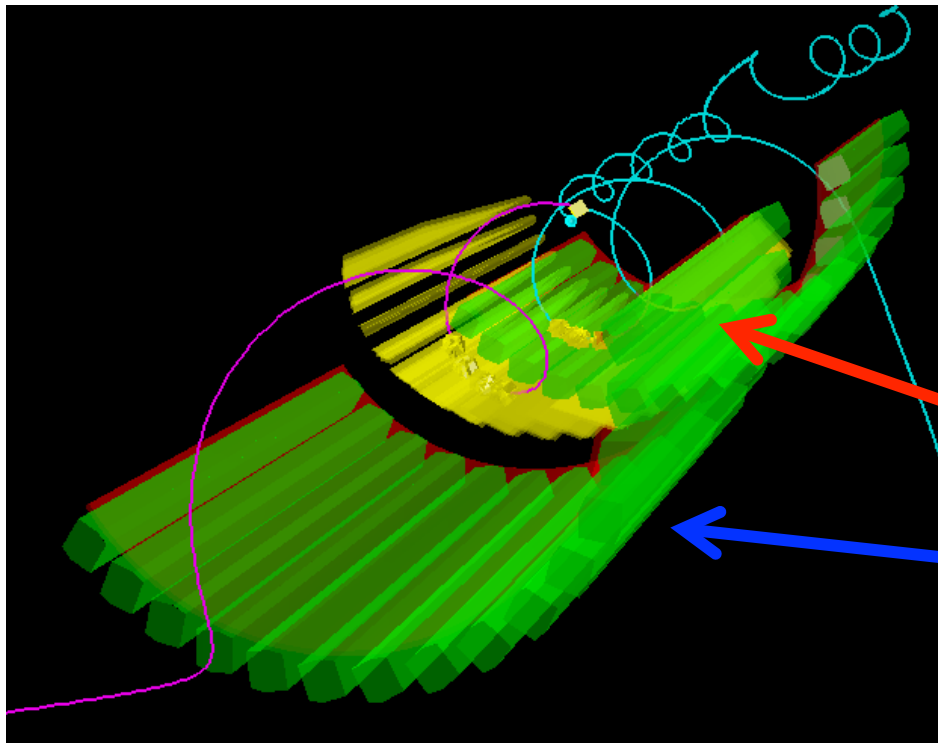
スカラー+ベクター

ベクター



Simulation & background

- シミュレーションで再現したCOBRAスペクトロメータ中で $\mu^+ \rightarrow e^+e^-e^-$ 生成事象



ピンク：電子の飛跡
水色：陽電子の飛跡

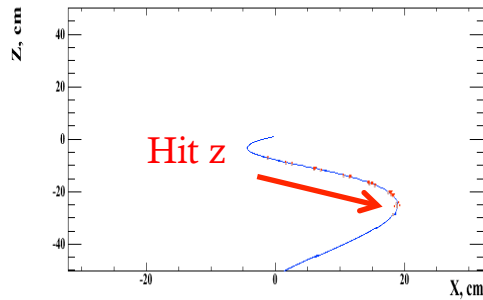
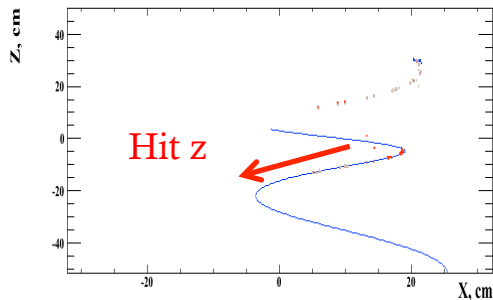
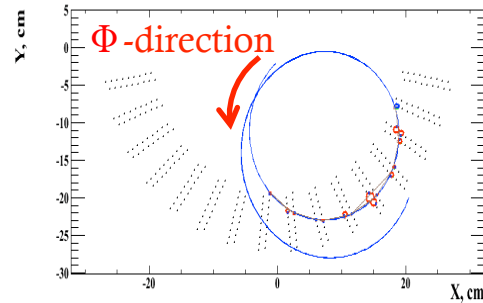
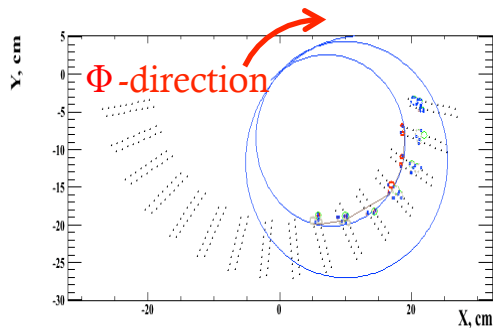
ドリフトチェンバー

タイミングカウンター

Event reconstruction

Simulationから再構成された陽電子の飛跡

Simulationから再構成された電子の飛跡



- 荷電粒子はCOBRAマグネットという特殊な勾配磁場を持った超伝導磁石によって曲げられ、ドリフトチェンバーによって飛跡が再構成される

- 電子の飛跡は、磁場に対して陽電子とは逆の方向に曲げられる

- MEG実験でこれまで陽電子の飛跡を再構成するために用いられていた飛跡再構成アルゴリズムを改良し、電子の飛跡を再構成する

- *問題点：z軸に対して直角に近い角度で放出された粒子の区別がまだできていない (フェイク事象となる)

Performance

- ◆ データ及びシミュレーションから、COBRAスペクトロメータの $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$ 崩壊事象に対する性能を評価する

- ◆ 評価項目は以下の通り

1. Resolution

- a) 運動量分解能
- b) 角度分解能
- c) 崩壊点分解能
- d) 時間分解能

} 信号領域の決定

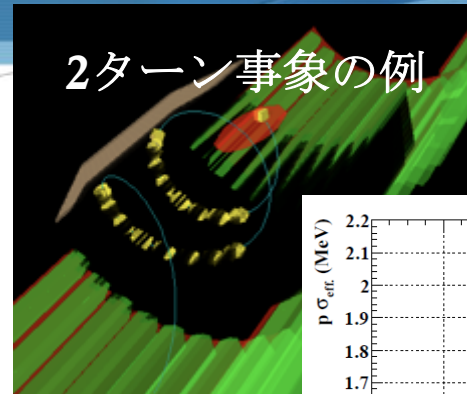
2. Efficiency

- a) 陽電子に対する検出効率
- b) 電子に対する検出効率

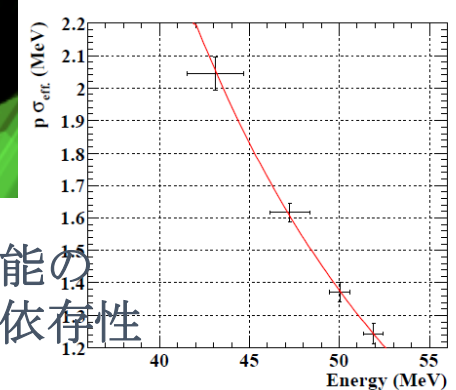
} 信号事象に対する検出効率

Resolution

- データで陽電子の分解能を評価し、電子に対しても同様の分解能を仮定する (シミュレーションを用いたスタディより、これで問題無いことがわかっている)
- データではドリフトチェンバー中で2ターンしている事象を取ってきて、1周目と2周目の飛跡の差を見る
- 運動量、角度、崩壊点、時間に関してエネルギー依存性を求める
- テール成分が存在するため、分解能を求める際は2個のガウス関数の重ね合わせでフィットする



運動量分解能の
エネルギー依存性

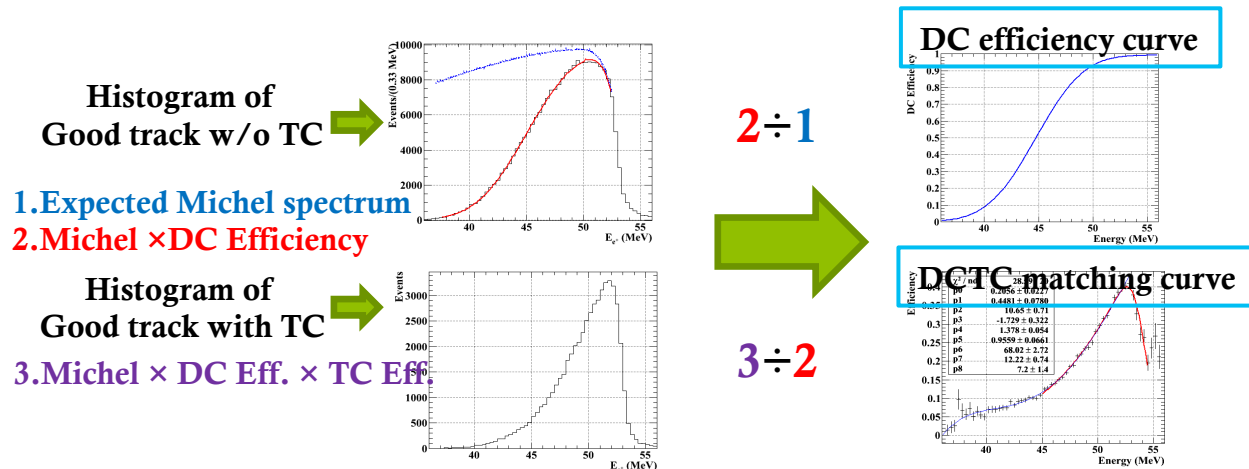


Preliminary results

Energy	$p \sigma_{core}$ MeV	$\phi \sigma_{core}$ mrad	$\theta \sigma_{core}$ mrad	$z \sigma_{core}$ cm	$r \sigma_{core}$ cm
37.5 MeV	0.58	9.5	14	0.46	0.33
52.8 MeV	0.44	7.2	12	0.33	0.21
	$p \sigma_{eff}$ MeV	$\phi \sigma_{eff}$ mrad	$\theta \sigma_{eff}$ mrad	$z \sigma_{eff}$ cm	$r \sigma_{eff}$ cm
37.5 MeV	3.0	26	29	0.87	2.0
52.8 MeV	1.2	16	21	0.62	0.51

Efficiency

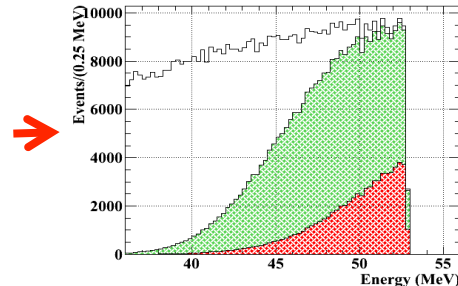
- 陽電子に対するスペクトロメータの検出効率のエネルギー依存性を求める
- 実データから検出効率カーブを求める
- シミュレーションで生成した信号事象のエネルギースペクトルに検出効率カーブをかけることで、信号事象に対する検出効率を求める
- シミュレーションと実データの差は、Michel崩壊のシミュレーションと実データの差を求めて補正する



Efficiency

- 陽電子に対するスペクトロメータの検出効率のエネルギー依存性を求める
- 実データから検出効率カーブを求める
- シミュレーションで生成した信号事象のエネルギースペクトルに検出効率カーブをかけることで、信号事象に対する検出効率を求める
- シミュレーションと実データの差は、Michel崩壊のシミュレーションと実データの差を求めて補正する

Energy spectrum
×
Efficiency curve



Green : only DC Efficiency
Red : DC Eff. × DCTC Eff.

Preliminary results

Parameters	Value (%)
$\epsilon_{(Michel,e^+)}$	9.7 ± 0.6
$\epsilon_{(sig)}^{\alpha_1}$	0.45 ± 0.05
$\epsilon_{(sig)}^{\alpha_2}$	0.75 ± 0.08

Analysis

- 3体崩壊で生成した荷電粒子のうち、COBRAスペクトロメータで再構成されるのは高い運動量を持った陽電子と電子の2粒子のみ
- ただし、2粒子の運動量 ($E1, E2$) と放出角度 ($\theta 1, \theta 2, \phi 1, \phi 2$) から、崩壊面上での運動量欠損 (\mathbf{p}_{miss}) が求められる
- 静止ミューオンからの純粋な3体崩壊の場合、

$$\mathbf{p}_{\text{miss}} + E1 + E2 = M_{\mu}$$

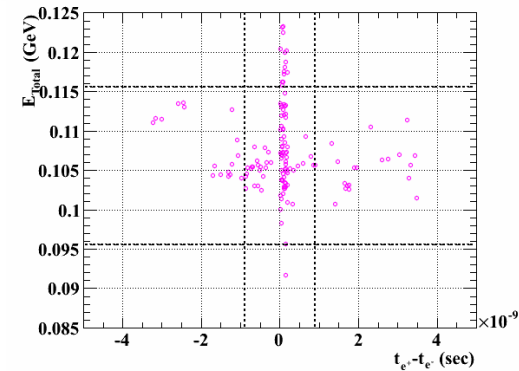
- よってこの式を満たし、陽電子と電子が同時に生成している事象を探せば良い
- 今回は物理データ取得前に試験的に取得されたMichelトリガーデータを用いて解析を行う
 - 合計ターゲット静止ミューオン数は 6×10^{11} 個、但しtrigger数に対してDAQ rateを 7×10^4 で抑制している
- 信号領域は1粒子に課したエネルギー閾値である37.5 MeVでの 2σ 分解能で設定する

Analysis

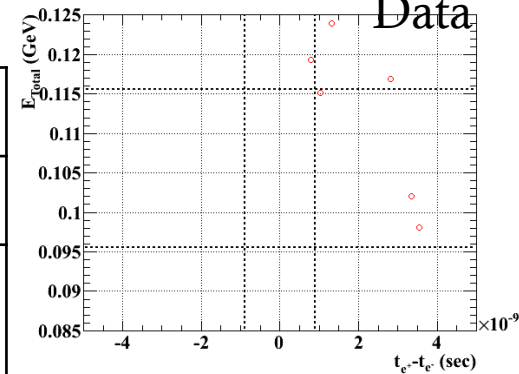
- シミュレーション ($\alpha 2$ モデル) で見た場合の解析領域での $t_{e+} - t_{e-}$ vs E_{total} 2次元プロット
- データで見た場合は信号領域でゼロ事象観測
- 統計から得られる1事象感度と、今回与えられる崩壊分岐比の上限値を以下に示す
- データで得られたプロットに残っている点はすべてフェイク事象による非物理的なバックグラウンド

	$\alpha 1$	$\alpha 2$
1事象感度	6×10^{-3}	3×10^{-3}
上限値 @ 90 % C.L.	14×10^{-3}	6×10^{-3}

simulation



Data



Analysis

- 得られた結果から今後2年間、現在のミュオンレートでトリガー効率100%に近い $\mu \rightarrow e+e+e$ -専用トリガーを開発しデータ取得を行った場合、（かなり理想的な仮定）

Preliminary results

$$\mathcal{S}_{\mu \rightarrow eee}^{\alpha_1} \simeq 3.4 \times 10^{-11},$$

$$\mathcal{S}_{\mu \rightarrow eee}^{\alpha_2} \simeq 1.7 \times 10^{-11}.$$

の予想到達感度が期待される

- これは現在与えられている上限値 1×10^{-12} よりも1桁大きい

Summary

- ◆ 現在の解析と性能では上限値を超えるのは難しいという結果
- ◆ ただし電子に対してタイミングカウンターとのマッチング条件を課さない場合、検出効率が5倍以上よくなることが期待される→p13で緑の網掛け領域が検出されるため
- ◆ 今後、ドリフトチェンバーの支持機構及び読み出しケーブルの見直しによる検出効率の改善も予定されており、これと併せて解析段階での検出効率を上げることで、現在の上限値更新が可能かどうかをさらに検討する
- ◆ 今回用いたデータの統計量では物理的なバックグラウンドは無視できるレベルと見積もられていたが、さらに統計が増えた場合のバックグラウンドの影響を見積もる必要がある
- ◆ 再構成段階での非物理的バックグラウンドを抑えるため、再構成アルゴリズムの見直しも必要
- ◆ 実際にデータを取得する場合はトリガーの最適化も行う必要がある→もう1つ上のstep