

# $\mu$ -e 転換過程探索実験 DeeMe における バックグラウンド事象アフタープロトンの評価

大阪大学理学研究科物理学専攻

博士前期過程2年 久野研究室

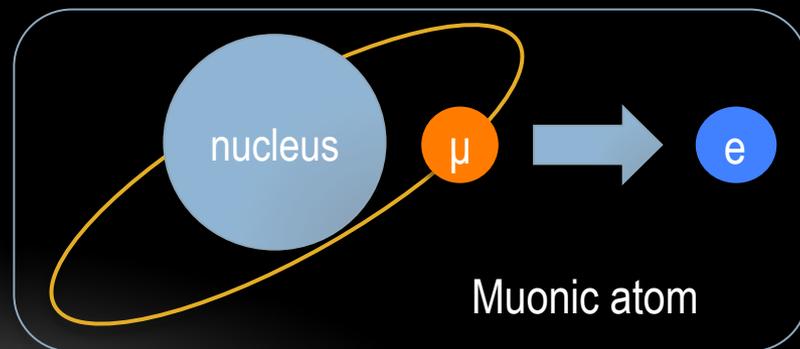
長尾大樹

# Outline

- $\mu$ -e 転換過程
- DeeMe 実験概要
- アフタープロトンについて
- アフタープロトン測定方法
- 2013年データの解析
- ビームロスモニターのアップグレード
- 2016年ビームの測定と解析
- まとめ

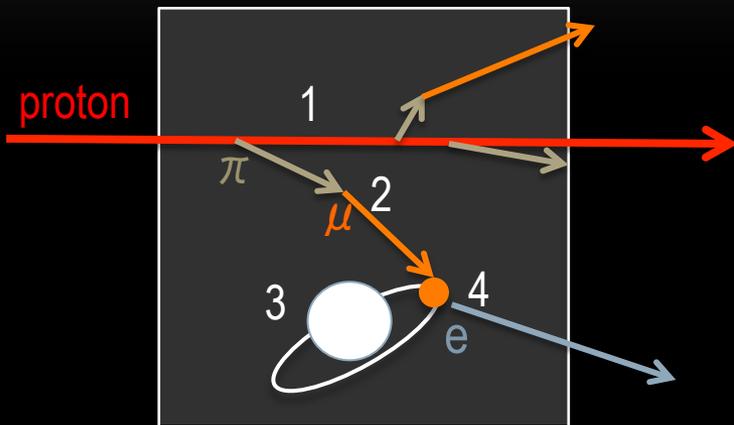
# $\mu$ -e 転換過程

- $\mu$ -e 転換過程
  - 荷電レプトンフレーバー非保存過程(cLFV: charged Lepton Flavor Violation)
  - cLFVは標準模型では禁止されている(反応確率  $\sim 10^{-54}$ )
  - 標準模型を超えた物理モデルでは現在の実験感度のすぐ下で発見できる可能性
- $\mu + (A, Z) \rightarrow e + (A, Z)$ 
  - $\mu$ が原子核に捕まりミュオン原子を形成してレプトンフレーバーを保存せず電子に変化する
  - 原子核に依存した寿命をもつ
  - 原子核に依存した単一エネルギーの電子
  - 上限値:  $7 \times 10^{-13}$  (Au)  
 $4.3 \times 10^{-12}$  (Ti)



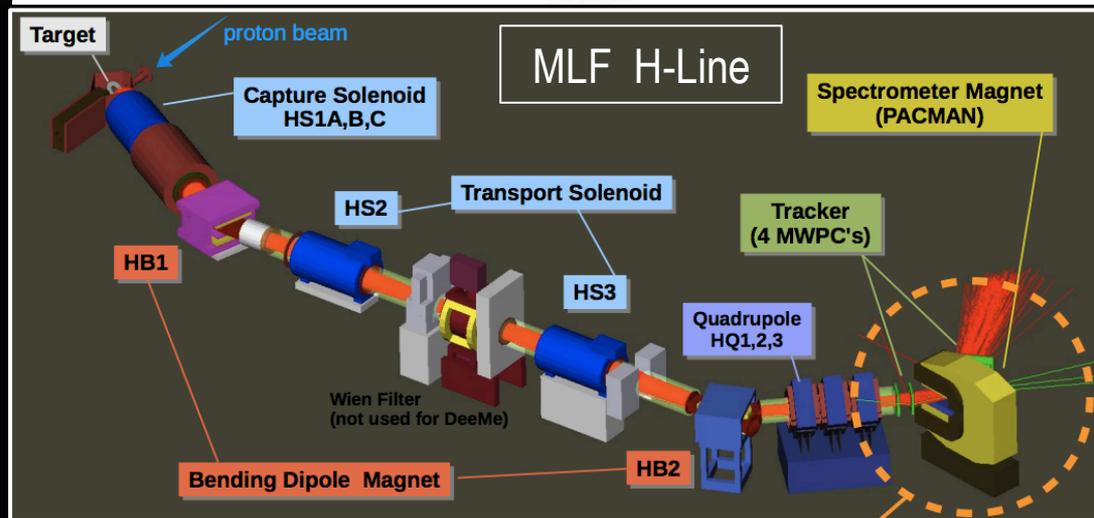
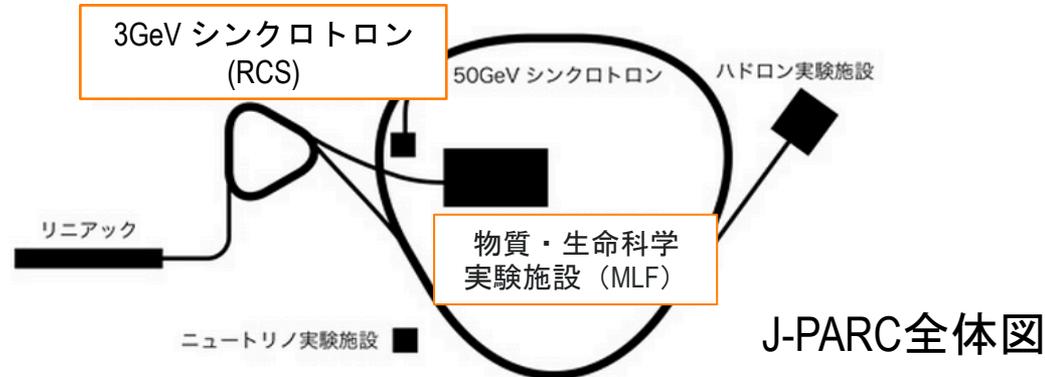
# DeeMe 実験概要

## 陽子標的



## 陽子標的內部で

1.  $\pi$  生成
2.  $\mu$  生成
3. ミューオニック原子の生成
4.  $\mu$ -e 転換

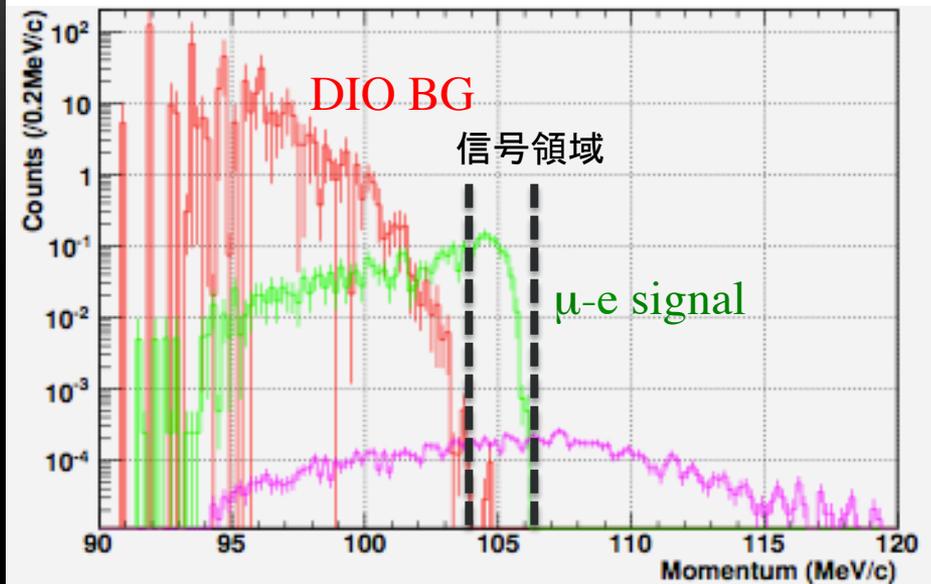


- 陽子標的: C ( $\rightarrow$  SiC)
  - ミューオニック原子の寿命  $\sim 2\mu\text{s}$
  - $\mu$ -e 転換電子のエネルギー = 105MeV
- $10^{-14}$  の感度を目指す

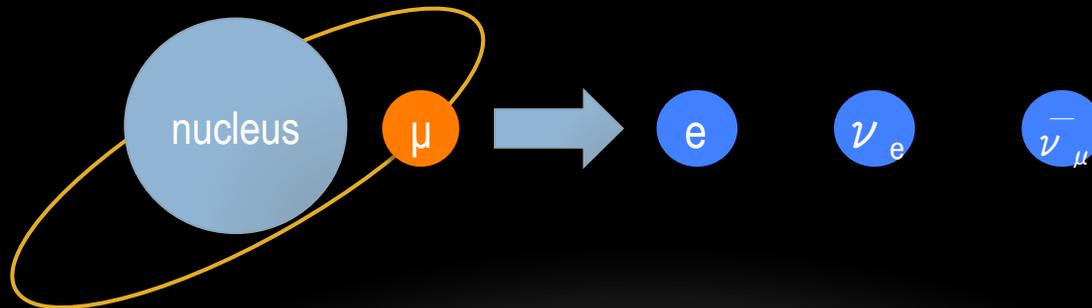
# DeeMe 実験概要

- バックグラウンド
  - Decay in Orbit (DIO)
  - 陽子捕獲による自由電子
  -
- $\mu$ -e 転換電子の選別
  - 運動量スペクトル
  -

モンテカルロ計算で予想されるシグナルとバックグラウンドの運動量スペクトル



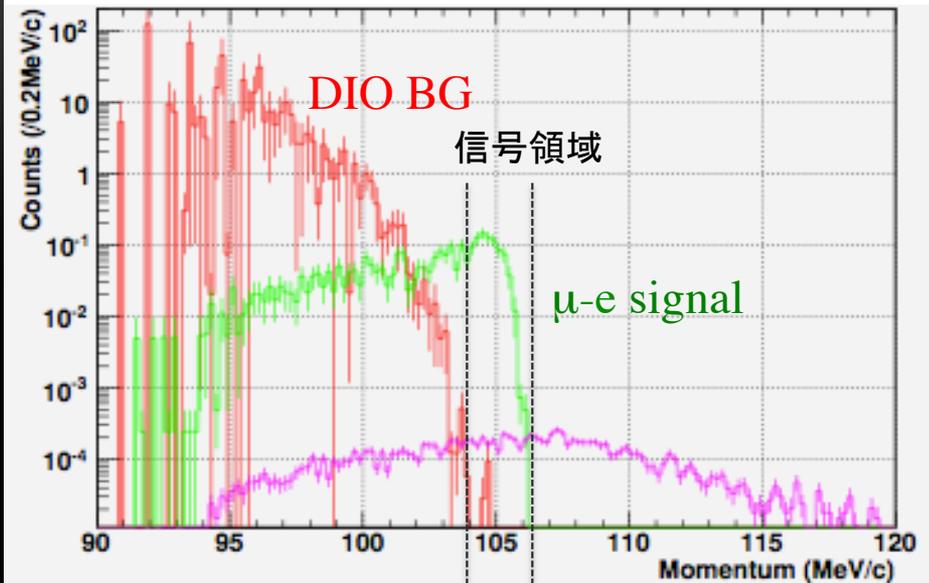
Decay in Orbit



# DeeMe 実験概要

- バックグラウンド
  - Decay in Orbit (DIO)
  - 陽子ビームによる即発電子
- $\mu$ -e 転換電子の選別
  - 運動量スペクトル
  - 時間スペクトル

モンテカルロ計算で予想されるシグナルとバックグラウンドの運動量スペクトル



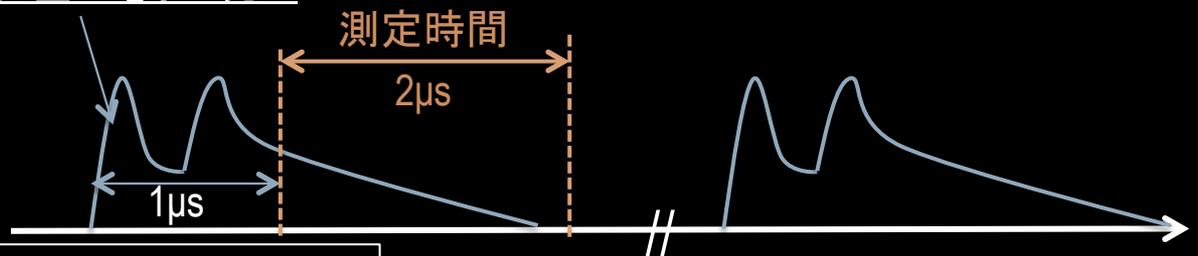
## 陽子ビームと2次粒子の時間構造

3 GeV パルス陽子ビーム



瞬間的に大量の電子が発生

スペクトロメータ部に到達する電子

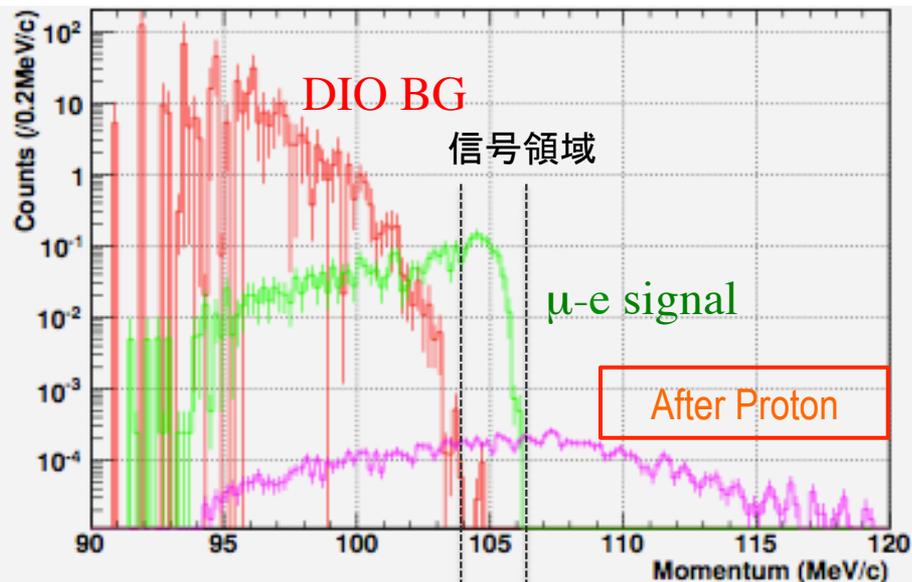


スペクトロメータ不感時間

# DeeMe 実験概要

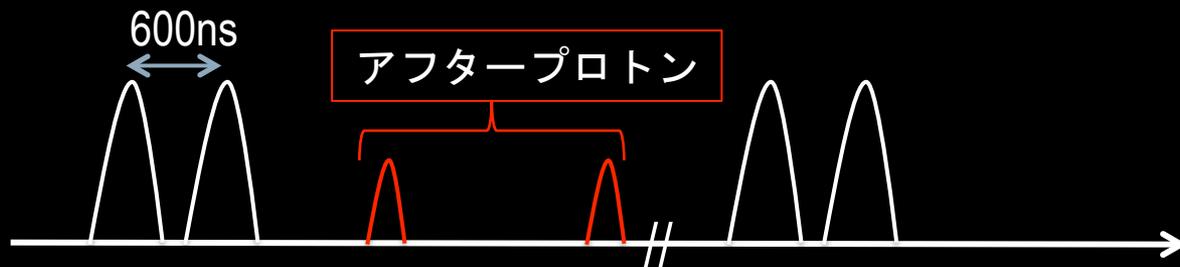
- バックグラウンド
  - Decay in Orbit (DIO)
  - 陽子ビームによる即発電子
  - アフタープロトン (AP)
- $\mu$ -e 転換電子の選別
  - 運動量スペクトル
  - 時間スペクトル

モンテカルロ計算で予想されるシグナルとバックグラウンドの運動量スペクトル

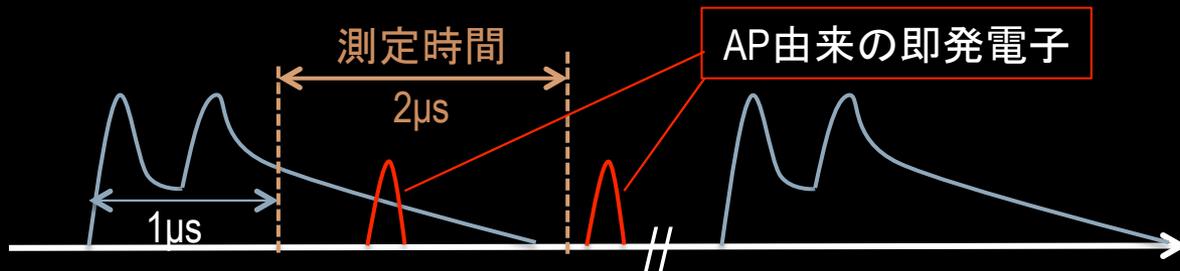


## 陽子ビームと2次粒子の時間構造

3 GeV パルス陽子ビーム

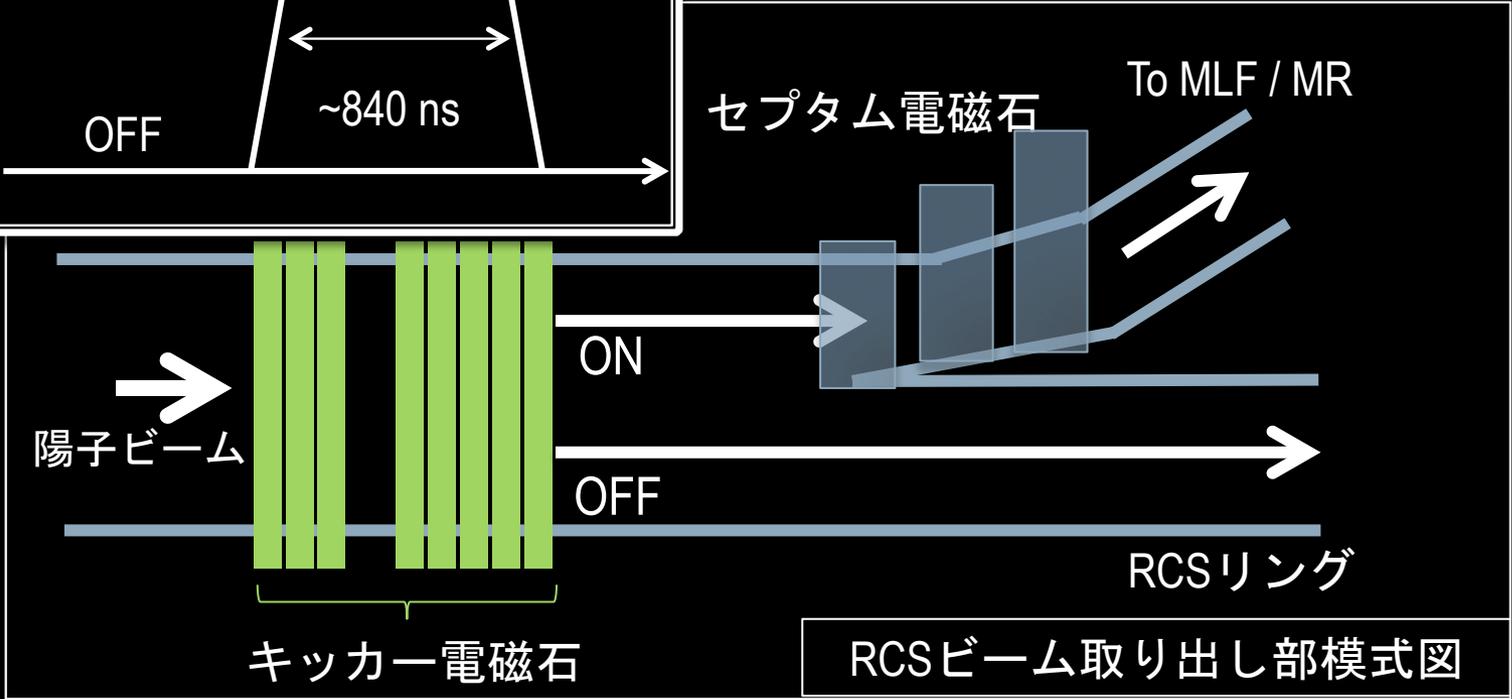
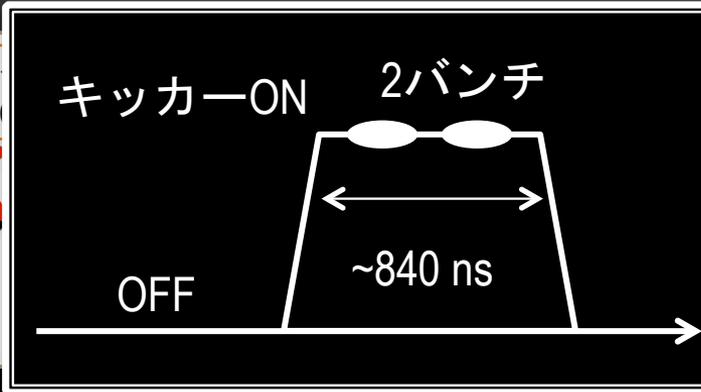


スペクトロメータ部に到達する電子



どちらの方法でも分けられない  $\Rightarrow$  AP数の評価が必要

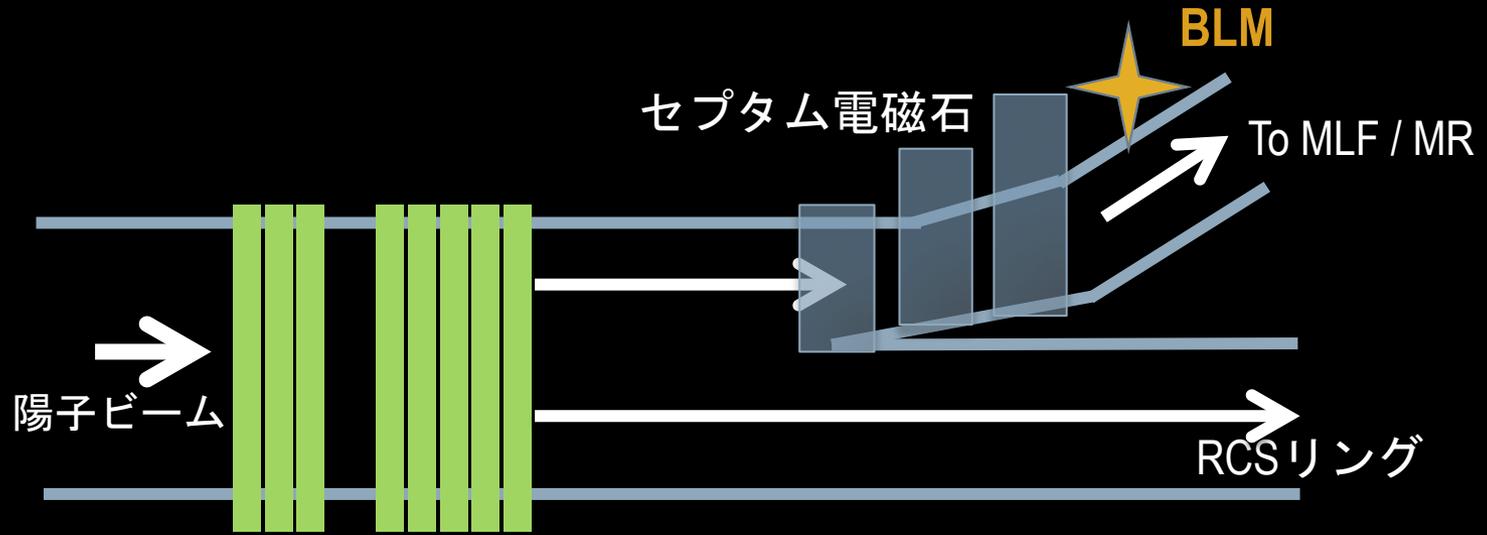
# アフタープロトン



RCSビーム取り出し部模式図

- RCSからのビームの取り出しは「速い取り出し」
  - 大エミッタンス陽子であればキッカー電磁石オフの状態に取り出される可能性
  - 原理的にはビーム取り出し後リング内に陽子は周回しない

# アフタープロトン測定方法

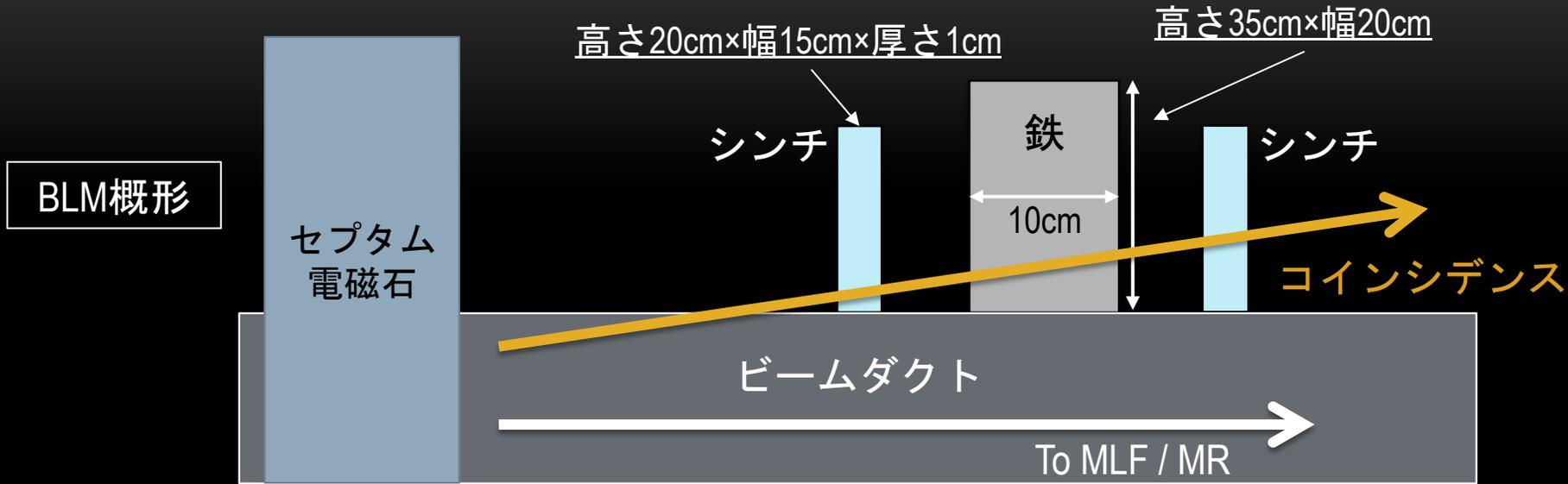


- ビームロスモニター(BLM)を設置
  - ダクトから漏れ出る陽子をモニター
  - モンテカルロ計算により以下を仮定  
BLMのヒット数 : アフタープロトン数 = 1 : 40

- $R_{AP}$  を定義
  - DeeMeでは $R_{AP} < 10^{-18}$ を要求
- 2013年にBLMを設置、データの取得を開始した

$$R_{AP} = \frac{\text{AP数}}{\text{全陽子数}}$$
$$\text{AP数} = 40 \times \text{hit}_{\text{BLM}}$$

# アフタープロトン測定方法



- ビームロスモニター(BLM)を設置
  - ダクトから漏れ出る陽子をモニター
  - モンテカルロ計算により

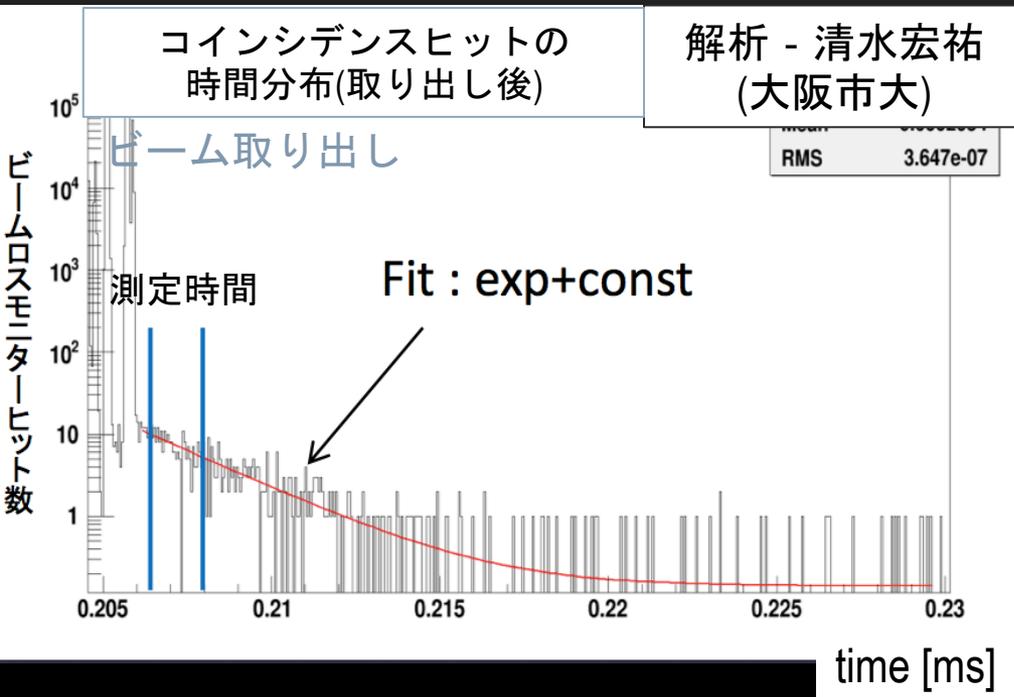
BLMのヒット数 : アフタープロトン数 = 1 : 40

- $R_{AP}$  を定義
  - DeeMeでは $R_{AP} < 10^{-18}$ を要求
- 2013年にBLMを設置、データの取得を開始した

$$R_{AP} = \frac{\text{AP数}}{\text{全陽子数}}$$

$$\text{AP数} = 40 \times \text{hit}_{\text{BLM}}$$

# 2013年データの解析



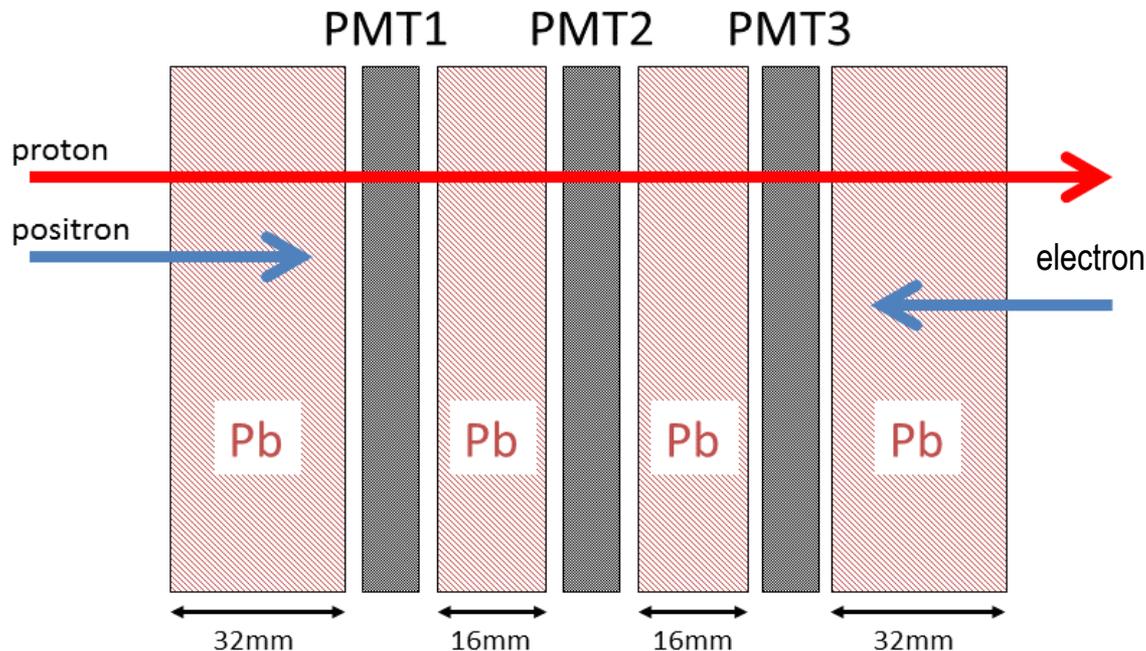
- 取り出し後2 $\mu$ sのヒット数から
  - $R_{AP} < 2.2 \times 10^{-18}$
  - BGイベント数は0.045イベント以下 (ビームタイム $2 \times 10^7$ s中)
- ビーム取り出し後のヒット数を指数関数+定数でフィッティング
- 指数関数の寿命はミュオンの寿命に近い値となった
- 静止ミュオン由来の陽電子 (Michel positron ( $< 52.6$  MeV/c)) がBLMをヒットしている可能性

- 陽電子がBLMをヒットしていることを確かめ、
- $R_{AP}$ を小さくしてAPバックグラウンドを無視できる量にするため陽電子の検出率を2~3桁小さくする

# ビームロスモニターのアップグレード

- G4beamline を用いたシミュレーションを行った
- 以下の様なデザインにアップグレード
  - 3GeV陽子は十分な運動エネルギーを持っているため鉛を貫通
  - 運動量 50 MeV/c の陽電子は電磁シャワーを起こして鉛で止まるか、低エネルギーのガンマ線になってシンチレータでほとんどエネルギー損失しない
  - 陽子の検出効率90%以上、陽電子の検出率 $\sim 10^{-4}$ を達成可能

## プラスチックシンチレータ



## 2013年BLMの検出効率

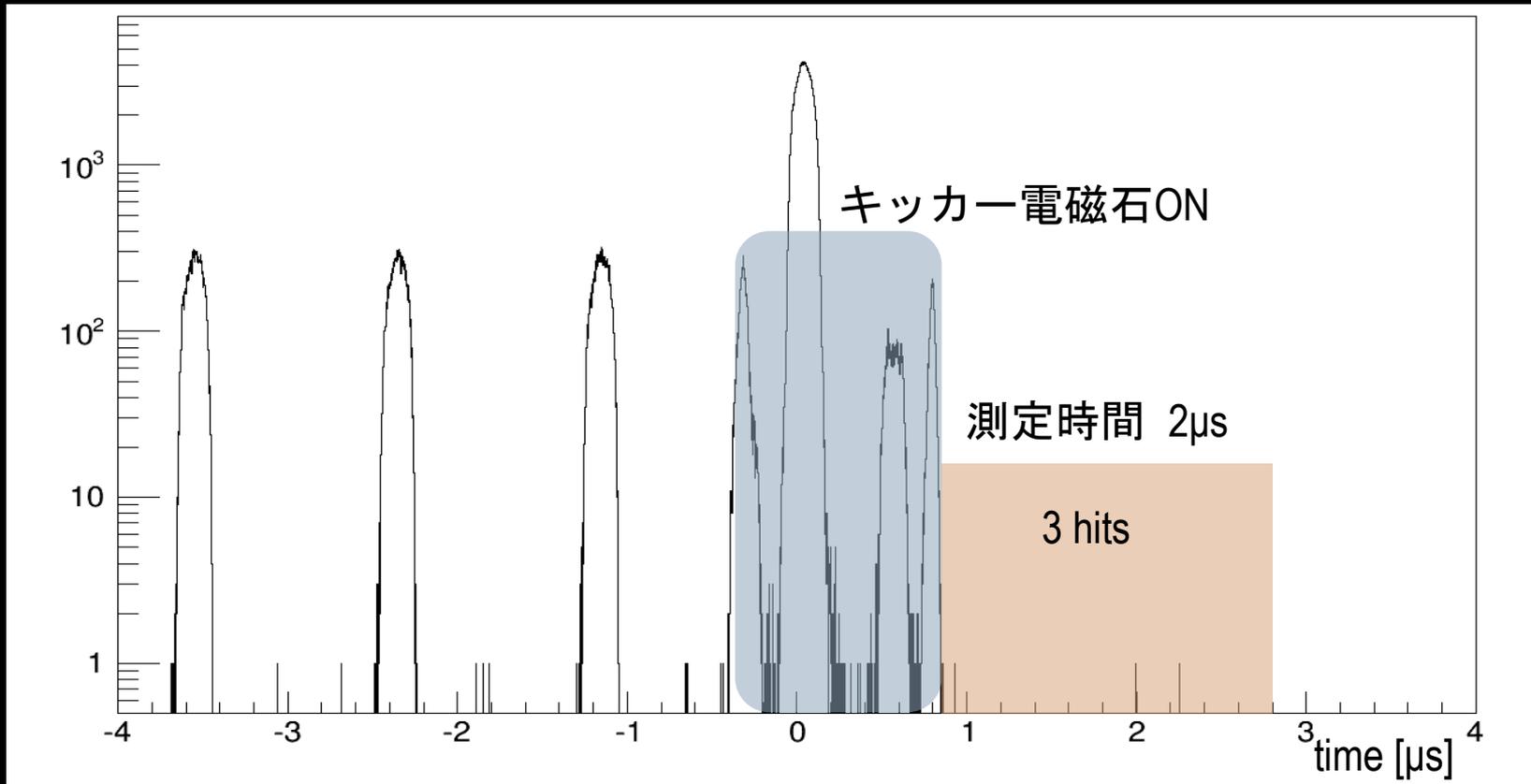
particle	efficiency
3 GeV proton	0.98
Michel positron	0.04

2桁向上

2015年に設置完了

# 2016年MLF行きビームの測定

- 2016年2月15日からMLF行きのビーム運転が再開
  - 21～26日の間のデータを測定・解析
  - 1バンチ運転
  - ビーム強度: 200kW (2013年 300kW)



# 2016年MLF行きビームの解析

ビーム取り出し後のヒットはMichel陽電子が支配的であるとする、陽電子の検出効率の減少に伴いBLMヒット数も減少するはず

⇒  $R_{AP}^{new} = (40 \times \text{BLMヒット数}) / (\text{全陽子数}) < 10^{-20}$  となる事が期待出来る

- 今回測定した取り出し回数 : 5729404
  - 取り出された全陽子数 :  $9.23 \times 10^{19}$  protons
- 取り出し後2 $\mu$ s中 : 3 hits ( $0 < n_{hit} < 5.3$  hits 90% C.L.)
  - $R_{AP}^{new} < 2.3 \times 10^{-18}$  (90% C.L.)  
(2013年解析 :  $R_{AP} < 2.2 \times 10^{-18}$  )
  - 2013年の結果とは無矛盾
    - Michel陽電子ではない粒子のヒットであったり、BLMの性能が思ったほど出ていない可能性もある
- 統計量が十分ではないため、今後測定を続けていく必要がある

# まとめ

- $\mu$ -e 転換過程は標準模型を超えた物理では探索可能
- $\mu$ -e 転換過程探索実験DeeMeがJ-PARC MLFで計画されている
- アフタープロトンがバックグラウンド源となり得る
  - BLMでモニターする
- 電磁シャワーを生かして電子不感なBLMへアップグレード
  - シミュレーションにより電子の検出効率を $\sim 10^{-4}$ と見積もった
- 5日間の測定の結果2013年の解析結果と無矛盾な結果が得られた
  - 統計量が不十分であったため、今回の測定だけではBLMの性能向上を確認する事は出来なかった

## 今後の展望

- 測定を続け新しいBLMの性能を確認
- APバックグラウンドのメカニズムなどを研究
- BLMヒット数とAP数の比を実験的に決定