

# Mu $\rightarrow$ $\overline{\text{Mu}}$ 転換の探索に向けた Mu の真空への引き出し

京都大学 理学部

2018年度 課題研究P2

富永 辻川 中川 西田

# 背景

- $\text{Mu} \rightarrow \overline{\text{Mu}}$  : レプトンファミリー数非保存過程
- 標準模型では起こらないが、いくつかのbeyond standard model では起こると予想されている
- 転換率  $P(\text{Mu} \rightarrow \overline{\text{Mu}})$  の上限を(実験的に)与えることは意味がある

# 背景

- $\text{Mu} \rightarrow \overline{\text{Mu}}$  の転換は真空中でないと大きく抑制される
- 真空中に  $\text{Mu}$  を引き出す必要性

# 目的

1.  $\mu$  の生成を確認
2.  $\mu$  を真空に引き出す
3.  $\mu \rightarrow \bar{\mu}$  転換を探索(次年度以降)

# 方法(概略)

## 1. Mu の生成を確認

- $\mu\text{SR}$ ,  $m\text{SR}$  の振幅から生成率を計算

## 2. Mu を真空に引き出す

- $\mu^+$  の崩壊に伴う  $e^+$  をトラッキング

## 3. $\text{Mu} \rightarrow \overline{\text{Mu}}$ 転換を探索(次年度以降)

- (候補1)  $\overline{\text{Mu}}$  の軌道  $e^+$  を加速・選別
- (候補2)  $\mu^-$  をタングステンに吸収させ、特性X線を見る

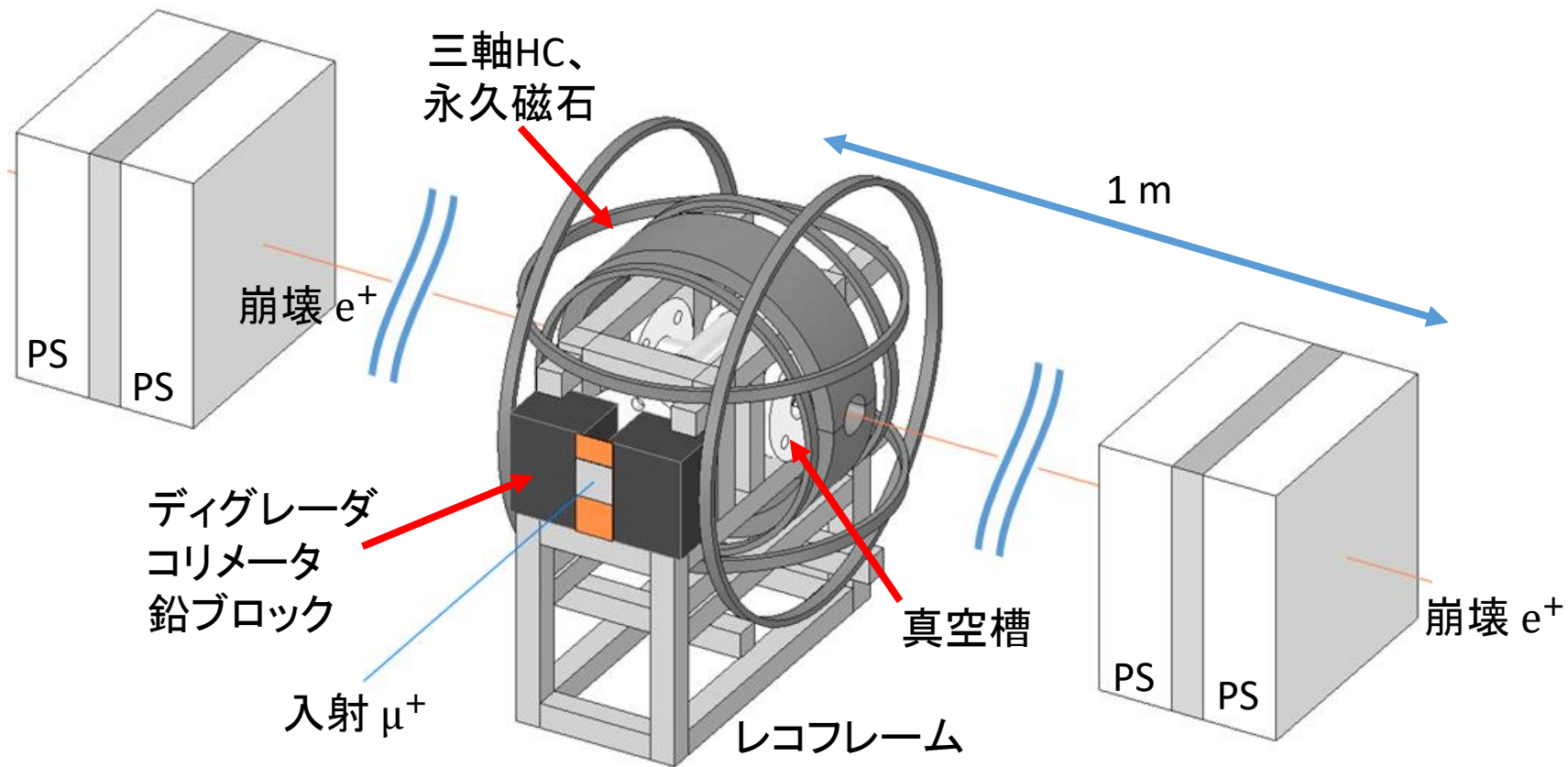
# お借りするビーム

- J-PARC MLF D2 line
- ビームタイム 2/17 9:00-21:00

# 1. Mu 生成

SiO<sub>2</sub>で  $\mu^+$ ビームを止め Mu を生成する  
 $\mu$ SR、mSRにより生成率を求める

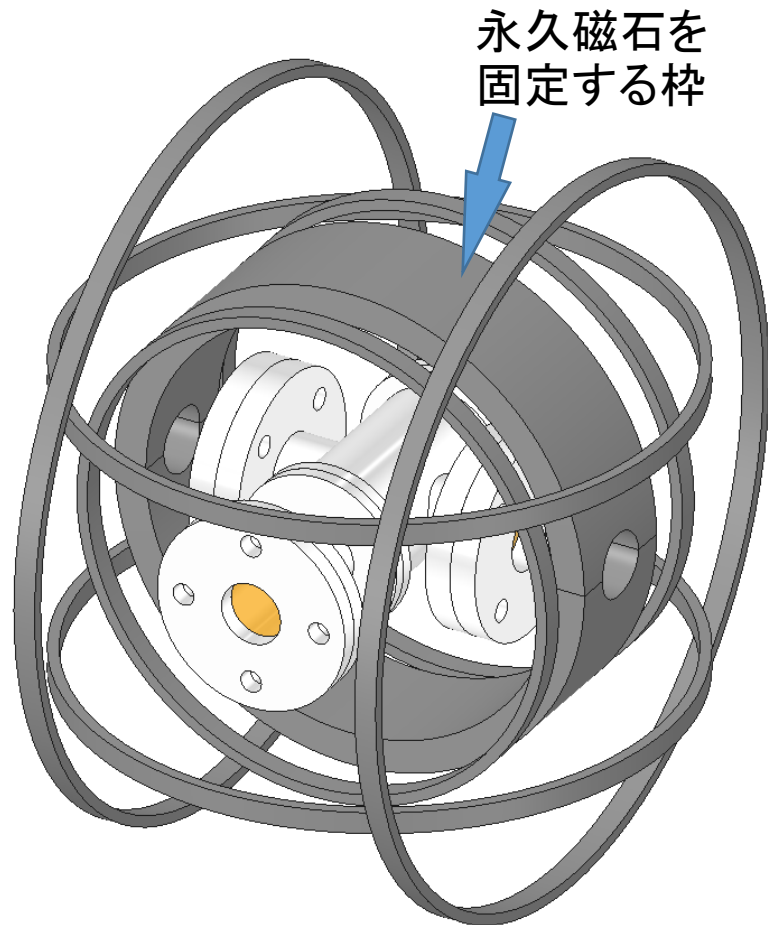
# 装置全体像 (Mu 生成)





# 磁場調整

- 3軸HC
  - ~ 0.05G精度で2Gまで出せるもの
  - 水平方向は環境磁場のキャンセル用
  - 垂直方向はmSR用(1.23G)
- 永久磁石
  - $\mu$ SR用、垂直方向に127G
    - mSRのときは枠ごと取り外す
  - 去年作った物の2倍の磁場
    - 参考: 2017 P2レポート p.20 図22 [https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P2/P2-17/P2\\_2017\\_report\\_muon.pdf](https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P2/P2-17/P2_2017_report_muon.pdf)



# ビーム入射・静止

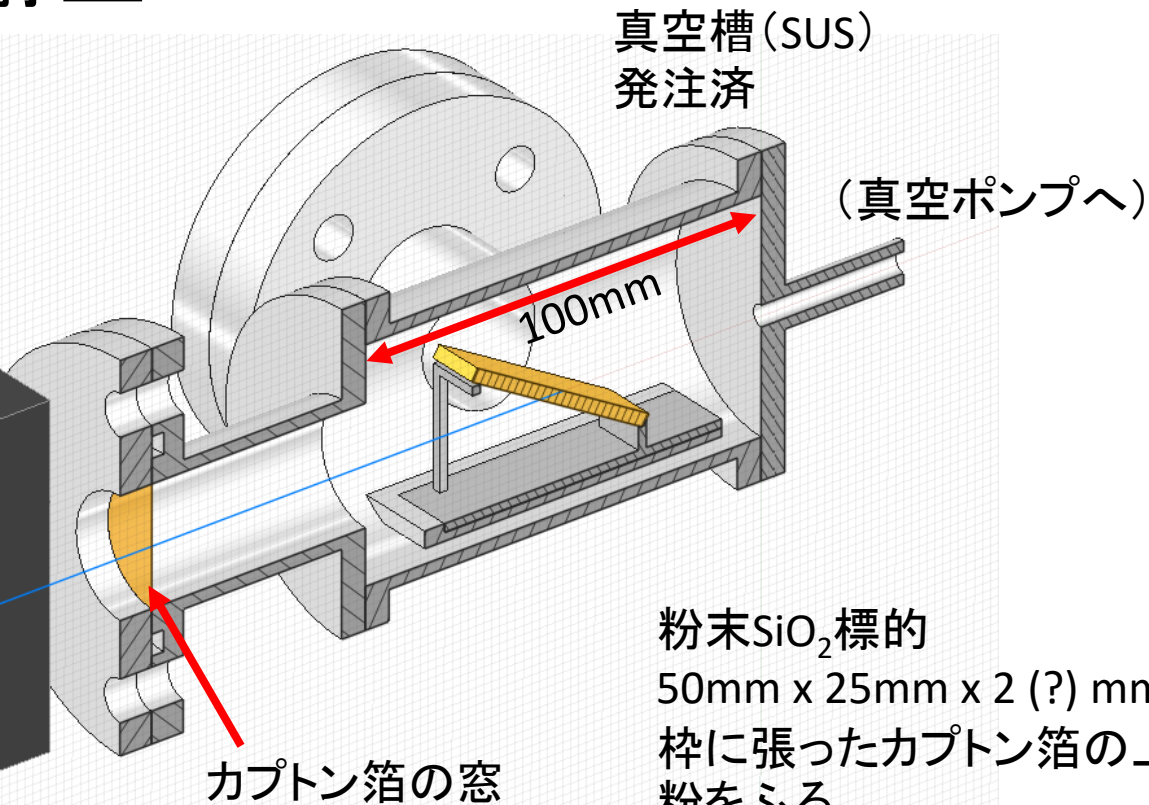
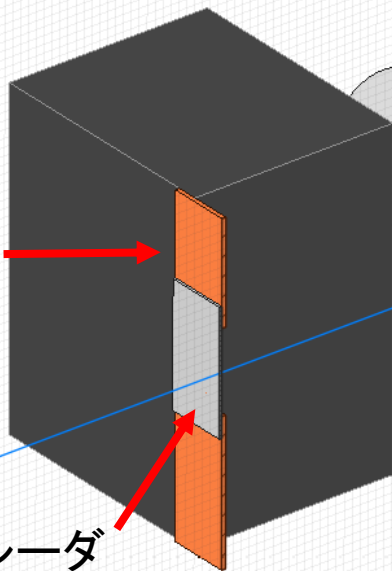
↑ 垂直磁場  
1.23G for mSR  
127G for  $\mu$ SR

鉛ブロック

銅コリメータ  
(20mmの  
穴あき)

入射  $\mu^+$

アルミディグレーダ



真空槽 (SUS)  
発注済

(真空ポンプへ)

100mm

カプトン箱の窓

粉末SiO<sub>2</sub>標的  
50mm x 25mm x 2 (?) mm  
枠に張ったカプトン箔の上に  
粉をふる

# ビーム入射・静止



垂直磁場

1.23G for mSR

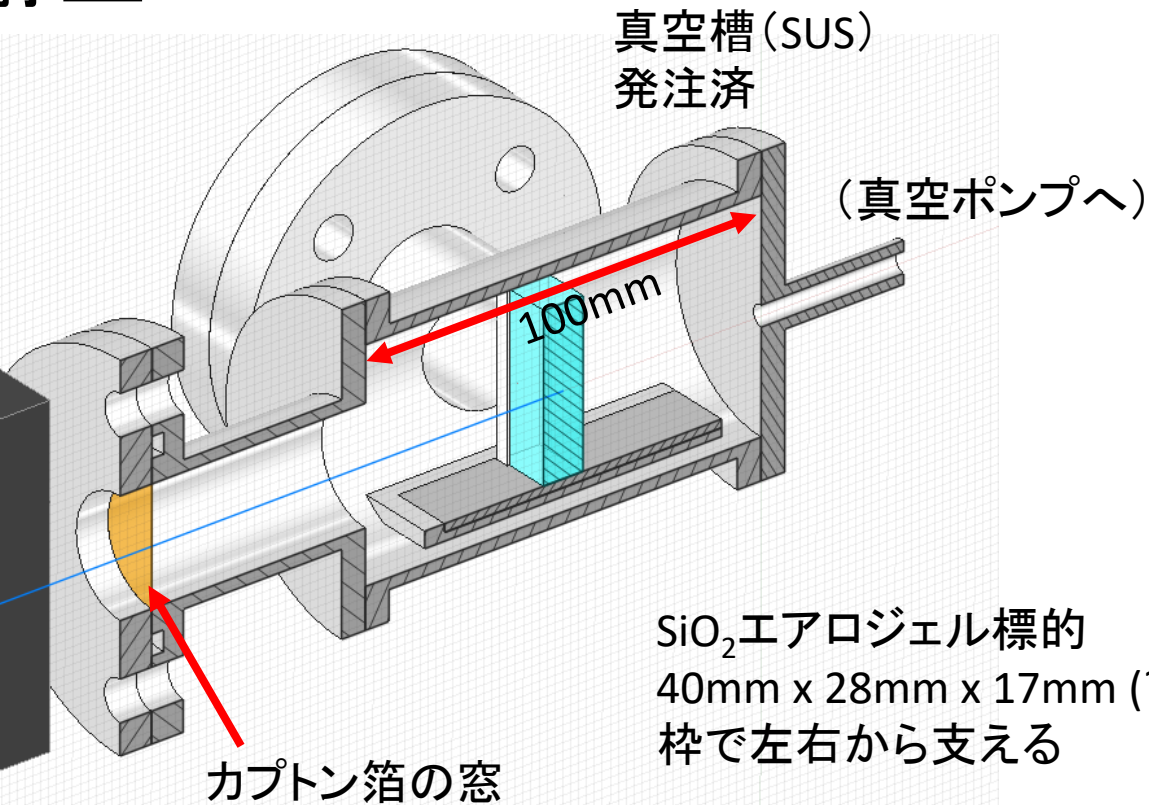
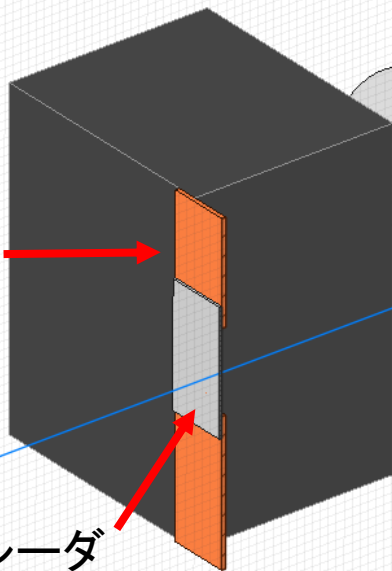
127G for  $\mu$ SR

鉛ブロック

銅コリメータ  
(20mmの  
穴あき)

入射  $\mu^+$

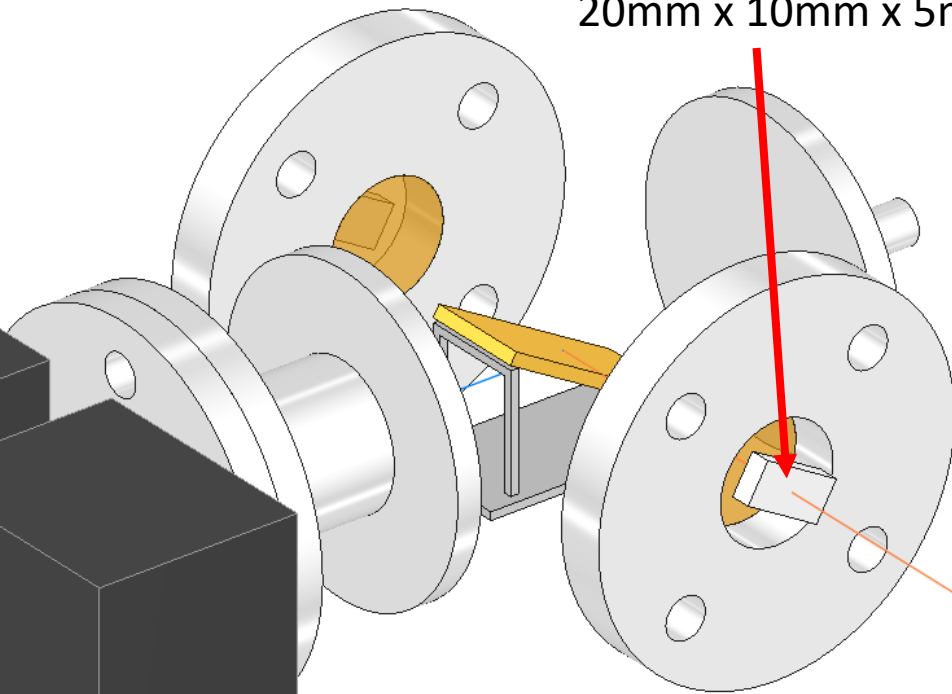
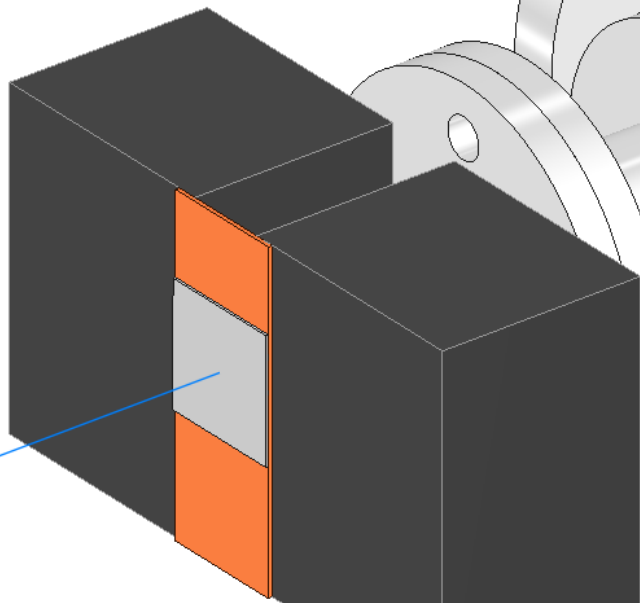
アルミディグレーダ



# $e^+$ 検出

↑ 垂直磁場  
1.23G for mSR  
127G for  $\mu$ SR

入射  $\mu^+$



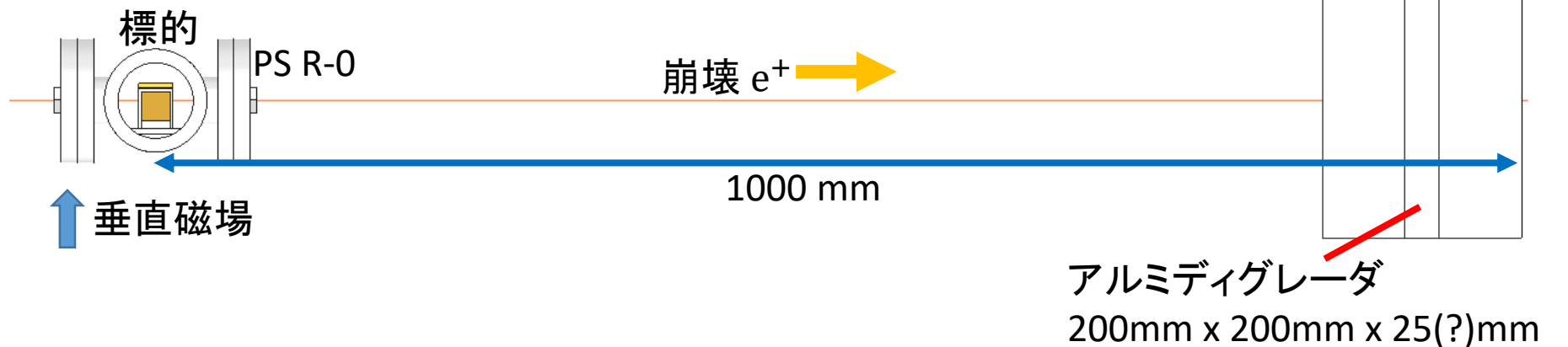
右側フィンガーカウンター  
(以降PS R-0)

20mm x 10mm x 5mm (?)

崩壊  $e^+$   
PSへ

# $e^+$ 検出

- R-0 & R-1 & R-2 の coincidence を  $\text{Count}_R(t)$  とする
- 標的中で崩壊した、高エネルギーの  $e^+$  のみ検出
  - Threshold :  $m_\mu/4 \simeq 26 \text{ MeV}$ 
    - Asymmetry を大きくするため
  - 要 Al ディグレーダの厚み計算 (Geant4)

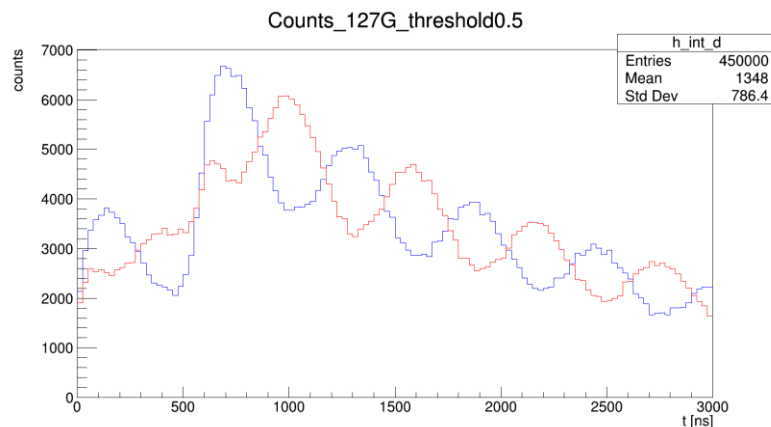
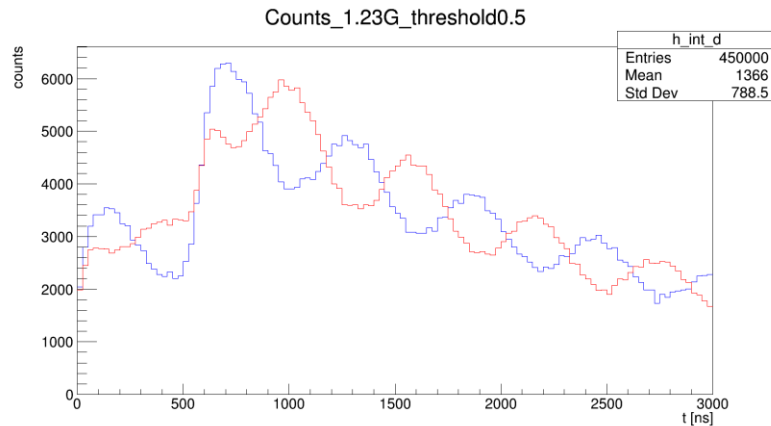


# e<sup>+</sup> 検出

- 40 MHz のFADCで読み出す
  - 動作クロックが去年使用したFADCの1/10
  - そのままではPSの早い信号が見えないので、RC回路で信号を引き伸ばす
  - その分パイルアップしやすくなる
- 5 counts/pulse を目標にビームを絞る
  - 去年は 8~9 counts/pulse だった
  - 去年より立体角が広い代わりに、標的で止まる割合が少ない
    - 両者の寄与はほぼキャンセルする
    - 残りの1/2倍はビームライン備え付けの絞りで調整できると考えている
- カウントレート:  $125 \text{ counts/s} = 4.5 \times 10^5 \text{ counts/h}$

# シミュレーション

- Toy Monte Carlo
  - Larmor歳差運動 ( $\mu^+$ ,  $Mu$ )
  - ミッセル分布  $\rightarrow$  崩壊角度分布
- 右図:  $4.5 \times 10^5$  発 (1時間分) を標的に止めた場合のシミュレーション結果
  - 2バンチ、FWHM  $\sim 100$  ns 考慮済み
  - スピン緩和、磁場不均一性、検出器の効率などは未考慮



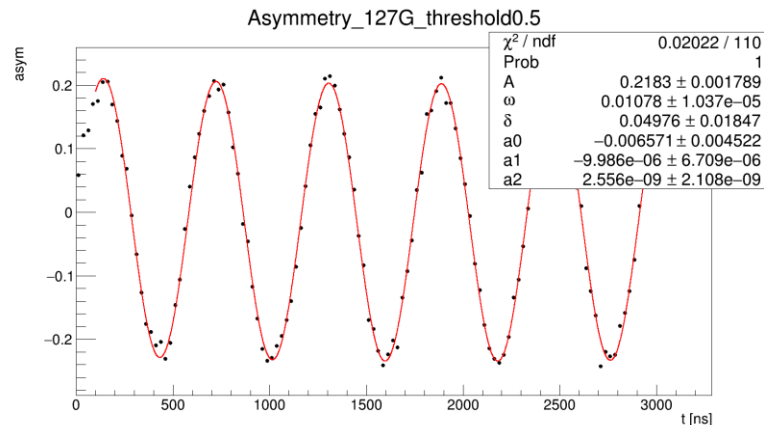
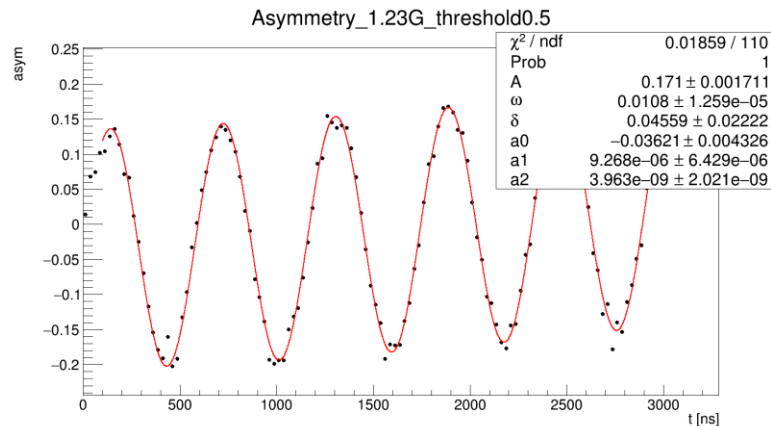
# シミュレーション

- $\text{Asym.} = \frac{\text{Count}_R - \text{Count}_L}{\text{Count}_R + \text{Count}_L}$  を計算
- 理論予想 (スピン緩和無視):
  - $\text{Count}_{R,L} = C e^{-t/\tau_\mu} \left[ (1 - R)(1 \pm P \sin \omega_\mu t) + R \left( 1 \pm \frac{P}{2} \sin \omega_{\text{Mu}} t \right) \right]$
  - $\text{Asym.} = P \left( (1 - R) \sin \omega_\mu t + \frac{R}{2} \sin \omega_{\text{Mu}} t \right)$ 
    - $R$ : Mu 生成率
    - $P$ : ミツシエル分布を積分して求まる定数
- $\omega_{\text{Mu}} \simeq 103\omega_\mu$  なので実効的にどちらかの振動しか見えない



# シミュレーション

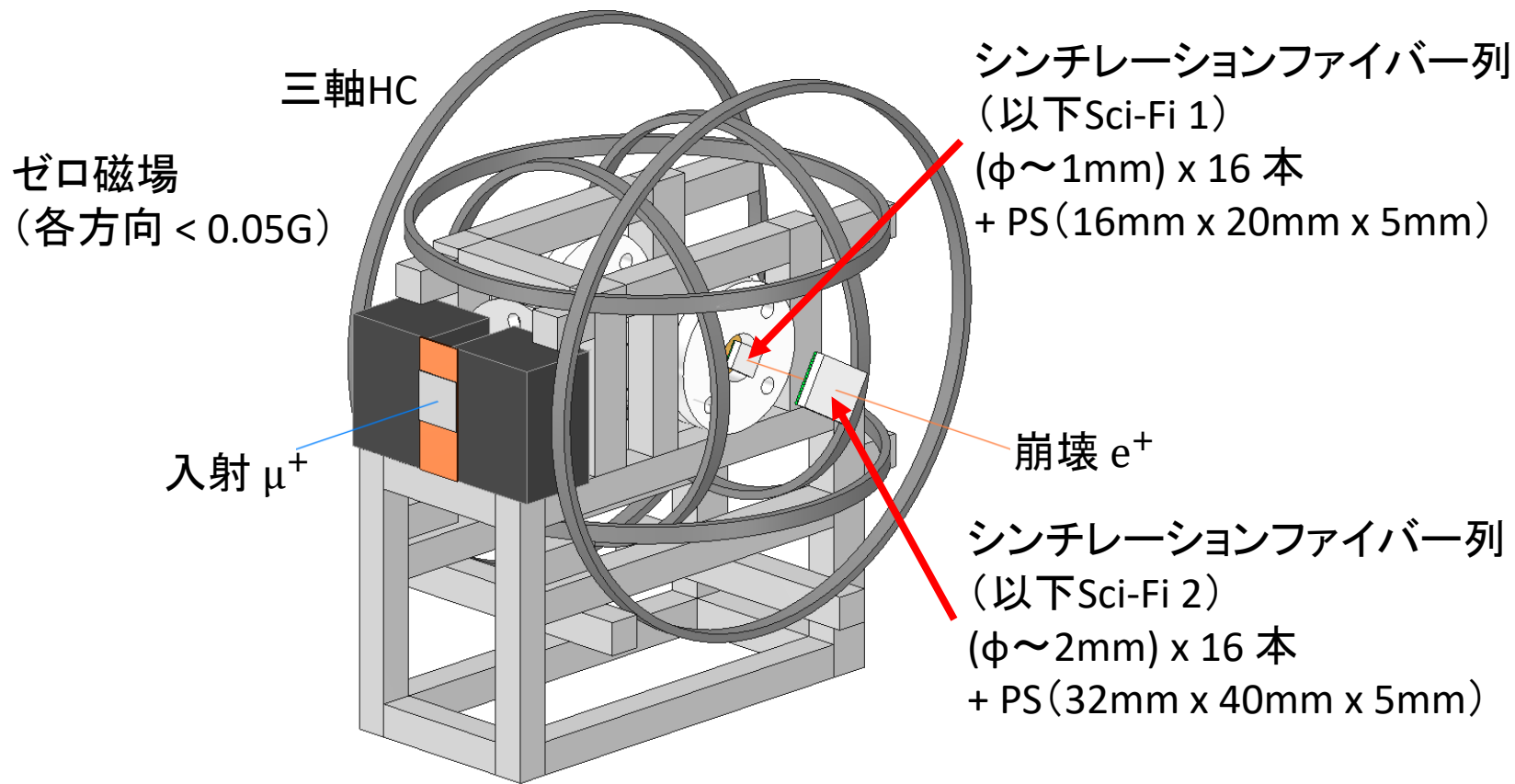
- Asym. を  $A \sin(\omega t + \delta) + (\text{二次関数})$  でfit
- 振幅比から Mu 生成率を計算
  - $R = \frac{2A_{\text{Mu}}}{A_{\mu} + 2A_{\text{Mu}}}$
  - 右の例では  $R = 0.6106 \pm 0.0024$
  - シミュレーションで与えた値  $R = 0.61$
- ビームの時間的広がり、2バンチを考慮しても十分fitできている
- このセットアップで Mu を観測できると考える



## 2. 真空へ引き出し

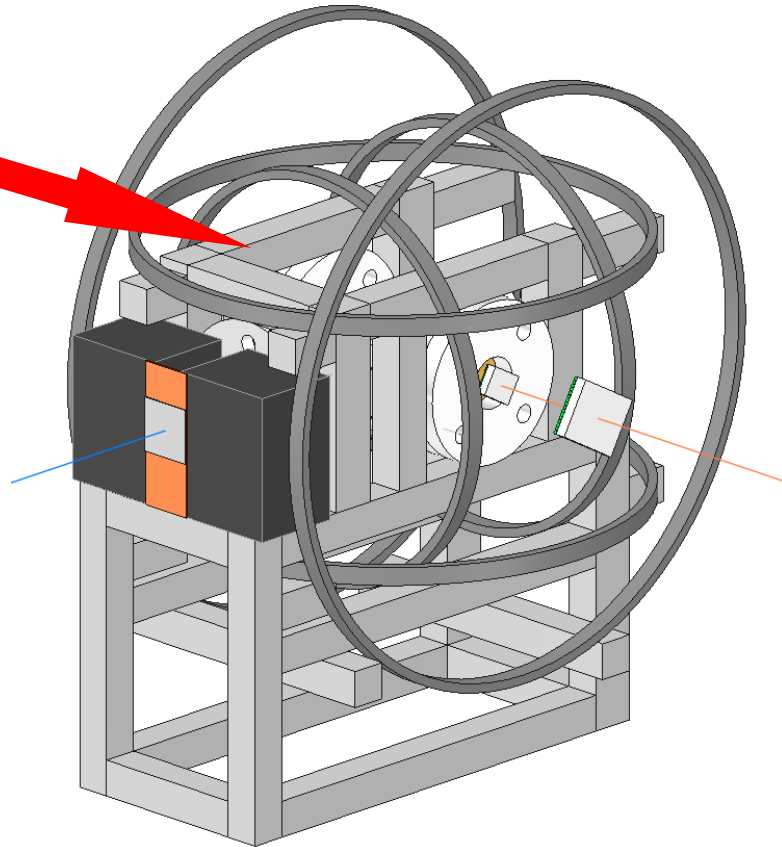
$\mu^+$  の崩壊に伴う  $e^+$  をトラッキングすることにより  
真空中への  $\mu$  の拡散を確かめる

# 装置全体像(真空引き出し)



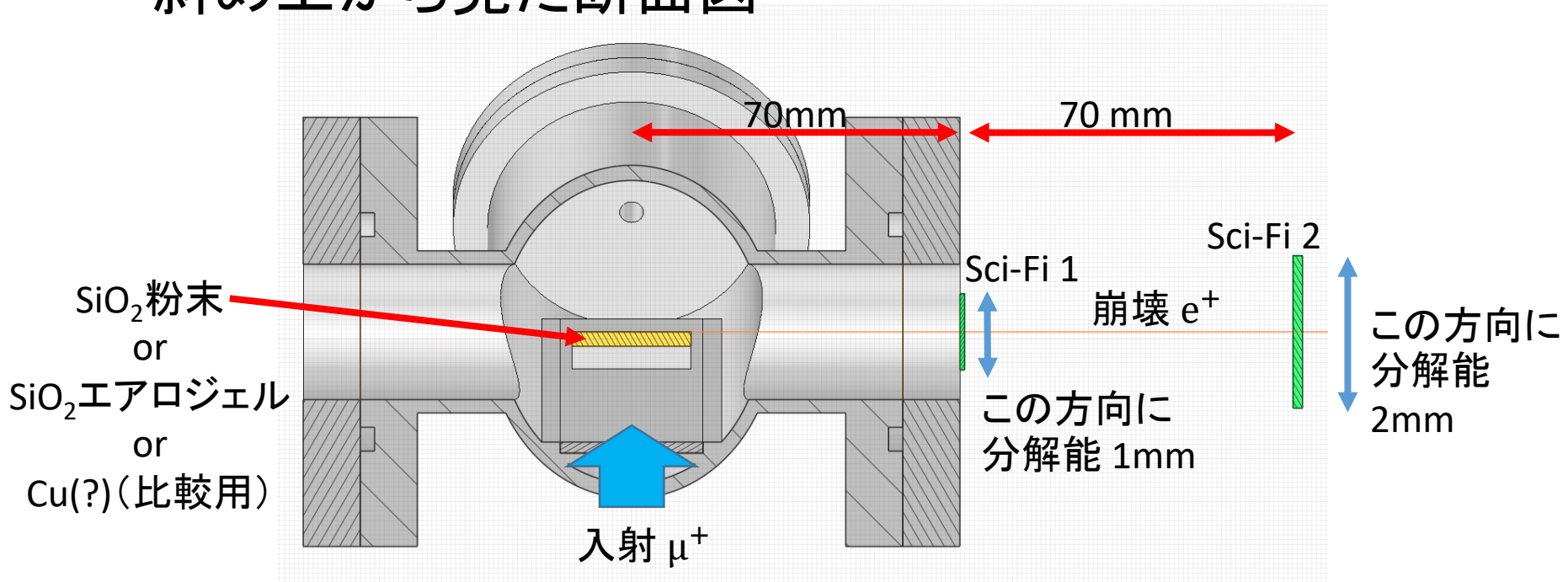
# トラッキング

斜め上から見た  
図を次に示す



# トラッキング

- 斜め上から見た断面図

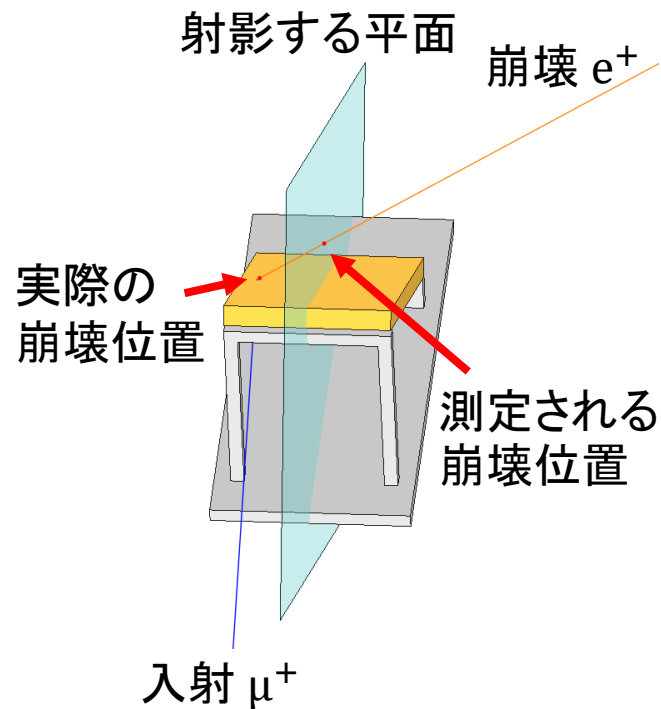


# 信号読み出し

- 2x16chのSci-Fiの光を2x16個のMPPCで読み出す
- 16ch FADCでデジタル化、記録
- 立体角制限用(&高エネルギー抽出用?)のPSの信号もFADCで読み出す

# 崩壊位置の再構成

- Sci-Fi 1, 2を通過した位置  $h_1, h_2$  から外挿して Mu の崩壊位置  $h$  を再構成
  - $h = 2h_1 - h_2$
  - 2 mm の精度で  $h$  を測定できる
- ビームの左右方向の広がりによりずれる
  - 右図のように、実際は  $h = 0$  で崩壊しているも、射影の結果  $h \neq 0$  で崩壊したように見えてしまう
- 比較のために Cu 標的のデータを用いる

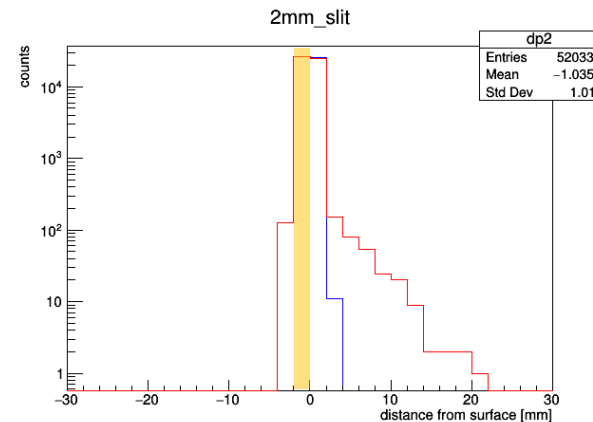
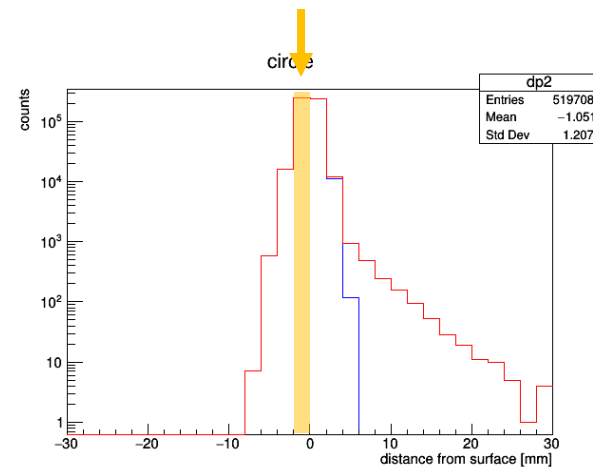


# シミュレーション

- Toy MC シミュレーション

- 1時間分の  $\mu^+$  を入射
- ターゲット領域で適当な分布で止まる
  - 今回は下流側表面を中心とするGaussian(の両端をカットしたもの)を仮定した
- そのうち表面付近(厚み換算1%以内)で止まったものが標的 surface 法線方向に拡散
  - 速度分布: 300K Maxwell分布
  - 角度分布:  $\cos \theta$  分布
- 崩壊、等方的に  $e^+$  を放出
- 崩壊位置を外挿しヒストグラム化

ターゲット領域

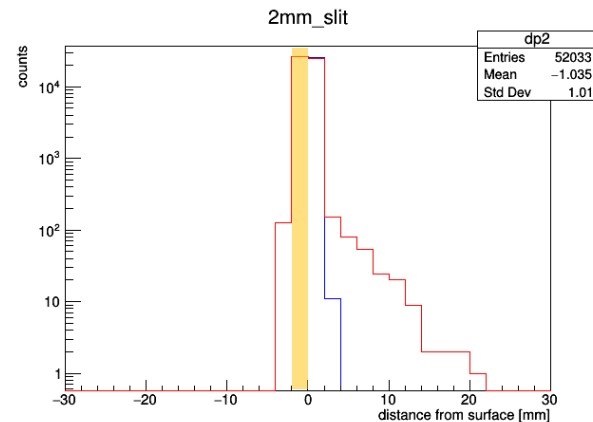
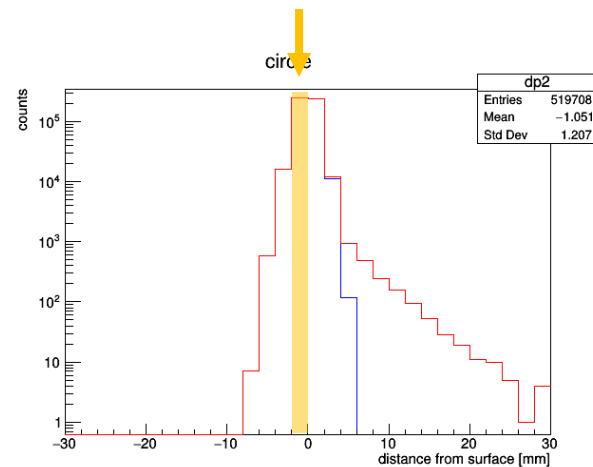




# シミュレーション

- 青線: 真空への放出なし
- 赤線: 表面付近の Mu が真空へ放出される
- 上段: 内径 20 mm のコリメータのみ
- 下段: さらに幅 2 mm の縦長スリットを通した場合
  - 位置の推定は正確になるが、統計が減る

ターゲット領域



# カウントレート

- 立体角はmSR/ $\mu$ SRのPSと同じぐらい

- $0.1 \times \frac{0.04\text{m} \times (0.002\text{m} \times 16)}{4\pi(0.14\text{m})^2} \approx \frac{(0.05\text{m})^2}{4\pi(0.75\text{m})^2}$

- パイルアップは起こらないと考える
- カウントレートも同程度、 $\sim 4.5 \times 10^5$  counts/h

# 実験手順

# [0-1] Helmholtz Coil 組み立て(前日)

1. ターゲット領域の磁場を3軸とも測っておく
  - 磁場プローブは化研 岩下さんからお借りする
2. 3軸HC、真空槽を組み立てる
  - 真空槽の裏蓋は開けておく
  - 永久磁石はまだ使わない
3. 事前に作成した「電流vs磁場」表を参考に電流をかけていく
  - 1月初旬に作成予定
4. 目標精度まで調整を続ける
  - 水平方向 0.05G以下
  - 垂直方向  $1.23 \pm 0.05$  G

## [0-2] 検出器設置(前日)

1. PS [L, R] [0, 1, 2] 計6個のPSを設置
2. L, Rができるだけ左右対称になるようにチェック
  - 去年は位置出しにレーザーを使用
  - 今年もお借りできないでしょうか？
3. 回路組み立て
  - PMTの出力をFADCに入れる
4. 組み終わったら動作チェックをしたいが、良い方法は.....

# [1] Mu 生成

1. 磁場が前日から変動していないか確認
2. ターゲット台を準備
  - 粉末の場合: 傾斜したカプトン箔の上に粉をふる
  - エアロジェルの場合: 表面をアルコールで洗浄し、枠にセットする
    - これによりyieldを少し上げることができると報告されている
    - Schwarz et al., *Journal of Non-Crystalline Solids* 145 (1992年1月): 244–49.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(05\)80465-X](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(05)80465-X).
3. 真空槽にターゲット台を挿入(慎重に)
4. 裏蓋をして真空引き
  - $\text{Mu} \rightarrow \overline{\text{Mu}}$  を見るなら1Pa欲しいが、今回は $10^3\text{Pa}$ まで

# [1] Mu 生成

## 5. テストラン

- 5 counts/spill となるように絞りを調整

## 6. データテイキング 1-1 (mSR)

- 1時間

## 7. 永久磁石をセット

## 8. データテイキング 1-2 ( $\mu$ SR)

- 1時間

# [1] Mu 生成

## 9. ターゲットを交換

- 粉末、エアロジェルの両方を試して比較したい

## 10. 真空引き

## 11. データテイキング 1-3, 4, ...

## 12. PS [L/R] [0, 1, 2] を撤収

← (時間的余裕があれば)



## [2] 真空へ引き出し

1. Sci-Fi 1, 2 を設置
2. 位置合わせ
3. テストラン
4. データテイキング 2-1
5. 標的を比較用Cu板に入れ替え
6. 真空引き
7. データテイキング 2-2

## [2] 真空へ引き出し

8. ターゲットを交換

9. 真空引き

10. データテイキング 2-3, 4, ...

11. (翌日)全装置撤収

← (時間的余裕があれば)

解析

# [1] Mu 生成

1. FADCのデータからシグナルを抽出、寿命をヒストグラム化
  2. シミュレーションと同様に Asym. を計算、fitting
    - fitting関数はデータによっては変える必要あり(スピン緩和因子など)
  3.  $\mu^+$  と Mu の振幅比から Mu 生成率を計算
- Leadingな誤差は Asym. のフィッティング誤差と予想される
- 十分なカウントを貯めることが重要

## [2] 真空へ引き出し

1. FADCのデータから有効なシグナルを抽出
2. Sci-Fi 1, 2 を通過した位置  $h_1, h_2$  から外挿して Mu の崩壊位置  $h$  を特定
3. 崩壊位置  $h$  をヒストグラム化
4. Cu標的のヒストグラムと比較
5. (詳細未定) 有意に標的から離れて崩壊している Mu のカウント数を求め、Mu 生成数で割って引き出し割合を求める
  - Mu 生成数は[1]の結果を用いて計算