

$\text{Mu} \rightarrow \overline{\text{Mu}}$ 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

- $\mu \rightarrow \bar{\mu}$: 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 $P(\mu \rightarrow \bar{\mu})$ 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 Mu を引き出す必要性

目的

1. μ の生成を確認
2. μ 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

- μSR , $m\text{SR}$ の振幅から生成率を計算

2. Mu を真空中に引き出す

- μ^+ 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) μ^- をタングステンに吸収させ、特性X線を見る

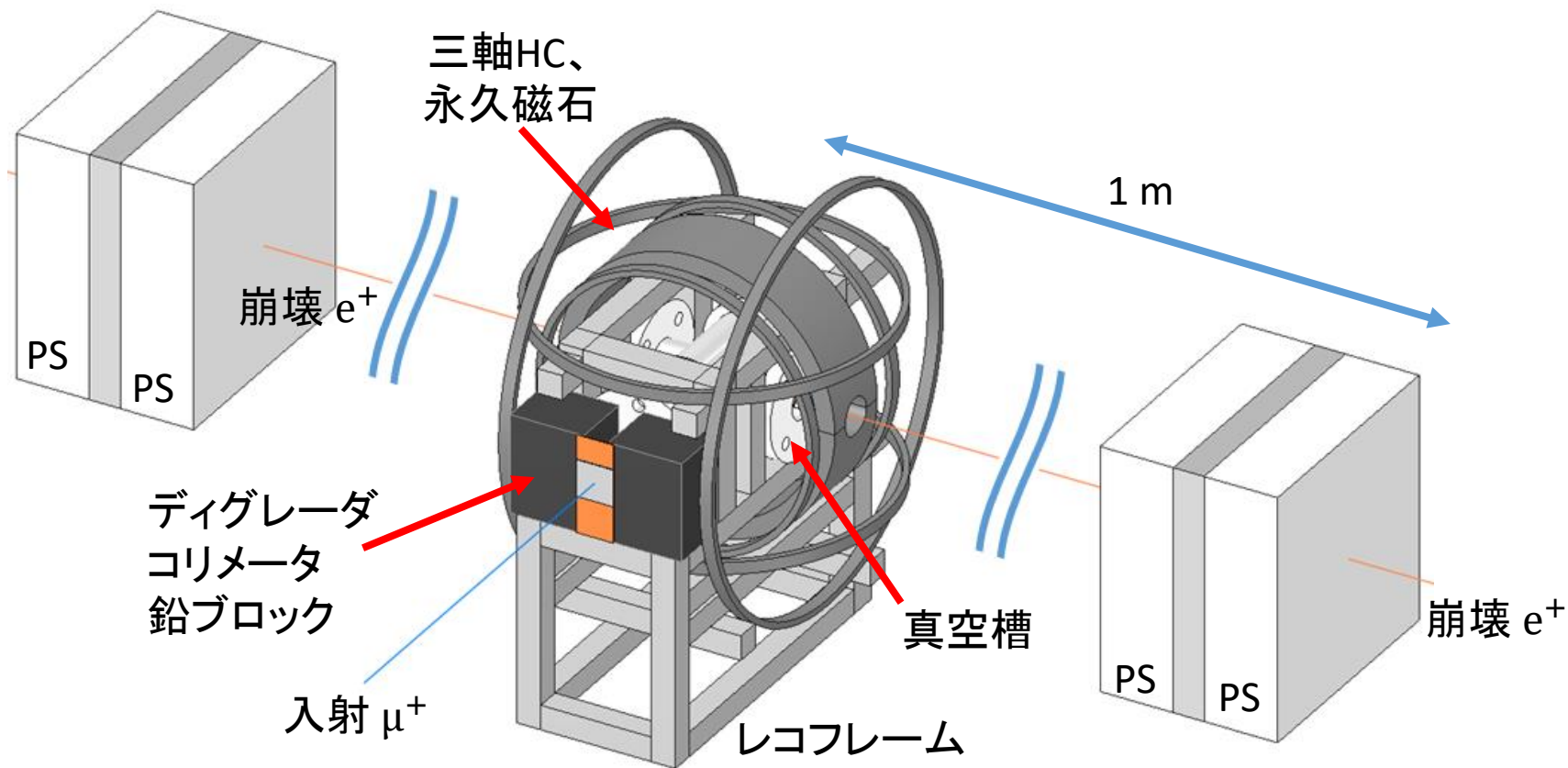
お借りするビーム

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

1. Mu 生成

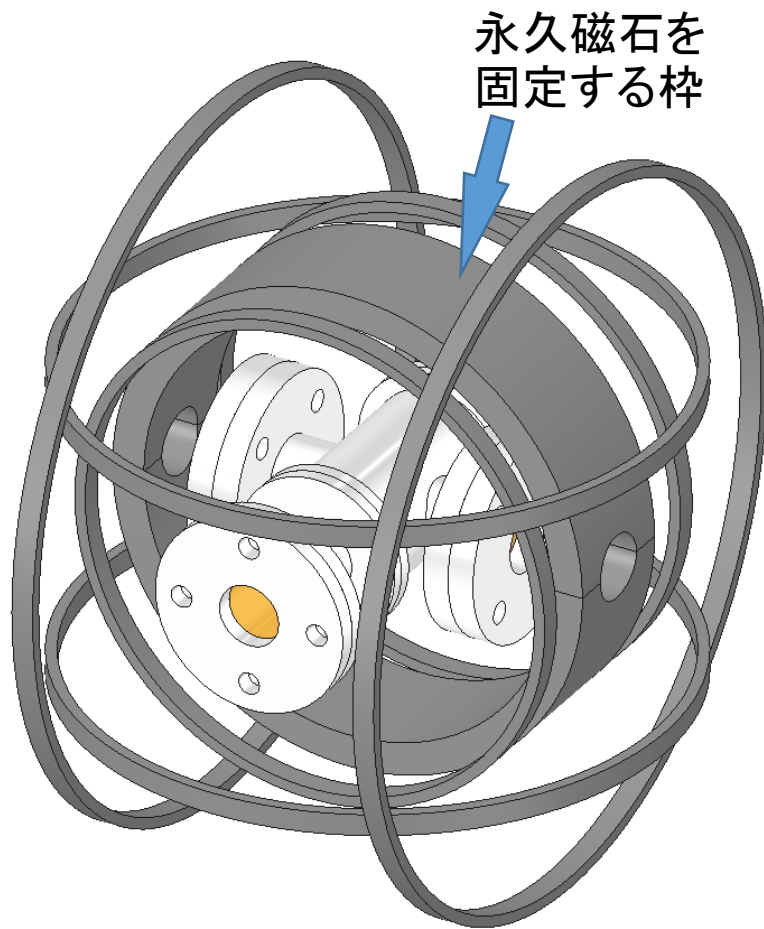
SiO_2 で μ^+ ビームを止め Mu を生成する
 μSR 、 mSR により生成率を求める

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
 - μ 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



ビーム入射・静止



垂直磁場

1.23G for mSR

127G for μ SR

鉛ブロック

銅コリメータ
(20mmの
穴あき)

入射 μ^+

アルミディグレーダ

真空槽(SUS)
発注済

(真空ポンプへ)

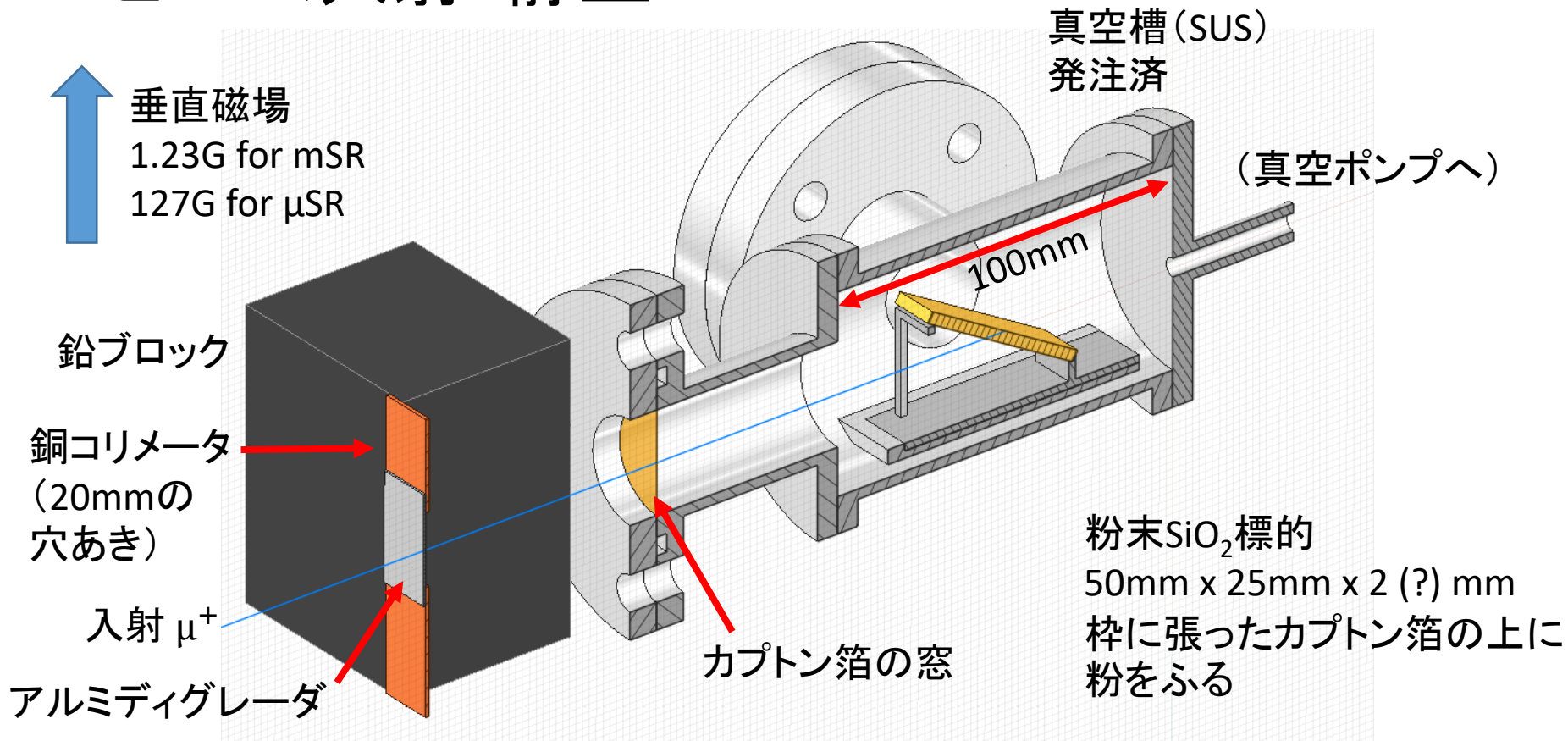
100mm

カプトン箔の窓

粉末 SiO_2 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 μ SR

鉛ブロック

銅コリメータ
(20mmの
穴あき)

入射 μ^+

アルミディグレーダ

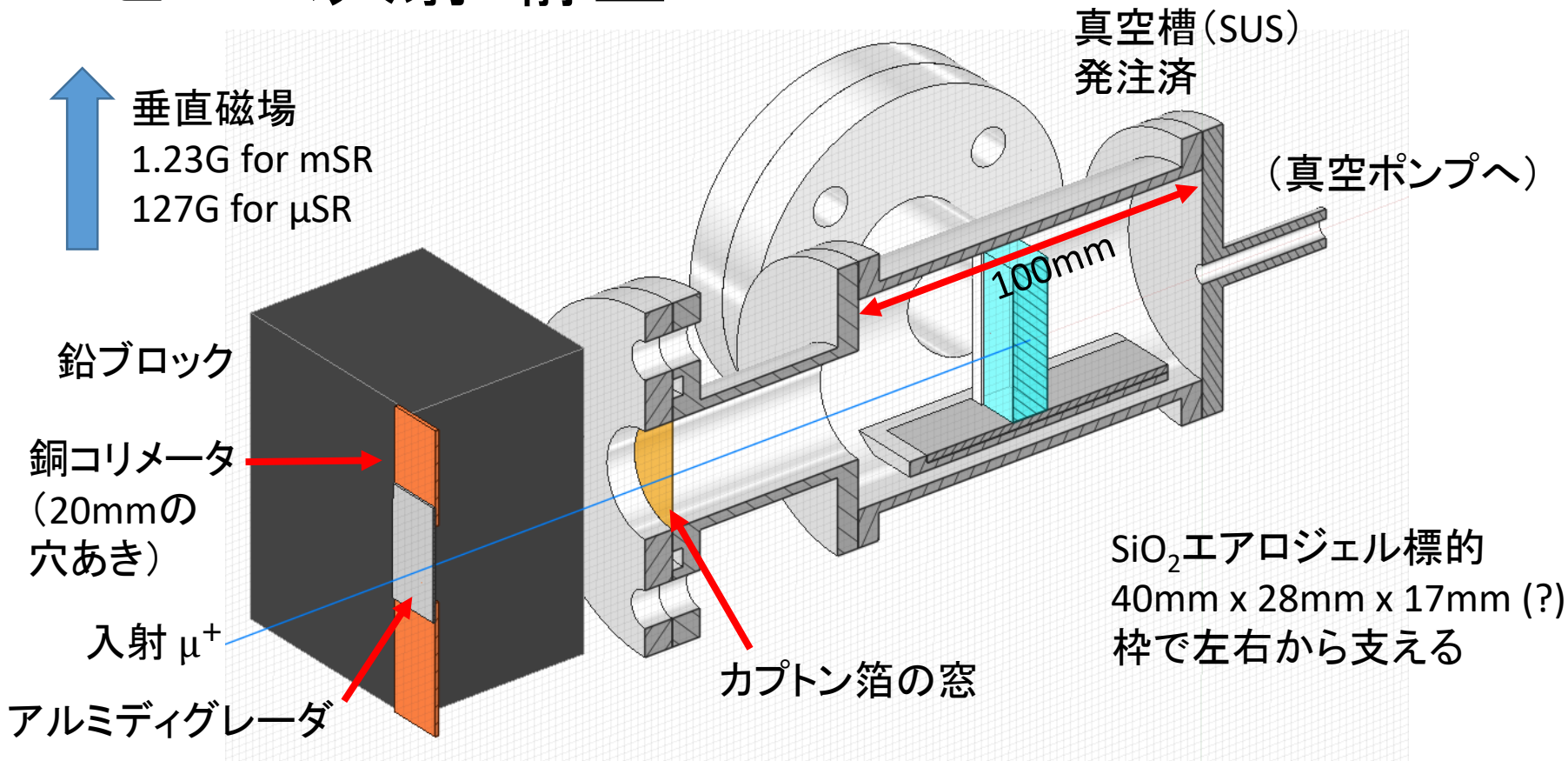
真空槽(SUS)
発注済

(真空ポンプへ)

100mm

カプトン箔の窓

SiO_2 エアロジェル標的
40mm x 28mm x 17mm (?)
枠で左右から支える



e^+ 検出

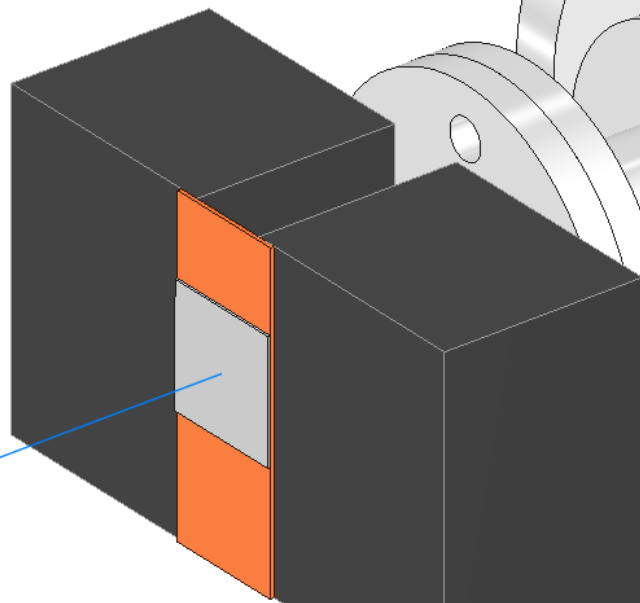


垂直磁場

1.23G for mSR

127G for μ SR

入射 μ^+



右側フィンガーカウンター
(以降PS R-0)

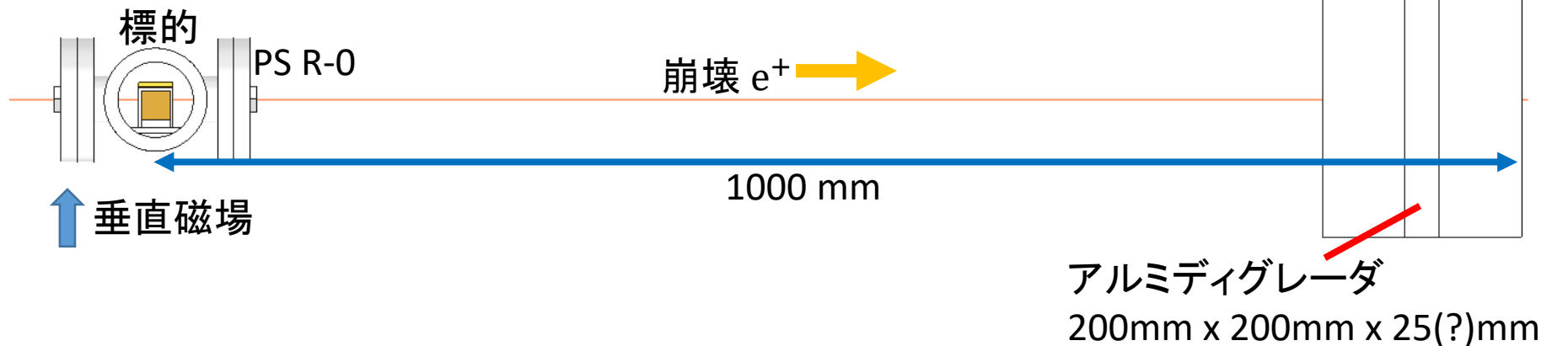
20mm x 10mm x 5mm (?)



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)

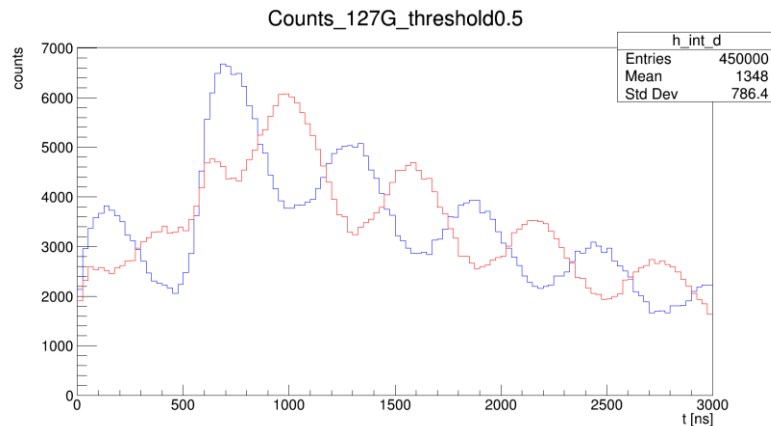
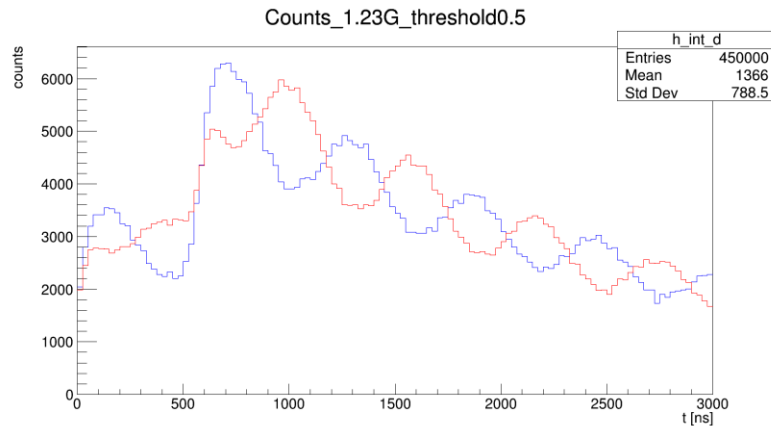


e⁺ 検出

- 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 (μ^+ , Mu)
 - ミッセル分布 $\rightarrow$ 崩壊角度分布
- 右図: 4.5×10^5 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 ~ 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

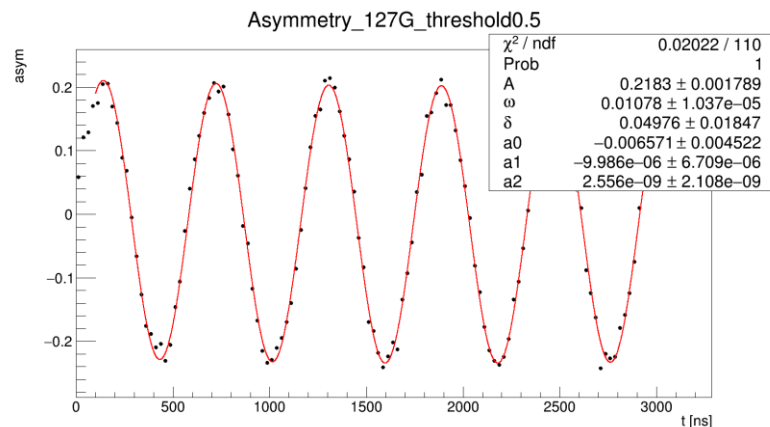
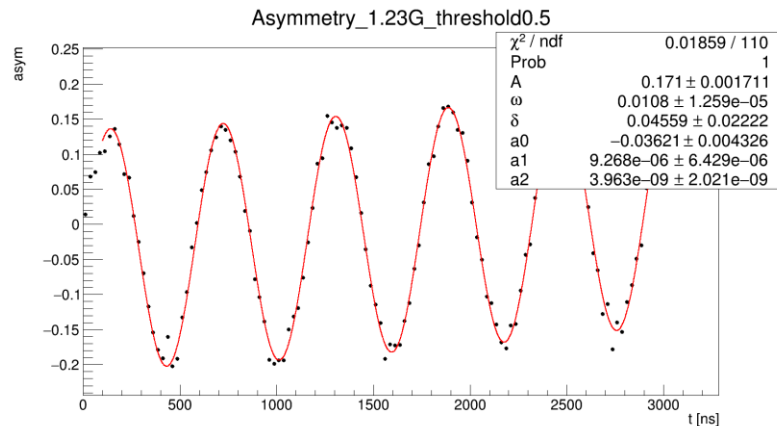


シミュレーション

- $\text{Asym.} = \frac{\text{Count}_R - \text{Count}_L}{\text{Count}_R + \text{Count}_L}$ 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

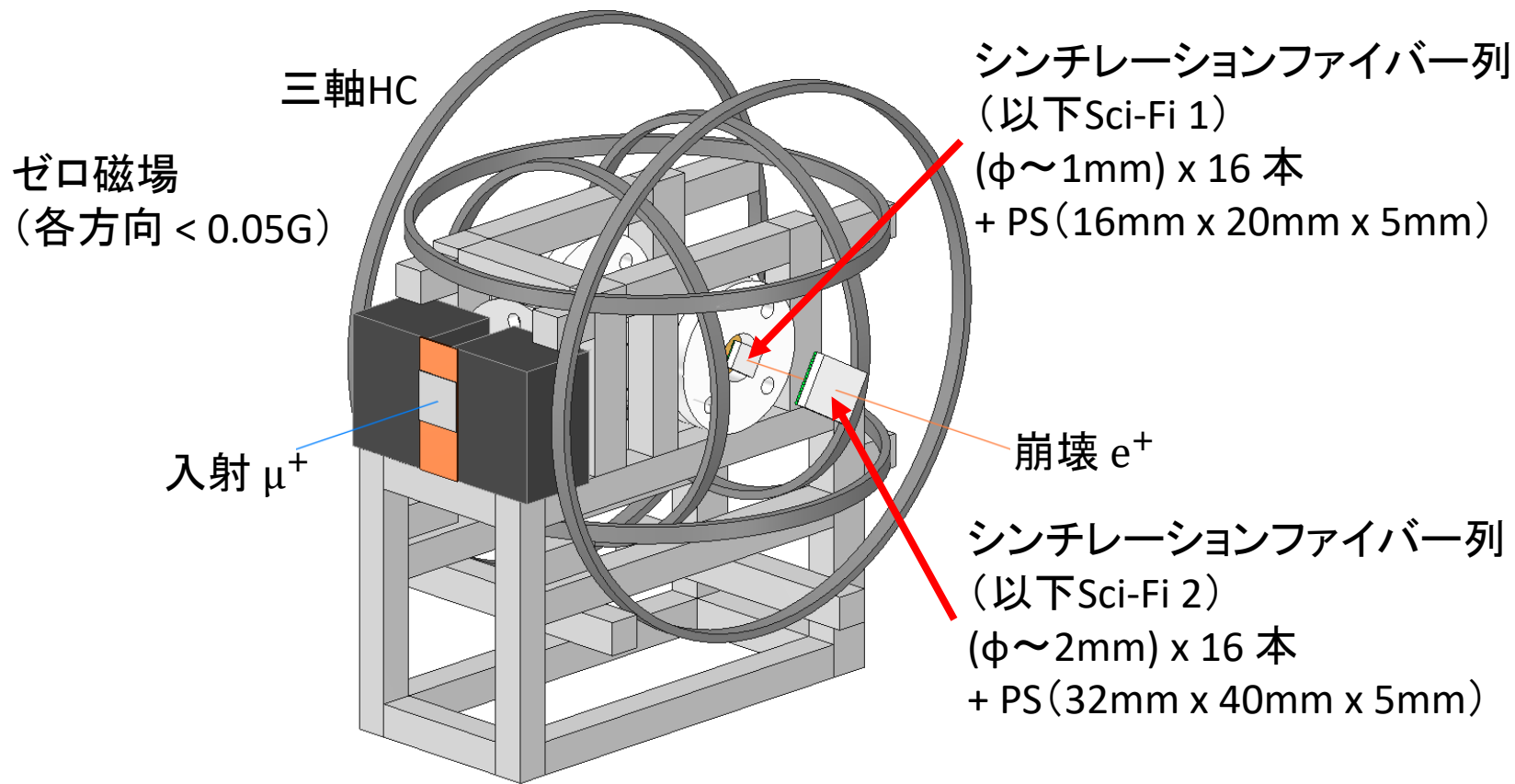
- Asym. を $A \sin(\omega t + \delta) + (\text{二次関数})$ でfit
- 振幅比から Mu 生成率を計算
 - $R = \frac{2A_{\text{Mu}}}{A_{\mu} + 2A_{\text{Mu}}}$
 - 右の例では $R = 0.6106 \pm 0.0024$
 - シミュレーションで与えた値 $R = 0.61$
- ビームの時間的広がり、2バンチを考慮しても十分fitできている
- このセットアップで Mu を観測できると考える



2. 真空へ引き出し

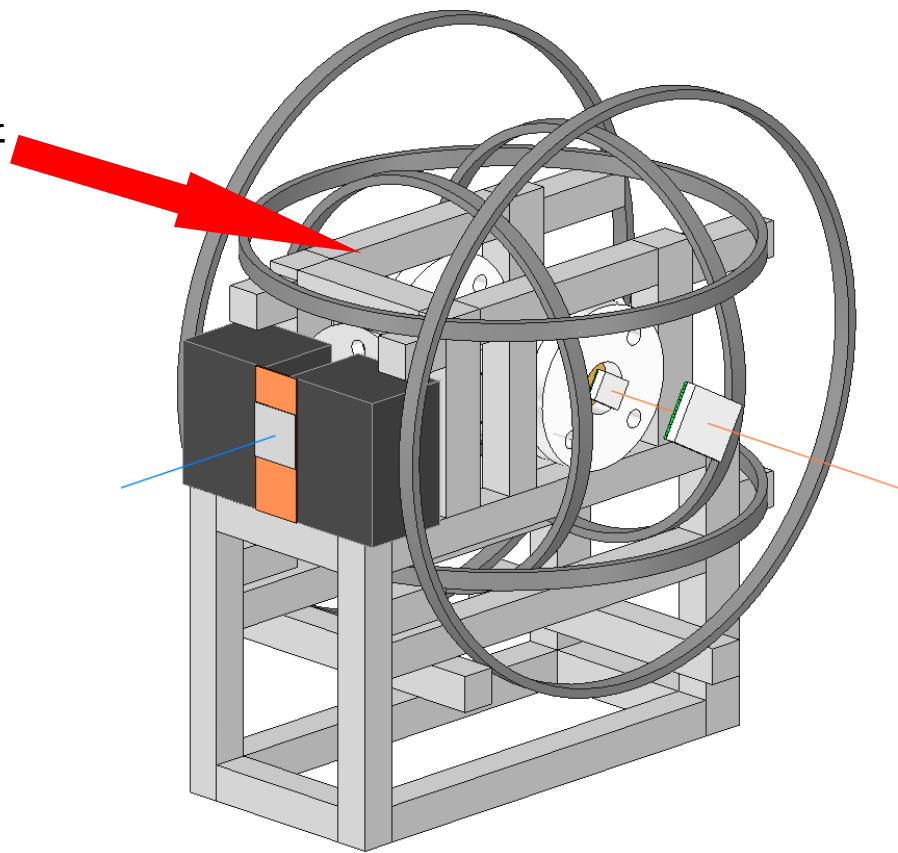
μ^+ の崩壊に伴う e^+ をトラッキングすることにより
真空中への μ の拡散を確かめる

装置全体像(真空引き出し)



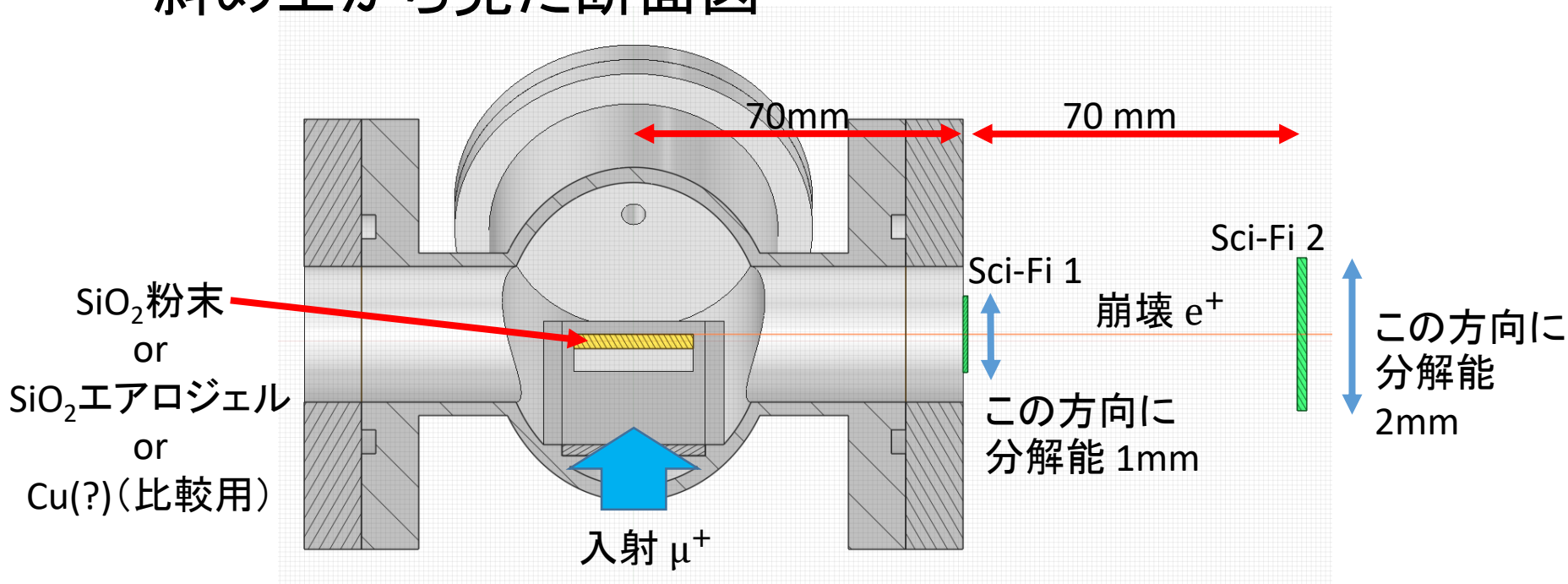
トラッキング

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

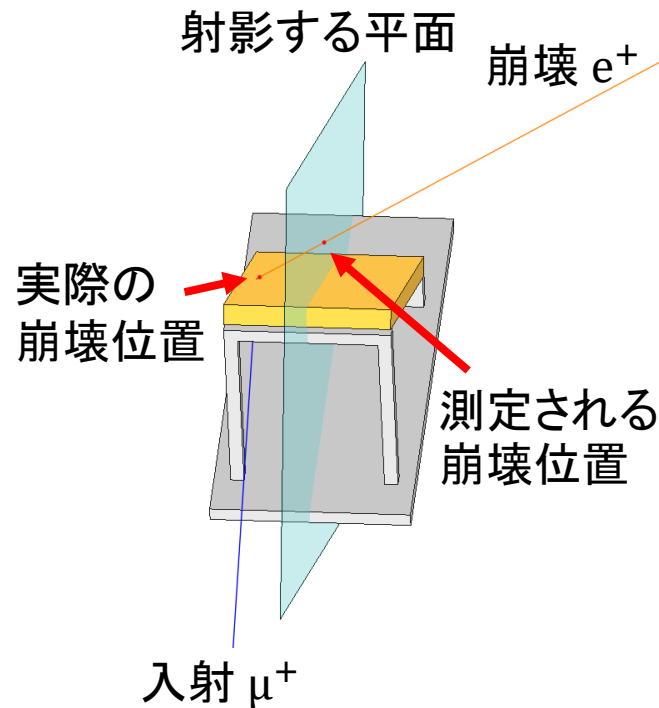


信号読み出し

- 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

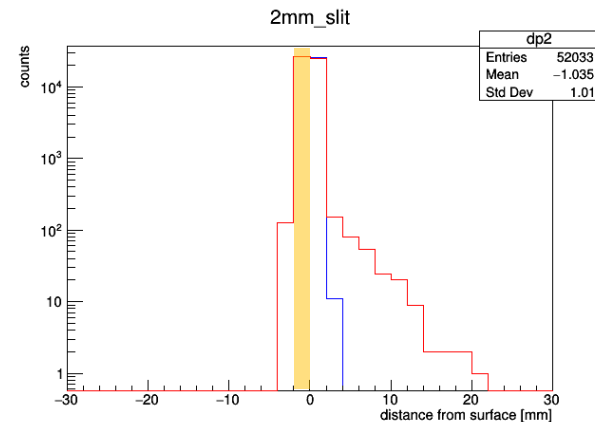
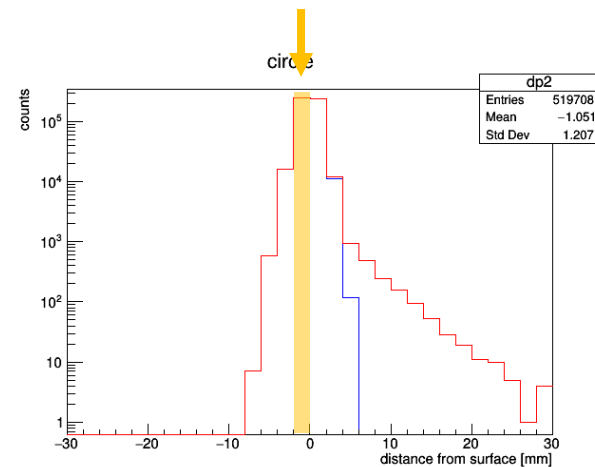


シミュレーション

- Toy MC シミュレーション

- 1時間分の μ^+ 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

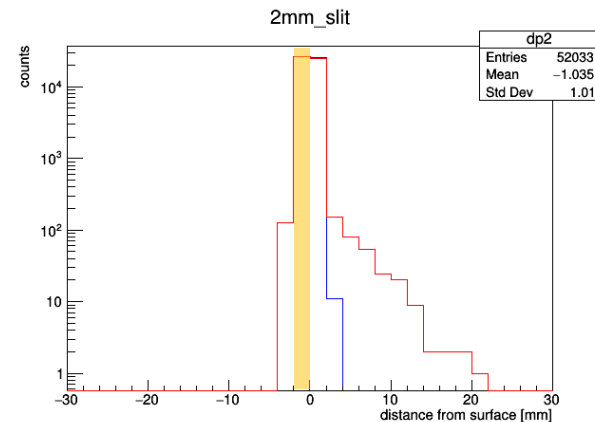
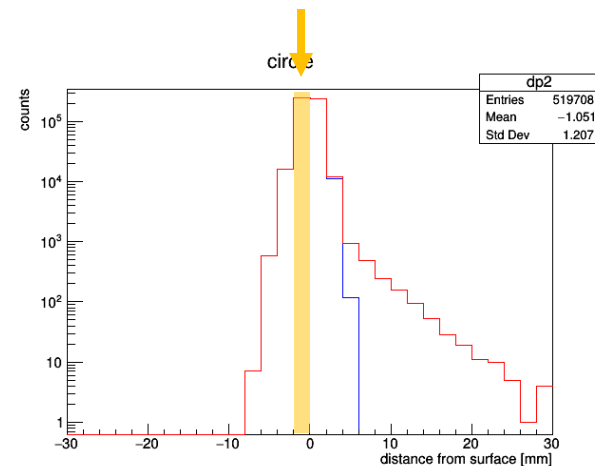
ターゲット領域



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/μSRのPSと同じぐらい

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

- 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 ± 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 10^3Pa 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 (μ 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. μ^+ 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