

P2 Mu班 進捗ノート

目的

1. Muの生成割合を測定する
2. Muの真空への引き出し割合を測定する（必要？）
3. anti-Muの生成割合を測定してMu→anti-Muの転換率の上限を与える

先行研究

μSR

1. 門野良典. 「ミュオン・スピン回転(μSR)法」. RADIOISOTOPES 64, no. 11 (2015年11月15日): 697–705. <https://doi.org/10.3769/radioisotopes.64.697>.
2. 門野良典. 「μSRによる物性研究」. 波紋 10, no. 1 (2000年): 16–24. <https://doi.org/10.5611/hamon.10.16>.
3. 2017年P2
 - muの寿命、g因子、michel parameterの測定
 - セットアップがμSRの参考になる

Muの真空への引き出し

1. Marshall, G.M., J.B. Warren, D.M. Garner, G.S. Clark, J.H. BrewerとD.G. Fleming. 「Production of Thermal Muonium in the Vacuum between the Grains of Fine Silica Powders」. Physics Letters A 65, no. 4 (1978年3月): 351–53. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(78\)90727-2](https://doi.org/10.1016/0375-9601(78)90727-2).
 - SiO₂粉末から引き出したMuスピン緩和の酸素濃度依存性の測定
 - レプトン数非保存過程の探索がmotivation
 - Muとanti-Muが縮退⇒転換の可能性がある
 - 原子などの外場を感じると縮退が解ける
 - 本当になにもない真空の中で生涯を過ごすMuが必要
 - Asymの計算式など基本的なアイデアはだいたい載っている
2. Marshall, G. M., J. B. Warren, C. J. OramとR. F. Kiefl. 「Search for Muonium-to-Antimuonium Conversion」. Physical Review D 25, no. 5 (1982年3月1日): 1174–80. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.25.1174>.
 - CaOを蒸着したcollodion filmにSiO₂パウダーを0.3mm載せたもの×17層
 - ターゲット台に蒸着したCaOにμが入るとミュオニックCaの2P-1S X線が出るため、これをGeで検出することでanti-Muの証拠とする
 - X線とdecay e⁺の判別はシンチによる（X線はこれを鳴らさない）
 - 3軸200cm立方のヘルムホルツコイルで20mGまでコントロール

- mumetalパイプでターゲットエリアを覆うことで環境磁場の勾配をゆるめ、4mGまでコントロールできるようにする
 - μ を入射してからX線を検知するまでステップバイステップでファクターを計算している
 - Muの生成割合は当たり前のようMSRで求めている
3. Beer, G. A., G. M. Marshall, G. R. Mason, A. Olin, Z. Gelbart, K. R. Kendall, T. Bowen(ほか). 「Emission of Muonium into Vacuum from a Silica-Powder Layer」. Physical Review Letters 57, no. 6 (1986年8月11日): 671–74. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.671>.
- SiO₂粉末からのMuの真空への引き出し割合の測定
 - TRIUMF
 - 標準的な方法
 - 3層のMWPCでトラッキング
 - ターゲット上空を4つの領域に区切り、それぞれのTOFヒストグラムを求める
 - ここから拡散速度分布を求め、Maxwell分布でfitすると室温ぐらいになる
4. Janissen, A. C., G. A. Beer, G. R. Mason, A. Olin, T. M. Huber, A. R. Kunselman, T. Bowen(ほか). 「Muonium Production from Fine Silica Powder」. Physical Review A 42, no. 1 (1990年7月1日): 161–69. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.42.161>.
- 上のやつの詳細版
 - 基本的な事項がいろいろ載ってる
 - Mu生成の歴史
 - SiO₂パウダーの詳細 (Cab-O-Silという特殊なもの)
 - Geant4(?)を用いたシミュレーションの詳細
 - Beam運動量などを変えてyieldを見ている
 - ターゲットの材質について
 - Cab-O-Silを圧縮するとyieldが減った
 - Merck Opt-Purは良い
 - エアロゲルはpoorだった
 - 拡散係数の計算が本題
 - パウダーの厚みの不均一を考慮すべきという指摘
 - 理論値より大きい
 - 空隙が思ったより大きいということ
 - 具体的にどういった内部構造がどういった影響を与えるかは未解明?
5. Schwarz, W., V. Ebert, H. Geerds, K. Jungmann, S. Kirches, S. Koppe, F. Maas(ほか). 「Thermal Muonium in Vacuo from Silica Aerogels」. 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).
- まだ読んでない
 - エアロゲル
6. Woodle, K. A., K. -P. Arnold, M. Gladisch, J. Hofmann, M. Janousch, K. P. Jungmann, H. -J. Mundinger(ほか). 「Measurement of the Polarization of Thermal Muonium in Vacuum」. Zeitschrift Für Physik D Atoms, Molecules and Clusters 9, no. 1 (1988年3月): 59–64. <https://doi.org/10.1007/BF01384448>.
- まだ読んでない

7. Antognini, A., P. Crivelli, T. Prokscha, K. S. Khaw, B. Barbiellini, L. Liskay, K. Kirchほか.
「Muonium Emission into Vacuum from Mesoporous Thin Films at Cryogenic Temperatures」. Physical Review Letters 108, no. 14 (2012年4月3日).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.143401>.

- 多孔質SiO₂中でのMuの拡散係数の温度依存性の測定
- PSI
- 最新のもの
- μ SRの設備のみでMuの生成、真空への引き出しを確認している
 - 真空に出ると下流側検出器のカウントが高TOF側で増えることを利用

8. 1999年P1

- 粉末SiO₂によるMuの生成と真空への引き出しの確認
 - 結果としては定性的
- Beerの方法

anti-Muの検出

e+を加速する方法

1. Abela, R., J. Bagaturia, W. Bertl, R. Engfer, B. Fischer von Weikersthal, A. Großmann, V. W. Hughesほか. 「Improved Upper Limit on Muonium to Antimuonium Conversion」. Physical Review Letters 77, no. 10 (1996年9月2日): 1950–53.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.1950>.

- まだ読んでない
- 下のやつのプロトタイプ?

2. Willmann, L., P. V. Schmidt, H. P. Wirtz, R. Abela, V. Baranov, J. Bagaturia, W. Bertlほか.
「New Bounds from a Search for Muonium to Antimuonium Conversion」. Physical Review Letters 82, no. 1 (1999年1月4日): 49–52. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.49>.

- Mu→anti-Mu 転換率の下限の更新
- anti-Muの低エネルギーe+を検出する

Activation法

1. Aoki, Masaharu. 「Muonium to Anti-Muonium Conversion and M⁻ – M⁺ Conversion」, 日付なし, 4.

- Activation Methodの必要性・利点
 - かつてのanti-Mu検出法はほぼ精度の限界に来た
 - タングステン標的にMuを吸わせてその後のカスケードを見る
 - バックグラウンドの消し方も書いてある
 - 宇宙線はビーム照射の有無で比較すればOK
 - 具体的なセットアップは?

2. Huber, T. M., A. R. Kunselman, A. C. Janissen, G. A. Beer, G. R. Mason, A. Olin, T. Bowenほか.
「Search for Mixing of Muonium and Antimuonium」. Physical Review D 41, no. 9 (1990年5

月1日): 2709–25. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.41.2709>.

- 読んでる
- Mu-anti-Mu転換の理論の軽いまとめあり
 - 25mG以上では転換率半減

3. 2002年P2

- Activation Methodの実践

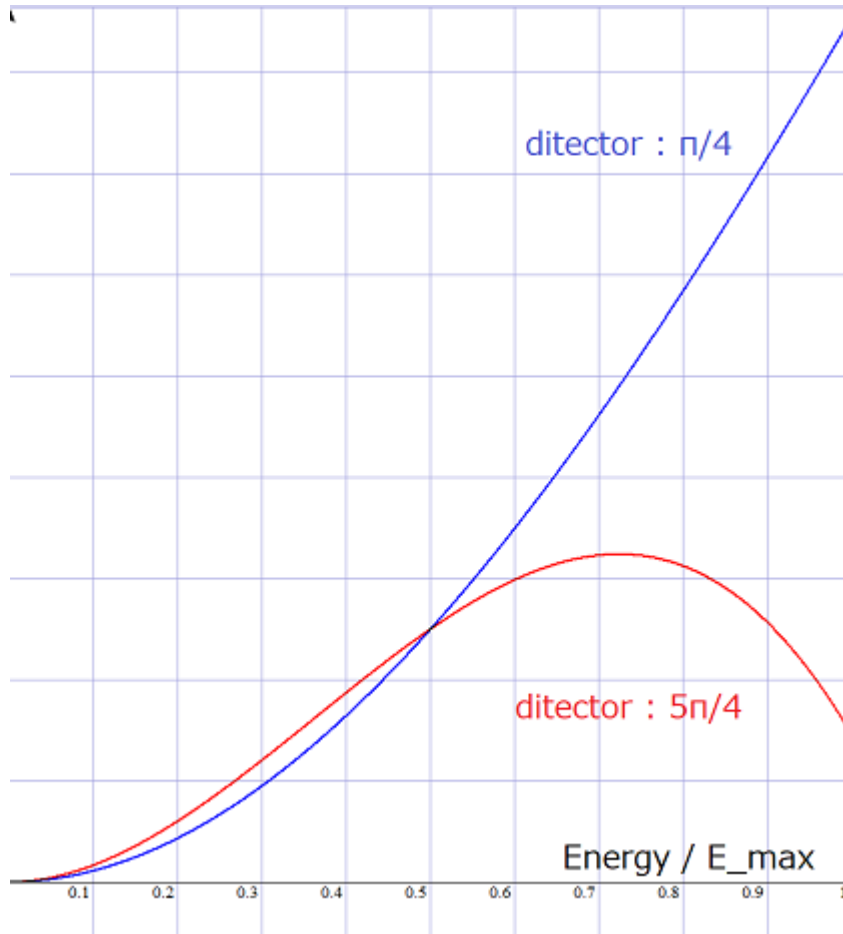
その他、未分類、関連度低

1. Hughes, V. W., D. W. McColm, K. ZiockとR. Prepost. 「Formation of Muonium and Observation of Its Larmor Precession」. Physical Review Letters 5, no. 2 (1960年7月15日): 63–65. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.5.63>.
 - まだ読んでない
 - ミューオニウム初観測
 - 50atmのアルゴン中、High yieldだが真空ではない
2. Feinberg, G., とS. Weinberg. 「Conversion of Muonium into Antimuonium」. Physical Review 123, no. 4 (1961年8月15日): 1439–43. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.123.1439>.
 - まだ読んでない
 - Mu-anti-Mu転換の理論
3. Kiefl, Robert F., John B. Warren, Chris J. Oram, Glen M. Marshall, Jess H. Brewer, Dale R. HarshmanとCarl W. Clawson. 「Surface Interactions of Muonium in Oxide Powders at Low Temperatures」. Physical Review B 26, no. 5 (1982年9月1日): 2432–41. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.26.2432>.
 - まだ読んでない
 - スピン緩和の測定?
 - Muの生成割合61%の出处?
4. Crivelli, Paolo, Ulisse Gendotti, André Rubbia, Laszlo Liskay, Patrice PerezとCatherine Corbel. 「Measurement of the Orthopositronium Confinement Energy in Mesoporous Thin Films」. Physical Review A 81, no. 5 (2010年5月18日). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.81.052703>.
 - Muの放出率の温度・入射エネルギー依存性の測定
 - KEK
 - 高温・高純度タングステン標的を使用
 - 標的の準備が困難
 - プラスチックシンチレーターの列2層でトラッキング
5. Mills, A. P., J. Imazato, S. Saitoh, A. Uedono, Y. KawashimaとK. Nagamine. 「Generation of Thermal Muonium in Vacuum」. Physical Review Letters 56, no. 14 (1986年4月7日): 1463–66. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.1463>.
 - Muの放出率の温度・入射エネルギー依存性の測定
 - KEK
 - 高温・高純度タングステン標的を使用
 - 標的の準備が困難
 - プラスチックシンチレーターの列2層でトラッキング

理論

エネルギー依存性

- 2017 P2などに載っている式をプロットしたもの :



- $x > 0.5$ のものだけ抽出したほうがよい

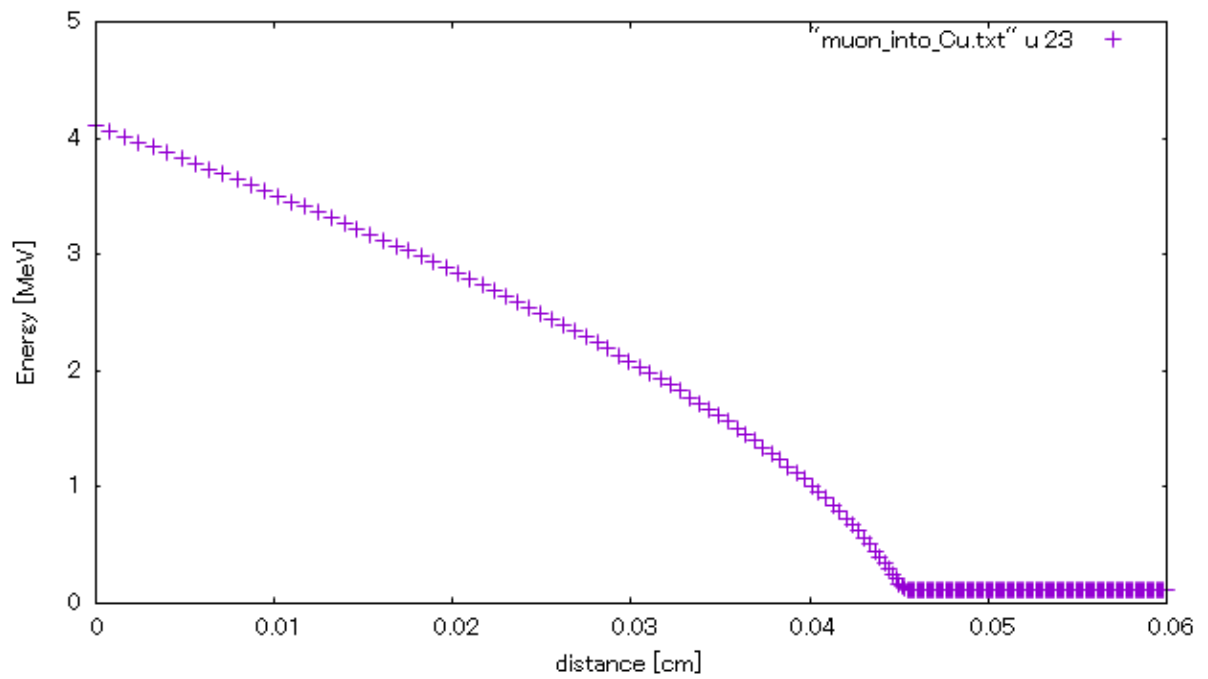
実験方法

1. μ SR
 - 上流と下流のカウントのAsymmetryをとる
 - Muの生成率がわかる
2. トラッキング
3. anti-Mu検出
 - Willmannの方法（低速e+を選別して検出）
 - タングステン

シミュレーション

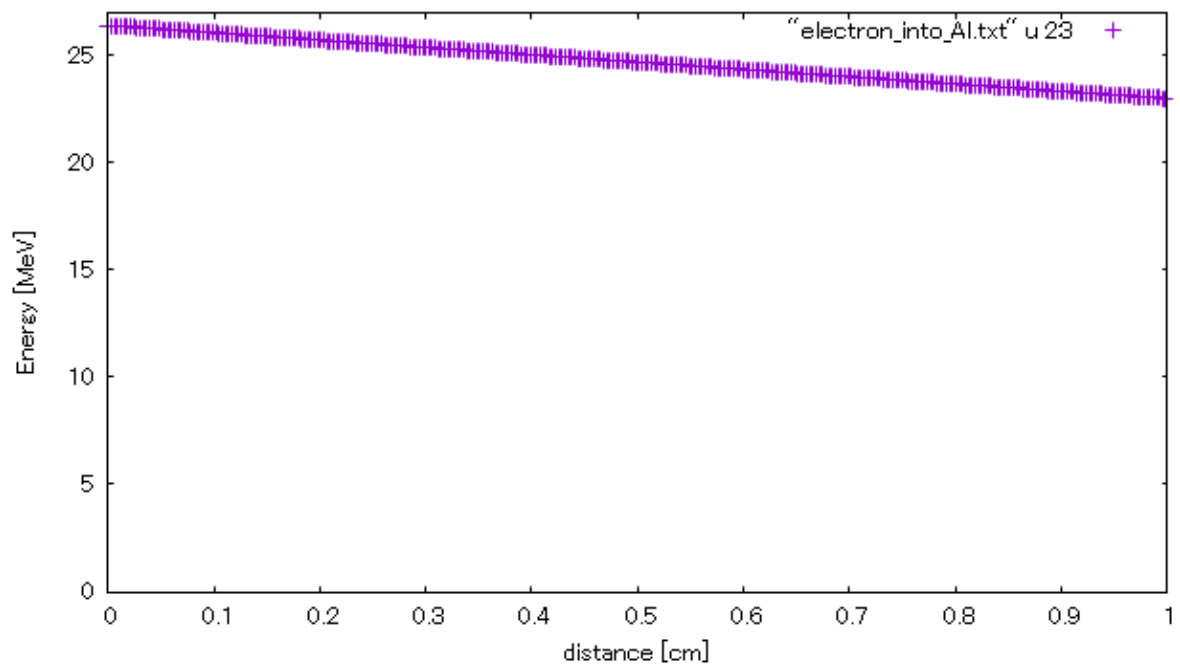
Bethe-Bloch

- Cuターゲットによるビームの受け止め (去年のセットアップ)



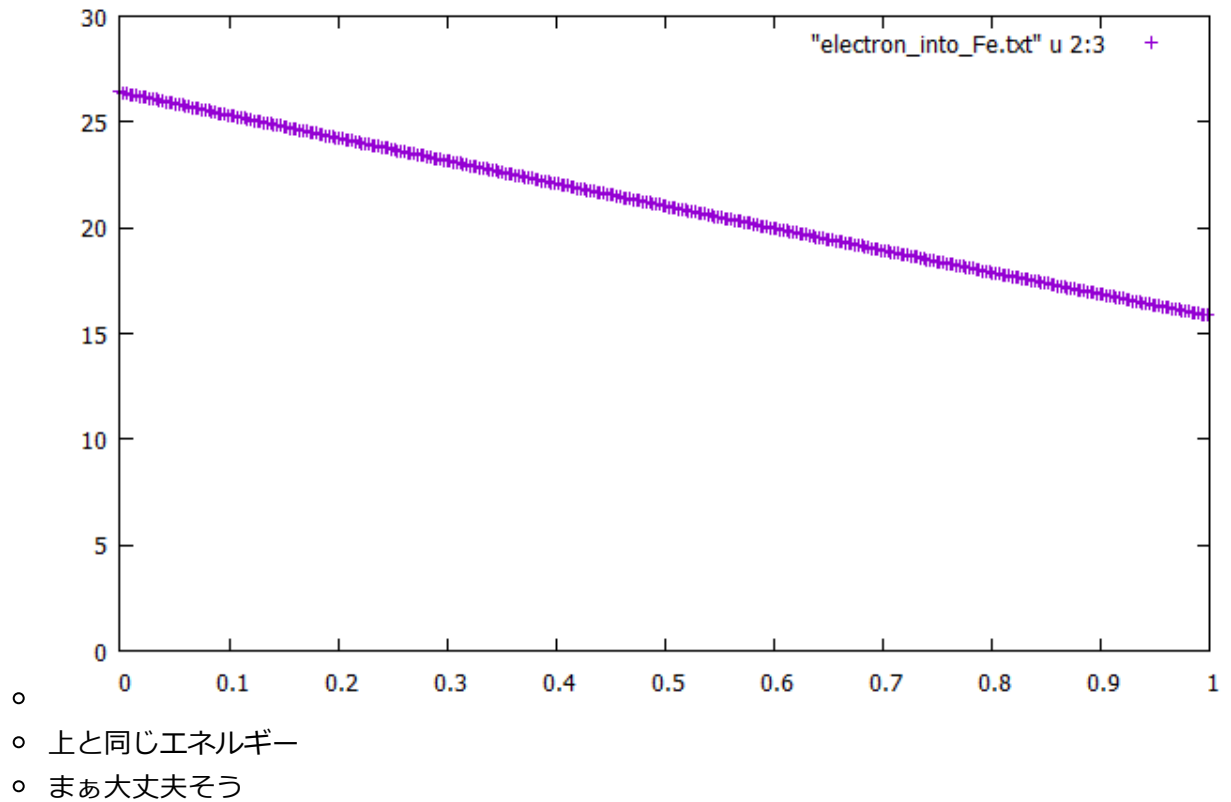
-
- 良さそう

- Al真空槽をe+が突き抜けるか



-
- エネルギーは、見たい最小のエネルギー $m_\mu / 4$ (i.e. $x=0.5$)
- 良さそう

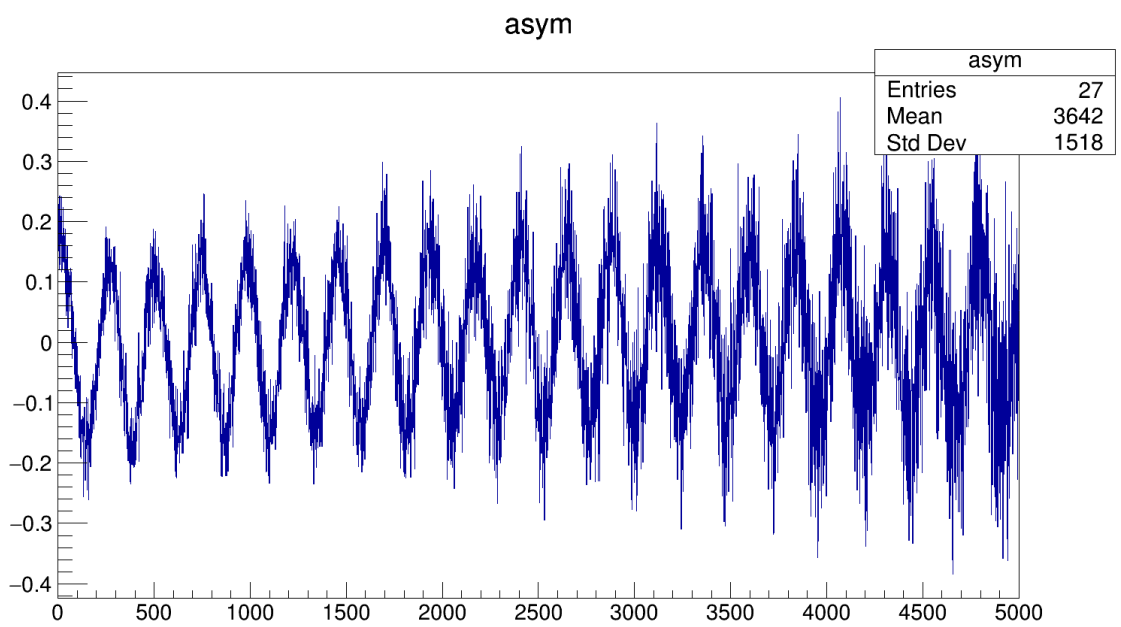
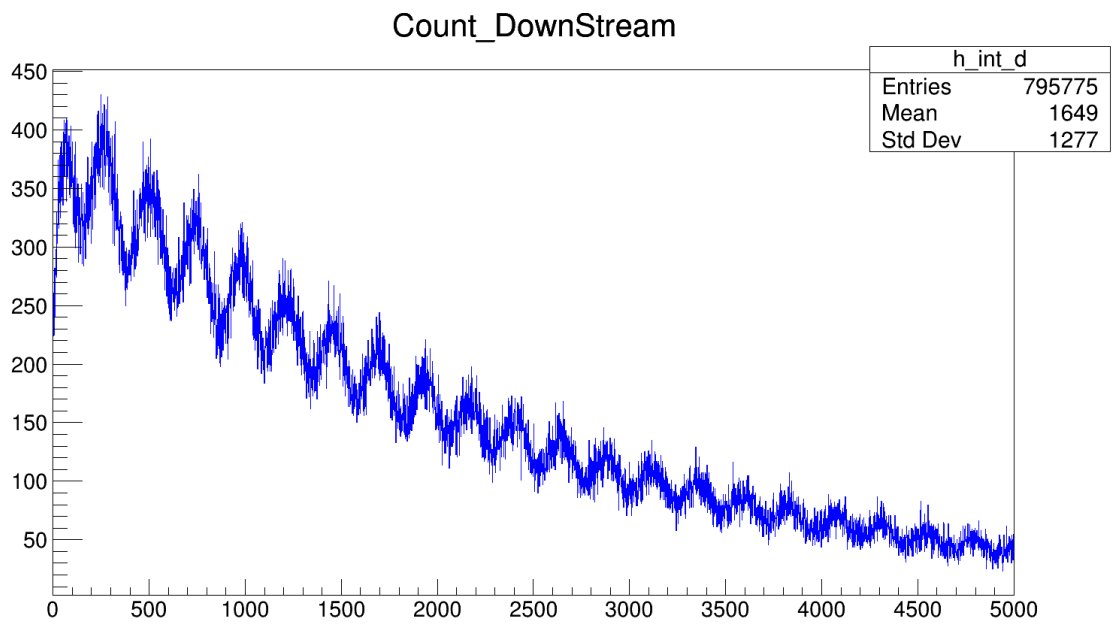
- ステンレス真空槽なら？



μSR

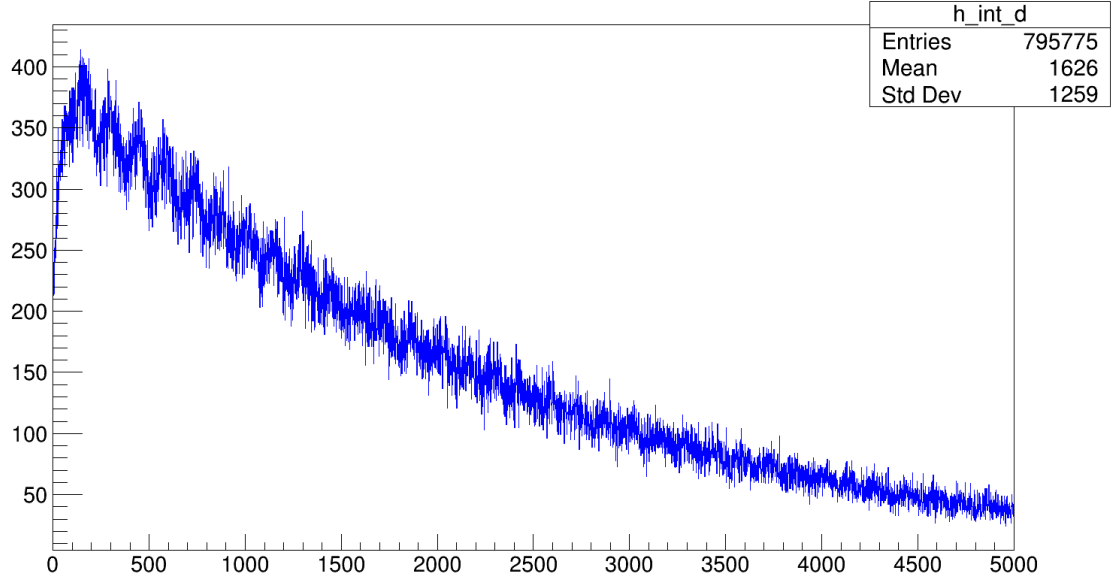
- 実装
 - ターゲットで止まるμの数を指定
 - e+の角度分布を去年のP2レポートの式から計算
 - ただしエネルギーは $0.5 < x < 1$ で積分した
 - 0から積分してもそんなに変わらない？
 - michel parameterは理論値
 - 時刻tの角度分布にdecayの因子をつけた関数countを用意
 - 検出器の立体角を指定し、ここに入る粒子の数だけ count->GetRandom
 - ビームの時間ゆらぎを足してヒストグラム化
- 結果

o 3Gauss

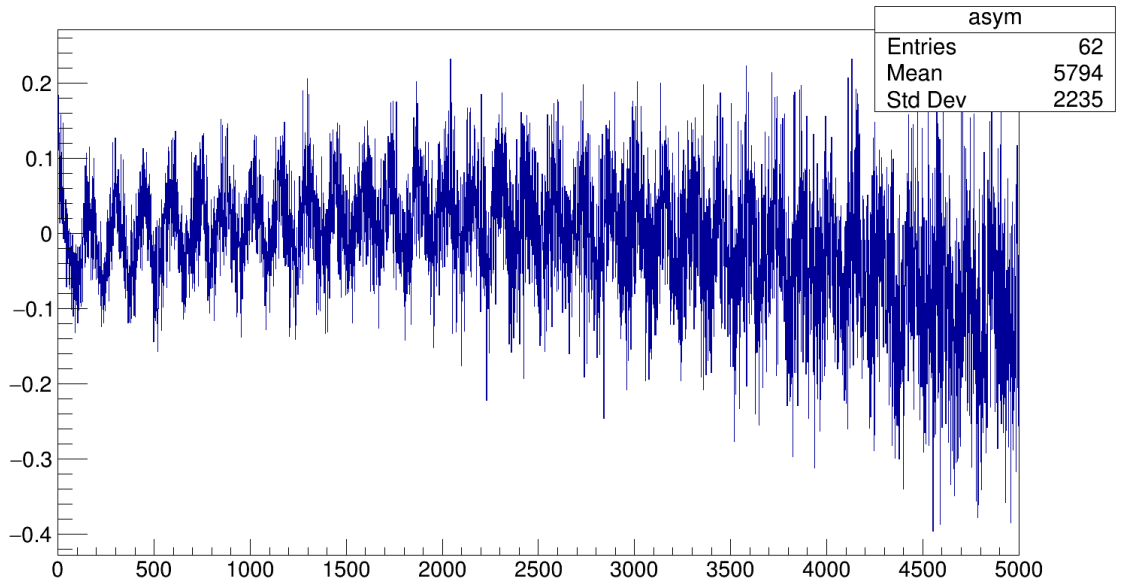


○ 5Gauss

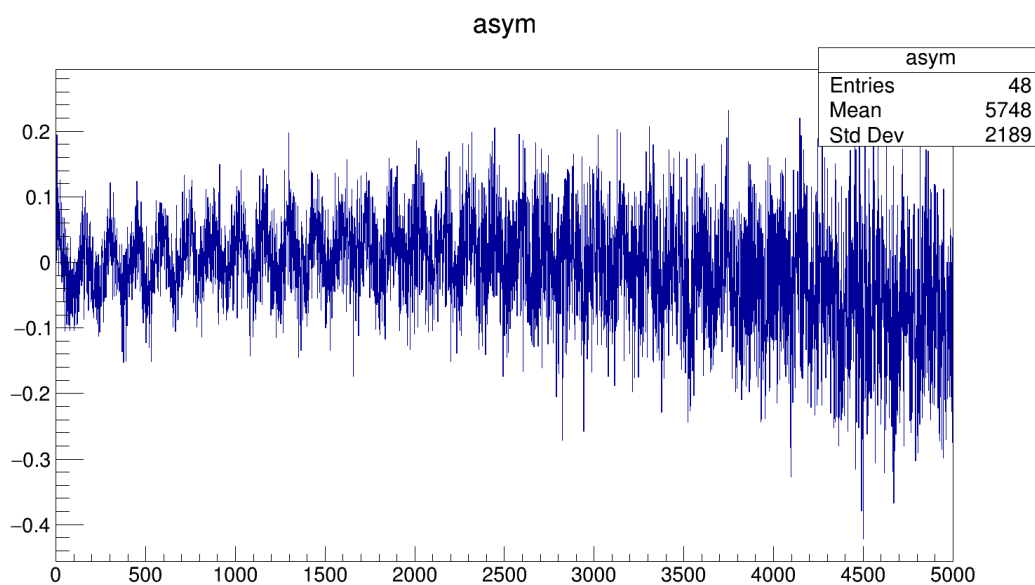
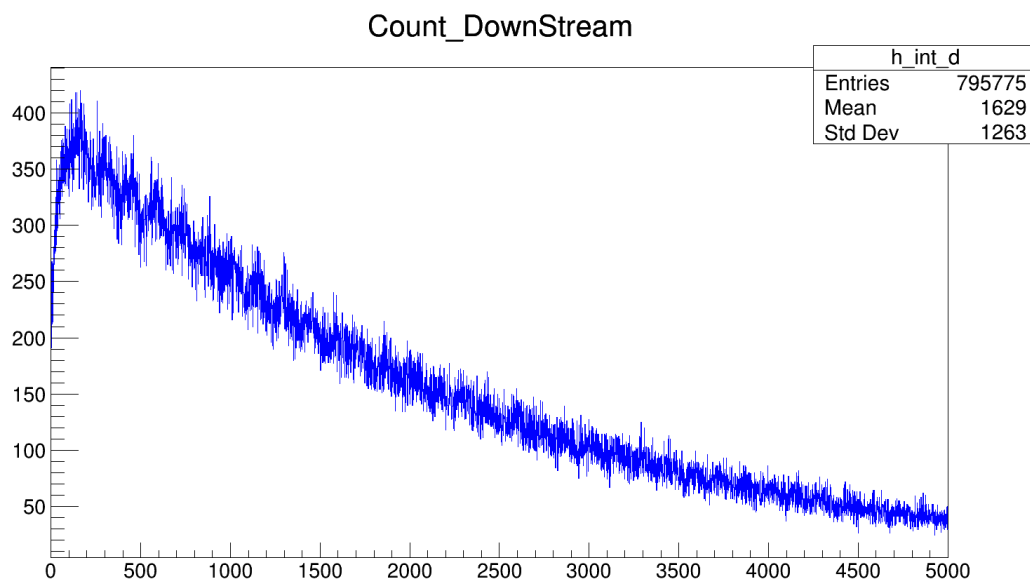
Count_DownStream



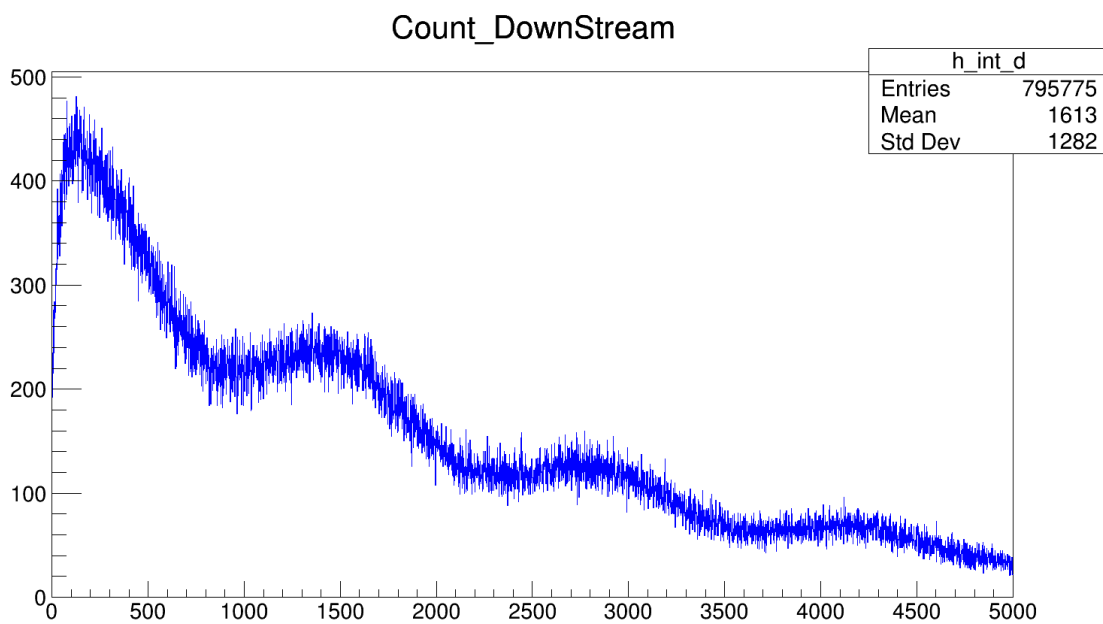
asym

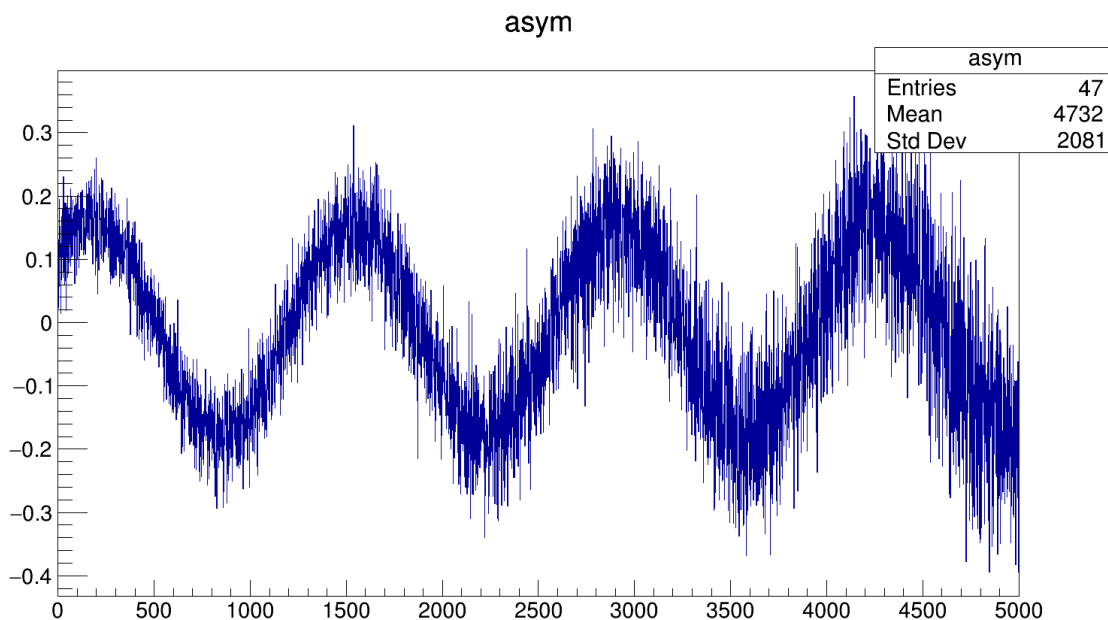


- (参考) 5Gauss、エネルギー $0 < x < 1$ で積分



- 53.97Gauss (去年と同じ)

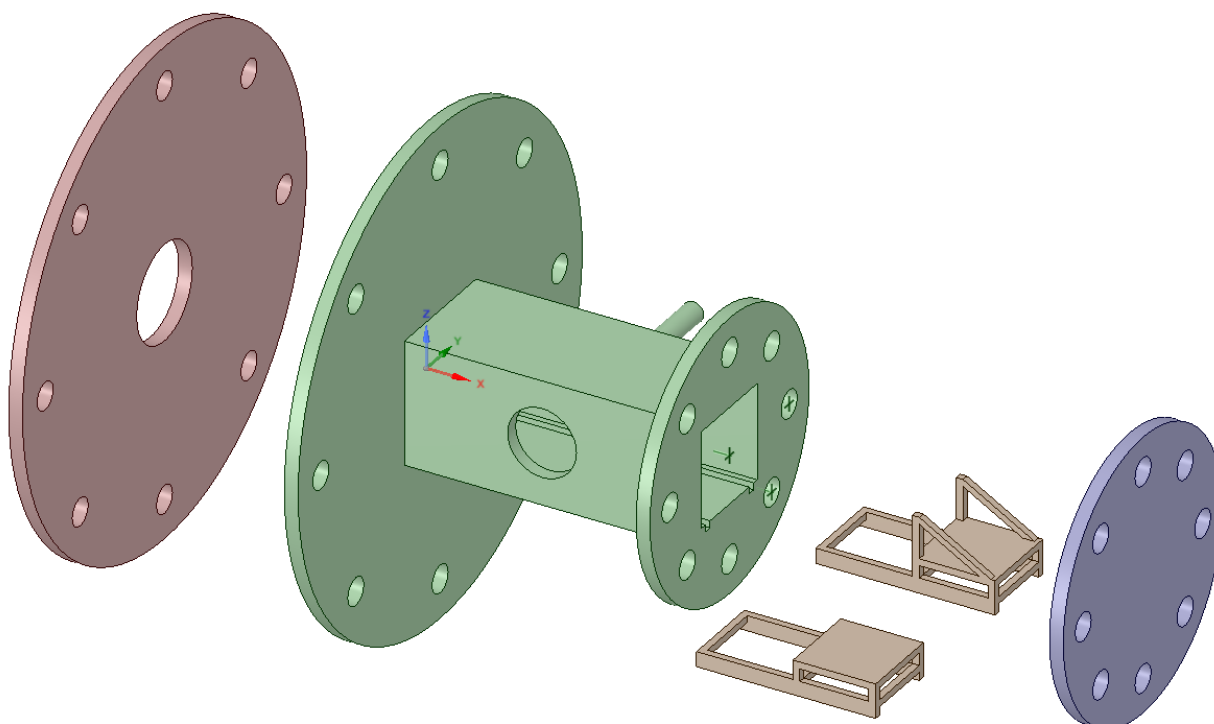




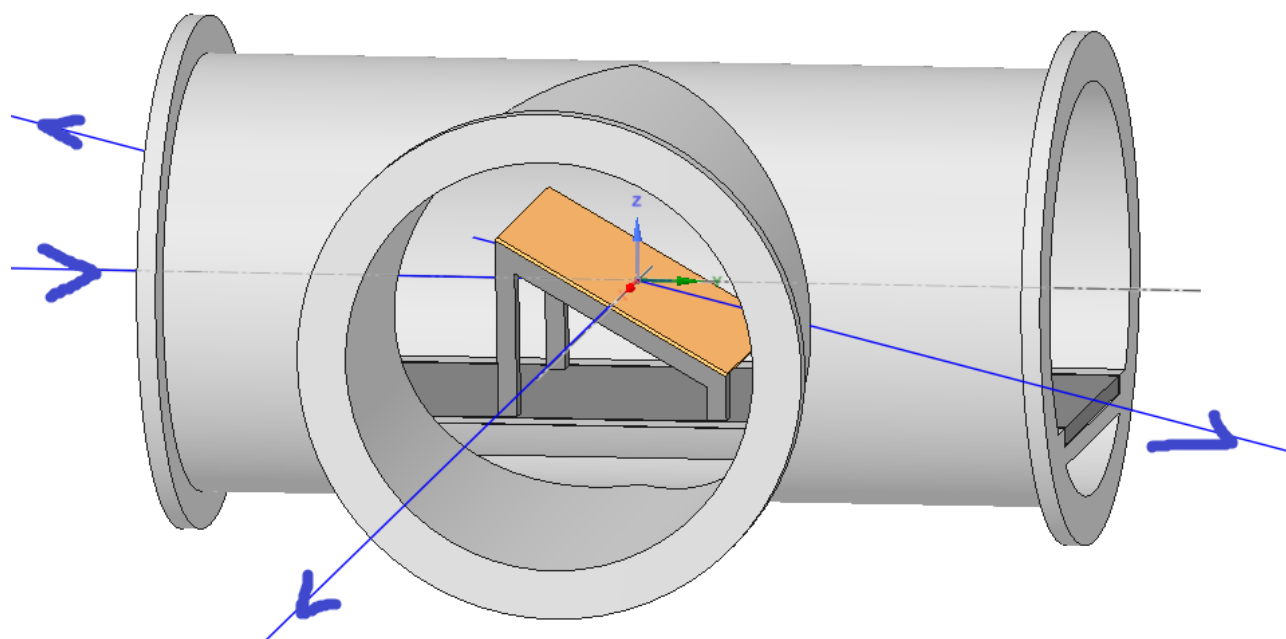
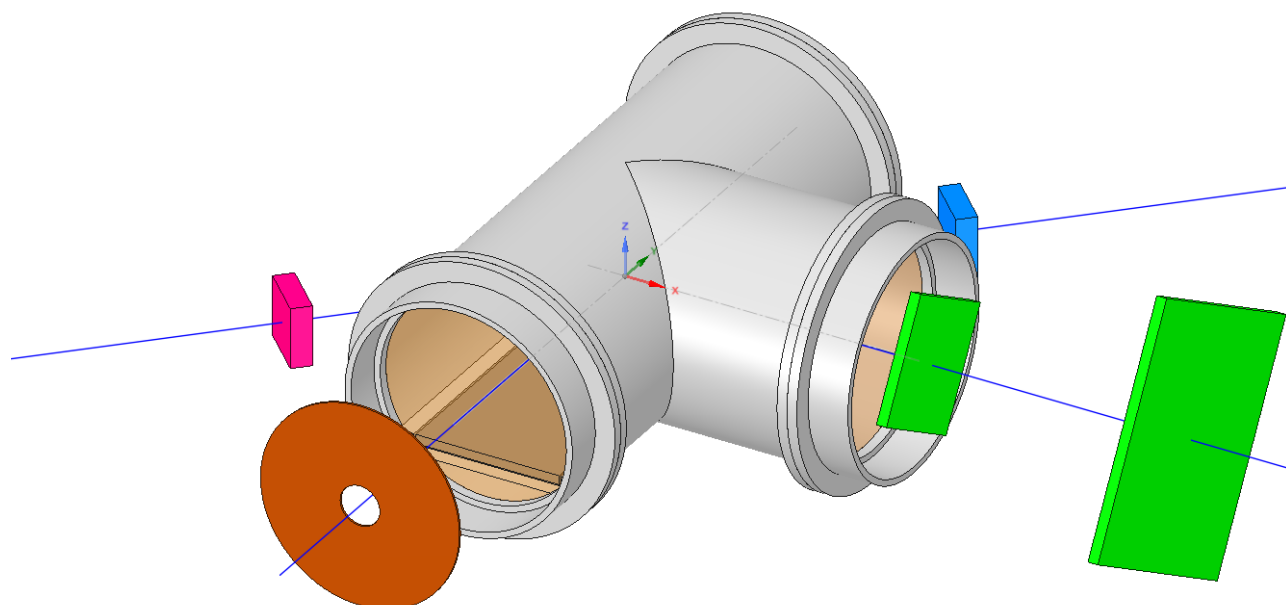
装置設計

真空槽

プロトタイプ (予算申請見積もり用)



•
11/23版



-
- NWティ MCK-7100 (加工)
 - https://jp.misumi-ec.com/vona2/detail/221000561210/?CategorySpec=00000238374%3a%3ah&bid=bid_list_template
- NWブランクフランジ MCK-4100 (加工)
 - https://jp.misumi-ec.com/vona2/detail/221000561175/?CategorySpec=00000238374%3a%3ah&bid=bid_list_template
- NWショートフランジ NW100-20L-TK x2

- https://jp.misumi-ec.com/vona2/detail/221000561669/?CategorySpec=00000238374%3a%3ah&bid=bid_list_template
- NWセンターリング MCK-2100 x3
 - https://jp.misumi-ec.com/vona2/detail/221000561120/?rid=hs_221000561210_221000561120
 - SUS304 ? SUS316L ?
- NWチェーンクランプ NW100-CC x3
 - https://jp.misumi-ec.com/vona2/detail/221000561861/?rid=hs_221000561827_221000561861

決定版

磁場装置

定常磁場

環境磁場のキャンセル

ToDo

調べること

- 真空中に引き出す必要性（中家さん）
 - SiO₂内部にいる時間は3ns、その後空隙に出てくる
 - 空隙は真空中でいいのでは？ by 三部さん
 - 空隙に出た後にSiO₂と衝突するのはまずいのでは……？
- 580ns 2-bunchあるのをどうするか
 - 290nsに周期を合わせる
 - $f(x) + f(x-290\text{ns})$ でfitting
 - 580ns以内に測定を終えてしまう？
 - Fittingがうまくいくかどうか
- NaIは必要か
 - rootでシミュレーションしてみる（西田）
- 田島さんに聞きたいこと
 - フランジが特殊っぽい（KF規格）けど大丈夫か？
 - カプトンに角が当たると破れたりしないか
 - 下流側蓋の設計はあれでいいか
 - ターゲット台は自作できそう？
 - 真空中に引いても良い接着剤とは
 - ヘルムホルツコイルについて

やること

- CAD (急ぎ) (西田)
 - 既成品(直径10cm)のT字管のジオメトリで中にレーンを敷く
 - ビームプロファイルを見てターゲットの大きさ決める
 - μ SR用の窓は必要?
 - 散乱が怖い
 - 十字筒
- 3Gauss 磁場 (中川)
- SiO₂のどこで止まるかシミュレーション (辻川・富永)

考えてること

- トラッキングのときに適当な平面に射影するが、実際はその平面から出たとは限らない。そのズレをどう考えるか?
 - Sci-Fiの立体角を制限してある程度真横に出たe+のみ選別する?
- 真空槽の壁で止まる μ はやはり避けられなさそう
 - Al標的 (Mu放出なし) と比較する?
 - Janissen,1990ではN₂ガスを入れている→exp成分を引いたのと同じらしい
- vacuum Muの検出法として、MWPCでトラッキングして直接見る他に、 μ SRでの下流側のTOF分布のexpからずれる部分を見るという方法がある (2010年のやつ)
 - 大目標としてはMu→anti-Muで、中目標はvacuum Muの効率よい生成方法の探索、小目標としてvacuum Muの検出の2つの方法の比較を行うというのはどう?
- Mu WSまでに実験の骨格を完成させておきたい
 - あわよくば良いコネを?