



# J-PARC MUSE

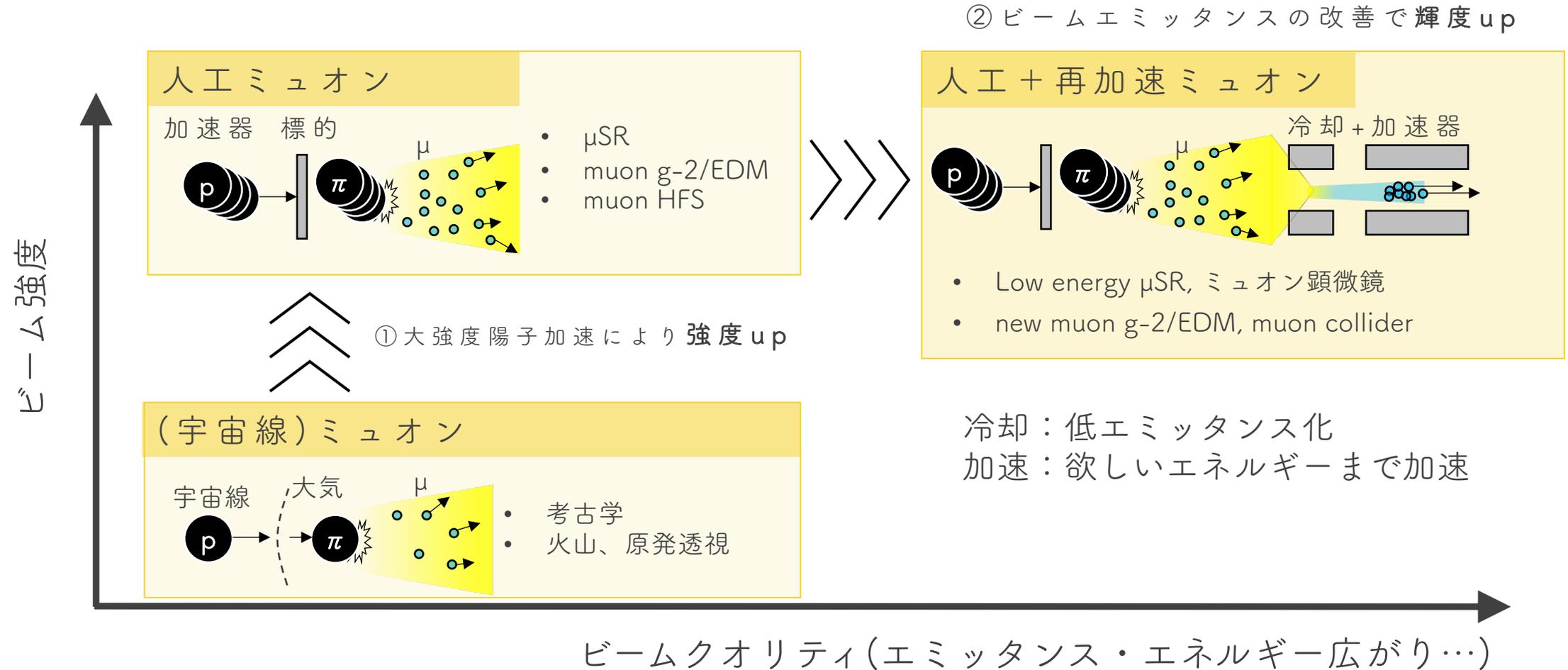
## 超低速ミュオンビームラインにおける ビームコミッショニング

Yuga Nakazawa / KEK (RIKEN)

<sup>A)</sup>RIKEN, <sup>B)</sup>KEK, <sup>C)</sup>Ibaraki Univ.

T.Adachi<sup>A)</sup>, J.Ohnishi<sup>A)</sup>, T.Adachi<sup>B)</sup>, Y.Ikeda<sup>B)</sup>, Y.Oishi<sup>B)</sup>,  
K.Shimomura<sup>B)</sup>, P.Strasser<sup>B)</sup>, S.Kanda<sup>B)</sup>, A.Goto<sup>B)</sup>, N.Teshima<sup>B)</sup>,  
Y.Nagatani<sup>B)</sup>, Y.Miyake<sup>B)</sup>, T.Yamazaki<sup>B)</sup>, T.Yuasa<sup>B)</sup>, T.Umezawa<sup>C)</sup>,  
K.Umeda<sup>C)</sup>, S.Nakamura<sup>C)</sup>,

# ミュオン実験の可能性を広げる

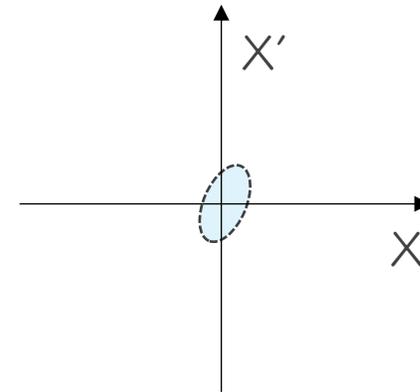
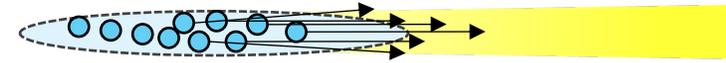
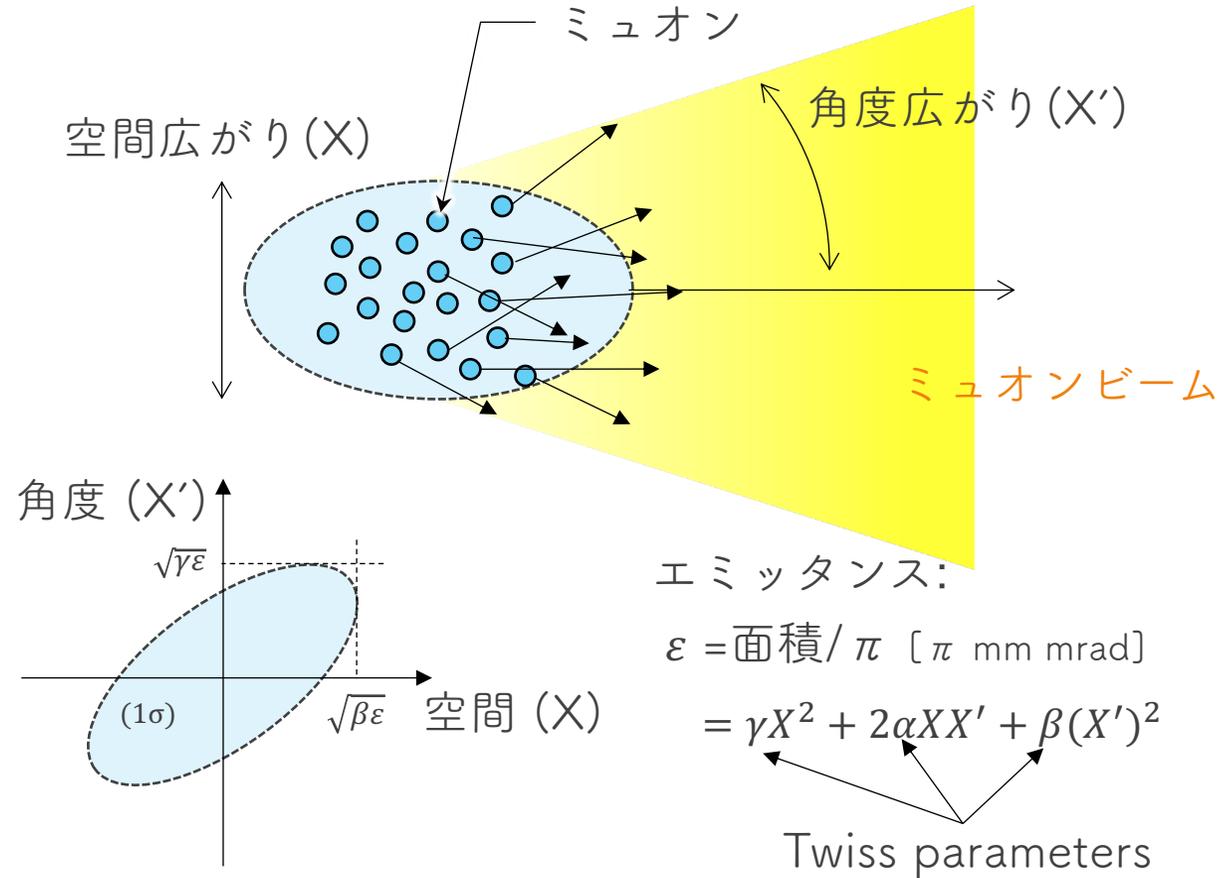


絞られた(低エミッタンス)ミュオンビームで色々やりたい

## エミッタンスとは？

エミッタンスが大きい = 空間・角度広がりが大きい

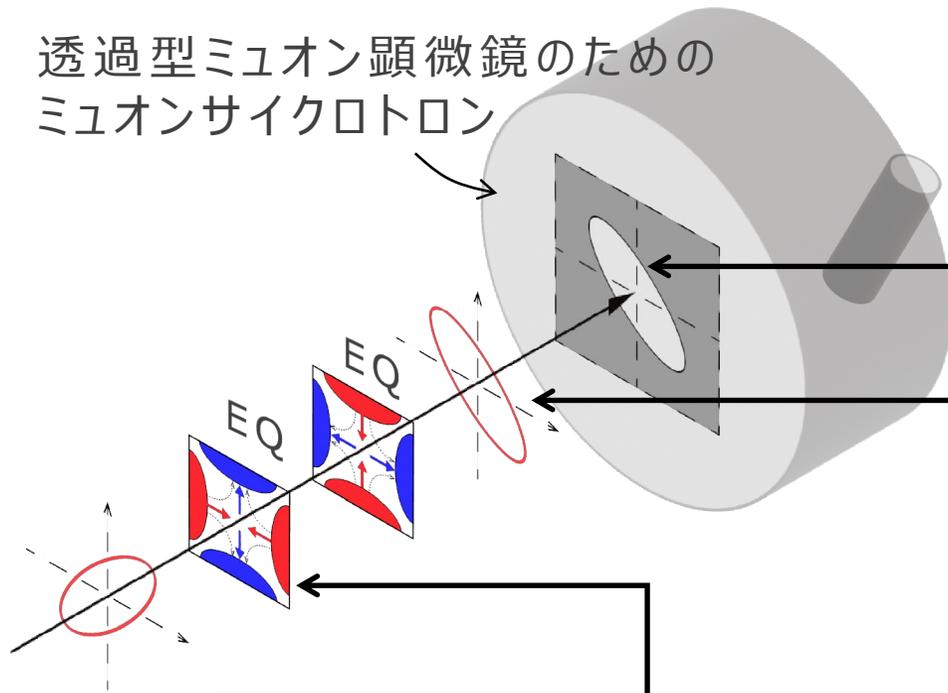
エミッタンスが小さい = 空間・角度広がりが小さい



位相空間分布(空間的・エネルギー的広がり)の大きさ

# 「加速」 加速器へのビーム入射とミスマッチ

透過型ミュオン顕微鏡のための  
ミュオンサイクロトロン



Twissを合わせる操作 = ビームマッチング

ビーム横方向(x,y) および  
縦方向(t)の収束発散をコントロール  
ビームのtwissの測定と制御が必要

6次元 (x, x', y, y', t, w) のアクセプタンス

入射の物理的な口径、内部での収束発散条件  
時間的(RF)な受け入れ可能領域

ビーム分布のTwissは加速器と必ずしも一致しない

Mismatch  $M$ : 位相空間分布の設計からのズレ

$$M = \left[ \frac{1}{2} \left( R + \sqrt{R^2 - 4} \right) \right]^{\frac{1}{2}} - 1$$

$$R = \beta_1 \gamma_2 + \beta_2 \gamma_1 - 2\alpha_1 \alpha_2$$

設計のTwiss (加速器で要求)

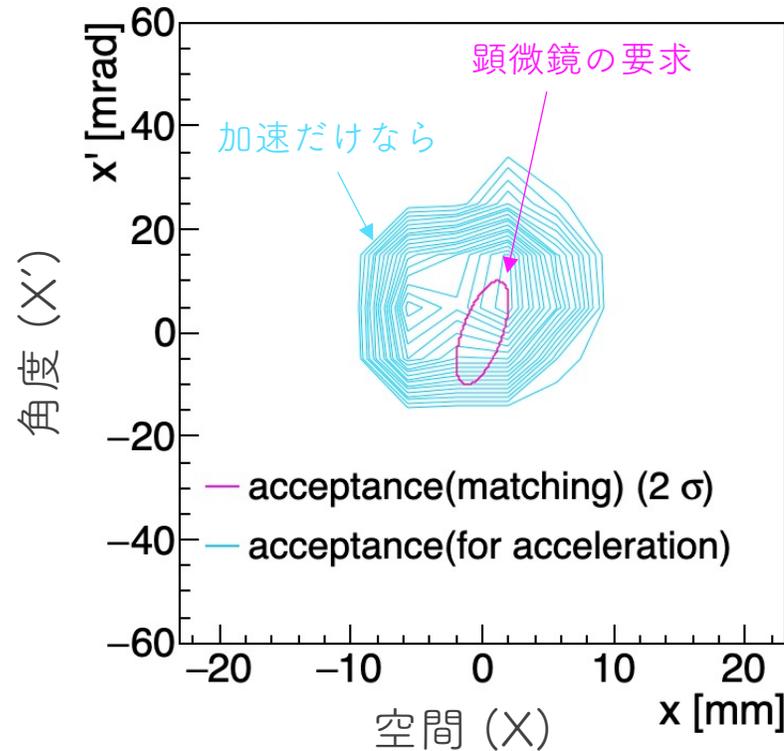
実際のビームのTwiss

ミスマッチ大 → 加速器内でのビーム損失増, エミッタンス増

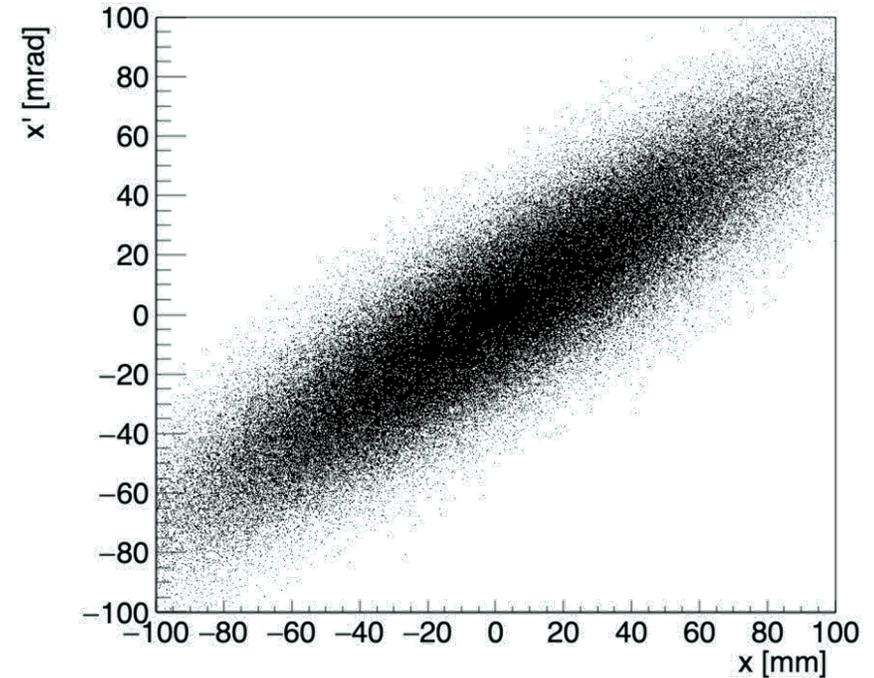
位相空間分布の形(Twiss)も大事

## ミュオンの場合

透過型ミュオン顕微鏡のための  
ミュオンサイクロトロン $x$ - $x'$ アクセプタンス(設計)



表面ミュオンビームの $x$ - $x'$ 分布 (計算)

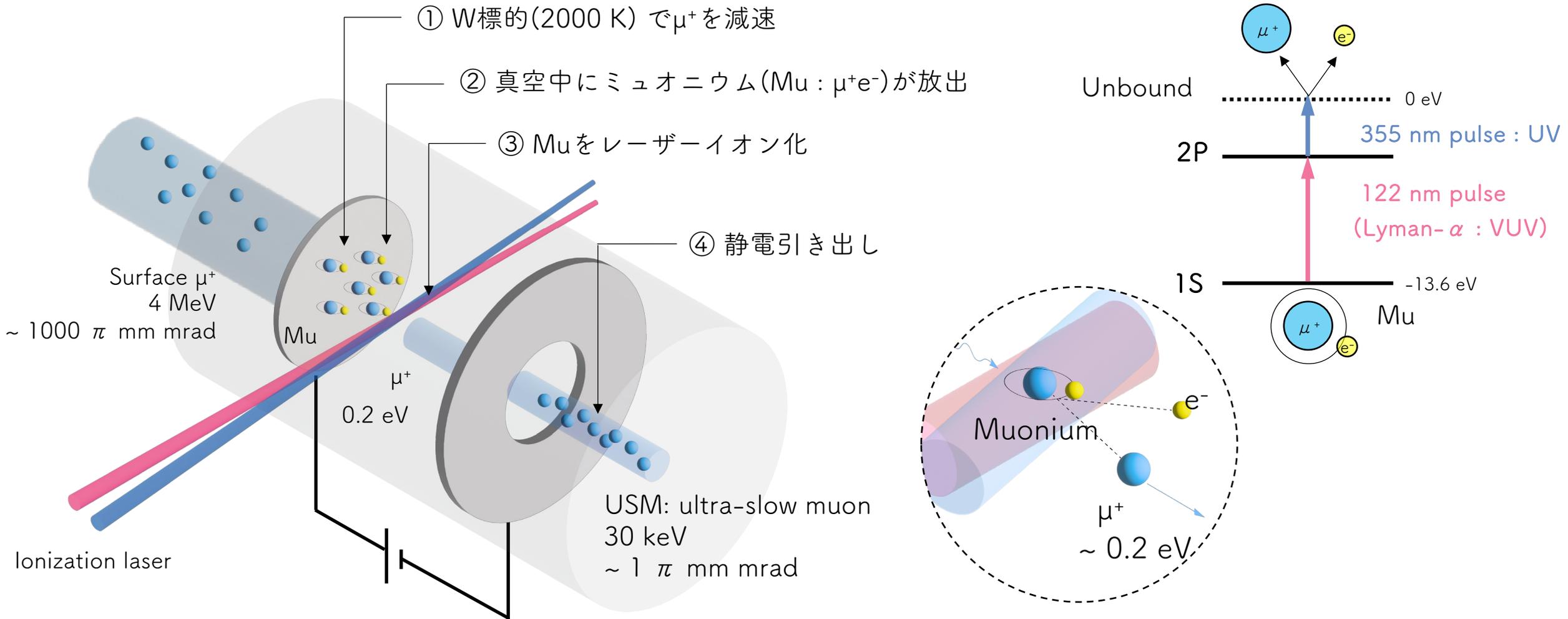


(規格化)

要求されるエミッタンス  $< 1 \pi \text{ mm mrad}$   $\leftrightarrow$  実際は  $\sim 1000 \pi \text{ mm mrad}$

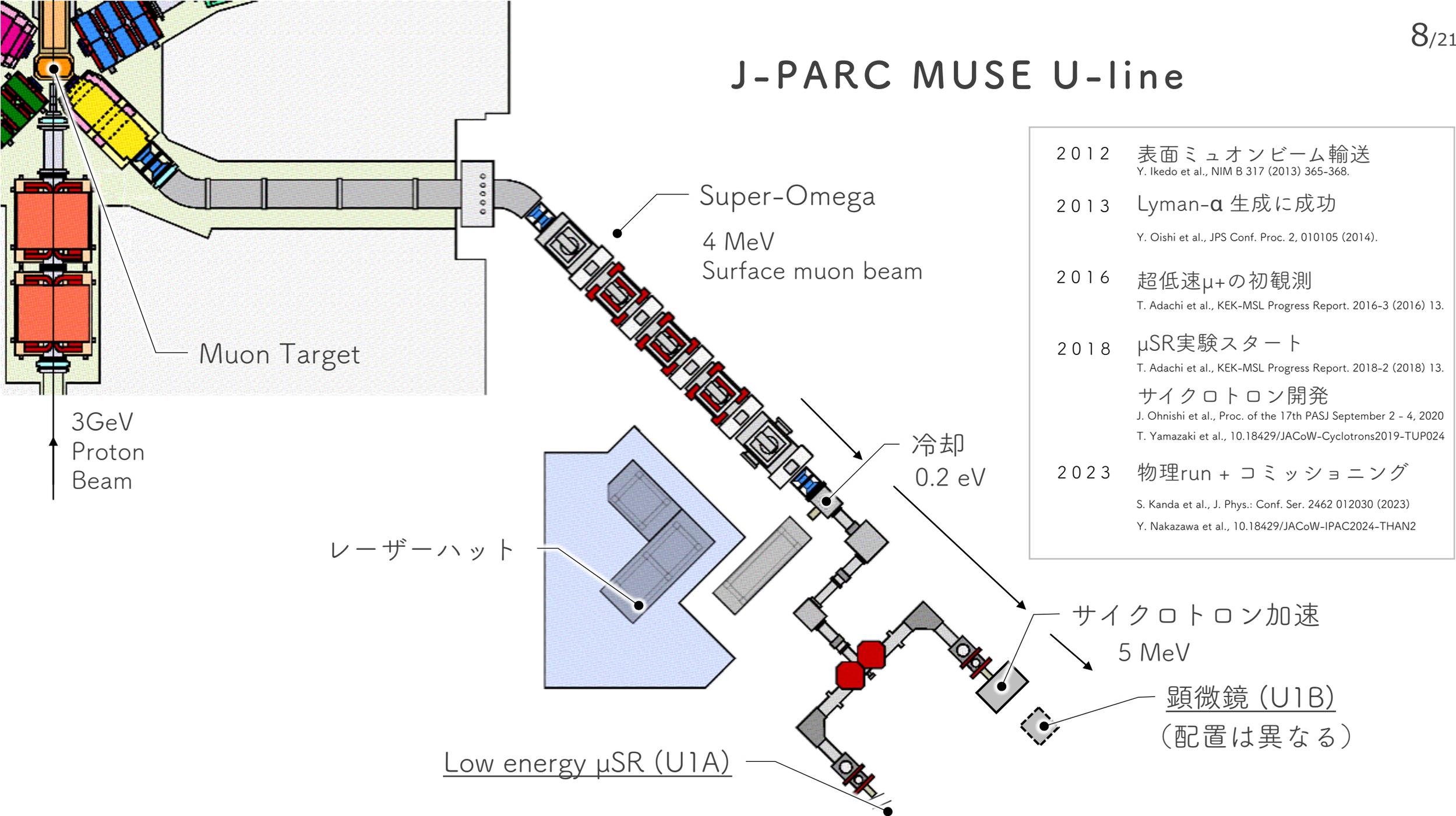
この差をどう解消するか?

# 「冷却」 J-PARC MUSE 超低速ミュオンビームライン(U1 area)



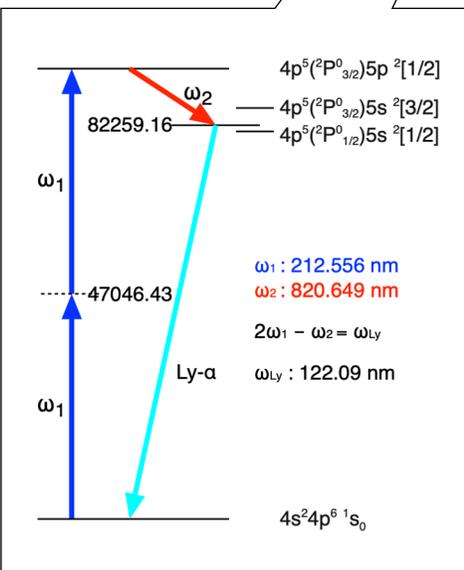
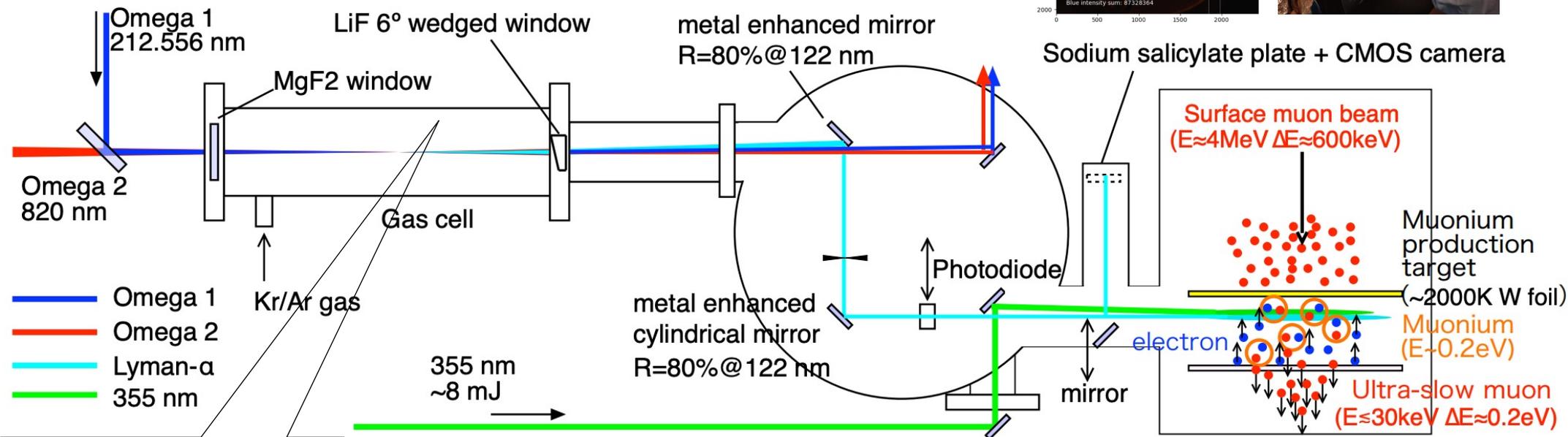
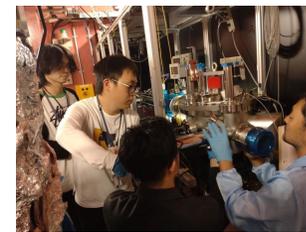
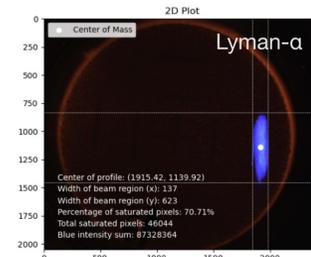
レーザーイオン化でミュオンを“冷却” = 超低速ミュオンビーム

# J-PARC MUSE U-line



- |      |  |
|------|--|
| 2012 | 表面ミュオンビーム輸送<br>Y. Ikedo et al., NIM B 317 (2013) 365-368.  |
| 2013 | Lyman- $\alpha$ 生成に成功<br>Y. Oishi et al., JPS Conf. Proc. 2, 010105 (2014).  |
| 2016 | 超低速 $\mu^+$ の初観測<br>T. Adachi et al., KEK-MSL Progress Report. 2016-3 (2016) 13.   |
| 2018 | $\mu$ SR実験スタート<br>T. Adachi et al., KEK-MSL Progress Report. 2018-2 (2018) 13.<br>サイクロトロン開発<br>J. Ohnishi et al., Proc. of the 17th PASJ September 2 - 4, 2020<br>T. Yamazaki et al., 10.18429/JACoW-Cyclotrons2019-TUP024 |
| 2023 | 物理run + コミッショニング<br>S. Kanda et al., J. Phys.: Conf. Ser. 2462 012030 (2023)<br>Y. Nakazawa et al., 10.18429/JACoW-IPAC2024-THAN2  |

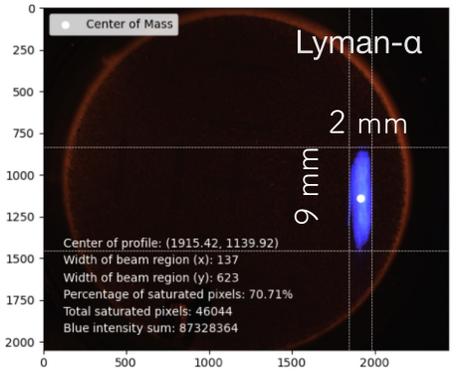
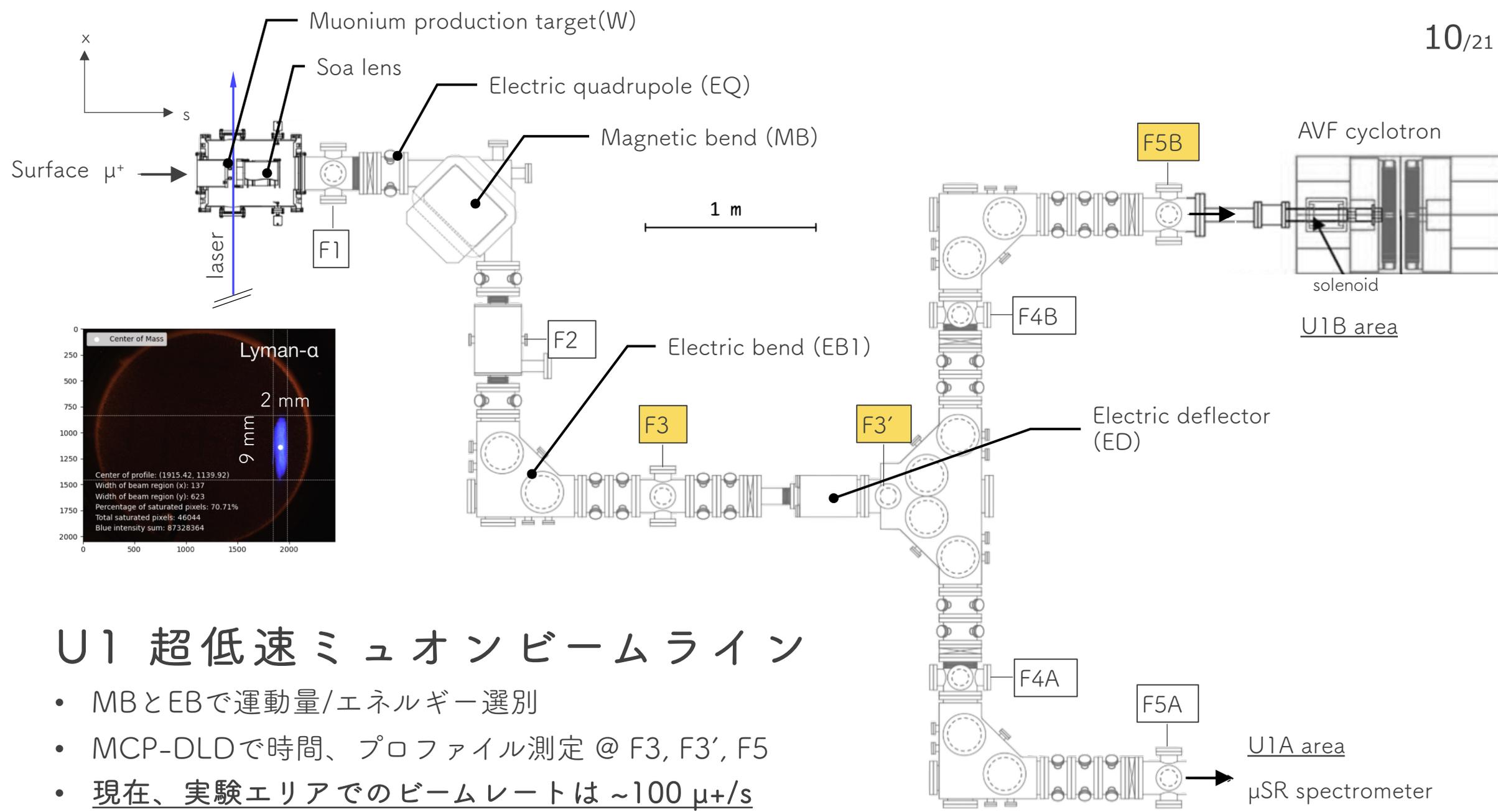
# レーザーシステム



Y. Oishi et al., JPS Conf. Proc. 2, 010105 (2014).

Lyman- $\alpha$  (122nm)の波長を直接発振できるレーザー媒質はない  
 Krガス中での二光子共鳴四波混合でLyman- $\alpha$ を生成(KEK, 大石)  
 レーザープロファイル用のモニター開発(茨城大, 中村研)

レーザー強度 + 2種レーザーの重ね合わせが重要



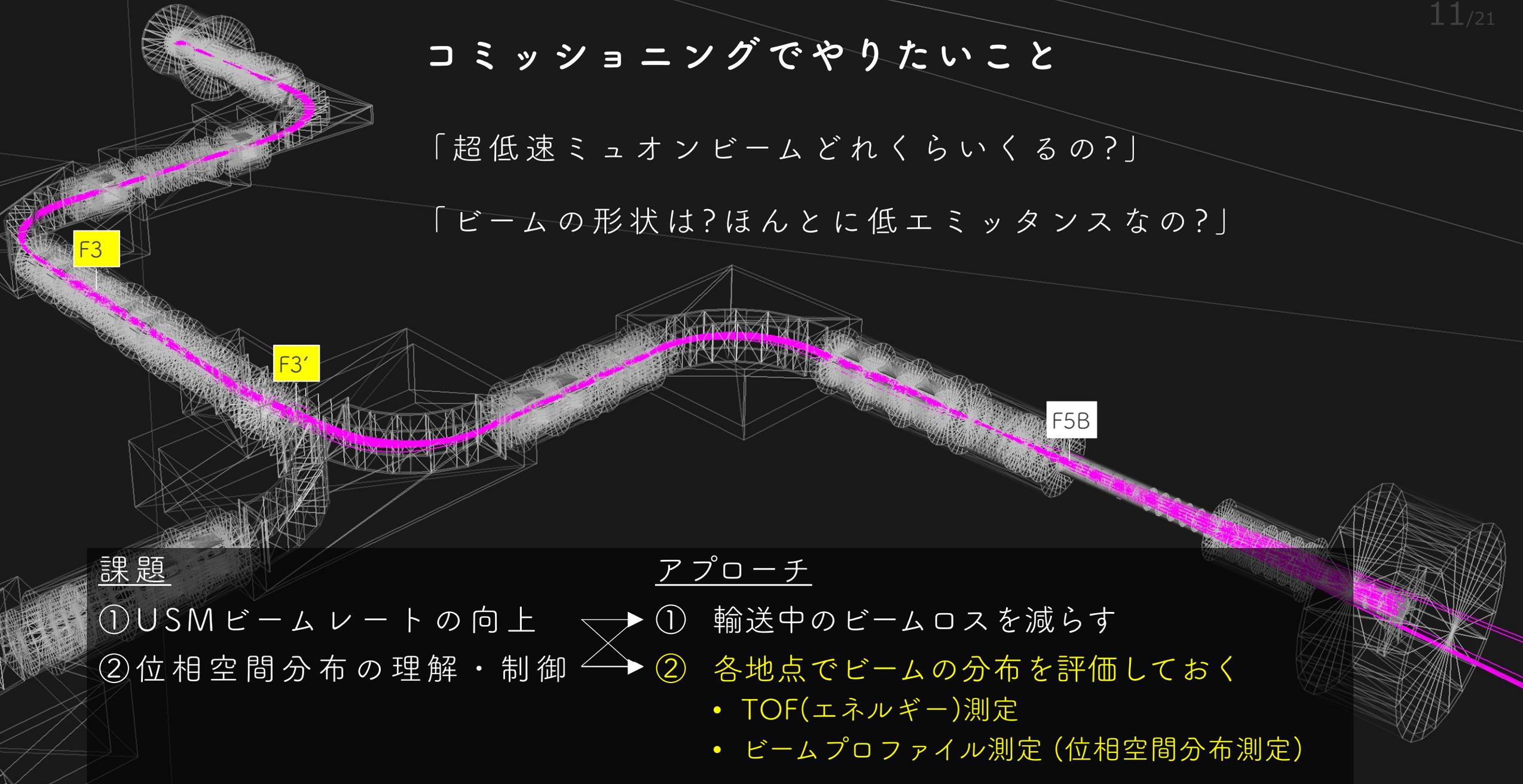
## U1 超低速ミュオンビームライン

- MBとEBで運動量/エネルギー選別
- MCP-DLDで時間、プロフィール測定 @ F3, F3', F5
- 現在、実験エリアでのビームレートは ~100  $\mu^+$ /s

## コミッショニングでやりたいこと

「超低速ミュオンビームどれくらいくるの？」

「ビームの形状は？ほんとに低エミッタンスなの？」



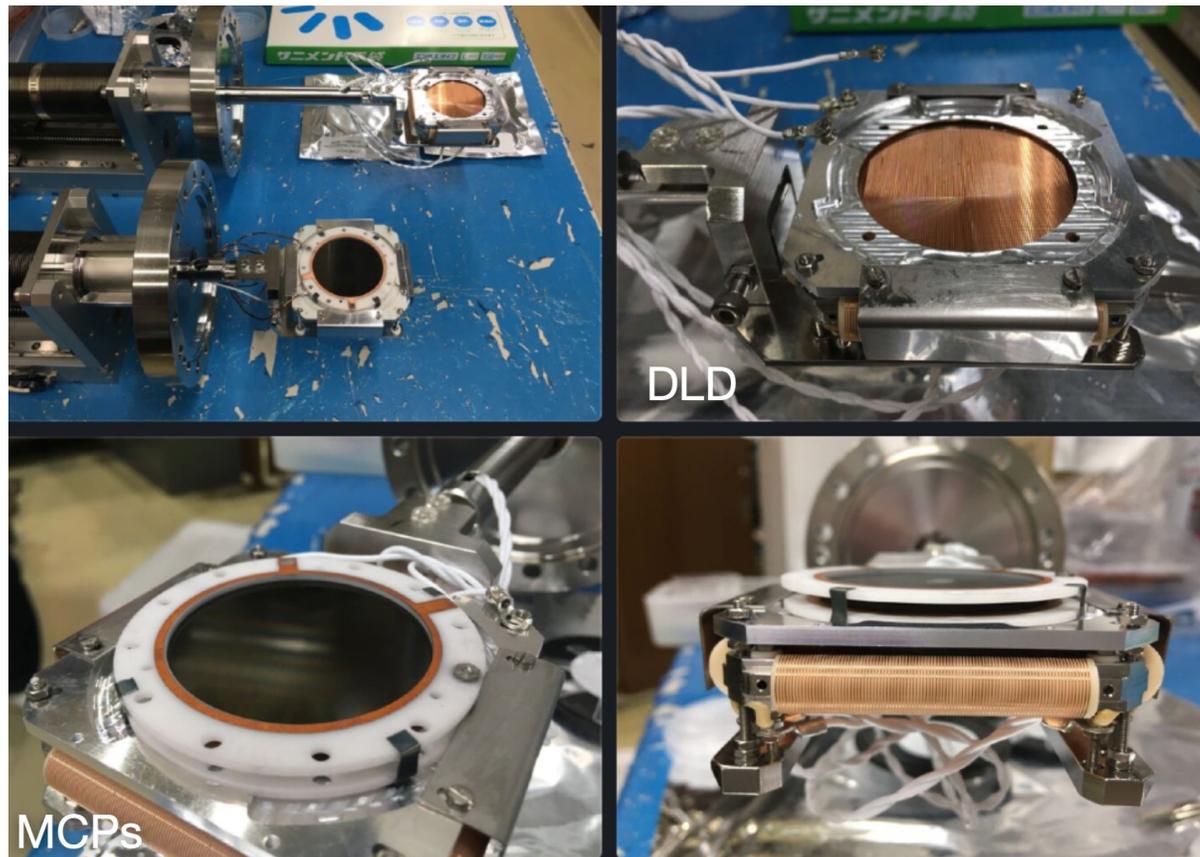
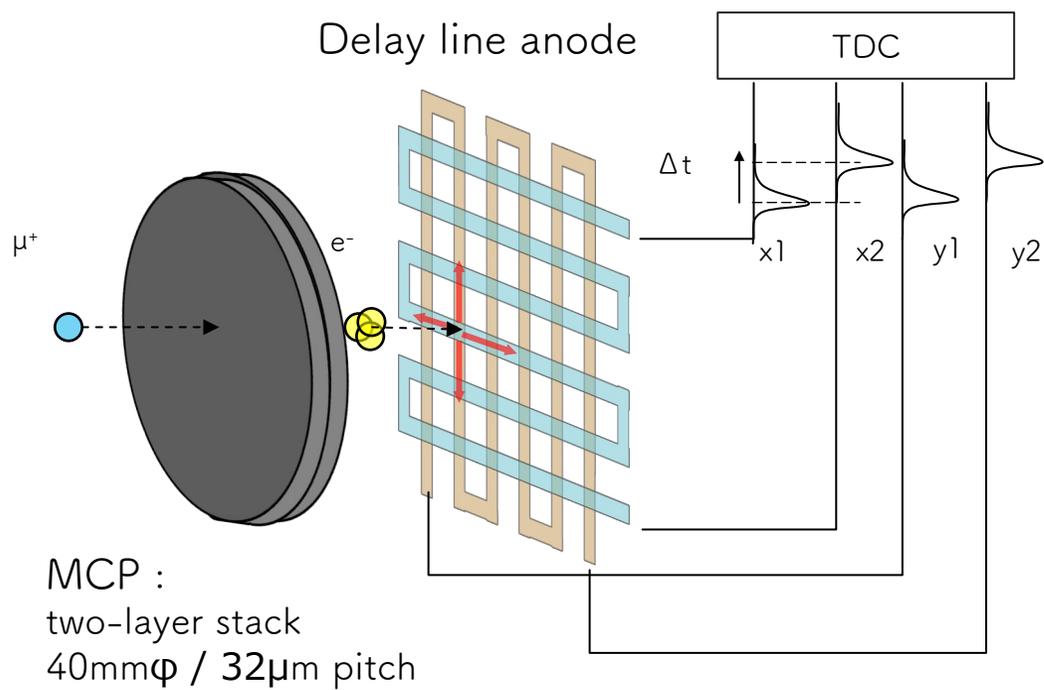
### 課題

- ① USMビームレート向上
- ② 位相空間分布の理解・制御

### アプローチ

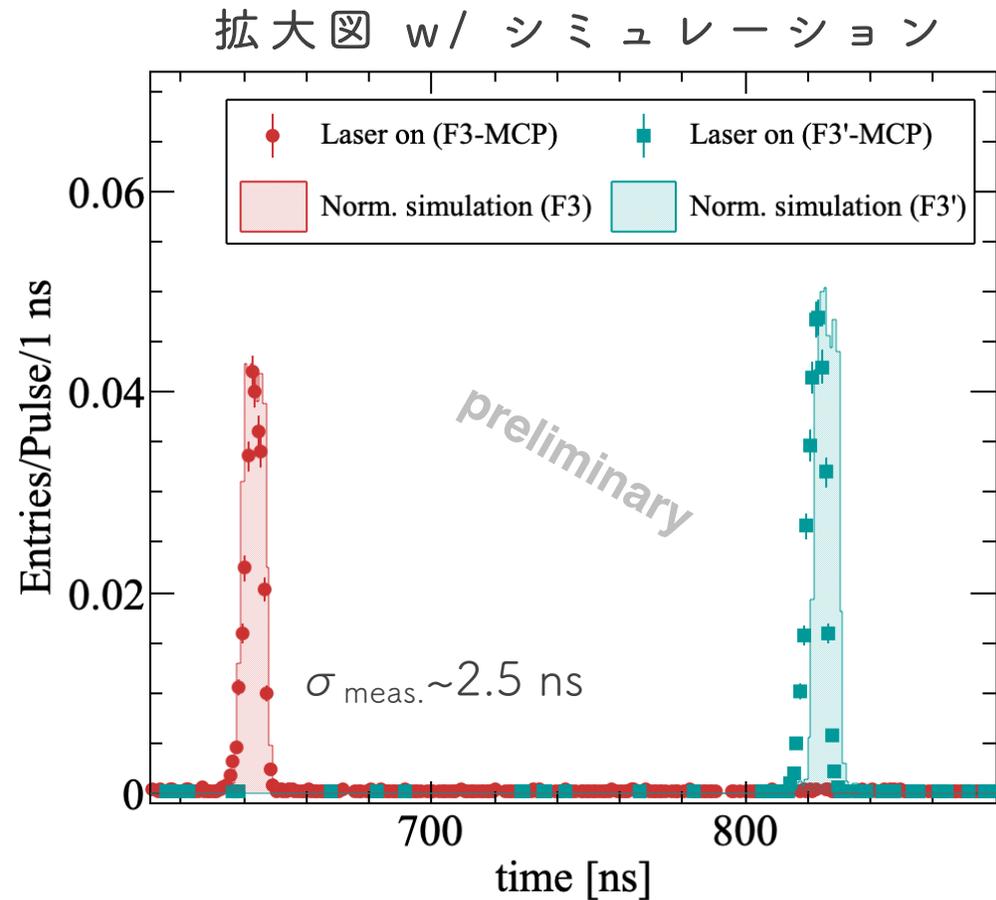
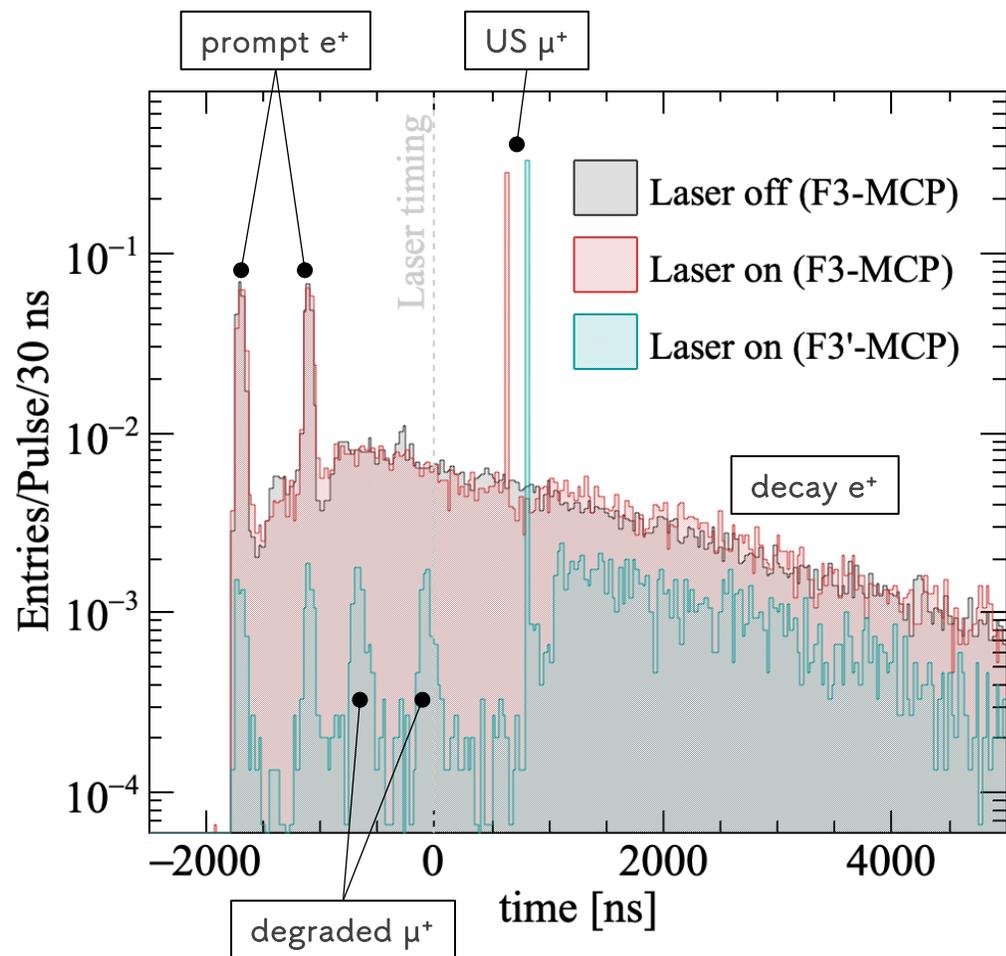
- ① 輸送中のビームロス減らす
- ② 各地点でビームの分布を評価しておく
  - TOF(エネルギー)測定
  - ビームプロファイル測定(位相空間分布測定)

## プロファイル測定用：MCP-DLD検出器



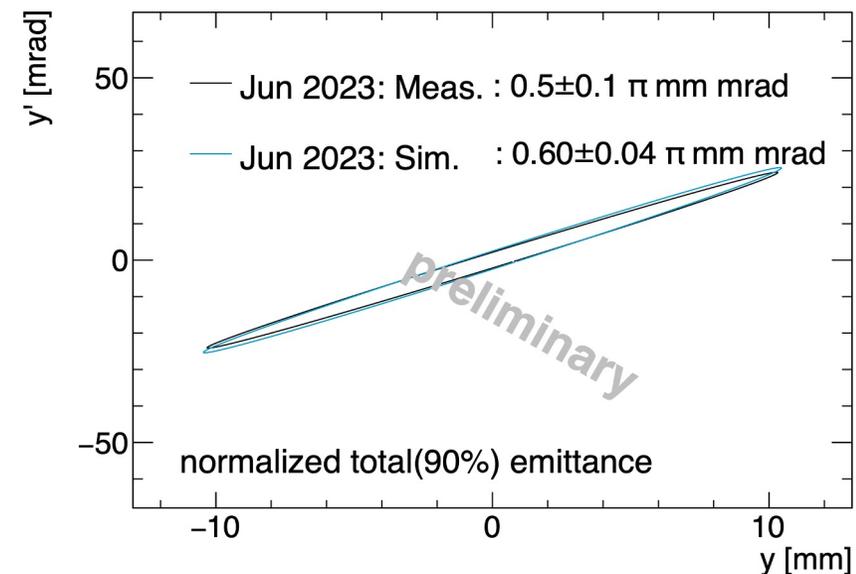
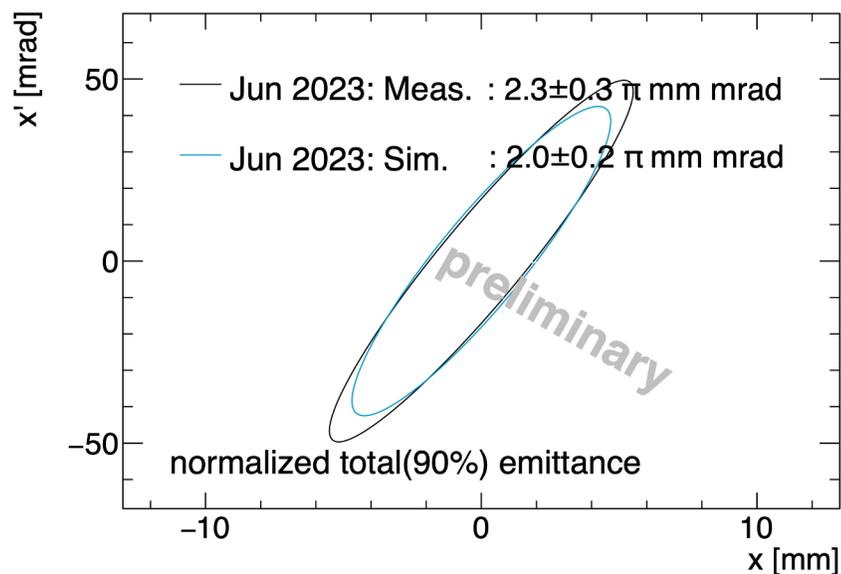
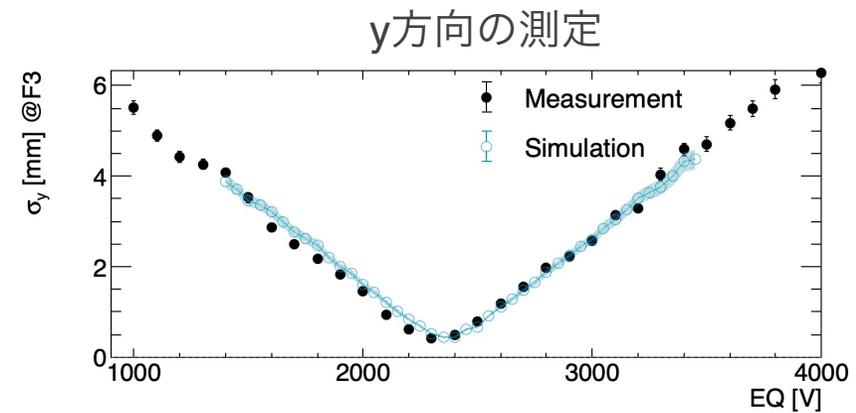
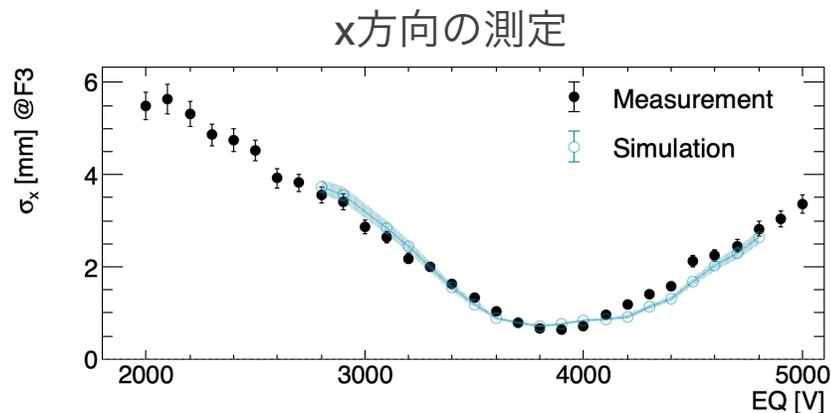
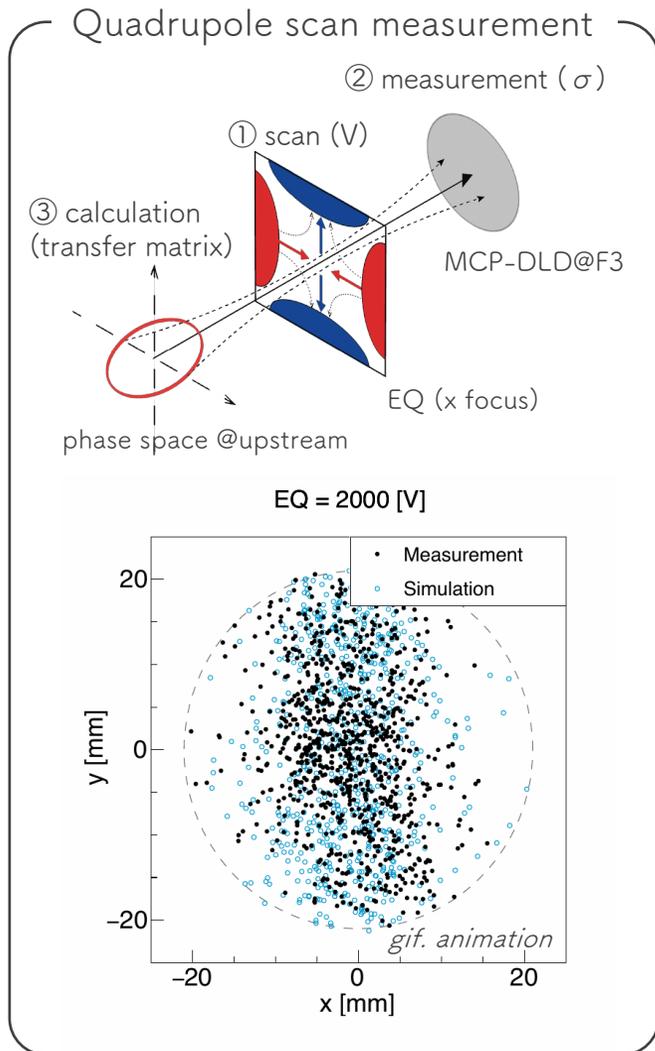
x, y方向のアノード線からのTDCデータの時間差で位置を同定する

# TOF測定(F3-F3')による超低速 $\mu^+$ の信号同定



$\mu^+$ の冷却+静電引出し( $\sim 30$  keV)を確認 / 縦(時間)方向は $\sigma \sim 2.5$  ns

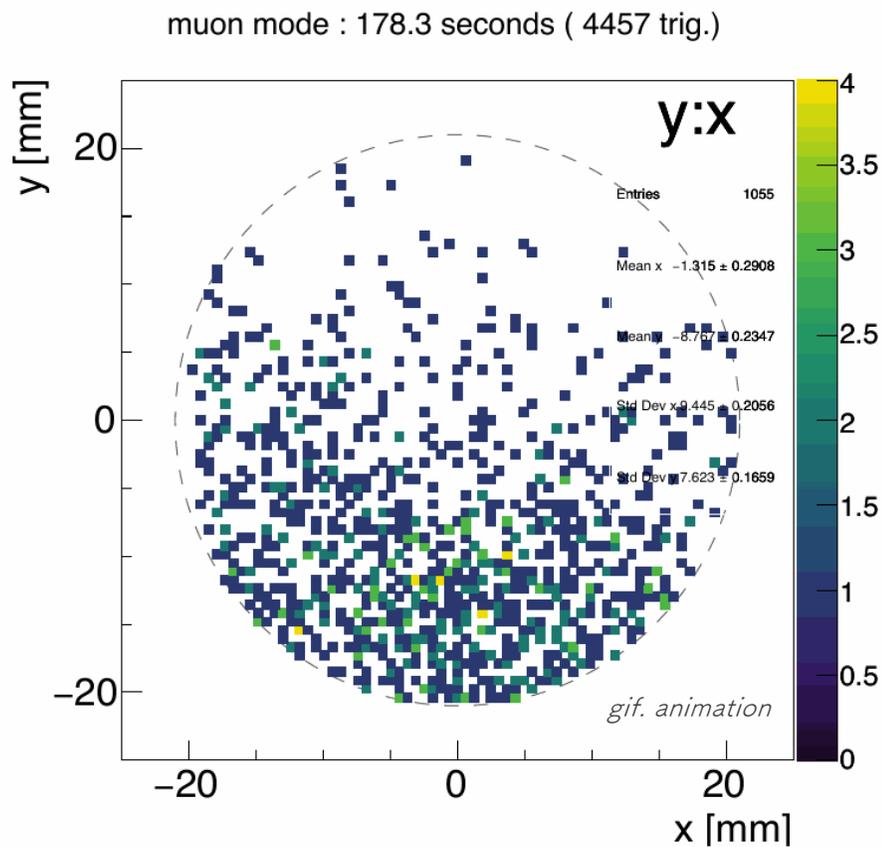
## F3地点での位相空間分布の評価



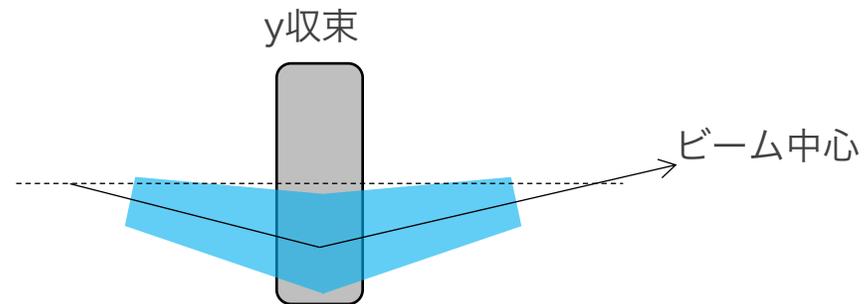
横(空間-運動量)方向は  $\varepsilon_{x,n,total} = 2.3$ ,  $\varepsilon_{y,n,total} = 0.5 \pi$  mm mradの広がり

## がしかし、、悩みも多い

ビームの軸ズレが発生し、最適な光学(EQの設定値など)系がシーズン毎で変わったりする



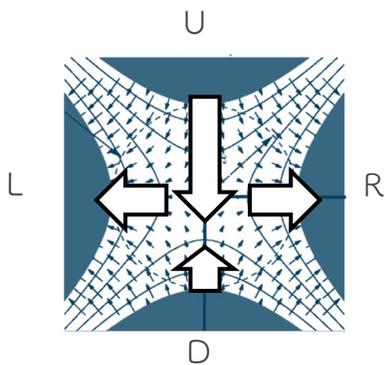
ビームがEQの中心に来ていないと  
EQの電圧を変えた時にビーム幅だけでなく軸も変わってしまう



非線形な力により正しく位相空間分布を見積もれない

# 応急策：EQの各電極に独立な電圧をかけて軸ずれを補正する

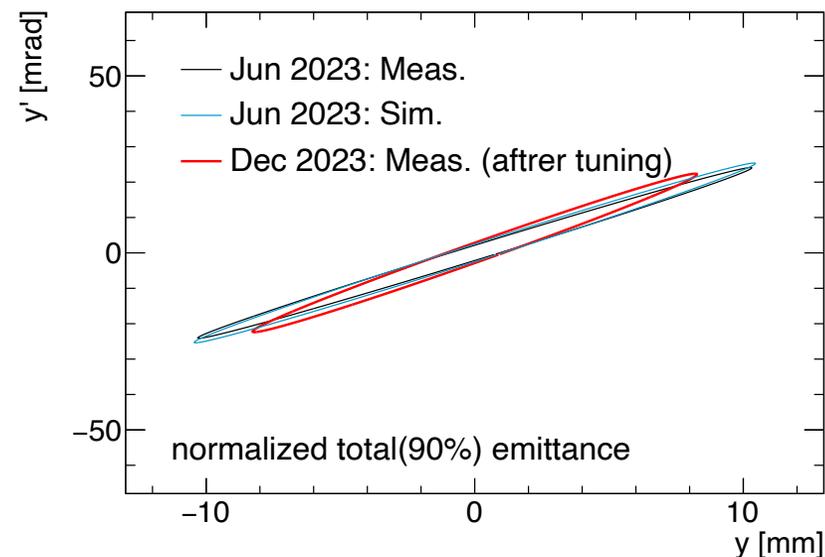
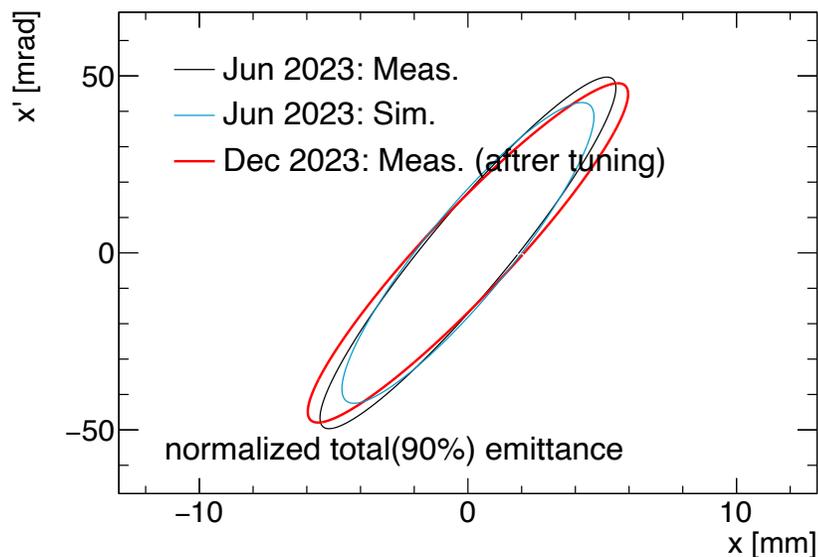
Electric Quadrupole



電圧を非対称に印加

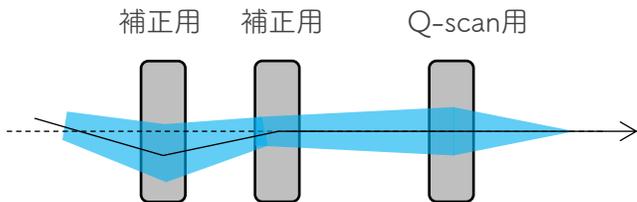
軸ずれを補正したあと

EQを調整し、位相空間分布が前の結果を再現することができた



が、しかし、

- 輸送中に補正しようとする、ビームが削れてレートが下がる
- (おそらく)上流での根本解決が必要

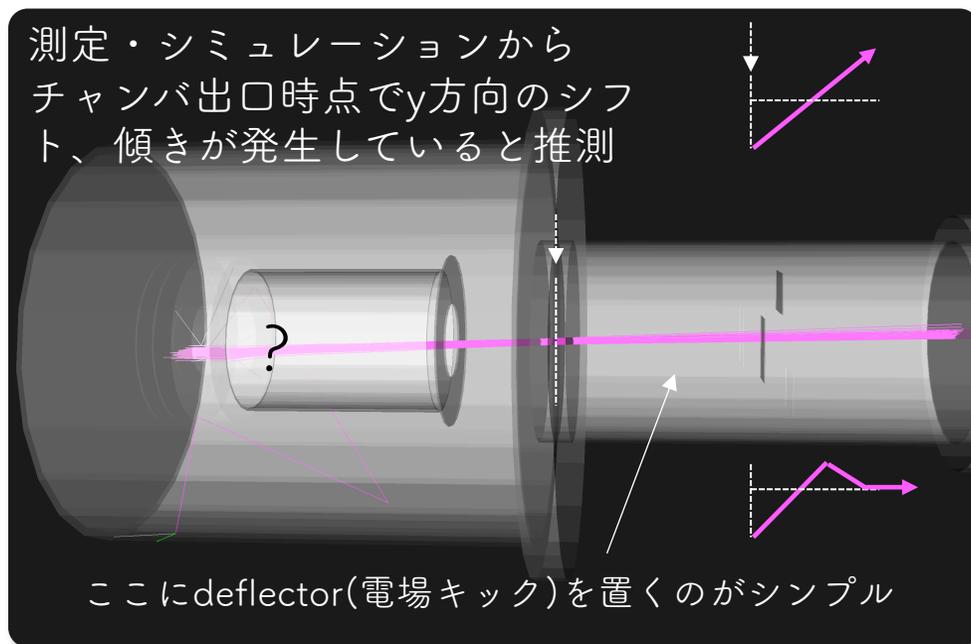


## 考察

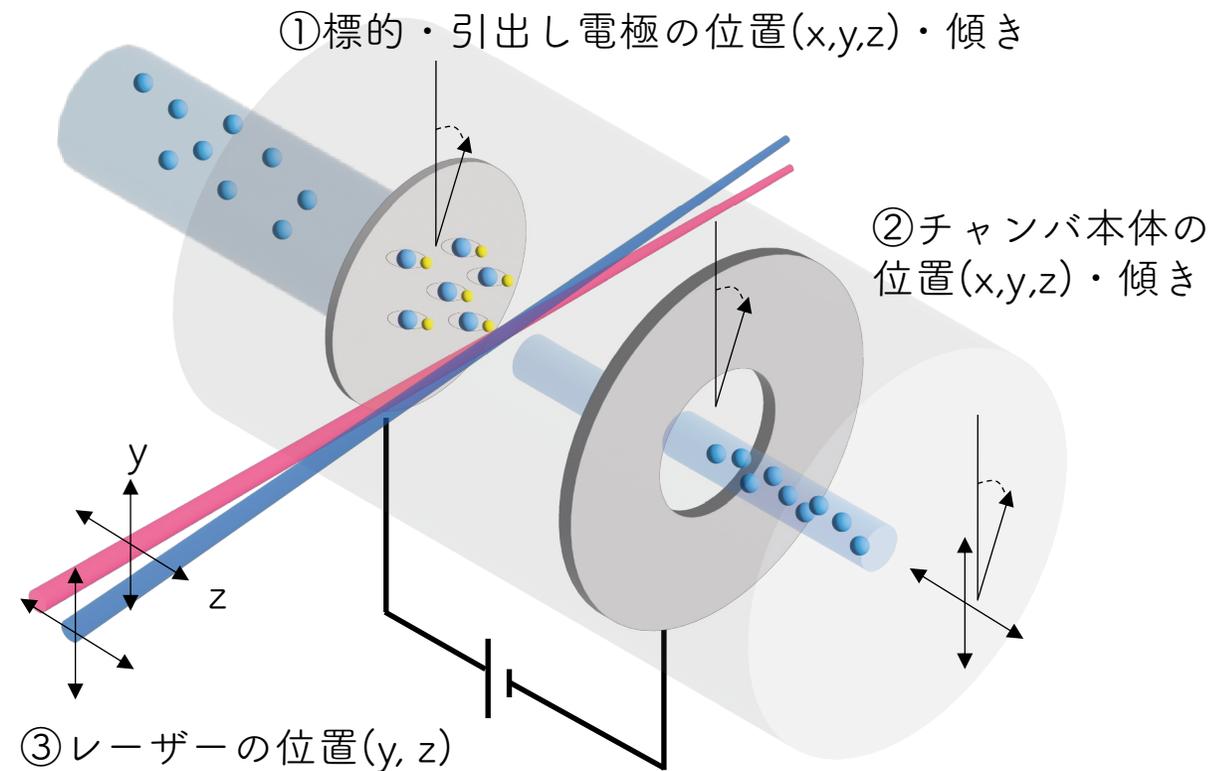
### 超低速 $\mu^+$ の生成

- ビーム発生ポイントが小さい
- 低エネルギー (0.2 eV  $\rightarrow$  30 keV)

$\rightarrow$  チャンバ出口でのビーム軸のズレが生じると下流に大きく影響する



### 原因の予想

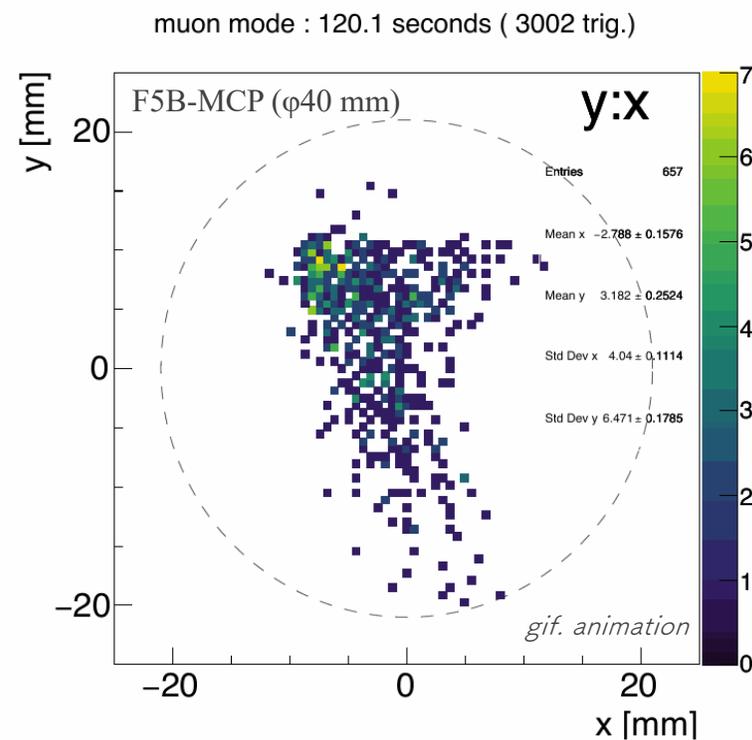
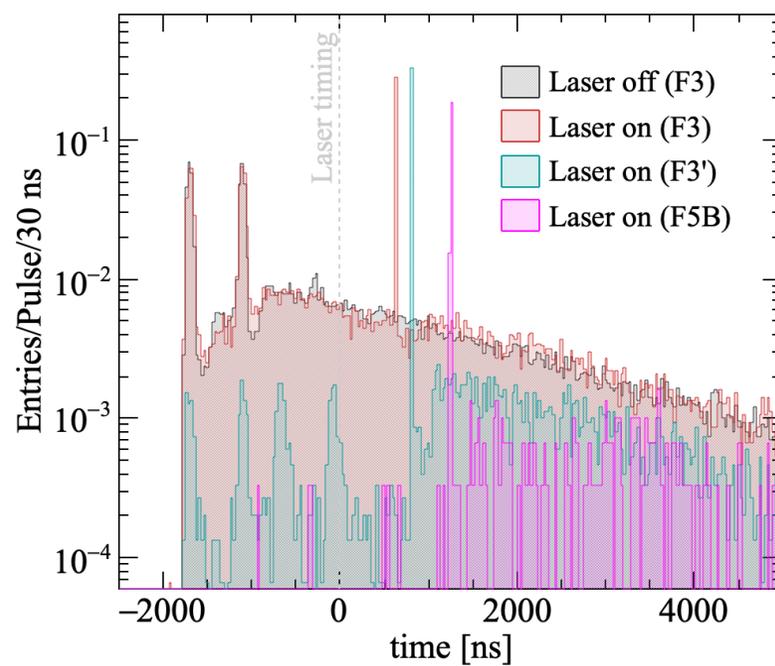
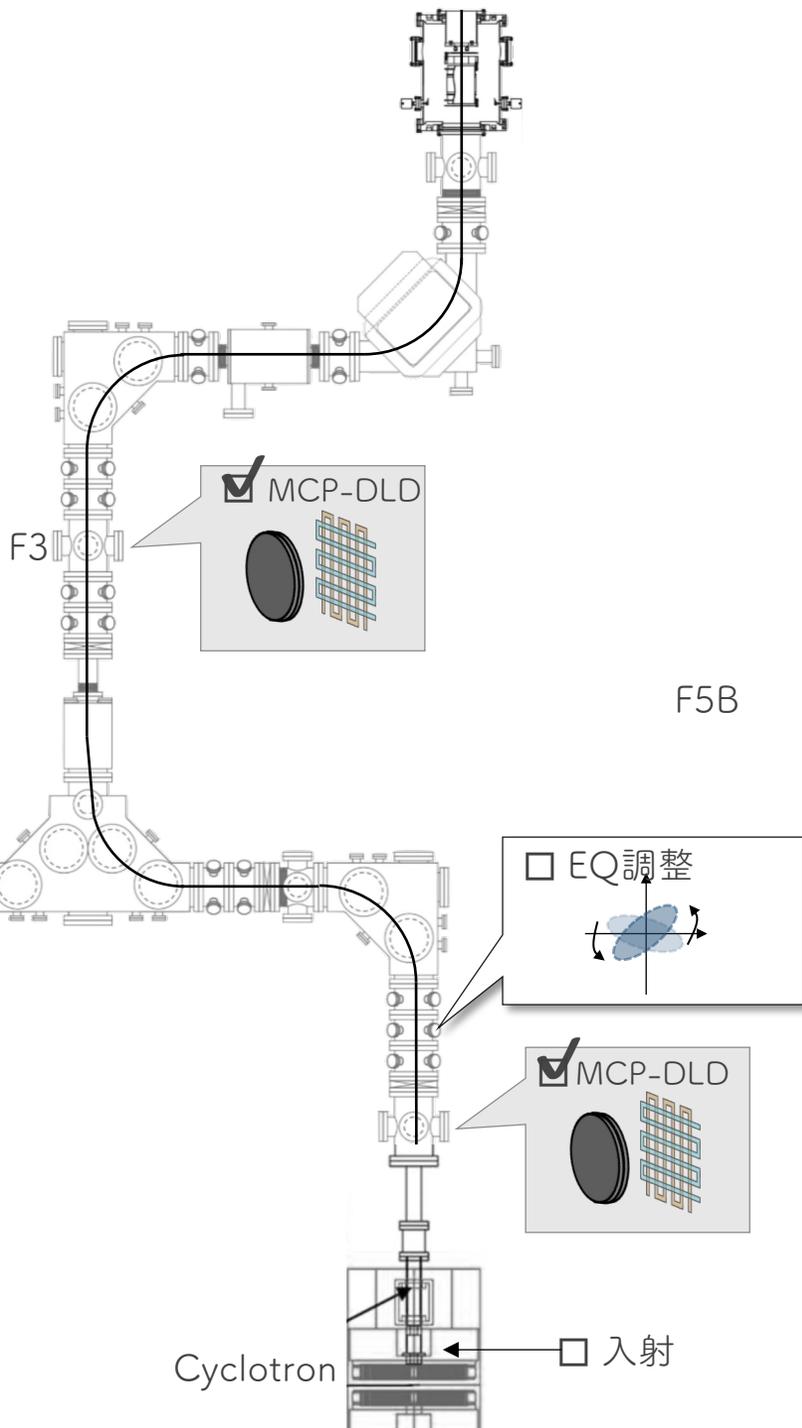


その他：上流ソレノイド磁石の漏れ磁場, EQの電圧値

発生直下で $\mu^+$ プロファイルが測定できれば嬉しいのだが、  
B.G.(penetrating  $\mu^+$ , decay  $e^+$ )が多すぎて信号見えない。

## 今後のコミッショニング

- 軸ずれ問題は依然残るが、現状の理解(縦・横方向)は概ね完了
- 下流で、位相空間分布の測定 + 制御(= マッチング)を行う



Q-scanやってみたがやはり軸ズレがある☹

U1A物理run, U1Bサイクロトロン加速試験が予定されている

## まとめ

- 低エミッタンスミュオンビームの開発が推進中
- 超低速ミュオンビームの性質を測定した。
  - エネルギー
  - 位相空間分布
- が、軸ズレが懸念事項
  
- 加速による高輝度(強度up, 低エミッタンス)なミュオンビームを目指す