

J-PARC muon g-2/EDM実験に おける超低速ミュオン静電加速 収束器の設計

東京大学 理学系研究科 物理学専攻 修士1年
有留翔一

名大理^A, 名大KMI^B, Peking Univ.^C, 高工研^D, 理研^E
四塚麻衣^A, Ce Zhang^C, 上岡修星^D, 大谷将士^D, 石田勝彦^E,
鈴木一仁^B, 三部勉^D, 齊藤直人^D

2022年 2月 23日

□ ミューオン異常磁気能率： $a_\mu \equiv (g - 2)/2$

標準理論で極めて高精度に計算できる。

- ・ 理論値・・・ $a_\mu(\text{SM}) = 116591810(36) \times 10^{-11}$
- ・ 実験値・・・ $a_\mu(\text{exp}) = 116592061(41) \times 10^{-11}$

⇒ 4.2σ の解離 ⇒ 新物理の兆候 (?)

今、最もホットな話題の1つ!

目標感度：0.1 ppm



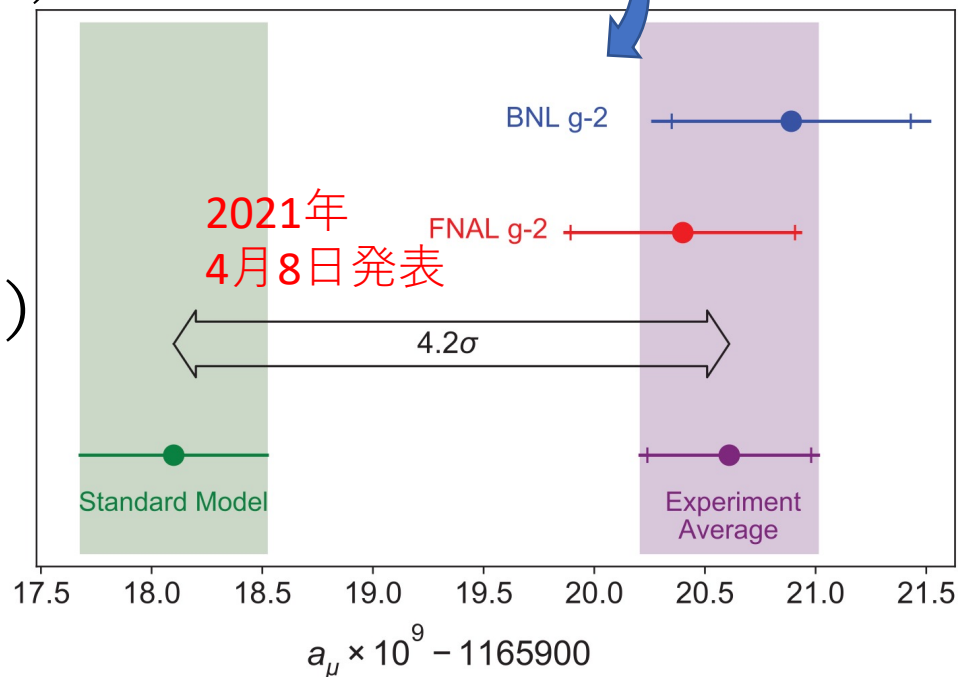
□ 電気双極子モーメント (EDM)

- ・ 有限のEDMの発見

：CPを破る新物理存在の証拠

⇒ 物質優勢宇宙解決の手がかり

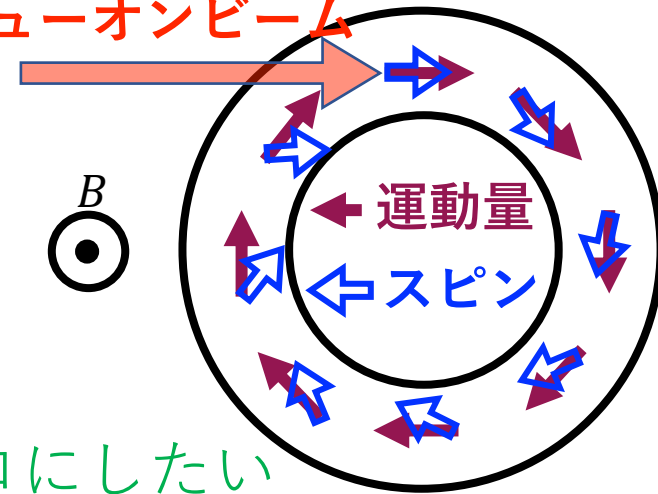
目標感度： $10^{-21} e \cdot \text{cm}$



a_μ と EDM の測定

：磁場中にあるミュオンの運動量と
スピンの歳差周期のズレを測定

偏極ミュオンビーム



☆本実験は今までとは全く異なる手法

この項をゼロにしたい

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_{a_\mu} + \vec{\omega}_{\text{EDM}} = -\frac{e}{m} \left[a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left(\vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right) \right]$$

今までの実験 (BNL, FNAL): magic $\gamma = 29.3$ 本実験: $\vec{E} = 0$

電場を用いずにミュオンを蓄積する必要がある。

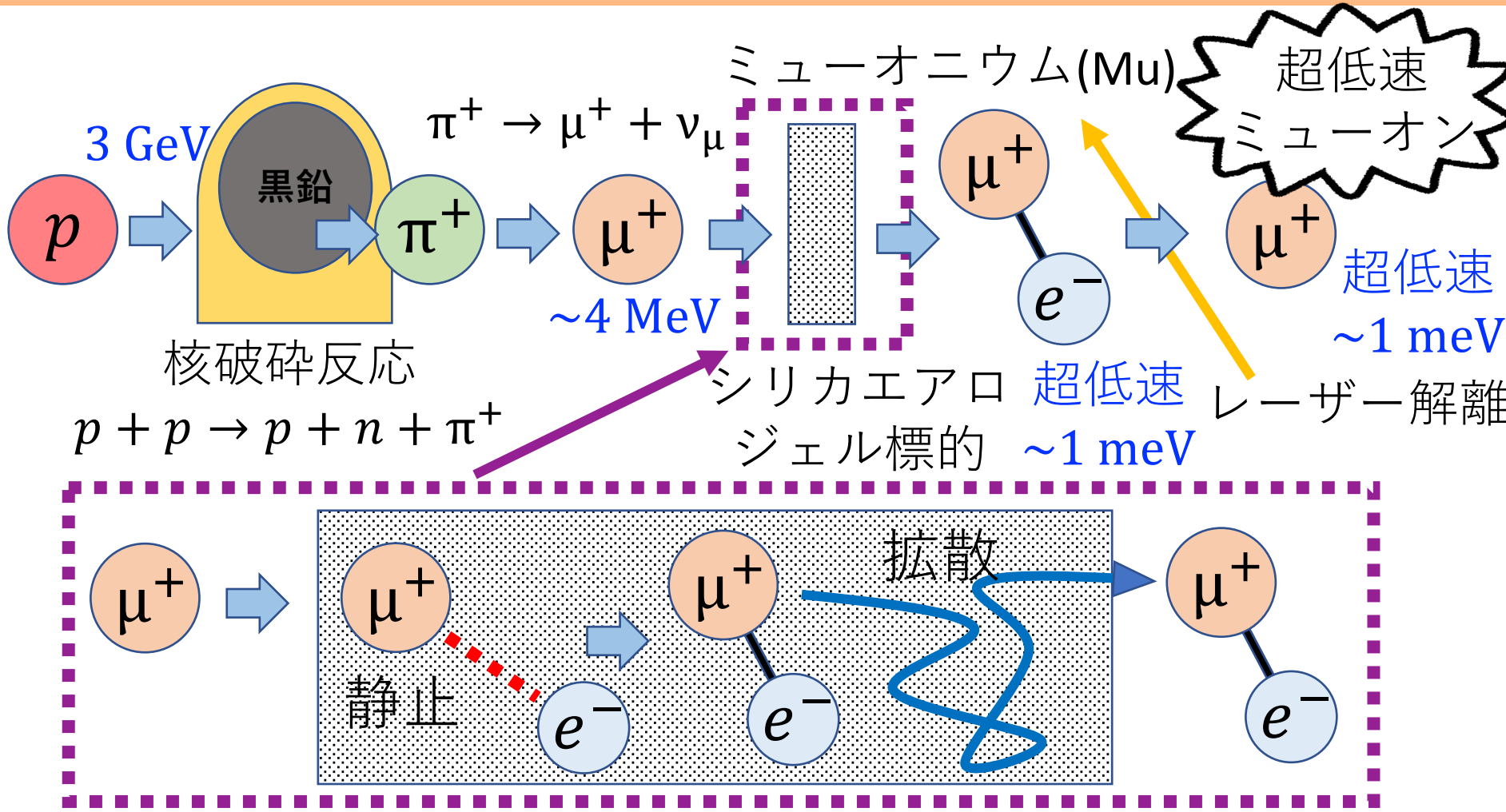
→長い距離を輸送してもビームの質が悪化しない必要がある

→**超低速ミュオンビームの利用**

実験の肝は、如何に超低速ミュオンを高い強度で作り、
高い強度のミュオンビームを磁場中に蓄積できるか

超低速ミューオンの生成

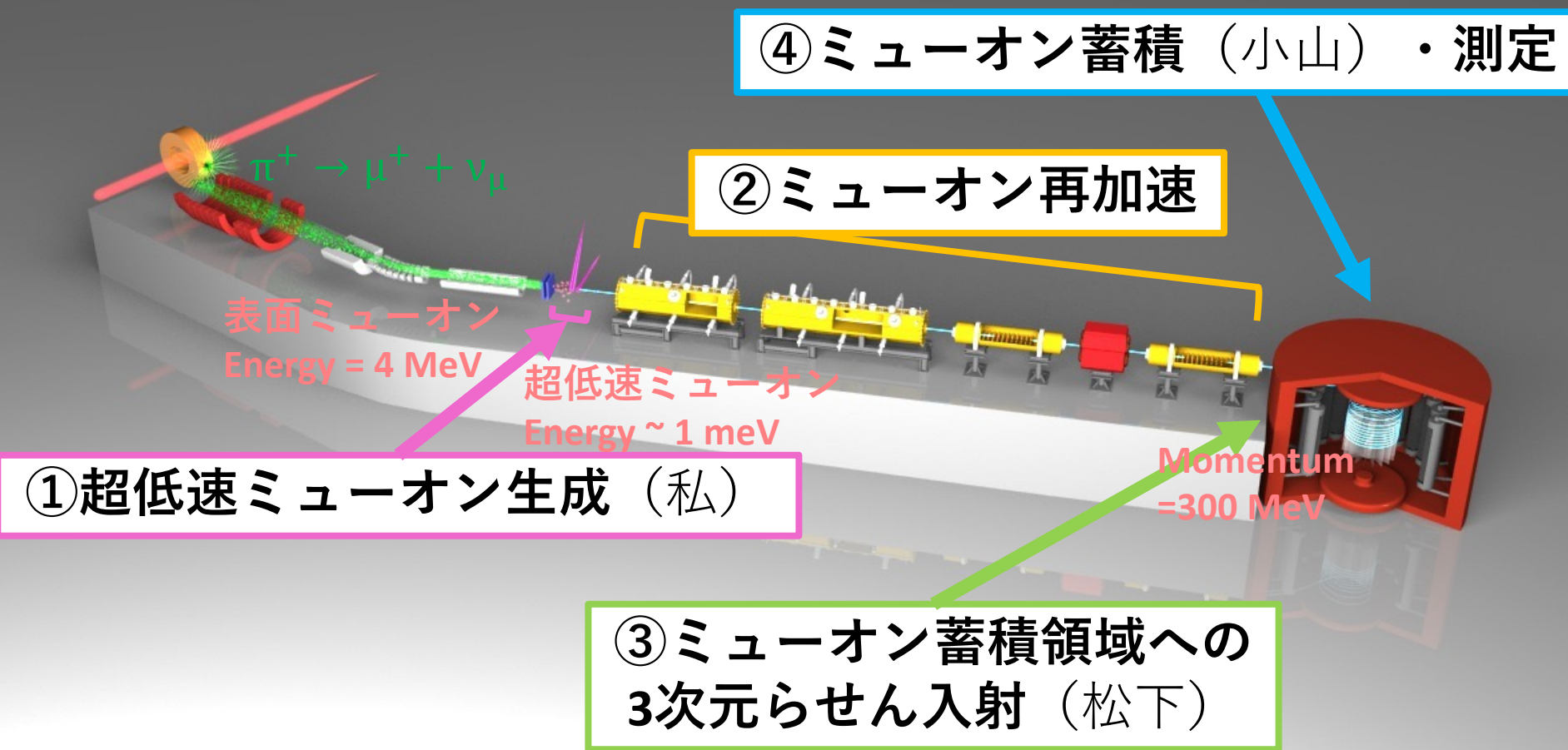
2022/2/23



超低速ミューオンの特徴

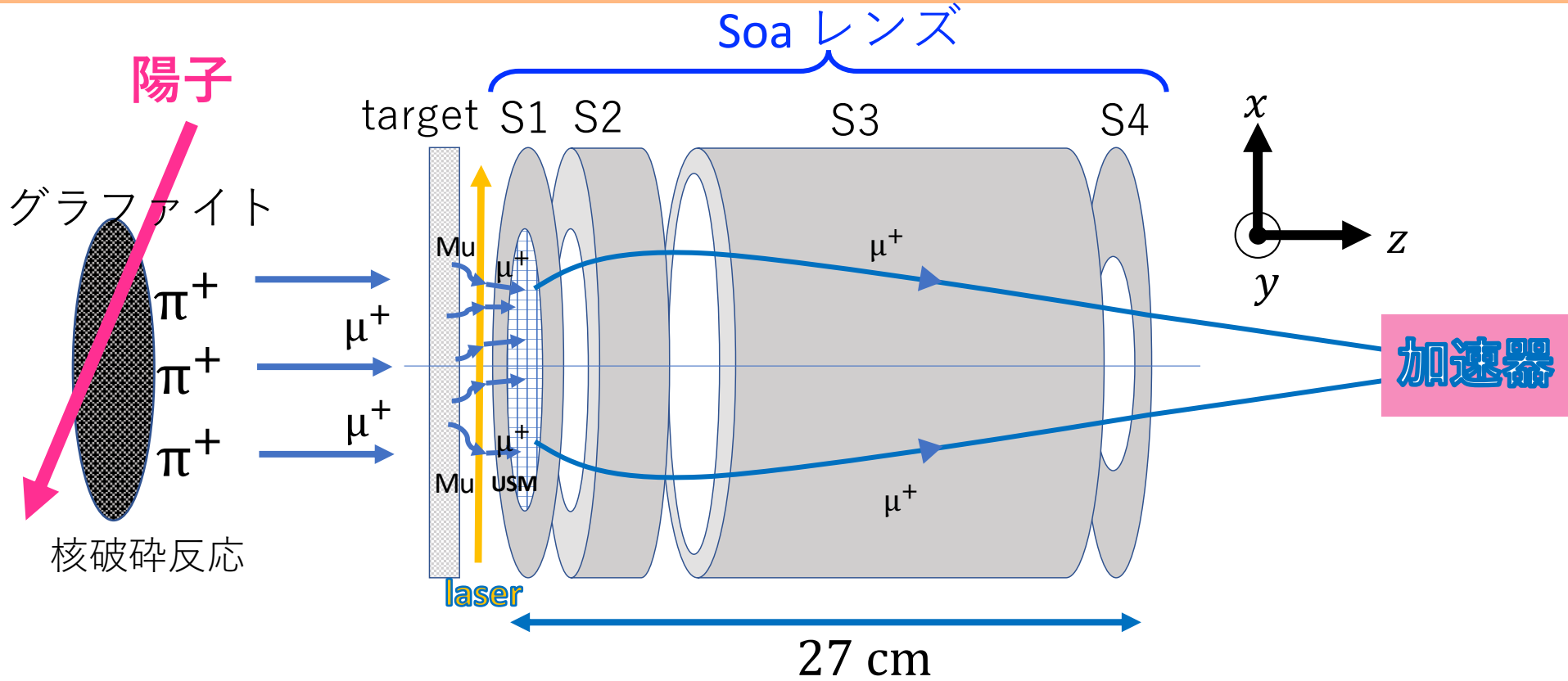
エミッタンスが小さく ($\sim 1 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$)、長い距離を輸送してもビーム径が大きくなるらない。

2027年実験開始予定



静電加速収束器 (Soaレンズ)

2022/2/23

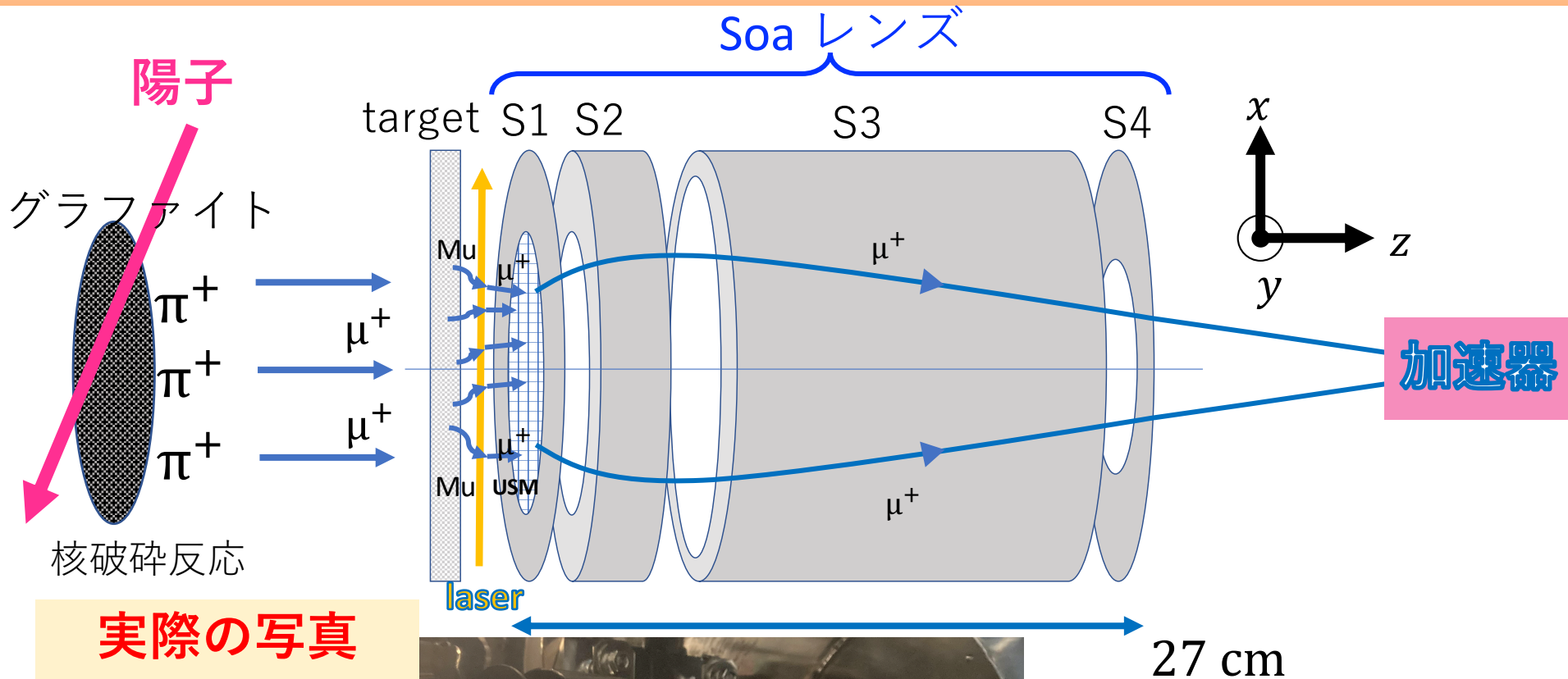
**加速器**

Soaレンズ

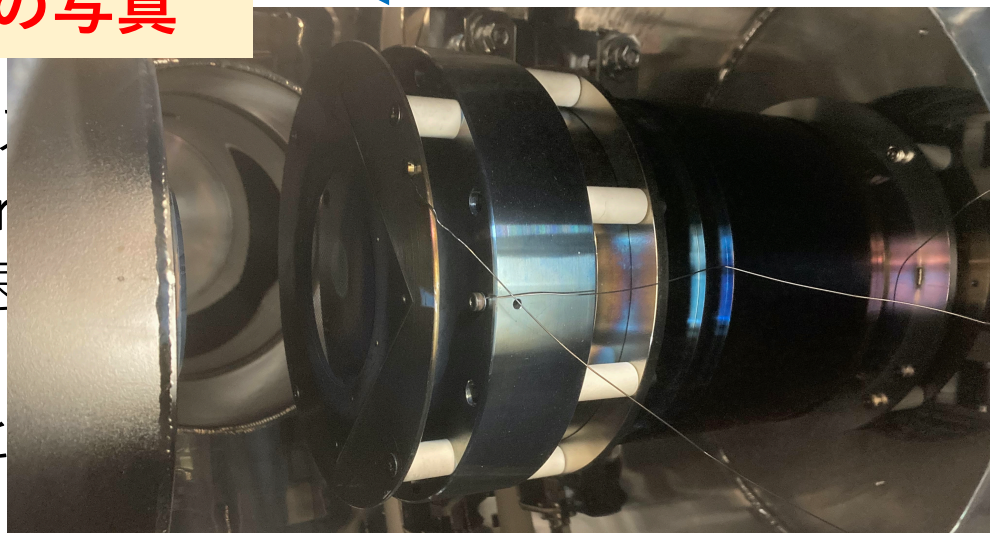
- immersion lens (両端で電圧が異なる静電レンズ)の一種。
- 超低速ミューオンを集め、下流の加速器まで加速しながら輸送する。
- 寸法と印加電圧がおおよそ最適化された4つの電極から成る。

静電加速収束器 (Soaレンズ)

2022/2/23



実際の写真



- Soaレンズ
- immer
- 超低速
- する。
- 寸法と

レンズ)の一種。
まで加速しながら輸送
の電極から成る。

実機チェンバー製作の段階

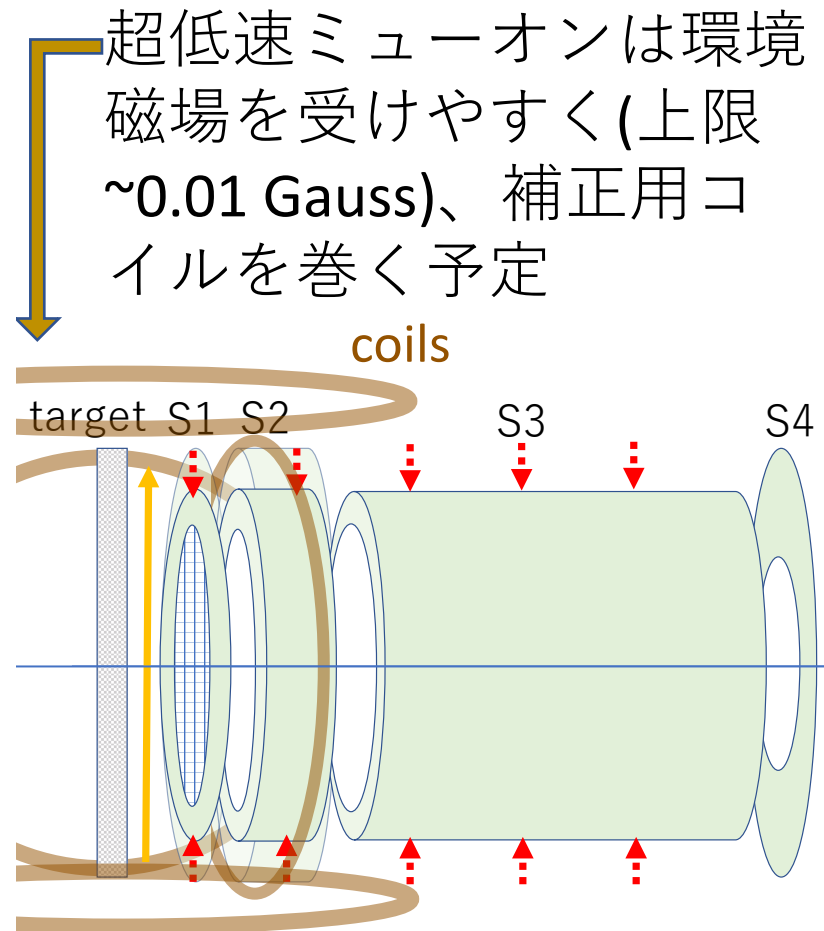
→ S3の内径と長さを変え、最適なSOAの寸法を見つける。

行ったこと

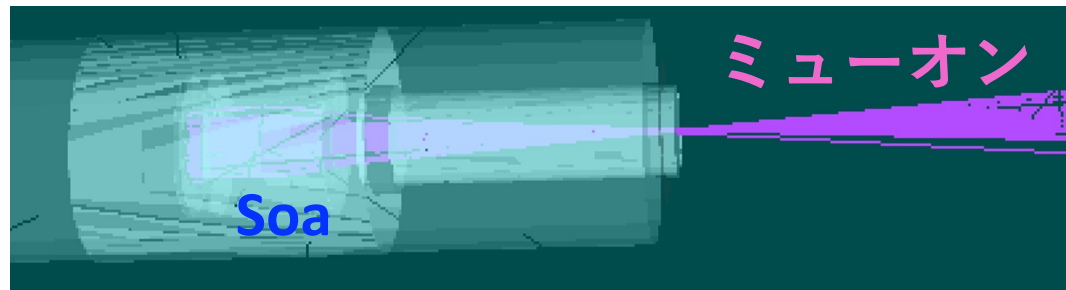
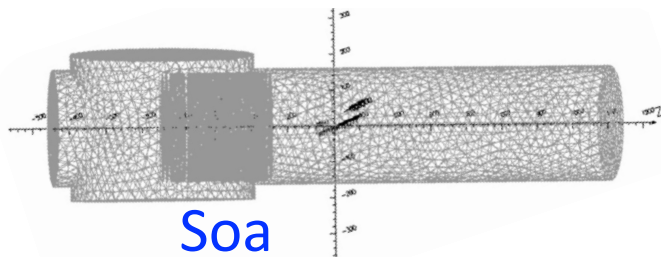
下流に設置される加速器(RFQ)入り口でのビームプロファイルとビーム輸送効率を確認

→ もしSOAのサイズを小さくすることができれば…

- ・ コイル磁場の一様性が良くなる。
→ S3のみを変化させた。
- ・ コスト



Operaによる電位分布、Geant4によるシミュレーションの結果

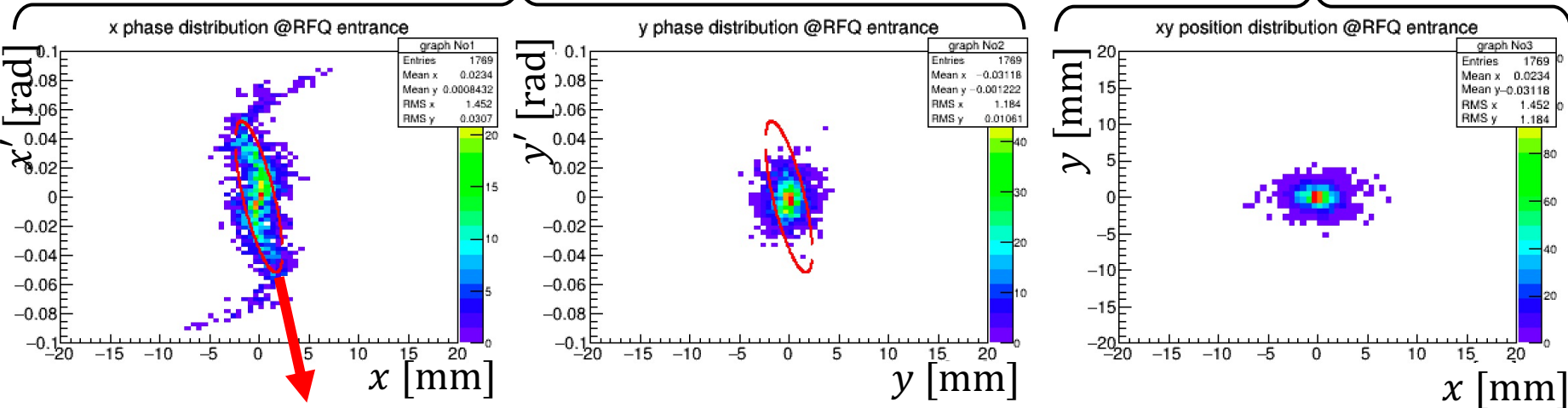


$$x' \equiv p_x/p_z, y' \equiv p_y/p_z$$

RFQの位置での位相空間分布

生成イベント数 = 2388

実空間分布



後段の加速器 (RFQ) で加速できる領域の目安

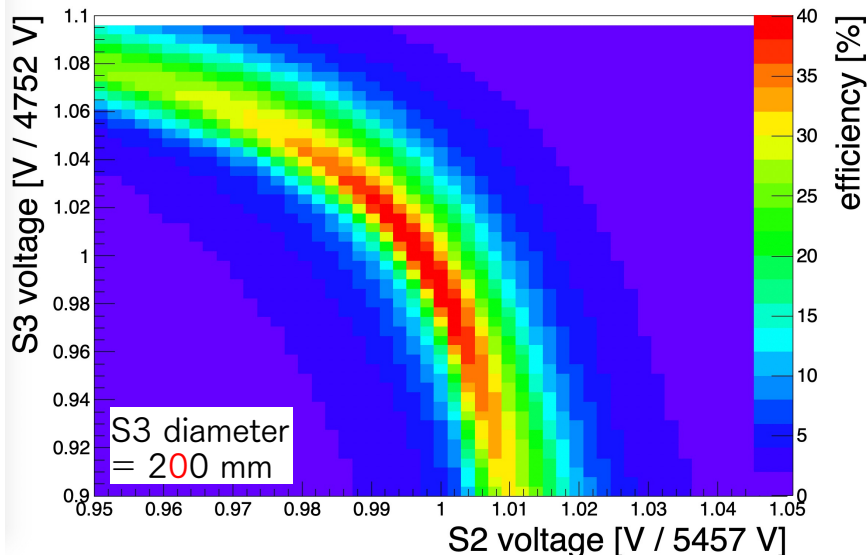
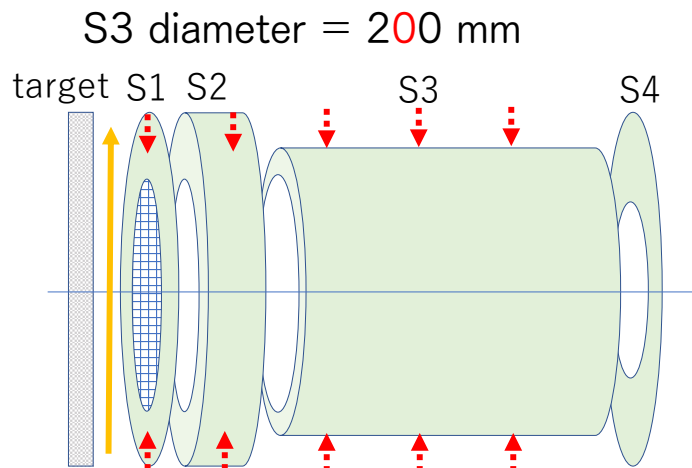
$$\text{efficiency} \equiv \frac{\text{赤い楕円の中の粒子数}}{\text{生成イベント数}}$$

efficiency = 42.5 %

2022/2/23

- Geant4を用いてシミュレーションを行った。
- 異なる3つの内径(200, 240, 260 mm) について行った。
- それぞれのS3の内径に対して、
 - ・ 有限要素法ソフトウェアOperaによって電位マップを計算
 - ・ 電位のスキャン (S2 & S3)
 を行った。

例 : S3 diameter = 200 mm
 efficiencyのS2、S3電圧依存性



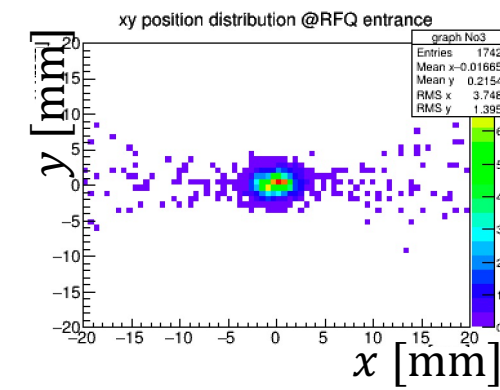
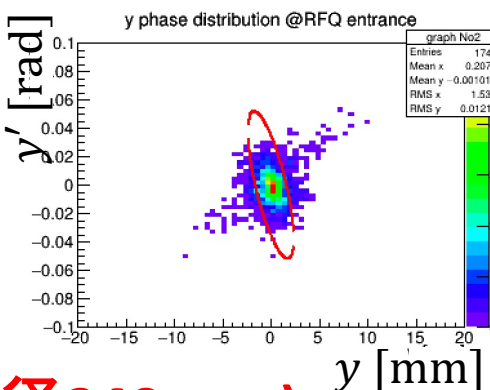
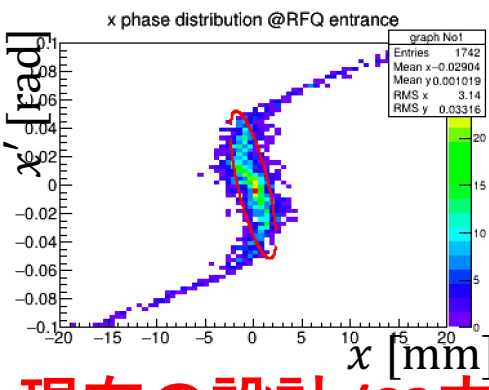
	S3内径が小さい時	現在の設計	S3内径が大きい時
S3内径	200 mm	240 mm	260 mm
S3電圧	4733 V	4752 V	5189 V
S2電圧	5446 V	5457 V	5359 V

それぞれのS3内径に対するRFQでのミューオン分布 11

2022/2/23

S3内径 = 200 mm

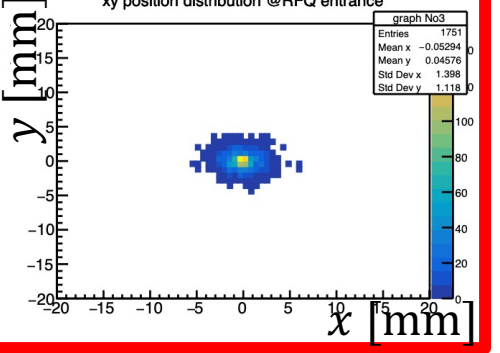
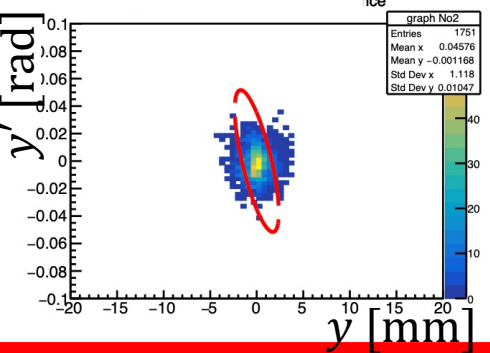
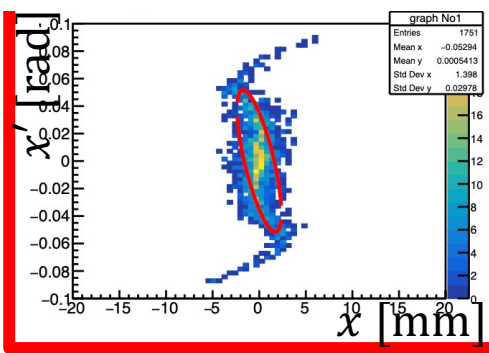
efficiencyの誤差はそれぞれ1%程度



efficiency = 40.1 %

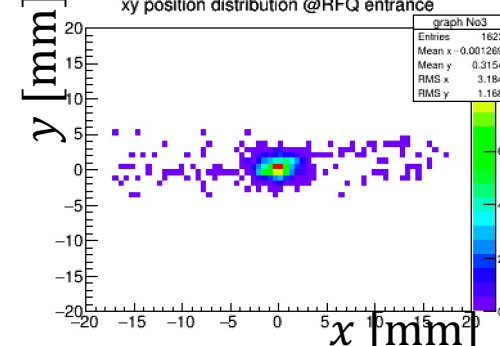
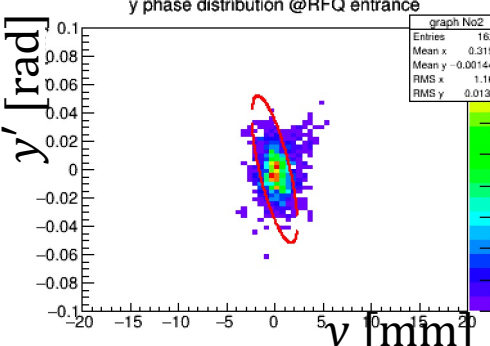
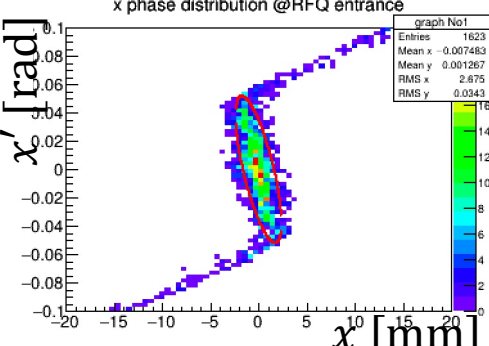
Relatively 6.0 % decrease

現在の設計 (S3内径240 mm)



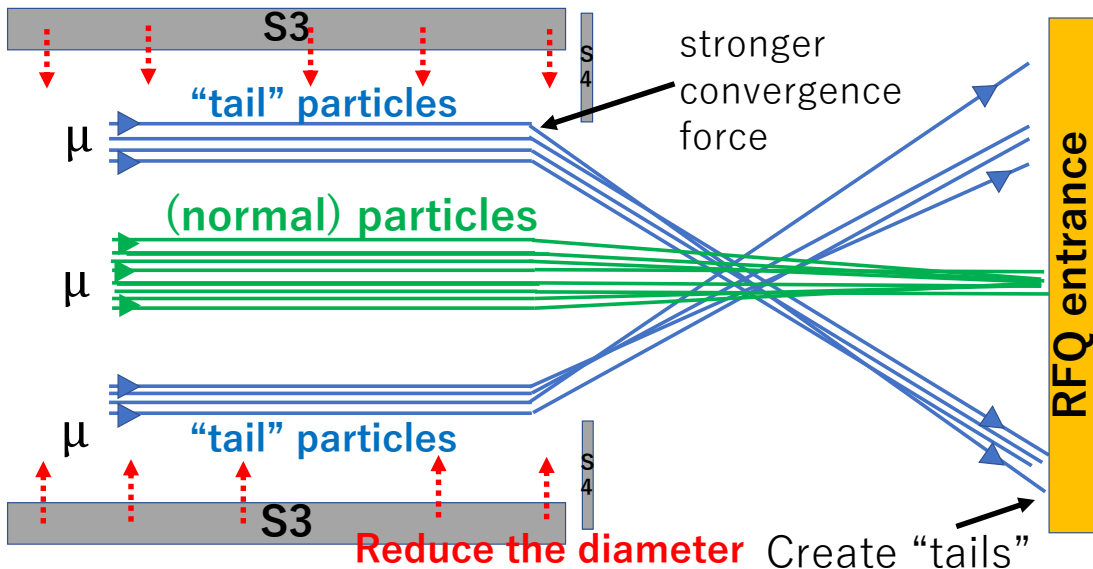
efficiency = 42.5 %

S3内径 = 260 mm

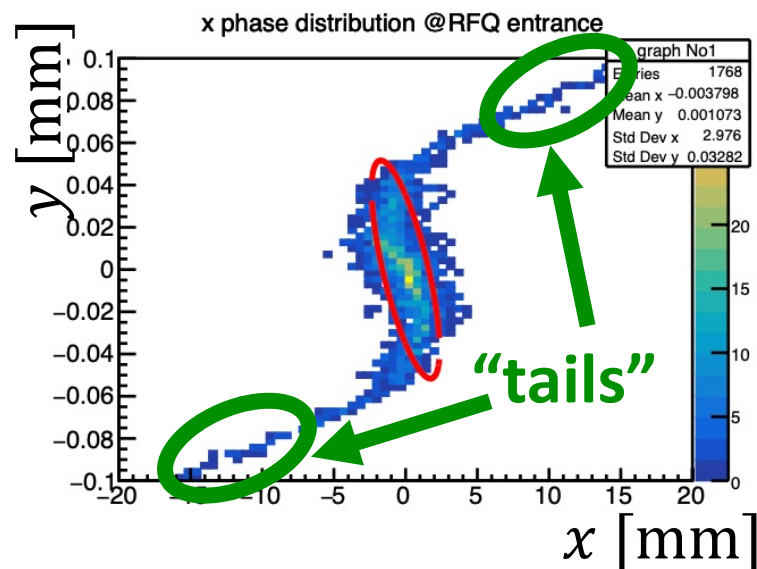


efficiency = 42.8 %

SOAレンズからRFQに行く粒子の概念図



位相空間での分布



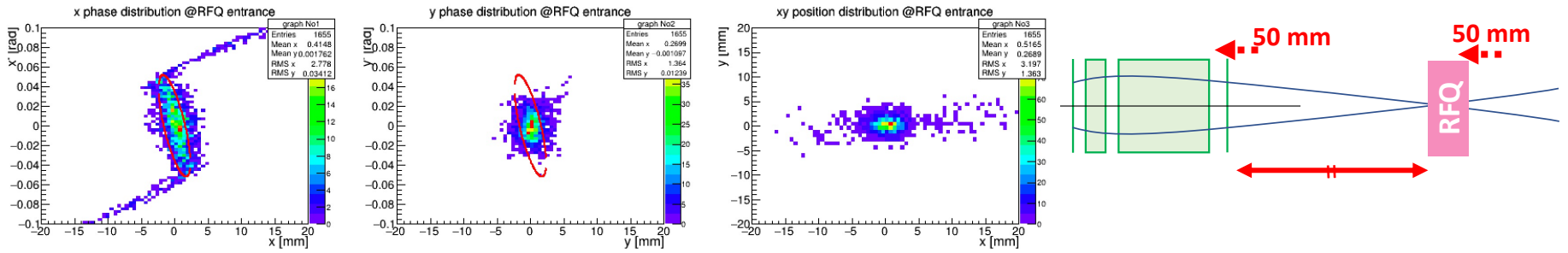
- ① S3の内径を小さくすると、電極近くを通過するミュオンが多くなる
- ② 理想レンズとは異なる強い収束力を感じる。
- ③ "tail"の粒子はRFQよりも上流で焦点を持つ。

➔これがS3の内径を小さくしたときに"tail"が現れ、efficiencyが減少する原因

2022/2/23

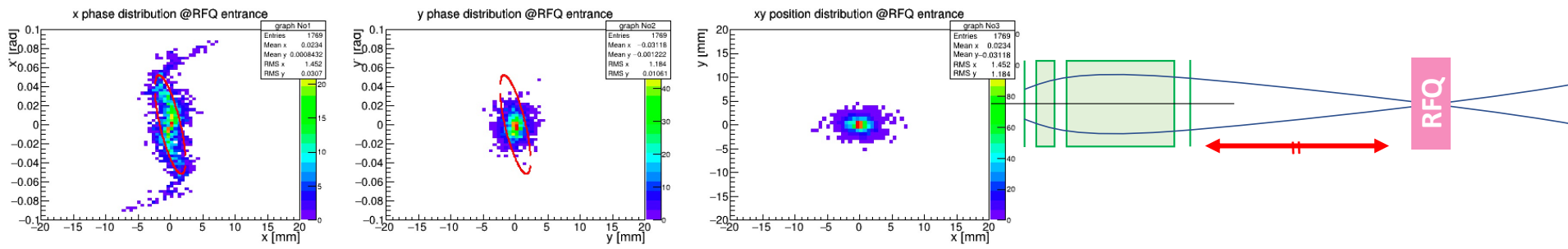
S3の長さ = 166 mm

efficiency = 35.4 %



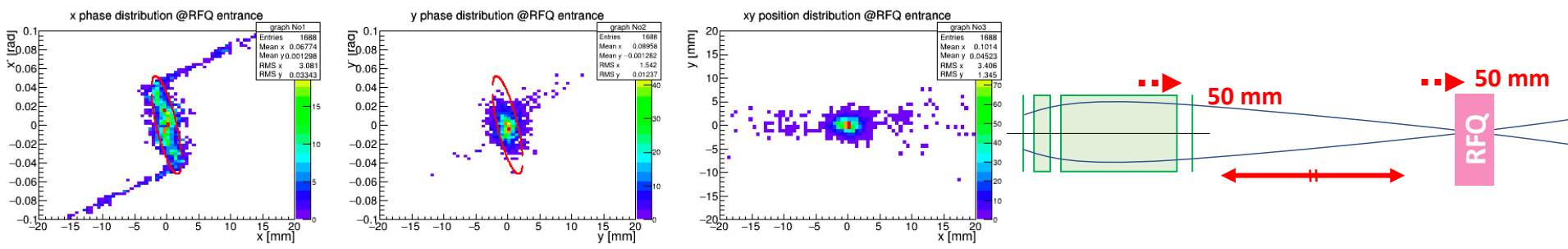
現在の設計 (S3の長さ = 216 mm)

efficiency = 42.5 %



S3の長さ = 266 mm

efficiency = 40.9 %



S3を短くした時のefficiency減少の理由

2022/2/23

現在の設計

efficiency = 42.5 %

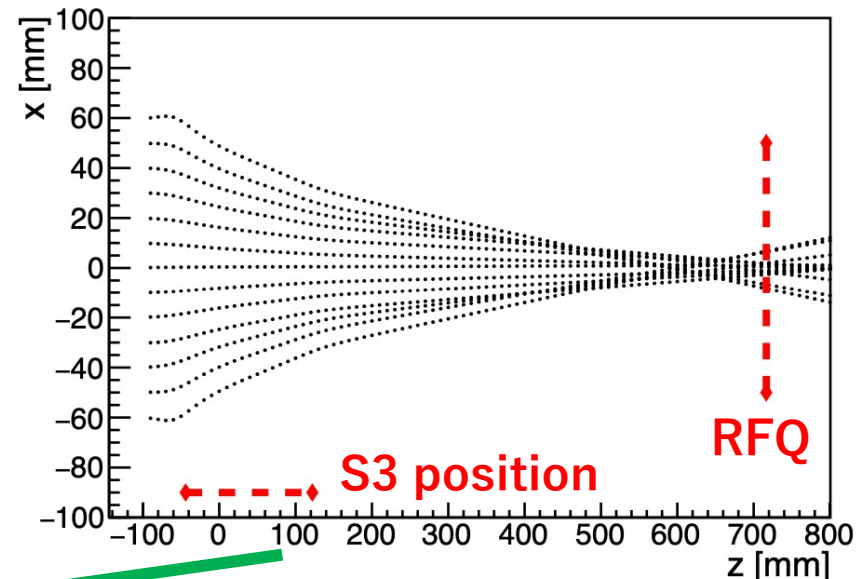
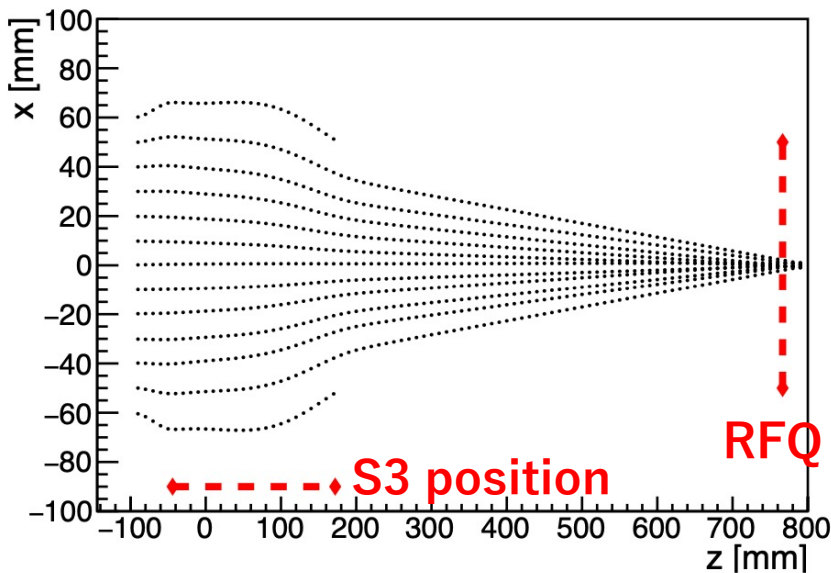
S3を50 mm 短くした時

efficiency = 35.4 %

TDR_x

Same momentum, different positions

S3_50mm_short_x



収差が生じる

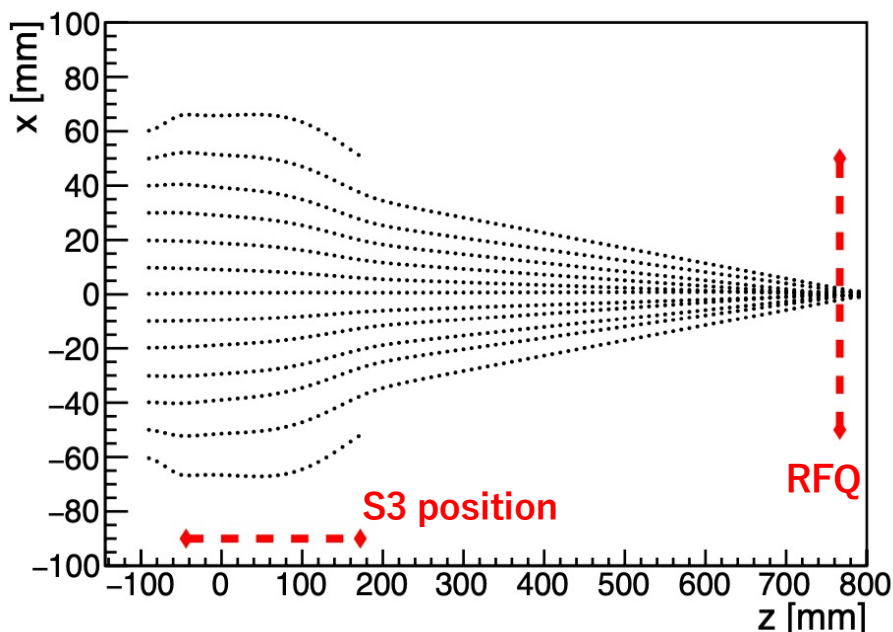
➡これがefficiency減少の理由になっている。

現在の設計

efficiency = 42.5 %

TDR_x

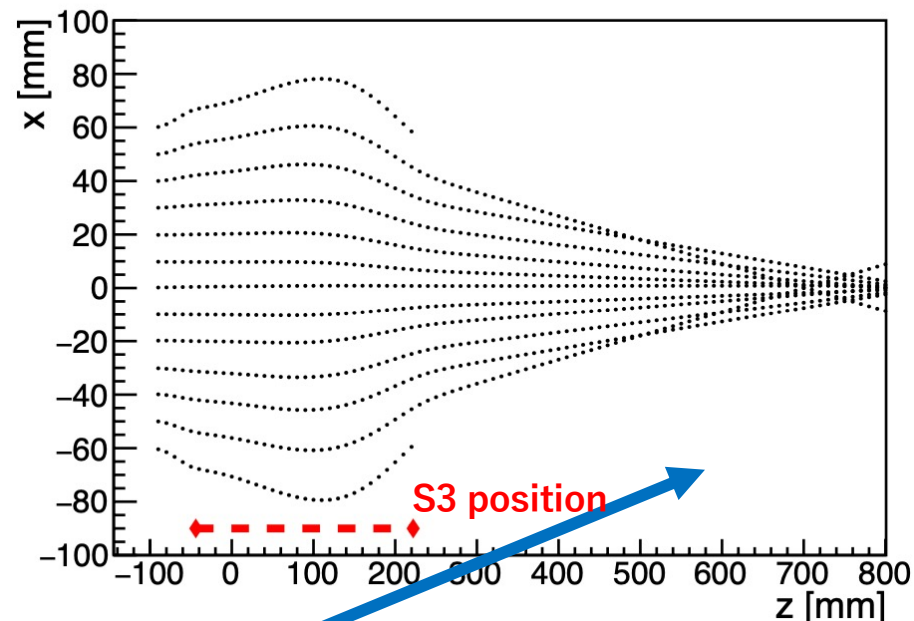
Same momentum, different positions



S3を50 mm長くした時

efficiency = 40.9 %

S3_50mm_long_x



ミュオンはより下流で収束電場を感じるため、ビーム径が大きくなる。そのため、電極に近いより外側の電場を感じ、収差ができる。

efficiency (誤差はそれぞれ1%程度)

□S3内径

- S3内径 = 200 mm : **40.1 %**
- 現在の設計 : **42.5 %**
- S3内径 = 260 mm : **42.8 %**

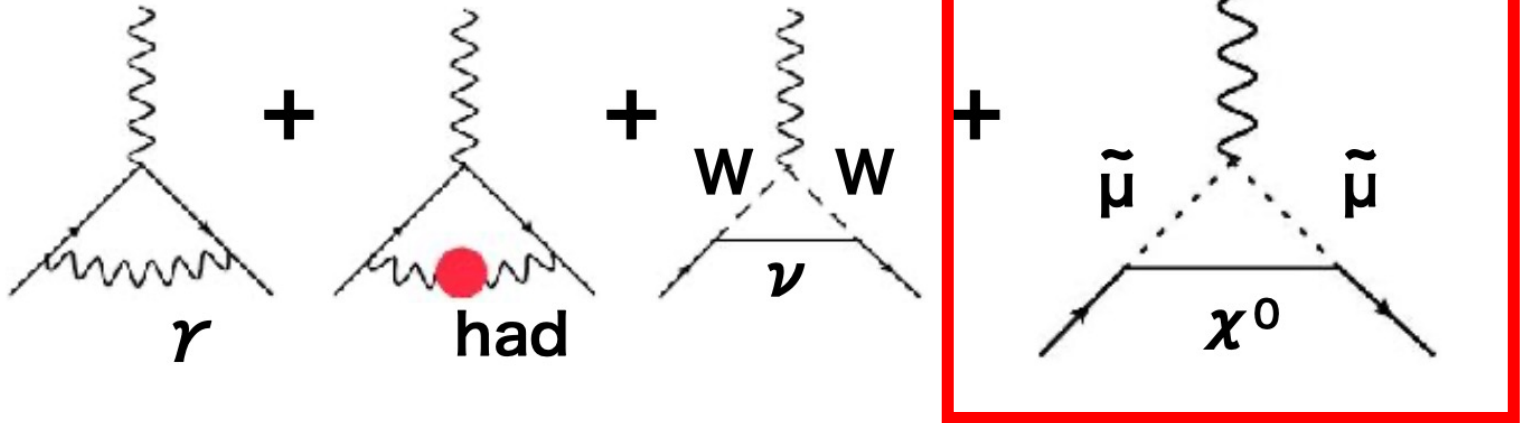
□S3長さ

- S3長さ = 166 mm : **35.4 %**
- 現在の設計 : **42.5 %**
- S3長さ = 266 mm : **40.9 %**

⇒現在の設計は、efficiencyを減少させないために必要な大きさである。

Backup

$$a_{\mu} = a_{\mu}^{\text{QED}} + a_{\mu}^{\text{had}} + a_{\mu}^{\text{weak}} + a_{\mu}^{\text{BSM}}$$



$$a_{\mu}^{\text{weak}} \sim a_{\mu}^{\text{BSM}}$$

New physics interpretations

[Refs: Athron et al, 2104.03691; Buen-Abad et al, 2104.03267; Krnjaic et al, 1902.07715; Dermisek et al, 2103.05645]

NP type	diagrams	mass range	probe
Supersymmetry		200~500 GeV	$\tilde{\chi}_2^0 \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow (h \tilde{\chi}_1^0) (W^\pm \tilde{\chi}_1^0)$ $pp \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow \tilde{\ell}\tilde{\ell}^*$
Scalar extensions		20~100 GeV, 150~250 GeV	$Z \rightarrow \tau^+\tau^-$ $h \rightarrow AA$
Axion-like particle		40 MeV~6 GeV	$e^+e^- \rightarrow \gamma a, a \rightarrow \gamma\gamma$
Leptoquark		1.5~2 TeV	$pp \rightarrow LQ\bar{L}\bar{Q}$
U(1) μ - τ		10~200 MeV	$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-Z'$ $K^- \rightarrow \mu^-\bar{\nu}Z'$
Vector-like lepton		< 7 TeV	$h, Z \rightarrow \mu^+\mu^-$

表面ミュオン標的に関して

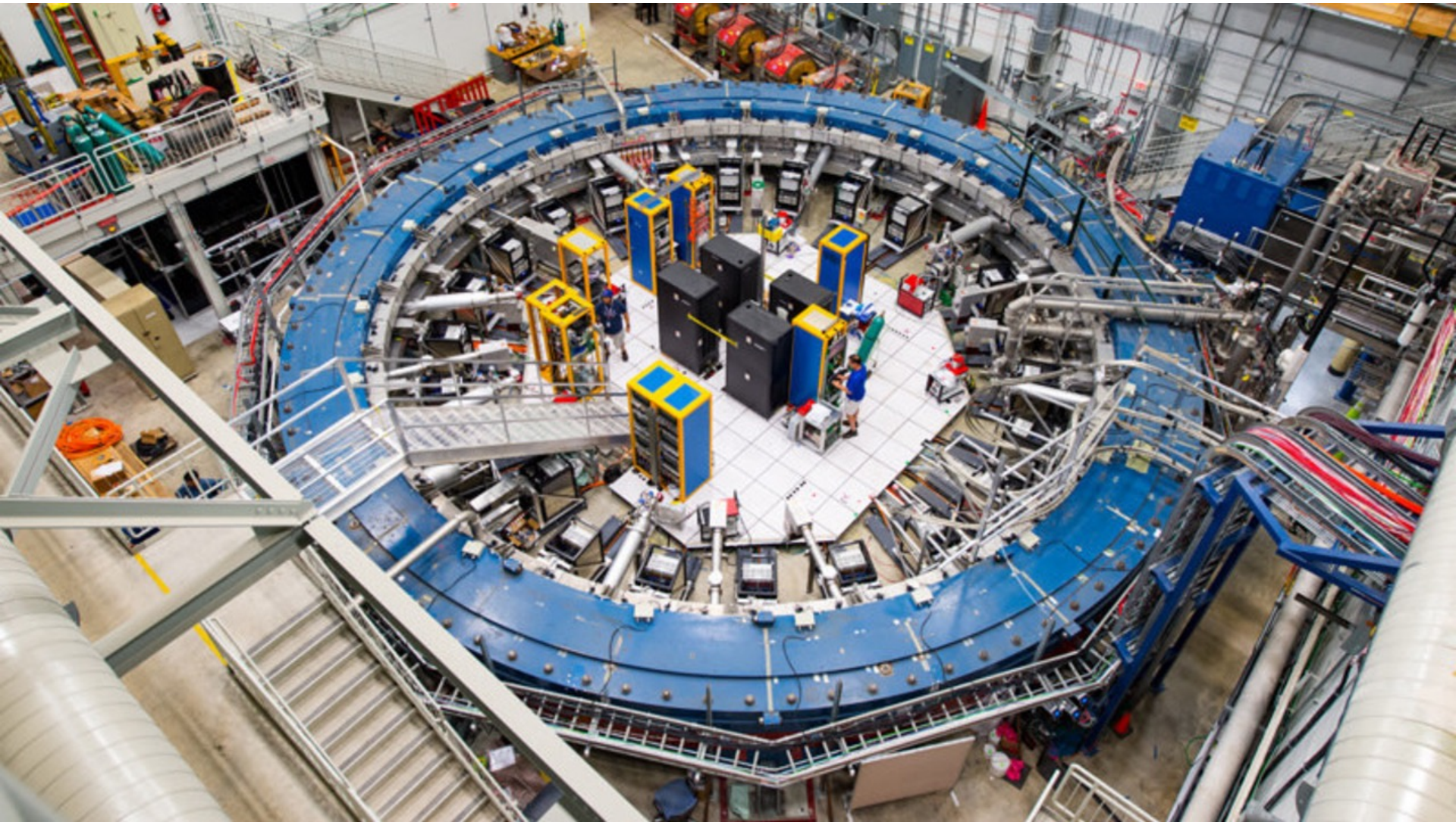
- タングステン (~2000 K)
- 粉末状のシリカパウダー (室温)
→ 設置が困難 & 経年劣化 (数日間の間にミュオニウムの放出効率が低下)

の問題

- シリカエアロジェル (室温)
 - エネルギーの典型的な大きさ: ~25 meV
 - レーザー穴加工することによって、ミュオニウムの収量がおおよそ10倍

Fermilab g-2

21

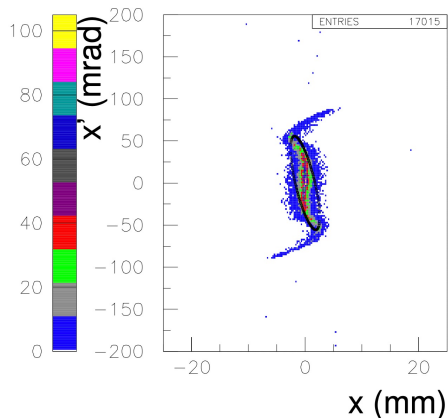


2022/2/23

Definition of RFQ acceptance

2022/2/23

TDRに載ってる図



- TDRに書かれている楕円は、規格化されたrmsエミッタンスを4倍したもの（らしい）

⇒この楕円を設計エミッタンスという。
(RFQアクセプタンスということもある)

- 今までプロットしていた楕円は、規格化されたrmsエミッタンスの5倍の大きさの楕円

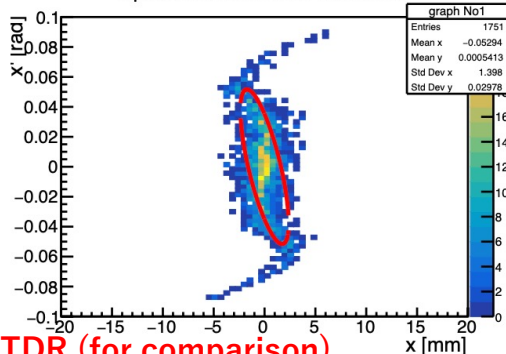
⇒定義が異なりますが、これまでの議論と整合性を取るために、今まで通りrmsエミッタンスの5倍の大きさの楕円で議論をします。

規格化されたrmsエミッタンス : $\epsilon_{normalized} = \beta\gamma\epsilon_{rms}$

※ β と γ はLorentz因子

エネルギーが変わっても保存される

x phase distribution @RFQ entrance

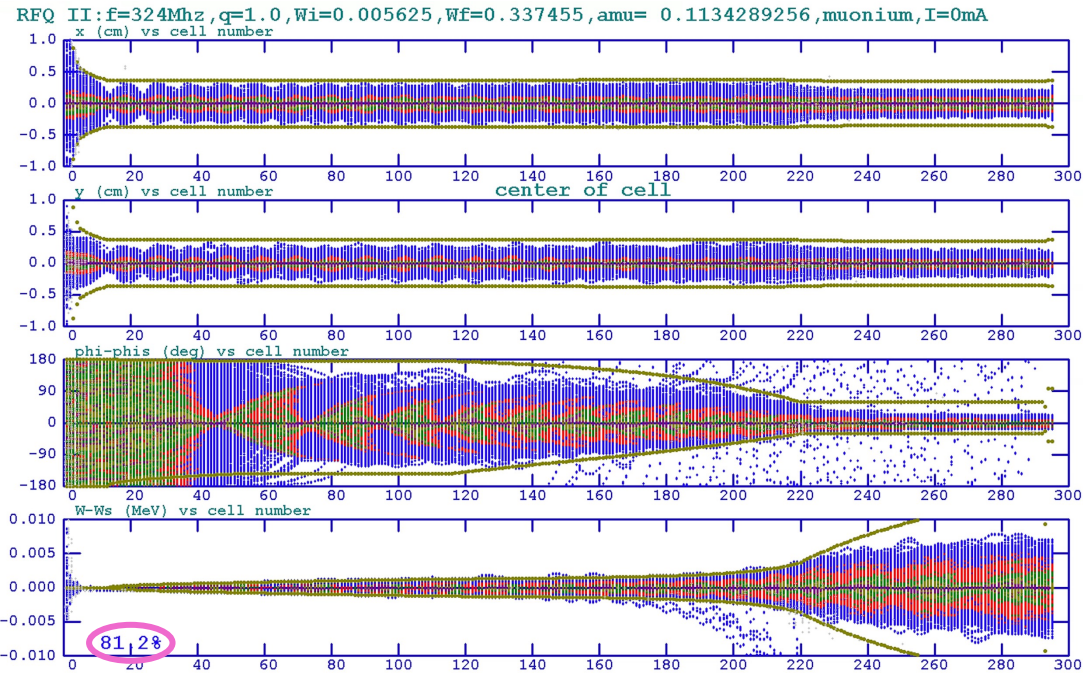


TDR (for comparison)

RFQ acceleration

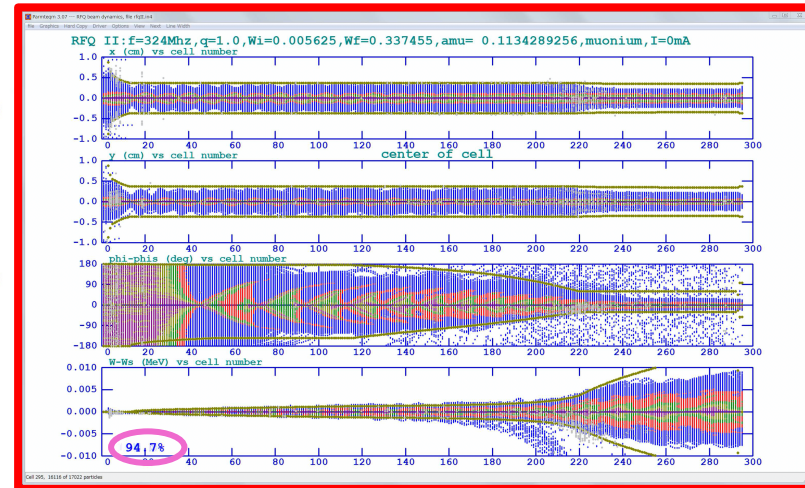
23

2021/9/28



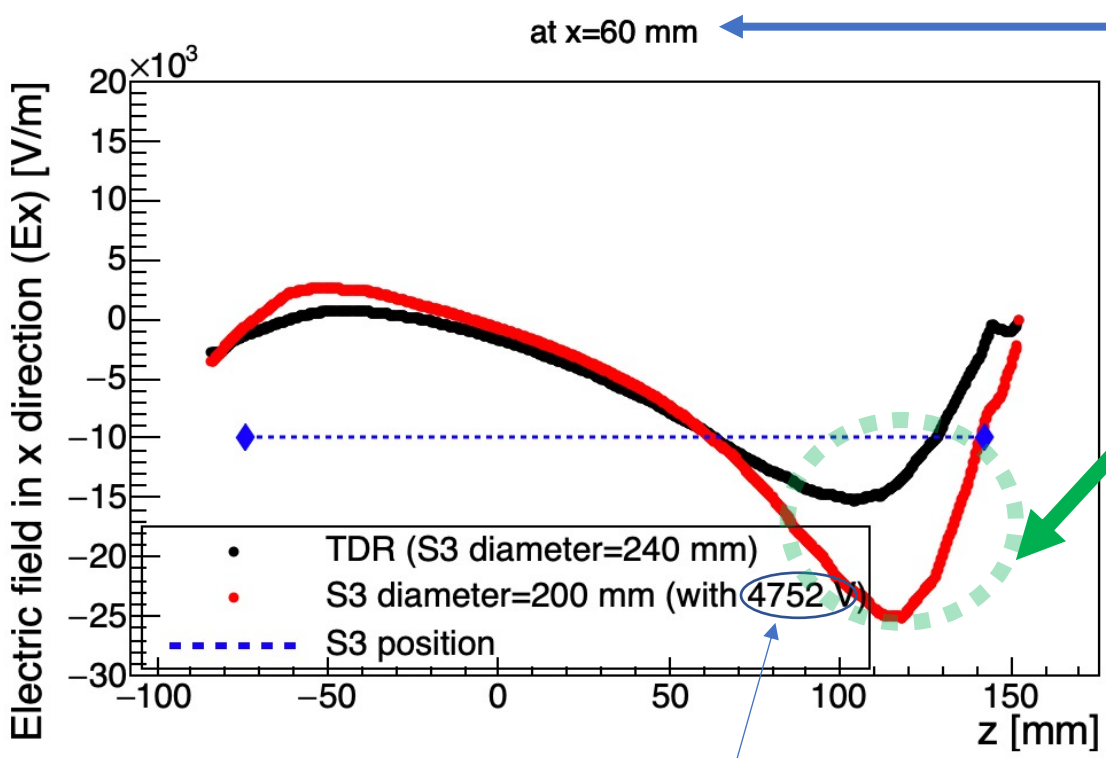
Transmission efficiency
(from RFQ entrance to RFQ exit)

TDR



Electric field in the horizontal direction

2022/2/23

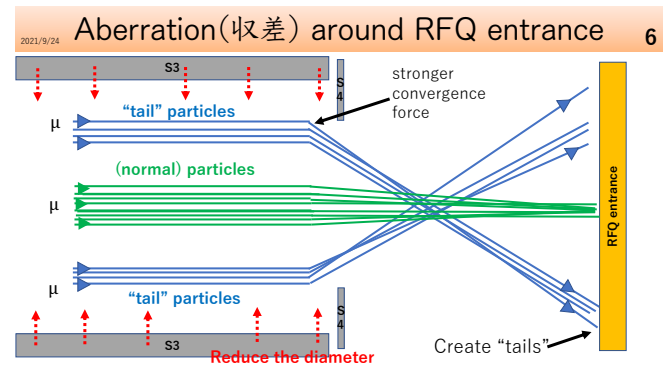


Not 4688 V, but similar to 4688 V

“tail” particles are around $x=50\sim 60$ mm at S3 exit.

“Ex is negative” means it has a stronger convergence force.

This difference create “tails”



- About SOA lens
- Purpose of this study
- Current design (TDR)
- Simulation of each changing the structure
- Summary & Conclusion



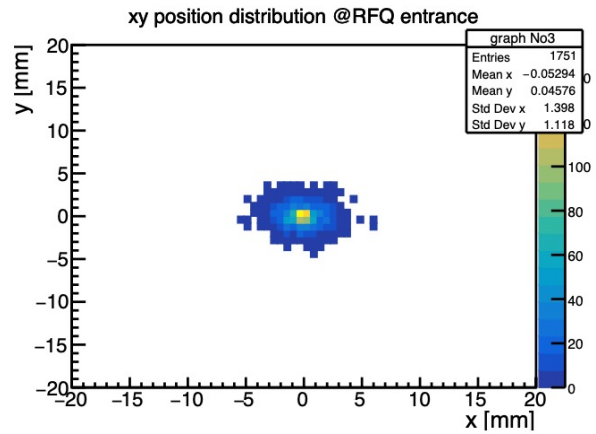
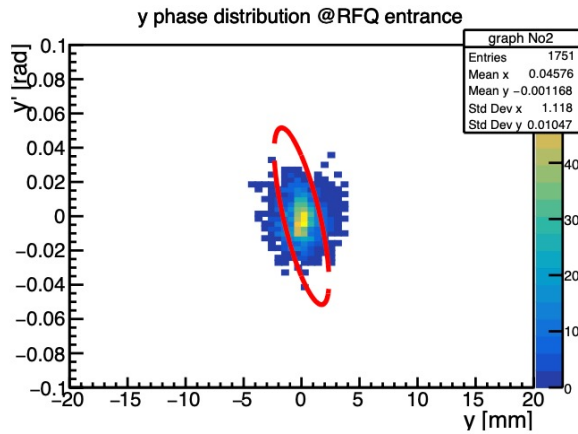
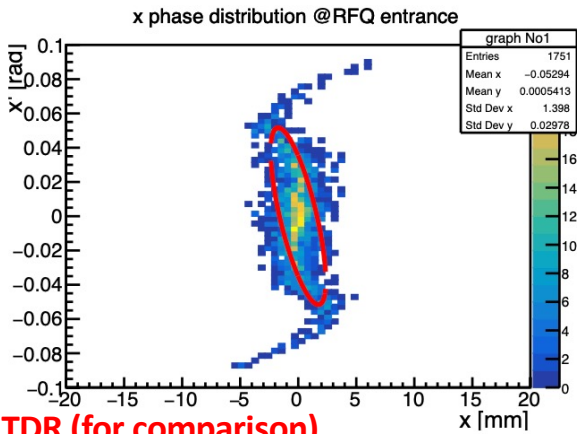
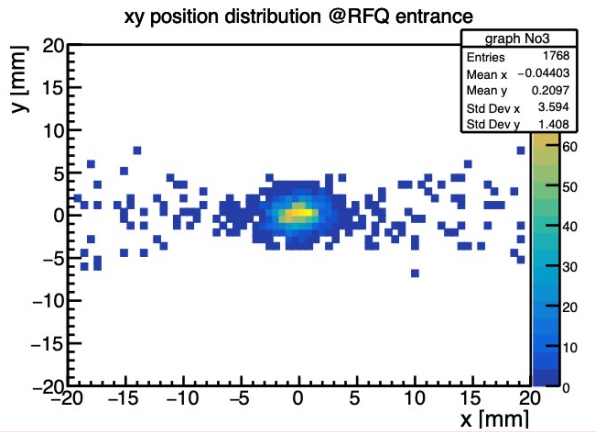
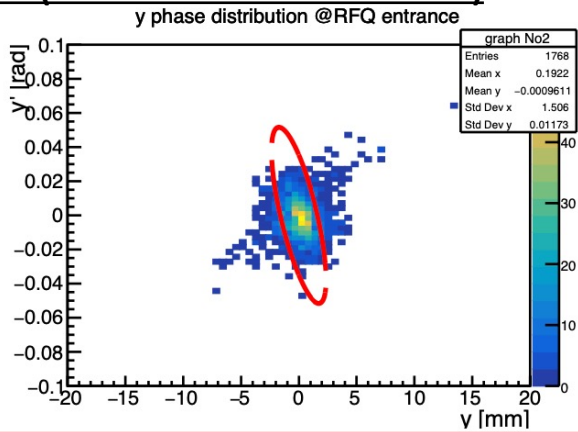
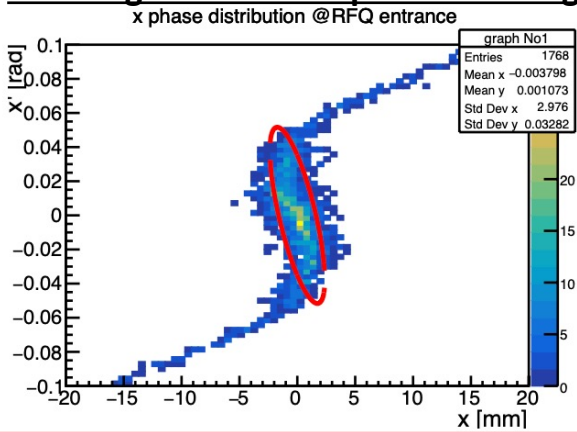
Searching for best S3 voltage

2022/2/23

S3 voltage = 4688 V : optimized voltage

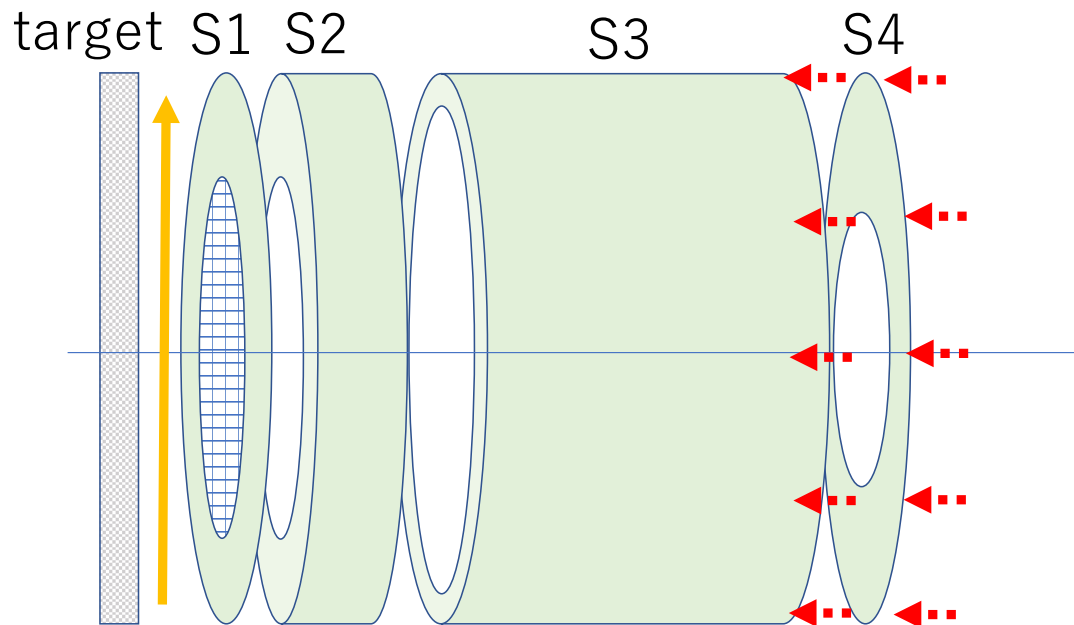
(S3 inner diameter = 200 mm)

2388 events

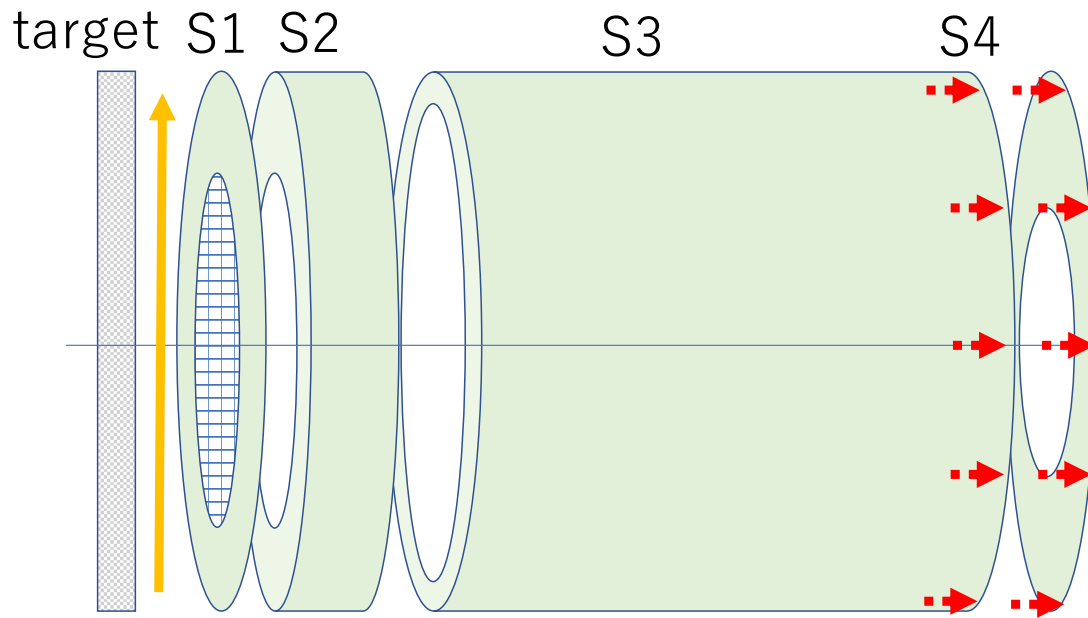


TDR (for comparison)

When S3 length is reduced
: S3 length = 166 mm
(Current design : 216 mm)



When S3 length is increased
: S3 length = 266 mm
(Current design : 216 mm)



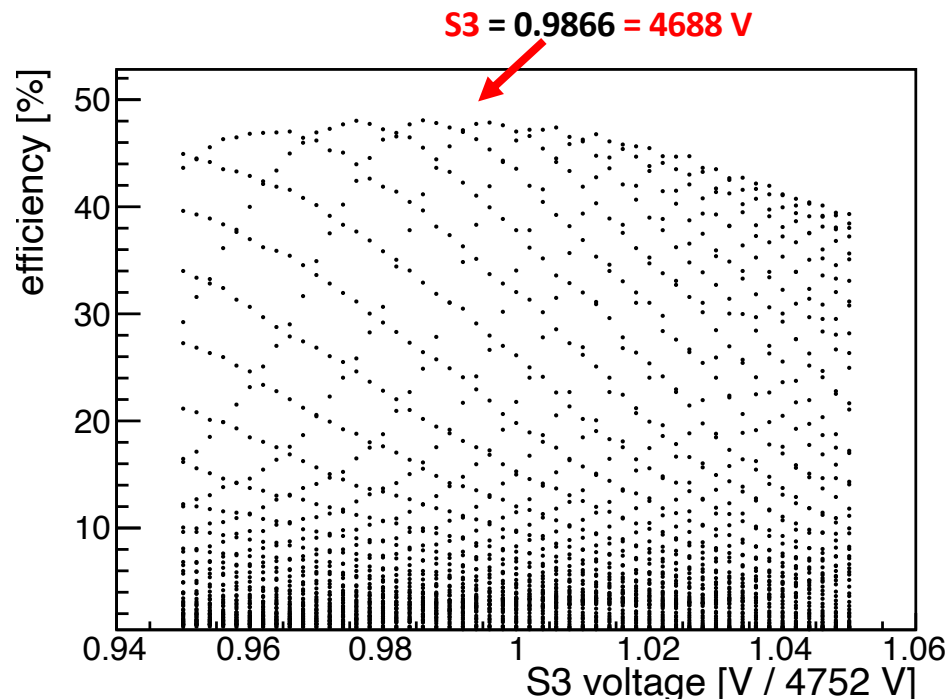
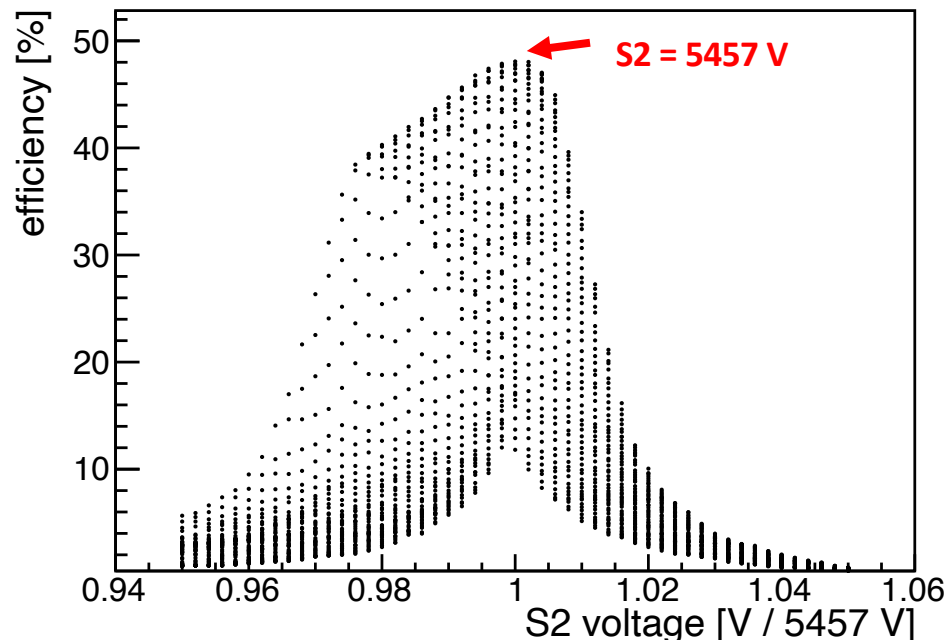
Parameter scan (S3 diameter = 200 mm)

29

S1 voltage is fixed. RFQ position is also fixed to put deflectors.

→ S2 & S3 voltage are the parameters.

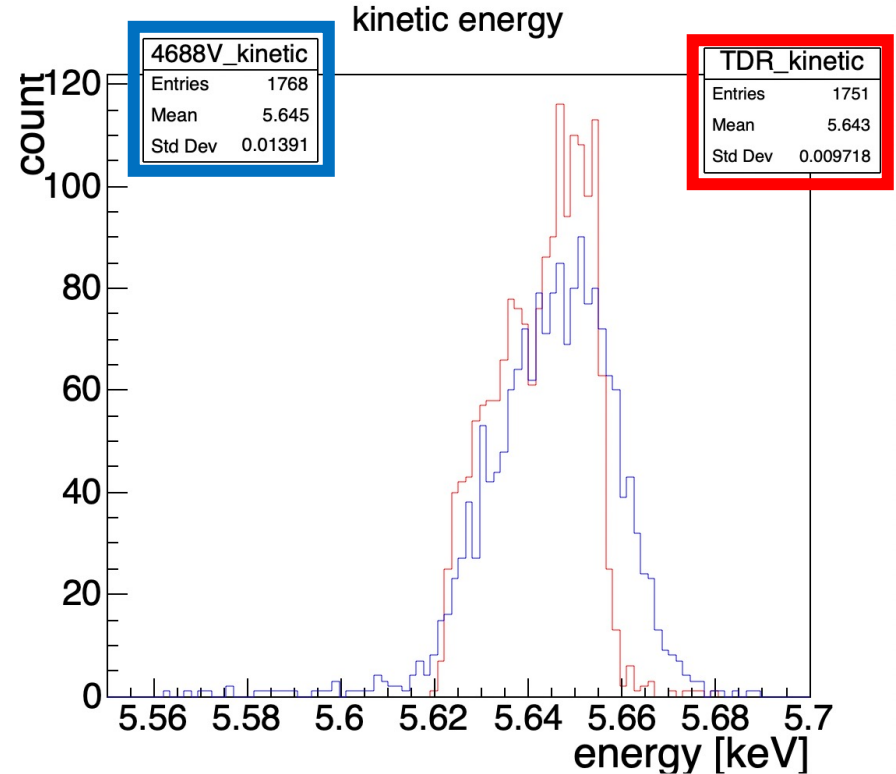
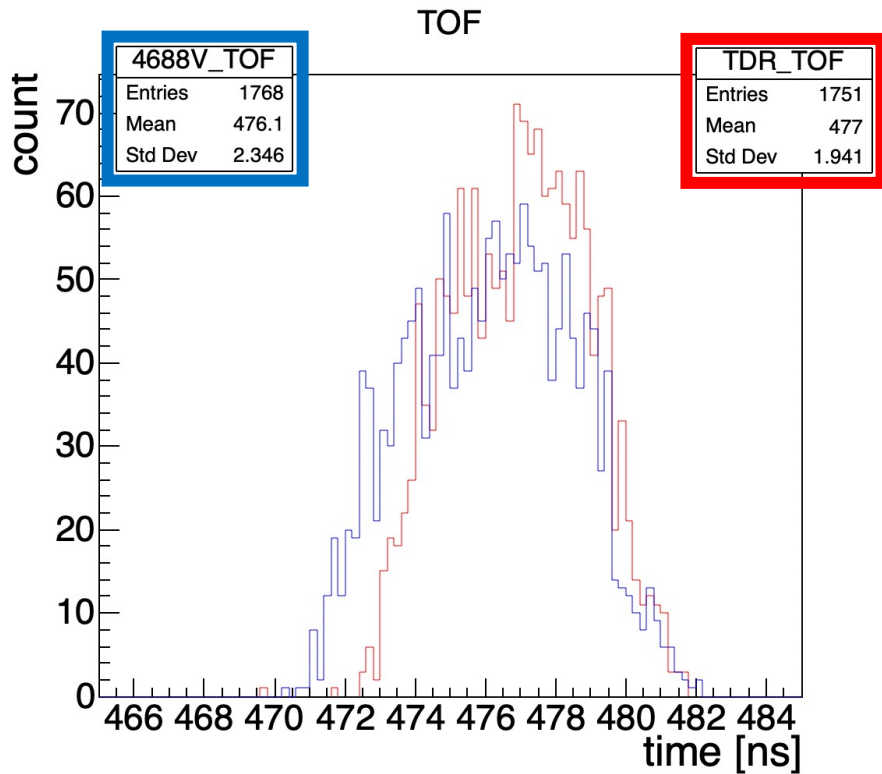
図の説明



Best voltages : **S2 = 5457 V, S3 = 4688 V**

Previous slide (+ α)

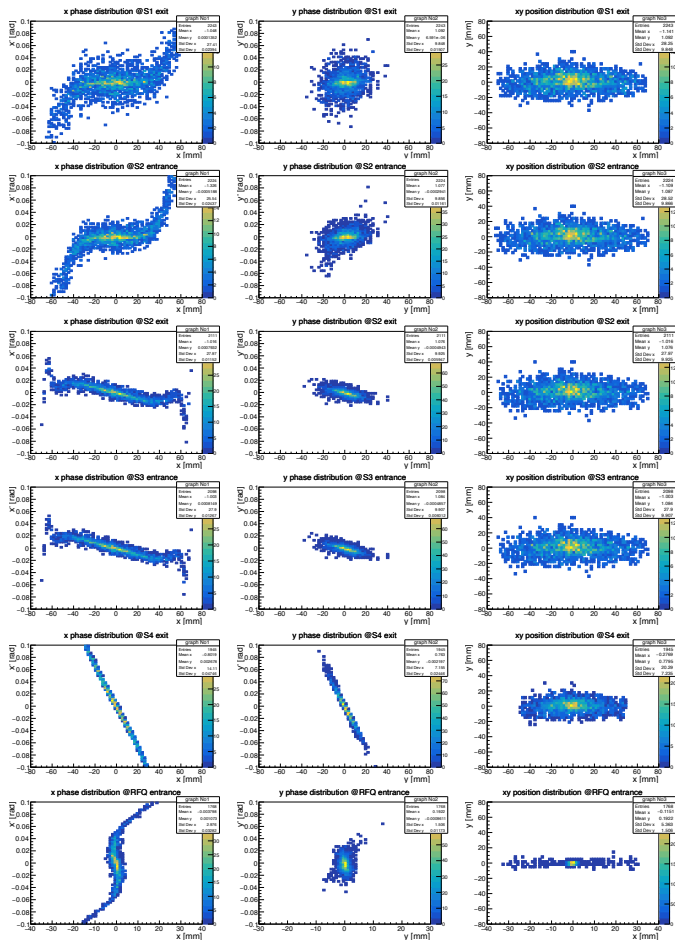
2022/2/23



Distributions at another positions 31

2022/2/25

S3 voltage = 4688 V



TDR

S1 exit

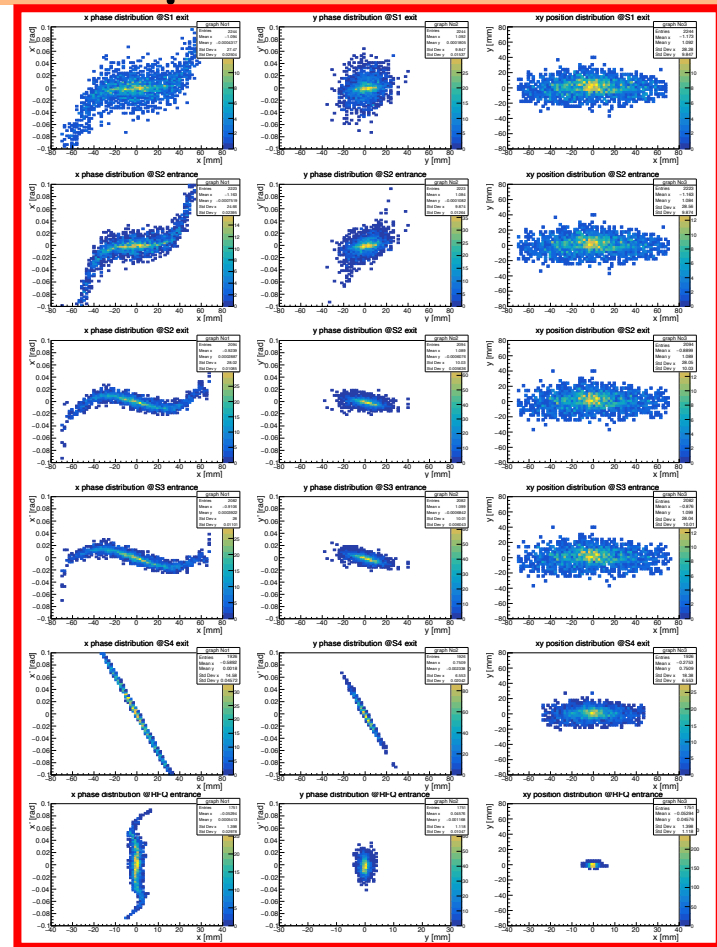
S2 entrance

S2 exit

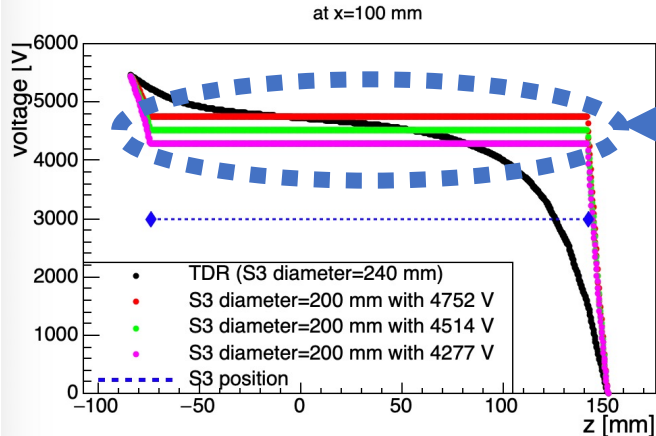
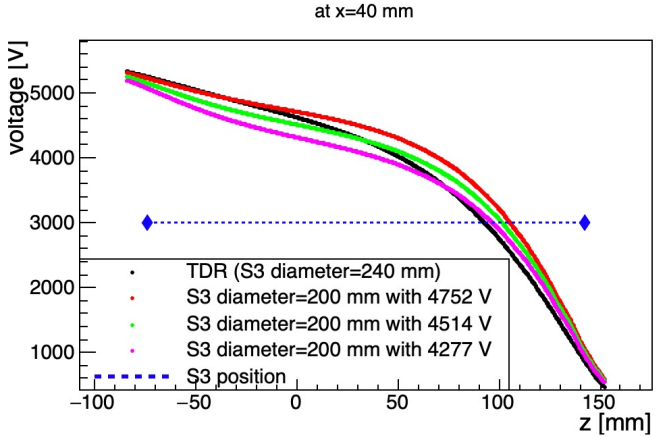
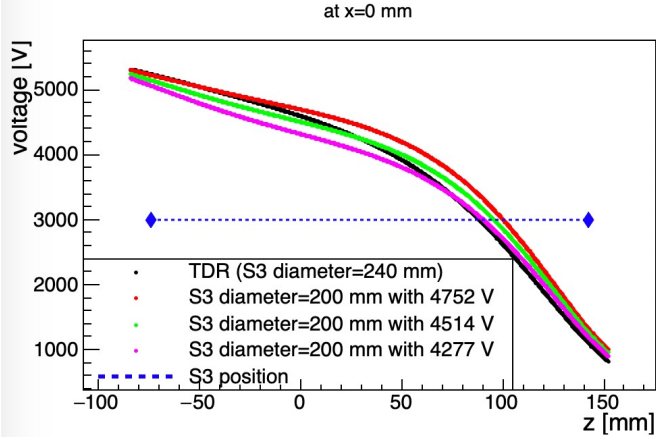
S3 entrance

S4 exit

RFQ entrance

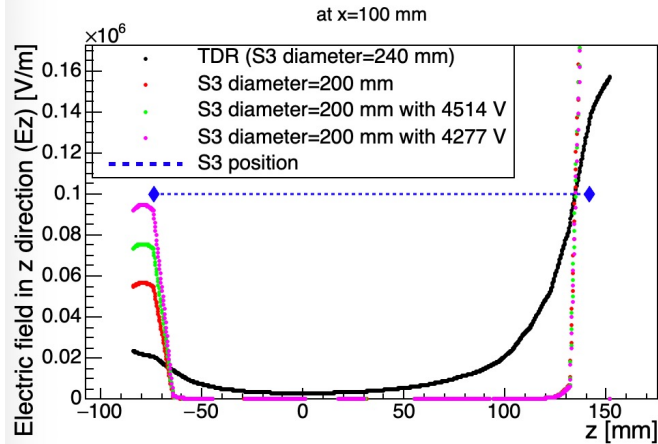
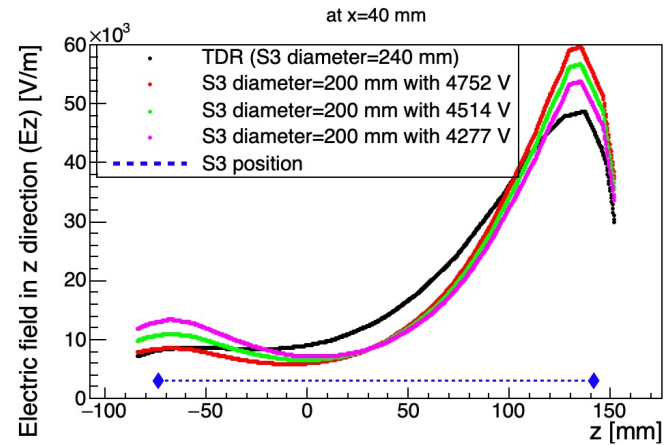
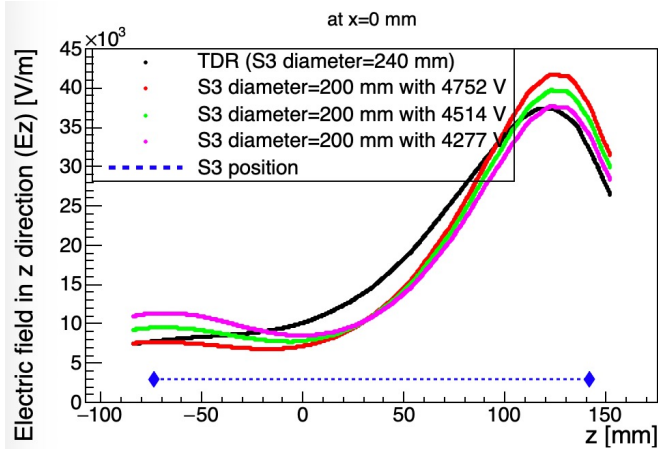


The z-dependence of the voltage₃₂



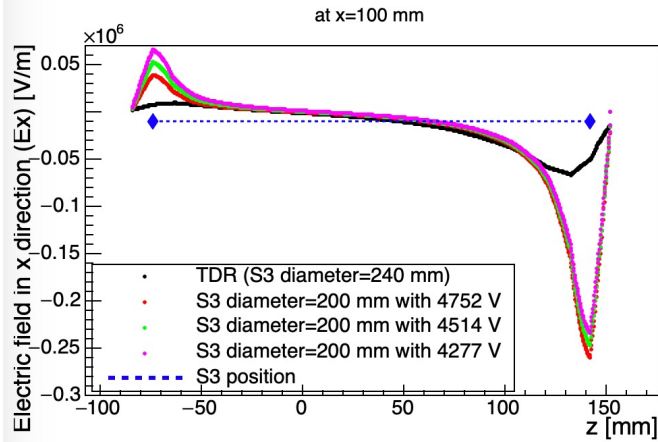
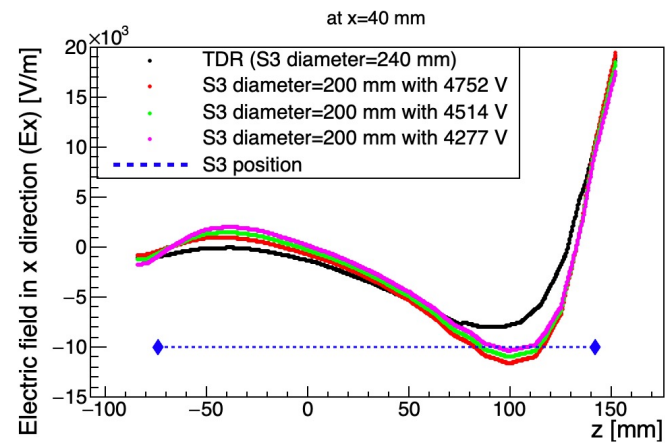
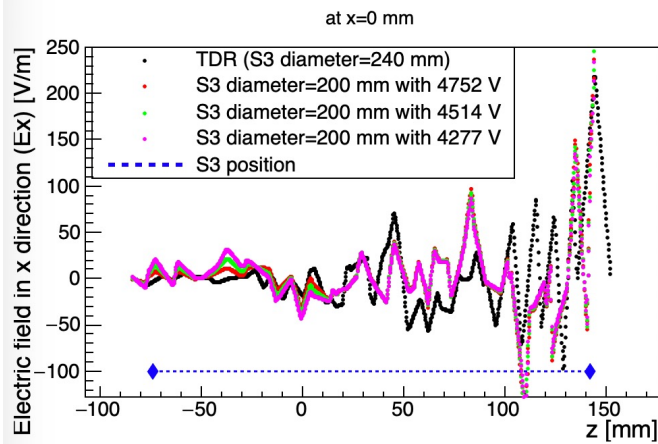
on the electrode

② The z-dependence of the E_z



③ The z-dependence of the E_x

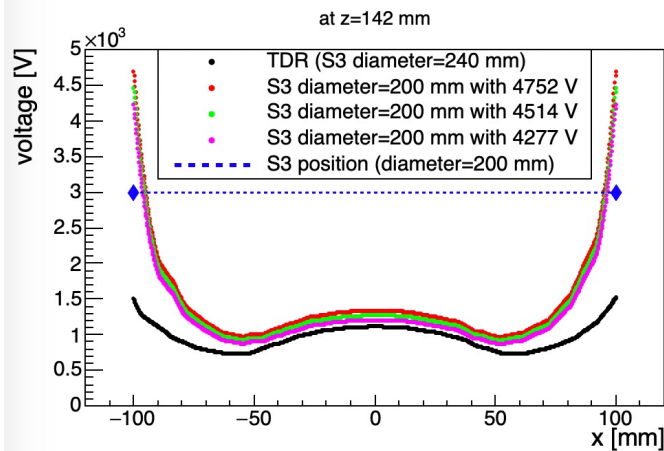
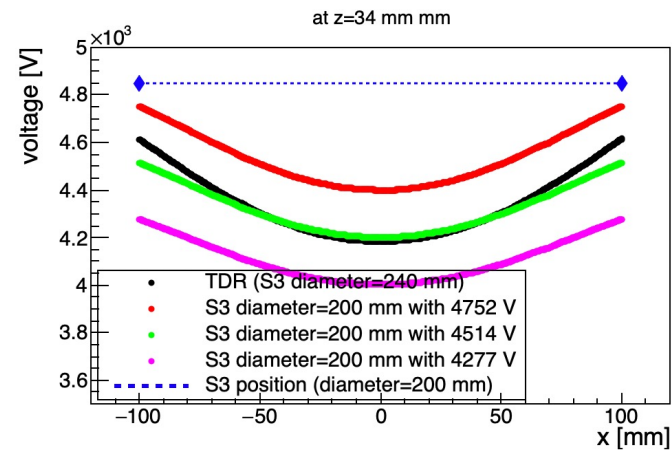
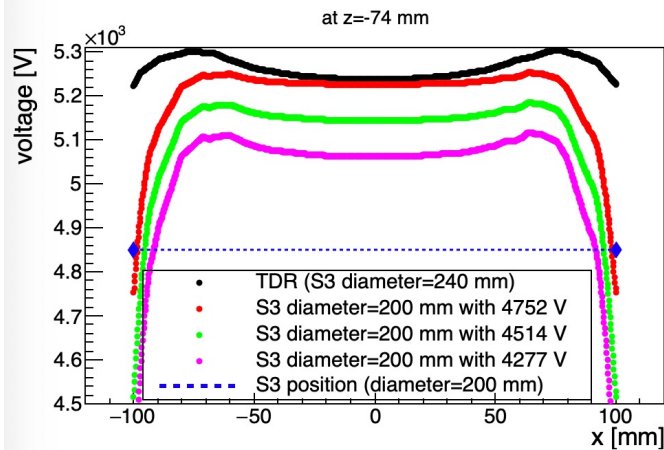
2022/2/23

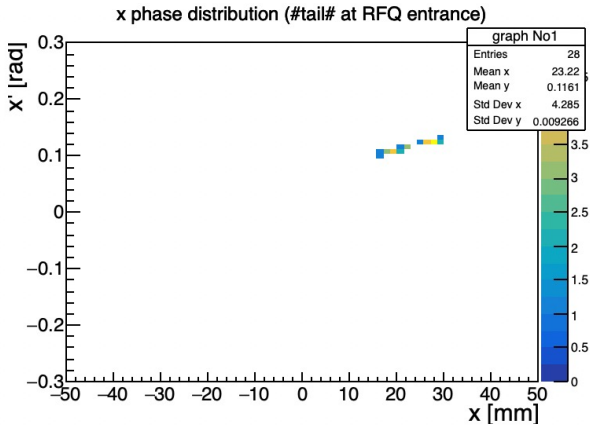


4

The x-dependence of the voltage₃₅

2022/2/23





All "tail" particles at 4688V also reached the RFQ in TDR.

TDR

