

THO609

多価重イオンの大強度ビーム輸送系に対する Multi-Frequency RFQを用いた 質量分離法の適用可能性の検討

齋藤誉志大 (総研大)、佐藤洋一 (KEK)

第22回日本加速器学会年会
8月7日 17:00-17:20



本発表の流れ

1. Motivation
2. Multi-Frequency RFQとは
3. 多価重イオン 計算結果
4. 今後に向けて
5. まとめ

本発表の流れ

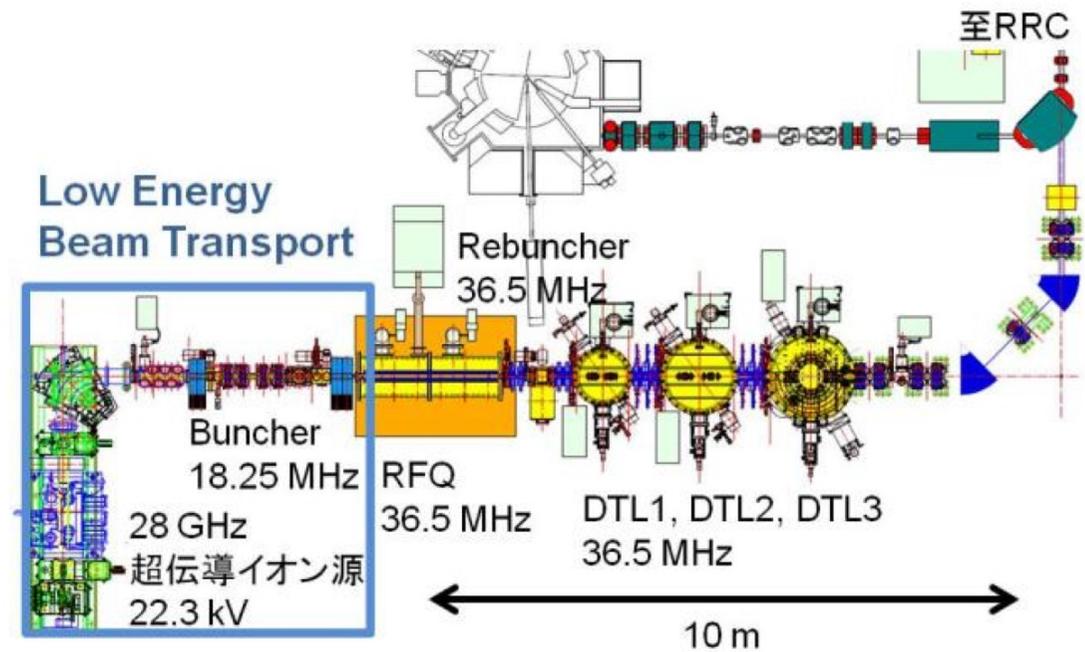
1. **Motivation**
2. Multi-Frequency RFQとは
3. 多価重イオン 計算結果
4. 今後に向けて
5. まとめ

Motivation

- 多価・大強度 重イオン加速器の短尺化、単純化

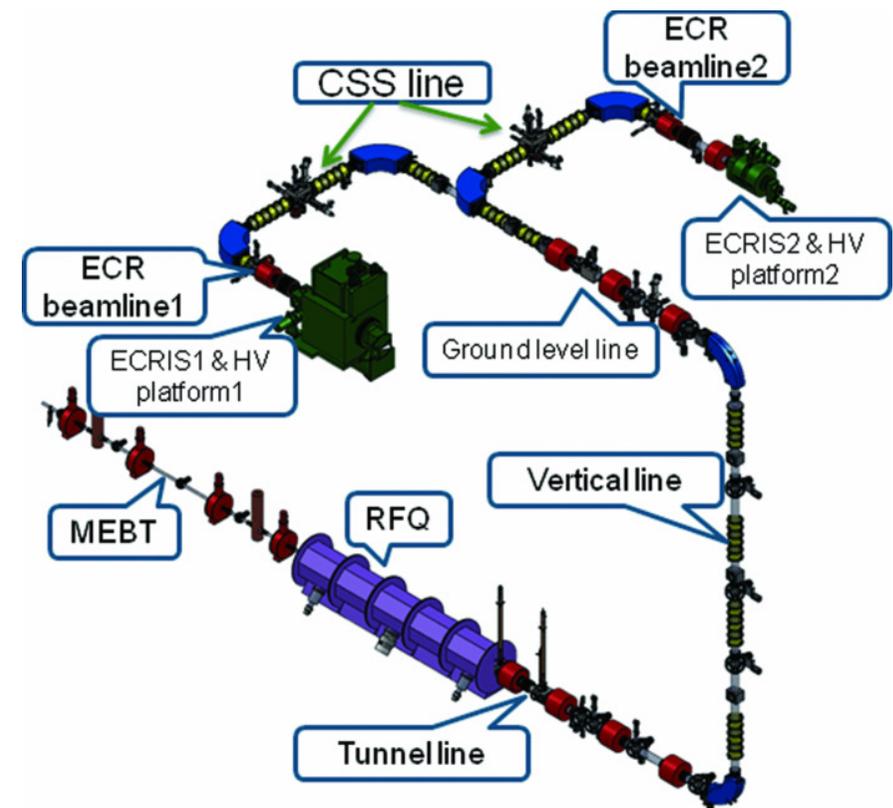
→ 価数分離に注目

引用:
 Y. Sato, “DESIGN OF THE LOW ENERGY BEAM TRANSPORT FOR RIKEN NEW LINAC SYSTEM (RILAC2)”,
 Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009



価数分離の例: FRIB

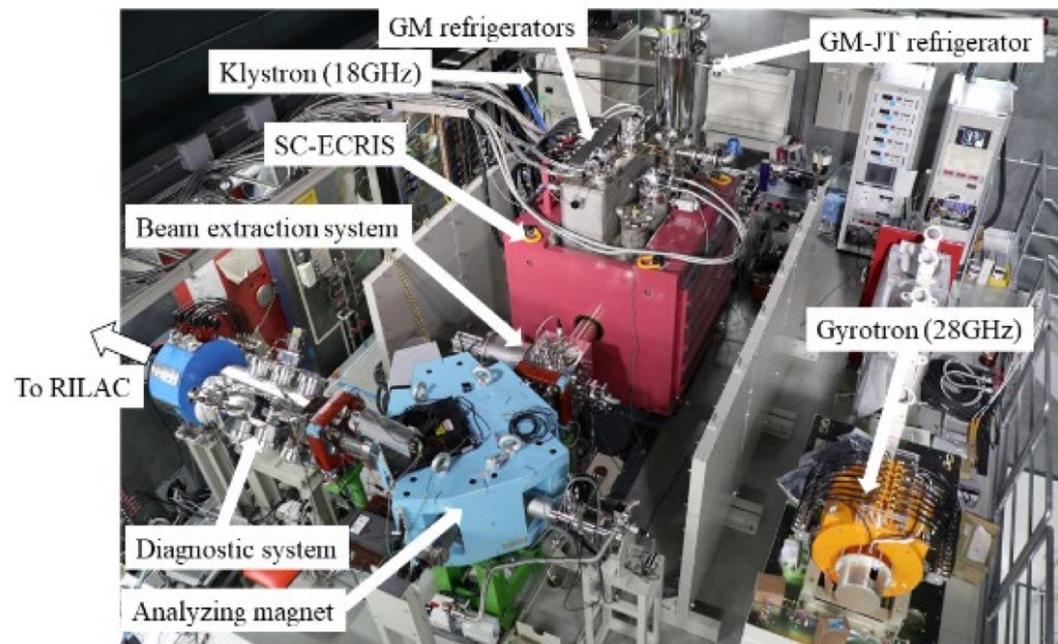
- ・ 大口径・大型の偏向電磁石
~ 100mm
- ・ 収束点にスリット
→ 不要なイオンを除く



L. T. Sun, "Low energy beam transport for facility for rare isotope beams driver linear particle accelerator"
Rev. Sci. Instrum. 83, 02B705 (2012)

価数分離の例: RIKEN

- 分析用 偏向電磁石
- 焦点距離も考慮すると
~1.5mの軌道長
大口徑に応じた高次成分の
補正シムも必要になりうる



T. Nakagawa *et al.*, “Development of RIKEN 28 GHz SC-ECRISs for Synthesizing Super-Heavy Elements”,
in *Proc. HIAT'18*, Lanzhou, China, Oct. 2018, pp. 77-81.

Motivation

• 多価・大強度 重イオン加速器の短尺化、単純化

→ 価数分離に注目

今回は $^{238}\text{U}^{46+}$ 取り出しを目指す

本発表の流れ

1. Motivation
2. Multi-Frequency RFQ (MRFQ)とは
3. 多価重イオン 計算結果
4. 今後に向けて
5. まとめ

Multi-Frequency RFQ

- RFQに複数周波数+DCを加える
- 縦方向の加速・収束はしない

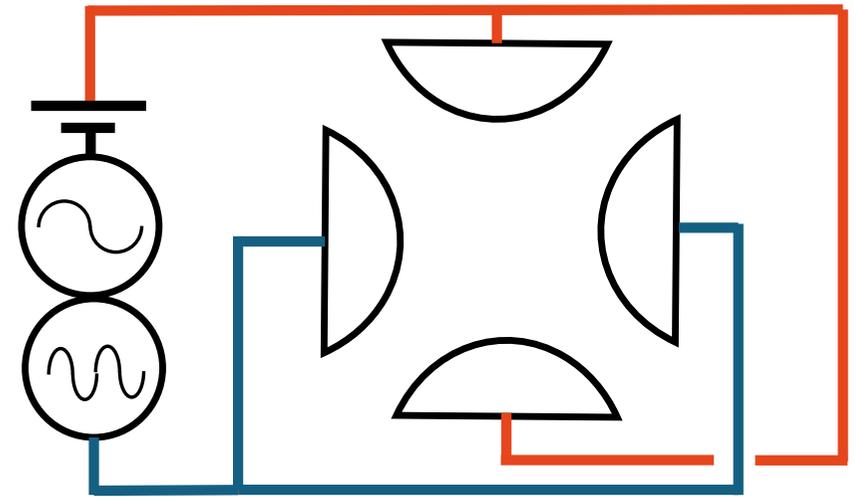
EoM:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{2q_e}{mr_0^2}(V_{DC} + V_1 \cos n_1\omega_0 t + V_2 \cos n_2\omega_0 t)x = 0$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} - \frac{2q_e}{mr_0^2}(V_{DC} + V_1 \cos n_1\omega_0 t + V_2 \cos n_2\omega_0 t)y = 0$$

q_e : charge, m : mass, r_0 : bore radius, V_{DC} : DC voltage,

n_i : integers, V_i : voltages with angular frequency $n_i\omega_0$ ($i = 1, 2$)



動作点:

2.668 kV, DC

15.26 kV, 20MHz

2.000 kV, 10MHz

Multi-Frequency RFQ 先行研究

スズ132の電子散乱実験が計画中@SCRIT, RIKEN ・ **解析的近似**で安定性を議論

→質量差0.002%の**同重核分離**が必要

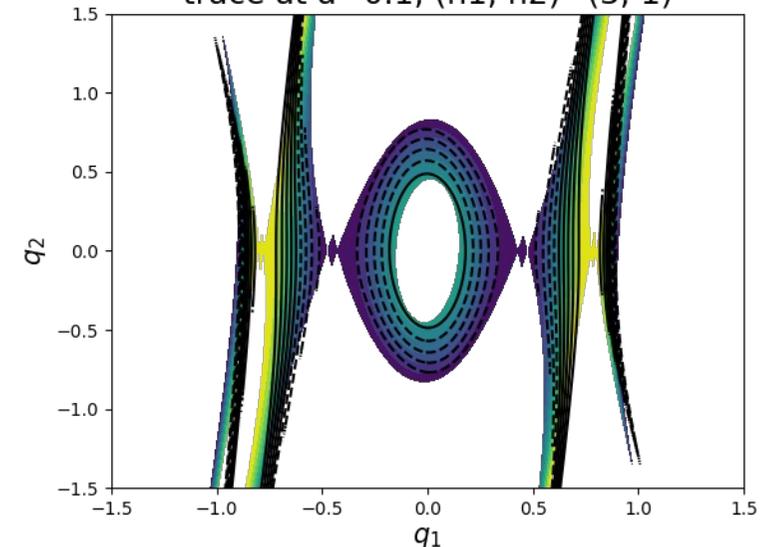
・ RFQに2種のRF+DC電圧+ skew

⇒**ベータトロン共鳴**で高精度分離

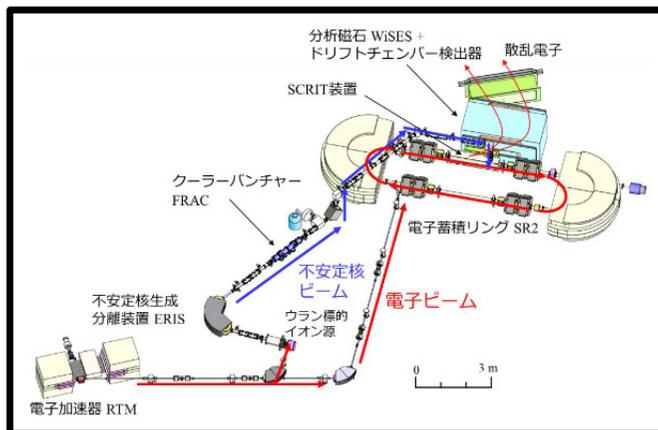
by 若杉昌徳 教授@京都大学

by 斎藤、若杉

trace at $a=0.1, (n_1, n_2)=(3, 1)$



x方向の一周期転送行列トレスマップ
 黒: 正弦波での数値計算、色付: 矩形近似の計算結果
 低電圧領域 $|q| < 0.5$ でよく一致、概形を再現
 RIKEN Accelerator Progress Report Vol.58
 に掲載予定



引用: https://www.riken.jp/press/2023/20230901_1/index.html

RF2種がなぜ必要？

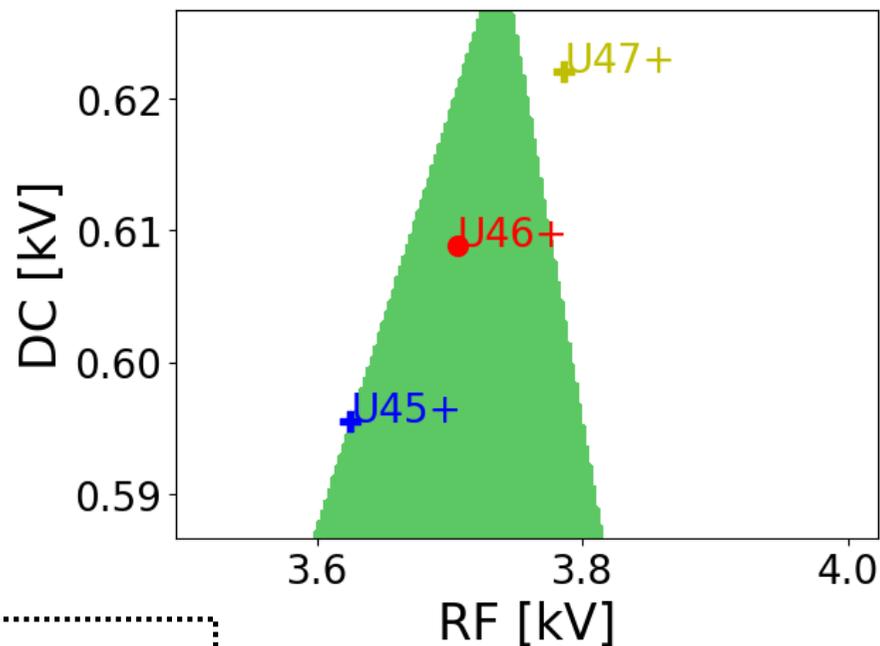
RF1種+DCでは分離に距離が必要

@ 1RF+DC RFQ

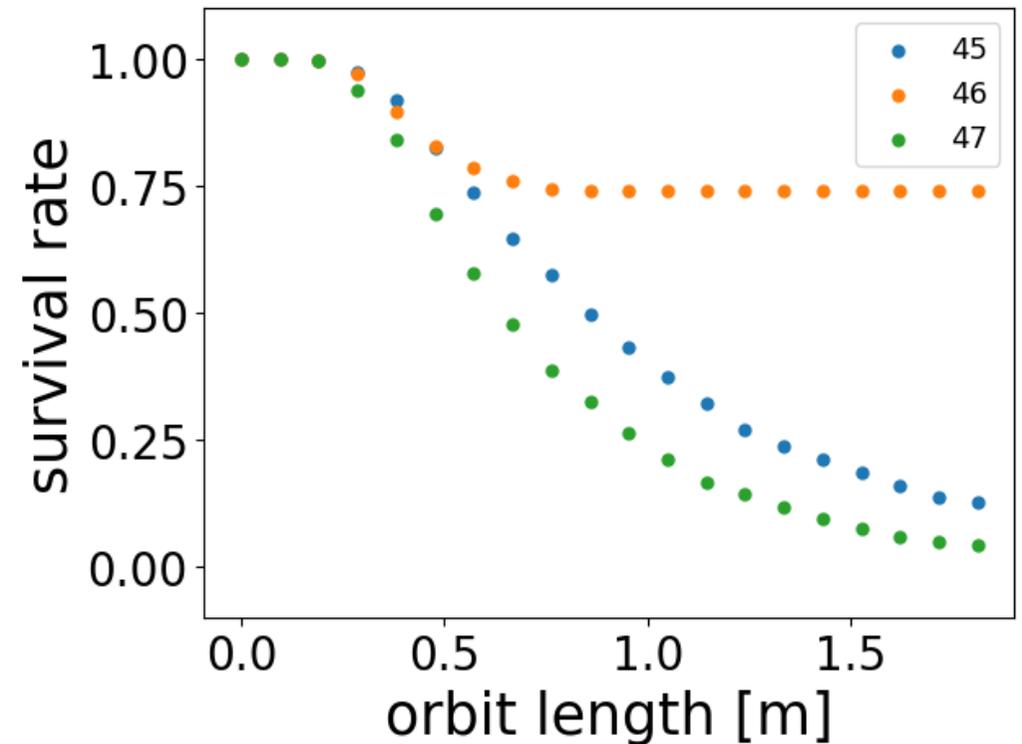
数値計算の結果(入射条件は後述)

xy安定領域

$|Tr M_x| < 2$ & $|Tr M_y| < 2$



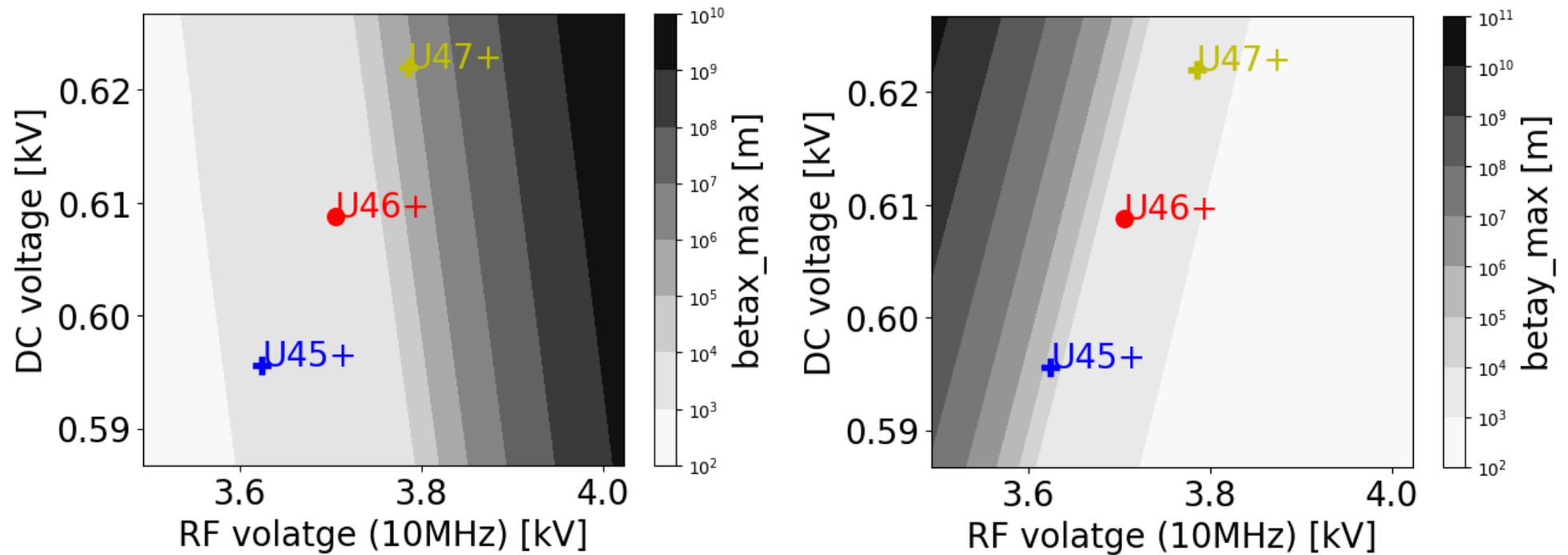
動作点:
0.613 kV, DC
3.706 kV, 10MHz



beta function @ 1RF+DC RFQ

初期分布:

$\beta = 0.0625 \text{ m}$, $\gamma = 1/\beta$, $\alpha = 0$ (4 σ 楕円に対応)



本発表の流れ

1. Motivation
2. Multi-Frequency RFQとは
3. 多価重イオン 計算結果
4. 今後に向けて
5. まとめ

Multi-Frequency RFQ

$^{238}\text{U}^{46+}$ 取り出しを目指す
skewなし
安定領域境界で分離

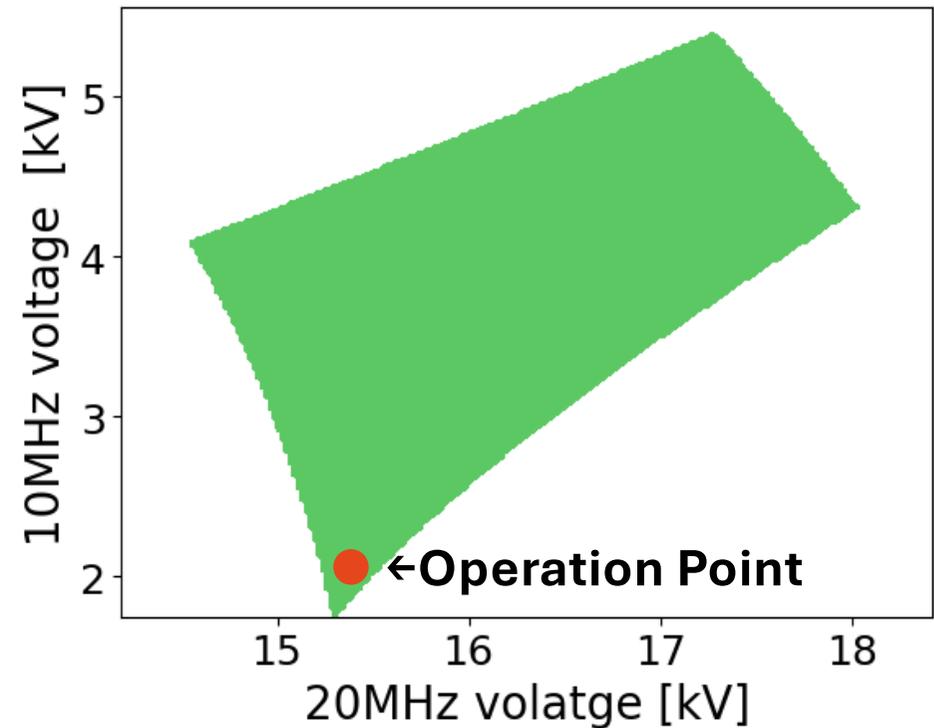
動作点:

2.668 kV, DC

15.26 kV, 20MHz

2.000 kV, 10MHz

ボア半径 $r_0 = 10\text{mm}$



xy安定領域 (DC: 2.668kV)

Multi-Frequency RFQ

$^{238}\text{U}^{46+}$ 取り出しを目指す

skewなし

安定領域境界で分離

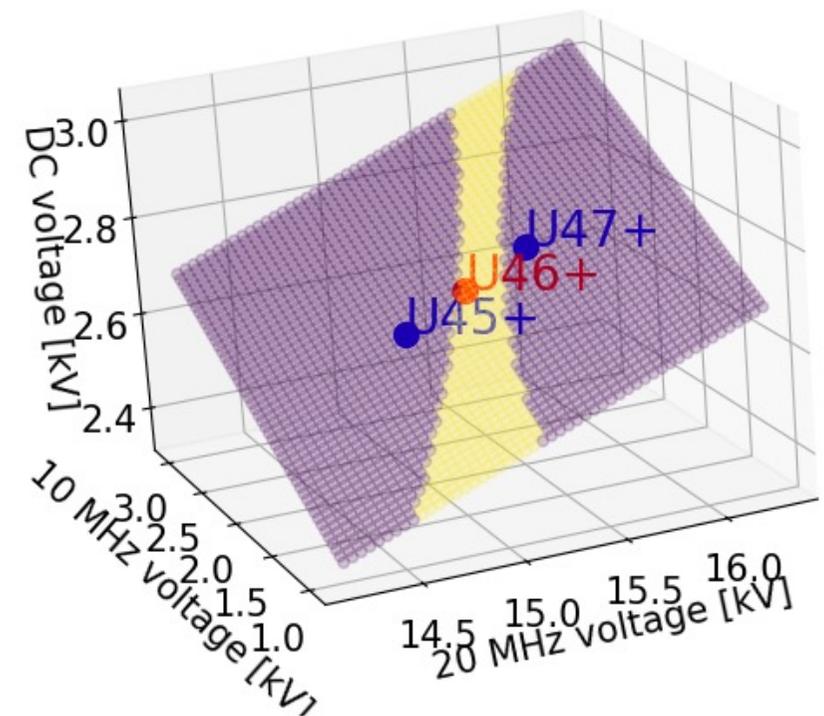
動作点:

2.668 kV, DC

15.26 kV, 20MHz

2.000 kV, 10MHz

ボア半径 $r_0 = 10\text{mm}$



転送行列トレースから計算

黄色: xy安定領域

紫色: 不安定領域

計算結果: 入射条件

- ・ ウラン238の+44~+48価全て同じ電流で入射→+46価取り出し
- ・ イオン源のサポートガス:酸素16の3価 (5倍の電流)

- ・ 横方向: xyそれぞれ2Dガウシアン
4 σ : ± 2.5 mm \times ± 40 mrad 楕円
- ・ 縦方向:
連続ビーム OR $1\sigma = 2.5$ ns で切り出したビーム
入射前のBuncher性能との対応は今回の議論対象としない
運動量分布 1σ : $dp/p_0 = 0.01$ のガウス分布
- ・ 引き出し電圧 22kV ($v = 9 \times 10^5$ m/s)
- ・ 空間電荷効果は考慮せず
- ・ N=100000->確率計算

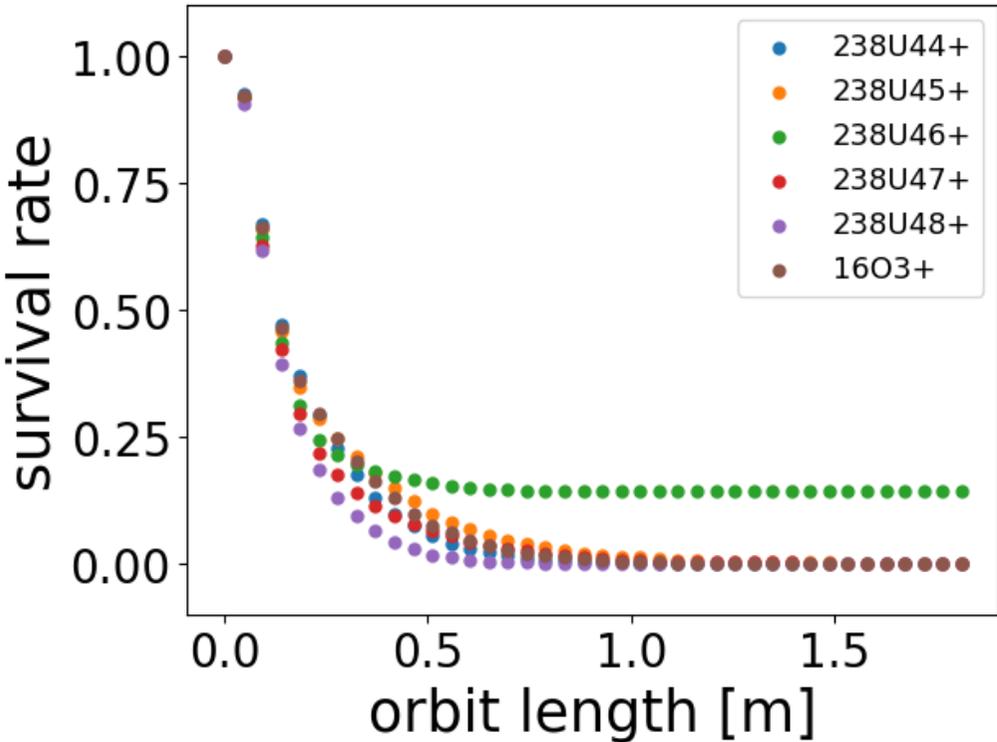
計算結果: 目標

	Aimed	Simulated
U^{45+}/U^{46+} , U^{47+}/U^{46+} (number ratio)	< 1%	0.6%
O^{3+}/U^{46+} (number ratio)	< 1%	1%
Length [m]	< 1.5	1.4
Survival rate of U^{46+}	> 70%	72%
Transverse projected emittance [mm mrad]	25	65 (x), 310 (y)

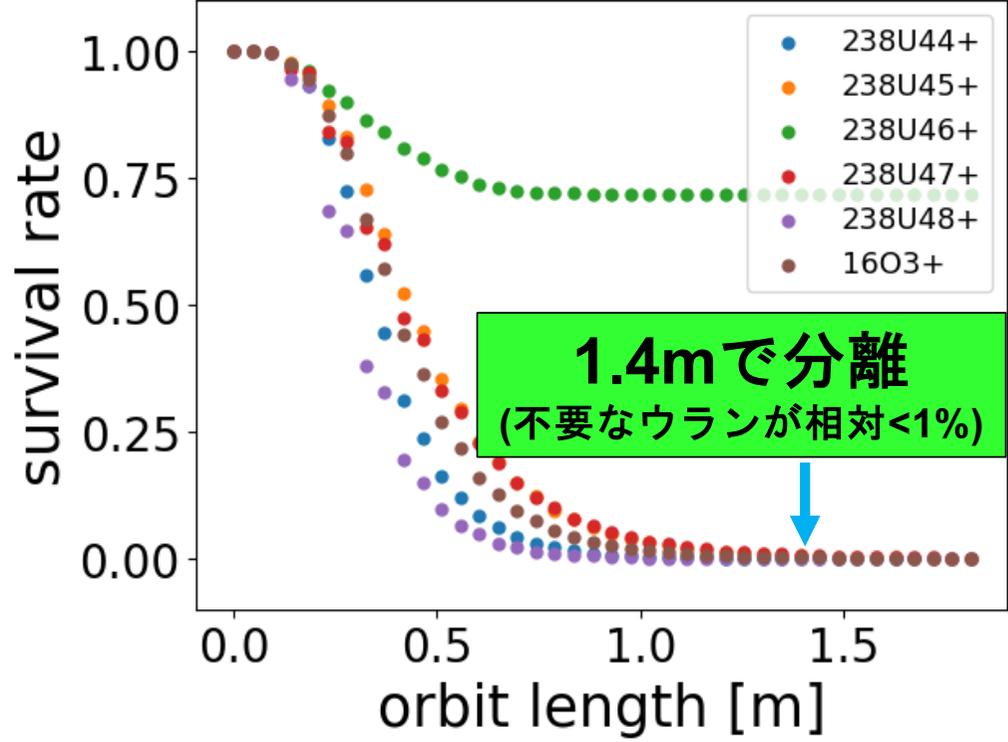
計算結果

動作点:
2.668 kV, DC
15.26 kV, 20MHz
2.000 kV, 10MHz

連続ビームで入射



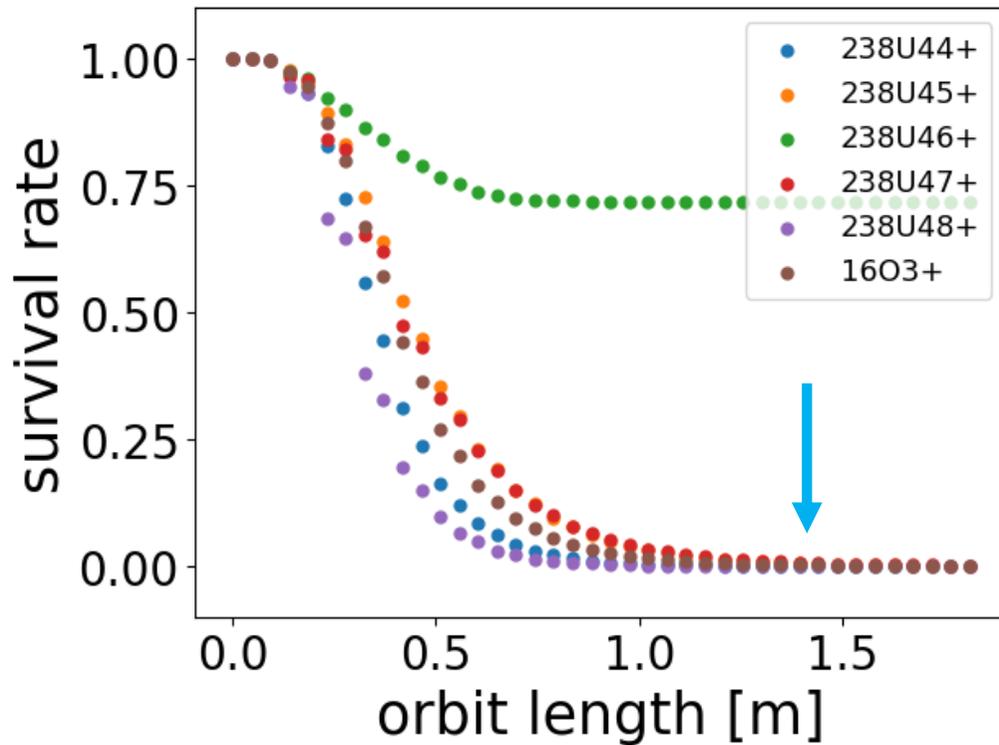
1σ=2.5nsで切り出し



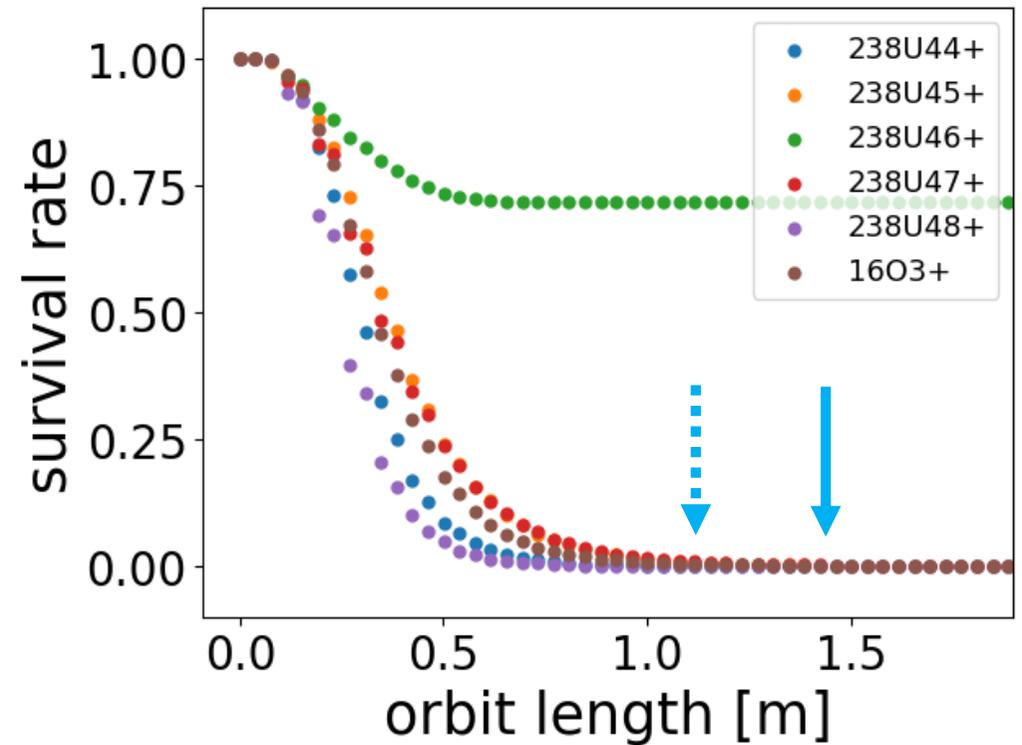
計算結果: 周波数による短尺化

動作点:
 3.781 kV, DC
 21.98 kV, 24MHz
 2.880 kV, 12MHz

前スライドの設定



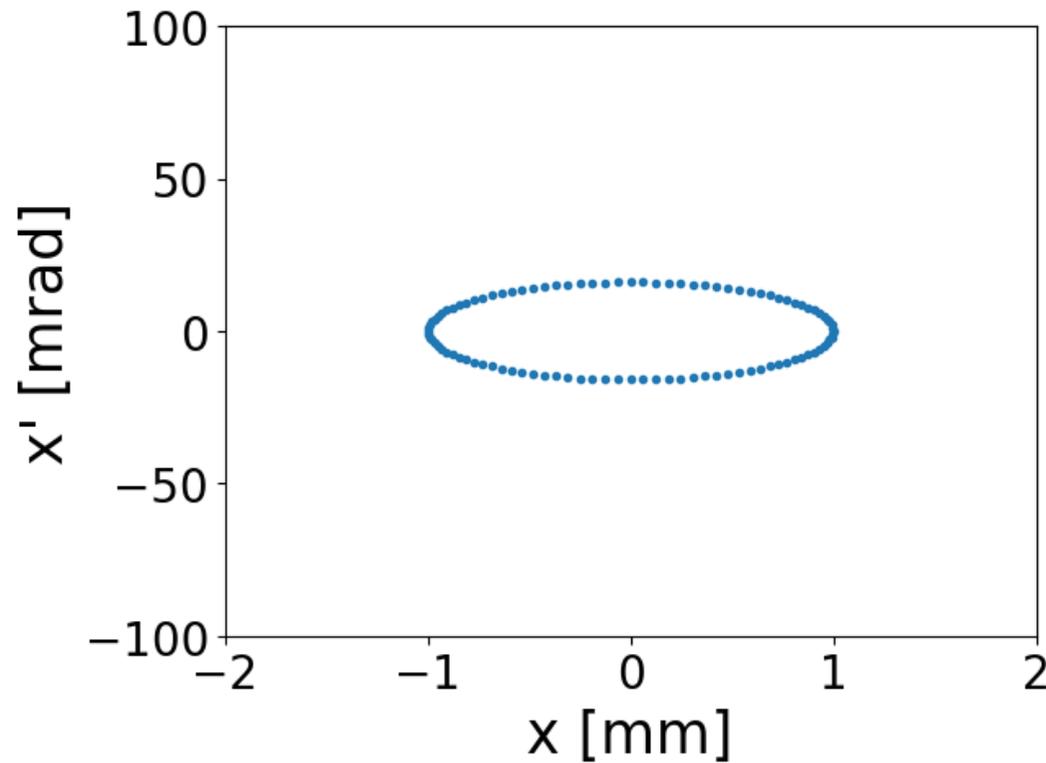
周波数1.2倍、電圧1.2²倍



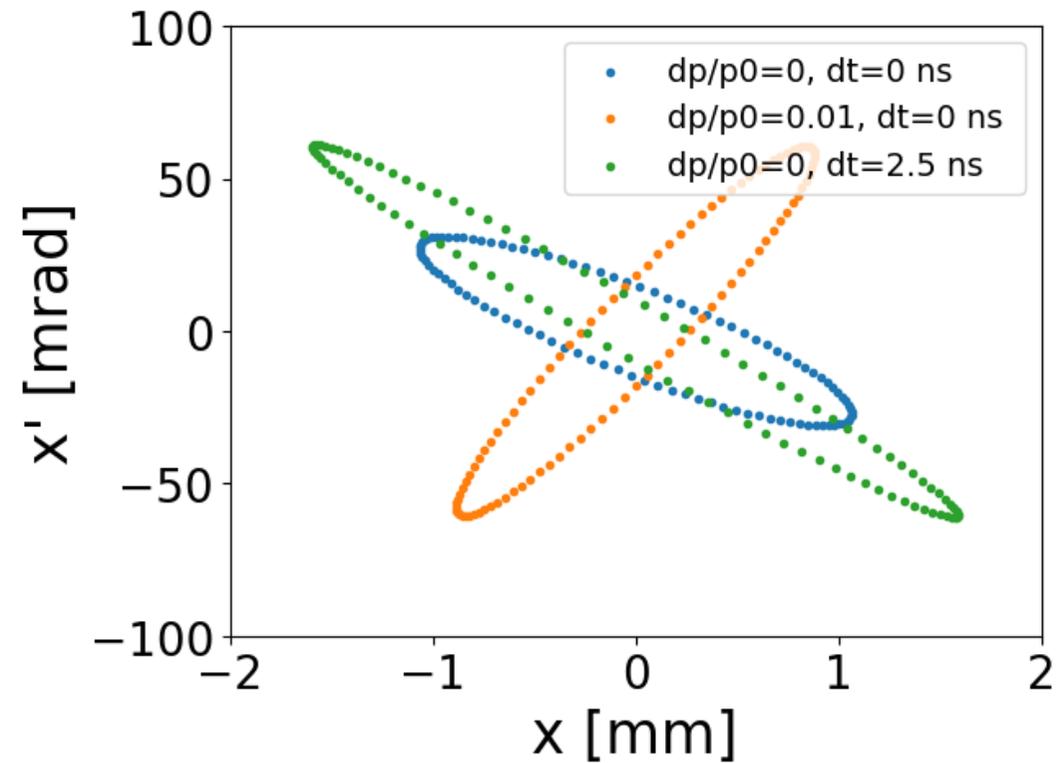
- 周波数1.2倍 → turn数あたりの軌道長 短 → 短尺化

縦方向分布による射影エミッタンス広がり

1mm × 16 mradの楕円を入射



1m進んだ後

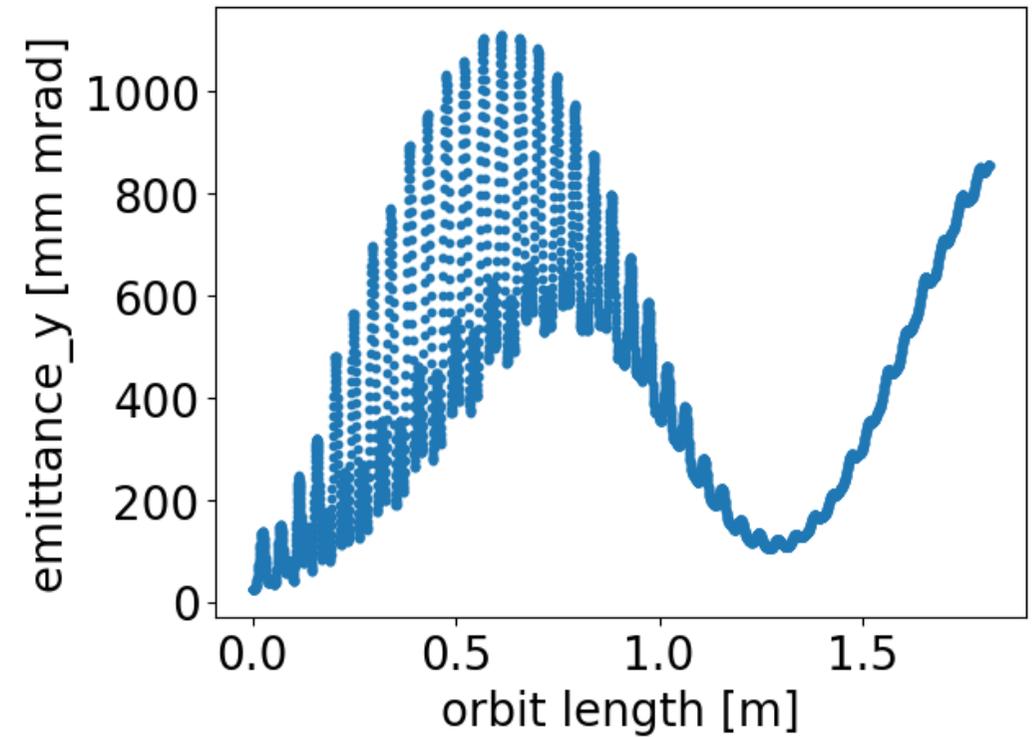
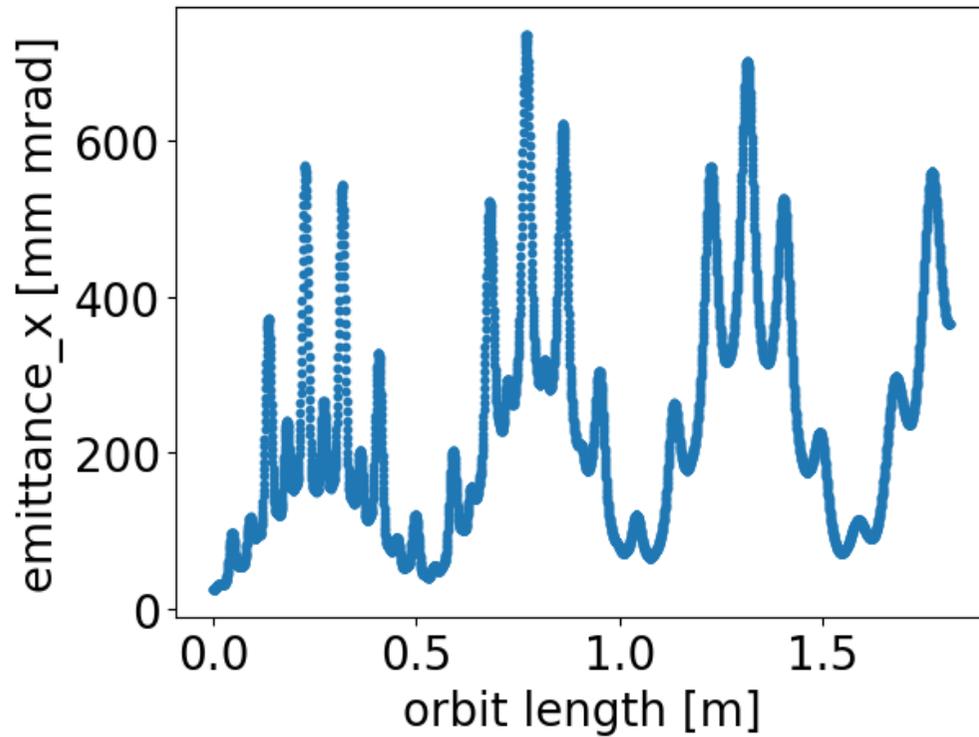


計算結果

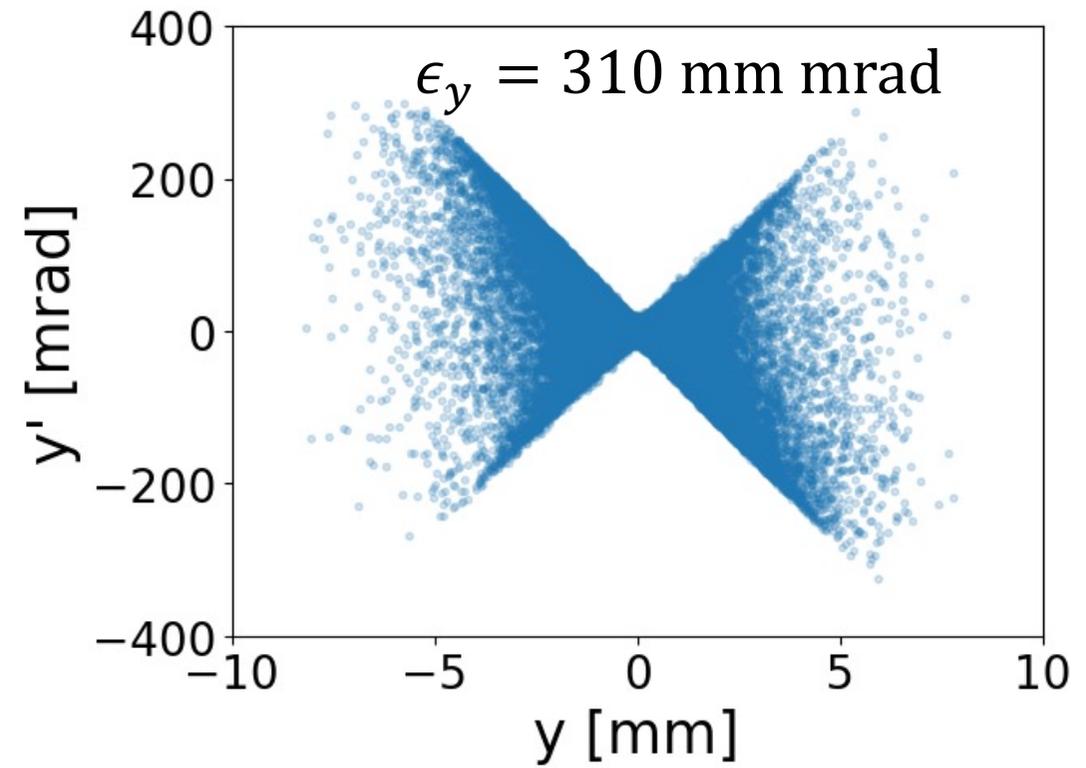
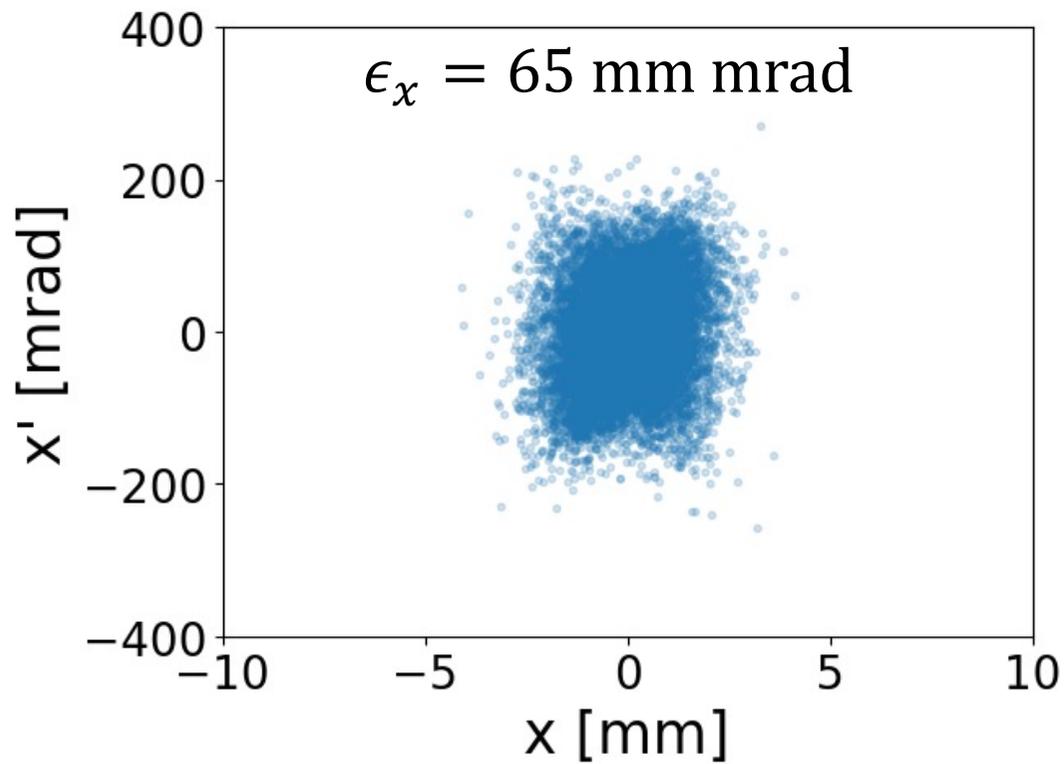
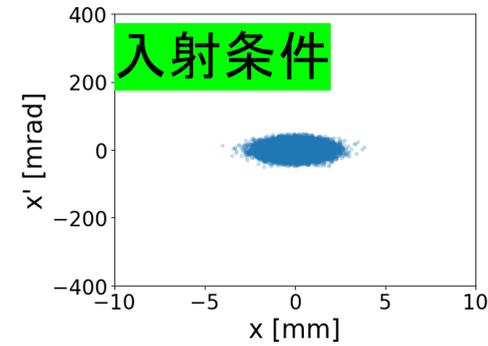
- 射影エミッタンスの変化(46価)

$$\epsilon_x = 2 \sqrt{\sigma_{x^2} \sigma_{x'^2} - \sigma_{xx'}^2}$$

初期値 25 mm mrad



s=1.08m での粒子分布



計算結果: まとめ

	Aimed	Simulated
U^{45+}/U^{46+} , U^{47+}/U^{46+} (number ratio)	< 1%	0.6%
O^{3+}/U^{46+} (number ratio)	< 1%	1%
Length [m]	< 1.5	1.4
Survival rate of U^{46+}	> 70%	72%
Transverse projected emittance [mm mrad]	25	65 (x), 310 (y)

本発表の流れ

1. Motivation
2. Multi-Frequency RFQとは
3. 多価重イオン 計算結果
4. 今後に向けて
5. まとめ

今後に向けて

- より良い動作点探し

指標:

エミッタンス増大の抑制、xy同時収束

連続ビームでの生存率

ノブ: 電圧に応じた無単位量 q

$$q = \frac{q_e V}{m r_0^2 \omega_0^2}$$

- 空間電荷効果

空間電荷効果の影響

- **ラフな見積もり**
- $< 1\text{p}\mu\text{A}$: 無視できる
- $1\text{p}\text{mA}$: 影響大→
動作点の電圧が上がる傾向(~1.5倍)

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{2q_e}{mr_0^2}(V_{DC} + V_1 \cos n_1\omega_0 t + V_2 \cos n_2\omega_0 t)x - \frac{K_{SC}}{\sigma_x(\sigma_x + \sigma_y)}x = 0$$

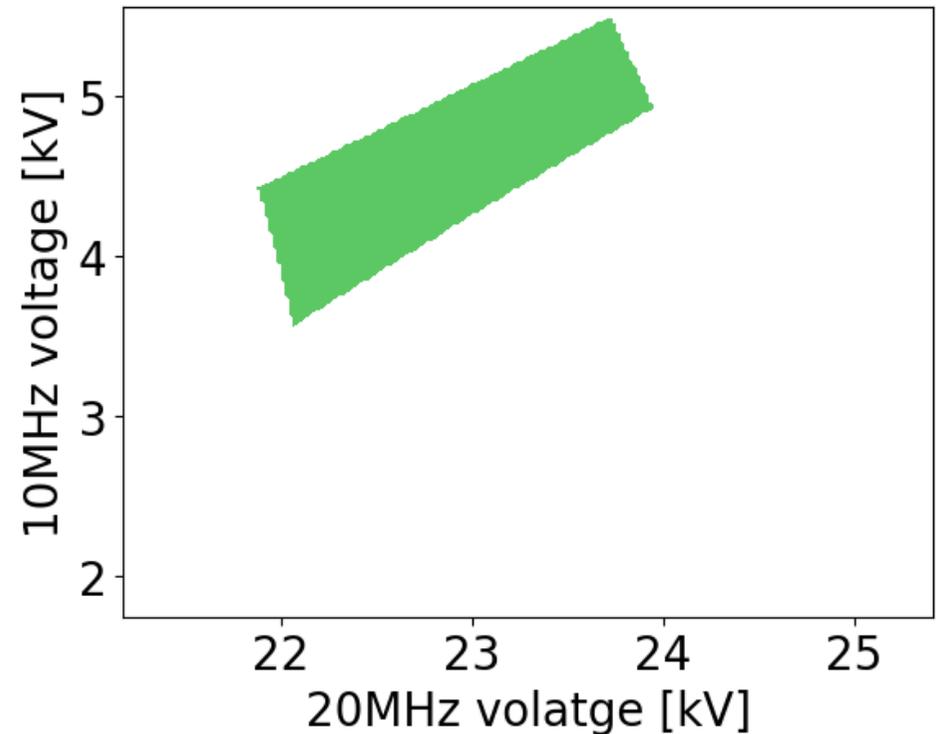
$$\frac{d^2y}{dt^2} - \frac{2q_e}{mr_0^2}(V_{DC} + V_1 \cos n_1\omega_0 t + V_2 \cos n_2\omega_0 t)y - \frac{K_{SC}}{\sigma_y(\sigma_x + \sigma_y)}y = 0$$

$$K_{SC} = \frac{2N}{\beta^2\gamma^3} \frac{q_e^2}{4\pi\epsilon_0 mc^2}$$

N: 長さあたりの数密度

σ_x, σ_y : x,y方向の 1σ

xy安定領域
@Vdc項=Ksc項



まとめ

- MRFQで、1.4mでの価数分離能力を確認
- 高電圧を許せば、より短尺化も見込める
- 課題が具体化できた、引き続き検討が必要
エミッタンス、連続ビームの生存率、空間電荷効果

謝辞

京都大学：若杉昌徳先生、小林大輝さま、鏡鈴さま

理化学研究所：奥野広樹先生、福西暢尚先生

BNL：岡村昌宏先生

KEK / J-PARC：佐藤健一郎先生、武藤亮太郎先生、富澤正人先生、

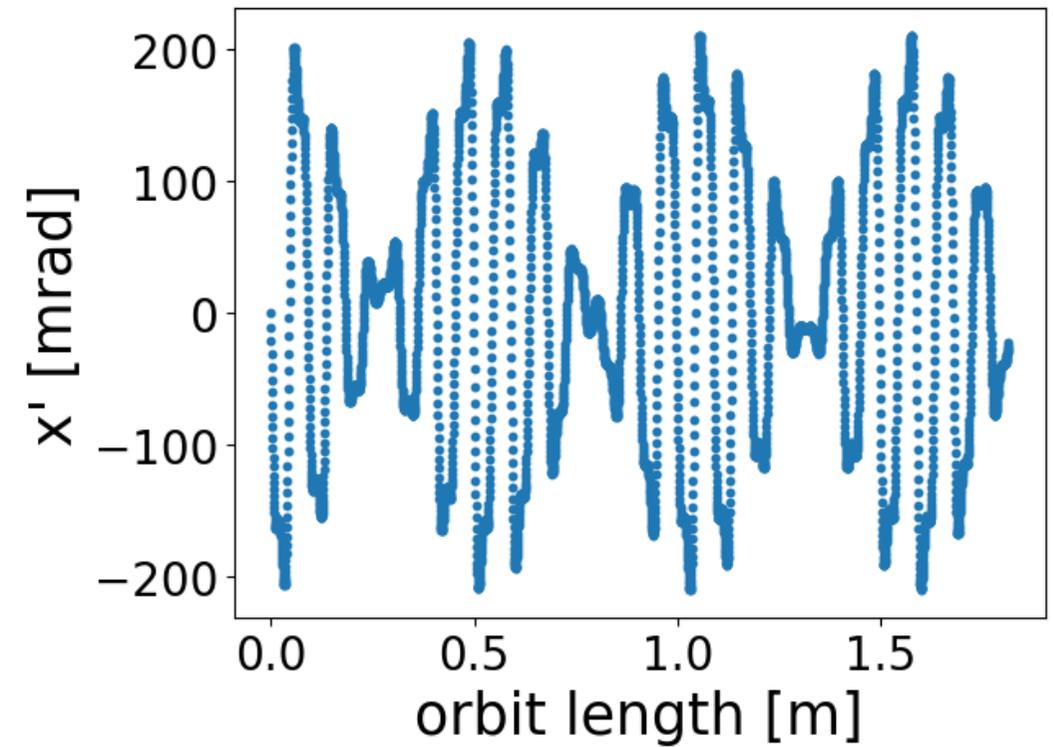
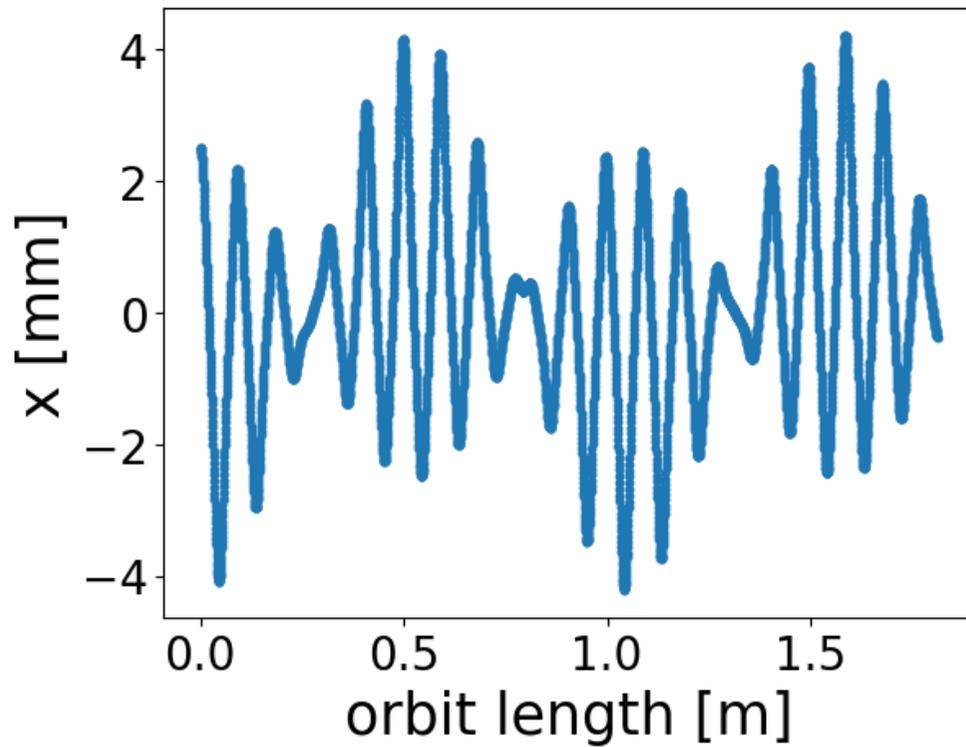
安居孝晃先生、浅見高史先生

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導、ご支援を賜りました。
ここに深く感謝の意を表します。

BACKUP

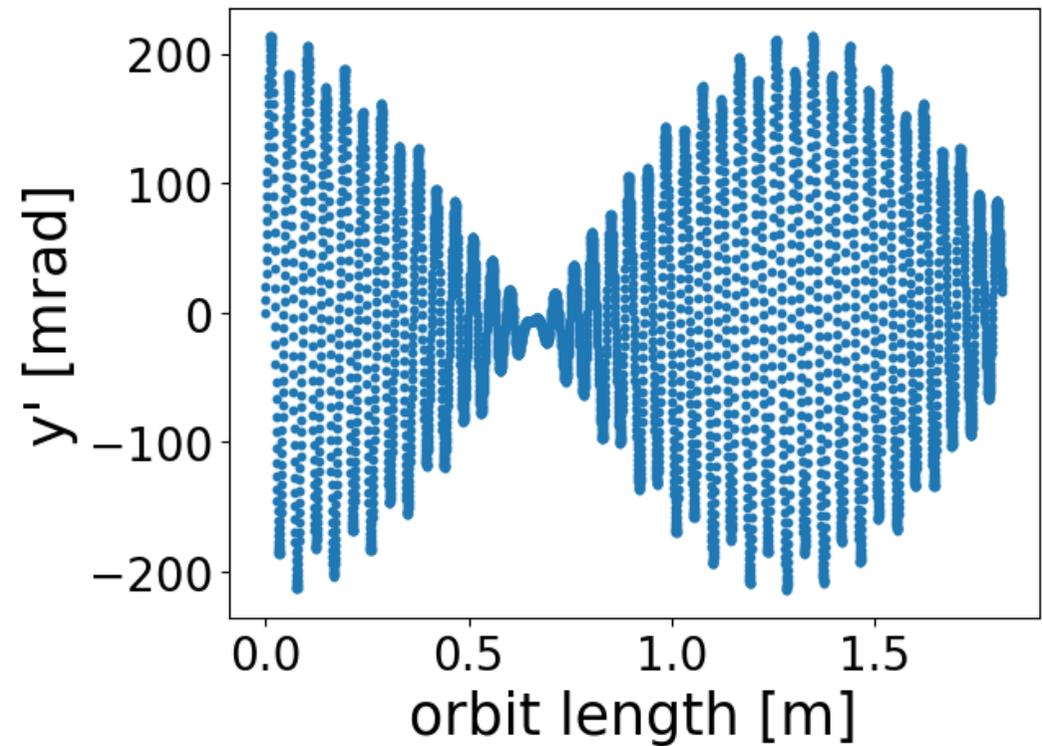
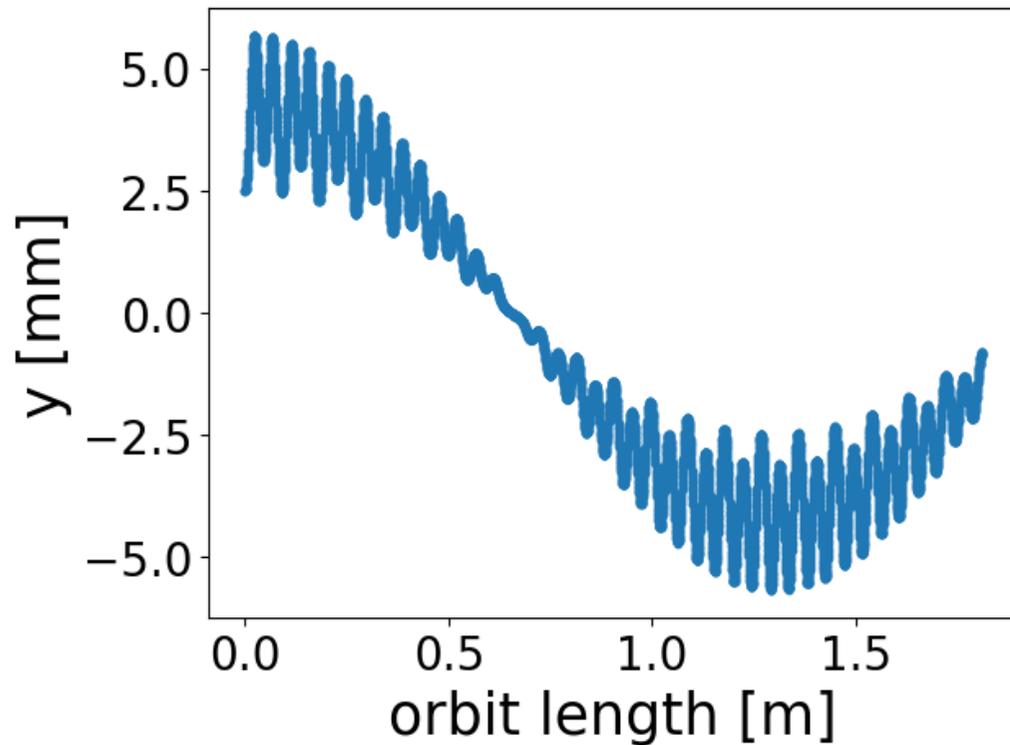
粒子の軌道 x

- 初期値: $(x, x') = (y, y') = (2.5 \text{ mm}, 0 \text{ mrad})$

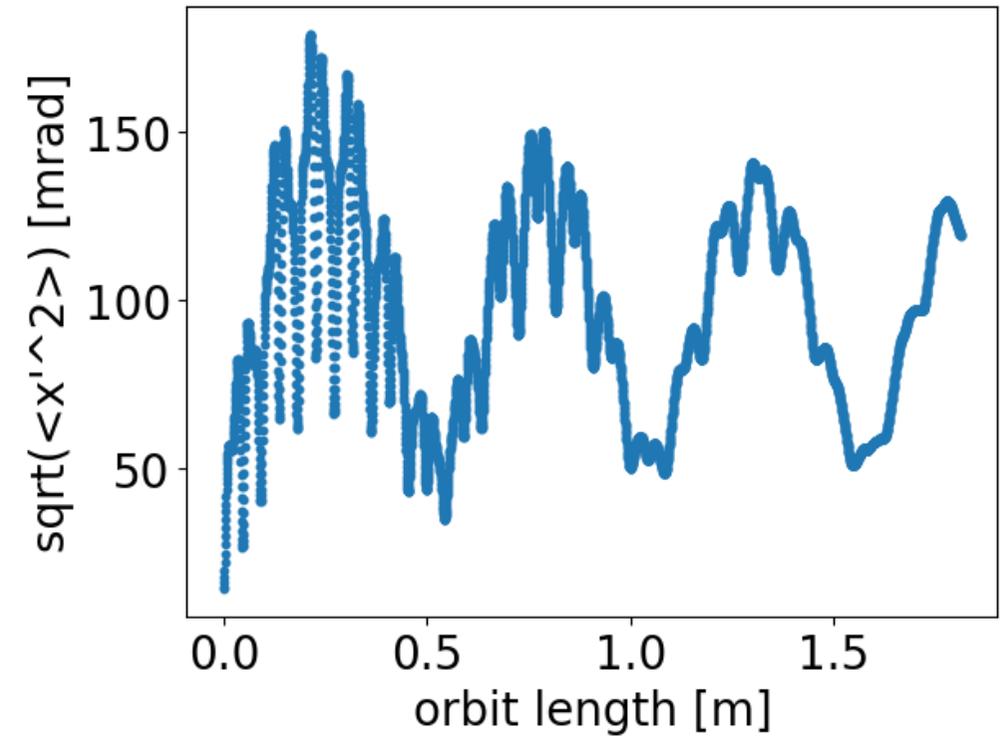
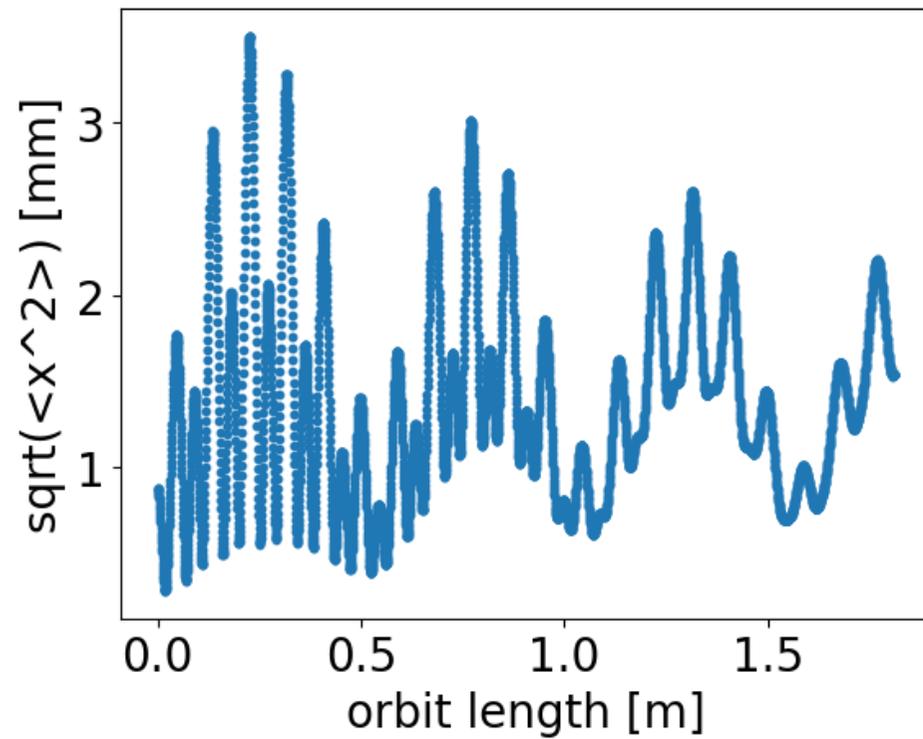


粒子の軌道 y

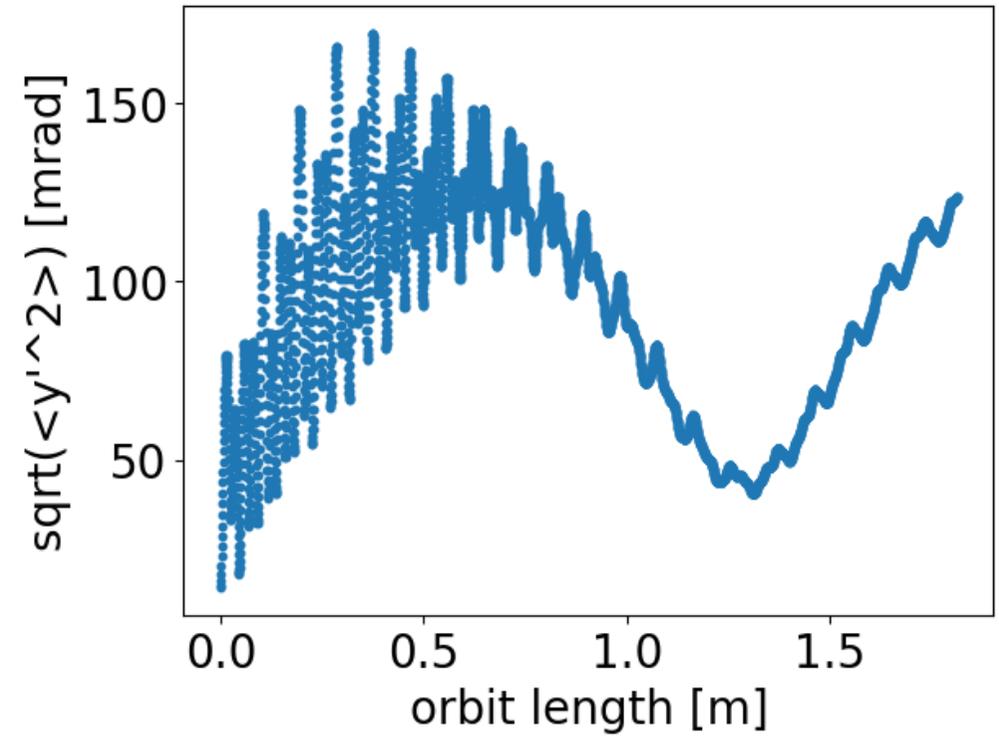
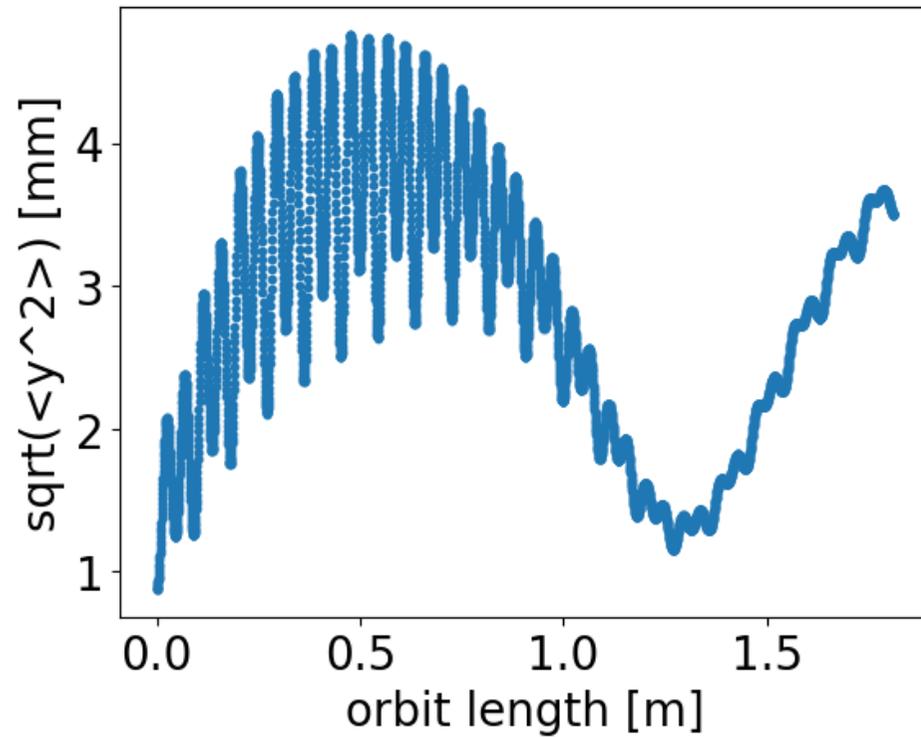
- 初期値: $(x, x') = (y, y') = (2.5 \text{ mm}, 0 \text{ mrad})$



粒子の分布の時間変化 x

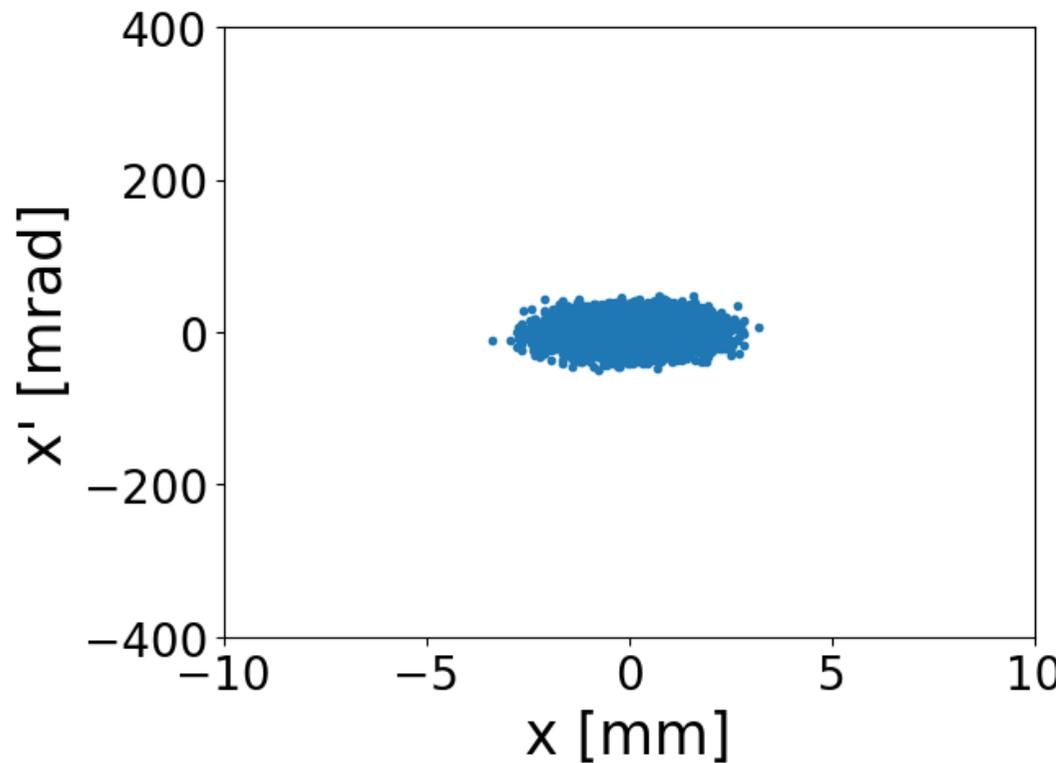


粒子の分布の時間変化 y

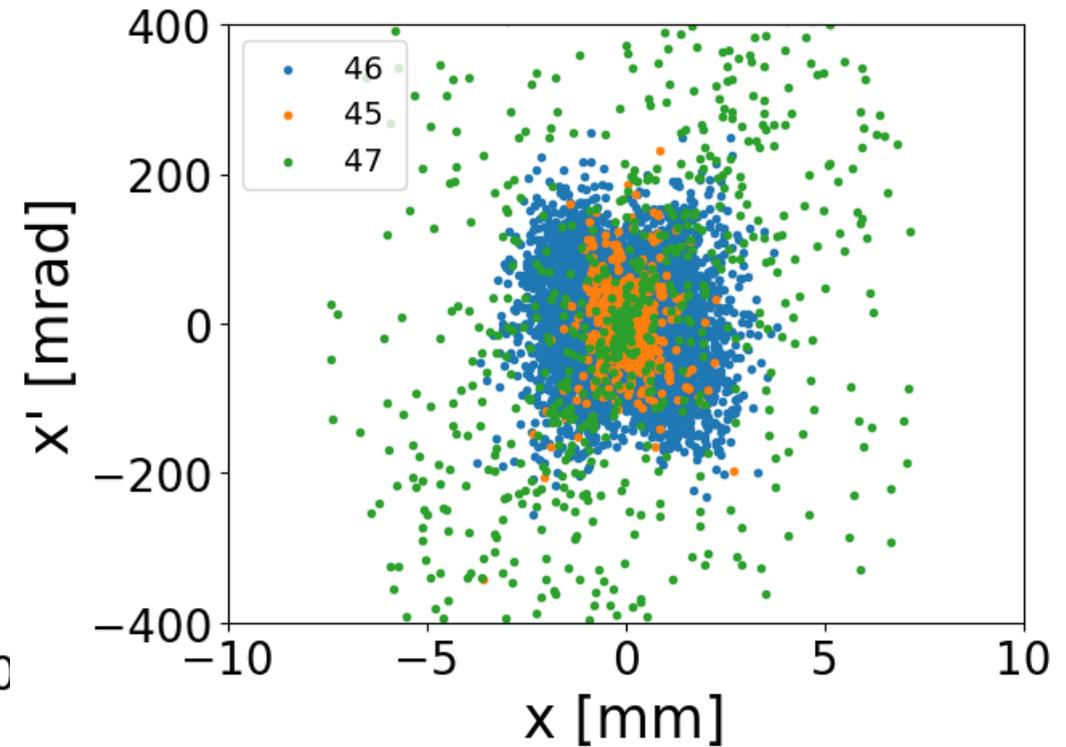


縦方向分布による楕円の変化/価数

入射条件

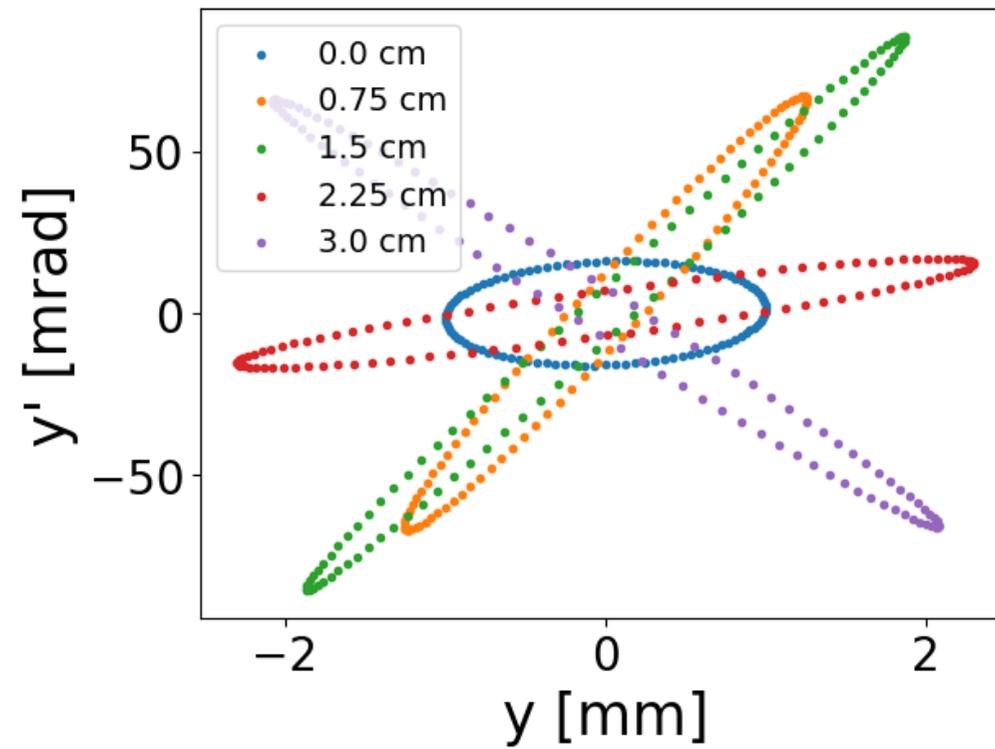


1m進んだ後



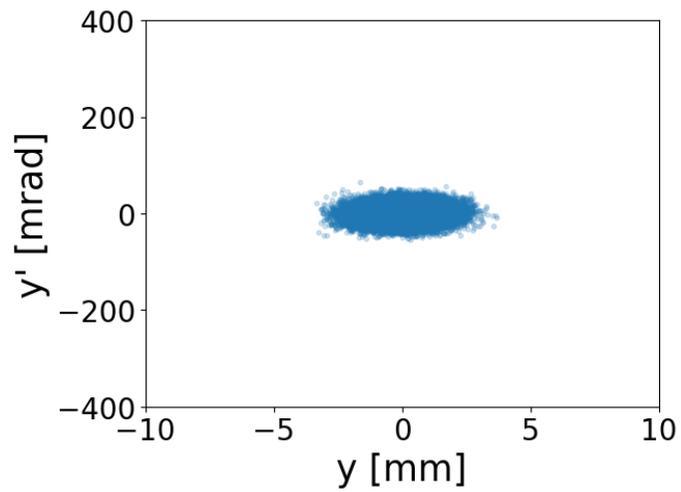
47価はx方向で不安定

楕円の変化(y)

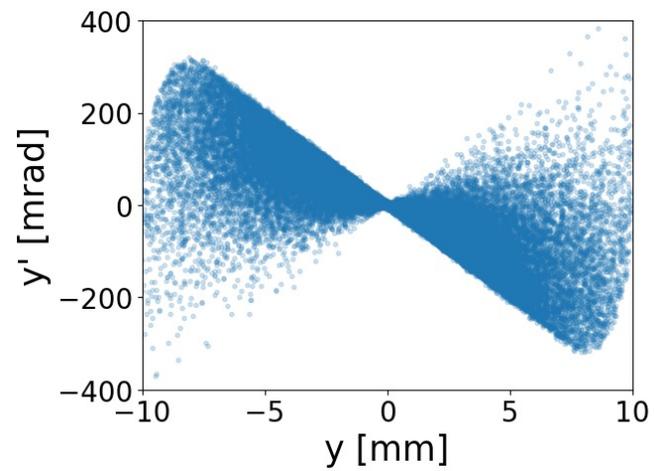


楕円の変化(y)

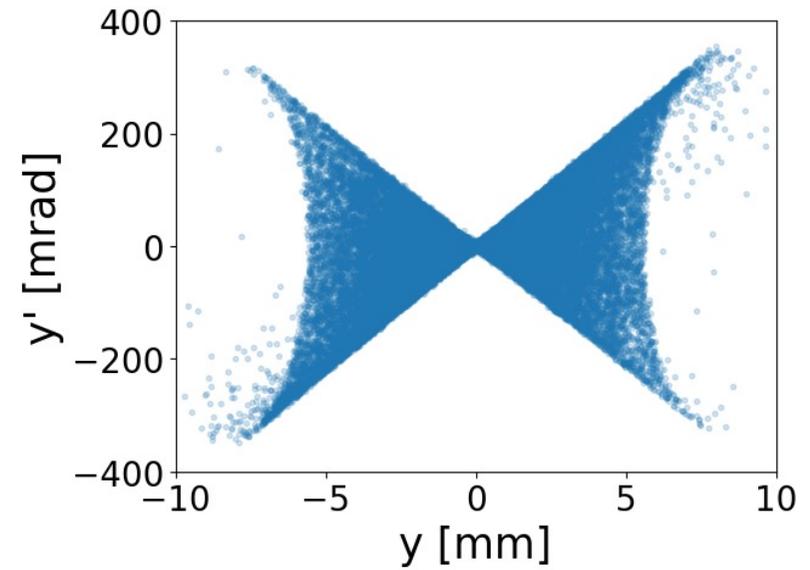
s=0cm



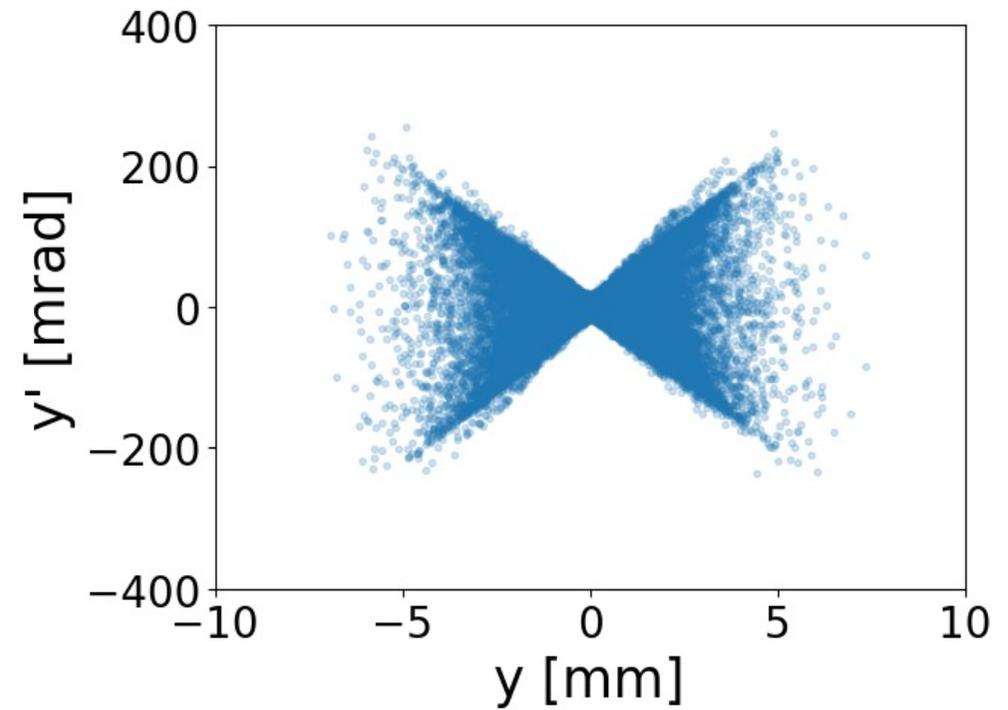
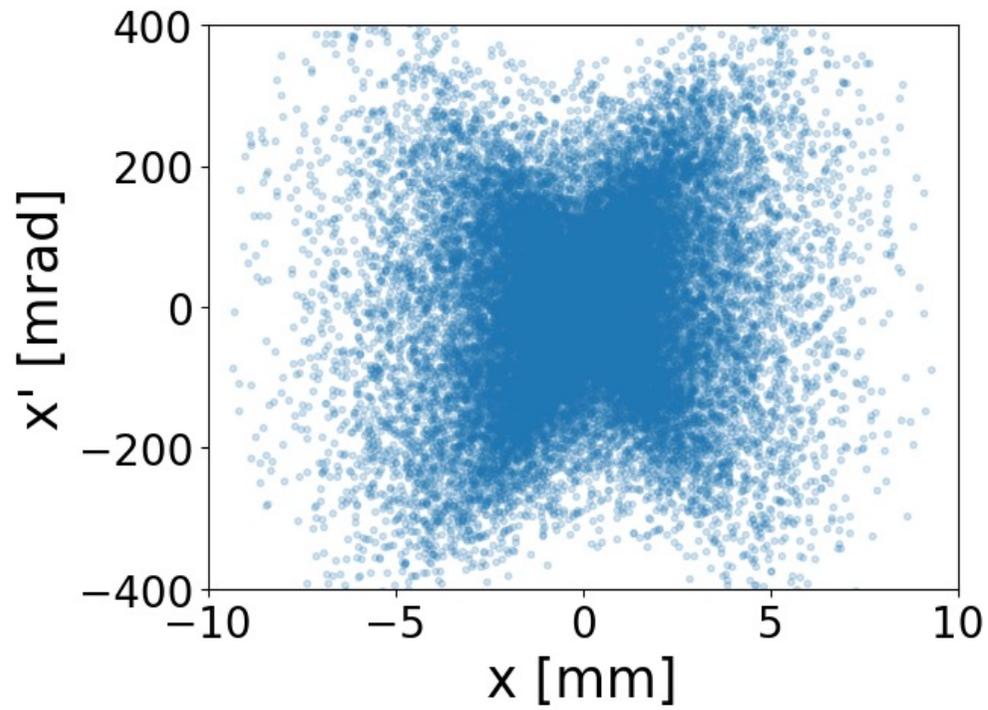
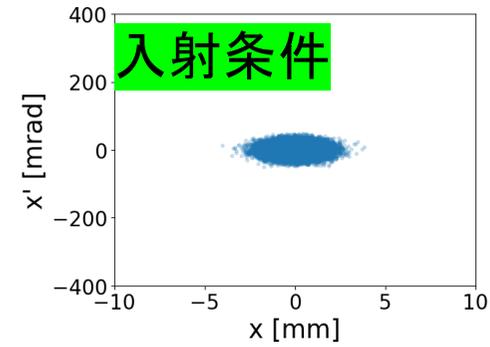
s=3cm



s=5cm

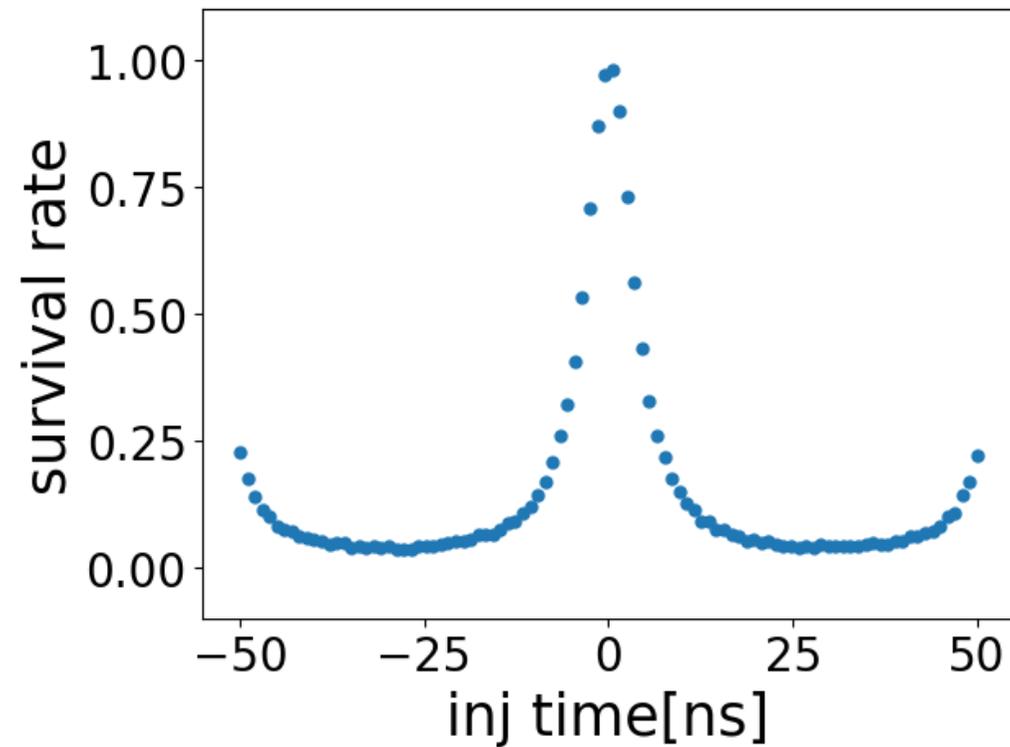


s=1.4mでの粒子分布



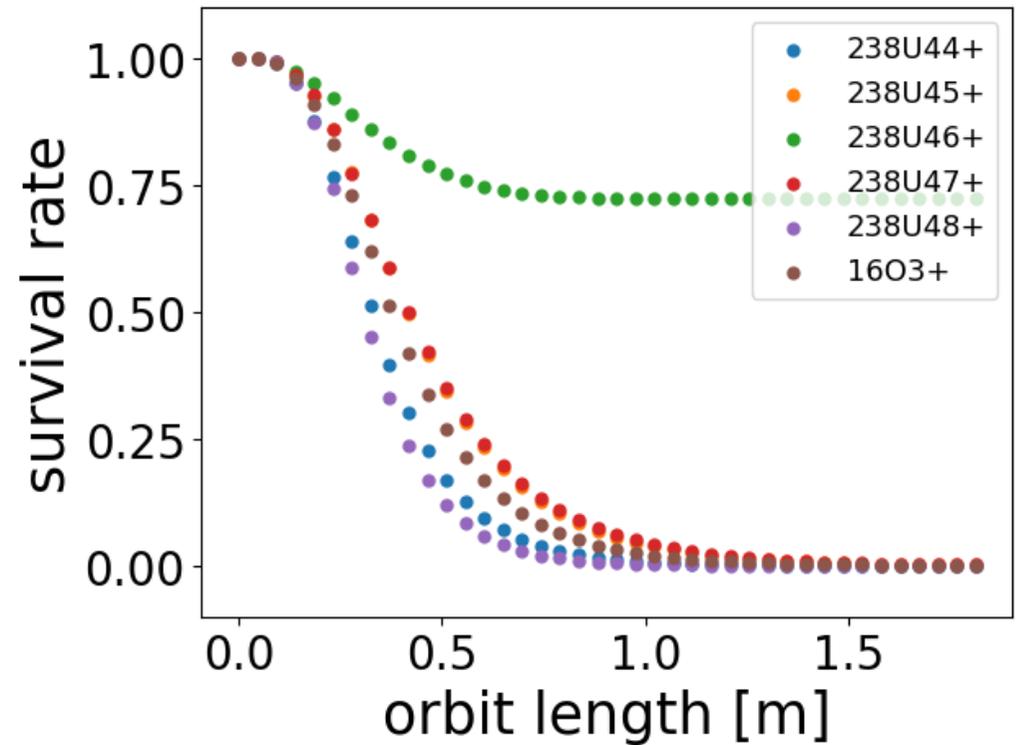
入射時間に応じた生存率

連続ビームで生存率が悪くなる原因

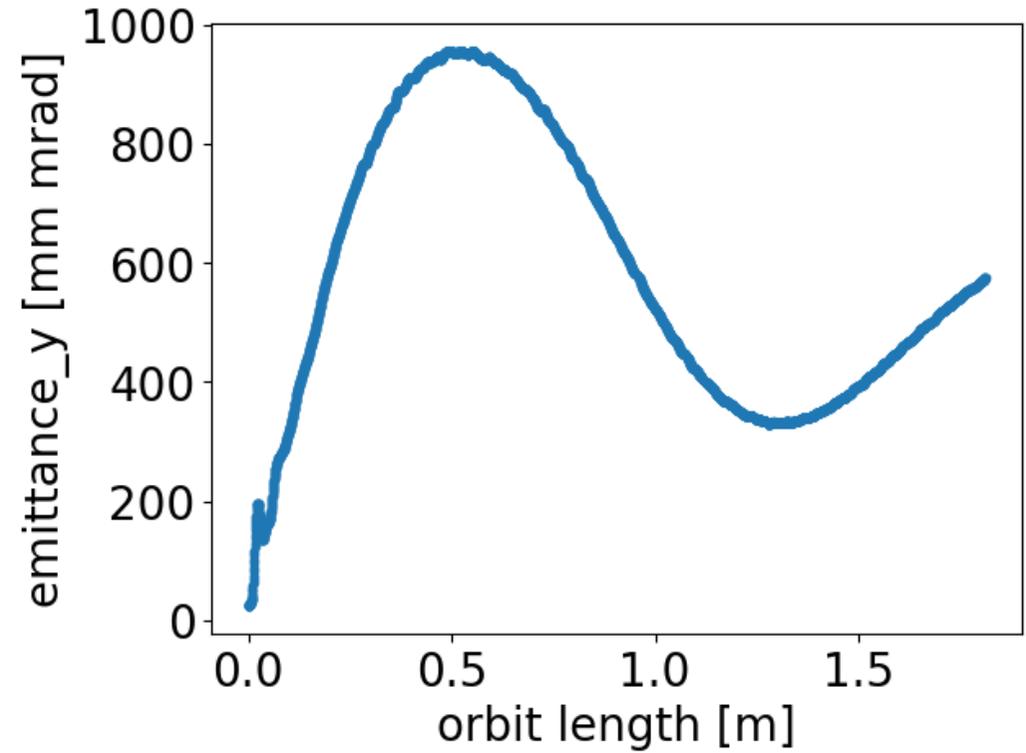
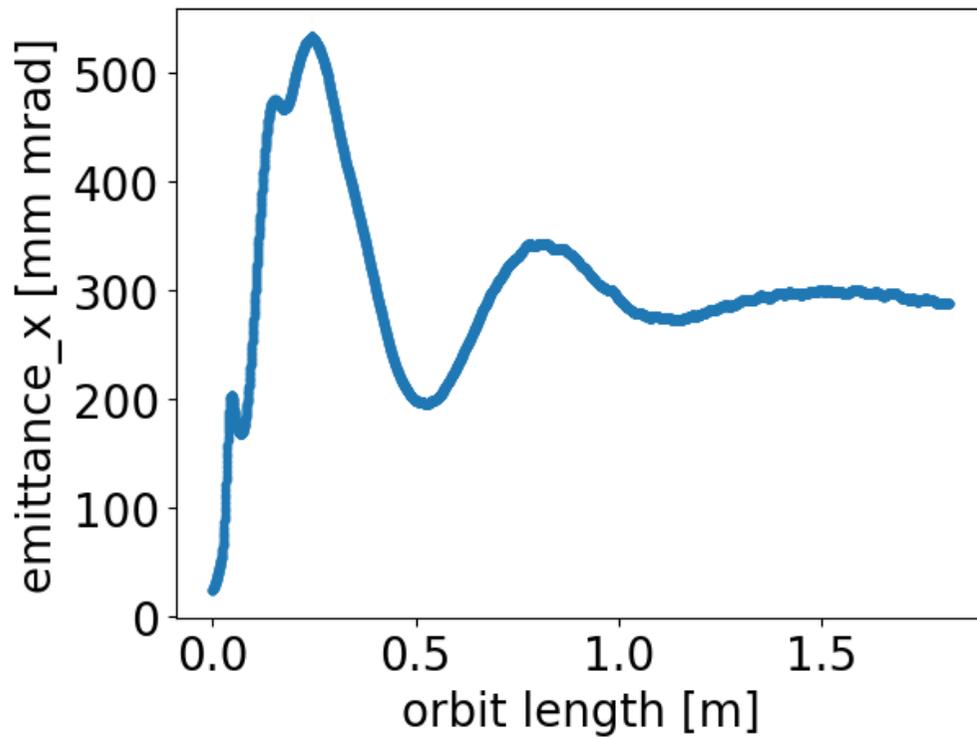


dt: $1\sigma=2.5\text{ns}$, dp/p0: $1\sigma=0.2$

運動量広がり
分離・生存率に
あまり影響しない



dt: $1\sigma=2.5\text{ns}$, dp/p0: $1\sigma=0.2$



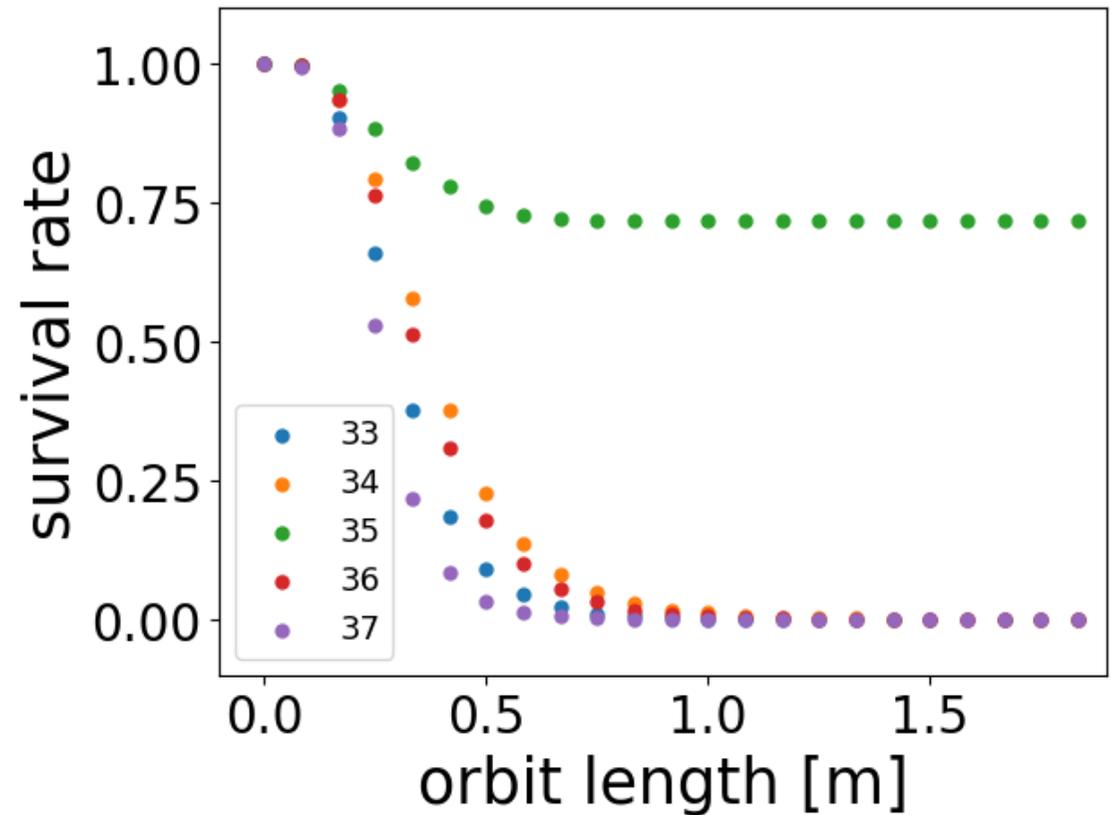
ウラン+35の取り出し

動作点:

3.533 kV, DC

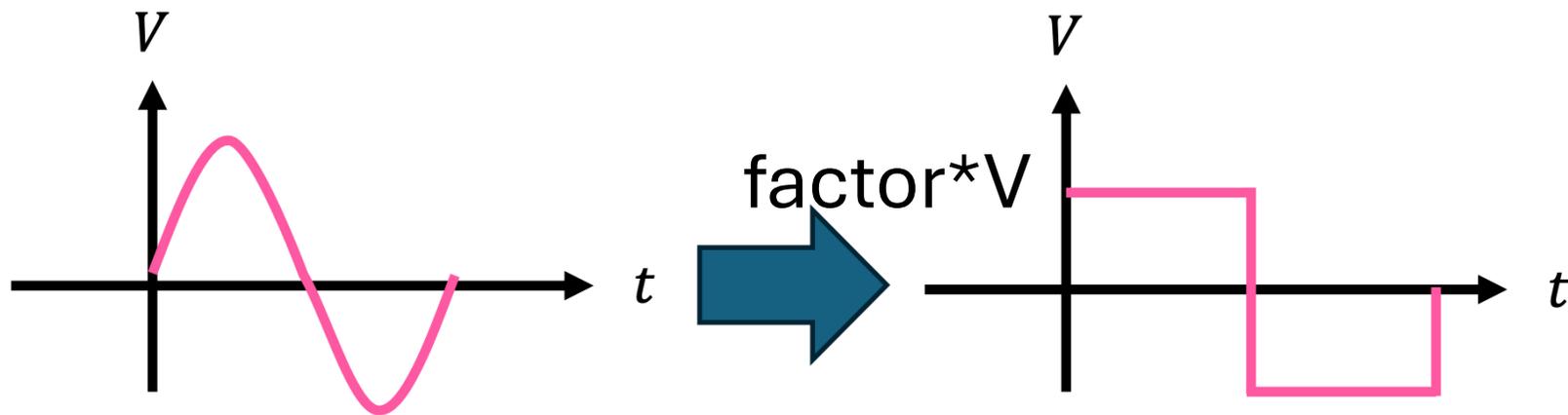
20.06 kV, 20MHz

2.629 kV, 10MHz



MRFQの解析的取り扱い: 矩形波近似

- 印加する正弦波を矩形波に近似→ 解析的計算が可能
- 転送行列トレース電圧2次の係数が合うように
- $\text{factor} = \sqrt{6}/\pi \sim 0.8$ 決定
- (\uparrow 低電圧近似)

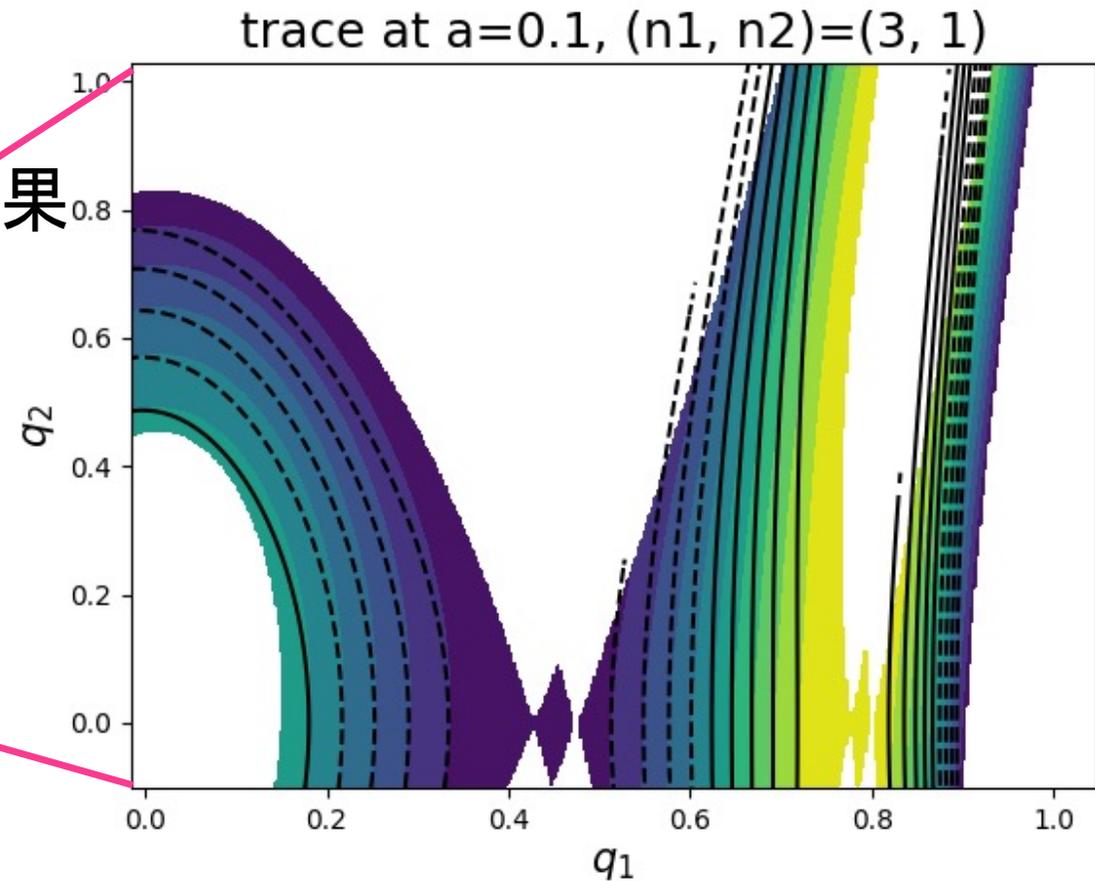
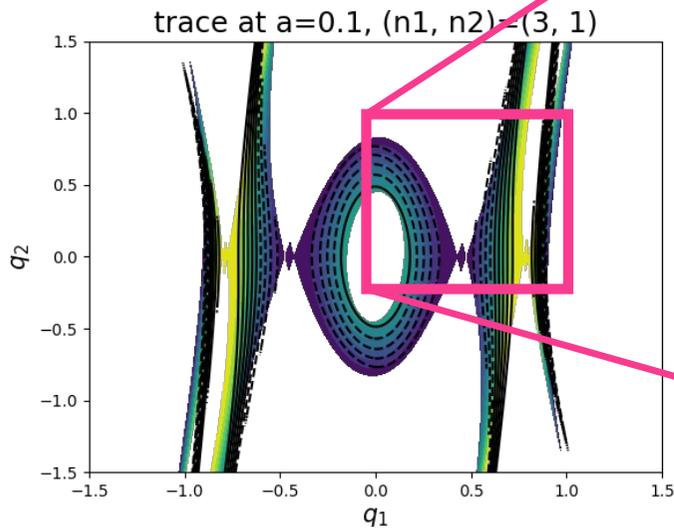


近似と数値計算の比較: x, y 方向の安定領域

拡大図

黒: 数値計算

色付: 矩形近似の計算結果



矩形波MRFQ

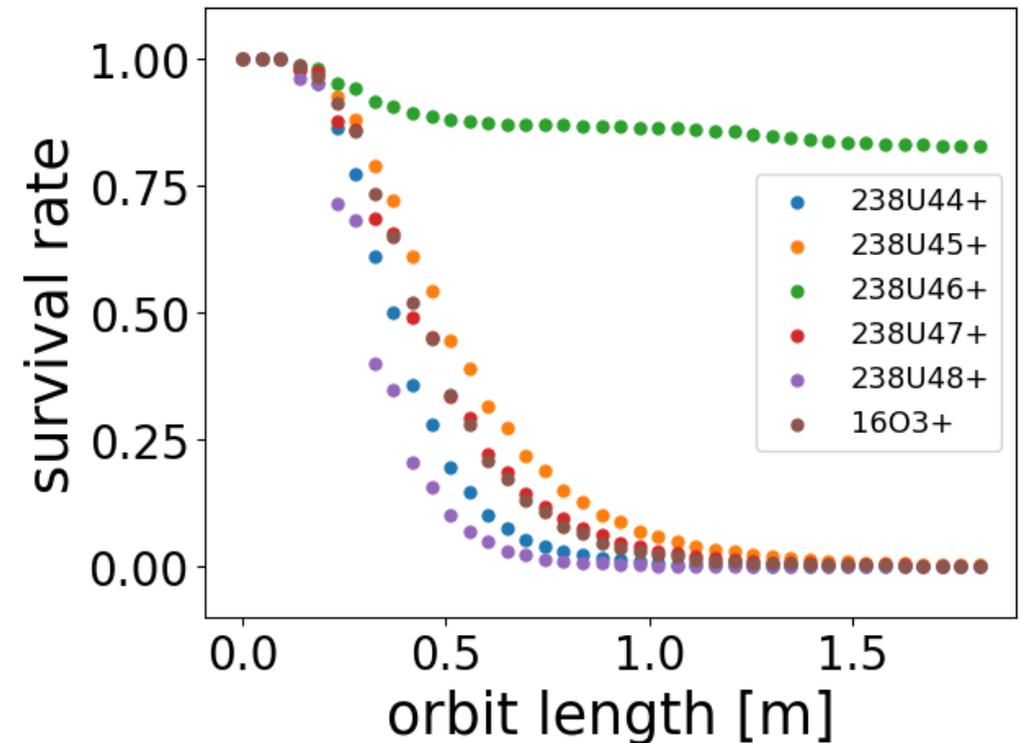
- 生存率微増、分離能力ほぼ変化なし
- 動作点: 矩形波近似のもとで、
トレースが正弦波の場合と等しい点

2.080 kV, DC

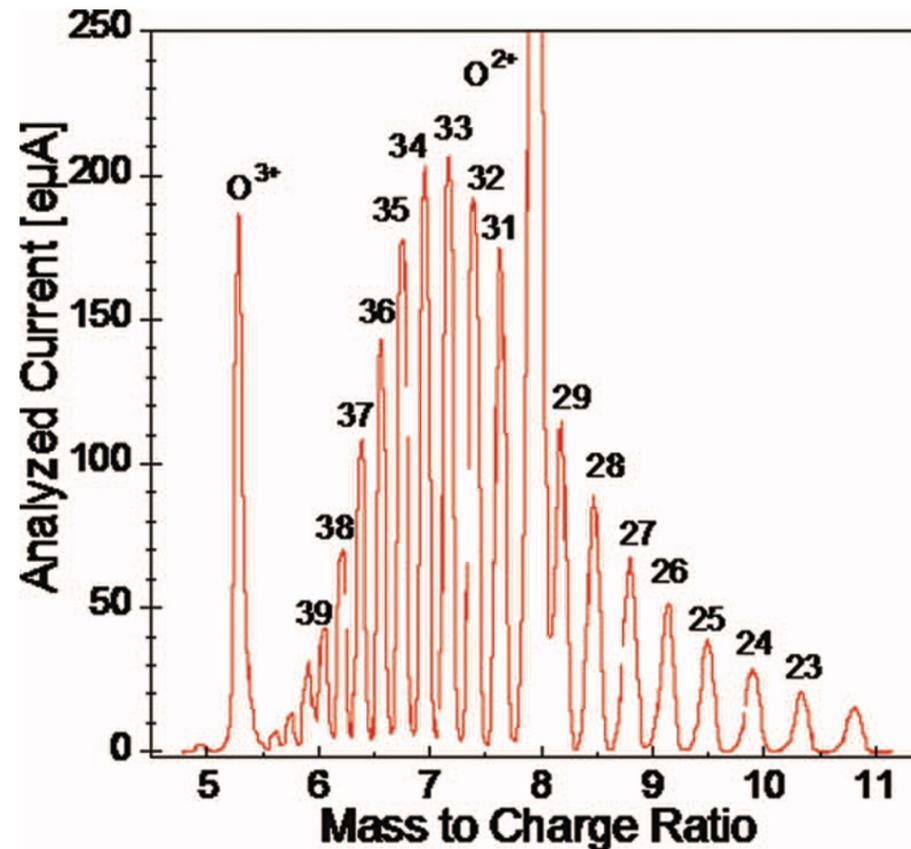
11.90 kV, 20MHz

1.569 kV, 10MHz

- 矩形波を歪ませずに
印加するのは難しいので、
今回は採用しなかった



価数分離の現状



L. T. Sun, "Low energy beam transport for facility for rare isotope beams driver linear particle accelerator"
Rev. Sci. Instrum. 83, 02B705 (2012)

価数ごとの生存率@1.4m

