

# ダイポール磁場配位に捕獲された陽電子 軌道の径方向操作

東大新領域, IPP<sup>A</sup>, ミュンヘン工科大<sup>B</sup>, ローレンス大<sup>C</sup>

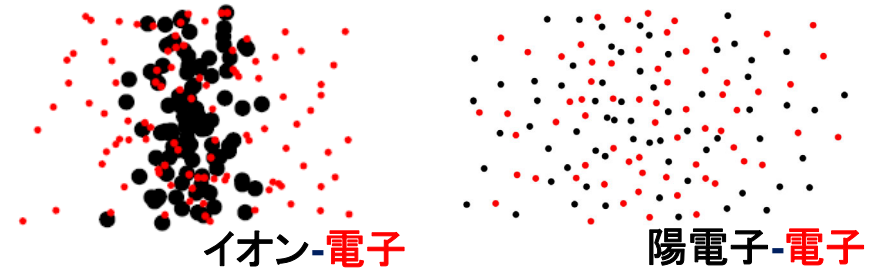
齋藤晴彦, J. Horn-Stanja<sup>A</sup>, M. Singer<sup>A,B</sup>, S. Nissl<sup>B</sup>, E.V. Stenson<sup>A,B</sup>, M. Stoneking<sup>C</sup>,  
T. Sunn Pedersen<sup>A</sup>, and C. Hugenschmidt<sup>B</sup>

1. ダイポール磁場と大強度陽電子源による電子・陽電子プラズマ計画
2. 径方向圧縮による高密度化の重要性と先行研究
3. ダイポール磁場中で回転電場が陽電子軌道に与える効果と実験結果
4. まとめと今後の課題

# ダイポール磁場配位による電子・陽電子プラズマ実験の計画

2020 Stoneking+ J. Plasma Phys.

- ペアプラズマ ( $m_{e^+} = m_{e^-}$ ) の **波動・安定性**  
 → 実験的に未検証 (基礎プラズマ)



- 電子・陽電子群はパルサー磁気圏等の **宇宙環境** に広く存在  
 → ガンマ線バーストに関わる無衝突衝撃波とWeibel不安定性, 構造形成
- 実験的にペアプラズマ生成は **陽電子の大量蓄積** の実現を経て達成  
 → ポジトロニウム (電子と陽電子の束縛系) の物理, 反水素実験など

## ● 反物質ペアプラズマ実験の全体計画

大強度陽電子源

$10^7$  e+/s, 10eV

$10^{10-11}$  e+

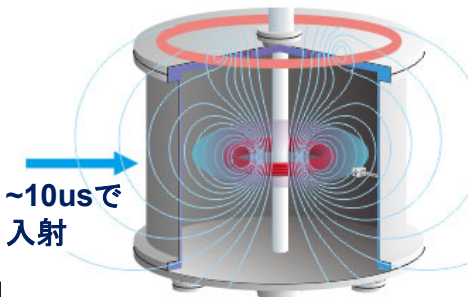
リニアックベース  
パルス陽電子ビーム



バッファガス+超伝導トラップ

陽電子の前段蓄積,  
高速パルス引き出し

径方向圧縮による  
高密度化が重要な課題



磁気浮上ダイポール

$>10^{10}$  e+  
 $10^{11-12}$  m<sup>-3</sup>

反物質ペア  
プラズマ生成

物性解明  
科学的応用

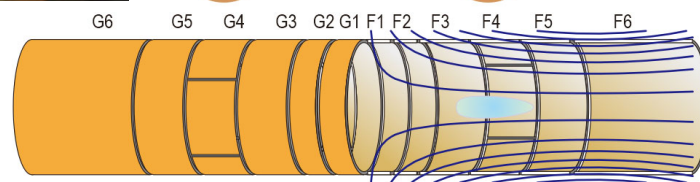
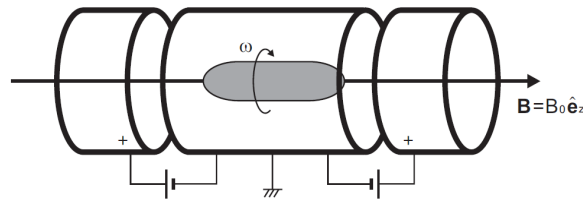


産総研・リニアックベース陽電子源

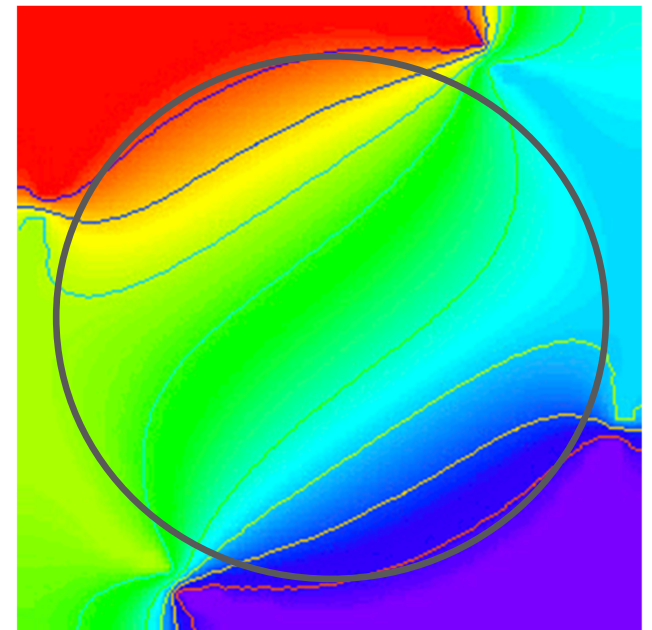
2020 Higaki Michichio+ Appl. Phys. Exp.

# 非中性プラズマの経方向圧縮の先行研究

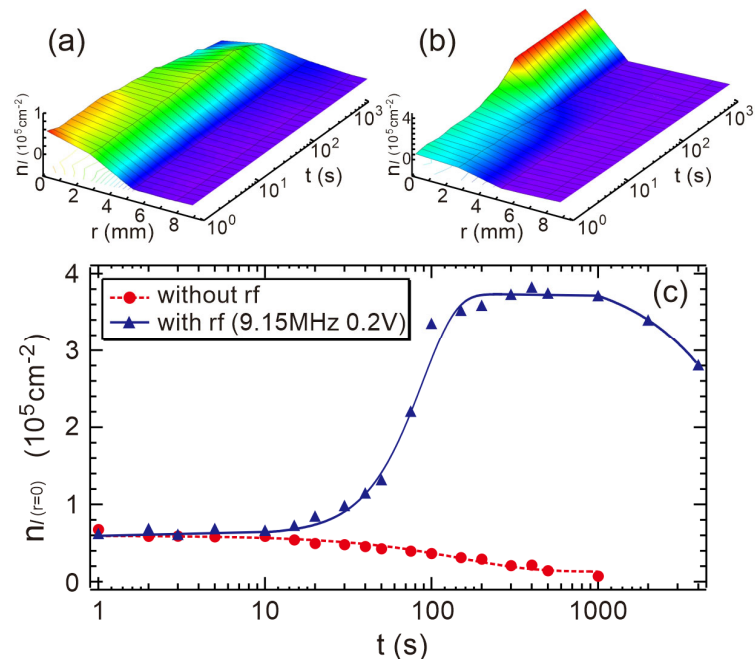
## 「直線型」配位における回転電場



xy平面(軸に垂直)の電位分布



2008 Saitoh, Mohri+ Phys. Rev. A



- 周方向の分割電極によるトルク印加
- 周期運動との結合(粒子運動レベル), TGモードの利用, strong driveモード
- 高密度化, 径方向制御, 長時間閉じ込め

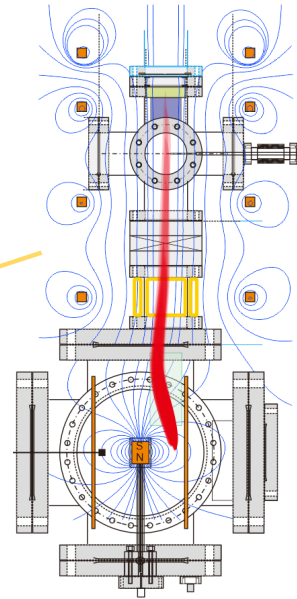
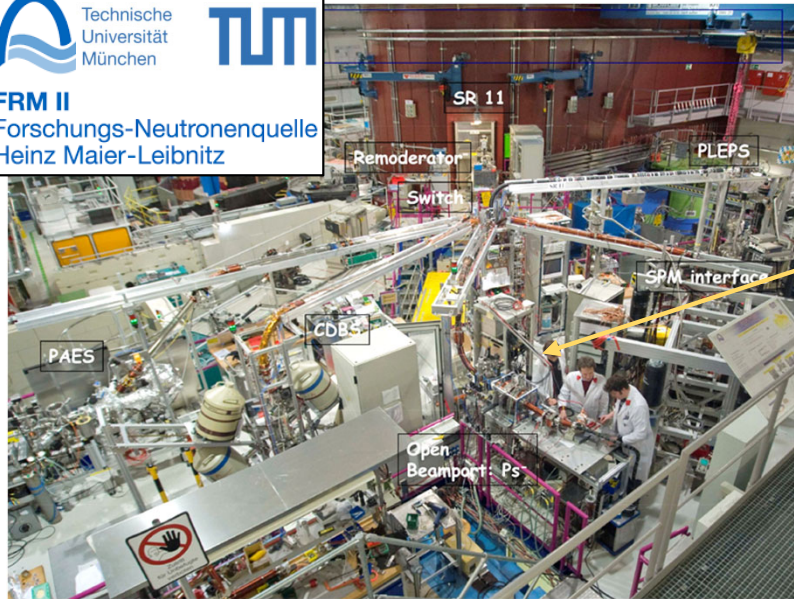
※これらは全て直線型配位の研究例

2015 Danielson, Dubin, Greaves, Surko, Rev. Mod. Phys.

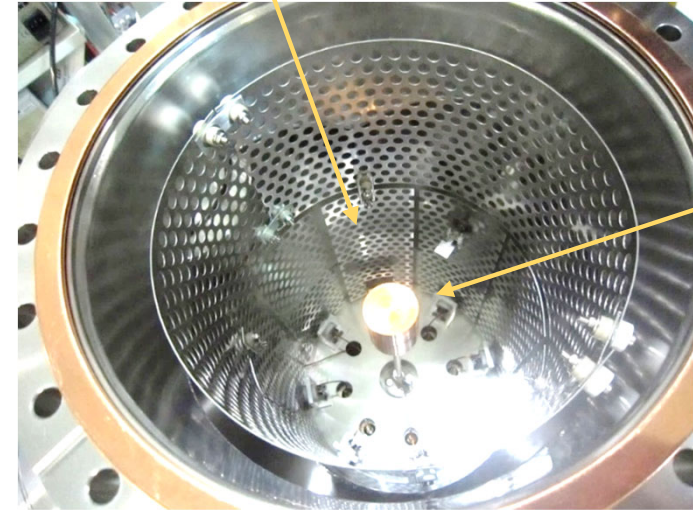
## 本研究の目的： ダイポール磁場中の陽電子の軌道圧縮

- ダイポール磁場配位における電子・陽電子プラズマ生成のために径方向圧縮による高密度化の実現は必要不可欠
- トロイダル系で回転電場圧縮の研究例はなく、どのような電場の適用が効果を持つか、効率的となるか、未解明
- ダイポール磁場中の高効率の陽電子圧縮方法を、単一粒子の運動に注目し、軌道解析と実験を通して明らかにすることが目標

# 陽電子トラップ実験装置と回転電場印加電極の構造と配置

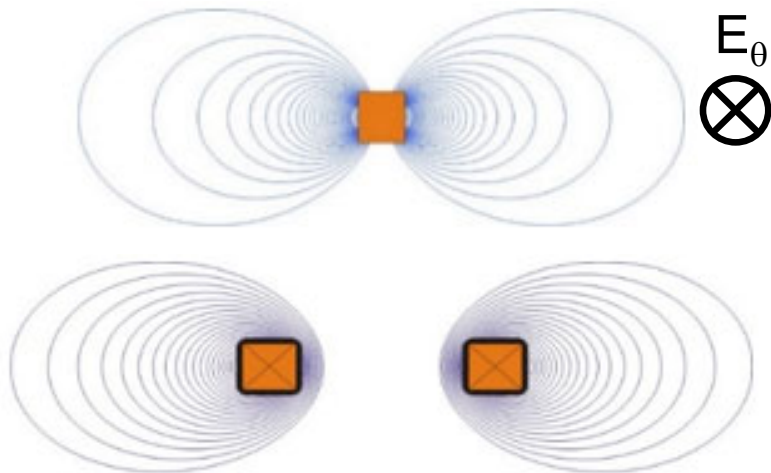


回転電場印加電極  
(周方向に8分割)



永久磁石

ミュンヘン工科大学FRM-II原子炉(20MW)のNEPOMUCビームラインと、構築した永久磁石によるダイポール磁場実験のプロトタイプ。



- 陽電子ビームラインに装置を設置
- 永久磁石(ネオジム)によるプロトタイプ
- 直線型装置からの類推で、周方向に分割した電極を閉じ込め領域周囲に配置

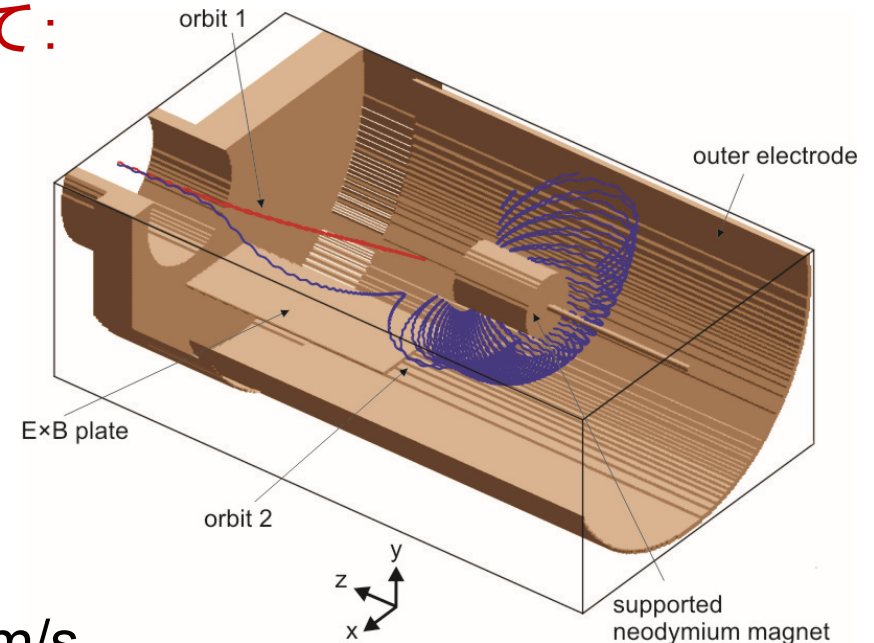
周方向分割電極により、磁場とクロスする電場を生成する

# プロトタイプダイポール装置への陽電子入射と各種時間スケール

陽電子をExBドリフト入射後の軌道に対して:

- **gyromotion**

- cyclotron frequency of positron with  $B = 10 \text{ G} - 100 \text{ G} \rightarrow 28 \text{ MHz} - 280 \text{ MHz}$



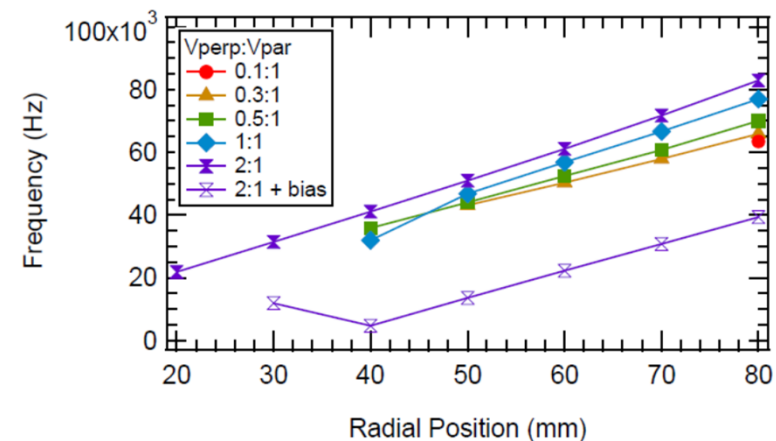
- **vertical bounce** motion

- thermal speed of 5 eV positron is  $1.3 \times 10^6 \text{ m/s}$
- typical bounce length would be  $\sim 0.1 \text{ m} \rightarrow$  order of MHz  $\sim 10 \text{ MHz}$

- **toroidal precession** motion

- simion calculations for various cases
- also a function of  $E_r$ , but anyway

$\rightarrow$  order of 10 kHz



# 分割電極によるダイポール磁場中の「回転電場」の生成

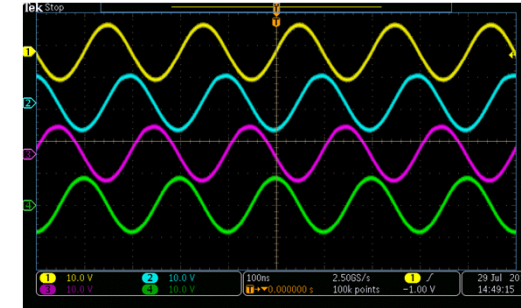
- application of RW electric fields by 4 or 8 segmented electrodes

RW  
electrode  
voltages

```
-- ### Apply electrode voltages; start ###
-- called multiple times per time-step to adjust voltages.
function segment.fast_adjust()

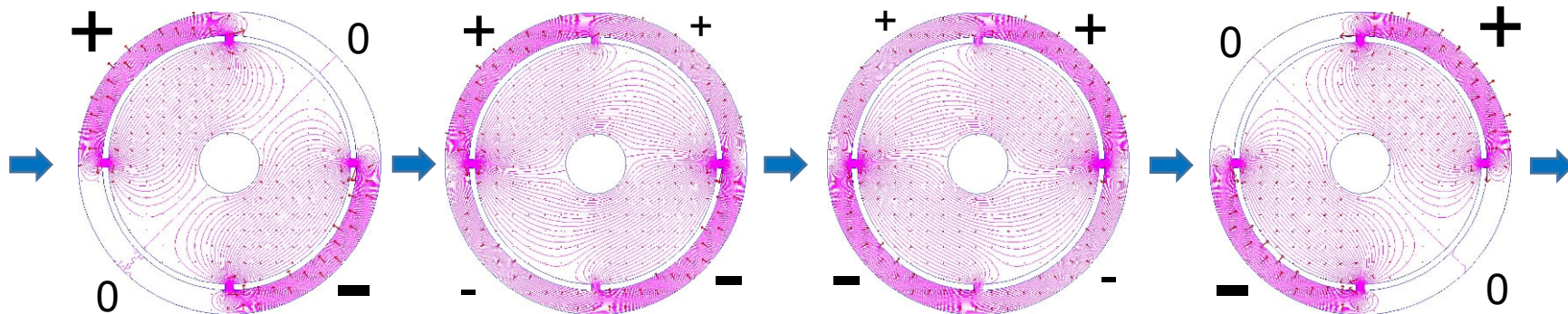
    freq = tonumber(ts12a[ptcl_n1])
    ampe = tonumber(ts13a[ptcl_n1])

    adj_elect02 = tonumber(ts7a[ptcl_n1]) -- magnet rod
    adj_elect03 = tonumber(ts7a[ptcl_n1]) -- magnet
    adj_elect05 = tonumber(ts4a[ptcl_n1]) -- Vexb+
    adj_elect06 = tonumber(ts5a[ptcl_n1]) -- Vexb-
-- outer electrode start
    adj_elect07 = tonumber(ts6_1a[ptcl_n1]) + ampe * sin(2 * math.pi * 1E-6 * freq * ion_time_of_flight + 0.0 * math.pi)
    adj_elect08 = tonumber(ts6_2a[ptcl_n1]) + ampe * sin(2 * math.pi * 1E-6 * freq * ion_time_of_flight + 0.25 * math.pi)
    adj_elect09 = tonumber(ts6_3a[ptcl_n1]) + ampe * sin(2 * math.pi * 1E-6 * freq * ion_time_of_flight + 0.5 * math.pi)
    adj_elect10 = tonumber(ts6_4a[ptcl_n1]) + ampe * sin(2 * math.pi * 1E-6 * freq * ion_time_of_flight + 0.75 * math.pi)
    adj_elect11 = tonumber(ts6_5a[ptcl_n1]) + ampe * sin(2 * math.pi * 1E-6 * freq * ion_time_of_flight + 1.0 * math.pi)
    adj_elect12 = tonumber(ts6_6a[ptcl_n1]) + ampe * sin(2 * math.pi * 1E-6 * freq * ion_time_of_flight + 1.25 * math.pi)
    adj_elect13 = tonumber(ts6_7a[ptcl_n1]) + ampe * sin(2 * math.pi * 1E-6 * freq * ion_time_of_flight + 1.5 * math.pi)
    adj_elect14 = tonumber(ts6_8a[ptcl_n1]) + ampe * sin(2 * math.pi * 1E-6 * freq * ion_time_of_flight + 1.75 * math.pi)
-- outer electrode end
    adj_elect15 = tonumber(ts6_9a[ptcl_n1])
```



sinusoidal voltages with phase differences (these are for 8 electrodes)

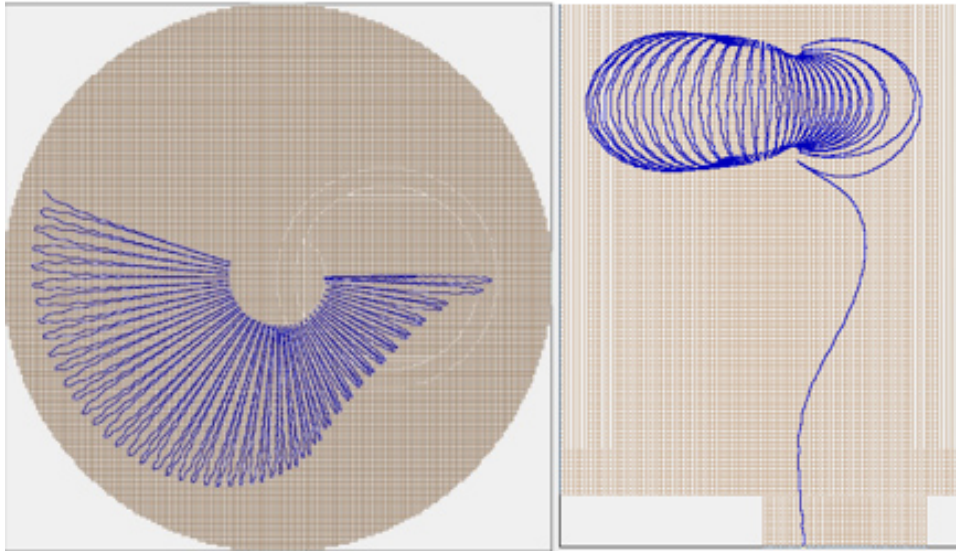
- potential contours in the trapping region (4 electrodes case)



# ジャイロ周波数程度 (~100MHz) の回転電場印加の効果

- high frequency RF of 100 MHz (~ gyromotion frequency)

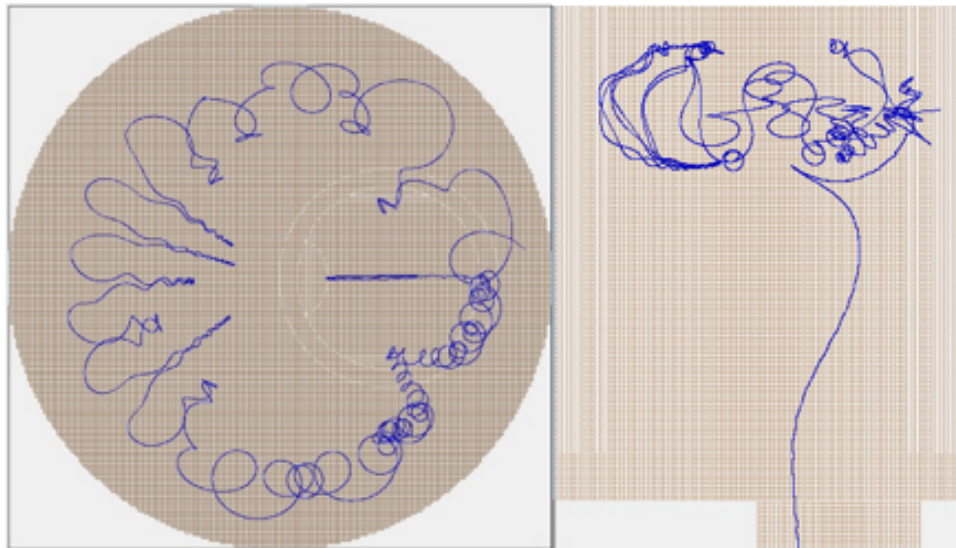
120, 100, 400, 160, -160, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 5, -0.10811487166967, -0.17674489577929, -1  
x,y,z,Vexb,-Vexb,oe1,oe2,oe3,oe4,oe5,oe6,oe7,oe8,oe9,oe10,Vmag,Te,vx,vy,vz



without RW

- injection and 180-deg rotation

$V_{oe}=0V$



with RW

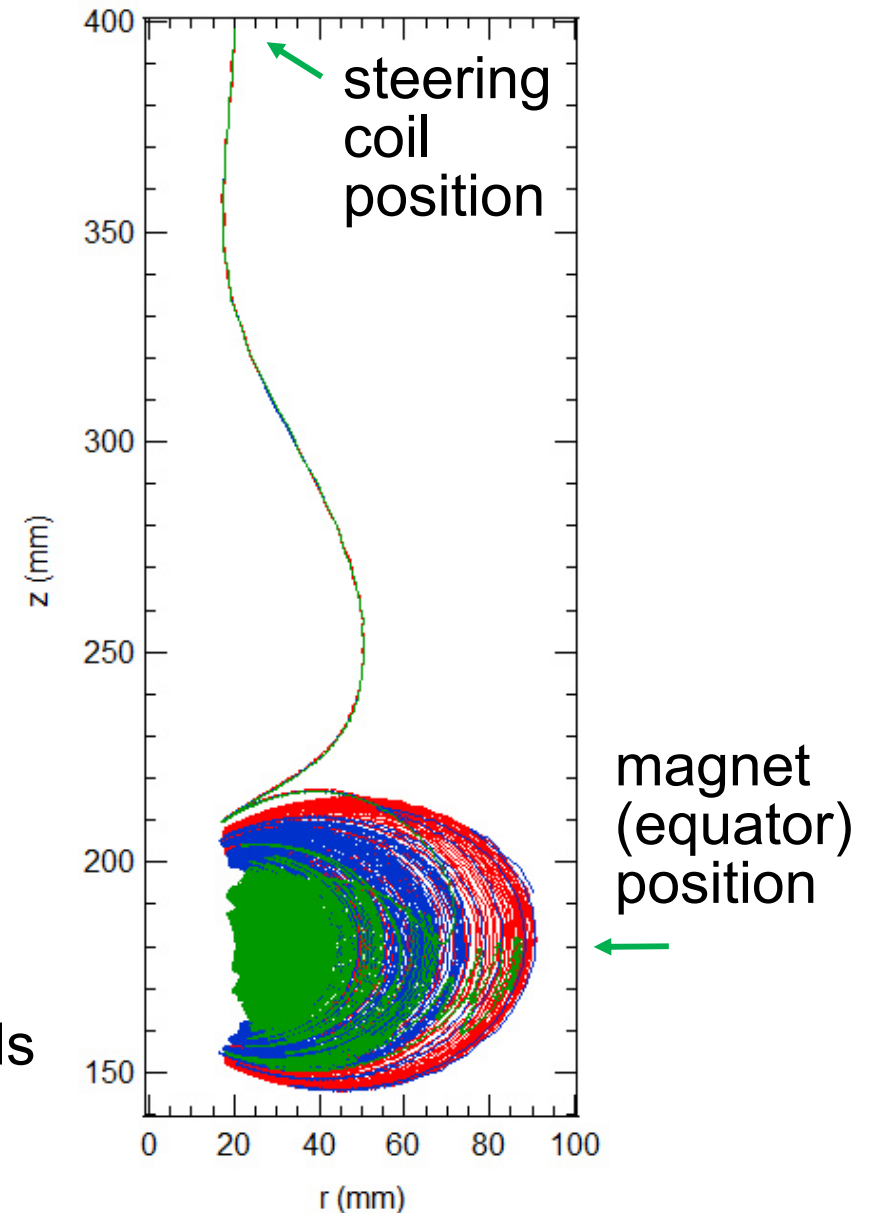
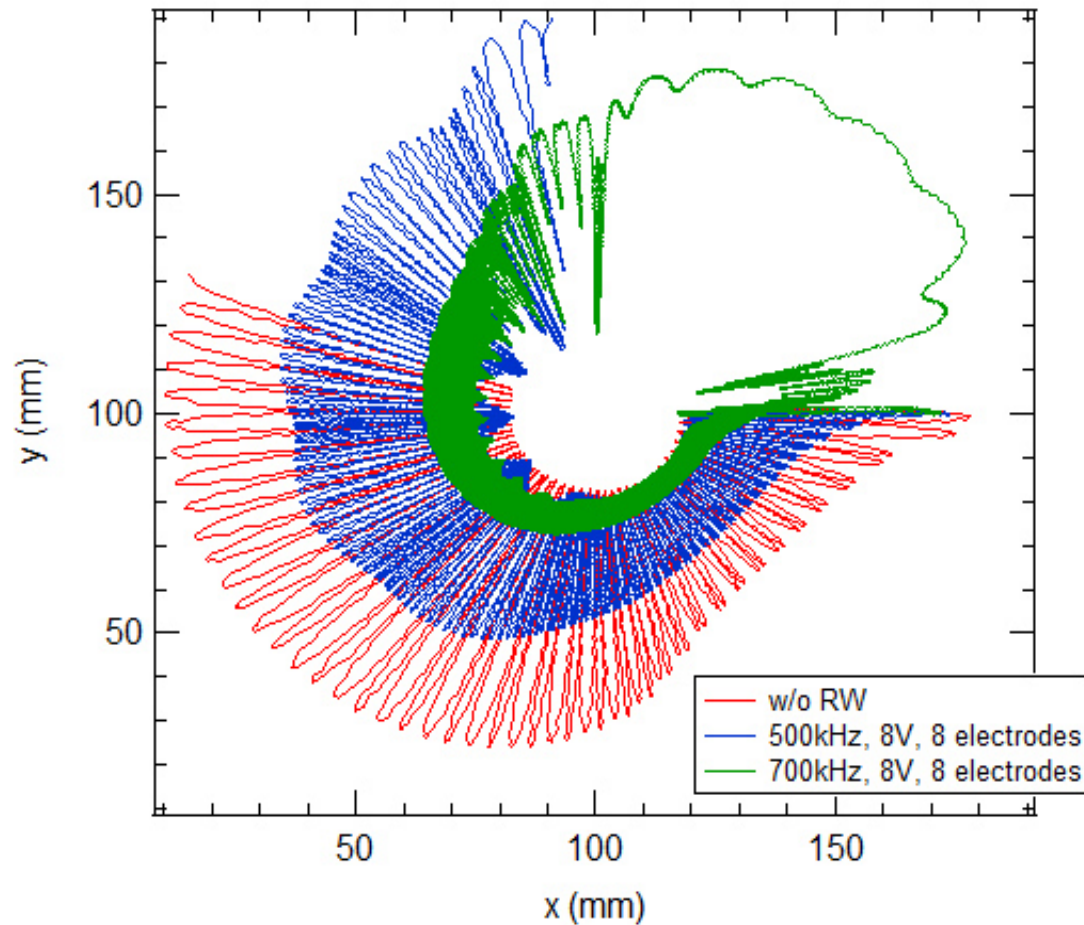
- decoupled with injection
- there are effects, but
- no guiding center transport

100MHz(1e8) 200V rotating E



# バウンス運動以下, 周回周波数 (~10-100kHz) の回転電場印加

- medium frequency range of ~1MHz (~ vertical bounce frequency)



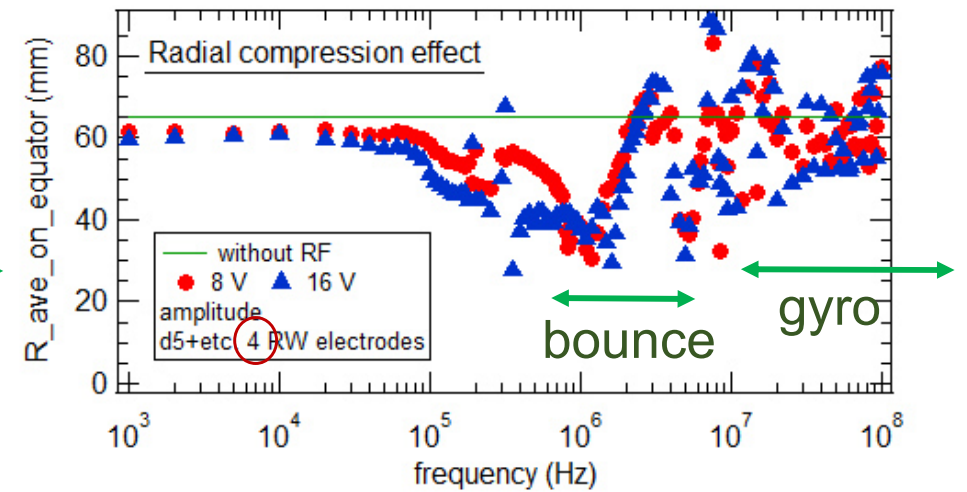
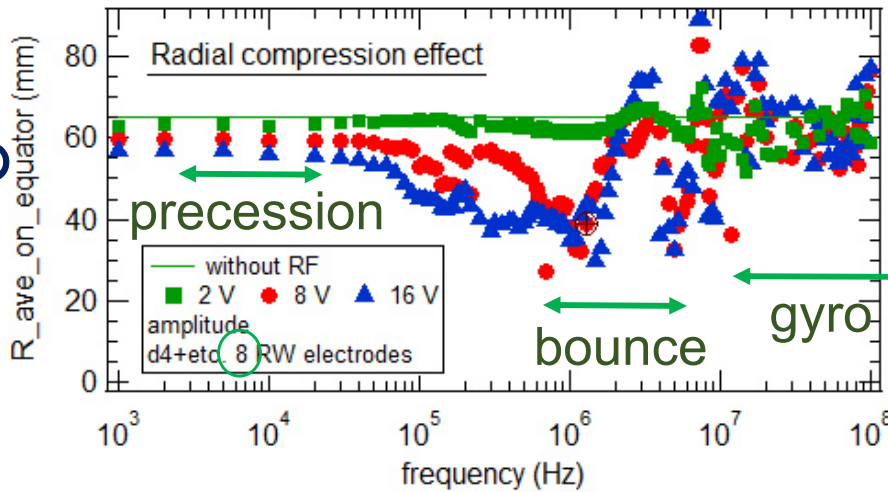
- 5eV positron orbits with or without RW fields
- inward transport with certain conditions
- can be combined with ExB drift injection scheme

# 各周波数の回転電場に対して、陽電子の圧縮と飛行時間の計算

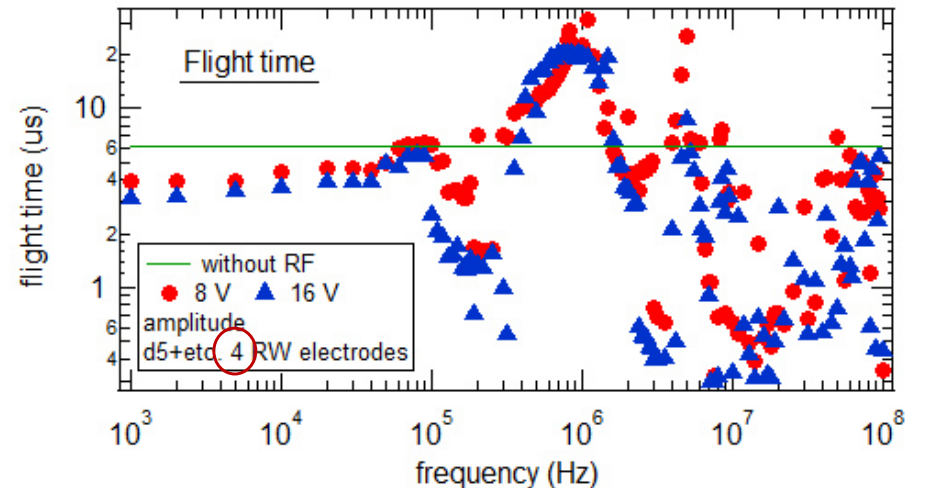
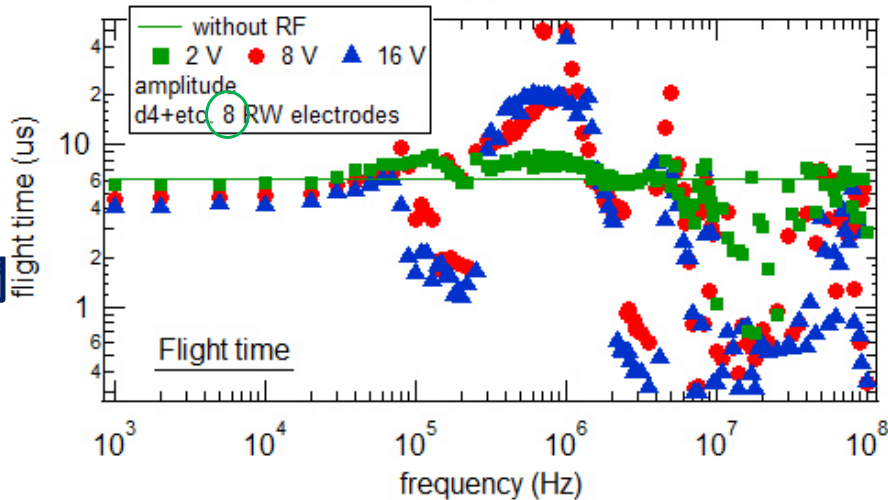
## 8分割電極

## 4分割電極

一周後の  
径方向  
位置

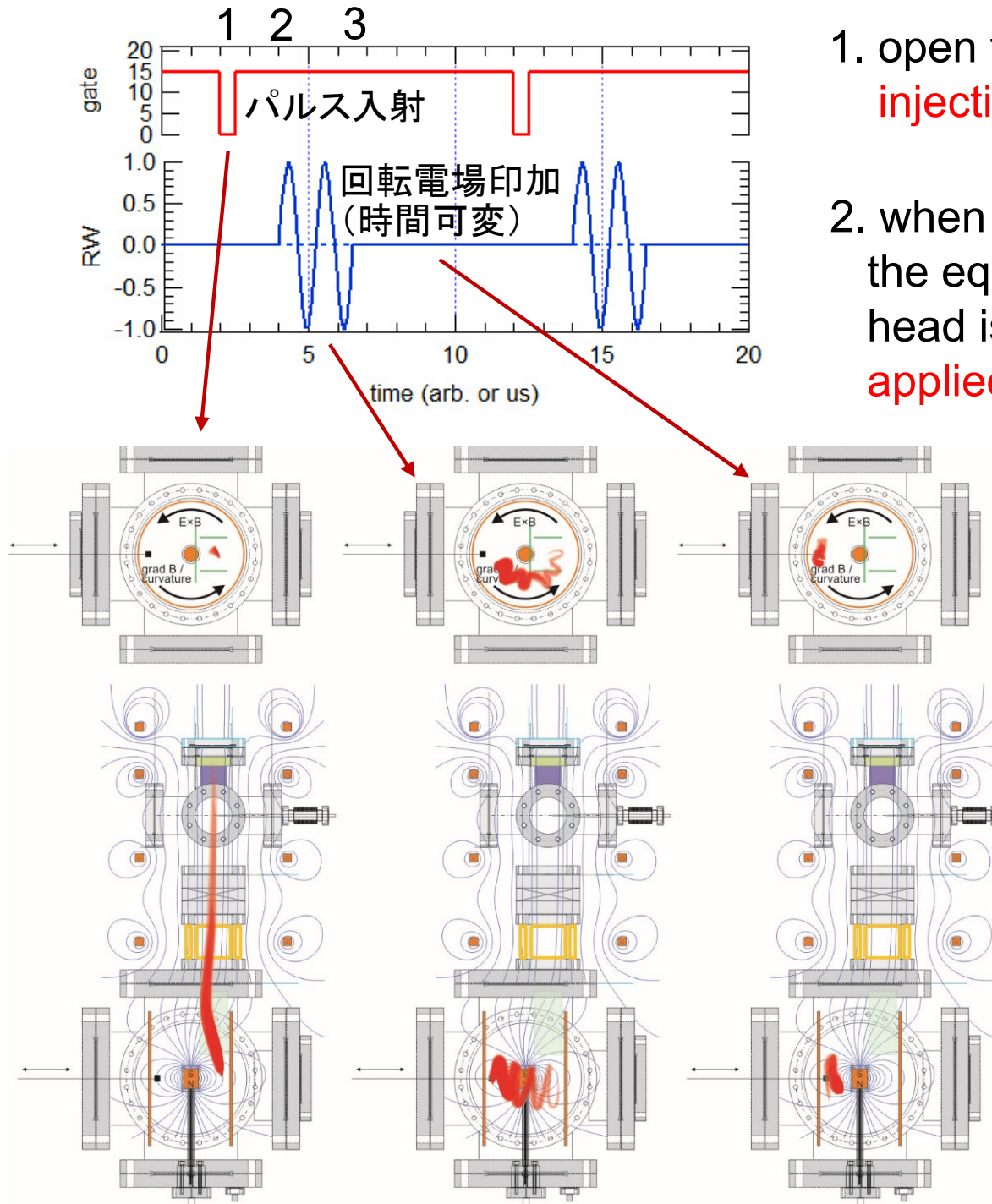


消滅まで  
の  
飛行時間



- compression effects at broad frequencies between  $\sim 100\text{kHz}$  and  $\sim 2\text{MHz}$
- small differences between 8 and 4 RW electrode cases
- correlation with flight times (inward transport  $\rightarrow$  long flight time)
- needs statistical treatment for orbit calculations

# 回転電場の効果を調べる陽電子実験の手順

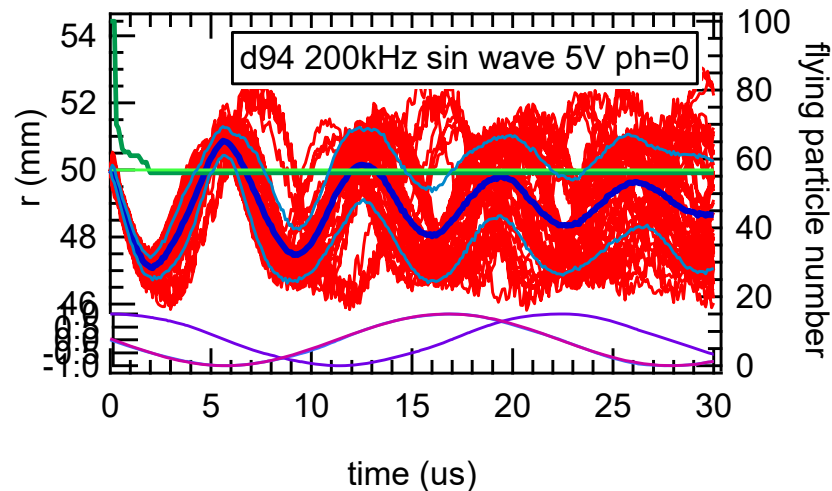


1. open the gate (deflector or aperture) injecting short pulse of e+ beam
2. when the tail end of the beam reaches the equator ("injected"), (and the beam head is in the trapping region,) RF is applied (or not applied, for comparison)
3. sinusoidal waves stop when the tail end reaches the target (or before), and go back to 0V.

Continue measurements of counts at the target with various r, with and without applying RF waves

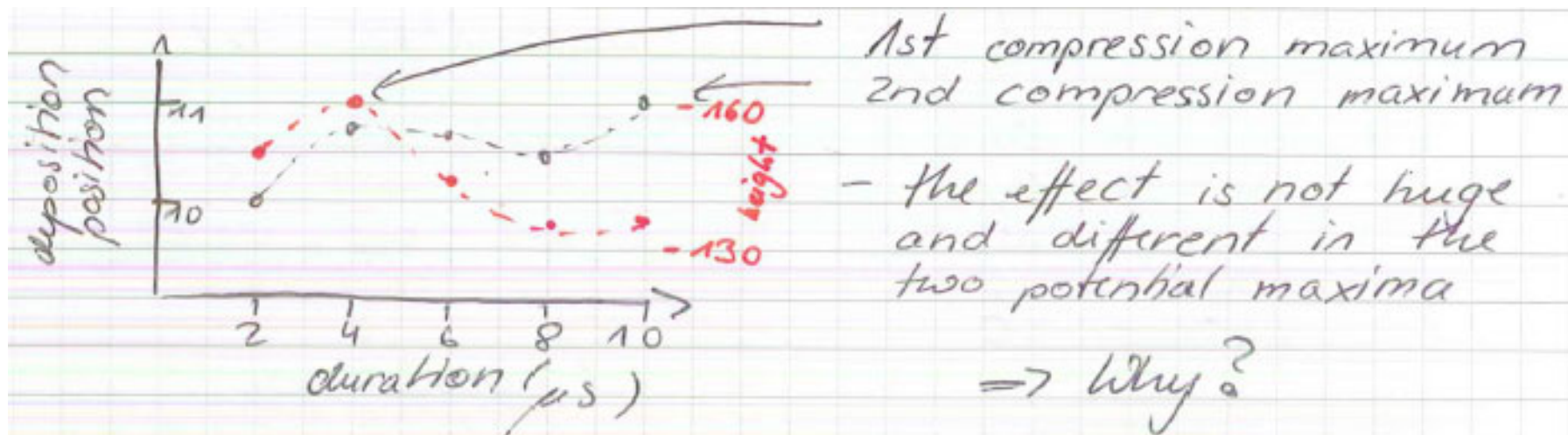
ターゲットプローブ  
を使用して、径方向  
の軌道分布を計測

# 回転電場の印加時間に応じて、軌道計算から予測される 径方向位置の振動が観測された

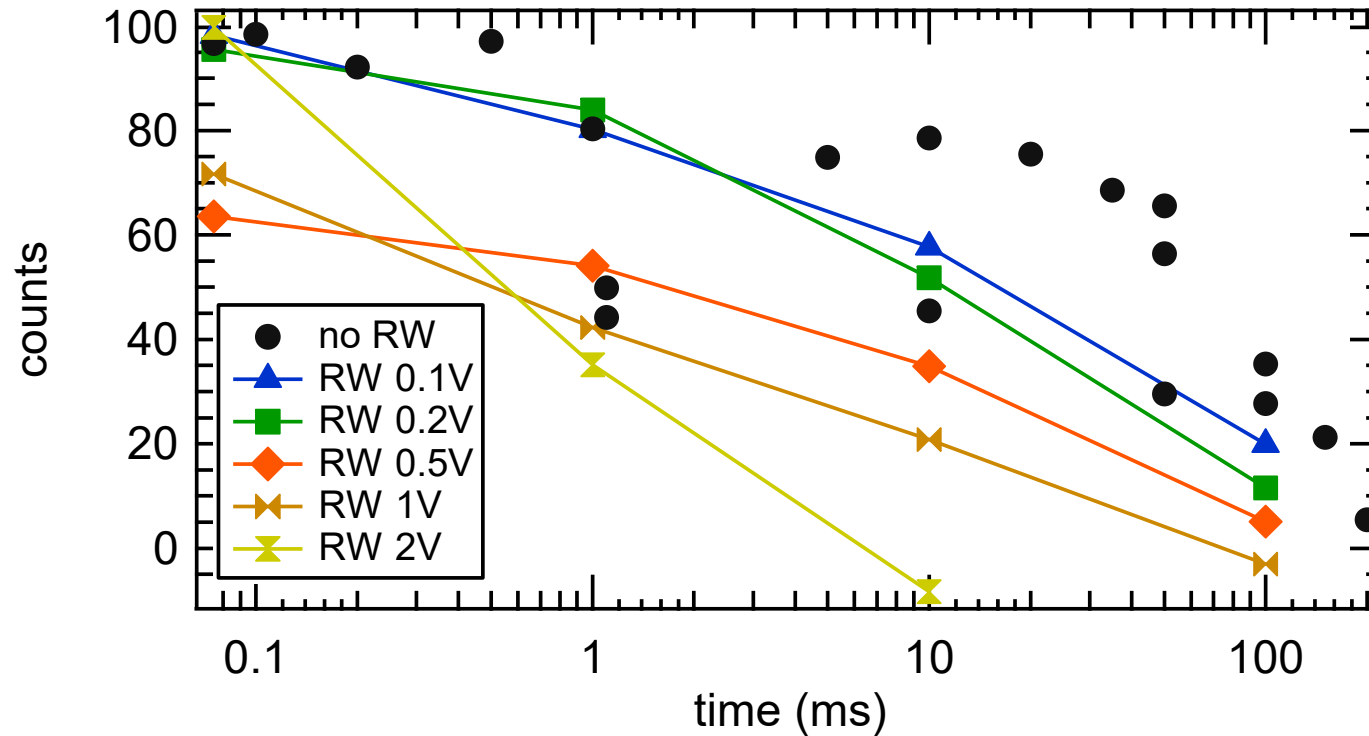


- further comparison with orbit analysis is needed

"initial phase" of this calculation is almost opposite to the experimental condition!



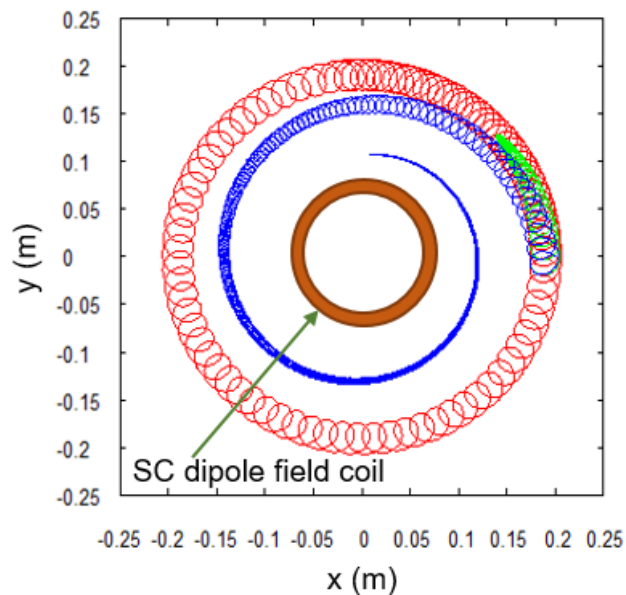
# 軌道を径方向に圧縮した後の陽電子の寿命は、むしろ悪化する



- the beam was somehow unstable
- application of random fluctuating electric field shortened the trapping time of positrons
- re-planning is needed for studies on random fluctuations

## まとめと今後の課題

- ダイポール磁場における電子・陽電子プラズマ実現の重要なステップとして、トロイダル非中性プラズマの径方向圧縮と高密度化を目指している
- 単一粒子軌道に着目した解析を行い、バウンス周波数～トロイダル周回の周波数付近に「回転電場」を加えて、軌道運動との結合が見られた
- 陽電子ビーム実験では、入射後の比較的短い期間を対象とした計測で、回転電場による径方向輸送(振動)を確認した
- 圧縮による閉じ込め時間の延長は、現時点では実現していない



- より長時間の挙動として、閉じ込め中に秒以上のオーダーで印加するのが本来の回転電場
- 中性粒子との衝突の効果を含む圧縮(左図)の軌道解析, 実験
- 直線型で見られる, 異なる周期運動の結合による圧縮の機構が存在するか