

# ダイポール磁場配位における回転電場による陽電子の径方向軌道操作

齋藤晴彦<sup>AB</sup>, 檜垣浩之<sup>C</sup>, 満汐孝治<sup>D</sup>, 大島永康<sup>D</sup>, 柳長門<sup>B</sup>, 佐藤直木<sup>B</sup>  
東大新領域<sup>A</sup>, 核融合研<sup>B</sup>, 広島大先進理工<sup>C</sup>, 産総研<sup>D</sup>

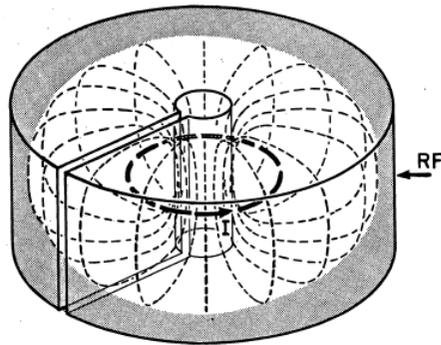
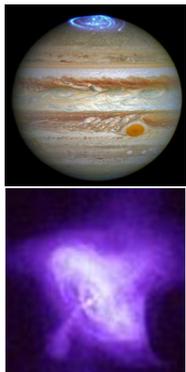
1. はじめに: ダイポール磁場におけるプラズマ研究の進展
2. 磁場閉じ込めによる電子・陽電子プラズマ計画の目標と現状
3. 陽電子群の径方向圧縮の必要性和回転電場による先行研究(直線型配位)
4. ダイポール磁場中の荷電粒子群への「回転電場」による径方向操作
5. まとめと今後の課題

# 1. ダイポール磁場によるプラズマ研究の進展： 先進核融合からトロイダル非中性プラズマまで

1987 Hasegawa, Comm Plasma Phys. Contr. Fusion

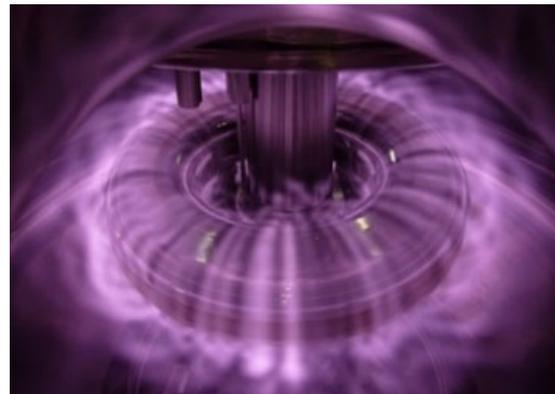
## 磁気浮上超伝導コイルにより，惑星磁気圏と類似のプラズマ環境を実現

ひさき衛星(JAXA)webより



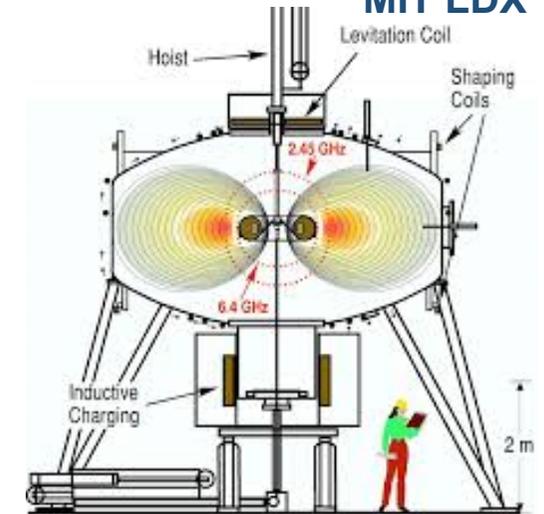
高速流を持つ高βプラズマ

"Dipole Fusion" concept 東大RT-1



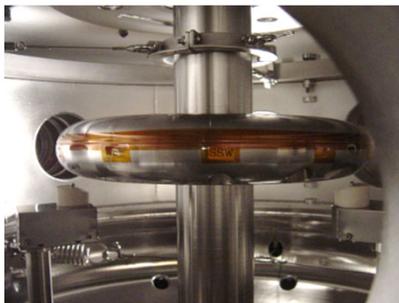
内向き拡散・加熱: D-D or D-<sup>3</sup>He  
Local β ~100% (3秒以上持続)

MIT LDX



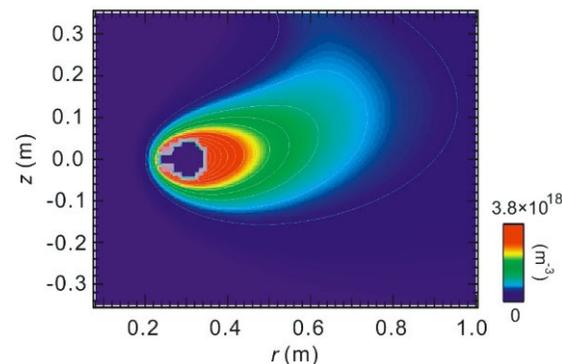
2013 Yoshida+ PPCF  
2010 Boxer+ Nature Phys.

● 超伝導コイル磁気浮上



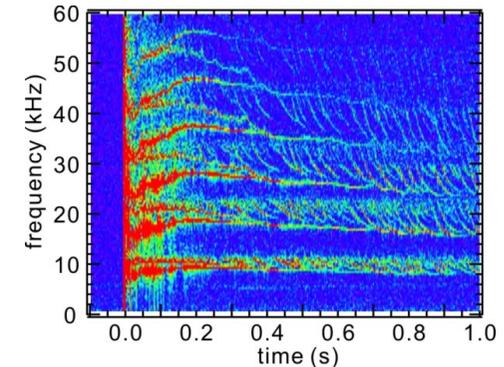
2013 Ogawa, Mito, Yanagi+ 低温工学  
2006 Yoshida+ Plasma Fusion Res.

● 先進核融合/磁気圏現象



2022 Kenmochi, Nishiura+ Nucl. Fusion

● トロイダル非中性プラズマ

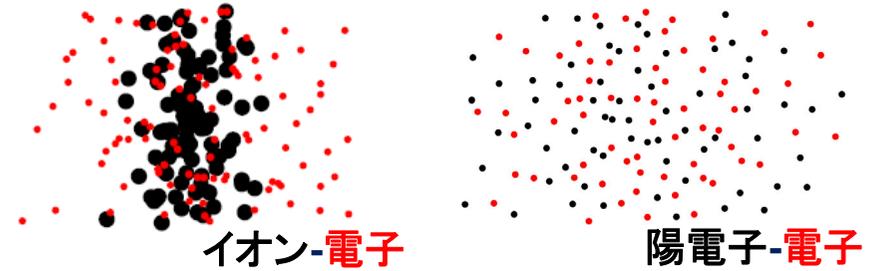


2010 Yoshida+ Phys. Rev. Lett.  
e-, 原理的にe+も可能

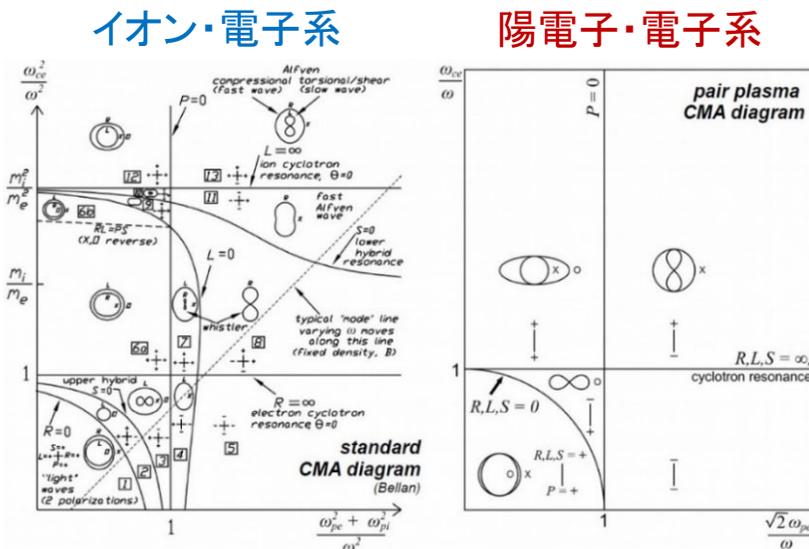
## 2. 電子・陽電子系のペアプラズマの実現と物性解明について

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)

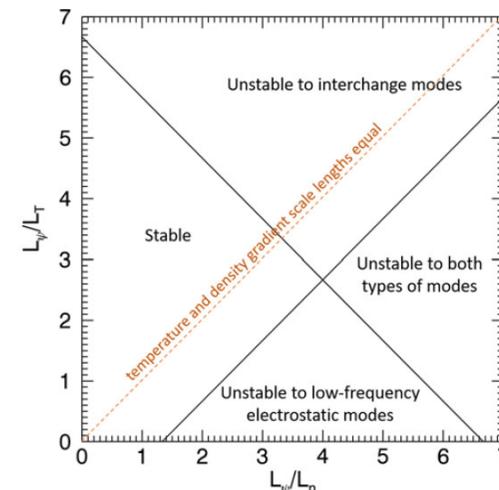


- 電子・陽電子群はパルサー磁気圏等の **宇宙環境** に広く存在  
 ガンマ線バーストに関わる無衝突衝撃波とWeibel不安定性, 構造形成
- 実験的にペアプラズマ生成は **陽電子の大量蓄積** の実現を経て達成  
 ポジトロニウム (電子と陽電子の束縛系) の物理, 反水素実験など



縮退した分散関係 (波動特性)

1978 Tsytovich & Wharton, Comm. Plasma Phys. Cntr. Fusion\*  
 2014 Helander, Phys. Rev. Lett.\*\*; 2017 Stenson, J. Plasma Phys.



運動論による強靱な安定性の予言

## ● 電子・陽電子系のペアプラズマ計画



### パルス陽電子入射

$10^7 \text{ e+}/\text{s}, 10\text{eV}$

リニアックベース  
パルス陽電子ビーム

(既存)

バッファガス+超伝導トラップ

### 5Tトラップ製作

$10^{10-11} \text{ e+}$

$\sim 10\mu\text{s}$ で  
入射

### 冷却試験・装置製作

$>10^{10} \text{ e+}$

$10^{11-12} \text{ m}^{-3}$

反物質ペア  
プラズマ生成  
物性解明

磁気浮上ダイポール

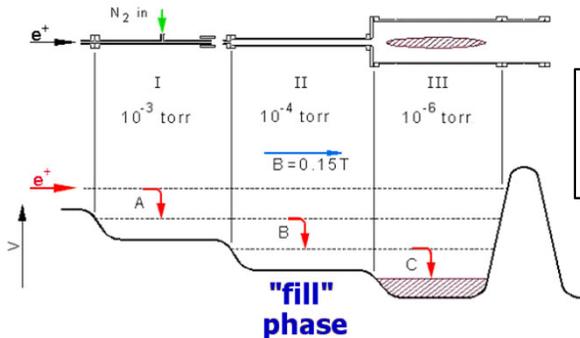
陽電子の前段蓄積,  
高速パルス引き出し

産総研・リニアックベース陽電子源  
2020 Higaki Michichio+ Appl. Phys. Exp.

低エネルギー陽電子と電子の磁場閉じ込めによる手法を提案し、開発研究を進めている

## ● Trap and extraction of many e+s

### Separation of injection and trapping phases



SC trap enhance  
e+ number

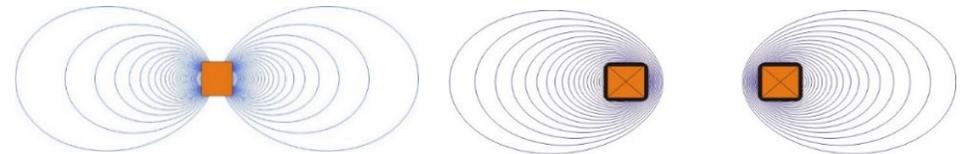
2020  
Higaki Michichio+  
Appl. Phys. Exp.

## ● Pair-plasma in artificial magnetosphere

### Simultaneous trapping of e+ and e-

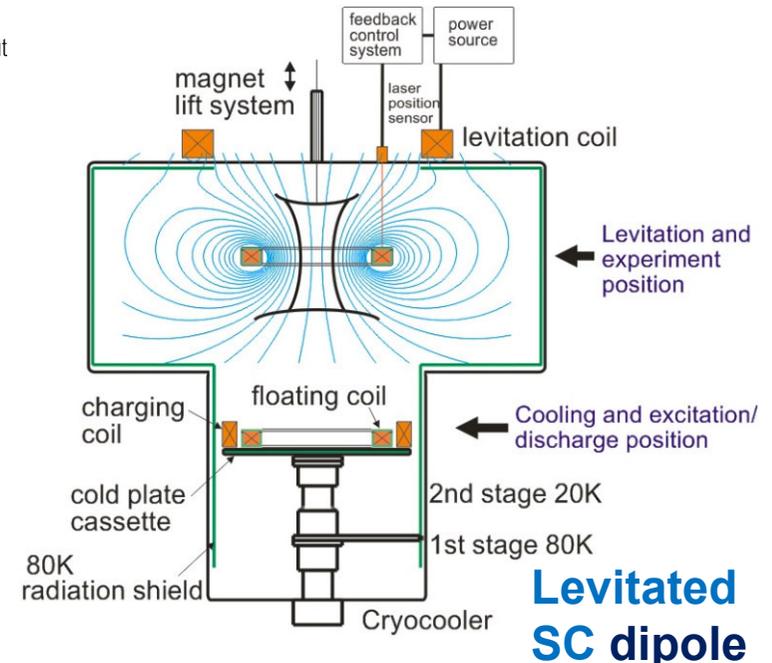
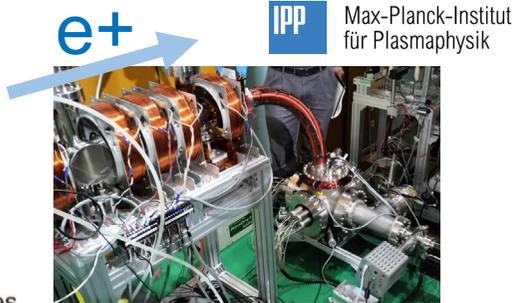
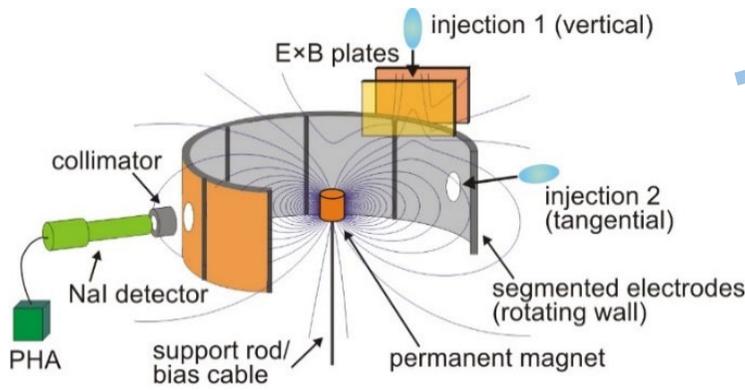
Dipole development

Fast pulse injection



● Prototype dipole with  
permanent magnet

● Artificial magneto-  
sphere with SC dipole

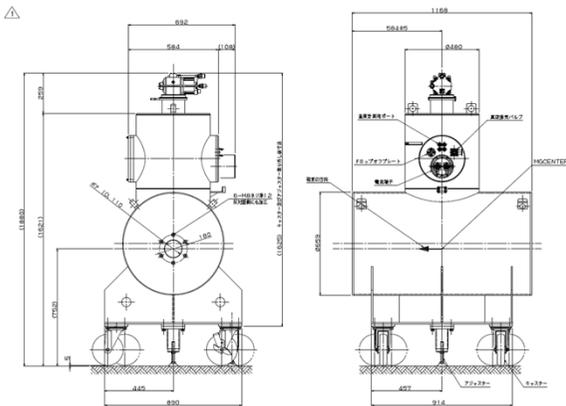


## Prototype dipole with permanent magnet

- drift injection (100% efficiency)
- positron trapping (~1s): 1000 e+ so far
- **experiment with buffer gas trap: 1e5 e+ numerical orbit analysis of their dynamics**

- simultaneous trapping of e+ and e-
- SC coils and levitation system
- **new injection scheme is needed**

**Levitated SC dipole**

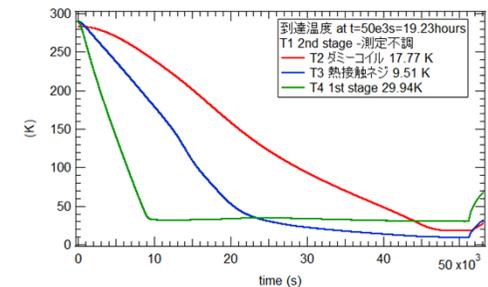
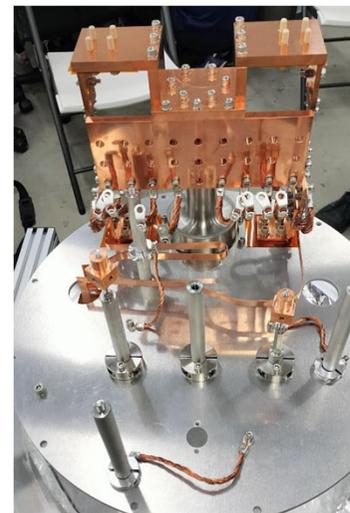


H. Higaki

- **60cm homogeneous B region**



Linear e+ accumulator with 5T magnet



- cooling without He gas
- design of compact levitated dipole

# 陽電子群の高密度化がプラズマ状態実現の鍵となる

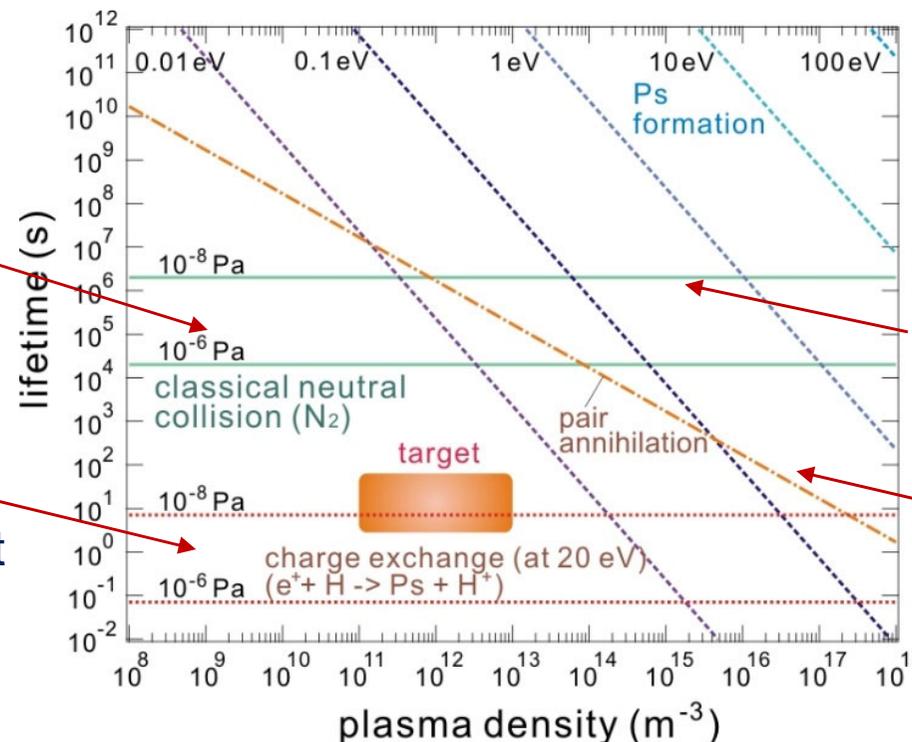
● target:  $n_{e^+/e^-} > \sim 10^{11-12} \text{ m}^{-3}$ ,  $T_e \sim 1 \text{ eV}$

Debye length  $\lambda_D \sim 2 \text{ cm} < \text{exp. size}$ ,  
collective phenomena as plasmas

Slow  $e^+$  source intensity ( $e^+/s$ ) is Na-22:  $\sim 10^6$ , Linac:  $\sim 10^7$ , Reactor:  $\sim 10^8$

Classical collisions  
with neutrals can be  
negligible at  
UHV environment

Charge exchange with  
hydrogen atoms may set  
the lifetime.  
The cross section has  
a peak around 20eV



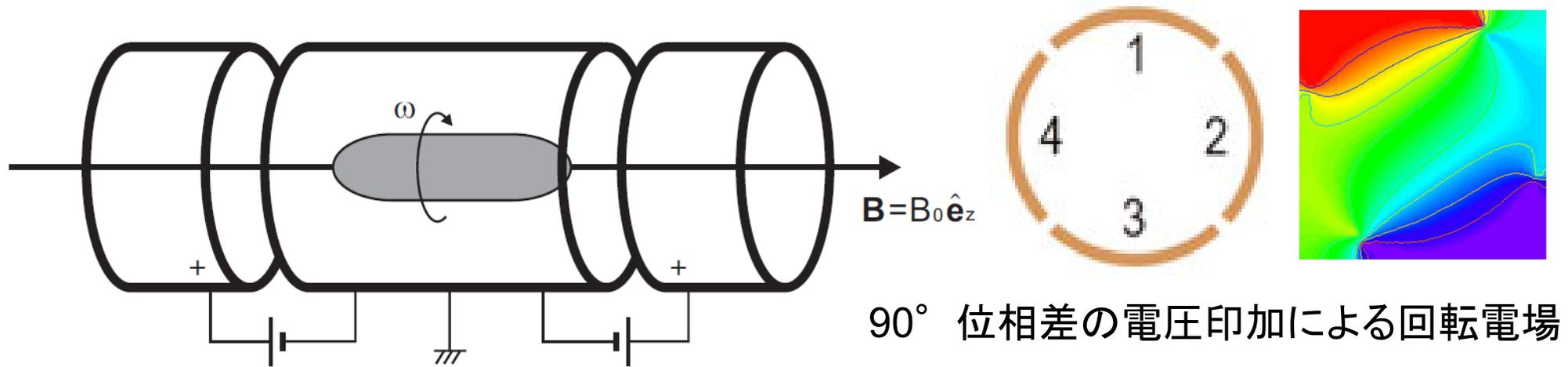
Positronium (Ps) formation  
Effective only in extremely  
low temperature (<10meV)  
conditions

Pair-annihilation  
Negligible at low density  
operation region

Life time of positrons and electron-positrons set by various processes

対消滅やポジトロニウム生成(荷電交換反応含む)などの各種反応に対して、期待される閉じ込め時間は十分に長い。一方で、必要な数密度は高いハードル。

### 3. 直線型配位における荷電粒子の保存量と回転電場の効果



直線型配位 Penning-Malmberg trap

$$P_\theta = \sum (mv_\theta + qA_\theta)r \sim \frac{qB}{2} \sum r^2$$

- 軸方向はエネルギー保存(静電場),
- 径方向は正準角運動量の保存 による閉じ込めが実現される

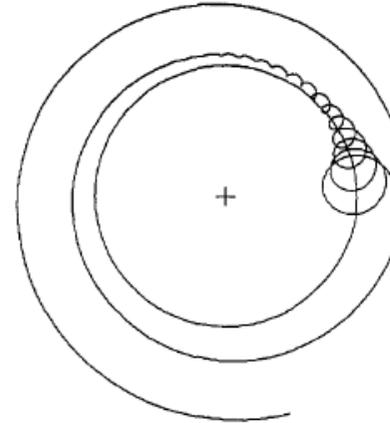
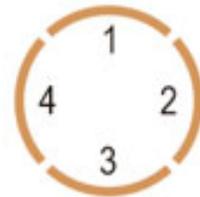
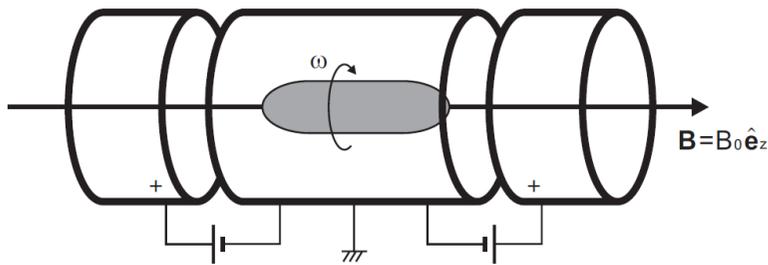
多くの非中性プラズマ, 原子分子実験に有用な性質

- 軸対称かつ衝突等の無い理想的な条件では, プラズマは磁力線を横切り輸送されることはない(単一粒子であれば周回半径が一定)
- 実際の系では, 軸対称性や残存粒子との衝突により正準角運動量は保存せず, 粒子が徐々に失われる -> 回転電場による圧縮と高密度化

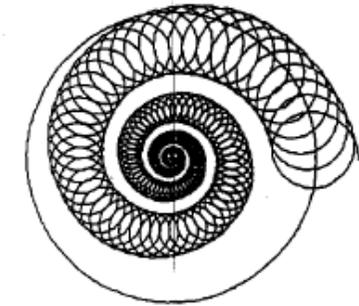
# 直線型配位における非中性プラズマ+回転電場の先行研究

- **単一粒子レベル**: “sideband technique”では, 回転電場によるジャイロ運動とマグネトロン運動(周回運動)等の結合が可能 (両者の周波数の和)

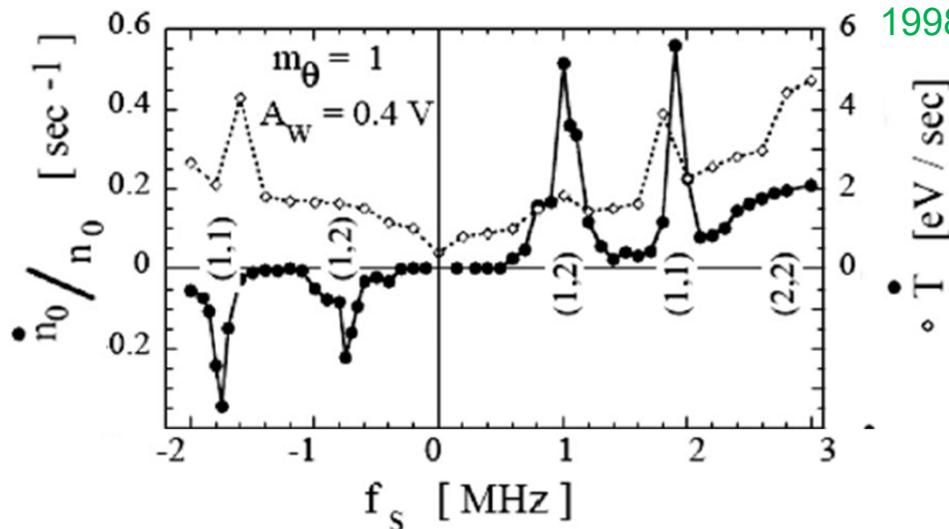
ジャイロ運動とマグネトロン運動の交換による径方向操作



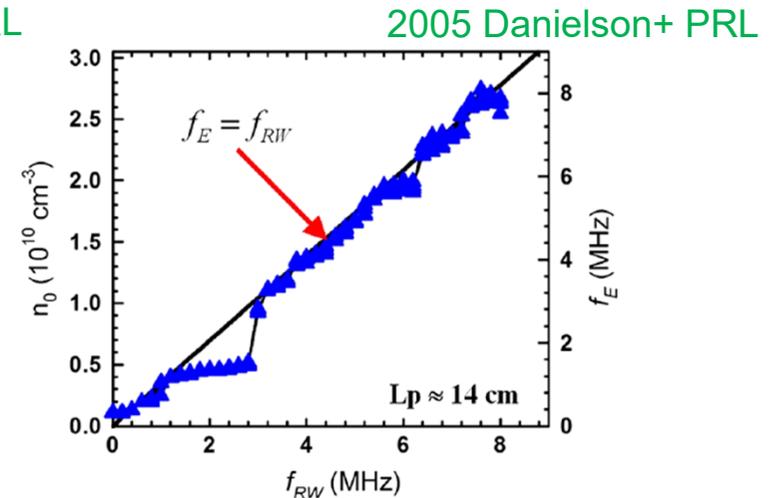
1991 Savard+ J. Phys. Lett. A



- **集団現象**として: プラズマのモードとの結合や, "strong drive" modeが存在し, トルクを与えて径方向の圧縮が可能: 加熱は中性粒子との衝突で冷却



1998 Anderegg+ PRL

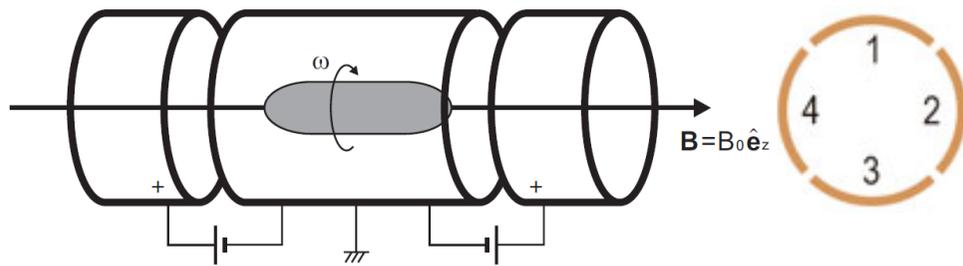


2005 Danielson+ PRL

直線型配位では, 回転電場による径方向操作や高密度化が実現されている

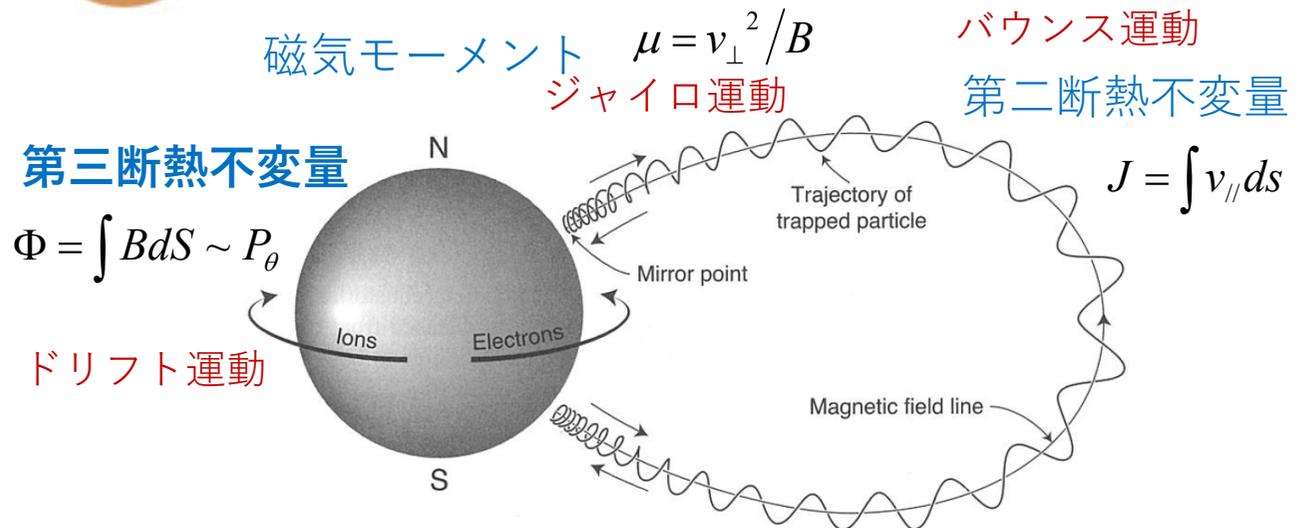
# 4. トロイダル系のダイポールで変動電場による軌道圧縮は可能か？

- プラズマ状態の実現のために高密度化が必要
- 密度勾配に対する安定性を研究する上で制御性の向上は重要
- 直線型とは大きく異なるジオメトリ, 極めて非一様な磁場
- 一方で, 軸対称性は正準角運動量を保存, 粒子を磁気面上に拘束



一様磁場の直線型配位

$$P_\theta = \sum (mv_\theta + qA_\theta)r \sim \Psi$$

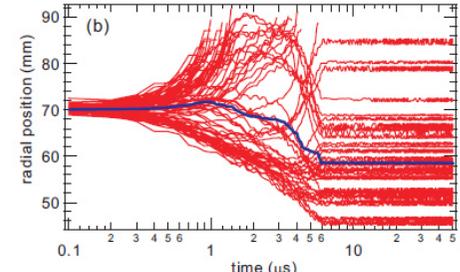
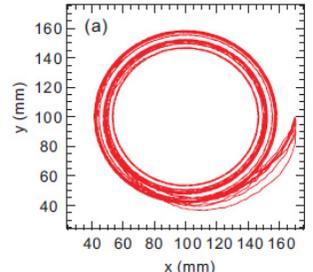
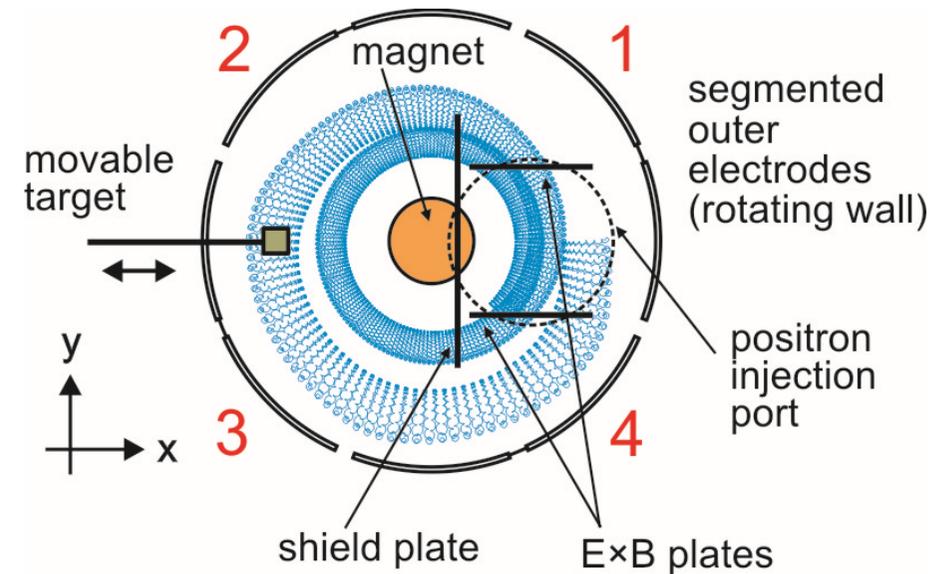
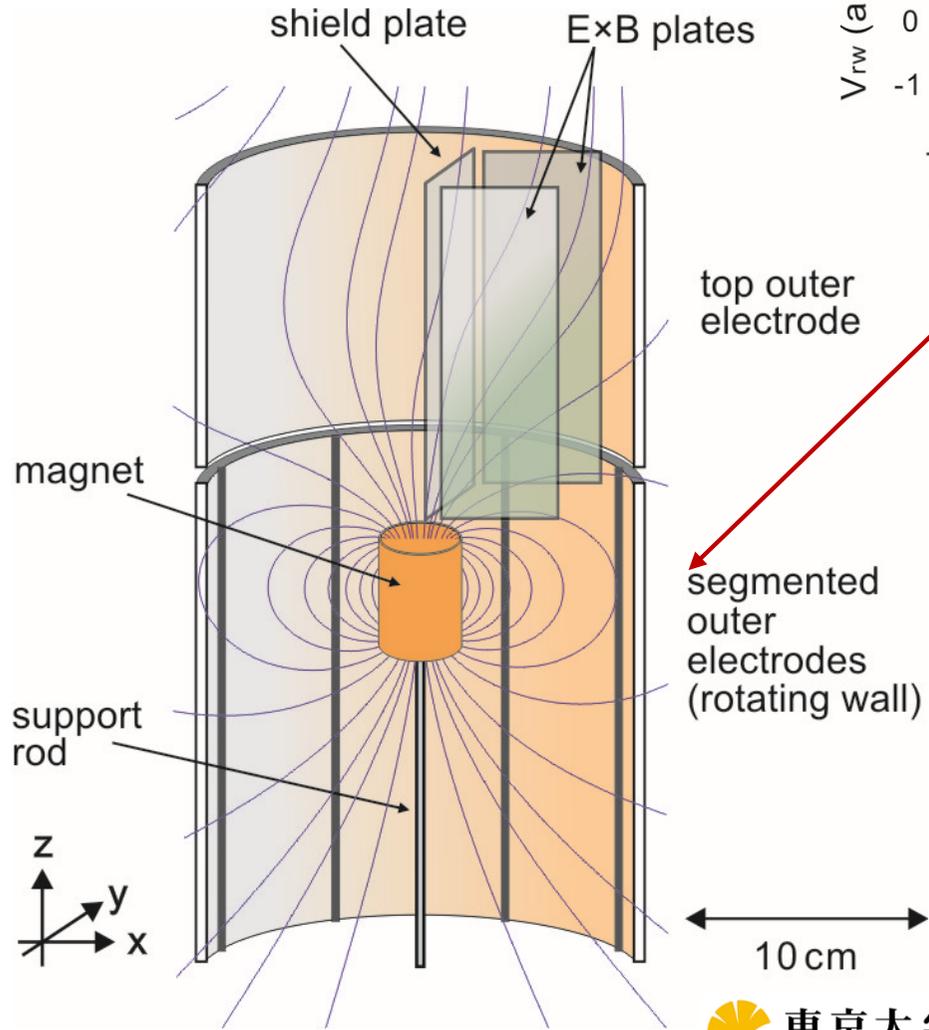
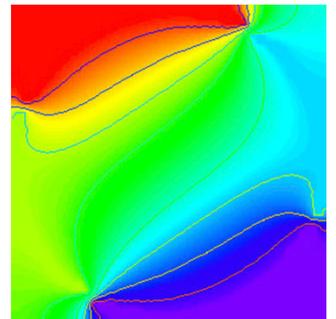
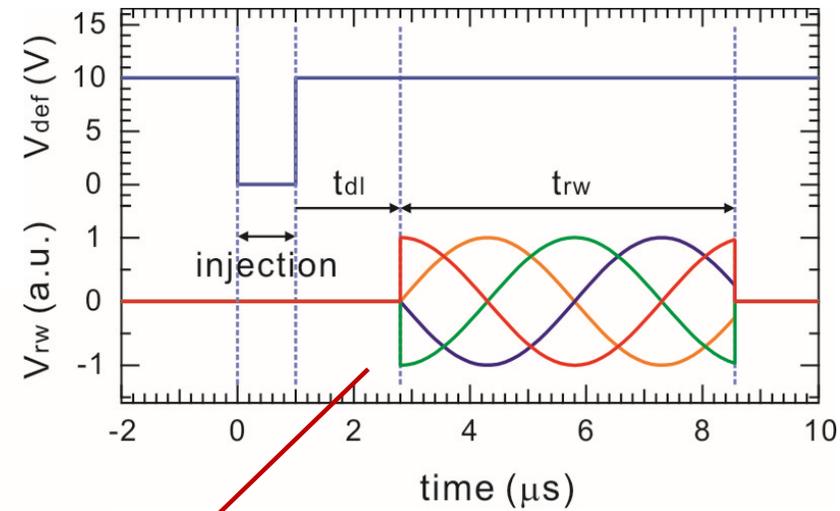


- Cross-field の方向に変動電場を与える類推から, トロイダル方向に分割した電極を導入して「回転電場」を与える

ダイポール磁場配位

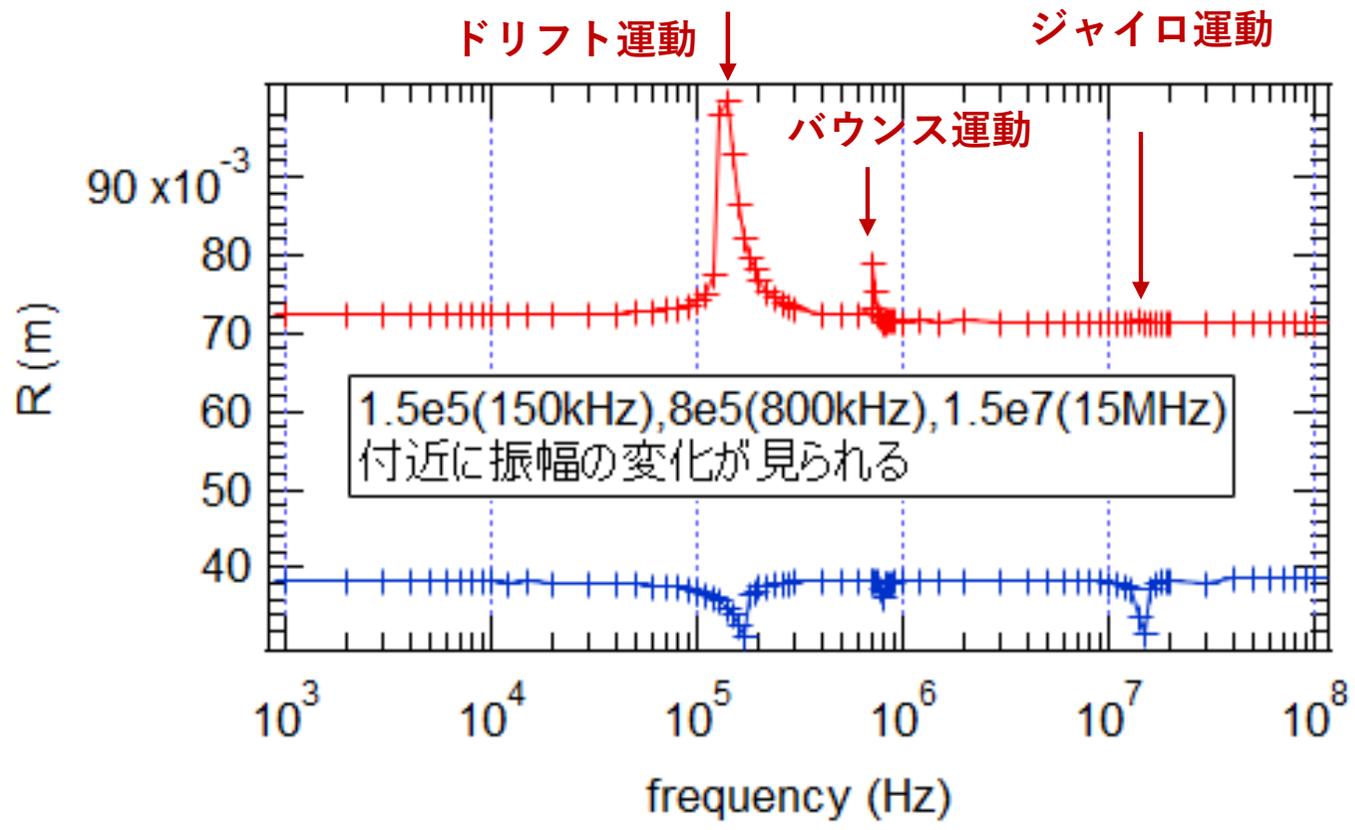
# トロイダル方向に四分割した電極による「回転電場」と粒子軌道

- マグネトロン運動を周回運動に見立てて、電場は径方向運動と結合する



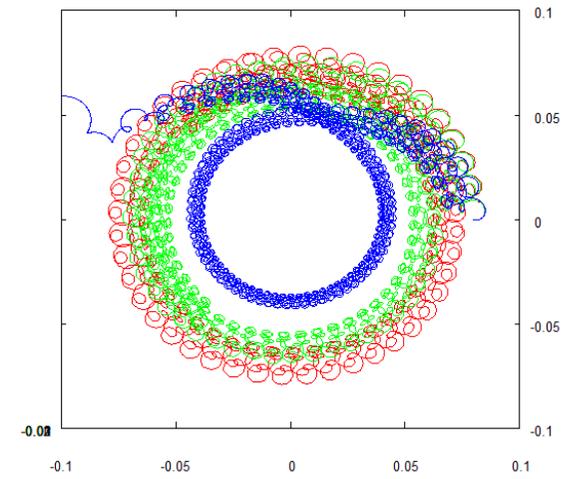
永久磁石ダイポール装置

# 回転電場は、トロイダル周回運動と強い相互作用を持つが、異なる周期運動間に強い結合は見られない

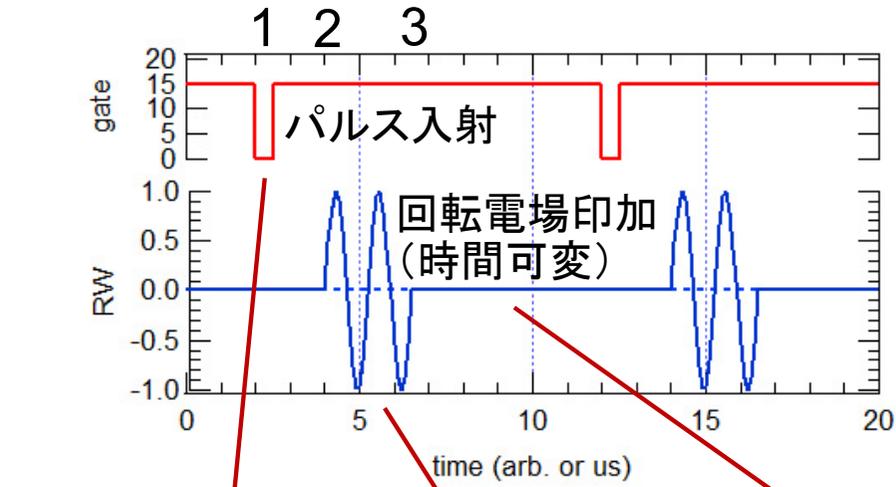


"orb0001bbr.txt" — red  
 "orb0003bbr.txt" — green  
 "orb0004bbr.txt" — blue

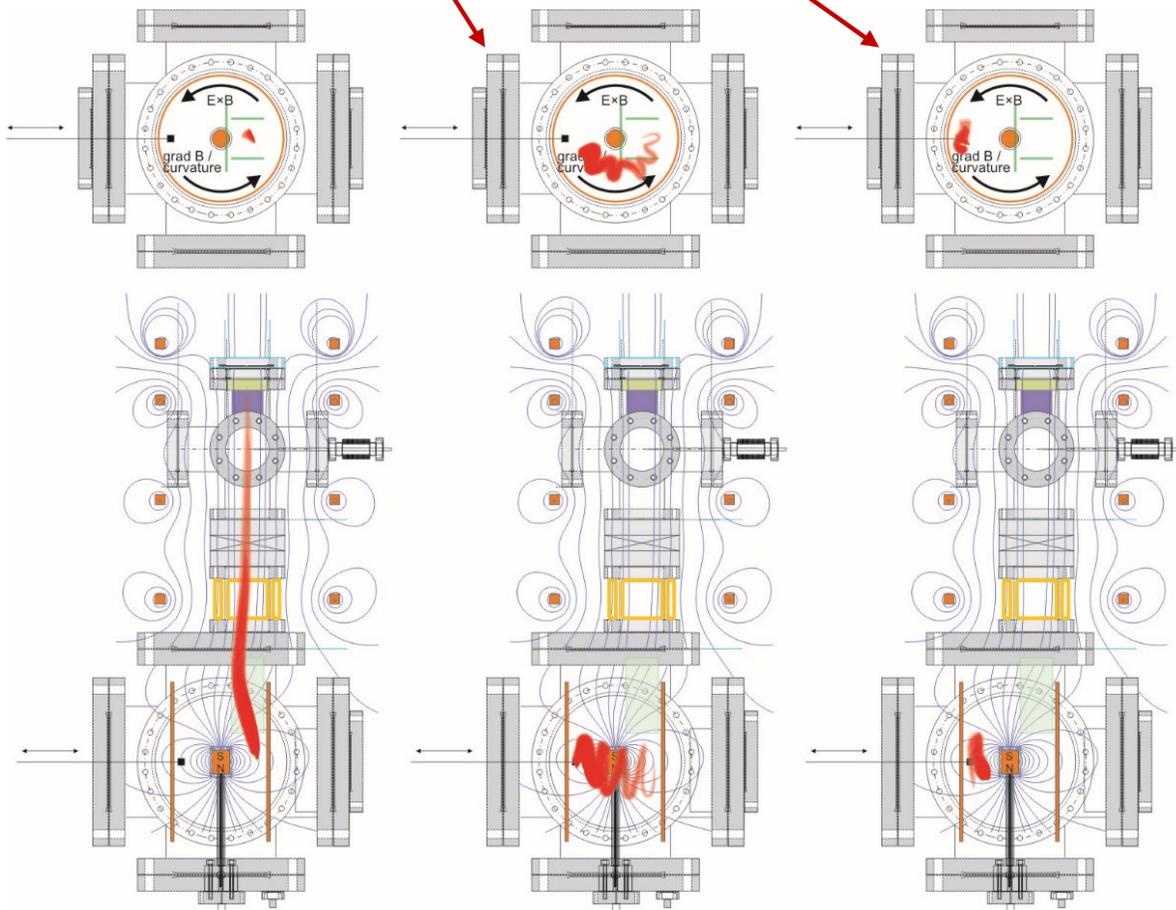
- 周期運動付近の周波数で軌道に影響
- トロイダル方向のドリフト周波数に近い回転電場により、径方向位置に変化 ->
- 異なる周期運動の結合は見られない



# 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.

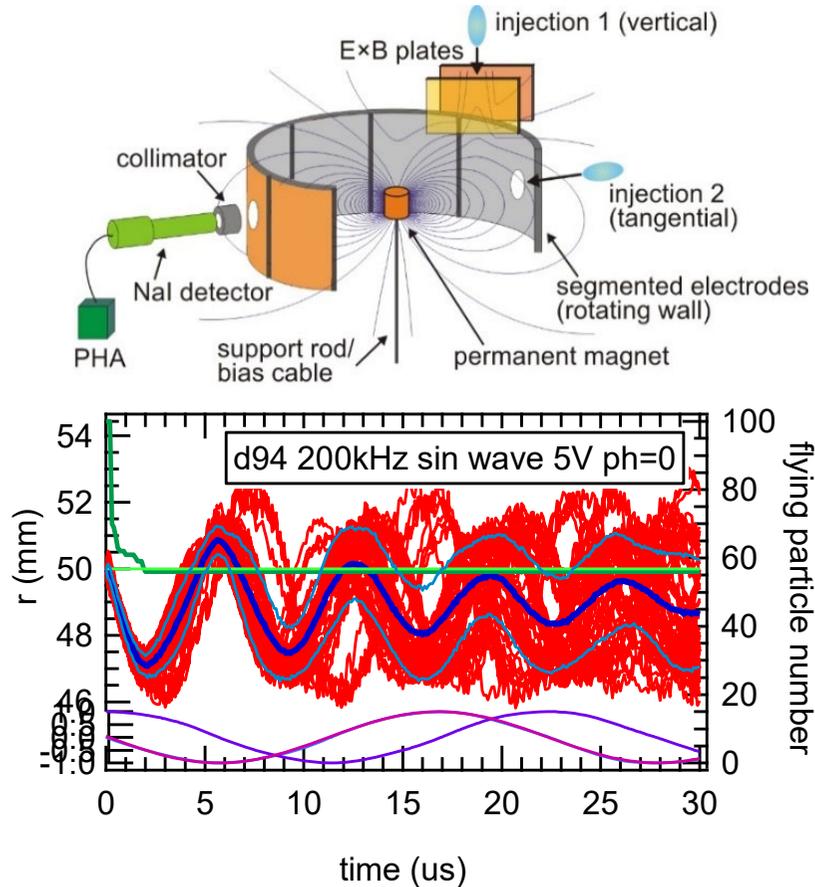


3. **sinusoidal waves stop** when the tail end reaches the target (or before), and go back to 0V.

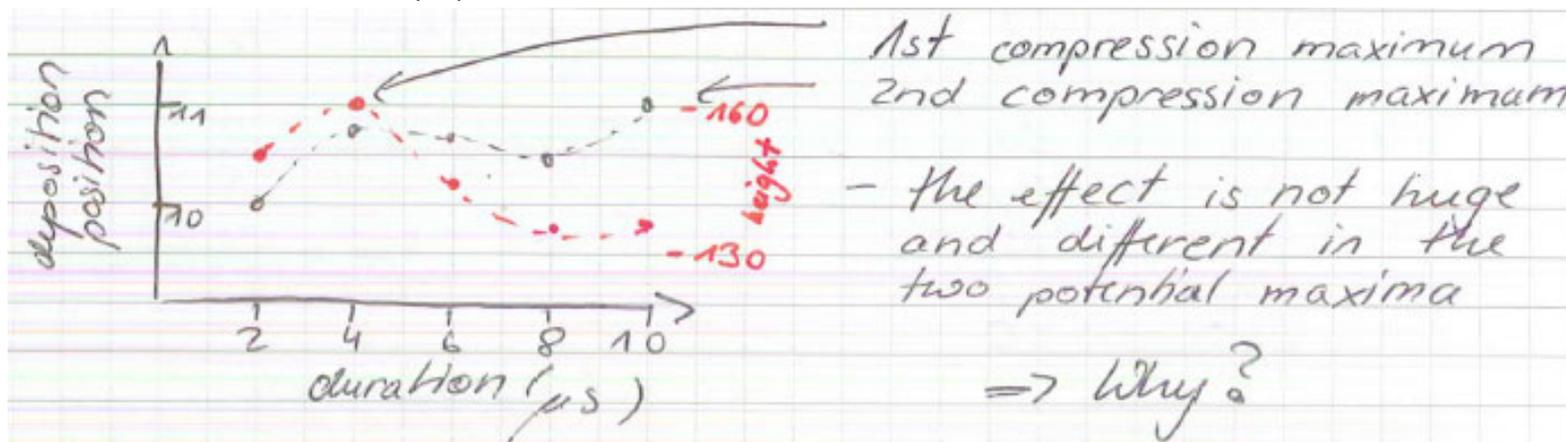
Continue measurements of counts at the target with various r, with and without applying RF waves

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

# ダイポール版の回転電場による陽電子軌道の径方向制御は、計算結果とNEPOMUCの陽電子実験の間で良い一致を得た

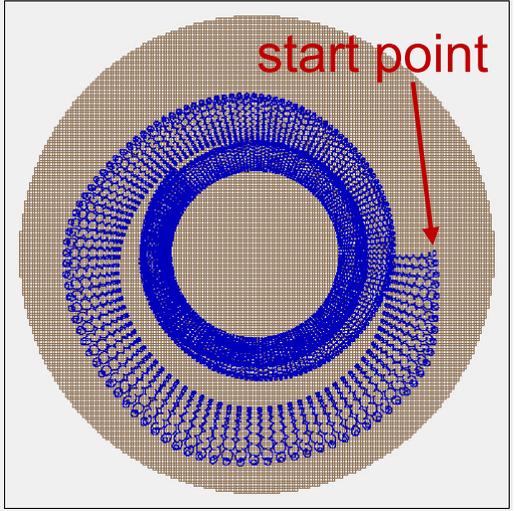


FRMII原子炉を利用した低速陽電子源NEPOMUC(ミュンヘン工科大学)



陽電子の径方向の振動を観測

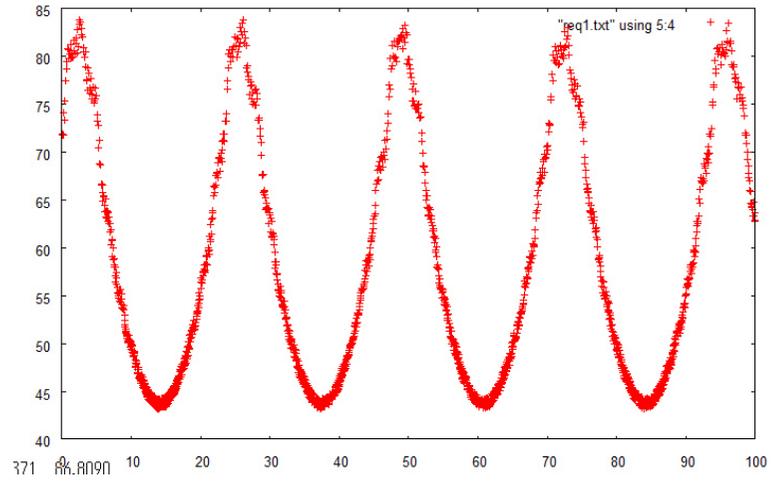
# ダイポール磁場中で粒子軌道の径方向操作は可能になったが、振動であり、圧縮とは言えない(時間区分印加は少数粒子に有効)



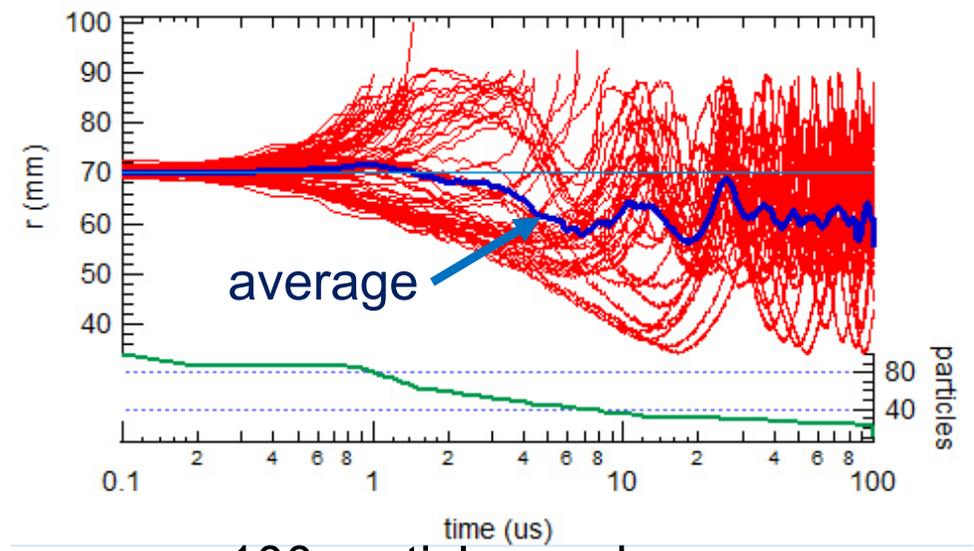
single particle

- 時間を区切って回転電場を与え、適切な位置に陽電子を誘導することは可能である
- しかし、特にエネルギーや位置の広がりを持つ多数の粒子に適用した場合、位相を最適な状態に保つことが難しくなる

## • radial position at z=0 for typical and 100 random particles with 5 eV



single particle

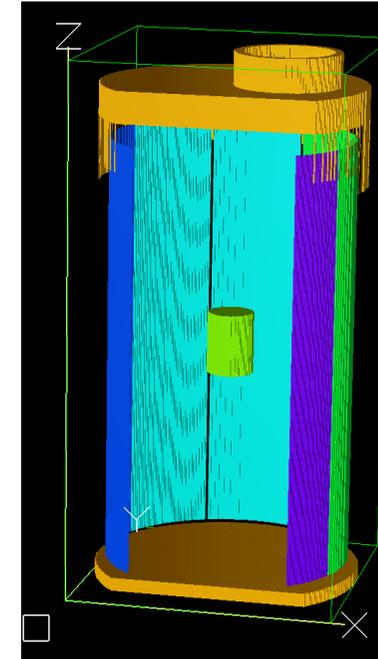


100 particles and average

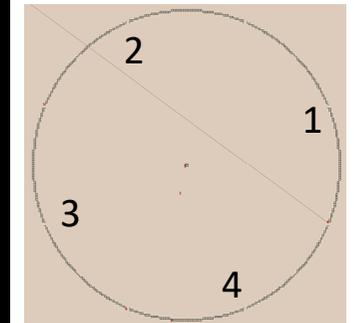
# 中性粒子との衝突による減速の効果を取り込み、ダイポール磁場中で回転電場が粒子軌道に与える効果を調べた

$$\frac{d}{dt}(\gamma m \mathbf{v}) = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \kappa \mathbf{v}$$

- 陽電子は一回の衝突で一定割合のエネルギーを失うとし、タイミングをランダム化した衝突（平均値は一定）の効果を含める
- 静磁場と電極による回転電場中でBoris法で積分

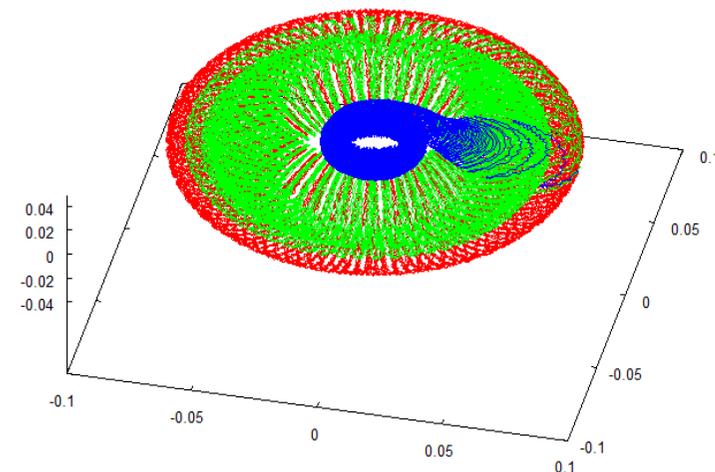
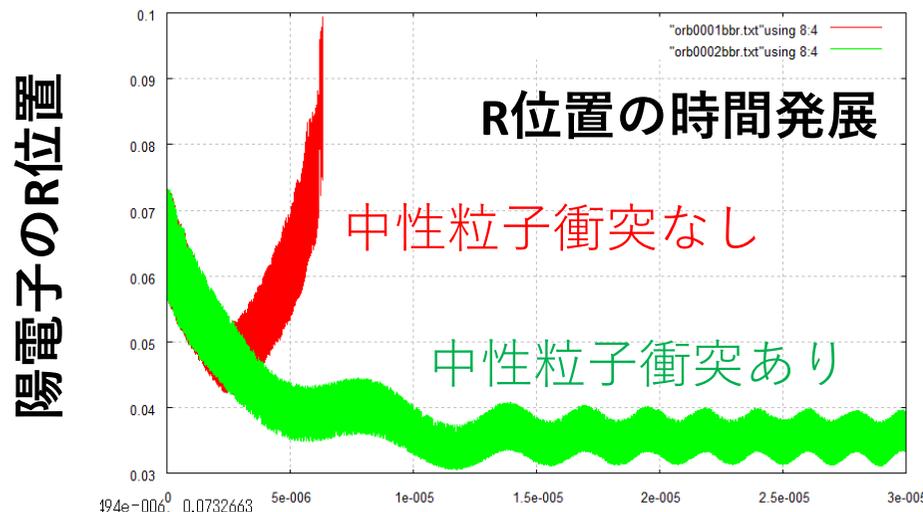


真空容器壁と回転電極、永久磁石と同様の形状のコイルを考慮した



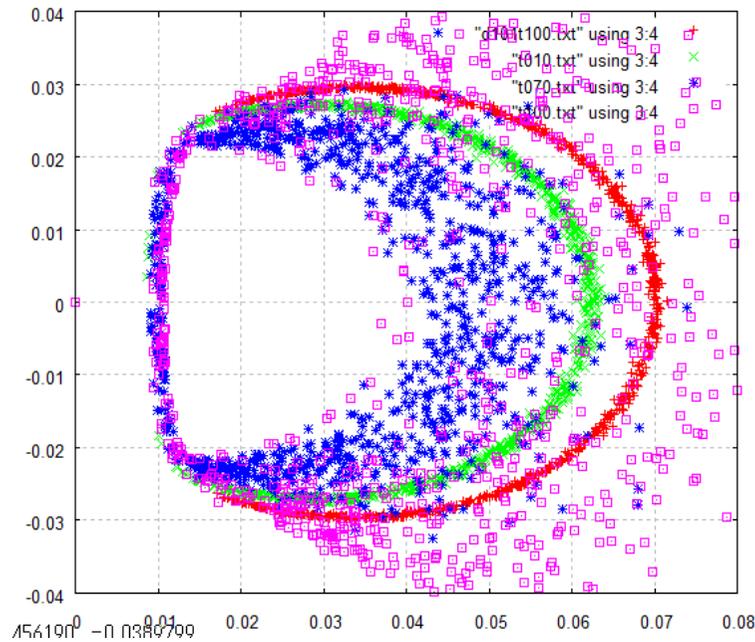
"orb0001bbr.txt" — red line  
 "orb0002bbr.txt" — green line  
 "orb0004bbr.txt" — blue line

壁で損失

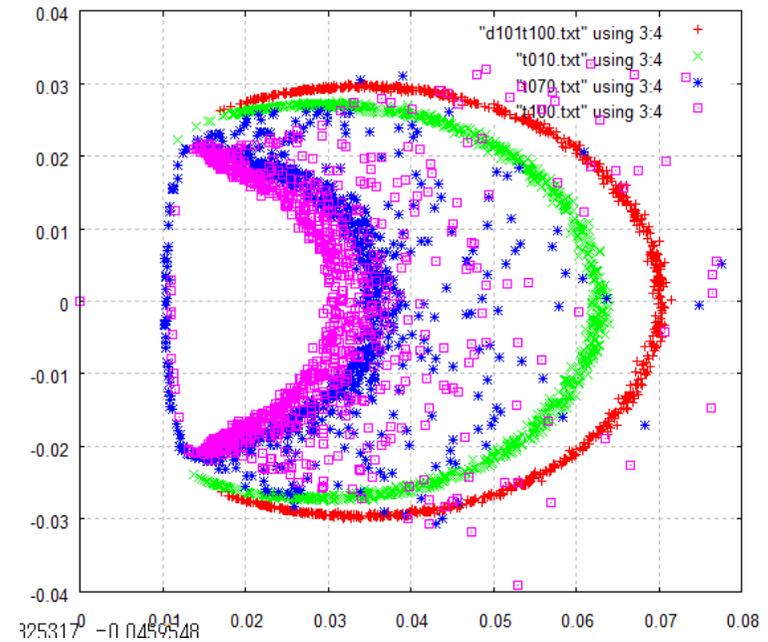


# 中性粒子との衝突による減衰は、多数粒子の拡散を抑制して 圧縮状態を維持する効果がある

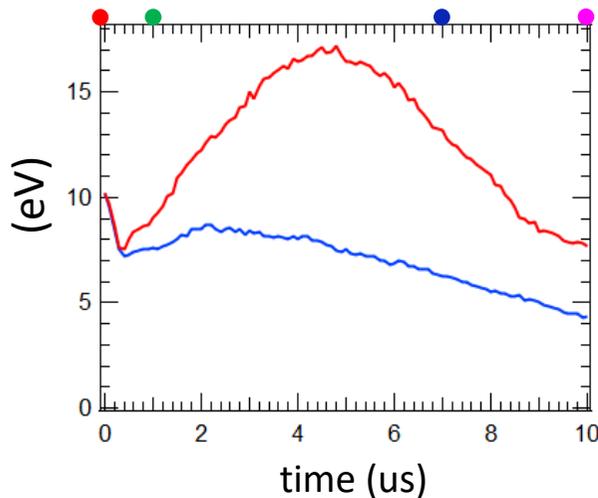
中性粒子との衝突効果なし



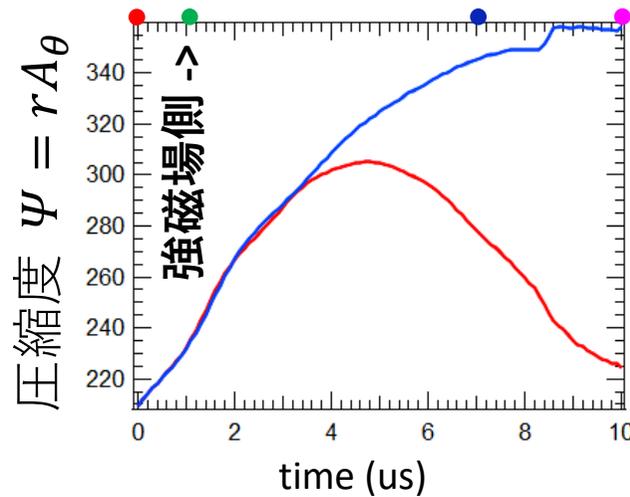
中性ガス（おおよそ $10^{-5}$ Pa）追加



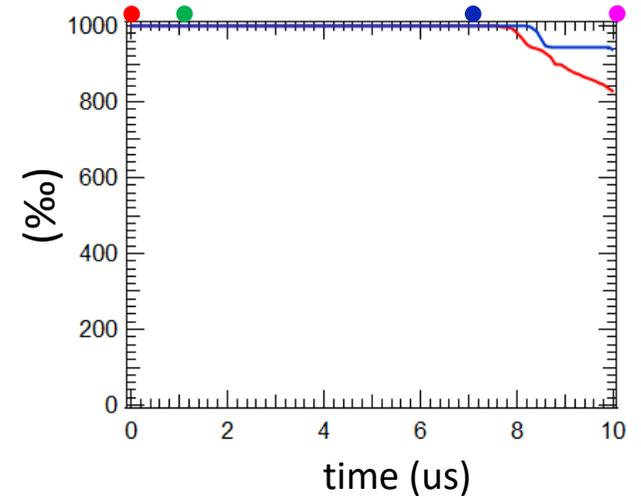
平均エネルギー



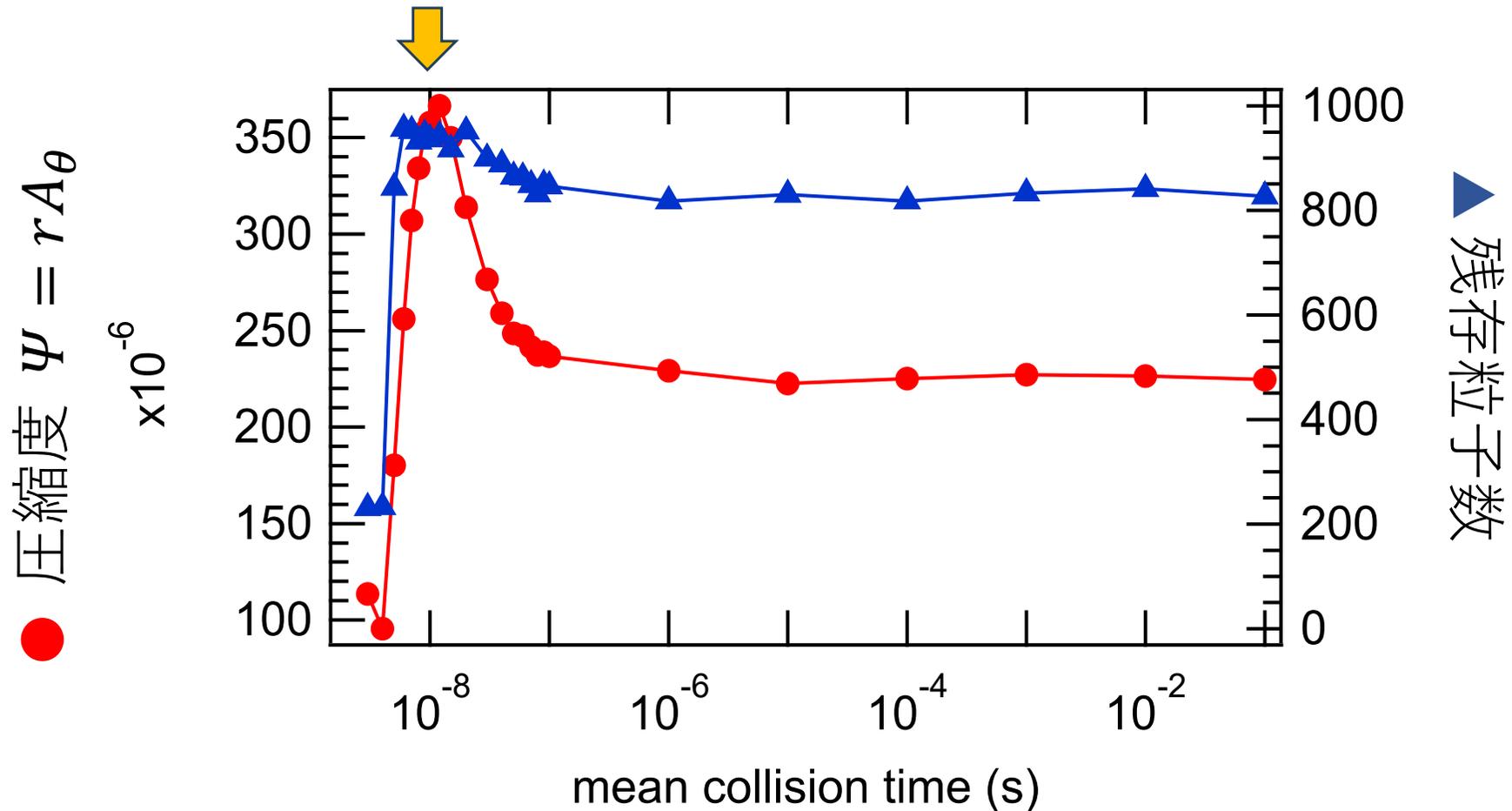
平均圧縮度



残存粒子数



# 中性粒子との衝突による減衰は、多数粒子の拡散を抑制して圧縮状態を維持する効果がある



- 比較的幅広い圧力範囲で圧縮の効果が見られるが、パラメータ領域の最適化と計算-実際の衝突の対応は検討の余地がある
- 2024年1月に産総研陽電子ビームラインでの実験を予定している

## まとめと今後の課題

- 電子・陽電子ペアプラズマの実現と物性解明を目指す計画を進めている。
- ダイポール磁場中の陽電子群/非中性プラズマの径方向圧縮と高密度化は重要な課題であるが、従来の研究は直線型での実験のみであった。
- 単一粒子の範囲で軌道を調べ、トロイダル周回周波数と結合する「回転電場」の印加により、磁力線を横切る径方向輸送が可能になることを示した。
- 中性粒子衝突による減衰を含まない条件では、径方向の周期運動となる。時間を区切って回転電場を与えることで、ある程度の径方向移動が実証されたが、粒子のenergy/spatial spreadにより、多数粒子の圧縮は難しい。
- 中性粒子との衝突の効果を含めると、エネルギーの損失により振動が減衰し、比較的多数の粒子を同時に径方向圧縮する条件が存在する。
- 今後の課題： 圧縮の実現(集団現象の効果は計算の範囲外)、こうした各要素研究に基づく電子・陽電子プラズマの実現と物性解明が目標。