



ダイポール磁場中の電子群と陽電子群 のカオスの効果による混合の検討

東大新領域^A, 核融合研^B

齋藤晴彦^{AB}, 三村洸生^A, 青柳信之介^A

1. はじめに: 電子・陽電子プラズマ生成と物性解明を目指す実験の進展
2. 陽電子群と電子群の分布重ね合わせの必要性
3. ダイポール磁場中の粒子軌道のカオス発生時の混合促進
4. 「重ね合わせ」の指標の導入とカオス的な混合の計算結果
5. まとめと今後の課題

● 電子・陽電子系のペアプラズマ計画



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



AIST
国立研究開発法人 産業技術総合研究所



核融合科学研究所



広島大学



Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik



AIST
国立研究開発法人 産業技術総合研究所

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} e^+

$\sim 10 \mu\text{s}$ で
入射

陽電子の前段蓄積,
高速パルス引き出し

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

17aC209-3 Higaki

2024 Deller+ PRE

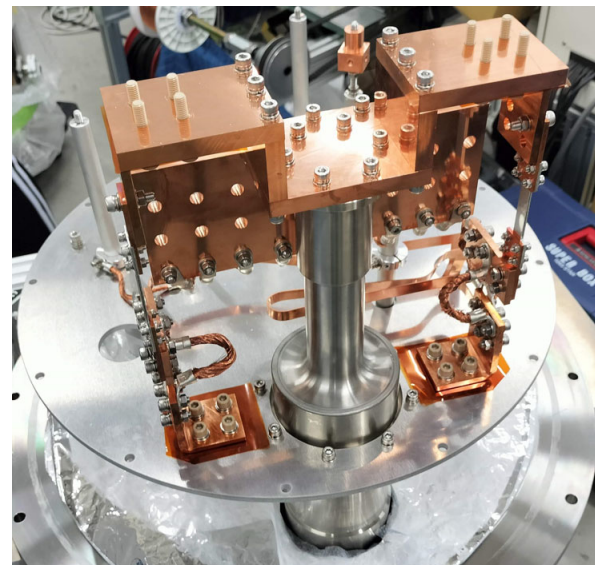
産総研・リニアックベース陽電子源

2020 Higaki Michichio+ Appl. Phys. Exp.

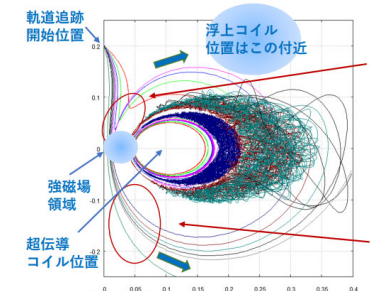
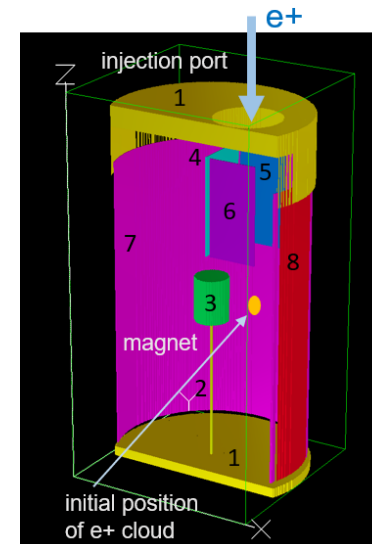
低エネルギー陽電子と電子の磁場閉じ込め実験の開発研究を進めている



5Tマグネットによるトラップ

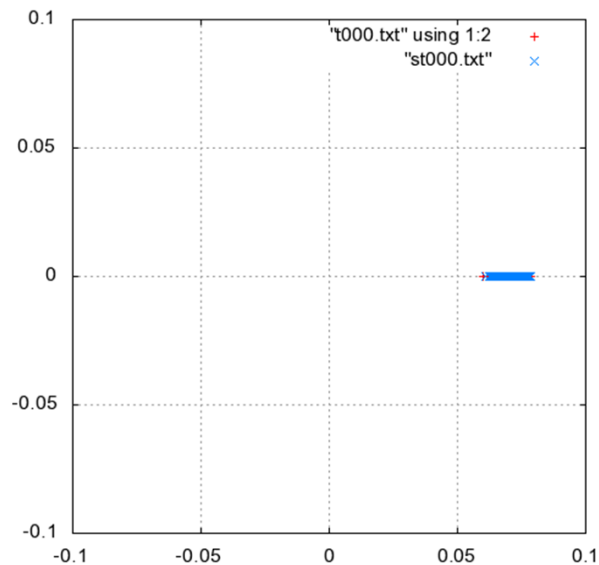


小型磁気浮上ダイポール

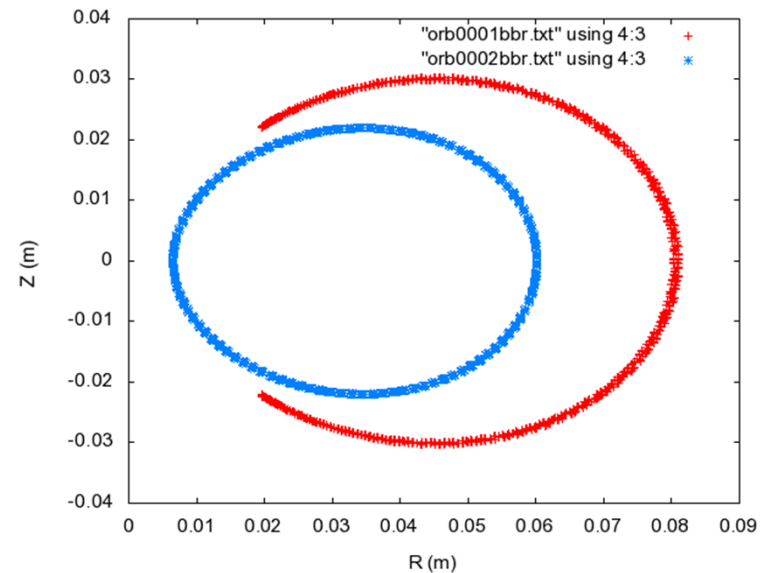


陽電子の高効率の入射方法, 電子
との同時閉じ込めと重ね合わせ

- 強磁場トラップによる陽電子大量生成に先立ち、ライナック+バッファガストラップからの $\sim 10^4$ のパルス陽電子の入射実験を開始した(まだ静電的)
17aC209-3 Higaki; 2024 Deller+ PRE
- トロイダル方向には $\sim 10\mu\text{s}$ で一様化が起こる(温度拡がりによる)が、電子と陽電子はそれぞれ初期磁気面上にとどまり、両者が混合されとは限らない



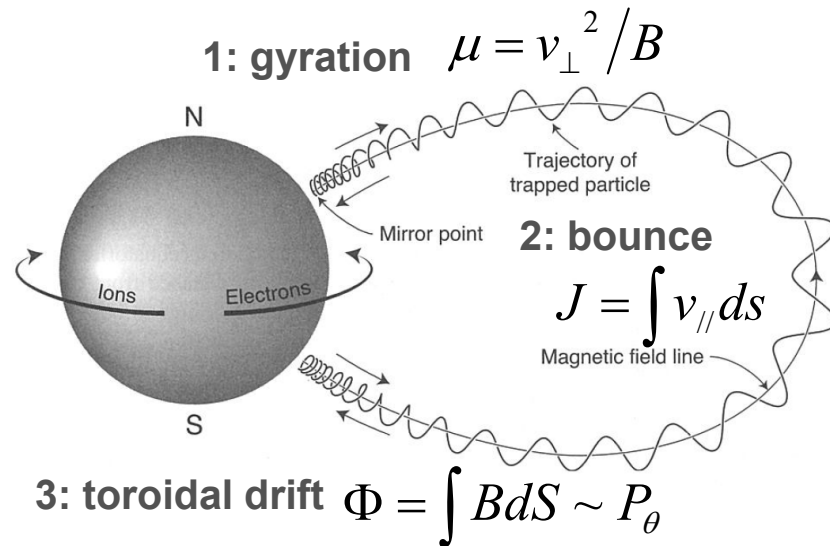
入射後100 μs の電子と
陽電子の混合 (top view)



径方向には入射直後の磁気面に留まる
一方、入射位置決定の自由度は高くない

- コイルの磁気浮上に必要な軸対称性を保ちながら、軌道をカオス化して陽電子と電子の効率的な混合に活用できないか？ を数値的に検討する

ダイポール磁場中の荷電粒子の周期運動と、断熱不変量の非保存化によるカオス的軌道の出現と混合 4/11



- 軸対称なダイポール磁場中で磁化した荷電粒子の運動は周期運動の合成
- 良好な閉じ込めが期待できる一方で、磁気面を横切る混合は発生しない

2015 Yoshida Mahajan, Prog. Theor. Exp. Phys.

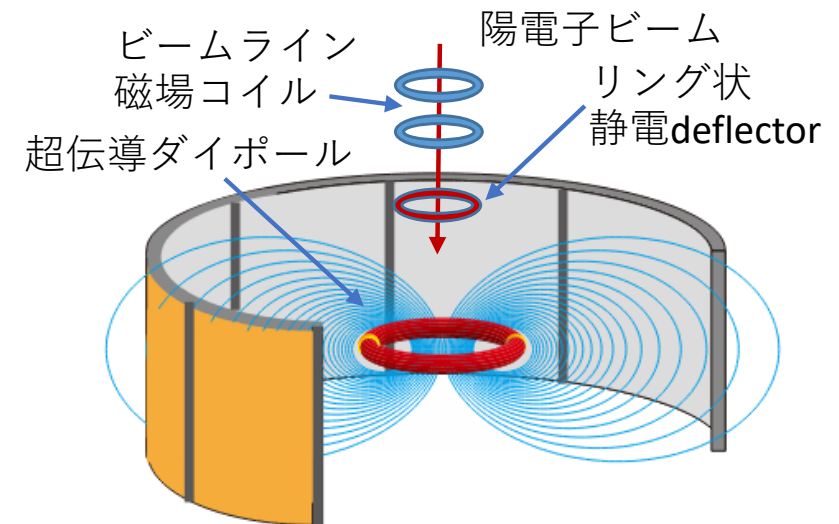
2019 Nishiura+ NF, 2015 Kawazura+ PoP, 2017 Sato+ PRE

- 断熱不変量保存時に μ, J, Ψ の線形和となる粒子の運動エネルギーに、揺動や非対称性、周期運動の結合等により非線形項が加わり径方向輸送が可能

$$H = \mu\omega_c + J\omega_b + \Psi\omega_d + \boxed{N_c}$$

1990 Murakami, Sato, Hasegawa, PoF

- 軸対称性が重要となる磁気浮上ダイポールにおいて、粒子の断熱不変量を非保存化するためにランダム電場を適用する



- 相対論的運動方程式を保存性の良い Buneman-Boris法で時間積分し, 同じく相対論的な断熱不変量を計算する

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

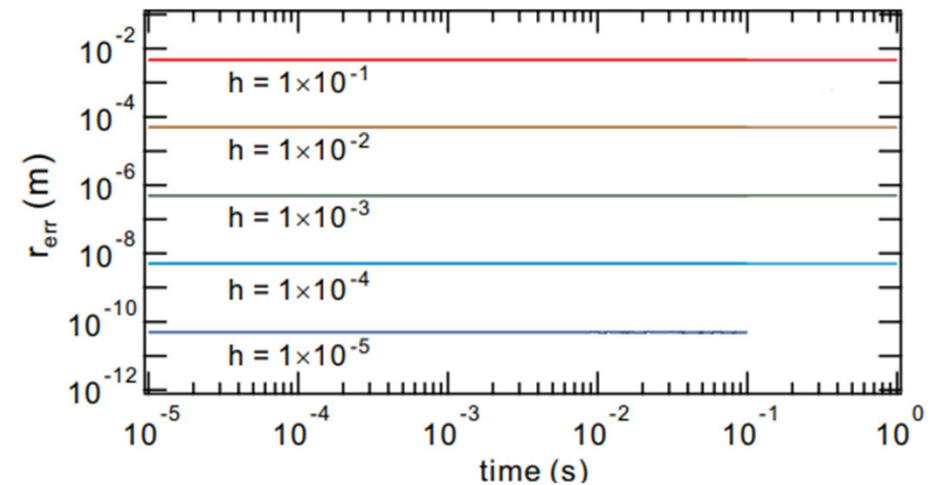
$$\mu = \int \gamma v_{\perp} dl = \int \frac{\gamma^2 v_{\perp}^2}{B} dt$$

$$J = \int \gamma v_{\parallel} ds$$

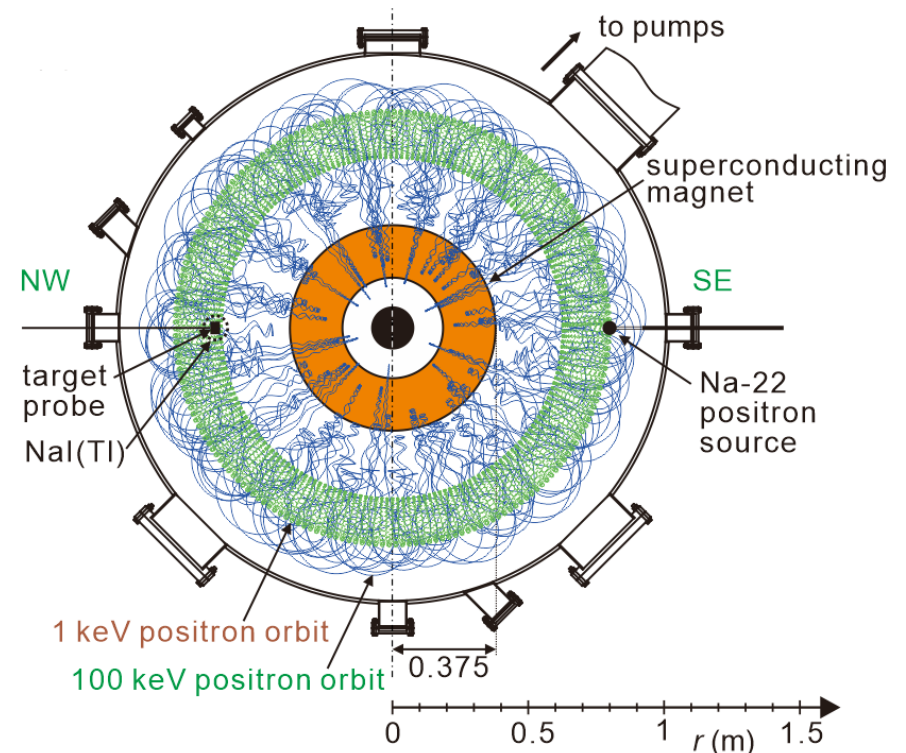
$$\Psi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

- 高エネルギー粒子の周期運動結合**
や磁気中性線の活用*に代わり, RF
電場***を与えて断熱不変量を非保存化

***1999 Nakashima+, NIMA



*2022 Saitoh & Tanioka, PFR



**2016 Saitoh+, PRE

2種類の粒子の混合度 Q の定義とRZ断面の閉じ込め領域への適用

6/11

$$Q = 1 - \sqrt{I_s}, \quad I_s = x = \frac{\sum (r_{Ai} - \bar{r}_A)^2}{N \bar{r}_A (1 - \bar{r}_A)}$$

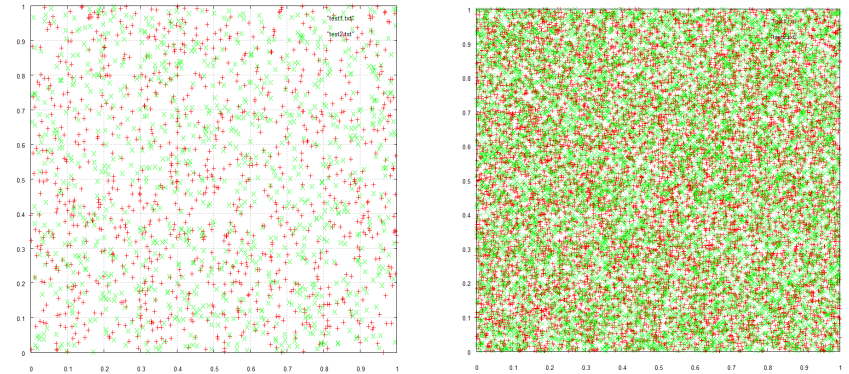
N : 閉じ込め領域（RZ断面）における分割数

r_{Ai} : 分割した各小領域での陽電子の割合

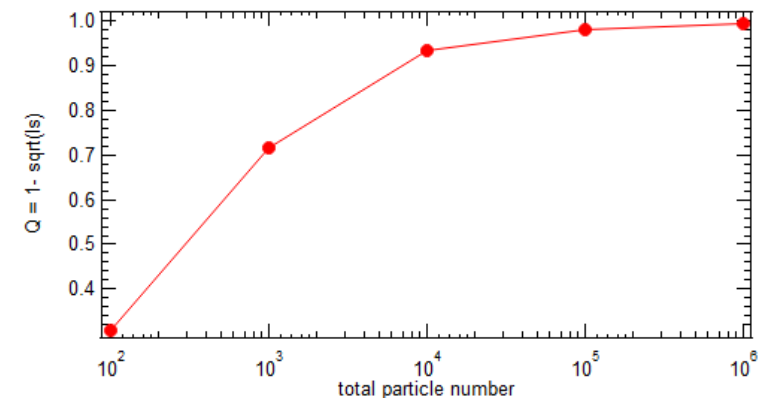
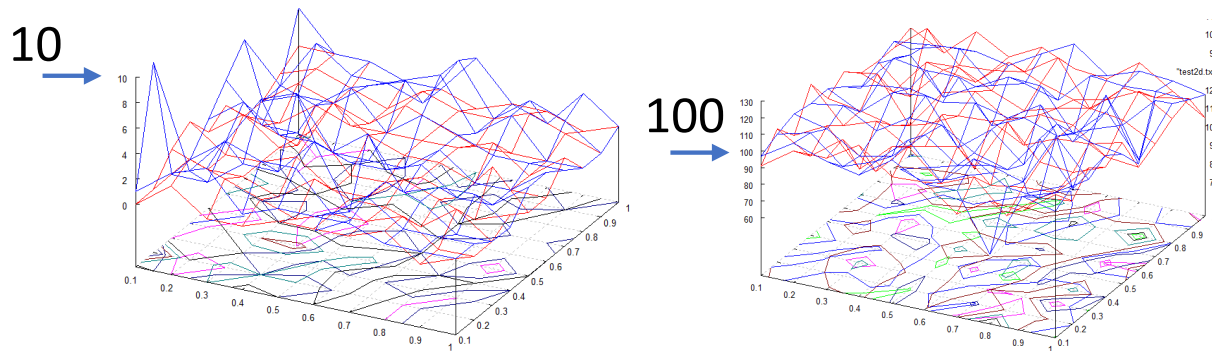
$\bar{r}_A$: 全粒子数のうち陽電子数の割合

1952 Danckwerts, Appl. Sci. Res.

2023 船越満明, ながれ42, 35.



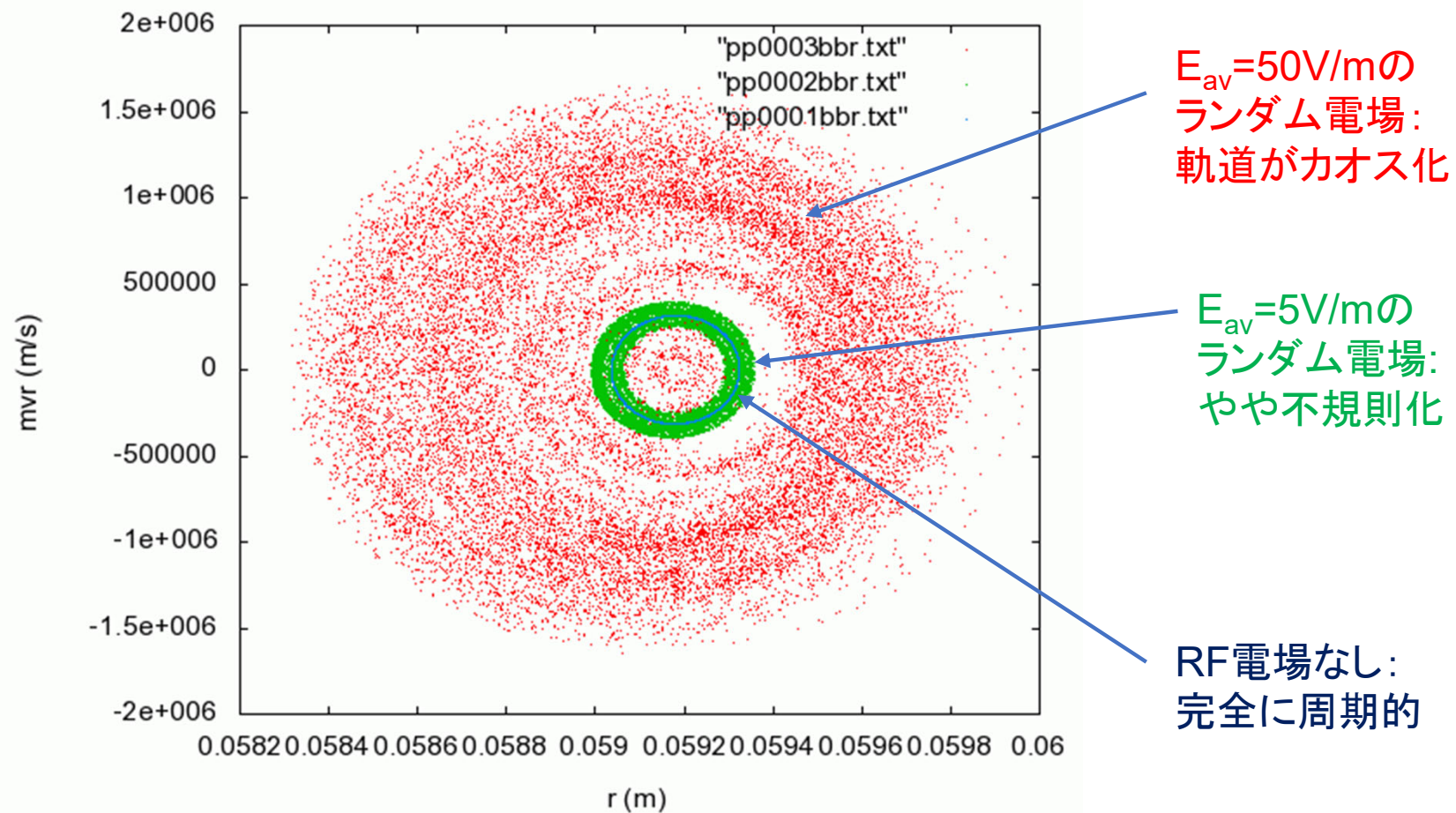
- 同一の分割数で, (例えば)総粒子数を増やすと Q は1に近づく



- ダイポール磁場中でRZ断面の混合度を考えることとして, 総粒子数がゼロでない分割領域に対して Q を計算して混合度を評価する

$Q \sim 0.1$: 重ね合わせの中心領域で完全混合, $Q \sim 0.2$: 30%程度の完全混合領域

ランダム電場の追加による軌道のカオス化と異なる磁気面への拡がり 7/11

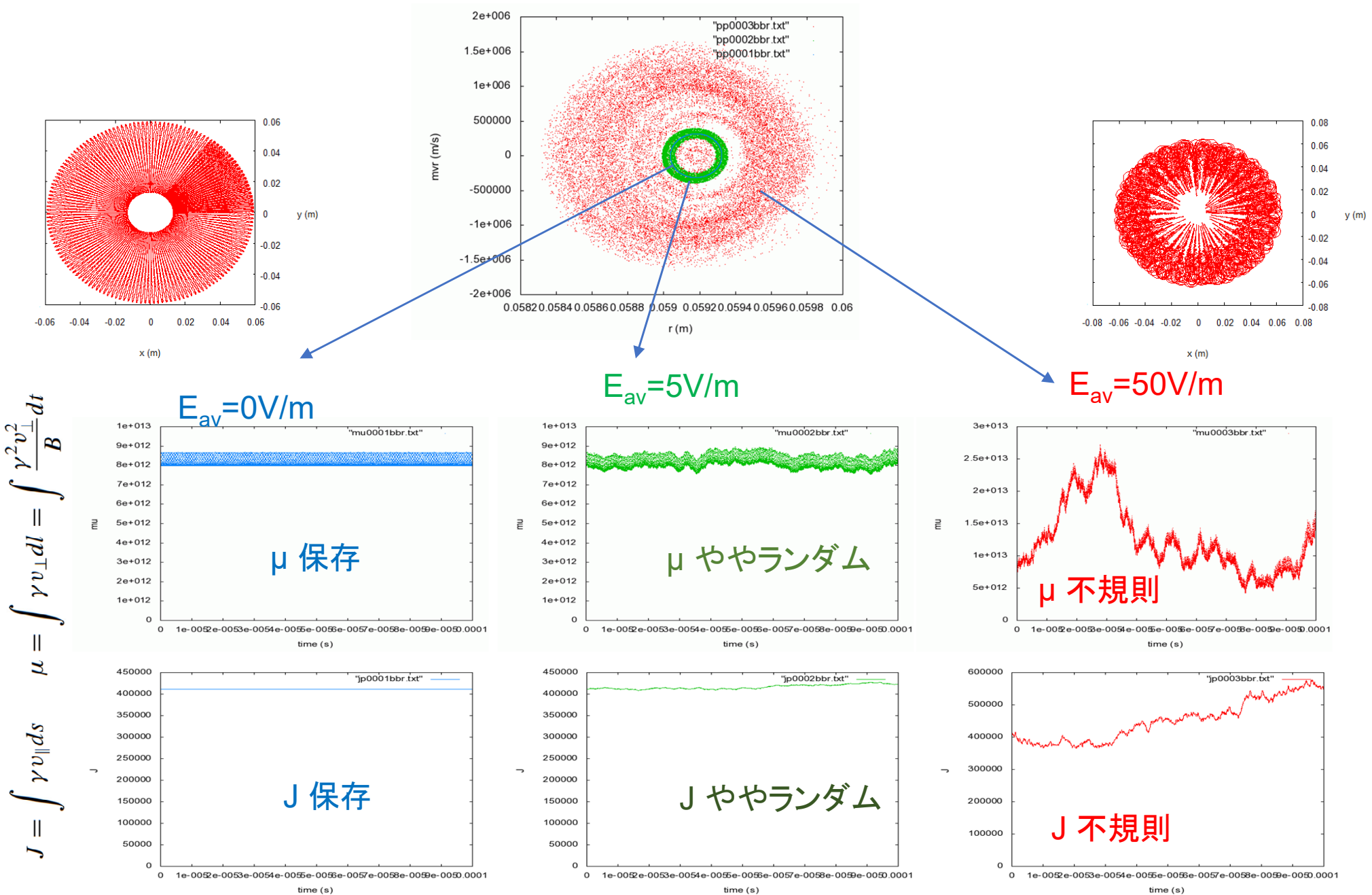


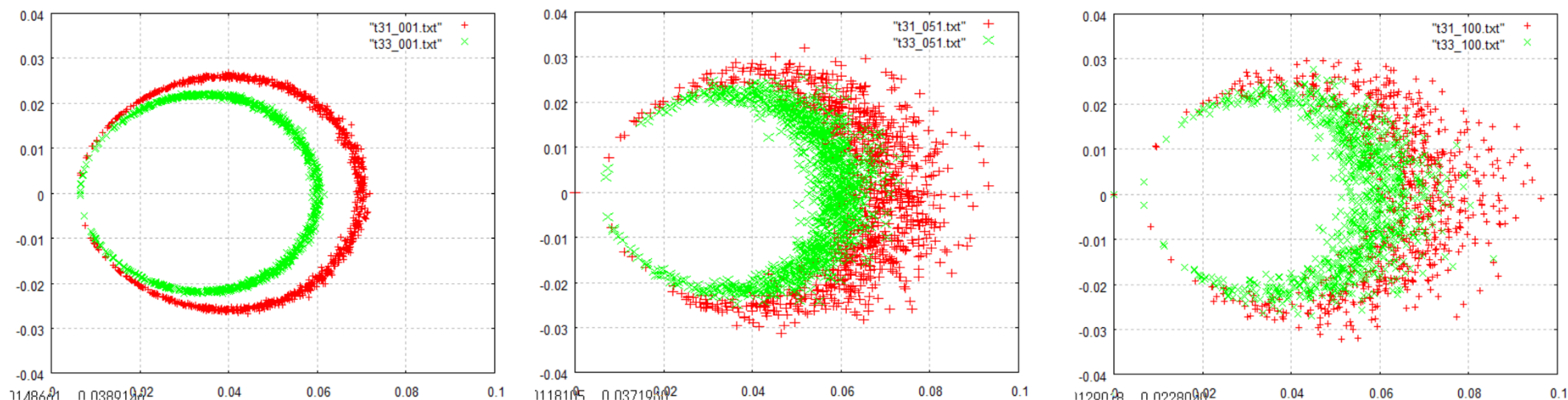
ランダム電場の印加による粒子軌道のポアンカレプロット(r-Pr)の変化

- 適度な強度のランダム電場を印加することにより, 閉じ込め領域内で異なる磁気面上に広がる分布を作り出すことができる

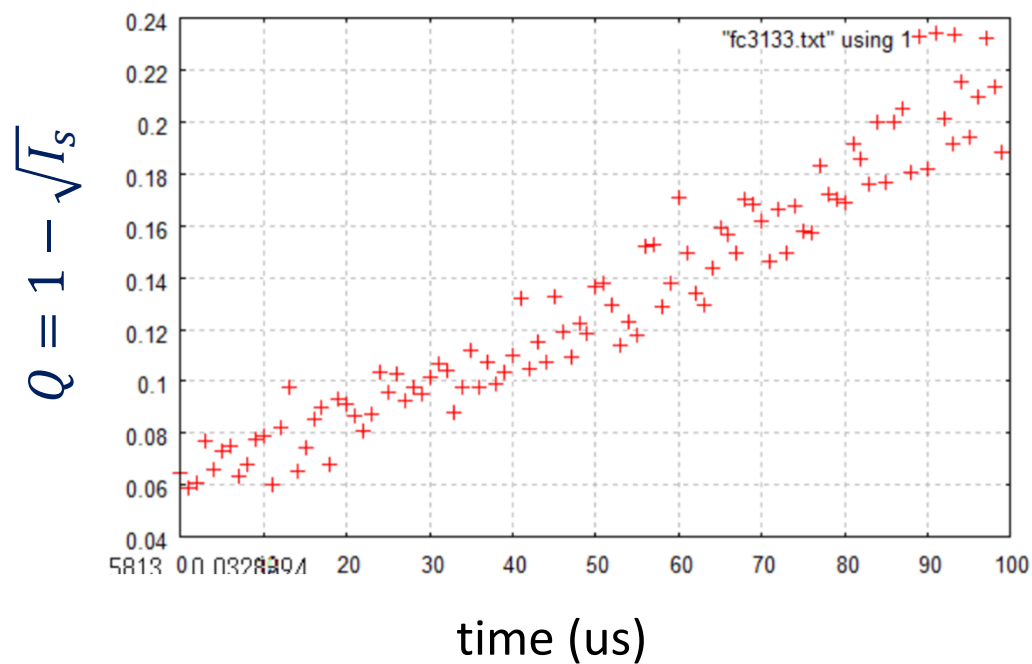
断熱不変量の時間発展と軌道の不規則化

- 断熱不変量の非保存化により軌道がカオス化しランダムな分布を取る

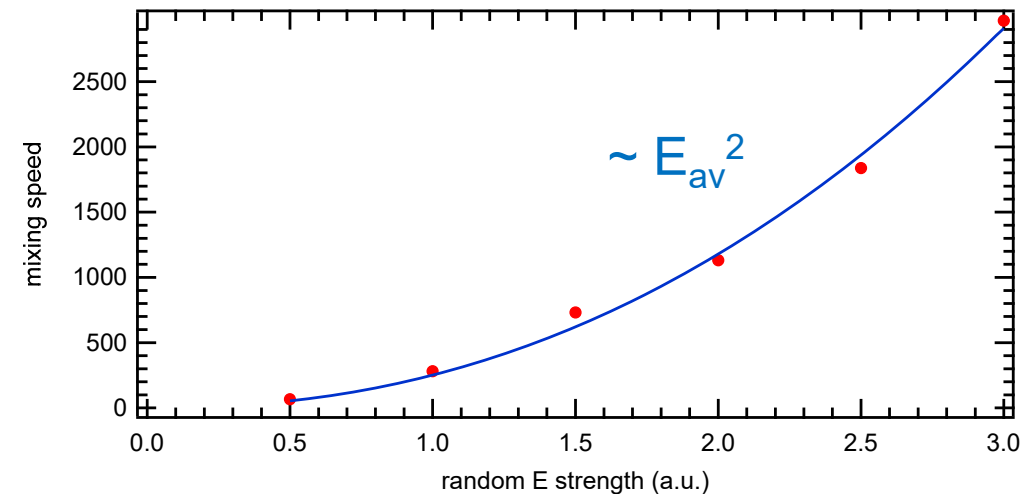
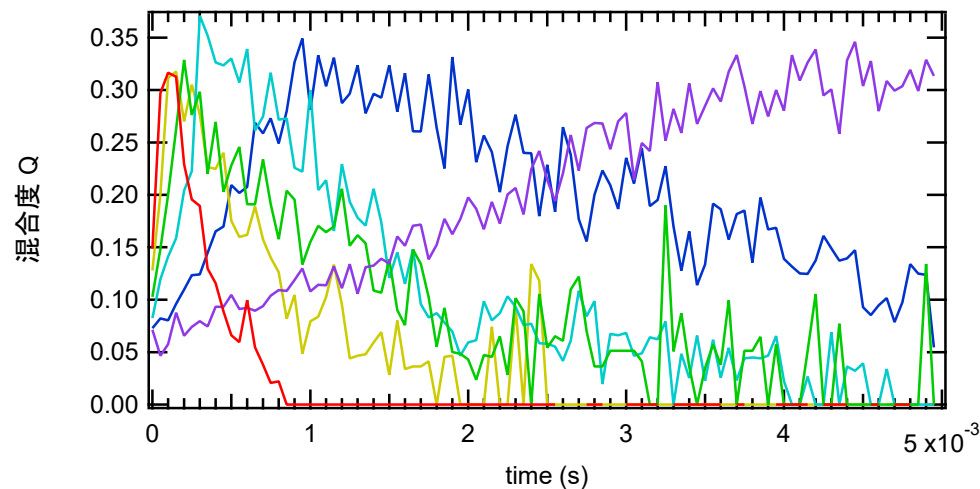




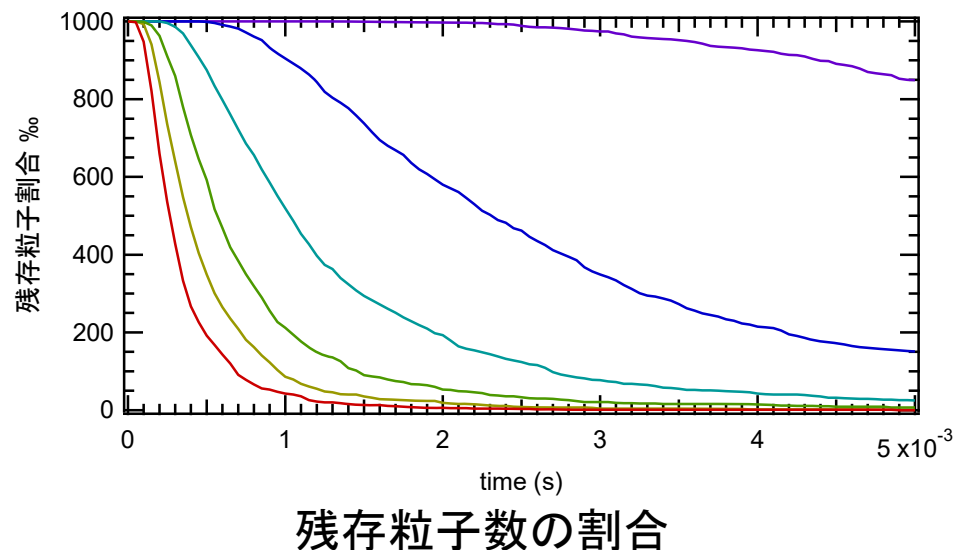
RF電場印加時のRZ断面に投影した電子と陽電子の分布（入射から1us, 10us, 50us）



- RF電場により混合が進み、少なくとも閉じ込め領域の中心付近では十分に陽電子と電子を重ね合わせ
- 混合度 Q はほぼ線形に向上



異なる強度の電場(赤: 3kV/mから紫: 0.5kV/m)に対する混合度の時間変化と「混合速度」



- 到達混合度は~30% (初期位置の中間付近で十分な混合) で, それより長時間のRF印加では壁への損失が問題となる
- 強電場/短時間印加と弱電場/長時間印加で, 到達混合度や損失粒子割合に明確な差異は見られない

まとめと今後の課題

- 陽電子と電子のペアプラズマ実験に向けた開発研究を進めており、ダイポール磁場中で電子と陽電子の入射実験を実施している
- 陽電子/電子群は、トロイダル方向には短時間に一様化する一方で、径方向には初期磁気面上にとどまり両者の混合が困難な場合がある
- 軸対称な磁気浮上ダイポール系に適した方法として、ランダムなRF電場を印加して断熱不変量を非保存化して混合する可能性を検討した
- 大幅な加熱や壁への損失といった悪影響を避けて、陽電子と電子の混合度を向上し、両者の十分な重ね合わせを実現できるパラメータ領域が存在する
- 得られた混合度には改善の余地あり(電場による壁への損失の抑制など)
- 永久磁石ダイポール中で純電子実験による検証を行う
- 陽電子と電子の同時閉じ込めを行う磁気浮上ダイポールで、径方向の拡散を発生させる手段の一つとして使用予定