

16aA307-1

物理学会2023年年次大会 2023年9月16日

永久磁石ダイポールに捕獲したパルス 陽電子群の軌道解析

齋藤晴彦^{AB}, J. von der Linden^C, A. Deller^C, 檜垣浩之^D, 満汐孝治^E, 堀利彦^E, 大島永康^E
東京大新領域^A, NIFS^B, IPP^C, 広島大先進理工^D, 産総研^E

1. はじめに: 電子・陽電子プラズマ計画の目標と現状
2. パルス化陽電子ビームの重要性と初期実験
3. 永久磁石ダイポール中の陽電子の軌道と閉じ込め特性
4. トロイダル方向の一様化について
4. まとめと今後の課題



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



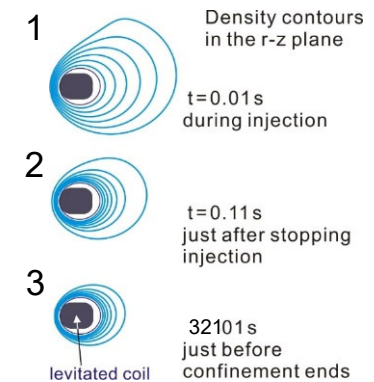
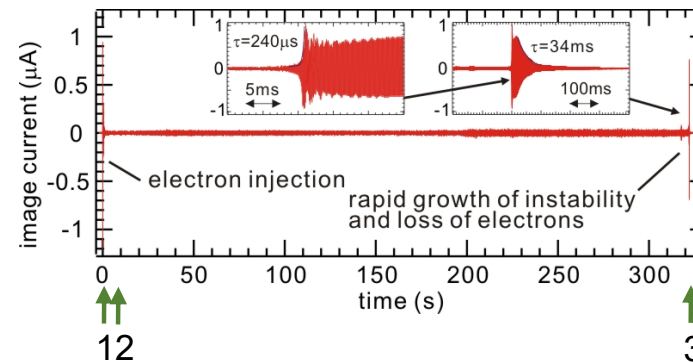
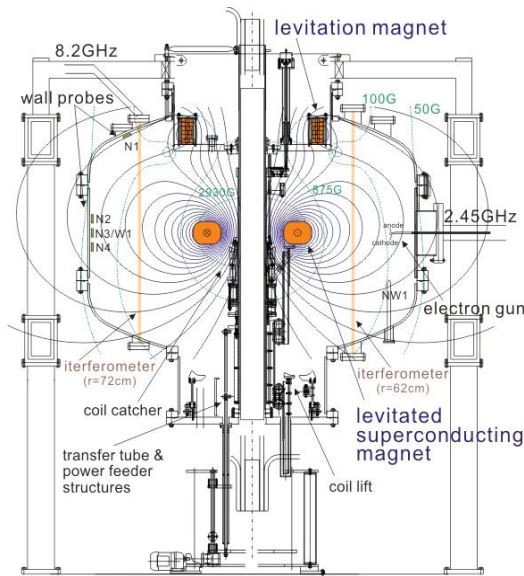
Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik



広島大学

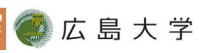


● 磁気浮上ダイポールによる各種(特に非中性)プラズマの安定閉じ込め



RT1では純電子プラズマの300秒以上のトラップと安定構造の自己組織化が観察され, 原理的に陽電子群にも適用可能

● 電子・陽電子系のペアプラズマ計画



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

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^+

○ ○

~10us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

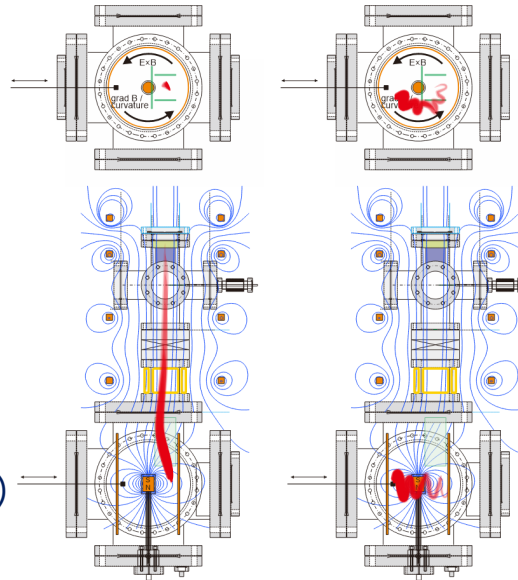
低エネルギー陽電子と電子の磁場閉じ込めによる手法を提案し, 開発研究を進めている

パルス陽電子入射の重要性と本研究の目的

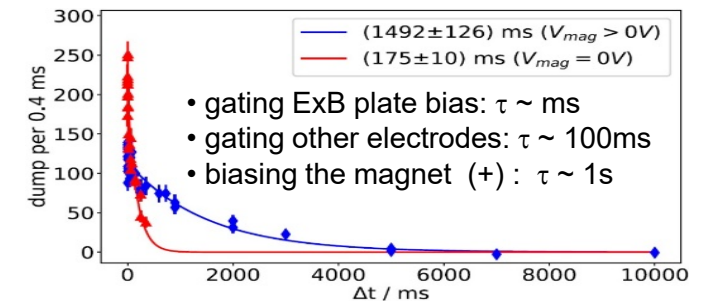
● 定常陽電子ビームを利用した先行研究



NEPOMUC@FRM-II原子炉
(定常ビーム $\sim 10^9$ slow e^+/s)
で永久磁石ダイポールを運転



2018 Stenson+ PRL **121**, 235005.
2018 Horn-Stanja+ PRL **121**, 235003.



ExBドリフト入射により, **100%の入射効率**と **$\sim 1\text{s}$ 閉じ込め**を実現

しかし, $e^+ < \sim 10^3$ (トロイダル系への入射と閉じ込めの両立は困難)

● パルス陽電子ビーム利用による粒子数向上と課題

- トロイダル方向に一様化した粒子群生成 (定常ビームと異なる特性)
- 入射後の空間分布, 特に強磁場側への輸送の効果 (集団的, 統計的な挙動)
- そもそも, 中性粒子との衝突等による閉じ込め時間が現実的な値となるか

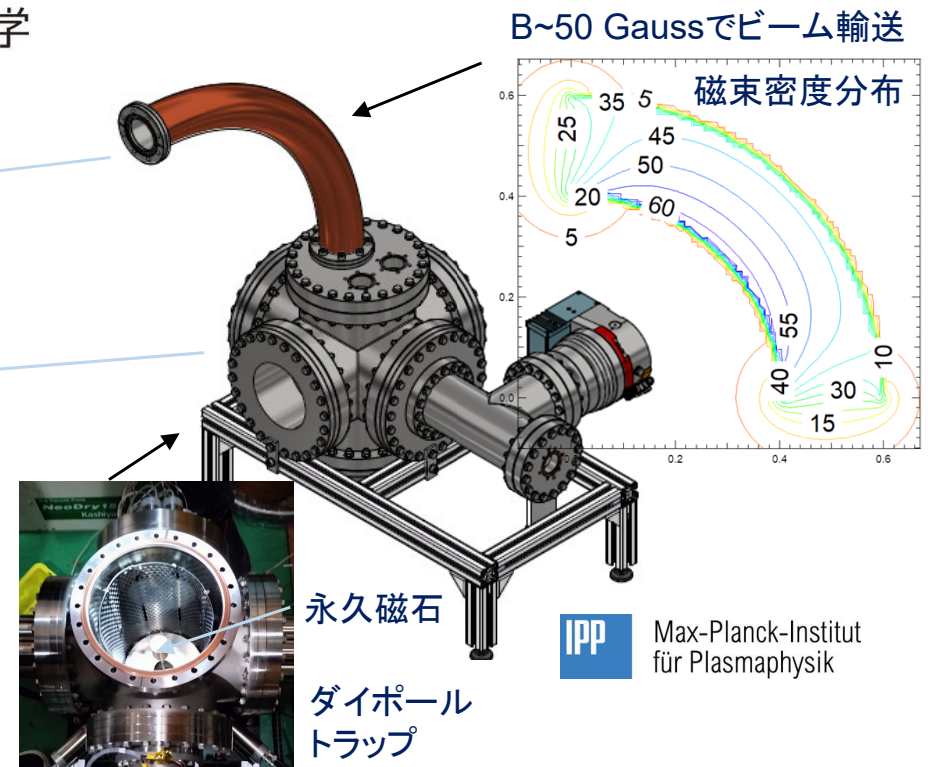
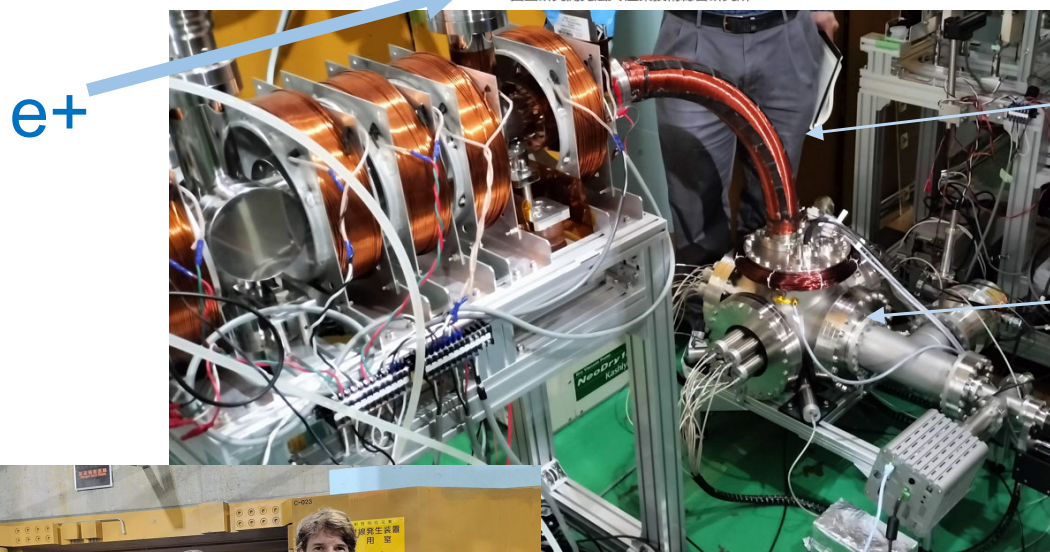


5Tトラップによる大量 e^+ 蓄積に先立ち, **BGTから永久磁石ダイポールへの直接入射**実験を開始しており, その際の粒子軌道を計算して上記課題を調べる

- 産総研+広島大学のライナック+バッファガストラップ陽電子源
にIPP/東大の永久磁石ダイポールトラップを接続 $\sim 10^5 \text{ e}^+ / \text{pulse}$

全量を捕獲できれば従来の100倍程度の捕獲数(プラズマ条件の達成はまだ困難)

- ガイド磁場(+ステアリングコイル)+ExBドリフト入射(先行研究で実績)



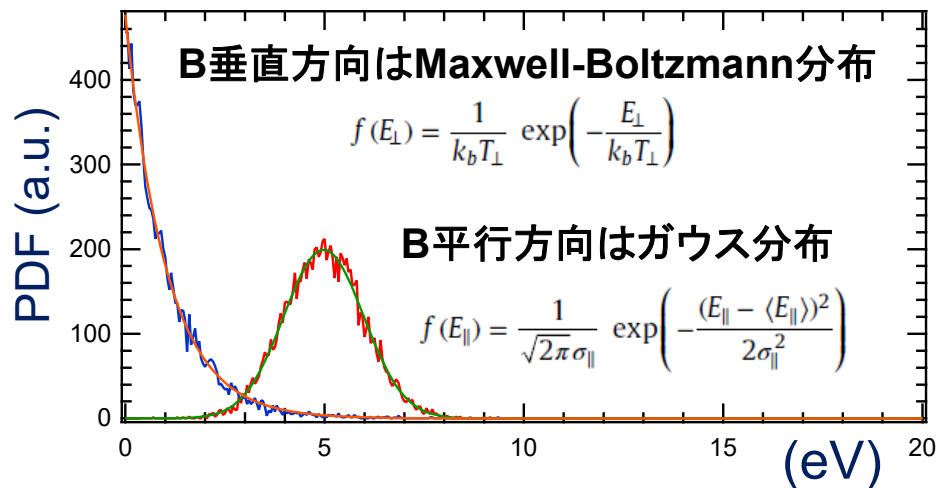
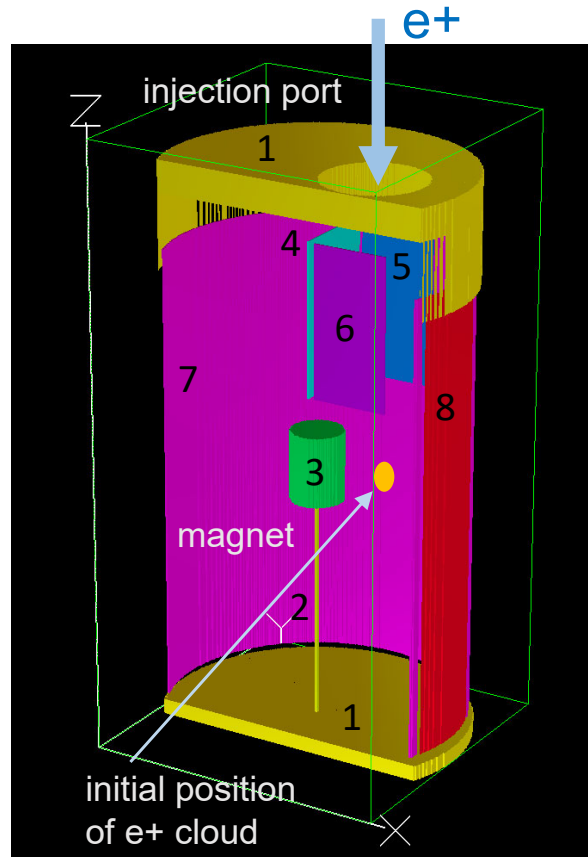
2023-入射実験開始

入射後の一様化の時間発展, 閉じ込め時間の実験解析

本研究では入射後の陽電子軌道を追跡し閉じ込め特性を評価

永久磁石ダイポールトラップ中の軌道計算

- 入射電極やバイアス可能なマグネットの作る電磁場中で陽電子の軌道を計算
- ビームの空間的や温度の広がりを考慮して複数粒子を計算する



$$y_0 + A \exp\left\{-\left(\frac{x-x_0}{width}\right)^2\right\}$$

$$y_0 = -0.044426 \pm 0.279$$

$$A = 199.24 \pm 1$$

$$x_0 = 4.977 \pm 0.00572$$

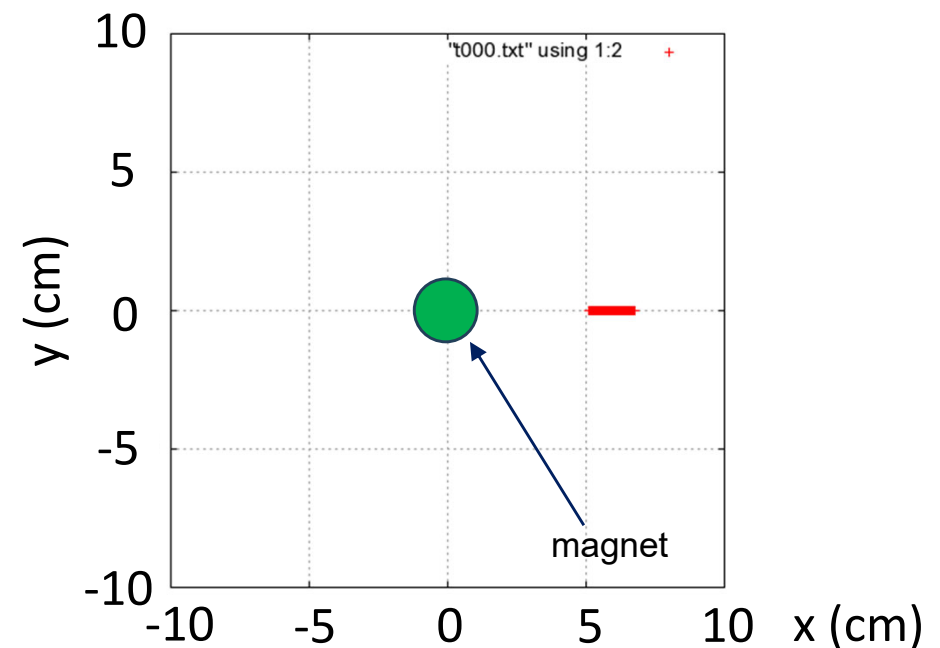
$$width = 1.4184 \pm 0.00856$$

$$y_0 + A \exp(-invTau \cdot x)$$

$$y_0 = -0.26267 \pm 0.285$$

$$A = 477.15 \pm 2.13$$

$$invTau = 0.96738 \pm 0.00665$$



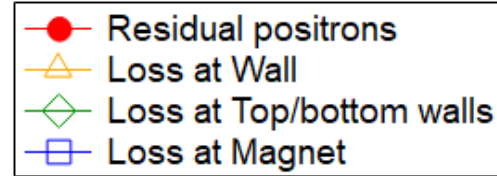
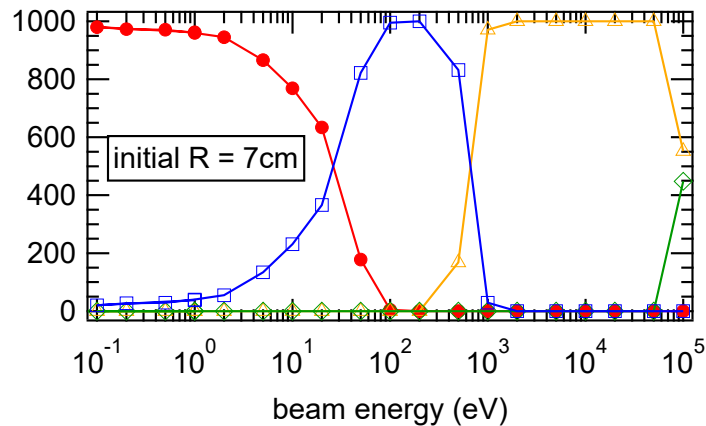
軌道計算例(装置上面からの投影200us)

赤道面(magnetのz位置)上で空間的に分布した多数粒子の軌道をBoris法で追跡

トロイダル方向にドリフト, 有限温度の効果によりトロイダル方向に一様化する

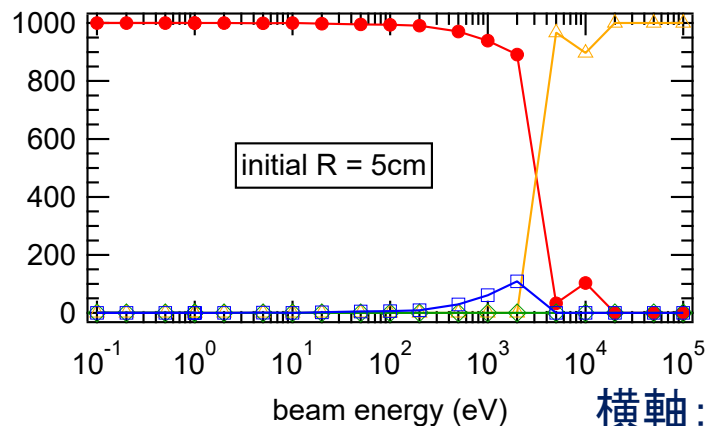
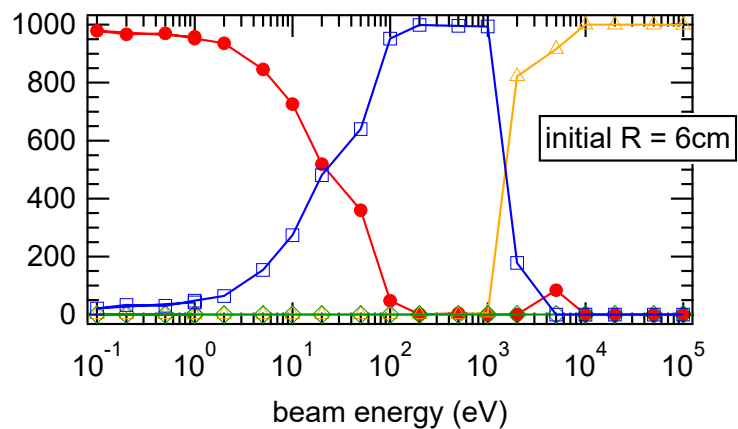
永久磁石ダイポールの陽電子トラップ能力と粒子損失場所

6/13

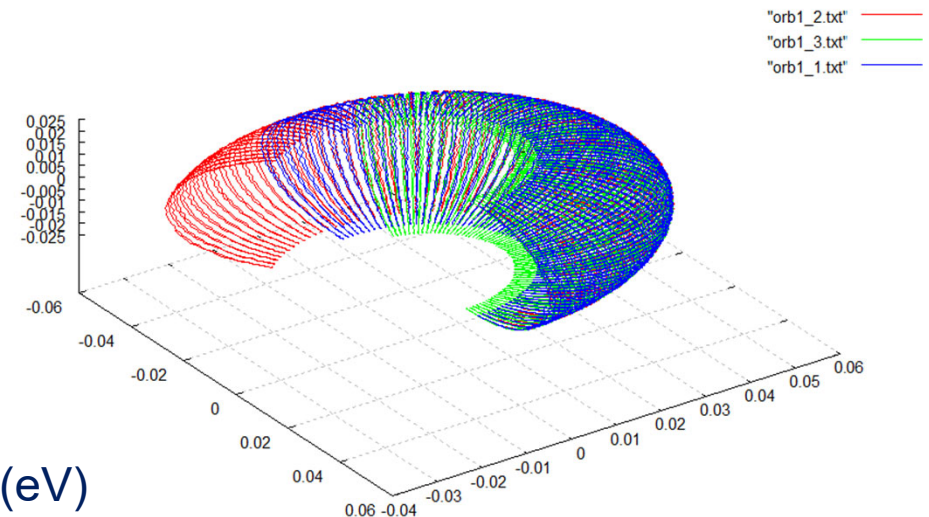
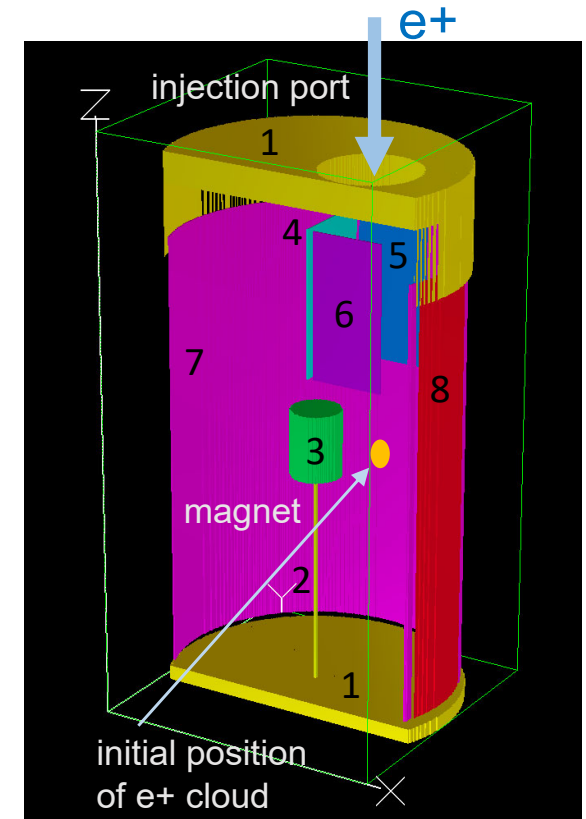


初期位置R（壁R=9cm）に依存するが、

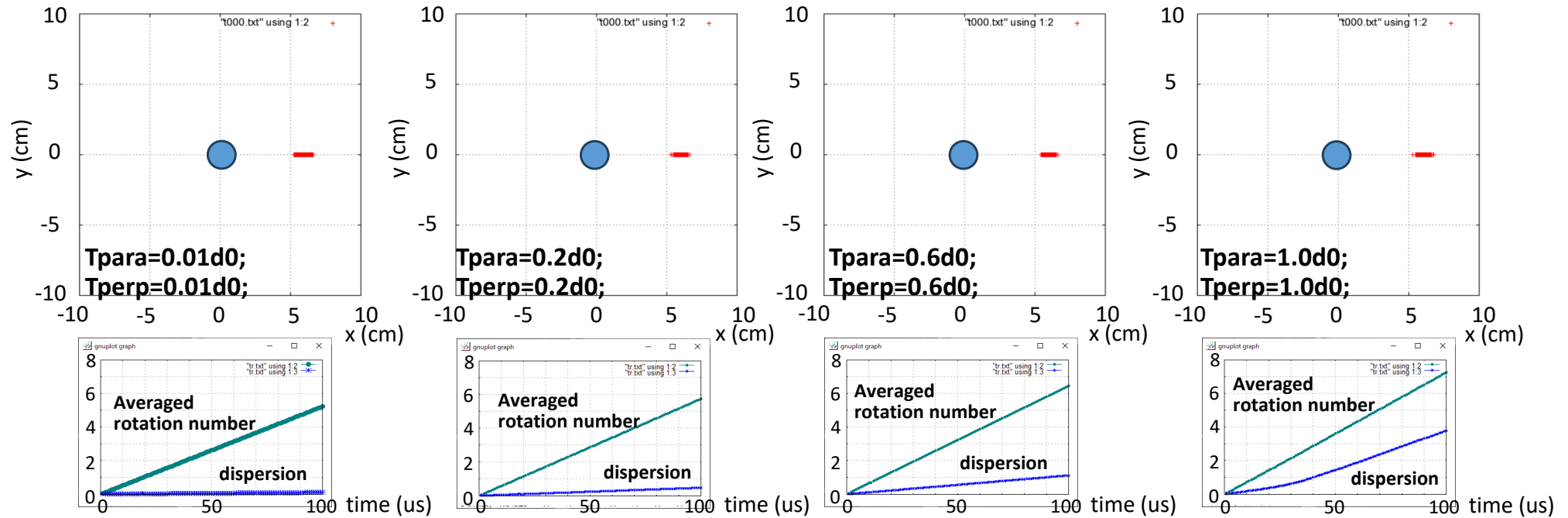
- $\sim 10\text{eV}$ 以下の陽電子は trap 軌道に入る（赤）。
- それ以上のエネルギーのビームは主にマグネットで損失（青）
- 更に高エネルギーになると真空容器壁で損失（黄）



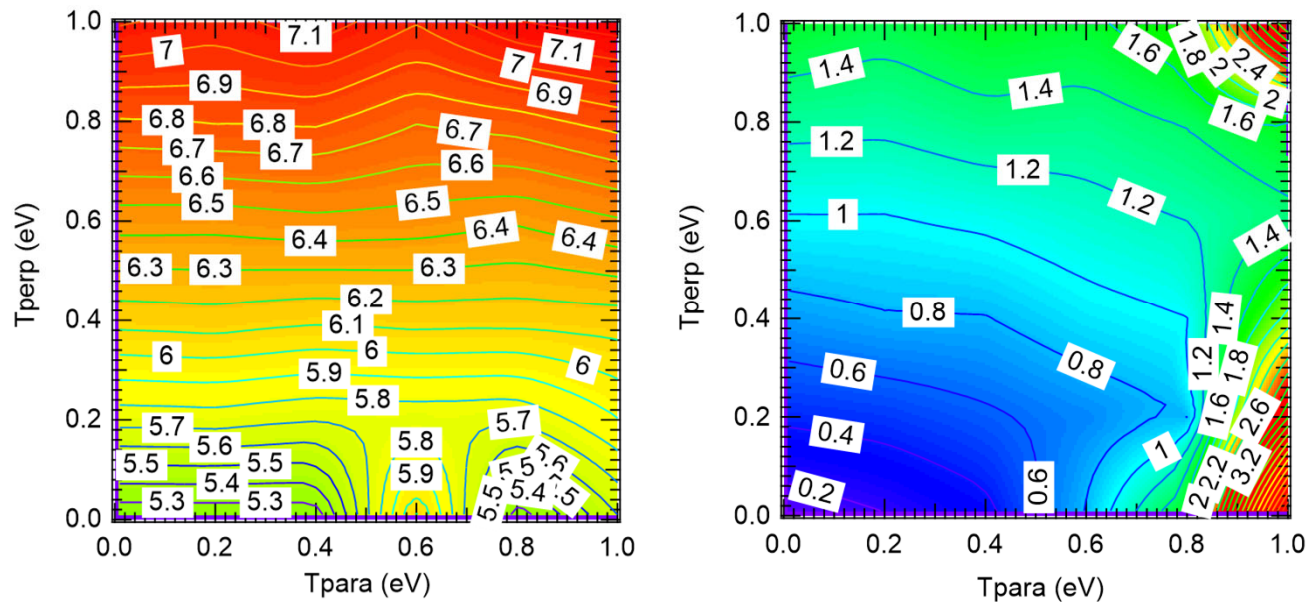
横軸: ビームエネルギー(eV)



トロイダル方向の一様化時間は閉じ込め時間より十分短い

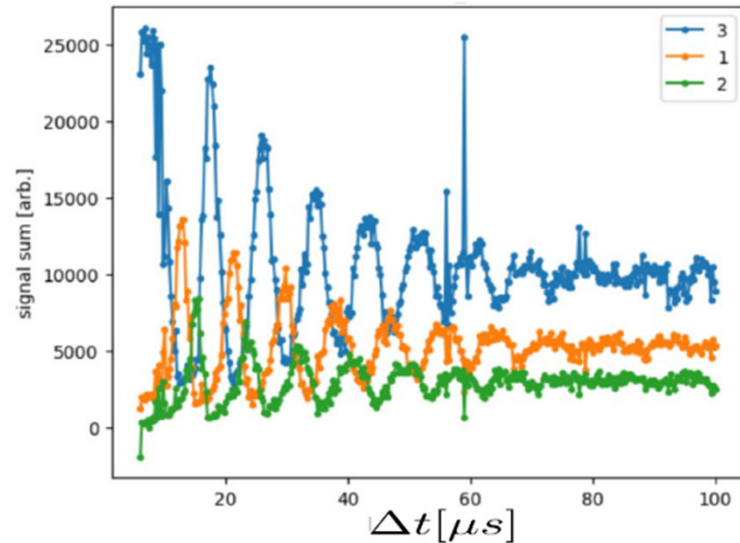


- 入射実験の現実的な温度($\sim eV$)時, 閉じ込め初期の $\sim 100us$ で一様化する



多数粒子の100us飛行後の
平均トロイダル周回数 (左)
とその分散 (右)

一様化の実験結果(消滅ガンマ線計測)との比較



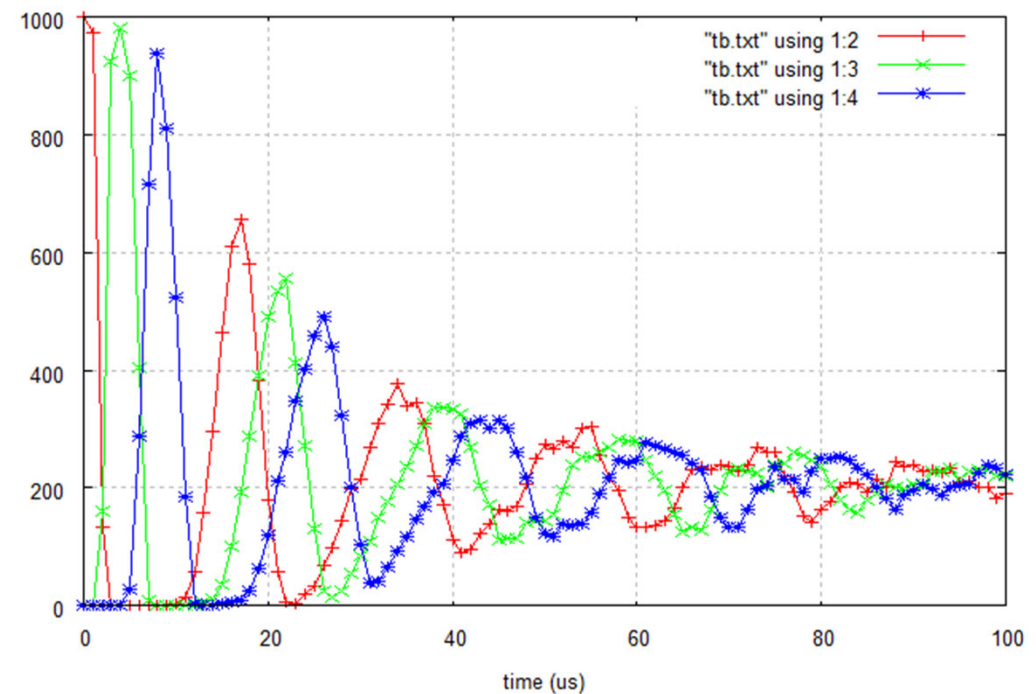
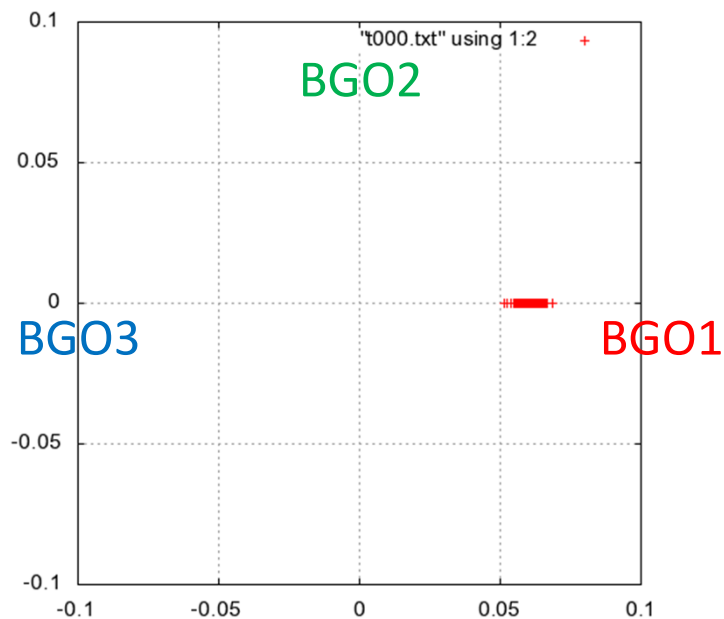
消滅ガンマ線の観測結果 (実験)

入射後の初期には振動が時間的に減衰し、より長時間の信号強度の減衰が見られる

J. von der Linden, A. Deller+, to be published

観測される消滅ガンマ線の計算値

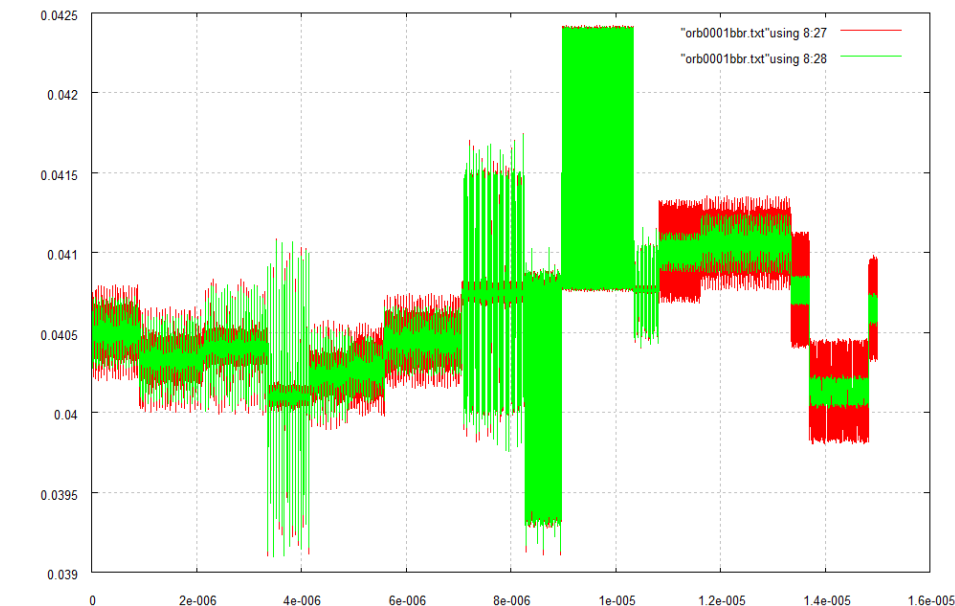
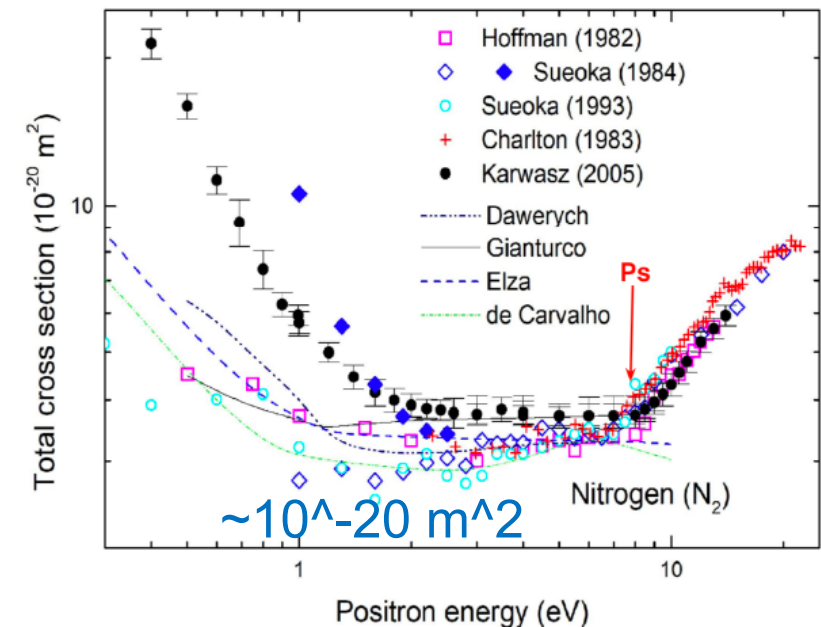
類似の時定数の振動と減衰を再現した



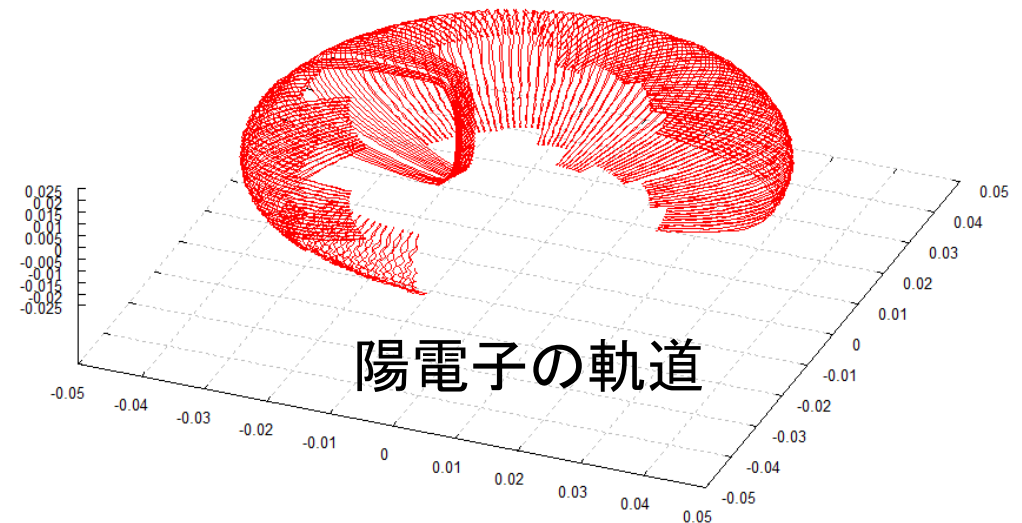
中性粒子衝突の効果を含む閉じ込め時間の評価

2021 Carelli+

- 低エネルギーでは弾性衝突が支配的
~ 10^{-6} Paでの平均衝突時間は~ 10^{-1} s
- 衝突頻度はランダムかつ平均時間を設定
- 衝突前後でエネルギー不変, 方向がランダムに変化する弾性衝突に近い状況とした

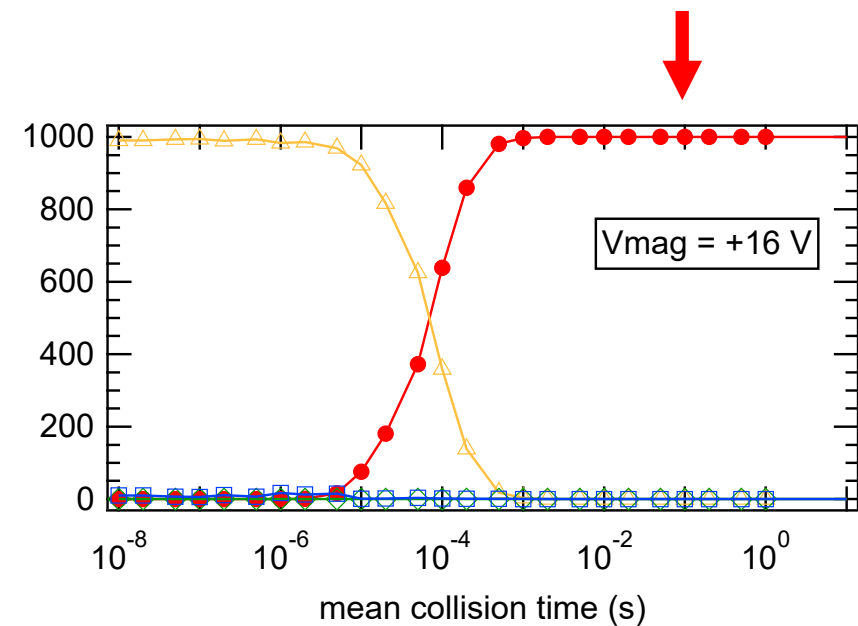
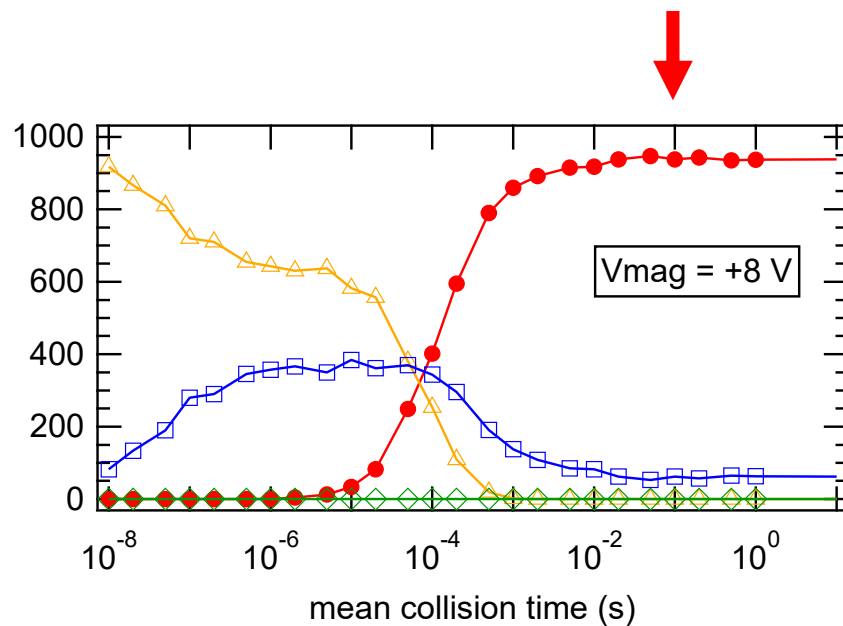
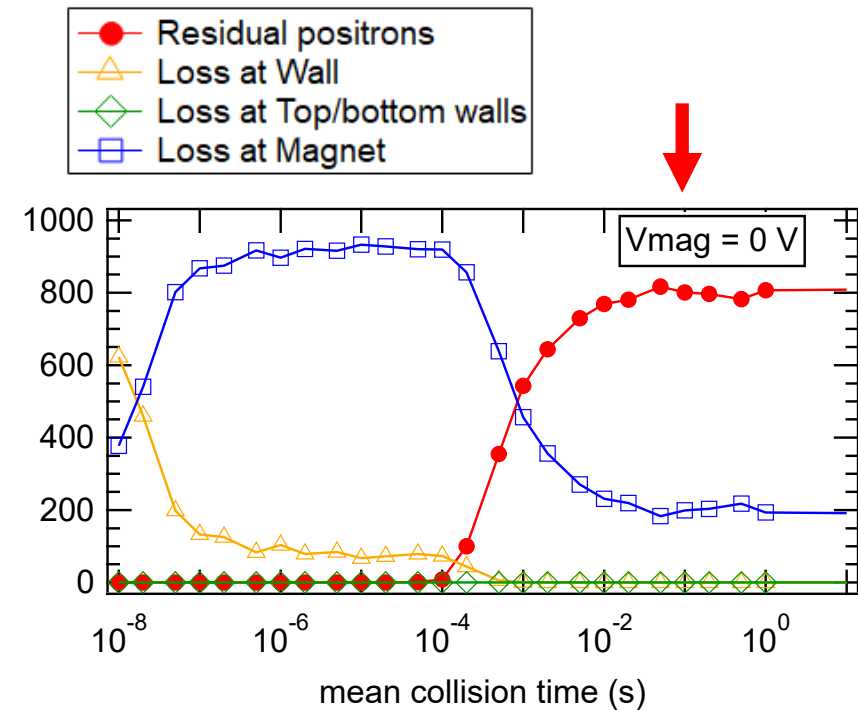
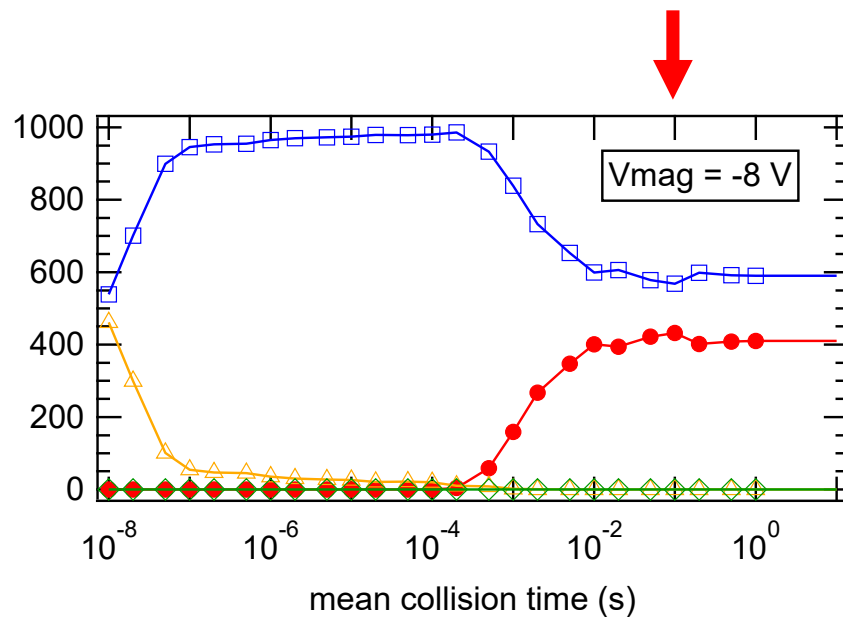


粒子のR位置の時間変化



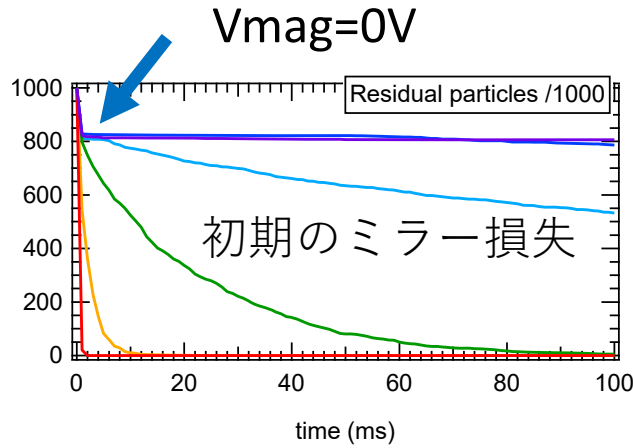
中性粒子衝突の効果(10ms捕獲後の残存/損失粒子数)

10/13



~10msまで中性粒子の影響は少ない(問題となるのはミラー口 横軸::平均衝突時間 (s))

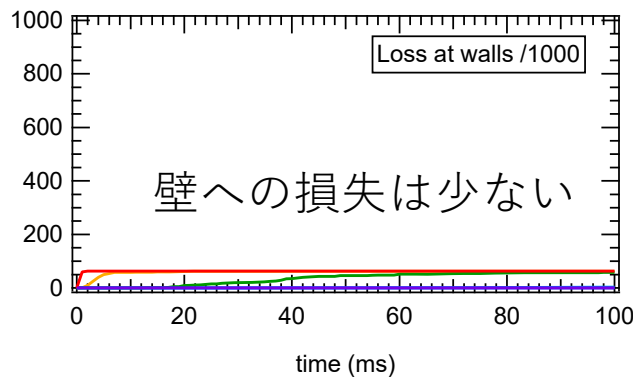
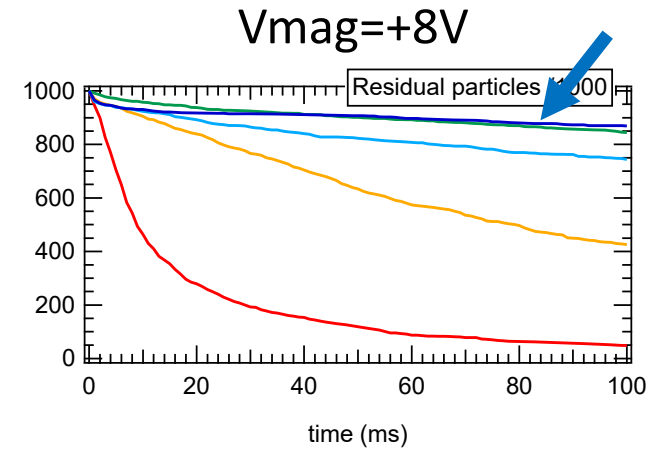
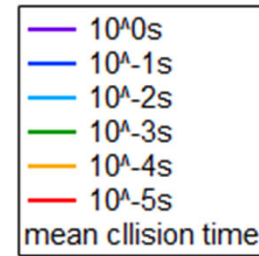
より長時間の閉じ込め傾向



残存粒子数

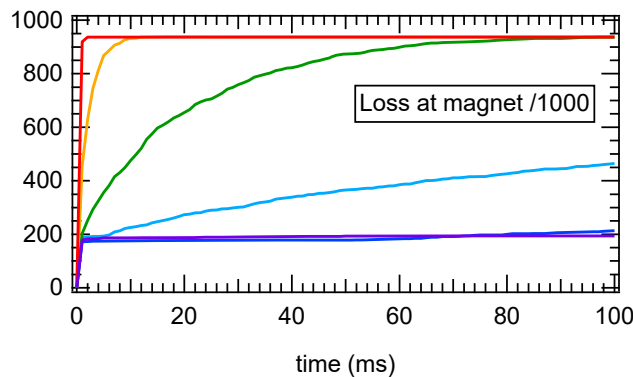
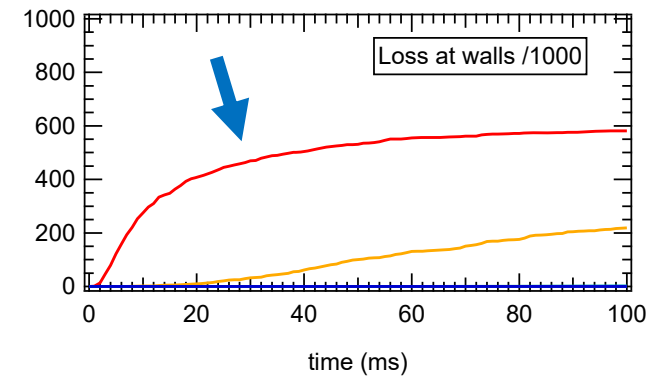
バイアス無し（左）時の閉じ込め初期に見られるマグネットでの損失は解消

しかし、不正電場の発生により緩やかな損失が発生



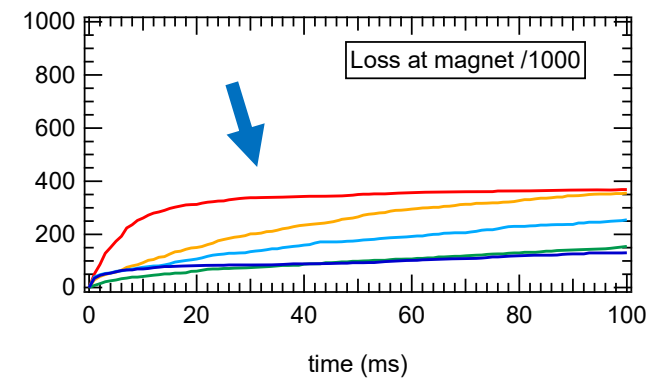
真空容器壁への損失

大きな損失経路となるのは、がマグネットに正バイアス（右）し、中性粒子との衝突頻度が高い時のみ



マグネットへの損失

バイアス無し（左）時の主な損失経路. 正バイアス時にも、内向き輸送された陽電子が損失する



現状の捕獲環境で、入射後にある程度(~s)の閉じ込めは可能と見積もられる

閉じ込め体積と現状粒子数でのデバイ長について

- トロイダル方向に投影した粒子密度分布
- RZ断面の各bin (2x2 mmの正方形) 中の粒子数

0: 2342 // 粒子が居ないbinの数

1-9: 104 particle number: 320

10<: 155 particle number: 9679

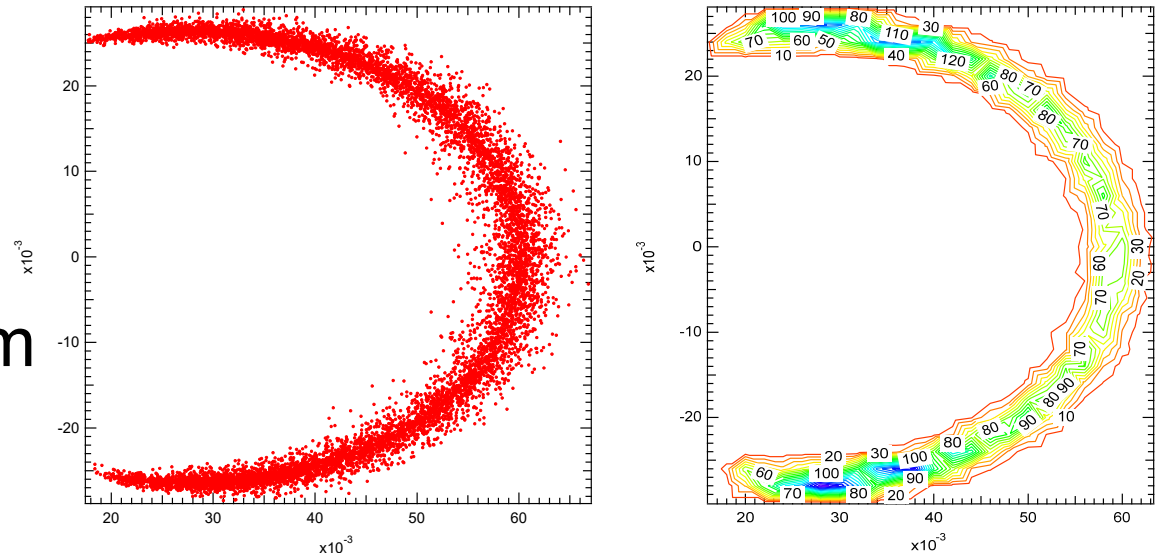
20<: 117 particle number: 9141

30<: 103 particle number: 8806

40<: 93 particle number: 8468

total particle number: 9999

粒子重心位置は $R=0.0430851$



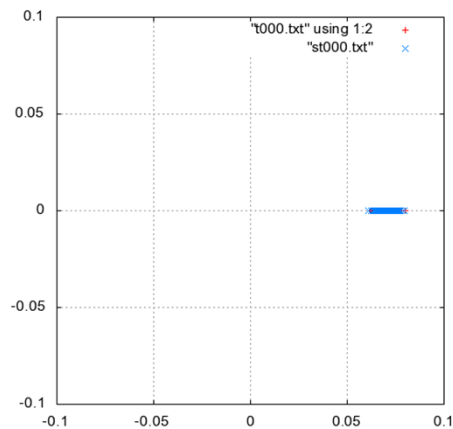
96.79%の粒子が155個のbinに収まっている. 断面積は
 $S = 4e-6(m^2) \times 155 = 6.2e-4 (m^2)$

回転体の体積は
 $V = 2\pi RS = 1.675e-4 (m^3)$

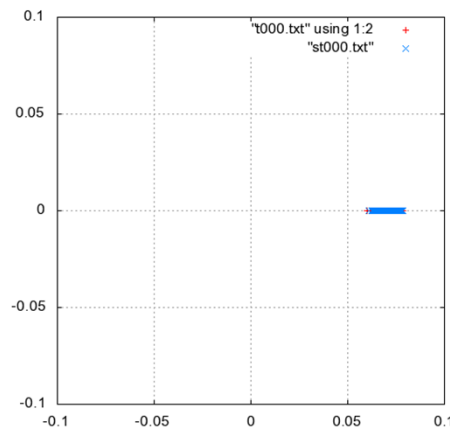
デバイ長 $7439 \cdot \sqrt{Te/n} \sim m$
 プラズマ条件は満たさない

まとめと今後の課題

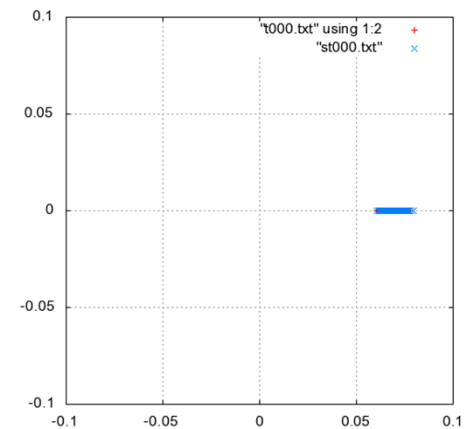
- 強磁場トラップによる陽電子大量生成に先立ち、ライナック+バッファガストラップからの $\sim 10^4$ のパルス陽電子のダイポールへの入射実験を開始した。
- 入射後の良好な閉じ込め(中性粒子衝突や不正電磁場の影響は小さい),
- トロイダル方向の一様化は入射直後に起こる(実験結果と矛盾しない).
- プラズマ条件を満たす閉じ込め粒子数の増大と, 電子と陽電子の同時閉じ込めが今後の課題となる.



$V_{\text{mag}} = 0\text{V}$



$V_{\text{mag}} = +8\text{V}$



$V_{\text{mag}} = -8\text{V}$

10^5 程度の空間的に一様な e^+/e^- の同時閉じ込め実験を年度内に実施予定