

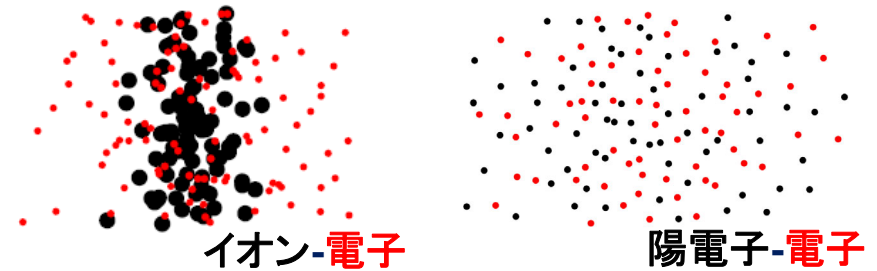
電子陽電子プラズマ生成に向けたダイポール磁場中への陽電子の入射と捕獲法の検討

東大新領域 齋藤晴彦

1. ダイポール磁場とパルス陽電子源による電子・陽電子プラズマ計画
2. 反物質用の超伝導磁気浮上ダイポール装置の開発計画
3. 磁場の軸対称性を保つ粒子入射と捕獲方法の検討
4. 装置パラメータにおける陽電子軌道のカオス
5. まとめと今後の課題

Introduction: 電子・陽電子プラズマの実験研究計画

- 電子と陽電子の等質量のプラズマ
 - ペアプラズマとして特異な性質
 - 核融合プラズマや天体現象との関連
 - 多くの理論・数値計算による研究, しかし実験研究例は少ない 2020 Stoneking+ JPP

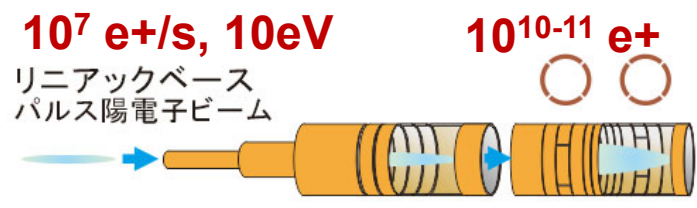


➡ 低エネルギー陽電子の磁場閉じ込めによるペアプラズマ実現を計画

- 全体計画: 磁気浮上ダイポールとパルス陽電子源の活用



パルス陽電子源



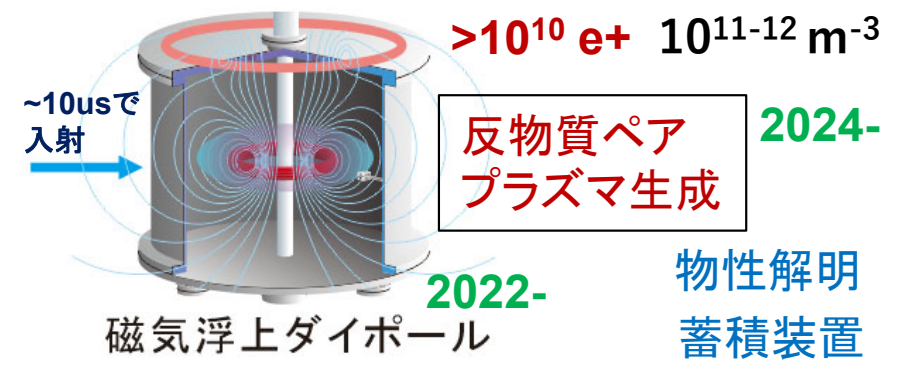
10^7 e+/s, 10eV
リニアックベース
パルス陽電子ビーム

10^{10-11} e+
○ ○

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

2023-



$>10^{10}$ e+ 10^{11-12} m⁻³

反物質ペア
プラズマ生成

2024-

2022-
磁気浮上ダイポール

物性解明
蓄積装置

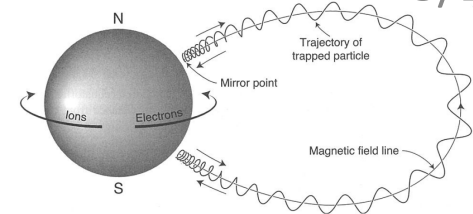
産総研・リニアックベース陽電子源
2020 Higaki Michishio+ Appl. Phys. Exp.

- パルス化で閉じ込め粒子数の向上を図る

- 小型装置(コイル半径~10cm)
- 直接冷却と熱絶縁の両立
- 可動式のSolton®端子の利用

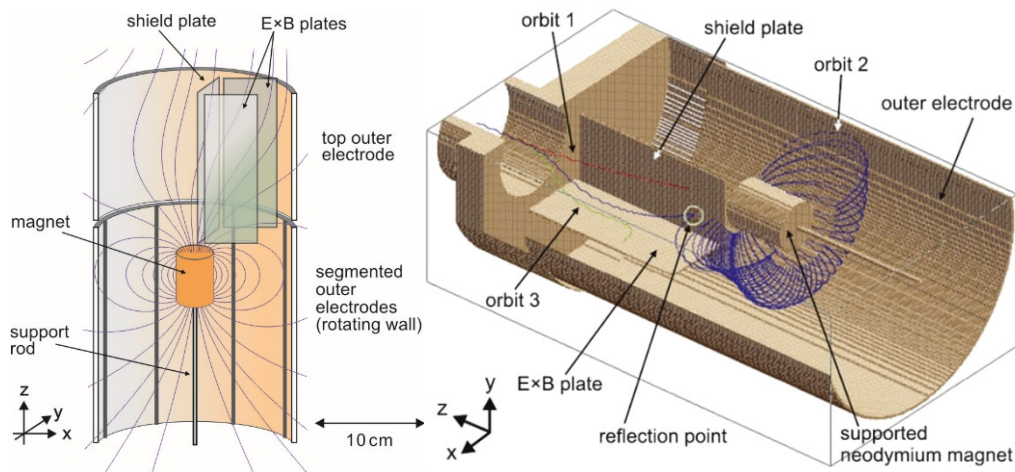
磁気浮上ダイポールへの入射は重要な開発課題

人工磁気圏でのペアプラズマ生成の入射の課題



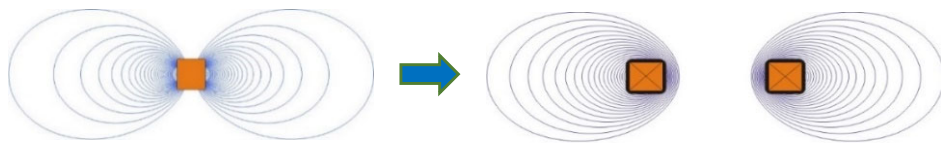
- 円環電流によるダイポール磁場(「革新的閉じ込め配位」)
- 外部磁場で軸対称, 断熱不変量の保存 → ペアプラズマの良好な閉じ込め
- 閉じた磁気面内への粒子(陽電子)入射が課題 周回軌道の実現後は, 内向き輸送や回転電場の適用で径方向制御が可能

● ドリフト入射法@永久磁石装置



永久磁石装置では, 高効率の「オフセット入射」法を実現した

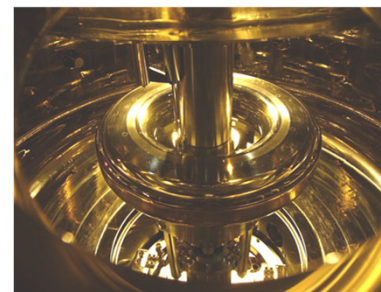
2015 Saitoh+ NJP



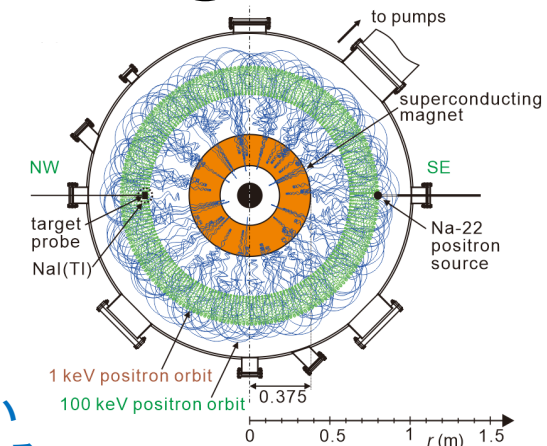
安定磁気浮上が必要, 異なる磁場構成

磁気浮上ダイポールに適した陽電子入射法?
高効率の入射経路は存在するか?

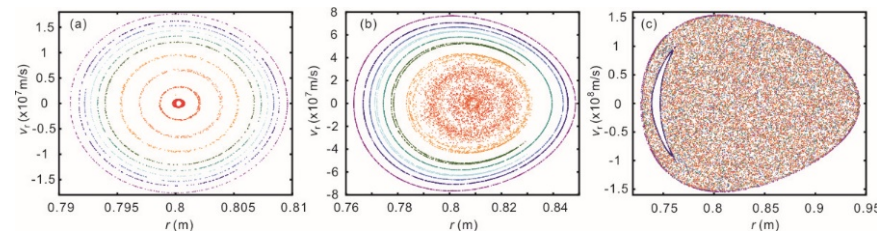
● カオスの効果の利用@RT1



高エネルギー(>10keV)
陽電子のカオス的な長い
軌道長: 入射に活用できる



2016 Saitoh+ PRE

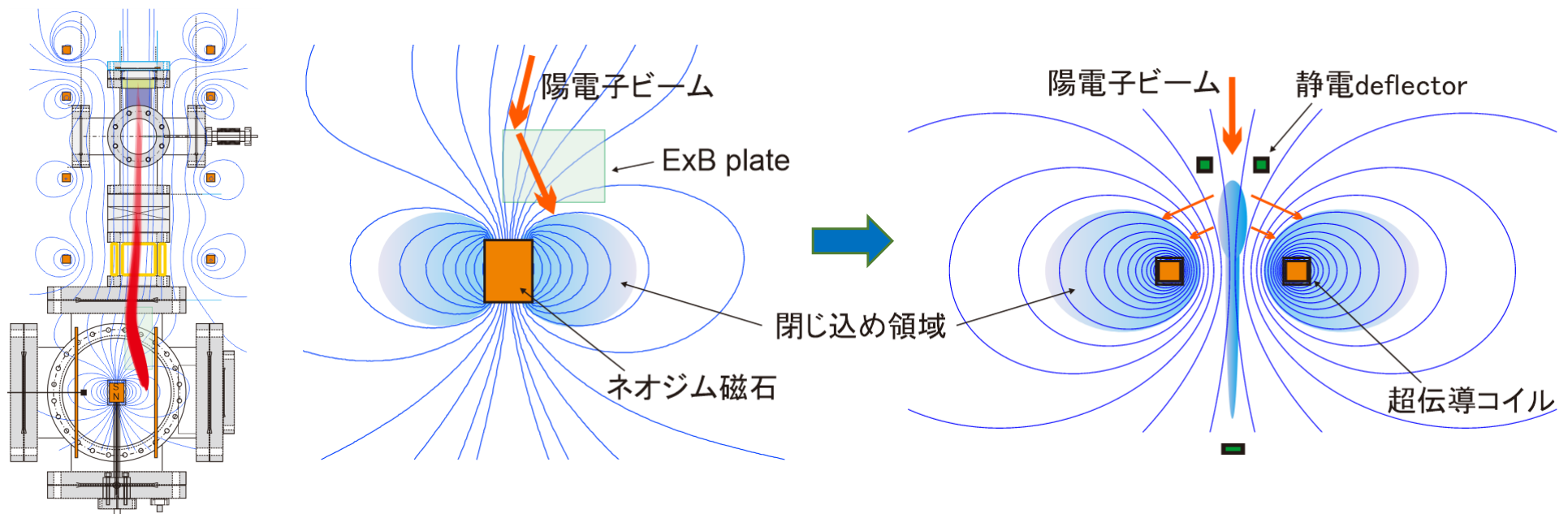


低エネルギー, しかし装置スケールも小さい

コンパクトダイポールで低エネルギー
陽電子のカオスの効果出現の閾値は?

本研究の目標

- 磁気浮上ダイポールに適した粒子入射方法
 - 永久磁石同様のオフセット入射が磁気浮上系で適用可能か？を評価
 - 磁場の軸対称性を保つ入射経路を選定し，現実的な入射法を決定する
 - 飛行距離の長距離化に有効な軌道カオスの出現を装置パラメータで計算



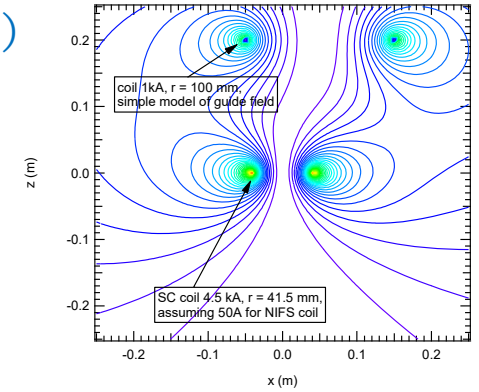
プロトタイプ装置で導入したオフセット入射：
 ビームラインのガイド磁場をダイポール磁場と
 同心状にしないことで，磁石の上表面での損失が
 抑制され100%の入射効率が実現された。

磁気浮上ダイポールへの陽電子入射：
 閉じた磁気面を持ち陽電子と電子の同時閉じ込め
 が期待される一方，入射方法は調べられていない。
 コイル磁気浮上と両立する必要がある。

従来のオフセット入射は磁気浮上ダイポールには適用が難しい

- 超伝導コイルの磁気浮上に関して:

RT1では地磁気 (<1Gauss) の補正が必要なレベル

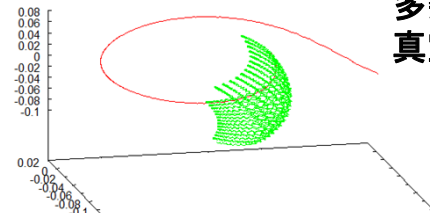


- コイル安定浮上のために, 入射位置オフセットは適用困難
- ダミーの入射ポート(磁場のみ)の設置で補正は可能

- 荷電粒子の閉じ込め特性に関して:

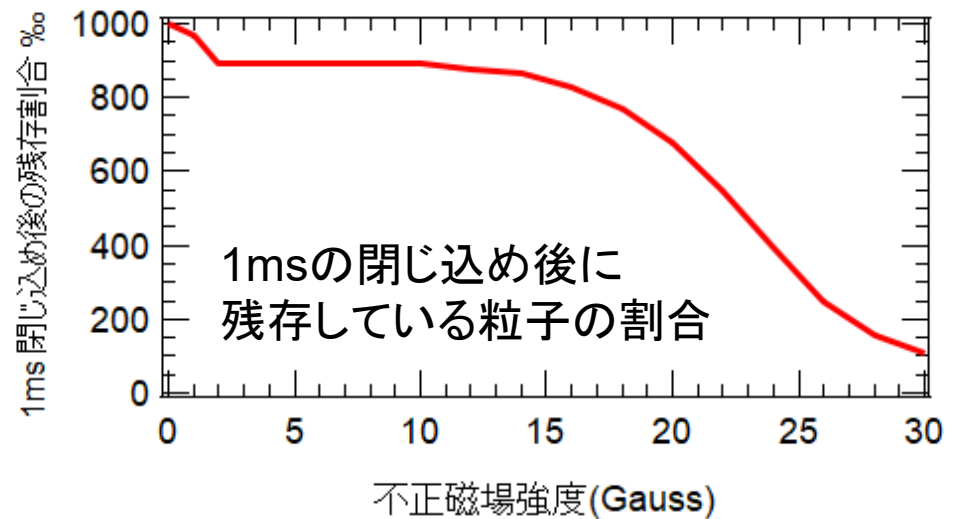
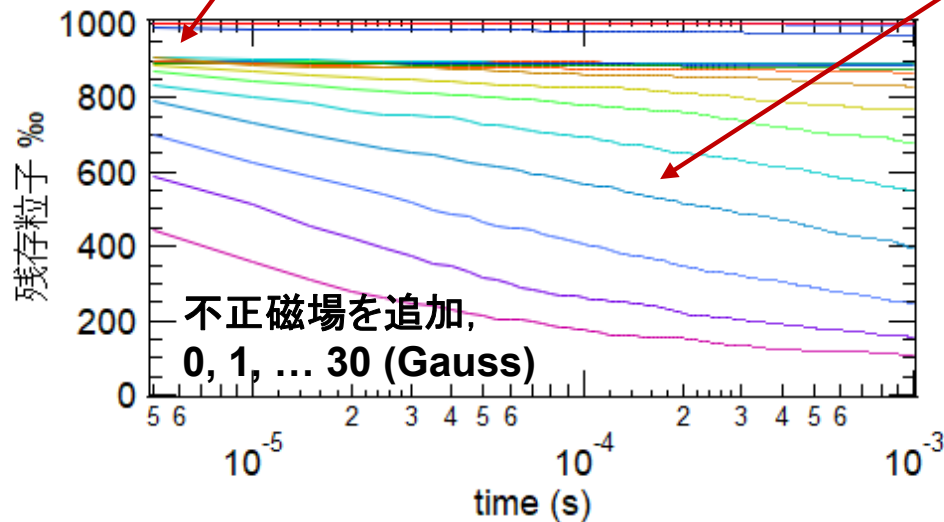
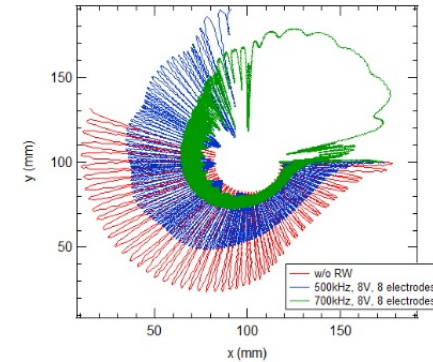
- ダイポール磁場 + 不正磁場中の効果は深刻

トロイダル周回運動する軌道に入らない粒子が発生



多数粒子(K=10eV)の軌道追跡, 真空容器壁に到達=損失とみなす

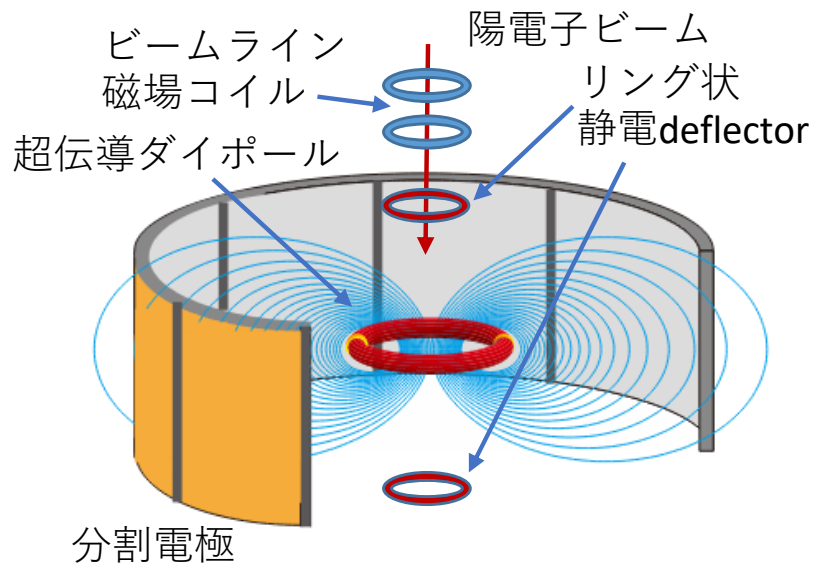
軌道が外側に拡がり容器壁で損失する



- ~数ガウスの不正磁場で粒子損失が増大 ➡ オフセット入射法は適用困難

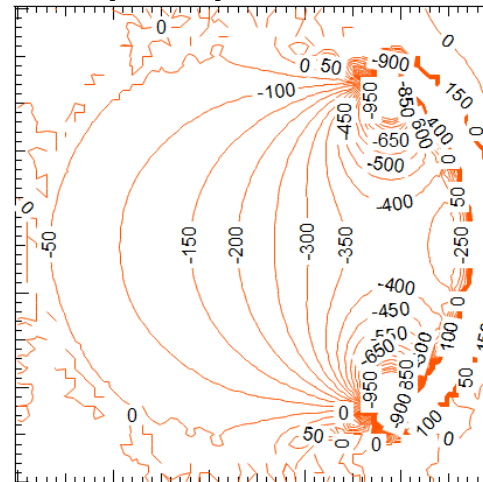
軸対称磁場中で、直方向電場を利用したドリフト入射

- 軸対称磁場中のドリフト入射経路の検討
 - 入射ビームラインとダイポール，浮上コイルを同軸配置
 - 周方向に分割した電極による垂直電場によるドリフトの発生

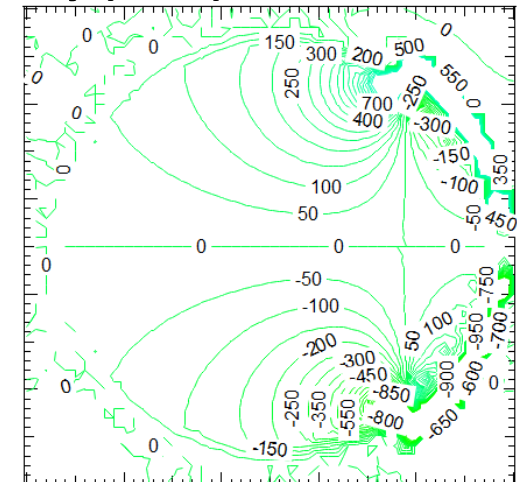


プロトタイプ装置で導入した分割電極

E_x (V/m)



E_y (V/m)

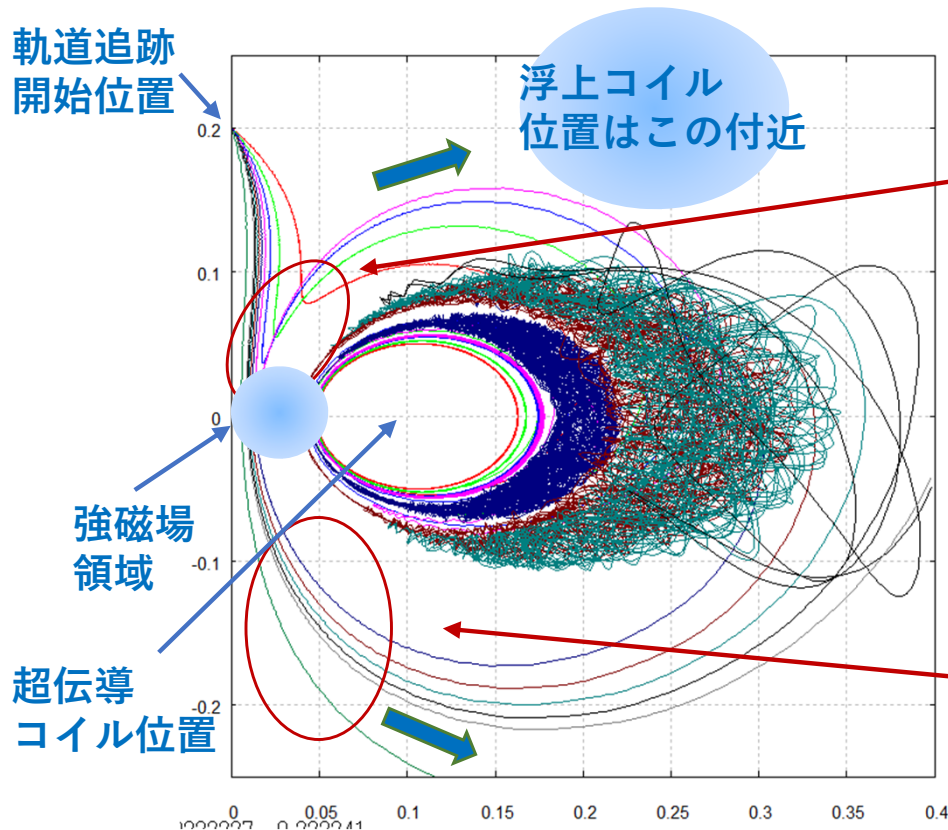


真空容器の内側に配置した分割電極（直径60cm）による E_x （水平方向）と E_y （垂直方向）の印加例（装置のtop view, コイル上部でのスライス）：自由度の高い電場が生成可能

➔ 実現可能な電場を与えて（現状は領域を区切り一定強度電場）軌道追跡し、同軸入射後の有効なドリフト入射の経路を探す

ダイポールの閉じ込め領域に到達可能な2つのドリフト入射経路

- 磁場の軸対称を保ち(安定浮上と両立し)入射可能な経路が存在する
 - 永久磁石の場合と同様のオフセット入射は磁気浮上系で適用可能か？
 - 一方, 閉じた磁気面内への粒子入射は課題となる(特に希少な陽電子)



1. 赤道面より上部で比較的急なドリフト:
V_{perp}を増大させてミラー反射を起こし,
上部経由で閉じ込め領域に送る経路

軌道自体は定性的には従来の永久磁石の場合と類似(損失しない軌道が存在する)

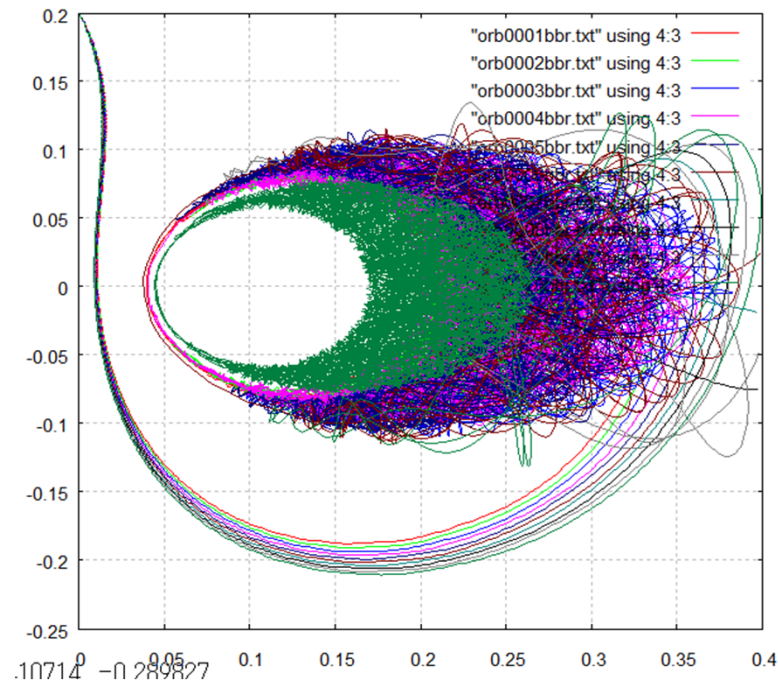
2. 比較的弱電場で赤道面下部に到達させる:
V_{perp}の増大を抑制しミラー反射を起こさず,
下部経由で閉じ込め領域に送る経路

浮上コイル(この計算では含めていない)
近傍を通らずに到達できる

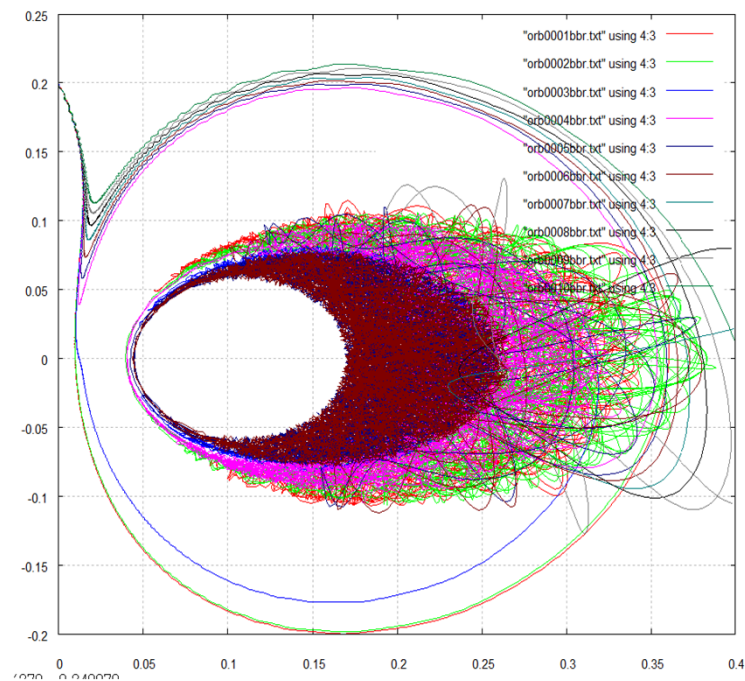
典型的な2つの入射経路の典型軌道。
V_{para}=3eV, V_{perp}=1eVの陽電子に対して
500-1400V/mの一様電場を垂直方向に印加。

入射可能なパラメータ領域は現状の計算ではあまり広くない

- 温度広がり(0.1 eVのオーダー)を持つビームに対しては、入射可能領域が十分に広いことが必要となる。
- 多数粒子の計算では入射効率自体は100%に近いものも得られたが、反射位置は粒子の初期速度に敏感で、望ましくない経路も混入している



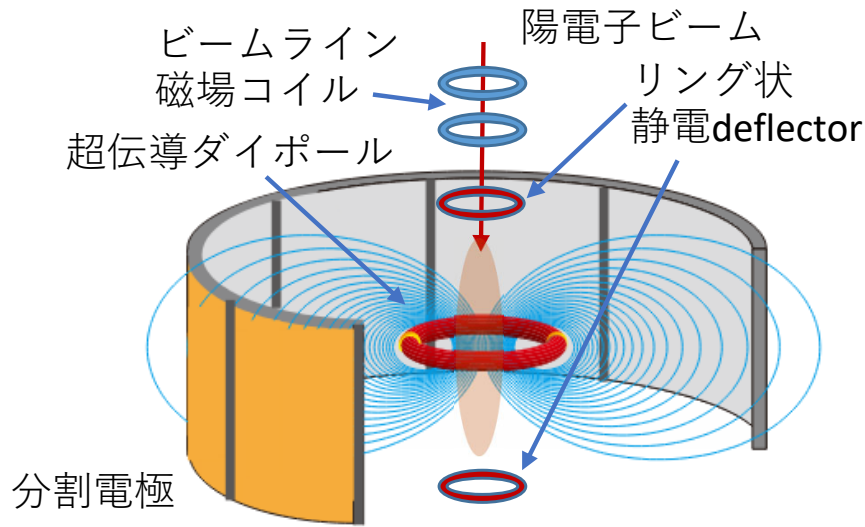
$V_{para}=3 \pm 1$ eV, $V_{perp}=1$ eVの陽電子
に対して、同様の経路で入射が可能



$V_{para}=3$ eV, $V_{perp}=1 \pm 0.5$ eVの陽電子
に対して、同様の経路で入射が可能

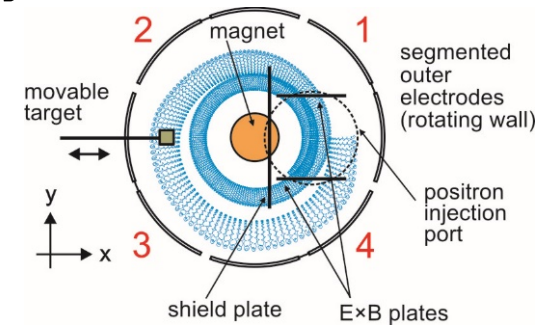
反射を制御し入射効率を維持したまま経路を選択することは今後の課題

ドリフト入射とカオス・径方向輸送の効果の組み合わせについて



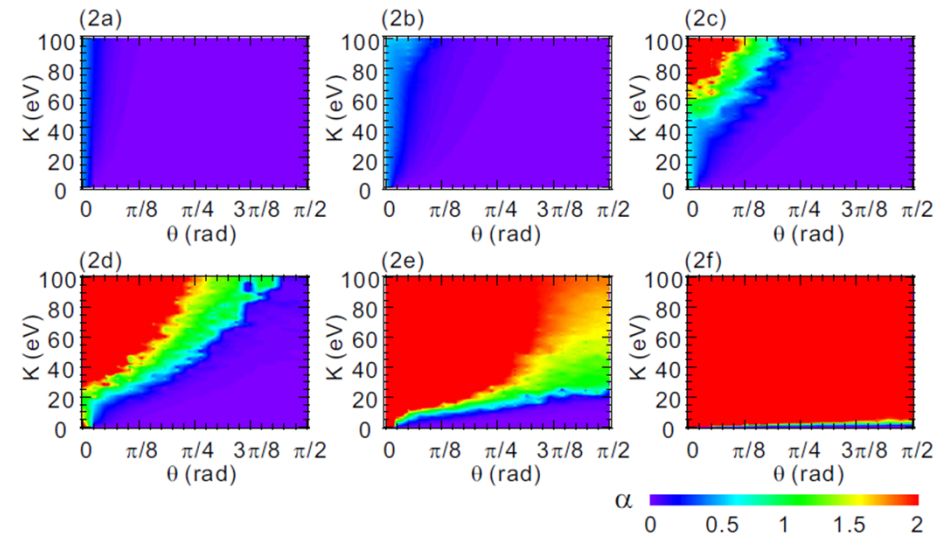
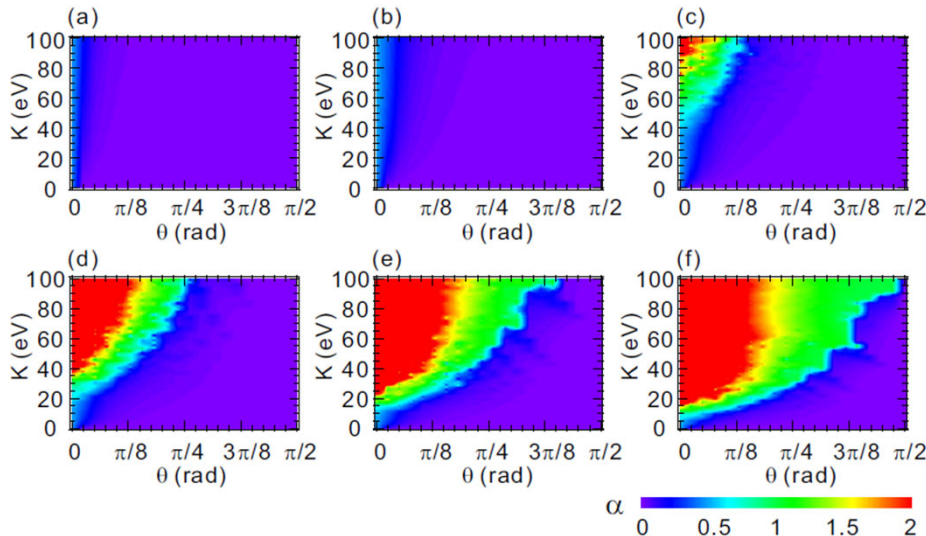
- 軸上のミラー領域に進入, 閉じ込め
- ドリフト入射により閉じ込め領域の周辺部へ
- 強磁場領域への移動:

内向き輸送,
回転電場,
カオスの効果



- 装置パラメータ下の低エネルギー陽電子軌道のカオス
入射ポート等で損失せず長い軌道長を持つ陽電子の存在

谷岡+ 2022物理学会年次大会から,
装置パラメータを更新した計算結果



小型ダイポール(コイル大半径 a:7.5, b:10, c:12.5, d:15, e:17.5, f:20cm)の閉じ込め配位で, 陽電子の異なるエネルギーとピッチ角に対するカオスの効果の評価(緑の領域がしきい値).

セパトリクスの効果(主コイル電流に対して, a:0%, b:10%, c:15%, d:20%, e:25%, f:30%の浮上コイル電流を設定)によるカオスとなる領域の増大(パラメータは左と同様).

まとめと今後の課題

- 電子・陽電子プラズマ成績を目的として、コンパクトな磁気浮上ダイポール製作を進めており、高効率の入射方法の実現が課題となっている。
- 先行研究の永久磁石プロトタイプ装置では「オフセット入射」が実現されたが、これは磁気浮上装置には適用が困難（浮上と閉じ込めの両方の原因）。
- これに代わる入射方法として、軸対称な磁場で垂直電場を印加することで、閉じ込め領域の周辺へとドリフト入射が可能な経路が存在する（永久磁石との配位の違いによる）。
- 粒子の V_{para} の揺らぎに対しては広い入射可能領域を持つが、 V_{perp} など電場配位の最適化が進んでおらず、今後の課題。
- 低エネルギー陽電子軌道にカオスの効果が出現することを確認。
- より現実的な電磁場配位での陽電子入射の最適化、設計、装置構成への反映を現在進めている。