

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 Radial manipulation of positron orbit by rotating wall electric field in dipole magnetic field configuration

齋藤晴彦^{1,2}, 檜垣浩之³, 満汐孝治⁴, 大島永康⁴, 柳長門², 佐藤直木²
H. Saitoh^{1,2}, H. Higaki³, K. Michishio⁴, N. Oshima⁴, N. Yanagi², N. Sato²

東京大新領域¹, 核融合研², 広島大先進理工³, 産総研⁴
GSFS U. Tokyo¹, NIFS², GSASE Hiroshima U.³, AIST⁴

我々は、等質量粒子から構成されるペアプラズマ[1,2]の波動や不安定性等の諸特性の解明を目的として、大強度陽電子源[3]とダイポール磁場装置[4]を活用した電子・陽電子プラズマ[5]の研究を計画している。現在、 10^9 個以上の大量陽電子を蓄積するための直線型超伝導強磁場 (5T) トラップと、ペアプラズマを捕獲する小型磁気浮上ダイポール装置[6]の製作、冷却試験を進めている。ダイポール磁場中で電子と陽電子それぞれの非中性プラズマを混合することでペアプラズマが生成されるが、入手可能な粒子数が絶対的に少ない陽電子群のプラズマ条件を満たすことは挑戦的な課題の一つである。またプラズマの密度勾配に対する安定性や構造の自己組織化の研究を行うためには、ダイポール磁場において任意の径方向分布を持つプラズマを生成することが必要である。こうした理由から、ダイポール磁場中で荷電粒子群の径方向分布制御や圧縮を高い自由度で実現する手法の実現が求められている。

非中性プラズマの分野で標準的に使用される直線型の Penning-Malmberg トラップでは、回転電場と呼ばれる時間変動する電場を用いた捕獲粒子の径方向操作方法が知られている[7]。軸方向の一様磁場を用いた直線型配位では、磁場と直交する回転電場を与えて粒子群にトルクを与え圧縮し、損失の抑制が可能である。プラズマ圧縮の機構としては、個々の粒子運動あるいは非中性プラズマの持つ揺動モードと印加電場との結合、またモードに依存しない strong drive と呼ばれる運転領域が存在する。一方、直線型とは異なるトロイダル系のダイポール磁場中では、変動電場による非中性プラズマの径方向操作が可能かは不明であり、そのための手法は検討されてこなかった。

本研究では、ダイポール磁場における回転電場による陽電子群圧縮の効果を単一粒子レベルで軌道計算により調べた結果と過去の実験との比較、また今後の実験計画について報告する。現時点では、図1に示す永久磁石によるダイポール磁場装置での回転電場印加の解析を進めている。磁

力線と直交する径方向の粒子輸送を引き起こすためには、方位角方向の電場成分が有効である。このため図1(b)に示すように、ダイポール磁場装置の真空容器壁付近で、トロイダル方向に分割した電極を配置した。ドリフトによるトロイダル方向の周回運動と結合する低周波の時間変動電場を与えることで、陽電子軌道の径方向の操作が可能になる。現在の実験及び数値計算では電極は4分割した状態で使用しており、それぞれに

$$V_i(t) = A_{rw} \sin(2\pi ft - \phi_i),$$

(ただし $\phi_i = i\pi/2, i = 1-4$) で表される位相差を持つ正弦波を印加する。こうしてダイポール磁

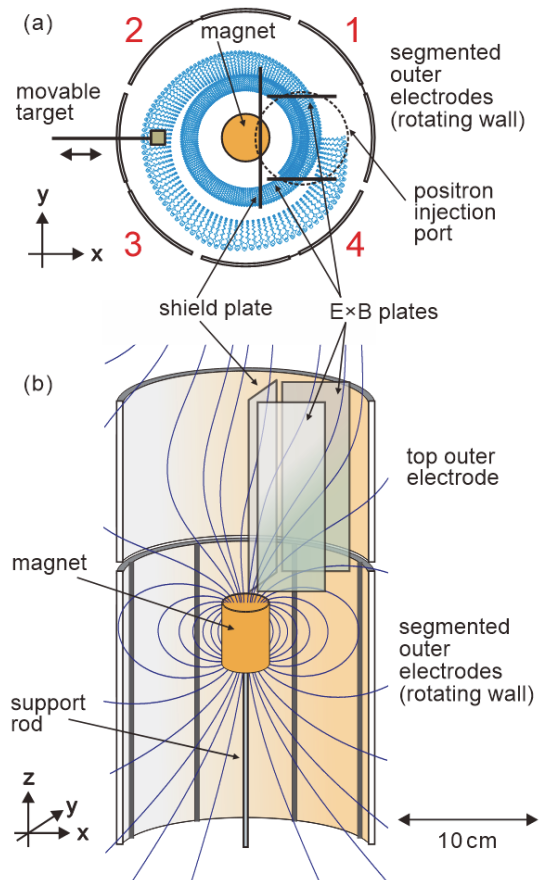


図1: 永久磁石ダイポール装置と、周回方向に分割した電極に印加した回転電場の影響を受けて径方向に圧縮される陽電子軌道の模式図。

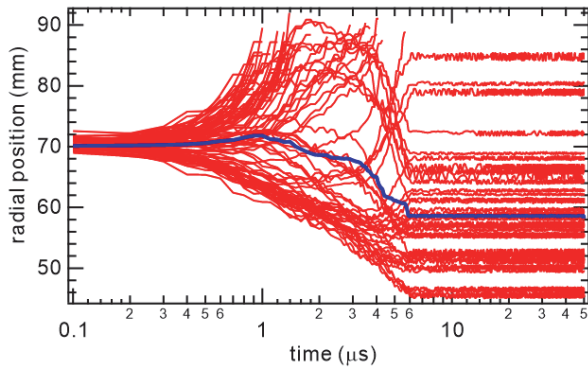


図2: 多数粒子に回転電場を時間を区切って ($t=0$ s の入射直後から6 μ sまで) 印加することで、径方向平均位置 (青) は強磁場側に移動する。

場版の「回転電場」を捕獲した陽電子に与えることで、荷電粒子の正準角運動量の制御と径方向のドリフト状運動の駆動 (図 1(a)) が可能になる。従来の解析では、周方向電場として、実験で使用した回転電場の強度をやや定性的に取り込み計算を行っていたが、本研究では電極形状や支持構造を含むマグネットの影響を正確に取り込んでいる。これにより、過去にミュンヘン工科大学の大強度陽電子源 NEPOMUC において永久磁石を用いたダイポール磁場装置により実施した初期実験[8,9]の結果と一致する傾向が強まった。

回転電場印加による荷電粒子の運動は基本的に径方向の振動であり、入射後の陽電子の飛行位置に応じて選択した短時間の回転電場を印加することにより、「圧縮」(平均位置の強磁場側への移動) が実現される (図 2)。ところで、直線磁場装置における回転電場圧縮では、残存あるいは封入中性ガスと荷電粒子の非弾性衝突の効果が重要な役割を果たす[7]ことが知られている。ダイポール磁場においても同様に、中性粒子の衝突の効果をとり入れた陽電子の軌道計算を行った。回転電場の印加は、一般にトラップ中の荷電粒子群を加熱し、プラズマ条件を満たすことを困難にする。またサイクロトロン回転半径の増大は、ダイポール磁場コイルや真空容器壁に接して消滅する陽電子の増大につながり好ましくない。こうした点について、陽電子と非弾性衝突をするバッファガス粒子の効果を軌道計算に取り込み、回転電場により径方向に圧縮した陽電子を低温状態に保つ条件が存在することが示された。図 3 に示すように、非弾性衝突によるエネルギー損失が効果的に働く場合には、プラズマ状態の実現に有効である低エネルギー状態を維持しながら、粒子軌道を強磁場の内側へと径方向に圧縮可能である。

本研究では、単一粒子描像の範囲で、ダイポール磁場中で陽電子の径方向分布操作を実現す

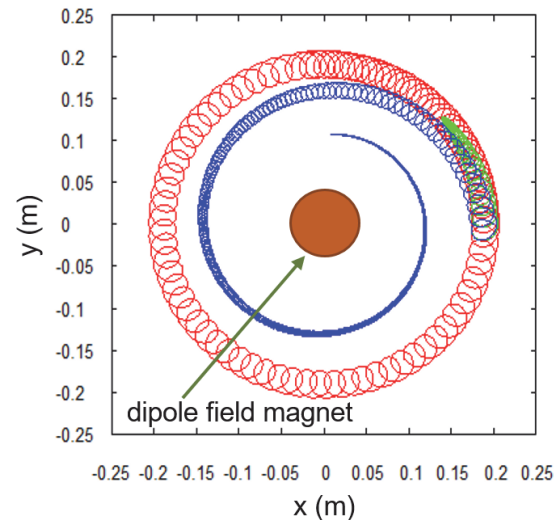


図3:永久磁石ダイポール磁場 (図1, top view) 中の陽電子軌道の計算例. 中性粒子衝突による非弾性衝突の効果は、緑、青、赤 (なし) の順に強い。

る回転電場を提案し、先行実験結果と粒子軌道計算が比較的良好一致を示すことが示された。こうした過程は、電子・陽電子プラズマ実験を実現する上で必須であると共に、ダイポール磁場中の荷電粒子群の構造形成としても興味深い研究課題である。線形加速器とバッファガストラップから構成される現行の低速陽電子源[3]では、パルス陽電子群 (10^5 程度) の自己電場の効果は非常に小さい。このため、NEPOMUC 同様、今回軌道の評価を行った単一粒子としての扱いが比較的良好に成立すると予想される。一方、バッファガストラップの次段に導入する強磁場トラップから引き出す更に大強度のパルス陽電子群では、軌道計算に含まれない多数粒子同士の相互作用の影響が無視できない。ダイポール磁場中の多数荷電粒子の集団現象として、直線型配位における strong drive と類似の圧縮機構が存在するか、また単一粒子描像の範囲でも効果的な陽電子圧縮を実現するためのパラメータ依存性を解明し、その最適化を進めていくことは今後の実験的な課題である。

JSPS 科研費 22H00115 及び 22H04936, NIFS 一般共同研究 NIFS23KIEA040 の助成を受けた。

- [1] 1978 Tsytovich & Wharton, CPPCF **4**, 91.
- [2] 2003 Oohara & Hatakeyama, PRL **91**, 205005.
- [3] 2020 Higaki+, Appl. Phys. Express **13**, 066003.
- [4] 2006 Yoshida+, Plasma Fusion Res. **1**, 008.
- [5] 2023 Sato, Phys. Plasmas **30**, 042503.
- [6] 2020 Saitoh+, Rev. Sci. Instrum. **91**, 043507.
- [7] 2015 Danielson+, Rev. Mod. Phys. **87**, 245.
- [8] 2018 Stenson+, Phys. Rev. Lett. **121**, 235005.
- [9] 2018 Horn-Stanja+, Phys. Rev. Lett. **121**, 235003.