

電子・陽電子プラズマの実現に向けたダイポール磁場装置の開発状況

齋藤晴彦¹, 柳長門² 東大新領域¹, 核融合研²

● 研究動機と本課題の目的

- 磁気浮上ダイポール装置「人工磁気圏」とパルス陽電子源を活用した、磁場閉じ込めによる電子・陽電子プラズマ実現と物性解明を目指している。
- 希少な反粒子の高密度状態を実現するためには、閉じ込め領域が小体積のコンパクトな磁気浮上ダイポール装置が要求され、最適な冷却・運転条件の選定と高効率の粒子入射方法の解明が必要となっている。
- 直接冷却 (He循環等なし), 誘導励磁 (外部電源を使用しない) など、高温超伝導コイルを用いた汎用性の高い小型装置の開発を目指す。

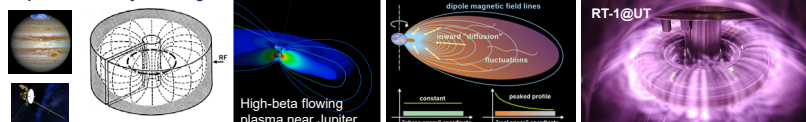
● 現時点でのまとめと今後の課題

- 陽電子入射経路の軌道計算による検討の結果、コイルの安定磁気浮上と両立可能な軸対称性を保つ構成で装置設計を進めている。
- 永久磁石のプロトタイプ装置で高効率入射を達成したオフセット入射とは異なり、軸上から閉じ込め領域に到達可能な入射経路を確認した。
- 無冷却で永久電流を維持する超伝導コイル巻線の熱遮蔽と直接冷却を両立するために、ソルトン端子とヘリウムガスを用いた熱スイッチを組み合わせた構成を検討しており、冷却試験で実現性検証を進めている。

人工磁気圏によるプラズマ研究と電子・陽電子プラズマ

● 磁気浮上超伝導ダイポールによるプラズマ閉じ込め

"Dipole Fusion" by A. Hasegawa



- 先進核融合に適した超高βプラズマの探究
- 非一様な磁場中の拡散としての自己組織化
- 波動粒子相互作用による構造の形成
- 磁気圏の波動, 非中性・反物質プラズマ

● 電子・陽電子系のペアプラズマ

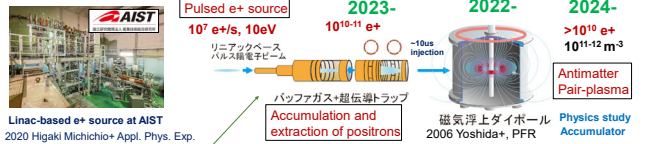
1978 Tsytovich&Wharton, Comm. Plasma Phys. Cntr. Fusion*
2014 Helander, Phys. Rev. Lett.**; 2017 Stenson, J. Plasma Phys.

外部電場に対する応答の違いの模式図

- 波動, 安定性の実験検証: 基礎プラズマ
- 自己組織化: 宇宙プラズマの構造形成
- 陽電子の大量蓄積: ポジトロニウムの活用

電子・陽電子プラズマ計画

● 大強度低速陽電子源+磁気浮上超伝導ダイポール



● Trap and extraction of many e+
Separation of injection and trapping phases

SC trap enhance e+ number
2020 Higaki Michichio+ Appl. Phys. Exp.

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

● ペアプラズマ実験

- 波動励起/検出
- 回転電場制御
- 密度境界の探索

先行研究 (陽電子実験と装置検討)

● 陽電子ビームの高効率入射と閉じ込め検証@NEPOMUC

Ratio of positron number reaching the target probe after injection

Trapping with positively biasing and grounding the magnet

- 永久磁石による装置
- 高効率(~100%)入射
- 1秒程度の捕獲

2018 Stenson+ Phys. Rev. Lett.
2018 Horn-Stanja Phys. Rev. Lett.

● 磁気浮上ダイポールドラップへ

閉じた磁気面: 電子と陽電子の同時閉じ込め

反粒子の高密度化には小閉じ込め体積が重要

粒子入射法の検討と装置構成

- 軸対称性を保つ必要性: コイル磁気浮上, 閉じ込め性能
- コイルの安定浮上には磁場対称性が必要 (dummy port設置は可能)
- 一方, 粒子軌道追跡によれば不正磁場下で閉じ込めは難しくなる

Some particles are not injected into circulation orbit

Many particles (0.1-10eV) orbit calculated until hitting the chamber wall

Orbit slowly expands toward chamber wall

Survival rate %

Ratio of flying particles after 1ms trapping

不正磁場強度 (Gauss)

- 外側に広がる軌道が増加
- 数ガウス程度の不正磁場で閉じ込め時間が顕著に悪化

● 陽電子の入射経路と径方向電場によるドリフト入射

Field coils for e+ beam injection

SC dipole

Start position

Levitation coil region

Strong Field region

Coaxially located beamline, deflector, and dipole field ring coil

Route 1. Relatively strong bias; Mirror reflection by increased V_{perm} "northbound" injection into trapping region

Route 2. Relatively weak bias; moderate V_{perm} , increase without reflection, "southbound" injection

Orbit does not interfere the region close to the levitation coil position

コンパクト磁気浮上ダイポールの構成要素, 解決法, 冷却試験の現状

- 永久電流スイッチ(PCS)を使用しない誘導励磁方式
- 熱接触冷却: 可動式のソルトン端子
- 励磁用コイルの試作

- 磁束保存による誘導励磁: 100A通電で必要電流を励起

外部電源に接続した励磁用コイルを使用して closed loop の浮上コイルの励磁消磁を実施

● コイルの熱容量と入熱許容量

- 無冷却運転(<40K)の熱容量は3000J, 1W程度の入熱が目標

真空容器壁近傍に80K熱遮蔽を設置 (反粒子等の低密度プラズマを想定) してコイル熱侵入を1W程度に抑制し, 低温到達と1時間程度の運転時間が可能

真空容器近傍での80K熱遮蔽ではなく, コイル近傍に熱遮蔽層を設置

到達温度は T1 34.3K (アルミ板) T2 17.7K (下の端子) T3 22.2K (上の端子)

励磁用コイルの100A通電に要求される目標温度30K到達 サンプル試験に基づき, 試験巻線の含湿と冷却試験予定.

- 励磁用コイルの直接冷却試験完了.
- 浮上コイル用の熱スイッチ構造の選定を進めている.