

ダイポール磁場配位における電子・陽電子プラズマ実験計画

Planned experiments on electron-positron plasma in dipole 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

東京大新領域¹, 核融合研², 広島大先進理工³, 産総研⁴

Haruhiko SAITOH^{1,2}, Hiroyuki HIGAKI³, Koji MICHISHIO⁴, Nagayasu OSHIMA⁴, Nagato YANAGI²,
and Naoki SATO²

U Tokyo¹, NIFS², Hiroshima U.³, AIST⁴

磁気浮上した超伝導コイルによるダイポール磁場中では、高 β プラズマや非中性プラズマの安定生成が実現される。これを活用して、電子・陽電子系のペアプラズマの生成と物性解明を目指す計画を進めている。大強度陽電子源や強磁場蓄積装置、小型磁気浮上ダイポール等から構成される実験計画の現状と、これまでにトロイダル非中性プラズマや陽電子ビーム実験で得られた成果を報告する。

1 はじめに

ダイポール磁場は最も基本的な磁場配位の一つであり、実験室のプラズマ装置から地球や木星等の惑星、高エネルギー天体の磁気圏等、多くの場面に見られる。惑星磁気圏で観測される高 β プラズマをヒントに、磁気浮上させた超伝導コイルにより実験室に人工磁気圏を作り出し、先進核融合を実現しようというアイデアが提案され[1]、日米で研究が実施されてきた[2,3]。ダイポールは高い β と優れた閉じ込め特性を持ち、また極めて非一様な磁場中における荷電粒子群の自己組織化現象は、実験室や宇宙のプラズマの構造形成の観点からも興味深い研究対象となる[4]。我々は、ダイポール磁場を活用したプラズマ核融合研究と反物質科学の融合により、これまで実験的に実現されていない電子・陽電子プラズマを生成し、その特異な物性を実験的に解明することを目指している。本研究では、電子・陽電子プラズマ計画の現状とこれまでの成果、今後の計画を報告する。

2 トロイダル電子・陽電子プラズマ

通常のイオン電子系と異なり、等質量の荷電粒子から構成されるプラズマはペアプラズマと呼ばれる[5]。質量対称性により電磁場に対する応答が通常のプラズマとは異なり (Fig.1), ペアプラズマは独自の波動や安定性を示す。ペアプラズマでは多くの波動モードが縮退し、例えば電磁波の Faraday 回転が発生しない。またジャイロ運動論を用いた安定性の解析が進み、通常のプラズマが不安定となる密度勾配におい

ても、ペアプラズマは強靱な安定性を示すと予測されている。電子・陽電子プラズマは、パルサー磁気圏やブラックホール周辺等の宇宙環境に広く存在すると考えられており、その物性は、基礎プラズマとしてだけでなく、天体周辺の構造形成など宇宙現象を解明する上でも重要である[6]。また電子・陽電子プラズマを生成するためには、その過程で陽電子の大量蓄積を実現する。大量の陽電子はそれ自体に科学的な応用性があり、ポジトロニウム (Ps, 電子と陽電子の束縛状態) のボーズアインシュタイン凝縮やガンマ線レーザー、また対称性の検証を目指す反水素実験への適用等が考えられる。

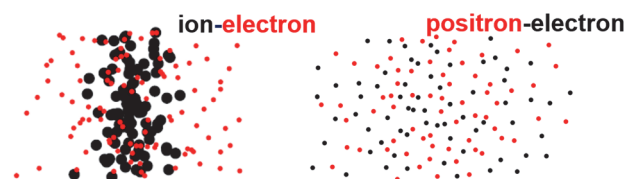


Fig. 1 電場の変化に対するイオン電子系と電子・陽電子系のプラズマの応答の違いの例。

ペアプラズマは、理論と数値計算による活発な研究対象となってきた。実験的には、フーレンを用いたペアプラズマ[7]が実現され、また負イオンとの関係で興味を持たれてきた経緯があるが、磁場閉じ込めによる電子・陽電子プラズマの生成はこれまで成功していない。低質量かつ不純物の少ない電子・陽電子系のペアプラズマの実現により、波動や安定性の物理に関して高周波領域までの研究が可能になると期待される。また、陽電子をはじめとした反粒子

を含むプラズマは電子・陽電子系以外にも数多く存在し、未解明の現象が多く残されている。反物質が示すプラズマとしての集団現象に注目して、反物質プラズマ科学という新しい研究分野を確立することを目指している。

3 目標パラメータとその実現性

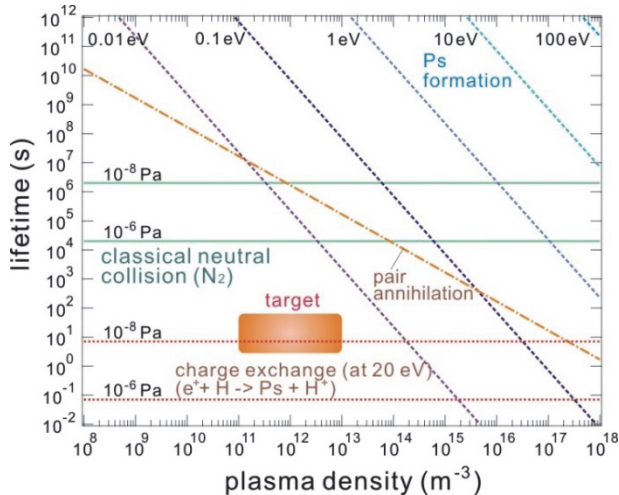


Fig. 2 様々な過程による陽電子/電子・陽電子群の、密度と温度に応じた lifetime.

陽電子群のデバイ長を装置サイズ以下としてプラズマとしての集団現象を発現させるためには、数密度 10^{11} m^{-3} 以上、電子温度 1 eV 程度の状態が目標となる。Fig.2 に、様々な密度と温度を持つ陽電子群また電子・陽電子群に対して、各過程により決定される lifetime を示した。電子陽電子対消滅の頻度は、目標とする比較的低密度の領域では十分に低く問題にならない。温度によりポジトロニウム (Ps) の生成が顕著になるが、meV 程度の極端に低温状態にしない限りは大きな影響は与えない。一方、中性粒子との衝突のうち、Ps を生成する水素原子との荷電交換反応には比較的大きな断面積を持つものがある。良好な真空環境では残留ガスの主成分は水素となる場合が多く、この反応が陽電子

の閉じ込め時間を規定する可能性が高い。しかし、この荷電交換反応は 20 eV 付近に比較的尖ったピークを持ち (Fig.2 では、このピークの断面積を用いて計算している)、このエネルギー領域を避け、かつ超高真空環境で実験を行うことにより、少なくとも数百秒以上の閉じ込めが可能であると見積もられる。これは計測対象とする波動や不安定性の時間スケールよりも十分に長く、磁場閉じ込めによる電子・陽電子プラズマの研究は原理的に実現可能である。

4 実験装置の計画と構成要素

電子・陽電子プラズマが実験的に未踏であることには主に 2 つの要因があり、まず 10^9 個以上という大量の低速陽電子を捕獲することは挑戦的な課題である。また、電子のみ、あるいは陽電子のみの非中性プラズマを単独で安定に生成することは実現されているが、閉じ込めに磁場に加え電場を使用する Penning-Malmberg 型のトラップでは、陽電子と電子をプラズマとして同時に捕獲することは一般に困難である。これらの問題を解決するために、Fig.3 に示す実験系を計画している。

大強度陽電子源として、従来からの ^{22}Na 等の放射線源に代わり、線形加速器や原子炉をベースとした陽電子源が実用化され、引き出し陽電子の運動エネルギーにも依存するが 10^9 個/s に達する強度が実現されている。産総研と広島大の低速陽電子源は、線形加速器から供給される陽電子をバッファガストラップ中で非弾性衝突により減速し、数秒間の入射で 10^5 個以上の陽電子群の生成が実現されている[8]。バッファガストラップの下流には、これを更に 1000 秒オーダーで蓄積するための強磁場 ($B=5\text{T}$) 超伝導線形トラップが設置される計画であり、ここで 10^9 個以上の陽電子を蓄積することが目標である。長時間の蓄積時間を実現するためには超高真空環境が必要であり、トラップの電極は

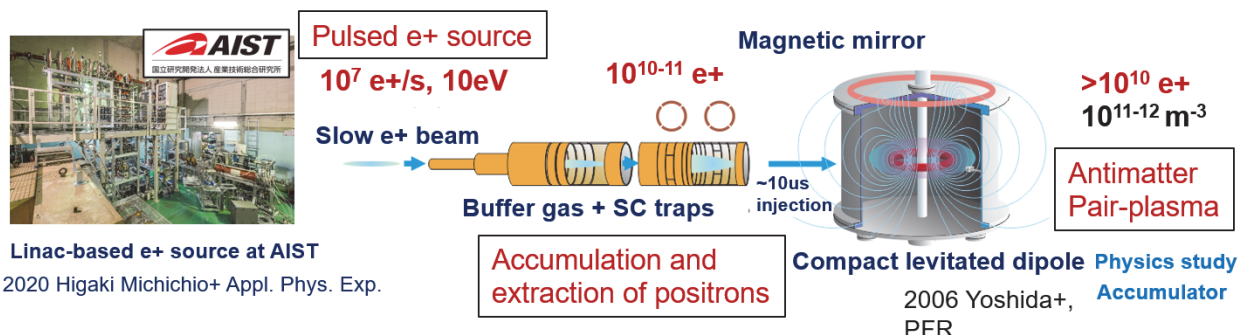


Fig. 3 産総研/広島大の線形加速器ベースの陽電子源、バッファガストラップ、強磁場蓄積トラップ、小型磁気浮上ダイポールから構成される、電子・陽電子プラズマ実験計画の全体構成。

10K 以下に冷却して運転される。蓄積した大量陽電子は 1 μ s 以下の短いパルスとして引き出され、更に下流の磁気浮上ダイポール装置に導入される。ここで等量の電子と同時に捕獲することでペアプラズマ状態を実現し、波動の分散関係や密度勾配に対する不安定性等の基礎特性を解明することが到達目標である。陽電子の高密度状態を得るためには、閉じ込め領域が小体積であることが望ましい。超伝導浮上コイルの小型化により、既存の磁気浮上ダイポール装置で用いられたヘリウムガス循環方式による冷却は困難となるので、冷凍機からの熱伝導による直接冷却方式を採用している。

プラズマ計測は、電子陽電子群の密度を段階的に向上させ、集団的現象を発現させる境界を確定させることが最初のステップとなる。その上で、揺動励起と検出により波動の分散関係の探索・検証を行う。また、グローバルな揺動モードに着目し、多数の電極センサによるモード検出と、マクロな構造を形成する拡散や輸送の効果を解明する計画である。

5 ペアプラズマに向けた研究と装置製作

電子・陽電子のペアプラズマの実現に向けて、トロイダル系であるダイポール磁場における非中性プラズマの特性理解、閉じた磁気面への陽電子ビームの入射と回転電場を用いた軌道操作、また装置開発と平衡等の理論研究[9]を実施してきた。

5.1 トロイダル非中性プラズマ研究の進展

電子・陽電子プラズマは、基本的に電子と陽電子それぞれの非中性プラズマを適切に混合することで得られる。このため電子・陽電子ペアプラズマは非中性プラズマと関連性が深く、ダイポール磁場における純電子プラズマの研究を進めている。ダイポール磁場では、粒子の内向き拡散により強磁場側にプラズマの構造が自己組織化する傾向が見られる。閉じ込め領域の周辺部に配置した電子銃から電子を注入 (Fig.4) することで、



Fig. 4 磁気浮上ダイポール装置 RT-1 で電子ビームの入射により可視化した磁気面の様子。

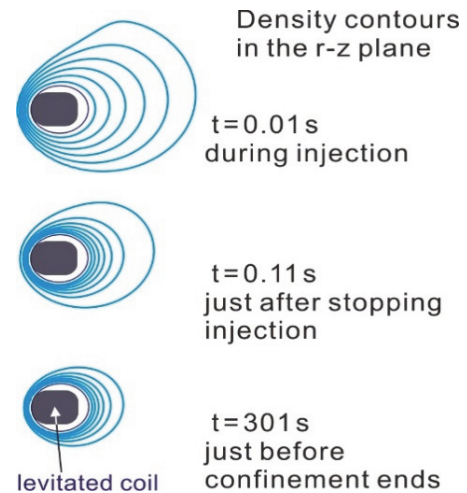


Fig. 5 内向き輸送により凝集するプラズマの様子。

Fig.5 に示すように、強磁場領域に強いピークを持つトーラス状の非中性プラズマが生成される。軸対称系であるダイポールでは純電子プラズマは極めて安定な構造を形成し、RT-1 では 300 秒以上の閉じ込め時間が得られた。静電揺動を中心とした計測を通して、中性粒子との衝突に規定される複数のモードを示す閉じ込め時間や、また非接触計測による密度分布の再構成により、内向き輸送による自己組織化を実証した。

5.2 永久磁石装置による陽電子ビーム実験

直線型の荷電粒子トラップと異なり閉じた磁気面を持つダイポールでは、閉じ込め領域への粒子の入射が課題となる。これは線源強度の弱い陽電子の場合に特に重要であり、磁気浮上ダイポールの製作に先立ち、永久磁石ダイポールにおいて陽電子ビームを用いた研究を進めている。永久磁石ダイポール (Fig.6) は、磁気浮上型と異なり全ての磁力線がマグネットと交差するためペアプラズマの捕獲は困難である。しかし、マグネットを電氣的にバイアスすることで陽電子のみの閉じ込めは実現され、これを用いて入射や各種の研究が可能になる。実験は主にミュンヘン工科大学の大強度陽電子

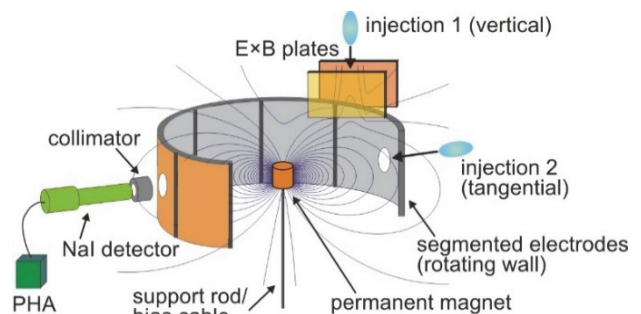


Fig. 6 機械的に支持した永久磁石を用いたプロトタイプダイポール磁場装置の模式図。

源 NEPOMUC を使用して実施され[6], $E \times B$ ドリフトを用いた入射方法の開発と 1 秒程度の比較的長い閉じ込め時間が観測された。

原子炉ベースで定常ビームを供給する NEPOMUC に対して、産総研の陽電子源は線形加速器によるパルス運転であり、ダイポールへの入射と閉じ込め期を分離することにより、閉じ込め陽電子数の増大が可能である。強磁場蓄積装置の製作を前に、産総研において永久磁石ダイポールへの入射実験を進めており、 10^5 程度の陽電子の高効率入射と、空間的な一様化に致るダイナミクスを観測している。

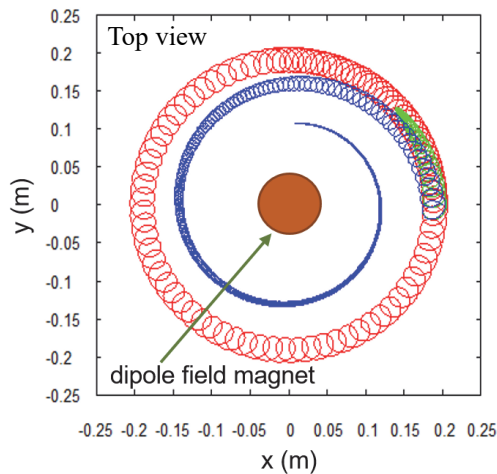


Fig. 7 ダイポール磁場中の陽電子軌道の計算例。中性衝突の効果により異なる経路を取る。

ダイポールへの入射後、陽電子の径方向圧縮による高密度化は、プラズマ状態の実現のために有効である。また、陽電子及びペアプラズマの密度勾配に対する安定性や自己組織化の研究を行うためには、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。直線型の Penning-Malmberg トラップでは、時間変動する回転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。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。直線型装置とのアナロジーから、ダイポールにおいて磁場と直交する変動電場を与えることを検討した。単一粒子レベルでは、ダイポールにおいても回転電場により径方向の軌道操作が可能になり (Fig.7), こうした手法が少数の陽電子に対して有効であることが実験的にも示された。実際に陽電子群の圧縮が可能であるかは、回転電場の周波数や振幅、中性粒子との非弾性衝突による散逸の効果等、複雑なパラメータを持ち単純では無く、今後更に解析と実験が必要である。

5.3 装置製作の状況

実験システムの主要な構成要素である、強磁場マグネットトラップと小型磁気浮上ダイポールの製作を平行して進めている。強磁場トラップは軸方向に 60cm の一様磁場領域 (最大 $B=5T$) を持ち、multi-ring electrodes により軸方向の閉じ込め電場を生成して超高真空環境に 10^9 個 (目標値) 以上の陽電子を蓄積する。磁気浮上ダイポールは運転特性から Bi-2223 線材を採用し、励磁は、磁氣的に結合させた別の超伝導コイルによる誘導で実施する。直接冷却の高効率化と、実験中に無冷却で永久電流運転を行うための良好な熱遮蔽の実現が課題である。同等のシステムで冷却試験を行い目標温度への到達を得ており、金属含浸の検討や作業性向上のための熱スイッチの導入を検討している。

6 まとめと今後の課題

プラズマ核融合の分野で培われた荷電粒子閉じ込めの知見と反物質科学を組み合わせ、反物質プラズマ科学の展開を目指している。特に、プラズマとしての集団現象や宇宙現象の理解の観点から重要な電子・陽電子ペアプラズマに着目し、その実現と物性解明のための各要素の研究と装置製作を進めている。磁気浮上ダイポールにおける非中性 (純電子) プラズマの 300 秒以上の安定閉じ込め、永久磁石ダイポールを利用したドリフト入射 (効率 100%, 最大陽電子数 10^5 個) と閉じ込め (1s 程度)、回転電場等について初期実験を終えた。製作段階にある各装置を用いた高密度の陽電子及び電子・陽電子プラズマの実現と物性解明が今後の課題である。

謝辞

本研究の一部はマックスプランク・プラズマ物理研究所、ミュンヘン工科大学と共同で実施した。JSPS 科研費 22H00115 と 22H04936, NIFS 一般共同研究 NIFS23KIEA040 の助成を受けた。

References

- [1] Hasegawa, Plasma Phys. Ctrl. Fusion **11**, 147 (1987).
- [2] Yoshida+, Plasma Fusion Res. **1**, 008 (2006).
- [3] Boxer+, Nat. Phys. **6**, 207 (2010).
- [4] Yoshida+, Plasma Phys. Ctrl. Fusion **55**, 014018 (2013).
- [5] Tsytovich & Wharton, CPPCF **4**, 91 (1978).
- [6] Stoneking+, J. Plasma Phys. **86**, 155860601 (2020).
- [7] Oohara & Hatakeyama, PRL **91**, 205005 (2003).
- [8] Higaki+, Appl. Phys. Express **13**, 066003 (2020).
- [9] Sato, Phys. Plasmas **30**, 042503 (2023).