

ユニットテーマ提案書

1. テーマ名

反物質プラズマ Antimatter Plasmas

2. 核融合科学としての課題

荷電粒子群の閉じ込めと制御に関する技術と装置学はプラズマ核融合科学の研究基盤の一つであり、高温プラズマの理解と高性能化の過程で多くの知見が得られてきた。一方、多数の荷電粒子の集団が示す複雑な挙動の解明は、核融合分野だけでなくビーム物理や原子分子物理、反物質科学、宇宙科学等の広範な分野においても重要な研究対象となる。電磁場を巧妙に用いて荷電粒子群の捕獲や操作を実現する原理と技法の進展は、単に技術的進歩にとどまらず、従来実現困難であった研究対象を実験室に作り出し、新しい研究分野を開拓する原動力となってきた。本テーマでは、近年粒子線技術が飛躍的に進展する反物質科学分野に注目し、プラズマ核融合科学と共通する粒子操作や超伝導技術の装置学・技術としての応用とそれらが可能にする反物質プラズマ研究に注力する。

3. 学術的な特徴づけ（何の研究だと言えるか）

本ユニットテーマが対象とする反物質プラズマの分野では、近年、陽電子や反陽子等の低速大強度ビームが入手可能となり、プラズマとしての性質を示す大量の反粒子を活用した実験研究の実現性が高まっている。こうした反物質研究の多くで共通の課題となる、大量の反粒子を安定に捕獲し更に必要とされる操作を施すことは容易ではなく、例えば高密度の電子陽電子プラズマや反水素プラズマの生成は実現されていないのが現状である。こうした実験上の困難の原因は、異なる電荷符号を持つ粒子群や生成した反物質粒子の同時閉じ込めに適した配位が確立していないことにあり、プラズマ核融合学からの貢献の余地は大きいと考えられる。また、実現される反物質プラズマの物性解明は、核融合科学の基盤となるプラズマ基礎物理としても重要である。本ユニットは、新閉じ込め配位や超伝導技術の応用により反物質科学の諸問題を解決し、従来不可能であった種類や粒子数規模の反粒子プラズマ実験を可能にして核融合学の基盤となるプラズマ研究の新展開を目指す。

4. 定式化・アプローチ

通常のプラズマと比べ特異な性質を示すことが予測される、反物質を構成要素に含むプラズマを実験室に実現し、その物性解明を行う。電子と陽電子から構成されるペアプラズマは、質量の対称性により、負イオン源開発と関連した水素ペアプラズマと共通する特異な波動特性や安定性を持つことが理論的に予測されているが、実験的には実現していない。本課題では、プラズマ核融合の分野で培われてきた荷電粒子閉じ込めの物理と技法を活用して、リング電流の作り出す軸対称かつ小体積の閉じ込め配位を超伝導磁場トラップとして開発し、希少粒子から構成される反物質プラズマの安定捕獲を実現する。その上で、加速器ベースの大強度ビームを用いた陽電子の大量捕獲と、電子陽電子プラズマの定常的磁場閉じ込めを実現する。更に、開発した反物質閉じ込め配位を活用して、従来実現不可能であったレベルでの高効率の反水素合成への応用を目指す。これらを活用した物理研究として、高エネルギー天体現象の素過程を理解する上でも重要な電子陽電子ペアプラズマの物性を解明し、更に大量の反水素生成を可能にすることで CPT 対称性の高精度検証に貢献する。

反物質に適した閉じ込め配位を開発し、希少粒子の蓄積及び入射と閉じ込め性能の評価の上、プラズマとしての集団的効果に着目した実験を実施する。装置開発は、磁気中性線を持つ軸対称磁場配位を実現する磁気浮上ダイポールを基本構造として、希少な反粒子の高密度閉じ込めとビームラインでの運転への最適化を行う。磁場中への電子陽電子の入射方法として、ポジトロニウムの光脱離による手法の開発を行う。プラズマ状態の実現には粒子冷却が必要であり、運転性に優れた高温超伝導線材による強磁場環境によりこれを実現する。単一種及び複数粒子から構成される非中性プラズマの入射及び安定捕獲と、磁気モーメントを利用した中性粒子の閉じ込めが可能であることを実証した上で、大強度陽電子施設（産総研の線形加速器、ミュンヘン工科大の原子炉、レーザーとの連携も視野に入れる）と低速反陽子施設（CERN でのみ使用可能）において反水素プラズマ生成と冷却による反水素合成、大量陽電子捕獲による電子陽電子プラズマ生成と物性解明を実施する。

5. 学際的展開

プラズマ核融合と反物質科学の知見を融合することで、従来実現不可能であった種類、また粒子規模での反物質プラズマ実験を可能にし、反物質を活用した新たな研究の展開を目指している。反物質プラズマの中でも、核融合と関わりが深い荷電粒子捕獲技術が重要な役割を果たし集団現象が出現する領域に注目し、電子陽電子系と反水素プラズマに関わる実現性の高い目標を設定した。反物質研究は多くの魅力的課題を持つ一方、閉じ込め配位の問題が実現上のボトルネックとなっている。核融合分野の知見を導入し学際展開として閉じ込め配位を提案することで分野の大きな進展が期待され、研究は、電子陽電子プラズマ、反水素、ポジトロニウム、超伝導開発等の多様な課題から構成される。

6. 独自性・優位性など

陽電子等の反粒子を含む非中性プラズマ実験における標準的な粒子閉じ込め手法では、一様な軸方向の磁場中で静電井戸を使用する手法（Penning-Malmberg trap）が用いられてきた。電子・陽電子や反水素プラズマ等、異なる電荷符号を持つ多様な粒子から構成される反物質プラズマの安定捕獲を実現する上で、本課題ではトロイダル配位の使用を代替となる新手法として提案する。低密度の反物質プラズマを捕獲するために、外部電流のみにより磁気面を形成する必要があり、また荷電粒子の良好な閉じ込めの観点からは軸対称系が自然な選択である。更に、生成した反水素原子の微小な磁気モーメントを利用した閉じ込めや高効率の引き出しを行うためには強い磁場勾配が要求される。ここで、磁気浮上した超伝導コイルが生成するダイポール磁場では、純電子プラズマの安定閉じ込めが示され原理的に陽電子の捕獲が可能であり、また陽電子の高効率入射が実証されている。こうした配位を大強度反粒子線源と組み合わせることにより、プラズマ工学と関連分野の融合研究を可能にし、反物質プラズマの実験研究の新展開を目指す点が、本テーマの特徴である。

多くの反物質研究は実験的に未踏の研究対象であり、CPT 対称性や物質と反物質の重力対称性などの基礎物理研究、また電子と陽電子の束縛系であるポジトロニウムのボーズアインシュタイン凝縮やこれを用いたコヒーレントなガンマ線レーザーの実現など、重要な未解決問題を解決し、革新的技術を実現する可能性を持っている。一方で、この分野でプラズマとしての集団現象に着目した研究例は少なく、プラズマ核融合学の立場から反物質科学に関わり、プラズマ核融合科学由来の手法を活用して従来困難であった実験研究の推進を可能にすることが本ユニットの最終目標である。