

2021 年 8 月 7 日

ユニットテーマ提案書

1. ユニットテーマ

反物質エキゾチックプラズマ研究

2. 提案者（氏名・所属）

齋藤晴彦・東京大学

3. テーマと研究内容の概要

通常のプラズマと比べて特異な物性を示し、安定生成の可能性が不明であるなど実現が挑戦的な領域にあるプラズマを、本ユニットではエキゾチックプラズマと呼ぶ。反物質を構成要素に含むエキゾチックプラズマは、単に実験的に未踏の研究対象であるだけでなく、CPT 対称性や物質と反物質の重力対称性、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、従来不可能であった革新的技術を実現する可能性を秘めている。本ユニットは、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新しい超伝導磁場トラップ配位を開発し、希少粒子から構成される反物質エキゾチックプラズマの安定捕獲を実現する。その上で、プラズマ理工学と反物質科学の連携により、①陽電子の大量捕獲、②電子陽電子プラズマの定常的磁場閉じ込め、③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を実現する。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重要な電子陽電子ペアプラズマの物性を解明し、大量の反水素を用いた CPT 対称性の高精度検証に貢献することが本ユニットの目標である。

4. 位置づけ

荷電粒子群の閉じ込めと制御はプラズマ核融合分野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に向けて多くの知見が得られてきた。特に NIFS は閉じ込め物理と超伝導技術の進展に基づき、ヘリカルに限らず多様な閉じ込め概念を実証してきた。一方、多数の荷電粒子の集合が示す複雑な挙動の理解は、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課題となっている。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対象を実験室に作り出し、不可能であった新しい研究分野を開拓する原動力となってきた。

本ユニットが対象とする反物質エキゾチックプラズマの分野では、近年、粒子線技術の飛躍的進展により大強度の陽電子や反陽子の低速ビームが入手可能となり、上述のような魅力的な研究テーマを現実のものとする機運が高まっている。一方で、プラズマとしての集団的運動を示すために必要な大量の反粒子を安定に捕獲することは依然として容易でなく、高密度の反水素プラズマや電子陽電子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

2 ページ以内で記述し、10.5pt・行間1行を使用してください。青字の注意書きは削除してください。

ある。本ユニットは、プラズマ核融合分野の知見に基づいた新配位の提案によりこの問題を解決し、物理の根幹に関わる基礎研究や革新的技術の実現を目指す融合的な研究を展開する。

これまで反水素合成の手法は、磁場中で多重静電井戸を形成する nested trap を用いた方法に限られてきた。純電子や純陽電子等の非中性プラズマの閉じ込めも、同様に主として直線型の配位で実施されてきた。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ためには、プラズマ核融合の立場からはトロイダル配位の使用が自然な回答の一つと考えられる。低密度の反物質プラズマを捕獲する上では外部電流のみにより磁気面を形成する必要がある、閉じ込めの観点からは軸対称系が望ましい。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、強い磁場勾配が必要となる。これらの要求を満たす磁場は、円環電流の作り出すダイポール磁場とその組み合わせにより生成可能であり、その優れた閉じ込め特性は、高 β プラズマや非中性（純電子及び陽電子）プラズマを用いた実験を通して実証されている。

5. 研究の方法

ユニットの活動は、①反物質エキゾチックプラズマに適した閉じ込め配位の設計と高温超伝導装置開発、②希少粒子の蓄積及び入射方法の開発と閉じ込め特性の評価、③電子陽電子及び反水素実験から構成される。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。三体再結合による反水素合成のためにはシンクロトロン放射による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する。その上で、大強度陽電子施設（国内では産総研や京大熊取、海外ではミュンヘン工科大等が候補となる）と低速反陽子施設（CERN でのみ実施可能）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行う。

6. 自己評価

1) 未来志向であること

プラズマ核融合分野の知見を異分野に取り入れ連携した研究を行うことで、従来実現不可能であった実験を可能にし、反物質を活用した新たな研究の展開を目指している。

2) 目標を具体的に示していること

エキゾチック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す領域に焦点を当て、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。

3) 10 年後に学术界に輝くテーマに育つこと

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ボトルネックとなっている。核融合分野の知見を導入し閉じ込め配位を提案することで、この分野の大きな進展が期待される。

3) 多様な「個人のテーマ」を包摂できること

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。