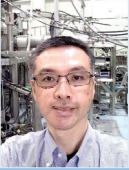


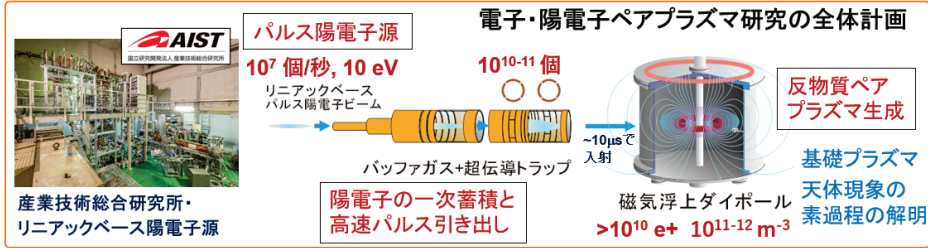
人工磁気圏を反物質トラップとして活用する電子・陽電子プラズマの実現と物性解明

	研究代表者	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授 齋藤 晴彦（さいとう はるひこ） 研究者番号:60415164
	研究課題情報	課題番号：22H04936 研究期間：2022年度～2026年度 キーワード：反物質プラズマ、電子・陽電子プラズマ、人工磁気圏、ダイポール磁場、高温超伝導

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

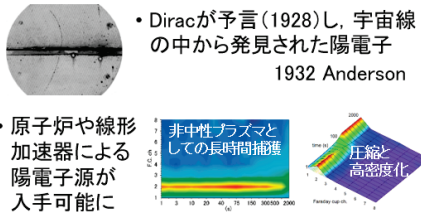
●研究の全体像

天体現象と関連が深い電子・陽電子プラズマは、等質量のペアプラズマとして興味深い性質を示すが、実験では実現していない。大強度パルス陽電子源を用いて、磁気浮上させた超伝導マグネットの作り出す人工磁気圏の中に陽電子と電子を大量に閉じ込めて集団現象を調べ、反物質プラズマの物理を理解したい。



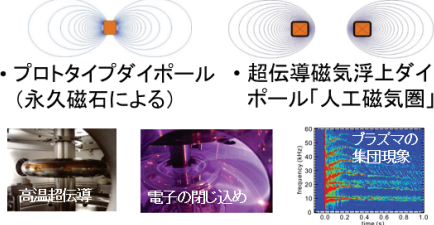
線形加速器と減速・蓄積法を組み合わせ大量陽電子捕獲 + 人工磁気圏への大量陽電子のパルス入射 + 電子と共存 → ペアプラズマの実現へ

反物質である陽電子を大強度ビームとして引き出し、物理実験や応用への使用が可能になった



反物質科学・粒子線科学 ・操作技術の進展

人工磁気圏では高性能プラズマが実証され、原理的に電子と陽電子を同時に捕獲できる



プラズマ・核融合分野 ・閉じ込め技法の革新

●プラズマ核融合学（人工磁気圏）と反物質科学（陽電子）の融合

プラズマ核融合の分野では、永久電流を流す超伝導コイルを磁気浮上させて「人工磁気圏」を作り出し、高性能プラズマを実現する手法が確立された。東京大学のRT-1（図2）は電子だけの非中性プラズマの長時間閉じ込めを実現し、原理的に陽電子の閉じ込めが可能であることを示した。また近年の粒子線技術の進展は、我々の宇宙にはほとんど存在しない反物質を生成し、大強度の反粒子ビームを各種の物理研究や応用に用いることを可能にした。これら2つの分野のブレークスルーを融合的に活用して、従来不可能であった電子・陽電子プラズマを実験室に実現し、その物性を解明する。即ち、高温超伝導コイルの作り出すコンパクトな人工磁気圏にパルス陽電子源から供給される陽電子ビームを蓄積して電子と同時に閉じ込め、プラズマとしての集団現象の出現条件を満たす反物質ペアプラズマを実現する。電子・陽電子プラズマの波の性質を表す分散関係、安定性、輸送といったプラズマの基礎特性を実験的に解明し、長年の理論予測に実験的に答える。



図2 人工磁気圏のイメージ図

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●人工磁気圏においてプラズマ条件を満たす電子・陽電子群の実現と物性解明

電子・陽電子プラズマという新しい研究対象を作り出すことが最初のマイルストーンである。プラズマとしての集団現象が出現する条件から、 10^{10} 個以上の陽電子を捕獲し、密度 $10^{11}\text{--}10^{12}\text{m}^{-3}$ 、温度1eV（電子ボルト）程度の電子・陽電子プラズマの生成を目標として設定している。対消滅やポジトロニウム生成等による陽電子寿命の評価（図3）によれば、 10^{-8}Pa （地上大気圧の10兆分の1）を上回る超高真空の適用と適切な温度制御により、100秒以上の閉じ込めが可能である。これは、研究対象となるペアプラズマが示す各種の揺動や不安定性の時間スケールよりも遙かに長く、現実的かつ実現可能な達成目標である。図1のように、産業技術総合研究所のリニアックベース陽電子源から供給される平均電流1pA（ 10^7 個/秒）の低速陽電子ビームを、非弾性衝突により陽電子を減速するバッファガストラップ（BGT）と超伝導トラップ（SCT）を組み合わせた装置に蓄積し、これを磁気浮上ダイポール磁場装置で電子と捕獲し、電子・陽電子プラズマを実現する。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た上で、プラズマ中の波の励起と検出により、後進波を含む分散関係を確定する（図4）。構造形成や自己組織化と関連が深い揺動や輸送現象に注目し、回転電場による構造制御を可能にした上で、密度勾配を規定する安定性限界を明らかにする。反物質プラズマでは、波の測定に加えて消滅ガンマ線を利用した非接触の計測が可能であり、トモグラフィ的手法による構造の再構築を計画している。

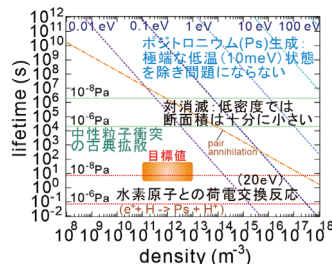


図3 各種過程による陽電子寿命

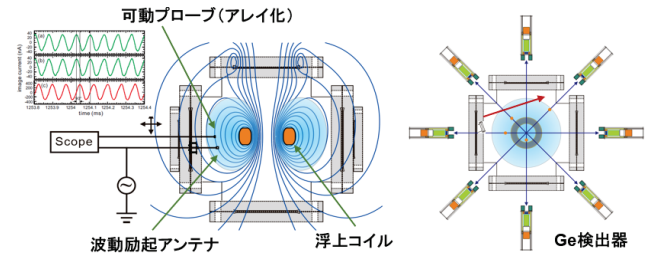


図4 波動（左）とガンマ線（右）を用いたペアプラズマ計測のイメージ

●プラズマとしての反物質研究実現と今後の波及効果

宇宙線から発見され実在が明らかになった陽電子などの反物質は、今日では最先端の物理研究だけでなく医療や工業用にも幅広く活用されている。反物質科学とプラズマ核融合学の分野融合により、より多数の物質・反物質粒子が相互作用し生み出すプラズマとしての集団現象の研究が可能になる。電子・陽電子プラズマの実現と性質解明を入り口として、プラズマとして捕獲可能な反粒子の種類と組み合わせを拡大し、宇宙プラズマにおける構造形成の起源解明や、大量陽電子を活用した新しい物性研究への発展を目指す。

図1 パルス陽電子源と人工磁気圏を用いた電子・陽電子プラズマ実現のイメージ図

●電子・陽電子系のエキゾチック・ペアプラズマの実験室研究

通常のプラズマはイオンと電子の混合物であり、その質量比が非常に大きいことが多くの性質を決定している。これに対して、電子とその反粒子で質量が等しい陽電子からなるプラズマは、ペアプラズマとして特別な波の性質や不安定性を示すエキゾチック・プラズマとして、多くの理論及びシミュレーション研究の対象となってきた。電子・陽電子プラズマは、自然界にはバルサーや活動銀河核の周辺に存在すると考えられ、宇宙プラズマの構造形成の起源や輸送現象を理解する上でも重要である。しかし、希少な反物質である陽電子を大量に蓄積し、さらに同数の電子群と同時に捕獲することは容易ではなく、電子と陽電子をペアプラズマとして閉じ込めることはこれまで実現していない。近年のプラズマ核融合分野と粒子線技術のブレークスルーにより、電子・陽電子ペアを大量に捕獲し、プラズマとしての集団現象の実験研究を展開する時機が到来した。