

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2020

課題番号：16KK0094

研究課題名（和文）磁気浮上ダイポール磁場配位と大強度陽電子ビームを用いた電子陽電子プラズマの生成（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Formation of electron-positron plasma using a levitated dipole magnetic configuration and intense slow positron beam(Fostering Joint International Research)

研究代表者

齋藤 晴彦 (Saitoh, Haruhiko)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：60415164

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,600,000円

渡航期間： 18ヶ月

研究成果の概要（和文）：電子とその反粒子である陽電子から構成されるペアプラズマは、質量比の大きいイオンと電子から構成される通常プラズマと異なる性質を示すことが予測され、天体現象で重要と考えられている。本課題では、電子陽電子プラズマの実験室での実現を目指して、ミュンヘン工科大学の大強度の低速電子源と、ダイポール磁場配位を活用した研究を行った。コンパクトなダイポール磁場装置において、高効率（ほぼ100%）の陽電子ビーム入射と、比較的長時間（1秒以上）の安定閉じ込めを実現し、ダイポール磁場中で回転電場を用いた軌道圧縮の手法を開発した。超伝導配位で電子陽電子がプラズマ状態を満たすだけの高密度状態の実現は今後の課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

パルサー等の高エネルギー天体周辺に存在すると考えられている電子陽電子プラズマの性質の解明は、天体現象の理解のために、また核融合等の様々な応用を持つプラズマ物理の進展への寄与の観点からも重要である。本研究では、実験的に電子陽電子プラズマを実現する上で鍵となる、高い効率で陽電子ビームを閉じ込め装置に入射する方法と、安定な閉じ込めを実現した。回転電場をダイポール磁場中で初めて適用し、反物質プラズマの高密度状態を実現するための原理検証がなされた。最終的な研究目標である電子陽電子プラズマ生成には至らなかったが、提案した手法により反物質閉じ込めが可能であることが示され、重要な段階の幾つかが解決された。

研究成果の概要（英文）：Pair plasmas consisting of electrons and positrons, the antiparticles of electrons, are predicted to show unique properties when compared with ion electron plasmas with large mass ratios. The electron-positron plasmas are also important in astrophysical phenomena. In this study, we conducted investigation toward the experimental realization of electron positron plasmas by using intense slow positron source in Technical University of Munich and dipole magnetic field configuration. In a compact dipole magnetic trap, efficient (approximately 100%) injection, relatively long time (longer than 1s) trapping, and orbit compression with rotating wall electric field were realized in experiments with positron beam. High density state of electrons and positrons to satisfy the plasma condition in a superconducting configuration was not realized in this research period.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：反物質 陽電子 電子陽電子プラズマ ペアプラズマ ダイポール磁場 磁気圏型閉じ込め

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

質量の著しい非対称性が特性を規定する電子イオン系と異なり、電子陽電子プラズマは等質量の粒子から構成される「ペアプラズマ」に属し、その特異な分散関係や安定性はプラズマ物理学の分野で活発な理論及びシミュレーションによる研究対象となっている。宇宙物理学の分野では、電子陽電子プラズマはパルサー磁気圏等に広く存在すると考えられており、その物性を理解する事は、天体現象の基礎研究としても重要である。数多くの理論や数値計算による研究が存在する一方で、磁場閉じ込めにより電子陽電子プラズマを実験室に生成し実験的に物性を明らかにする試みは成功していない。その主な原因は、電子と陽電子の安定な同時閉じ込め配位が確立していない事と、大強度の陽電子源が入手困難な事にある。

近年、日本と米国においてダイポール磁場配位を用いた核融合研究が進展し、先進的な核融合を目指す高性能のプラズマ閉じ込めが実現された。東京大学の RT-1 では、超伝導コイルを磁気浮上させて極限的に擾乱を抑制する事により、非中性（純電子）プラズマが剛体回転する安定構造を自己組織化し、300 秒以上に渡り構造を維持する事が観測されている。非中性プラズマの分野で標準的に使用される直線型閉じ込め配位と異なり、端部の無いトロイダル系のダイポール磁場配位では、原理的に陽電子をも同時に安定に閉じ込める事が可能である。一方で、入手可能な線源強度が極めて限定される陽電子では、核融合プラズマや純電子プラズマで観測された乱流輸送による自発的な内向き輸送は発生し得ず、閉じた磁力線を持つダイポール磁場中に陽電子を入射する事は容易ではない。また、既存のダイポール磁場装置はコイル冷却や浮上システムを備えた比較的大規模な装置であり、反物質研究に向けた装置系の最適化が要求される。

2. 研究の目的

こうした観点から、閉じ込め領域への効果的な陽電子入射と、反物質プラズマ生成に適したコンパクトなダイポール磁場配位の開発に向けた基礎研究を実施し、未踏の領域である電子陽電子プラズマを実験的に

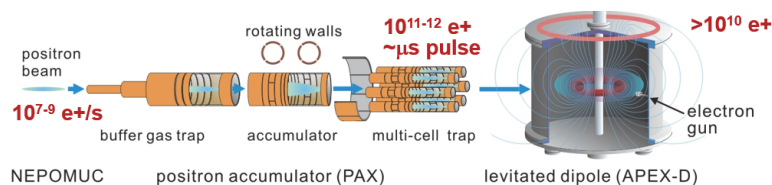


図1 電子陽電子プラズマ生成のための入射と閉じ込め配位。

実現することが本課題の目的である。永久磁石を使用した小型ダイポール磁場装置を開発して、陽電子ビームをドリフト入射により高効率で導入する手法を実証する。また、放射線源からの高エネルギー陽電子は、回転電場やカオスの効果等によりダイポール磁場中で効果的な圧縮や軌道の制御が可能であり、これを効率的な入射や高密度化へと応用出来る可能性がある。こうした研究提案を、小型放射線源を用いた実験を通して実証し、高効率の反物質プラズマ生成に活用する。装置開発に関しては、高温超伝導線材の小型巻線を使用して、永久電流の誘導励起やフィードバック制御によるコイル浮上システムの開発等を進め、反物質プラズマに適したダイポール磁場装置を実現する。電子陽電子プラズマを生成する上でのもう一つの鍵となるのは、大強度の陽電子ビームの使用である。電子や通常のイオンビームと比較して、入手可能な陽電子ビームの強度は非常に小さい。近年、既存の放射線源や線形加速器を使用に加えて、原子炉中性子源を使用した大強度ビームの研究が進んでいる。ドイツのミュンヘン工科大学 (TUM) の研究用原子炉 FRM II では、低速陽電子源 NEPOMUC が稼働し、 $10^9/s$ を上回る世界最高の強度を持つ定常ビームが生成されている。こうした大強度の反物質ビームは、表面科学やプラズマ物理学等の関連分野に、従来不可能であった新しい研究の機会を提供している。本課題では、こうしたプラズマ理工学と反物質研究の最近の進展を活用して、電子陽電子プラズマを実験室で実現するための開発研究を進める。電子陽電子プラズマ生成のための大強度陽電子源、一時蓄積装置、ダイポール磁場による電子との同時閉じ込め装置の模式図を図1に示す。

3. 研究の方法

こうした研究目的を踏まえ、本申請課題では、ドイツにおいて Christoph Hugenschmidt 教授 (ミュンヘン工科大学, TUM, 図2) 及び Thomas Sunn Pedersen 教授 (マックスプランク・プラズマ物理研究所, IPP) と共同研究を実施し、超伝導装置を含むダイポール配位を開発して NEPOMUC において運転する事でパルス入射により大量の陽電子を捕獲し、陽電子と電子の同時閉じ込めを行う事を目指とした。研究の手順としては、図1に示すシステムを IPP と共同開発し、TUM が主催する NEPOMUC から供給される定常陽電子ビームを、減速用バッファガスを介して一時蓄積用の Penning-Malmborg トラップへと捕獲する。ビームのパルス引き出しを行い、E×B ドリフトにより陽電子をダイポール配位の閉じ込め領域内部へ

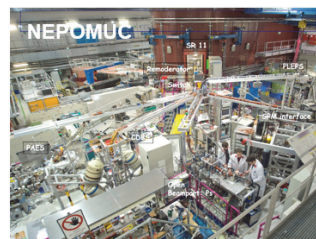


図2 研究用原子炉 FRM-II と大強度陽電子源 NEPOMUC。

と短時間で輸送する．生成した陽電子プラズマに対して，閉じ込め領域の周辺部に配置した電子銃から，揺動による内向き輸送の効果を使用して強磁場領域へと電子ビームを入射し，最終的に両者の同時閉じ込めを行う一連の研究を計画した．

4. 研究成果

(1)陽電子ビームの高効率入射と長時間閉じ込め

電子陽電子プラズマ実現のためには，高効率の陽電子入射と入射した陽電子の安定閉じ込めを実現する必要がある．こうした技術課題を達成するために，陽電子ビームラインでの運転に適した小型ダイポール磁場装置を，永久磁石を利用したプロトタイプ装置として開発した．装置開発や粒子軌道解析等の数値計算は主に IPP で実施し，隣接した TUM の NEPOMUC 陽電子施設にて実験研究を行った．図 3 が開発したコンパクトなダイポール磁場装置であり，NEPOMUC の

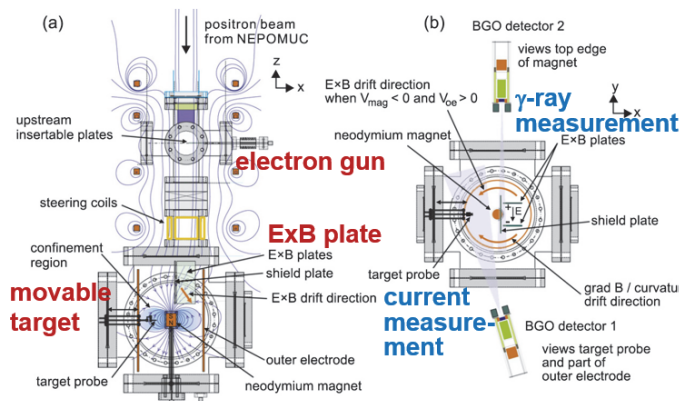


図 3 NEPOMUC に導入したダイポール装置の模式図．

open beam port と呼ばれるラインで運転を行った．ビームラインの弱磁場（典型的には 50 ガウス）側から，ダイポール磁場中に高効率の入射を実現するために，電場の印加によるドリフト流の利用を提案し，軌道の数値計算に基づいて電極を設置した．閉じ込め領域には可動式のターゲットプローブを設置し，BGO 検出器により消滅ガンマ線をカウントすることで，陽電子の空間分布情報を取得可能にした．ビームの位置調整のために 2 次元のステアリングコイルを設置し，NEPOMUC 側の調整コイルと協同的に運転して入射効率の最適化を図った．

数値軌道解析による最適化の結果，ビームラインから供給される陽電子の極めて高効率（ほぼ 100%）の入射を実現した．図 4 左に示すように，制御用電極に適切な電圧を印加することにより，陽電子がミラー反射やマグネット上で消滅することを抑制し，閉じ込め領域内に導入される軌道を作り出すことができる．入射された陽電子は，ダイポール磁場中でトロイダル方向に周回運動し，ターゲットプローブを導入した場合には消滅ガンマ線として観測される．可動式のターゲットを用いて，511keV ガンマ線カウントを観測すると共に，高精度の電流増幅器を開発し，陽電子電流の直接計測を試みた．これにより，ビームラインから供給される陽電子数とトラップされた陽電子数の絶対値の比較が可能になり，入射効率の高精度の計測が可能になった．こうして評価された陽電子の径方向分布（プローブの移動により，これは径方向に積分した表示となっている）を図 4 右に示す．電極電位等の詳細な最適化を進めた結果，入射効率は段階的に上昇し，最終的には損失なし（効率 100%）の入射が実現された．ビーム強度の限定される陽電子に対して，高密度のプラズマ状態を実現するために入射効率は非常に重要な指標であり，100%入射効率の達成は，目標実現に向けた大きな成果である．

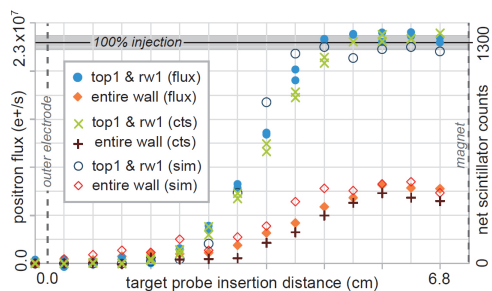
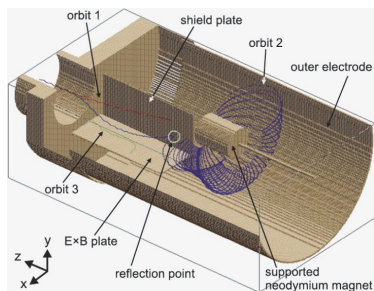


図 4 陽電子のトラップ内の典型軌道と，入射効率 100%達成を示す消滅ガンマ線の計測結果．

入射した陽電子に対して，ダイポール磁場トラップ中の閉じ込め時間の評価を行った．入射用にドリフト発生用電極に電圧を印加する状況は，言わばトラップの扉が開いた状態であり，入射された陽電子はトロイダル方向への短い周回運動の後，トラップの外部へと排出され，長時間の閉じ込めが実現されることはない．本実験では，入射電極用に高速動作可能な高電圧スイッチを開発して入射期と閉じ込め期を分離し，閉じ込め期に観測される消滅ガンマ線の時間発展を計測してトラップ期間の陽電子の寿命の評価を行った．ドリフト電極に入射用電圧を印加し続けた場合と，電圧にゲートを掛けて閉じ込め期に設置した場合の比較が図 5 左である．これらの操作の違いにより，0.1ms 程度であった閉じ込め時間は 10ms 程度にまで改善した．こうして得られた閉じ込め時間は，陽電子がトロイダル方向に数千回以上の周回運動を行う時間に対応して

おり、系の対称性を壊す非対称性の存在が問題となる。軸対称なダイポール磁場配位で荷電粒子の閉じ込めを保証するのは正準角運動量の保存であり、不正電場の効果により非対称となる系では、長時間の閉じ込めは実現されない。閉じ込め期間中の系の軸対称性を改善する目的で、ドリフト流発生用以外のビーム整形電極全てに同様の高速高電圧スイッチを導入した。これにより、図5右に示すように100ms程度の閉じ込めが得られた。この段階で閉じ込めを規定するのは、陽電子が中性粒子との衝突によりピッチ角散乱を起し、マグネットのロスコーンへと落ち込むことによる損失である。支持構造を持つ現在の永久磁石の場合、この効果は、マグネットを正電圧にバイアスすることで回避できる。図5右に示すように、ミラー損失を抑制するマグネットバイアスにより、陽電子の閉じ込めは1秒以上に達した。こうして得られた閉じ込めの時間スケールは、電子陽電子プラズマ実験で研究対象とする各種の揺動や安定性等のいずれの時間スケールと比較しても十分長く、電子との同時閉じ込めが実現された場合には、ペアプラズマによる実験の実現可能性が高いと言える。なお、最終的に得られた閉じ込め時間を規定する効果としては、中性粒子衝突を介して弱磁場側の真空容器へと輸送されることによる緩やかな損失や、残存する系の非対称性による径方向の輸送等が原因として考えられる。

(2) 回転電場の印加による径方向輸送実験

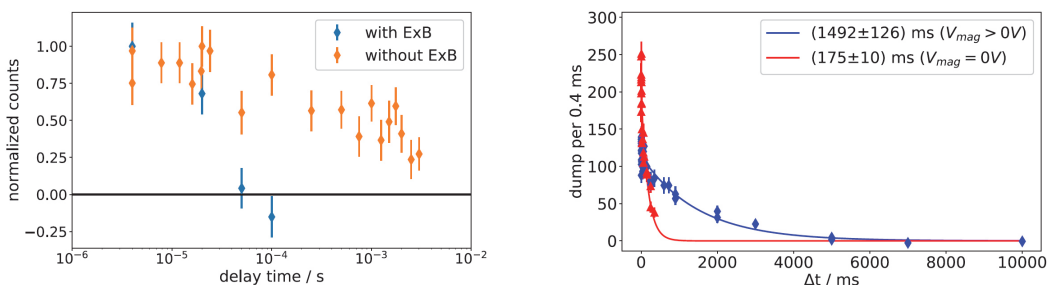


図5 ダイポール磁場トラップ中の陽電子群の種々の条件に応じた閉じ込め時間 (本文参照)。

トラップ内に導入して捕獲した陽電子のプラズマ状態を実現するためには、高密度化が重要となる。磁場とクロスする方向に時間的に変動する電場を加えることで荷電粒子にトルクを与え、径方向の分布を制御する手法は回転電場と呼ばれ、直線型の Penning-Malmberg 装置では実用化されている。トロイダル系の配位では、こうした手法によるプラズマの移送や密度制御は実現されていない。開発したダイポール磁場装置において、トロイダル方向に分割した電極を用いて回転電場を印加可能とし、陽電子の軌道圧縮実験を行った。図6に示すように、陽電子のトロイダル方向の周回運動と良好に結合する回転電場を印加することにより、陽電子を強磁場側へと効果的に輸送することができる。問題となるのは、エネルギーと位置の拡がりを持つ多数の陽電子群を効率的に軌道圧縮する場合であり、全ての陽電子に与える回転電場の位相等の条件を最適化することは不可能で、高効率の圧縮が難しい。

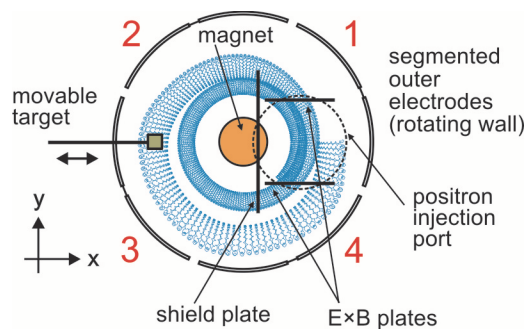


図6 回転電場印加による軌道圧縮の計算。

このため実験では、陽電子の入射時間と回転電場の印加時間を共に短く(数 us 程度)し、ビームパラメータの拡がりや圧縮の効果が出現する時間のスケールを分離することを試みた。この手法は、将来的に陽電子蓄積装置を用いることで、多数の陽電子にも適用可能である。時間的に変動する回転電場の下での陽電子軌道を数値的に解析した上で陽電子ビーム実験を行い、回転電場により陽電子ビームが閉じ込め領域で強磁場領域に輸送されること、また入射効率が改善し、回転電場なしでは入射効率が低い場合にも、100%の陽電子がターゲットに到達した(図7)。これは、陽電子がトロイダル方向の周回運動中に真空容器に向かう径方向輸送による損失が

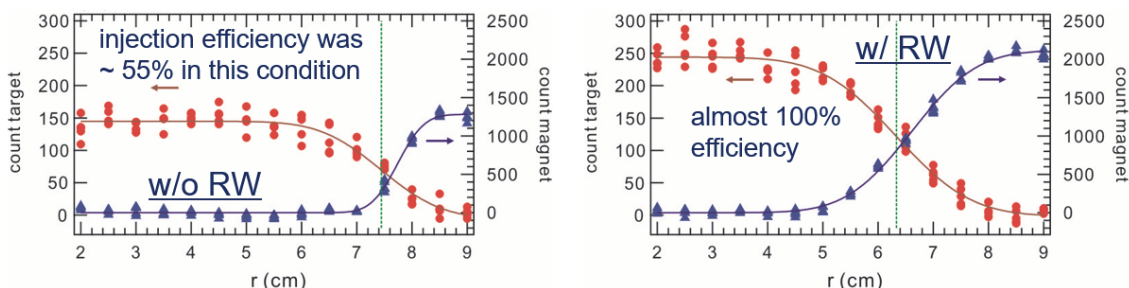


図7 回転電場を印加しない場合とした場合の陽電子分布は、圧縮と入射効率の改善を示す。

抑制され、より多数の陽電子がターゲットプローブに到達したことを示している。

(3) 超伝導磁気浮上ダイポール開発に向けて

前項までの入射閉じ込めと圧縮実験の成功により、陽電子単独の高効率入射と捕獲が可能となった。一方、電子との同時閉じ込めによりペアプラズマ生成という最終目標を実現するためには、陽電子の長時間閉じ込めで用いたような電圧印加は不可能であり、閉じた磁気面を持つ磁気浮上ダイポールで実験を実施する必要がある。反物質の閉じ込めに適したコンパクトな超伝導ダイポール装置の開発を、ドイツの IPP 及び日本国内の東京大学及び核融合科学研究所と共同で実施した。ビームラインでの運転が容易な方式として、GM 冷凍機の直接熱接触による冷却による超伝導コイルの運転を選定し（図 8）、これに向けた開発研究を進めた。

機械的な熱接触の確保が容易な励磁用コイルと比較して、直接冷却による超伝導運転の適用を行う上で困難となるのは、プラズマ実験中に浮上を行う磁場発生用コイルである。GM 冷凍機とコイル巻線の間熱接触低減を目的として、真空容器内に独立して排気や加圧が可能な槽を設置してこの中にコイルを配置し、ヘリウムガスを封入して熱接触を高める方式を考案した。冷却と励磁後にはヘリウムガスを排気し、槽を開放してコイルを移動してプラズマ閉じ込めを行う計画である。Bi-2223 高温超伝導線材による小型巻線を試作し、良好な冷却と磁束保存による永久電流の駆動を実現した。

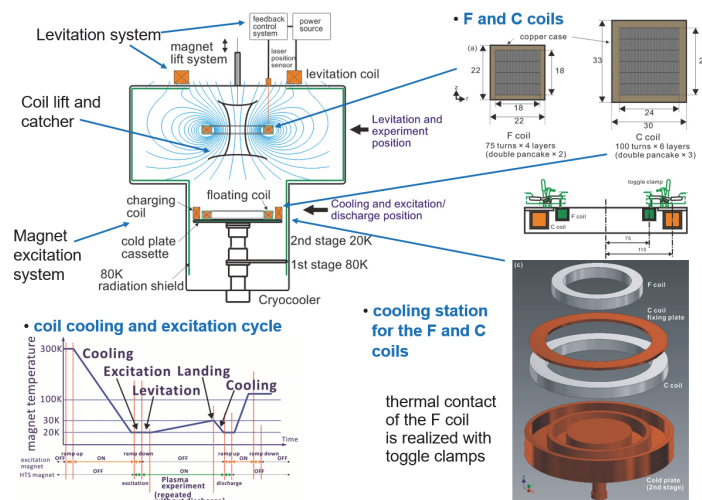


図 8 高温超伝導コイルの直接冷却による小型ダイポール。

これらの冷却試験及び予備実験

の結果に基づいて、電子及び陽電子の同時捕獲に使用する浮上コイル及び励磁用コイル巻線を、Bi-2223 高温超伝導線材を使用して作成した（図 9）。冷却試験の結果、磁気浮上超伝導コイルについては、冷却効率と機械的強度の確保が必要であることが判明し、熱伝導を向上する窒化アルミのフィラを含むエポキシ含浸処理を行った。これにより冷却時の温度特性が大きく改善し、要求される磁場生成が可能になった。また冷却昇温サイクルを繰り返した場合のクラック発生が抑制され、実用レベルに達した。試験は、複数のサンプル用コイルを用いた含浸処理と低温試験の実施後、フィラの最適な混合比や種別を選定し、磁場発生用コイル巻線の含浸処理を行った。含浸剤の熱伝導度の大幅な向上によりコイル全体の均熱性が高まり、目標を超える 15K 以下までの冷却が実現されている。これにより、直接冷却方式によるコンパクトなダイポール磁場配位で定格の電流運転によるダイポール磁場発生が可能となり、反粒子を含む各種プラズマへの適用性が拡大した。こうした一連の開発研究を通して、浮上コイル及び励磁コイル双方に要求される冷却と、陽電子捕獲に必要な定格電流による運転を実現するための道筋が得られ、プラズマ実験に使用するコイルの原型の開発を完了した。

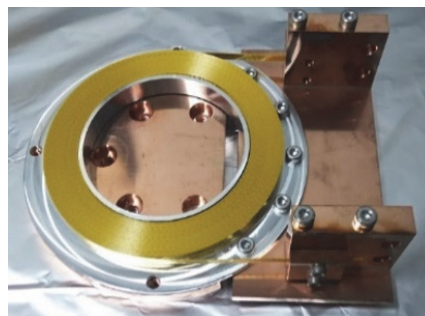


図 9 試作した超伝導コイル巻線。

以上、本課題では、大強度の陽電子ビームが得られるドイツの NEPOMUC 施設においてダイポール磁場トラップによる反物質プラズマの基礎実験を行い、入射と閉じ込め、また回転電場を用いた径方向輸送に関して大きな進展が得られた。ミュンヘン工科大学で得られた一連の成果に基づいて、超伝導コイル装置の開発研究をマックスプランク・プラズマ物理研究所及び日本国内の核融合科学研究所と東京大学において継続して実施し、直接冷却により磁気浮上運転を行う装置の概念を設計し、重要な構成要素である励磁及び浮上コイルの試作と冷却励磁試験、要求される運転性能（特に熱伝導の向上）を満たすためのフィラを使用した含浸処理を行った。一連の基礎物理実験と、装置製作に先立つ要素技術の開発研究に時間を要し、最終目標である電子陽電子プラズマの実現に到達することはできなかったが、最終目標を目指す上で重要なステップである陽電子の 100% に達する入射効率、1 秒以上の長時間閉じ込め、回転電場による軌道圧縮をダイポール磁場において初めて実現した。こうした研究の進展の結果、多数の陽電子の一時的な蓄積による短時間の入射及び軌道調整と、その上で電子との同時閉じ込め、さらにプラズマとしての高密度化が、当初の目標を実現する上で残された課題となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 10件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 M. Singer, M.R. Stoneking, E.V. Stenson, A. Deller, S. Nissl, J. Horn-Stanja, T. Sunn Pedersen, C. Hugenschmidt, H. Saitoh, A. Card	4. 巻 未定
2. 論文標題 Injection of positrons into a dense electron cloud in a magnetic dipole trap	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas, accepted for publication	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 M.R. Stoneking, T. Sunn Pedersen, P. Helander, H. Chen, U. Hergenbahn, E.V. Stenson, G. Fiksel, J. von der Linden, H. Saitoh, C.M. Surko, J.R. Danielson, C. Hugenschmidt, J. Horn-Stanja, A. Mishchenko, D. Kennedy, A. Deller, A. Card, S. Nissl, M. Singer, M. Singer, S. Koenig, L. Willingale他3名	4. 巻 86
2. 論文標題 A new frontier in laboratory physics: magnetized electron-positron plasmas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 052107 1-26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/S0022377820001385	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Saitoh, M.R. Stoneking, and T. Sunn Pedersen	4. 巻 91
2. 論文標題 A levitated dipole magnetic configuration as a compact charged particle trap	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 043507 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5142863	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Horn-Stanja J, Stenson E V, Stoneking M R, Singer M, Hergenbahn U, Nissl S, Saitoh H, Pedersen T Sunn, Dickmann M, Hugenschmidt C, Danielson J R	4. 巻 2
2. 論文標題 Injection of intense low-energy reactor-based positron beams into a supported magnetic dipole trap	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma Research Express	6. 最初と最後の頁 015006 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2516-1067/ab6f44	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 檜垣浩之, 齋藤晴彦	4. 巻 14
2. 論文標題 低エネルギー陽電子を用いた電子陽電子プラズマの磁場閉じ込め実験にむけて	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 陽電子科学 (日本陽電子科学会会報)	6. 最初と最後の頁 9-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 E.V. Stenson, S. Nissl, U. Hergenhahn, J. Horn-Stanja, M. Singer, H. Saitoh, T. Sunn Pedersen, J.R. Danielson, M.R. Stoneking, M. Dickmann, and C. Hugenschmidt	4. 巻 121
2. 論文標題 Lossless positron injection into a magnetic dipole trap	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 235005 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.235005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 J. Horn-Stanja, S. Nissl, U. Hergenhahn, T. Sunn Pedersen, H. Saitoh, E.V. Stenson, M. Dickmann, C. Hugenschmidt, M. Singer, M.R. Stoneking, and J.R. Danielson	4. 巻 121
2. 論文標題 Confinement of positrons exceeding 1s in a supported magnetic dipole trap	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 235003 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.235003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Higaki, J. Horn-Stanja, E.V. Stenson, H. Saitoh, U. Hergenhahn, T. Sunn Pedersen, M. Singer, M. Dickmann, and C. Hugenschmidt	4. 巻 14
2. 論文標題 低エネルギー陽電子を用いた電子-陽電子プラズマ研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 原子衝突学会誌「しょうとつ」	6. 最初と最後の頁 15-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Saitoh, J. Horn-Stanja, S. Nissl, E.V. Stenson, U. Hergenbahn, T. Sunn Pedersen, M. Singer, M. Dickmann, C. Hugenschmidt, M.R. Stoneking, J.R. Danielson, and C.M. Surko	4. 巻 1928
2. 論文標題 Manipulation of positron orbits in a dipole magnetic field with fluctuating electric fields	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020013 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5021578	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 U. Hergenbahn, J. Horn-Stanja, S. Nissl, T. Sunn Pedersen, H. Saitoh, E.V. Stenson, M.R. Stoneking, M. Dickmann, C. Hugenschmidt, M. Singer, J.R. Danielson, and C.M. Surko	4. 巻 1928
2. 論文標題 Progress of the APEX experiment for creation of an electron-positron pair plasma	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020004 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5021569	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 M.R. Stoneking, H. Saitoh, M. Singer, E.V. Stenson, J. Horn-Stanja, T. Sunn Pedersen, S. Nissl, U. Hergenbahn, N. Yanagi, C. Hugenschmidt, M. Dickmann, J.R. Danielson, and C.M. Surko	4. 巻 1928
2. 論文標題 Toward a compact levitated superconducting dipole for positron-electron plasma confinement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020015 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5021580	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 齋藤晴彦, 谷岡樹, 西浦正樹, 吉田善章
2. 発表標題 高温超伝導小型巻線を用いたダイポール磁場荷電粒子トラップの開発計画
3. 学会等名 物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Saitoh, Z. Yoshida, N. Kenmochi, M. Nishiura A, K. Nakamura, T. Mori, Y. Yokota, K. Ueda
2. 発表標題 Chaos of energetic positron orbit in a dipole magnetic field configuration
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤晴彦, M. Stoneking, J. Horn-Stanja, E.V. Stenson, S. Nissl, U. Hergenbahn, T. Sunn Pedersen, M. Singer, C. Hugenschmidt, 吉田善章, 釘持尚輝, 柳長門, 三戸利行
2. 発表標題 電子陽電子プラズマ生成のための小型ダイポール磁場トラップの開発状況
3. 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Saitoh, U. Hergenbahn, J. Horn-Stanja, S. Nissl, T. Sunn Pedersen, E.V. Stenson, M. Dickmann, C. Hugenschmidt, M. Singer, M. R. Stoneking, J.R. Danielson, and C.M. Surko
2. 発表標題 Overview of the status of the PAX/APEX pair plasma project
3. 学会等名 45th EPS Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤晴彦, T. Sunn Pedersen, J. Horn-Stanja, E. V. Stenson, U. Hergenbahn, M. Singer, M. Dickmann, C. Hugenschmidt, M. R. Stoneking, and J. R. Danielson
2. 発表標題 ダイポール磁場配位を用いた陽電子閉じ込め研究の進展
3. 学会等名 物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤晴彦, J. Horn-Stanja, S. Niszl, M. Singer, E.V. Stenson, U. Hergenbahn, T. Sunn Pedersen, M. Dickmann, C. Hugenschmidt, M.R. Stoneking, J.R. Danielson, C.M. Surko
2. 発表標題 回転電場を用いたダイポール磁場中の陽電子軌道の径方向圧縮
3. 学会等名 物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Saitoh, J. Horn-Stanja, E.V. Stenson, M. Singer, U. Hergenbahn, T. Sunn Pedersen, Y. Kawazura, Y. Yano, M. Nishiura, and Z. Yoshida
2. 発表標題 Chaotic long orbits of energetic positrons in a dipole magnetic field configuration
3. 学会等名 12th International Workshop on Non-neutral Plasmas
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 H. Saitoh, J. Horn-Stanja, E.V. Stenson, U. Hergenbahn, T. Sunn Pedersen, M. Singer, M. Dickmann, C. Hugenschmidt, M.R. Stoneking, and J.R. Danielson
2. 発表標題 Injection and manipulation of positron beam in a dipole magnetic field toward the creation of electron-positron pair plasmas
3. 学会等名 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2017) (招待講演)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 齋藤晴彦, T. Sunn Pedersen, J. Horn-Stanja, E.V. Stenson, U. Hergenbahn, M. Singer, M. Dickmann, C. Hugenschmidt, M.R. Stoneking, and J.R. Danielson
2. 発表標題 ダイポール磁場配位を用いた陽電子閉じ込め研究の進展
3. 学会等名 物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2017年～2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	サン ペダーセン トーマス (Sunn Pedersen Thomas)	マックスプランク・プラズマ物理研究所・E4・Director	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	フーゲンシュミット クリstoff (Hugenschmidt Christoph)	ミュンヘン工科大学・Physics Department・教授	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	マシュー ストンキング (Matthew R. Stoneking)	ローレンス大学・Department of Physics・教授	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
その他の研究協力者	ホルン スタンヤ ユリアナ (Horn-Stanja Juliane)	マックスプランク・プラズマ物理研究所・E4・研究員	
その他の研究協力者	ステンソン イヴ (V. Stenson Eve)	ミュンヘン工科大学・Physics Department・研究員	
その他の研究協力者	ヘルゲンハーン ウーヴェ (Hergenhahn Uwe)	マックスプランク・プラズマ物理研究所・E4・Priv.-Doz. Dr.	
その他の研究協力者	ジンガー マルクス (Singer Markus)	ミュンヘン工科大学・Physics Department・ Wissenschaftlicher Mitarbeiter	
その他の研究協力者	ニスル シュテファン (Nissl Stefan)	ミュンヘン工科大学・Physics Department・ Wissenschaftlicher Mitarbeiter	
その他の研究協力者	ディックマン マルセル (Dickmann Marcel)	ミュンヘン連邦軍大学・Physics Department・Scientist	
その他の研究協力者	ダニエルソン ジェームス (R. Danielson James)	カリフォルニア大学サンディエゴ校・Department of Physics・Scientist	
その他の研究協力者	サーコ クリフォード (Surko Clifford)	カリフォルニア大学サンディエゴ校・Department of Physics・教授	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ドイツ	マックスプランク・プラズマ物理研究所 (IPP)	ミュンヘン工科大学 (TUM)	
米国	ローレンス大学	カリフォルニア大学サンディエゴ校	