

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2017

課題番号：25707043

研究課題名(和文) ダイポール磁場配位を用いた電子陽電子プラズマの生成と基礎特性の解明

研究課題名(英文) Formation and investigation of electron-positron plasma in a dipole magnetic field configuration

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・客員共同研究員

研究者番号：60415164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,000,000円

研究成果の概要(和文)：電子陽電子プラズマの実験室生成を念頭に置いて、ダイポール磁場配位において大強度低速陽電子ビームを用いた実験を実施した。永久磁石を用いたプロトタイプのダイポール装置をNEPOMUC陽電子源において運転し、閉じた磁気面内への損失無し(効率100%)の入射、1秒を上回る閉じ込め、軌道制御を5eVの陽電子ビームに対して実証した。これらの実験結果に基づき、磁気浮上ダイポール磁場装置の開発を進め、浮上システムの作成、直接熱接触による高温超伝導(HTS)コイル巻線の冷却、プラズマ捕獲用の高温超伝導コイルの作成を行った。

研究成果の概要(英文)：Toward the formation of electron-positron plasmas in a laboratory, experiments with intense slow positron beam were conducted in a dipole magnetic configuration. In a prototype dipole experiment with a permanent magnet, operated at the NEPOMUC positron facility, 100% lossless injection into closed magnetic surfaces, trapping for more than 1 s, and orbit manipulation were demonstrated for 5 eV positron beam. Based on these experimental results, development of a levitated dipole experiment was conducted, including the levitation system, efficient direct cooling of a high temperature superconducting (HTS) coil winding, fabrication of HTS coils to be used for the confinement of plasmas.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：反物質プラズマ ダイポール磁場 電子陽電子プラズマ 低速陽電子ビーム 高温超伝導線材

1. 研究開始当初の背景

通常プラズマとはイオンと電子から構成される荷電粒子群を指すが、自然界にはこの範疇には留まらない多様なプラズマが存在する。電子陽電子プラズマは、等質量の荷電粒子から構成されるペアプラズマである。質量の対称性は、プラズマの安定性や波動伝播特性に関して特異な性質を発現させる事が予測されており、興味深い研究対象である。電子陽電子プラズマは、パルサーや活動銀河核等の天体磁気圏に存在すると考えられており、天体現象における素過程の理解を深化する上でも重要である。また、新しい技術に基づく陽電子の効率的な蓄積技法が確立されれば、ポジトロニウムの大量生成やそれを用いたボーズアインシュタイン凝縮等の先進的課題への応用が考えられる。

ペアプラズマについて活発な理論及び数値計算による研究が進められている一方で、実験室研究の例は少ない。電子陽電子プラズマの実験研究としては、非中性プラズマの分野で標準的な直線型の電磁場閉じ込め配位を使用したビームプラズマ相互作用や、ミラー磁場を用いた電子と陽電子の同時閉じ込め研究の例がある。また近年、レーザーを用いた対生成により、高密度の電子陽電子ペアをプラズマとして生成する試みが開始されている。これらのいずれの研究においても、プラズマ条件を満たす電子陽電子群は生成されていない。ペアプラズマの実験研究として、過去にフラーレン分子の正負イオンを用いた研究が存在する。低質量かつ不純物の少ない電子陽電子系を用いる事で、研究対象となる周波数帯域を拡げ、かつ上述の反物質プラズマとしての研究展開が期待出来る。

陽電子及び電子陽電子の磁場閉じ込めを行う上で、各種過程により規定される lifetime を図 1 に示す。目標とする 10^{12} m^{-3} 程度の密度領域では、対消滅の断面積は十分小さく、再結合によるポジトロニウム (Ps) 生成の効果も極低温の場合を除いて小さい。現実的に閉じ込め時間を規定すると予想されるのは、残存する水素原子との荷電交換反応に

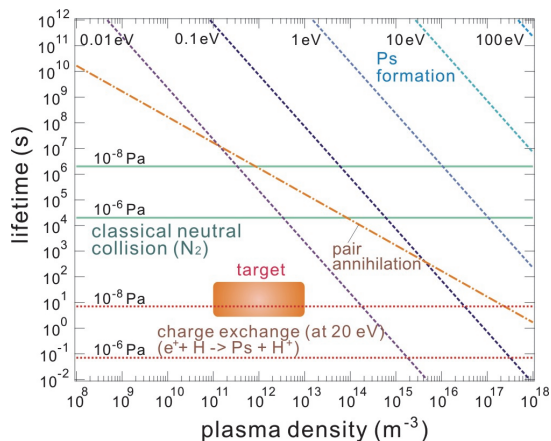


図 1: 様々な効果により規定される陽電子及び電子陽電子群の lifetime.

よる Ps 生成であるが、超高真空環境の実現と適切な陽電子温度を選択する事で、プラズマの波動や安定性の研究の実施に必要な閉じ込め時間を確保する事が出来る。

磁場閉じ込め配位として、単一粒子非中性プラズマの閉じ込めに適した直線型配位では、異なる電荷符号を持つ荷電粒子を特に低温状態で同時捕獲する事は困難である。低密度のプラズマをトロイダル磁場配位に閉じ込める上では、外部コイルのみにより磁気面を生成する必要がある。これが可能なトロイダル磁場配位として、ダイポールとヘリカルが存在する。惑星磁気圏を模擬したダイポール磁場配位は高い軸対称性を持つ。東京大学の RT-1 では、非中性 (純電子) プラズマの極めて安定な閉じ込めが実現されており、反物質プラズマに適用可能である。また、ダイポール磁場中の荷電粒子の運動はそれ自身が興味深い研究対象であり、消滅ガンマ線を使用して精密計測が可能な陽電子を使用する事で、粒子輸送や自己組織化について詳細な研究を展開する事が可能になる。

2. 研究の目的

こうした観点から、本研究では、惑星磁気圏に類似したダイポール磁場配位を用いた、磁場閉じ込めによる電子陽電子プラズマの生成を目指す。これまでダイポール磁場配位に反物質粒子を捕獲した研究例は無く、様々な技術開発が必要とされる。ダイポール磁場の閉じた磁気面中では陽電子の良好な閉じ込めが予測される一方で、外部で生成された陽電子を閉じ込め領域へと高効率で入射する必要がある。また、陽電子の閉じ込めに関しては電子とは異なる機構が存在する可能性があり、これを検証する事は重要である。さらに、陽電子を高密度化してプラズマ状態を実現するためには、ダイポール磁場中で陽電子軌道を精密に制御する必要がある。こうした一連の研究を実際の低速陽電子ビームを使用して実施する事でダイポール磁場による陽電子捕獲の知見を深めると共に、さらに電子陽電子プラズマの生成を目指す事が、本研究の開始時に設定した最終目標である。

3. 研究の方法

(1) 大強度陽電子源 NEPOMUC の使用

上述の研究目標を達成するために、本研究では小型のダイポール磁場装置をミュンヘン工科大学 (TUM, ドイツ) の低速陽電子施設 NEPOMUC において運転し、陽電子ビームを用いた実験を実施する。NEPOMUC は、研究用原子炉 FRM-II から供給される高速中性子を用いた低速陽電子源であり、放射線源や線形加速器を用いた標準的な陽電子源と比較して大強度の陽電子ビーム ($10^9/\text{s}$ at 1keV, $10^7/\text{s}$ at 5eV) を供給可能である。NEPOMUC の open beam port と呼ばれるポートが本実験の実施場所であり、ここでの陽電子ビーム特性を明らかにした上で、陽電子の入射と閉じ

込め、また電子ビームとの同時閉じ込め実験を実施する。本研究は、TUM 及びマックスプランク・プラズマ物理研究所 (IPP) と密接な協力の下に実施する計画であり、現地での装置開発や基礎実験は IPP において実施する。

(2) 永久磁石装置を用いた陽電子実験

電子陽電子プラズマ生成に向けた開発研究は、超伝導装置の製作に先立ち、永久磁石を用いた小型装置を使用して実施可能である。反物質粒子のダイポール磁場捕獲を実現する上で鍵となるのは、磁気面のセパトリクスを越えた陽電子の高効率入射を実現し、良好な閉じ込めを実証する事である。研究期間の初期に、図 2 に示すような小型装置を製作し、これらの課題について実験研究を行う。

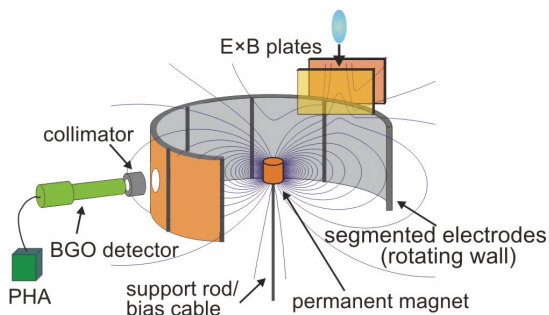


図 2: 永久磁石を用いたダイポール磁場装置の概念図。磁気面を横切る入射実験が可能。

小型装置では、軸方向に着磁された表面磁場強度 0.6T のネオジウム磁石を真空容器中に機械的に支持してダイポール磁場を生成した。図 3 に示すように、NEPOMUC ビームラインと小型装置を、ヘルムホルツコイルを介して接続した。永久磁石は無酸素銅のケースに収納され、真空容器に対してバイアス可能である。永久磁石の磁力線は閉じた磁気面を形成しないため、電子と陽電子の同時閉じ込めは不可能であるが、E×B ドリフトを使用した陽電子入射と、永久磁石への電圧印加を行

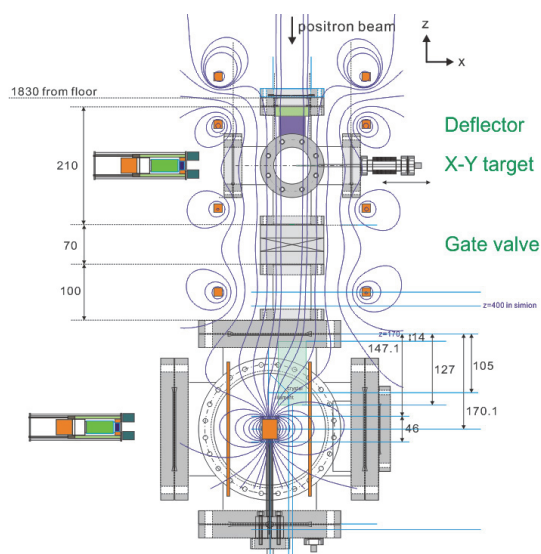


図 3: NEPOMUC 陽電子ビームラインに導入した小型ダイポール装置の断面図。

う事で陽電子の閉じ込めが可能となる。磁力線を横切る粒子輸送を可能にする E×B 電極に加えて、不正電場を抑制するためのシールド板や、周回方向に分割された外周電極、また装置の赤道面には、可動式のターゲットプローブが設置されている。陽電子の挙動の観測は、BGO 検出器を用いてプローブ及びマグネット上の消滅ガンマ線の計測を行うと共に、電気的に絶縁された構造を持つプローブを用いて陽電子電流の直接計測を行う事により、陽電子の入射効率、経方向分布、閉じ込め時間等の評価を行う。

(3) 小型超伝導ダイポール装置の開発

永久磁石装置を用いた入射閉じ込め実験結果に基づいて、電子と陽電子の同時閉じ込め可能な小型超伝導ダイポール磁場装置を製作する。希少な陽電子を高密度のプラズマ状態で捕獲するためには小型装置の開発が重要であり、ヘリウムガス循環によるコイルの冷却方式の採用は構造上非常に困難である。このため、常時超高真空環境で運転を行う特性を生かして、GM 冷凍機のクールドヘッドとの直接熱接触による冷却方式を採用した超伝導装置を開発して実験に供する。また、高温超伝導線材を用いた磁気浮上コイルの設計は、核融合科学研究所 (NIFS) と共同研究を実施する計画である。

4. 研究成果

(1) ダイポール磁場への陽電子の高効率入射

NEPOMUC ビームラインの磁場強度は 5mT であり、供給される陽電子は、磁力線を横切るドリフト運動を発生させない限り、永久磁石表面との衝突による再結合かミラー反射により、ダイポール磁場の閉じ込め領域へと進入させる事は出来ない(図 4 の orbit 1)。E×B 板により磁場と垂直方向に適切な電場を印加する事で、磁力線を横切る効果的なドリフト運動を発生する事が出来る (orbit 2)。閉じ込め領域に進入しトロイダル方向に半周した後の陽電子ビームを、ターゲットプローブを用いて収集し、入射前に閉じ込め領域上部で MCP 及び電流計測により測定した陽電子強度と比較する事により入射効率を測

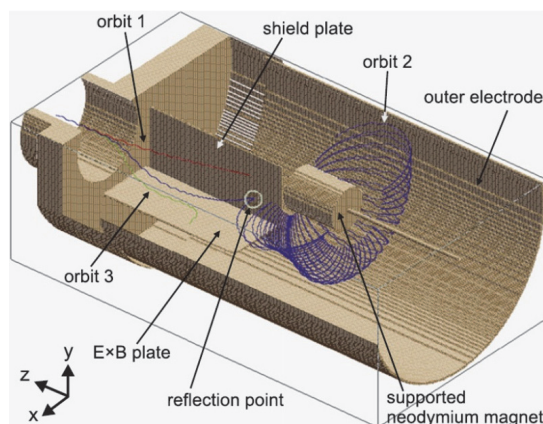


図 4: ダイポール磁場配位の閉じ込め領域への陽電子のドリフト入射の軌道計算例。

定した。永久磁石及びビームラインの磁場と各種電極の電場を含む軌道計算に基づいて入射実験を行った。実験の初期段階では40%、さらに外周電極を分割した構造とする事で自由度の高い外部電場印加を可能にし、5eVのビームを使用してほぼ100%の陽電子入射を実現した。これは、ダイポール磁場内への反粒子ビームの無損失入射を実現した初めての成果であり、プラズマとして的高密度捕獲を実現する上で重要な一歩である。

(2) 陽電子の長時間閉じ込め

ダイポール磁場に入射された陽電子の閉じ込め時間の評価を行った。計測方法は、系の対称性を壊す事で閉じ込めが悪化する事を利用して、ビーム入射停止後の保持時間後、非対称な電場を印加する事で陽電子の急速な損失を発生させ、その際の消滅ガンマ線をカウントした。陽電子損失には複数の機構が存在する事が明らかになった。入射に使用したE×B電極を保持中もバイアスし続けた場合に得られる閉じ込め時間は0.1ms程度であるが、E×B電極を含め非対称性を生じる電極の電位にゲートを掛ける事で、100ms程度まで改善する。この状況で永久磁石をバイアスしてミラー損失を抑制する事で、図5に示すような1秒を上回る閉じ込めが観測された。永久磁石をバイアスしない場合の閉じ込め時間は、中性粒子との衝突による陽電子のロスコーン内への移動時間と同程度である。バイアス時には、中性衝突による経方向輸送、また非対称な磁場や永久磁石の着磁精度の効果が、閉じ込めの上限を定めている可能性が高い。観測された閉じ込め時間は、計測対象である波動や不安定性の時間スケールに対して十分長く、ダイポール磁場の優れた陽電子閉じ込め性能が明らかになった。

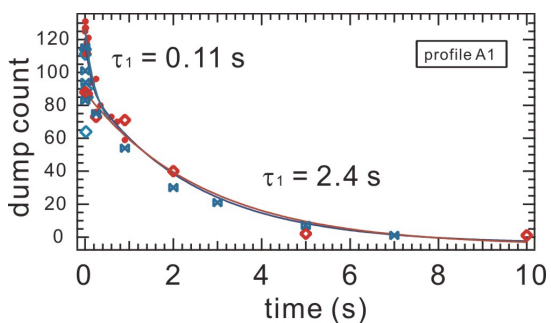


図5: 消滅ガンマ線の計測により得られたダイポール磁場中の陽電子の閉じ込め時間。

(3) 回転電場状の電場印加による陽電子圧縮

陽電子の高密度状態を実現するために、ビームや蓄積した陽電子群の繰り返し入射を検討している。陽電子群をダイポール磁場中の閉じ込め領域で高密度化し、特に自由度の高い入射を行うためには、陽電子軌道の制御方法を開発する事が重要である。こうした観点から、図6に示すように外周電極を周回方向に分割した構造とし、独立した電圧印加を行った。位相をずらした正弦波を印加し、陽

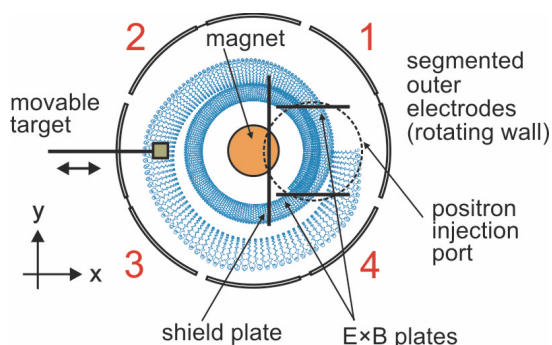


図6: 外周電極による「回転電場」の印加による陽電子軌道の変調の計算例。

電子のトロイダル方向の周回周波数と近い周波数を選択する事で、陽電子軌道に変調を生じさせる事が出来る。これは、初期条件の揃った多数の陽電子から構成されるビームに対しても適用であり、ビーム全体の位置制御に応用する事が出来る。図7に示すように、実験条件に合わせた回転電場をNEPOMUCから供給される陽電子に適用し、経方向の圧縮と入射効率の上昇を実証した。

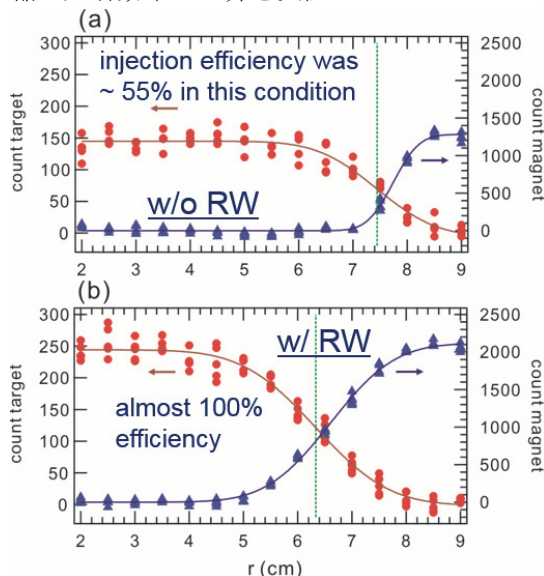


図7: 回転電場を(a)非印加時と(b)印加時の消滅ガンマ線信号のターゲット位置依存性。

(4) 陽電子と電子の同時入射

電子陽電子プラズマを実現するためには、同一の閉じ込め領域内に両者を導入する必要がある、複数のシナリオが考えられる。本研究では、陽電子ビームラインの周辺部に配置した電子銃から電子を入射し、最終的に永久磁石装置の閉じ込め領域内へと到達させる事を試みた。ターゲットプローブを用いた消滅ガンマ線と電流の直接計測により、陽電子の入射効率と電子の入射ビーム強度を計測した。電子の初期エネルギーを独立に制御する事により、空間的に離れた初期位置にある陽電子と電子ビームを、同一のE×B電極バイアスによってダイポール磁場中へと進入させる事に成功した。図8は、入射後にターゲットプローブ上で消滅した陽電子による511keVガンマ線の強度であり、ビーム位置を

制御するコイル電流に対する依存性を示している。高効率の陽電子入射は、これらのパラメータの比較的幅広い領域で実現されており、同時に電子入射が可能であった。なお、電子の同時入射時には陽電子信号の減少が観測されており、装置の帯電の影響を疑っている。今後の装置開発では、これを踏まえた設計を行う必要がある。

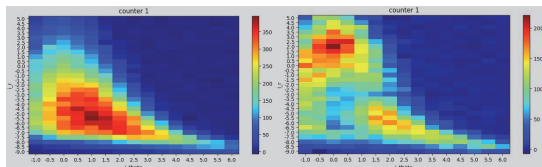


図 8: 制御コイル電流 (横軸 I_{θ} , 縦軸 I_r) に対する消滅ガンマ線信号。右が電子追加時。

(5) 超伝導装置の開発研究

永久磁石装置を使用した陽電子実験結果に基づいて、超伝導ダイポール磁場装置の開発を進めた。コイル浮上制御系については、安定性の解析に基づいてPID制御による安定浮上システムを製作し、永久磁石を用いて安定浮上運転を実現し、安定性の解析結果と良い一致を見た。コイル冷却試験では、Bi-2223 試験巻線を用いて液体窒素及びGM冷凍機による冷却を行い (図 9)、熱接触による冷却方式での超伝導転移を確認した。実機での試験と合わせてコイルのへ熱侵入の検討を行い、コイル昇温までに1時間程度以上の浮上実験が可能であるとの見通しを得た。

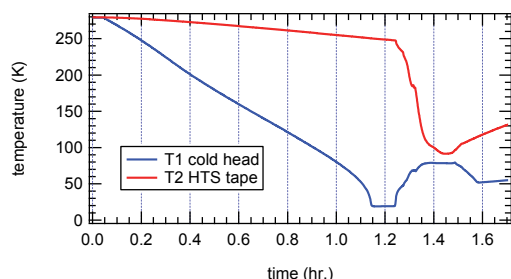


図 9: GM 冷凍機コールドヘッドと高温超伝導線材巻線の直接熱接触による冷却試験。

冷却試験と複数の試験巻線の作成を段階的に進めた上で、プラズマ閉じ込め用の浮上用及び励磁用コイルの諸元を決定し、NIFSにおいてこれらの巻線を作成した (図 10)。コイル性能と巻線作成の容易さのバランスから、Bi-2223 線材を採用し、外部電源による直接励磁を行う励磁用コイルはカプトン絶縁、浮上用コイルは絶縁無しとした。これ

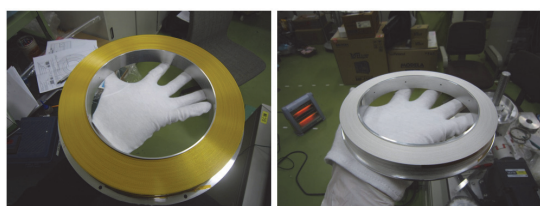


図 10: Bi-2223 線材で作成した励磁用コイル (左) と浮上用コイル (右)。

らのコイルを使用した磁場配位において、電子及び陽電子の閉じ込めが可能である事を数値計算により確認した。

(6) まとめ

電子陽電子プラズマの生成という当初の最終目標には到達出来なかったが、ダイポール磁場における荷電粒子の挙動について、陽電子を用いた実験により各種の新しい知見が得られた。主要な成果である希少な陽電子ビームのダイポール磁場中への高効率入射、安定閉じ込め、軌道制御、電子との同時入射の実現は、電子陽電子プラズマに向けた重要な研究開発段階と位置付けられる。また、反物質捕獲に適した小型超伝導装置の開発についても一定の成果を得た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件) (全て査読あり)

- ① 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, "Manipulation of positron orbits in a dipole magnetic field with fluctuating electric fields", AIP Conference Proceedings **1928**, 020013 1-6 (2018). DOI10.1063/1.5021578
- ② 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, "Progress of the APEX experiment for creation of an electron-positron pair plasma", AIP Conference Proceedings **1928**, 020004 1-11 (2018). DOI 10.1063/1.5021569
- ③ 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, "Toward a compact levitated superconducting dipole for positron-electron plasma confinement", AIP Conference Proceedings **1928**, 020015 1-6 (2018). DOI 10.1063/1.5021580
- ④ H. Higaki, J. Horn-Stanja, E.V. Stenson, H. Saitoh, U. Hergenbahn, T. Sunn Pedersen, M.Singer, M. Dickmann, C. Hugenschmidt, "低エネルギー陽電子を用いた電子-陽電子プラズマ研究", 原子衝突学会誌しようつ **14**, 15-24 (2017). <http://www.atomiccollision.jp/collision/collision.html>
- ⑤ H. Saitoh, Z. Yoshida, Y. Yano, M. Nishiura, Y. Kawazura, J. Stanja, and T. Sunn Pedersen, "Chaos of energetic positron orbits in a dipole magnetic field and its potential application to a new injection scheme",

- Physical Review E **94**, 043203 1-9 (2016). DOI10.1103/PhysRevE.94.043203
- ⑥ J. Stanja, U. Hergenbahn, H. Niemann, N. Paschkowski, T. Sunn Pedersen, H. Saitoh, E.V. Stenson, M.R. Stoneking, C. Hugenschmidt, and C. Piochacz, "Characterization of the NEPOMUC primary and remoderated positron beams at different energies", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **827**, 52-62 (2016). DOI10.1016/j.nima.2016.04.093
- ⑦ H. Saitoh, J. Stanja, E.V. Stenson, U. Hergenbahn, H. Niemann, T. Sunn Pedersen, M.R. Stoneking, C. Piochacz, and C. Hugenschmidt, "Efficient injection of an intense positron beam into a dipole magnetic field", New Journal of Physics **17**, 103038 1-9 (2015).DOI10.1088/1367-2630/17/10/103038

[学会発表] (計 11 件)

- ① 齋藤晴彦, T. Sunn Pedersen, J. Horn-Stanja, E.V. Stenson, U. Hergenbahn, M. Singer, M. Dickmann, C. Hugenschmidt, M.R. Stoneking, J.R. Danielson, 「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」, 物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 9 月 21-24 日 東京理科大.
- ② H. Saitoh, J. Horn-Stanja, E.V. Stenson, U. Hergenbahn, T. Sunn Pedersen, M. Singer, M. Dickmann, C. Hugenschmidt, M.R. Stoneking, J.R. Danielson, "Injection and manipulation of positron beam in a dipole magnetic field toward the creation of electron-positron pair plasmas", 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPS-DPP2017), 18-23 September 2017, Chengdu, China.
- ③ H. Saitoh, J. Horn-Stanja, E.V. Stenson, M. Singer, U. Hergenbahn, T. Sunn Pedersen, Y. Kawazura, Y. Yano, M. Nishiura, Z. Yoshida, "Chaotic long orbits of energetic positrons in a dipole magnetic field configuration", 12th International Workshop on Non-neutral Plasmas, 10-13 July 2017, Lawrence University, Appleton, Wisconsin, USA.
- ④ H. Saitoh, J. Horn-Stanja, E.V. Stenson, U. Hergenbahn, M. Singer, M.R. Stoneking, N. Yanagi, "Development status of a levitated dipole experiment for pair-plasma production" Deutsche Physikalische Gesellschaft Frühjahrstagung (DPG Spring Meeting), 13-17 March 2017, Bremen, Germany.
- ⑤ H. Saitoh, U. Hergenbahn, H. Niemann, N. Paschkowski, T. Sunn Pedersen, J. Stanja, E.V. Stenson, M.R. Stoneking, C. Hugenschmidt, C. Piochacz, S. Vohburger, L. Schweikhard, J.R. Danielson, C.M. Surko, "Progress toward the creation of magnetically confined pair-plasmas", 6th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical plasmas APCTP, 11-16 July 2016, Tsukuba, Japan.
- ⑥ H. Saitoh, U. Hergenbahn, H. Niemann, N. Paschkowski, T. Sunn Pedersen, J. Stanja, E. V. Stenson, M.R. Stoneking, C. Hugenschmidt, C. Piochacz, S. Vohburger, L. Schweikhard, J.R. Danielson, C.M. Surko, "Progress toward the creation of magnetically confined pair-plasmas", Deutsche Physikalische Gesellschaft Frühjahrstagung (DPG Spring Meeting), 29 February-4 March 2016, Hanover, Germany.
- ⑦ U. Hergenbahn, H. Niemann, N. Paschkowski, T. Sunn Pedersen, H. Saitoh, J. Stanja, E.V. Stenson, M.R. Stoneking, C. Hugenschmidt, C. Piochacz, S. Vohburger, G. H. Marx, L. Schweikhard, J.R. Danielson, C.M. Surko, "Recent status of the PAX and APEX projects toward the formation of electron-positron plasma", 25th International Toki Conference (ITC-25), 3-6 November 2015, Toki, Japan.
- ⑧ H. Saitoh, J. Stanja, T. Sunn Pedersen, U. Hergenbahn, E.V. Stenson, H. Niemann, N. Paschkowski, C. Hugenschmidt, G.H. Marx, L. Schweikhard, J.R. Danielson, C.M. Surko, "Status of A Positron-Electron Experiment (APEX) towards the formation of pair plasmas" (invited talk), 11th International Workshop on Non-neutral Plasmas, 1-4 December 2014, Takamatsu, Japan.
- ⑨ H. Saitoh, T. Sunn Pedersen, U. Hergenbahn, E.V. Stenson, J. Stanja, N. Paschkowski, C. Hugenschmidt, "Injection and trapping of electrons in a dipole magnetic field: towards the formation of an electron-positron plasma", 41st EPS Conference on Plasma Physics, 23-27 June 2014, Berlin, Germany.
- ⑩ H. Saitoh, T. Sunn Pedersen, U. Hergenbahn, E.V. Stenson, N. Paschkowski, C. Hugenschmidt, "Trapping properties of magnetic dipole fields" Physics of Electron-Positron Plasma Workshop, 11 October 2013, IPP Greifswald, Germany.
- ⑪ H. Saitoh, T. Sunn Pedersen, U. Hergenbahn, E.V. Stenson, N. Paschkowski, C. Hugenschmidt, "Recent status of A Positron-Electron Experiment (APEX)", 13th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques and Applications, 15-20 September 2013, TUM, Germany.

6. 研究組織

(1)研究代表者

齋藤 晴彦 (SAITOH, Haruhiko)

東京大学・新領域創成科学研究科・客員共同研究員

研究者番号 : 60415164