

ペニングトラップにイオンを閉じ込める際に誘起される イオン漏洩現象の物理機構の解明とその漏洩抑制方法

本学電気電子工学系の比村治彦教授のグループは、大阪大学大学院理学研究科の青木順助教等の協力を得て、約 20 年以上前から観測されていた荷電粒子トラップ（ペニングトラップ^{*1}）にイオン群を閉じ込める際に生じるイオン漏洩現象の物理機構とその詳細を世界で初めて明らかにし、その漏洩の抑制方法を示した。これにより、荷電粒子トラップを用いる反物質生成実験^{*2}や、量子コンピュータ^{*3}、がん治療用ビームなど、多くの研究分野で同様に生じる可能性があるこの漏洩現象を回避することができる。

この研究の最新成果は、2018 年 12 月 17 日発行のアメリカ物理学協会発行の学術雑誌「Physics of Plasmas」に掲載された。これまでに、この研究に関連する成果が同誌上で連続的に掲載されている。

ポイント

- ✓ 世界初となるペニングトラップのポテンシャル障壁開閉動作で生じるイオン漏洩現象の物理機構の解明とその漏洩を回避する方法の提示
- ✓ ペニングトラップを用いる様々な応用研究への寄与が可能

研究の背景

1989年にイオン・トラップ法のひとつであるペニングトラップの開発者2名がノーベル物理学賞を受賞した。それまでもその後もペニングトラップは、荷電粒子を局所的に効率よく閉じ込める技術として多くの研究で使用され、近年では次世代の科学技術に必要な量子コンピュータや反物質、日本人の死亡原因1位であるがん治療用ビームなどの実験で使用されている。ペニングトラップでは、荷電粒子を閉じ込めるために2つのポテンシャル障壁(図1参照)が使用される。それら2つの内、片側のポテンシャル障壁を開閉することで荷電粒子をポテンシャル障壁間にトラップすることができる(図1(b)参照)。イオン群をトラップするために片側の(上流側)ポテンシャル障壁を開閉する際に、もう一方の開閉していない(下流側)ポテンシャル障壁から一部のイオンが漏洩する(図1(c)参照)。我々の研究は、開閉動作中の上流側ポテンシャル障壁上にいるイオン群が、上流側ポテンシャル障壁の時間変化によりエネルギーを受け取り、エネルギーを受け取ったイオン群がトラップから漏洩することを明らかにした。また、ペニングトラップに閉じ込められたイオン群が軸方向に静電的に振動して、その静電振動と共鳴したイオンがペニングトラップから間欠的に漏洩することも明らかにしてきた。今回の論文はその物理機構の詳細と、イオン漏洩の回避方法について示している。

研究の内容

これまでの研究で、イオン群が上流側ポテンシャル障壁の上に滞在する時間と、ポテンシャル障壁が閉じるのに必要な時間(立ち上がり時間)それぞれがマイクロ秒オーダーで等しいため、イオン群がポテンシャル障壁の変化によりエネルギーを受け取ることが実験的かつ数値シミュレーションで明らかにされていた。

そこで本研究では、上流側ポテンシャル障壁の立ち上がり時間を徐々に長くし、イオン群の軸方向エネルギー分布およびイオンの漏洩量を、蛍光盤付きマイクロチャンネルプレート*4と積分回路を用いて測定した。測定結果から、イオン群が受け取るエネルギーやイオンの漏洩量は、上流側ポテンシャル障壁の立ち上がり時間が長くなるほど、減少することが明らかになった(図2参照)。

次に、荷電粒子トラップに残されたイオン群は軸方向に ≈ 14 kHzで静電振動し、その静電振動と共鳴した一部のイオンがペニングトラップから断続的に漏洩することが、我々のこれまでの論文で示されている。このとき、そのイオン群の静電振動の振動数は、ペニングトラップの電位形状に依存することが理論的に示されている。

そこで本研究では、その静電振動数と間欠的にトラップから漏洩してくるイオン群の時間周期を、ペニングトラップの電位形状を変えながら電流アンプ等を用いて測定した。測定

の結果、静電振動数の値と漏洩時間周期は一致した（図3参照）。さらに、この間欠的漏洩は、上流側ポテンシャル障壁の立ち上がり時間を十分長くすることで、回避できることも明らかにした。また、静電振動を急速に減衰させるためには、ポテンシャル障壁を非対称にすればよいことも明らかにした（図1(d)参照）。

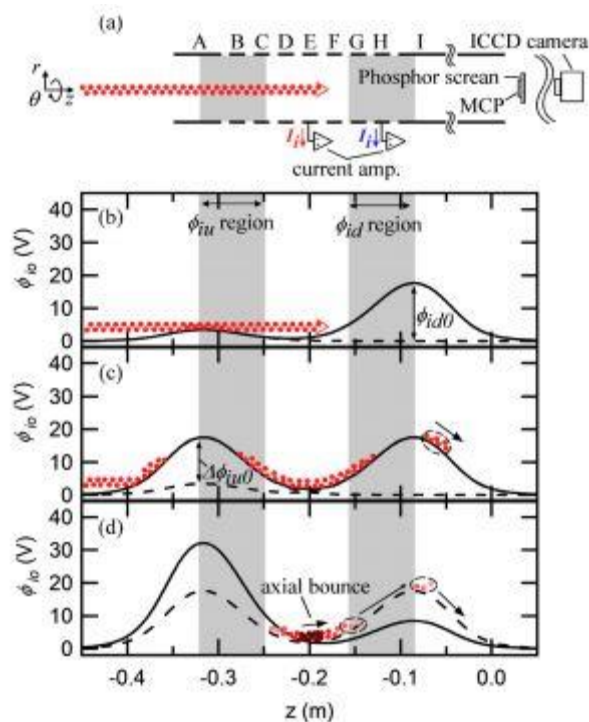


図1 実験セットアップの模式図

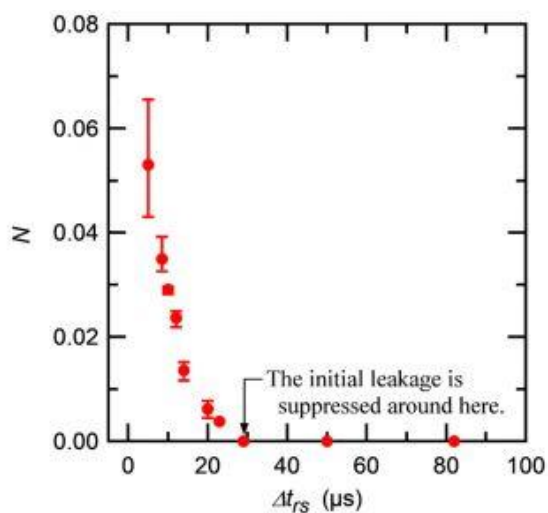


図2 イオン漏洩量の立ち上がり時間依存性

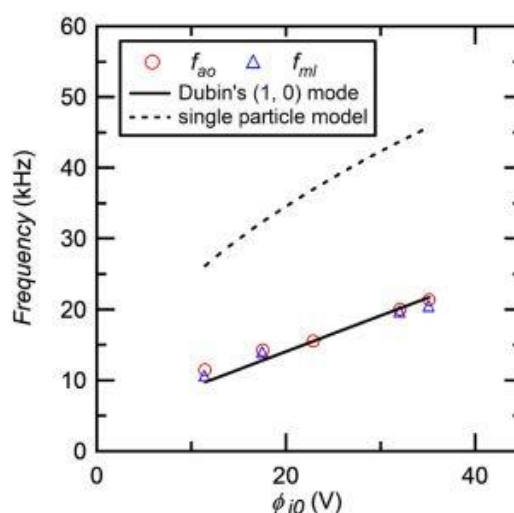


図3 イオンの振動数と漏洩周波数のポテンシャル形状依存性

今後の展開

本研究で上流側ポテンシャル障壁の立ち上がり時間を変化させることで、イオン群が受け取るエネルギーも変化することが明らかになった。この現象を利用すれば、指向性がよくエネルギー拡がりの少ない荷電粒子ビームを生成できる可能性がある。現在、顕微鏡検査や分光に用いられる荷電粒子ビーム生成には、レーザーや回転電場など、難易度の高い技術が使用される。これらの技術は、ペニングトラップの磁場強度が 1 T 以上の強磁場下で実現されているため、高価な超電導コイルの使用が必須となっている。弱磁場下で指向性のよいイオンビームを生成できる技術が開発できれば、それらコストを抑えられる。また、弱磁場中で緩く磁化されたイオン群を用いることで、人類が今まで発見していない新しい物理現象が生じる可能性がある。今後は、本研究で発見した物理現象を踏まえた基礎研究と応用研究を展開していく予定である。

用語解説

1. ペニングトラップ

ペニングトラップとは荷電粒子を閉じ込めるために静電場と静磁場を用いる荷電粒子トラップ法である。

2. 反物質

反物質とは、質量とスピンの全く同じであるにもかかわらず、構成する素粒子の電荷が逆の反粒子によって組成される物質である。例えば、電子はマイナスの電荷を持つが、反電子（陽電子）はプラスの電荷を持つ。

3. 量子コンピュータ

量子コンピュータは、量子力学的な重ね合わせを用いて並列性を実現するとされるコンピュータである。

4. マイクロチャンネルプレート

マイクロチャンネルプレートとは、入射した荷電粒子（電子やイオン等）の数に応じて大量の 2 次電子を発生させる装置である。構造は微小な光電子増倍管を束ねた構造になっているので、微弱な紫外線や X 線等の光子を大量の 2 次電子に変換して検出することも可能である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)「非中性プラズマを応用した制御自己ポテンシャル場が創り出す 2 流体プラズマの動力学 (課題番号 18H01194)」の支援を受けて行った。

論文情報

- タイトル
“Studies of ion leakage from a Penning trap induced by potential barrier closure”
- 著者
Kiyomasa Akaike, Haruhiko Himura
- 掲載誌
Physics of Plasmas **25** (12), 102129 (2018).