

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 27 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340057

研究課題名(和文)不安定核研究の精密化に向けたMRFQクーラー・バンチャーの開発

研究課題名(英文)Development of MRFQ Cooler Buncher for the Advancement of Unstable Nuclei Research

研究代表者

栗田 和好 (KURITA, KAZUYOSHI)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：90234559

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円

研究成果の概要(和文)：この研究はこれまで不可能と思われて世界でも例を見ない不安定核の電子散乱実験を実現するためのイオン濃縮装置の開発である。我々はイオンを加速装置内にとどめて電子散乱を実現できることを実証したが、その蓄積イオン濃度の向上が実験の成否のカギとなる。我々は最終的に電極のエッジ効果を利用したイオントラップに方針を切り替えて、目標の半分ほどのイオン濃度を実現することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Our goal of this research is to develop a method to increase the density of unstable nuclei ions to realize electron scattering experiments. We have shown experimentally that ions can be trapped inside the electron beam stored in a synchrotron and the electron scattering events occur by itself. The final key element of our project is to condense the unstable nuclei ions. We have utilised the fringing field effect of an RFQ trap and achieved about half of the ion density which we originally aimed at.

研究分野：実験核物理

キーワード：四重極トラップ 不安定核構造 電子散乱 ISOL 電子蓄積リング イオントラップ現象 バンチャー
質量分離装置

1. 研究開始当初の背景

原子核反応によって短寿命で崩壊してしまう不安定原子核が生成されることが知られていたが 1980 年代にその不安定核をビームとして用いた実験で中性子数が異なるアイソバーの半径が大きく違うという実験結果が得られた(PRL 55, 2676-2679 1985 他)。のちにそれは中性子ハローや中性子スキンといわれる中性子が外にはみ出した原子核の存在に起因していることが判明した。また、そのような不安定核ではユニバーサルな安定条件とされていた魔法数(ある特定の核子数のとき飛びぬけて大きな結合エネルギーを示す)が成立しないこと(Phys.Lett.B346,9-14,1995 他)などが明らかになり、今や世界中の原子核実験家はそのエキゾチックさに強い興味を持って取り組むトッププライオリティの課題になっている。また、超新星爆発のときに起こると考えられている元素合成に不安定核が重要な役割を果たす点で学際的重要性も世界の注目を集めている。原子核ルネッサンスの到来といわれているゆえんである。

世界で稼働する不安定核生成施設では、安定核の一次ビームを安定核標的に衝突させ、不安定核を二次ビームとして取出して研究が行われており、核図表はより短寿命領域へ拡大しつつある。しかし一次ビームとして安定核を使用している場合、元素合成過程に関わると予想される極短寿命核の生成が困難であったり、生成された不安定核ビームの質が悪く精度の高い測定が困難であったりするところが多い。これらを克服するための方法として二次ビームを高品質ビームに変換して再び加速することが世界中で進められつつある。その代表的な方法は、ISOL 方式で生成された不安定核をバンチ化して線形加速器等で再加速する方法である。そのためには ISOL で供給される DC ビームを高品質なパルスビームとして供給する必要性から、クーラー・バンチャーが要求される。CERN/ISOLDE に代表されるこうした施設では、クーラー・バンチャーとして He パッファガスで満たした RFQ トラップが採用されている。パッファガスの使用は、ビームを停止させ冷却するという効果は十分果たせるが、ガスの存在が、せつかく蓄積したイオンの取出しを阻害したり、大量のガスを垂れ流して使用する機器が、超高真空環境を要求する加速器の直近で動作することによって、大掛かりな排気シス

テムが必要であったりその弊害も多い。蓄積・冷却が超高真空環境を維持したままできるならば、こうした弊害が一掃される。

2. 研究の目的

ISOL などで作られる低速の不安定原子核イオンビームを蓄積および冷却するための、超高真空環境で動作するイオンビームクーラー・バンチャーを開発する。これは、不安定核研究の精密化を実現すること、また、不安定核イオンの再加速のためのイオン源等に応用することを目的としている。加速器等においては、超高真空環境こそが決定的な性能を与える場合が多く、世界に普及しているパッファガス法はその条件を満たさない。本研究では従来の RFQ トラップに、Multi-Frequency RFQ (MRFQ) という新しいアイデアを導入する。これにより冷却蓄積を目的とする重イオンと軽いイオンを一台の RFQ に同時に蓄積し、しかも各 RF 電圧操作によってそれぞれのイオンの蓄積量を容易に制御できる。我々は MRFQ のプロトタイプを製作し動作原理を実証する。

我々はこのクーラー・バンチャーの実現の末に、不安定核の電子散乱実験の実施を計画している。我々は電子蓄積リング中に外部からイオンを注入してビームにトラップさせ浮遊標的を実現する手法を開発した。(PRL 100, 164801, 2008, PRL 102, 10250, 2009, PTEP03C008, 2012 他)その標的を SCRIT (Self Confining RI Ion Target) と呼ぶ。その SCRIT を用いた電子散乱実験では、付随する ISOL 型イオン源で目的不安定核イオンは生成され続ける。SCRIT への入射は数十 μ 秒の長さのバンチで行われるが、電子散乱事象の収集後(1 秒程度のトラップ時間を想定)トラップ領域から掃き出される。したがって、次の不安定核イオンバンチは待機している必要があるがそのイオンをパッファしてため込み、バンチ化する装置として今回の開発研究の対象としている MRFQ クーラー・バンチャーが利用される。

3. 研究の方法

初年度である平成 24 年度については、シミュレーションに基づいた設計の後 MRFQ プロトタイプを製作し、重イオンの代表例としての Cs イオンと冷却剤としての H や He イオ

ンを同時にトラップし、軽イオンによるクーリングの原理検証を行うことを最大の目標とする。その後、冷却可能な最大 Cs イオン密度の条件だしを行う。また、その際に入射 Cs イオンに対して冷却後引き出されるイオンの効率を最適化し、Cs イオンの蓄積効率測定及び蓄積限界の Cs イオン数測定を行う。平成 25 年以降については以下のようなアイデアに基づき引き出し効率の向上を狙う。MRFQ セルにイオンがある程度たまると、空間電荷の影響でイオンが失われるが、イオンガイドにかける直流電圧および閉じ込め条件を満たす複数の RF 空間をスキャンするなどの地道な測定を通して、その引き出し効率向上の可能性を探り更なるイオン強度の改善を目指す。我々が最も重要視しているのは、四重極 RF にトラップしているイオンを維持したままで、後から生成されてくるイオンを注ぎ足していくことが可能かどうかである。それには、生成された入射イオンの運動エネルギーをトラップ入口のポテンシャルより大きくしてまず入射することが必要である。そのうち入射イオンは反対側のポテンシャルで跳ね返って（この時出口側のポテンシャルは入射イオンの運動エネルギーを上回る値に設定することができるので必ず入射口まで戻ってくる）戻ってくるが、その 1 往復の間に出会う軽イオンの冷却効果で入射ポテンシャルより低い運動エネルギーになっていなければならない。果たして、同時トラップされた軽イオンでその短い時間に十分な冷却が実現可能かが問われている。

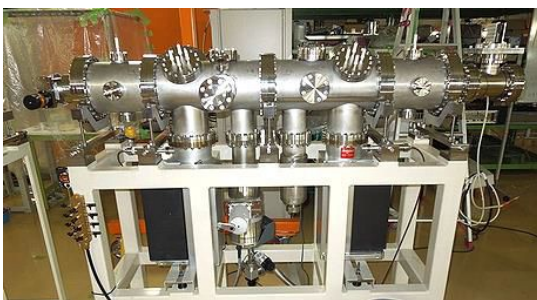


図 1 . クーラー・バンチャー全景

4 . 研究成果

当初、複数の RF を導入することにより不安定核重イオンを冷却して蓄積濃度を最大化する予定であったが、入射電極のエッジ効果により単色の RF でも重イオンをある程度蓄積できることが分かり、最終年度である平成 26 年度では、その蓄積性能を理解し、最適化する方針に切り替えて研究を進めた。そ

の理由は主として、必要とされる RF の最大電圧を実現することに手間取ったため、蓄積濃度を最大化するイオントラップ領域に到達するには、時間が不十分であると判断したためである。

イオンの濃縮度を上げるためには、四重極 RF トラップ(図 1)の RF 電圧と周波数をさまざまな組み合わせで行う必要がある。しかし、四重極はグラウンドと静電容量でカップルしているため、高周波アンプを用いてもなかなか最高電圧が上がらず、開発を進める大きな足かせとなった。そこで、RF 共鳴を駆使して特定の周波数では 400V 程度の振幅が与えられるよう工夫した。広い周波数-振幅平面内をサーチすることはできないが特定の周波数だけでも大きな振幅を得られることで、現象論的にどれだけのイオン濃縮度が達成できるかの実験が可能になった。

イオンは四重極電極の入り口で小さな穴を通り抜ける必要があるが、その穴を持つ極板と四重極電極の間には、電場のゆがみのために進行方向に電場が振動している。あるタイミングで入射したイオンはそこで減速されるため、軸方向の閉じ込めポテンシャルの山を越えられなくなり、トラップされてしまうというのが上記のエッジ効果である。

イオンの閉じ込めは四重極電極の正確な電極形状やアライメントに敏感に依存することが知られている。また、上述のように四重極電極が持つ大きな静電容量が高周波電圧を上げる妨げとなったため、静電容量を抑えた新電極を急遽製作してインストールするなど、さまざまな最適化を行った。しかし、以前トラップが実現していた状況を再現できなくなってしまったりして開発研究の道のは平坦ではなかった。後に、電極をオリジナルに戻してアライメントの精度を上げて行ったところ、トラップ効率として最高の値を得ることができた。

最終的には ^{133}Cs による達成蓄積効率は目標の 10%には遠く及ばないが、バンチャーを利用しないときに比較すると数十倍の濃縮を実現することが出来た。結論として、当初予定していた複数 RF によるイオン冷却による蓄積率向上のテストには達しなかったが、実験遂行に最低限必要な蓄積率を実現し電子散乱実験にこのバンチャーを利用する目的がついた。

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 0件)

[学会発表](計 0件)

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

栗田 和好 (KURITA KAZUYOSHI)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：90234559

(2)研究分担者

榎園 昭智 (ENOKIZONO AKITOMO)

立教大学・理学部・助教

研究者番号：20638118

菊池 崇志 (KIKUCHI TAKASHI)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30375521

若杉 昌徳 (WAKASUGI MASANORI)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器
器研究センター装置開発室・室長

研究者番号：70250107

(3)連携研究者