

要約

中性原子ガスのボーズ・アインシュタイン凝縮では蒸発冷却が重要かつ必須な冷却手段として注目を集めているが、同様な原理に基づく冷却手段が多価イオンでも有効に使えるかどうかを理論・実験の両面から検討し肯定的な結果が得られた。

序論

まず、多価イオンの冷却法には最近関心が集まっているが、なぜ冷やす必要があるのかという理由を3点挙げると、1. 通常、多価イオンは(高温プラズマなどを用いた)その生成過程によって、温度が必然的に1000万度前後まで上がる。そこで、多価イオンの分光法はいずれも、激しく動き回るイオンのドップラー効果によって分光精度に強い制限を受ける。2. 多価イオンをトラップから引き出すような実験のためにも、イオンの温度が冷えた方が好ましい(温度が高いと速度がバラバラで、イオンを同じ方向に引き出しにくい。)3. 高価数ほど電子ビームとクーロン衝突しやすい、というのが通説だが、蒸発冷却効果も増大するので、加熱効果を上回るようなことが起こらないか?ということに興味を持たれる。というのが挙げられる。

蒸発冷却の原理

図1は、蒸発冷却の原理についての略図である。まず、トラップの深さ(E_{cut})を越えるような高いエネルギーを持って粒子がトラップから飛び出す。これが蒸発である。次に、残った粒子同士の衝突によってエネルギーが平均化される。これが熱化である。飛び出した粒子が沢山のエネルギーを持っていったので、残った粒子のエネルギーの平均値は下がる。これで冷却が起こる。そして、冷却が起こって蒸発がストップすると、再び蒸発を起こす。ここでトラップを下げるのが速すぎると、熱化が起こらないで平均的なエネルギーの粒子までも捨てるようになってしまい、熱化が起こらない。逆に遅ければ遅いほど高いエネルギーの少数粒子だけを捨てることが出来、冷却の効果が大きくなる。そこで問題は、冷えるのにどれくらい時間がかかるか?ということで、高エネルギー粒子ほど数が少なく、多数回の衝突を経ないと生成されない。したがって、とにかく衝突を頻繁に起こした方が有利である。

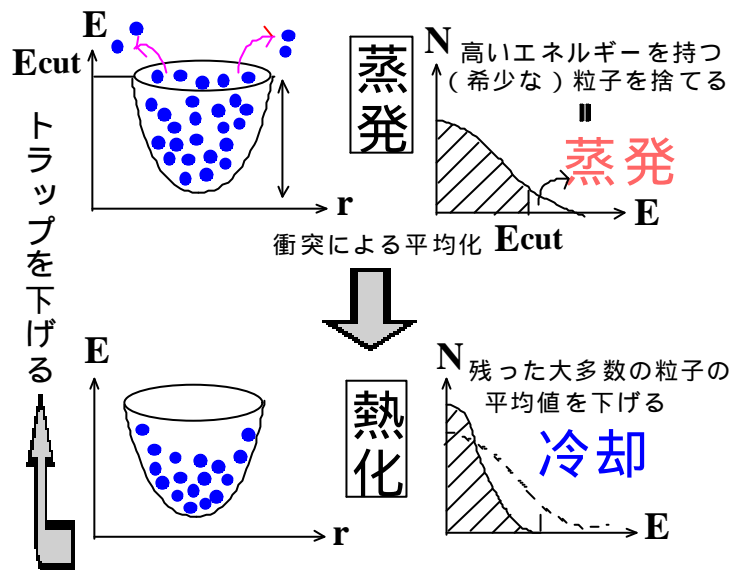


図 1

蒸発冷却の理論的根拠

前の原理をふまえて多価イオンの蒸発冷却の理論的根拠を3つほど述べると、1つ目の根拠として、荷電粒子の方が中性原子よりも蒸発冷却に有利な特徴を持っていることが挙げられる。

1. 価数 Z が大きくなるにつれて、イオン間の衝突が急激に起こりやすくなる。(Z^4 で増加)

2. 温度が下がるほど衝突断面積が増える。(ラザフォード散乱公式より明白)。というのが挙げられる。2つ目の根拠として、低価数イオンの定常的な蒸発による冷却は、既に実験的に成功している。というのが挙げられる。図2のように、低価数イオンと高価数イオンを同時にトラップすると、低価数イオンの方が優先的に蒸発して、高価数イオンをどんどん冷却する。実験的には図3より、低価数イオンを混ぜたときの方が混ぜてないときよりも、高価数イオンのX線が強くてでていることが確認される。ならば、高価数イオンの蒸発ではもっと冷えるのではないか？ということが予想される。3つ目の根拠として、数値計算による見積もりが挙げられる。中性原子で使われている蒸発の方程式に、多価イオンのパラメータを代入して計算したところ、1.2秒の時間のうちで、500eVから室温まで冷える、という予想が得られている。

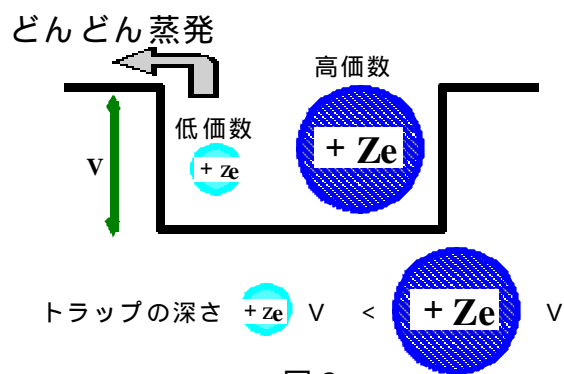


図 2

AuのX線

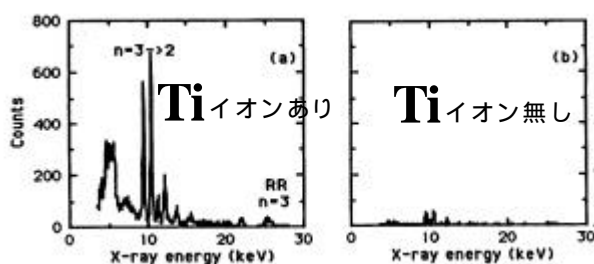


図 3

検証実験

上のような理論的根拠を元に、簡単かつ間接的な検証実験を行った。図4に見られるように、高温の多価イオンを電子ビームイオントラップ (EBIT) で、生成、トラップした。次に軸方向のトラップ電位を徐々に下げて、蒸発を強制的に引き起こし、そのときのX線強度の時間的変化を調べた。これでなぜ検証実験になるかということの説明する。温度が高い場合多価イオンは中心の電子ビームから離れたところを大部分の時間運動している。もし冷却が起こったとすると、中心のマイナスの電荷に引きつけられやすくなるはずである。すると、蒸発で多価イオンの数は減るにも拘わらず、電子ビームと衝突しやすくなって、X線強度が増加するだろうと予想される。この予想は、多価イオンの熱平衡分布を計算してみると定量的に

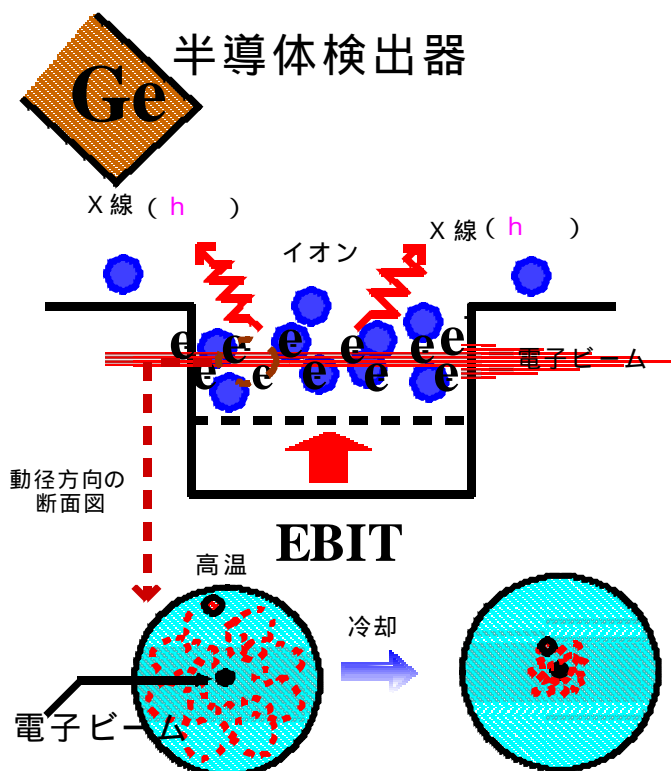


図 4

に裏付けることが出来る。電子ビームの周りには空間電荷によって、図5のようにポテンシャルの井戸が出来ている。この電位分布のもとで、統計力学的な熱平衡分布を計算すると図6のようになる。通常EBIT中ではKr 30 価程度のイオンは、500 eVほどの高温であることが実験的に確認されている。このような高温の場合には、点線のような分布になる。大部分のイオンは電子ビームの外にあって、電子ビームの中にある割合は0.5%ぐらいしかない。もし10 eVまで冷却されたとすると、実践のような分布になる。この場合にはほぼ100%電子ビームの内側に入っている。このようなことから、蒸発冷却現象が起こったとすると、イオンを捨てているにもかかわらずX線強度が増える、といったことを定量的に予想した。

実験結果

実験結果を示す。図7は、Arの放射性再結合で出てくるX線を観測したものである。横軸が時間で縦軸がX線強度である。0秒から1.7秒までは、トラップには+400Vがかかっていた。そして、3.7秒から6.7秒までで、トラップの電位を+400Vから-100Vまで徐々に上げた。6秒あたりでトラップ電位が0になって、トラップがからになるように設定した。この図から明らかのように、トラップがからになる直前で急激なX線の増加が予想通り観測された。X線の増加は、温度の低下だけでなく、イオンの数が増えても起こるが、温度の低下であると判断する理由がいくつかある。1つは、この実験では放射性再結合の線を選んで観測しているが、18 価の裸のイオンか、17 価の水素様のX線を選んで見ていることで、そういう多価イオンの数が短い時間の間に急激に増えるというのは考えにくい。a

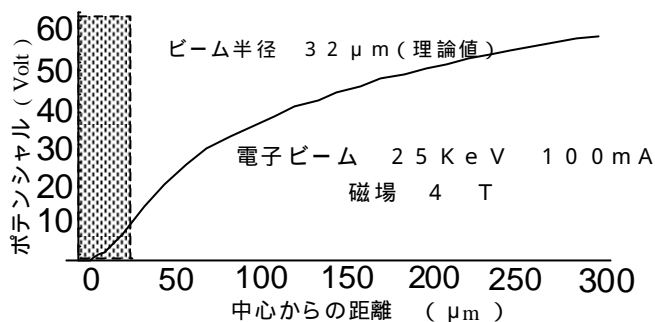


図5

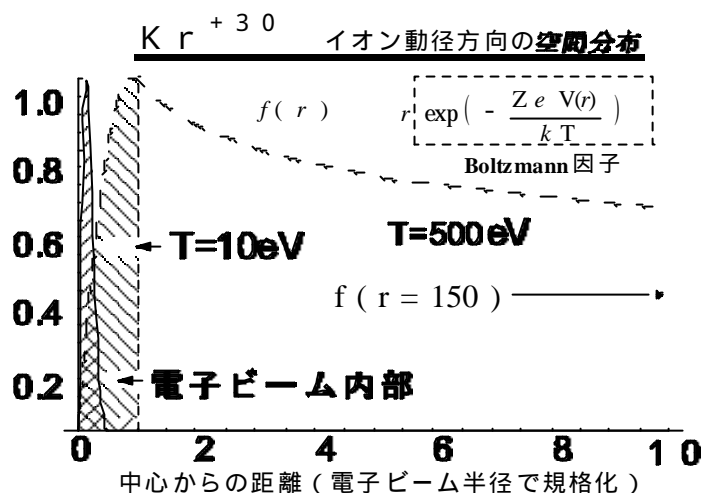


図6

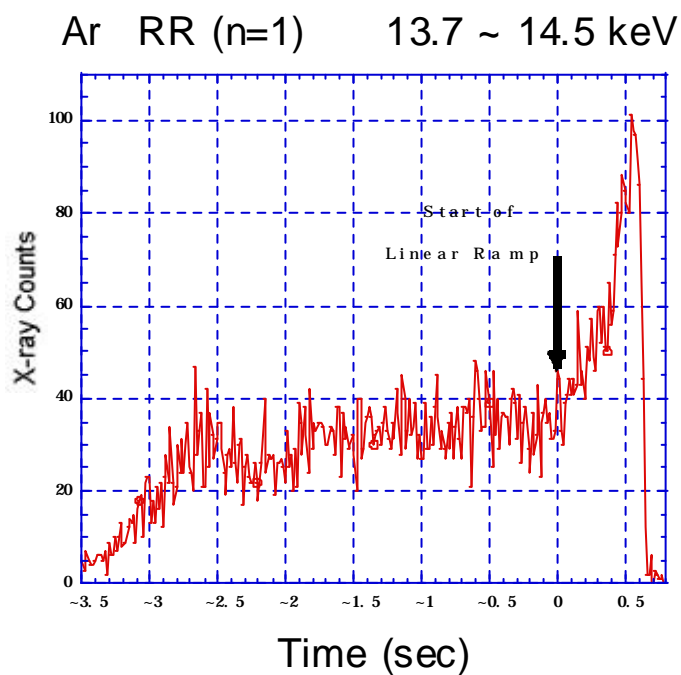


図7

蒸発冷却が起こっていると考えられるもう一つの実験結果を示す。図8の上の図は、トラップを除々に下げていった場合のX線強度の時間変化で、下の図はトラップを除々に上げていった場合のX線強度の時間変化である。上の図は0V付近にピークがあるのに対し下の図はない。同じトラップ電位をかけているのにこのような違いが生じるのは、蒸発冷却を想定するとうまく説明できる。上の図の場合には、蒸発冷却のメカニズムが働く方向にトラップを変化させているので、ピークが見られるものと思われる。下の図では、トラップを上げる方向に変化させているので、蒸発のメカニズムが働くことはありえない。

まとめ

多価イオンのパルス的な蒸発による冷却の可能性を、理論的、実験的に検討し、かなり肯定的な予想を得た。まず、Tokyo-EBITでの簡単かつ間接的な検証実験で、多価イオンを生成・トラップし、トラップ電位を徐々に下げて蒸発を

強制的に起こし、X線増加を観測した。また、電位の昇降に対して不可逆。高価数イオン特有のスペクトル線も増加。上昇が急激。などのことから、蒸発による温度低下の可能性が大きいといえる。

今後の課題

まず1つ目に実際の温度を測るために、TOF分析により温度の直接的な計測を試みる。2つ目として、蒸発冷却にはガス圧が大きく影響するので、導入するガス圧を精密にコントロールする。3つ目として、本当に高価数イオンの蒸発なのかを確かめるために、蒸発開始とともにガス導入を止める。というのが今後の課題として残されている。

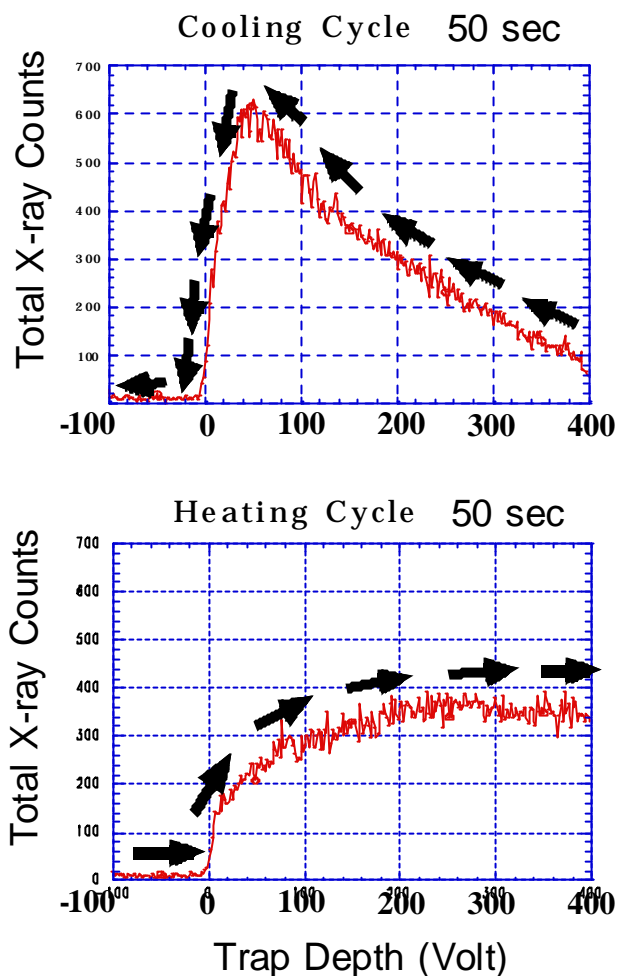


図 8