

準安定状態ヘリウムを用いた真空度測定

量子・物質工学科 清水研究室 中筋 拓也

1. 背景、目的

現在、極高真空(10^{-9} Pa以上)を測定する真空計として電離真空計が用いられているが、軟X線効果などの影響で、測定限界が 10^{-10} Pa程度であり、新しい真空度測定法が模索されている。我々の研究室では、レーザー冷却により減速しトラップした準安定状態ヘリウム原子(He*)を用いた極高真空計の開発を目的としている。

主な分子の第一イオン化エネルギー

2. 原理

2-1. 準安定状態ヘリウム原子(He*)

基底状態と準安定状態のエネルギー差(内部エネルギー)が19.8eVあり、He*に残留ガスが衝突した際、残留ガスをイオン化させることができる。右表は主な分子の第一イオン化エネルギーの表である。He以外はHe*の内部エネルギーよりイオン化エネルギーが低いため、ペニングイオン化が期待できる。

分子	第一イオン化エネルギー (eV)
H_2	15.43
He	24.587
H_2O	12.61
O_2	12.07
N_2	15.58
Ar	15.76

2-2. He*イオンゲージ

表1 主な分子の第一イオン化エネルギー

基本原理は電離真空計と同じで、違う点は電子の代わりにHe*を使う。つまり、He*に衝突しイオン化した残留ガスのイオン電流を測定する。

2-3. He*を使用する理由

He*の内部エネルギー19.8eVは主なガスのイオン化エネルギーより高いが、電離真空計で加速した電子よりは小さく、軟X線効果はない。さらにHe*は寿命が8000秒と長く、トラップもできるためチャンパー内に滞在する時間を非常に長くすることが可能である。従って少ないHe*でイオン電流を測定できるためである。

3. 実験

今回の実験ではHe*と真空チャンパー内に個別に注入したガス(H_2 , He , H_2O , N_2 , O_2 , Ar)との衝突で生成されたイオンをHe*とともに同時計測し、He*によるイオン化効率の相対値を求める。気体によって大きく断面積が違う可能性があるためである。

3-1. 実験の手順

- 1、トラップチャンパーにHe*を磁気光学トラップ(MOT)する。
- 2、プッシュ光で高真空チャンパーにHe*を落とす。

- 3、 高真空チャンバーに個別にガス(H₂, He, H₂O, N₂, O₂, Ar)を入れる。
- 4、 Q-massで各分子の分圧を測定し、MCPでHe*のカウントとHe*に衝突しイオン化した個別のガスのイオンカウントを測定する。
- 5、 求めた測定値からHe*によるイオン化効率の相対値を求める。

3-2. 方法

He*はHeをDC放電し生成する。レーザー冷却に用いる遷移はヘリウム原子の³S₁ ⇌ ³P₂の閉じた遷移で、冷却遷移波長は1083nmである。

右図は高真空チャンバーの図である。Variable leak valveから個別にガスを注入しバルブを調節することで流量を変化させる。トラップしたHe*をプッシュ光で落とし、下にあるMCP2で測定する。He*との衝突でイオン化したガスは、表面に-2kVをかけたMCP1で測定する。個別のガスの分圧はQ-massによって測定する。

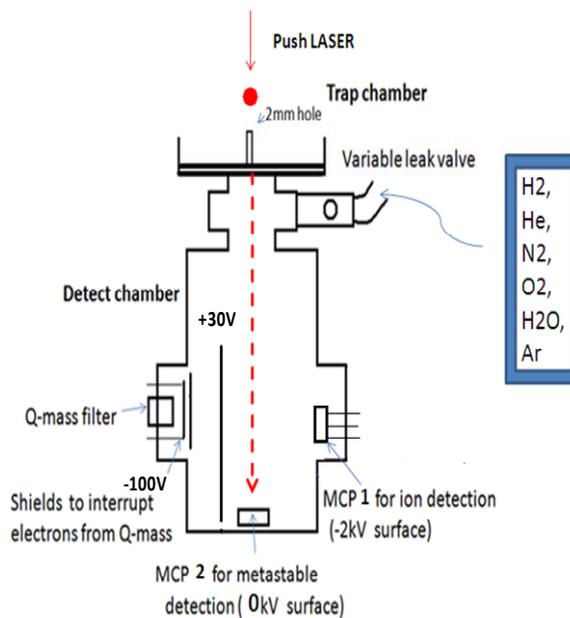


図1 高真空チャンバー図

Q-massのフィラメントから出る正のイオンがMCPに衝突するのを防ぐため、アルミの板でシールドを作りそこに負の電圧をかけシャットアウトした。

またHe*ビームに沿って正の電圧をかけた電極を置き、衝突の際に生じた電子を集めてMCP2に入るのを防いだ。

3-3. He*によるイオン化効率の相対値

He*のカウント N_{He^*} の単位圧力あたりの変化量は次式となる。

$$\frac{dN_{He^*}(p)}{dp} = -\frac{1}{p_0} N_{He^*}(p)$$

これを解き、単位圧力当たりのHe*のカウント N_{He^*} は次式となる。

$$N_{He^*}(p) = A_{He^*} \exp\left(-\frac{p}{p_0}\right)$$

同様にイオンカウント N_{ion} は

$$N_{ion}(p) = A_{ion} \{1 - \exp\left(-\frac{p}{p_0}\right)\}$$

となる。この N_{ion} の圧力0付近での勾配

$$\frac{A_{ion}}{p_0}$$

N_{He^*}	He*のカウント数
N_{ion}	ガスイオンのカウント数
p	圧力
$A_{ion} =$	$N_{ion}(\infty)$
$A_{He^*} =$	$N_{He^*}(0)$
p_0	落下してきたHe*が1/eになる圧力

を個々のガスで比べ、イオン化効率の相対値とした。

4. 結果

図 2～図 4 は例として O₂ をチャンバーに注入した時の測定データである。図 2 は Q-mass の測定データであり、横軸に時間、縦軸に圧力をとっている。初めに 10⁻⁶ torr 程度 O₂ を注入し Variable leak valve を調節することで圧力を時間的に変化させている。図 3 は MCP の測定データであり、図 2 と同じ時間軸上での He* とイオンのカウントをとっている。図 2, 図 3 のデータより O₂ の分圧を横軸に、イオンカウントを縦軸にとったものが図 4 である。この図 4 を N_{ion} の式でフィッティングし勾配を求めた。求めた勾配を H₂O を基準としてそれぞれのガスと比べて得たイオン化効率の相対値が表 2 である。この結果より H₂O と O₂ のイオン化効率が高いことが判明した。特に H₂O は H₂ や N₂ の 200 倍程度の大きさであるため、より高真空で測定を行う場合チャンバー内の H₂O の除去が重要であると考えられる。

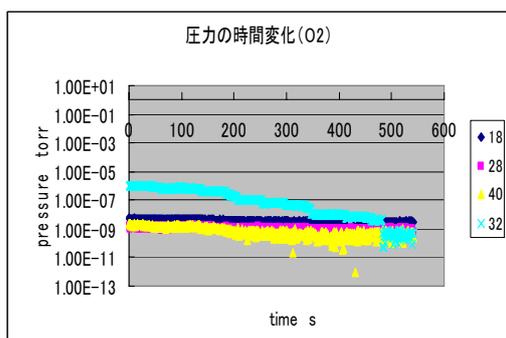


図 2 圧力の時間変化

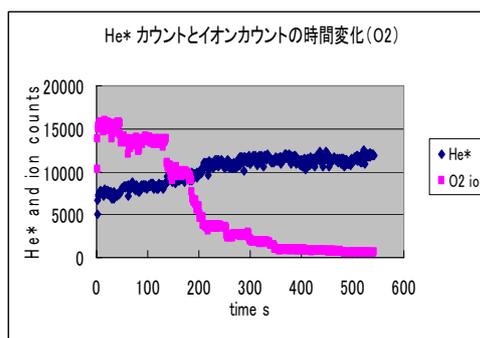


図 3 He*カウントとイオンカウントの時間変化(O₂)

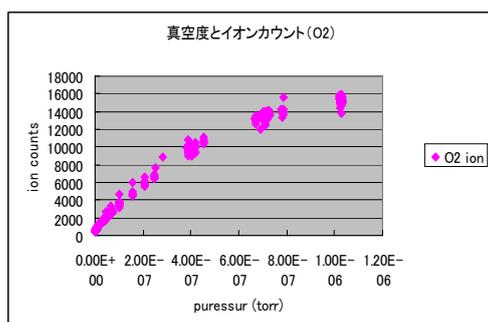


図 4 真空度とイオンカウント(O₂)

H₂Oを基準とした相対的なイオン化効率

基準H ₂ O	相対的なイオン化効率
Ar	0.0060
O ₂	0.056
He	0.0027
N ₂	0.0054
H ₂	0.0065
H ₂ O	1.0

表2 H₂O を基準としたイオン化効率の相対値

5. 考察

5-1 He*イオンゲージの測定限界

He*イオンゲージの検出限界は電離真空計とは異なった理由で決まる。ヘリウム原子を真空系に注入しているから、ポンプで引かなければ真空度はどんどん悪くなる。つまり測定限

界はポンプの排気速度(He)とイオン検出器の限界で決まる。

例えば毎秒 N 個の He^* を真空タンクに注入したとする。

極高真空に He^* がトラップされている場合、極限では He^* の減衰は準安定状態の自然寿命できまり、生成されるイオンの総数 N_i は

$$N_i = \frac{\sigma_{ion} n_0 v}{\gamma} N$$

となる。ここで σ_{ion} はイオン化断面積、 n_0 は粒子密度、 v は衝突速度、また、 γ は He^* の減衰定数である。

ポンプ速度を U とすると、真空タンク中の平衡ヘリウム密度 n は

$$n = \frac{N}{U}$$

である。これが元々の真空中の粒子密度 n_0 に等しくなる値が最大流量 N_{max} とすると

$$N_{max} = n_0 U$$

となる。これを N_i の式の N に代入すると次式となる。

$$N_{ion,max} = \frac{\sigma_{ion} n_0^2 v}{\gamma} U$$

これが 1 秒あたりのイオンカウント数になる。 n_0 の式にすると

$$n_0 = \sqrt{\frac{\gamma N_{ion,max}}{\sigma_{ion} v U}}$$

となる。例えば、イオン検出器の限界が毎秒一個 ($N_{ion,max} = 1$)、ポンプ速度が 10 l/s 、 $\sigma = 10^{-20} \text{ m}^2$ 、 $v = 300 \text{ m/s}$ 、とすると、 $n_0 = 6 \times 10^7 \text{ m}^{-3}$ 、すなわち 10^{-13} Pa 程度まで測定可能である。

6. 今後の課題

プッシュ光により落下した He^* の速度は測定した結果 55 m/s 程度であった。今後はより遅い He^* での実験が課題となる。具体的には以下のものが挙げられる。

1. He^* のガイド光を導入し自由落下して高真空チャンバーに入射する He^* 数を増やすことが可能である。 $\lambda = 1.5 \mu \text{ m}$ 、出力 20 W のレーザーを用いて、 He^* ガイドを行い、数 m/s の He^* を生成し残留ガスイオン信号測定感度の向上をはかる。
2. He^* を高真空チャンバー内で再度トラップし、より低速にした He^* による残留ガスイオンの測定を行う。