

低速準安定ヘリウムを用いる真空度測定法の研究
電気通信大学大学院 情報理工学研究科 先進理工学専攻
清水和子研究室 荒井俊介

1. 研究背景

真空装置の進歩により、真空度 10^{-11}Pa 以上の極高真空領域の真空状態を達成したが、電離真空計では軟X線効果などの影響で 10^{-10}Pa 以上において信頼性の高い測定は出来ないため、新しい真空度測定法が模索されている。

我々は電離真空計の測定限界を超える、即ち 10^{-11}Pa 以上の真空度を測定することを目的とした低速準安定状態ヘリウム原子(He^*)を用いる真空度測定法の開発研究をしている。我々が目指す真空度測定法は、電子の代わりにレーザー冷却した低速準安定状態ヘリウム原子(He^*) 2^3S を用いる。 2^3S 状態の内部エネルギーは 19.8eV であり、真空装置内の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小さく軟X線の効果はない。また、寿命が 8000s と長く、レーザー冷却により減速、トラップ出来る。トラップした超低速の He^* を用いることで真空度に影響を与えずに測定する事が可能となる。

具体的には DC 放電により準安定状態ヘリウム原子を作り、それをゼーマン同調法により減速し、第一磁気光学トラップ(Magneto Optical Trap)により捕捉し、ガイド光を用いてさらに高い真空度領域で第二磁気光学トラップを行う。このトラップ原子と極高真空槽内の残留ガスとの衝突によるトラップ原子の損失率から真空度を見積もる。

2. 本研究の目的

本研究は 10^{-11}Pa 以上の真空度測定において測定子となる超低速準安定状態ヘリウム原

子と各種ガス($\text{H}_2, \text{He}, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{Ar}$)の相対イオン化断面積を求め、既存のデータと比較し、極高真空度の測定限界を見積もることを目的とした。

3. 相対イオン化効率測定

トラップした He^* の MOT に PUSH 光を照射し、この He^* を検出チャンバー内に輸送してイオン化効率の測定を行った。

超低速 He^* と槽内に個別に注入した各種ガス($\text{H}_2, \text{He}, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{Ar}$)を衝突させて、MCP 1,2,Q-Mass を用いて He^* カウントの減衰、イオンカウントの生成、真空度を同時計測した。

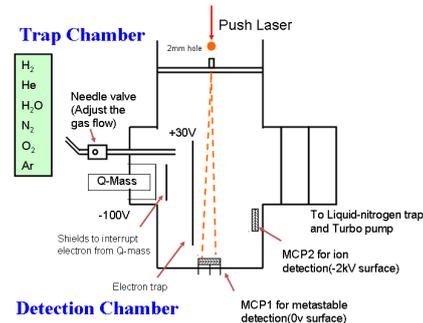


図. 1 ディテクション(検出)チャンバー概略図

検出チャンバーは 2mm の穴のあいた筒で仕切られた空間となっており、他空間よりも高い真空度となっている。これより、MOT チャンバーの真空度が悪くなくても、検出チャンバーの真空度を害さず実験が可能になる。また、MOT チャンバーで補足した He^* を PUSH 光により検出チャンバーに輸送出来る。

検出チャンバーの真下に He^* 測定用の MCP1 が、 He ビームより 8cm の離れた壁際には衝突の際に生じるイオン測定用の MCP2 がある。MCP1 の表面電圧は 0V 、MCP2 の表面電圧は -2kV かけてある。一定以上高い

真空度において、特に問題となる H_2O 、 H_2 などの影響を減らすために、チャンバーはベーキングを数回行っている。しかしながら、実験の際に発生する H_2O は液体窒素トラップにより、影響を軽減させている。また、真空度計測はゲージだけではなく、四重極質量分析計(Q-Mass)を取り入れている。ここではさらに、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板でシールドを作り、-100V かけてシャットアウトした。また、 He^* ビームに沿って電極を置き、+30V をかけて衝突の際に生じる電子を集めて MCP2 に入るのを防いだ。Variable Leak Valve を用いることで個別にガスを注入、及び流量を調整出来る仕組みになっている。

実験方法

1. 液体窒素トラップを稼働し、トラップチャンバーに He^* の MOT を作成する。
2. PUSH 光で検出チャンバーに He^* を落とし、Variable leak Valve から個別に各種ガス($H_2, He, H_2O, O_2, N_2, Ar$)を注入する。
3. 流量を調整し、Q-MASS で真空度、MCP1 で He^* カウントの減衰、MCP2 で He^* と衝突して生成したイオンカウントを同時に測定する。

測定

図 2~5 は例として O_2 を注入した測定データである。図 2 は Q-MASS で測定した O_2 分圧表示の時間変化であり、Variable Leak Valve により O_2 を $10^{-4}Pa$ 程度注入し、徐々に減じている。図 3 は同じ時間軸上の MCP1、2 のデータであり、それぞれ He^* カウントと O_2 イオンカウントを測定している。図 4 は O_2 分圧を横軸に、 He^* カウントを縦軸にとっている。同様に、図 5 は O_2 分圧を横軸に、 O_2

イオンカウントを縦軸にとっている。

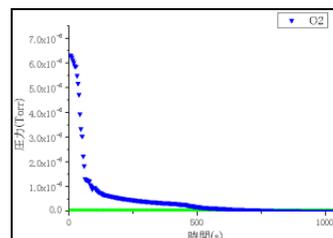


図.2 O_2 分圧表示の時間変化

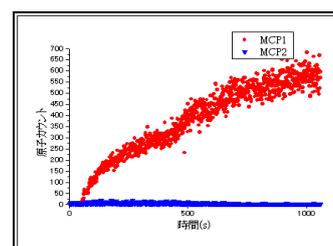


図.3 He^* (MCP1) O_2 イオン (MCP2) カウントの時間変化

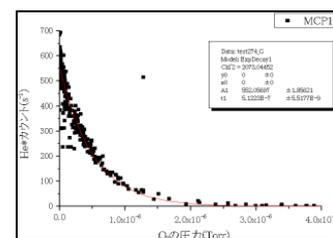


図.4 O_2 分圧表示と He^* カウント

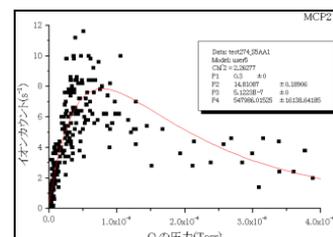


図 5. O_2 分圧表示と O_2 イオンカウント

4. Q-MASS の分圧表示の較正

四重極質量分析計は同一機種においても気体や測定条件によって分圧表示は変わる。測定精度を向上させるためには、測定対象のおのおのについて既知濃度のガスによって較正する必要がある。ここでは各種ガスを空間 1 に同じ圧力だけ入れた際の Q-MASS の表示を測定し、前データの補正をおこなう。

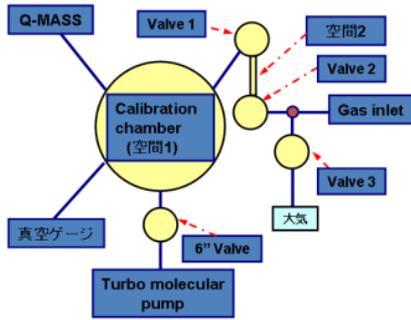


図.6 Q-MASS 分圧表示補正チャンバーの概略図

チャンバーは表面積/体積比が小さく、ガスを効率的に拡散出来る球状のものを選んだ。Q-MASS の動作範囲は $1 \cdot 0^{-4} \text{Pa}$ 以上であるため真空ゲージを取り付け、チャンバー内の真空度が良くなったことを確認し、Q-MASS で測定した。空間 1、2 の体積比を利用し、注入ガスを Q-MASS で測定できるまで低圧にして測定を行う。(体積比 1:14308)

実験方法

1. 空間 2 に特定のガスを 1 気圧注入する。
2. Valve1 を開け、予め真空にしていた空間 1 へ空間 2 のガスを入れる。
3. 十分拡散させた後、Valve1 を閉め、6" Valve を開き、再び空間 1 を真空にする。
4. 2-3 の過程をもう一度行った後に、6" Valve を閉めた状態で Valve1 を開き、空間 1 の圧力を Q-Mass で測定する。
5. 1-4 の過程をそれぞれのガス($\text{H}_2, \text{He}, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2, \text{N}_2, \text{Ar}$)で行う。

測定

図 7 は例として、 O_2 ガスを注入した時の Q-MASS のデータである。これは横軸に時間、縦軸に O_2 分圧をとっている。始めに 10^{-7}Pa 程の真空度であったが、30s 過ぎで Valve1 を開けることで O_2 ガスが一気に入っている様子が分かる。このときの分圧の増加を各種ガスで測定して感度比を求める。

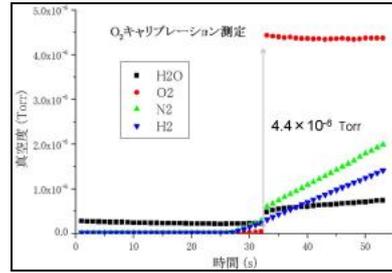


図.7 O_2 キャリブレーション測定

5. 結果

5.1 イオンカウント

毎秒 $N = N_0$ 個の準安定ヘリウム原子を真空タンクに注入したとする。N の時間変化は

$$\frac{dN}{dt} = - \left\{ \sum_i (\sigma_i n_i v_i) + \gamma_s \right\} N \quad (5.1)$$

ここで σ_i は衝突過程 i の断面積、 n_i はその原子密度、 v_i は衝突速度である。 γ_s は準安定状態の減衰定数である。時間 t で MCP 検出器に到着すると

$$N(t) = N_0 \exp(-At) \quad (5.2)$$

但し、 A は全減衰過程の減衰定数の和

$$A = \sum_i (\sigma_i n_i v_i) + \gamma_s \quad (5.3)$$

である。過程 i で生じる粒子の数 N_i は

$$\frac{dN_i}{dt} = (\sigma_i n_i v_i) N \quad (5.4)$$

であることより、MCP に到着するまでに生じる粒子 N_i は

$$N_i(t) = N_0 \frac{\sigma_i n_i v_i}{A} \{1 - \exp(-At)\} \quad (5.5)$$

となる。イオン生成に寄与する気体が一種類の場合には

$$N_i(t) = N_0 \frac{\sigma_{ion}}{\sigma_{total}} \{1 - \exp(-\sigma_{total} n_i v_i t)\}. \quad (5.6)$$

条件 $At \ll 1$ であれば

$$N_i(t) = \sigma_i n_i v_i t N_0 \quad (5.7)$$

となる。

準安定ヘリウム原子がトラップされている間に過程 i で生成される粒子の総数 N_i は

$$N_i(t) = N_0 \frac{\sigma_i n_i v_i}{A} N_0 \quad (5.8)$$

となる。

5.2 相対イオン化効率

準安定状態ヘリウムカウント N_{He^*} の単位圧力あたりの変化量は以下ようになる。

$$\frac{dN_{\text{He}^*}(p)}{dp} = -\frac{1}{p_0} N_{\text{He}^*}(p) \quad (5.9)$$

これより、単位圧力あたりの He^* カウント N_{He^*} は次のようになり

$$N_{\text{He}^*}(p) = A_{\text{He}^*} \exp\left(-\frac{p}{p_0}\right) \quad (5.10)$$

同様にイオンカウント N_{ion} は $p=0$ 近辺で

$$N_{\text{ion}}(p) = A_{\text{ion}} \{1 - \exp\left(-\frac{p}{p_0}\right)\} \quad (5.11)$$

となる。

イオンカウント N_{ion} が線形に増加する領域の傾き ($p=0$ 近辺)

$$\frac{A_{\text{ion}}}{p_0} \quad (5.12)$$

を個々のガスで求めた。

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}	$N_{\text{ion}}(\infty)$
A_{He^*}	$N_{\text{He}^*}(0)$
p_0	落下してきたHe*が1/eになる圧力

各種ガスにおいて、 He^* カウントは(5.10)でフィッティングし勾配を求める。イオンカウントは(5.11)であるが圧力が高くなった際にMCP2へイオンが到着するまでの減衰を考慮し、次の式でフィッティングし、表にまとめた。

$$N_{\text{ion}}(p) = A_{\text{ion}} \left\{1 - \exp\left(-\frac{p}{p_0}\right)\right\} \exp\left(-\frac{p}{p_1}\right) \quad (5.13)$$

表 1 相対イオン化効率

分子	勾配 (μTorr^{-1})	相対イオン化効率
H ₂	4.81	0.0071
N ₂	4.10	0.0061
O ₂	28.9	0.043
Ar	3.00	0.0045
H ₂ O	679	1

相対イオン化効率 (H₂O基準)

原子・分子種によって勾配が異なり、特に H₂O の勾配が格段に大きかった。ここでは、H₂O を基準として相対イオン化効率とした。

5.3 Q-MASS の分圧表示の補正測定

同一流量に対する各種注入ガスの Q-MASS の分圧表示は以下ようになった。

表 2 Q-MASS の分圧表示の補正測定

原子・分子	真空度 (μtorr)	N ₂ との比
H ₂	13.1	3.12
He	1.9	0.45
N ₂	4.2	1
O ₂	4.4	1.05
Ar	6.3	1.5
H ₂ O	?	?

ガスによって Q-MASS の分圧表示は異なる値を示すことが鮮明となり、N₂と比較すると Ar は 1.5 倍となり、さらに H₂ では 3.12 倍も異なっており、前実験の補正が必要である。H₂O の測定においては、蒸気や大気による測定を行ったが、チャンバーが必要以上に H₂O に汚染されてしまうことや、湿度の影響など外的要因で実験環境が変わり、信頼性のあるものは得られなかったため、現在測定方法を思索している。

また、今回の結果を用いてイオン化効率実験の補正を達成できた。過去の論文[3]との比較では、 He^* とその他ガスとの相対エネルギーは 25meV 程度であるので、O₂ と比較して

Ar, N₂ の値は小さいように見えるが、傾向は同じである。

5.4 相対イオン化効率② (補正後)

Q-MASS の分圧表示の較正後の相対イオン化効率を以下の表にまとめた。

表 3 相対イオン化効率のまとめ

分子	相対イオン化効率 (校正前)	相対イオン化効率 (校正後)
H ₂	0.0071	0.022
N ₂	0.0061	0.0061
O ₂	0.043	0.045
Ar	0.0045	0.0068
H ₂ O	1	??

イオン化効率は原子・分子種により大きく異なることが分かり、H₂O、O₂に加えてH₂も大きい可能性もある。依然としてH₂OはN₂などの200倍程度の大きさであり、極高真空での測定を行う場合はチャンバー内H₂Oのさらなる除去が重要であることがわかった。

6. 低速準安定状態ヘリウム原子の導入

真空度が良くなるほどMCP2の信号は微小になる。そこで、ガイド光を導入して検出チャンバーに入射する低速He*の数を増やし、MCP1までの到達時間を長くし、測定感度をあげることを目的とする。ガイド光は光双極子力を利用し、光の強度勾配により原子に作用させる。1.55 μm、出力30Wのレーザー光[KeopsysKPS-STD-BT-EFL-1550-30-TERA-SM-00-CO]を用いる。

レーザーはガウシアンビームで出力されているとすると、トラップ直下でのスポットサイズは $w = 0.125\text{mm}$ となる。

最大出力30Wを掛けた時のポテンシャル $U(r)$ を原子飽和パラメーター p を用いて表記すると

$$U(r) = \frac{1}{2} h(\nu - \nu_0) \ln(1 + p) \quad (6.1)$$

$$p = \frac{\lambda^3}{\pi^3 hc \Delta \nu_N} \frac{\Delta \nu_N^2 / 4}{(\nu - \nu_0)^2 + \Delta \nu_N^2 / 4} \frac{P}{w^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) \quad (6.2)$$

となる。

式中の ν は周波数、 λ は原子の共鳴波長、 P はレーザーパワーの出力、 w はガウシアンビームのビームウエスト、 ν_0 は原子の共鳴周波数 $\Delta \nu_N$ は自然幅である。トラップ中心のポテンシャル $U(0)$ 、レイリー長 Z_R 、光散乱レート Γ_{scat} はそれぞれ

$$U(0) \cong 1.58 \times 10^{-28} J = 11.4 \mu K (21.8 m/s)$$

$$Z_R \cong 31.7 \text{mm}$$

$$\Gamma_{scat} \cong 4.25 \times 10^{-5} s^{-1}$$

装置概略図を以下に示す。

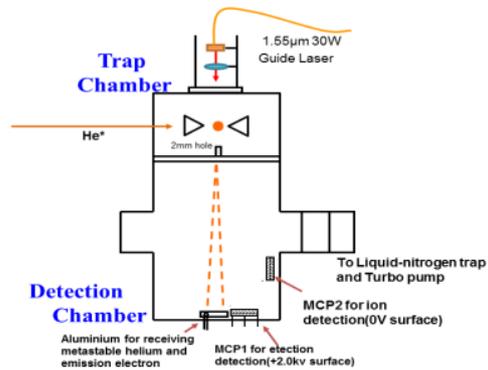


図.8 ガイド光導入後の概略図

トラップチャンバー真上に取り付けてあるファイバーレーザーの先端から10cm程度下に $f = 400\text{mm}$ のレンズを入れ、トラップ原子の真下に焦点が合うように設置した。高出力レーザーを用いるので、He*原子の落下位置にアルミ板を設置してある。これはMCP1を保護すると同時に、外にレーザー光が反射しないようにシールドの役割も兼ねている。観測にはHe*原子がアルミ板に衝突した際に、生じる電子を真横に設置したMCP1で感知できるようにになっている。

実験方法

1. He*原子のMOTを作る。
2. 1.55 μm、出力30Wのガイド光をMOT

に入射する。

3. MOT カウントの減少、MCP1 のカウントの変化を観測する。

現状は真空系、光学系を構成し検証を行っている。

7. 準安定状態ヘリウム原子の測定限界

電離真空系は電子しか検出しないため、放出する粒子は系の真空度には影響しない。しかし多量の電子 ($\approx 10^{16} \text{s}^{-1}$) を数百 eV のエネルギーで放出するので、これにより発生する X 線などが真空系に影響を与えるのを避けることはできない。準安定ヘリウムは真空度に影響を与えるが、壁との衝突や自然脱励起の際に 20eV 程度以下のエネルギーしか放出しないのでペニングイオン化の不要な過程で生じる現象が真空度に与える影響は殆どない。

ヘリウムゲージ検出限界は電離真空系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。毎秒 N 個の準安定ヘリウム原子を入れるとして、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は

$$n = \frac{N}{U} \quad (7.1)$$

である。これが元々の真空中の粒子密度 n_0 に等しくなる値で真空度が 2 倍悪くなるので、個の状態になる時が最大流量 N_{\max} であるとする

$$N_{\max} = n_0 U \quad (7.2)$$

となる。これより

$$N_{i,\max} = \frac{\sigma_i n_i \nu_i}{A} n_0 U \quad (7.3)$$

が減衰過程 i の 1 秒あたりのカウント数になる。極限では A の主要項は準安定ヘリウム原子の自然崩壊 γ_s であることより

$$N_{i,\max} = \frac{\sigma_{ion} \nu_i n_0^2}{\gamma_s} U \quad (7.4)$$

となる。例えば、イオン検出の限界が毎秒 1 個、ポンプの速度が 10l/s 、 $\sigma_{ion} = 10^{-20} \text{m}^2$ であり、入射する準安定ヘリウム原子の数 $n_0 U = 10^6 \text{s}$ であると、 $n_0 = 2 \times 10^2 \text{cm}^{-3}$ 、即ち 10^{-13}Pa 程度までの真空度測定が可能になる。

8. 今後の課題

真空度が良くなる程イオン化の信号は小さくなる。そこで He* 原子の自由落下及び、ガイド光の導入によるビーム拡がりの抑制により、さらに良い測定感度を得られると考える。また、測定下の検出チャンバーの最高到達真空度は $2.0 \times 10^{-8} \text{Pa}$ 程度だったため、今後は新型ポンプを導入し $2.0 \times 10^{-11} \text{Pa}$ 以上で測定したい。よって、今後の課題を示す。

1. He* 原子を自由落下に導くために、ガイド光のアライメントを行うこと。
2. より高い真空度中での残留ガスイオンの測定をすること
3. 検出チャンバー内に MOT を作ること

参考文献

- [1] William D Phillips, laser cooling and trapping of neutral atoms*, Reviews of Modern Phys .vol70.No3.July 1998
- [2] After T.P .Parr et al , J. Chem.Phys.76,316
- [3] レーザー物理入門 霜田光一,岩波書店
- [4] 真空技術 (物理光学実験) 堀内源一, 東京大学出版
- [5] 四重極質量分析計,原理と応用,不破敬一郎 藤井敏博,講談社サイエンティフィック
- [6] 準安定状態ヘリウム原子の光双極子トラップの研究 ,亀山喬史,修士論文