



卒業論文
アクティブポンプを用いない
磁気光学トラップの長期維持に向けた
真空槽内への気体流入量の評価

東京工業大学 理学院 物理学系
松原 佳祐

指導教員 上妻 幹旺 教授

2020年2月

概要

磁気光学トラップ（MOT）によって生成された極低温原子気体は、周波数標準や精密センサーとして利用することが可能であり、現在、実験室外で MOT を行うための技術開発が精力的に進められている。こうした研究の一環として、私が所属する研究室では、非蒸発型ゲッターポンプ（NEG）を使って真空系を小型化、省電力化する研究が行われている。NEG は小型で、一度活性化させれば電力供給が必要ないという利点をもつが、ヘリウム、ネオン、アルゴンといった希ガスを吸着できないという欠点をもつ。特にヘリウムは MOT を行う上で必須のガラス窓を介して真空槽内に流入してしまうため、真空度悪化は最終的にヘリウムによって決まると予想される。我々の研究室は、MOT 真空槽内へのヘリウムの流入を定量的に評価する実験を進めてきたが、測定時に短期的に発生する水素や、それを NEG が吸蔵する際に生成されるメタンなどが影響し、ヘリウムの流入量を正しく評価するには至っていなかった。

これらの問題点を解決し、MOT 真空槽における真空度悪化の主要因がヘリウムであることを確認することを目的として研究を行った。アクティブポンプを停止させ NEG のみで真空を維持する状態にし、およそ 1 時間後の真空度を MOT のローディング時間から推定することで、気体の流入量を評価した。質量分析器による測定もあわせて行うことで、NEG によって形成された MOT 真空槽の真空度悪化の主要因がヘリウムであることを確認した。

また、得られた知見をもとに、ヘリウムが流入しにくいガラス素材を使用した真空装置を別途作成し、MOT を用いて真空度の時間的な変化を測定した。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	2
1.3 本論文の構成	3
第2章 ガラスの壁面を介したヘリウムの流入	5
2.1 ガラスの壁面を介して流入するヘリウムの理論	5
2.2 ガラスの壁面を介して流入するヘリウムの流入量の計算	7
第3章 石英ガラスでの実験	9
3.1 実験装置	9
3.1.1 非蒸発型ゲッターポンプ (NEG)	10
3.1.2 磁気光学トラップ (MOT)	10
3.1.3 質量分析器	12
3.1.4 ヘリウムの流入量の理論値	13
3.2 質量分析器での測定	14
3.2.1 イオンポンプをオフにして測定	14
3.2.2 バルブを閉めて測定	15
3.2.3 イオンポンプをオフにした場合とバルブを閉めた場合の比較	16
3.3 質量分析器を使用しない測定	16
3.3.1 イオンポンプをオフにして測定	17
3.3.2 バルブを閉めて測定	17
3.3.3 質量分析器の真空度に対する影響	18
3.4 ルビジウムの真空度に対する影響	19
3.5 まとめと考察	20
第4章 コバルガラスでの実験	23
4.1 実験装置	23
4.2 ヘリウムの流入量の理論値	24
4.3 質量分析器での真空装置内部の調査	24

4.4	質量分析器を用いない測定	25
4.5	まとめと考察	26
第 5 章	まとめと今後の展望	29
5.1	まとめ	29
5.2	今後の展望	29

目 次

1.1	過去の実験の質量分析器での測定結果	2
2.1	ガラスの壁面を介したヘリウム流入のモデル	5
2.2	ガラスの種類による単位面積あたりの流入量の時間変化	8
2.3	ガラスの種類による真空度の時間変化	8
3.1	石英ガラスセルの実験系	9
3.2	MOT の模式図	10
3.3	MOT のローディング時間計測の近似の例	12
3.4	真空度の時間変化の理論値 (石英ガラス)	14
3.5	流入量の時間変化の理論値 (石英ガラス)	14
3.6	各気体の真空度の時間変化 (質量分析器あり、IP オフ)	14
3.7	各気体の流入量の時間変化 (質量分析器あり、IP オフ)	14
3.8	真空度の時間変化 (質量分析器あり、IP オフ)	15
3.9	流入量の時間変化 (質量分析器あり、IP オフ)	15
3.10	各気体の真空度の時間変化 (質量分析器あり、バルブ閉め)	16
3.11	各気体の流入量の時間変化 (質量分析器あり、バルブ閉め)	16
3.12	真空度の時間変化 (質量分析器あり、バルブ閉め)	16
3.13	流入量の時間変化 (質量分析器あり、バルブ閉め)	16
3.14	バルブの開け閉めによる真空度の時間変化の比較 (質量分析器あり)	17
3.15	バルブの開け閉めによる流入量の時間変化の比較 (質量分析器あり)	17

3.16 真空度の時間変化（質量分析器なし、IP オフ）	17
3.17 流入量の時間変化（質量分析器なし、IP オフ）	17
3.18 真空度の時間変化（質量分析器なし、バルブ閉め）	18
3.19 流入量の時間変化（質量分析器なし、バルブ閉め）	18
3.20 質量分析器の有無による真空度の比較（IP オフ）	18
3.21 質量分析器の有無による真空度の比較（バルブ閉め）	18
3.22 質量分析器の有無による真空度の比較（IP オフ）	19
3.23 質量分析器の有無による真空度の比較（バルブ閉め）	19
3.24 ローディングレート減衰の時定数の求め方の例	20
3.25 ローディングレート減衰の時定数の違いによる流入量の比較	21
4.1 コバルガラスセルの実験系	23
4.2 真空度の時間変化の理論値（コバルガラス）	24
4.3 流入量の時間変化の理論値（コバルガラス）	24
4.4 それぞれの気体の真空度の時間変化（コバルガラス）	25
4.5 それぞれの気体の流入量の時間変化（コバルガラス）	25
4.6 MOT での真空度測定の結果（コバルガラス）	25
4.7 MOT での流入量測定の結果（コバルガラス）	25
4.8 真空度の時間変化（1 回目）	26
4.9 流入量の時間変化（1 回目）	26
4.10 蛍光量の時間変化	26
4.11 ローディングレートの時間変化	27
4.12 真空度の時間変化（2 回目）	28
4.13 流入量の時間変化（2 回目）	28

第1章 序論

1.1 研究の背景

磁気光学トラップ (MOT) [1] は、高感度慣性センサー [2, 3] や、高精度周波数標準 [4] を実現するためのリソースとして盛んに活用されている。それらの超精密測定を実験室外で行うことを目的として、MOT系を小型化、可搬化、省電力化する研究が世界中で熱心に行われている [5]。この目的を達成するためには、小型で省電力な光学系、制御系、真空系を作る必要がある。光学系については、単一の MOT ビームからなる回折格子 MOT [6] や、ピラミッド型 MOT [7] などがすでに存在しており、研究が進められている。制御系に関しては、技術の発展により、小型化、省電力化が進められていることは言うまでもない。真空系については、近年になりイオンポンプと非蒸発型ゲッター材 (NEG) を用いた比較的小型なものが利用可能になってきたが、高電圧電源が必要、精密測定上好ましくない磁場が発生するといった問題が残っている。そこで、我々の研究室ではこうした問題を解決することを目的として、非蒸発型ゲッターポンプ (NEG) のみを用いて MOT をに必要な超高真空を維持するための研究を進めてきた [8]。NEG は小型で、一度活性化させれば電力供給なしで長期間高い排気能力を維持することができる。しかし、NEG は希ガスを吸うことができない。希ガスであるヘリウムの大気中での分圧はおよそ 0.5 Pa であり、ヘリウムはガラスを介して真空槽内に侵入してくる。そのため、超高真空を長時間にわたって維持しようとしたとき、ヘリウムの流入が主要な、問題となると推察した。しかし、これまで研究室内で行われた実験では、図 1.1 に見られるように、ヘリウムだけでなく、本来は大気中からガラスを介して侵入するはずのない、アルゴン、ネオンといった希ガスの流入が確認されていた。さらに、イオンポンプの電源を遮断した後、最初の数分間において、水素やメタンの急速な流入が認められているにも関わらず、こうした短期の真空度変化から流入量を割り出しているという問題があった。

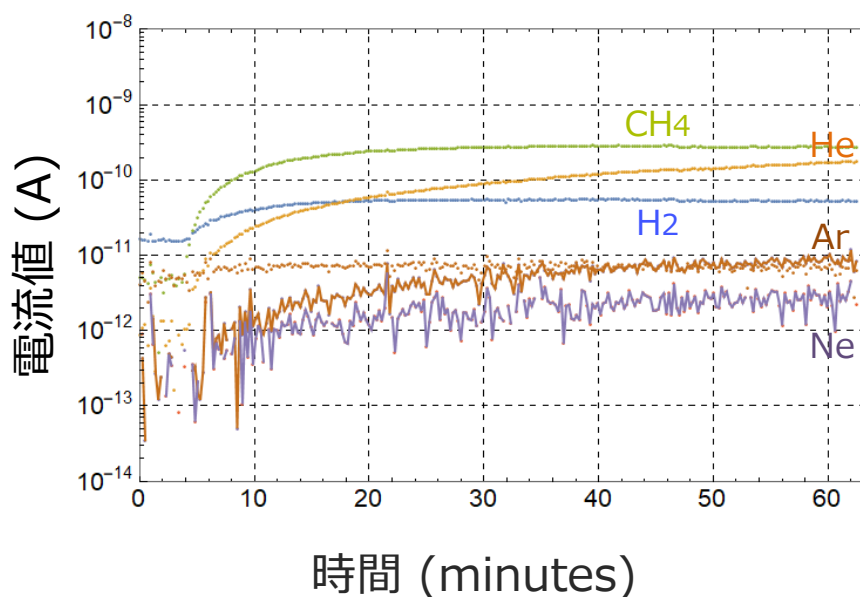


図 1.1: 過去の実験の質量分析器での測定結果

1.2 研究の目的

先述の通り、以前我々の研究室で行った研究は改善できる点がいくつかあった。アルゴン、ネオンといった希ガスが流入している原因として、私はイオンポンプからの脱ガスを疑った。この問題は、イオンポンプを新しいものに取り替えることで解決がはかれるはずである。イオンポンプを遮断した直後、水素の流入量が増すのは、金属チャンバーからの脱ガスが常時存在する状態で、イオンポンプによる排気を切ったことによる。NEGは水素の吸着に伴い、メタンを放出する性質があるため、同時にメタンの流入が増加するのも頷ける。これらの流入量は、最初の数分間においてはヘリウムのそれを上回るが、やがてはヘリウムが支配的になることが図 1.1 から読み取れる。したがって、真空度測定を十分長時間行いさえすれば、流入量を正しく評価できることになる。このようにして真空度悪化の主要因が、ガラスを介して外から流入してくるヘリウムであることを確認することが本研究の目的である。また、ヘリウムが真空度悪化の主要因であることが確認できた場合、ヘリウムが流入しにくいガラス素材を用いた真空装置での測定も行う。

1.3 本論文の構成

2章ではガラスの壁面を介したヘリウムの流入について論じる。3章では真空度悪化の主要因を特定するために、石英ガラスセルでの実験を行う。4章ではヘリウムが流入しにくいガラス素材である、コバルガラスセルでの実験について述べる。

第2章 ガラスの壁面を介したヘリウムの流入

2.1 ガラスの壁面を介して流入するヘリウムの理論

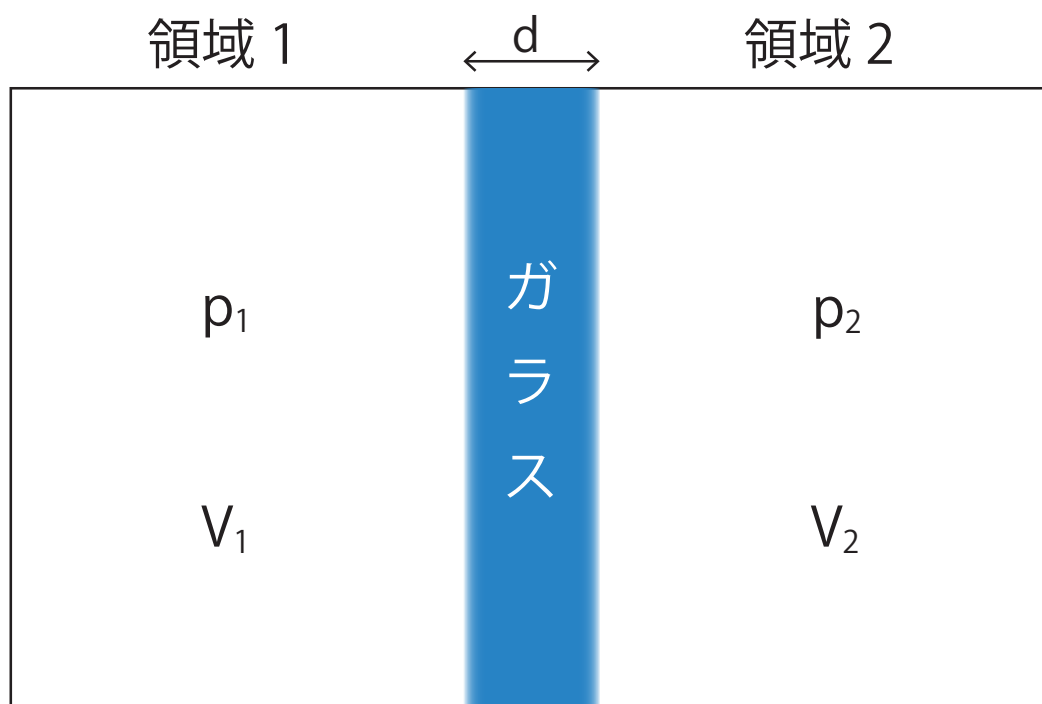


図 2.1: ガラスの壁面を介したヘリウム流入のモデル

ヘリウムがガラスの壁面を介して流入してくるモデルを考える。図 2.1 のようにガラスで分けられた 2 つの領域を考える。領域 1 にはヘリウムが存在し、領域 2 は

真空である。ヘリウムの密度 j は

$$j = \frac{V}{A} \frac{dp}{dt} \quad (2.1)$$

で表される。 A はガラスの表面積である。平面膜において、定常状態における電流密度はヘリウムの圧力 p_1 とガラスの厚さ d に依存すると仮定すると

$$j = \frac{kp_1}{d} \quad (2.2)$$

となる。また、領域2の真空度 p は常に p_1 よりも小さい。比例定数である k は、浸透性と呼ばれている。なお、式 (2.2) は、拡散方程式 (式 (2.3)) の特別な場合である。

$$j = -D\nabla n \quad (2.3)$$

ただし、 n はガラス内部のヘリウムの濃度である。 D は拡散係数である。実際の実験では、密度も濃度も時間とともに変化するので、時間に依存する拡散方程式 (式 (2.4)) を解く必要がある。

$$D\nabla^2 n = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2.4)$$

これは式 (2.3) から得られる。式 (2.4) を初期状態が $n = 0$ として解く。ゼロ時間で領域1に圧力 p_1 のヘリウムを入れる。なお、 p_1 はずっと一定とする。 p_1 と領域1側の n の境界値は関係しており、ガラスに溶け出しているヘリウムの濃度と外部のヘリウムの分圧の比率は、それらが平衡状態にあるとき、ヘリウムの溶解度によって決まる。したがって、圧力 p_1 のヘリウムにさらされたガラスは、式 (2.5) で与えられる濃度に飽和するまでヘリウムを吸収する。

$$n_1 = Sp_1 \quad (2.5)$$

ただし、 S は溶解度である。

式 (2.4) を解き、式 (2.3) を用いると、次の結果が導ける。

$$\frac{dp}{dt} = \frac{ADS}{Vd} p_1 \left\{ 1 + \sum_{m=1}^{\infty} 2 \cos(\pi m) \exp\left(-\frac{m^2 \pi^2 Dt}{d^2}\right) \right\} \quad (2.6)$$

十分に時間が経過すると、 dp/dt は一定になり、

$$\frac{dp}{dt} = \frac{A}{V} DS \frac{p_1}{d} \quad (2.7)$$

となる。積 DS は浸透性 k と同じである。これは、式 (2.2) と式 (2.7) を見れば分かる。また、これらより、

$$k = \frac{Vd}{A} \frac{1}{p_1} \frac{dp}{dt} \quad (2.8)$$

が得られる。この単位は cm^2/sec である。式 (2.6) を 0 から t まで時間積分すると、圧力 p が得られる。

$$p = \frac{ADS}{Vd} p_1 \left\{ t - \frac{d^2}{6D} - \frac{2d^2}{\pi^2 D} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \frac{\exp(-m^2 \pi^2 Dt/d^2)}{m^2} \right\} \quad (2.9)$$

式 (2.9) から分かるように、真空度はガラスの表面積 A に比例し、真空装置の体積 V に反比例している。ここで、真空装置の大きさについて考える。簡単のため、真空装置の形状は球であり、素材はすべてガラスと考える。真空装置の半径を R とすると、 $A \propto R^2$ 、 $V \propto R^3$ であるので、 $p \propto R^{-1}$ の関係がわかる。したがって、真空装置が小型になればなるほど、相対的に表面積の割合が増し、その結果、ガラスの壁面を介して侵入するヘリウムの真空度に対する影響は大きくなっていく。

2.2 ガラスの壁面を介して流入するヘリウムの流入量の計算

流入量は

$$Q = V \frac{dp}{dt} \quad (2.10)$$

で計算することができる。式 (2.6) を変形して式 (2.10) の形にし、3種類のガラスを用いたときの単位面積あたりの流入量の時間変化を計算した。ガラスの種類による拡散係数と浸透性の値は表 2.1 に示す。

表 2.1: 室温でのそれぞれのガラスのヘリウムの拡散係数と浸透性

ガラスの種類	拡散係数 $D(\text{cm}^2/\text{s})$	浸透性 $k(\text{cm}^2/\text{s})$
石英ガラス@25℃	$3.00 \times 10^{-8}[10]$	$1.14 \times 10^{-10}[11]$
パイレックス@27℃	$7.74 \times 10^{-9}[12]$	$7.60 \times 10^{-11}[12]$
コバールガラス@25℃	$1.00 \times 10^{-9}[13]$	$5.00 \times 10^{-12}[13]$

また、参考として、500ml ペットボトルのような形と大きさの小型真空装置を使用した場合の真空度の時間変化のグラフを図 2.3 に示す。コバールガラスを使用した場合は、1、2ヶ月程度は超高真空が維持できることが分かる。

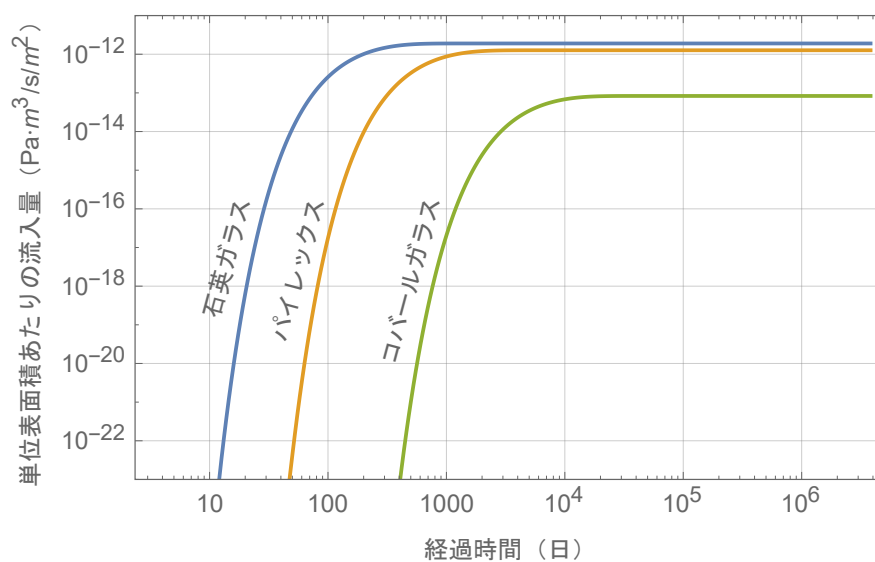


図 2.2: ガラスの種類による単位面積あたりの流入量の時間変化

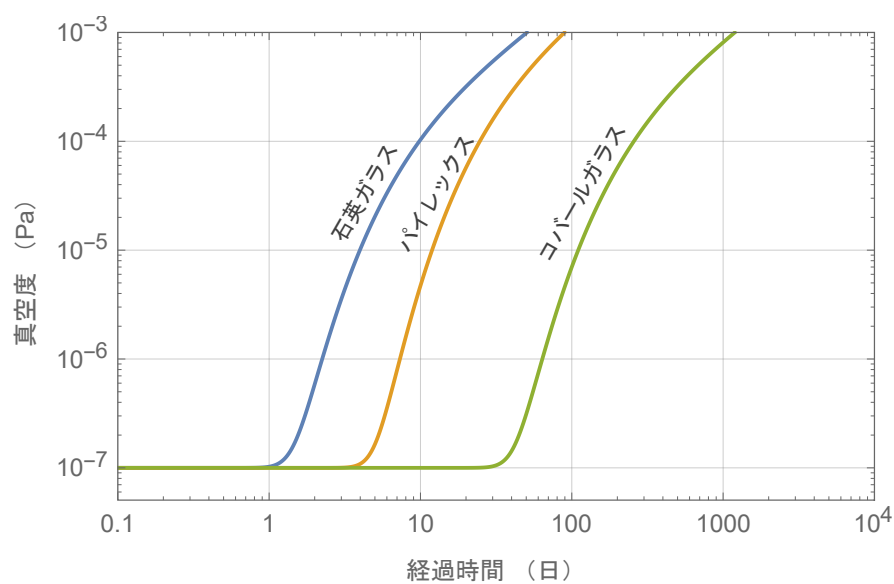


図 2.3: ガラスの種類による真空度の時間変化

第3章 石英ガラスでの実験

まずは、NEG を封入した真空装置の真空度悪化の主要因を特定するために、石英ガラスを用いた真空装置を使って測定を行う。本章では、実験装置についての説明、MOT のローディング時間を観測することで真空度を推定する方法の説明のあとに、質量分析器を用いて真空槽内の気体の種類を、MOT を用いて真空槽内の真空度を測定する。

3.1 実験装置

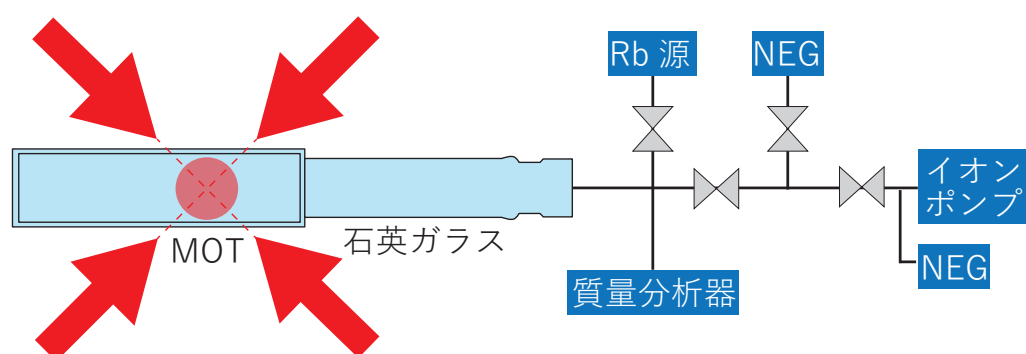


図 3.1: 石英ガラスセルの実験系

使用した実験装置の模式図が図 3.1 である。まずは石英ガラスセルで実験を行い、真空度悪化の主要因を調べる。ルビジウム源と MOT 領域を近くに設置することで、ルビジウムの量の調整をしやすくしている。また、イオンポンプからの脱ガスの影響の調査のために、イオンポンプを真空系から切り離すバルブを設置し、真空槽内の素性の調査のために、質量分析器を設置している。

3.1.1 非蒸発型ゲッターポンプ (NEG)

非蒸発型ゲッターポンプ (NEG) [9] は $\text{Al} \cdot \text{Zr} \cdot \text{Ti} \cdot \text{V} \cdot \text{Fe}$ の合金である。NEG は小型で、一度活性化させると、電力供給なしで高い排気能力を維持することができる。水素、一酸化炭素、水などに対しては、イオンポンプよりも高い排気能力を持つという利点がある。しかし、希ガスを吸収できないという欠点を持つ。希ガスの中でも、アルゴンやネオンは、一度真空引きをすれば外部からは侵入しないが、ヘリウムは、ガラスの壁面を介して真空槽内に侵入して真空度を下げてしまう。[11] また、NEG は水損を吸うことで、メタンを放出してしまう。したがって、NEG のみを用いて超高真空を維持するためには、水素とヘリウムの流入の対策を行えば良いと考えた。

3.1.2 磁気光学トラップ (MOT)

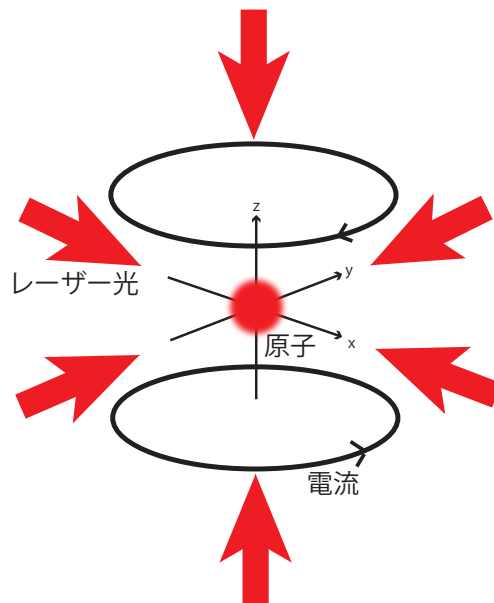


図 3.2: MOT の模式図

磁気光学トラップ (MOT) とは、3組の直交するレーザーと、磁場勾配を用いて冷却原子を一箇所に集めることである。このときの冷却原子の速度は約 10cm/sec で、温度は約 $100\ \mu\text{K}$ である。今回の実験では、ルビジウムを使用する。この MOT を用いて、真空槽内の真空度を測定することができる。[14]

MOT の原子のローディングとロスの関係は、式 (3.1) のように近似できる。

$$\frac{dN}{dt} = R - \gamma N(t) - \beta \bar{n} N(t) \quad (3.1)$$

ここで、 N は MOT にトラップされた原子の数、 R はレーザー冷却を通して原子が装填されていく速度である。通常、 R は、トラップされている気体の分圧に比例する。トラップから脱落する原子は γ と β で表される。 γ は、すべての背景気体の衝突による損失のレートの定数であり、 β はトラップ内での非弾性二体衝突による損失のレートの定数である。二体衝突のレートは、トラップされた原子の平均密度 ($\bar{n} = (1/N) \int d^3r n(\mathbf{r})^2$) に依存している。式 (3.1) を解くためには、 N の $\bar{n}$ による変化を知る必要があるが、それは一般的に大変複雑である。二体衝突のレートが十分小さい時、 $\beta \bar{n} N(t)$ は無視することができる。このとき、式 (3.1) は

$$\frac{dN}{dt} = R - \gamma N(t) \quad (3.2)$$

と書くことができる。式 (3.2) を解くと、

$$N = \frac{R}{\gamma} (1 - e^{-\gamma t}) \quad (3.3)$$

となる。ただし、

$$\gamma = \frac{1}{\tau} \quad (3.4)$$

と書ける。 τ は MOT のローディング時間である。

原子数と蛍光量は比例するため、観測した蛍光量の時間変化は、図 3.3 のように、式 (3.3) のような指数関数の形で近似できる。図 3.3 の場合の時定数は、 $\tau = 5.6$ 秒である。

真空度 P とローディング時間 τ の積 $P\tau$ は、真空チャンバー内に存在する気体の原子の種類に依存している。それぞれの気体の $P\tau$ の値を表 3.1 に示す。

したがって、 τ を用いて、真空度 P は

$$P \approx 2.7 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s} / \tau \quad (3.5)$$

と表される。真空度悪化の主要因が何であるかは確定できていないので、今回の実験では水素の値を用いる。他の原子と比べて大きくても 2 倍程度の違いしかないため、今回の測定では十分な精度である。

なお、この測定は、磁気トラップコイルに、一定時間ごとに電流を流すことで集まってくるルビジウム原子の蛍光を、CCD カメラを用いて観測することで行う。今回使用した CCD カメラで MOT の立ち上がりを捉えられる限界は、真空度に直

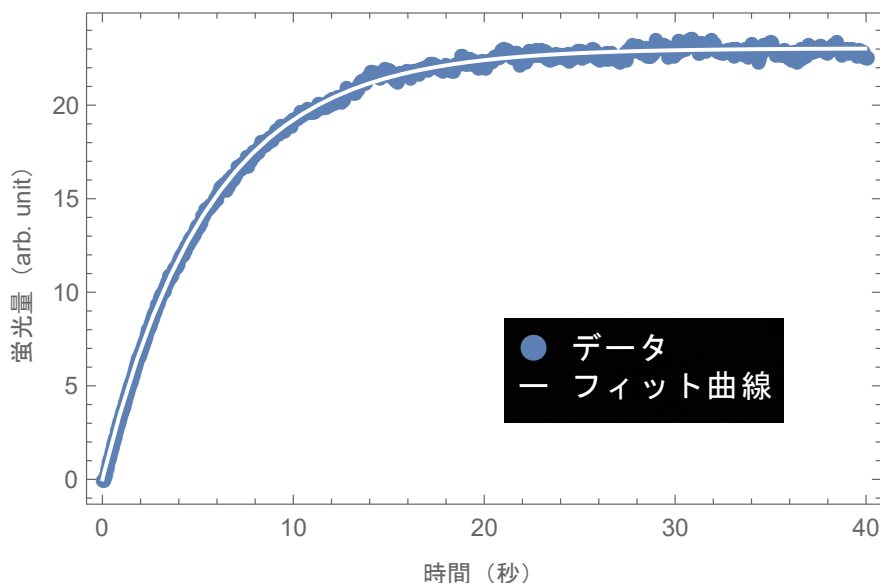


図 3.3: MOT のローディング時間計測の近似の例

しておよそ 10^{-5} Pa である。したがって、MOT の観測によって得られる真空度が 10^{-5} Pa よりも悪かった場合、それは信頼できないデータである。

このようにして、真空槽内に侵入する気体の流入量は、イオンポンプをオフにして、ガラスセル内の MOT のローディング時間を測定することで、計測することができる。MOT のローディング時間は式 (3.5) のように、真空度に変換することができる。イオンゲージなどを用いた真空度測定では、背景ガスをイオン化する過程そのものが真空排気として働く可能性があるが、MOT を使ったこの真空度測定はその心配がないため、流入量の評価にはふさわしい測定方法である。また、MOT 系の小型化、省電力化が最大の目標であるので、MOT そのもので真空度の測定ができるのは都合がいい。

また、気体の流入量は式 (3.6) で求めることができる。

$$Q \equiv V \frac{\partial P}{\partial t} \quad (3.6)$$

ただし、 V は真空チャンバーの体積である。

3.1.3 質量分析器

質量分析器は、真空槽内の原子や分子の分圧を質量別に測定することができる装置である。原子や分子を気体状のイオンにし、そこに特定の電圧をかけること

表 3.1: それぞれの気体の $P\tau$ の値

気体の種類	$P\tau$ Pa s
H ₂	2.7×10^{-6}
He	5.3×10^{-6}
N ₂	5.1×10^{-6}
H ₂ O	4.8×10^{-6}
Ar	5.8×10^{-6}
CO ₂	5.1×10^{-6}
Rb	3.0×10^{-6}

によって、決まった質量のイオンを通過させ、それを検出する。そのため、質量分析器で測定を行うと、真空槽内の原子や分子の一部を真空引きしてしまう。その排気速度を表 3.2 に示す。

表 3.2: 質量分析器の各気体に対する排気速度 (10^{-7} Pa $\sim$ 10^{-3} Pa) (参考文献 [15] より引用)

ガス種	H ₂	D ₂	He	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	O ₂	Ar
排気速度 ($\times 10^{-6}$ m ³ /s)	6.7	6.7	0.0	2.9	6.1	2.7	21.0	71.5	0.063

これより、質量分析器での測定では、完全に正確なデータを取ることはできないため、質量分析器での測定他に、非破壊測定である MOT のローディング時間の測定による真空度測定も行い、その結果に齟齬がないかを確認する。

なお、今回の実験のように、超高真空での質量分析器での測定は、オーダー程度の精度しかない。[15] そのため、今回の実験では、質量分析器での測定の結果は、流入してくる気体の特定と、それらの中で最も真空度悪化に対して支配的なものの特定に用い、具体的な数値は使用しない。

3.1.4 ヘリウムの流入量の理論値

今回の石英ガラスでの実験での真空度と流入量の時間変化の理論値を計算する。ガラスの表面積 $A = 256$ cm²、体積 $V = 7 \times 10^3$ cm³ である。ただし、この計算は最初の真空度が 10^{-7} Pa とし、ゼロ時間以前は真空槽内にもガラスにも全くヘリウムが存在していないという仮定のもとで行われている。それらをプロットしたものが、図 3.4 と図 3.5 である。実際には、はじめから真空槽内にもガラスにもヘ

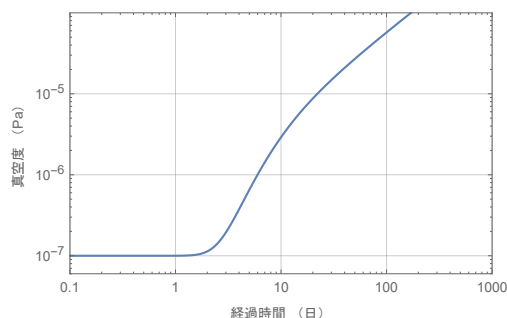


図 3.4: 真空度の時間変化の理論値
(石英ガラス)

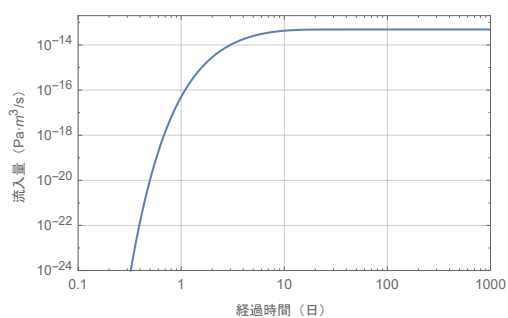


図 3.5: 流入量の時間変化の理論値
(石英ガラス)

リウムは存在しているので、実験で得られる流入量の値は十分時間がたったあとの値である、 $4.9 \times 10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であると考えられる。

3.2 質量分析器での測定

まずは、質量分析器を用いて、真空槽内に流入する気体の種類を調査する。同時に、先述した方法で、MOT のローディング時間の観測による真空度の測定も行う。

3.2.1 イオンポンプをオフにして測定

ゼロ時間でイオンポンプをオフにして測定を開始する。質量分析器の測定結果が図 3.6、流入量の結果が図 3.7 である。

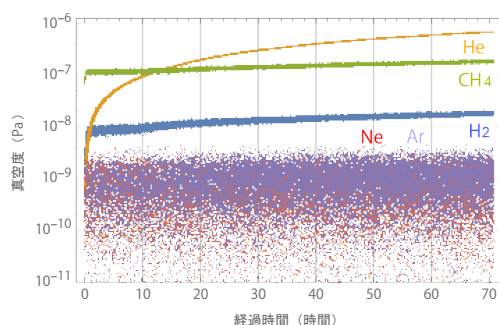


図 3.6: 各気体の真空度の時間変化
(質量分析器あり、IP オフ)

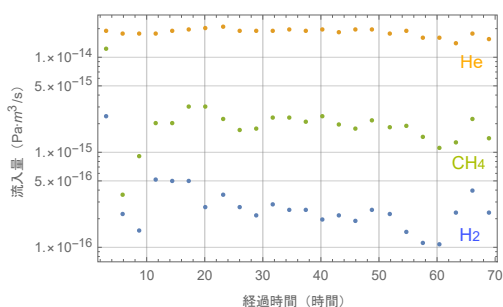


図 3.7: 各気体の流入量の時間変化
(質量分析器あり、IP オフ)

この水素、ヘリウム、メタンの3種類以外の原子はノイズレベルであった。特に、ネオンとアルゴンは、過去の測定では流入が見られたが、イオンポンプを新しいものに取り替えた今回の測定では流入が見られなかった。以後、見やすさのため、水素、ヘリウム、メタンの3種類のみグラフに記載する。流入量のグラフを見れば分かるように、ヘリウムの流入量が、水素よりも2桁程度、メタンよりも1桁大きいことが分かる。

次に、MOTの測定から求めた真空度と流入量のグラフが図3.8と図3.9である。

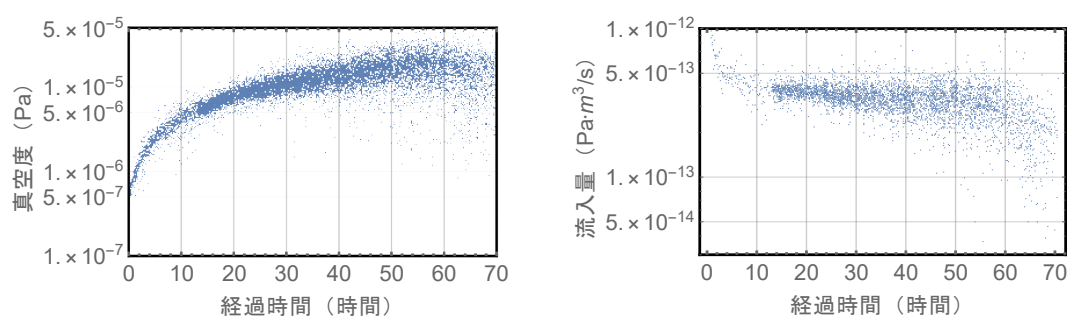


図 3.8: 真空度の時間変化図 3.9: 流入量の時間変化
(質量分析器あり、IP オフ) (質量分析器あり、IP オフ)

測定開始からしばらくの間の流入量が多くなっているのは、イオンポンプをオフにしたときの脱ガスが原因であると考えられる。その後十分に時間が経過するとおおよそ $3 \times 10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度で安定する。しかしこの値は、計算によって求めた流入量の値 ($4.9 \times 10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) に比べると、大きくなっている。

3.2.2 バルブを閉めて測定

次に、イオンポンプからの脱ガスが真空度へ与える影響を考えるため、ゼロ時間でイオンポンプをオフにする代わりに、イオンポンプのバルブを閉めて測定を行う。この測定の結果は、真空度が図3.10、流入量が図3.11である。

先程の実験とあまり結果は変わらず、ヘリウムの流入量が、水素よりも1桁程度、メタンよりも2桁大きいことが分かる。測定開始からしばらくの間、流入量が大きくなっているのは、バルブを閉めるときに潰された金属からの脱ガスによるものだと考えられる。次に、MOTのローディング時間の測定から求めた結果は図3.12と図3.13である。

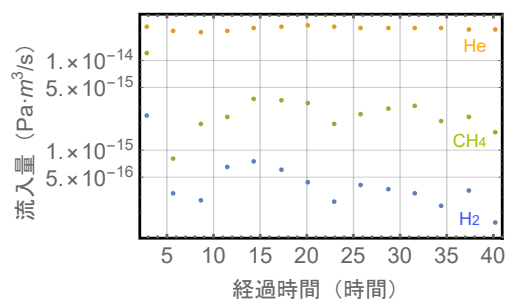
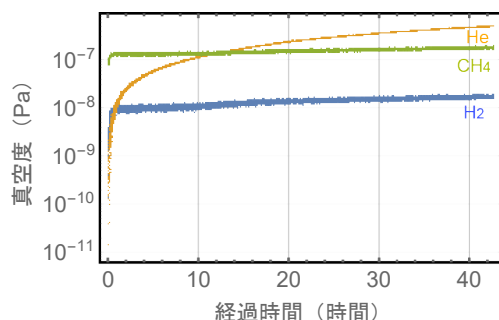


図 3.10: 各気体の真空度の時間変化
(質量分析器あり、バルブ閉め)

図 3.11: 各気体の流入量の時間変化
(質量分析器あり、バルブ閉め)

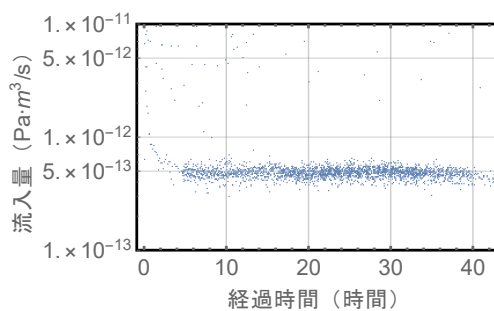
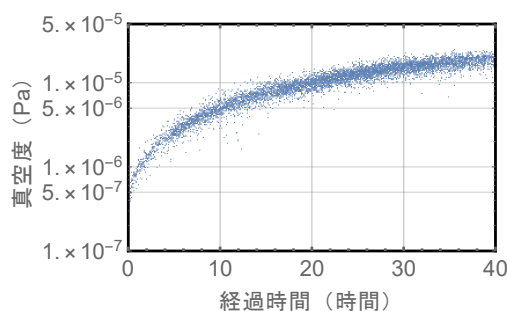


図 3.12: 真空度の時間変化
(質量分析器あり、バルブ閉め)

図 3.13: 流入量の時間変化
(質量分析器あり、バルブ閉め)

3.2.3 イオンポンプをオフにした場合とバルブを閉めた場合の比較

真空度の時間変化をイオンポンプをオフにした場合とバルブを閉めた場合の違いで比較したものが図 3.14、流入量の比較が図 3.15 である。

真空度の悪化が、バルブを締めたときのほうが僅かに早いことが分かる。バルブをオフにしたときに流入量が僅かに大きくなるのは、イオンポンプを真空系から切り離すと、NEG の一部も真空系から切り離されるためであると考えられる。

3.3 質量分析器を使用しない測定

質量分析器を使用して測定する過程で行われる真空槽内の気体のイオン化が、真空排気として働く可能性がある。それによる真空度への影響を調査する。質量分析器をオフにし、先程までの実験と同様の測定を行う。

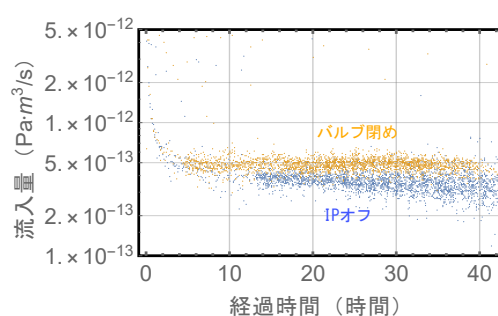
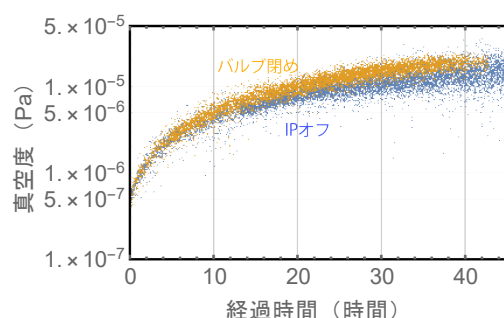


図 3.14: バルブの開け閉めによる真空度の時間変化の比較（質量分析器あり） 図 3.15: バルブの開け閉めによる流入量の時間変化の比較（質量分析器あり）

3.3.1 イオンポンプをオフにして測定

真空度の結果が図 3.16、流入量の結果が図 3.17 である。

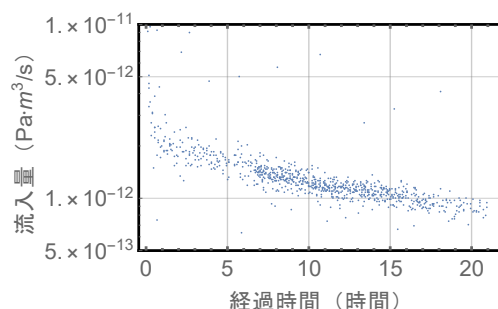
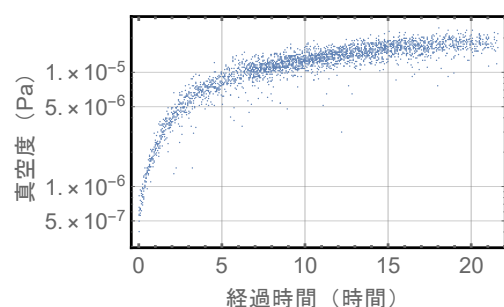


図 3.16: 真空度の時間変化（質量分析器なし、IP オフ） 図 3.17: 流入量の時間変化（質量分析器なし、IP オフ）

測定開始からしばらくの間、流入量が大きくなっているのは、先述の実験と同様に、イオンポンプをオフにしたときの脱ガスが原因であると考えられる。また、流入量はおおよそ $1.0 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度で落ち着く。この値も計算によって求めた流入量の値 ($4.9 \times 10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) に比べると、大きくなっている。

3.3.2 バルブを閉めて測定

次に、イオンポンプからの真空度への影響を考え、ゼロ時間でイオンポンプをオフにする代わりにバルブを閉めて測定を行う。真空度の結果が図 3.18、流入量の結果が図 3.19 である。

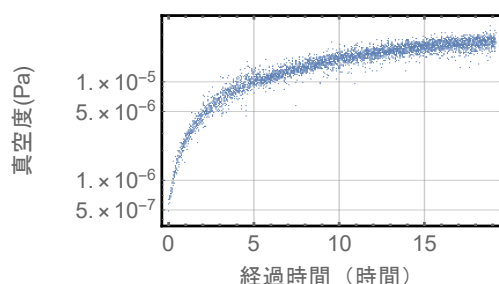


図 3.18: 真空度の時間変化（質量分析器なし、バルブ閉め）

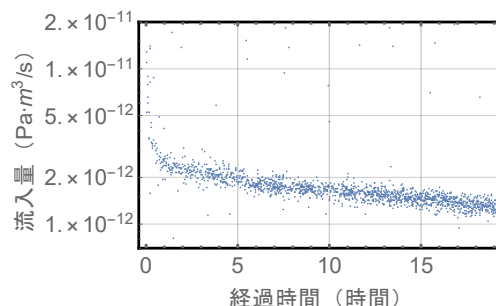


図 3.19: 流入量の時間変化（質量分析器なし、バルブ閉め）

測定開始からしばらくの間、流入量が大きくなっているのは、先述の実験と同様に、バルブを閉めるときに潰された金属部分からの脱ガスであると考えられる。また、流入量はおよそ $1.2 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度で落ち着く。この値も計算によって求めた流入量の値 ($4.9 \times 10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) に比べると、大きくなっている。

3.3.3 質量分析器の真空度に対する影響

質量分析器がある時とない時の真空度の時間変化を比較した。イオンポンプをオフにして測定したときの比較が図 3.20、バルブを閉めて測定したときの比較が図 3.21 である。また、流入量の比較が図 3.22 と図 3.23 である。

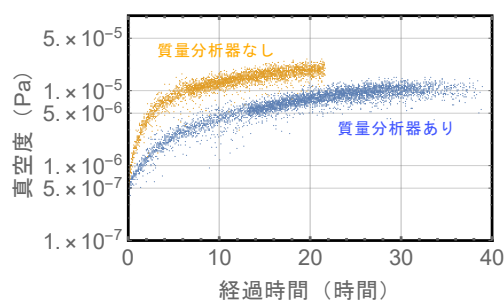


図 3.20: 質量分析器の有無による真空度の比較（IP オフ）

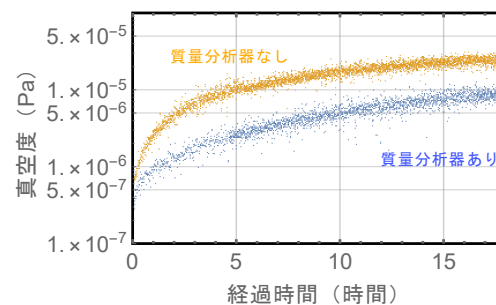


図 3.21: 質量分析器の有無による真空度の比較（バルブ閉め）

どちらの結果でも、質量分析器ある時のほうが、無しのとくに比べて真空度が悪くなるのが早い。これは、質量分析器のフィラメントによって真空層内の気体が真空引きされてしまったなどの影響のためと考えられる。これまでの実験の質

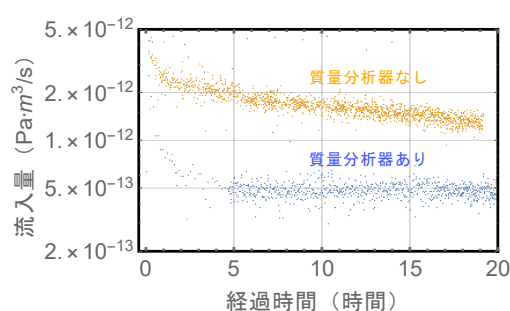
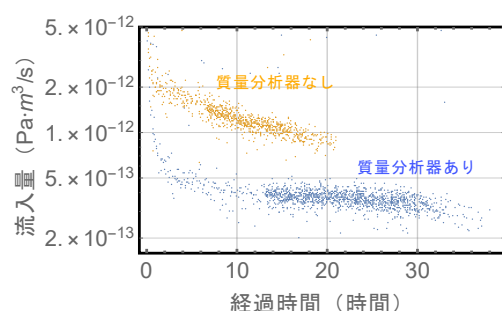


図 3.22: 質量分析器の有無による真空度の比較 (IP オフ) 図 3.23: 質量分析器の有無による真空度の比較 (バルブ閉め)

質量分析器がない時の流入量とある時の流入量の差から、質量分析器の排気能力を評価したものが表 3.3 である。

表 3.3: 質量分析器の排気能力

(Pa · m³/s)	イオンポンプオフ	バルブ閉め
質量分析器あり	3.8×10^{-13}	5.0×10^{-13}
質量分析器なし	6.2×10^{-13}	7.0×10^{-13}
質量分析器の排気量	1.1×10^{-12}	1.0×10^{-12}

どちらの結果も、排気量はおよそ $10^{-12} \sim 10^{-13}$ Pa · m/s 程度の値となった。質量分析器排気速度 (表 3.2) の 10^{-6} Pa での水素、ヘリウム、メタンの値を考えると、妥当な結果であると言える。

3.4 ルビジウムの真空度に対する影響

ここまで測定しても MOT の測定から求めた流入量と流入量の計算値が 1 桁程度の差があることの原因がわからなかった。ここで、ローディングレートの減衰の時定数が非常に大きくなっていることが判明した。ここでローディングレートの減衰の時定数とは、ローディングレートの時間変化を $A \exp(-t/\tau)$ の形でフィッティングしたときの τ の値のことである。図 3.24 の場合の時定数は 28 時間である。ルビジウムが MOT 系に多く存在し、真空槽の内壁にルビジウムが多く吸着していれば吸着しているほど、この時定数は大きくなる。今までの実験の質量分析器の測定結果には、ルビジウムはノイズレベルでしか現れていない。しかし、MOT 領域とルビジウム源の間よりも質量分析器とルビジウム源の間のほうが離れてい

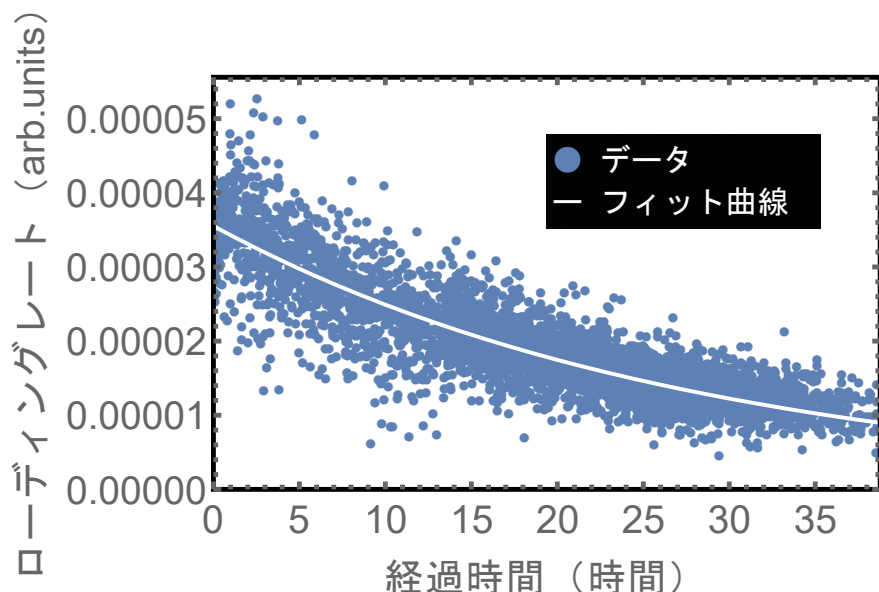


図 3.24: ローディングレート減衰の時定数の求め方の例

るため、質量分析器とルビジウム源の間のコンダクタンスが悪かった場合、MOTの領域にルビジウムが過度に存在していても、質量分析器の結果にルビジウムは現れない。したがって、MOTの測定にはルビジウムが寄与していないかを確認する。なお、イオンポンプをオフにする測定と、バルブを閉める測定の結果が、これまでの実験でほぼ変わらなかったため、今回の実験ではイオンポンプをオフにする測定のみ行う。

軽めのベーキングを行い、真空装置の内壁に吸着したルビジウムを放出させる。その後、ゼロ時間でイオンポンプをオフにし、MOTのローディング時間の観測による真空度測定を行った。この手順を2度行い、時定数が異なる測定を更に2回行った。それらの真空度と流入量の時間変化を、ローディングレート減衰の時定数の違いによって比較したグラフが図3.25である。

どの結果も、違いはほぼ見られない。この結果から、MOT測定の結果にルビジウムは寄与していないことが分かる。

3.5 まとめと考察

測定結果によると、水素とメタンも傾きを持っているが流入量の結果を見ると、やはりヘリウムの流入量が最も大きいため、ヘリウムが真空度に対して支配的であることが分かる。これより、ヘリウムがより流入しにくいコバルガラスを用

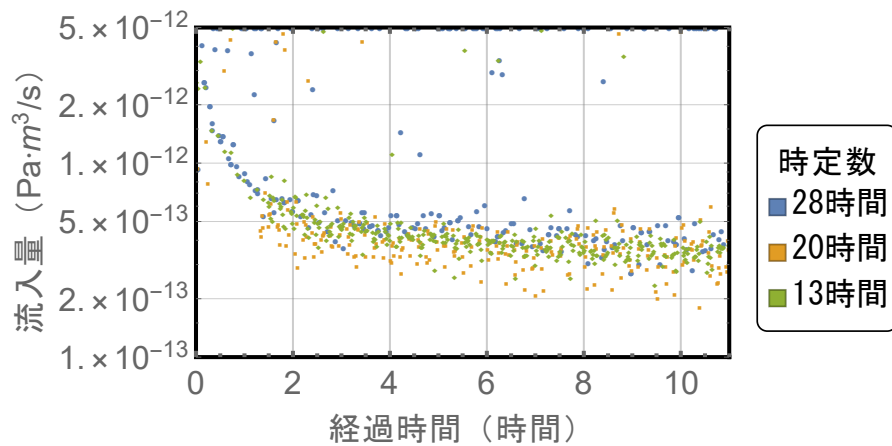


図 3.25: ローディングレート減衰の時定数の違いによる流入量の比較

いた真空装置での実験を行う。この真空装置では金属部分が現在の系よりも少ない。そのため、金属からの脱ガスによって真空系に流入する水素や、その水素を NEG が吸うことによって発生するメタンの流入量はより少なくなることが予想される。そのため、コバルガラスを用いた真空装置の実験系でも確認のため、まずは質量分析器を用いて、どの気体が真空度に対して支配的であることを調べることにする。

第4章 コバルトガラスでの実験

前章では、石英ガラスでの実験を通して、NEG を使用した真空装置の真空度悪化の主要因がヘリウムであることを確認した。本章では、ヘリウムと水素の流入の対策を施した真空装置で同様の測定を行う。

4.1 実験装置

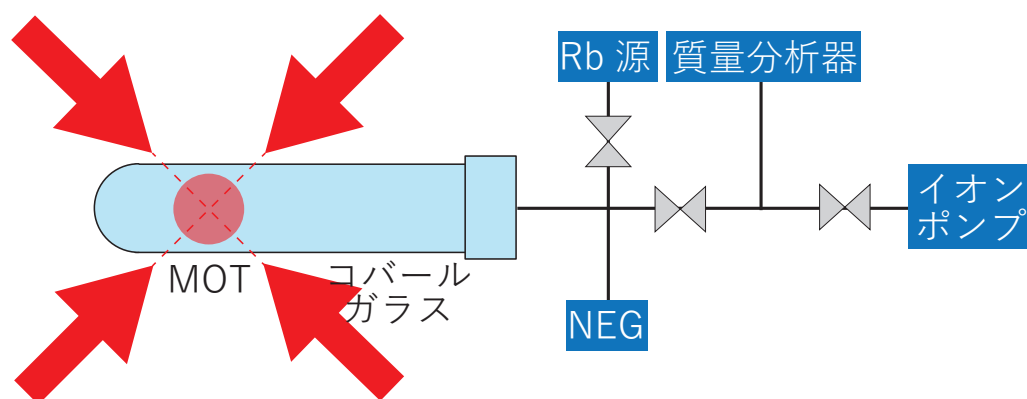


図 4.1: コバルトガラスセルの実験系

使用した実験装置の模式図が図 4.1 である。石英ガラスの実験と同様に、ルビジウム源と MOT 領域を近くに設置することで、ルビジウムの量の調整をしやすいとしている。また、これも石英ガラスの実験と同様に、真空槽内の素性の調査のために、質量分析器を設置している。こちらの実験系では、真空装置の体積を小さくするためと金属部分を減らすために、最小限度の要素で真空計を切り離せ得るような位置にバルブを設置している。

4.2 ヘリウムの流入量の理論値

コバルガラスでの実験の真空度と流入量の時間変化の理論値を石英ガラスのときと同様に最初の真空度を 10^{-7} Pa とし、ゼロ時間以前は真空層内にもガラスにも全くヘリウムが存在しないものとして計算する。真空度が図 4.2、流入量が図 4.3 である。

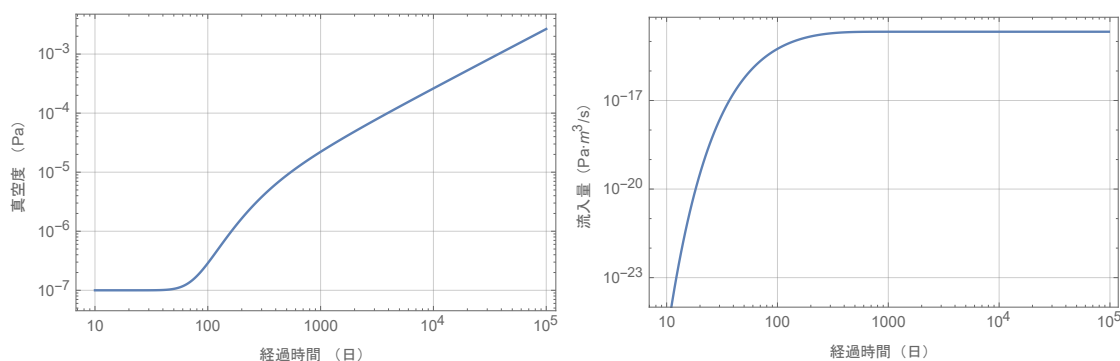


図 4.2: 真空度の時間変化の理論値 (コバルガラス) 図 4.3: 流入量の時間変化の理論値 (コバルガラス)

実際には、はじめから真空槽内にもガラスにもヘリウムは存在しているので、実際の流入量は十分時間がたったあとの値である、 $2.1 \times 10^{-15} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であると考えられる。石英ガラスのとき ($4.9 \times 10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) よりも流入量が少なく、真空度の悪化も緩やかであることが分かる。

4.3 質量分析器での真空装置内部の調査

まずは、前述の通り、コバルガラスセルでも、質量分析器を用いて内部の素性を調査する。ゼロ時間でバルブを閉め、質量分析器と MOT の測定を開始する。質量分析器で測定したとしたときの結果が図 4.4、流入量のグラフが図 4.5 である。

MOT の測定から出した真空度の結果が図 4.6、流入量の結果が図 4.7 である。

MOT は消えること無く鮮明に見え続けた。流入量は石英ガラスのときと同様に、図 4.7 の 3 種類以外の原子はノイズレベルであったのでグラフには表示していない。ヘリウムの流入量が最も多く、そこから 1 桁程度小さく水素が流入している。メタンに関しては、分圧が時間経過とともに小さくなった。これは、質量分析器のフィラメントによって真空引きされたなどの影響によるものだと考えられる。

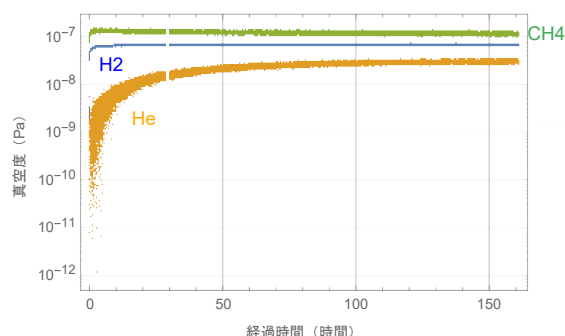


図 4.4: それぞれの気体の真空度の時間変化 (コバルガラス)

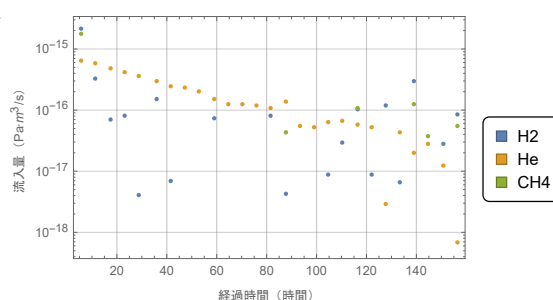


図 4.5: それぞれの気体の流入量の時間変化 (コバルガラス)

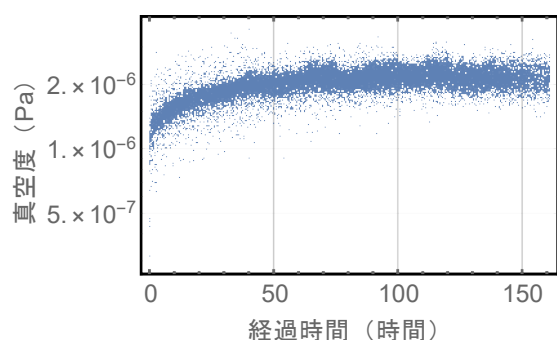


図 4.6: MOT での真空度測定の結果 (コバルガラス)

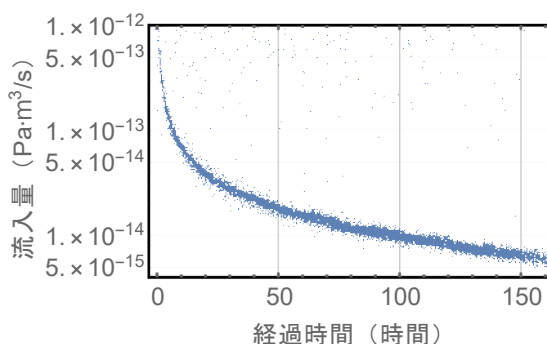


図 4.7: MOT での流入量測定の結果 (コバルガラス)

4.4 質量分析器を用いない測定

前述の通り、質量分析器を使わずに、MOT の観測によって真空度を測定する。その結果が図 4.8 と図 4.9 である。

真空度が超高真空を維持しているように見えるが、同時に測定していた蛍光量の時間変化 (図 4.10) を見れば分かるように、MOT は 2 日程度で見えなくなってしまった。

その原因は、同時に測定していたローディングレートの時間変化のグラフ (図 4.11) を見ればわかる。

ローディングレートがどんどん小さくなっている。これから、ルビジウムが不足していたことが分かる。ルビジウムは真空槽の壁面に吸着するため、最初はルビジウムが十分でも時間経過と共に減少していく。これより、真空槽内のルビジ

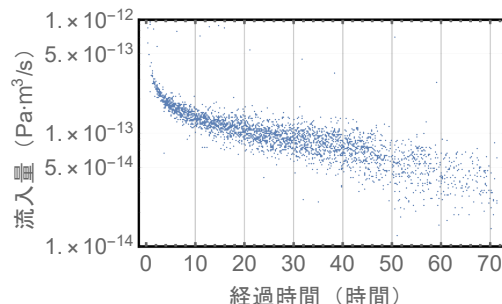
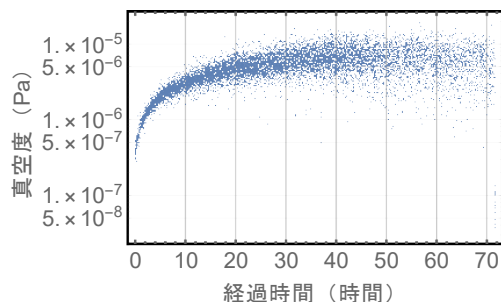


図 4.8: 真空度の時間変化 (1 回目)

図 4.9: 流入量の時間変化 (1 回目)

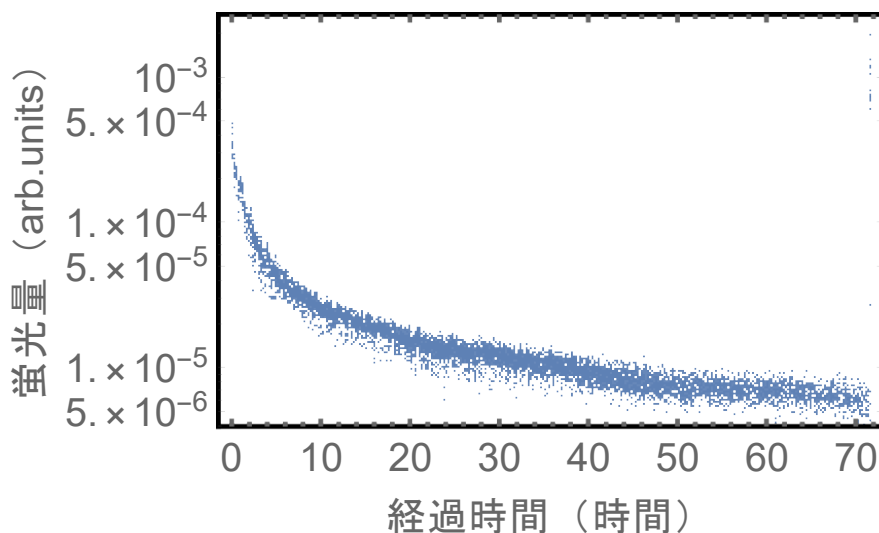


図 4.10: 蛍光量の時間変化

ウムの量を増やしてもう一度測定する。その結果が図 4.12 と図 4.13 である。

MOT が消えることはなかったが、カメラの性能の限界である、 10^{-5} Pa に数日で到達してしまった。これでは真空度を正しく測定することができない。

4.5 まとめと考察

質量分析器を使用していた測定では MOT が消えることなく見え続けたが、質量分析器を使用していない最初の測定では数日で MOT が消えてしまった。これは、最初の測定は質量分析器のフィラメントによって真空引きされてしまったためと考えられる。石英ガラスの実験のときよりも、気体の流入量が小さくなった

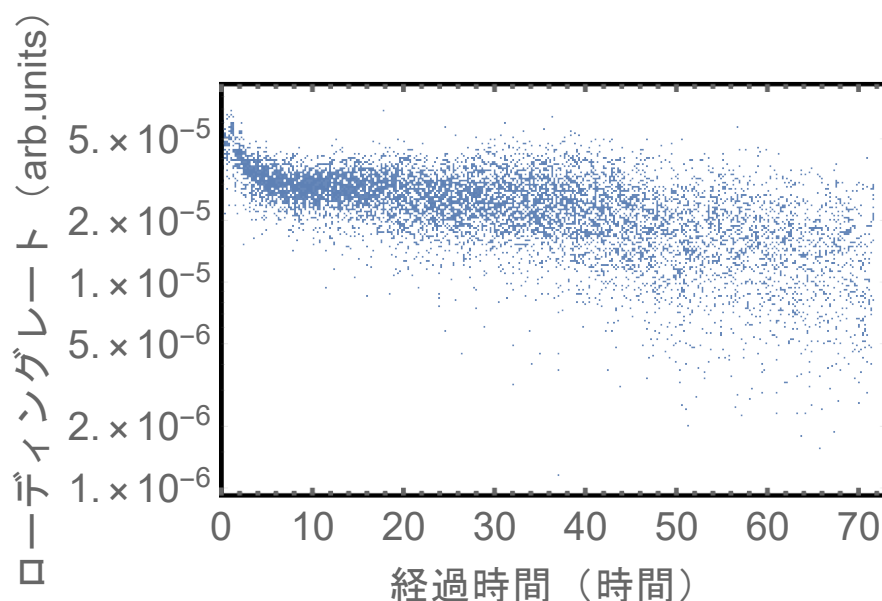


図 4.11: ローディングレートの時間変化

ため、質量分析器による真空引きの影響が大きくなったと考えられる。

最後の測定で、数日でカメラの限界である真空度に達してしまった原因を考察する。まず候補として挙げられるのは、NEG がうまく働いていなかった可能性がある。NEG の周りに様々な原子が吸着してしまい、うまく気体を排気できなかった可能性がある。次に、ルビジウムの量が適切でなかった可能性がある。1 度目の測定ではルビジウムが不足していると判断したため、MOT 領域のルビジウム量を増加させたが、その際に真空槽の内壁にルビジウムが吸着しすぎてしまい、ルビジウムが過多になってしまった可能性がある。

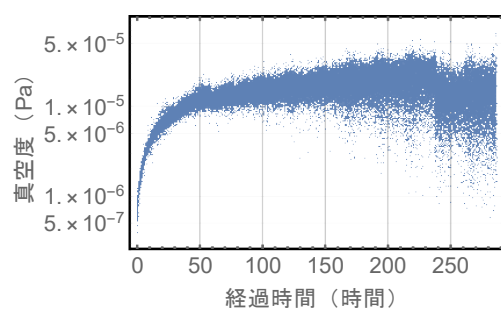


図 4.12: 真空度の時間変化 (2 回目)

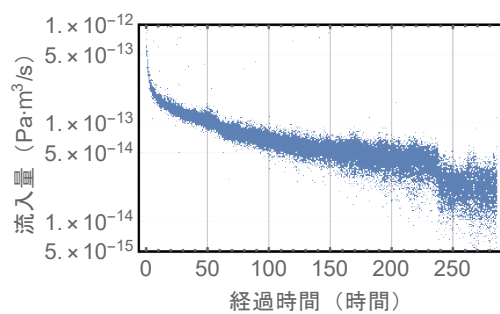


図 4.13: 流入量の時間変化 (2 回目)

第5章 まとめと今後の展望

5.1 まとめ

石英ガラスを使用した真空装置での実験では、過去の実験から実験系を改善し、流入量の計算も最適化することで、ヘリウムの流入量を正しく評価することができた。そして、NEGを封入した真空装置の真空度悪化の主要因がヘリウムであることが確認できた。

その結果を受けて、ヘリウムの流入しにくいコバールガラスを使用した真空装置での実験も行った。しかし、こちらの実験はルビジウムの量が適切でないなどの要因によって、予想では、 10^{-5} Pa 以下の真空度が2ヶ月以上保たれ、MOTがその間中維持できるはずであったが、実際には1週間程度で 10^{-5} Pa に到達してしまい、期待する結果が得られなかった。

5.2 今後の展望

コバールガラスでの実験における改善策として考えられるのは、

1. ルビジウムの量を適切に調節する
2. NEGを再アクティベーションする

などである。なお、ルビジウムの量を適切に調節する方法としては、ルビジウムのバルブを開いたまま、ルビジウム源を適切な温度で冷やす方法が考えられる。

関連図書

- [1] E. L. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu, and D. E. Pritchard. Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure. *Physical Review Letters*, 59:2631–2634, December 1987.
- [2] S. M. Dickerson, J. M. Hogan, A. Sugarbaker, D. M. S. Johnson, and M. A. Kasevich. Multiaxis Inertial Sensing with Long-Time Point Source Atom Interferometry. *Physical Review Letters*, 111(8):083001, August 2013.
- [3] D. Savoie, M. Altorio, B. Fang, L. A. Sidorenkov, R. Geiger, and A. Landragin. Interleaved atom interferometry for high-sensitivity inertial measurements. *Science Advances*, 4(12), December 2018.
- [4] R. Wynands and S. Weyers. Atomic fountain clocks. *Metrologia*, 42:S64–S79, June 2005.
- [5] J.A. Rushton, M. Aldous and M.D. Himsworth. The Feasibility of a Fully Miniaturized Magneto-Optical Trap for Portable Ultracold Quantum Technology. *Review of Scientific Instruments*, 85(12):121501, December 2014.
- [6] C. C. Nshii, M. Vangeleyn, J. P. Cotter, P. F. Griffin, E. A. Hinds, C. N. Ironside, P. See, A. G. Sinclair, E. Riis, and A. S. Arnold. A surface-patterned chip as a strong source of ultracold atoms for quantum technologies. *Nature Nanotechnology*, 8:321–324, May 2013.
- [7] J.J. Arlt, O. Marago, S. Webster, S. Hopkins and C.J. Foot. A pyramidal magneto-optical trap as a source of slow atoms. *Optics Communications*, 157:303–309, December 1998.
- [8] 小田拓実. Magneto-optical trapping without active vacuum pumping. *Master's thesis*, 東京工業大学, 2019.
- [9] Paolo Manini. Non Evaporable Getter (NEG) Pumps: a Route to UHV-XHV. *AIP Conference Proceedings*, 1149, 1138 (2009)

- [10] J. S. Masaryk and R. M. Fulrath. Diffusivity of helium in fused silica. *Journal of Applied Physics*, 59:1198–1202, August 1973.
- [11] V. O. Altemose. Helium Diffusion through Glass. *Journal of Applied Physics*, 32:1309– 1316, July 1961.
- [12] W. A. Rogers, R. S. Buritz, and D. Alpert. Diffusion Coefficient, Solubility, and Permeability for Helium in Glass. *Journal of Applied Physics*, 25:868–875, July 1954.
- [13] H. F.-W. Sadrozinski. GLAST, a Gamma-Ray Large Area Space Telescope. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 466:292–299, July 2001.
- [14] T. Arpornthip, C. A. Sackett and K. J. Hughes. Vacuum-pressure measurement using a magneto-optical trap. *PHYSICAL REVIEW A*, 85(3):033420, March 2012.
- [15] 渡辺文夫. 封止残留ガス分析計を用いた新しいガス放出速度測定法. 真空 51(10), 647-652, 2008-10-20.

謝辞

本卒業論文は、私が上妻研究室に所属してから1年間の研究成果をまとめたものです。本研究を行っていく過程で、多くの方々の助けをいただきました。皆様のおかげでこの卒業論文を書き上げることができました。この場を借りて感謝の意を述べさせていただきます。

指導教官である上妻幹旺教授には、この1年間大変お世話になりました。ミーティングの際に私の理解が不足していた点や問題点を指摘してくださり、わかりやすく教えていただきました。また、発表練習などにも付き合ってくださいました。ありがとうございました。

井上遼太郎特任准教は、私が悩んでいるときに声をかけてくださり、たくさんの的確な助言を頂きました。また、発表練習などにも付き合ってくださいました。ありがとうございました。

ミランダ・マルティン特任助教は、ミーティングの際に、私の理解が不足している点を指摘していただきました。ありがとうございました。

佐藤智哉特任助教は、ミーティングのときや熱心に実験を行っている姿を見て、とても刺激を受けました。ありがとうございました。

博士3年の細谷俊之さんには、実験の基礎を教えてくださいました。また、私が実験をしているときに声をかけてくださり、助言をいただきました。ありがとうございました。

博士3年の宮澤裕貴さんは、本を紹介していただいたり、質問に答えていただいたりと、多く助けていただきました。ありがとうございました。

博士1年の小田拓実さんは、共同実験者としてたくさんのことを教わったり、たくさんのお話を助言していただきました。また、発表資料を見ていただいたり、発表の仕方なども教わりました。ありがとうございました。

修士2年の上田剛生さんは、夜遅くまで実験をしている姿を見てとても刺激を受けました。また、よく話しかけていただき、心の支えになりました。ありがとうございました。

修士2年の松井宏樹さんは、朝早くから夜遅くまで研究を行っている姿を見て大変刺激を受けました。ありがとうございました。

修士2年の長尾胡桃子さんは、一緒に実験する機会はありませんでしたが、よ

く話しかけていただきました。ありがとうございました。

修士1年の高梨健太さんには、実験の基礎を教えてくださいました。また、よく話しかけていただきました。ありがとうございました。

修士1年の谷口建人さんは、前期の実験を共同で行いました。夜遅くまで研究を行い、更には身体まで鍛えるその文武両道さには大変刺激を受けました。ありがとうございました。

修士1年の久保直人さんは、前期の実験を共同で行いました。また、隣の席で熱心に研究をしている姿に刺激を受けました。ありがとうございました。

同期の松本諒也君とは、他愛もない雑談をしたり、一緒に昼食を食べたりと多くの時間を過ごし、お互いに励まし合いながら楽しく1年間を過ごすことができました。ありがとうございました。

最後に、学士課程の4年間、経済的支援と精神的支援をしてくれた家族に感謝します。本当にありがとうございました。