

## 1 実験条件

実験日時 2010（平成 22）年 5 月 27 日木曜日 午後 1 時～午後 4 時

天気 曇

気圧・気温・湿度 省略

## 2 実験の目的

真空ポンプの原理およびその利用について理解し、実際に真空環境を再現しイオン分光における残留ガスの質量分析の原理を学ぶ。それを通して分光評価について誤差の分析を行うことを目的とする。

## 3 実験の原理

まず真空技術について述べる。真空状態を表すのには気体圧力を用い、Pa、Torr (mmHg)、気圧、kg 重/cm<sup>2</sup>などの単位がある。各単位間の換算は、1Pa=7,5006 × 10<sup>-5</sup>Torr=9,8692 × 10<sup>-6</sup> 気圧=1.01972 × 10<sup>-5</sup>kg 重/cm<sup>2</sup>である。

真空環境を作るポンプは、大きく分けて大気圧から働く補助ポンプと、ある程度真空になってから使用する高真空ポンプの 2 種類がある。前者はローターを回転させて空気を抜く回転ポンプが、後者は高速回転した風車で気体粒子を吸い込むターボ分子ポンプが代表的である。他にも後者にはチタンイオンで吸着するスパッタイオンポンプ、多孔質の活性炭で吸着するソーブションポンプ、極低温で気体を吸い込むクライオポンプがある。

次にイオン分光の原理について述べる。実験装置を図 1 に示す。左側のイオン発生装置で生じた電子は加速電圧を受けて加速し、スリットから飛び出す。電子は原則直進するが、外部から磁界を与えることによって  $F = qv \times B$  なるローレンツ力を受け円運動する。これを利用して電子の軌道を調整し、イオン検出部に設置したスリットを通るまで磁界 B を変化させる。円運動する電子について次の運動方程式が成り立つ。

$$qvB = m \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow r = \frac{mv}{qB} \quad (2)$$

さらに電子を加速する際のエネルギー保存則が成り立ち、

$$qV = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

これらをまとめると

$$\frac{m}{q} = 4.8 \times 10^{-5} \left( \frac{r^2 B^2}{V} \right) \quad (4)$$

となる。ただし式??では V[V]：加速電圧、B[G]：磁束密度、r[cm]：円軌道半径、m：質量数、q：イオンの価数とした。

この式を用いれば、質量数の分かっているガスを測定することで円軌道半径が分かり、逆に円軌道半径が分かれば質量数未知のガスを測定することができる。実験では V 一定で B を変化させながらイオン検出部で得られたスペクトルのグラフを得、そこから質量数を求める。

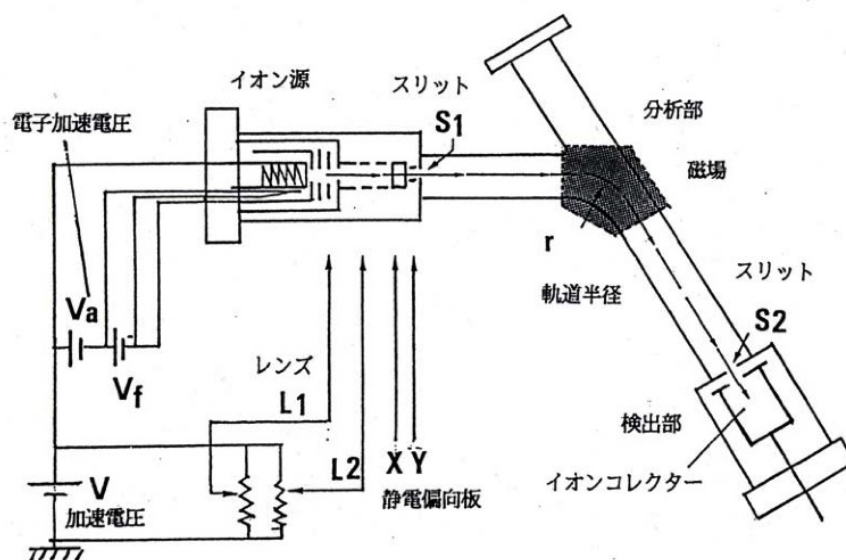


図1 実験装置

分解能は検出部で特定のイオンを区別する能力のことで、電気素量  $e$  当たりの原子質量を  $M$  とすれば、

$$C = \frac{M}{\Delta M} \quad (5)$$

と表される。この実験では  $\Delta M$  をピークの高さの 10% の位置の質量をもつ  $M$  の範囲とするので、高い方を  $M_1$ 、低い方を  $M_2$  とすれば、

$$C = \frac{M}{M_1 - M_2} = \frac{B^2}{B_1^2 - B_2^2} \quad (6)$$

ただし  $B$ 、 $B_1$ 、 $B_2$  はそれぞれ中心及び 10% の高さを示す磁束密度の値である。

## 4 使用器具及び装置

- イオン発生装置
- 加速電圧発生装置
- イオン検出部
- セクター型磁石
- レンズ
- 真空ポンプ（油回転ポンプ・ターボ分子ポンプ）
- グラフプロッター
- 筆記用具・グラフ用紙・実験ノート・カメラ

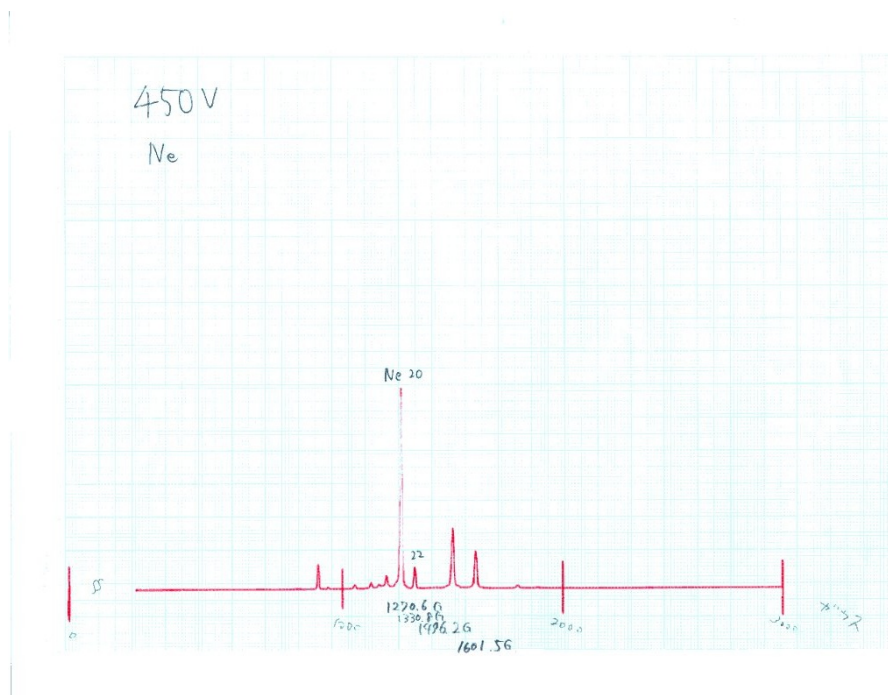


図2 Ne ガス-加速電圧 450V

## 5 実験結果

Ne ガスを注入し、加速電圧を 450V から 1050V まで 100V 刻みで変化させた場合のスペクトルを図 2 から図 8 に示す。

次に Ne ガスを抜き、不明なガスを使って同様の測定を行った場合のスペクトルを図 9 から図 15 に示す。

最後に、残留ガスを加速電圧 850V に設定し測定した場合のスペクトルを図 16 に示す。

## 6 検討

- (1) 実験結果のグラフよりピークを読み取ったところ、表 1 のようになった。
- (2) (1) より  $^{20}\text{Ne}$  と  $^{22}\text{Ne}$  それぞれに対して  $V - B^2$  グラフを描くと図 17 および図 18 のようになった。図より最小二乗法を用いて回帰直線の傾きと相関係数を求め、その直線の y 切片、すなわちオフセットと、回帰直線が原点を通る場合の傾きの値から  $r$  を求めたものを表 2 にまとめる。

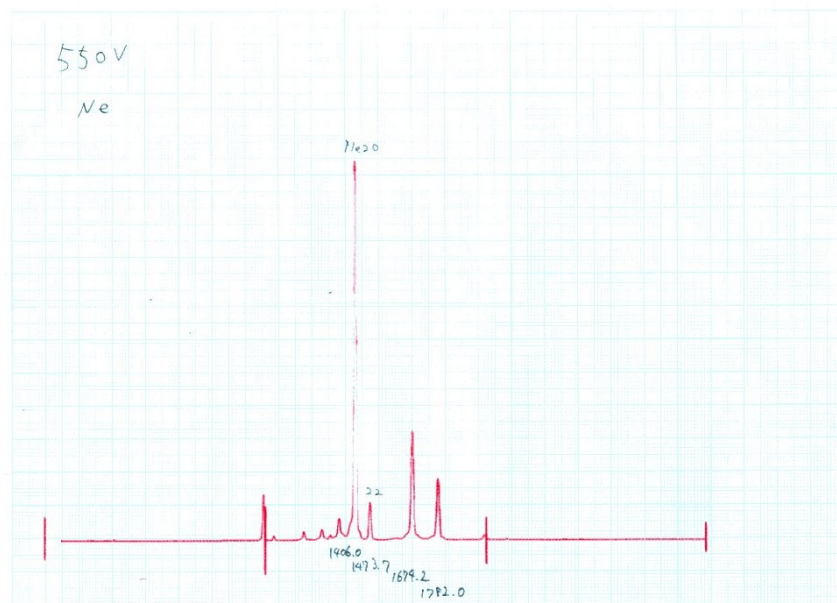


図3 Ne ガス-加速電圧 550V

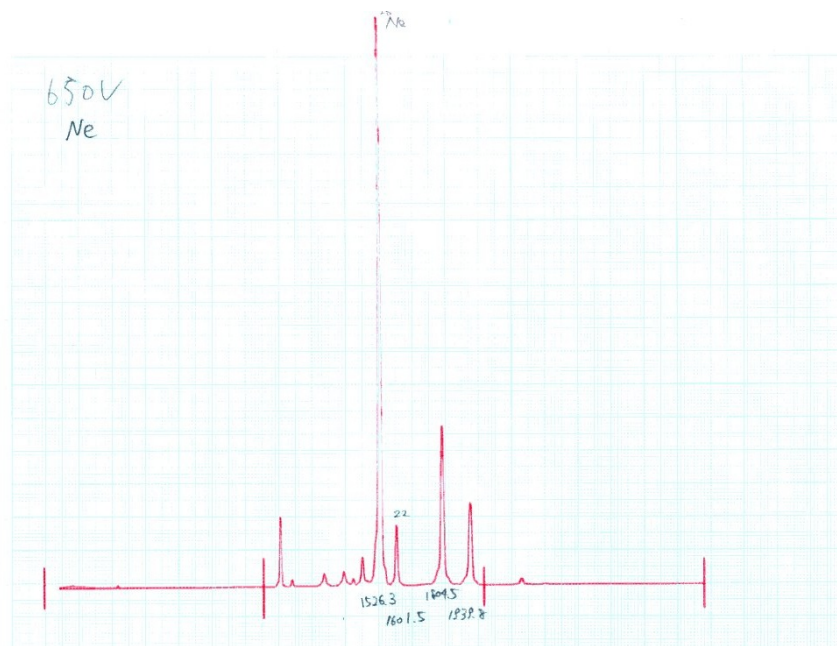


図4 Ne ガス-加速電圧 650V

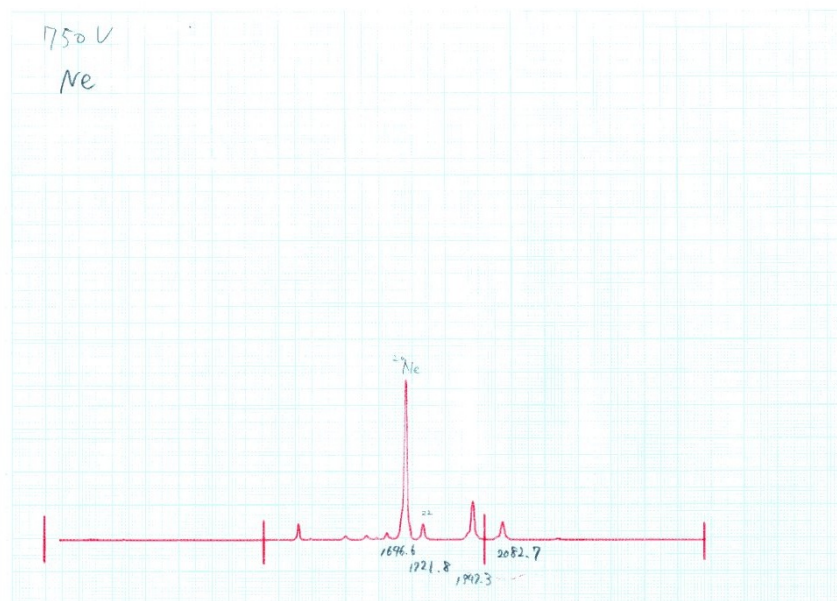


図5 Neガス-加速電圧 750V

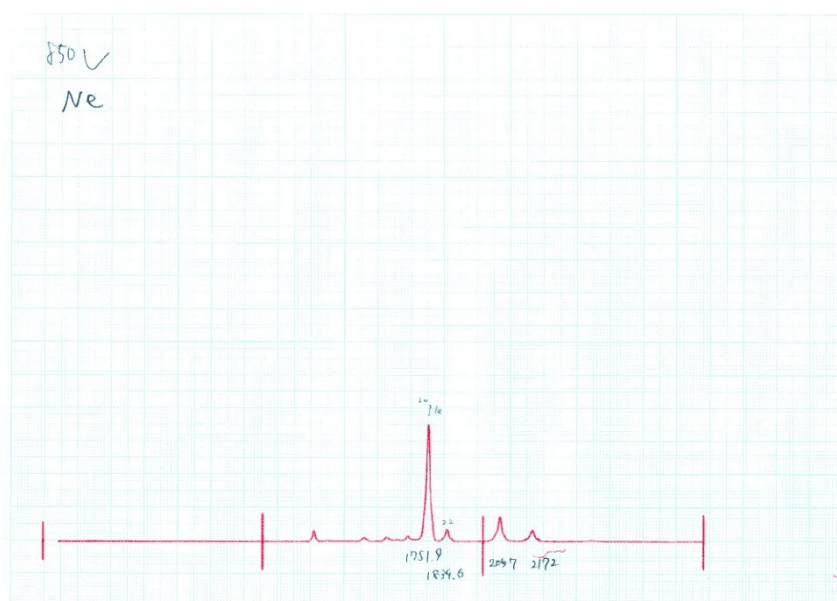


図6 Neガス-加速電圧 850V



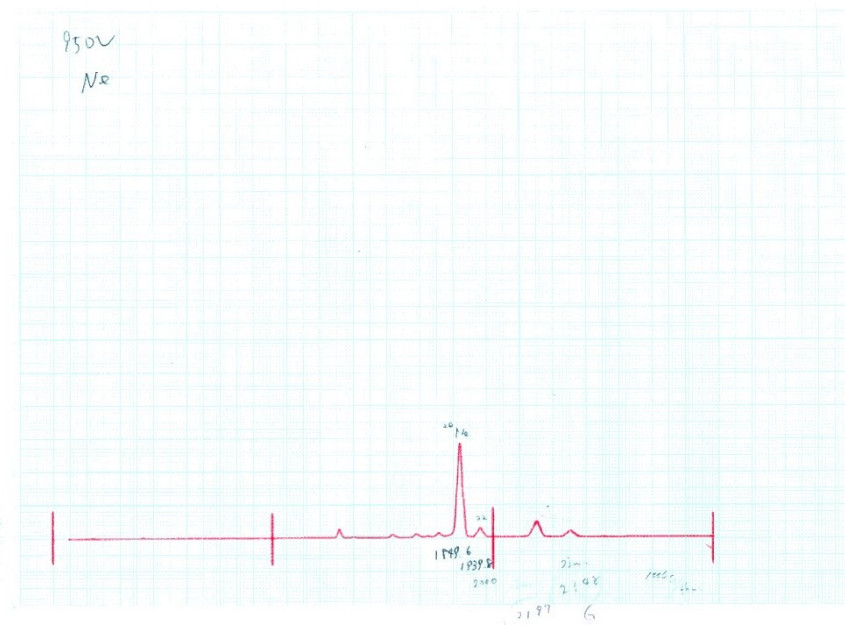


図7 Ne ガス-加速電圧 950V

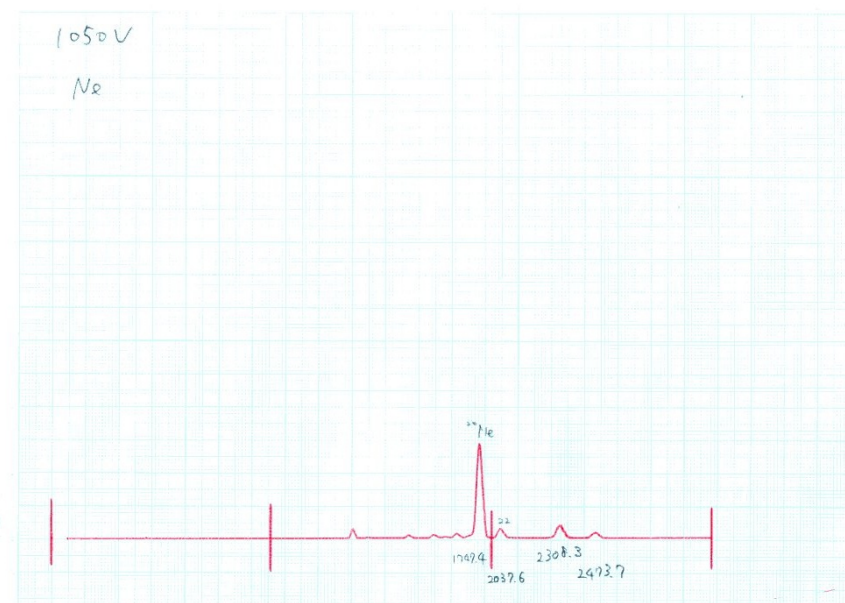


図8 Ne ガス-加速電圧 1050V

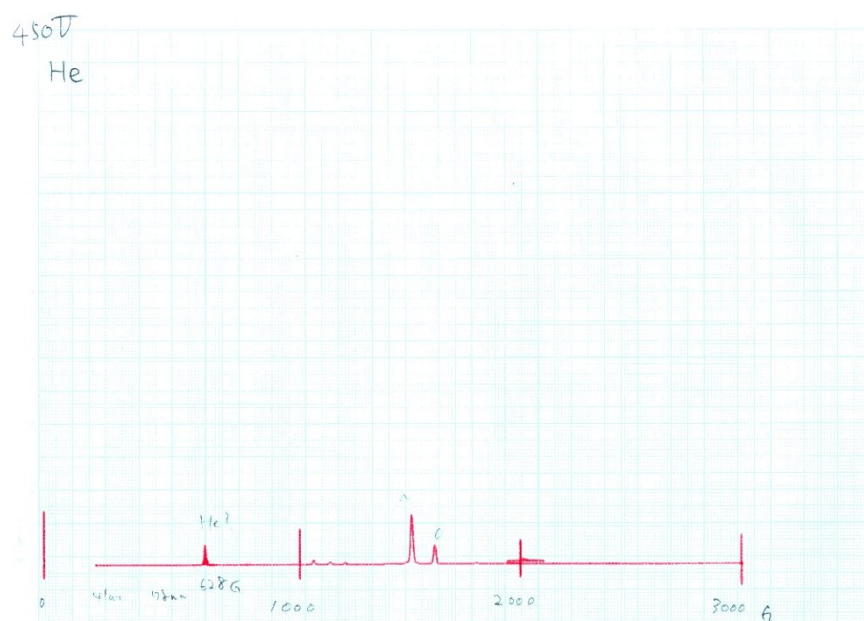


図9 不明ガス-加速電圧 450V

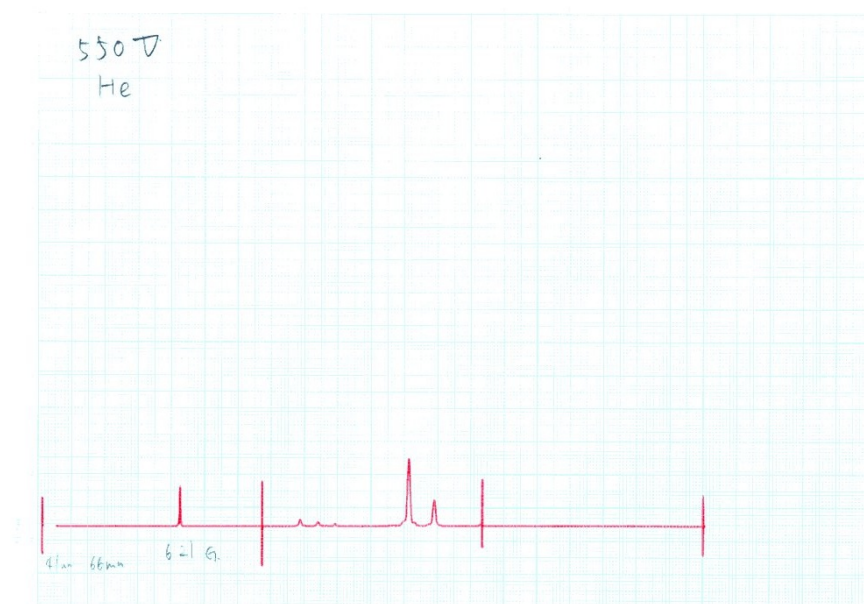


図10 不明ガス-加速電圧 550V

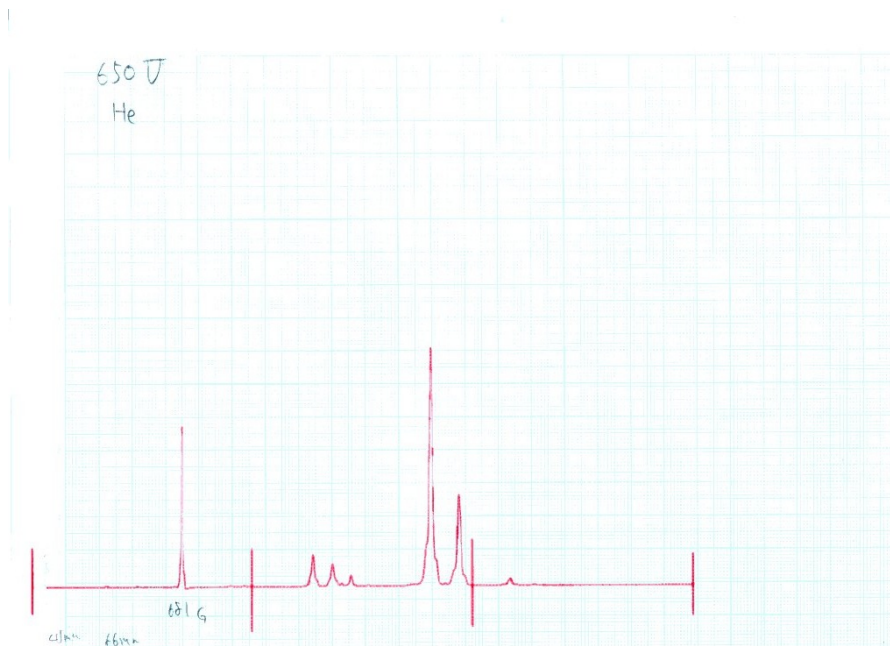


図 11 不明ガス-加速電圧 650V

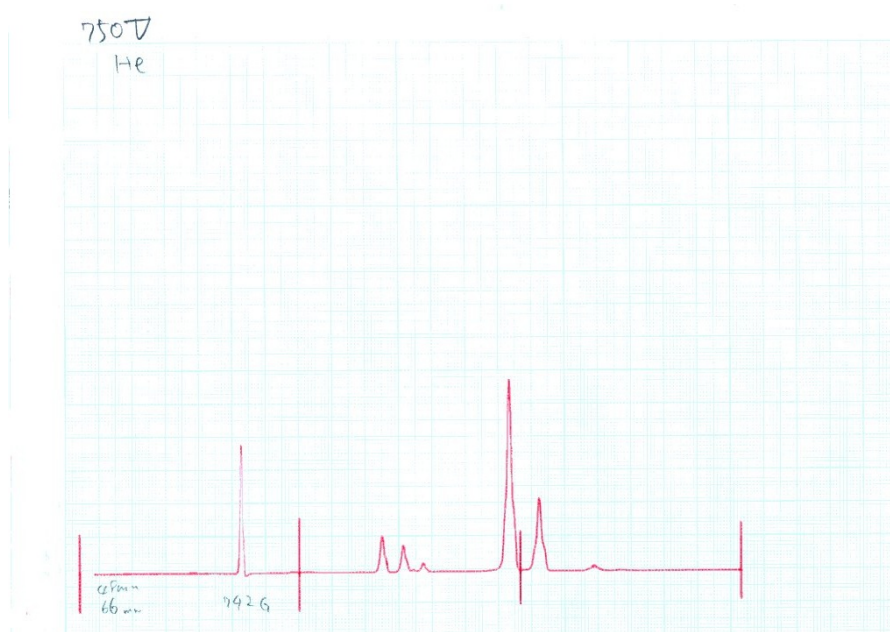


図 12 不明ガス-加速電圧 750V





図 13 不明ガス-加速電圧 850V

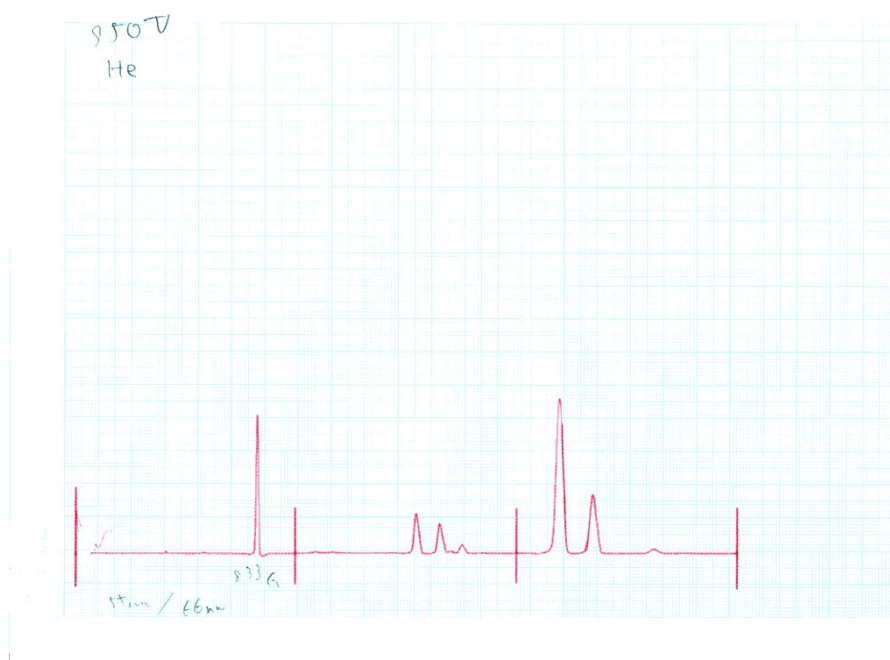


図 14 不明ガス-加速電圧 950V



図 15 不明ガス-加速電圧 1050V

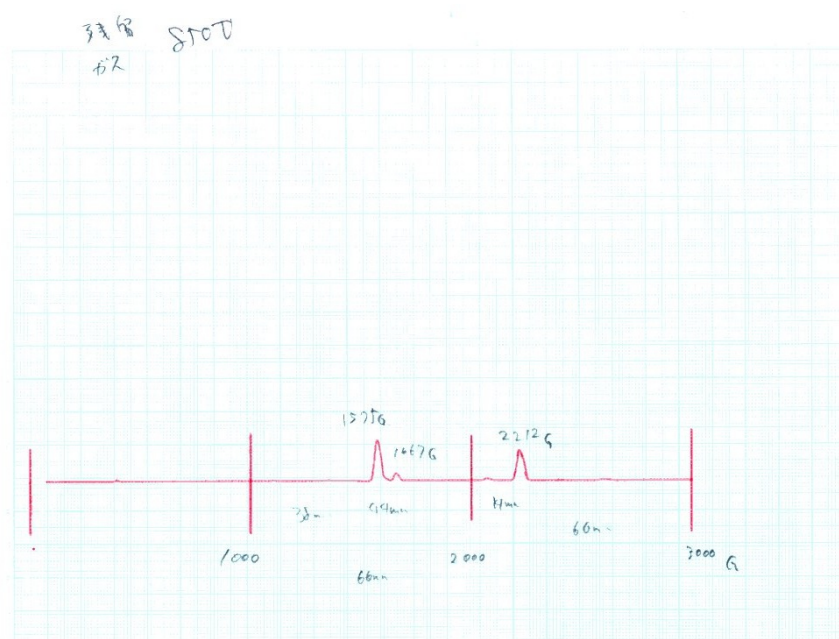


図 16 残留ガス-加速電圧 850V

表 1 20Ne と 22Ne のピーク

	20Ne	22Ne
V[V]	B[G]	B[G]
450	1270.6	1330.8
550	1406	1473.7
650	1526.3	1601.5
750	1646.6	1721.8
850	1751.9	1834.6
950	1849.6	1939.8
1050	1949.4	2037.6

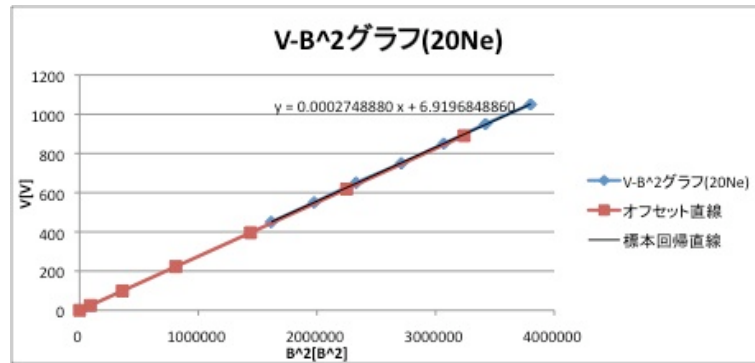


図 17 20Ne  $V - B^2$  グラフ

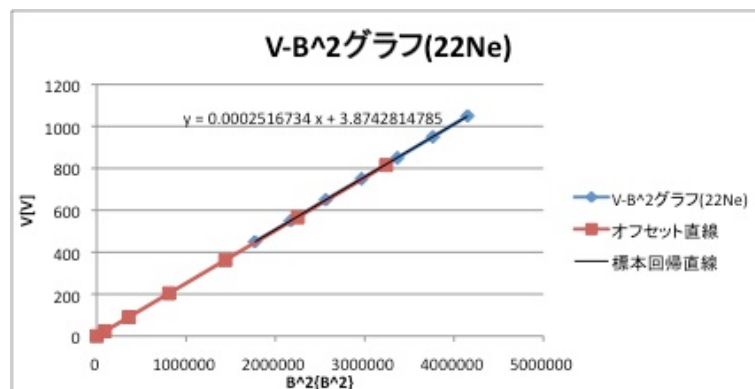


図 18 20Ne  $V - B^2$  グラフ

表 2 20Ne・22Ne の傾き・相関係数・オフセット・r

20Ne		22Ne	
傾き(=V/B <sup>2</sup> )	0.0002748880	傾き(=V/B <sup>2</sup> )	0.0002516734
相関係数	0.9999593489	相関係数	0.9999929696
Vオフセット(y切片)	6.9197	Vオフセット(y切片)	3.8743
r	10.7021804632	r	10.7401260855

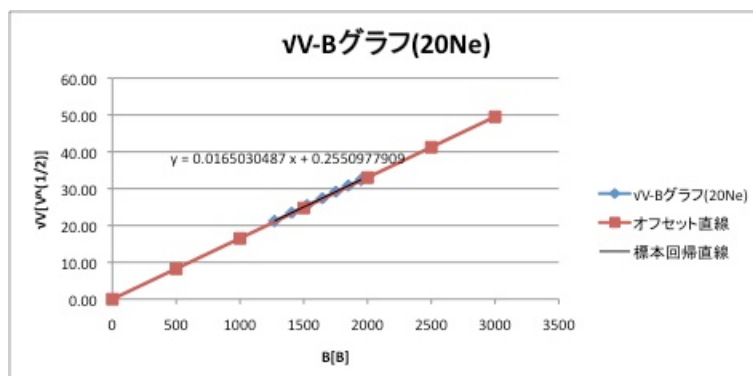


図 19 20Ne  $\sqrt{V} - B$  グラフ

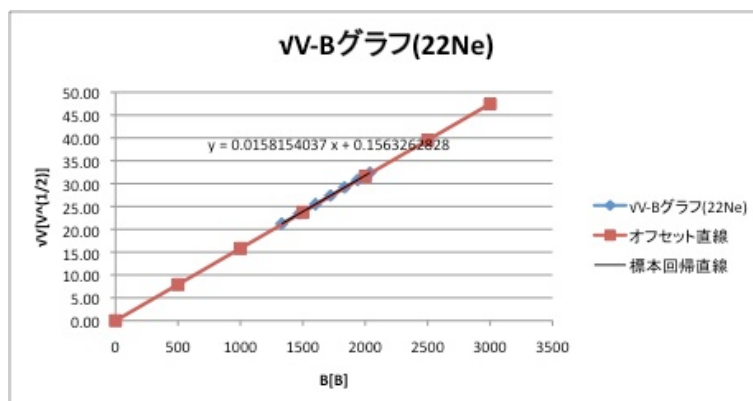


図 20 20Ne  $\sqrt{V} - B$  グラフ

- (3) 20Ne と 22Ne それぞれに対して  $\sqrt{V} - B$  グラフを描くと図 19 および図 20 のようになった。図より最小二乗法を用いて回帰直線の傾きと相関係数を求め、その直線の y 切片、すなわちオフセットと、回帰直線が原点を通る場合の傾きの値から r を求めたものを表 3 にまとめる。
- (4) (2) (3) より V と B のオフセットを比べると、20Ne・22Ne 両方で B の方が大きかった。よって B の方が多くずれており、r の値は誤差が多く含まれていると考えられる。逆に V のオフセットは小さいので、r は確からしいと言える。
- (5) 実験結果のグラフよりピークを読み取ったところ、表 4 のようになった。
- (6) (5) より  $V - B^2$  グラフを描くと図 21 のようになった。図より最小二乗法を用いて回帰直線の傾きと相関係数を求め、その直線の y 切片と、(2) で求めた r を用いて m を求めたものを表 5 にまとめる。



表 3 20Ne・22Ne の傾き・相関係数・オフセット・r

20Ne			22Ne		
傾き( $=\sqrt{V/B}$ )		0.0165030487	傾き( $=\sqrt{V/B}$ )		0.0158154037
相関係数		0.999963197	相関係数		0.999993516
Bオフセット(x切片)		-15.45761608	Bオフセット(x切片)		-9.884432024
r		10.65267213	r		10.70707892

表 4 不明ガスのピーク

	4He	14N	16O
V[V]	B[G]	B[G]	B[G]
450	628	1566	1606
550	621	1667	1787
650	681	1818	1939
750	742	1960	2091
850	787	2008	2227
950	833	2197	2348
1050	864	2303	2470

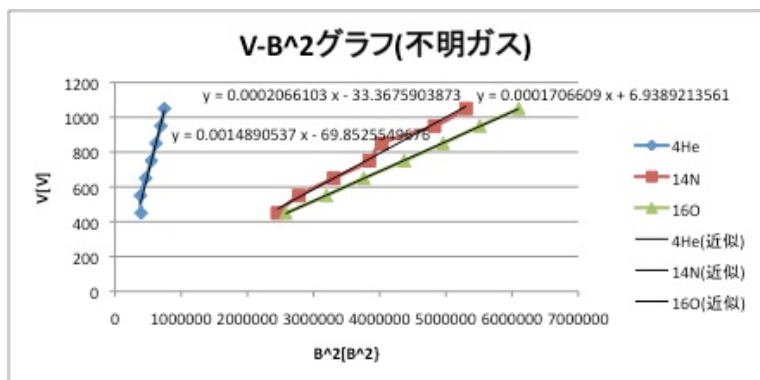


図 21 不明ガス  $V - B^2$  グラフ

各元素の質量数を求めると 3.70、26.7、32.3 となったことから、それぞれ 4He、 $N_2$  分子、 $O_2$  分子と推定される。

- (7)  $\sqrt{V} - B$  グラフを描くと図 22 のようになった。図より最小二乗法を用いて回帰直線の傾きと相関係数を求め、その直線の y 切片と、(2) で求めた r を用いて m を求めたものを表 6 にまとめる。各元素の質量数を求めると 3.31、24.7、32.5 となった。
- (8) (6) (7) より磁束密度 B のオフセットの方が大きく、m の誤差に大きく影響していると考えられる。
- (9) イオン分光による元素分析の実験では、式 (4) より円軌道半径 r が分かれば質量数 m を求めることができる。ただし今回の実験ではイオンの価数 q を 1 としたが、実際は 2 価以上のイオンも含まれていると考えられ、誤差の原因になると考えられる。よって m/q の値で分子のスペクトルを評価するべきであろう。

また磁束密度 B の走査は人間の手でボリュームを調節してスペクトルを記録したが、より精度の高い

表 5 傾き・相関係数・y 切片・m

4He			14N			16O		
傾き(=V/B <sup>2</sup> )		0.0014890537	傾き(=V/B <sup>2</sup> )		0.0002066103	傾き(=V/B <sup>2</sup> )		0.0001706609
相関係数		0.986089929	相関係数		0.993524631	相関係数		0.999922834
Vオフセット(y切片)		-69.85255497	Vオフセット(y切片)		-33.36759039	Vオフセット(y切片)		6.938921356
m		3.70521904	m		26.70375156	m		32.32884698

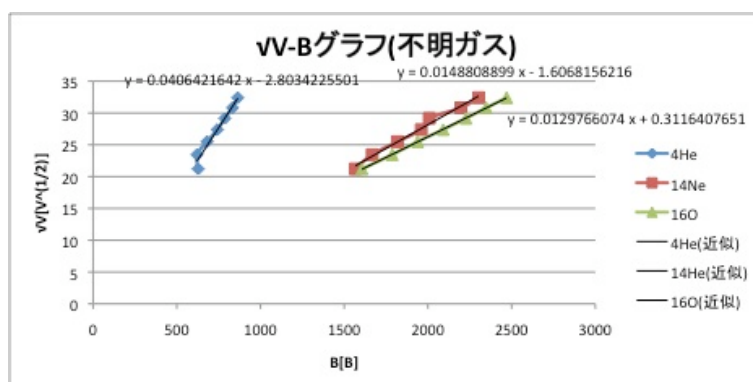
図 22 不明ガス  $\sqrt{V} - B$  グラフ

表 6 傾き・相関係数・y 切片・m

4He			14N			16O		
傾き(=√V/B)		0.0406421642	傾き(=√V/B)		0.0148808899	傾き(=√V/B)		0.0129766074
相関係数		0.980428599	相関係数		0.993558515	相関係数		0.999914515
Bオフセット(x切片)		68.9781808	Bオフセット(x切片)		107.9784631	Bオフセット(x切片)		-24.01558092
m		3.314514834	m		24.72383362	m		32.51256911

結果を得るためには走査のスピードを一定にし、なおかつグラフの目盛りを細かくとる必要があると考えられる。するときれいなスペクトルが得られ、磁束密度 B の測定が精密になる。

- (10) 20Ne のスペクトルの分解能 C について、加速電圧 450V と 1050V の時で比較する。450V の時、 $B=1268.18[G]$ 、 $B_1=1259.09[G]$ 、 $B_2=1254.55[G]$  より、式 (6) を用いて

$$C = \frac{1268.18^2}{1259.09^2 - 1254.55^2} = 140.93 \quad (7)$$

同様に 1050V の時、 $B=1939.85[G]$ 、 $B_1=1969.92[G]$ 、 $B_2=1917.29[G]$  より、 $C=18.394$  となる。よって分解能は加速電圧が高くなるにつれ減少し、より正確にスペクトルを解析できるようになるということが分かる。

- (11) ネオンの同位体の比は加速電圧によって変わらないので、それぞれのスペクトル高さと各加速電圧でまとめると表 7 になる。よって 20Ne と 22Ne の比は  $10.182 : 1 = 0.91 : 0.0894$  となり、理論値の

表 7 20Ne と 22Ne のスペクトルの高さとその比

V	20Neスペクトル高さ[mm]	22Neスペクトル高さ[mm]	20Ne/22Ne
450	60	6	10
550	114	11	10.36363636
650	171.5	18	9.527777778
750	48	4.5	10.66666667
850	34.3	3.2	10.71875
950	28	2.8	10
1050	28	2.8	10
		平均比	10.1824044

	N2	28	O2	32
V[V]	B[G]	m	B[G]	m
450	1496.2	27.447	1601.5	31.44601516
550	1674.2	28.117	1782	31.85495216
650	1804.5	27.639	1939.8	31.93925638
750	1947.3	27.895	2082.7	31.90923687
850	2057	27.465	2172	30.62139441
950	2197	28.032	2348	32.01819366
1050	2308.3	27.998	2473.7	32.15355569
	m平均	27.799	m平均	31.706

図 23 Ne ガス中のネオン以外のスペクトル

0.8847-0.9051 : 0.0920-0.0996 にほとんど一致していると考えられる。

- (12) 図 2 から図 8 でネオン以外に見られるスペクトルを計測すると、図 23 のようになった。質量数 28 前後の分子としては  $N_2$ 、 $CO$ 、 $C_2H_6$ 、 $CO_2$  などが考えられる。また質量数 32 前後の分子としては  $O_2$ 、 $H_2O$  が考えられる。このうち最も可能性が高いのは空気中に多く含まれる  $N_2$  と  $O_2$  であるが、残留ガスのスペクトル解析から装置のリークによって空気が侵入したとは考えられず、使用したガスにこうした気体が予め含まれていた恐れがある。

イオン分光による元素解析は、物理学で最も基礎となる運動方程式の理論に従っていることを自分の手で確認することのできる実験であり、世の中の現象が理論通りに動いていることを実感することができた。さらに精度の良い実験をするために、B の走査速度や加速電圧 V を適切に調節し、未知の元素を解析してみたい。

## 7 結論

1. ポンプは補助ポンプと高真空ポンプの 2 つに分類され、前者は大気圧付近で、後者は中低圧になってから使い分ける必要がある。
2. イオン分光は  $\frac{m}{q} = 4.8 \times 10^{-5} \left( \frac{r^2 B^2}{V} \right)$  にしたがって質量数を求めることができる。ただし r は既知の気体から求める必要がある。
3. 精度の良い実験のためには、 $B \cdot V$  を正確にとること、分解能 C をできるだけ小さくすることが大事である。

## 8 謝辞

最後になったが、実験に協力してくれた班員の5人と、丁寧に指導して下さいった先生方・TAの方々に感謝申し上げたい。

## 9 参考文献

- 実験テキスト「デジタル回路シミュレーション」
- 「大阪大学物理学実験 2008」大阪大学物理教育研究会編 学術図書出版社 第2版第1刷 第2編
- 「真空技術実務読本」中山勝矢著 オーム社 第1版第5刷
- 「付表 F.1 主な分子のマススペクトル」バルザス QMS カタログ
- 「Wikipedia」<http://ja.wikipedia.org/> ネオンの同位体など
- 「 $\text{\LaTeX}$  2 $\epsilon$  美文書作成入門 改訂第4版」奥村晴彦著 技術評論社 第4版第6刷

以上