

物理チャレンジ 2017
実験問題
2017年8月19日（土）

諸注意・実験器具確認	13:50	～	14:00
実験問題にチャレンジ	14:00	～	18:40
実験器具後片付け	18:40	～	18:50

実験問題にチャレンジを始める前に下記の<注意事項>をよく読むこと。

<注意事項>

1. 開始の合図があるまでは、机の上の問題冊子、解答用紙、下書き用紙、実験器具箱を開けてはいけない。
2. 監督者の指示があったら解答用紙の全てのページの所定の箇所にチャレンジ番号と氏名を記入しなさい。
3. チャレンジ開始後、次ページに記載の**注意事項**をまず読むこと。続いて次ページ以降に記載の実験で**使用する器具・部品一覧**により、全ての物品を確認した後、**課題**に取り組むこと。
4. 実験結果や計算結果、式の導出など、採点して欲しい事項は解答用紙の所定の場所に記入すること。下書き用紙は回収・採点しないので、解答はすべて解答用紙に記入すること。
5. 持参した筆記用具と、与えられた実験装置、部品、定規、電卓以外は使用してはならない。
6. 実験中に部品を壊した場合には、1回だけ新しいものと交換できるので、番号札を通路側に出して監督者に申し出ること。2回以上同じ部品を壊した場合には、さらに新品と交換できるが、減点となる。ただし、数には限りがあるので、交換できない場合もある。
7. チャレンジ開始後から17:20まではチャレンジを終了（放棄）することはできない。
8. チャレンジ時間中に気分が悪くなったときやトイレに行きたくなったとき、あるいは質問があるとき、チャレンジを終了するときには、番号札を通路側に出して監督者に知らせること。
9. 終了の合図があれば、解答をやめ、解答用紙を机の上に置き、監督者による回収がおこなわれるまで静かに待つこと。その後、実験器具をもと通りに箱に入れること。ゴミは机の上に1ヵ所に集めておくこと。問題冊子と下書き用紙は持ち帰ってよい。
10. 会場の大気圧の値を監督者が口頭で伝えるので下の欄に書き入れなさい。

大気圧：

hPa

重要な注意事項

1. この実験課題では、赤色レーザーを使用する。レーザーの強力な光は容易に目に取り返しのつかないダメージをあたえることがある。本課題で用いるレーザーは小出力であり、さらに出力部分には減光フィルタを取り付け、出力が1 mW 未満（クラス1 レベル）となるように作られているが、**決して直接レーザー光をのぞき込んではいけない**。またレーザー装置の出力部分の減光フィルタがはがれ落ちている場合は監督者に伝え、修理してもらうこと。
2. この実験課題で用いる水素放電発光装置は高圧電源を使用している。電源はアルミニウムケースで覆われているので安全であるが、ケースを開ける、ケースを濡らす、濡れた手で操作する、あるいは開口部から指などを入れたりすると**感電の危険**がある。決してこれらのことは行わないこと。
3. この実験課題では加熱剤を使ってビーカーの水を加熱する。**やけどの恐れ**があるのでビーカーを倒したりしないよう十分注意すること。また使用後の加熱剤の扱いにはアイストングを使用すること。

物理量の記法に関する注意事項

物理量の値は、単位とする大きさを表す記号と、その何倍であるかを表す数値の積として表記される。今回の物理チャレンジの実験課題では、国際単位(SI)推奨の記法に従い、以下のような記法を用いる。

物理量の値を表すときには単位をつける。この時、単位をカッコなどで囲わない。例えば、「自転車の速さは $v = 18 \text{ m/s}$ である。」と書き、 $v = 18 (\text{m/s})$ とか $v = 18 [\text{m/s}]$ などとは書かない。表など、多くの数字を書くときにいちいち単位を書くのは煩わしい。この場合は以下のようにする。

単位 U で表した物理量 X の数値を表やグラフに表す場合、欄や座標軸には、 X/U と記し、そこに現れる数値が単位 U で表した物理量 X の数値であることを明示する。例えば、表やグラフに電流 I を mA 単位で表したい場合には、見出し欄や座標軸に I/mA と書けばよい。なお、一般に物理量を表す記号は斜体(イタリック体)、単位を表す記号は立体(ローマン体)で表記する。

実験で使用する器具・部品一覧

机上の物品を点検し、表の後にある写真も参考にしながら、以下の器具・部品があることを確かめなさい。すべて袋を開けず、留め具を外さずに確認すること。方眼紙 (A3, A4), 黒色上質紙, バケツ, 水 (2 L ペットボトル) は箱の外にある。また, 氷は必要時に求めに応じて配るので当初配布されていない。

部品が不足していることがわかった場合はプラカードを使って監督者を呼ぶこと。

なお, 体積の単位リットルを表す記号として L を用いる。1 L = 1000 cm³ = 10⁻³ m³, 1 mL = 1 cm³ = 10⁻⁶ m³ である。

表 1 実験で使用する器具・部品等一覧

	品名	内容	数量	包装 ※	検
1	水素放電発光装置	押しボタンスイッチ付アルミシャーシ, 電池・高圧電源内蔵	1 台		
2	赤色レーザー光源	木製台上, スイッチ付き電池ボックス, 減光フィルタ付	1 台		
3	50 cm 直定規	アクリル製	1 本		
4	L 型アクリル台	W50 mm×(D50 mm+H150 mm)	2 個		
5	50 mm 角木板	50 mm×50 mm×10 mm	2 枚	袋 A	
6	回折シート	500 lines/mm 枠付	1 個	袋 A	
7	回折シート	1000 lines/mm 枠付	1 個	袋 A	
8	手元押しボタンスイッチ	コネクタ付	1 個		
9	遮光用黒布	1 m×1 m	1 枚		
10	A3 方眼紙 ※1		2 枚		
11	A4 方眼紙 ※1		5 枚		
12	A4 黒色上質紙 ※1		1 枚		
13	半周分度器 ※1	分度器が印刷された A4 用紙	1 枚		
14	電子はかり	キッチンスケール, 最大秤量 2 kg, 単 4 電池 2 個入	1 台		
15	デジタル温度計	キッチン温度計, ボタン電池内蔵	1 本		
16	ビーカー	ガラスビーカー, 500 mL*	1 個		
17	紙コップ	ビーカーの箱の中にある	2 個		
18	工業用注射器	10 mL	1 個		
19	木柱	30 mm×30 mm×179 mm	2 本	袋 B	
20	注射器保持板	38 mm×118 mm×10 mm (穴付)	1 枚	袋 B	
21	押し板	30 mm×200 mm×10 mm	1 枚	袋 B	
22	スペーサ用木板 (30 mm 厚)	30 mm×30 mm×30 mm	2 枚	袋 B	
23	同 (10 mm 厚)	30 mm×30 mm×10 mm	4 枚	袋 B	

24	同 (5 mm 厚)	30 mm×30 mm×5 mm	2 枚	袋 B	
25	同 (3 mm 厚)	30 mm×30 mm×3 mm	2 枚	袋 B	
26	同 (2 mm 厚)	30 mm×30 mm×2 mm	2 枚	袋 B	
27	アルミフレーム	長さ 330 mm, L 型金具・注射器保持板付, 両端に M5 ねじ 2 個付属	1 個		
28	ベース木板	200 mm×200 mm×5 mm, 裏面ゴム足付	1 枚		
29	滑車付木板	40 mm×90 mm×10 mm	1 個		
30	LED ライト		1 個	袋 D	
31	ミラー付き直定規	15 cm, 樹脂ミラー付き	1 本	袋 D	
32	アイストング		1 個	袋 D	
33	攪拌用スプーン		1 本	袋 D	
34	ベローズピペット	30 mL, 長さ 250 mm	1 本		
35	ドライバ	プラス, 2 番	1 本		
36	はさみ		1 個		
37	糸	約 50 cm	1 本	袋 C	
38	ボタン足	台座直径 10 mm	1 個	袋 C	
39	おもり	赤・ナス型 4 号	1 個	袋 C	
40	おもり	ナス型 0.5 号	1 個	袋 C	
41	銅線	直径 1.2 mm, 長さ 7 cm と 20 cm	2 本	袋 C	
42	注射器キャップ		1 個	袋 C	
43	加熱剤	EDYC スーパーヒート 10 g	2 個		
44	紙ふきん		1 枚		
45	両面テープ		1 個		
46	粘着テープ		1 個		
47	バケツ ※1	内容積約 5 L	1 個		
48	水 ※1	2 L, ペットボトル入	1 本		
49	氷 ※2	約 700 g, アルミクーラーバッグ入	1 袋		
50	単 3 乾電池 ※3	レーザー用, LED 用	3 個	袋 D	

※ 包装欄に袋 A～袋 D と記された物品はポリ袋 (A～D) に入れられている。

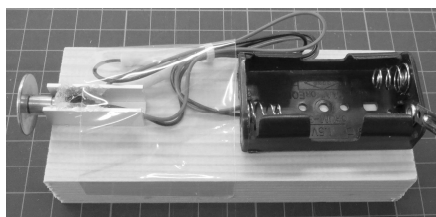
※1 方眼紙 A3, A4, 黒色上質紙, 半周分度器, バケツ, 水 (2 L) は箱の外にある。

※2 氷は予め配布されてはいない。必要時に求めに応じて配る (後述)。

※3 単 3 乾電池は赤色レーザーと LED に使用する。なお, 水素放電発光装置の中の電池は予め装着してある。



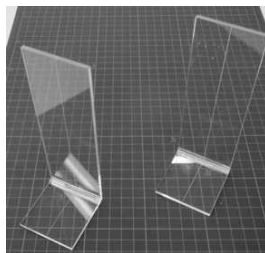
1. 水素放電発光装置
(黒いアルミシャーシ)



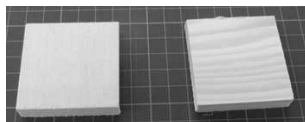
2. 赤色レーザー光源
(木製台上, 電池ボックス, 減光フィルタ (左端) 付き)



3. 50 cm 直定規



4. L型アクリル台
(2個)



5. 50mm 角木板
(50 mm×50 mm×10 mm)



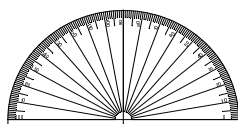
6, 7. 回折シート
(2種) 各1枚
※枠のデザインは写真と異なる場合がある。500 lines/mmと1000 lines/mmの表記を確認すること。



8. 手元押しボタン
スイッチ

<画像無し>

9. 遮光用黒布
(1 m×1 m) 1枚
10, 11. 方眼紙
12. 黒色上質紙



13. 半周分度器
(A4) 1枚



14. 電子はかり (箱入り)



15. 温度計
ケース入り



16. ビーカー (500 mL)
箱(左)入り



17. 紙コップ
2個 (ビーカーの箱の中にある)



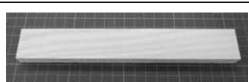
18.工業用注射器
(ケース入り)



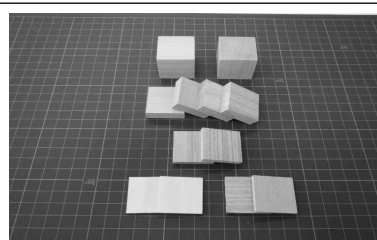
19. 木柱 (2本)



20.注射器保持板



21. 押し板



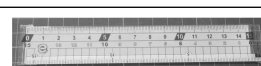
22~26.スペーサ用木板
(30 mm×30 mm)
厚さ : 30 mm, 10 mm, 5 mm,
3 mm, 2 mm



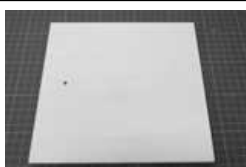
27. アルミフレーム
1個



29. 滑車付き木板



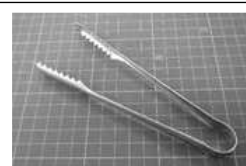
31.ミラー付き直定規
(15 cm)



28. ベース木板
1枚



30. LED ライト



32. アイストング



33. 攪拌用スプーン



34. ベローズピペット



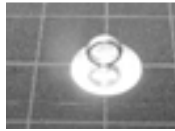
35. ドライバー



36. はさみ



37. 糸



38. ボタン足



39, 40. おもり
41. 銅線



42. 注射器キャップ
(形状が異なる場合がある)



43. 加熱剤 2包



44. 紙ふきん 1枚



45. 両面テープ
1個



46. 粘着テープ
1個



47. バケツ 1個

<画像無し>

48. 水 (2L) 1本

49. 氷 (約 700 g) 1袋

50. 乾電池 (単3) 3個

実験課題 I 水素原子の発光スペクトル

高温の単原子気体はその原子種（元素）に特有な波長を持つ光を放射する。これを原子スペクトル*という。原子の発光は原子核のまわりを運動する電子のエネルギーと深く関わっており、原子スペクトルが離散的であることは、原子核のまわりを回る電子には特定の軌道のみが許されることを意味する。図 1-1 に示すように、電子がエネルギーの高い高励起状態からエネルギーの低い低励起状態に変化（遷移という）する際、状態間のエネルギー差 ΔE は放射される光子のエネルギーに等しく、放射される光の振動数 ν 、波長 λ は次の関係式で表される。ここで c は光速 ($c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$)、 h はプランク定数 ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$) である。

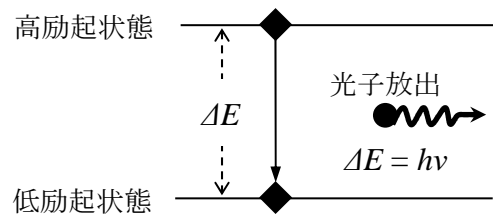


図 1-1

$$\Delta E = h\nu = hc/\lambda \quad (1-1)$$

実験課題 I では水素放電管を使って水素原子の発光スペクトルを測定し、水素原子の電子軌道に関する考察を行うことを目的とする。

光がどのような波長の光から成り立っているかを調べることを分光という。原子スペクトルを分光すると、いくつかの幅の狭い明るい線（輝線）が観測されることになる。本実験での分光は回折格子を用いて行う。**課題 I - 1** では、まず単色のレーザー光を使って、回折格子による分光の原理を確認することから始める。次に、**課題 I - 2** でこの回折格子を使って水素原子の発光スペクトルを調べる。

*注意 スペクトル：光の強さを波長によって分けたもの。太陽光のように、いろいろな波長を連続的に含む場合は連続スペクトル、水銀灯のように特定の波長の光が強い場合は線スペクトルという。スペクトルを得るための装置を分光器といい、特定の波長の光が強い場合は縦長の線（輝線）として観測される。原子スペクトルも線スペクトルである。

課題 I - 1 回折格子によるレーザー光の波長測定

1. 実験の目的

回折格子にレーザー光を入射させ、その回折光の方向から、レーザー光の波長を決定する。

2. 実験の原理

(1) 三角比と三角関数

直角三角形は、直角以外の一つの内角が決まれば相似形となる。従って、各辺の長さの比は、直角以外の一つの内角で決まることとなり、この関係を表したのが三角比である。図 1-2 に示す直角三角形の 2 辺の比の値、 b/a 、 c/a 、 b/c 、は内角 θ の大きさだけで定まり、それぞれ θ の正弦、余弦、正接といい、 $\sin \theta$ 、 $\cos \theta$ 、 $\tan \theta$ と表す。

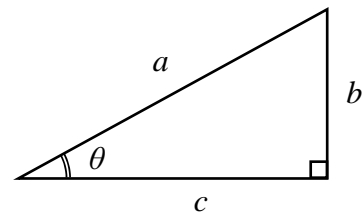


図 1-2

$$\text{正弦: } \sin \theta = \frac{b}{a}, \quad \text{余弦: } \cos \theta = \frac{c}{a}, \quad \text{正接: } \tan \theta = \frac{b}{c}$$

次に、図 1-3 のように xy 座標で原点 O を中心とした半径 r の円を描き、円周上に点 $P(x, y)$ を設ける。このとき、線分 OP と x 軸とのなす角 θ は、 x 軸を基準として反時計回りを正とすると、比

$$\frac{y}{r}, \quad \frac{x}{r}, \quad \frac{y}{x}$$

は θ の値だけで定まり、それぞれ三角比と同様に、

$$\text{正弦: } \sin \theta = \frac{y}{r}, \quad \text{余弦: } \cos \theta = \frac{x}{r},$$

$$\text{正接: } \tan \theta = \frac{y}{x}$$

と表すことができる。これらを θ の三角関数という。

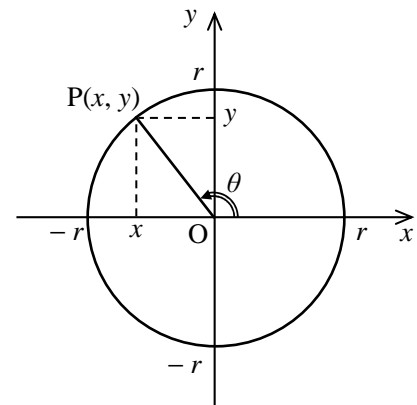


図 1-3

(2) 回折格子

回折格子とは、一定の間隔（格子間隔という）で多数のスリットを並べたものである。ガラス等の透明な物質に細い溝を等間隔に刻んで作られ、溝が 1 mm に 100~1000 本（100~1000 lines/mm、格子間隔が 10^{-5} ~ 10^{-6} m）程度のものである。回折格子の溝の部分は光を乱反射して不透明となり、溝と溝の間の平面部分は光を透過させるスリットの役割を果たす。

図 1-4 のように、格子間隔 d の回折格子に対して垂直（入射角 0° ）に位相の揃った単色光（波長 λ ）を入射すると、光は各スリットを透過した後に回折し、互いに干渉

する。いま、回折格子の面の法線方向となす角 r (回折角という。右折の場合を正とする) の方向に回折した光を考える。このとき、隣り合うスリットを透過した光との間に生じた経路差 ΔL (負の場合もある) が波長の整数倍であれば、波として位相が揃う。この場合、各スリットからの回折光は全て強め合う干渉をし、この向きに強い光を観測する。

$$\text{回折光が強め合う条件} : \Delta L = d \sin r = n \cdot \lambda \quad (n \text{ は整数}) \quad \dots (1-2)$$

一方、この条件を満たさない場合は、各回折光の中には強めあう干渉をするものも、弱めあう干渉をするものも含まれ、結果的にそのような方向の光はほとんど消えてしまう。このように、単色の光ビームを回折格子に入射すると、(1-2)式を満たす特定の方向だけに強い回折光が現れることになる。このとき、整数 $n = \pm 1, n = \pm 2, \dots$ の回折光をそれぞれ 1 次回折光、2 次回折光、 \dots と呼ぶ。また、直進する光 ($n = 0$ に相当する) を 0 次光と呼ぶ場合もある。

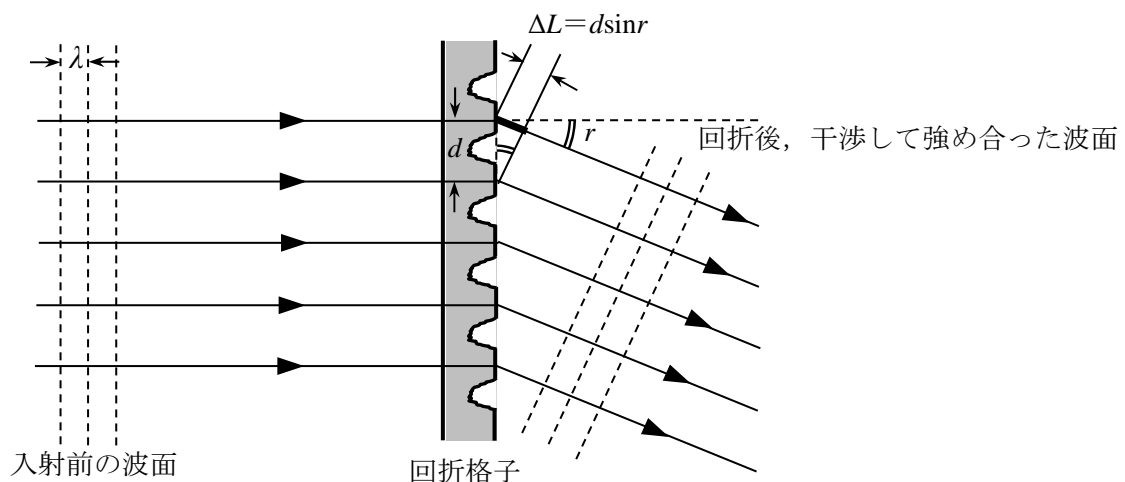


図 1-4

3. 実験で用いる器具

表 1-1 課題 I - 1 で使用する部品・器具

品名	内容	数量
赤色レーザー光源	木製台上, スイッチ付き電池ボックス, 減光フィルタ付	1 台
回折シート	回折格子 500 lines/mm 枠付	1 個
回折シート	回折格子 1000 lines/mm 枠付	1 個

50 mm 角木板	50 mm×50 mm×10 mm	2 枚
A3 方眼紙		2 枚
A4 方眼紙		
A4 黒色上質紙		1 枚
50 cm 直定規	アクリル製	1 本
半周分度器	A4 用紙に印刷	1 枚
遮光用黒布	約 1 m×1 m	1 枚
はさみ		1 個
両面テープ		1 個
粘着テープ		1 個
単 3 乾電池	レーザー用	2 個

⚠ 直接レーザー光をのぞき込んではいけません。

この実験課題では、赤色レーザーを使用する。レーザーの強力な光は容易に目に取り返しのつかないダメージをあたえることがある。本課題で用いるレーザーは小出力であり、さらに出力部分には減光フィルタを取り付け、出力が 1 mW 未満（クラス 1 レベル）となるように作られているが、決して直接レーザー光をのぞき込んではいけません。

4. 実験装置のセットアップ

(1) 回折格子の準備

回折シートは枠付で、溝の本数（lines/mm）は枠に印刷されている。これを図 1-5 のように、木製板の側面に両面テープや粘着テープで固定して使用する。

(2) スクリーンの準備

図 1-6 ように、木製板に 50 cm 直定規を両面テープ等で固定し、さらにその上に適当な形に切った方眼紙を粘着テープ等で貼り、スクリーンとする。

(3) 光源（赤色レーザー光源）の準備と確認

木製台の上に、電池、スイッチ付き電池ボックス、レーザー素子が固定されている。電池ボックスについている金属板はスイッチを兼ねており、これを倒すとレーザーが点灯する。ただし、必要ないときにはスイッチは切っておくこと。レーザー素子の出力部分には金属板と減光フィルタが貼り付けてあり、出力光は 1 mW 未満である（図 1-7）。また出力部の金属板を回すとレンズ位置が変わるのでビームを絞ることができる。ビーム方向が水平に対して上下方向に多少ずれる場合があるので、木製台の下に適当な枚数の紙などをはさんでビーム位置を調整する。

以下の手順でレーザー光源の動作を確認しなさい。

- ・出力部分に減光フィルタの取り付けられた焦点調整用金属板が付いていることを

確認する。もし金属板がはがれ落ちている場合は監督者に伝え、レーザー装置を交換してもらいなさい。これ以降の実験の途中で落ちた場合も同様である。

- ・単3乾電池2個を電池ボックスに正しく入れなさい。
- ・レーザー光源をスクリーンの方向に向けスイッチを倒して、スクリーン上のレーザー光源とほぼ同じ高さにレーザー光が見えることを確認しなさい。
- ・出力部分の金属板を回してビームを細く絞りなさい。

レーザー装置に正しく電池を入れてもレーザーが光らない場合、ビームの上下方向のずれが大きく調整が困難な場合、金属板を回しても光がぼけたままである場合は監督者に伝え、レーザー装置を交換してもらいなさい。



図 1-5

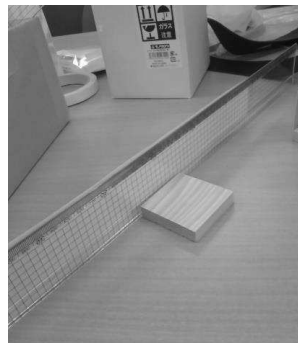


図 1-6



図 1-7

(4) 光源とスクリーンの配置

光源とスクリーンを図 1-8 のように配置する（方眼紙等を台紙に利用してよい）。このとき、スクリーンの面が光軸（レーザー光の経路）と垂直になるように設置する（台紙に軸を設けるとよい）。スクリーンに現れるレーザー光の位置に印をつけて原点とする。

(5) 回折格子の配置

光源とスクリーンの間に回折格子（1000 lines/mm）を配置する。このとき、回折格子の面が光軸と垂直になるように設置する。スクリーンに現れる1次回折光を確認する。回折格子を500 lines/mm に変えて違いを確認する。なお、照明が明るくて回折光を見つけにくい場合には黒い布で覆うなどして工夫すること。

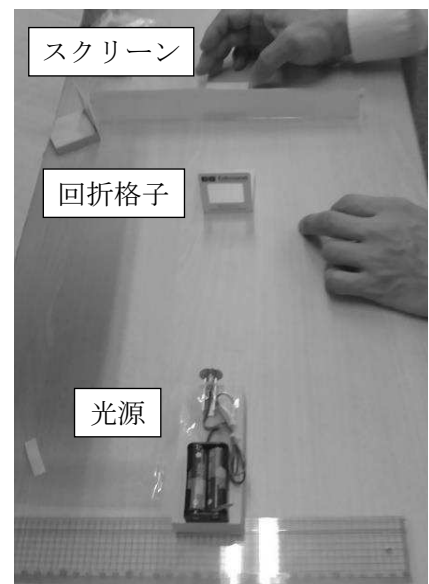


図 1-8

5. 実験の課題

問 1-1 スクリーンに現れる 1 次回折光の位置は、回折格子とスクリーンとの距離、および回折格子の格子間隔によって変化する。このことに留意しながら、なるべく精度良くレーザー光の波長を求める実験方法を考え、装置の配置図とともに寸法も含めて詳しく示しなさい。どの器具を用いて、何を測定するのか判るようにすること。

問 1-2 問 1-1 で考えた方法を 1000 lines/mm の回折シートを使って実施し、測定結果を示しなさい。必要に応じてグラフを描きなさい。

グラフは A4 方眼紙に解答用紙の欄の大きさを超えないサイズで書き、はさみで切って、解答用紙の該当する部分に粘着テープあるいは両面テープでしっかり貼ること。万一はがれたときのために、表面あるいは裏面に、必ずチャレンジ番号と氏名を書くこと。以下の問題でも同様である。

問 1-3 問 1-1 で考えた方法を 500 lines/mm の回折シートを使って実施し、測定結果を示しなさい。必要に応じてグラフを描きなさい。

問 1-4 問 1-2、問 1-3 で得られた測定結果から、レーザー光の波長を求めなさい。測定値の精度から、求めた波長がどの桁まで正しいと考えられるか、有効桁数を明らかにすること。

課題 1-2 水素原子スペクトルの測定

1. 実験の目的

水素原子スペクトルを観察し、水素のリュードベリ (Rydberg) 定数を求める。リュードベリ定数については、以下で説明する。

2. 実験の原理

水素原子の電子は中心にある正電荷を持つ原子核 (陽子) によるクーロン引力によって束縛されている。量子力学により、原子に束縛された電子の状態は量子数とよばれる少数の離散的な数の組み合わせによって分類できることが明らかにされている。水素原子の場合、束縛状態の電子のエネルギーは、

$$E_n = -(\text{正定数}) \times \frac{1}{n^2} \quad (1-3)$$

と表される。ここで n は主量子数とよばれる。 n は 1 以上の整数であるので、最も低いエネルギー状態は E_1 ($E_1 < 0$) であり、

$$E_n = E_1 \times \frac{1}{n^2} \quad (1-4)$$

と表される。

この課題の初めに述べたように、水素原子から放射される光子のエネルギーは、遷移状態間のエネルギー差に等しい。従って、主量子数 m の状態から主量子数 n の状態に遷移したときに放射される光の振動数 ν は、図 1-9 に示すように、次の式で表される。

$$h\nu = E_m - E_n \quad (1-5)$$

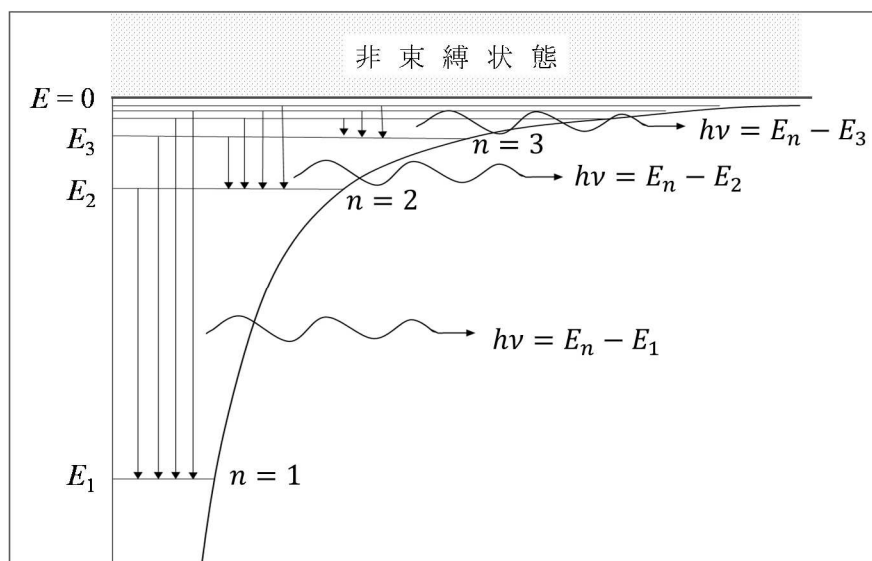


図 1-9

量子力学が現れる前の 1890 年、分光学者リュードベリ (Rydberg) は原子スペクトルが簡単な式で表され、水素原子の場合それは次のような式となることを発見していた。

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (n < m, \text{ 共に正の整数}) \quad (1-6)$$

これはまさに(1-5)式と等価な式である。これにちなんで、定数 R はリュードベリ (Rydberg) 定数と呼ばれている。水素原子スペクトルについてのリュードベリ定数 R を求めるのが課題 I-2 の目的である。

3. 実験で用いる器具

図 1-9

表 1-2 課題 I-2 で使用する部品・器具

品名	内容	数量
水素放電発光装置	押しボタンスイッチ A が付いたアルミシャーシ、電池・高圧電源内蔵	1 台
手元押しボタンスイッチ	押しボタンスイッチ B が付いた長さ 1.3 m ほどのコード (赤黒)	1 個
回折シート	回折格子 1000 lines/mm 枠付	1 個
L 型アクリル台	W 50 mm × (D 50 mm + H 150 mm)	2 個
50 cm 直定規		1 本
A3 方眼紙		2 枚
A4 方眼紙		
半周分度器	A4 用紙に印刷されたもの	1 枚
遮光用黒布	約 1 m × 1 m	1 枚
はさみ		1 挺
両面テープ		1 個
粘着テープ		1 個

高電圧に注意

この実験課題で用いる水素放電発光装置は高圧電源を使用している。電源はアルミニウムケースで覆われているので安全であるが、ケースを開けたら、ケースを濡らす、濡れた手で操作する、開口部から指などを入れたりすると感電の危険がある。決してこれらのことは行わないこと。

4. 実験装置のセットアップ

(1) 水素放電発光装置の準備

図 1-10 に示してある金属製のケースが水素放電発光装置であり、水素放電管、電池、高圧電源装置などが内蔵されている。図のように、長辺方向を鉛直に立てて使用し、細長い窓の開いた面が正面、押しボタンスイッチ A のある面が上面である。放電管の中心部はケース表面から奥に約 2 cm、底から 12.5 cm の位置にある。発光部の長さは 5 cm ほどの長さであり、その部分に細長い窓があげられている。

手元押しボタンスイッチ（押しボタンスイッチ B が付いた長さ 1.3 m ほどのコード（赤黒））の他端にあるプラグを、金属ケース左下のジャックに差し込みなさい。

押しボタンスイッチ B を押し、放電管が光ることを確認しなさい。もし光らない場合は、しばらく押し続け、発光するのを待ちなさい。30 秒ほど押し続けても光らないときは、ケース上面にある押しボタンスイッチ A も一緒に押し、発光するかどうか確認しなさい。それでも光らないときは、監督者を呼びなさい。

押しボタンスイッチ A を B と一緒に押すと、放電管にかかる電圧が少し上昇するため発光がやや明るくなる。そのため、スペクトル光が弱いときは、このボタンスイッチ A を押すことにより、観測しやすくなる。また、水素放電管は長時間押し続けると放電しにくくなるので、押しボタンスイッチ B は手で押すだけとし、粘着テープなどで ON 状態を固定しないこと。

(2) L型アクリル台の準備

L型アクリル台は、図 1-11 に示すように 5 cm×15 cm の長い部分と、5 cm×5 cm の短い部分から成る。放電管の発光部はケース下面より 10～15 cm の間にあるので、アクリル台はこの高さの光を観察する際に利用できる。L字型の両部分にわたってその中央位置に刻線が刻まれている。アクリル台は 2 個あり、ひとつは、1000 lines/mm の回折シートを保持するのに使用する。回折シートは両面テープや粘着テープで貼り付ければよい。もう一方を、例えば方眼紙の上に立てて置き、刻線を目印に利用すれば、回折シートを透過する回折光の回折位置と進行方向を精度良く決めることができる。このとき、背景として黒い紙を回折シートの先に置くと、輝線が見やすくなる。

ただし、L字型の長い部分と短い部分との間の角度はほぼ 90°ではあるが、わずかにずれている可能性もある。したがって、台を立てた場合に下面から上に行くにしたがって、刻線の位置がずれる可能性があることに注意すること。ずれが大きい場合、誤差に影響する可能性がある。この場合、ずれを何らかの方法で読めば位置の修正に利用することができる。

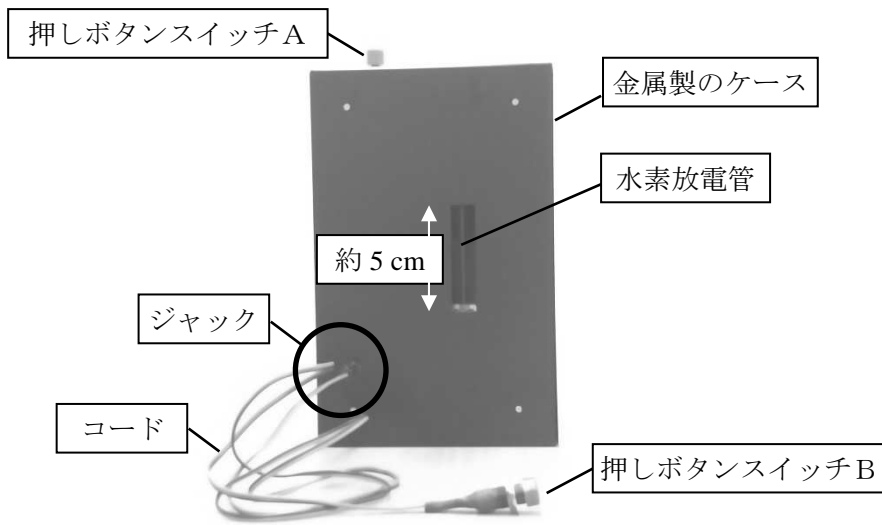


図 1-10

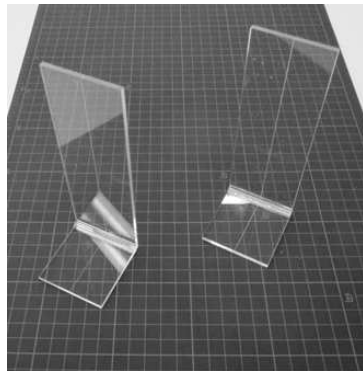


図 1-11

5. 実験の課題

問 1-5 まず、放電発光装置の押しボタンスイッチBを押し、1000 lines/mmの回折シートを通して発光を観察しなさい。特に、水素スペクトルの1次回折光がどの方向にどのようにみえるかに注意しなさい。次に、この観察結果をもとに、水素原子の発光波長を精度よく決めるためには、水素放電発光装置、回折シート、およびその他の部品をどの様に配置して何を観察し、何を測定すればよいか考えなさい。さらに、考えた結果を図に示し、波長を精度よく求める方法を、理由を含めて説明しなさい。

問 1-6 水素原子スペクトルは可視光領域で赤・青・紫の3本の輝線を持つ。水素放電管からの赤・青・紫の3本の輝線に対して、問 1-5 で述べた方法による測定を行い、その測定値を表にして示しなさい。さらに、3本の輝線の波長を、有効数字に注意して求めなさい。紫の輝線は観測が難しいので、ケース上面にある押しボタンスイッチAを押すと少し見やすくなるが、どうしても見つからない場合は2本の輝線でこの問いに答えなさい。輝線のほかに水素分子や照明等による連続スペクトルが見られるが、これらは無視すること。

問 1-7 観察した輝線スペクトルがどのような主量子数を持つ状態間の遷移であるかを決め、水素のリュードベリ (Rydberg) 定数を求めなさい。解答用紙には、決めた方法とその理由 (他の主量子数ではない理由を含めて) を記しなさい。ただし、遷移前の状態は連続した3つの主量子数 m , $m+1$, $m+2$ の状態であり、遷移後の状態は3本とも同じ主量子数 n の状態であり、かつ n は4以下である ($n \leq 4$) としなさい。グラフを用いる場合は問 1-2 と同様の方法で貼り付けなさい。なお、どの状態間の遷移であるかを一つに絞り切れなかった場合は、可能性のある遷移を列記し、他の量子数ではない理由とともに、なぜ一つに決めることができないかの理由も書きなさい。

実験課題Ⅱ 気体の法則・絶対零度の決定

酸素や窒素，またそれらの混合気体としての空気など，通常の気体では室温付近で，ボイル・シャルルの法則が成り立つ。すなわち，気体の圧力 p と気体の体積 V および気体の温度 T の間には k を比例定数として $pV = kT$ の関係が得られる。これに，等温，等圧の条件下では体積が等しい気体中の分子数は，すべての気体において等しいというアボガドロの法則（アヴォガードロの法則）を加えたものが理想気体の状態方程式

$$pV = nRT \quad (2-1)$$

である。ここで， n は気体の物質量（モル数）であり， R は気体定数と呼ばれる。温度 T は絶対温度目盛によるもので，単位は K（ケルビン）である。

ボイル・シャルルの法則は，温度一定（等温）の条件下で気体の圧力 p は気体の体積 V に反比例するボイルの法則

$$pV = \text{一定} \quad (\text{等温条件}) \quad (2-2)$$

と，圧力一定（等圧）の条件下では気体の体積 V が絶対温度 T に比例するシャルルの法則

$$V/T = \text{一定} \quad (\text{等圧条件}) \quad (2-3)$$

を組み合わせたものである。

絶対温度とは物質の特異性に依存しない温度目盛を定義したもので，英国のケルヴィン卿(Lord Kelvin)によってはじめて導入された。絶対零度を 0 K，水の三重点（気体・液体・固体の水が共存する状態）の温度を 273.16 K と定義する。現在では，通常のセルシウス温度（セ氏温度，単位記号は $^{\circ}\text{C}$ ）は 0°C が 273.15 K になるように，すなわち，セ氏温度 t [$^{\circ}\text{C}$] と絶対温度 T [K]の数値の間には，

$$T/\text{K} = t/^{\circ}\text{C} + 273.15 \quad (2-4)$$

の関係が成り立つように定義されている。この結果，水の三重点の温度は 0.01°C となった。

ここでは，気体のボイル法則（課題Ⅱ－１）およびシャルルの法則（課題Ⅱ－２）が成り立つことを確かめるとともに，絶対零度がセ氏何度であるかを実験的に決めることを目的とする。

課題Ⅱ－１ ボイルの法則

1. 課題の概要

与えられた材料を用いて、空気についてボイルの法則、すなわち圧力と体積の反比例関係が成り立つかどうかを実験しなさい。

工業用注射器に適量の（乾燥）空気を入れた後、注射器の先端に注射器キャップを強くはめ、閉じ込めたものを試料とする。注射器の内外の圧力に差が生じると、シリンダとピストンの間の隙間を通して空気がわずかに漏れる可能性があるため、漏れの影響の少ない測定法を考案すると共に、結果の解析では測定中の気体の漏れの影響を考慮すること。なお、装置組み立てについては図 2-1 を参照すること。ただし、この例に必ずしも従う必要はない。

圧力は単位面積当たりの力で定義される。すなわち、圧力＝力／面積となる。圧力の単位は Pa（パスカル）であり、 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ となる。大気圧の単位に用いられる hPa（ヘクトパスカル）とは、 $1 \text{ hPa} = 10^2 \text{ Pa}$ の関係がある。力は電子はかりで測ることができる。はかりが質量 m を表示するとき、はかりの計量皿には mg の力が新たに加わっている。ここで、 g は重力加速度の大きさであり、ここでは $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ とする。つまり、 1 kg の表示のときの力は 9.80 N である。

圧力 p_0 で体積 V_0 の気体を、等温の条件の下で、体積 V まで ΔV 圧縮し、圧力を p まで Δp 上昇させたとする

$$p_0 V_0 = pV = p(V_0 - \Delta V) = (p_0 + \Delta p)V = (p_0 + \Delta p)(V_0 - \Delta V) \quad (2-5)$$

の関係が得られる。なお、当日のチャレンジ会場の大気圧の値はチャレンジ開始時に口頭で伝えてある。

2. 実験で使用できる器具

表 2-1 課題Ⅱ－１で使用する部品・器具

器具・材料等	個数
工業用注射器（10 mL）	1
注射器キャップ	1
ビーカー	1
LED ライト	1
電子はかり	1
注射器保持板（38 mm×118 mm×10 mm，穴付）	1
押し板（30 mm×200 mm×10 mm）	1
木柱（30 mm×30 mm×179 mm）	2
スぺーサ用木板（30 mm 厚）（30 mm×30 mm×30 mm）	2

同 (10 mm 厚)	(30 mm×30 mm×10 mm)	4
同 (5 mm 厚)	(30 mm×30 mm×5 mm)	2
同 (3 mm 厚)	(30 mm×30 mm×3 mm)	2
同 (2 mm 厚)	(30 mm×30 mm×2 mm)	2
直定規 (15 cm, 50 cm)		各 1

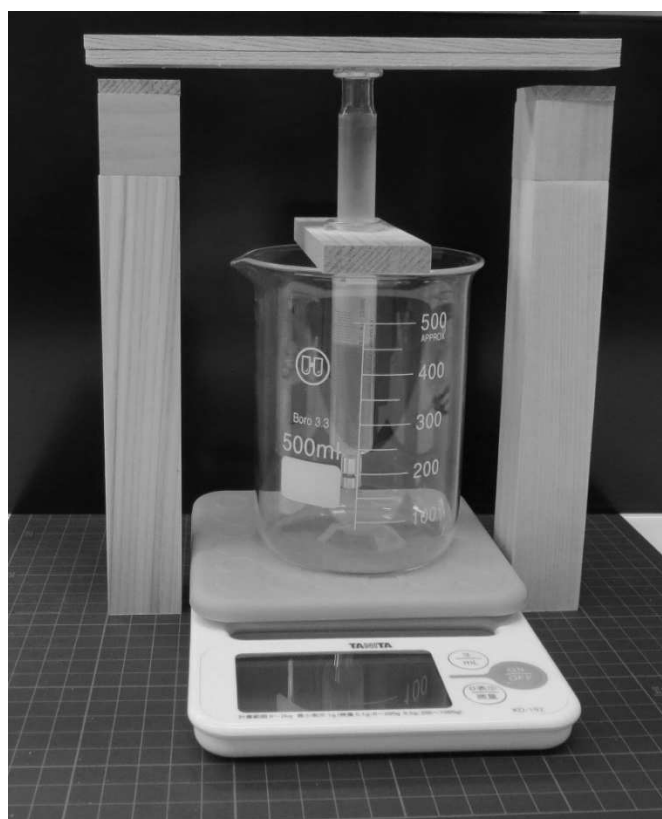


図 2-1 : 実験セットアップ例

3. 電子はかりの準備と動作確認

使用する電子はかりは、最大で 2000 g まで測定できるが、通常モードでの分解能は 1 g である。微量モードでは、測定範囲 1000 g 以下では分解能 0.5 g、さらに 200 g 未満では分解能 0.1 g で測定できる。また、電池の節約のために、6 分以上同じ表示が続くと、電源が切れる（オートパワーオフ）ので注意する必要がある。なお、[g/ml] ボタンは使用しない。

- (1) このはかりは電源として単 4 乾電池 2 個を使用する。乾電池は箱の中のプラスチックケースに入っている。まず、本体裏側中央のふたを外して電池をセットしなさい。もし乾電池がない場合や電源が入らない場合は監督者に知らせること。
- (2) 通常使用時は、[ON/OFF] ボタンを押し電源を入れると、約 4 秒後に、0 を表示して計量できるようになる。最初は通常モードとなり小数点以下は表示されない。このモードでは上部に 1 マークが表示される。

- (3) 電源の入った状態で、計量皿に容器などの測定物がのっていても、[0表示/微量]のボタンを1回押すと、表示は0となり、容器の質量を差し引いた、追加の質量だけを測定できる。また、電源の切れた状態で計量皿に容器などの測定物を乗せた後、電源を入れた場合も同じ状態となる。
- (4) 計量皿にのっている質量が200g未満のとき、もう一度、[0表示/微量]のボタンを押すと、微量モードとなり、質量表示は0.0となる。この微量モードでは上部に0.1マークが表示される。課題Ⅱでは、このモードで、ある最初の質量からの変化を測定する。この場合、計量皿の上の質量が[0表示/微量]のボタンを押したときの基準質量より軽くなると、表示はマイナスとなることに注意する。微量モードの場合は、わずかに表示がふらついて安定しないことがある。
- (5) 上記の機能を確認するために、何ものっていない状態で[ON/OFF]ボタンを押して4秒以上待ち、画面の表示テストが終了して表示が0となることを確認しなさい。次に鉛筆等をのせた後、[0表示/微量]ボタンを押して表示が0になることを確認しなさい。もう一度[0表示/微量]ボタンを押すと表示が0.0になることを確認しなさい。
- (6) 次に、電源を切った状態で鉛筆等をのせ、電源を入れた場合は表示が0になり、[0表示/微量]ボタンを押すと表示が0.0になることを確認しなさい。表示がおかしいときには監督者を呼ぶこと。

4. 実験と解析

工業用注射器(10 mL)に適量の(乾燥)空気を入れた後、注射器の先端に注射器キャップを強くはめると空気は注射器に閉じ込められる。これを試料として以下の実験をしなさい。

問 2-1 注射器からピストンを抜き、その質量を量りなさい。また注射器の長さ(0 mLと10.0 mL目盛りの間隔)を測りなさい。ピストンの表面とシリンダの内面にはゴミや汚れ、水が付かないように注意しなさい。測定が終わったらピストンをさし、ピストンが滑らかに動くことを確認すること。

問 2-2 注射器をはじめ表 2-1 の器具・材料を使ってボイルの法則を確かめる実験の方法(実験装置の配置と測定手順)を(2-5)式を参考にして、具体的に述べなさい。

問 2-3 問 2-2 の方法で実験を行い、その測定結果(直接読み取った値あるいはその平均値)を適当な表にして示しなさい。

問 2-4 注射器からの空気の漏れの影響が少なくなるようにどのような工夫をしたかを述べなさい。

問 2-5 力から圧力を知るには面積が必要である。シリンダの断面積＝ピストンの断面積をどのようにして決めたらよいか。その値はいくらか。注射器のピストンを自由にしたとき（秤の読みは 0）、および、ピストンに力を加え圧縮したとき（電子はかりの読みを質量 m とする）のそれぞれの場合について、注射器中の空気の圧力 p_0 および p の値の決め方を説明しなさい。

問 2-6 問 2-5 の方法を使って、問 2-3 の各データについて、空気の圧力（圧力変化）を計算し、問 2-3 の解答用紙の所定の欄に書き入れなさい。

二つの物理量 x , y の間にある関係が成り立つか否かを視覚的にわかりやすく示す方法として、データ点が直線にのるようなグラフを作成することがしばしば行われる。例えば、 $y = ax^3 + bx$ の関係があると考えられる場合には、 $X = x^2$, $Y = y/x$ として X - Y グラフを書くと、データは直線 $Y = aX + b$ 上にのるはずであり、もしデータが直線ではなく曲がって分布していればその関係は疑われる。

問 2-7 得られたデータから、ボイルの法則が成り立つことを視覚的にわかりやすく示すためにはどのような X - Y グラフを作れば良いだろうか。2つの量 X および Y を問 2-3 で測定した物理量で表す関係式を記し、各測定データから得られた X , Y の値を表に示しなさい。

問 2-8 問 2-7 の結果をグラフに示しなさい。グラフは A4 方眼紙に解答用紙の欄の大きさを超えないサイズで書き、はさみで切って、解答用紙の該当する部分に粘着テープあるいは両面テープでしっかり貼ること。万一はがれたときのために、表面あるいは裏面に、必ずチャレンジ番号と氏名を書くこと。以下の問題でも同様である。

問 2-9 問 2-8 のグラフから、この実験からボイルの法則が成り立っていると結論できるか。空気の漏れの影響や測定の精度などを考え、考察しなさい。

課題Ⅱ－２ シャルルの法則と絶対零度の評価

1. 実験の概要

工業用注射器に閉じ込めた空気を試料とし、注射器を水、湯あるいは氷水の中に入れて試料の温度を変え、そのときの試料の膨張、収縮を調べる。ピストンの重さが空気を圧縮し注射器のすき間から空気が漏れてしまわないように、ピストンを同じ重さのおもりで釣りバランスさせる。

やけどに注意

この実験課題では加熱剤を使ってビーカーの水を加熱する。やけどの恐れがあるのでビーカーを倒したりしないよう十分注意すること。また加熱剤は 100 °C 以上になるため扱いにはアイストングを使用すること。直接接触ってはいけない。

2. 実験で用いる器具

表 2-2 課題Ⅱ－２で使用する部品・器具

器具・材料等	個数
工業用注射器 (10 mL)	1
ビーカー (500 mL)	1
紙コップ	2
電子はかり	1
デジタル温度計	1
アルミフレーム (注射器保持板付)	1
ベース木板 (20 cm×20 cm)	1
滑車付き木板	1
LED ライト	1
ミラー付き直定規 (15 cm)	1
アイストング	1
攪拌用スプーン	1
ベローズピペット	1
ドライバー (+ 2)	1
はさみ	1
糸	1
ボタン足	1
おもり (4 号, 0.5 号)	各 1
銅線 (直径 1.2 mm)	2
注射器キャップ	1

加熱剤 (10 g)	2
紙ふきん	1
両面テープ	1
粘着テープ	1
バケツ (5 L)	1
水 (ペットボトル 2 L)	1
氷 (保冷袋入, 約 700 g) ※ 氷は最初に配布するセットには含まれていない。求めに応じて配布する。	1
単 3 乾電池 (LED ライト用)	1

【デジタル温度計の使用法】

使用するデジタル温度計は $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲の温度を測ることができる。感温素子は細い金属棒の先端部分に埋め込まれている。電源は1.5 Vのボタン電池であり、予めセットされている。以下はボタンの説明である。

- ON/OFF : [ON/OFF] ボタンを押すと電源が入り、測定後 [ON/OFF] ボタンを押すと電源が切れる。約10 分間何もしないと自動的に電源が切れる。
- HOLD : 温度表示を保持する。もう一度押すと温度測定を再開する。
- $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$: セ氏と華氏の表示変更
- MAX/MIN : 最高温度と最低温度を表示する。

電源を入れ、動作を確認しなさい。正常に動作していないと考えられるときは監督者を呼ぶこと。

3. 実験装置のセットアップ

工業用注射器に閉じ込めた空気を試料とし、注射器を湯あるいは氷水の中に入れて試料の温度を変え、そのときの試料の膨張、収縮を調べる。ピストンの重さが空気を圧縮し注射器のすき間から空気が漏れてしまわないように、**図 2-3** のように、注射器を板の穴に差し鉛直に固定し、ピストンを同じ重さのおもりで釣る。

図 2-2 を参考にして、以下のようにして実験装置を組み立てなさい。もし不具合がある場合や、問題冊子に記述されているようにならない場合は、プラカードを使って、速やかに監督者に知らせること。

<重要> 注射器のピストンとシリンダの間に水が入ると摩擦が極端に大きくなり、実験ができなくなる。水を入れないこと。万一水が入った場合は、注射器を外して両者を完全に乾かさなければならない。

- (1) **図 2-2(a)** のように、注射器保持板のついたアルミフレームとベース板 (20 cm 角) を 5 mm のボルトでしっかり固定する。ボルトはアルミフレームの両端に予め付いているので、外して用いる。ベース板の裏面にはゴム足が四隅に貼ってある。



図 2-2 (a) フレーム完成図



(b) ボタン足の固定



(c) おもりの取付

- (2) 図 2-2 (a) のように、アルミフレームの上部に滑車付き板を 5 mm のボルト(M5)で固定する。滑車が滑らかに回転することを確認する。
- (3) 図 2-2 (b) のように、注射器のピストンの上面に両面テープを用いてボタン足を貼る。二つのおもり (4 号と 0.5 号) が 6 cm の銅線で結ばれたものを電子はかりにのせ質量を測り、それが 問 2-1 で測定したピストンの質量と、0.5 g 以内で一致していることを確認する。もし一致しないときは銅線はずし、新たに銅線をはさみで切って調整する。10 cm の銅線は約 1 g である。ピストンの表面に水やゴミがつかないように注意すること。
- (4) 糸を約 25 cm の長さに切り、その一端はボタン足にしぼり、他端には 3 つのおもり (4 号, 0.5 号, 銅線) をしぼる (図 2-2 (b), (c) 参照)。
- (5) ピストンを注射器に差し、試料となる適量の空気を残して注射器キャップで封じる。ピストンを押して筒先から漏れがないことを確認する。
- (6) ビーカーをベース板の上に置き、注射器を注射器保持板の穴に差し込む。さらに糸を滑車にかけ、おもりでピストンを支える。おもりが落下しビーカーを割らないように気をつけること。このようにしてピストンの重さが注射器の中の空気を圧縮することを防ぐ。
- (7) 鏡付き定規を両面テープで L 型金具に固定する。定規は注射器と平行でなければならない。

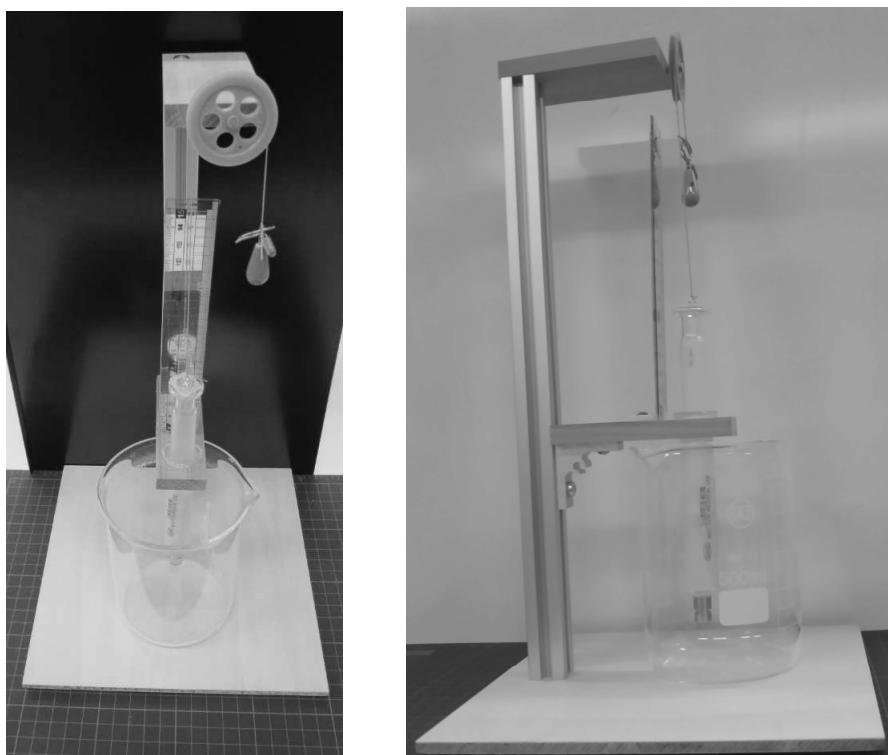


図 2-3 : 実験装置組立図

4. 実験

(1) デジタル温度計で気温を測り、また注射器中の空気体積を読む。さらにピストンの高さ位置を、鏡付き定規を使って読む。なお、注射器中のピストン位置は LED ライトで横から照らすと見やすい。ピストンの高さ位置は測りやすい箇所（例えば、上面、ボタン足上端など）を各自決めてよい。LED ライトには電池が入っていないので、胴体を回して開け、単 3 乾電池 1 本を装着してから使用すること。

問 2-10 この始状態の値を記録しなさい。

以下の測定では、デジタル温度計でビーカーの中の水温を測る。試料である注射器内の空気の温度と温度計の示す温度の差をなるべく小さくするにはどのようにしたらよいか考えながら実験を行うこと。

(2) 氷を入手する。監督者にプラカードで知らせ、「準備ができたので氷が必要である」事を伝える。なお、氷の配布は 1 回のみである。無駄に使うと測定温度範囲が十分にとれなくなるので、よく考え有効に利用すること。

(3) ビーカーに加熱剤を 2 個入れ、さらに水を 500 mL まで加える。加熱剤の反応によっ

て泡が発生するとともに、水温が上昇する。加熱剤は膨らんで浮くのでアイストングや攪拌スプーンを適宜用いて、反応が滞らないようにする。デジタル温度計で温度を監視しながら、空気の体積の変化を観察する。数字の記録をとる必要はない。



図 2-4 : 加熱剤による加熱

(4) 約 10 分で反応は収まり、水温は約 60 °C になるはずである。水温が約 60 °C になったら、アイストングを用いて加熱剤を取り出し、バケツの中に入れ、バケツには新たに水を約 100 mL 入れる。加熱剤は最高約 100 °C になるので、手で直接触れてはいけない。やけどをしないように十分注意すること。もし温度が 50 °C 至らない場合は監督者に知らせ新たな加熱剤 1 個をもらい、古い加熱剤をとりだし、新たな加熱剤 1 個を加えて温度上昇をまつ。

問 2-11 最高温度での温度と空气体積、ピストンの高さ h を読み記録しなさい。

問 2-12 温度が 60 °C から降下する過程で、温度 T と空気の体積 V 、ピストンの高さ h の時間変化を記録する。温度の降下速度が遅い場合には、水や氷を適宜追加してよい。ビーカーからあふれそうな場合にはベローズピペットを利用して吸い出し、バケツに捨てる。紙コップや攪拌用の攪拌用スプーンも適宜使用してよい。測定は 60 °C ~ 5 °C の間の 8 ~ 15 点の温度で行いなさい。

問 2-13 測定が完了したら、注意して注射器を持ち上げ、ビーカーを外し、水をバケツの中に入れる。室温に戻ったら空气体積と気温を記録しなさい。

問 2-14 測定した温度 T と空気の体積 V の間の関係を、グラフなど用いて、わかりやすく示せ。グラフは問 2-8 と同様の方法で貼り付けなさい。

問 2-15 V と T の間にシャルルの法則のような直線関係はあったか？直線からのズレがあった場合，その原因として考えられることはあるか？

問 2-16 V と T の関係を直線で近似することによって，絶対零度の値をセ氏温度で求めよ。この実験で絶対零度を決めるときの誤差の原因として特に重要と考えられることがらを挙げよ。