

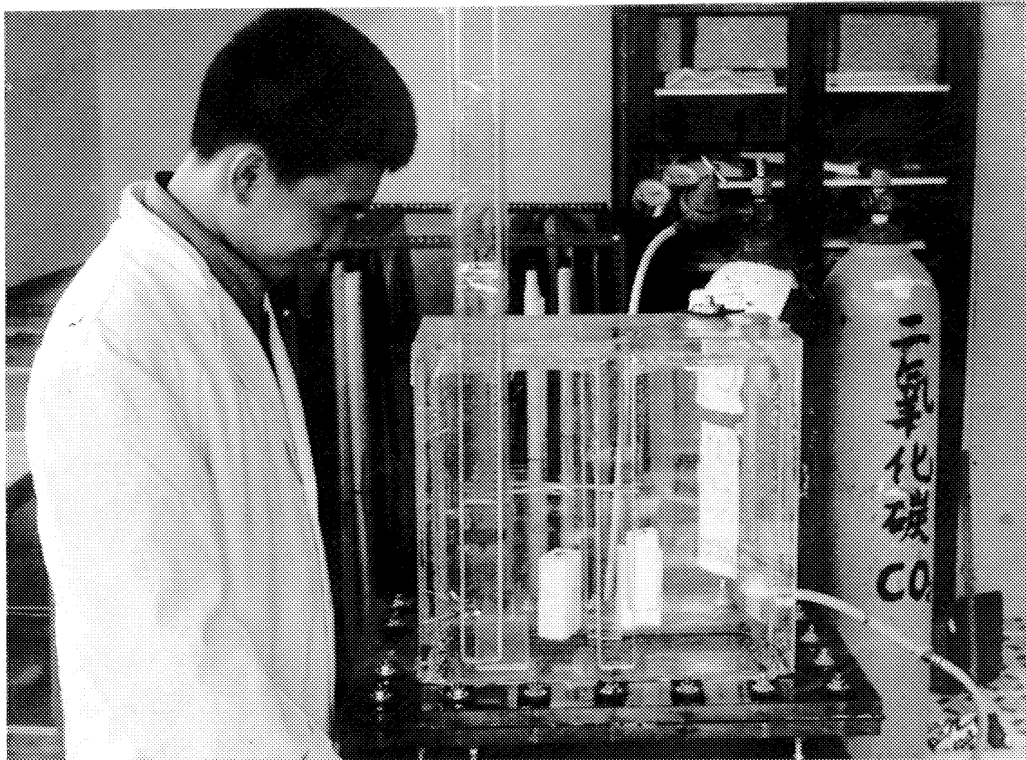
# 利用微量天平測定氣體分子量

## 高中組物理科特別獎

台南二中

作者：李世泉

指導教師：陳銘堯、劉俊雄



### 一、研究動機及目的

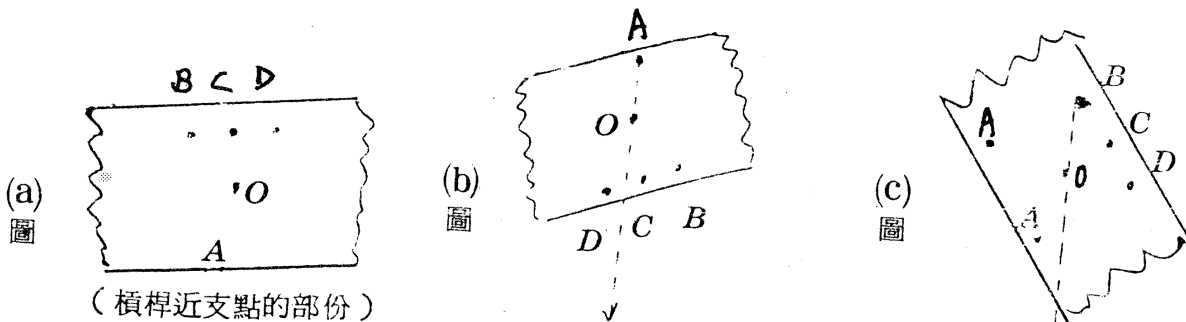
- (一)物理課本教我們如何製造使用微量天平，當我們辛辛苦苦製造完成以後，却只能稱稱頭髮，實在有些大材小用，沒有實際的貢獻。
- (二)化學課本利用亞佛加厥學說教我們如何去測定氣體分子量，可是測量的結果誤差太大。
- (三)如果能用微量天平去測定氣體的分子量，相信一定比較準確。雖然測定氣體分子量尚有其他很多精密的儀器，但是我們的目的是在藉微量天平的研究，進而對 1. 槓桿原理， 2. 浮體原理， 3. 波以耳定律， 4. 查理定律， 5. 密度定義， 6. 亞佛加厥學說，

⑦大氣壓力原理等相關理論，得以實際的運用、探討，建立我們對於基礎物理學的正確觀念。

## 二、原理依據

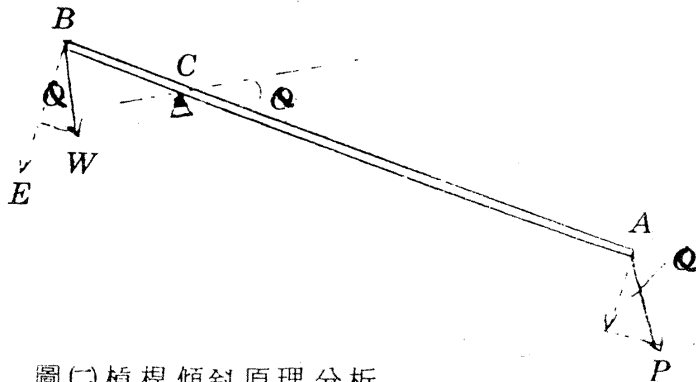
(一)利用槓桿原理（施力 $\times$ 施力臂 $=$ 抗力 $\times$ 抗力臂）可以測定微小的質量。我們就依照物理課本所教的方法製造出的微量天平加以改良。利用其微量天平左右之浮力不同所造成的誤差使得天平左右施力不同。進而影響其平衡時的角度，即可得到靈敏的感度，並測得當時氣體的密度與質量。

(二)重力與槓桿的靈敏度：重力對槓桿的靈敏度，有很大的影響：如圖(一) [ *a* 、 *b* 、 *c* ]



圖(一)重力對槓桿靈敏度的影響

設  $O$  點為全部槓桿的重心，則當  $A$  點作為支點的轉軸時，因為重力的作用，槓桿就會如圖(b)，倒轉且原來的左端變為右端而向上；若以  $B$  點為支點，則槓桿如圖(c)，左端向上；所以欲使槓桿保持水平時，當以  $C$  點為支點且  $C$  點愈接近  $O$  點，則愈靈敏。又當槓桿在傾斜時，其力的關係如圖(二)之分析：



圖(二)槓桿傾斜原理分析

按照槓桿原理： $A P \cos \theta \times A C = B W \cos \theta \times B C$

$$\therefore A P \times A C = B W \times B C$$

則原來是水平的槓桿仍應水平，而今之所以傾斜必為A端所載質量比原來的多，引起共同重心向右端移，如圖(一)之(c)圖：

(三)依據浮體原理，可以求氣體的密度（氣體對物體的浮力=當時狀況氣體的密度×物體的體積）。當我們把微量天平放進一個密閉的壓克力箱中（如圖三），用一塊保麗龍掛在天平的長端，作為體積不變的物體，在短端以螺釘，使天平保持在一個平衡狀況。因為不同的氣體，有不同的密度，所以只要箱內的氣體改變，就對保麗龍產生不同的浮力，天平的傾斜角度就會改變。所以若能調整待測氣體的壓力，即可推算出氣體的密度，當槓桿再恢復到原來的平衡狀況時，此待測氣體的密度就等於原來氣體的密度，則可根據調整後的壓力，利用波以耳定律求出待測氣體在標準狀況時的體積。

(四)依據波以耳查理定律  $\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$  可以把實驗時的氣體體積

換算成氣體在標準狀況（ $0^\circ C$ ， $76 \text{ cm-Hg}$ ）下的體積，進而可求得在標準狀況時的密度。根據參考資料空氣在標準狀況下，其密度為  $1.293 \frac{g}{l}$ ，可作為本研究的參考值。

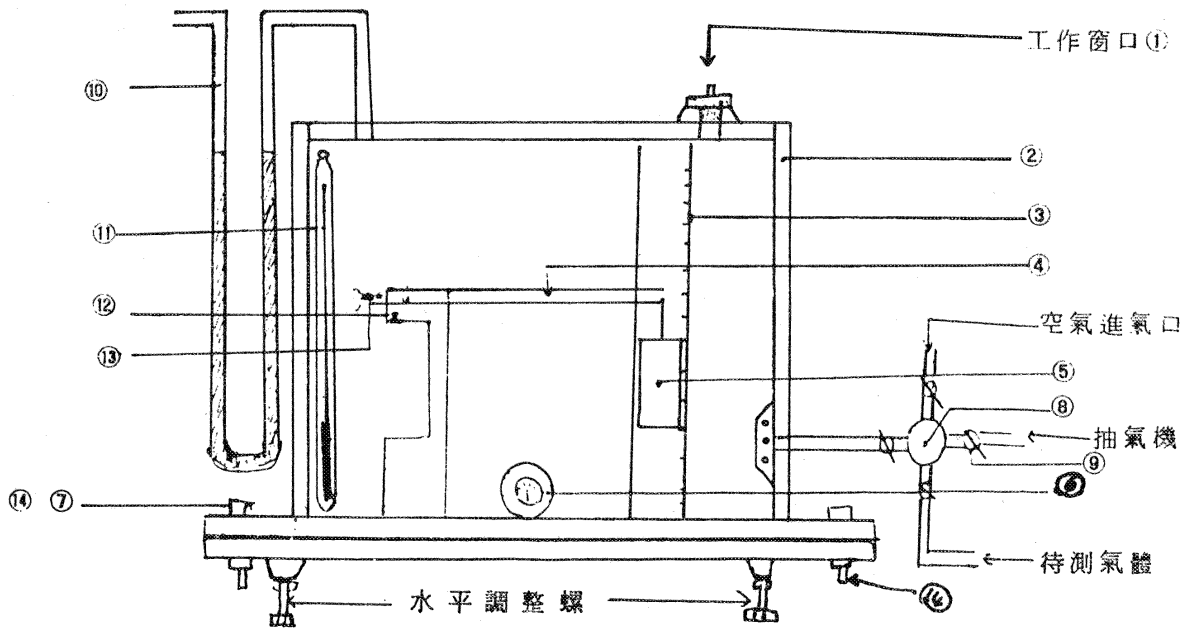
（本參考值亦可由本儀器測出，但恐誤差過大，故以參考資料所提供之值為標準）

(五)依據亞佛加厥學說可求得氣體的分子量。因為理想氣體在標準狀況下，一克分子的體積都是（ $22.4 \pm 0.2$ ）升，所以氣體的密

$$\text{度} = \frac{\text{質量}}{\text{體積}} = \frac{\text{分子量} (g)}{22.4 \pm 0.2 (\text{升})}$$

### 三、研究設備器材

(一)自製設備器材：如圖(三)



圖(三) 自製氣體密度測定儀

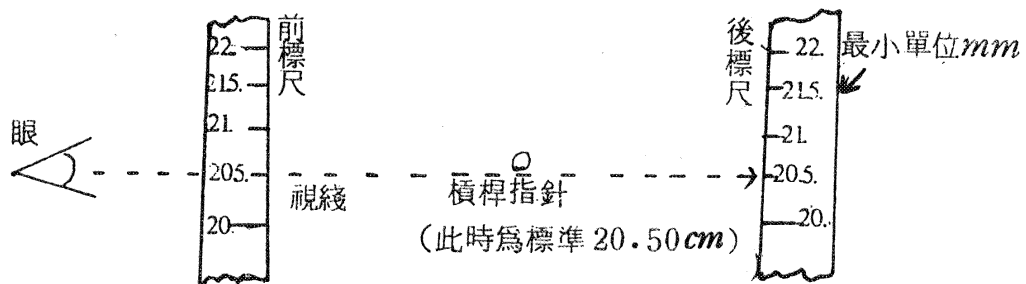
說明：

1. 工作窗口及窗門

2. 壓克力 (Acry) 箱：以透明壓克力製成，厚  $2\text{ cm}$ ，依據出品廠商之商品說明，其抗壓力在  $1.25\text{ kgw/cm}^2$  以上。箱內容積為

$$40\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 20\text{ cm} = 32000\text{ cm}^3 = 32$$

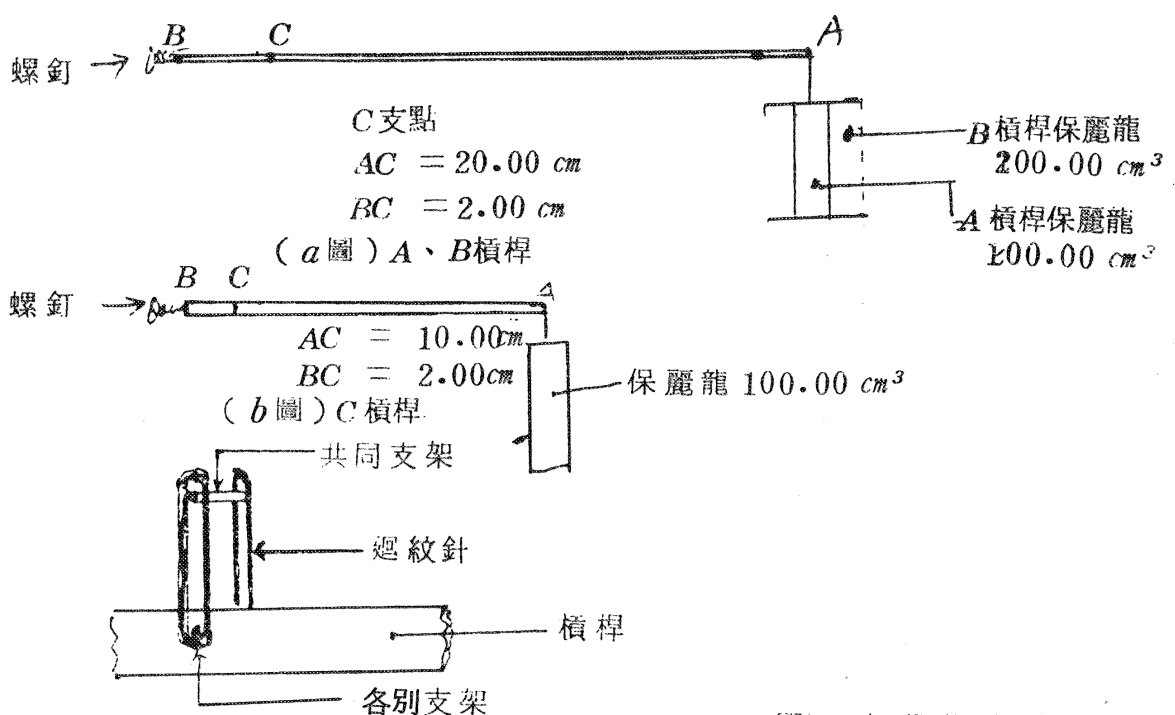
3. 高度標尺，前後二支透明尺。當天平長端指針與尺的刻度在同一直線上時，就是所測的高度了。操作如圖(四)



前後二標尺等刻度的二點，由視線延長直線（此直線不一定水平亦可），即可視為一支尺的刻度，則當槓桿尖端指在此刻度時，即可確定為其高度。

4. 微量天平：用吸管製成，共分三支以便比較。三支吸管槓桿的支點高度相同，但在不同軸上各別自由轉動，其構造如圖(五)。

三支槓桿的長度分別為：A管 22.00 cm，B管 22.00 cm，C管 12.00 cm。



圖(五) 槓桿構造

A槓桿：長臂：短臂 = 10 : 1；保麗龍體積 100.00 cm<sup>3</sup>

B槓桿：長臂：短臂 = 10 : 1；保麗龍體積 200.00 cm<sup>3</sup>

C槓桿：長臂：短臂 = 5 : 1；保麗龍體積 100.00 cm<sup>3</sup>

各別支點用迴紋針相連，則每一接觸點都可自由轉動，摩擦必可減少到最少，使三支槓桿可自由傾斜。

5. 保麗龍：作為體積不變的固體，在保麗龍外以玻璃紙包封以防保麗龍內空隙之氣體分子外洩，影響壓克力箱內的氣體分子。

6. 氣壓計：放在箱外，以測定實驗時的大氣壓。

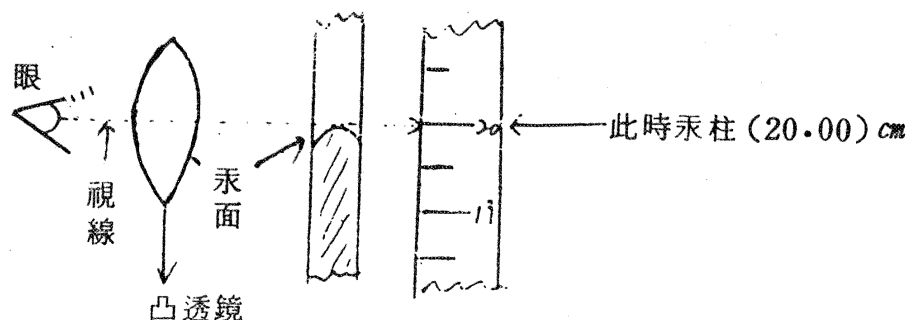
7. 底面封閉螺絲。

8.三通：連接 待測氣體、空氣、及抽氣機。

9.氣閥。

10.水銀開口壓力計：

(1)玻璃管製成，高度超過75 cm以上，黏貼在直尺之前，汞柱高的測定方法如圖(六)：可測到0.01 cm。



圖(六) 汞柱高度測定法

(2)本實驗為定容氣體溫度計的擴張利用的發現，所以按照標準操作，應該把接往壓克力箱的定管汞柱的汞面高度固定不變，才能使容器的氣體體積固定不變。但是由於汞柱體積很小，與容器容積32公升比較，不致形成顯著的誤差，所以本實驗的全部汞柱都固定不動。

11.溫度計：測定當時實驗溫度。

12.U型架：壓克力製，承支槓桿。

13.螺釘。

14.同 7。

(二)準確體積保麗龍小塊的割切法：

1.割切法：測出大塊保麗龍的密度，以密度公式：

體積 =  $\frac{\text{質量}}{\text{密度}}$  割取所需要的體積。由於玻璃紙很薄，包封後亦

不致影響其體積。

2.校正：

(1)實測：同游標尺實測其長、寬、高以校正其體積。

(2)排水法：把樣品沈入定量的水中，按照亞基米德原理：（*Archimede's principle*）校正。（保麗龍比重小於水所採用重錘法測定之）。

(三)操作方法：

- 1.參閱圖(三)，打開通氣孔，利用開管壓力計證明箱內外壓力一致，（預先已將箱內氣體換成當時箱外空氣）並記下氣壓和溫度。
- 2.封閉通氣孔，記下槓桿長端指針的標尺刻度。
- 3.開動抽氣機，當汞柱兩邊高度差恰為無液氣壓計的一半時（也可以抽成其他汞柱差），停止抽氣。此時槓桿長端因為空氣分子減半（波以耳定律），密度減半，浮力減半，而向下降低。
- 4.慢慢灌入待測氣體，使內外壓力相等（由開管壓力計得之）。此時若天平比原高度高，即箱內之氣體密度大於原來箱內空氣之密度，即證明待測氣體之密度大於空氣時，抽取箱內的混合氣體，使指針恢復到原高度  $h$ ，則二邊汞柱必不等高，（接箱端汞柱較高）其汞柱差，即為箱內外的壓力差  $\Delta P$ ，且  $\Delta P = P_1 - P_2$ （ $P_1$  為實驗時的大氣壓力， $P_2$  為箱內之壓力）再者，若設原來空氣對長端保麗龍  $V_p$  的浮力  $B_a$ ，必等於（指針復原）混合氣對保麗龍的浮力  $B_m$ ，不過壓力已經改變了，所以

設： $P$  為標準大氣壓  $76 \text{ cm-Hg}$ ， $P_1$  為實驗時大氣壓， $P_2$  為箱內降低後的壓力。則  $P_2 = P_1 - \Delta P$   
 $T$  為  $273^\circ\text{C}$ ， $T^1 = 273 + t^\circ\text{C}$ ， $t^\circ\text{C}$  為實驗時的氣溫。

$d_a$  為  $S.T.P$  時的空氣密度  $1.293 \frac{\text{g}}{\text{l}}$

$d' a$  為實驗時的空氣密度， $d'' a$  為箱內壓力降低後的空氣密度。

$dx$ ， $dx'$ ， $dx''$  分表時待測氣體在  $S.T.P$  實驗時壓力降低後的密度。

$$\text{則： } Ba = da' \times V_p = B_m = da'' \times \frac{V_p}{2} + dx'' \times \frac{V_p}{2}$$

$$\therefore dx'' = 2 da' - da'' \dots\dots\dots(1)$$

又：根據密度定義及波以耳查理定律

$$d = \frac{m}{V} \quad \frac{PV}{T} = \frac{P^1 V^1}{T^1}$$

$$\therefore \frac{P}{dT} = \frac{P^1}{d^1 T^1}$$

$$\therefore d = \frac{P d^1 T^1}{T P^1} \quad \text{or} \quad d^1 = \frac{dT}{T^1 P} \dots\dots\dots(2)$$

根據式(2)

$$d' a = \frac{P_1 dT}{T^1 \times P} = \frac{P_1 \times 1.293 \times 273}{T^1 \times 76} \dots\dots\dots(3)$$

$$da'' = \frac{P_2 dT}{T^1 \times P} = \frac{(P_1 - \Delta P) \times 1.293 \times 273}{T^1 \times 76} \dots\dots\dots(4)$$

又由式(1)

$$\therefore d'' x = \frac{2P_1 \times 1.293 \times 273 - (P_1 - \Delta P) \times 1.293 \times 273}{T^1 \times 76} \dots\dots\dots(5)$$

化簡：而  $dx = \frac{P d'' x' T^1}{T \times P_2}$

$$\begin{aligned} & \frac{76 \times \frac{2P_1 \times 1.293 \times 273 - (P_1 - \Delta P) \times 1.293 \times 273}{T^1 \times 76} \times T^1}{273 \times (P_1 - \Delta P)} \end{aligned}$$



$$\therefore dx = \frac{1.293 (P_1 + \Delta P)}{P_1 - \Delta P} \dots\dots\dots(6)$$

5. 如果灌氣後內外壓力相等但天平較原高度低即證明待測氣體之密度較空氣小 $\Rightarrow$ 記下指針的標尺刻度  $h_1$  用吹氣機吹入空氣（室溫），排出箱內的混合氣，使其還原成全空氣。當槓桿指針再低到  $h_1$  時（抽氣後），記下汞柱差  $\Delta P$ ，則按下式又可算出待測氣體的密度了。（設  $d_H$ ， $d'_H$  分表待測氣體在  $S.T.P$  和實驗時之密度）

$$B'a = d'' a V_p = B'm = d'a \frac{V_p}{2} + d'_H \frac{V_p}{2}$$

$$\therefore 2 d'' a = d'a + d'_H \dots\dots\dots(7)$$

以(3)(4)式代入(7)式

$$\frac{(P_1 - \Delta P) \times 1.293 \times 273}{T^1 \times 76}$$

$$= \frac{P_1 \times 1.293 \times 273}{T^1 \times 76} + \frac{P_1 \times d_H \times 273}{T^1 \times 76}$$

$$\therefore d_H = \frac{1.293 (P_1 - 2 \Delta P)}{P} \dots\dots\dots(8)$$

6. 氣體對槓桿短端螺釘的浮力變化是不必考慮。因為如式(1)當箱內的氣體改變成待測氣體，原氣體對螺釘的浮力  $B'' a$  和待測氣體對螺釘的浮力  $B''_m$ ，二者之比是恆等的，即

$$B'_a : B''_m = B'_a : B'_m = B_a : B_m$$

所以只要  $Ba \times Ac = Ba' \times Bc$  成立（槓槓平衡時）

則  $B_m \times Ac = B'_m + Bc$  .....(9)仍可成立，  
 同理若天平處於圖(二)的情形下，由於  $\cos$  可以消除，則式(9)  
 仍可成立。所以不論箱內的氣體如何改變，只要槓桿的傾斜  
 狀況前後一致時，氣體對長端的浮力與短端的浮力的比，仍  
 然不變，也就不會影響式(1)到式(8)的計算了。

7. 求氣體的分子量  $M_x$ ；根據亞佛加厥學說，任何氣體在  $S.T.P$   
 下，一克分子的體積都是  $22.4l$

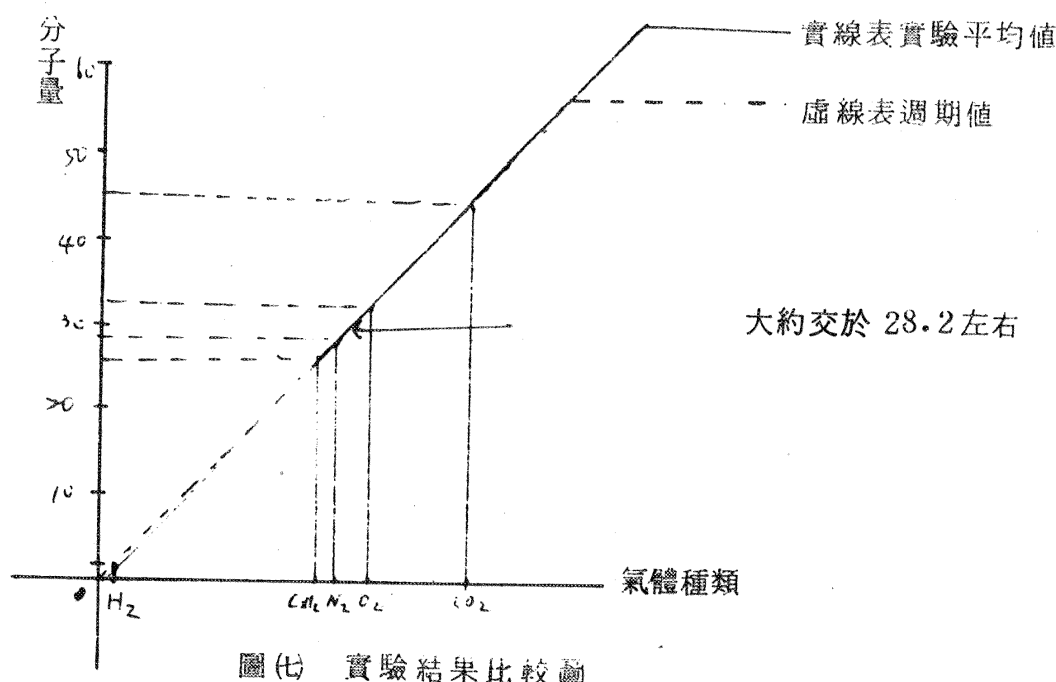
$$\therefore M_x = dx \times 22.4 \text{ .....(10)}$$

#### 四、實驗結果

詳細實驗過程參閱本研究的原始資料。此處只把實驗結果統計如  
 表(一)及圖(七)

| 分子<br>量<br>氣<br>體 | 次<br>數 | 一      | 二      | 三      | 四      | 五      | 平<br>均<br>值 | 週<br>期<br>表<br>值 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|------------------|
| 氧 $O_2$           |        | 31.985 | 32.254 | 31.923 | 31.834 | 32.301 | 32.1594     | 32.00            |
| 二氧化碳 $CO_2$       |        | 43.827 | 44.235 | 44.172 | 44.314 | 43.995 | 44.2086     | 44.01            |
| 氫 $H_2$           |        | 1.987  | 1.726  | 2.135  | 2.014  | 1.827  | 1.9398      | 2.016            |
| 氮 $N_2$           |        | 28.017 | 28.232 | 28.171 | 27.942 | 27.897 | 28.2518     | 28.02            |
| 乙炔 $C_2H_2$       |        | 25.970 | 26.142 | 26.281 | 25.732 | 25.928 | 26.2106     | 26.00            |

表(一) 其中五次實驗的統計結果



圖(七) 實驗結果比較圖

## 五、討論

### (一) 本實驗克服一般測定氣體分子量的困難

1. 氣體的體積不易測定，本實驗中的式(6)和式(8)中，已無氣體體積因素，所以測定的值也較準確。
2. 由於氣體密度小，很輕，不易用砝碼去稱質量。本實驗式(6)和式(8)中沒有氣體質量因素，排除了製造小砝碼的困難，而以很準確的汞柱差來代替，直接提高了準確度。
3. 天平都有摩擦力，對於小質量的測定就有很大的影響，不易準確。本實驗的天平構造與歸零方式，都是採用天平的自然平衡或還原歸零方式，摩擦力的影響已減少到最低的程度，提高了測定的準確度。

### (二) 影響本實驗的因素

1. 參考值(1) S.T.P 時的空氣密度 1.293 g (2) 克分子體積 22.4 l，其準確度，直接影響本實驗的計算值，所以要再設法加以研究其改進方法。但已非本實驗的研究對象，所以未作發展工作。
2. 各樣品氣體的純度，直接影響測定結果，而此項先天性的不

足，用事後的任何精密方法都是無法補救的（如槓桿指針的觀察汞柱高度的確定等）。所以如何取得高純度的樣品氣體，亦為本實驗的相關研究對象，有待發展。

## 六、參考資

國中物理 1，2，3，4 冊

國中化學 1，2，3，4 冊

高中物理上下冊，及實驗課本

高中化學上下冊，及實驗課本

- 評語：1. 作者具有物理學上槓桿原理、氣體原理及大氣壓力原理等正確瞭解並加以運用，以簡單器具設計可以測定氣體分子量的微量天平，就高中一年級程度言之，甚為難得。
2. 作者具有獨立思考精神，一人完成測定裝置，甚為可嘉。
3. 本作品有創意，具有教學上實用價值。