

物理教學實驗室

安全守則與生活公約

實驗前注意事項：

1. 實驗前請先核對實驗儀器清單，並檢查實驗桌上之儀器，若有短缺或破損請註明於器材清點單內，並請立即通知教師或助教。
2. 禁止閒談、嬉鬧，更嚴格禁止拿儀器作為嬉鬧工具。
3. 禁止穿夾腳拖、拖鞋或涼鞋進入實驗室，以防儀器掉落砸傷。
4. 實驗室內不得飲食（水除外）。

實驗中注意事項：

1. 儀器須按規定使用，實驗過程中若儀器損壞，應立即通知教師或助教進行檢修或更換。如因操作不當而損壞，操作者須負賠償之責。
2. 實驗室電腦僅供數據運算與資料傳輸。
3. 實驗完成後應立即檢查結果，誤差過大或不合理之處，應查出發生原因並立即重做。建議準備工程計算機與熟習 MS EXCEL，以利計算。
4. 如遇問題應先自行思考解決方式再與教師或助教討論，勿過度依賴。

實驗後注意事項：

1. 若實驗結果於合理誤差範圍內，不要急著收儀器，待數據經由教師或助教檢查核可後再行收拾儀器。
2. 實驗數據若無教師或助教簽名，該次實驗成績以零分計算。
3. 實驗數據簽名後，務必將實驗器材歸回原位並關掉儀器電源與刪除數據檔案，檢查器材是否短缺或毀損，並於實驗器材清點單上簽名。
4. 儀器收整齊後，請找教師或助教檢查簽名後，方可離開實驗室。

實驗儀器操作注意事項：

1. 使用電源的觀念：

實驗桌之電壓插座包含 110 V 及 220 V 兩種，實驗前應先確定儀器所需電壓為何後，再插上插頭，以避免損壞儀器。

實驗儀器中常常使用到電源開關及調節大小用的旋鈕，如電源供應器。操作這些儀器時須養成良好習慣，以延長儀器的使用壽命。例如，實驗上要求供應 3 V 直流電壓時，正確使用方法是先將所有旋鈕轉到最小，然後插上插頭，再打開開關，當電源燈亮後，再將電壓及電流的旋鈕慢慢適度地調整直到顯示 3 V 為止。若要關閉電源，則應將所有旋鈕轉到最小，再關閉開關，最後拔掉插頭。

2. 注意雷射安全：

雷射 (LASER，全名為 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) 是實驗室中常運用到的工具，具有高強度及同調特性。本實驗室所使用之雷射其功率皆不超過 5 mW，但其強度約為陽光強度數百倍以上，所以仍可能會對眼睛造成傷害，應小心使用。

3. 訊號端子的連接：

很多端子的連接雖有防呆設計，但不要讓自己成為設計者擔心的對象，況且錯誤的硬接，會損壞端子，有時造成兩端子的連接性不佳，無形中影響量測的準確性。請先看兩端子的接腳，找出正確連接方向，再連接兩端子。

4. 儀器不能運作，怎麼辦？

根據過去經驗，發生儀器不能運作的情形有超過一半原因為電源沒開，或者是插頭根本就沒接上。其次才是儀器的組裝或連接有問題。所以當發現儀器不能運作時，請先別急著找教師或助教，請試著培養「自行除錯」的能力。當再次詳細檢查確認非上述問題時，再考慮問題是否出在儀器上。

缺課：

1. 若因病假或公假而不能出席實驗課，**必須事前(上課前)於學校請假網頁系統附上文件正式請假(同學代為傳話者請假無效)**，同意後請與助教聯繫安排補作。
2. 若未能在事前請假，則必須於一周內向教師提出合理的證明，否則以曠課論，且不得補作實驗。若請假事由可被接受，才可補作實驗，但必須於規定時間內完成。

目次

導論	1
基本測量與統計	15
一維運動	23
圓周運動	29
一維碰撞	33
波動	41
熱力學	45
附錄	I

導論

前言：

大學教育不僅傳授專業知識，也著重於培養良好的實驗態度與習慣。在實驗課所提供的學習機會裡，同學們不但可以親手獲得第一手知識，也學到如何正確地使用儀器，鍛鍊出一雙靈巧的手，體驗本身能力以及發揮器材效用，這是一種寶貴的經驗。

「求真」是科學的美德，在實驗室裡清楚地知道自己在做什麼、忠實地記錄下所有的原始數據與結果，這就是求真。我們固然重視實驗結果的合理與否，但更重要的是對問題的了解、對問題的透視以及分析能力上的訓練。實驗做完後要能知道什麼樣的原因會造成這樣的結果：如果結果對了，要能知道為什麼會對；如果錯了，要有能力判斷出問題的癥結，看出影響的嚴重性如何，分析出解決困難的途徑……等等，這些功力都將成為各位日後發展的本錢，也是實驗課的訓練目的。一位了解為什麼做出重力加速度量值 $g = 10.0 \text{ m/s}^2$ 並知道如何改進的學生，比起另一位不知道為什麼做出 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 的學生要來得有收穫。

以眾所周知的庫倫定律(Coulomb's law)為例，根據 David K. Cheng 所著 *Field and Wave Electromagnetics (2/e)* 其原文嚴密敘述為：「The force between two charged bodies, q_1 and q_2 and, that are very small in comparison with the distance of separation, R_{12} , is proportional to the product of the charges and inversely proportional to the square of the distance, the direction of the force being along the line connecting the charges.」以數學式表示則為：

$$\vec{F}_{12} = \hat{R}_{12} k \frac{q_1 q_2}{R_{12}^2}$$

儘管庫倫定律最初是由實驗所得出來的結果，我們不禁有個疑問：帶電物體到底要小到什麼地步才算是「very small in comparison with the distance of separation」？首先，我們要知道點電荷僅是理想化的假設，就跟質點一樣，在現實世界裡是不存在的。當帶電體幾何尺寸給定時，將距離拉遠是可用近似來表示「very small in comparison with the distance of separation」，如此一來新的問題產生了。當距離拉得太遠可能導致庫倫力非常微弱，以至於很容易受到外界影響，使得實驗結果更不準確，更何況是在實驗室有限空間裡也不容許我們將距離拉得很遠，做實驗以及設計實驗的人總是在各個現實條件下找尋一個最佳化的狀態。因此，實驗的不準度是永遠無法完全避免的。

就因為不準確，實驗就一文不值了嗎？非也。實驗是檢驗真理的必要方式，即便理論說得再漂亮、再天衣無縫，要是禁不起實驗的考驗，它仍舊會被摒棄。當實驗有誤差時，該如何去克服呢？以「謹慎」的態度、多次「練習」藉以提昇實驗技巧，永遠是做好實驗的不二法門。

以下提供幾項做實驗「求真」的基本觀念：

1. 所有測量值都要毫不改變地記錄下來，且不要再有任何的更改或謄錄以降低筆誤甚至被懷疑捏造數據的機會。即使出現了筆誤，就在該數據上畫上橫槓，不可塗改或是修飾。記住，留下所有原始資料，即使它是錯的。
2. 養成將實驗數據以表格形式記錄下來。記住，所有物理量皆應附單位。

3. 單一次測量在實驗上價值不大，因為它可能包含了相當大的誤差而不自知，甚至根本就是錯的。準確起見，盡可能對可測量的物理量做五次以上的測量。

物理量單位：

以國際度量單位 SI. (M.K.S.)為準，數字與單位間應加上一個空格：如 3 kg、4 V、5 m....等等。

採用人名的單位時若欲全寫則必須全為小寫字母，若為簡寫則其第一個字母須大寫，例如：

Newton (人名) → newton (單位) → N (單位)

Hertz (人名) → hertz (單位) → Hz (單位)

Ampere (人名) → ampere (單位) → A (單位)

非採用人名之單位則無論是全寫或簡寫均以小寫字母表示：

例如：

meter = m, hour = h, second = s；但 liter = L 是唯一的例外。

在任何的實驗觀測中，即使採用非常精密的測量儀器也不可能得到絕對精確的實驗結果。此時，便衍生出估計值、有效數字、誤差等觀念。

科學記號：

由阿基米德所提出，科學記號是一種記數的方式由阿基米德所提出。當實驗數據位數過多時，為方便記錄會將實驗數據簡化以科學記號表示。

科學記號是將一個數寫成 1 到 10 間的實數與 10 幕次方的乘積，以 $a \times 10^n$ 表示。在電腦或計算機中通常以「EXP」或「E」來表示 10 的幕次方。

[例 1] 1.632E-19 即 1.632×10^{-19}

[例 2] 3.00E8 即 3.00×10^8

有效數字：

有效數字定義為準確值再加上一位估計值，而估計值為準確值下一位數。

對於長度的表示法可用 2.376×10^{-4} km、0.000 237 6 km、0.237 6 m、23.76 cm、237.6 mm、237 600 m、.....等。上述所有表示法僅單位不同但有效位數都是四位，乍看來很唬人的「零」都只是用來表示小數點的位置而已，並不影響有效數字的位數。

假如有效數字中的「零」不是用來標明小數點的位置，則這些「零」跟所有「不是零」的數字一樣都是有效數字。例如：0.500 06，34.209 都是五位有效數字。

「零」的規則如下：

1. 第一位數之前的「零」一律不算有效數字。
2. 第一位與末位之間所有的「零」均為有效數字。
3. 末位數之後的「零」若為估計值則為有效數字。

A. 四則運算法

(a) 加減法則

有單位者應化成相同單位再進行運算。計算結果以計算前小數點後位數最少者為準，其餘捨去。

[例 1] $49.57 + 2\,903.405\,0 + 9.679 + 5.08 = 2\,967.734\,0 \rightarrow 2\,967.73$

[例 2] $123.579 - 12.41 = 111.169 \rightarrow 111.17$

(b) 乘除與開根號法則

有單位者應化成相同單位再進行運算。計算結果以計算前有效位數最少者為準，其餘捨去。

[例 1] $9\,500\,635 \times 0.58 = 5\,510\,368.30 \rightarrow 5\,500\,000 = 5.5 \times 10^6$

[例 2] $36.94 \times 28.55 = 1\,054.637\,0 \rightarrow 1\,055$

[例 3] $9357.98 \div 508 = 18.421 \rightarrow 18.4$

B. 四捨六入法

在進行大量數據運算時，因四捨五入法，逢五就進位，容易導至誤差均值偏高，因此會改採用四捨六入進行運算，使總體誤差均值較低且趨近於零。規則如下：

1. 估計值(底線)下一位數大於或等於 6 時，進位。

[例] $30.29 \rightarrow 30.3$

2. 估計值(底線)下一位數小於或等於 4 時，不進位。

[例] $30.24 \rightarrow 30.2$

3. 估計值(底線)下一位數為 5 時，再往下看一位數，再決定是否進位。

(a) 往下一位數為 1-9 時進位。

[例] $30.256 \rightarrow 30.3$

(b) 往下一位數為 0 時，應由估計值判斷是否進位，「遇偶便捨，逢奇則入」。

◇ 當估計值為奇數時，進位。

[例] $30.350 \rightarrow 30.4$

◇ 當估計值為偶數時，不進位。

[例] $30.850 \rightarrow 30.8$

誤差表示：

實驗中所有的測量值皆非絕對準確。即使是由同一個人以同一套系統操做重覆實驗也常會得出不完全相同的結果，可見每一次實驗都難免會產生誤差。為了將誤差降到最低，我們必須先分析出導致誤差的原因才能對症下藥。

誤差來源一般分成系統誤差、人為誤差及隨機誤差三大類：

A. 系統誤差

- (a) **設備上缺陷所造成：**例如儀器設計不良或機械零件精度不夠、刻度不準，甚至磨損與老化，都可能造成實驗結果不可靠。解決辦法有：針對特定的測量工作要特別選擇適用的器材，按照標準程序對儀器作校正。上述方法均無效後，可嘗試找出修正公式，用來將原測量值換算成正確的數據。
- (b) **環境所造成：**例如實驗室溫度突然改變將導致米尺的熱脹冷縮，解決的方法可在實驗室裝設恆溫的空調；又比方說，有些電磁輻射會對一些電子儀器造成干擾，所以在設計或採購儀器時可加上「防電磁輻射」的功能設計。
- (c) **理論誤差與實驗方法誤差：**因為理論不夠嚴密或實驗方法採取不當的近似所導致。

B. 隨機誤差

任何系統的物理狀態都具有統計上的不確定性，且此誤差是物理的本質之一，也是永遠存在而無法避免的。唯一應付之道便是增加實驗次數，再以統計學的理论來處理數據以獲得較佳的結果。

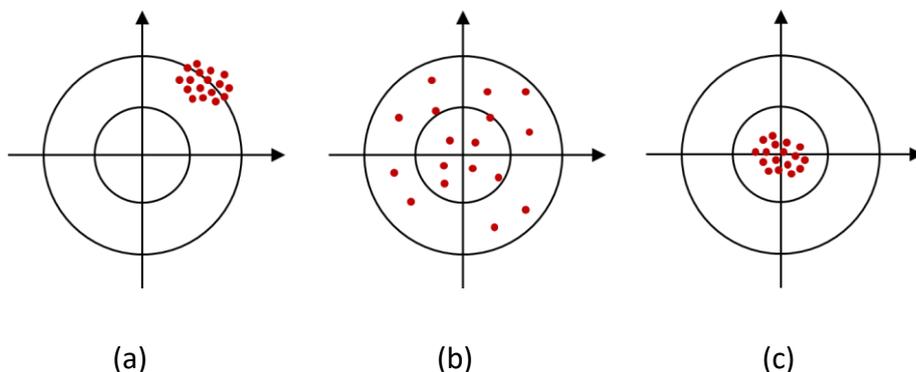
C. 人為誤差

多半為個人疏忽所造成。例如數據的判讀有誤、實驗前忘了校正、記錄數據時的筆誤，或是計算錯誤等。解決的辦法為多做幾次重覆的實驗，以便挑出離譜數據並捨棄之，以及平常便養成細心的習慣等等。

記住，當在整套實驗數據裡找到一個錯誤時，只有「劃去不用」或「實驗重做一遍」兩條路，千萬不可修飾它，也不可只單獨重取該數據，因為這個新取的數據已不屬於原來的那套數據的一部分。此外，人的感官或不良習慣也是造成此類誤差的原因。

測量，有本質上的極限。我們必須認知的是：數量、物理公式、甚至經驗方程式……等等並「不等於」其所描述的那件現象本身。我們只是「人為嘗試著去形容它」罷了。以下，我們將探討如何藉由統計上的方法來詮釋數據。

數據表示：



圖一 精確度示意圖

要完整而精確地表示出一個實驗所量測到的物理量，必須包含以下三者：數量、精確度以及單位。

A. 數量與單位：除物理上以定義的真值(例： $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ 、 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 等)或數學常數(如： R 、 N_A 等)外，皆應以有效數字及科學記號($a.bc \times 10^n$)與單位來表示。

B. 精確度：通常以加減型式表示。可再細分為精度，確度以及精確度三大類。

(a) 精度 - 觀察實驗數據密集程度，用以反映隨機誤差。當實驗數據越集中，即表示隨機誤差較小，實驗精度越高。

(b) 確度 - 觀察實驗數據於實際值偏差程度，用以反映系統誤差。當實驗數據與真值偏差越小，即表示系統誤差較小，實驗確度越高。

(c) 精確度 - 系統與隨機誤差的綜合性指標。當實驗數據越集中且實驗數據與真值偏差越小，即表示實驗準確度越高。

統計分析：

統計分析常用於分析數據，是一種清晰明瞭且具有說服力的工具。即以相同儀器測量相同待測物 n 次時，應將實驗結果加以整理表示。

A. 算術平均數

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

平均數並非真正的值，亦不表示其最可能值，我們只能說它「具代表性」。

B. 偏差 (有正負之分)

$$d_i = x_i - \bar{x}$$

C. 平均偏差

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n}$$

D. 百分誤差

$$\frac{D}{\bar{x}} \times 100\%$$

E. 標準差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}}$$

當實驗數據量夠多(理想情況是 $n \rightarrow \infty$)時，數據將成常態分佈。根據某一數值距離平均值多少個標準差可得知：從「平均值到該值之間的數據個數」佔「總個數」的百分比。根據理論計算的結果，在平均值上下一個標準差範圍內的個數佔總個數的 68.3%；兩個標準差範圍內的個數佔 95.4%；三個標準差範圍內的個數佔 99.7%。因此，當我們看到一段描述「質量 127 公克，標準差 2 公克」時必須知道「約有將近七成的測量數據是在 125 到 129 公克間」。

F. 平均標準差

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n-1)}}$$

在有限次數測量下，所計算的平均值其實只是實際值的一個估計，平均標準差可以做為平均值與實際值差距的不準度參考，越小代表平均值越接近實際值的機率越高。測量次數的增加並不會影響每次測量的可能誤差，可是平均值卻可以抵消隨機誤差而使實驗結果越接近實際值。亦即，標準差並不會隨著測量次數減少，而平均標準差卻會隨著測量次數減少。

平均標準差嚴格定義為對一個測量對象取了 n 個數據 (n 是有限值)，用這 n 個數據可得出一個平均值 \bar{a}_1 。再以這 n 個數據為一組，重覆取無限多組，則每一組將各有其平均值 \bar{a}_i ，於是我們得到了無限多個 \bar{a}_i (它們也將成常態分佈)。而這無限多個 \bar{a}_i 的標準差就是我們所定義的平均標準差。從另一個角度來看，對一個實驗操作九次測量所獲得的平均值，其可靠性為單一測量時的三倍。這種工作冗繁無比，但我們無需這樣做，只要利用統計理論，就可以從一組 n 個量度的標準差 σ 算出平均標準差 σ_x 。

G. 相關係數

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n\sigma_x\sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

$\gamma = 0$	零相關
$0.0 < \gamma < 0.3$	低度相關
$0.3 < \gamma < 0.7$	中度相關
$0.7 < \gamma < 1.0$	高度相關
$\gamma = 1$	完全相關

H. 實驗結果

所有實驗結果應記錄為 $\bar{x} \pm \sigma_x$ ，並附上單位。

誤差傳遞：

兩組以上的實驗結果進行四則運算時，皆應考慮誤差傳遞。

令 $x = \bar{x} \pm \sigma_x$ 且 $y = \bar{y} \pm \sigma_y$

A. 加減法的誤差傳遞

$$\begin{aligned} \overline{x \pm y} &= \bar{x} \pm \bar{y} \quad \text{and} \quad \sigma_{x \pm y}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 \\ x \pm y &= (\bar{x} \pm \bar{y}) \pm \sigma_{x \pm y} \quad \text{and} \quad \sigma_{x \pm y} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \\ \text{一般式(通式)可表示為：} \quad \sigma_N^2 &= \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \end{aligned}$$

B. 乘除法的誤差傳遞

(a) 乘法

$$x \times y = \overline{(xy)} \pm \sigma_{xy}$$

$$\text{where } \overline{(xy)} = \bar{x} \times \bar{y} \quad \text{and} \quad \sigma_{xy} = \sqrt{\left[\left(\frac{\sigma_x}{\bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\bar{y}}\right)^2\right]} \times (\bar{x} \times \bar{y})$$

(b) 除法

$$\frac{x}{y} = \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right) \pm \sigma_{\frac{x}{y}}$$

where $\overline{\left(\frac{x}{y}\right)} = \frac{\bar{x}}{\bar{y}}$ and $\sigma_{\frac{x}{y}} = \sqrt{\left[\left(\frac{\sigma_x}{\bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\bar{y}}\right)^2\right]} \times \frac{\bar{x}}{\bar{y}}$

一般式(通式)可表示為：

$$\left(\frac{\sigma_N}{y}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_1}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{y_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\sigma_n}{y_n}\right)^2$$

其中 y 為導出量的平均值； y_1 、 y_2 、...、 y_n 為乘除計算中每一個物理量的平均值。

C. 冪次運算的誤差傳遞

$$x^l \times y^m = (\bar{x}^l \times \bar{y}^m) \pm \sigma_{x^l y^m}$$

where $\overline{x^l \times y^m} = (\bar{x}^l \times \bar{y}^m)$ and $\left(\frac{\sigma_{x^l y^m}}{\bar{x}^l \bar{y}^m}\right)^2 = l^2 \left(\frac{\sigma_x}{\bar{x}}\right)^2 + m^2 \left(\frac{\sigma_y}{\bar{y}}\right)^2$

D. 一般情況下平均標準差的誤差傳遞

令 $N = f(x, y)$ ，則

$$\sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2}$$

最小平方迴歸分析：

這是一種常用的分析工具，經由計算求得一條最佳逼近曲線，使所有的數據到此線的鉛垂方向距離平方之總和為最小。

設 n 個實驗數據：

$$(x_i, y_i), i = 1, 2, 3, \dots, n$$

簡而言之，線性迴歸分析即為利用數學或統計的方法取得最佳曲線用以解釋過去與預測未來。

A. 線性迴歸 (linear regression)

若其最佳曲線函數型式為 $y = f(x) = Ax + B$ ，其中 A 與 B 均為未知參數，則所有數據到此線的鉛垂方向距離平方和，表示如下

$$D(A, B) = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n [Ax_i + B - y_i]^2$$

所謂最佳化就是使 $D(A, B)$ 為最小，則

$$\frac{\partial D}{\partial A} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial D}{\partial B} = 0$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial D}{\partial A} &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial A} [Ax_i + B - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n 2[Ax_i + B - y_i]x_i \\ &= 2 \sum_{i=1}^n [Ax_i^2 + Bx_i - x_i y_i] = 2 \left[A \sum_{i=1}^n x_i^2 + B \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \right] = 0 \\ \frac{\partial D}{\partial B} &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial B} [Ax_i + B - y_i]^2 = 2 \left[\sum_{i=1}^n Ax_i + \sum_{i=1}^n B - \sum_{i=1}^n y_i \right] \\ &= 2 \left[A \sum_{i=1}^n x_i + nB - \sum_{i=1}^n y_i \right] = 0\end{aligned}$$

解得

$$A = \frac{n[\sum_{i=1}^n x_i y_i] - [\sum_{i=1}^n x_i] \cdot [\sum_{i=1}^n y_i]}{n[\sum_{i=1}^n x_i^2] - [\sum_{i=1}^n x_i]^2} \quad ; \quad B = \frac{[\sum_{i=1}^n y_i] - A[\sum_{i=1}^n x_i]}{n}$$

在很多工程用計算機裡頭都有計算 A 與 B 的功能，我們只須輸入 (x_i, y_i) 便可輕易得出 A 與 B，不須如上作繁雜的計算。試算表軟體(如 MS-Excel)亦可求出迴歸(趨勢)線。

B. 指數迴歸 (exponential regression)

用來描述實驗數據的函數型式為 $y = A \times e^{Bx}$ 者，也可以用計算機或試算表軟體求得其迴歸曲線的參數。

C. 對數迴歸 (logarithmic regression)

用來描述實驗數據的函數型式為 $y = A \times \ln x + B$ 者，也可以用計算機或試算表軟體求得其迴歸曲線的參數。

D. 乘冪迴歸 (power regression)

用來描述實驗數據的函數型式為 $y = A \times x^B$ 者，也可以用計算機或試算表軟體求得其迴歸曲線的參數。

實驗報告的標準格式

封面(Cover)

自由設計

但一定要在封面寫上系、班級、學號、組別、姓名

前言(Introduction)

動機、目的

歷史小故事、前人的成果、有趣的資訊

原理(Theories)

實驗中物理現象的原理

扼要寫出現象、觀念與數學公式

方法(Methods)

說明實驗方法

畫出實驗裝置的示意圖，詳細說明實驗中使用的材料、儀器、設備

結果(Results)

畫數據圖呈現實驗的結果

說明數據的走勢

說明數據圖的特徵，有哪些符合你(妳)的期望，有哪些出乎意料之外

說明數據的精確度如何，誤差傳遞要計算清楚

討論(Discussion)

比對 Results 中**實際的結果**和**預測的結果**，兩者有那裡相符？有哪裡不符合？為什麼不符合？

實驗結果中呈現了哪些誤差？歸納**系統性誤差**和**隨機性誤差**。

你想要如何重新設計實驗，讓方法更簡潔或更嚴謹？

你想要採取那些改善措施，修正系統性誤差或減少隨機性誤差？

結論(Conclusion)

心得與展望

在這次實驗中你學習到哪些事情？

這個實驗還有哪些有趣的問題或方向可以一直發展下去？

這個實驗中的物理現象可以如何應用在日常生活中？

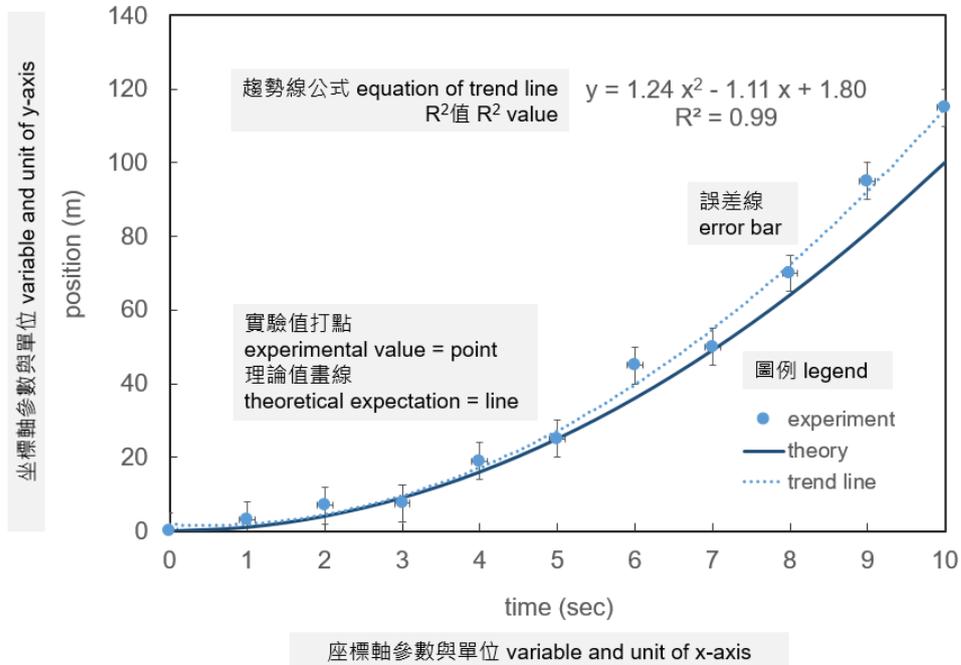
心情小語，或留言給助教

參考資料(References)

請列出參考資料的作者、文章標題、收錄這篇文章的書或期刊、出版商、年份。如果有網址也請註明。

數據圖的標準格式

下圖是一張完整的數據圖：



圖一 隕石位置隨時間變化圖。圖中圓點是實驗數據，粗實線是理論期望值，粗虛線是擬合得到的趨勢線。圖中有標示出趨勢線的公式與擬合的 R^2 值。圖說

以下元素，缺一不可：

- 坐標軸參數與單位
- 實驗值：打點(x_i, y_i)。請不要把點連起來。
- 實驗值的誤差線(error bar)
- 理論值：畫線。請不要打點。
- 趨勢線
- 圖例：圖中每一種符號和線條都要說明它是誰
- 趨勢線公式 $y(x)$ 與 R^2 值(量化數據與趨勢線的接近程度，完全吻合為 1)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - y(x_i))^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad \text{and} \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \quad n: \text{number of data points}$$

- 圖說：圖編號與圖名(一目了然圖表示的物理)

有效數字的處理原則

實驗中我們會用量尺或電子儀器測量物理量。紀錄數據的時候，要記得用「有效數字」表示出量尺(或儀器)的精密度，把「量尺(或儀器)的精密度」這筆資訊保留下來。例如：用尺測量一枝筆的長度，尺的最小測量單位是 1 mm，要讀取長度就是 150.51 mm。其中 150.5 是刻度上可準確讀到的數字，「5」右方的「1」是估計值，150.51 mm 為 5 位有效數字。再以電子天平量重量為例，同一樣藥品若用兩台天平稱量，得到 2.20 g 及 2.1745 g 二組數據，從數據紀錄我們可以判斷這兩台天平的精密度分別為 ± 0.01 g 及 ± 0.0001 g。數據「2.20 g」中的 0 要保留，不可以省略，以正確地呈現出天平的精密度是 ± 0.01 g。記錄實驗測量數據時，記得要養成保留有效數字的習慣，每一筆數據都要記錄**精確讀到的數值再加一位估計值**。

有效數字彼此之間加減乘除的時候，先把數值轉換成科學記號，把數字和數量級 (order of magnitude, 10 的幾次方) 區分清楚，接下來會比較容易處理。例如：

$$0.3456 = 3.45\mathbf{6} \times 10^{-1}$$

$$4567.8 = 4.567\mathbf{8} \times 10^3$$

上面兩筆數字中，粗體是準確值，灰色有襯底線的是估計值，數量級不算有效數字。

以下列出幾個常見的狀況，有些比較棘手，甚至偶爾會產生疑義，請大家記得把數字轉換成科學記號，遵守「保留量尺精確度資訊」這個大原則，棘手狀況就能迎刃而解。

加減：

■ 最直觀沒有疑問的狀況

$$3.45\mathbf{6} \times 10^{-1} + 1.00\mathbf{1} \times 10^{-1} = 4.45\mathbf{7} \times 10^{-1}$$

有效數字的位數從頭到尾都相同，都是四位。

■ 一個值很精密，一個很粗糙，怎麼辦？

$$3.45\mathbf{6} \times 10^{-1} + 1.\mathbf{1} \times 10^{-1} = 4.\mathbf{5} \times 10^{-1}$$

前者很精密，後者很粗糙，這時只能使用跟粗糙的那個量測一樣的精準度。

■ 兩筆數字相加以後，進位了，有效數字位數變多，怎麼辦？

$$3.45\mathbf{6} \times 10^{-1} + 8.00\mathbf{1} \times 10^{-1} = 11.45\mathbf{7} \times 10^{-1}$$

這裡有人是算數字位數派的(只保留四位有效數字)，有人是保留量測精準度派的(保留有效數字到小數點後三位)，兩種都可以。理由說明清楚即可。

乘除：

- 最直觀沒有疑問的狀況

$$(3.45\bar{6} \times 10^{-1}) \times (1.00\bar{1} \times 10^{-1}) = 3.45\bar{9} \times 10^{-2}$$

有效數字的位數從頭到尾都相同，都是三位。

- 一個值爆炸大，一個很小，怎辦？

$$(1.00\bar{1} \times 10^7) \times (1.\bar{1} \times 10^{-1}) = 1.\bar{1} \times 10^6$$

值的數量級(order of magnitude)由 10 的指數吸收，數字只呈現出準確值跟估計值。

前者很精密，後者很粗糙，這時只能使用跟粗糙的那個量測一樣的精準度。

- 相乘以後，進位了，數字位數變多，怎辦？

$$(5.00\bar{1} \times 10^2) \times (5.00\bar{1} \times 10^7) = (25.01\bar{0} \times 10^9)$$

值的數量級(order of magnitude)由 10 的指數吸收，數字只呈現出準確值跟估計值。這裡有人是算數字位數派的(只保留四位有效數字)，有人是保留量測精準度派的(保留有效數字到小數點後三位)，兩種都可以。理由說明清楚即可。

基本測量與統計 I

實驗目的：

1. 使用游標尺(Vernier Caliper)測量待測物長度以及容器外徑、內徑與深度。
2. 使用螺旋測微器(Screw Micrometer)，測量待測物直徑及薄片厚度。
3. 使用走讀顯微鏡(Traveling micrometer)，測量狹縫寬度。

實驗儀器：

游標尺，螺旋測微器，走讀顯微鏡，馬克杯，金屬線，單狹縫，雙狹縫，狹縫架，LED

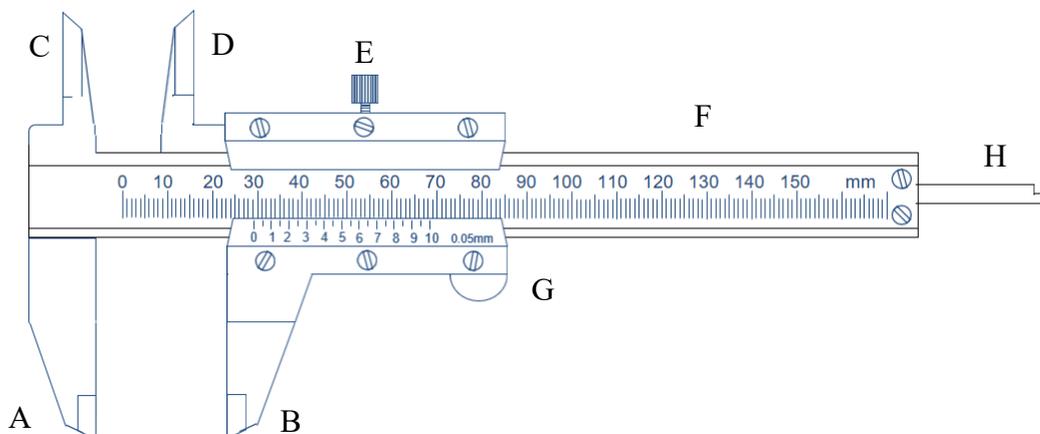
實驗原理：

測量儀器包含主尺與副尺。一般測量儀器於長久使用下極易產生偏差(即不夾待測物時無法歸零)，故測量任何待測物前，應先對測量儀器進行校正並記錄各儀器誤差值，而儀器歸零時所產生的偏差值稱為零點誤差或校正長度。因此，以游標尺、螺旋測微器與走讀顯微鏡測量待測物時，其實際讀值應包含主尺讀值、副尺讀值以及零點誤差。記錄方式如下所示：

$$\text{待測物實際值} = \text{主尺讀值} + \text{副尺讀值} - \text{零點誤差}$$

A. 游標尺

1. 構造說明：圖一為精密度 0.05 mm 游標尺構造示意圖。其中，F 為主尺、G 為副尺並套於主尺上，可左右滑動。副尺上附有螺旋帽 E，用途是將副尺固定於主尺上。A、B 兩鉗用來測量待測物外徑；C、D 兩鉗用來測量待測物內徑；H 桿用來測量待測物深度。



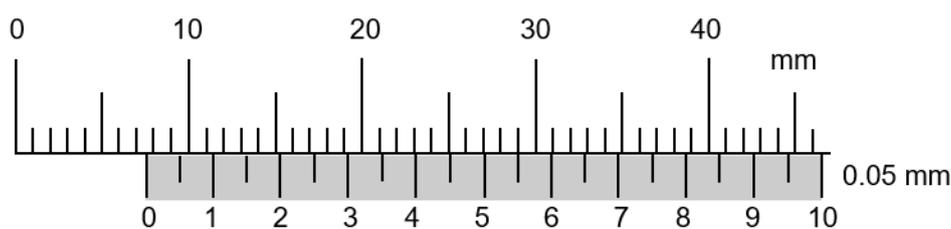
圖一 游標尺構造示意圖。

2. **精密度**：承上，以精密度 0.05 mm 游標尺為例(圖一所示)。
- 主尺最小刻度為 1 mm。
 - 副尺共刻劃 20 個刻度，未夾待測物(歸零)時，副尺第 20 個刻度會與主尺 39 mm 切齊，則可得知副尺每格為 1.95 mm。此數值與主尺兩格(2 mm)相差了 0.05 mm，故可藉由長度差異判定副尺精密度為 0.05 mm。
3. **測量方法**：待測物長度 = 主尺讀值 + 副尺讀值 - 零點誤差。
- 零點誤差：未夾待測物(歸零)時，主尺零點應與副尺零點相切齊。若無，應記錄未夾待測物時，游標尺零點誤差 a_0 。
[註] 副尺零點在主尺零點右側取正值；副尺零點在主尺左側取負值。
 - 主尺讀取方式：以副尺零點位置來判斷。置入待測物後，副尺零點介於主尺 N 與 N+1 mm 間，記錄主尺讀值為 N mm。
 - 副尺讀取方式：以副尺與主尺刻度切齊處來判斷。置入待測物後，將副尺與主尺切齊格數乘上精密度，即為副尺讀值。

在圖二中，若此游標尺未夾待測物(歸零)時，主尺零點與副尺零點相切齊，即表示此游標尺零點誤差為 0.00 mm。當待測物置入後，副尺零點介於主尺 7 與 8 mm 間，故將主尺讀值記錄為 7 mm；同時，副尺第 11 小格與主尺 29 mm 刻度切齊，故副尺讀值記錄為 $11 \times 0.05 \text{ mm} = 0.55 \text{ mm}$ 。

綜合上述，此待測物長度應記為 $7 \text{ mm} + 0.55 \text{ mm} - 0.00 \text{ mm} = 7.55 \text{ mm}$ 。

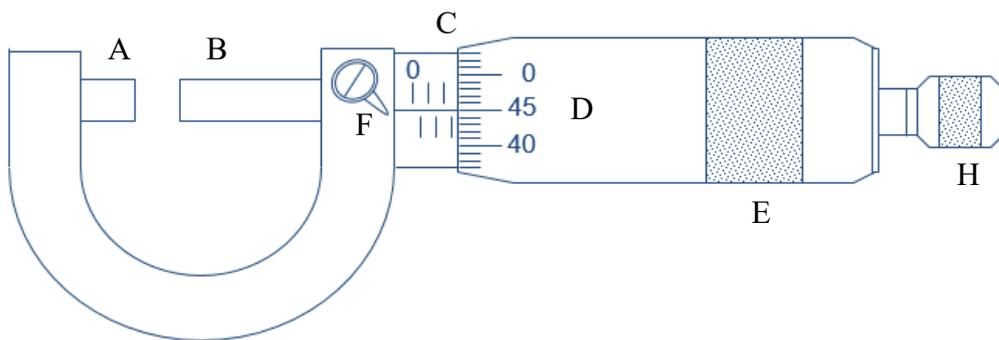
[註] 以 mm 為單位時，記錄至小數點後第二位。



圖二 游標尺範例。

B. 螺旋測微器

1. **構造說明**：圖三為螺旋測微器構造示意圖。其中，C 為主尺、D 為副尺其刻度刻劃於旋轉套筒 E 上、F 為固定閥門，用途是將旋轉套筒固定於主尺上。A、B 兩趾是用來固定待測物，將待測物置於 A、B 兩趾間，再旋轉套筒 E 使 A、B 兩趾確實夾住待測物後，再輕轉壓觸螺旋 H，直到聽到『答、答、答』三響就停止。



圖三 螺旋測微器構造示意圖。

2. **精密度**：主尺以橫線分為上、下兩部分，上部或下部相鄰兩刻度間距皆為 1 mm，而上下部相鄰刻度間距為 0.5 mm。旋轉套筒上共刻劃 50 個刻度作為副尺，當旋轉套筒旋轉一周時，主尺會向前或向後移動 0.5 mm，即副尺精密度為 0.01 mm。
3. **測量方法**：待測物厚度 = 主尺讀值 + 副尺讀值 - 零點誤差。
 - (a) 零點誤差：未夾待測物(歸零)時，主尺橫線應與副尺零點相切齊。若無，應記錄未夾待測物時，螺旋測微器零點誤差 a_0 。
 [註] 主尺橫線在副尺零點上方取正值；主尺橫線在副尺零點下方取負值。
 - (b) 主尺讀取方式：置入待測物後，主尺出現最大刻度值即為主尺刻度。
 - (c) 副尺讀取方式：以主尺橫線對應副尺刻度位置來判斷(必須包含估計值)。

在圖三中，若此螺旋測微器未夾待測物(歸零)時，主尺橫線與副尺零點相切齊，即表示此螺旋測微器零點誤差為 0.000 mm。置入待測物後，主尺出現最大刻度為 2.5 mm，及為主尺讀值；主尺橫線對應致副尺 45.0 格(小數第一位為估計值)，故副尺讀值記錄為 $45.0 \times 0.01 \text{ mm} = 0.450 \text{ mm}$ 。

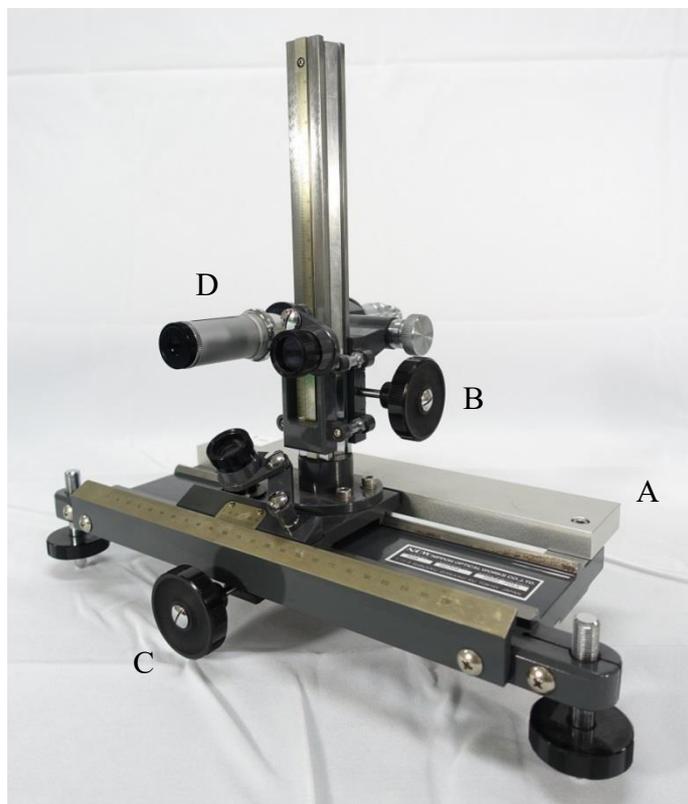
綜合上述，此待測物長度為 $2.5 \text{ mm} + 0.450 \text{ mm} - 0.000 \text{ mm} = 2.950 \text{ mm}$ 。

[註] 以 mm 為單位時，記錄至小數點後第三位(已含估計值)。

C. 走讀顯微鏡

1. **構造說明**：圖四為走讀顯微鏡構造圖。其中，A 為固定平台，平台上附有垂直游標尺組 B 與水平游標尺組 C，用以測量垂直與水平距離，D 為低倍率顯微鏡。
2. **精密度**：判斷方式與游標尺相同。
 - (a) 主尺最小刻度為 0.5 mm。
 - (b) 副尺共刻劃 50 個刻度，未夾待測物(歸零)時，副尺第 50 個刻度會與主尺 24.5 mm 切齊，則可得知副尺每格為 0.49 mm。此數值與主尺每格(0.5 mm)相差了 0.01 mm，故可藉由長度差異判定副尺精密度為 0.01 mm。

3. 測量方法：待測物長度 = 主尺讀值 + 副尺讀值 - 零點誤差。
- (a) 零點誤差：未夾待測物(歸零)時，主尺零點應與副尺零點相切齊。若無，應記錄未夾待測物時，此游標尺零點誤差 a_0 。
- (b) 主尺與副尺讀取方式皆與游標尺相同，不多加描述。



圖四 走讀顯微鏡構造圖。

注意事項：

1. 螺旋測微器使用完畢後，兩趾間應留有些許空隙，以免損傷。
2. 測量儀器夾待測物時，不可過度緊壓。尤其在使用螺旋測微器時，待兩趾與待測物接觸後，當聽到『答、答、答』三響後停止轉動。

實驗步驟：

A. 以游標尺測量馬克杯內徑、外徑與深度，藉以計算馬克杯容積

1. 記錄游標尺零點誤差 a_0 。
2. 以 A、B 兩鉗測量馬克杯外徑 $2R$ 。
3. 以 C、D 兩鉗測量馬克杯內徑 $2r$ 。
4. 將 H 桿深入馬克杯內並緊靠邊緣，測量馬克杯不同位置深度 h 。
5. 計算平均值與平均標準差。
6. 計算馬克杯容積 V (應考慮誤差傳遞)。

[註] 馬克杯容積 $V = \pi r^2 h = \bar{V} \pm \sigma_V$

$$\bar{V} = \pi \bar{r}^2 \bar{h} \quad \sigma_V = \sqrt{\sigma_r^2 (2\pi \bar{r} \bar{h})^2 + \sigma_h^2 (\pi \bar{r}^2)^2}$$

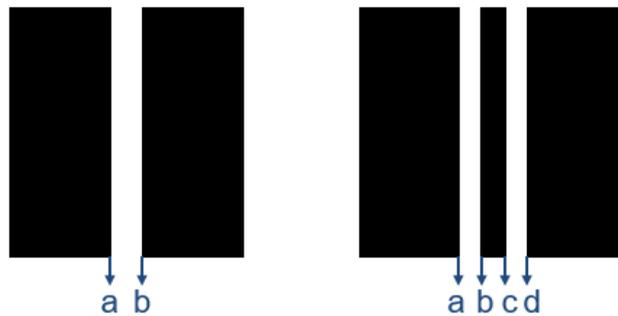
B. 以螺旋測微器測量金屬線直徑與自選物厚度

1. 記錄螺旋測微器零點誤差 a_0 。
2. 以 A、B 兩趾夾緊金屬線測量金屬線不同位置直徑。
3. 同上，測量自選物於不同位置厚度。
4. 計算平均值與平均標準差。

C. 以走讀顯微鏡測量單狹縫寬度、雙狹縫寬度及中央亮暗帶寬度

1. 調整走讀顯微鏡腳座高度，使水平儀內氣泡落於正中央。
2. 將待測狹縫置於狹縫架上，依序調整垂直與水平兩游標尺上旋鈕以及顯微鏡目鏡位置(伸縮)，使待測狹縫可於顯微鏡內清楚成像。
3. 以單狹縫為例(如圖五所示)，調整旋鈕使顯微鏡筒內十字線落於單狹縫 a 緣，並記錄此時位置為 x_1 ；再調整旋鈕使顯微鏡筒內十字線落於單狹縫 b 緣，此並記錄此時位置為 x_2 。則此單狹縫寬度 Δx 即為 $|x_2 - x_1|$ 。
4. 雙狹縫寬度及中央亮暗帶寬度測量方式如上所述。
5. 計算平均值與平均標準差。

[註] 實驗前應確認顯微鏡統與狹縫相互垂直



圖五 單狹縫(左)與雙狹縫(右)示意圖。

討論提示：

1. 測量馬克杯不同位置內徑、外徑與深度時會發現其讀值不盡相同。試問，在相同位置測量與在不同位置測量有何不同？試說明。
2. 使用螺旋測微器測量待測物厚度時，待測物是否有所限制？試說明。
3. 當走讀顯微鏡放大倍率改變時，是否會影響最小刻度判別？試說明。
4. 如何判定狹縫與顯微鏡垂直？若兩者未垂直是否會對實驗造成影響？試說明。

基本測量與統計 II

實驗目的：

以球徑計測量曲面玻璃之曲率半徑。

實驗儀器：

儀表式球徑計，傳統式球徑計(參考)，平面玻璃，曲面玻璃

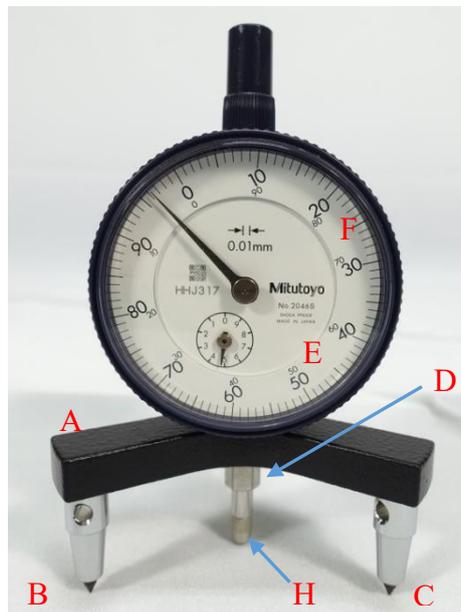
實驗原理：

A. 構造說明：

圖一為儀表式球徑計示意圖，A 為三臂等長之三腳架，相鄰兩臂夾角均為 120 度。

B、C、D 為三腳架的等長固定腳。

內部刻度盤 E 為主尺，每小格刻度為 1 mm；外部刻度盤 F 為副尺，分成 100 等分。當副尺指針轉動一圈時，主尺指針會增加或減少 1 mm (即測微探針 H 伸長或內縮 1 mm)，由此判定副尺精密度為 0.01 mm。



圖一 球徑計構造圖。

B. 讀取方法：

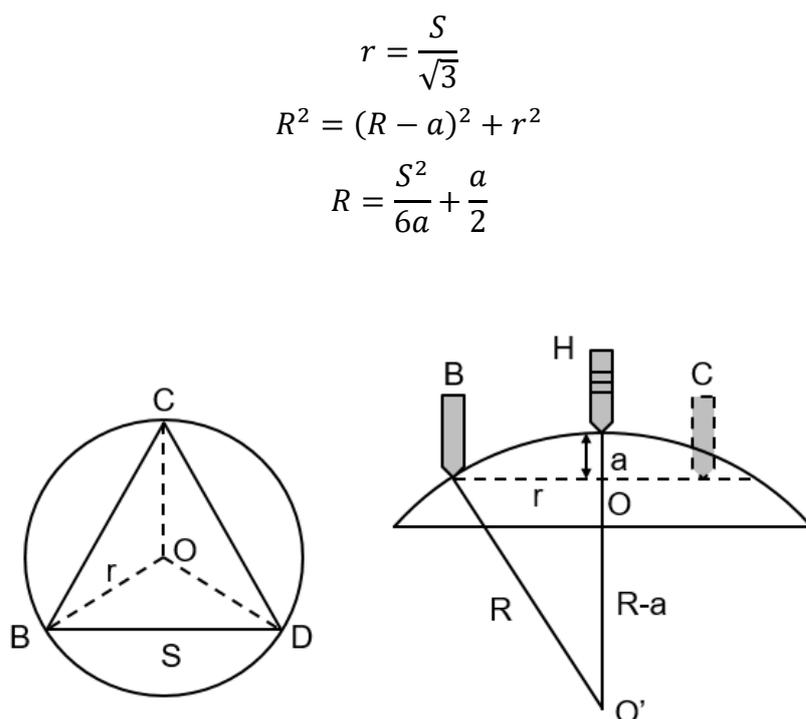
(d) 主尺：判斷方式與游標尺主尺雷同。當主尺指針指向 N 與 N+1 時，記錄主尺讀值為 N mm。

(e) 副尺：判斷方式與螺旋測微器副尺雷同。即以副尺指針對應位置來判斷，必須包含估計值。

C. 球面曲率半徑測量

如圖二所示，球徑計三固定腳構成一個等邊(正)三角形 BCD，三固定腳彼此之間的垂直距離為 S 。在此，以 r 表示正三角形外接圓半徑。

將球徑計置於曲面玻璃上時，球徑計測微探針 H 的鉛直延長線必會通過待測球面的球心 O' 與三角形 BCD 外接圓的圓心 O 。假設球面玻璃曲率半徑為 R ，經由球徑計測微探針 H 所測得的高度為 a ，則可由畢氏定理求得待測球面曲率半徑 R 。



圖二 球徑計俯視圖(左)與側視圖(右)。

注意事項：

1. 實驗時應將球徑計輕放於平板玻璃或曲面玻璃上方，以免固定角尖端變形。
2. 測量過程中，球徑計四固定腳應與玻璃接觸。

實驗步驟：

1. 調整球徑計下方固定腳，使其呈正三角形(理想)。
2. 將球徑計放置於紙面上並輕壓球徑計。
3. 移開球徑計再於紙面描繪三固定腳所構成之正三角形。
4. 以游標尺於紙面上測量球徑計相鄰兩固定腳間的距離 S 。
5. 將球徑計輕放於平板玻璃上，記錄此時讀值為 a_0 。
6. 再將球徑計輕放於曲面玻璃上，記錄此時讀值為 a_1 。

7. 計算平面與曲面玻璃高度差 a 。

$$a = |a_1 - a_0|$$

8. 計算平均值與平均標準偏差。
9. 計算球面玻璃曲率半徑 R (應考慮誤差傳遞)。

[註] 曲率半徑 $R = \frac{s^2}{6a} + \frac{a}{2} = \bar{R} \pm \sigma_R$

$$\bar{R} = \frac{\bar{s}^2}{6\bar{a}} + \frac{\bar{a}}{2}$$

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_s^2 \left(\frac{\bar{s}}{3\bar{a}}\right)^2 + \sigma_a^2 \left(-\frac{\bar{s}^2}{6\bar{a}^2} + \frac{1}{2}\right)^2}$$

10. 改以傳統式球計測量球面曲率半徑。

討論提示：

1. 傳統球徑計與儀表式球徑計設計上是否不同？試說明。
2. 是否可用球徑計測量凹面鏡的曲率半徑？試說明。

一維運動

實驗目的：

藉重力拉軌道上的滑車，分別觀測滑車的水平與爬坡滑動，驗證牛頓運動定律。

實驗儀器：

鋁製軌道，滑車，水平儀，軌道斜面支架，掛鉤，砝碼，細線，直尺，電子秤(公用)，含滑輪之光閘(含連接線) photogate with pulley，數位轉接頭(藍、PS-2159)，藍牙訊號收發器(白、PS-3200)，電腦(含Capstone 程式軟體)。

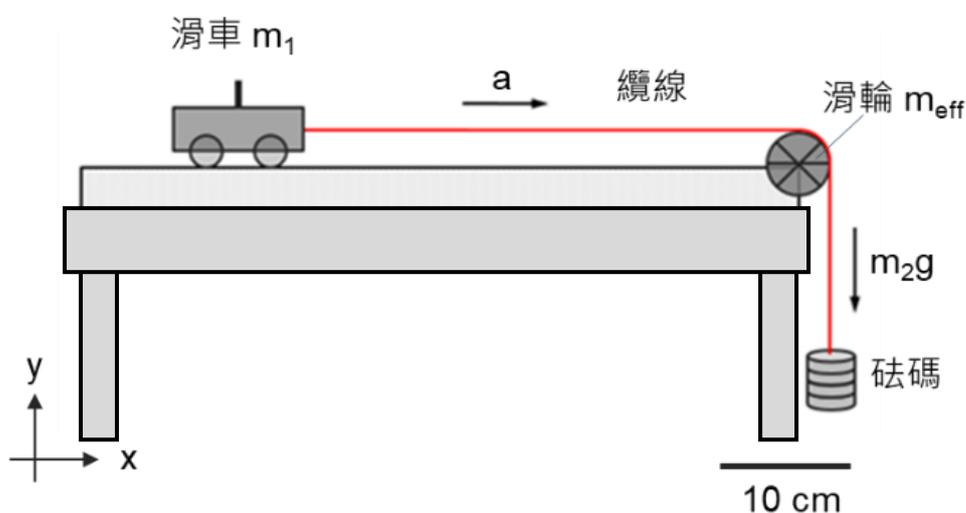
實驗原理：

牛頓第二運動定律定義運動中的物體所受到的淨力等於物體質量與加速度的乘積。其受力方程式可表示為

$$\vec{F} = M\vec{a} \quad (1)$$

(1)式中， \vec{F} 是作用於物體上所有力的向量和，具有量值與方向性。 M 為物體的質量，只有量值沒有方向性。 \vec{a} 為物體的加速度，具有量值與方向性。

圖一為牛頓運動定律實驗裝置示意圖，滑車與砝碼用纜線連接在一起，纜線掛在滑輪上，重力會拉動砝碼往 $-y$ 方向下墜並帶動滑車往 x 方向前進。



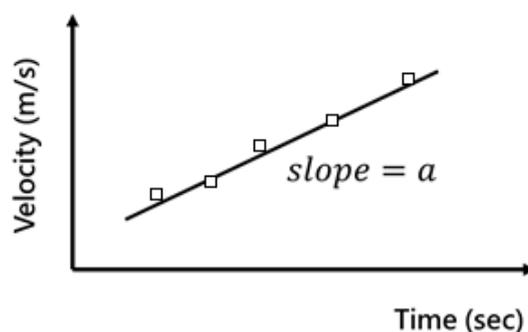
圖一 牛頓運動定律實驗裝置示意圖。圖中 m_1 為滑車與滑車上砝碼總質量， m_2 為砝碼與掛鉤的總質量， a 是滑車滑行與砝碼下墜的加速度， g 是重力加速度， m_{eff} 定義為滑輪轉動的等效質量。

圖一中， m_1 為滑車與滑車上砝碼總質量， m_2 為砝碼與掛鉤的總質量。另滑輪轉動須提供其轉動動能(見物理 I 轉動章節)，就能量觀點，懸掛砝碼與掛鉤(m_2)的下落提供重力位能，轉換成滑車與滑車上砝碼(m_1)與懸掛砝碼與掛鉤(m_2)的線性動能，以及滑輪的轉動動能，當然還有少量因摩擦消耗的能量；滑輪的轉動動能決定於其轉動慣量 I 與角速率 ω ， $K_{rotation} = \frac{1}{2}I\omega^2$ ，通常可寫成 $\frac{1}{2}\beta m_r v^2$ ， β 決定於轉動物的質量 (m_r) 分布，為無單位係數；因此我們定義滑輪轉動的等效質量為 m_{eff} ，其能量變化導致對系統的力為 m_{eff} 乘上加速度 $-\vec{a}$ 。對我們的實驗系統而言， m_{eff} 是 4.50 g，就好像系統裡多出 4.50 g 的質量一樣。

當 m_1 受到 m_2g 作用而作等加速度運動時，公式(1)可改寫為

$$\begin{aligned} F &= Ma \\ \Rightarrow m_2g - m_{eff}a &= (m_1 + m_2)a \\ \Rightarrow m_2g &= (m_1 + m_2 + m_{eff})a \end{aligned}$$

實驗裝置的軟體會自動測量滑輪的轉速，換算成滑車滑動的位移與速度，顯示出速度隨時間的變化(如圖二所示)，用線性回歸算出直線的斜率，此斜率就是系統加速度 a 。



圖二 速度與時間關係圖

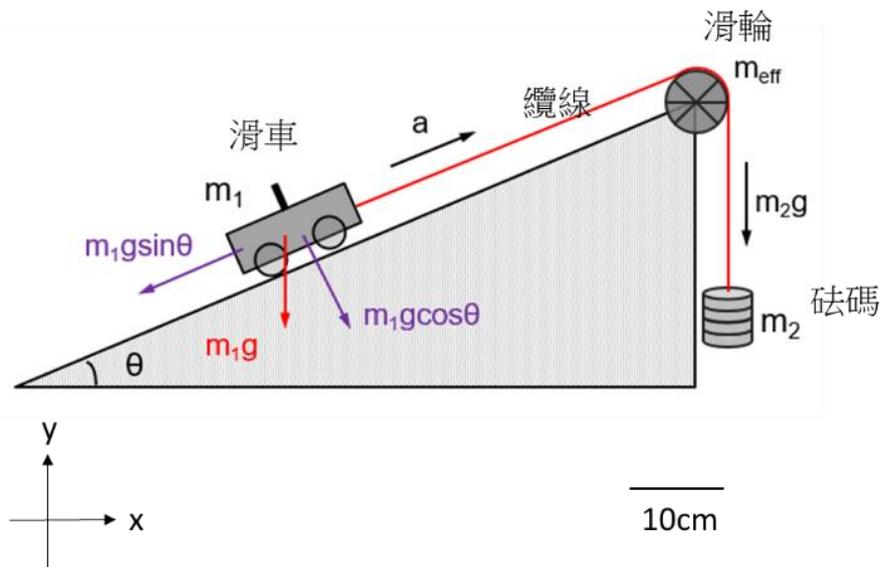
圖三為滑車爬坡裝置示意圖(又稱阿特午機 Atwood machine)。滑車與砝碼用纜線連接在一起，纜線掛在滑輪上。 m_2 往 $-y$ 方向下墜並帶動滑車在坡上爬升。 m_1 為滑車與滑車上方砝碼總質量， m_2 為掛鉤與鉤上砝碼總質量，同上，我們定義滑輪轉動的等效質量為 m_{eff} ，滑輪轉動對系統產生的淨力為 m_{eff} 乘上加速度 $-\vec{a}$ 。

由牛頓第二運動定律可知，力與加速度的關係如下

$$\begin{aligned} F &= Ma \\ m_2g - m_1g \sin \theta - m_{eff}a &= (m_1 + m_2)a \end{aligned}$$

因此，系統加速度 a 可表示為

$$a = \frac{m_2g - m_1g \sin \theta}{m_1 + m_2 + m_{eff}}$$



圖三 滑車爬坡實驗裝置示意圖。圖中 m_1 為滑車與滑車上砝碼總質量， m_2 為砝碼與掛鈎的總質量， a 是滑車滑行與砝碼下墜的加速度， g 是重力加速度。 θ 是軌道傾斜角度， m_{eff} 定義為滑輪轉動的等效質量。

當 $\theta < 10^\circ$ 時， $\sin \theta (\text{deg}) \approx \theta (\text{rad})$ ，系統加速度 a 可改寫成

$$a \approx \frac{m_2 g - m_1 g \theta}{m_1 + m_2 + m_{\text{eff}}}$$

此時若 $m_1 \gg m_2$ 且 $m_1 \gg m_{\text{eff}}$ 時，系統加速度 a 可再簡化為

$$a \approx \frac{m_2 g}{m_1} - g \theta$$

調整軌道的傾斜角度等同於調整滑車受到的拉力，實驗中可以觀察到拉力改變如何影響滑車爬升的加速度。

注意事項：

1. 實驗進行前將軌道調整為近乎水平狀態並鎖緊螺絲。軌道一側應置放緩衝架。
2. 滑輪結構脆弱，且掛鈎很纖細，因此掛鈎上砝碼總重不要超過 100 g，以免拉力過大造成細繩斷裂或滑車脫軌。
3. 黃色緩衝地墊應置於載有砝碼掛鈎的正下方地板上，以免它們直接扎到地板或人腳。

實驗步驟：

➤ 水平滑動實驗：

實驗前校正

1. 將水平儀置於軌道上方，調整軌道下方螺絲使軌道盡量水平。
2. 將滑車置於軌道上方，觀察滑車是否會順著軌道移動(軌道未呈水平)。如果會，請再次調整軌道水平，直到滑車幾乎靜止不動。如軌道本身有形變無法水平，可試著估計其影響。
3. 取適當長度細線，將細線一端先繫於黑色 O-ring 後再套於滑車上方固定柱，另一端繫於掛鈎扣環。
4. 將細線跨過滑輪搭在上面，調整滑輪高低位置使細線與軌道面平行。

A. F 固定不變，改變 M ，觀察 a 如何隨著 M 改變

1. 以電子秤測量掛鈎與掛鈎上砝碼總質量 m_2 。
2. 以電子秤測量滑車與滑車上砝碼總質量 m_1 。
3. 計算系統總質量 $M = m_1 + m_2 + m_{\text{eff}}$ 。
4. 依軟體操作說明書設定相關參數與關係圖。
5. 將滑車置於軌道上方並以手輕壓滑車。啟動軟體開始擷取數據後釋放滑車，由軟體取得系統加速度 a ，以 $a = \bar{a} \pm \sigma_a$ 表示。
6. 固定系統作用力 F ，改變系統總質量 M ，重覆上述步驟。
7. 作 $\frac{1}{a}$ vs. M 關係圖， $\frac{1}{a}$ 為應變數在 y 軸， M 為自變數在 x 軸，與期望結果作比較。

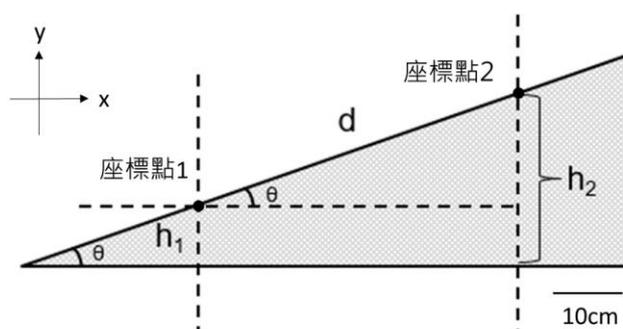
B. F 改變，固定 M ，觀察 a 如何隨著 F 改變

1. 以電子秤測量掛鈎與掛鈎上砝碼總質量 m_2 。
2. 以電子秤測量滑車與滑車上砝碼總質量 m_1 。
3. 計算系統總質量 $M = m_1 + m_2 + m_{\text{eff}}$ 。
4. 將滑車置於軌道上方並以手輕壓滑車。啟動軟體開始擷取數據後釋放滑車，由軟體取得系統加速度 a ，以 $a = \bar{a} \pm \sigma_a$ 表示。
5. 將掛鈎上砝碼或滑車上砝碼以不改變總質量 M 的原則下任意移動(即進退改變掛鈎與鈎上砝碼拉力 $F = m_2 g$)，重覆上述步驟。
6. 作 a vs. F 關係圖， a 為應變數在 y 軸， F 為自變數在 x 軸，與期望結果作比較。

► 爬坡實驗：

實驗前校正

1. 將水平儀置於軌道上方，調整軌道下方螺絲使軌道水平。
2. 將軌道斜面支架固定於軌道其中一側，用以抬高軌道使其傾角為 θ ，改變傾角時，務必手扶著軌道再調整支架螺絲，改變軌道傾斜度後，鎖緊支架螺絲後再放手。
3. 以三角公式測量軌道傾角 θ 。如圖四所示， h_1 為座標點 1 高度， h_2 為座標點 2 高度， d 則為兩座標點間的距離，傾斜角 θ 可根據座標點高度差及兩點間距 d ，代入三角函數公式求得。(電腦中的三角函數所使用的引數皆為徑度量。)
4. 取適當長度細線，細線一端先繫於黑色 O-ring 後再套於滑車上方固定柱，另一端繫於掛鈎扣環。
5. 將細線跨過滑輪搭在上面，調整滑輪高低位置使細線與軌道面平行。



$$\sin \theta = \frac{h_2 - h_1}{d}$$
$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{h_2 - h_1}{d} \right)$$

圖四 三角公式測量軌道傾角示意圖。 h_1 為座標點 1 高度， h_2 為座標點 2 高度， d 則為兩座標點間的距離， θ 為軌道傾斜角度。

C. 固定 M ，固定 F ，改變 θ ，觀察 a 如何隨著 θ 改變

1. 以電子秤測量掛鈎與掛鈎上砝碼總質量 m_2 。
2. 以電子秤測量滑車與滑車上砝碼總質量 m_1 。
3. 計算系統總質量 $M = m_1 + m_2 + m_{\text{eff}}$ 。
4. 以三角公式測量軌道傾角 θ 。
5. 依軟體操作說明書設定相關參數與關係圖。
6. 將滑車置於軌道上方並以手輕壓滑車。先啟動軟體開始擷取數據後釋放滑車，再由軟體取得系統加速度 a ，以 $a = \bar{a} \pm \sigma_a$ 表示。
7. 固定滑車(含滑車上砝碼)總質量 m_1 與掛鈎(含鈎上砝碼)總質量 m_2 ，改變軌道斜面傾角 θ ，重覆上述步驟 6。
8. 作表，將 θ 與拉力 F 的對應關係列出來。
9. 作 a vs. θ 關係圖， a 為應變數在 y 軸， θ 為自變數在 x 軸，與期望結果作比較。
10. 作 a vs. $\sin \theta$ 關係圖， a 在 y 軸， $\sin \theta$ 在 x 軸，與期望結果作比較。

討論提示：

1. 如何從 a vs. F 關係圖中(水平滑動 B)的擬合直線外插於 x 軸或 y 軸截距，判斷滑車在初始狀態發生了什麼事？
2. 如何從 $\frac{1}{a}$ vs. M 關係圖和 a vs. F 關係圖中(水平滑動) a 的走勢，推論滑車輪子和軌道間的靜摩擦力和動摩擦力是否存在？能不能估算出靜摩擦力和動摩擦力的數值？
3. 分析繩子與滑輪、滑輪與軸承之間有哪些摩擦力？試推導解釋為何這些摩擦力的總和正比於滑車的加速度。
4. 如何改進實驗裝置，減少摩擦力的影響？
5. 如果把實驗裝置搬到月球和火星上，實驗結果會如何變化？

圓周運動

實驗目的：

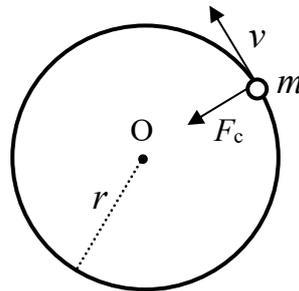
圓周運動為自然界基本的運動模式之一，舉凡原子內電子運動，車輛轉彎到星體間的運動，皆涉及圓周運動。本實驗將驗證圓周運動中，旋轉滑塊質量、旋轉半徑、旋轉週期、旋轉角速率與向心力之間的關係。

實驗儀器：

轉動平台系統，旋轉滑塊，砝碼，水平儀，馬達，電源供應器，電子秤(公用)，藍牙力感測器 Force sensor (PS-3202)，電腦(含Capstone 程式軟體)。

實驗原理：

如圖一所示，當一物體以半徑 r 作水平圓周運動時，此物體所受到的向心力量值 F_c 如下所示：



圖一 物體進行圓周運動示意圖。實線圓為物體水平軌跡， m 為物體的質量、 r 為物體旋轉的半徑、 v 為物體移動的速率、 F_c 為物體受到的向心力量值。

$$F_c = m\omega^2 r = m \left(\frac{v}{r}\right)^2 r = m \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

(1)式中， m 為物體質量， v 為物體旋轉時的切線速率， ω 為物體旋轉時的角速率。

在圓周運動中，物體旋轉時的切線速率 v 可表示為

$$v = r\omega = \frac{2\pi r}{T} \quad (2)$$

(2)式中， T 為物體旋轉周期。

把(2)式代入(1)式可知，物體感受的向心力 F_c 、旋轉角速率 ω 與旋轉周期 T 關係，表示如下

$$F_c = \frac{mv^2}{r} = \frac{m(r\omega)^2}{r} = mr\omega^2 = \frac{4\pi^2mr}{T^2} \quad (3)$$

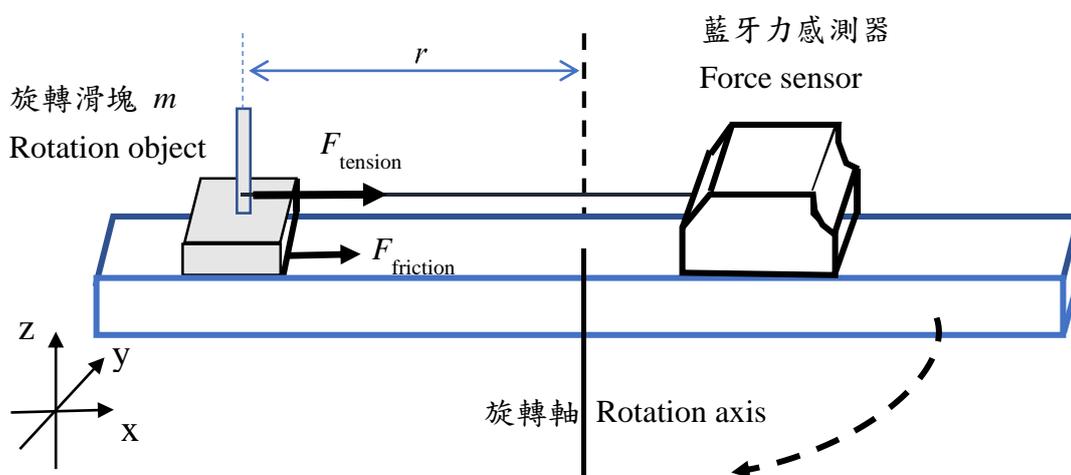
圖二為圓周運動實驗裝置示意圖。 m 為旋轉滑塊(含其上方砝碼)總質量、纜線的兩端連結旋轉滑塊與藍牙力感測器(PS-3202)。

當轉台轉速逐漸增加時，旋轉滑塊所需的向心力便會逐漸增大。此時，旋轉滑塊所受向心力量值 F_c ，可表示為

$$F_c = |\vec{F}_{\text{tension}} + \vec{F}_{\text{friction}}| = mr\omega^2$$

$$F_{\text{friction}} = \mu mg$$

其中， F_{tension} 為纜線張力量值、 F_{friction} 為旋轉滑塊與滑軌間的靜摩擦力量值、 μ 為旋轉滑塊與滑軌間的靜摩擦係數、 g 為重力加速度。



圖二 圓周運動實驗裝置示意圖。粗虛線為滑塊水平圓周運動的部分軌跡， m 為旋轉滑塊與其上方砝碼的總質量， r 是旋轉滑塊的旋轉半徑， F_{tension} 是纜線張力量值， F_{friction} 是旋轉滑塊與滑軌間的摩擦力量值。

注意事項：

1. 轉台轉動前，應先確認旋轉滑塊與藍牙力感測器皆置於旋轉軌道內，並確認所有螺絲(含軌道兩側)已鎖緊，避免砝碼或滑塊因轉動拋出而造成傷害。
2. 不可用力推或拉力感測器(Force sensor)，以免造成儀器損壞。
3. 力感測器所測量到的力可為正負兩種，正值代表纜線對感測器為推力；負值代表纜線對感測器為拉力。
4. 馬達由直流電源供應器驅動，馬達香蕉接頭(紅)插在電壓輸出正端(紅)、馬達香蕉接頭(黑)插在電壓輸出負端(黑)，為避免馬達損壞，提供電壓不可超過 10.0 V。
5. 電源供應器設定為定電壓(C.V.)輸出模式：使用前先確定電流電壓共四個旋鈕逆時針轉到底(即~零)，按下開關(ON)，將電流粗調鈕順時針轉至最大，再慢慢順時針轉電壓鈕至所要的電壓；關電源供應器則依前述順序反向操作。(圖示於附錄二)

實驗步驟：

➤ 實驗前校正

1. 將水平儀放置於滑軌上方，調整基座螺絲使滑軌保持水平。
2. 調整馬達螺絲，使轉台下方橡皮繩應緊緊繫於轉盤與馬達間，將螺絲鎖緊，實驗完成後須鬆螺絲，馬達移靠近轉盤放鬆橡皮繩。
3. 利用 capstone 的校正功能(Calibration)校正力感測器數值(見操作說明書)。
4. 藉由調整力感測器位置來改變旋轉半徑，調整時請先鬆開橫向的白色半透明 PE 螺絲，再調整直立的黑色 HDPE 螺絲棒。待移動到定位後,再反向一一鎖緊。
5. 藉由調整電源供應器輸出電壓來改變角速率。

A. 向心力 vs. 角速率

1. 測量旋轉滑塊質量 m 。
2. 依軟體操作說明書設定相關參數與關係圖。
3. 於滑軌放置滑塊、另一側放置力感測器(需固定於滑軌上)，測量旋轉半徑 r 。滑軌兩側的安全鎖鈕需鎖緊。
4. 開啟電源供應器，並提供電壓使馬達帶動轉台轉動。(注意:電壓若太小，轉動緩慢，繩未緊繃，誤差可能較大，但也不要瞬間轉至大電壓。提供電壓不可超過 10.0 V。)
5. 待轉台轉速穩定後，啟動軟體開始擷取數據，觀察『角速率-時間』與『力-時間』關係曲線變化約 20 秒-30 秒後，再將電壓調變改變轉速，曲線改變待穩定後持續約 20 秒-30 秒後，再繼續下一電壓，依序完成數組不同轉速的測量後，停止擷取數據，然後調降電壓至零使其停止轉動。(相鄰的力量值差 $> 0.5 \text{ N}$)
6. 記錄不同電壓下，各穩定狀態下，角速率 ω 與纜線張力量值 F_{tension} 各平均值。
7. 作 F_{tension} vs. ω^2 關係圖，作線性擬合，其與 y 軸之截距為何？比較斜率和其預期值。

B. 向心力 vs. 旋轉半徑

1. 測量旋轉滑塊質量 m 。
2. 先設定初始旋轉半徑為 r (建議初始長度為 10.0 cm)。
3. 依軟體操作說明書設定相關參數與關係圖。
4. 開啟電源供應器，並提供電壓使馬達帶動轉台轉動。(注意:電壓若太小，轉動緩慢，繩未緊繃，誤差可能較大提供電壓不可超過 10.0 V。)
5. 待轉台轉速穩定後，啟動軟體開始擷取數據，觀察『角速率-時間』與『力-時間』關係曲線變化約 20 秒-30 秒後再停止擷取，電源供應器電壓輸出調為零。
6. 記錄穩定狀態下，角速率 ω 與纜線張力量值 F_{tension} 各平均值。
7. 改變旋轉半徑為 r 的長度(即力感測器位置)，固定角速率 ω (可微調電源供應器驅動電壓 V)，重覆上述步驟 2-6。
8. 作 F_{tension} vs. r 關係圖，作線性擬合，其與 y 軸之截距為何? 比較斜率和其預期值。

C. 向心力 vs. 旋轉物的質量

1. 依軟體操作說明書設定相關參數與關係圖。
2. 測量旋轉滑塊質量 m 與旋轉半徑 r 。
3. 開啟電源供應器，並提供電壓使馬達帶動轉台轉動。(注意:電壓若太小，轉動緩慢，繩未緊繃，誤差可能較大。提供電壓不可超過 10.0 V。)
4. 待轉台轉速穩定後，啟動軟體開始擷取數據，觀察『角速率-時間』與『力-時間』關係曲線變化約 20 秒-30 秒後停止擷取，再將電壓調輸出為零，停止轉動。
5. 分別記錄穩定狀態下，角速率 ω 與纜線張力量值 F_{tension} 各平均值。
6. 改變旋轉滑塊質量 m ，其它參數固定(可微調電壓維持角速率 ω 固定)，重覆上述步驟 2-5。
7. 作 F_{tension} vs. m 關係圖，作線性擬合，其與 y 軸之截距為何? 比較斜率和其預期值。

討論提示：

1. 是否可由實驗數據計算靜摩擦係數 μ ? 所得數值在不同運動狀態會相同嗎? 試說明。
2. 若滑軌不完全水平，對實驗結果有何影響? 試說明。

一維碰撞

實驗目的：

藉由兩台滑車在鋁製軌道上碰撞，觀察各典型彈性碰撞與非彈性碰撞，驗證動量守恆與能量守恆定律。

實驗儀器：

鋁製軌道，滑車，網路攝影機(含三角架)，砝碼，水平儀，磁鐵，橡皮筋 U 型架組，鋁片，魔鬼氈組，針尖與黏土組，電子秤(公用)，電腦(含 Logger Pro 3.16 程式軟體)。

實驗原理：

當兩物體在封閉且孤立的環境相撞，碰撞前後系統總動量並不會改變，稱為動量守恆。當碰撞是彈性碰撞，動能也會守恆。如果碰撞不是彈性(即非彈性)，有些能量轉化成熱或聲音等...散逸出去，碰撞後的總動能就會減少。以下將說明，

1. 彈性碰撞：滑車互相靠近然後彈開，動能守恆。
2. 非彈性碰撞：滑車互撞、有接觸到、然後彈開，動能損耗不守恆。

完全非彈性碰撞：滑車互撞然後黏住合體、一起滑走，會有最大的動能損耗。

此三類碰撞狀況下的動量和動能變化。在此定義 m_1 與 m_2 分別為滑車(含車上砝碼)總質量，兩滑車於一維(線性)碰撞前速度分別為 v_1 與 v_2 ；碰撞後速度分別為 u_1 與 u_2 。

A. 彈性碰撞

圖一為兩滑車於軌道上進行彈性碰撞示意圖。在此條件下，兩滑車於碰撞前後必遵守動量守恆與動能守恆定律，其關係式表示如下：

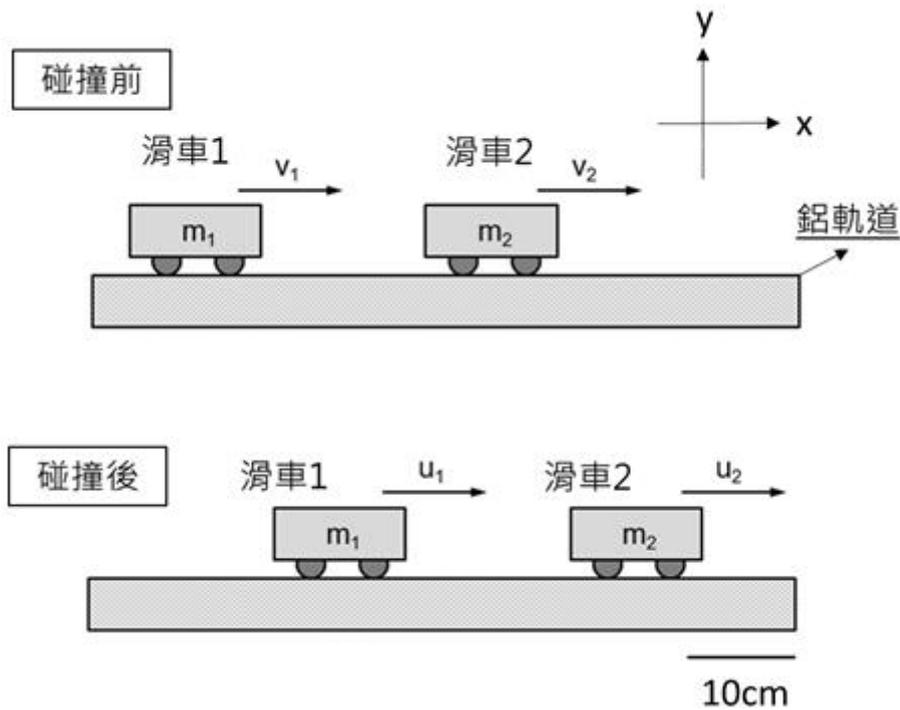
$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2$$

則兩滑車碰撞後速度 u_1 、 u_2 表示如下：

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 + \frac{2m_2}{m_1 + m_2} v_2$$

$$u_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 + \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} v_2$$



圖一 兩滑車彈性碰撞側視圖。 v_1 、 v_2 是兩滑車碰撞前分別的速度， u_1 、 u_2 則是兩滑車碰撞後分別的速度

若質量 m_2 滑車於碰撞前靜止($v_2 = 0$)於軌道上，則兩滑車碰撞後速度 u_1 、 u_2 可改寫為

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1$$

$$u_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1$$

承上，假設兩滑車於碰撞前速度 $v_1 > 0$ 且 $v_2 = 0$ 。以下將說明兩滑車於不同條件下進行彈性碰撞後，兩滑車速度與運動情形。

注意：滑車速度向右取正值，向左取負值。

1. 當 $m_1 = m_2$ 時，碰撞後 $u_1 = 0$ 且 $u_2 > 0$ ，兩滑車運動狀態與碰撞前相反且速度交換。
2. 當 $m_1 > m_2$ 時，碰撞後 $u_1 > 0$ 且 $u_2 > 0$ ，兩滑車朝同方向運動。
3. 當 $m_1 < m_2$ 時，碰撞後 $u_1 < 0$ 且 $u_2 > 0$ ，兩滑車反方向運動。

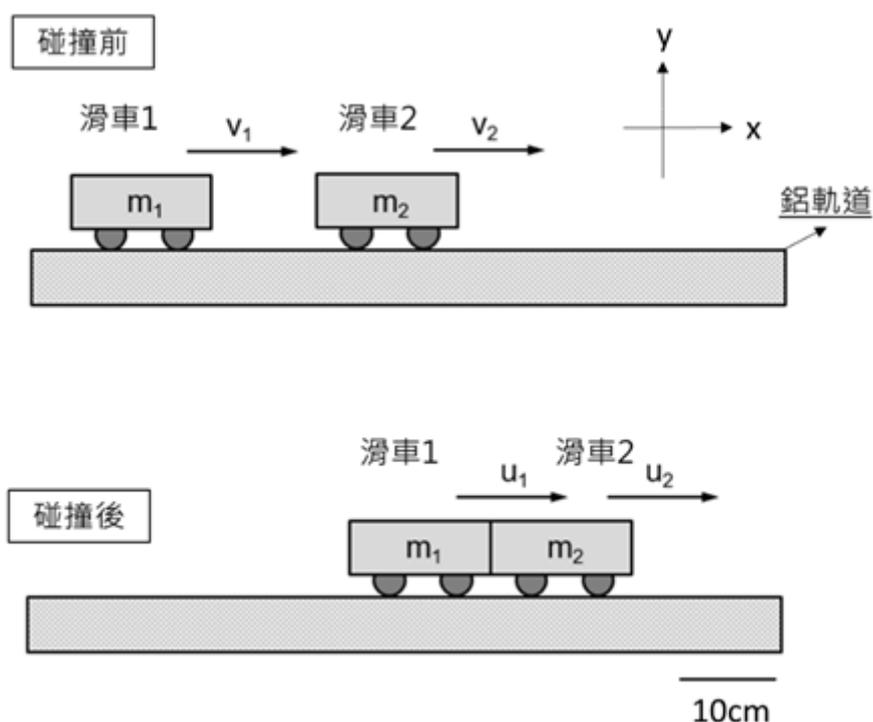
非彈性碰撞

圖二為兩滑車於軌道上進行非彈性碰撞側視圖。在此條件下，兩滑車於碰撞前後僅遵守動量守恆定律，其能量會因碰撞過程產熱能和聲音等逸散而耗損。

完全非彈性碰撞即兩車碰撞後會結合在一起並以相同速度($u_1 = u_2 = u$)朝相同方向運動。則兩滑車碰撞前後關係式可表示為

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2$$

$$\Rightarrow m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2)u$$



圖二 兩滑車非彈性碰撞側視圖 v_1 、 v_2 是兩滑車碰撞前分別的速度， u_1 、 u_2 是兩滑車碰撞後分別的速度。

若質量 m_2 滑車於碰撞前靜止($v_2 = 0$)於軌道上，則兩滑車碰撞後速度 u 可改寫為

$$u = u_1 = u_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1$$

恢復係數

碰撞屬彈性或非彈性程度可以用恢復係數來判斷。兩滑車碰撞前後速度差的比值，定義為恢復係數 e ，表示如下：

$$e = -\frac{u_2 - u_1}{v_2 - v_1}$$

1. 當 $e = 0$ 時，稱為完全非彈性碰撞。
2. 當 $0 < e < 1$ 時，稱為非彈性碰撞。
3. 當 $e = 1$ 時，稱為彈性碰撞。

(a) 動量損耗率

在碰撞實驗中，兩滑車不論是在彈性碰撞、非彈性碰撞或完全非彈性碰撞情況下，碰撞前後總動量皆應遵守動量守恆定律。而實際實驗過程中，兩滑車有可能受外力影響造成碰撞前後總動量損耗，故可由下式計算動量損耗率 ΔP

$$\Delta P(\%) = \frac{(m_1 v_1 + m_2 v_2) - (m_1 u_1 + m_2 u_2)}{m_1 v_1 + m_2 v_2} \times 100\%$$

(b) 動能損耗率

兩滑車在非彈性碰撞與完全非彈性情況下，碰撞前後總動能並不守恆。故可由下式計算動能損耗率 ΔE

$$\Delta E(\%) = \frac{(m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2) - (m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2)}{m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2} \times 100\%$$

注意事項：

1. 實驗進行前務必將軌道調整為水平狀態並鎖緊螺絲。軌道兩側應置放緩衝架。
2. 將網路攝影機對準軌道的中點，調攝影機的角度使軌道水平地呈現於畫面，且攝影機的視野要能涵蓋整個軌道，才能完整拍攝滑車碰撞前後運動情形，有較多可擷取的數據點。
3. 滑車速度向右取正，向左取負。

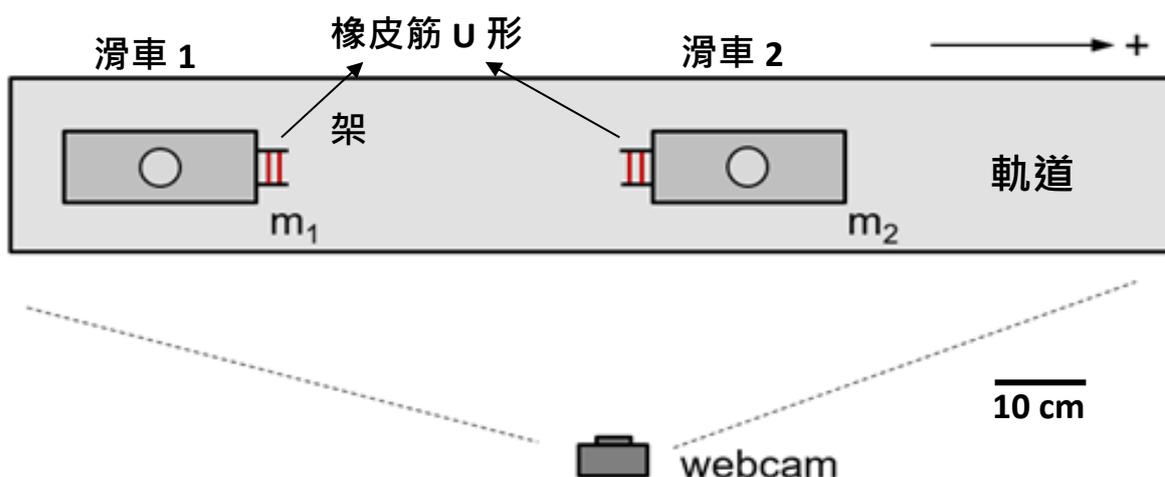
實驗步驟：

➤ 實驗前校正

1. 將水平儀置於軌道上方，調整軌道下方螺絲使軌道水平。
2. 將滑車置於軌道上方，觀察滑車是否會順著軌道某側滑動。若有，請再次調整軌道水平，直到滑車靜止不動。

A. 彈性碰撞

實驗裝置如圖三彈性碰撞實驗裝置俯視圖所示， m_1 與 m_2 分別為滑車(含各車上砝碼)總質量，webcam為網路攝影機。將橡皮筋 U 形架或磁鐵兩兩相對插於滑車車頭，利用彈力或磁力讓滑車在互相最接近的時候會彈開。



圖三 彈性碰撞實驗裝置俯視圖。 m_1 與 m_2 分別為滑車(含各車上砝碼)總質量。
Webcam 為網路攝影機。

(a) 兩車質量相同

1. 以電子秤測量兩滑車總質量(含車上砝碼)，使兩滑車總質量近乎相同，即 $m_1 = m_2$ 。
2. 將質量為 m_2 的滑車靜置($v_2 = 0$)於軌道上，如圖三所示。
3. 以適當的力道推動總質量為 m_1 的滑車，同時錄製碰撞前後兩滑車運動情形。
4. 由軟體分析並記錄兩滑車碰撞前後速度。
5. 重複觀察紀錄至少五次。
6. 計算碰撞前後總動量、總動能、恢復係數、動量損耗率與動能損耗率。

(b) 重車撞輕車

1. 以電子秤測量兩滑車總質量(含車上砝碼)，使兩滑車總質量滿足 $m_1 > m_2$ 。
2. 將質量為 m_2 的滑車靜置($v_2 = 0$)於軌道上，如圖三所示。
3. 以適當的力道推動總質量為 m_1 的滑車，同時錄製碰撞前後兩滑車運動情形。
4. 由軟體分析並記錄兩滑車碰撞前後速度。
5. 重複觀察紀錄至少五次。
6. 計算碰撞前後總動量、總動能、恢復係數、動量損耗率與動能損耗率。

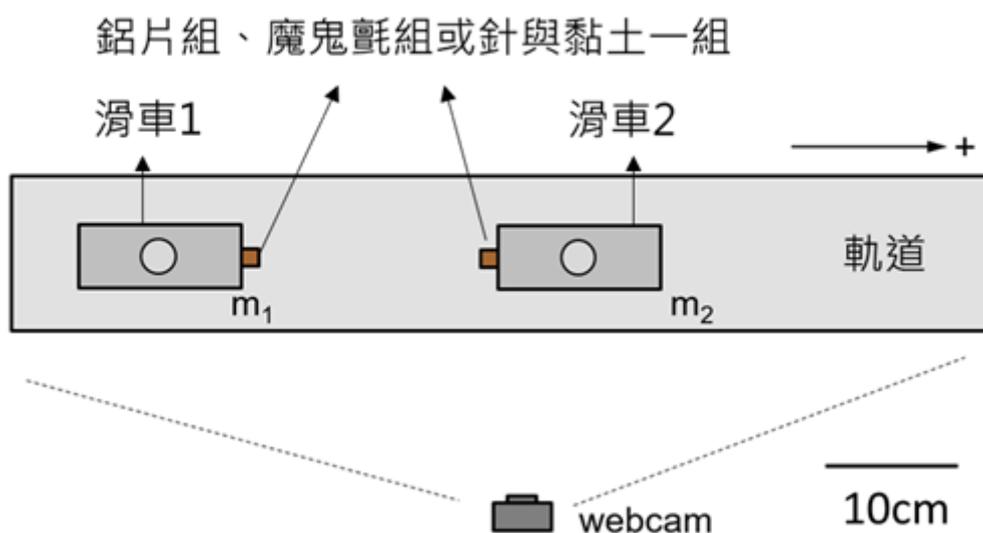
(c) 輕車撞重車

1. 以電子秤測量兩滑車總質量(含車上砝碼)，使兩滑車總質量滿足 $m_1 < m_2$ 。
2. 將質量為 m_2 的滑車靜置($v_2 = 0$)於軌道上，如圖三所示。
3. 以適當的力道推動總質量為 m_1 的滑車，同時錄製碰撞前後兩滑車運動情形。
4. 由軟體分析並記錄兩滑車碰撞前後速度。
5. 重複觀察紀錄至少五次。
6. 計算碰撞前後總動量、總動能、恢復係數、動量損耗率與動能損耗率。

(d) 比較(a)(b)(c)三種狀況，描述碰撞過程，入射車與被撞車因彼此質量造成的影響

B. 非彈性碰撞

實驗裝置如圖四所示， m_1 與 m_2 分別為滑車(含車上砝碼)總質量，webcam為網路攝影機。將橡皮筋U形架、鋁片、魔鬼氈或針尖與黏土組兩兩相對插在滑車車頭進行碰撞實驗。



圖四 非彈性碰撞實驗裝置俯視圖。 m_1 與 m_2 分別為滑車(含車上砝碼)總質量。Webcam為網路攝影機。

維持兩車質量相同，觀察比較磁鐵、橡皮筋、鋁片、魔鬼氈、針刺與黏土組六種材料造成的碰撞模式（前二者是屬彈性碰撞，是為做比較用；鋁片不互碰但可與魔鬼氈或磁鐵塊互碰）

1. 以電子秤測量兩滑車總質量(含車上砝碼)，使兩滑車總質量近乎相同，即 $m_1 = m_2$ 。
2. 將質量為 m_2 的滑車靜置($v_2 = 0$)於軌道上，如圖四所示。
3. 以適當的力道推動總質量為 m_1 的滑車，同時錄製碰撞前後兩滑車運動情形。
4. 由軟體分析並記錄兩滑車碰撞前後速度。
5. 六種碰撞各取至少五組數據。
6. 計算碰撞前後總動量、總動能、恢復係數、動量損耗率與動能損耗率。
7. 比較六種碰撞下材料的恢復係數、動量損耗率與動能損耗率，依照恢復係數大到小排列(從完全彈性排列到最沒有彈性的碰撞)。
8. 描述六種碰撞時滑車間的互動，推測是怎樣的物理(或材料)特性和現象造成從彈性碰撞到完全非彈性碰撞的區別。

討論提示：

1. 請由公式證明碰撞後兩滑車速度與質量關係？
2. 若軌道並未達水平，碰撞前後系統總動量是否依舊守恆？試說明。

波動

實驗目的：

用振盪器使繩子產生波動，觀察行進波與駐波。並用駐波探討繩波的傳遞速率如何受繩的張力與繩的線質量密度影響。

實驗儀器：

波形產生器，振盪器，滑輪組(含支架與掛鉤)，砝碼，繩，捲尺，電子秤。

實驗原理：

A. 行進波

物質中週期性的形變會形成波。週期性的形變若往前後傳遞，稱之為行進波。以繩子上的行進波為例，當波動從左向右傳遞，繩子上每一個質點只有上下移動，並沒有順著波傳遞的方向移動，但對觀察者卻會由質點上下震盪的行為造成看見似乎一個質點接一個質點向右邊傳遞，形成一種波形往右邊行進的視覺感受。

只要繩子的張力 τ 和線質量密度 μ 固定，繩波波速 v 就會是定值。繩波波速 v 即是一周期時間行進一波長，如下所示。

$$v = f\lambda$$

B. 駐波

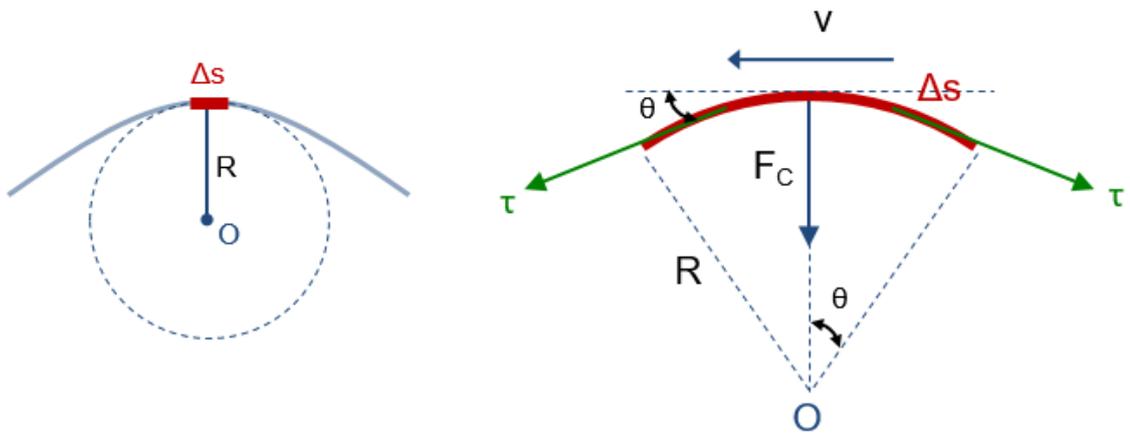
在適當的邊界條件下，兩股傳播方向相反，振幅、頻率、波長都相同的波疊在一起，只要相位搭配正確，會讓觀察者產生波在空間中靜止的錯覺，波形並未傳遞只是質點作上下簡諧震盪，稱為駐波。駐波上有些特定質點都靜止。驅動駐波的外加力之頻率與簡諧振盪的自然頻率一樣的時候，繩波會產生共振現象而形成巨大的振幅。

因為駐波在空間中不移動，很容易測量出它的波長與頻率，推算出速度，所以本實驗中將先調整出駐波，針對駐波來觀察波如何傳遞。

C. 推導繩波波速

考慮一脈衝波以一等速率 v 在張力為 τ 的繩上行進(相對靜止於地面的觀察者)，由於在任何慣性參考座標系都遵守牛頓運動定律，因此可以在隨繩波前進的參考坐標系利用圓周運動來分析，圖一為單位長度繩子受力示意圖，繩單位長度為 Δs ，曲率半徑為 R 且圓心角為 2θ ，在繩兩端會受到量值相等切向張力 τ 作用，則可將向心力 F_c 表示為

$$F_c = 2\tau \sin \theta \approx \tau(2\theta) = \tau \frac{\Delta s}{R} \quad (1)$$



圖一 單位長度繩受力示意圖。圖中繩單位長度為 Δs ，曲率半徑為 R ，圓心為 O ，圓心角為 2θ ，繩承受的張力為 τ ，一小段繩所受的向心力為 F_c ， v 為繩波波速。

此單位長度繩的質量為 Δm ，可以其單位長度(Δs)與其線質量密度 μ 表示，即

$$\Delta m = \mu \Delta s$$

當單位長度繩移動至脈波頂部時，可視為圓周運動，故向心加速度 a 可表示為

$$a = \frac{v^2}{R}$$

其中， v 為波傳遞速率

根據牛頓第二運動定律，則可將向心力 F_c 表示為

$$F_c = \Delta m a = (\mu \Delta s) \frac{v^2}{R} = 2\mu \theta v^2 \quad (2)$$

由於(1)式等於(2)式，向心力 F_c 可表示為

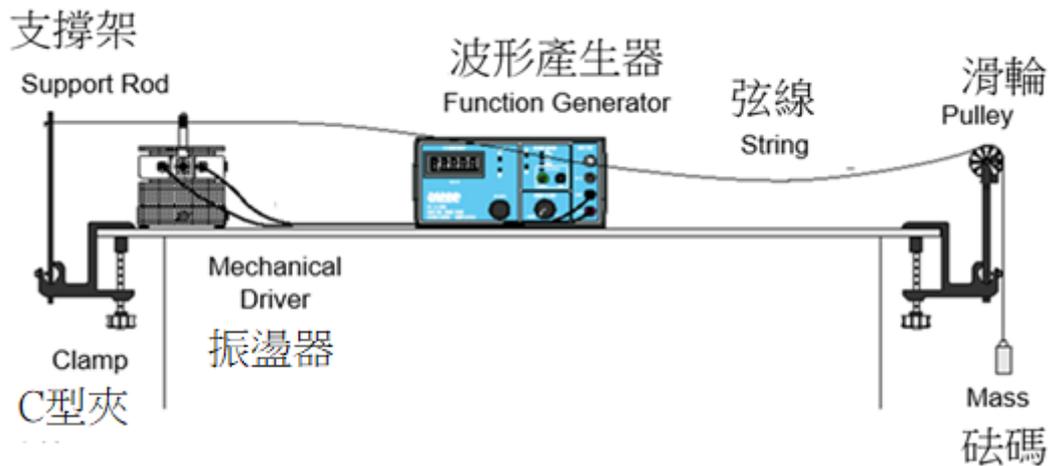
$$F_c = 2\tau \theta = 2\mu \theta v^2$$

則

$$\tau = \mu v^2$$

波傳遞速率 v 可表示為

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}}$$



圖二 實驗裝置示意圖。

注意事項：

1. 振動儀應盡量靠近固定端。
2. 繩子應先穿過振動儀上方小孔後再鎖緊固定。將一端繫於固定支柱上，另一端繫於掛鉤。
3. 實驗前應將振動儀上方鎖桿撥至 **UNLOCK**；實驗完成後將鎖桿撥至 **Lock**。
4. 起振前確認繩子是否張緊且砝碼切口方向交錯於掛鉤上，並將波形產生器振幅調至最小。

實驗步驟：

圖二為實驗裝置圖示意圖。圖中數位波形產生器會產生訊號到振動儀，使振動儀撥動繩子產生繩波。左邊支撐架及 C 型夾用以固定繩子一端，而右邊懸掛砝碼以提供繩子張力。調整滑輪高低使繩子盡量維持水平。

A. 測量弦線密度 μ

1. 以捲尺測量繩長 l 。
2. 以電子秤測量繩子質量 m_2 。
3. 計算繩的線質量密度 μ 。

B. 駐波的和弦(Harmonics)

1. 以電子秤測量砝碼與掛鉤總質量 m_1 。
2. 計算繩張力 $\tau = m_1 g$ 。
3. 如圖二架設實驗裝置。將振盪器上的鎖桿撥至 **UNLOCK**，再啟動波形產生器。
4. 先固定張力 τ 與線質量密度 μ 。張力 τ 是砝碼質量決定的，而線質量密度 μ 是繩子型式決定的。
5. 調整頻率 f 與振幅先找到一駐波，再改變 f (從小到大)。記錄產生駐波的數個頻率。
6. 畫圖記錄駐波的波形。標示出駐波的頻率、波長及速度，並與該繩行進波速預期

值 $v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}}$ 相比較。實驗值和預期值相符嗎？

C. 測試波速如何隨繩張力而改變

1. 更改數種砝碼重量。
2. 各調出駐波。
3. 由駐波的波長與對應頻率算出波速。
4. 作 v^2 vs. τ 關係圖呈現波速如何隨張力變化。和預期作比較。

D. 測試波速如何隨繩線質量密度改變

1. 置換數種不同的繩子。
2. 各調出駐波。
3. 由駐波的波長與對應頻率算出波速。
4. 作 v^2 vs. $\frac{1}{\mu}$ 關係圖呈現波速如何隨繩的線質量密度變化。和預期作比較。

討論提示：

1. 在一繩子上，產生的駐波節點越多(波長越短)，振幅如何改變？試說明。
2. 若繩子非水平振動，對實驗是否有影響？試說明。
3. 在本實驗中是先將繩子一端固定在支撐架上再穿過振動儀，若將繩子直接綁在振動儀是否會影響實驗結果？試說明。

熱力學

熱學實驗包含兩個小實驗：「理想氣體」與「絕對零度」。

第一部分：理想氣體

實驗目的：

觀察氣體在壓縮、膨脹的過程中其體積、氣壓、溫度之間的關係，並用測量的數值檢驗理想氣體定律，推測氣體分子莫耳數。

實驗儀器：

理想氣體定律儀(TD8596A)，絕對壓力與溫度感測器（藍、PS-2146），藍牙訊號收發器(白、PS-3200)，電腦(含Capstone 程式軟體)。

實驗原理：

A. 理想氣體方程式

十七世紀時，波以耳(R. Boyle)發現當氣體溫度 T 固定時，氣體壓力 P 與氣體體積 V 乘積為定值，即

$$PV = \text{const (溫度不變)} \quad (1)$$

在等溫過程中，氣體壓力 P 與氣體體積 V 成反比關係，稱為波以耳定律。

而後，查理(J. Charles)與給呂薩克(J. Gay-Lussac)發現當氣體壓力 P 固定時，低密度的氣體體積 V 與攝氏溫度 t 關係如下所示

$$V = V_0 \left(1 + \frac{t}{273.15} \right) \quad (2)$$

(2)式中 V_0 為 0°C 時氣體體積。即當氣體壓力 P 不變時，氣體溫度每升高(或降低) 1°C 時，氣體體積增加(或減少)量為 V_0 的 $\frac{1}{273.15}$ 倍。

在國際公制中，溫度的單位為克爾文(Kelvin, K)，又稱絕對溫度。絕對溫度不僅

是溫度單位，亦為熱力學的主要參數之一。絕對溫度 T 與攝氏溫度 t 的關係如下所示：

$$T = 273.15 + t \quad (3)$$

由公式(3)可知，當攝氏溫度為 0°C 時，所對應的絕對溫度為 273.15 K ；攝氏溫度為 -273.15°C 時，所對應的絕對溫度為 0 K ，又稱絕對零度。

假設 $T_0 = 273.15\text{ K}$ ，則可將(2)式改寫成

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} = \text{const} \quad (4)$$

結合(1)式與(4)式，則氣體分子必滿足下述關係式，即稱為理想氣體方程式。

$$\frac{PV}{T} = \text{const} \quad (5)$$

理想氣體的條件為分子不佔有體積、分子間無吸引力且無交互作用之氣體。若氣體之分子量小且在高溫低壓的狀況下，則此氣體的性質越接近理想氣體。

B. 氣體分子莫耳數

由理想氣體方程式可知，在標準狀態下，氣體溫度 $T_0 = 273.15\text{ K}$ ，且一莫耳氣體壓力 $P_0 = 1.0\text{ atm}$ ，氣體體積 $V_0 = 22.4\text{ L}$ 。代入公式(4)，即可推得氣體常數 R

$$\begin{aligned} R &= \frac{P_0 V_0}{n T_0} = \frac{(1.0\text{ atm})(22.4\text{ L})}{(1.0\text{ mol})(273.15\text{ K})} \\ &= 0.082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \\ &= 8.3 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 8.3 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

承上， n 莫耳氣體其氣體方程式可表示為

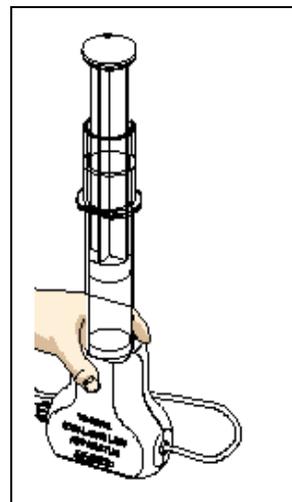
$$\begin{aligned} PV &= nRT \\ \Rightarrow V &= nR \frac{T}{P} \end{aligned}$$

即在氣體體積 V (mL) 與 絕對溫度 T /氣體壓力 P (K/ kPa) 關係圖中，即可由斜率 (slope) nR 計算氣體分子莫耳數 n 。

$$n = \frac{\text{slope}}{8.3} \times 10^{-3} (\text{mol})$$

注意事項：

1. 理想氣體定律儀與壓力感測器相連接的白色腔體密合接頭很纖細，操作時注意不要折斷它們，兩者要密合。
2. 下壓活塞時，應以一手緊握理想氣體定律儀(如圖一)，另一手再以適當的力道迅速下壓活塞。

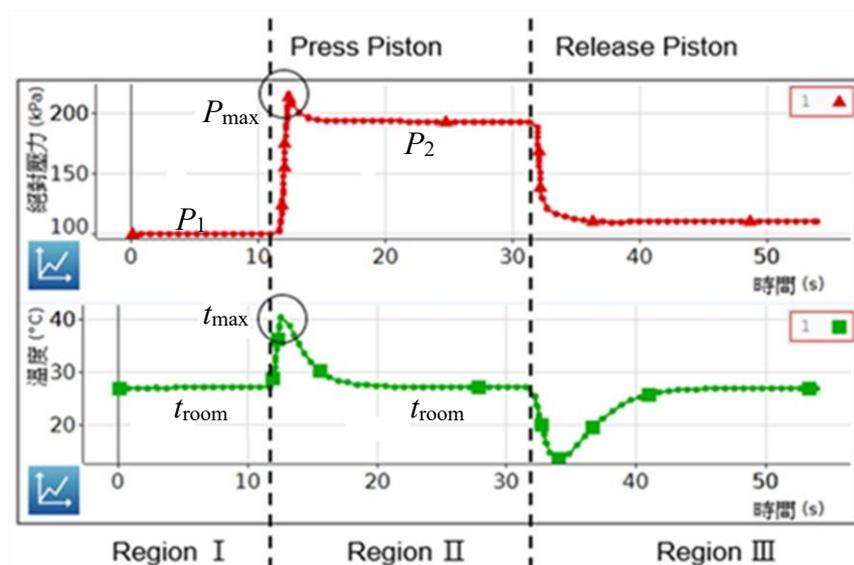


圖一 理想氣體定律儀示意圖

實驗步驟：

A. 觀察理想氣體的熱力學行為

1. 於理想氣體定律儀未連接壓力感測器前，將活塞下壓至理想氣體定律儀最底部。紀錄此時空氣柱體積為 V_2' ，即活塞下緣(黑色橡皮圈)所對應刻度。
2. 將理想氣體定律儀的活塞向上拉，紀錄此時的針筒刻度使空氣柱體積 V_1' ，約 35.0 mL-40.0 mL 為佳，再連接壓力與溫度轉接頭/延長線等...
3. 依軟體操作說明書設定相關參數與關係圖
4. 啟動軟體開始擷取數據，同時觀察『絕對壓力-時間』與『溫度-時間』關係曲線變化約 10 秒。(如圖二，區域 I)
5. 以一手緊握理想氣體定律儀，另一手以適當力道快速下壓活塞至理想氣體定律儀最底部且 **壓住不放**，紀錄此時的針筒刻度，此時，理想氣體定律儀內部空氣柱體積即為 V_2' 。
6. 觀察『絕對壓力-時間』關係圖，氣壓會由 P_1 會迅速上升至某一極大壓力 P_{\max} 後，再往下降至穩定壓力 P_2 。(圖二，區域 II)
7. 觀察『溫度-時間』關係圖，溫度會由室溫 T_{room} 迅速上升至某一極大溫度 T_{\max} 後，再往下降至室溫 T_{room} 。(圖二，區域 II)
[提示] 因為熱從理想氣體定律儀耗散出來
8. 承上，待兩關係圖表內曲線變化皆趨於穩定約 10 秒後再釋放活塞。(圖二，區域 III)。
9. 釋放活塞後，再觀察『絕對壓力-時間』與『溫度-時間』關係圖，當氣壓 P 與溫度 T 趨於穩定約 10 秒後，再停止擷取數據。



圖二 理想氣體定律儀的『絕對壓力-時間』與『溫度-時間』關係圖 I。
上圖為壓力對時間的變化。下圖為溫度對時間的變化，Region I、II、III 分別為活
塞筒的初始狀態、活塞下壓按緊的狀態、與活塞被釋放後的狀態。

(a) 定溫 T 、定莫耳數 n 下，計算透明塑膠管等體積 V_0

1. 對照圖二，記錄下壓理想氣體定律儀活塞前(區域 I)，空氣壓力 P_1 。
2. 對照圖二，記錄下壓理想氣體定律儀活塞至底後(區域 II)，空氣壓力 P_2 。
3. 於定溫下由理想氣體方程式($P_1V_1=P_2V_2$)，計算透明塑膠管體積 V_r 。

[註] V_1 表示理想氣體定律儀活塞下壓前空氣總體積($V_1=V_1'+V_r$)；

V_2 表示理想氣體定律儀活塞至底後空氣總體積($V_2=V_2'+V_r$)。

理想氣體定律儀中有接頭和管線，這些的空氣體積 V_r 並沒有包含在空氣柱標示的體積中。

(b) 瞬間體積變化，擾動至平衡之趨勢分析

1. 對照圖二，記錄下壓理想氣體定律儀活塞前(區域 I)，空氣壓力 P_1 、空氣總體積 V_1 與空氣溫度 T_{room} 。記錄下壓理想氣體定律儀活塞至底後，空氣壓力極大值

P_{max} 、空氣總體積 V_2 與空氣溫度極大值 T_{max} ，比較活塞下壓前後瞬間 $\frac{P_1V_1}{T_{room}}$ 及

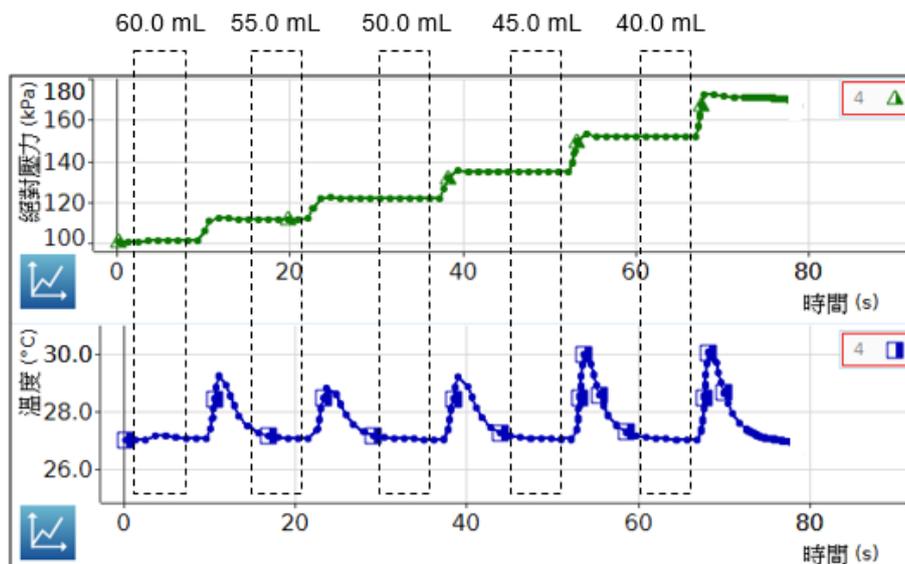
$$\frac{P_{max}V_2}{T_{max}}。$$

2. 根據測得的圖二：(1) 氣壓 P (kPa) vs. t (s) 變化圖、與 (2) 溫度 T ($^{\circ}\text{C}$) vs. t (s) 變化圖，併在一起，解釋線形的變化。

例如：為何體積縮小氣壓會上升？為何氣壓和溫度衝到最高點後會下降？為何釋放被壓縮的空氣後溫度會下降？為何溫度下降後又反升？並判斷哪一段是等壓、絕熱、等容、等溫過程？ P 、 V 、 T 的走勢合理嗎？

B. 推得氣體分子莫耳數 n

1. 於理想氣體定律儀未連接任何感應器前，將理想氣體定律於活塞向上拉，使內部空氣柱體積為 60.0 mL，再依序連接壓力與溫度感應器。
2. 依軟體操作說明書設定相關參數與關係圖。
3. 啟動軟體開始擷取數據，同時觀察『絕對壓力-時間』與『溫度-時間』關係曲線變化約 10 秒。
4. 以一手緊握氣體定律儀，另一手以適當力道快速下壓理想氣體定律儀活塞，使內部空氣柱體積為 55.0 mL 且壓住不放。
5. 觀察『絕對壓力-時間』關係圖，氣壓會由 P_1 會迅速上升至某一極大壓力 P_{\max} 後，再下降並趨於穩定。
6. 觀察『溫度-時間』關係圖，溫度會由室溫 T_{room} 迅速上升至某一極大溫度 T_{\max} 後，再下降回至室溫 T_{room} 。
7. 承上，待兩關係圖內曲線變化皆趨於穩定約 10 秒後，重覆上述步驟。依序下壓理想氣體定律儀活塞使內部空氣柱體積為 55.0 mL、50.0 mL、45.0 mL、40.0 mL 與 35.0 mL，如圖三所示。
8. 當空氣壓力 P 與溫度 T 趨於穩定約 10 秒後，停止擷取數據。依序記錄所測得(如圖三)的平衡下不同空氣柱體積所對應空氣壓力與空氣溫度值。
[註] 勿遺漏管路中的空氣體積 V_r 。試試看，用理想氣體定律 $PV = nRT$ 和這裡數據(如圖三)推導出這些 V_r 是否與 (a) 相同。
9. 作圖呈現 $V(\text{mL})$ vs. T/P (K/kPa) 的變化走勢。用線性回歸求出莫耳數 n 。



圖三理想氣體定律儀的『絕對壓力-時間』與『溫度-時間』關係圖 II

第二部分：絕對零度

實驗目的：

在固定氣體體積與分子數下，觀察氣壓與氣體溫度之間的關係。預計溫度降低時氣壓也會降低。從實驗數據推測，當氣壓等於零時，溫度應該為何？此值即所謂「絕對零度」。

實驗儀器：

絕對零度儀(TD8595)，數位溫度計，塑膠量筒，攪拌棒，電熱瓶(公用)，[壓力感測器(CI6532A)，溫度轉接頭/延長線，含壓力感測器與溫度轉接之類比盒(藍、PS-2146)，藍牙訊號收發器(白、PS-3200)，電腦(含Capstone 程式軟體)。

實驗原理：

由理想氣體方程式，可知氣體溫度 T 與氣體壓力 P 關係式可表示為

$$T = \frac{V}{nR} P \quad (1)$$

其中， T 為絕對溫度。

已知絕對溫度 T 與攝氏溫度 t 的關係式為 $T = 273.15 + t$ ，即可將公式(1)改寫成

$$273.15 + t = \frac{V}{nR} P$$

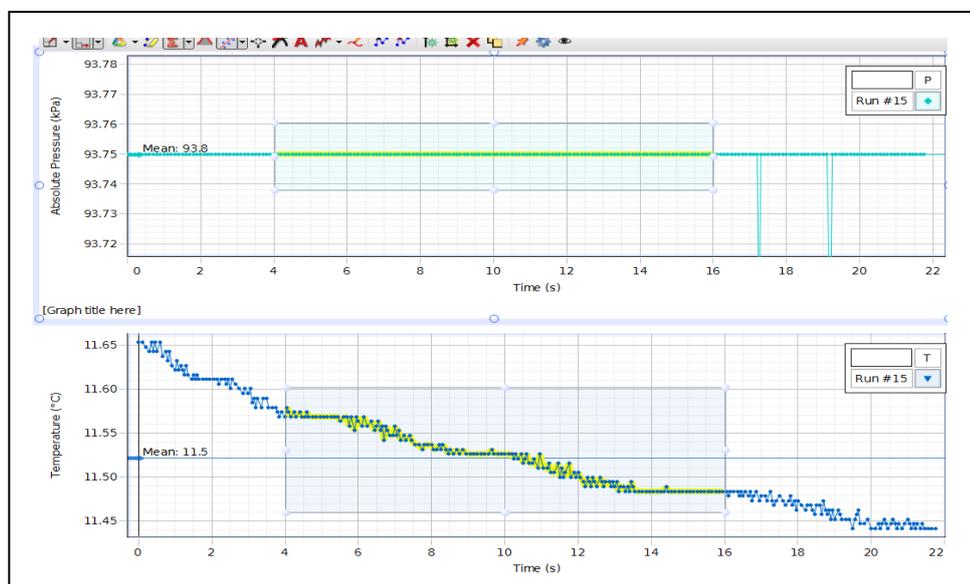
即攝氏溫度 t 與氣體壓力 P 關係圖中，其 y 軸截距即為絕對零度。

注意事項：

1. 以電熱瓶燒熱水時，勿將電熱壺置於桌角或桌邊，添加熱水與擺置盛有熱水的容器時，應小心處理，避免同學們碰撞、誤觸等...而發生意外。
2. 絕對零度儀與壓力感測器相連接的白色腔體密合接頭很纖細，操作時注意不要折斷它們，兩者要密合。

實驗步驟：

1. 將絕對零度儀連接壓力感測器與溫度轉接頭/延長線等...
2. 取一塑膠量筒並裝入適量熱水(約 80°C - 90°C , 800 mL)。
3. 請以玻璃棒適當攪拌，再以數位溫度計測量塑膠量筒內水溫是否已達熱平衡。待塑膠量筒內熱水已達熱平衡後，將絕對零度儀完全沉入熱水中。
4. 待溫度達平衡後，啟動軟體開始擷取數據，同時觀察『絕對壓力-時間』與『溫度-時間』關係曲線變化約 10 秒-20 秒後，再停止擷取，取出絕對零度儀。
5. 記錄穩定狀態下，氣壓 P 與溫度 t 平均值。(10 秒內溫差在 0.2°C 內，如圖四所示。)
6. 取冷水倒入熱水中，降低水溫度，重覆上述步驟 3-4。 註: 注意塑膠量筒水量 (<1000 mL)。
7. 取冰塊拌入水中，讓水溫更低，重覆上述步驟 3-4。
8. 作 $t (^{\circ}\text{C})$ vs. P (kPa) 關係圖。由線性擬合取得 y 軸截距，此值即為絕對零度實驗值。



圖四 絕對零度儀的『絕對壓力-時間』與『溫度-時間』關係圖。

討論提示：

1. 若絕對零度儀未完全沉入水中，是否會影響實驗準確性？試說明。
2. 當水溫低於 30°C 是否會影響實驗準確性？試說明。

附錄一

常用係數表：

A. 固體之物性常數

物質	密度 (g/cm ³)	楊氏係數 ×10 ¹¹ (dyne/cm ²)	線膨脹 係數 α (10 ⁻⁶)	比熱 (cal/g°C)	電阻係數 at 20°C ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	電阻 溫度係數 (10 ⁻³ [K ⁻¹])
鋅	7.14	12.5	29.76	0.0925	5.8	4.2
鋁	2.69	7.05	22.20	0.211	2.83	4.2
玻璃 (Crown)	2.4-2.5	6.5-7.8	8.97			
玻璃 (Flint)	2.9-4.5	5.0-6.0	7.88			
金	19.3	8.0	14.70	0.0309	2.44	4.0
銀	10.50	7.0	18.90	0.0560	1.59	3.1
膠皮	0.91- 0.96	0.048-0.052	65.7-68.6	0.4		
黃銅 ¹	8.56	9.7-10.2	19.06	0.0925	5.0-7.0	1.42-2.0
青銅 ²	8.7	8.08	18.44		13.0-18.0	
白銅 ³	8.5	11.6	19.36	0.0946	17.0-41.0	0.04-0.38
銅	8.93	12.3-12.9	16.66	0.0919	1.72	4.3
鎢	19.30		4.44	0.0321	5.5	5.3
銅錳鎳合 金 ⁴	8.15	12.4	18.1	0.097	44.0	-0.03-0.02
鉛	11.34	1.62	27.09	0.0304	22.0	4.2
鉑	21.45	16.8	8.99	0.0316	10.6	3.8
鐵（鑄）	7.8	10.0-13.0	10.61		57.0- 114.0	
鐵（鍛）	7.8	19.0-20.0	8.5			
鋼	7.8	19.5-50.6	11.4	0.11-0.13	10.0-20.0	5.0
鎳 (97%)	8.9	20.2	12.79	0.1032	7.8	6.7

¹ 66%Cu, 34%Zn

² 85.7%Cu, 7.2%Zn, 7.1%Sn

³ 60%Cu, 15%Ni, 25%Zn

⁴ 84%Cu, 12%Mn, 4%Ni

B. 液體之物性常數

物質	密度 (g/cm ³)	表面張力 (dyne/cm)	體膨脹 係數 at 20°C ×10 ⁻⁴	比熱 (cal/g°C)	溶解熱 (cal/g)	折射率
甲醇	0.782	22.6	11.99	0.824		1.3290
乙醇	0.789	22.3	11.2	0.570	24	1.3625
乙醚	0.715	16.5	11.56	0.551		1.3538
橄欖油	0.918	32.0				1.4763
丙三醇	1.260	63.4	48.95	0.576		1.4730
水銀	13.55 (20°C)	487.0	1819	0.033	28	
石油	0.878	26.0		0.511		~1.4
水	0.998 (20°C)	72.75	3.02 (20°C-40°C)	1.00	79.7	1.3332

C. 物質的導熱係數 (cal/cm·°C·s)

物質	係數	物質	係數	物質	係數	物質	係數
鋁	0.504	鎳	0.142	石英 (0 軸)	0.030	生棉	0.000 04
黃銅	0.260	鉑	0.166	石英 (1 軸)	0.016	軟土	0.0013
銅	0.918	銀	0.974	絲	0.000 22	混凝土	0.0022
金	0.700	鋅	0.265	木屑	0.000 12	空氣	0.000 05
鐵	0.144	錫	0.155	橡皮	0.0006		
鉛	0.083	玻璃	0.0024	地殼	0.004		

D. 水的表面張力 T (與空氣相接) (dyne/cm)

溫度 (°C)	0	5	10	15	20	25	30	40	60	80	100
T	75.64	74.92	74.22	73.49	72.75	71.97	71.18	69.59	66.18	62.61	58.85

E. 水之黏滯係數 η (dyne·s/cm²)

溫度 (°C)	0	10	20	30	40	50
黏滯係數	0.017 92	0.013 08	0.010 05	0.008 01	0.006 56	0.005 49

F. 液體之黏滯係數 (dyne·s/cm², at 20°C)

物質	酒精	乙醚	甘油	石油
黏滯係數	0.0172	0.002 33	14.560	0.1274

G. 空氣的密度 (kg/m³)

mmHg	690	700	710	720	730	740	750	760	770	780
0 °C	1.174	1.191	1.208	1.225	1.242	1.259	1.276	1.293	1.310	1.327
5 °C	1.153	1.169	1.186	1.203	1.220	1.236	1.253	1.270	1.286	1.303
10 °C	1.132	1.149	1.165	1.182	1.198	1.214	1.231	1.247	1.264	1.280
15 °C	1.113	1.129	1.145	1.161	1.177	1.193	1.209	1.226	1.242	1.258
20 °C	1.094	1.109	1.125	1.141	1.157	1.173	1.189	1.205	1.220	1.236
25 °C	1.075	1.091	1.106	1.122	1.138	1.153	1.169	1.184	1.200	1.215
30 °C	1.057	1.073	1.088	1.103	1.119	1.134	1.149	1.665	1.180	1.195

H. 折射率

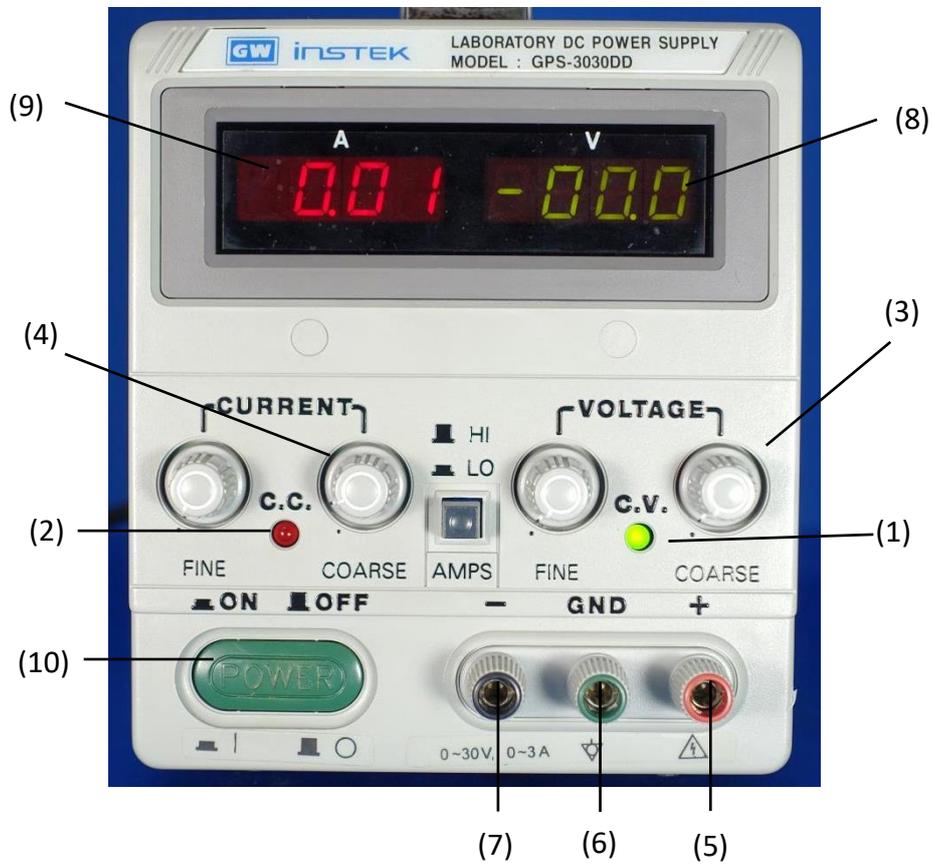
物質	波長	赤線 C (H α)	黃線 D (Na)	青線 E (H β)
		656.3 nm	589.3 nm	486.1 nm
水 (18 °C)		1.3311	1.3332	1.3373
乙醇 (18 °C)		1.3609	1.3925	1.3665
二硫化碳 (18 °C)		1.6199	1.6291	1.6541
玻璃 (Crown)	輕	1.5127	1.5153	1.5214
	重	1.6126	1.6152	1.6213
玻璃 (Flint)	輕	1.6038	1.6085	1.6200
	重	1.7434	1.7515	1.7723
方解石	常光	1.6545	1.6585	1.6679
	異常光	1.4816	1.4864	1.4908
水晶	常光	1.5418	1.5442	1.5496
	異常光	1.5509	1.5533	1.5589

I. 常用物理係數表

名稱	符號	近似值	SI 單位
Avogadro's number	N_A	6.022×10^{23}	mol^{-1}
Boltzmann's constant	$k = R / N_A$	1.381×10^{-23}	J/K
Coulomb-law constant	$k (=1/4 \pi \epsilon_0)$	9.00×10^9	$\text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$
Electron mass	m_e	9.109×10^{-31}	kg
Elementary charge	e	1.602×10^{-19}	C
Permeability constant	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m
Permittivity constant	$\epsilon_0 (=1/\mu_0 c^2)$	8.854×10^{-12}	F/m
Planck's constant	h	6.626×10^{-34}	J·s
Speed of light in vacuum	c	3.00×10^8	m/s

附錄二

直流電源供應器面板說明：



1. 定壓指示燈
2. 定流指示燈
3. 電壓粗調
4. 電流粗調
5. 輸出端 (正極)
6. 接地端
7. 輸出端 (負極)
8. 電壓計
9. 電流計
10. 電源開關