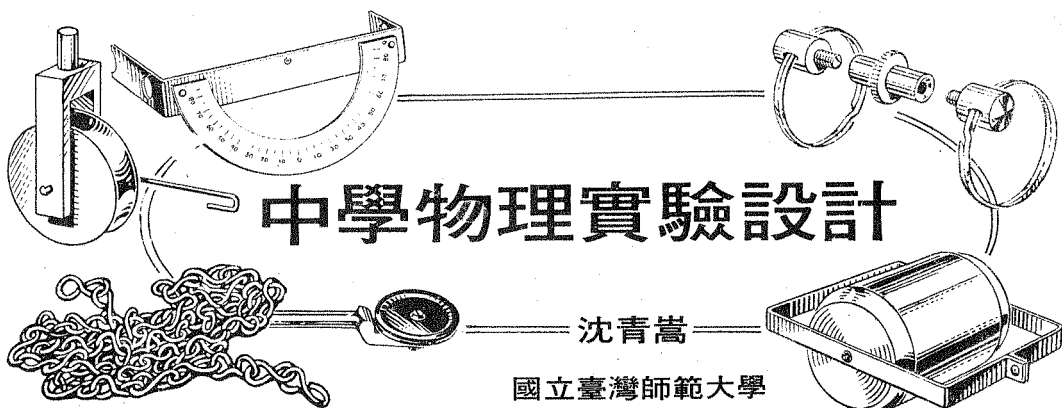




中學物理實驗設計

沈青嵩

國立臺灣師範大學

十九世紀德國物理學家克希荷夫 (Gustav Kirchhoff) 及馬赫 (Ernst Mach) 等人主張科學不應探求「為什麼」而應研究「怎麼樣」^①。意思是說研究物理的人不必要為「為什麼」的形而上學之問題煩心，唯需用實驗定律來描述一切事實，用實驗定律的結構來解釋自然現象即可，而不必要接受黑格爾 (Hegel)，費希特 (Fichte) 等理想主義哲學家之主張——認為只知道世界為何種作為是不夠的，唯有靠形而上學以及在現象之外所能找到的超自然因素才能全盤而深入的瞭解宇宙。由此可知實驗在物理研究上所佔之地位及其重要性；近代科學與以前最大的不同就是強調實驗方法，在這方面有其豐碩的結果，近數十年來物理學的發展，實驗技術的進步與被重視功不可沒。一個再令人震驚創新的理論，若沒有實驗的驗證永遠不可能被物理學界所公認，愛因斯坦的狹義相對論經巴邱爾 (Bucherer) 於 1909 年量度高速電子電量與質量之比值而獲得證實後方才為大家所深信不疑，杜勃勞意 (De Broglie) 所倡物質波之概念，經第弗遜 (C.J. Davission) 等人的電子晶體繞射實驗證實後而開量子力學之先河；經不起實驗考驗的理論假設，不是被揚棄就得修正至不抵觸實驗的結論，譬盛極一時的以太觀念，磁分子說等，今日不是早已煙消雲散？拉塞福原子模型固仍為大家所稱道，但經近世紀的實驗嚴密考驗下也做了多次的修正，今日的原子模型與拉塞福初提出的原子模型已大相逕庭；再說開創科學新境界的理論大都

為觀察實驗所得結論之延伸與推廣。所有實驗得來的知識都是基於觀察，觀察有兩種方法，一種是對自然現成環境的非實驗觀察，諸如觀察星象或花朵，注意其異同性以期發現能用定律表示的規律性；另一種是主動地佈置有意義的環境，採用一些嚴密的步驟與方法俾能產生較自然更佳的结果，不止等待自然的情況，我們還要製造某些情況，簡言之，我們做實驗。現代科學的研究後者倍重於前者，科學發展至今，直接從自然環境觀察其共同性與規律性以發現控制宇宙的準則大都已被我們前輩科學家挖掘殆盡，唯有精於設計，善於佈置特殊環境，運用更有力的儀器，方能發現他人所未見的自然定律、原理，實驗設計的訓練實是科學教育應該特別重視的課題。

翻開教育部公佈的現行高級中等學校課程標準總目標規定為「高級中學教育目標，在國民中學教育基礎之上，施以一般文化陶冶，科學教育及軍事訓練，以奠定其研究高深學術及學習專門知能之基礎，並養成文武俱備，智德兼修，效忠國家，服務社會之優秀人才」。重視科學教育除為奠定將來研究高深學問之基礎外，更希望能培養文武合一，服務社會的優秀人才，針對此目標而言，科學實驗的訓練尤重於科學理論知識的灌輸，實驗學習中除了可以了解科學過程、印證理論外，更可訓練學生解決實驗困難的能力，小至一個螺絲釘的裝配大至精密儀器的操作均可能產生事前預想不到的麻煩，隨時需要實驗者去動腦筋去設法解決，於是學生在實驗過程中得到了許

多寶貴的經驗，實驗是需要實際去操作去設計的，久而久之，實驗者自然而然具有了耐心、毅力，也具有了獨立解決問題的能力與精神。這些都是將來社會中堅者及領導者所必須具備的。

本文不準備多談物理實驗設計的理論，而是舉出多個實驗設計具體例子略加介紹，以為同好者參考，實驗內容的選取是與中學物理教材較為切合者為準。資料大部份取自 Physics Notes。部份實驗只是簡述較一般設計不同之處，也就是舊實驗的改進。

一、改良型電流天平

電流天平是利用帶電流之導線在磁場中受磁力作用的原理而設計的，其所受磁力可用向量方程式代表之 $\vec{F}_b = i\vec{\ell} \times \vec{B}$ ，式中 F_b 為導線所受之磁力， i 為導線之電流， ℓ 為導線之長度，由於 F 、 i 及 ℓ 均可量度，磁場大小就可算出，電流天平最大的用途即在量度磁場的大小，目今高級中學均有此套設備，數年前大學聯招實驗題選考過此項實驗；今即以高中現行實驗為藍本，提出一項更精確可行的改進實驗，蓋電流天平在設計上主要的三個問題分別為：

1. 如何維持平衡
2. 電流如何導入與導出
3. 磁力大小如何量度

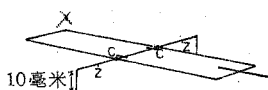


圖 1

設計結構圖如圖 1 及圖 2，圖一支架是 18 s.w.g 之銅線彎成的，中間部份從 C 切開移走如圖 2 所

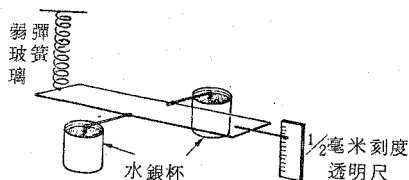


圖 2

示，圖一 Z 處靜置於盛著水銀的兩小塑膠杯上，塑膠杯半徑為 7.5 毫米，高 25 毫米，由於水銀價昂，特於水銀面上倒入一層純水以防水銀蒸發。圖一標示 X 之一邊為導線經過之一端，通電後，電流由此側流過，右端指針設計方向可任意調節，以確保未受磁力前絕對平衡，由以上敘述可知第 1、2 個問題可完全解決，而且此設計較現行者更為穩定，不過靈敏度較差，但對實驗不致有太大的影響，反而不易受到氣流等因素的干擾。至於第三個問題即如何量度磁力之大小，設計上是在標有 X 端支撐著一力常數 (Force Constant) 較小之彈簧，並於右端置一以 1/2 毫米刻度的透明塑膠 R 如圖 2 所示，指針在塑膠 R 刻度位置可經由 7D 透鏡在距它 2 米處之光屏上的幾何投影而放大，當然事先得對此彈簧刻度，以已知力作用，記錄指針之位置；一切就緒後即可將電流天平左側導線置入磁場通入電流，觀測光屏上指針之位置而測得所受磁力大小，進而求出磁場之大小。本實驗原作者是用一對 Helmholtz 線圈所產生之均勻磁場做實驗，彈簧之力常數為 $2 \times 10^{-4} \text{ N}(\text{mm})^{-1}$ ，垂直於磁場導線之長度 ℓ 為 35mm，其結果如圖 3 所示，圖中直線為理論值

$B = \frac{8\mu_0 nI}{5\sqrt{5}r}$ 式中 n 為線圈圈數， r 為半徑， I 為電流。至於圖中 “+” 為實驗值，可說與理論值完全一致；換言之，本實驗之設計相當理想。

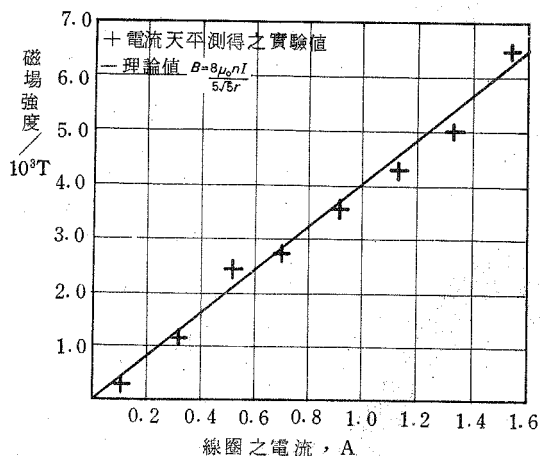


圖 3

二、靜液壓力實驗

液體壓力與深度成正比對日常生活有許多的應用價值，也跟許多物理定律息息相關，這兒介紹一種適合中學學生程度驗證此理論的實驗方法

1. 原理

根據柏努利方程式，無黏滯性、不可壓縮的穩定流恒有下列之關係：

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g y = \text{常數}$$

式中 P 為壓力， ρ 為流體密度， v 為流速， g 為重力加速度而 y 為該點之高度座標。今考慮液面 A 及液內任一點 B 如圖 1，則

$$P_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 + \rho g y_A = P_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 + \rho g y_B \quad \dots (1)$$

A 處為靜止液面故 $v_A = 0$ ，不計大氣壓力下 $P_A = 0$ （事實上大氣壓力處處相等，故相互抵消，只討論液體壓力即可，所以式中 P 均代表液壓），若 B 點亦封閉，則 $v_B = 0$ 則(1)式變成

$$P_B = \rho g (y_A - y_B) = \rho g h \quad \dots (2)$$

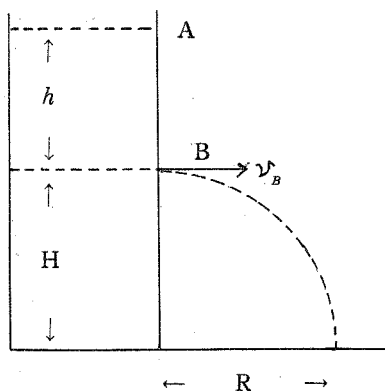


圖 1

即：靜液中，壓力與深度成正比。今若 B 開個小

狹縫，則 $P_B = 0$ ，而 v_B 不為零，(1)式變成

$$\rho g y_A = \frac{1}{2} \rho v_B^2 + \rho g y_B$$

$$\frac{1}{2} \rho v_B^2 = \rho g h \quad \dots (3)$$

由(2)式及(3)式知 $P_B = \frac{1}{2} \rho v_B^2 \quad \dots (4)$

流體一離開小筒，只受重力場作用，加速度向下，由牛頓運動定律可知

$$H = \frac{1}{2} g t^2 \quad \dots (5)$$

而水平方向未受力（忽略阻力）應做等速運動

$$R = v_B t \quad \dots (6)$$

由(5)、(6)式消去 t 得

$$v_B^2 = \frac{g R^2}{2 H} \quad \dots (7)$$

由(7)、(4)及(2)知

$$P_B = \rho g \frac{R^2}{4 H} \quad \dots (8)$$

及 $h = \frac{R^2}{4 H} \quad \dots (9)$

(9)式中 h ， R ， H 均為可量度值，若柏努利方程式正確，則(9)式成立。故查驗 h 是否確等於 $R^2/4H$ 即可證明靜液壓力是否與深度成正比。

2. 方法

裝置如圖 2 所示，塑膠筒在不同高度處刻有四個直徑為 5 毫米的小圓孔，實驗前分別用橡皮塞塞住，筒中小管接水龍頭以維持水位之一定。筒底右側裝有固定米尺以便測定 R 值。這兒特別一提的是四個小圓孔開鑿好壞影響實驗至巨，開口不均匀將使水流裂成碎片，太大及太小亦均對實驗有不良影響；再則水位的固定更為重要，維持得宜，投射路徑非常穩定，著地點也將固定一點，若水位不穩定其路徑將成蛇形。

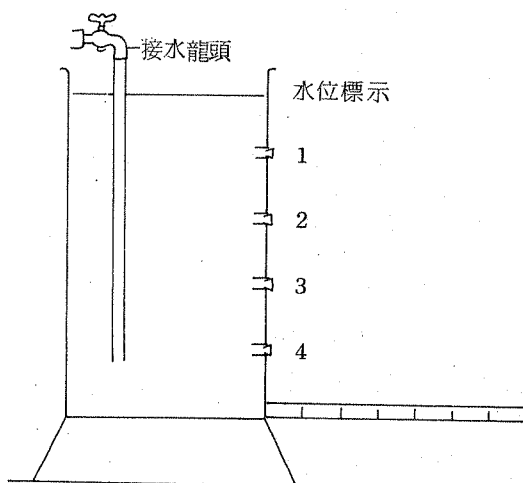


圖 2

3. 結果

實驗數據如下：

洞	R (cm)	H (cm)	$R^2/4H$ (cm)	h (cm)
1	59.5	35.2	25.1	26.0
2	59.7	24.9	35.8	36.3
3	51.8	14.7	45.6	46.4
4	31.8	4.5	56.2	56.5

由上表後兩欄，可知在實驗差誤範圍內， h 可視為等於 $R^2/4H$ 。而證明了靜液內壓力確與液深成正比。

4. 進一步討論

- 由(9)式知 $R^2 = 4Hh$ ， R 與 h 之函數圖形為拋物線。
- $R^2 = 4Hh$ ， $R = f(h)$ 而與流體密度 ρ 無關，即不管筒內盛何種液體，同一深度之小孔噴出來之路徑均相同，此觀念頗難被一般學生所接受，可做實驗檢驗之；經實驗觀測發現 R 值略有差異，以水及 CCl_4 而言，相差約 3%，此乃兩者具有不同的黏滯係數之故，數學引導根據柏努利定律，其假設液體均為無黏滯性的理想液體，事實上是不可能的。
- 由 $P = \rho gh$ 知壓力亦與流體密度成正比；此點可另行設計實驗驗證；考慮圖 3 左管由於

平衡可知

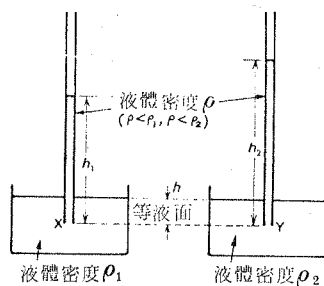


圖 3

$$\rho gh_1 = \rho_1 h$$

同理右管亦有相同之關係

$$\rho gh_2 = \rho_2 h$$

$$\text{兩式相除得 } \frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \text{ 即 } \frac{\rho_1}{h_1} = \frac{\rho_2}{h_2}$$

廣泛的說 $\frac{\rho_i}{h_i} = \text{常數}$

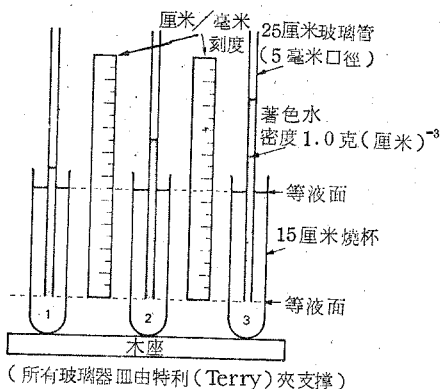


圖 4

實驗裝置如圖 4 所示，管 1，2，3 分別置比重為 1.1, 1.33 及 1.61 的有機液體，分別測量液高，其數據及分析結果如下表：

液體	密度 ($g\text{ cm}^{-3}$)	液柱高 (cm)	$\frac{\rho_i}{h_i}$
1	1.11	12.8	8.67×10^{-2}
2	1.33	15.5	8.58×10^{-2}
3	1.61	18.7	8.60×10^{-2}

由上表可知 $\frac{\rho_i}{h_i}$ 確為定值，印證了液體壓力與液體密度成正比。

三、對流教學

熱的傳播方式有三：傳導、對流及輻射，這是中學物理教材中的一部份，傳導的教學似乎較為容易，對流有時學生較不容易了解，主要原因乃影響對流方向的因素有二，一是重力，一是溫度；重力的因素使密度小的分子往上升密度大的往下降；至於溫度，根據氣體動力論，溫度越高，分子運動速度越大，亦可影響對流方向；在一封閉系統內，若沒熱振盪則分子必然全部堆積在底層，反之若無重力由於熱振盪分子將均勻地分佈在封閉系統內。對流方向的判定，關鍵乃在分子的分佈情況。今考慮圖1的封閉系統，形狀完全一樣的兩盒子，內裝等量的相同氣體，溫度均

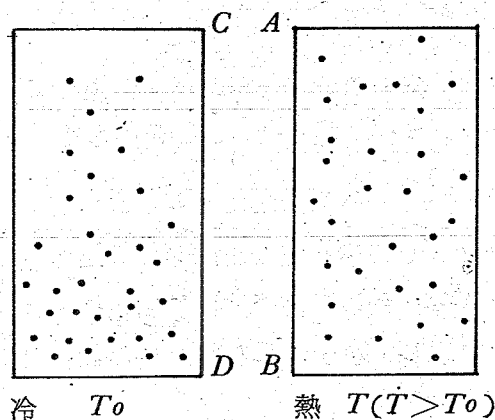


圖 1

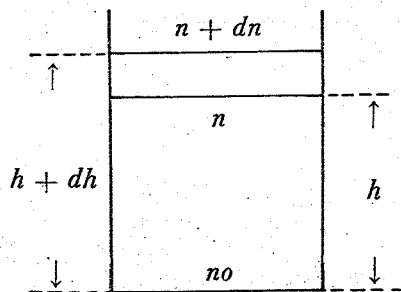


圖 2

為 T_0 ，氣體分子的分佈自然兩盒一致；由於重力

的關係下層密度必然較上層為大，當右盒開始加熱時，由於熱能的因素，右盒氣體分子有沿 BA 方向（向上）的淨移動趨勢，在維持一恆溫 T ($T > T_0$) 後右盒分子之分佈比左盒更為均勻。

今若將 AC 用一水平小管接通，很容易看出來對流的方向必然是由 A 至 C ，因 A 處的密度本就較 C 處為大，而且溫度亦高於 C ，兩項因素均促成氣體淨位移向左。我們可設計一靈敏的風向儀實際觀測之，發現實驗結果亦相符。其次，兩盒底部 B 、 D 處亦用一水平小管接通，到底對流方向為何呢？無疑的， D 處的密度大於 B 處，有利於分子從 D 流向 B ；然而 B 處溫度高，分子運動速率大，有利於分子向左移，因此究竟淨移動方向為何呢？理論上的預測非借重數學的分析不可，理論的預測再佐以實驗的印證，當可使學生徹底了解。

由圖 2 知

$$\ln \frac{n}{n_0} = -\frac{Mg}{RT} h$$

式中符號照一般規定， n 為高 h 處之分子密度， M 為分子之質量， R 為氣體常數而 T 為絕對溫度^②。上式告訴我們 $n \propto \rho^{-\frac{h}{T}}$ ，轉移率 TR (Transfer rate) 與單位體積的分子數及對流速率乘積成正比，換言之， $TR \propto n\nu$ (1)

$$\text{今 } \frac{1}{2} m \nu^2 = \frac{3}{2} KT$$

$$\therefore \nu \propto \sqrt{T} \text{ (2)}$$

由(1)、(2)式知 $TR \propto \sqrt{T} \rho^{-\frac{h}{T}}$

從 AB 盒至 CD 盒的淨轉移率為

$$TR \propto \sqrt{T} \rho^{-\frac{h}{T}} - \sqrt{T_0} \rho^{-\frac{h}{T_0}} \text{ (3)}$$

若淨轉移率為零則 $TR = 0$ 由(3)式得

$$h \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) = \ln \sqrt{\frac{T_0}{T}}$$

$$\therefore h = \frac{\ln \sqrt{\frac{T_0}{T}}}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}} \text{ (4)}$$

此乃無對流發生時之高度。

繼續討論高度增減對淨轉移率之影響，對(3)

$$\text{微分 } \frac{dTR}{dh} = \left(-\frac{\rho^{-\frac{h}{T}}}{\sqrt{T}} + \frac{\rho^{-\frac{h}{T_0}}}{\sqrt{T_0}} \right) C \quad \text{式中 } C \text{ 爲正}$$

值之常數

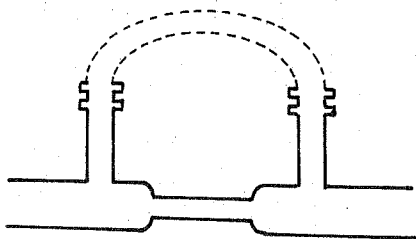
無淨轉移發生時之條件爲 $\sqrt{T}\rho^{-\frac{h}{T}} = \sqrt{T_0}\rho^{-\frac{h}{T_0}}$

$$\therefore \frac{dTR}{dh} = \frac{C\rho^{-\frac{h}{T_0}}}{\sqrt{T_0}} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) > 0 \quad \text{若 } T > T_0$$

此乃告訴我們在 T 大於 T_0 條件下，當 $\Delta h > 0$ ，即在無淨轉移位置之上時，對流方向由熱處流向冷處；反之， $\Delta h < 0$ 在無淨轉移位置之下時，對流方向由冷處流向熱處。

四、水環路 (Water Circuit) 的改進

類化原則在教學上有極大的利用價值，以學生原有的經驗爲基礎，推廣至新學習的事物上，教者省力，學者易於接受。譬如教流體問題時就以電流來比擬。欲測流線任兩點的水壓降落，就分別以兩個壓力計來代替電路的伏特計，問題是學生常會疑問壓力計何處與伏特計電流流進流出的兩接頭處相似，爲解決此困惑，可設計如下圖所示，分別在壓力計之一頭接一開關，打開時可見水噴出，兩頭並用透明塑膠管連在一起（如圖中虛線所示），仿如伏特計一樣。



五、肥皂泡沫的實驗

肥皂泡沫不但色澤五彩繽紛對學生極富吸引力而且可用來解決一些非常實際的問題；當肥皂泡沫到達平衡後，它的表面積恆爲極小^③，譬如當一圓環從肥皂泡沫中抽出，平衡後其上肥皂泡成圓盤狀，這乃熱力學上自由能（Helmholtz Free Energy）恆最小的自然表現。

用肥皂泡沫解問題，最簡單的是用來決定兩點間的最短距離，準備兩塊透明平板，以兩個固定器使平板互成平行，並且使固定器與平板垂直，將這套裝置從肥皂水溶液中抽出，將可看到如圖1的虛線狀的泡沫，這是未達平衡前的圖形，

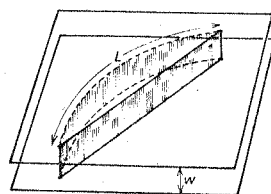


圖1 虛線表未達平衡前的泡沫，實線則表已達平衡

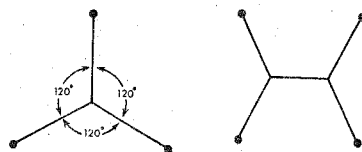


圖2 連接三點的最短路徑 圖3 連接四點的最短路徑

其寬度當然等於兩板間之距離 W ；設觀察瞬時之長度爲 L ，（在兩固定器之間之曲線距離），則面積 $A = WL$ 。到達平衡後，面積須最小， W 爲定值，故 L 須爲最小，即爲直線，果然最後可看到如圖1的實線部份之泡沫。

本實驗目的在求更複雜的最短路徑，例如三個等距城市間欲築道路，使之兩兩互通，其最省錢也就是最短的路徑爲何呢？你可把上述的兩透明平板用三個固定器固定互成平行，然後投入泡沫內，抽出後泡沫形狀如圖2所示，即三條線交於一點而相鄰夾角爲 120° ，此乃使城市兩兩相同的最短路徑，而這 120° 乃此類等距點最短路徑共有的通性，很容易在實驗上獲得證明。

很明顯地，無論多少個等距城市欲築兩兩互通的最短路徑均可用如上所示的實驗方法及幾何結構求出^④、^⑤，圖3即爲四個城市的圖形，城市是以黑點代表，實驗上就以固定器之固定點代

表城市的位置。

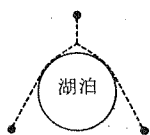


圖 4 避開湖區的等距三點最小路徑

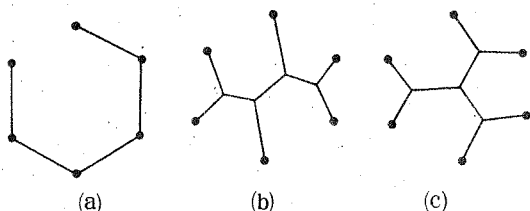


圖 5 等距六點最小路徑的三種可能圖形

更複雜的情形是加上特殊條件的限制，如兩城中點有個大湖，不在湖上造橋築路的情況也可用泡沫圖形表示出來，你只要在透明板上挖個洞代表大湖，其他步驟相同，圖 4 即是在這種條件下泡沫顯示出來的圖形。另一種情況是在數學上（相對）極小值在一個以上，欲確定何者為絕對極小值可將各相對極小之路徑求出，再加量度即可；先從相鄰線段均互成 120° 的通性繪出各種可能的圖形，例如等距六點其可能圖形有下列三種，如圖 5 (a)(b)(c) 所示；在泡沫實驗中，發現從各種不同方法抽出之泡沫結構，平衡後也只有圖 5 的三種形狀。而且也可從其中任一種輕吹干擾後變成另一種平衡結構，其中以 (a) 圖為最短。

本實驗有個特殊優點，(一)肥皂泡沫製容易不需特別準備，一碗水及半湯匙的任何牌的洗潔劑即綽綽有餘，洗潔劑加入已備好的水中，如此可避免在水面上產生泡沫，不過溶液應徹底攪拌。(二)實驗系統——透明平板及泡沫圖形可借助投影機投射在銀幕上，便於向全班同學說明，銀幕上肥皂泡沫將如圖中黑線所示，清晰可見，除外，也可利用肥皂泡沫圖形觀察如四方體、正方體等幾何結構的最小表面積。

六、波折狀硬紙板上的進行波

一小片矩形波折硬紙板或塑膠板，對波折線以某一角度剪成如圖 1 所示之形狀（應避免 45° ）

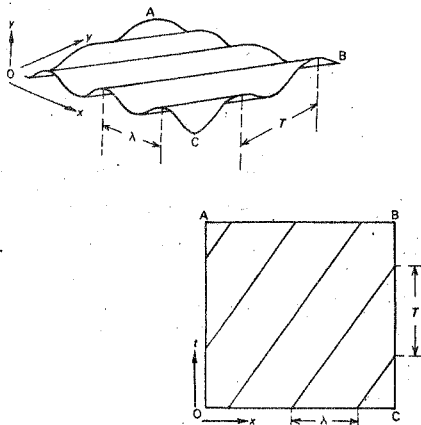


圖 1

，對波動方程式的教學是一件很好的教具，波動觀念非常抽象，學生對波動方程式尤其陌生，透過它可使學生對波動方程式的微分形態有初步的了解。描述某波動為位置及時間的函數時，其方程式為

$$y = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

從下列的引導非常有助於學生對波動微分方程的揣摩。

(a) OA 邊恰為表示介質做簡諧運動的圖形，就(1)式對時間兩次微分可知週期為

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\text{加速度}}{\text{位移}}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}}{y}}$$

(b) OC 邊表某一瞬間波的外廓，就(1)式對位置兩次微分知波長為

$$\lambda = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}}{y}}$$

$$(c) \text{波速 } \nu = \frac{\lambda}{T} \quad \text{得} \quad \nu = \frac{\sqrt{\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}}}{\sqrt{\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}}}$$

$$\text{或} \quad \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \nu^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

上式正是二階波動微分方程式，對任一特定點，波方程式的認識，可指導學生手指先沿著Y軸在硬紙板上游走，再沿X軸前進，如此可由感覺而增強波動的概念。

七、由月蝕測量地球與月球直徑之比

古希臘哲學家亞里斯多德(Aristotle)早就注意到地球落在月球的影子為弧狀而斷言地球是球形。西元前250年愛琴海上Samos島的天文學家Aristarchus更根據此項觀察而估計地球與月球直徑之比約為3:1，太陽直徑及地球之距離分別為地球直徑的7倍和200倍；雖然數字不很正確，但他是第一個以邏輯方式估出天體距離的人。

1975年11月18日原作者(E. G. Le Quesne)利用10英寸反射器照出月偏蝕時地球影子落在月球上的照片，如圖1所示，根據他量度之結果，像片中月球直徑恰為6厘米的圓而地球的影像則為16厘米直徑的圓，因此

$$\frac{\text{地球落在月球影像直徑}}{\text{月球直徑}} = \frac{16}{6} = 2.67$$

從日蝕中我們知道月球的影子恰可到達地球，假定太陽是在極遠的距離而月球繞地球做圓周運動，則我們從圖2可假設地球投射在月球上影子的直徑比實際之直徑減小了一個月球的直徑，因此

$$\frac{\text{地球直徑}}{\text{月球直徑}} = 2.67 + 1 = 3.67 = 3.7$$

而精確值是3.66，因此此法之估定，具有極高

的準確性。

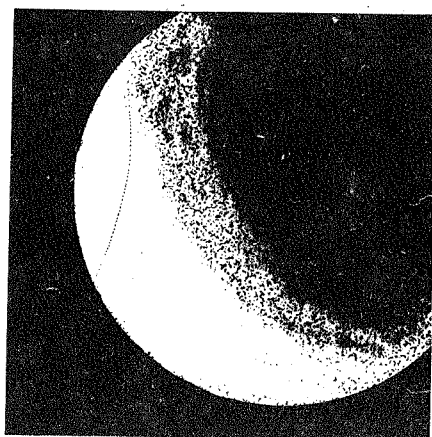


圖1 月偏蝕

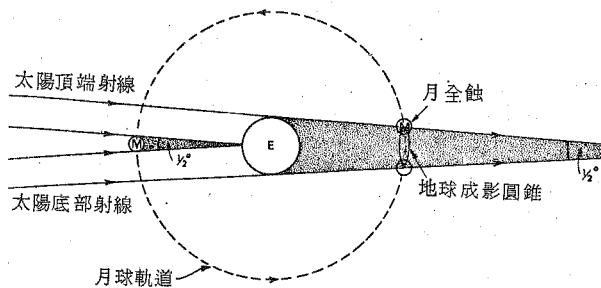


圖2

參考資料

- ① Rudolf Carnap, Philosophical Foundation of Physics, 1968, Chapter 1.
- ② Tabor, D., Gases, Liquids and Solids (Penguin, 1969) PP. 74-5.
- ③ Tabor, D., Gases, Liquids and Solids (Penguin, 1969) PP. 212-22.
- ④ Courant, R., and H. Robbins, What is Mathematics? (Oxford University Press, 1951) PP. 385-97.
- ⑤ Newman, J.R., The world of Mathematics, Vol. II (New York: Simon and Schuster, 1956) PP. 882-910.