



創意教學

當哈利波特遇上物理——熱學篇



鄭永銘老師 ◆ <http://www.balloon.com.tw>

筆者在進行下列的熱學實驗時，發現有些實驗結果與所謂的常識互相違背，這不禁讓我想起愛因斯坦曾說過的“常識就是累積的各種偏見”。而身處資訊爆炸的時代，網路上也存在著許多似是而非的錯誤資訊，更讓筆者感嘆於錯誤知識的一再傳遞是件可怕的事。愛因斯坦有句名言：「想像力比知識更重要—因為知識是有限的」；物理學家霍金也如是說：「我仍然問東問西，偶爾，我會找到答案」。所以，無論您是老師或是學生，請多問問題吧，放棄所謂標準答案這回事，因為想像力與好奇心永遠比知識還重要。

一、序曲：（<http://www.balloon.com.tw/heat1.htm>）

連結之影音包含「禮炮」、「焦耳熱效應」、「跳舞吧！蒜頭」、「形狀記憶效應」、「愛情熱度測試器」、「愛情運勢占卜」等，這些趣味實驗是開始上熱學時很受學生歡迎的戲碼。

二、橡皮筋熱力學：（<http://www.balloon.com.tw/heat2.htm>）

在「愛情運勢占卜」的連結影音中，以吹風機加熱氣球時，氣球的長度會變短，這項實驗說明同樣是橡膠所製成的橡皮筋在受熱時是會收縮的。而橡皮筋或是氣球產品是在天然橡膠中加入3%的硫，由於硫化的程度低，分子間交聯較少，故仍保有線型結構。因此，橡皮筋拉直時構形數目變少（亂度熵變小），而橡皮筋放鬆時，構形數目則變多（亂度熵變大）。因此，對橡皮筋加熱時，其朝向增加亂度的方向進行，亦即加熱時其長度將會變短。由於在熱力學中，自由能的定義是：自由能 $G = \text{系統的熱含量 } H - \text{溫度 } T \times \text{熵 } S$ 。而且，自然驅動的系統其自由能必須下降。自然驅動的系統發生變化的原因有兩種：一是降低系統的內能（熱含量），另一則是增大系統的亂度（熵）。因此萬物皆趨向於降低能量或增大亂度，故山崩海嘯乃至煙消雲散皆是自然之理。也就是系統能量越低或亂度越大，皆有助於自由能的下降。譬如汽水中 CO_2 的溢散是自發性的吸熱反應，這是因為 CO_2 散逸後，增大的亂度足以補償所吸收的熱能，使得自由能仍下降。而水蒸氣遇冷凝結也是自發性的放熱反應，這是因為亂度雖然降低，但由於釋出的熱能足以補償所損失的亂度，所以自由能還是下降。

至於拉放橡皮筋所伴隨的放熱或吸熱現象，是因為拉直橡皮筋時，由於此時亂度熵變小，但因為外力對系統作功，造成系統的內能增加。所以橡皮筋必須升溫，才能符合系統自由能 $G = H - T \times S$ 會下降之趨勢。另一種合理的解釋則是：當外力將橡皮筋拉長時，如果橡皮筋是朝



向降溫的趨勢進行。由於低溫時的橡皮筋會自動伸長，此結果將造成橡皮筋不需增加外力即可再度伸展，然後又會繼續降溫。此過程反覆進行，將形成橡皮筋只要將它稍微拉長，它就會自動越變越長，而且溫度還一直持續下降。這樣的結果將違反熱力學第二定律，亦即我們不可能製造出橡皮筋夢幻冷氣機—不僅不須電能，還自動將熱能轉變成橡皮筋的彈力位能儲存。根據這個理由，將橡皮筋拉長時溫度就必須上升。同理，放鬆時橡皮筋的溫度就必須下降。

三、伽利略溫度計：（<http://www.balloon.com.tw/heat3.htm>）

藉由溫度所造成的效應可以設計出相關的溫度計，譬如溫度會造成液體的熱漲冷縮，因此藉由測量其體積的變化即可得知其溫度。由於酒精溫度計是最早被設計出來的溫度計，因此實驗室中那款充填紅色液體的溫度計就一直沿襲「酒精溫度計」這個名稱。不過藉由觀察其量測範圍可高達 110°C ，即可推知其並非使用酒精。因為乙醇的沸點只有 78.4°C ，無法拿來測量超過其沸點的溫度。當筆者試著打破這種溫度計時，發現其紅色液體與水不互溶而浮於水面上，聞起來有著煤油味。加上煤油的沸點為 110°C 而凝固點為 -10°C ，恰好與這支溫度計的量測範圍吻合，因此就能確定它其實是「煤油溫度計」。

在連結影音中，筆者使用了一款由竹科 ZyTemp 所設計的簡易型紅外線溫度計 TN110，這個溫度計的量測範圍雖只有 $-33^{\circ}\text{C} \sim 220^{\circ}\text{C}$ ，但在中學的熱學實驗已足以擔當重任。紅外線溫度計的最大優點，是以非接觸方式測量物體的溫度，加上其回應時間只有半秒，因此可以得到幾乎是暫態的測量結果。其測量原理是應用圖1之黑體輻射在不同溫度下會有不同的波長分佈，其最大輻射的波長與絕對溫度成反比的關係（ $\lambda_m \times T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ）。或者依「史蒂芬一波茲曼定律」，輻射總強度 $W = \text{史蒂芬常數 } \sigma \times \text{絕對溫度 } T^4 \text{ (watt / cm}^2\text{)}$ ，因此只要測量最大輻射之波長或是輻射總強度，即可得知該發射體的溫度，TN110 是使用後者的方法。

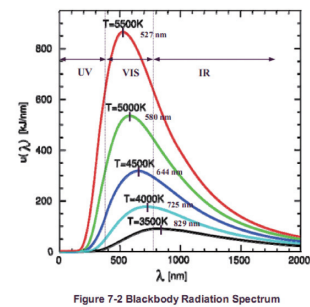


Figure 7-2 Blackbody Radiation Spectrum

圖1 黑體輻射波譜（註①）

關於伽利略溫度計，此是否為伽利略所發明還是頗有爭議的，主要原因是並無可靠的文獻或實物留存下來。反倒是義大利醫生 Santorio 在 1612 年發表的著作中首次提到溫度計的應用，圖2即為其原始設計草圖。該溫度計是下端插在液體中而上端封有氣泡的玻璃管，由於空氣會因氣溫變化而改變體積，因此根據氣柱的長度就可以推算出溫度。至於現代版的伽利略溫度計，由於玻璃小球是封閉的，因此其測溫原理與 Santorio 溫度計的原理不同，它是藉由玻璃小球外圍的液體密度會隨溫度而改變，進而造成浮力的變化。由於乙醚是液體中體膨脹係數最高的，因此伽利略溫度計若以此液體充填會有最靈敏的效果（筆者曾試著打破一支伽利略溫度計，測得其沸點接近乙醚的沸點 35°C ）。已知乙醚的體膨脹係數 $\gamma = 1.62 \times 10^{-3} / \text{K}$ ，因此其密度隨溫度變化的函數 $\rho = M / V = M / V_0 (1 + \gamma T) \approx \rho_0 (1 - \gamma T)$ ，由於此溫度計設計成每差 2°C 即會造成一顆小球的升降，而且根據維基的資料顯示相鄰小球間的質量差為 1mg （註③），因此相鄰兩小球間的浮力差 $\Delta \rho V g = \Delta m g$ ，可得



圖2 Santorio 的溫度計（註②）



$\rho_0 \gamma \Delta T V = \Delta m$ ，根據乙醚的物質安全資料表得知 $\rho_0 = 0.7135 \text{ g/cm}^3$ ，帶入數據可計算出小玻璃球的體積 $V = \Delta m / \rho_0 \gamma \Delta T = 10^{-3} / (0.7135 \times 1.62 \times 10^{-3} \times 2) = 0.432 \text{ cm}^3$ 。但影片中小玻璃球的直徑約 3 cm，其體積約 14.1 cm^3 ，二者竟然相差了三十多倍，這不禁讓人懷疑維基所提供的資訊是否正確？

四、過冷水：（<http://www.balloon.com.tw/heat4.htm>）

水凝結成冰其實是一種結晶的過程，若水質純淨無雜質而且容器光滑，即使溫度低於水的凝固點也無法結冰，此時稱為過冷水（supercooled water）。網路上的資訊說明只要條件適合，譬如壓力改變、有結晶核、擾動等，過冷水就能凝固為冰。為了確定過冷水結冰的觸發機制是否包含擾動這個因素，筆者使用了礦泉水、啤酒、可樂、過飽和醋酸鈉溶液來做實驗。因為冰晶的形成可分為「均勻成核作用」與「非均勻成核作用」二類，「均勻成核作用」是指過冷水全體同時形成相變。由於這種過程需要全部的水分子均移動到正確的位置與方向才能開始發生堆積，因此需克服相當大的表面能障礙，亦即需要相當大的過冷程度才能成核，此溫度低於 -40°C （註④）。由於一般家用冰箱冷凍庫的動力設計，其溫度約只能達到 -12°C 左右，因此經由家用冰箱所形成之過冷水的結冰機制，就不可能是這種「均勻成核作用」。至於「不均勻成核作用」則是指過冷水體系中已經存在某種不均勻性，譬如懸浮的雜質、容器壁上的凹凸不平處。由於它們能有效降低成核時的表面能障礙，因此就會優先在這些具有不均勻性的地方長出晶核，本實驗即屬於此種「不均勻成核作用」的類型。實驗結果顯示，影片中所有的過冷水都是從界面開始結冰，並沒有發生從器壁或是從瓶底敲擊處開始長晶的現象。這是因為從液面蒸發的水氣先在瓶蓋底部凝固形成晶種，當振動瓶身時「上方冰晶掉落液面才導致長晶」。因此，在缺乏結冰核的情況下，以家用冰箱所製造的過冷水若突然受到擾動是不可能結冰的。

大自然中也有過冷水的現象，「凍雨」就是過冷水滴落在物體表面而迅速凝固為冰的天氣現象，嚴重的情況下甚至會形成冰暴（ice storm）。圖3即是瑞士日內瓦在 2005 / 1 / 27 所發生的冰暴，當天氣溫 -12°C 、風速超過 100 km/hr 。



圖3 ice storm（註⑤）



五、乾冰的三態變化：（<http://www.balloon.com.tw/heat5.htm>）

2011 / 10 / 28 聯勤兵工廠在拆解老舊閃光彈時不慎引爆而造成 8 人死傷的慘案，對於這種危險的作業，美國軍方則是採用較為安全的自動化處理－操作人員在另一個房間以電腦監控防爆屋內的作業。2009 / 12 / 26 在臺北發生的寶特瓶爆炸意外事件（註⑥），對於這種危險的實驗，美國 Discovery 流言終結者的主持人也是在另一個房間以攝影機監看爆炸過程。兩相對照之下，我們的標準作業程序（SOP）真的是有瑕疵。現在我們試著從科學的角度來探討意外發生的原因，在拆解閃光彈的事件中，他們誤把含鎂的閃光彈當作拆解一般手榴彈的流程來處理。因為根據鎂的物質安全資料表，特別註明勿把水加入鎂粉中，而拆彈的處理過程「人員還一邊沖水降溫」，這就是造成意外的元兇。其實類似的意外事件，就我的印象已經發生過好幾次了（註⑦）。

接著我們來分析寶特瓶的爆炸事件，圖4是 CO₂ 的三相圖，由於在一大氣壓之下的乾冰，受熱後只能昇華成氣態，為了呈現出液態的 CO₂，於是網路上就出現了利用寶特瓶裝入乾冰的方法。殊不知此法非常危險，因為 PET 寶特瓶耐內壓的國內標準，是在 10 atm 壓力下 30 秒而不爆瓶就算合格。其耐壓值雖然比 CO₂ 的三相點壓力 5.1 atm 高，但這並不代表裝入乾冰的寶特瓶內壓力不會高於 5.1 atm。怎麼說呢？以圖中 1 atm 的虛線為例，放在室溫下的乾冰之狀態是落在圖中的 A 點，當乾冰昇華時會汲取空氣中的熱能來當作相變所需的能量，CO₂ 的狀態也會一直維持在 A 點直到全部昇華完畢後，A 點才會向右移動。將乾冰放入影音中的耐高壓水管時，CO₂ 的初始狀態也是在圖中的 A 點。當把高壓管的另一端折起封閉後，昇華的氣體會

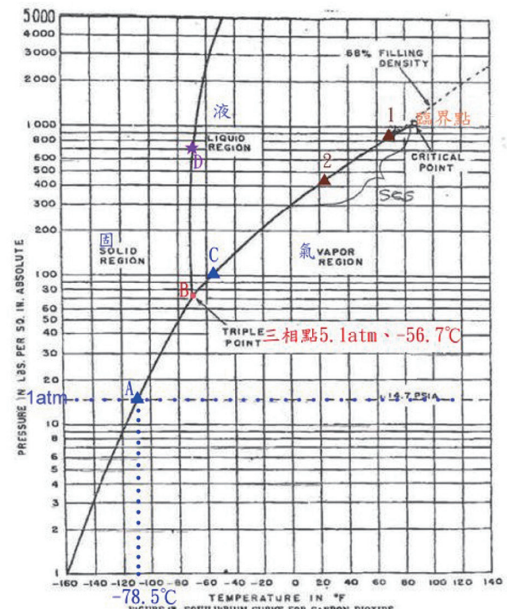


圖4 CO₂的三相圖（註⑧）

增加密閉容器內的壓力，由於昇華要吸熱，因此水管外圍就會出現結霜現象。這時如果不將結霜去除，那麼昇華所造成的冷卻效應就會抑制昇華的持續進行。若抹去結霜，手就能透過管壁對乾冰提供熱能，氣體也就能持續釋出而增加管內氣壓。由於氣壓增加，CO₂ 的狀態就由 A 點往 B 點移動。一旦氣壓達到 5.1 atm 時，管內的乾冰就開始熔化而形成固液氣三相共存。接著以手溫持續對系統供熱時，乾冰逐漸全部熔化成透明液體。再繼續供熱，又可觀察到液體的沸騰現象。由於氣壓持續增高，此時 CO₂ 狀態是由 B 點往 C 點移動的液氣共存相。至於 1、2 這兩點的數據，則是影片中 CO₂ 瓶的二種狀態。由於高壓水管的耐壓值為 30 atm，在此壓力下的 CO₂ 液氣共存溫度是 -4°C，因此只要由 B 點往 C 點的液氣共存時間不要經歷太久，或是發現管壁外圍已經不再結霜時，這時就應該立即將折起的管口打開洩壓，讓 CO₂ 的狀態再度變回 A 點的乾冰。

那麼使用寶特瓶來觀察乾冰液化現象時，又怎麼會發生爆炸的意外呢？筆者認為這是供熱速率太小所導致。因為 1000 CC 寶特瓶內的乾冰其吸熱速率遠比在水管內來得慢（容器的尺度越小越容易傳熱），加上該實驗當初是在溫度特別低的日子來進行，因此 B 點的狀態在供熱不足的情況下，它就不是往 C 點移動而是往 D 點方向移動了。由於 BD 這條固液相共存的斜率非常



陡，升壓的過程中系統溫度幾乎不變，表示 CO_2 的分子動能幾乎不變而不須吸熱，而系統也不須汲取由 B 到 C 所需的大量熔化熱，因此外界只要能提供用來增加壓力能之微小能量即可快速地增加瓶內壓力。加上其固液相共存的曲線不像水是向左上方傾斜，可藉由高壓來促成液化（增大壓力會降低熔點）。因此在供熱不良的情況下， CO_2 的溫度卻是保持在 -56.7°C 直到壓力達到 50 atm 的 D 點之後才會升溫，但在此之前其壓力早就超過寶特瓶的耐壓值，於是意外就這麼發生了。

六、感溫變色液晶片：（<http://www.balloon.com.tw/heat6.htm>）

影音中的液晶片是使用苯甲酸膽固醇酯為材料，由於此種液晶具旋光性，其長軸會隨溫度產生不同程度的扭轉，因而呈現出不同的顏色。圖5為此種液晶的模型，其層狀結構的螺距會隨溫度而改變，右方是低溫狀態，左方是高溫狀態。其螺距的一半（圖6）即為布拉格繞射公式中的晶格距離 d ，當 $2d \sin 90^\circ = 1\lambda$ 時，符合最強反射光的波長 λ 即等於液晶的螺距，因此該色光就被反射而顯示出來。當溫度上升時，由於上下層液晶分子間的扭轉角度變大，螺距因而縮短，使得膽固醇液晶的反射波段往短波長移動，因而呈現出紅→橙→黃→綠→藍→紫的顏色變化。由於其隨溫度變化所呈現的顏色不同，因此可應用於測溫用途。譬如圖 7 的 Carl Mertens Wine Thermometer 可顯示瓶身的溫度，藉以瞭解其是否處於這種酒類的適飲溫度。

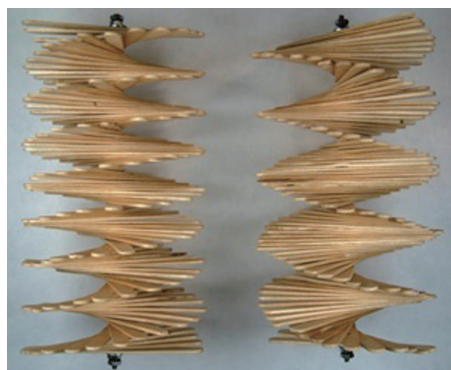


圖5 膽固醇型液晶模型（註⑨）

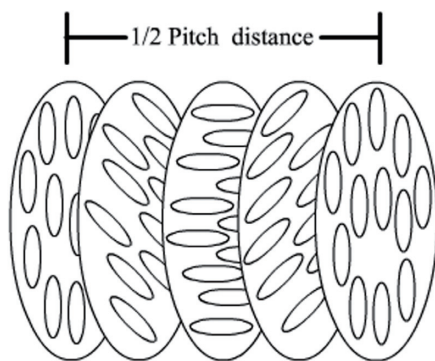


圖6 半螺距（註⑩）



圖7 酒瓶溫度計（註⑪）

七、感溫變色粘土：（<http://www.balloon.com.tw/heat7.htm>）

溫變顏料的應用範圍非常廣泛：溫度計、高溫變色電線、溫變貼紙、溫變杯、溫變餐具、溫變玩具、溫變服裝……。本實驗中的感溫材料具有可逆的熱變色行為，但由於無法從廠商處得知其成分與分子結構，因此其詳細的變色原理就無從得知。至於物質能顯現顏色的機制，是低能階的電子在吸收某個波段的光而向高能階躍遷時，如果吸收的光恰好落在可見光區，則物質即能顯出吸收光顏色的互補色。因此若要改變物質顏色，就必須要改變某原子或離子的電子排列形態。亦即材料如果是屬於利用配位鍵結的化合物，當其中心原子或離子四周的配位幾何形狀與配位數若會因溫度而改變時，那麼這種化合物就能當作感溫材料來使用。這時的顏色改變是屬於化學變化，因為有發生電子的轉移。而筆者唸國中時，國立編譯館印的理化課本有提及「強熱氧化鋅會使其顏色由白轉黃，冷卻後恢復成白色」，書上提到這種變化是屬於物理變化（因為這時沒有電



子的轉移而只是分子振動頻率的改變）。我們接著來回憶一下中學時所學的這個常識：「會產生氣體、沈澱或變色為化學變化」，這是否正確呢？譬如鐵在高溫時所呈現的紅色熔融狀態與低溫時的顏色不同，這種改變就不是化學變化；而膽固醇型液晶片的顏色變化也僅是經由扭轉液晶軸所呈現的物理效應，這種改變應該也不是化學變化。因此，這是否就是愛因斯坦所說的“常識就是累積的各種偏見”？

八、熱導管：（<http://www.balloon.com.tw/heat8.htm>）

圖8是一款電腦 CPU 的散熱模組，由連結影音中可以看出導熱管的傳熱效果非常的快，在 8 秒鐘之內冷凝段就已經上升了將近 40°C，而其傳熱功率甚至可達相同外徑實心銅管的 1000 倍。熱導管目前使用於筆記電腦的散熱、太空梭內部的溫度控制、太陽能熱水器的集熱、空調系統、工業的熱交換器等應用。其工作示意圖如圖9，藉由蒸發段接觸到熱源，將裡面的工作流體蒸發而攜出熱量，所產生的蒸汽再經由變高的壓力流向低溫區的冷凝段，並藉由冷凝將凝結熱散逸於外界環境中。冷凝後的液體則循管壁的燈芯結構經由毛細作用而再度流回高溫區，形成一個熱交換的循環。

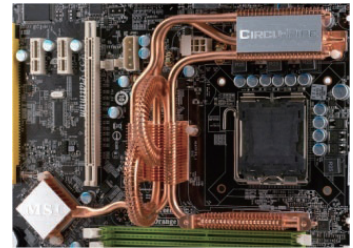


圖8 CPU的熱導管（註⑫）

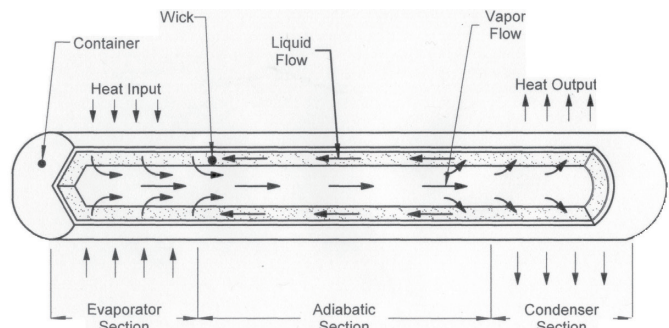


圖9 熱導管的工作示意圖（註⑬）

運用熱導管來散熱不需供應電力即能提供高導熱的效率，為什麼它能擁有如此良好的導熱能力呢？這要從熱傳播的方式說起：

以熱傳導而言，銀的熱傳導係數最高，其次是銅，但不管是那種單一材料都遠不如熱導管的傳熱效率。這是因為熱對流的傳熱效率遠比熱傳導方式高，這也是空氣或水等流體在不對流的情況下，其實是熱的不良導體之原因（ex. 棉被中的空氣）。而熱導管則透過毛細作用的協助，提供了熱蒸汽與冷凝水能同時進行對流的機制，因此就能以高速率與高功率來實現傳播熱量的目的。

九、熱氣球：（<http://www.balloon.com.tw/heat9.htm>）

1. 太陽能熱氣球

將塑膠袋的一端打結後，然後抓住另一端的開口，藉由跑步來充填空氣。充氣後的塑膠袋約 15 公尺長、直徑約 0.6 公尺、體積約 5 立方公尺，接下來就需要太陽公公來幫忙了。本實驗要選擇陽光充足而無風的晴天，塑膠袋由於受到陽光照射時，黑色的表面容易吸收輻射熱，因而袋內的空氣漸漸升溫而膨脹，造成球體之空氣浮力變大。一旦浮力大於氣球與球內熱空氣的總重量時，熱氣球就會升空。本實驗的塑膠





袋質量 m 約為 300 g、熱空氣體積 V 約為 5 m^3 、當天氣溫約 27°C

$$\Rightarrow \rho_0 \cdot V \cdot g = \rho' \cdot V \cdot g + m \cdot g$$

$$\Rightarrow \frac{PM}{RT_0} \cdot V \cdot g = \frac{PM}{RT'} \cdot V \cdot g + m \cdot g$$

$$\Rightarrow \frac{101300 \times 0.0288}{8.31 \times 300} \cdot 5 = \frac{101300 \times 0.0288}{8.31 \times T'} \cdot 5 + 0.3$$

$\Rightarrow T' = 316.2 \text{ K}$ (43°C)。因此袋內空氣的溫度只要被陽光加熱至 43°C ，亦即內外溫差只需達到 16°C 以上，熱氣球就會升空。



2. 垃圾袋天燈

取長 90 公分之鋁線，將其以透明膠帶黏成圓框。將鋁線圓框置於垃圾袋之開口端，以 12 小段之透明膠帶等距離貼於圓框上，使圓框與垃圾袋二者結合。再取 30 公分之鋁線，跨接於圓框之直徑處，並在中央繞一小圈來置放面紙，並將其以酒精沾溼。然後將垃圾袋置於已點火之休閒爐上方，利用產生的熱氣讓垃圾袋慢慢鼓起來。然後將底座放低至距休閒爐頂部約 15 公分處，不久即可看到酒精自動被熱氣點燃，至此放開垃圾袋即可上升。天燈必須要在無風的天氣和空曠的場地上放飛，否則不會順利飛上天，並可能會造成危險，放飛時需要 2-3 人的共同協力且必須有成年人陪同。最好也在天燈底部拴上線，這樣既可以重複放飛，又能控制起飛高度和範圍，以避免引起火災。本實驗中，90 公升塑膠袋連同鋁條與酒精面紙的總質量 m 約為 40g、氣溫約 17°C 。



$$\therefore \frac{PM}{RT_0} \cdot V \cdot g = \frac{PM}{RT'} \cdot V \cdot g + m \cdot g$$

$$\Rightarrow \frac{101300 \times 0.0288}{8.31 \times 290} \times 0.09 = \frac{101300 \times 0.0288}{8.31 \times T'} \times 0.09 + 0.04$$

$\Rightarrow T' = 458.2 \text{ K}$ (185°C)。亦即內外溫差需達到 168°C 以上，熱氣球才能升空。由於垃圾袋開始升空之後，氣球內熱空氣的溫度就會因為熱量散逸而降低，因此底部需燃燒酒精以補充熱能，否則將無法持續上升。此簡易天燈之製作方法比糊紙方式簡單，但升空時易受到天候與場地之影響。風大時易將燈體吹斜而使燈體燒毀，因此最好選在無風的時候於空曠處施放。為了避免塑膠袋造成環境的污染，可於底部繫上控制線來施放。燃料則不宜使用汽油或煤油，否則太高的熱氣易使塑膠袋熔化。

使用 5000 公升的塑膠袋，內外溫差只須達到 16°C 以上，熱氣球即能升空。而使用 90 公升的塑膠袋時，內外溫差卻須達到 168°C 才能升空，二者的溫差比超過 10 倍。這是因為氣球皮的重量正比於長度平方，而浮力卻正比於長度三次方，因此尺度越小就越難以升空，除非以加大內外氣體密度差的方式來彌補。提到這一點，就讓筆者回憶起早期 Discovery 曾做過的實驗「以線香的煙讓雞蛋殼升空」（註⑭）。從理論上就可以知道這是不可能成功的，因為

蛋殼重量約 5 克重，但是體積卻僅有 65 立方公分。由於 1 公升的空氣質量才 1.2 克，縱使將蛋殼內抽至真空，這已經是能提供最大浮力的狀況了，其浮力還是遠小於 1 克重，因此怎麼能升起 5 克重的蛋殼呢？

十、葉輪輻射計：（<http://www.balloon.com.tw/heat10.htm>）

圖10是一個可驗證熱輻射的儀器，其利用黑白雲母片對熱輻射吸熱程度的差異，使密閉在玻璃球內的稀薄空氣因溫差而產生流動，進而推動雲母片快速轉動。因此，可以經由轉速的測量來得知輻射的功率。其構造為四片薄的雲母片，葉片之一面塗黑而另一面塗白。並以等間隔黏於小玻璃管四周，而小玻璃管則置於針尖上，以減少扇葉轉動所受之阻力，並在扇葉外套上一玻璃球罩。當葉片的黑色面吸收了輻射熱，將造成溫度升高，使附近的氣體分子平均動能升高。而白色面則反射大部分

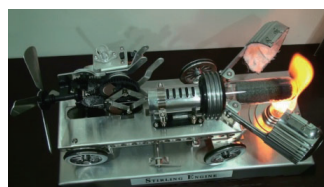


圖10 Radiometer (註⑮)

輻射能，使得溫度升高較小，因此白色面附近的氣體分子平均動能較小。又當氣體分子垂直對平面做彈性碰撞時，其動量變化為 2 倍的入射動量，故由黑面端反彈的空氣分子，其動量變化大於白面端，即黑面端受力較白面端大，致使葉片順時針旋轉。這樣的解釋似乎合情合理，不過，我的學生根據一份由臺中一中學生所做的科展報告（註⑯）而提出質疑。這位學生認為如果葉片旋轉的驅動力是來自於球罩內的稀薄氣體，那麼為何該份科展數據卻顯示罩內氣壓由 4 torr（約 1 / 200 atm）至 0.17 torr（約 1 / 5000 atm）的抽真空過程中，空氣分子變少會造成碰撞頻率降低，但轉速卻反而是愈來愈大呢？因此他就提出了他自己的觀點。這位學生之所以能從熟知的現象中發現新奇之處，不正就是因為「放棄所謂標準答案」之後才擁有的收穫嗎？

十一、史特林引擎：（<http://www.balloon.com.tw/heat11.htm>）

史特林引擎是一種將熱能轉換成動能的熱機，在引擎外的一側加熱，產生兩個氣室間的溫差。當熱區的空氣受熱膨脹時，就會推動活塞，並同時以拉桿控制冷熱兩區的氣體移動，使空氣從熱區流到冷區，空氣就會遇冷而收縮，進而使活塞退回原位置。圖11為其工作示意圖與簡化的史特林引擎循環之 P-V 圖、T-S 圖，一個完整的循環可分為以下四個過程：



- A. 1→2 的過程，低溫的空氣被等溫壓縮，內能不改變，活塞對氣體所作之功，以廢熱形式散逸於外界。
- B. 2→3 的過程，空氣等體積升溫，定容不作功，所增加的內能來自於暫存在鋼絲絨中的熱量。
- C. 3→4 的過程，高溫的空氣作等溫膨脹，內能不改變，氣體對活塞作的功等於熱源提供的熱量。
- D. 4→1 的過程，空氣等體積降溫，定容不作功，所減少的內能與 B 過程所增加的內能等值，而釋放暫存於鋼絲絨中。

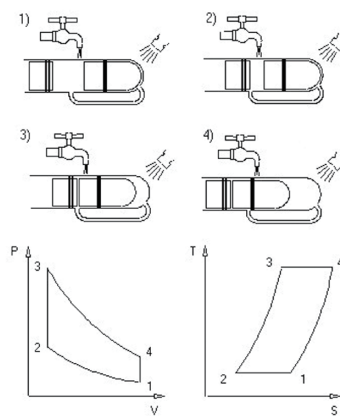


圖11 工作示意圖 (註⑰)



以上四個過程，只有 3→4 會對外界作正功。由於 $P \cdot V = n \cdot R \cdot T \Rightarrow P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V}$

$$\therefore W_{3 \rightarrow 4} = \int_{V_3}^{V_4} P \cdot dV = \int_{V_3}^{V_4} \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \cdot dV = n \cdot R \cdot T_{\text{hot}} \cdot \ln \frac{V_4}{V_3} \quad (\text{定溫條件: } dT=0)$$

$$\text{做的負功 } W_{1 \rightarrow 2} = -n \cdot R \cdot T_{\text{cold}} \cdot \ln \frac{V_1}{V_2} = -n \cdot R \cdot T_{\text{cold}} \cdot \ln \frac{V_4}{V_3}$$

功等於 P-V 圖中封閉曲線所包圍的面積 $W_{\text{net}} = W_{3 \rightarrow 4} + W_{1 \rightarrow 2} = n \cdot R \cdot (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}) \cdot \ln \frac{V_4}{V_3}$ ，n 為

氣體莫耳數，R 為氣體常數， V_3 和 V_4 分別是氣體膨脹前後之體積。所以若要增加此熱機輸出的功，除了使用大汽缸與提高壓縮比之外，最簡單的方法就是提高冷、熱區之間的溫差。

十二、喝水鳥：<http://www.balloon.com.tw/heat12.htm>

能將熱能轉換成動能的熱機，其工作流體在壓縮後經加熱而膨脹作正功，膨脹後先冷卻再壓縮作負功而完成熱機循環。若符合這種條件的裝置是史特林引擎，那麼圖12這隻喝水鳥就可視為是一種可愛的史特林引擎了。為什麼筆者會這麼認為呢？因為熱機必須有冷熱兩側的溫差，史特林引擎的熱區是由酒精燈來提供，冷區是室溫環境；而喝水鳥的熱區是腹部的室溫環境，冷區則是由頭部的蒸發致冷效應來達成，至於工作流體則是有發生相變的二氯甲烷。



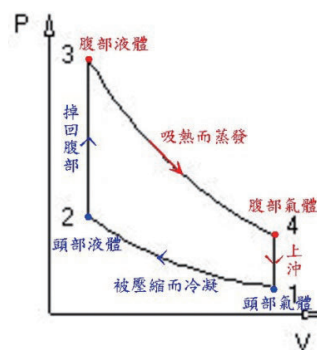
圖12 喝水鳥（註⑱）

至於喝水鳥的 P-V 圖，一個完整的循環也是分為四個過程：

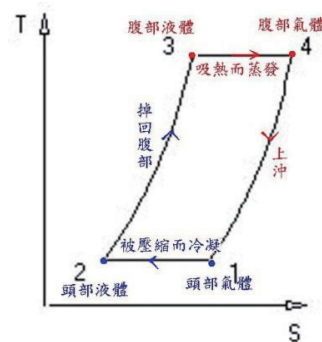
- 1→2 的過程，頭部的氣體被壓縮而冷凝成液體，凝結熱藉由鳥頭的水分蒸發，以廢熱形式散逸於外界。
- 2→3 的過程，當鳥頭降到最低點時，頭部的液體由打通的玻璃管通道流回腹部，低溫液體並被加熱成高溫狀態，所增加的內能來自於室溫的加熱。
- 3→4 的過程，腹部的高溫液體繼續被熱源（外界空氣）蒸發成高溫氣體，氣體並推動液柱上升，造成重心上移，進而提升了系統的力學能。此過程中由外界所吸收的熱能 $Q = \text{內能增加量 } \Delta E$ （相變所需的汽化熱）+ 機械功 W （擺動的動能 & 增加的重力位能）。
- 4→1 的過程，當鳥頭降到最低點時，腹部的氣體由玻璃管通道向上沖回頭部，並藉由鳥頭水分的蒸發，將其冷卻成低溫氣體而回到起始狀態。

接著我們來分析它的 T-S 圖：

- 1→2 的過程，冷凝後液體的亂度熵會比原先的氣體時小。
- 2→3 的過程，由於熵 $S = \text{供給熱 } Q / \text{溫度 } T$ ，所以液體吸熱後熵變大。



喝水鳥的 P-V 圖



喝水鳥的 T-S 圖



C. 3→4 的過程，液體蒸發成氣體時，亂度熵變大。

D. 4→1 的過程，氣體降溫會放熱，亂度熵變小。

前一實驗的史特林引擎車若要增加輸出的功，就必須提高冷、熱區之間的溫差。而這隻喝水鳥若要增加輸出的功（擺得快），也是得提高冷、熱區之間的溫差，也就是要降低室溫環境中的溼度，因為這樣才能提高蒸發速率而形成比較低溫的鳥頭冷區。因此若是外界環境的濕度已達飽和，則蒸發不再持續進行，冷熱區的溫度就會相等，喝水鳥也就會停止擺動了。

十三、塞風咖啡壺的運作原理：（<http://www.balloon.com.tw/heat13.htm>）

每天早上一定要一杯咖啡醒腦的我，特別偏愛以塞風壺來沖煮咖啡。「塞風」的英文名 syphon 或 siphon 就是「虹吸」的意思，因此這種沖泡方式就稱為「虹吸式煮法」，網路上有些文章甚至說明它就是「虹吸原理」的應用。其實它在沖煮的過程中，與虹吸現象根本扯不上關聯，因此這是一則以訛傳訛的錯誤資訊。至於當初為何取名叫做「虹吸壺」？我只能猜測當初的原設計或許真的有使用到虹吸管，但現代的款式已看不到此結構，以致於變成一個「沒有虹吸管的虹吸壺」。至於其運作原理，請參考連結的影音。



圖13 塞風咖啡壺（註⑱）

十四、灑鹽能融雪的原因：（<http://www.balloon.com.tw/heat14.htm>）

「Q：雪上撒鹽，為何可融雪？」「A：這是因為灑鹽可以降低雪的熔點」，這段話已是眾所皆知的常識，而這種觀點也屢見於各科普文章中（註⑳）。不過，熔點是純物質的物理特性，能夠改變它的只有壓力。譬如由水的三相圖中可知，若增大壓力則水的沸點會上升（ex. 壓力鍋），凝固點則會下降（ex. 復冰現象）。由於在雪上撒鹽以後就形成了混合物，既然已經不是純物質了，怎麼還能說是改變了雪的熔點呢？其實改變的是鹽水的凝固點，是藉由鹽的溶解而造成蒸氣壓下降，進而降低了鹽水的凝固點，所以這是拉午耳定律所造成的效應。不過，鹽與雪都是固體，那麼何來「鹽的溶解」呢？筆者提出了動態平衡的觀點，在 0°C 的冰、水二相共存時，冰的質量能保持不變是因為冰融化的同時也會有水結冰。但是由於有鹽的存在，一旦水從冰塊表面熔化，就會立刻與鹽水混合，由於鹽水的凝固點低於 0°C，因此它就不會結凍，也就是說可逆反應的平衡已經被加入的食鹽所破壞了。



圖14 撒鹽融雪作業（註㉑）

十五、絕熱膨脹：（<http://www.balloon.com.tw/heat15.htm>）

一份「臺北縣立高中職 98 學年度教師聯合甄選」的物理科考題中出現了這樣的題目：「解釋為什麼張口哈氣時，哈出的氣體溫度較高，而噓口吹氣時，吹出的氣體溫度較低」。該份試題提供的答案是：「張口哈氣時，口腔內的氣壓與外界大致相同，因此哈出的氣體約與體內溫度相同，因此會覺得熱熱的。噓口吹氣時，口腔內氣壓比外界高，當氣體到口腔外時會膨脹，因此會



對外界做功，溫度會下降」(註②)。當初筆者看到這樣的解答時，不解為何這份會影響物理教師能否被聘任的試題，竟然會出現這樣的錯誤？在上網搜尋相關的資料時，發現這份試題的命題者可能是取材自國內某個物理問題討論區，因為該試題解答與那位版主的論述相同(註③)，接著又發現持有這種觀點的人還真是不少(註④)。

連結的影音中，筆者測量煮開水時距離壺口 10 公分處的蒸汽溫度僅有 40°C ，會造成這麼大的冷卻效果應該不是絕熱膨脹所造成。這是因為在對流層的氣溫梯度是每上升 1 公里，溫度會因為氣體絕熱膨脹的因素而下降 6.5°C 。由於上升 1 公里的氣壓下降 $8/76 \text{ atm}$ ，而煮開水時連壺蓋都不會被噴開，就可以證明壺蓋的內外壓力差不會比壺蓋重量所造成的壓力大。以該實驗的壺蓋為例，其重量 90 克重、直徑 10 公分，重量所造成的壓力也約僅有 $1/1000 \text{ atm}$ 。因此可以判斷在這麼微小壓力差的驅使之下，蒸汽經由壺嘴噴出之後，因為絕熱膨脹所造成的溫度下降量就應該遠比 6.5°C 少。那麼煮開水這種高達 60°C 的冷卻效應(請不要忽略水蒸氣的凝結熱更可觀)，就應該不是絕熱膨脹的因素所造成。那麼到底是什麼因素會有這麼大的冷卻效果呢？相信讀者們在看完連結的影音之後，正確的答案就會清晰地浮現出來了。

The important thing is not to stop questioning. -Albert Einstein



◎附註

- ① 圖片來源：<http://files.instrument.com.cn/bbs/upfile/200946123121.gif>
儀器信息網，儀器論壇，上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ② 圖片來源：http://www.zytemp.com/infrared/images/figure1_1.jpg
ZyTemp，The History of Thermometry，上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ③ 資料來源：http://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_thermometer
維基百科，伽利略溫度計，上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
<http://140.114.80.32/schoolpad/front/bin/ptdetail.phtml?Part=10>
清華大學物理系科普教育網站，伽利略溫度計，上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ④ 資料來源：http://www.rcec.sinica.edu.tw/~lccr/download/cyber_course_II/chap7.pdf
許晃雄，雲與降水，第 4 頁，上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑤ 圖片來源：http://www.pbase.com/scherrer/january_2005_ice_storm
Jean-Pierre Scherrer，Ice Storm over Geneva Switzerland，上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑥ 資料來源：<http://www.nownews.com/2009/12/27/11490-2551322.htm>
今日新聞網，實驗乾冰炸彈險毀容，上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑦ 資料來源：<http://www.youtube.com/watch?v=mMqYsUV6bWA>
YouTube，實驗室驚魂 無火源鎂粉自燃，上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑧ 圖片來源：<http://www.hipressure.com.tw/resserver.php?blogId=1&resource=CO2%203%E7%9B%B8%E6%9B%B2%E7%B7%9A%E5%9C%96.jpg>
Tech Lead Enterprise CO.,LTD，超臨界流體應用原理，上網日期：民 101 年 1 月 1 日。



- ⑨ 圖片來源：http://mrsec.wisc.edu/Edetc/nanolab/LC_prep/images/IMG_9622a.jpg
University of Wisconsin, Preparation of a Cholesteryl Ester Liquid Crystal Thermometer, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑩ 圖片來源：<http://cnx.org/content/m15768/latest/graphics6.png>
Rice University, Nanotechnology, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑪ 圖片來源：http://www.bookofjoe.com/images/2007/06/24/regslide9_2.jpg
bookofjoe, Carl Mertens Wine Thermometer, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑫ 圖片來源：http://china-heatpipe.net/up_files/image/2008-1-31/53952532.jpg
IXBT LABS, MSI P35 Platinum Motherboard, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑬ 圖片來源：<http://www.ixbt.com/mainboard/msi/p35-platinum/heat-pipe-top.jpg>
china-heatpipe.net, How does the heat pipe work?, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑭ 資料來源：<http://140.123.22.19/7-up/research/d10/complete.pdf>
中正大學, 中國古代科學之雞子飛蛋, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑮ 圖片來源：<http://sannado.com.tw/index.php?cPath=55&sort=2a&page=4>
仙納杜生活館, Sannado光風車, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑯ 資料來源：<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/48/senior/040112.pdf>
廖冠翔等, 光風車性質之相關研究, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑰ 圖片來源：<http://www.brad.ac.uk/staff/vtoropov/burgeon/pix/stirling.gif>
Henrik Carlsen, OPTIMIZATION OF STIRLING ENGINE PERFORMANCE, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑱ 圖片來源：<http://www.scientificsonline.com/famous-drinking-bird.html>
Edmund Scientifics, The Famous Drinking Bird, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑲ 圖片來源：<http://redbarncoffeehouse.files.wordpress.com/2008/01/coffee-siphon.jpg>
Javaholics, Blog at WordPress.com, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ⑳ 圖片來源：<http://image.ce.cn/main/shehui/201001/06/W020100106374433620609.jpg>
經濟日報社, 全力保通暢, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ㉑ 資料來源：http://www.sciscape.org/news_detail.php?news_id=1912
Sciscape, 灑鹽融雪的后遺症, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ㉒ 資料來源：<http://www.icejoke.tw/test/2009tpcphans.pdf>
朱晉杰, 妙師物語, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ㉓ 資料來源：<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=7892>
物理課程相關問題, 白努利???吹氣與哈氣, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。
- ㉔ 資料來源：<http://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=17215>
高瞻自然科學教學資源平臺, 絕熱過程, 上網日期：民 101 年 1 月 1 日。