

中華民國第四十七屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

佳作

040119

氣球的脹熱縮冷

學校名稱：臺北市立第一女子高級中學

作者： 高二 王韻筑	指導老師： 張清俊
---------------	--------------

關鍵詞：熱學 氣體動力論 彈性位能

氣球的脹熱縮冷

壹、摘要

彈性物質受外力拉伸時，溫度會升高；反之，當彈性物質由拉伸狀態縮放回去時，溫度會下降，並且降溫溫差會比原本的升溫溫差來得大。

對此現象，我們仿造氣體動力論的模型做解釋：溫度是一個宏觀的物理量，其根本為分子運動動能的表現，橡皮筋未拉伸前是一個三維系統，而拉伸後長度變長、截面積變小，使橡皮筋接近一維系統，然而在拉伸的過程中我們並未提供動能的變化，因此原本分布在三個維度上的能量現在集中在一個維度上，造成等效的溫度上升現象；反之，將橡皮筋放開使其恢復原長時，將使橡皮筋恢復成三維系統，能量重新分配在三個維度上，造成收縮後的溫度比拉伸時溫度低的現象。

本實驗檢驗橡皮筋溫度上升與拉伸速率、拉伸長度的關係，並且檢驗拉伸時溫度上升倍率及下降時溫度下降倍率之間的關係，同時針對整個溫度變化過程做詳細的分析說明。

貳、研究動機

小時候吹氣球的時候，常常可以注意到將氣球吹脹起來的時候，氣球溫度會上升，而且即使沒有吹氣，而僅只是把氣球拉長，也會有相同的溫度上升效果，另外，若是將氣球從伸長狀態縮放回原本的狀態，在收縮的過程中也可以明顯感受到氣球溫度的下降。在高中物理學到彈性能及熱學的相關知識後，欲對此一現象進行更深入的研究探討，在請教老師及一些專家學者，似乎可以仿造氣體動力論的方式，藉由不同維度的能量變化來解釋，氣體動力論指出單元子分子在每一個維度有 $\frac{1}{2}kT$ 的能量，因此在三維系統中的能量為 $\frac{3}{2}kT$ ，而在一維系統中的能量為 $\frac{1}{2}kT$ ；當一個溫度為 T 的三維系統在能量沒有補充或散失的狀況下變成一維系統，基於能量守恆 $\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}kT'$ ，因此 $T' = 3T$ ，亦即溫度會上升，反之 $T = \frac{1}{3}T'$ 可以說明當

系統由一維變成三維時會造成溫度下降。

為了檢驗上面的說法，故設計以下實驗，並且由於考慮氣球的形狀較為複雜，並且很明顯可以看出一些厚度不均勻的地方，因此以形狀較單純也較均勻的橡皮筋作代替品來進行以下實驗。

參、研究目的

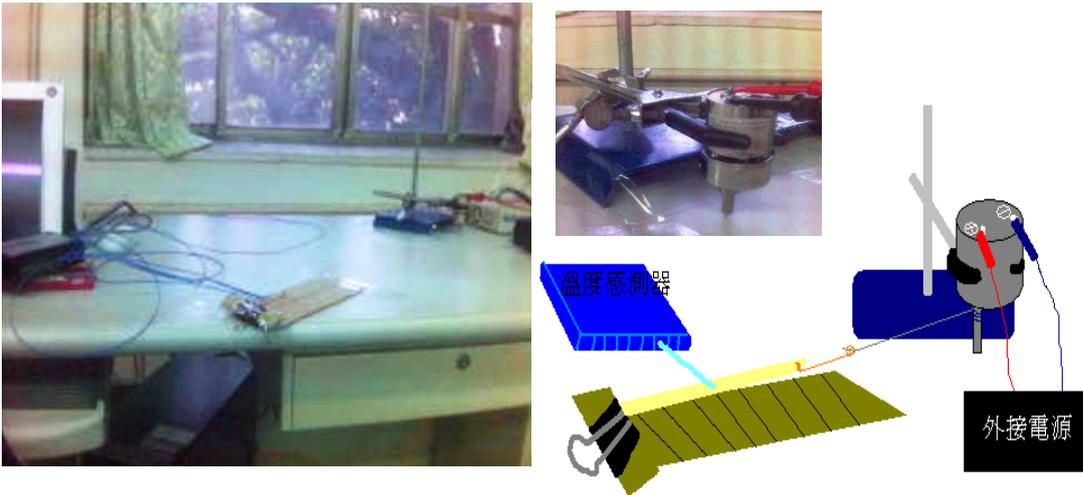
探討橡皮筋受拉伸時溫度上升，縮放回原狀態時溫度下降之現象。

- 一、探求拉伸橡皮筋時，拉伸速率與其溫度變化的關係。
- 二、探求橡皮筋拉伸時，形變量與溫度變化倍率的關係。
- 三、探求橡皮筋拉伸時溫度變化倍率與收縮時溫度變化倍率的關係。

肆、研究設備及器材

主器材：	
厚紙板	1 片
粗橡皮筋	數條
燕尾夾	1 只
數位力量感測器	1 組
電偶溫度感測器	1 組
步進馬達	1 顆

輔助器材：	
泡綿膠	1 條
原子筆	1 支
尺	1 把
美工刀	1 把
膠帶	1 網
外接電源	1 組



【實驗裝置圖】

伍、研究方法

- 一、將厚紙板以美工刀裁成矩形，在矩形厚紙板上用尺和原子筆標出單位 1 cm 的刻度。另外依照燕尾夾的深度再裁減幾塊小厚紙板，以雙面膠黏小紙板於矩形板刻度 0 之前，小紙板的數量取決於夾上橡皮筋後，橡皮筋固定端必須與施力點的高度一致處。
- 二、厚紙板夾上燕尾夾，夾子尾端對齊刻度 0，夾住裁斷成一長條橡皮筋之一端，另一端則以綁上棉線，棉線的另一頭則用膠帶固定於步進馬達的轉軸上。
- 三、把溫度感測器埋於橡皮筋內，待橡皮筋溫度穩定在室溫 T_0 後，供電壓予步進馬達使之轉動，棉線將會隨之纏繞於馬達轉軸上，使橡皮筋得以等速拉伸。逐次改變橡皮筋的拉伸速率，觀察並記錄橡皮筋的溫度變化。
- 四、根據前一步驟的結果，控制拉伸速率 $v=4 \text{ cm/s}$ 使熱量散失較小，同時因為等速率運動，外力與橡皮筋彈力大小相等，外力所作的功與橡皮筋彈性位能變化也會大小相等，外力所作的功完全轉換成橡皮筋的彈力位能儲存起來，橡皮筋內部分子動能並未改變。
- 五、然而在拉伸的過程中，隨著長度增加面積變大，橡皮筋逐漸由原本的三維系統轉變成準一維系統。仿造氣體動力論的方式，將三維系統的動能與溫度關係寫成 $E_k = xkT_0$ 、準一維系統的動能與溫度關係寫成 $E_k = ykT_1$ ，其中 $x > y$ ，由於系統動能不變，等效溫度

$$T_1 = \frac{x}{y} T_0 = nT_0 \text{ 高於原本的溫度。}$$

六、觀察並記錄固定拉伸速率時，橡皮筋的溫度變化與伸長量的關係。

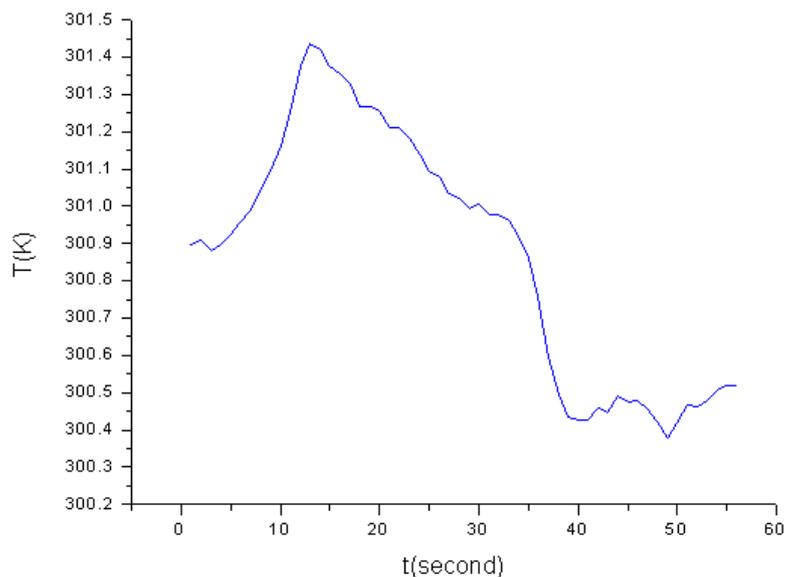
七、當橡皮筋拉伸至一選定刻度後停止動作，橡皮筋會逐漸與室溫達到熱平衡，此時將橡皮筋由拉伸狀態直接放掉使其恢復原長，記錄橡皮筋放掉前的溫度 T_2 及放掉後的最低溫 T_3 ，計算溫度變化倍率 $m = \frac{T_3}{T_2}$ ，由於橡皮筋從準一維系統回復成三維系統，因此等效溫度會下降，並且因為熱平衡過程使得 $T_2 < T_1$ ，造成 $T_3 < T_0$ 。

八、最後低溫的橡皮筋亦會逐漸與室溫達成熱平衡。

陸、研究結果

一、不同拉伸速率下，橡皮筋的溫度變化。

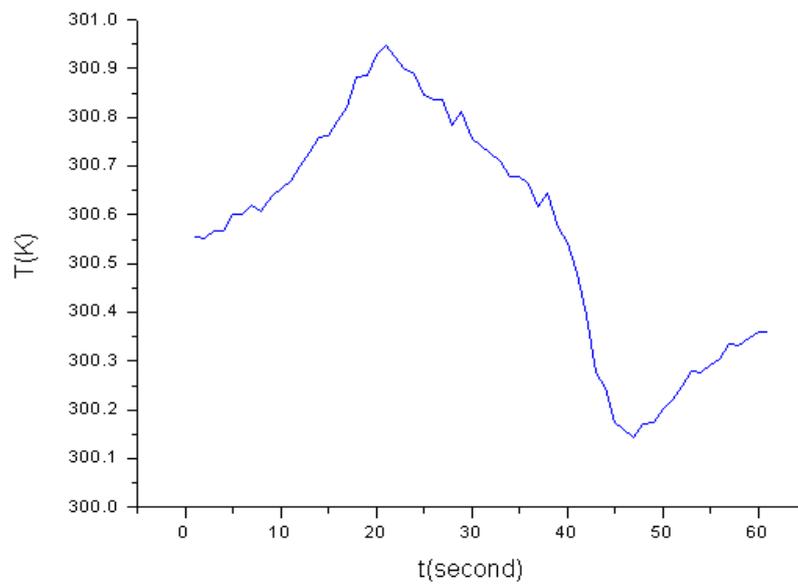
1. 拉伸速率為 2 cm/s



室溫 $T_0=300.555(\text{K})$ ；拉伸最高溫 $T_1=300.949(\text{K})$ ；

溫度變化 $\Delta T=0.394(\text{K})$

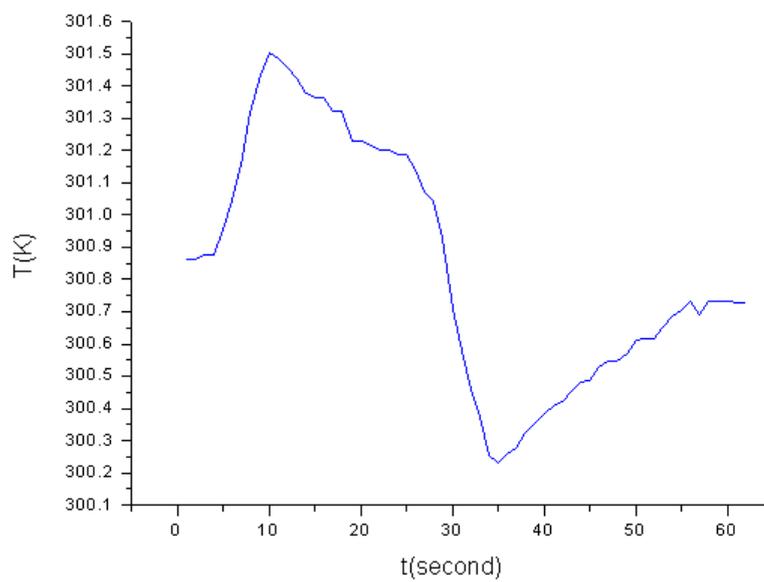
2. 拉伸速率為 3 cm/s



室溫 $T_0=300.896(K)$ ；拉伸最高溫 $T_1=301.437(K)$ ；

溫度變化 $\Delta T=0.541(K)$

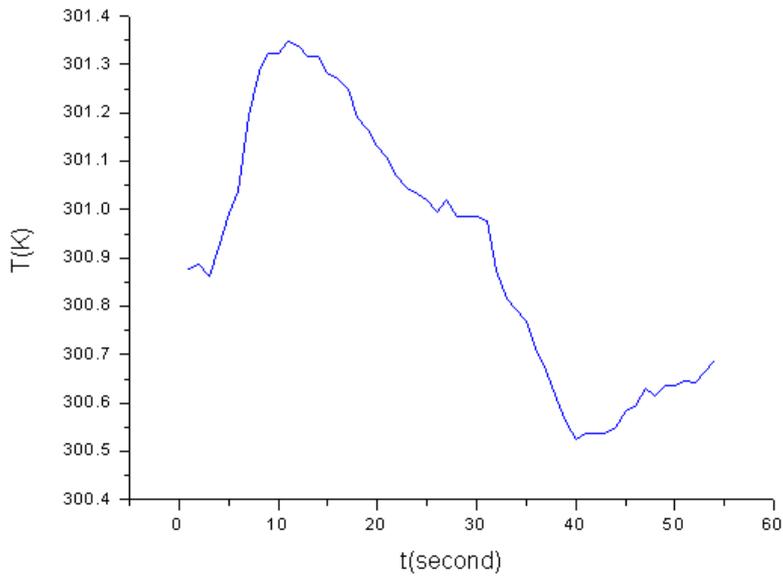
3. 拉伸速率為 4 cm/s



室溫 $T_0=300.862(K)$ ；拉伸最高溫 $T_1=301.505(K)$ ；

溫度變化 $\Delta T=0.643(K)$

4. 拉伸速率為 5 cm/s

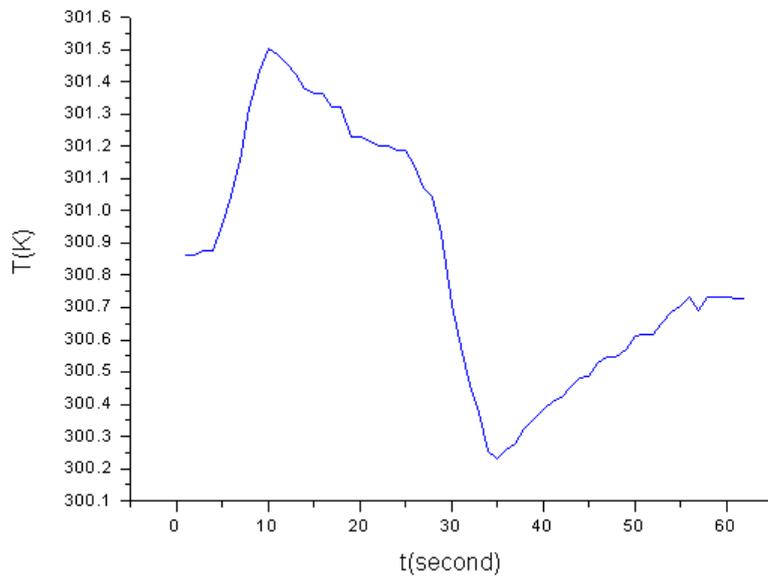


室溫 $T_0=300.877(\text{K})$ ；拉伸最高溫 $T_1=301.350(\text{K})$ ；

溫度變化 $\Delta T=0.473(\text{K})$

二、不同伸長量時，橡皮筋的溫度變化。

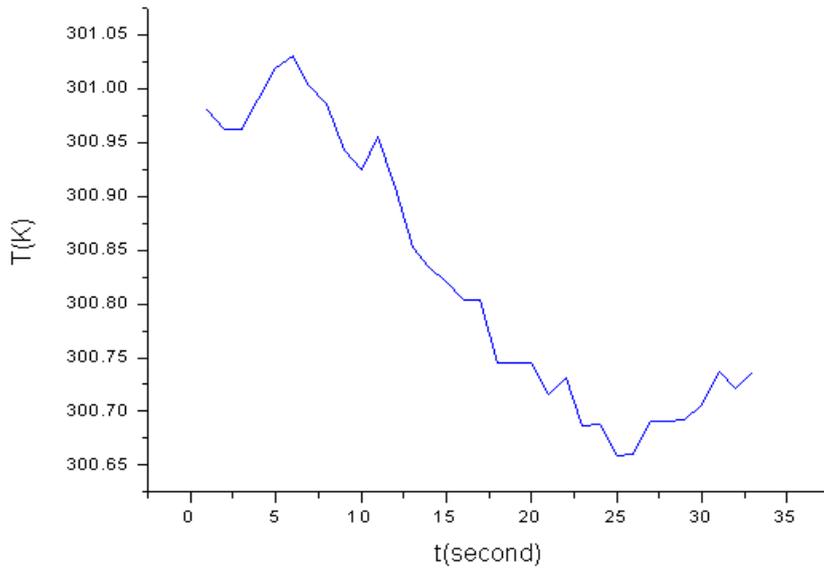
1. 拉伸形變量為 18 cm



室溫 $T_0=300.862(\text{K})$ ；拉伸最高溫 $T_1=301.505(\text{K})$ ；

溫度變化倍率 $n=1.00214$

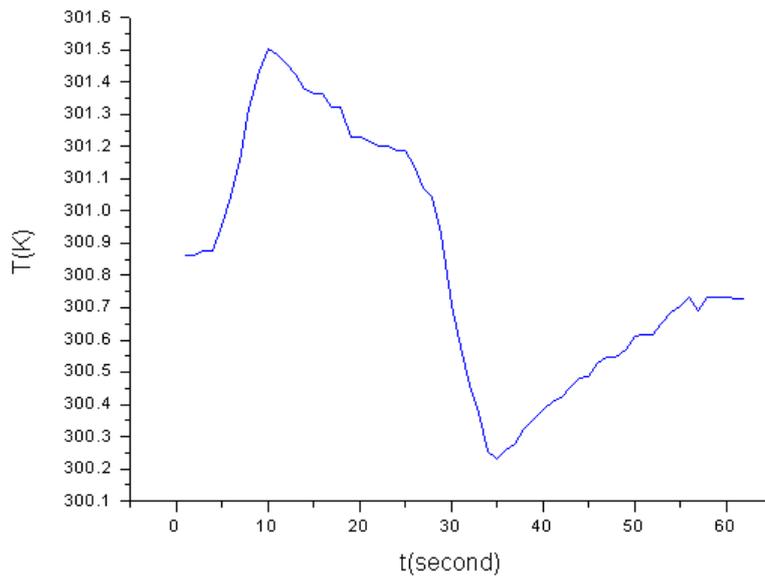
2. 拉伸形變量為 9 cm



室溫 $T_0=300.980(\text{K})$ ；拉伸最高溫 $T_1=301.031(\text{K})$ ；

溫度變化倍率 $n=1.00017$

三、拉伸與縮放時，橡皮筋的溫度變化倍率。



室溫 $T_0=300.862(\text{K})$ ；拉伸最高溫 $T_1=301.505(\text{K})$ ；

溫度上升倍率 $n = \frac{T_1}{T_0} = 1.00214$ ；

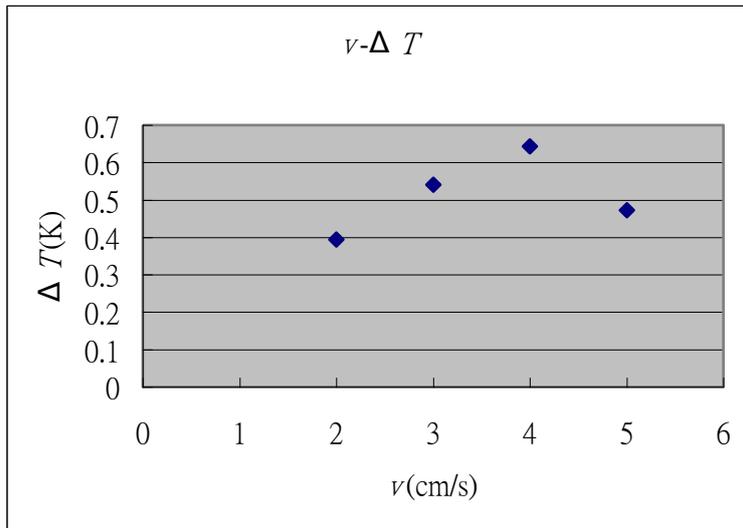
放掉前溫度 $T_2=301.187(\text{K})$ ；放掉後最低溫 $T_3=300.230(\text{K})$

溫度下降倍率 $m = \frac{T_3}{T_2} = 0.99682$

柒、討論

一、固定伸長量為 18 cm 時，不同拉伸速率下，橡皮筋的溫度變化。

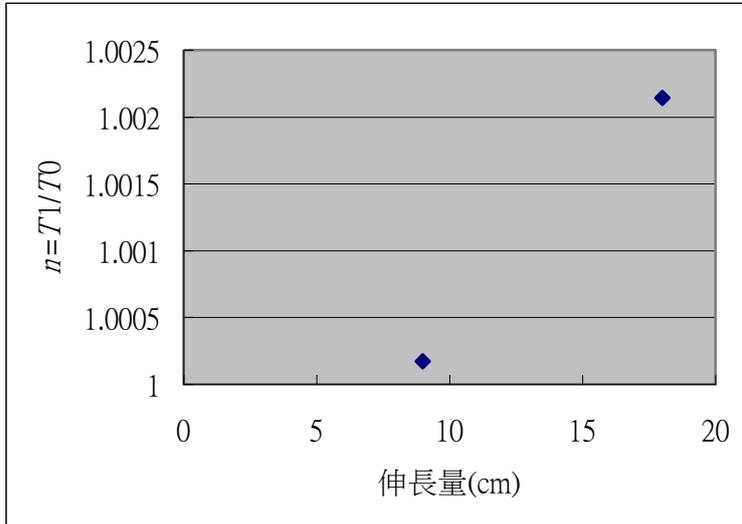
$v(\text{cm/s})$	2	3	4	5
$\Delta T(\text{K})$	0.394	0.541	0.643	0.473



由圖中可看出，起初當拉伸速率越大，溫度變化會越明顯，但當速率太大時，反而會使溫度變化較小，推測原因應該是拉伸速率越大到達預定伸長量所需時間越短，因此散熱時間也就越短、散失熱量越少，但若拉伸速率太快使散熱表面積增加較快，散熱效果也會較好，考量散熱時間及散熱表面積兩因素，在拉伸速率 $v=4 \text{ cm/s}$ 時會有最明顯的溫度變化。

二、固定拉伸速率為 4 cm/s 時，不同伸長量下，橡皮筋的溫度變化倍率。

伸長量(cm)	9	18
$n = \frac{T_1}{T_0}$	1.00017	1.00214



由圖中大致可看出，當伸長量越大的時候，溫度變化倍率越大，溫度變化越明顯，然而由於橡皮筋本伸長度、彈性疲乏、及步進馬達力量大小等因素限制，無法作更進一步確認，但仍可看出溫度變化倍率隨伸長量增加而增加的趨勢，推測原因應該是當伸長量變大，橡皮筋越接近一維系統，能量越是集中在一個維度上，使得等效溫度更高，也就是溫度變化倍率會越高。

三、將橡皮筋拉伸速率固定為 4 cm/s、拉伸長度固定為 18 cm 時，並且在拉伸達選定刻度時將橡皮筋放開始其溫度下降，橡皮筋拉伸時溫度會上升變成原本的 n 倍 ($n=1.00214$)，橡皮筋收縮時溫度會下降變成原本的 m 倍 ($m=0.99682$)，可以發現 $n \times m = 0.99895 \approx 1$ ，亦即拉伸時溫度上升多少倍，縮放時溫度就下降多少倍，可知橡皮筋拉伸與縮放時的溫度變化確是由維度變化所造成的；另外由於並不是拉伸後直接放開（以免拉伸時的溫度變化影響縮放時的溫度變化），而是稍待一會兒使其與室溫逐漸平衡，也因此並不是從最高溫直接降溫，但是由於上升倍數與下降倍數相同，因此會造成下降後的溫度比原本溫度還要低的現象。

捌、結論

假設未伸長的橡皮筋與室溫平衡溫度為 T_0 ，其內部分子的動能為 xkT_0 ，將橡皮筋等速拉伸的過程中，外力所作的功完全轉變成橡皮筋的彈力位能，因此其動能/溫度除了受到熱量散失的影響外大致維持守恆，然而橡皮筋系統由三維變成準一維，使得原本分佈在三個維度上的能量集中在一個維度上，即 $xkT_0 = ykT_1$ ，其中 ykT_1 代表準一維時橡皮筋內部分子的動能，並且 $y < x$ ，所以 $T_1 = \frac{x}{y}T_0 = nT_0$ ，造成等效溫度上升的現象，實驗指出 n 值約只有 0.2%，因此表現出來的溫度變化約只有 0.6 K。

事實上，拉伸過程中難以避免熱量的散失，這其中包含了散熱時間長短及散熱面積大小等因素，拉伸速率越快會使氣球散熱時間越短，散熱量減少，但也同時讓面積增加較快，有較大的面積可以散熱，實驗指出並非速率越快溫度變化越大，而是在兩個因素之間取一個折衷點，約以 4 cm/s 的速率將橡皮筋拉伸會得到最好的升溫效果。

由於橡皮筋的升溫是因為維度變化所造成，因此若我們將橡皮筋拉伸越長使其越接近一維系統，則能量勢必會更加集中，溫度變化會更加明顯，實驗指出橡皮筋拉伸時的溫度變化確實受到伸長量的影響，而且有伸長量越大，溫度變化倍率越大的趨勢。然而受限於橡皮筋在伸長量過大時會有彈性疲乏的現象出現，甚至造成斷裂，另外橡皮筋的伸長量過小也無法造成明顯的溫度變化，因此實驗能良策的範圍極其有限。

將橡皮筋拉伸後，造成橡皮筋溫度高於室溫，因此可以很明顯看出橡皮筋與室溫逐漸達成熱平衡，當橡皮筋溫度降至 T_2 時，若將拉伸的橡皮筋鬆開，則準一維系統的橡皮筋將恢復成三維系統，能量重新分布在三個維度上，即 $ykT_2 = xkT_3$ ，使得 $T_3 = \frac{y}{x}T_2 = mT_2$ 溫度下降，實驗指出溫度下降倍率約只有 0.3%，因此表現出來的溫度變化約只有 0.9 K。由於溫度上升倍率 $n = \frac{x}{y}$ 、溫度下降倍率 $m = \frac{y}{x}$ ，兩者恰為倒數，實驗指出兩者的乘積確實相當接近 1。

另外，實驗中可以看出下降後的溫度低於原本的室溫，這是因為 $T_1 = \frac{x}{y}T_0$ 、 $T_3 = \frac{y}{x}T_2$ ，並且由於散熱的關係使得 $T_2 < T_1$ ，因此橡皮筋收縮後的最低溫度 T_3 會低於原本的室溫 T_0 ，理論預期與實驗結果相符合。而且因為下降後的溫度 T_3 低於室溫 T_0 ，所以可以很明顯看出溫度逐

漸上升與室溫達成熱平衡。

由以上結果分析，可以看出藉由維度變化來解釋橡皮筋拉伸與收縮時的溫度變化，不論是升溫過程還是降溫過程，都可以合理的解釋，並且實驗數據也相當吻合，不過這個研究在未來仍有很大的改進空間，像是絕熱環境的控制使溫度變化更加明顯、橡皮筋伸長量與溫度變化的定量分析、橡皮筋不同區域受伸縮影響的溫度變化差異、以及更換不同的彈性物質檢驗是否仍有類似的性質等等，更進一步檢驗這些現象將有助於對彈性物質的完整了解。

玖、參考資料

1. 林明瑞主編，高中物質科學物理篇(下)，二版，臺南市，南一書局企業股份有限公司，1-46, 168-228，95年。
2. Xiangjun Xing, Paul M. Goldbart, and Leo Radzihovsky，2007，Thermal Fluctuations and Rubber Elasticity，Phys. Rev. Lett. 98, 075502

【評語】 040119 氣球的脹熱縮冷

1. 測量溫度的有效數字高達六位，要改進。
2. 結論部份：橡皮筋由拉長後鬆開，認為「準一維系統」恢復成「三維系統」的敘述，有待考量。