

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 物理科

佳作

080118

「真」「震」破瓶術

學校名稱：高雄市三民區十全國民小學

作者：	指導老師：
小五 林容基	呂明吉
小五 林鴻瑋	黎懿瑩
小五 翁漢明	

關鍵詞：真空泡、震動、玻璃瓶

摘要

無意間看到許多空手破玻璃瓶的影片，感到很神奇，便進行了一系列的實驗探究。首先，想辦法克服了用空手就可以順利將玻璃瓶擊破的方式，再來便設計實驗來找出破瓶的原理，特別的是，我們自製了一個壓力變化觀測器，可以用來觀測瓶內液體所受壓力的變化。最後，真正破瓶的奇妙原理被我們找出來了，主要可分成兩個部分：一是利用力的慣性作用，使得水與瓶底發生瞬間分離，因而產生了真空泡。二是利用真空泡的壓力幾乎等於零，使得周圍的水瞬間往真空泡收縮而產生震動，因而震裂了瓶底。這個發現也破除了一些人認為這個實驗會造成危險的疑慮，因為真正破瓶的原因，是由於水瞬間收縮而震裂瓶底，而不是會讓玻璃瓶爆裂碎片四飛造成危險。

壹、 研究動機

我們幾個同學偶然在網路影片中，看到有人利用空手就把玻璃瓶擊破，覺得很不可思議，於是激起我們的研究興趣，我們利用五上康軒版自然與生活科技第四單元「力與運動」所學的知識加以延伸，設計了一系列的實驗進行探討，想找出空手破瓶的物理原理為何？在實驗期間，為了減少操作的誤差，還利用了六上南一版自然與生活科技第四單元「奇妙的電磁世界」的知識，製作了一個電磁鐵開關來進行實驗。

貳、 研究目的

一、探討可以減輕手所受到作用力的裝置

實驗(一)、各式不同的泡棉墊對於減輕作用力道的情形

二、探討可以減輕手部痛感的裝置

實驗(二)、各式不同的泡棉墊，對於所產生壓力的變化情形如何

三、探討可以代替手直接施力的裝置

實驗(三之一)、改變砝碼釋放的高度，對破玻璃瓶的影響

實驗(三之二)、改變彈簧的伸長量，對破玻璃瓶的影響

實驗(三之三)、改變木槌的重量，對破玻璃瓶的影響

四、探討玻璃瓶內的液體對玻璃瓶的影響

實驗(四之一)、改變玻璃瓶內水的高度，對破玻璃瓶的影響

實驗(四之二)、改變玻璃瓶內液體的種類，對破玻璃瓶的影響

五、探討玻璃瓶被擊破時，瓶內所產生的現象

實驗(五之一)、觀察玻璃瓶被擊破瞬間所發生的現象

實驗(五之二)、觀測玻璃瓶被擊破瞬間，瓶內底部所發生的現象

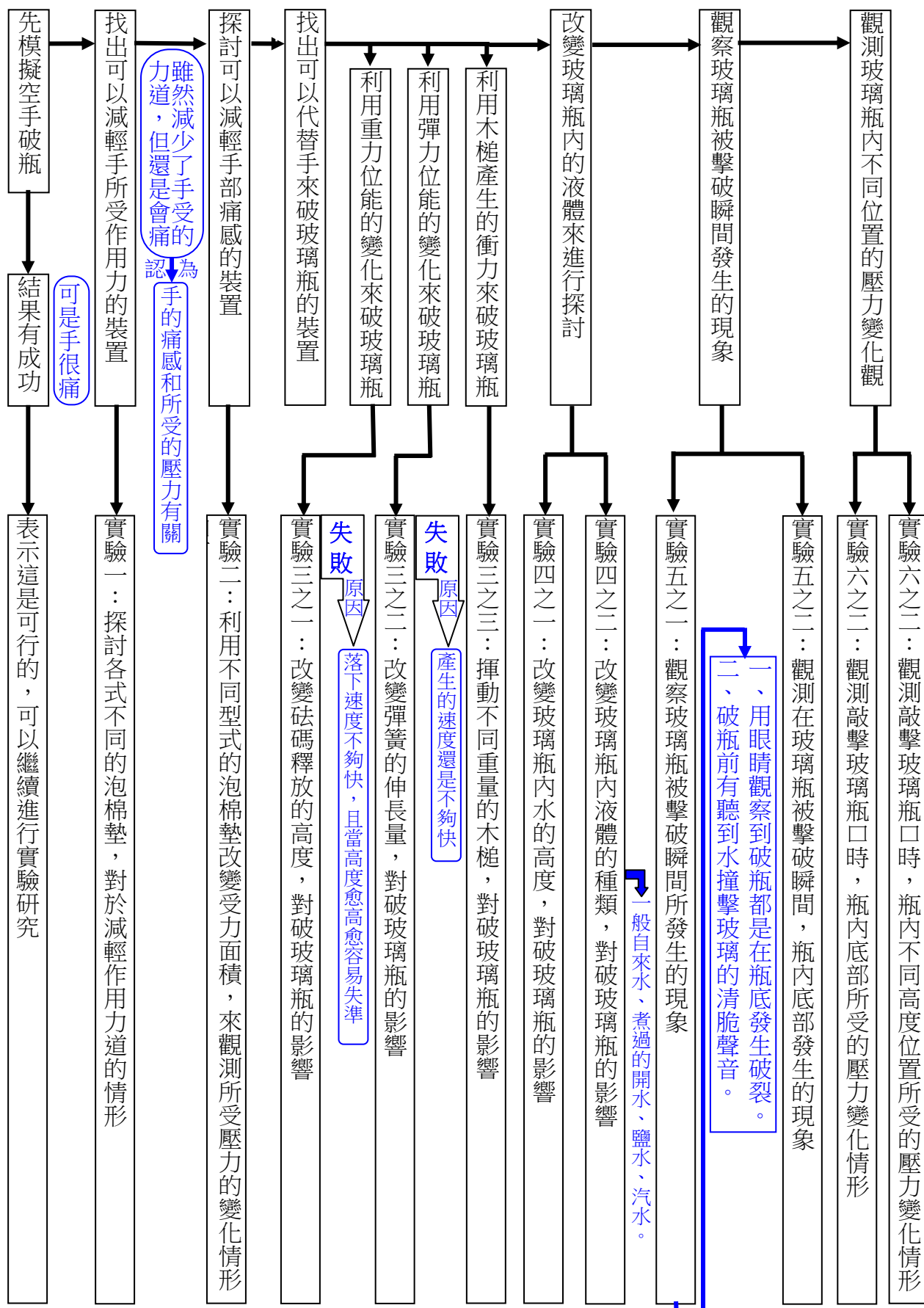
六、探討敲擊玻璃瓶口時，瓶內的壓力變化情形

實驗(六之一)、觀測敲擊玻璃瓶口時，玻璃瓶內底部所受的壓力變化情形

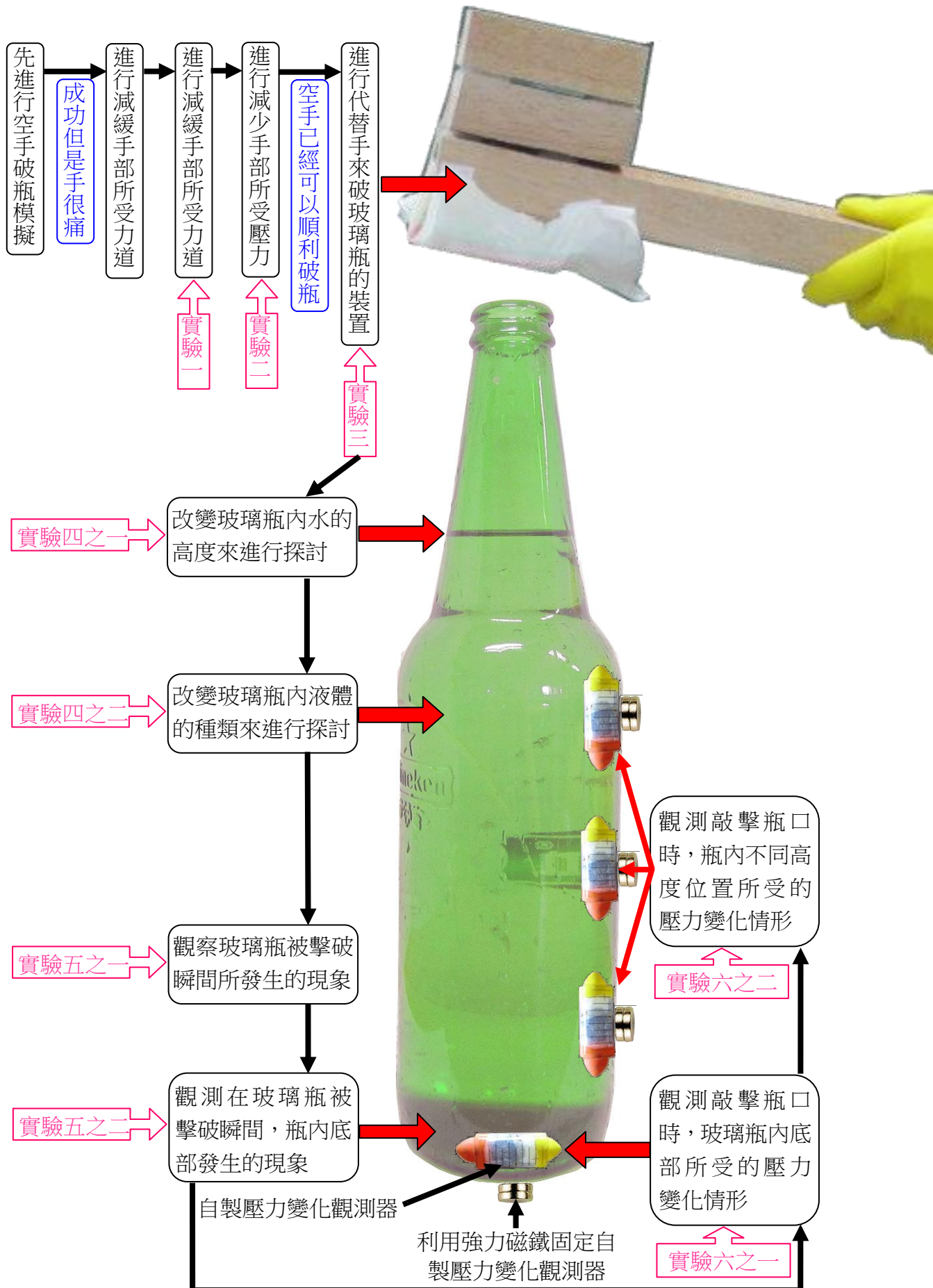
實驗(六之二)、觀測敲擊玻璃瓶口時，玻璃瓶內不同高度位置所受的壓力變化情形

參、研究流程與架構

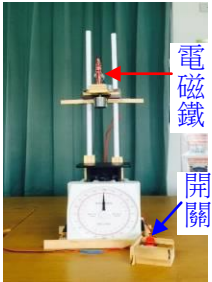
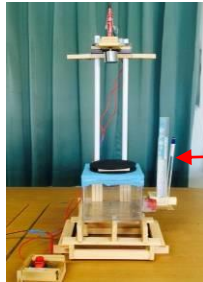
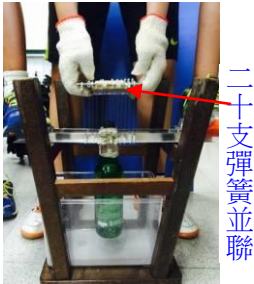
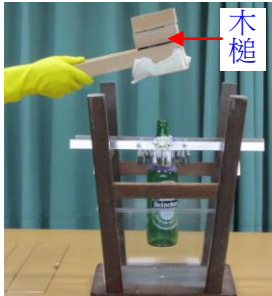
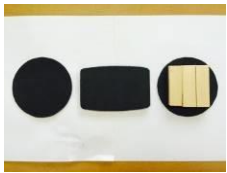
一、研究流程



二、研究架構



肆、 研究設備與器材

			
固定使用 A 牌玻璃瓶 進行實驗	使用透明玻璃瓶觀測 瓶底產生的真空泡	在透明玻璃瓶裡裝設 自製壓力變化觀測器	食用油
			
觀測受力裝置 (滑輪+手動)	觀測受力裝置 (電磁鐵開關)	自製氣壓變化觀測器 裝置	汽水
			
自製破瓶裝置(利用重 力位能的變化)	自製破瓶裝置(利用彈 力位能的變化)	自製破瓶裝置(模擬手 臂施力－木槌)	木槌
			
薄墊、厚墊、以及夾 一木塊的兩薄墊	自製壓力變化觀測器	食鹽	游標尺
			
1200FPS 高速攝影相機	各式手套	照明設備	護目鏡

伍、研究過程、方法、結果與討論

問題一：各式不同的泡棉墊對於減輕作用力道的情形如何？

構想：因為空手破瓶時，手會很痛，所以想找出可以減輕手所受作用力的裝置。

實驗一、利用各式厚薄泡棉墊置於彈簧秤上，將砝碼從不同高度落下，比較彈簧秤的受力變化情形。

過程與方法：

(一) 將 100 克砝碼分別置於彈簧秤上方 0、5、10、15、20、25cm 處自由落下。

(二) 利用 600 FPS 高速相機觀測彈簧秤的最大受力情形。

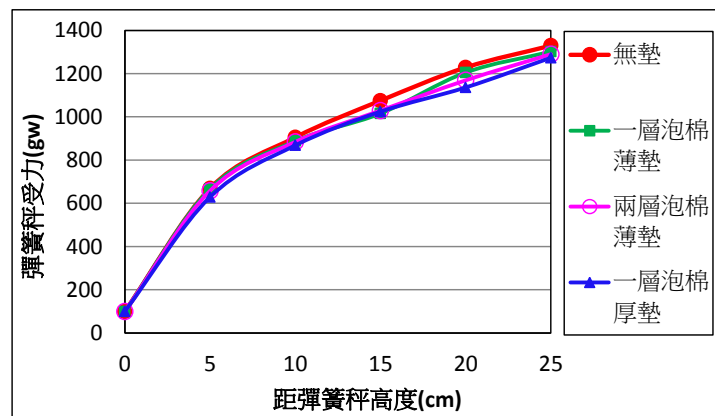
(三) 依序將一層泡棉薄墊、兩層泡棉薄墊、一層泡棉厚墊置於彈簧秤上，重複上述步驟

(一)~(二)進行實驗。

結果：

表一：砝碼在不同高度釋放，透過各式不同泡棉墊的受力變化情形

次數			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
無墊	彈簧秤 受力 (gw)	0cm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		5cm	660	650	665	655	680	690	665	685	670	675	669.5
		10cm	910	895	900	915	905	915	895	900	910	905	905.0
		15cm	1095	1060	1070	1050	1095	1050	1075	1100	1100	1055	1075.0
		20cm	1250	1225	1250	1245	1225	1180	1230	1250	1200	1230	1228.5
		25cm	1335	1315	1340	1305	1315	1345	1340	1310	1340	1350	1329.5
一層 泡棉 薄墊	彈簧秤 受力 (gw)	0cm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		5cm	700	695	675	650	660	680	645	650	660	655	667.0
		10cm	875	880	940	755	805	950	940	945	900	890	888.0
		15cm	1075	1105	960	965	1000	1000	970	990	1050	1040	1015.5
		20cm	1200	1205	1155	1160	1235	1200	1215	1250	1200	1230	1205.0
		25cm	1320	1275	1275	1280	1305	1320	1310	1285	1340	1305	1301.5
兩層 泡棉 薄墊	彈簧秤 受力 (gw)	0cm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		5cm	695	650	655	655	655	660	660	640	650	660	658.0
		10cm	885	875	870	875	890	895	895	900	880	875	884.0
		15cm	1000	1045	1000	1050	1020	1030	1035	1040	1040	1030	1029.0
		20cm	1195	1185	1150	1150	1160	1175	1180	1170	1165	1160	1169.0
		25cm	1300	1300	1270	1310	1280	1275	1300	1290	1285	1290	1290.0
一層 泡棉 厚墊	彈簧秤 受力 (gw)	0cm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
		5cm	635	625	645	630	630	620	620	610	640	635	629.0
		10cm	890	855	875	880	855	850	850	860	880	885	868.0
		15cm	995	1030	1045	1010	1005	1050	1070	1010	1005	1020	1024.0
		20cm	1150	1130	1135	1150	1135	1120	1125	1145	1140	1130	1136.0
		25cm	1280	1255	1305	1300	1300	1255	1255	1255	1260	1270	1273.5



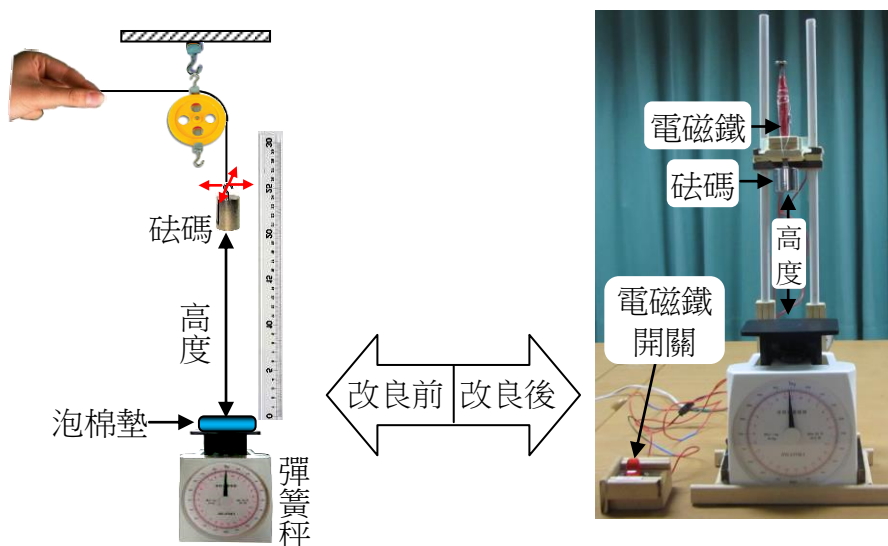
圖一：砝碼在不同高度釋放，透過各式不同泡棉墊的受力變化圖

發現：

- (一) 當砝碼的高度愈高，則彈簧秤所受的力也愈大。
- (二) 當彈簧秤上無墊時，其所受的力最大。
- (三) 當彈簧秤上放兩層薄墊時，比放一層薄墊所受的力稍小。
- (四) 當彈簧秤上放厚墊時，比放薄墊所受的力稍小。

研究討論：

- (一) 原本我們是利用滑輪來調整砝碼的高度，但是每次實驗操作時，砝碼的高度都會產生些許誤差。且因繩子會些許搖晃，造成每次落下的位置也會些許不同，因此實驗結果產生較大的誤差。後來經我們改良，設計一個 3V 的電磁鐵開關與支架，不僅每次實驗的高度可以控制相同，且砝碼被電磁鐵吸住後也不會搖晃，大大減少了每次實驗操作時所產生的誤差，如圖二所示。



圖二：實驗一改良前後裝置圖

- (二) 因為砝碼落下的速度很快，造成彈簧秤指針偏轉很快，一般相機錄影功能只有 30 FPS (frame per second)，無法錄到清楚的影像顯現彈簧秤受力的讀數。後來改用 600 FPS 的高速相機錄影，再配合可以格放影片的威力導演播放軟體，才成功讀取數據。
- (三) 我們把彈簧秤模擬成手，用各式的泡棉墊想來減少手的作用力。實驗結果顯示，隨著泡棉墊層數與厚度的增加，所產生的力道有稍微減小。

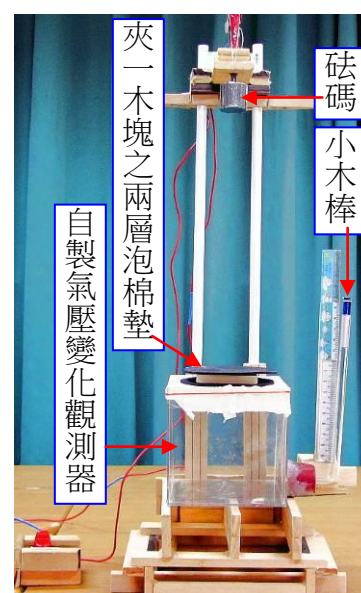
問題二：探討可以減輕手部痛感的裝置

構想：雖然由實驗一得知，增加墊的厚度可以減少受力情形，我們實際墊在手上去測試破玻璃瓶，結果手還是感到痛。經詳細討論後，認為痛感主要是與所受壓力有關，所以想進行減少所受壓力的實驗觀測。

實驗二、利用不同型式的泡棉墊來改變受力面積，觀測其所受壓力的變化情形

過程與方法：

- (一) 自製一氣壓變化觀測器，如圖三。
- (二) 將一層泡棉墊置氣壓變化觀測器上，然後將 100 克砝碼置於泡棉墊上方 25cm 處自由落下。
- (三) 利用 600 FPS 高速相機觀測氣壓變化觀測器上的小木棒所移動的最大距離。
- (四) 依序將一層泡棉墊換成兩層泡棉墊和夾一木塊的兩層泡棉墊置於氣壓變化觀測器上，重複上述步驟(二)~(三)進行實驗。

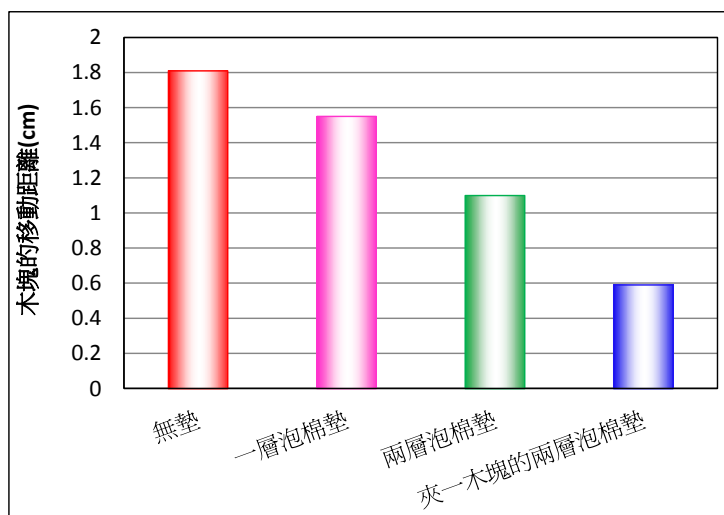


圖三：實驗二裝置圖

結果：

表二：不同型式的泡棉墊下，所產生的壓力對小木棒的作用情形

次數	小木棒的移動距離(cm)										平均
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
無墊	1.9	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7	1.9	1.8	1.8	1.8	1.81
一層泡棉墊	1.5	1.6	1.5	1.5	1.6	1.6	1.5	1.5	1.6	1.6	1.55
兩層泡棉墊	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1
夾一木塊的兩層泡棉墊	0.5	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.59



圖四：透過不同型式的泡棉墊，所產生的壓力對小木棒的作用情形

發現：

- (一) 小木棒被移動的距離，隨著泡棉墊層數的增加而減小。
- (二) 夾一木塊的兩層泡棉墊，使小木棒移動的距離最小。

研究討論：

- (一) 拿筆的頭部尖端和尾部，用相同的力道來刺手，手的感受是不同的。這是因為相同的力，但是不同的受力面積，會產生不同的壓力。因此要減輕手部的痛感，除了要減輕手所受的力道之外，還要減少手所受的壓力。
- (二) 我們把氣壓變化觀測器模擬成手，砝碼模擬成瓶口，利用各式的墊想來減少所產生的壓力。
- (三) 當砝碼自由落下撞擊氣壓變化觀測器時，使其內部氣壓增加，而推動木塊向上移動。當木塊被移動的距離變小，表示其內部所增加的氣壓變小了。
- (四) $\text{壓力} = \text{作用力} / \text{受力面積}$ 。當泡棉墊的層數增加時，不僅減少了作用力，同時也稍微增加了受力面積，所以減少了所產生的壓力。
- (五) 我們在兩泡棉墊間夾一木塊，目的在增加受力面積，結果大幅減少了所產生的壓力。
- (六) 後來我們實際利用夾一木塊的兩層泡棉墊，墊在手上去破瓶，結果成功擊破玻璃瓶，而且手也不會很痛。

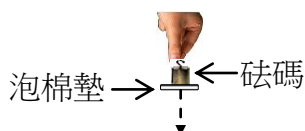
問題三：探討可以代替手直接施力的裝置

構想：為安全起見，我們想尋找可以代替手來擊破玻璃瓶的裝置。由實驗一得知，砝碼從愈高處釋放，所產生的力道愈大。所以想利用重力位能的變化來破玻璃瓶。

實驗三之一、將砝碼從不同高度自由落下，來觀測對玻璃瓶的影響

過程與方法：

- (一) 將玻璃瓶固定於支架上，並裝水至離瓶口 5cm 處。
- (二) 將 100 克砝碼底部黏上泡棉墊。
- (三) 依序將砝碼從距玻璃瓶口 20、40、60、80、100cm 處自由落下，來觀測對玻璃瓶的影響。



圖五：實驗三之一裝置示意圖

結果：

表三之一：砝碼從不同高度自由落下，對玻璃瓶的影響

砝碼距瓶口的距離(cm)	20	40	60	80	100
破瓶成功與否	×	×	×	×	×

×表示破玻璃瓶失敗

發現：

- (一) 都無法成功破玻璃瓶。

研究討論：

- (一) 在砝碼下方黏上泡棉墊，是以防砝碼直接撞擊瓶口，產生破裂。
- (二) 當砝碼高度不大時(20~40cm)，因落下所產生的力道不夠，無法成功破瓶。
- (三) 砝碼隨著高度愈大(60~100cm)，愈難準確擊中瓶口，所以無法成功擊破玻璃瓶。

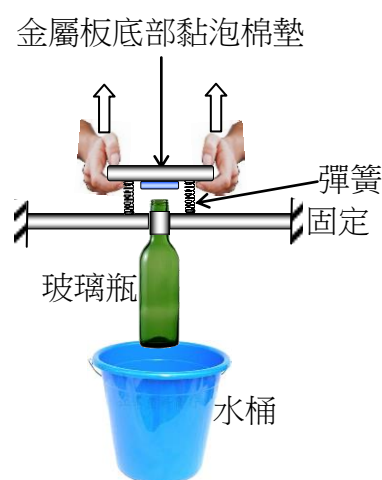
實驗三之二、改變彈簧的伸長量，對破玻璃瓶的影響

構想：要有較大的重力位能，則砝碼高度要愈高，但準度也愈不準，愈不容易擊破玻璃瓶。

為了解決這個問題，我們想到縮小距離變化的彈力位能的變化，來進行實驗。

過程與方法：

- (一) 將玻璃瓶固定於支架上，並裝水至離瓶口 5cm 處。
- (二) 將 200 克金屬板底部黏上泡棉墊。
- (三) 依序將彈簧支架拉動 1、2、3、4、5、6cm，來觀測對玻璃瓶的影響。



圖六：實驗三之二裝置示意圖

結果：

表三之二：拉動彈簧伸長量，對玻璃瓶的影響

彈簧伸長量(cm)	1	2	3	4	5	6
破瓶成功與否	×	×	×	×	×	×

×表示破玻璃瓶失敗

發現：

- (一) 都無法成功破玻璃瓶。

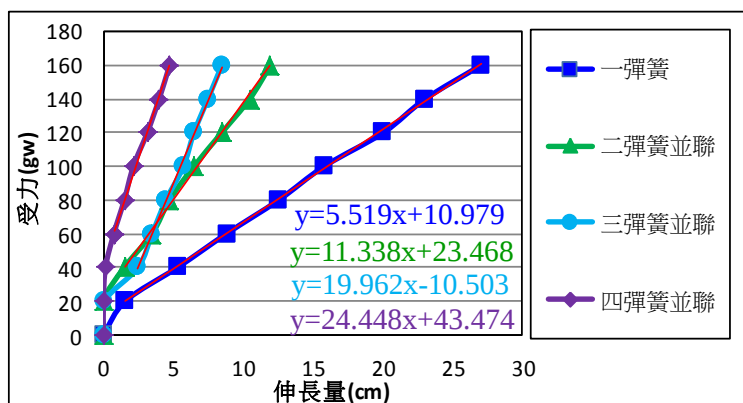
研究討論：

- (一) 在進行實驗三之二前，我們先進行彈簧的彈力常數測量，我們先選定一種彈簧 A 進行受力與伸長量的測量如下：

1. 實驗結果

表三之二-1：彈簧 A 的受力與伸長量的關係

物重(gw)	0	20	40	60	80	100	120	140	160
一彈簧	0	1.6	5.35	8.85	12.6	15.85	20.1	23.1	27.1
二彈簧並聯	0	0	1.5	3.5	4.75	6.5	8.5	10.5	12
三彈簧並聯	0	0.1	2.5	3.5	4.5	5.75	6.5	7.5	8.5
四彈簧並聯	0	0	0.15	0.75	1.5	2.15	3.15	4	4.75

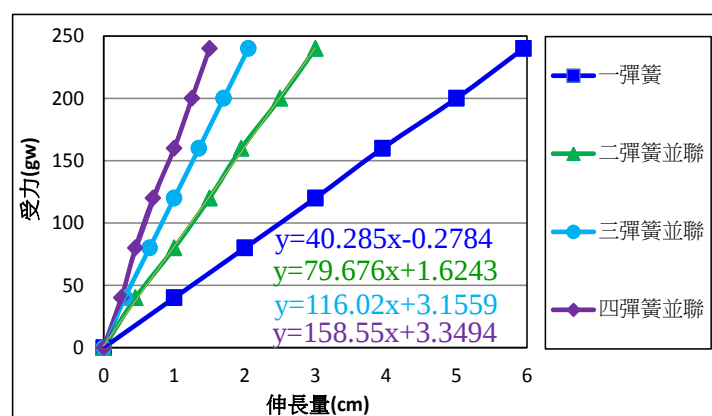


圖七：彈簧 A 的受力與伸長量的關係圖

- 以上實驗結果發現，並不符合虎克定律。經查詢得知，工廠製造彈簧時，為使彈簧縮至最短，經常使彈簧殘留一內縮力使彈簧縮起來。在懸掛重量小於內縮力時，彈簧都不會伸長。欲使彈簧伸長時，必先使用一重量將內縮力抵消使彈簧稍微伸展開，始可驗證虎克定律。
- 為了解決測量的誤差，我們改採用教具彈簧秤內的彈簧 B，並改良實驗裝置進行測量，大大減低了測量上的誤差，裝置如下頁圖九所示。實驗結果如下：

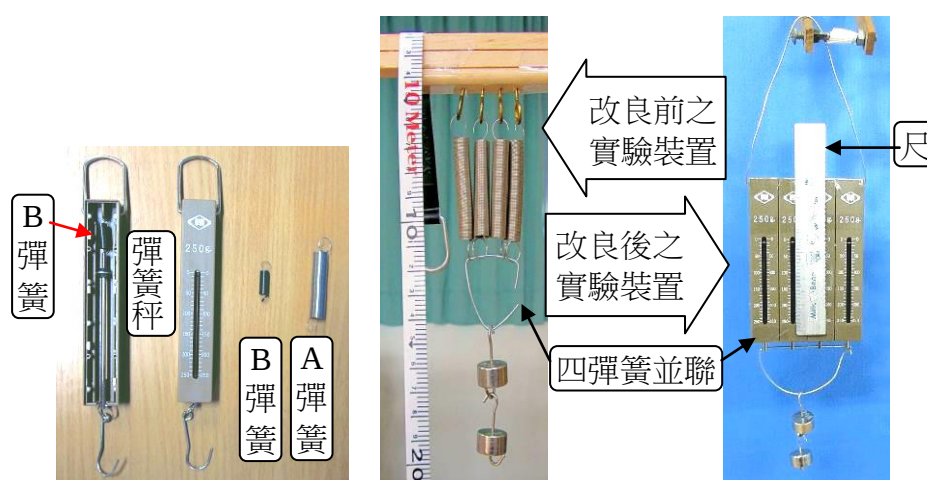
表三之二-2：彈簧 B 的受力與伸長量的關係

物重(gw)	0	40	80	120	160	200	240
一彈簧	0	1	2	3	3.95	5	5.95
二彈簧並聯	0	0.45	1	1.5	1.95	2.5	3
三彈簧並聯	0	0.3	0.65	1	1.35	1.7	2.05
四彈簧並聯	0	0.25	0.45	0.7	1	1.25	1.5



圖八：彈簧 B 的受力與伸長量的關係圖

4. 圖七、八中，趨勢線的斜率代表彈簧的彈力常數。由圖八結果發現，由二個、三個和四個彈簧並聯的彈力常數分別約是一彈簧的二倍、三倍和四倍。
5. 本實驗將 20 個彈簧 B 並聯進行實驗，其彈力常數約為 $40 \times 20 = 800 \text{ (gw/cm)}$ 。本實驗拉動彈簧時，不僅增加了彈力位能，同時也增加了重力位能。若以拉動 100 克砝碼 6cm 為例，能量變化為 $\frac{1}{2} kx^2 + mgh = 100 \times 6 + \frac{1}{2} \times 800 \times 6^2 = 15000 \text{ gw*cm}$ ，相當是實驗三之一中需要將 100 克砝碼提升約 150cm 的高度。



圖九：彈簧 A 與彈簧 B 與改良前後之實驗裝置

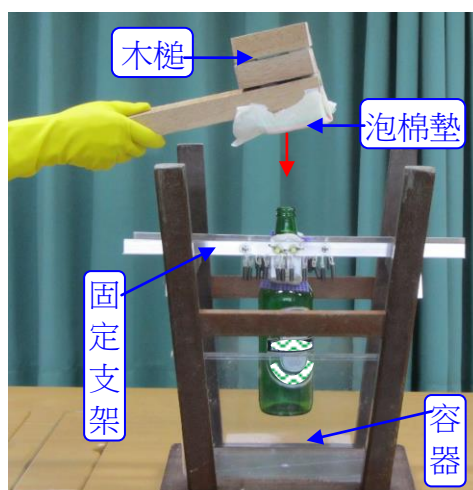
- (二) 原本以為解決了距離影響準度的問題，可以成功擊破玻璃瓶，實際卻不然。原因可能是彈簧 B 的伸長量約只有 6cm，若拉得太長則會彈性疲乏產生變形，以致產生的末端速度不夠大，無法成功破瓶。經我們實際測得使用彈簧產生的最快末端速度約為 1000cm/s，可是用手成功破瓶的末端速度至少約 1200cm/s。

實驗三之三、改變木槌的重量，對破玻璃瓶的影響

構想：利用前面兩個的方法都無法成功破瓶，但實際用手卻可以成功破瓶，所以想利用木槌模擬成手的方法來破瓶。

過程與方法：

- (一) 將玻璃瓶固定於支架上，並裝水至離瓶口 5cm 處。
- (二) 將泡棉墊固定在木槌下方。
- (三) 逐次增加力道揮動 250gw 木槌，用有泡棉墊的那一端來破瓶，利用 1200 FPS 高速攝影相機觀測其末端速度。
- (四) 依序將 250gw 木槌換成 350gw、450gw 和 550gw 的木槌，重複上述步驟(一)~(三)做實驗。



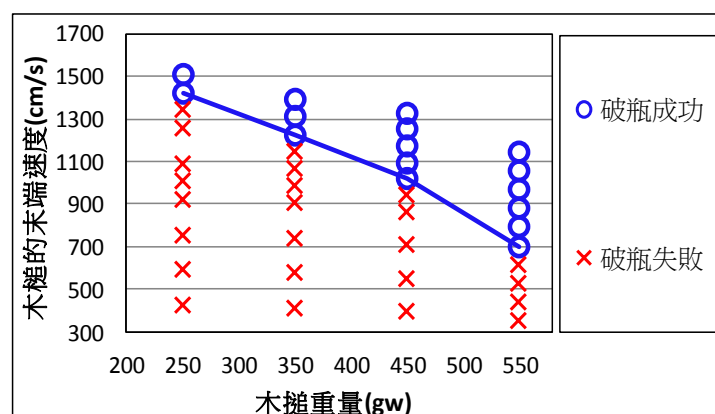
圖十：實驗三之三裝置圖

結果：

表三之三：不同重量的木槌，對破玻璃瓶的影響

次數	木槌的末端速度(cm/s)與是否成功破瓶									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
250gw 木槌	418.6	586.1	753.5	920.9	1004.7	1088.4	1255.8	1339.5	1423.3	1507.0
	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O
350gw 木槌	409.1	572.7	936.4	900.0	981.8	1063.6	1145.5	1227.3	1309.1	1390.9
	X	X	X	X	X	X	X	O	O	O
450gw 木槌	391.3	547.8	704.4	860.9	939.1	1017.4	1095.7	1173.9	1252.2	1330.4
	X	X	X	X	X	O	O	O	O	O
550gw 木槌	351.2	526.8	702.4	790.2	878.1	965.9	1053.7	1141.5	1229.3	1317.1
	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O

x表示破玻璃瓶失敗；O表示破玻璃瓶成功



圖十一：不同重量的木槌，對破玻璃瓶的影響

發現：

- (一) 木槌的末端速度愈大，愈容易成功破瓶。
- (二) 木槌重量愈大，可以成功破瓶時的最小末端速度，有減少的趨勢。

研究討論：

- (一) 所使用的木棍長度不宜太長(實驗的木棍長度為 25cm)，否則揮動時容易失準。
- (二) 根據牛頓第二運動定律，木槌施於瓶口的力，與質量有關，所以當木槌的重量愈大時，愈容易成功破瓶。
- (三) 本實驗是用手施力來操作，原本是無法測得施力的大小，但是施力所產生的加速度會影響木槌的末端速度。根據牛頓第二運動定律，木槌施於瓶口的力與其動量變化有關，即和木槌的末端速度有關，末端速度愈大(動量變化愈大)，則對瓶口的施力也會愈大，愈容易成功破瓶。
- (四) 承上，我們利用 1200FPS 的高速攝影相機，可以觀測到木槌接觸瓶口前 1/1200 秒的移動距離，求其平均速度當作是末端的瞬時速度，如此便能進行實驗來觀測木槌末端速度對破瓶的影響。

問題四：探討玻璃瓶內的液體對玻璃瓶的影響

構想：瓶內水量多少影響到瓶內空氣的多寡。我們想知道水瓶中空氣量的多寡，對破玻璃瓶有何影響。

實驗四之一、改變玻璃瓶內水的高度，對破玻璃瓶的影響

過程與方法：

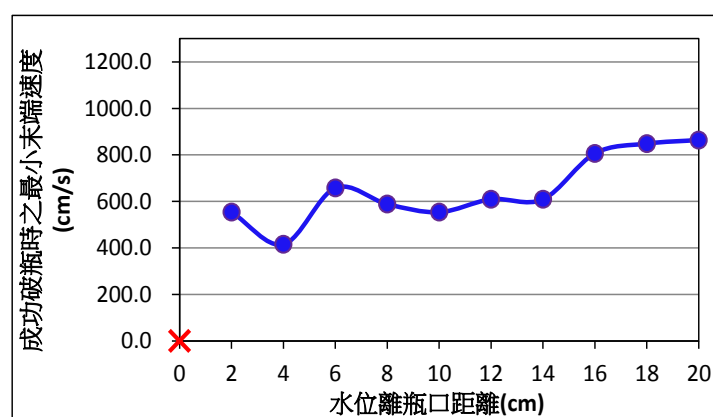
- (一) 將玻璃瓶固定於支架上，依序改變玻璃瓶內的裝水量，使水的高度距離瓶口 0、2、4、6、…、18、20 公分。
- (二) 逐次增加力道揮動 550gw 木槌，用有泡棉墊的那一端來破瓶，利用 1200 FPS 高速攝影相機觀測其末端速度。

結果：

表四之一：水瓶內水位高低，對破玻璃瓶的影響

水位離瓶口距離(cm)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
成功破瓶時之 最小末端速度(cm/s)	×	553.9	415.4	657.7	588.5	553.8	609.2	609.2	806.4	848.6	864.0

×表示破玻璃瓶失敗



圖十二：瓶內水位高低，對破玻璃瓶的影響

發現：

- (一) 水瓶水位全滿時，無法成功破瓶。
- (二) 水位離瓶口距離 4cm 時，成功破瓶的最小末端速度較小。
- (三) 水位離瓶口距離從 16cm 再往下降時，成功破瓶的最小末端速度有增加的趨勢。

研究討論：

- (一) 當水瓶滿水位時，瓶內除了水外沒有多餘的空間，即使末端速度已增至 1500cm/s，還是無法成功破瓶。
- (二) 要容易成功破瓶，瓶內水位不宜太高或太低。當瓶內水位距離瓶口約 4cm 時，成功破瓶的最小末端速度較小，較容易成功破瓶。
- (三) 當瓶內水量繼續減少，水位距離瓶口超過 16cm 時，成功破瓶的最小末端速度有增

加的趨勢，表示較不容易成功破瓶。

實驗四之二、改變玻璃瓶內液體的種類，對破玻璃瓶的影響

構想：瓶內水位高低會影響到破瓶的情形，那不同型式的液體，對破玻璃瓶的影響如何。

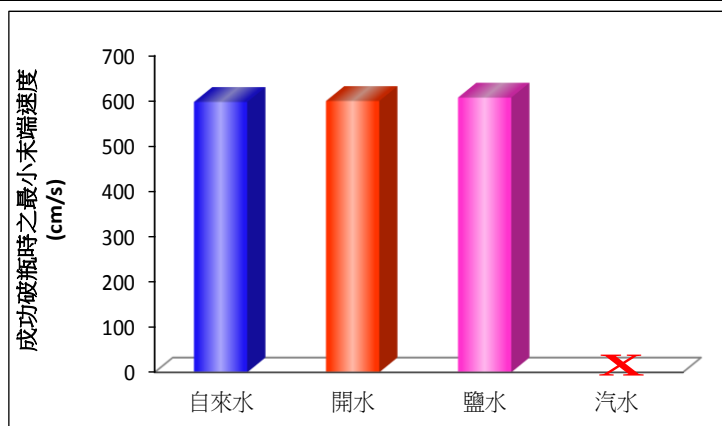
過程與方法：

- (一) 將玻璃瓶固定於支架上，依序將一般自來水、煮過的開水、鹽水、汽水裝進玻璃瓶，使其水位離瓶口 10cm。
- (二) 逐次增加力道揮動 550gw 木槌，用有泡棉墊的那一端來破瓶，利用 1200 FPS 高速攝影相機觀測其末端速度。

結果：

表四之二：不同種類的液體，對破玻璃瓶的影響

瓶內液體種類	自來水	開水	鹽水	汽水
成功破瓶時之最小末端速度(cm/s)	597.9	600.0	607.5	X



圖十三：不同種類的液體，對破玻璃瓶的影響

發現：

- (一) 瓶內裝自來水、開水和鹽水時，成功破瓶的最小末端度沒有明顯差別。
- (二) 瓶內裝汽水時，無法成功破瓶。

研究討論：

- (一) 水經煮過沸騰時，會把水中的空氣給釋放出來，因此水中所含的空氣量會大幅減少。
- (二) 我們使用的鹽水是採用飽和食鹽水溶液。
- (三) 在敲打汽水瓶時，瓶內會產生大量氣體而從瓶口逸出。可能是汽水中的氣體容量太

多，以致無法成功破瓶。但敲打多次後，汽水中的氣體容量變少了，最後還是可以破瓶成功。

問題五：探討玻璃瓶被擊破時，瓶內所產生的現象

構想：被擊破的玻璃瓶都是經由底部裂開的，因此想了解破瓶時，瓶內到底發生了甚麼情形。

實驗五之一、觀察玻璃瓶被擊破瞬間所發生的現象

過程與方法：

- (一) 將玻璃瓶固定於支架上，然後裝水使水位距離瓶口 4 公分。
- (二) 揮動 550gw 木槌，用有泡棉墊的那一端來破瓶。同時，用眼睛、耳朵等，仔細觀察玻璃瓶被擊破瞬間所發生的現象。

結果：

發現：

- (一) 破瓶前有聽到水撞擊玻璃，產生清脆的聲音。
- (二) 破瓶都是在瓶底發生破裂。

研究討論：

- (一) 首先，力量是作用在玻璃瓶口，可是卻是從玻璃瓶底部幾乎完整地裂開，瓶口卻完好如初，如圖十四。
- (二) 其次，我們注意聽到，當玻璃瓶被擊破前，從瓶中傳來好像水撞擊玻璃的清脆聲音。
- (三) 根據上述(一)、(二)，我們認為，瓶內底部一定發生某種現象，而導致瓶底發生破裂。因此進行以下實驗五之二。



圖十四：玻璃瓶被擊破的情形

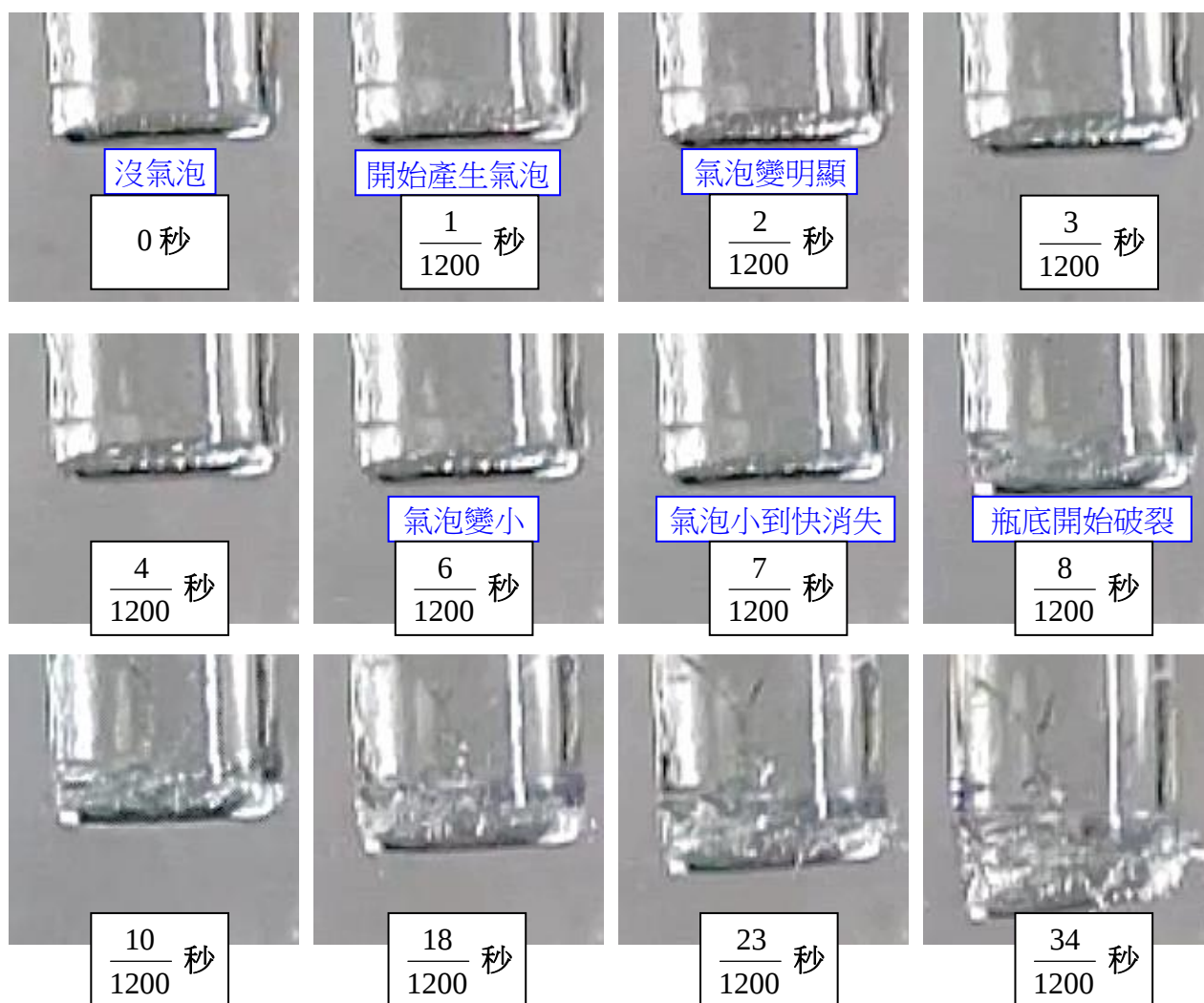
實驗五之二、觀察玻璃瓶被擊破瞬間，瓶內底部發生的現象

過程與方法：

- (一) 將透明玻璃瓶固定於支架上，然後裝水使水位距離瓶口 4 公分。

(二) 揮動 550gw 木槌，用有泡棉墊的那一端來破瓶。利用 1200 FPS 的高速攝影相機來觀測玻璃瓶底所發生的現象。

結果：



圖十五：玻璃瓶被擊破前後瞬間，瓶內底部發生的現象

發現：

(一) 破瓶前，在瓶底有類似氣泡的生成。

(二) 在瓶底的類似氣泡快消失時，瓶底才開始發生破裂。

(三) 從瓶底開始產生氣泡，然後變大變明顯，之後變小消失，到瓶底開始破裂前，總共

歷時約 $\frac{7}{1200}$ 秒。

研究討論：

(一) 為清楚觀察瓶底現象，我們採用透明的玻璃瓶來進行觀測。

(二) 因為擊破玻璃瓶的速度很快，所以需要高速攝影的設備，才能觀測到所產生的現象。

我們利用 1200 FPS 高速相機來攝影，一秒鐘可以錄到 1200 張影格。但是需要較強的光量，所以在瓶底部需要再外加照明設備來增加光亮度。

(三) 果然不出所料，在瓶底發現有類似氣泡的產生。

(四) 從瓶底產生類似氣泡後開始變小到消失，約只經歷 $\frac{6}{1200}$ 秒。雖然只是很小的體積，

可是瞬間體積變化產生的力量，卻足以將玻璃瓶底擊破。

問題六：探討敲擊玻璃瓶口時，瓶內的壓力變化情形

構想：我們認為玻璃瓶被擊破，與瓶內壓力變化有關係，因此想知道瓶內壓力變化情形如何。

實驗六之一、觀測玻璃瓶內底部所受的壓力變化情形

過程與方法：



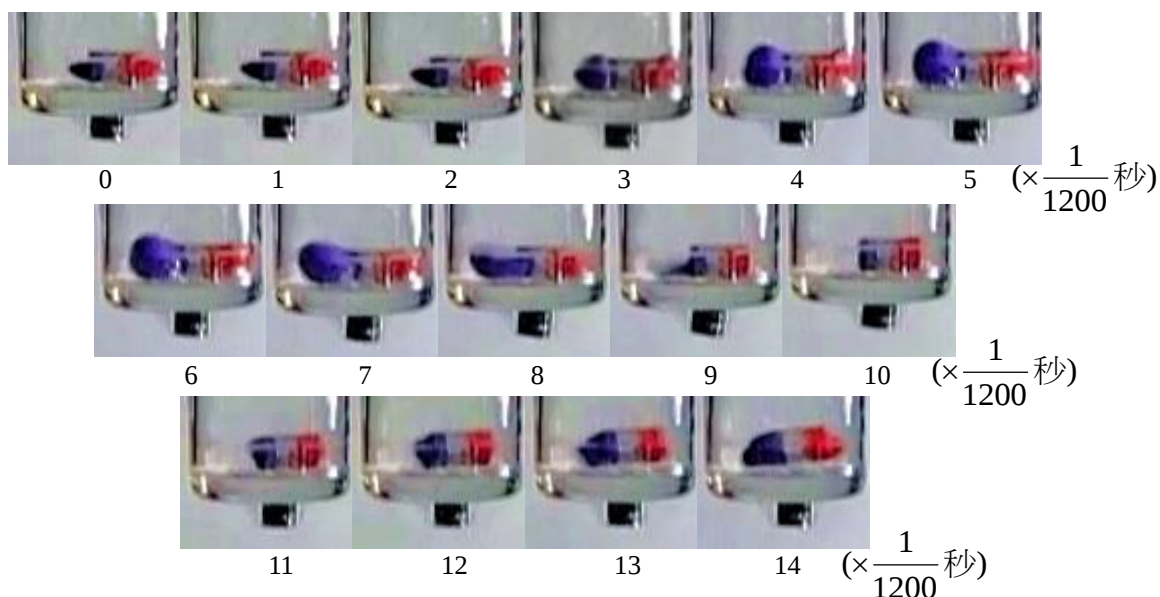
圖十六：自製壓力變化觀測器

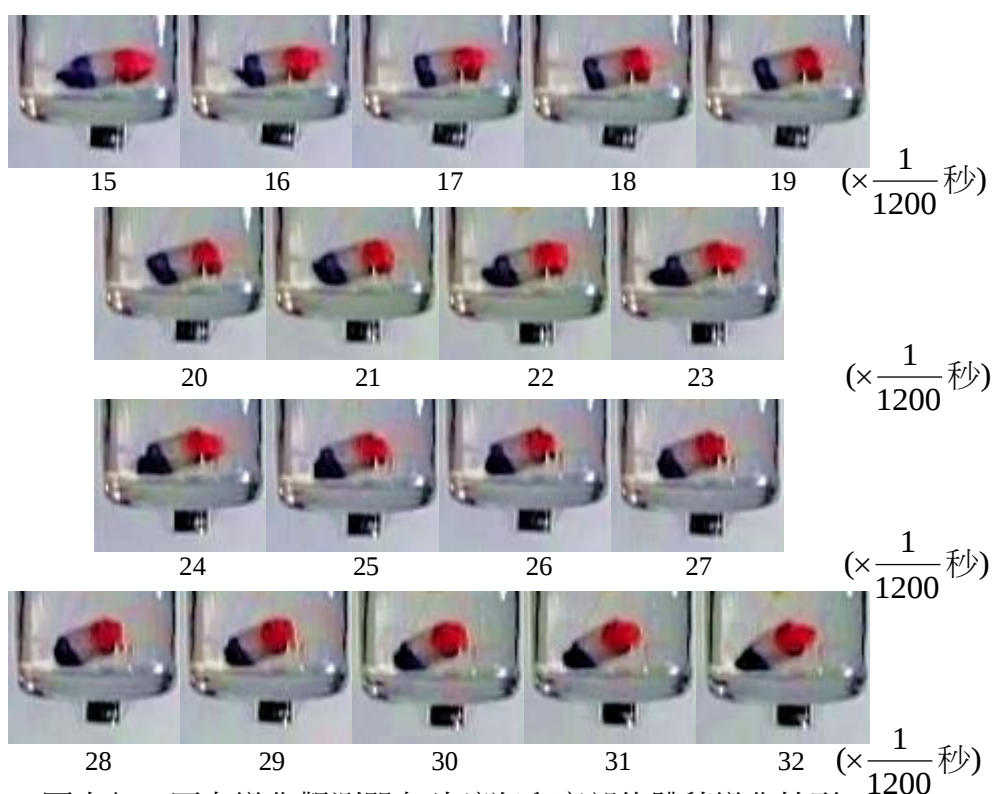
(一) 自製一壓力變化觀測器，如圖六所示，利用強力磁鐵固定於透明玻璃瓶內底部。

(二) 在瓶內裝水使水位距離瓶口 10 公分。

(三) 揮動 550gw 木槌，用有泡棉墊的那一端來破瓶。利用 1200 FPS 的高速攝影相機來觀測玻璃瓶底的壓力變化觀測器所發生的現象。

結果：





圖十七：壓力變化觀測器在玻璃瓶內底部的體積變化情形

發現：

- (一) 壓力變化觀測器一開始的體積變化是先膨脹。
- (二) 隨後壓力變化觀測器的體積發生收縮、膨脹的交替現象。

研究討論：

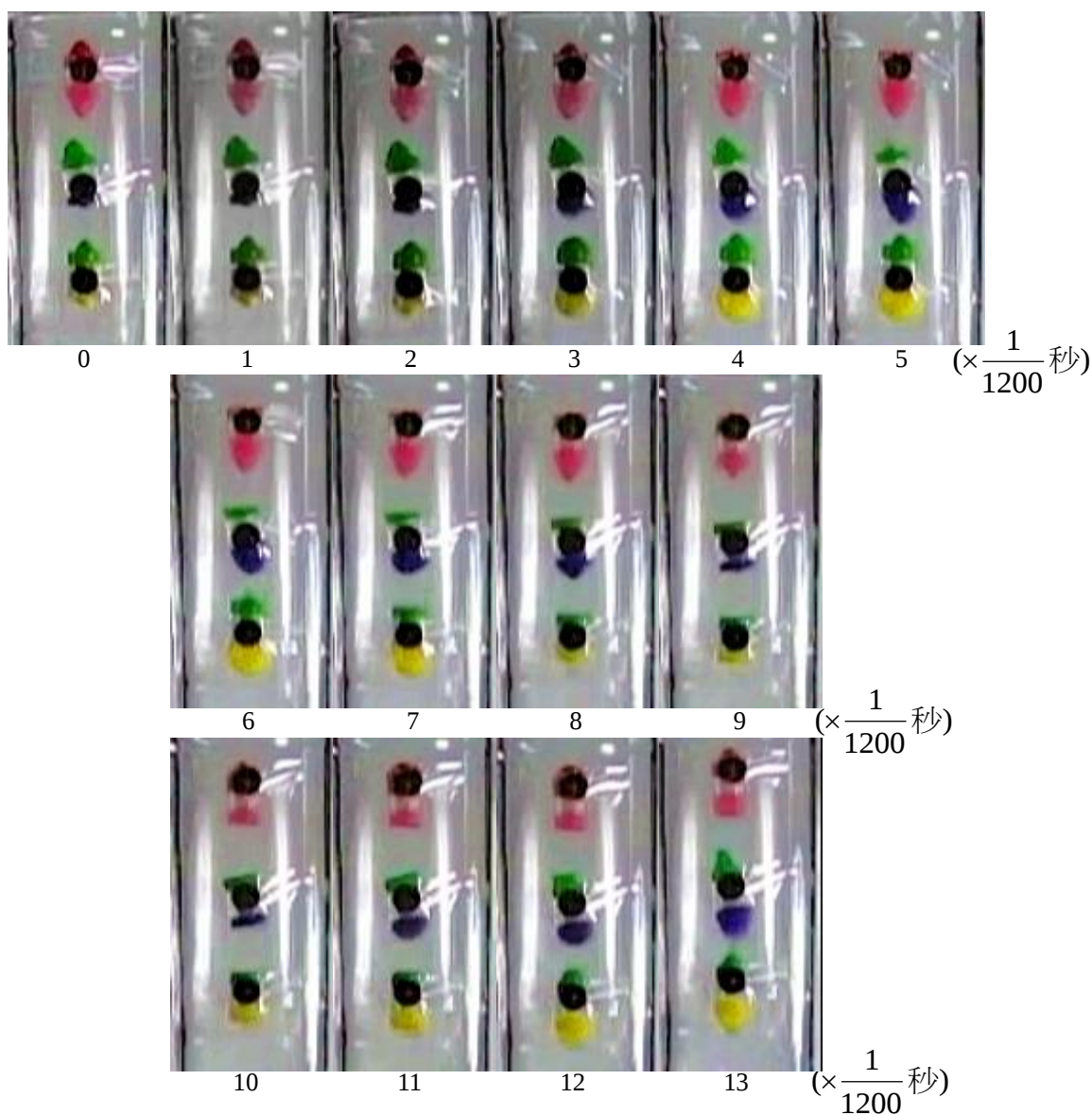
- (一) 我們擷取的影片每一影格的時間間隔為 1 秒／1200。
- (二) 自製壓力變化觀測器的設計如下：
 - 1. 截一段試管約 2 公分，裡面黏一塊強力磁鐵，然後試管兩端用汽球封好黏住。
 - 2. 因為壓力變化觀測器會受到水的浮力作用，所以必須用強力磁鐵固定吸在瓶內。
 - 3. 根據波以耳定律，密閉容器內的氣體體積和壓力會呈反比。當所受壓力變大時，則其體積會縮小；當所受壓力變小時，則其體積就會脹大。
- (三) 原本我們以為瓶底液體壓力一開始會因為敲擊瓶口而先變大，使得壓力變化觀測器的體積先收縮變小。可是觀測到的結果是壓力變化觀測器一開始的體積變化是先膨脹，表示液體壓力一開始是變小的。
- (四) 隨後壓力變化觀測器的體積發生收縮、膨脹的交替現象，表示在液體中產生波的現象。

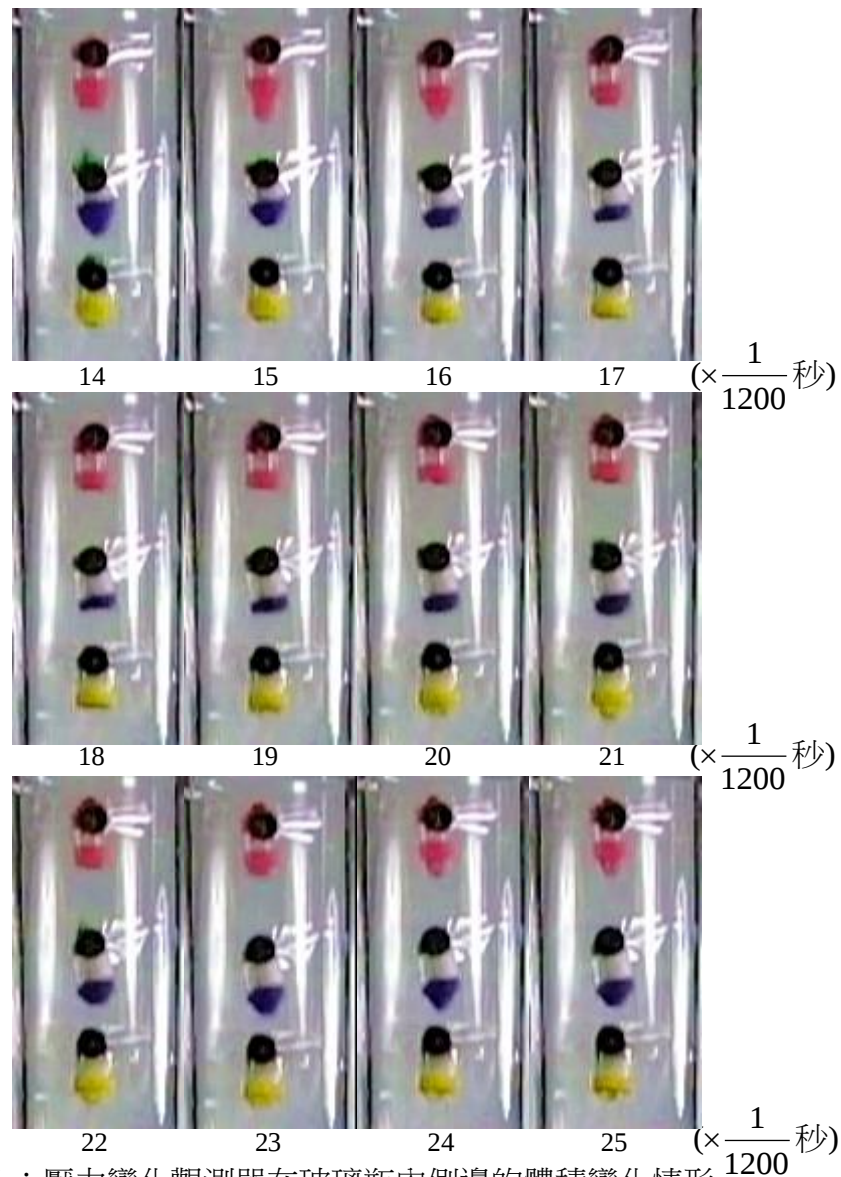
實驗六之二、觀測玻璃瓶內不同高度位置所受的壓力變化情形

過程與方法：

- (一) 將三個自製壓力變化觀測器，利用強力磁鐵固定於透明玻璃瓶內側邊三個不等高度的位置。
- (二) 在瓶內裝水使水位距離瓶口 10 公分。
- (三) 揮動 550gw 木槌，用有泡棉墊的那一端來破瓶。利用 1200 FPS 的高速攝影相機來觀測玻璃瓶側的壓力變化觀測器所發生的現象。

結果：





圖十八：壓力變化觀測器在玻璃瓶內側邊的體積變化情形

發現：

- (一) 除了最靠近液面的壓力變化觀測器，一開始是體積收縮(請參考的第 4 秒／1200)。其餘的壓力變化觀測器的體積，一開始都是先膨脹的。
- (二) 愈靠近瓶底的壓力變化觀測器，其體積變化愈大。
- (三) 隨後，壓力變化觀測器的體積都是發生收縮、膨脹的交替現象。

研究討論：

- (一) 愈靠近瓶底的壓力變化觀測器，一開始體積膨脹較大，表示愈靠近瓶底的壓力，一開始壓力變得較小。
- (二) 最靠近液面處，因為距離瓶底較遠，受到瓶底壓力變小的影響較小，而受到液面上方的影響較大，所以一開始是壓力變大導致壓力變化觀測器的體積收縮。

陸、 綜合討論

一、經我們觀察發現，瓶底的壓力變化觀測器體積膨脹時，同時也看到類似氣泡的出現。

因此這類似氣泡的出現，會使得瓶底壓力變小。

二、我們懷疑這類似氣泡並不是氣泡，而是類似真空泡。我們認為：

(一) 產生的類似氣泡並沒有往上浮起，而是直接縮小消失。

(二) 這類似真空泡的壓力很小，和瓶底水的壓力差很大，收縮時就會產生很大的震動力量。

三、因此我們認為在瓶底產生的是類似真空泡，才會使得瓶底壓力大幅變小。而真空泡與水的壓力差所產生的力量，使得水在瓶底震動玻璃瓶，造成瓶底破裂。

四、瓶底類似氣泡的產生原因，我們認為可能有二：

(一) 敲擊瓶口時，先擠壓瓶口的空氣，再傳到瓶底，然後在瓶底產生波動。而類似真空泡就在波發生疏部時產生。

(二) 由於受到力的慣性作用，力作用在玻璃瓶，瞬間水不動而玻璃瓶往下，造成水和玻璃瓶會瞬間分離，而類似真空泡就在此時產生。

五、為了證明以上的可能性，我們設計了一個實驗：

(一) 在玻璃瓶口擺兩塊木塊，然後敲擊木塊來破瓶而非直接敲擊瓶口。此時敲擊木塊就不會對瓶內液面上方的空氣造成擠壓。如圖十九所示。

(二) 實驗結果，玻璃瓶底還是有類似真空泡的產生，且玻璃瓶底還是產生破裂。

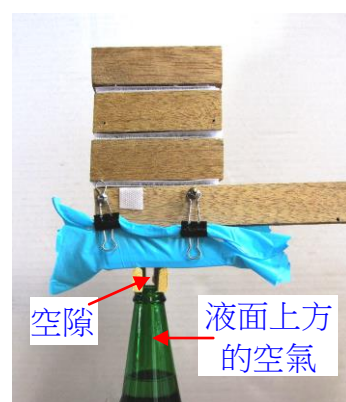
(三) 證明類似真空泡的產生和擠壓無關，應該是受到力的慣性作用所致。

六、在實驗三之三中，當木槌愈重、末端速度愈大，則所施的力愈大，則慣性作用愈強，愈容易產生真空泡，則愈容易破瓶。

七、在實驗四之一中，

(一) 當瓶內裝滿水，敲擊瓶口時無法使水與玻璃瓶產生瞬間分離，所以無法產生真空泡，無法成功破瓶。

(二) 當水位離瓶口距離超過 16 公分時，水位太低，水量少，所產生的慣性作用也較小，



圖十九：敲擊木塊來破瓶

所以較不容易成功破瓶。

八、在實驗五之一中，所聽到清脆的聲音，就是瓶底產生的真空泡收縮，使得水撞擊玻璃瓶所產生的聲音。

九、在實驗六中，由於在瓶底產生真空泡，真空泡的壓力幾乎等於零，所以造成瓶底的壓力大幅減小。

十、綜合以上討論，玻璃瓶底之所以會破裂，是由於：

(一) 力的慣性作用，使得水與玻璃瓶底產生瞬間分離，而在此時產生了真空泡。

(二) 由於真空泡的壓力很小，真空泡收縮時，與周圍水間壓力差的作用下，造成水震動瓶底，而使得瓶底破裂。

十一、為了驗證以上說法，我們又進行了另一個實驗：

(一) 在玻璃瓶內裝食用油進行破瓶實驗。

(二) 當敲擊瓶口時，在瓶底有產生真空泡。因為油中沒有氣體，所以不可能產生氣泡。

(三) 當敲擊瓶口的力量較大時，在瓶底不是產生真空泡，而是油與瓶底分離了一段距離，如圖二十所示。這時，連平時都敲不破的厚玻璃瓶也產生破裂了。



圖二十：裝有食用油的玻璃瓶底所發生的現象

十二、玻璃瓶是因為水往內收縮產生震動，而被震裂瓶底的。而不是因為被擠壓爆破，不會有玻璃碎片四飛的危險。

柒、 研究結論

一、在實驗一中，

(一) 砝碼從愈高處釋放，所產生的力道愈大。

(二) 泡棉墊愈多、愈厚，所減緩的力道也愈多。

二、在實驗二中，

- (一) 增加泡棉墊的厚度，可以減少所產生的壓力。
- (二) 在兩泡棉墊間夾一木塊，大幅減少了所產生的壓力。

三、在實驗三中，

- (一) 木槌的末端速度愈大，愈容易成功破瓶。
- (二) 木棍的重量愈大，其成功破瓶時的最小末端速度會愈小，愈容易破瓶。

四、在實驗四中，

- (一) 瓶內水位全滿時，無法成功破瓶。
- (二) 水位離瓶口距離 4cm 時，成功破瓶的最小末端速度較小，較容易破瓶。
- (三) 水位離瓶口距離從 16cm 再往下降時，成功破瓶的最小末端速度有增加的趨勢，較不易破瓶。
- (四) 瓶內裝自來水、開水和鹽水時，成功破瓶的最小末端度沒有明顯差別。
- (五) 瓶內裝汽水時，無法成功破瓶。

五、在實驗五中，

- (一) 破瓶前有聽到水撞擊玻璃的清脆聲響，且都是在瓶底發生破裂。
- (二) 破瓶前，在瓶底有真空泡生成。
- (三) 在瓶底真空泡快消失時，此時瓶底才開始發生破裂。
- (四) 由於瓶底真空泡體積的瞬間變化，使得水體產生震動，而震破玻璃瓶底。

六、在實驗六中，

- (一) 玻璃瓶底一開始的壓力會先變小。
- (二) 最靠近液面的壓力一開始是先變大。
- (三) 愈靠近瓶底的壓力變化愈大。

七、玻璃瓶底之所以會破裂的原因：

- (一) 受到力的慣性作用，使得水與玻璃瓶底產生瞬間分離，而在此時產生了真空泡。
- (二) 產生的真空泡壓力很小，真空泡收縮時，與周圍水間壓力差的作用下，造成水震動瓶底，而使得瓶底破裂。

捌、參考資料

- 一、王天胤(民 59)。自然科學大百科—14：大氣科學(13 頁)。台北市：綠地球股份有限公司。
- 二、伍昊慈(民 59)。自然科學大百科—15 量度與力(23-70 頁)。台北市：綠地球股份有限公司。
- 三、伍昊慈(民 59)。自然科學大百科—17 電磁與機械(38 頁)。台北市：綠地球股份有限公司。
- 四、沈陌農(民 76)。小學生知識之旅—發明發現：汽水(38 頁)。高雄市：愛智圖書有限公司。
- 五、林麗霞(民 80)。十萬個為什麼—物理 II (127 頁)。台北市：國際少年村圖書出版社。
- 六、高原清(民 82)。牛頓科學研習百科—物理：水的壓力(34 頁)；氣體的性質和定律(43 頁)。台北市：牛頓出版股份有限公司。
- 七、莊福裕(民 82)。為什麼？365(52 頁)。高雄市：尚志文化出版社。

【評語】 080118

能夠自行設計壓力觀測器、氣壓觀測器、受力裝置，且都能將變因控制到準確，值得嘉許。