

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

040104

當我們撞在一起-液體碰撞

學校名稱：國立板橋高級中學

| | |
|---|--------------|
| 作者： 高二 楊志文 高二 徐英庭 高二 蘇巧慈 高二 倪柏揚 | 指導老師： 劉榮吉 |
|---|--------------|

關鍵詞：液體碰撞 液體碰撞的能量消失

摘要

我們利用不同速率液滴撞擊液面，發現液柱彈起的力量來源可能為液體的壓力或表面張力；並且測量液滴進入液面下的深度和彈起的水柱高度，由實驗結果發現入射速率越快，其能量損耗百分比越小。另外我們做了固體間碰撞實驗來與液體間碰撞做比較，發現其能量損失百分比比液體間碰撞來的小。

壹、研究動機

電視上的鮮奶廣告，爲了烘托出鮮奶的濃、醇、香，常會播放鮮奶滴入液體中，激起一環環乳白、且似皇冠形的畫面，如此鮮明的畫面，攫獲了我們的好奇心。在高中課本中，只提到固體碰撞，對於液體碰撞我們所知無幾，面對截然不同的物理狀態，必定能激發出不一樣的火花！於是，我們開始設計一系列的實驗，研究液體碰撞之情形，而一場神聖的液體戰爭，就在我們摩拳擦掌之下，如火如荼開「撞」了……

貳、研究目的

- 一. 觀察液體間碰撞的過程。
- 二. 利用不同入射速率的液體與液面碰撞，研究其碰撞過程的能量損耗。
- 三. 比較液體間碰撞與固體間碰撞的差異。

參、研究設備及器材

攝影機(SONY HDV：30 張/秒)、滴定管、水缸(長：30 公分，寬：17 公分，高：19 公分)、長尺、光電計時器(最小單位 0.001 秒)、塑膠球(質量：2 公克，直徑：15 mm)、沙拉油、PowerDirector 和 PhotoImpact 程式



圖一：測量速率



圖二：測高度與深度

肆、研究過程和方法

一. 實驗原理：

(一) 原理 1：液滴碰撞前的能量

將光電計時器的啓動器和接收器相疊，測量其間的距離為 $d = 4.75$ 公分，利用光電計時器測量水滴經過的時間為 t ，將可以求出平均速率 $\bar{v} = \frac{d}{t}$ ，因為 d 很小，我們假設此平均速率為 \bar{v} 近似於啓動器和接收器中間位置 $\frac{d}{2}$ 的瞬時速率 v ，以此作為水滴碰撞水面的入射速率。利用動能公式 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 算出水滴碰撞水面前的動能。

(二) 原理 2：液體碰撞後的能量

假設入射水滴為圓形且碰撞後彈起的水柱為均勻圓柱體，若令水面為重力位能零位面，則碰撞後的能量以彈起水滴與水柱的重力位能加上整體表面能的變化來表示。

(三) 原理 3：損失能量百分比

能量損耗 = 撞擊前的能量 - 碰撞後的能量

損失能量百分比 = (能量損耗/撞擊前的能量)×100%

二. 實驗一：水滴碰撞水面

(一) 步驟一：水滴質量測量

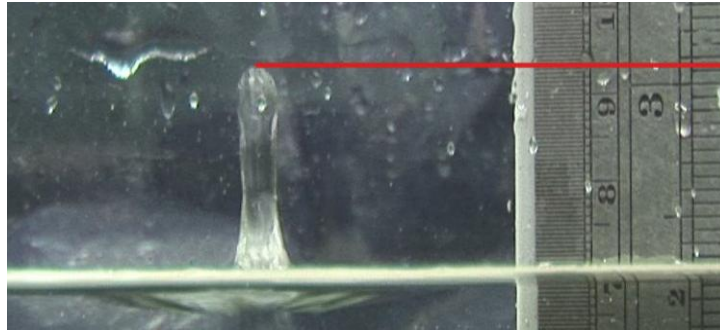
用滴定管在量筒中滴入 100 滴的液滴，測得總體積為 5.5ml，每一滴液滴平均為 0.055 ml，設水的密度為 1 g/cm^3 ，即得到每液滴質量為 0.055 公克。

(二) 步驟二：入射水滴速率測量

將滴定管裝置離地 25 公分處滴出水滴。測量出啓動器和接收器相疊之間的距離為 $d = 4.75$ 公分，並讓啓動器和接收器的中間距地面 7 公分，因水槽中水面高度為 7 公分，光電計時器上會顯示通過距離 d 的時間 t (單位：秒)，用 $\bar{v} = \frac{d}{t}$ 算出此高度的水滴到水面時的速率 (單位：公分/秒)。

(三) 步驟三：深入距離度與反彈水滴和水柱的高度測量

將滴定管裝置離地 25 公分滴下水滴，並控制滴定管每秒滴出少量的液滴，以避免滴速過快，破壞水面的穩定。滴定管下方放置一個水缸，並讓其液面維持在離地 7 公分，將滴定管旁邊架設一把長尺，可以測量液滴彈起高度和深入水底的深度。利用 PowerDirector 可擷取出所需的圖片。使用 PhotoImpact 時，在每個水滴的最高點和最大深度，畫一條紅色水平線，將其拉到圖片中的尺做對照，再讀出尺上的數據並做紀錄。



(四) 步驟四：改變入射速率

調整滴定管滴下的距離，分別為 25、30、35……120 公分，然後重複步驟一、二、三，可獲得不同入射速率的實驗數據。

三. 實驗二：水槽中所裝水的高度

更改不同的水面的深度，分別為 3、5、7……17，並且從距水面 70 公分處滴下，然後測量其反彈的高度（同實驗一的步驟三）。

四. 實驗三：塑膠球撞擊地面

我們用塑膠球代表固體，使塑膠球撞擊地面，然後測量它撞擊時的速率和反彈後的高度(同實驗一的步驟二、三)，只測量 30、40、50 到 110 公分時落下的實驗數據。

五. 實驗四：沙拉油滴撞沙拉油面

分別從距地 50cm 和 150cm 滴下，並用攝影機拍出圖片以比較水滴碰撞的差異。

伍、研究分析與結果

一. 分析分法：

(一) 水滴撞擊液面前時的能量 E (動能)：

測得水滴到達液面時的速率為 v ，利用 $\frac{1}{2}mv^2$ 算出水滴的動能，若設水面為重力位能零位面，則水滴入射的能量即撞擊液面時的動能。

(二) 水滴撞擊液面後的能量 U ：

從實驗得知，離地面 25 到 45 公分滴下時，會分離出小水滴，50 到 120 公分時則不會，於是我們實驗數據分成兩組來分析。

1. 水柱會分離出小水滴：

找出水柱到達最高點時的照片，此時動能為零。因為會水柱與水滴分離，於是把小水滴的重力位能和液柱的重力位能相加，再加上整體表面能的變化量，此為碰撞後之能量。

(1) 小水滴的重力位能 (U_1)：

$$U_1 = m_1 g h_1 = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r_1^3 \cdot g \quad (h_1 : \text{小水滴質心距水面的距離})$$

(r_1 ：小水滴的半徑)

(2) 液柱的重力位能 (U_2)：

$$U_2 = m_2 g h_2 = \rho \cdot \pi \cdot r_2^2 \cdot H \cdot \frac{H}{2} \quad (r_2 : \text{圓柱的半徑})$$

(H ：圓柱頂離水面的最高距離)

(3) 整體增加的表面能(U_3)：

$$U_3 = T \times \Delta A \quad (T : \text{水的表面張力})$$

(ΔA ：整體的表面積增加量)

(4) 碰撞後之能量 U ：

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

2. 水柱不會分離出小水滴：

$$\text{碰撞後之能量 } U = U_2 + U_3$$

(三) 能量損失：我們只考慮第一次碰撞時的能量損失。

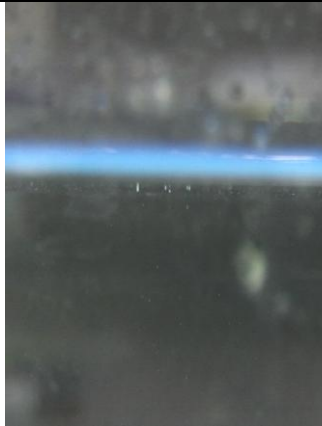


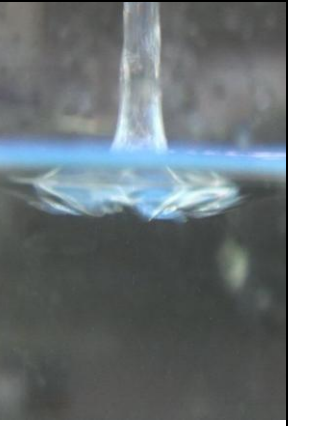
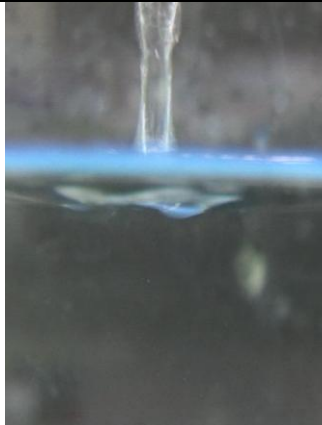

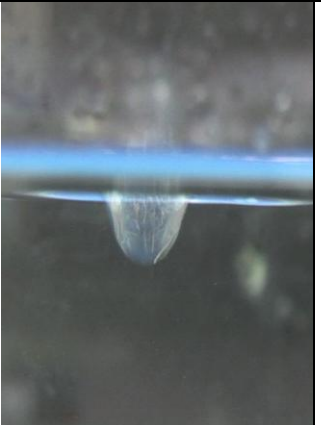
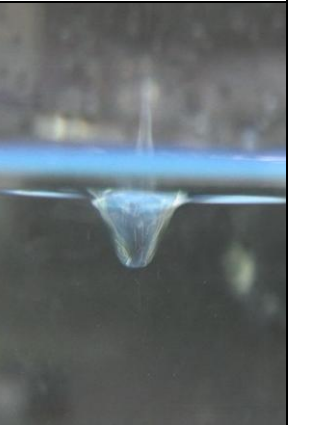
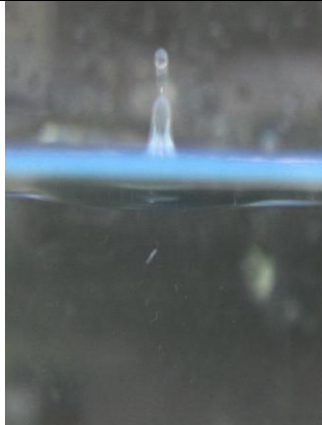
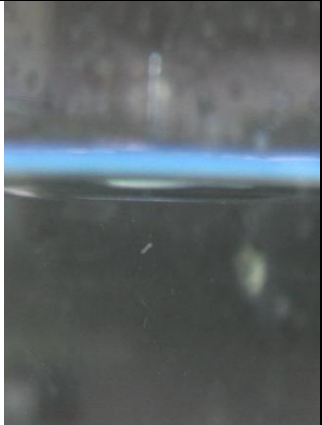
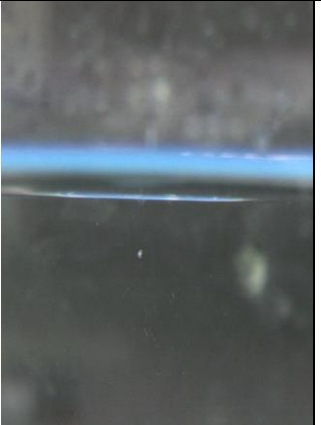
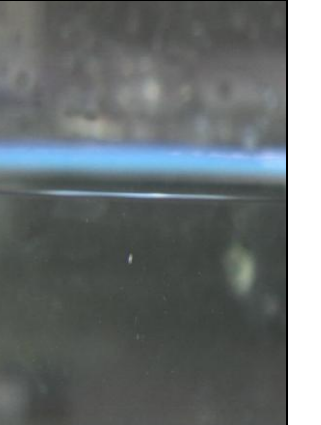
$$\text{損失能量 } (\Delta E) = \text{入射能量 } (E) - \text{碰後能量 } (U)$$

(四) 損失能量百分比：


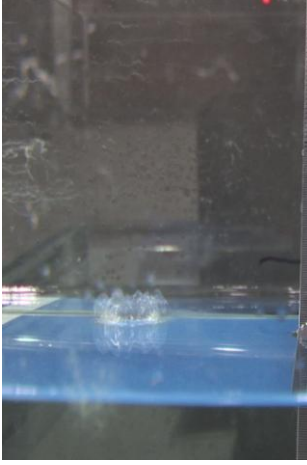


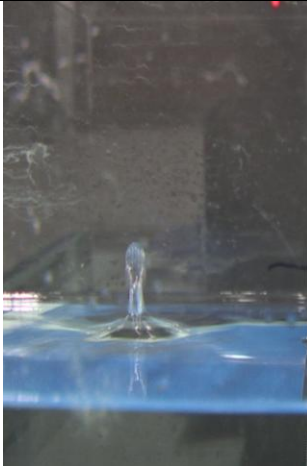
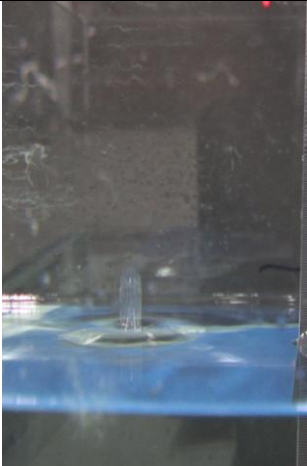
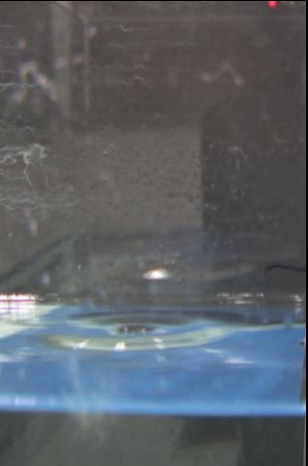
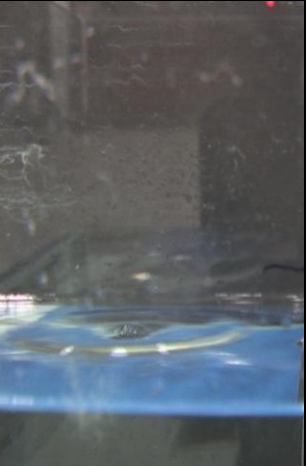
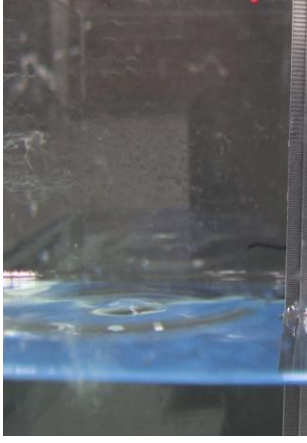
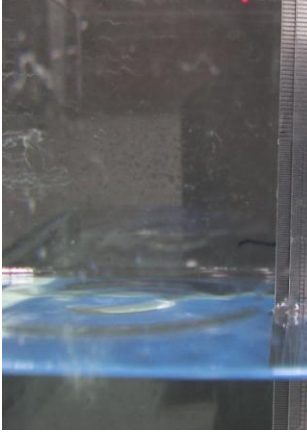
$$\text{損失能量百分比} = \frac{E - U}{E} \times 100\% = \frac{\Delta E}{E} \times 100\%$$

二. 液體之間的碰撞之產生過程：

(一) 水面下凹洞形成過程：

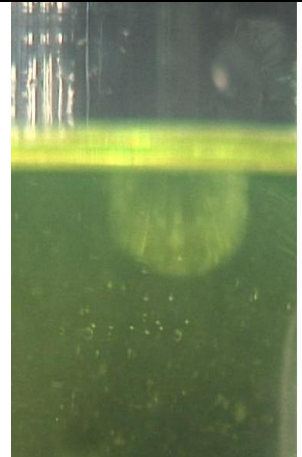
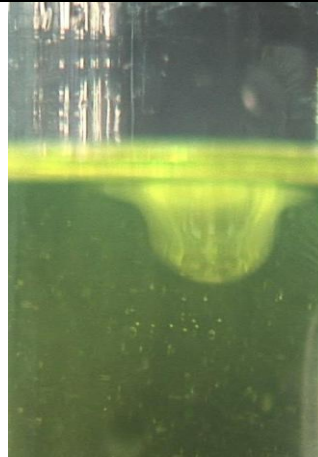
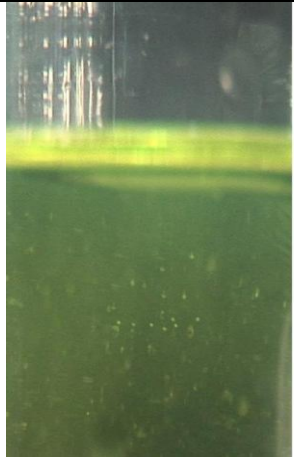
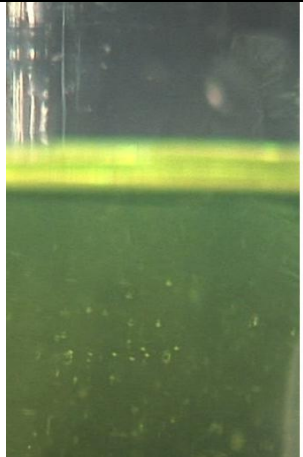
| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 撞擊水面 | 產生凹洞 | 凹洞壓縮 | 彈起液柱 |
|  |  |  |  |
| 到最高點 | 已有點下降 | 再撞出一個凹洞 | 凹洞再壓縮 |
|  |  |  |  |
| 拉起液柱 | 液柱下降 | 能量不夠撞出凹洞 | 結束 |

(二) 水面上水柱形成過程：

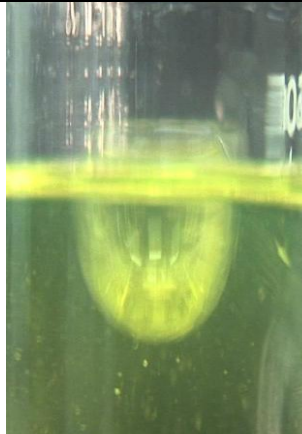
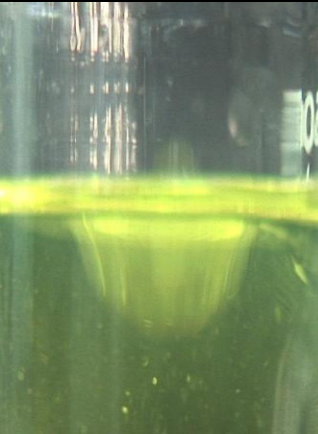
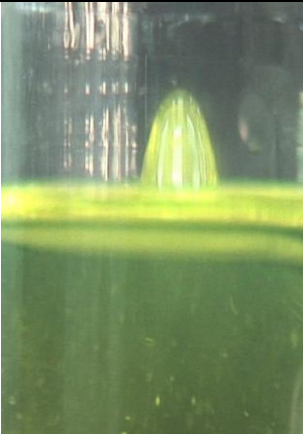
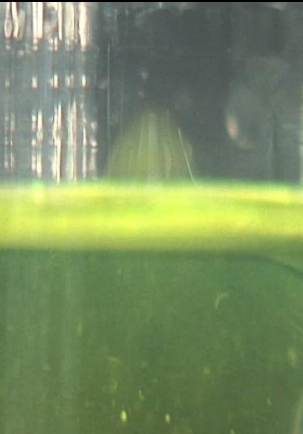
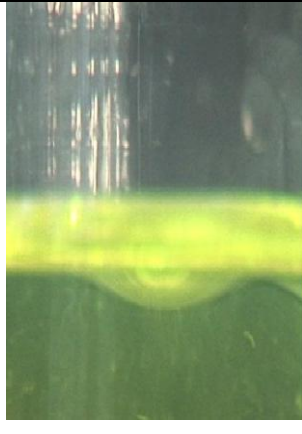
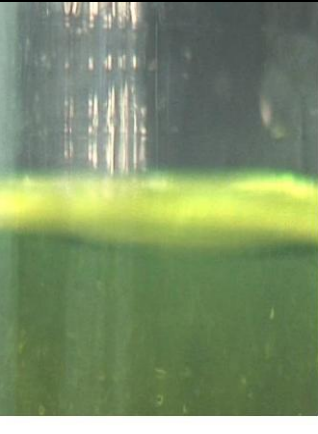
| | | | |
|---|---|---|--|
|  |  |  |  |
| 撞擊水面 | 在水面上形成薄膜 | 液柱的頭拉起 | 形成液柱 |
|  |  |  |  |
| 到最頂 | 液柱下收 | 再撞擊水面 | 能量不夠 |
|  |  | | |
| 無形成液柱 | 結束 | | |

三. 沙拉油之間碰撞產生過程：

(一) 50 公分滴下之過程：

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 撞擊液面產生凹洞 | 凹洞壓縮 | 液柱拉起不明顯 | 結束 |

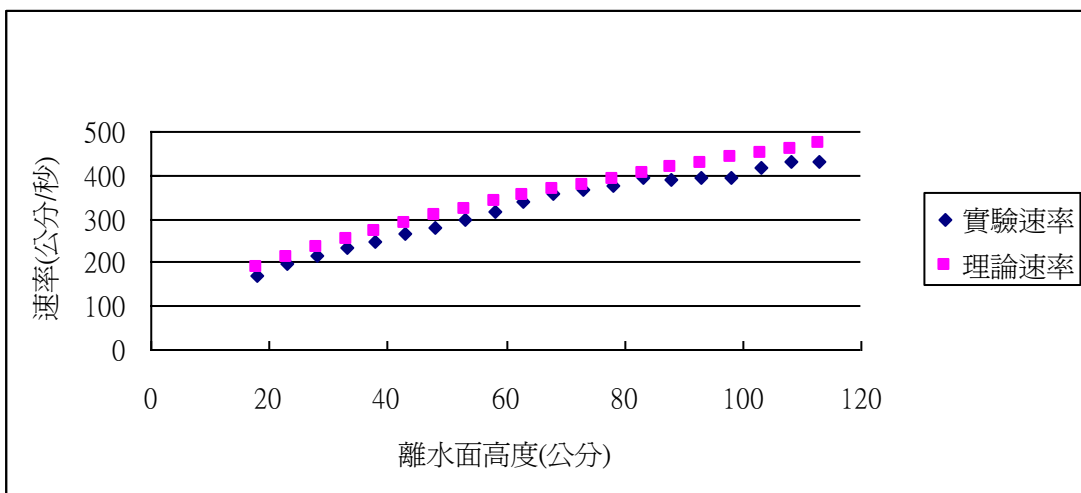
(二) 150 公分滴下之過程：

| | | | |
|---|---|---|--|
|  |  |  |  |
| 撞擊液面產生凹洞 | 凹洞壓縮 | 拉起液柱 | 已有點下降 |
|  |  | | |
| 再撞出一個凹洞 | 結束 | | |

四. 液體碰撞之能量探討：

(一)入射水滴速率：

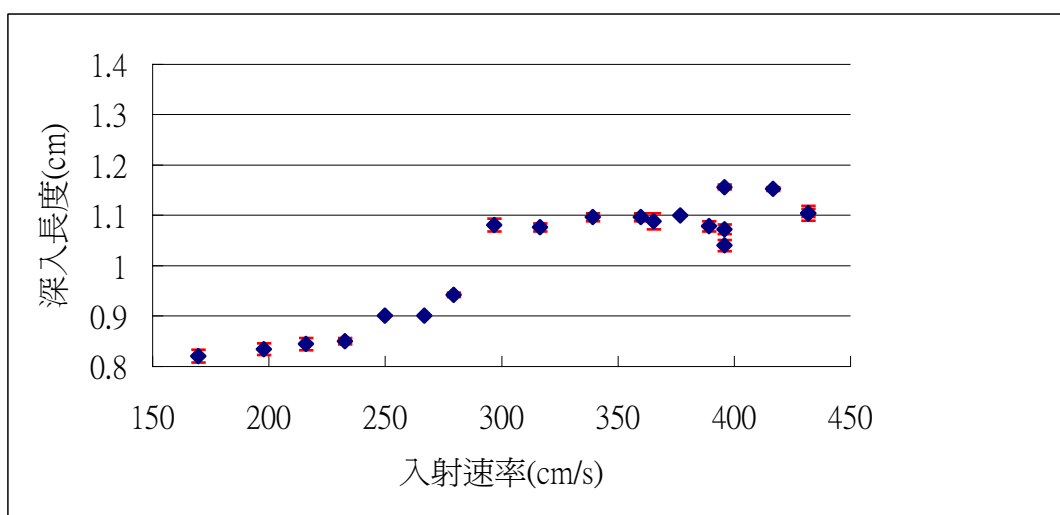
| 距水底高度 (單位：cm) | 時間 (單位：s) | 實驗速率 (單位：cm/s) | 理論速率 (單位：cm/s) |
|------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| 25 | 0.028 | 169.64 | 190.42 |
| 30 | 0.024 | 197.91 | 214.61 |
| 35 | 0.022 | 215.90 | 236.34 |
| 40 | 0.020 | 232.84 | 256.24 |
| 45 | 0.019 | 250.00 | 274.69 |
| 50 | 0.017 | 266.85 | 291.99 |
| 55 | 0.017 | 279.41 | 308.31 |
| 60 | 0.016 | 296.87 | 323.82 |
| 65 | 0.015 | 316.66 | 338.61 |
| 70 | 0.014 | 339.28 | 352.78 |
| 75 | 0.013 | 359.84 | 366.41 |
| 80 | 0.013 | 365.38 | 379.55 |
| 85 | 0.012 | 376.98 | 392.24 |
| 90 | 0.012 | 395.83 | 404.54 |
| 95 | 0.012 | 389.34 | 416.48 |
| 100 | 0.012 | 395.83 | 428.08 |
| 105 | 0.012 | 395.83 | 439.38 |
| 110 | 0.011 | 416.66 | 450.39 |
| 115 | 0.011 | 431.81 | 461.15 |
| 120 | 0.011 | 431.81 | 471.65 |



圖三：發現實驗速率和理論速率有些微差距 (理論速率只考慮重力作用時的速率)，實際上小水滴速率受到空氣阻力的影響而較小。

(二) 液滴碰撞過程所深入的長度：

| 距水底高度 (單位：cm) | 入射速率 (單位：cm/s) | 深入長度 (單位：cm) | 損失能量 (單位：耳格) |
|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| 25 | 169.64 | 0.82 | 827 |
| 30 | 197.91 | 0.83 | 1049 |
| 35 | 215.90 | 0.84 | 1247 |
| 40 | 232.84 | 0.85 | 1327 |
| 45 | 250.00 | 0.90 | 1353 |
| 50 | 266.85 | 0.90 | 1670 |
| 55 | 279.41 | 0.94 | 1659 |
| 60 | 296.87 | 1.08 | 2145 |
| 65 | 316.66 | 1.07 | 2348 |
| 70 | 339.28 | 1.09 | 2728 |
| 75 | 359.84 | 1.09 | 3144 |
| 80 | 365.38 | 1.08 | 3479 |
| 85 | 376.98 | 1.10 | 3291 |
| 90 | 395.83 | 1.04 | 4055 |
| 95 | 389.34 | 1.07 | 3298 |
| 100 | 395.83 | 1.07 | 3825 |
| 105 | 395.83 | 1.15 | 3241 |
| 110 | 416.66 | 1.15 | 4070 |
| 115 | 431.81 | 1.10 | 4208 |
| 120 | 431.81 | 1.10 | 3345 |

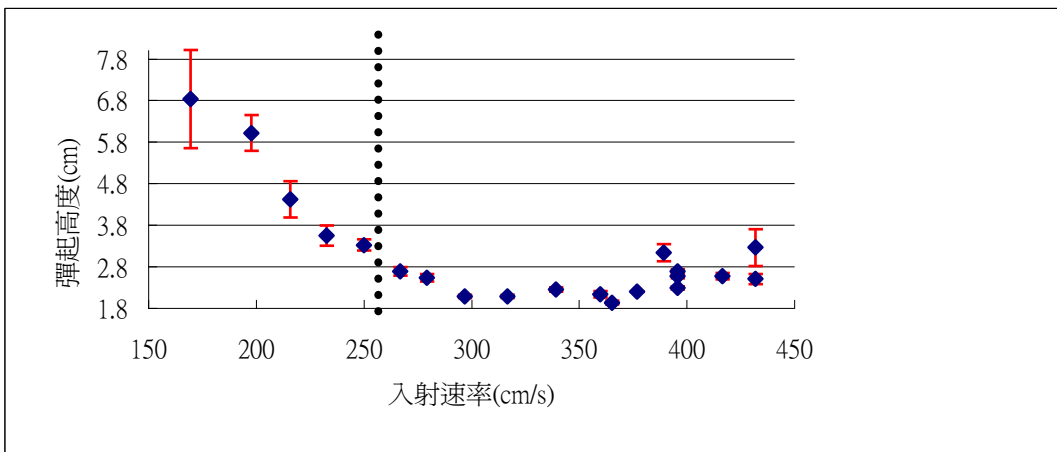


圖四：深入長度和入射速率的關係

水滴從距地 25 到 120 公分，拍下水滴撞擊液面的過程。發現當入射速率越快時，深入的長度有增大的趨勢，但在高速率時，深度趨於平緩。因為在流體內，物體運動速率越快，其所受的阻力會越大，所以深入長度到後面才會趨於平緩。

(三) 液滴的入射速率與碰撞後彈起最大高度的關係：

| 距水底高度 (單位：cm) | 入射速率 (單位：cm/s) | 彈起高度 (單位：cm) |
|------------------|-------------------|-----------------|
| 25 | 169.64 | 6.83 |
| 30 | 197.91 | 6.01 |
| 35 | 215.90 | 4.41 |
| 40 | 232.84 | 3.55 |
| 45 | 250.00 | 3.31 |
| 50 | 266.85 | 2.68 |
| 55 | 279.41 | 2.53 |
| 60 | 296.87 | 2.08 |
| 65 | 316.66 | 2.08 |
| 70 | 339.28 | 2.25 |
| 75 | 359.84 | 2.13 |
| 80 | 365.38 | 1.93 |
| 85 | 376.98 | 2.20 |
| 90 | 395.83 | 2.56 |
| 95 | 389.34 | 3.13 |
| 100 | 395.83 | 2.28 |
| 105 | 395.83 | 2.68 |
| 110 | 416.66 | 2.57 |
| 115 | 431.81 | 2.50 |
| 120 | 431.81 | 3.25 |



圖五：彈起高度和入射速率的關係

虛線的左邊為水柱會分離出小水滴，右邊則不會。

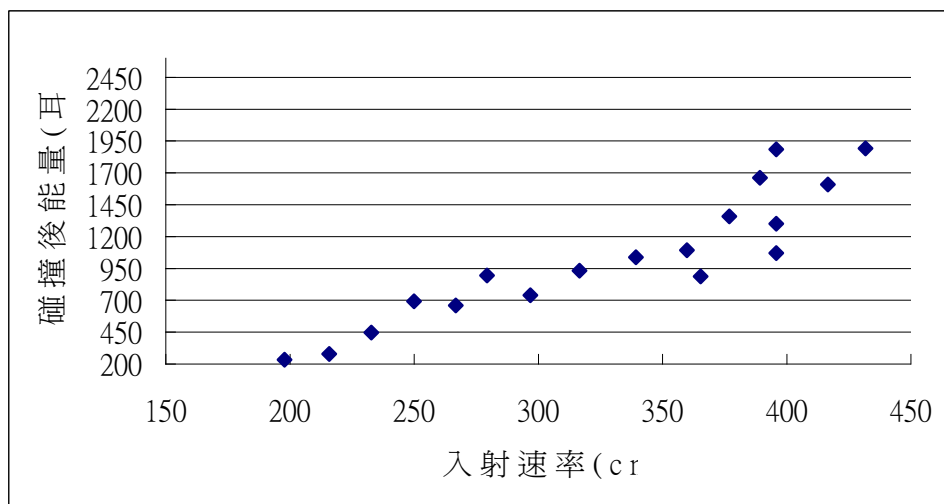
發現水滴入射速率越快時，彈起水柱最大高度有降低的趨勢，但在高入射速率時，彈起高度趨於平緩。

推測因深入的長度趨於平緩所造成的(參考圖五)。

(四) 液體碰撞損失能量百分比：

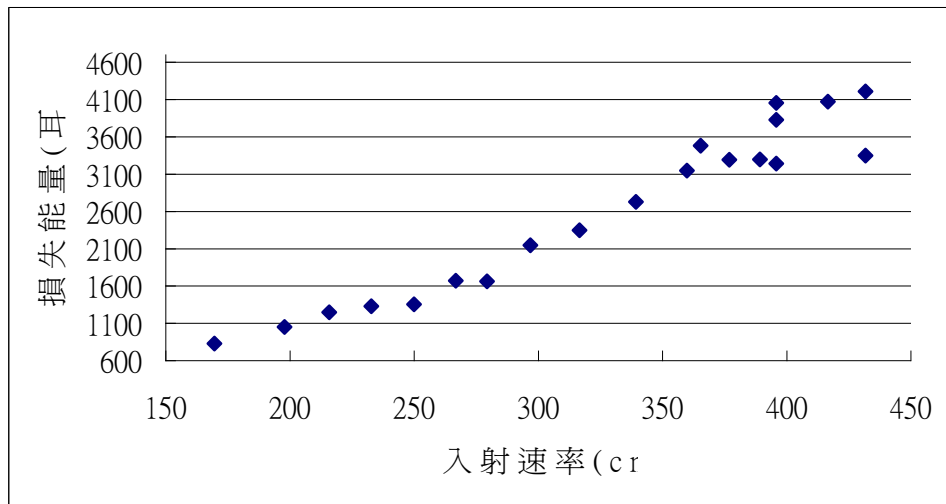
| 距水底高度 (單位：cm) | 入射速率 (單位： cm/s) | 深入長度 (單位： cm) | 撞擊時能量 (單位：耳格) | 碰撞後能量 (單位：耳格) | 損失能量 (單位：耳格) | 損失能量 百分比 (單位：%) |
|------------------|-----------------------|---------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------------|
| 25 | 169.64 | 0.82 | 941 | 114 | 827 | 87.87 |
| 30 | 197.91 | 0.83 | 1281 | 231 | 1049 | 81.91 |
| 35 | 215.90 | 0.84 | 1524 | 276 | 1247 | 81.84 |
| 40 | 232.84 | 0.85 | 1773 | 445 | 1327 | 74.88 |
| 45 | 250.00 | 0.90 | 2044 | 690 | 1353 | 66.23 |
| 50 | 266.85 | 0.90 | 2329 | 659 | 1670 | 71.70 |
| 55 | 279.41 | 0.94 | 2553 | 894 | 1659 | 64.98 |
| 60 | 296.87 | 1.08 | 2882 | 737 | 2145 | 74.40 |
| 65 | 316.66 | 1.07 | 3279 | 931 | 2348 | 71.59 |
| 70 | 339.28 | 1.09 | 3765 | 1036 | 2728 | 72.46 |
| 75 | 359.84 | 1.09 | 4235 | 1090 | 3144 | 74.24 |
| 80 | 365.38 | 1.08 | 4366 | 887 | 3479 | 79.68 |
| 85 | 376.98 | 1.10 | 4648 | 1356 | 3291 | 70.80 |
| 90 | 395.83 | 1.04 | 5124 | 1069 | 4055 | 79.13 |
| 95 | 389.34 | 1.07 | 4958 | 1659 | 3298 | 66.52 |
| 100 | 395.83 | 1.07 | 5124 | 1298 | 3825 | 74.65 |
| 105 | 395.83 | 1.15 | 5124 | 1883 | 3241 | 63.25 |
| 110 | 416.66 | 1.15 | 5678 | 1607 | 4070 | 71.68 |
| 115 | 431.81 | 1.10 | 6099 | 1890 | 4208 | 68.99 |
| 120 | 431.81 | 1.10 | 6099 | 2753 | 3345 | 54.85 |

1. 液體碰撞的碰撞後能量：



圖六：碰撞後能量和入射速率的關係
當入射速率越快時，碰撞後剩餘的能量也會越多。

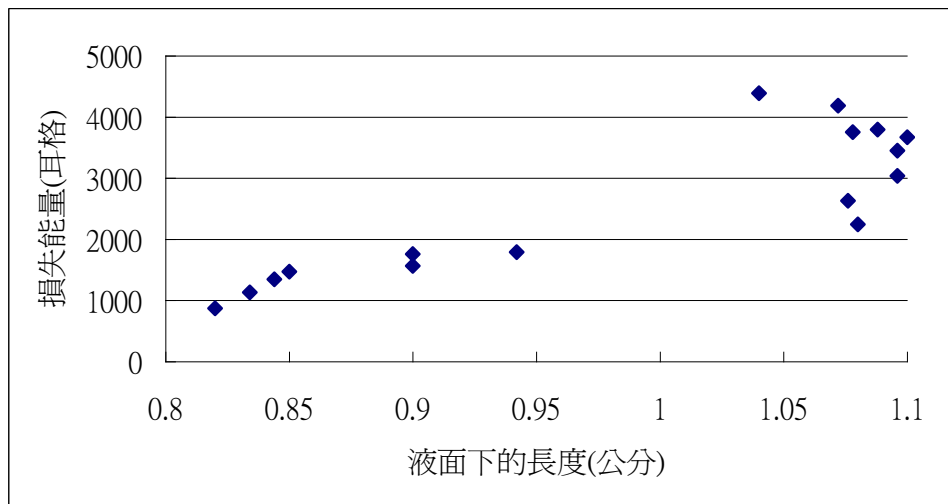
2. 液體碰撞的能量損耗：



圖七：損失能量和入射速率的關係

發現當入射速率越快時，所損失的能量也會越多。

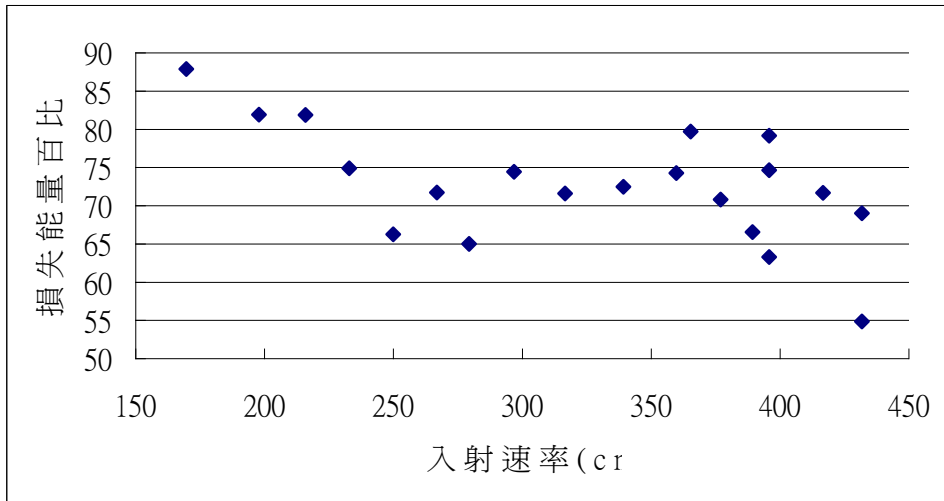
3. 液體碰撞的深入長度和損失能量的關係



圖八：深入長度和損失能量的關係

當深入液面下的長度越長時，損失能量也會越多。

4. 液體碰撞的損失能量百分比：

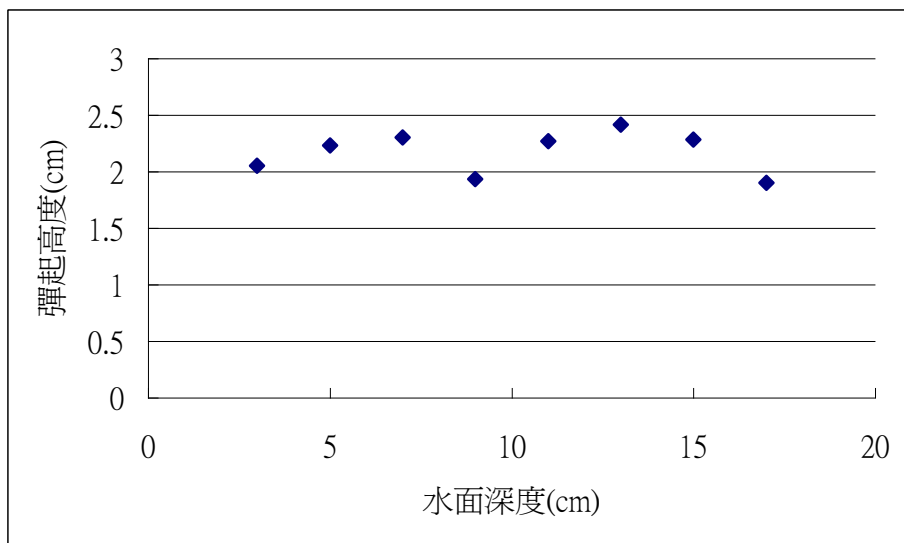


圖九：損失能量百分比和入射速率關係

我們發現當入射速率越快時，損失能量百分比也會越小，推測為深入長度的變化率變小的關係。

五.水槽中所裝水的高度：

| | | | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 水面深度 (單位：cm) | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 |
| 彈起高度 (單位：cm) | 2.05 | 2.23 | 2.30 | 1.93 | 2.26 | 2.41 | 2.28 | 1.90 |

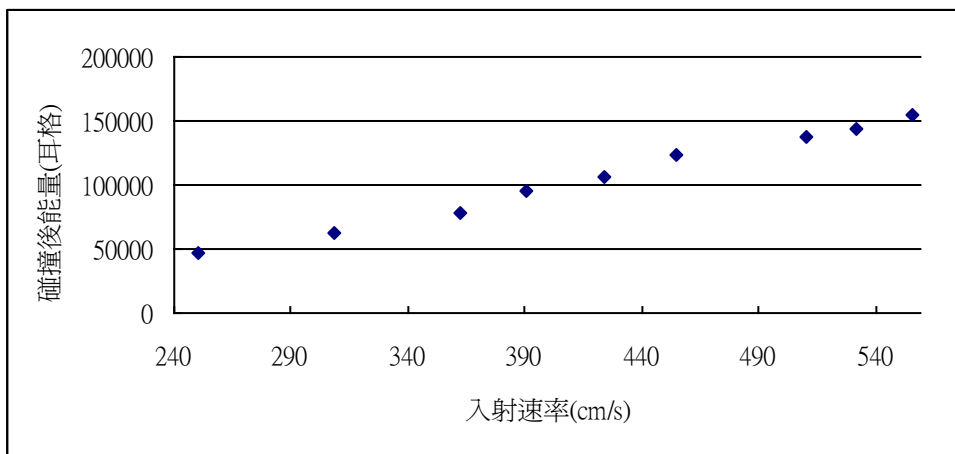


圖十：水面深度和彈起高度的關係

六. 固體間碰撞：(塑膠球質量 $m=2$ 公克)

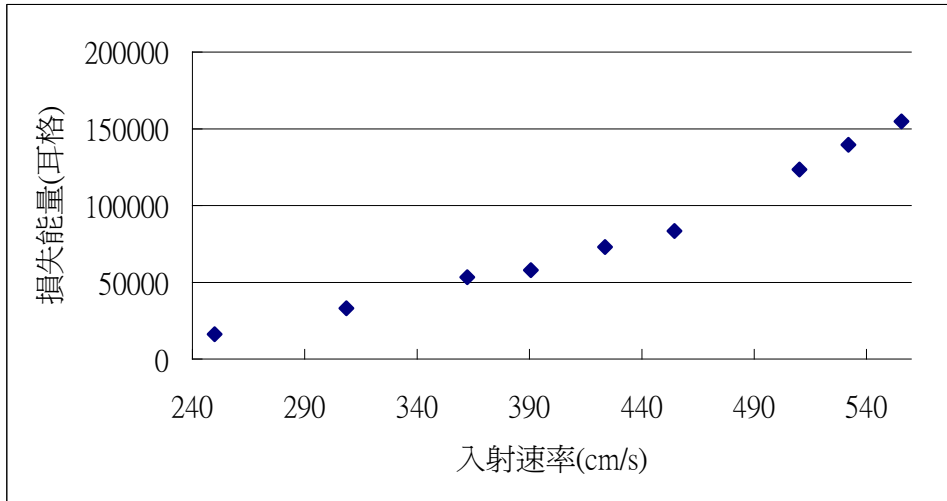
| 距水底高度 (單位：cm) | 入射速率 (cm/s) | 入射能量 (耳格) | 彈起能量 (耳格) | 損失能量 (耳格) | 損失能量百分比 (%) |
|------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| 30 | 250.00 | 62500 | 46360 | 16139 | 25.82 |
| 40 | 308.64 | 95259 | 62249 | 33010 | 34.65 |
| 50 | 362.31 | 131274 | 78112 | 53162 | 40.49 |
| 60 | 390.62 | 152587 | 94831 | 57756 | 37.85 |
| 70 | 423.72 | 179546 | 106676 | 72869 | 40.58 |
| 80 | 454.54 | 206611 | 123231 | 83379 | 40.35 |
| 90 | 510.20 | 260308 | 137010 | 123297 | 47.36 |
| 100 | 531.91 | 282933 | 143491 | 139441 | 49.28 |

(一)固體碰撞的碰撞後能量：



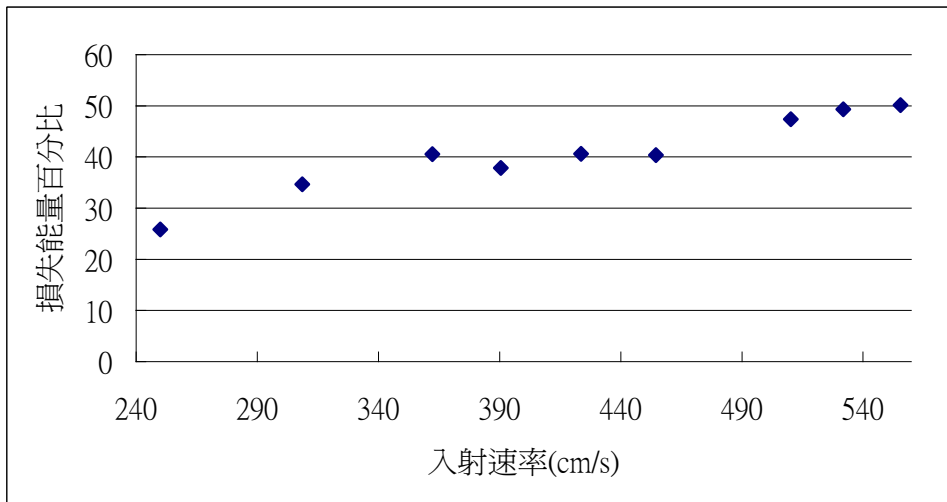
圖十一：碰撞後能量和入射速率的關係
當入射速率越快時，碰撞後剩餘的能量有越大的趨勢。

(二) 固體碰撞的能量損耗：



圖十二：損失能量和入射速率的關係
發現入射速率越快時，碰撞過程所損失的能量也會越多。

(三) 固體碰撞的損失能量百分比：



圖十三：損失能量百分比和入射速率的關係
發現損失能量百分比在 25% 到 50% 之間，比液體碰撞能量損失百分比比較小。

陸、討論

一. 液體碰撞時的過程：

- (一) 水滴滴入液面時，會在表面上撞出一個凹洞，因凹洞周圍的水壓力及表面張力作用下，凹洞越來越小，而且觀察到凹洞底部慢慢有水柱形成，直到整個水柱被彈起。若用速率較慢的水滴撞擊液面時，水柱上會分離出形狀較完整的圓形小水滴，當小水滴落回液體表面時，整個碰撞過程會再來一次，依此循環下去，直到能量不足為止。
- (二) 當入射的能量不大時，深入的長度不大，凹洞周圍液體所給予的作用力不大，所以不容易彈起液柱。而當撞擊的能量夠時，深入的距離較深，液體給予的作用力較大，所以液柱彈起的較高。因為沙拉油的黏滯力比水大且表面張力比水小，所以碰撞後不易彈起液柱。
- (三) 如果碰撞後能量很小的時候，能拉上來的水量有限；而當水柱的半徑很小時，水的表面張力所提供的的作用力太小，並不足以拉住水柱最上端的水，因而造成水柱最上端的水脫離水柱而形成小水滴。

二. 碰撞過程能量的損耗探討：

- (一) 根據流體力學，物體在水裡速率越大時，所受阻力 f 大小也會越大；當液體入射速率越大時，雖然可深入的距離較大，但所受阻力也較大，故深入距離的增加量會越小，因而碰撞過程所損失能量的百分比越小。水滴碰撞的能量損失主要是液體阻力所做的功，將其部分能量轉成熟能。

$$\text{能量損耗 } \Delta E = W = f \cdot d = \Delta E_0 \cdot W_1 = f \cdot d_0 \cdot W_d$$

$$\text{損失能量百分比又可寫成} = \frac{\Delta E}{E} \times 100\% = \frac{\Delta E_0 \cdot W_1}{E_0 \cdot W_2} \times 100\%$$

(W ：阻力所做的功)

(f ：阻力)

(d ：深入距離)

(ΔE_0 ：25 公分的損失能量)

(W_1 ：損失能量/ ΔE_0)

(d_0 ：25 公分的深度)

(W_d ：深入距離/ d_0)

(ΔE_0 ：25 公分的損失能量)

(E_0 ：25 公分的入射能量)

(W_2 ：入射能量/ E_0)

當速率越來越快時， W_d 變化越來越小，造成 W_1 變化越來越小， $\frac{W_1}{W_2}$ 的值也越

來越小，損失能量百分比就會越來越小。

- (二) 固體碰撞時，因為接觸時間短，且無法深入被撞擊物，沒有液體碰撞時有受深入距離的影響，故損失能量百分比比較少。當入射速率變大時，其 $\frac{W_1}{W_2}$ 的變化並不大，所以實驗出來的損失能量百分比變化不大。

三. 實驗誤差的探討：

- (一) 我們的平均速率並非於啓動器和接收器中間位置的瞬時速率，所以物體的平均速率並非真正的碰撞速率。
- (二) 光電計時器最小單位為 0.001 秒。當速率很快時，真實時間可能是 0.0012 秒，但計時器只能計成 0.001 秒，造成數據在較大速率時，會有誤差產生的現象。
- (三) 長度測量的鐵尺最小刻度為 0.1 公分，所以測量水滴深入距離與水柱彈起高度會有誤差。
- (四) 固體碰撞時，用位能計算損耗的能量時會因空氣阻力而有一點誤差，但是我們後來計算空氣阻力所做的功時，發現所做的功在 7 到 60 耳格，很小於是我們把它忽略。

柒、結果

- 一. 水滴撞擊液面時，在液面先形成一個凹洞，因凹洞周圍水的壓力和表面張力作用，使得液柱彈起。
- 二. 液體碰撞時當入射水滴速率越快時，深入液面下的距離越大，所損失的能量會越多，碰撞後剩餘的能量也越多，但所損失的能量百分比卻越小。
- 三. 固體碰撞時，因沒有深入液面的關係，損失能量百分比比較液體小。

捌、參考資料

- 一. 物理第七版(上) 田麗文、王行達、莫定山 編譯 全華科技圖書股份有限公司
- 二. 物質科學物理篇(下) 南一書局

【評語】 040104 當我們撞在一起-液體碰撞

本實驗觀察液體間之碰撞過程，探討水滴撞擊液面時，液粒彈起高度與入射水滴能量之關係並以能量的觀點分析碰撞過程，唯此現象明顯為非彈性碰撞，分析建議應從動量角度著手。