

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

040116

空間穿越-油滴二次觸水的穿透現象

學校名稱：新北市立板橋高級中學

作者： 高二 張豈榕 高二 范祥鈺 高二 蒲其磊	指導老師： 劉榮吉 林天來
---	-----------------------------

關鍵詞：碰撞、穿透、表面張力

摘要

入射油滴(母油滴)與水面第一次碰撞時並不會穿透水面，但碰撞過程所產生的液柱會震盪，我們發現若液柱震盪過程中有產生分離的油滴(子油滴)，則子油滴落下時跟液面進行第二次碰撞，在某些狀況下會發生穿透液面的現象，但母油滴高度並非愈高就愈容易產生可穿透液面的子油滴，經由觀察結果顯示，子油滴是否可以穿透液面與觸水時液面振動方向有關。另外我們也觀察到水面的溫度對子油滴穿透的影響非常小，但加入清潔劑的液面比較容易被子油滴給穿透了，另外我們試著縮小母油滴的體積，來觀測子油滴穿透液面的狀況。

壹、 研究動機

比水密度大的物質往下沉，比水密度小的物質向上浮是一般常理，但在一次使用高速攝影機重複做以前學長的科展作品時，我們意外發現比水密度小的油滴在某些高度靜止滴落時，竟可穿透水面，且此現象並非發生在動能最大的第一次觸水，而是在彈起後的二次觸水才會發生。如此有趣的現象，讓我們想透過實驗設計來找出油滴可穿透水面的條件，並試著用理論來解釋我們所觀察到的結果。我們嘗試改變油滴高度、油滴大小、水面溫度、水溶液成分。

貳、 研究目的

- 一、拍攝油滴穿透水面的過程。
- 二、探討影響油滴穿透水面的因素：
 - (一)油滴高度(入射速率或動能)與油滴穿透水面的關係。
 - (二)水面溫度與油滴穿透水面的關係。
 - (三)介面性質(加入清潔劑)與油滴穿透水面的關係。

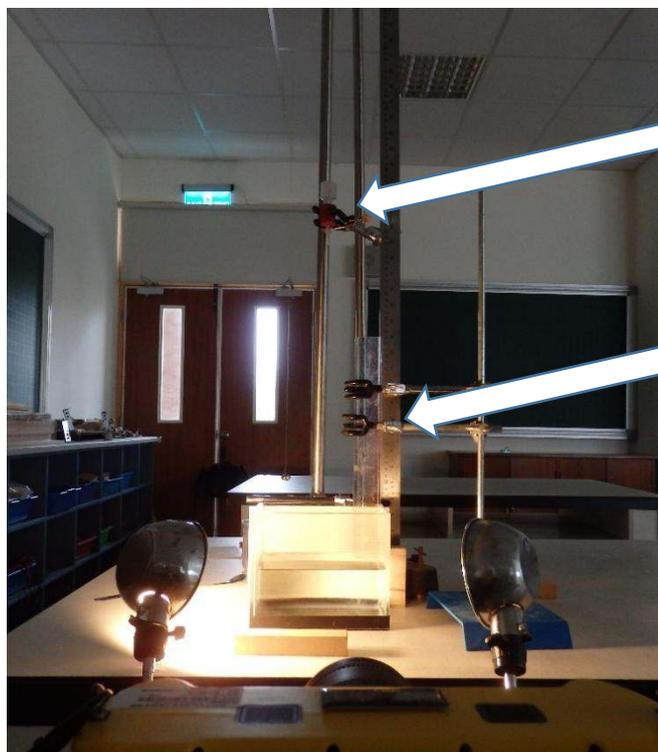
參、研究設備及器材

一、實驗器材

- 葵花油($D=0.887\text{g/cm}^3$)
- 自來水
- 角架
- 玻璃水缸(底面積 100cm^2)x2、屏幕
- 鹵素燈 x2
- 尺 (100cm)、重錘(校正用)
- 大小口徑滴管
- 溫度計

二、軟體

- 高速攝影機、Nikon 攝影機
- tracker 分析軟體(影片)、imageJ 分析軟體(圖片)



滴管

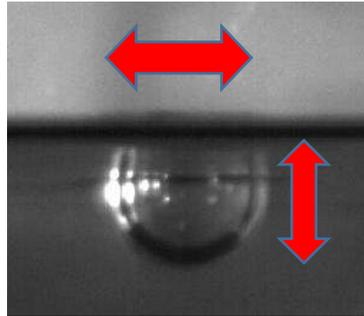
尺(電腦分析比例尺)

肆、研究過程或方法

一、測量

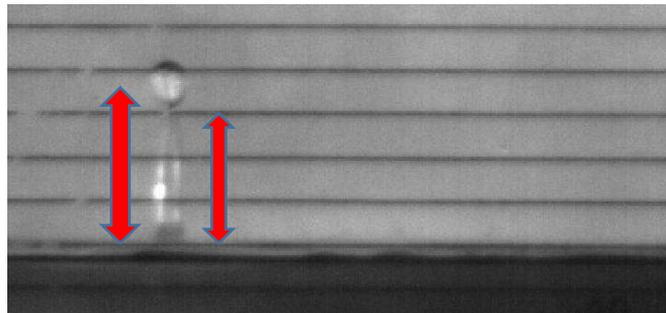
(一)測量第一次碰撞可深入水面的距離與寬度：

我們使用 tracker 將水面定為零位面，並進行水平面的校準，再將第一次碰撞造成水面下陷的深度與寬度記錄下來分別紀錄下來(以 mm 做為單位)。



(二)測量反彈液柱與油滴的高度：

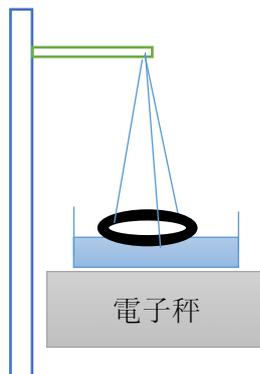
記錄反彈子油滴高(箭號較長者 h_1)、反彈液柱高(箭號較短者 h_2)



(三)計算表面張力：

公式：表面張力 $T = \frac{(F-W) \times g}{2\pi(r_1+r_2)}$ (單位：dyne/cm)

$F =$ (環完全沒入淺盆時秤的讀數) - (液膜破裂瞬間秤的讀數)
 $W =$ 圓環質量(g)
 $g = 980 \text{ cm/s}^2$
 $r_1 =$ 圓環內徑(cm)
 $r_2 =$ 圓環外徑(cm)



二、實驗步驟：

(一)實驗一：觀測大油滴在哪些高度可穿透水面。

1.步驟一：測量油滴的平均體積與質量。

將大滴管滴出之的油滴滴入量筒中，分別滴入 300 滴測量其體積與重量，並計算出每滴油滴的平均體積和重量。

2.步驟二：測量油滴接觸水面的速率。

先將直尺置於水滴落處，使用 tracker 軟體進行長度的校正；後將油滴接觸水面前的兩影格位置紀錄(高速攝影機所拍攝兩影像的時間約 1/750 秒)，再利用 $v = \Delta x / \Delta t$ 得出油滴接觸水面的速率。

3.步驟三：改變油滴與水面的高度，重複上步驟。

我們調整滴管出口與水面的距離，自 10cm 到 90cm，每次增加 5 公分，並測量各數據及記錄。

(二)實驗二：觀測水溫對油滴穿透水面的影響。

找出不同溫度下，穿透所需的最低高度(大油滴)。

(三)實驗三：觀測清潔劑對油滴穿透水面的影響。

在水中加入清潔劑並重複實驗二之步驟。

(四)實驗四：比較大小油滴在哪些高度可穿透水面。

將滴管換成小口徑，重複實驗一的步驟，並與實驗一進行比較。

伍、研究結果

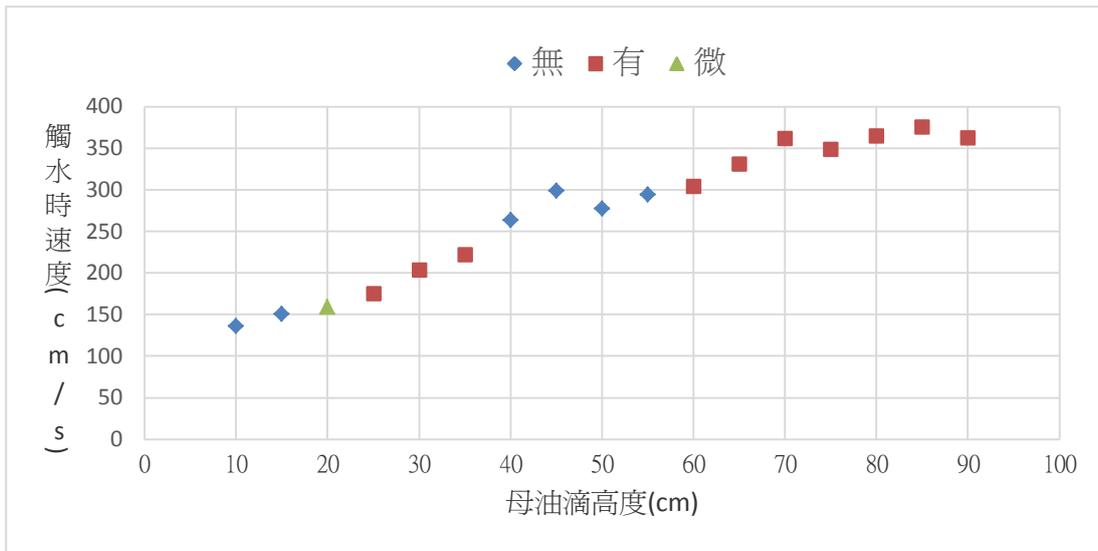
一、實驗一：觀測大油滴在哪個高度可穿透水面（水溫度約 21.6°C）。

(一) 大油滴的平均體積與質量：

滴數	重量(公克)	體積(毫升)
300	9.6	10.68
平均每滴	0.032	0.356

(表一)

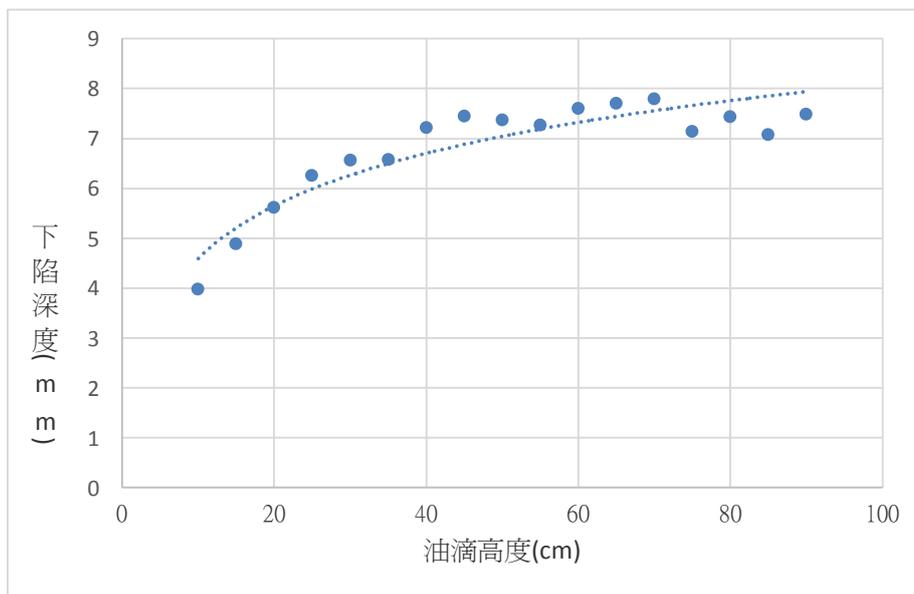
(二) 母油滴高度與母油滴接觸水面的速率關係：



(圖一)

從圖一可看出隨著油滴高度的增加，觸水速度亦增加，但油滴高度在超過70公分左右，觸水速度會達到一個極限值（終端速度）。

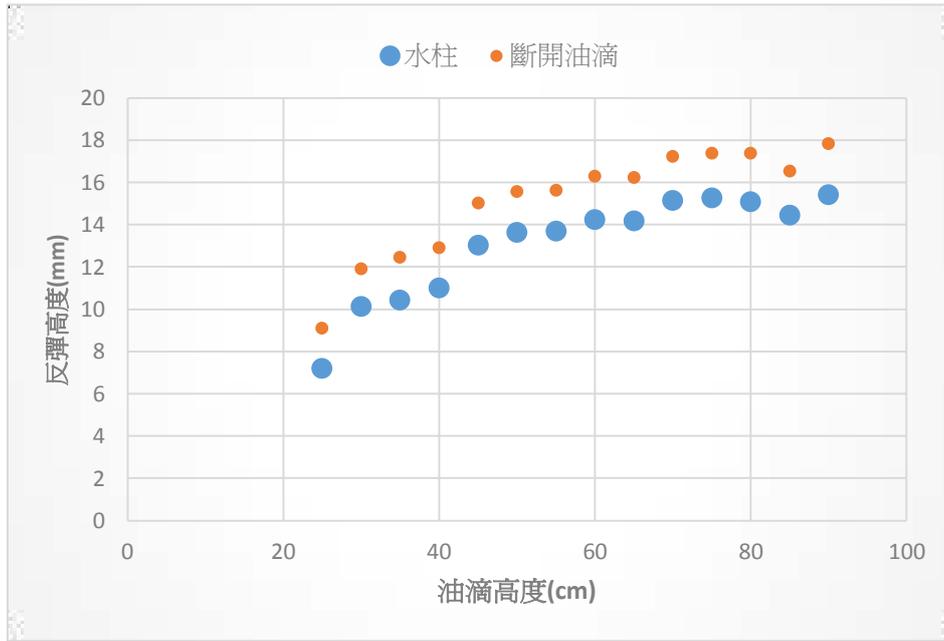
(三) 母油滴高度與碰撞液面下陷深度的關係：



(圖二)

圖中水面下陷的深度隨油滴高度有增加的趨勢，不過隨著距油滴高度的增加，下陷深度的改變有平緩的現象。

(四) 母油滴高度與液柱反彈的高度：



(圖三)

圖中液柱反彈高度與斷開油滴的高度隨油滴高度增加而增加，但趨於一個極限值。

(五) 油滴高度與油滴穿透水面的關係。

油滴高度 cm	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
子油滴有無穿透液面	無	無	微	有	有	有	無	無	無	無	有	有	有	有	有	有	有

(表二)

(註)

- 1.無：全部觀測皆無穿透現象發生。
- 2.微：部分觀測有穿透現象發生。
- 3.有：全部觀測皆有穿透現象發生。

二、實驗二：水溫對表面張力的影響與油滴可穿透液面的最低高度。

溫度	表面張力(dyne/cm)	穿透所需最低高度(cm)
20°C	70.18	25.0
60°C	68.34	25.0

(表三)

三、實驗三：水中加入清潔劑(水溫 20°C)。

	表面張力(dyne/cm)	穿透所需最低高度(cm)
水	70.18	25.0
水+清潔劑 100:1	24.01	18.0
水+清潔劑 100:2	20.20	17.0

(表四)

四、實驗四：比較大、小油滴可穿透水面的高度。(小油滴體積為 0.029ml、質量 0.0275g)

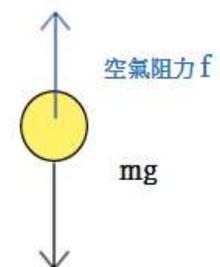
高度	小油滴	大油滴
10cm	無	無
15cm	無	無
20cm	無	微
25cm	微	有
30cm	有	有
35cm	有	有
40cm	有	無
45cm	微	無
50cm	微	無
55cm	無	無
60cm	無	有
65cm	無	有
70cm	無	有
75cm	無	有
80cm	無	有
85cm	無	有
90cm	無	有

(表五)

陸、討論

一、終端速度：

由圖一所示的母油滴高度與觸水速度關係，我們發現隨母油滴高度的增加，油滴觸水速度亦增加，但母油滴高度達到 70 公分左右後，油滴觸水速度幾乎不增加而趨向某一數值(終端速度)；推論是因為母油滴落下時，空氣阻力隨著速度的增加而加大，最終油滴受重力與空氣阻力作用達到平衡，而有終端速度出現。



二、子油滴穿透液面的條件：

(一)由觀察的結果，我們推論影響油滴在二次入水是否能穿透水面的條件如下：

油滴二次觸水時液面振盪方向。

(1)向下。

(2)向上，但向上水流的能量需足以將油滴撞開。

一、實驗分析原理：

(一) 碰撞的能量變化：

1. 撞擊前能量：

以 tracker 計算出油滴接觸水面速度的近似值後帶入動能公式 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$

計算出碰撞前油滴的動能。

2. 撞擊後能量：

利用下面(1)到(4)的式子算出：水面下陷之表面能的變化、水面反彈之油滴、液柱重力位能的變化。

(1)下陷排開的水量 (V)：

(假設下陷最深處時排開的水為剖半的橢球體以方便計算)

$$V = \frac{1}{2} \left(\frac{4}{3} \pi \times r_1 \times r_2 \times r_2 \right)$$

(r_1 ：下陷最深深度)

(r_2 ：下陷最深時寬度的 $\frac{1}{2}$)

(2)表面能的改變量 U_1 ：

$$U_1 = T \times \Delta A = T \left\{ \frac{1}{2} \times \frac{[4\pi(r_1 \times r_2 + r_2 \times r_2 + r_1 \times r_2)]}{3} - \pi r_2^2 \right\}$$

(T：表面張力)

(ΔA ：表面積改變量)

(3)油滴重力位能 U_2 ：

$$U_2 = \left(\frac{4}{3}\pi r_3^3\right) \times \rho_{\text{油}} g h_1$$

(r_3 ：油滴半徑)

(ρ ：油滴密度)

(h_1 ：球心距水面)

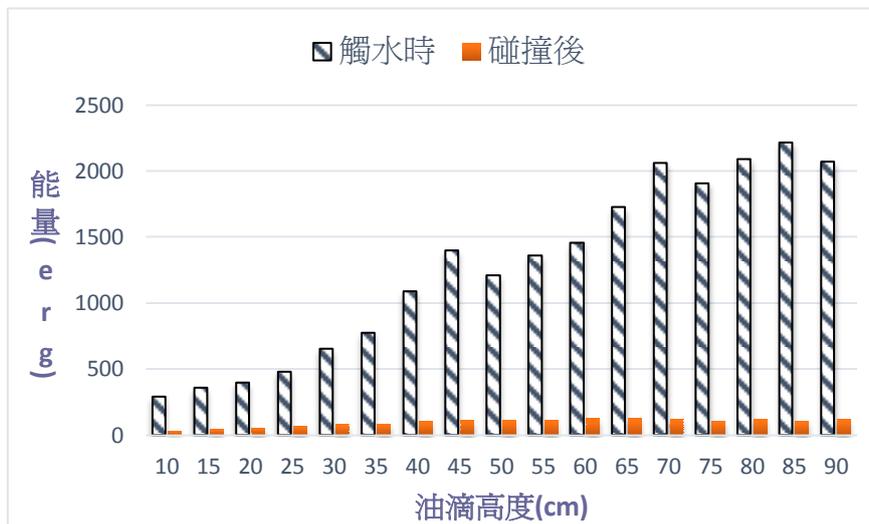
(4)水柱重力位能 U_3 ：

$$U_3 = \rho_{\text{水}}(\pi r_4^2 \times h_2) \times \frac{h_2}{2}$$

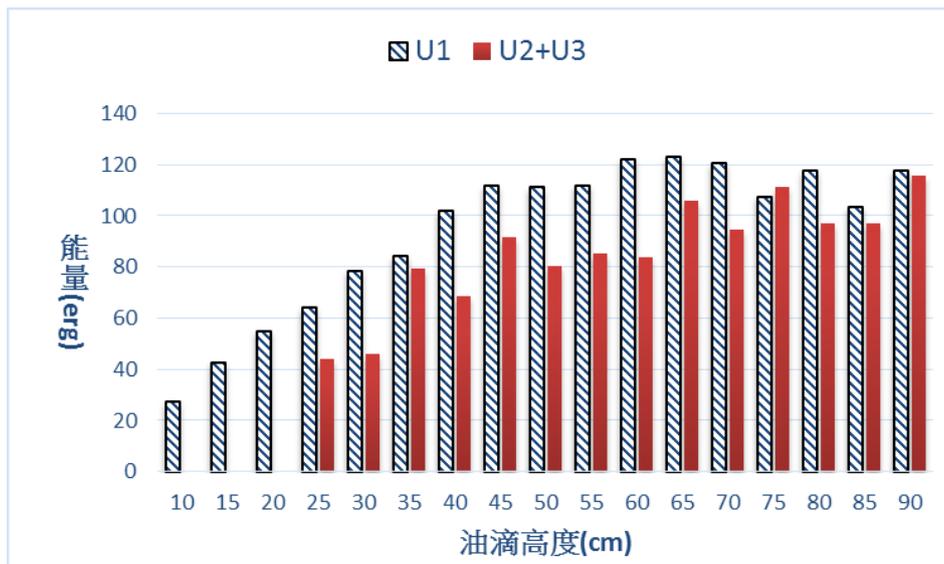
(r_4 ：水柱半徑)

(ρ ：水密度)

(h_2 ：液柱高)



(圖四) 母油滴接觸水面時的動能與碰撞液面後液面的表面能的改變量(U_1)



(圖五) 碰撞液面後液面的表面能的改變量與〔拉起液柱位能+子油滴位能〕

在第一階段分析影片時，我們發現母油滴距水面 25cm 以上可產生穿透現象，但在 40cm ~ 55cm 這個區段卻不行。原先推測是因為液面振動的影響而在 40cm ~ 55cm 區段中，反彈的子油滴在二次落水時與震盪的液面互相抵消，導致子油滴無法穿透(如圖六所示)，不過 60cm 以上也有落下的子油滴與震盪的液面互相衝撞的現象，於是我們挑 30cm 與 80cm 高度的穿透進行不同角度的多次拍攝，並進行比較。



(圖六)

我們將拍攝方式改為由下往上（能呈現完整入水過程），發現母油滴的高度在 30cm 與 80cm 雖然都會穿透液面，但不同的是在 30cm 所彈起的子油滴與液面再次接觸時，液面的振動方向是向下的(如圖七所示)；而在 80cm 所彈起的子油滴與液面再次接觸時，液面的振動方向雖然是向上的，但落下的子油滴卻被向上震盪的液面撞裂成穿透液面的較小油滴(如圖八所示)。



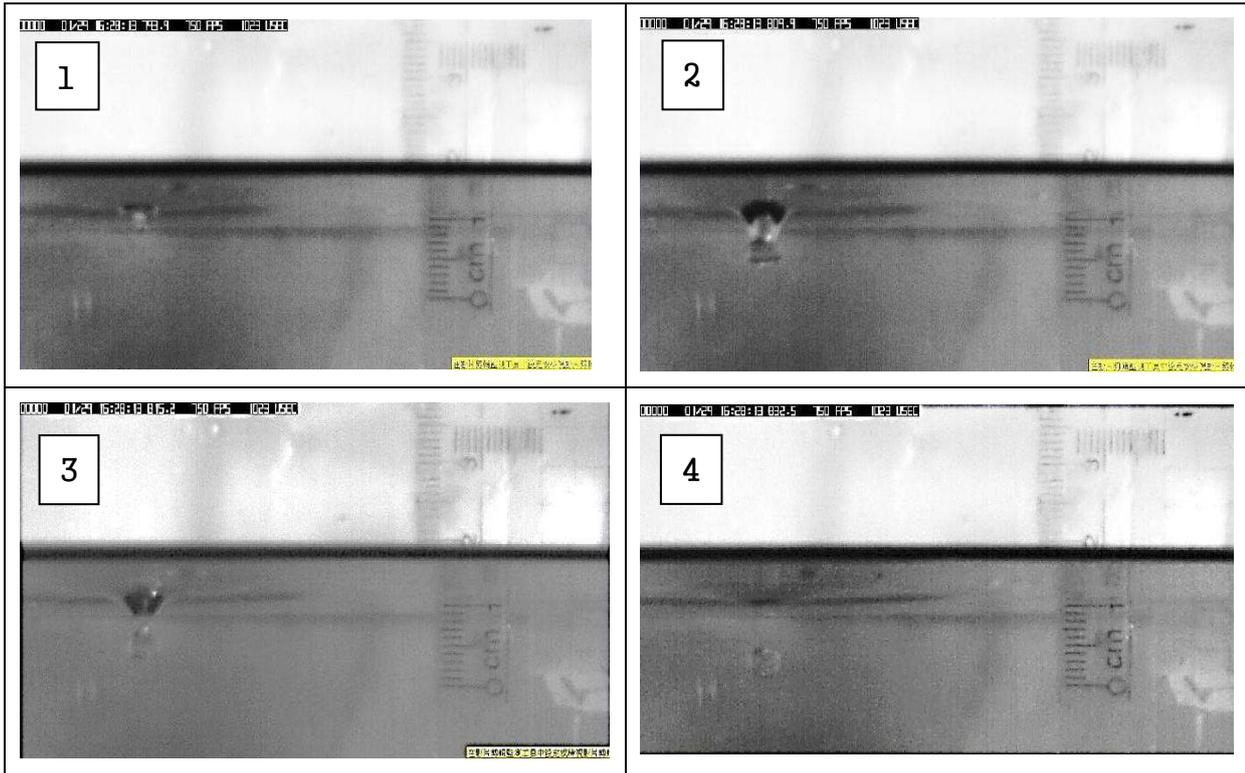
(圖七)



(圖八)

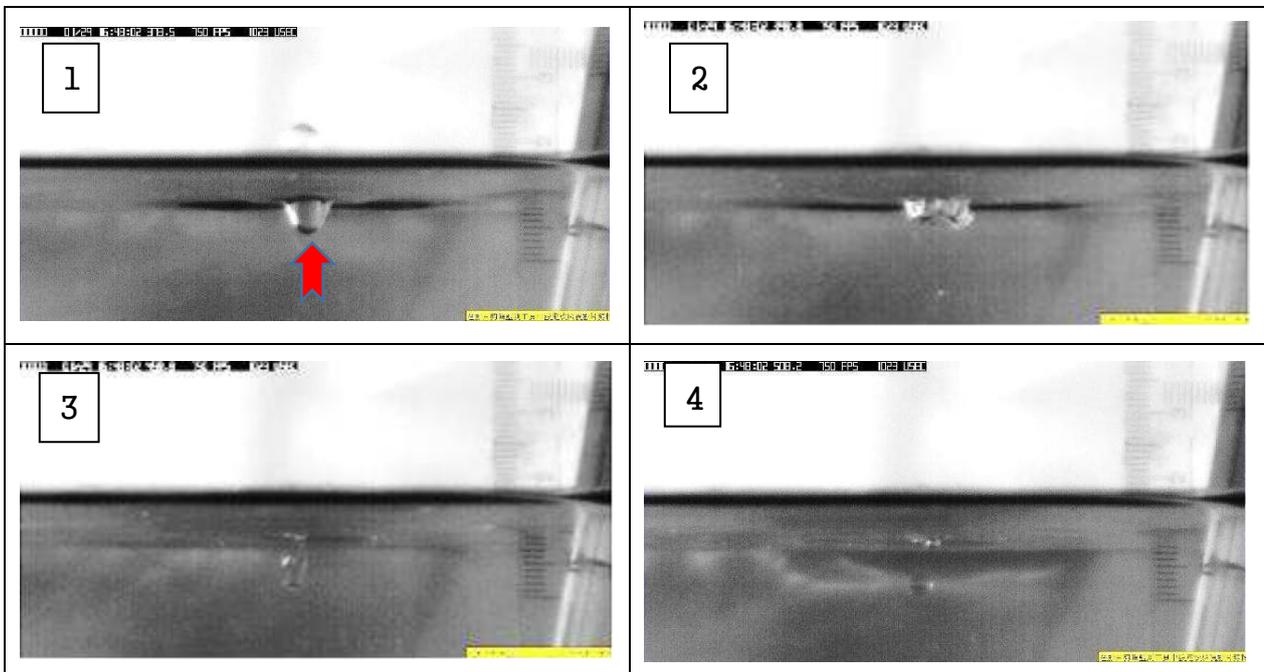
我們推測母油滴在 60cm 以上的高度落下觸水時所造成液面的振盪方向對子油滴能否穿透液面有很大的影響，因被撞成碎塊的小油滴之表面積變小，故突破液面表面張力所需的能量也跟著變小，而母油滴落下所釋放的能量，使得液面產生較劇烈的震盪，而讓撞成碎塊的小油滴能輕易的穿透液面。在 40cm~55cm 的高度，則因為衝擊的能量較 60cm 以上小，所以並沒有將子油滴撞裂，故與液面互相衝撞後並無穿透現象的發生。

➤ 母油滴高度為 30cm



(圖七的實際過程圖片)

➤ 母油滴高度為 80cm



(圖八的實際過程圖片)

二、實驗二與實驗三-表面張力：

經過實驗一的分析之後，我們得知液面的震盪對落下的子油滴是否穿透液面的影響很大，所以爲了減少液面震盪的影響，我們在實驗二與實驗四中只找能穿透液面的母油滴之最低高度。

一開始我們改變水溫(60°C)來觀察表面張力對子油滴穿透液面是否有影響(實驗二)，但因結果與室溫下(約 20°C)所測出來的結果沒有差別，於是我們改以在水中加入清潔劑，讓表面張力變成 20°C 水的 1/3 左右(60°C 水的表面張力約是 20°C 水的 97%)，而實驗四的結果顯示，表面張力越弱，穿透現象越容易發生；至於實驗二的結果，我們推測只是因爲表面張力的變化較小，而我們測試的高度間距太大(1cm 爲單位)，所以測出的數值無法精確比較。

三、實驗四-以能量觀點預測小油滴是否可穿透水面：

我們以理論值進行預測，並將實驗四與實驗一進行比較後(由實驗二的結果，且兩次測試實驗時的溫度相近，於是我們忽略兩者的溫差)，發現雖然小油滴穿透液面所需的最低速率比大油滴來得高，但若將其以動能換算下來，則兩者穿透所需最低動能差距不大；而與預測中不同的是小油滴在另一預測點(70cm 以上)沒有穿透液面的現象發生，我們認爲可能原因爲下列兩項：

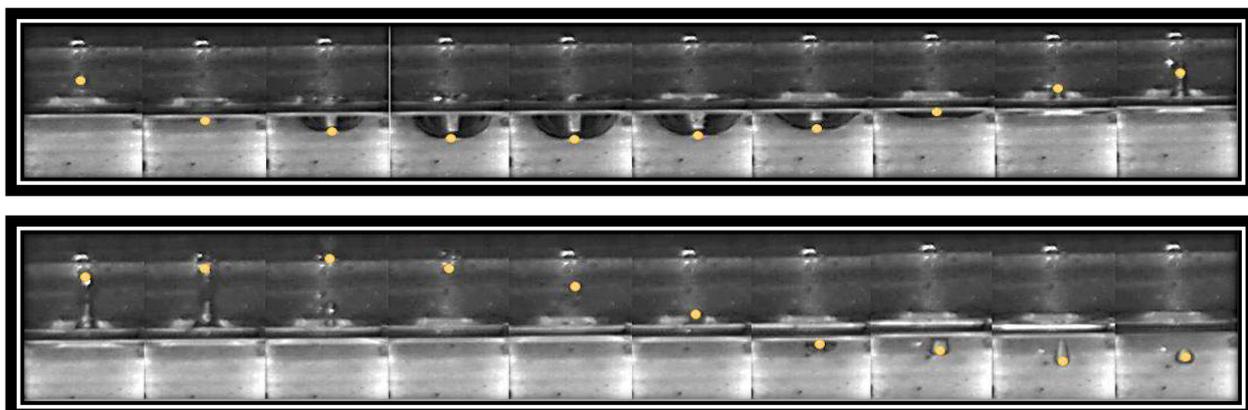
(一)小油滴比大油滴不易被液柱造成的液面震盪所撞裂。

(二)因受空氣阻力的影響，小油滴的觸水動能無法使液面產生足夠的震盪，使二次觸水的子油滴被液面撞散。

四、整體穿透過程的討論：

落下的母油滴與靜止的水面接觸時，衝擊力使水面撞出了一個凹洞，因表面張力作用使液面如同一層彈性膜般，將兩著接觸面積拉展到最大。當衝擊能量漸漸被水吸收後，凹陷處在水壓和表面張力作用下，使得凹洞寬度逐漸變小，最後彈出一條液柱。當液柱到達最高處時，因油本身的內聚力作用而與液柱分離後形成子油滴，斷落的液柱因表面張力的作用先行往下拉，使液面繼續來回震盪。當子油滴碰觸液面時，若液面的震盪方向爲向下，則子油滴

可穿透液面；若液面震盪方向為向上，則可能抵消子油滴落下的能量，此時子油滴無法穿透液面，或是將子油滴再撞裂，使碎裂的子油滴穿透液面。



五、實驗誤差的探討：

(一)油滴大小：我們無法將每滴油滴的大小做準確測量，只能以平均值來計算。

(二)長度測量：用 tracker 做測量時，因為我們使用的比例尺的最小間隔為 1mm 所以測量時會有誤差。

(三)觸水速率：我們算出的觸水速率是利用 tracker 將觸水前的兩影格相差距離帶入

$$v = \Delta x / \Delta t, \text{ 所以並非實際的觸水速率。}$$

六、介面性質影響油滴穿透液面與否：

我們嘗試以油性染料將油滴染色，發現除了反彈的子油滴外，拉起的液柱也有顏色的殘留（如圖九所示），我們猜測油滴碰觸液面時的介面性質（水是極性液體；油是非極性液體）是造成油滴為何只在第二次碰觸液面時會穿透，因為此時的液面是油水介面；但在第一次觸水時不會穿透，因為此時的液面是純水介面。



(圖九)

表面張力(dyne/cm)	
20°C 水	70.18
油水介面	68.17
單純油	51.21

(表七)

柒、結論

一、依據實驗與觀察的結果，我們推論最主要影響油滴在二次觸水時是否能穿透液面的條件如下：

(一)子油滴的產生：觸水後彈起的油滴必與液柱分開。

(二)液面的振盪方向：

1. 子油滴接觸液面時，液面的震盪方向為向下。

2. 子油滴接觸液面時，液面的震盪方向為向上，但震盪的能量需足以將子油滴撞裂。

二、影響油滴穿透液面的最低高度之因素：

(一)油滴大小：油滴質量與空氣阻力影響母油滴觸水時動能，進而影響穿透液面所需的高度。

(二)表面張力：表面張力越弱，穿透液面所需的最低高度越低。

捌、未來展望

一、子油滴能否穿透液面：

我們希望在未來能找出一個數學關係式，代入表面張力、油滴大小、觸水時速率等數據後能直接預測油滴是否能穿透。

二、解釋為何油滴只會在第二次觸水時穿透進入液面：

深入研究介面極性影響油滴穿透液面的難易度，且試著以理論來進行解釋。

玖、參考資料及其他

- 1.第四十七屆科展作品 < 當我們撞在一起-液體碰撞 >
- 2.第五十一屆科展作品 < 「液表」人才-同性相吸，異性相斥 >
- 3.小峯龍男 - <流體力學 >
- 4.表面張力 - 普通物理實驗室

http://experiment.phys.nchu.edu.tw/EZphysics/ex_h/ex_h.pdf

【評語】 040116

作品中提及本作品係使用高速攝影機重複做以前學長的科展作品時的物理現象，在作品創意部分略顯不足，也未交代與前人作品之差異性，整件作品量測資料透過高速攝影機的呈現，不論在量測數據與資料呈現方面皆相當完備，充分展現科展的精神。惟作品中針對物理現象的解釋僅屬現象推論的解說，並無物理原理的定量論述與推導，若能強化理論分析與計算，將可使整件作品更加完備。