

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

第三名

051812

剛體和液滴穿透皂膜的探討

學校名稱：國立臺南第一高級中學

作者： 高二 蔡秉勳 高二 翁瑋襄	指導老師： 劉演文 詹雅婷
-------------------------	---------------------

關鍵詞：分光光度計、臨界動量、螢光測試

摘要

本研究要探討物體在穿透皂膜過程中，皂膜在被衝擊變形後又能回復原狀，此過程中若物體和皂膜之間出現物質成份交換，其影響變因及可能機制各為何。

實驗中以鋼珠、水滴、皂滴和油滴這四種表面性質不同物體穿透皂膜，並以高速攝影記錄物體在穿透期間皂膜變形及物體軌跡。液滴體積可用微量滴管精確控制；液滴穿透染色皂膜後其成份變化，可由分光光度計的分析結果推算。

實驗結果發現促使皂膜破裂的「臨界動量」與入射鋼珠截面積成正比。此外，鋼珠和水滴穿透皂膜時機制較單純，皆被一層皂膜包覆後落下；皂滴和油滴在穿透皂膜時的機制較複雜，因而帶出更多皂液。希望本研究使用的光色分析技術及最終提出的交互作用模型，將來在生物科技領域上有所應用。

壹、研究動機

有一次在跟鄰居家的小朋友玩吹泡泡的遊戲時，小朋友突發奇想，想比看看誰吹的泡泡比較堅固，所以就拿石頭丟剛吹出來的泡泡，原本預期泡泡在石頭碰到的那刻會破掉，但是出乎意料地，泡泡有時候在小石子穿過去之後，自己「癒合」了，這引發了我的疑問，除了運氣成分外，可不可以用科學方法分析呢？

上網查了一下泡泡膜（本研究將稱之為「皂膜」）的相關資料，發現其結構與生物的細胞膜竟十分相似，這讓我聯想到生物學上的「胞吞」現象，是否當小石子穿過皂膜的時候，我們也可以用同樣的模型來描述這個現象呢？後來到實驗室做了基本的測試，發現剛體（如鋼珠、小石子）穿過皂膜，在不同的高度範圍，會觸發不同的機制，皂膜有可能是「癒合」（如圖 1），也有可能是破裂。經由統計的方法分析，發現這其實是有規則的，甚至可以由實驗數據，推得簡單的公式，以描述這個現象。

剛體的規則似乎蠻單純的，那像皂滴（就是吹泡泡用的液滴）或水滴這些種類液滴呢？是否各種液滴裡面的分子會和皂膜，先有什麼不同的交互作用，甚至有「物質交換」，再穿過呢？抑或就如同剛體一樣，皂膜只是包覆了一層上去呢？有沒有可能各種變因（包括體積、釋放高度）的調整，會觸發不同的機制，產生出乎意料之外的結果？本研究希望能深入探討皂膜與其他物體的交互作用，並歸納出一些趨勢，以期能拓展到實際應用，甚至跟細胞膜的結構理論結合，以發展新的生物技術。

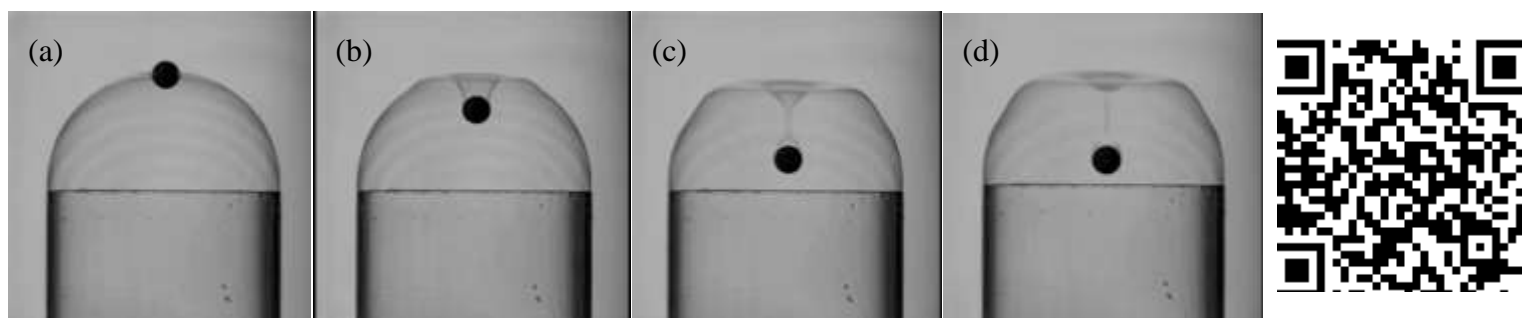


圖 1：鋼珠穿透後皂膜的「癒合」（影片取自 Self Healing Soap Films, <https://www.youtube.com/watch?v=5ThEyeh6z7g>）

貳、研究目的

一、文獻探討

(一) 皂膜的癒合 (self-healing)

如圖 1，關於鋼珠穿透皂膜，而皂膜自己「癒合」的實驗，如圖 1 (a)：鋼珠與皂膜接觸。如圖 1 (b)：皂膜變形，但是持續包覆著鋼珠。如圖 1 (c)：表面張力使得中間的氣柱部分趨向收縮，而根據拉普拉斯--楊格方程 $\Delta P = \sigma\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$ ，較細處（即曲率半徑較小）的內部氣壓（大氣壓力加上 ΔP ）較大，空氣往兩側流動，細處愈細，直到那部分斷裂。如圖 1 (d)：皂膜達到癒合，而鋼珠表面則保留一層皂液。這個過程中，主導的因素就是皂膜的表面張力。

(二) 皂膜與細胞膜的結構

參考皂膜結構圖（如圖 2），可以看到肥皂分子排列在皂膜的表面，其兩端分別是長鍊的部分有疏水性（或稱為親油端），圓球部分有親水性，方向為親油端朝外，而親水端則一直朝內，將水溶液包在裡面，可以有效抑制水溶液中水的蒸發。膜的平均厚度約數十奈米到數千奈米。

細胞膜的結構（如圖 3）跟皂膜相似，但是親水端是朝外，原因是因為生物體內大部分是處在水溶液的狀態。而當一物質要通過細胞膜的時候，物質會先被細胞膜包住，形成一個由雙層磷脂質包起來的微泡，再進入細胞，這個過程稱為「胞吞作用」（如圖 4）。

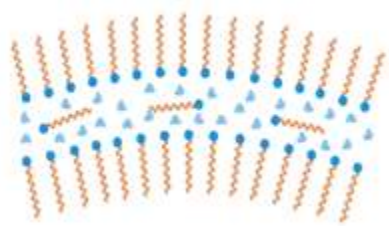


圖 2：皂膜結構圖

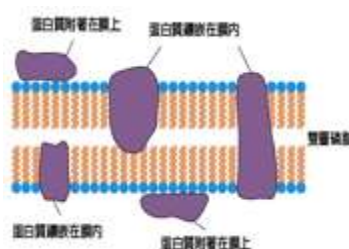


圖 3：細胞膜結構圖

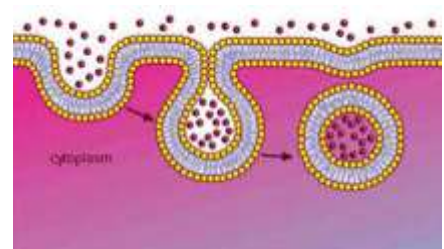


圖 4：胞吞作用

二、實驗設計

- (一) 探討各種大小的鋼珠穿透皂膜時，在各個不同初始釋放高度的結果有何不同。在明確定義「臨界高度」的前提下，用適當的方法，找尋不同的鋼珠對不同的皂液的臨界高度，並利用多個皂液來源，以確認皂膜的來源如何影響此實驗觀察的結果。本實驗操縱變因：鋼珠直徑、質量、釋放高度、皂膜來源。
- (二) 探討不同體積的皂滴自不同高度釋放而穿透皂膜時，將帶走多少量的皂膜和色素，

配合高速攝影所拍攝的影片，提出一個皂滴穿透皂膜的模型。本實驗操縱變因：皂滴體積、釋放高度。控制變因：色素濃度、皂液來源

(三) 探討單一體積的水滴在不同高度將帶走多少量的皂膜和色素，配合高速攝影所拍攝的影片，提出一個當水滴穿過皂膜的模型。本實驗操縱變因：釋放高度。控制變因：色素濃度、皂液來源、水滴體積。

(四) 探討單一體積油滴穿透皂膜時的情形，在不同高度將帶走多少量的皂膜和色素，並搭配高速攝影所拍攝的影片，與皂滴實驗和水滴實驗做比較。本實驗操縱變因：釋放高度。控制變因：色素濃度、皂液來源、油滴體積。

(五) 探討不同模型的正確性，利用產生螢光的機制，進行本子實驗。本實驗操縱變因：液滴種類。

參、研究設備與器材

一、微量滴管（如表 1 圖(a)）

型號：Dragon-Laboratory 的 100-1000 μL 、10-100 μL 、2-20 μL

用途：

利用 2-20 μL 微量滴管，裝上剪過前端的 tip，可以形成 10-16 μL 的液滴。（之所以 tip 的前端要剪掉，是因為假如沒剪掉的話，在尚未排開指定的體積時，液體便已滴出。而將前端剪開，則可增加滴管口的周長，而提供更多的液體表面張力以支撐更重的液滴。）

在製作檢量線時，含有紅色色素的皂液要用 10-100 μL 微量滴管來提取，而用澄清皂液稀釋時，則利用 100-1000 μL 微量滴管。

另一個用途是要測量微小的體積，方法是以固定體積的微量滴管將分光管內的液體移到另一個分光管，持續這個動作，期間可以調整微量滴管吸上來的體積，直到原分光管內的體積被吸完，把前面用來吸原分光管內的液體的微量滴管體積，全部加起來，就是待測液體的體積。（例如：待測液體在分光管 A 中，用微量滴管吸 A 中的液體吸取 1000 μL 兩次，100 μL 三次，並移轉到分光管 B 中（後續拿來分析），則這樣的體積就是 $1000*2 + 100*3=2300 \mu\text{L}$ ）

二、分光管（如表 1 圖(b)）

用途：

盛裝液體體積約 3500 μL （放入分光光度計，因裝入的液體體積若過多，則實驗時液滴可能溢出，過少則無法以分光光度計測量吸收度）。

分光管的四個側面，分為亮面以及粗糙面，粗糙面是用來手拿的，亮面則是在放入分光光度計時，讓光透過去的那一面。

主要功能是收集色素濃度未知的皂液（或皂液與水混合的液體）放入分光光度計，測得各波長的光的吸收度，加上先前做出的檢量線，我們可以換算得此皂液的色素濃度。

三、分光光度計（如表 1 圖(d)）

型號：Hitachi U-2900 Spectrophotometer

用途：測量液體在波長 191-1100 nm 的光之下的吸收度 ABS（定義 $ABS = -\log(\text{穿透度})$ ）。本研究中將用以分析皂液中的色素濃度：首先將兩份澄清液放入前後槽，跑一次 baseline 後，再跑一次 measure，當特定波長（本研究主要是 500-520 nm）的 ABS 皆顯示為 0.000，即可在前槽（靠近使用者的那個槽）放入待測液體進行測量。

四、皂液（如表 1 圖(c)）

型號：分為自製（水：洗碗精：洗髮精：甘油：膠水 = 3:2:1:1:1）以及罐裝的泡泡液（Jin Shuangxi Toys）

用途：利用微量滴管吸取不同體積的皂液，以形成特定體積的皂滴。配合金屬圓環製造皂膜。

五、礦物油（如表 1 圖(j)）

用途：用於製造油滴，選擇礦物油，是因為一般市面上的食用油都有顏色，而分光光度計較適合分析澄清的液體（參考液體），此外礦物油的成分也較單純。

六、攝影機（如表 1 圖(e)）

型號：Casio EX-F1

用途：拍攝物體（鋼珠與各種液滴）穿透皂膜的過程，有 1200 fps、600 fps。

七、光電計時器（如表 1 圖(f)）

用途：具可吸附鋼珠的電磁鐵便以確定鋼珠釋放高度，避免因人手持所造成的誤差。

八、金屬圓環（如表 1 圖(g)）

用途：附有支架，本研究利用此圓環產生穩定的皂膜。

九、紅色色素（如表 1 圖(h)）



型號：水溶性、一般用於白板筆

用途：滴入澄清皂液使其有顏色，方便標定。本研究定義之色素濃度為 150 mL 的澄清皂液加入 500 μL 的紅色色素後，均勻混合，取 X μL ，加入分光管，並加入澄清皂液至 3500 μL ，將此溶液的濃度定義為 X ($\mu\text{L}/3500\mu\text{L}$)。

十、Tracker 4.87（如表 1 圖(i)）

用途：分析鋼珠和液滴掉落過程的速度，以及穿透皂膜時的情形。

表 1：研究設備與器材圖表

		
<p>圖(a) 微量滴管</p>	<p>圖(b) 分光管</p>	<p>圖(c) 皂液 (罐裝)</p>
		
<p>圖(d) 分光光度計</p>		
		
<p>圖(e) 攝影機</p>	<p>圖(f) 光電計時器 (電磁鐵部分)</p>	<p>圖(g) 金屬圓環</p>
		
<p>圖(h) 紅色色素</p>	<p>圖(i) Tracker 4.87</p>	<p>圖(j) 礦物油</p>

肆、研究方法與結果

一、鋼珠實驗

(一) 實驗方法

當鋼珠穿透皂膜時，兩個可能的結果，就是皂膜破或不破。此部分實驗是要觀察皂膜受到多大的衝擊時才會破掉。因為實驗中，皆有控制使鋼珠恰好穿透皂膜的正中央，所以可忽略邊際效應。又，本實驗進行時，因為鋼珠下落的高度都在一公尺左右，因此也可合理地忽略空氣阻力的影響。

另外，皂膜則有「自製皂液」和「玩具商的皂液」兩種來源。本實驗中定義的「臨界高度」是指皂膜剛產生，以鋼珠下落而穿透時能使皂膜破掉的最低釋放高度。

鋼珠實驗裝置圖如圖 5，其中，釋放器是為了避免鋼珠釋放的時候，實驗人員手持不穩造成干擾，因此借用光電計時器的電磁鐵吸附鋼珠，調整好高度，釋放的按鈕就在光電計時器上。

在做實驗時，若鋼珠以同一釋放高度穿透皂膜，但皂膜有時破有時不破，那則認為此高度是低於臨界高度，這是因為有許多因素可能導致皂膜破裂，故只要有出現任一次皂膜不破裂的狀況，即表示這樣的衝擊不足以破壞皂膜，因此只有在任何時候更大高度釋放的鋼珠皆能穿破皂膜的狀況下，才能算是本實驗所求的臨界高度。

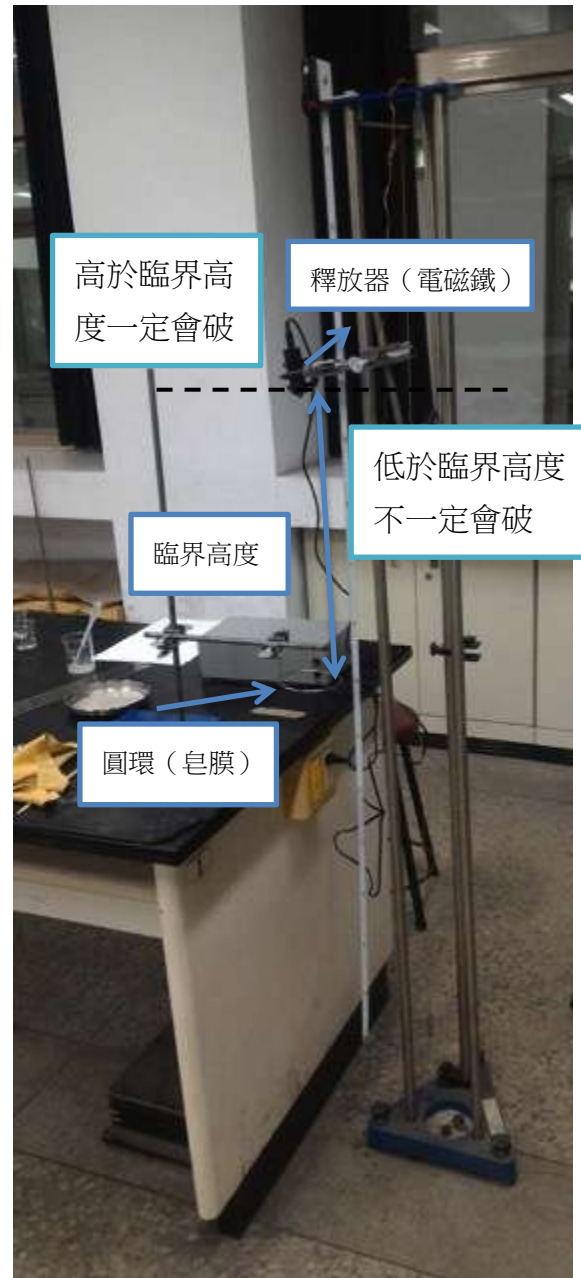


圖 5：鋼珠實驗裝置圖

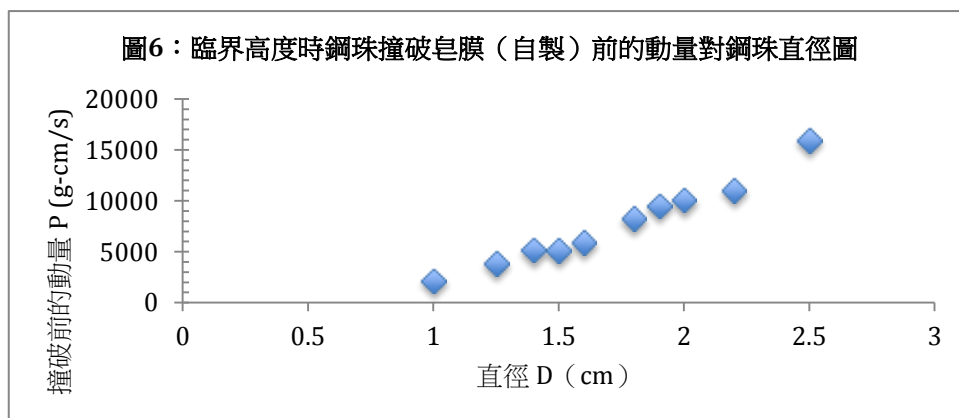
(二) 實驗結果

1. 自製皂液

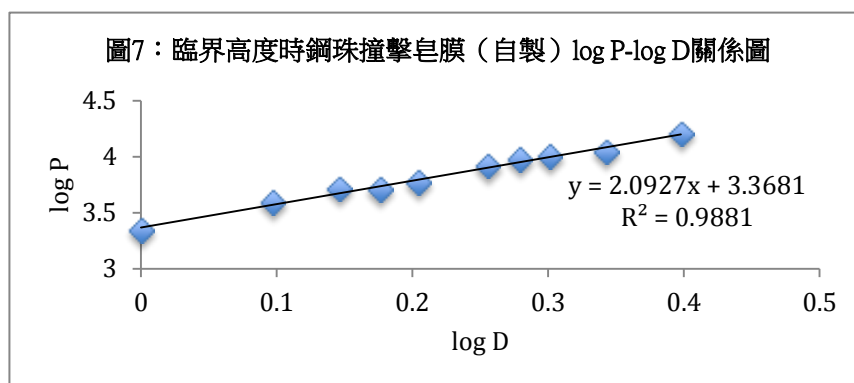
表 2：不同大小鋼珠對皂膜（自製）的臨界高度以及撞擊前的鋼珠動量表

直徑 D (cm)	質量 m (g)	臨界高度 h (cm)	撞擊前的動量 P (g-cm/s)
1.0	4.05	150	2195.98
1.25	8.34	112	3907.54
1.4	11.91	97	5193.09
1.5	13.76	71	5133.05
1.6	16.34	67	5921.31
1.8	23.77	62	8286.16
1.9	28.27	58	9531.64
2.0	32.67	49	10124.54
2.2	44.89	31	11065.18
2.5	67.05	29	15985.48

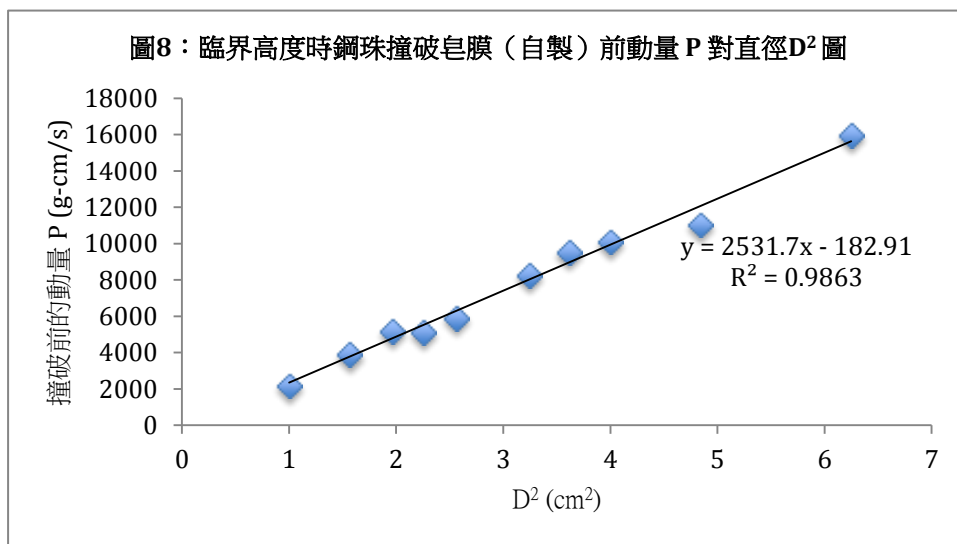
備註：鋼珠下落時，可忽略空氣阻力，撞擊時的速度 $v = \sqrt{2gh}$ ，又動量 $P = mv$



備註：撞擊前的動量與直徑有正相關，但是仍須藉由取對數，才能看出次方關係



備註：斜率接近正整數 2，因此又作了一個 P 對 D^2 圖（如圖 8）



備註：如圖 7，P 應與 D² 成正比，所以此圖的截距應為誤差

$$P = mv = \left(\frac{1}{6}\rho\pi D^3\right) \times \sqrt{2gh} \propto D^2 \quad D\sqrt{h} = \text{const.}$$

表 3：鋼珠撞破皂膜（自製）直徑 D 與臨界高度 h 關係表

直徑 D (cm)	$D\sqrt{h}$ (cm ^{1.5})	直徑 D (cm)	$D\sqrt{h}$ (cm ^{1.5})
1.0	12.25	1.8	14.17
1.25	13.23	1.9	14.47
1.4	13.79	2.0	14.00
1.5	12.64	2.2	12.25
1.6	13.10	2.5	13.46

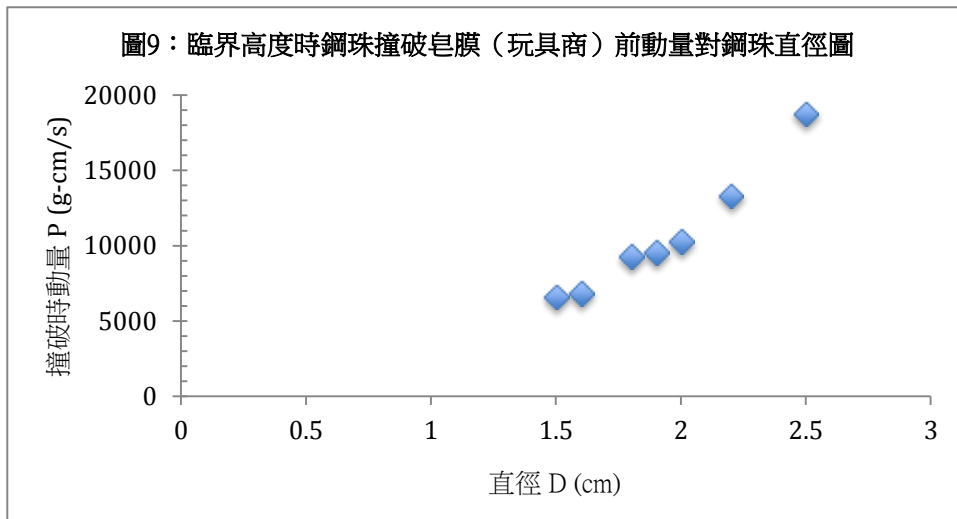
備註： $D\sqrt{h}$ 平均值是 13.34 ± 0.24 ，統計誤差在 1.8% 以內

2. 玩具商的皂液

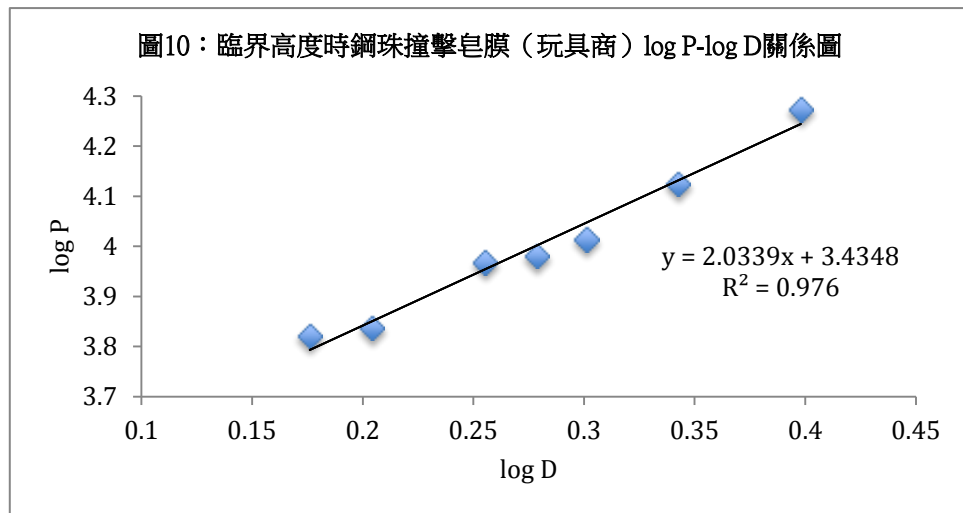
表 4：不同大小鋼珠對皂膜（玩具商）的臨界高度以及撞擊前的動量表

直徑 D (cm)	質量 m (g)	臨界高度 h (cm)	撞擊時動量 P (g-cm/s)
1.5	13.76	119	6631.41
1.6	16.34	91	6881.84
1.8	23.77	78	9294.04
1.9	28.27	59	9572.64
2.0	32.67	51	10329.09
2.2	44.89	45	13331.65
2.5	67.05	40	18774.00

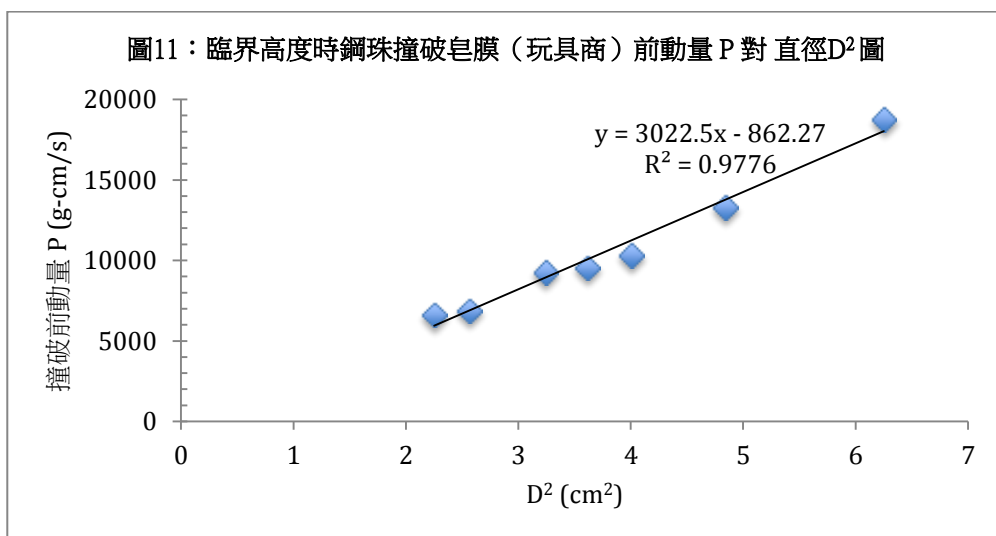
備註：鋼珠下落時，可忽略空氣阻力，撞擊時的速度 $v = \sqrt{2gh}$ ，又動量 $P = mv$



備註：撞擊前的動量與直徑有正相關，但是仍須藉由取對數，才能看出次方關係



備註：斜率接近正整數 2，因此又作了一個 P 對 D^2 圖（如圖 11）



備註：根據圖 10，P 應與 D^2 成正比，所以此圖的截距應為誤差

表 5：鋼珠撞破皂膜（玩具商）直徑 D 與臨界高度 h 關係表

直徑 D (cm)	$D\sqrt{h}$ ($\text{cm}^{1.5}$)	直徑 D (cm)	$D\sqrt{h}$ ($\text{cm}^{1.5}$)
1.5	16.33	2.0	14.28
1.6	15.22	2.2	14.76
1.8	15.90	2.5	15.81
1.9	14.53		

備註： $D\sqrt{h}$ 平均值是 15.26 ± 0.23 ，統計誤差在 1.5% 以內

二、 皂滴實驗

(一) 實驗方法

本部分實驗主要是探討皂滴穿過含有紅色色素的皂膜的情形，主要操縱變因有皂滴大小及釋放高度，而應變變因則是皂滴帶走的體積量和帶走的色素量。

本實驗要先製作檢量線，而所使用的皂液皆來自玩具商（因為有標準配方），皂膜的成分則是用 0.5 mL 紅色色素加入 150 mL 澄清皂液均勻混合。

在放入分光光度計分析前，需將收集到的液體統一稀釋到 3500 μL ，原因是在不影響分光光度計的分析條件下，分光管所需的最少體積，就是 3500 μL 。

另外，本實驗所使用的「色素濃度」，定義請參見「參、研究設備及器材 -- 九、紅色色素」。產生液滴的方法，是利用微量滴管的前端，相關的原理，請參見「參、研究設備及器材 -- 一、微量滴管」。

滴的過程中，器材架設如下頁圖 12，而微量滴管先從澄清皂液（如下頁圖 14）吸取，形成一個皂滴懸空（如下頁圖 13），當微量滴管按到第二段時，液滴會落下，穿透含有色素的皂膜（如下頁圖 15），而落入乾淨的分光管。滴了數百滴之後，將收集到的一些粉紅皂液（如下頁圖 16）以微量滴管測量其體積，並稀釋到 3500 μL 後，置入分光光度計進行分析。

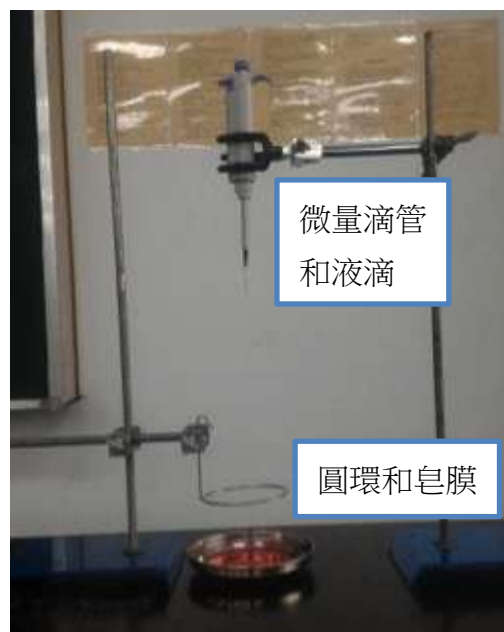


圖 12：皂滴實驗器材架設圖

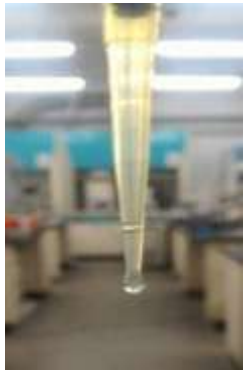


圖 13：液滴滯空



圖 14：澄清皂液



圖 15：含有色素的皂膜



圖 16：收集到的液體

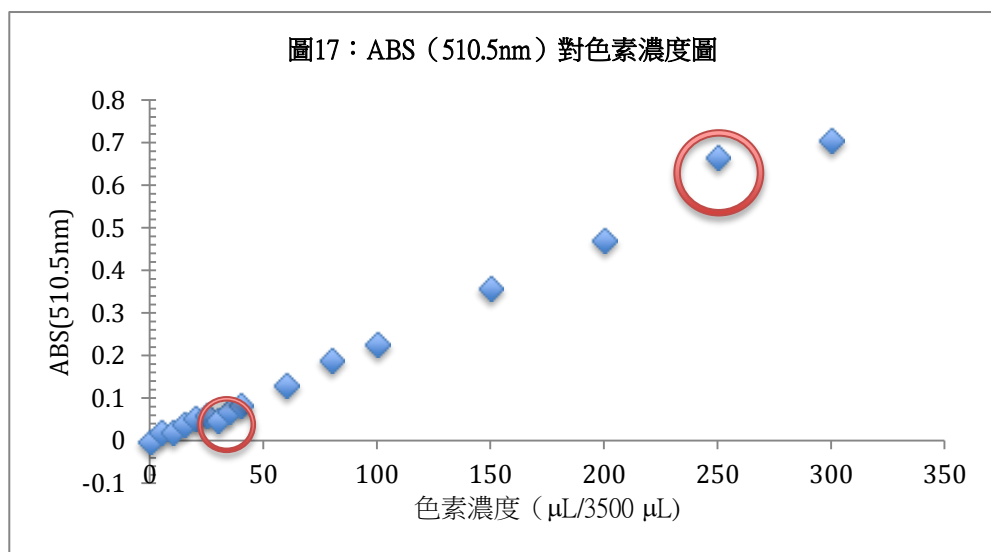
(二) 實驗結果

1. 檢量線的製作

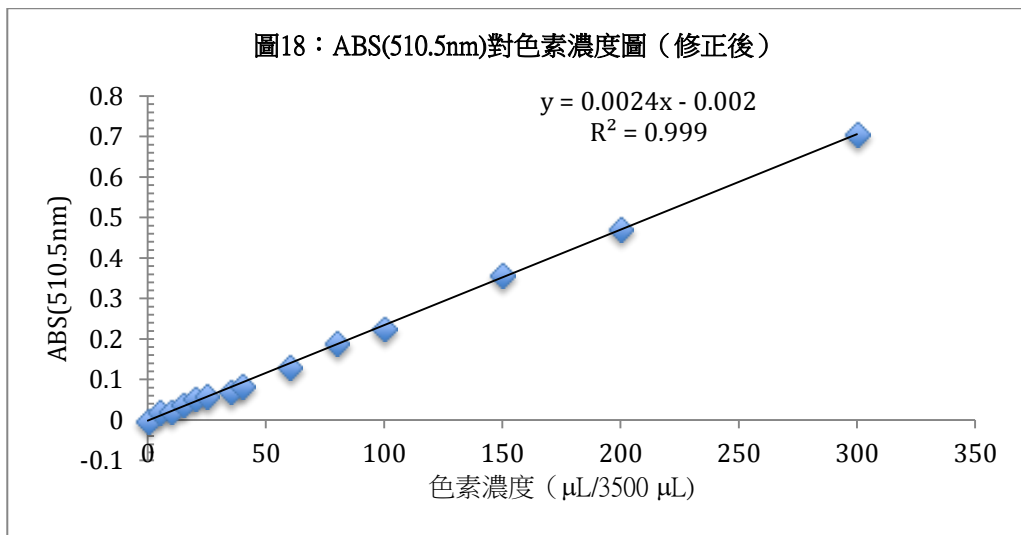
表 6：檢量線上各色素濃度對應之 ABS 值

色素濃度 ($\mu\text{L}/3500\mu\text{L}$)	ABS(510.5nm)	色素濃度 ($\mu\text{L}/3500\mu\text{L}$)	ABS(510.5nm)
0	-0.002	40	0.083
5	0.020	60	0.131
10	0.021	80	0.190
15	0.038	100	0.226
20	0.053	150	0.358
25	0.059	200	0.472
30	0.047	250	0.665
35	0.07	300	0.706

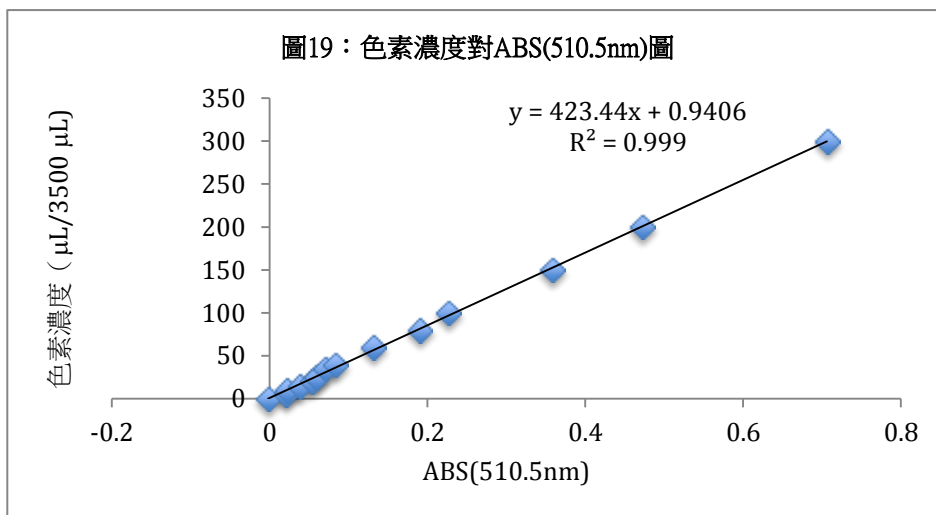
備註：隨著色素濃度的增加，吸收度 ABS 值再增加，符合 Beer Lambert's Law



備註：其中色素濃度 30 和 250 的點，明顯不符，在製作檢量線前，必須加以刪除修正



備註：R²達到 0.99895，此檢量線可採用，實驗時量得的數據是 ABS 值，還需另一個公式回推色素濃度



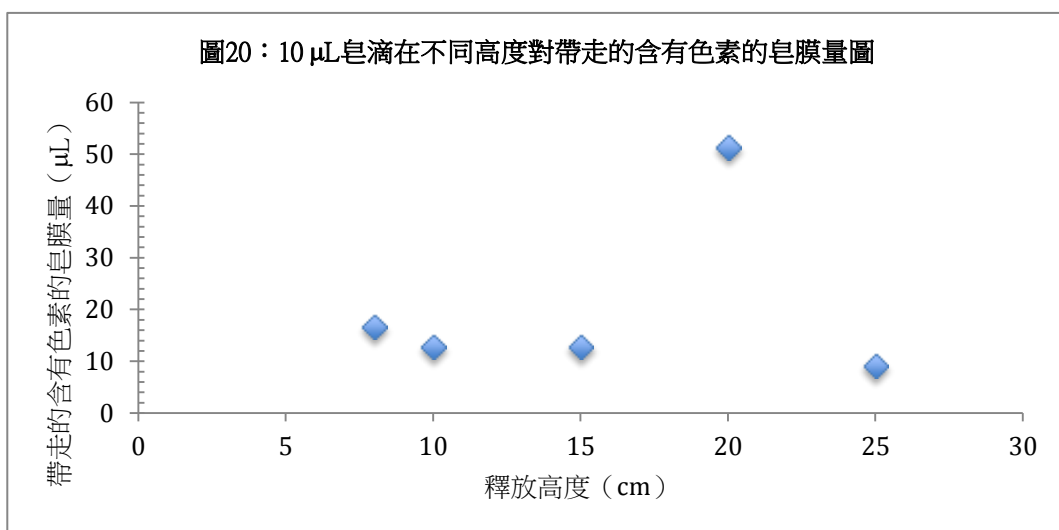
備註：特稱此公式為「原色素濃度公式」

2. 10 μL 的皂滴實驗

表 7：10 μL 的皂滴實驗數據表

釋放高度 (cm)	滴的顆數 (個)	收集到的總 體積 (μL)	稀釋後的總 體積 (μL)	ABS (510.5nm)	假設只稀釋到 3500μL 的 色素濃度 (μL/3500 μL)
8	100	1100	3600	0.036	16.65
10	100	1120	3620	0.027	12.80
15	100	1115	3615	0.027	12.78
20	100	1060	3560	0.117	51.35
25	100	1060	3560	0.019	9.14

備註：利用原色素濃度公式，可以從原始數據推得各溶液的色素濃度，另外，此表之所以還要將色素濃度轉成「假設只稀釋到 3500μL 的色素濃度」，因為此部分實驗在進行時，還未明確定義色素濃度，為了本研究的統一性，特將這個色素濃度做明確的定義。根據此表，我們可以發現，色素濃度的貢獻來自染有色素的皂膜，值得一提的部分是，這個數值，並不會等於增加的體積，這樣的狀況，將在本說明書的「伍、討論」中進一步討論。



備註：此圖並沒有單調性（遞增或遞減），留到「伍、討論」，跟 13 μL 皂滴實驗、16 μL 皂滴實驗一起比較

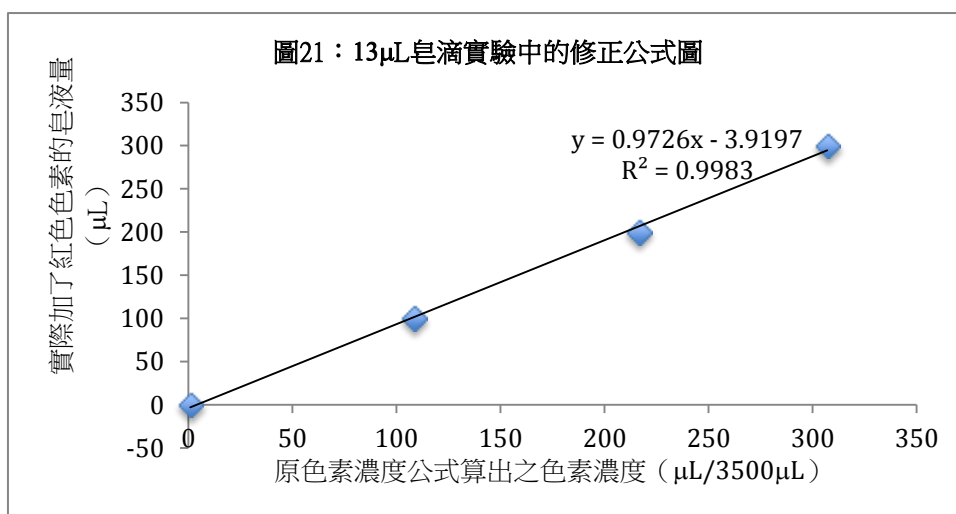
3. 13 μL 的皂滴實驗

因為此部分實驗與檢量線製作不在同一天，因此含有色素的皂膜的濃度不一定跟檢量線製作時的色素濃度完全一樣，因此要做校準，校準的方法是分別配置含有 100 μL、200 μL、300 μL 的加了紅色色素的皂液稀釋到 3500 μL，利用分光光度計量得 ABS 值後，代入原色素濃度公式，再利用回歸法，算出應加以修正的公式。

表 8：13 μL 皂滴實驗中的校準原始數據

加了紅色色素的皂液量 (μL)	ABS(510.5nm)	原色素濃度公式算出之色素濃度 (μL/3500μL)
0	0.000	0.94
100	0.254	108.49
200	0.509	216.47
300	0.723	307.09

備註：利用原色素濃度公式 ($y = 423.44x + 0.9406$)，可以從原始數據推得各溶液的色素濃度

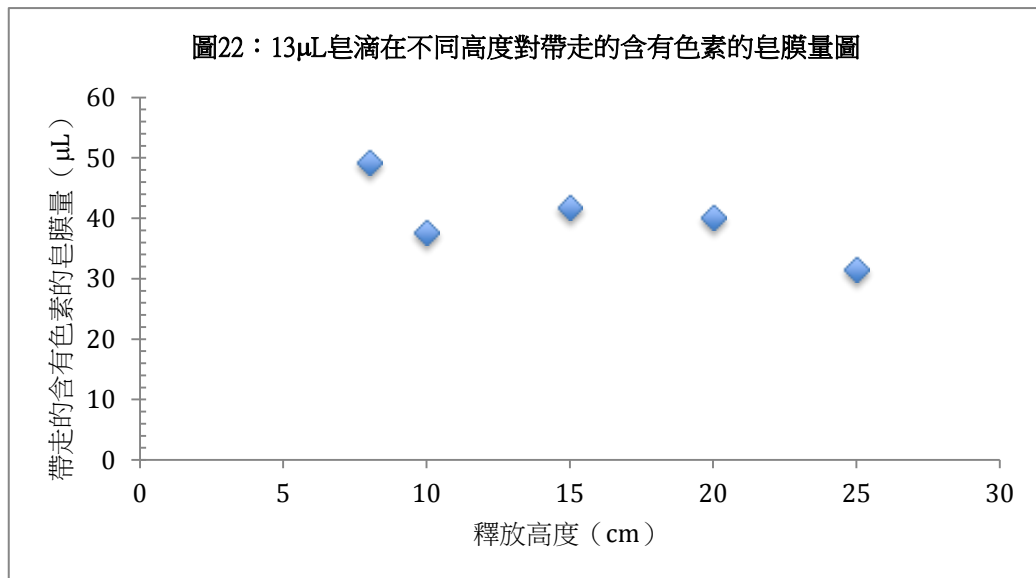


備註：在 13 μL 皂滴實驗中，利用「原色素濃度公式」算出的色素濃度，還需套用此圖的修正公式

表 9：13 μL 皂滴實驗數據表

釋放高度 (cm)	滴的顆數 (個)	收集到的總體積 (μL)	稀釋後的總體積 (μL)	ABS (510.5nm)	利用兩個公式所得之色素濃度 ($\mu\text{L}/3500\mu\text{L}$)
8	150	2020	3500	0.127	49.30
10	150	2000	3500	0.099	37.77
15	150	2080	3500	0.109	41.89
20	150	2100	3500	0.105	40.24
25	150	2100	3500	0.084	31.59

備註：利用「原色素濃度公式」和「13 μL 皂滴實驗修正公式」加以分析，算得色素濃度，其貢獻來自皂膜，而那個值就是那樣體積 (μL) 的皂膜中的色素被完全帶走，值得一提的部分是，這個體積，並不會等於增加的體積，這樣的狀況，將在本說明書的「伍、討論」中進一步討論。



備註：此圖並沒有單調性（遞增或遞減），留到「伍、討論」，跟 10 μL 皂滴實驗、16 μL 皂滴實驗一起比較

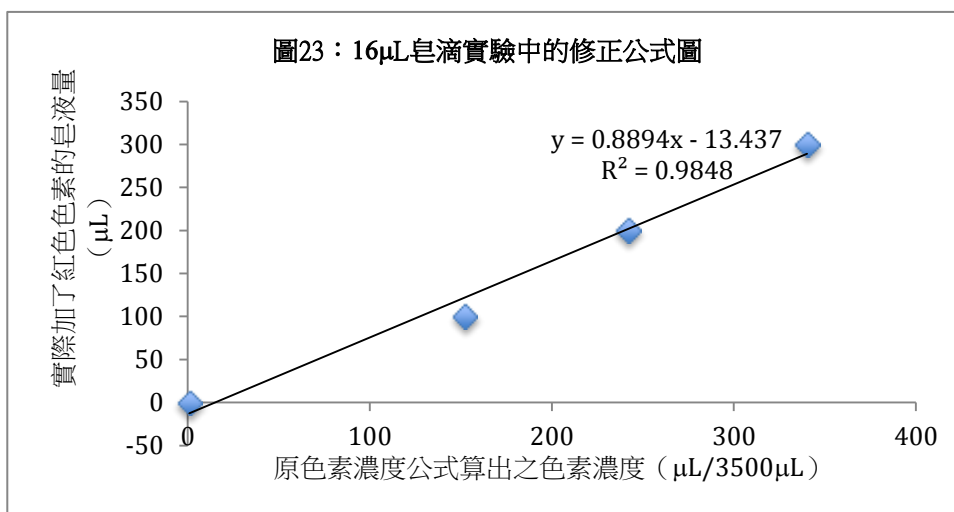
4. 16 μL 的皂滴實驗

如同 13 μL 的皂滴實驗，在 16 μL 的皂滴實驗中，色素濃度公式，需加以修正。

表 10：16 μL 皂滴實驗中的校準原始數據

加了紅色色素的皂液量 (μL)	ABS(510.5nm)	原色素濃度公式算出之色素濃度 ($\mu\text{L}/3500\mu\text{L}$)
0	0	0.9406
100	0.357	152.10868
200	0.569	241.87796
300	0.801	340.11604

備註：利用原色素濃度公式，可以從原始數據推得各溶液的色素濃度

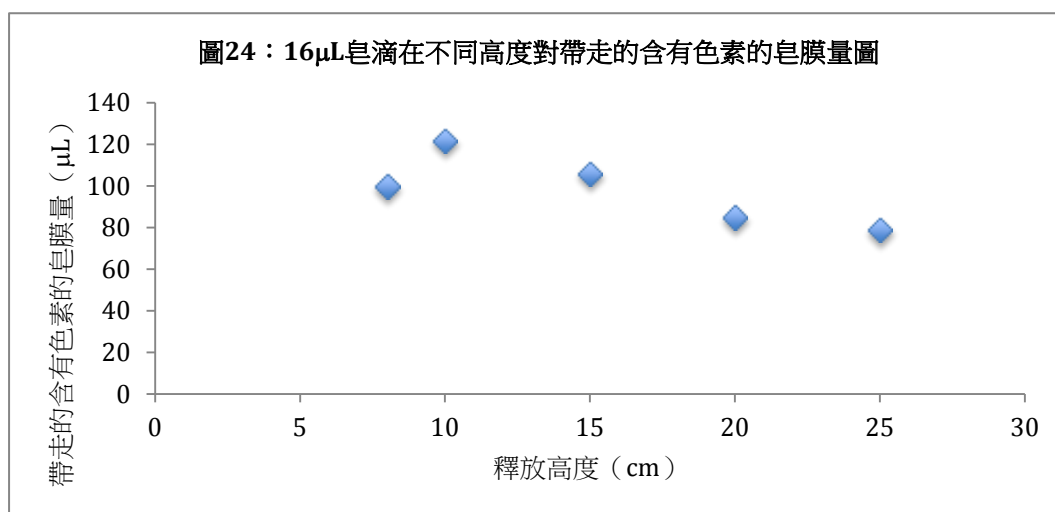


備註：在 16 μ L 皂滴實驗中，利用「原色素濃度公式」算出的色素濃度，還需套用此圖的修正公式

表 11：16 μ L 皂滴實驗數據表

釋放高度 (cm)	滴的顆數 (個)	收集到的總體積 (μ L)	稀釋後的總體積 (μ L)	ABS (510.5nm)	利用兩個公式所得之色素濃度 (μ L/3500 μ L)
8	150	3070	3500	0.299	100.01
10	150	3000	3500	0.357	121.85
15	150	3000	3500	0.315	106.03
20	150	3000	3500	0.259	84.94
25	150	3000	3500	0.243	78.92

備註：仍須利用「原色素濃度公式」和「16 μ L 皂滴實驗修正公式」加以分析，算得色素濃度，其貢獻來自皂膜，而這個值就是這麼多體積 (μ L) 的皂膜中的色素被完全帶走，值得一提的部分是，這個體積，並不會等於增加的體積，這樣的狀況，將在本說明書的「伍、討論」中進一步討論。



備註：此圖並沒有單調性（遞增或遞減），留到「伍、討論」，跟 10 μ L 皂滴實驗、13 μ L 皂滴實驗一起比較

三、 水滴實驗

(一) 實驗方法

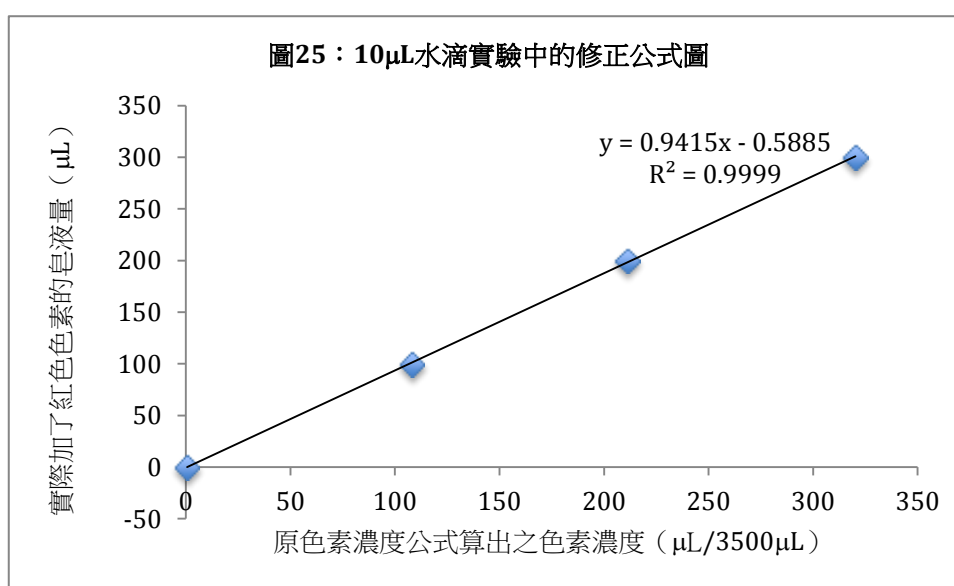
本實驗過程與皂滴實驗大致相同，唯一不同的是在稀釋到 3500 μL 的過程中，是以水來稀釋。此外，還需注意純水在波長 510.5 nm 的吸收度，需加以扣除，因為在使用分光光度計時，主要還是以皂液為參考液體，而水雖看似澄清，但是那部分波長的吸收度一定會跟皂液不一樣，因此這部分也要做校準。另外，在水滴實驗中，只用 10 μL 這個單一體積的水滴進行實驗。

(二) 實驗結果

表 12：10 μL 水滴實驗中的校準原始數據

加了紅色色素的皂液量 (μL)	ABS(510.5nm)	原色素濃度公式算出之色素濃度 ($\mu\text{L}/3500\mu\text{L}$)
0	-0.001	0.52
100	0.253	108.07
200	0.496	210.97
300	0.754	320.21

備註：利用原色素濃度公式，可以從原始數據推得各溶液的色素濃度



備註：在 10 μL 水滴實驗中，利用「原色素濃度公式」算出的色素濃度，還需套用此圖的修正公式

表 13：純水以皂液為參考液在分光光度計中測得的數據

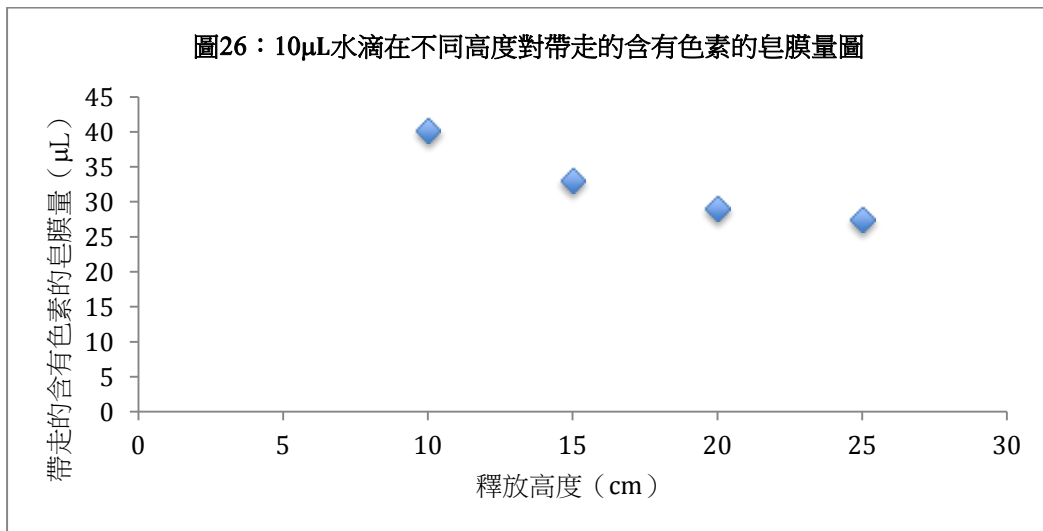
樣品	ABS(510.5nm)	原色素濃度公式算出之色素濃度 (μL/3500μL)	修正後的色素濃度 (μL/3500μL)
純水	-0.012	-4.14	-4.49

備註：在 10 μL 水滴實驗中，還需考慮純水的吸收度，再拿去修正本 10 μL 水滴實驗中的數據，以下實驗的數據，經過「原色素濃度公式」和 10 μL 水滴實驗修正公式修正後，應再減去 (-4.49)

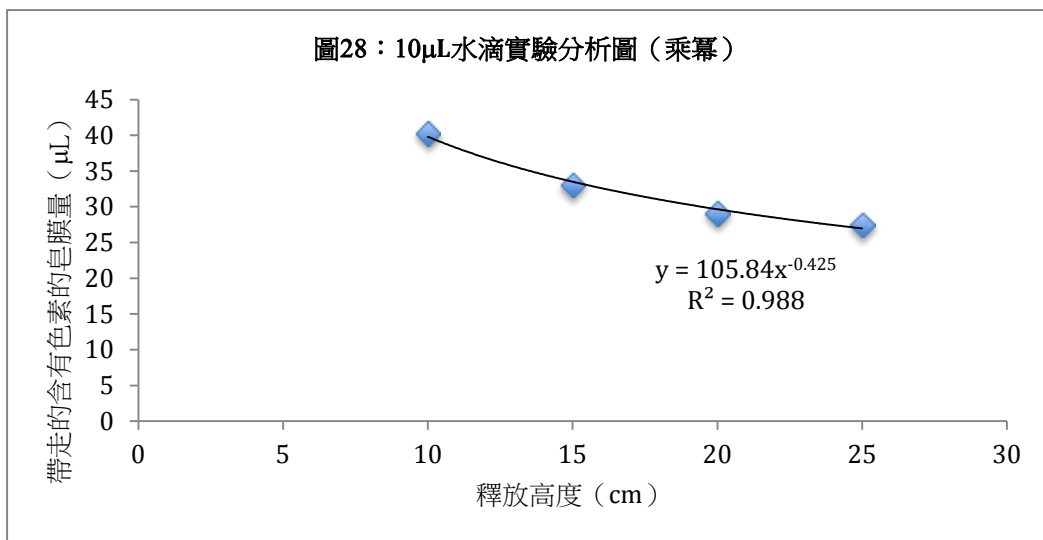
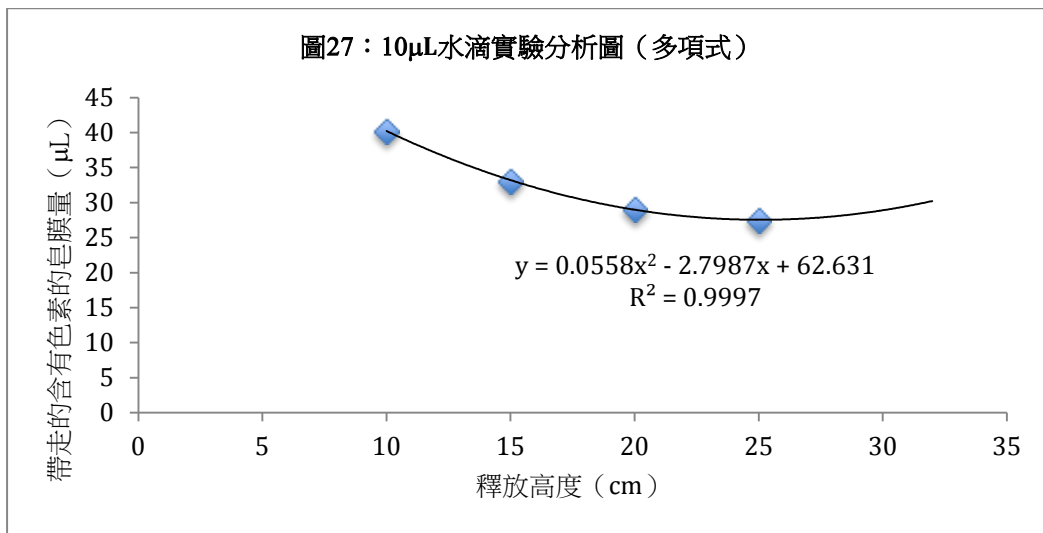
表 14：10 μL 水滴實驗的數據以及推算得的色素濃度表

釋放高度 (cm)	滴的顆數 (個)	收集到的總體積 (μL)	稀釋後的總體積 (μL)	ABS (510.5nm)	原色素濃度公式算出之色素濃度 (μL/3500μL)	修正後所得之色素濃度 (μL/3500μL)
10	200	2040	3500	0.089	38.63	40.27
15	200	2030	3500	0.071	31.00	33.09
20	200	2030	3500	0.061	26.77	29.10
25	200	2030	3500	0.057	25.08	27.51

備註：釋放高度對應色素濃度有單一變化性，即隨著釋放高度的增加，色素濃度則是減少，但要獲得進一步的資訊，仍要透過 y-x 圖加以分析，判斷兩者之間的關係



備註：這樣的圖形有兩種可能的解，分別是多項式和乘冪關係，要分開分析，再討論其個別的可能性



備註（圖 27 和圖 28）：多項式在釋放高度為 25 公分左右，為一最低點，不符合函數的單調性，故乘冪為較可能的解，而且其 R^2 也達到 0.988，有一定的可信度

四、油滴實驗

（一）實驗方法

本部分實驗原本在設計時，打算跟前面的皂滴和水滴實驗進行一樣的方法，如同水滴實驗中做的微調，油滴實驗也應該在稀釋過程中用礦物油來稀釋，但是做完第一組試驗之後，發現如右圖（如圖 29）的狀況，皂液的部分自己形成一個微泡包著含有紅色色素的水溶液（因為色素是水溶性的），導致無法以分光光度計進行分析，但還是先將能測量到的各個變因記錄下來，以便後續的討論。



圖 29：油滴實驗所收集到的液

(二) 實驗結果

表 15：10 μL 油滴實驗原始數據表

釋放高度 (cm)	滴的顆數 (個)	收集到的總體積 (μL)	稀釋後的總體積 (μL)
8	150	1720	3500
25	150	1750	3500

備註：此部分的討論留到「伍、討論」

五、 攝影

(一) 實驗方法

為了提出一個可以解釋物體穿透皂膜的模型，還需藉助高速攝影機的功能，本實驗設備裝置如圖 30，在拍攝液滴穿過的過程中是用 1200fps，而鋼珠則是 600fps。

拍攝完的影片，再搭配 Tracker 軟體，逐張分析畫格，並擷取關鍵的幾個畫面以利比較，最後再用 Tracker 定好座標軸以及時間軸，算出物體撞擊皂膜前的速度。



圖 30：高速攝影的器材架設圖

(二) 實驗結果

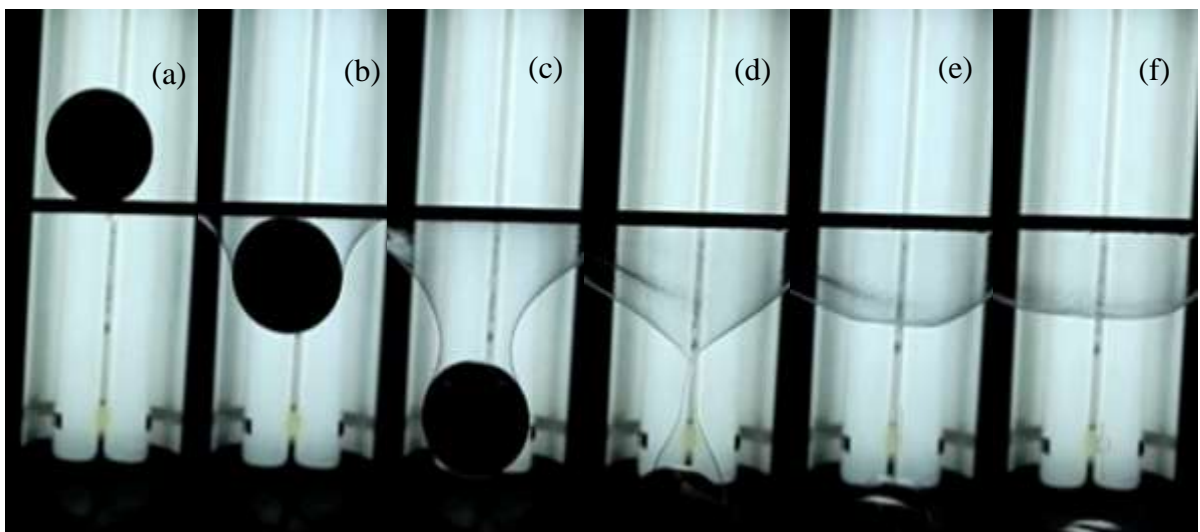


圖 31：直徑 25 mm 鋼珠 釋放高度 10 cm 撞擊前的速度 139.4 cm/s

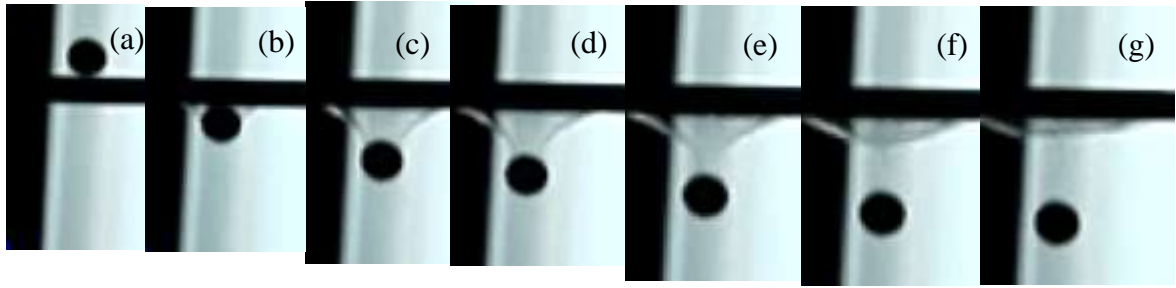


圖 32：直徑 4 mm 鋼珠 釋放高度 10 cm 撞擊前的速度 145.2 cm/s

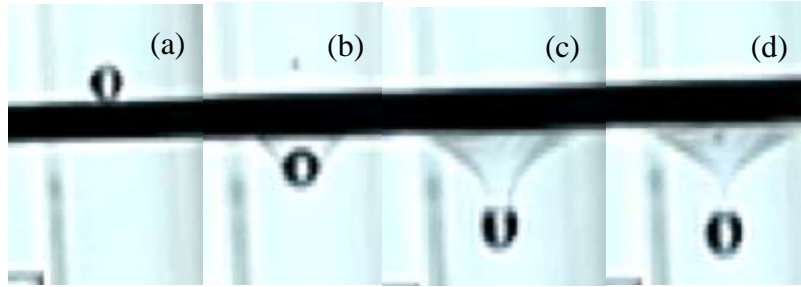


圖 33：皂滴 16 μL 釋放高度 8 cm 撞擊前速度 111.2 cm/s

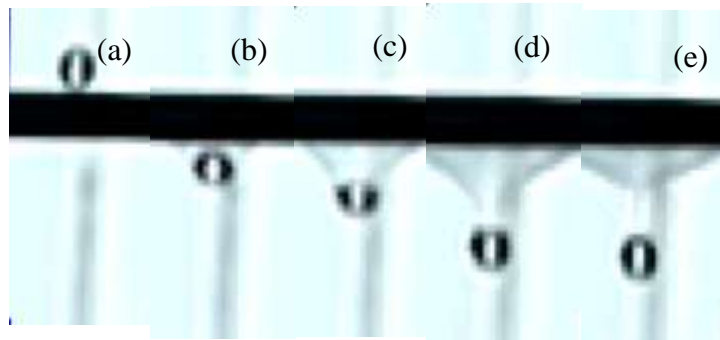


圖 34：皂 10 μL 釋放高度 8 cm 撞擊前速度 125.1 cm/s

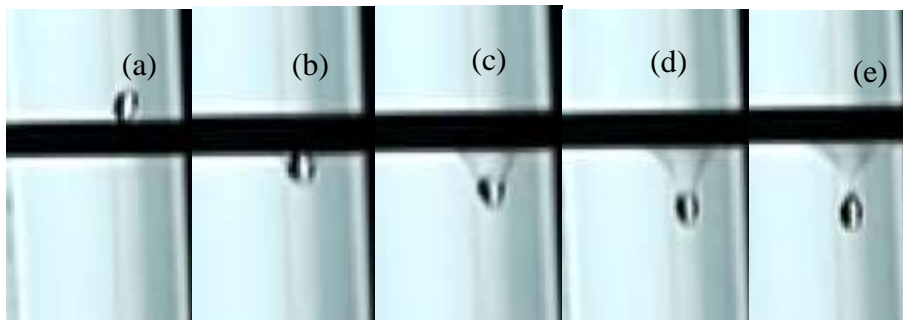


圖 35：水滴 10 μL 釋放高度 8 cm 撞擊前速度 125.5 cm/s

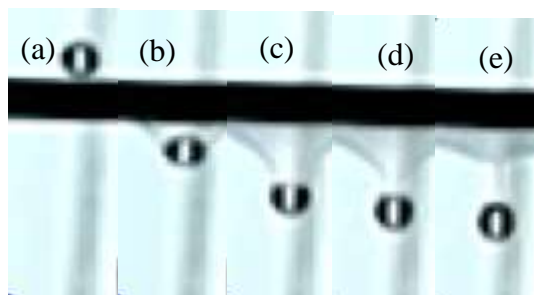


圖 36：油滴 10 μL 釋放高度 8 cm 撞擊前速度 113.5 cm/s

六、 螢光實驗

(一) 實驗方法

先配置兩種溶液 A 和 B，其中 A 溶液是 1M NaOH 加上 0.75g 發光胺共 50ml，原始溶液顏色為淡黃色；B 溶液是 0.125M (2.05g) 赤血鹽加上 7% 雙氧水共 50ml，原始顏色為亮黃色。當 A 溶液與 B 溶液混合時，會產生藍色螢光，在暗室中，微弱的螢光可被觀察到。

在「伍、討論」中，本研究提出了兩個液滴穿透皂膜的模型，藉由此螢光實驗中，A、B 溶液混合時產生螢光的現象，檢驗液滴是否會殘留在皂膜上，加以判斷兩個模型分別的可能性。

本實驗進行中，器材裝置圖跟皂滴實驗的器材裝置圖是一樣的，唯一的不同，是在溶液中加入 A、B 溶液：在液滴溶液中加入 B 溶液(混合體積比例 2:1)，皂膜中加入 A 溶液(混合體積比例為 3:1)。微量滴管的尖端和皂膜垂直距離固定為 15cm，每次液滴體積固定取 10 μL 。

當十數滴液滴穿透皂膜後，若皂膜邊緣發出微弱的藍色螢光，則推斷液滴會殘留在皂膜上，呈現物質交換現象。

(二) 實驗結果

1. 皂滴：

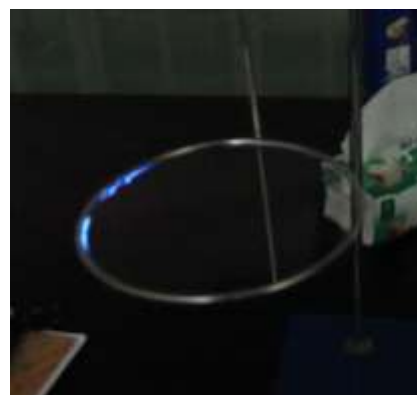


圖 37 和 圖 38：螢光皂滴實驗結果圖

備註：經過十多次的嘗試，以上兩張螢光較明顯的圖片供作參考。圖片中，可以明顯看到皂膜周圍有藍色螢光的出現，顯示出皂滴穿透皂膜時皂滴有物質殘留在皂膜上。

2. 水滴：



圖 39 和 圖 40：螢光水滴實驗結果圖

備註：經過多次嘗試後，並未在皂膜上觀察出明顯的螢光，顯示水滴沒有和皂膜發生物質交換作用。

3. 油滴：

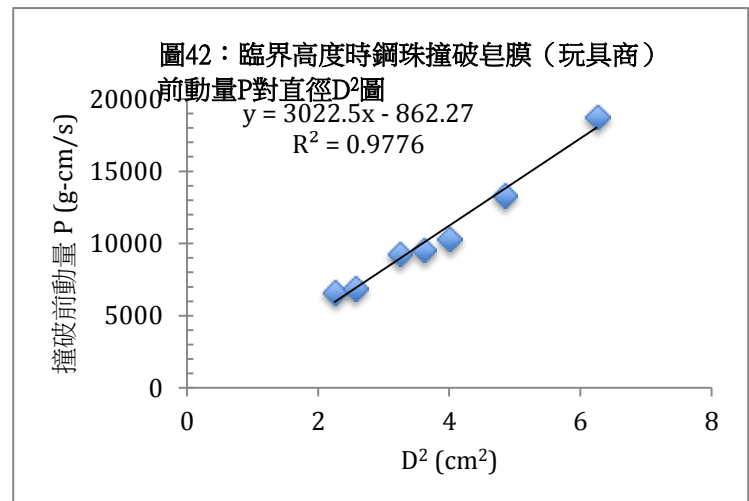
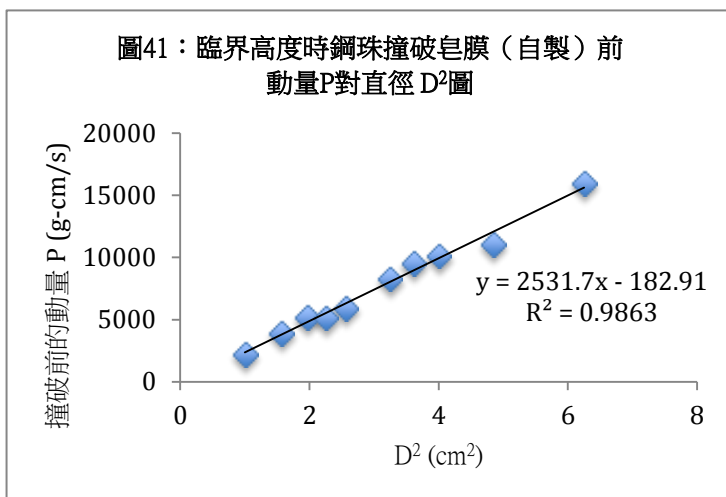
在拍攝照片中，並無看到有產生藍色螢光的現象。推測由於油滴和螢光溶液（水溶液）不互溶，當混合液滴穿透皂膜時，如同油滴和帶有 B 溶液的水滴分別穿透皂膜，因此難以觀測油滴是否和皂膜有物質交換。

伍、討論

一、鋼珠實驗

參考以下兩張圖（如圖 41 和圖 42）可知，不管是哪種來源的皂液，由臨界高度換算而得的臨界動量，皆會跟截面積（ $\frac{\pi}{4}D^2$ ）成線性關係，而這個結果可用以下模型來解釋：皂膜所承受的撞擊截面就是鋼珠的截面積，由搭配高速攝影得到的連續圖，可以推知，當動量引發的衝擊效應超過了此截面下皂膜的回復能力，則皂膜將無法經歷完整的「癒合」過程，導致皂膜就會破掉。

$D\sqrt{h}$ 會是個定值（如表 3 和表 5），而當這個值越大時，同樣大小的鋼珠，要破壞這個皂膜所需的最低高度則越高，則代表這個皂膜在一樣的截面積下，可以承受更大的動量，換句話說，比較堅固。



二、 皂滴實驗

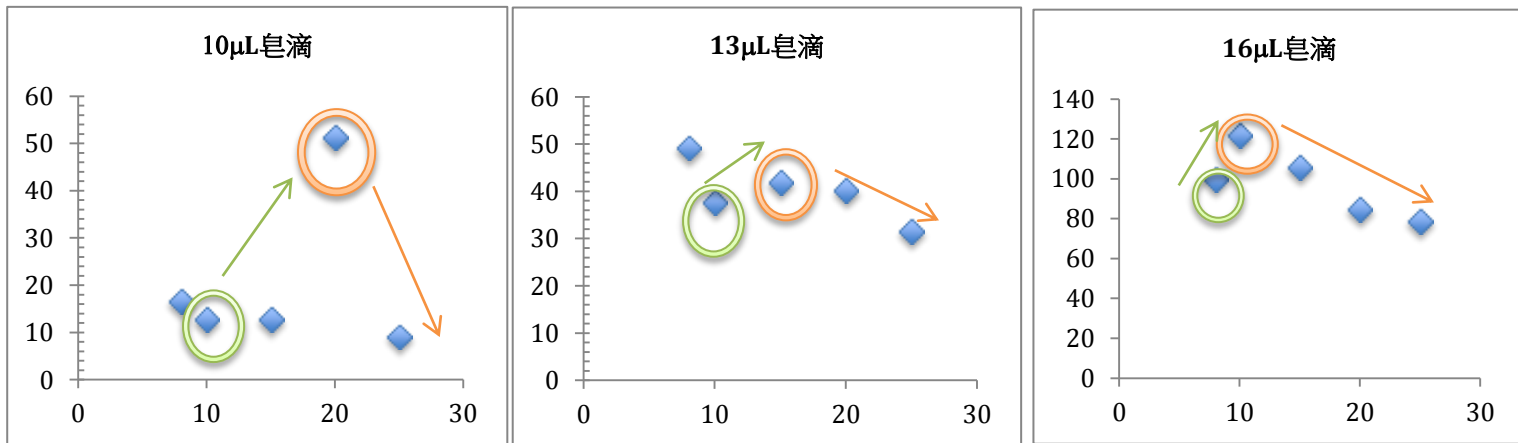


圖 43： 3 種不同體積的皂滴實驗結果圖

備註：橫軸是釋放高度 (cm)，縱軸是帶走的含有色素的皂膜量 (μL)

觀察以上三張子圖 (包含於圖 43)，不同體積的皂滴分別在不同釋放高度之下，所帶走的色素量會有相似的趨勢，這個趨勢是在某一點 (綠色圈起) 之後，上升達到另一點 (橘色圈起) 之後，再下降，由這樣的趨勢，本研究發現，這個影響因素並不單純，可能同時有重力、表面張力在互相「拉扯」，造就了這樣的曲線。

有趣的是，隨著落下皂滴體積的增加，整個趨勢有往左移的傾向，如果以動量的觀點來解釋的話，那就是要達到一定的動量，觸發某種一樣機制，越大的皂滴，所需的速度越小，釋放高度則越低，也就是上三個子圖中，趨勢往左傾的原因。

表 16：皂滴實驗的數據表

10 μL			13 μL			16 μL		
A	B	C	A	B	C	A	B	C
8	100	16.65	8	70	49.30	8	670	100.01
10	120	12.80	10	50	37.77	10	600	121.85
15	115	12.78	15	130	41.89	15	600	106.03
20	60	51.35	20	150	40.24	20	600	84.94
25	60	9.14	25	150	31.59	25	600	78.92

備註：各代號代表文字如下，A 釋放高度 (cm)，B 皂膜被皂滴帶走的總體積 (μL)，C 色素濃度 (μL/3500 μL)

直觀的來看，皂液所增加的總體積，應該都是皂膜提供的，而紅色色素也會是這些增加的皂液量中的全部紅色色素，所以這兩個數值--皂膜被皂滴帶走的總體積(如表 16 B)和色素濃度(如表 16 C) 理應一樣。(這是因為色素濃度定義)

然而，由以上這三個子表(包含於表 16)，本研究發現，皂滴穿過皂膜所應加的皂液體積，比色素濃度的數值多很多，這原因，可以推測是因為是皂滴會先經歷跟鋼珠、水滴穿過皂膜一樣的過程(請比較圖 31 (a)~(c)、圖 32 (a)~(d)、圖 33 (a)~(c)、圖 34 (a)~(d)、圖 35 (a)~(d)、圖 36 (a)~(d)，過程的前半部分，這幾張連續圖，幾乎沒什麼差別，都是皂膜包覆液滴的接觸部分)。

但是在皂滴穿過皂膜的過程後半部分，皂滴表面與皂膜之間的吸引力，吸引了更多原本表面上的肥皂分子跟水分子，且其中含色素的比例又比原本的低很多，這原因可參考圖 44，紅色色素分子是位於比較內層，不容易在最後這個吸引過程中，跟著被吸走，這就是為什麼紅色色素並不是等比例的被帶走的原因。

另外一個不同的觀點，Killian, Huey, Bryson 和 Truscott(2013)在 Self Healing Soap Films 中提出，液滴與液面的溶合現象 (merge): 如下一頁圖 45 和圖 46，水滴在水面上、皂泡在皂膜上，由靜止釋放，從液滴(水滴與皂泡)與液面的溶合，到子液滴彈出，兩個過程有十分相似的部分。液滴與液面先溶合，在這個連續的過程(如圖 45、46)中，原液滴與液面因表面張力互相拉扯，結果就是原液滴與液面分裂，彈出一個半徑約一半的液滴，此現象中主要的因素仍是表面張力。

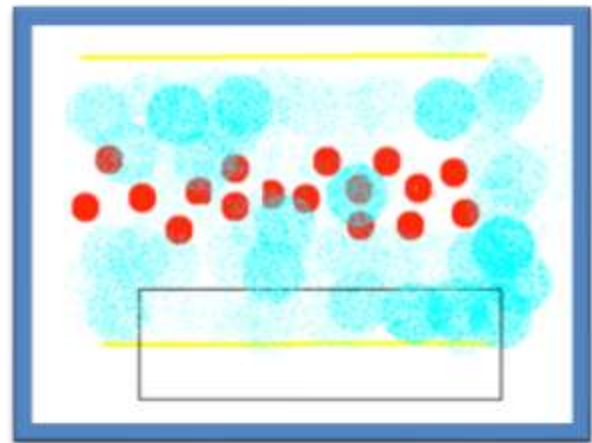


圖 44：含有紅色色素的皂膜

備註：黃色是肥皂分子，紅色是紅色色素分子，藍色區域是水分子示意，黑色框線是指靠近表面的部分所涵蓋的主要範圍

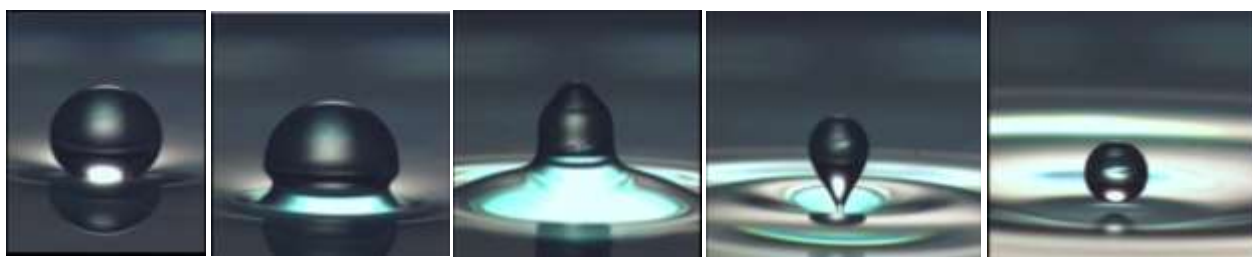


圖 45：水滴與水面溶合 (影片取自 The merger of a bubble and a soap film <https://www.youtube.com/watch?v=ZUllziPdRkw>)

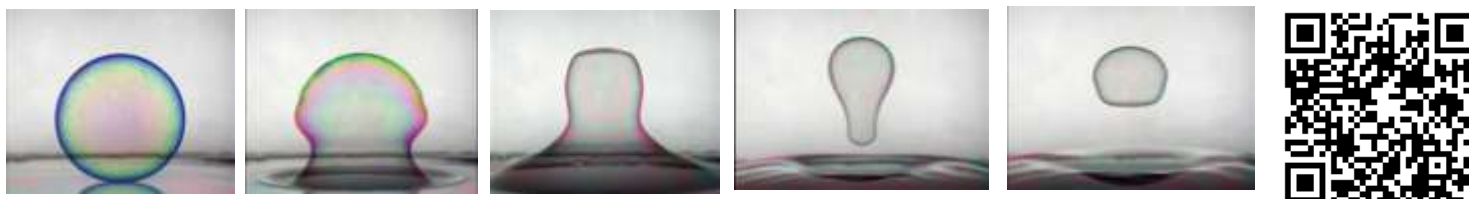


圖 46：泡泡與皂面溶合（影片取自 The merger of a bubble and a soap film <https://www.youtube.com/watch?v=ZU11ziPdRkw>）

根據這個觀點，皂滴和油滴從高處落下後，會先溶入皂膜，但是動量和動能並不會白白消失，而是轉換成皂膜下表面肥皂分子和水溶液向下的動量和動能，如此，一新的液滴會再往下滴落。

在本研究中，綜合實驗數據、攝影的連續圖、螢光實驗結果，第一個模型可以完整的描述整個機制，就是因為水滴和皂膜不會發生物質交換，而皂滴和皂膜會，可以推論物質交換是發生在最後吸引的部分，當皂滴和皂膜互相吸引，便有分子在其接合通道來回移動，達到我們所觀察到的物質交換。但是從文獻的觀點推到第二個模型，與第一個模型有衝突，這可能跟流體中的雷諾數不同所觸發的機制便不同，因此本研究仍保留模型二，也許釋放高度夠小，便可觀察到這個機制。

三、 水滴實驗

表 17：10 μL 水滴實驗數據與結果表

釋放高度 (cm)	收集到的總體積扣掉滴過皂膜的水滴總體積 (μL)	修正後所得之色素濃度 ($\mu\text{L}/3500\mu\text{L}$)
10	40	40.27
15	30	33.09
20	30	29.10
25	30	27.51

備註：在計算體積時，皆以 5 μL 為單位，因為 100-1000 μL 微量滴管的最小單位就是 5 μL

由以上這個表 17，可以發現，「多」收集到的體積，幾乎就跟色素濃度的數值吻合，再搭配右圖（如圖 47）和圖 35（可以發現皂膜是完整地貼在水滴上），肥皂膜的外側是親油端，所以當水滴滴過去的時候，因為之間沒有吸引力，所以水滴就如同剛體穿過去一樣，只是多了一層肥皂膜，雖然體積不大（相較於皂滴實驗中得到的數據），但是水溶液的部分，能完整地融入水滴，所以上表的兩個數值（收集到的總體積扣掉滴過皂膜的水滴總體積和修正後所得之色素濃度）才會如此相近。

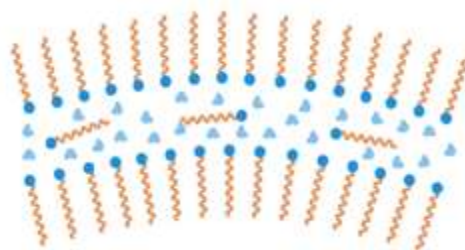
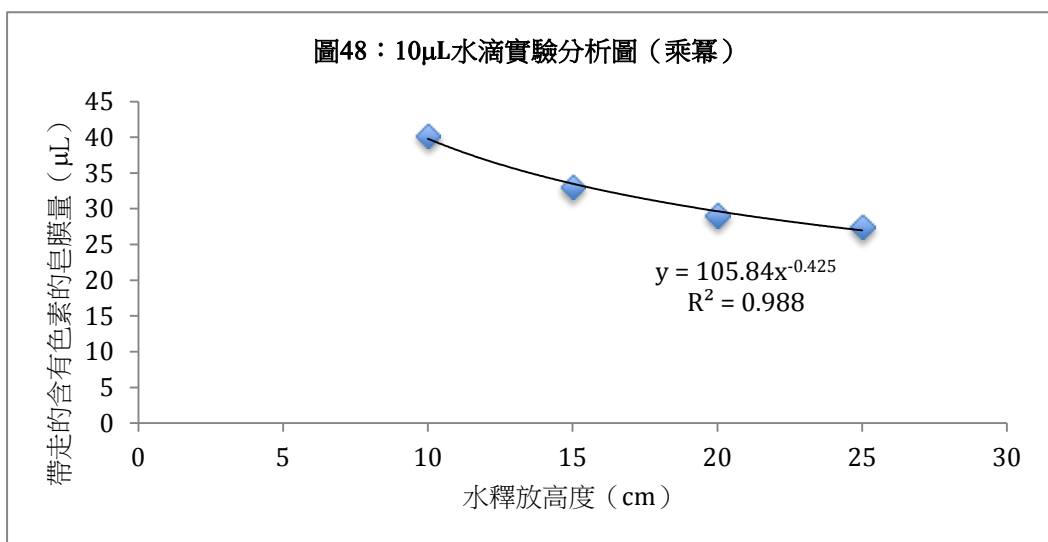


圖 47：肥皂膜結構



備註：由以上這張圖，可以知道此部分實驗主要是「較單純」的物理現象，似乎變因比較少，亦即在單一體積的水滴實驗中，主要會影響實驗結果的因素就是釋放高度。

四、 油滴實驗

表 18：10 μ L 不同的液滴滴過皂膜所帶走的體積數據圖

油滴				皂滴				水滴			
A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
8	150	220	1.47	8	100	100	1.00	8	200	35	0.18
25	150	250	1.67	25	100	60	0.60	25	200	30	0.15

備註：以上代號分別代表，A 是釋放高度 (cm)，B 是滴的顆數 (個)，C 是皂膜被皂滴帶走的總體積 (μ L)，D 是平均每一滴所帶走的量 (μ L)

由以上三個子表格（包含於表 18），可以發現油滴的穿過皂膜模式，跟皂滴穿過皂膜模式較相似，跟水滴的穿過皂膜模式較不相似。此皂膜結構模型來看，因皂膜表面分子是親油端朝外，所以油滴穿透的時候，油滴跟皂膜表面有吸引力，這情形跟皂滴穿過皂膜表面一樣，油滴穿過皂膜的過程後半部分（如圖 36 (d)~(e)），油滴與皂膜之間的吸引力會吸引更多原本表面上的肥皂分子跟水分子，所以帶走的量才會明顯比水滴的情況多了許多。

陸、結論與展望

一、結論

(一) 鋼珠穿過皂膜會使得皂膜破掉的臨界高度，與鋼珠本身直徑有直接關係，而且臨界動量大致上與截面積成正比。 D^2h (D : 鋼珠直徑, h : 臨界高度) 為一定值，此值愈大的皂膜，則越堅固，不容易破。

(二) 皂滴體積越大，所引發的特有機制所需的高度會越低，這可以用動量的概念來切入，要達到某一特定的動量，質量（體積）越大，則所需的速度（初始釋放高度）則越小。

(三) 不管是剛體或者液滴，在穿透皂膜的前半過程中都是類似的。它們都會先被皂膜包覆（如圖 49），直到皂膜的表面在剛體或者液滴的上方，逐漸靠近，兩種不同的機制才會開始不同。因為鋼珠、水滴與肥皂分子之間沒有吸引力，所以表面僅會有單一薄層的皂膜，但是油滴、皂滴與肥皂分子都有吸引力，所以導致更多的肥皂分子和水分子（水分子貼在皂膜肥皂分子上，但是紅色色素的量就少很多）會被帶到液滴上。

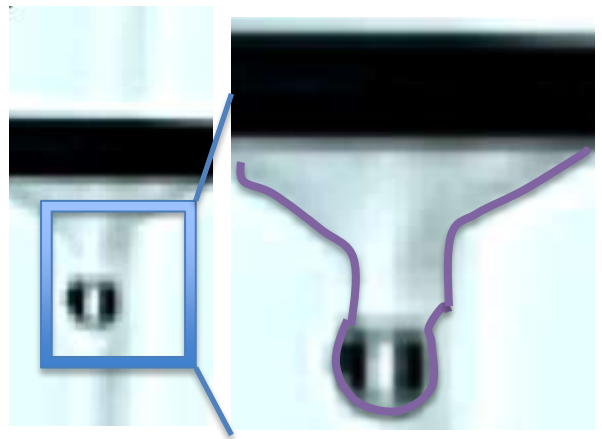


圖 49：水滴穿透皂膜圖

備註：取自圖 34 (d)，紫色線條就是皂膜的部分

(四) 經過本研究不同子實驗的結果推論，最適合解釋這個液滴穿透皂膜的模型是，液滴在接觸的那一刻，仍保持完整，直到液滴已穿過圓形環，一層皂膜已經覆蓋整個液滴後，如圖 50 中的空氣腔，更有力地支持皂膜完整地包覆，此後，皂滴和皂膜的介面打通，有部分分子會和皂膜做物質交換，但是水滴沒有交換（或者說是交換的量太微小了），可歸因於不同分子間的吸引力。



圖 50：皂滴穿透皂膜圖

備註：綠色圈起為空氣腔

(五) 在做微量物質的實驗中，本研究利用了一些新的實驗技巧，是目前文獻中，尚未看到的，像是產生指定體積的液滴，本研究用了相當常見且不貴的研究器材微量滴管，以及便宜的消耗品塑膠 tip，即產生非常準確的實驗數據。

二、 展望

(一) 本研究的結論，有部分呼應到文獻中的「原胞理論」。(原胞理論的介紹，傅宗玫、陳正平(2001)在「冒泡的美」這篇文章中有提到，其中比較重要的幾點是，自然合成的脂類分子在水表面會散布為單分子層，親水端向內，覆蓋在水面上(如圖 51)。如果一個由同樣的單分子層包裹著的水滴掉入水面(如圖 52)，疏水性使兩層雙親分子排列成膜，產生一個細胞膜原型(如圖 53)。有了外層膜的保護，細胞內的氨基酸或其他生命分子便能夠進一步反應。現在的細胞模型中，有很多胞器都需要脂質的親水疏水性來隔絕化學反應，這樣生物體內的許多化學反應才不會互相影響，生物體的很多機制才能持續進行。)

如果可以將此技術利用到生物科技上，將藥物包裹在同時有疏水性和親水性的分子中，作為人體或者動物內部運輸藥物的工具，那這將會是個低成本，而控制性極好的一個技術。

另外，物質交換也是一個值得發展的部分，利用液滴與基底液體的微量交換，在醫學方面，也可以作為標靶藥劑傳送的新技術，精準控制藥品的劑量，以及傳送的目標。

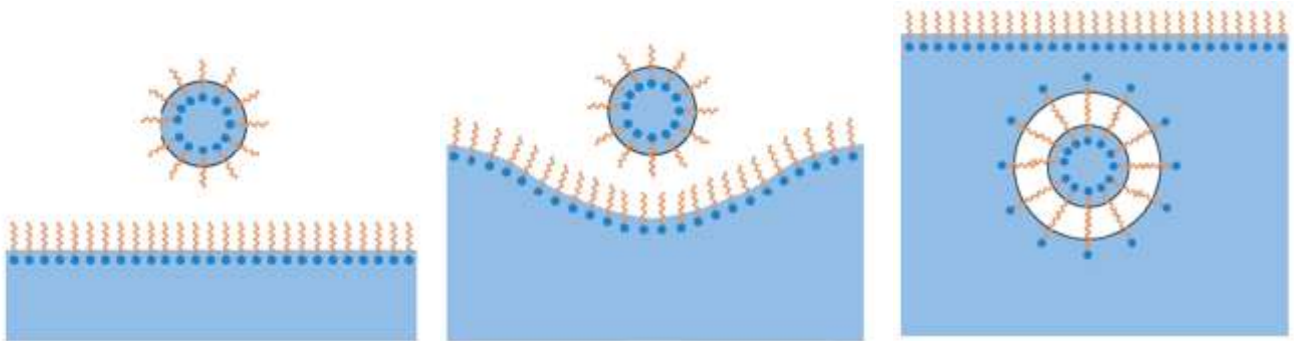


圖 51：原胞理論

圖 52：原胞理論

圖 53：原胞理論

(二) 本研究還可以繼續發展的方向就是，完成更多的實驗，越多的實驗數據，就會在本說明書中的很多圖表中增加更多點，這樣更具體的相關公式便可以逐漸被分析出來，不只是本研究著重的定性趨勢，或許這可以增加本研究提出來的模型可信度，並且讓更多皂膜的性質再繼續深入研究下去。

柒、參考文獻

- 一、傅宗玫、陳正平（2001）：冒泡的美。科學發展月刊，第 29 卷第 11 期，788-796。
- 二、Bryson, Joshua A., "Soap Bubbles and Solid Spheres: Collisions and Interactions" (2011). All Theses and Dissertations. Paper 3016.
- 三、Brasz, Frederik., "Soap Films: Statics and Dynamics" (2010). Princeton University.
- 四、Biance, Anne-L., Clanet, Christophe., Que' re, David., "First steps in the spreading of a liquid droplet" (2004). PHYSICAL REVIEW E 69, 016301.
- 五、How stuff works. (2014). How Luminol Works. Retrieved May 30, 2016, from <http://science.howstuffworks.com/luminol.htm>

【評語】 051812

本作品探討液滴通過皂膜的現象，而利用紅墨水和螢光的方式，呈現證實皂滴穿過皂液有物質交換的現象。是一件嚴謹可喜之作，值得鼓勵。