

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

030111

力拔山河-立體幾何模型與氣體對泡泡薄膜的影響

學校名稱： 南投縣立名間國民中學

作者： 國二 岳欣瑩 國二 張柏祥 國二 賴弘霖	指導老師： 邱悅熒
---	------------------

關鍵詞： 泡泡、氣體、表面張力

摘要

我們學會使用表面張力儀，也利用天秤自製工具，透過實作驗證溫度影響表面張力，每調製泡泡水皆測液溫及表面張力。將幾何模型由泡泡溶液中提離，模型中出現的薄膜因泡泡液體的表面張力而存在，泡膜間相接觸後會重新分配分子位置利於達穩定且內凹的泡膜型態。不同的速率、不同的方位(點、線、面)將模型拉離泡泡水面，發現點先離開泡泡水的內凹薄膜完整成型率最高，面先離開泡泡水成型率最低，邊數越多的幾何模型中間越不易形成結點或小平面的薄膜。對著泡泡薄膜中間打氣可形成與該模型圖案相近的氣室；可藉由抽氣筒將此氣室內的氣體抽出，並恢復該泡膜無氣室前之型態。若乾燥針尖戳入某一片泡膜，可發現，沒被戳的部分區域的泡膜幾乎可保持原貌。

壹、前言

一、研究動機

偶然一次社團課程，指導老師讓我們操作、觀察浸泡過洗碗精的中空立體模型內會形成我前所未見的、難以想像的、美麗的泡泡薄膜，用吸管對著模型裡面的泡泡薄膜吹入氣體、抽氣和戳破泡泡膜的某一面，泡泡薄膜不像想像中的容易全部瓦解，而是原本泡膜的形狀因外加氣體與少許泡泡水後發生美麗而夢幻的改變：泡膜中形成的泡泡(氣室)，隨著吹入越多氣體，氣室會越大顆；隨著吹入越多次數的氣體，氣室會越多顆，我們上網查詢相關文獻，發現泡泡薄膜外框的形狀有相當的關聯。為何會形成這些美麗的薄膜，雖然其最後形狀已被廣泛的研究和當作科普實驗教材，其主要以最低表面能、最低表面積來解釋。然而其形成的中間過程，何種現象、何種力作用於薄膜上，似乎還有許多值得探討的地方。因此本研究利用 iphone 或是 ipad 拍攝泡膜的 formed 歷程，並嘗試分析形成過程中的物理原因。

二、研究目的

- (一)調製本實驗所需之液體，及測量其溫度與表面張力。
- (二)觀察立體幾何模型由泡泡水中提起後所構成的泡泡薄膜型態與歷程。
- (三)觀察立體幾何模型中的泡膜打氣時原泡膜的變化與氣室型態與成因。
- (四)觀察立體幾何模型中的泡膜或氣室被針戳或抽走氣體的變化。

三、文獻回顧

(一) 調製讓泡泡不易破之黃金比例

根據文獻探討，有關於泡泡水的配方心得，大略有以下四個主要成份：

1. 水：水做為溶劑。「水越純越好，例如：蒸餾水、水」(洪嘉嶸等人，2021)。本實驗，以某牌子的純淨水(經電池組通電測試，它不導電，代表其電解質含量極低。)作為調製泡泡水用之溶劑。
2. 起泡劑：「起泡劑可降低水的表面張力，易於起泡，種類有：洗碗精、洗髮精等」。(洪嘉嶸等人，2021)。本實驗則選用某牌洗碗精當作起泡劑。
3. 保溼劑：起泡後，泡泡薄膜隨著泡泡分子間水的蒸發，約數分鐘左右，泡膜自然而然會走到破掉的一刻，因此，若添加一些保溼劑將減慢水分蒸發。本實驗選用保溼效果較佳(洪嘉嶸等人，2021)且藥局亦可買得到的甘油作為泡泡薄膜之保溼劑。
4. 增強劑：水溶性高分子，如膠水、明膠、阿拉伯膠等，可增強泡泡強度，唯泡泡乾掉後，留下膠狀殘留物，不易清潔。(洪嘉嶸等人，2021)。本實驗所調製的泡泡水即使不加膠水也能有一段不短的觀察期(約 10 分鐘左右)。因此，本實驗不添加之。

本實驗旨在研究泡泡與模型交互作用形成的薄膜，而不是研究泡泡水的配方，因此，參考相關文獻後，決定本研究之泡泡水配方，以進行後續模型中央內凹泡膜成因之探討。

(二) 立體幾何模型從泡泡水中提起後所構成的泡膜型態

立體幾何模型從泡泡水中提起後所構成的泡膜型態的研究，在洪嘉嶸等人的科展作品中，有提到：蠻多種類的幾何模型浸泡過泡泡水後，可以形成各式泡泡薄膜，此外，該篇以數學運算表面張力作用確實使得泡膜傾向面積最小。(洪嘉嶸等人，2021)。至於與本實驗則好奇於泡泡與模型交互作用形成的薄膜的成因與並嘗試了解其泡膜形的動態歷程。

(三) 泡泡薄膜上的七彩變化與泡泡破裂的原因

泡泡顏色變動方式，發覺剛形成的肥皂泡七彩紋路不明顯，等到快破之前，邊緣到底部出現明顯虹彩，因地心引力，造成泡泡厚度往側邊與底部集中，導致頂部過薄而破裂。(陳矩翰等人，2011) 此外，聲音振動使薄膜外觀顏色出現複雜變化(周姿吟等人，2022)。

(四)立體幾何模型中的泡膜打氣時所構成的氣室

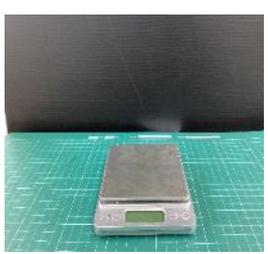
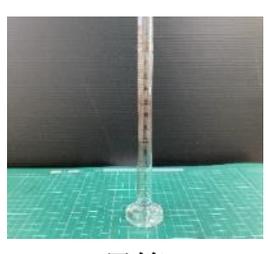
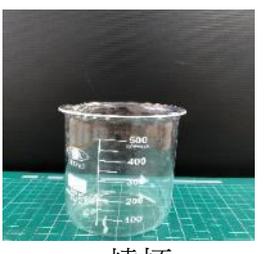
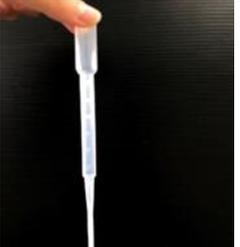
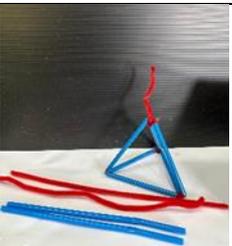
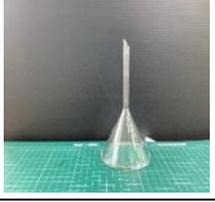
從正立方體浸泡於泡泡水中後提起所形成的方塊泡膜，中央的泡膜圍成一個類正方形的形狀。(洪嘉嶸等人，2021)。與本實驗所觀察到的泡膜型態(氣室)相同。本實驗想進一步了解形成氣室期間原泡膜的動態變化與發展歷程。

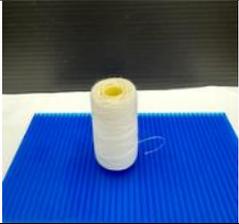
貳、研究設備及器材

一、溶液：共三種溶液，羅列於下表(一)中。(表一 溶液種類)

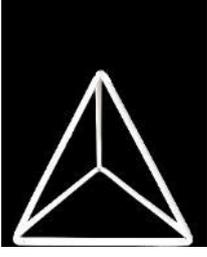
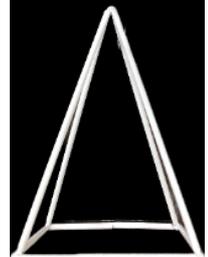
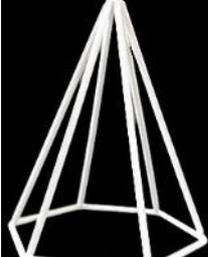
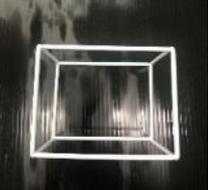
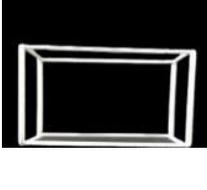
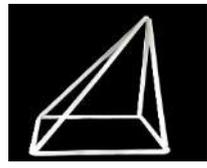
		
洗碗精	純淨水	甘油

二、工具：(表二)相關實驗歷程中輔助之器材與工具

			
量瓶 500ml*3	電子秤(0.001 克)	量筒	燒杯
			
鋁箔紙	平板	滴管	自製打氣筒
			
溫度計(水銀)	溫度計(電子)	毛根	保鮮膜
			
玻璃盆	筆電	砝碼	漏斗

			
白線	支架與槓桿	表面張力測量儀	注射筒

三、防鏽鐵製幾何模型： (表三 立體幾何模型一覽表)

錐形	 三角錐(小) 底邊 7.20 cm 斜邊 8.00cm	 三角錐(大) 底邊 7.40 cm 斜邊 12.00 cm	 四角錐 底邊 4.40 cm 斜邊 11.80 cm	 五角錐 底邊 4.40 cm 斜邊 11.70 cm	 六角錐 底邊 4.90 cm 斜邊 11.70 cm
柱形	 三角柱 底邊 7.30 cm 高 9.30 cm	 四角柱 1 (正方體) 邊長 9.30 cm	 四角柱 2 (長方體) 邊長 7.30cm 高 9.30 cm	 四角柱 3 (扁長方體) 長 10.90 cm 寬 5.40 cm 高 7.20 cm	 五角柱 邊長 4.70 cm 高 9.30 cm
其他	 斜三角錐 底邊 7.20 cm 最長斜邊 13.30 cm 第二長斜邊 11.00 cm 最短斜邊 8.00 cm	 平行四邊稜柱 長 7.90 cm 寬 5.30 cm 高 4.60 cm	 梯形 上邊長 5.40 cm 下邊長 7.30 cm 斜邊 6.50 cm	 正八面體 斜邊 7.30 cm 中邊 7.00 cm	 球 半徑 9.30 cm

參、研究過程或方法

一、調製本實驗所需之液體，及測量其溫度與表面張力。

(一) 調製泡泡水

市售的泡泡水，無法在幾何模型內部形成立體泡泡，我們依據文獻研究及不斷的實驗，我們得到合適的泡泡水配方：「純水：洗碗精：甘油 = 4：1：1」。所以我們決定，純水 2600ml、洗碗精 650ml、甘油 650ml，依序倒入 TF 量瓶內，因為 TF 瓶只有 500ml，所以我們還有用量杯和量筒，先將水、洗碗精、甘油依序加進去透明玻璃容器，我們觀察到三者密度：甘油>洗碗精>水，與網路查到的數據相符。調製泡泡水時要注意單位換算，調製泡泡水時要看清楚加入的化學物質，過程中曾有不小心中加入丙酮過，浪費了許多已倒入的材料，也損傷了一個全新的塑膠盆；暫時不用泡泡水時須用保鮮膜封起，降低蒸發率；每次調製泡泡水後，都有測量溫度、利用天秤自製的工具和表面張力儀測出表面張力。

(二) 自製測量表面張力的裝置

用水平儀確認桌子是否平行，將天秤保持平衡，兩邊掛上等重的砝碼，準備一個玻璃容器裝待測溶液，再用電子秤（50x0.001g）秤出多個 0.5g、0.1g、0.05g 的鋁箔當作小砝碼，之後其中一邊的砝碼放置最接近液體表面的位置，但不能陷入其中，不然會有浮力的影響，接著將另一邊陸續掛上自製小砝碼，直到溶液的那一邊砝碼漸漸往上脫離液面（或是砝碼離溶液表面最遠且跟表面有接觸），停止添掛小砝碼，並讀取砝碼總質量。

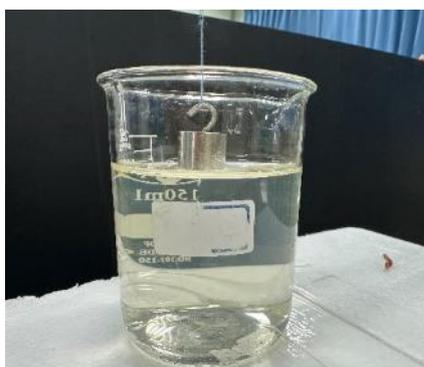


圖 1



圖 2

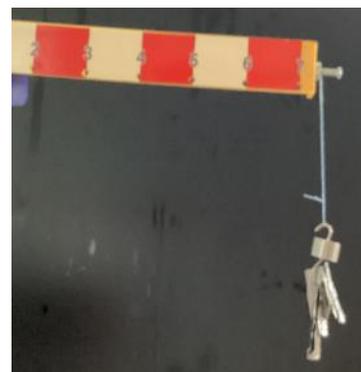


圖 3

(三) 利用表面張力測量儀進行液體表面張力測量與校正

先用水准儀檢測表面張力儀、桌子是否平行，並將白金環放上去刻度指針上，並將刻度指針調為 0，接著旋轉試料臺用升降鈕調製最低點，放下玻璃器皿，並且依序加入待測溶液，紀錄液溫，以利後續判讀表面張力用，接著放鬆試料臺固定鈕上升至白金環高度（但不能碰到），旋轉試料臺升降鈕，然後轉動測量表面張力用的接觸角度的刻度鈕，直到刻度指針彈起，在旋轉調角度的刻度鈕時若快彈起來時要放慢轉速，最後讀取角度。

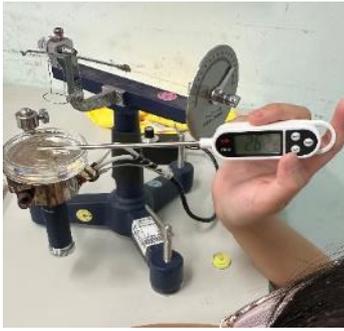


圖 4



圖 5

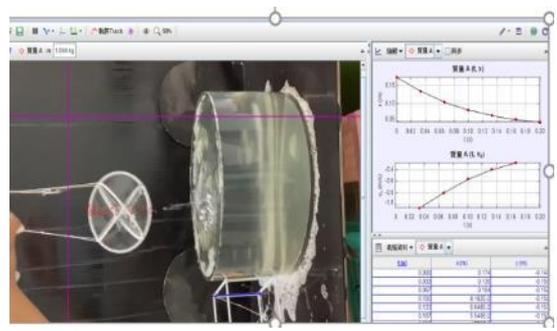


圖 6

二、觀察立體幾何模型由泡泡水中提起後所構成的泡泡薄膜型態與歷程。

(一) 觀察各種幾何模型由「點 露出液面」，模型提起速率與產生泡泡薄膜的成型率

步驟 1：調製足量之泡泡水「水：洗碗精：甘油 = 4:1:1」，並用透明度高的容器盛裝，泡泡水的量不能太少，液深要大於模型高度，確保各種模型能完全浸泡於泡泡水中。

步驟 2：分別將下列幾何模型：三角錐(小)、三角錐(大)、四角錐、五角錐、六角錐、三角柱、四角柱正方體、四角柱長方體、四角柱扁長方體、五角柱、斜三角錐、平行四邊稜柱、梯形、正八面體、球盡可能以平穩速率由原本浸泡於泡泡水中以「點 露出液面」方位提離泡泡水面，到模型完全離開液面後，泡泡薄膜的移動、分布之變化，直到泡泡薄膜穩定停在某個型態時為止的過程中，重複上述動作 20 次，並統計拉 20 次，各模型其泡泡薄膜型態能完整呈現內凹薄膜的成形(模型中每一頂點皆有泡泡薄膜分子共同組成內凹薄膜)的次數，以利進一步估算產生泡泡薄膜的成型率(%)。全程用平板錄影紀錄。再以 tracker 軟體分析膜型提離液面之速率。(如右上圖 6 所示)

步驟 3：分別將下列幾何模型：三角錐(小)、三角錐(大)、四角錐、五角錐、六角錐、三角柱、四角柱正方體、四角柱長方體、四角柱扁長方體、五角柱、斜三角錐、平行四邊稜柱、梯形、正八面體、球盡可能以緩慢平穩速率或急速速率由原本浸泡於泡泡水中以「點 露出液面」方位提離泡泡水面，到模型完全離開液面後，泡泡薄膜的移動、分布之變化，直到泡泡薄膜穩定為止的過程中，重複上述錄影數次，再以 tracker 軟體分析嘗試找到能 100%完整成型出中央內凹泡膜(模型中每一頂點皆有泡泡薄膜分子共同組成內凹薄膜型態)所需的模型提起速率。

(二) 觀察各種幾何模型由「邊線 露出液面」，模型提起速率與產生泡泡薄膜的成型率

步驟 1：調製足量之泡泡水「水：洗碗精：甘油 = 4:1:1」，並用透明度高的容器盛裝，泡泡水的量不能太少，液深要大於模型高度，確保各種模型能完全浸泡。

步驟 2：分別將下列幾何模型：三角錐(小)、三角錐(大)、四角錐、五角錐、六角錐、三角柱、四角柱正方體、四角柱長方體、四角柱扁長方體、五角柱、斜三角錐、平行四邊稜柱、梯形、正八面體、球盞可能以平穩速率由原本浸泡於泡泡水中以「邊線 先露出液面」到「邊線 最後離開液面」(斜三角錐，則是由點 最後離開液面)提離泡泡水面，到模型完全離開液面後，泡泡薄膜的移動、分布之變化，直到泡泡薄膜穩定停在某個型態時為止的過程中，重複上述動作 20 次，並統計拉 20 次，各模型其泡泡薄膜型態能完整呈現內凹薄膜的成形(模型中每一頂點皆有泡泡薄膜分子共同組成內凹薄膜)的次數，以利進一步估算產生泡泡薄膜的成型率(%)。全程用平板錄影紀錄。再以 tracker 軟體分析膜型提離液面之速率。

步驟 3：分別將下列幾何模型：三角錐(小)、三角錐(大)、四角錐、五角錐、六角錐、三角柱、四角柱正方體、四角柱長方體、四角柱扁長方體、五角柱、斜三角錐、平行四邊稜柱、梯形、正八面體、球盞可能以緩慢平穩速率或急速速率由原本浸泡於泡泡水中以「邊線 先露出液面」到「邊線 最後離開液面」(斜三角錐，則是由點 最後離開液面)提離泡泡水面，到模型完全離開液面後，泡泡薄膜的移動、分布之變化，直到泡泡薄膜穩定為止的過程中，重複上述錄影數次，再以 tracker 軟體分析嘗試找到能 100%完整成型出中央內凹泡膜(模型中每一頂點皆有泡泡薄膜分子共同組成內凹薄膜型態)所需的模型提起速率。

(三) 觀察各種幾何模型由「面 露出液面」，模型提起速率與產生泡泡薄膜的成型率

步驟 1：調製足量之泡泡水「水：洗碗精：甘油 = 4:1:1」，並用透明度高的容器盛裝，泡泡水的量不能太少，液深要大於模型高度，確保各種模型能完全浸泡。

步驟 2：分別將下列幾何模型：三角錐(小)、三角錐(大)、四角錐、五角錐、六角錐、三角柱、四角柱正方體、四角柱長方體、四角柱扁長方體、五角柱、斜三角錐、平行四邊稜柱、梯形、正八面體、球盞可能以平穩速率由原本浸泡於泡泡水中以「面 露出液面」方位提離泡泡水面，到模型完全離開液面後，泡泡薄膜的移動、分布之變化，直到泡泡薄膜穩定停在某個型態時為止的過程中，重複上述動作 20 次，並統計拉 20 次，各模型其泡泡薄膜型態能完整呈現內凹薄膜的成形(模型中每一頂點皆有泡泡薄膜分子共同組成內凹薄膜)的次數，以利進一步估算產生泡泡薄膜的成型率(%)。全程用平板錄影紀錄。再以 tracker 軟體分析膜型提離液面之速率。

步驟 3：分別將下列幾何模型：三角錐(小)、三角錐(大)、四角錐、五角錐、六角錐、三角柱、四角柱正方體、四角柱長方體、四角柱扁長方體、五角柱、斜三角錐、平

行四邊稜柱、梯形、正八面體、球盡可能以緩慢平穩速率或急速速率由原本浸泡於泡泡水中以「面 露出液面」方位提離泡泡水面，到模型完全離開液面後，泡泡薄膜的移動、分布之變化，直到泡泡薄膜穩定為止的過程中，重複上述錄影數次，再以 tracker 軟體分析嘗試找到能 100%完整成型出中央內凹泡膜(模型中每一頂點皆有泡泡薄膜分子共同組成內凹薄膜型態)所需的模型提起速率。

三、觀察立體幾何模型中的泡膜打氣時原泡膜的變化與氣室型態與成因。

(一)步驟 1：

原本是以吸管當作打氣導管，但後來將洗滌瓶的管子拔掉並裝在有刻度的針筒上，就可以自製出可以量化氣體體積用的打氣筒並取代吸管。

步驟 2：將固定 5 毫升的空氣透過接了導管的注射筒、管口沾取一點泡泡水後，依序打入角錐與角柱中間的泡泡薄膜，觀察錄影並做紀錄。

注意事項：可將模型中間拉出薄膜，拿打氣筒先裝 5ml 的空氣，切忌裝空氣時不能吸到泡泡水，不然會變得不好打氣，打氣時還會噴泡泡水，經過多次實驗發現 5ml 是最好觀察，且最好掌控的空氣量，然後將要接觸泡泡膜打氣筒的那端沾泡泡水，不然泡泡膜會被刺破瓦解。

四、觀察立體幾何模型中的泡膜或氣室被針戳或抽走氣體的變化。

(一)用乾燥針戳破幾何模型中的泡泡薄膜，觀察錄影並做紀錄。

(二)用乾燥針戳破幾何模型中的泡泡薄膜中央的氣室，觀察錄影並做紀錄。

(三)用自製的打氣筒沾取一些泡泡水，用細管口吸取泡泡薄膜中的氣室中的氣體，觀察錄影並做紀錄。

肆、研究結果

一、調製本實驗所需之液體，及測量其溫度與表面張力。其實驗數據如下表(四)所示。

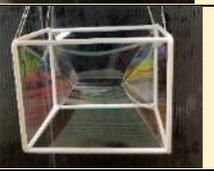
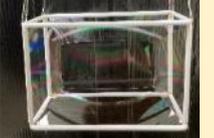
溶液成分	液體溫度(°C)	表面張力儀(mN/m)	利用天平自製工具(gw)
水	24.9	71.97	1.6
甘油	26	41.77	1.25
洗碗精	24.8	27.68	1
稀泡泡水 混合液(體積比) 水：甘：洗 4：1：1	25.3	30.20	1.1
濃泡泡水 混合液(體積比) 水：甘：洗 1：5：1	28.9	48.76	0.6

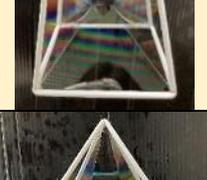
二、觀察立體幾何模型由泡泡水中提起後所構成的泡泡薄膜型態與歷程。

(表五) 觀察各種幾何模型由「點 露出液面」，模型提起速率與產生泡泡薄膜的成型率				
幾何模型	中央內凹薄膜型態	點露出液面 泡膜達到此 型態成型率 (%)	中央內凹薄膜 成型所需之模 型提起速率 (cm/s)	依此速率區 間內拉動膜 型之內凹薄 膜成型率 (%)
三角錐(小)		100%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
三角錐(大)		100 %	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
四角錐		95%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
五角錐		90%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
六角錐	無	0	有限的操作 內無法成功	0
三角柱		100 %	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
四角柱 1(正方體)		90%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %

四角柱 2(長方體)		90%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
四角柱 3(扁長方體)		90%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
五角柱		90%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
斜三角錐		100%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
平行四邊稜柱		100 %	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
梯 形		100%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
正八面體		90%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
球		100%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %

(表六) 觀察各種幾何模型由「邊 露出液面」，模型提起速率與產生泡泡薄膜的成型率				
幾何模型	中央內凹薄膜型態	邊露出液面 泡膜達到此 型態成型率 (%)	中央內凹薄膜 成型所需之模 型提起速率 (cm/s)	依此速率區 間內拉動膜 型之內凹薄 膜成型率 (%)

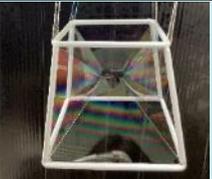
三角錐(小)		100%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
三角錐(大)		95 %	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
四角錐		90%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
五角錐		95%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
六角錐	無	0	有限的操作 內無法成功	100 %
三角柱		100%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
四角柱 1(正方體)		80%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
四角柱 2(長方體)		90%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
四角柱 3(扁長方體)		90%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %

五角柱		85%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
斜三角錐		100%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
平行四邊稜柱		95 %	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
梯 形		100%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
正八面體		70%	36~目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
球		15%	91~目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %

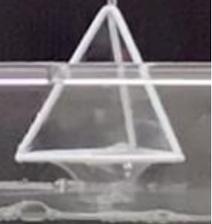
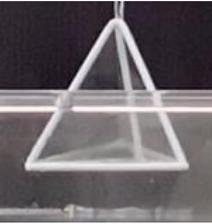
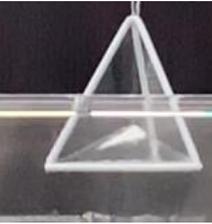
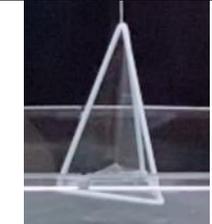
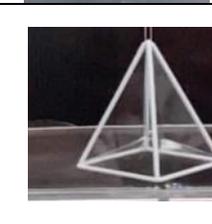
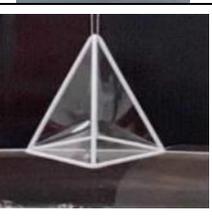
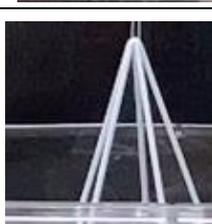
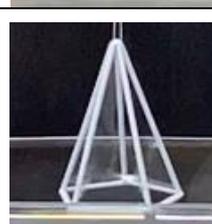
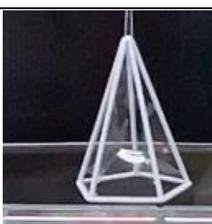
(表七) 觀察各種幾何模型由「面 露出液面」，模型提起速率與產生泡泡薄膜的成型率

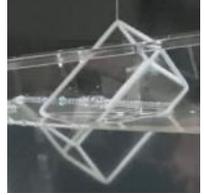
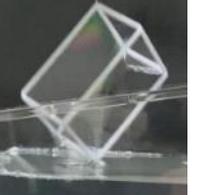
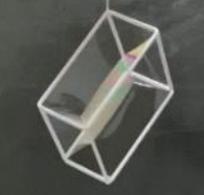
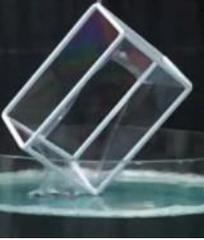
幾何模型	中央內凹薄膜型態	面露出液面 泡膜達到此 型態成型率 (%)	中央內凹薄膜 成型所需之模 型提起速率 (cm/s)	依此速率區 間內拉動膜 型之內凹薄 膜成型率 (%)
三角錐(小)		0	45~目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
三角錐(大)		0	45~目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %

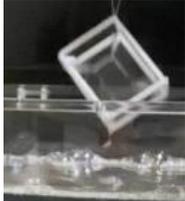
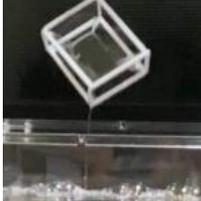
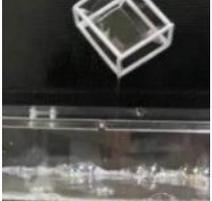
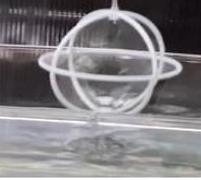
四角錐		0	65~目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
五角錐		0	有限的操作內無法成功	100 %
六角錐	無	0	有限的操作內無法成功	100 %
三角柱		80%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
四角柱 1(正方體)		75%	27~目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
四角柱 2(長方體)		20%	30.3~目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
四角柱 3(扁長方體)		60%	31.3~目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
五角柱		60%	24.8~目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
斜三角錐		0	45~目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
平行四邊稜柱		0	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %

梯形		100%	目前已知 1673 cm/s 以內皆可	100 %
正八面體		0	有限的操作 內無法成功	100 %
球		100%	有限的操作 內無法成功	100 %

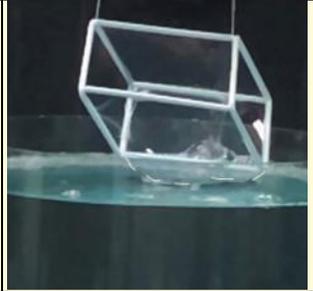
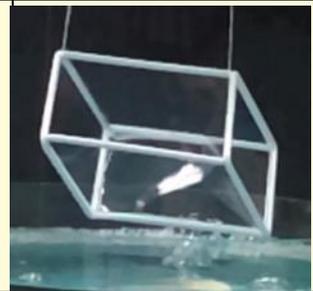
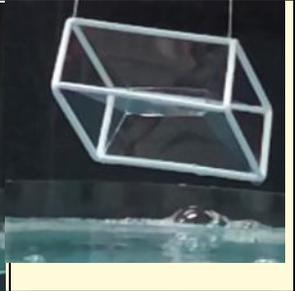
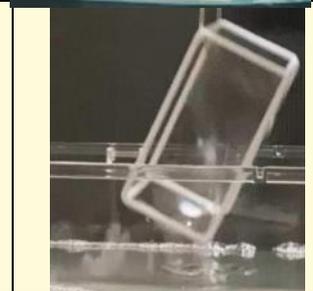
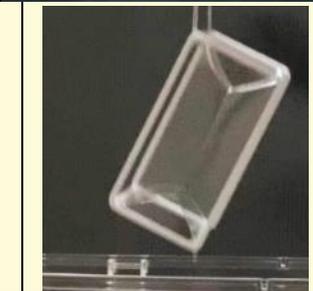
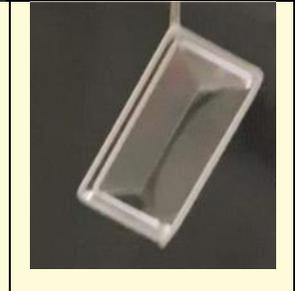
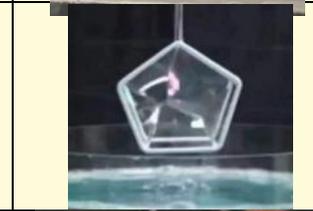
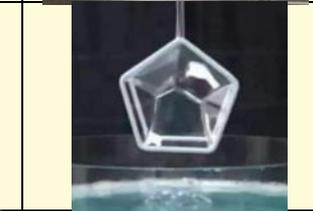
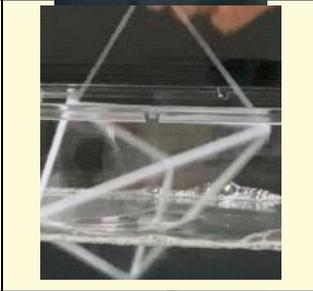
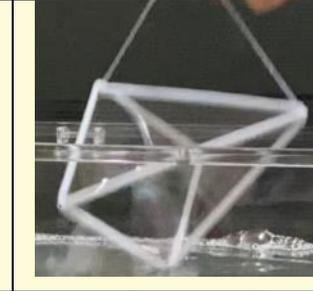
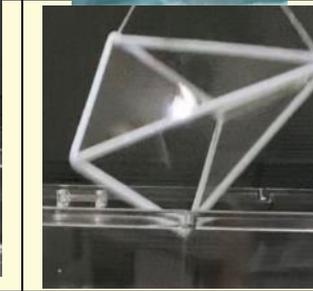
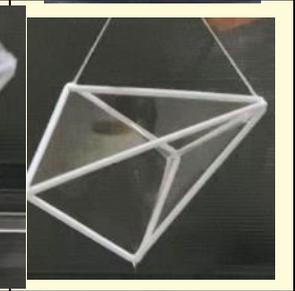
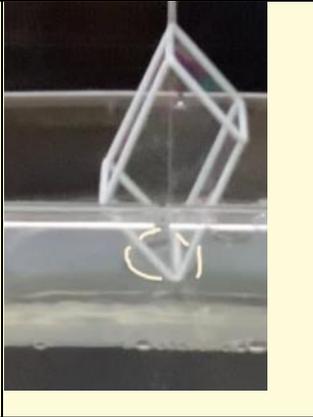
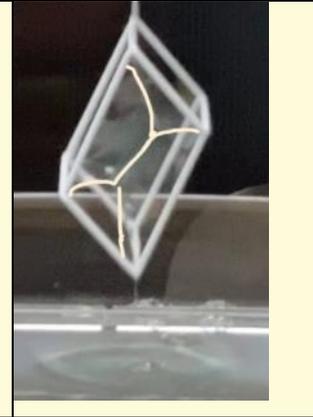
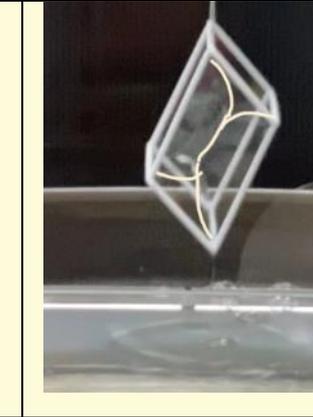
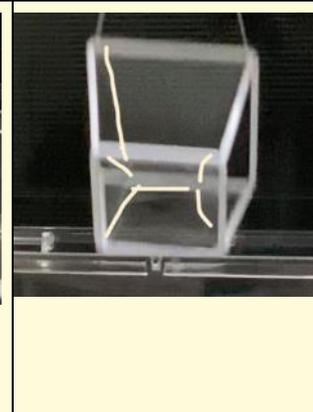
(表八) 觀察各種幾何模型由「點 露出液面」後，泡泡薄膜成形的過程……

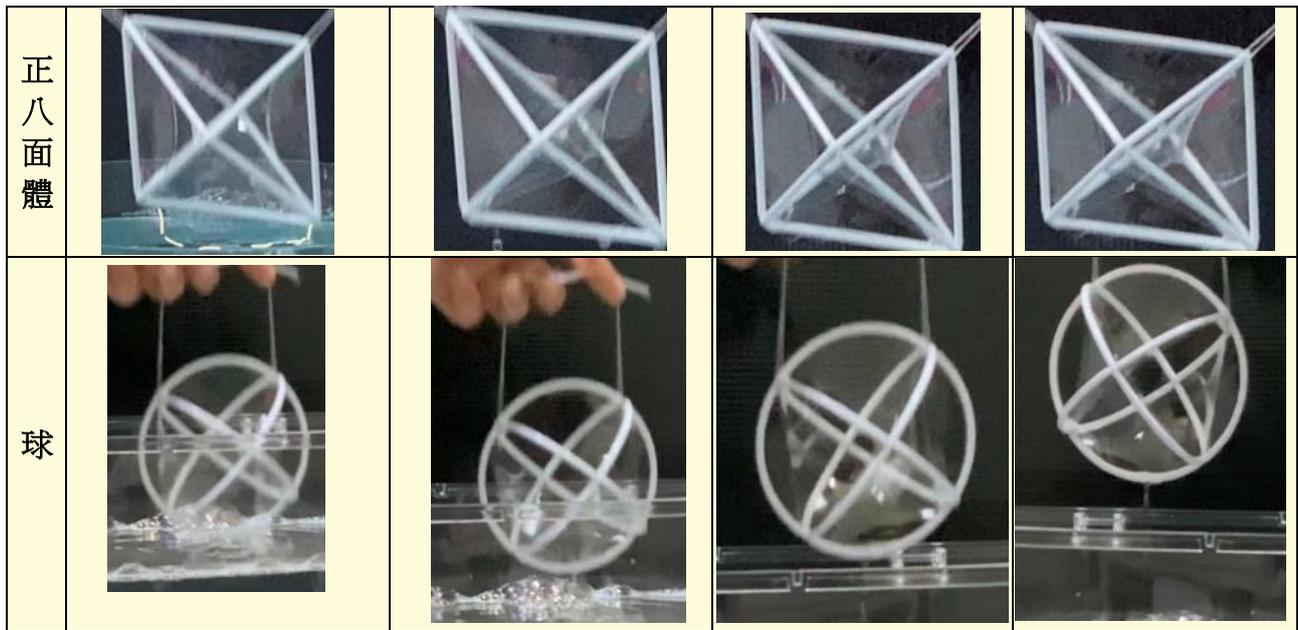
幾何模型	離開水面前	離開水面後 1	離開水面後 2	泡泡薄膜成形圖
三角錐 (小)				
三角錐 (大)				
四角錐				
五角錐				

六角錐				
三角柱				
四角柱 正方體				
四角柱 長方體				
四角柱 扁長方體				
五角柱				

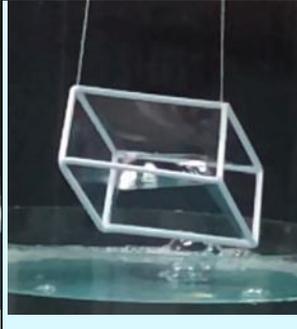
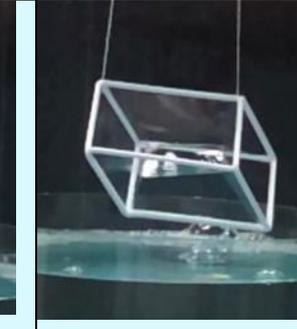
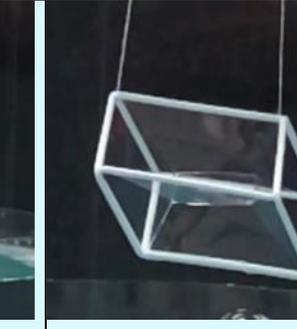
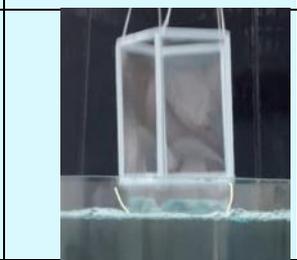
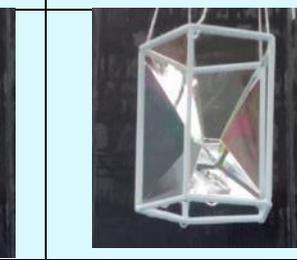
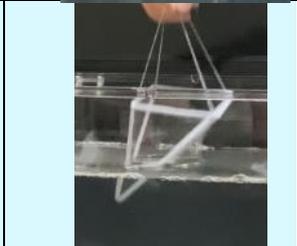
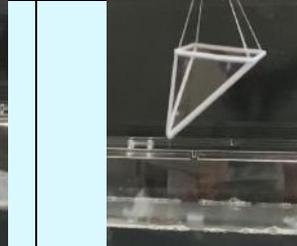
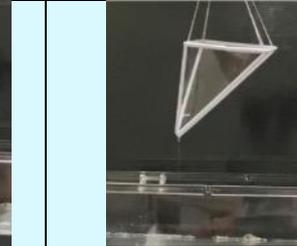
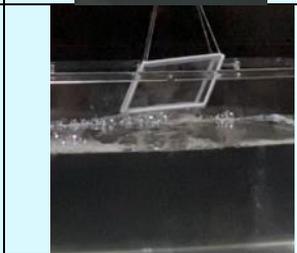
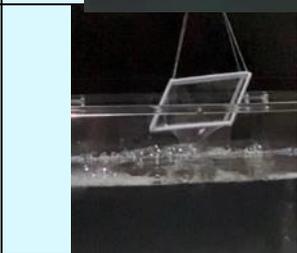
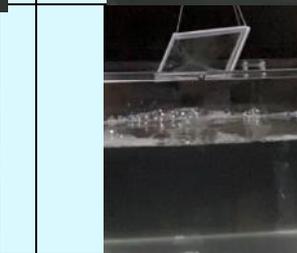
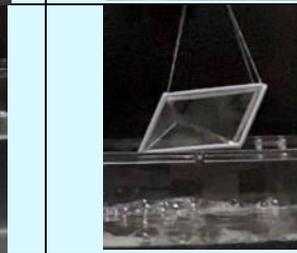
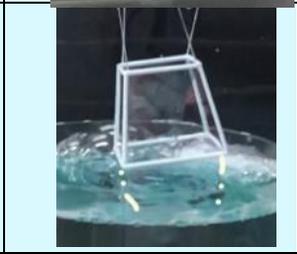
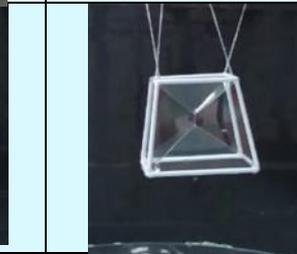
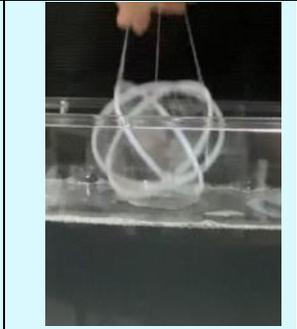
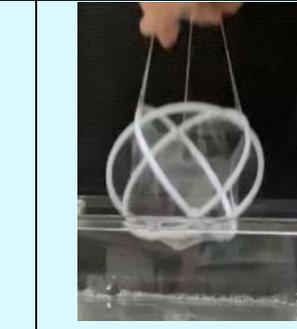
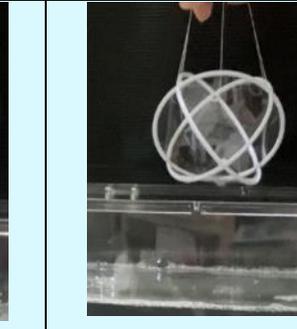
<p>斜三角錐</p>				
<p>平行四邊稜柱</p>				
<p>梯形</p>				
<p>正八面體</p>				
<p>球</p>				

(表九) 觀察各種幾何模型由「邊線 露出液面」後，泡泡薄膜成形的過程……				
模型	離開水面前	離開水面後 1	離開水面後 2	泡泡薄膜成形圖
小三角錐				
大三角錐				
四角錐				
五角錐				
六角錐	因屢次嘗試拉起還是未成功，所以此圖無數據。			
三角柱				
四角柱 正方體				

四角柱 長方體				
四角柱 扁長方體				
五角柱				
斜三角錐				
平行四邊形 稜柱				
梯 形				



(表十) 觀察各種幾何模型由「面 露出液面」後，泡泡薄膜成形的過程……				
模型	離開水面前	離開水面後 1	離開水面後 2	泡泡薄膜成形圖
(小)三角錐	因屢次嘗試拉起還是未成功，所以此圖無數據(面的成型率極低)			
(大)三角錐	因屢次嘗試拉起還是未成功，所以此圖無數據(面的成型率極低)			
四角錐	因屢次嘗試拉起還是未成功，所以此圖無數據(面的成型率極低)			
五角錐	因屢次嘗試拉起還是未成功，所以此圖無數據(面的成型率極低)			
六角錐	因屢次嘗試拉起還是未成功，所以此圖無數據(面的成型率極低)			
三角柱				
四角柱 正方體				
四角柱 長方體				

四角柱扁長方體				
五角柱				
斜三角錐				
平行四邊稜柱				
梯形				
正八面體 因屢次嘗試拉起還是未成功，所以此圖無數據(面的成型率極低)				
球				

三、觀察立體幾何模型中的泡膜打氣時原泡膜的變化與氣室型態與成因。

打越多氣泡模中間形成的泡泡會越大，發現中間形成的氣室圖形與模型本身的圖形類似。相關實驗結果之圖示，礙於篇幅，合併至第五章實驗討論中呈現。

四、觀察立體幾何模型中的泡膜或氣室被針戳或抽走氣體的變化。

(一)立體幾何模型中的泡膜被針戳：

戳破其中的一個面，模型中形成不一樣的泡膜型態，以達到新的穩定情形。若戳破其中的兩個面以上，容易出現泡膜全部瓦解的情形。

(二)立體幾何模型中的氣室被針戳

戳破薄膜中的氣室，整個泡泡薄膜有可能全數瓦解；但也有可能沒有全數瓦解，甚至泡膜恢復成原打氣前的型態。此時的結構是最穩定，達到力平衡和最低能量。

(三)立體幾何模型中的氣室被抽氣

將抽氣瓶的導管深入泡膜氣室中，逐漸將空氣抽取出來，會發現中間的圖形越來越小。縮小後的泡泡氣室仍與其幾何模型本身的圖形相關。若將氣室內氣體全數抽走，氣室內接近真空，則外面大氣壓力將氣室泡膜壓縮成一點，模型中間的泡膜可再度重新分配位置，恢復成未打氣產生氣室前的型態。

相關實驗結果之圖示，礙於篇幅，合併至第五章實驗討論中呈現。

伍、討論

一、調製本實驗所需之液體，及測量其溫度與表面張力。

溫度確實影響表面張力，水溫度越高表面張力越小，已知泡泡薄膜的成形與表面張力有關，後續若有更多時間觀察泡膜與模型拉起速度實驗時，我們將比較溫度、表面張力對泡膜的影響。

二、觀察立體幾何模型由泡泡水中提起後所構成的泡泡薄膜型態與歷程。

(一)尖端(點)出水面成功次數和機率

- 1.錐體尖端(點)出水面 20 次中央內凹泡膜完整成形 15.4 次,機率为 77%
- 2.柱體尖端(點)出水面 20 次中央內凹泡膜完整成形 18.4 次,機率为 92%
- 3.不規則體尖端(點)出水面 20 次中央內凹泡膜完整成形 19.6 次,機率为 98%

(二)邊線出水面成功次數和機率

- 1.錐體邊線出水面 20 次中央內凹泡膜完整成形 15.2 次,機率为 76%
- 2.柱體邊線出水面 20 次中央內凹泡膜完整成形 17.8 次,機率为 89%
- 3.不規則體邊線出水面 20 次中央內凹泡膜完整成形 15.2 次,機率为 76%

(三)面出水面成功次數和機率

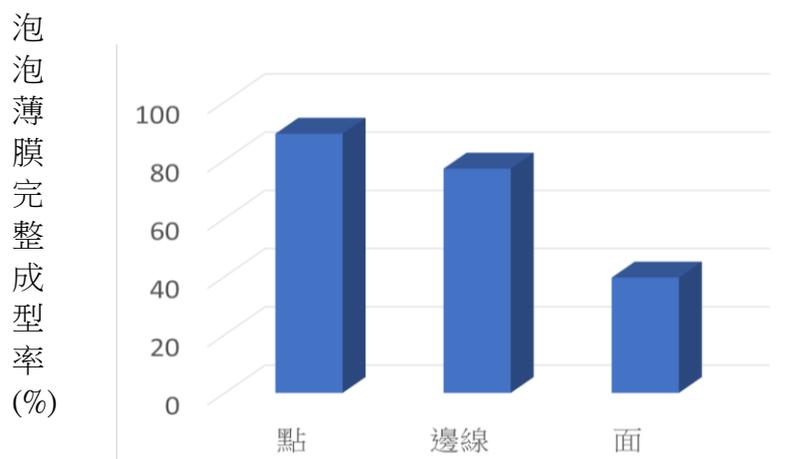
- 1.錐體面出水面 20 次中央內凹泡膜完整成形 0 次,機率为 0%
- 2.柱體面出水面 20 次中央內凹泡膜完整成形 11.8 次,機率为 59%
- 3.不規則體面出水面 20 次中央內凹泡膜完整成形 8 次,機率为 40%

(四)由實驗結果可以發現，綜合各種幾何模型，成型率为 點>邊線>面。

尖端(點)出水面，泡泡面呈內凹型的機率为約為 89%，

由立方體的一邊(線)先出水面的機率为，約為 77%，

由面出水面的機率为，大幅減少，大約僅為 39.6%。



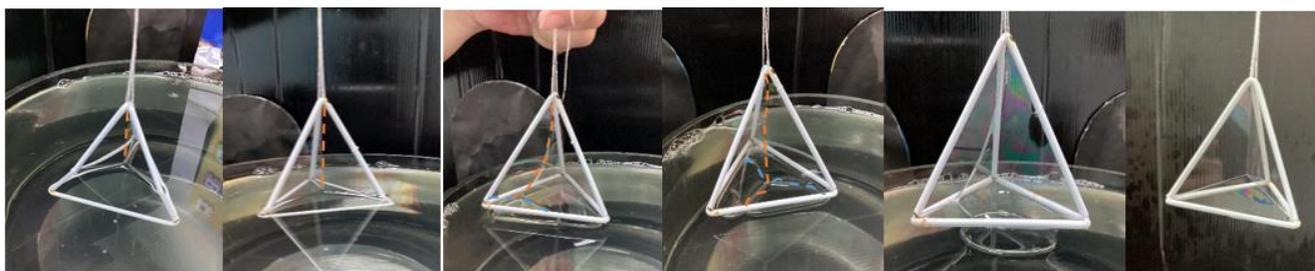
(圖 7) 泡泡薄膜完整成型率與模型提離液面的方位之比較

(二) 重覆實驗數十次發現，當面出表面的速度太慢或太快時，其內凹泡膜不會形成。

1. 當拉起幾何模型速度增快時，形成內凹圖案的機率为大幅增加。
2. 當速度大至某一程度時，對稱性的內凹機率为接近 100%。
3. 由實驗結果可以發現，綜合各種幾何模型，成型率为 點>邊線>面。扣除六角椎以外，「點 露出液面」與「邊線 露出液面」的成形成率高，其 100%成形成所需之模型提離液面速度幾乎沒有明顯限制，手部提起速率快、慢皆頗易呈現完整的中央內凹泡膜。

至於以「面 露出液面」的成形成率偏低，因此，其 100%成形成所需之模型提離液面速度則有明顯區間限制，且各種模型所需之提離速率稍有不同。

(三)以三角錐為例，由點 先露出水面，最後由面 離開液面時。



(圖 A)

(圖 B)

(圖 C)

(圖 D)

(圖 E)

(圖 F)

- 1.由(圖 A)可發現當點先離開水面時，三個邊和點早已有交互作用，形成了 3 個面。
- 2.由點出液面，不論提離速率慢到快，皆可發現每次泡膜並非附著於三角錐各別表面上，而是三側面的泡膜內凹，且已碰觸有交互作用的泡膜形態。
- 3.由圖(A)到(B)可以發現當模型拉離水面的距離越遠，則中間與水面垂直的線越來越長，中間的分界線是 3 個分側面的泡泡水分子群與液面共同拉出的。圖(B)可以發現，即使拉到三角框出水面瞬間，泡膜間的形狀維持不變。
- 4.圖 C、圖 D 當我們將模型提出水面時，因無法控制是否每個角同時離開，所以先離開的角與垂直水平面的直線會因各邊、各角具液面距離不同，各分側面之表面張力使原本垂直於液面的中間分界線發生扭曲，因垂直的線與周邊扭曲的線是互相拉扯，所以垂直的線也因被拉扯而彎曲。【圖 C、D 為同個步驟不同攝影方向】圖 C 發現，當三角框拉出水面，此時膜並沒有破裂。圖 E 可以觀察到拉出表面一段距離內，由於表面張力關係，其泡泡尚未破裂，在液面與膜形底面的邊框中形成一個很大的圓形泡泡膜。而最後當模型逐漸遠離液面時，模型底部空心圓形泡泡膜面積縮小，直到表面膜破裂時，可以觀察到膜形底部有一些泡泡水分子群因為表面張力關係跟著模型帶動而快速往上彈起。
- 5.圖 E 到圖 F 可發現隨著膜形離開水面的距離遞增底下的圓柱會因表面張力而彈起，與上面已形成的面黏在一起、互相作用拉扯，又因內聚力所以內凹，形成一個內凹 6 面的形態。
- 6.圖 E 所示當拉出液面一定皆為空心圓形，而非為因為底面是三角形，就圍成三角形。類似水因表面張力內聚力希望形成一個最小的表面積所致。因此無論何種膜形當底部屬於面 離開液面之模式時，都可以觀察到此現象。

(四) 以三角錐為例，由邊線與液面平行先露出液面。



(圖 G)

(圖 H)

(圖 I)

(圖 J)

(圖 K)

1. 圖 G 可以觀察到，當一邊先出水面時，因分子距離較近，已有交互作用而黏在一起，並且與水面拉出 5 個面。
2. 圖 G~I 可發現側邊與水面拉出的 2 組面，兩面分別連在一起的邊會越來越長，因為此邊是與水面一起拉出。

3. 圖 G~J 可以發現左右兩組面的距離隨著拉起的高度而變短，直到四個斜邊皆離開水面，左右兩組面的分子就會接觸，黏在一起。
4. 由圖 J 可發現各面泡膜皆碰觸黏在一起，曲邊受到拉扯後，分子群新分配位置拉扯後變直線條。且模型邊未全部拉起最終圖形早已形成。
5. 圖 J 可以觀察到，框架並未拉出表面時，其最終形狀已經初步形成，唯一會改變的是最終中間泡膜的節點的位置，中間節點的位置是逐漸移動到穩定的平衡位置。

(五) 以四角柱(長方體)為例：當邊線 出液面



(圖 L) (圖 M) (圖 N) (圖 P) (圖 Q)

1. 圖 (L) 可發現跟三角錐邊先離開水面一樣，泡泡膜不會在框表面形成且跟水面形成 5 個面。
2. 圖(M)可發現當地二條邊離開水面時，會與水面與已開始早已拉出的膜，一起在拉出一個面，此時共有 6 個面。
3. 圖(N)可以觀察到當第三個長邊離開水面時，因為表面張力第三個邊會與水面拉出似橢圓形空心圓柱，所以此時共有 7 個面。
4. 由圖(P)可發現當長方體第四個邊拉起但與水面還有接觸時，在(圖 M)時形成的面會因表面張力往上彈，與已形成的膜黏在一起，從新找到平衡拉出 10 個面。
5. 由圖 P 到圖 Q 可觀察到當第四個邊已完全沒有跟水面接觸時，在圖 N 時形成的似橢圓空心的圓柱會因拉起的高度，而慢慢拉大，直到一個限度，會反彈與上面的膜接觸，又因內聚力，所以形成了 13 個面的泡膜的形態。
6. 由圖 L 到圖 Q 可發現當越多長邊離開水面所形成泡膜的面數會越來越多，柱狀的模型中央形成一個與模型形狀相關的小平面泡膜。

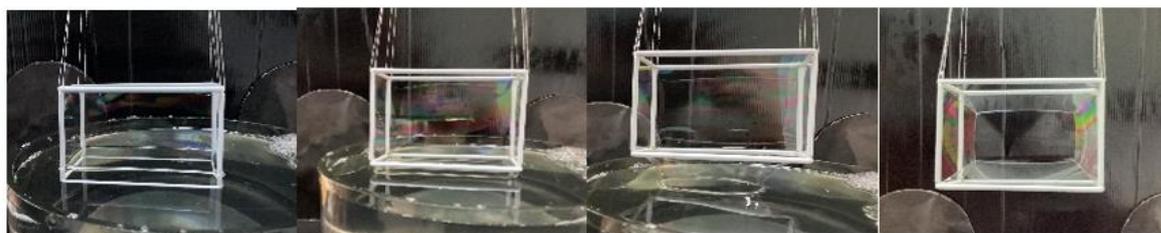
(六) 以三角錐為例：面 出液面



(圖 R) (圖 S) (圖 T) (圖 U) (圖 V) (圖 W)

- 1.由圖(R)和圖(S)可發現跟三角錐與點離開不一樣的是它並不會一開始就有泡泡薄膜間的交互作用，而是模型各邊與液面在邊框形成 3 面泡膜。
- 2.由(圖 T)可發現當點還與水面碰觸時，上面的三個面早已在邊框形成。
- 3.由(圖 U)可以發現與三角錐點先離開水面不同，因為底下未出現似空心圓形。且上面三角錐先離開水面的面未有薄膜形成。
- 4.由面先露出液面，慢慢拉起的形成內凹的可能幾乎為零，因為薄膜和薄膜分子沒有相互接觸以及也沒有發生重新排列。
- 5.唯當快速拉起，薄膜震盪，使薄膜接觸形成內凹的機率會上升。
- 6.由圖 V 之操作可發現拉起未形成內凹，我們再平行晃動時，無法使薄膜接觸，形成內凹。
- 7.由圖 W 之操作拉起未形成內凹，我們在垂直晃動，能使薄膜接觸，再加上內聚力，形成與以點拉起時，相同的數量的面形成相同內凹的形態。

(七) 以四角柱(長方體)為例：面 出液面



(圖 X)

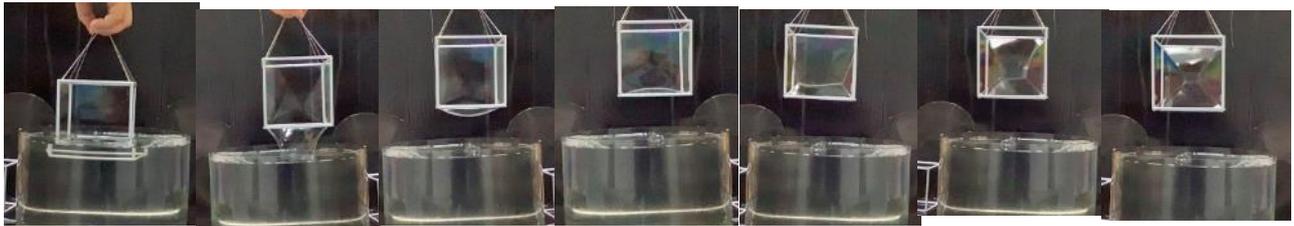
(圖 Y)

(圖 Z)

(圖 a)

1. 長方體慢速拉出水面時，發現與長方體邊先離開水面不同，薄膜會在框架成形，此時共形成 4 個面。
2. 由圖 Y、圖 Z 會發現底下跟三角錐以點先離開水面、面 後離開液面一樣，因表面張力底下會形成似空心圓形圖案，且當模型的距離與水面距離增加，底下的圓形半徑會越小，最後反彈，當拉起的速度較慢，反彈震盪的幅度很小，無法使底下的面與上面的面接觸、黏在一起，所以中間不會有內凹的泡膜型態，但是當我們對這個模型產生擾動、迅速提起或是風吹，所提供的動能，使兩側與底部的薄膜產生振盪，當能量足夠時薄膜碰在一起時，此時中央泡泡水分子重新分配位置，平衡後產生穩定的內凹圖形；或快速拉起模型時因為震盪較大而直接甚至迅速產生內凹的泡膜形態。(如圖 a)

(八)各分面泡膜的節點或中央小平面泡膜，並非一開始就存在，而是慢慢由下方往上移，最後停在穩定、能量低的平衡位置。以四角柱為例：



(圖 b) (圖 c) (圖 d) (圖 e) (圖 f) (圖 g) (圖 h)

三、觀察立體幾何模型中的泡膜打氣時原泡膜的變化與氣室型態和成因。

打越多氣形成中間形成的泡泡會越大，泡泡洽會發現中間形成的氣室圖形像模型的圖形。打氣時，不管洗滌瓶的導管口打氣前是否已存在泡泡薄膜，打氣時皆會形成泡泡，打氣時泡泡水的分子又接觸使泡泡可以形成。吹入之空氣有體積、氣壓，雖被泡膜包覆，但碰觸到模型內既有薄膜，既有的薄膜型態與模型本身形狀有關，接觸後泡泡分子們相互拉扯使泡泡呈現與模型相似的氣室。



(圖 i)打氣前 (圖 j)打氣後 (圖 k)打入更多體積的氣體



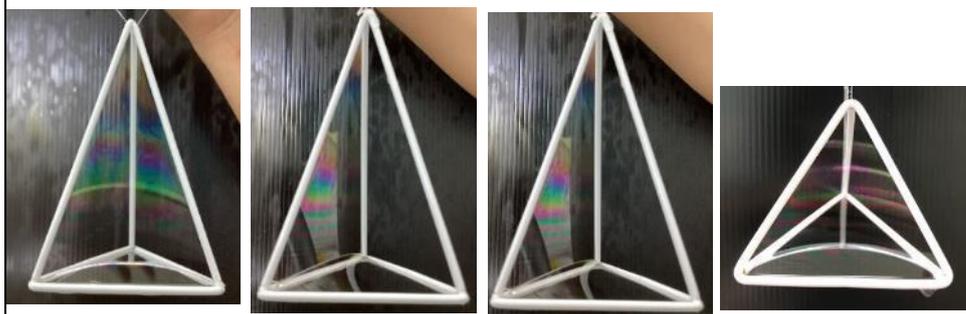
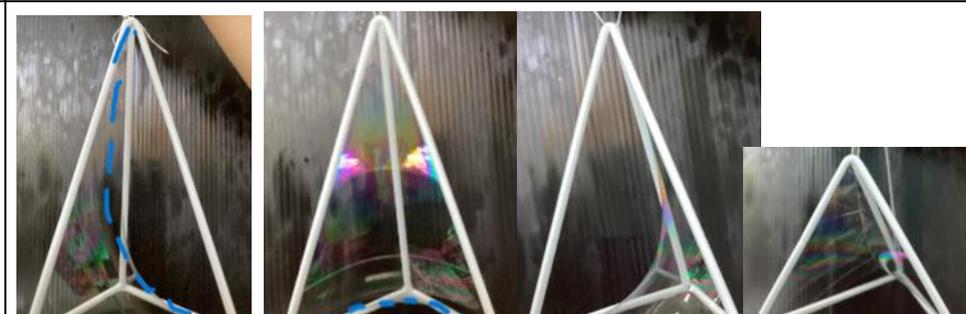
(圖 l)打氣後 (圖 m)打入更多毫升的氣 (圖 n)打氣前 (圖 p)打氣後

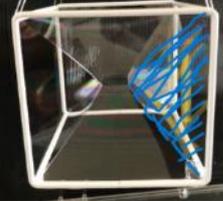
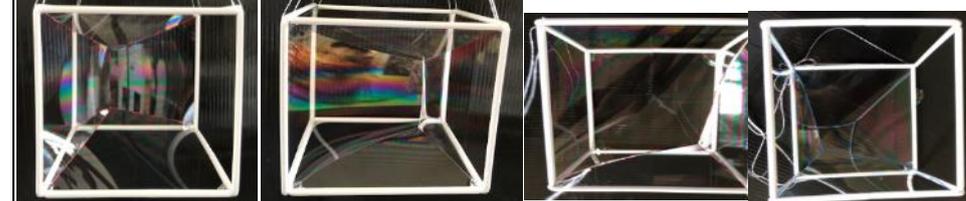
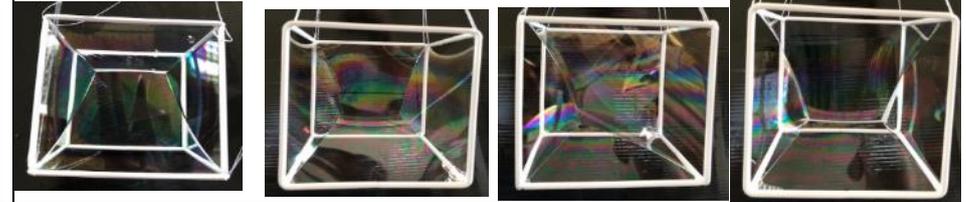
四、觀察立體幾何模型中的泡膜或氣室被針戳或抽走氣體的變化。

(一) 立體幾何模型中的泡膜被針戳：

- 1.戳破其中的一個面，模型重新形成不一樣的泡膜型態，以達到新的穩定平衡。戳破其中的一個面，部分泡泡水分子掉落或位移，破壞了原排列的型態。原本薄膜內的平衡被破壞後，泡膜並未就此瓦解，而是以現存泡泡水分子群重新分配找一個新的平衡位置，於模型中形成不一樣的泡膜型態，達到新的穩定狀態。此外，沒被戳到的部分區域的泡膜幾乎可保持原貌。

2.若戳破其中的兩個面以上，容易出現泡膜全部瓦解的情形。

圖形	以著色標記被戳破的面	(表十一) 用不同視角觀察：戳破後的泡膜新型態 戳破任一薄膜面，觀察立體模型內薄膜結構的變化
大三角錐		
大三角錐		

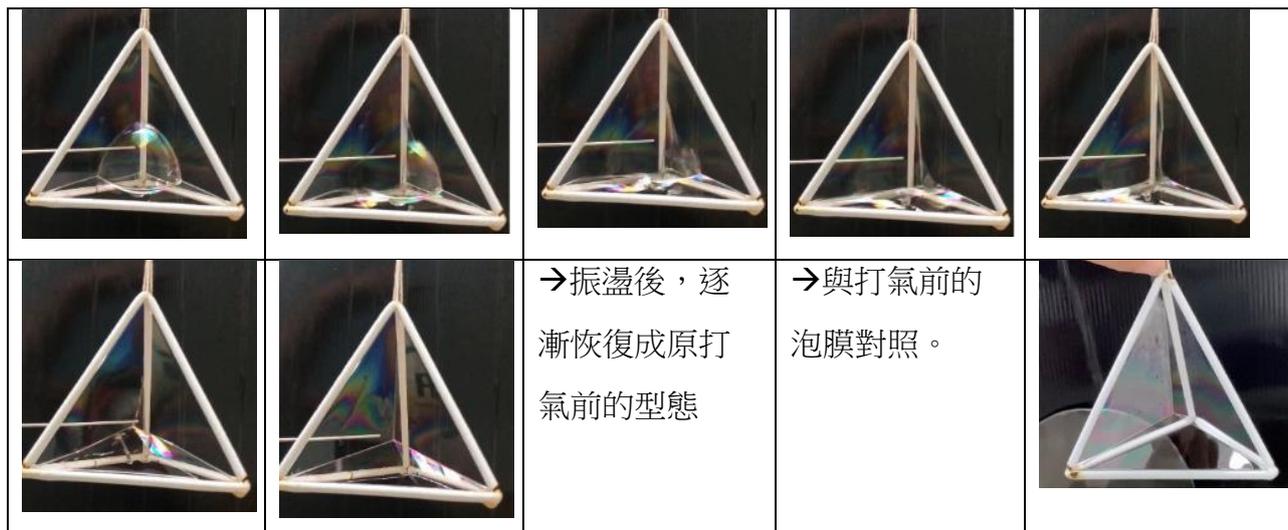
圖形	以著色標記被戳破的面	(表十二) 用不同視角觀察：戳破後的泡膜新型態
正方體		
正方體		

(二)立體幾何模型中的氣室被針戳：

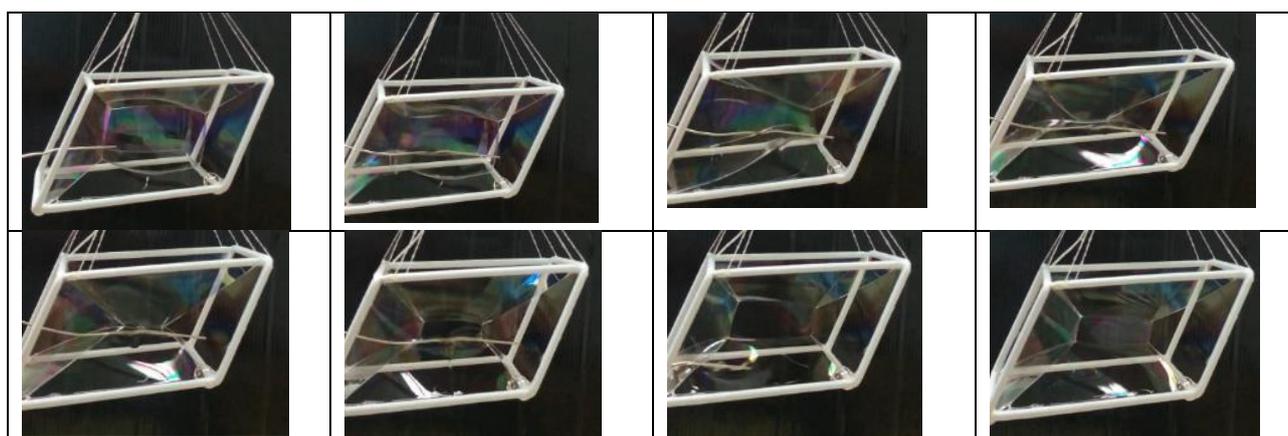
戳破薄膜中的氣室，整個泡泡薄膜有可能因此全數瓦解；但也有可能沒有全數瓦解，甚至泡膜恢復成原本打氣前的型態。以三角錐、稜柱兩種情形為例：

1. 氣室內的氣體因被針戳，內部氣體氣壓大沿著破口往氣壓低的外界逸出，部分泡泡水分子掉落或位移，改變了原有排列的型態。遠離破口端的氣室外圍的泡泡分子群因氣體逸出內縮互相靠近產生碰觸與振盪，雖原本薄膜內的平衡被破壞後，但現存泡泡水分子群有可能重新分配找一個新的平衡形態，甚至隨著氣體散逸，中央泡膜

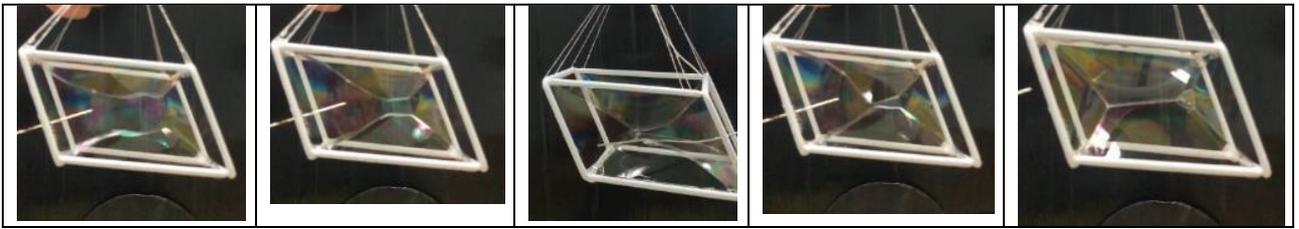
恢復成原打氣前的型態。以三角錐模型中的氣室被針戳為例，如下表(十三)所示。



- 氣室內的氣體因被針戳，內部氣體氣壓大沿著破口往氣壓低的外界逸出，部分泡泡水分子掉落或位移，改變了原有排列的型態。遠離破口端的氣室外圍的泡泡分子群因氣體逸出先內縮互相靠近產生碰觸與振盪，緊接著，破口端的泡泡分子群也因為整體氣室崩潰內部氣壓逐漸變小，被外部氣壓壓著往中央靠攏，雖原本薄膜內的平衡被破壞後，但現存泡泡水分子群有可能重新振盪、分配找一個新的平衡形態，甚中央泡膜恢復成原本打氣前的形態，只是部分泡泡分子折損，柱狀模形中間原本的小平面薄膜，似乎面積變小一些。以稜柱中的氣室被針戳為例，如下表(十四)所示。



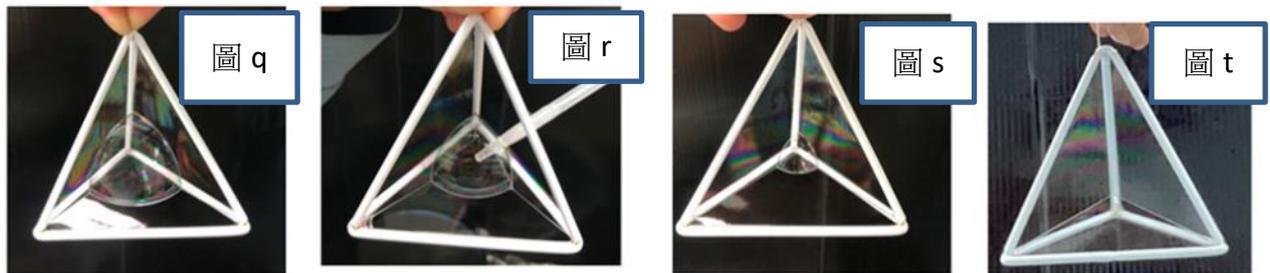
- 氣室內的氣體因被針戳，內部氣體氣壓大沿著破口往氣壓低的外界逸出，部分泡泡水分子掉落或位移，改變了原有排列的型態。遠離破口端的氣室外圍的泡泡分子群因氣體逸出先內縮互相靠近產生碰觸與振盪，若是振盪速率快大於氣室內的氣體逸出，則會有部分氣體來不及排出，當剩餘泡泡分子們重新分配位置，將能量降至最低時，可能將未逸出的氣體包在泡膜間，在節點間形成比原本體積小一些的氣室。以下表(十五)所示。



(三) 立體幾何模型中的氣室被抽氣：

將抽氣瓶的導管深入泡膜氣室中，逐漸將空氣抽取出來，會發現中間的圖形越來越小。縮小後的泡泡氣室仍與其幾何模型本身的圖形相關。

1. 如圖 r，當氣室內氣體被抽走時，氣室內的氣壓小於外部大氣壓力，導致外面的大氣壓力相對大於氣室的壓力，餘留的泡膜沒有塌陷。如圖 s，變成一個縮小版的氣室泡膜型態。
2. 因應氣室內外壓力差，氣室泡膜附近的泡泡水分子群重新排列，形成新的平衡型態。
3. 若將氣室內氣體全數抽走，氣室內接近真空，則外面大氣壓力將氣室泡膜壓縮成一點(圖 t)，模型中間的泡膜又再度重新分配位置，恢復成未打氣產生氣室前的型態。



4. 利用自製的針筒抽氣瓶導管沾取一些泡泡水後，將抽氣瓶的導管深入泡膜氣室中，逐漸將空氣抽取出來，會發現氣室越來越小。比較各種不同幾何模型的差異，發現縮小後的泡膜中形成的氣室圖形依然與模型本身的圖形類似。

陸、結論

一、調製本實驗所需之液體，及測量其溫度與表面張力。

自製的天秤和表面張力儀都可測出表面張力，雖然表面張力儀較精準，但利用天平與槓桿較容易取得，因為表面張力的數值很小，本實驗採鋁箔紙自製小砝碼測量，至於鋁箔砝碼輕巧則需要最小刻度達 0.001 公克的電子秤判讀，經過本實驗後驗證：溫度確實影響表面張力，已知泡泡薄膜的成形與表面張力有關，後續若有更多時間觀察泡膜與模型拉起速度實驗時，我們將紀錄當時溫度與表面張力。

二、觀察立體幾何模型由泡泡水中提起後所構成的泡泡薄膜型態與歷程。

(一) 模型中央出現凹的泡膜因為內聚力，使薄膜會往內縮。產生的膜會在每個面上保持平衡。以不同的速率不同的方向先離開泡泡水(點、線、面) 成功的機率會不同，點先

離開泡泡水的成功率最高，面先離開泡泡水成功率最低。

(二)形成泡膜的條件有：模型須完全浸泡於泡泡水中，離開液面之模型，至少需 N-1 面有泡泡薄膜。再者，須提供這些泡泡薄膜動能(例如：人力迅速拉起模型、外力擾動模型、風力吹拂..)讓每一面泡泡薄膜與鄰近之薄膜間能相互碰觸震盪，重新分配位置與將能量降到最低。因此，角錐中，當邊數達 6 以上，相鄰泡膜間的碰觸機會少，於中間形成美麗泡膜的機率幾乎為零。

(三)當由點先出液面，泡膜平衡後有一小塊幾何圖形，其形狀與該模型底面形狀相同。

由觀察可知，此片泡膜不是一離開液面就固定在該處，而是模型底部離開液面時與液體的表面張力造成的薄膜向上震盪時，與側面的泡泡薄膜相互作用拉扯後才能停在平衡位置，此位置的合力為零。當模型邊數達 6 以上，會發現底部這塊薄膜會由下往上移動至其上頂點後，消失，顯示，無法在此類模型中空處找到由底面帶上來的泡泡薄膜之最低能量位置。

三、觀察立體幾何模型中的泡膜打氣時原泡膜的變化與氣室型態與成因。

打越多氣形成中間形成的泡泡會越大，泡泡洽會發現中間形成的氣室圖形像模型的圖形。無論沾有泡泡水的導管口是否已存在泡泡薄膜，打氣時皆會形成泡泡，吹入之空氣泡的氣壓與外界達成平衡時，體積不再變大，此包覆著氣室的泡泡水分子們碰觸到模型內既有薄膜，既有的薄膜型態與模型本身形狀有關，接觸後泡泡分子們相互拉扯使泡泡呈現與模型相似的氣室。

四、觀察立體幾何模型中的泡膜或氣室被針戳或抽走氣體的變化。

用抽氣筒將氣室內的氣體抽出或戳破氣室，導致氣室內氣壓小於大氣壓力，原包圍氣室的相鄰泡泡分子受力作用重新閉合，可恢復該泡膜無氣室時之泡膜型態。若用乾燥針尖戳破泡膜的某一面，可發現沒被戳到的面會重新做疊加，並不會全部崩解。

照片、圖片出處說明

本作品說明書中表一~表三中輔以說明用的附圖、表五~表十五中輔以說明用的附圖、圖 1~7、圖 A~N、圖 P~Z、圖 a~n、圖 p~t 全數皆由作者於研究過程到科展參賽期間自行拍攝與製作。

柒、參考文獻資料

- 一、洪嘉嶸等人(2021)。中華民國第 61 屆中小學科學展覽會國小組物理科-親愛的!泡泡怎麼變形了。新竹市東區龍山國民小學。
- 二、陳矩翰等人(2011)。中華民國第 51 屆中小學科學展覽會國中組地球科學科-大氣怎麼流，泡泡來解說。雲林縣私立永年高級中學(附設國中)。
- 三、周姿吟等人(2022)。中華民國第 62 屆中小學科學展覽會國小組生活與應用科學科。想看「膜」「換」色彩----試試「搗」音「佈」全。新北市三重區正義國小。

【評語】 030111

本作品探討立體幾何模型與氣體對泡泡薄膜的影響，研究上調製本實驗所需液體並測量其表面張力，設計以立體幾何模型製作泡泡，探討泡泡薄膜型態變化與氣室型態成因，進行變因實驗及分析討論，在實驗設計上可考慮更多創新的想法，跟以往科展作品做出明顯區隔。作品提出了大量且相當詳盡的觀測結果，但在物理解釋上較為缺乏，如可以再添加這個部分及探究實際應用關聯，將可以將作品的重要性更往上提升。

作品簡報

力拔山河-立體幾何模型 與氣體對泡泡薄膜的影響

摘要

我們學會使用表面張力儀，也利用天秤自製工具，透過實作了解並測量我們所使用的泡泡水其表面張力值。將立體幾何模型由泡泡溶液中提離，模型中出現的薄膜因泡泡液體的表面張力而存在，若泡膜間相接觸則會重新分配分子位置以利於達穩定且內凹的泡膜型態。不同的速率、不同的方位(點、線、面)將模型拉離泡泡水面，發現點先離開泡泡水的內凹薄膜完整成型率最高，面先離開泡泡水成型率最低，邊數越多的幾何模型中間越不易形成結點或小平面的薄膜。對著泡泡薄膜中間打氣可形成與該模型圖案相近的氣室；可藉由抽氣筒將此氣室內的氣體抽出，並恢復該泡膜無氣室前之型態。若乾燥針尖戳入某一片泡膜，可發現，沒被戳的部分區域的泡膜幾乎可保持原貌。

壹、前言

一、研究動機

偶然一次社團課程，指導老師讓我們操作、觀察浸泡過洗碗精的中空立體模型內會形成我前所未見的泡泡薄膜，用吸管對著模型裡面的泡泡薄膜吹入氣體、抽氣和戳破泡泡膜的某一面，泡泡薄膜不像想像中的容易全部瓦解，而是原本泡膜的形狀因外加氣體與少許泡泡水後發生美麗而夢幻的改變：泡膜中形成的泡泡(氣室)，隨著吹入越多氣體，氣室會越大顆；隨著吹入越多次數的氣體，氣室會越多顆，我們上網查詢相關文獻，發現泡泡薄膜外框的形狀有相當的關聯。為何會形成這些美麗的薄膜，雖然其最後形狀已被廣泛的研究和當作科普實驗教材，其主要以最低表面能、最低表面積來解釋。然而其形成的中間過程，何種現象、何種力作用於薄膜上，似乎還有許多值得探討的地方。因此本研究利用iphone或是ipad拍攝泡膜的形成歷程，並嘗試分析形成過程中的物理原因。

二、研究目的

- (一) 調製本實驗所需之液體，及測量其溫度與表面張力。
- (二) 觀察立體幾何模型由泡泡水中提起後所構成的泡泡薄膜型態與歷程。
- (三) 觀察立體幾何模型中的泡膜打氣時原泡膜的變化與氣室型態和成因。
- (四) 觀察立體幾何模型中的泡膜或氣室被針戳或抽走氣體的變化。

貳、研究設備及器材

一、洗碗精	二、純水	三、甘油	四、量瓶500ml	五、量筒	六、燒杯	七、漏斗	八、滴管
九、表面張力測量儀	十、支架與橫桿	十一、砝碼	十二、鋁箔紙	十三、保鮮膜	十四、玻璃盆	十五、白線	十六、電子秤0.001克
十七、水銀溫度計	十八、電子式溫度計	十九、注射筒	二十、洗滌瓶	二十一、自製打氣筒	二十二、毛根	二十三、八面體	二十四、球
二十五、小三角錐	二十六、大三角錐	二十七、四角錐	二十八、五角錐	二十九、六角錐	三十、平行四邊柱	三十一、梯形	三十二、色素
三十三、三角柱	三十四、正立方柱	三十五、長方體柱	三十六、扁長方體柱	三十七、五角柱	三十八、斜三角錐	三十九、平板	四十、筆電

參、研究過程與方法

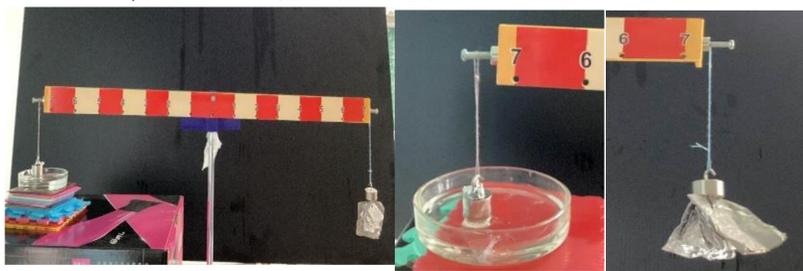
一、調製本實驗所需之液體，及測量其溫度與表面張力。

(一)調製泡泡水：

我們選擇便於較長時間觀察，穩定不致迅速破滅的泡泡水的配方為：「水：洗碗精：甘油 = 4：1：1」。再考慮本實驗所需泡泡水量，我們以水2600ml、甘油650ml 洗碗精650ml 配製。確保各種模型能完全浸於泡泡水中。

(二)自製測量表面張力的裝置：

將天秤保持平衡，兩邊掛上等重的砝碼，準備一個玻璃皿裝溶液，再用電子秤(50x0.001g)秤出多個0.5g、0.1g、0.05g的鋁箔當作小砝碼，之後其中一邊的砝碼放入溶液將砝碼放置最接近液體表面的位置，不然會有浮力的影響，接著將另一邊掛上自製小砝碼，發現溶液的那一邊砝碼漸漸往上跟溶液接近的面出現圓柱形液膜，一直加小砝碼直到砝碼跟溶液沒有接觸，最後讀取砝碼。



(圖一)

(圖二)

(圖三)

(三)利用表面張力測量儀進行液體表面張力測量

先用水平儀檢測表面張力儀、桌子是否平行，並將白金環放上去刻度指針上，並將刻度指針調為0，接著旋轉試料臺用升降鈕調至最低點，放下玻璃皿，並且加入溶液，紀錄水溫(因為上網查發現水溫會影響表面張力)，接著放鬆試料臺固定鈕上升至白金環高度(但不能碰到)，旋轉試料臺升降鈕，然後轉動測量表面張力用的接觸角度的刻度鈕，直到刻度指針彈起，在旋轉調角度的刻度鈕時如果快彈起來時要放慢轉動速度，最後讀取角度。



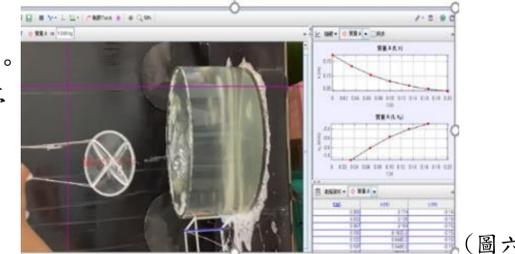
(圖四)



(圖五)

二、觀察立體幾何模型由泡泡水中提起後所構成的泡泡薄膜型態與歷程。

- (一)觀察各種幾何模型由「點露出液面」(面最後離開液面)
 - (二)觀察各種幾何模型由「邊線露出液面」(邊線最後離開液面、斜三角錐，則是由點最後離開液面)
 - (三)觀察各種幾何模型由「面露出液面」(點最後離開液面，模型移動速率與產生泡泡薄膜的成型率和泡泡薄膜形成過程。
- 步驟1：調製足量之泡泡水「水：洗碗精：甘油 = 4:1:1」確保各種模型能完全浸泡於泡泡水中。
- 步驟2：分別將現有幾何模型：重複上述動作20次，並統計拉20次，各模型其泡泡薄膜型態能完整呈現內凹薄膜的成形(模型中每一頂點皆有泡泡薄膜分子共同組成內凹薄膜)的次數，以利進一步估算產生泡泡薄膜的成型率(%)。
- 步驟3：分別將下列幾何模型：球盡可能以緩慢平穩速率或急速速率重複上述錄影數次，再以tracker軟體分析嘗試找到能100%完整成型出中央內凹泡膜(模型中每一頂點皆有泡泡薄膜分子共同組成內凹薄膜型態)所需的模型提起速率。



(圖六)

三、觀察立體幾何模型中的泡膜打氣時原泡膜的變化與氣室型態和成因。

- 步驟1：自製量化用打氣筒：將洗滌瓶的管子拔掉並裝在有刻度的針筒上取代吸管。
- 步驟2：將固定5毫升的空氣透過接了導管的注射筒、管口沾取一點泡泡水後，依序打入角錐與圓柱中間的泡泡薄膜，觀察錄影並做紀錄。

四、觀察立體幾何模型中的泡膜或氣室被針戳或抽走氣體的變化。

- (一)用乾燥針戳破幾何模型中的泡泡薄膜，觀察錄影並做紀錄。
- (二)用乾燥針戳破幾何模型中的泡泡薄膜中央的氣室，觀察錄影並做紀錄。
- (三)用自製的打氣筒沾取一些泡泡水，用細管口吸取泡泡薄膜中的氣室中的氣體，觀察錄影並做紀錄。

肆、研究結果與討論

一、調製本實驗所需之液體，及測量其溫度與表面張力。

[結果一]

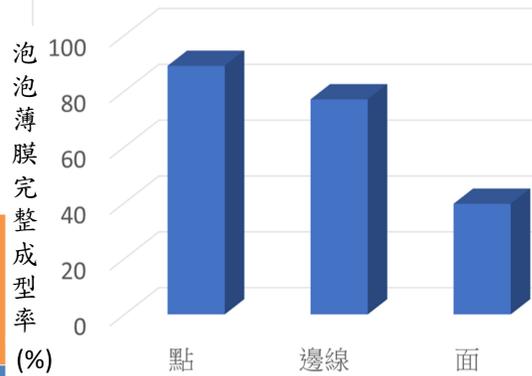
溶液種類	液體溫度(°C)	表面張力(mN/m)儀	槓桿(gw)
水	24.9	71.97	1.60
甘油	26.0	41.77	1.25
洗碗精	24.8	27.68	1.00
稀泡泡水混合液 體積比 水：甘：洗=4：1：1	25.3	30.20	1.10
濃泡泡水混合液 體積比 水：甘：洗=1：5：1	28.9	48.76	0.60

二、觀察立體幾何模型由泡泡水中提起後所構成的泡泡薄膜型態與歷程。[結果二]

梯形 (點出水面)		起初隨意操作20次 泡膜成型率 100%	速率0~1673 cm/s 薄膜皆可100%成型
四角錐 (線出水面)		起初隨意操作20次 泡膜成型率 90%	速率0~1673 cm/s 薄膜皆可100%成型
三角錐 (小) (面出水面)		起初隨意操作20次 泡膜成型率 0%	速率45~1673 cm/s 泡膜皆可100%成型

[討論一]

- (一)調製本實驗所需之液體過程中，我們觀察到三者密度：甘油>水>洗碗精，與我們查到的資料吻合。(甘油密度1.26、水1.00、洗碗精0.81g/cm³)
- (二)稀的泡泡水(水：甘油：洗碗精=4：1：1)可使泡膜迅速成形，其表面張力小於濃的泡泡水(水：甘油：洗碗精=1：5：1)的表面張力

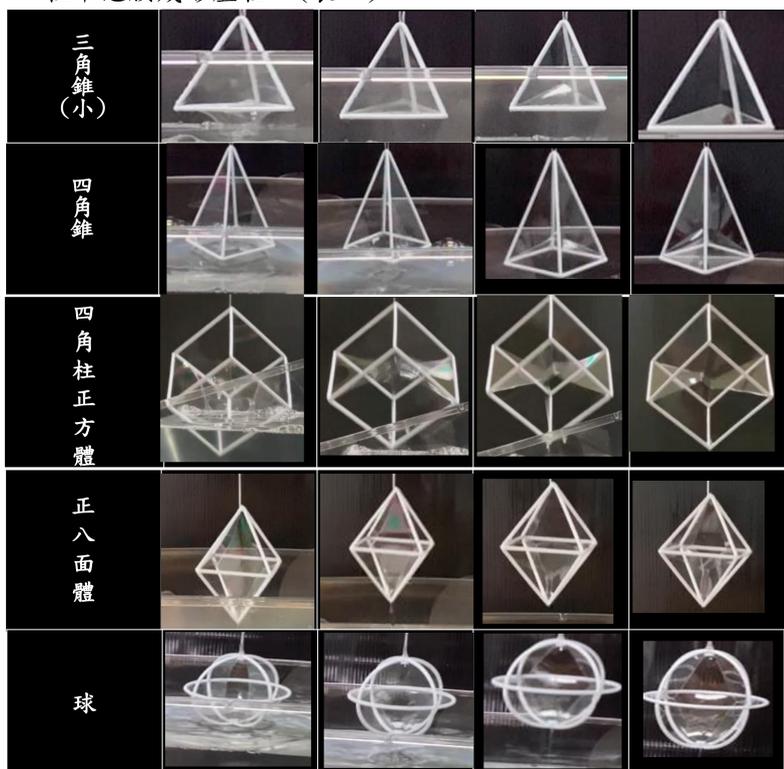


(圖7) 泡泡薄膜完整成型率與模型提離液面的方位之比較

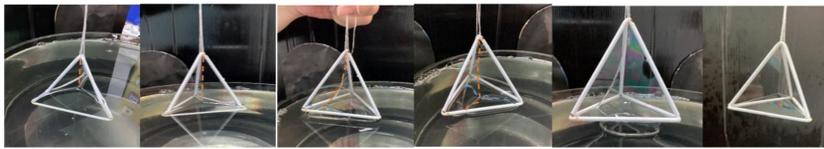
[討論二]

- (一)尖端(點)出水面，泡泡面呈內凹型的機率約為89%，由立方體的一邊(線)先出水面的機率，約為77%，由面出水面的機率，大幅減少，大約僅為39.6%。由實驗結果可以發現，內凹泡膜成型率為：點>邊線>面。

- (二)當拉起幾何模型速度增快時，形成內凹圖案的機率大幅增加。當速度大至某一程度時，對稱性的內凹機率接近100%。
- (三)扣除六角柱以外，「點 露出液面」與「邊緣 露出液面」的成形率高，其100%成形所需之模型提離液面速度幾乎沒有明顯限制，手部提起速率快、慢皆頗易呈現完整的中央內凹泡膜。
- (四)以「面 露出液面」的成形率偏低，因此，其100%成形所需之模型提離液面速度則有明顯區間限制，且各種模型所需之提離速率稍有不同。
- (五)各類幾何模型，皆由點 先露出液面，最後由面離開液面的過程中泡膜成形歷程。(表八)

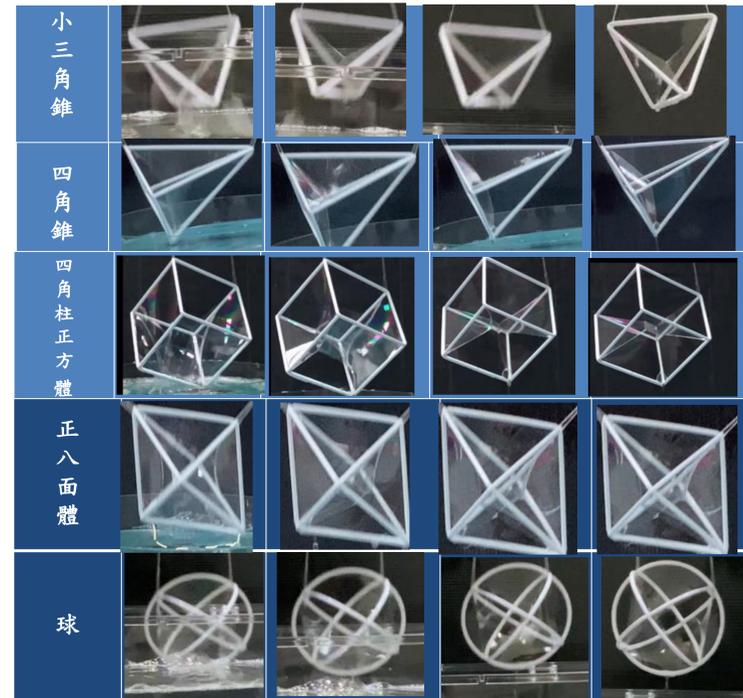


(六)以三角錐為例，探討點 先露出水面時，泡膜的成因。

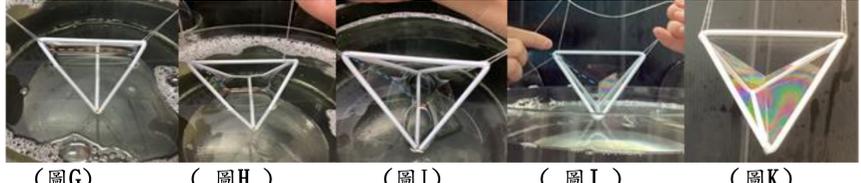


- (圖A) 當點先離開水面時，三邊和點早已有交互作用，形成3個面
- 由點出液面，不論提離速率慢到快，皆可發現每次泡膜並非附著於三角錐各別表面上，而是三側面的泡膜內凹，且已碰觸有交互作用的泡膜形態。
- 由圖(A)到(B)可以發現當模型拉離水面的距離越遠，則中間與水面垂直的線越來越長，中間的分界線是3個側面的泡泡水分子群與液面共同拉出的。圖(B)可發現，即使拉到三角框出水面瞬間，泡膜間的形狀維持不變。
- 圖C、圖D當模型提出水面時，因每個角不容易控制成同時離開液面，導致角與垂直水平面的直線會因各邊、各角具液面距離不同，各分側面之表面張力使原本垂直於液面的中間分界線發生扭曲，圖C發現，當三角框拉出水面，泡膜並沒有破裂。圖E可以觀察到拉出表面一段距離內，因表面張力關係，在液面與膜形底面的邊框中形成一個很大的圓形泡泡膜。當模型逐漸遠離液面時，模型底部近乎圓形泡膜(圖E)面積縮小，直到膜形底部有一些泡泡水分子群因為表面張力關係跟著模型帶動而快速往上彈起。圖E所示當拉出液面一定皆為空心圓形，而非因為底面是三角形，類似水因表面張力內聚力希望形成一個最小的表面積所致。因此無論何種膜形當底部屬於面 離開液面之模式時，都可觀察到此現象。
- 圖E到圖F可發現底下薄膜彈起後，與上面已形成的面黏在一起、互相拉扯影響，又因內聚力所以內凹，泡膜形成一個內凹6面的形態。

(七)不同幾何模型，皆由邊緣 先露出液面，最後整個模型離開液面的過程中泡膜成形歷程。(表九)

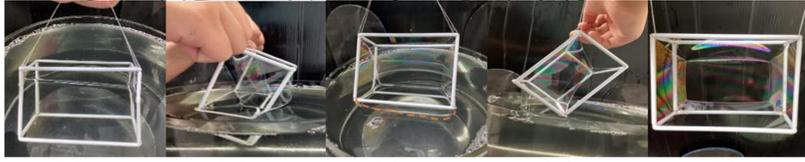


(八)以三角錐為例，由邊緣 先露出水面，最後整個模型離開液面時，泡膜的成因。



- 圖G可以觀察到，當一邊先出水面時，因分子距離較近，已有交互作用而黏在一起，並且與水面拉出5個面。
- 圖G~I可發現側邊與水面拉出的2組面，兩面分別連在一起的邊會越來越長，因為此邊是與水面一起拉出。
- 圖G~J可以發現左右兩組面的距離隨著拉起的高度而變短，直到四個斜邊皆離開水面，左右兩組面的分子就會接觸，黏在一起。
- 由圖J可發現各面泡膜皆碰觸黏在一起，曲邊受到拉扯後，分子群重新分配位置拉扯後變直線條。且模型邊未全部拉起最終圖形早形成。
- 圖J可以觀察到，框架並未拉出表面時，其最終形狀已經初步形成，唯一會改變的是最終中間泡膜的節點的位置，中間節點的位置是逐漸移動到穩定的平衡位置。

(九)以長方體柱為例，由邊緣 先露出水面，最後整個模型離開液面時，泡膜的成因。



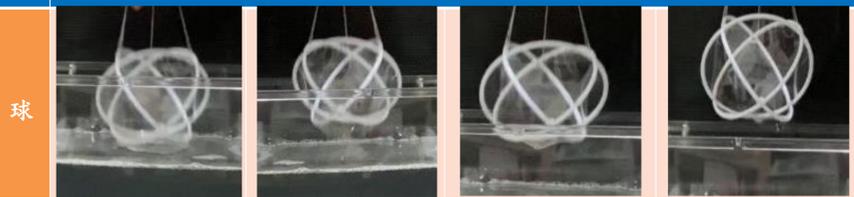
- 1. 圖L可發現跟三角錐邊先離開水面一樣，泡泡膜不會在框表面形成，而是跟水面形成5個面。
- 2. 圖M可發現當第二條邊離開水面時，會與水面與之前拉出的泡膜，一起再拉出一個面，此時共有6個面。
- 3. 圖N可以觀察到當第三個長邊離開水面時，因為表面張力第三個邊會與水面拉出似橢圓形空心圓柱，所以此時共有7個面。
- 4. 由圖P可發現當長方體第四個邊拉起但與水面還有接觸時，在圖M時形成的面會因表面張力往上彈，與已形成的膜黏在一起，從新找到平衡拉出10個面。
- 5. 由圖P到圖Q可觀察到當第四個邊已完全沒有跟水面接觸時，在圖N時形成的似橢圓空心的圓柱會因拉起的高度，而慢慢拉大，直到一個限度，會反彈與上面的膜接觸，又因內聚力，所以形成了13個面的泡膜的形態。
- 6. 由圖L到圖Q可發現當越多長邊離開水面所形成泡膜的面數會越來越多，柱狀的模型中央形成一個與模型形狀相關的小平面泡膜，而非結點。

(十)不同幾何模型，皆由面 先露出液面，最後由面離開液面的過程中泡膜成形歷程。(表十)

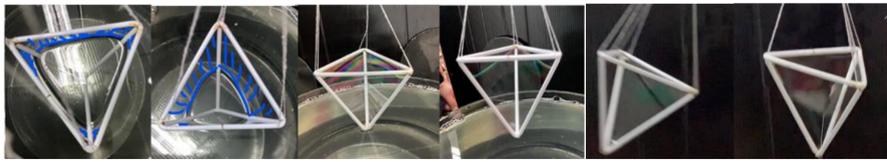
(小)三角錐 請見下方，第十一點說明。



正八面體 因屢次嘗試拉起還是未成功，所以此圖無數據(面的成型率極低)

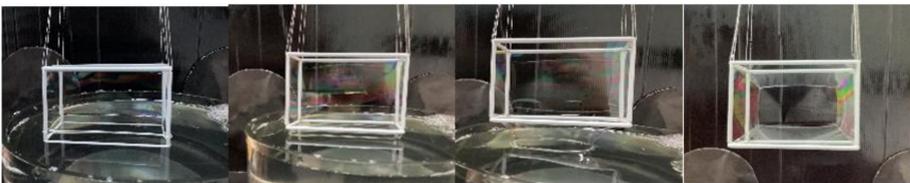


(十一)以三角錐為例：探討 面 露出液面情形下的泡膜成因：



- (圖R)和圖(S)可發現跟三角錐與點離開不一樣的是它並不會一開始就有泡泡薄膜間的交互作用，而是模型各邊與液面在邊框形成3面泡膜。
- 由圖(T)可發現當點還與水面碰觸時，上面的三個面早在邊框形成。
- 由圖(U)可以發現與三角錐點先離開水面不同，因為底下未出現似空心圓形。且上面三角錐先離開水面的面未有薄膜形成。
- 由面先露出液面，慢慢拉起的形成內凹的可能幾乎為零，因為薄膜和薄膜分子沒有相互接觸也沒有重新排列。
- 唯當快速拉起，薄膜震盪，使薄膜接觸形成內凹的機率上升。
- 由圖(V)操作可發現拉起未形成內凹，我們再次水平晃動時，無法使薄膜接觸形成內凹。
- 由圖(W)操作拉起未形成內凹，我們在鉛直方向晃動，能使薄膜接觸，再加上內聚力，形成與以點拉起時，相同的數量的面形成相同內凹的形態。

(十二)以長方體柱為例：探討面 露出液面情形下的泡膜成因：



- 圖X) 長方體慢速拉出水面時，發現與長方體邊先離開水面不同，薄膜會在框架成形，此時共形成4個面。
- 由圖Y、圖Z會發現底下跟三角錐以點先離開水面、面後離開液面一樣，因表面張力底下會形成似空心圓形圖案，且當模型的距離與水面距離增加，底下的圓形半徑會越小，最後反彈，當拉起的速度較慢，反彈震盪的幅度很小，無法使底下的面與上面的面接觸、黏在一起，所以中間不會有內凹的泡膜型態，但是當我們對這個模型產生擾動、迅速提起或是風吹，所提供的動能，使兩側與底部的薄膜產生振盪，當能量足夠時薄膜碰在一起時，此時中央泡泡水分子重新分配位置，平衡後產生穩定的內凹圖形；或快速拉起模型時因為震盪較大而直接甚至迅速產生內凹的泡膜形態。(如圖a)

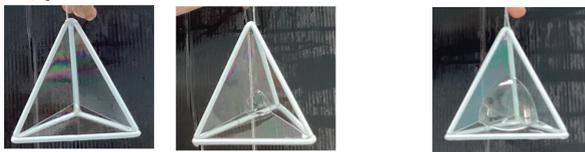
(十三)模型中間泡膜的結合點不是一開始就固定在某處，而是慢慢往上移，最終停在穩定、低能量的位置。



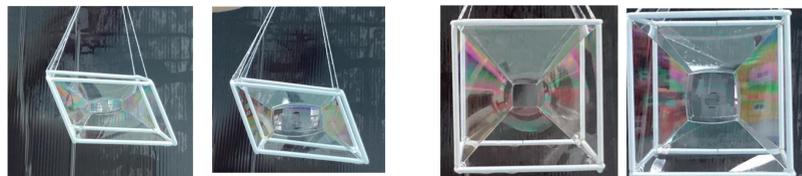
(圖b) (圖c) (圖d) (圖e) (圖f) (圖g) (圖h)

三、觀察立體幾何模型中的泡膜打氣時原泡膜的變化與氣室型態和成因。

[結果三]



(圖i)打氣前 (圖j)打氣後 (圖k)打入更多體積的氣



(圖l)打氣後 (圖m)打入更多毫升的氣 (圖n)打氣前(圖p)打氣後

[討論三]

打越多氣形成中間形成的泡泡會越大，泡泡洽會發現中間形成的氣室圖形像模型的圖形。打氣時，不管洗滌瓶的導管口打氣前是否已存在泡泡薄膜，打氣時皆會形成泡泡，打氣時泡泡水的分子又接觸使泡泡可以形成。吹入之空氣有體積、氣壓，雖被泡膜包覆，但碰觸到模型內既有薄膜，既有的薄膜型態與模型本身形狀有關，接觸後泡泡分子們相互拉扯使泡泡呈現與模型相似的氣室。

四、觀察立體幾何模型中的泡膜或氣室被針戳或抽走氣體的變化。

(一)立體幾何模型中的泡膜被針戳：

[結果四之一]

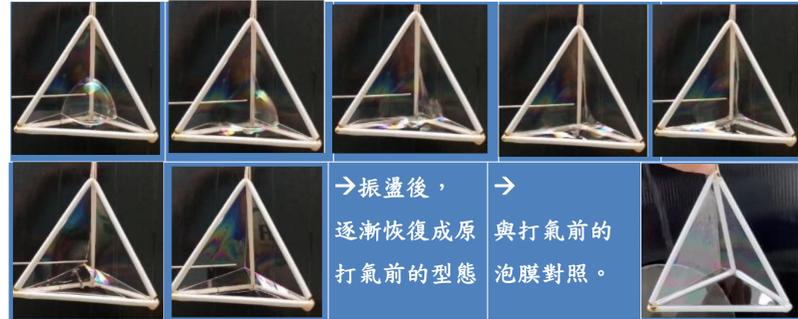
戳破其中的一個面，模型中形成不一樣的泡膜型態，以達到新的穩定情形。若戳破其中的兩個面以上，容易出現泡膜全部瓦解的情形。

圖形	戳破的面	(表十一) 用不同視角觀察：戳破後的泡膜新型態戳破任一薄膜面，觀察立體模型內薄膜結構的變化
大三角錐		
大三角錐		
圖形	以著色標記被戳破的面	(表十二) 用不同視角觀察：戳破後的泡膜新型態
正方體		
正方體		

[討論四之一]

- 當立體幾何模型中的泡膜被針戳時，發現戳破其中一個面，部分泡泡水分子掉落或位移，破壞了原有排列的型態。原本薄膜內的平衡被破壞後，泡膜並未就此瓦解，而是以現存泡泡水分子群重新分配找一個新的平衡位置，於模型中形成不一樣的泡膜型態，達到新的穩定狀態。此外，沒被戳到的部分區域的泡膜幾乎可保持原貌。
- 若戳破其中的兩個面以上，容易出現泡膜全部瓦解的情形

(二) 立體幾何模型中的氣室被針戳：[結果四之二](表十三)



[討論四之二]

戳破薄膜中的氣室，整個泡泡薄膜有可能因此全數瓦解；但也有可能沒有全數瓦解，甚至泡膜恢復成原本打氣前的型態

- 以三角錐為例：氣室內的氣體因被針戳，內部氣體氣壓大沿著破口往氣壓低的外界逸出，部分泡泡水分子掉落或位移，改變了原有排列的型態。遠離破口端的氣室外圍的泡泡分子群因氣體逸出內縮互相靠近產生碰觸與振盪，雖原本薄膜內的平衡被破壞後，但現存泡泡水分子群有可能重新分配找一個新的平衡形態，甚至隨著氣體散逸，中央泡膜恢復成原打氣前的型態，如上表(十三)所示。
- 以稜柱為例：氣室內的氣體因被針戳，內部氣體氣壓大沿著破口往氣壓低的外界逸出，部分泡泡水分子掉落或位移，改變了原有排列的型態。遠離破口端的氣室外圍的泡泡分子群因氣體逸出先內縮互相靠近產生碰觸與振盪，緊接著，破口端的泡泡分子群也因為整體氣室崩潰內部氣壓逐漸變小，被外部氣壓壓著往中央靠攏，雖原本薄膜內的平衡被破壞後，但現存泡泡水分子群有可能重新振盪、分配找一個新的平衡形態，甚中央泡膜恢復成原本打氣前的形態，只是部分泡泡分子折損，柱狀模型中間原本的小平面薄膜，似乎面積變小一些。以稜柱中的氣室被針戳為例，如下表(十四)所示。



- 氣室內的氣體因被針戳，內部氣體氣壓大沿著破口往氣壓低的外界逸出，部分泡泡水分子掉落或位移，改變了原有排列的型態。遠離破口端的氣室外圍的泡泡分子群因氣體逸出先內縮互相靠近產生碰觸與振盪，若是振盪速率快大於氣室內的氣體逸出，則會有部分氣體來不及排出，當剩餘泡泡分子們重新分配位置，將能量降至最低時，可能將未逸出的氣體包在泡膜間，在節點間形成比原本體積小一些的氣室。以下表(十五)所示。

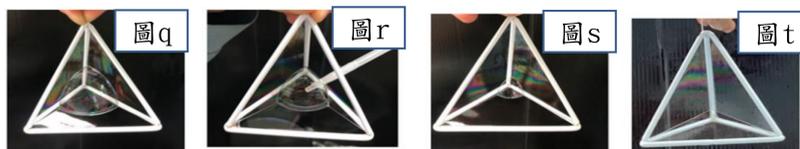


(三)立體幾何模型中的氣室被抽氣：

[結果與討論 四之三]

將抽氣瓶的導管深入泡膜氣室中，逐漸將空氣抽取出來，會發現中間的圖形越來越小。縮小後的泡泡氣室仍與其幾何模型本身的圖形相關。

- 如圖r，當氣室內氣體被抽走時，氣室內的氣壓小於外部大氣壓力，導致外面的大氣壓力相對大於氣室的壓力，餘留的泡膜沒有塌陷。如圖s，變成一個縮小版的氣室泡膜型態。
- 因應氣室內外壓力差，氣室泡膜附近的泡泡水分子群重新排列，形成新的平衡型態。
- 若將氣室內氣體全數抽走，氣室內接近真空，則外面大氣壓力將氣室泡膜壓縮成一點(圖t)，模型中間的泡膜又再度重新分配位置，恢復成未打氣產生氣室前的型態。
- 利用自製的針筒抽氣瓶導管沾取一些泡泡水後，將抽氣瓶的導管深入泡膜氣室中，逐漸將空氣抽取出來，會發現氣室越來越小。比較各種不同幾何模型的差異，發現縮小後的泡膜中形成的氣室圖形依然與模型本身的圖形類似。



伍、結論

一、調製本實驗所需之液體，及測量其溫度與表面張力。

自製的天秤和表面張力儀都可測出表面張力，雖然表面張力儀較精準，但利用天平與槓桿較容易取得，因為表面張力的數值很小，本實驗採鋁箔紙自製小砝碼測量，至於鋁箔砝碼輕巧則需要用最小刻度達0.001公克的電子秤判讀，經過本實驗可了解我們使用的泡泡水其表面張力值。稀泡泡水(水:甘油:洗碗精=4:1:1)內四泡膜迅速成形，表面張力值為30.20mN/m;濃泡泡水(水:甘油:洗碗精=1:5:1)泡膜緩慢成形，表面張力48.76mN/m

二、觀察立體幾何模型由泡泡水中提起後所構成的泡泡薄膜型態與歷程。

- 模型中央出現凹的泡膜因為內聚力，使薄膜會往內縮。產生的膜會在每個面上保持平衡。以不同的速率不同的方向先離開泡泡水(點、線、面)成型的機率會不同，點先離開泡泡水的成功率最高，面先離開泡泡水成功率最低。
- 形成泡膜的條件有：模型須完全浸泡於泡泡水中，離開液面之模型，至少需N-1面有泡泡薄膜。再者，須提供這些泡泡薄膜動能(例如：人力迅速拉起模型、外力擾動模型、風力吹拂等)讓每一面泡泡薄膜與鄰近之薄膜間能相互碰觸震盪，重新分配位置與將能量降到最低。因此，角錐中，當邊數達6以上，相鄰泡膜間的碰觸機會少，於中間形成美麗泡膜的機率幾乎為零。
- 當由點先出液面，泡膜平衡後有一小塊幾何圖形，其形狀與該模型底面形狀相同。由觀察可知，此片泡膜不是一離開液面就固定在該處，而是模型底部離開液面時與液體的表面張力造成的薄膜向上震盪時，與側面的泡泡薄膜相互作用拉扯後才能停在平衡位置，此位置的合力為零。當模型邊數達6以上，會發現底部這塊薄膜會由下往上移動至其上頂點後，消失，顯示，無法在此類模型中空處找到由底面帶上來的泡泡薄膜之最低能量位置。

三、觀察立體幾何模型中的泡膜打氣時原泡膜的變化與氣室型態和成因。

打越多氣形成中間形成的泡泡會越大，泡泡洽會發現中間形成的氣室圖形像模型的圖形。無論沾有泡泡水的導管口是否已存在泡泡薄膜，打氣時皆會形成泡泡，吹入之空氣泡的氣壓與外界達成平衡時，體積不再變大，此包覆蓋氣室的泡泡水分子們碰觸到模型內既有薄膜，既有的薄膜型態與模型本身形狀有關，接觸後泡泡分子們相互拉扯使泡泡呈現與模型相似的氣室。

四、觀察立體幾何模型中的泡膜或氣室被針戳或抽走氣

用抽氣筒將氣室內的氣體抽出或戳破氣室，導致氣室內氣壓小於大氣壓力，原包圍氣室的相鄰泡泡分子受力作用重新閉合，可恢復該泡膜無氣室時之泡膜型態。若用乾燥針尖戳破泡膜的某一面，可發現沒被戳到的面會重新做疊加，並不會全部崩解。

照片、圖片出處說明

本作品說明書中表一~表三中輔以說明用的附圖、表五~表十五中輔以說明用的附圖、圖1~7、圖A~N、圖P~Z、圖a~n、圖p~t全數皆由作者於研究過程到科展參賽期間自行拍攝與製作。

陸、參考文獻

- 洪嘉嶸等人(2021)。中華民國第61屆中小學科學展覽會國小組物理科-親愛的!泡泡怎麼變形了。新竹市東區龍山國民小學。
- 陳矩翰等人(2011)。中華民國第51屆中小學科學展覽會國中組地球科學科-大氣怎麼流，泡泡來解說。雲林縣私立永年高級中學(附設國中)。
- 周姿吟等人(2022)。中華民國第62屆中小學科學展覽會國小組生活與應用科學科。想看「膜」「換」色彩-----試試「搗」音「佈」全。新北市三重區正義國小。