



# 雞精瓶玩光學

文・圖／謝迺岳

東亞地區已經進入高齡化時代，而臺灣海峽兩岸的居民都信任雞精能滋補強身，於是生活中就多出了許多空的玻璃瓶。玻璃回收的價錢並不高，但是雞精瓶卻精巧可愛，丟棄可惜，那麼除了裝小物，這種玻璃瓶還能有什麼用途呢？

在化學實驗中，雞精瓶最適合製作海底花園和天氣瓶。在電學實驗中，它可以製作驗電器和交流馬達。在生物實驗中，它可以用來養螞蟻和孵豆芽。在地球科學實驗上，還可以製作暖暖包（醋酸鈉結晶）和密度計（水晶寶寶）呢！雞精瓶的透光度高、瓶身單手可握不占空間、和瓶底向內凹等特質都是光學實驗的好工具。現在讓我們用雞精瓶玩一系列科學遊戲，進入光學的奧妙世界吧！

## 一、反射與折射

### 1. 孫悟空的分身

把一瓶水直立在桌上，然後點一支小蠟燭放在瓶子的旁邊。數數看，除了在瓶

子後方看到的透射燭火像，我們還能看到多少個反射像呢？理論上燭火能形成無窮多個像，因為光會在玻璃上一再反射與折射；但是經過幾次折射與反射後，光的強度減弱到我們無法分辨，所以只能看到有限個像（圖 1）。



圖 1. 一支蠟燭能在玻璃瓶上反射出幾個像呢？



通常我們能在瓶身上看到的像，都是由於反射所形成的虛像。光在兩種介質的界面上會反射；從瓶外往內，光線依序遇到玻璃、水、玻璃，然後射向瓶子另一側的空氣；共有四個界面，就會形成四個反射像。事實上在每兩個界面之間，反射光來來回回還可以產生許多像；如同我們站在平行且相對的兩面鏡子間會看到許多自己的現象。

## 2. 愛麗斯的變身

愛麗絲夢遊仙境的故事中，喝一瓶藥水就能把身體變大或變小，真神奇！我們的雞精瓶也具有這種魔幻功能，試試看吧。

把一瓶水直立在桌上，在瓶子兩側分別放置蠟燭和紙屏（白紙對摺並直立），就能在紙屏上看到一條火炬；調整紙屏到瓶子的距離，當火炬變為一條光亮的直線，就是燭火的實像了（圖 2）。其實在紙屏上無法形成完整的燭火像，是因為玻璃瓶是圓柱體，在水平方向把燭火變寬或變窄，而垂直方向則保持原貌。即使如此，我們仍然可以用這個玻璃瓶代替凸透鏡來認識成像的經驗公式。

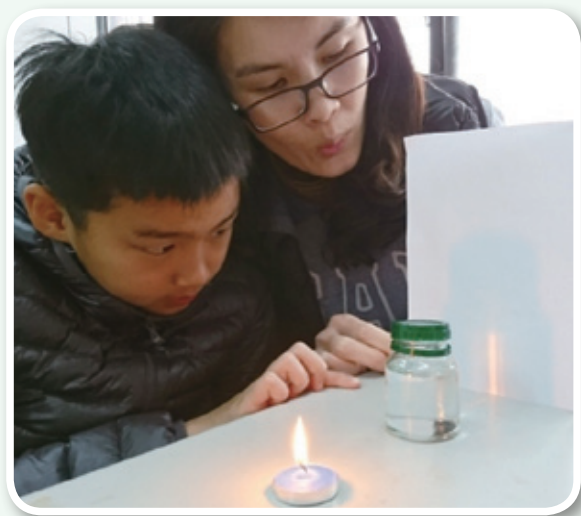


圖 2. 藉著雞精瓶，能認識透鏡成像定律

對於薄的透鏡一例如眼鏡或名片型放大鏡，用「高斯定律」可以推算像距與物距的關係。高斯定律： $1/p + 1/q = 1/f$ ，其中  $p$  與  $q$  分別是物距與像距， $f$  是透鏡的焦距。對於厚的透鏡如我們的瓶子，公式較為複雜，然而「物距愈短則像距愈長，且像也愈大」是確定的。所以我們可以隨意擺放蠟燭的位置，找到燭火的像以後，記住蠟燭和紙屏到瓶子兩側的距離；然後移動蠟燭到新的位置，再次找燭火的像，再記住蠟燭和紙屏到瓶子兩側的距離。多做幾次，比較看看，是不是能找到規律。

## 3. 找不到的寶藏

有時候東西明明在眼前，我們卻找不到它，用雞精瓶子可以變這個戲法。在雞精瓶中裝滿水並鎖住蓋子，然後直立壓在一枚硬幣上；不論從什麼地方看，硬幣似乎消失了。打開瓶蓋，發現硬幣還在瓶子的下方；明明硬幣往四周發出光線，為什麼只能從瓶口看見它，從瓶子的旁邊卻看不見硬幣呢？

用雷射筆來觀察「光路」吧。把雞精瓶舉高，使雷射光從瓶底往上射，會發現光線可以穿過水面，但是在瓶子的側方會反射而無法穿出。這個現象稱為「全反射」，是光線由水中（或玻璃中）射向空氣時，入射角太大的時候會發生的現象。所以在瓶底的硬幣所發出的光線，凡是射向瓶壁的光都被反射向瓶口去了（圖 3），從側面當然看不見它。



圖 3. 從瓶底射出的光，都被瓶壁全反射了

#### 4. 錢真的變大了

把一枚硬幣放在桌上，把雞精瓶內的水倒空，不蓋蓋子且倒立在硬幣上。由上往下觀察硬幣，會覺得沒有什麼變化；然後在瓶底加一點水，再把瓶子慢慢舉高，由上往下看，會發現錢錢變大了（圖 4）！

如果真有這種聚寶盆就好了。原來雞精瓶的瓶底是凹的，加點水就成為了「雙凸透鏡」，在短距離內有放大效果。那麼如果把瓶口朝上，並在瓶內加一點水淹過瓶底，用同樣的方式觀察硬幣，會有什麼變化呢？把瓶子慢慢舉高，這時會發現硬幣縮小了！原來這時水形成一個「平凹透鏡」，像近視眼鏡一樣，看東西都成為「正立縮小虛像」囉！



圖 4. 利用瓶底的凹處，可以把硬幣隨意縮小或放大

#### 5. 硬幣浮起來了

在雞精瓶內加水約八分滿，然後在瓶子內外各放一枚一元硬幣；由上往下看，瓶內的硬幣比較大。接著用指尖托住瓶外的硬幣，慢慢往上舉高；當兩枚硬幣看起來一樣大的時候，測量一下兩枚硬幣到水面的高度。

我們會發現，兩枚硬幣到水面的高度比大約是 4:3。這個現象稱為視深，也就是眼睛看到的物體深度比實際深度淺。視深與實深的差異，來自於「相對折射率」，也就是光速在兩種物質中的差異。在空氣中的光速是水中的 4/3 倍，所以視深是實

深的 3/4。在空氣中的光速是玻璃中的 3/2 倍，所以視深是實深的 2/3。

把一支竹籤插在裝滿水的瓶內，從側面看竹籤似乎斷掉了（圖 5），這是「旁位移」，也是折射率不同造成的影響。從上往下看，發現水中的竹籤似乎翹起來了，這就是視深的現象。因為由水面往下看，竹籤的每一小段都有 4:3 的視深，所以測量竹籤翹起來的角度，也可以算出水對空氣的「相對折射率」。

#### 6. 世界盃射魚賽

如果人要從水面射魚，而且魚乖乖的不動，那麼一定射得到嗎？先準備一支魚



圖 5. 我可以讓硬幣浮起來，還能讓竹籤折斷喔

叉吧；用一條橡皮圈綁在長竹籤的尾端，並在細吸管上剪一個勾子；把竹籤插入吸管並將橡皮圈勾在吸管上，就完成了。接著準備一條魚；在裝水八分滿的瓶中，投一顆粘土球(比黃豆大一點)沈入瓶底；從水面上方瞄準球的中心，會發現竹籤始終射到球的後方，讓魚跑了(圖 6)！

這並非瞄準的失誤，仍然是視深的問題。當我們從水面斜方向觀察，球是浮起來的；讓竹籤射向那顆浮起來的球(球的「像」)，當然射不到真的球(稱為「物」)。所以射擊時，必須瞄準球的前方才有可能射到它(圖 7)。



圖 6. 製作一支好魚叉，魚兒通通跑不掉

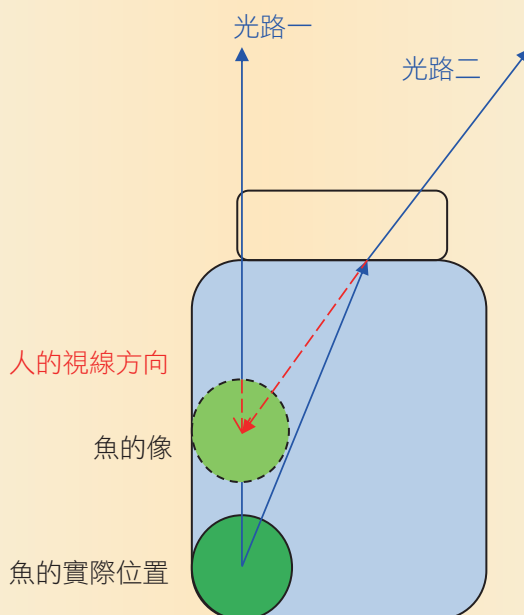


圖 7. 從斜方向射魚，瞄準點必須靠近自己，才不會射到魚的像

## 7. 人看魚，魚看人（折射率）

從水面看魚，魚兒悠游自在；那麼，魚看得到人嗎？光路是可逆的，也就是說從空氣進入水中的光線，也可以由水中循著同一條路徑返回空氣中。所以如果人和魚的視線相遇，魚就看得到人的眼睛。這條路徑不一定是直線，卻是最節省時間的路線。就像閃電曲曲折折，電荷會尋找最容易行進的通路，大都不是直線。

當光線由空氣進入水中時，它的頻率不變，但是速率和波長變小了，行進方向也偏了（垂直水面時，光會直進）。在界面

上，光也不是全然折射，總有部分反射；差別是，光從空氣中射入水中時，可以射向水裡的任意地方；從水中往空氣射出時，如果入射角太大，可能出不去，就形成只有反射的狀態，稱為「全反射」現象（圖 8）。

全反射應用於光纖通訊，可以把訊號傳遞的很遠，耗損小、速度快、且不易受干擾。全反射應用於精密光學儀器如望遠鏡、潛望鏡、影印機等，可以取代一般的「前鍍膜」或「後鍍膜」鏡片，使用年限較久且不易失真。



圖 8. 光線從空氣可以射入水中，反之則不一定

## 二、色散與散射

有一種「手指燈」玩具，包含一顆發光二極體與數顆水銀電池，作為迷你手電筒既便宜又好用，配合雞精瓶更能玩許多光學遊戲。

### 8. 我們是一家人

把紅、綠、藍三色手指燈投射到白紙上的同一位置，可以顯出三個色塊而中央有個白圈；這證明了白光是「複合光」。在白光區域前面放一個小物體，還可以在白紙上投射出彩色的影子（圖 9），影子的顏色就是用白光減去某個色光，剩下的「互補光」造成的現象。

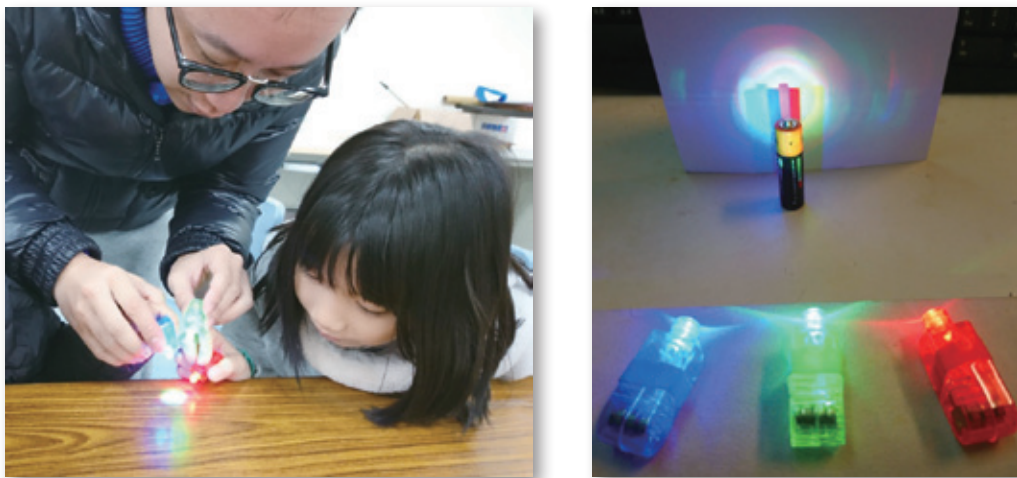


圖 9. 三原色可以組成白光，還可以顯現彩色影子

三稜鏡利用折射來「色散」，而光碟片利用小洞的「繞射」來分光，都是因為複合光具有各種波長，遇到界面或小洞，使不同波長的光射往不同方向而造成的現象。

用一根鐵線在雞精瓶上繞個圈並綁緊，在鐵線的尾端掛一支白光手指燈。在瓶中裝半瓶水，使光束貼近水面但略往下照射，光束就會在桌面白紙上顯出色散效果。如果色散不明顯，就把雞精瓶放在另一個瓶上墊高，一定能看到紅到紫的美麗彩色（圖 10）。

這種設計兼有三稜鏡與凸透鏡的優點，可以在白天看到明亮的彩色聚光效果，同時藉著色散證明了白光真的是複合光。各種波長的光在真空中的速率相同，可是在水中紫光的速率最慢，因此偏向較大。我們藉著稜鏡的兩個鄰邊產生兩次色散，把不同色光的偏向角度放大，於是各種顏色就能被我們清楚地分辨了。

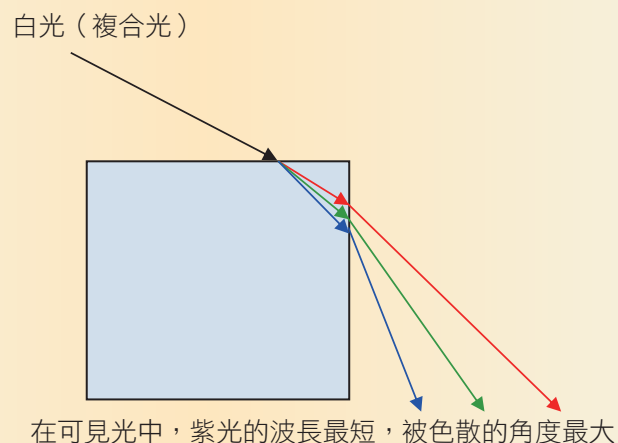


圖 10. 稜鏡可以分光，看看我生成的色彩

### 9. 變出一道彩虹

彩虹也是一種色散的現象。當我們背對太陽望向雨後的天空，就能看到一彎彩虹高掛天際，如果有黑雲當背景，甚至可能看到霓喔！彩虹是白光射到懸浮在空中小水珠，經過二次折射而分光的現象（圖 11）。霓也是二次折射，但是在水珠內多反射一次，所以亮度較暗、和視線的張角較大、且色彩的排列次序與虹相反。

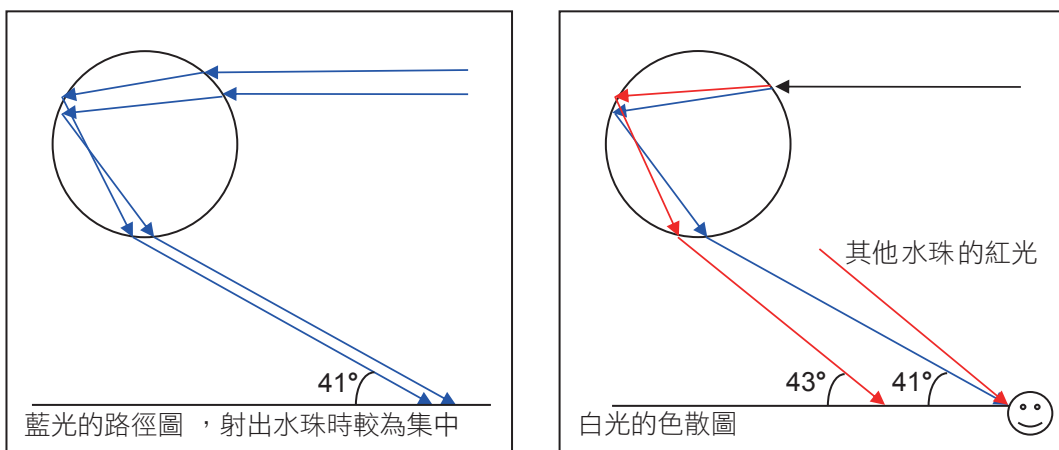


圖 11. 陽光射向小水珠時，從水珠內一次反射出來的光路，會讓人看到彩虹

把白光手指燈照向一支橫放的雞精瓶，會在瓶後生成一條清晰的光帶；這條光帶再射向第二支直立的雞精瓶，就可以看到有彩色條紋在瓶中出現。當平行的陽光射向懸浮在空氣中的水珠時，從水珠內部反射出來的光線不但被色散，且集中在某些方向射向我們眼睛，而這些光線的強度也比從其他角度射出的光線強，就會形成虹與霓的現象囉！（圖 12）



圖 12. 用兩支雞精瓶（裝滿水）與白光，可以模擬彩虹的生成原理

## 10. 藍天映照彩霞

在做折射實驗時，在水中加入極少量懸浮液（如豆漿或牛奶），並在瓶內用線香製造煙霧，就能使光路清晰顯現（圖 13）。這個現象在物理上稱為「散射」，在化學上稱為「廷得耳效應」(Tyndall effect)，是由於懸浮粒子直徑在小於 100 奈米時，讓光彈射開的作用。波長較短的藍光散射角度大，波長較長的紅光散射的角度小，於是造成了藍天與夕陽的美麗。

用手指燈來觀察散射現象也很有趣。把三支不同顏色的手指燈照射同樣濃度的豆漿水瓶，會發現藍光光束被擴散得較廣，而紅光較窄。如果把數個豆漿水瓶排成一列，從整列的一端用白光手指燈照



圖 13. 在水中加牛奶並在瓶中施放煙霧，觀察折射的現象超清楚

射，會發現另一端的光束變成黃色，就是因為藍光都散射往四周去了。如果豆漿的濃度恰當，而且光很強，甚至有可能製作出紅紅的夕陽（圖 14），就不會再哀怨「夕陽無限好，只是近黃昏」囉！👉



圖 14. 各種色光在牛奶中的散射角度不同。使白光穿過牛奶時偏黃色，像陽光一樣

謝迺岳

新竹市科學城社區大學專任講師、中華民國物理教育學會監事