
飛行紙杯

邱美智* 蕭次融

財團法人大學入學考試中心基金會

許多學生聽了要上「科學」，就會嚇一跳，總覺得科學太難，其實科學就是生活，在我們周圍所發生的許多自然現象，都是科學。例如看棒球賽，總希望我隊擊出全壘打，他隊揮棒落空，三振出局。要對方的球員擊不到球，有賴於我隊的投手，能投出變化球。你知道如何投出變化球嗎？請看紙杯飛行的模擬。本文報告在家裡就可以動手做的簡單而有趣的科學(Plain and Attractive Science 簡稱 PAS)實驗。

本文分為學生實驗與教師手冊兩部分，介紹「飛行紙杯」實驗，其設計相當簡單，取材又相當生活化，每一學生在家裡的客廳就可以找到適當的器材來製作並操作，從玩中體會科學的趣味性。盼望學生都能進而更上一層樓，自行設計屬於自己的創意實驗。要使紙杯飛行，一般的簡易科學實驗書都有所介紹，但多止於上飄飛行而已，例如參考資料 1，但本文特地加上其他的飛行方法，尤其連動手臂拋射紙杯的下墜飛行，可說是獨創的拋射方法，值得大家一試。

*為本文通訊作者

壹、學生實驗

一、器材

紙杯、橡皮筋、膠帶、筷子、剪刀、美工刀

二、步驟

(一)上飄飛行

1. 取兩個紙杯，杯底對杯底相疊後，用膠帶將兩個紙杯相連在一起，就成為飛行紙杯。
2. 取橡皮筋 2 條，串在一起做成一條兩個圈圈相連的橡皮筋，供作彈力發射繩。
3. 用大姆指(例如左手的)壓住發射繩的一頭於紙杯的中央處，然後用右手持發射繩的另一端，將發射繩纏繞飛行紙杯的中央位置，只繞一圈多一點即可，如圖 1。
4. 左手持紙杯，用大姆指壓住飛行紙杯上發射繩的一端，然後反轉持杯的左手，大姆指向下，右手拉起發射繩的另一頭，如圖 2，照片一的架勢。
5. 用力拉發射繩後，放鬆壓在飛行紙杯上的手指頭，即見紙杯往空中上飄彎曲地飛出去，而且著地時還會在地上盤旋。
6. 改變發射繩的纏繞方向，與飛行紙杯的持法，會有不同的效果。

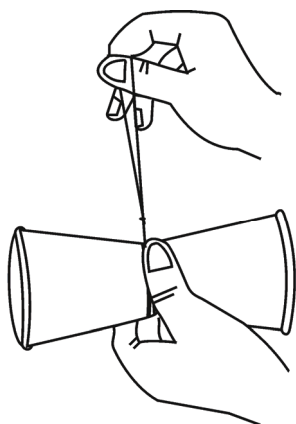


圖 1、大姆指壓住紙杯上的橡皮筋，另一姆指勾住當做發射繩的橡皮筋

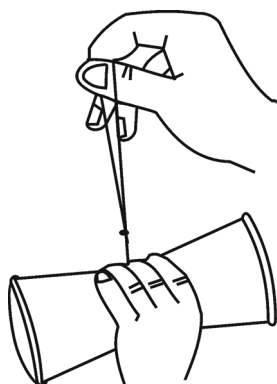


圖 2、反轉持杯的手，四只手指背朝上



照片一、紙杯發射前的架勢

(二)下墜飛行

7. 首先的三個步驟與上飄飛行的步驟 1~3 相同，但在步驟 4 時，持杯的左手不要反轉，直接用右手拉起發射繩發射，如圖 1 的架勢，紙杯飛出去後會向下彎曲就成為下墜飛行。
8. 另一種下墜飛行的方式，比較有魄力，整個手臂都要用上，是單手用力拋射紙杯。例如左手持杯，右手持繩，將發射繩纏繞在紙杯的中央處兩三圈（注意發射繩纏繞時，要盡量重疊以纏住發射繩的一頭，使其不滑動）後，將發射繩的另一端套在右食指，再將其繞中指的背後半圈，如圖 3。接著反轉右手掌以便持杯，並放空左手，改為右手單手持杯，如圖 4 與圖 5，照片二。拋射之前，先將持杯的右手垂直放下如照片三，以便手臂可以大幅度地用力往上拋射紙杯。
9. 拋射紙杯時，要手臂一起連動，手臂由下往上揮到即將到達最高點時，放鬆手指的同時拉回發射繩（亦即橡皮筋），則紙杯飛出，在垂直方向繞一個大圈下墜，有可能飛回你的手上，不妨多試試看！
10. 另一種下墜飛行的拋射方式，也是單手持杯，其單手掌持杯的方法如圖 6，拋射時同樣要連手臂一起揮的大動作，但右手臂先垂直舉高在肩膀的正上方，然後往前拋射出去，方式如同投手要投出下墜球的架勢。

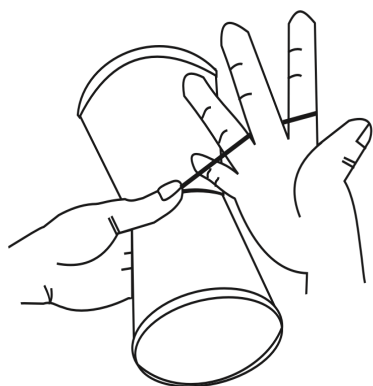


圖 3、橡皮筋的一端套在食指後，繞中指背半圈

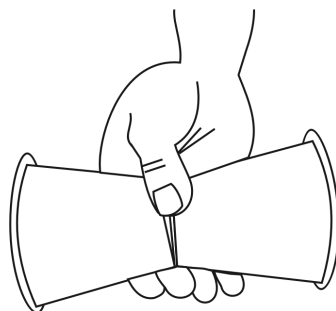


圖 5、單手持杯的正面圖

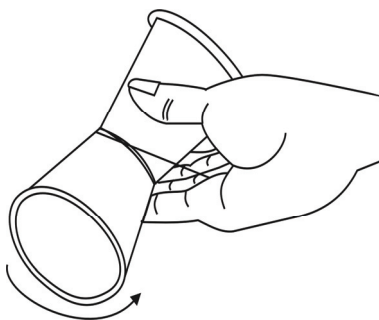


圖 4、單手持杯的側面圖



照片三、持紙杯的手，垂直放下，以便可以大幅揮手臂，往上拋射紙杯



照片二、單手持紙杯，橡皮筋繞中指背手

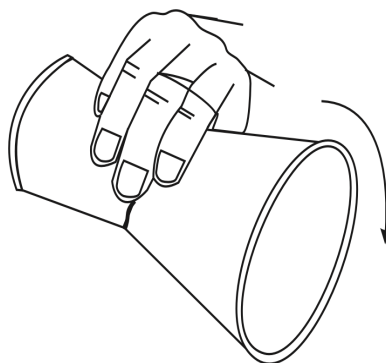


圖 6、單手掌持杯，準備拋射下墜球

(三)左右外角飛行

11. 紙杯左右外角彎曲飛行，可以採用前述圖 1 的持杯方式，但紙杯要與地面垂直，拉長了橡皮筋後發射，紙杯就會左向或右向(視繞紙杯的橡皮筋的方向而定)像香蕉彎曲的方式飛行。
12. 另外也可以如圖 6 的方式單手持杯(例如右手)，右手臂彎至左胸前，然後將紙杯往前揮射出去。揮手的手臂約與地面平行或一點點仰角。當紙杯即將離開手掌時，記得要用力將發射繩拉回來的感覺。

(四)競賽

13. 在離發射區的 1 公尺遠，2.5 公尺高的地方拉一條線，每次飛行(上飄與下墜)均要過線。當下墜飛行時，紙杯飛回發射區或在發射區接住紙杯，分別加分。比賽在相同的時間內(不限發射次數)，誰得分最高。
14. 用剪刀或美工刀剪紙杯，以自己的創意做出花樣，比賽紙杯在上飄或下墜飛行時，誰的紙杯旋轉的花樣最美。

三、想一想

- 問 1、你知道棒球的投手，如何投出變化球嗎？試一試用飛行紙杯模擬一下投手的變化球，例如上飄球、下墜球、內角球、或外角球。
- 問 2、你知道飛行紙杯能上飄飛行的原因嗎？這是因為紙杯在空中前進的同時，還拌隨著旋轉，導致杯子上方的空氣流速(空氣移動的速率)比杯子下方的空氣流速快，因此上

方的壓力比下方的壓力低，使杯子往壓力低的上方飄上去。你能繪圖說明嗎？(伯努力效應：氣體的流速越快的地方，壓力就越低)

- 問 3、若發射飛行紙杯時，要飛出去的紙杯會打到手，怎麼辦？想一想彈弓，能不能將橡皮筋的發射繩，綁在一隻竹筷子上來發射紙杯？

貳、教師手冊

一、要學生「想一想」的參考答案

答 1、要投出變化球，投手在投出球的同時，必須要旋轉球，使球一邊旋轉一邊往前飛出去。先讓學生用空手投射紙杯，則紙杯不僅投不遠，而且不易旋轉。讓學生理解為什麼要用橡皮筋當做發射繩。最好準備幾條不同性質的繩子，讓學生親自體驗其與橡皮筋的不同。

答 2、想一想的第二問，目的在於要學生了解文字敘述後，以其個別的創意，繪圖來表達紙杯上飄彎曲飛行的軌跡。用球體來說明彎曲飛行的例子在許多趣味科學實驗的書上可以找得到，例如高爾夫球(參考資料 3)，足球(參考資料 4)。以下則用分步驟的分解圖(圖 7)來說明，僅供教師參考指教。圖 7 除了(A)為斜側面外，其餘各圖(B 至 H)均為了簡便，只繪出正對著杯口看的，杯口正面圖。

- (A)假定紙杯被往右上方射出的同時，紙杯沿反時針的方向旋轉。

- (B) 紙杯被往右上方射出後，飛行時在其附近所造成的氣流，則相對地往左下方流動。
- (C) 另一方面，因紙杯反時針方向旋轉，在與紙杯直接接觸的那一部分空氣，會被帶動著一起旋轉，並會相繼帶動鄰近的空氣旋轉，結果在紙杯的周圍會產生一層與紙杯一起旋轉的附面層。
- (D) 以上(B)與(C)說明了紙杯在旋轉飛行時，紙杯鄰近會有兩股氣流：一為紙杯被射出去，飛行時所造成的氣流【圖(B)】，另一為紙杯旋轉所造成的附面層氣流【圖(C)】。爲了要說明這兩股氣流的相互作用導致的合作用（影響），將圖(B)簡化成圖(D)中的氣流(1)與(2)。
- (E) 同樣將圖(C)簡化，只繪出紙杯飛行方向的上下附面層流動方向，則可以簡化成如圖(E)附面層氣流的(3)與(4)。
- (F) 紙杯鄰近的兩股氣流，在紙杯上方附面層中的空氣旋轉方向亦即氣流(3)與紙杯飛行時所造成的氣流(1)方向相同，會有加速的作用，但紙杯下方，因紙杯旋轉所造成的附面層氣流(4)的方向與紙杯飛行所造成的氣流(2)方向相反，會有減速的作用。如此兩股氣流所造成的氣流速率，在紙杯上方的爲 $|(1)+(3)|$ 亦即如圖(F)中的氣流(5)，大於紙杯下

方的氣流 $|(2)-(4)|$ ，圖(F)中的氣流

(6)。

- (G) 圖(G)系依據伯努力效應：「氣體的流速越快的地區，其壓力就越低的原理」，將圖(F)的流速改爲用壓力來表示，因此紙杯上方因氣流的流速(5)較大，壓力就較小如圖(G)中的壓力(7)，而紙杯下方的情況恰好相反。

- (H) 總而言之，紙杯往前旋轉飛行的同時，也有空氣擦過杯壁，兩種氣流綜合作用，使紙杯獲得側向的推力，亦即使得紙杯上方產生較低壓力區，而紙杯下方產生較高氣壓區，因此紙杯往右上方飛行的同時，另受一力從紙杯的下方往上方推，導致紙杯彎曲飛行。

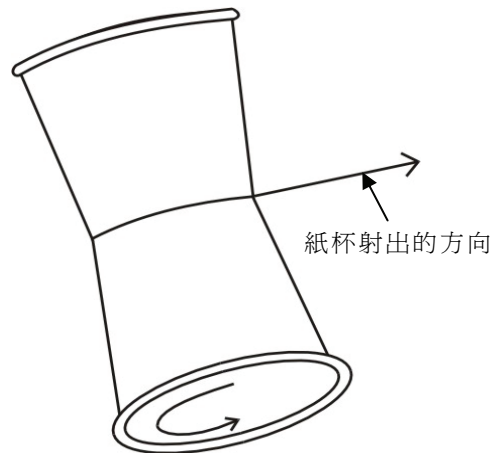


圖 7、紙杯彎曲飛行的分步解說圖

圖 7 (A) 紙杯向右上方射出，紙杯反時針方向旋轉

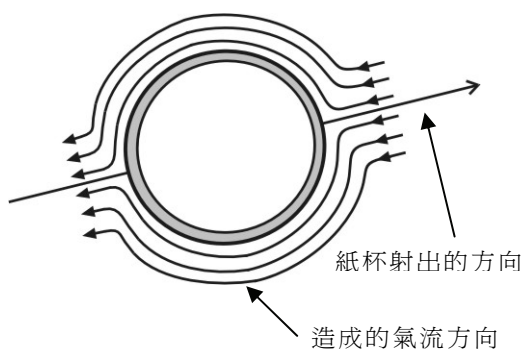


圖 7 (B) 相對於紙杯向右上飛行，造成的氣流往左下方流動

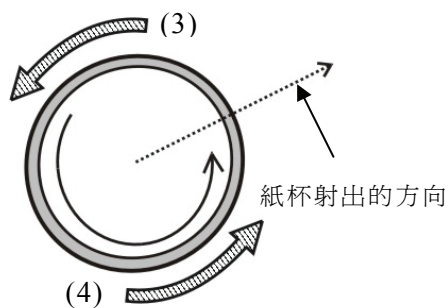


圖 7 (E) 紙杯旋轉造成在紙杯上下的附面層流動方向

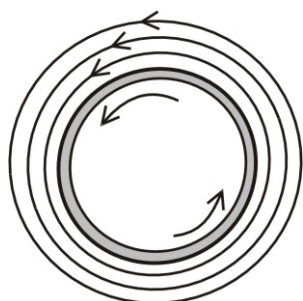


圖 7 (C) 紙杯旋轉的方向反時針，帶動紙杯鄰近的空氣，一起反時鐘方向旋轉

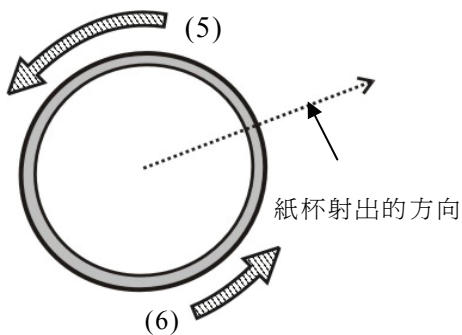


圖 7 (F) 紙杯上下氣流的流速：上的(5) > 下的(6)

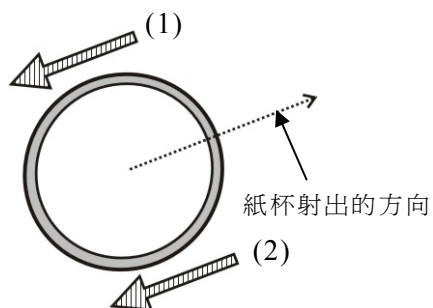


圖 7 (D) 相對於紙杯飛行的方向，在紙杯上下，造成的氣流簡化圖

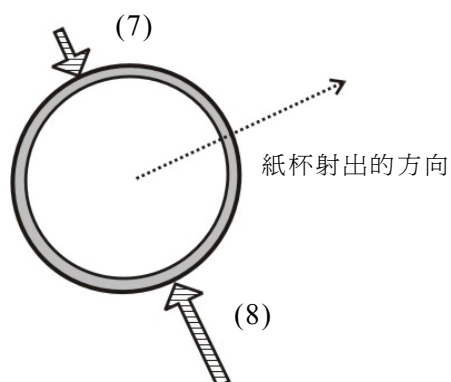


圖 7 (G) 紙杯上下的流速不同，造成的壓力：上的(7) < 下的(8)

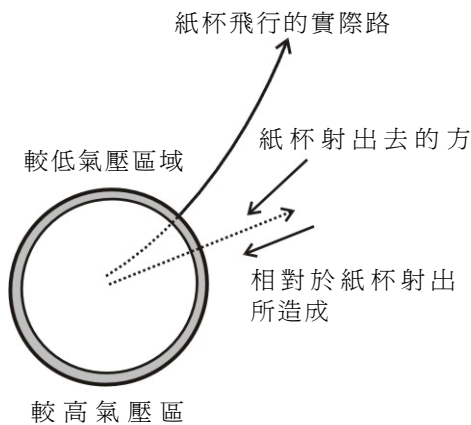


圖 7 (H) 旋轉紙杯的飛行曲

答 3、利用竹筷子發射紙杯的方式也有幾種，以下只介紹筆者常用的一種。先將兩條橡皮筋相連後，將其一端牢牢綁在筷子的一頭如圖 8 的 (B)，然後將橡皮筋的另一頭，如同圖 1 的方式繞在紙杯上，就成為筷子橡皮筋的紙杯發射繩。利用筷子輔助發射紙杯的架勢如圖 9，照片四。

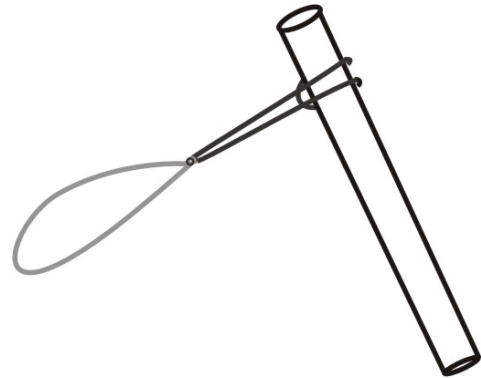


圖 8 (B) 拉緊串過橡皮圈的橡皮

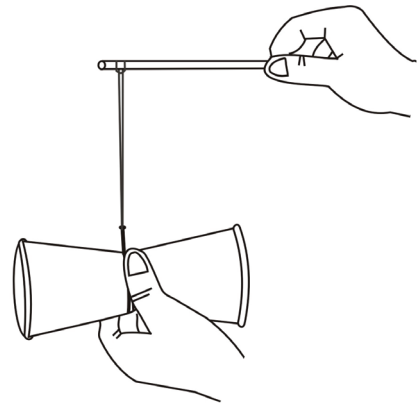


圖 9、利用筷子發射器輔助發射紙杯的架勢

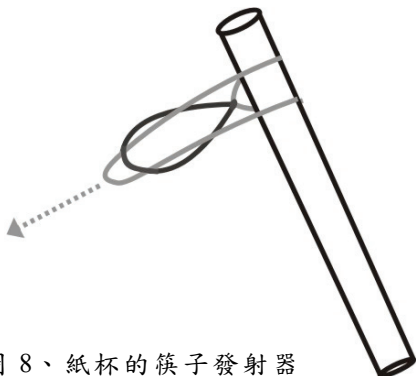


圖 8、紙杯的筷子發射器

圖 8 (A) 相連的兩個橡皮圈，一個橡皮圈的頭，先繞過筷子後串過另一橡皮圈的圈內



照片四、圖 9 的照片

二、教學經驗分享

1. 兩個紙杯的杯底間要用膠帶密封，不能有空隙，以避免橡皮筋卡在隙縫間射不出去。
2. 紙杯旋轉的速率與繞在紙杯的發射繩間的摩擦力（或說橡皮筋的拉緊度）有關。至於紙杯射出去的遠近，則與橡皮筋的拉緊度有關，但若用繩子時，則與手臂揮出去的力度有關。最好分別用橡皮筋與繩子試試作比較。
3. 紙杯的飛行，在遠哲科學教育基金會的少年科學營實施了好多年。本文所介紹的是筆者之一（蕭）採用的，而羅芳晁老師（建中退休物理教師）與謝迺岳老師（新竹中學退休物理教師）的教學心得，認為如下的教學方式對高年級的小學生較為有效而且較具趣味性，敬請參考。

羅老師的建議為：

1. 紙杯（羅老師稱飛行紙杯為幽浮杯）先徒手投不遠。
2. 再用橡皮筋四條發射。
3. 再將橡皮筋綁在筷子上發射。
4. 再垂直發射模擬曲球。
5. 再在上杯中加綠豆發射。
6. 再徒手投。

謝老師的建議為：

1. 先在紙杯上用彩色貼紙裝飾，然後用橡皮筋四條發射。
2. 再將橡皮筋綁在筷子上發射。
3. 接著將紙杯的兩端各塞一個杯子發射。

4. 再將兩端杯子取出，而將兩端杯緣剪成齒輪折立起，發射。
5. 再將兩端齒輪折入杯內發射。
6. 再將其中一杯杯口用四條橡皮筋綁緊用手投射紙杯成為精靈炸彈。
7. 最後將精靈炸彈的尾部齒輪各折 45 度再投射。

三、給老師的建議

帶學生做紙杯飛行的活動，可以有許多不同的方式，應視學生年級、時間、場所而定。至於紙杯彎曲飛行的解釋，也可以用不同的圖形來說明。本文的圖 7 是分部解說圖，看起來比較複雜，是提供給教師要利用黑板繪圖解說時用的，例如圖(B)與(D)說明紙杯直飛時所造成的氣流影響，圖(D)是從圖(B)簡化而來的，將圖(B)紙杯左右的氣流擦掉就可以了。同樣圖(C)與圖(E)的關係也是如此。因此也可以將分部解說圖簡化繪成下列的兩組圖。假定紙杯往右飛，則造成氣流方向往左，如圖 10 的(A)，而由此對紙杯所造成的衝力就如圖 10 的(B)，紙杯往右飛，紙杯右邊所受衝力較大。至於紙杯旋轉所造成的氣流影響就如圖 10 的(C)，紙杯上方的旋轉方向與氣流的方向相抵，速度較慢，依伯努利效應，導致所產生的壓力較大。因此將因紙杯旋轉而造成的氣流與紙杯飛行所造成的氣流影響的圖(B)合起來，可以繪成圖(D)。由圖 10 的(D)易見紙杯所受的合力不等於零，因此紙杯飛行的軌跡就成曲線了。（請參閱參考資料 5，謝老師的網頁）

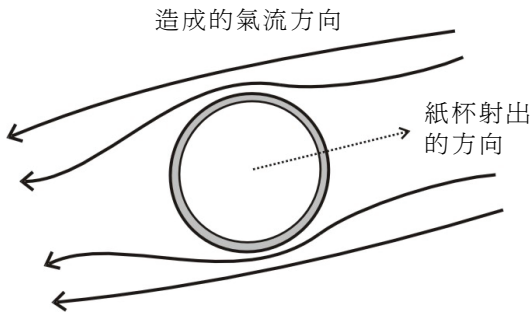


圖 10、紙杯彎曲飛行的簡易圖

圖 10 (A)相對於紙杯的飛行所造成的氣流方向

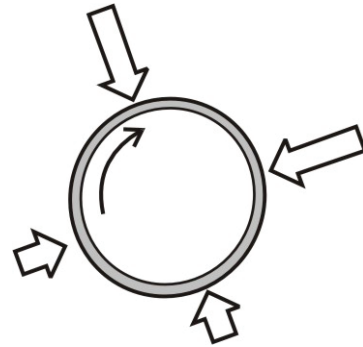


圖 10(D)飛行與旋轉所造成的兩種氣流的影響

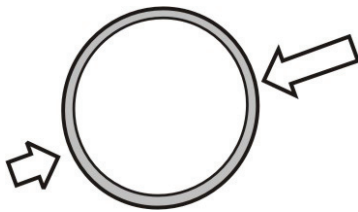


圖 10 (B)在紙杯飛行的方向衝力較大

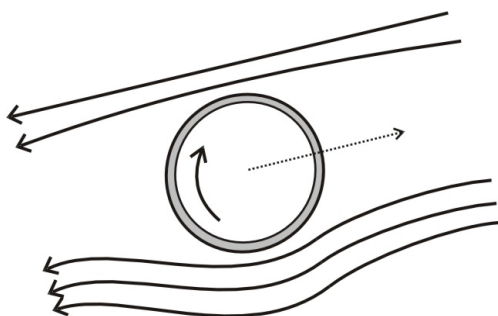


圖 10(C)紙杯旋轉所造成的氣流影響

參、參考資料

- 「生活科學 23，發現科學－應用科學」，遠哲科學教育基金會（民 89.4）
- 蕭次融，「科學小玩子」，資訊工業策進會推廣服務處（民 92.1）
- 小暮陽三，「圖解生活物理世界」，P72，「流體運動」，張厚江譯，世茂出版社（中譯）1998。
- 黃鐘等，「趣味力學新編」，P.140，「香蕉球」，中國石化出版社（北京），1997。
- 謝迺岳，「迺哥的童話科學（38 紙杯的趣味科學）」，<http://messenger.yahoo.com.tw/>，2005。