湯匙擲球器與拋體運動課程

文／吳明德

前言

高中物理課程的學習，對初次接觸的學生而言，最困難的部分，是如何透過物理定律，認識真實物理現象，並且將兩者相互結合。雖然有大量的模擬軟體協助，但是對於大多數的學生，希望能實際操作與觀察，才能在腦海中建構科學概念，並開始想像運作的原理。

教科書中解釋斜向拋射運動：「其水平方向為等速運動，鉛直方向為等加速度鉛直拋射運動，計算時有已知發射初速、發射仰角，求出水平射程、飛行時間與最大高度。」本文介紹利用湯匙、曬衣夾等日常材料，設計出可調發射仰度與速率的擲球器教具。為了觀測紀錄斜向拋射的乒乓球飛行軌跡，不採用免費的電腦版本的 Tracker，而是使用內建攝影機的 iPad 等載具，藉由 Video Physics App 能夠更方便及有效率分析拋射運動軌跡。

湯匙擲球器適合 2~3 小時活動的國、高中生營隊，還可以在物理課程的教學演示實施，或是探究與實作等課程。如果時間充裕，還可以配合 Algodoo 或 PhET 進行軟體模擬教學。如果是鋸子與 C 型夾數量充足，還可以讓學生裁切擲球器底座木板，或是鑽孔等工序。目前在教育現場，最欠缺的就是親自動手實踐的經驗。

材料準備

湯匙擲球器材料明細如下（圖 1），其中梧桐木我是由特力屋購入，而曬衣夾是由大創等雜貨商店購入。而 Video Physics App 是 Vernier 公司出品。

1. 擲球器底座/梧桐木 12×80×80 mm
2. 彈力裝置/曬衣夾（夾尾附上小孔，以木螺釘可固定在底座上）
3. 投擲臂/長柄塑膠湯匙
4. 調整發射仰角/長螺釘與螺帽×2
5. 調整發射速率/木片與細線
6. 固定彈力裝置與底座/木螺釘×2
7. 拋體/乒乓球
8. 其他/螺絲起子、直尺、電器膠帶、剪刀

9. 觀測儀器/iPad 及 Video Physics App/智慧手機及 Phyphox App。
10. 閱讀資料/YouTube 搞飛機學物理物理頻道—湯匙擲球器/吳明德，物理搞什麼飛機，泰宇出版

圖 1. 製作湯匙擲球器的材料與工具

斜向拋射原理

斜向拋射的水平速度為定值，不隨時間變化　$v_x(t) = v_{x0}$

斜向拋射的垂直速度會隨時間遞減，　$v_x(t) = v_{xo} - gt$

其中 v_{x0}、v_{y0}，為初始水平與垂直的初速。$v_{x0} = v_0\cos\theta$，$v_{y0} = v_0\sin\theta$

課前準備

最理想的分組是採取三個人為一組，可以依據班級人數準備事先材料。每組需要準備湯匙擲球器的材料一份，以及 iPad 一台。 如果課程實施的時間僅為兩小時，老師必須要事先將擲球器底座木板裁切（圖 2）與鑽孔（圖 3）。而提供彈力的曬衣夾，除了夾尾端原有的小孔外，還需預先鑽一小孔（圖 4），以便將曬衣夾以木螺絲鎖在木板底座。

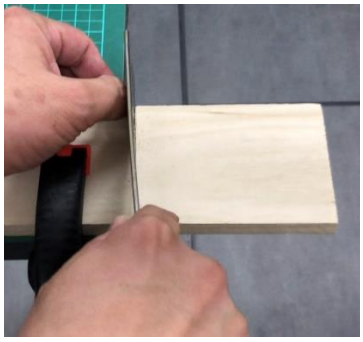

圖 2. 鋸子裁斷擲球器桐木底座

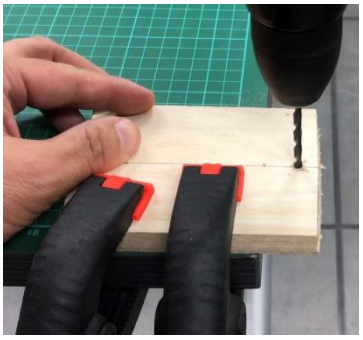

圖 3. 電鑽將桐木底座鑽孔

圖 4. 曬衣夾鑽孔
(木頭保護桌面)

課程實施

課程實施可以分為幾個階段：第一個階段是製作湯匙擲球器，這部分是依靠影片自學。第二部分是利用 Phyphox 測量發射仰角，以及聲學停錶測量飛行時間。以及利用 Vernier Video Physics App 分析斜拋影片，再經由 Vernier Graphical App 分析 v-t 圖斜率得到加速度，速度曲線與時間軸所圍面積得到位移量值。

1 **自學取代老師教學**：由於課程時間的限制，讓各組同學自行觀看 YouTube 頻道：「搞飛機學物理物理」中的湯匙擲球器影片。由於每組有三個人，利用 iPad 頂多提供兩人觀看影片，而第三人則是閱讀由泰宇出版，《物理搞什麼飛機》書籍的「湯匙擲球器」實驗內容。

2 **自己動手實作**：在各組觀看影片及閱讀書籍後。我會請各組自行拿取材料盒，並且開始製作湯匙擲球器。很明顯可以觀察到，各組幾乎又重複再看一次製作影片，但是這次是一邊觀看同時進行實作（圖 5 至圖 7）。這目的是希望同學日後學習任何一項新技能，不需要找老師教，可以藉由看影片自學。

3 **運動分析軟體教學**：前面湯匙擲球器需要約 20 分鐘左右時間製作。接下來教授藉由螺絲與螺帽調整發射仰角，可藉由手機緊貼湯匙臂測量（圖 8），並利用 Phyphox 測量發射仰角（圖 8）。再教使用 Vernier Video Physics App ，從錄製影片需去頭去尾，僅保留拋射飛行的那一、兩秒瞬間，再設定原點與尺規，再依據影片的每一幀畫面，逐一將乒乓球描點數位化，最後形成 x-y 平面的飛行軌跡，再分別呈現水平的速度時間關係，以及鉛直速度與時間關係。教學這部分大約需要 15 分鐘時間，並留下 10 分鐘給各組學生練習使用軟體。

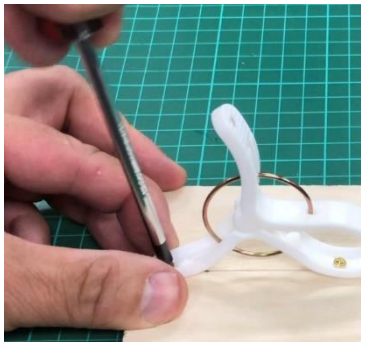

圖 5. 以兩顆木螺絲鎖緊曬衣夾與擲球器桐木底座

圖 6. 以長螺桿改變上下兩顆螺帽位置調整桐木底座仰角

圖 7. 木片寬度調整曬衣夾張開的程度，拉繩繫住此木片

4　等待學生練習軟體的同時，將示範實驗桌位置挪至背景比較乾淨的牆面。湯匙擲球器的位置十分重要，要預設飛行軌跡由左至右。錄製影片內需有標示一公尺的長度，以便定義尺規，並且在調整曬衣夾張開程度的小木片寬度，直到乒乓球的水平射程不會太遠，還能落至桌面上，並在桌上放置手機，利用發射聲響啟動 Phyphox 的聲學停錶，再藉由乒乓球落至桌面聲響停止計時，測量出飛行時間。再調整 iPad 位置，確保能將拋射全程錄製，不會球飛出錄製範圍出鏡。iPad 錄製時要確保左右、前後不能傾斜，高度要適當，否則畫面角度會嚴重失真（圖 9）。

圖 8. 手機 PhyPhox 傾斜儀測發射仰角，此手機向左傾斜 48.79 度，表示發射仰角也為 48.79 度。

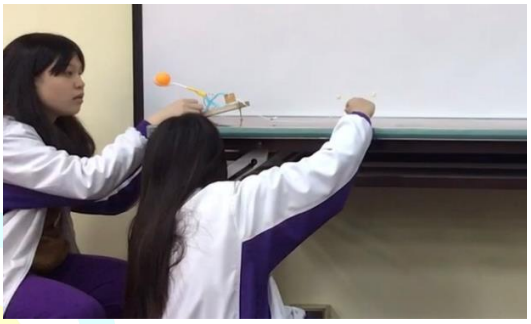

圖 9. 兩人合作，一人緊握湯匙擲球器，另一人拉繩釋放曬衣夾彈力，拋射需由左向右飛。此實驗畫面尚欠缺標示一公尺記號，攝於 2018 年 12 月 18 日，新北市明德高中。

5　前面示範實驗大約需要 7 分鐘左右時間。示範錄製拋射影片，再複習 Video Physics 後（圖 10 至圖 13），將處理的資料轉到 Vernier Graphical App 分析鉛直的速度與時間關係圖斜率（圖 14、15），得到重力加速度量值，可以與真實世界的重力加速度作比較（大約 9.8m/s2），速度曲線與時間軸所圍面積得到鉛直位移的量值。同時可以得到飛行時間與最大高度，這部分可以與聲學停錶所測量的飛行時間加以比較。而示範將實驗影片進行分析，大約需要 8 分鐘左右時間。

接下來學生各組實驗，並整理數據最後要簡短上台報告，報告內容需要包含科學論文四個部分，屬性類似高腳杯各部位形狀（圖 16）。前言 Introduction 搜集足夠廣的資料，如同杯口的形狀，先閱讀大量文獻資料，才進行初步測試與探究。接者發展合適研究方法與材料 Materials & Methods（圖 17），就需逐漸聚焦，類似杯底。結果 Results，必須足夠深入且能支持整個研究，就像杯柱。最後是討論 Discussion，討論是可以依據結果數據，加以整理與推測。並撰寫接下來的研究，包含未來展望的延伸與應用，當然期望能夠具有價值且影響深遠，成為大面積的杯座。這部分保留 20 分鐘給學生操作。

圖 10. 設定乒乓球發射前位置為原點，以及設定一公尺的尺規長度。

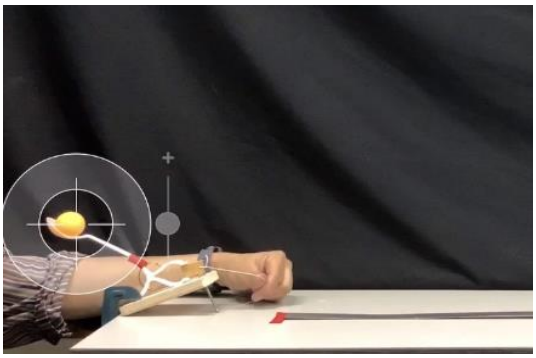

圖 11. 調整選取運動追蹤物-乒乓球大小範圍

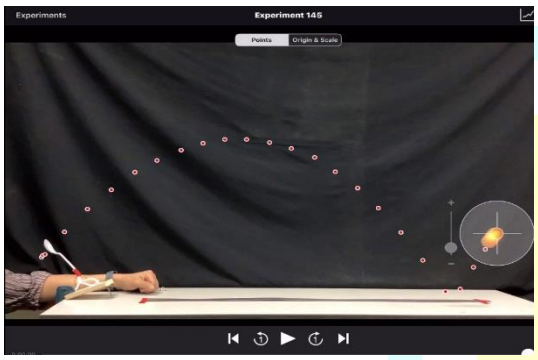

圖 12. 可選擇自動追蹤或手動點選運動物件

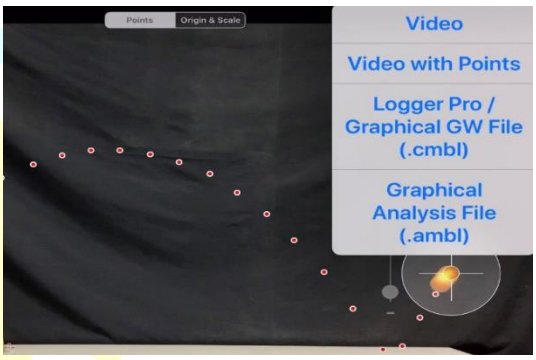

圖 13. 將 Video Physics 轉換至 Graphical

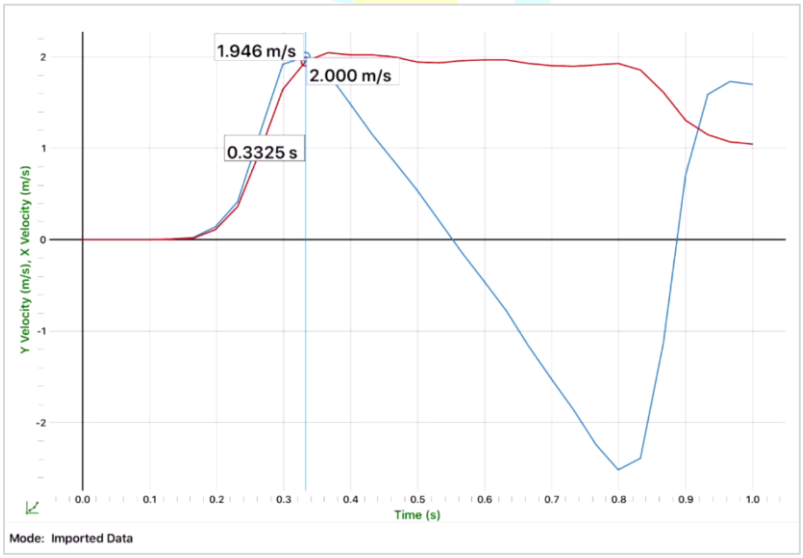

圖 14. 以 Vernier Graphical 分析水平及垂直初速分別為 1.946m/s 及 2.000m/s

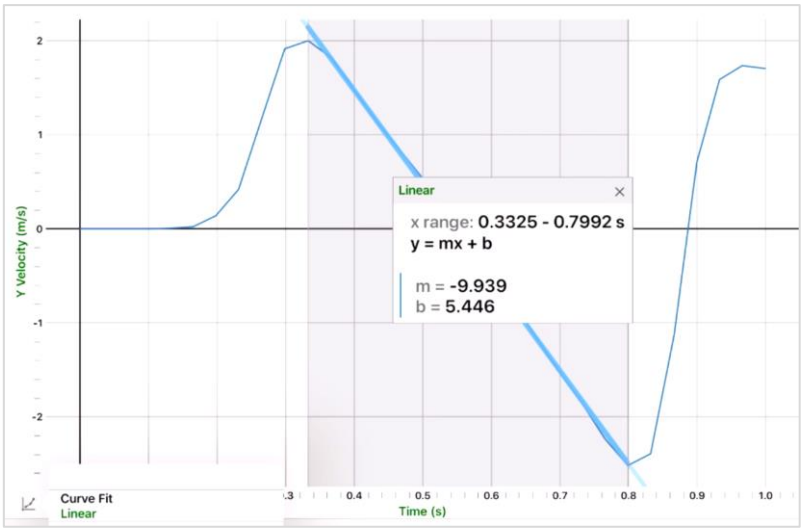

圖 15. 以 Vernier Graphical 垂直速度與時間關係圖斜率為-9.939m/s2

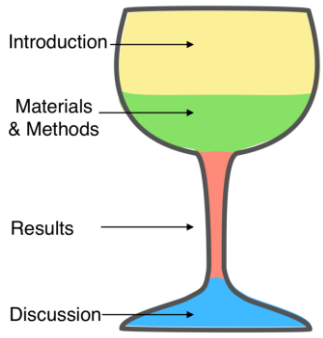

圖 16. 科學論文包含四個部分，屬性類似高腳杯各部位的形狀。

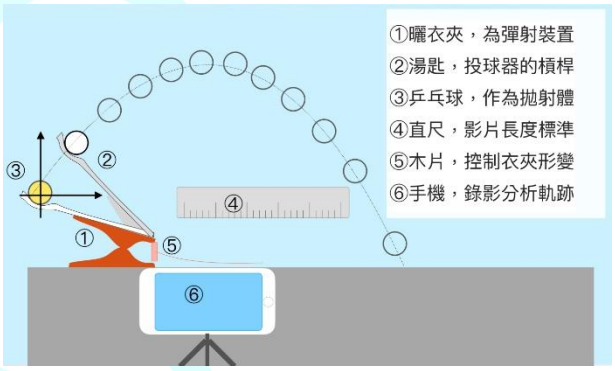

圖 17. 湯匙擲球器實驗裝置示意圖

6　最後是讓各組進行一分鐘報告，報告與講評總計為 15 分鐘時間，為減少各組上台連接訊號線浪費時間，所以在自己的實驗室，iPad 的簡報投射，都是採用 Apple TV 連接大尺寸液晶電視（圖 18），在報告的進行，同時也在登記各組每一位同學的上台報告分數，讓學生會在意這門的課程。

7　如果是營隊活動，就不需要要求同學上台報告。營隊的重點是如何讓所有參加的同學，能夠快樂而且印象深刻，並能夠學習到新東西。所以會發給各組不同編號的乒乓球，教學生使用軟體的測距儀，讓同學建立在不同距離，需要調整多少角度的發射仰角？以及曬衣夾需張開多少距離？才能擊中。所以可以在各組湯匙擲球器圍著一個小垃圾筒，每組分別測量距離後，投擲三顆乒乓球，看看那一組可以擊中最多顆？

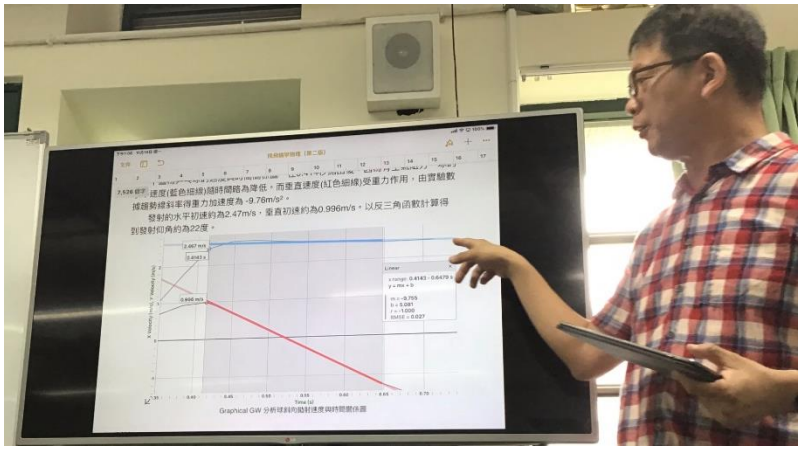

圖 18. 使用 Apple TV 結合 iPad 進行簡報教學或實物投影

探究與討論

1 **拍攝誤差**：學生從實驗測量得到的重力加速度，大約是在 8.5 到 9.5m/s2 之間。學生通常會將實驗上的誤差，不經過求證就隨便認定為空氣阻力。其實有一部份重力加速度數值過低，與實驗影片的拍攝角度有密切的關係，最理想的拍攝自在無窮遠處，以望遠鏡頭錄製。最不理想的是在極近的距離，以廣角鏡頭錄製。因為廣角鏡頭原本就會將畫面的邊緣處放大，導致失真變形。

2 **球體旋轉**：有時後投擲出時，球體可能會因為湯匙與球體間的摩擦產生旋轉，產生馬格納斯效應 Magnus Effect，此時的平乒球可能變身為上飄球，或是下飄球等變化球，當然測量出來的重力加速度數據，會與理論值有極大的落差產生。為瞭解球體是否旋轉，可以在乒乓球上塗上記號，並以每秒 240 張的高速攝影，研究球體是否有旋轉。

3 **空氣阻力**：實際上乒乓球質量輕、體積大，本來就容易受到空氣阻力所影響，可以換成體積較小，質料略大的小球，先做自由落體實驗，驗證加速度與理論值的差異。

4 **實驗變因**：如果將湯匙擲球器課程，放在探究與實作的實驗內，可以要求各組同學進行不同的實驗變因探討。例如曬衣夾張開距離與發射初速比較，或是驗證發射仰角會為餘角時，例如仰角 30 度與 60 度，有相同的水平射程。由於是與課程相關，所以十分方便，讓學生自己列出可能的實驗變因。

5 **軟體模擬**：研究方法有需多種類，其中最常用的就是實驗法，接下來是模擬法也十分常見。如果不考慮其他因素，也可以利用斜向拋射公式計算得到的解。所以可以並列三種研究法的數據，在一張圖表內進行疊圖比較。模擬可以運用 PhET 的拋射運動進行模擬。

回饋與心得

課程結束後，我以個案調查方式詢問許多學生，絕大多數反應是十分正面的，尤其是斜向拋射運動，水平是等速運動，垂直是等加速度運動，原本是極為抽象的物理概念，現在透過擲球器實驗及 Video Physics 數位影像分析軌跡，能藉由實驗的函數變化，讓學生感受到物理量的改變。

有的高中物理老師反應，如果是在教授斜向拋射的前一週，就先進行湯匙擲球器實驗，會讓學習更有效率。還有的物理老師聽過我的教學演示課程之後，就決定採用湯匙擲球器課程，作為探究與實作的內容之一。

在學生們的眾多回饋中，最讓我驚訝的是，有很多學生是生平第一次，使用螺絲起子轉緊螺絲。如果時間充分，我會更希望能讓學生拿起鋸子與電鑽，使用三角板畫垂直平分線。現在的孩子接觸僅有概念或者是素養，學校教育或是在家庭教育，都忽略學習最基本的技能，才能執行操作與解決問題。就像學會使用筷子吃飯一樣重要。

另外一件事，也讓我十分匪夷所思，大部份同學對於手機的測量功能，完全沒有接觸過，感覺十分的陌生。例如使用手機測量傾斜角度，就像是氣泡水平儀一樣。深入思考這問題，因為臺灣家庭沒有讓學生使用氣泡水平儀，檢查畫作是否掛歪的生活經驗。自然連帶以為手機由便於持握直立狀態，改為方便觀賞影片的橫向設計，不會深入思索是什麼感測器在運作。這感測器能否能提供測量傾斜的功能。

學生的求知好奇心，似乎並沒有因為湯匙擲球器的實驗而被啟發。在實驗中，可以藉由手機測量發射仰角，藉由影片分析得到發射初速。但是只要老師不要求，幾乎沒有學生會主動計算射程、飛行時間、最大高度等經常考試的試題內容。原本這擲球器實驗與課拋體課程，內容完全相符合，應該要有觸類旁通的反應才對。

吳明德

臺北市麗山高中教師

參考資料

吳明德（2019）。**物理搞什麼飛機**，泰宇出版。

吳明德，湯匙擲球器，搞飛機學物理 YouTube 頻道。

吳明德，科需論文格式，搞飛機學物理 YouTube 頻道。