嘉義市第 38 屆中小學科學展覽會

作品說明書

科別：物理科

組別：國中組

作品名稱： 火焰大怒神

—探討加速系統中的火焰形狀

關鍵詞：加速系統、火焰、失重

編號：

摘要

在自由落下的箱子中，蠟燭的火焰會變成怎麼樣呢? 我們利用手機 app 測量加速度的功能進行了研究，發現在自由落下的紙箱中，火焰變形可分成四個階段 : (1)長條水滴狀 (2)短橢圓形火焰 (3)長條水滴狀 (4)超長條形火焰，實驗的結果推論火焰的形狀受到熱對流與慣性兩種因素的影響，使火焰形狀有不同的變化。另外我們也探討了火焰周圍出現藍色火焰的原因，而有初步的結果。

壹、研究動機

在某個奇怪的生日郊遊上，跟著同學一起乘坐大怒神，在同學們忙著尖叫的同時我動起了我充滿鬼靈精怪點子的腦袋思考著:「大家的頭髮在下墜時都往上飛，那麼有沒有東西在往下掉的時候會飛起來呢?如果蛋糕在掉下來的時候不會往上飛那就可以邊玩大怒神邊慶生了呢!!」我想了又想，最終我決定上網查找答案，在我真的要相信這世界沒有東西在下墜時不會上浮之際，眼角的餘光瞄到了一線的曙光----科學頻道 Physics Girl 介紹失重火焰的形狀的影片，在影片中火焰在重力為零的狀態下會呈現圓形的樣子，不會像平常我們熟知的水滴狀，而且在火焰的邊緣會因為擴散，達到較完全的燃燒，而呈現一圈藍色的火焰，因此我決定找幾個同學來做實驗，完成我對於找到不會往上飛的東西的夢想。

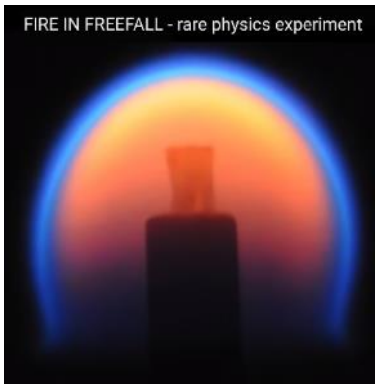


圖 1. 截錄自 Physics Girl 的 FIRE IN FREEFALL - rare physics experiment 影片，
網址：https://www.youtube.com/watch?v=VAA_dNq_-8c

貳、研究目的

一、探討自由落體(失重)時的火焰形狀

二、利用搧風和吹風模擬火焰變短的原因

三、以水和海綿球模擬水平加速時火焰的形狀

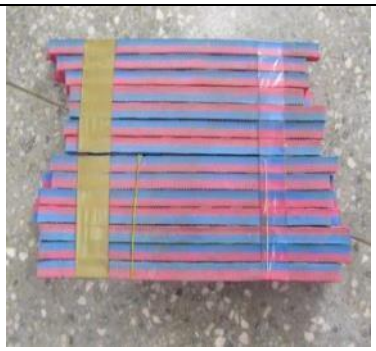
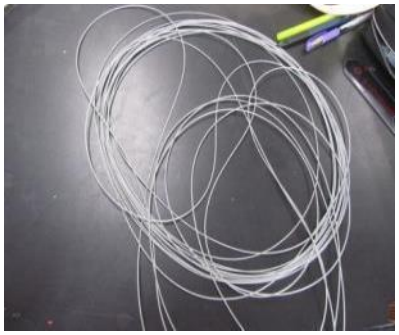
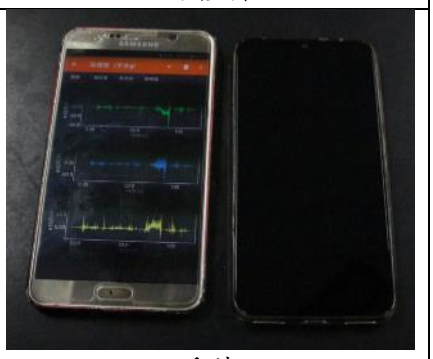
四、探討水平加速時火焰的形狀

五、探討圓周運動時火焰的形狀

六、探討水平蠟燭失重時的火焰形狀

七、利用吹風和純氧探討圓環形藍色火焰的產生原因

參、研究設備及器材

 紙箱	 木板	 防撞條
 帆布	 鋼繩	 手機
 密封罐與海綿球	 重物	 抽氣馬達
 打火機	 打氣筒 寶特瓶	 蠟燭

參、研究過程、結果與討論

一、準備實驗：組裝實驗器材與測試實驗流程

我們準備了一個紙箱，在側邊開了一個門，並在內部的底部用保麗龍做了一個底座，將蠟燭固定座上，然後將相機貼在一邊的牆上，拍攝蠟燭燃燒的情況，然後將紙箱的門關上，由四樓底部朝下讓紙箱自由落下，在落下處有同學拉住帆布，接下落下的紙箱。準備好後我們先試丟，觀察結果，如圖 2。

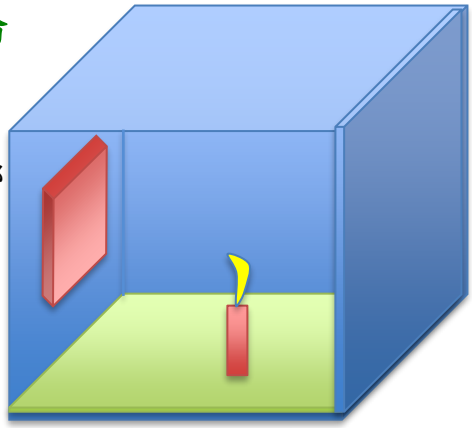


圖 2.a 實驗構想示意圖

圖 2.b 先將紙箱黏好

圖 2.c 將蠟燭固定在底座上

圖 2.d 將相機黏在壁上

圖 2.e 將紙箱由四樓落下，過程中紙箱會旋轉

在測試實驗中我們發現，紙箱掉落過程中會旋轉，落在帆布上時不一定是底部朝下，所以我們在紙箱的底部加上一塊木板，並在木板下方釘上一個釘子，然後在釘子上掛上水球，如圖 3，希望在落下過程中，可以確保蠟燭的方向朝上。

圖 3. 在紙箱底部黏上木板再綁上水球

結果我們發現紙箱在落下過程中，因為水球的彈力，會產生上下晃動的情況，所以後來我們改用寶特瓶裝水，然後用鐵絲綁在木頭底座的釘子上，這樣落下時，紙箱就不會翻轉或胡亂晃動，如圖 4。

圖 4.紙箱落下不翻轉

我們希望知道在紙箱落過程中，加速度大小是多少，所以我們利用手機下載了一個測量加速度的 app : phyphox，然後將手機黏在相機對面的壁上，這樣相機就可以拍到蠟燭燃燒和當時加速度的大小，如下圖 5。

圖 5. 紙箱內攝影可拍到加速度大小並拍到火焰的變形

二、實驗一：探討自由落體(失重)時的火焰形狀

實驗過程

1. 先在一樓紙箱掉落的位置綁上帆布，如圖 6，兩位同學分別拉住帆布兩個角，使帆布張開。
2. 一位同學先將紙箱搬到 4 樓，大聲確定樓下準備好
3. 啟動紙箱內的相機開始錄影
4. 啟動紙箱內手機加速度測試 app，開始測量加速度
5. 以打火機將紙箱內蠟燭點火
6. 關上並黏好紙箱的門
7. 抬起紙箱，移到欄杆外，讓紙箱落下
8. 樓下同學以帆布接住紙箱
9. 打開紙箱門關上相機與手機測試軟體，並將相機與手機資料存檔

圖 6.準備帆布

圖 7.a 紙箱剛要落下

圖 7.b 紙箱落到 2 樓高度

圖 7.c 紙箱被帆布接住

實驗結果：

圖 8.a 未開始掉落時的火焰

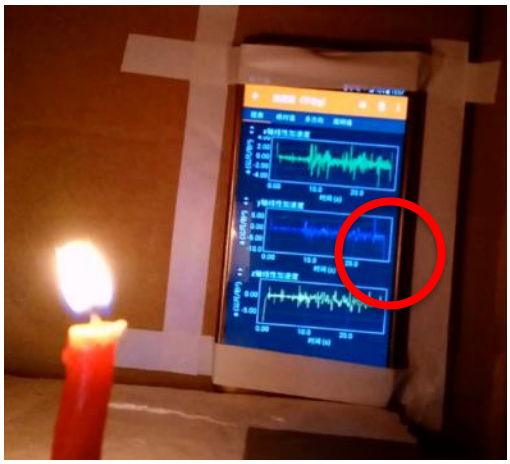


圖 8.b 剛開始落下時的火焰，持續 0.4-0.8 秒

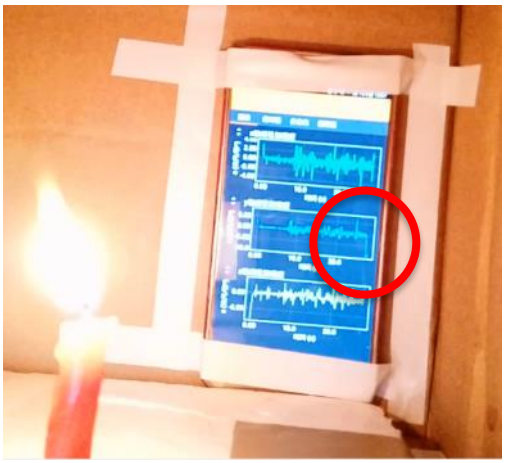


圖 8.c 第三階段火焰，約持續 0.6-1.0 秒

圖 8.d 撞擊帆布熄滅火焰，只有一瞬間

討論：

我們發現紙箱落下時，蠟燭的燃燒可以分成四個階段，第一階段尚未落下，蠟燭燃燒正常，火焰因熱對流而變成水滴形如圖 8.a，當開始落下時，蠟燭會先縮短變成橢圓形，如圖 8.b，時間大約 0.5 秒鐘的時間，我們猜可能的原因是因為紙箱落下時，上方的板子造成空氣向下流動，向下的氣流壓縮了火焰，使火焰變短、變橢圓。

第三階段是蠟燭恢復到類似第一階段的正常燃燒如圖 8.c，最後一階段是紙箱撞到帆布，減速停止時，火焰會忽然被拉長很多，大約有原本火焰的兩到三倍高，如 8.d，然後熄滅。

三、實驗二:以吹風模擬氣流改變火焰形狀

因為懷疑是由上向下的氣流造成火焰變短，所以我們以抽氣幫浦、搧風以及打氣筒吹氣的方式看是不是能產生能維持 0.5 秒鐘的橢圓短火焰。

圖 9.a 抽氣幫浦吹氣　　圖 9.b 用來吹氣的打氣筒

結果:

1. 抽氣幫浦吹氣:火焰晃動厲害，形狀不斷改變，不能維持變短的橢圓形

2. 搧風:輕輕搧風時，火焰先變短，隨著氣流繞一圈，但形狀不斷改變，不能維持

3. 打氣筒：持續穩定緩慢吹氣，火焰變形嚴重且快速，不能維持變短的橢圓形

討論：

我們觀察到不管是哪一種方式，都沒有辦法產生能維持 0.5 秒左右的變短的火焰，所以我們之前假設是向下流動的氣流造成火焰變短可能是錯誤的。

四、實驗三：以水和海綿球模擬水平加速時火焰的形狀

在實驗一中我們猜測是因為氣流造成了第二階段的變短的橢圓形火焰，可是實驗二推翻了這個假設，我們討論後認為可能是慣性造成的火焰變短，因為火焰是高溫的空氣，密度小於其他位置常溫下的空氣，所以我們以黑色空心海綿球代表火焰，水代表周圍的空氣，模擬在水平加速的情況下，黑色空心海綿球是不是會因為慣性，向加速的方向移動。

我們將黑色空心海綿球以繩子黏在容器的蓋子上，在將透明塑膠罐裝滿水，鎖上蓋子，使容器倒立，黑色海綿球浮起。並以橡膠地板墊做出軌道，然後將繩子綁在容器上，另一端掛重物，讓重物垂直落下拉動透明塑膠罐移動，並以攝影機拍攝，觀察黑色海綿球的移動方向。

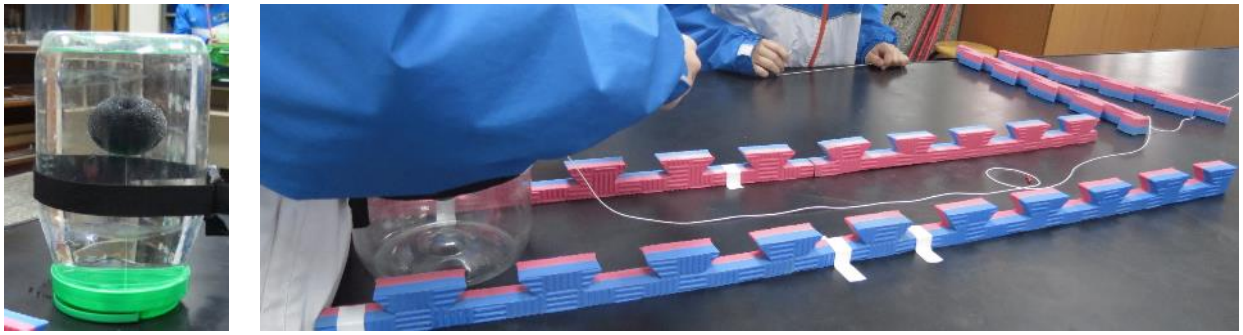


圖 10.a 裝有浮球的透明罐與滑行軌道，浮球以線固定在一定高度

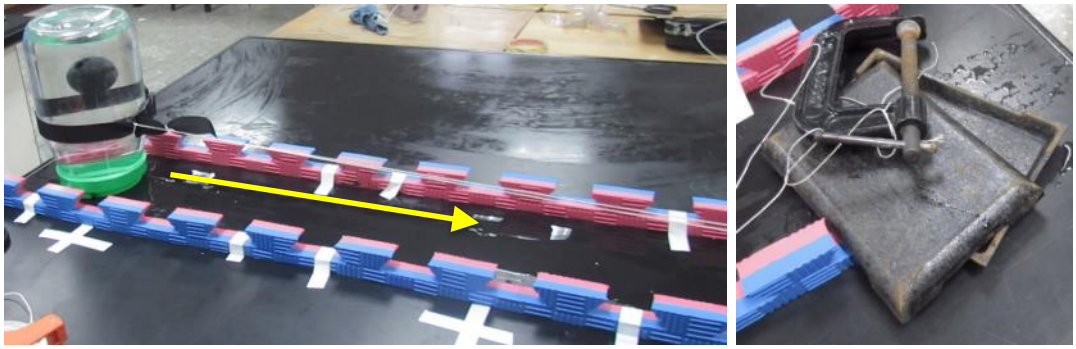


圖 10.b 將海綿球固定於罐中，利用重物將塑膠罐向前拉，觀察海綿球的移動方向。

實驗結果與討論

圖 11.a 靜止時　　圖 11.b 剛開始向右加速　　圖 11.c 重物著地後　　圖 11.d 摩擦減速時

海綿球被水包圍，一開始還沒有移動時，海綿球在罐子的中間，如圖 11.a。向右加速時，海綿球向右移動，如圖 11.b。重物著地後，海綿球移回中央，如圖 11.c，向右減速時，海綿球移到罐子的左邊，如圖 11.d。

以上的實驗結果符合伽利略對慣性的描述，當質量越大的物體，越不容易改變運動狀態，一開始的時候，水的慣性大，留在罐子的後面，海綿球質量小，慣性小，所以往前方跑。而當重物著地後，罐子不再加速，所以海綿球移回罐子中間，當罐子和桌面的摩擦力使罐子減速時，慣性大的水跑到前方，慣性小的海綿球留在後方。

五、實驗四：探討水平加速時火焰的形狀

在實驗三中，我們用模擬實驗解釋火焰變短的原因是因為慣性，但是因為燭火不是以繩子綁在蠟燭上，所以我們也懷疑模擬的結果是不是可以直接套用到蠟燭火焰上，因此就直接以蠟燭火焰來進行水平加速拉動的實驗，看看是不是火焰會向著我們水平加速的方向傾斜，我們將蠟燭依照實驗一的方式裝好點燃，然後以細鋼繩綁住紙箱，由同學拉住在走廊上慢慢加速，拉動箱子時為避免空氣流動造成實驗誤差，所以我們箱子的門朝向後方，以相機拍照的方向，如果蠟燭火焰向前移動，要偏向左側，向後移動，要偏向右側，如圖 12。

實驗過程

圖 12.人拉著紙箱跑，照相機位置使紙箱門在右側，拉動紙箱前進時，門在後方

實驗結果與討論

圖 13 未開始　　開始拉動　　加速度變大　　加速度變回 0　　減速中

我們發現燭火的偏移方向和預測的相同，偏向加速的方向，當向左方加速時，燭火偏向左邊，當向左減速時(加速度向右)，燭火向右偏移，實驗結果符合我們的預期。

六、實驗五：圓周運動時火焰的形狀

實驗四的過程中我們想到如果是在水平面上作圓周運動，火焰會偏向哪一邊呢？可不可以用慣性來解釋，所以我們就利用透明塑膠罐和海綿球，先進行模擬，再以蠟燭和紙箱實際進行實驗，看看火焰是不是會偏向加速度的方向。

實驗過程 1. 模擬實驗

我們為了觀察海綿球的移動方向，先在塑膠桶上以木條和壓克力板做出一個平台，可以放置相機，然後將具有相機功能的手機以膠帶固定在平台上，使它剛好可以拍到塑膠罐，將塑膠罐裝滿水然後蓋上有海綿球的蓋子，倒立起來使海綿球浮在塑膠罐底部，如圖 14。

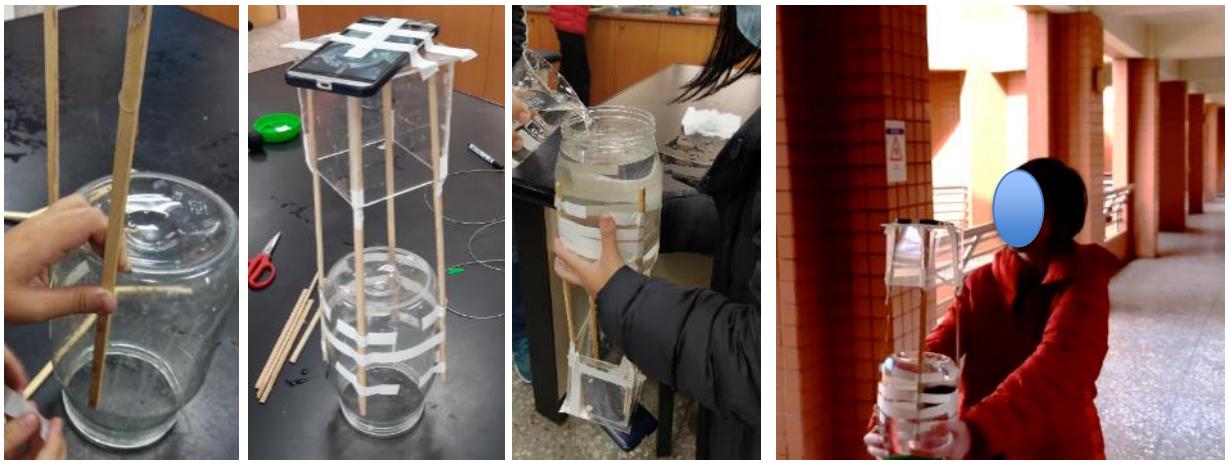


圖 14. 將手機固定在塑膠罐上，人抱著塑膠罐，以測量球體的移動。

結果與討論 1.

圖 15. 未經運動狀態的球的位置　　運動狀態中的球的位置移向圓心

裝水的塑膠罐做圓周運動時會受向心力的作用，所以加速度的方向指向圓心，也就是操作的同學身上，實驗的結果也是如此，如圖 15。

實驗過程 2. 圓周運動時火焰的形狀

為了避免風由紙箱縫隙中吹進去，影響了實驗的結果，我們又找了另一個紙箱，切割成剛好的大小將原本的紙箱裝入，然後在實驗時，蠟燭點火後，以門朝內的方向塞到大紙箱中固定好，然後以門向內的方式抱住，坐在旋轉椅上，由另一位同學快速轉動，使紙箱作圓周運動，如圖 16。

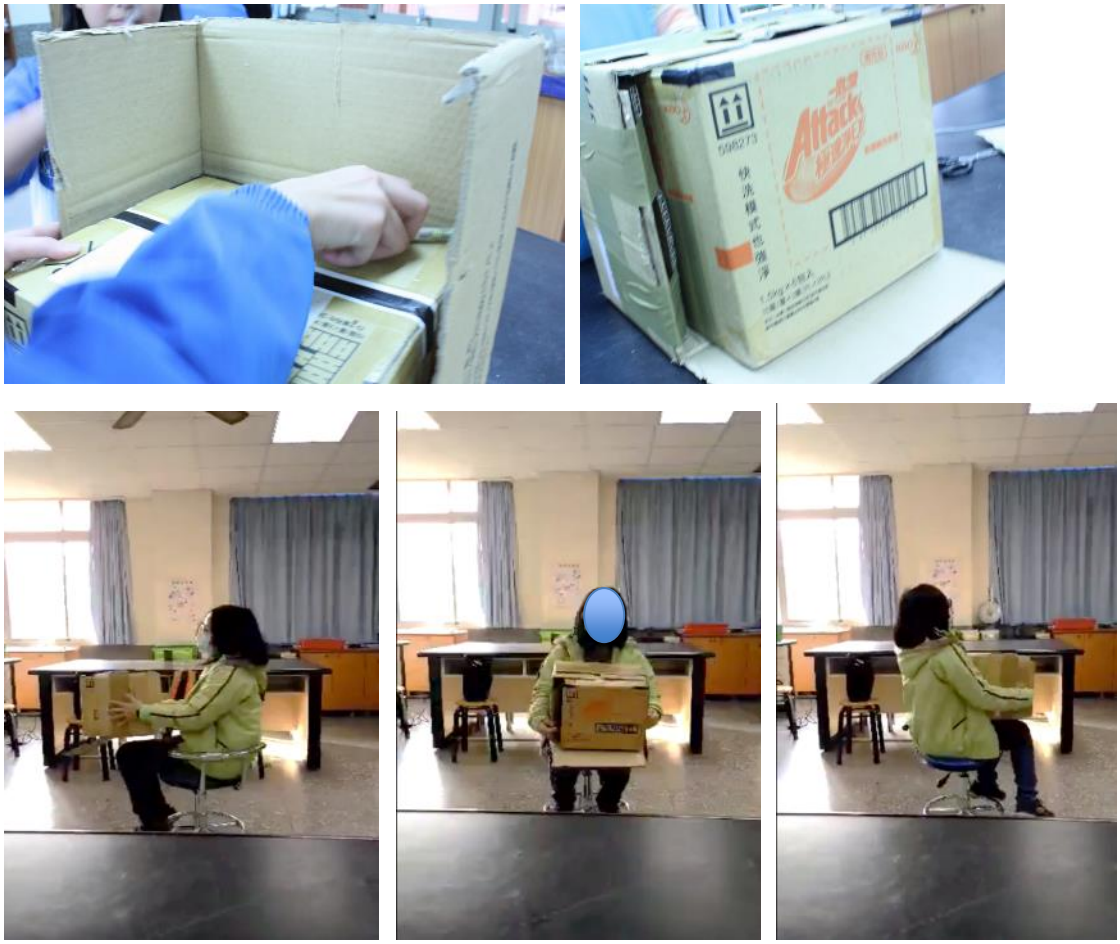


圖 16.製作防風紙箱及以旋轉椅進行實驗

因為不確定火焰偏轉的方向，所以我們在門的對面與側面及上方都黏上相機拍照，以確定火焰偏轉的方向。

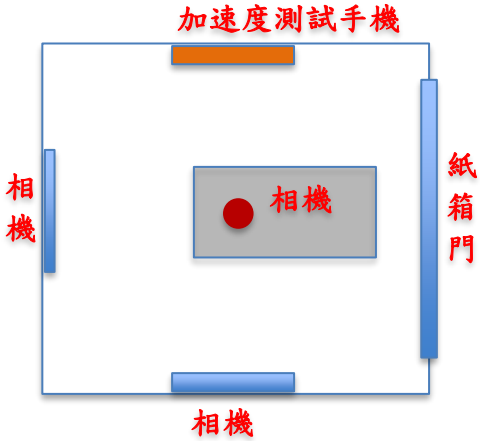
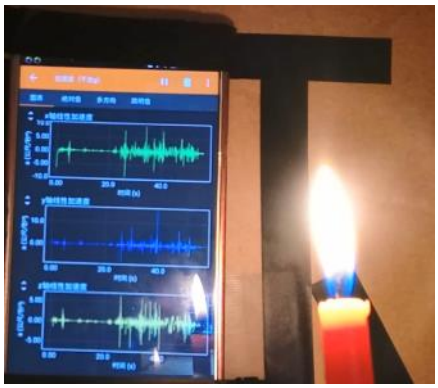


圖 17.紙箱設計及實際裝置圖

實驗結果與討論：



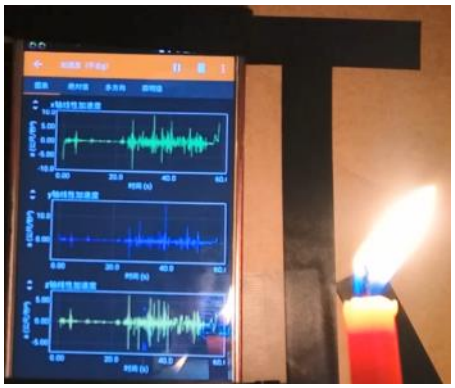


圖 18.尚未運動前的火焰形狀　　旋轉時運動狀態中的火焰形狀(偏向門)

火焰如同我們預期偏向圓心，當紙箱作圓周運動時，紙箱內的火焰會偏向圓心。在以上的實驗中，我們推論是因為慣性，造成第二階段的火焰變短成橢圓形，同樣的道理，在第四階段燭火熄滅前忽然被拉長到 2 到 3 倍，如圖 19，然後才熄滅，也可以用慣性來解釋，在紙箱撞擊帆布的時後，加速度的方向向上，所以密度大的空氣會比密度小的火焰下移，所以火焰就會被拉長，因為撞擊時間很短暫，慣性也可能造成燭芯的蠟油快速向下而使燃燒蠟油變少，所以火焰瞬間熄滅。

圖 19.拉長的火焰

實驗過程 3. 紙箱外火焰作圓周運動時的形狀

我們又猜想如果不是在紙箱內，蠟燭的火焰又會如何偏轉呢?我們以電鑽和木板做了一個旋轉盤，然後將蠟燭固定在轉盤上，點火後再使轉盤慢慢旋轉，由正上方拍攝火焰偏轉的方向，觀察是否也會偏向圓心，如圖 20。

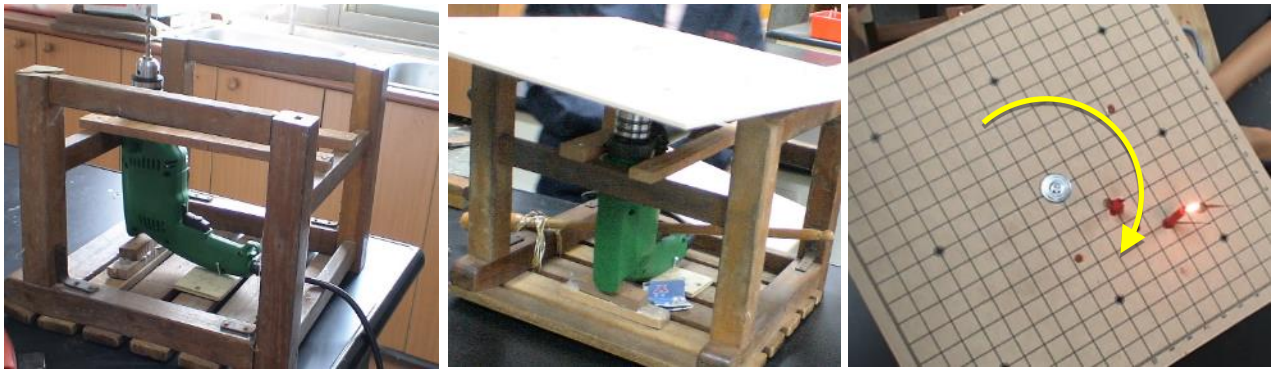


圖 20.製作旋轉台觀察蠟燭的火焰

結果與討論：

火焰偏向切線方向，會留在後方，不會偏向圓心，與密閉紙箱中的火焰偏向圓心不一樣，我們推測應該是空氣的影響，蠟燭轉動時有迎面吹來的風，使火焰留在移動路徑的後方，如圖 21。

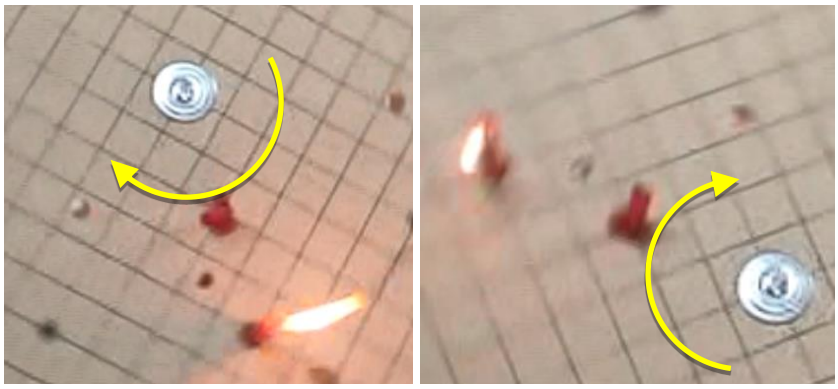


圖 21. 旋轉中的蠟燭火焰

七、實驗六：探討水平蠟燭失重時的火焰形狀

我們想了解這個慣性造成的影響有多大，當火焰變短時，火焰的下方有蠟燭擋住，使火焰無法再往下移動，因此以水平擺放蠟燭的方式來進行實驗，觀察是否火焰會移動到燭芯的下方，跟垂直擺放蠟燭來進行比較。

實驗方式如實驗一，只是將保麗龍底座改成垂直放置，使臘燭變成水平放置，一樣準備好之後拿到 4 樓，並有兩位同學在下方以帆布承接，當 4 樓的同學確定樓下準備好，就開啟加速度測量 app，並啟動相機錄影，然後將蠟燭點燃，關上紙箱門，再讓紙箱由四樓落下，並在落下後取出相機，將影片存檔分析。

圖 22. 水平蠟燭的裝置圖

結果與討論：

我們觀察到，慣性使得火焰向下移動，而一開始的加速度大約為 $10m/s^2$ 向下，代表此時幾乎為自由落體，紙箱內處於失重狀態，此時紙箱內的燭火處因為失重使熱對流無法產生，再加上慣性，所以火焰向下移動，甚至可以超過燭芯，移動到燭芯的下方，但是隨著加速度變小，脫離了失重狀態，又使得熱對流產生，燭火移到燭芯的上方。

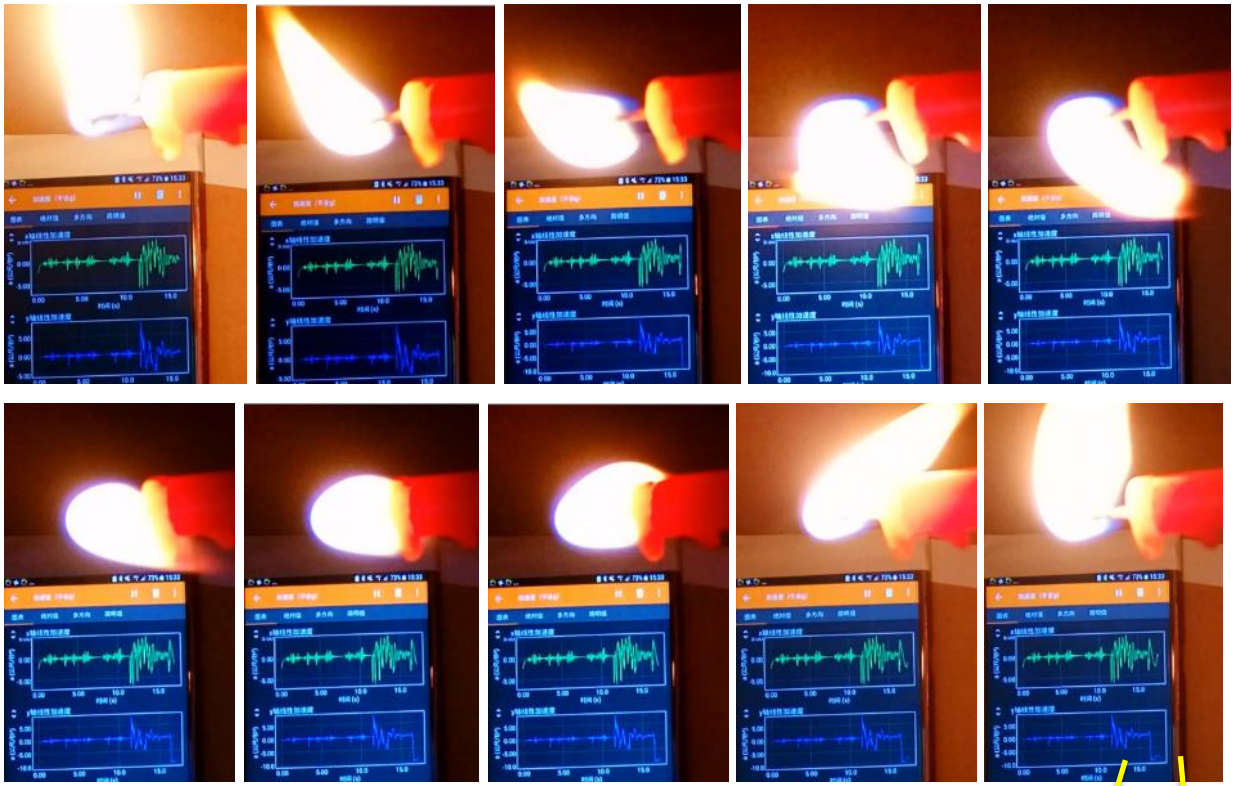


圖 23.水平蠟燭在不同加速度下的火焰形狀

另外我們發現，在火焰縮到最小的時候，火焰的外圈出現了一個藍色的圈圈，如圖 24。在燭火燃燒的過程中，藍色火焰表示氣態的蠟燭蒸氣完全燃燒，而黃色火焰代表燃燒較不完全，有固態碳微粒被加熱發出黃光。

圖 24.火焰外側有一圈藍色火焰

八、 實驗七：以吹氣與氧氣探討藍色環狀火焰的原因

在實驗六中我們觀察到了自由落下的紙箱內，是以大約 $10m/s^2$ 的加速度落下，此時因為慣性，火焰確實變得比較短和較接近圓形，而且也觀察到了火焰的周圍有一圈藍色火焰。我們想要了解形成藍色火焰的原因，因此進行這個實驗。

圖 25.正常燭火

我們觀察到蠟燭在正常狀態下燃燒，火焰的最底部有一點呈現藍色，上面的火焰呈現黃色，如右圖 25。因為燃燒時熱空氣上升的對流現象使的補充進火焰中的氣流是由底部進入火焰，在火焰底部，空氣與可燃的蠟燭蒸氣混合均勻後才燃燒，使得底部呈現藍色。

火焰的上方有燃燒不完全的碳粒，被火焰加熱後發出黃光，所以火焰的上面呈現黃色。我們認為充份的提供氧氣，可以使火焰燃燒完全，所以我們利用雙氧水和及二氧化錳製做氧氣，並以排水集氣法收集。然後將蠟燭剪短，固定在燃燒匙上，放入裝有純氧的廣口瓶中燃燒，希望可以看到藍色的火焰。

結果與討論：

實驗結果如下圖，蠟燭在純氧中劇烈燃燒，但顏色還是黃色，只是亮度增加，我們推測是氧氣來不及與蠟燭蒸氣混合均勻，所以無法產生藍色火焰。

圖 26. 在氧氣瓶中燃燒的蠟燭

所以我們試著以打氣筒對著火焰側向輕輕吹氣，發現氣流吹入火焰的地方果然呈現藍色，如右圖。所以我們猜測要產生藍色火焰，必須可燃性氣體與氧氣有時間均勻的混合並達到適當的比例，如果在太空中的火焰可以呈現藍色，應該也是如此。

圖 27. 吹風下的火焰

伍、結論

1. 由實驗一可知， 裝有燭火的密封紙箱落下時，燭火的形狀會發生以下幾個階段的變化
   (1) 長條水滴狀：空氣的熱對流使燭火呈現長條水滴形
   (2) 短橢圓形：紙箱向下自由落下加速初期，此時加速度大約為重力加速度，火焰因慣性變短成接近圓形的橢圓形
   (3) 長條水滴形：向下自由落下加速後期，此時紙箱因為空氣阻力，使加速度小於重力加速度，火焰因熱對流回復成長條水滴形。
   (4) 超長條火焰：紙箱撞擊地面瞬間，此時加速度方向向上且數值很大，慣性使得火焰被拉成兩三倍長的長條火焰，並瞬間熄滅。
2. 不管是水平加速或圓周運動，在密閉紙箱中的火焰都會向加速度的方向偏移。
3. 代表燃燒完全的藍色火焰需要空氣與可燃蒸氣均勻混合，在紙箱以重力加速度落下時的圓形藍色火焰表示空氣由四面八方向火焰內部擴散，使原本只在底部的藍色火焰擴展到全部的火焰表面，也代表著此時沒有熱對流。

陸、參考文獻

1. 郭重吉等編著(民國 108 年)，自然與生活科技二上 2-3 空氣的性質，南一出版。
2. 郭重吉等編著(民國 108 年)，自然與生活科技三上 1-4 自由落體，南一出版。
3. Physics Girl, FIRE IN FREEFALL - rare physics experiment 影片，2017/9

   網址：https://www.youtube.com/watch?v=VAA_dNq_-8c