



## 創意教學

# 當哈利波特遇上物理——電學篇



鄭永銘老師 ◆ <http://www.balloon.com.tw>

### 一、實驗名稱

名稱	實驗器材	影音連結
1. 星際爭霸戰光劍秀	40 瓦日光燈管、30 瓦環形燈管	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect1.htm">http://www.balloon.com.tw/elect1.htm</a>
2. 光劍的製作方法	40 瓦日光燈管、電蚊拍、漆包線、電池盒、1.5 V 乾電池 × 2	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect2.htm">http://www.balloon.com.tw/elect2.htm</a>
3. 魔法櫻花樹	特斯拉線圈、日光燈管	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect3.htm">http://www.balloon.com.tw/elect3.htm</a>
4. 特斯拉線圈的玩法	日光燈管、省電燈泡、臭氧機	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect4.htm">http://www.balloon.com.tw/elect4.htm</a>
5. 實驗室的特斯拉線圈	特斯拉線圈、日光燈管	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect5.htm">http://www.balloon.com.tw/elect5.htm</a>
6. 電子風車	特斯拉線圈、電子風車	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect6.htm">http://www.balloon.com.tw/elect6.htm</a>
7. 靜電章魚	PVC 塑膠水管、塑膠繩	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect7.htm">http://www.balloon.com.tw/elect7.htm</a>
8. 水是具有極性的分子	PVC 塑膠水管、水流	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect8.htm">http://www.balloon.com.tw/elect8.htm</a>
9. 旋轉的紙杯	紙杯、粗吸管、面紙	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect9.htm">http://www.balloon.com.tw/elect9.htm</a>
10. 徒手吸紙屑	紙屑	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect10.htm">http://www.balloon.com.tw/elect10.htm</a>
11. 一起牽手來驗證電阻定律	調光器、鎢絲燈泡、水壺、水桶	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect11.htm">http://www.balloon.com.tw/elect11.htm</a>
12. 電動機 I	鈦鐵硼磁鐵、1.5V 乾電池、鐵釘、導線	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect12.htm">http://www.balloon.com.tw/elect12.htm</a>
13. 電動機 II	鈦鐵硼磁鐵、1.5V 乾電池、鋁罐	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect13.htm">http://www.balloon.com.tw/elect13.htm</a>
14. 棒棒糖耳機	棒棒糖、收音機、3V 直流小馬達、導線	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect14.htm">http://www.balloon.com.tw/elect14.htm</a>
15. 披薩盒上的精靈	電磁爐、環形鋁箔	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect15.htm">http://www.balloon.com.tw/elect15.htm</a>
16. 法拉第感應定律	電磁爐、漆包線、燈泡	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect16.htm">http://www.balloon.com.tw/elect16.htm</a>
17. 感應電動勢 V.S. 屏蔽效應	電磁爐、漆包線、蜂鳴器、收音機、鋁箔紙	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect17.htm">http://www.balloon.com.tw/elect17.htm</a>

名稱	實驗器材	影音連結
18. 千人震	3 號乾電池、1A 的 3V 對 110V 變壓器、開關、導線	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect18.htm">http://www.balloon.com.tw/elect18.htm</a>
19. 微波爐中的日光燈	微波爐、環形燈管、水	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect19.htm">http://www.balloon.com.tw/elect19.htm</a>
20. 微波爐中的燈泡	微波爐、鎢絲燈泡、水	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect20.htm">http://www.balloon.com.tw/elect20.htm</a>
21. 微波爐中的葡萄	微波爐、葡萄	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect21.htm">http://www.balloon.com.tw/elect21.htm</a>
22. 人體接電亮燈	燈泡、導線	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect22.htm">http://www.balloon.com.tw/elect22.htm</a>
23. 人體接電烤蝦	蝦子、鐵串、導線	<a href="http://www.balloon.com.tw/elect23.htm">http://www.balloon.com.tw/elect23.htm</a>

## 二、實驗步驟與原理

### 1. 星際爭霸戰光劍秀

請參考連結之影音。

### 2. 光劍的製作方法

- (1) 將市售電蚊拍握柄內的電路板拆下，以泡棉膠黏在 40 瓦日光燈管的底部附近。
- (2) 將四號的電池盒兩個正負串聯，並串接一個開關之後，接上電蚊拍電路板的電壓輸入端。
- (3) 電路板的兩個高壓輸出端連出兩條漆包線，分別接在燈管上下兩端的任何一個電極上。
- (4) 漆包線經過燈管的部分以透明膠帶貼住，目的除了固定漆包線之外，尚可避免遭受電擊。
- (5) 日光燈管在一般的使用情況下，其鎢絲會先被燒紅以釋出大量的熱電子。但這個實驗由於電子純粹是因為外加的電場而從鎢絲表面被游離出來，所以電流就會比熱電子發射（thermionic emission）的方式來得小，因而造成燈管的亮度下降。不過它在晚上使用時還是頗亮的，因此就可以拿來當作可移動式的光源，不僅停電時很好用，晚上拿著它走在馬路上還是挺嚇人的！

### 3. 魔法櫻花樹

如果覺得燈管上的電路元件與漆包線太礙眼，而想單純拿著燈管就能發光的話，那麼就必須藉助一個特斯拉線圈。只要把它綁在樹幹上就可以徒手來表演，這樣就如同絕地武士一般，手一摸燈管就會亮了。

### 4. 特斯拉線圈的玩法

特斯拉線圈除了綁在樹幹上，當然也可以藏在別處。譬如有小朋友來我們家玩的時候，我就會一個人發一根燈管，然後讓他們尋寶來找出會讓燈管發光的地方。接著就可以聽見小朋友們快樂的笑聲以及他們父母的對話。♂：「這樣室內就可以不必裝電燈了！」♀：「鄭老師家裡磁場很強喔，到處都會發光！」（無言……）。在進行這個遊戲時可以發揮創意，特斯拉線圈只要藏得好，任何地方都可以是絕地武士的表演舞臺，只不過千萬不可以放在身上以免造成危險。



## 5. 實驗室的特斯拉線圈

- (1) 由於實驗室的特斯拉線圈功率較高，因此可以讓幾個同學每人拿一根燈管串聯起來，這樣就可以同時點亮所有的燈管。但此實驗需做好接地的安全措施，學生也都要戴手套並且站立於木製椅子上，這樣才能避免遭受電擊。
- (2) 雖然利用網路可以搜尋到特斯拉線圈的製作方法，不過非專業人士其實很難入門。比較簡單的方法就是拆下臭氧產生機，因為其內部就是一個小型的固態特斯拉線圈。
- (3) 使用特斯拉線圈有其潛在的危險，因此實驗需在教師考量安全電流值之專業設計下才能進行，學生禁止自行私下嘗試，以免因電流量過大造成觸電的危險。

## 6. 電子風車

利用特斯拉線圈與電子風車，來印證陰極射線的存在及其電性。

## 7. 靜電章魚

- (1) PVC 水管經摩擦後帶負電，這是因為其成分為聚氯乙烯。由於氯原子的陰電性或電負度很大（僅次於氟、氧），表示其對電子的吸引能力很強，因此拿 PVC 來做靜電的實驗是很理想的選擇。
- (2) 本實驗是否容易成功取決於溼度的大小，若是在課堂上表演，由於學生人數眾多因此呼吸及體表所蒸散的水氣將會提高空氣中的溼度，如此將造成同樣帶負電的塑膠繩不容易被 PVC 水管所斥開，建議此時不妨開冷氣來降低溼度，以利此實驗的進行。

## 8. 水是具有極性的分子

- (1) 由於氫原子的電負度是 2.2，小於電負度為 3.4 的氧原子，所以電子分布情形是不均勻的。因此氫和氧結合時，電子就會比較靠近氧，使得氧稍微帶負電，氫稍微帶正電。而且彎曲形的水分子其鍵角為  $104.5^\circ$ ，方向性並沒被抵消因此就具有極性。
- (2) 摩擦後的 PVC 水管靠近細水流附近時，由於水分子會旋轉使其偶極矩順著外加電場的方向，因此就會形成水流被帶電體吸引的現象。若是在課堂上演示本實驗時，可以改採紙杯裝水來代替，並以原子筆在紙杯底部戳洞來製造出極細的水柱，這樣甚至會比以水龍頭來演示的效果好。

## 9. 旋轉的紙杯

## 10. 徒手吸紙屑

高中物理以金屬球為例，說明了金屬球在帶電體附近的靜電感應，乃是由於金屬中的自由電子移動所造成。那麼以帶靜電的塑膠尺來吸引紙屑時，其原理是否相同呢？答案顯然是否定的，因為乾燥的紙屑中幾乎沒有自由電子（其電導係數約為銅的萬分之一）。那麼是不是因為紙屑中具有水分，因此藉由水分子的旋轉來達成靜電感應的效果呢？筆者曾試著將紙屑以烤箱烤乾後，發現紙屑被靜電吸引的效果並無太大的差異。其實原因就是電場作用下的極化（polarization）效應所造成，因為雖然摩擦起電時所形成的靜電量很小，不過電壓卻是很高的（可達 2000 伏特以上）。因此在帶電體附近的強電場就足以將紙屑中的分子極化（共價鍵  $\delta$  變成具有部分的離子性  $\delta^+ \delta^-$ ），這就是帶靜電的塑膠尺能吸引紙屑的原因。

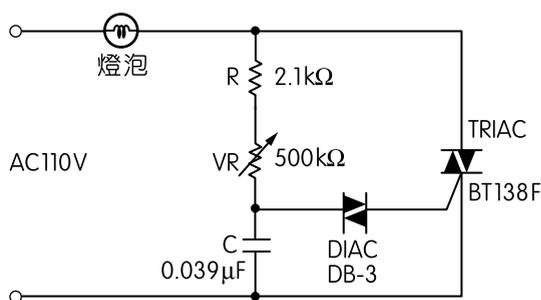


## 11. 一起牽手來驗證電阻定律

- (1) 高中物理是利用惠斯同電橋測量待測電阻值，進而驗證電阻線長度 ( $L$ )、截面積 ( $A$ ) 與電阻值 ( $R$ ) 之關係。通常在進行這個實驗之前，我會先跟學生們做個定性的趣味實驗。讓班上同學手拉手，然後串聯一顆調光器及裝水的水壺，接著讓水注入水桶內形成通路。請學生觀察水量大小（截面積  $A$ ）、水壺距水面高度（長度  $A$ ）改變時，燈泡亮度隨之變化的有趣現象。此實驗雖然通過人體的電流小於 1 毫安培，但還是可以聽到學生們尖叫連連！
- (2) 在電子材料行或水電行均可買到調光器，拆開外殼後的模樣如左下圖：

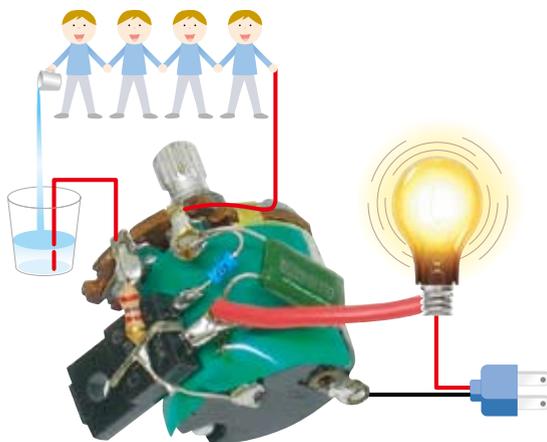


調光器零件



調光器線路圖

- (3) 如下圖，將可變電阻  $VR$  的兩端各拉出一條導線，其中一條露銅後放入裝水的水桶內，另一條則是讓串聯的同學們握著，自己則以左手握著另一端的同學，然後自己以右手握在水壺的金屬把手處。



- (4) 此時將  $VR$  的開關打開並將水注入水桶中來形成通路，當增加注入的水量時，水的截面積變大，電阻會變小導致燈泡變亮。若是升高水壺距水面高度時，水的長度變長，電阻變大燈泡就會變暗。學生一旦親身體驗後就很容易了解電阻  $R$  正比於  $\frac{\ell}{A}$ ，並且理解  $R = \rho \frac{\ell}{A}$  公式的由來了。



- (5) 若以 2B 鉛筆在紙面上畫出含石墨粉的線條痕跡，利用這些線條的並聯與串聯，就可以拿來印證電阻的並、串聯公式。
- (6) 此實驗裝置還可以有其他的玩法，譬如當成下雨偵測器來使用。只要將燈泡換成蜂鳴器，而且把 VR 兩端拉出的兩條導線分別夾住一張紙的兩端並將其放在戶外。那麼當紙張因下雨而淋溼時，蜂鳴器就會響了。
- (7) 調光器電路主要的控制元件是 TRIAC，利用 R-C 電路在 DIAC 端產生一觸發電壓使 TRIAC 導通。由於 RC 造成的時間延遲，當 VR 越大時，電容 C 的充電電流變小，使得電容 C 的電位達到足以觸發 TRIAC 的時間越長。因此在 TRIAC 的 Gate 極之觸發角度變大，造成相位延遲愈久，燈泡就愈暗，使用時只要將欲控制的燈泡與調光器串聯即可。

## 12. 電動機 I

- (1) 首先展示一個圓形強力磁鐵，並問學生如何得知 N 極是哪一面？（參考答案：直接將其以圓周邊緣站立在桌面上，磁鐵即可自行旋轉成 N 極指向地磁的方向）
- (2) 參考本實驗的影片將材料結合，由於鈹鐵硼磁鐵可以導電（黑色的氧化鐵磁鐵則不行），一旦電路形成通路時，流過磁鐵內部的電流將會受到磁力。由於此時電流、磁場、受力方向彼此正交，因此這個趣味實驗就可以拿來驗證右手開掌定則。在學生傳遞此教具並觀察之後，相信這時再來上電動機的理論部分，學生就比較能理解其原理了。

## 13. 電動機 II

這又是一款無電樞的簡易電動機，讓學生傳遞並觀察之後，若有人能合理解釋其轉動的原理，那就是非常厲害的學生了。

## 14. 棒棒糖耳機

- (1) 在課堂上講完電動機繁瑣的計算題之後，我喜歡慰勞學生吃棒棒糖，並拿出一臺收音機請他們上臺來。當學生瞠目結舌地發現「耳」機竟然是塞在「嘴」裡而且還可以吃時，相信他們就會喜歡上物理了。
- (2) 將音源線的一端接在 3V 直流小馬達上，另一端接在喇叭輸出端（speaker out 而非耳機輸出），由於訊號是交流形式，因此直流馬達就會隨之往復地轉動。靠著套在馬達轉軸上的棒棒糖，即可將此振動經由骨傳導的方式，傳到三小聽骨之蹬骨上，因此即可抵達聽覺細胞來感受到聲音。

## 15. 披薩盒上的精靈

- (1) 可以利用這個實驗來解釋渦電流與冷次定律。
- (2) 電磁爐內有一保險裝置，目的是當偵測到鐵製容器時才啟動開關。如果希望鋁箔不要連續跳動而能持續漂浮著，就必須先把此 sensor 的功能 OFF 掉。

## 16. 法拉第感應定律

法拉第電磁感應定律是電磁學的一個重要內容，它說明了感應電動勢  $\varepsilon_N$  與閉合線圈內磁通量的變化率  $\Delta\Phi / \Delta t$ 、線圈匝數  $n$  所成的正比關係： $\varepsilon_N = n \times \Delta\Phi / \Delta t$ 。線圈的匝數越多，產生的感應電動勢也就越大。透過這個趣味實驗，相信學生會對電磁感應定律留下深刻的印象。

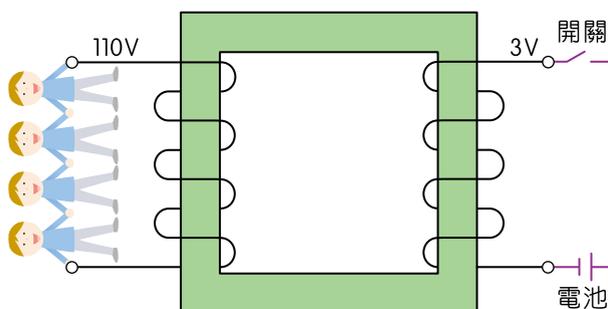


### 17. 感應電動勢 V.S. 屏蔽效應

在日常生活中有很多電磁感應的應用，譬如電動牙刷、PHS 手機等的無接點充電。本實驗介紹了幾款利用無接點提供電能的實例，另外也演示了電磁波屏蔽效應的實驗。實驗中還特別舉出電磁爐上產生的電磁波卻無法被金屬所屏蔽，請思考其原理為何？

### 18. 千人震

- (1) 當電學上到變壓器時即已接近尾聲，這時我就會以這個實驗做 ending 來慶祝，讓學生實際體驗僅使用一顆 3 號乾電池就能讓全班有「來電的感覺」！
- (2) 讓全班同學手拉手串聯後接在 110 V 輸出端，將 3 號乾電池串接一開關後連接於變壓器之 3 V 輸入端，當開關接合或跳開時就會在匝數較多的 110 V 輸出端獲得感應之高電壓。
- (3) 線路圖如下：



### 19. 微波爐中的日光燈

- (1) 將環形的日光燈放入微波爐內，旁邊並同時放入一杯水。將微波爐功率調至最弱，加熱時間小於 30 秒，然後觀察日光燈管發光的奇特現象。
- (2) 日光燈在微波爐中發光的原理眾說紛紜，網路上至少有以下五種版本：

**A. 燈管內的汞蒸氣受到電磁波激發產生紫外光，再碰撞管壁的螢光物質而發出可見光**

由於微波爐的微波波長為 122 mm，其對應的光子能量僅有  $10^{-5}$  eV，由於此能量遠低於汞原子的第一激發能 4.88 eV，因此說法 A 明顯錯誤。

**B. 燈管表面的螢光劑直接受到微波激發產生可見光**

當螢光劑以紫外線或 X 射線照射時，其會吸收光能進入激發態，並且立即退激發並發出比入射光波長長的出射光（通常波長在可見光波段）。可見說法 B 也是錯的，因為可見光的光子能量 1.8 eV ~ 3.1 eV 遠大於  $10^{-5}$  eV。

**C. 微波爐內的電場直接將日光燈絲極中的電子游離出來（並非微波加熱燈絲），原理和電漿球類似**

電漿球能點亮日光燈，就如同特斯拉線圈附近的日光燈會被點亮是一樣的原理。此時的鎢絲並未被加熱，純粹是因為外加的強電場引起鎢絲表面的電子被游離出來（稱為場效發射）。為了證實 C 說法是否正確，我曾將一根鎢絲已燒斷的日光燈管放入微波爐中，而這根燈管微波時仍然會發光，所以這樣的解釋看起來好像正確。不過，有一篇論文則指出，微波爐內的干涉效應會導致爐腔內出現熱點，其電場強度最高可達 600 伏特 / 公尺 (<http://www.cnipc.org/fu/jiangtan-008.pdf>)。



雖然這樣的電場強度很高，燈管內只要有游離電子，該電子加速 8.1mm 即可達到 4.88 eV 來激發汞原子。但 600 V / m 這樣的電場強度卻不足以將電子從鎢絲表面直接游離出來，因為筆者的固態特斯拉線圈所輸出的高壓超過一萬伏特，而燈管必須在 20 公分以內才能被點亮。由此可以算出游離出電子的電場強度至少需 5 萬伏特 / 公尺，所以說法 C 就不正確。更何況在光電效應中，由於鎢的功函數為 4.55 eV，電子在 600 伏特 / 公尺的電場下須被加速 7.6 mm 才擁有 4.55 eV，也才能從鎢絲表面被游離出來，但這必須是電子在加速過程中沒有因碰撞而損失能量的情況下才是對的。顯然這是不可能的，因為電子在高電阻的鎢絲中漂移時，由電場加速所獲得的動能絕大部分轉換成金屬的熱能了。

#### D. 微波直接加速日光燈管內部的汞蒸氣，或是加速汞蒸氣內的自由電子

以摩擦後之 PVC 塑膠管接觸日光燈時，可以在接觸點附近看見螢光劑所發出的亮光。由這個實驗可以證實日光燈內部確實存在著水銀蒸氣，以致於在塑膠管靠近燈管時，靜電所形成的強電場能將電子由水銀蒸氣中游離出來。此自由電子再被電場加速後撞擊其他的汞原子，然後發出 254 nm 的 UV，此紫外光再被螢光劑吸收並放出藍光 452 nm、綠光 543 nm、紅光 611 nm。既然如此，那麼在微波的環境下，日光燈管內部的汞蒸氣是否也能提供游離電子呢？由於汞的功函數為 4.5eV，在 600 伏特 / 公尺的電場下須被加速 7.5 mm 才有 4.5 eV，但由於汞蒸氣的直徑遠小於 7.5 mm，所以可以確定電子無法由汞蒸氣表面被游離出來。至於此電場能否加速汞蒸氣來產生游離電子呢？答案當然也是否定的，因為電中性的汞蒸氣無法被電場加速，所以說法 D 就不正確。

#### E. 微波會加熱日光燈的鎢絲，產生游離的熱電子

遇到眾說紛紜時，解決爭議的最好方法就是實驗並讓數據來說話，這也是物理學美麗的地方。由本實驗的影片中可以發現，日光燈在微波爐啟動後約 1.2 秒時，先從絲極處開始發光。BINGO！說法 E 正確。

### 20. 微波爐中的燈泡

- (1) 將透明的鎢絲燈泡放入裝水的玻璃杯中，微波時間小於 30 秒，觀察燈泡內頂端產生電漿態的過程。
- (2) 由影片可明顯看出燈泡內的鎢絲先被燒紅，接著由鎢絲處向上噴出一道弧光，隨後產生一團亮光蓄積在燈泡的頂端。
- (3) 微波燈泡能發光的原理如下：

A. 鎢絲內的自由電子被微波的電場震盪時所獲得的動能，會因鎢絲的高電阻特性而大部分轉換成金屬的熱能（微波鋁箔紙時則是因為鋁箔的電阻較小，自由電子能擁有較大的動能，因此容易脫離鋁箔的邊緣而形成尖端放電現象）。當金屬溫度上升到 1000°C 以上時，動能超過功函數的電子數目急劇增多，大量電子將由金屬表面逸出，這就是熱電子發射（thermionic emission）。此時若無外加電場，則逸出的熱電子會在金屬表面附近堆積，成為空間電荷進而阻止熱電子的繼續發射。但在此實驗中，由於逸出的熱電子會受到微波電場的來回震盪，因此熱電子流即可回轟金屬表面，進而產生二次電子發射。此



過程反覆進行，鎢絲的溫度就愈來愈高，發射的熱電子數也越來越多。如此循環下去，鎢絲溫度終會達到熔點（ $3400^{\circ}\text{C}$ ）而燒斷。因此，本實驗請使用低功率的燈泡，因為低功率的鎢絲較細而容易燒斷。但若使用 100 瓦以上的燈泡，則在鎢絲燒斷之前，燈泡內的氬氣早已經因為高溫造成高壓而將燈泡爆開。

- B. 電漿態是物質的第四態，它是氣體離子，由於氣體失去電子形成自由電子和正離子時，兩者的電量相等，因此又叫做等離子體。由於低溫氣體的負電子和正離子會再度結合，因此必須是高溫的氣體被電離時才可能形成等離子態。本實驗的鎢絲被加熱至高溫時，同時將周圍的氬氣加熱，這些熱氣體隨後被震盪的熱電子高速碰撞而造成電離現象。由於這些電子和正離子在電場中的運動方向相反，所以碰撞會更加激烈，終究形成電漿態。
- C. 影片中可觀察到先有一道由鎢絲向上伸展的弧光，這是等離子體形成時的證據，代表此時部分的負電子和正離子復合而發光，就如同電路短路時會造成電弧光芒一樣。然後這些電離氣體因為高溫，所以密度低於未電離的氬氣而聚積於燈泡頂端。接著往下打出另一道紫色弧光，燈泡到這時候才會整個充滿了電漿。

## 21. 微波爐中的葡萄

- (1) 將葡萄對半剖開留一點果皮連接而不切斷，觀察其在微波爐內發光的奇特現象。
- (2) 由於葡萄汁含有電解質，因此能被微波的電場加速。更因為兩半的葡萄所連接的通道狹小，所以電阻較高而能形成較大的熱功率  $I^2R$ ，一旦連接處的水分被蒸乾後就會因高溫而著火。
- (3) 如果葡萄是以玻璃杯蓋住，此密閉空間就比較能蓄積熱量而形成高溫的氣體。由於此時形成的火焰中含有少數的氣態離子，因此就在微波電場的推波助瀾之下，將高溫氣體大量電離而形成電漿態。
- (4) 可參考成功大學物理系「紅色精靈研究團隊」所研究的高空氣體放電現象：

[http://sprite.phys.ncku.edu.tw/new/news/0626\\_press/nature\\_paper.html](http://sprite.phys.ncku.edu.tw/new/news/0626_press/nature_paper.html)

[http://hp735.as.ntu.edu.tw/ATMOSPHERE/6\\_6.doc](http://hp735.as.ntu.edu.tw/ATMOSPHERE/6_6.doc)

## 22. 人體接電亮燈

## 23. 人體接電烤蝦

- (1) 家用交流電的頻率為 60 赫，此種狀況下能引起人體感覺觸電的最低電流約為 0.9 毫安培（女：0.7 mA、男：1.1 mA），而觸電後無法憑藉自力脫離電路的電流約為 13 毫安培（女：10 mA、男：16 mA）。在進行人體接電的特技表演時，只要表演者的皮膚夠乾燥而且也夠粗糙，此時雙手兩端的電阻可以高達  $100\text{ K}\Omega$ 。因此當雙手接上 110 伏特電壓時，通過人體的電流約為 1.1 毫安培，會有觸電的感覺，不過經由訓練則是有可能耐得住電擊的。但是如果表演時空氣溼度過大或是表演者流汗等因素，這時雙手兩端的電阻就可能降低至  $5\text{ K}\Omega$  左右。110 伏特的電壓將會造成 22 毫安培的電流，也就是表演者就會無法憑自力逃脫而可能喪命。因此請勿模仿此實驗，因為嘗試進行這個危險實驗時，將會對生命安全造成極大的威脅。



(2) 至於光劍表演所使用的小型固態特斯拉線圈，由於其頻率約為 10000 赫，在此高頻之下引起人體感覺觸電的最低電流則提高至 16 毫安培，而且觸電後無法憑藉自力脫離電路的電流亦升高為 75 毫安培左右。這種因為頻率不同所造成的差異性，主要是來自集膚效應（skin effect），造成導體表面的電流密度變大而導體內的電流密度呈指數遞減，而且越高頻則集膚效應越明顯。由於人體的外層皮膚（角質層、透明層、顆粒層）是沒有神經分布的，因此高頻之下不僅引起人體感覺觸電的最低電流會提高，並且幾乎只流經表皮的電流對於人體臟器（主要是危害心臟）的傷害就會大大的降低了。所以在高頻之下來進行電學實驗，相對而言是比較安全的。

### 三、給學生的課外作業

請試著利用電蚊拍做出一把絕地武士的光劍，然後與同學們相約在元宵節。當別人提燈籠時，我們提燈管！



圖片來源：中央大學物理學系物理演示實驗室  
<http://demo.phy.tw/events/2007-06-10/thumbnail-1024.jpeg>



最大的喜悅是學生都喜歡上物理

最大的希望是學生都勤奮學物理

～鄭永銘