

2022 年【全國科學探究競賽-這樣教我就懂】

高中（職）組 成果報告表單

題目名稱：微波加熱葡萄之發光現象探討

一、摘要：

YouTube 有不少影片中介紹將一個葡萄切成兩半，留下一條薄皮連接兩個半球；或是在表面凹陷的錶玻璃上放置 2 個貼靠在一起的葡萄，在微波爐強烈的微波輻射下會產生電漿火花，如圖 1a、圖 1b 所示。

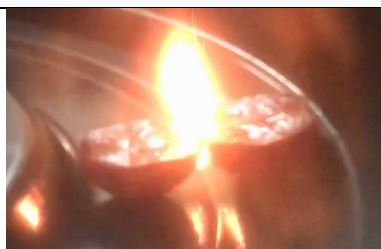


圖 1a 半球葡萄的電漿發光現象



圖 1b 錶玻璃上 2 顆葡萄的電漿發光現象

網路上有人認為圖 1a 這 2 半球葡萄類似短偶極天線，因葡萄皮具有水分及富含離子，類似鹽橋具有導電的功能。另有學者專門討論電漿葡萄的現象[1]，藉由眾多實驗說明圖 1b 的效應是由於 2 半球葡萄因內含水的介電物質，在微波頻率下呈現出與形態相關的共振結果。在共振時之電磁熱點會導致電漿態的發光，類似奈米金屬顆粒的表面電漿效應。

根據本作品探究結果，

- (一)、葡萄電漿產生之發光現象應是葡萄本體之微波共振下高電場、高熱及接觸點上類似電流短路之熱效應所導致。
- (二)、加熱下 2 顆接觸的葡萄所發射之光譜主要應是葡萄中鈉鉀離子與空氣中 O_2 游離後的 O_2^+ 所形成之發射光譜。

二、探究題目與動機

有段時間影音平台盛傳把對半切的葡萄放進微波爐中加熱下會產生火花，在大部分的影片中，葡萄的果肉被切開，但果皮仍然相連。很多人推測電漿產生的是因為果皮富含離子，具有良好導電效果，使得相連的兩半球葡萄會像天線一樣吸收微波輻射所導致。

但後來有科學家[1]深入研究這個電漿葡萄的發光現象，發現葡萄本體才是關鍵，葡萄皮的導電性並非關鍵。此實驗主要是因為微波爐的微波頻率是 2.45GHz，在空氣中的波長約為 12 公分，但在葡萄中微波的折射率約為 10，所以波長約為空氣中的十分之一，可在直徑約 2.4 公分的球狀葡萄內形成駐波(如圖 2a)，所以此時微波可在葡萄中產生電磁共振並累積能量，讓葡萄在特定位置溫度大幅提高，因而導致電漿態的發光。期刊中學者[1]指出 2 顆接觸的電漿葡萄所產生的可見光光譜主要是由葡萄中的氣態鈉離子所發射約為 589nm 之黃光光譜與氣態鉀離子所發射約為 770nm 之紅光光譜 (如圖 2b，取自 youtube 影片[2])。

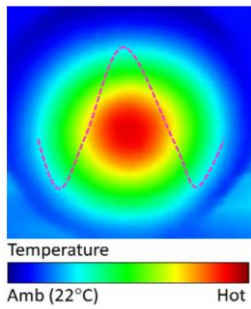
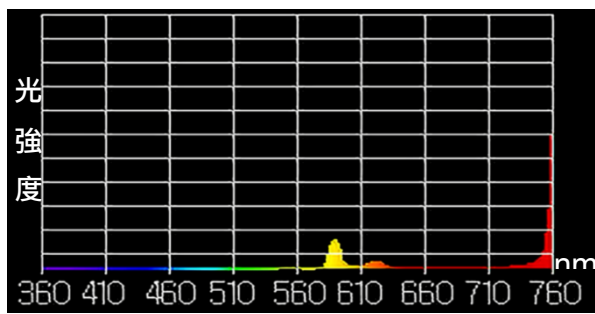


圖 2 a 葡萄球內微波駐波與溫度分布示意圖



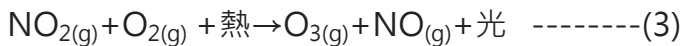
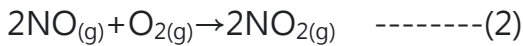
b.葡萄電漿之發光光譜



c.火柴微波加熱之發光情形

(圖 2 a 取自[1]之圖後製處理； b、c 均取自 youtube 影片截圖[2])

但 YouTube 影片作者[2]使用鋁箔、火柴等不含鈉的物體置於微波爐中加熱，仍可以產生黃光(如圖 2c，取自 youtube 影片[2])。該作者質疑電漿葡萄發射的黃光主要是空氣在高熱下產生下列的反應所導致：



那到底何者的說明較正確呢？所以引起我們的探究動機。

三、探究目的與假設

目的：

- (一)了解葡萄在微波爐中加熱後的發光機制。
- (二)確認電漿葡萄在發光時的黃光來源是何種因素造成。

假設：

- (一)電漿葡萄的發射的黃光主要是因為葡萄中鈉的電漿態所導致。
- (二)葡萄加熱後若形成的黃光因是鈉離子電漿態導致，則實驗中的空氣多寡應不會影響黃光發生的機率。

四、探究方法與驗證步驟

實驗中量測使用的葡萄直徑約在 22mm-28mm，實驗前先用電鑽將微波爐後側之金屬板鑽孔，貼上透明壓克力片作為拍攝的觀景窗(如圖 3a)，以 iphone 7 手機拍攝紀錄葡萄在微波爐中固定加熱 30 秒的過程。每種探究過程都同樣重複 5 次，將相關結果紀錄加以比較分析。

前置作業：因微波爐是藉由微波的駐波加熱，在駐波中的腹點位置功率最高，故先將長條茄子置於微波爐中，找出在微波爐近底部凹陷處為功率高的熱點位置處(如圖 3b)。之後的實驗都固定在此位置進行。

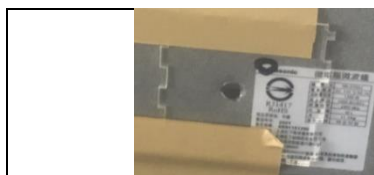


圖 3a 微波爐後方自製觀景窗



圖 3b 微波爐之熱點位置(黑漬處)

我們探究步驟如下：

- (一)、將葡萄切成兩半，留下薄皮連接

1、不同微波功率之實驗結果

我們使用的微波爐共有 4 種不同的輸出功率，其對應之實驗結果如表 1。

表 1 不同功率下 2 連皮半球葡萄之發光現象結果

微波功率 (瓦特)	發光現象(有：O；無：X)				
	1	2	3	4	5
1000w	O	O	O	O	O
800w	O	X	X	O	X
600w	X	X	X	X	X
440w	X	X	X	X	X

當微波爐加熱功率不夠大時，葡萄只有加熱產生液體沸騰冒泡泡的現象，不會產生發光現象。由表 1 可看出只有在功率 1000 瓦時葡萄才極易有發光現象形成，所以之後微波爐都是以 1000 瓦的功率加以實驗。

當對半切開的連皮葡萄產生發光(主要是黃光)現象時，會伴隨滋滋的聲響，推測應當有電漿態形成。實驗中發現當連接的葡萄皮燒斷後，若 2 半球葡萄分離，發光現象就立刻消失(如圖 4a)，兩個半球葡萄若還有接觸(如圖 4b)，則陸續還會有發光現象；代表對半切開的葡萄加熱形成的發光現象與葡萄皮的接觸密切相關。



圖 4a 連接之葡萄皮燒斷後，若兩半球葡萄分離，發光便立刻停止

圖 4b 葡萄皮燒斷後，兩半葡萄若再接觸可再度發光

研究人員發現葡萄皮並非加熱葡萄發光的重要關鍵[1]，他們把兩個和葡萄大小相仿，表面富有透析孔且內含鹽水之塑膠球放在一起，一樣能產生電漿。另同時對微波加熱下由遠而近的 2 半球葡萄的溫度分布及電場分布分別做了量測與模擬計算(圖 5b [1])，以下列解釋說明葡萄皮並不是葡萄產生電漿的主要關鍵。

在圖 5 A 中，兩半球葡萄球心距離約為 4cm，此時可視為獨立的。圖 5B 顯示微波加熱下葡萄溫度的分布情形，由於葡萄內的水分會吸收微波放出熱量，因此溫度分布圖相當於電場強度分布圖。從圖 5B 中可以看出，半球葡萄此時像微波的共振腔，高強度的電場集中在球心。此實驗結果和理論預測吻合(圖 5C)，再次說明果皮並非重點，葡萄本體和微波產生的共振現象才是關鍵[3]。當兩半葡萄稍微靠近，兩者球心相距約為 2cm(圖 5D)，此時左側葡萄電場強度減弱，溫度下降(如圖 5E、F)。當兩半葡萄接觸時(如圖 5G)，圖 5H、I 中顯示此時電場強度集中在接觸點上。研究人員認為這個現象可以用化學鍵的方式來理解[3]：當兩個原子距離非常遠的時候，電子分別集中在個別原子。當兩個原子足夠近時，它們之間產生鍵結形成雙原子分子，而電子集中在化學鍵上。在葡萄的系統中，電場越強溫度越高越能把氣體和液體游離變成電漿，這就是為什麼影片中的電漿總是從兩半葡萄的接觸點上產生。

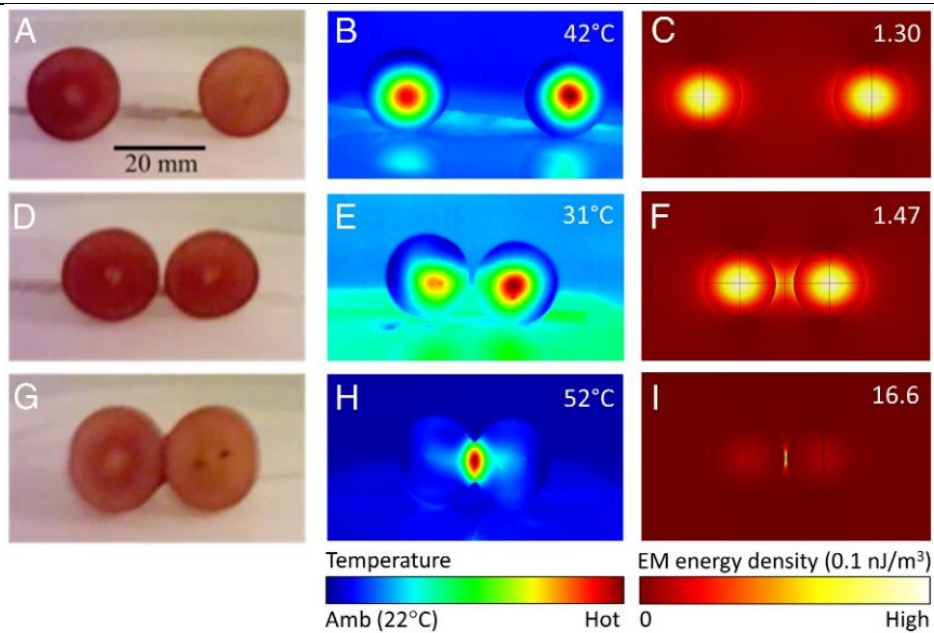


圖 5 兩半球葡萄由遠而近到接觸時之溫度分布(中)，及理論模擬電場強度之分布情形(右)[1]

在此我們想針對圖 4a 與圖 4b 的實驗結果提出自己的模型來加以解釋。由圖 5 之 B、C、E、F 可看出，當 2 半球葡萄未接觸時，葡萄核心位置處溫度最高，電場最強；但當 2 半球葡萄接觸後，卻是接觸位置處溫度最高，電場最強。我們認為當葡萄接觸時，在接觸點附近的液態離子會因微波共振的高電場驅動在左右 2 半球葡萄形成 2 個局部的小迴圈電流(如圖 6)，當這 2 個迴圈電流接觸時，產生類似電線短路的現象，在接點上產生強大的電流熱效應，因而造成劇烈的高熱。此種高熱不亞於水分子吸收微波後振動所產生之熱量，易使葡萄接觸點中的液態鈉鉀離子瞬間氣化變為電漿態，造成強烈的電漿發光現象。此發光現象會在葡萄皮燒掉，2 半球葡萄分離下立刻中斷，是因此時 2 迴圈電流不再接觸，短路現象消失，故電漿發光立刻中止；當 2 半球葡萄後續若再碰觸，立刻又有機會讓 2 迴圈電流短路，便可使葡萄再度產生電漿發光。

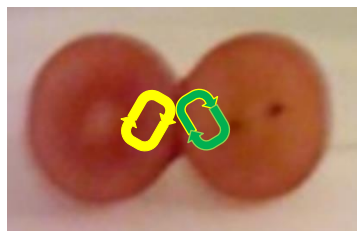


圖 6 兩半球葡萄之離子在接觸點上形成局部迴圈電流之示意圖

2. 不同容器蓋置下的實驗結果:

為了解空氣多寡是否會影響 2 半球葡萄電漿之形成，我們使用 3 種不同的容器(直徑 11 公分，高 2.5 公分之培養皿、250 毫升燒杯及 400 毫升燒杯)將葡萄蓋住，來觀察不同容積的空氣是否會影響葡萄電漿之形成。相關實驗結果如表 2 所示。從表 2 之實驗結果可看出，不論有無容器遮蓋及容器大小，2 連皮半球葡萄幾乎都會產生電漿發光現象，所以可推論出此時微波加熱葡萄的發光現象主要應是前述微波共振與短路現象，造成葡萄中的液態鈉、鉀離

子在高電場、高熱的環境下變成氣態離子，造成電漿發光的現象。

表 2 不同容器蓋置下 2 連皮半球葡萄發光現象結果

容器種類	電漿發光現象(有：O；無：X)				
	1	2	3	4	5
無遮蓋容器	O	O	O	O	O
培養皿	O	O	O	O	O
250 毫升燒杯	O	O	X	O	O
400 毫升燒杯	O	O	O	X	O

但在培養皿及 250 毫升燒杯的蓋罩實驗中，葡萄電漿產生後會形成黃色火光上升至容器頂部持續約 5-7 秒鐘(如圖 7a、b)，且容器高度最低之培養皿產生電漿發光的情形非常強烈(如圖 7a)，似乎容器高度較低有利於觀察 2 半球葡萄之電漿發光現象。推測是因為容器頂部限制氣態離子在特定高度範圍內，不易散失至微波爐其他位置，便可有效提升電漿態密度，增加發光強度。

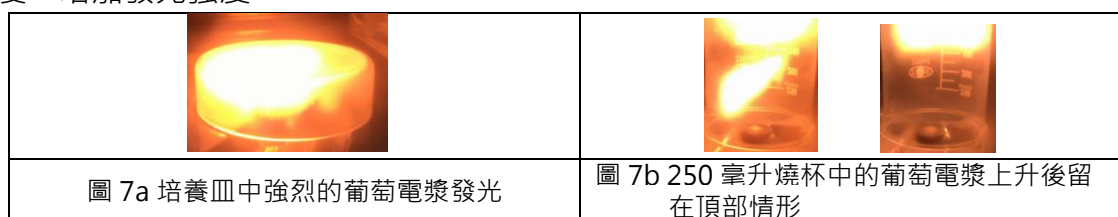


圖 7a 培養皿中強烈的葡萄電漿發光

圖 7b 250 毫升燒杯中的葡萄電漿上升後留在頂部情形

(二) 錶玻璃上 2 顆葡萄的實驗結果

2 顆葡萄以微波加熱時，葡萄會產生排斥的現象，而我們懷疑此種排斥現象可能是葡萄加熱後表面噴出水蒸氣或是接觸點上產生圖 6 中的 2 迴圈電流所形成之排斥力。實驗中為了控制電漿有效生成，故將 2 顆葡萄放置在凹陷的錶玻璃上，以利於葡萄碰觸。為了解空氣多寡是否會影響葡萄電漿之形成，我們同樣使用上述 3 種容器(培養皿、250 毫升燒杯及 400 毫升燒杯)將葡萄罩蓋，來觀察不同容積的空氣是否會影響 2 顆接觸的葡萄之電漿形成。相關實驗結果如表 3 所示。

表 3 不同容器蓋置下 2 顆葡萄之發光現象結果

容器種類	電漿發光現象(有：O 無：X)				
	1	2	3	4	5
無蓋罩容器	X	O	O	X	X
培養皿	O	X	X	X	X
250 毫升燒杯	X	X	O	X	X
400 毫升燒杯	O	X	O	O	O

由表 3 可以看出在有罩蓋情況下，體積最大的 400 毫升燒杯最易產生電漿發光的現象，似乎容器內空氣較充分時有利於電漿發光現象的形成，代表此時發光似乎受到容器內的空氣多寡所影響。推測可能是空氣在高電場、高熱時產生如前所述的化學反應[2]或是空氣分子發生游離。經文獻搜尋我們發現 O_2 游離所產生的 O_2^+ 之光譜如圖 8 所示，由圖 8 可看出 O_2^+ 可發射黃光(約 565nm-590nm)的光譜，並同時發射偏橙色的光譜(約 590nm-625nm)。而實驗中觀察到葡萄電漿發光除了黃色外還帶有橙色如圖 2b 及圖 7，說明電漿態應不只是氣態鈉離子的光譜，很有可能還有 O_2^+ 的電漿光譜。

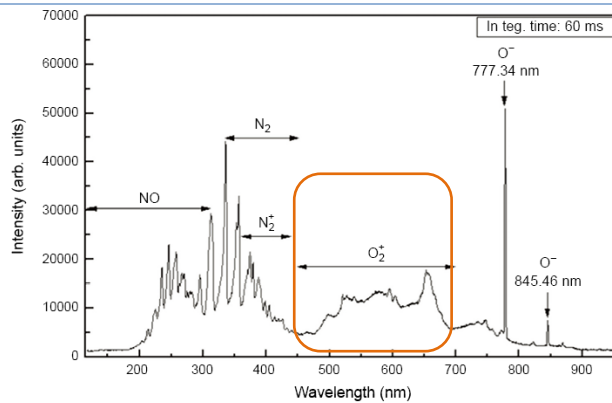


圖 8 空氣大氣電漿物種分析圖譜(取自參考資料[4])

我們評估另一個 yotuber[2]提出的化學反應，應當不是產生黃光和橙光的來源。因為實驗中有強烈發光時均伴隨發出類似高壓電塔旁的滋滋聲響，代表此時空氣中應含有被高電場游離之氣態離子。而 Yotuber [2]所提到，空氣中的 N_2 、 O_2 要進行 3 種反應才能產生黃光，要同時滿足 3 種反應過程才能發出黃光的機率遠較 O_2 分子直接游離成為 O_2^+ 的機率來得低，所以我們認為葡萄微波加熱發射的黃光與 Yotuber[2]提出的化學反應較無關聯。

實驗中觀察到無罩蓋下，空氣供應應當更為充分，但加熱後 2 顆接觸葡萄在無罩下的發光機率卻較 400 毫升燒杯為低。推測應當是 400 毫升的燒杯的蓋罩侷限下，能有效增加氧分子運動至強電場位置之機率產生游離；若無容器的限制，氣體分子易運動到微波爐其他位置，不利於上述的游離現象發生。

而實驗中 2 顆接觸葡萄之電漿發光均無法像 2 半球葡萄般強烈，推測是因為切開之半球葡萄，葡萄表面液態離子之補充能有效供應電漿態之形成，讓發光強度更劇烈。

五、結論與生活應用

結論：

- (一)、葡萄的電漿發光主要應當是葡萄中的鈉鉀離子及空氣中 O_2^+ 之電漿態所導致。
- (二)、2 半球或 2 顆葡萄接觸下的電漿發光，除了因葡萄之微波共振之高電場、高熱所導致，亦可能是因接觸點附近產生類似電流短路之熱效應所致。

本實驗研究的電漿現象和奈米科學中的表面電漿類似，了解微波尺度的原理有助於設計奈米光學裝置。

參考資料

1. Hamza K. Khattak et al., Linking plasma formation in grapes to microwave resonances of aqueous dimers, PNAS 201818350 (2019)
2. 影片 The microwave plasma mystery，作者 NileRed 取自 <https://www.youtube.com/watch?v=l0u8Vtf2GoQ&t=1072s>
3. 葡萄的微波爐物理，陳奕廷，CASE PRESS,台大科學教育發展中心，取自 <https://case.ntu.edu.tw/blog/?p=33729>
4. 自動化大氣電漿設備建置與醫療用口罩去異味活化，郭俞麟、孫瑛穗、何明樺、盛信儒、陳松郁、郭兆渝、王憲柏、柯季良，2021 年 6 月 科儀新知 第 227 期，取自 https://www.tiri.narl.org.tw/Publication/InstTdy_Full/12487?PubId=227