



# 從 法拉第的 演講看 蠟燭科學



蠟燭在我們日常生活中，  
實在是一個再也普通不過的東西了，  
到了法拉第眼中，  
竟然可以講出長篇道理來，  
而且一講講了12年。  
可見只要專心、細心、用心，  
雖小道亦能悟出大哲理！

## 科學家兼科普教育推動者

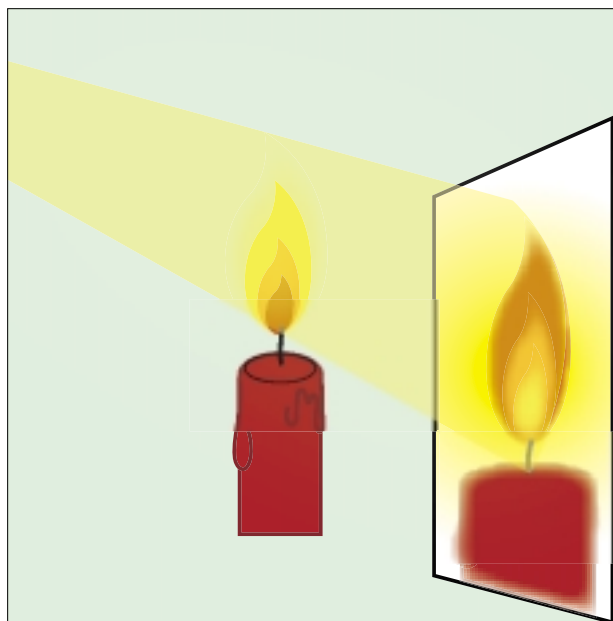
英國大科學家法拉第在電磁學、光學及化學上的貢獻，二百年來一直受到舉世推崇。電磁學四大定律之一的法拉第定律，講到如何由磁場變化產生電場，這定律導致馬達與發電機的發明。在光學上，法拉第效應講的是磁場可以如何改變光的行進，即所謂的磁光效應。在化學上，法拉第發現氣體的液化行爲並在電解及電化學等領域有極大的貢獻，他還製造出許多當時頗爲新奇的物質，如四氯乙烯、合金鋼、苯等。有人推崇他是最偉大的實驗家，爲了尊敬這位偉人，英國皇家化學學會中設有法拉第學會（Faraday Society）。

法拉第也是一位傑出的科學教育者，他在一八四〇～一八六〇年間以蠟燭爲主題，對青少年發表的一系列演講尤其著名。演講的內容後來被編成一本書——《蠟燭的化學史》（*Chemical History of a Candle*），書中篇章包括蠟燭的組成、蠟燭的燃燒，以及氫、氧、水、二氧化碳的物理化學性質，還有大氣的組成。

這一本基礎物理化學通俗讀物在西方十分流行，在此書中，法拉第利用蠟燭將自然的奧秘揭示給世人看，由這本書可以看出法拉第在科學上的素養，以及他在推廣通俗科學上的努力。法拉第關於蠟燭的第一次演講，是在一八四八年的聖誕節，聽眾是青少年朋友，最後一次則是在一八六〇年的聖誕節。

這些演講雖然已是很久以前的事了，但現在讀起來內容仍感清新生動，因爲演講者本身就是一位天才科學家，他對事情有很深入的看法。蠟燭一書啓發了許多人對科學的興趣，例如一九九四年諾貝爾獎得主歐希瑞夫（D. D. Osheroff，史丹福大學教授，因發現氦的低溫物理性質而得獎），就曾提到這本書在他幼年時，引發了他對科學的興趣。《蠟燭的化學史》曾翻譯成各種文字，尤其日文版更暢銷了七十多版，但遺憾的是，這本書一直未出現中文版。

法拉第演講的所在地是倫敦的皇家科學院（Royal Institution），它的創辦人是美國人湯普生（Benjamin Thompson），在美國內戰期間他爲英軍助陣，戰後被迫逃離美國至倫敦定居。湯普生對熱學研究很有貢獻，發明過許多實用的鍋爐裝置。皇家科學院由他出資成立，後來成爲一流的科研機構，法拉第成名後，在此度過一



將一支點著的燭火放在強光下，使影子投射在一張紙上，便可以清楚觀察到燭火的內部，它描繪出燃燒中燭火的構造。當你把火焰點著之後，屏幕上可看到一束上升氣流把火焰向上拉。很妙的是，紙屏上較暗的部分在火焰中卻是較亮的區域。

生。皇家科學院至今仍爲英國著名的研究機構，許多傑出的科學家都曾在這裡工作過。法拉第認爲，倫敦皇家科學院聖誕節的演講應集教育、娛樂、啓發於一身。這些原則一直爲皇家科學院所遵循，聖誕節的通俗科學演講年年舉辦，至今不輟，相關資訊可上[www.rigb.org](http://www.rigb.org)網站查詢。

接下來讓我們看看《蠟燭的化學史》前二章的部分內容，在這一部分演講中，提到蠟燭的製造、燃燒，然後提到燃燒時的火焰及氣流的助燃等現象。在以後的章節中，還提到燃燒的產物：水、氫、氧、二氧化碳及大氣組成等有趣的問題。要記得這是一本他當時在現場示範的紀錄，所以是以講演的形式寫下來的，當時他準備了許多道具，當場以實驗示範蠟燭燃燒及其相關現象，所以效果非常好。書中所示範的實驗，一般讀者在家中也很容易做到。

## 蠟燭的製作

首先談到蠟燭的製造過程，我們一般所見到的蠟燭都是用蠟做的。其實，蠟燭還可以用許多不同材料來做。尤其在一、兩百年前，蠟燭是最重要的照明工具，人類曾嘗試以不同的方法製造蠟燭，例如，有由牛脂或



將一支金屬彎管的一端放入火焰中暗區，馬上就有東西自管的另一端冒出。

抹香鯨的油脂做成的，也有用蜂蜜中的黃蠟精製而成的，或以愛爾蘭油沼地取來的石蠟製造的。自油脂提煉材料的方法，可能是給呂撒克（Gay Lussac）所發展出來的。

因為蠟燭可以熔化，我們也許會想像這些蠟燭是用模子做出來的。其實不然，例如用石蠟做的火燭，就無法用模子做出來，它是經由一種特別的手續製造的。但由動物脂肪做的蠟燭，卻可以鑄造。

石蠟做的蠟燭，是用一種特別的方法製造的。第一步將許多棉線掛起來，底部用金屬片蓋住，這一部分不會被蠟塗上。掛線架可以旋轉，在轉動時，工人將熔化的蠟一層層澆上，待冷卻後再繼續澆，直到線上蓋了厚厚的蠟為止，這時再把它們拿下，用石板磨圓。錐形的蠟頂是用特製管做的，底部則切掉磨平。這些工作十分細緻，因此蠟燭可以做成一樣大小，例如一磅四支、六支等數目。

### 蠟燭的燃燒

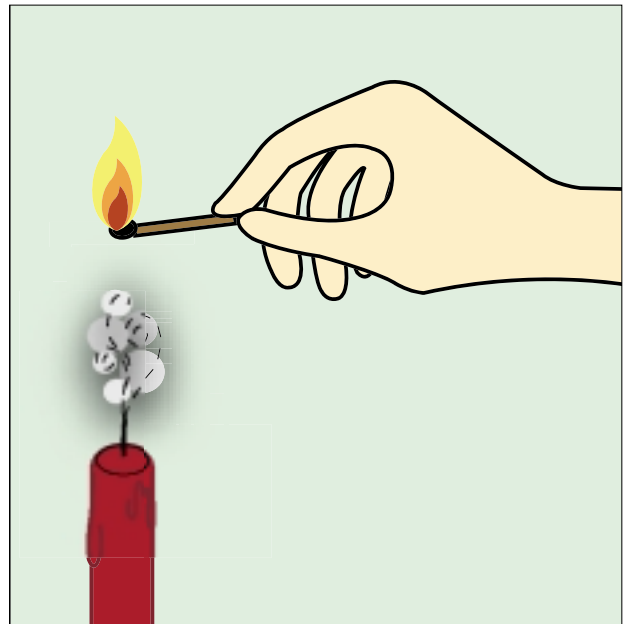
我們要談談蠟燭和油燈燃燒不同之處。油燈是燃燒液體的燈油，而蠟燭則是燃燒固體的蠟，到底蠟燭是怎樣將固體化成液體再進一步燃燒呢？其中有關未燒完的油蒸氣，法拉第以精彩的實驗示範，展現燃燒所形成的

物質。有興趣的讀者可以動手試一試，以了解燃燒的過程。

油燈都具備油槽，蠟燭是固體，因此不需要容器。蠟燭燃燒時，在頂端會形成一個杯槽，杯槽內裝滿了熔化的蠟油，這就相當於油槽。而杯槽中的蠟一直熔化到接近火焰燃燒的部分，這和油燈的燃燒情況類似。蠟燭燃燒時，火焰只在燈線上燒著，可能很多人會問，為什麼火焰不會沿線燒下來？這是因為在燃燒過程中，還包括一個蠟油氣化的過程，若沒有氣化，液態蠟油是會把火弄熄的！在蠟燭或油燈的燒燃過程中，燃油都是藉毛細作用，自油槽中沿燭芯向上送到火焰燃燒的部分，當燃油抵達上端時，就開始氣化。

毛細作用力把燃料帶到可燃燒之處，而且儲存在那裡。舉一個關於毛細作用的例子，當你將乾淨的手指插入熱水中，水會沿指縫爬上手指到略為高出水面的地方，或許你並沒有注意到這些現象。

有一個實驗可以說明這個原理。首先把一條鹽柱放在盤中，再將飽和鹽水倒入盤內。因為溶液已飽和，所以鹽不可能再溶解，因此盤內溶液的變化，不可能是由於鹽柱溶化造成的。和蠟燭比起來，盤子是蠟燭本體，鹽柱是燈芯，溶液是燭油。之後將溶液染黑，你可以觀察到這黑色流體慢慢爬上鹽柱，一直到頂（只要鹽柱不倒下）。假如這溶液是可燃的，同時我們在鹽柱上加上燈



吹熄蠟燭，當蒸氣冒出來時，可以在遠端將這些蒸氣再點燃。

芯，它就會燃燒起來，這就和蠟燭燃燒完全一樣了。

蠟燭燃燒時產生的熱氣將空氣向上推，在燭頂附近靠邊緣的蠟，由於接觸較冷的空氣，使熔化的蠟油冷卻下來，因而在燭頂形成杯槽，如果讓蠟燭傾倒，蠟油會沿重力方向流走。所以杯槽是因持續上升的熱氣流作用而形成的，這種作用造成空氣對流，結果是熱空氣沿燭頂上升，冷空氣自周圍進來。

當蠟燭點燃後，有一股熱空氣挾著一些看不見的物質上升。蠟燭頂端的火焰是被這股上升的氣流拉出來的，而且拉得很高。如果把一支點著的燭火放在陽光下，再將其影子投射在一張紙上，便可以清楚觀察到燭火的內部。首先可以看到火焰旁的一些陰影，它們不屬於火焰的一部分，但卻在上升，而且拉著火苗上升，它們就是上升的熱氣流。

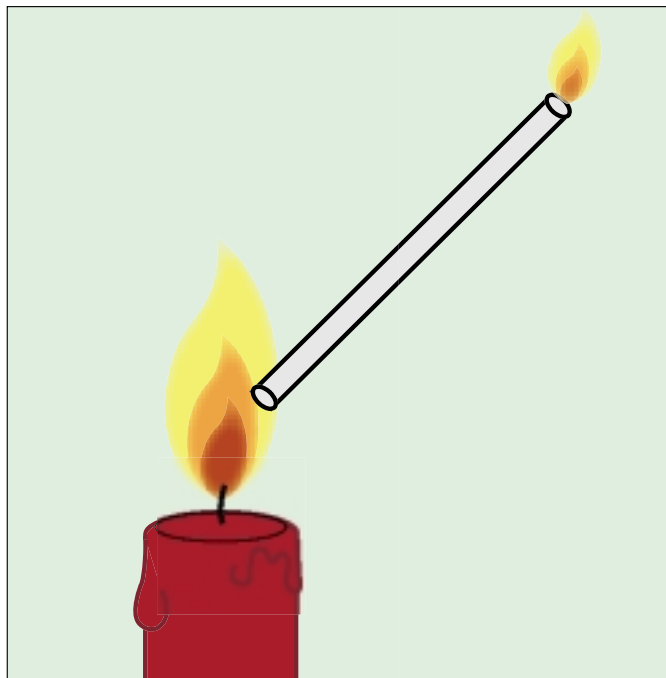
假如用更亮的電燈來代替陽光，會更清楚地看到火焰的投影。除了燭體及燈芯外，還有一道暗影及一條拉長的氣流，很妙的是，紙屏上較暗的部分在火焰中卻是較亮的區域。也可以看到屏幕上有一束上升氣流，它不但將火焰向上拉，供應燃燒所需的空氣則使燭芯的凹槽邊緣冷卻。至於為何火焰中較亮的部分，投影到紙屏上反而變得較暗，這將在後面加以說明。

## 燭焰的結構

要觀察火焰的內部，可將一隻玻璃彎管插入火焰中較暗的那一區域，不吹動蠟燭，保持燭火的穩定，你可以看到一旦將彎管插入暗區，馬上就有東西自管的另一端冒出。如果放一個燒杯之類的容器在管的另一端，收集它冒出來的東西，可以看到有些東西自管的這一端冒出來落到杯底，像是它們有重量似的，這與火焰外部的

氣體不同。我們發現自管端落下之物其實是蠟蒸氣，這就是當我們把蠟燭吹熄時所聞到的那股味道。

所以，蠟燭燃燒的就是這些蒸氣。為了更清楚地說明這點，你可以吹熄蠟燭，當蒸氣冒出來時，再在遠端點燃它。若是透過上面所提的步驟，在一只燒杯內收集大量凝結的蠟蒸氣，再用油燈把它燒熱，會看到凝結的蠟先化成液體，然後開始冒出一點煙來，接著就會有蒸氣產生，持續加熱會有更多東西冒出來，甚至可以把蠟蒸氣倒到一個平底盤上，然後點火引燃。這些蒸氣就是在蠟燭中間較暗部位的蠟蒸氣。



用一支管子將蒸氣引出來，然後在管子的遠端點火，可以看到有熊熊的火焰冒出。

為了確認這點，我們再做一個實驗，來試燒這些來自蠟燭中間部位的蒸氣。用一支管子把蒸氣引出來，然後在管子的遠端點火，你可以看到有熊熊的火焰冒出。但是如果把管子放在蠟火中燃燒完全的部分，也就是火焰的上部，沒有了蒸氣，管子另一端也就沒有火焰了。

為什麼會這樣？這是因為在火焰中心或燈芯部位，有許多易燃的氣體，而火焰外圍有燃燒所需的空氣，兩者之間混合處就是發生劇烈化學反應的地

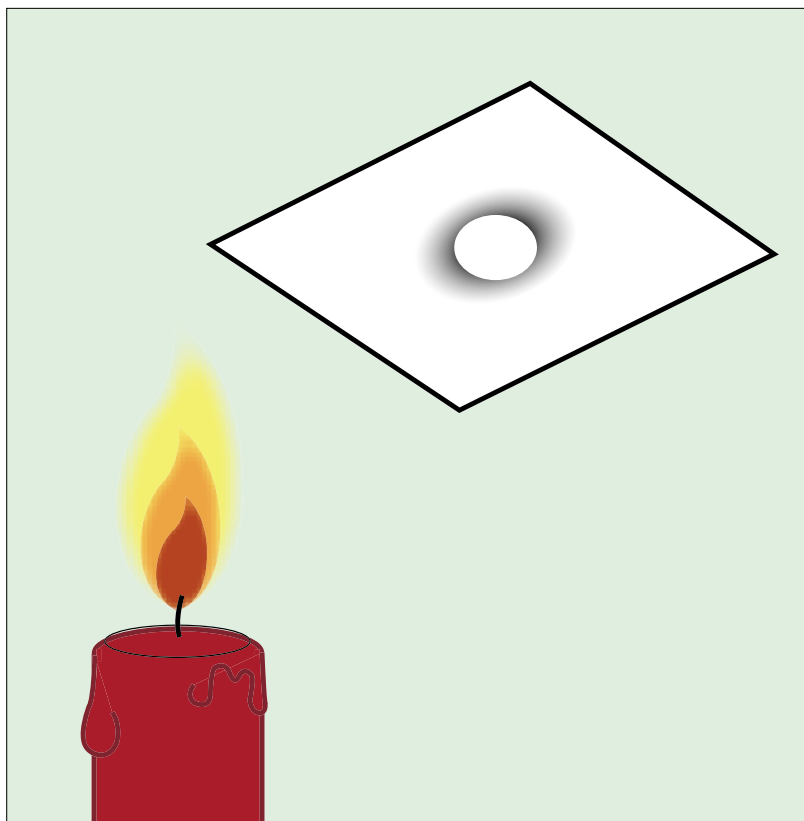
方，空氣與燃料彼此相互作用，蒸氣被耗盡了，同時也產生了光亮。在蠟芯發生劇烈化學反應之處，有很多化學物質生成，它們會吸收光線，前面提到火焰中較亮的部分在紙屏上反而顯得較暗，就是因為反應物吸收光線的緣故。

我們可以把一片紙很快地插到火焰裡去，看看究竟是那個部位最熱，紙上會顯示出一圈燒黑的地方，它的位置正是發生化學反應之處。這實驗只要沒有太大的干擾，在家裡就可以做成，先找一片紙，讓屋內的空氣靜下來（沒有流動），然後很快地將紙片放入火焰正中央再迅速拿出，會看到紙上有一塊燒焦的地方，中間部位卻

只有些許燒焦甚或完全沒有。多試一、二次後，就會做得熟練，而輕易地找到火焰中最熱的部位，也就是空氣及燃料結合的地方。

若我們把蠟燭放在一個密閉的大罐子內，一開始它會燒得很好，但情況很快就有了改變，你會看到火焰慢慢降低，最後熄滅了。這是由於空氣的供應不足，使得燃燒不完全，燭火一滅馬上就有一束黑煙自蠟燭冒出，這些飛揚的碳粒是因為沒有足夠的新鮮空氣而產生的，蠟燭火焰的內部也同樣產生碳粒，但它們隨後在其他的部位反應燒掉了。

當你拿一根管子插到火焰中的明亮部位時，管子另一頭會冒出白煙；如果把管子伸進火焰中最明亮那部分的上端時，會看見管子的另一端冒出黑煙。這黑煙像墨水一樣黑，顯然與白煙不同，當你用火苗去點時，點不著它，反而把火弄熄了，這些粒狀物就是蠟燭的煙。組成煙的物質顯然早已存在於蠟燭內，否則它不會在這裡冒出。法拉第也舉例說，在倫敦上空飛揚的煙霧，就是火焰中的這些黑煙，它們也是燃燒的產物。



把一片紙很快地插到火焰裡去，紙上顯示出一圈燒黑的地方，它的位置正是劇烈化學反應發生之處。

## 火焰中的碳粒與光芒

最後談到蠟燭的光與熱。我們知道蠟燭曾是一種重要的照明工具，它很亮，但溫度不高；而同樣來自氫氧焰的火炬，溫度很高卻不亮。法拉第對這兩種火焰的差異，做了相當生動的解釋。

除蠟燭外，尚有其他形式的火焰，例如火藥的燃燒會產生火焰，它與蠟燭的火焰有什麼不同？火藥內需要加入碳及其他材料使它燃燒，然後才能產生火焰。（提醒大家，如果想在家裡自己做這些實驗，必須小心。應該謹慎使用這幾樣化學品，否則它們會造成傷害的！）你可以拿一點火藥放在容器內，然後與鐵粉混合，將鐵粉與火藥混合的目的，是要利用火藥點燃鐵屑，讓它們在空氣中燃燒，然後比較有火焰與沒有火焰的燃燒二者之間的差別。

當火藥點燃時，請注意這裡面會有二種燃燒發生，首先會看到火藥燃燒，它有火焰產生，然後看到鐵屑跟著點著了，但是它沒有火焰，它只是鐵屑的個別粒子在燃燒（燒紅）。這二種燃燒的確有很大差別，這與它們發

生火光的機制有關。當我們用油、氣體或蠟燭來照明時，就像以上情況一樣，有各種不同形式的燃燒（包括氣體或固體）在進行著。

像鐵屑之類的物質，當它們沒有經過氧化過程就燃燒時，它們會變得很亮。其實對任何物質都一樣，只要是固體，不論它們燒著與否，加熱後都會變得很亮。蠟燭的光亮也是因為火焰中含有許多微小的固態粒子而造成的。固態粒子的存在與否，才是亮與不亮的主要原因！

先前的實驗證明火焰含有碳粒，這是蠟燭大放光明的原因。我們可以找一個沒有碳粒的火焰來比較，有一種物質叫氧，它可以與氫燒起來形成氫氧焰，它們雖然是氣體，卻能產生比蠟燭更多的熱量，由於缺少粒子，它的火焰並不亮。但是若在其中放入一些固體，就會很亮，例如取一塊石灰放入火焰中，可以看到它很快就會變得非常亮。（其實石灰並不會燃燒，而

且一直是保持固態的) 氫與氧燃燒的火焰會產生很多的熱，但一點都不亮，要光亮並不需要熱，要的是固體粒子。氫氧焰中石灰塊產生的光芒，幾乎與日光相等。

如果將一條白金(鉑)絲線放在火焰中，可以看到它變得多亮！加熱這條白金絲線時並不會發生化學變化。若你把火焰弄小，使它只能放出一點點亮光，這時火焰傳給鉑線的熱雖然只有一點點，依舊將鉑線弄得很亮。這些例子顯示了所有火光中都有顆粒，就是因為有這些顆粒的存在，才會帶給我們光輝與絢麗。

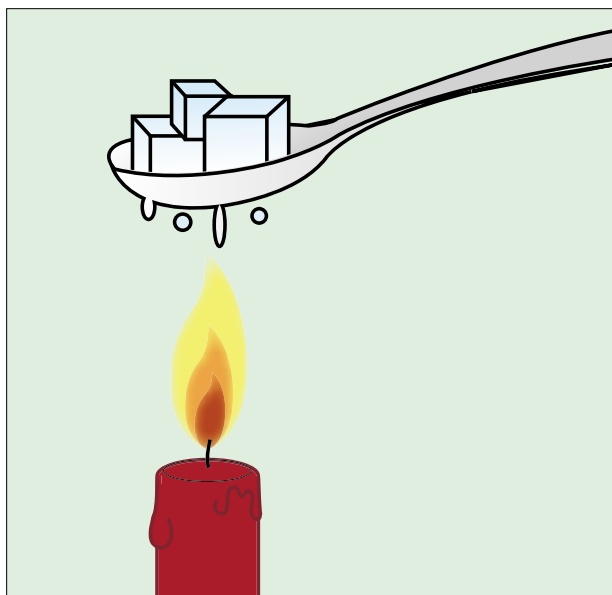
若我們用炙熱的氫氧焰來對著蠟燭火焰吹，使碳粒都完全燃燒，蠟燭火焰也會變藍而不亮。很顯然當我們用氫氧焰燒它時，有足夠的氧氣讓碳粒燒完，以致無法將碳粒再釋放到火焰中。我們也可以在氫氧焰中放入一些會產生碳的東西來增加亮度，例如用一點樟腦油，它燒起來會產生許多煙，利用一支管子將這些煙送進氫氣的火焰中，可以看到它立刻變得很亮，這是二度燃燒的碳粒子，用一張紙面對吹出來的氫氧焰，就能夠輕易看到它們。煤氣火焰中的光芒也是因粒子而產生的，它和燭火的碳粒相同。

我們可以看到，在燃燒蠟燭時有東西產生，其中一部分是碳，此外還有其他物質產生，消失在空氣中。若是我們想知道消散在空氣中的物質有多少，可以進行以下實驗。

先前的二、三個實驗，已顯示上升的是熱氣，但爲了要知道上升的物質爲何，我們可做個簡易的實驗。利用一個裝滿酒精的盤子，就像蠟燭上的杯槽，在它上面放一個像煙囪的東西，它有規範氣流的作用，頂端再套上氣球，點燃酒精後，在火焰頂端應該會收集到燃燒的產物，它與燃燒蠟燭所產生的物質相似。這種由酒精所產生的火焰並不亮，因爲酒精燃料產生的固體碳很少。

我們用氣球可收集燃燒的產物(氣球在充滿時必須抓住)。它會飛走是因爲裡面裝滿了熱氣(這就是熱氣球的原理)。

如何可以看到火焰燃燒時產生的物質呢？用一支大試管倒放在燃燒的蠟燭上方，可以看到管子變得不透明了。如果我們將一支蠟燭放在一個大罐內，再用另外一支蠟燭放在罐外當作照明用，可以看到罐內變得霧狀，而且燭火在罐內變弱了。如果找一支冷湯匙放在蠟燭



在蠟燭上放一個冷的湯匙(內盛冰塊)或乾淨的面板，或任何其他低溫的物體，會有水凝結在下面。

上，調節它與蠟燭間的高度而不要使它變黑，在上升的火焰中，我們發現有一種物質會凝聚在冷的湯匙或乾淨的面板上，或是任何其他低溫的物體上，但也有一部分物質不會凝結。我們首先要觀察會凝結的這部分，很妙的是，我們發現這部分產物就是水。

最後作者要補充說明的是，物體加熱發光是日常生活中常見的現象，例如鐵燒熱會變紅，再加溫會變白熱。法拉第注意到氣體加熱後發出的光並不強，這可以拿我們日常所用的鎢絲燈來對照，它可是靠固體加熱發光。氣體發光的例子是霓虹燈，是由氬氣放電造成原子內部電子的躍遷而發光。

由於蠟燭火焰所能提供的能量不夠強，無法造成電子躍遷，因此一般氣體火焰都比較暗淡，如果將火焰溫度加高，焰中的碳粒在尚未形成電子躍遷前，早就氯化而不存在了。對物體的加熱發光，到一九二五年量子理論提出後才完全了解，法拉第那個時代這些理論都尚未成形，但是他所描述的現象，則是完全正確與可解釋的。 □

倪簡白

中央大學物理學系