

中華民國第四十八屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

第三名
最佳創意獎

040117

微波爐測光速之迷思？-微波干涉的探討

學校名稱：國立新莊高級中學

作者： 高二 黃朝威 高二 張皓奇	指導老師： 李育賢 張正平
-------------------------	---------------------

關鍵詞： 微波、干涉、駐波

作品名稱

微波爐測光速之迷思?—微波爐干涉的探討

壹、摘要

在微波爐內，微波經由內壁的反射，和原來的波形成干涉的現象。有資料指出：藉由此特性，我們可利用微波爐來測量光速。本實驗旨在探討微波在微波爐中的干涉形式，利用巧克力及氯化亞鈷，測量爐內微波振幅強弱的分佈。

實驗發現：微波加熱後巧克力上的熱點以及塗有氯化亞鈷溶液紙巾上的條紋，皆顯示微波在其中有穩定的干涉現象。雖然其形式頗為複雜，但是利用虛擬鏡像波源的探討，可得到和結果相近的分析。

貳、研究動機

參考資料二提到：由於微波爐中電磁波在其加熱空腔中形成駐波，以致於微波能量在空間中的分佈並不均勻。若將巧克力片放置在微波爐中加熱，將會因為受熱不均勻而使巧克力上的某些地方會先被加熱融化，以下稱巧克力融化之處為「熱點」。報導提到由於而這熱點間的距離接近微波波長之半，若在微波頻率已知的情況下，即可以利用測量熱點間的距離來推求光的速度。如果真如報導所言，那麼就可以利用生活中容易取得的微波爐來測量電磁波的速率。

參、研究目的

藉由實驗的研究，我們希望能藉由探討在微波爐中干涉的特性，探討「微波爐測光速」這個方法的正確性與可行性，以期能在日常生活中，能以容易取得的物品來正確及便利地推測光速的大小。

肆、實驗原理

一、微波的探討【觀念一】

一般微波爐所發出的微波，其頻率約為 2.45[GHz]，具有如反射、折射、繞射與干涉的各種波動特性。

二、電磁波的干涉【觀念二】

如果假想微波為一空間中的平面波源（如右圖 1），從金屬面反射之微波可看成由一對稱的虛擬波源發出。

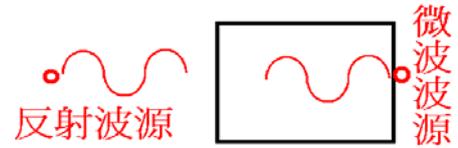


圖1 - 波源與虛擬波源

兩個同頻率、同振幅且相反方向行進的波動，在行進方向上疊加後形成的干涉，（如右圖 2），在腹點處能量較高而先行融化，可推測巧克力上的熱點間所量測到的距離即波長之半。又從 $c = \lambda \times f$ 的關係式，藉由巧克力熱點間距得到半波長之後，乘以 2 即為波長 λ ，又已知微波的頻率 f 為 2.45[GHz]，即可推測光速。

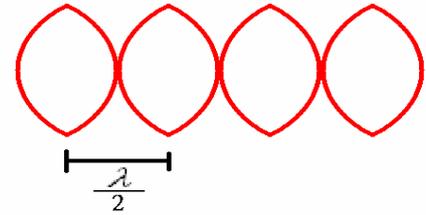


圖2 - 反向行進波駐波示意圖

三、兩個點波源的干涉【觀念三】

考慮由一點波源(S_1)以及一個反射面反射的虛擬波源(S_2)發出的波在空間中疊加，若兩個波源 S_1 、 S_2 所發射的波動若在空間中的 P 點相遇，兩波源造成波程差 $\delta \equiv |\overline{PS_1} - \overline{PS_2}|$ 。波程差會直接影響兩波在 P 點疊加後的振幅，合成振幅 A' 是 δ 的函數 $A' = A'(\delta)$ 。接著利用相角的概念加以分析：當波程差為 δ 時，兩波的相位差 $\Delta p \equiv \frac{\delta}{\lambda}$ 、相角差 $\Delta \theta \equiv \Delta p \times 2\pi$ [rad]，則由圖 3 可

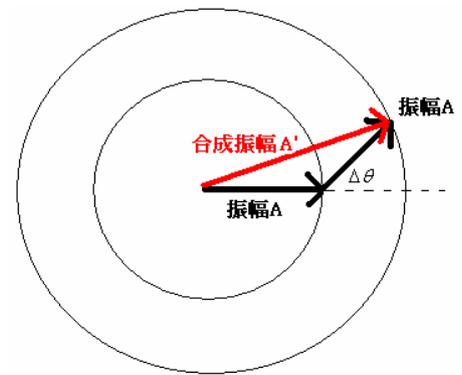


圖3 - 兩相角差 $\Delta \theta$ 的波合成振幅

知，疊加後的合成振幅： $A'(\Delta \theta) = \sqrt{(A + A \cos \Delta \theta)^2 + (A \sin \Delta \theta)^2}$ 。我們利用 Mathematica4.0 模擬了一個這樣的情形(如下圖 4 與圖 5)

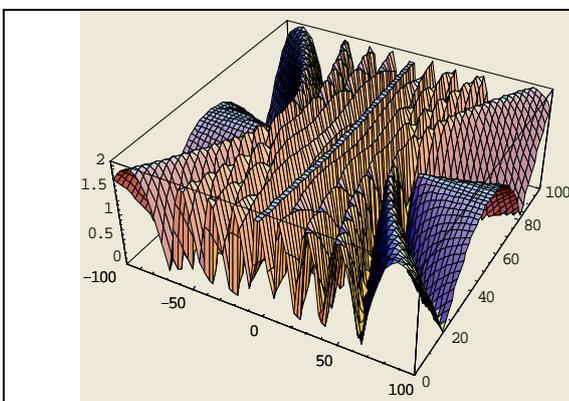


圖4 - 兩波源所在空間中的振幅分佈

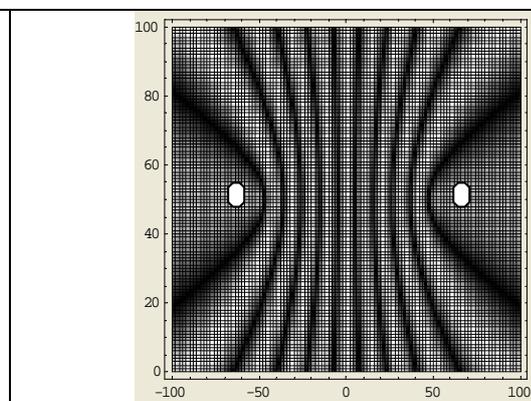


圖5 - 左圖中，振幅越高之處以白色代表；白點為波源位置。

四、多個點波源的干涉【觀念四】

考慮空間中有三個同振幅、同相的點波源 S_1 、 S_2 、 S_3 發出的波在 P 點相遇，若 S_2 與 S_1 的相角差為 $\Delta\theta_{21}$ 、 S_3 與 S_1 的相角差為 $\Delta\theta_{31}$ ，依照右圖 6，合成波的振幅 A' 應為：

$$A' = \sqrt{(A + A\cos\Delta\theta_{21} + A\cos\Delta\theta_{31})^2 + (A\sin\Delta\theta_{21} + A\sin\Delta\theta_{31})^2}$$

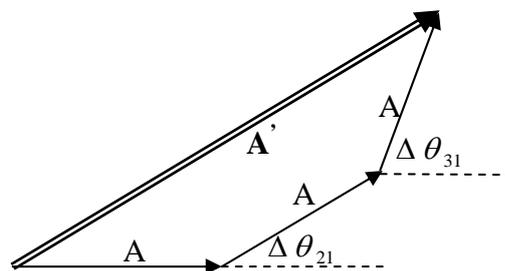


圖6-三個有相差的同幅波在空間的合成振幅

以此類推，若為 N 個同幅、同相的點波源 S_1 、 S_2 ...、 S_N 發出的波在 P 點相遇，若 S_k 與 S_1 的相角差為 $\Delta\theta_{k1}$ ，

$$\text{合成波的振幅 } A' \text{ 應為：} A' = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^N A\cos\Delta\theta_{k1}\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^N A\sin\Delta\theta_{k1}\right)^2}$$

伍、研究設備及器材

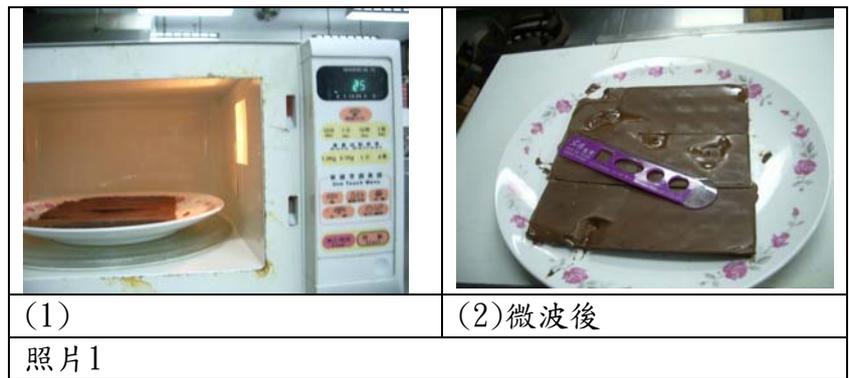
編號	設備或器材	數量(單位)
1	國際牌微波爐	1(台)
2	巧克力	數片
3	塑膠瓦楞板	數片
4	電磁爐	1(台)
5	鐵鍋	2(個)
6	紙餐盒	數個
7	氯化亞鈷	1(瓶)
8	紙巾	數包
9	方型鐵盤	數個
10	鐵管	2支
11	磁電管與變壓器	1(組)

陸、研究過程與方法

一、實驗前置作業【實驗一】

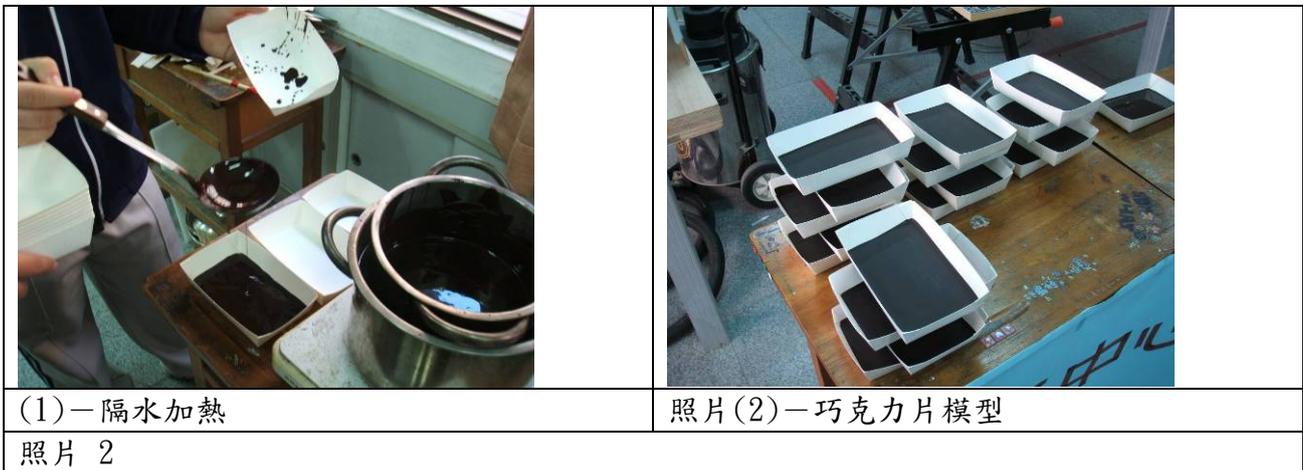
(一)、測試是否有熱點產生【實驗一 - 1】

我們讓轉盤不會旋轉去微波後發現，巧克力真的不是均勻受熱(如下照片 1-(2)、(3))，而且有些許的熱點，只是相鄰的間距也不是像駐波間距為半波長。



(二)、巧克力製作【實驗一 - 2】

隔水加熱巧克力(如下照片 2-(1))，製成較薄的巧克力片(如下照片 2-(2))。



二、微波爐的探討【實驗二】

(一)、微波爐的發射波源【實驗二 - 1】

微波爐內有著頻率 2.45[GHz]的電磁波，微波是從磁電管所發射出來的(如下照片 3-(7))。若以微波爐的左下角當成座標原點(如右圖 7)，該天線的座標為 (38.0, 24.5, 9.5)[cm]。

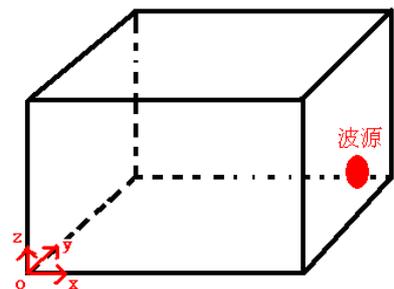


圖 7 - 微波爐空間的座標定義

微波爐的設計中，為了讓食物可以均勻受熱，底部有一轉盤，附著有一個三爪勾(如下照片 3-8)。故我們在實驗時，皆是把轉盤移出，並墊加高度。

		
(1)微波爐外觀	(2)右側的塑膠片	(3)微波出口
		
(4)微波爐上部	(5)磁電管	(6)磁電管
		
(7)磁電管	(8)旋轉爪勾	(6)規格表
照片3 微波爐的構造		

(二)、驗證微波波源的形式【實驗二 - 2】

我們將一片巧克力檔在微波出口前(如照片 4-(1))，加熱後發現巧克力在波源的出口產生一個圓形的熱點(如照片 4-(2))。可以推測微波波源為一個點波源。

	
(1)把巧克力壓在波源上	(2)只有一個圓形的熱點
照片4 - 微波波源的形式	

三、以巧克力片微波加熱【實驗三】

(一)、巧克力分片微波【實驗三-1】

我們把每片將要微波的放在一大片的塑膠瓦楞板上，周圍的四個角我們分別以六小片塑膠瓦楞板為一組貼合成的支撐。加上原本大片塑膠瓦楞板的總厚度即為 2.1[cm]的倍數加高，並分次將巧克力放入爐中微波 30 秒(如下照片 6)，記錄微波後巧克力上熱點的座標。照片中的熱點我們以紅線框住。



照片5 - 六片塑膠瓦楞板總厚度 1.8cm

			
紅色點為原點	巧克力片擺置	高度 2.1cm	
			
高度 4.2cm		高度 6.3cm	
			
高度 8.4cm		高度 10.5cm	
			
高度 12.6cm		高度 14.7cm	
照片6 - 每次以不同高度微波一片巧克力			

每片巧克力形成的熱點相對位置並不相同，相鄰的熱點間距也不是 6.12[cm]。我們把這些熱點的中心位置記錄下來。以微波爐最左下方為原點，以公分為單位，在不同的高度(z 座標)，標出熱點的座標，以(x,y)表示如下表。

Z=2.1[cm]	Z=4.2[cm]	Z=6.3[cm]	Z=8.4[cm]	Z=10.5[cm]	Z=12.6[cm]	Z=14.7[cm]
10,6	6,8	9,8	7,14	28,18	10,33	8,16,
8,6	7,17	9,28	7,36		18,16	15,15
	12,22	11,13	22,29		19,34	23,13
	13,13	15,12	25,23		20,21	29,19
		15,30	28,16		25,10	
		15,33	30,24		29,16	
		22,10			31,19	
		22,30,6				
		27,23				
		28,13				

我們請老師幫我們使用程式把資料點輸入 AutoCAD，轉到 3D MAX 把這些點標在三度空間的圖上，得到下圖 8)。

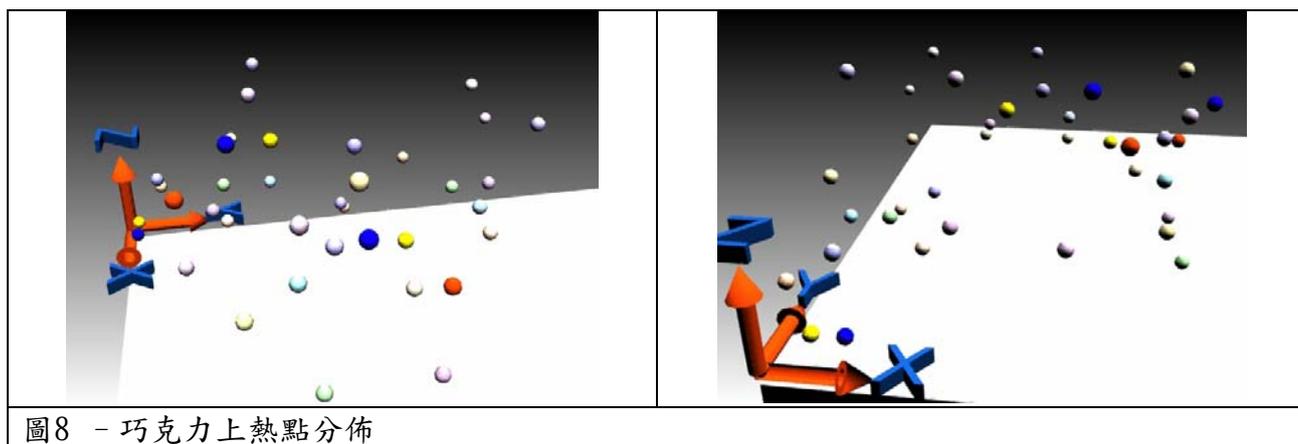


圖8 - 巧克力上熱點分佈

在這一次的實驗中，我們發現：

- 1、在巧克力交界邊緣處明顯地融化得比較厲害，可能是因為巧克力片並不是一體成型，造成在邊界處微波能量聚集，故巧克力的製作方式需要改進。
- 2、高度不同時，造成的干涉結果也會不同，故不能把這七片的實驗結果一比較分析之，故必須將七片巧克力同時進入微波爐微波加熱。

(二)、不同高度的巧克力同時微波【實驗三-2】

接著我們以高度為 2.1[cm]的倍數，一次放入七層不同高度的巧克力同時微波 60 秒，得到的結果如下照片 7。



(1)巧克力外觀，與微波前情形

(2)高 2.1[cm]



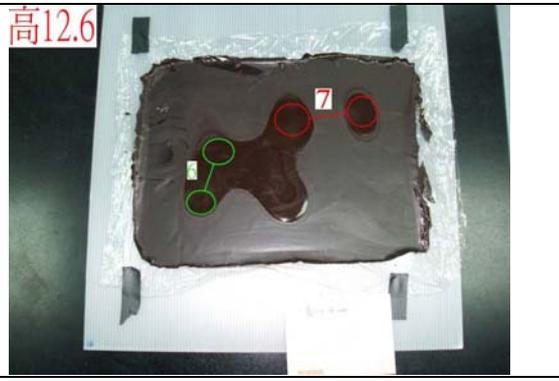
(2)高 4.2[cm]

(3)高 6.3[cm]



(4)高 8.4[cm]

(5)高 10.5[cm]



(6)高 12.6[cm]

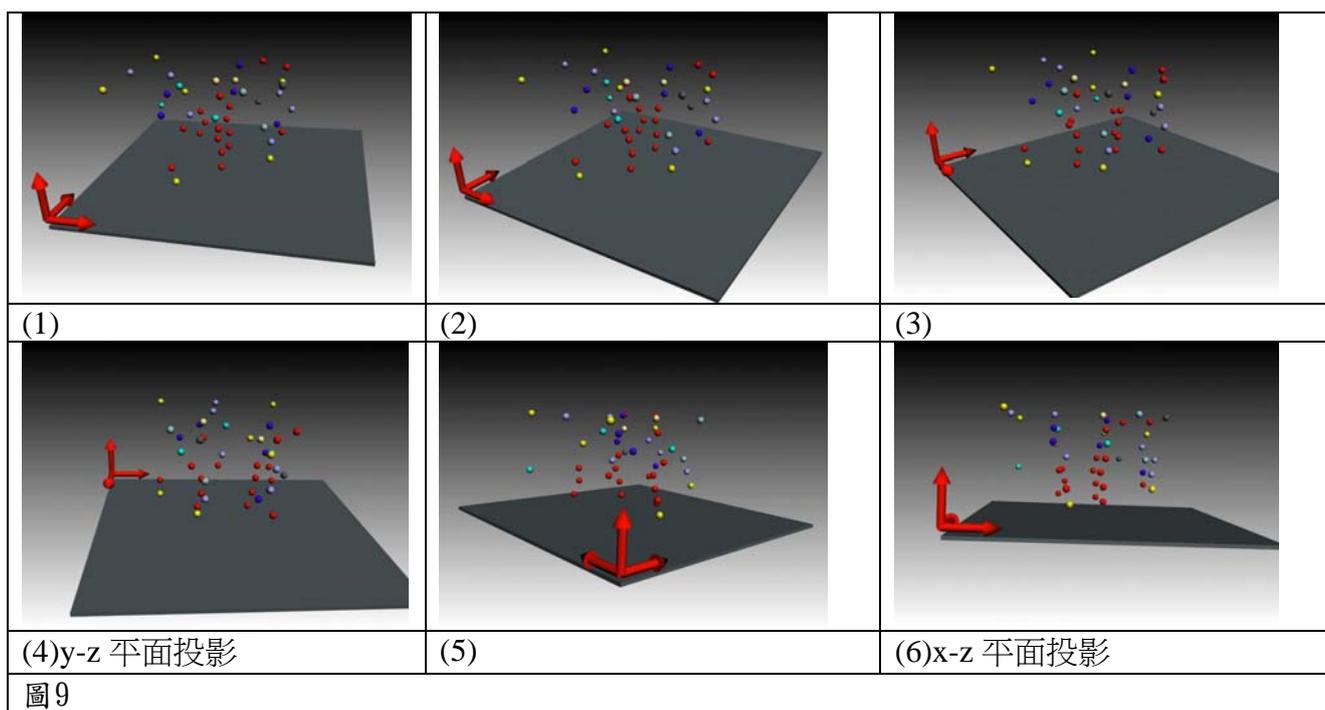
(7)高 14.7[cm]

照片7 - 一次微波七片巧克力

我們以微波爐最左下方為原點，以公分為單位，在不同的高度下得到以下這些座標(由左至右為 x,y)

Z=2.1[cm]	Z=4.2[cm]	Z=6.3[cm]	Z=8.4[cm]	Z=10.5[cm]	Z=12.6[cm]	Z=14.7[cm]
5,1	1,3	4,3	2,9	23,13	5,28	3,11
14,5,9	14,9	13,18	19,5,13.5	12,12	27,23	27,5,23.5
13,26.5	19,5,15	19,15	19,23	19,5,12	20,23	5,5,9
19,22	19,22.5	18,5,23	14,18.5	12,23	19,5,15	5,5,18
19,5,14.5	14,26.5	13,5,26	25,5,15	19,5,24	12,15	6,27.5
	27,24	26,5,22	23,26	26,5,24	12,5,19	20,5,24
	26,5,14	26,5,15	28,5,23			23,5,27
		6,28				12,17
						19,15
						23,5,10.5

我們使用 AutoCad 程式，把這些點標上，得到以下圖 9，並以不同角度顯示。



由上實驗結果可知：

- 1、許多熱點間的連線距離仍非微波的半波長(6.12[cm])，多數為7~8公分左右的間距。
- 2、不同片的巧克力夾層產生的熱點仍然不相同，可見熱點並不是整齊的格狀分佈。

(三)、改變高度再微波【實驗三 - 3】

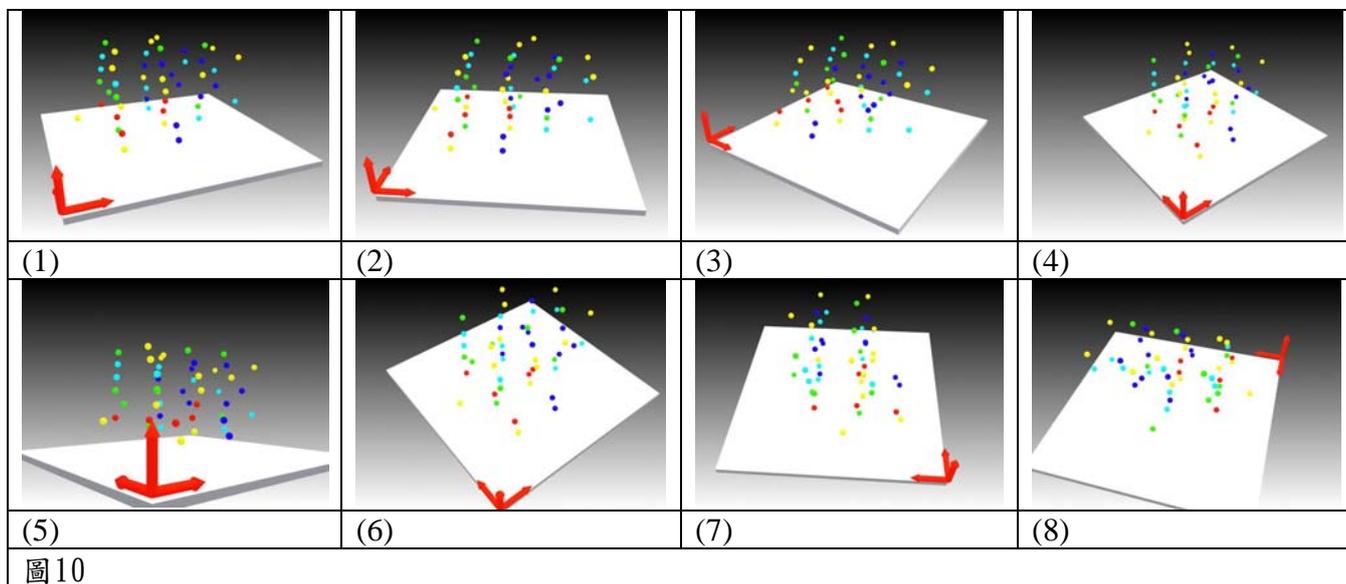
從起點再增加 0.9[cm]的高度，用微波同樣加熱一分鐘，結果如下：

<p>(1)微波前的情形</p>	<p>(1)高 3[cm]</p>
<p>(2)高 5.1[cm]</p>	<p>(3)高 7.2[cm]</p>
<p>(4)高 9.3[cm]</p>	<p>(5) 高 11.4[cm]</p>
<p>(6)高 13.5[cm]</p>	<p>(7)高 15.6[cm]</p>
<p>照片 8</p>	

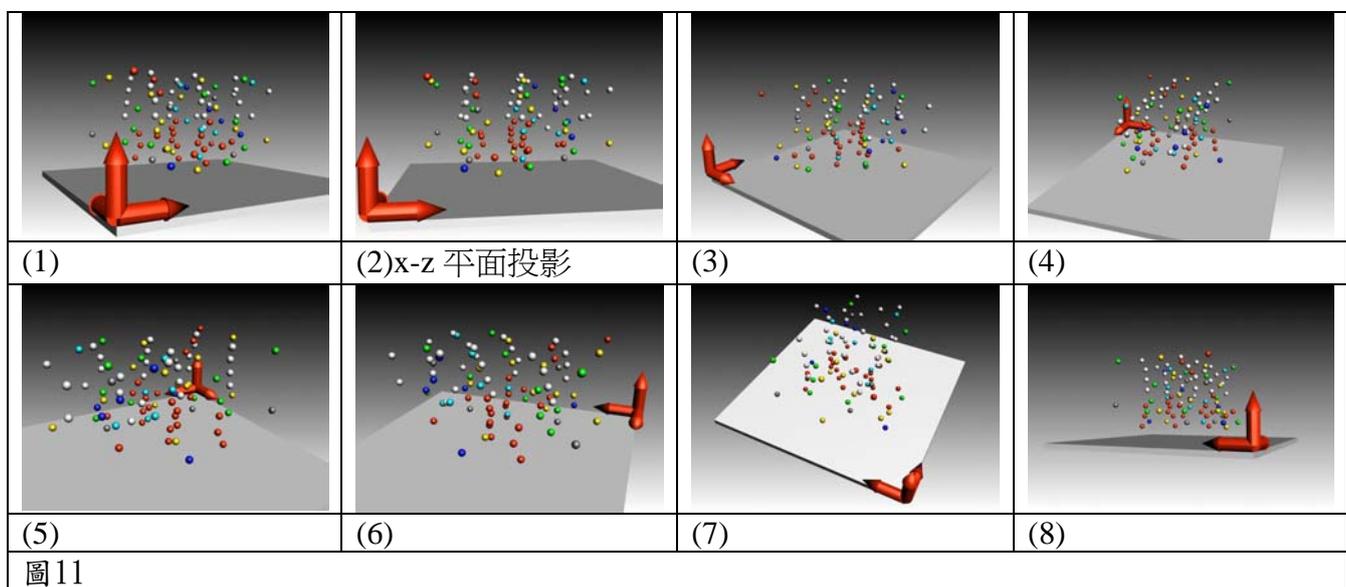
將熱點的座標標示如下：

Z=3[cm]	Z=5.1[cm]	Z=7.2[cm]	Z=9.3[cm]	Z=11.4[cm]	Z=13.5[cm]	Z=15.6[cm]
10,8	10,9	11.5,15	10.5,13.5	10.5,13.5	10.5,15	11.5,17
11,15.5	18.5,9	11.5,23.5	18.5,13.5	18,13.5	18.5,15	19,17
19,24	5,18	19,15	27.5,13.5	25,13.5	25.5,15	27,17
18.5,8,	11,16	18.5,23.5	10,23.5	10.5,24	32.5,15	12,26
19,15.5	19,16	25.5,15	18,23.5	18.5,24	11,24.5	20,24.5
20,29	25.5,16	25,23.5	23.5,23.5	26.5,24	19,24.5	22.5,28.5
25.5,15.5	33,16		32.5,23.5		26.5,24.5	
	10,23.5				32.5,24.5	
	18.5,23.5					

將熱點標示在空間中，如下圖 10。



把實驗三-2 與三-3 所得到的熱點一起標示在空間中，得到下圖 11



- 1、由以上的實驗結果可以得知：微波爐的確有駐波形式存在，但是每個平面上相鄰熱點的間距多為 7~8[cm]，並不是微波的半波長 6.12[cm]。
- 2、微波爐空間似乎不是單純的兩波源駐波形式，除了熱點在 x-z 平面的投影間距略具週期外如圖 11-(2))，y 方向似乎非常的沒有規律，可能還有更多的虛擬波源參與干涉，

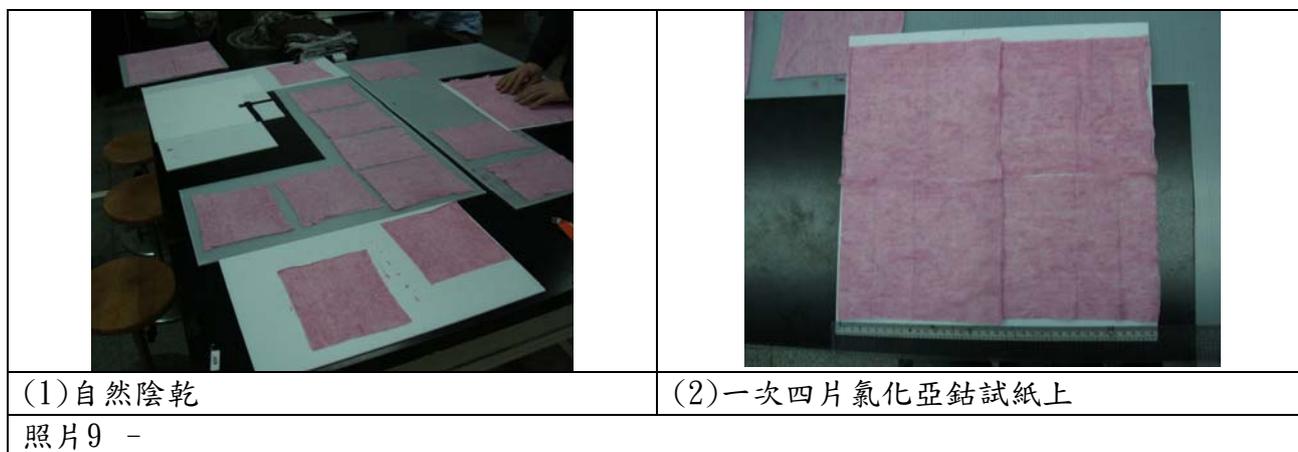
四、用氯化亞鈷試紙微波加熱【實驗四】

氯化亞鈷反應：

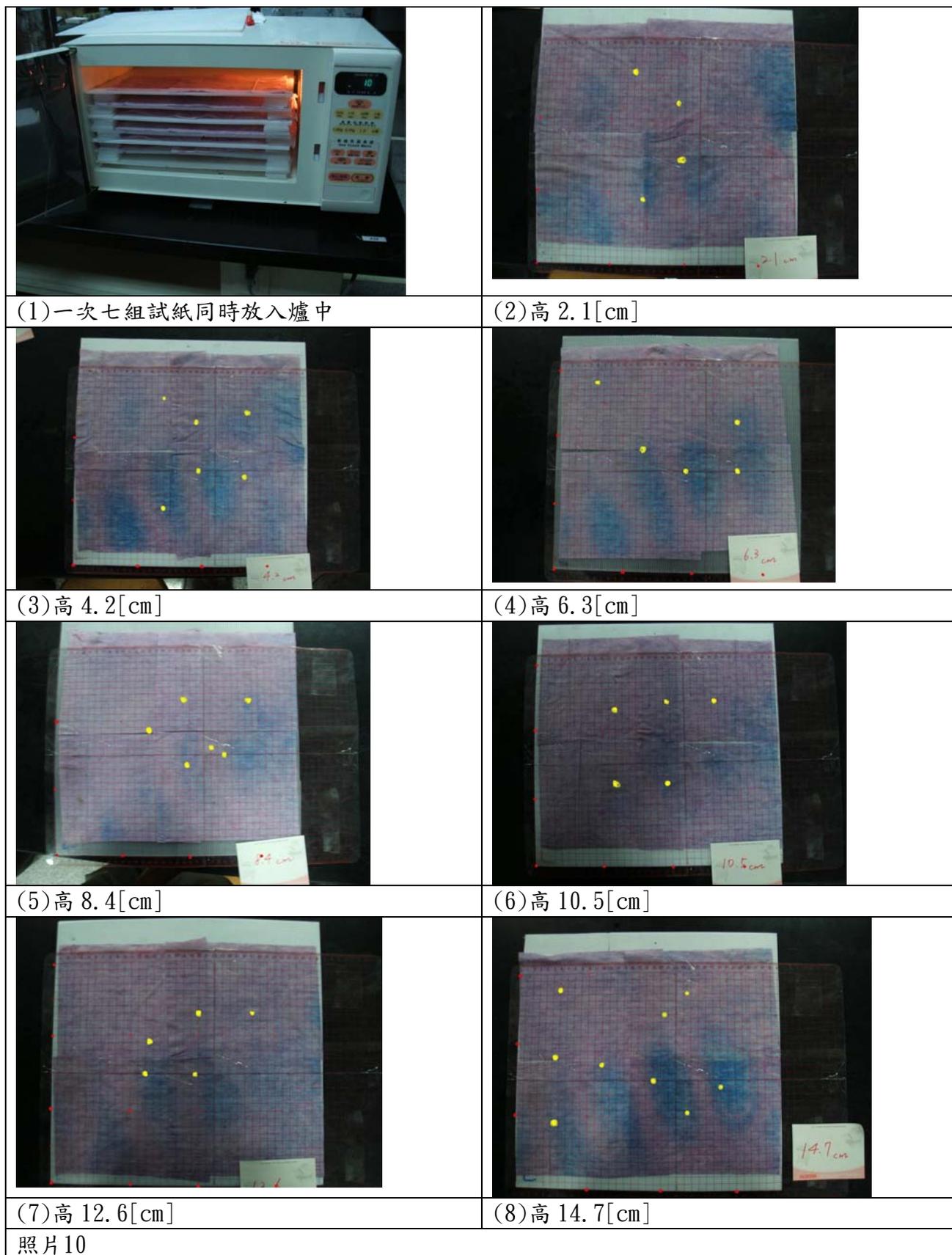


含水的氯化亞鈷在加熱後向右反應，呈現藍色。若將氯化亞鈷的水溶液塗在紙上，便可以做為實驗的試紙使用。紙張材料方面，以 2M 濃度的氯化亞鈷泡入紙巾，並放置在室內自然風乾後的試紙，效果最佳，且微波後不會馬上被潮濕的空氣水合。(如下方照片 9-(1))。

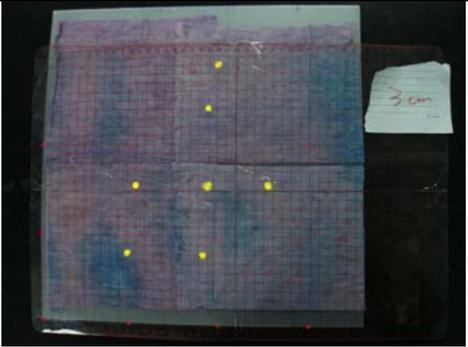
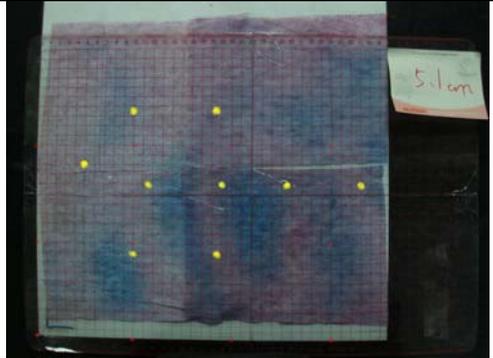
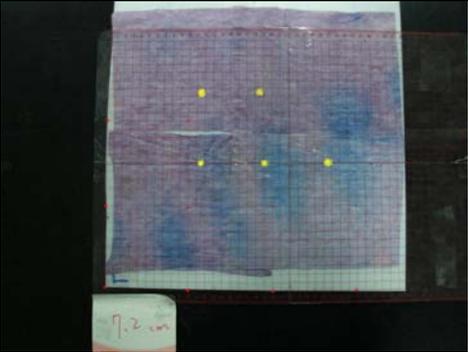
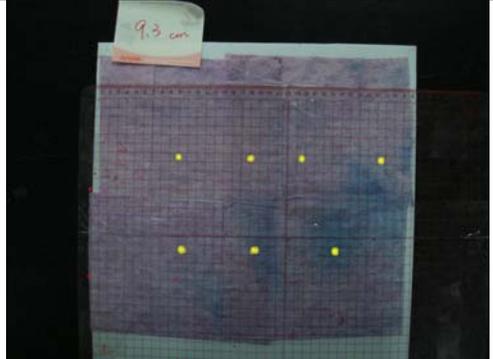
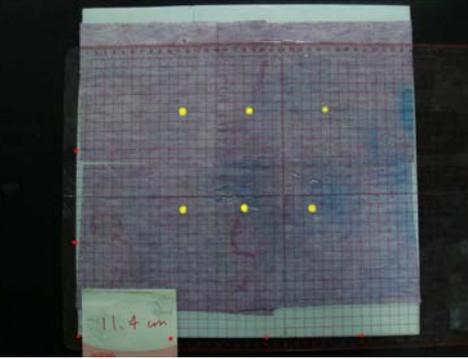
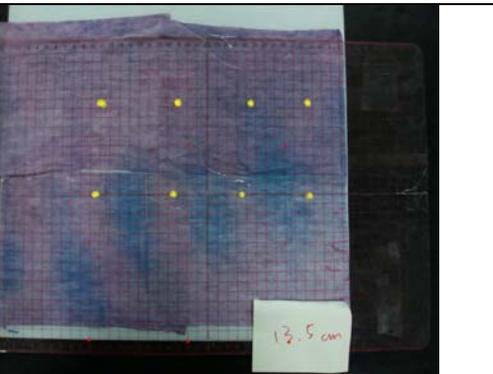
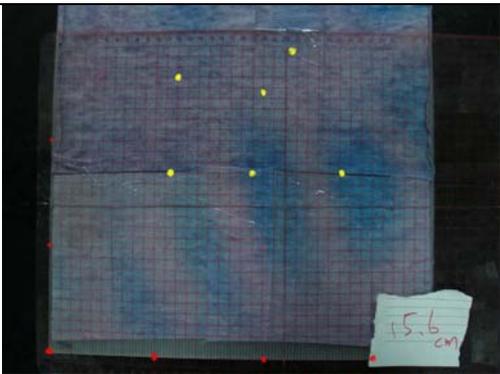
以四片一組在爐中不同高度裡進行微波(如下方照片 9-(2))。微波完的氯化亞鈷試紙，表現出干涉後的波線，以利觀察。



以不同高度同時加熱七片試紙，觀察試紙上的顏色分佈，結果如下照片 10



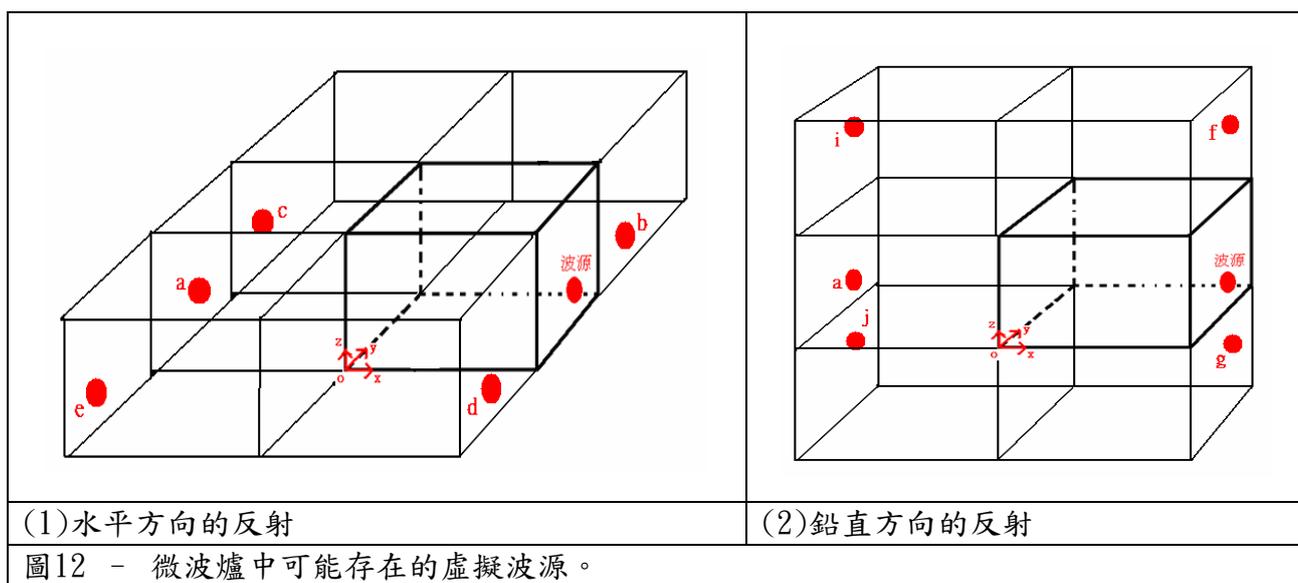
把最底層加高 0.9cm 後，同樣以 2.1[cm]為間距，一次加熱七層試紙，結果如照片 11。

	
(1)底層加高 0.9[cm]	(2)高 3[cm]
	
(3)高 5.1 [cm]	(4)高 7.2[cm]
	
(5)高 9.3 [cm]	(6)高 11.4 [cm]
	
(7)高 13.5[cm]	(8)高 15.6[cm]
照片11 - 底部加高 0.9[cm]後進行加熱	

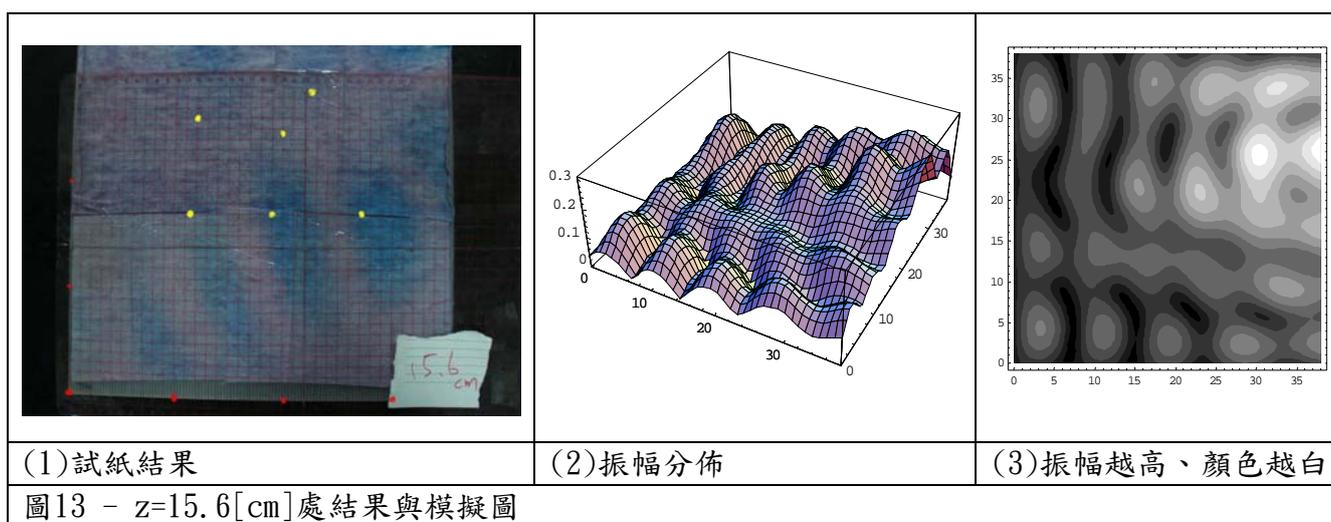
由結果看來：多數氯化亞鈷試紙在下方($y < 20$ [cm])出現波紋狀的藍色條紋，顯示下方的微波顯現較強的干涉現象。但相鄰藍色條紋間的距離，經測量發現仍約為八公分左右，與巧克力的熱點情形相似。

我們將實驗三-2、三-3 中巧克力結果以黃色點標示在氯化亞鈷的結果上（如上方照片 10 與照片 11），發現巧克力的熱點和的氯化亞鈷試紙的藍色波紋都有規律在，都是在 $y-z$ 平面上有著較明顯規律的週期分佈（約為 $8[\text{cm}]$ ）。但是巧克力的熱點無法與氯化亞鈷的藍色條紋完全吻合。巧克力似乎有一向左的偏移量。我們猜測造成這些偏移的原因可能與材質有關：不同的材質對於微波的穿透或反射有著不同的影響。若時間上允許，在未來可以作更深入的探討。

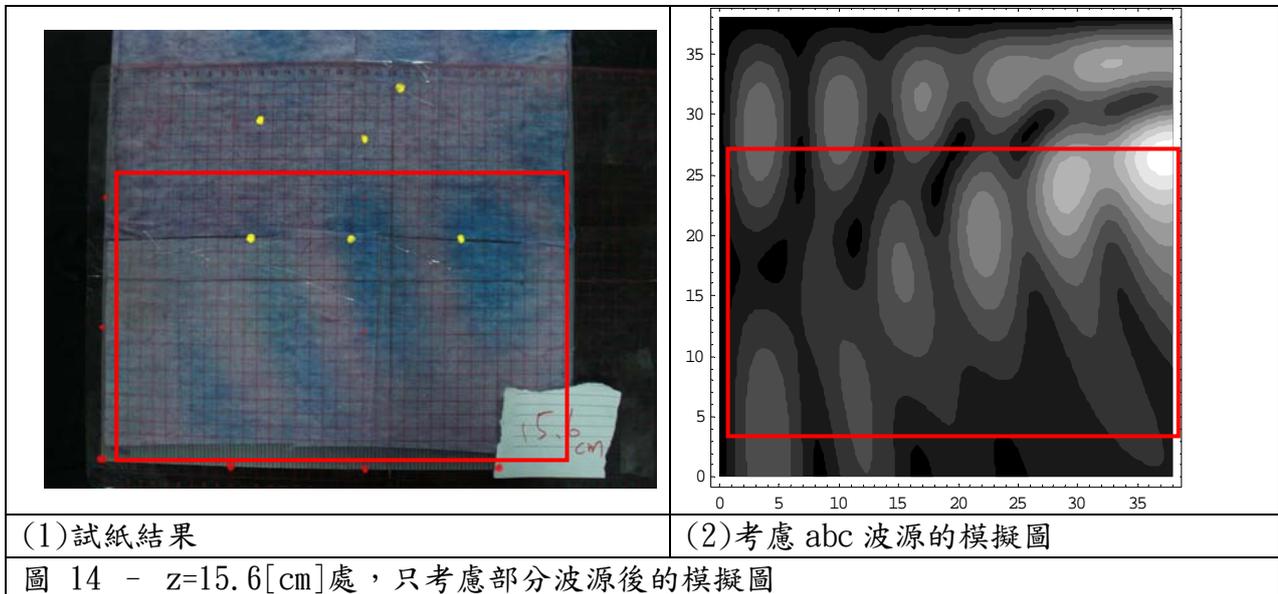
根據觀念四，試圖以 Mathematica 模擬氯化亞鈷試紙的結果。若考慮爐中各反射面造成的虛擬波源(如下圖 12)。點 a 為波源對 $y-z$ 平面的反射波之虛擬波源， d 則為經 $x-z$ 反射的虛擬波源，以此類推。



氯化亞鈷的實驗結果，在不同高度的結果頗為類似，因此我們想模擬在 $z=15.6[\text{cm}]$ 高度處的振幅分佈，考慮所有虛擬反射波源($a\sim j$)。得到如下圖 13：

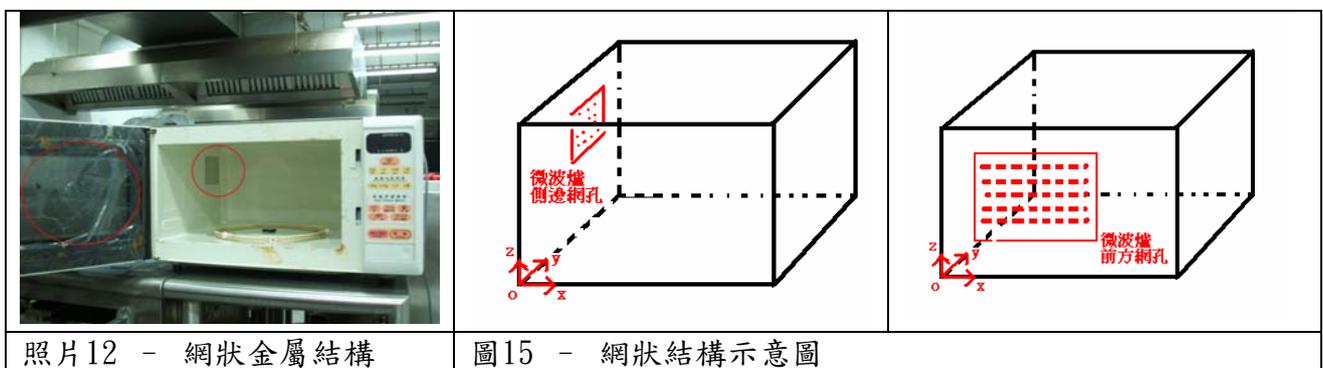


從模擬圖，我們發現這樣的結果與氯化亞鈷不太相符。在圖 13(3)中的熱點呈現散亂的分佈。經過許多嘗試，我們發現若只考慮 a、b、c 的影響，並考慮微波能量隨傳遞距離的平方反比衰減、與微波藉由腔壁反彈後，微波的相位反相後的影響。若考慮微波能量正比於振幅平方，則振幅應隨傳遞距離一次方衰減。因此經過修改後，其結果頗吻合氯化亞鈷的結果（如下圖 14）。



根據模擬結果與氯化亞鈷試紙對照，在靠近腔門前方($y < 25$ [cm])的範圍，兩者有類似的波紋分佈(圖 14紅色匡線內部分)，儘管有些許的偏移，但模擬出來波紋的間距與走勢，和試紙上的結果都頗為相符。至於試紙後方($y > 25$ cm)的部分，需要再微波一陣子以後，才會有受熱的熱點產生，但若加熱時間過長，將使得前方的試紙上全部呈現藍色。

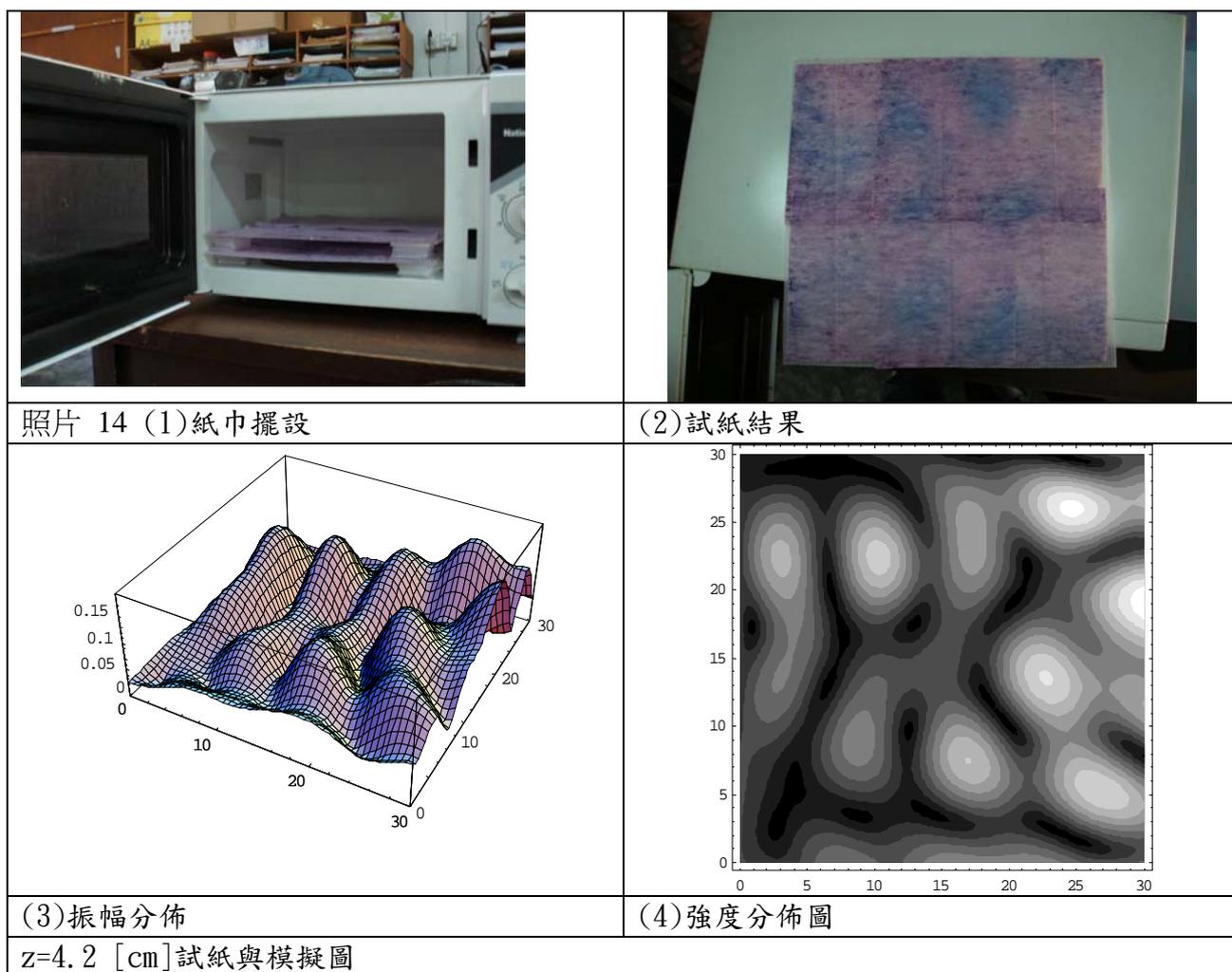
此外，我們發現在微波爐腔壁左後側有一網狀的通風孔(如下照片 12)，若假設網狀的金屬結構會降低微波的反射率，則在爐中後方因為減少反射波的干涉。同時，微波爐的腔門內也貼有網狀的微波阻擋裝置（如下圖 15），若經過腔門的反射波也不多，則可忽略虛擬的反射波源 e 與 d(如前圖 12)。可以符合我們選取的模擬模型。所以，有網子的地方雖然是為了防止微波穿透，但是也降低了微波反射的比例。



爲了驗證我們使用的空腔模擬理論是否具有普遍性，我們再取另一種規格的小台微波爐來做氯化亞鈷試紙微波後顏色的分佈，我們使用的微波爐照片如下照片 13：



此台微波爐的空腔大小爲(30,30,20)[cm](如圖 16)，該波源在微波爐中的座標爲(30,20,8)[cm]，由先前的實驗已知高度對氯化亞鈷的熱線分佈影響並不大，所以我們置入兩片氯化亞鈷試紙做實驗(如照片 14)，並取 (高 4.2)【cm】較清楚的顏色分佈結果做爲理論分析



此台微波爐左方的網狀金屬結構的範圍並不大，故照片 14-(2)在 $y > 20\text{cm}$ 左右的熱線依舊可以顯現。此微波爐(照片 14-(1))與之前我們實驗的微波爐前方金屬網狀結構面積比較後，發現小台微波爐前方的網狀結構所占面積並沒有很大，故推測 d、e 的反射點有些許的作用，並加上 0.5 倍數的振幅強度，模擬的結果更加的吻合，也更能證實網狀結構對微波的反射有不利的影響。

五、共振腔管設計與實驗【實驗五】

我們發現：在爐中微波的干涉形式甚為複雜，根本無法量取熱點的間距而得到半波長，以測得光速。所以，若讓微波在能在一維空間中來回反射，便能以實驗原理的觀念一所言之駐波形式了。

於是我們想到：是否能讓爐中微波在管狀的容器中行進並反射，而在其中形成駐波呢（如右圖 17）？所以我們訂做了金屬管，來測試我們的想法。

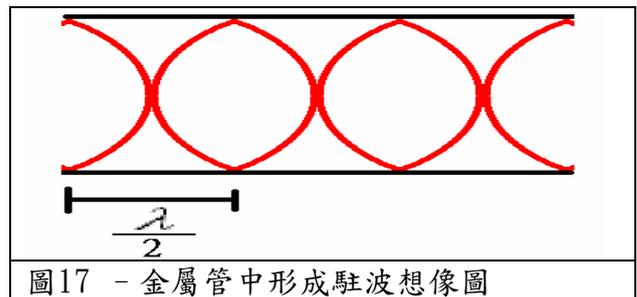
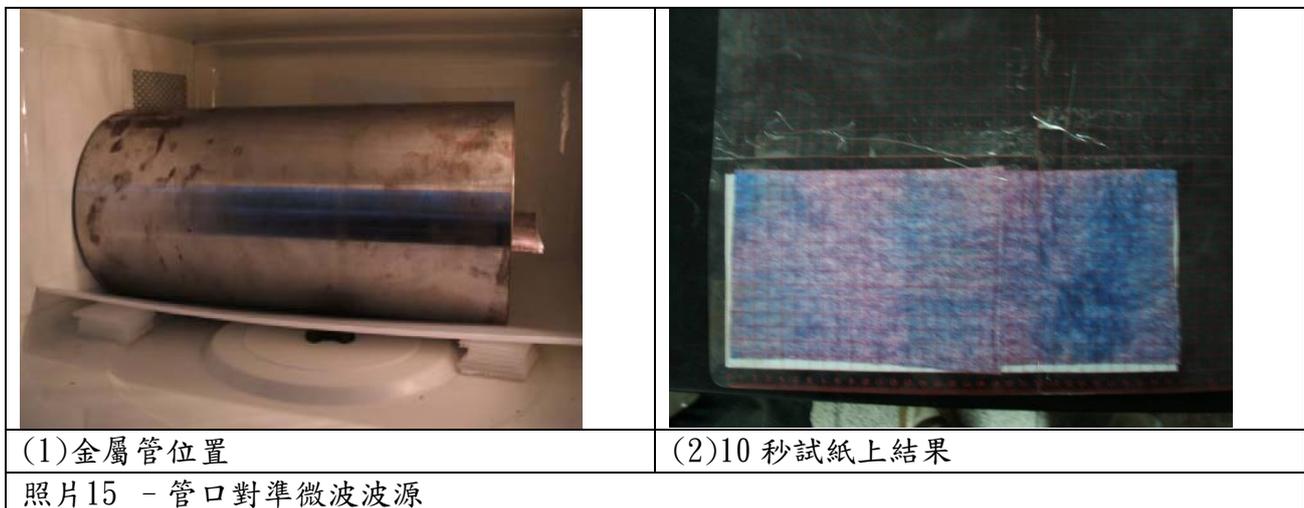


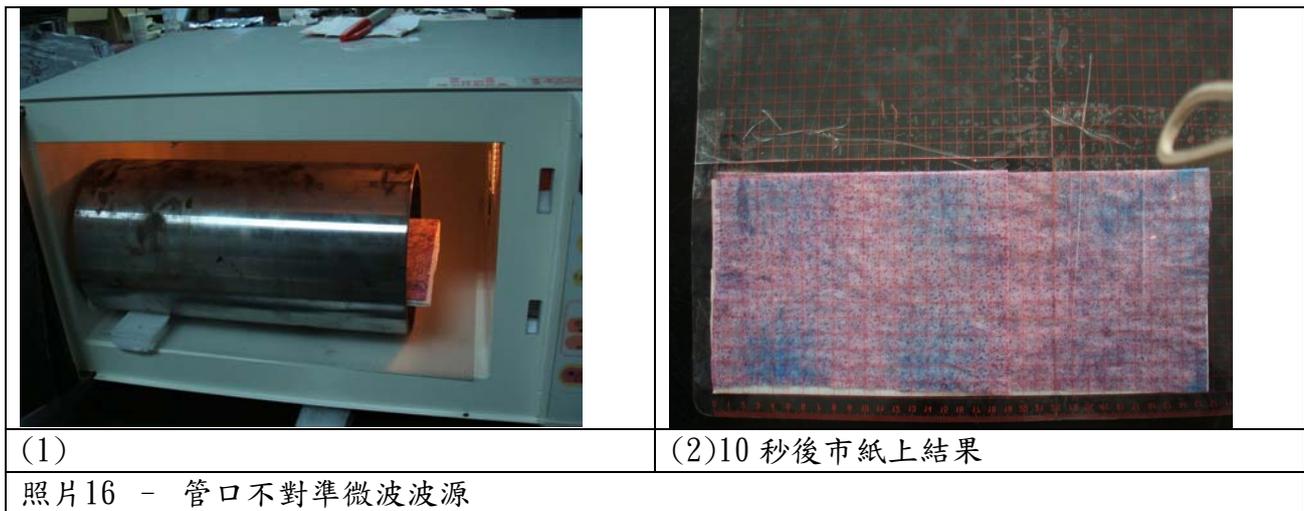
圖17 - 金屬管中形成駐波想像圖

我們以一半徑為 7[cm]，長度為 30[cm]，厚度 0.8[cm]的金屬管，將氯化亞鈷試紙放在瓦楞板上，置入金屬管內部中央的橫切面上。管的左側抵緊微波爐內壁，讓微波可以在左側反射（如下照片 15-1）。微波 10[s]後，得到如照片 15-2 的結果。



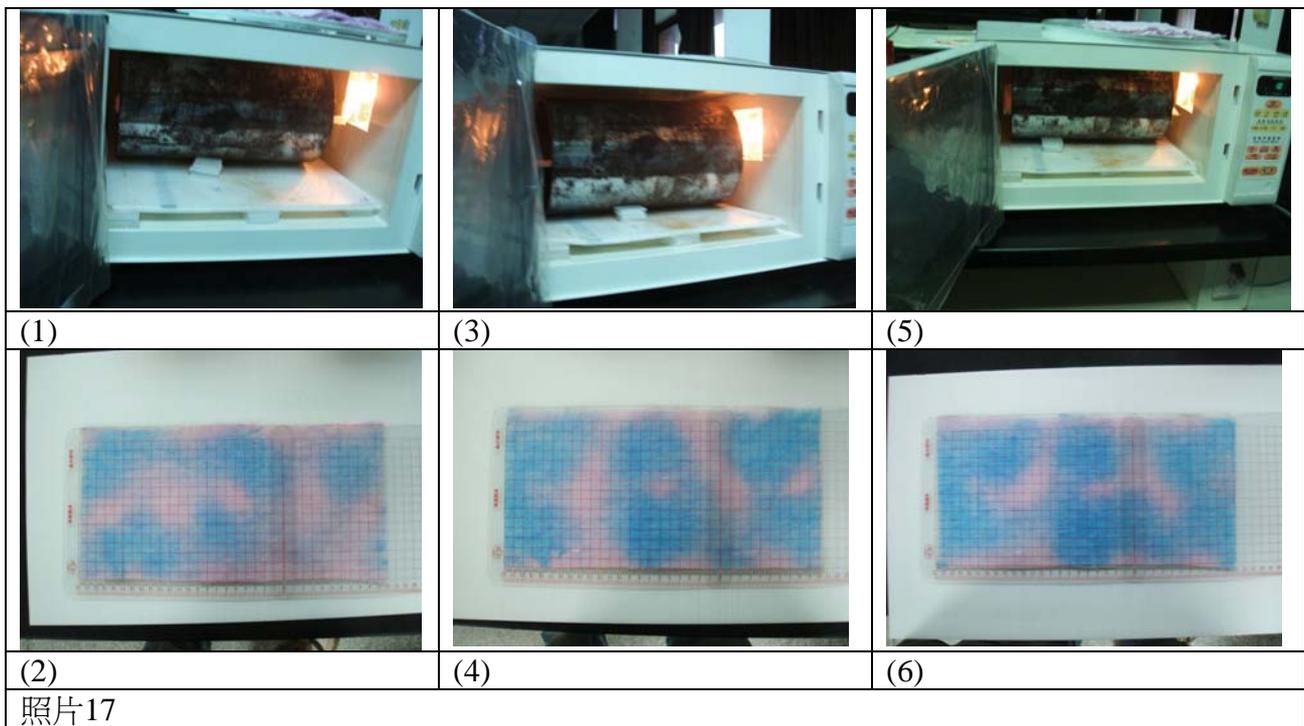
很明顯，氯化亞鈷試紙上產生規律駐波形狀。令人訝異的是：振幅加强的地方分佈在管的兩側。而 x 方向熱點出現的的距離並不是微波的半波長，反而是接近波長(12[cm])左右！

我們嘗試往前平行移動金屬管，以使微波能在內部反射(如下照片 16-1)。微波 10 秒後，得到如照片 16-2 的結果。



同樣地金屬管中央對稱軸處振幅並沒有加強，而駐波在 x 方向的週期性更為明顯，仍為微波波長 12[cm]左右。

再以一直徑為 16.7[cm]，長度為 30[cm]，厚度 0.8[cm]的訂做金屬管，並適當的改變金屬管前後距離，如果擺設位置得當，我們一樣可以得到有規律的熱區域分佈(如照片 17)。



熱點間間距也是接近 12【cm】左右，故開始懷疑金屬管中形成駐波的可能性，於是我們想到，12【cm】左右的熱點間距，會不會是微波在金屬管中多次反射後的干涉結果？

我們若給定一個金屬管入射波源的坐標，然後在金屬管中直徑的平面上假想三次反射以內的反射波源，波源相關位置標記如下圖 18。

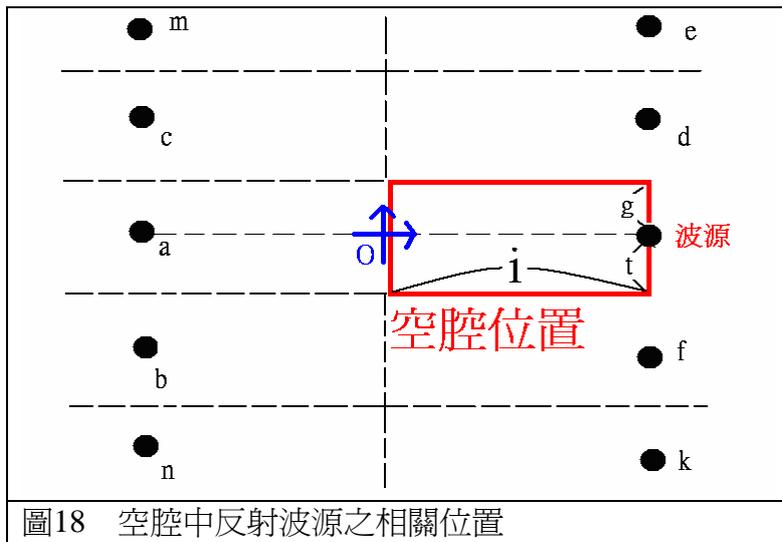


圖18 空腔中反射波源之相關位置

圖中， i 為金屬管空腔長度， $g+t$ 則為金屬管之直徑， o 點則為 $(x, y)=(0, 0)$ 之座標，我們嘗試改變 g 與 t 之數值，發現， g 與 t 在某些數值下，所模擬出振幅加強的位置(如下圖 19)，與我們的訂做金屬管之實驗結果極為吻合(如下照片 18)。

<p>(1)小金屬管模擬 $g=3$ $t=11$ $i=30$</p>	<p>(1)小金屬管結果</p>
<p>(2)大金屬管模擬 $g=3.5$ $t=13.2$ $i=30$</p>	<p>(2)大金屬管結果</p>
<p>圖 20</p>	<p>照片 18</p>

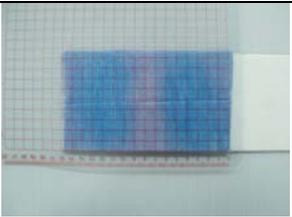
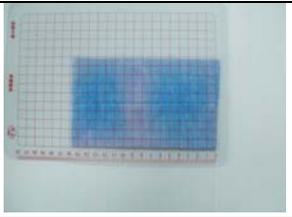
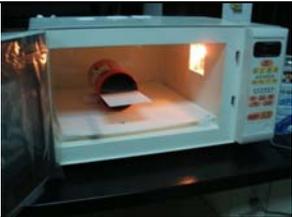
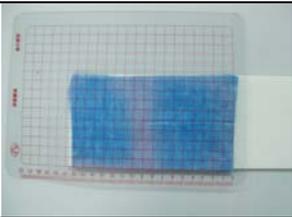
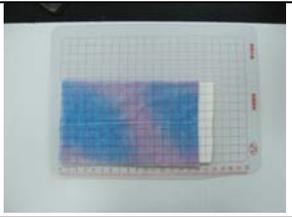
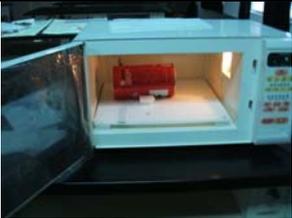
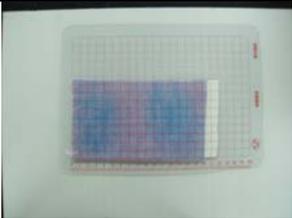
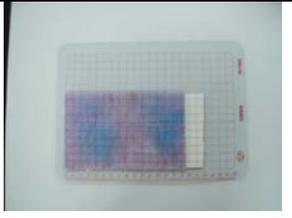
在模擬微波在金屬管中的干涉中，並沒有讓微波的振幅隨著距離衰減，此外，我們可以由實驗結果得知，微波入射波源選定得當(即 g 與 t 之值)，金屬管中可以讓微波反射後的干涉結果具有較高的對稱性，這也是為何我們在實驗中，放置的金屬管必需在特定的位置上，才能看出 12【cm】間距的干涉結果。

接著我們使用平常即可容易取得的小口徑鐵罐做開口處理，以做為不同的微波金屬腔體，我們找到三個大小相異的金屬罐，尺寸如下照片 19所示

		左管：編號【1】 直徑 9.8【cm】、高 18【cm】
		中管：編號【2】 直徑 8.7【cm】、高 11【cm】
		右管：編號【3】 直徑 6.5【cm】、高 10【cm】

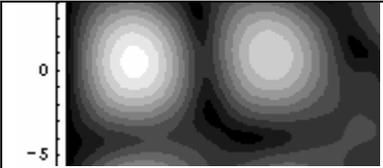
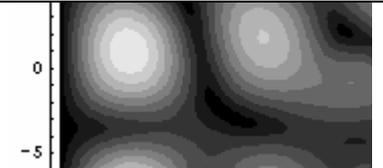
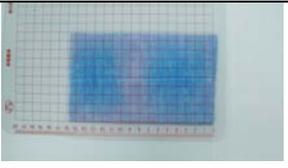
照片19

以下為不同位置使用相同之編號【1】管所微波之對應結果，不難發現同金屬腔管微波的熱點結果大致相似。

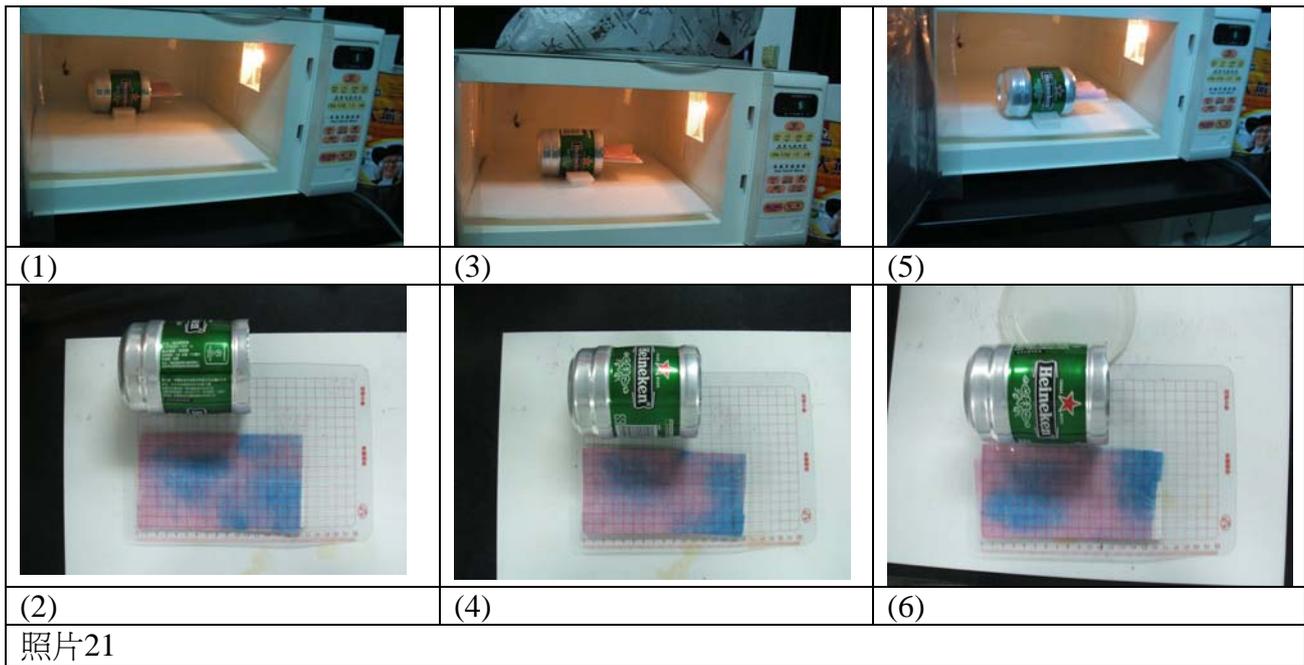
			
(1)		(2)	
			
(3)		(4)	
			
(5)		(6)	

照片20 不同位置加熱情形

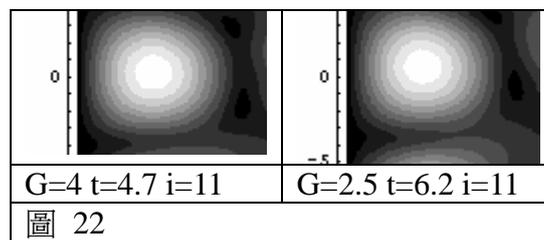
我們把實驗結果拿來比對兩個不同入射波源(改變 g 、 t 參數)之模擬圖，得到如下圖 22

		
(1)模擬圖 1 $g=4$ $t=5.8$ $i=18$	(2)模擬圖 2 $g=3$ $t=6.8$ $i=18$	(3)對照
圖21		照片 20

使用編號【2】管的在不同位置的實驗結果(如下照片 21)。



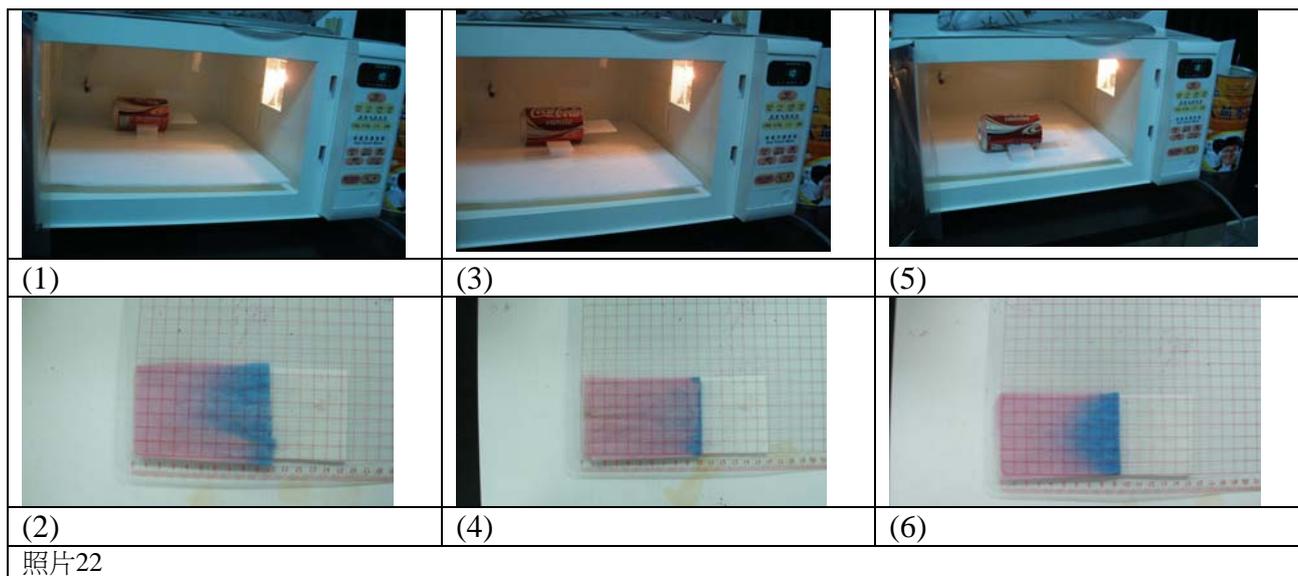
我們嘗試以兩個不同的 g 、 t 參數模擬出熱點分佈情形，(如圖 22)，由上述之實驗照片 21 可以得知，金屬管內的紙巾部分只有一個熱點，與模擬圖中只出現一個熱點的結果大致相符，因此，金屬管擺設位置不同，並不會產生差異極大的干涉結果。



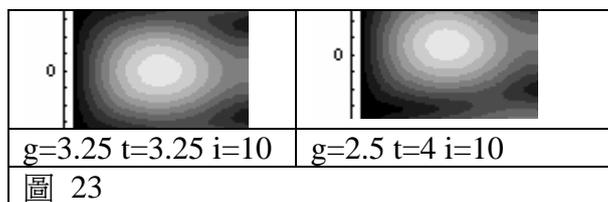
對照實驗結果的照片，做出以下結論：

- 1、不同位置的相同金屬腔體，氯化亞鈷試紙上之振幅較強處位置大致相同。
- 2、金屬管之口徑較小，管口的波源位置不同時，對金屬管中干涉結果造成的變化較小。

我們使用編號【3】管，來做金屬管中之干涉情形探討。



實驗結果(如照片 22)中，編號【3】管之金屬內部並無熱點的產生，只受到開口處微波加熱的影響，與模擬結果(如下圖 23)極為不符。我們嘗試增加加熱的時間，編號【3】管中的氯化亞鈷試紙依舊無任何的熱點產生。因此我們猜想是否因為管口直徑小於波長太多，導致只有管口的試紙出現些微的受熱反應；抑或是有其它原因導致微波無法到達半徑較小的金屬管內部，也許需要繼續探索。



柒、結論

- 一、微波爐加熱腔內的干涉形式，相鄰兩熱點或熱線間的距離並非半波長，故不宜直接以其距離做為依據來計算光速的大小。
- 二、微波爐內的微波由於在腔壁間來回反射，所形成干涉之最大振幅處是以點的方式散落呈現，不像在課本中探討的兩個水波源之干涉結果所形成之雙曲線，而應考慮多個點波源在空間中的干涉情形，較符合實驗的結果。
- 三、比較起微波爐的金屬內壁，網狀腔壁對微波的反射效果不佳。
- 四、以管狀的金屬腔體，能得到較簡單的干涉形式，與較高的對稱形式。若選定適當的波源位置(即 g 、 t 之值)，就可以模擬出與實驗相符合的干涉條紋。
- 五、微波的強度在金屬管中傳遞不容易衰減。

捌、未來展望

- 一、巧克力之熱點無法與氯化亞鈷熱點中央完全符合，並有一向左的偏移量，故不同的材質應該會影響干涉結果的偏移量。可再探討不同材料對微波穿透吸收或反射的影響，以及其如何影響微波在爐中的干涉形式。
- 二、可深入探討不同金屬板或網狀金屬對微波的反射情形探討。
- 三、探討微波在其它形式金屬空腔中所形成的干涉，模擬出不同空腔中的干涉結果。
- 四、共振腔管中的間距約為一個微波波長(12.24cm)，與理論所推的微波形成駐波腹點的半波長(6.12cm)相差兩倍，是巧合還是另有依據，值得再深入分析。
- 五、口徑較小的金屬管擺設在不同的位置上，熱點較容易有一致性，較不受入射波源位置的影響。但是口徑過小的金屬管，微波無法進入金屬管內，使之產生熱點，值得探討。

玖、參考資料

- 一、物理教學示範實驗教室網站
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=7871>
- 二、TAIPEI TIMES Sunday science Sunday, Aug 26, 2007, Page 14
- 三、《微波與微波爐》，香港科技大學物理系，吳大琪教授、陳志華先生。
- 四、**The Magnetron Tube Structure and Operation** —磁電管—
<http://www.gallawa.com/microtech/magnetron.html>
- 五、《物質科學物理篇下冊》，康熙圖書，陳文典等人主編。
- 六、《物理下冊》，康熙圖書，陳文典等人主編。

拾、附註

一、大台微波爐指令碼

h=15.6 a=1 b=1 c=1 d=0 e=0 f=0 g=0 i=0 j=0 p=3.14

ContourPlot[

$$\sqrt{\left(\left(\cos\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x+38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right] + p\right) * \frac{a}{\sqrt{(x+38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}} + \cos\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x-38)^2 + (y-51.5)^2 + (h-9.5)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right] + p\right) * \frac{b}{\sqrt{(x-38)^2 + (y-51.5)^2 + (h-9.5)^2}} + \cos\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x+38)^2 + (y-51.5)^2 + (h-9.5)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right]\right) * \frac{c}{\sqrt{(x+38)^2 + (y-51.5)^2 + (h-9.5)^2}} + \cos\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x-38)^2 + (y+24.5)^2 + (h-9.5)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right] + p\right) * \frac{d}{\sqrt{(x-38)^2 + (y+24.5)^2 + (h-9.5)^2}} + \cos\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x+38)^2 + (y+24.5)^2 + (h-9.5)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right)\right] * \frac{e}{\sqrt{(x+38)^2 + (y+24.5)^2 + (h-9.5)^2}} + \cos\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (30.5-h)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right] + p\right) * \frac{f}{\sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (30.5-h)^2}} + \cos\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (30.5-h)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right] + p\right) * \frac{g}{\sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (30.5-h)^2}} + \cos\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x+38)^2 + (y-24.5)^2 + (30.5-h)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right)\right] * \frac{i}{\sqrt{(x+38)^2 + (y-24.5)^2 + (30.5-h)^2}} + \cos\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x+38)^2 + (y-24.5)^2 + (h+9.5)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right)\right] * \frac{j}{\sqrt{(x+38)^2 + (y-24.5)^2 + (h+9.5)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2 + 0.1}}\right)^2 +$$

$$\left(\sin\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x+38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right] + p\right) * \frac{a}{\sqrt{(x+38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}} + \sin\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x-38)^2 + (y-51.5)^2 + (h-9.5)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right] + p\right) * \frac{b}{\sqrt{(x-38)^2 + (y-51.5)^2 + (h-9.5)^2}} + \sin\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x+38)^2 + (y-51.5)^2 + (h-9.5)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right)\right] * \frac{c}{\sqrt{(x+38)^2 + (y-51.5)^2 + (h-9.5)^2}} + \sin\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x-38)^2 + (y+24.5)^2 + (h-9.5)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right] + p\right) * \frac{d}{\sqrt{(x-38)^2 + (y+24.5)^2 + (h-9.5)^2}} + \sin\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x+38)^2 + (y+24.5)^2 + (h-9.5)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right)\right] * \frac{e}{\sqrt{(x+38)^2 + (y+24.5)^2 + (h-9.5)^2}} + \sin\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (30.5-h)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right] + p\right) * \frac{f}{\sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (30.5-h)^2}} + \sin\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (30.5-h)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right] + p\right) * \frac{g}{\sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (30.5-h)^2}} + \sin\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x+38)^2 + (y-24.5)^2 + (30.5-h)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right)\right] * \frac{i}{\sqrt{(x+38)^2 + (y-24.5)^2 + (30.5-h)^2}} + \sin\left[\left(\frac{2*\pi}{12.4} * \left(\sqrt{(x+38)^2 + (y-24.5)^2 + (h+9.5)^2} - \sqrt{(x-38)^2 + (y-24.5)^2 + (h-9.5)^2}\right)\right)\right] * \frac{j}{\sqrt{(x+38)^2 + (y-24.5)^2 + (h+9.5)^2}}\right)^2,$$

{x, 0, 38}, {y, 0, 38}, ContourLines -> False, PlotPoints -> 100];

二、小台微波爐指令碼

h=4.2 a=1 b=1 c=1 d=0.5 e=0.5 f=0 g=0 i=0 j=0 p=3.14

DensityPlot[

$$\sqrt{\left(\left(\cos\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x+30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right]+p\right)\star\frac{a}{\sqrt{(x+30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}}+\right.\right. \\ \cos\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x-30)^2+(y-40)^2+(h-8)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right]+p\right)\star\frac{b}{\sqrt{(x-30)^2+(y-40)^2+(h-8)^2}}+ \\ \cos\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x+30)^2+(y-40)^2+(h-8)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)\right]\star\frac{c}{\sqrt{(x+30)^2+(y-40)^2+(h-8)^2}}+ \\ \cos\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x-30)^2+(y+20)^2+(h-8)^2}-\sqrt{(x-38)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)+p\right]\star\frac{d}{\sqrt{(x-30)^2+(y+20)^2+(h-8)^2}}+ \\ \cos\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x+30)^2+(y+20)^2+(h-8)^2}-\sqrt{(x-38)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)+p\right]\star\frac{e}{\sqrt{(x+30)^2+(y+20)^2+(h-8)^2}}+ \\ \cos\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(32-h)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)+p\right]\star\frac{f}{\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(32-h)^2}}+ \\ \cos\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(32-h)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)+p\right]\star\frac{g}{\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(32-h)^2}}+ \\ \cos\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x+30)^2+(y-20)^2+(32-h)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)\right]\star\frac{i}{\sqrt{(x+30)^2+(y-20)^2+(32-h)^2}}+ \\ \cos\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x+30)^2+(y-20)^2+(h+8)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)\right]\star\frac{j}{\sqrt{(x+30)^2+(y-20)^2+(h+8)^2}}+ \\ \left.\frac{1}{\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2+5}}\right)^2,$$

$$\left(\sin\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x+30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)+p\right]\star\frac{a}{\sqrt{(x+30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}}+\right. \\ \sin\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x-30)^2+(y-40)^2+(h-8)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)+p\right]\star\frac{b}{\sqrt{(x-30)^2+(y-40)^2+(h-8)^2}}+ \\ \sin\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x+30)^2+(y-40)^2+(h-8)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)\right]\star\frac{c}{\sqrt{(x+30)^2+(y-40)^2+(h-8)^2}}+ \\ \sin\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x-30)^2+(y+20)^2+(h-8)^2}-\sqrt{(x-38)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)+p\right]\star\frac{d}{\sqrt{(x-30)^2+(y+20)^2+(h-8)^2}}+ \\ \sin\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x+30)^2+(y+20)^2+(h-8)^2}-\sqrt{(x-38)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)+p\right]\star\frac{e}{\sqrt{(x+30)^2+(y+20)^2+(h-8)^2}}+ \\ \sin\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(32-h)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)+p\right]\star\frac{f}{\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(32-h)^2}}+ \\ \sin\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(32-h)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)+p\right]\star\frac{g}{\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(32-h)^2}}+ \\ \sin\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x+30)^2+(y-20)^2+(32-h)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)\right]\star\frac{i}{\sqrt{(x+30)^2+(y-20)^2+(32-h)^2}}+ \\ \left.\sin\left[\left(2\pi\div 12.4\star\left(\sqrt{(x+30)^2+(y-20)^2+(h+8)^2}-\sqrt{(x-30)^2+(y-20)^2+(h-8)^2}\right)\right)\right]\star\frac{j}{\sqrt{(x+30)^2+(y-20)^2+(h+8)^2}}\right)^2,$$

{x, 0, 30}, {y, 0, 30}, PlotPoints -> 50];

三、金屬管的指令碼

```

DensityPlot[
  Sqrt[{{Cos[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x+i)^2 + (y)^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2]) + p] * a +
    Cos[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x+i)^2 + (y+2*t)^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} * b +
    Cos[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x+i)^2 + (y-2*g)^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} * c +
    Cos[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x-i)^2 + (y-2*g)^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} + p] * d +
    Cos[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x-i)^2 + (y-2*(g+t))^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} * e +
    Cos[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x-i)^2 + (y+2*t)^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} + p] * f +
    Cos[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x-i)^2 + (y+2*(g+t))^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} * k +
    Cos[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x+i)^2 + (y+2*(g+t))^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} + p] * m +
    Cos[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x+i)^2 + (y-2*(g+t))^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} + p] * n + 1}^2 +
  {Sin[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x+i)^2 + (y)^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} + p] * a +
    Sin[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x+i)^2 + (y+2*t)^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} * b +
    Sin[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x+i)^2 + (y-2*g)^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} * c +
    Sin[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x-i)^2 + (y-2*g)^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} + p] * d +
    Sin[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x-i)^2 + (y-2*(g+t))^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} * e +
    Sin[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x-i)^2 + (y+2*t)^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} + p] * f +
    Sin[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x-i)^2 + (y+2*(g+t))^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} * k +
    Sin[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x+i)^2 + (y-2*(g+t))^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} + p] * n +
    Sin[2 * Pi / 12.4 * (Sqrt[(x+i)^2 + (y+2*(g+t))^2 + (h)^2] - Sqrt[(x-i)^2 + (y)^2 + (h)^2])]} + p] * m}^2, {x, 0, 30}, {y, -15, 15},
  PlotPoints -> 70];

```

【評語】 040117

本作品利用微波爐量測光速，能以多種實驗結構來改變實驗參數，並證實以微波爐量測光速時之干涉波紋並非微波之半波長。在實驗設計上有創意性的設計，並獲得具體結論。