

臺灣二〇〇八年國際科學展覽會

科 別：物理與太空科學

作品名稱：探討聲致發光效應中，改變溫度，濃度，液體種類，頻率對氣泡發光的影響及雙泡發光的分析

得獎獎項：佳作

學校 / 作者：臺北市立建國高級中學
臺北市立建國高級中學

許承郁
顏齊賢

目錄

作者簡介	3
中文摘要	4
英文摘要	4
壹、 研究動機	5
貳、 文獻探討	5
參、 研究目的	6
肆、 研究過程與方法	7
伍、 研究結果討論.....	13
陸、 結論.....	23
柒、 未來展望.....	24
捌、 參考文獻.....	24

作者簡介



顏齊賢 & 許承郁

我們是顏齊賢&許承郁，從原本只會玩蟲蟲對打，到現在卻愛上了科學研究，全是因為投入了這趟不平凡的旅程！因為整個研究過程就好像一部偵探小說，而我們就是身歷其境的主角，可以不斷激發腦力思考並且做有趣的實驗，當想法獲得證實時，那種愉悅總是令我們高興好多天，而當研究碰到瓶頸時，更可以在與同學和長輩們的討論下，讓自己了解更多、習得更多經驗。每次做專題都不是輕鬆的，但我們樂於將自己的時間付出在熱愛的活動中。同時我們也都感謝同組好 partner 以及指導我們的老師，這次參展的經驗，將是我們揮灑年輕汗水的美麗記憶！

摘要

聲致發光效應(sonoluminescence)為最近二十年來相當新穎的研究領域，其基本原理是利用超聲波將水中的氣泡集中，並使之隨著超聲波快速且連續的膨脹壓縮，當氣泡被壓縮至最小時溫度急遽上升，並放出藍白色的光芒。

正因為這是一個嶄新的領域，所以許多實驗是以嘗試錯誤的方法去進行，但也因此發現了一些特殊的現象：

1. 氣泡在正常的頻率(30kHz)以外，經過一段不可發光的頻率後，還可在更高頻率(接近40kHz)的地方發光
2. 氣泡發光效率曲線在不同性質溶液中的差異
3. 針對高頻率發光及雙泡發光的部分，做了兩個相關的假設並進一步驗證，得到了相當特別的結論。

至今已有許多關於此研究的成果發表，但對於同時兩顆氣泡存在並發光的雙泡發光現象(double-bubble sonoluminescence)卻還很少人研究。因此我們嘗試較系統化地分析雙泡發光，期望能夠對這個現象有進一步的認識，並對日後的多泡發光(multi-bubble sonoluminescence)研究奠定基礎。

Abstract

Sonoluminescence has been a very popular topic for the past twenty years. Single-bubble sonoluminescence occurs when an acoustically trapped and periodically driven gas bubble collapses so strongly that the energy focusing on collapse leads to light emission.

Because it is a new topic, few related experiments on this issue have been carried out before. However, while doing the research and making adjustments at the same time we discovered some special phenomenon:

1. Besides the normal amplitude frequency (30kHz) added on the bubble, we found that after a period of frequency which can not emit, the bubble is able to remain and emit in higher amplitude frequency (about 40 kHz).
2. We also compared the emission efficiency when bubbles are in different liquids.
3. To explain part of the results in high frequency and double-bubble sonoluminescence, we made two assumptions and attempted to demonstrated them in the end of the report.

Some research studies in this field have been released already; nevertheless, few people concentrate on “double-bubble sonoluminescence.” Therefore, we attempt to systematically analyze the emission of double-bubble, expecting to have more comprehension of this marvelous effect and also establish the fundamental background to “multi-bubble sonoluminescence.”

壹、研究動機

最初是在一個科普網站上，發現有人宣稱在單泡發光的中成功地產生了核融合反應，只需用普通的水和氣泡就可以將聲能轉換成光能，這驚人成果除了令我們無比興奮外，也激起了投入此項研究的熱情。於是我們開始對它更進一步了解，並發現了一些問題，在好奇心的驅使下開始著手研究。

貳、文獻探討

一、聲致發光效應(sonoluminescence)

先介紹一個簡單的物理觀念：若快速地壓縮一物質，因為壓縮過程中外力做功轉化為熱能，此一被壓縮的物溫度會上升。

同樣的，當我們製造超聲波向一球狀的水體中心傳，讓泡泡聚集在壓力最小處(球心附近)時，由於壓力波是一個正弦波，泡泡會在受到負壓力時會膨脹至半徑約數十微米，而當負壓力轉為正壓力時，泡泡半徑會在極短的時間內塌縮至差不多最大時的100分之一倍，體積被壓縮至100萬分之一倍，因此溫度急遽上升，在泡泡中心產生高達 10^4 K，同時看到泡泡發出淡藍色的光，雖然一次發光只在約三萬分之一秒內完成，但肉眼看起來就是一顆持續發光的泡泡，這就是聲致發光效應的過程。

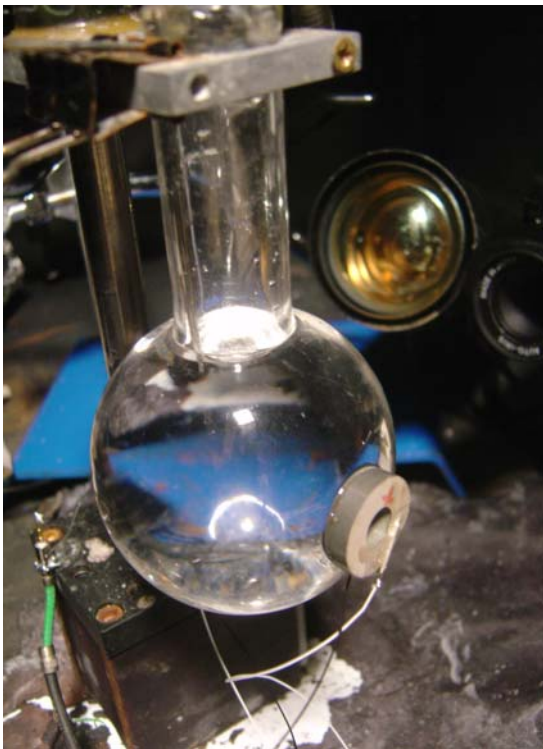


圖 2-1：實驗使用的石英瓶

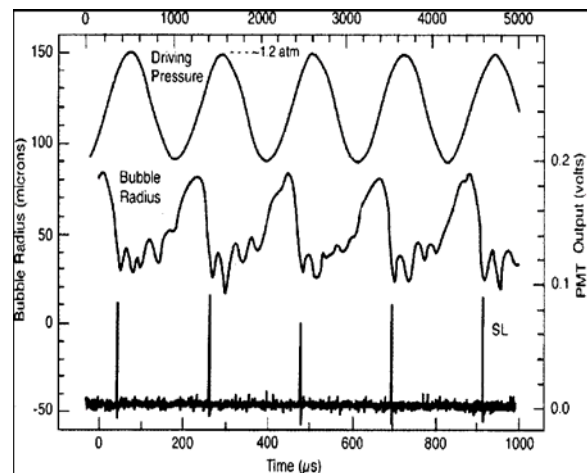


圖 2-2：最上方的曲線為泡泡所受到的壓力，中間代表泡泡的直徑，最下方顯示泡泡發光的時間。由圖中可看出，當氣泡在無發承受壓力而塌縮時發光。

二、背景

聲致發光效應是源於一個很早就被造船工人所發現的現象：當船在快速行進後，螺旋槳常會出現像是被炸開的小洞。後來有科學家指出，當船在快速行進時，原本溶在水中的氣體，會在螺旋槳快速旋轉經過的地方產生大量的泡泡，然而當螺旋槳離開後，這些泡泡又會產生強烈的收縮(崩潰)，而吸附在螺旋槳上的泡泡，在崩潰時所釋放的能量將造成許多小洞，這就是所謂的空蝕現象(cavitation)。

此後，許多科學家嘗試在實驗室中建立此模型以進行研究，但大部分的情況只能產生一群隨機移動、難以控制的泡泡，當時也曾觀察到發光現象，但多數人認為那是泡泡在容器中碰撞摩擦所產生類似摩擦發光的現象，而未加以注意。直到1989年 Felipe Gaitan 與 Larry Crum 成功地將一顆泡泡穩定的懸浮在瓶中發光(SBSL, single-bubble sonoluminescence)，才證實了它並非因摩擦而發光，且自此提供了一套能夠系統化研究聲致發光效應的途徑。至今，不少關於單泡發光的性質已被研究詳盡，然而對於穩定的雙泡(DBSL, double-bubble sonoluminescence)與多泡發光(MBSL, multi-bubble sonoluminescence)還有許多尚未被研究的課題，值得我們去探討。

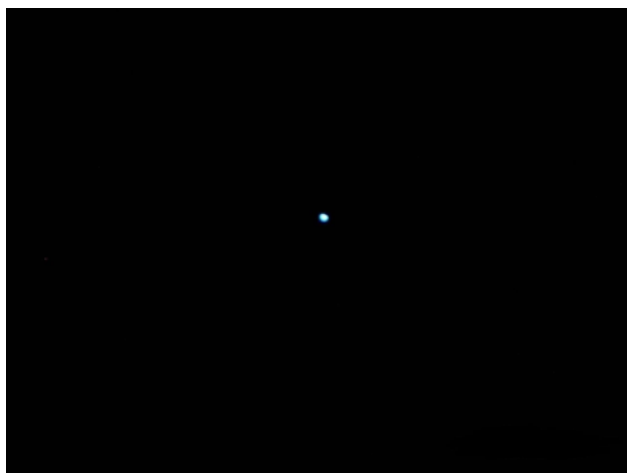


圖 2-3：石英瓶中正在發光的氣泡。






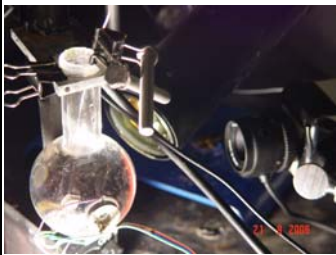

圖 2-4：CCD 中觀察的多泡發光
(multi-bubble sonoluminescence)

參、研究目的

- 一、了解不同溫度對於強酸溶液中單泡發光性質的影響
- 二、了解不同濃度溶液對於單泡發光性質的影響
- 三、比較氣泡在強酸、強鹼、鹽類及純水中發光性質的差異
- 四、探討H₂O在高頻率時的發光現象
- 五、探討雙泡發光時的相關性質

肆、研究過程與方法

一、研究設備與器材

名稱	圖片	功能	備註
打氣用橡膠球		打氣以製造泡泡	
函數信號產生器		用以產生穩定弦波訊號	配合power suppliers 和放大器，提供高電壓 (~300 volt) 低電流 (~0.05 A) 以驅動壓電晶體
光電倍增管		偵測聲致發光現象的光強度，能譜等重要物理量	為一極靈敏的光探測器，具高時間解析度 (~nanosecond), 可偵測僅數個光子的訊號，為高能物理的基本工具之一
壓電晶體及圓底石英瓶		壓電晶體用以產生壓縮氣泡所需的超音波. 石英瓶可有效降低光在穿越瓶壁時的吸收	
電感		用以調整電流及電壓的相位差	正常情況時以不調整電感為優先

<p>CCD與顯示器</p>		<p>將恆溫箱中的影像送至外面並放大，以觀察泡泡目前的狀況。</p>	<p>上圖中，左側為光電倍增管右側為CCD。</p>
<p>快速類比-數位轉換器 FADC(Flash Analog to Digital Converter)</p>		<p>擷取光電倍增管的訊號.</p>	<p>取數速率： 150event/sec 品質： 2560 points/event 為出口管制的高級快電子學產品</p>
<p>FAN-IN/OUT</p>		<p>快速的精光電館的訊號複製為多個，分別傳送致FADC、discriminator、示波器…等作為不同用途</p>	
<p>真空抽氣機</p>		<p>利用拉午耳定律，抽器使我們水溶液中的含氣量減少。</p>	

二、實驗裝置示意圖

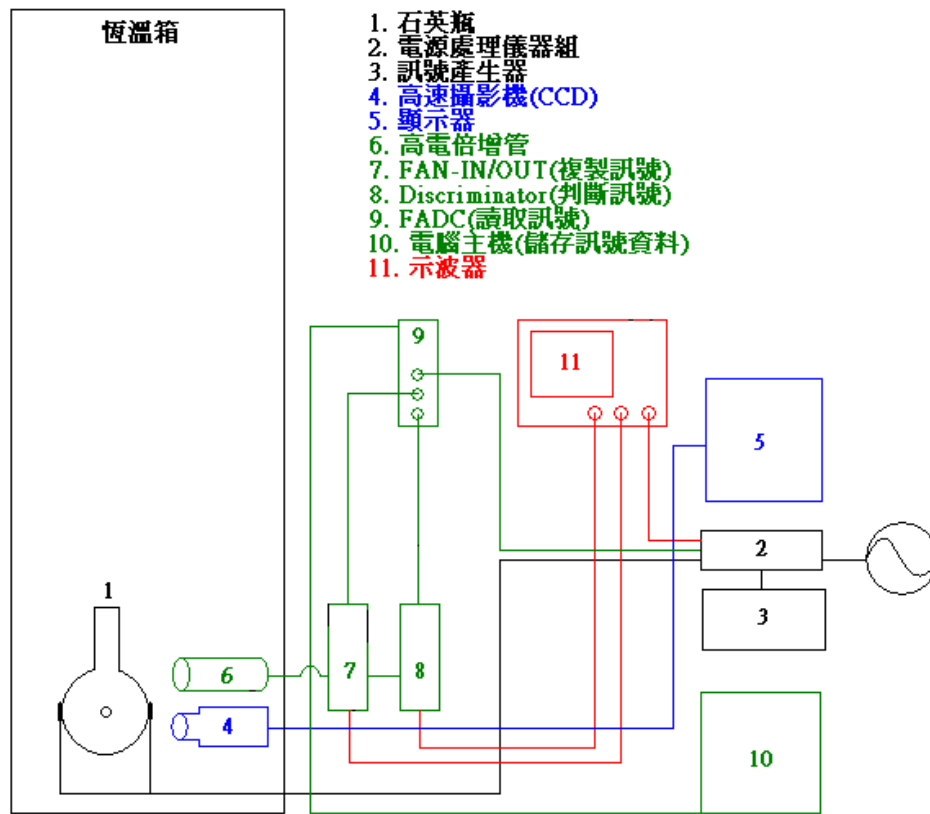


圖 4-1：實驗裝置示意圖



圖 4-2：實際的驗室照片

三、實驗流程

(一) 液體的處理

- 1.配置所需溶液約200ml於一大燒杯內。
- 2.將磁石攪拌子放入燒杯並用CD片蓋住，防止抽氣攪拌時有溶液濺出同時又可與外界空氣接觸。
- 3.放入抽氣箱內並將顯示器調為760torr，開始抽氣並同時啓動磁石攪拌機攪拌，一直到30或6torr(視實驗需要)再將攪拌子及抽氣機關掉。

(二) 產生聲致發光效應

- 1.將處理好的溶液倒入底部為球形容積100ml的石英瓶，石英瓶固定在恆溫箱內，溫度設定在6~8°C，同時用電子溫度計測量瓶內溶液實際溫度，視實驗需要靜置冷卻。
- 2.將壓電晶體的振動頻率從28.5kHz往上調，直到看到打入的氣泡發光，即可開始進行實驗。實驗中可調整電流頻率、電壓大小振幅，有時亦會使用電感作細微調整。

(三) 存取數據並加以分析

- 1.我們取數的來源有二：光電管產生的電壓和當時電流的值，兩者皆由FADC負責紀錄並傳送至電腦作為原始資料。

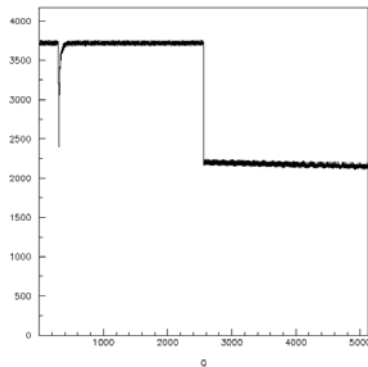


圖 4-3：FADC 取下的其中一組數

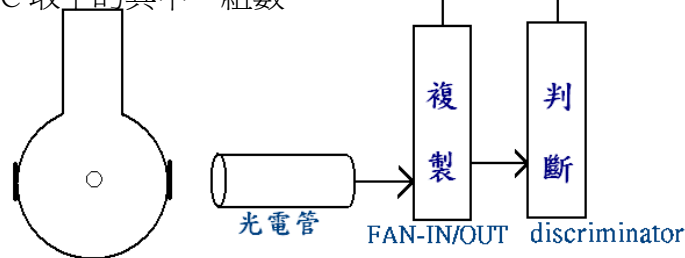


圖 4-4：數據存取示意圖

- 2.我們取數時供應光電管的電壓為1500V，由於泡泡發光強度較小，周圍因熱擾動引起的雜訊相對較大，又FADC有其連續取數時間限制，因此我們用discriminator將雜訊過濾，原理是當光電管的訊號大於一個可以確認此訊號為泡泡發光的訊號而非雜訊的值之後，discriminator將傳送一個方波給FADC，FADC接到方波後便傳送當時分別往前後共1.28 μ s的訊號大小至電腦主機，這對泡泡發光產生約20ns的訊號長度已相當足夠，且又可從示波器上看出方波的位置，得知泡泡發光時是受到正壓力或負壓力。
- 3.以上述方法取下泡泡發光時光電管的訊號和電流強度後，便可用程式去處理數據、繪製圖表，進而討論其物理意義。

四、名詞介紹與分析數據的方法

(一) 名詞介紹

在討論實驗結果之前，有一些重要的物理量要介紹。我們將以FADC所存取氣泡發光一次的數據為範例，經由Linux內建繪圖軟體，將數據的5120個點繪成下圖4-5。圖中，左半部分為光電倍增管的訊號，右半部分為電流的訊號。

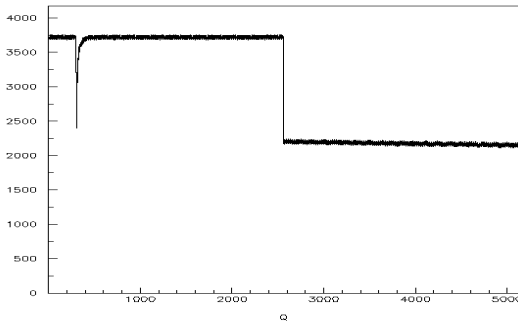


圖 4-5：單組數據圖



圖 4-6：Q 值示意圖

- 1.發光強度(Q)：我們將光電管訊號中低於標準值的面積定義為Q，如圖4-6中黃色部分的面積。
- 2.電流大小(I)：氣發光時的電流大小，電流使壓電晶體震動，電流越大產生的震動越大，給予氣泡的力量越強，圖中右半部的訊號看似直線，實際上是弦波中的一小段。
- 3.發光效率(Q/I)：定義為發光強度(Q)除以當時的電流大小(I)，在比較時常以共振頻率時的量值為標準。
- 4.共振頻率：泡泡在發光時，隨著頻率的調整，發光效率(Q/I)會有所變化，而發光效率最大時的頻率即為共振頻率。
- 5.半高寬：如圖4-8中所示，在共振頻率時發光效率(Q/I)值的一半高處，發光效率曲線的寬度。其物理意義為共振的集中程度。
- 6.發光相位(phase)：如圖4-7所示，以泡泡發光時電流的斜率推斷發光時間點在電流正弦波上的位置。一個電流週期中定義左端起始點為0，右端末點為1。

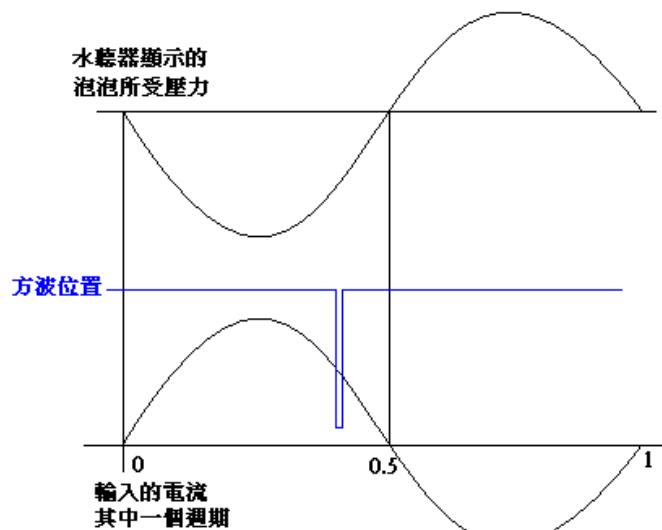


圖 4-7：相位(phase)示意圖

(二) 分析數據的方法

取數完成後，以程式將實驗數據繪製成下圖：

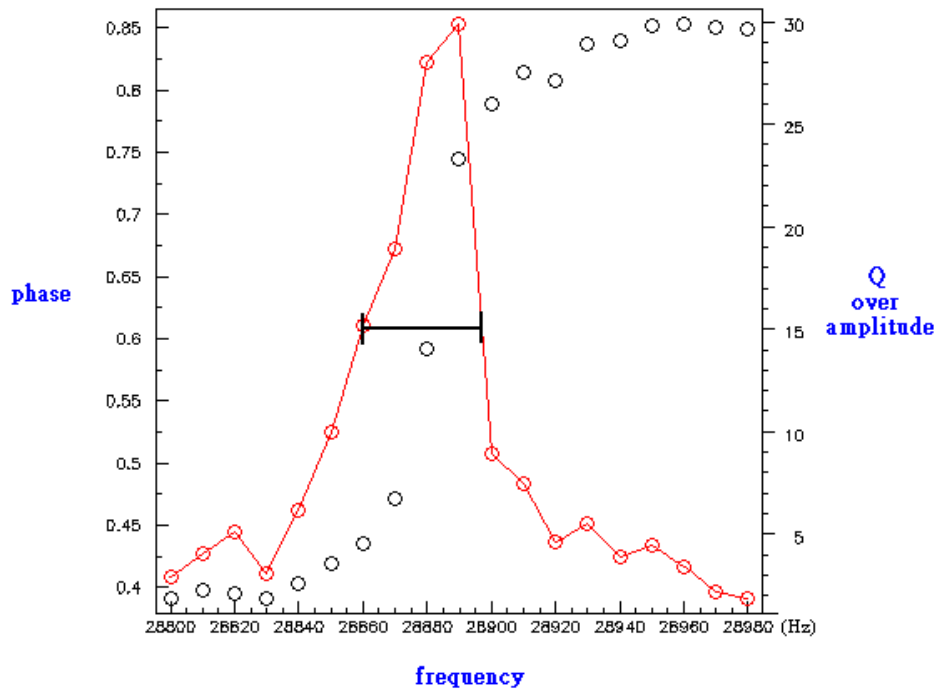


圖 4-8：利用程式處理將每個頻率時的發光效率數據繪成本圖。圖中，右邊的縱座標為發光效率(Q/I)，左側的縱座標為發光相(phase)，橫座標為頻率(frequency)。本次實驗的共振頻率約為 28890kHz，半高寬如圖中所示。

伍、研究結果討論

一、不同溫度的 H_2SO_4 對於單泡發光(SBSL)性質的影響

溫度：23.5° C 與 12.4° C

抽氣壓力：30torr

溶液濃度(H_2SO_4 /溶液)：0.25

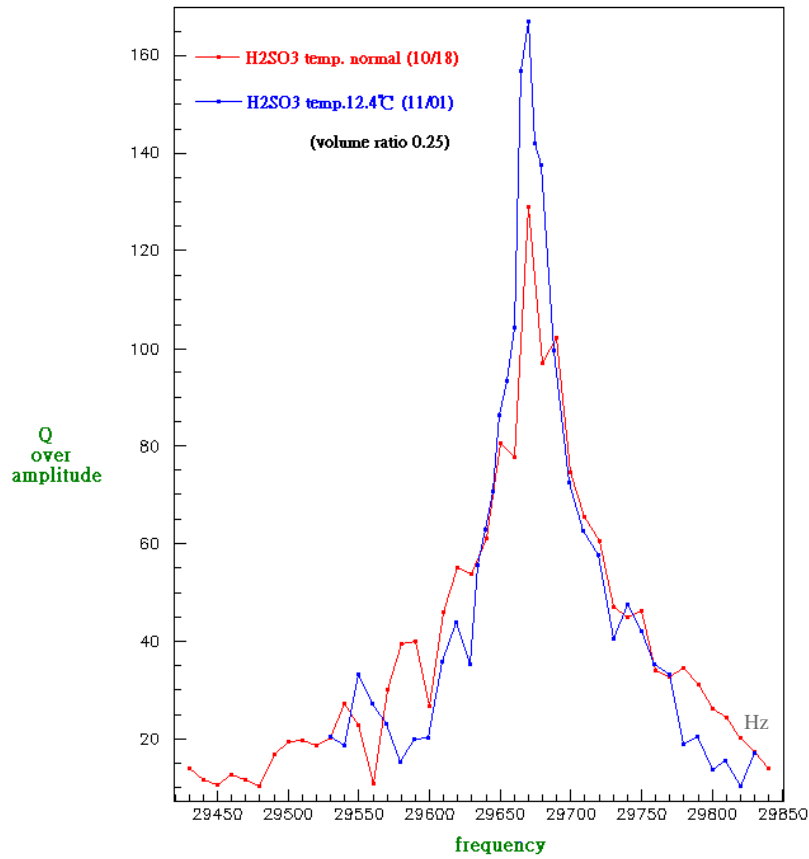


圖5-1：不同溫度的 H_2SO_4 對於單泡發光性質的影響

由圖5-1可知，在 H_2SO_4 溶液中當溫度降低時，泡泡發光的半高寬變短，表示振集中程度提高，而Q/I值也隨溫度降低而變大。

二、不同濃度溶液對於發光性質的影響

(一)不同濃度的CuSO₄ 溶液對於單泡發光(SBSL)性質的影響

溶液濃度(體積莫耳濃度)：0.1 與 0.2

抽氣壓力：6torr 溫度：23.5

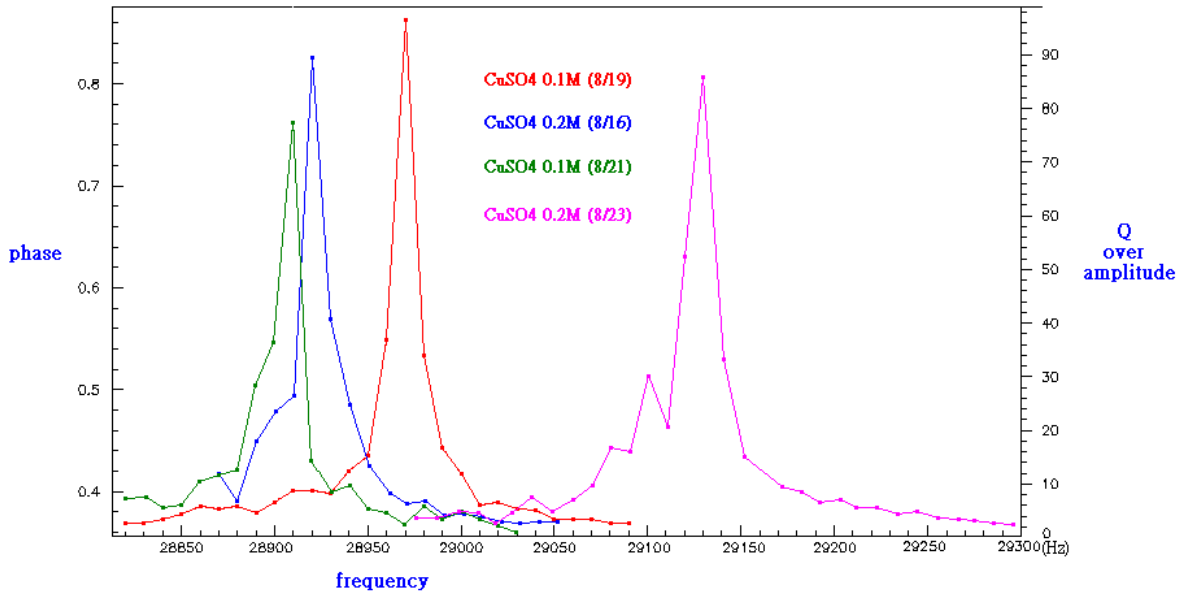


圖5-2：不同濃度的CuSO₄ 溶液對於單泡發光性質的影響

- 1.由圖5-2可知，四次實驗結果中，在共振頻率時的發光效率(Q/I)並沒有顯著的差異，且半高寬均相近，顯示不同濃度的CuSO₄ 溶液對於單泡發光的發光效率及共振集中現象影響不大。
- 2.其中粉紅色實驗數據(CuSO₄0.2M 8/23)的共振頻率與其他三次相差較大，應是實驗當天某些其他因素影響所造成，但這並不影響我們的討論。
- 3.實驗中意外的發現：CuSO₄ 溶液中聲致發光的Q/I值高達70~90，這遠比純水的20~25要高出很多，促成我們進行往後對於非水溶液發光效率比較的實驗。

(二)不同濃度的 H_2SO_4 溶液對於單泡發光(SBSL)性質的影響

溶液體積比(H_2SO_4 /溶液)：0.25 與 0.5

抽氣壓力：30torr

溫度：23.5° C

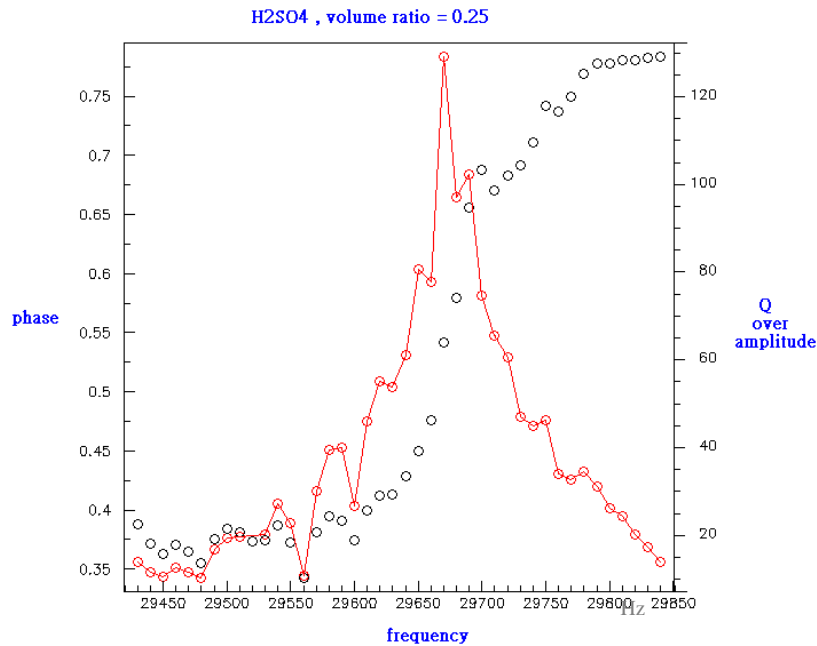


圖 5-3：體積比 0.25 的硫酸數據

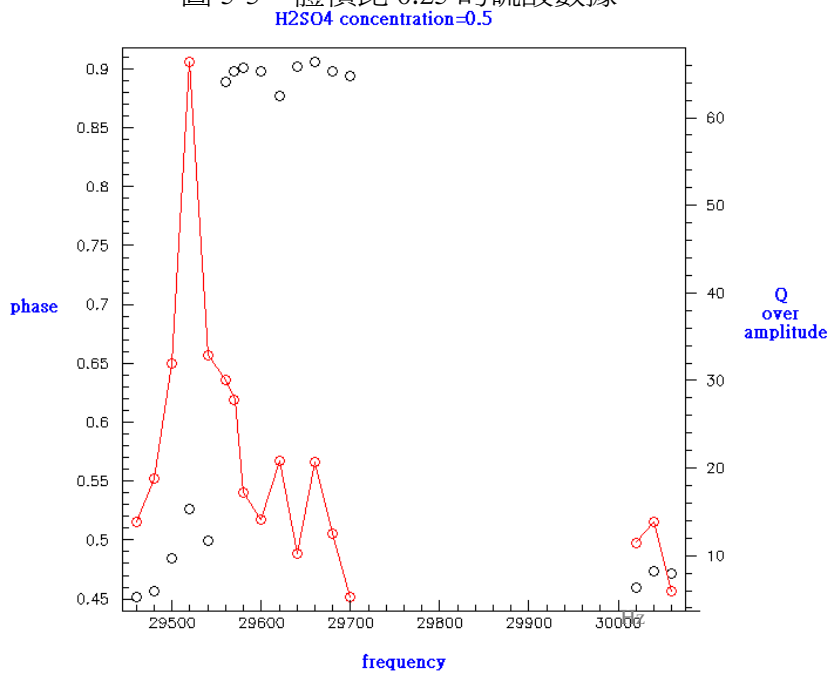


圖 5-4：體積比 0.5 的硫酸數據

- 1.由圖5-3、圖5-4可知， H_2SO_4 在濃度較低時(體積比0.25)的 Q/I 值要比高濃度時(體積比0.5)高很多，但低濃度時半高寬較長，共振集中現象反而不如高濃度時明顯。
- 2.再次審視數據時，發現有疑惑的地方：本次 H_2SO_4 體積比0.5的數據中，最高的 Q/I 值竟只有約66，比一般的狀況(Q/I 值在100多)要低了很多。事後發現本次取數中，泡泡在快要達到共振頻率時，其中幾組數據的取數有包含雙泡發光(DBSL)，因此推論有可能是雙泡發光改變了原本單泡發光 Q/I 應有的曲線。在實驗結果與討論五中有對於此問題更深一步的討論。

3.另外，我們也在本次的取數中發現了 H_2SO_4 中的泡泡，在經過一段無法發光的頻率後，竟然又可在更高的頻率再一次的發光！讓我們有了以下的猜想：

《假設一》

在一般的認知裡，泡泡發光有唯一的共振頻率，在此頻率的發光效率最大，如下圖所示：

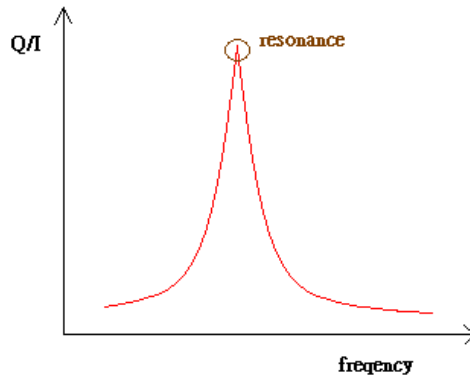


圖 5-5：共振示意圖

但在本次的數據中(圖5-4)，泡泡在經過第一次的共振頻率時，發光相位(phase)的大小由0.45移動到約0.9，發光效率(Q/I)從10上升到最高的70再下降到大約0的位置，到目前為止都還算正常，直到頻率調到30000Hz之後，泡泡又再度發光！而且phase及Q/I的數值，也都與從第一次發光(29460Hz時)的數值相差不遠。看這樣奇特的結果，不禁讓我們有了以下的猜想：

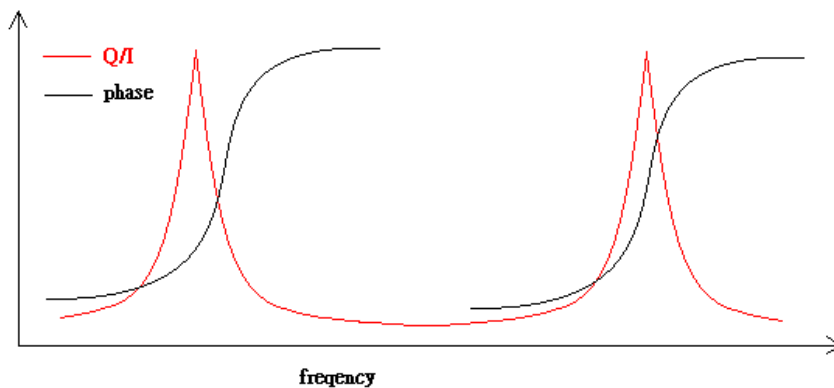


圖 5-6：假設一

如果在電流強度的許可之下，是否泡泡能再更高頻的區域有另一次的共振頻率？猜想發光效率與向位的曲線應如上圖5-6所示。為了想知道答案，我們在之後又做了新的高頻實驗，在實驗與討論四中將繼續探討。

三、比較氣泡在強酸、強鹼、鹽類及純水中發光性質的差異

我們在 H_2SO_4 、 H_3PO_4 、 $NaOH$ 、 $NaHCO_3$ 、 $CuSO_4$ 及 H_2O 等不同的溶液中作單泡發光的實驗，數據如下：

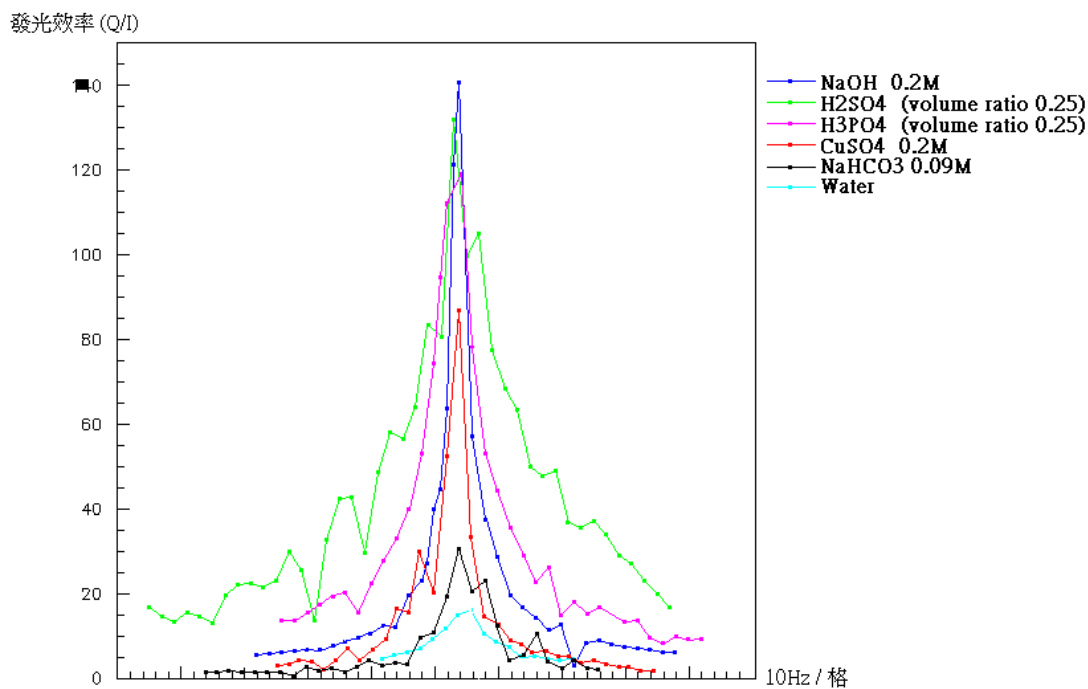


圖 5-7： H_2SO_4 、 H_3PO_4 、 $NaOH$ 、 $NaHCO_3$ 、 $CuSO_4$ 、 $NaHCO_3$ 及 H_2O 等不同溶液中作單泡發光的實驗數據

- 1.比較其最大發光效率： $NaOH$ 、 H_2SO_4 、 H_3PO_4 相當接近，約為水的7倍；其次是 $CuSO_4$ ，約為水的5倍，最低者為 $NaHCO_3$ ，約為水的2倍。由此可以得知：強酸、強鹼($NaOH$ 、 H_2SO_4 、 H_3PO_4)的最大發光效率最大，鹽類($CuSO_4$ 、 $NaHCO_3$)次之，其中 $CuSO_4$ 又比 $NaHCO_3$ 大，水為所有溶液中最低者。
- 2.比較其半高寬： H_2SO_4 的半高寬最大，約為水的1.4倍，其次為 $NaHCO_3$ ，約為水的1.2倍， H_3PO_4 與水接近， $NaOH$ 又與 $CuSO_4$ 接近，約為水的0.3倍。由此可以得知：強鹼、鹽類($NaOH$ 、 $CuSO_4$)的半高寬最小，水與強酸(H_3PO_4)接近， H_2SO_4 又比水稍大， $NaHCO_3$ 則在兩者之間。
- 3.仔細觀察發現， $NaOH$ 的最大發光效率最大，半高寬又最小，可說是所有溶液中最為集中、明顯的共振現象。

四、H₂O在高頻率時的單泡及雙泡(SB&DBSL)發光現象

在實驗結果與討論一之(二)中曾提到，發現H₂SO₄ 竟可在經過一段無法發光的頻率後，在更高的頻率再次發光，這樣的發現另我們感的有趣，進而提出了《猜想一》。在另外一次的實驗中，我們又成功地作出了H₂O的高頻發光，下圖5-8為H₂O在一般頻率的發光數據，圖5-9則為在高頻中的發光數據：

溶液：純水(H₂O)

溫度：23.5° C 抽氣壓力：6torr

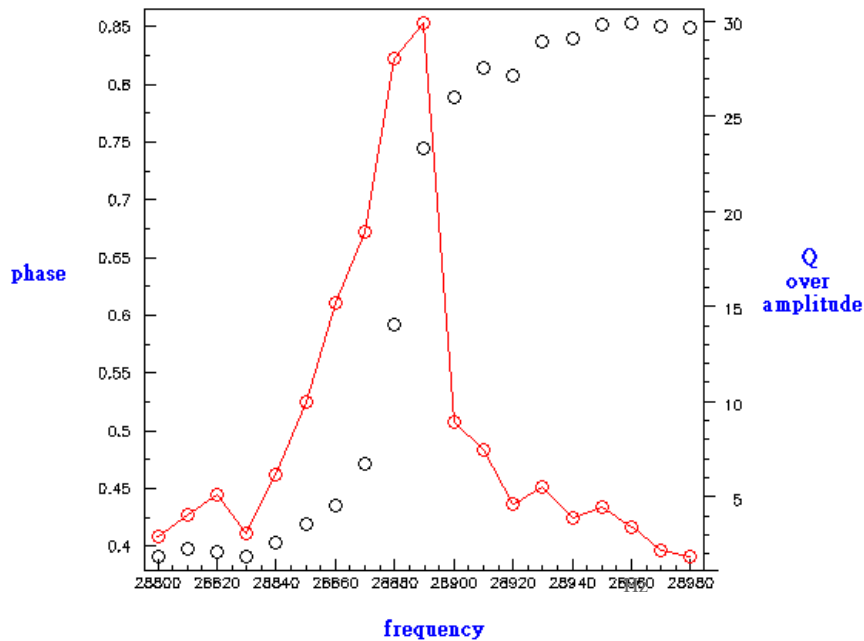


圖 5-8：正常頻率時水的發光數據

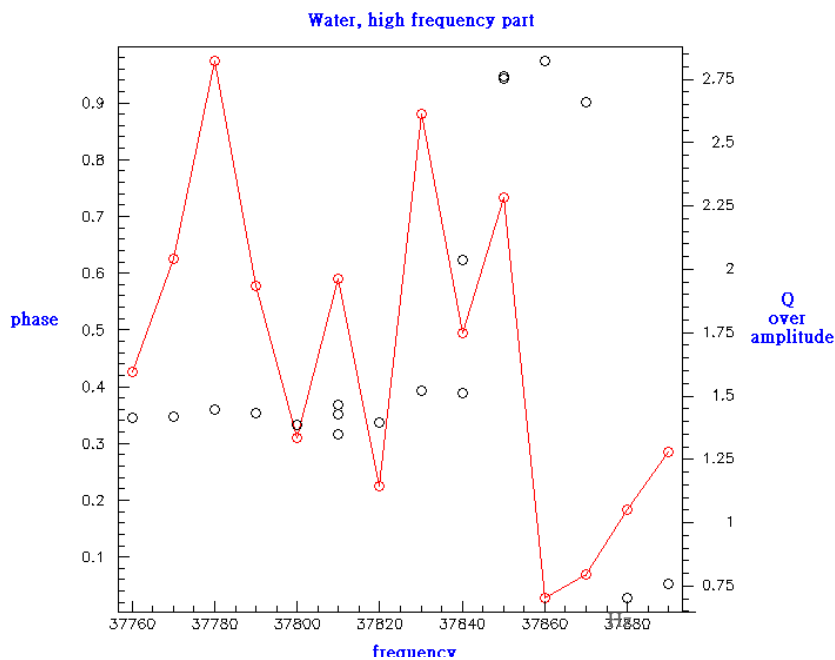


圖 5-9：高頻率時水的發光數據

- 1.由圖5-8可知，正常水中SBSL的共振頻率約在28800Hz~28980Hz之間，將頻率從28980Hz再往上微調時，泡泡將受限於儀器所提供電流值而無法繼續發光。(因為當發光頻率離共振頻率越遠時，所需給予氣泡的壓力要更大才足以使之發光，但儀器提供的電流有其上限。)此時，示波器上仍可看到不發光的泡泡。繼續將頻率調高，當頻率高到一定量值時，氣泡將無法繼續穩定地維持在溶液中，有時則是浮出溶液表面。
- 2.當繼續調高頻率至約37000Hz時，氣泡竟又開始聚集，且在37760Hz再次發光！如圖5-9所示，氣泡在37760Hz~37890Hz間發光，phase的量值也從大約0.4移動到0.9、1，這與我們先前的《假設一》在發光相位的部分完全相同！但在分析Q/I值時卻看到一些凌亂不規律的折線，且量值非常小，僅在0.75~2.75之間，我們可將其視為遠離共振頻率後偏低的發光頻率，如下圖5-10所示。

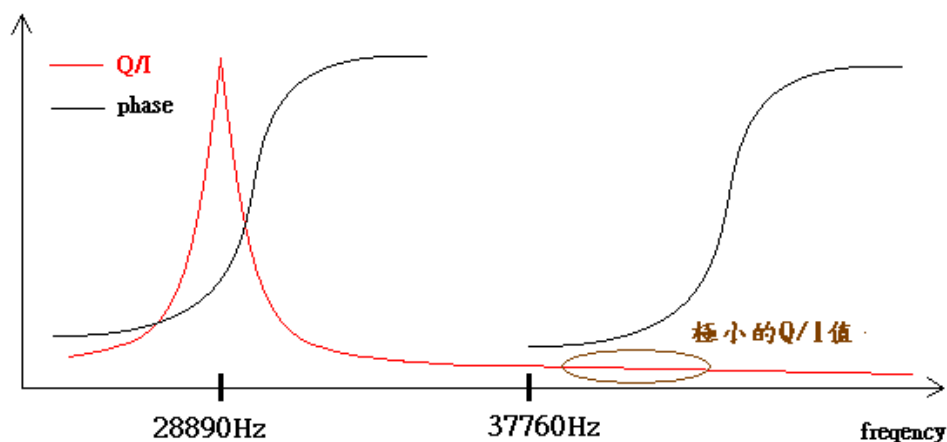


圖 5-10：假設一的修正

如此一來，與我們的《假設一》有所出入，發光效率最大的共振頻率仍然只有一個，但發光相位的確會有週期性的變化。至於氣泡在溶液中會經過一段頻率無法發光或聚集，卻在更高頻率時再次發光的原因，仍有待探討。

- 3.在本次實驗中也發現H₂O 可在高頻率時可產生雙泡發光(DBSL)。

五、雙泡發光(DBSL)的數據與討論

在某一次 H_2SO_4 的發光實驗中，我們發現了一個有趣的結果：

溶液體積比(H_2SO_4 /溶液)：0.5

抽氣壓力：6torr 溫度：23.5° C

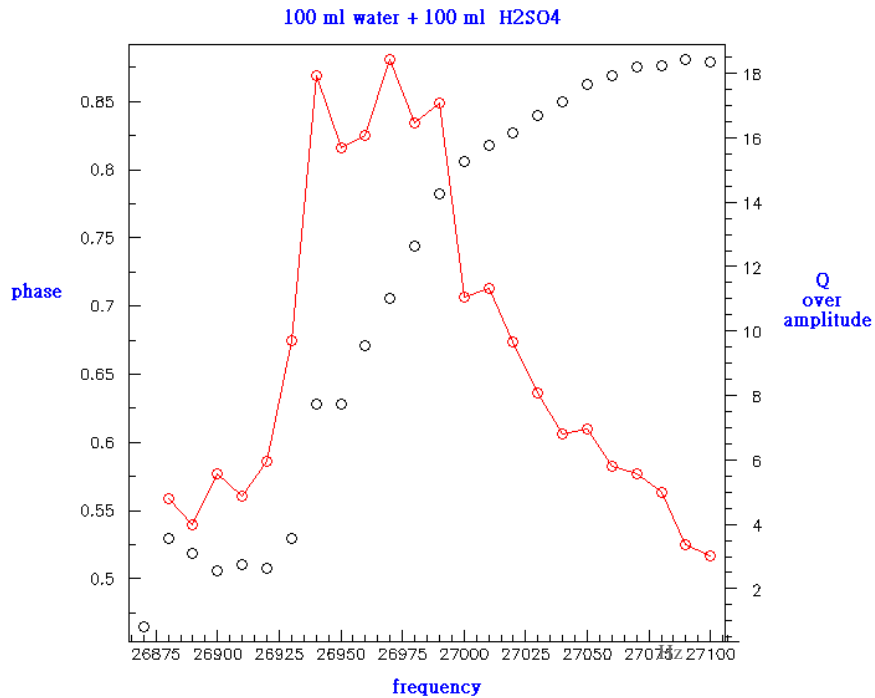


圖 5-11：體積比 0.5 硫酸的發光數據

圖5-11中的結果顯示，本此 H_2SO_4 的實驗數據中， Q/I 值曲線雖如常地增減，但無法看出一個明顯的共振頻率。後來由實驗紀錄本上查驗，發現26950Hz~26990Hz之間的數據在取數時有雙泡發光的現象，看到這樣的巧合，讓我們又有了新的想法：

《假設二》

當我們用程式處理原始數據時，發光效率(Q/I)的計算是把定義的發光強度(Q)除以氣泡發光時的電流大小(I)。然而，在雙泡發光時，光電管紀錄的訊號會是兩個的脈衝(圖5-12)，若在分析時將兩個脈衝分別定義為 Q_1 、 Q_2 ，則在除以電流大小(I)後，將會得到兩個氣泡各自的發光效率(Q_1/I 、 Q_2/I)。

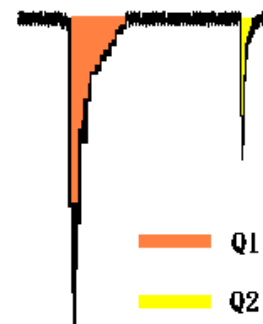


圖 5-12：雙泡發光時光電管的訊息

如此一來，我們猜想 Q_1/I 、 Q_2/I 的圖形是否會是兩個獨立的單泡發光曲線？

如下圖所示，而中間兩個曲線重疊的區域處於兩個氣泡的共振頻率之間，恰好可以解釋圖5-11實驗中 Q/I 值偏小的情形。

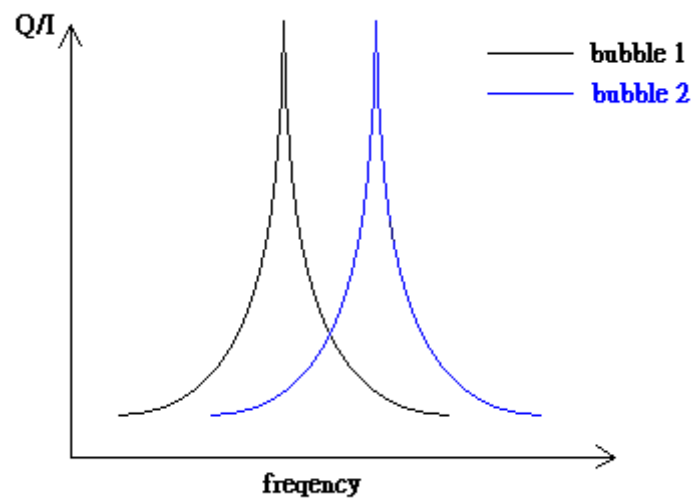


圖 5-13：假設二

有了這樣的猜想後，我們將之後的實驗進行改良為兩部分：第一部分為單泡發光(SBSL)，先把可發光的頻率由低到高掃過一遍，並取數紀錄。第二部分為雙泡發光(DBSL)，由較好產生雙泡的共振頻率開始，頻率往上及往下尋找雙泡發光，並取數紀錄。如此可比較氣泡在單泡及雙泡發光的差異。圖5-14、圖5-15為兩次 H_2SO_4 的實驗結果：

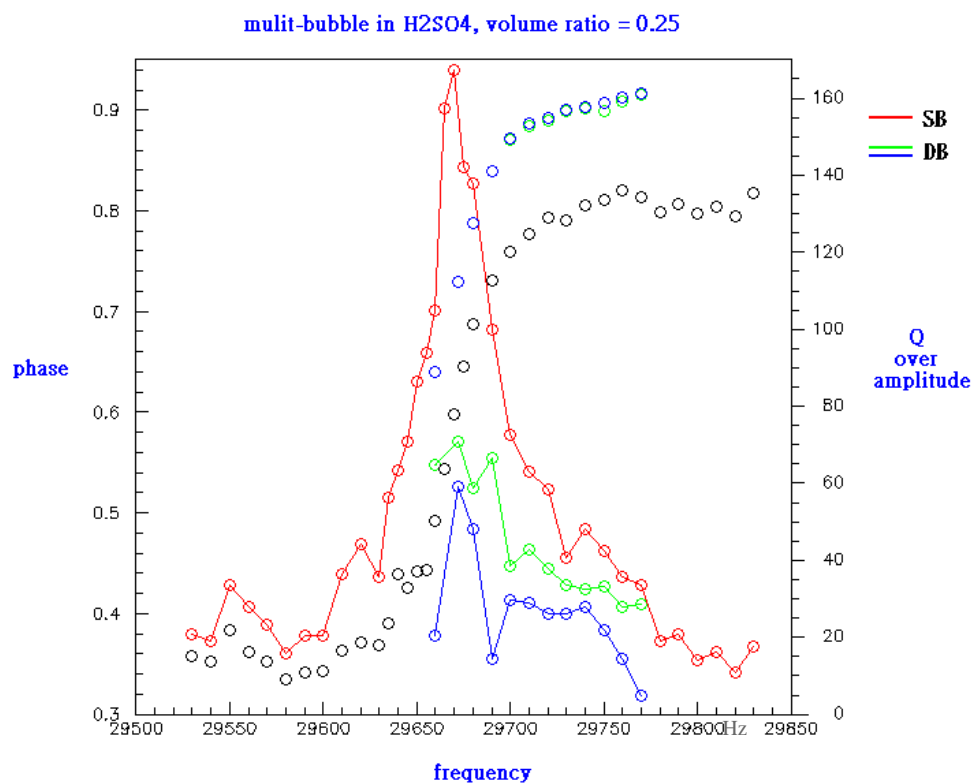


圖 5-14：硫酸中單泡及雙泡發光的數據，圖中紅色折線為單泡發光，藍、綠色為雙泡發光

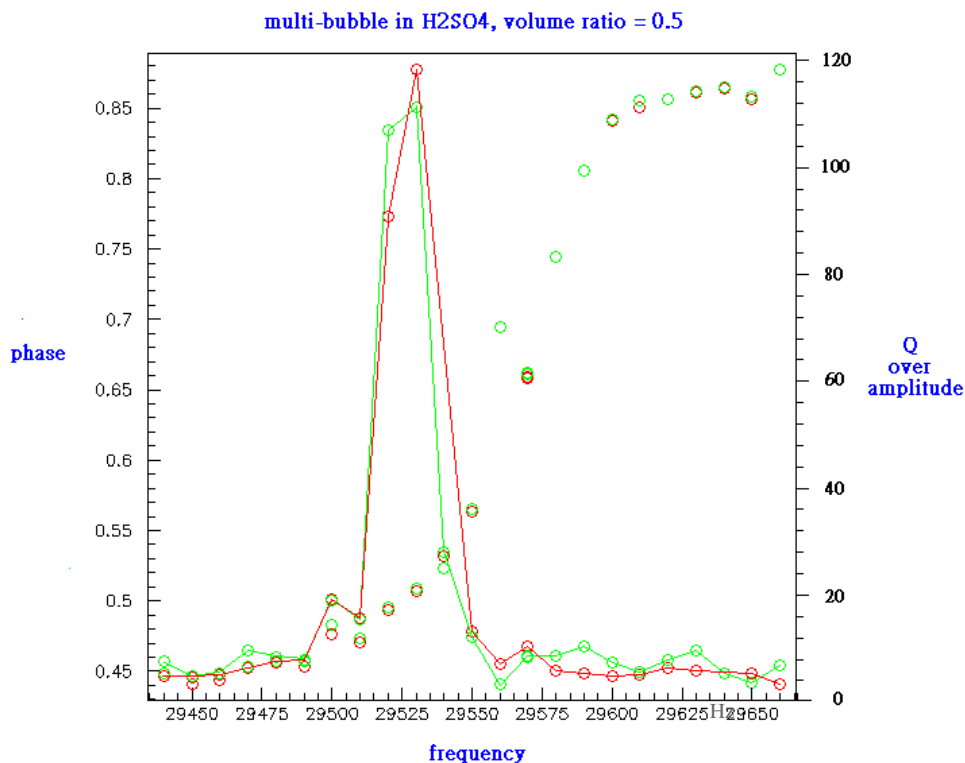


圖 5-15：另一次硫酸雙泡發光的數據
紅色折線為 Bubble1、綠色為 Bubble2

- 1.圖5-14中的紅線是標準的單泡發光發光效率曲線，而綠色和藍色曲線，分別為雙泡發光實驗中兩個泡泡的發光效率曲線，由圖中可以得知，雙泡發光時的兩個泡泡分別有和單泡相似的效率曲線，此部份與我們在《假設二》中的想法一致。不同的地方在於，兩者個別的共振頻率和單泡發光的共振頻率也都一樣！
- 2.再看圖5-15，紅色和綠色分別為雙泡發光兩個泡泡的發光效率曲線，同樣的也可發現它們分別會有和單泡相同的曲線，而且兩者的共振頻率是同一個，和圖5-14的結果完全吻合。
- 3.除此之外，我們也可以發現雙泡發光的兩個泡泡，兩者各別的phase彼此相近，且在圖5-14中可看出，它們的phase比單泡發光的phase要來的高。
- 4.圖5-14中的數據顯示，大部分的時候雙泡發光中個別Q值的和，比單泡發光的Q值還小，尤在共振頻率特別顯著，代表在同一個頻率時，如果可以產生單泡發光也可以產生雙泡發光，那麼用相同的電流來產生的發光，雙泡發光雖然有兩個泡泡，但總Q值仍比單泡發光的一個氣泡低；由此可以解釋圖5-4及圖5-11兩次數據的明顯偏低情形。
- 5.注意到圖5-15中共振頻率的發光效率，兩者分別都高達約120，比起圖5-14的60或70要大的多，因為兩次實驗的濃度不一樣，其原因還待討論。

陸、 結論

一、不同溫度對於強酸溶液(H₂SO₄)中單泡發光性質的影響

溶液溫度越低，氣泡發光的半高寬越窄，即共振集中程度越高，而發光效率(Q/I)值也隨溫度降低而變大。

二、不同濃度溶液對於單泡發光性質的影響

CuSO₄溶液：不同濃度其共振頻率時的發光效率(Q/I)並沒有顯著的差異，且半高寬均相近，顯示不同濃度的CuSO₄ 溶液對於單泡發光的發光效率及共振集中現象影響不大。

三、氣泡在強酸、強鹼、鹽類及純水中發光性質的差異

(一) 比較其最大發光效率：NaOH、H₂SO₄、H₃PO₄相當接近，約為水的7倍；其次是CuSO₄，約為水的5倍，最低者為NaHCO₃，約為水的2倍。由此可以得知：強酸、強鹼(NaOH、H₂SO₄、H₃PO₄)的最大發光效率最大，鹽類(CuSO₄、NaHCO₃)次之，水為所有溶液中最低者。

(二) 比較其半高寬：H₂SO₄的半高寬最大，約為水的1.4倍，H₃PO₄與水接近，NaOH與CuSO₄接近，約為水的0.3倍。由此可以得知：強鹼、鹽類(NaOH、CuSO₄)的半高寬最小，水與強酸(H₃PO₄)接近，而H₂SO₄又比水稍大，NaHCO₃較特殊，位於水和H₂SO₄之間。

(三) NaOH的最大發光效率最大，半高寬又最小，可說是所有溶液中最為集中、明顯的共振現象。

四、H₂O在高頻率時的發光現象

(一) 水中在高頻(37760Hz~37890Hz) 的單泡發光：在正常的頻率範圍內(28800Hz~28980Hz)，可產生典型的發光效率與相位曲線，如下圖 左半邊之形狀。而在高頻時發光效率曲線可視為典型曲線的延伸，但相位曲線仍呈現正常頻率時的樣子。整體發光效率與相位的曲線如下圖_所示。

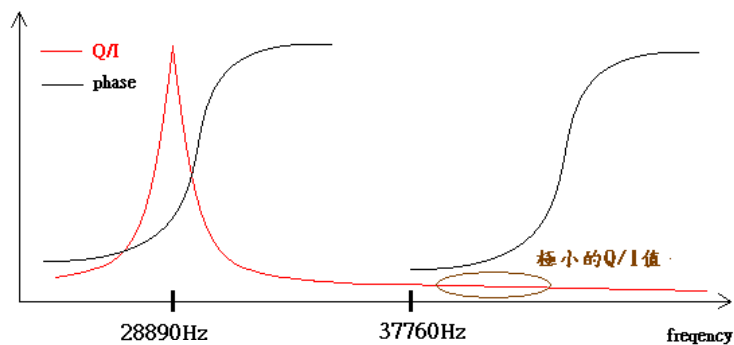


圖 6-1：假設一的修正圖

(二) 發現在高頻(37760Hz~37890Hz)時水中的雙泡發光

五、H₂SO₄水溶液中雙泡發光的相關性質

(一) 雙泡發光時的兩個氣泡分別都有和單泡相似的效率曲線，兩者個別的共振頻率和單泡發光的共振頻率也都一樣

(二) 雙泡發光的兩個氣泡，兩者各別的相位彼此相近，而又比單泡發光的相位要來的高。

(三) 大部分的時候雙泡發光中個別Q值的和，比單泡發光的Q值還小，其意義為：若在同一個頻率時，如果可以產生單泡發光也可以產生雙泡發光，那麼用相同的電流來產生的發光，雙泡發光雖然有兩個泡泡，但總Q值仍比單泡發光的一個泡泡低。

柒、未來展望

研究暫時告一段落，然而我們仍有許多想要完成的實驗，接下來希望能夠增加數據資料庫，使整體結論更為完整，並嘗試找出更多互相有關係的參數。單泡發光中，在不同液體種類比較的實驗方面，應該要找到影響發光表現的液體性質，以推廣預測其他液體在聲致發光中的表現，並助於深入了解氣泡發光的內部反應；氣泡可以在某些範圍的頻率中發光，而某些頻率中卻無法發光的原因也是我們迫切想要了解的問題。

另外，在雙泡發光的分析上，單泡發光與雙泡發光之間發光效率的大小關係，及共振頻率是否重合；利用個別分析氣泡的方式，除了讓我們發現雙泡及單泡發光中的某些共同點，也使得兩顆氣泡彼此影響的交互關係更加值得探討。

目前以氣泡發光的時間差(ΔT)、氣泡的位置變化(S)或相對位置變化(ΔS)與發光強度差(ΔQ)以及發光頻率的關係為主要著手進行的課題，然而雙泡與單泡的發光效率關係，也可在數據趨於完備後進行分析。如此一來，對於未來多泡發光現象(multi-bubble sonoluminescence)的研究，定能有初步的架構、更深入的了解，相信日後的研究會容易的多。

捌、參考文獻

- 一、Michael P. Brenner April 2002 “Single-bubble sonoluminescence” *Reviews of Modern Physics*, Volume 74
- 二、Seth Putterman , February 1995, "Sonoluminescence: Sound into Light", *Scientific American* p. 46-51,
- 三、Robert Hillary and Bradley Barber, February 1995, “The Amateur Scientist” , *Scientific American* p. 96-98,

評語

優：實驗技術精巧，對背景了解清楚。

缺：1) 實驗內容太單純。

2) 無此參考文獻更新的結果。