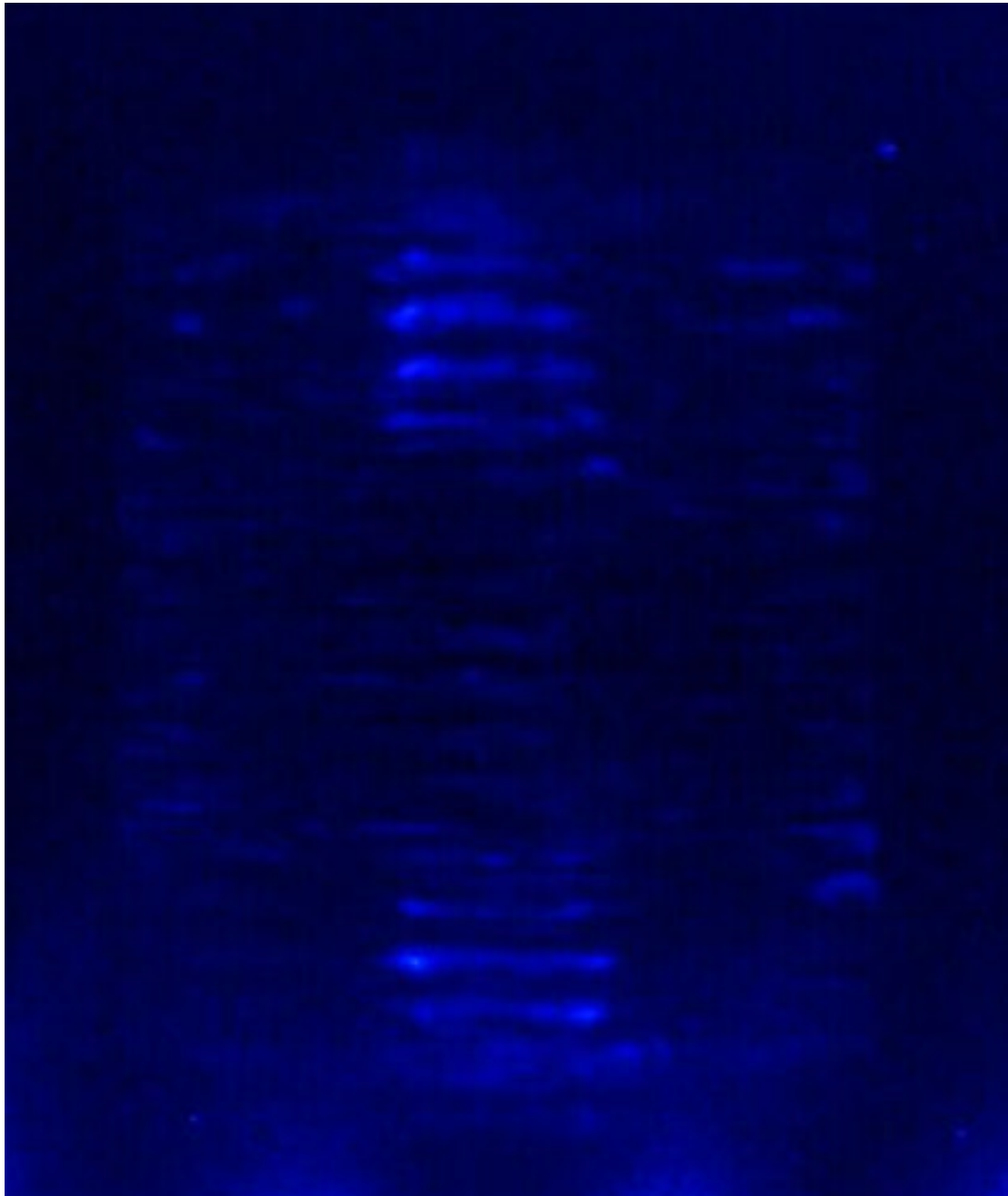


Tesina di Esperimentazioni III

SONOLUMINESCENZA



di

Claudio Demelia, Alessandro Esposito,
Luca Pellegrino, Alessandro Torrielli.

Sommario

<i>introduzione</i>	2
<i>cenni storici</i>	2
<i>il fenomeno ed i parametri sperimentali</i>	2
il raggio della bolla	
la pressione	
la temperatura	
i tempi	
il gas disciolto	
<i>le teorie</i>	5
___ iniziale	
___ della Microscarica	
___ MeccanoChimica	
___ della Scarica Anionica	
___ del Punto Caldo	
___ dell'Onda d'Urto	
contrasti fra Hot Spot Th. e Shock Wave Th.	
ultime ricerche	
<i>risonanza</i>	8
___ acustica	
modello matematico tridimensionale	
limite unidimensionale	
___ elettrica	
<i>l'apparato sperimentale</i>	20
il risonatore	
i trasduttori piezoelettrici	
generatore d'onda	
il liquido e la bolla	
<i>ricerca della sonoluminescenza</i>	22
prime prove e primi problemi	
il felice accordo col modello	
informazioni per un approccio di fit del modello	
esperimenti con la potenza	
sonoluminescenza	
una prova di consistenza	
misure sulle fotografie	
<i>misura delle frequenze di risonanza</i>	32
strategia utilizzata	
apparato sperimentale	
esito della misura	
un modello del metodo	
<i>ottimizzazione e riutilizzo dell'apparato</i>	42
<i>altre tipologie di apparati</i>	43
<i>conclusioni</i>	44
<i>bibliografia</i>	45
<i>siti internet</i>	45

Introduzione

SL cioè sonoluminescenza, un fenomeno importante di non recente scoperta, ma non ancora interpretato definitivamente anche perché i primi importanti studi si sono aperti solo nell'ultimo ventennio.

Una bolla d'aria, intrappolata in un campo acustico stazionario all'interno di un risonatore colmo d'acqua, si espande e contrae ad elevata velocità concentrando l'energia sonora al suo centro per 11-12 ordini di grandezza e causando l'emissione di un flash di luce violetta, molto breve, ripetitivo e relativamente molto intenso.

La sonoluminescenza si innesca anche durante un normale processo di cavitazione in condizioni abbastanza ampie, ma risulta essere più difficilmente misurabile a causa del processo estremamente irregolare.

Cenni storici

La prima volta che si sono potuti riscontrare gli effetti di tale fenomeno è stata nel 1895 quando un cacciatorpediniere della Marina Britannica dovette tornare in cantiere dopo soli pochi giorni dal varo: le onde sonore generate dall'elica facevano cavitare l'acqua, producendo bolle le quali, implodendo, originavano un effetto corrosivo strabiliante; era il 1917 quando Rayleigh comprese questo processo.

Fu però negli anni venti che gli effetti della sonoluminescenza iniziarono ad entrare nella scienza, quando un gruppo di chimici, adoperando un sonar, notarono che un intenso campo acustico poteva catalizzare reazioni chimiche, ma solo nel 1934 tale fenomeno fisico emerse nella sua reale essenza, quando H. Frenzel e H. Schultes dell'Università di Colonia, rilevarono lampi di luce nell'acqua eccitata da un campo sonoro. Nel 1947 Paounoff, Pinoir e Pouradier analizzando lastre fotografiche apparentemente impressionate da ultrasuoni scoprirono che responsabile era la SL e non il campo acustico, ma solo nel 1952 fu descritta da Virginia F. Griffing della Catholic University ed usata per avviare ardui processi chimici.

Più recentemente studi approfonditi, condotti soprattutto da ricercatori dell'UCLA, hanno potuto spiegare ed osservare meglio il fenomeno, senza però giungere ancora ad una definitiva descrizione di esso né tantomeno trovando un modello fisico-matematico completo.

Il fenomeno ed i parametri sperimentali

La bolla raggiunge pressioni dell'ordine di 10000 atmosfere e temperature che si aggirano sui 10000 Kelvin con un limite inferiore accertato di 72000 Kelvin (ricerche dell'UCLA).

La bolla d'aria emette un lampo di luce con una potenza maggiore di 30mW, una durata minore di 50 pS e periodo coincidente con quello del campo acustico. La frequenza della luce emessa si aggira sugli $8 \cdot 10^5$ GHz.

Il raggio 7 della bolla

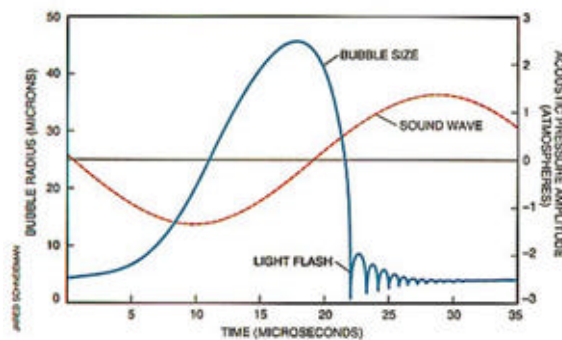
Il raggio della bolla in condizioni ambientali è di qualche micrometro per poi subire una considerevole espansione indotta dal campo acustico raggiungendo i 50µm di raggio.

Quando termina la fase di depressione il volume della bolla si è notevolmente accresciuto, il rapporto fra il volume finale ed iniziale è $(r_f / r_i)^3 \approx 4600$, le dimensioni della bolla quindi sono quasi 5000 volte maggiori ed essendo il numero di molecole intrappolate in essa circa costante la densità del gas è lo 0.2 per mille del valore iniziale.

L'interfaccia aria-acqua quindi collassa su se stessa sotto l'azione di una elevata differenza di pressione fra interno della bolla in cui si è formato un vuoto relativo e l'esterno su cui agisce il campo acustico nella fase di compressione e la pressione atmosferica. Tale violento e simmetrico collasso porta il raggio a 0,5µm quando le forze repulsive fra atomi bloccano improvvisamente l'implosione.

Probabilmente, se l'implosione fosse sufficientemente simmetrica, a concentrare ulteriormente l'energia sarebbe l'onda d'urto, ma questa fase del fenomeno non è sufficientemente conosciuta. Infine le dimensioni della bolla rimbalzano elasticamente fino a ripristinare le condizioni iniziali.

Per misurare il raggio della bolla si può utilizzare un laser HeNe da 10mW che la illumina e se ne misura la luce diffusa. L'intensità diffusa da una bolla è proporzionale al quadrato del suo raggio. La diffusione è in teoria isotropa, ma tale considerazione in realtà è rispettata solo in parte così per ovviare al problema è necessario focalizzare con una lente la luce osservata su un angolo più ampio. Nell'esperienza descritto su Ph.Rew.Let. Vol.69 N.26 Pg 3840 si indica una lente a corta lunghezza focale che copre $46^\circ \div 94^\circ$ in avanti ("... by collecting light with a short focal length lens that spans __ from the forward direction"). Per ridurre gli errori dovuti alle impurità si pone uno schermo aperto in corrispondenza della bolla e per misurare l'intensità diffusa si utilizza un fotomoltiplicatore ad alto guadagno (Hamamatsu R2027). Lo stesso PMT si può utilizzare per la misura dei lampi. Le misure sono fatte con un oscilloscopio digitale a 250 MHz (HP54510).

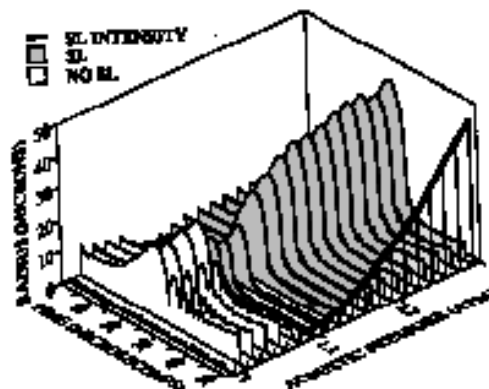


La pressione

La sonoluminescenza dipende in maniera marcata dalla pressione.

Sotto una pressione acustica di 1,1 atm il raggio della bolla segue la caratteristica curva senza però che avvenga il fenomeno. In corrispondenza di 1,075 atm, R_m , il raggio massimo della bolla, invece di continuare a crescere ha un brusco decremento per poi aumentare con l'aumento della pressione.

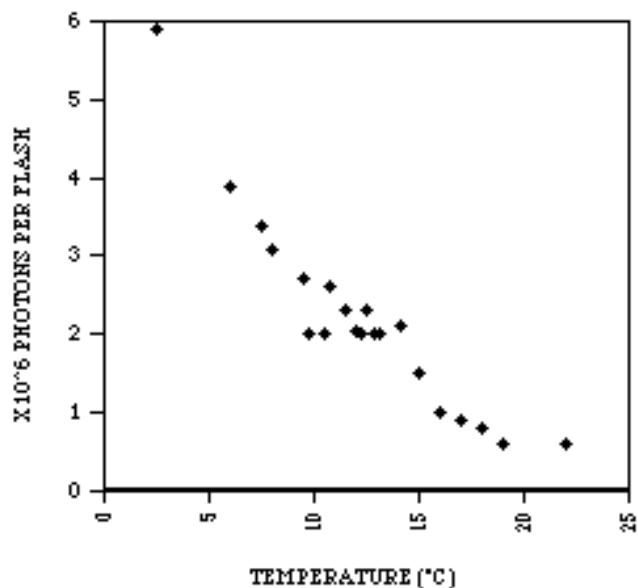
A questa soglia si ha la comparsa della SL. Superate le 1,3 atm R_m raggiunge un limite massimo oltre al quale la bolla non mantiene più una forma stabile e si disgrega.



La temperatura

E' molto marcata anche la dipendenza della SL dalla temperatura, infatti se a 40°C essa non è in pratica visibile ad occhio nudo, a 3°÷7° la luce violacea emessa è visibile ad un occhio abituato al buio. Da 40° a 1° l'emissione si incrementa di più di 200 volte.

Abbassando la temperatura di 10° la SL si incrementa di un fattore ≈10.



f=27KHz

T=7° N° fotoni per lampo=3,3·10⁶

T=22° N°=0,4·10⁶

Nell'esperimento descritto in Ph.Rew.Let. Vol.69 N.8 Pg. 1183, utilizzando un fotomoltiplicatore Hamamatsu R2027 ed uno spettrometro, emerge che all'abbassarsi della temperatura vi è uno spostamento verso gli UV. Il picco massimo infatti a 10°C è ≈280nm mentre a 22°C ≈320nm..

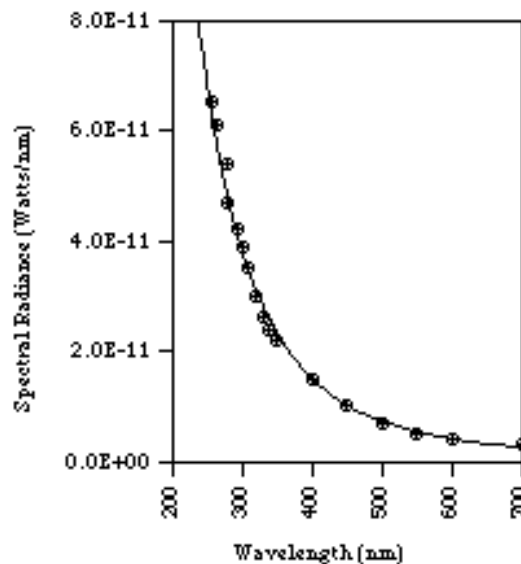
I tempi

I lampi della SL hanno una durata così breve che gli strumenti fino ad oggi utilizzati sono solo riusciti a stabilire una soglia massima di 50ps con un sampling scope HP54123 a 34GHz e un microchannel plate PMT Hamamatsu 2809U.

La SL si può osservare a frequenza già di 10KHz fino al MHz, ma i principali esperimenti sono stati fatti intorno ai 26KHz; anche se in teoria si potrebbe scendere sotto i 10KHz, normalmente si utilizzano frequenze ultrasoniche perché sarebbe necessario insonorizzare l'apparato che potrebbe altrimenti danneggiare i timpani dei ricercatori.

Si è potuto constatare che l'intervallo di tempo fra un lampo e quello successivo è pari al periodo del campo acustico con un leggero ritardo.

La risposta della SL all'attivazione del campo acustico è relativamente lento e raggiunge l'intensità stabile dopo 2,5s; analogamente, portando l'intensità sonora sopra il limite di mantenimento, dopo 4s la SL scompare a causa della disgregazione della bolla.



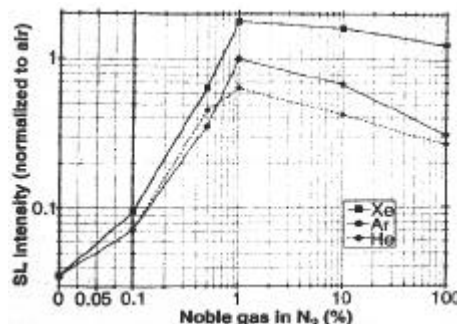
Questi periodi comunque sono correlati molto probabilmente alle condizioni sperimentali in quanto alcuni esperimenti non sono stati soggetti a questi tempi di ritardo.

(nel nostro esperimento non si sono osservati tempi di ritardo)

Il gas disciolto

La SL è strettamente correlata al tipo di gas disciolto nell'acqua.

Con una bolla di N_2 , di O_2 o di una miscela 4:1 di tali elementi la sonoluminescenza è 20 volte minore rispetto a una bolla d'aria. Le bolle divengono ottimi emettitori se drogate con gas nobili quali Xe, Ar, He, il migliore dei quali pare essere lo Xe. In una bolla di N_2 drogata si ha un massimo di SL con l'1% di gas nobili, ma mentre con l'argon si raggiunge l'intensità normale di una bolla d'aria, l'elio riesce ad arrivare al 65% e lo xenon aumenta fino al 109%.



Le teorie

TEORIA INIZIALE

Zimakov studiò la sonoluminescenza in diverse soluzioni acquose e concluse che l'emissione era dovuta a scariche elettriche fra le bolle ed il vetro del contenitore e poiché in acqua degassata non si produce luce, Frenzel e Shultes conclusero che l'emissione era causata dallo sfregamento fra bolle cavitanti e acqua.

Anche le successive interpretazioni attribuivano alla sonoluminescenza un'origine di natura elettrica, ma uno studio più approfondito di tale fenomeno nel corso degli anni sollevò dubbi al riguardo.

LA TEORIA DELLA MICROSCARICA (1940)

Si teorizzò che la bolla, nell'ipotesi di non sfericità ma di cavità lenticolari, in espansione potesse concentrare ioni di carica opposta su facce opposte, generando così al proprio interno forti campi elettrici e conseguentemente una scarica elettrica.

Il modello fisico cadde però dinanzi a varie incongruenze, ma soprattutto perché prevedeva il lampo nella fase di espansione, mentre sperimentalmente si è constatato che viene emesso durante la contrazione della bolla.

LA TEORIA MECCANOCIMICA (1949)

Questa teoria suggeriva che l'emissione di luce si originasse dalla ricombinazione fotochimica degli ioni liberi prodotti per dissociazione meccanica delle molecole all'interfaccia aria acqua della bolla sul nascere delle cavità generate a loro volta dalla rottura del reticolo quasi-cristallino del liquido.

La dipendenza della SL da certi parametri ambientali confutò tale modello che oltretutto non risolveva l'incongruenza vista nella precedente teoria.

LA TEORIA DELLA SCARICA ANIONICA (1974)

Si suppose che le cariche sulla bolla originassero dalla neutralizzazione di anioni sulla superficie della bolla stessa con molecole adsorbite sull'interfaccia gas-liquido.

Quando la densità di carica durante la compressione raggiunge una certa soglia, degli elettroni si muovono dalla bolla al liquido, eccitando molecole del liquido e provocando emissione di fotoni oltre ad altri effetti chimici.

Tale modello prevedeva una crescita di emissione di luce scorrendo all'inverso la tavola periodica cosicché i gas rari sarebbero dovuti essere pessimi "emettitori" al contrario di ciò che accade.

LA TEORIA DEL PUNTO CALDO (1950)

Tale modello presuppone che una cavità gassosa si accresca lentamente a temperatura costante fino ad una bolla di raggio R_0 per poi collassare su se stessa originando una compressione adiabatica del gas.

Posti T_0 la temperatura iniziale, γ il rapporto delle capacità di calore specifiche del gas e R_f il raggio finale della bolla si ha che la temperatura finale raggiunta dal gas è:

$$T_{ad} = T_0 (R_0/R_f)^{3(\gamma-1)}$$

Con $\gamma = 4/3$, $T_0 = 300K$ ed R_0/R_f dell'ordine di 10^2 come sperimentalmente ricavato si ottengono temperature dell'ordine di 10^3K .

La temperatura è sufficientemente elevata per indurre le molecole di gas ad emettere fotoni.

Benché tale teoria risolva le incongruenze degli altri modelli proposti, non giustifica temperature più elevate di 10^4K ed altre discrepanze con le osservazioni sperimentali riguardo la dipendenza dal numero atomico dei gas interessati.

DELL'ONDA D'URTO

Il modello del "punto caldo" risulta essere quello più coerente con le osservazioni di laboratorio, ma il fatto stesso che la bolla non vaporizzi ci suggerisce che la concentrazione dell'energia avvenga in un punto più interno alla superficie della bolla.

Non solo, analizzando lo spettro della SL ci si rende conto di quale analogia esso abbia con la radiazione di *Bremsstrahlung*, cioè la luce emessa da un plasma a 10^4K . Analisi spettroscopiche hanno quindi fissato un limite inferiore della temperatura all'interno della bolla pari a 72^4K .

Molto probabilmente il collasso della bolla sincronizzata con il campo è così veloce e simmetrico da generare un'onda d'urto sferica che si propaga verso il centro.

Nel diminuire il raggio dell'onda d'urto R_u la sua ampiezza e velocità aumentano ed in tal caso la soluzione delle equazioni idrodinamiche assume la forma: $R_u = At^b$ con b coefficiente che per l'aria vale 0.7.

Ad un'onda d'urto si può associare un numero di Mach cioè il rapporto fra le velocità dell'onda e del suono in quel particolare mezzo. La temperatura dietro ad un fronte d'urto è più alta che davanti ad esso ed il rapporto fra le due temperature è proporzionale al quadrato del numero di Mach.

Nella situazione in esame la bolla d'aria implode a velocità supersoniche ed essa continua ad aumentare pian piano che si avvicina al centro quindi il numero di Mach associato a tale implosione è particolarmente elevato e quindi avviene un

riscaldamento delle molecole interessate al fronte d'urto ben superiore al processo adiabatico.

Quando infine il fronte raggiunge il centro esso rimbalza ed investe le molecole una seconda volta con la differenza che le molecole che erano dietro ad esso vengono bruscamente a trovarsi davanti.

Tali molecole quindi aumentano ancora di temperatura raggiungendo temperature teoricamente elevatissime, però nella realtà c'è un limite a questo processo cioè la stabilità del fronte.

Per giustificare i presunti 100'000K è necessario che il fronte rimanga sferico fino a 0.1 μ m dal centro della bolla.

Attualmente tale estensione della Hot-Spot potrebbe giustificare il fenomeno in esame, ma la sfida è comprendere se davvero l'implosione della bolla possieda questa simmetria e magari se è possibile che il fronte rimanga sferico anche fino ai 10 nm.

Non è stato possibile infatti stabilire un estremo superiore alla stima della temperatura al centro della bolla in quanto i raggi ultravioletti non vengono trasmessi dall'acqua e quindi misure spettroscopiche sono inutili.

CONTRASTI FRA TEORIA DELL'HOT-SPOT E DELL'ONDA D'URTO

Le fonti bibliografiche utilizzate per questa tesina fanno essenzialmente capo agli articoli dei ricercatori Barber, Putterman ed Hiller dell'U.C.L.A. ed al libro Ultrasound come si può leggere nella bibliografia.

E' necessario a questo punto evidenziare che nel citato libro stampato nel 1988 si afferma che la radiazione emessa sotto SL è simile a quella di un corpo nero a 10'000K, mentre le analisi spettrometriche condotte negli anni '90 dagli altri studiosi hanno trovato una forte analogia con radiazione di Bremsstrahlung cioè di un plasma a 100'000K.

Inoltre in alcuni articoli si indica con 11 ordini di grandezza il potere di focalizzazione dell'energia della SL, in altri con 12.

Essendo la descrizione degli esperimenti dei ricercatori dell'UCLA abbastanza esaustiva e producendo inoltre anche un modello fisico autoconsistente ed in accordo con le osservazioni di laboratorio, comunque pare essere questo il modello più corretto, benchè sollevi questioni delicate come la probabile emissione di raggi X.

ULTIME RICERCHE

Nessun modello fisico matematico, al momento della stesura di questa tesina, si è dimostrato totalmente congruente con le realtà sperimentali; ogni teoria, infatti, per raffinata che sia, non riesce a spiegare per esempio lo spettro di emissione.

Recenti ricerche hanno dimostrato che esso non è né radiazione di corpo nero a 10'000K né radiazione di Bremsstrahlung, ma piuttosto una combinazione delle due.

Alcuni hanno ipotizzato una correlazione con l'effetto Casimir, ma pare escludersi anche tale opzione.

La ricerca si sta comunque indirizzando verso l'individuazione di eventuali cause ed effetti di natura quantistica, oltre che ad uno studio della SL per la fusione nucleare. Le condizioni di temperatura e pressione interne alla bolla, infatti,

potrebbero far pensare a fusione nucleare, ma se pare che ciò in realtà non accada, è pur sempre un buon modello per studiare il confinamento inerziale.

Risonanza

La risonanza dell'apparato è una condizione imprescindibile per l'ottenimento della sonoluminescenza da singola bolla, in quanto, come vedremo, consente di avere un campo acustico stazionario con l'ampiezza necessaria ad intrappolare le bolle vincendo la forza idrostatica e sufficientemente energetico da produrre, nella fase di focalizzazione, lampi di luce d'intensità visibile. Prima di procedere, quindi, bisogna occuparsi della risonanza, innanzitutto di quella acustica, che riguarda il cilindro con il liquido e i trasduttori, poi di quella del campo elettrico che pilota l'esperimento, per estrarre la massima potenza disponibile dai generatori.

RISONANZA ACUSTICA

In questa fase ci siamo cimentati nella formulazione di un semplice modello del sistema in questione e ne abbiamo risolto le equazioni associate, procedendo in maniera del tutto autonoma a partire dalle equazioni fondamentali dell'acustica. È stato assolutamente interessante constatare che i risultati che emergono da questi semplici conti portano a conclusioni non proprio immediate e naturali sul comportamento che dovevamo aspettarci dalla nostra realtà sperimentale complessa e articolata, risultati tuttavia almeno qualitativamente e in alcuni casi anche quantitativamente riscontrati durante lo svolgimento della tesina.

Questo non vuol significare una piena conferma, ma per noi è certamente un piccolo motivo di soddisfazione.

IL MODELLO MATEMATICO TRIDIMENSIONALE

Per far sì che i due trasduttori piezoelettrici mettessero in vibrazione di risonanza il sistema costituito dal liquido e dal contenitore, abbiamo esaminato i modi normali di vibrazione del sistema cercando di ricavare indicazioni sui parametri dimensionali (lunghezza, raggio di base del cilindro contenitore) e di funzionamento (frequenza dei trasduttori) degli oggetti in utilizzo. Per fare ciò abbiamo semplificato un po' il problema, invero molto complicato se si tiene conto di tutti i supporti connessi al contenitore e della non idealità del fluido in questione, riducendoci a trattare il problema dei modi normali di vibrazione di un gas perfetto libero in un cilindro secondo un processo adiabatico (sistema-gas perfetto isolato) nell'ipotesi ulteriore di piccole oscillazioni; l'equazione che regola il processo è :

$$\nabla^2 U - \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \quad (o)$$

dove v_s è la velocità del suono nel gas perfetto $\left(v_s = \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0}} \right)$

$g = \frac{c_p}{c_v} p_0$ è la pressione iniziale e ρ_0 la densità iniziale) e U rappresenta il potenziale

definito come segue: $\vec{v} = -\vec{\nabla}U$

Inoltre un campo acustico può essere definito anche da un campo di pressione P o di densità ρ , collegati dalle relazioni:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -v_s^2 \vec{\nabla} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) \quad -\vec{\nabla} P = \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$$

Pur avendo a disposizione, nella approssimazione di piccole oscillazioni, una descrizione sulla propagazione delle onde di pressione (o di velocità) in un fluido, ci siamo posti il problema su come impostare le condizioni per l'equazione d'onda ai bordi, ovvero all'interfaccia acqua-vetro-aria e acqua-metallo-aria.

Abbiamo ritenuto opportuno studiare un modello base ed eventualmente in seguito discutere i risultati alla luce delle approssimazioni fatte.

Si risolve l'equazione d'onda con la condizione al contorno di non attraversamento, ovvero si impone che le particelle di liquido abbiano componenti di velocità nulle lungo le normali alle superfici del cilindro.

$$\left. \frac{dU}{dr} \right|_{R_0} = 0 \quad \left. \frac{dU}{dz} \right|_{0,l} = 0$$

Inoltre abbiamo supposto che le onde acustiche fossero già presenti nel risonatore, senza alcun meccanismo di trasferimento dall'esterno tramite vibrazioni delle pareti.

Tale modello è evidentemente rozzo, in quanto la trasmissione di suono tra diversi materiali in mutuo contatto è prova del fatto che qualsiasi oggetto non potrà mai essere considerato come completamente rigido.

Agli ordini di approssimazione successivi è conveniente notare che nella nostra descrizione della realtà esistono analogie tra fenomeni diversi e concetti unificanti, quali l'impedenza di un mezzo ad una sollecitazione.

In acustica si definisce $Z = \frac{P_a}{V}$

per un'onda sinusoidale ad esempio $\frac{P_a}{V} = \rho_0 v_s$

Dove con P_a si indica l'eccesso di pressione rispetto alle condizioni a riposo, con V la velocità delle particelle del liquido e con v_s la velocità del suono.

Nel passaggio di un'onda sonora tra materiali diversi (Z diverse) si verificano le seguenti condizioni al contorno di continuità.

$$V_i + V_r = V_t \quad ; \quad P_{a,i} + P_{a,r} = P_{a,t}$$

da cui con la definizione $z=P_a V$ si ottengono le seguenti:

$$\frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \frac{V_t}{V_i} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

tipiche di molti fenomeni di riflessione-trasmissione come quelli elettrici ed ottici.

L'analogia prosegue identificando P_a con V (tensione) e V (velocità) con I di un sistema elettrico.

Nel nostro modello base le pareti rigide si descrivono attribuendo nel secondo mezzo una impedenza infinita, da cui $V_t/V_i=0$.

Si potrebbe schematizzare il nostro risuonatore come un circuito risonante elettrico a parametri distribuiti e simularne le soluzioni al computer.

Il concetto "le stesse equazioni hanno le stesse soluzioni"(R.P.FEYNMAN) ci invita ad ipotizzare che, come nelle cavità EM le condizioni al contorno non ideali diminuiscono il fattore di merito Q del sistema alla risonanza, così il nostro apparato potrà presentare fenomeni di risonanza negli intorni delle frequenze calcolate con il modello base.

Una deviazione dal nostro schema iniziale potrebbe consistere nel fatto che l'onda acustica non "sente" la parete di vetro, ma si accoppia, pur smorzandosi, con l'aria, cambiando così le condizioni al contorno da noi imposte.

Le possibili sorgenti di vibrazione a causa di disomogeneità nell'oscillazione dei piatti, del vetro e della struttura in genere, potrebbero instaurare dei nuovi modi acustici non previsti nel modello a pareti rigide.

Ritorniamo al nostro modello base.

La natura delle condizioni al contorno suggerisce di procedere separando le variabili, ottenendo perciò la soluzione come funzione stazionaria. Riportiamo i principali passaggi attraverso i quali ricaveremo le frequenze dei modi normali:

- proponendo come soluzione $U = U_0(\vec{r})e^{i\omega t}$ si perviene all'equazione:

$$\nabla^2 U_0(\vec{r}) + k^2 U_0 = 0 \quad k^2 = \frac{\omega^2}{v_s^2} \quad (i)$$

- separando le variabili in coordinate cilindriche come $U_0(\vec{r}) = R(r) \Phi(\mathbf{j}) Z(z)$ si ha un'espressione che sostituita nell'espressione (i) restituisce:

$$Z'' + aZ = 0$$

$$\Phi'' + b\Phi = 0$$

$$R'' + \frac{1}{r}R' + [(k^2 - a) - \frac{b}{r^2}]R = 0 \quad a, b \in \Re$$

- imponendo che $\Phi(\mathbf{j}) = \Phi(\mathbf{j} + 2\mathbf{np})$ $n \in \mathbb{Z}$ si ottiene

$$\Phi(\mathbf{j}) = A \cos \sqrt{\mathbf{b}\mathbf{j}} + B \sin \sqrt{\mathbf{b}\mathbf{j}} \quad \mathbf{b} = n^2 \quad n \in \mathbb{N} \quad (\text{periodicità di } \Phi(\varphi))$$

- a questo punto ci si rende conto che non è possibile verificare completamente la condizione al contorno, che prevederebbe che il campo di velocità fosse vettorialmente nullo alla superficie, mentre è sensatamente "più fisico" imporre una condizione di "non attraversamento", vale a dire alle basi velocità nulla solo lungo l'asse del cilindro, e alla superficie laterale, velocità nulla solo radialmente; riscriviamo perciò la condizione al contorno come:

$$\left. \frac{dZ}{dz} \right|_{0,l} = 0$$

$$\left. \frac{dR}{dr} \right|_{R_0} = 0$$

- la condizione su $Z(z)$ impone $Z(z) = C \cos \sqrt{\mathbf{a}} z$ con $\mathbf{a} = \frac{m^2 \mathbf{p}^2}{l^2}$ $m \in \mathbb{N}$

- con $\mathbf{b} = n^2$ l'equazione per R è un'equazione di Bessel se opportunamente riscritta:

$$\frac{d^2 R}{d\mathbf{x}^2} + \frac{1}{\mathbf{x}} \frac{dR}{d\mathbf{x}} + \left[1 - \frac{n^2}{\mathbf{x}^2}\right] R = 0 \quad \text{con } \mathbf{x} = \sqrt{\mathbf{K}^2 - \mathbf{a}} r$$

(quella di ordine n), e imponendo che la soluzione sia limitata in $r=0$ si ottiene:

$$R(r) = j_n(\sqrt{k^2 - \mathbf{a}^2} r)$$

e dalla condizione al contorno si ottiene, se $\mathbf{x}_{i,n}$ è l' i -esimo punto stazionario di $j_n(\mathbf{x})$, che

$$(ii) \quad \sqrt{k^2 - \mathbf{a}} R_0 = \mathbf{x}_{i,n} \quad \text{da cui} \quad \sqrt{k^2 - \mathbf{a}} = \frac{\mathbf{x}_{i,n}}{R_0}$$

- riscrivendo $\vec{U}_0(\vec{r})$ si ha:

$$\vec{U}_0(\vec{r}) := U_{0,i,n,m}(\vec{r}, \mathbf{j}, z) = j_n\left(\mathbf{x}_{i,n} \frac{r}{R_0}\right) C_m \cos \frac{m\mathbf{p}}{l} z [A_n \cos n\mathbf{j} + B_n \sin n\mathbf{j}]$$

e da (ii) ricordando le considerazioni fatte su α , si ottiene:

$$k_{i,n,m}^2 = \frac{\mathbf{x}_{i,n}^2}{R_0^2} + \frac{m^2 \mathbf{p}^2}{l^2}$$

- le soluzioni del problema sono perciò:

$$U_{i,n,m}(r, \mathbf{j}, z, t) = j_n \left(\mathbf{x}_{i,n} \frac{r}{R_0} \right) C_m \cos \frac{m\mathbf{p}}{l} z [A_n \cos n\mathbf{j} + B_n \sin n\mathbf{j}] e^{i \mathbf{w}_{i,n,m} t}$$

con (iii) $\mathbf{w}_{i,n,m} = v_s \sqrt{\frac{\mathbf{x}_{i,n}^2}{R_0^2} + \frac{m^2 \mathbf{p}^2}{l^2}}$ pulsazioni dei modi normali di vibrazione.

Riscrivendo perciò la relazione (iii):

$$(iv) \quad l_{i,n,m} = \frac{m\mathbf{p}}{\sqrt{\frac{\mathbf{w}^2}{v_s^2} - \frac{\mathbf{x}_{i,n}^2}{R_0^2}}} \quad \text{con il vincolo che} \quad \frac{\mathbf{w}^2}{v_s^2} > \frac{\mathbf{x}_{i,n}^2}{R_0^2}$$

cioè che $\mathbf{x}_{i,n} < \frac{\mathbf{w} R_0}{v_s}$

Sapendo, infatti, che la frequenza di massimo rendimento dei trasduttori si aggirava intorno ai 22 Khz e che il raggio delle basi del cilindro era di 90 mm ci siamo posti il problema di valutare il range di valori di "l" su cui puntare, cercando così di ottenere per lo meno indicazioni sull'ordine di grandezza in gioco, considerando che il modello utilizzato non corrisponde se non in parte alla realtà da noi sperimentata. Abbiamo così ottenuto, per una velocità del suono nell'acqua di 1500 m/s circa:

m	n	i	$l_{i,n,m}$ (mm)
0	∇	∇	solo oscillazioni radiali
1	0	1	34
1	0	2	38
1	0	3	65
1	0	≥ 4	VIETATO
1	1	1	35
1	1	2	45
1	1	≥ 3	VIETATO

Si ha poi che

$$l_{i,n,m} = m l_{i,n,1}$$

LIMITE UNIDIMENSIONALE

Com'è noto in linea di principio si ottiene il fenomeno della risonanza allorchè si eccita dall'esterno un sistema con frequenza pari ad una delle sue frequenze proprie di vibrazione. Noi ci siamo perciò resi conto che applicando i piezoelettrici alle basi del cilindro avremmo eccitato prevalentemente i modi longitudinali di vibrazione, vale a dire che nel nostro modello di gas perfetto avremmo dovuto far tendere R_0 allo infinito, operazione equivalente a trascurare il vincolo radiale,

ottenendo perciò
$$l_m = m \rho \frac{v_s}{w}$$

e quindi selezionando dalla tabella precedente solo la serie di modi con $n = 0$, $i = 1$, $m \geq 1$, ossia $\xi_{i,n} = 0$.

Da notare che alla stessa conclusione saremmo giunti imponendo $\vec{v} = v \text{ vers}(z)$ da cui $U_0 = U_0(z)$ e riscrivendo la (i) come

$$\frac{d^2 U_0}{dz^2} + \frac{w^2}{v_s^2} U_0 = 0 \quad \text{con la condizione al contorno} \quad \left. \frac{dU_0}{dz} \right|_{0,l} = 0$$

Abbiamo così ricavato che trascurando l'importanza delle autovibrazioni radiali, dovevamo puntare sulle seguenti lunghezze:

$$l_1 = 34\text{mm}, l_2 = 68\text{mm}, l_3 = 102\text{mm}, l_4 = 136\text{mm}, \dots$$

riservandoci di poterle variare di una manciata di millimetri durante l'esperimento tramite un fondo di silicone per aggiustare il tiro alla luce delle chiare deviazioni dal modello del nostro apparato.

In definitiva ci aspettavamo un campo di velocità del tipo

$$v(z, t) = A \sin \frac{w}{v_s} z \cos wt$$

da cui, sapendo che $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -v_s^2 \vec{\nabla} \left(\frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_0}{r_0} \right)$ se ρ è il campo delle densità

nel fluido e sempre nelle ipotesi descritte all'inizio si ha

$$\mathbf{r}(z, t) = \mathbf{r}_0 \left(1 - \frac{A}{v_s} \cos \frac{w}{v_s} z \sin wt \right)$$

e poiché $-\vec{\nabla} P = \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$ si ha

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho_0 \left(1 - \frac{A}{v_s} \cos \frac{w}{v_s} z \sin wt \right) A w \sin \frac{w}{v_s} z \sin wt$$

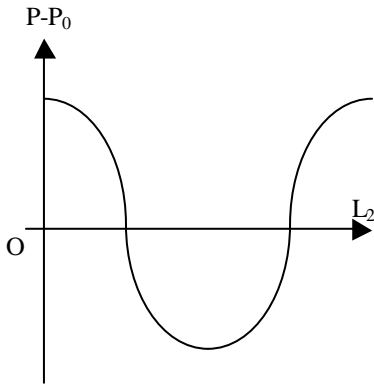
da cui, ricordando che $\sin 2\alpha = 2\sin\alpha \cos\alpha$, si ottiene

$$P = P_0 - Av_s r_0 \cos \frac{\omega}{v_s} z \sin \omega t + \frac{A^2 r_0}{4\omega} \sin \frac{2\omega}{v_s} z \sin^2 \omega t$$

Considerando tuttavia per semplicità A^2 trascurabile rispetto ad A (piccole oscillazioni) si perviene alla formula

$$P \cong P_0 - Av_s r_0 \cos \frac{\omega}{v_s} z \sin \omega t = P_0 + P_a$$

Notiamo che, in condizioni stazionarie, ai ventri (ai nodi) della pressione corrispondono i nodi (i ventri) del campo di velocità.



In base al modello unidimensionale, in fase di dimensionamento si sono stimati gli errori dovuti all'imprecisione del taglio del vetro e la corrispondente necessaria compensazione in frequenza.

La cavità utilizzata per gli esperimenti non è vincolata a ferrei criteri se non quello di risuonare alla frequenza del campo acustico.

$$l = K\lambda = K 1500 / v$$

$$\partial l / \partial v = - K 1500 / v^2 \Rightarrow \Delta l = \Delta v K 1500 / v^2$$

$$\text{viceversa } v = K 1500 / l ; \partial v / \partial l = - K 1500 / l^2 \Rightarrow \Delta v = \Delta l K 1500 / l^2$$

La compensazione in frequenza per una variazione delle dimensioni del recipiente è $\Delta v = \Delta l K 1500 / l^2 = \Delta l K 1500 / (K 1500 / v)^2 = \Delta l v^2 / (K 1500)$

per $v = 26\text{KHz}$ e $\Delta l = 1\text{mm}$ si ha $\Delta v = 451\text{Hz} / K$

Riprendendo l'equazione del modello tridimensionale ricaviamo, quindi, un generico modo normale del campo di pressione (in quanto la dipendenza di V da R e da φ non è cambiata):

$$U_{i,n,m}(r, \mathbf{j}, z, t) = j_n \left(\mathbf{x}_{i,n} \frac{r}{R_0} \right) C_m \cos \frac{m\pi}{l} z [A_n \cos n\mathbf{j} + B_n \sin n\mathbf{j}] e^{i \omega_{i,n,m} t}$$

$$P = P_0 + \mathbf{r} \frac{\partial}{\partial t} U_{i,n,m}$$

Ovviamente va fatta una precisazione: in generale il campo di pressione, a priori, sarà composto da una sovrapposizione di tutti questi modi normali (timbro del risuonatore); nel momento in cui il sistema venga eccitato proprio con una pulsazione particolare uguale a una delle $\omega_{i,n,m}$ un modo solo prevarrà su tutti gli altri.

L'asserzione: "gli effetti del campo acustico sono più evidenti alla risonanza" va poi interpretata in questo senso: maggiormente (o solamente) alla risonanza

l'ampiezza dell'onda stazionaria è tale da costringere le bolle ad un moto collettivo verso gli zeri del campo spaziale delle velocità, cioè i punti stazionari (massimi e minimi spaziali) del campo delle pressioni, com'è noto dalla dinamica delle bolle [cfr. ULTRASOUND-ITS CHEMICAL, PHYSICAL, AND BIOLOGICAL EFFECTS - VCH 1988, pag 85-88].

Gli studi teorici e sperimentali sulla dinamica di corpi e bolle in un fluido in presenza di un campo acustico risalgono al 1960. Ad un'onda acustica si possono associare proprietà di trasporto (acoustic streaming) che, per un campo stazionario, hanno conseguenze non banali sulla dinamica delle bolle.

Esponiamo brevemente alcune considerazioni al riguardo.

Se si definisce il raggio di risonanza come $R_0=3.3/f$, si trova sperimentalmente che le bolle si posizionano nei ventri (nodi) della pressione a seconda che il loro raggio sia minore (maggiore) di R_0 .

Ciò è coerente con il fatto che la SL coinvolge solo bolle con raggio molto piccolo e si verifica in punti in cui la pressione varia di molto nel tempo.

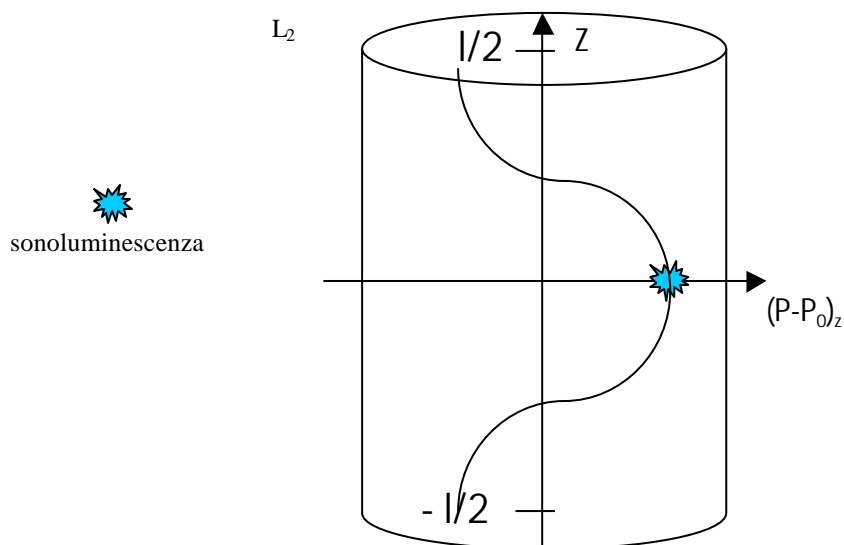
Riteniamo, in base a quanto letto, che le bolle da noi osservate ad occhio nudo alla risonanza, fossero invece in equilibrio nei nodi della pressione.

Il problema su come determinare i punti di equilibrio è comunque molto complesso; la risultante delle forze generate dal campo acustico su di una bolla, infatti, dipende dal suo volume che, a differenza dei corpi rigidi, è funzione della pressione e quindi non costante.

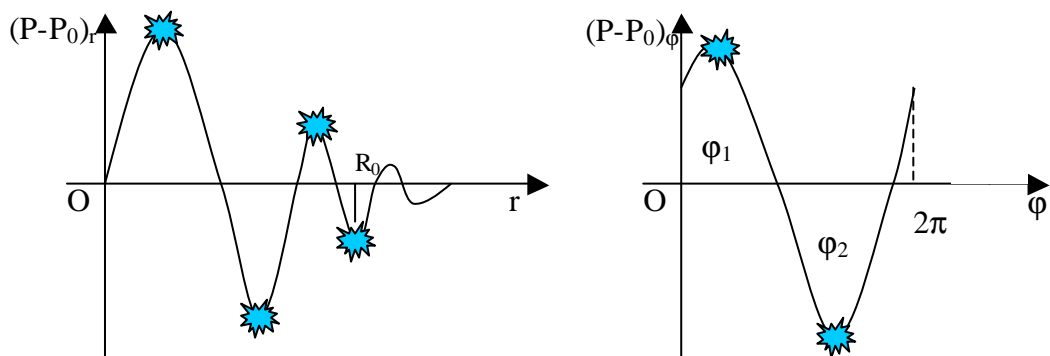
La pressione idrostatica, inoltre, altera l'equilibrio del sistema in misura inversamente proporzionale alla potenza del campo sonoro (sono stati progettati esperimenti di SL in condizioni di microgravità).

Per evidenziare la risonanza si sono osservate le traiettorie delle bolle ed il loro eventuale intrappolamento più o meno oscillante nei nodi della velocità:

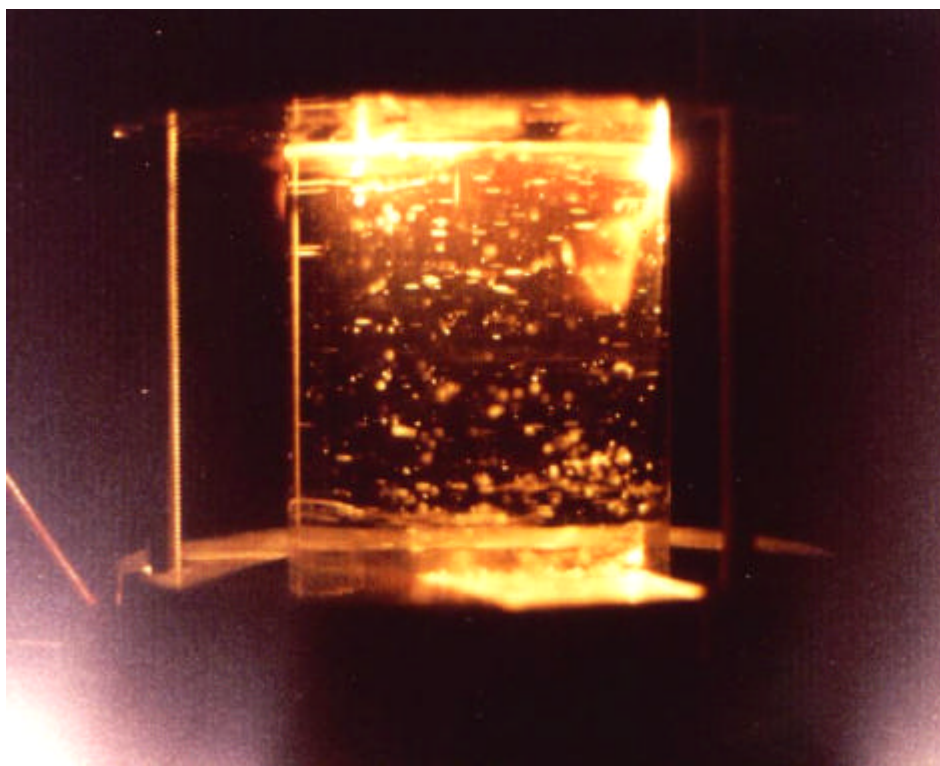
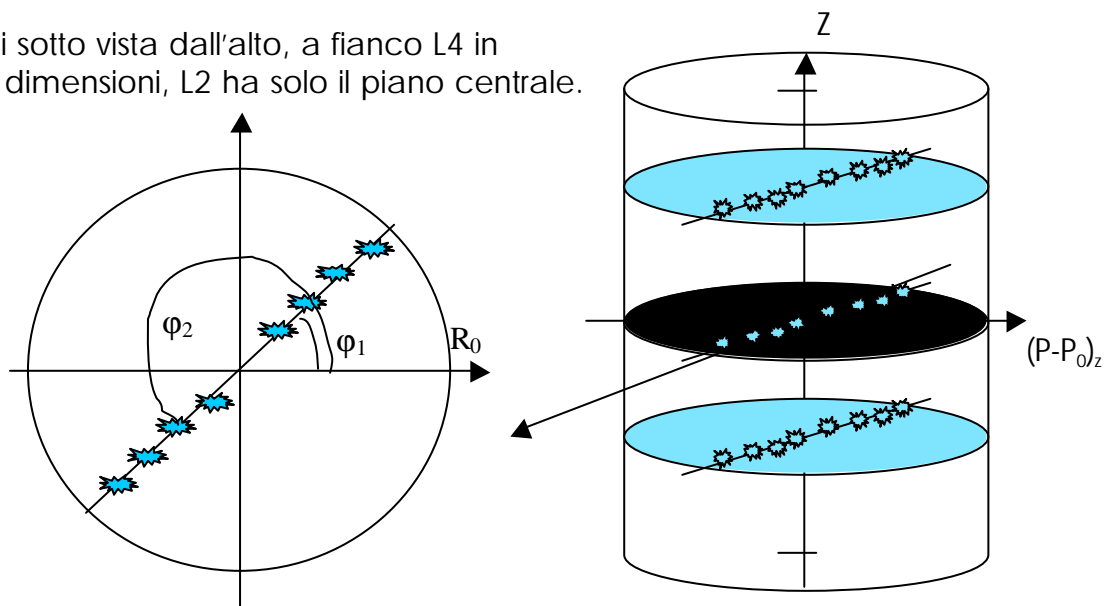
LONGITUDINALMENTE:



RADIALMENTE:



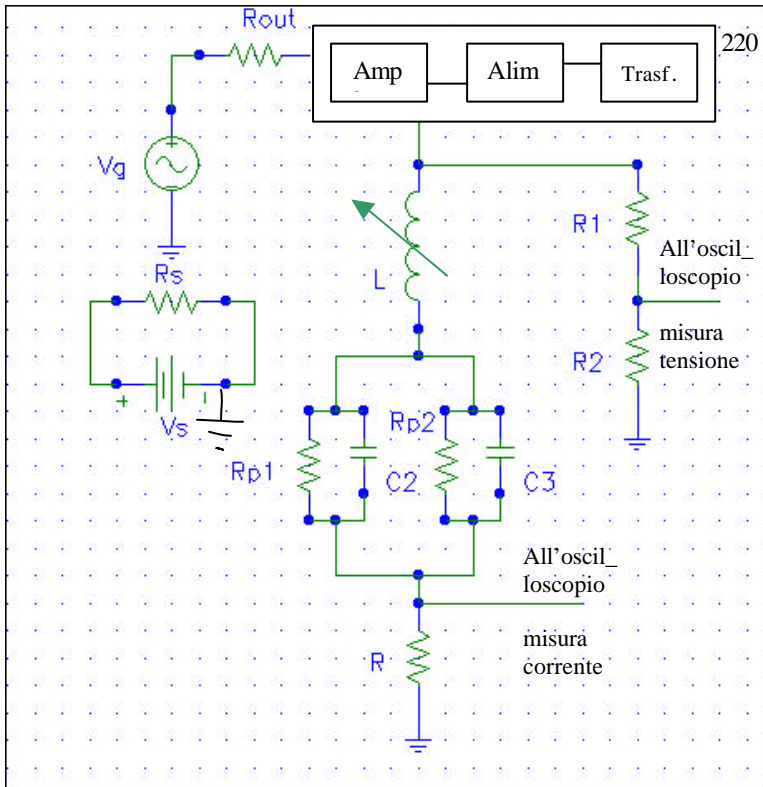
Qui sotto vista dall'alto, a fianco L4 in tre dimensioni, L2 ha solo il piano centrale.



Le bolle nei punti di equilibrio

RISONANZA ELETTRICA

Il circuito utilizzato per l'alimentazione dei piezoelettrici può essere così schematizzato:



Vg generatore di segnali
Vs alimentatore riscaldatore

Amp amplificatore
Alim alimentatore
Trasf trasformatore toroidale

Partitore per misura tensione ai capi dei piezo:

R1 1MΩ 1/4W
R2 10KΩ 1/4W

Rs 1Ω 1/2W riscaldatore

L induttanza variabile

R 1Ω 300W per misura di corrente attraverso i piezo

Piezoelettrici:
Rp1 C2; Rp2 C3
modello circuitale dei trasduttori

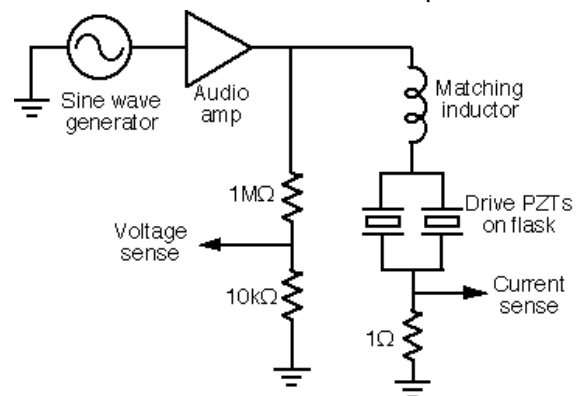
Si può semplificare il circuito considerando il parallelo dei due piezo e ponendo
 $C_p = 2C_{p1}$ $R_p = 1/2R_{p1}$ $Z_m = R_1 + R_2$ $Z_p = \text{impedenza piezo}$ $R_{int} = \text{resistenza interna dell'amplificatore}$

Dalle specifiche del generatore abbiamo ricavato i 2 parametri che a tutti gli effetti consentono di conoscere il suo comportamento, cioè tensione a circuito aperto e resistenza interna: leggendo che fornisce 282 W_{rms} su 4Ω e 185 W_{rms} su 8Ω ricaviamo:

$$P_{rms \text{ sul carico}} = \frac{\frac{V_0^2}{2} R_x}{(R_{int} + R_x)^2}$$

da cui

$$\begin{cases} 282 = \frac{V_0^2 \cdot 4}{2(R_{int} + 4)} \\ 185 = \frac{V_0^2 \cdot 8}{2(R_{int} + 8)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_0 = 63.4V \\ R_{int} = 1.3\Omega \end{cases}$$



Ora studiamo il circuito considerando Z_M , la serie di resistenze che utilizzeremo per misurare la tensione in uscita dal generatore, come infinita, riservandoci di scegliere R_i molto maggiore delle resistenze in gioco nel resto del circuito, e osserviamo che la potenza istantanea sui trasduttori è

$$P_p = I^2 Z_p = \frac{V^2 Z_p}{|Z_{TOT}|^2} \quad \text{e se} \quad Z_{TOT} = |Z_{TOT}| e^{jj} \quad \text{abbiamo}$$

$$P_p = \frac{V_0^2 e^{j2\omega t} e^{-j2j} Z_p}{|Z_{TOT}|^2} \quad \text{quindi il massimo di potenza trasferita}$$

ai piezoelettrici si verifica per $|Z_{TOT}|$ minimo

$$Z_{TOT} = R_{INT} + j\omega L + \frac{R_p \frac{1}{j\omega C_p}}{R_p + \frac{1}{j\omega C_p}} + R \equiv a + ib$$

Poiché $|Z_{TOT}| = \sqrt{a^2 + b^2}$ minimizziamo prima la parte reale e poi la parte immaginaria:

$$a = R_{INT} + R + \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}$$

$$b = \omega L - \frac{\omega R_p^2 C_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}$$

minimizzeremo a prendendo R piccola (le altre quantità sono fissate), e addirittura annulleremo b scegliendo:

$$L = \frac{R_p^2 C_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (v)$$

Si noti che così facendo ϕ , la fase dell'impedenza totale del circuito, che è uguale a $\arctg \frac{b}{a}$, essendo $b=0$ è nulla, il che significa che

$$I = \frac{V}{Z_{TOT}} = \frac{V_0 e^{j\omega t}}{a} \quad \text{cioè corrente in fase con la tensione: è questo che}$$

vorremmo verificare tramite una misura contemporanea di tensione in cima e corrente in fondo al circuito.

Una volta scelta L opportunamente il circuito sarà puramente resistivo. Dalle specifiche dei piezoelettrici ricaviamo : $C_{P1} = 5\text{nF}$; $R_{P1} = 1200\Omega$.

Possiamo pertanto calcolare la potenza dissipata nei vari punti del circuito:

$$P_{\text{richiesta al generatore}_{\text{RMS}}} = \frac{V_0^2}{2} \frac{1}{R_{\text{INT}} + R + \frac{R_P}{1 + \omega^2 C_P^2 R_P^2}} = 5,6W$$

$$P_{\text{dissipata sui piezoelettrici}_{\text{RMS}}} = \frac{V_0^2}{2} \frac{1}{\left(R_{\text{INT}} + R + \frac{R_P}{1 + \omega^2 C_P^2 R_P^2}\right)^2} |Z_P| = 5,6W$$

$$P_{\text{dissipata sulla res.interna}_{\text{RMS}}} = \frac{V_0^2}{2} \frac{1}{\left(R_{\text{INT}} + R + \frac{R_P}{1 + \omega^2 C_P^2 R_P^2}\right)^2} R_{\text{INT}} \approx 0W$$

$$P_{\text{dissipata su } R_{\text{RMS}}} = \frac{V_0^2}{2} \frac{1}{\left(R_{\text{INT}} + R + \frac{R_P}{1 + \omega^2 C_P^2 R_P^2}\right)^2} R \approx 0W$$

Calcoli effettuati con $\omega = 2\pi \cdot 22\text{KHz}$.

L'apparato sperimentale

L'apparato sperimentale si può suddividere nelle componenti così elencate:

- risonatore
- trasduttori piezoelettrici
- generatore d'onda
- il liquido e la bolla

IL RISUONATORE

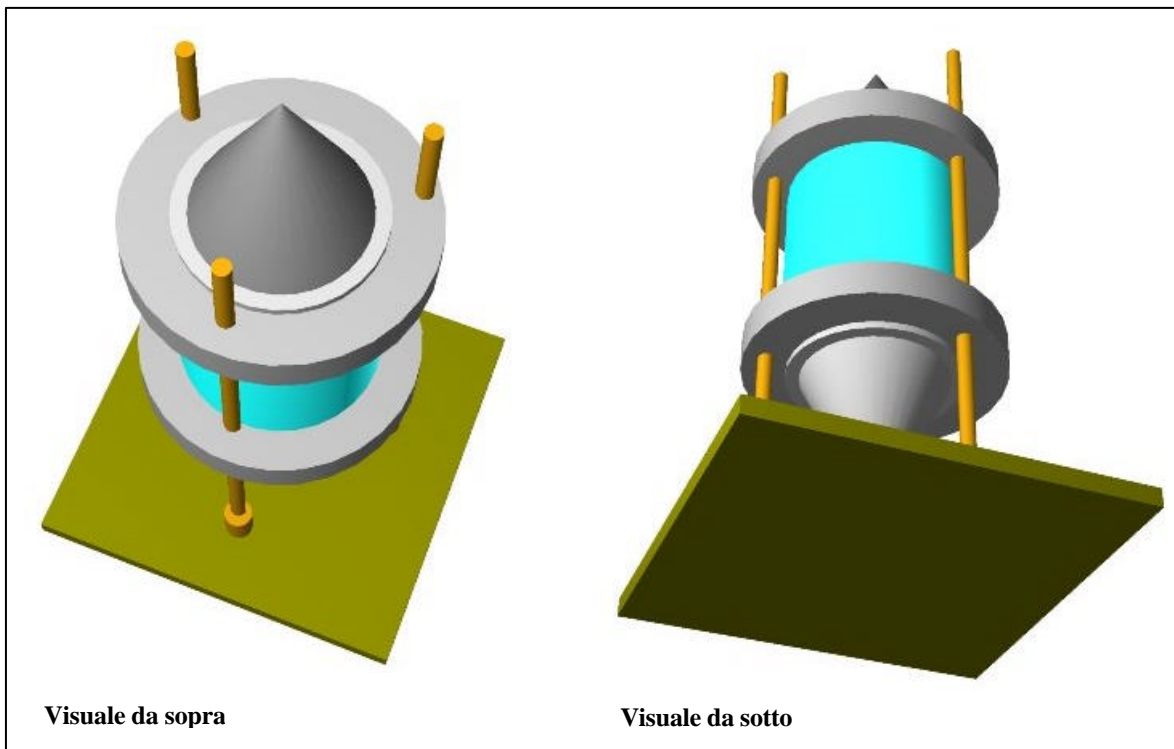
Per generare il campo acustico necessario all'esperimento si deve costruire un contenitore a tenuta nel quale si possa innescare il fenomeno di risonanza ricercato.

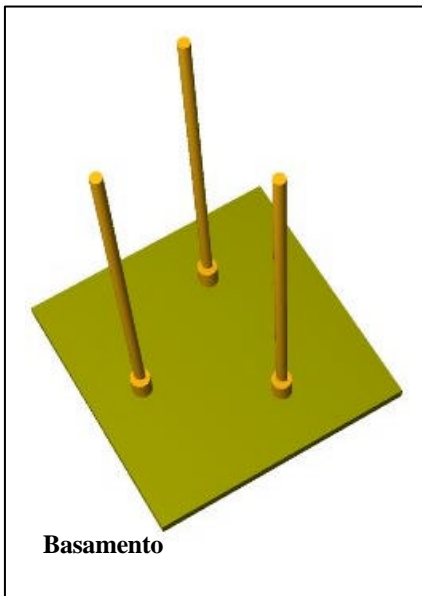
Le possibili geometrie sono quella sferica che avrebbe previsto un flask da 100ml e quella cilindrica da noi adottata perché gli unici trasduttori trovati non si potevano adattare alla prima configurazione, essendo troppo grandi.

Sulla trattazione della risonanza si rimanda al capitolo dedicato, è chiaro comunque che il problema essenziale è quello di accordare il cilindro sulla frequenza giusta, avendo i piezo una buona efficienza solo a frequenze determinate.

Inizialmente il progetto prevedeva due pistoni a tenuta, scorrevoli all'interno di un cilindro di vetro, sui quali sarebbero stati montati i trasduttori; in seguito si è deciso di utilizzare un unico pistone mobile ed una flangia fissa per ridurre al minimo vibrazioni non desiderate, ma come scelta finale e definitiva si è adottata una configurazione "rigida", cioè, come si può vedere nel progetto inviato all'officina meccanica e dalle riproduzioni al computer, con due flangie fisse, ma con la possibilità di modificare la lunghezza d'onda caratteristica cambiando il cilindro di vetro o stringendo maggiormente le flange giocando così sull'elasticità delle guarnizioni.

La soluzione adottata quindi prevede:





Basamento

➤ **basamento**

esso è costituito da una spessa base metallica su cui sono saldati tre supporti ai vertici di un ideale triangolo equilatero, in cui alloggiato tre lunghe viti necessarie per sostenere il risonatore e stringere contro il cilindro di vetro le flange

➤ **flange**

le flange sono due anelli uguali in alluminio in cui sono stati incisi incavi per ospitare gli Oring e le guarnizioni per la tenuta, rispettivamente per ospitare il vetro ed il trasduttore. Esso è incollato sotto vuoto ad una lamina di alluminio spessa 3mm che presenta fori per essere fissato sugli anelli, ma la lamina del trasduttore superiore possiede due fori aggiuntivi per il

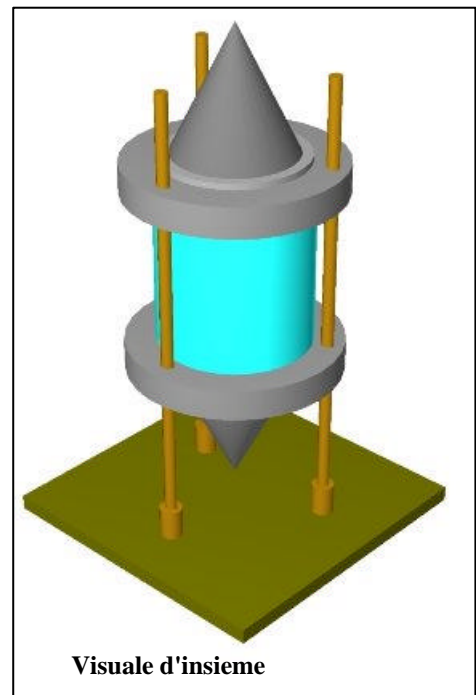
passaggio

dell'acqua e di eventuali strumenti. Le guarnizioni flangia-vetro sono state costruite adagiando sul fondo dell'incavo un tubicino di gomma in seguito ricoperto di silicone; ciò non solo permette una corretta tenuta, ma garantisce la possibilità di variare un po' la lunghezza della cavità risonante restringendo i dadi opportuni.

➤ **cilindro**

il cilindro di vetro costituisce la camera di risonanza vera e propria in cui si deve posizionare una bolla d'aria e da cui si può osservare la sonoluminescenza.

Sono state tagliate più misure di questo elemento per poter modificare la frequenza di risonanza dell'apparato e per lavorare anche con differenti numeri d'onda.



Visuale d'insieme

I TRASDUTTORI PIEZOELETRICI

Per generare il campo acustico all'interno del risonatore si sono utilizzati due trasduttori piezoelettrici ceramici da 50W l'uno, saldati sotto vuoto su flange in alluminio spesse 3mm.

GENERATORE D'ONDA

I trasduttori devono essere pilotati da un amplificatore di potenza in grado di erogare tensioni dell'ordine di 100V per questo abbiamo montato un amplificatore da 250W su 4Ω, MK1300 della G.P.E.

Classe	AB
Potenza massima su 4Ω	250W RMS
Potenza massima su 8Ω	150W RMS
Sensibilità di ingresso	1V RMS per 120W su 8Ω
Rapporto segnale rumore	90dB a potenza MAX
Distorsione armonica totale	0.05%
Impedenza d'ingresso	25Ω
Tensione di offset in uscita	< ±20mV
Tensione di alimentazione	±70÷75V

Tab. 1. Caratteristiche dell'amplificatore

con finali a Mosfet che ci permettono quindi di lavorare a frequenze ultrasoniche senza problemi di banda passante.

Per generare la forma d'onda si utilizza un generatore da laboratorio la cui frequenza e tensione vengono costantemente monitorate da un voltmetro digitale, un oscilloscopio ed un frequenzimetro.

L'amplificatore ed il suo alimentatore sono stati costruiti in KIT ed in seguito assemblati insieme con un trasformatore toroidale in una scatola metallica, raffreddando l'aletta dei mosfet con una ventola in quanto i giusti radiatori non sono stati reperiti in commercio.

L'alimentatore è un duale con $\pm 75V$ 500W di potenza.

Per la taratura si veda l'allegato.

IL LIQUIDO E LA BOLLA

Per uno studio sistematico sulla SL, è conveniente controllare il numero di bolle presenti nel risuonatore (al limite una sola bolla per esperimenti di single bubble sonoluminescence). Un eccesso di gas disciolti, normalmente presenti in soluzione, porterebbe alla continua formazione di bolle a causa della cavitazione (vedi ULTRASOUND).

Impurità, inoltre, potrebbero disturbare la stabilità della bolla od addirittura alterarne le caratteristiche di interfaccia come accadrebbe in presenza di tensioattivi.

Per ridurre al minimo le impurità inizialmente si è pulita la camera di risonanza con acqua normale ed una seconda volta con acqua purificata. Essa è stata ottenuta utilizzando un sistema milli-Q di ultra purificazione.

Dallo stesso dispositivo si è ricavata l'acqua parzialmente degassata lasciandola bollire per mezz'ora e tappando in seguito il contenitore durante il raffreddamento.

Ricerca della sonoluminescenza

PRIME PROVE E PRIMI PROBLEMI

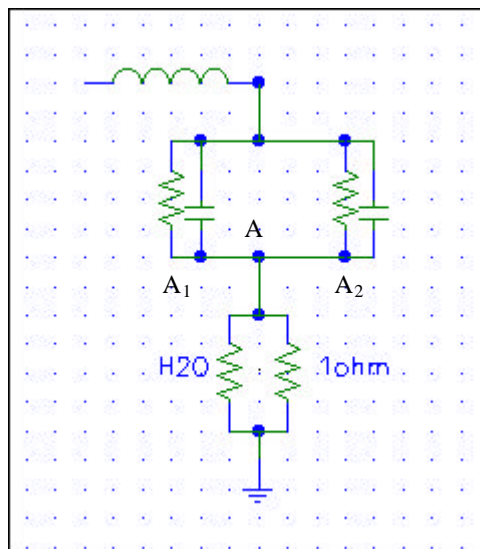
AmMESSO di trovare la risonanza, era chiaro fin dal principio che un ruolo determinante avrebbe giocato l'ampiezza della forzante, poiché per vincolare le bolle ai ventri del campo di pressione bisogna se non altro vincere la forza idrostatica che spinge le stesse verso la cima del cilindro.

Confortati anche da quanto letto sull'articolo ispiratore della tesina (SONOLUMINESCENCE: SOUND INTO LIGHT - S.J. PUTTERMAN e l'allegato THE AMATEUR SCIENTIST- PRODUCING LIGHT FROM A BUBBLE OF AIR - R.A.MILLER B.P.BARBER in SCIENTIFIC AMERICAN FEBBRAIO 1995) abbiamo perciò ritenuto necessario l'uso di un potente stadio di amplificazione del segnale.

Prima di attivare questo amplificatore, tuttavia, abbiamo provato ad attaccare semplicemente il generatore di segnali ai trasduttori e osservato incuriositi il comportamento di alcune bolle prodotte tramite la resistenza R_L in presenza di questo debole campo acustico.

Innanzitutto tra i primi problemi che ci siamo posti c'era quello di isolare perfettamente la resistenza riscaldatrice dal contatto con l'acqua non distillata: infatti per caratteristica propria dei trasduttori i punti A_1 e A_2 sono connessi alla struttura metallica di sostegno al cilindro, la quale è a diretto contatto con l'acqua che a sua volta potrebbe toccare i fili della resistenza e fare in modo che il punto A si trovi a massa, cioè connesso alla massa del generatore di V_{Rs} , al che lo oscilloscopio in A misurerebbe tensione nulla.

Ci siamo in ogni caso cautelati mettendo guaine termorestringenti intorno ai fili della resistenza: tuttavia l'alta resistenza dell'acqua avrebbe da sola risolto il problema, infatti, durante l'esperimento, la misura della corrente non è stata minimamente influenzata dalla accensione o meno di V_{Rs} , benché, sotto l'azione del campo acustico, i suddetti termorestringenti si siano deteriorati in maniera evidente e tale da compromettere la tenuta stagna.



Le operazioni iniziali consistevano in:

- accendere il generatore, avendo prima riempito completamente il cilindro d'acqua, evitando la formazione di sacche d'aria sotto i trasduttori che avrebbero modificato la trasmissione sonora e perfezionare tale procedimento in seguito;
- variare la frequenza attorno ai 22 KHz per trovare esattamente la "risonanza dei piezoelettrici", cioè la precisa frequenza di lavoro propria dei trasduttori, alla quale hanno per loro caratteristiche un migliore rendimento di potenza);
- agire sulle viti della struttura di supporto del cilindro (l'acqua presente può essere asportata a piacimento tramite due sfiati) per ritrovare la risonanza acustica che chiaramente non ha nulla a che vedere con quella di lavoro dei piezoelettrici;
- fasare tensione e corrente per avere risonanza elettrica, che nuovamente è indipendente dalle altre due ma è altrettanto indispensabile al raggiungimento della massima ampiezza di onda stazionaria possibile. Tramite l'oscilloscopio abbiamo perciò cercato un picco nella corrente al variare della frequenza e della lunghezza, e trovato abbiamo agito sull'induttanza variabile per azzerare lo sfasamento tra corrente e tensione di ingresso.

IL FELICE ACCORDO COL MODELLO

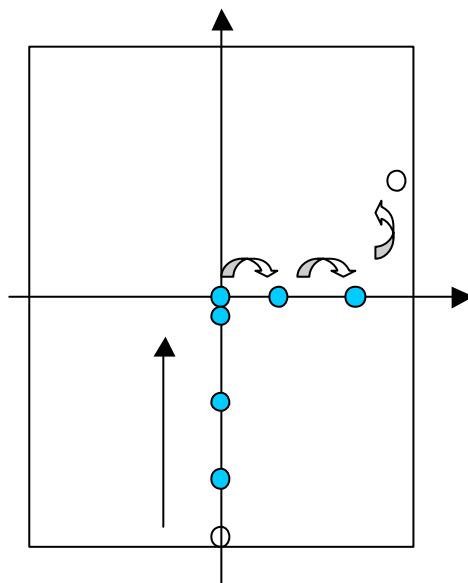
Ci si è presto accorti che, variando la sola frequenza, fissando cioè la lunghezza del cilindro ad un valore solo prossimo a quello di risonanza e selezionando arbitrariamente l'induttanza, si ottenevano evidenti risonanze in più punti.

Ciò era evidenziato da picchi improvvisi di corrente (infatti in condizioni di risonanza, rispettivamente dei piezoelettrici o del circuito, è minore la frazione di potenza dissipata in quello stadio per compiere lavoro interno di resistenza agli echi propri del cristallo piezoelettrico o rispettivamente del cilindro, lasciandone di più a disposizione per l'ampiezza di campo) o semplicemente ascoltando l'intenso rumore prodotto dalle vibrazioni della struttura (la risonanza fornisce sufficiente energia alle vibrazioni dell'apparato per entrare nel campo di ampiezza udibile, e

anche ad alta frequenza, mentre la membrane dei piezoelettrici vibrano concordemente al valore di frequenza impostata sul generatore, i piatti e i sostegni entrano in vibrazione secondo i loro modi normali che comprendono anche frequenze udibili).

Nel frattempo, osservando il cilindro, vedevamo come le bollicine prodotte dalla resistenza sul fondo a frequenza compresa tra un picco e l'altro salivano pressoché indisturbate verso la cima senza deviare il proprio percorso, mentre in corrispondenza dei picchi minori si comportavano in questo modo: ad una regolare ascesa praticamente verticale seguiva un improvviso arresto, come se avessero trovato un muro invalicabile, un breve viaggio rettilineo orizzontale fino quasi al bordo del vetro, infine una salita a parabola nei pressi del vetro.

Centrata la risonanza alcune bollicine, muovendosi a "salti", davano luogo a filari orizzontali abbastanza stabili e ben distinguibili; questa bolle in pratica percorrevano la distanza R_0 non più con continuità (vedi fig) ma balzando su precisi punti che abbiamo entusiasticamente interpretato come i punti di equilibrio radiali ipotizzati.



Altre volte al picco massimo non avevamo filari, ma una bollicina restava intrappolata immobile al centro per alcuni secondi fino a che non ne sopraggiungeva un'altra che, roteandole un po' intorno, finiva per fondersi con essa; il volume della due bolle unite diventava comunque troppo elevato e tale da rompere l'equilibrio, aumentando, infatti, bruscamente la spinta di Archimede e facendo schizzare verso l'alto la bolla.

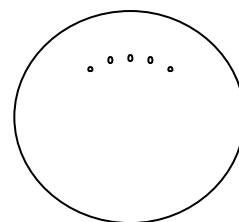
Spesso si potevano osservare anche bollicine che muovendosi lungo un diametro si univano al centro del cilindro fino al raggiungimento della instabilità o clusters di bolle che non si univano in un'unica più grande.

Analogamente cambiando cilindro e mettendo quello di lunghezza 13.6cm distinguevamo chiaramente gli stessi identici fenomeni con però più piani e anzi i filari erano anche più visibili di prima.

Le bolle provenienti dal basso non superavano il primo muro, ma variando la frequenza molte bolle si sparpagliavano per il cilindro, per cui alla risonanza grande vi erano filari in tutti i piani.

Alcune considerazioni:

-in tutti i casi osservati, per ciascun piano mai abbiamo visto più di un filare, e questo sempre semidiametrale, cioè esteso da $r=0$ al bordo e prevalentemente da una stessa parte del cilindro; abbiamo pensato ad una certa asimmetria della struttura che favorisse φ_1 a $\varphi_1 + \pi$.



Confortati dal fatto che una mattina abbiamo isolato per caso a 44.0 KHz questa configurazione di bolle ferme si può ipotizzare che probabilmente fosse il modo $\cos n\varphi$ con n grande, ma che non vedevamo semplicemente perché la presenza di un punto nodale non significa che bisogna

necessariamente trovarvi una bolla, perché quello dipende dalle condizioni iniziali di posizione e velocità delle singole bolle;

-dopo alcuni minuti di continua alimentazione del campo acustico, sulla superficie laterale le bollicine attaccate si organizzavano in circonferenze all'altezza dei piani, in maniera molto regolare; subito abbiamo pensato che fosse dovuto al fatto che il riempimento con acqua del cilindro non era avvenuto tutto di un colpo, come se interrompere la salita dell'acqua avesse provocato un'impronta all'interfaccia con l'aria residua alla quale le bolle della parete trovavano facile aderire; abbiamo provato a cambiare cilindro e modificato il metodo di riempimento, senza osservare la scomparsa o l'attenuazione del fenomeno.

Abbiamo allora accettato fosse proprio effetto della risonanza, che ferma le bolle in piani e le lascia aderire bene alle pareti, tanto che anche al variare della frequenza esse non si staccano;

-variando lievemente l'ampiezza dell'onda fornita dal generatore di segnali, fissata precedentemente ad una frequenza di risonanza, ci si accorge come il picco della risonanza si instaura bruscamente al variare dell'altezza del segnale e contemporaneamente si avverte un rumore caratteristico.

INFORMAZIONI PER UN APPROCCIO DI FIT DEL MODELLO

Rendersi conto quantitativamente della precisione delle nostre misure non è impresa banale. Misurare in qualche modo l'altezza dei piani nodali e la spaziatura tra due punti contigui di un filare con un minimo di accuratezza avrebbe richiesto il progetto di un metodo un po' astuto, e avrebbe inevitabilmente sottratto tempo al conseguimento del reale obiettivo della tesina, l'osservazione della sonoluminescenza e in qualche modo un suo primigenio studio. Più avanti proveremo con misure sulle fotografie ottenute.

Per la misura delle frequenze di risonanza si rimanda alla ultima parte della relazione. Nel frattempo riportiamo le frequenze di risonanza proprie dei trasduttori ricavate osservando i picchi di corrente, perlomeno i più evidenti, che si hanno quando questi sono separati dal cilindro, liberi di vibrare all'aperto: essendo appoggiati sullo stesso tavolo il circuito si chiude ugualmente, ma non pensiamo di aver misurato le frequenze proprie del tavolo, troppo pesante per risuonare apprezzabilmente al KHz: confidando che il tavolo si sia comportato da vincolo neutro di onde sonore, abbiamo considerato i picchi di corrente propri esclusivamente delle risonanze dei piezoelettrici.

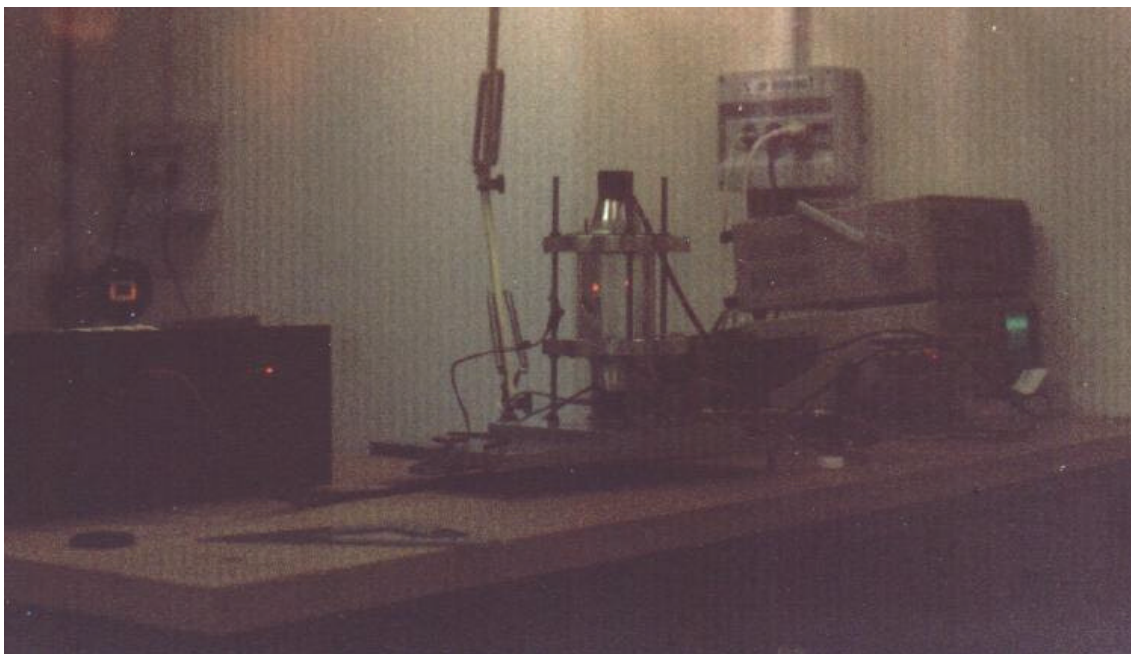
NOTA: questa misura può essere pericolosa per l'udito in quanto non c'è più il cilindro d'acqua a trattenere la potenza dei trasduttori, per cui mettere cautela nel ripeterla e non avvicinare l'orecchio agli stessi, usando bassa potenza o addirittura spegnendo l'amplificatore.

Principali picchi dei piezo fra i 20 e i 150 KHz (errore ± 0.1 KHz ; L=1mH)

21.9	43.5	59.2	63.9	70.9	76.8	83.6	137.2
------	------	------	------	------	------	------	-------

Tali valori verranno utilizzati per l'analisi dei tracciati elaborati più avanti.

ESPERIMENTI CON LA POTENZA



Il laboratorio di ottica allestito per l'esperimento.

Con l'utilizzo della potenza la non linearità del processo, latente prima, si manifesta chiaramente: il moto delle bolle si fa convulso e la struttura stessa produce ormai un rumore continuo, intensissimo, alla risonanza. I filari ci sono ancora, anche se un po' deformati, è forse più difficile intrappolare una bolla in un punto nodale della velocità, ma alla $\nu=115$ KHz appare un fenomeno spettacolare: un vero e proprio reticolo di bolle oscillanti intorno alla posizione di equilibrio prende forma piuttosto stabile nell'interno del cilindro, concordemente al fatto che ad alta frequenza i piani orizzontali aumentano di numero e si infittiscono.

Abbiamo ritenuto opportuno cercare di osservare la sonoluminescenza senza preoccuparci di raffinare la lunghezza del cilindro, né di fasare, sperando già così di avere una sufficiente ampiezza di campo acustico da vedere il fenomeno. Questo primo approccio ci sarebbe servito per renderci conto di quanto le nostre stime fossero state accurate e di quanto era necessario modificare l'apparato.

Si è quindi rimontato l'apparato nel laboratorio di ottica e, nel buio, iniziato a variare la frequenza del generatore con l'amplificatore acceso.

Inizialmente avevamo utilizzato l'acqua distillata degassata, non notando tuttavia alcun fenomeno, abbiamo deciso di incrementare il numero di bolle nel liquido usando normale acqua del rubinetto.

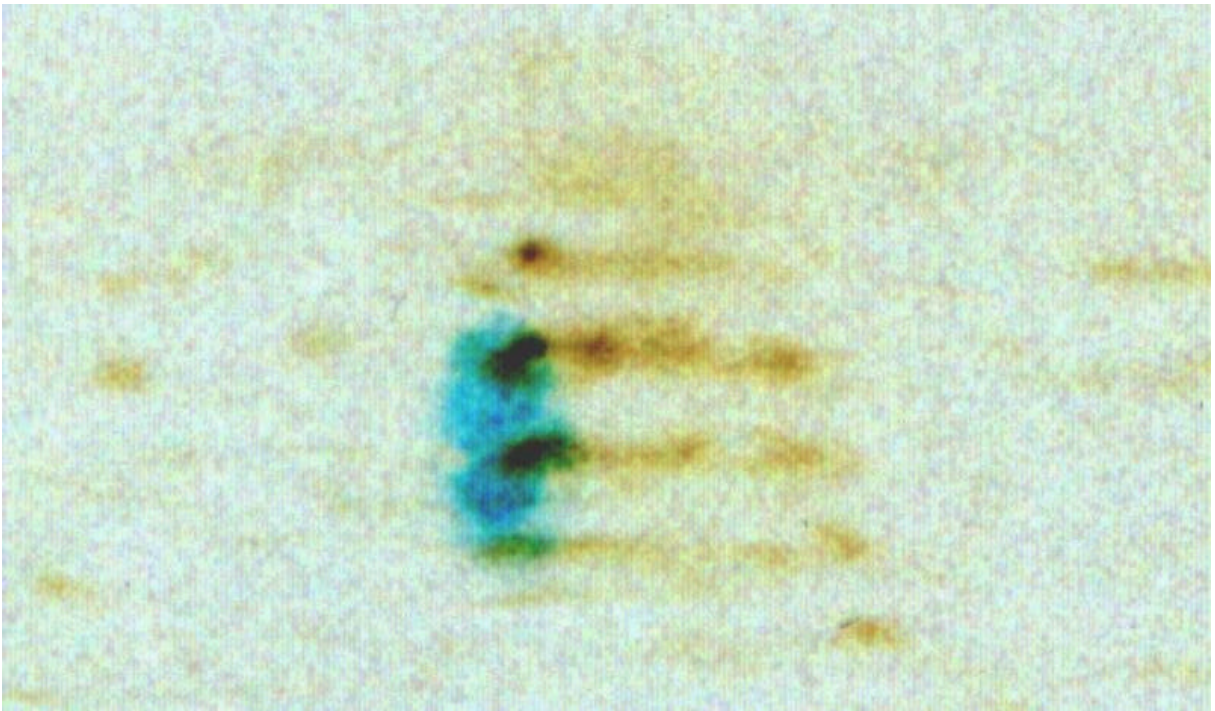
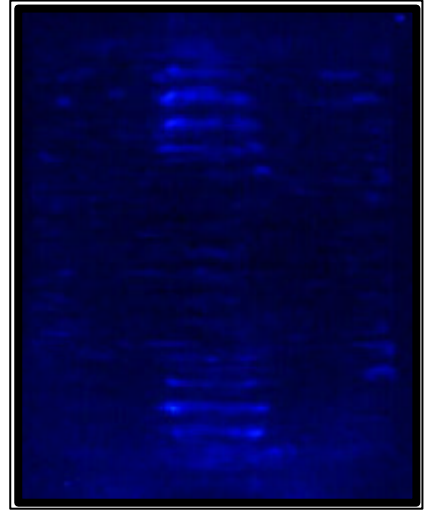
Verso i 40KHz improvvisi e fugaci bagliori bluastri hanno fornito il segno evidente che avevamo costruito un risonatore adeguato, ma la bassa intensità degli spot, non ci permetteva di essere sicuri di ciò che vedevamo, benché tutti noi avessimo esultato contemporaneamente e ciò non poteva essere solo una coincidenza.

La prova non è tardata a venire quando all'aumentare della frequenza sono apparsi reticoli più o meno stabili e più o meno intensi di punti luminescenti.

SONOLUMINESCENZA

Se lontani dalla risonanza (o meglio "dalle risonanze" perché ora siamo nella condizione della formula (iii), l è fissato) il cilindro resta buio, alle frequenze di risonanza esso si illumina di una luce bluastra che, può essere distinta nell' oscurità dopo una decina di minuti di abitudine dell'occhio al buio. Dopodiché prima si vede un vago bagliore, poi si riescono lentamente a distinguere le sorgenti di luce, cioè i piani nodali.

Accendendo la luce improvvisamente al momento della sonoluminescenza si vedeva il reticolo di bolle sopra descritto. Infine abbiamo osservato forme straordinariamente varie e affascinanti di sonoluminescenza qui sotto descritte, e abbiamo tentato di fotografarle con una camera professionale a posa lunga.



Ingrandimento della zona superiore del cilindro, digitalizzata in colori veri e messa al negativo per evidenziare le nette bande di luminescenza che appaiono qui più scure. Le bande sono reticoli planari di bolle luminescenti visti di taglio. La zona bluastra è un riflesso del vetro.

FREQUENZE DI SONOLUMINESCENZA

($L = 0.3\text{mH}$ lunghezza cilindro $13.6 \pm 0.1\text{cm}$)

(KHz , $\pm 0.1\text{KHz}$)	V_{pp}	I_{pp}	NOTE
44.0 - 47.2 (max 46.0)	$(57.2 \pm 2.2)\text{V}$	$(1.80 \pm 0.05)\text{A}$	cilindro completamente illuminato, ma instabile (sempre ben visibili le strutture); forte odore come di ozono)
50.8	$(57.2 \pm 2.2)\text{V}$	$(1.80 \pm 0.05)\text{A}$	illuminato un piccolo cilindro concentrico molto bene

68.7 - 70.0 (max 69.0)	$(44.0 \pm 2.2)V$	$(2.20 \pm 0.05)A$	illuminate solo le 2 basi del cil. piccolo
74.0	$(44.0 \pm 2.2)V$	$(6.6 \pm 0.1)A$	illuminate 2 nuvolette alle basi del cil. piccolo
78.7	$(44.0 \pm 2.2)V$	$(5.0 \pm 0.1)A$	si illuminano le nuvolette e un filino luminoso le unisce coassialmente al cilindro
91.4	$(33.0 \pm 2.2)V$	$(1.2 \pm 0.1)A$	bagliore alle due basi del cilindro
102.6	$(26.4 \pm 2.2)V$	$(4.0 \pm 0.1)A$	bagliori sparsi poco più intensi del precedente
115.0	$(26.4 \pm 2.2)V$	$(12.0 \pm 0.2)A$	cilindro piccolo con centro oscuro
115.0 - 115.7	continuità di diffusa luminescenza		
115.7	$(26.4 \pm 2.2)V$	$(10.0 \pm 0.2)A$	cilind. grande illuminato
115.7 - 125.0	continuità di diffusa luminescenza		
125.0	$(26.4 \pm 2.2)V$	$(9.2 \pm 0.2)A$	cilind. piccolo illuminato
125.2	$(26.4 \pm 2.2)V$	$(12.0 \pm 0.2)A$	cilind. grande illuminato
126.4	$(26.4 \pm 2.2)V$	$(12.0 \pm 0.2)A$	cilind. piccolo illuminato con aloni di ingrossamento
131.2	$(26.4 \pm 2.2)V$	$(4.4 \pm 0.2)A$	bagliori
131.2 - 142.6	continuità di luminescenza		e bagliori
142.6	$(22.0 \pm 2.2)V$	intorno 1.2A	bagliori

Non abbiamo stimato la potenza sui trasduttori, in quanto la corrente, alla risonanza, non aveva più aspetto sinusoidale.

Ad un certo punto ci è venuto un dubbio: è vero che avevamo sufficiente potenza per vedere la sonoluminescenza anche senza fasare, ma forse fasando avremmo potuto osservarla meglio cioè con luce più intensa o addirittura osservarla a frequenze a cui non l'abbiamo osservata; non a tutte le risonanze, infatti, abbiamo visto sonoluminescenza. Ciò sarà discusso in seguito.

Non abbiamo ripetuto le misure fasando alle frequenze del grafico perché manualmente sarebbe stata una misura incerta e dispendiosa, ma è uno spunto che lasciamo, consigliando di costruire un circuito che rifasi in maniera automatica tensione e corrente al variare della frequenza. Tale accorgimento non è necessario per esperimenti a frequenza fissa, ma indispensabile per misure di "spettro".

L'intensità della SL inoltre dipende dall'intensità del campo acustico, consigliamo, quindi di sfruttare meglio di quanto abbiamo fatto il generatore di potenza, usando un trasformatore come adattatore di impedenza, e non semplicemente di aumentare l'ampiezza della tensione del generatore di segnali: così facendo, infatti, si aumenta il ripple dell'amplificatore al Mhz (già ben visibile all'oscilloscopio) col rischio di bruciarlo.

Un'ultima nota: abbiamo notato che la sonoluminescenza si osserva meglio con acqua quanto più fredda, tanto che per le fotografie abbiamo usato acqua raffreddata con azoto liquido (solo per ridurre i tempi). Dopo circa un'ora di accensione l'acqua è già così calda da non permettere più una buona visibilità.

UNA PROVA DI CONSISTENZA

Abbiamo poi fatto una prova con il cilindro riempito a metà d'acqua, poi quasi fino in cima, infine solo con poco liquido sul fondo: in tutti i casi, a frequenze diverse da quelle sopra esposte, vedevamo sonoluminescenza nella parte riempita.

In seguito abbiamo arbitrariamente fissato una frequenza e lentamente riempito il cilindro nel buio: come ci aspettavamo, al variare dell'altezza della colonna d'acqua, osservavamo alternativamente reticoli luminosi (insieme all'intenso rumore della risonanza) e buio. La differenza di livello del liquido tra le varie risonanze, inoltre, corrispondeva alla lunghezza d'onda nel mezzo; ciò è coerente con il fatto che soltanto spostandosi di un numero intero di lunghezze d'onda si preserva la simmetria di eccitazione del modo, ovvero il campo di velocità è antisimmetrico rispetto al centro essendo i trasduttori in fase.

MISURE SULLE FOTOGRAFIE

La seguente immagine è l'unica su cui si possono effettuare delle misure di un certo significato.

Essa è stata digitalizzata tagliando con filtri il rosso ed il verde, evidenziando quindi le bande di sonoluminescenza (a causa di una variazione casuale in frequenza vi sono sovrapposte due figure, un cilindro piccolo ed un cilindro che occupa tutto il risonatore, posa 15' 3200ASA).

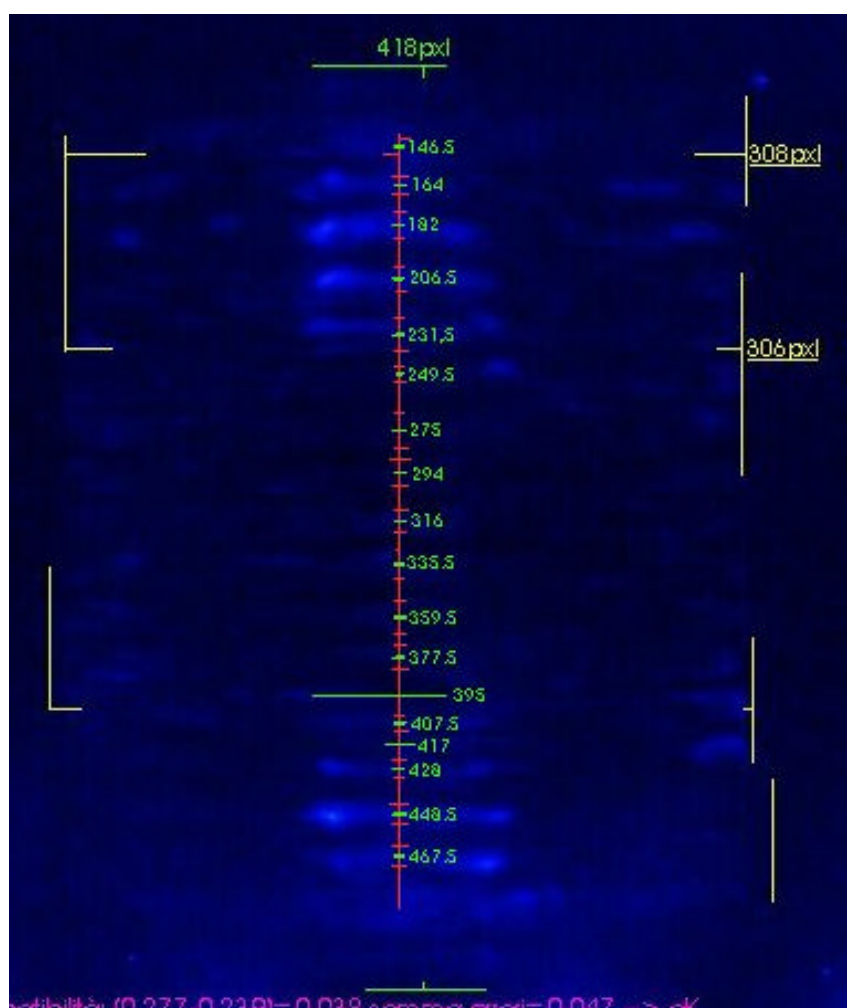
Le righe verdi sul margine superiore ed inferiore sono servite per la misura del numero di pixel della lunghezza del vetro.

Le righe gialle verticali per misurare la larghezza.

Conoscendo tali valori in mm si possono stimare due fattori di equivalenza.

Nelle successive tabelle si possono leggere tutti i calcoli effettuati compreso il test di compatibilità fra tali due stime, test positivo che conferma, quindi, la validità delle misure.

Si è proceduto, quindi, ad una media pesata dei due valori ottenendo il miglior valore stimabile di mm/pxl.



Sulla riga verticale rossa sono stati individuati con dei tratti orizzontali gli estremi delle bande luminescenti ed in verde il punto medio con il corrispondente valore in pixel.

Eseguita la media della distanza interplanare in pixel e convertita in mm si è potuto stimare la frequenza corrispondente (130 ± 28)KHz.

E' ovvio che, a causa della qualità dell'immagine, gli errori su tale stima sono considerevoli, ma comunque essa individua il corretto range di frequenze; l'immagine, infatti, è stata presa a 123KHz.

pxl	D
146,5	
164,0	17,5
182,0	18,0
206,5	24,5
228,0	21,5
249,5	21,5
275,0	25,5
294,0	19,0
316,0	22,0
335,5	19,5
359,5	24,0
377,5	18,0
395,0	17,5
407,5	12,5
428,0	20,5
448,5	20,5
467,5	19,0

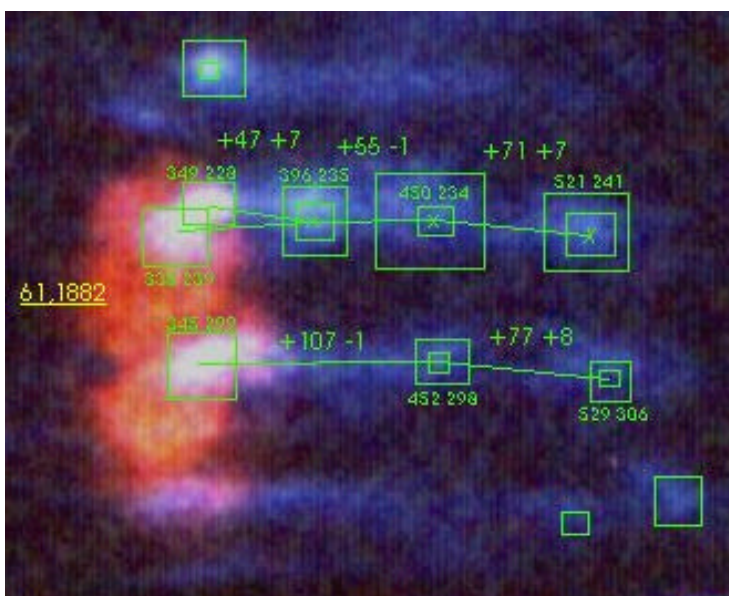
media (pxl):	20 ±	3
mm/pxl:	0,270 ±	0,011
spaziatura (mm):	5,4 ±	1,1
freq. (KHz):	138 ±	28

larghezza cil. In pxl		
308		
306	311 ±	6
318		
diametro cilindro(mm)	86 ±	2
mm/pxl (1)	0,277 ±	0,012
lunghezza cilindro(mm)	136 ±	1
spessore piatti (mm)	18 ±	1
lunghezza cil.vetro(mm)	100 ±	6
pxl calcolati (5%):	418 ±	21
mm/pxl (2)	0,2392 ±	0,027

compatibilità (1),(2)	
differenza	0,038
somma err:	0,039
stime compatibili	

Media pesata: mm/pxl	0,270 ±	0,011
----------------------	---------	-------

La stessa fotografia digitalizzata a definizione maggiore e su tutto lo spettro del visibile, ingrandita sulla zona superiore, evidenzia delle zone di luminescenza più intensa. Se inizialmente non sembrava essere significativa, abbiamo calcolato le distanze fra questi punti e si è notato una certa regolarità. Con altre fotografie ed



un'analisi più approfondita, si potrebbe stimare l'ordine della funzione di Bessel, ma è necessario dotarsi degli opportuni strumenti tecnici e teorici.

Immaginiamo di riuscire a misurare i valori x_1 e x_2 coordinate radiali della prima e della seconda bolla stabili.

Si calcoli un parametro

$$\sigma = (2X_1 - X_2) / X_1$$

esso esprime di quanto si discosti in percentuale la coordinata X_2 dalla stima $2X_1$.

Verificando nella tabella l'andamento di tale parametro sulle varie funzioni di Bessel si può constatare che misurando σ si può perlomeno fissare un limite inferiore all'ordine.

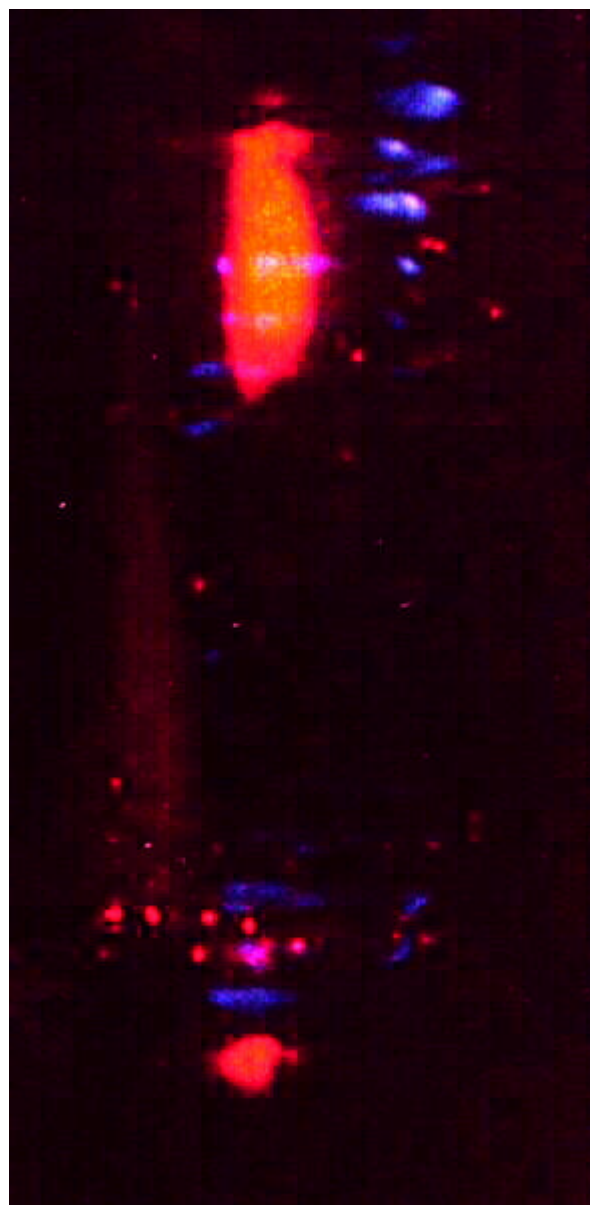
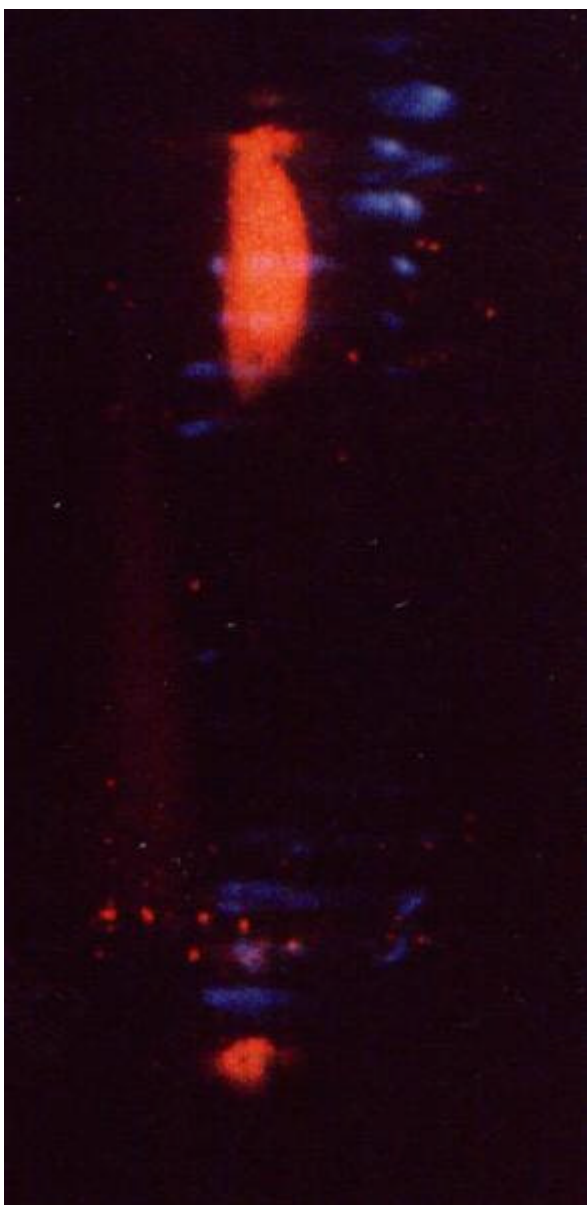
ordine	x_1	x_2	s
0	3.83 (escluso lo 0)	7.01	+0.17
1	1.84	5.33	-0.90
2	3.05	6.70	-0.20
3	4.20	8.01	+0.09
4	5.32	9.28	+0.25
6	7.5 stima	11.8 stima	+0.43
10	11.6 stima	16.4 stima	+0.59
20 \rightarrow inf.	21.5 stima	27.4 stima	+0.72 \rightarrow 1

La J_0 non si può confondere con la J_4 in quanto la prima avrebbe bolle sull'asse del cilindro, mentre la seconda no.

Coerentemente $\sigma \rightarrow 1$ in quanto i punti stazionari si infittiscono sempre di più; per ordini superiori al 4° è stato necessario fare delle stime estrapolando l'andamento

della serie in tabella perché non abbiamo trovato i valori tabulati.

Riportiamo, infine le altre immagini.



Queste immagini sono un ingrandimento di un reticolo cilindrico piccolo, posa 30'.

Quella a sinistra è in colori veri, l'altra è trattata per evidenziare la componente rossa senza però perdere gli altri colori. Era già presente una macchia rossa sulla prima foto ed essa pareva chiaramente un riflesso sul vetro del risonatore.

In questa foto però si evidenziano due macchie molto evidenti e dei punti. Essi sono bolle che diffondono questa luce rossa che probabilmente proviene da una spia non perfettamente oscurata. Si potrebbe sfruttare tale fenomeno per misurare le distanze "interreticolari" su una foto scattata ad hoc.



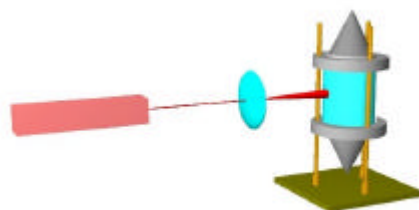
Le uniche due immagini di sonoluminescenza ricavate; a causa di un incidente nella fase dello sviluppo le altre sono andate perdute. A sinistra 15' di posa due tipi di figure (cil.piccolo e cil.grande) sovrapposte, a destra 30' di posa cilindro piccolo, si intravede la struttura. Le macchie rosse sono riflessi. Queste foto sono state ottenute utilizzando il risonatore da 13.6cm

Misura delle frequenze di risonanza

La fase conclusiva della tesina riguarda il tentativo di misura delle frequenze di risonanza del sistema a lunghezza ed induttanza fisse.

STRATEGIA UTILIZZATA

Durante i giorni di osservazione nel laboratorio di ottica, per verificare la possibilità di misurare il raggio di una bolla attraverso la diffusione di un laser da parte della stessa, abbiamo inviato un raggio laser all'interno del cilindro.



Constatato che la stabilità delle bolle non era sufficiente, a questo punto della taratura, a permettere tale misura, si è notato che la figura proiettata sul muro presentava un forte rumore in presenza del campo acustico.

Il metodo consiste nell'inviare un fascio laser, fatto leggermente divergere da una lente per aumentarne la sezione, sul cilindro con il campo acustico in azione; la

luce del laser viene scatterata e si osserva una figura che sarà caratteristica dei processi che stanno avvenendo nel cilindro.

Si modula la tensione in ampiezza e in frequenza:

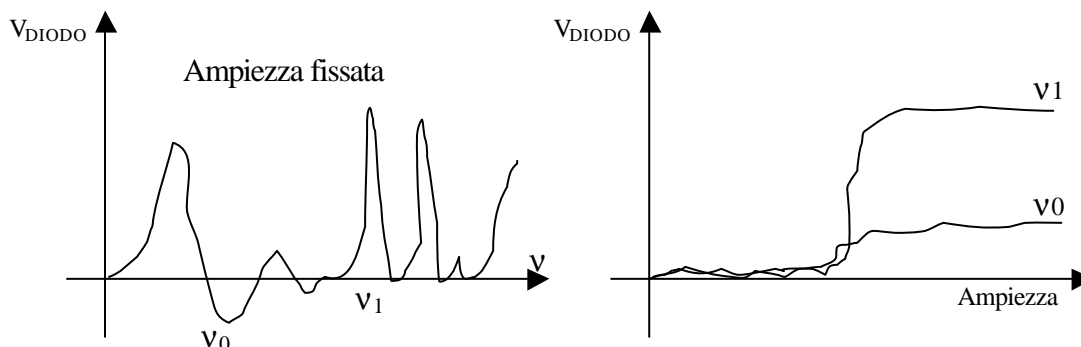
- l'ampiezza in onda quadra a frequenza di 300 Hz tutta positiva;
- la frequenza viene controllata da una rampa triangolare molto lenta che spazzi da 20 a 150 KHz.

La luce diffusa viene raccolta da un fotodiodo il cui segnale viene inviato all'ingresso di un LOCK-IN, il canale di "reference" è collegato al segnale che modula l'ampiezza.

L'uscita del LOCK-IN viene poi inviata ad un registratore a carta che registrerà la risposta del sistema al variare della frequenza.

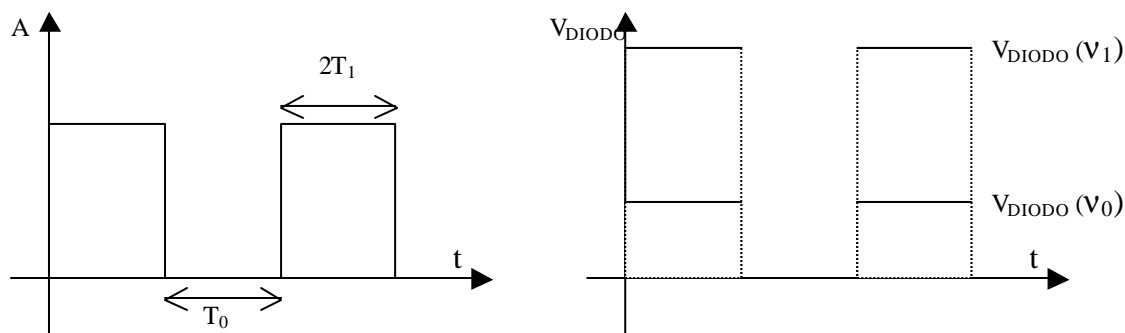
Utilizzando una grande modulazione i tracciati evidenzieranno il segnale nascosto nel rumore del laser dipendente dalla frequenza del campo acustico.

- noi ipotizziamo che sussista una certa relazione $V_D = V_D(u, A)$, con V_D tensione diodo.

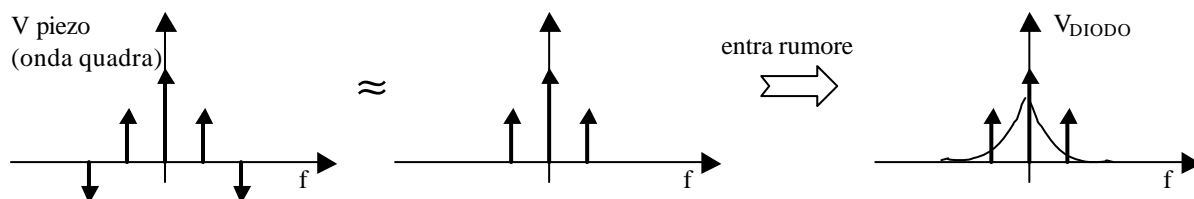


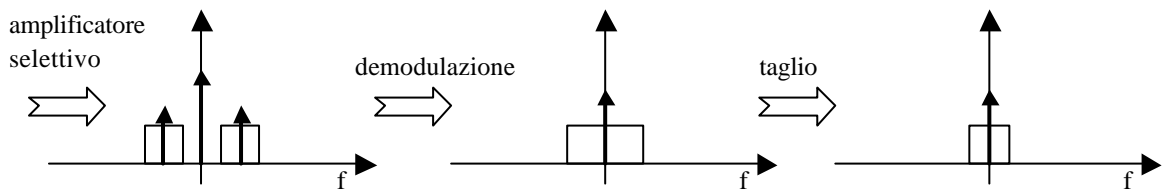
...poichè abbiamo detto che la risonanza è piuttosto improvvisa al variare dell'ampiezza.

Moduliamo ora l'ampiezza a frequenza fissata:

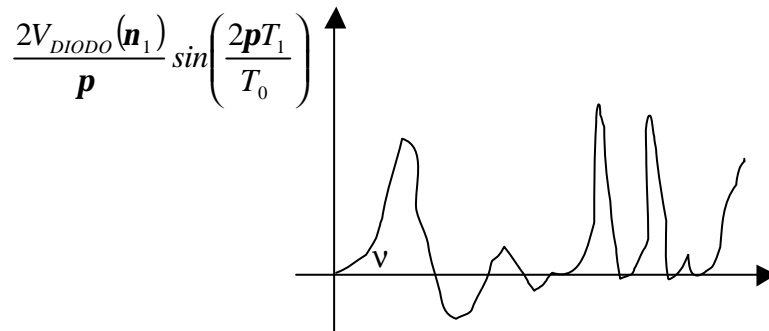


- nel LOCK-IN accade questo (nel dominio delle frequenze): fissato ad es u_1





- percorrendo la rampa v spazza tutti i valori da 20 a 150KHz, quindi al registratore arriverà:

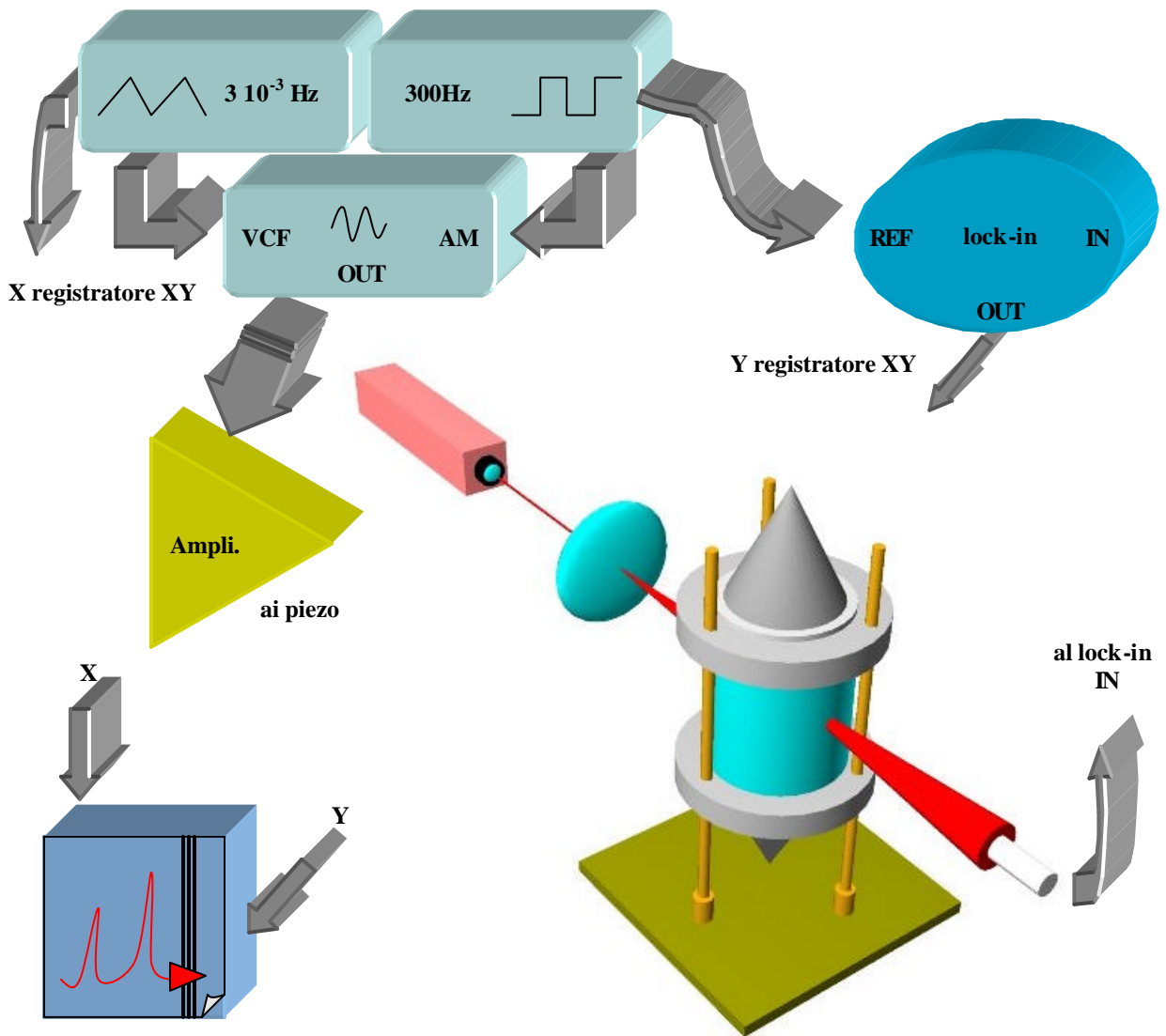


Come si vede conviene tagliare a una frequenza molto bassa per migliorare il rapporto segnale rumore, dato che siamo interessati solo al valore di $u_0(f)$ proveniente dalla demodulazione.

APPARATO SPERIMENTALE

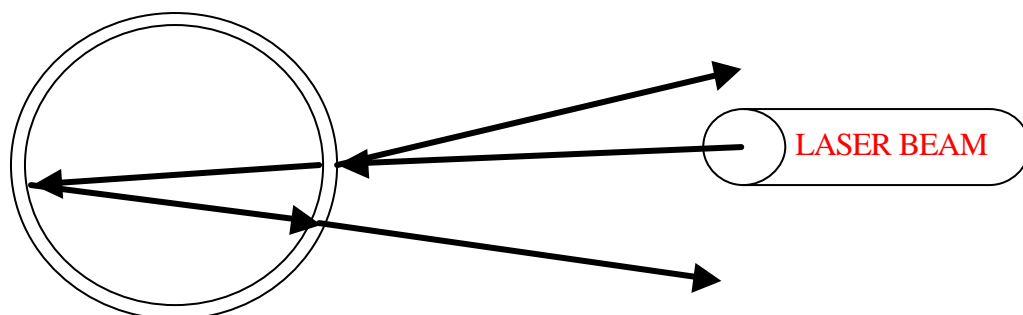
Seguono alcune note sulla realizzazione in laboratorio di un simile procedimento. Innanzitutto servono tre generatori di segnale, due pilotanti e uno di uscita:

- La frequenza massima dell' intervallo che si vuol far spazzare va impostata sul generatore di OUT (per noi 150KHz), quella minima è determinata tramite l'oscilloscopio variando l' ampiezza del generatore FM (per noi 3.7 V per avere frequenza minima a 20 KHz)
- Il periodo della rampa è difficile da misurare direttamente all'oscilloscopio: meglio fissarlo usando un'onda quadra e un cronometro, e guardando il tempo intercorso tra una transizione e l'altra.
- Sia la rampa che la quadra devono partire da zero, essere cioè tutte positive.
- L' ampiezza della sinusoide del generatore di OUT va impostata a 1V, e su questo stesso generatore va selezionato il modo PULL TO EXT – AM

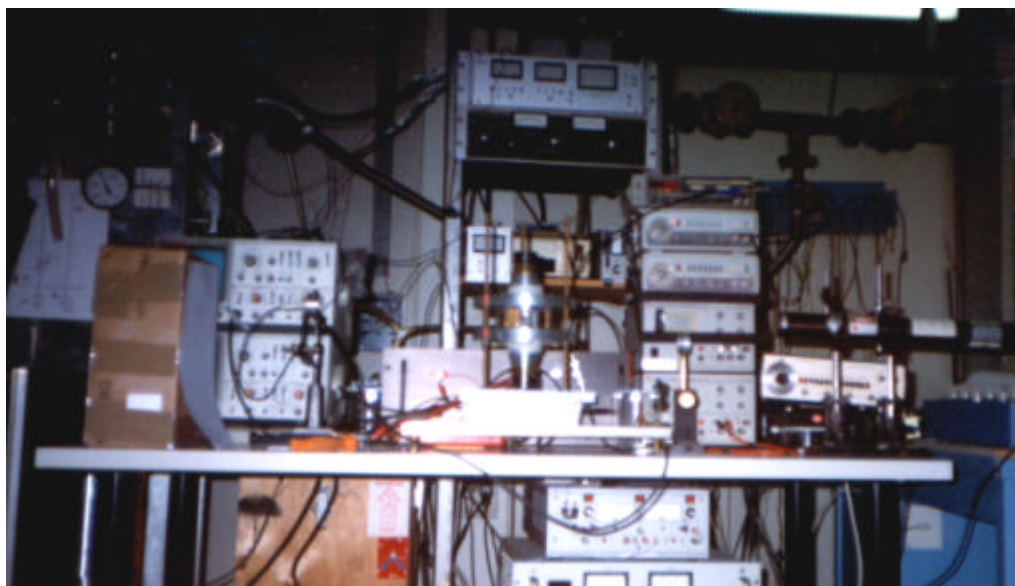


NOTA: Il dubbio fondamentale sul metodo era che il laser potesse rilevare le vibrazioni del vetro e non il movimento delle bolle.

Con una semplice osservazione ci si può rendere conto che il cambiamento della figura di diffrazione non dipende dalla vibrazione del vetro; se si fa in modo di avere incidenza non perfettamente perpendicolare del fascio sul cilindro, infatti, si riuscirà a distinguere il fascio riflesso dalla prima interfaccia aria-vetro da quello penetrato e poi riflesso all'interfaccia acqua-vetro.



Le due immagini così generate, nella semplice prova che abbiamo fatto, risultavano trovarsi una a sinistra e l'altra a destra della sorgente laser, e mentre la luce riflessa dal solo vetro risultava priva di rumore ed insensibile al campo acustico, il raggio che percorreva due volte l'acqua tornando indietro presentava l'evidente rumore correlato alla presenza o meno delle bolle.



L'apparato montato per la misura delle frequenze di risonanza

ESITO DELLA MISURA

Abbiamo in tutto ottenuto 8 tracciati oltre le varie prove iniziali, quattro dei quali risultano essere la base della misura, mentre gli altri sono serviti a tarare la strumentazione, ma soprattutto a dimostrare la riproducibilità degli stessi.

I tracciati sono stati ricopiati su carta da lucido, sui quali poi è stata aggiunta una opportuna scala di frequenze e segnati quindi i picchi. La scala è stata ricostruita imponendo i valori di minima e massima frequenza misurati durante l'esperimento, nei punti di simmetria del tracciato corrispondenti all'inversione dell'onda triangolare che controllava la frequenza; tutti questi punti sono risultati, entro i margini di errore sistematico e casuale, vicini ai segni posti manualmente sugli originali.

I quattro riferimenti allegati sono siglati G1, G2, P1, P2 e sono stati misurati con le seguenti caratteristiche:

Sigla	n inf.	n sup.	cilindro	induttanza	KHz/cm
G1	19.6KHz	147KHz	13.6cm	0.3mH	2.42
G2	19.6KHz	147KHz	13.6cm	1.0mH	2.53
P1	18.8KHz	147KHz	7.2cm	0.3mH	2.33
P2	18.8KHz	147KHz	7.2cm	1.0mH	2.32

Picchi principali

range	P1	P2	G1	G2
20-30	20.0 20.9 21.6 24.0	21.6	22.8 24.5	21.3 22.8 26.7
30-40	33.3	31.6 38.0	33.0	33.8 34.5 38.5
40-50	40.3 43.4	40.2 43.6 46.2 47.7	42.5 44.2 45.5	43.4 45.2 47.2 48.3
50-60	58.6	58.0	55.6 59.1	50.4
60-70	61.4 65.0 67.5	60.6 68.4	62.3 65.3 67.1	69.0
70-80	71.7 75.2 77.7	74.0 79.5	71.5 73.2 78.5	74.8
80-90	83.7 86.7	83.6 87.0	84.2 87.5	80.0 83.8 86.7
90-100	93.9	93.0 96.4		93.4 97.0
100-110	105.1 108.2	105.8 108.4		105.8
110-120		112.8 114.2 115.3 117.3	115.5 119.7	113.6 115.8 116.0 117.5
120-130	124.2 125.9	124.3 125.7 128.3	121.5 124.2	121.2 124.5 125.9 126.9 129.1
130-140	133.1 135.2 138.0	134.3 135.5 137.6	131.3 135.2 138.7	134.0 135.6 138.7
140-150	140.6 142.7	140.5 147.0	140.5 142.8	140.6 147.0

Il verde, l'azzurro ed il giallo sono stati utilizzati per evidenziare strutture presenti in tutti e quattro i tracciati; il fuxia per il cilindro piccolo, il verde scuro per quello grande, il verde oliva per il P2 ed il G1, il grigio per il P1 ed il G2

				Medie	Medie sul solo cilindro grande	
21,6	21,6	-	21,3	→ 21,5	A	
		22,8	22,8	→ 22,8		
24,0		24,5		→ 24,25		
33,3	31,6	33,0	33,8	→ 32,93		
		38,0	38,5	→ 38,25		
40,3	40,2			→ 40,25		
43,4	43,6	42,5	43,4	→ 43,22	B	
		45,2	45,5	→ 45,35		
		47,7	47,2	→ 47,45		
58,6	58,0	-	59,1	→ 58,57		
		65,3		→ 65,15		
67,5	68,4	67,1	69,0	→ 68,0	C	68.05
		71,5		→ 71,6		
75,2	74,0	73,2	74,8	→ 74,3	C	74.0

77,7	79,5	78,5	80,0	→	78,93	C	79.25
83,7	83,6	84,2	83,8	→	83,83		
86,7	87,0	87,5	86,7	→	86,98	seq1	
93,9	93,0	-	93,4	→	93,43		
	96,4		97,0	→	96,7		
105,1	105,8	-	105,8	→	105,6	D	
108,2	108,4			→	108,3		
-	115,3	115,5	115,8	→	115,53		115.7
-	117,3	-	117,5	→	117,6	D	
		121,5	121,2	→	121,35		
124,2	124,3	124,2	124,5	→	124,3		124.35
125,9	125,7	-	125,9	→	125,83		125.9
-	128,3	-	129,1	→	128,7	D	129.1
133,1	134,0	-	134,0	→	133,7		
135,2	135,5	135,6	135,2	→	135,38	seq2	
138,0	137,6	138,7	138,7	→	138,25		
140,6	140,5	140,5	140,6	→	140,55		
142,7		142,8		→	142,75		
	147,0		147,0	→	147,0		

Fin dall'acquisizione dei tracciati le "figure " ricorrenti più evidenti erano un primo picco (B) intorno ai 43KHz, tre picchi (C) fra i 65-80KHz ed altri tre picchi molto marcati in alcuni e quasi assenti in altri (D) fra i 105-130KHz.

B) Questo picco, molto pronunciato in tutti i tracciati, in alcuni è molto largo in altri stretto ma preceduto e seguito da altri picchi evidenti. La frequenza risulta essere indicativamente il doppio di quella di lavoro dei trasduttori e questi due elementi suggeriscono che questa "struttura" derivi dalla sovrapposizione della risonanza elettomeccanica dei piezo con quella acustica dell'apparato che talvolta coincidono perfettamente ed altre volte un po' meno (d'altronde il sistema è stato dimensionato perché ciò accada).

Ricordando la tabella dei picchi principali di corrente nei piezo:

picchi misurati dalla corrente	21.9	43.5	59.2	63.9	70.9	76.8	83.6	137.2
picchi misurati dai tracciati	21.5	43.22	58,57	no	71,6	no	83.83	138.25
differenza	-1.8%	-0.6%	-0.8%		+1%		+0.3%	+0.8%

E' evidente che nei tracciati sono presenti tali picchi, ma questi sono solo i principali misurati con l'oscilloscopio: due non sono rilevati forse per i problemi del metodo che più avanti tratteremo, altri bisogna cercarli perché nella tabella ne mancano molti che come corrente erano "bassi" ma se accoppiati sulla lunghezza d'onda del cilindro possono emergere.

Dal confronto dei valori misurati con l'oscilloscopio si può constatare che sono presenti alcuni multipli interi e semi-interi della prima frequenza .

Stimata come $(21.9+21.5) / 2 = 21.7\text{KHz}$ la frequenza di risonanza dei piezo cerchiamo i multipli nei tracciati:

<i>K</i>	<i>K n</i>	<i>picco</i>	<i>differenza</i>	<i>K</i>	<i>K n</i>	<i>picco</i>	<i>differenza</i>
1	21.7	21.5	-0.9%	4.5	97.65	96.7	-1%
1.5	32.55	32.93	+1.2%	5	108.5	108.3	-0.2%
2	43.4	43.22	-0.4%	5.5	119.35	**	-
2.5	54.25	-	-	6	130.2	**	-
3	65.1	65.15	≈0	6.5	141.5	142.75	+0.9%
3.5	75.95	*	-	7	151.9	out	
4	86.8	86.98	+0.2%	7.5	162.75	out	

(-) assente (*) praticamente assente (**) picchi molto alti ed ampi, qui molto probabilmente la risonanza dei piezo si sovrappone con quella acustica: la sonoluminescenza, infatti, in queste due zone è facile da ottenere, stabile e più intensa.

Una stima della frequenza di risonanza dei piezoelettrici basata sui tracciati, come media dei picchi individuati è: **(21.70±0.17)KHz**

Ora si cercheranno le frequenze in cui è presente sonoluminescenza, in cui significativi sono i tracciati del cilindro grande:

(L= 0.3mH lunghezza cilindro 13.6±0.1cm)

freq. osservate	NOTE	freq. tracciato
44.0 - 47.2 (max 46.0)	cilindro completamente illuminato, ma instabile (sempre ben visibili le strutture; forte odore come di ozono)	45.35 *
50.8	illuminato un piccolo cilindro concentrico molto bene	NO
68.7 - 70.0 (max 69.0)	illuminate solo le 2 basi del cilindro piccolo	68.05
74.0	illuminate 2 nuvolette alle basi del cilindro piccolo	74.0
78.7	si illuminano le nuvolette e un filino luminoso le unisce coassialmente al cilindro	79.25
91.4	bagliore alle due basi del cilindro	NO
102.6	bagliori sparsi poco più intensi del precedente	NO
115.0	cilindro piccolo con centro oscuro	*
115.0 - 115.7	luminescenza diffusa	*
115.7	cilindro grande illuminato	115.7
115.7 - 125.0	luminescenza diffusa	*
125.0	cilindro piccolo illuminato	
125.2	cilindro grande illuminato	oK
126.4	cilindro piccolo illuminato con aloni di ingrossamento	
131.2	bagliori	*
131.2 - 142.6	bagliori	*
142.6	bagliori	142.8

E' chiaro dunque che il metodo ha correttamente individuato anche le frequenze in cui c'è sonoluminescenza cioè quelle frequenze in cui c'è risonanza acustica ed elettrica.

Si noti che le frequenze non misurate sono quelle in cui si vedono bagliori o strutture piccole che il sistema non "vede" o stenta a vedere (i tracciati talvolta sono lievemente ondulati in tali zone). Le zone segnate con l'asterisco sono quelle in cui i picchi sono molto ampi ed ivi è presente luminescenza diffusa.

Le uniche tre frequenze non coerenti, quindi, sono quelle segnate con "no"; abbiamo formulato un'ipotesi al riguardo che sarà esposta nel prossimo paragrafo.

La struttura B, come abbiamo già evidenziato, è formata da un insieme di picchi che talvolta possono non distinguersi, dovuti al sovrapporsi impreciso della frequenza di risonanza dei piezo con quella acustica. Esse però sono sufficientemente vicine da generare un reticolo come solo ad alte frequenze è più visibile. Coerentemente però tale reticolo cilindrico risulta essere molto instabile e le bolle si muovono molto velocemente, ma coerentemente l'una con l'altra, cioè non in un moto caotico di bolle luminescenti, bensì in un moto coordinato delle bolle.

A più alte frequenze gli errori sulla lunghezza del risuonatore si fanno sentire meno e i reticoli sono stabili perché le due frequenze di risonanza tendono a convergere entro gli errori.

A questo punto, compreso meglio il significato di molti picchi, si può cercare di giustificare la presenza di altri, presupponendo che picchi ricorrenti solo in una particolare lunghezza del cilindro possono essere modi normali dello stesso.

Per il cilindro da 13.6cm:

22,8	22,8	→	22,8	}	22,74KHz ⇒ 13,2cm
45.245.5		→	45.35/2	22.68	
121,5	121,2	→	121,35		

La seconda frequenza è il doppio della prima, la terza non si può mettere in relazione alle altre così facilmente. A queste corrisponderebbe una lunghezza del cilindro, secondo il modello unidimensionale, pari a 13,2cm cioè inferiore del 3% rispetto al valore misurato. Potrebbe essere un buon segno, si possono cercare quindi gli altri multipli e si trova: 67,1 69,0 ⇒ 68,1; 113.6.

Considerando anche tali valori si ottiene sempre 13,2cm.

Per il cilindro da 7.2cm:

40,3	40,2	→	40,25
108,2	108,4	→	108,3

Le ricorrenze possono considerarsi analoghe alle precedenti, infatti è presente, in un tracciato, 20.0 KHz, frequenza non ottenibile dall'altro in quanto più disturbato in tale zona. <20KHz,40.25/2 KHz> = 20.13KHz a cui corrisponderebbe una lunghezza di 7.5cm.

Si individuano così altri multipli: 61.4 60.0 ⇒ 60.7KHz.

Considerando anche tale valori si ottiene sempre 7,5cm. superiore del 4% rispetto al valore misurato.

Tali stime non sono compatibili, entro gli errori sperimentali, con le misure effettuate e ciò può dipendere:

- 1) da una sottostima degli errori;
- 2) dalla variazione della frequenza di risonanza e quindi dal discostamento della "lunghezza di risonanza" da quella reale; ciò in realtà accade, ma per

- giustificare in un caso la crescita, nell'altro la diminuzione, sarebbe necessario costruire un modello dettagliato;
- 3) da un'artificiosità del metodo con cui si sono fatte le stime, che potrebbe aver portato a "vedere ciò che si voleva vedere".

Non avremmo riportato tali stime per il punto 3), ma poiché le frequenze ritenute valide da analizzare sono state scelte prima di questi calcoli ed esse non coincidono con quelle dei piezo, si ritengono valide come "indizio", ma da verificarsi con altri esperimenti.

Un'ultima considerazione su tali frequenze.

Sopra i 100KHz cercare i multipli sarebbe troppo arbitrario a causa della presenza di molti picchi larghi con altri più piccoli che emergono. Sia per il cilindro piccolo che grande però sono presenti una ricorrenza come avevamo individuato:

108,2	108,4	→	108,3	cil.pic.
121,5	121,2	→	121,35	cil.gr.

Il rapporto con le corrispondenti frequenze di risonanza è rispettivamente 5,42 e 5,32 indice di una certa relazione.

UN MODELLO DEL METODO

Il metodo utilizzato misura l'interazione delle bolle con il raggio laser correlata alla presenza del campo acustico.

In condizioni normali nel cilindro sono presenti N bolle che salgono verso l'alto sotto la spinta di Archimede e la forza viscosa con velocità V_0 ; esse generano rumore eliminato dal lock-in se il campo acustico non altera N e V.

Sono due i fenomeni che possono generare perturbazioni dipendenti dal campo acustico:

- la cavitazione che genera flussi caotici di bolle (abbiamo osservato vortici di bollicine);
- la risonanza dell'apparato che genera **strutture ordinate o moto coordinato** di bolle già presenti nel cilindro.

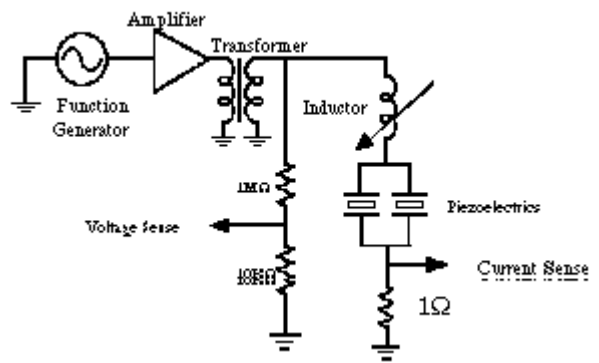
Nel secondo caso, qualora si eccitasse la J_0 funzione di Bessel con un'unica bolla al centro, la probabilità che tale bolla interagisca con il raggio laser è veramente bassa.

Se si genera un filare con più bolle la probabilità aumenta ed ancora maggiormente nel caso di piani. All'aumentare della frequenza il numero di punti di equilibrio è sempre più elevato e nel caso si ecciti una J_s (s arbitrario) che da luogo ad un reticolo di bolle la probabilità che esso venga individuato dal raggio laser si incrementa di molto.

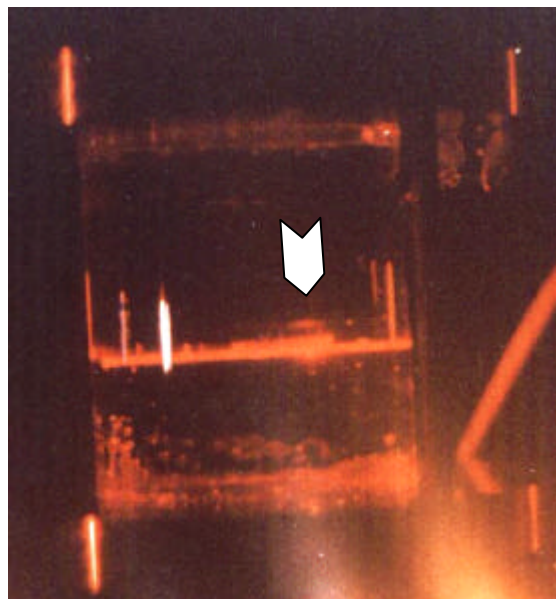
E' per questo che alcune frequenze in cui si osserva sonoluminescenza o si ascolta il caratteristico rumore della risonanza non vengono rilevate dal metodo a meno di non raffinare la misura e riuscire ad apprezzare il segnale derivante dallo scomparire delle bollicine di fondo alla frequenza di modulazione (esse schizzano via durante qualsiasi risonanza).

Ottimizzazione e riutilizzo dell'apparato

Durante l'esperimento sono sorti numerosi spunti di riflessione e di approfondimento dello studio dei fenomeni considerati e delle molte possibili misure che interessano la SL, insieme ad accorgimenti di miglioria dell'apparato che vogliamo segnalare a chi volesse proseguire in questa direzione:



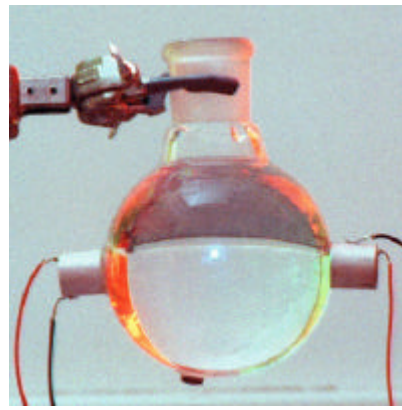
- studiare le risonanze con cilindri di lunghezza maggiore per eliminare dissimmetrie del sistema o con lunghezze diverse da l_2 l_4 ... per separare nei tracciati i due tipi differenti di risonanza (acustica e dei piezo);
- provare a sondare con un trasduttore piezoelettrico usato come microfono, magari integrato con un sistema che ne riveli la posizione all'interno del cilindro oppure con un array di piezo interfacciati ad un computer, il campo di pressione per verificare la compatibilità delle previsioni del modello con il comportamento del risonatore, in particolare per ciò che concerne i seguenti punti:
 - sono giustificate le condizioni al contorno di pressione alle pareti del risonatore?
 - approfondire lo studio sulla disposizione delle bolle nel campo stazionario;
 - e` in definitiva sensata l'approssimazione di pareti rigide, ed e` possibile fare un fit delle misure del campo con il modello di onda stazionaria da noi proposta?
- utilizzare un circuito che fasi tensione e corrente in maniera automatica;
- utilizzare un trasformatore all'uscita dell'amplificatore come adattatore di impedenza ed estrarre così maggior potenza dallo stesso per poter riprodurre eventualmente l'andamento in potenza della SL;
- collimando un raggio laser su una bolla se ne può stimare il diametro in funzione del tempo misurando la luce da essa diffusa;
- misure di intensità di SL in funzione dei parametri ambientali;
- utilizzare il lock-in in configurazione piccola modulazione; noi non ci siamo riusciti perché i generatori di segnale non erano adeguati e dovevamo terminare i lavori;
- isolare ed ascoltare il rumore prodotto dalle bolle; in particolare le armoniche ad alta frequenza da esse generate;
- misurare il fattore di merito del cilindro.



Se si vuole aumentare la potenza sul carico sarà necessario ridimensionare tutti la parte relativa alla dissipazione termica dei mosfet.

Altre tipologie di apparati

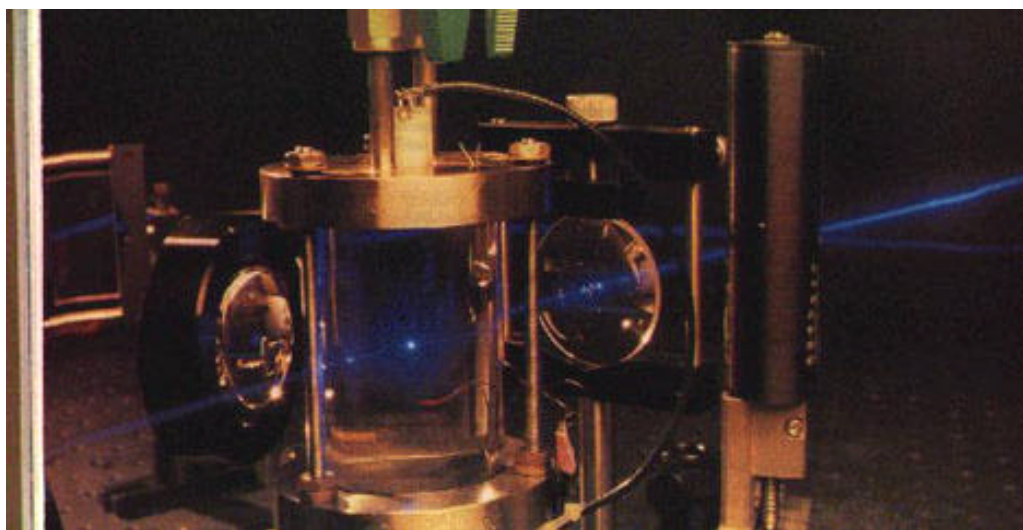
Se in letteratura avere un'immagine di un apparato sperimentale non è stata cosa facile, navigando su internet ne abbiamo trovate molte. Celle sferiche, cilindriche, tetragonali e vasche:



Le due configurazioni classiche: cavità cilindrica a sinistra, sferica a destra; in queste immagini la bolla luminosa è molto probabilmente stata aggiunta al computer.



Cella tetragonale con due bolle luminescenti. Il trasduttore piezoelettrico è l'asta verticale. Questo è l'apparato più recentemente scoperto in rete, ma pare essere anche il più semplice e dall'evidente efficacia.



Ecco l'apparato su cui ci siamo basati per costruire il nostro. Questo è anche il più complesso in quanto permette il controllo di tutti i parametri ambientali. La bolla è illuminata da un laser per misurarne il raggio.

Conclusioni

Non solo gli esperimenti che si possono effettuare con l'apparato costruito sono innumerevoli, ma anche l'interpretazione dei dati da noi raccolti potrebbe andare molto più a fondo.

Le fotografie possono essere migliorate di molto in quanto due set di immagini sono state rovinare da incidenti nello sviluppo della pellicola e le uniche due salvate sono parzialmente bruciate.

Solo rifacendo le foto si potrebbe stimare l'ordine della funzione di Bessel misurando la differenza di incremento sulle coordinate radiali rispetto alla prima ed alla seconda bolla. Tale parametro, infatti, varia molto con il variare dell'ordine della J_N e si può molto probabilmente fissare quantomeno un limite inferiore ad N .

Da un'analisi più approfondita dei tracciati, con eventuali altre misure prese tali che le risonanze non si sovrappongano più, si può stimare la lunghezza del risonatore.

Le stime dei vari parametri si sono dimostrate valide, l'accordo del modello con i dati sperimentali è discreto, le misure sulle immagini e sui tracciati sembrano coerenti e consistenti, si conclude quindi che tutto il lavoro svolto è migliorabile, ma poggia su basi quantomeno realistiche.

Per la stesura di questa tesina, da quando ci è stato fornito il servizio dal Dipartimento di Fisica, ci siamo avvalsi attivamente delle risorse internet constatando come attiva sia in rete la comunità di ricercatori o semplici interessati.

Siamo ora in contatto con alcuni di questi e stiamo costruendo un sito della nostra esperienza all'indirizzo:

<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/1460> (case sensitive)

Bibliografia

- **Ultrasound** *Kenneth S.Suslick* [534.91 ΩSU80 Dip.Fis.]
- **The Physics of Vibrations and Waves** *H.J.Pain* [534 PA Dip.Fis.]
- **Equazioni della Fisica Matematica** *A.N.Tichonov A.A.Samarskij* Ed.Mir
- **Ultrasound – It's chemical, physical and biological effects** *VCH1988*

- **Le Scienze** *Seth. Putterman* La Fonoluminescenza: dal suono alla luce [n°320 pag.26]
- **Scientific American** *R.A. Hiller, B.P. Barber* Producing Light from a Bubble of Air [Feb 95 pag. 78]
- **Focus** *Mauro Gaffo* L'enigma della sonoluminescenza [n°49 pag.142]
- **Science** *R. Hiller, K. Weninger, S.J. Putterman, B.P. Barber* Effect of Nubble Gas Doping in Single-Bubble Sonoluminescence [Vol. 266 14oct94 pag. 248]
- **Phy. Rev. Let.** *R.G. Holt, F.Gaitan, A.A. Atchley, J. Holzfluss* Chaotic Sonoluminescence [Vol. 72 n°9 pag. 1376]

- **Phy. Rev. Let.** *B.P. Barber, C.C. Wu, R. Lofstedt, P.H. Roberts, S.J. Putterman* Sensitivity of Sonoluminescence to Experimental Parameters [Vol. 72 n°9 pag.1380]
- **Nature** *B.P. Barber, S.J. Putterman* Observation of synchronous picosecond sonoluminescence [Vol. 352 25jul91 pag. 318]
- **Phy. Rev. Let.** *R. Hiller, S.J. Putterman, B.P. Barber* Spectrum of Synchronous Picosecond Sonoluminescence [Vol. 69 n°8 pag. 1182]
- **Phy. Rev. Let.** *C.C. Wu, P.H. Roberts* Shock-Wave Propagation in a Sonoluminescing Gas Bubble [Vol. 70 n°22 pag. 3424]
- **Phy. Rev. Let.** *B.P. Barber, S.J. Putterman* Light Scattering Measurements of the Repetitive Supersonic Implosion of a Sonoluminescing Bubble [Vol. 69 n°26 pag. 3839]

Siti Internet

- <http://www.sonoluminescence.com>
- <http://members.aol.com/Cpeter2001/sonoluminescence.index.html>
- <http://www.stetson.edu/~physics/sonolum.htm>
- <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Launchpad/1460>
- <http://fulton.seas.virginia.edu/~das4k/sono.html>
- www.calpoly.edu/~dfroula/SL/SL2.html