



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**ASSEMBLAGGIO DI UN DISPOSITIVO DI LEVITAZIONE ACUSTICA FUNZIONANTE  
AD ULTRASUONI PER LA VISUALIZZAZIONE DI IMMAGINI CON EFFETTO  
SCHLIEREN**

---

**ASSEMBLY OF AN ULTRASONIC ACOUSTIC LEVITATION DEVICE FOR  
DISPLAYING IMAGES WITH THE SCHLIEREN EFFECT**

Relatore:

**Prof. Daniele Eugenio Lucchetta**

Tesi di Laurea di:

**Giovanni Fiatti**

**A.A. 2023 / 2024**

## **SCOPO DELLA TESI:**

In questo lavoro di tesi si tratterà il concetto di levitazione acustica, un fenomeno fisico utilizzato per mantenere sospese e manipolare piccole particelle o oggetti di piccole dimensioni, sfruttando le proprietà del suono e quindi senza nessun intervento manuale.

Questa tecnica sta assumendo oggi un ruolo di fondamentale importanza in diversi settori, ad esempio nel campo medico/farmaceutico dove viene impiegata per la creazione di nuovi farmaci e vaccini.

Abbiamo realizzato un prototipo che ci permettesse di dimostrare l'effettiva capacità delle forze di radiazione acustica nel contrastare la forza di gravità, mantenendo appunto sospesi i corpi.

Nei primi capitoli verranno trattati concetti e teorie basilari per comprendere il fenomeno in questione, per poi confrontare il funzionamento ed evidenziare le migliorie del levitatore TinyLev realizzato, rispetto ai modelli precedenti.

Successivamente verranno descritte le varie fasi seguite per la realizzazione del prototipo e per la verifica del suo corretto funzionamento, focalizzando l'attenzione sui principi che regolano il movimento delle particelle sospese e sulla relazione che sussiste tra la tensione eccitazione e le dimensioni, massa e densità dei corpi levitati.

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione.....</b>	<b>6</b>
1.1	Definizione di levitazione acustica.....	6
1.2	Cenni storici e origini sullo studio.....	6
<b>2</b>	<b>Concetti teorici sulle onde.....</b>	<b>7</b>
2.1	Generalità sulle onde .....	7
2.2	Classificazione delle onde .....	7
2.3	Parametri di riferimento di un'onda .....	8
2.4	Fenomeni fisici relativi onde .....	9
2.5	Descrizione matematica di un'onda .....	12
2.6	Ampiezza della pressione sonora .....	12
2.7	Suoni, infrasuoni e ultrasuoni.....	12
2.8	Potenza della sorgente sonora (intensità di suono).....	13
2.9	Onde stazionarie .....	13
<b>3</b>	<b>Concetti teorici sulla levitazione acustica.....</b>	<b>15</b>
3.1	Levitazione acustica .....	15
3.2	Tipi di levitazione acustica.....	16
<b>4</b>	<b>Campi applicativi.....</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>Approfondimento dei levitatori acustici.....</b>	<b>19</b>
5.1	Levitatori ad asse singolo non risonanti e risonanti .....	19
5.2	Levitatore Langevin Horn .....	21
5.3	Modello TinyLev.....	22
<b>6</b>	<b>Caratteristiche e funzionamento del modello TinyLev .....</b>	<b>23</b>
6.1	Analisi funzionamento del modello TinyLev.....	23
6.2	Consumo energetico .....	24
6.3	Studio della disposizione ottimale dei trasduttori .....	25

6.4	Studio della variazione della forza di cattura al variare della distanza tra matrice superiore e inferiore .....	27
6.5	Caratteristiche delle particelle levitate .....	28
6.6	Elettronica di guida: Arduino Nano e Driver L298N .....	29
<b>7</b>	<b>Assemblaggio prototipo levitatore acustico.....</b>	<b>34</b>
7.1	Componenti del kit .....	34
7.2	Procedimento per assemblare il modello.....	35
<b>8</b>	<b>Approfondimenti sugli strumenti impiegati.....</b>	<b>47</b>
8.1	Multimetro.....	47
8.2	Pistola per colla a caldo .....	48
8.3	Saldatore a stagno .....	49
8.4	Stampa 3D .....	50
8.4.1	Funzionamento della stampa 3D .....	50
8.4.2	Tecnologie di stampa 3D comuni.....	51
8.4.3	Applicazioni della stampa 3D.....	51
8.4.4	Materiali per la stampa 3D .....	52
8.4.5	Operazioni post-lavorazione per modelli stampati in 3D .....	52
8.4.6	Fotopolimerizzazione.....	53
8.4.7	Due diversi processi di fotopolimerizzazione .....	54
8.4.8	Ciclo di lavorazione della stampante 3D SLA .....	55
<b>9</b>	<b>Approfondimento sull'ottimizzazione del levitatore acustico .....</b>	<b>58</b>
9.1	Ottimizzazione layout levitatore.....	58
9.2	Approfondimento su altri modelli del levitatore .....	64
<b>10</b>	<b>Conclusioni.....</b>	<b>66</b>
<b>11</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>67</b>



# 1 Introduzione

## 1.1 Definizione di levitazione acustica

La levitazione acustica è un fenomeno che si ottiene sfruttando principi fisici in grado di contrastare la forza di gravità. Più precisamente la levitazione acustica è una tecnica che permette di muovere piccoli oggetti solidi o liquidi nell'aria senza che vengano "toccati" ma sfruttando la pressione generata dalle onde sonore. Tramite le forze di radiazione acustica si contrasta la gravità con il risultato di riuscire a sospendere gli oggetti a mezz'aria.

## 1.2 Cenni storici e origini sullo studio

I primi approcci allo studio della levitazione acustica risalgono a metà del XIX secolo, mediante i primi esperimenti eseguiti in una camera di risonanza con cui si dimostrò che le particelle potevano essere raccolte ai nodi di un'onda stazionaria.

La prima levitazione fu dimostrata da Muller e Bucks, i quali fecero levitare goccioline di alcol tra un cristallo di quarzo e un riflettore.

Tale fenomeno fisico fu poi sviluppato da Hilary St Clair che realizzò il primo dispositivo elettromagnetico capace di generare le ampiezze di eccitazione necessarie per la levitazione di oggetti ancor più grandi e pesanti grazie al suo particolare interesse rivolto alle forze di radiazione acustica e la loro applicazione sull'agglomerazione di particelle di polvere utilizzate in campo minerario.

Il levitatore più comune dagli anni '70 fino al 2017 fu il Langevin Horn, poi sostituito dal levitatore Tingley, strumento studiato in questa trattazione [1].

## 2 Concetti teorici sulle onde

### 2.1 Generalità sulle onde

Ricordiamo che le onde sono delle perturbazioni di tipo oscillatorio o vibratorio che si propagano nello spazio implicando trasporto di energia e non di materia.

Le onde di tipo elastico o meccanico sono quelle che si propagano in mezzi materiali solidi, liquidi o gassosi e tra queste rientrano appunto le onde sonore.

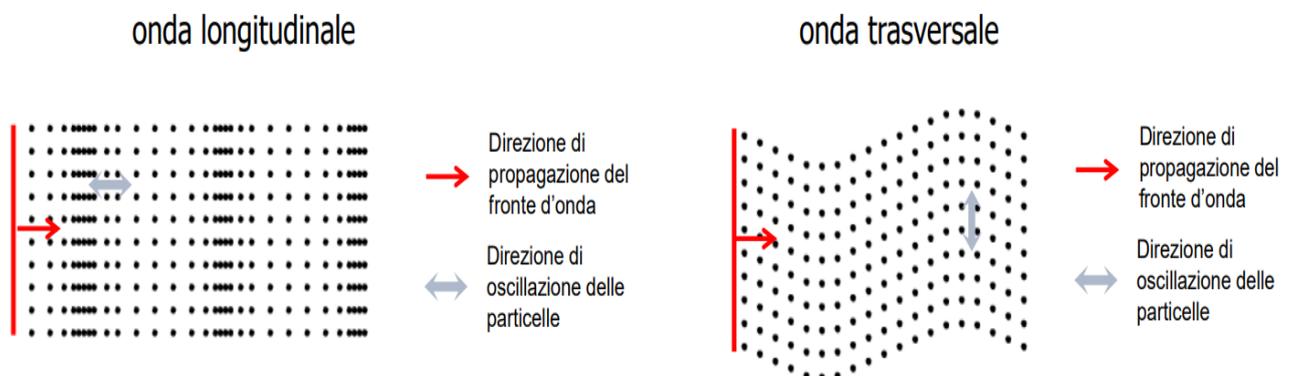
Specifichiamo inoltre che a parte un trascurabile assorbimento di energia da parte del mezzo in cui si propagano le onde considerate, il moto vibratorio si mantiene finché queste non incontrano un ostacolo che ne impedisce la progressione o ne perturba il moto e ne muta la velocità.

### 2.2 Classificazione delle onde

- Trasversali: perturbazione ortogonale alla direzione di propagazione
- Longitudinali: perturbazione parallela alla direzione di propagazione

Vedi (fig.1)

**Fig.1** onde trasversali e longitudinali



### 2.3 Parametri di riferimento di un'onda

In generale, la propagazione delle onde può essere descritta mediante i parametri: ampiezza, lunghezza d'onda e frequenza. L'ampiezza rappresenta lo spostamento massimo di un punto dalla posizione di equilibrio; la lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) rappresenta la distanza percorsa dall'onda in un periodo o la minima distanza tra due punti in cui lo spostamento dalla configurazione di equilibrio assume lo stesso valore; la frequenza ( $\nu$ ) indica il numero di vibrazioni complete che avvengono in 1 secondo e si misura in hertz (Hz) [2].

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{Numero d'onda}$$

$$T = \frac{2\pi}{k\nu} = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{Periodo}$$

$$\omega = k\nu \quad \text{Pulsazione}$$

$$v = \frac{\omega}{k} \quad \text{Velocità di fase}$$

$$\lambda = \quad \text{Lunghezza d'onda}$$

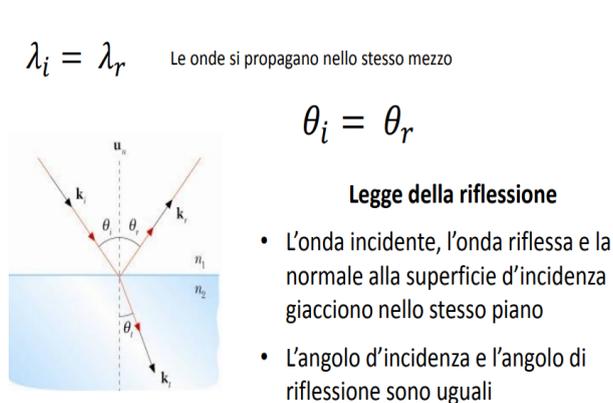
$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{Frequenza}$$

## 2.4 Fenomeni fisici relativi onde

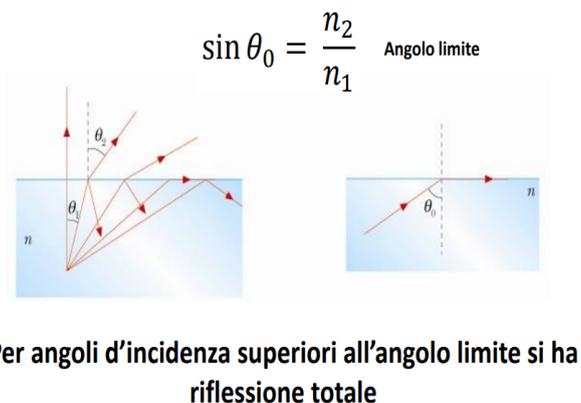
Analizziamo ora i fenomeni di riflessione, rifrazione, diffrazione e diffrazione dell'onda.

La riflessione è il fenomeno per cui un'onda, nel momento in cui incide sulla superficie di separazione di due mezzi diversi, torna indietro. Il fenomeno dell'eco rappresenta un esempio di riflessione delle onde sonore: la presenza di un ostacolo in grado di riflettere le onde sonore emesse da un osservatore fa sì che questo percepisca lo stesso suono due volte (onda diretta e onda riflessa) (fig.2a) (fig.2b).

**Fig.2a** riflessione di un'onda



**Fig.2b** riflessione di un'onda

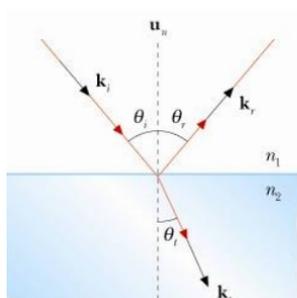


La rifrazione è la deviazione che un'onda subisce quando attraversa la superficie di separazione di due mezzi trasparenti e di diversa densità (fig.3).

**Fig.3** rifrazione di un'onda

**Legge di Snell**

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

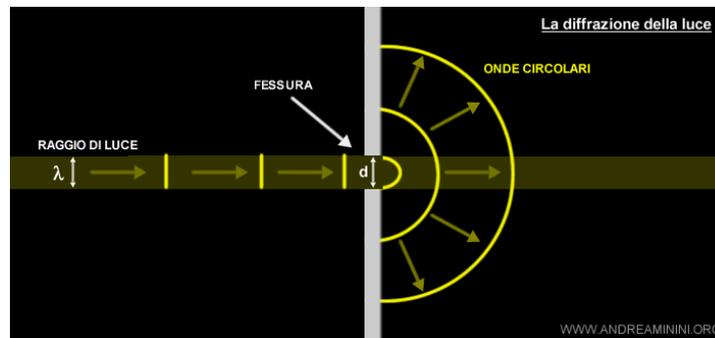


**Legge della rifrazione**

- L'onda incidente, l'onda rifratta e la normale alla superficie d'incidenza giacciono nello stesso piano
- L'angolo d'incidenza e l'angolo di rifrazione soddisfano la legge di Snell

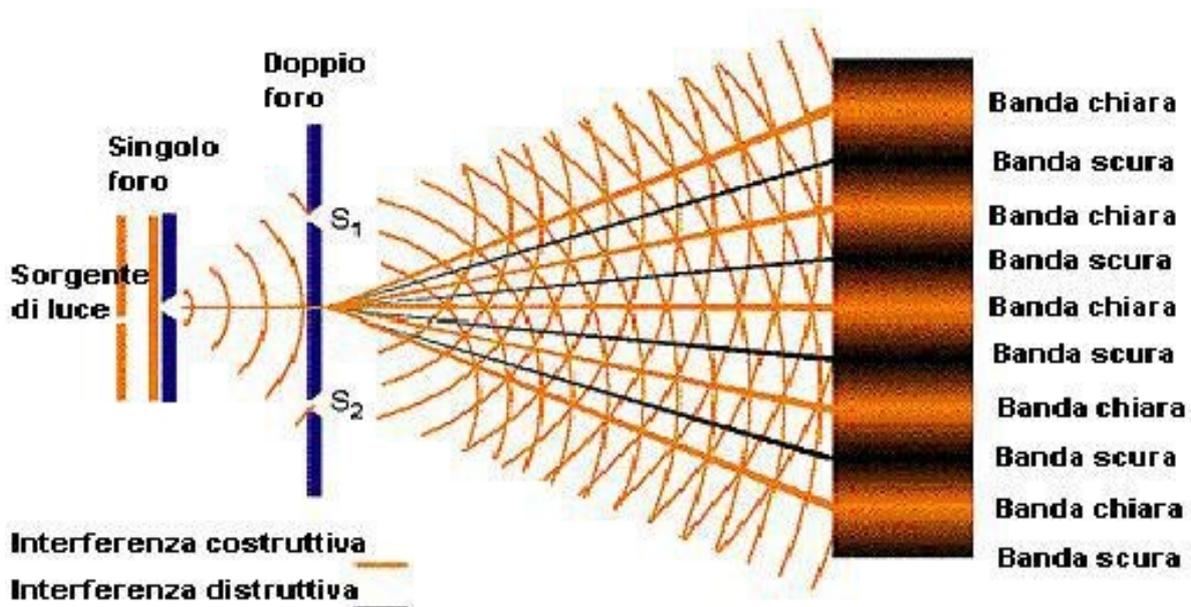
La diffrazione si verifica quando l'onda incontra un ostacolo che presenti un'apertura di dimensioni dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda in questione (fig.4).

**Fig.4** diffrazione di un'onda



L'interferenza sovrapposizione di onde generate da singole sorgenti puntiformi. Due sorgenti monocromatiche puntiformi S1 e S2 emettono onde sferiche. Le onde si sovrappongono e danno origine al fenomeno dell'interferenza. Su uno schermo posto a grande distanza si osserva una sequenza di frange chiare e scure. L'intensità risultante non è la somma delle intensità delle singole onde (fig.5a) (fig.5b).

**Fig.5a** interferenza di un'onda



## Fig.5b interferenza di un'onda

### Condizioni necessarie per l'interferenza

1. Stessa frequenza
2. Differenza di fase costante o nulla (onde coerenti)
3. Polarizzazione non ortogonale



Paolo Mengucci

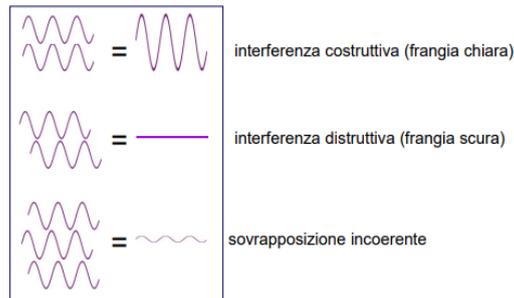
Fisica 2

22

## Interferenza

### Analisi qualitativa

Quando due onde si sovrappongono in un punto dello spazio, l'intensità risultante dipende dallo sfasamento.



Il principio di sovrapposizione afferma che, quando due o più onde sono presenti contemporaneamente nella stessa regione dello spazio, la perturbazione risultante è la somma delle perturbazioni prodotte dalle singole onde.

L'interferenza costruttiva tra due onde avviene nei punti in cui esse si sommano «cresta a cresta» e «ventre a ventre» rinforzandosi a vicenda. Quando due onde, emesse in concordanza di fase, viaggiano per un certo tempo e poi interferiscono in un punto, l'interferenza è costruttiva ogni volta che i cammini 1 e 2 percorsi dalle onde sono uguali, oppure differiscono di un numero intero qualunque di lunghezze d'onda:

$$L_2 - L_1 = m\lambda \text{ con } m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

L'interferenza distruttiva tra due onde avviene nei punti in cui esse si sommano «cresta a ventre» e «ventre a cresta» annullandosi a vicenda. Quando due onde, emesse in opposizione di fase, viaggiano per un certo tempo e poi interferiscono in un punto, l'interferenza è distruttiva ogni volta che i cammini 1 e 2 percorsi dalle onde differiscono di un numero dispari di mezze lunghezze d'onda, cioè quando:

$$L_2 - L_1 = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \text{ con } m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

## 2.5 Descrizione matematica di un'onda

Quando un'onda si propaga in un mezzo sposta le particelle del mezzo dalla loro posizione di equilibrio. Nel caso di un'onda periodica generata dal moto armonico della sorgente, lo spostamento è espresso mediante una funzione goniometrica del tempo, come il seno o il coseno [3].

Consideriamo una particella a distanza  $x$  dall'origine del sistema di riferimento; lo spostamento  $y$  di questa particella in ogni istante  $t$  in cui transita un'onda di ampiezza  $A$ , frequenza  $f$  e lunghezza d'onda  $\lambda$  è

$$y = A \sin\left(2\pi ft - 2\frac{\pi x}{\lambda}\right) \text{ Onda che si propaga verso } x +$$

$$y = A \sin\left(2\pi ft + 2\frac{\pi x}{\lambda}\right) \text{ Onda che si propaga verso } x -$$

## 2.6 Ampiezza della pressione sonora

L'ampiezza della pressione di un'onda sonora è il valore massimo della differenza di pressione tra una regione di compressione e la pressione normale del mezzo in cui l'onda si propaga. Dall'ampiezza della pressione dipende una caratteristica soggettiva del suono che è l'intensità sonora: quanto maggiore è l'ampiezza della pressione, tanto più forte è il suono percepito.

## 2.7 Suoni, infrasuoni e ultrasuoni

Le onde elastiche che hanno una frequenza compresa tra 20 Hz e 20000 Hz vengono percepite dall'orecchio come suoni. Le vibrazioni al di fuori di questo range di frequenza non sono più udibili: se la frequenza è inferiore ai 20 Hz si parla di infrasuoni e un esempio è rappresentato dalle onde sismiche. Se la frequenza è superiore a 20000 Hz si parla invece di ultrasuoni.

## 2.8 Potenza della sorgente sonora (intensità di suono)

La sorgente sonora è un sistema in vibrazione che emette quella che va sotto il nome di energia acustica (o sonora). La potenza acustica ( $P_a$ ) è l'energia che viene emessa nel tempo dalla sorgente che produce il suono ed è data dalla seguente relazione:  $P_a = E/\Delta t$  dove  $E$  è l'energia emessa nell'intervallo di tempo  $\Delta t$ . Allontanandoci da una sorgente sonora (ad esempio un altoparlante) il suono ci sembrerà più debole: la quantità di energia captata da un ricevitore dipenderà dalla distanza di questo dalla sorgente [4].

## 2.9 Onde stazionarie

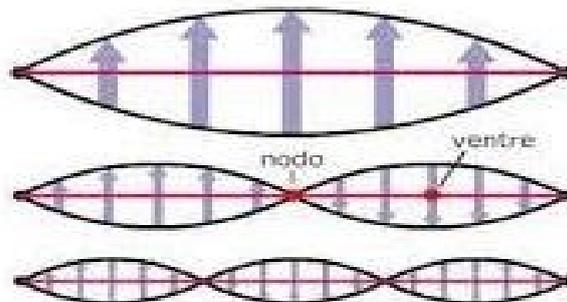
Un'onda stazionaria è il tipo di perturbazione che si verifica quando si sovrappongono due onde che hanno la stessa ampiezza, la stessa frequenza e versi di propagazione opposti (combinazione riflessione e interferenza).

Le onde stazionarie, anziché viaggiare da un luogo all'altro come un'onda classica, si spostano avanti e indietro o addirittura vibrano, ed è proprio questa illusione di quiete che dà il nome a questa tipologia di onde.

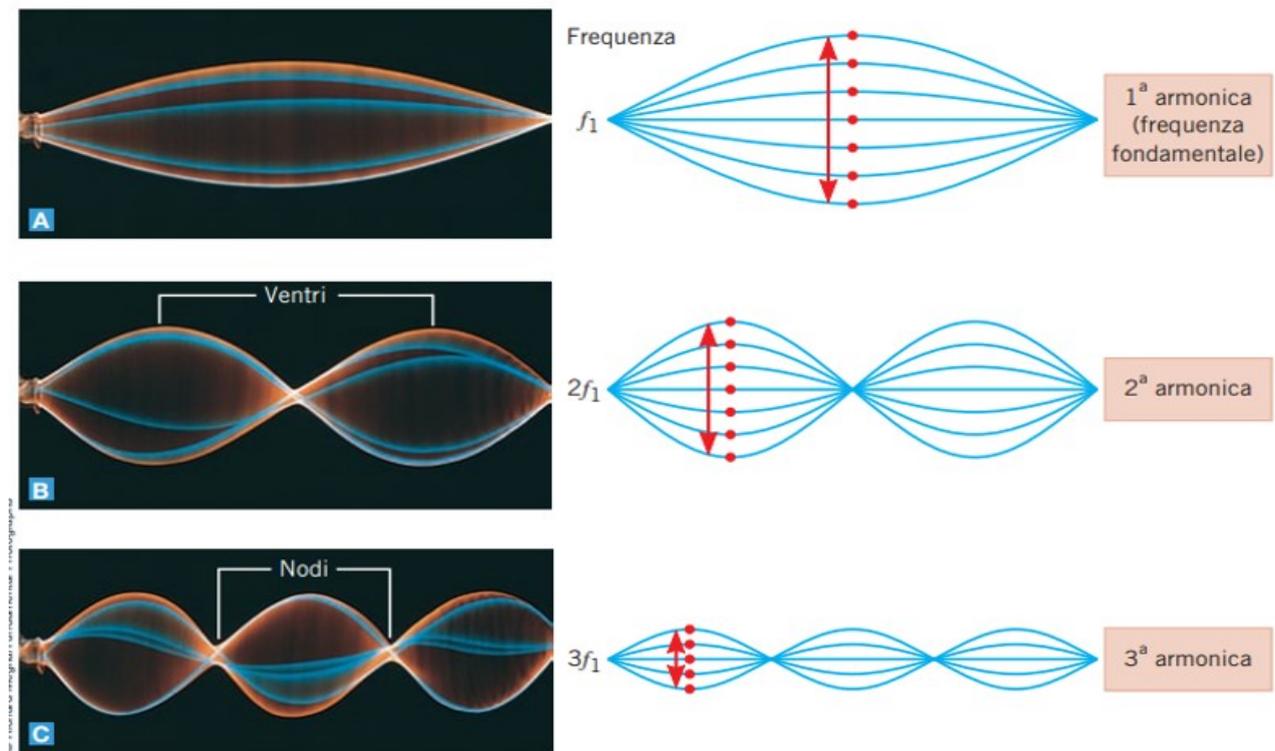
I punti di un'onda stazionaria in cui l'ampiezza della vibrazione è nulla si chiamano nodi (aree di pressione minima e aree di pressione massima) (fig.6), mentre quelli in cui l'ampiezza della vibrazione è massima si chiamano ventri.

I nodi di un'onda stazionaria sono al centro della levitazione acustica.

**Fig.6** Nodi e ventri(antinodi) di un'onda stazionaria



Immagina un fiume con rocce e rapide. L'acqua è calma in alcune parti del fiume ed è turbolenta in altre. I detriti che galleggiano e la schiuma tendono a depositarsi nelle zone calme del fiume. Per fare in modo che un oggetto galleggiante rimanga fermo in una parte del fiume che è in rapido movimento, l'oggetto dovrebbe essere ancorato o spinto nella direzione opposta al flusso dell'acqua. Questo è essenzialmente ciò che fa un levitante acustico (fig.7).



**Fig.7** nodi e ventri onda stazionaria

### 3 Concetti teorici sulla levitazione acustica

#### 3.1 Levitazione acustica

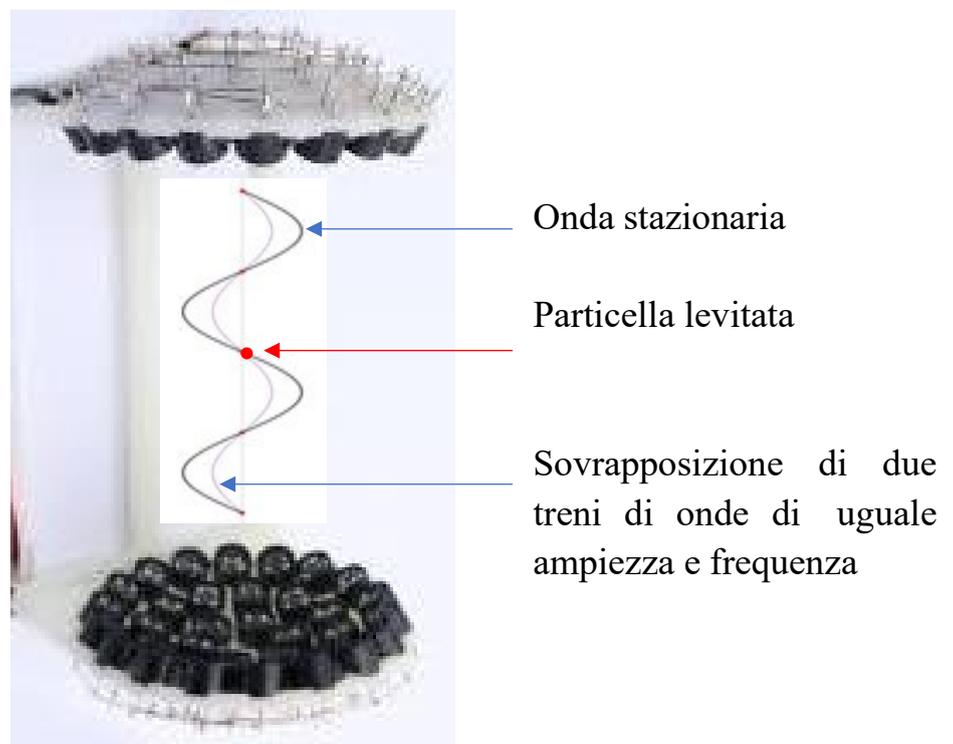
Posizionando un riflettore alla giusta distanza da un trasduttore, abbiamo un semplice modello di levitatore acustico, che crea un'onda stazionaria data dalla sovrapposizione di due treni di onde di uguale ampiezza e frequenza: quello che dalla sorgente viaggia verso una estremità e quello riflesso che torna verso la sorgente. Quando l'orientamento dell'onda è parallelo alla forza di gravità, porzioni dell'onda stazionaria hanno una pressione costante verso il basso e altre hanno una pressione costante verso l'alto.

Nello spazio, dove c'è poca gravità, le particelle fluttuanti si raccolgono nei nodi dell'onda stazionaria, che sono calmi e immobili.

Sulla terra, gli oggetti si raccolgono appena sotto i nodi come mostrato in (fig.8), dove la pressione di radiazione acustica, o la quantità di pressione che un'onda sonora può esercitare su una superficie, bilancia la forza di gravità.

Gli oggetti si librano in un'area leggermente diversa all'interno del campo sonoro a seconda dell'influenza della gravità [5].

**Fig.8** Particella in levitazione



## 3.2 Tipi di levitazione acustica

La levitazione acustica può essere suddivisa in cinque diverse categorie:

1. Levitazione dell'onda stazionaria: le particelle sono intrappolate nei nodi di un'onda stazionaria, formata da una sorgente sonora e da un riflettore (nel caso del Langevin Horn) o da due gruppi di sorgenti (nel caso del TinyLev). Ciò si basa sul fatto che le particelle siano piccole rispetto alla lunghezza d'onda, tipicamente nella regione del 10% o meno, e il peso massimo levitato è solitamente dell'ordine di pochi milligrammi. Tipicamente questi levitatori sono ad asse singolo, il che significa che tutte le particelle sono intrappolate lungo un unico asse centrale del levitatore. Tuttavia, con l'uso dei PAT (phased array transducers) possono anche essere dinamici. Questa è la tecnica più potente per la levitazione a una distanza maggiore di una lunghezza d'onda a causa dell'interferenza costruttiva delle due onde viaggianti che la formano. Le forze della levitazione a raggio singolo a distanza sono 30 volte più deboli di una semplice onda stazionaria.
2. Levitazione acustica in campo lontano: gli oggetti più grandi della lunghezza d'onda vengono levitati generando un campo adattato alle dimensioni e alla forma dell'oggetto levitato. Ciò consente agli oggetti più grandi della lunghezza d'onda di essere levitati a distanze maggiori della lunghezza d'onda dalla sorgente. Tuttavia, l'oggetto non deve essere ad alta densità. L'oggetto più pesante sollevato da questa tecnica è una sfera di polistirene espanso di 30 mm di diametro di massa 0,6 g; mentre, un ottaedro di polistirene espanso con una lunghezza diagonale di 50 mm e una massa di 0,5 g è l'oggetto più grande mai levitato acusticamente da questa tecnica utilizzando PAT sopra e sotto l'oggetto.
3. Levitazione a raggio singolo: levitazione di oggetti a una distanza maggiore di una singola lunghezza d'onda dalle sorgenti, mediante l'utilizzo di una sola matrice. In questo caso la geometria della matrice deve essere appositamente progettata e di solito assume una forma a vortice (fig.9). La trappola a vortice crea un "buco" di bassa pressione al centro e richiede un campo di fase più complesso ma, a differenza della trappola doppia, può essere utilizzato per sollevare oggetti più grandi della lunghezza d'onda. Nel 2019 l'oggetto più grande mai sollevato da un raggio traente è stata una palla di polistirene espanso di 19,53 mm di diametro presso l'Università di Bristol.

**Fig.9** Levitatore acustico a raggio singolo in grado di levitare una particella di polistirene espanso circa il doppio della lunghezza d'onda; vengono utilizzati 450 trasduttori a 40kHz



4. Levitazione del campo vicino: un grande oggetto planare viene posizionato molto vicino alla superficie del trasduttore e funge da riflettore, permettendo di levitare su una pellicola d'aria molto sottile. Questa tecnica è in grado di sollevare diversi chilogrammi, ma non può superare le centinaia di micrometri sopra la superficie.
5. Levitazione acustica in campo vicino invertito: in determinate condizioni la forza repulsiva che produce la levitazione in campo vicino si inverte e diventa una forza attrattiva. In questo caso il trasduttore può essere puntato verso il basso e il set up levita l'oggetto sotto di esso. L'oggetto levita a una distanza di decine di micrometri e gli oggetti nella scala dei milligrammi sono stati levitati. La ricerca attuale suggerisce che si verifica dove il raggio equivalente del disco è inferiore al 38% della lunghezza d'onda.

Questa classificazione è un modo per ordinare i diversi tipi di levitazione, ma non sono definitive. Ulteriori ricerche sono in corso sulla combinazione delle precedenti tecniche per ottenere maggiori forze di cattura, come la levitazione stabile di oggetti non assialsimmetrici, combinando la levitazione dell'onda stazionaria con una doppia trappola (tipicamente una tecnica di levitazione a raggio singolo). C'è anche un notevole interesse mirato a combinare queste tecniche con componenti di sfasamento stampati in 3D per ottenere ulteriori vantaggi come la formazione di campi passivi o una risoluzione spaziale migliore [6].

## 4 Campi applicativi

La versatilità della levitazione acustica lo rende uno strumento molto utile ed efficace in diversi ambiti, sia a livello di ricerca e sviluppo, che in campo industriale.

La levitazione magnetica può trattenere fortemente i campioni a mezz'aria ma supporta solo materiali ferromagnetici.

La manipolazione senza contatto di goccioline allo stato liquido ha acquisito una significativa importanza in quanto promette una chimica su piccola scala senza contatto. Uno dei vantaggi principali in questo settore è che i ricercatori possono studiare materiali corrosivi e/o tossici mantenendoli sospesi, eliminando del tutto il rischio di contaminazione o distruzione dei contenitori.

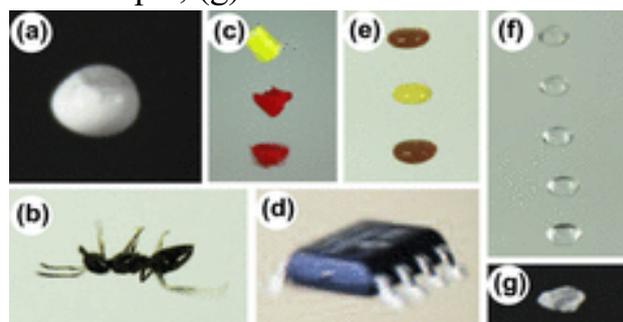
Alcune applicazioni molto interessanti in ambito medico e farmaceutico sono la trasfezione del Dna, tecnica che consente di inserire parti di Dna all'interno delle cellule con lo scopo della creazione di nuovi farmaci e vaccini e lo studio di diverse proteine.

Sono state effettuate inoltre, ricerche nel campo dell'assemblaggio di componenti elettrici (micro-assemblaggio) attraverso una combinazione di campi acustici o magnetici.

Un altro esempio applicativo è nello studio della fisica della schiuma che presenta un importante ostacolo: la gravità. La gravità tira il liquido verso il basso della schiuma asciugandolo e distruggendolo; i ricercatori possono contenere la schiuma con campi acustici per studiarla nello spazio senza l'interferenza della gravità, ottenendo una migliore comprensione di come la schiuma possa svolgere attività come la pulizia. Ulteriori usi ne sono stati fatti ad esempio per lo studio dell'evaporazione dei liquidi, nella crescita dei cristalli eutettici e nella spettroscopia con casi specifici per alghe e globuli.

Vedi esempi su (fig.10) [7].

**Fig.10** Campioni levitati con TinyLev. (a) soluzione di isopropile e biossido di stagno, (b) formica, (c) acido polilattico, (d) microchip, (e) ketchup e senape, (f) acqua, (g) cristallo di zucchero



## 5 Approfondimento dei levitatori acustici

### 5.1 Levitatori ad asse singolo non risonanti e risonanti

La disposizione più comune per i levitatori acustici è una configurazione ad asse singolo per la quale esistono due tipi principali.

Il primo si basa su un trasduttore acustico e un riflettore, la cui distanza di separazione e geometria sono tipicamente progettate per agire come una cavità risonante.

D'altra parte, i levitatori non risonanti possono essere realizzati utilizzando due emettitori separati e opposti.

I dispositivi risonanti sono più efficienti ma sono sensibili ai cambiamenti di temperatura e alla disposizione degli elementi.

Sia i levitatori risonanti che quelli non risonanti sono guidati da un segnale di eccitazione sinusoidale per generare un'onda stazionaria tra i loro elementi; questa onda stazionaria intrappolerà le particelle nei suoi nodi.

Per i levitatori risonanti, è stato dimostrato che un riflettore concavo produce forze di intrappolamento più forti di uno planare e che l'utilizzo di una grande piastra di radiazione attaccata alla parte anteriore dell'emettitore fornisce maggiore stabilità consentendo la levitazione di liquidi e lo studio di campioni in microgravità.

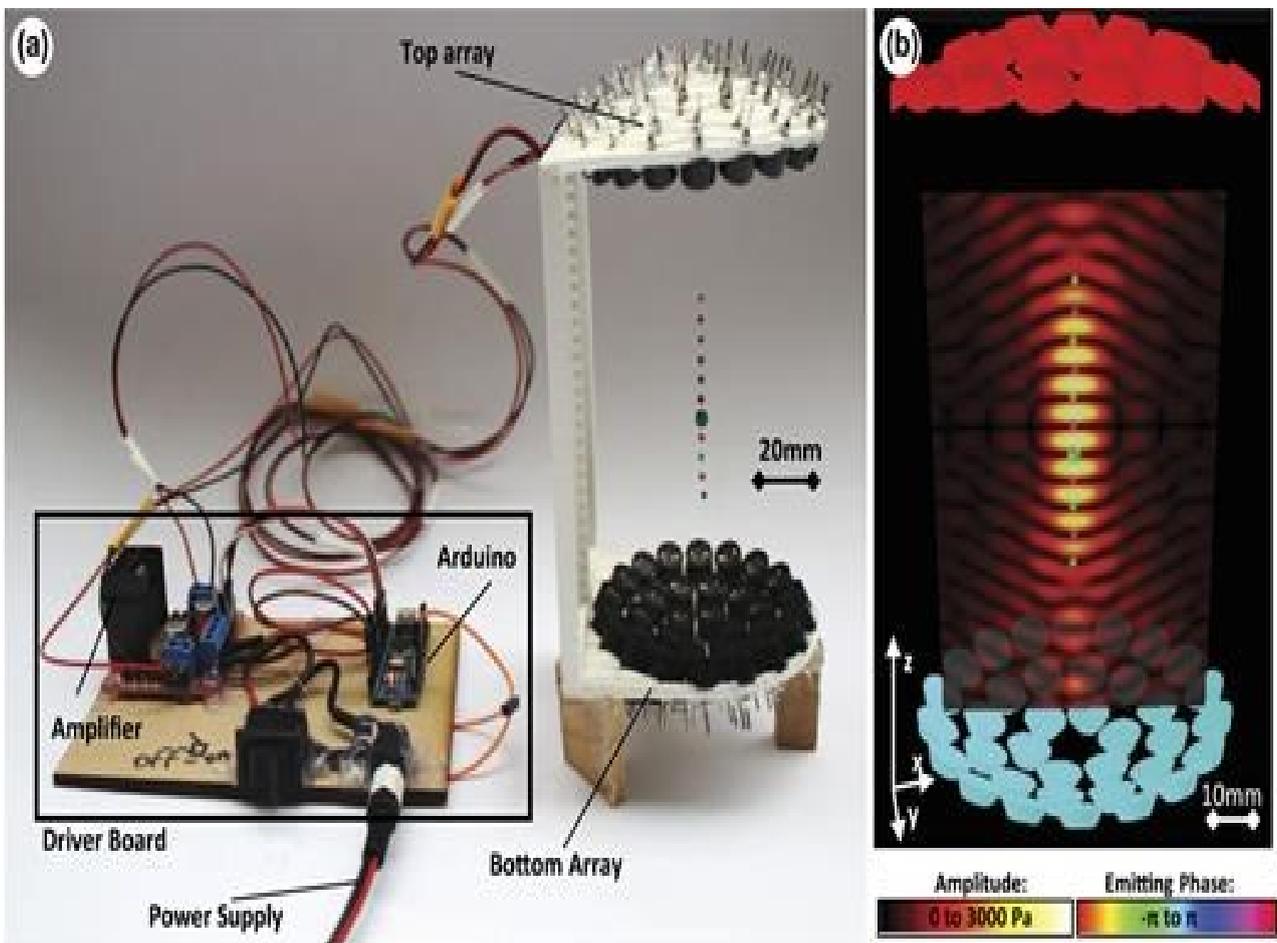
L'utilizzo di un emettitore concavo ha aumentato significativamente l'efficienza dei levitatori, concentrando localmente l'energia acustica.

I ricercatori utilizzano sistemi non risonanti per levitatori versatili e più stabili. Questi sistemi sono tipicamente composti da due emettitori contrapposti tra loro. Utilizzando questo approccio, è stato sviluppato un levitatore con un intervallo di temperatura operativa compreso tra  $-40$  e  $+40$  °C che non richiedeva alcuna calibrazione per la separazione degli emettitori opposti.

Vedi (fig.11) [8].

**Fig. 11**

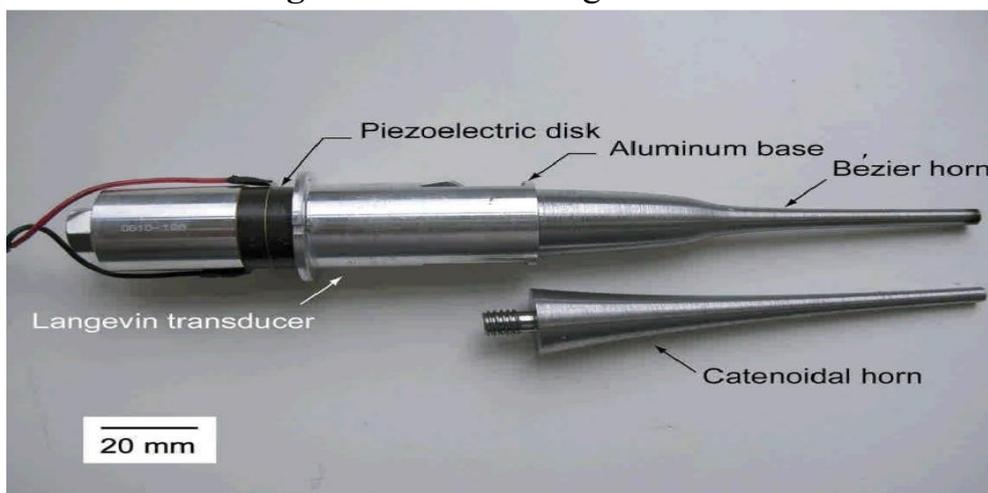
- (a) Sistema TinyLev composto dalla scheda driver e dal levitatore a asse singolo con 72 trasduttori (disposizione su due superfici, ciascuna contenente 36 trasduttori). Le particelle di polistirene espanso sono intrappolate nei suoi nodi.
- (b) Campo acustico simulato; il colore rappresenta la fase di emissione dei trasduttori (sono necessari due segnali di pilotaggio per produrre il movimento verticale delle trappole).



## 5.2 Levitatore Langevin Horn

Il levitatore più comune dagli anni 70 fino al 2017 è stato il modello Langevin Horn costituito da un attuatore piezoelettrico, un trasmettitore in metallo e un riflettore (fig.12). Tuttavia, tale levitatore richiedeva una regolazione precisa tra il trasmettitore e il riflettore: la loro distanza doveva essere un multiplo esatto della lunghezza d'onda, il che risulta piuttosto difficile da attuare a causa delle variazioni della velocità del suono dovute a fattori ambientali, come la temperatura e l'altitudine. Tale modello di levitatore ha il vantaggio di supportare le alte tensioni (tipicamente 100-1000V) che portano alla generazione di pressioni acustiche elevate con un singolo emettitore. Tuttavia, il levitatore in questione, presenta diversi inconvenienti che ne limitano il campo di applicazione: innanzitutto, è difficile da sintonizzare su una specifica frequenza di risonanza; in secondo luogo, l'alta tensione richiesta è potenzialmente pericolosa e, terzo, le matrici tendono a surriscaldarsi a causa dell'inefficienza di trasduzione quindi il suo comportamento risonante è fortemente sensibile alla temperatura [9].

**Fig.12** Levitatore Langevin Horn



### 5.3 Modello TinyLev

Questo levitatore acustico ora molto diffuso è caratterizzato da un gran numero di piccoli trasduttori a ultrasuoni che trasformano il segnale elettrico in potenza acustica. I trasduttori generalmente utilizzati sono i trasduttori a ultrasuoni Murata che garantiscono un ottimo compromesso tra pressione generata e deviazione standard della fase.

Il primo di questi levitatori ad essere messo a punto è stato un levitatore ad onde stazionarie ad asse singolo denominato TinyLev.

Le principali differenze rispetto al Langevin Horn sono l'uso di sorgenti sia dall'alto che dal basso (piuttosto che una sorgente e un riflettore) e l'uso di un gran numero di piccoli trasduttori con eccitazione parallela, piuttosto che un singolo elemento piezoelettrico.

L'uso di due onde viaggianti opposte garantisce una buona efficienza di levitazione anche quando la distanza tra le matrici superiore e inferiore non è un multiplo preciso della lunghezza d'onda, poiché grazie all'utilizzo di un elevato numero di singoli trasduttori, vengono a crearsi campi stazionari di dimensioni maggiori rispetto a quelli che si creerebbero usando una singola sorgente e un riflettore.

Ciò ha portato ad un sistema più semplice e resistente ai cambiamenti di temperatura e umidità, funzionante ad una tensione più bassa e per periodi più prolungati nel tempo.

L'uso di più piccole sorgenti è stato inizialmente progettato come misura di risparmio sui costi, ma ha anche aperto la porta alla levitazione PAT (Phased Array Transducers).

I trasduttori a ultrasuoni Phased Array sono un insieme di altoparlanti a ultrasuoni controllati per creare un singolo campo sonoro. Ciò si ottiene controllando la fase relativa (ovvero il tempo di ritardo) tra ciascuna uscita e talvolta le relative grandezze di uscita. Questi array utilizzeranno un'uscita continua invece di brevi esplosioni di energia; ciò ha consentito la levitazione unilaterale, così come la manipolazione simultanea di un gran numero di particelle [8][1].

## 6 Caratteristiche e funzionamento del modello TinyLev

### 6.1 Analisi funzionamento del modello TinyLev

La pressione acustica complessa  $P$  nel punto  $r$  dovuta ad una sorgente di pistone che emette ad una singola frequenza può essere modellata come:

$$P(r) = P_0 V \frac{D_f(\theta)}{d} e^{i(\varphi + kd)}$$

dove

- $P_0$  è una costante di ampiezza che definisce la potenza di uscita del trasduttore;
- $V$  è la massima escursione del segnale di eccitazione;
- $D_f$  è una funzione di direttività di campo lontano che dipende da  $\theta$ , angolo tra la normale del pistone e  $r$ ;
- $1/d$  rappresenta la divergenza, dove  $d$  è la distanza di propagazione nello spazio libero;
- $k=2\pi/\lambda$  è il numero d'onda;
- $\varphi$  è la fase di emissione della sorgente.

Il campo acustico totale ( $P$ ) generato da  $N$  trasduttori sarà dato dalla somma dei singoli campi.

Per caratterizzare un trasduttore occorrono la costante di ampiezza ( $P_0$ ) e il raggio del pistone ( $a$ ).

Per calcolare la forza esercitata su una sfera a causa di un campo di pressione, si può utilizzare il gradiente negativo del potenziale di Gork'ov:  $F = -\nabla U$ :

$$U = 2K_1(|p^2|) - 2K_2(|p_x|^2 + |p_y|^2 + |p_z|^2)$$
$$K_1 = \frac{1}{4} V \left( \frac{1}{c_0^2 \rho_0} - \frac{1}{c_p^2 \rho_p} \right) \quad K_2 = \frac{3}{4} V \left( \frac{\rho_0 - \rho_p}{\omega^2 \rho_0 (\rho_0 + 2\rho_p)} \right)$$

dove

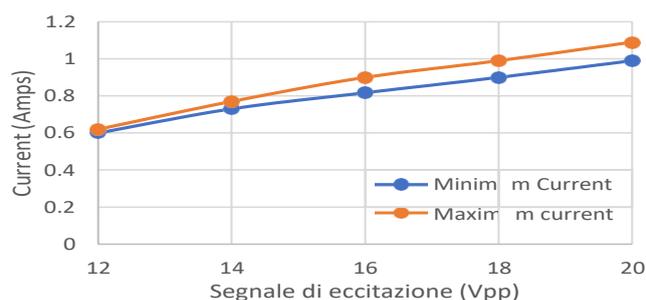
- $V$  è il volume della particella sferica;
- $\omega$  rappresenta la frequenza delle onde emesse;
- $\rho$  è la densità;
- $c$  è la velocità del suono;
- $p$  è la pressione ( $p_x$  è la sua derivata rispetto a  $x$ ,  $p_y$  è la sua derivata rispetto a  $y$  e  $p_z$  è la sua derivata rispetto a  $z$ ).

I pedici 0 e p si riferiscono rispettivamente al mezzo ospite e al materiale della particella [8].

## 6.2 Consumo energetico

Il consumo di corrente del sistema è stato misurato, è mostrato nella figura (fig.13). C'era solo una piccola dipendenza del consumo di corrente a diverse differenze di fase tra gli array superiore e inferiore a sostegno dell'ipotesi che il sistema possa essere approssimato come non risonante [8].

**Fig.13** Consumo di corrente del levitatore a diverse differenze di fase tra l'array superiore e inferiore.



### 6.3 Studio della disposizione ottimale dei trasduttori

Il levitatore TinyLev è composto da 72 emettitori ultrasonici di diametro 10 mm disposti rispettivamente metà nella matrice superiore e l'altra metà in quella inferiore. La maggior parte dei trasduttori disponibili in commercio funzionano a 40 kHz; le onde acustiche trasportate dall'aria a quella frequenza hanno una lunghezza d'onda di 8,65 mm a 25°C e permettono la levitazione di campioni fino a 4 mm (mezza lunghezza d'onda). In alcuni casi potrebbero verificarsi alterazioni e sfasamenti dei segnali emessi dai trasduttori, dovute a problematiche legate a difetti di fabbricazione. Dopo aver valutato le possibilità si è giunti alla decisione di utilizzare 36 trasduttori su ciascun lato come compromesso tra forza di cattura e costo/complessità; questi trasduttori sono disposti in anelli aschema esagonale di 6,12 e 18 (fig.14).

**Fig.14** Disposizione trasduttori sulle rispettive matrici.

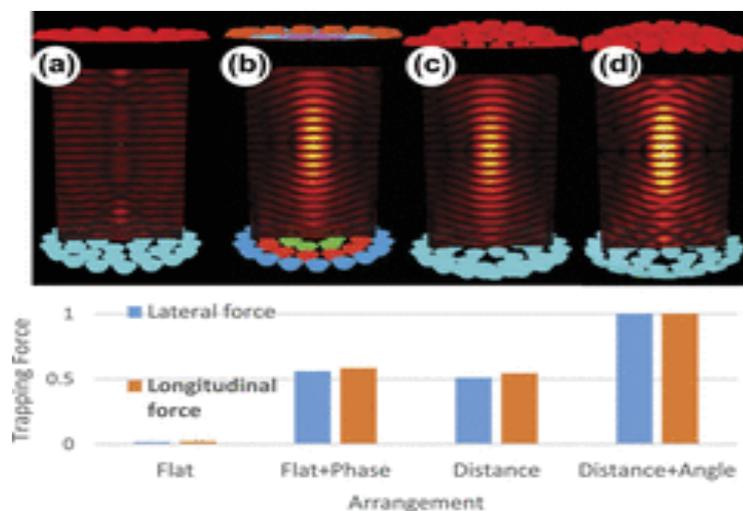


Questo numero di trasduttori genera una forza sufficiente per far levitare i campioni e mantenere il processo di esecuzione; tuttavia, è possibile aggiungere più trasduttori, aumentando l'intensità delle forze di cattura, andando però così a gravare sui costi e complessità del prototipo.

Al contrario dei levitatori Langevin Horn, che irradiano il suono da un'ampia superficie, focalizzando naturalmente le onde acustiche, il levitatore TinyLev è composto da due matrici caratterizzate da piccoli trasduttori, che permettono di ottenere una messa a fuoco acustica grazie al loro orientamento e alla loro distanza.

Sono state analizzate 4 possibili diverse strategie di focalizzazione (fig.15):

- Una disposizione su superficie piana dei trasduttori consente una costruzione semplice, ad esempio utilizzando una piastra, ma la forza di cattura risulta in questo caso troppo bassa (circa il 2% delle prestazioni della forza di cattura rispetto alla migliore configurazione analizzata);
- Una seconda alternativa consente di focalizzare l'energia acustica di una matrice regolando elettronicamente la fase dei segnali per aumentare la forza di cattura (circa il 50%), ma richiede un'elettronica complessa in grado di produrre segnali indipendenti;
- La terza alternativa raggiunge lo stesso incremento di forza di cattura della precedente soluzione, fissando i ritardi di fase posizionando i trasduttori a determinate distanze verticali;
- La disposizione ottimale dei trasduttori si ottiene orientandone le normali verso la messa fuoco: questa opzione garantisce il raggiungimento di un maggiore focus e l'insonificazione di massima intensità del punto focale [8].



**Fig.15** Effetto simulato di diversi metodi di focalizzazione sul campo acustico:

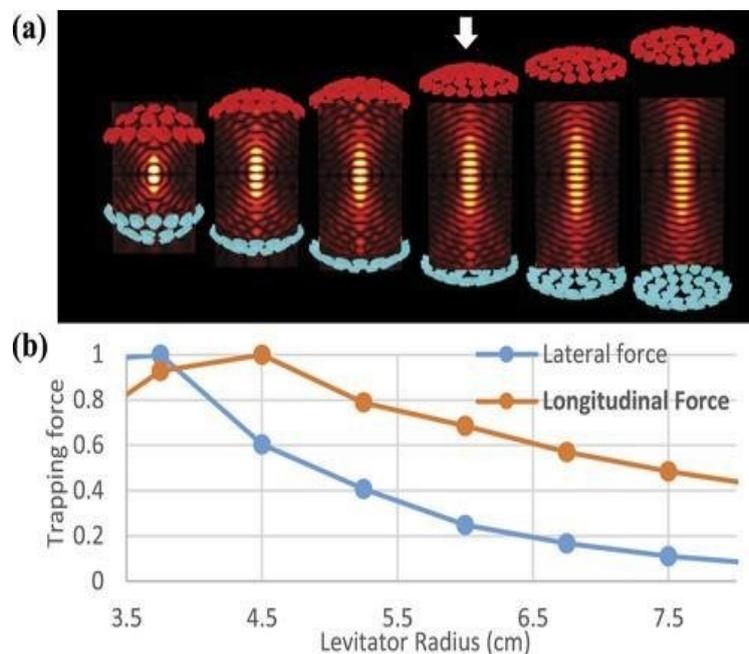
- (a) nessuna messa a fuoco,
- (b) messa a fuoco elettronica di fase,
- (c) messa fuoco tramite offset di distanza,
- (d) messa a fuoco tramite offset di distanza e angolo di orientamento del trasduttore.

## 6.4 Studio della variazione della forza di cattura al variare della distanza tra matrice superiore e inferiore

Un altro aspetto fondamentale da analizzare è l'influenza della distanza relativa tra matrice superiore e inferiore sull'intensità della forza di cattura che il dispositivo genera.

In figura (fig.16) è mostrato come la distanza tra le 2 matrici influenza la forza prodotta. In ogni caso, la superficie curva delle matrici permette di ottenere il fuoco geometrico al centro della cavità; ciò significa che, all'aumentare della distanza tra le 2 superfici, aumenta anche il raggio di curvatura delle stesse.

La forza  $z$  diretta longitudinalmente rispetto al corpo levitato deve essere più alta possibile, in modo da contrastare la gravità e garantire la levitazione; le forze laterali  $x$  e  $y$  possono essere più piccole, ma sono comunque importanti per fornire stabilità all'oggetto levitato [8].



**Fig.16** Prestazioni simulate della forza di cattura, in funzione della distanza tra le matrici,

(a) mappe della pressione acustica per diversi gradi di separazione,

(b) andamento delle forze di cattura per i diversi gradi di separazione.

## 6.5 Caratteristiche delle particelle levitate

La levitazione acustica di un piccolo oggetto è fortemente influenzata dalla sua densità, dimensione e massa.

Tali parametri sono di fondamentale importanza per la determinazione della forza gravitazionale agente sul corpo.

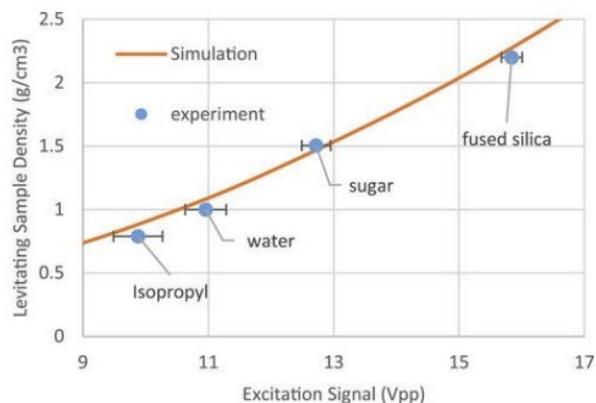
Il levitatore TinyLev può intrappolare oggetti di densità fino a  $2,2\text{g/cm}^3$  e di dimensioni comprese tra i 2 e i 5mm; questo perché i trasduttori, funzionando a 40kHz, trasmettono onde acustiche di lunghezza d'onda  $\lambda=8,65\text{mm}$  a  $25^\circ\text{C}$  e di conseguenza la dimensione degli oggetti intrappolati sarà circa pari a metà della lunghezza d'onda ( $\approx 4\text{mm}$ ).

Inoltre, le particelle levitate devono avere una massa molto ridotta, pari a pochi milligrammi.

La principale misura delle prestazioni del levitatore è la densità massima delle particelle che può levitare.

Se le particelle sono nel regime di Rayleigh (cioè inferiori alla metà della lunghezza d'onda) la forza di cattura sarà proporzionale al volume e di conseguenza la densità giocherà un ruolo fondamentale nei campioni che potranno essere sospesi.

In figura (fig.17) viene mostrata la tensione minima di eccitazione richiesta per levitare campioni di diversa densità: alcol isopropilico ( $0,79\text{g/cm}^3$ ), acqua ( $1\text{g/cm}^3$ ), zucchero ( $1,5\text{g/cm}^3$ ) e silice fusa ( $2,2\text{g/cm}^3$ ) [8].



**Fig.17** Tensione di eccitazione minima necessaria in funzione della densità del materiale.

L'andamento della curva permette di affermare che la relazione tra le dimensioni degli oggetti levitati e il voltaggio minimo per alimentare il levitatore è di tipo lineare: questo significa che aumentando le dimensioni degli oggetti levitati, il voltaggio minimo per sostenerli cresce. Tali valori di eccitazione minima sono stati ricavati dalla determinazione della pressione acustica complessiva in un determinato punto  $r$  dovuta ad una sorgente a pistone che emette a una singola frequenza (formula vista in precedenza) [8].

## 6.6 Elettronica di guida: Arduino Nano e Driver L298N

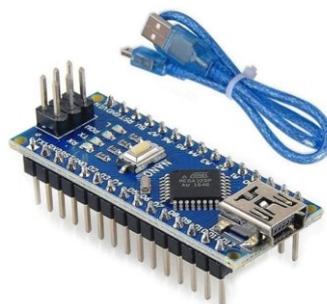
I due componenti principali che governano l'elettronica, e quindi il segnale di eccitazione ricevuto dai trasduttori, del levitatore TinyLev sono un Arduino Nano e un Driver L298N.

### Arduino Nano:

Arduino (fig.18) è una piattaforma elettronica costituita da un hardware e un software, progettato per essere semplice e immediato; pertanto, è possibile programmare e strutturare un progetto attraverso il software Arduino IDE che rende più facile la scrittura del codice e il suo trasferimento sulla scheda.

Arduino Nano, è una versione ridotta de Arduino UNO. Ciò riduce al minimo la domanda di energia e consumi.

**Fig.18** scheda Arduino Nano

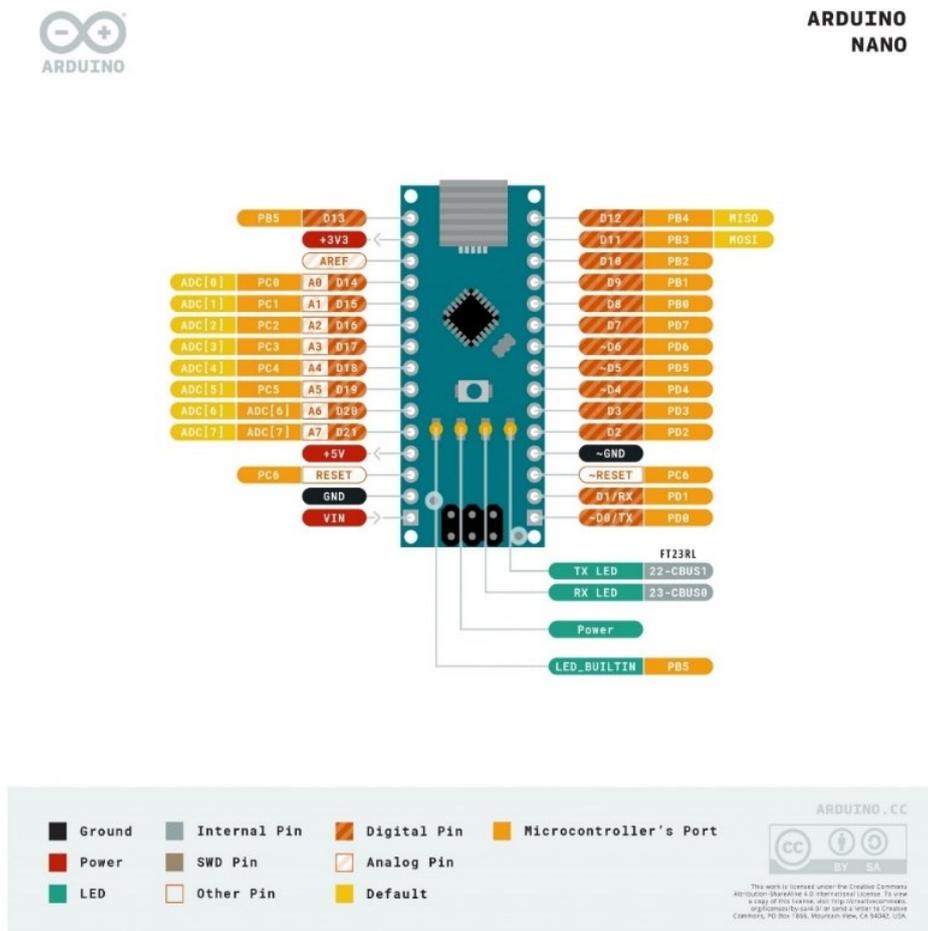


## caratteristiche tecniche

- È una scheda microcontrollore (cervello del sistema) piccola, flessibile e facile da usare.
- Si basa sul microcontrollore Atmel ATmega328p o MCU nelle versioni 3.xe su ATmega168 nelle versioni precedenti. In ogni caso, funziona ad una frequenza di 16 Mhz.
- La memoria è composta da 16 KB o 32 KB flash a seconda della versione (2 KB utilizzati per il bootloader), con 1 o 2 KB di memoria SRAM e una EEPROM da 512 byte o 1 KB a seconda della MCU.
- Ha una tensione di alimentazione di 5 V, ma la tensione di ingresso può variare da 7 a 12 V.
- Dispone di 14 pin digitali, 8 pin analogici, 2 pin di reset e 6 pin di alimentazione (Vcc e GND). Ai pin analogici e digitali, vengono assegnate diverse funzioni extra come pinMode e digitalWrite e analogRead per gli analoghi. Nel caso degli analoghi, consentono una risoluzione a 10 bit da 0 a 5v. Sulle digitali, 22 possono essere utilizzate come uscite %PWM. Vedi (fig.19).
- Non include una presa di corrente continua.
- Utilizza un miniUSB standard per la sua connessione con il computer per programmarlo o alimentarlo.
- Il suo consumo energetico è di 19mA.
- Pin digitali: I pin D0 fino a D13 sono pin destinati ai segnali digitali e possono essere usati come ingresso o come uscita, ovviamente impostabili via software.
- Pin analogici: I pin da A0 a A7 hanno differenti funzionalità a seconda di come vengono impostati via software; ovviamente una funzionalità esclude l'altra, quindi se usiamo il pin come ingresso analogico, non potremo usarlo come interrupt o come bus.
- Pin di reset: I pin di reset permettono il reset del microcontrollore presente nell'Arduino.

- Pin di alimentazione: I pin di alimentazione sono denominati VIN, 3.3V, 5V e GND; VIN è la tensione di ingresso compresa tra 7 e 12 V, 3.3V è la tensione minima generata dal regolatore interno, 5V è la tensione necessaria all'alimentazione della scheda e dei componenti e GND rappresenta il pin di massa della scheda [10].

**Fig.19** Pinout Arduino Nano



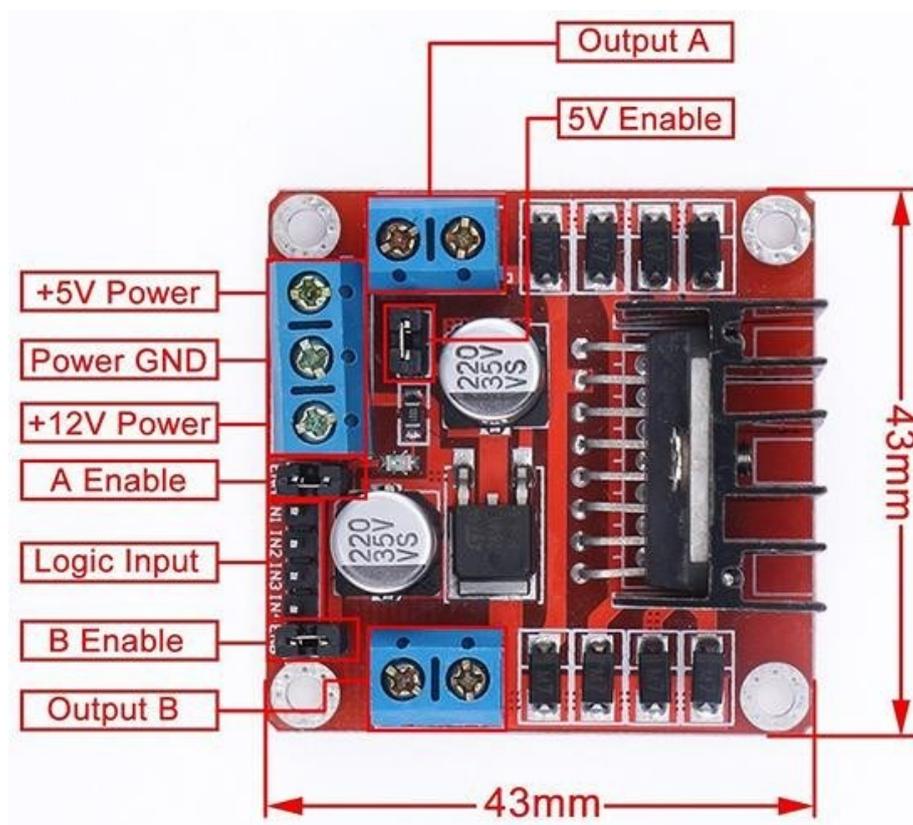
### Driver L298N:

Si tratta di un modulo basato sul driver Dual H-Bridge L298N che viene principalmente utilizzato per pilotare con motori DC, motori passo-passo, solenoidi e relè, controllandone velocità e direzione.

La scheda può funzionare con tensione operativa compresa nel range tra 5V e 35V e fornire 2A di corrente per ogni uscita.

È composto da due connettori laterali ai quali collegare i motori (o i carichi in generale), e da connettori frontali dove collegare l'alimentazione e le connessioni logiche atte a pilotare i carichi (fig.20).

**Fig.20** Driver L298N



Il modulo L298N presenta inoltre una funzione molto utile: quando è alimentato a 12V, dal connettore di alimentazione, in corrispondenza dell'uscita +5V sarà possibile prelevare una tensione regolata a 5V per alimentare un eventuale Arduino (con il quale è compatibile). Per abilitare questa funzione bisognerà lasciare in sede il jumper presente dietro i connettori di alimentazione, ma se il nostro modulo è alimentato con tensioni maggiori di 12V questo jumper va rimosso per impedire che venga danneggiato il regolatore di tensione a 5V.

Nel caso del levitatore Tinylev tale funzione consente di mettere in funzione l'Arduino attraverso i collegamenti elettrici dei pin GND e A0, A1, A2 e A3 dell'Arduino Nano, con i pin GND e i 4 INPUT della scheda Driver.

Per quanto riguarda i segnali utilizzati, vengono usate le onde quadre come segnali di eccitazione, poiché sono più facilmente generabili da un punto di vista prettamente digitale rispetto alle onde sinusoidali.

L'Arduino Nano viene utilizzato per generare segnali caratterizzati da onde quadre e il Driver L298N per amplificarli: attraverso una configurazione push-pull si riesce a garantire che la tensione picco-picco ricevuta dai trasduttori sia il doppio rispetto a quella ricevuta in ingresso [11].

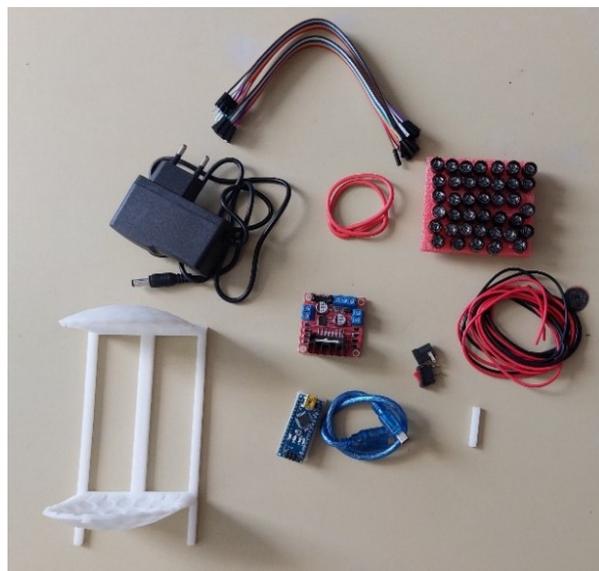
## 7 Assemblaggio prototipo levitatore acustico

### 7.1 Componenti del kit

I componenti utilizzati per la realizzazione del levitatore TinyLev sono i seguenti (fig.21) [12]:

- 72x trasduttori, diametro 10mm, frequenza 40kHz;
- 1x supporto Tinylev stampato in 3D;
- 1x Arduino Nano;
- 1x scheda di azionamento a doppio motore L298N;
- 1x interruttore di alimentazione;
- 1x adattatore DC variabile tra 7 e 12V;
- 1x connettore CC femmina;
- cavi di collegamento;
- cavo 12AWG nero e rosso;
- cavo 24AWG nero e rosso;
- cavo esposto 24AWG

**Fig.21** componenti utilizzati per la realizzazione del levitatore TinyLev



Gli strumenti impiegati per la realizzazione del prototipo sono:

- saldatore a stagno;
- pistola per colla a caldo;
- multimetro;
- cacciavite e pinze;
- oscilloscopio con due sonde
- stampante 3D

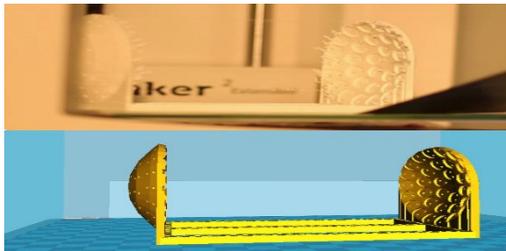
## 7.2 Procedimento per assemblare il modello

Procedura step by step per assemblare il modello del levitatore acustico

### Step 1: stampare la base del levitatore

Stampa 3D della base per il levitatore (fig.22)

(in rete è possibile trovare il file stl).



**Fig.22** stampa la base del levitatore

### Step 2: pulire la base

Vedi (fig.23).

**Fig.23** pulizia base



### Step 3: contrassegnare polarità usando multimetro

Se hai un multimetro e un nastro di rame, questo metodo è abbastanza semplice da eseguire.

I trasduttori hanno polarità ed è importante incollarli nella base orientata con la stessa polarità. I marchi fatti dal produttore, non sono affatto affidabili. È possibile utilizzare due strisce di rame per rendere questo processo più veloce (fig.24). Dopo tutto, dovrai contrassegnare 72 trasduttori.

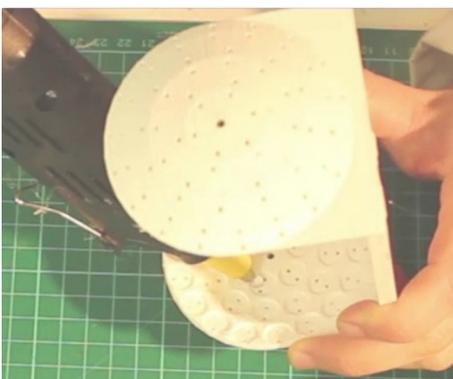


**Fig.24** Striscia di rame

### Step 4: incollare i trasduttori

Applicare un po' di colla a caldo sul lato della presa (se si applica la colla vicino ai fori per le gambe, le gambe saranno coperte di colla quando si spingono i trasduttori attraverso), spingere il trasduttore e applicare una certa pressione con le dita per farlo posare il più piatto possibile nella presa (fig.25a) (fig.25b).

È importante che tutte le gambe contrassegnate puntino verso il centro del dispositivo.



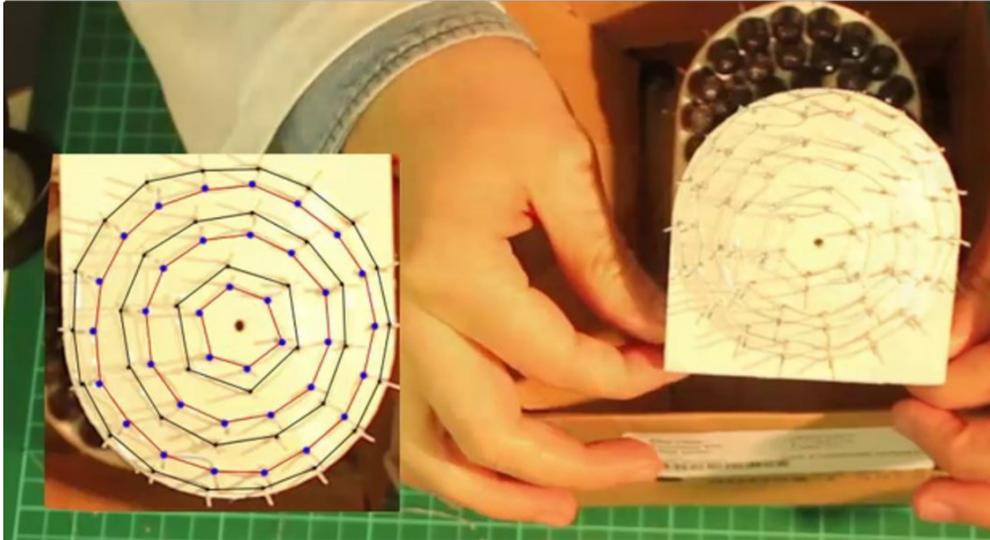
**Fig.25a** Applicazione colla a caldo



**Fig.25b** Inserimento trasduttori

## Step 5: collegare i trasduttori

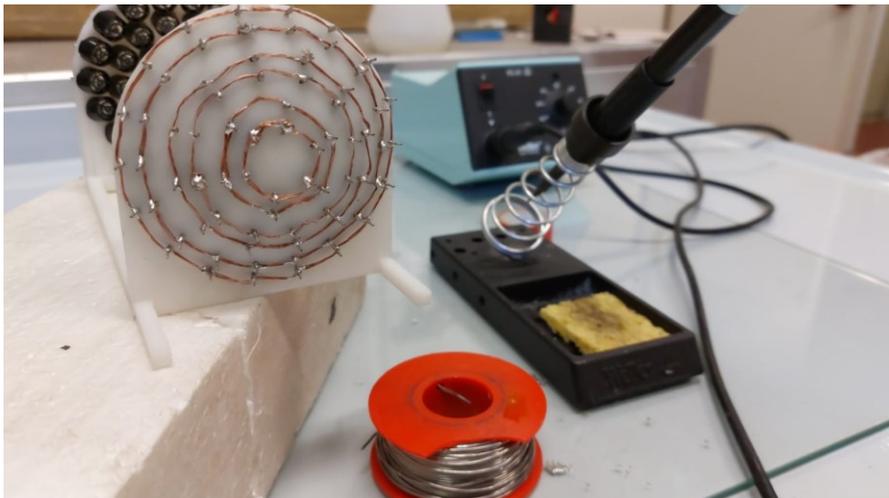
Avvolgere il filo esposto in sei anelli concentrici attorno alle gambe dei trasduttori (fig.26).



**Fig.26** Avvolgimento filo in anelli

## Step 6: saldare

Saldare i pin con i fili di stagno (fig.27).



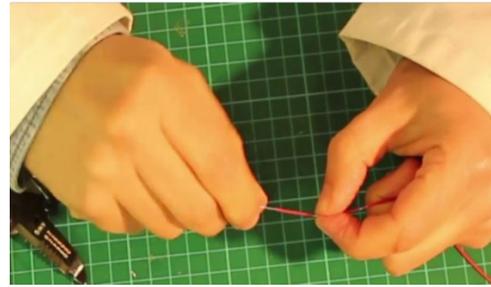
**Fig.27** Saldatura pin

## Step 7: preparare i fili lunghi

Ora, abbiamo bisogno di realizzare i fili che collegano i trasduttori alla scheda driver. fili rossi e 2 fili neri. Devono essere di circa 1 metro. In un lato c'è solo la punta esposta. Dall'altro lato ci sono 3 segmenti esposti, il lato con 3 segmenti andrà negli anelli dei trasduttori e il lato con solo la punta andrà nella scheda del driver (fig.28a) (fig.28b).



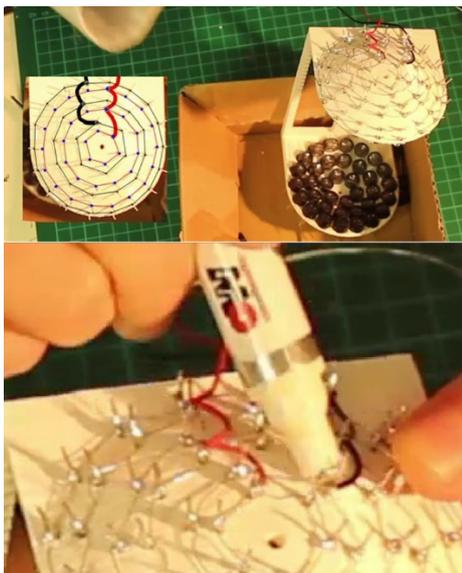
**Fig.28a** Preparazione fili



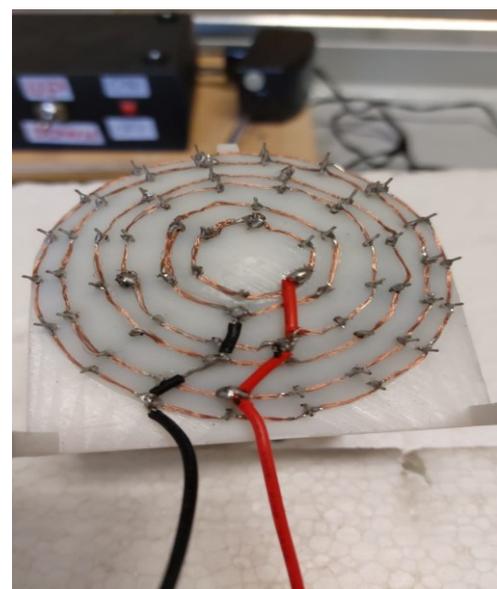
**Fig.28b** Preparazione fili

## Step 8: saldare fili lunghi

Il lato con i 3 segmenti esposti va nei trasduttori, un segmento per ogni anello. Ogni lato del levitatore ha un filo nero e uno rosso. È possibile utilizzare le pinzette per facilitare la saldatura. Stagnare gli altri lati dei fili (il lato che ha solo la punta esposta) (fig.29a) (fig.29b).



**Fig.29a** Saldatura filo rosso e nero

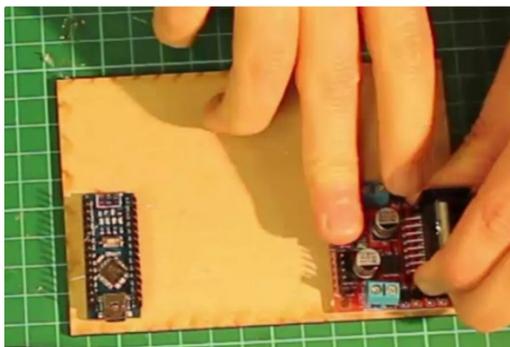


**Fig.29b** Saldatura filo rosso e nero



## Step 11: incollare Arduino e Driver

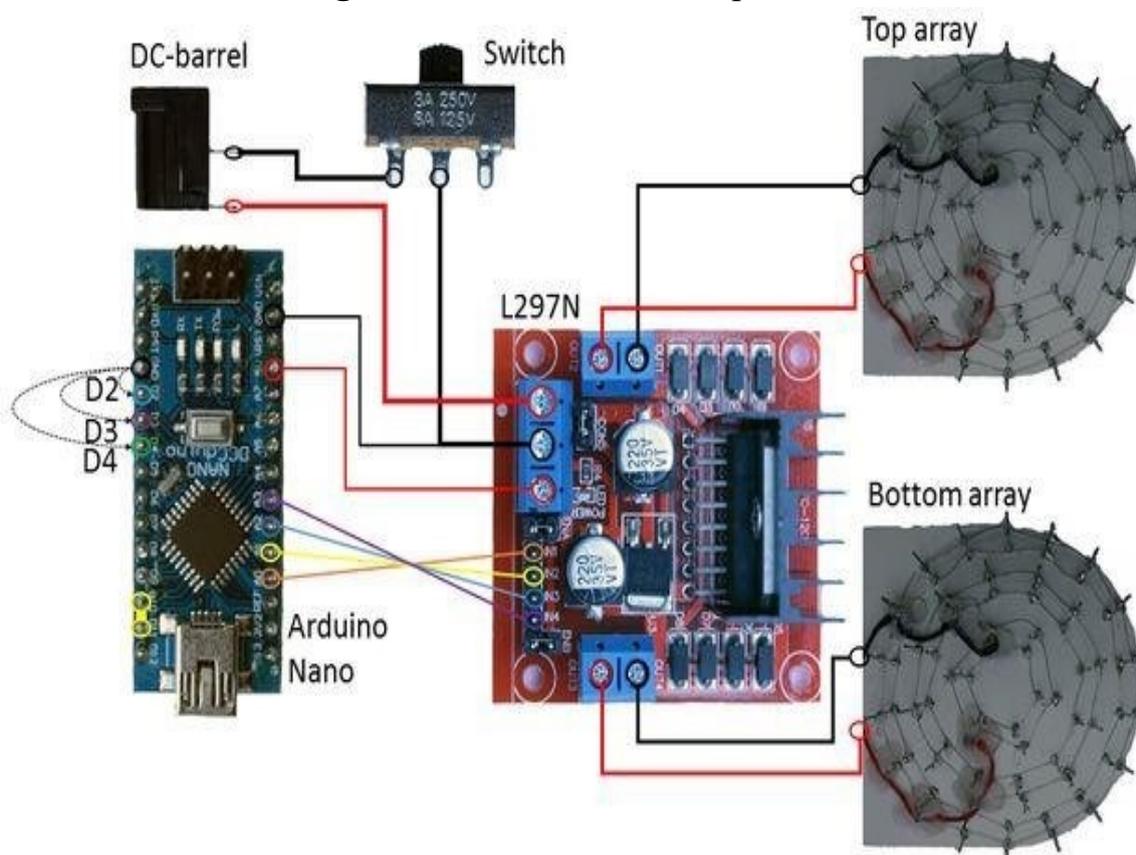
Incolla Arduino Nano e il Driver nella base. È importante utilizzare le posizioni e gli orientamenti delle figure (fig.32).



**Fig.32** Posizionamento Arduino e Driver

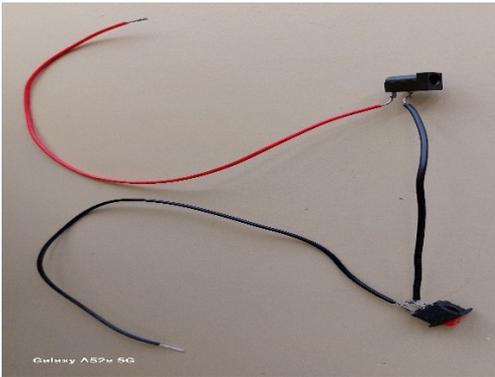
Schema elettrico in (fig.33), il quale mostra i vari collegamenti elettrici da eseguire per la realizzazione del prototipo da eseguire negli step successivi.

**Fig.33** Schema elettrico complessivo

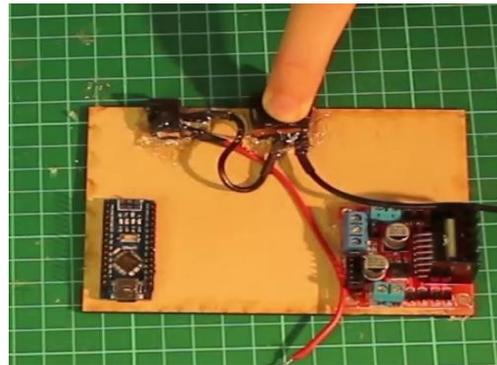


## Step 12: creare l'alimentazione CC

collegare il connettore femmina all'interruttore e lasciare libere le due estremità dei fili per fornire alimentazione alla scheda driver (fig.34a); successivamente incollare il connettore e l'interruttore sulla stessa base contenente l'Arduino e il driver (fig.34b).



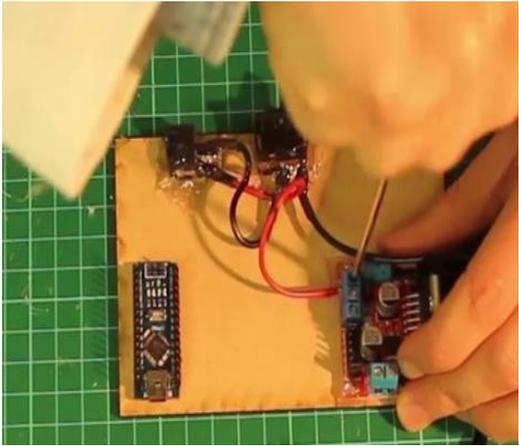
**Fig.34a** Collegamenti per alimentazione



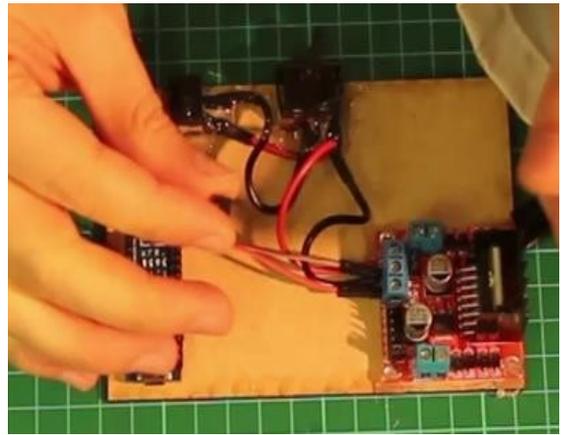
**Fig.34b** Posizionamento alimentazione

## Step 13: incollare CC e cablaggio

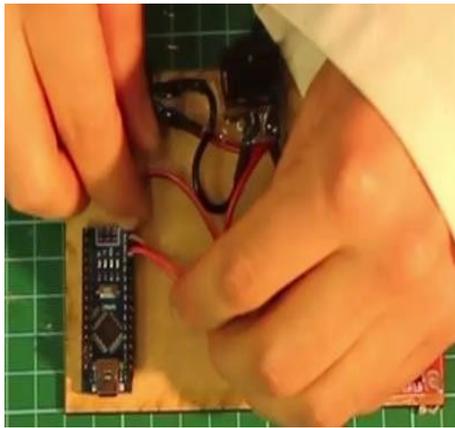
collegare il filo rosso dell'alimentazione all'ingresso 12V del driver (fig.35a); collegare la terra (GND) dall'alimentazione al connettore centrale del driver e inserire un opportuno ponte maschio-femmina (fig.35b); inserire un ponte maschio-femmina nell'ingresso 5V del driver; collegare i 2 ponticelli maschio-femmina, già collegati al driver, alla terra e all'ingresso 5V dell'Arduino (fig.35c); collegare i 4 punti ponticelli femmina dall'Arduino (A0, A1, A2 e A3) agli ingressi del driver (IN1, IN2, IN3 e IN4) e lasciare un filo libero collegato al GND (fig.35d); collegare un ponticello femmina-maschio nella terra dell'Arduino che potrà essere collegato a D2, D3 o D4 con l'obiettivo di far variare la posizione delle particelle levitate verso l'alto, verso il basso o ripristinare la loro posizione iniziale (fig.35e); collegare D10 a D11 con un ponticello in modo tale che l'emissione dei segnali sia sincronizzata.



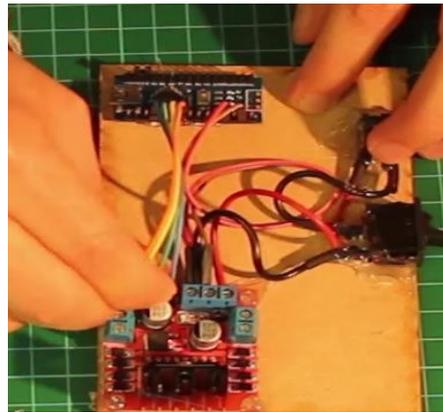
**Fig.35a**



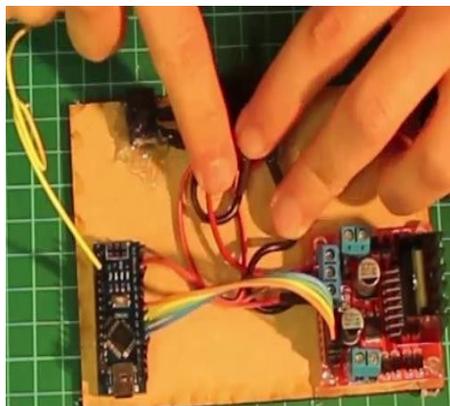
**Fig.35b**



**Fig.35c**



**Fig.35d**

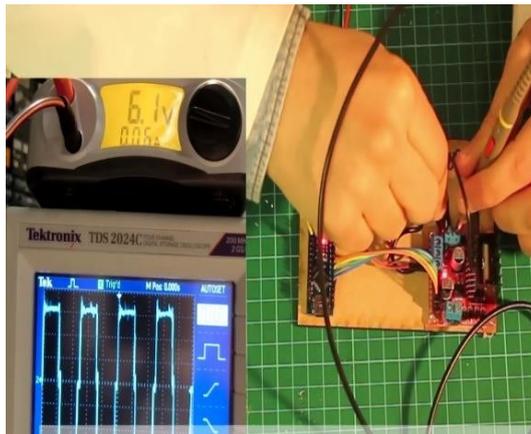


**Fig.35e**

## Step 14: testare il driver

Prima di aver collegato il driver alle matrici della struttura, una volta collegato il connettore all'alimentazione e acceso l'interruttore, testeremo con l'oscilloscopio le uscite 1/2 o 3/4 del driver, che dovranno emettere un'onda quadra a 40kHz, pari al doppio della tensione fornita dal circuito (fig.36).

**Fig.36** Uscita segnale oscilloscopio



## Step 15: verifica la presenza di scorciatoio

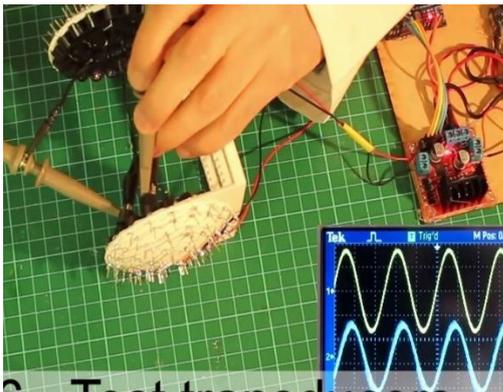
Verificare che non vi siano scorciatoio tra i fili rosso e nero del levitatore (fig.37).



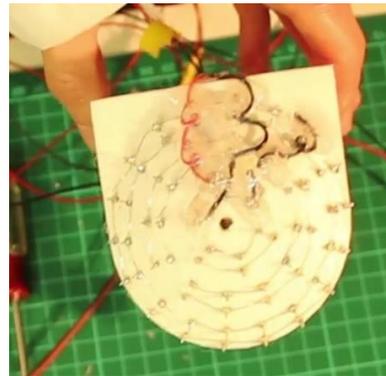
**Fig.37** Test interruzioni

## Step 16: testare i trasduttori

collegare il filo rosso e il filo nero delle matrici al driver, accendere l'interruttore e collegare due trasduttori alle due sonde dell'oscilloscopio; collegare la gamba contrassegnata del trasduttore con la sonda positiva e assicurarsi che i trasduttori della stessa matrice siano in fase tra loro (fig.38a). Gli eventuali errori possono essere corretti andando a tagliare il filo esposto e costruendo un ponte con i fili (fig.38b).



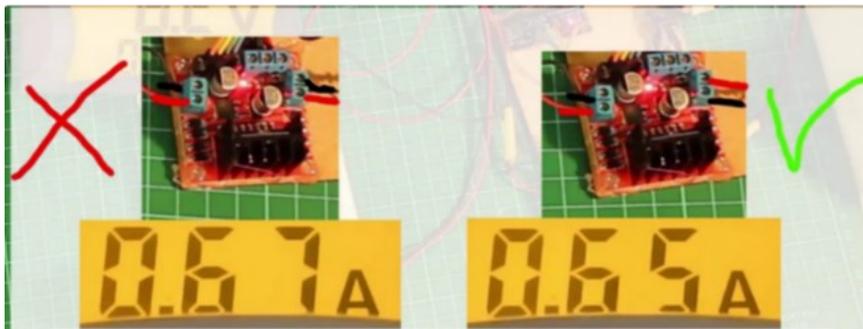
**Fig.38a** Test trasduttori



**Fig.38b** Soluzione con ponte

## Step 17: Testare la risonanza ottimale

Il collegamento dei fili come mostrato a sotto dovrebbe fornire prestazioni ottimali e un consumo energetico minimo (fig.39). Altrimenti, scambia il filo rosso e nero.



**Fig.39** Test risonanza

## Step 18: fissare i fili e incollare le gambe

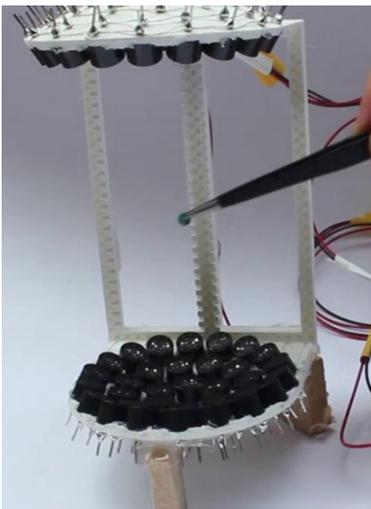
Applicare della colla a caldo per incollare i fili al levitatore per il supporto meccanico. Ora puoi incollare le gambe. (fig.40).

**Fig.40** fissaggio sostegno levitatore

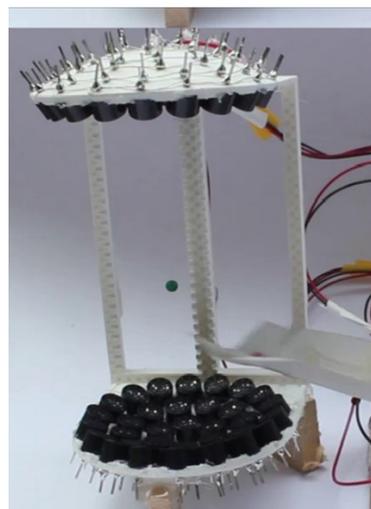


## Step 19: Solidi levitanti

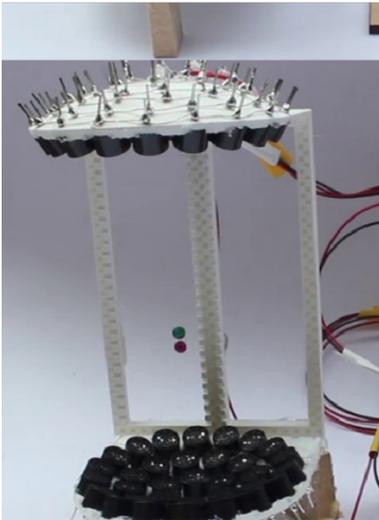
Fornire fino a 10V. Puoi usare una pinzetta per posizionare le particelle o anche una griglia metallica o un tessuto sottile (acusticamente trasparente) (fig.41a) (fig.41b) (fig.41c) (fig.41d).



**Fig.41a**



**Fig.41b**



**Fig.41c**



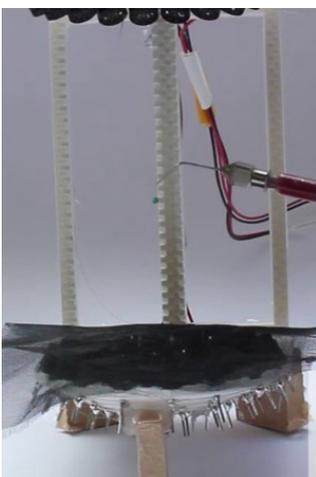
**Fig.41d**

## Step 20: Liquidi levitanti

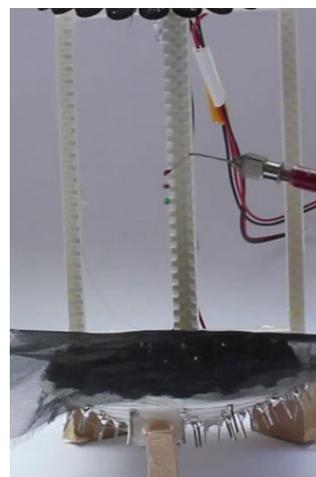
È necessario regolare la tensione in base al tipo di liquido. Troppo alto e le goccioline scoppieranno, troppo basse e cadranno. Per l'acqua è sufficiente circa 9V e per l'alcol circa 8V.

È importante posizionare un tessuto sottile sul fondo per assorbire le goccioline che cadono, possono danneggiare i trasduttori. Posizionare una particella per avere una guida su dove iniettare le goccioline (fig.42a) (fig.42b).

Si consiglia uso di siringa con un ago piegato e la punta rimossa è l'opzione migliore [12].



**Fig.42a**



**Fig.42b**

## 8 Approfondimenti sugli strumenti impiegati

### 8.1 Multimetro

Un multimetro digitale è uno strumento utilizzato per misurare due o più valori elettrici, principalmente la tensione (volt), la corrente (ampere) e la resistenza (ohm). Si tratta di uno strumento diagnostico standard per i tecnici in ambito elettrico ed elettronico.

I multimetri digitali combinano le funzionalità di test dei singoli dispositivi di misurazione monofunzionali: il voltmetro (per la misurazione dei volt), l'amperometro (per gli ampere) e l'ohmmetro (per gli ohm). Spesso includono diverse ulteriori funzioni specializzate oppure opzioni avanzate.

In genere, la parte anteriore di un multimetro digitale comprende quattro componenti(fig.43):

- Display: dove vengono visualizzati i valori.
- Pulsanti: per la selezione delle varie funzioni; le opzioni variano in base al modello.
- Manopola (o commutatore rotante): per selezionare i valori di misura principali(volt, ampere, ohm).
- Connettori di ingresso: in cui vengono inseriti i puntali.



**Fig.43** Multimetro

I puntali sono cavi flessibili e isolati (rosso per il polo positivo, nero per quello negativo) che vengono inseriti nel multimetro digitale. Servono da conduttori tra l'elemento oggetto di test e il multimetro. I puntali su ciascun cavo sono utilizzati per eseguire i test dei circuiti.

I punti e le cifre vengono utilizzati per descrivere la risoluzione di un multimetro digitale, ossia la finezza con cui un multimetro è in grado di effettuare una misurazione. Conoscendo la risoluzione di un multimetro, un tecnico può stabilire se è possibile rilevare una piccola variazione di un segnale misurato.

Esempio: Se un multimetro offre una risoluzione di 1 mV nel range di 4 V, è possibile rilevare una variazione di 1 mV (1/1000 di volt) durante la misura di 1 V [13].

In linea di massima, i multimetri possono essere di cinque diverse categorie:

- Per uso generico (denominati anche tester);
- Standard;
- Avanzati;
- Compatti;
- Wireless

## 8.2 Pistola per colla a caldo

Una pistola per la colla a caldo è un dispositivo elettrico che utilizza un elemento riscaldante (resistenza) per fondere la colla solida. Una volta che il surriscaldamento avviene, (dopo aver attaccato la spina ad una presa di corrente ed aspettando 3/4 minuti) la colla fuoriesce dall'ugello e quindi c'è la possibilità di applicarla su un determinato oggetto per attaccarlo, tenerlo in posizione o ripararlo. Originariamente creata per l'incollaggio di soles di scarpe, oggi la maggior parte degli amanti del fai-da-te e del bricolage ritengono la pistola per la colla a caldo, un punto fermo nei loro kit di attrezzi grazie anche alla sua versatilità e facilità d'uso (fig.44) [14].



**Fig.44** pistola a caldo

### 8.3 Saldatore a stagno

La saldatura a stagno consiste nell'unire due elementi di metallo per mezzo di un terzo metallo fuso che viene depositato lungo la linea di giunzione dei due pezzi da collegare.

Viene usato lo stagno perché è un metallo resistente alla corrosione e all'ossidazione. Si tratta di un componente estremamente malleabile e duttile, di colore argento. Inoltre, è molto usato in elettronica questo perché, in primo luogo, si tratta di un ottimo conduttore, ma non solo, un'altra caratteristica che lo rende ottimo per questo scopo è la sua capacità, molto elevata, di legarsi con il rame.

Il meccanismo di funzionamento del saldatore a stagno in figura (fig.45) è alquanto elementare ed è determinato dal riscaldamento mediante resistenza di un supporto metallico che sarà utilizzato per sciogliere lo stagno, un metallo che ha una temperatura di fusione di  $232^{\circ}$  e che quindi passa allo stato liquido con estrema facilità e può essere utilizzato come "legante" per connettere partietroniche o elettriche in modo ottimale.

Nei modelli più economici il saldatore è rappresentato dal supporto metallico, dall'impugnatura e dalla resistenza che necessita di essere collegata alla rete elettrica, mentre nei modelli professionali una stazione saldante permette di regolare la temperatura ed eventualmente di dissaldare ed aspirare lo stagno attraverso un apposito utensile.



**Fig.45** Saldatore a stagno

Effettuare saldature a stagno è abbastanza semplice ma bisogna fare alcune considerazioni. Lo stagno deve essere fuso ad una temperatura ideale per evitare che si produca una saldatura a freddo. In questo caso è necessario che la temperatura sia in grado di fondere il filo di stagno con facilità per connettere le due parti in modo ottimale ed evitare malfunzionamenti o distacco dello stagno. Il colore dello stagno ci può dire se la nostra saldatura è stata effettuata correttamente: un colore lucido e brillante indica una corretta saldatura mentre una superficie opaca ed irregolare sta ad indicare che la quantità dello stagno è eccessiva e che la saldatura non ha raggiunto un punto di fusione uniforme [15].

## 8.4 Stampa 3D

La stampa 3D è il processo di creazione di oggetti depositando strati di materiale uno sull'altro. La stampa 3D è chiamata manifattura additiva invece dei tradizionali metodi sottrattivi, come la fresatura CNC, utilizzata per la produzione industriale [16].

### 8.4.1 Funzionamento della stampa 3D

Un modello 3D digitale viene tagliato in centinaia di strati sottili da un software dedicato per essere esportato in formato G-code. Questo formato di stampa 3D è un linguaggio che la stampante 3D legge per sapere esattamente quando e dove depositare il materiale. Ogni strato corrisponde alla forma 2D esatta di una sezione dell'oggetto. Ad esempio, se si stesse stampando in 3D una piramide, il primo strato (in basso) sarebbe un quadrato piatto e l'ultimo strato (in alto) sarebbe un piccolo punto. Gli strati vengono stampati in 3D uno alla volta fino a ottenere l'oggetto completamente stampato [16].

## 8.4.2 Tecnologie di stampa 3D comuni

Esistono diversi modi per stampare oggetti in 3D. Le principali tecnologie di stampa 3D oggi disponibili sono:

- FFF (fused filament fabrication) o FDM (fused deposition modeling), che utilizzano bobine di filamento
- SLA (stereolitografia), una tecnologia che fa solidificare la resina fotosensibile
- PBF (powder bed fusion), una serie di metodi basati sulle polveri che fondono le particelle con potenti laser
- Il getto di materiale o di legante, in cui minuscole gocce di materiale vengono depositate su un letto di polvere.

Queste tecnologie di stampa 3D hanno ciascuna i propri punti di forza e di debolezza e possono adattarsi a diversi casi d'uso e settori industriali [17].

## 8.4.3 Applicazioni della stampa 3D

La stampa 3D offre un numero considerevole di vantaggi, il più significativo dei quali è la capacità di produrre progetti altamente complessi che sarebbero impossibili da realizzare altrimenti.

Un altro vantaggio significativo della stampa 3D è la velocità. Anche se la stampa 3D di un oggetto può richiedere ore o addirittura giorni interi, è comunque molto più veloce dei metodi di produzione tradizionali, come lo stampaggio a iniezione.

La prototipazione, che è uno degli utilizzi professionali più diffusi della stampa 3D, può essere effettuata internamente con tempi di realizzazione minimi e le iterazioni del progetto possono essere implementate e stampate sul posto [16].

#### 8.4.4 Materiali per la stampa 3D

Questi materiali sono disponibili in vari formati, da filamenti, resine e polveri a inchiostri speciali. Esiste anche un'ampia scelta di materiali di stampa 3D, tra cui decine di materiali termoplastici, metalli e persino cemento (fig.46) [16].

**Fig.46** esempio di materiale usato per la stampa 3d



#### 8.4.5 Operazioni post-lavorazione per modelli stampati in 3D

Le parti stampate in 3D devono quasi sempre essere sottoposte ad almeno una forma di post-elaborazione per completare il lavoro.

Questo termine raggruppa diverse fasi e tecniche, dalla rimozione del supporto alla finitura della superficie e alla colorazione dei pezzi [17].

## 8.4.6 Fotopolimerizzazione

La tecnologia di stampa 3D a fotopolimerizzazione comprende diversi processi che si basano sulla stessa strategia di base: un fotopolimero liquido contenuto in una vasca (o serbatoio) viene indurito selettivamente da una fonte di calore. Strato dopo strato, viene costruito un oggetto fisico 3D fino al suo completamento.

I laser sono alla base di diversi tipi di dispositivi di polimerizzazione.

Le tecnologie di stampa 3D con fotopolimerizzazione più diffuse sono le seguenti:

- StereoLithogrAphy (SLA) nota anche come fotosolidificazione o stampa di resina. Durante il processo di produzione SLA, un fascio concentrato di luce ultravioletta o un laser si concentra sulla superficie di una vasca riempita con un fotopolimero liquido, creando ogni strato dell'oggetto 3D desiderato utilizzando la reticolazione o la degradazione di un polimero.
- Elaborazione digitale della luce (DLP) Per il processo di stampa 3D DLP, lo schermo di un proiettore digitale proietta una singola immagine di ogni strato sull'intera piattaforma in una sola volta. Poiché il proiettore è uno schermo digitale, l'immagine di ogni strato è composta da pixel quadrati, con il risultato di uno strato formato da piccoli mattoni rettangolari chiamati voxel. La tecnologia DLP consente di ottenere tempi di stampa più rapidi per alcune parti, poiché ogni strato viene esposto simultaneamente anziché essere estratto con il laser.
- Produzione continua di interfacce liquide (CLIP) Molto simile al processo SLA, ma con differenza che il processo di stampa 3D è continuo e sostiene di essere fino a 100 volte più veloce dei metodi di stampa 3D commerciali [17].

#### 8.4.7 Due diversi processi di fotopolimerizzazione

Anche all'interno della tecnica di stampa 3D con fotopolimerizzazione ci sono due approcci diversi. Entrambi costruiscono il pezzo all'interfaccia tra l'ultimo strato e la superficie del serbatoio di resina. L'approccio dall'alto verso il basso consiste nel posizionare la fonte di calore al di sotto della vasca. La piattaforma di stampa 3D viene poi progressivamente sollevata in aria e il pezzo finale viene costruito a testa in giù.

La seconda tecnica, detta bottom-up, consiste nel posizionare la fonte di calore sopra il serbatoio. Pertanto, la stampante immerge progressivamente la piattaforma di stampa 3D nella vasca.

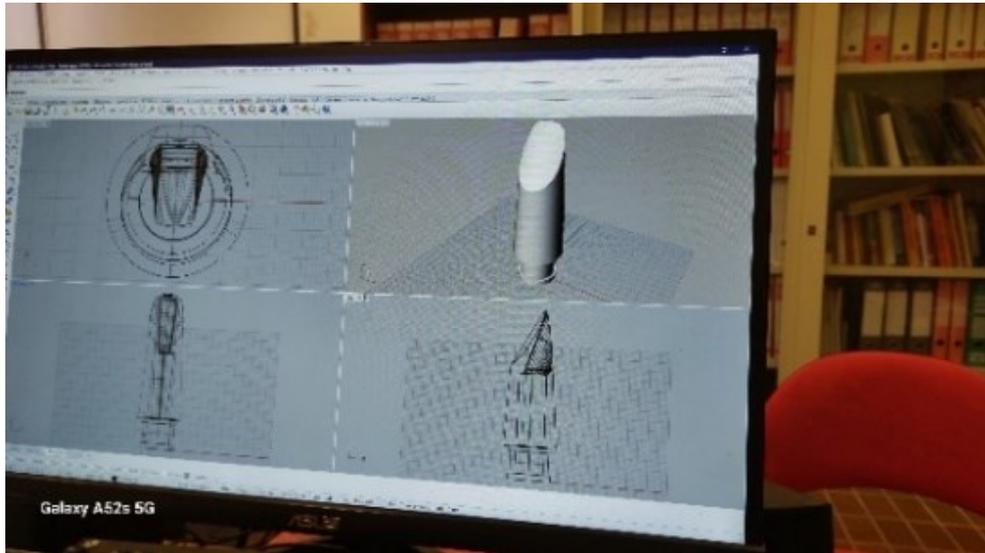
L'alta risoluzione di questa tecnica la rende ideale per tutti i tipi di prototipazione e per la produzione di massa. I processi di polimerizzazione in vaschetta sono eccellenti per produrre pezzi con dettagli fini e una finitura superficiale liscia. Questo li rende ideali per la gioielleria, la microfusione e molte applicazioni dentali e mediche.

I limiti principali della polimerizzazione al tino sono le dimensioni della costruzione e la resistenza del pezzo [17].

## 8.4.8 Ciclo di lavorazione della stampante 3D SLA

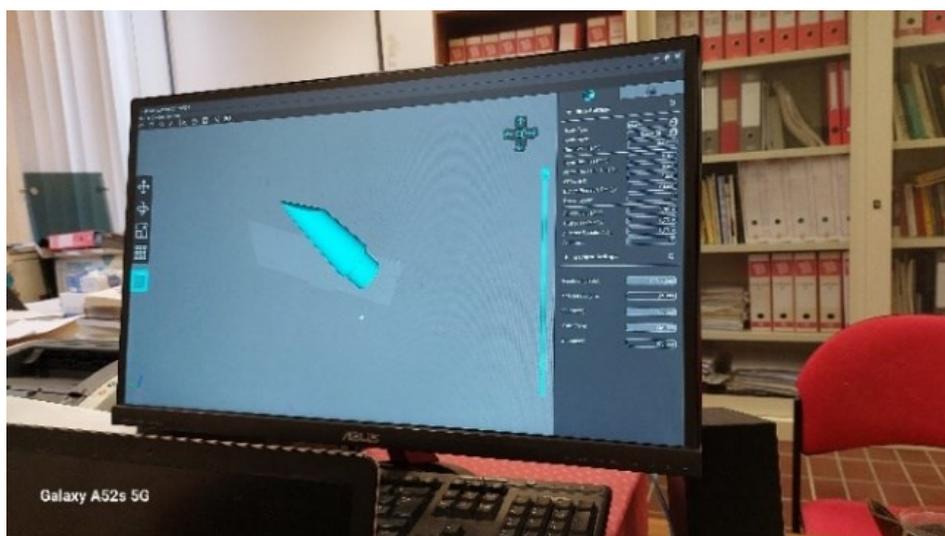
1-creazione modello 3D con appositi software (fig.47).

**Fig.47** creazione modello 3D usando il software Rhinoceros



2-esportazione modello 3D in file STL per poi caricarlo sul software della stampante (fig.48).

**Fig.48** visualizzazione file STL



3-impostazione parametri di stampaggio scelti in base al materiale da stampare e alle esigenze richieste per lo stampaggio del modello (fig.49).

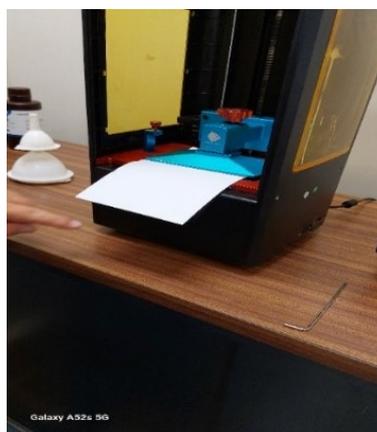
**Fig.49** tabella parametri di stampaggio in funzione del materiale da stampare

Exposure 50µm (Base exposure)	Exposure 100µm (Base exposure)	Lift/retract speed	Wait before print
15-17,4s (160s)	21,9-25,4s (240s)	100mm/min 1,7mm/s	1s
15,1-17,6s (160s)	22,1-25,7s (240s)	100mm/min 1,7mm/s	1s
14,6-16,9s (160s)	21,5-25s (230s)	100mm/min 1,7mm/s	1s
10,7-12,5s (120s)	16,1-18,7s (170s)	100mm/min 1,7mm/s	1s
16,1-18,7s (170s)	23-26,8s (250s)	100mm/min 1,7mm/s	1s
13,2-15,4s (140s)	19,2-22,3s (210s)	100mm/min 1,7mm/s	1s
12,8-14,9s (140s)	18,4-21,4s (200s)	100mm/min 1,7mm/s	1s
15-17,4s (160s)	21,9-25,4s (240s)	100mm/min 1,7mm/s	1s
33,4-38,9s (360s)	-	50mm/min 0,8mm/s	1s
33,4-38,9s (360s)	-	50mm/min 0,8mm/s	1s

4-riempimento vasca stampante con il materiale scelto per uso

5-azzeramento asse z della stampante (fig.50).

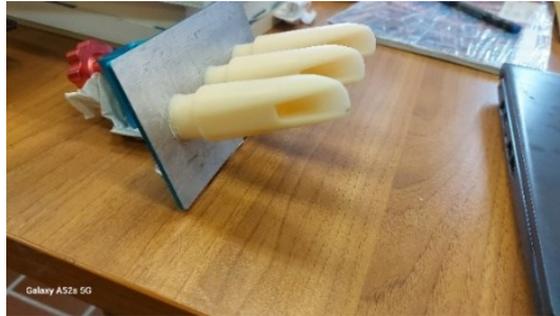
**Fig.50** azzeramento stampante



6-caricamento parametri e file STL sulla stampante tramite USB e avvio stampa

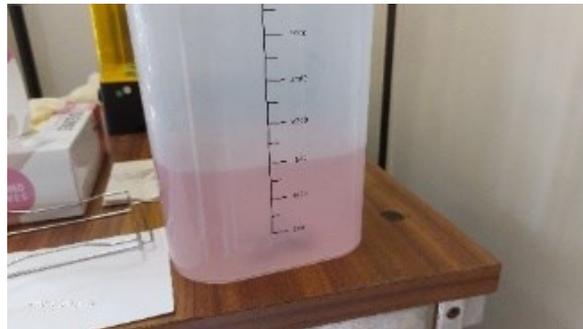
7-estrazione e rimozione modello (fig.51).

**Fig.51** estrazione modelli



8-immersione modello in una vasca riempita di alcol etilico per rimuovere materiale in eccesso (fig.52).

**Fig.52** rimozione materiale in eccesso



9-esposizione al modello a raggi UV per far indurire il materiale (fig.53).

**Fig.53** indurimento del modello



10-pulizia stampante e vasca

## 9 Approfondimento sull'ottimizzazione del levitatore acustico

### 9.1 Ottimizzazione layout levitatore

Una volta costruito il levitatore come precedentemente descritto ed aver eseguito dei test per testare il corretto funzionamento del modello, è possibile modificare il layout del levitatore messo a punto cercando di migliorarlo esteticamente.

Di seguito vengono riportate alcune configurazioni del levitatore con layout ottimizzato.

Una soluzione potrebbe essere quella di inserire foglio di plastica trasparente per avvolgere la struttura sia davanti che dietro, lasciando un'apertura centrale per l'inserimento delle particelle, al fine di rendere il sistema perfettamente funzionante anche all'esterno in caso di vento (fig.54).

**Fig.54** levitatore con foglio di plastica protettivo in caso di venti



Si potrebbe applicare una striscetta led da disporre sulla colonna centrale della struttura stampata in 3D.

Ci possiamo divertire creando diversi layout della base del levitatore modificando la struttura originale tramite i software di disegno.

Una volta creata la nuova base basterà convertire il file in formato stl così da poter portare il file sulla stampante e stamparlo; ovviamente senza perdere di mira obiettivo di migliorare il layout complessivo della struttura. In figura sono mostrati alcuni esempi (fig.55a) (fig.55b) (fig.55c).



**Fig.55a**



**Fig.55b**



**Fig.55c**

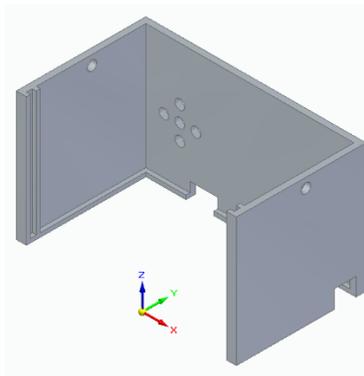
Un'ultima miglioria fortemente consigliata da eseguire è quella di inserire 3 interruttori:

- l'interruttore per accendere o spegnere la luce led
- il selettore UP/DOWN che permette di far salire e scendere le particelle levitate
- ultimo l'interruttore ON/OFF che regola l'accensione e lo spegnimento dell'Arduino

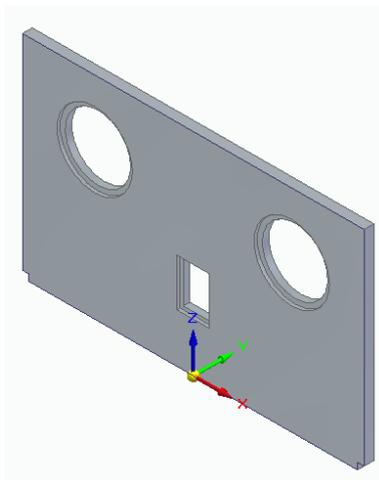
Infine si inserisce una scatola che contenga tutti i dispositivi facenti parte dell'elettronica del sistema (Arduino, Driver, connettori e interruttori).

In questa maniera avremo una minor sovrapposizione dei cavi così da rendere funzionale al massimo l'utilizzo dei pulsanti esterni (fig.56a) (fig.56b) (fig.56c) (fig.56d) (fig.56e) (fig.57a) (fig.57b) (fig.57c) (fig.57d)

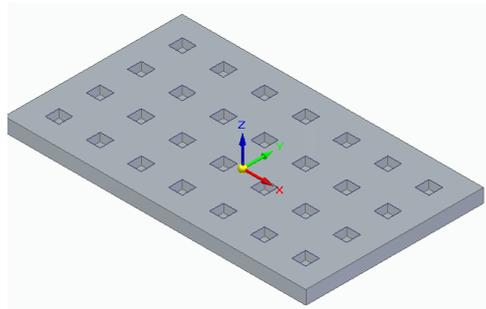
**Fig.56a** Corpo scatola elettronica TinyLev (parte 1) realizzata su solid edge e poi stampata con stampante 3D



**Fig.56b** Pulsantiera TinyLev (parte 2) realizzata su solid edge e poi stampata con stampante 3D



**Fig.56c** Coperchio TinyLev (parte 3) realizzata su solid edge e poi stampata con stampante 3D



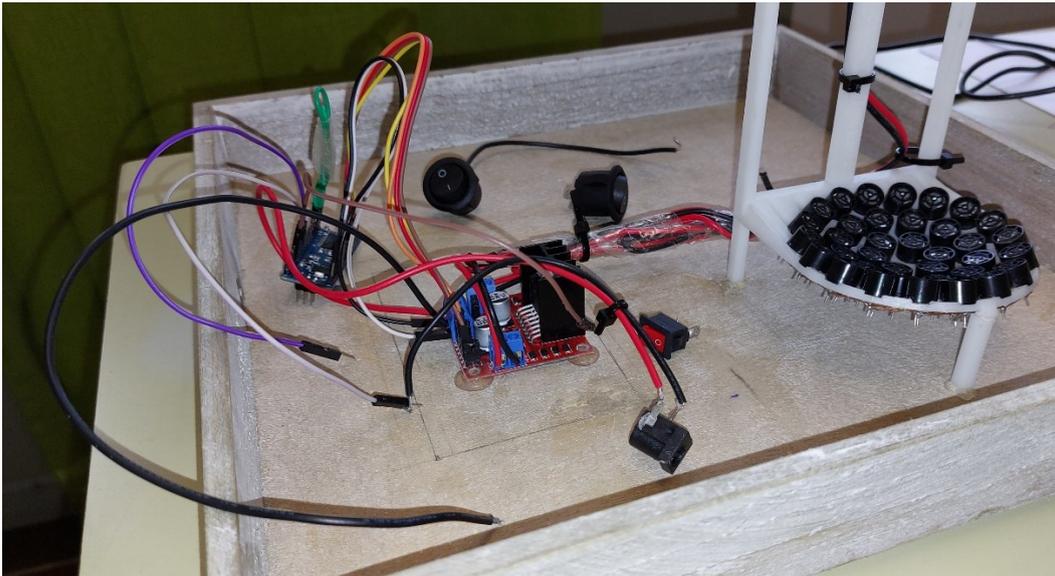
**Fig.56d** assieme scatola realizzata con stampante 3D



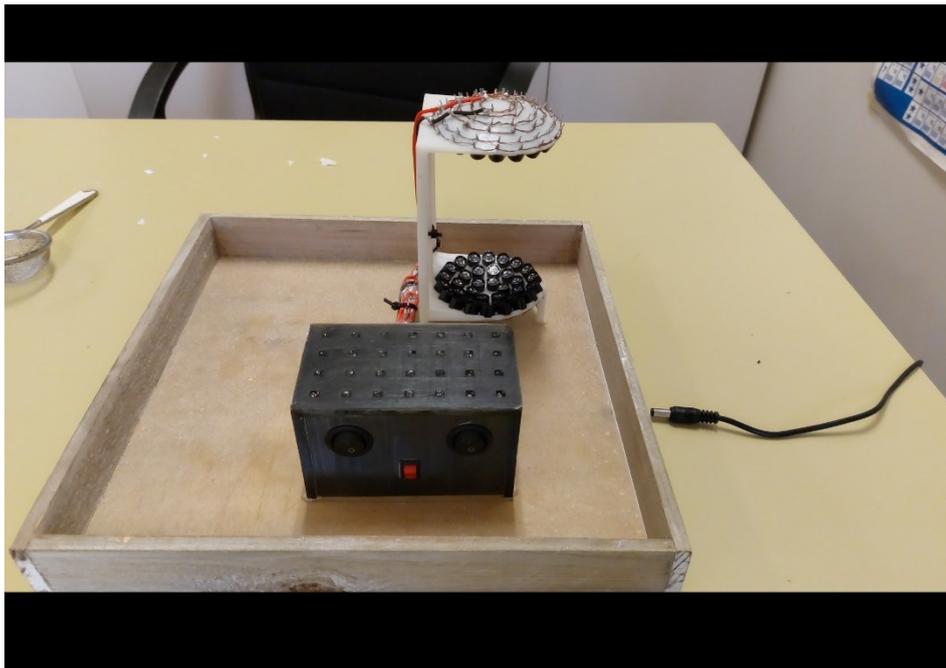
**Fig.56e** assieme scatola realizzata con stampante 3D



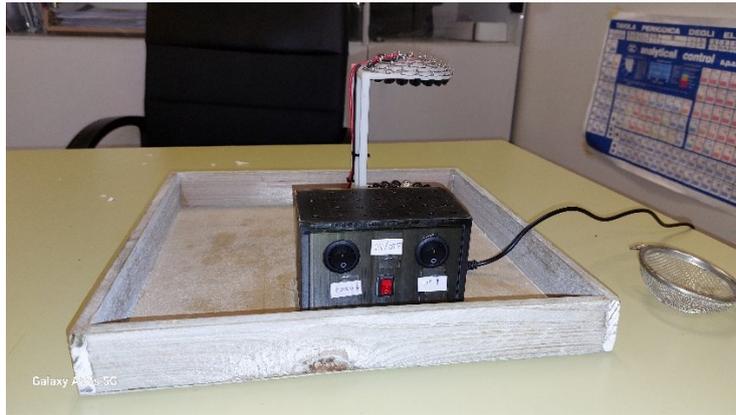
**Fig.57a** parte elettronica cablata



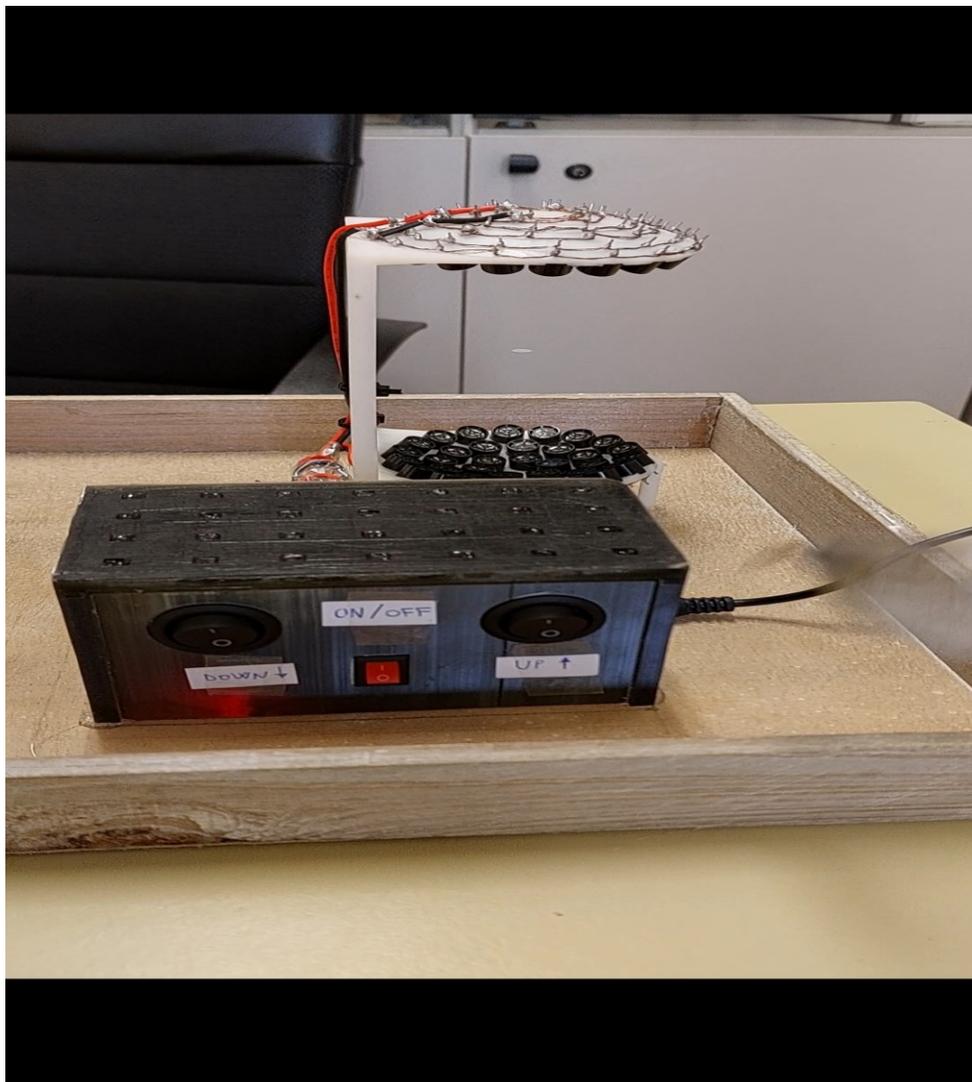
**Fig.57b** scatola contenente parte elettronica del levitatore acustico



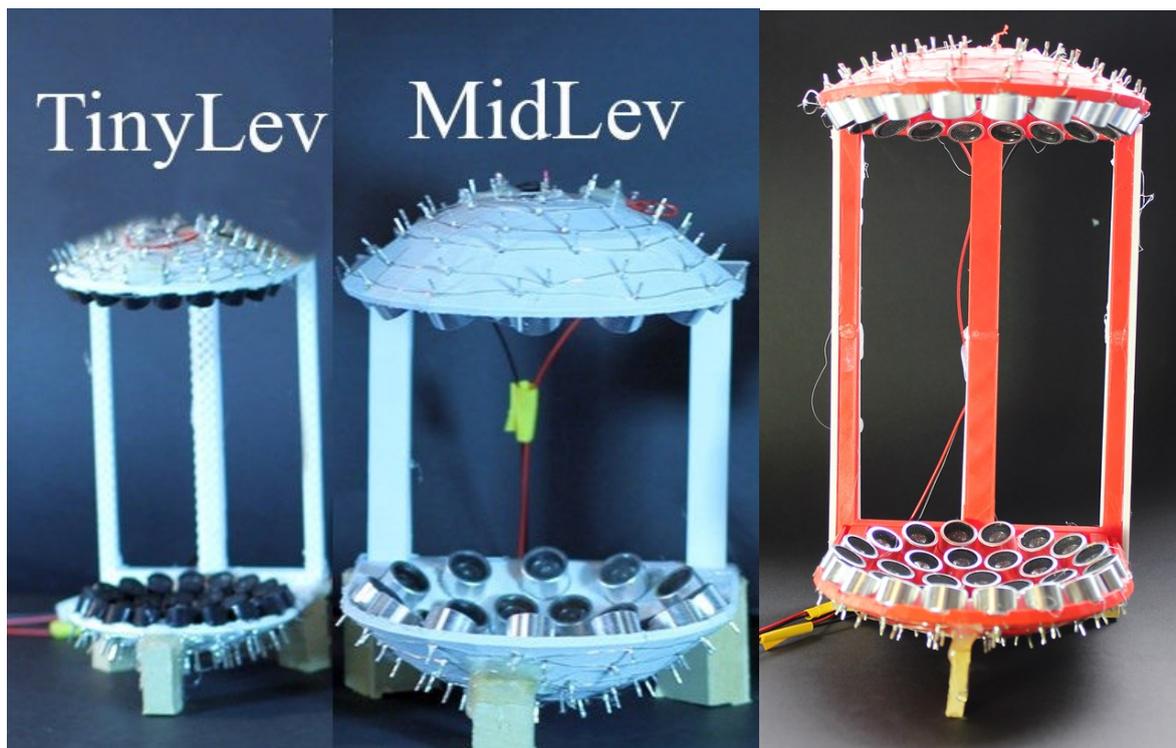
**Fig.57c** assemblaggio e collegamento interruttori On/Off, Up, Down



**Fig.57d** TinyLev completo e in funzione



## 9.2 Approfondimento su altri modelli del levitatore



**Fig.58a**

**Fig.58b**

**Fig.58c**

Il prototipo da noi realizzato (TinyLev) (fig.58a) è uno dei modelli più piccoli in commercio.

Se si desidera un levitatore più potente (BigLev) (fig.58c) puoi utilizzare i trasduttori da 16 mm (trasduttori 72x 16mm 40kHz Manorshi). Il processo di costruzione è analogo a quello descritto sopra, ma si dovrà stampare in 3D la base del levitatore in 2 parti e incollarle insieme.

Questo levitatore può assorbire fino a 20 V nella scheda driver (40 Vpp) e far levitare solidi fino a 6 g/cm<sup>3</sup>, ma non è così facile da usare per i liquidi.

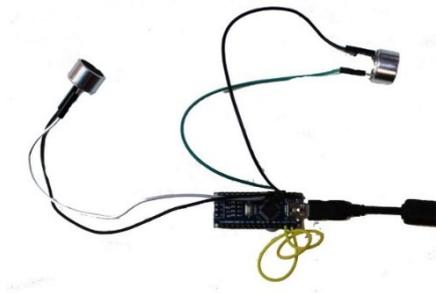
Puoi usare invece trasduttori da 25kHz, sono più deboli ma permetterebbero di far levitare oggetti più grandi.

Se si desidera utilizzare trasduttori da 16 mm di diametro ma BigLev è troppo grande, è possibile utilizzare MidLev (fig.58b). Utilizza trasduttori da 16 mm di diametro ma si adatta alla maggior parte delle stampanti.

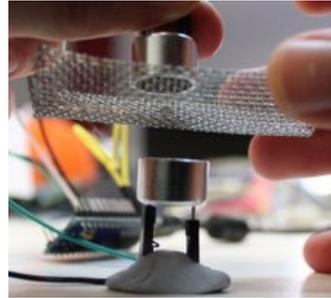
Un altro tipo di modello molto piccolo ed economico è MiniLev. Questa soluzione richiede solo un Arduino Nano e due trasduttori.

Metti i trasduttori uno di fronte all'altro per far levitare una particella tra di loro, è più facile posizionare la particella con una griglia metallica.

In figura sono mostrati alcuni esempi (fig.59a) (fig.59b) (fig.59c) (fig.59d).



**Fig.59a**



**Fig.59b**



**Fig.59c**



**Fig.59d**

Un ultimo modello è Levitatore V18 che utilizza solo 18 trasduttori(fig.60).



**Fig.60** Levitatore V18

## 10 Conclusioni

In questo progetto di tesi è stata approfondita l'applicazione del principio fisico della levitazione acustica, tramite la realizzazione del levitatore TinyLev, un levitatore acustico monoasse e non risonante in grado di mantenere sospesi e manipolare i campioni di interesse senza nessun intervento manuale.

La costruzione di questo prototipo è stata fatta usando componenti facilmente reperibili in commercio.

Facendo varie prove di levitazione di particelle di polistirene e di carta eseguite sul prototipo alimentato a 12V, si è osservato che il range di diametro ottimale per un'efficiente manipolazione dei corpi levitati è compreso tra 3mm e 4,5 mm e il peso di tali corpi pari a pochi milligrammi.

Si è notato inoltre che i nodi che si creano a ridosso dei trasduttori, di solito non sono adatti alla levitazione delle particelle; ciò è dovuto al fatto che le onde creano una zona di pressione vicino alle superfici riflettenti perturbata ed inadatta a sostenere le particelle in aria, poiché l'intensità delle forze di radiazione acustica non è sufficientemente elevata per bilanciare la forza di gravità.

La levitazione acustica ha innumerevoli applicazioni che includono in via esemplificativa e non esaustiva: la separazione cellulare, la ricerca di nuovi farmaci, analisi del sangue, studio della dinamica dei fluidi e della microgravità.

Quindi questa tecnologia ovvero la levitazione acustica potrebbe essere un giorno d'aiuto nella ricerca scientifica in una molteplici ambiti.

## 11 Bibliografia

- [1] “Acoustic levitation”, Da Wikipedia, L’Enciclopedia Libera  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic\\_levitation](https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_levitation)
- [2] <https://www.skuela.net/fisica/elettricit -magnetismo/onde-definizione.html>
- [3] “Elementi di fisica. Vol. 2: Elettromagnetismo e onde di Paolo Mazzoldi di (Autore) Massimo Nigro (Autore) Cesare Voci (Autore) Edises, 2008”  
<https://www.ibs.it/elementi-di-fisica-vol-2-libro-vari/e/9788879594783>
- [4] <https://www.studenti.it/acustica-onde-sonore-in-fisica-vibrazioni-propagazione.html>
- [5] “Ultrasonic Levitation with Arduino UNO”, Ingeimaks,  
<https://www.hackster.io/Ingeimaks/ultrasonic-levitation-with-arduino-uno-a901f>
- [6] “Revisione dei progressi nella levitazione acustica”, Marco Aurelio Brizzotti Andrade, Nicolas Perez and Giulio Cezar Adamovski
- [7] <https://www.meteoweb.eu/2013/07/levitazione-acustica-quando-il-potere-del-suono-vince-la-gravita-e-a-dimostrarlo-e-la-scienza/215346/>
- [8] <https://pubs.aip.org/aip/rsi/article/88/8/085105/962938/TinyLev-A-multi-emitter-single-axis-acoustic>
- [9] Review of Scientific Instruments 88, 085105 (2017);  
<https://doi.org/10.1063/1.4989995> Asier Marzo, Adrian Barnes and Bruce W. Drinkwater
- [10] [https://www.hwlibre.com/it/arduionano/?utm\\_source=feedburner&utm\\_medium=feed&utm\\_campaign=Feed%3A+hwlibreweb+%28Hardware+libre%29](https://www.hwlibre.com/it/arduionano/?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+hwlibreweb+%28Hardware+libre%29)
- [11] <https://www.lombardoandrea.com/1298n-motore-dc-arduino/>
- [12] <https://www.instructables.com/Acoustic-Levigator/>

[13] <https://www.fluke.com/it-it/informazioni/blog/tester/che-cose-un-multimetro-digitale>

[14] <https://www.collagraf.it/come-usare-la-pistola-per-la-colla-a-caldo/>

[15] [https://www.faidate360.com/Saldatore\\_a\\_stagno.html](https://www.faidate360.com/Saldatore_a_stagno.html)

[16] <https://www.3ds.com/it/make/guide/process/3d-printing>

[17] <https://www.3ds.com/it/make/guide/process/photopolymerization>