



Regione Toscana



INAIL

Seminario Il Rischio ULTRASUONI

IL RISCHIO ULTRASUONI: CHE COSA È E DOVE È PRESENTE NEI LUOGHI DI LAVORO

EFFETTI SULL'APPARATO Uditivo ED EFFETTI EXTRA-UDITIVI

Claudia Giliberti

**Laboratorio VI – Valutazione dei rischi e degli strumenti per la
tutela del lavoratore**

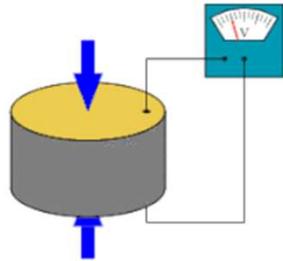
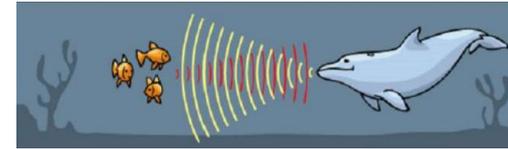
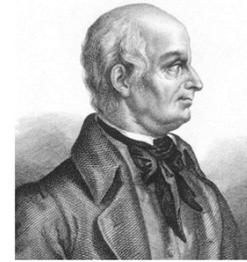
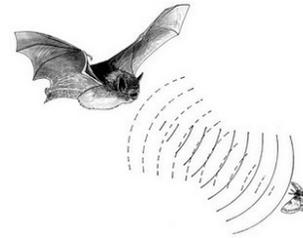
14 febbraio 2023

c.giliberti@inail.it

Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti prodotti e insediamenti antropici

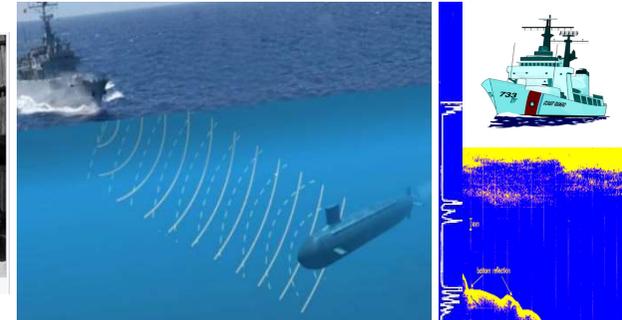
Un po' di storia...

Fine del 18° secolo: Lazzaro Spallanzani, osservando il volo del pipistrello, notò la sua capacità di orientarsi usando l'ecolocalizzazione



Nel 1880, i fisici francesi Pierre e Jacques Curie scoprirono l'effetto piezoelettrico

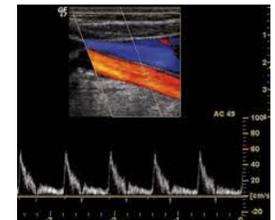
Durante la prima guerra mondiale, il fisico francese Paul Langevin cercò di usare gli US per rilevare i sottomarini.



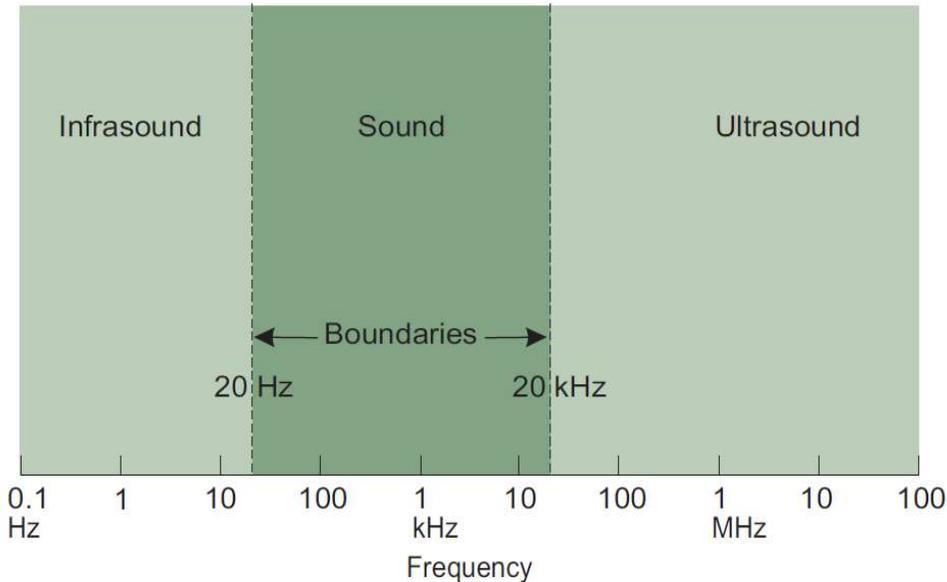
La tecnica SONAR (SOund Navigation And Ranging) divenne pratica durante la seconda guerra mondiale.

Gli usi industriali degli US iniziarono nel 1928 con il fisico sovietico Sokolov che intuì che gli US potessero essere utilizzati per rilevare difetti nascosti nei materiali.

A partire agli anni '50 le ricerche vennero estese all'applicazione degli ultrasuoni in campo medico e venne proposto l'utilizzo dell'effetto Doppler per lo studio del flusso sanguigno.

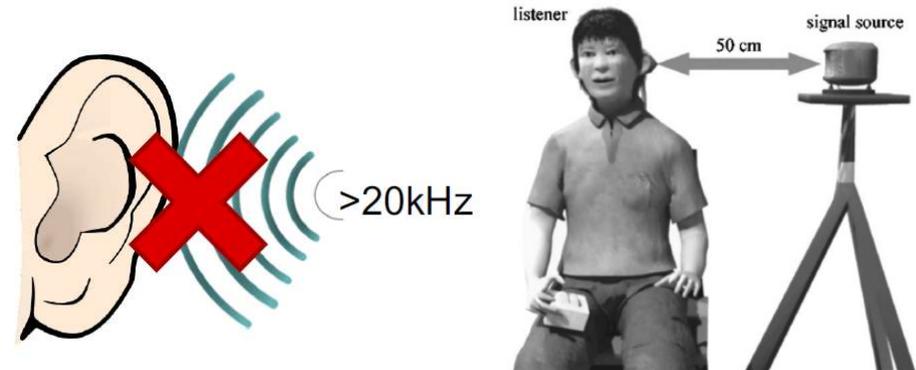


Lo spettro delle onde acustiche

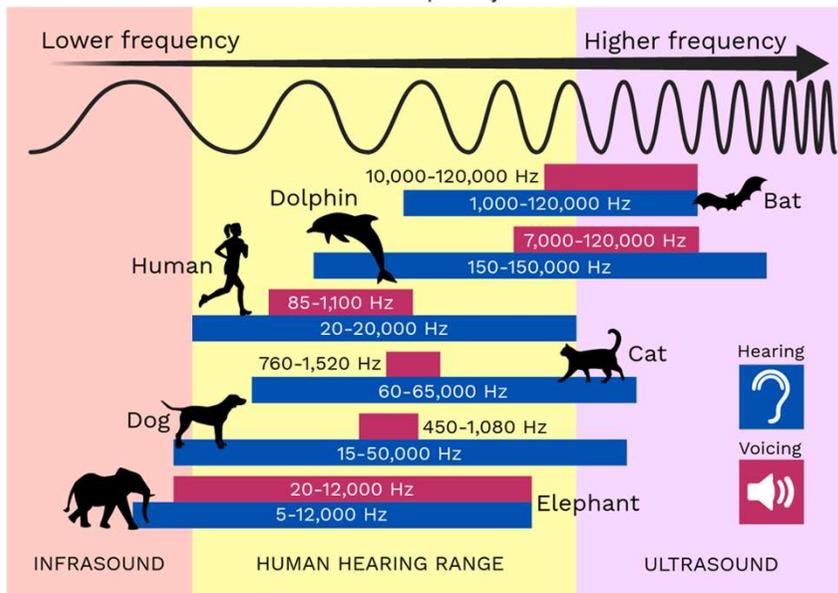


Age dependence of the middle-value upper frequency limit of human hearing
(from Lawton, 2001)

Age band (years)	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79
Hearing limit (kHz)	17.9	16.7	15.7	14.8	13.8	12.8

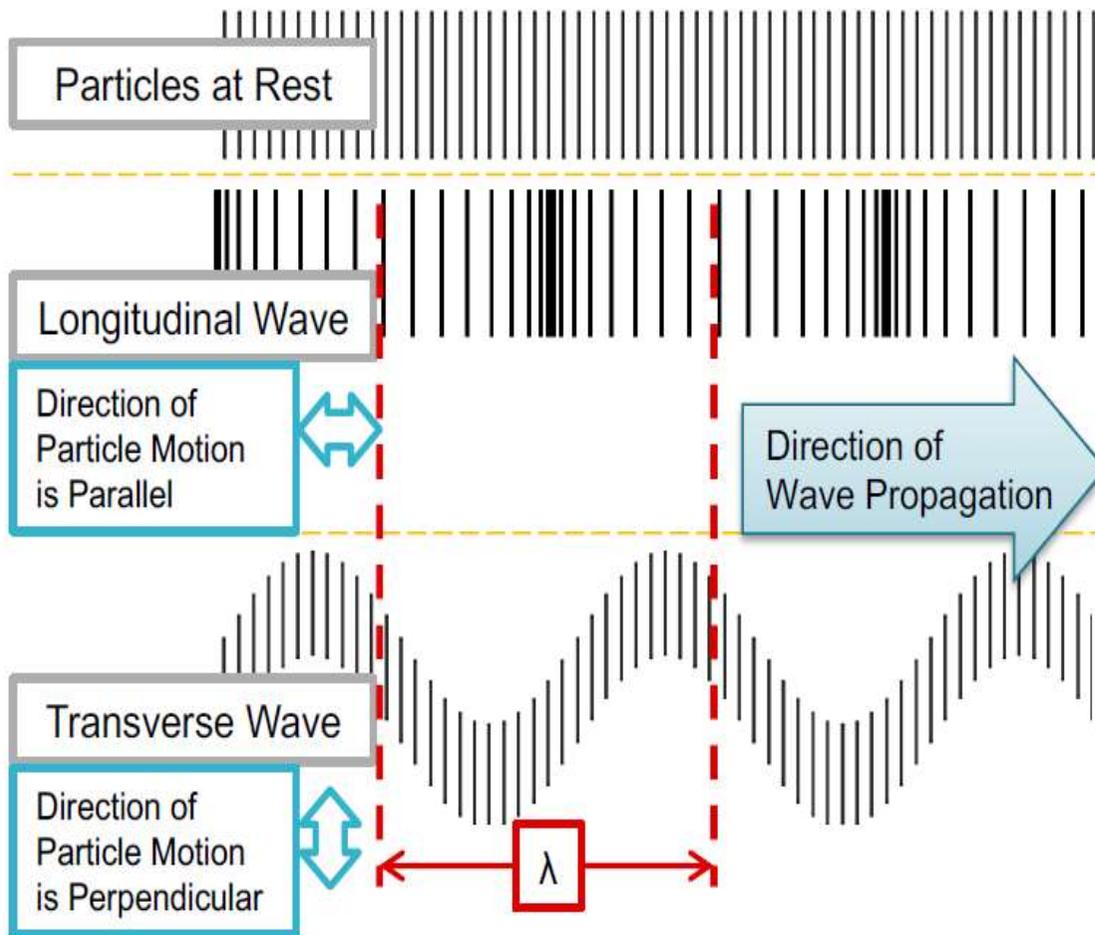


La soglia assoluta di udibilità è stata studiata da molti gruppi di ricerca con riferimento a toni puri: i risultati mostrano che tale soglia inizia ad aumentare bruscamente quando la frequenza del segnale supera i 15 kHz, raggiungendo circa gli 80 dB, mentre, per toni a 22 kHz e 24 kHz, non sono stati ottenuti valori di soglia inferiori a 85 dB. (Ashihara, 2007)



La propagazione delle onde meccaniche sonore in un mezzo

Non vi è un sostanziale cambiamento nelle proprietà fisiche delle onde sonore quando ci si sposta dalle frequenze udibili a quelle ultrasonore.

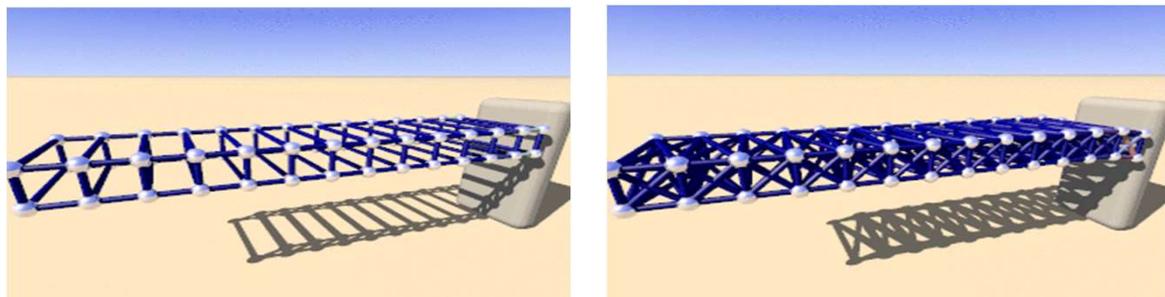


La propagazione degli ultrasuoni può avvenire secondo differenti modalità:

Onde longitudinali o di compressione: lo spostamento delle particelle del mezzo rispetto alla loro posizione di riposo avviene nello stesso verso della propagazione del fascio ultrasonoro: la direzione di vibrazione coincide con quella di propagazione.

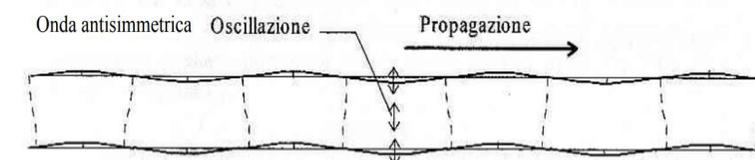
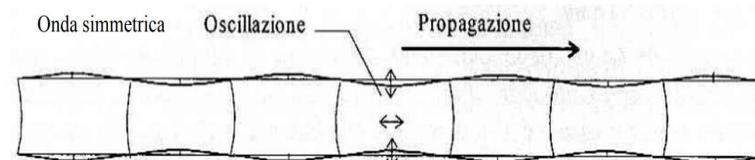
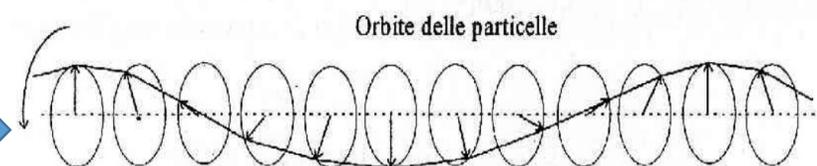
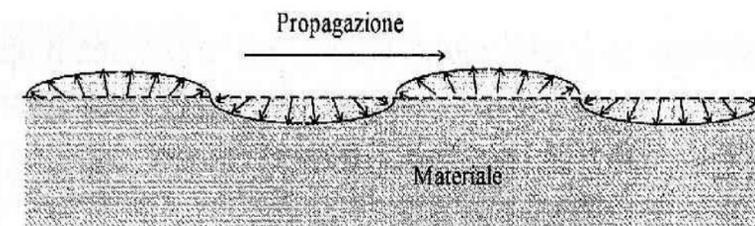
Onde trasversali o di taglio: lo spostamento delle particelle del mezzo è normale alla propagazione del fascio US: la direzione dell'oscillazione delle particelle, sottoposte a sollecitazione di taglio, è perpendicolare alla direzione di propagazione.

La propagazione degli US per onde longitudinali, trasversali, superficiali, di Lamb



Le onde superficiali, dette anche onde di Rayleigh, si propagano sulla superficie di separazione tra due mezzi diversi, ovvero solamente negli strati superficiali dei solidi ad una profondità massima paragonabile alla lunghezza d'onda

Le onde di Lamb hanno un complesso modo di vibrazione e si manifestano quando lo spessore del materiale è minore della lunghezza d'onda dell'ultrasuono che lo attraversa.

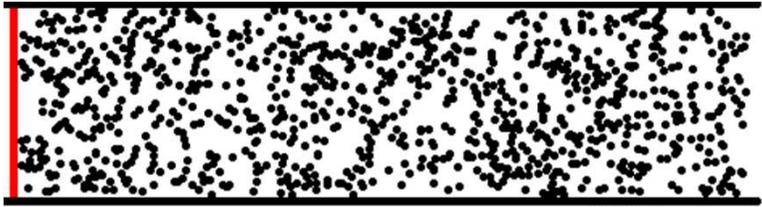
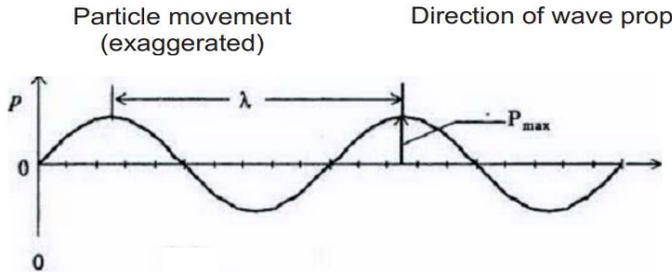
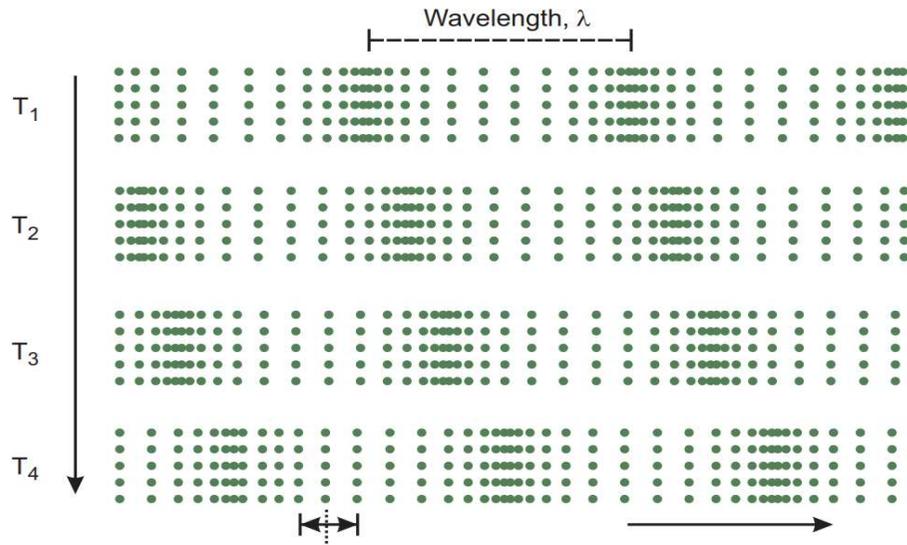


All'interno dei solidi, dotati di reticolo cristallino, la propagazione può avvenire tramite onde longitudinali, trasversali, superficiali e di Lamb.

Nei liquidi e nei gas, privi del reticolo cristallino, avviene solo attraverso onde longitudinali.

Un'eccezione è rappresentata dai liquidi molto viscosi, o gel, che sopportano per brevi percorsi la propagazione di onde trasversali.

Parametri che caratterizzano la propagazione degli ultrasuoni



©2002, Dan Russell

$$p(x, t) = P \cos(\omega t - kx) \quad L_p = 20 \log \log_{10} \left(\frac{p}{P_0} \right) \text{ dB}$$

Pressione sonora (Pa=N/m²)

$$I \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{P^2}{2\rho c} \quad L_I = 10 \log \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \text{ dB}$$

Intensità (W/cm²) con ρ densità del mezzo e c velocità del suono

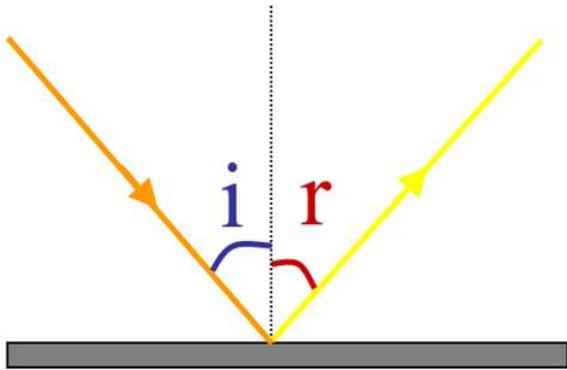
Approximate Velocities of Ultrasound in Selected Materials

Nonbiologic Material	Velocity (m/sec)	Biologic Material	Velocity (m/sec)
Acetone	1174	Fat	1475
Air	331	Brain	1560
Aluminum (rolled)	6420	Liver	1570
Brass	4700	Kidney	1560
Ethanol	1207	Spleen	1570
Glass (Pyrex)	5640	Blood	1570
Acrylic plastic	2680	Muscle	1580
Mercury	1450	Lens of eye	1620
Nylon (6-6)	2620	Skull bone	3360
Polyethylene	1950	Soft tissue (mean value)	1540
Water (distilled), 25°C	1498		
Water (distilled), 50°C	1540		

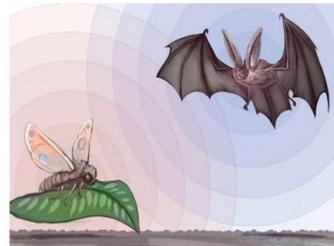
Parametri che caratterizzano la propagazione degli ultrasuoni: la lunghezza d'onda

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Frequenza	100 Hz	1000 Hz	10 kHz	20 kHz	40 kHz	100 kHz	160 kHz	220 kHz	300 kHz
Lunghezza d'onda degli US in aria	3.3 m	0.33 m	34 mm	17 mm	8.66 mm	3.4 mm	2.16 mm	1.57 mm	1.15 mm

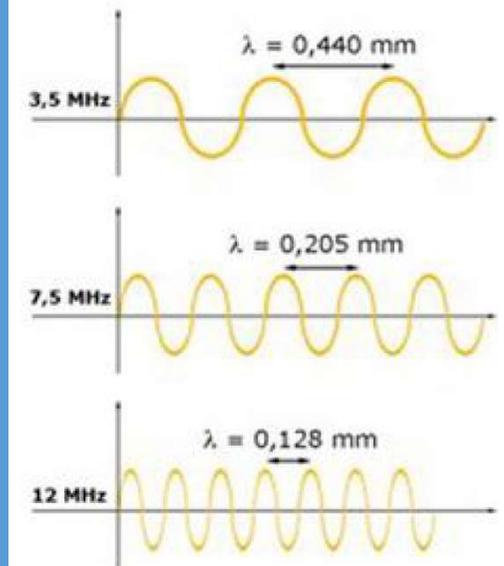


Dimensioni oggetti $\gg \lambda$



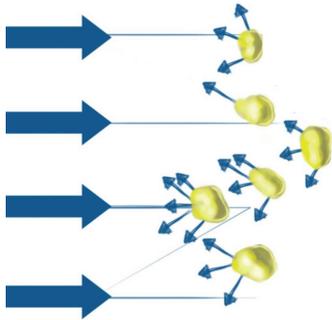
$d > \lambda$

Lunghezza d'onda degli US in acqua



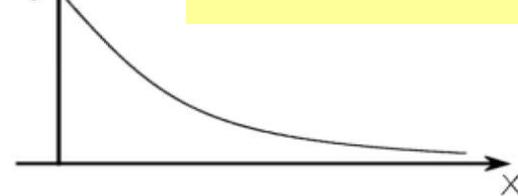
Le lunghezze d'onda sono molto piccole e quindi si ha un'alta direzionalità nella trasmissione degli ultrasuoni, che si presentano a fasci molto simili a dei veri e propri raggi sonori.

La propagazione degli US in aria: Attenuazione del fascio ultrasonoro



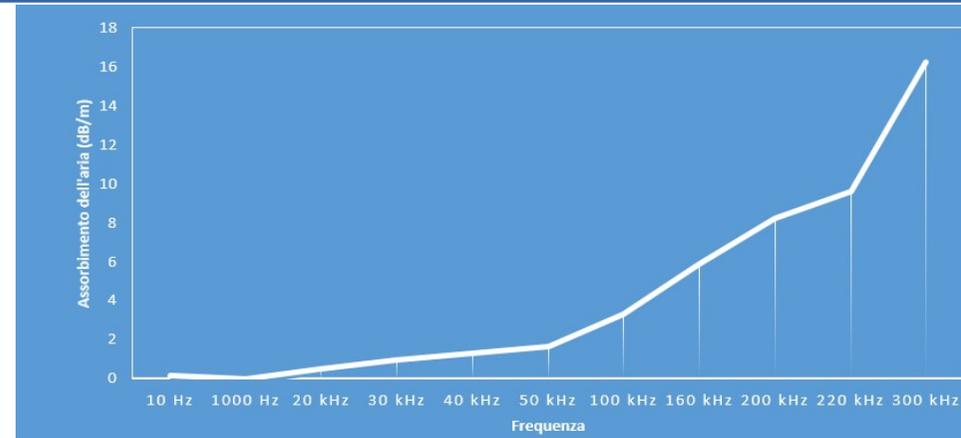
Ampiezza

I_0



$$I_x = I_0 e^{-\alpha x}$$

$\alpha =$ coeff. di assorbimento
dB/m



La *diffusione* agisce disperdendo il fascio in più direzioni, generando attenuazioni.

L'*assorbimento* è dovuto allo scorrimento relativo delle particelle del mezzo per permettere il passaggio dell'onda, ostacolato dalla viscosità, che porta alla trasformazione di parte dell'energia associata alle stesse particelle in calore.

L'onda ultrasonora viene profondamente attenuata nel suo propagarsi in aria. Maggiore è la frequenza degli US, maggiore è l'attenuazione, minore sarà la distanza che l'onda riesce a percorrere

Per frequenze superiori a circa 300 kHz, ai fini pratici si può affermare che gli US non si propagano in aria, in quanto i fenomeni di assorbimento diventano rilevanti in percorsi dell'onda dell'ordine del millimetro.

INTERNATIONAL
STANDARD

ISO
9613-1

First edition
1993-06-01

**Acoustics — Attenuation of sound during
propagation outdoors —**

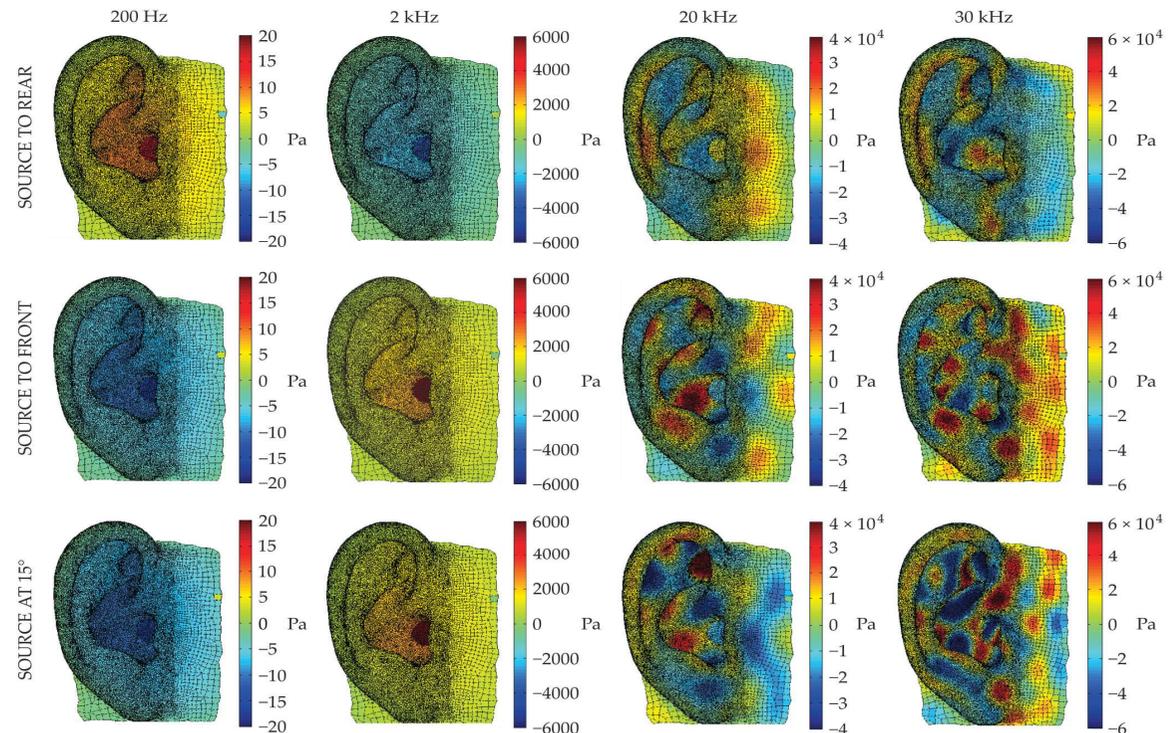
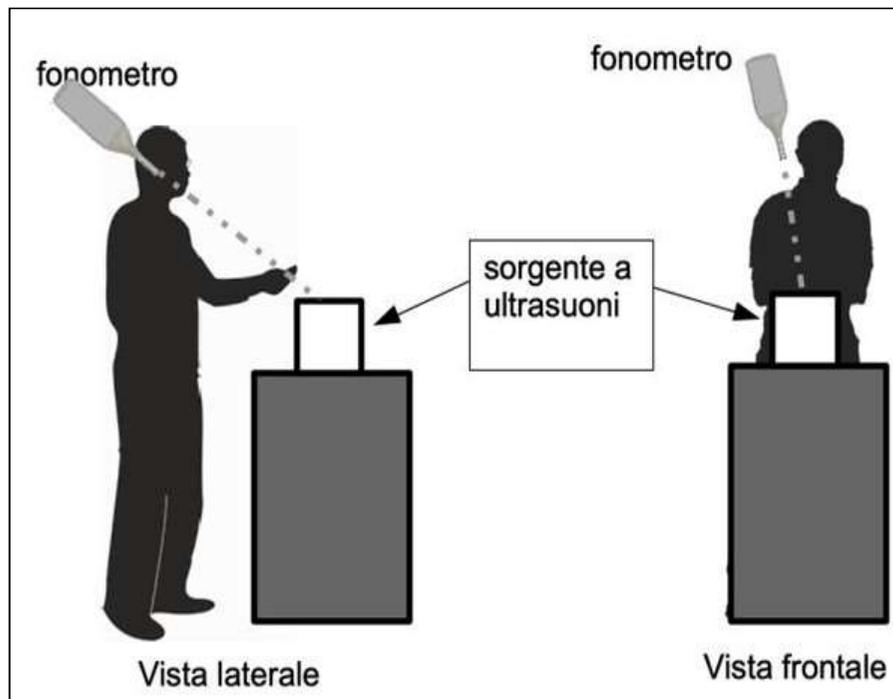
Part 1:

Calculation of the absorption of sound by the
atmosphere

<http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/absorption/>

Possiamo dunque affermare che gli ultrasuoni:

- Sono più confinati vicino alle sorgenti
- Rispetto ai suoni sono molto più direzionabili
- Si possono facilmente creare zone di ombra dovute ad ostacoli



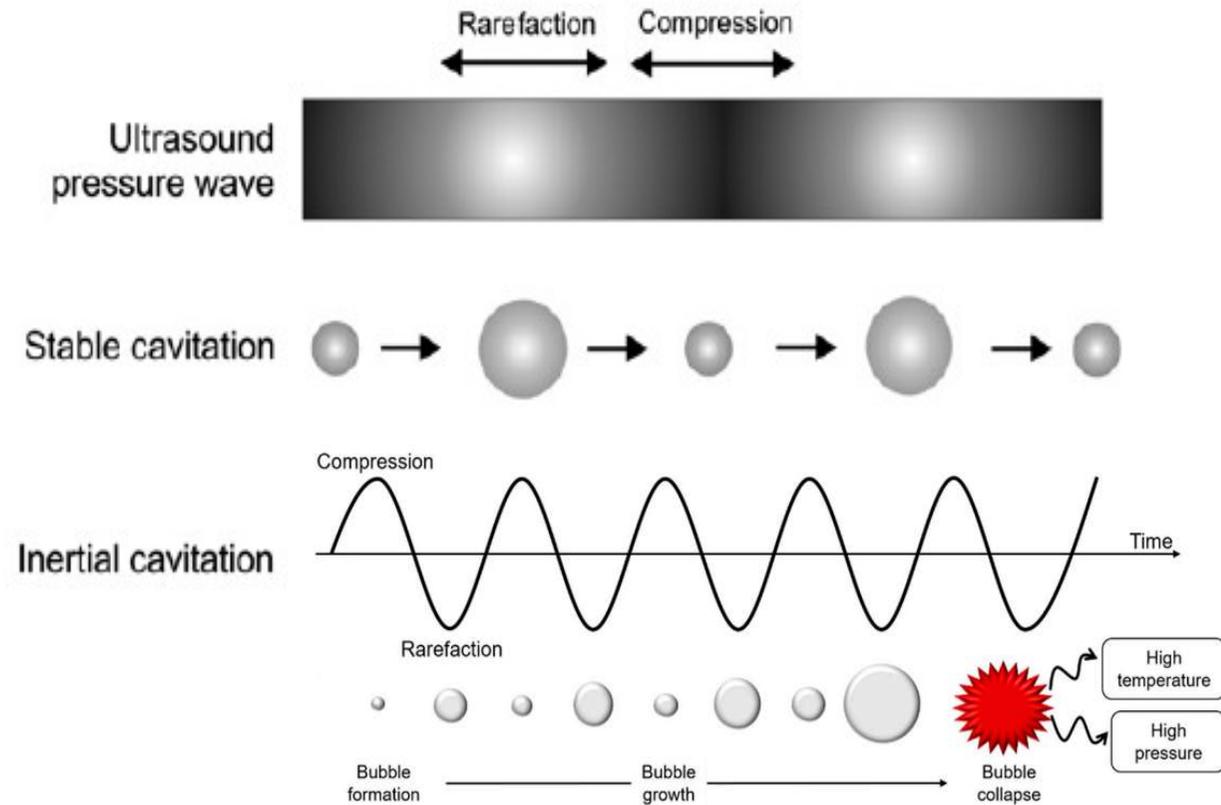
Ultrasound in air, Leighton, Physics Today, 2020

La propagazione degli US in acqua: la cavitazione

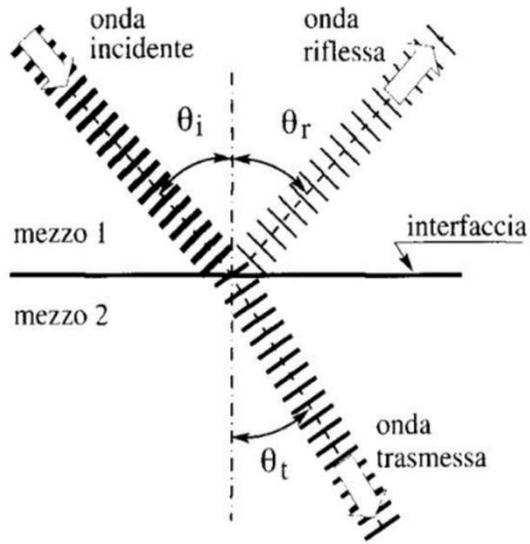
Il termine cavitazione è usato per riferirsi a una gamma di fenomeni che consistono nella formazione di cavità gassose (bolle) all'interno del mezzo, che possono oscillare (**cavitazione stabile**) o crescere per poi collassare (**cavitazione inerziale**) nel campo dell'onda, a causa di cambiamenti del gradiente di pressione.

Per bassi valori di pressione acustica di picco, le oscillazioni nel raggio della bolla seguono le variazioni di pressione; la pressione acustica agisce come una forza motrice che provoca il cambiamento delle dimensioni e della forma della bolla. La bolla si comporta come un oscillatore (**cavitazione stabile**).

All'aumentare della pressione acustica di picco, la bolla si espande a molte volte la dimensione della bolla originale durante un semiciclo di rarefazione. A questo segue una rapida fase di collasso, con la temperatura che localmente può aumentare transitoriamente ben oltre i 1000°C (**cavitazione inerziale**).



Riflessione e trasmissione dell'onda ultrasonora all'interfaccia tra 2 mezzi diversi



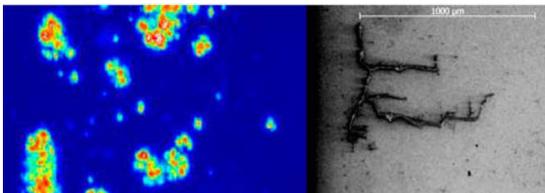
La misura in cui l'intensità sonora viene riflessa o trasmessa dipende dalle caratteristiche dei due mezzi: i rapporti relativi possono essere espressi in termini di una grandezza caratteristica, l'**impedenza**, definita come:

$$Z = \rho c$$

ρ densità del mezzo
 c velocità di propagazione degli US in quel mezzo

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4 Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

Material	Density (kg/m ³)	Sound velocity (m/s)	Acoustic impedance (kg/m ² s)	
Air (dry at STP)	1.293	331.5	429	Gases
Carbon dioxide	1.977	259	512	
Water (distilled)	0.998 x 10 ³	1497	1.494 x 10 ⁶	Liquids
Water (salt)	1.025 x 10 ³	1530	1.568 x 10 ⁶	
Ethanol	0.79 x 10 ³	1210	0.956 x 10 ⁶	
Castor oil	0.969 x 10 ³	1207	1.170 x 10 ⁶	
Chloroform	1.49 x 10 ³	987	1.471 x 10 ⁶	
Carbon tetrachloride	1.595 x 10 ³	926	1.534 x 10 ⁶	Solids
Glycerol	1.26 x 10 ³	1900	2.394 x 10 ⁶	
Mercury	13.6 x 10 ³	1450	20.0 x 10 ⁶	
Polyethylene	0.90 x 10 ³	1950	1.755 x 10 ⁶	
Neoprene rubber	1.33 x 10 ³	1600	2.128 x 10 ⁶	
Polystyrene	1.10 x 10 ³	2670	2.937 x 10 ⁶	
Epoxy resin	1.2 x 10 ³	2800	3.36 x 10 ⁶	
Polymethylmethacrylate	1.19 x 10 ³	2680	3.20 x 10 ⁶	
Glass (crown)	2.24 x 10 ³	5100	11.424 x 10 ⁶	
Glass (pyrex)	2.32 x 10 ³	5640	13.085 x 10 ⁶	
Glass (flint)	3.88 x 10 ³	3980	15.442 x 10 ⁶	
Aluminium	2.71 x 10 ³	6420	17.398 x 10 ⁶	
Brass	8.60 x 10 ³	4700	40.42 x 10 ⁶	
Stainless steel (347)	7.9 x 10 ³	5790	45.74 x 10 ⁶	

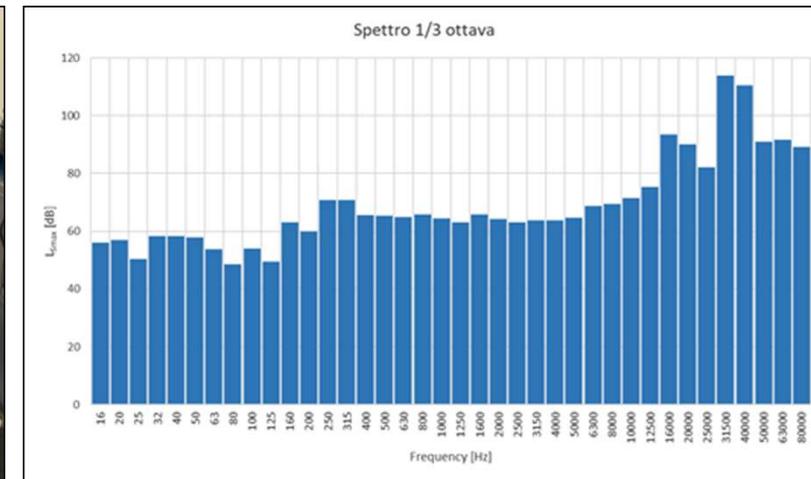
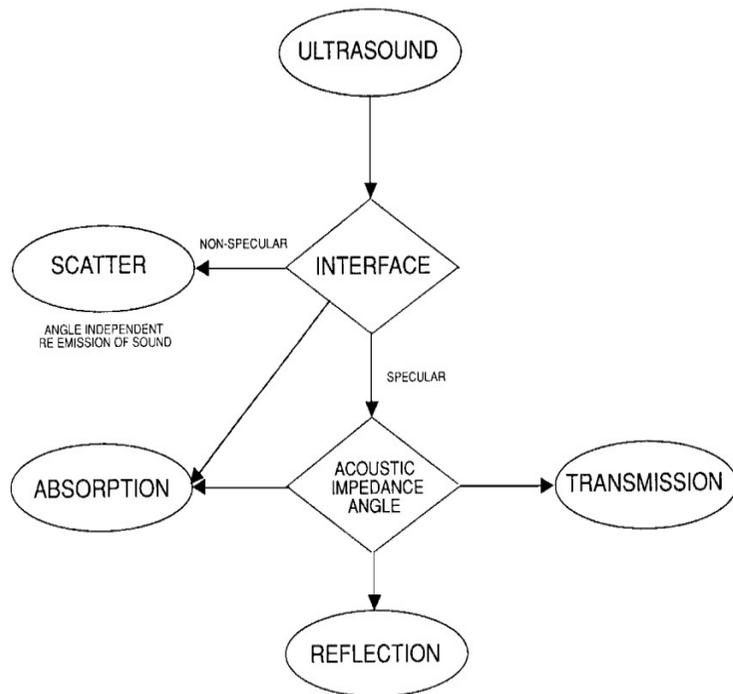


La proprietà di generare echi in corrispondenza di discrepanze nell'impedenza acustica consente l'uso diagnostico degli US in medicina e il rilevamento di difetti nell'industria.

Nel caso di generazione e propagazione di US in un mezzo diverso dall'aria, la differenza di impedenza fra il mezzo in cui vengono generati (ad esempio l'acqua) e l'aria, tipicamente comporta un'elevata riflessione all'interfaccia.

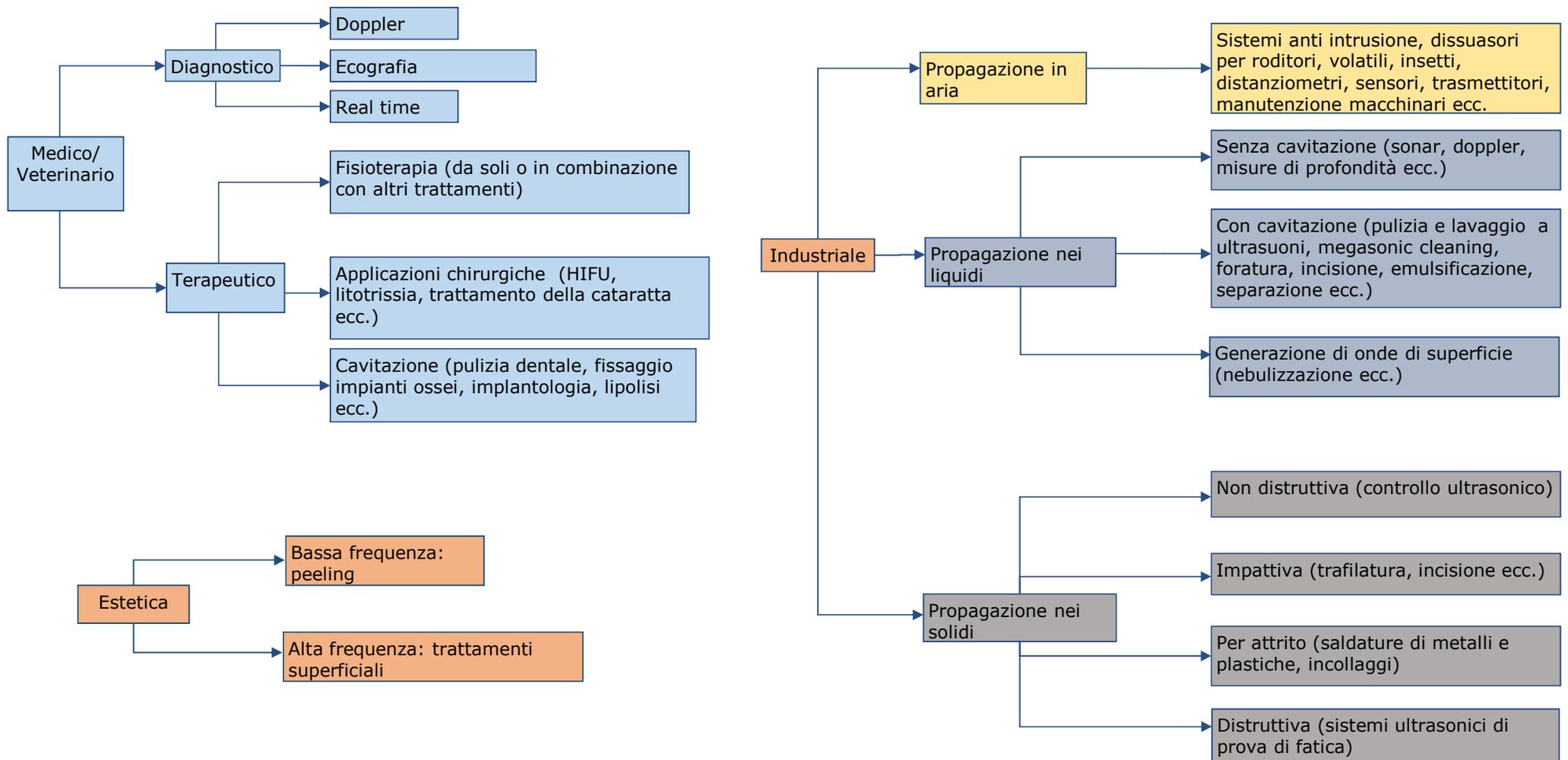
Di conseguenza la quasi totalità dell'energia ultrasonica rimane confinata nel mezzo stesso.

Tuttavia, in alcuni casi l'emissione di US in aria potrebbe essere rilevante e va presa in considerazione.

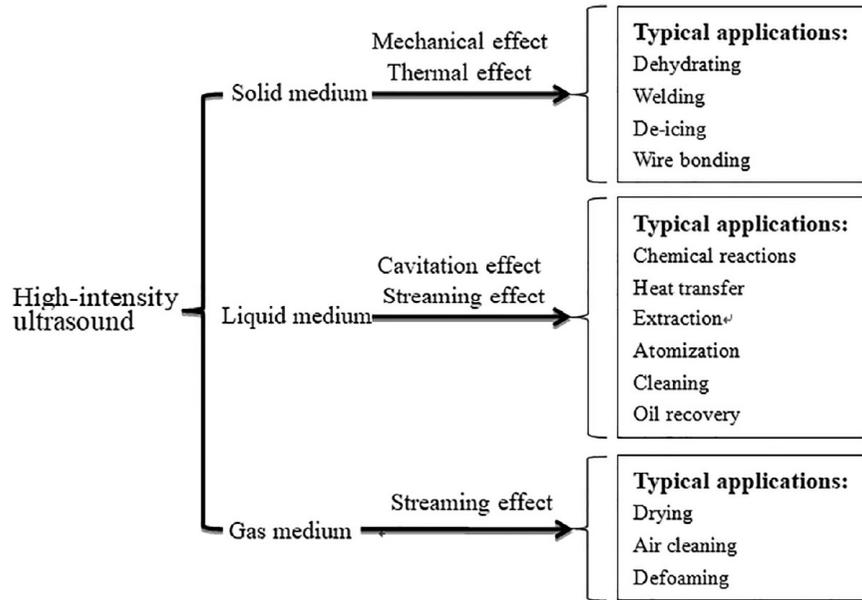


E' il caso dei bagnetti ad ultrasuoni
Verrà presentato un caso pratico

Applicazioni degli ultrasuoni in ambito occupazionale



Gamma di frequenze e potenza dei dispositivi a ultrasuoni



Low-Frequency, High-Intensity Uses

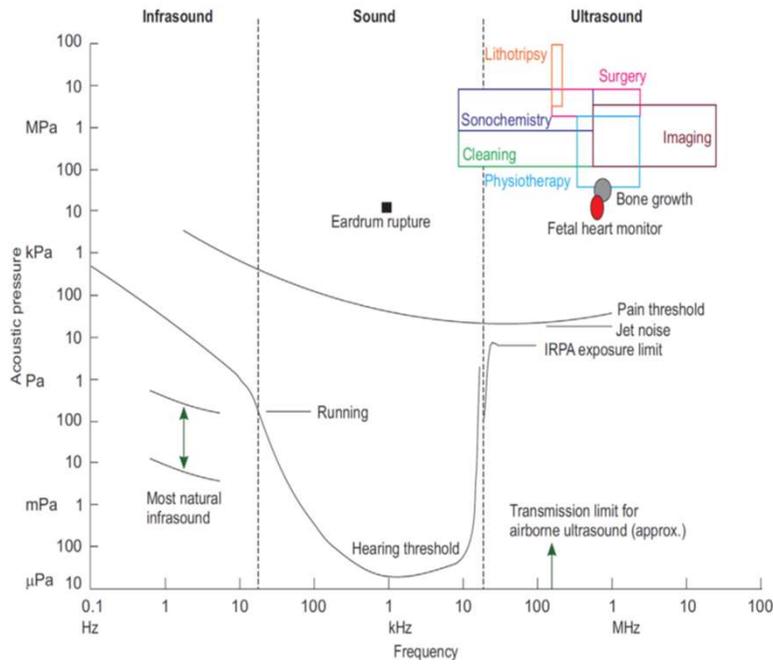
Cleaning and degreasing by immersion in cavitated solution
 Drilling and abrading using an abrasive slurry
 Soldering, brazing, and tinning without a chemical flux
 Bonding metals by arc- or spark-free welds
 Welding plastics by frictional melting
 Foaming of beverages to displace air
 Defoaming and degassing of liquid chemicals
 Emulsification, dispersion, and homogenization
 Metal insertion for injection molds
 Atomization for aerosol formation and vaporization
 Solid particle precipitation and agglomeration
 Electroplating
 Impregnating porous materials such as textiles
 Degassing melts of glass and metal
 Drying of plastic, paper, and textiles
 Food treatment and sterilization
 Acceleration of chemical reactions

High-Frequency, Low-Intensity Uses

Measurement of fluid flow and particle size
 Sensing and switching controls
 Determination of liquid level
 Communications and alarms
 Nondestructive testing and inspection for flaws
 Thickness measurements
 Hardness measurements
 Viscosity measurements
 Medical diathermy
 Dental scaling
 Medical diagnosis through neurologic, cardiac, abdominal, and ophthalmic imaging
 Obstetric and gynecologic examinations
 Measurement of blood flow

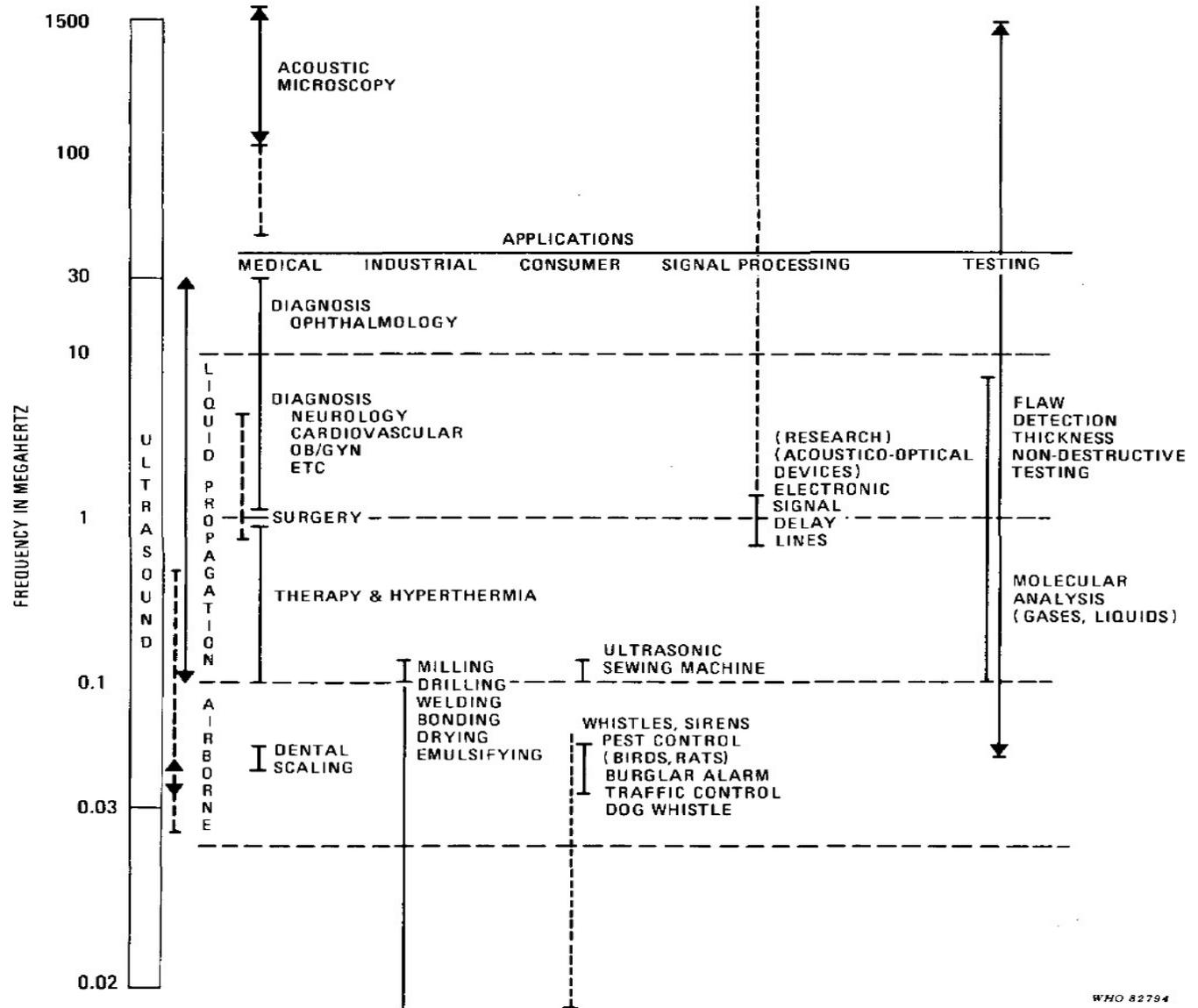
Application	Frequency Range	Average Power	Power Mode
Industrial cleaning and machining	15-50 kHz	100 W - kilowatts	Continuous wave
Dental scaling	20 kHz	20 W	Continuous wave
Medical diathermy	80 kHz - 1 MHz	"	Continuous wave
Medical diagnostic	1-30 MHz	1-100 mW	Continuous wave pulsed wave
Industrial nondestructive testing	"	"	pulsed wave
Cleaning	13 kHz - 1 MHz	4-8 W/cm ²	Continuous wave
Welding			
Plastic	20 kHz	1 kW	Continuous wave
Metal	10-60 kHz	5 kW	Continuous wave

Applicazioni degli ultrasuoni: frequenza

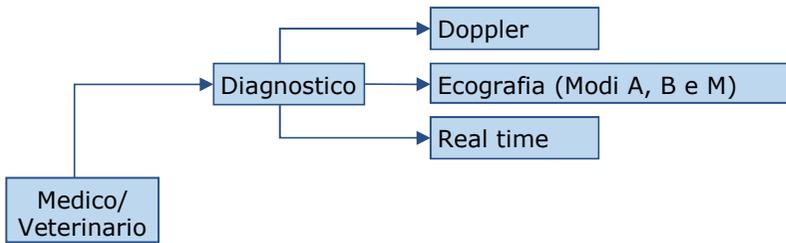


Ultrasound applications. NTP 205: Ultrasound: occupational exposure. (INSHT, 1985)

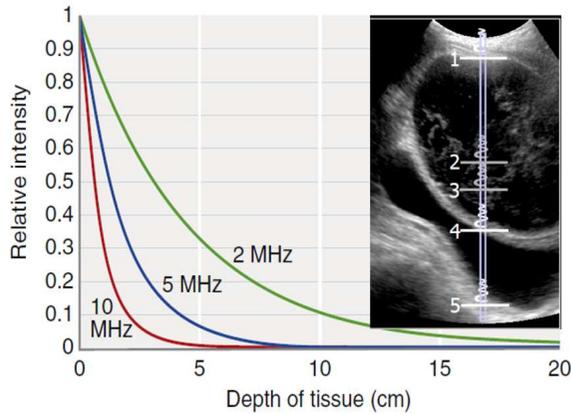
Application	Frequency (kHz)	Intensity Range (W/cm ²)
Low-frequency underwater signals	16-20	—
Aerosol reactions and agitation	16-20	—
Ultrasonic control devices, door opening	25	—
Welding	16-20	3-32
Industrial cleaning and degreasing	20-25	<6
Plastic welding	20	1000
Metal welding	10-60	10,000
Mechanization	20	variable
Extraction	10	500
Automation	20-300	variable
Thickness measurement	300	—
Experimental biological work	760	—



Applicazioni degli ultrasuoni in ambito medico: diagnostica



Il range di frequenze per questa tipologia di utilizzo è 1-10 MHz e l'intensità è dell'ordine dei 100 mW/cm², ad eccezione dei sistemi Doppler in cui le intensità possono raggiungere anche 2.5 W/cm².



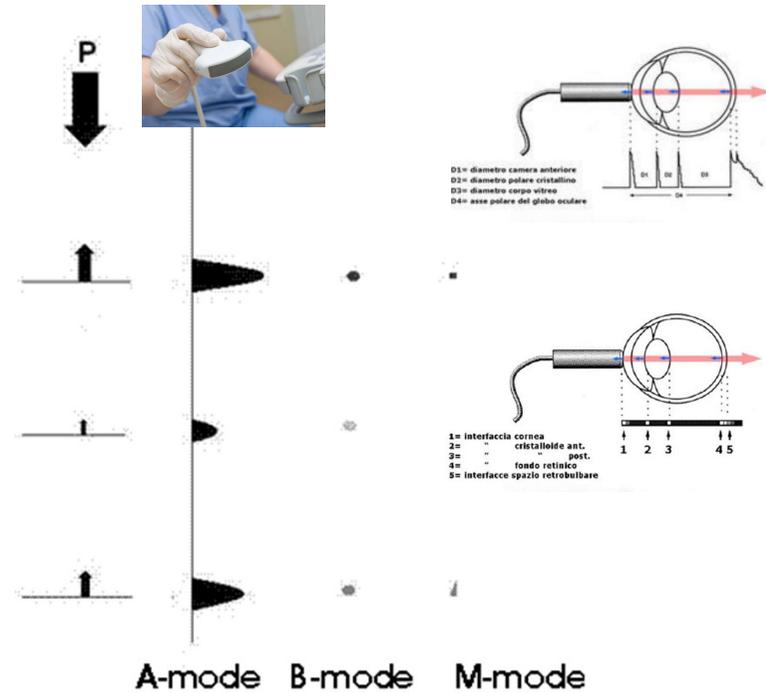
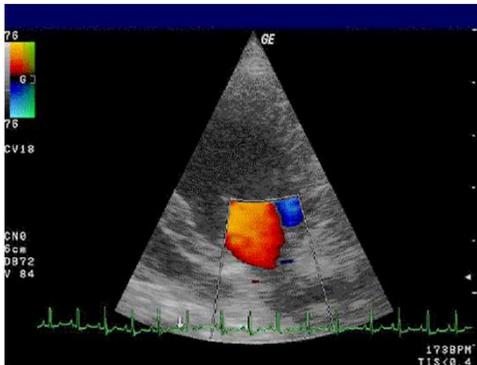
I segnali riflessi possono essere visualizzati in tre diverse modalità:

A-mode (Ampiezza): echi rappresentati come picchi di intensità.

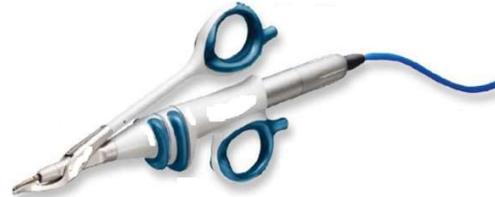
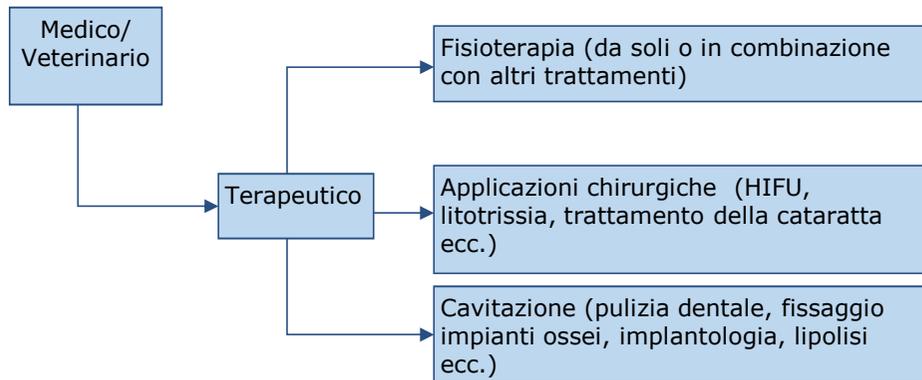
B-mode (Brightness): gli echi vengono rappresentati in sequenza lungo una linea a seconda della loro distanza dalla sorgente.

Intensità presentata in scala di grigi.

M-mode (Time Motion Mode): un singolo raggio in una scansione a US può essere utilizzato per produrre un'immagine con un segnale di movimento.



Applicazioni degli ultrasuoni in ambito medico: terapia (1/2)

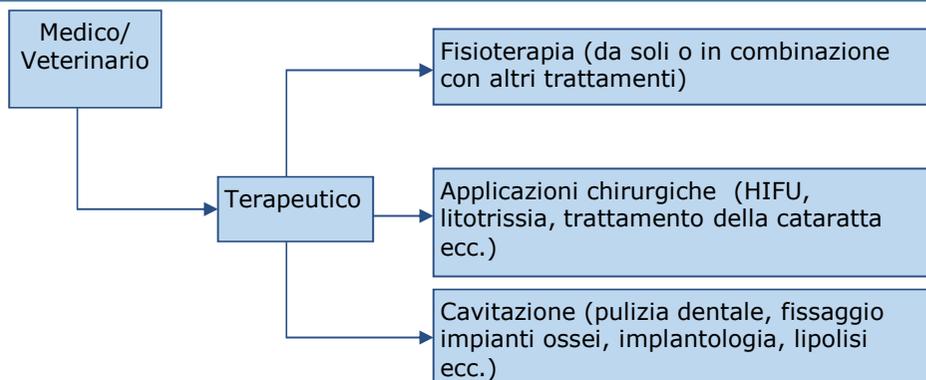


In ambito terapeutico, viene sfruttato l'assorbimento delle onde ultrasonore nei tessuti e i relativi effetti termici e meccanici prodotti.

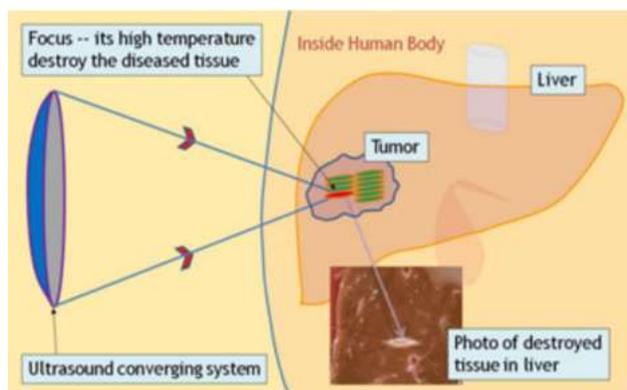
Gli usi terapeutici degli ultrasuoni riguardano:

- la possibilità di indurre un riscaldamento non distruttivo o altri effetti meccanici che stimolano o accelerano il normale recupero fisiologico in risposta ad una lesione. Rientrano in questa categoria le applicazioni fisioterapiche, che vengono utilizzate per diminuire il dolore, accelerare la cicatrizzazione delle ferite e ridurre il gonfiore.
- la distruzione, selettiva e controllata di tessuti per effetto termico (es HIFU) e cavitazione (es bisturi ad US)

Applicazioni degli ultrasuoni in ambito medico: terapia (2/2)



Effects	Mechanism
Vasodilation	Release of tissue stimulants. Reduction in muscle tone.
Muscle relaxation	Elimination of tissue stimulants. Post-excitatory depression orthosympathetic.
Increased membrane permeability	Forcing the tissue fluid through. pH less acidic.
Increased tissue regeneration	Mechanical effect.
Thermal effect	Can block conduction. Nervous tissue possesses special sensitivity to ultrasound.
Decrease in pain	Normalization of muscle tone. Decrease in pH.



Chirurgia non invasiva - HIFU

High Intensity Focused Ultrasound
Focalizzazione in regioni dell'ordine di qualche cm degli US ad alta potenza per l'ablazione termica dei tumori.

Le frequenze utilizzate vanno da 0.5 – 5 MHz e le intensità 1000 – 10000 W/cm²



Chirurgia invasiva - bisturi ad US

per la dissezione, il taglio e il coagulo dei tessuti molli.

La frequenza di utilizzo è intorno ai 55 kHz con intensità superiori a 8 W/cm².



Ablatore ad US

una punta metallica sterilizzata, messa in oscillazione, è in grado di frammentare gli accumuli di placca e tartaro. La contemporanea emissione di un getto d'acqua permette di rimuovere le incrostazioni, assicurando che il riscaldamento per attrito sia ridotto al minimo.

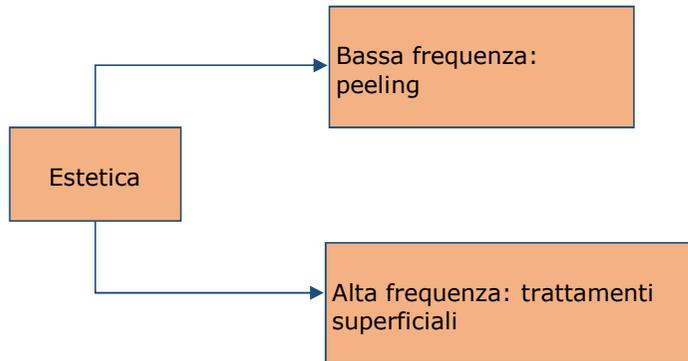
La frequenza di utilizzo è 20–30 kHz.

Ultrasound Therapy Application	Therapeutic Outcome	Bioeffect Mechanism	Frequency
Physical therapy	Therapy of sports injuries, chronic inflammation, arthritis, and trauma	heating	1MHz
Physical therapy	Bone fracture healing	unknown	1.5 MHz
Physical therapy	Treatment of the most superficial of tendon injuries	heating	3 MHz
Physical therapy	Skin & facial rejuvenation, fat removal, cellulite, scars & scar tissue, sunburn, bruises, superficial cuts & scrapes	heating	5 MHz
Physical therapy	Bone growth stimulation	heating	1.5 MHz
Hyperthermia	Cancer therapy	heating	1-3.4 MHz
HIFU	Uterine fibroid ablation	thermal lesion	0.5-2 MHz
HIFU	Glaucoma relief	thermal lesion	4.6 MHz
HIFU	Laparoscopic tissue ablation	thermal lesion	4 MHz
HIFU	Laparoscopic or open surgery	thermal lesion	3.8-6.4 MHz
Focused ultrasound	Skin tissue tightening	thermal lesion	4.4-7.5 MHz
Extracorporeal lithotripsy	Kidney stone destruction	mechanical stress; cavitation	~150 kHz
Intracorporeal lithotripsy	Kidney stone comminution	mechanical stress; cavitation	25 kHz
Extracorporeal shock wave therapy	Plantar fasciitis epicondylitis	unknown	~150 kHz
Phacoemulsification	Lens removal	vibration; cavitation	40 kHz
Ultrasound-assisted liposuction	Fat tissue removal	fat liquefaction; cavitation	20-30 kHz
Cutting tissue and scaling vessel	Laparoscopic or open surgery	thermal lesion and vibration	55.5 kHz
Intravascular ultrasound	Thrombus dissolution	gas body activation; not clear	2.2 MHz
Skin permeabilization	Transdermal drug delivery	mechanical effect	55 kHz
Focused ultrasound	Microbubble-aided gene delivery	cavitation	20 kHz-2 MHz

Different therapeutic applications of ultrasound and a comparison between ultrasound frequency, therapeutic outcome, and related bioeffect mechanism (thermal or non-thermal)

(Izadifar, 2016)

Applicazioni degli ultrasuoni in ambito estetico non medico

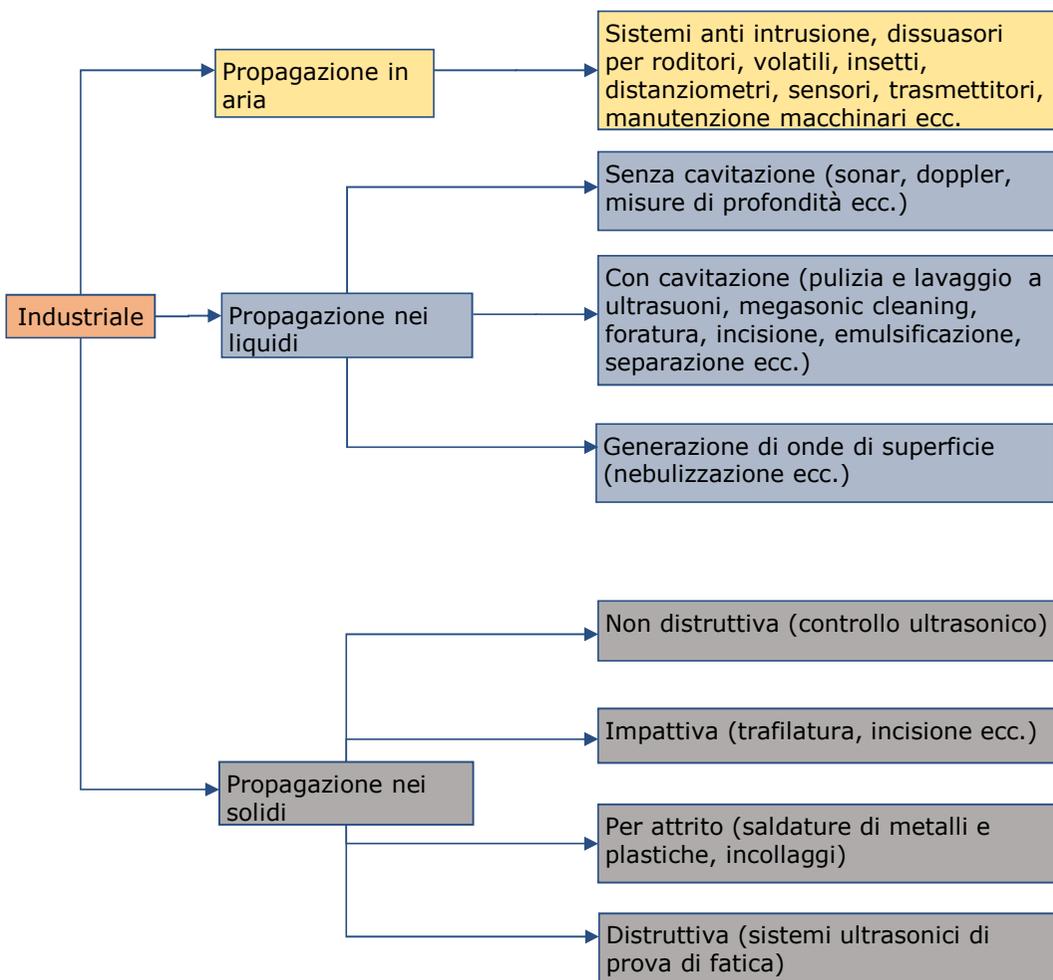


In ambito estetico non-medico, gli US sono impiegati per il peeling e trattamenti di ringiovanimento cutaneo.

Bassa frequenza: 22-28 kHz (Frequenza tipica 25 kHz). Peeling: la parte di cute da trattare è cosparsa di un prodotto liquido o gelificato. Applicando la lamina metallica sulla pelle con la punta inclinata di circa 30° sulla stessa, la vibrazione produce una nebulizzazione del prodotto applicato il quale asporterà le cellule morte superficiali della pelle e relative impurità.

Alta frequenza: 0.8-3.5 MHz. Si tratta di trattamenti superficiali per il ringiovanimento cutaneo, con US utilizzati per la micro sollecitazione meccanica, per produrre una maggiore tonicità dell'epidermide, per trattare le lassità cutanee di modesta entità e per la riduzione delle rughe superficiali.

Applicazioni degli ultrasuoni in ambito industriale

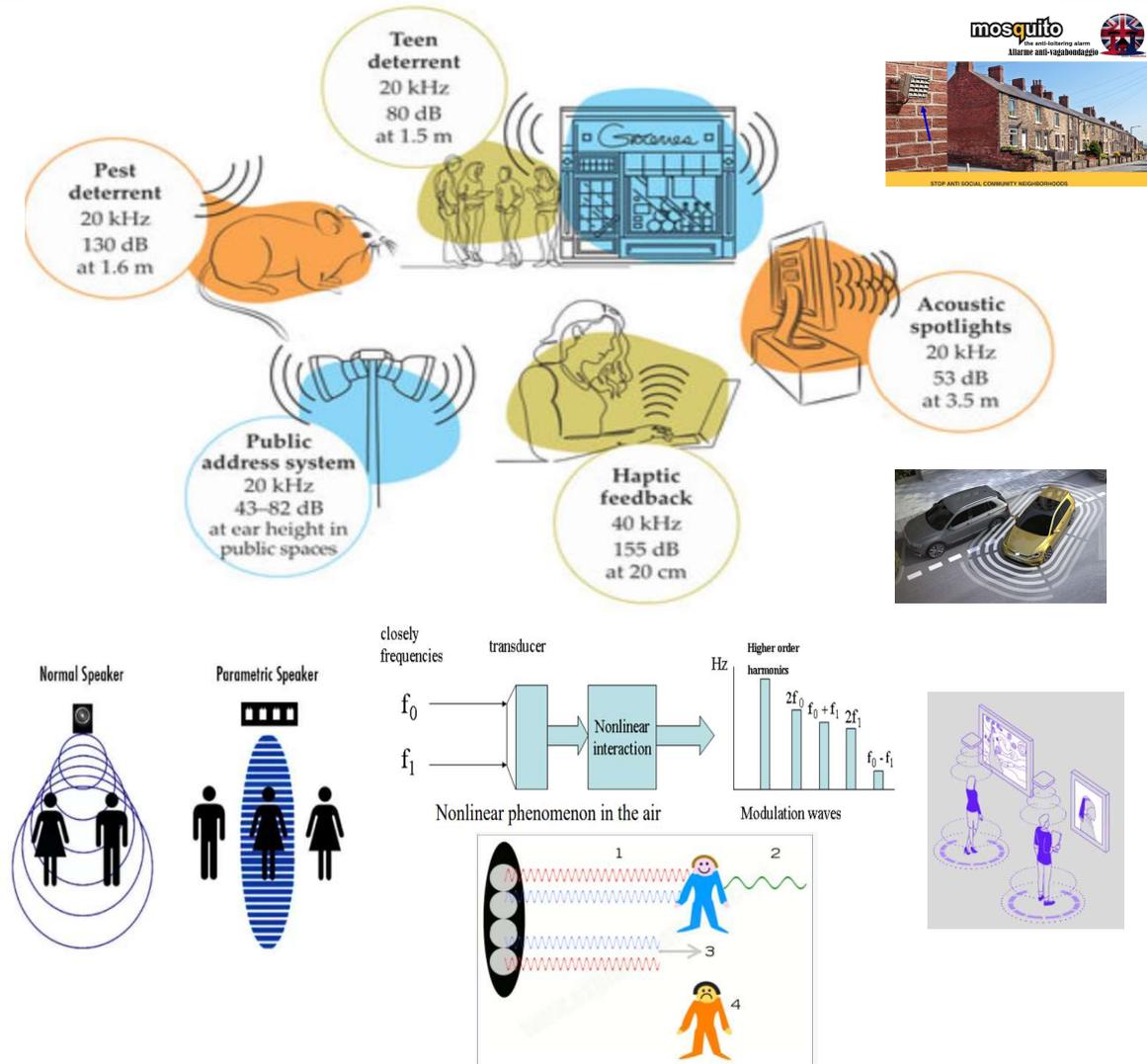


Applicazioni degli ultrasuoni in aria: teen e pest deterrent; sensori ad ultrasuoni; altoparlanti direzionali

Incidental or Deliberate Exposure?	Commercial Source	Frequency	SPL Levels at the Possible Position of the Human Ear	Reference for Measurement	
Deliberate	Pest deterrents: Used to deter birds, rodents, and insects away from locations (barns, homes, and shops)	20-kHz TOB	130 dB at 1.6 m	Ueda et al., 2014a,b	
			90 dB at 14 m		
Deliberate	Teen deterrent: Exploits high-frequency sensitivity of teenagers and children to deter them from shops as age-discriminatory deterrent to make the shop more welcoming to older customers who are assumed to have greater purchasing power and be less likely to steal.	12.5-kHz TOB	72 dB at 1.5 m	Conein, 2006	
			16-kHz TOB		92 dB at 1.5 m
			20-kHz TOB		80 dB at 1.5 m
Incidental	Public-Address-Voice-Alarm: Speakers, usually set in ceilings or high on walls in public places to alert people, e.g., to evacuate in case of bomb threat or fire; by EU law must be monitored to ensure they are functioning. Many types produce a ~20-kHz tone as a by-product of this monitoring.	~20 kHz	76 dB	Fletcher et al., 2018c	
			65 dB	Paxton et al., 2018	
			43-82 dB	Mapp, 2018	
Incidental	Acoustic spotlights: Two high-intensity ultrasonic beams overlap, and the nonlinear difference frequency produces a low-power audible signal so that listeners to recordings who share a space do not bother one another (for museums, exhibitions, and homes). It is not known whether anecdotal reports of adverse effects, if confirmed, would be due to the fundamental, a subharmonic produced by the source of a nonlinearity in propagation, or when the ear is driven by the signals.	~20 kHz	53 dB at 3.5 m	Dolder et al., 2019	
			~40 kHz		118 dB at 3.5 m
Incidental	Haptic feedback: ultrasonic beams (e.g., above a computer keyboard) produce modulated radiation pressure that gives the sensation resembling "soap bubbles bursting on the skin."	~40 kHz	125 dB at 60 cm	Battista, 2019	
			155 dB at 20 cm	Lieber et al., 2019	

SPL, sound pressure level, TOB, third-octave band; EU, European Union. See Leighton, 2016a, for details of devices. Reproduced from Leighton et al., 2020.

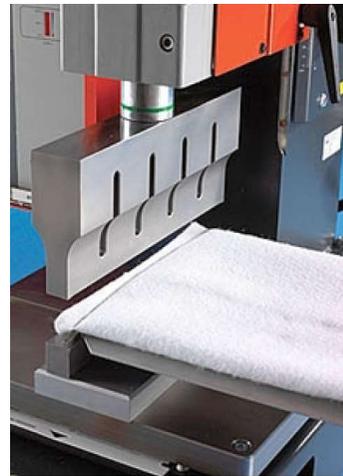
Leighton, 2020



Applicazioni degli ultrasuoni in ambito industriale ad alta potenza

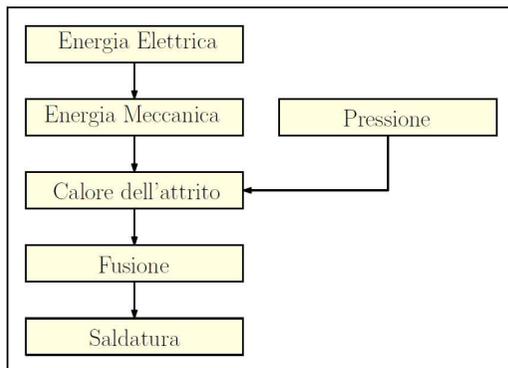
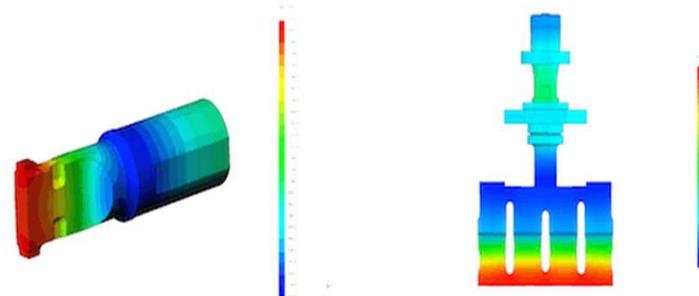
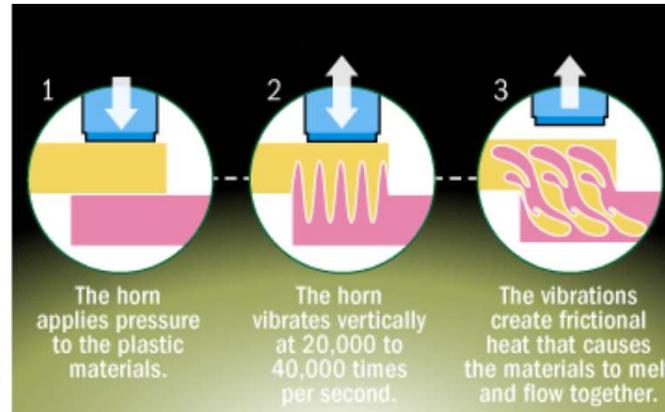
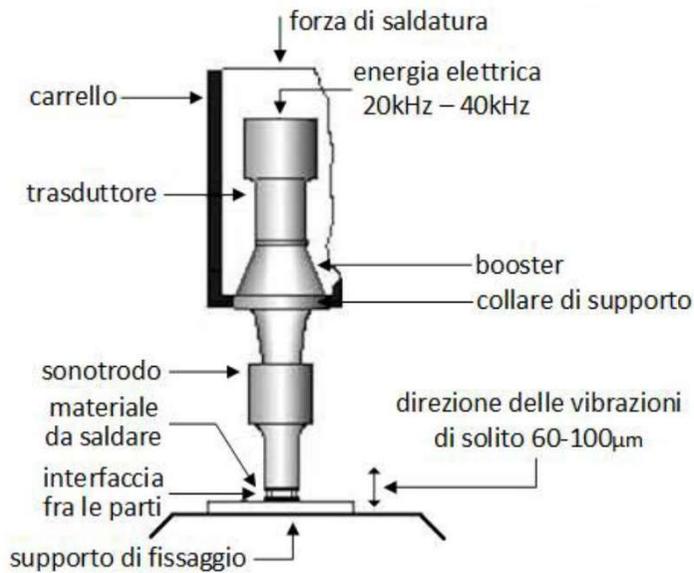
Nelle applicazioni industriali ad alta potenza, l'uso degli US ha l'obiettivo di esporre il pezzo in lavorazione a un'energia vibratoria di intensità sufficiente per provocarne un cambiamento fisico permanente

- saldatura ad ultrasuoni di plastiche: (frequenza: 20-40 kHz, intensità dell'ordine dei 10 W/cm²) è veloce, pulita, efficiente, ripetibile e poco dispendiosa in termini di energia;
- saldatura ad ultrasuoni di metalli: permette di saldare tra loro anche materiali diversi come alluminio e ceramica;
- taglio ad ultrasuoni di prodotti alimentari: le vibrazioni vengono concentrate su una lama permettendo un taglio senza frizioni che non deforma o rovina il materiale da tagliare.



Applicazioni degli ultrasuoni in ambito industriale ad alta potenza: saldatura ad ultrasuoni

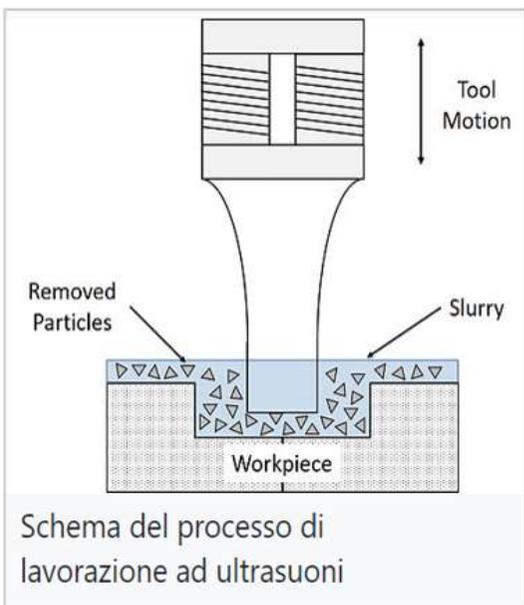
Saldatura ad ultrasuoni materie plastiche



La saldatura a ultrasuoni sottopone i pezzi da saldare dello stesso materiale o di materiali differenti, ad una vibrazione ad alta frequenza, generalmente 20-40 kHz, per fondere i materiali nel punto di giunzione. Le parti vengono tenute insieme sotto pressione.

La saldatura avviene mediante un sonotrodo che trasmette la vibrazione al pezzo da assemblare. La vibrazione avviene tipicamente in direzione perpendicolare alla superficie di saldatura.

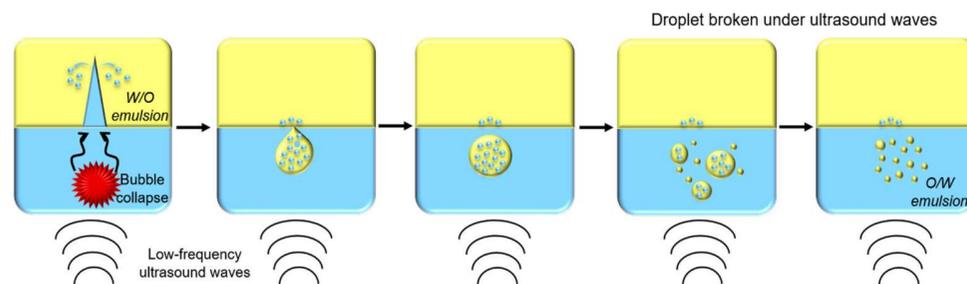
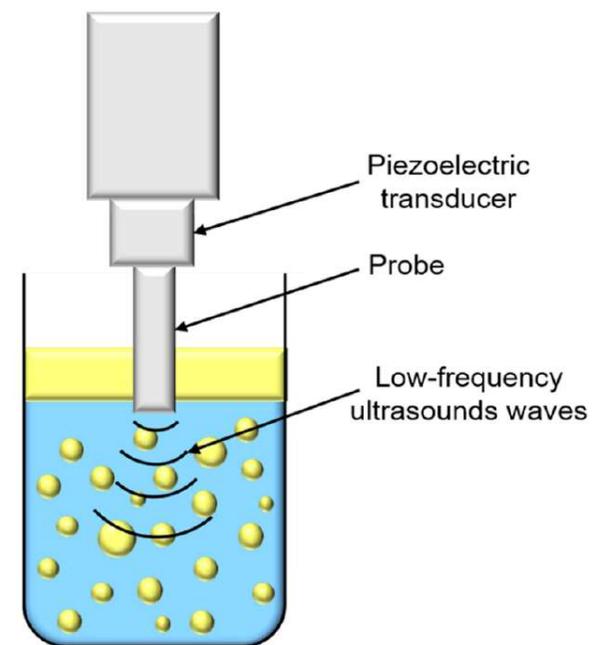
Altre applicazioni degli ultrasuoni in ambito industriale: emulsione, foratura



Lavorazione con US di un particolare in cristallo, del diametro di 9 mm e 35 mm di altezza

Per le emulsioni, gli US ad alta intensità forniscono la potenza necessaria per disperdere una fase liquida (fase dispersa) in piccole gocce in una seconda fase (fase continua).

Emulsioni olio-in-acqua (O/A): processo a due fasi: le molecole d'acqua vengono spinte in una fase oleosa e si forma un'emulsione acqua in olio (A/O). Le goccioline contenenti l'emulsione A/O vengono separate dalla fase oleosa in fase acquosa. Sotto l'effetto degli US, queste goccioline si rompono in goccioline più piccole fino a formare un'emulsione olio-in-acqua (O/A).



Schematic representation of oil-in-water (O/W) emulsion formation by low-frequency ultrasounds.

Generazione intenzionale e non intenzionale di US

Applicazione/dispositivi	Descrizione del processo	Intervallo di frequenza [kHz]	Mezzo di propagazione
Saldatura della plastica	Saldatura di plastica rigida o flessibile	20 – 40	ARIA
Saldatura metalli	Saldatura di metalli simili e dissimili	<10 – 63	ARIA
Tagliatrici al plasma	Pantografo per il taglio di lamiere	<10 – >40	ARIA
Lavorazioni meccaniche	Pialle per legno, fresatrici, smerigliatrici elettrico	<10 - 80	ARIA
Trapani elettrici	Foratura di materiali fragili	<10 - 20	ARIA
Trapani ultrasonici	Trapani con punta vibrante a frequenze ultrasoniche	25 - 40	ARIA
Smerigliatrici	Affilatura lame metalliche	<10 – 31,5	ARIA
Ugelli ad aria compressa	Asciugatori e pulitori ad aria compressa	<10 – >40	ARIA
Verniciatura tramite aerografo	Aerografo per deposizioni/verniciatura	<10 - 50	ARIA
Lavorazione legno, lapidei, metalmeccanica	Lavorazione rotativa, smerigliatura a impatto con fanghi abrasivi, foratura assistita da vibrazioni	<10 - >40	ARIA
Estrazione	Estrazione di essenze e succhi da fiori, piante e frutta per l'utilizzo in industria cosmetica	20	ARIA
Macchine tessili	Macchine con lavorazione ad alta velocità	<10 - 40	ARIA
Motori aereo	Zona gas di scarico	<10 - 30	ARIA
Dissuasori ultrasonici	Dispositivi per allontanare animali/insetti anche in zone ad accesso pubblico	10 – 63	ARIA
Scaccia zanzare	Applicazione per smartphone	20	ARIA
Avvitatore pneumatico	Avvitatore bulloni	<10 - 50	ARIA
Disintegratore ultrasonico	Disintegratore di solidi/corpuscoli non in acqua	<10 - 25	ARIA
Compressori aria	Generatori di aria compressa	<10 - 40	ARIA
Gruppo elettrogeno	Generatori elettrici con motore a scoppio	<10 - 25	ARIA
Generatori elettrici ad Inverter	Generatori elettrici a stato solido	20 - 50	ARIA
Turbina Vapore centrali elettriche	Turbine Vapore /Gas per la produzione energia elettrica	<10 - 40	ARIA
Alternatore di Potenza centrali elettriche	Alternatori di potenza per la produzione di energia elettrica	<10 - 40	ARIA
Riduttori di pressione impianti industriali	Turbo riduttore di pressione gas e valvole di sviato	<10 - 80	ARIA
Bisturi ad US	Chirurgia	40 - 60	ARIA
Ablatori ad US	Applicazioni odontoiatriche	20 - 60	ARIA
Umidificatori ad US	Umidificatore per ambienti interni	<60 - 80	ARIA
Dispersione ultrasonica di fanghi ceramici	dispersione e de-agglomerazione delle particelle ceramiche	18 – 20	LIQUIDI/ARIA
Laboratori industriali e di ricerca	Omogenizzatori da laboratorio: accelerazione alcune reazioni chimiche; emulsificazione; dispersione; dissoluzione o rottura delle cellule; sonicatori	20-40	LIQUIDI/ARIA
Lavatrici ultrasoniche	Pulizia e sgrassaggio. La soluzione detergente pulisce le parti immerse attraverso il processo di cavitazione	20 – 63	LIQUIDI/ARIA
Diagnostica per immagini	Ecografia	1000 – 20 000	LIQUIDI
Terapie mediche	Litotrissia percutanea	1000 – 3000	LIQUIDI

Alcuni apparati possono essere causa di generazione non intenzionale di US, quali:

- caldaie
- condensatori
- sistemi di aria di controllo
- valvole
- scaricatori di condensa
- motori
- pompe
- ingranaggi
- ventilatori
- compressori
- convettori
- quadri meccanici/elettrici
- trasformatori
- turbine gas/vapore
- generatori
- iniettori per lubrificazione



Effetti dell'esposizione ad US sulla salute e sicurezza: esposizione da contatto



L'esposizione da contatto avviene quando non vi è interposizione di aria o di un liquido tra la sorgente che genera US ed il tessuto esposto.

L'esposizione per contatto diretto è in grado di trasferire la maggior parte dell'energia irradiata al tessuto esposto, a tutte le frequenze.

Nel caso dei bagnetti ad US, l'immersione delle mani nelle vasche di lavaggio può produrre sensazioni di formicolio, fino a sindrome neurovascolare.

Per sorgenti di US di elevata intensità (es macchina per l'incollaggio ad US), nel caso di contatto delle mani, si possono verificare effetti periferici al sistema nervoso e vascolare, nonché ustioni, anche per esposizioni brevissime.

Dispositivi che operano nell'intervallo di frequenze dei MHz sono in grado di danneggiare i tessuti solo in caso di contatto diretto del corpo con la sorgente.

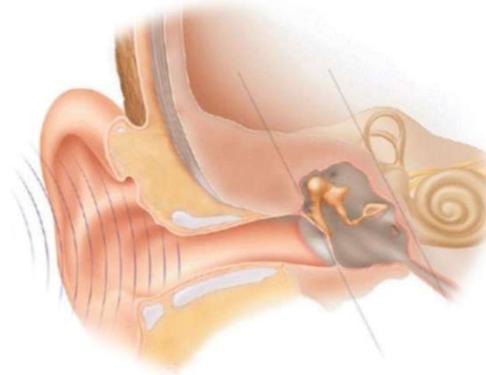
L'esposizione al contatto diretto può verificarsi a seguito di incidenti o incuria.

Devono essere prese adeguate precauzioni per evitare l'esposizione accidentale da contatto con la sorgente ultrasonora.

Effetti dell'esposizione ad ultrasuoni sulla salute e sicurezza

Gli ultrasuoni possono provocare:

- effetti uditivi a bassa frequenza
- effetti soggettivi
- effetti di cavitazione
- effetti termici ad alta frequenza
(frequenze > 1 MHz)
- effetti indiretti



Effetti uditivi degli ultrasuoni

Si riferiscono a frequenze fino a circa 100 kHz

Può verificarsi un innalzamento temporaneo della soglia uditiva che può portare nel tempo ad una perdita significativa dell'udito.



Esistono diversi **meccanismi** attraverso i quali gli ultrasuoni aerei possono generare sensazioni uditive:

- 1) quando i livelli degli US sono sufficientemente elevati, una parte dell'energia raggiunge l'orecchio interno, attivando i canali uditivi della coclea;
- 2) a livelli superiori a circa 120 dB SPL, possono essere generate subarmoniche udibili a causa delle caratteristiche non lineari del timpano o dell'orecchio medio;
- 3) componenti udibili in alta frequenza (subarmoniche) possono essere generate come sottoprodotto dei processi lavorativi che impiegano ultrasuoni;
- 4) gli US con frequenze comprese tra ~25–60 kHz potrebbero anche essere trasmessi dall'occhio all'orecchio interno attraverso la conduzione del fluido intracranico.

(Ashihara, 2006; Carcagno, 2019; Grzesik, 1986; Macca, 2015; Dudarewicz, 2017; Chopra, 2016)

Nel caso di propagazione aerea, gli operatori possono risultare esposti a livelli nocivi per l'apparato uditivo, come può avvenire nel caso di addetti a saldature o pulitrici o altri apparati ad US.

Effetti soggettivi

La percezione può variare da individuo a individuo.
Possono comparire dopo pochi minuti di esposizione.

- affaticamento eccessivo
- cefalea
- nausea
- vomito
- gastralgie
- sensazione di occlusione e pressione nell'orecchio
- ronzii
- disturbi del sonno
- perdita del senso di equilibrio
- vertigini

(WHO 1982, IRPA 1984, Lawton 2001, HPA 2010)

Meccanismi proposti per tali effetti:

reazione del sistema nervoso centrale; la membrana timpanica subisce uno spostamento microscopico, attivando i recettori per la propriocezione, i muscoli dell'orecchio medio e della tuba di Eustachio; attivazione degli organi otolitici dell'apparato vestibolare. (Lubner, 2020)

Il tipo di sintomo e il grado di gravità sembrano variare a seconda dello spettro della radiazione ultrasonica e della suscettibilità individuale delle persone esposte, in particolare della loro acuità uditiva alle alte frequenze.



I limiti raccomandati dall'IRPA-INIRC a cui, in un'ottica cautelativa, si fa riferimento nelle FAQ, sono stati stabiliti sulla base di studi condotti da Acton. I livelli di pressione sonora, fissati a 110 dB per ogni banda di un terzo di ottava centrata alle frequenze superiori a 25 kHz, sono stati stabiliti in modo da tenere conto della possibile generazione di sub-armoniche aventi livelli di pressione sonora potenzialmente pericolosi nel campo delle frequenze udibili.

Lo stesso Acton, nel 1975, per la sola banda di terzo d'ottava centrata alla frequenza di 20 kHz, fissò il limite a 75 dB con lo scopo di evitare l'insorgenza di effetti soggettivi (criterio di Acton).

I limiti sono stati stabiliti a livelli tali da non causare un innalzamento anche momentaneo della soglia uditiva e con lo scopo anche di limitare i potenziali effetti soggettivi, indipendentemente dal tempo di esposizione (in quanto gli effetti soggettivi possono verificarsi immediatamente), basandosi anche sull'assunto che l'esposizione avvenga in aria e che non si verifichi mai il contatto diretto del soggetto esposto con la sorgente.

Frequenza centrale della banda in terzi d'ottava (kHz)	Esposizione lavoratori SPL - Livello di pressione sonora (dB re: 20 µPa)	Esposizione popolazione SPL - Livello di pressione sonora (dB re: 20 µPa)
20	75	70
25	110	100
31,5	110	100
40	110	100
50	110	100
63	110	100
80	110	100
100	110	100

Selected SPLs in dB at the Operator's Position in 1/3-Octave Bands from Industrial Ultrasonic Sources

Ultrasonic Device	1/3 Octave Band Center Frequency (kHz)					
	10	12.5	16	20	25	31.5
Drill (no enclosure)	91	85	90	81	108	84
Welder	76	95	115	93	73	69
Cleaner	<61	<61	<61	83	67	<61
Cleaner	77	78	79	96	77	77
Jet engine (after-burner) power	114	113	11	108	106	103
Cleaner	86	77	86	105	97	80
Drill	75	67	75	97	75	78
Cleaner (small)	53	61	91	83	75	102
Cleaner (large)	83	86	91	96	91	102
Welder	NA	NA	NA	127	NA	NA
Welder	NA	NA	NA	106	NA	NA
Cleaner	78	66	76	97	74	70
Welder (no enclosure)	106	114	119	96	80	56

Exposure SPLs in dB for Various Commercial Devices.

Ultrasonic Device	1/3-Octave Band Center Frequency (kHz)						
	10	12.5	16	20	25	31.5	40
Video display terminal (VDT)	-	-	66	-	-	-	-
VDT	-	-	61	-	-	-	68
Ultrasonic person sensor	-	-	-	-	94	-	-
Ultrasonic intrusion alarm	-	-	-	93	-	-	-
Ultrasonic dog repeller	-	-	108	-	-	-	-

Effetti di cavitazione e termici

Effetti di cavitazione in organi/tessuti contenenti gas anche disciolti. Tali fenomeni, di tipo meccanico, sono in genere determinati dall'applicazione degli US in ambito estetico e medico.

Effetti termici su organi e tessuti.

Si riferiscono principalmente ad US a frequenze > 1 MHz.

L'assorbimento localizzato o diffuso di energia può provocare il riscaldamento del tessuto interessato, con entità dipendente dalla frequenza ultrasonica.

Il danno è funzione del calore accumulato e quindi della variazione di temperatura nel tessuto.

Basse frequenze

cavitazione

Principalmente in organi e tessuti contenenti gas

Alte frequenze

riscaldamento

Frequenze > 1 MHz
Riscaldamento dei tessuti
in funzione di intensità e frequenza

Valori del coefficiente di assorbimento per alcuni tessuti confrontati con quello dell'acqua e di altri materiali

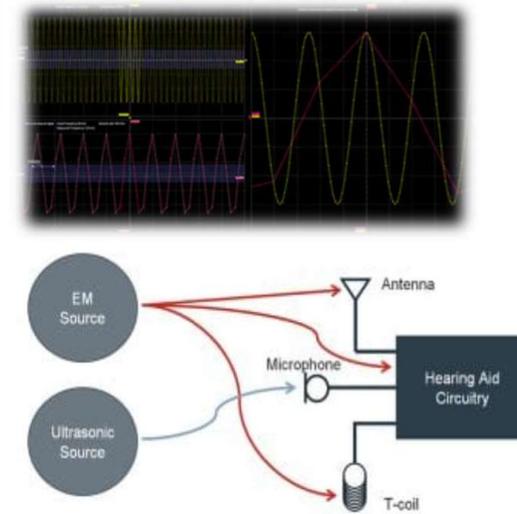
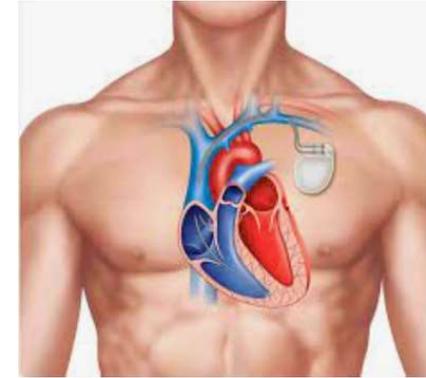
MATERIALE	Coefficiente di assorbimento α , a 1 MHz e 37 °C, (dB/cm)
Acqua	0,002
Olio di ricino	0,37
Polistirene	0,35
Perspex	2,0
Polietilene	4,7
Sangue	0,2
Milza	0,3
Muscolo	1,5 ÷ 2,5
Cervello	0,5
Fegato	0,7
Osso del cranio	10
Polmone gonfio	35

Effetti indiretti

Gli US potrebbero influire negativamente su dispositivi medici quali ad esempio protesi acustiche, lenti a contatto o pacemaker, determinando sui soggetti esposti effetti di tipo indiretto



Le interferenze generate da sorgenti ultrasoniche si manifestano nelle protesi digitali sotto forma di frequenze di aliasing, legate alla frequenza di campionamento della protesi digitale e dall'attenuazione del filtro antialiasing.



Soggetti particolarmente sensibili

Articolo 183 - Lavoratori particolarmente sensibili (Decreto legislativo n° 81, 9 aprile 2008)

Il datore di lavoro adatta le misure di cui all'articolo 182 (Disposizioni miranti ad eliminare o ridurre i rischi) alle esigenze dei lavoratori appartenenti a gruppi particolarmente sensibili al rischio

lavoratrici in gravidanza
minori

lavoratori che indossano protesi acustiche, lenti a contatto, pacemaker, soggetti ipoacusici;

alcuni individui possono risultare più suscettibili di altri all'insorgenza di disturbi per predisposizione individuale o altro.



Principali fattori che possono incrementare il rischio individuale e valutazione del rischio

- Predisposizione individuale o familiare
- Età
- Patologie croniche del tipo diabete ed ipertensione
- Fumo
- Patologie pregresse a carico dell'organo dell'udito
- Uso di farmaci ototossici (alcuni antibiotici, farmaci per il trattamento del cancro, diuretici, chinine, ecc). **Non è stato provato un effetto combinato di medicinali e US sull'udito**
- Esposizione a sostanze ototossiche (solventi, sostanze chimiche, solitamente inalate o assorbite attraverso la pelle, che possono raggiungere l'orecchio interno attraverso la circolazione sanguigna: tricloroetilene, xilene, stirene, toluene, esano e disolfuro di carbonio).
Non sono note curve dose risposta che consentano di quantificare l'incremento del rischio di esposizione agli US in presenza di sostanze ototossiche
- Esposizione a vibrazioni.
Non sono disponibili relazioni dose risposta che consentano di quantificare l'incremento del rischio di esposizione agli US in presenza di contestuale esposizione a vibrazioni mano braccio o al corpo intero

Per tutte le condizioni di incremento di rischio espositivo, la valutazione del rischio è da effettuarsi caso per caso.

Per i soggetti particolarmente a rischio è richiesto almeno il rispetto dei limiti fissati per la popolazione

Ruolo del medico competente e sorveglianza sanitaria

Sorveglianza sanitaria (SS): insieme degli atti medici di prevenzione atti a verificare:

- Compatibilità tra la salute dei lavoratori e l'esposizione ad un agente di rischio
- Permanenza della condizione di salute
- Valutazione sull'efficacia delle misure di prevenzione intraprese

L'obbligo di attivare la sorveglianza sanitaria nei confronti dei lavoratori esposti ad US scaturisce dai **risultati della valutazione del rischio-specifico**.



La SS andrà attivata, anche su richiesta del lavoratore, quando i livelli di esposizione presenti nel luogo di lavoro sono tali, allo stato attuale delle conoscenze, da indurre effetti, tipicamente per l'apparato uditivo.

Necessità di impartire un'efficace informazione/formazione aziendale sugli effetti dell'esposizione ad US, per rendere consapevole il lavoratore delle condizioni di rischio residuo e di suscettibilità individuale.



Grazie per
l'attenzione