

Marco Marinoni

ACUSTICA E PSICOACUSTICA MUSICALE

Lezione 4. Acustica degli strumenti musicali (2)

4.1 Il pianoforte

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

4.1.3 Vibrazione della tavola armonica

4.2 Il clavicembalo

4.3 La chitarra

4.1 Il pianoforte

- **Jean Marius**, 1716 presentò all'Accademia Reale delle Scienze di Parigi quattro progetti di *clavecins à mallets*, mai realizzati
- **Scipione Maffei** aveva già divulgato le potenzialità del *gravicembalo col piano e forte* di **Bartolomeo Cristofori**
 - Realizzato con corde percosse da martelletto

4.1 Il pianoforte

- Lo studio scientifico dell'acustica del pianoforte è opera di **Helmholtz**
 - *On the sensations of tone*, appendici: analisi teorica del funzionamento fisico degli strumenti, tra cui il caso della corda percossa da martelletto
- L'acustica del pianoforte ottocentesco non differisce da quella dei moderni gran coda

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- Il generatore sonoro del pianoforte è costituito da **una corda tesa e un martelletto che vi imprime energia**
- Dal tasto pigiato scaturisce una serie di eventi caratteristici della sonorità dello strumento, attraverso una serie di leveraggi, fino al **martelletto**
 - In origine ricoperto da vari strati di pelle di animale selvatico
 - La scelta della pelle variava la sonorità del transitorio d'attacco

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- 1821: meccanica a doppia ripetizione sui pianoforti **Erard**
- 1826: **H. Pape** sostituì la pelle con una guarnitura di feltro
- Estensione dalle quattro ottave di Cristofori alla versione standard di 88 tasti (da 27 a 4186 Hz)
- La potenzialità acustica raggiunge 0.1 W (livelli di intensità prossimi a 110 dB)

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- Una **corda metallica** è tesa tra due supporti, dalla **graffa metallica** al **capotasto**, passando per un punto vincolare posto sul **ponticello** della **tavola armonica**
- La corda può entrare in vibrazione solo nella zona libera tra graffa e ponticello
- La tavola armonica può sopportare questa compressione, moltiplicata per il numero delle corde, grazie alle **catene** che rinforzano il fondo della tavola.

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- Il contatto fisico con il martelletto produce una deformazione che induce una ridistribuzione energetica di movimento sulle due direzioni opposte rispetto al punto di contatto
 - Due onde si muovono in direzioni opposte
 - Poiché la corda è messa in vibrazione vicino alla graffa, una delle due onde sarà riflessa molto prima dell'altra
 - Una **serie di riflessioni dell'impulso viaggiante** si sommano all'oscillazione
 - Tante volte al secondo proporzionalmente alla **frequenza** stabilita dalla lunghezza della corda, dalla **tensione** e dall'**accordatore**

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- Le leggi che regolano la velocità di propagazione dell'impulso sono legate a
 - **Massa** della corda
 - **Tensione** della corda
 - **Lunghezza** della corda
- L'altezza di un suono è dovuta alla combinazione di questi fattori

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

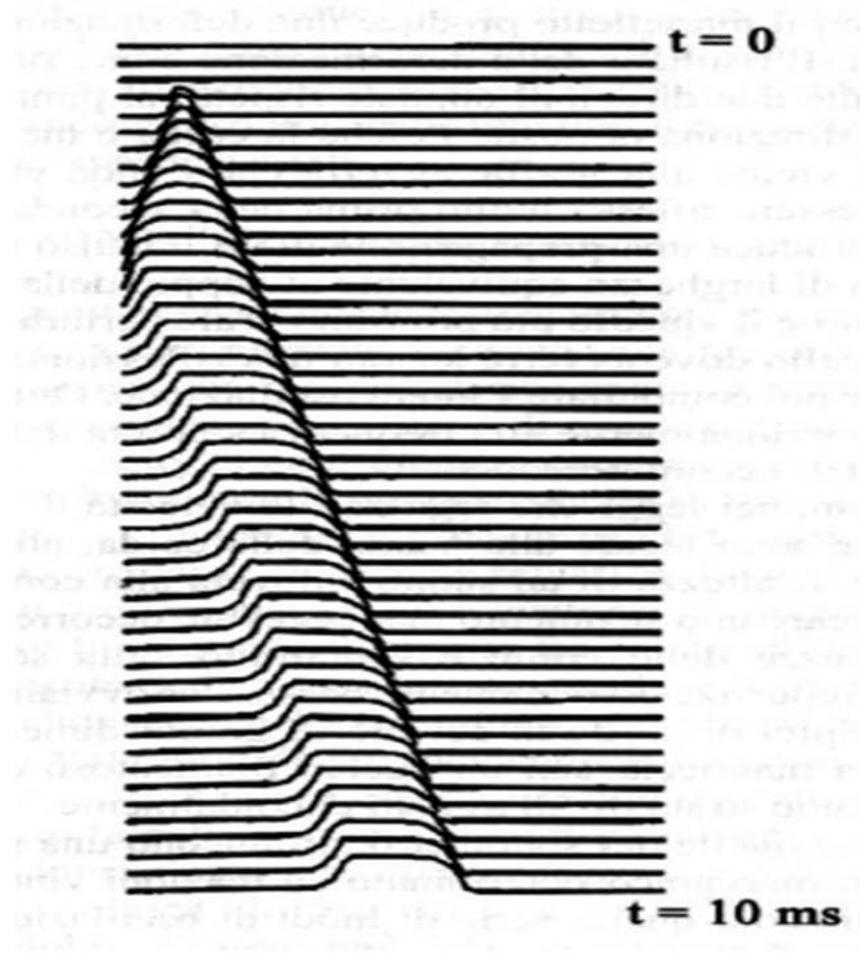
- Problema dell'**inarmonicità** e della **rigidità** delle corde gravi
 - Risolto mediante l'utilizzo di una struttura massiccia con un nucleo filamentoso centrale di piccole dimensioni, rivestito da uno strato di fili avvolti elicoidalmente
 - In teoria: nella corda vibrante esistono solo i modi di oscillazione che parte dalla fondamentale (fuso di mezz'onda) fino a n oscillazioni
 - L'altezza del suono percepito corrisponde alla frequenza fondamentale della serie

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- Nel pianoforte, le frequenze di risonanza delle corde non sono in proporzione armonica ma **differiscono leggermente per la presenza dell'inarmonicità**
- 1 : 2.0008 : 3.0025 : 4.011 : 5.078

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- Andamento nel tempo dell'impulso in una corda di pianoforte. La sequenza si sviluppa a intervalli di 200 microsec.



4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- La presenza di **inarmonicità** è avvertita soprattutto in pianoforti di piccola dimensione, come quelli di struttura verticale
- I pianoforti a coda compensano l'effetto per la maggiore lunghezza delle corde delle frequenze gravi

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- **Ampiezza e forma dell'impulso** dipendono dalla forza impressa al martelletto e da struttura e rigidità del feltro
 - Rigidità non lineare: il martelletto diventa più duro durante la fase di compressione contro la corda
 - Al crescere della compressione l'impulso diventa più netto
 - Estensione tonale verso le parziali di alta frequenza

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- **Il martelletto moderno**

- Presenta un modo di vibrazione intorno ai 250 Hz

- Non udibile per frequenze gravi
 - Contribuisce, per frequenze acute, come una presenza di componente percussoria del suono

- Da 3 a 12 grammi

- La massa aumenta regolarmente fino agli 80 Hz
 - Massa costante per tutta la prima ottava

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- Il **peso del martelletto** deve essere controbilanciato in modo da mantenere la stessa forza di appoggio in rapporto al tempo di contatto con la corda
 - Regione critica tra sol 4 e sol 6
 - Tempo di contatto con la corda = tempo di percorrenza del primo impulso
 - Se il martelletto si presenta ancora alla corda all'arrivo del primo impulso riflesso si ha uno scadimento del suono

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- **La durezza del martelletto** incide su
 - Intensità sonora
 - Brillantezza
 - Qualità dello strumento
- Le superfici si lavorano anche dopo il montaggio dei feltri, per garantire la giusta coloritura sonora

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- All'atto della sollecitazione **la corda contiene un numero infinito di parziali** che potremmo immediatamente udire se non esistesse un **problema fisico legato alla dimensione dell'oscillatore**
 - La corda irradia efficacemente il suono solo se accoppiata alla tavola armonica attraverso il ponticello
 - Ma i due oscillatori oppongono una **diversa resistenza alla radiazione (disadattamento d'impedenza tra corda e tavola)**
 - Parte dell'energia vibrazionale rimane intrappolata nella corda

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- L'incremento della massa della tavola (che aumenterebbe l'impedenza meccanica) produrrebbe un aumento dell'inarmonicità
- Il problema si risolve attraverso il **rivestimento della corda o triplicando il numero delle corde che incidono su uno stesso martelletto**
- Resta il **problema del rapido decadimento dell'energia del sistema vibrante**
 - Al pianoforte non è possibile fornire energia in maniera continua (es. violino)

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- **Alle frequenze gravi la tavola vibra come un unico oscillatore.** La spinta verso l'alto dell'aria è controbilanciata dalla depressione sottostante la tavola
 - Continuo scambio tra parte alta e parte bassa della tavola
- Questo impedisce una efficace trasmissione frontale delle perturbazioni ondose
 - Il problema si risolverebbe con la chiusura della scatola (es. chitarra) o con una sospensione pneumatica della tavola.

4.1.1 Corda, martelletto, tavola armonica

- Questo fenomeno si chiama **cortocircuito acustico**
 - Può presentarsi anche per le frequenze acute come **interazione tra aree adiacenti vibranti in controfase**

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Il meccanismo che governa l'impressione sonora di un pianoforte è la posizione del contatto del martelletto rispetto all'intera lunghezza libera della corda oscillante
- Rapporto d/L
 - d = distanza dal più vicino supporto (le graffe metalliche)
 - L = lunghezza dell'intera corda utile

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- **Bartolomeo Cristofori**
 - $d/L = 1/5$
- **Pianoforte ottocentesco**
 - $d/L =$ da $1/7$ a $1/9$
- **Pianoforte moderno**
 - $d/L = 1/8$ fino all'ottava centrale
 - Si riduce nelle frequenze acute fino a $1/17$ per l'ultima ottava

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Trovare la voce migliore del pianoforte è un **compromesso che si gioca tra la caratteristica del martelletto e la posizione del contatto con la corda**
 - Per le frequenze acute minore è il rapporto d/L e più bassa è la qualità del suono
 - Percuotendo la corda in un **punto nodale** si ottiene una riduzione o l'annullamento della frequenza parziale corrispondente

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Le corde montate all'interno della cassa armonica sono tenute insieme dal **telaio**
 - Fino al XIX sec. spesso in **legno**
 - Dalla fine del XIX sec. i telai sono in **ghisa**
 - Maggiore stabilità d'intonazione
 - Maggiore affidabilità alla deformazione per tensione (applicata agli estremi)
 - Inizialmente 8000 N
 - Oggi 210000 N

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Il **telaio** ha bassissima efficienza di radiazione
 - Il suo compito è quello di tenere insieme le corde
- La **tensione** delle corde non è regolare per tutta l'estensione
 - Nella prima ottava si possono superare tensioni di 1500 N per corda

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Le corde presentano diversi modi di vibrazione
 - Il principale è rappresentato dalla frequenza fondamentale (vibrazione **trasversale**) generata dalla sollecitazione del ponticello
 - Direttamente proporzionale al carico tensorio
 - Inversamente proporzionale alla lunghezza della corda

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Le corde presentano diversi modi di vibrazione
 - Vibrazione **longitudinale** (lungo la corda) associata a periodiche compressioni del materiale
 - Per valori di frequenza 10-15 volte superiori rispetto alla fondamentale
 - Non è influenzata dalla tensione ma solo dalla lunghezza vibrante

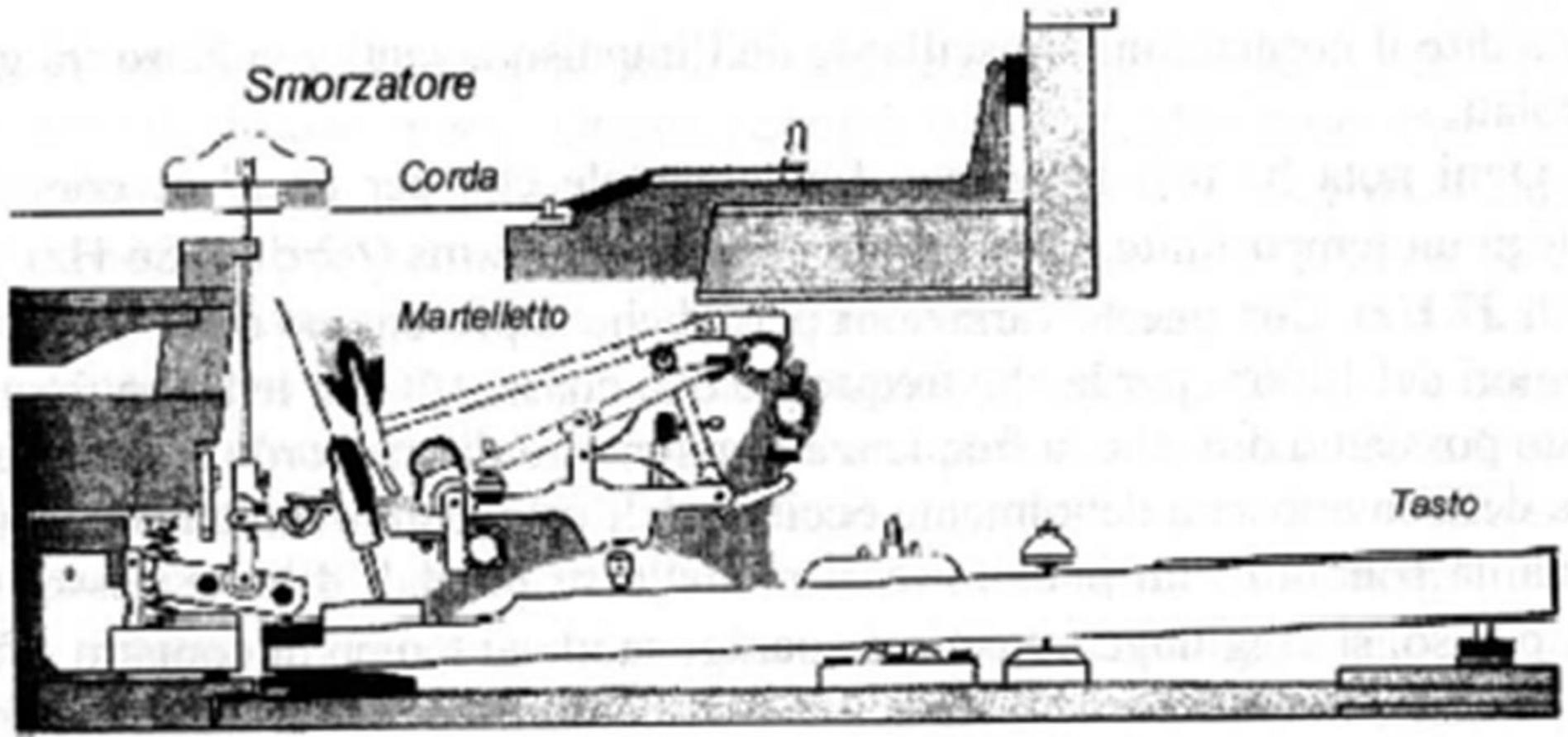
4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- La meccanica del pianoforte funziona da interfaccia tra le dita a contatto coi tasti e l'urto con la corda
 - Premendo il tasto si trasmette energia meccanica a una serie di manovellismi dello scappamento, dello smorzatore fino alla leva del martelletto che muove verso la corda
 - Una parte di questo movimento sgancia la leva del martelletto in un impulso dal libero movimento, **non soggetto a ulteriore controllo da parte del pianista**

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Contatto dito-tasto → intervento dello smorzatore → contatto martelletto-corda → tasto completamente abbassato
- Tempo di contatto martelletto-corda: **2 ms**
- Lo smorzatore
 - lascia la corda **15 ms prima**
 - Ritorna ad annullare il suono **50 ms dopo**

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione



4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Nel *mf* il contatto martelletto-corda dura 2.5 ms
 - Il tasto arriva a fine corsa 1 ms dopo l'inizio del contatto martelletto-corda
- Nel *p* il contatto martelletto-corda dura 3.5 ms
 - Il tasto arriva a fine corsa 8 ms più tardi che nel *mf*
 - Nel *ppp* si arriva a un ritardo di 20 ms

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Il **tempo di contatto** martelletto-corda aumenta leggermente al diminuire della **dinamica**
- L'**impulso** determinato dal contatto martelletto-corda non si comporta in modo lineare
 - **ff**: 145 N, 0.22 ms (larghezza d'impulso)
 - **pp**: 12 N, 0.47 ms

Il feltro del martelletto ha cambiato le sue caratteristiche meccaniche, divenendo durante l'urto sempre più rigido e riducendo in tal modo la durata dell'impulso

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Ogni nota ha una frequenza fondamentale che per oscillare completamente impiega un tempo finito, che varia tra 0.12 ms ($t/2$ di 4186 Hz) e 18.5 ms ($t/2$ di 27 Hz)
- **Sovrapposizioni**
 - Frequenze acute: > 1000 %
 - Frequenze gravi: 10 %

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- La frequenza di risonanza di una corda con il periodo di oscillazione più corto del tempo di contatto corda-martelletto sarà debolmente eccitata dall'urto
- Ne segue che **la qualità sonora di un pianoforte si modella su parziali di note basse**
 - Nelle quali il periodo di oscillazione eguaglia il tempo di contatto corda-martelletto solo a partire dalla 10° parziale

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- L'influenza dei vari tipi di **tocco pianistico** si ripercuote sui comportamenti meccanici di tasto e martelletto
- Nel *mf* la massima velocità raggiunta dal tasto è 0.3 - 0.5 m/s e la velocità impressa al martelletto è 2.5 m/s
- Nel *f* la velocità impressa al martelletto raggiunge i 5-6 m/s

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Gli interventi che il pianista può eseguire si riducono all'influenza sulla velocità finale del martelletto
- Nell'ultima fase di *lancio* dell'asta del martelletto si possono presentare diverse configurazioni oscillatorie prima del contatto con la corda
 - **La risonanza del martelletto è memoria dello stato fisico precedente (→ tocco pianistico)**

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Senza la tavola armonica le corde presentano **decadimento energetico** dovuto a
 - Attriti interni al materiale
 - Dissipazione viscosa con il mezzo circostante
 - Diretta radiazione sonora
- L'accoppiamento corda-tavola armonica genera un'emissione sonora forte ma di rapido decadimento
 - Per questo si usano corde accoppiate (doppie o triple) per buona parte del registro (medio e acuto)

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- **Decadimento energetico**
 - Due differenti contributi vibratorii (un suono iniziale e un suono successivo)
 - Prima parte: elevata pendenza (rapida estinzione)
 - Seconda parte: minore pendenza, in cui l'energia immagazzinata dalla corda durante l'urto permane per un tempo prolungato
 - La permanenza del **suono secondario** è dovuta al meccanismo delle corde multiple

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Due modi distinti di vibrazione
 - Polarizzazione verticale
 - Dovuta all'urto del martelletto
 - Decadimento rapido
 - Polarizzazione orizzontale
 - Dovuta all'accoppiamento delle corde
 - Decadimento lento
 - Le corde accoppiate sono colpite dallo stesso martelletto e possono vibrare in fase, con movimento simmetrico o **antisimmetrico**
 - » In questo caso il decadimento sarà molto lento (si annulla la forza esercitata sul ponticello)

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- Nella polarizzazione orizzontale le corde accoppiate vibrano con movimento antisimmetrico a causa delle piccole imperfezioni della testa del martelletto
 - L'iniziale **scostamento di fase** diviene **stato asimmetrico**
- In un modello ideale non si produrrebbe alcun suono
- Nel modello reale la **lievissima necessaria scordatura delle corde accoppiate** crea un'efficace trasmissione sonora con la tavola armonica

4.1.2 Urto della corda e sua vibrazione

- **La scordatura in questo caso non comporta necessariamente battimento poiché le corde sono accoppiate attraverso il ponticello non perfettamente rigido**
 - Il **punto nodale** della corda si sposta oltre il vincolo geometrico (il ponticello) e la corda si abbassa di frequenza
 - La presenza della seconda corda influenza la lettura dell'**impedenza del ponticello**

4.1.3 Vibrazione della tavola armonica

- Da quando l'asta del martelletto è catapultata contro la corda, inizia il percorso che porterà lo strumento ad esprimersi attraverso l'irraggiamento sonoro della **tavola armonica**
 - Leggermente **arcuata** e di forma irregolare
 - **Sostenuta** dai bordi esterni
 - **Irrigidita** da una serie di catene disposte sotto di essa

4.1.3 Vibrazione della tavola armonica

- **Strumenti antichi:**
 - Spessore 3.5mm, legno di cipresso
- **Strumenti moderni:**
 - Spessore tra 6.5 e 9.5 mm, serie di tavole di abete prive di imperfezioni o nodi, incollate assieme

4.1.3 Vibrazione della tavola armonica

- La tavola armonica, per mezzo del ponticello, riceve l'impulso della corda (dotata di ampia serie di parziali) e **trasforma l'energia vibrazionale in suono irradiato**
 - Agendo come **un grande diaframma vincolato ai bordi** che presenta, all'atto della vibrazione, una serie di **risonanze**
 - di intensità variabili
 - Associate al punto di eccitazione superficiale

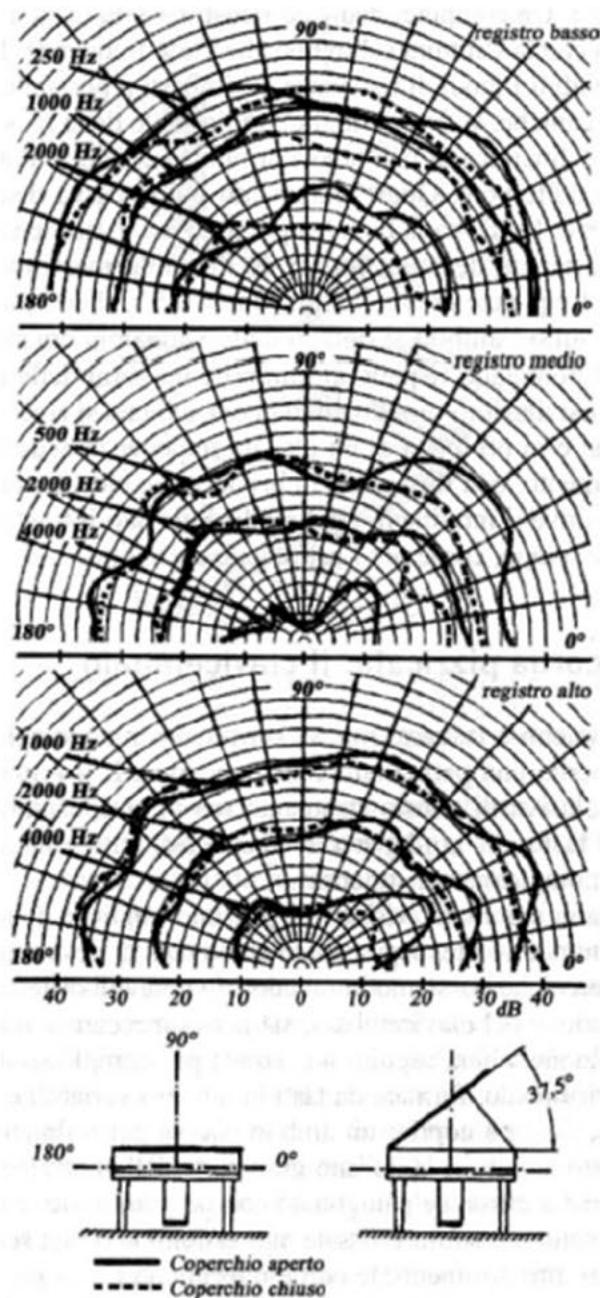
4.1.3 Vibrazione della tavola armonica

- **Diaframma teorico:**
 - L'efficienza di radiazione aumenta in funzione della frequenza, con un massimo nella regione acuta
- **Diaframma reale:**
 - Elevate perdite di energia durante la flessione della tavola, che riducono l'irraggiamento sonoro a cominciare da 1 kHz

4.1.3 Vibrazione della tavola armonica

- **Regione acuta:**
 - Le zone di irraggiamento si frammentano in piccole aree con fase opposta
 - → perdita di energia irraggiata verso l'esterno
- **Regione grave:**
 - Cortocircuito acustico
- La zona di maggiore irraggiamento acustico si trova tra 100 Hz e 1.5 o 2 kHz

4.1.3
Vibrazione
della tavola
armonica –
diagrammi di
irraggiamento
direzionale
misurati in
camera
anecoica
(Meyer, 1978)



4.1.3 Vibrazione della tavola armonica

- Alta impedenza:
 - Una forza elevata deve essere spesa per raggiungere un certo valore di velocità
- Bassa impedenza:
 - La stessa velocità può essere raggiunta da una forza minore
- La più bassa frequenza alla quale una tavola armonica può vibrare è chiamata **primo modo di risonanza**
 - In corrispondenza del primo modo di risonanza si misura la minore impedenza acustica

4.1.3 Vibrazione della tavola armonica

- Nei pianoforti a coda (290 cm) si riscontrano una serie di risonanze corrispondenti a diversi modi di oscillazione della tavola
 - **Primo modo:** 50 o 60 Hz
 - **Secondo modo:** 70 o 90 Hz
 - **Terzo modo:** 90 o 105 Hz

4.1.3 Vibrazione della tavola armonica

- **La reazione dinamica di una tavola armonica conduce alla modifica del tempo di decadimento delle note**
 - Curva discendente dalle basse alle alte frequenze
- **Ottava bassa: $t_d = 6$ o 7 s**
- **Ottave acute: $t_d = 0.5$ s**
 - Per un decadimento di 20 dB dalla intensità di picco

4.2 Il clavicembalo

- L'evoluzione del clavicembalo ha seguito una strada più complessa di quella del pianoforte, sotto i punti di vista di
 - Meccanica
 - Forma
 - Ornamentazione
- Tastiera con numero di tasti variabile
 - In genere dal La_1 al Fa_6

4.2 Il clavicembalo

- L'interno della cassa differisce da quello del pianoforte
 - Corde più sottili e fissate agli estremi con una serie di **piroli di accordatura**
 - Le corde imprimono energia a un **lungo ponticello disposto sulla tavola armonica**
 - Corde a 4 piedi (ottava più alta) e 16 piedi (ottava più bassa)
 - Corde aggiuntive per variare intensità e timbro
 - Leve per i **registri** accanto alla tastiera
 - Possibilità di avere **2 tastiere**

4.2 Il clavicembalo

- **Meccanica:**

- Una serie di saltarelli appoggiati sulle leve dei tasti

- Quando il tasto viene pigiato, il saltarello sale verticalmente accanto alla corda portando a contatto dinamico un piccolo becco di plettro che pizzica, strisciando, la corda posta sul suo cammino
- **Plettro:** penna di animale (anticamente), nylon o delrin (oggi)

4.2 Il clavicembalo

- **Meccanica:**

- Scendendo, il plettro quando sente la presenza della corda arretra insieme al suo legnetto di sostegno (**bilancino**), quindi ritorna in posizione grazie a una piccola molla
 - In questo modo la nota non viene pletrata 2 volte
- Al rilascio del tasto, il saltarello si appoggia sulla corda tramite un feltro smorzante che annulla le vibrazioni

4.2 Il clavicembalo

- Nei clavicembali a **due tastiere**, una seconda serie di saltarelli è posizionata in una zona diversa della corda
 - Sonorità più vellutata, con meno parziali acute (*registro di liuto*)
- **Strumenti moderni:**
 - lunghezza della corda = $1/f$ per le ottave acute
- Diametro di $la_4 = 0.4\text{mm}$ (3 volte inferiore a quello del pf)
- Tensioni applicate = 40 N (15 volte inferiore al pianoforte)

4.2 Il clavicembalo

- Le corde sono pizzicate a una distanza dal bordo che varia per frequenze gravi e acute
- Per ovviare a **problemi di non linearità delle corde** si tende ad allungare la reale lunghezza, portando il materiale al limite di rottura

4.2 Il clavicembalo

- **Non è possibile variare il tocco** se non intervenendo sulla rapidità del contatto con il tasto
 - Necessita grande esperienza
- Premere il tasto di un clavicembalo è un'esperienza del tutto diversa dalla continuità dinamica di un tasto pianistico
 - È come **pizzicare una chitarra a distanza**

4.2 Il clavicembalo

- La **tavola armonica** ha forma quasi triangolare ed è molto sottile (non supera i 3mm di spessore)
 - Irrigidita da una serie di listelli di incatenatura nella parte inferiore
 - Irraggia l'energia sonora ricevuta dalle corde, dopo una perdita per dissipazione interna con una frequenza corrispondente al campo tra 50 Hz e 10 kHz
 - Non tutte le frequenze sono efficacemente irradiate
 - Contributo sonoro inesistente sotto i 30 Hz
 - Elevata efficienza tra 100 e 500 Hz
 - Sopra: degrado costante di 10 dB per ottava

4.2 Il clavicembalo

- Si tratta di strumenti pensati per **piccoli ambienti**, inadatti all'uso nei teatri, con orchestra o amplificazione elettroacustica
- Ogni clavicembalo ha la propria caratteristica acustica legata a
 - Dimensioni
 - Tipo di corde
 - Plettro
 - Esecuzione (in parte)



Clavicembalo di Giovanni Battista Giusti, Ferrara 1679. Tavola armonica di cipresso, bordata da cornice, ponticelli di noce (Collezione Luigi Ferdinando Tagliavini, Bologna)

Marco Marinoni - Conservatorio
"L. Marenzio" di Brescia

4.3 La chitarra

- Si è affermata soprattutto per opera dei compositori del XIX secolo e per la fantasiosa vena costruttiva dei grandi liutai spagnoli
- Non differisce oggi molto dallo strumento originario del XVI secolo
- **Sei corde tese sopra una cassa armonica dotata di foro**
 - 82, 110, 147, 196, 247 e 330 Hz

4.3 La chitarra

- Molte varianti strumentali esistenti
 - Differenti per l'**incatenatura**
 - Struttura reticolare di sostegno alla tavola armonica
 - Responsabile dell'equilibrio statico tensionale della cassa armonica
 - Caratterizza la risposta vibratoria della cassa, dovuta alla trasmissione dell'impulso proveniente dalla corda pizzicata

4.3 La chitarra

- **Manico:**
 - Presenta una serie di traversine metalliche delimitanti il tasto, secondo una spaziatura legata alla distanza dal ponticello
 - Incremento frequenziale di un semitono
- **Cassa armonica:**
 - Legno di acero per la tavola superiore
 - Legno duro (mogano, rosewood, acero, ebano, cedro) per le altre parti dello strumento

4.3 La chitarra

- In genere si monta il **tasto successivo** a una distanza che riduce la distanza dal ponticello di circa 1/18
- Le **tavole della cassa** hanno spessore di 2.5 mm ca. e sono montate senza l'interposizione dell'anima, grazie all'ampia struttura delle **fasce perimetrali**

4.3 La chitarra

- Sistema fisico formato da **vibratori accoppiati**
 - Corde pizzicate
 - Ponticello che funge anche da cordiera
 - Tavola armonica
 - Cavità della cassa
 - Foro
 - Tavola di fondo

4.3 La chitarra

- La sonorità dipende principalmente dalla **tavola frontale**
- Il **fondo** ha un apporto più ridotto
 - Ma contribuisce alla formazione delle frequenze gravi
- A frequenze acute la meccanica del ponticello e l'urto con la corda contribuiscono in modo significativo alla marcatura timbrica dello strumento
 - Ma non esistono riferimenti costruttivi assoluti

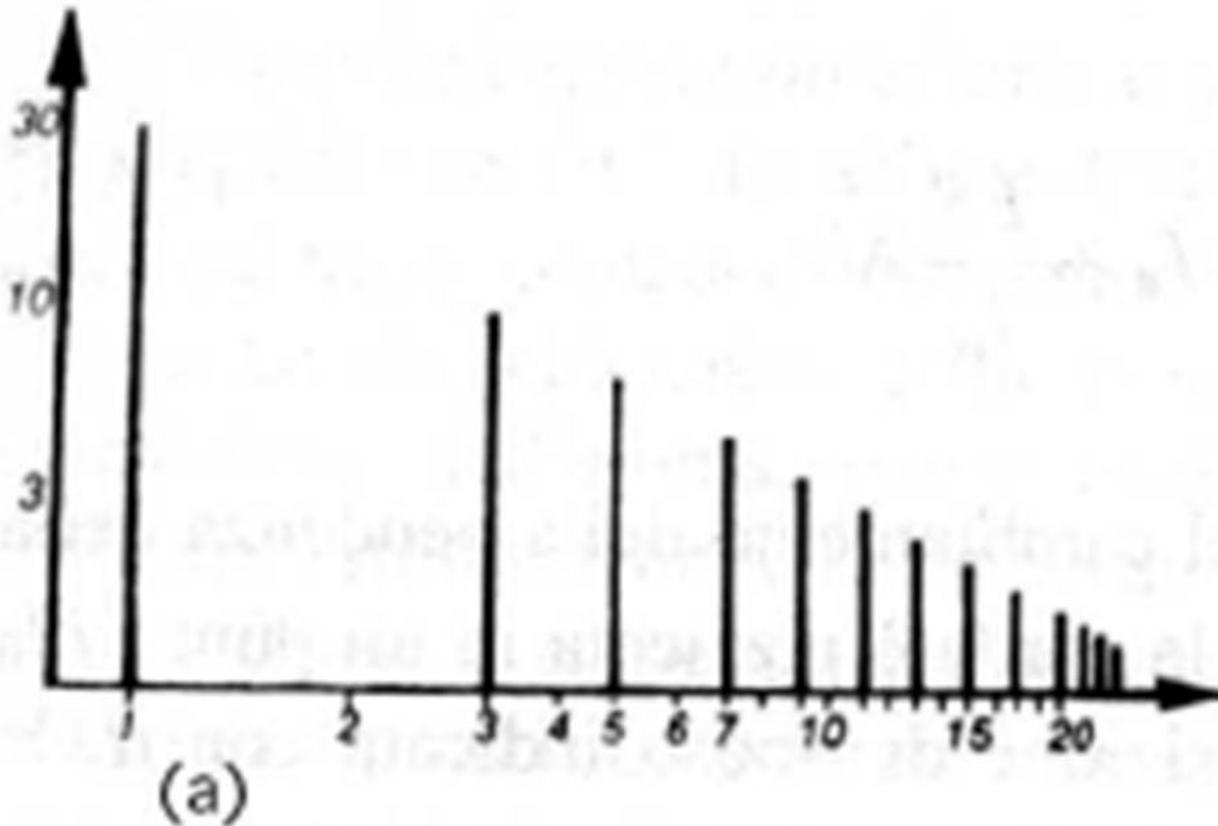
4.3 La chitarra

- Si individuano le caratteristiche comuni tipiche di una famiglia di strumenti
 - Chitarra **classica**
 - Chitarra **folk**
 - Chitarra **flamenco**
 - Chitarra **elettrica**
 - Produce suono solo per interazione elettromagnetica tra corde metalliche e piccoli rocchetti di avvolgimento elettrici posti nelle vicinanze del ponticello
 - L'incidenza del sistema elettrico di amplificazione è superiore alle caratteristiche proprie del sistema meccanico

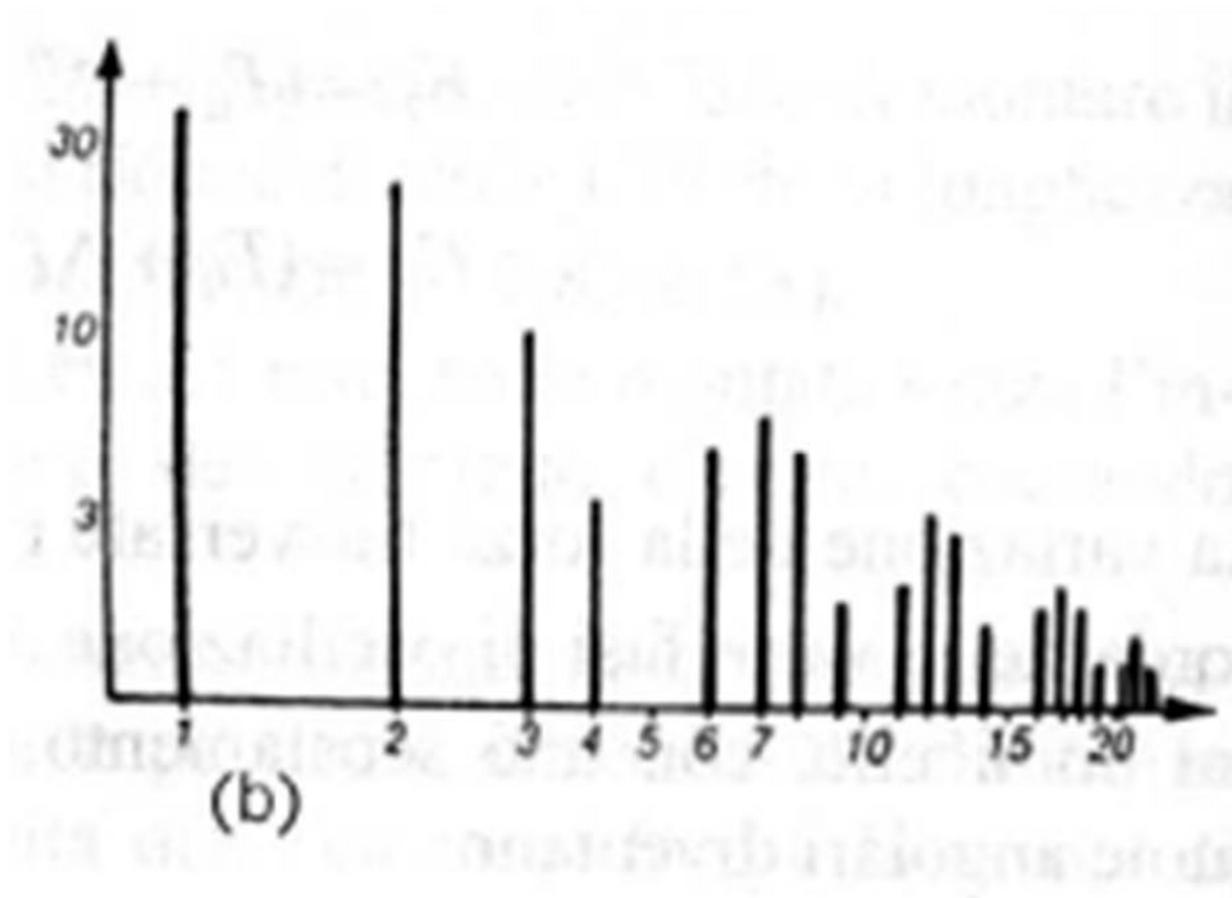
4.3 La chitarra

- La risposta risonante di una chitarra classica dipende dalle **vibrazioni della tavola** unite alla **risonanza di Helmholtz dell'aria** parzialmente racchiusa nella cavità
- La corda può essere sollecitata a diverse distanze dal ponticello
 - Ne derivano diverse **strutture spettrali**
 - Figura [Slide 70]: posizione centrale
 - Figura [Slide 71]: $1/5$ della lunghezza della corda
 - Figura [Slide 72]: $1/20$, *al ponticello*

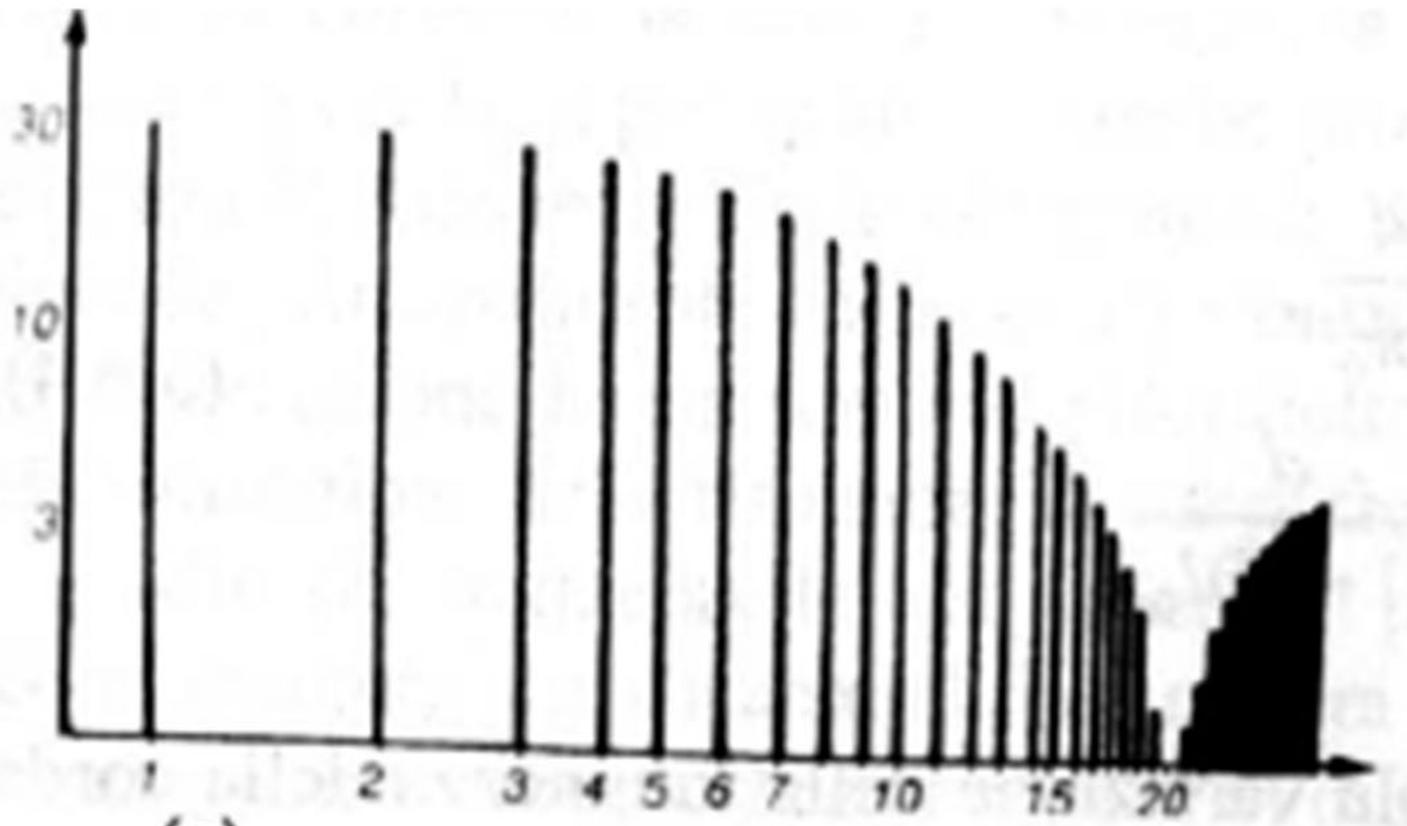
4.3 La chitarra



4.3 La chitarra



4.3 La chitarra



(c)

4.3 La chitarra

- **Teoria della corda sollecitata:**
 - si produce l'annullamento dell'armonica corrispondente alla posizione del contatto
 - Posizione centrale: si perde la seconda parziale
 - A 2-3 cm dal ponticello: si perdono le parziali di ordine elevato
 - Rimodellamento della sonorità verso caratteristiche più metalliche e cristalline

4.3 La chitarra

- Ampia scelta di **corde** che variano per
 - Lunghezza
 - Diametro
 - Proprietà intrinseche
 - Massa per unità di lunghezza
- Corde di **nylon**
 - Tensioni variabili tra 50 e 80 N
- Corde **d'acciaio**
 - Tensioni tra i 100 e i 180 N

4.3 La chitarra

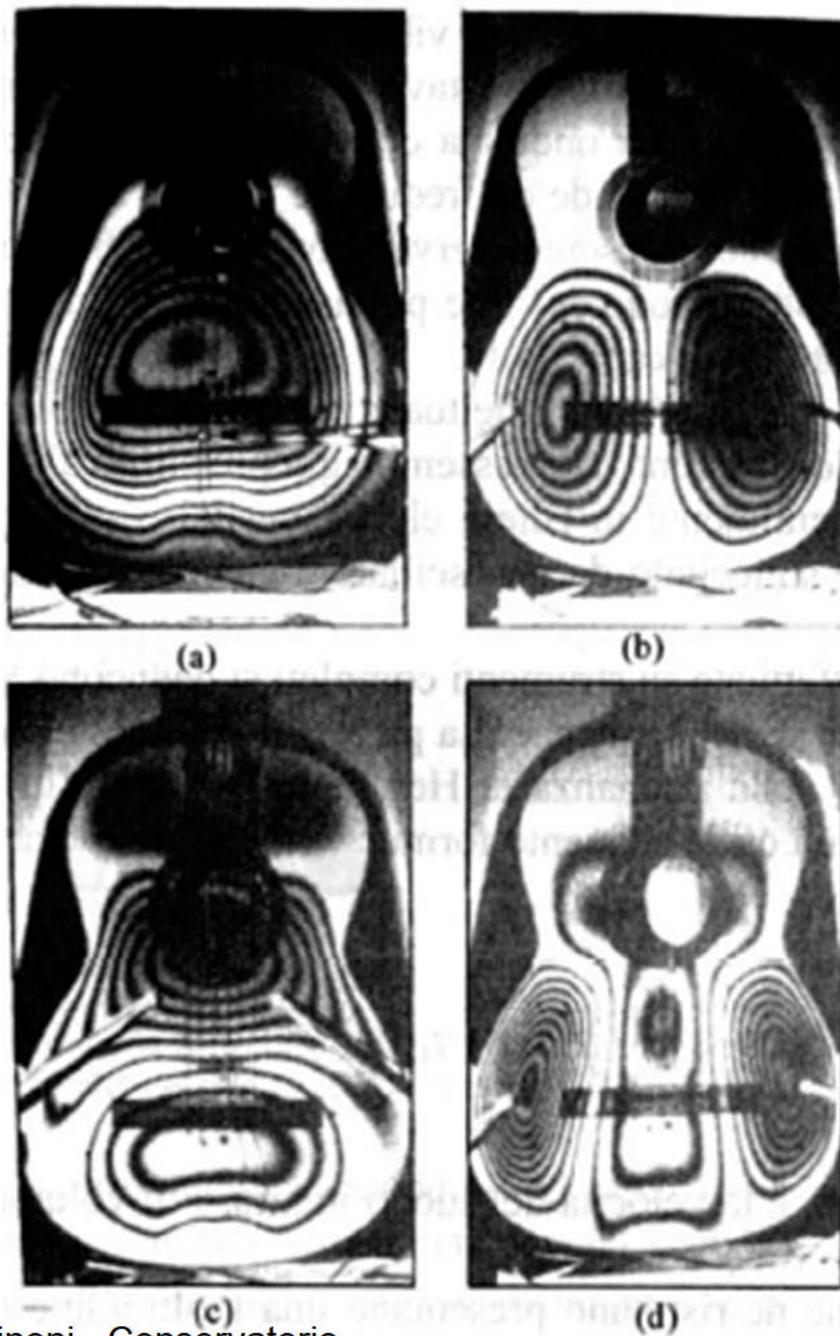
- La tavola armonica vibra in una serie di modi che in genere partono da 50 Hz
- La frequenza fondamentale dello strumento (**risonanza di Helmholtz**) può essere calcolata con la formula
 - c = velocità del suono in aria
 - V = volume della cassa in m^3
 - S = area di apertura in m^2

$$f_0 = 0,17c \frac{\sqrt[4]{S}}{\sqrt{V}}$$

4.3 La chitarra

- Il più basso modo di risonanza della tavola armonica si colloca in genere un'ottava sopra la risonanza di Helmholtz
- Figura [slide 77]: registrazioni olografiche relativamente ad alcune frequenze modali della tavola
 - Le linee nere indicano i contorni di vibrazione di uguale ampiezza

- A: 216 Hz
- B: 268 Hz
- C: 431 Hz
- D: 553 Hz



4.3 La chitarra

- **Risposta in frequenza: due risonanze e un'antirisonanza**
 - 1: flusso d'aria verso l'esterno del foro in fase con il movimento verso l'interno della cavità della tavola
 - 2: seconda risonanza della tavola
 - 3: antirisonanza della frequenza di Helmholtz