



# Psicoacustica

## Parte 3

---

Prof. Filippo Milotta  
milotta@dmi.unict.it



# Timbro percepito (dal testo)

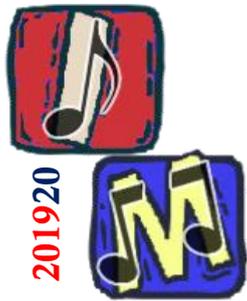
- Il timbro descrive la *qualità* di un suono, cioè quel parametro che permette di distinguere due suoni con la stessa altezza e volume
  - Il principale determinante fisico del timbro è la forma d'onda, cioè il contenuto armonico del suono (involuppo, transitori, e fenomeni di vibrato/tremolo)
  - Il contenuto armonico è particolarmente importante per il timbro soprattutto per suoni che rimangono costanti (sostenuti)
  - Nella lingua parlata, quali suoni possono essere sostenuti?



# Timbro percepito

## Le formanti delle vocali

- Le vocali (a differenza delle consonanti) possono essere sostenute
- Il contenuto armonico delle vocali è caratterizzato dalle **formanti**: specifiche distribuzioni di energia sulle frequenze, che caratterizzano ciascuna vocale
- Esercizio 2.6.3 →



# Esercitazione Pratica

## (dal testo)

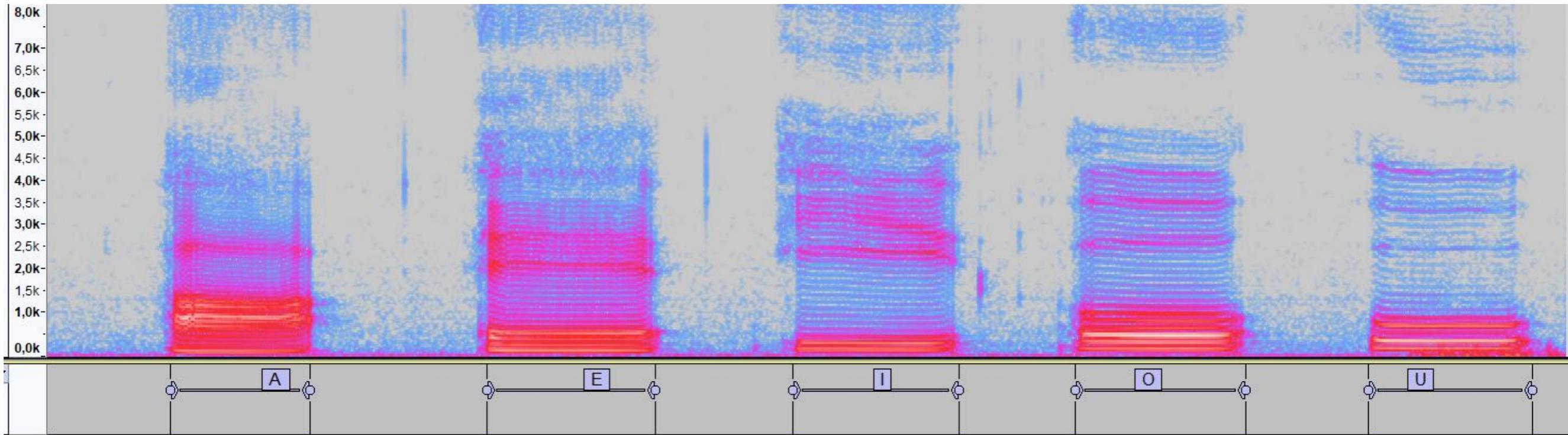
- 2.6.3 – Registrare una vocale e individuare le formanti  
In un editor audio registrare in successione le vocali usando un microfono
  - Visualizzare la traccia come sonogramma
  - Osservare le principali regioni delle frequenze formanti:
    - A: 800-1200 Hz
    - E: 400-600 Hz e 2200-2600 Hz
    - I: 200-400 Hz e 3000-3500 Hz
    - O: 400-600 Hz
    - U: 200-400 Hz



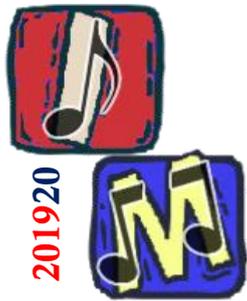
# Esercitazione Pratica

(un esempio di risultato)

## ■ 2.6.3 – Registrare una vocale e individuare le formanti



- Osservare le principali regioni delle frequenze formanti:
  - A: 800-1200 Hz
  - E: 400-600 Hz e 2200-2600 Hz
  - I: 200-400 Hz e 3000-3500 Hz
  - O: 400-600 Hz
  - U: 200-400 Hz



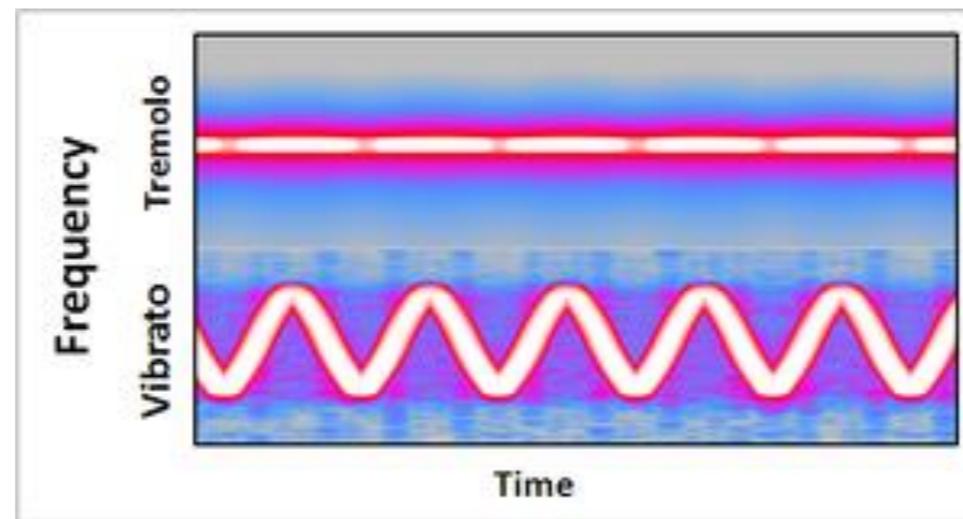
# Timbro percepito

## Tremolo e Vibrato

- Oltre che dai transitori e dal contenuto armonico, i contributi fondamentali al timbro possono essere modificati dall'eventuale presenza di vibrato / tremolo
- Tremolo:
  - Variazione periodica dell'ampiezza di una nota (modulazione di ampiezza)
- Vibrato:
  - Variazione periodica dell'altezza di una nota (modulazione di frequenza)



Esempi audio di tremolo su Wikipedia

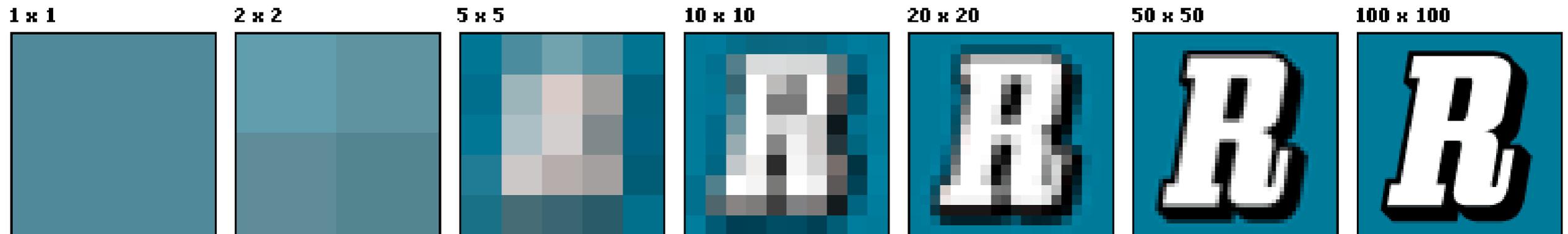


Esempi audio di vibrato su Wikipedia



# Approfondimento: la Risoluzione nelle immagini

- La *risoluzione grafica* indica la densità di pixel in un'immagine  
→ Una **maggiore risoluzione** significa che saremo in grado di **distinguere più dettagli**





# Risoluzione in Frequenza

- L'orecchio ha un funzionamento tonotopico
- In teoria, ogni zona dell'orecchio dovrebbe rilevare una specifica frequenza, tuttavia
  - I suoni che giungono all'organo di Corti non sono mai perfettamente puri
  - La zona di attivazione sulla membrana basilare non è puntiforme:
    - Più frequenze ricadono nella stessa regione
- Si parla allora di **Risoluzione in Frequenza**
  - Capacità discriminatoria del sistema uditivo

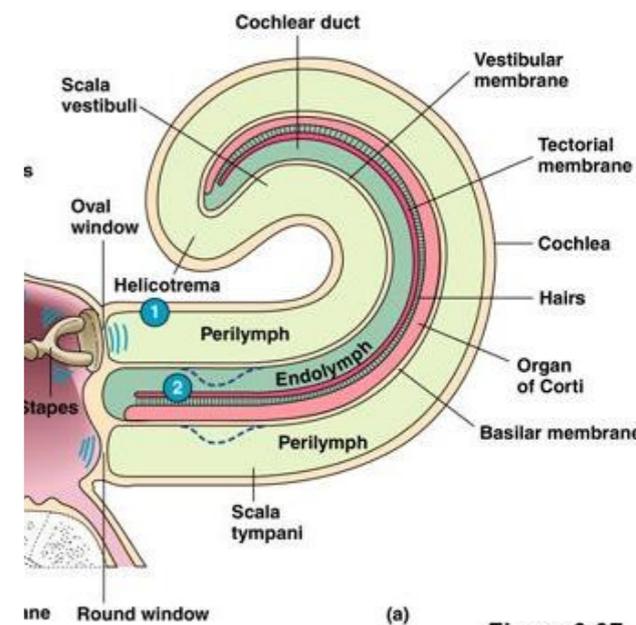
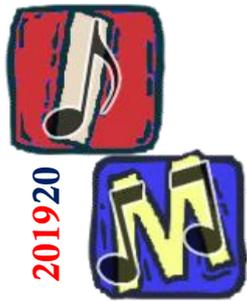


Figure 6-37

Una maggiore Risoluzione in Frequenza significa che saremo in grado di distinguere più dettagli



# Mascheramento e Banda Critica

## (dal testo)

- Come calcolare l'ampiezza di banda dei filtri uditivi?
  - Il fenomeno psicoacustico che permette la rilevazione è detto **Mascheramento**
    - Un segnale forte maschera un segnale debole
  - Un effetto simile è la **Cattura**, che si verifica nella radio
    - quando una stazione *forte* impedisce la ricezione di una stazione *debole*
- L'ampiezza di banda con cui lavorano i filtri uditivi ha assunto il nome di **banda critica ...**



# Mascheramento e Banda Critica

(dal testo)

## ■ Banda Critica:

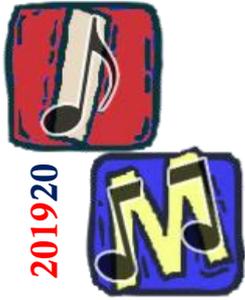
- ❑ È la gamma (=intervallo) di frequenze all'interno della quale si verificano fenomeni di mascheramento
- ❑ I suoni possono essere discriminati solo quando ricadono in differenti bande critiche
- ❑ Le bande critiche sono tutte uguali?
- ❑ Quanto sono grandi?
- ❑ Quante bande critiche esistono?

Risponderemo più avanti a queste domande



# Mascheramento

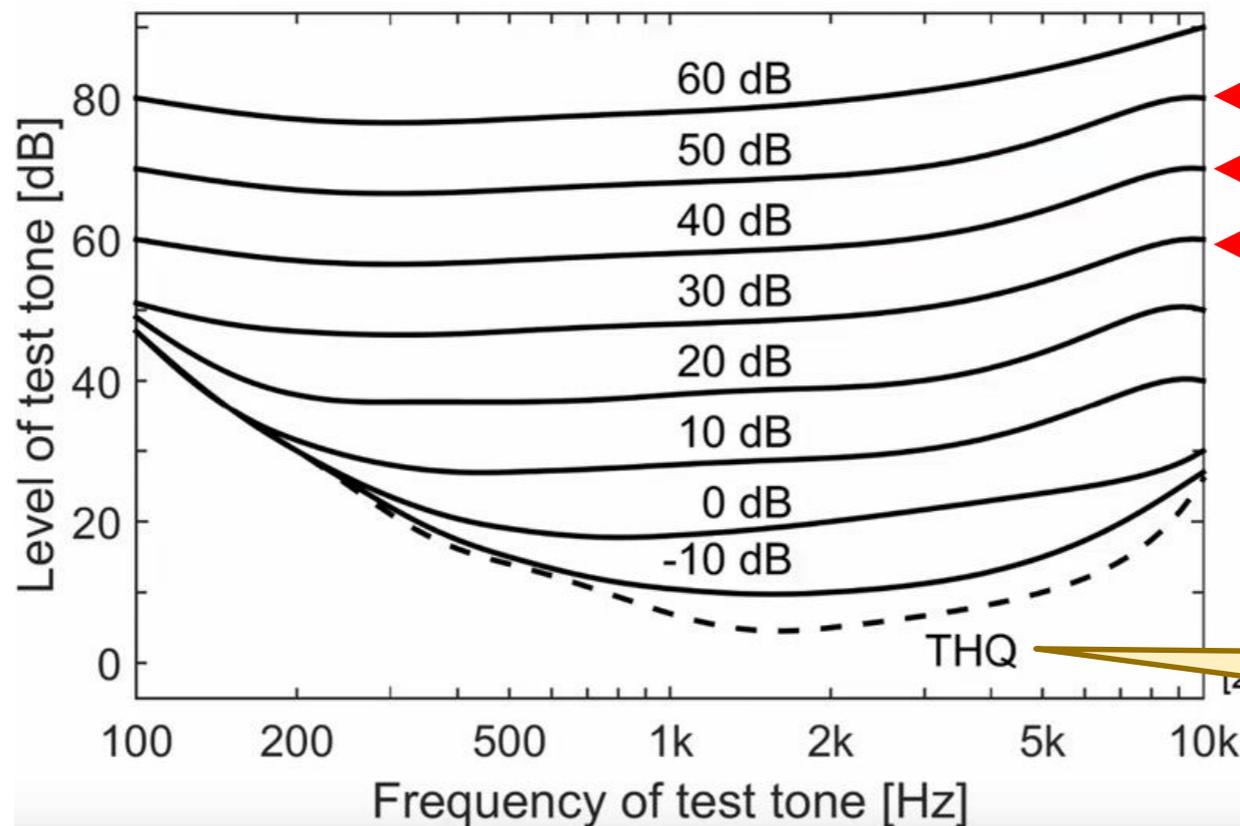
- Distinguiamo 2 tipi di mascheramento:
  - **Tonale:**
    - Il mascheramento avviene con un tono (tono semplice o complesso, cioè con più toni semplici)
  - **Non Tonale:**
    - Il mascheramento avviene con un rumore (a banda larga o stretta)



# Mascheramento Non Tonale

## Rumore bianco a banda larga

- Il rumore maschera abbastanza uniformemente tutte le frequenze
- Ogni 10dB di incremento d'intensità del rumore, affinché il tono (*test tone*) rimanga udibile anche quest'ultimo deve essere incrementato di 10dB (→ comportamento lineare)



Queste curve indicano la soglia di mascheramento del rumore bianco al variare della sua intensità.

Si noti come sia verificato il comportamento lineare:  
Rumore 60dB → Test tone 80dB  
Rumore 50dB → Test tone 70dB  
Rumore 40dB → Test tone 60dB  
...

Ricordiamo cos'è la **THQ**?  
Vedere lezione precedente



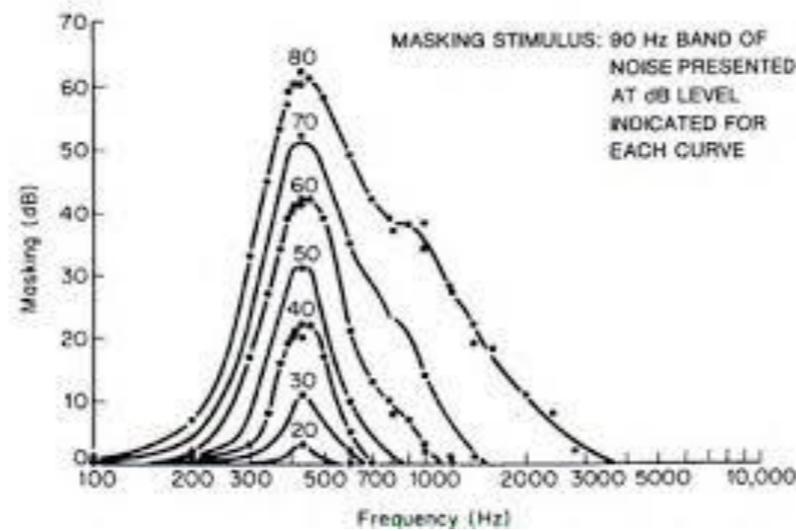
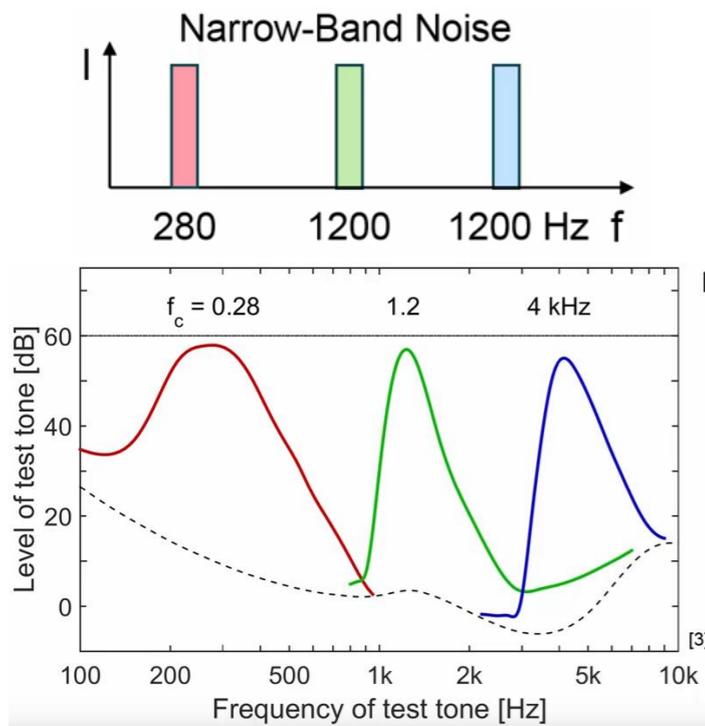
# Mascheramento Non Tonale

## Rumore a banda stretta

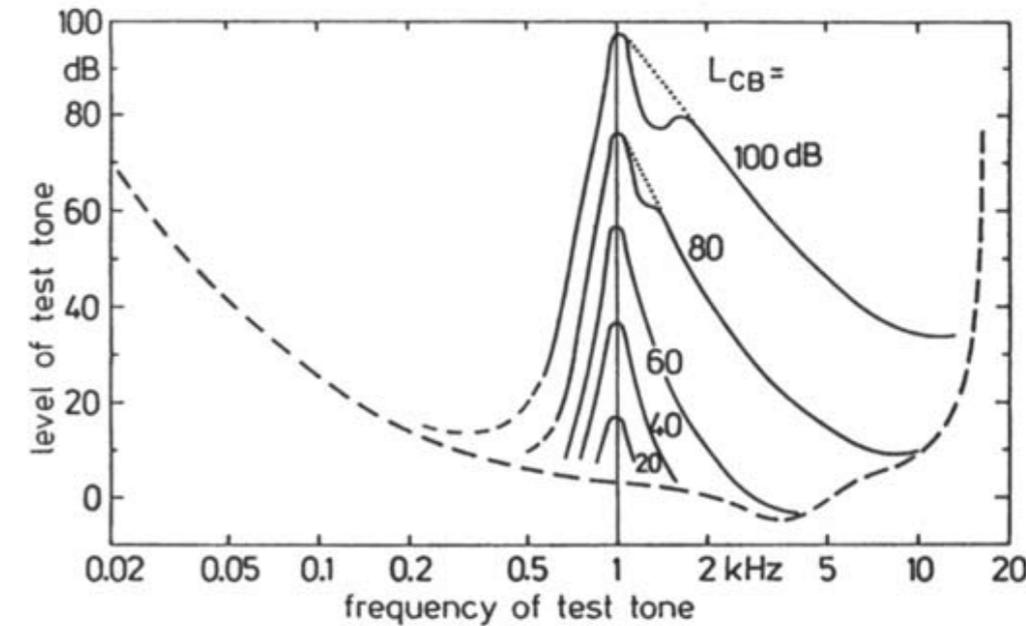


Esempio audio

- Il suono mascheratore è una forma di rumore a banda più o meno stretta in cui non è possibile individuare un tono specifico



Suono mascheratore di 410 Hz con banda di 90 Hz



Suono mascheratore di 1000 Hz con banda di 200 Hz

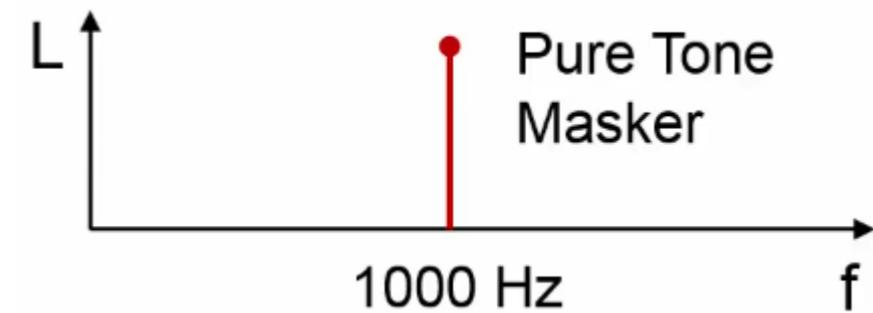
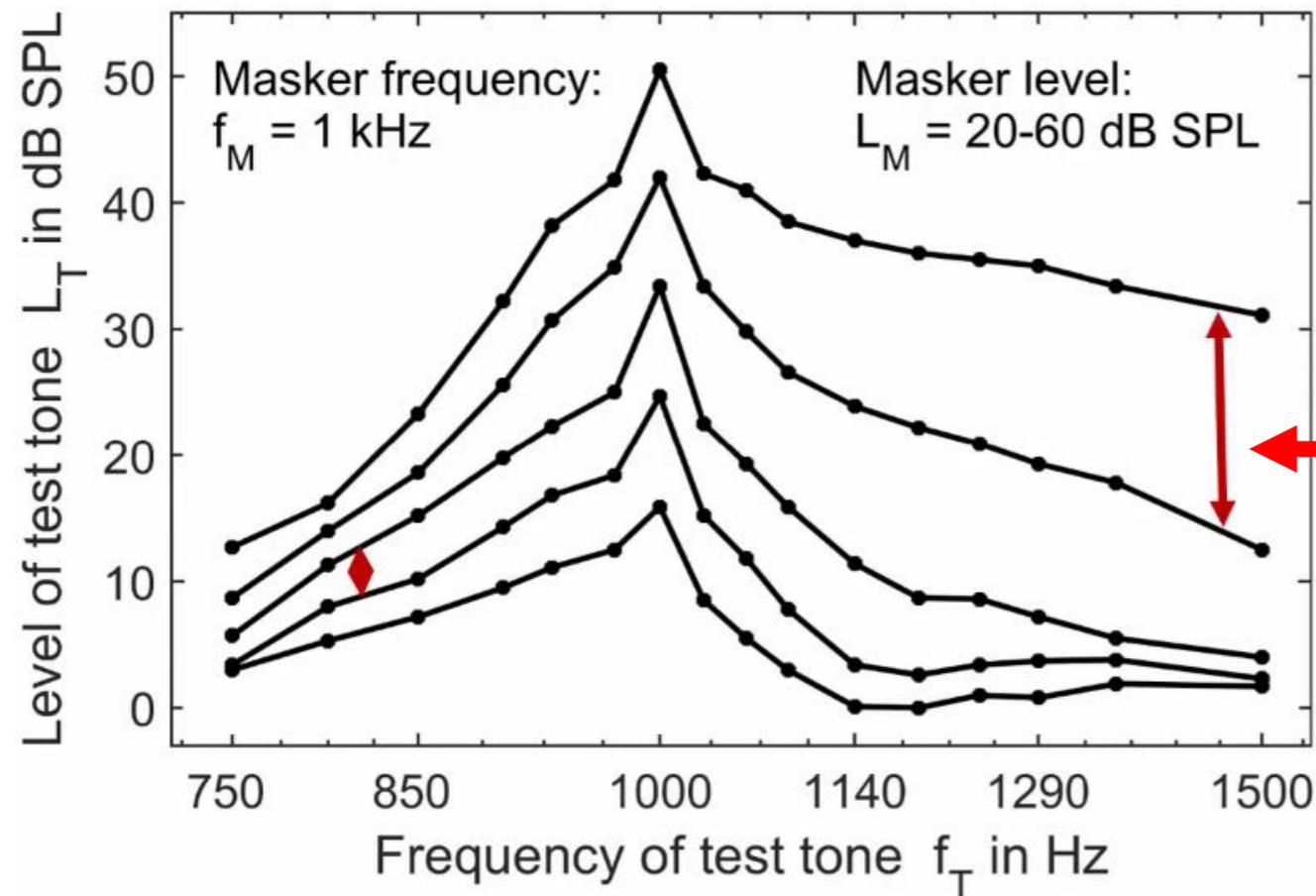
- Il mascheramento non tonale impone una soglia più alta del tonale, ma è meno efficace per le alte frequenze



# Mascheramento Tonale

## Tono semplice (singolo tono puro)

- Distinguiamo fra:
  - Tono Mascheratore e *Test tone* Mascherati



Il Tono Mascheratore maschera di più le alte frequenze, rispetto alle basse, quando ha forte intensità (alti dB), altrimenti si comporta al contrario.

Il divario di mascheramento tra alte e basse frequenze diventa sempre più evidente all'aumentare dell'intensità.



# Esercitazione Pratica (dal testo)

Simile al 2.6.4,  
esercizio sulle bande critiche

## ■ 2.6.6 – Mascheramento Non Tonale

In un editor audio generare i seguenti segnali

- [ T ] Tono puro da 400Hz, ampiezza 0.5
- [ R ] Rumore bianco (banda larga), ampiezza 0.5
- Testare il mascheramento in questi vari test
  - Riducendo l'ampiezza di T gradualmente fino a -30dB
  - Filtrare R con Passa-alto=350, Passa-Basso=450 (Banda=100Hz)
  - Aumentare l'ampiezza di R (senza superare il clipping)



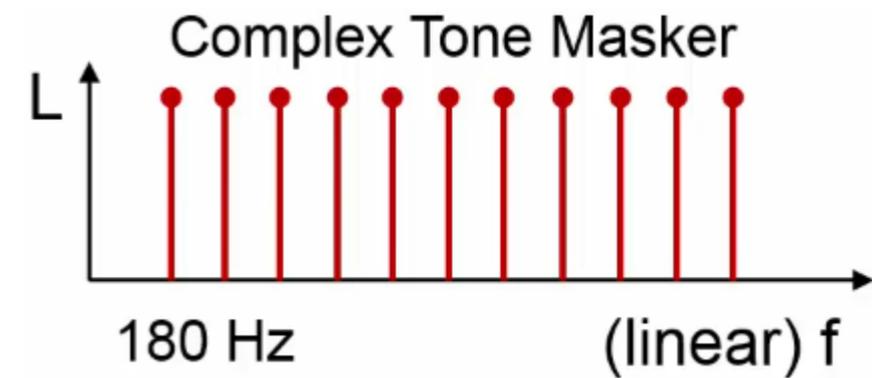
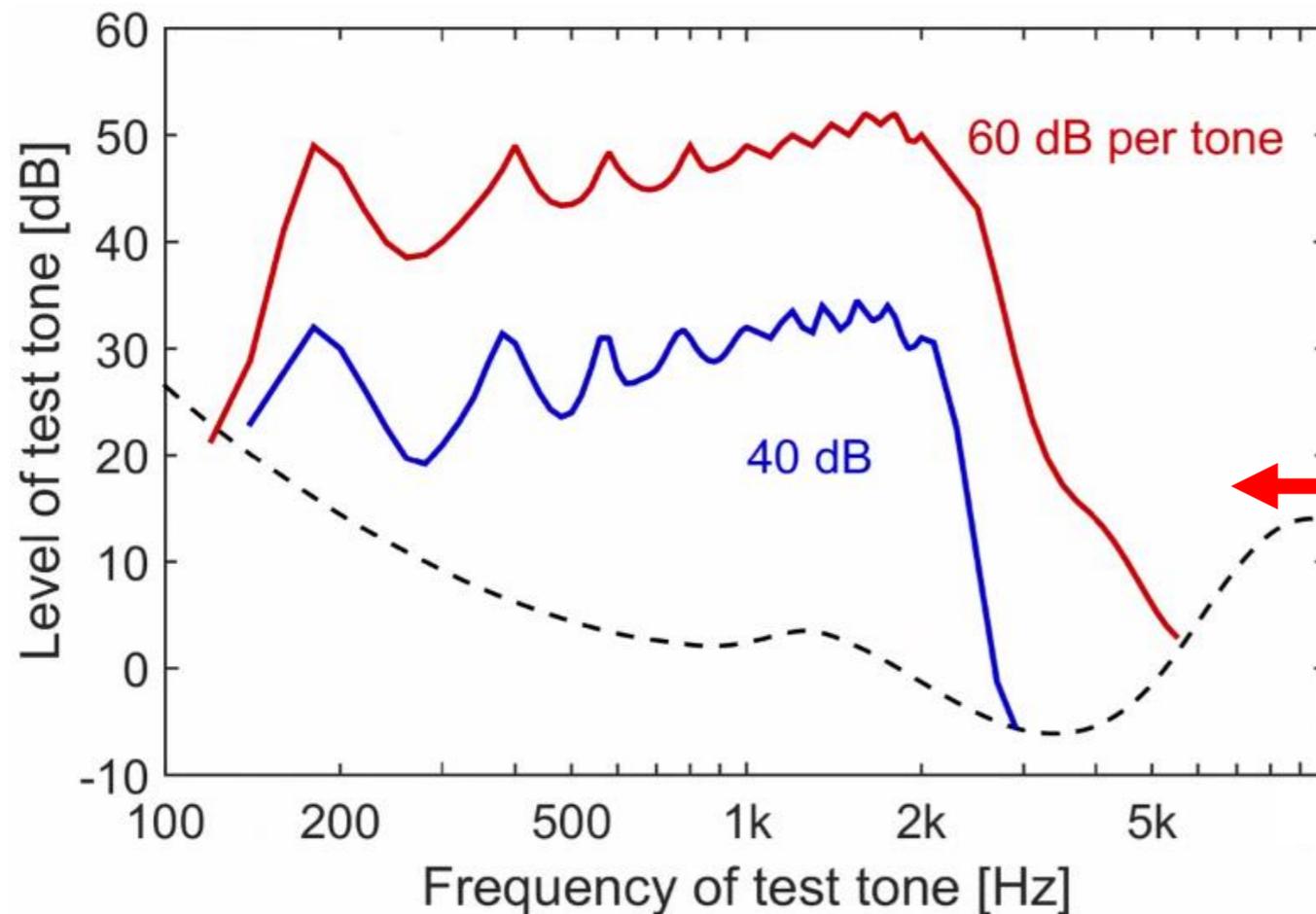
201920



# Mascheramento Tonale

## Tono complesso (più toni semplici)

- Un esempio di tono complesso è dato dalle formanti nelle vocali



Come se avessimo sommato i singoli grafici del mascheramento di ciascun tono semplice che compone il tono complesso



# Esercitazione Pratica (dal testo)

## ■ 2.6.5 – Mascheramento Tonale

In un editor audio generare i seguenti segnali

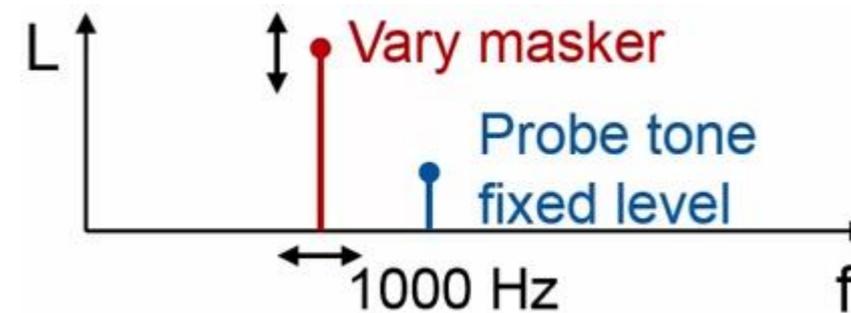
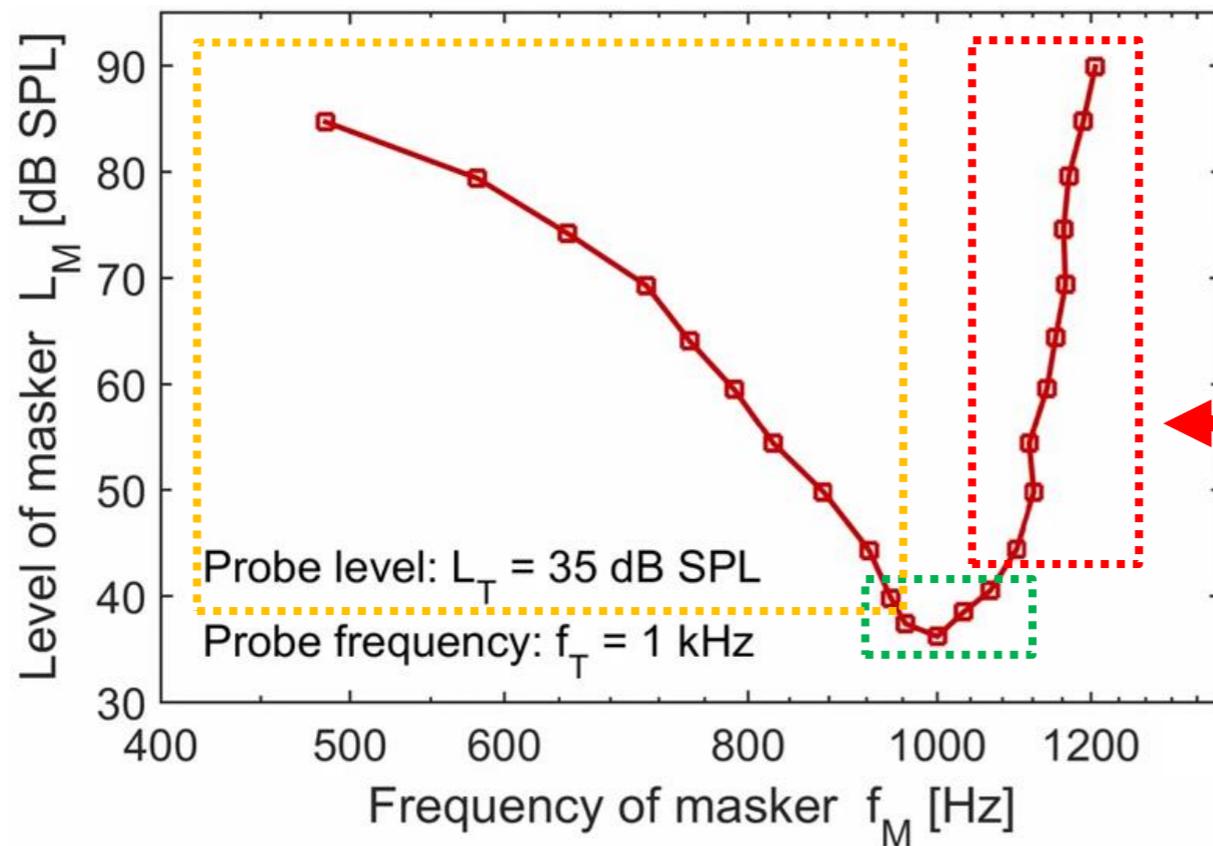
- [ T1 ] Tono puro da 1000Hz, ampiezza 0.5
- [ T2 ] Tono puro da 1300Hz, ampiezza 0.5
  - Ascoltare le due tracce mixate
  - Ridurre l'ampiezza di T2, gradualmente, fino a -30dB
  - Notare come T1 maschera T2



# Mascheramento Tonale

## Tuning Curve

- Anziché fissare il rumore e variare il *test tone*, proviamo a fare il contrario...



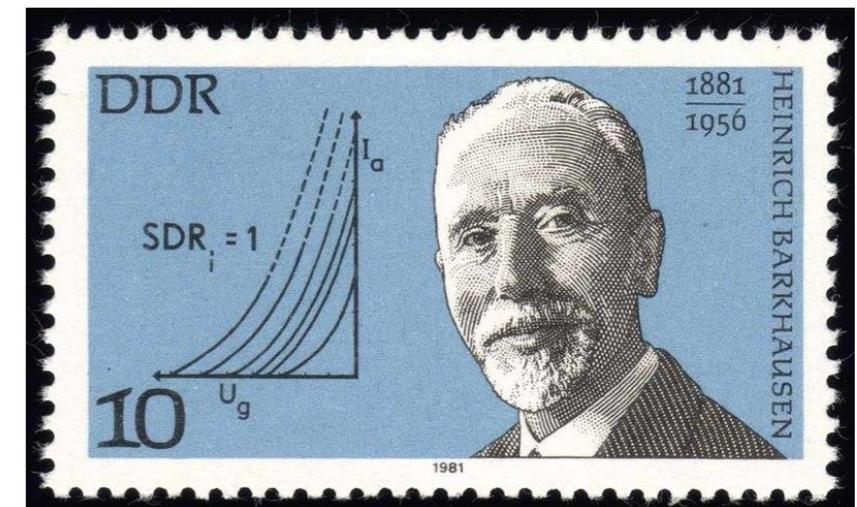
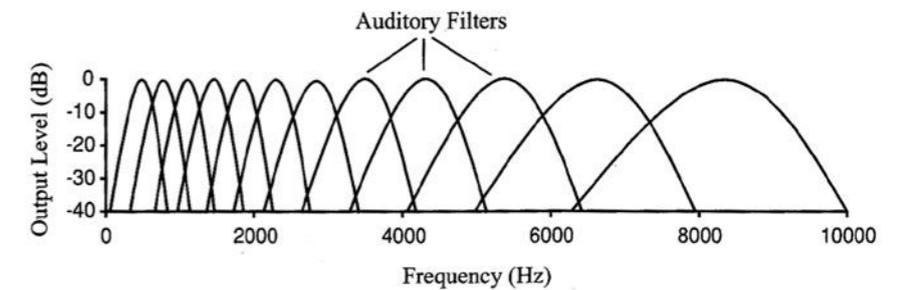
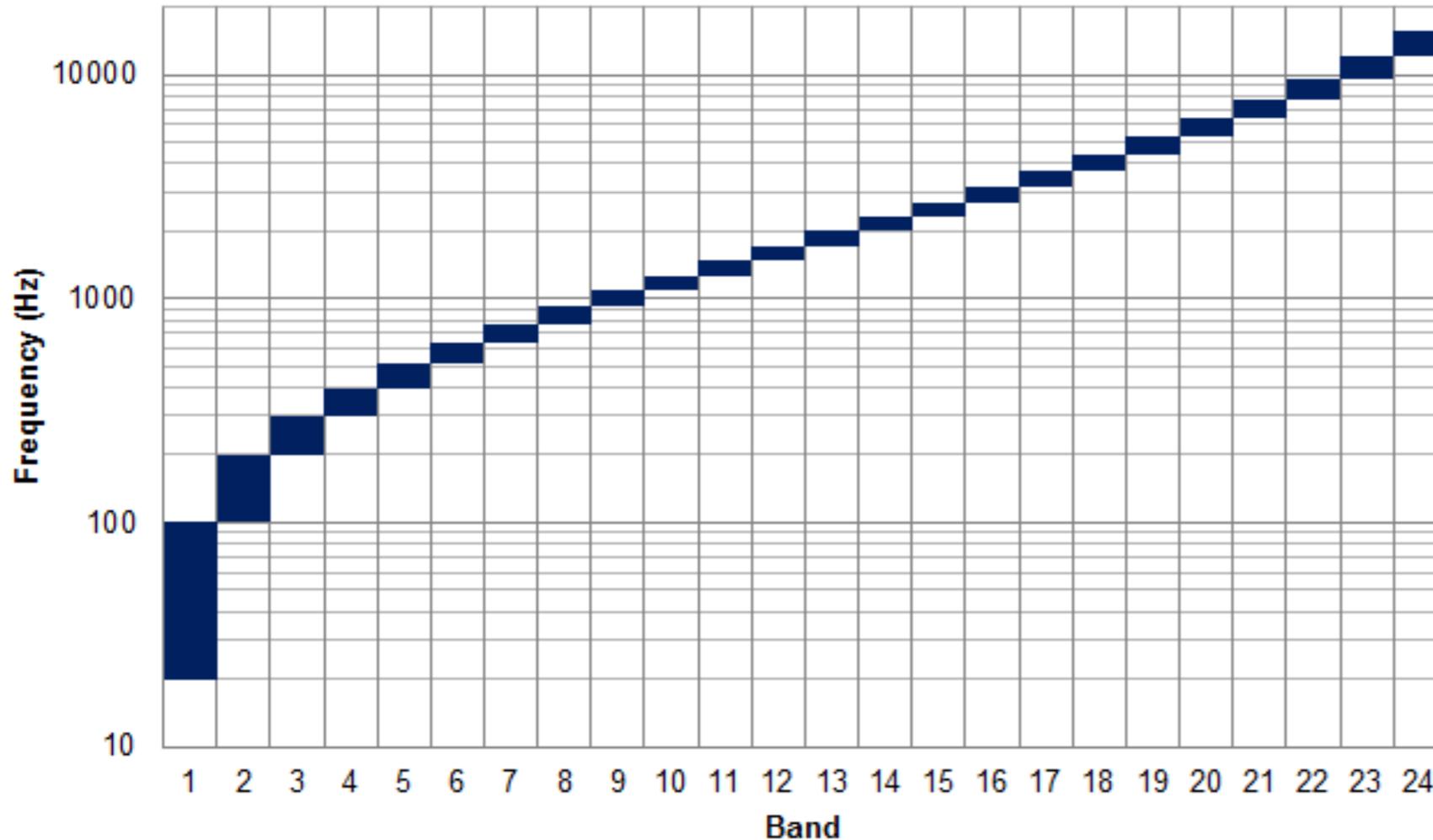
Le frequenze **vicine** sono facilmente mascherabili, le alte frequenze risultano difficilmente mascherabili (la curva sale subito), le basse frequenze sono difficilmente mascherabili (ma la curva sale piano).  
È come se ci fosse un filtro centrato su 1kHz. In effetti, abbiamo già visto che è proprio così, ma approfondiamo...



# Mascheramento e Banda Critica

## Scala di Bark

- L'intera gamma delle frequenze udibili viene ripartita in **24 bande critiche** (o filtri auditori, o filtri coclearari)





# Mascheramento e Banda Critica (dal testo)

- Le bande critiche hanno **larghezza di banda variabile**, a seconda della frequenza
  - Frequenza  $< 500\text{Hz}$ 
    - Larghezza di banda critica: circa  $100\text{Hz}$
  - Frequenza  $> 500\text{Hz}$ 
    - Larghezza di banda critica: circa  $20\%$  della Frequenza
  - Frequenze molto alte ( $> 15\text{kHz}$ )
    - Larghezza di banda critica: circa  $6500\text{Hz}$



# Mascheramento e Banda Critica (dal testo)

Cioè, come si  
calcola?

- Un piccolo esempio:
  - Dato un **tono a 2kHz**, qual è la sua **banda critica**?
  - Generiamo un rumore composto da un insieme di frequenze in un intervallo centrato su 2kHz e raggio variabile
    - Cioè avente banda variabile attorno al tono 2kHz
  - Variazioni dell'intensità sonora del suono originale sono apprezzabili solo con rumori aventi larghezza di banda inferiore a 250Hz
  - Pertanto, la larghezza di banda critica del segnale da 2kHz è 250Hz



# Esercitazione Pratica

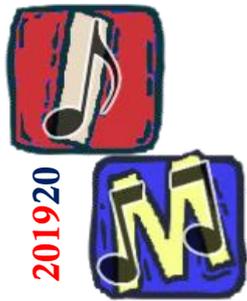
## (dal testo)

- 2.6.4 – Mascheramento nelle bande critiche  
In un editor audio generare i seguenti segnali
  - [ T ] Tono puro da 2000Hz, ampiezza 0.2
  - [ R ] Rumore bianco (banda larga), ampiezza 0.8
  - Testare il mascheramento in questi vari test
    - Riducendo l'ampiezza di T gradualmente fino a -30dB
    - Duplicando R e filtrandolo con questi filtri:
      - [ R1 ] Passa-alto=1500, Passa-Basso=2500 (Banda=1kHz)
      - [ R2 ] Passa-alto=1875, Passa-Basso=2125 (Banda=250Hz)
      - [ R3 ] Passa-alto=1995, Passa-Basso=2005 (Banda=10Hz)

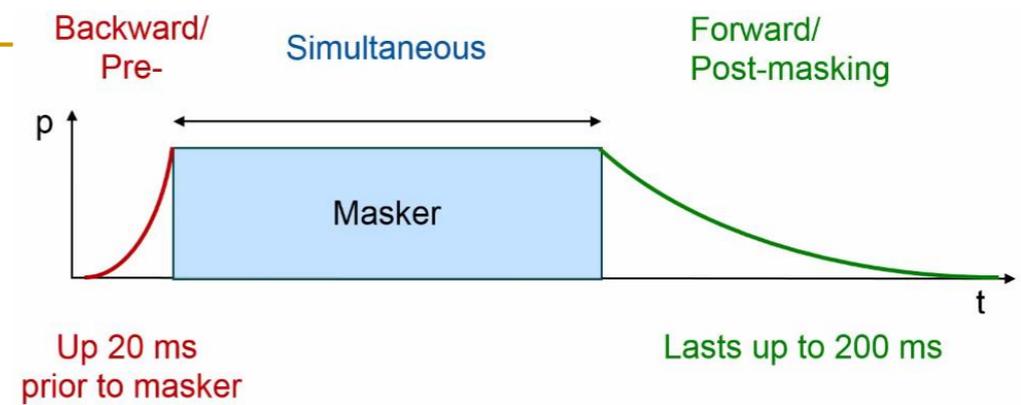


# Soglia di mascheramento (dal testo)

- La **soglia di mascheramento** di un *tono mascherato* è il livello di intensità al quale esso si riesce ad ascoltare anche in presenza di un *tono mascheratore*
- La **quantità di energia mascherata** è la differenza fra la soglia di mascheramento e la soglia assoluta di udibilità
  - Vedi curve isofoniche: curva a 0 foni



# Mascheramento

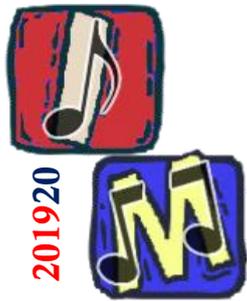


- Negli esempi precedenti abbiamo assunto che tono mascherato e mascheratore fossero emessi nello stesso istante:
  - **Mascheramento Simultaneo**
  - Esistono anche fenomeni di *Mascheramento Temporale*
- Il mascheramento può essere sfruttato per la compressione del segnale audio, eliminando parti del segnale che non verrebbero percepite dal nostro apparato uditivo



Esempio audio





# Approfondimenti (1 di 2)

- ***Wikipedia [EN]: Auditory Masking***  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Auditory\\_masking#Critical\\_bandwidth](https://en.wikipedia.org/wiki/Auditory_masking#Critical_bandwidth)
- **[EN] HyperPhysics (cliccare su “Sound and Hearing”)**  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- **Progetto 05 – 2018/19: Mascheramento**  
A cura di Andronaco M., Campione G., Caruso B.  
<https://fmilotta.github.io/teaching/computermusic/Projects/ComputerMusic-Project-05mask-2018-IT.pdf>



# Approfondimenti (2 di 2)

- [EN] YouTube – Masking Part 1  
<https://www.youtube.com/watch?v=mkZ0mWS2WAE>
- [EN] YouTube – Masking Part 2  
<https://www.youtube.com/watch?v=qKmrup8FXYM>
- [EN] YouTube – Critical Bands  
[https://www.youtube.com/watch?v=fwi8p\\_iSMz4](https://www.youtube.com/watch?v=fwi8p_iSMz4)
- [EN] YouTube – Loudness  
<https://www.youtube.com/watch?v=mkZ0mWS2WAE>

*Video Lezioni  
sull'argomento*