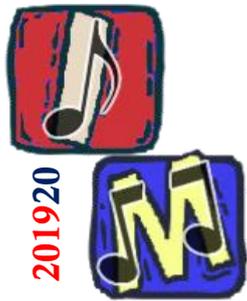


# Digitalizzazione

## Parte 1

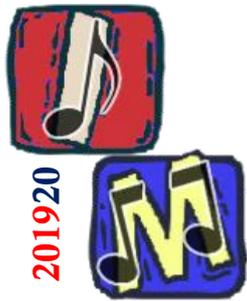
---

Prof. Filippo Milotta  
milotta@dmi.unict.it



# Audio analogico e digitale

- Come per la maggior parte dei segnali, possiamo distinguere in **audio analogico e digitale**.
- Ricordiamoci che un segnale si dice analogico quando è a *tempo continuo* e *valori continui*. Viceversa si dice digitale se è a *tempo discreto* e *valori discreti*.
- Normalmente, i segnali analogici hanno sempre preceduto cronologicamente la controparte digitale.

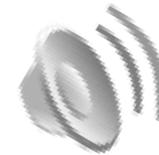


# Audio multicanale

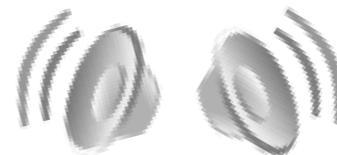
Per migliorare l'esperienza sonora e fornire una maggiore consapevolezza dello spazio, può essere utile sfruttare più flussi informativi differenti, riprodotti e mescolati insieme.

Un segnale audio costituito da più flussi informativi differenti, prende il nome di **audio multicanale**. Ogni singolo flusso informativo può essere considerato come un segnale audio a se stante. Ovviamente questa caratteristica è indipendente dal fatto che l'audio sia analogico o digitale.

■ Un audio ad un solo canale si dice **Mono**.

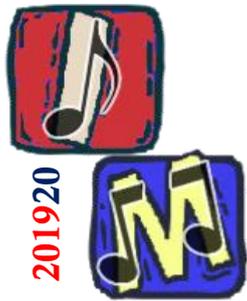


■ Un audio a due canali si dice **Stereo**.



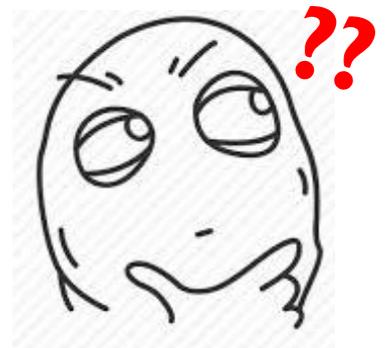
■ ...

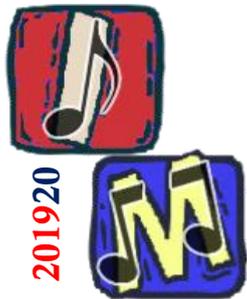




# Audio: Rappresentazione Analogica (dal testo)

- E' una rappresentazione che lavora per ***analogia***
  - la curva continua nel tempo delle variazioni di ampiezza viene rappresentata da una curva continua nel tempo delle variazioni di tensione elettrica
    - Cioè, la traccia registrata segue l'andamento della curva dell'ampiezza, dopo che questa è stata convertita in segnale elettrico





# Audio analogico - Acquisizione

Nonostante non verrà approfondito l'audio analogico, è comunque necessario dare un accenno. Non solo perché ancora oggi è diffuso, ma soprattutto per analizzare il processo di creazione di un segnale audio digitale.

Come si ottiene un audio analogico a partire da un suono?

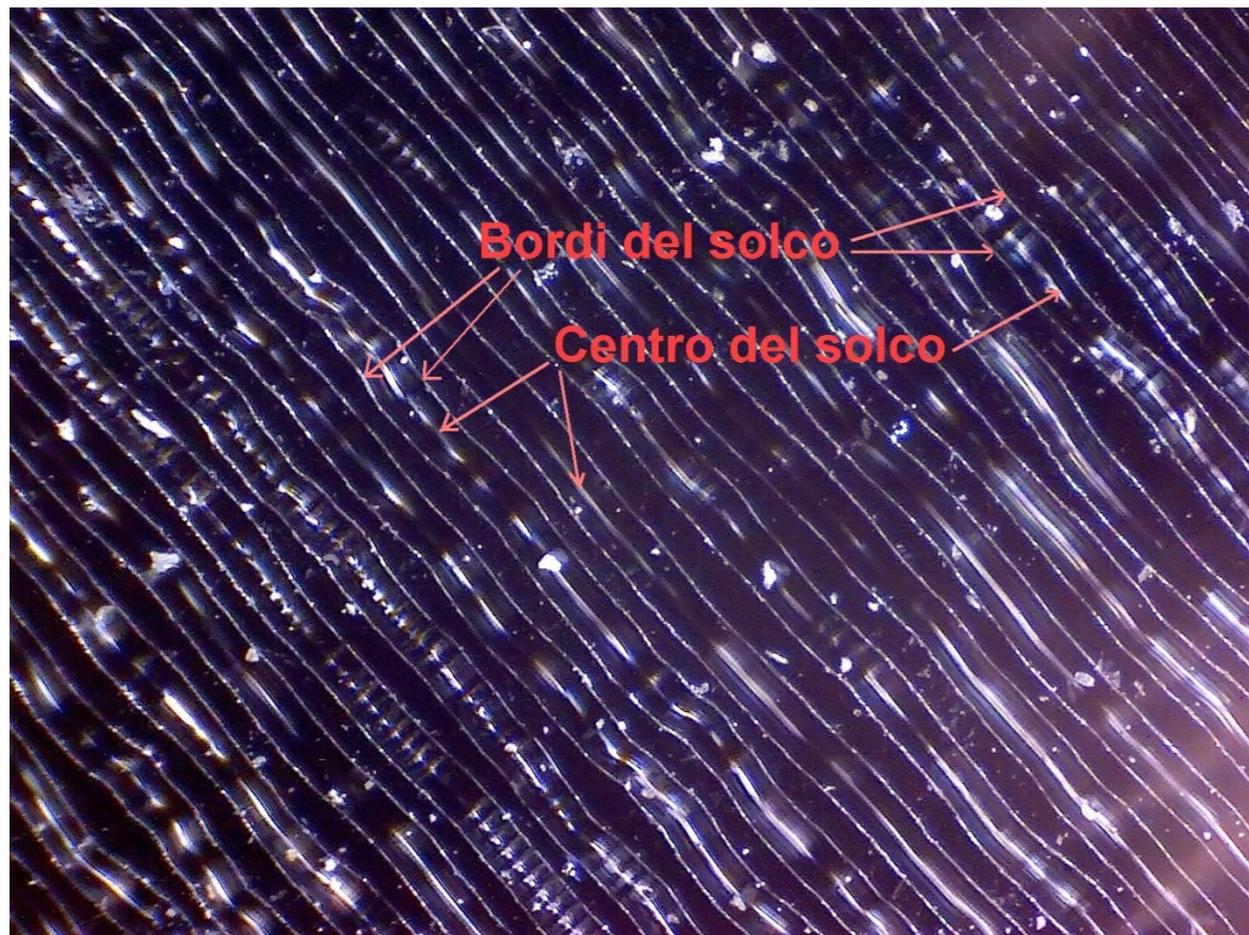
- Il suono viene rilevato da un **trasduttore** che trasforma le onde di pressione in onde elettriche (variazioni di tensione).
- Il segnale così ottenuto viene pretrattato e registrato su un supporto analogico (es: **disco in vinile, audio cassetta**).



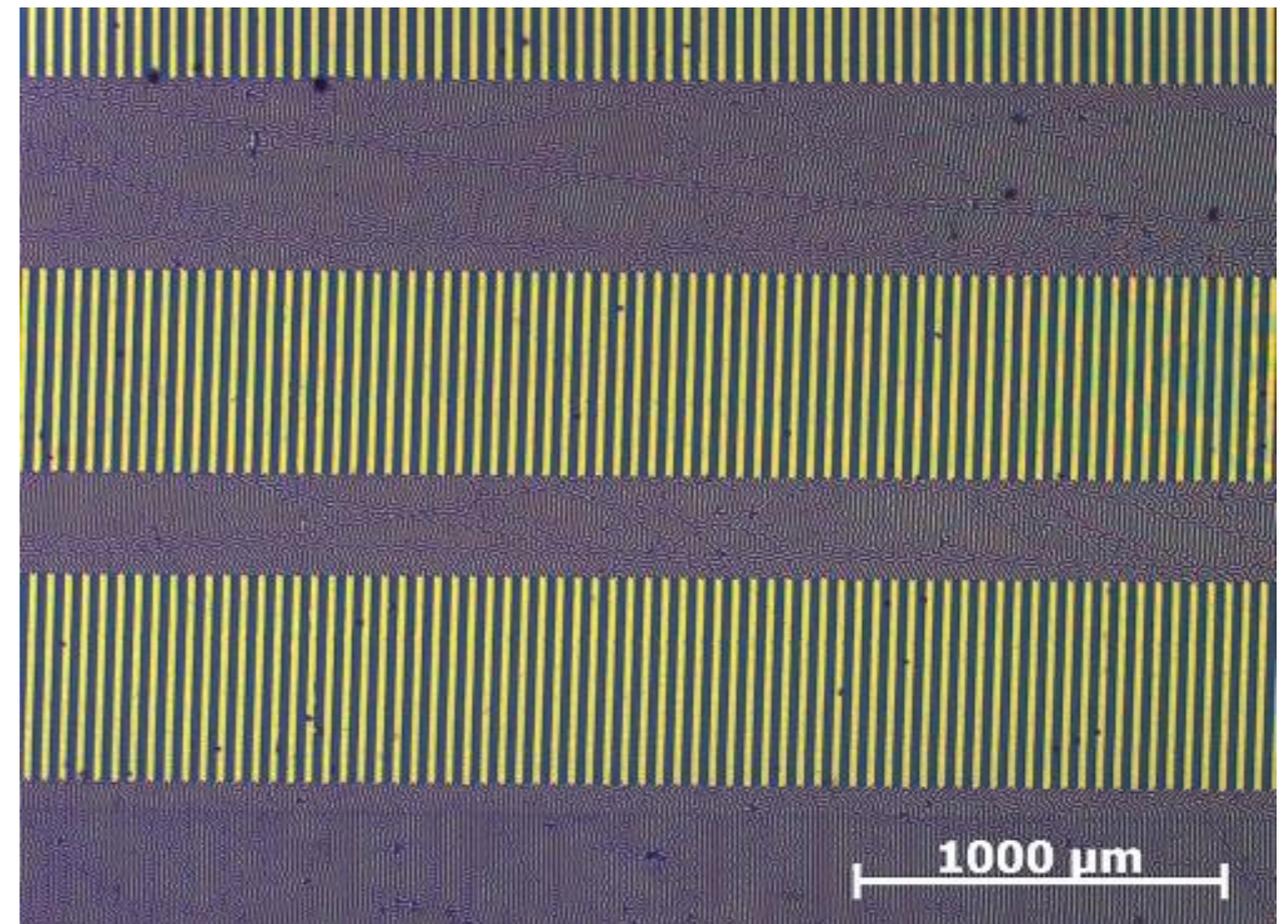


# Audio analogico - Riproduzione

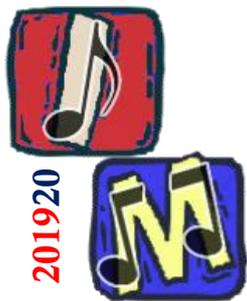
Il suono originale può essere riprodotto interpretando le variazioni delle grandezze fisiche presenti sul supporto. Nel caso del disco in vinile la variazione **della profondità o irregolarità dei solchi**, mentre per le audiocassette la **variazione dell'intensità dei campi magnetici**.



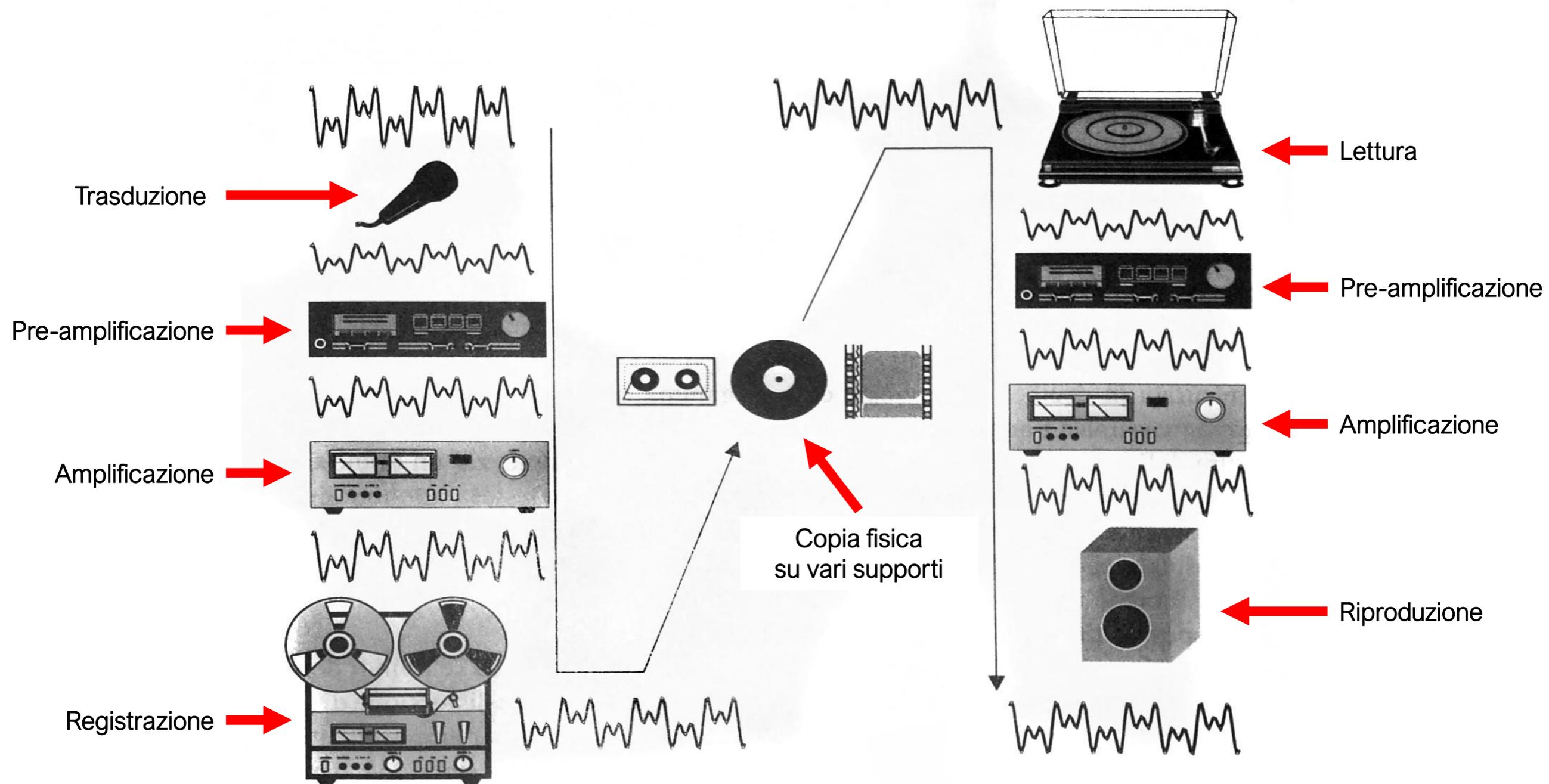
Solchi di un disco in vinile

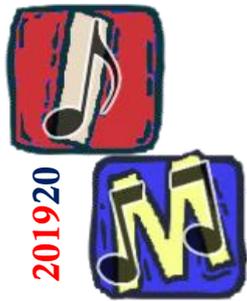


Domini magnetici allineati di un audiocassetta



# Catena dell'Audio Analogico (dal testo)





# Audio analogico - Distorsione

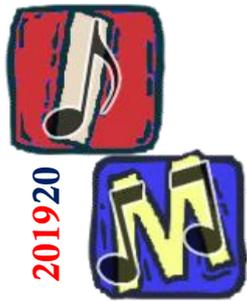
Ogni trasformazione fisica a cui è sottoposto il suono originale avviene sempre con un certo errore. L'errore si propaga fino alla riproduzione dell'audio analogico, che risulterà differente rispetto al segnale di partenza. La **distorsione** introdotta viene chiamata anche **rumore**.

L'entità della distorsione può essere misurata e di solito rappresenta un indice di qualità.

Definiamo il **rapporto segnale-rumore (Signal Noise Ratio - SNR)** come:

$$SNR = \frac{S}{N}$$

Dove  $S$  è l'ampiezza massima del segnale originale e  $N$  è l'ampiezza massima della distorsione introdotta.



# Audio analogico - Distorsione

Il valore  $SNR$  può essere misurato anche in **decibel**:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \frac{S^2}{N^2} = 20 \log_{10} \frac{S}{N}$$

Ovviamente è auspicabile che il valore di  $SNR$  sia quanto più grande possibile.

I dischi in vinile usurati, introducono tic e altre imperfezioni. Alcune di queste vengono ritenute «gradevoli» dagli audiofili. Nelle audiocassette è invece tipico un fruscio di fondo.



# Audio analogico – Pro e contro

- **Pro:** permette di rappresentare facilmente gamme molto ricche di frequenze; richiede apparecchiature poco sofisticate per essere riprodotto.
- **Contro:** soggetto a distorsioni fisiche; degrado continuo dei supporti; rappresentazione dipendente dal supporto.



# Audio analogico – Pro e contro?

	Advantages	Disadvantages
Analogue	<p>Once recorded, audio is stored/archived. 2" 24 track tape is a world wide standard.</p> <p>Warm and natural sound?</p> <p>Theoretically better audio bandwidth.</p> <p>Tried and tested format.</p> <p>Editing limitations discourage constant tinkering and changing of audio.</p>	<p>Cheaper recorders suffer from distortion and tape noise/hiss.</p> <p>Tape is expensive and vulnerable to deterioration.</p> <p>Tape is becoming increasingly hard to source.</p> <p>Recorded need constant maintenance.</p> <p>Linear format - tape must be wound/rewound to the location of the recording to be heard.</p> <p>Editing of audio difficult if not impossible.</p> <p>Harder to synchronise.</p> <p>Copying deteriorates sound.</p>



# Audio digitale

- Un segnale si dice **digitale** se è a *tempo discreto* e a *valori discreti*.
- Intuitivamente ci rendiamo conto che il segnale sonoro descritto da un audio digitale, consisterà in un insieme di istanti di tempo, in cui potrà assumere uno tra un numero finito di valori di ampiezza.
- Come la maggior parte dei segnali digitali, è adatto ad essere trattato da elaboratori.



# Audio: Rappresentazione Digitale (dal testo)

- E' una rappresentazione che NON cerca di imitare la curva continua di ampiezza con una curva analoga ad essa, MA assegna dei numeri che rappresentano di volta in volta il valore dell'ampiezza in istanti successivi di tempo
  - Sarà la successione di numeri a rappresentare l'andamento della curva di ampiezza



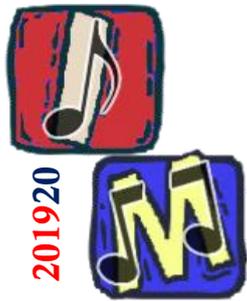


# Audio digitale - Acquisizione

Come si ottiene un audio digitale a partire da un suono?

- Il suono viene rilevato da un **trasduttore** che trasforma le onde di pressione in onde elettriche (variazioni di tensione) → Es.: materiali *piezoelettrici* (come il quarzo)
- Il segnale così ottenuto viene pretrattato e mandato ad un **convertitore** Analogico-Digitale (**ADC**).
- In uscita dall' ADC si ottiene un segnale a tempo discreto e a valori discreti, ossia digitale.
- Il segnale digitale viene infine rappresentato in un **formato** specifico e archiviato in una memoria di massa.

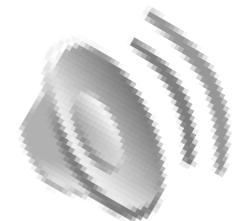




# Audio digitale - Riproduzione

## Come si ottiene il suono a partire dall'audio digitale?

- Il formato in cui è memorizzato l'audio viene interpretato e l'output inviato ad un convertitore Digitale analogico (**DAC**).
- Il **DAC** (nel nostro caso la **scheda audio**), produce un segnale elettrico che descrive il suono, ossia un audio analogico.
- Le variazioni della grandezza elettrica vengono interpretate da un dispositivo (ad esempio **casse audio**), per produrre una vibrazione, ossia la sorgente dell'onda sonora.

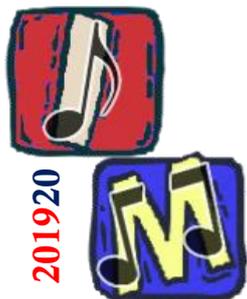




# Audio digitale

- Dispositivi più complessi che si occupano sia di acquisire che di riprodurre prendono il nome di dispositivi di **Data AcQuisition (DAQ)**



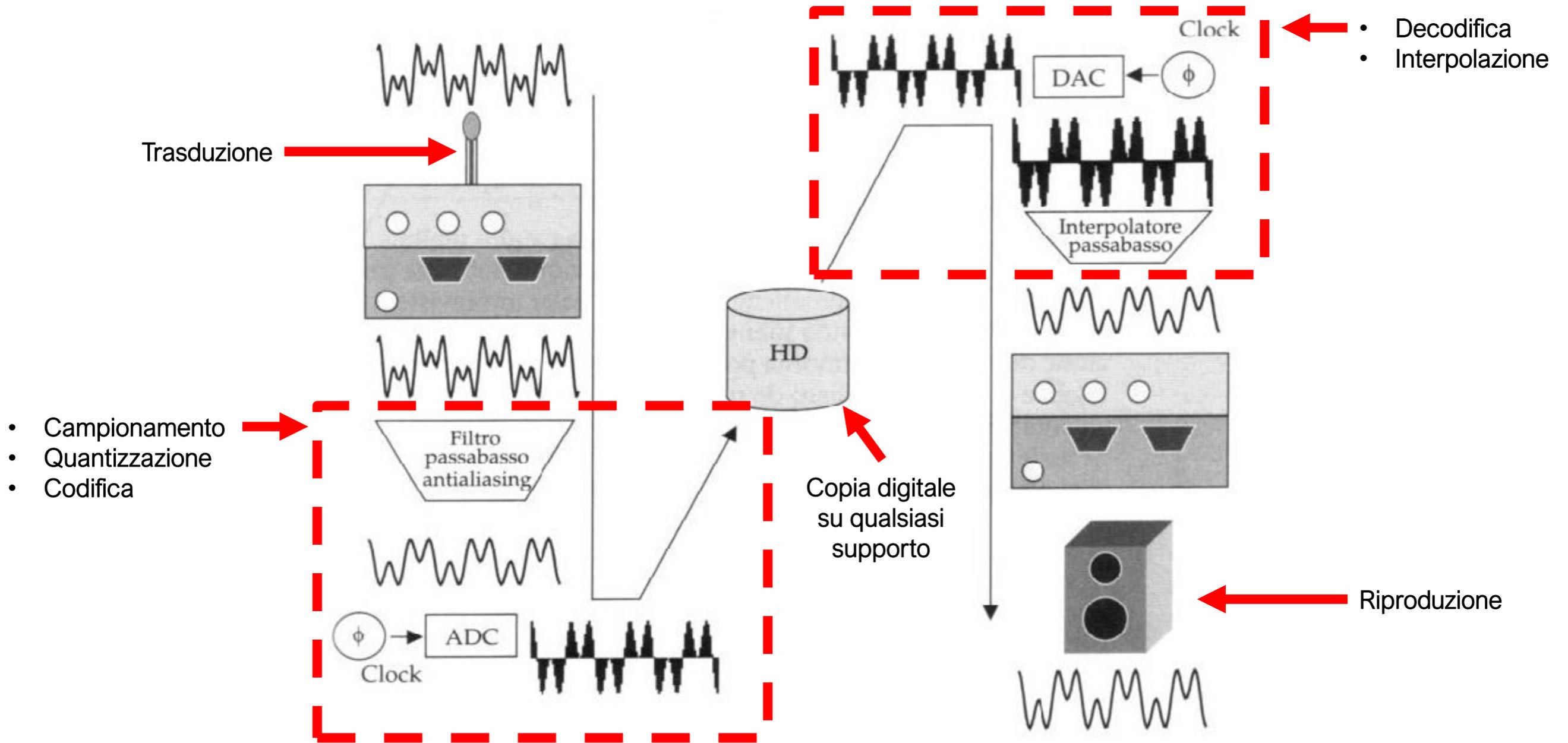


# Ma cosa c'è dentro un ADC?





# Catena dell'Audio Digitale (dal testo)





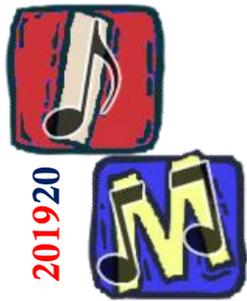
# Conversione Analogico-Digitale

La maggior parte dei dispositivi oggi in uso, trattano segnali digitali. Per questo motivo è necessario convertire i segnali che per loro natura sono analogici, in segnali digitali.

Questo richiede il passaggio da domini continui a domini discreti. In particolare si deve:

- Trasformare un segnale a tempo continuo in uno a tempo discreto;
- Trasformare un segnale a valori continui in uno a valori discreti.

Il primo processo prende il nome di **campionamento**, mentre il secondo **quantizzazione**. Segue la fase di **codifica**.



# Campionamento

La trasformazione di un segnale a tempo continuo in un segnale a tempo discreto prende il nome di **campionamento**.

In pratica si considerano solo alcuni valori del segnale tra loro equidistanti. Si descrive cioè il segnale, utilizzando solo un numero limitato di **campioni**.

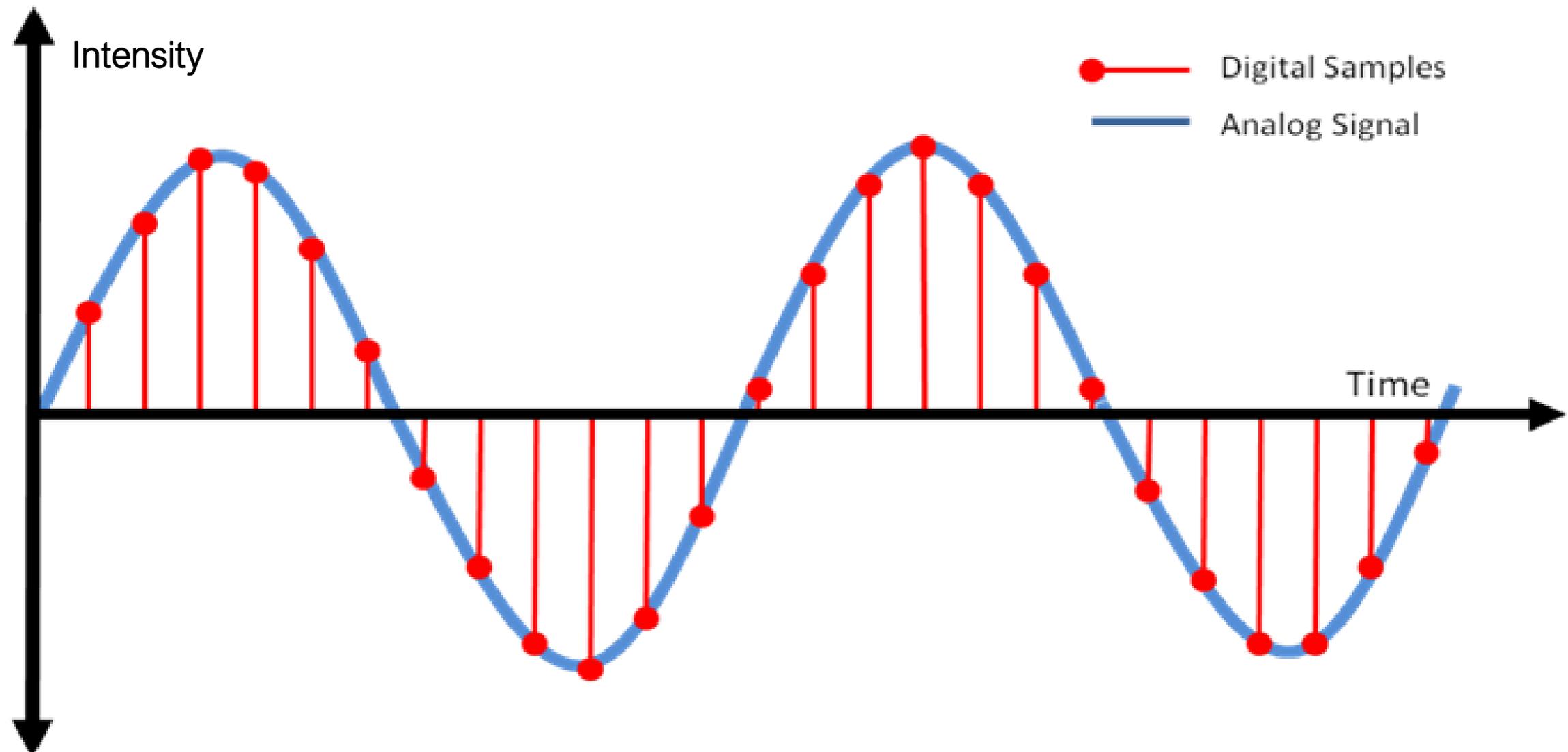
La frequenza con cui si prendono i campioni prende il nome di **tasso di campionamento**.

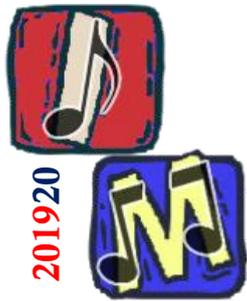
**Tasso** viene tradotto in inglese con il termine **rate**.  
Ambiguamente si potrebbe dire *frequenza di campionamento*, ma **frequency** è l'inverso del periodo!  
→ Il termine corretto è tasso, in inglese **sampling rate**

Il problema è: quanti campioni servono per rappresentare fedelmente il segnale originale?



# Campionamento - Esempio

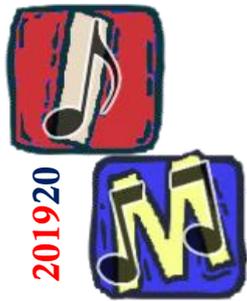




# Campionamento – Frequenza di Nyquist

In un segnale **periodico** e **a banda limitata**, si definisce **frequenza di Nyquist**, la più alta frequenza presente nello **spettro** segnale.

- Per conoscere la frequenza di Nyquist basta utilizzare la Serie di Fourier per ottenere lo spettro.
- Per segnali non periodici si può agire utilizzando la Trasformata di Fourier. Mentre, per segnali a banda non limitata (spettro non limitato), si è costretti ad usare un filtro **passa basso** per riportarsi ad un segnale a banda limitata.



# Campionamento – Teorema del campionamento di Nyquist-Shannon

Il **teorema** afferma che per poter ricostruire fedelmente un segnale campionato, è necessario che il **tasso di campionamento** sia almeno il doppio della **frequenza di Nyquist**.

$$f_c > 2 f_N$$

Attenzione!  
Con l'uguaglianza stretta si ottiene il *Campionamento Critico*.  
Che significa?

Con tasso di campionamento  $f_c$  ci riferiamo al numero di campioni presi per ogni secondo.



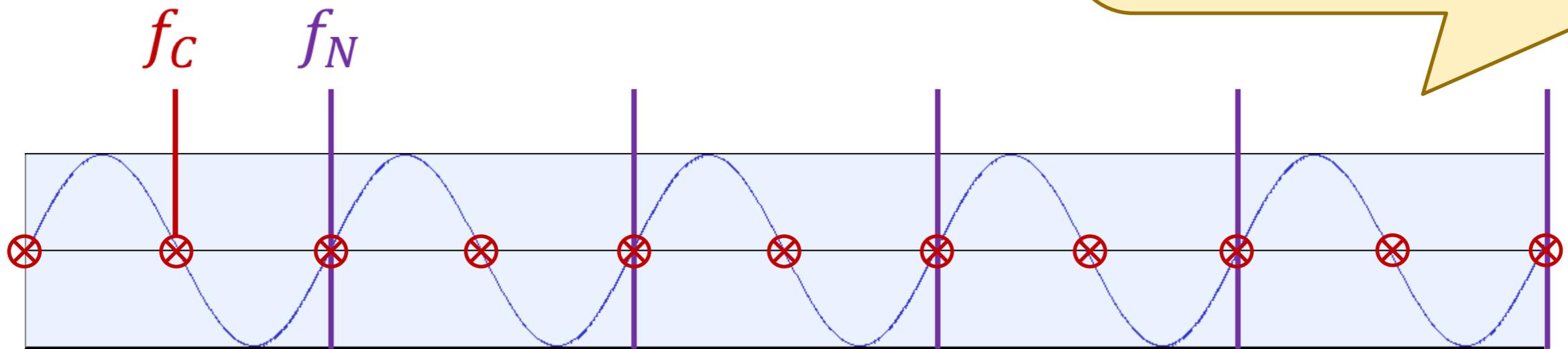
# Campionamento Critico

## Esempio:

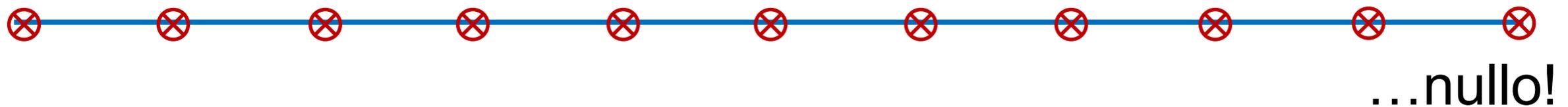
- Tono puro da 100Hz
  - $f_N = 100Hz \rightarrow f_C = 200Hz$

Lo stato di Campionamento Critico non porta sempre ad una ricostruzione errata del segnale. Campionare esattamente al doppio della frequenza di Nyquist può causare questo problema, ma non è detto che accada per forza.

Ad esempio: se avessimo uno sfasamento di +90° sarebbe possibile ricostruire il segnale senza nessun problema.



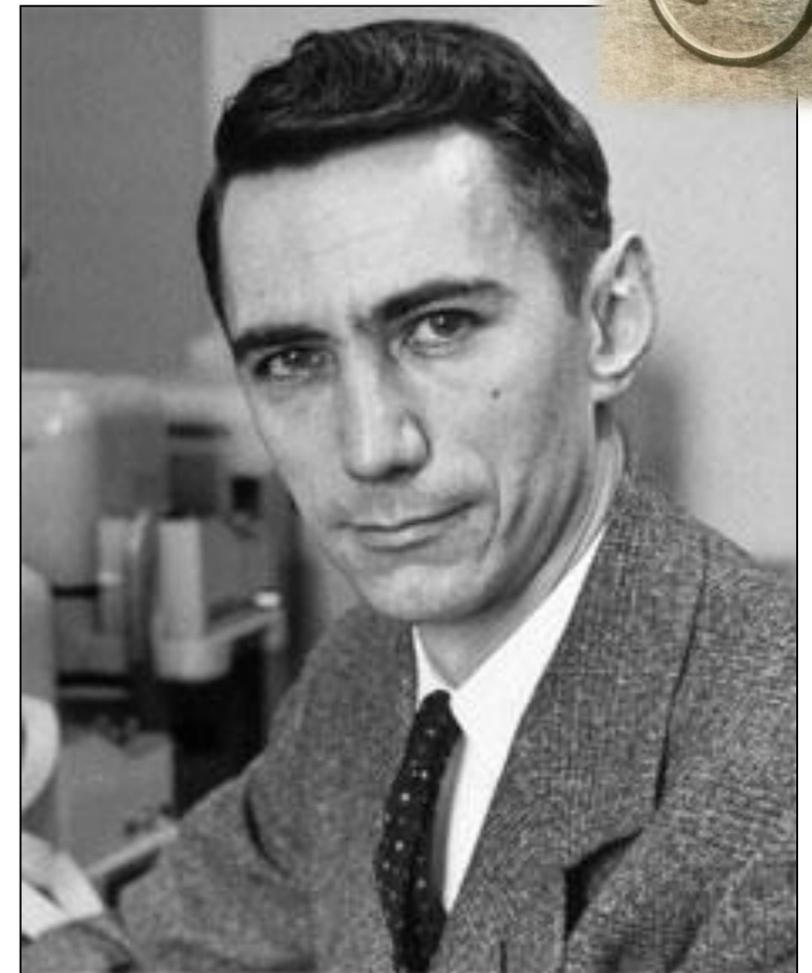
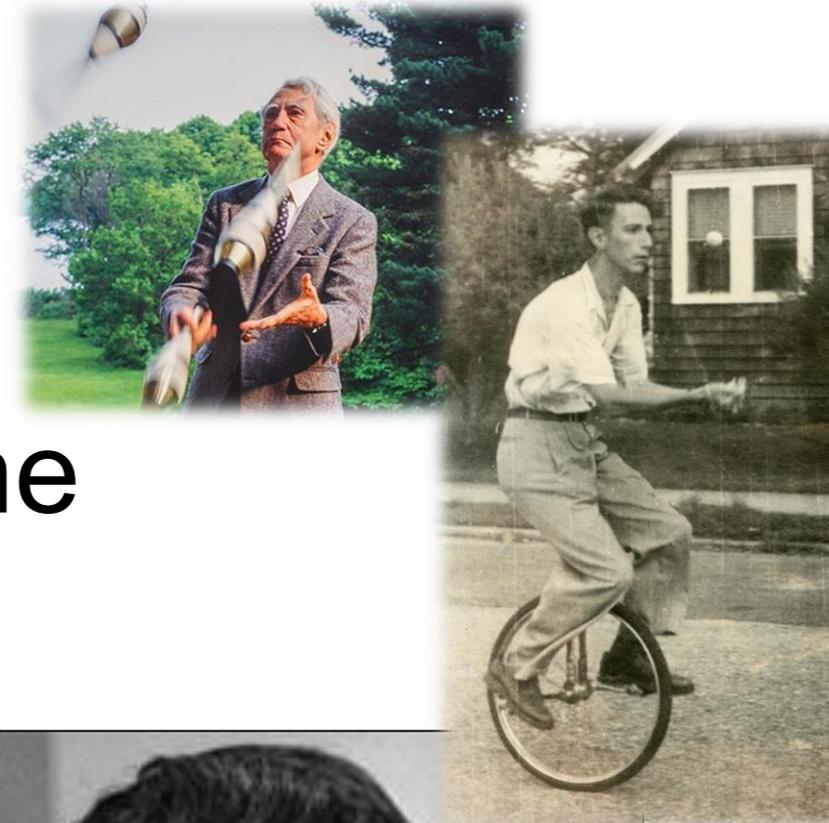
Come sarà il segnale ricostruito con questo campionamento?





# Claude Elwood Shannon (1916 – 2001)

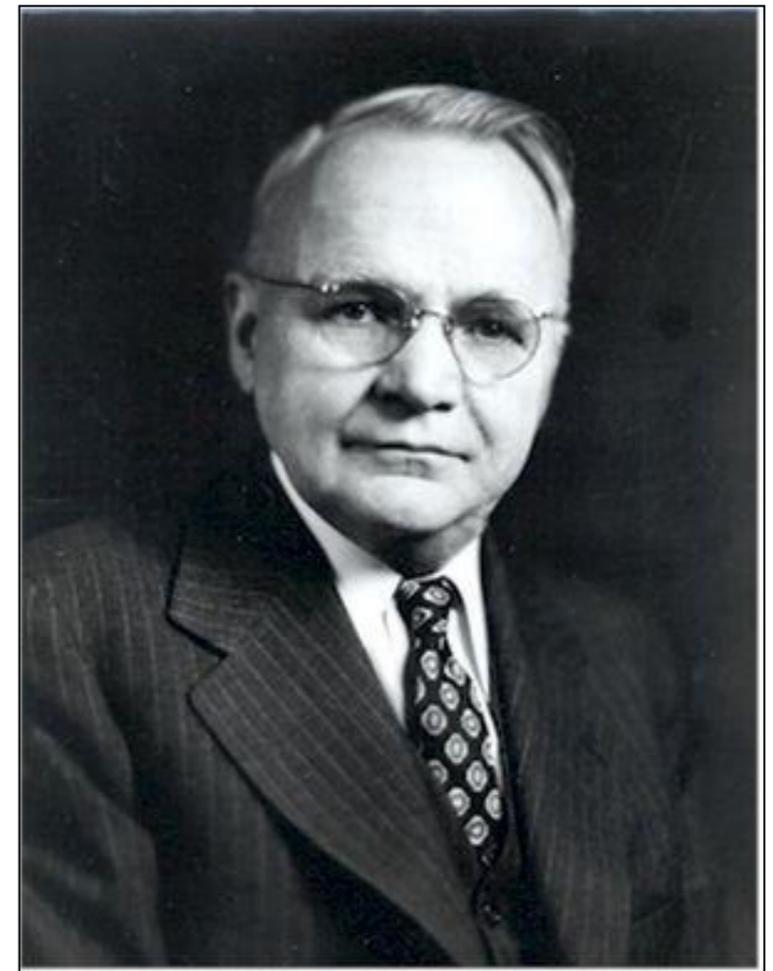
- Il padre dell'era dell'Informazione
- Giocoliere, appassionato di scacchi e si dilettava con il monociclo. Ha inventato molti dispositivi, compresa una macchina per giocare a scacchi, un "saltapicchio" (pogo stick) a motore e una tromba lanciafiamme, per una mostra scientifica. Morì malato di Alzheimer.





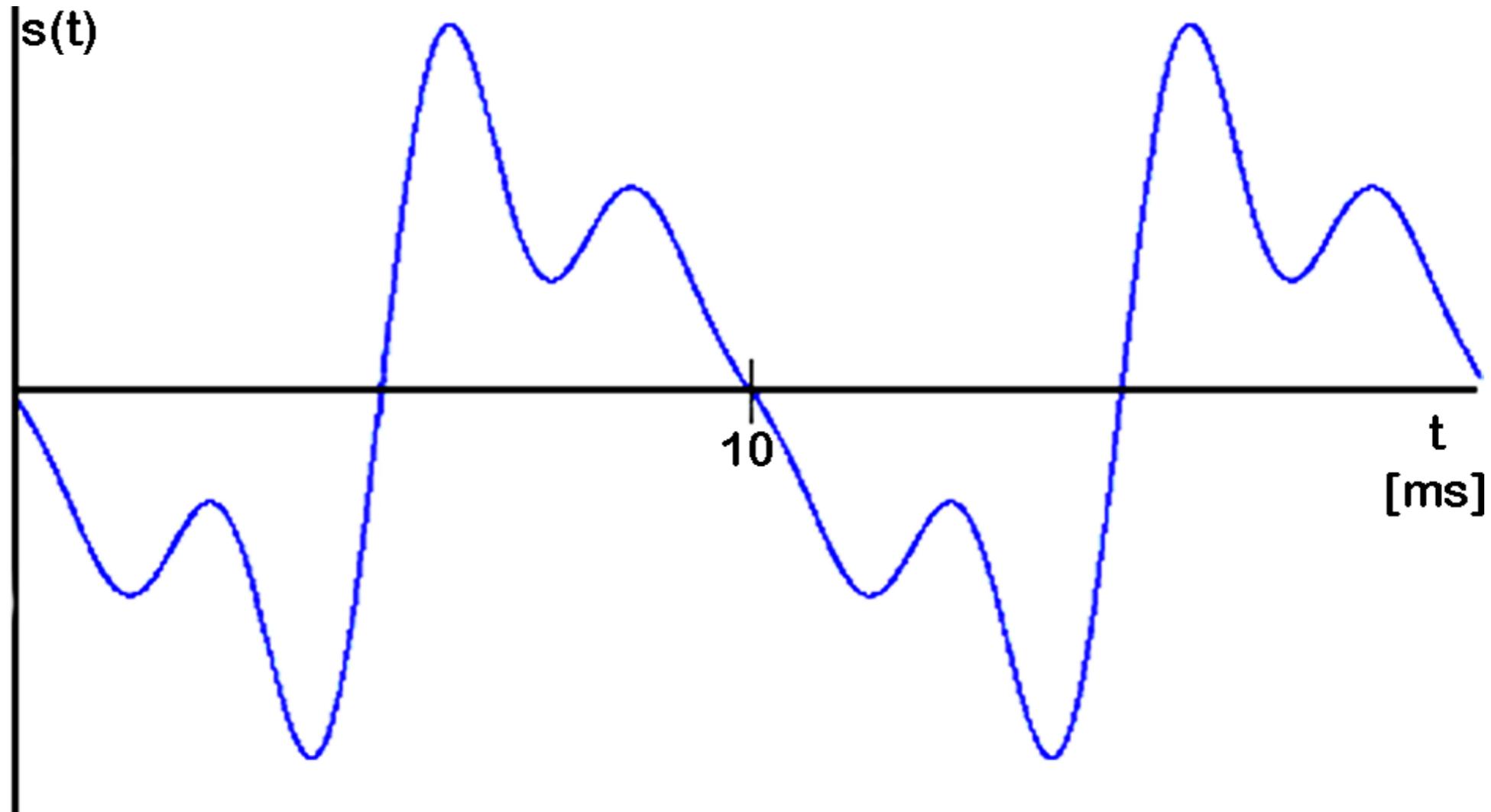
# Harry Theodor Nyquist (1889 – 1976)

- Ingegnere elettronico specializzato nella teoria delle comunicazioni
- Lavorò nelle Bell's Industries e dopo il pensionamento lavorò per l'esercito.





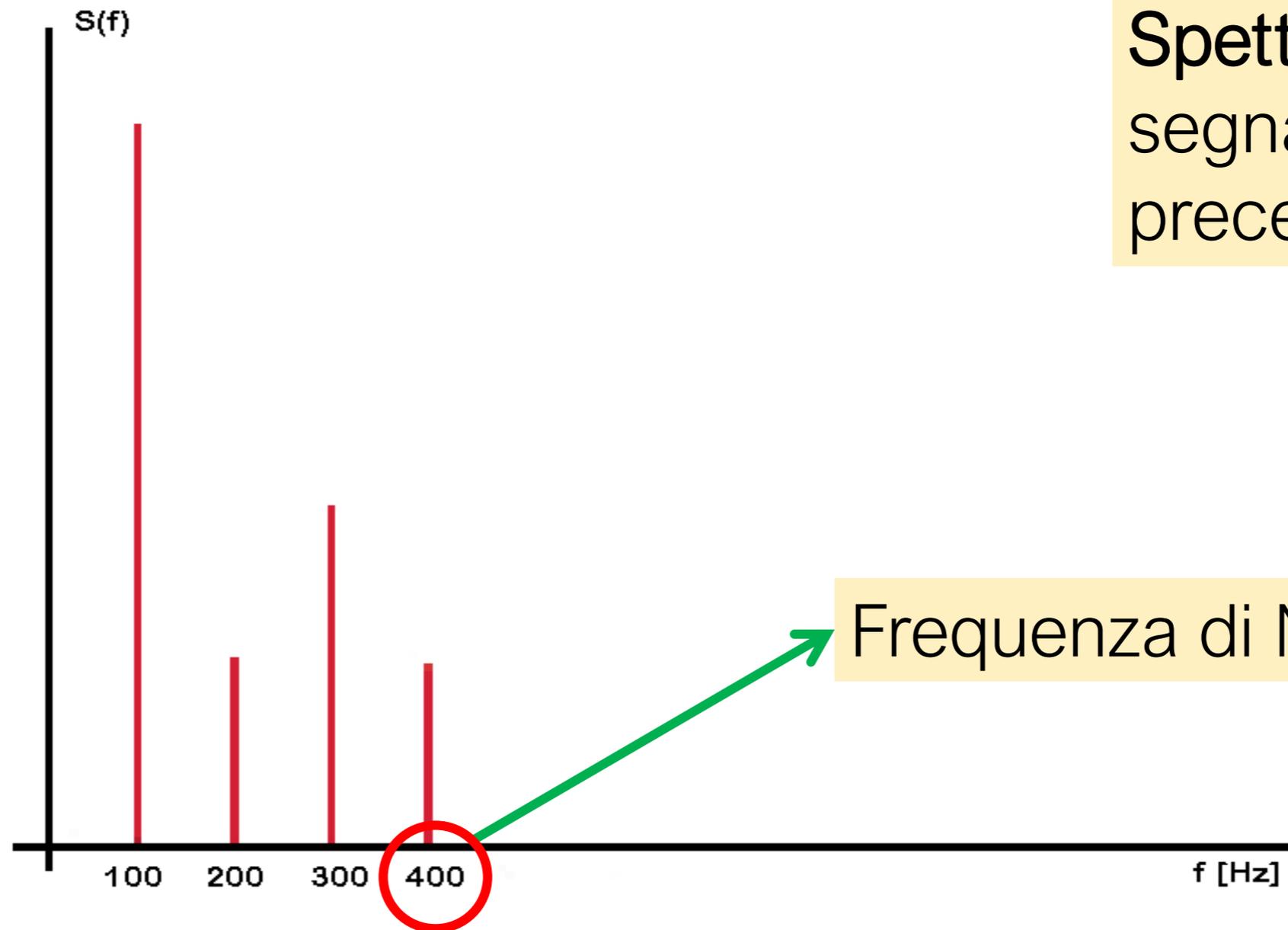
# Dominio del tempo...



Attraverso l'operazione di **Serie di Fourier...**



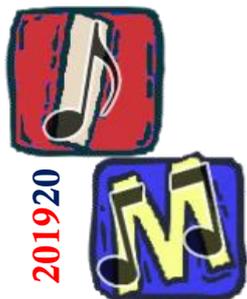
# ... e della frequenza



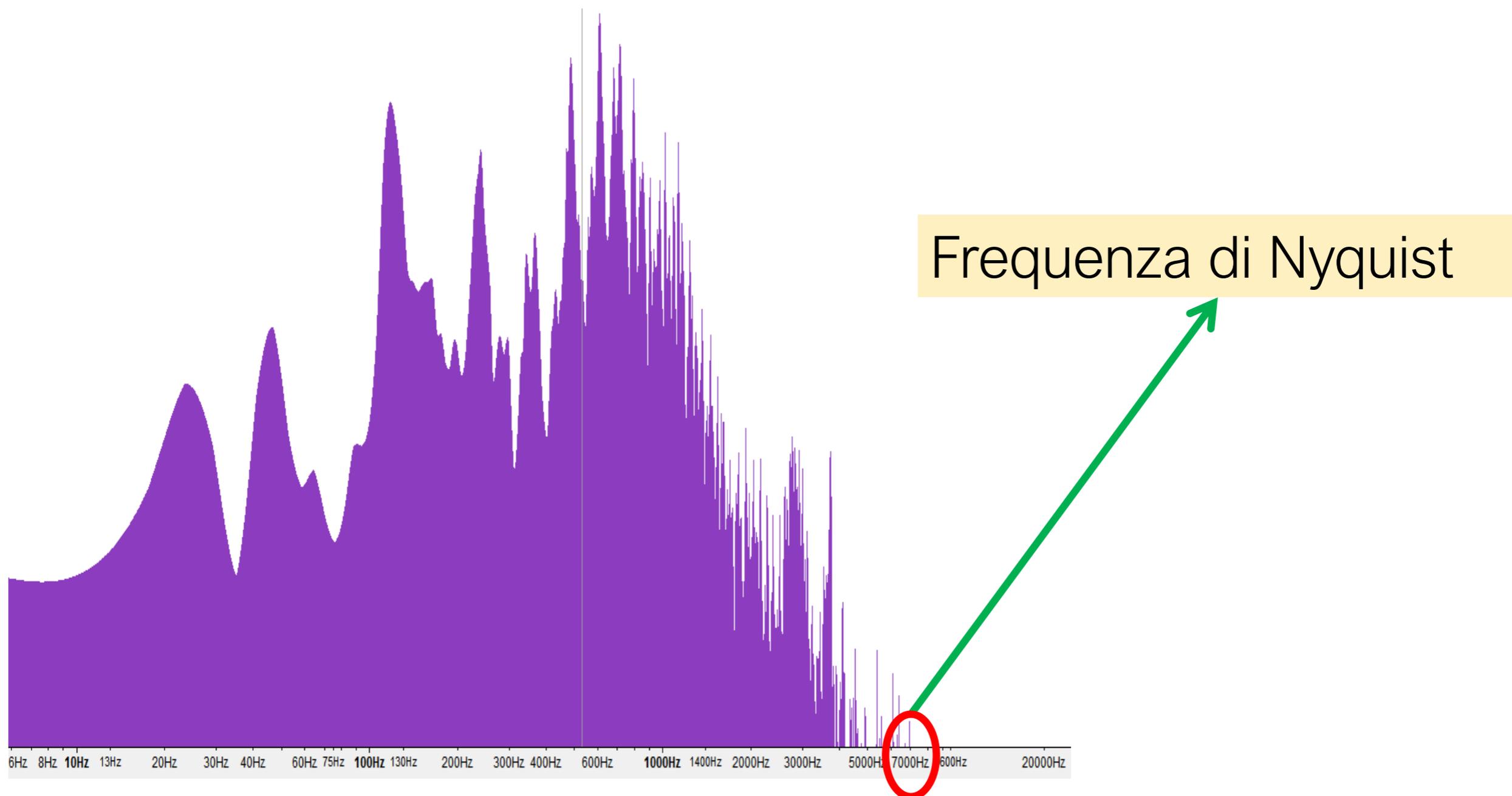
Spettro del segnale precedente

Frequenza di Nyquist

... si passa al dominio delle frequenze.

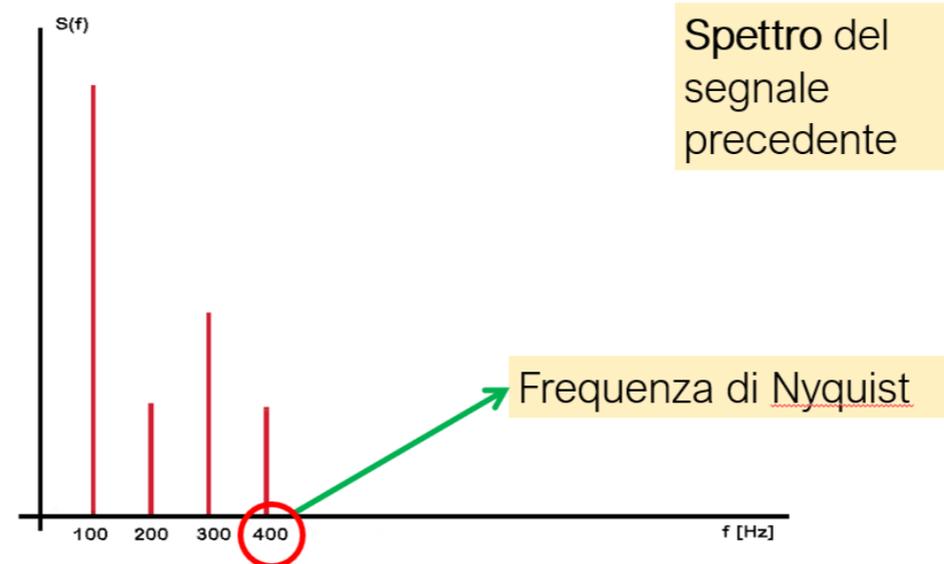


# Esempio non periodico



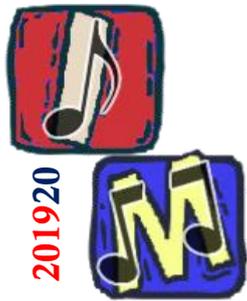


# Tasso di campionamento



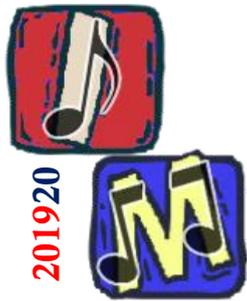
Dunque un segnale come quello precedente (periodico e a banda limitata), che ha come massima frequenza dello spettro 400 Hz, può essere ricostruito fedelmente prendendo i campioni con un tasso di campionamento di almeno 800 Hz.

In altre parole, servono almeno 800 campioni al secondo.



Perché proprio al doppio della  
frequenza di Nyquist?

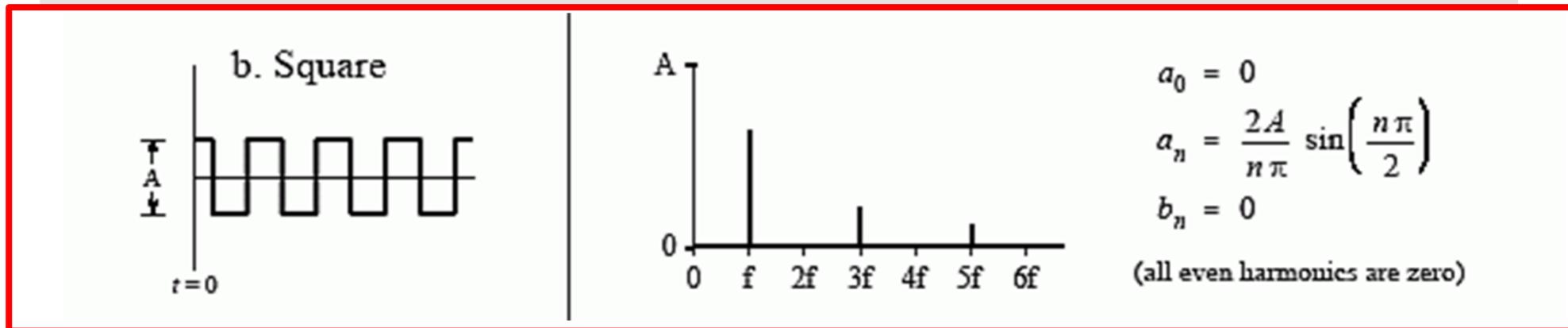
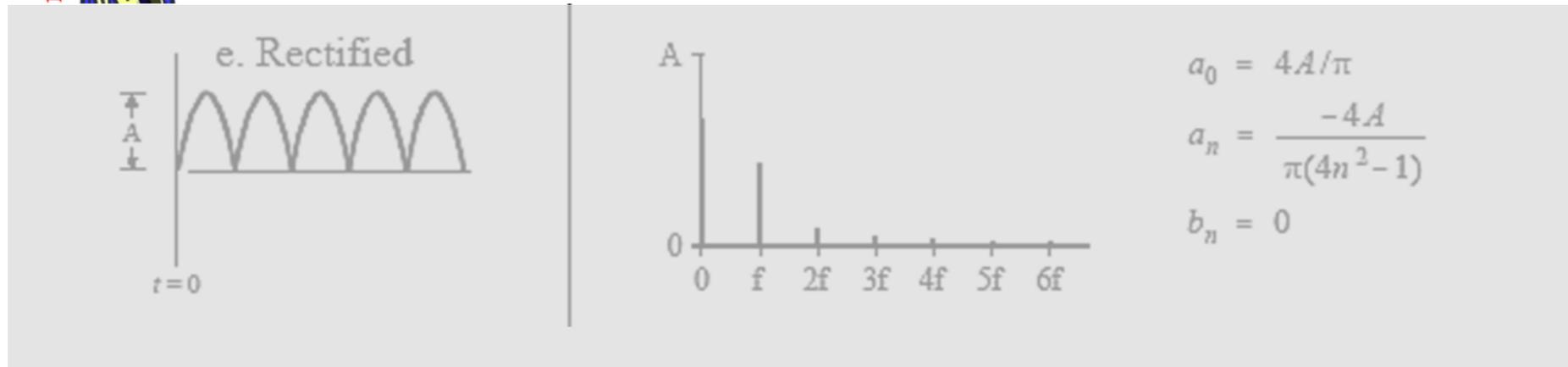




# Richiamo dalle lezioni sull'Acustica



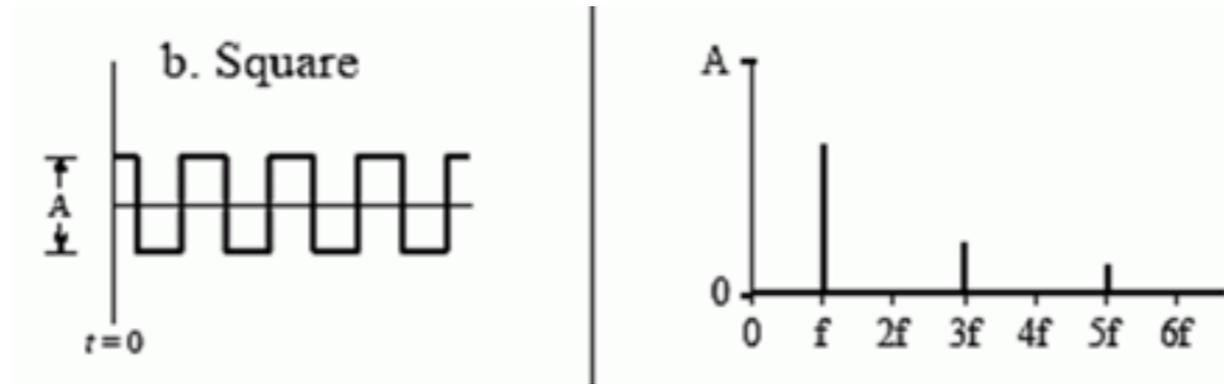
## Esempi – Raddrizzata e Quadra



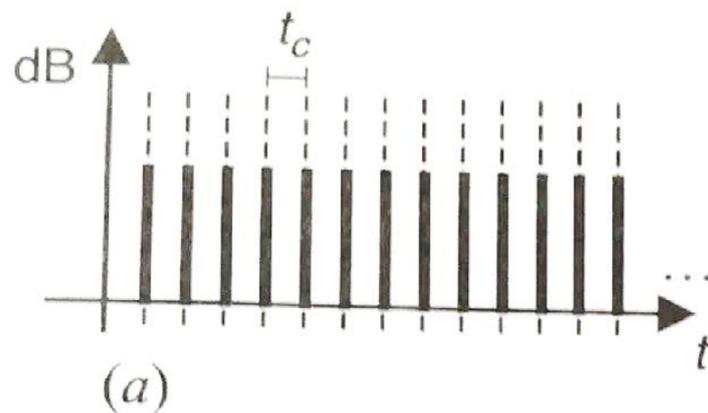
Lo stesso discorso relativo al numero di termini elementari necessari a rappresentare le onde triangolari e a dente di sega, vale per le due onde sopra.



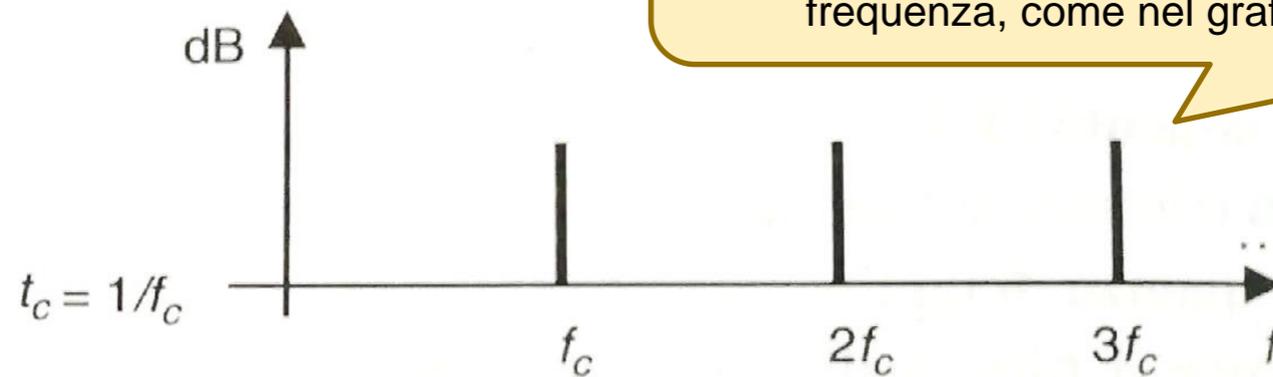
# Spettro di un treno di impulsi



Per praticità stiamo assumendo che le armoniche abbiano ampiezza costante, in realtà decrescono con l'aumentare della frequenza, come nel grafico sopra

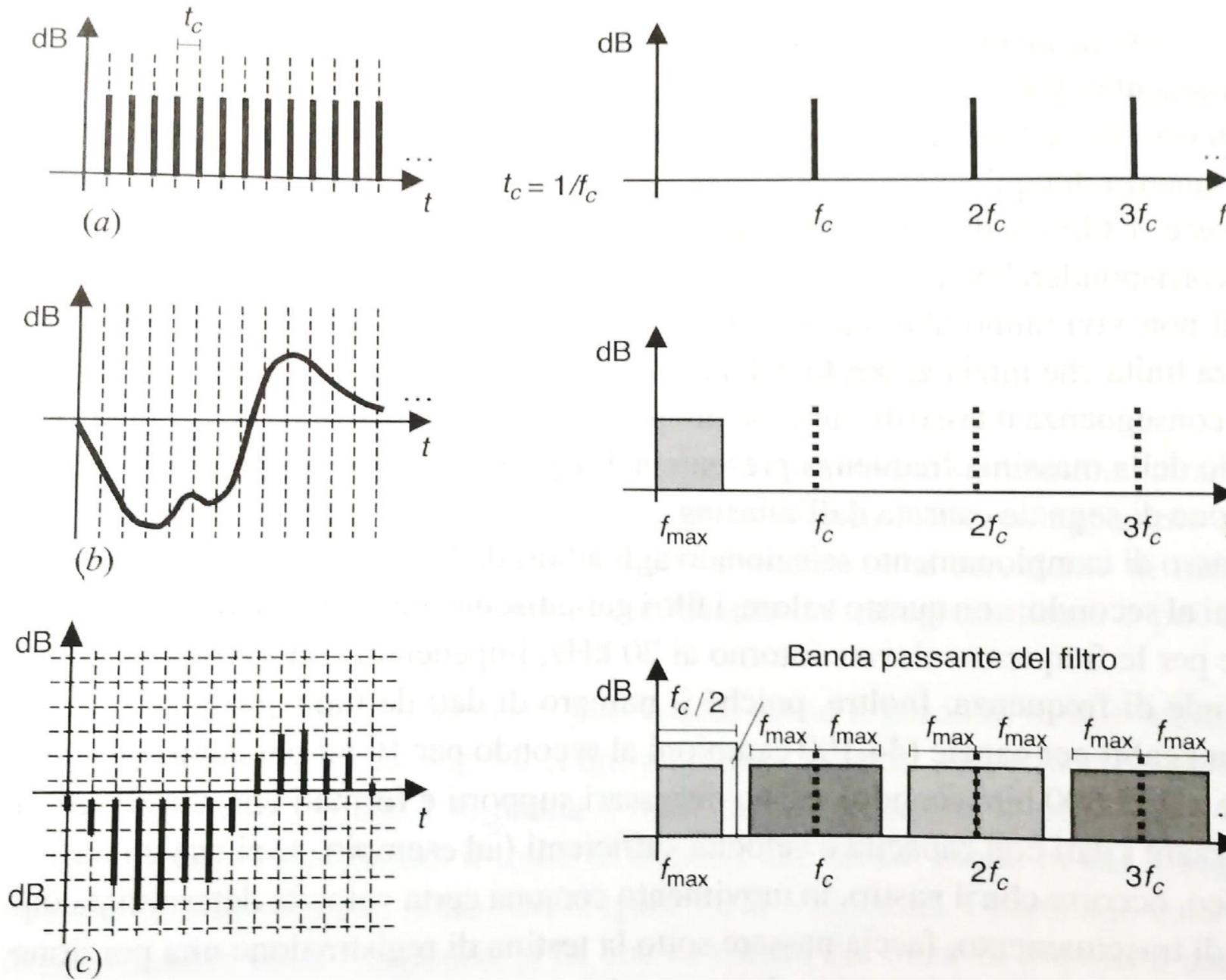


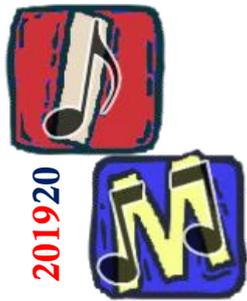
Ad ogni impulso si estrae un campione dalla traccia audio



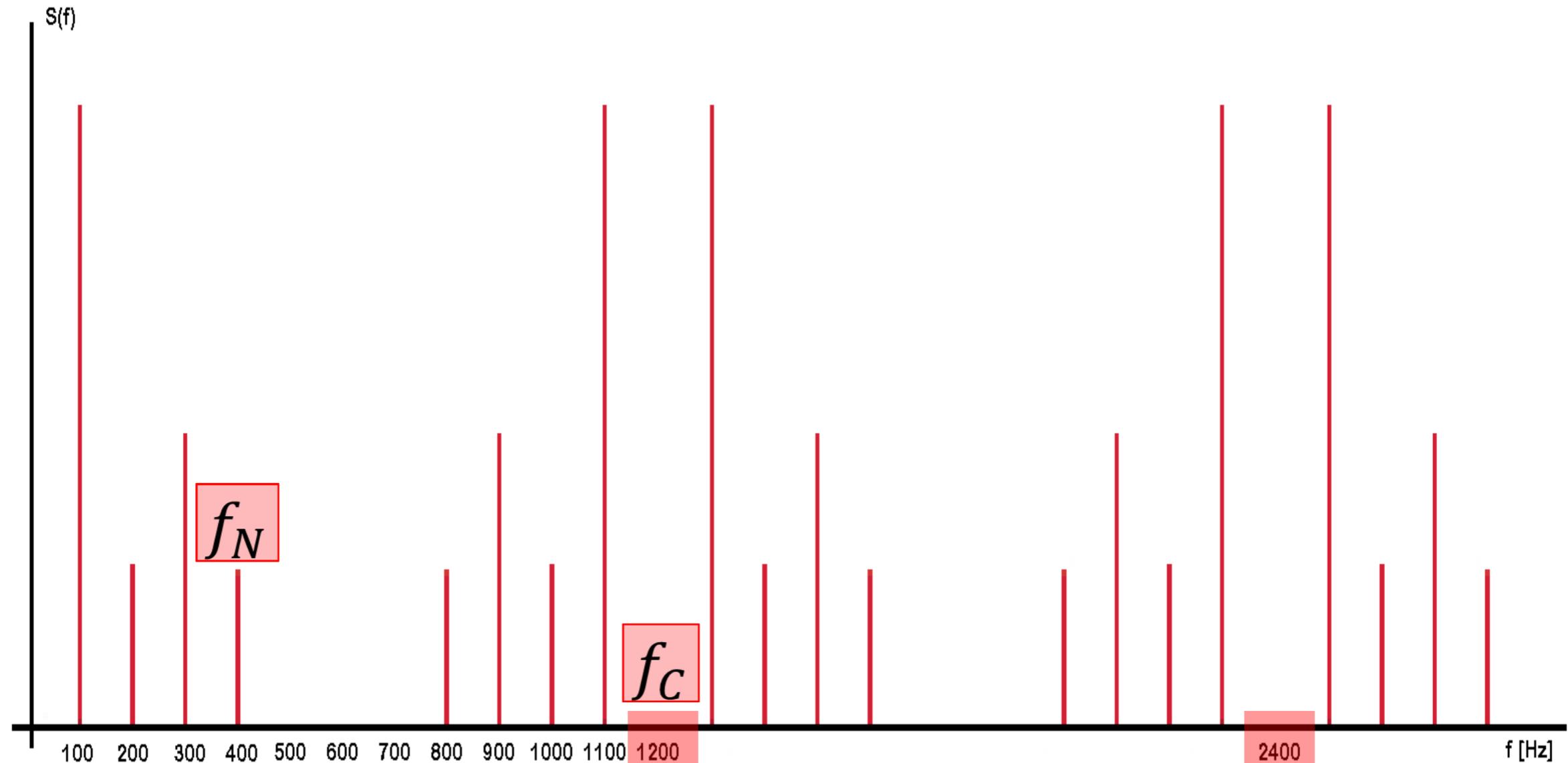


# Campionamento come modulazione di una forma d'onda su un treno di impulsi

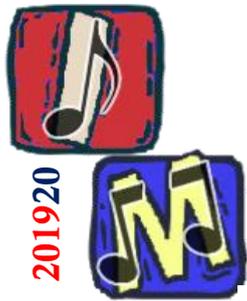




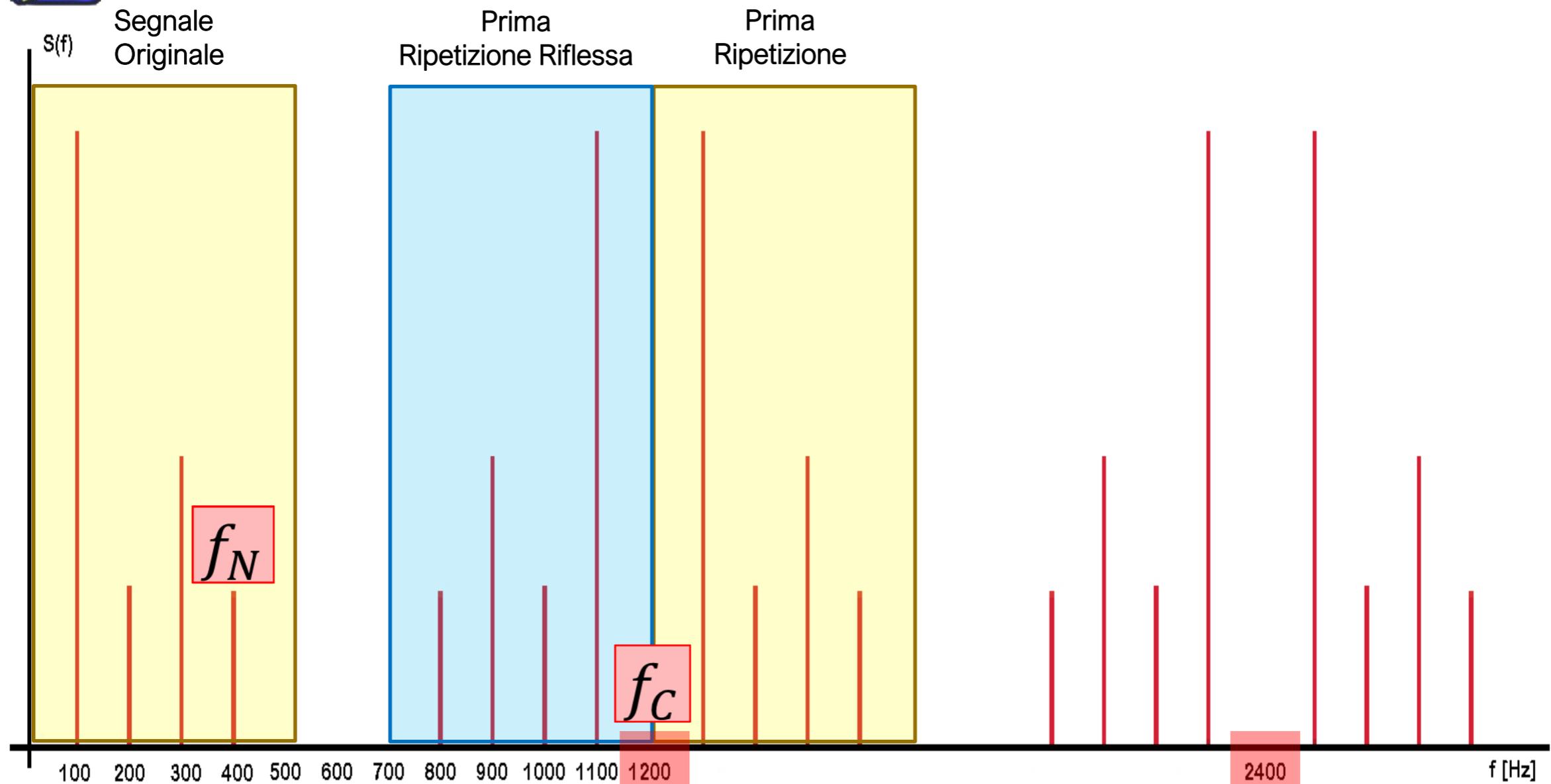
# Esempio: Spettro del segnale campionato con $f_c = 1200\text{Hz}$



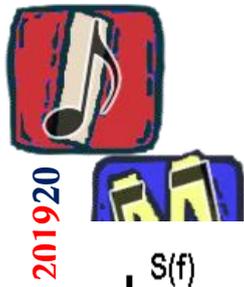
Nello spettro del segnale campionato, lo spettro originale si ripete per multipli della frequenza di campionamento e viene anche riflesso. Nell'esempio si vede lo spettro del segnale campionato con tasso di campionamento pari a 1200 Hz.



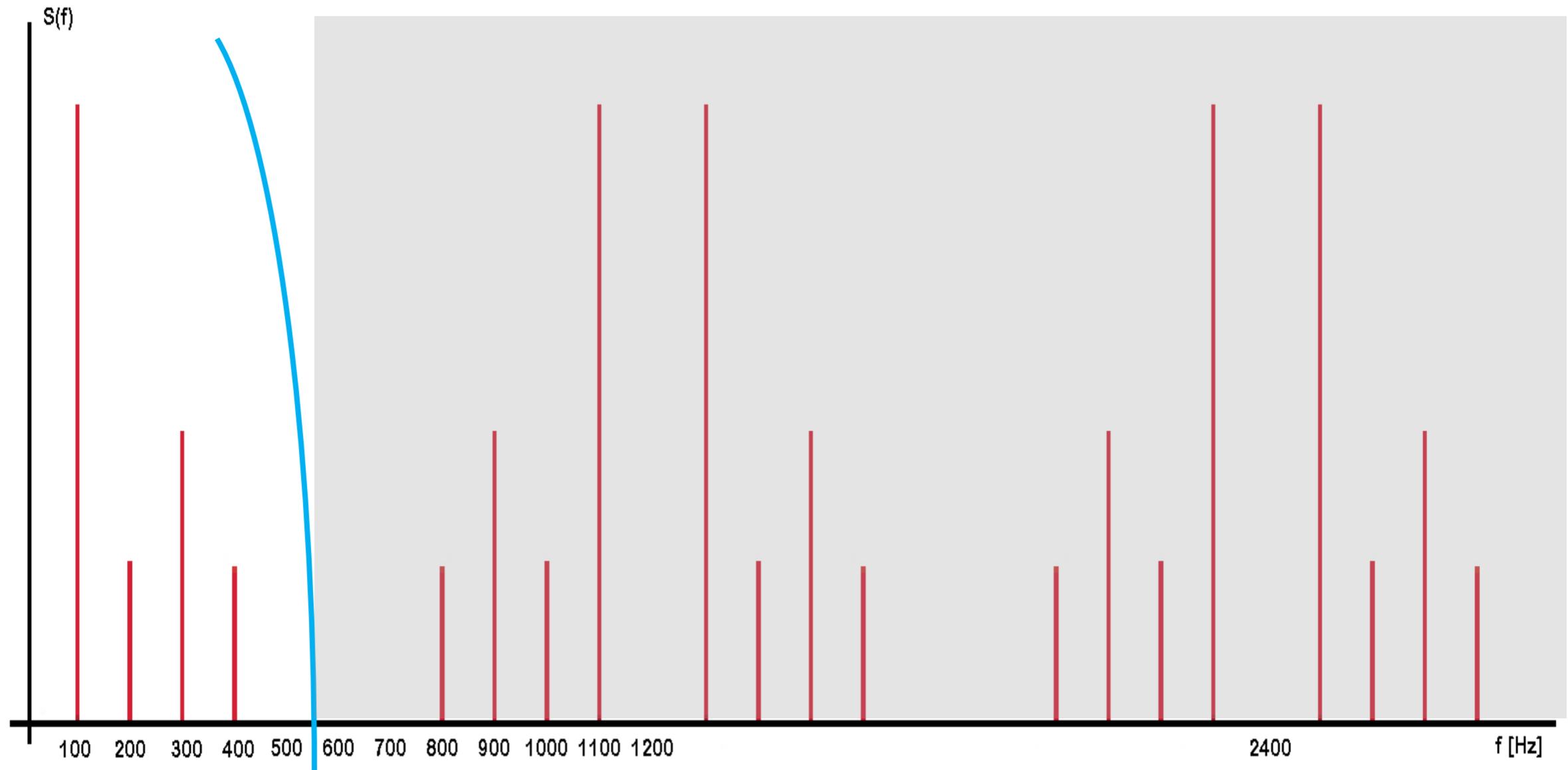
# Esempio: Spettro del segnale campionato con $f_c = 1200\text{Hz}$



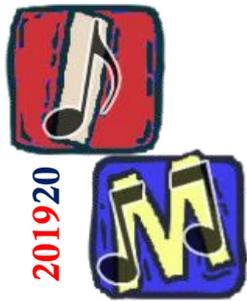
Nello spettro del segnale campionato, lo spettro originale si ripete per multipli della frequenza di campionamento e viene anche riflesso. Nell'esempio si vede lo spettro del segnale campionato con tasso di campionamento pari a 1200 Hz.



# Ricostruzione segnale originale



Per ricostruire il segnale originale bisogna eliminare tutte le frequenze indesiderate (non presenti in origine). Per questo si utilizza un **filtro passa basso** che elimini tutte le frequenze superiori a quella di Nyquist originale.

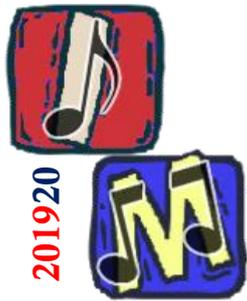


# Sottocampionamento

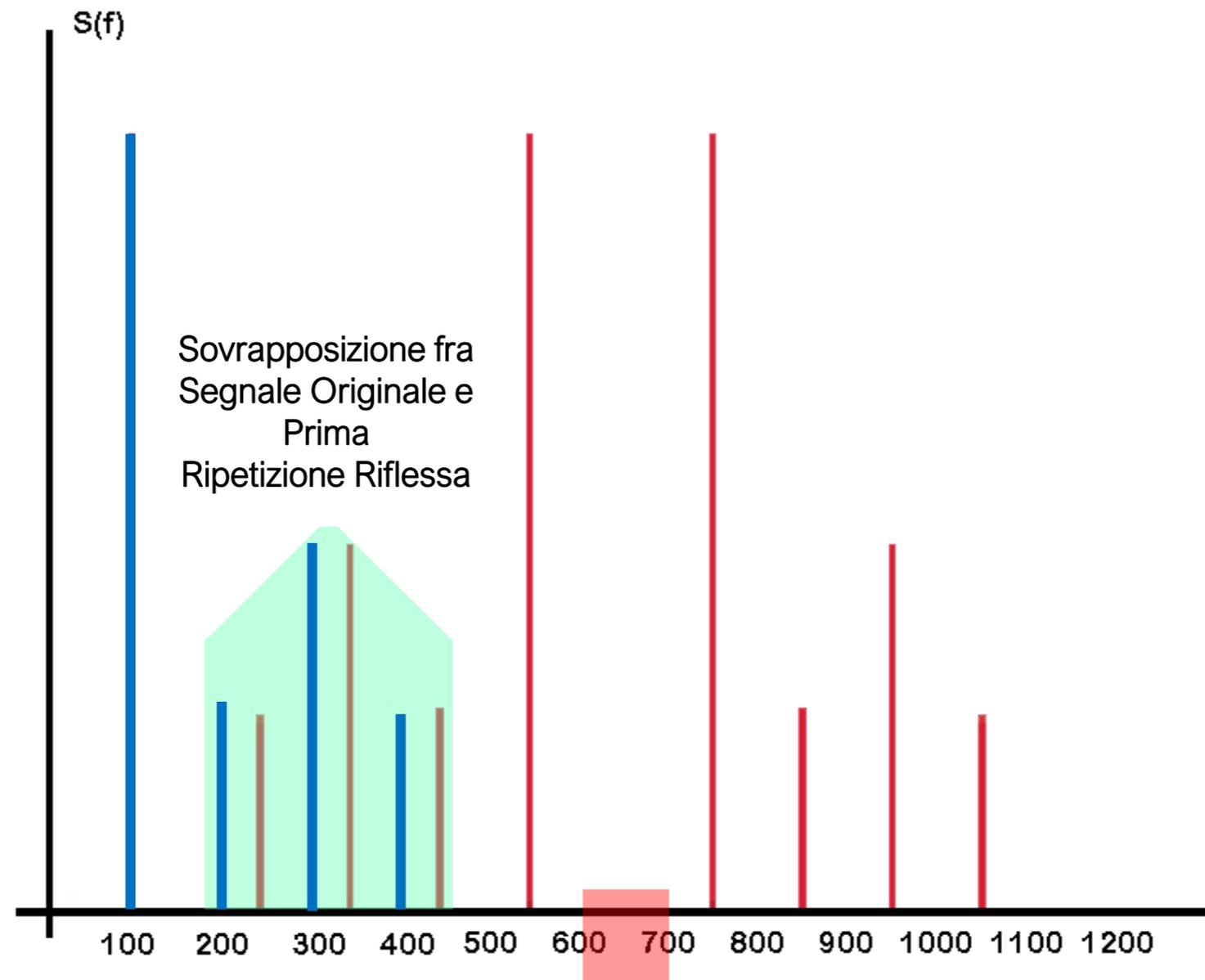
Cosa accade se la frequenza di campionamento è troppo bassa?

- Si perdono dettagli del segnale originale.
- Si introducono informazioni in origine non presenti, cioè una distorsione: **Aliasing**.

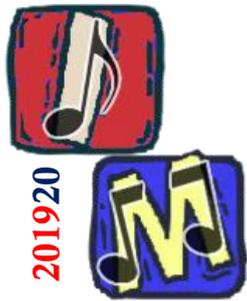
L' *aliasing* deriva da una sovrapposizione delle più alte frequenze dello spettro del segnale originale, con le frequenze introdotte nel segnale campionato



# Aliasing



Nell'esempio il segnale è stato campionato ad un frequenza di 650 Hz, più piccola di quella suggerita dal teorema del campionamento. Alcune righe spettrali attorno alla frequenza di campionamento, sono andate a sovrapporsi alle frequenze originali.



# Audio digitale - Campionamento

- E' chiaro che una frequenza di campionamento alta è sempre migliore, in termini di qualità del segnale finale, rispetto ad una più bassa.
- Nonostante ciò, oltre una certa soglia, prendere troppi campioni porterebbe ad uno spreco di memoria senza effettivi miglioramenti.

Quale potrebbe essere una buona frequenza di campionamento per un suono?



# Audio digitale - Campionamento

- IDEA: gli esseri umani percepiscono frequenze fino a **20000 Hz**. Elimino tutte le frequenze superiori, così da rendere il suono a **banda limitata**.
- Una possibilità è campionare ad una frequenza di campionamento  $f_c$  pari a **44100 Hz**. Un *secondo* di audio digitale sarà rappresentato quindi da 44100 campioni.
- Questa frequenza è tipica degli audio digitali. E' un po' più del doppio di 20000, per assicurarsi una **banda di sicurezza**. Ricordiamo infatti che i **filtri passabasso ideali non esistono!** E' bene quindi non campionare esattamente al doppio della frequenza di Nyquist



# Approfondimenti

- **Progetto 31 – 2018/19: Il vinile**  
A cura di Di Blasi S.  
<https://fmilotta.github.io/teaching/computermusic/Projects/ComputerMusic-Project-31b-2018-IT.pdf>
- ***[EN] YouTube: Piezoelectricity***  
<https://www.youtube.com/watch?v=wcJXA8IqYI8>
- ***Biografia di Claude Shannon***  
<https://biografieonline.it/biografia-claude-shannon>
- ***[EN] YouTube: Documentario su Claude Shannon***  
[https://www.youtube.com/watch?v=z2Whj\\_nL-x8](https://www.youtube.com/watch?v=z2Whj_nL-x8)
- ***[EN] YouTube: Shannon e il topolino Teseo***  
<https://www.youtube.com/watch?v=nS0luYZd4fs>