

OSCILLOSCOPI

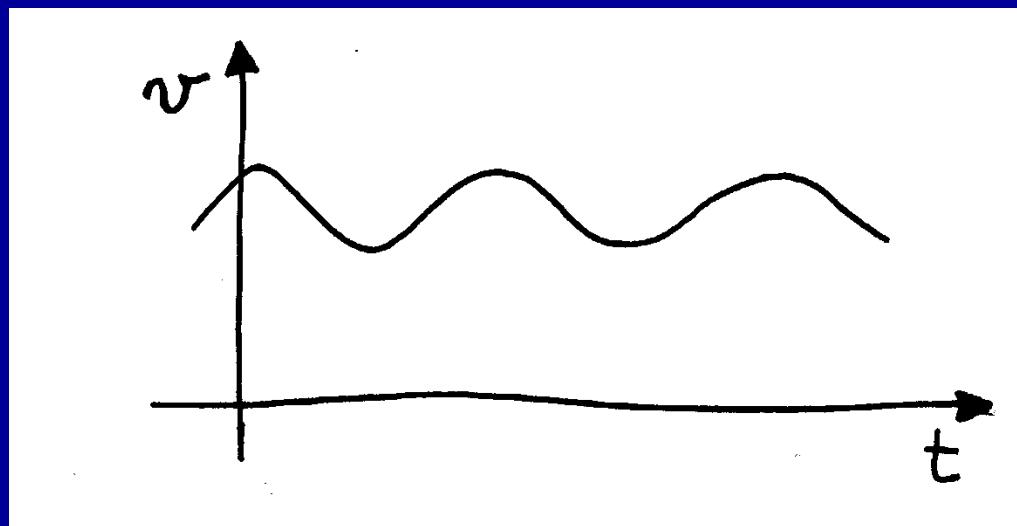
funzionamento OSC ANALOGICO e SONDE



prof. Cesare Svelto

L'oscilloscopio (oscillografo)

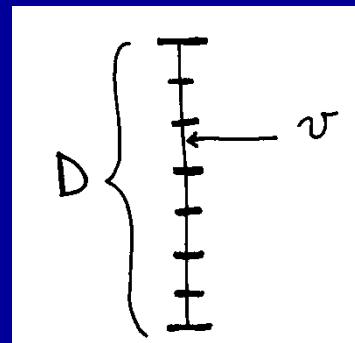
E' uno strumento di misura che consente la visualizzazione grafica dell'evoluzione temporale di un segnale di **tensione** (in ordinata o Asse Y) in funzione del **tempo** (in ascissa o Asse X)



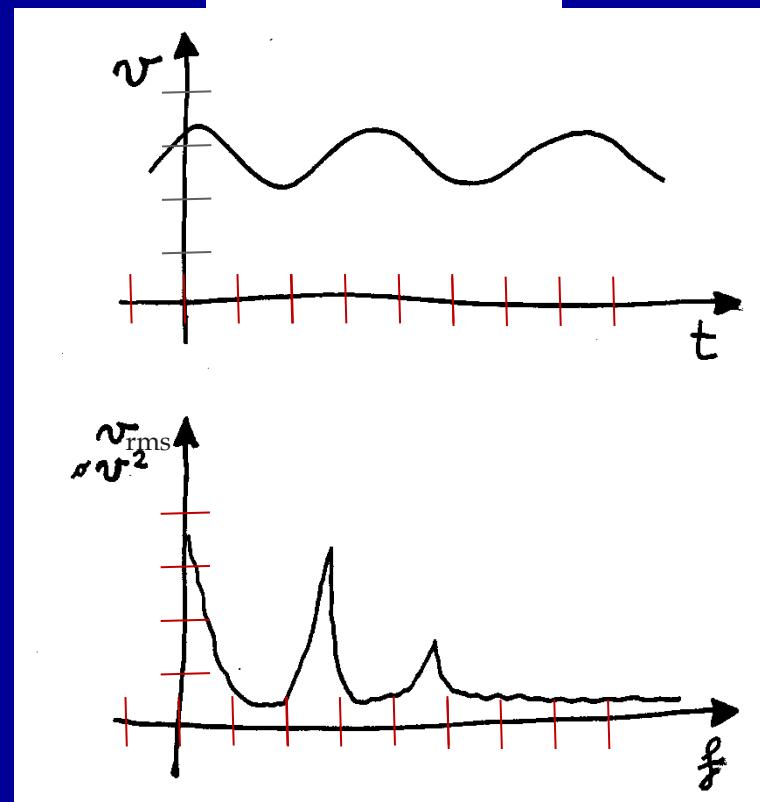
Utilizzando scale calibrate e graduate, è possibile effettuare **misure quantitative** oltre che qualitative

Confronto tra Strumenti di Misura

1) VOLTMETRI



2) OSCILLOSCOPI



3) ANALIZZATORI
DI SPETTRO

Sezioni dell'Oscilloscopio

4 SEZIONI PRINCIPALI

- 1) Schermo e regolazione della traccia
- 2) Condizionamento e amplificazione verticale
(accoppiamenti e guadagni d'ingresso)
- 3) Sincronismo (trigger)
- 4) Base dei tempi (amplificazione orizzontale)

Funzioni delle 4 Sezioni

1) Schermo e regolazione della traccia

consente di visualizzare una traccia luminosa che evolve nel dominio del tempo (asse X) tenendo conto dei livelli di tensione (asse Y)

2) Condizionamento e amplificazione verticale

consente di accoppiare il segnale in DC o AC (o GND) e di scegliere il fattore di scala verticale $A_Y=[V/DIV]$ per l'asse Y

3) Sincronismo (trigger)

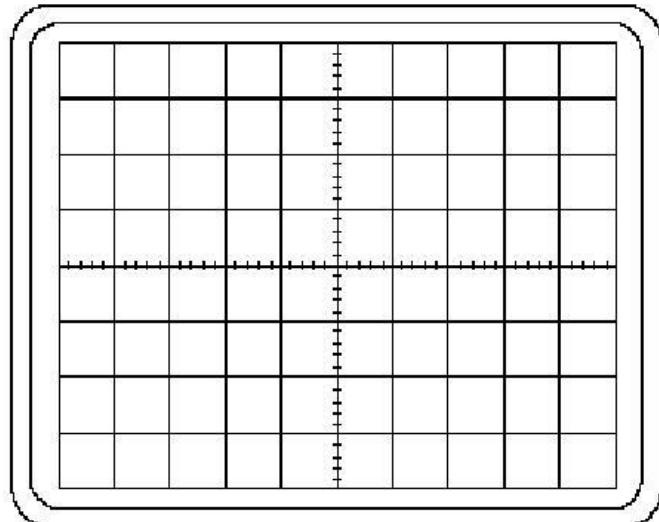
consente di "agganciare" un livello, con una data pendenza, sul segnale di trigger e da quel punto fa partire la visualizzazione

4) Base dei tempi (amplificazione orizzontale)

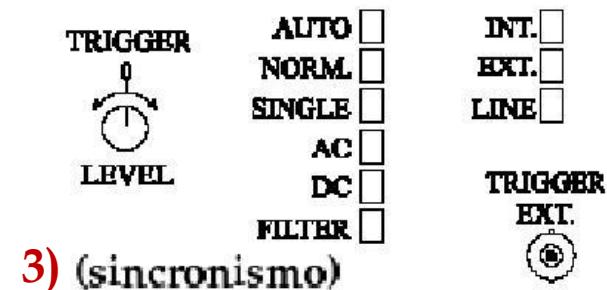
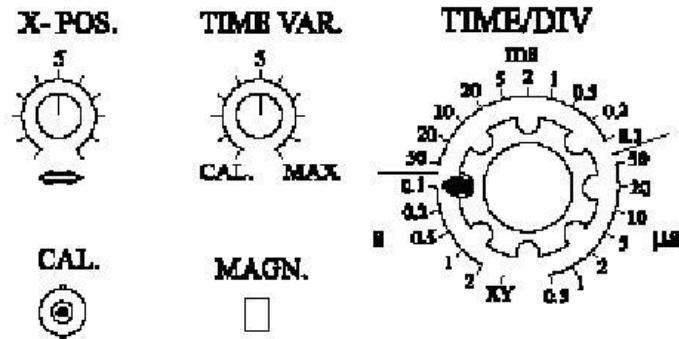
consente di "scansionare" la traccia da sx a dx lungo l'asse X e di scegliere il fattore di scala orizzontale $A_X=[s/DIV]$

Pannello frontale

1) (schermo)

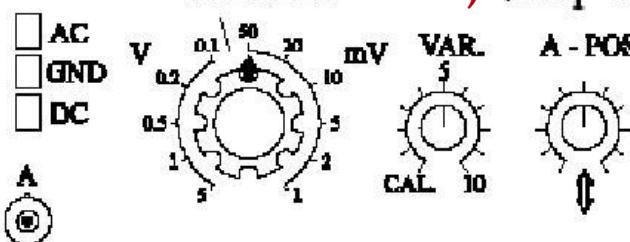


4) (base dei tempi)

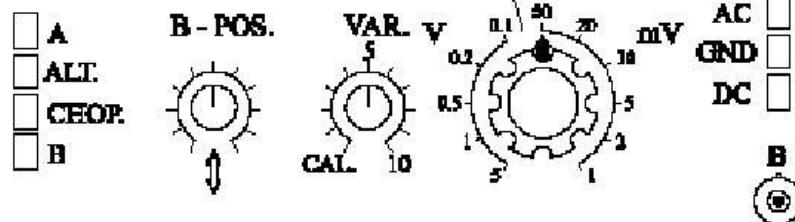


3) (sincronismo)

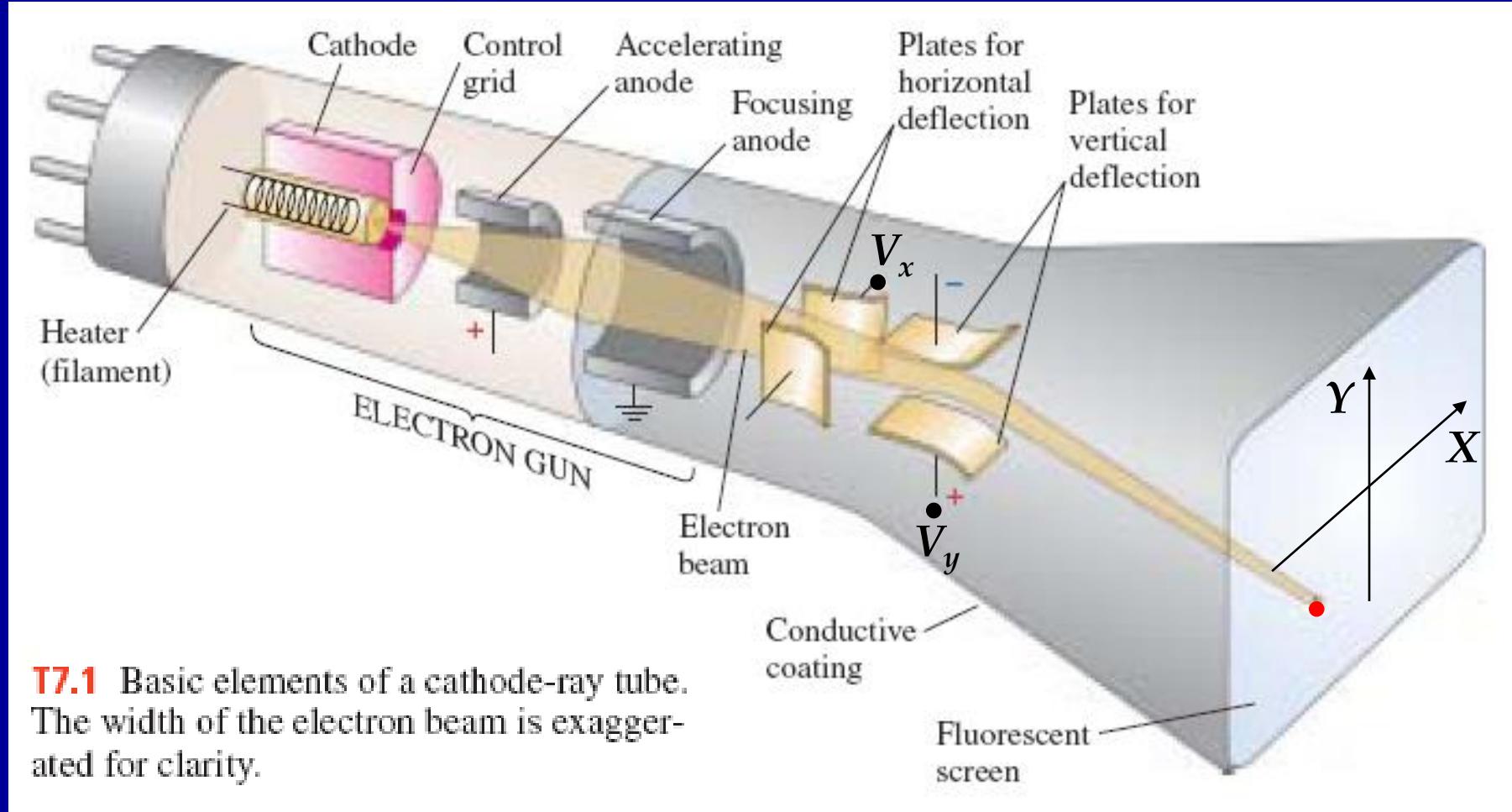
VOLT/DIV



2) (amplificazione verticale)



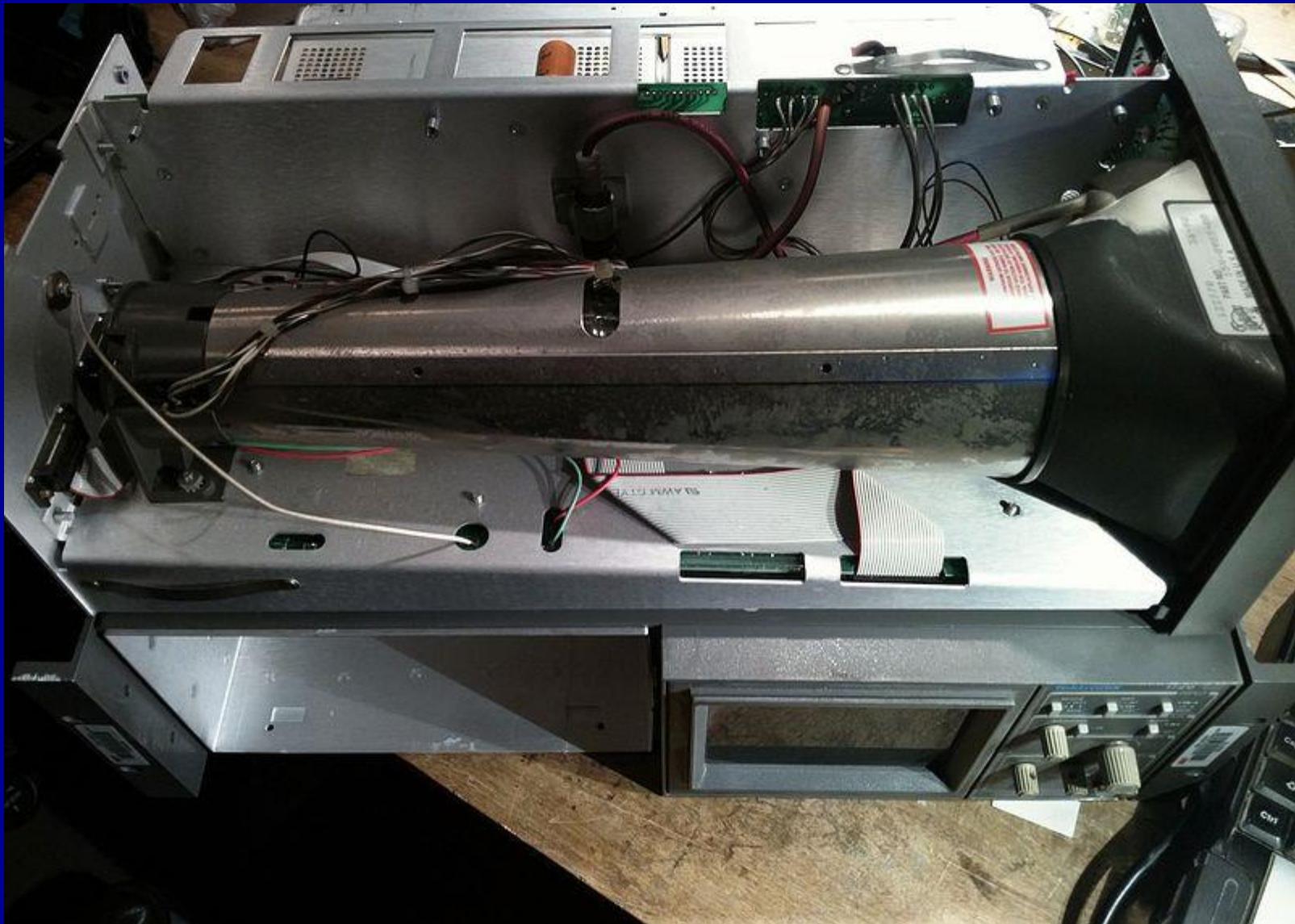
Tubo a raggi catodici (TRC o CRT)



T7.1 Basic elements of a cathode-ray tube.
The width of the electron beam is exaggerated for clarity.

Controllando le tensioni di deflessione, V_y e V_x , è possibile “disegnare” sullo schermo (PLOT X-Y) l’andamento dei segnali in funzione del tempo

Tubo a raggi catodici (TRC o CRT)



YOUTUBE Videos on CRTs

Electrostatic deflection of cathode Rays

<https://www.youtube.com/watch?v=Ne4ls1xEgiI>

Incredible Homemade Cathode Ray Tube - Part 1

<https://www.youtube.com/watch?v=5-Bco8KRpmU>

The Cathode Ray Tube "how it works"

Year 1943 16mm U.S. military training film

<https://www.youtube.com/watch?v=GnZSopHjmYQ>

Sensibilità e banda passante (1/3)

Considerando il caso di un segnale sinusoidale $\omega=2\pi f$ applicato in tensione per la deflessione verticale:

$$V_y(t) = V_y \sin(\omega t + \varphi) = V_y \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) \text{ SEGNALE}$$

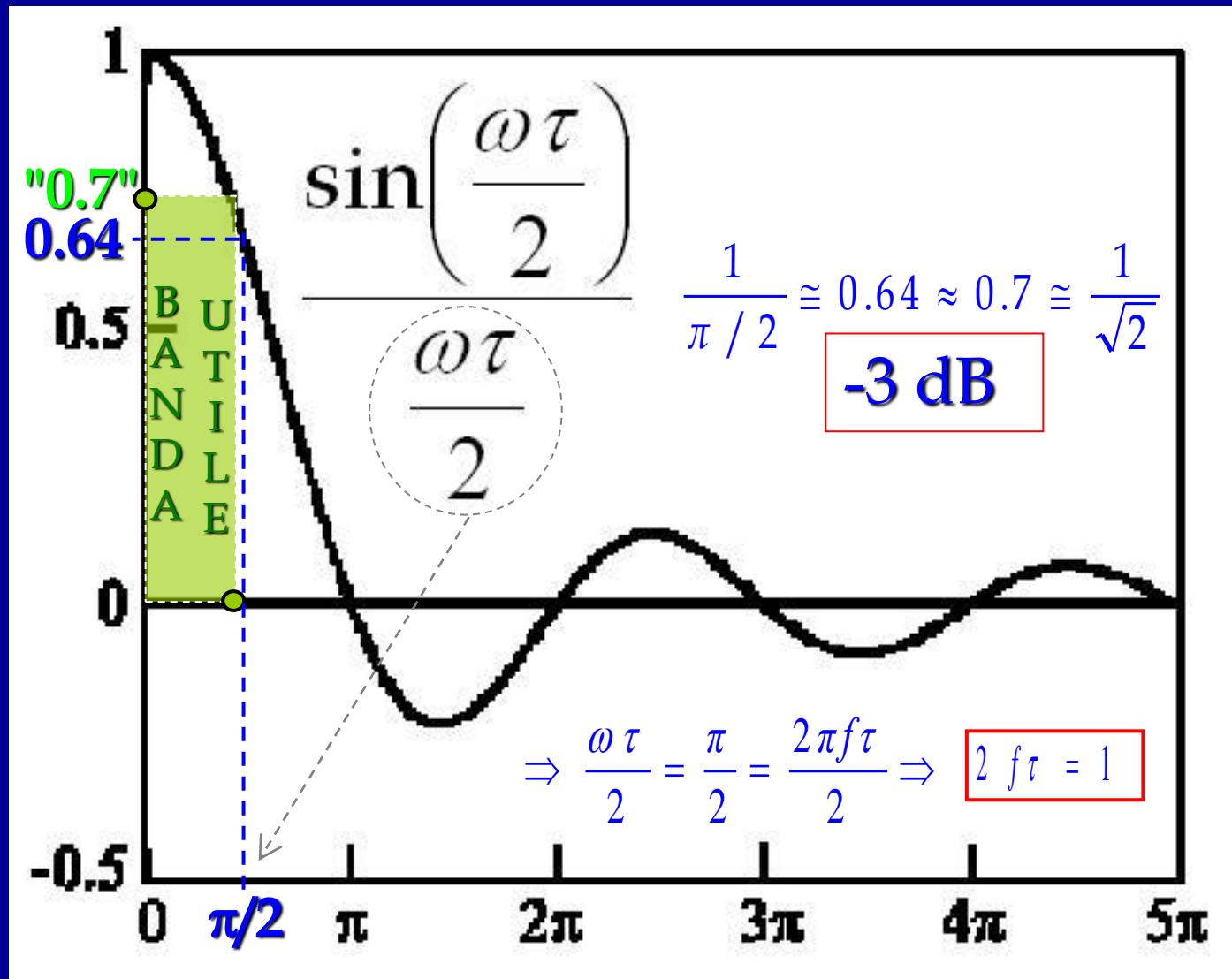
$$Y = \frac{BL}{2dV_{\text{acc}}} \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \cdot V_y \text{ DEFLESSIONE}$$

B, L, d
 V_{acc}, τ

$$S_{\text{d.}} = \frac{Y}{V_y} = \frac{BL}{2dV_{\text{acc}}} \frac{\sin\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)}{\frac{\omega\tau}{2}} = S_{\text{s.}} \frac{\sin\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)}{\frac{\omega\tau}{2}} \text{ SENSIBILITÀ'}$$

$\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) = (\pi f\tau)$ come nel voltmetro integratore

Sensibilità e banda passante (2/3)



Sensibilità e banda passante (3/3)

Frequenza massima di lavoro, BANDA, è f_{\max} t.c. :

$$\frac{\omega \tau}{2} = \frac{\pi}{2} \text{ per cui l'ampiezza si riduce di } \frac{1}{\pi/2} \approx 0.64 \approx 0.7 \approx \frac{1}{\sqrt{2}}$$

“Banda utile” di lavoro per “misure non distorte”:

$$\frac{\omega \tau}{2} < \frac{\pi}{2} \Rightarrow \frac{2\pi f \tau}{2} < \frac{\pi}{2} \Rightarrow f_{\max} = \frac{1}{2\tau} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{e V_{\text{acc}}}{2m_e}}$$

Banda passante e sensibilità sono requisiti contrastanti !!

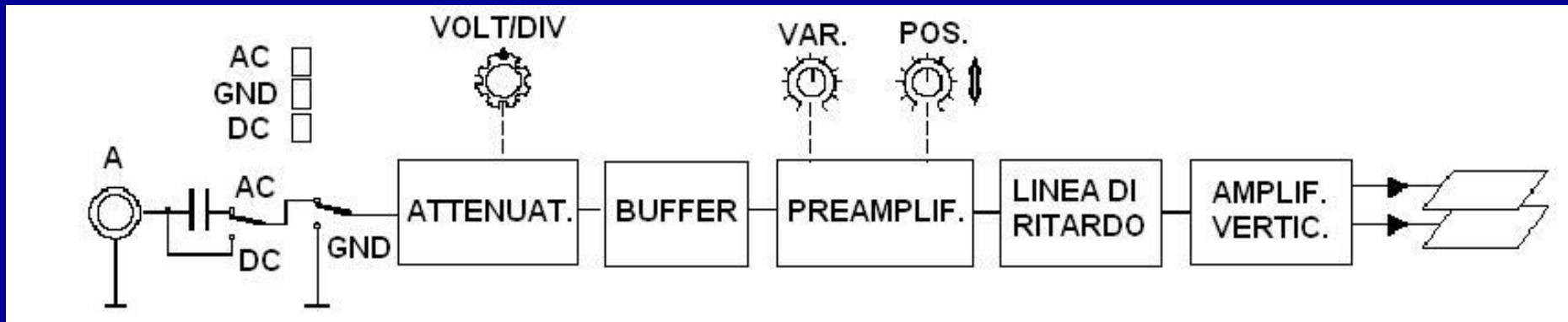
$$S_{\text{s.}} = \frac{B L}{2 d V_{\text{acc}}}$$

$$B \approx f_{\max} \propto \frac{\sqrt{V_{\text{acc}}}}{L}$$

mentre

$$S \propto \frac{L}{V_{\text{acc}}}$$

Condizionamento - ampl. verticale

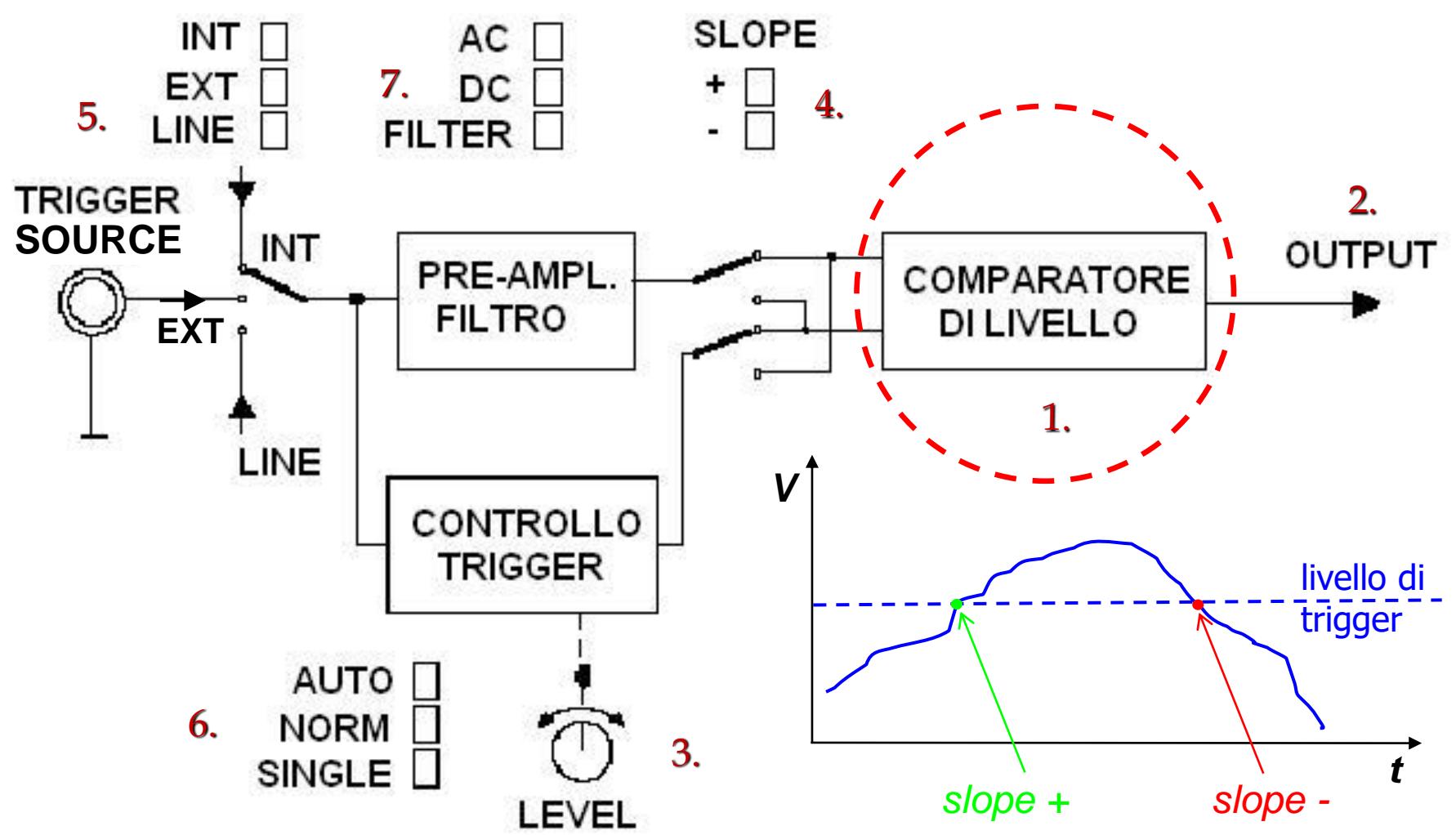


<i>coupling</i>	regolaz. scala vert.	adatt. imped.	guadagno fine e offset	rifasam. X-Y	100-400V alta banda	defl. Y carico C
-----------------	----------------------------	------------------	------------------------------	-----------------	------------------------	---------------------

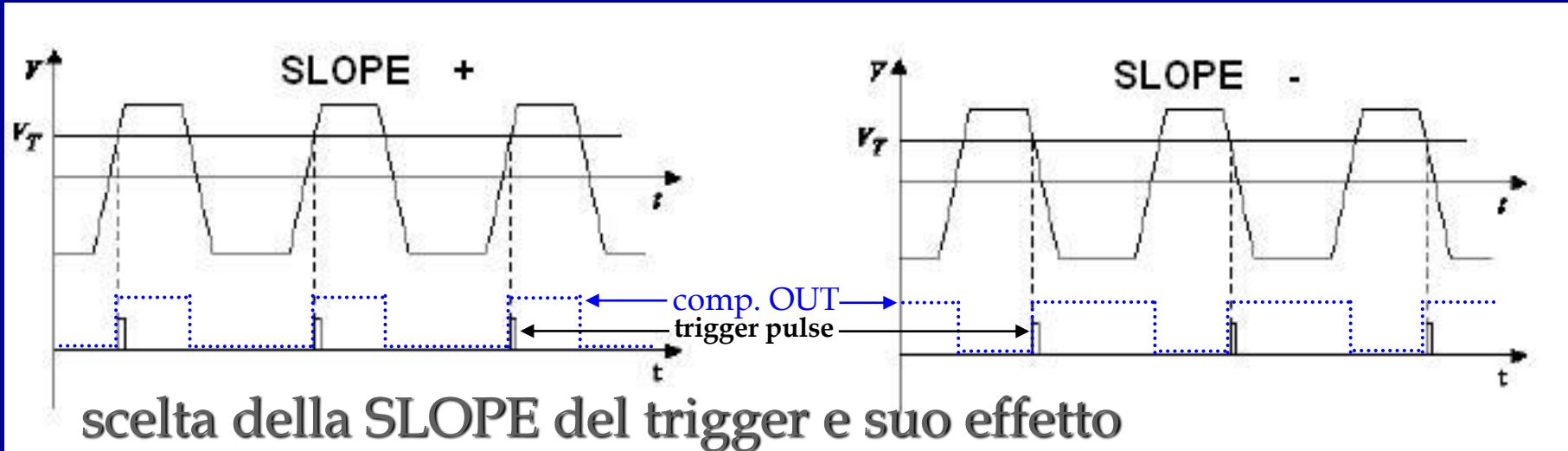
Tempo di salita dell'oscilloscopio (“risposta” Y):

$$t_{\text{so}}[\text{s}] = \frac{k}{B[\text{Hz}]} \left\{ \begin{array}{l} k = 0.35 \text{ per f.d.t. a un polo} \\ \quad (\text{v. lucidi "Misure con l'Oscilloscopio"}) \\ 0.35 < k < 0.5 \text{ per f.d.t. a due poli} \end{array} \right.$$

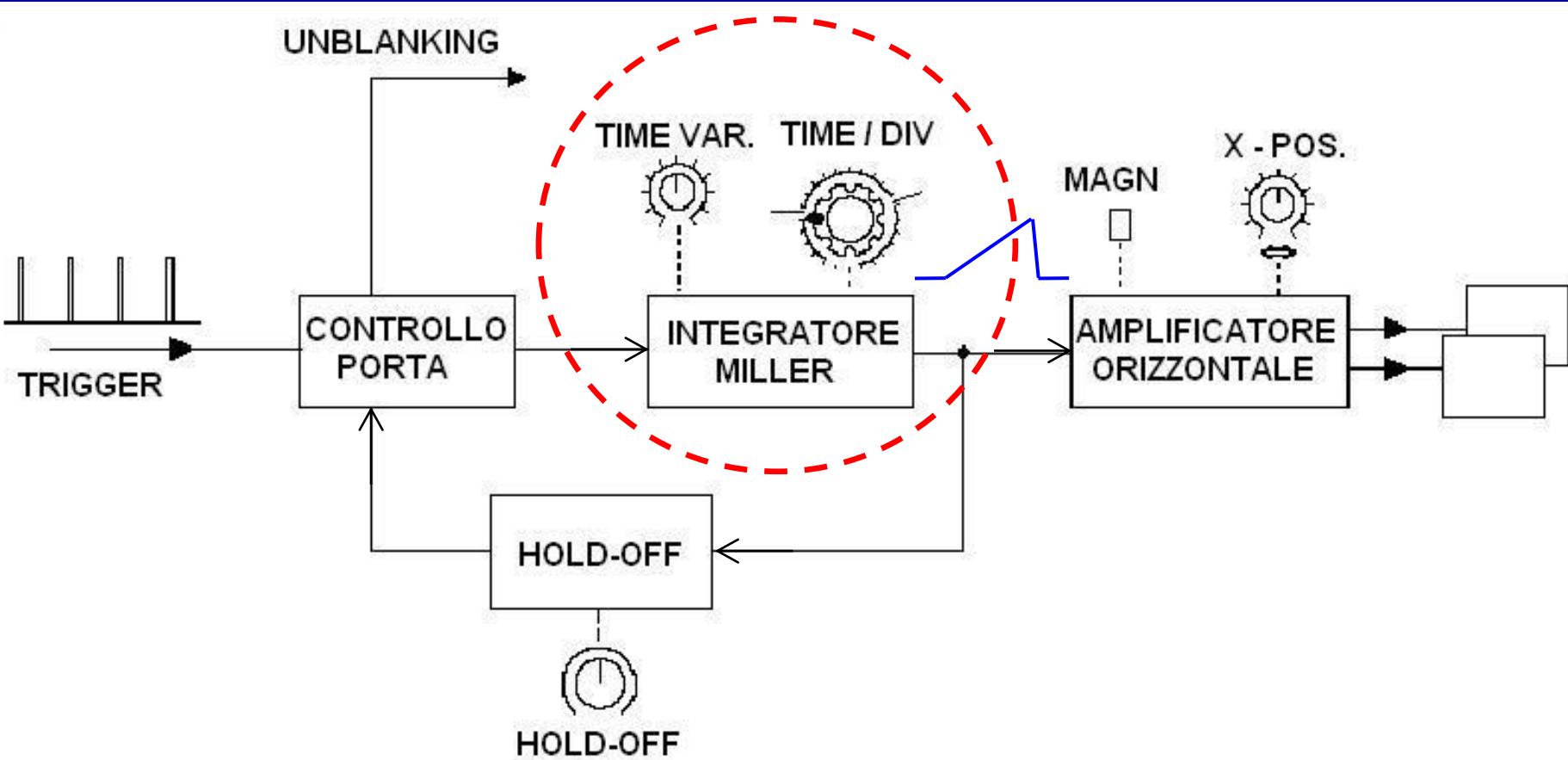
Sincronismo (*trigger*)



Trigger: slope e rumore additivo



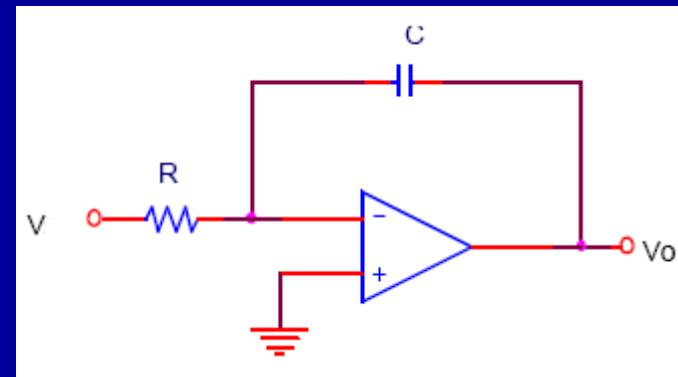
Base dei tempi (1/3)



Base dei tempi (2/3)

INTEGRATORE DI MILLER

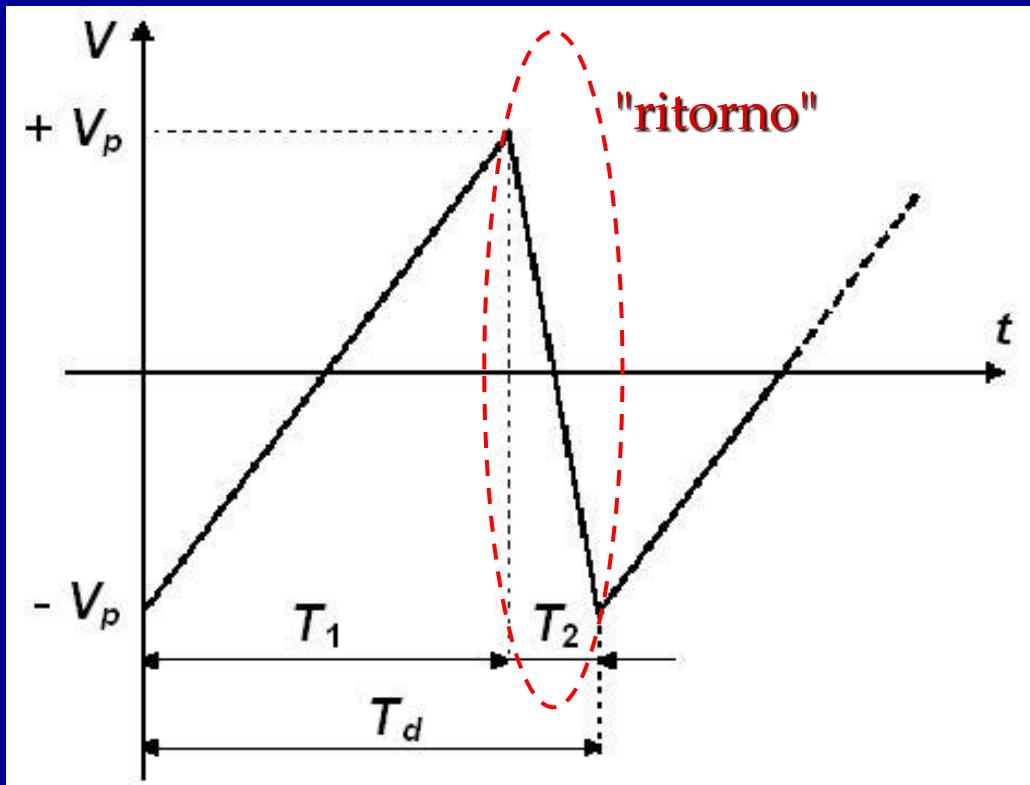
È un amplificatore operazionale, in configurazione invertente, con un condensatore (C) in reazione e una resistenza (R) in ingresso



È comandato da una tensione d'ingresso costante (V) che produce una corrente costante $I = V/R$ quindi "integrata" sul condensatore.

Si ottiene in uscita una **rampa di tensione** con pendenza regolabile variando il valore della costante di tempo RC (variando R e/o C a scatti)

Base dei tempi (3/3)



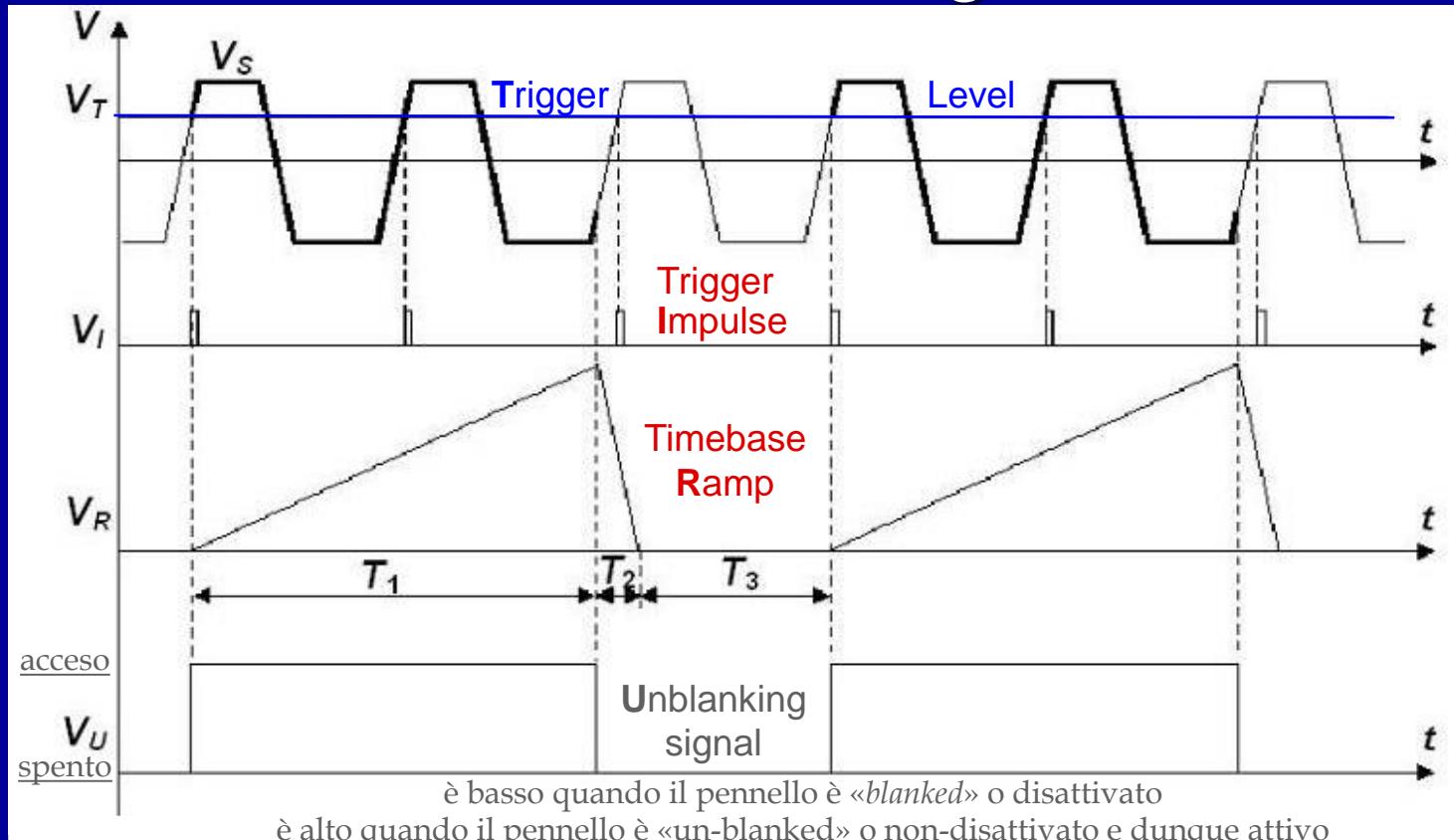
Rampa di deflessione X

L'amplificazione orizzontale è legata alla pendenza della rampa X $A_x \propto p^{-1}$
 $T_x = (2V_p/p)$
 $A_x = T_x / 10\text{DIV}$
= [s/DIV]

Durante il “ritorno” del pennello elettronico (tempo T_2) un comando (*unblanking*, su V_G di griglia) regola a zero l'intensità della traccia luminosa

Base dei tempi e trigger

Effetto del sincronismo sul segnale visualizzato

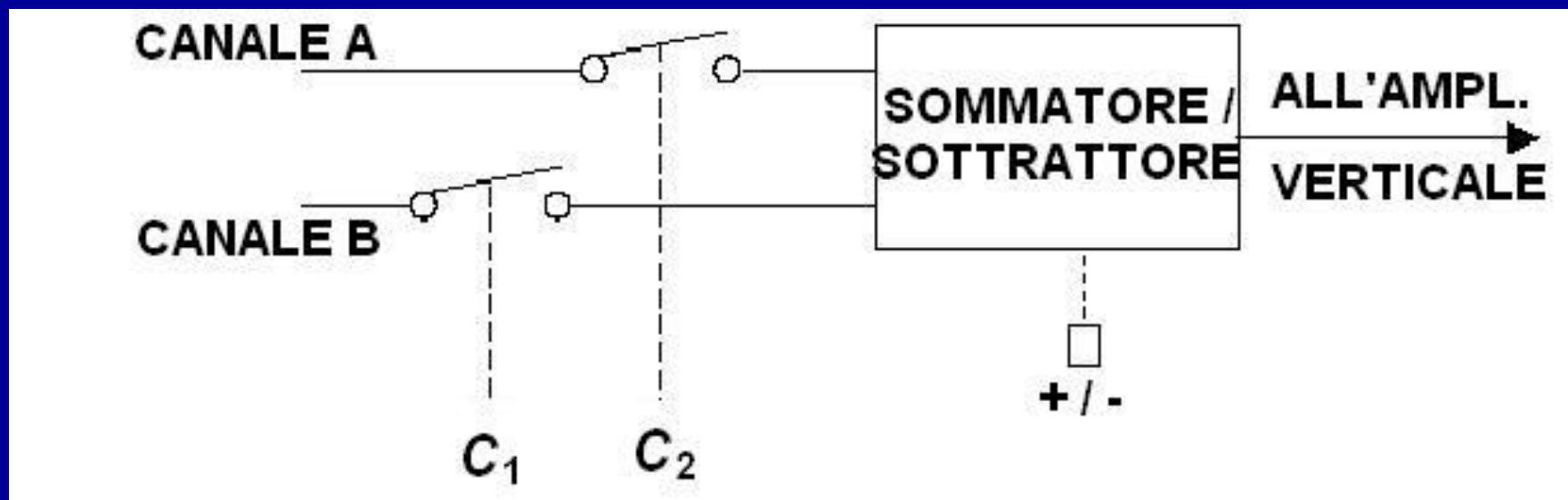


Il tempo T_2 occorre per riportare il pennello elettronico da dx a sx lungo lo schermo (il cannone elettronico è spento $\leftarrow V_U \text{ low}$)

Il tempo T_3 di attesa, prima di partire con il disegno di una nuova traccia, dipende dal segnale d'ingresso (da quando si ri-verificherà una condizione di *trigger* utile; Oscilloscopi V_U rimane *low*)

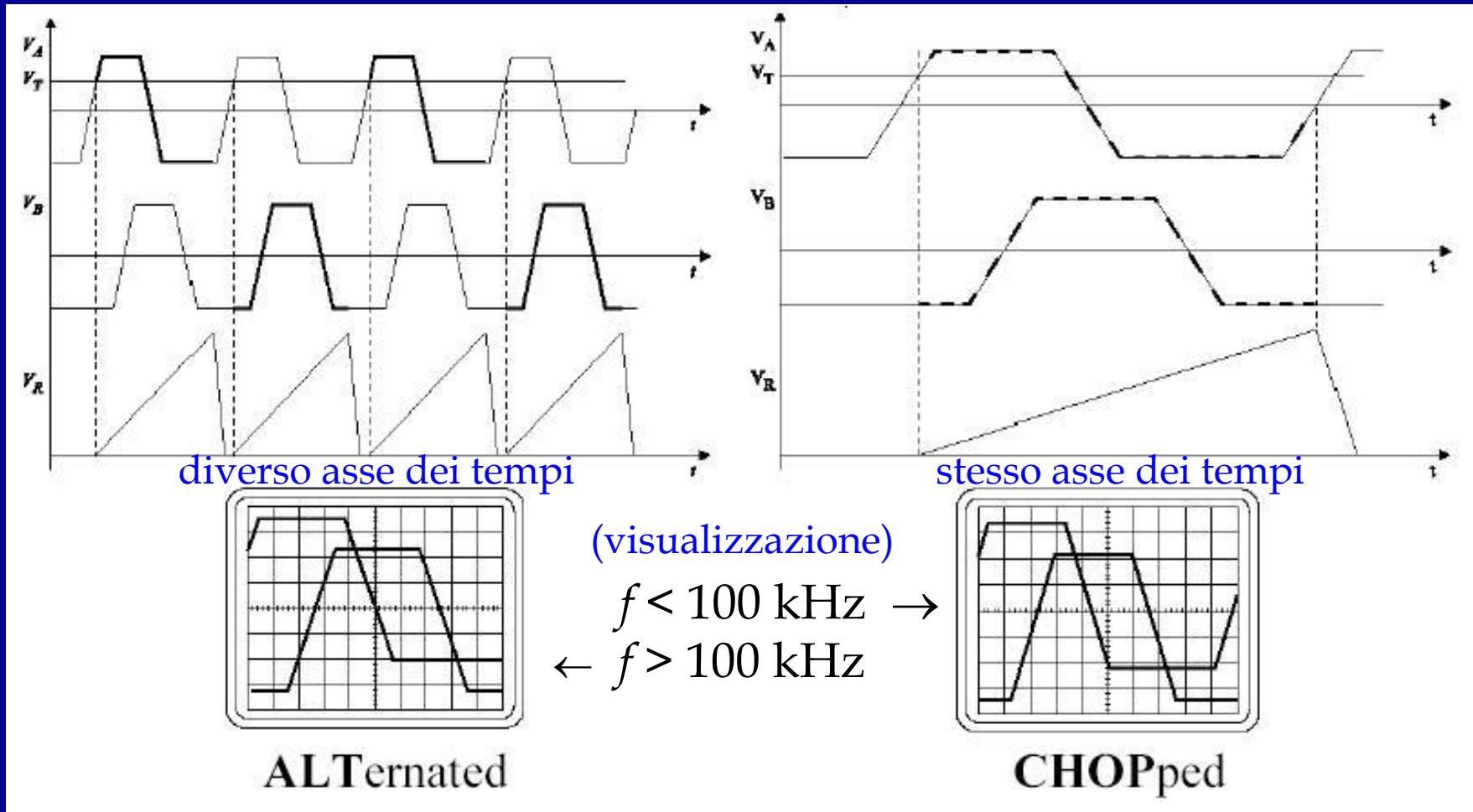
Amplificatore verticale per traccia multipla

Serve a inviare più segnali di misura all'unico amplificatore verticale che comanda le placchette di deflessione Y



I commutatori C_1 e C_2 (interruttori) regolano quali canali andranno all'amplificatore verticale e secondo quale modalità temporale

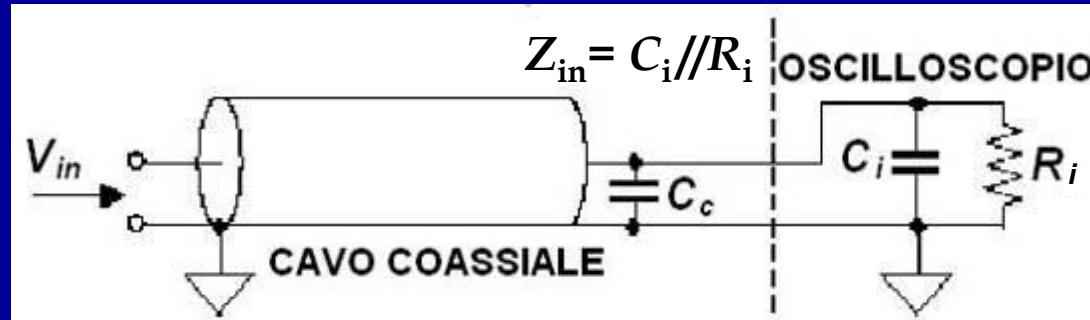
Multitraccia: ALTERNATED e CHOPPED



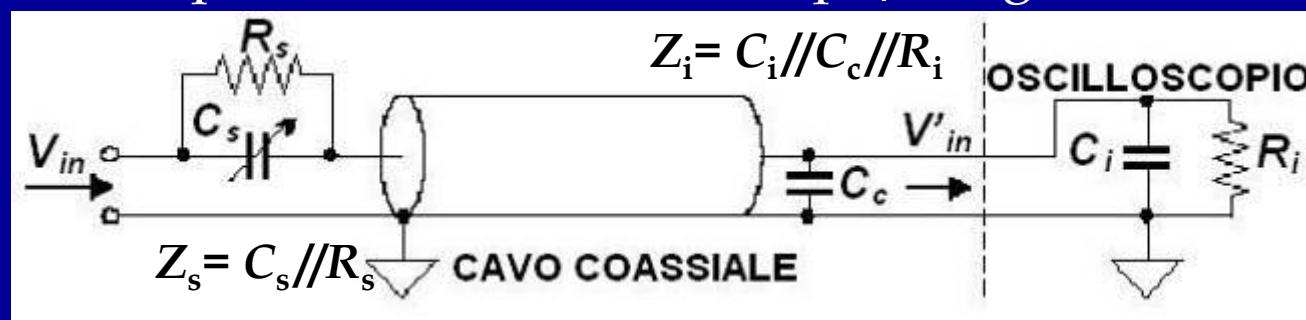
Per segnali “lenti” è preferibile la modalità **CHOPped** (che mantiene le relazioni di fase); per segnali “veloci” è preferibile (o necessaria) la modalità **ALternated** (non si deve vedere una traccia segmentata) (se il segnale V_B non è sincrono con V_A , il segnale *non-triggerato* scorrerà in X sullo schermo)

Sonde d'ingresso (1/2)

Poiché l'impedenza d'ingresso è elevata, il segnale viene prelevato con un **cavo schermato** (e.g. coassiale) così da **ridurre le interferenze esterne**



A causa della **capacità del cavo** (C_c) l'impedenza d'ingresso (da V_{in}) varia con la frequenza e cambia con il tipo/lunghezza di cavo



$$t = \frac{V'_{in}}{V_{in}}$$

$$a = \frac{V_{in}}{V'_{in}}$$

Se il cavo di collegamento fa parte di una sonda è possibile **compensare l'impedenza complessiva d'ingresso** (sonda + oscilloscopio), grazie alla capacità di compensazione C_s : di modo che l'attenuazione a tra V_{in} e V'_{in} sia puramente resistiva (indipendente dalla frequenza)

Sonde d'ingresso (2/2)

Attenuazione:

$$a = \frac{V_{\text{in}}}{V'_{\text{in}}} = \frac{Z_i + Z_s}{Z_i} = \frac{\frac{R_i}{1 + j\omega R_i(C_i + C_c)} + \frac{R_s}{1 + j\omega R_s(C_s)}}{\frac{R_i}{1 + j\omega R_i(C_i + C_c)}}$$

Durante la compensazione della sonda si varia la sua capacità d'ingresso C_s sino a ottenere un comportamento equalizzato in frequenza, ottenuto quando:

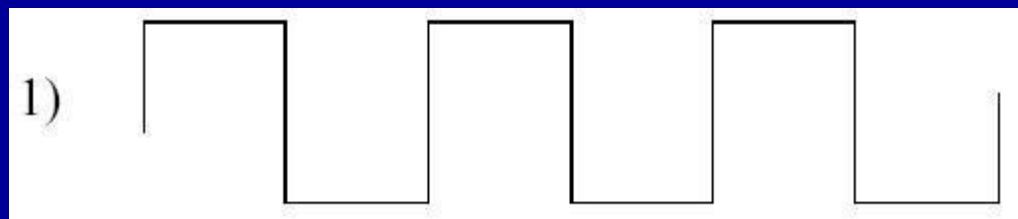
$$R_i(C_i + C_c) = R_s C_s \Rightarrow a = \frac{V_{\text{in}}}{V'_{\text{in}}} = \frac{Z_i + Z_s}{Z_i} = \frac{R_i + R_s}{R_i}$$

Tipicamente con $R_i = 1 \text{ M}\Omega$ e $R_s = 9 \text{ M}\Omega$ (sonda 10x)
si attenua il segnale di un fattore 10 e si ottiene $R_{\text{in}} = 10 \text{ M}\Omega = 10 R_i$

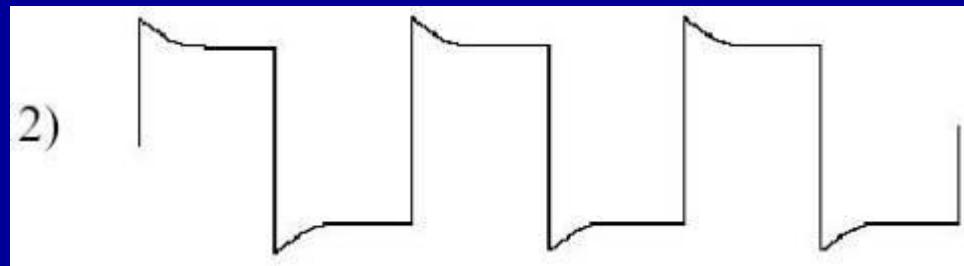
(aumenta l'impedenza d'ingresso! ☺ e anche la banda!! ☺ ☺)

Esistono anche sonde 100x oppure sonde attive (con guadagno) o di corrente

Compensazione sonda (1/2)

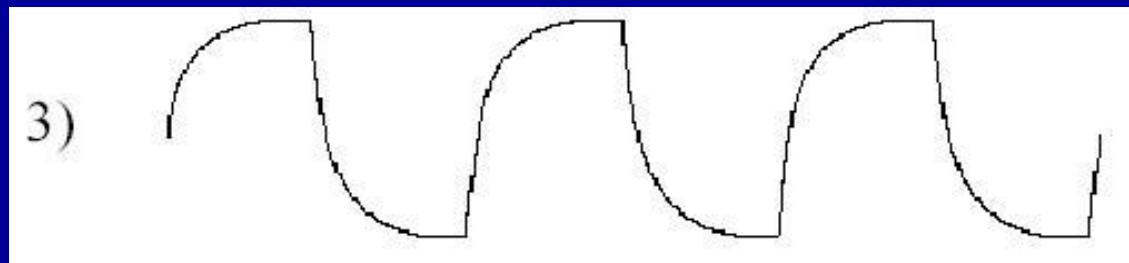


Compensazione corretta: la forma d'onda visualizzata è effettivamente di tipo rettangolare



Sovracompensazione della sonda: il valore di C_s è troppo elevato e vengono poco attenuate le armoniche a più alta frequenza (PASSA-ALTO)

Compensazione sonda (2/2)



Sottocompensazione della sonda: il valore di C_s è troppo piccolo e vengono attenuate maggiormente le armoniche a più alta frequenza (PASSA-BASSO)

OSCILLOSCOPI DIGITALI



prof. Cesare Svelto

Introduzione

Principio di funzionamento: **campionamento e conversione** del segnale (sequenza campioni numerici), **memorizzazione** della sequenza, **elaborazione** e **visualizzazione**

Innovazione tecnologica: convertitori A/D, memorie a semiconduttore, microprocessori veloci, ...

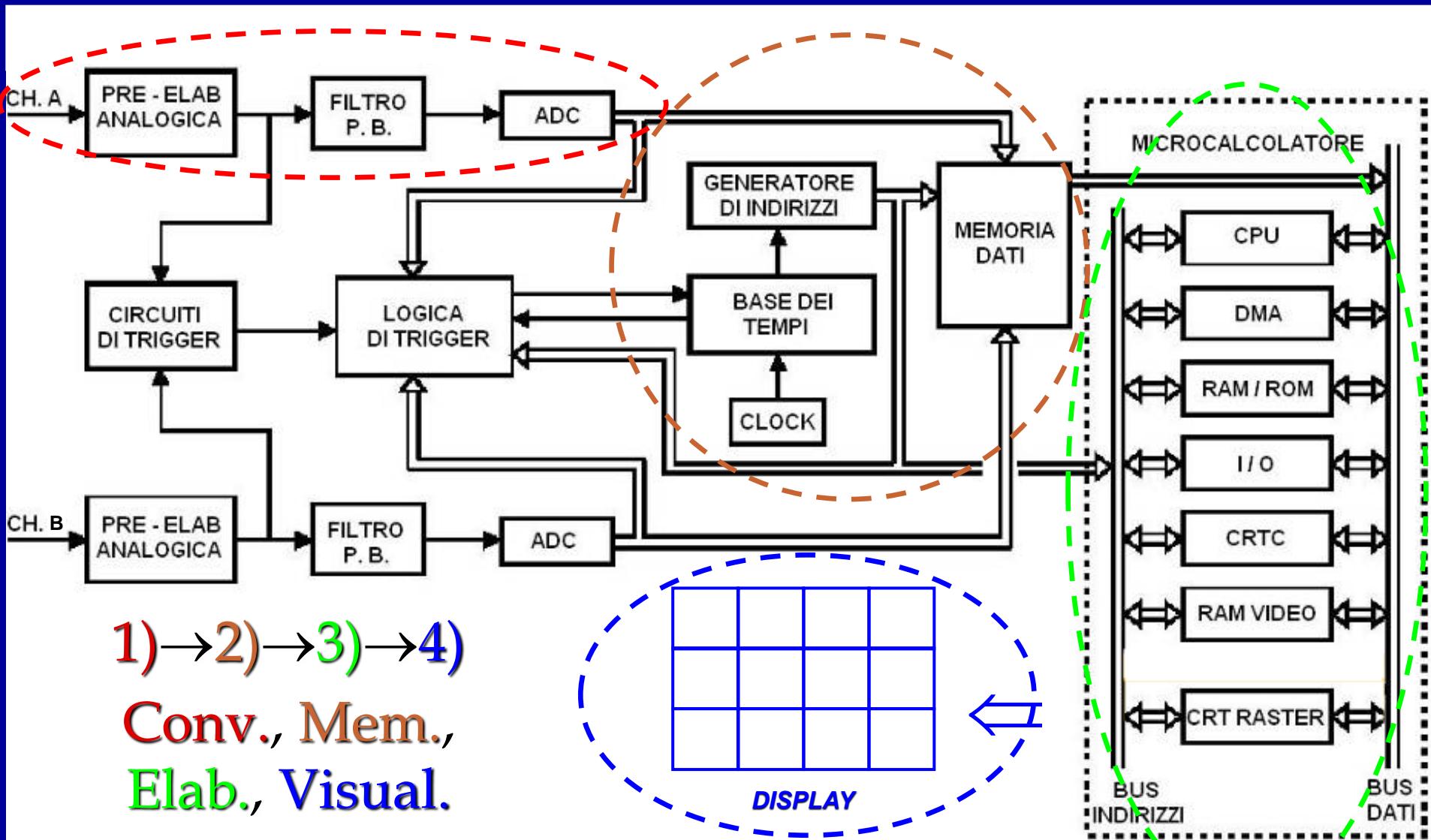


OSCILLOSCOPI DIGITALI o DSO
(Digital Storage Oscilloscope)

4 Sezioni o fasi di misura

- 1) **Condizionamento analogico**, campionamento e **Conversione** del segnale di misura
(produzione sequenza numerica)
- 2) **Memorizzazione** dei campioni
(salvataggio dati in memoria RAM)
- 3) **Elaborazione numerica**
(ricostruzione andamento segnale nel tempo)
- 4) **Visualizzazione** sullo schermo
(oscillogramma del segnale sul display)

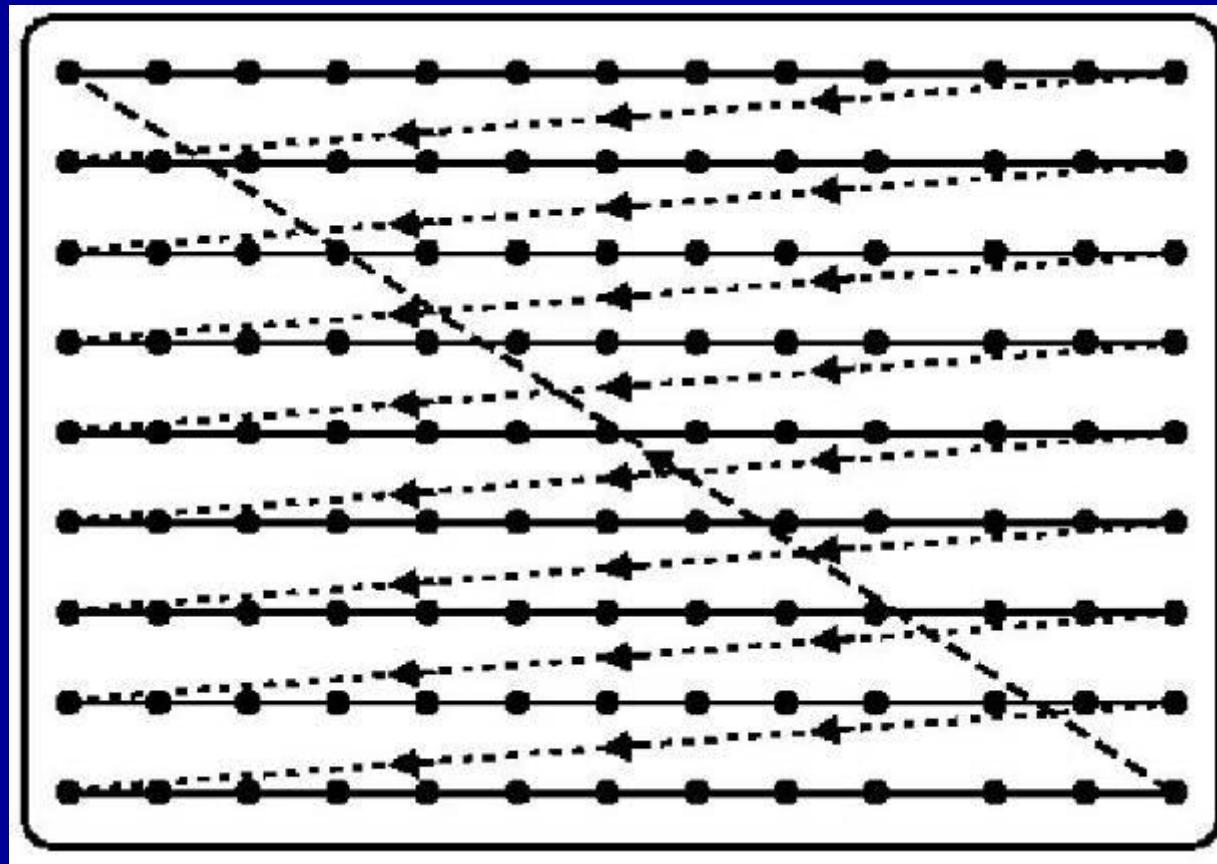
Schema a blocchi di un DSO



Elementi di novità

- **Disaccoppiamento temporale** tra il segnale e la visualizzazione (permesso dalla memorizzazione dei campioni e "successiva visualizzazione")
L'OSCILLOGRAMMA NON E' IN TEMPO REALE CON IL SEGNALE
- Visualizzazione mediante ***display*** di tipo ***raster*** (matrice bidimensionale di *pixel*)
- Memoria **RAM video** (la “mappatura” dell’immagine da realizzare ha una memoria dinamica dedicata)
- **Dispositivi Input/Output (I/O)** per trasferimento dati (stampante, *plotter*, memorie di massa, PC, rete Internet); interfacce RS-232, GPIB, USB, TCP-IP

Scansione linee/colonne dello schermo



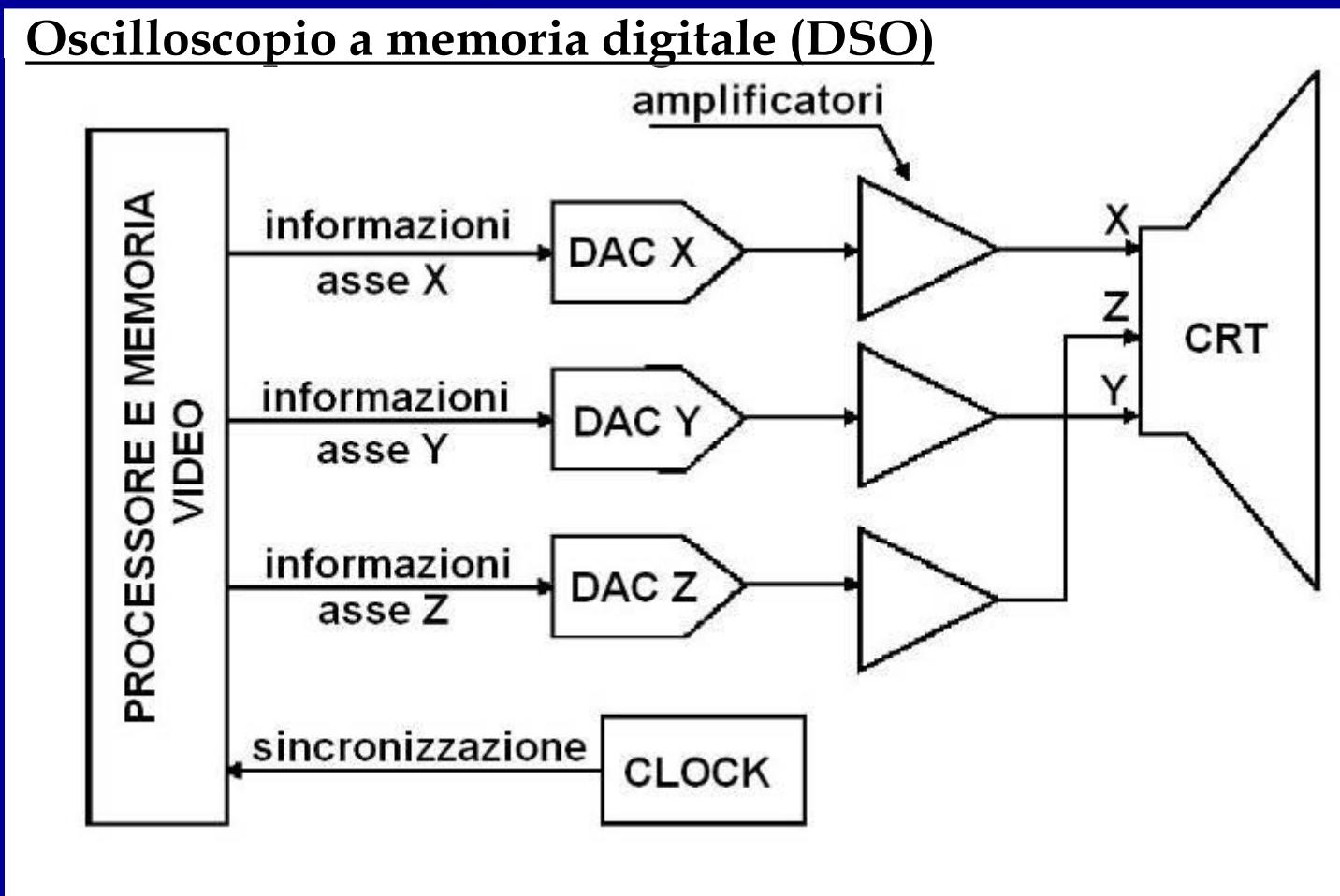
Importante proprietà del *display raster*: il tempo necessario per tracciare l'immagine è indipendente dalla complessità dell'immagine

Parametri della visualizzazione *raster*

- Rinfresco quadro: il periodo di rinfresco, o **tempo di quadro (20 ms)**, deve essere più piccolo della somma del tempo di persistenza dell'immagine sulla **retina** con quello di fosforescenza dei fosfori: $\approx 0.1 \div 10$ ms
- Risoluzione dello schermo: **VGA** (640 colonne verticali per 480 righe orizzontali, 307 200 *pixel*); vi sono oscilloscopi con risoluzioni più spinte (800 x 600 o anche 1024 x 1024)
- Requisiti di banda passante: una completa deflessione orizz. avviene in un **tempo di riga** ($20\text{ ms}/480 \approx 50\text{ }\mu\text{s}$) che è di **4 ordini di grandezza** più lento del tempo minimo di scansione (5 ns) dei più veloci CRT per OA

Conv. DAC e amplificatori X - Y - Z

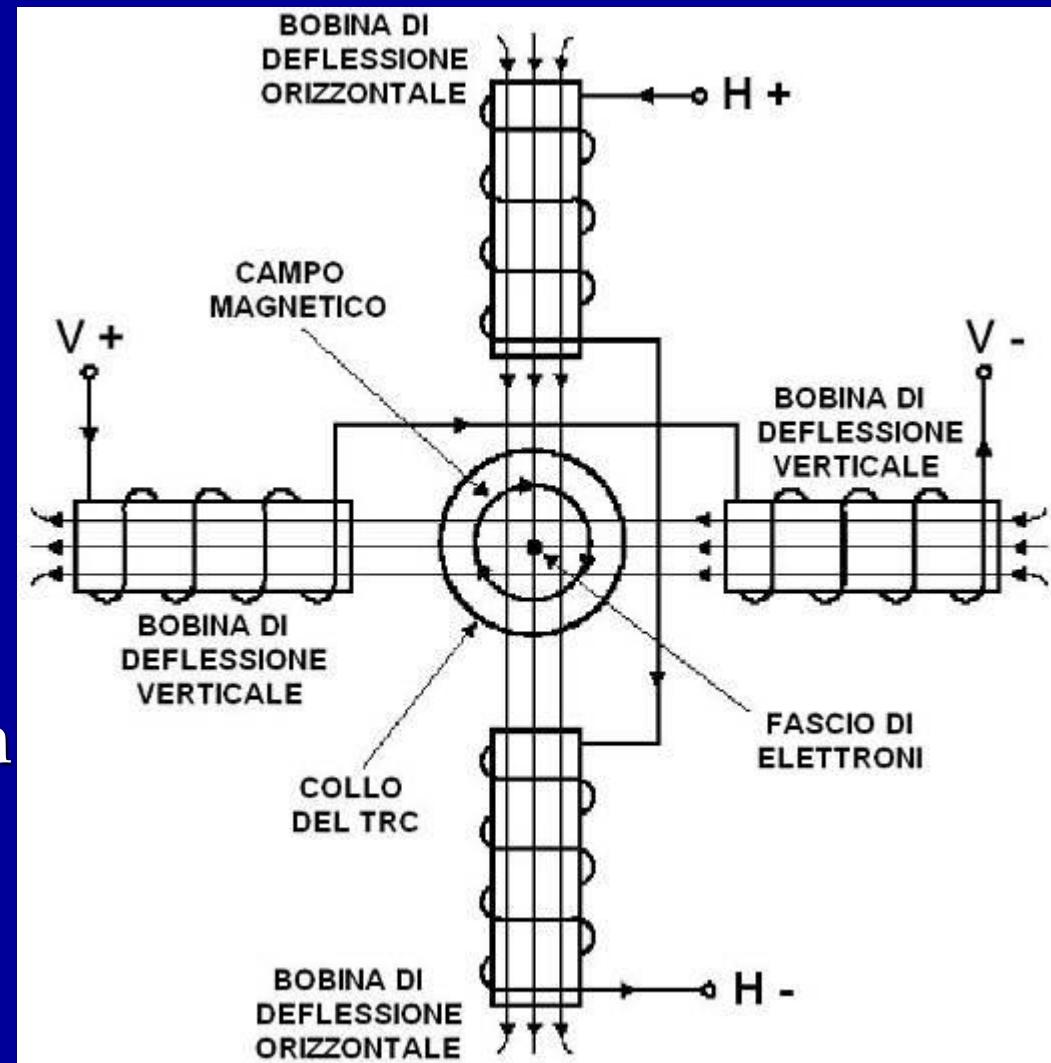
Visualizzazione con un **CRT tradizionale**
(a controlli analogici e scansione di tipo *X-Y vector*)



Z è il comando di **intensità** (griglia del CRT)

Deflessione e.m. in TRC di tipo *raster*

Le bobine di deflessione elettromagnetica sono meno "sensibili" (cm/V) [e di fatto più ""lente""]
delle placchette elettrostatiche ma consentono un comando elettrico semplice, in tensione/corrente, con la possibilità di **regolare la posizione delle bobine** (esterne) rispetto all'asse del tubo



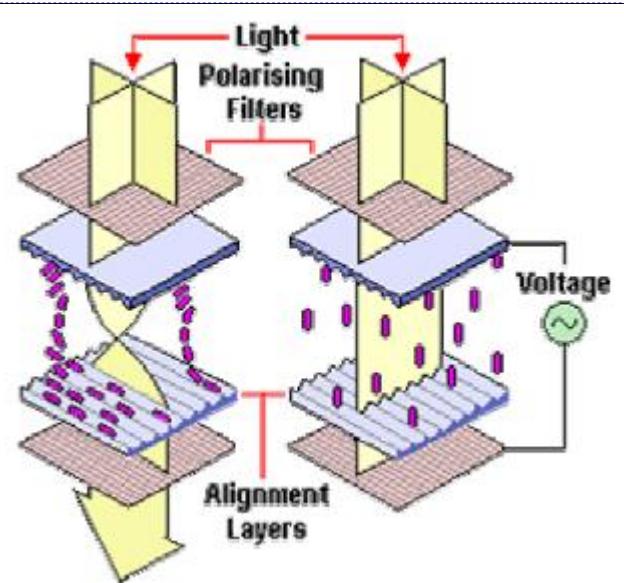
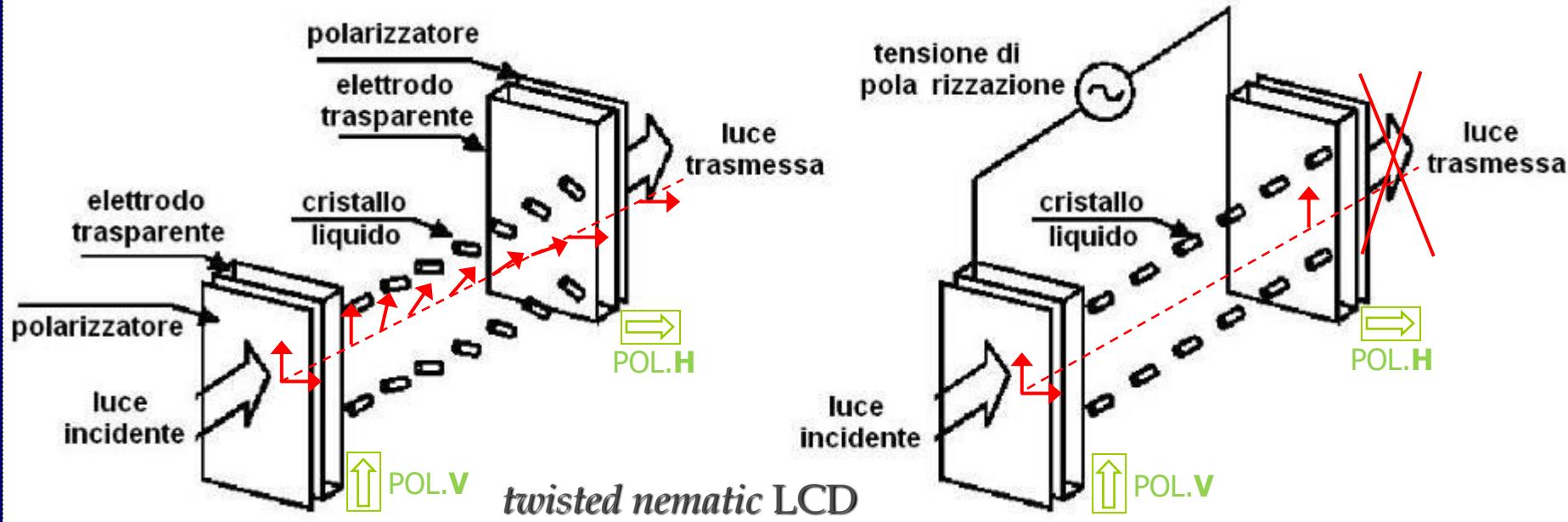
Display a schermo piatto (FPD)

L'evoluzione delle **tecnologie elettro-ottiche** ha reso disponibile, nel campo dei DSO, dispositivi per la visualizzazione che non richiedono la presenza di un tubo a vuoto. Le caratteristiche dei ***display* FPD** (*Flat Panel Display*) sono la ridotta profondità, il peso e il consumo assai limitati, e l'organizzazione dello schermo in una matrice di celle elementari (*pixel*)

Diverse tecnologie:

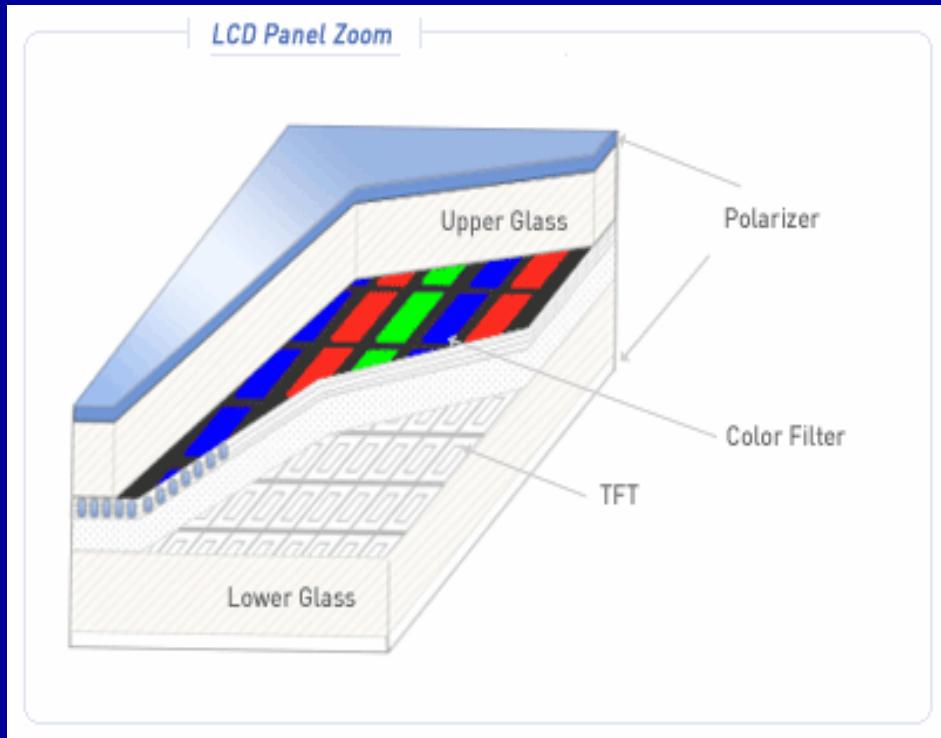
- **elettroluminescenza**
- **LED** (*Light Emitting Diode*)
- **LCD** (*Liquid Crystal Display*)
- **TFT** (*Thin Film Transistor, LCD*)
- ...**OLED** (*Organic LED*)

Visualizzatori a LCD



La luce polarizzata viene ruotata e trasmessa in assenza di campo elettrico applicato (*pixel* acceso). Invece non ruota, e dunque viene bloccata, in presenza della tensione di polarizzazione (*pixel* spento)

Display a TFT



La differenza tra TFT e LCD tradizionale è il modo in cui viene polarizzato il cristallo liquido. Mentre negli LCD tradizionali si applica una tensione dall'esterno del pannello di visualizzazione, come in un condensatore, nella tecnologia TFT il campo elettrico è applicato direttamente al *pixel*/tramite un transistor a film sottile realizzato con un substrato di materiale semiconduttore **trasparente** depositato sulle superfici interne dei vetri che ospitano anche i cristalli liquidi.

VANTAGGIO: *I e V basse e t rapidi*

LCD a TFT (*Thin Film Transistor*): integra nella cella elementare anche un transistor per l'accensione e spegnimento del *pixel*. Tecnologia a **matrice attiva**, che permette di realizzare *display* a colori ad elevata risoluzione e con ampie dimensioni dello schermo

Condizionamento analogico

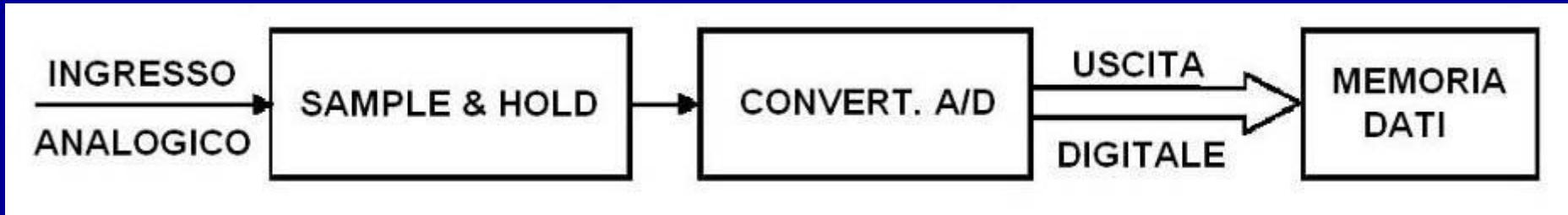
La sezione analogica di un DSO ricalca, in linea di principio, quella di un oscilloscopio analogico

Per evitare fenomeni di *aliasing*, si può effettuare un filtraggio di tipo passa-basso ma solitamente si preferisce omettere il filtro anti-aliasing per non limitare la banda di misura (v. camp. tempo equiv.)

Grazie alla modalità di campionamento in tempo equivalente la banda di misura, su segnali periodici o almeno ripetitivi, può essere anche superiore alla velocità di campionamento

(invece, per il teorema di Shannon, in *real-time* $B_{\text{mis}} < f_c/2$)

Conversione A/D e acquisizione dati

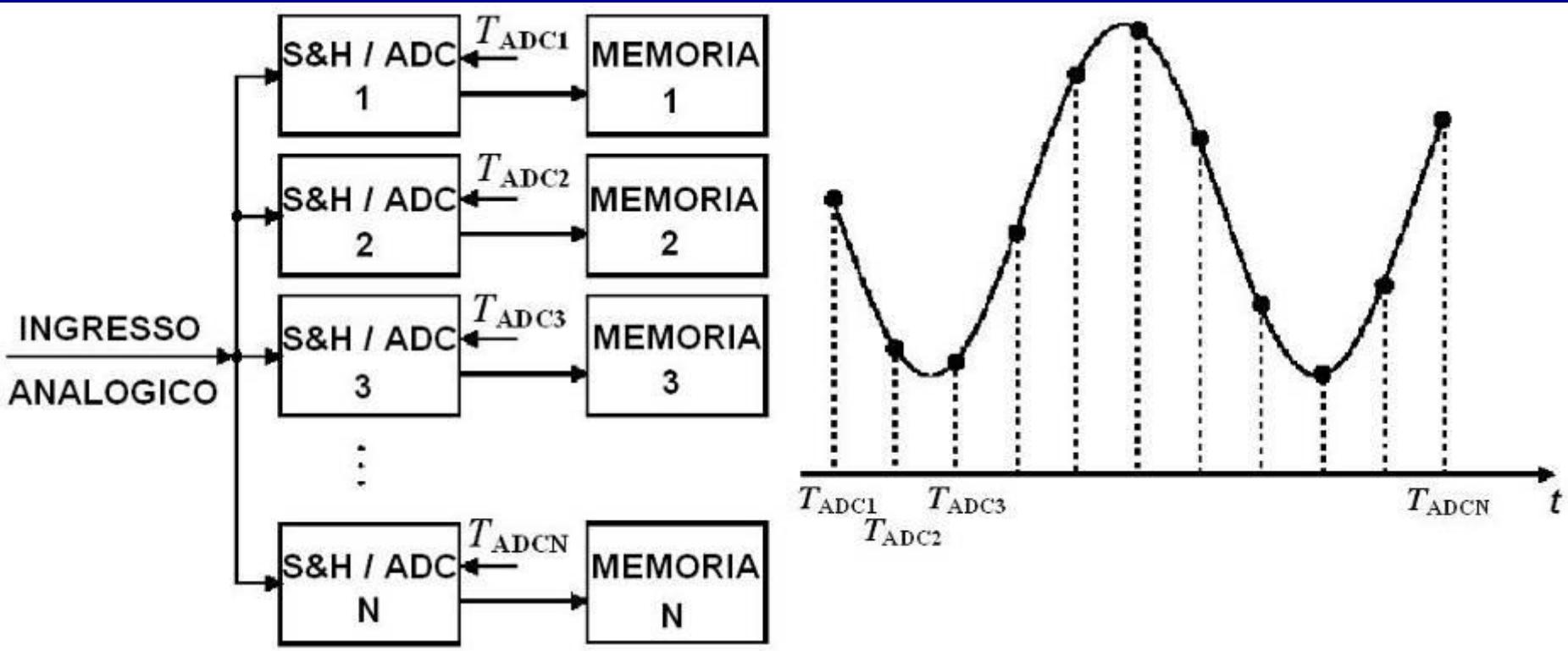


Parametri:

- **Risoluzione** del convertitore analogico / digitale
- Massima **frequenza** di campionamento e conversione
- Capacità (o profondità) massima di **memoria**, cioè il numero massimo di campioni memorizzabili
- **Capture rate**: numero di forme d'onda al secondo (wfs/s)

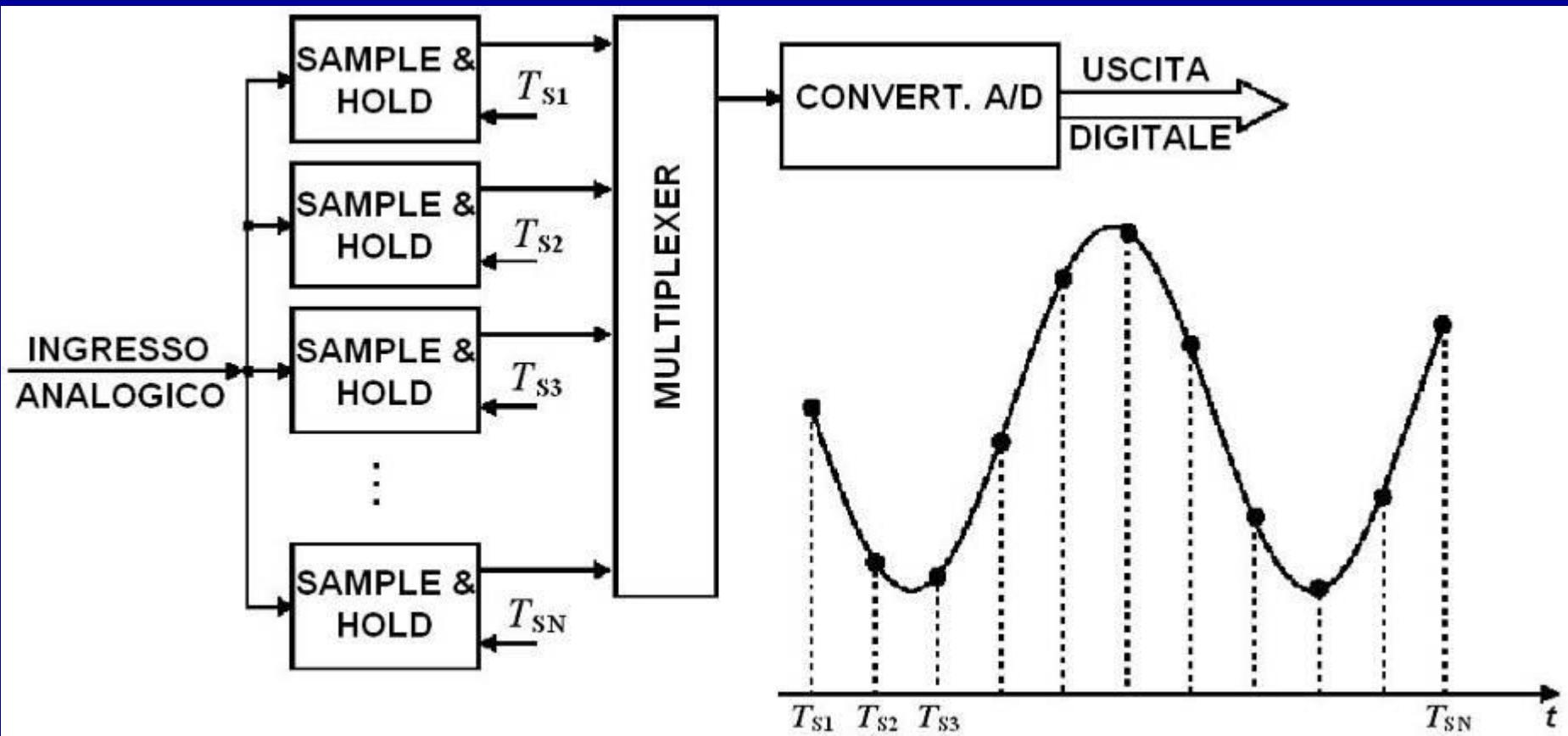
Esempi di configurazioni (1/2)

Campionamento e conversione a multiconvertitore



Esempi di configurazioni (2/2)

Struttura con singolo convertitore A/D in *multiplexing* verso più campionatori (ritardati) in parallelo

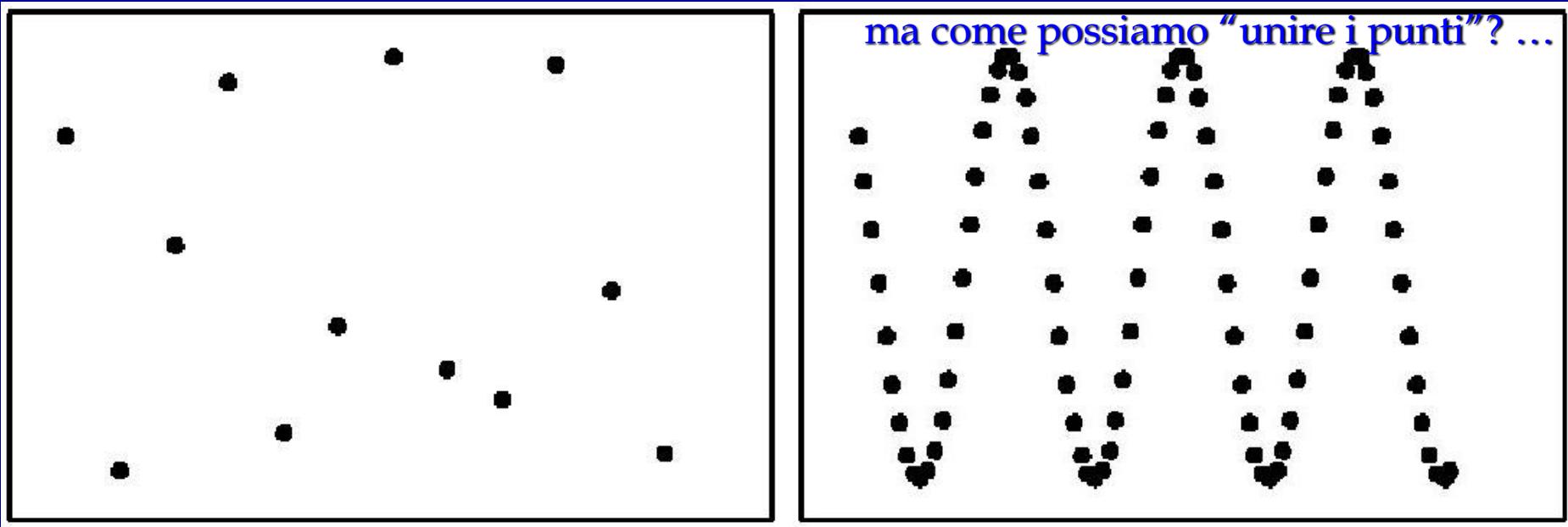


Problematiche del campionamento

Teorema del campionamento (Pb. *aliasing effettivo*): la **frequenza di campionamento** (in tempo reale) deve essere più **elevata** del doppio della massima frequenza, o banda, del segnale

Visualizzazione per punti (Pb. *aliasing percettivo*): affinché l'occhio possa riconoscere distintamente la forma d'onda, il numero di campioni acquisiti (su ciascun periodo) deve essere sufficientemente elevato da non generare ambiguità di percezione. Con i **segnali sinusoidali** un valore convenzionale è di almeno **25 punti per periodo**

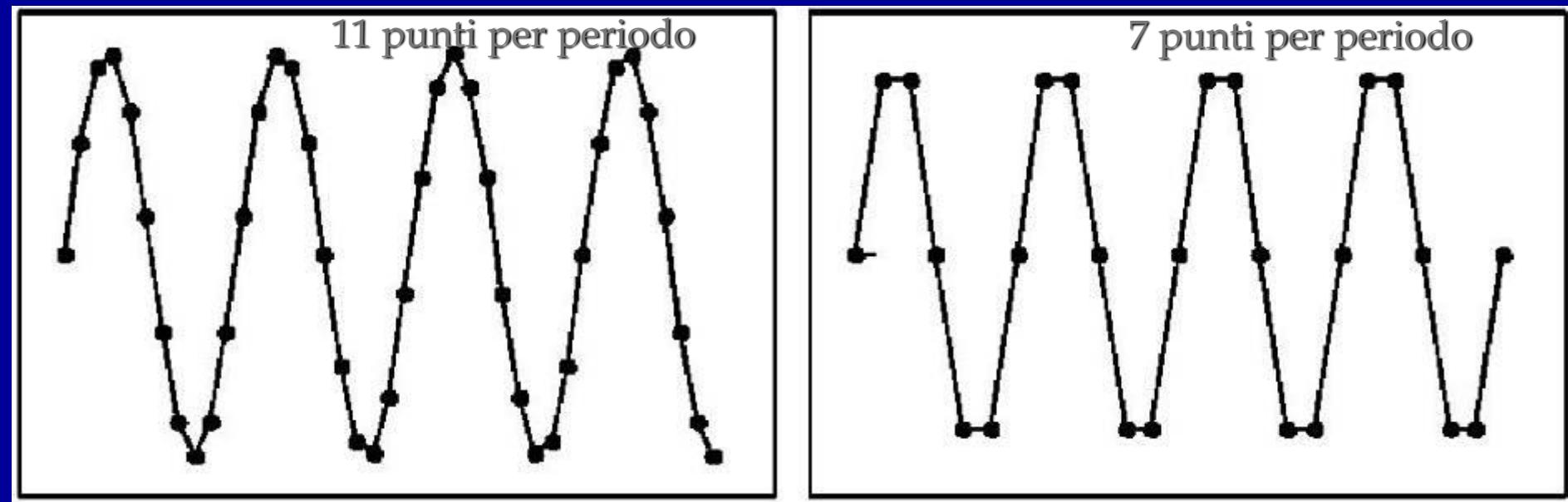
Aliasing percettivo



Anche rispettando il teorema del campionamento, con pochi punti per periodo la forma d'onda può non essere riconosciuta in maniera corretta
(la stessa sinusoide è visualizzata con 4 punti per periodo a sx e 25 a dx)

Interpolatori

Interpolatore lineare: riduce a circa 10 i punti necessari per periodo. Sotto questo valore è possibile interpretare erroneamente il segnale visualizzato



Interpolatore a $\sin(x)/x$: basato sulla teoria di Shannon, riduce a 2.5 il numero di punti necessari. La banda di misura risulta il 40% ($\approx f_c/2$) della massima frequenza di campionamento del convertitore A/D (in *real-time*)

Modalità di campionamento

Il campionamento di un segnale in un DSO può avvenire secondo tre differenti modalità:

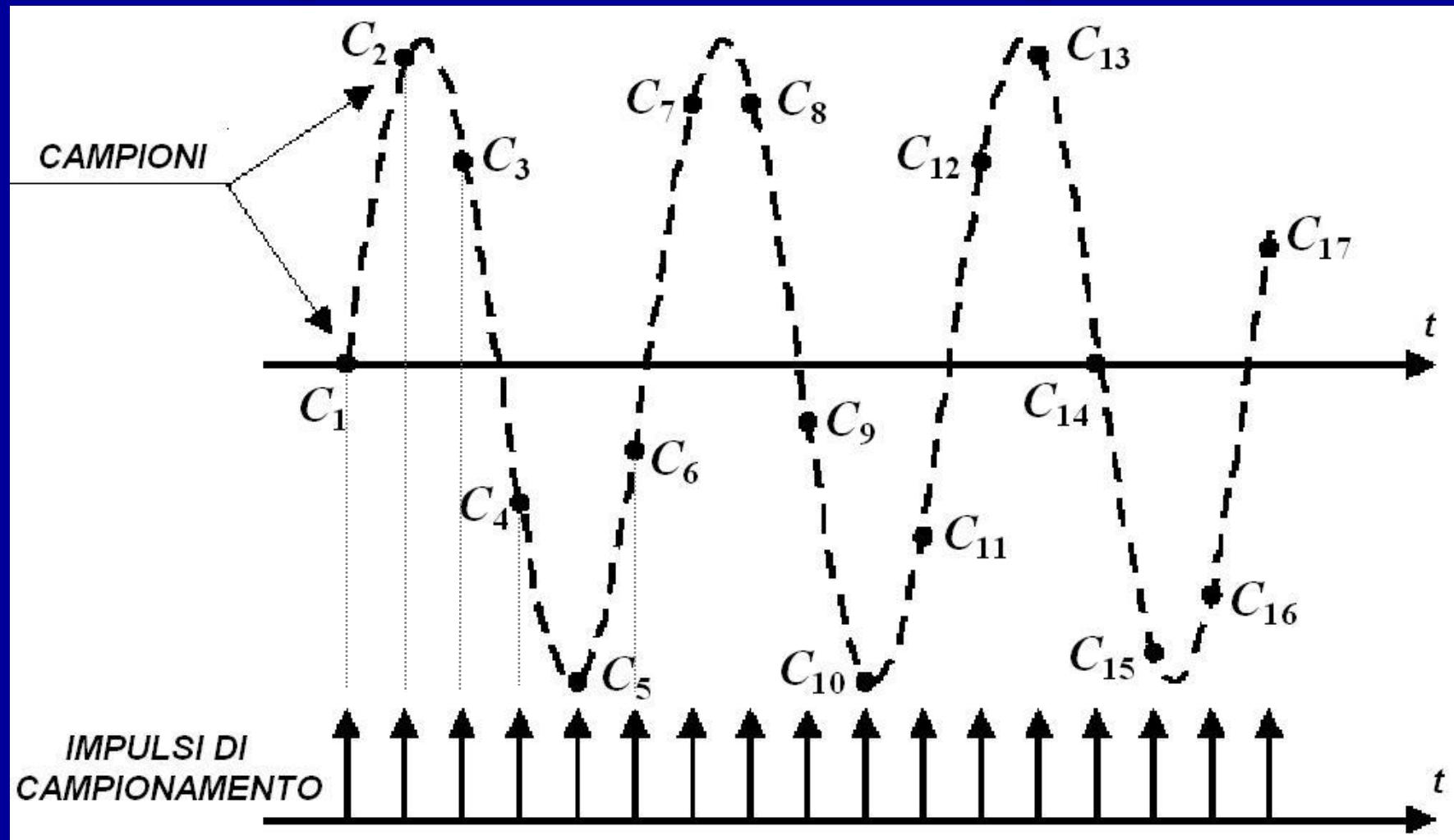
- C. RT **in tempo reale** (*single shot*)
- C. ET-SEQ **in tempo equivalente di tipo sequenziale**
- C. ET-RND **in tempo equivalente di tipo casuale**

La prima modalità ha validità generale ma presenta limiti di banda; le altre due sono invece applicabili solo ai segnali ripetitivi o periodici per i quali un ET consente di visualizzare segnali molto veloci)

In **tempo reale (RT)** i campioni sono prelevati direttamente nel periodo/tempo del segnale da visualizzare.

In **tempo equivalente (ET)** i campioni sono presi su più periodi della forma d'onda e successivamente riordinati e visualizzati

Campionamento in tempo reale



La sequenza dei dati acquisiti rispetta la sequenza temporale dei punti della forma d'onda che evolve sull'asse dei tempi

La distanza ΔT tra punti adiacenti acquisiti e visualizzati (risoluzione temporale) è il periodo di campionam. $T_{Sa,RT}$

Oscilloscopi Digitali

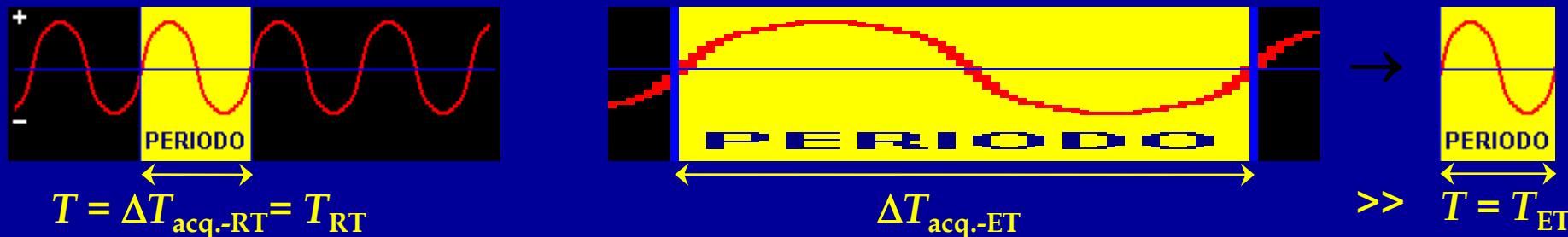
$T_{Sa,RT,MIN} = 1/f_{Sa,ADC,MAX}$

21/43 [38(5)]

Camp. in tempo equivalente seq. (1/4)

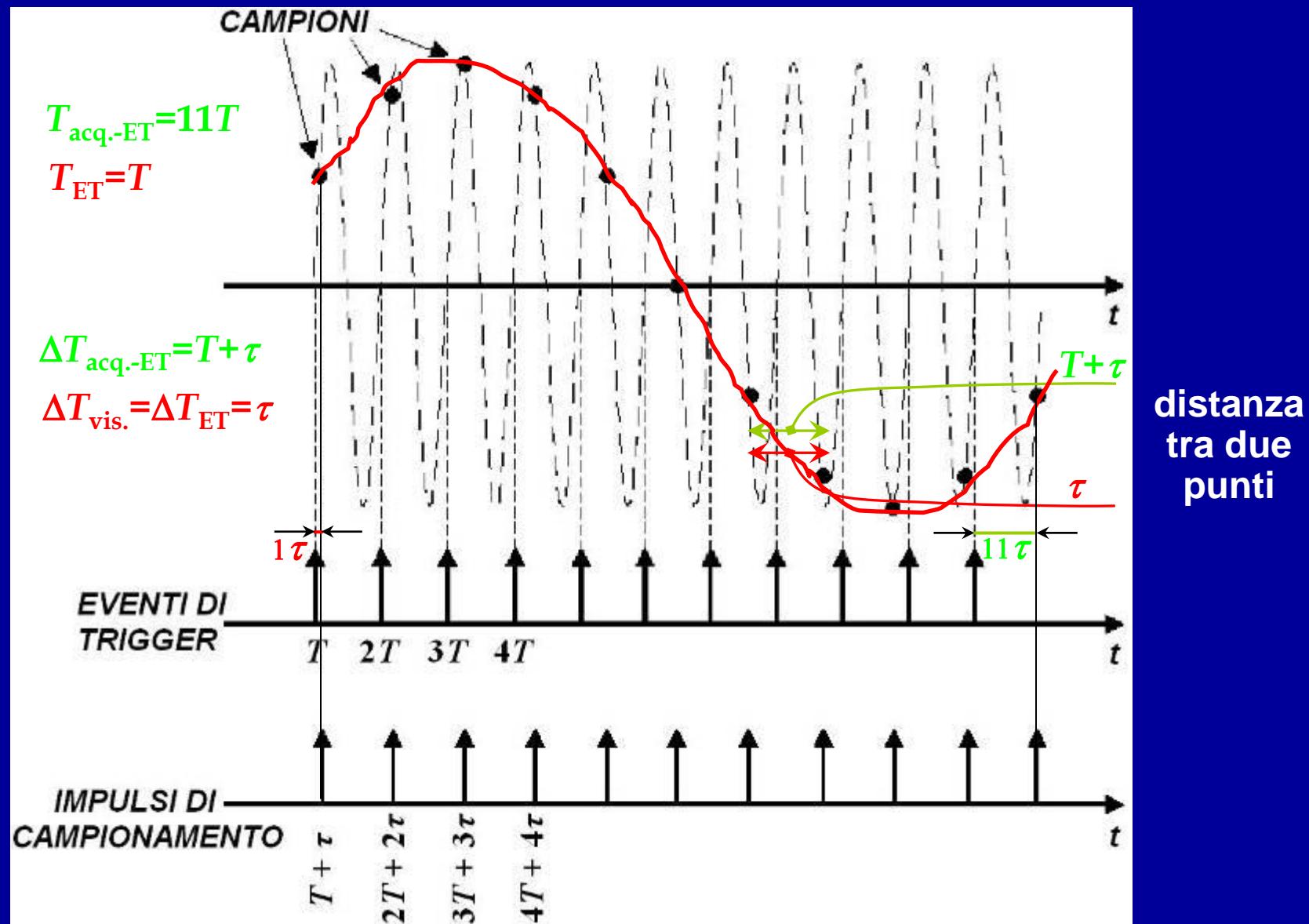
Si prendono i diversi campioni all'interno di periodi differenti del segnale (con una distanza temporale successivamente incrementata, dallo stesso punto di riferimento - trigger analogico - scelto nel periodo)

Dall'insieme di campioni acquisiti in “un tempo più lungo” del periodo T , si può ricostruire l'andamento della forma d'onda nel singolo periodo



In ET il tempo occorrente per l'acquisizione ($\Delta T_{\text{acq.-ET}}$) e il periodo equivalente ($T_{\text{ET}}=T$) del segnale visualizzato sono molto differenti tra loro: $\Delta T_{\text{acq.-ET}} >> T_{\text{ET}} = T = T_{\text{RT}}$

Camp. in tempo equivalente seq. (2/4)



Camp. in tempo equivalente seq. (3/4)

Per la ripetitività con periodo T del segnale $s(t)$, i campioni prelevati agli istanti di tempo t e $t + kT$ (con k intero) risultano uguali. Si adotta il periodo di campionamento “rallentato” $T_{\text{acq,ET}} = \Delta t_{\text{acq}} = kT + \tau$ (con $f_C = 1/T_C = 1/(kT + \tau)$), che è **maggiori di un fattore** $\xi = (kT/\tau + 1)$ rispetto al “periodo di campionamento equivalente” $*T_C = \Delta T_{\text{vis.}} = \Delta T_{\text{ET}} = \tau$ ($< \text{o} \ll T_C$) che occorrerebbe per un campionamento in tempo reale con distanza $*T_C$ tra i campioni ($*f_C = 1/*T_C = 1/\tau$ freq. camp.eq.):

$$*f_C = \frac{1}{\tau} \quad f_C = \frac{1}{kT + \tau} \quad \frac{*f_C}{f_C} = \frac{T}{\tau} = k + 1 > 1$$

freq.camp.eq. freq.camp.reale (rallentata) “guadagno” tra f_C e $*f_C$

La frequenza di campionamento in tempo equivalente $*f_C = \xi f_C = 1/\tau$ è **maggiori** (può essere $\xi = 10-100$) della frequenza di campionamento f_C in tempo reale. Dunque $f_{C,ET} = *f_C$ può essere molto elevata se riusciamo a fare τ molto piccolo (Pb. accur./ripet.)

Camp. in tempo equivalente seq. (4/4)

In queste condizioni si può usare $f_C \sim f_{ADC,max} < f_{segna}$ pur consentendo una **corretta ricostruzione del segnale**, “con abbastanza punti per periodo”: con $*f_C > f_{segna}$ e meglio ancora $*f_C \gg f_{segna}$ si avranno “molti punti per periodo $*T_C \ll T_{segna}$ ”

Nella sequenza campionata e quindi ricostruita in tempo equivalente, si ottiene una **distanza $\Delta T_{ET} = \tau$ tra due campioni adiacenti (risoluzione temporale)** molto spinta, che non sarebbe possibile ottenere con un campionamento in tempo reale

Allo stato dell’arte, si possono raggiungere **risoluzioni temporali di 1 ps** tra campioni adiacenti e visualizzare **segnali con banda fino a 50 GHz** (con 20 punti per periodo)

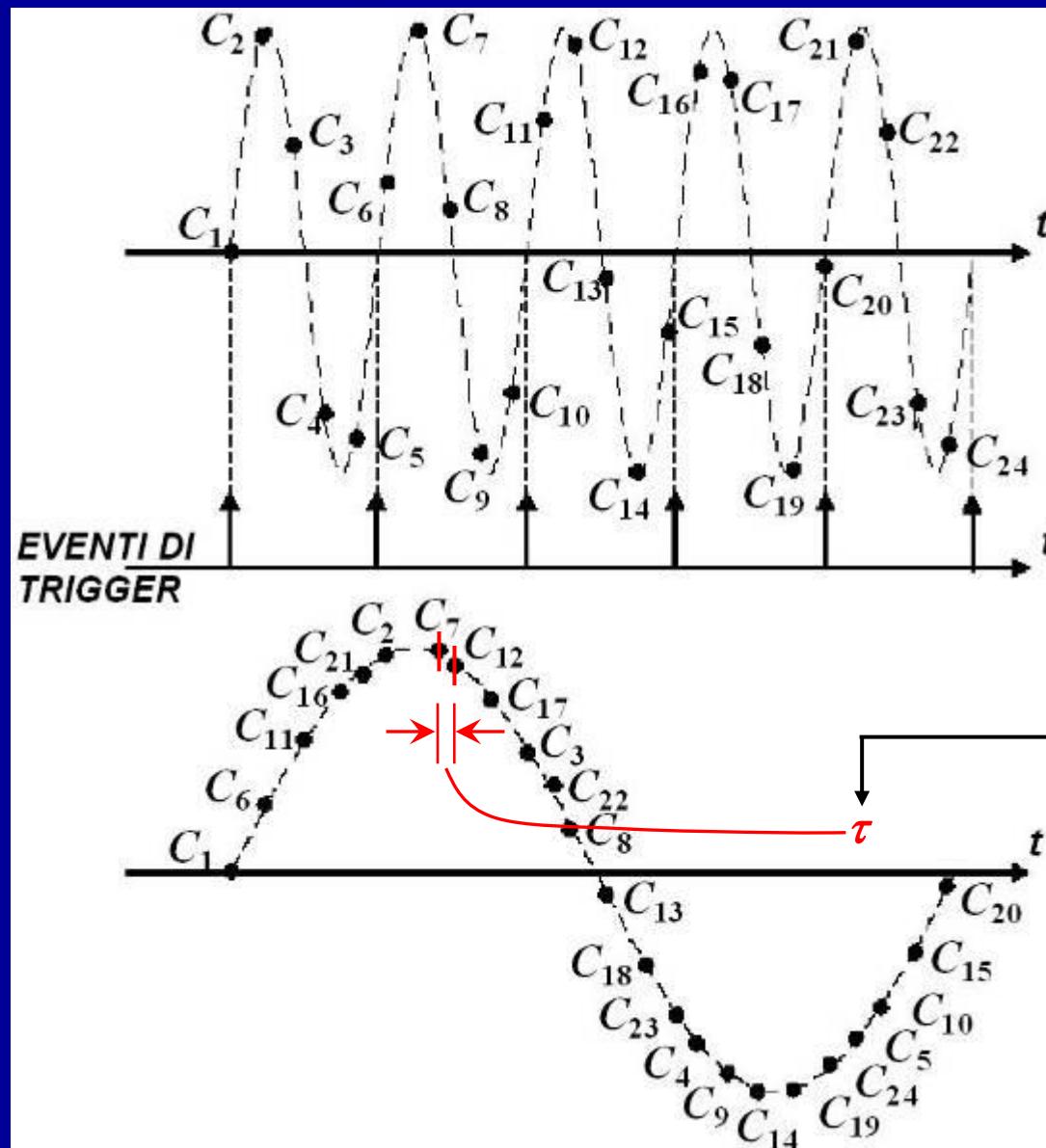
Camp. in t. equivalente casuale (1/2)

Campioni prelevati dal segnale in **modo casuale (asincrono)**, sia prima, sia dopo gli eventi di *trigger*. L'ADC può lavorare alla sua massima velocità. L'**intervallo di tempo** ("positivo o negativo") tra ciascun campione e l'evento di *trigger* a esso più vicino **deve essere misurato ($\Delta T_{ET} = \tau_{MIS}$)** in modo da poter ordinare correttamente i campioni sul *display* e quindi ricostruire l'andamento del segnale

A causa della scorrelazione temporale tra la frequenza di campionamento e la frequenza di *trigger*, i campioni acquisiti in cicli di *trigger* successivi possono essere da anteporre a quelli acquisiti in cicli di *trigger* precedenti.

$\Delta T_{ET,min} = \tau_{MIS,min}$ è la risoluz. (1-10 ps) del **contatore elettronico**

Camp. in t. equivalente casuale (2/2)



Esempi d'impiego ET in OD

1. Lavoriamo al CERN e dobbiamo visualizzare il segnale prodotto, ad ogni giro nel sincrotrone, da una particella subatomica: tempo di salita una decina di ps e durata complessiva inferiore al ns

Utilizziamo un OD con banda 50 GHz e campionatore a 10 GSa/s ($T_{Sa,RT,MIN}=0.1$ ns) ottenendo $T_{Sa,ET,SEQ}=1$ ps, più adeguato per vedere con abbastanza punti il segnale

2. Lavoriamo alla INTEL e dobbiamo visualizzare un segnale di un processore i7-6700K, *overclocked* a 4.8 GHz (durata \approx 0.2 ns)

Utilizziamo un OD con banda 10 GHz e campionatore a 1 GSa/s ($T_{Sa,RT,MIN}=1$ ns) ottenendo $T_{Sa,ET,RND}=5$ ps, più che adeguato per vedere con abbastanza punti il segnale

Modalità di *trigger* avanzate (1/3)

Nell'oscilloscopio analogico la sincronizzazione avviene attraverso l'individuazione di un livello e di una pendenza (*trigger level* e *trigger slope*)

Nell'oscilloscopio digitale esistono anche altre modalità di sincronizzazione assai più evolute e complesse realizzate tramite *trigger* digitale

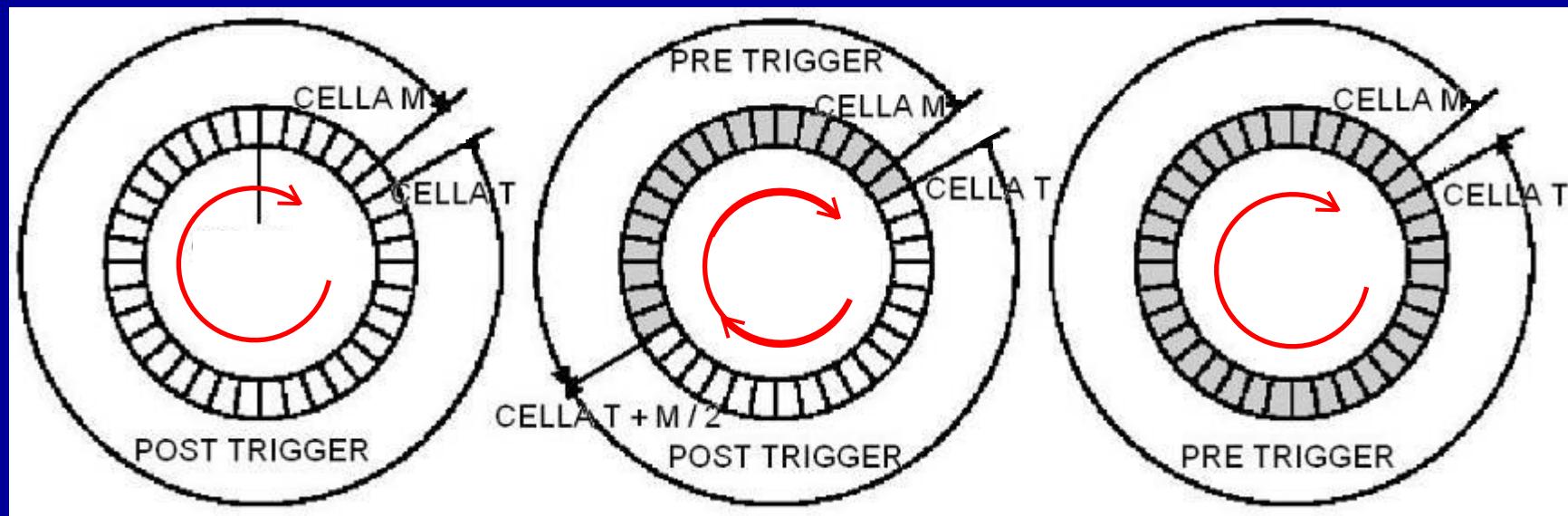
Pre-trigger sulla memoria circolare: consente di visualizzare sullo schermo l'andamento del segnale anche per tempi "prima dell'evento di *trigger*"

La posizione del *trigger* sullo schermo può essere scelta

La **memoria dati** (FIFO) è rappresentabile come un **buffer circolare** con capacità di **M celle**

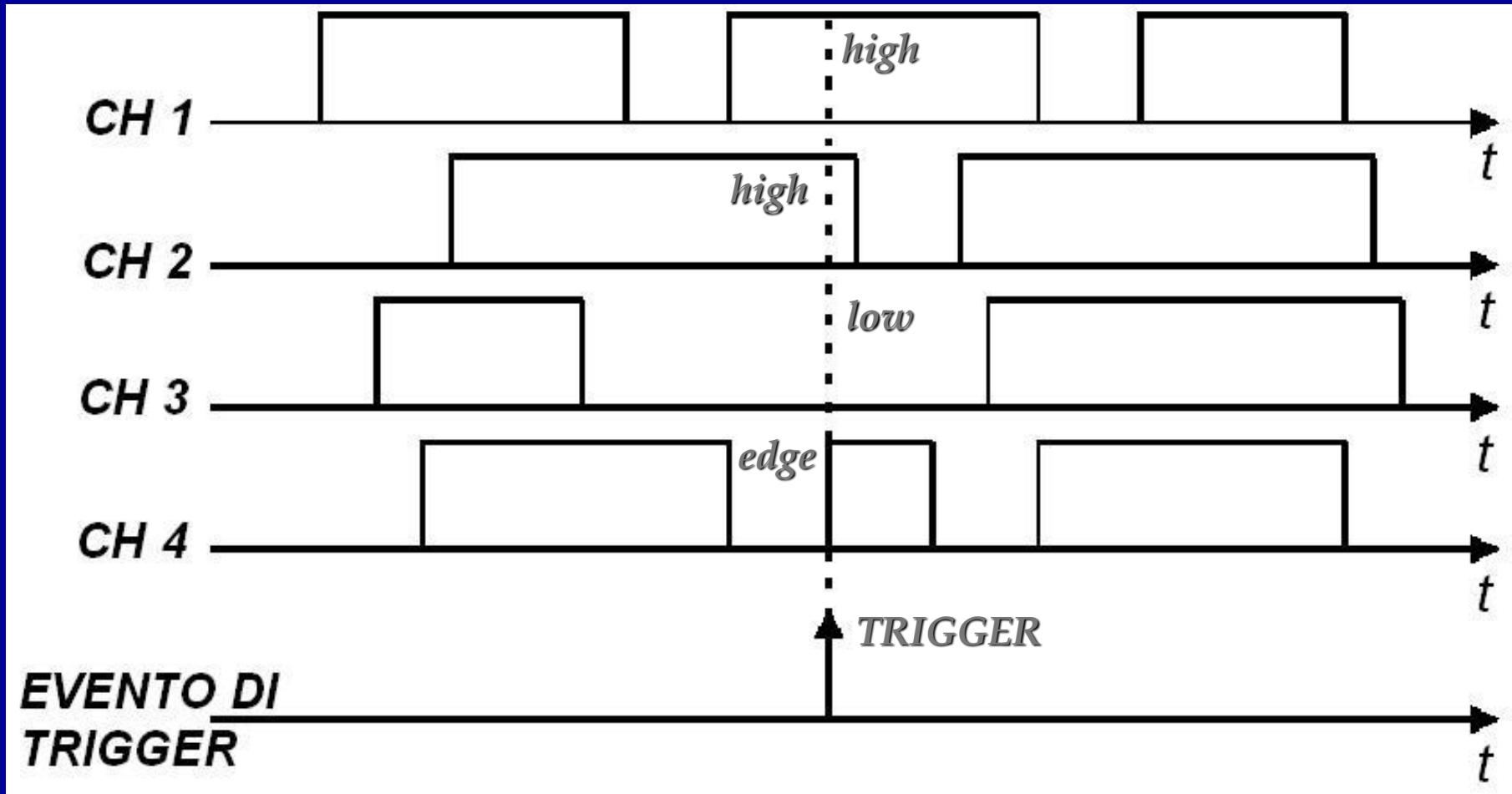
Modalità di *trigger* avanzate (2/3)

Durante il campionamento e la conversione le M celle vengono riempite in modo contiguo. Al verificarsi dell'evento *trigger* la CPU del DSO contrassegna il campione acquisito all'istante di *trigger*, così da poter identificare i campioni precedenti e quelli successivi al campione/evento/istante di *trigger*



Modalità di *trigger* avanzate (3/3)

Trigger booleano e funzionalità di “logica”



Risoluzione verticale (1/3)

Convertitore **8 bit** → **256 livelli** (risoluzione relativa, teorica, pari a **0.39 % del fondoscala**, $u_q \approx 0.1\%$)

Scelto un valore del coeff. di deflessione verticale (di solito in scala a passi decadici 1-2-5-10), il campo dei valori di ampiezza misurabili (**dinamica**) è compreso tra le due linee orizzontali sup./inf. del reticolo dello schermo (**$D = 8 \text{ DIV} \times A_{Y[V/DIV]}$**)

Es. coeff. di deflessione verticale = 10 mV/DIV
con 8 divisioni verticali:

Max escursione picco-picco = 80 mV

Risoluzione (256 livelli) ≈ 0.3 mV

Incertezza “quantizzazione” ≈ 90 µV (ma $u_{\text{Noise}} \gg u_q$)

Risoluzione verticale (2/3)

La risoluzione ha minore o maggiore incidenza sulla accuratezza della misura a seconda che il segnale misurato assuma valori compresi su tutta la scala dei valori d'ingresso del convertitore A/D oppure presenti un'ampiezza molto inferiore a quella del fondo scala (cmq. l'accuratezza è non meglio di qualche decina di mV a causa di $v_{N,ele}$)

Nei DSO la possibilità di impostare variazioni fini in condizioni di taratura, sia del coeff. di deflessione (A_Y) sia dell'offset (comando *vertical position*), consente di ridurre l'effetto della quantizzazione

Modalità di visualizzazione **media (average)** e **alta risoluzione (high resolution o box car averaging)**: n° bit effettivi può essere maggiore del n° bit reali [si ottiene una riduzione del rumore e migliora S/N]

Risoluzione verticale (3/3)

ESE: visualizzare in DC il segnale $s(t) = A \sin(2\pi ft) + B$
 $A = 0.25 \text{ V}$ $B = 0.2 \text{ V}$ $f = 25 \text{ Hz}$ (8 DIV verticali)

L'escursione picco-picco è $\Delta V_{pp} = 2A = 0.5 \text{ V}$ con $V_{min} = -0.05 \text{ V}$ e $V_{max} = 0.45 \text{ V}$ e naturalmente la linea di zero (*vert. pos.* con accoppiamento GND) potrà essere posizionata sotto il centro schermo (così da avere l'offset $B=0.2 \text{ V}$ a centro schermo)

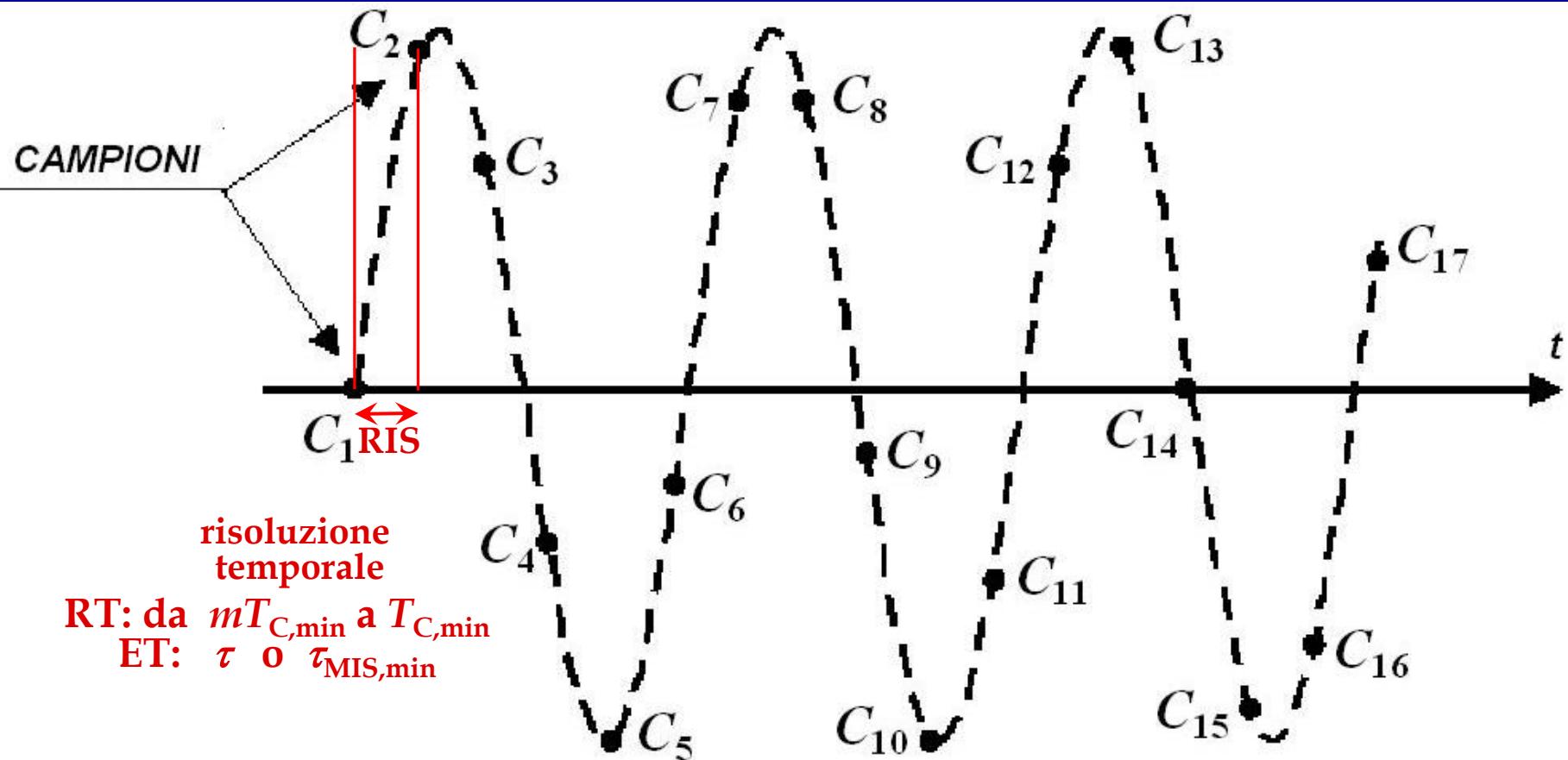
Oscilloscopio analogico:

coeff. di deflessione verticale $A_y = 100 \text{ mV/DIV}$
il segnale occupa 4.5 DIV nel verso positivo e 0.5 DIV nel verso negativo: ΔV_{pp} è 5/8 della dinamica verticale

Oscilloscopio digitale (su scala vert. "fine"):

coeff. di deflessione verticale * $A_y = 62.5 \text{ mV/DIV}$
il segnale occupa 7.2 DIV nel verso positivo e 0.8 DIV nel verso negativo. Il segnale non esce dal *display* e occupa appieno 8/8 della scala o dinamica verticale

Risoluzione orizzontale (1/2)



L'asse X a schermo ha un numero fissato di punti fisici (pixel) e dunque la risoluzione temporale del segnale visualizzato dipende dalla amplificazione A_X (s/DIV)

Risoluzione orizzontale (2/2)

Principale limitazione alla risoluzione temporale: $f_C = f_{Sa}$

Modalità *single shot (real time)*: miglior risoluzione = $T_{C,\min}$ dell'ADC. Tuttavia T_C dipende anche dal coeff. di tempo scelto per la taratura dell'asse orizzontale → risoluzione temporale varia con A_x scelta per il DSO (e.g. 1024 punti su asse X e scelta $A_x=1$ s/DIV ⇒ $T_C \approx 1$ ms)

Camp. in t equivalente sequenziale: risoluzione limitata dalla “riproducibilità e accuratezza” del **ritardo τ** (tra campioni equivalenti adiacenti)

Camp. in t equivalente casuale: risol. limitata da risol. e accuratezza della **misura dell'intervallo di tempo** (tra l'istante di campionamento e l'evento *trigger*)

Interfacce I/O e funzioni digitali (1/2)

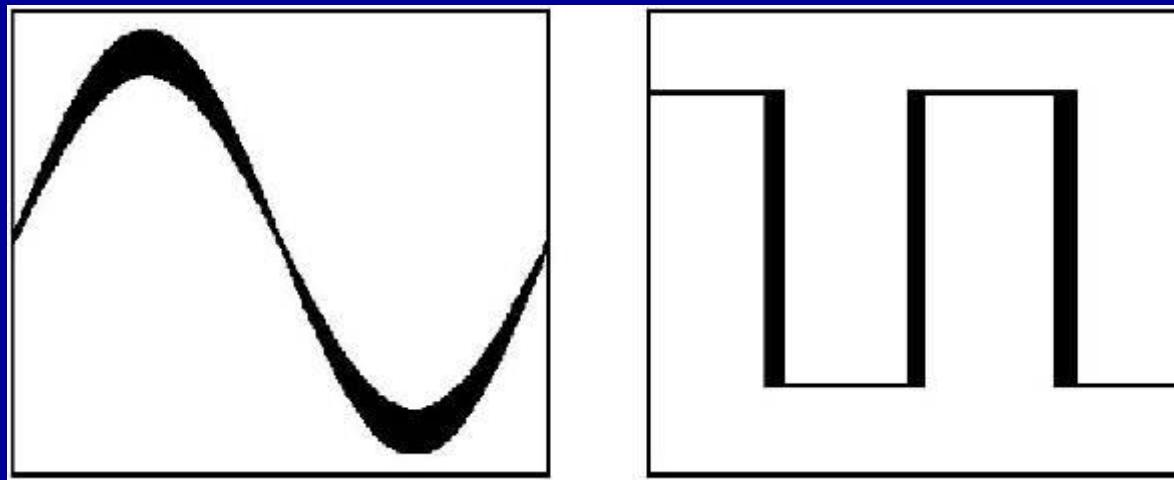
- Tutti i DSO sono dotati di **interfaccia con calcolatore elettronico** (controllo a distanza, sistema di misura automatizzato, salvataggio dati e *set up*, programmazione e analisi da PC delle misure)
- **Autoset**: lo strumento cerca la migliore configurazione dei parametri di misura e la predisponde da solo (*source*, *coupling*, *trigger*, *vert. level*, *coeff. defl. vert.*, *coeff. defl. orizz.* per la base dei tempi,...)
- Cursori o **markers** di ampiezza e tempo, che consentono di leggere direttamente sul *display* misure di differenze di tensione o intervalli di tempo [in un OA ci sono solo i *marker* verticali per mis. Δt]

Interfacce I/O e funzioni digitali (2/2)

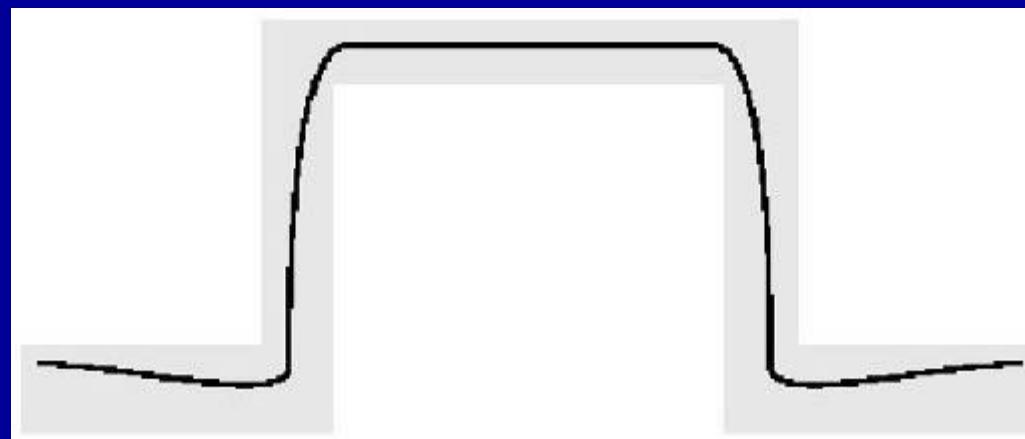
- **Misure standard automatizzate:**
 - in ampiezza (valore medio, efficace, di picco, picco-picco)
 - in tempo (frequenza, periodo, t_{rise} , intervalli Δt , *duty cycle*)
- **Analisi** semplici o **molto complesse** dei dati di misura (spettro FFT, misura di THD, *time-jitter*, analisi statistica del segnale, conformità a una specifica "maschera", *etc.*) ma in ogni caso “automatizzate”

Esempi di altre funzionalità

Persistenza infinita (DPO)



Controllo di conformità con maschera prestabilita



Vantaggi dei DSO (1/2)

- Maggior **banda** passante (no limite TRC e poi $*f_c > f_c$)
- Capacità di **memorizzare** più segnali, e "*wfm/s*", per "lunghi" intervalli di tempo ("tempo equivalente")
- **Visualizzazione stabile** anche di segnali a bassa o bassissima frequenza (no "sfarfallamento")
- Memorizzazione e visualizzazione **eventi *single-shot***
- Visualizzazione dell'andamento del segnale anche in intervalli di tempo **precedenti l'evento di trigger**
- Modalità di **trigger molto complesse**, per misure in sistemi digitali, analisi di guasti in apparecchiature, conformità, conteggio di eventi, ...

Vantaggi dei DSO (2/2)

- Capacità di effettuare **in modo diretto ed automatico misure sul segnale** nel dominio del tempo (ampiezze, periodo, frequenza, fase, ...) o nel dominio della frequenza (FFT e analisi spettrale)
- Possibilità di **documentare facilmente la misura**, trasferendo i dati dal DSO (*printer, USB, TCP-IP*)
- Possibilità di **interfacciare il DSO a un calcolatore** esterno per inserirlo in ambienti di misura o di test automatizzati
- Capacità di effettuare **test di autocalibrazione ed autodiagnosi**
- **HW+DSP+SW+... (manca solo il caffè!!!)**



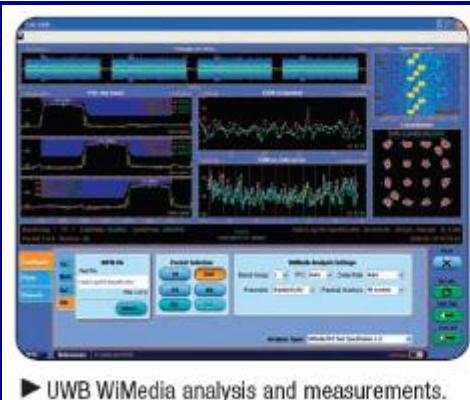
Limiti prestazionali dell'oscilloscopio digitale



Tektronix Digital Phosphor Oscilloscope **DPO7000**

With four channels up to **20 GHz bandwidth**
Up to **50 GSa/s Real-Time Sample Rate**
Up to 200 Megasamples Record Length
Waveform Capture Rate of 300,000 wfm/s

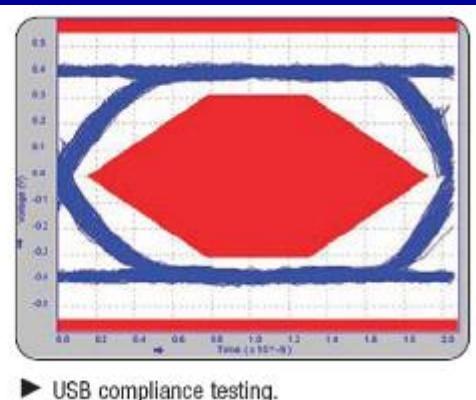
SEMINARIO "MOCA" Tektronix / Le Croy / Agilent / Keysight



► UWB WiMedia analysis and measurements.



► Power measurements and analysis.



► USB compliance testing.

Oscilloscopio Digitale Wi-Fi



$B = 10 \text{ MHz}$; 2 CH ; memory buffer 4 kSa per CH

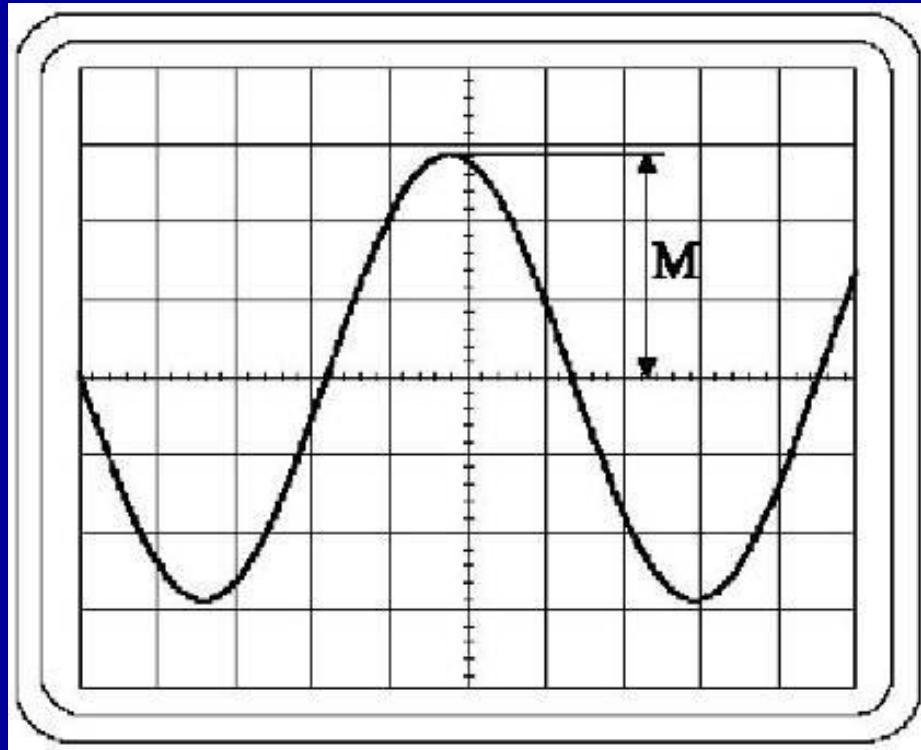
MISURE CON L'OSCILLOSCOPIO



prof. Cesare Svelto

Misure di ampiezza

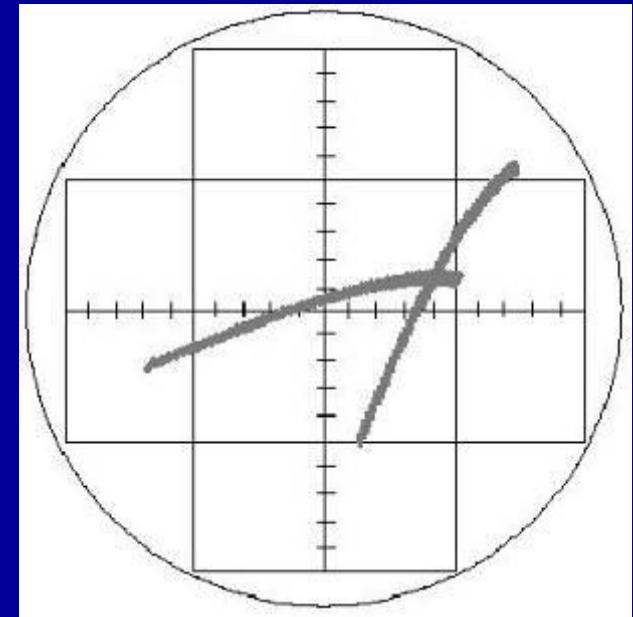
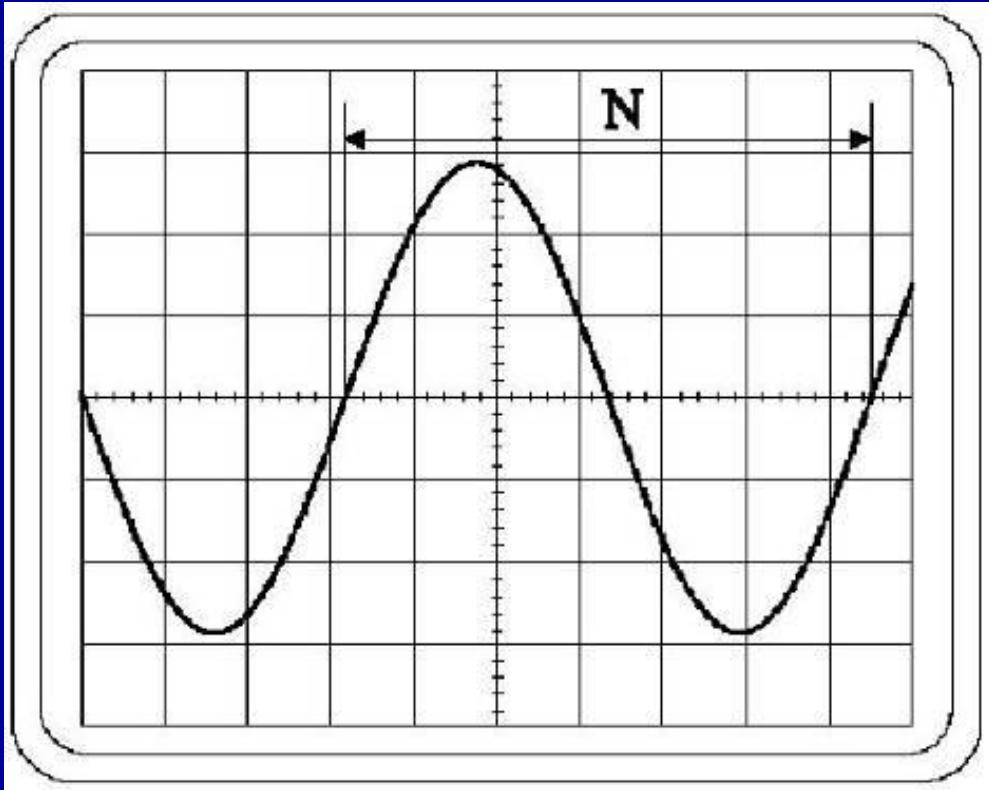
Visualizzare a schermo almeno un periodo della forma d'onda



$$V_p = M A_Y$$

La lettura dell'ampiezza (di picco o picco-picco) può anche essere effettuata ricorrendo ai *marker orizzontali* [solo DSO] oppure impiegando le **misure automatizzate** di ampiezza (picco, picco-picco, rms, media, varianza, dev. st., etc.)

Misure di tempo e periodo/frequenza

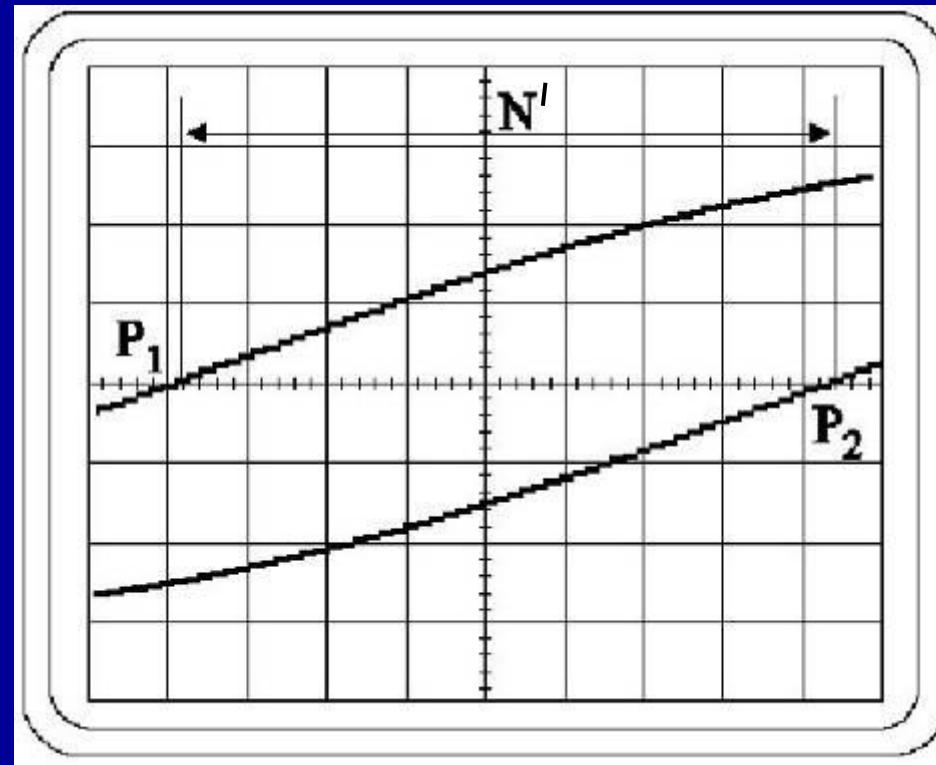
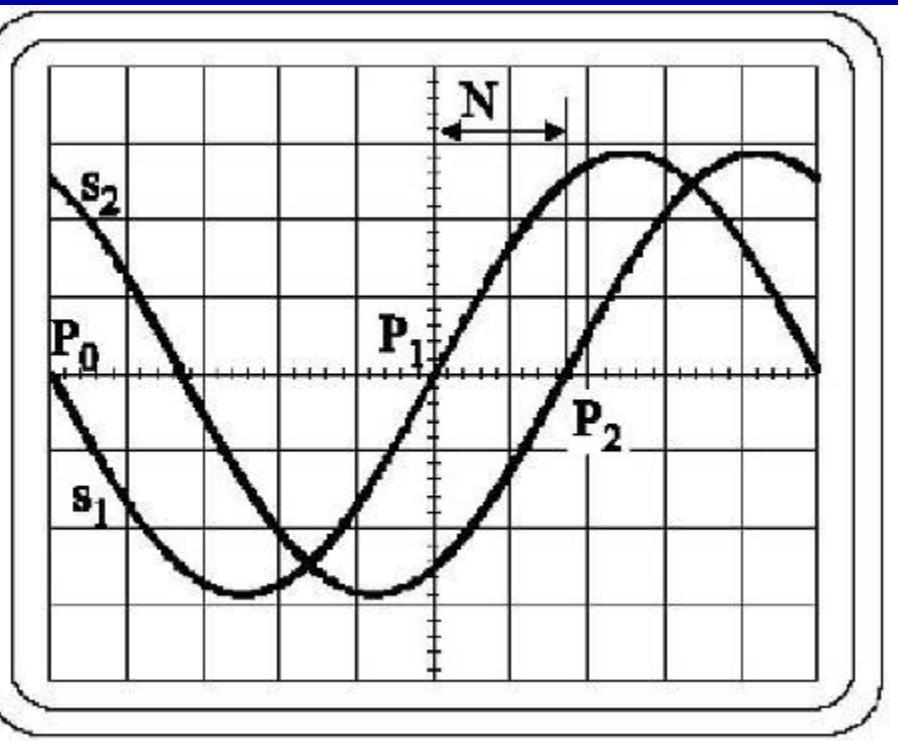


$$T = N A_x$$

Maggior pendenza del segnale
→ migliore valutazione ascissa
del punto di attraversamento
(aiuta anche una traccia sottile)

Si possono anche usare i *marker* verticali [sia OA che DSO] o le misure automatizzate di tempo/frequenza (periodo T , frequenza f , ritardo Δt , sfasamento $\Delta\phi$, *time jitter*, etc.)

Misure di sfasamento



Misura di sfasamento tra 2 segnali sinusoidali (isofrequenziali)

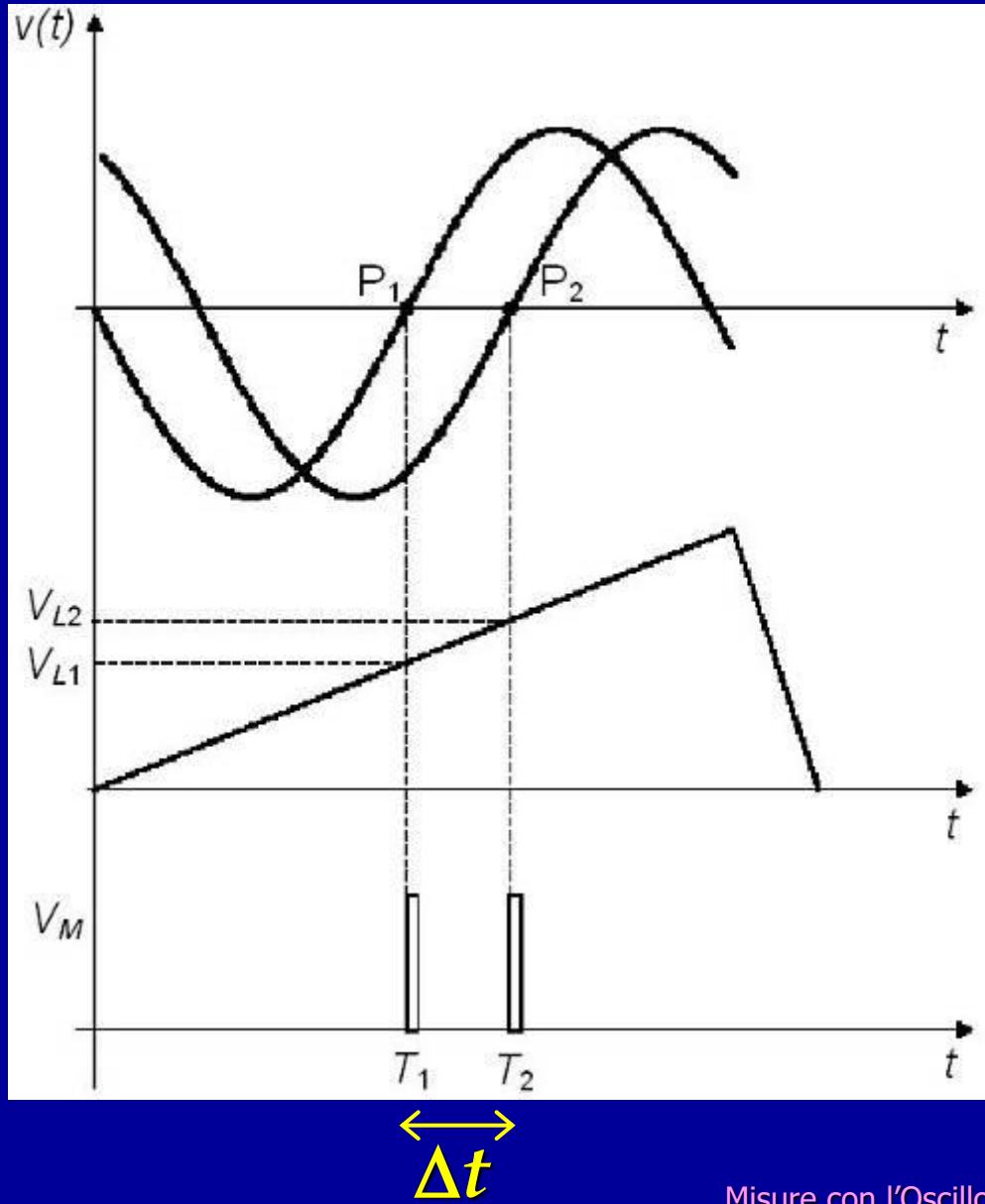
$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} \quad [\text{rad}]$$

$$\text{con } \Delta t (P_2 - P_1) = N A_x$$

Una maggiore espansione del tratto P_1P_2 determina una migliore risoluzione della misura

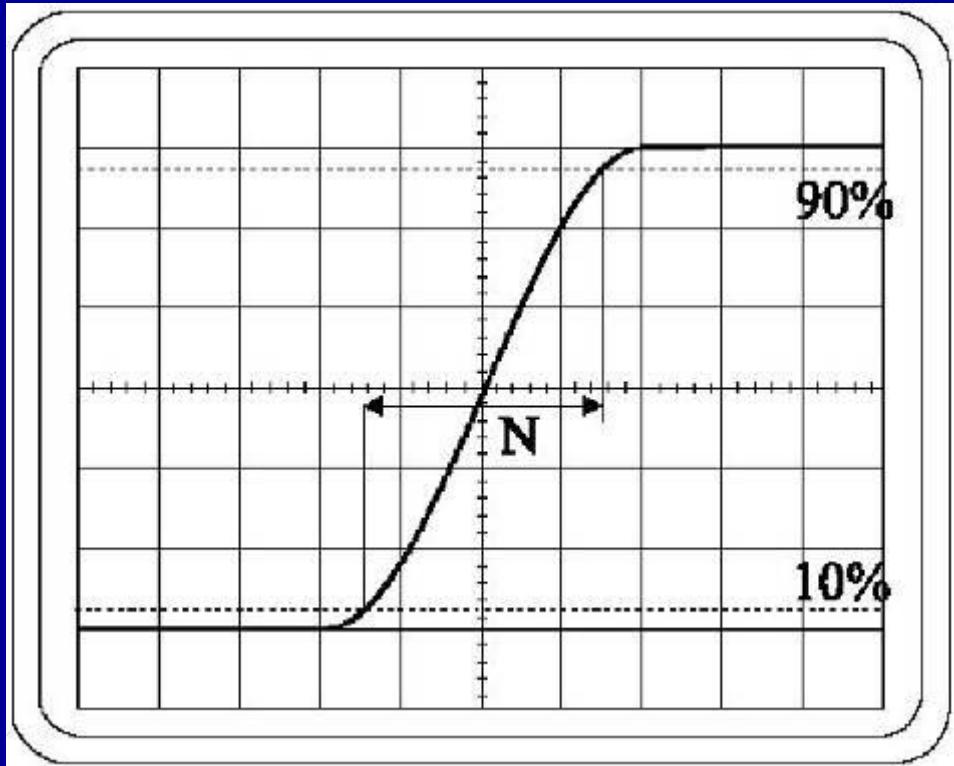
(ZOOM 5x ☺ ... ma come?)

Marker(s) per misure di ΔT



OA: schema semplificato del funzionamento dei **marker(s)**
Gli impulsi V_M , emessi in coincidenza della uguaglianza tra i livelli di tensione regolabili $V_{L(1,2)}$ e la rampa principale, determinano una **maggior luminosità dei punti P_1 e P_2**
Attraverso un **contatore elettronico** interno allo strumento viene misurato con precisione l'**intervallo di tempo tra l'istante T_1 e T_2**

Misure di tempo di salita



impostare da 0% a 100% della salita sulle 6 (o 5) div. centrali

7^a div. da basso

Utilizzo delle linee del reticolo per la **misura del tempo di salita** di un segnale a gradino

1^a div. da basso

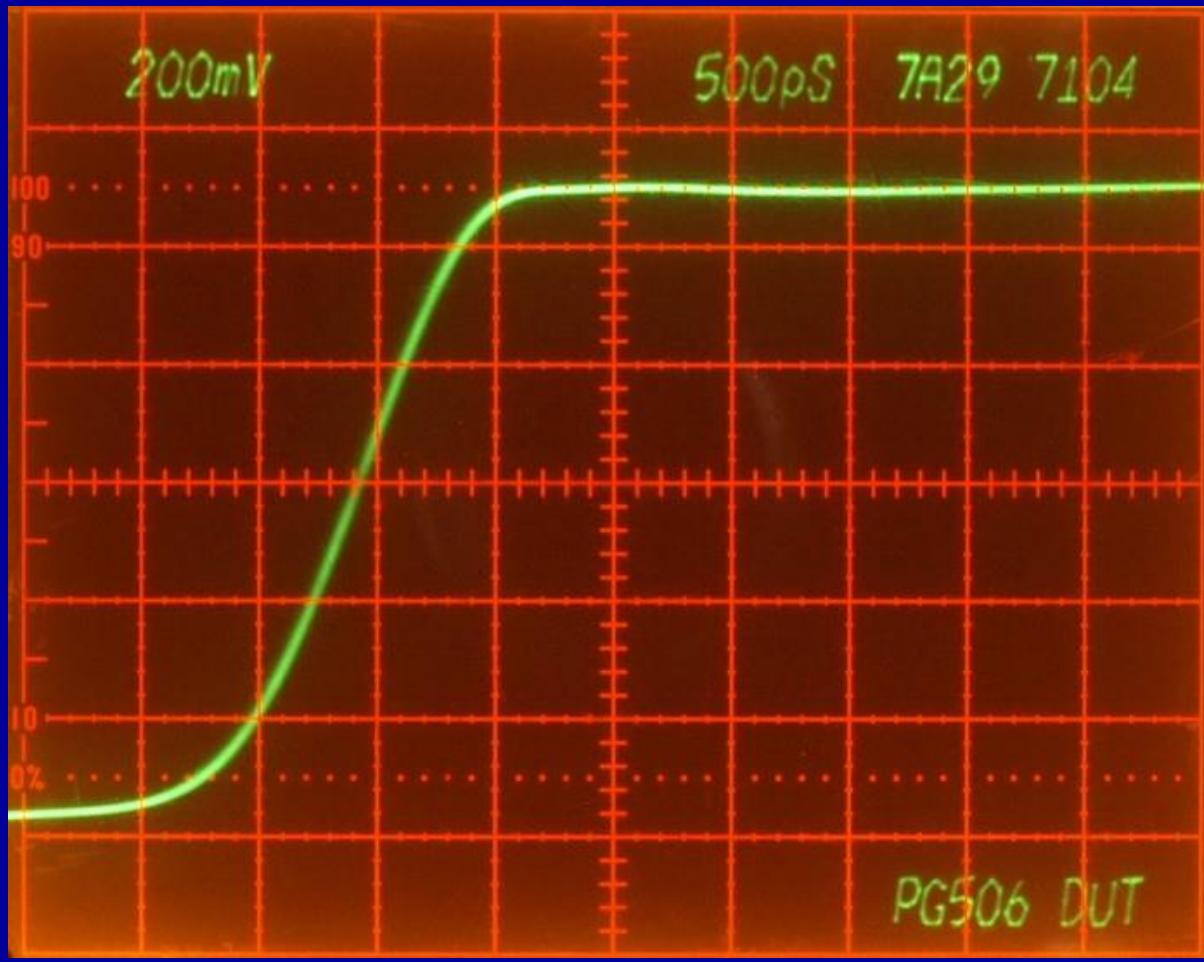
$$t_{sm} = \sqrt{t_{ss}^2 + t_{so}^2}$$

composizione quadratica dei tempi di salita

$$t_{ss} = \sqrt{t_{sm}^2 - t_{so}^2}$$

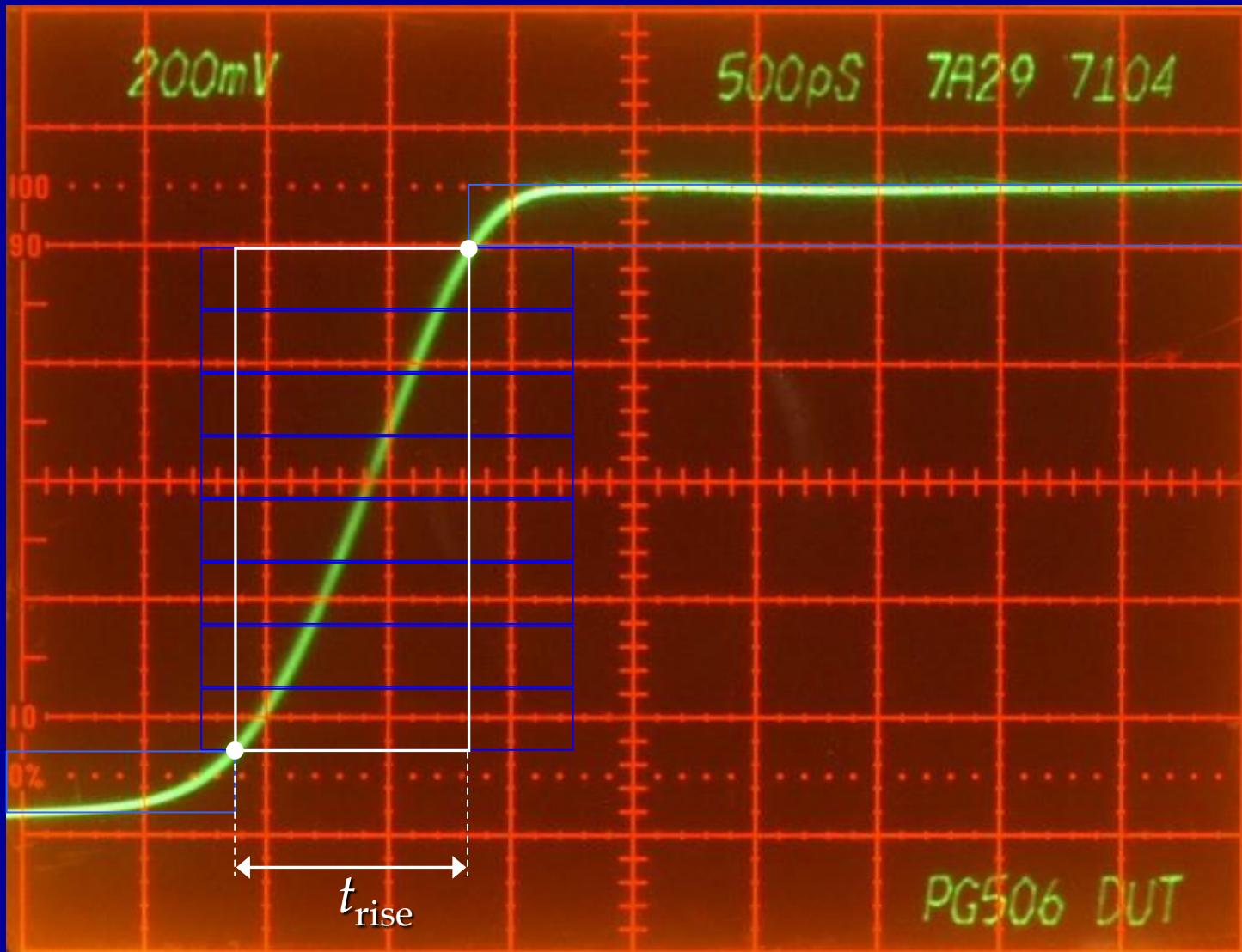
con $t_{so} \approx 0.35/B$

Misure di tempo di salita (esempio)



Esempio di misura (*non benfatta*) di un breve tempo di salita. Come si vede in Fig., contando le sottodivisioni X tra il 10% e il 90% del gradino di tensione si può misurare il tempo $t_{\text{rise}} \approx 9.5 \times 0.2 \text{ DIV} \times 500 \text{ ps}$ $t_{\text{rise}} \approx 900 \text{ ps} \approx 1 \text{ ns}$ a cui corrisponde una banda $f_{\text{MAX}} \approx 390 \text{ MHz} \approx 350 \text{ MHz}$ (prob. anche limitata dal segnale dato che l'oscilloscopio ha 1 GHz di banda!)

Misure di tempo di salita (esempio)



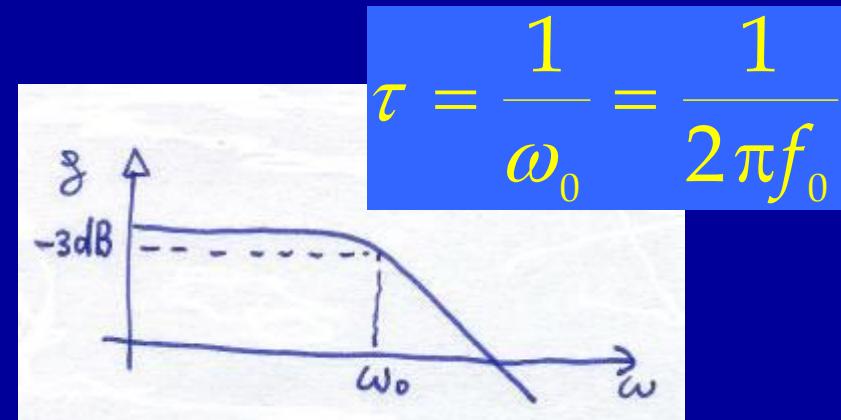
$$t_{rise} \approx 9.5 \times 0.2 \text{ DIV} = 1.8 \text{ DIV}$$

Misure con l'Oscilloscopio

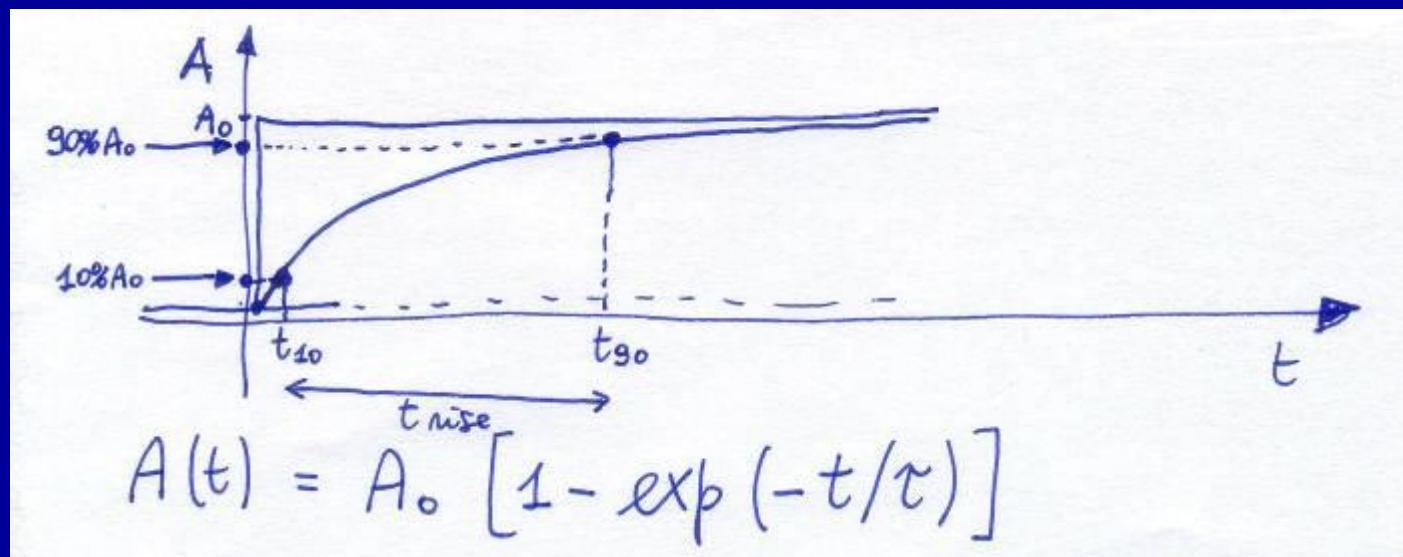
Sistema a singolo polo dominante

Risposta in frequenza

$$g(s) = \frac{1}{1 + s\tau} = \frac{1}{1 + j\omega/\omega_0}$$



Evoluzione nel tempo della risposta al gradino



Sistema a singolo polo dominante

$$\frac{A(t)}{A_0} = 10\% = [1 - \exp(-t_{10}/\tau)]$$

$$\frac{A(t)}{A_0} = 90\% = [1 - \exp(-t_{90}/\tau)]$$

e dunque:

$$\exp(-t_{10}/\tau) = 0.9$$

$$\exp(-t_{90}/\tau) = 0.1$$

Facendo prima il \ln e poi la differenza:

$$-t_{10}/\tau + t_{90}/\tau = \ln(0.9/0.1)$$

così da ottenere:

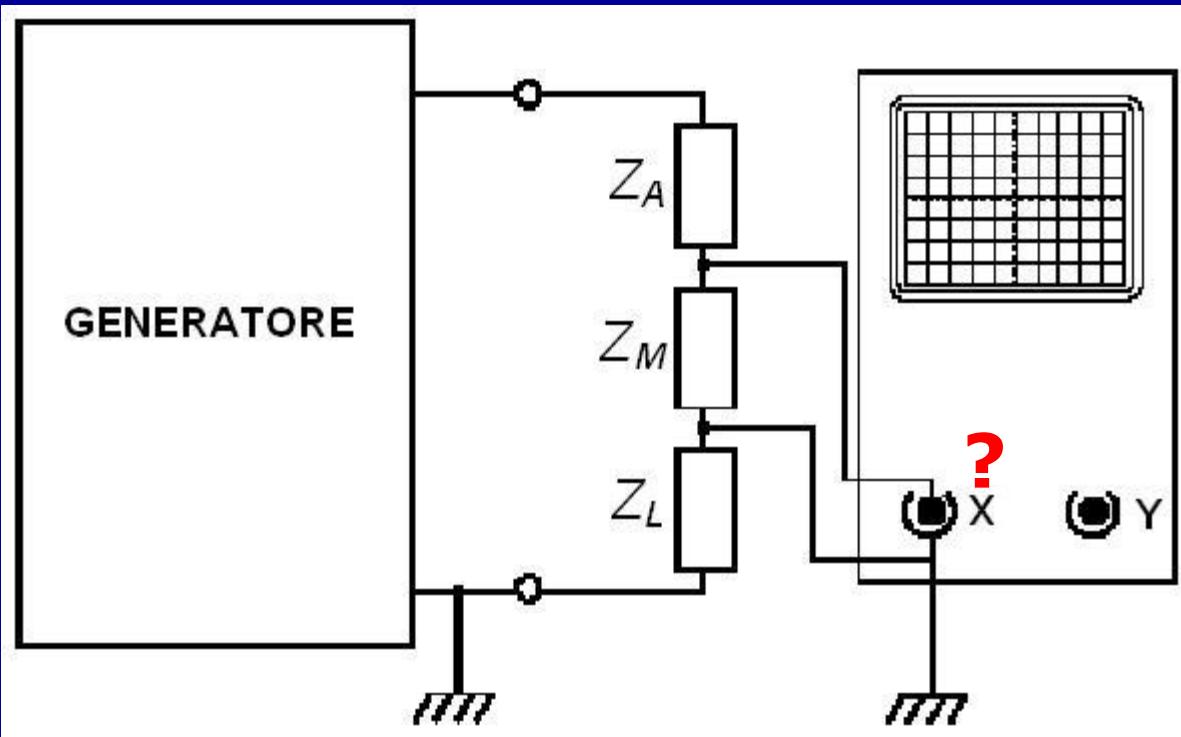
$$t_{\text{rise}} = t_{90} - t_{10} = (\ln 9)\tau \cong 2.2\tau$$

e infine... $t_{\text{rise}} \cong 0.35/B$

$$t_{\text{rise}} = t_{90} - t_{10}$$

$$B = f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau} \cong \frac{2.2}{2\pi} \cdot \frac{1}{t_{\text{rise}}} \cong \frac{0.35}{t_{\text{rise}}}$$

Misure differenziali (1/2)

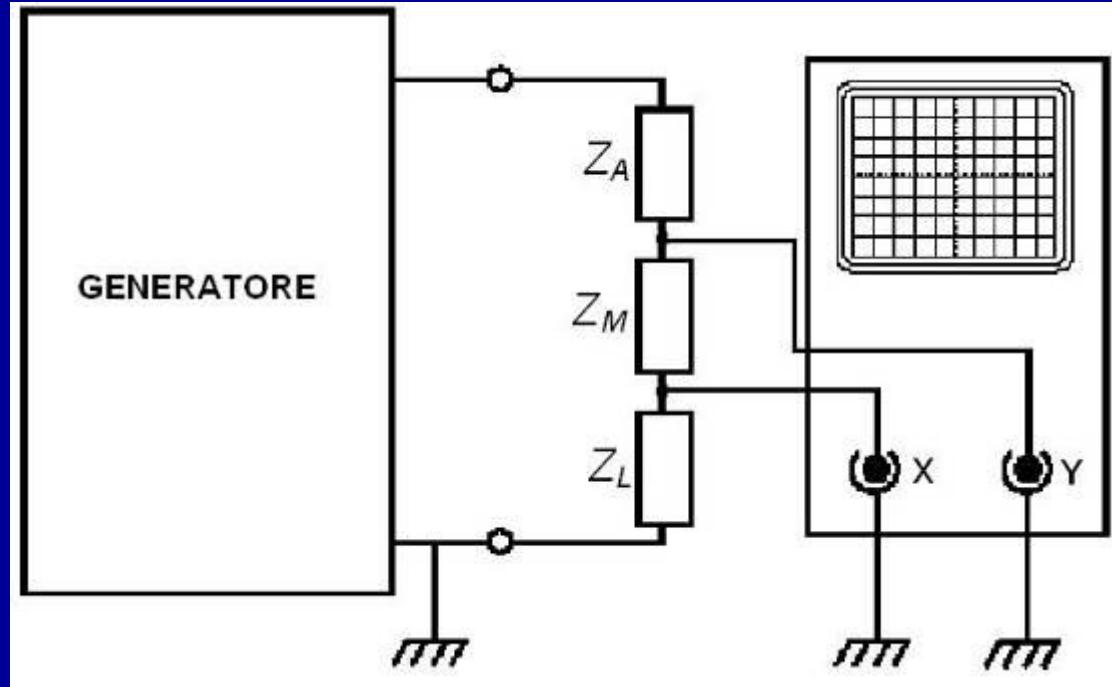


Gli **ingressi** dell'oscilloscopio sono di tipo **sbilanciato** (hanno un terminale connesso a massa). Un singolo ingresso non è adatto a misure di tipo differenziale (se il potenziale di rif. non è la massa)

Gli ingressi sbilanciati dei canali di amplificazione verticale dell'oscilloscopio e la connessione elettrica del morsetto di riferimento alla terra della rete elettrica di alimentazione possono portare a problemi di misura quando nel circuito sotto misura sono presenti altri dispositivi dotati di connessione a terra. **L'oscilloscopio cortocircuita a massa il nodo inferiore di Z_M !!**

Misure differenziali (2/2)

L'impedenza Z_M non ha alcun estremo connesso a massa

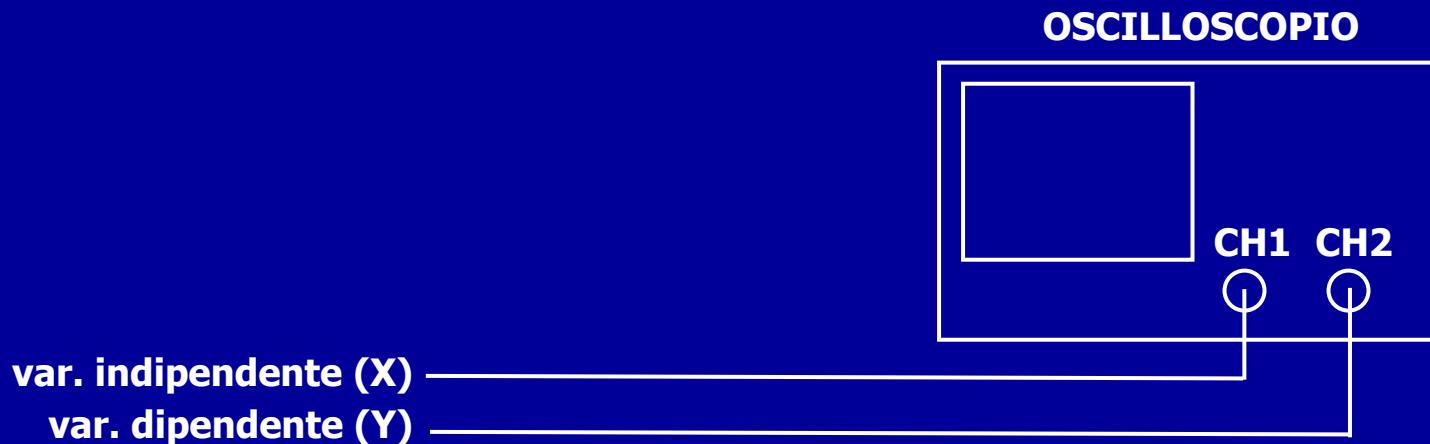


Collegando i due ingressi dell'oscilloscopio ai due morsetti dell'impedenza Z_M e visualizzando sullo schermo la **tensione differenza ($V_Y - V_X$)**, si ottiene una corretta misura della caduta di tensione sull'impedenza

Per misurare la tensione V_M senza alterare il funzionamento del circuito sotto misura (impedenze e punti di massa), si impiegano entrambi gli ingressi dell'oscilloscopio e si visualizza la loro differenza (oppure si usa una **sonda differenziale**)

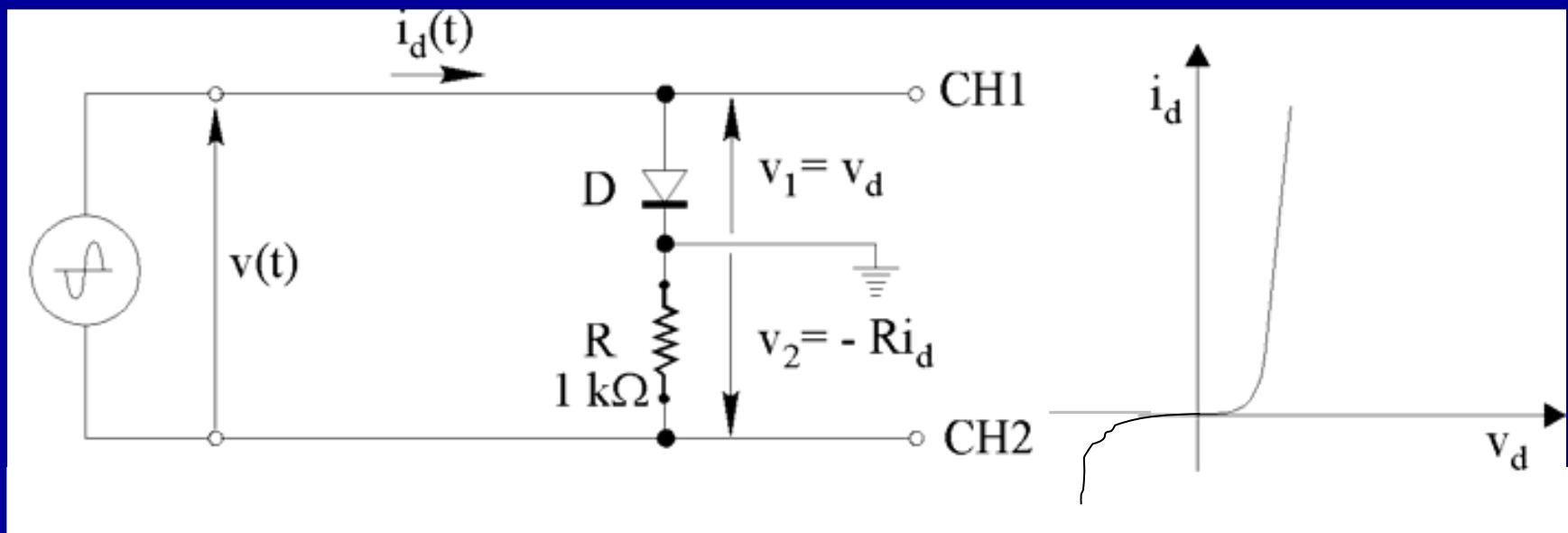
Modalità X-Y

La modalità di visualizzazione X-Y applica i due segnali presenti agli ingressi CH1 e CH2, rispettivamente, alle placche di deflessione orizzontale e verticale. Pertanto la sezione di *trigger* viene esclusa



Tale modalità consente la **visualizzazione di un segnale (V_Y su CH2)** in funzione di **un altro segnale (V_X su CH1)** e dunque di osservare la **caratteristica V_Y vs. V_X** di una grandezza fisica in funzione dell'altra. Una tipica applicazione è costituita dal rilievo delle funzioni **caratteristiche corrente-tensione (I-V)** di componenti o dispositivi

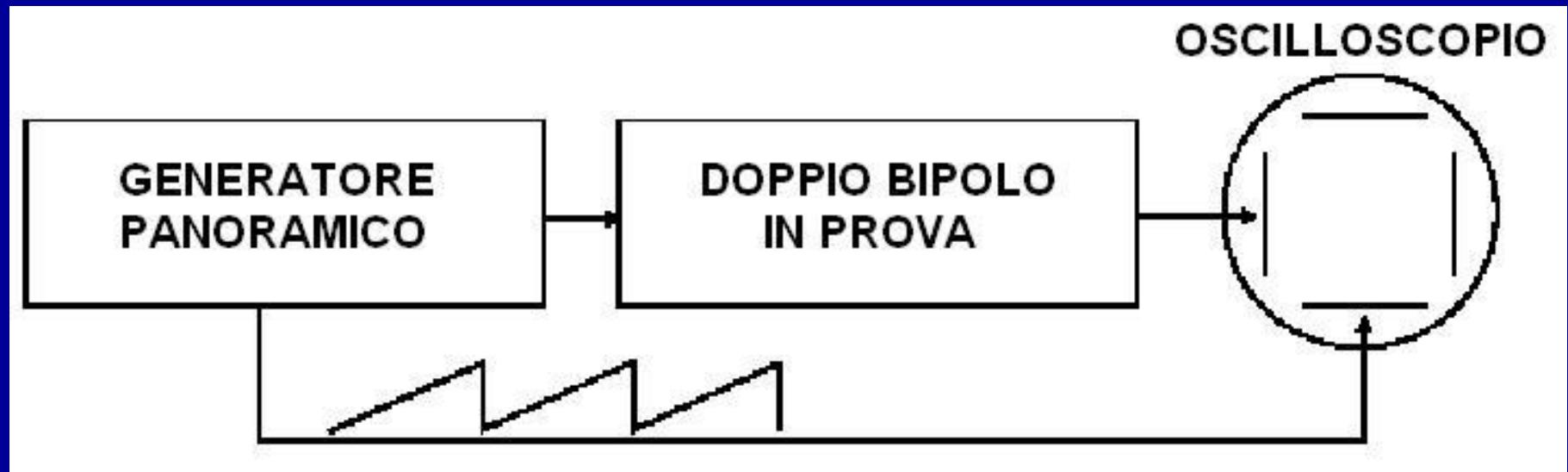
Misura della caratt. I-V di un diodo



Misura, mediante oscilloscopio in modalità X-Y, della caratteristica corrente-tensione (I-V) di un diodo a semiconduttore

Per osservare una traccia stabile, occorre “ripetere nel tempo” (con una ‘rapida’ rampa di tensione) la d.d.p. applicata ai capi del diodo

Misura funzione di trasferimento (1/2)

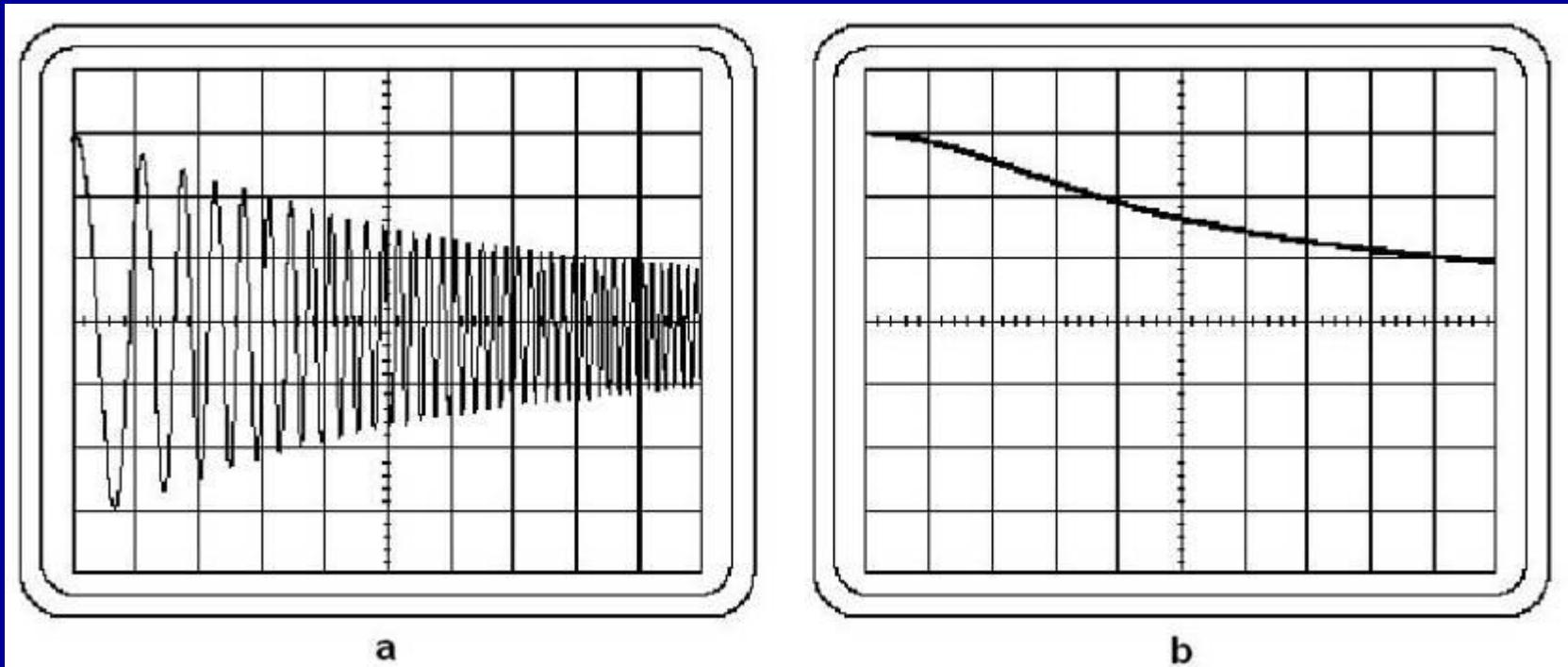


Schema semplificato per la **misura**/visualizzazione **della risposta in frequenza di un doppio bipolo** in prova.

La rampa di tensione, che produce la variazione in frequenza (vobulazione) del segnale sinusoidale erogato dal generatore panoramico, viene inviata anche al sistema di deflessione orizzontale (canale X) dell'oscilloscopio.

Al sistema di deflessione verticale (canale Y), viene invece inviato il segnale sinusoidale in uscita dal doppio bipolo.

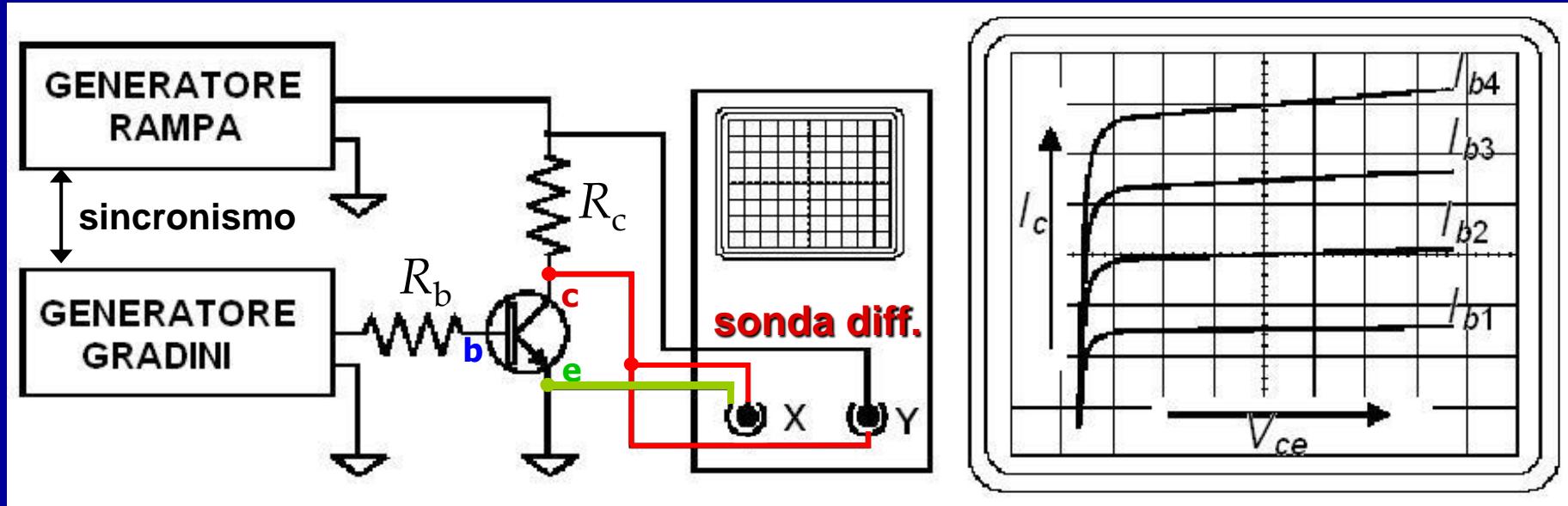
Misura funzione di trasferimento (2/2)



Rappresentazione sullo schermo dell'oscilloscopio del **segnale misurato in uscita da un filtro passa basso**, eccitato da un segnale vobulato (e.g. VCO), utilizzando la tensione/frequenza di vobulazione per pilotare l'asse orizzontale.

Nel primo caso, il segnale in uscita dal filtro viene applicato direttamente all'ingresso dell'oscilloscopio, mentre nel secondo caso viene utilizzato un rivelatore di picco per migliorare la visualizzazione delle ampiezze trasmesse

Misura caratt. I-V di un transistor



Schema di principio di un circuito per la **misura diretta delle caratteristiche di un transistor** ed esempio della rappresentazione sullo schermo dell'oscilloscopio della famiglia di curve caratteristiche $I_c - V_{ce}$ al variare della corrente di base ($I_{b1} < I_{b2} < I_{b3} < I_{b4}$)

si osservi che $V_Y = R_c I_c \propto I_c$ e $V_X = V_{ce}$

Figure di Lissajous (1/2)

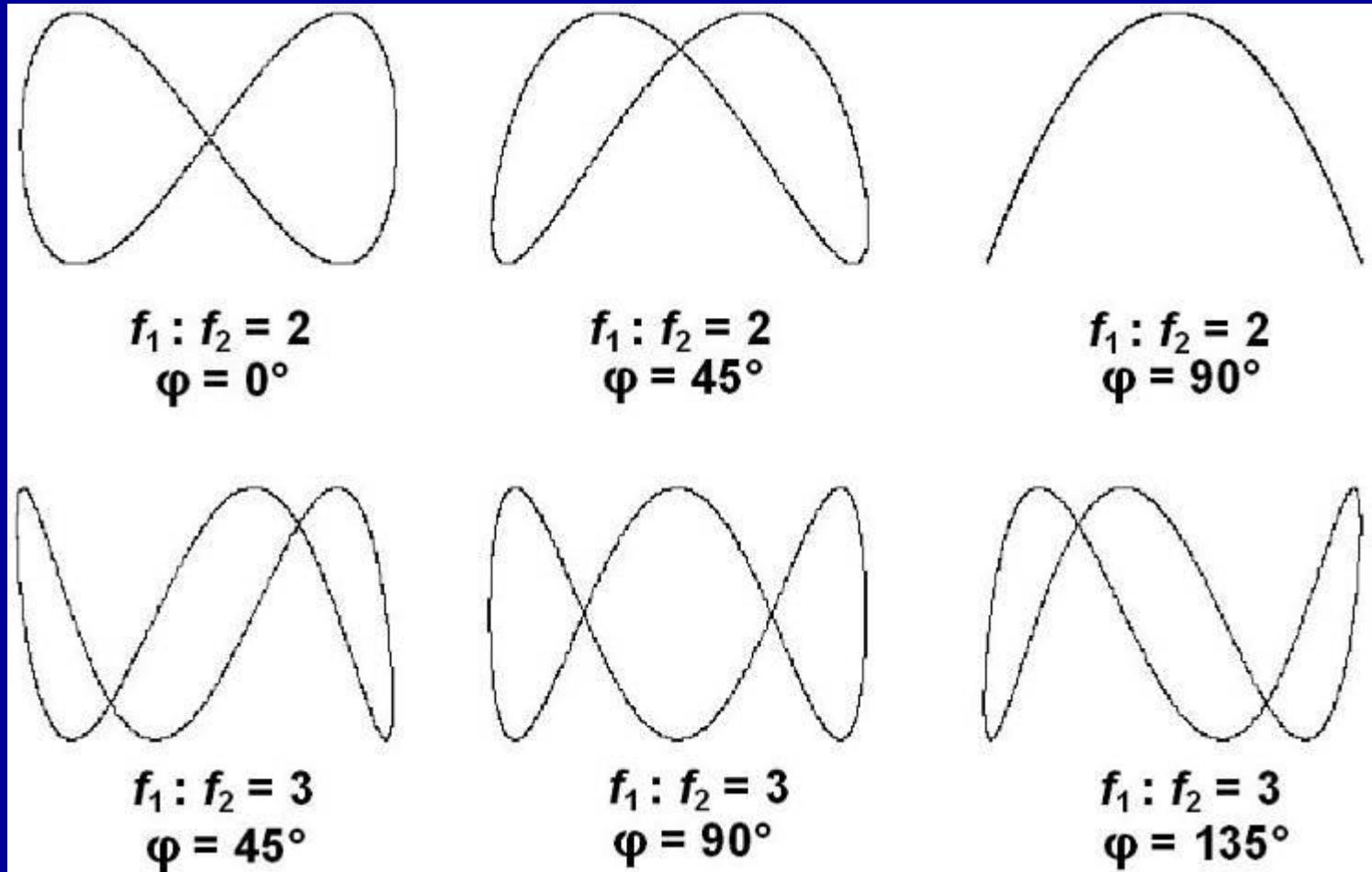
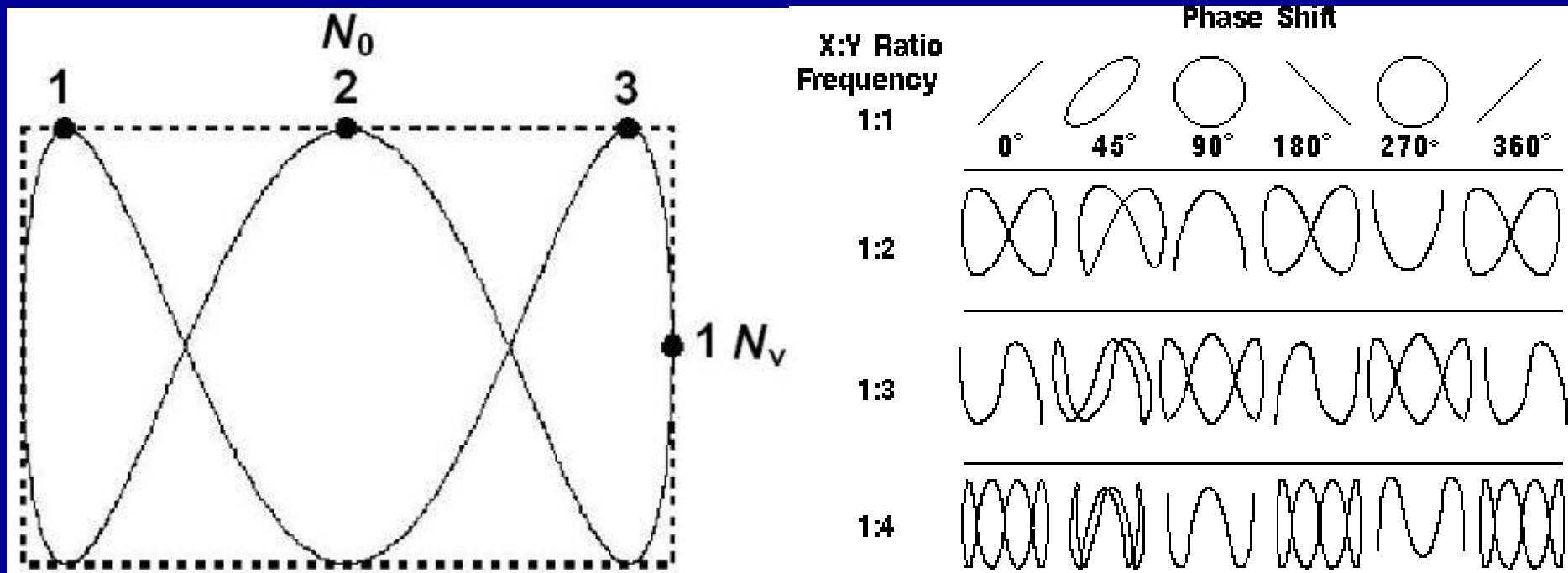


Figure di Lissajous: prodotte da due segnali sinusoidali (in **modalità X-Y**) con differenti frequenze e sfasamenti

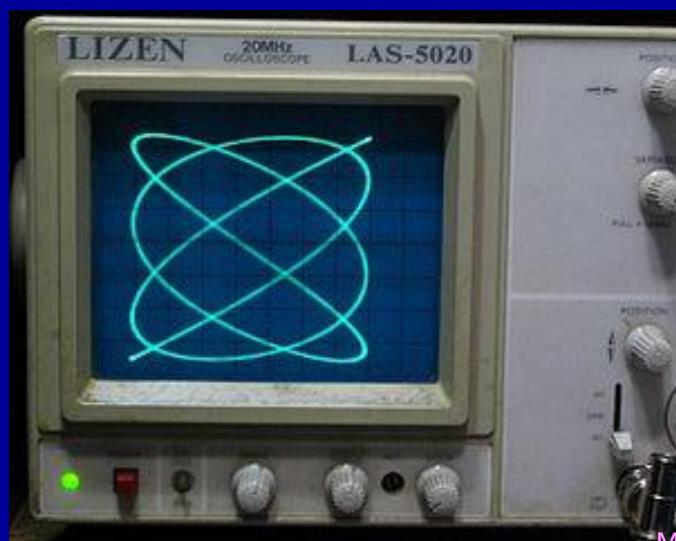
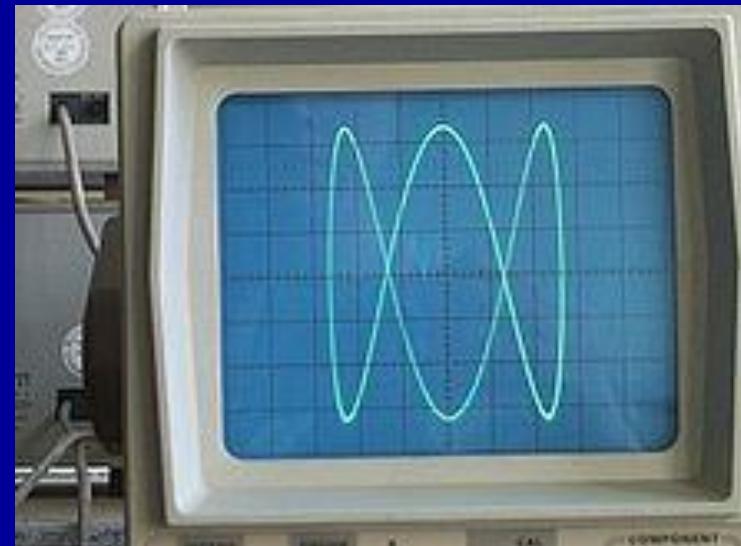
Figure di Lissajous (2/2)

Figure di Lissajous per due sinusoidi di pari ampiezza, al variare del rapporto di frequenza e dello sfasamento delle due onde



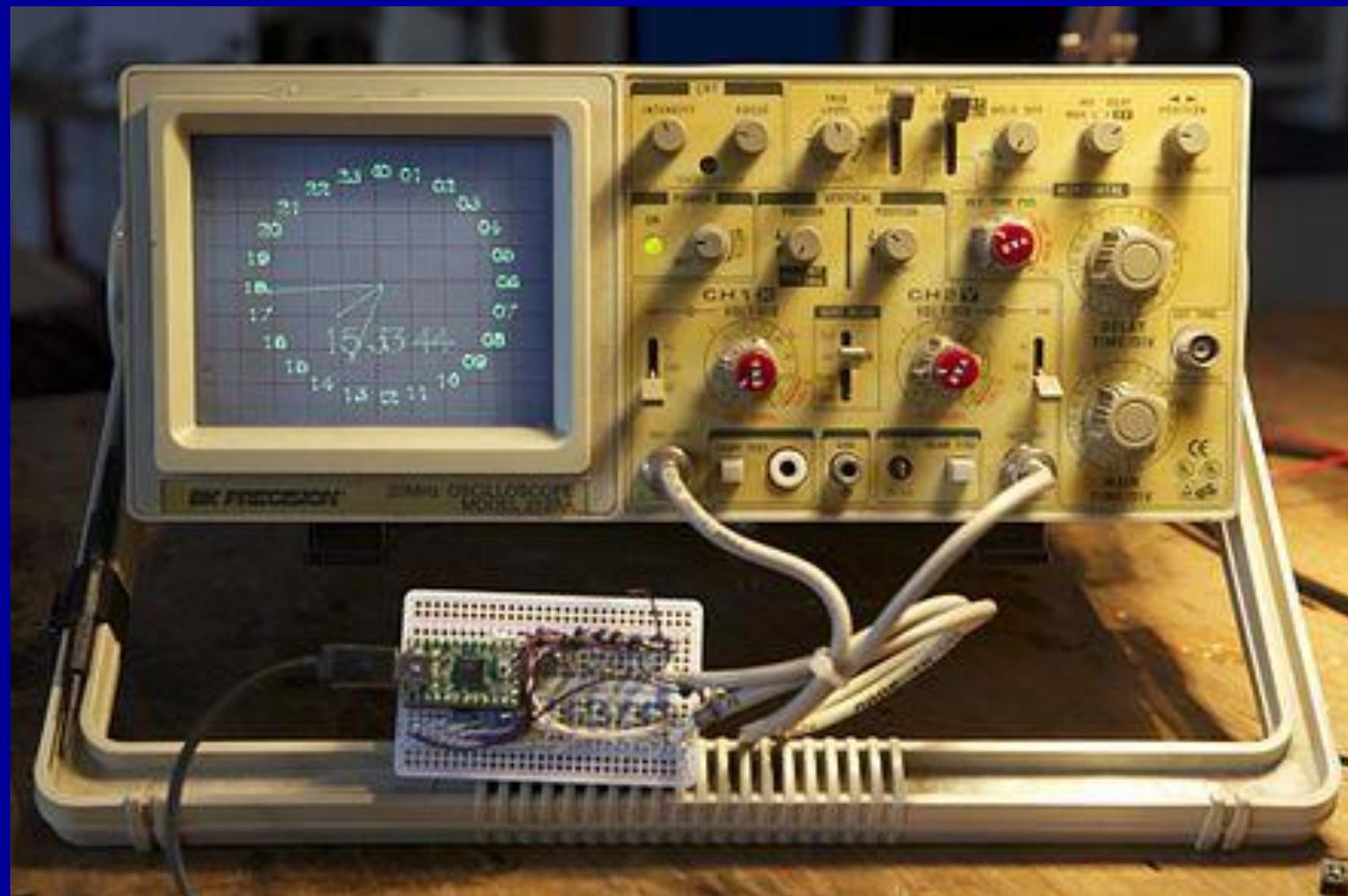
Misura del rapporto di frequenza tra due segnali mediante il conteggio del numero dei punti di tangenza. In questo caso $N_O = 3$ e $N_V = 1$: il rapporto di frequenza è quindi pari a $N_O / N_V = 3$

Esempi di figure di Lissajous



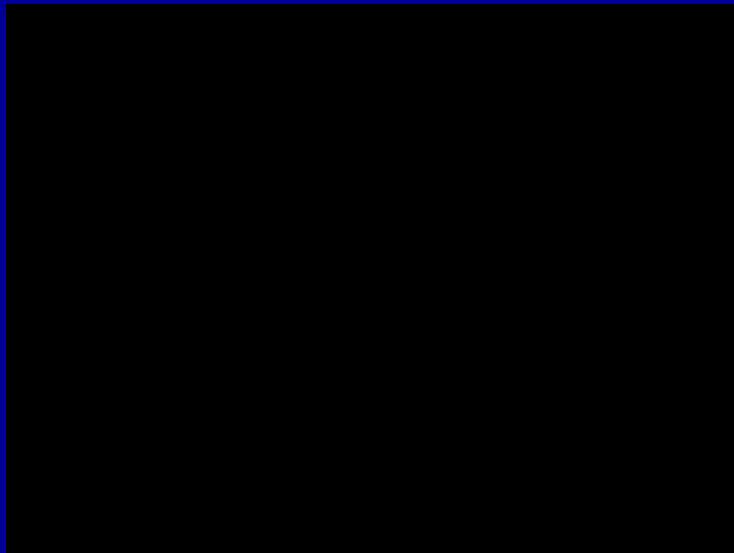
Misure con l'Oscilloscopio

Esempio Oscillo-PLOTTER X-Y

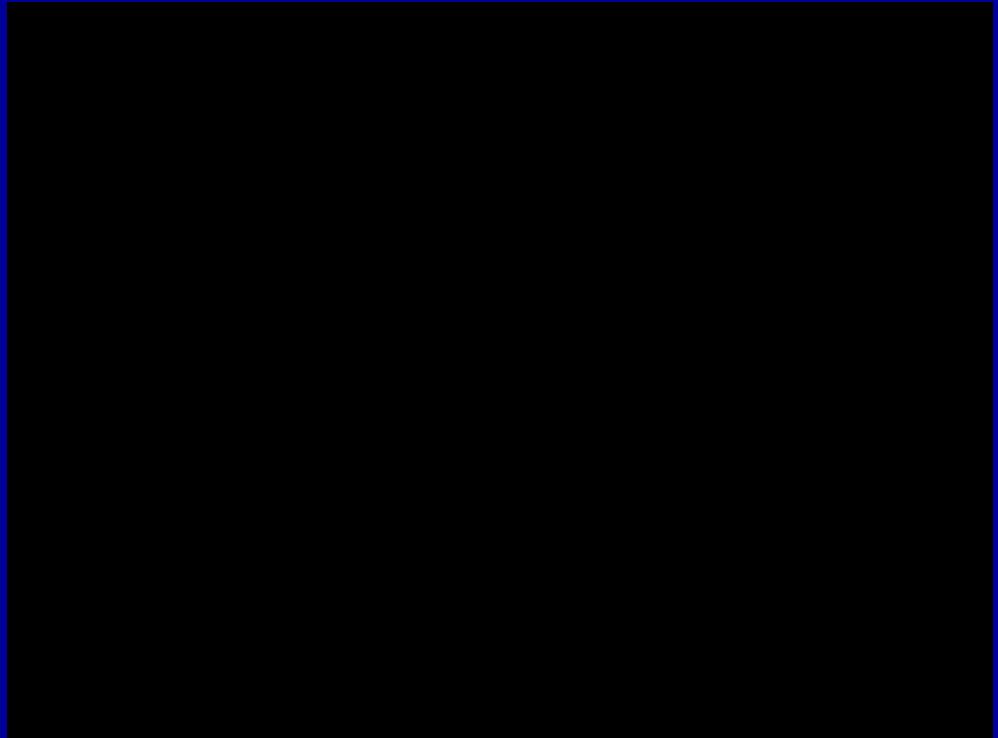


Oscillo-“QUAKE” in modalità X-Y

Quake on oscilloscope



Quake on an oscilloscope_better quality - HD



Video procurati dallo studente **Simone Mosciatti**