



Università degli Studi di Catania  
Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche  
ed Ambientali

# I sismometri

**Valerio Poggi**

*Proc sel n 1 SC 04/A4 SSD GEO/10*



## Prerequisiti alla lezione

Conoscenza pregressa di:

- Trasformate di Fourier
- Soluzione equazioni differenziali
- Introduzione base ai diversi tipi di onde elastiche (P, S, superficie)



## Cos'è e a cosa serve il Sismometro

Il **sismometro** è uno strumento in grado di reagire allo scuotimento indotto da una causa sorgente naturale o antropogenica, producendone una risposta meccanica o elettrica.

Se lo strumento ha capacità di registrare e archiviare tale risposta, si parla più propriamente di **sismografo**.

Nell'accezione più comune, i sismometri vengono impiegati per lo studio dei **terremoti**, sebbene il loro impiego si estenda anche ad altri ambiti come la rilevazione di rumore (o microvibrazioni) e la prospezione geofisica.



4.5HZ Geohopne

Seismometer S13

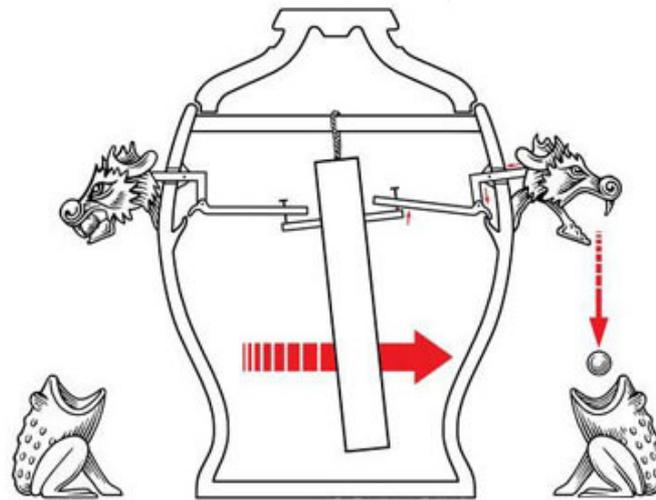


Trillium 240



## Origini della Sismometria

Il primo strumento considerato in grado di registrare l'occorrenza di un terremoto fu il **Sismoscopio**, ideato in Cina da **Zhang Heng** (matematico, astronomo e inventore) nel 130 A.C. circa.

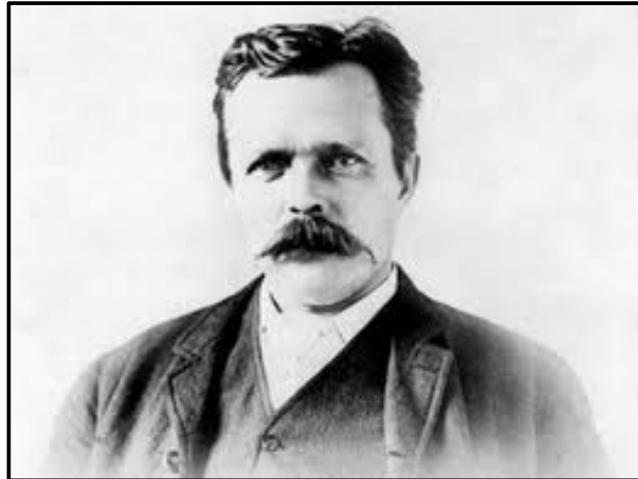


Il Sismoscopio, oltre a confermare l'occorrenza di un evento sismico, poteva fornire preziose (sebbene rudimentali) informazioni sulla direzionalità del moto.



## Origini della Sismometria

La sismografia si e' pero' accreditata ufficialmente come scienza solo dall'inizio del secolo scorso, grazie agli studi pionieristici di **John Milne** svolti in gran parte presso la società sismologica giapponese.

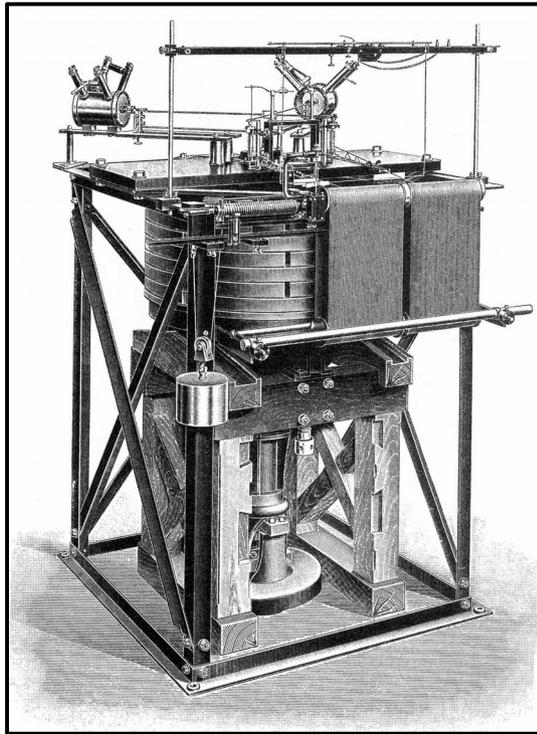


John Milne (e moglie) con il sismologo russo Boris Galitzin

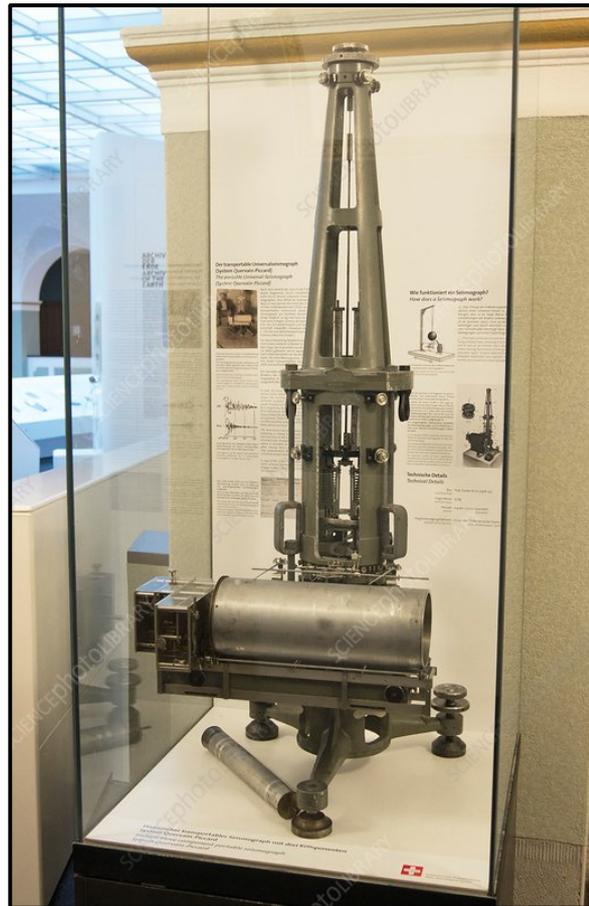


## Origini della Sismometria

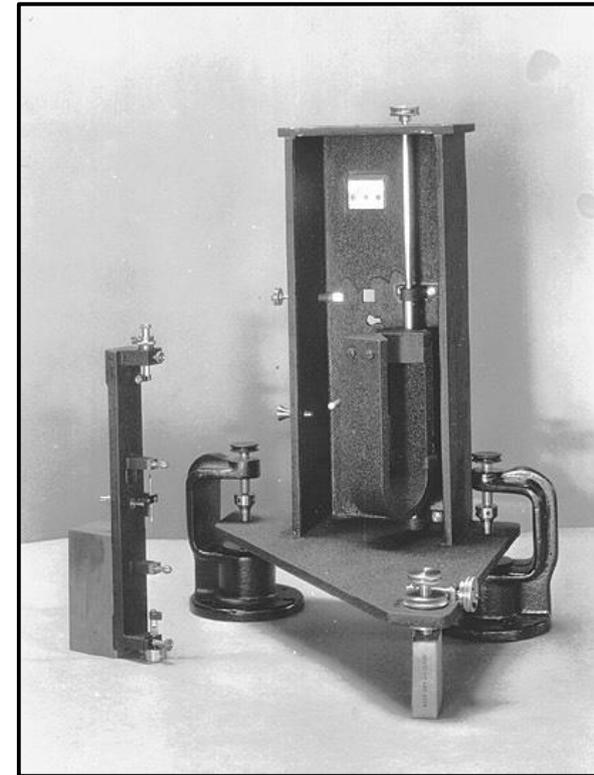
Da allora sono stati sviluppati numerosi modelli, con soluzioni ingegneristiche diverse e brillanti.



Sismometro a corto periodo  
Weichert



Sismometro portatile  
Quervain Picard

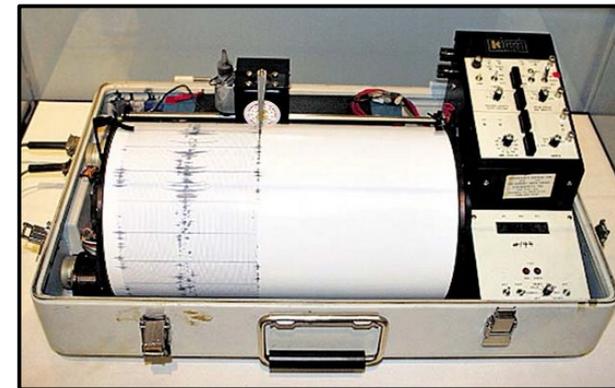
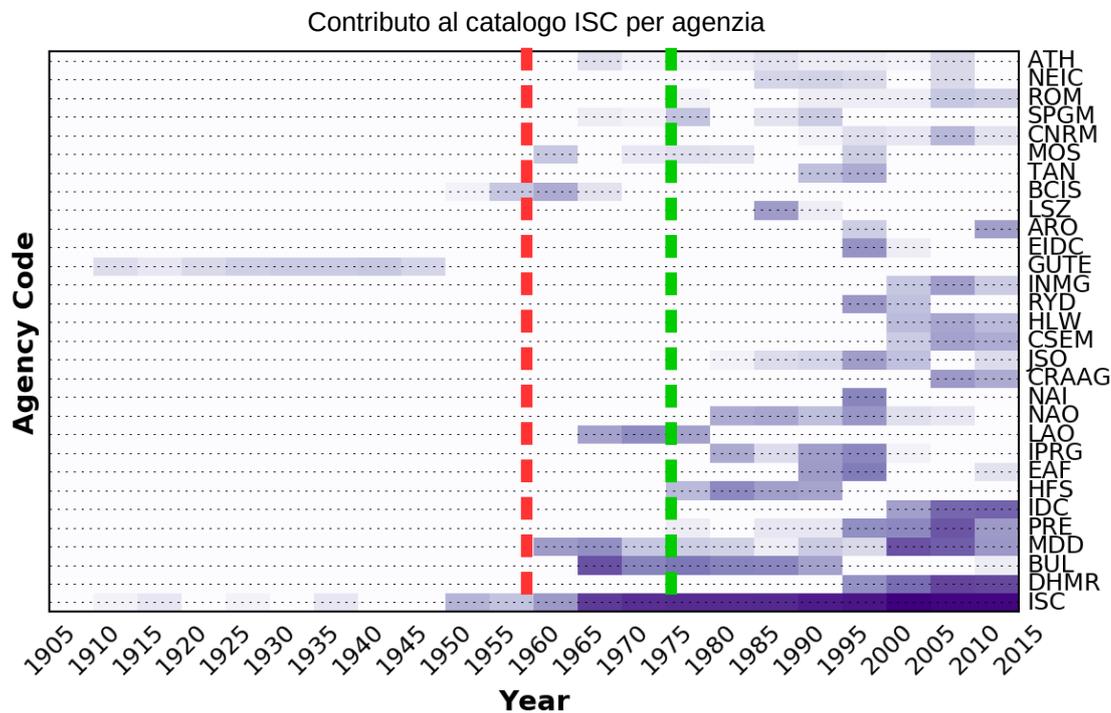


Sismometro a torsione Wood Anderson

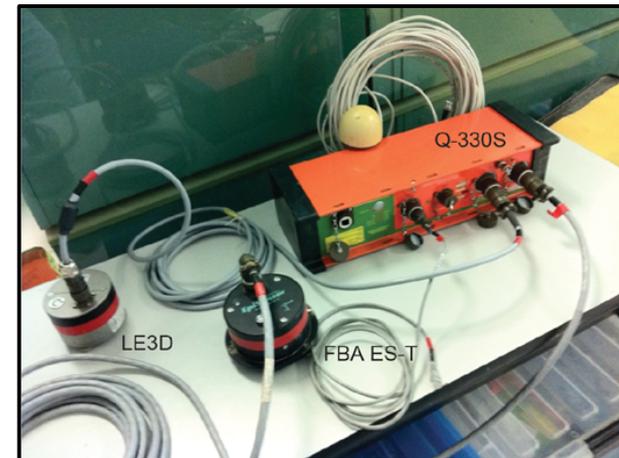


# Origini della Sismometria

Solo dalla meta' degli anni cinquanta pero' il sismometro diventa uno strumento standard nella pratica sismologica, grazie all'introduzione dell'elettronica, da prima **analogica** e poi **digitale**.



Stazione sismometrica analoga a tamburo  
Kinometrics



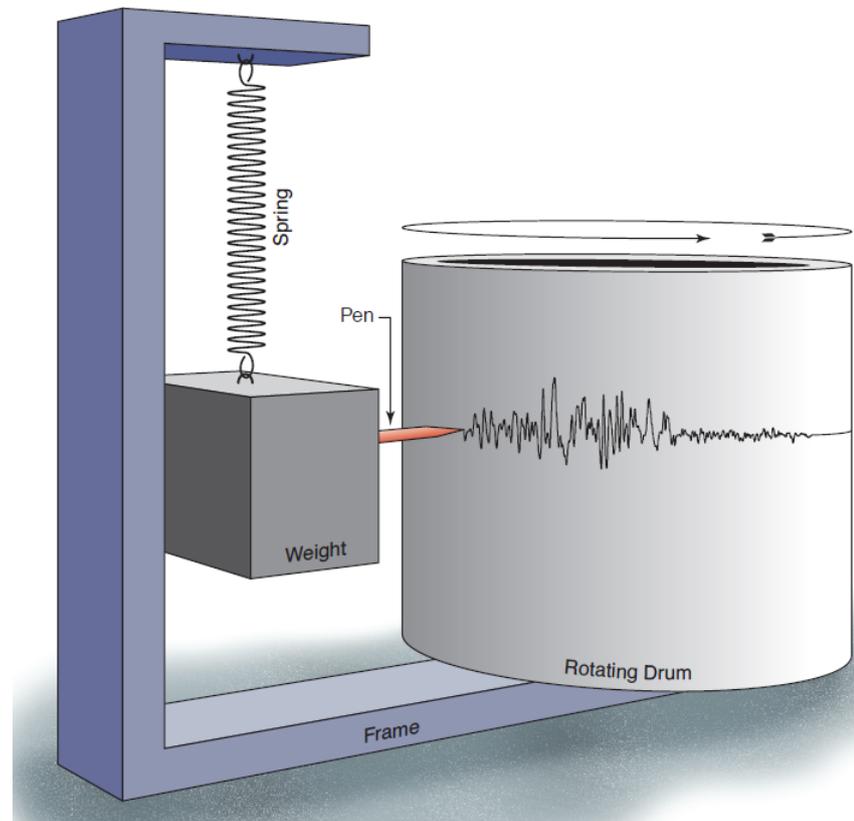
Stazione digitale QuanterraQ330 con  
velocimetro Lennartz 3D e accelerometro  
Episensor Kinometrics



## Principio di funzionamento

Nella sua espressione più semplice, un sismometro rileva la variazione di posizione di un punto (detto di misura) rispetto ad un **punto di riferimento**.

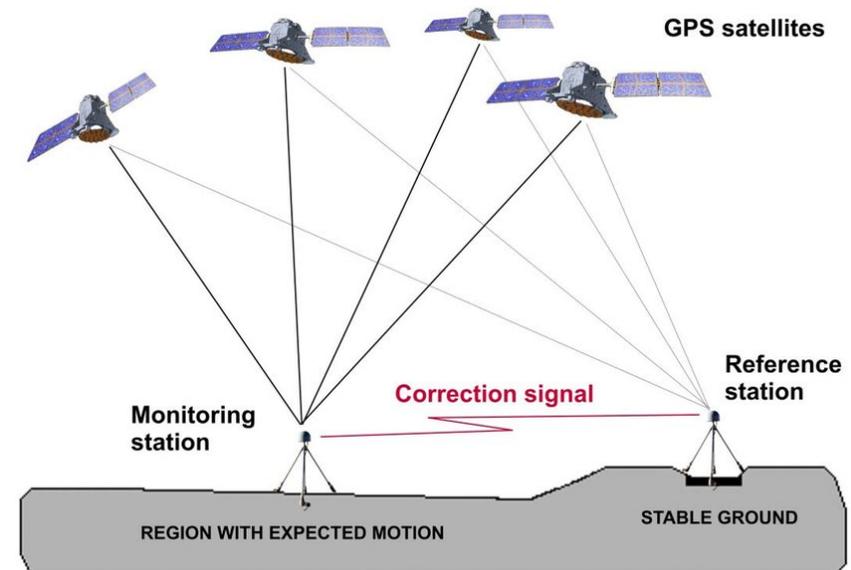
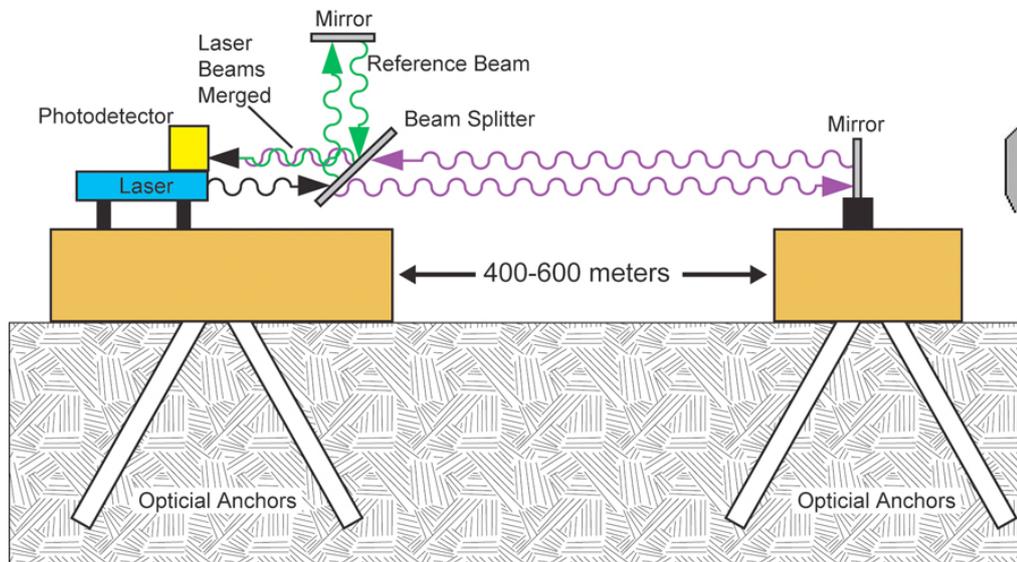
Poiché però non è possibile definire un riferimento assoluto, il più conveniente riferimento risulta quello **relativo inerziale**, ovvero rispetto ad una massa che si oppone alla variazione del suo stato di quiete (o di moto rettilineo uniforme...)





## Principio di funzionamento

E' comunque possibile utilizzare un qualunque riferimento **relativo**, come negli estensimetri (strainmeters) o costellazione di satelliti (misure GPS).





## Tipi di sismometro

I sismometri si distinguono principalmente per:

- Direzione di misura del moto (verticale, orizzontale, rotazionale)
- Quantità misurata (spostamento, velocità, accelerazione)
- Principio di funzionamento (meccanico o elettro-meccanico, attivo o passivo)
- Banda di frequenza
- Campo dinamico
- Ambiente per i quali sono prefigurati (terra, acqua, spazio)

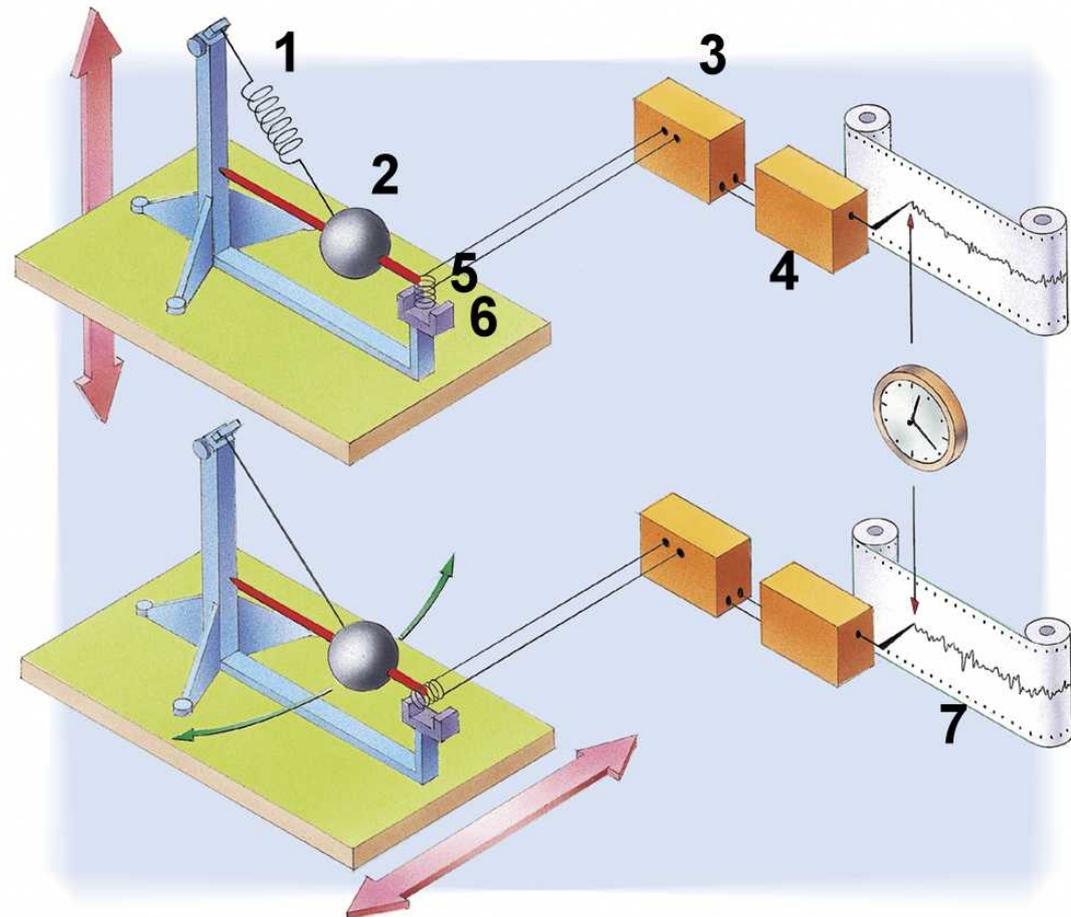


## Componente di misura

I sismometri sono progettati per essere sensibili ad una specifica componente di movimento, classicamente una direzione **traslazionale** orizzontale o **verticale** rispetto alla superficie della terra.

Dipendentemente dalla direzione di misura, lo strumento e' progettato con caratteristiche meccaniche diverse.

I sismometri a **tre componenti** sono semplicemente formati dall'accoppiamento di tre elementi separati...

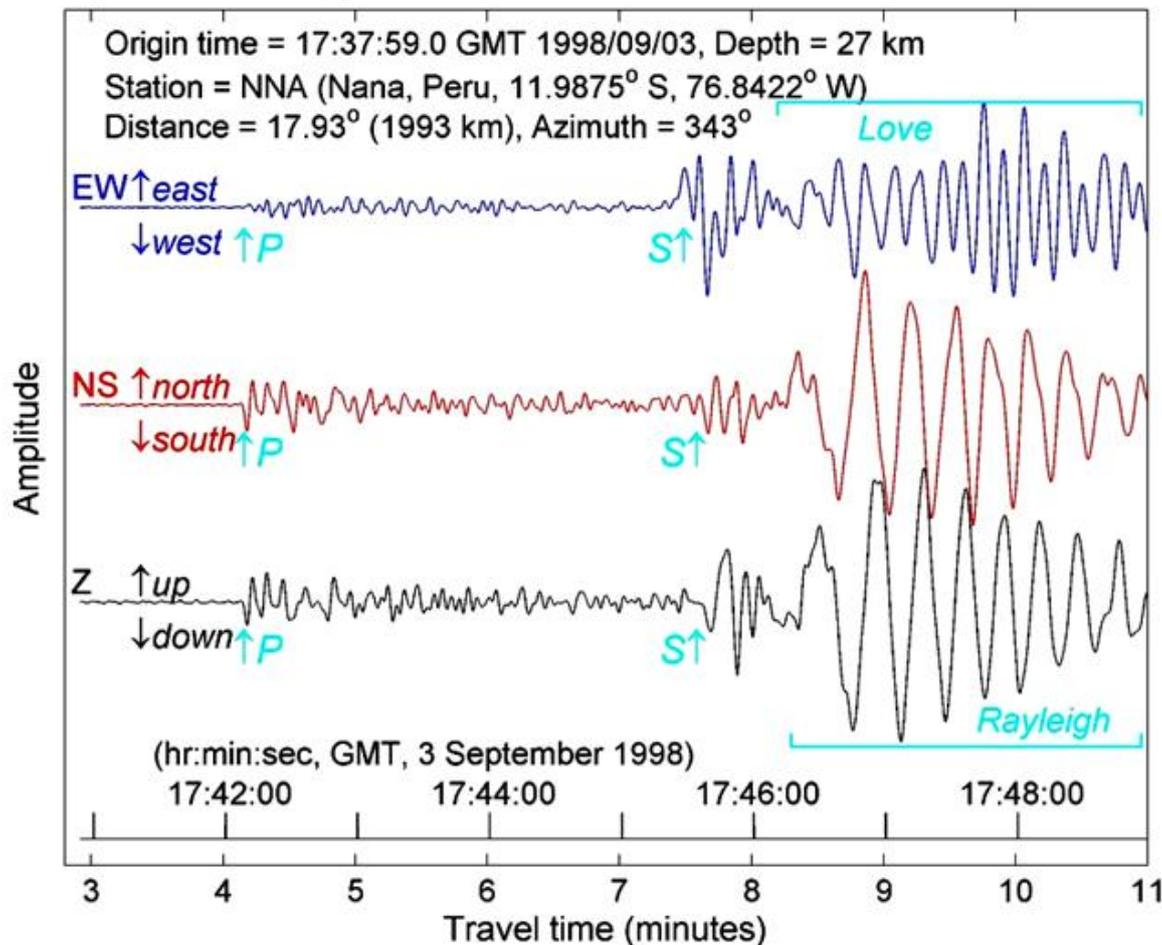




## Componente di misura

La scelta della componente da misurare dipende fortemente dal tipo di studio condotto e dall'onda che si vuole osservare.

Magnitude 6.5 earthquake, near coast of central Chile,  $29.2934^{\circ}$  S,  $71.5471^{\circ}$  W



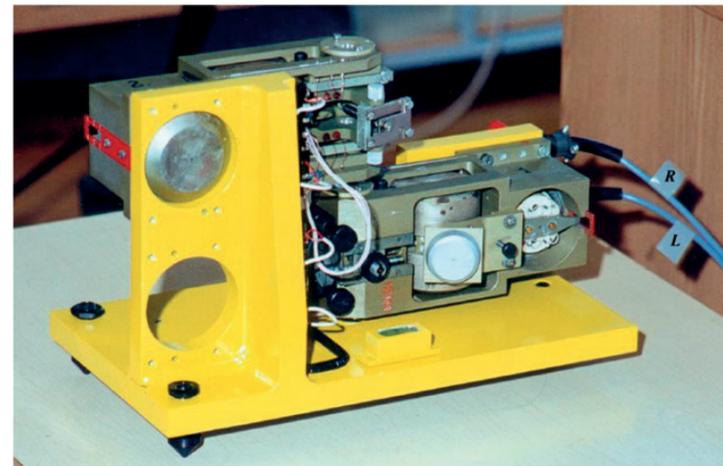
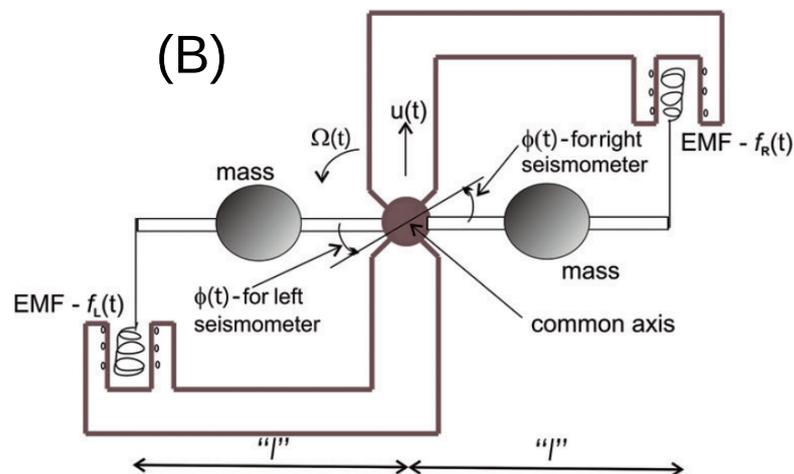
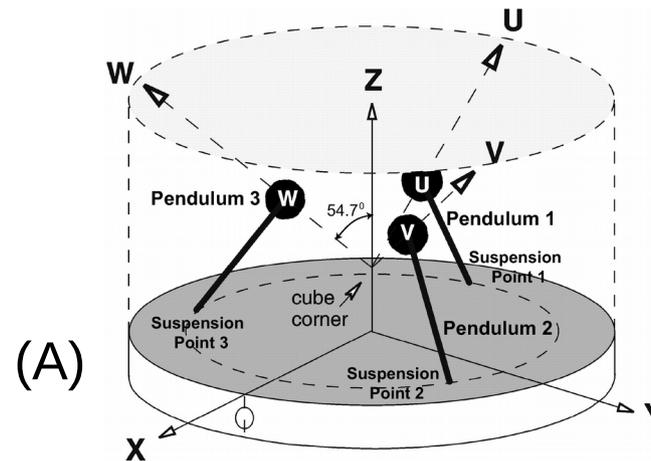
### Esempi:

- 1) Tomografia sismica su primi arrivi >> generalmente sismometri verticali
- 2) Riposta sismica di bacino >> preferenzialmente sismometri orizzontali



## Componente di misura

Esistono non di meno sismometri sensibili a movimenti traslazionali obliqui (A) e alle rotazionali (B).

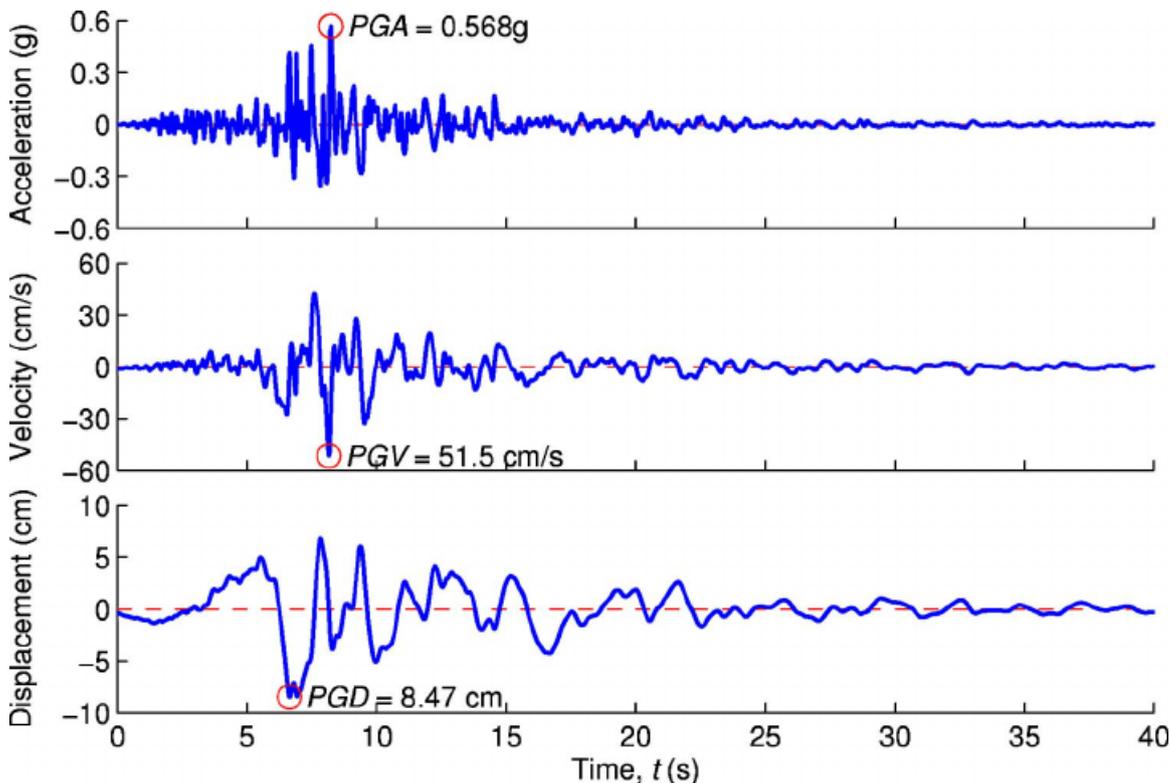




## Grandezza misurata

Dipendentemente dalla grandezza fisica misurata, si distinguono in **accelerometri**, **velocimetri** ed **estensimetri dinamici** (meno frequenti).

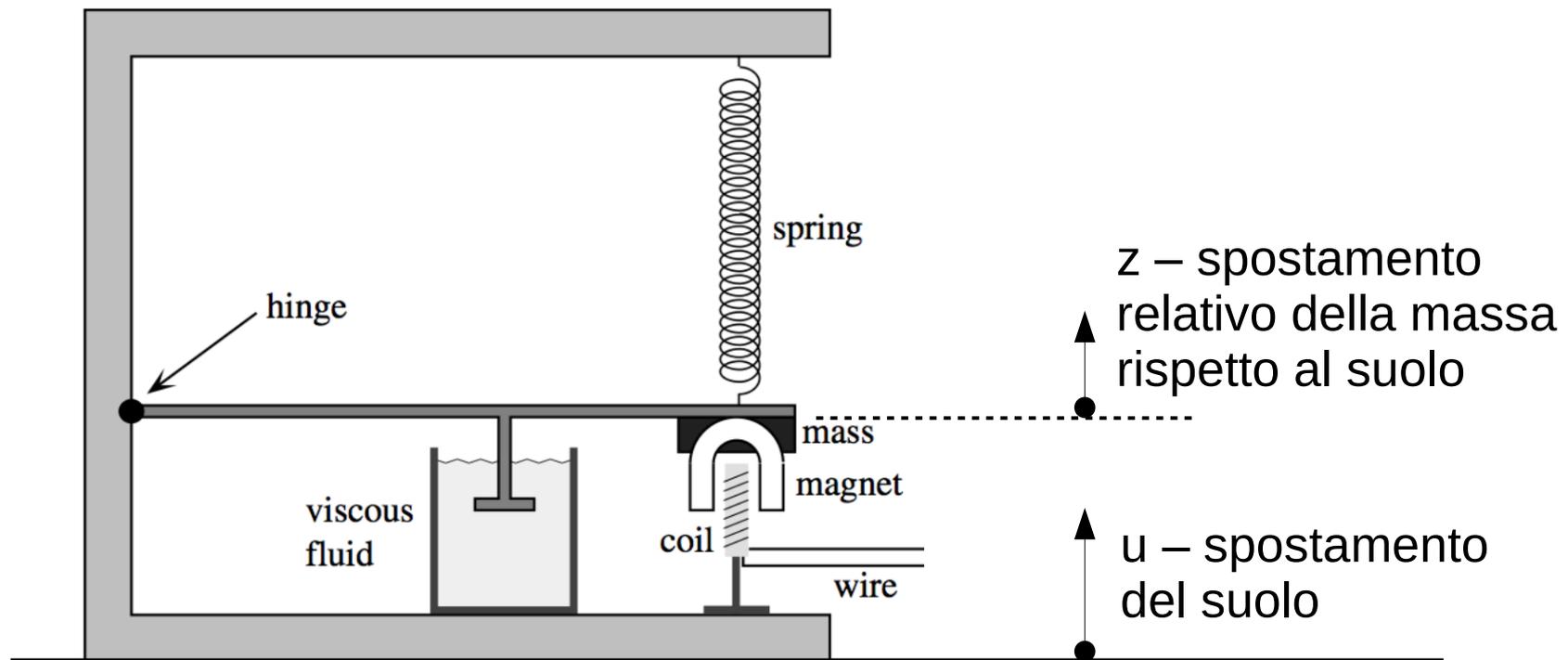
Data una specifica misura, e' possibile (generalmente) ricostruire a posteriori le altre grandezze.





## Principio di Funzionamento

Nelle sue componenti essenziali, un generico sismometro inerziale (per semplicità verticale) e' costituito da una massa sospesa ad una molla e da un sistema di smorzamento.





## Principio di Funzionamento

La risposta di tale sistema può' essere definita analiticamente bilanciando le forze in gioco concordemente al secondo principio della dinamica.

$$F_s = -kz,$$

$$F_d = -D \frac{dz}{dt},$$

$$-kz(t) - D \frac{dz(t)}{dt} = m \frac{d^2}{dt^2} [u(t) + z(t)],$$

$$\ddot{z} + \frac{D}{m} \dot{z} + \frac{k}{m} z = -\ddot{u}.$$

Forza di richiamo elastico

Smorzamento viscoso

Forzante esterna

che può anche scriversi:

$$\omega_0^2 = k/m,$$

$$2\epsilon = D/m.$$



$$\ddot{z} + 2\epsilon \dot{z} + \omega_0^2 z = -\ddot{u}.$$



## Principio di Funzionamento

L'equazione di bilancio puo' essere risolta imponendo soluzioni generiche (nel dominio di Fourier) per lo spostamento del suolo ( $u$ ) e relativo della massa rispetto al suolo ( $z$ ):

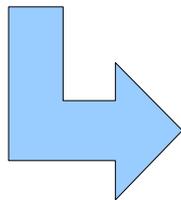
$$u(t) = U(\omega)e^{-i\omega t}, \quad z(t) = Z(\omega)e^{-i\omega t}.$$

Per cui derivando e per semplice sostituzione:

$$\ddot{u} = -\omega^2 U(\omega)e^{-i\omega t},$$

$$\dot{z} = -i\omega Z(\omega)e^{-i\omega t},$$

$$\ddot{z} = -\omega^2 Z(\omega)e^{-i\omega t}.$$



$$-\omega^2 Z(\omega) - 2\epsilon i\omega Z(\omega) + \omega_0^2 Z(\omega) = \omega^2 U(\omega),$$

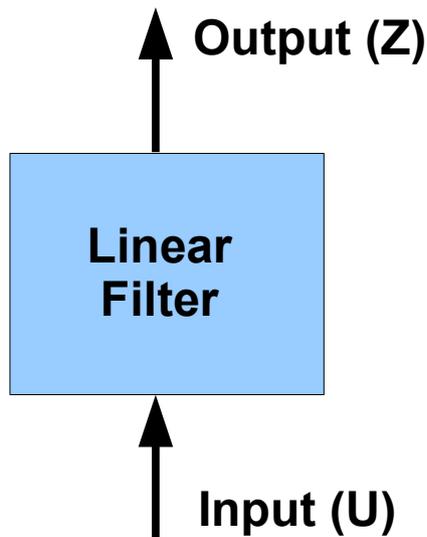


# Risposta Strumentale

Infine, raggruppando i termini comuni:

$$Z(\omega) = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - 2\epsilon i\omega - \omega^2} U(\omega) = \mathcal{Z}(\omega) U(\omega),$$

**Funzione di trasferimento**  
del sistema (o di risposta  
all'impulso)

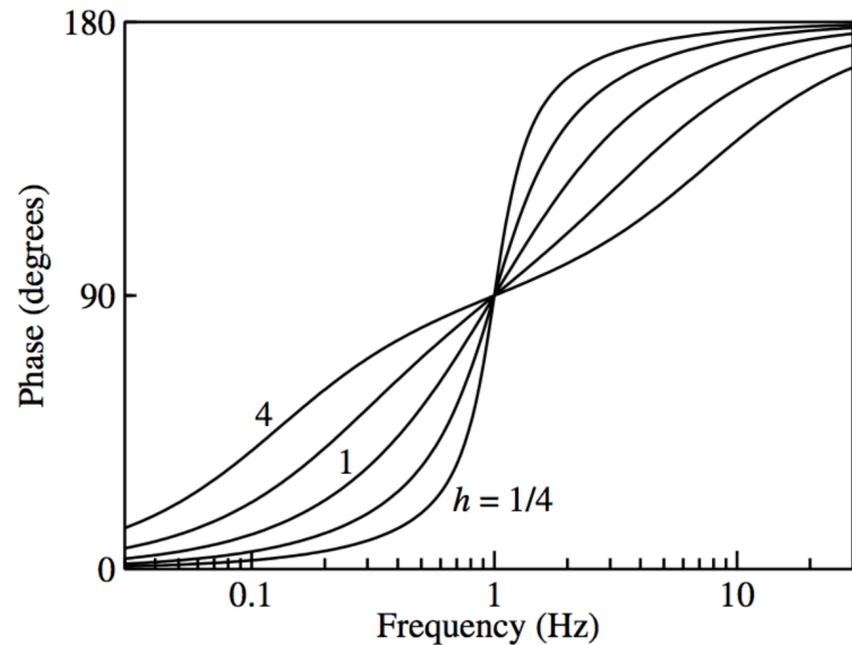
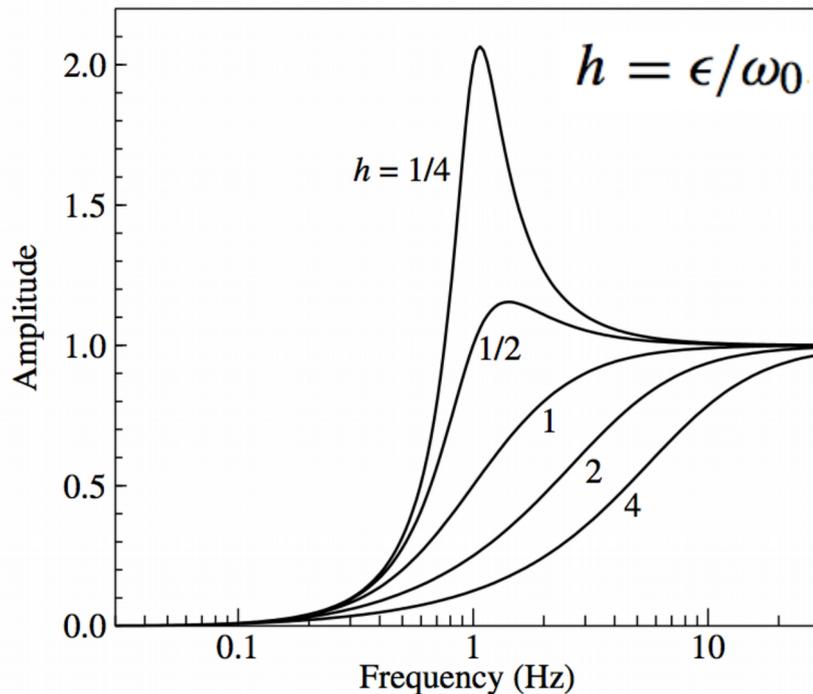


La funzione di trasferimento esprime quindi la **relazione lineare** tra input (U) e output (Z) del sistema tramite un'operazione di **convoluzione**



## Risposta Strumentale

Poiché la funzione di trasferimento è complessa, se ne può mappare l'andamento di **ampiezza** e **fase** in relazione alla frequenza angolare.

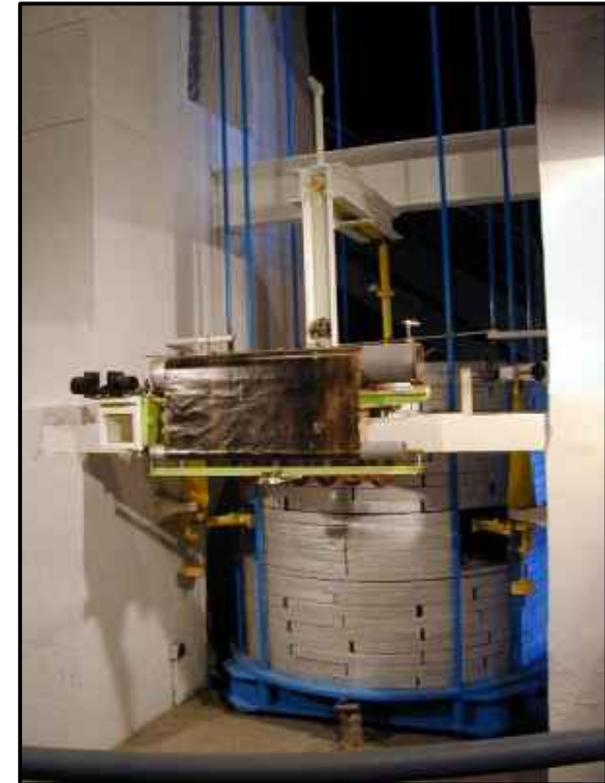
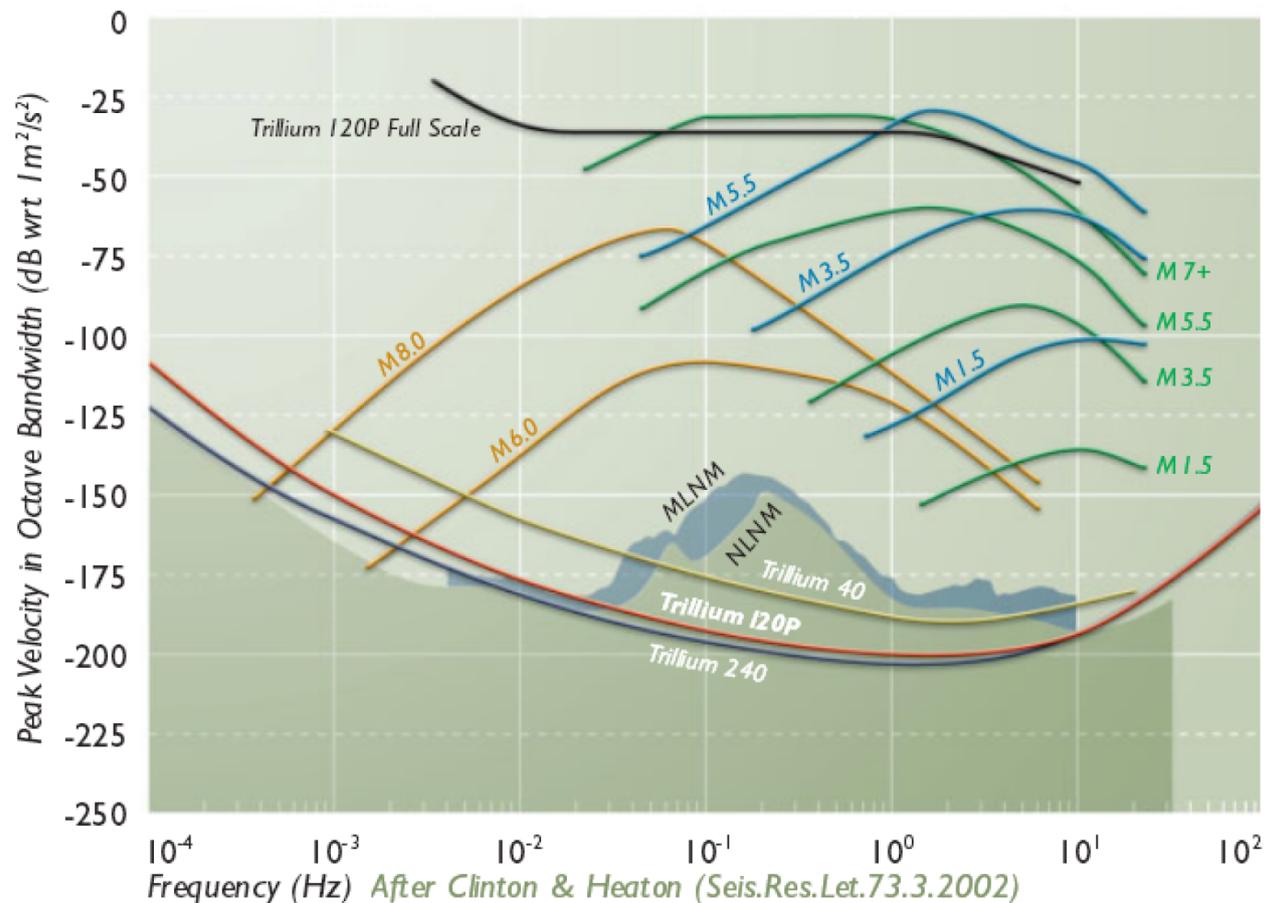


Al variare relativo dei parametri elastici e di smorzamento, il sistema tende a amplificare (**sottosmorzamento**) o deamplificare (**sovrasmorzamento**).



## Limiti Fisici

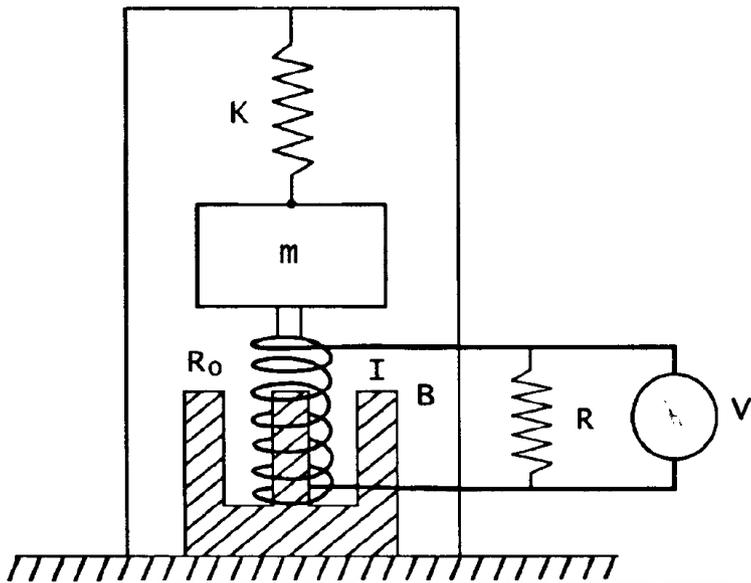
La risposta strumentale dei sistemi puramente meccanici e' limitata.  
Come estendere a basse frequenze?



Sismometro Quervain Picard  
(1000kg)

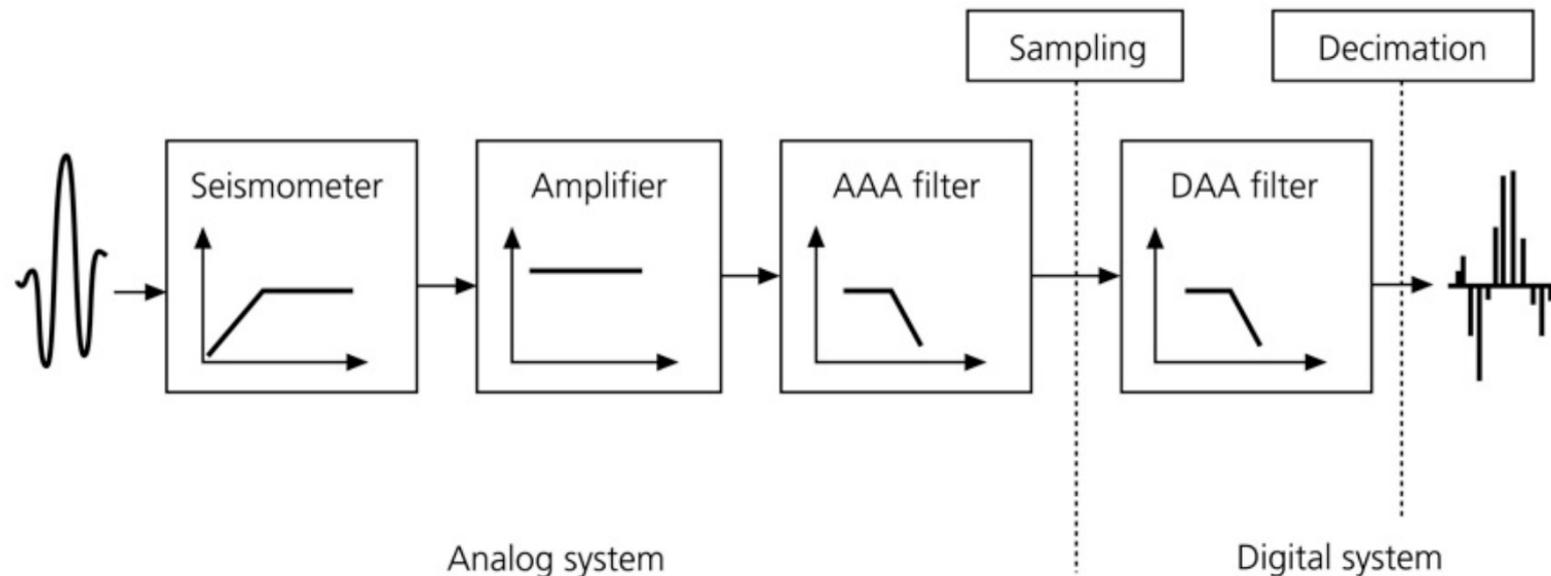


## Sismometri elettromagnetici



Nei sistemi moderni, il movimento meccanico viene convertito in impulso elettrico

Il segnale può poi essere filtrato e/o modificato tramite sistemi elettronici analogici e registrato in forma digitale.



Analog system

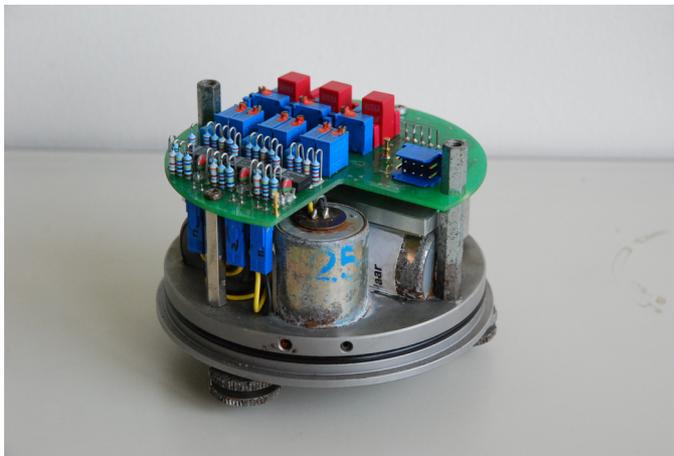
Digital system



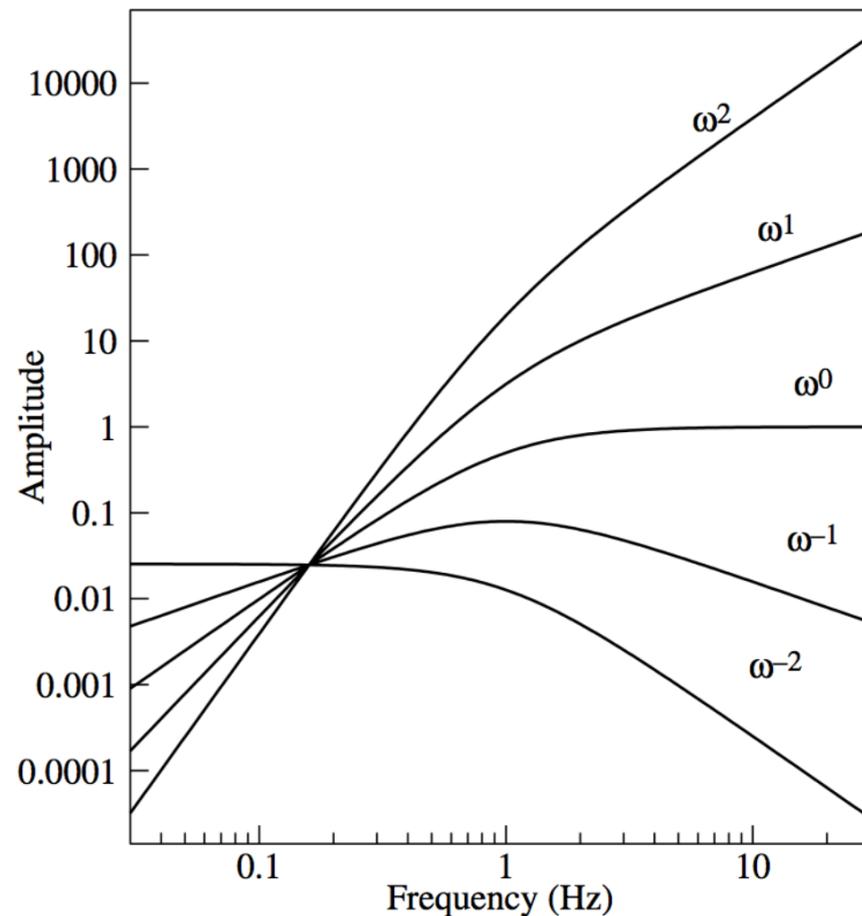
## Correzioni tramite filtri analogici

E' possibile modificare il segnale elettrico (**condizionamento**) al fine di migliorare artificialmente la risposta strumentale prima del campionamento digitale, in modo da estenderne la risposta a basse frequenze.

Questa correzione ha pero' dei limiti fisici, dovuti alla distorsione della fase e l'amplificazione simultanea del rumore sismico.

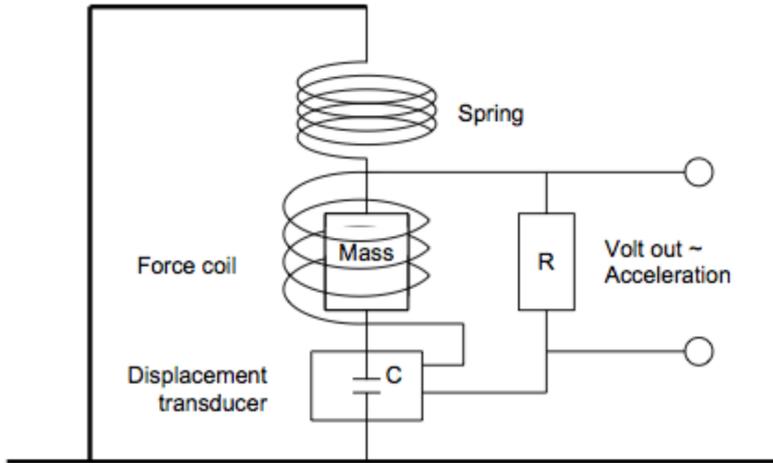


Lennartz 3D 1s





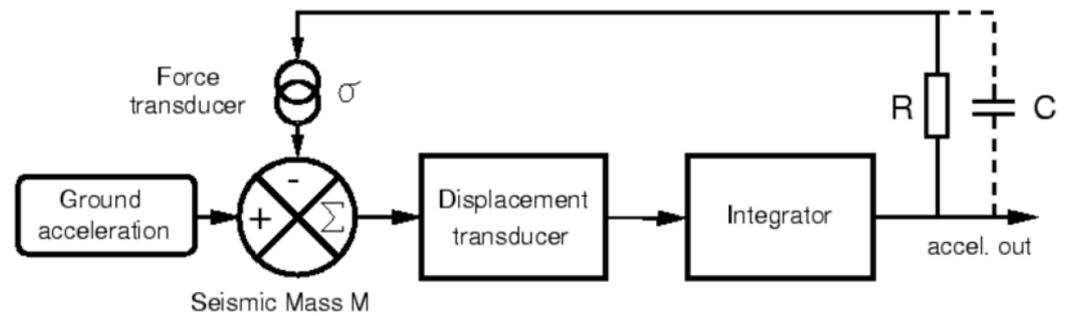
# Strumenti a feedback (a ciclo di reazione)



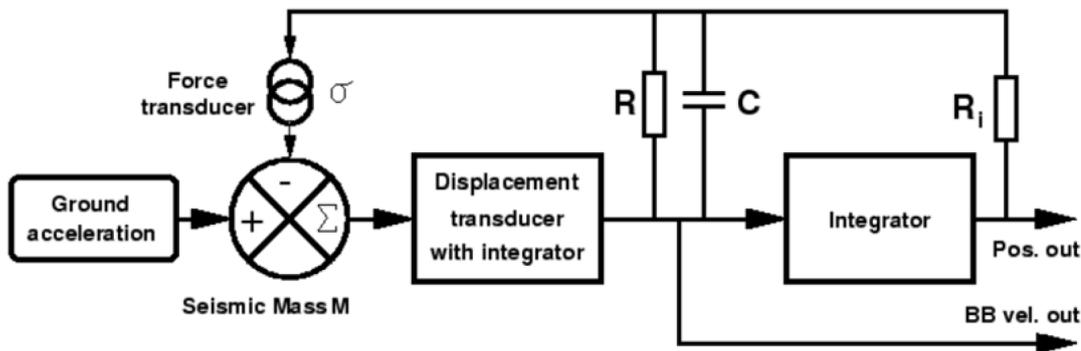
Kinometrics  
EpiSensor



Accelerometro Force-Balance



Velocimetro Broad-Band



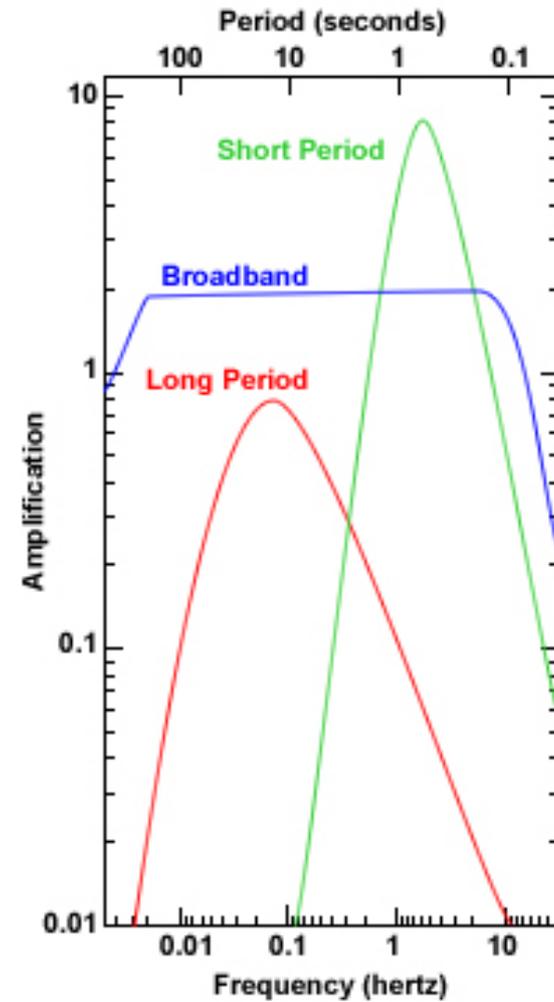
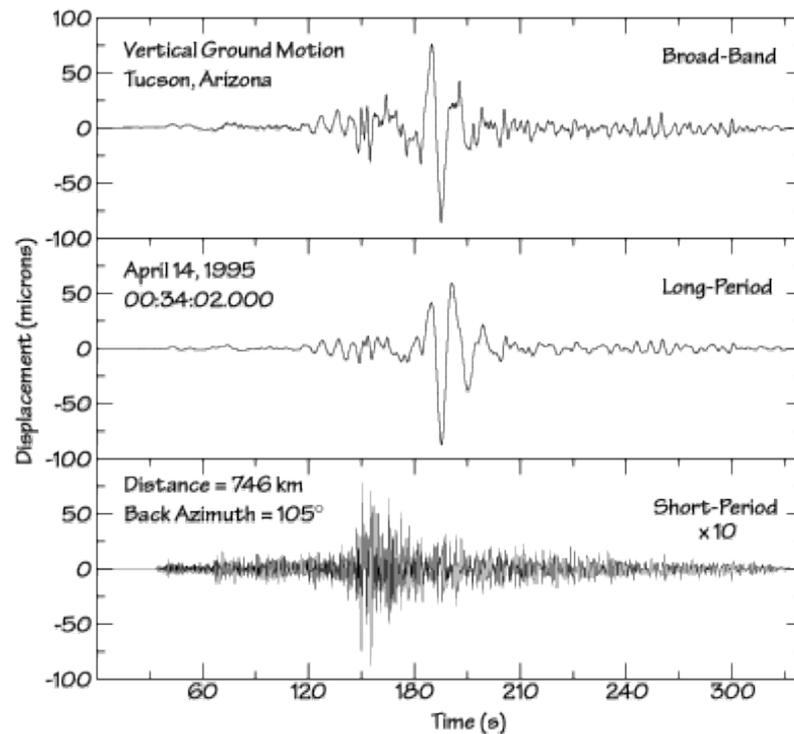
Streckeisen  
STS-2





# Strumenti a feedback (a ciclo di reazione)

Frequency (Hz)	Type of measurements
0.00001-0.0001	Earth tides
0.0001-0.001	Earth free oscillations, earthquakes
0.001-0.01	Surface waves, earthquakes
0.01-0.1	Surface waves, P and S waves, earthquakes with $M > 6$
0.1-10	P and S waves, earthquakes with $M > 2$
10-1000	P and S waves, earthquakes, $M < 2$

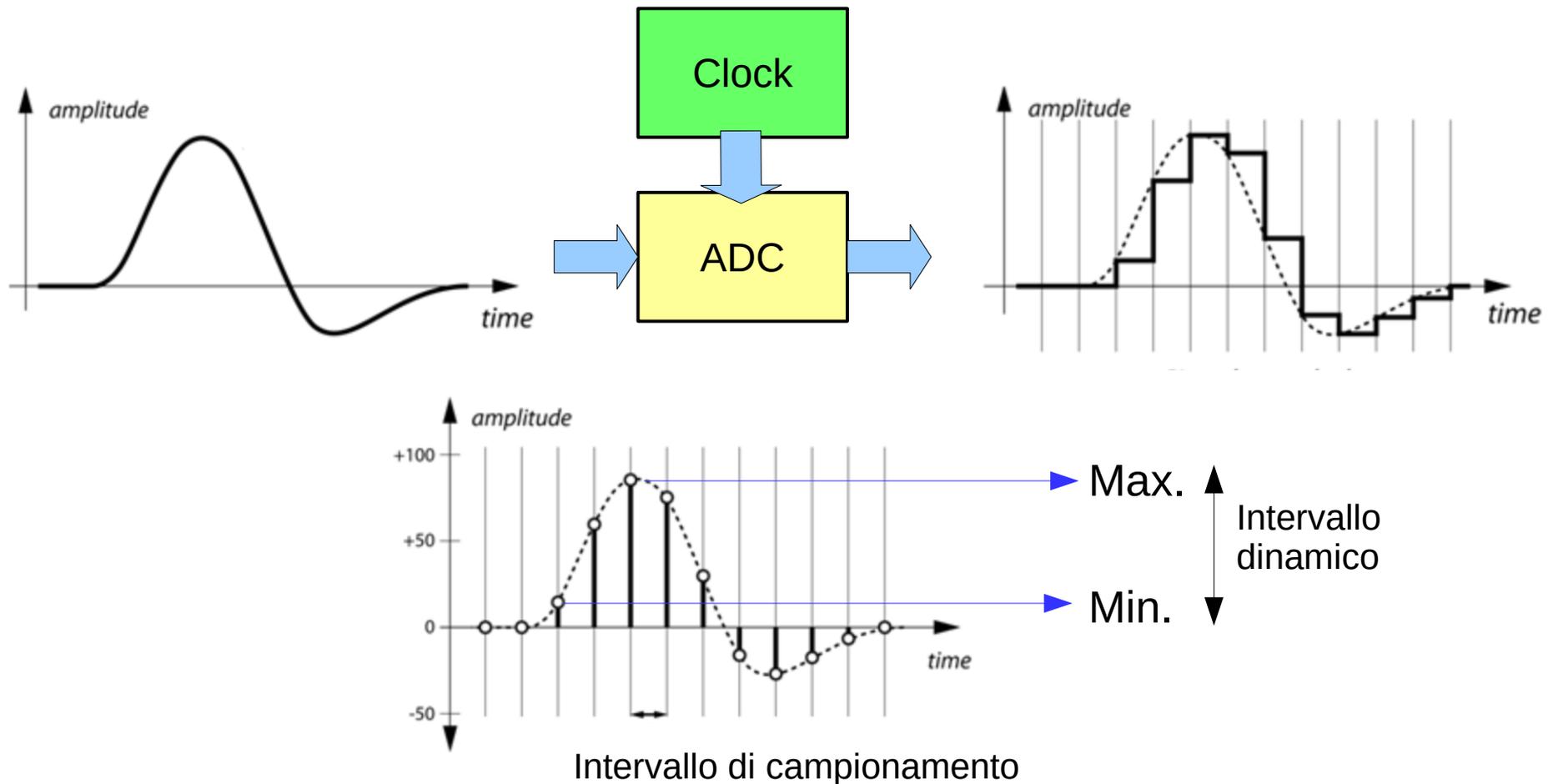


©The COMET Program



## Digitalizzazione e Range Dinamico

Il segnale analogico viene campionato da un **convertitore analogico-digitale** (ADC) e tradotto in sequenza numerica che può essere archiviata su supporti digitali o elaborata al computer.

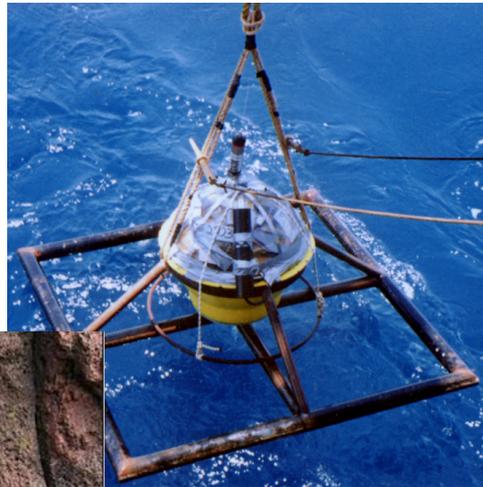




## Sismometri Esotici

Vi e' una varietà di sismometri altamente specializzati le cui caratteristiche sono studiate per registrare in condizione molto particolari.

Ocean Bottom  
Seismometer (OBS)



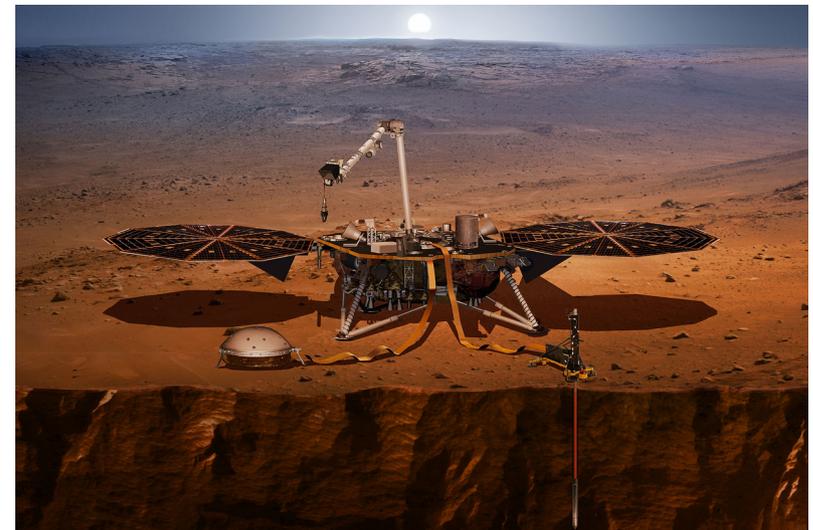
Borehole  
Seismometer (OBS)



Idrofoni



Sismometro  
Esoplanetario  
(missione InSight)

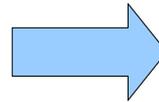
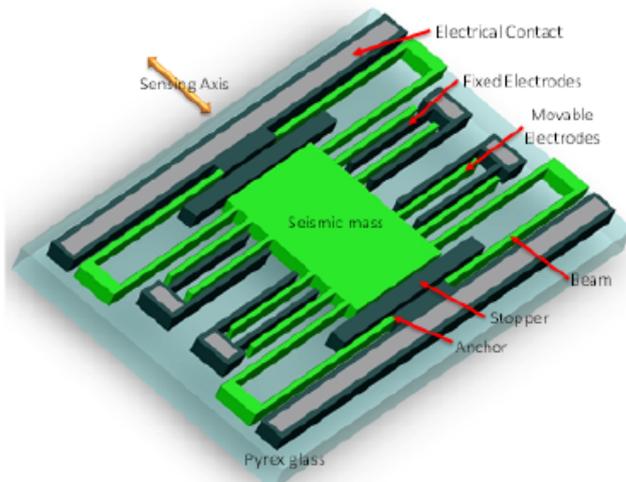




## Uno sguardo al futuro

L'obiettivo è di costruire sismometri sempre più compatti e a basso consumo energetico, pur mantenendone le caratteristiche dinamiche e di risposta.

I sensori **MEMS** (Micro Electro Mechanical Systems), sebbene non ancora all'altezza dei "fratelli maggiori", posseggono delle enormi potenzialità, e migliorano in prestazione di anno in anno.



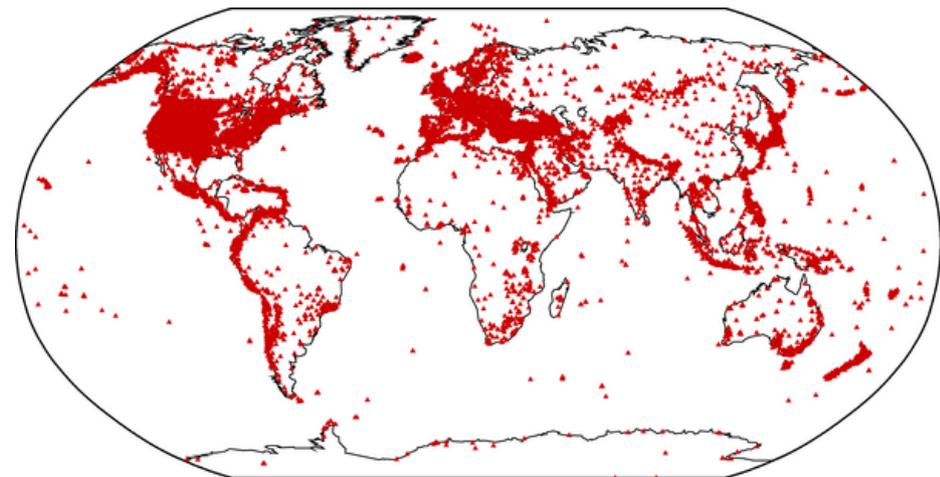
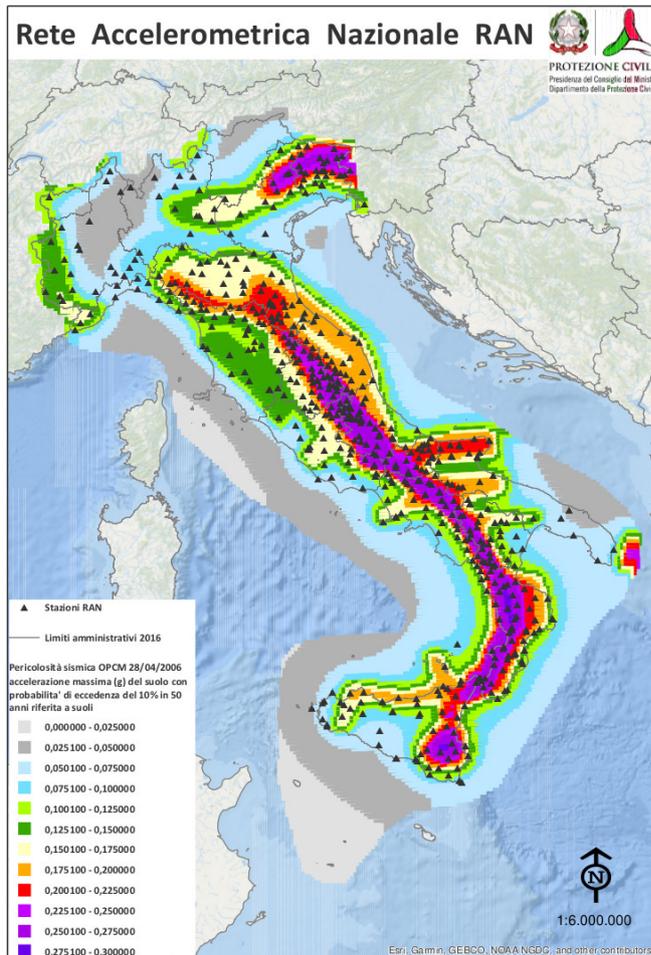
Colibry three-component  
MEMS geophone



# Reti Nazionali e Globali

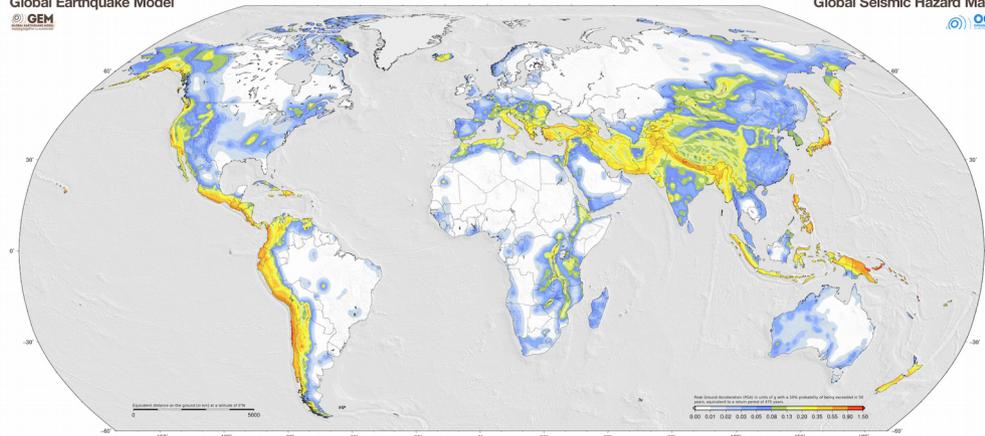
Le reti sono normalmente più dense in zone ad alta pericolosità sismica, il che porta alcuni svantaggi...

## International Registry of Seismograph Stations (IR)



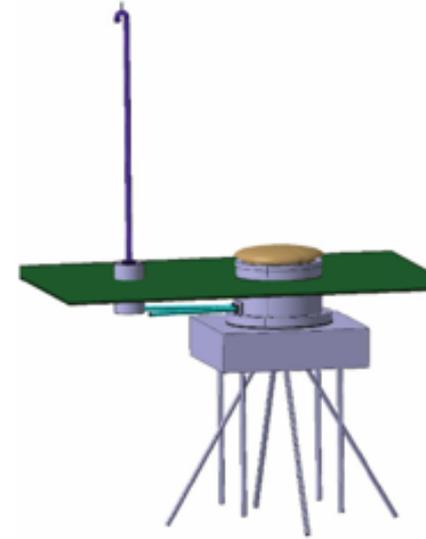
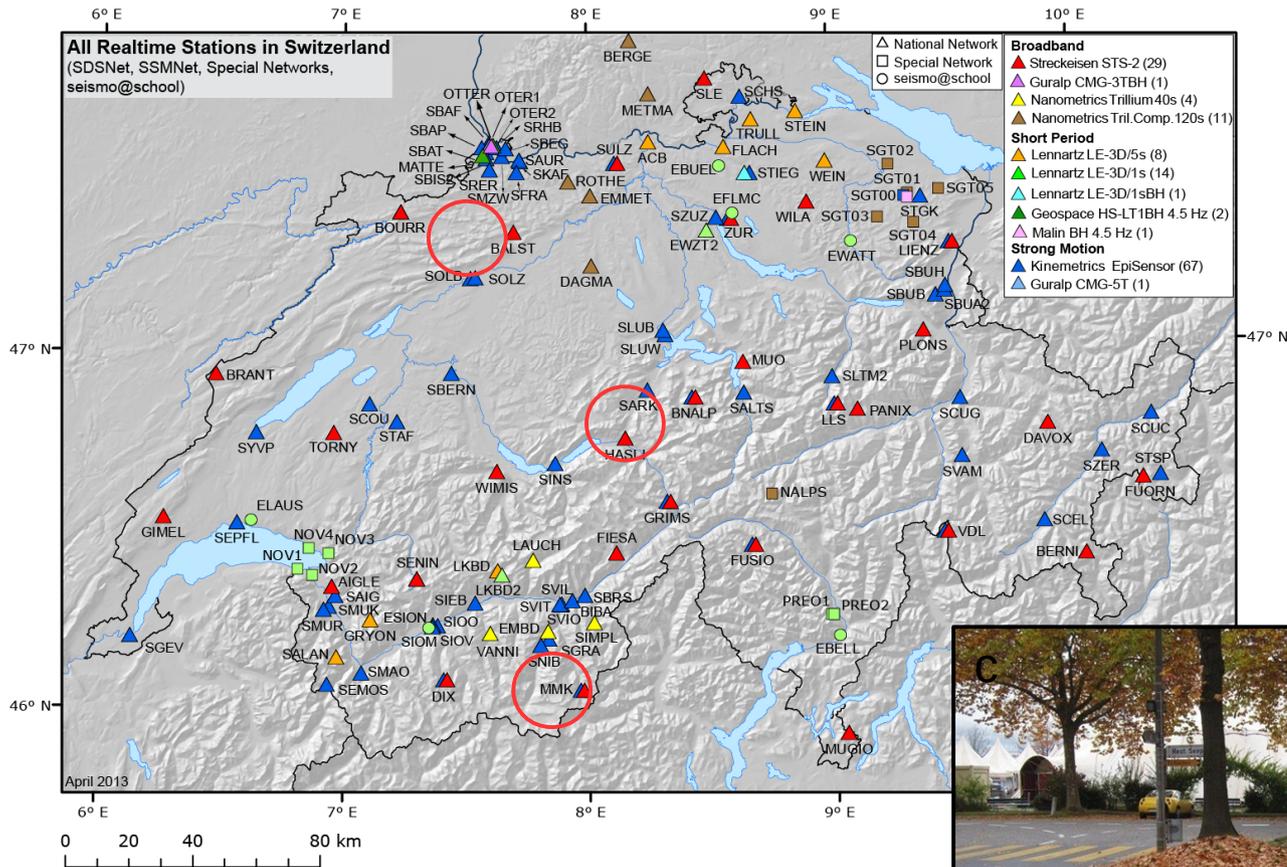
Global Earthquake Model  
GEM

Global Seismic Hazard Map  
GEM

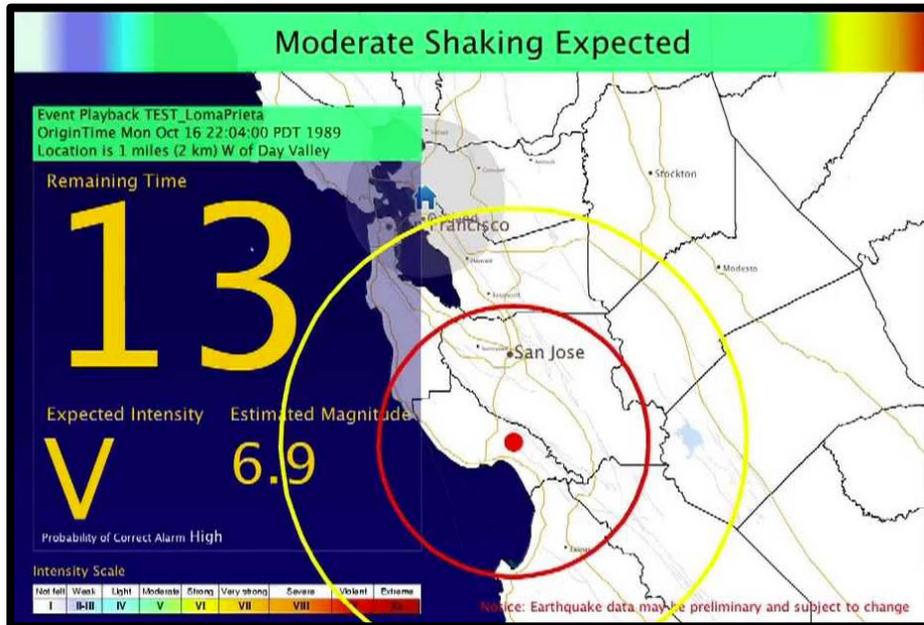




# Problematiche Connesse al Setup di una Rete



- Importanza strategica
- Accessibilità
- Condizioni ottimali di sito
- Logistica servizi di rete



## Early Warning Systems

Sistemi in tempo reale e a bassa latenza di comunicazione che permettono l'allerta precoce in caso di evento distruttivo.

Sono spesso utilizzati per l'arresto automatico del traffico ferroviario veloce e la messa in sicurezza dei servizi critici (e.g. gas, impianti energetici)

